Vol.15, No.2(통권 제35호) 2022년 12월 31일 [등록번호 : 11-1360620-000097-09] ISSN 2092-5336

# METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

기상기술정책

# 기상기술정책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

2022.12

특집 지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향

칼럼 | 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다 |

정책초점 | 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측 |
| 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진 |
| 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제 |
| 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언 |
| 화산기술과 화산특화연구센터 |

포커스 | 백두산 화산 재해 |

Volume 15, Number 2

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea
TEL. 064-780-6545 | FAX. 064-738-6513
http://www.kma.go.kr

2022·12

기상청

# 『기상기술정책』

Vol.15, No.2(통권 제35호)
2022년 12월 31일 발행
등록번호 : 11-1360620-000097-09
ISSN 2092-5336

『기상기술정책』지는 범정부적인 기상·기후 분야의 정책 수요에 적극적으로 부응하고, 창의적인 기상기술 혁신을 위한 전문적인 연구 조사를 통해 기상·기후업무 관련 분야의 발전에 기여할 목적으로 발간 기획되었습니다.

본 『기상기술정책』지는 기상·기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상 정책입안과 연구개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행되고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지에 게재된 내용은 출처와 저자를 밝히는 한 부분적으로 발췌 또는 인용될 수 있습니다.

## 원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 기술혁신과 관련된 원고를 모집하고 있습니다. 뜻있는 분들의 많은 참여를 부탁드립니다. 편집위원회의 심사를 통하여 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

▶ 원고매수: A4 용지 10매 내외
▶ 원고마감: 수시접수
▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.
☞ 더 자세한 투고방법은 맨 뒷편의 투고요령을 참고바랍니다.

## 『기상기술정책』 편집위원회

발 행 인 : 유희동
편 집 기 획 : 국립기상과학원(책임운영기관) 연구기획과
편집위원장 : 김성균
편 집 위 원 : 박순천, 홍성대, 조익현, 임하권,
박록진, 반기성, 홍진규, 김도우
편 집 간 사 : 이용갑, 이대근, 김인겸

## 발행처

주소 : (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33
국립기상과학원(책임운영기관)
전화 : 064-780-6545 팩스 : 064-738-6513
E-mail : dglee7@korea.kr

기상기술정책

제15권 제2호(통권 제35호)
2022년 12월 31일 발행

# CONTENTS

**특집: 지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향**

칼럼 03 _ 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다 / 유희동

정책초점 06 _ 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측 / 이준기

17 _ 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진 / 김광희

26 _ 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제 / 손상영

43 _ 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언 / 신성원

56 _ 화산기술과 화산특화연구센터 / 윤성효

포커스 71 _ 백두산 화산 재해 / 이윤수

# 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다

유희동
기상청장

"808,717명"

위 숫자는 2000년부터 2019년까지 전 세계에서 지진에 의해 사망한 사람들의 수이다. 여기에는 단일 사건으로 20만 명 이상의 사망자를 발생시킨 2004년 인도양 지진해일과 2010년 아이티 지진 피해의 사망자 수도 포함된다. 이처럼 지진으로 인한 피해는 전 세계적으로 심각한 수준으로, 지축을 흔드는 지각의 작은 꿈틀거림은 육상에서 삶을 영위하고 있는 우리들의 소중한 생명을 앗아갔으며 재산과 기반 시설 등에도 치명적인 타격을 가하였다. 우리나라의 상황은 어떨까? 과거 우리나라는 지진으로부터 안전하다고 여겨져 왔으나, 지난 2016년 경주에서 규모 5.8의 지진이 발생하여 큰 충격을 주었다. 그리고 놀란 마음이 채 가라앉기도 전인 이듬해 2017년 포항에서 규모 5.4의 지진이, 지난해는 10월 29일에 괴산에서 규모 4.1의 지진이, 지난 1월 9일 강화인근 해역에서 규모 3.7의 지진이 발생했다. 이렇게 최근 우리나라에 지진이 연이어 발생함에 따라, 해당 지역뿐만 아니라 우리나라 전역에 한반도가 더 이상 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확산하고 있다.

지진 발생을 미리 알고 피할 수 있다면 가장 좋겠지만, 현재로서는 첨단 과학기술을 동원하여도 예측이 불가능하다. 그래서 지진으로 인한 피해를 줄이기 위한 가장 확실한 방법은, 지진 발생 즉시 그 사실을 사람들에게 신속히 알려 대피 가능 시간을 최대한 확보하는 것이다. 이를 위해 지진파의 속도 차이를 이용하여 큰 피해를 유발하는 S파가 도달하기 전에 P파를 분석해 지진 발생 사실을 알려주는 서비스인 「지진조기경보」가 시행되고 있다. 기상청은 이 서비스를 꾸준히 개선하여, 경주지진 당시 12분 걸린 긴급재난문자 도착 소요 시간을 2021년 서귀포 인근 해역에 규모 4.9의 지진이 발생했을 때는 13초로 대폭 단축하였다. 또한 지난 1월 9일 강화인근 해역에서 발생한 규모 3.7의 지진에는 긴급재난문자 도착시간이 9초였다. 이는 10초의 벽을 넘어섰다는, 그리고 가장 취약시간대인 새벽 1시 25분에 발생한 지진에도 신속히 대응했다는 사실에 그 의의가 크다. 10초의 시간만 확보해도 90%의 인명을 구할 수 있다고 알려져 있기에, 이번 강화해역 지진

대응은 국민에게 우리나라 기상서비스의 발전 가능성을 보여주었다는 점에서 매우 고무적인 결과이다. 하지만 지진을 비롯해 관련 분야인 지진해일과 화산은 주변국들에 비해 여전히 투자와 관심이 부족한 영역으로, 만일에 대비하는 자세로 지속적인 연구와 지원이 필요한 실정이다.

우선 지진이 발생한 위치, 규모, 단층 운동 형태 및 그 영향 정보를 정확하게 제공하기 위한 지진 분석과 지진동 예측 능력을 향상하기 위한 모델 개발에 대한 이해를 넓혀가야 할 것이다. 1995년 일본 고베지진 이후 3차에 걸쳐 정부가 수립한 지진방재대책은 경주지진을 거치며 「지진방재종합대책」, 포항지진 이후 「지진방재개선대책」으로 개편되었다. 하지만 이 대책들은 육상에서의 대응에 치중되어, 우리나라 주변 해역에서의 지진과 지진해일 대응에는 부족하다. 대규모 산업단지가 위치한 동해안 인근에서 지진이 발생한다면 지진해일을 피하기 위한 시간이 부족할 수 있다. 이에 대응하기 위해 지진해일 조기탐지 및 예·경보 서비스 개발에 있어 지진해일의 생성-처오름-소멸에 이르는 생애를 모델링할 수 있는 프레임워크 구축, 단계별 최적 모형을 적용한 수치모델 분석이 중요할 것이다. 이와 함께 현재 근해 중심으로 설치된 관측장비를 외해까지 확대하여 도달시간 등의 정확도 개선도 꾀할 필요가 있다. 마지막으로, 분화할 경우 전례 없는 대폭발로 화산재에 의한 막대한 피해가 예상되는 백두산에 대한 이해를 넓히고 관련 융합연구를 원활하게 수행하기 위해, 화산특화센터 활용 및 전문가 양성, 지속적인 예산과 정책 지원이 이어져야 할 것이다.

하늘과 대기 상태를 '정확하게' 예보하는 데 힘을 기울여 온 기상청에게, 발아래 지각의 움직임과 그 변화를 '신속하게' 전달하는 것에 초점을 맞추는 지진·지진해일·화산 분야는 그 자체로 도전적인 과업이다. 하지만 한계를 규정짓지 않고 뚜렷한 비전 제시와 지속적 도전을 이어간다면, 머지않아 지진·화산 분야에서도 선진국들과 어깨를 나란히 할 수 있으리라 확신한다. 전문가들의 조언을 비롯해 관련 연구와 기술 습득에 깨어 있는 자세를 견지하며 우리나라 실정에 맞는 서비스를 개발해 나간다면, 비록 평소에는 주목받지 못하더라도 반드시 수많은 생명을 구할 때가 올 것이다. 그리고 그런 때가 오지 않더라도 국민이 든든한 안전망이 있음을 느끼고 언제 어디서든 안심하며 지낼 수 있다면 그것으로도 큰 의미가 아닐까. 기상청의 책무는 국민의 생명과 안전을 지키는 것이다. 신속·정확한 기상·기후 분야 전문 국가기관으로서의 역할에 지진·화산도 예외가 아님을 기억하자.

# 정 책 초 점

3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측
| 이준기

우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진
| 김광희

지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제
| 손상영

지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언
| 신성원

화산기술과 화산특화연구센터
| 윤성효

# 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측

이준기 서울대학교 지구환경과학부 교수 rhie@snu.ac.kr

Ⅰ. 속도구조 모델
Ⅱ. 지진 분석 사례
Ⅲ. 지진동 예측 사례
Ⅳ. 맺음말

지진파가 전파하는 매질의 공간적인 지진파 속도 분포를 수치로 표현한 모델을 지진파 속도구조 모델이라고 한다. 지구 내부의 지진파 속도는 3차원적으로 변화하기 때문에, 깊이 방향으로의 속도 변화만을 고려하는 1차원 속도 모델보다는 3차원 속도 모델이 더 우월한 모델이라고 할 수 있다. 3차원 속도 모델을 사용하는 경우 여러 분석을 위한 수치계산에 고성능컴퓨터를 사용한 많은 계산이 필요하므로 지금까지는 1차원 속도 모델이 주로 사용되고 있으나, 컴퓨터 성능의 급속한 발전에 힘입어 3차원 속도 모델의 활용 범위는 점차 넓어지고 있다. 본 고에서는 3차원 속도 모델을 사용한 연구 사례를 통해 3차원 속도 모델 사용의 장점을 소개한다. 신뢰할 수 있는 3차원 속도 모델을 사용하면 지진 분석과 지진동 예측의 정확도를 높일 수 있다. 국내 지진 관련 업무를 담당하는 기상청의 지원과 연구자들의 노력으로 한반도 지역의 3차원 모델들이 개발되고 있으며, 앞으로 개발된 모델이 기상청 업무에 적용되어 기상청의 지진 분석과 지진동 예측 능력이 향상되기를 기대한다. ■

## Ⅰ. 속도구조 모델

"지진파가 전파하는 매질의 공간적인 지진파 속도 분포를 나타내는 지진파 속도구조 모델"

지진학은 지진계에 기록된 지진 파형(Seismic Waveform)을 분석하여 지진파를 발생시킨 지진원(Seismic Source)과 지진파가 전파한 매질의 특성을 연구하는 학문 분야이다. 지진원에는 인간이 느낄 수 없을 정도로 작은 배경잡음을 일으키는 해양 활동에서부터 수십만 명의 인명피해를 일으킬 수 있는 대규모 지진까지 다양하며, 연구하는 매질의 스케일도 지표면 하부 수에서 수십 미터의 좁은 범위에서부터 전지구 스케일까지 다양하다.

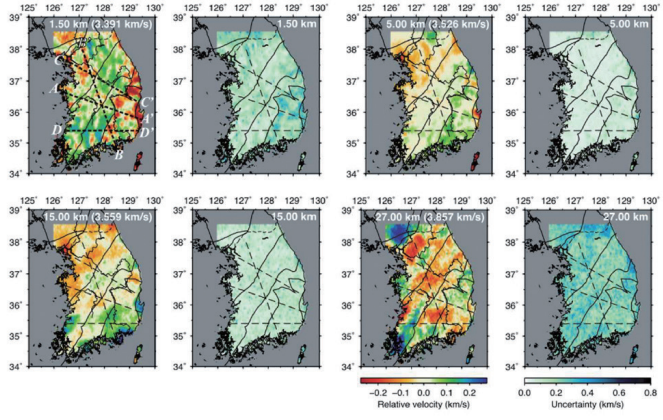
대상이 다양한 만큼 많은 연구 방법이 사용되지만, 기본적인 방법론은 비교적 단순하다. 지진계에 기록된 지진파형에는 지진원, 지진파 전파, 지진계에 대한 정보가 포함되어 있다. 이 중 이미 알고 있는 지진계에 대한 정보를 제거하면, 지진원과 지진파 전파에 대한 정보가 남게 된다. 따라서 지진파형에서 지진원 전파에 해당하는 정보를 추가로 제거하면 지진원에 해당하는 정보가 남게 되어 지진원의 특성을 파악할 수 있게 되고, 반대로 지진원에 대한 정보를 제거하면 지진파의 전파 특성을 알 수 있게 된다. 지진원의 정보는 언제, 어디서, 어떤 형태의 단층 운동으로 발생하였고, 시간과 방향에 따라 어떻게 에너지가 지진파의 형태로 방출되는지를 나타내는 것으로 지진에 따라 달라진다. 지진파 전파 정보는 지진파가 전파하는 매질의 특성에 따라 지진파의 진행 경로와 진폭 등이 어떻게 달라지는지를 나타내는 것이다. 지진파가 전파하는 매질의 공간적인 지진파 속도 분포를 나타내는 모델을 지진파 속도구조 모델(줄여서 속도 모델)이라고 부르며, 지진파형에 포함된 지진파 전파 정보는 속도 모델을 이용하여 수치적으로 계산할 수 있다. 정리하면 속도 모델이 있으면 관측된 지진파형으로부터 지진원에 대한 정보를 알아낼 수 있고, 지진원에 대한 정보를 추가로 가지고 있으면 원하는 지점에서 예상되는 지진파형을 계산하는 것이 가능하다. 이때 분석한 지진원이나 예측한 지진파형의 정확도는 속도 모델의 품질에 따라 달라진다.

속도 모델은 크게 수평적인 속도의 변화는 무시하고 깊이 방향으로의 속도 변화만을 고려하는 1차원 속도 모델과 깊이 방향과 함께 수평적인 속도의 변화까지 고

> “ 전 세계적으로 3차원 모델을 이용한 지진 분석과 연구들이 점차 늘어나는 추세 ”

려하는 3차원 속도 모델로 나눌 수 있다. 실제 지구 내부에서의 지진파 속도는 3차원적으로 변화하기 때문에 이론적으로는 3차원 속도 모델을 이용하는 것이 타당하다. 하지만 두 가지 이유로 3차원 속도 모델보다는 1차원 속도 모델이 주로 사용되고 있다. 첫 번째 이유는 3차원 속도 모델을 사용하면 여러 가지 분석을 위한 수치 계산량이 기하급수적으로 증가한다는 점이다. 따라서 3차원 속도 모델을 사용하기 위해서는 대용량의 계산이 가능한 컴퓨터 시스템이 필요할 뿐만 아니라 계산 시간도 오래 걸리게 되는 단점이 있다. 두 번째는 1차원 속도 모델과 비교하면 3차원 속도 모델을 구축하기가 어렵다는 점이며, 특히 신뢰도가 높은 3차원 속도 모델을 개발하기 위해서는 오랜 기간과 큰 노력이 필요하다. 이러한 문제로 인하여 3차원 속도 모델은 꼭 필요한 경우에만 제한적으로 사용됐으나, 컴퓨터 성능의 급속한 발전 및 사용할 수 있는 3차원 속도 모델들이 많아짐에 따라 전 세계적으로 3차원 모델을 이용한 지진 분석과 연구들이 점차 늘어나는 추세다. 국내에서도 다양한 방법들을 적용한 3차원 속도 모델의 개발이 진행되어왔으며, 최근에는 기상청의 지원으로 한반도와 주변 해역에 대한 상세 3차원 속도 모델이 개발되었다(이준기 외, 2022). [그림 1]은 이준기 외(2022)에서 개발된 한반도 남부지역의 3차원 속도 모델을 보여준다.

[그림 1] 깊이별 전단파 속도 변화 및 불확실성을 보여주는 한반도 3차원 속도 모델 결과(이준기 외, 2022)




3차원 속도 모델을 사용하면 어떻게 연구 결과가 개선되는지를 보여주기 위하여 독자들이 관심을 가질 만한 두 가지 주제에 관한 연구 결과를 소개하고자 한다. 첫 번째는 3차원 속도 모델을 지진 분석에 활용한 사례이고, 두 번째는 지진동 예측에 활용한 사례이다.

## II. 지진 분석 사례

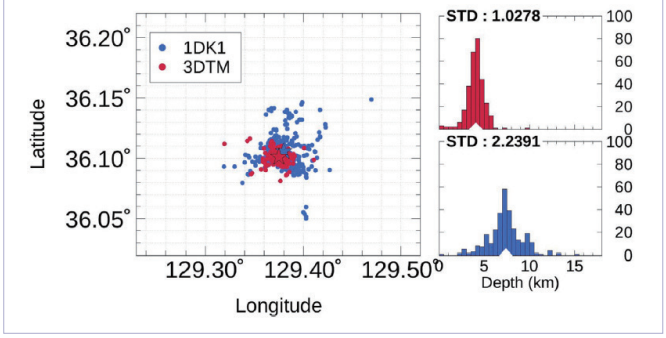
"포항 지진의 진원 깊이 연구 결과가 서로 달랐던 것은 1차원 속도 모델을 사용했기 때문"

3차원 속도구조 모델을 활용하여 지진을 분석한 사례로 2017년 발생한 포항 지진의 진원 깊이에 관한 연구가 있다(Jung et al., 2021). 2017년 포항 지진은 기상청이 공식적으로 지진 관측을 시작한 1970년대 이후 남한에서 발생한 지진 중 2016년 경주 지진에 이어 두 번째로 큰 지진으로 경제적인 피해만을 고려하면 가장 큰 피해를 일으킨 지진이다. 이 지진은 지열발전소 개발부지에서 발생하였기 때문에, 발생 원인에 대한 여러 의견이 제기되었다. 포항에서 개발 중이던 지열 발전소는 Enhanced Geothermal System(EGS)이다. 이 방식으로 발전하기 위해서는 물을 주입하고 추출하는 두 관정 사이에 투수도가 높은 경로를 만들어주어야 한다. 이때 투수도를 높이기 위하여 고압의 유체 주입을 통한 파쇄를 수행하게 되고, 이에 따라 지하의 응력 분포가 바뀌면서 지진이 발생할 수 있다는 것은 이미 알려져 있다. 다만, 포항 지진의 경우 주입된 유체의 양에 비하여 발생한 지진의 규모가 경험적인 관계식에 비해 매우 커서 유체 주입과 관계없는 지진일 가능성도 제기되었다. 유체 주입과 발생한 지진의 관계를 유추하는 데는 여러 정보가 사용될 수 있지만 가장 중요한 정보 중의 하나는 유체를 주입한 위치와 지진의 발생 위치(진원) 사이의 거리이고, 발생한 지진의 진원이 유체 주입 위치와 가까울수록 지진과 유체 주입 사이의 인과관계가 높다고 할 수 있을 것이다. 하지만 지진 발생 직후에 보고된 여러 연구에서 서로 다른 진원 깊이가 제시되었으며, 이는 발생 원인 추정을 어렵게 하는 요소가 되었다. 연구별로 서로 다른 결과가 제시된 이유에는 여러 가지가 있을 수 있으나 연구에 사용한 속도 모델이 실제 포항 지역의 지진파 속도를 잘 반영하지 못하기 때문일 가능성이 있다. 포항 지역을 포함한 한반도의 동쪽 해안 지역에서는 지각의 두께가 동서 방향으로 급격하게 변화하고, 특히 포항 지역에는 다수의 분지가 존재하기 때문에 지진파 속도의 수평적인 변화가 상당히 심할 것으로 예상된다. 하지만 대부분의 연구에서 지진파 속도의 수평 변화를 고려하지 않는 1차원 속도 모델을 사용하였으며, 이에 따라 어떤 관측소의 자료를 사용하여 분석하느냐에 따라 지진의 발생 위치 결과가 달라질 가능성이 있다. [그림 2]는 한반도를 대표

> “ 지진 발생 지역을 대상으로 개발된 3차원 모델로 지진 발생 위치 결정 가능 ”

하는 1차원 속도구조 모델(1DK1, Kim et al., 2011)과 포항 지역에서 예상되는 속도의 3차원적인 변화를 고려한 3차원 속도 모델(3DTM, 이준기 외, 2022)을 사용하여 포항 본진의 발생 위치를 추정한 결과를 비교한 그림이다. 서로 다른 자료들을 사용하였을 때 얼마나 안정적으로 위치를 결정할 수 있는지를 확인하기 위하여 진앙 주변의 18개 관측소 중 5개를 무작위로 추출하여 지진의 발생 위치를 300번 결정하였다. 속도 모델이 해당 지역의 지진파 전파 특성을 잘 반영하고 있다면 사용한 자료에 상관없이 발생 위치 분석 결과가 일정해야 한다. [그림 2]를 보면 3차원 모델을 사용할 때 1차원 모델보다 훨씬 일정한 결과가 도출되는 것을 확인할 수 있다. 또한 지진의 발생 깊이가 상대적으로 얕은 위치로 결정되며, 이는 지진파 분석 이외에 다양한 자료들을 이용하여 추정된 포항 지진의 발생 깊이와 유사하다. 이 사례는 지진 발생 지역을 대상으로 개발된 신뢰할 수 있는 3차원 속도 모델을 사용하면 지진 발생 위치를 보다 안정적으로 결정할 수 있다는 것을 보여준다.

[그림 2] 서로 다른 관측소 조합을 사용하여 3차원 속도 모델(red)과 1차원 속도 모델(blue)을 적용한 2017년 포항 지진의 발생 위치를 결정 예시(Jung et al., 2021)

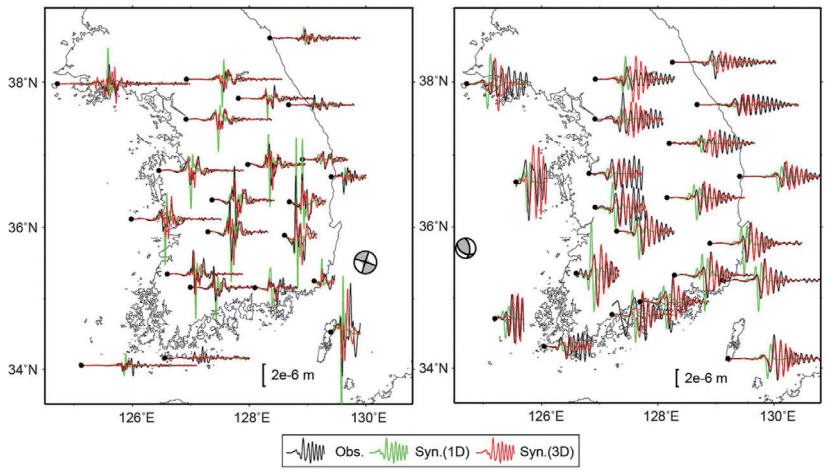



3차원 속도 모델을 지진 분석에 활용한 또 다른 사례로 국내 발생 지진의 모멘트 텐서 역산을 수행한 연구가 있다(Song et al., 2022). 모멘트 텐서는 지진의 발생 메커니즘을 간단한 힘의 조합으로 표현하는 방법으로 모멘트 텐서 분석을 통해 어떤 형태의 단층 운동으로 인하여 지진이 발생하였는지를 알아낼 수 있다. [그림 3]은 동해와 서해에서 발생한 두 지진의 모멘트 텐서를 파형 역산 방법을 이용하여 계산한 예를 보여준다. 관측된 지진 파형을 가장 잘 설명할 수 있는 모멘트 텐서 해를 찾는 방식이기 때문에 적절한 모멘트 텐서 해가 결정되었다면 관측 파형과 계산된 모멘트 텐서 해를 가정하여 합성한 파형은 유사해야 한다. [그림 3]에서 검정색 파형은 해당 관측소에서 관측된 지진 파형을 나타내고, 붉은색과 녹색 파형은 각각 3차원 속도 모델과 1차원 속도 모델을 사용하여 계산한 파형을 나타낸다. [그림 3]에서 볼

> “적합한 속도 모델을 사용하지 않으면 해역 지진의 발생 메커니즘 해석에 오류 가능성 커짐”

수 있듯이 대부분의 관측소에서 검정색과 붉은색 파형이 유사한 데 반하여, 녹색 파형은 상당히 다르다. Song et al. (2022)의 결과에 따르면 이러한 차이는 내륙에서 발생한 지진 보다는 해역에서 발생한 지진의 경우에 더 크게 나타난다. 이는 1차원 모델이 내륙의 지진파 전파 특성은 어느 정도 반영하는 데 반하여 해역에서의 지진파 전파는 제대로 반영하지 못하고 있는 것을 보여주며, 적합한 속도 모델을 사용하지 않으면 해역 지진의 발생 메커니즘을 실제와는 다르게 해석할 가능성이 크다는 것을 의미한다.

[그림 3] 1차원 속도 모델과 3차원 속도 모델을 이용하여 서해, 동해 지역 발생 지진의 모멘트 텐서를 계산한 예시(Song et al., 2022)




## Ⅲ. 지진동 예측 사례

발생한 지진 혹은 향후 발생할 가능성이 있는 지진에 대한 지진동 예측은 두 가지 방식으로 지진 피해 저감에 이바지할 수 있다. 첫 번째는 지진 발생 직후 신속한 피해 추정을 통해 응급대응(Emergency Response)에 활용하는 것이다. 대규모 지진으로 인하여 넓은 지역에 피해가 발생했을 때 제한된 자원을 어떻게 효율적으로 활용할지를 신속하게 결정하는 것은 지진 대응에 매우 중요하며, 최적의 대응 계획을 수립하기 위해서는 정확한 피해 상황을 신속하게 파악해야 한다. 하지만 지진 발생 직후에는 통신망이 작동되지 않는 경우가 많으므로 지역별로 정확한 피해를 파악하는 것이 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 관측된 지진 파형을 분석하여 지진 피해를 계산하는 방식이 사용된다. 하지만 이 경우 관측소 설치 위치에

"지진동 예측식은 간단하게 지진동을 예측가능하지만, 피해 영향 요소 등을 표현할 수 없다"

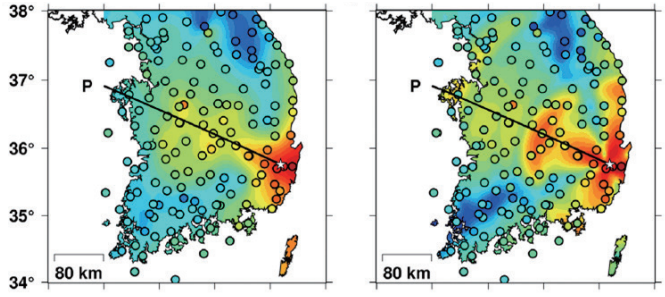
대한 정보만 활용할 수 있어서 관측소 사이의 정보는 추정할 수밖에 없다. 이때 내삽 등의 방법을 사용할 수도 있으나 지진 피해 양상은 좁은 지역에서도 크게 달라질 수 있으므로 최대한 상세하고 정확한 추정이 중요해진다. 지진 발생 직후 분석을 통하여 발생한 지진원에 대한 정보를 신속하게 획득할 수 있으면, 이를 활용하여 관측소가 없는 위치에서의 지진동을 계산할 수 있다. 관측값과 계산값을 조합하면 실제와 유사한 지진동 분포를 추정하는 것이 가능하고 이를 이용하여 합리적인 피해 추정도 가능해진다. 두 번째는 발생 가능성이 있는 지진의 피해 추정을 통해 해당 지역의 장기적인 활용/개발 계획 수립에 활용하는 것이다. 지진은 단층에서 발생하며 장기적인 지진 관측자료나 지질학적 자료 등을 분석하여 발생할 수 있는 지진의 시나리오를 작성할 수 있다. 작성된 지진 시나리오에 근거하여 예상되는 지진동과 지진 피해를 추정할 수 있으면, 예상되는 피해 정도에 따라 지역별로 건축이 가능한 시설들을 구분하는 방식으로 장기적인 지진 피해 저감에 이바지할 수 있다. 두 가지 방식 모두 실질적으로 지진 피해를 줄이기 위해서는 정확한 지진동 예측이 가능해야 한다. 지진동 예측에 가장 널리 사용되는 방식은 지진동 예측식을 이용하는 것이다. 지진동 예측식은 지진의 규모와 거리에 따른 지진동의 변화를 간단한 식으로 표현한 것으로 속도 모델을 이용한 복잡한 계산 없이도 간단하게 지진동을 예측할 수 있다는 장점이 있지만, 실제 지진으로 인한 피해에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들을 모두 표현할 수 없다는 근본적인 한계를 가지고 있어서 최근에는 속도 모델로부터 수치적으로 지진 파형을 직접 계산하여 피해를 추정하는 방식이 많이 사용되고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 지진동 예측을 통한 피해 예측은 정확한 지진동 예측이 가능하다는 것을 전제로 하고 있고, 이를 가능하게 하기 위해서는 정확한 속도 모델이 필요하다. 3차원 모델을 사용하는 것이 1차원 모델보다 얼마나 더 정확하게 지진동을 예측할 수 있는지를 확인하기 위하여 2016년 경주 지진의 최대지반속도를 1차원 속도 모델과 3차원 속도 모델을 이용하여 계산한 결과를 실제 관측값과 비교한 결과를 소개한다(Lee et al., 2021). 수치계산에는 한반도 지역을 대상으로

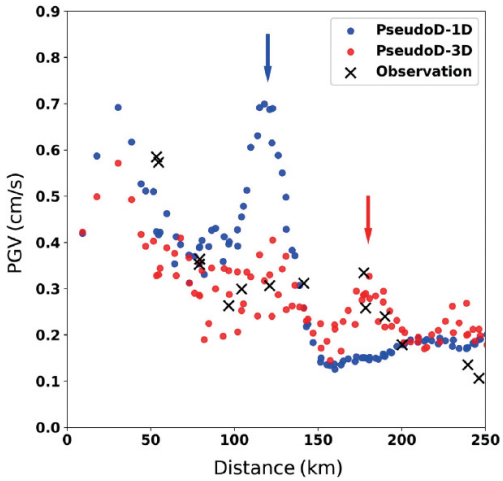
> “합성 지진동으로 지진 피해 추정시 부정확한 속도 모델은 피해의 과소/과대 평가 가능성 존재”

개발된 1차원과 3차원 속도 모델을 사용하였으며, 2016년 경주 지진의 지진원 모델로는 Uchide and Song (2018)의 결과를 이용하였다. [그림 4]는 한반도 남부 지역에서 2016년 경주 지진의 최대지반속도(Peak Ground Velocity, PGV)를 계산한 결과를 보여준다. 관측소의 위치는 원으로 표시하였으며, 원 내부의 색은 관측된 최대지반속도를 나타낸다. 전체적으로 원 내부와 배경색이 유사한 것을 확인할 수 있으며, 이는 두 모델 모두 어느 정도는 관측된 최대지반속도를 예측할 수 있다는 것을 보여준다. 하지만 좀 더 자세히 살펴보면 세부적으로는 상당한 차이가 있다는 것을 알 수 있다. [그림 5]는 [그림 4]에 표시된 프로파일을 따라 합성 지진동과 관측값을 비교한 그림으로 붉은색점은 3차원, 푸른색점은 1차원 합성 결과를 나타내고, x 표시는 관측값을 나타낸다. 거리가 멀어짐에 따라 전반적으로 관측값이 감소하는 양상이 나타나며, 이는 지진파가 전파하면서 진폭이 감소하는 것을 보여준다. 다만 진앙 거리 100~130㎞ 부근과 150~200㎞ 사이에서는 관측값과 1차원 모델을 사용한 합성 최대지반속도의 차이가 크게 나타난다. 100~130㎞ 구간에서는 관측값에 비하여 상당히 크게 합성값이 계산되었고, 반대로 150~200㎞ 구간에서는 상당히 작게 계산되었다. 이에 반하여 3차원 모델을 이용하여 계산한 최대지반속도는 전체 진앙 거리 영역에서 관측값과 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 합성 지진동을 이용하여 지진 피해를 추정할 때 속도 모델이 정확하지 않으면 지역에 따라 피해를 과소 혹은 과다 평가할 가능성이 있다는 것을 보여준다.

[그림 4] 2016년 경주지진에 의한 합성 지진동(최대지반속도) 분포((좌) 3차원 속도 모델, (우)1차원 속도 모델)(Lee et al., 2021)



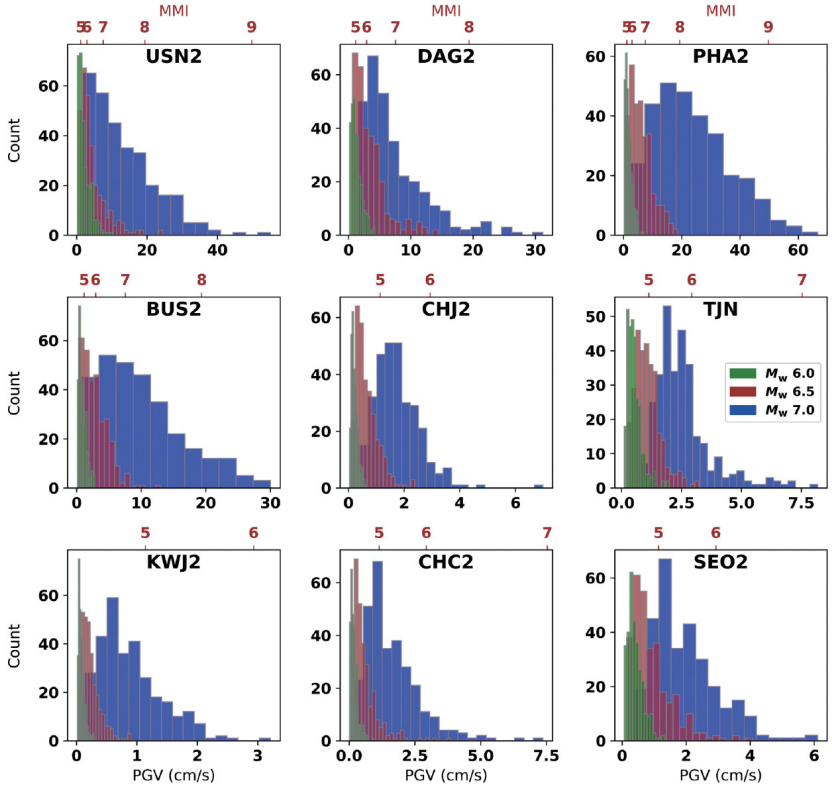

[그림 5] [그림 4]의 프로파일을 따라 계산된 1차원(blue circle)과 3차원(red circle) 합성 최대지반속도와 관측된 최대지반속도(cross)(Lee et al., 2021)



> “3차원 속도 모델은 경주 지진의 관측 지진동을 한반도 남부 전 지역에서 잘 설명 가능”

비교 결과를 통하여 한반도를 대상으로 개발된 3차원 속도 모델은 경주 지진의 관측 지진동을 한반도 남부 전 지역에서 잘 설명해 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 한반도의 동남부 지역은 역사 문헌상에도 대규모의 지진들에 대한 기록이 많이 언급되어 있으며, 지표면에서도 큰 단층들의 흔적이 많이 발견되기 때문에 2016년 경주 지진보다 큰 지진이 언젠가 발생할 가능성이 있다. 또한 부산, 울산과 같은 대도시들과 원전을 포함한 국가적으로 중요한 산업시설들이 밀집해 있는 지역이기 때문에 향후 발생할 수 있는 지진에 대한 위험 평가가 매우 중요하다. 이 지역에서 어느 정도까지 큰 지진이 발생 가능한지는 앞으로도 많은 연구가 필요한 분야이지만, 규모별로 어느 정도의 지진동이 예상되는지를 알고 있으면 막연한 불안감을 해

[그림 6] 주요 도시의 관측소에서 예상되는 최대지반속도 분포. USN2(울산), DAG2(대구), PHA2(포항), BUS2(부산), CHJ2(청주), TJN(대전). KWJ2(광주), CHC2(춘천), SEO2(서울)(Lee et al., 2022)



> “가장 중요한 정보는 지진 발생 위치, 크기, 단층 운동 형태 등과 피해 발생 가능성이다”

소하는 데 도움이 된다. [그림 6]은 2016년 경주 지진이 발생한 단층에서 규모 6.0, 6.5, 7.0의 지진이 발생하는 경우 주요 대도시에서 예상되는 최대지반속도의 분포를 보여준다(Lee et al. 2021). 주어진 규모에 맞춰 다양한 지진 시나리오를 가정하여 300번씩 계산을 수행하여 최대지반속도의 분포를 계산하였다. 대략 최대지반속도가 10.0㎝/s를 초과하면 건물에 손상이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이를 기준으로 살펴보면 경주 지진 발생 단층에서 규모 6.5나 7.0의 지진이 발생하면 가까운 곳에 있는 울산, 대구, 포항, 부산에서는 상당한 피해가 발생할 가능성이 있지만, 7.0의 지진이 발생하여도 청주, 대전, 광주, 춘천, 서울 등과 같이 진앙지와 비교적 멀리 떨어진 지역에서는 직접적인 큰 피해는 발생할 가능성이 크지 않다는 것을 보여준다.

## Ⅳ. 맺음말

2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진을 겪으면서 지진에 대한 사회적인 관심은 이 전과는 비교할 수 없을 정도로 높아졌다. 국민은 지진에 관한 더욱 정확하고 신속한 정보가 제공되기를 기대하고 있으며, 국내에서 발생한 지진의 관측 및 분석을 담당하고 있는 국가 기관인 기상청은 이러한 요구를 충족시켜줄 의무를 지고 있다. 지진과 관련하여 기상청에서 제공할 수 있는 정보는 다양하겠지만 가장 중요한 정보들은 지진 분석을 통해 얻을 수 있는 지진의 발생 위치, 크기, 단층 운동 형태 등에 대한 정보와 지진으로 인하여 어떤 피해가 발생할 수 있는지에 대한 정보이다. 이러한 정보를 정확하게 제공하기 위해서는 지진 분석과 지진동 예측 능력을 고도화하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 고에서 소개한 바와 같이 정확한 지진 분석과 지진동 예측을 위해서는 신뢰할 수 있는 속도 모델을 사용하여야 한다.

1차원 속도 모델은 3차원 속도 모델과 비교하면 수치계산을 간단하게 해주고 계산량을 줄여 준다는 장점이 있으나, 실제 지구 내부의 지진파 속도 분포를 정확하게 반영할 수 없으므로 정확한 계산이 필요한 경우에는 3차원 속도 모델을 사용하

“ 최근 기상청 지원으로 현존 가장 고해상도의 3차원 속도 모델 개발됨 ”

는 것이 타당하다. 국내에는 지진 분석이나 지진동 예측에 사용할 수 있는 3차원 모델들이 거의 없었으나, 최근에 기상청의 지원으로 지금까지 개발된 모델 중에 가장 높은 해상도를 가지고 있는 3차원 속도 모델이 개발되었으며, 이 모델은 앞으로도 계속 개선될 예정이다. 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 인하여 1차원 모델의 장점은 거의 사라져 가고 있으며, 미국이나 일본 등 지진 선진국에서는 3차원 속도 모델을 이용한 지진 분석 및 지진동 예측이 점차 일반화되어가고 있다. 국내에서는 3차원 속도 모델이 몇몇 대학에서 주로 연구 목적으로만 사용되고 있으나, 앞으로는 기상청의 지진 분석 업무에도 활용되어 기상청 지진 분석 능력 향상에 이바지할 수 있게 되기를 기대한다.

## 참고문헌


이준기, 김성룡, 김승섭, 2022: 3차원 속도구조 통합 모델 개발, 기상청, 한국기상산업기술원.

Kim, S., J. Rhie, and G. Kim, 2011: Forward waveform modelling procedure for 1-D crustal velocity structure and its application to the southern Korean Peninsula. Geophys. J. Int., 185, 453-468.

Jung, Y., J.-U. Woo, and J. Rhie, 2021: Enhanced hypocenter determination of the 2017 Pohang earthquake sequence. South Korea, using a 3-D velocity model. Geosc. J., 26(4), 499-511.

Lee, J., J.-H. Song, S. Kim, J. Rhie, and S.G. Song, 2021: Three-dimensional Seismic Wave Propagation Simulations in the southern Korean Peninsula using Pseudo-dynamic Rupture Models, Bull. Seism. Soc. Am., 122(2), 939-960.

Song, J.-H., S. Kim, J. Rhie, and D. Park, 2022: Moment Tensor Solutions for Earthquakes in the Southern Korean Peninsula Using Three-Dimensional Seismic Waveform Simulations. Front. Earth Sci. 10:945022

Uchide, T., and S.G. Song, 2018: Fault rupture model of the 2016 Gyeongju, South Korea, earthquake and its implication for the underground fault system. Geophys. Res. Lett., 45, 2257-2264.

# 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진

김광희 부산대학교 지질환경과학과 교수 kwanghee@pusan.ac.kr

Ⅰ. 최근 우리나라에서 발생하는 지진
Ⅱ. 과거 우리나라 주변 해역에서 발생한 지진과 지진해일의 시사점
Ⅲ. 맺음말

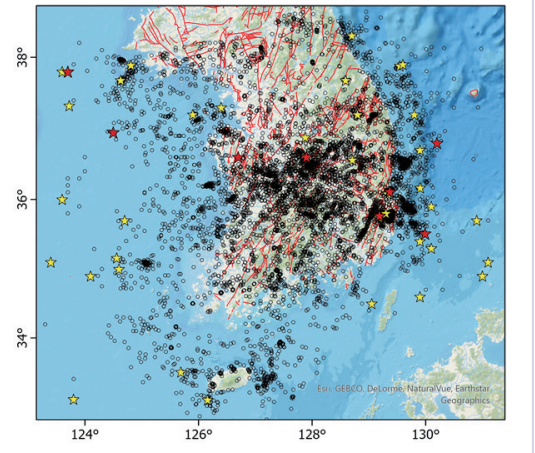
최근 우리나라 경주와 포항에서 발생한 지진으로 국민의 지진에 대한 인식과 대비가 예전보다 많이 향상되었고, 정부에서도 효과적인 지진재해 저감 노력에 최선을 다하고 있다. 그러나 정부에서 수립하여 추진하고 있는 지진방재종합대책도 바다에서 발생할 수 있는 지진에 대해서는 충분히 대응하지 못하고 있다. 우리나라 역사문헌에는 동해에서 큰 규모의 지진과 지진해일이 발생했던 기록이 남아있고, 최근에도 꾸준히 크고 작은 지진이 발생하고 있다. 지난 수백만 년 동안 우리나라의 지진 발생 환경에 큰 변화가 없었던 것을 고려하면, 이러한 역사지진과 지진해일 기록은 앞으로도 언제든 비슷한 규모의 지진과 지진해일이 발생할 수 있음을 의미한다. 이 기고에서는 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진과 지진해일 현황을 점검하고, 향후 해역지진 감시역량 강화 필요성을 제기한다. ■

"지진이 드문 우리나라에서 경주와 포항 지진으로 특별재난지역 선포는 상당히 이례적 상황"

## Ⅰ. 최근 우리나라에서 발생하는 지진

2016년 규모 5.8의 경주지진과 2017년 규모 5.4의 포항지진을 통해 우리는 지진의 위험과 피해를 처음으로 체험했다. 물론 그 이전에도 우리나라에서는 꾸준히 크고 작은 지진이 발생했지만[그림 1]〈표 1〉, 이전의 지진은 그저 귀찮은 존재 정도로 느껴지고 해외에서나 발생하는 안타까운 자연재해로 느꼈던 것이 사실이다. 우리 대부분이 그렇게 느꼈던 데에는 우리나라는 지진으로부터 안전하고, 우리나라에서는 대규모 지진이 발생하지 않는다는 근거 없는 믿음이 자리 잡고 있었기 때문이다. 정부는 두 지진 모두 국가의 안녕 및 사회질서 유지에 중대한 영향을 미칠 수 있고, 그 피해를 효과적으로 수습하기 위한 특별한 조치가 필요하다고 인정하여 경주와 포항지역을 특별재난지역으로 선포하고 응급대책과 재난구호 그리고 복구에 필요한 여러 조처에 최선을 다했다. 사태가 어느 정도 진정된 후 발표한 정부 집계를 보면 그 피해는 상상을 초월하는 수준이었고〈표 2〉, 그 여파는 지금까지도 지속되고 있다. 우리나라에서 발생하는 대부분의 자연재난이 태풍, 집중호우 혹은 대설 등임을 고려한다면 지진으로 인한 특별재난지역 선포는 상당히 이례적인 상황이었다. 이렇게 특별재난지역을 선포하고 관련 통계를 집계하여 공표하는 데에는 이러한 경험과 복구 과정을 통해 국가재난사태를 감소시키는 정책의 기초자료로 활용하기 위한 취지도 있다. 두 지진 발생 후 시간이 지나면서 지진으로 인한 피해를 줄이는 정책의 필요성에 대한 인식이 점차 줄어든 것은 사실이다. 그러나, 아직도 많은 국민은 작은 지진에도 경주지진과 포항지진을 상기하면서 깜짝 놀라는 상황이 반복되고 있다.

[그림 1] 1978년부터 최근까지 우리나라에서 발생한 지진 위치(검은색 원: 규모 4 미만 지진, 노란색 별: 규모 5 미만 지진, 붉은색 별: 규모 5 이상 지진)




두 지진을 경험한 지도 벌써 5~6년이 지난 현시점에 그때 우리는 어떤 준비가 되어 있었고, 어떤 준비가 미흡했었는지, 그리고 상황 발생 후 대처를 돌아보고 미래를 준비하는 것도 분명히 우리의 역할이다. 정부는 국외에서 발생한 1995년 고베 지진, 2005년 후쿠오카 지진, 그리고 2008년

〈표 1〉 우리나라에서 발생한 지진의 순위별 분포(기상청, 2022)

| 순위 | 규모(ML) | 발생시각 | 위도 | 경도 | 발생지역 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5.8 | 2016-09-12 20:32:54 | 35.76 | 129.19 | 경북 경주시 남남서쪽 8.7㎞ 지역 |
| 2 | 5.4 | 2017-11-15 14:29:31 | 36.11 | 129.37 | 경북 포항시 북구 북쪽 8㎞ 지역 |
| 3 | 5.3 | 1980-01-08 08:44:13 | 40.20 | 125.00 | 북한 평안북도 삭주 남남서쪽 20㎞ 지역 |
| 4 | 5.2 | 2004-05-29 19:14:24 | 36.80 | 130.20 | 경북 울진군 동남동쪽 74㎞ 해역 |
| 4 | 5.2 | 1978-09-16 02:07:06 | 36.60 | 127.90 | 경북 상주시 북서쪽 32㎞ 지역 |
| 6 | 5.1 | 2016-09-12 19:44:32 | 35.77 | 129.19 | 경북 경주시 남남서쪽 8.2㎞ 지역 |
| 6 | 5.1 | 2014-04-01 04:48:35 | 36.95 | 124.50 | 충남 태안군 서격렬비도 서북서쪽 100㎞ 해역 |
| 8 | 5.0 | 2016-07-05 20:33:03 | 35.51 | 129.99 | 울산 동구 동쪽 52㎞ 해역 |
| 8 | 5.0 | 2003-03-30 20:10:53 | 37.80 | 123.70 | 인천 백령도 서남서쪽 88㎞ 해역 |
| 8 | 5.0 | 1978-10-07 18:19:52 | 36.60 | 126.70 | 충남 홍성군 동쪽 3㎞ 지역 |
| 11 | 4.9 | 2021/12/14 17:19:14 | 33.09 | 126.16 | 제주 서귀포시 서남서쪽 41㎞ 해역 |
| 11 | 4.9 | 2013-05-18 07:02:24 | 37.68 | 124.63 | 인천 백령도 남쪽 31㎞ 해역 |
| 11 | 4.9 | 2013-04-21 08:21:27 | 35.16 | 124.56 | 전남 신안군 흑산면 북서쪽 101㎞ 해역 |
| 11 | 4.9 | 2003-03-23 05:38:41 | 35.00 | 124.60 | 전남 신안군 흑산면 서북서쪽 88㎞ 해역 |
| 11 | 4.9 | 1994-07-26 02:41:46 | 34.90 | 124.10 | 전남 신안군 흑산면 서북서쪽 128㎞ 해역 |

〈표 2〉 경주지진과 포항지진 현황과 지진피해 현황(11.15 지진백서)

| 구분 | 지진발생 | 규모 | 사망 | 부상 | 공식피해액산정 | 직·간접 피해추정액 | 시설물피해 | 이재민수 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 경주 | 2016.09.15 | 5.8 | - | 6 | 58억 원 | 230억 원 | 5,955개소 | - |
| 포항 | 2017.11.15 | 5.4 | 1 | 117 | 846억 원 | 3,323억 원 | 55,095개소 | 1,797명 |

쓰촨성 지진과 그 피해를 목격하면서 3차에 걸쳐 지진방재대책을 수립하였다. 이렇게 수립한 지진방재대책은 예산 투자와 지진연구 분야를 충분히 고려하지 않은 그간의 미흡한 법과 제도의 정비 위주였다. 경주지진과 포항지진 과정에서 실제 지진 상황에서 작동하지 않는 기존 대책을 개선할 필요성과 시급성이 대두되었다. 또한 지진으로 국민 불안감이 고조됨에 따라 정부에서는 두 지진의 발생 원인을 규명하고, 유사한 지진이 또 발생 가능한지, 이러한 지진이 발생한다면 그 피해를 줄이기 위한 대책이 무엇인지 등 기존 대책을 원점에서 재점검하여 109개의 세부과제로 구성된 지진방재종합대책을 마련하고 확정하여 추진해 오고 있다. 그러나 정부에서 마련한 종합대책이 아직도 동족방뇨(凍足放尿)의 미봉책인 경우가 있다. 특히, 지난 두 번의 대규모 피해를 동반한 지진이 육상에서 발생했고, 육상에서의 대

“ 1983, 1993년 지진 해일은 동해안에 인명/재산 피해 유발 ”

응에 치중한 나머지 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진과 지진해일 및 피해 대책과 대응은 미흡한 실정이다.

## II. 과거 우리나라 주변 해역에서 발생한 지진과 지진해일의 시사점

바다에서 지진이 발생하는 경우 특별한 조건이 만족하면 지진해일을 유발할 수도 있다. 23만 명 이상의 사망자를 발생시켜 인류 역사상 가장 참혹한 재난 중 하나로 꼽히는 2004년 인도양 지진과 지진해일, 원자력발전소 사고를 동반했던 2011년 일본 동북부 태평양 연안에서 발생한 거대한 지진과 지진해일은 지진보다 더 큰 피해가 지진해일로 발생해서 지금까지도 우리 기억에 생생히 남아있다[그림 2]. 우리나라 동해안에서도 1940년 이후 4차례 지진해일이 관측된 적이 있는데, 이 중 1983년과 1993년 발생한 지진해일은 동해안에 인명피해와 재산 피해를 유발하기도 했다[그림 3]. 4차례의 지진해일은 모두 동해 건너 일본 서쪽 해역에서 규모 7 이상의 지진이 발생하고 이에 따라 지진해일이 유발되어 우리나라 동해안에 영향을 끼친 사례이다. 이 경우 일본 서쪽 해역의 지진으로 유발된 지진해일이 우리나라 동

[그림 2] (좌)2004년 규모 9.3 지진으로 발생한 지진해일 피해 모습, (우)2011년 규모 9.1 동일본 대지진으로 발생한 지진해일 내습 모습(출처: 구글 이미지)

"동해 부근 지진 및 지진해일 발생시 대비시간 부족 가능"

해안까지 도달하기까지는 1시간 30분 이상의 시간이 소요되므로 동해안에서 준비할 수 있는 시간이 있을 수 있다. 그렇지만 만약 우리나라 동해안 부근에서 지진이 발생하고 지진해일이 발생한다면, 해당 지역에 거주하는 국민들이 대비할 시간이 충분치 않은 상황에서 지진해일이 육지에 도달할 수도 있다.

우리가 걱정할 정도로 큰 피해를 동반하는 지진의 재래주기는 매우 길고, 현대 과학기술을 이용한 지진관측 역사는 상대적으로 매우 짧다. 지진 위험성을 고려하

[그림 3] 우리나라 지진해일 피해사례(임원항, 1983년)

"대형 지진의 재래 주기와 현대 관측 역사가 짧기 때문에, 고지진, 역사지진 활용이 일반적"

는데 우리가 사용할 수 있는 최근 자료가 매우 제한적이기 때문에 관심 지역의 지진 위험성을 고려하는 과정에서는 고지진 또는 역사지진 자료를 활용하는 것이 보통이고, 이러한 상황은 우리나라뿐만 아니라 세계 어느 나라에서나 비슷한 실정이다. 우리나라에 지진 관측장비가 도입되기 이전에 발생한 지진은 삼국사기, 고려사절요, 고려사, 조선왕조실록, 승정원일기 등 역사문헌에 잘 기록되어 있고, 기상청에서는 이런 자료를 수집하여 한반도 역사기록을 정리하고 발간하기도 했다(국립기상연구소, 2012). 이 역사기록을 살펴보면 우리나라 주변 해역에서 62회 이상의 지진이 발생했고, 이 기록 중에는 1643년과 1681년 우리나라 동해에서 대규모 지진이 발생했고 이에 따라 지진해일이 발생했음을 의심할 만한 기록도 포함되어 있다[그림 4-5]. 만약 동해연안에서 지진에 대한 기록 없이 지진해일에 관한 기록만 있다면, 일본 서부해저에서 발생한 대규모 지진으로 인하여 지진해일이 발생했을 가능성이 있다. 그러나 동해연안에서 지진과 지진해일이 함께 기록되어 있다면, 이것은 한반도와 가까운 해저에서 대규모 지진이 발생하였고 이에 따른 지진해일이 발생했음을 의심하여야 한다. Ha et al.(2022)에서는 역사문헌에 기술되어 있는 내용이 발생 가능한지에 관한 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 최근 연구를 통해 확보된 동해 해역지진과 해저 단층의 분포를 바탕으로 여러 시나리오를 가정하고, 고해상 수심 자료 등을 활용해서 동해에서 지진해일의 생성, 처오름 높이와 전파과정을 모의했다. 그 결과 일부 시나리오의 경우 처오름 높이가 1681년 역사지진과 지진해일 상황과 유사할 수 있음을 보였다. 이런 지진해일이 지진이 발생한 후 짧게는 5분에서 길어도 20분 안에 동해안에 도달할 수 있다는 모의 결과를 보여 일본 서해안에서 발생하는 지진/지진해일과 달리 대비할 시간이 충분치 못할 수도 있다. 2011년 일본 동북부 태평양 연안에서 발생한 규모 9.1 지진과 지진해일, 그리고 이에 따라 일본과 세계 곳곳에 유발한 피해를 생각하면 자연재해에 대응하고 준비하는 과정에서 최악의 시나리오를 설정하고 준비할 필요가 있다.

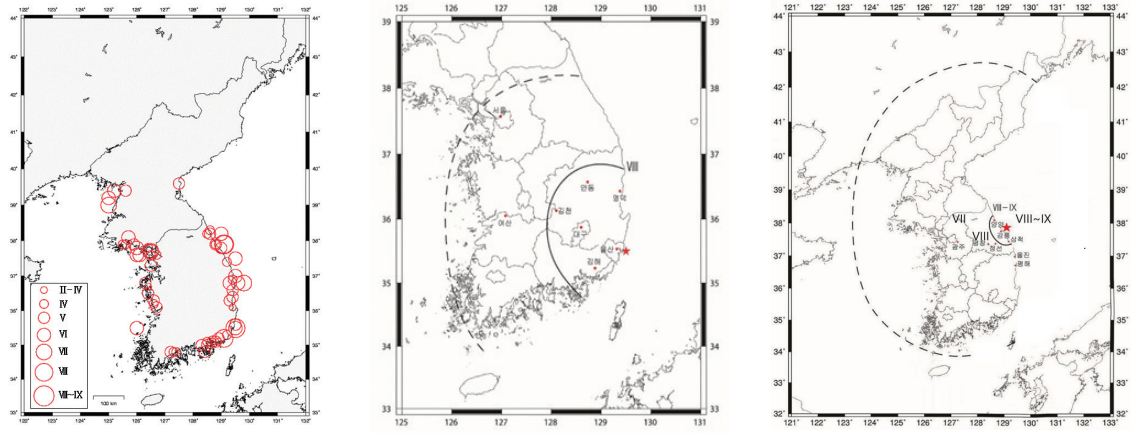
앞서 언급한 최악의 상황이 아니어도, 우리나라 주변 해역에서는 크고 작은 지진이 꾸준히 발생하고 있다. [그림 1]에 제시된 1978년 이후 최근까지 지진 발생 현황

> “실제 해저에서 발생하는 지진의 횟수는 알려진 것 보다 훨씬 많을 것”

만 보더라도 우리나라 주변 해역 여러 곳에 지진이 자주 발생하는 해역이 있음을 어렵지 않게 확인할 수 있다. 바다에서 지진이 발생했음을 인지할 수 있는 지진관측소 대부분은 지진이 발생한 장소로부터 멀리 떨어진 육상에 자리 잡고 있다. 이같은 관측조건 때문에 바다에서 발생하는 지진의 감시능력이 육상에서 발생하는 지진의 감시능력에 비해 현저히 떨어진다는 것을 고려한다면, 실제 해저에서 발생하는 지진의 횟수는 알려진 것보다 훨씬 많을 것임이 틀림없다. 이 지진다발 해역에는 울진-영덕 앞바다, 포항-경주 앞바다, 울산 앞바다가 포함되어 있다. 최근에도 이 지진다발 해역에서는 비교적 큰 규모의 지진이 발생하여 많은 사람이 느끼고 놀란 적이 있기도 하다. 또한, 이 지진 다발 해역 가까이에는 우리나라 경제와 사회를 유지하는 데 큰 역할을 하는 다수의 사회기반시설이 있다.

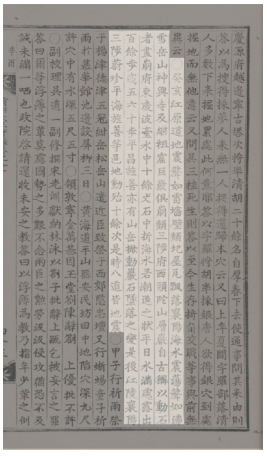
## Ⅲ. 맺음말

[그림 4] (좌)한반도 해역 역사지진, (중)1643년 역사지진과 지진해일 기록(추정규모 6.7), (우)1681년 역사지진과 지진해일(추정규모 6.7)




현재 우리가 가지고 있는 과학기술 수준으로 지진의 발생 시기를 단기예보하는 것은 불가능하다. 그러나, 지난 수백만 년 동안 우리나라 주변의 지체구조 환경에

[그림 5] 조선왕조실록 숙종 11권 강원도 지진과 지진해일 관련 기록기록(조선왕조실록 홈페이지)



「숙종실록 11권」 숙종 7년(1681년) 5월 11일

강원도(江原道)에서 지진(地震)이 일어났는데, 소리가 우레와 같았고 담벽이 무너졌으며, 기와가 날아가 떨어졌다. 양양(襄陽)에서는 바닷물이 요동쳤는데, 마치 소리가 물이 끓는 것 같았고, 설악산(雪岳山)의 신흥사(神興寺) 및 계조굴(繼祖窟)의 거암(巨巖)이 모두 붕괴[崩頹]되었다. 삼척부(三陟府) 서쪽 두타산(頭陀山) 층암(層巖)은 옛부터 돌이 움직인다고 하였는데, 모두 붕괴되었다. 그리고 부(府)의 동쪽 능파대(凌波臺) 수중(水中)의 10여 장(丈)(1장=3.03m) 되는 돌이 가운데가 부러지고 바닷물이 조수(潮水)가 밀려가는 모양과 같았는데, 평일에 물이 찼던 곳이 1백여 보(步) 혹은 5, 60보 (1보=1.8m) 노출(露出)되었다. 평창(平昌)·정선(旌善)에도 또한 산악(山岳)이 크게 흔들려서 암석(巖石)이 추락하는 변괴(變怪)가 있었다. 이후 강릉(江陵)·양양(襄陽)·삼척(三陟)·울진(蔚珍)·평해(平海)·정선(旌善) 등의 고을에서 거의 10여 차례나 지동(地動)하였는데, 이때 8도(八道)에서 모두 지진이 일어났다.

큰 변화가 없었으므로, 과거와 현재 우리나라에서 발생하는 지진 현황을 잘 살펴보면 앞으로 어느 곳에서 얼마나 큰 지진이 발생할지에 관한 정보는 사전에 확보할 수 있다. 현재 우리나라 기상청에서 운영하는 지진관측망은 이미 세계적인 수준의 관측밀도를 갖추고 있으며, 지진조기경보 등의 서비스를 제공하고 있다. 아직 미소지진이 특히 많이 발생하는 지역에 대한 보완이 필요하기는 하지만, 현재 갖춰져 있고 앞으로 가까운 미래에 보충되는 국가지진관측망으로 작은 규모의 지진까지도 신속하고 정확한 감시가 가능하다. 이렇게 생산되는 자료는 우리 정부와 국민이 바라는 요구에 부응할 수 있을 것이다. 육지와 마찬가지로 우리나라 동해, 서해, 남해 모든 해역에서 꾸준히 크고 작은 지진이 발생하고 있지만, 바다에서 발생하는 지진의 정확한 현황이 파악되지 않고 있는 것이 현실이다. 기상청에서는 앞으로 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진에 대한 감시역량을 강화할 필요가 있고, 이렇게 생산되는 자료는 지진방재종합대책을 보완하고, 향후 발생할 수 있는 해저지진과 지진해일에 대응하는데 필요한 정책을 수립하고 집행하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

11.15 지진백서, 2022: 발간등록번호 75-50200000-000113-01.

국립기상연구소, 2012: 한반도의 역사지진 기록(2년~1904년).

기상청, 2022: 지진통계, https://necis.kma.go.kr/necis-dbf/user/earthquake/selectRankList.do.

조선왕조실록, 2022: https://sillok.history.go.kr/id/ksa_10705011_001.

Ha T, Yoon J-S, Kyung JB, Yoon S-H, Lee D-W, Kim K-H. 2022: Occurrence of Local Tsunamis Along the Eastern Coast of the Korean Peninsula Based on Numerical Modeling of Historical Earthquakes. Frontiers in Earth Science. 2022-May-27;10, doi:10.3389/feart.2022.836168.

# 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제

손상영 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 sson@korea.ac.kr

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 지진해일 모델의 현황
Ⅲ. 가정과 한계
Ⅳ. 모델링의 새로운 지향점
Ⅴ. 결론 및 제언

지난 몇 년간의 지진해일 모델링 기법은 특히 해안지역 범람을 중심으로 지난 수십 년 동안보다 더 빠르게 진화했다. 무엇보다도 이러한 진화는 계산성능의 급격한 향상과 맞물리는데, 지구과학문제 전반에 걸쳐 활용성이 증대되는 GPU와 하이브리드 컴퓨팅, 그리고 곧 다가올 엑사스케일 컴퓨팅 시대에 의해 뒷받침된다. 엑사스케일 컴퓨팅은 외해에서의 지진해일 전파를 모델링하기 위한 2차원 천수방정식보다는 해안에서의 난류특성이 포함된 지진해일 전파를 모델링하기 위한 고차원의 Navier-Stokes 방정식 풀이에 더 큰 영향을 줄 것이다. 이 글에서는 외해에서 지진해일의 생성부터 해안에서 처오름 및 소멸까지 모델링하기 위한 다양한 접근 방식을 설명하고 흐름특성에 기초하여 각 방식이 지닌 한계를 살펴본다. 또한, 지진해일의 생애를 모의하기 위한 다중 규모(multi-scale) 모델링 노력도 덧붙인다. 마지막으로 미래형 지진해일 모델의 전형에 포함될 확률론적 지진해일 재해도 분석과 인공지능의 도입에 대해서도 간략히 소개한다. ■

## Ⅰ. 서론

> “ 해안으로 전파되는 지진해일 모델링은 여전히 도전적 과제 ”

2011년 발생한 동일본 지진해일로부터 일본의 도호쿠 해안을 보호하기 위해 설계된 수십억 달러 규모의 방호벽의 ‘실패’는 지진해일 피해 예방과 저감을 위한 대안적 접근법에 중요한 논쟁을 불러왔다[그림 1]. 즉, 방호벽이 지진해일 방재에 대한 최선의 해결책인지 근본적인 질문을 던졌으며, 규모가 큰 지진해일로부터 보호를 보장하지 못하는 방호벽에 불필요한 비용을 투자할 필요가 없음을 역설했다. 더군다나 이러한 전통적 방식의 콘크리트 기반 솔루션(이는 자연 기반 솔루션에 대응되는 표현)에만 의존하는 것은 인간과 더불어 해안 생태계, 그리고 해안선 안정성에 바람직하지 않거나 지속가능하지 않을 수 있다. 이러한 이유로 최근 의사결정자와 엔지니어는 방호벽에 대응하여 지속가능하고 효과적인 대안으로서 녹색 설계에 의한 보호 솔루션을 무게 있게 고려하고 있는 추세이다. [그림 2]는 불의 고리를 따라 표현된 세 가지 설계사례로서 해안 배후지역을 보호하기 위해 설치된 방재 언덕이다. 이를 통해 지진해일 에너지의 전체가 아닌 일부를 소멸시키고 동시에 일부를 허용하게 되는데, 이러한 대안적 방식이 실제로 배후에 있는 사람들과 재산을 효과적으로 보호할 수 있는지는 여전히 의문이 남은 상태다. 구조물과 그에 가해지는 힘을 시뮬레이션할 수 있는 강력한 모델 적용을 통해 이를 확인할 수 있을 것이다.

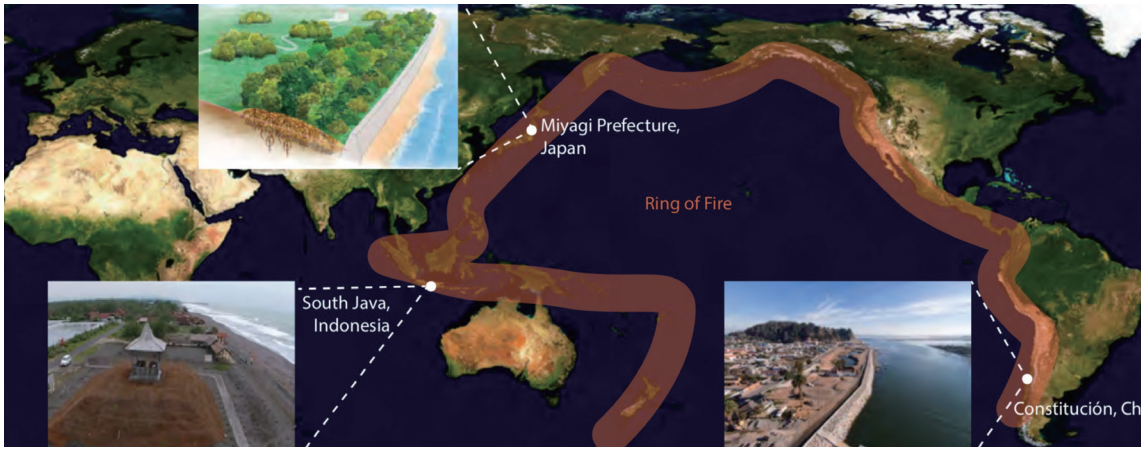
외해에서 지진해일을 모델링할 수 있는 수치적 능력은 비교적 잘 정립되어 있다고 할 수 있다. 하지만, 지진해일이 해안으로 전파되면서 지진해일과 해안 및 육상의 다양한 구조물과 상호작용 하는 모델링은 여전히 도전적 과제로 남아있다. 특히 지진해일 전파 시 복잡한 구조물에 작용하는 힘을 정확하게 추정하기 위해서는 세부적인 정보와 수식화가 필요한데, 최근 연구들

[그림 1] 2011년 지진해일이 일본 해안을 강타한 후 수십억 달러 규모의 도호쿠 지진해일 방호벽의 파편들

“ 3차원 모형 활용한 시뮬레이션을 통해 지진해일 예측성 진보 ”

에서 몇 가지 사례를 찾아볼 수 있다(Behrens and Dias, 2015). 3차원 모형을 활용한 미세한 규모의 시뮬레이션을 통해 지진해일 처오름, 지진해일-해안 상호작용 해석이 이루어져 지진해일 예측성능을 진보시키기도 하였다(Larsen and Fuhrman, 2019; Qin et al., 2018).

[그림 2] 규모가 큰 지진해일의 영향을 가장 많이 받는 불의 고리 지역에 건설된 자연기반 솔루션인 인도네시아, 일본, 칠레의 지진해일 저감 공원의 조성 모습




이 글에서는 지진해일의 생애에 포함하는 생성부터 처오름 및 소멸까지의 물리적 과정을 고려하여 이를 합리적으로 모델링할 수 있는 기법을 소개하고자 한다. 이를 위해, 현존하는 대부분의 지진해일 모델의 기초인 2차원 천수방정식의 기본적인 가정과 그에 내재된 한계점을 분명히 하고, 적용범위를 살펴보고자 한다. 이러한 가정과 한계를 지닌 천수방정식 모형을 고급의 3차원 및 동수역학(non-hydrostatic) 모델에 연결하면 현재 기술이 다가갈 수 있는 최첨단 모델의 전형을 보여줄 수 있게 된다. 원고의 논리 구성은 다음과 같다. 2장에서는 현재까지 개발되어 활용되는 지진해일 모델링의 발전상황을 점검한다. 일반적인 지진해일 모의에 활용되는 수학적 모델과 수치적 기법을 3장에서 간략히 살펴보고, 4장에서는 향후 지진해일 모의가 지향해야 할 다중 규모 시뮬레이션에 대한 아이디어와 확률론적 지진해일 재해 분석 및 인공지능 기법을 소개한다. 마지막으로 결론 및 제언을 5장에 담았다.

## II. 지진해일 모델의 현황

〈표 1〉 지진해일 모의가 가능한 수치모델들(SW 천수방정식, B Boussinesq 방정식, GN Green-Naghdi 방정식, N-S Navier-Stokes 방정식, FD 유한차분법, FE 유한요소법, FV 유한체적법, SPH 입자기반해석법). (Marras and Mandli, 2020)

| 수치모델 | 공간차원 | 수학방정식 | 난류 | 쇄파 | 침퇴적 모의 | 공간차분 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GeoCLAW | 1D/2D/2D12 | SW | No | No | No | FV |
| NUMA2D | 1D/2D | SW | No | No | No | FE |
| MOST | 1D/2D | SW | No | No | No | FD |
| Cliffs | 1D/2D | SW | No | No | No | FD |
| Tsunami-HySEA | 1D/2D | SW/B | No | Yes | No | FV |
| Multilayer-HySEA | 1D/2D(1/2) | SW/B | No | Yes | Yes | FV |
| TUNAMI | 1D/2D | SW | No | No | No | FD |
| NAMI-DANCE | 1D/2D | SW | No | No | No | FD |
| COMCOT† | 1D/2D | SW | No | No | No | FD |
| SELFE | 1D/2D | SW | No | No | No | FE |
| TsunAWI | 1D/2D | SW | No | No | No | FE |
| TsunaFlash | 1D/2D | SW | No | No | No | FE |
| VOLNA | 1D/2D | SW | No | No | No | FV |
| Delft3D | 1D/2D | SW | No | No | Yes | FD |
| Basilisk | 2D/3D | GN | No | Yes | Yes | FV |
| BOSZ | 1D/2D | B | No | No | No | FV/FD |
| Celeris | 1D/2D | B | No | No | No | FV |
| FUNWAVE | 1D/2D | B | No | No | No | FV/FD |
| pCOULWAVE | 2D/3D | B | Yes | No | No | FV |
| NEOWAVE | 2D | B | No | No | No | FD |
| GPUSPH | 3D | SPH | No | Yes | No | SPH |
| SCHISM | 1D/2D/3D | N-S | RANS | Yes | No | FE/FV |
| COBRAS | 2D/3D | N-S | RANS | Yes | No | FD |
| TSUNAMI3D | 2D/3D | N-S | RANS | Yes | No | FD |
| waves2FOAM | 2D (지진해일) | N-S | RANS | Yes | No | FV |
| NHWAVE | 2D/3D | N-S | LES | Yes | Yes | FV/FD |
| Alya | 2D/3D | N-S | LES/RANS | Yes | Yes | FE |

† 현재 우리나라 기상청에서 예보에 활용 중인 지진해일 모형

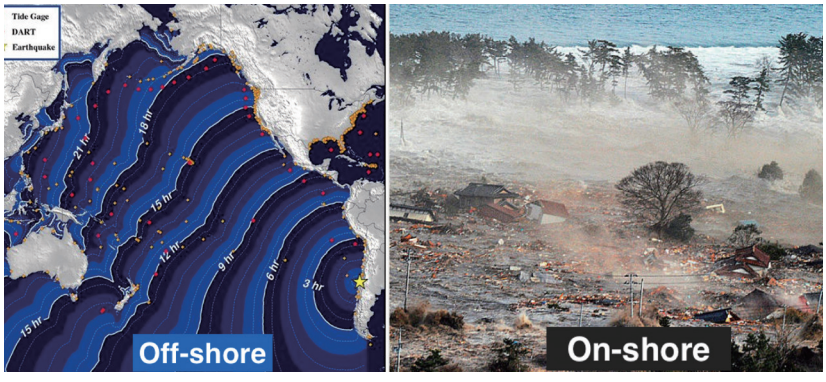
지진해일의 전파 과정을 떠올리면 대양에서의 대규모 장파특성에서부터 해안 및 육상지역에서의 미세규모 난류특성에 이르기까지 다양한 시공간 규모의 역학이 내재되어 있음을 알 수 있다. 이 때문에 수리실험을 통한 지진해일의 해석과 이해는 손쉽게 다가오지 않는다(Jiang et al., 2015). 마찬가지의 이유로 수리실험을 대신하

"모델링은 지진해일의 발생-전파-범람을 모의·분석하는데 효과적인 대안"

여 보급형 컴퓨팅 성능과 데이터 저장공간의 지원을 받는 수치 모델링이 대규모 지진해일 분석에 가장 널리 사용하는 도구로 성장했다(Behrens and Dias, 2015). 지진해일 모델링은 약 60여 년 전 일본에서 Aida의 연구(Aida, 1969)로 시작되었으며, 비록 지진해일로 인한 침수 모의 시 수치기법에 따른 오차 문제가 여전히 존재하지만, 모델링은 지진해일의 발생-전파-범람을 모의하고 분석하는데 효과적인 대안로 자리잡았다. 그 과정에서 다양한 수학적 가정과 수치기법 그리고 흐름구조의 개념화를 통해 많은 발전을 이루었다. 〈표 1〉은 현재까지 개발된 지진해일 모의가 가능한 수치모델을 나타내고 있다.

지진해일의 영향이 가장 심각해지는 해안에서 지진해일-해안 상호작용을 포함하는 복잡한 전파 양상을 분석하기 위해 지난 수년간 수치모의기법이 활용됐다. 이상화된 1차원(1D) 및 2차원(2D) 가정을 두고 해저지형 및 식생과 같은 고립된 요소의 영향이 깊이 있게 연구되었는데, 예를 들어 1D 및 2D 천수방정식 모델을 사용하여 지진해일의 비선형성이 육상에서의 유속과 전파에 상당한 영향을 미친다는 사실을 입증했다. 더 나아가 범람모의에도 확장하여 적용되었는데, 대부분의 범람 모델링은 수위예측을 목표로 하기에 이에 대한 어느 정도 성과를 얻기도 하였다. 하지만, 지진해일에 의한 작용력의 정확한 예측으로 이어지기는 어려웠는데, 이는 1D 및 2D 모델의 한계로 대응될 수 있다.

[그림 3] 외해의 지진해일 전파는 2차원 장파로 해석이 가능((좌)칠레 지진해일, 2010). 반면, 육상에서는 물, 모래, 흙, 잔해 등이 포함되어 난류특성을 지닌 다상의 흐름화가 진행됨((우) 일본 도호쿠 지진해일, 2011)




앞서 설명한 바와 같이 지진해일은 자연적으로 다양한 크기의 현상을 포함한다. 바다를 가로지르는 행성 규모의 흐름에서 미세규모의 난류현상에 이르기까지 내포하는 길이척도가 다양하다. 한편, 외해에서 지

> “천수방정식은 복잡한 흐름을 직접적으로 모델링하기에 구조적 한계를 갖고 있음”

진해일은 빠른 속도로 움직이는 2차원 장파이며 수천 킬로미터 동안 방해받지 않고 이동하기에 2D 비선형 천수방정식으로 정확하게 모의될 수 있다. 반면에, 지진해일이 해안에 접근하고 내륙으로 이동함에 따라 3차원과 난류특성이 중요해지고, 침식과 퇴적물 운송과 직접적으로 관계되는 경계층의 역할이 커진다. 지진해일이 내륙으로 이동함에 따라 유사(quicksand), 식생 및 기타 잔해가 해저에서 연행되어 이동하고 퇴적되어 잠재적으로 중요한 해안선의 변화를 초래한다(예: Son et al., 2020). 그러나 천수방정식은 침식 및 퇴적 모의에 활용되었지만 이러한 복잡한 흐름을 직접적으로 모델링하기에는 구조적으로 적합하지 않다[그림 3].

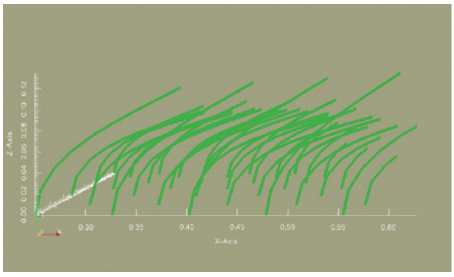
지진해일-유사이송 모델링에 관한 천수방정식 적용의 한계를 직접 이해하기 위해 몇몇 연구자들은 동일한 문제에 대해 천수방정식 모형과 3차원 모형을 동시에 적용하였고, 지진해일 침수와 관련된 유체 힘을 정확하게 예측하기 위해 난류 흐름에 대한 3D 모델이 필요하다는 것을 입증했다. 예를 들어 Qin et al.(2018)은 OpenFOAM 기반의 3차원 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)모형과 2차원 천수방정식 모형인 GeoClaw를 비교하였다. Navier-Stokes 방정식의 적용을 통한 지진해일 처오름 모델링의 최초 시도 중 하나를 Hsiao and Lin(2010)의 연구와 Larsen and Fuhrman(2019)의 연구에서 찾을 수 있다. 이들은 모두 지진해일 위험과 내륙에서의 전파를 연구하기 위해서는 높은 충실도의 다중 스케일 모델이 필요함을 강조하였다. 게다가, 공학에서 고전적으로 사용되는 RANS 방정식은 파도 아래에서 난류를 과잉 생산하는 것으로 나타났으며, 따라서 LES(Large Eddy Simulation)와 같은 충실도 높은 난류 모델의 필요성을 시사했다(Larsen and Fuhrman, 2018). Christensen(2006)은 LES의 경우 쇄파대(surf zone) 역학에 대한 수리모형 실험 결과를 재현하는데 문제가 없음을 보이기도 했다.

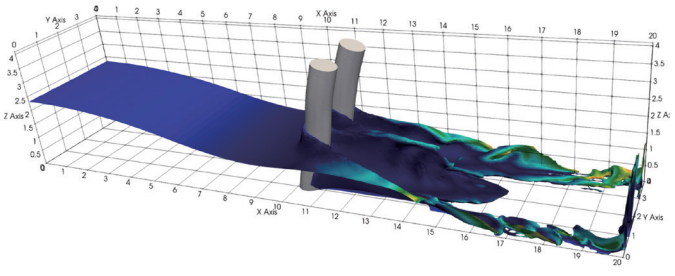
지진해일 처오름에 비교적 많은 연구가 이루어진 데 비하여, 지진해일과 건물 및 식생과의 상호작용, 그리고 지진해일에 의한 침식 관련 연구는 충분하지 않다. 천수방정식 모델을 사용한 침식 모델링은 일반적으로 전단속도를 산출하기 위해 속도의 연직 프로파일을 재구성하는데 이 과정에서 정확도가 낮아지게 된다. 더욱이,

> “지진해일 영향 저감 위한 식생-지진해일, 식생-지형 상호작용 상세 모델링 연구”

바닥경계층 영역에서 침식의 과정은 입자-입자 및 입자-유체 상호작용을 포함하기 때문에 연안 공학에서 여전히 미해결 과제이다. 모델간의 상호비교를 통해 흐름에서의 전단과 분리(separation)를 연구한 Lynett et al.(2017)은 다음과 같은 결론을 내리며 3차원 모형의 수월성을 강조했다. “(중략) 일반적으로, 우리는 물리적 복잡성이 강화된 모델이 더 나은 정확도를 제공하고, 낮은 차수의 3차원 모델이 높은 차수의 2차원 모델보다 우수하다는 것을 발견한다.”

[그림 4] 큰 레이놀즈 수에서 3차원 흐름의 유연한 식생의 두 가지 사례((좌)채널 흐름에 잠긴 구부러진 이상화된 1D 식물 모의(Mattis et al., 2015), (우)댐 붕괴에서 이상화된 3D 나무의 양방향 유체-구조 상호작용 모의(Mukherjee et al., 2020))





적절한 수준에서 상세하게 모델링하는 과정은 침식과 식생을 연구하는 데 중요하다. 지진해일 영향을 저감할 수 있는 방안 연구의 다음 영역은 식생-지진해일 및 식생-지형 상호작용의 상세한 모델링에 있을 수 있다. 식물이 폭풍해일의 홍수에 대해 생물학적 방패 역할을 할 수 있다는 미 육군 공병단의 선구적인 연구성과(USACE, 1963)에 비추어 볼 때, 전 세계 지진해일 영향의 저감을 위한 해법에 식물 활용 방안이 포함될 수 있다. 이 때문에 풍파, 흐름 및 지진해일에 대한 식생의 영향이 수리실험과 수치해석을 통해 다양하게 분석되고 있다(Moller, 1999; Thuy, 2012). Laso Bayas et al.(2011)은 2004년 수마트라 지진해일 발생시 서부 Ache 해안가를 따라 분포한 식생으로 말미암아 사상자가 5% 감소했을 것으로 추정하기도 했다. 해안가 식생의 이점은 단순히 지진해일 저감에 국한되지 않는다. 수심, 지형 및 해안선이 지진해일과 폭풍해일에 상당한 영향을 준다고 알려져 있기에, 식생의 존재는 유사의 이송 과정과 지형 진화를 야기하게 된다. 지진해일과 식생 사이

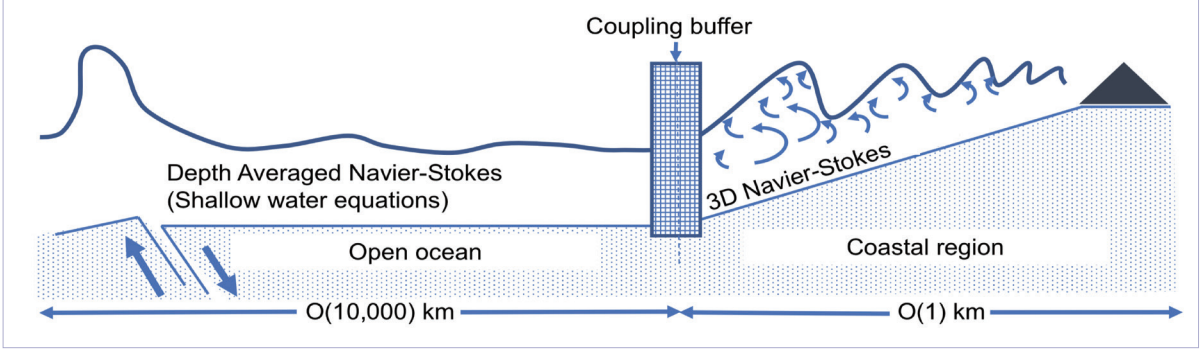
의 상호작용을 모델링하는 것은 식물의 유연한 특성 때문에 수치적으로 도전적인 일이다. 유연한 식생이 흐름에 미치는 영향을 포함하기 위한 노력 또한 이루어졌는데, 식물의 역학과 흐름의 단방향 및 양방향 결합의 예는 Mattis et al.(2015)의 최근 연구에서 찾을 수 있다. Mukherjee et al.(2020)은 또한 홍수시 유체-구조 상호작용 알고리즘을 사용하여 이상화된 나무의 변형이 흐름에 미치는 영향을 최초로 연구하기도 했다[그림 4].

> “지진해일을 자유수면 흐름으로 가장 잘 설명하는 방법은 Navier-Stokes 방정식을 적용하는 것”

## Ⅲ. 가정과 한계

지진해일을 난류특성을 지닌 자유수면흐름으로 설명하는 가장 완벽한 방법은 비압축성 유체의 Navier-Stokes 방정식을 적용하는 것이다. 반면에, 단순화된 파동모델은 수십 년 동안 외해에서의 지진해일 전파와 처오름을 연구하기 위해 효과적으로 활용되어 왔다. 이처럼 지진해일 모델링을 위해 다양한 수준의 방정식과 그에 기초한 수치모델들이 꾸준이 개발되고 활용되어 왔는데, 이 장에서는 각 모델을 간략히 소개하고 그 특성과 유효성의 한계를 강조하고자 한다. 이를 바탕으로 각 모델에 들어가는 가정과 그러한 가정이 더는 유효하지 않은 시점(예를 들어, 근해역에서의 지진해일 모의)을 설명할 수 있다. 이를 통해 1D 및 2D 모델이 부정확한 해석결과를 생산하기 쉬운 근해역 지진해일 경계층에 대한 연구에 3차원 Navier-

[그림 5] 외해에서 해안선까지 지진해일 전파시 흐름특성을 나타내는 개념도. 천해지역에서 적용가능한 3차원 Navier-Stokes 모델이 외해지역의 2차원 천수방정식 모델과 결합되는 방식으로 지진해일의 전생애 모의가 가능함



"Navier-Stokes 방정식에 근사한 대체방법은 수심평균방정식 혹은 수심적분모형"

Stokes 방정식의 활용이 증가하는 이유를 정당화할 수 있을 것이다. [그림 5]는 지진해일의 전체과정, 즉 다양한 규모의 물리적 현상을 포괄하여 모의하도록 2차원 천수방정식 모델과 3차원 Navier-Stokes 모델이 동시에 적용되는 개념을 보여준다.

## 1. Navier-Stokes 방정식

유체의 흐름을 묘사할 수 있는 현존하는 가장 완벽한 방정식인 3차원 Navier-Stokes 방정식을 우선 소개하고자 한다. 지진해일로 인해 범람이 발생하는 동안, 흐름은 침식가능한 해안 지형, 퇴적물, 식생, 구조물 상호작용을 하며 이는 완전한 난류의 특성을 보여준다. 따라서 해당 흐름은 3차원적이고 전단(즉, 전단방향으로 변화)이 매우 중요한 특징이다. 지진해일 피해에 직접적으로 영향을 주는 동역학적 힘의 정확한 추산을 위해 이러한 흐름 특성을 고려할 수 있는 모델이 필요하다. 연속체 성질, 뉴턴 유체, 비압축성 등의 가정으로 유도되는 3차원 Navier-Stokes 방정식은 이러한 특징을 포착할 수 있는 가장 완전한 모델이다.

## 2. 수심평균모형

비록 Navier-Stokes 방정식이 우리가 사용하고 싶은 지진해일 모델 방정식이지만 모든 곳에 활용하기에는 계산 비용이 상당할 뿐만 아니라, 관심 영역의 밖에서는 필요하지 않을 가능성이 높다. 따라서 Navier-Stokes 방정식을 근사하여 활용할 수 있는 조건(즉, 장소와 시기)을 신중하게 식별할 필요가 있다. 지진해일 모델링과 관련하여 대표적인 근사방법은 수심방향으로 물리량을 평균화하여 나타내는 것이다. 여기에서 '수심평균방정식'혹은 '수심적분모형'이라는 표현이 유래한다. 유속성분 등이 수심평균화 되어 표현되기에 수심방향으로 변동성이 작은 경우를 가정하여 방정식이 유도된다. 이는 장파 혹은 비분산성 파랑에 해당하는 특징으로 지진해일이 '철저하게' 장파의 성질을 지닌 경우 적용이 가능하며, 이러한 가정(즉, 수심이 파장에 비해 상당히 작아서 흐름의 진행이 수평방향을 중심으로 이루어지기에 연직유속성분을 무시하고 수평유속성분만을 고려함)을 통해 유도된 방정식

> “수심적분모형은 수심방향 물리현상을 고려할 수 없다는 단점을 보완하고 수심평균 이점은 유지”

이 천수방정식이다. 천수방정식에서는 지진해일에 의한 압력이 정수압만 존재하고, 수평유속성분의 수심방향 분포가 균일하며 연직유속성분이 무시되기에 지진해일 전파속도가 수심에만 의존하여 전파속도가 서로 다른 상황을 표방하는 분산성을 고려할 수 없다. 지진해일 이외에도 천수방정식이 활용되는 예는 쉽게 찾아볼 수 있는데, 대표적인 것이 장파에 해당하는 조석순환과 폭풍해일 모의이다. 또한 하천의 흐름 역시 파장이 아주 긴 파랑으로 간주될 수 있어 천수방정식(1차원으로 표현하면 St. Venant 방정식)으로 해석이 가능하다.

천수방정식에 포함된 가정을 살펴보면 한계점이 분명하게 노출되는데, 바로 비분산성이 유효하지 않거나 수심방향 유속성분이 더 이상 무시할수 없는 경우에 해당한다. 장파의 가정이 무너지는 경우(이론적으로는 파장이 수심의 20배보다 작은 경우)로도 표현이 가능한데, 앞서 설명된 바 있는 지진해일-해저지형, 지진해일-식생 상호작용에서는 수심방향으로의 물리현상이 중요하기에 천수방정식으로 해석이 난해하다. 또한 근해역 혹은 쇄파대에서의 지진해일은 구조물과의 상호작용 및 쇄파현상으로 인해 다양한 주기대의 파랑을 생산하여 천수방정식의 일괄적 적용은 오차를 낳을 수 있다.

수심방향으로의 물리현상을 고려할 수 없다는 단점을 보완하고 수심평균의 이점은 유지하기 위해 탄생한 모델도 존재하는데 바로 Boussineq 방정식과 Green-Naghdi 방정식과 같은 축척된 수심적분모형(scaled depth-integration models)이다. 이들은 중요물리량(예: 수심 대비 파장 혹은 파고의 비율)을 기준으로 축척화하고 섭동법(perturbation)을 통해 각 물리량을 전개함으로써 수식을 표현한다. 이 과정에서 축척의 유효한 값을 정의함으로써 적용 가능한 환경을 규정할 수 있는데, 가령 Boussnieq 방정식의 경우 파랑의 분산성과 비선형성이 동등한 수준의 중요도를 갖는다는 가정을 지닌다. 이러한 수학적 전개과정을 통해 수심방향의 물리현상을 ‘어느 정도’ 고려할 수 있게 된다. 수심방향의 물리현상에 대한 고려는 수평유속의 연직변화를 고려할 수 있음을 의미하는데 이를 통해 천수방정식에서 난해할 수 밖에 없었던 문제, 가령 파랑의 분산성과 해저 전단력에 의한 유속분포의

"지진해일 수치해석자는 곧 지진해일 생애를 모델링할 통일된 프레임워크를 구축할 수 있을 것으로 기대"

변화 등을 해소할 수 있다. 하지만 여전히 3차원 Navier-Stokes 방정식의 완벽함은 대체할 수 없다.

### 3. 수학적 변형의 한계

앞서 살펴보았듯이, 수식의 적분과 적절한 가정 등 수학적 변형을 통해 복잡성을 크게 줄일 수 있다. 이는 2차원 방정식을 활용하여 범람의 범위를 쉽게 재현할 수 있다는 것을 의미하지만, 3차원 속도장의 재현과 그에 따라 구조물에 가해지는 힘 등은 Boussinesq 및 Serre-Green-Naghdi 모델과 같은 고급 2차원 모형으로도 여전히 어렵기에 3차원 Navier-Stokes 방정식 모형의 필요성이 제기될 수 있다. 더군다나, 수학적 변형과정에서 등장한 다양한 가정은 종종 문헌에서 확인할 수 있는 것처럼 엄격하게 적용하기가 쉽지 않다. [그림 5]에서 확인할 수 있듯이, 지진해일의 생애가 단순히 장파 하나로 특징지워질 수 없는 만큼 지진해일 전파 단계별로 적합한 모형을 활용함으로써 해석의 정확도를 높일 수 있을 것이다. 마지막으로 유한요소, 유한차분 및 유한체적 등의 수치해석기법 적용에 기인할 수 있는 오차는 이 글에서 별도로 논의하지 않으나 이 역시 중요도 높게 고려되어야 한다.

## Ⅳ. 모델링의 새로운 지향점

지진해일의 발생과 전파, 그리고 상세한 규모의 처오름에 이르기까지 전과정에 대해 진행 중인 연구를 고려할 때, 지진해일 수치해석자가 곧 힘을 합쳐 생성에서 처오름 및 소멸까지 지진해일 생애를 모델링하기 위한 통일된 형태의 프레임워크를 구축할 수 있을 것으로 보인다(Madden et al., 2021). [그림 5]는 흐름특성과 복잡성의 함수로 지진해일의 영역을 세분화한 그림이다. 지진해일은 발생부터 소멸까지의 생애 동안 다양한 파형을 가정할 수 있는데, 수 초(발생시 100-1,000초)부터 최대 몇 시간(전파 및 처오름/처내림 과정)까지 범위의 시간 척도를 사용해야 한다. 이와 같은 시·공간 규모의 엄청난 변동성 때문에 모든 과정이 단일한 물리적 모델의

적용으로 설명될 수 없다. 원거리의 지진해일 전파에는 기술적으로 가능할 수도 있고 가능해질 수도 있지만, 3차원 Navier-Stokes 방정식의 적용으로 해결하는 것은 합리적이지 않다. 왜냐하면 천수방정식의 적용으로도 충분히 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 계산 비용도 크게 절감할 수 있기 때문이다. 지진해일은 수 센티미터에서 수십 센티미터까지 작은 진폭으로 외해에서 전파되며, 이는 보통 수심 혹은 파장보다 훨씬 작다. 이런 환경에서 지진해일은 천수방정식으로 잘 재현된다. 지진해일이 육지에 접근하는 동안 천수효과에 의해 진폭은 증가하고 파장은 급격하게 감소하게 되는데, 이 때문에 선형성과 비분산성을 잃게 된다. 이러한 조건에서 난류 쇄파를 설명하는 비선형 모델이 필요하게 된다. 가장 완벽한 모델은 역시 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식이다. 만약 유일한 관심사가 처오름 동안 발생한 범람수위라면 2차원 천수방정식 모형이 여전히 만족할만한 성과를 보여줄 것이다. 하지만, 구조물에 가해지는 동역학적 힘을 정확히 평가하는 데 여전히 한계를 지니고 있다.

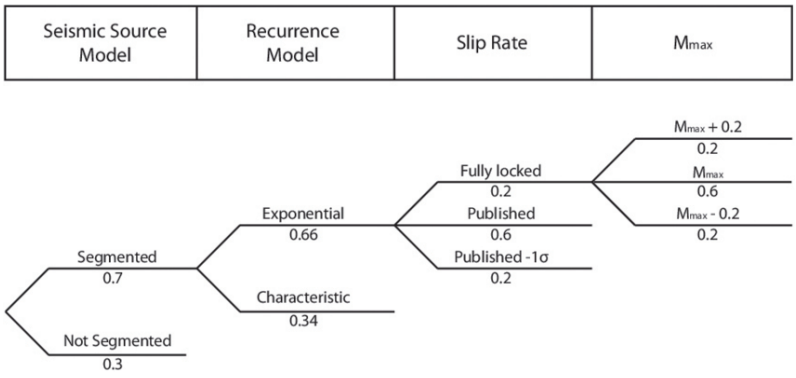
> “난류 쇄파를 설명하는 가장 완벽한 비선형 모델은 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식”

지진해일의 다중 스케일 모델을 완성하기 위해 [그림 5]와 같이 3차원 Navier-Stokes 방정식과 천수방정식 모델을 연계하는 등 다양한 모델들을 결합하여 활용할 수 있다(Chen, 2020). 또한 지진해일 발생지점에서는 지진 시뮬레이터와 천수방정식 모델을 연계하여 모의가 가능하다. 이러한 유형의 모델링 구성에서 가장 어렵고 여전히 불분명한 부분은 모델 간의 결합과정에 있기에 여전히 활발하게 진행 중인 연구분야라 할 수 있다(Lotto et al., 2019). 데이터 교환 및 시간 척도의 상호호환성은 결합 알고리즘을 설계할 때 극복해야 하는 어려움 중 하나이다. 한편, 모델 간 결합과정을 최적화하고 지진해일의 실시간 모델링을 위해 계산부하가 큰 지진해일 모의를 효율적으로 만들기 위한 노력이 진행되고 있다. 가령, CPU 혹은 GPU 기반의 병렬처리를 통해 계산속도를 기하급수적으로 향상시킬 수 있고, 엑사스케일 컴퓨팅(초당 100경($10^{18}$) 이상의 부동 소수점 연산이 가능한 새로운 수준의 슈퍼컴퓨팅)을 활용해 급격한 진보를 이룰 수 있다.

"발생 가능성을 확률적으로 분석하는 지진분야 PSHA, 지진해일분야 PTHA"

다중 스케일 모델링과 별개로 확률론적 지진해일 재해도 분석(Probabilistic tsunami hazard analysis, PTHA)과 인공지능의 도입 또한 지진해일 모델링의 패러다임 전환을 이끌 것이다. 지진해일 모델링의 출발점에 해당하는 지진은 발생빈도와 규모 등 특성에 불확실성이 매우 커서 이를 정확히 예측하는 것이 어렵다. 이 때문에 발생가능성을 확률적으로 분석하려는 시도가 지진분야에서 선행되었는데 확률론적 지진 재해도 분석(Probabilistic seismic hazard analysis, PSHA)이 그것이다. 이와 유사한 방식을 지진해일에 적용시킨 것이 PTHA에 해당하는데, 이는 지진해일 수치모형 실험을 통해 계산된 지진해일고 결과값에 대해 적절한 확률분포 모형을 개발한 후 각 지진해일 시나리오의 연초과확률을 분석함으로써, 기존의 결정론적인 지진해일 재해도가 아닌 확률론적인 지진해일 재해도를 분석하는 기법으로 설명할 수 있다. 지금까지 결정론적 지진해일 재해도 분석에서는 역사상 가장 심각한 경우를 포함한 다양한 시나리오를 기반으로 범람 지역의 최대수심 및 유속을 산출하고, 이를 지진해일 위험 저감계획에 활용한다(Prest et al., 2010). 그러나 시나리오 기반 접근법은 발생 확률이 명확히 정의되지 않아 위험을 정량화하는 데 제한적이므로, PTHA를 통해 이를 해결할 수 있다. 초기 PTHA에는 최대범람깊이에 초점을 맞춰 이루어진 반면, 최근에는 이를 피해도 예측에 관련이 높은 도착시간, 최대유속 등으로 확장하는 추세이다. PTHA의 최근 발전현황은 De Risi and Goda(2017)에서 확인이 가능하다. PTHA를 수행하기 위해 지진발생과 지진해일 전파과정에 포함되는 불확실성, 즉 확률이 도입되어야 하며 보통의 경우 로직트리(Logic tree)를 활용하는 것이다[그림 6]. 이 과정에서 엄청난 수의 모델링이 필

[그림 6] PTHA에서 사용하는 지진발생 로직트리 및 가중치 사례(Horspool et al, 2014)



요한데 계산자원의 발전과 통계프레임워크 사용을 통해 실제적인 수준에서 분석이 이루어질 수 있는 환경이 되었다.

마지막으로, 인공지능 역시 다른 분야와 마찬가지로 지진해일 예측분야에서 점차 활용성이 증대되고 있다. 물리기반의 모델링 기법은 현상을 그대로 모사하기 위해 자연의 법칙을 그대로 준용하며 변수화를 통해 미세한 역학과정까지 포함함으로써 정확도를 높인다. 반면 자료기반의 기계학습법을 포함하는 인공지능 접근법은 복잡한 물리현상과 숨겨진 이론에 집중하기보다 관측된 혹은 생산된 자료에 몰입하여 자료가 지닌 인과관계를 살핀다. 도출된 인과관계를 바탕으로 예측을 비교적 신속하게 이루어낼 수 있는데, 지진해일 분야에서도 차츰 활용도가 증가하고 있다. 더군다나 일부 지역에 밀도 높게 포진해 있는 지진해일 관측 시스템은 기계학습을 기반으로 실시간 지진해일 침수 예측시스템을 개발할 수 있는 발판을 제공하기도 한다(Mulia et al., 2022).

> “지진해일 관측 시스템은 기계학습을 활용해 지진해일 예측 시스템 개발 위한 발판 제공”

## Ⅴ. 결론 및 제언

이 글에서는 발생에서 처오름 및 소멸에 이르기까지 지진해일 모델링에 대한 다양한 접근 방식을 간략하게 알아보았다. 지진해일의 생애를 모의하기 위한 미래형 모델로 통합된 형식의 다중 규모 모델링 개념을 소개하고, 이를 달성하기 위해 진행중인 노력을 살펴보았다.

최근 개발된 지진해일 모델 사례는 개발의 방향이 적응형 격자 상세화, 외해에서 고차의 수치기법 적용 또는 근해에서 완벽한 3차원 모델링 도입을 통해 다양한 규모에 걸쳐 존재하는 지진해일의 고충실도 모델링으로 향하고 있음을 보여주고 있다. 더 나아가 지진모델, 천수방정식모델, Navier-Stokes 방정식 모델 등 이종 모형 간의 결합을 통해 통합된 지진해일 모델 솔루션을 제공하려는 노력이 이루어지고 있다. 지진해일 발생역에서 지진모델-지진해일모델의 결합을 통해 개선이 이루어지는 반면, 외해에서의 대규모 전파와 근해역에서의 처오름 및 3차원 현상을 상세

"'좋은' 지진해일 모델과 함께 활용 능력 배양 위한 전문가 양성이 중요함"

히 모의하기 위해 적응형 격자의 도입과 GPU 병렬컴퓨팅 및 엑사컴퓨팅과 같은 고성능계산자원의 활용을 통해 발전을 이루고 있다. 이처럼 우리는 지진해일 모델링의 새로운 전기를 마주하고 있다. 지금은 노트북에서 실시간(또는 더 빠른)으로 지진해일 모델링을 실행할 수 있는 시대다(Tavakkol and Lynett, 2017). 다시 말해, 16년 전 Synolakis and Bernard(2006)이 내세웠던 충실도 높은 지진해일의 전형 즉, 처오름 및 범람 등 모든 규모에 걸친 지진해일 현상이 내재된 통합된 모형이 이제 눈앞에 다가온 것이다. 발전된 계산역량을 발판으로 확률론적 지진해일 재해분석(PTHA)과 인공지능의 활용 역시 가시적 성과를 이룰 수 있는 수준이 되었다.

우리나라도 이러한 지진해일 모델링 발전 방향에 맞추어 개선의 속도를 조절해야 한다. 현재 예보에 활용 중인 모델의 한계점을 이해하고 이를 개선하기 위한 노력이 필요하다. [표1]에서 보여준 바와 같이 지진해일 예측을 위한 다수의 모델이 존재한다. 특정 모델이 타 모델에 비해 무조건 우수하다고 평가할 수 없기에 각 모델이 지닌 한계점을 정확히 이해하고 이를 바탕으로 결과를 해석·보정하는 능력을 키우는 것이 중요하다. 동일한 자료와 모형을 대상으로도 수치해석전문가에 따라 상이한 결과와 해석이 도출된다. 결국 '좋은'지진해일 모델을 갖추는 것도 중요하지만, 그것을 적절히 활용하는 능력도 그에 못지않게 중요하다. 기상예보를 위한 전문가 양성에 힘을 쏟듯이 지진해일 예보를 위한 전문가 양성에도 소홀할 수 없다. 특히 관측과 수치해석에 고른 전문성을 지닌 지진해일 예보관의 양성이 필요하다. 마지막으로, 자연재해에 대한 과학적 이해의 중요성을 강조한 Prager(2000) 서적의 문구를 인용하며 이 글을 마무리한다. "우리는 분노한 지구를 결코 통제할 수 없지만, 내재된 특성에 대한 과학적 이해를 통해 비극적이고 값비싼 손실을 막을 수 있을지도 모른다."

---

* 이 글은 Marras and Mandli(2020)의 내용을 중심으로 작성되었기에 이를 밝힙니다.

## 참고문헌


Aida, I., 1969: Numerical experiments for the tsunami propagation of the 1964 Niigata tsunami and 1968 Tokachi-Oki tsunami. Bull. Earthq. Res. Int. Univ. Tokyo, 47, 673–700.

Behrens, J., Dias, F., 2015: New computational methods in tsunami science. Philos. Trans. R. Soc. A, 373, 20140382.

Chen, X.J., 2020: Coupling an Unstructured Grid three-dimensional Model with a Laterally Averaged two-dimensional Model for Shallow Water Hydrodynamics and Transport Processes. Int. J. Numer. Methods Fluids.

Christensen, E. D., 2006: Large eddy simulation of spilling and plunging breakers. Coastal Engineering, 53(5-6), 463-485.

De Risi R, Goda K., 2017: Simulation-based probabilistic tsunami hazard analysis: empirical and robust hazard predictions. Pure Appl Geophys 174(8):3083–3106

Horspool, N., Pranantyo, I., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D. H., Kongko, W., ... & Thio, H. K., 2014: A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(11), 3105-3122.

Hsiao, S. C., & Lin, T. C., 2010: Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: Experiment and RANS modeling. Coastal Engineering, 57(1), 1-18.

Larsen, B., Fuhrman, D., 2018: On the over-production of turbulence beneath surface waves in Reynold-averaged Navier-Stokes models. J. Fluid Mech., 853, 419–460.

Larsen, B., Fuhrman, D., 2019: Full-scale CFD simulation of tsunamis. Part 1: Model validation and run-up. Coast. Eng., 151, 22–41.

Laso Bayas, J. C., Marohn, C., Dercon, G., Dewi, S., Piepho, H. P., Joshi, L., ... & Cadisch, G., 2011: Influence of coastal vegetation on the 2004 tsunami wave impact in west Aceh. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(46), 18612-18617.

Lotto, G., Jeppson, T., Dunham, E., 2019: Fully Coupled Simulations of Megathrust Earthquakes and Tsunamis in the Japan Trench, Nankai Trough, and Cascadia Subduction Zone. Pure Appl. Geophys., 176, 4009–4041.

Lynett, P. J., Gately, K., Wilson, R., Montoya, L., Arcas, D., Aytore, B., ... & Zhang, Y. J., 2017: Inter-model analysis of tsunami-induced coastal currents. Ocean Modelling, 114, 14-32.

Madden, E. H., Bader, M., Behrens, J., van Dinther, Y., Gabriel, A. A., Rannabauer, L., ... & van Zelst, I., 2021: Linked 3-D modelling of megathrust earthquake–tsunami events: from subduction to tsunami run up. Geophysical Journal International, 224(1), 487-516.

Marras, S. and Mandli, K.T., 2020: Modeling and simulation of tsunami impact: a short review of recent advances and future challenges. Geosciences, 11(1), p.5.

Mattis, S., Dawson, C., Kees, C., Farthing, M., 2015: An immersed structure approach for fluid-vegetation interaction. Adv. Water Res., 80, 1–6

Moller, I., Spencer, T., French, J.R., Leggett, D.J., Dixon, M., 1999: Wave transformation over salt marshes: A field and numerical modeling study from North Norfolk, England.

Estuar Coast Shelf Sci., 49, 411–426

Mukherjee, A., Cajas, J., Houzeaux, G., Lehmkuhl, O., Vázquez, M., Suckale, J., & Marras, S., 2020: Using fluid-structure interaction to evaluate the energy dissipation of a tsunami run-up through idealized flexible trees. In Proceedings of the ParCFD'2020 32nd International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, Nice, France (pp. 11-13).

Mulia, I.E., Ueda, N., Miyoshi, T. et al., 2022: Machine learning-based tsunami inundation prediction derived from offshore observations. Nat Commun 13, 5489. https://doi.org/10.1038/s41467-022-33253-5

Prager, E. J., 2000: Furious Earth: the science and nature of earthquakes, volcanoes, and tsunamis. McGraw Hill Professional.

Priest GR, Goldfinger C, Wang K, Witter RC, Zhang Y, Baptista AM., 2010: Confidence levels for tsunamiinundation limits in northern Oregon inferred from a 10,000-year history of great earthquakes at the Cascadia subduction zone. Nat Hazards 54(1):27–73

Qin, X., Motley, M.,; LeVeque, R., Gonzalez, F., Mueller, K., 2018: A comparison of a two-dimensional depth-averaged flow model and a three-dimensional RANS model for predicting tsunami inundation and fluid forces. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 2489–2506.

Son, S., Lynett, P., & Ayca, A., 2020: Modelling scour and deposition in harbours due to complex tsunami-induced currents. Earth Surface Processes and Landforms, 45(4), 978-998.

Synolakis, C., Bernard, E., 2006: Tsunami science before and beyond boxing day. Philos. Trans. Roy. Soc. Lond., 364, 2231–2265.

Tavakkol, S., & Lynett, P., 2017: Celeris: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization. Computer Physics Communications, 217, 117-127.

Thuy, N.B., Tanaka, N., Tanimoto, K., 2012: Tsunami mitigation by coastal vegetation considering the effect of tree breaking. J. Coast. Conserv., 16, 111–121.

USACE, 1963: Interim Survey Report, Morgan City, Louisiana and Vicinity; Technical Report 63; US Army Engineer District: New Orleans, LA, USA.

# 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언

신성원 한양대학교 ERICA 교수 sungwshin@hanyang.ac.kr

Ⅰ. 지진해일 연구 및 조기 탐지의 필요성
Ⅱ. 국외의 지진해일 조기 탐지 및 예·경보 연구와 기술 동향
Ⅲ. 국내 지진해일 조기 탐지 및 예·경보 연구 동향 및 제언
Ⅳ. 맺음말

연근해 낮은 수심에서의 해저 지형 영향과 외해에서의 관측지점 부족 등으로 지진해일은 그 발생 시기와 지점을 정확하게 예측하기 어렵기 때문에, 빠른 탐지와 예·경보만이 인명과 재산 피해를 최소화할 수 있다. 해외에는 다양한 종류의 관측장비를 설치하여 조기 탐지 및 영향예보에 활용하고 있다. 국내의 경우 현재까지 수치모형을 통한 예측 결과를 활용하여 시나리오 기반 예·경보를 수행하고 있으나, 관측자료를 활용하여 조기 탐지 후 예·경보의 정확도를 높이는 노력이 필요하다. 이를 위해 미국과 일본의 사례를 참고하고, 국내에서의 적용 방안을 알아보고자 한다. ■

"지진해일 예보를 위해 발생-전파-범람에 대한 종합적 이해 필요"

## Ⅰ. 지진해일 연구 및 조기 탐지의 필요성

지진해일은 발생에 대한 예측과 완벽한 방재가 어렵기 때문에, 조기경보를 통한 재해저감 및 대피가 중요하다. 그러므로 지진해일이 발생하면 규모와 지진해일의 파형에 대한 파악이 중요하고, 장파의 전파 특성을 고려한 전파 양상을 파악하고, 연안에 도달하는 시각 및 해일고에 대한 예측이 필요하다. 이러한 이유로 지진해일 연구는 발생(generation), 전파(propagation), 범람(inundation)의 분야에서 연구가 진행되어 왔으며, 예·경보를 위해서는 세 분야에 대해 종합적인 이해와 연구가 필요하다.

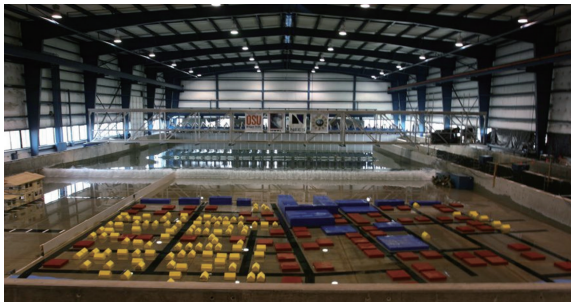
지진해일의 발생 원인은 주로 해저지진, 해저/연안 산사태, 해양 화산폭발, 유성의 네 가지로 분류되고 있다. 1900-2020년까지 전 세계적으로 발생한 지진해일을 분석해보면 80% 정도가 해저지진에 의해 발생하고, 산사태와 화산폭발에 의한 지진해일이 각각 5%와 2%를 차지한다(Reid and Mooney, 2022). 이러한 다양한 발생 기작에 의해 지진해일이 발생하면 초기파형에 대한 정보가 중요한데, 이는 수치모델의 중요한 입력자료가 되기 때문에, 지진해일 연구는 발생 빈도의 이유로 관측자료가 부족한 특성상 수치모델링에 대한 의존도가 높다. 따라서 예측 정확도를 높이는 초기파형에 관한 연구가 중요하다. 2022년 1월 15일에는 통가 화산폭발에 의해 발생한 지진해일에 기상해일의 효과가 더해져 전파되는 양상을 보였고, 많은 과학자들이 이 사례에 관해 연구를 시작하였다. 이들 연구를 위해선 먼저, 관측자료가 필요하며, 수리모형실험 및 수치모델링(수치모형실험)이 동반되어 수행되어야 한다[그림 1]. 둘째는 지진해일 전파에 관한 연구이다. 이는 주로 수치모델링을 통해 진행되며, 관측자료를 통해 검증이 이루어지고 있다. 파랑의 전파 특성상 반사, 굴절, 회절의 성격을 갖고 있으며, 수심에 따라 분산 특성(dispersion)을 갖기도 하여 각 해역에 도달하는 시각을 예측하는 데 영향을 준다.

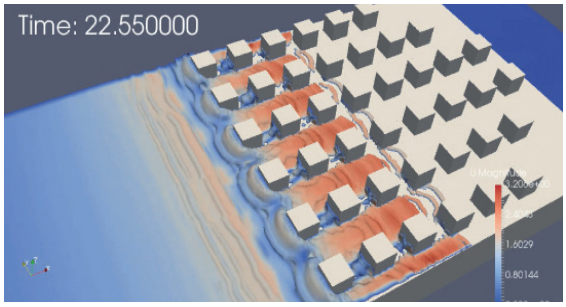
[그림 1] 지진해일 발생 및 초기파형 연구 기법

> “지진해일 연구에 관측자료는 필수, 예측과 분석을 위해 수치모델링과 수리 모형실험이 수행됨”

전파과정에서 지형에 의한 굴절, 연안에서 발생하는 천수 효과, 쇄파의 영향은 도달 시각에 영향을 준다. 셋째는 지진해일 범람에 관한 연구이다. 연안에 도달한 지진해일이 육상으로 범람하면 구조물 및 건물 피해뿐만 아니라, 심각한 인명피해를 야기한다. 지진해일에 의한 범람은 단순 침수와 달리 빠른 유속이 동반되어 건물에 동수압이 발생하고, 강한 유속으로 인해 인명사고가 발생하므로, 이에 관한 연구와 대비가 필요하다. 이러한 세 가지 연구 분야를 위해 관측자료가 필수이며, 예측과 분석을 위해 수치모델링과 수리모형실험이 수행된다[그림 2] 〈표 1〉.

[그림 2] 지진해일 침수 범람에 관한 연구 사례((좌)수리모형실험, (우)수치모델링))






〈표 1〉 지진해일 연구 분야와 기법 분류

| 기법 \ 연구 분야 | 발생 | 전파 및 도달 | 범람<br>(범람 수위, 속도, 해일고, 처오름 등) |
|---|---|---|---|
| 관측 | DART, 외해 부이, GNSS,<br>수중청음기 | 외해 관측 부이 | 연안 관측장비<br>(부이, 조위관측소, 해일파고계, 영상) |
| 수치모델링 | 초기파형 모형 개선<br>(다양한 발생원 고려) | 파랑 변형,<br>도달 시각 | 해일고, 처오름, 위험성 지수,<br>불확실성 계수, 조석 효과 |
| 수리모형실험 | 발생기작 별 초기파형 | | 범람 수위, 범람 속도, 처오름, 표류물 피해 |

앞서 설명한 바와 같이 지진해일은 발생, 전파 및 범람의 현상이 이어지고, 전파속도가 빠르므로 신속한 대응이 필수적이다. 2011년 동일본 대지진의 경우 각 지역별로 20분 내외의 대피 시간만이 주어졌기 때문에, 피해를 최소화하기 위해서는 빠른 탐지와 정확한 예·경보가 필수적이라고 할 수 있다. 지진해일은 발생에 대한 예측이 어렵고, 완벽한 방재가 어려워 조기경보를 통해 재해저감 및 대피가 중요하

"실시간 지진해일 관측 및 모니터링시스템인 NOAA의 DART"

다. 지진해일 발생시 얼마나 빨리 탐지하고, 그 경로를 정확히 예측하며, 해당 해역에 어떤 해일고와 범람 양상이 발생하는가를 예측한 결과가 신속한 대피를 통해 인명피해를 최소화하는 필수 요소가 된다고 할 수 있다. 따라서, 조기 탐지를 위한 관측기술 개발 및 개선이 매우 중요하다.

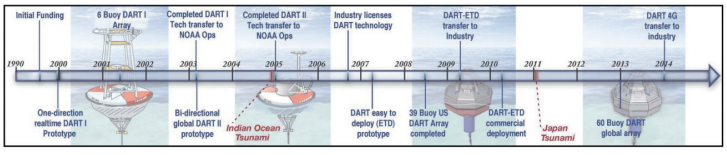
## II. 국외의 지진해일 조기 탐지 및 예·경보 연구와 기술 동향

태평양의 불의 고리 주변 국가에서는 각자의 환경을 고려한 지진해일 조기탐지 및 예·경보시스템을 운영·개선해 오고 있다. 본 장에서는 미국과 일본의 연구 및 기술 동향을 소개하고자 한다.

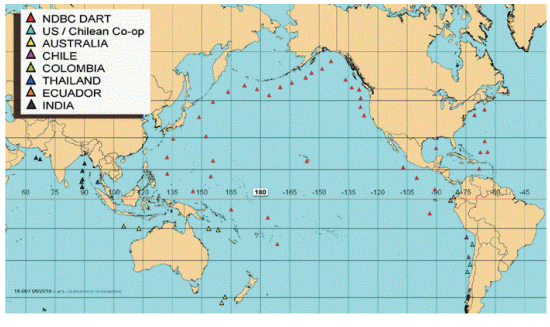
### 1. 미국의 연구 및 기술 동향

DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)는 미국 NOAA의 Pacific Marine Environmental Laboratory에서 개발한 실시간 지진해일 관측 및 모니터링시스템이다. [그림 3]과 같이 장비의 기능을 지속적으로 향상시켜왔으며, 최신 버전은 DART 4G이다.

[그림 3] DART시스템 개발 과정(NOAA)




[그림 4] DART 시스템 배치도(NOAA)



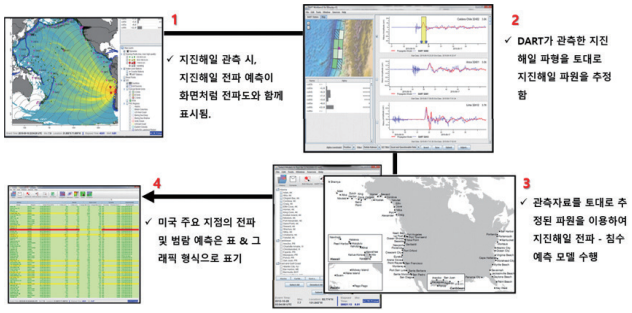

미국은 전지구적으로 위치한 지진·지진해일 발생 가능성이 큰 단층 근처에 DART를 배치한다[그림 4]. 지진해일 발생 시 DART의 심해 압력식 파고계(Bottom pressure recorder)로 지진해일을 관측하고 수중음향과 위성통신을 이용하여 Tsunami Warning Center(이하 TWC)로 지진해일 성분이 포함된 해수면 관측 시계열자료를 전송한다. TWC는 DART의 관측자료를 기반으로 지진해일 예·경보를 수

> “ 일본의 지진해일 관측장비는 S-net, DONET, NOWPHAS ”

행한다. DART는 양방향 통신이 가능하기에 만약, DART 관측자료의 노이즈로 인해 지진해일 오경보가 발생하면 오경보를 중단할 수 있다.

미국은 지진해일 연구센터(NOAA Center for Tsunami Research)에서 지진해일 예·경보를 위하여 Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis (SIFT)를 운용한다. SIFT는 DART의 실시간 지진해일 관측자료와 기구축된 DB를 통해 지진해일 파원을 추정한다. 기구축된 DB는 수치 모의를 통하여 단위 단층에 의해 발생한 지진해일의 전파시나리오 결과를 의미한다. 추정한 지진해일 파원을 수치모델의 입력자료로 사용함으로써 지진해일의 전파를 계산하고, 예상 침수지역과 해당 지역의 지진해일 도달시각과 최대해일고를 예측하고 경보한다(Percival et al., 2011)[그림 5].

[그림 5] NOAA SIFT 운용방식

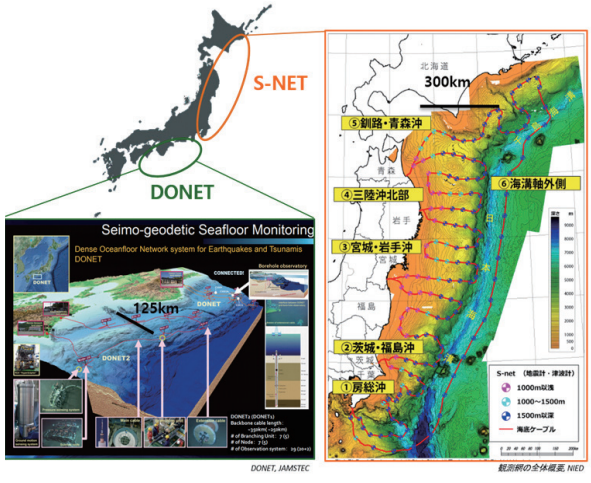



## 2. 일본의 연구 및 기술 동향

일본에서 운용 중인 지진해일 관측장비는 해저케이블 시스템인 Seafloor observation network for earthquake and tsunamis along the Japan Trench (S-net), Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET), 그리고 일본 전 연안에 배치된 지진해일 및 풍파관측시스템인 Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS)가 있다.

S-net은 해저 지진·지진해일 관측네트워크로, 노드당 지진계, 가속도계, 수압계로 구성되어 있고 노

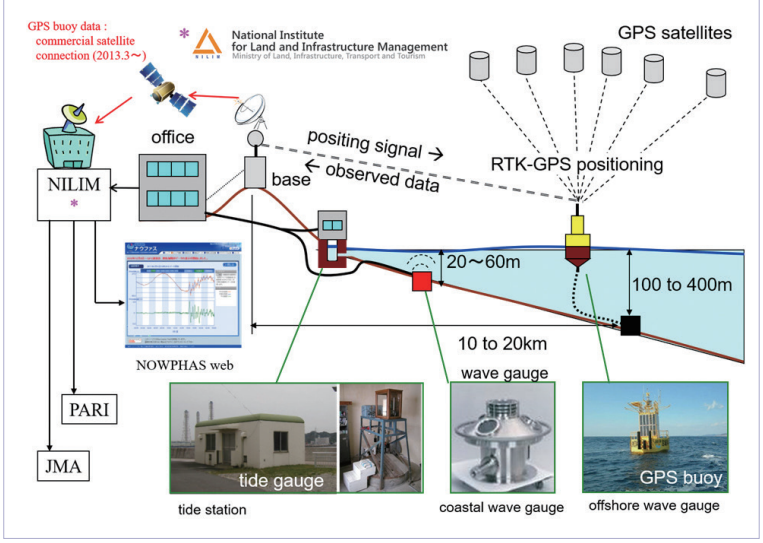
[그림 6] 일본의 해저케이블 시스템(S-net, DONET) 배치도 (출처: JAMSTEC; NIED)



> “ 일본은 지진 발생 후 예·경보 업데이트시 시나리오 DB와 관측 정보를 활용 ”

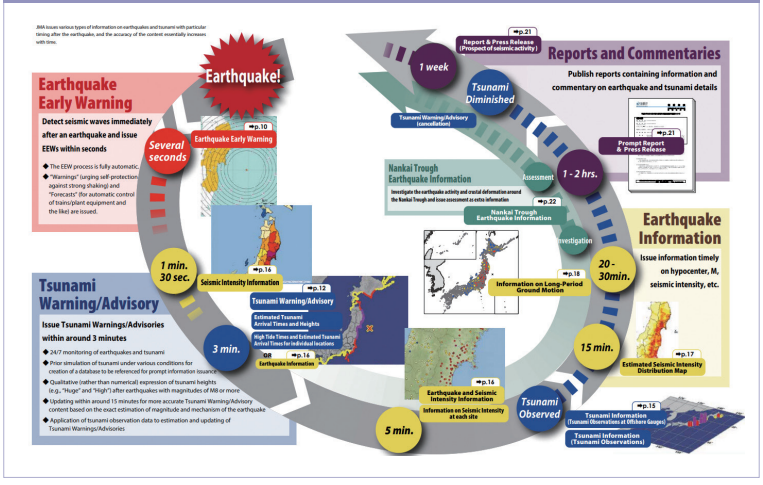
드가 케이블로 연결되어 실시간으로 관측자료가 전송된다. DONET은 S-net과 같은 시스템으로 Nankai Trough에서 발생하는 지진·지진해일을 실시간으로 모니터링한다. 각 노드는 강진계, 광대역 지진계, 수압계, 미세 차압계, 하이드로폰 그리고 정밀온도계로 구성되어 Long-period Ground Motion을 포함한 해저 단층의 움직임을 관측한다[그림 6].

[그림 7] 관측부터 저장에 이르는 NOWPHAS 흐름도(PARI)




NOWPHAS는 현재 일본 전역의 78개소에서 풍파 및 지진해일을 관측하며 GPS buoy, Bottom mounted wave gauge (coastal wave gauge), 그리고 조위관측소로 구성되어 운영 중이다. 최근에는 RTK-GPS를 활용한 GPS 부이의 수량을 늘려가며 관측시스템을 확장해 나가고 있으며, 구성도는 [그림 7]과 같다. 특히, 2011년 동일본 대지진 발생 당시 타 장비의 운용은 중단이 되었으나, RTK-GPS의 부이는 자료가 문제없이 저장되었음이 보고되고 있다.

[그림 8] 일본의 지진해일 예·경보 체계도(JMA)

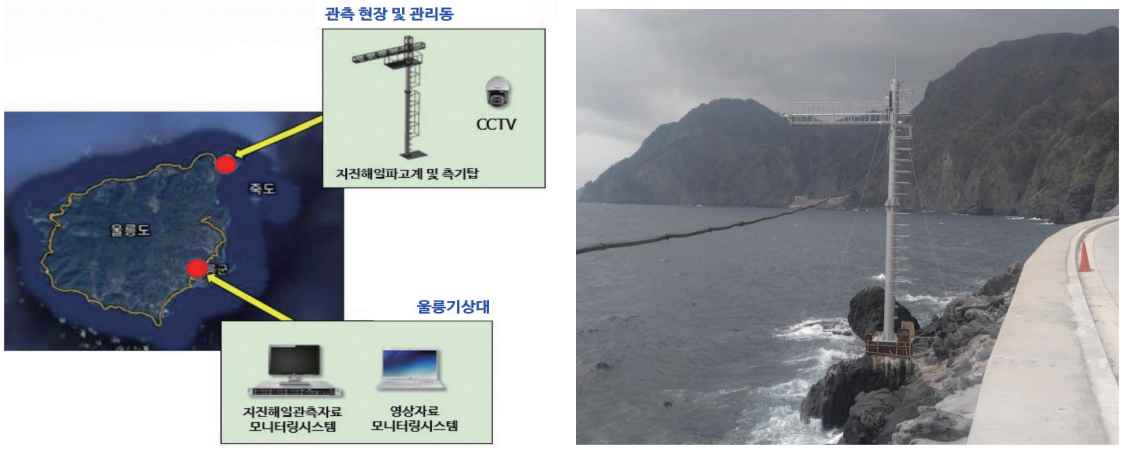



일본의 지진해일 예·경보 시스템은 지진 발생 후 짧은 시간 간격으로 예·경보를 업데이트하는데 이 과정에서 시나리오 DB와 관측정보를 활용하고 있다[그림 8]. 지진 발생 후 수초 내에 경보를 발생시키고, 시나리오 DB를 활용해서 3분 이내에 66개 구역에 경보 및 주의보를 발령한다. 그 후 관측정보를 활용하여 15분 이내에 예·경보 정보를 개선하는 방식이다.

# Ⅲ. 국내 지진해일 조기 탐지 및 예·경보 연구 동향 및 제언

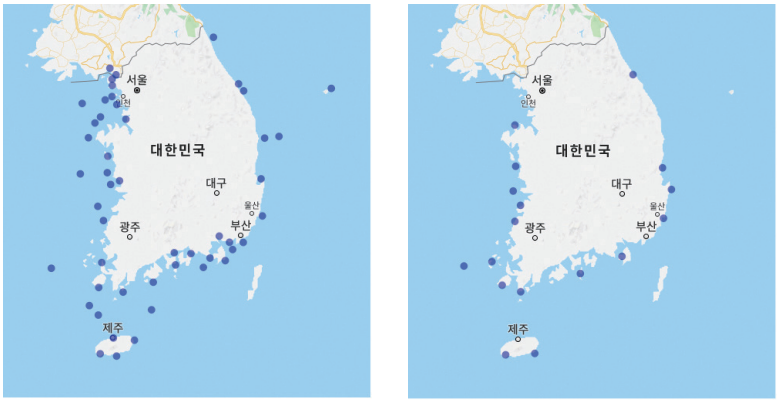
## 1. 국내 연구 및 기술 동향

[그림 9] 해일 파고계(기상청)




우리나라 기상청에서 운영하고 있는 지진해일 관측장비는 울릉도 해일파고계, 조위관측소(국립해양조사원 운용), 연안방재관측시스템이다. 기상청에서 운영하는 연안방재관측시스템(Coastal Long Wave Monitoring System)은 기상해일,

[그림 10] (좌)조위관측소 및 해양관측소 배치현황(총 49개소), (우)연안방재관측시스템 배치현황(총 17개소)

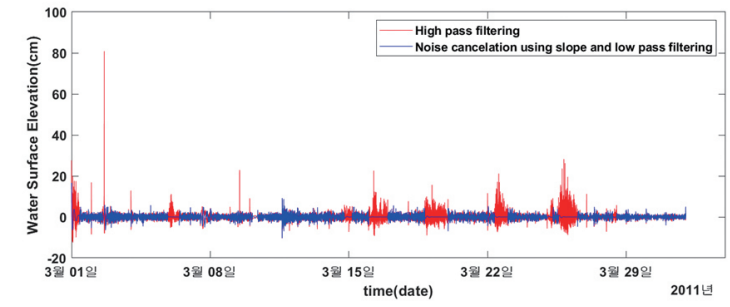


"기상청은 실시간 지진해일 성분 검출 알고리즘을 개발"

너울, 지진해일 등을 포함한 파랑의 장주기 성분에 의해 발생하는 사고를 예방하기 위해 설치되었다. 연안에 설치하여 기상(풍향, 풍속, 기압)과 수위를 관측한다. 또한 실시간으로 해안 지역의 기상, 해수면 현황을 모니터링하기 위해 CCTV도 같이 설치되어 있다[그림 9-10].

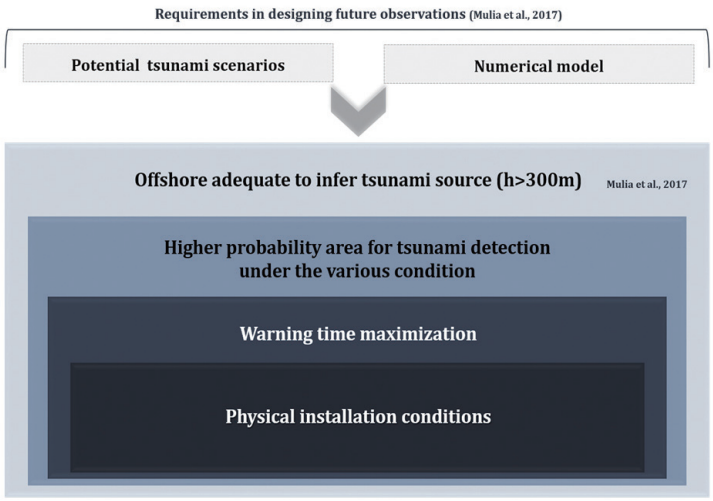
상기 관측장비에서 지진해일 성분을 추출하기 위해서는 관측장비별로 노이즈의 형태가 다르기 때문에, 노이즈의 형태를 파악하고 제거하는 작업이 필요하고, 그 후 지진해일 성분 필터링을 통해 추출하게 된다. 기상청은 기존에 울릉도 해일파고계에 적용되었던 지진해일 성분 추출 및 노이즈 제거 알고리즘을 개선하여 실시간 지진해일 성분 검출 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 울릉도 해일파고계, 연안방재관측시스템, 조위관측소의 노이즈 형태를 분석하고, 이를 효과적으로 제거하고 지진해일 성분을 검출한다. 개발된 알고리즘은 2011년 동일본 대지진 당시 울릉도 해일파고계에 탐지되었던 지진해일 성분을 성공적으로 추출하였다[그림 11]. [그림 11]에서 3월 11일에 푸른색으로 10㎝ 이상의 수위 변화를 보인 것이 지진해일인데, 다른 날에 그보다 더 큰 신호가 원시자료(붉은색)에서 기록된 것을 알 수 있으며, 이런 경우 지진해일 오경보를 불러일으킬 수 있어 제거가 필요했다.

[그림 11] 울릉도 해일파고계 원시자료(붉은색)에서 노이즈 제거 후 지진해일 성분 검출 예시(파란색)




그러나 조위계 및 연안 해일파고계는 지진해일이 육상에 도달했을 때 그 수면변위를 계측할 수는 있으나, 예·경보를 위한 조기 탐지의 목적으로 활용되는 것은 어렵다. 현재는 지진해일 발생시나리오를 기반으로 수치모델 결과를 DB화하여, 해저지진 발생시 시나리오 기반으로 예·경보를 수행하게 되어 있다. 그러나 관측자료를 통해 정확도 개선이 필요하며, 이는 미국과 일본의 사례에서도 알 수 있다. 따라서 향후 외해 관측장비를 설치할 때, 조기 탐지 목적에서 최적 관측지역을 파악하는

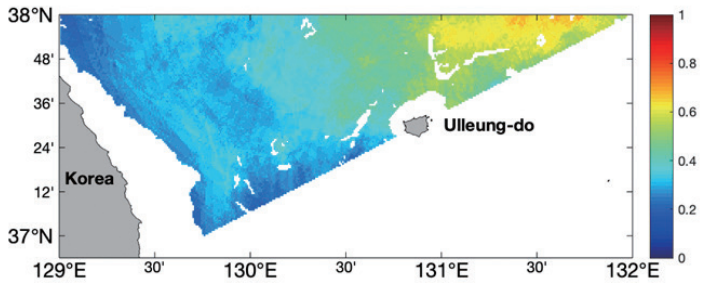
[그림 12] 한국 지진해일 관측장비 최적 배치 지역 선정을 위한 연구 흐름도




것이 필요하다. 이러한 목적으로 기상청은 2018년부터 연구개발과제를 발주하여 최적 관측지역 선정 연구를 수행하였다. 최적 관측지역 선정 연구를 위해 선행 연구들(Meza et al., 2018; Mulia et al., 2017; Percival et al., 2011; Omira et al., 2009; Schindele et al., 2008)을 참고하여 연구 목표를 달성하기 위한 연구 흐름도를 도식하였다[그림 12].

이러한 최적 관측지역 선정을 위해 선행 연구를 기반으로 하여 시나리오 기반으로 수행된 수치모의 결과 중 최대파고 분포도를 사용하여 발생 가능성이 큰 지진해일들이 동해 지형 조건에 의해 주로 지나가는 위치를 확인하여 먼저 지진해일 관측장비의 최적 배치 지역범위를 한정하였다. 다음 단계로, 한정된 최적 배치 지역범위 내에서 대피시간을 최대한 확보하는 지역을 파악하였다. 이러한 대피시간 계산을 위해 지진해일 도달시간, 탐지소요시간, 데이터 전송 소요시간, 오경보 파악 소요시간을 조건으로 설정하여 수행하였다. 동해안의 경우 지진해일 발생시나리오를 국내외 연구자들의 결과를 취합하여 일본 서해안에 39개 지역의 시나리오를 활용하고, 지진해일 수치모형인 COMCOT으로 계산을 수행하였다. 그 외 조건으로는 장비 설치를 위해 완만한 해저경사도를 갖는 지역으로 범위를 좁혀 울릉도 북동 지역으로 최적 관측지역을 도출하였다[그림 13].

[그림 13] 지진해일 전파 최대 우도, 지형, 대피시간을 고려한 최적 관측지역 (1에 가까울수록 최적)

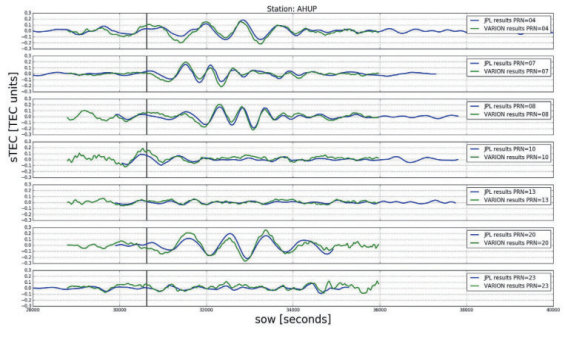


"지진해일 조기탐지를 위해 외해 관측장비와 원격탐사 연구가 필요"

## 2. 지진해일 탐지를 위한 관측기술 제언

앞서 기술했던 국내 장비는 조기탐지를 위한 장비는 아니기 때문에, 효과적인 예·경보를 위해서는 외해에 설치된 관측장비가 필요하다. 조기탐지뿐만 아니라, 미국과 일본에서의 경우처럼 예·경보 업데이트를 위해서도 필요하므로, 향후 이러한 장비의 설치가 요구된다. 우리나라의 경우 지진대가 영해에 거의 없고, 과거 일본 서해안에서의 지진해일이 영향을 주었기 때문에, 최대한 대피 시간을 갖는 조건으로 설치 지역을 찾아야 한다. 이러한 목적으로 최적 관측지역을 찾았고, 장비의 경우는 육상에서 통신이 가능한 거리에 RTK-GPS 부이를 설치하는 방안을 제안할 수 있다. 이 장비는 일본의 NOWPHAS에서도 사용하고 있는 장비이고, 육상에서 20㎞ 이내의 거리에서 LTE 통신을 통해 GPS 신호를 보정하여 자료를 실시간으로 전송할 수 있는 장점이 있다. 통신 거리를 연장할 수 있는 기지국과 통신 환경이 마련된다면 울릉도 북동쪽에 RTK-GPS 부이를 2~3기 설치하여 지진해일 파원을 역추정하고, 예·경보에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

[그림 14] 지진해일 발생시 전리층 교란으로 발생한 TEC 신호 (Savastano, et al., 2017)




다음으로 최근에는 원격탐사 기법이 연구 중인데, Jet Propulsion Laboratory와 NOAA의 연구진은 GNSS를 활용하여 지진해일을 탐지하는 연구를 수행 중이다. 이 기술은 지진해일이 발생했을 때 전리층의 교란이 발생하는 현상을 이용한 것으로 원거리, 또는 지진해일 발생 근원지 근처에서의 초기파형 연구에도 활용되고 있다(Savastano, et al., 2017). 더욱이 2022년 1월 15일에 통가에서 화산폭발로 인해 발생하고, 기상 현상과 함께 증폭된 지진해일에 관한 연구에서도 GNSS를 활용한 연구 사례가 발표되고 있다(Ghent and Crowell, 2022). 이러한 기술은 지진해일 발생 근원지(source)에서의 초기파형 및 전파 양상을 파악할 수 있어 실시간 조기 탐지를 위해 융합연구를 수행하는 것이 필요하다[그림 14].

"지진해일 예측 정확도 향상을 위한 조기탐지 최적 지역 선정, 파원 역추정, 피해 영향 연구 필요"

마지막으로, 지진해일은 연안에서 범람으로 인한 피해가 가장 크다. 범람(inundation)은 강우에 의한 침수와 달리 범람 수위와 수평으로 흐름이 발생하는 범람 속도가 강한 것이 특징이다. 따라서 외해에서의 지진해일 정보뿐만 아니라 연근해의 지진해일 정보 및 연안에서의 범람 수위 및 유속을 연동해서 관측하는 것이 중요하다. 연근해 장비로는 미국과 일본에서 연구 중인 HF-RADAR가 있는데, 수 ㎞ 밖의 거리에서 지진해일을 탐지할 수 있는 것으로 연구결과가 보고되고 있다(Ogata, et al., 2018). 또한 연안 및 육지에서의 범람 유속은 CCTV를 활용할 수 있다. 이처럼 발생, 전파, 범람 과정에서 단계별로 관측자료를 통해 예·경보 및 사후 연구 자료를 업데이트할 수 있는 시스템이 요구된다.

## Ⅳ. 맺음말

지진해일은 다른 해양재해에 비해 발생 빈도가 현저히 낮으나, 한번 발생시 그 피해가 큰 것으로 알려져 있다. 우리나라의 경우 일본과 달리 큰 피해가 발생하지 않았으나, 1983년과 1993년에 걸쳐서 약 3억 9천만 원 상당의 재산피해가 있었으며, 인명피해도 있었다. 게다가 일본 서해안에는 지진공백역이 존재하고, 일본 남쪽 류쿠 해구에서도 지진해일 발생 가능성이 제기되고 있다. 지진해일은 그 특성상 정확한 발생시점을 예측하기 어렵고, 대응 시간이 부족하다. 따라서, 조기탐지를 통한 예·경보 발령이 인명과 재산피해를 최소화할 수 있는 유일한 방안이다. 이러한 조기탐지를 위해 미국은 DART 시스템, 일본은 NOWPHAS, S-NET, DONET을 운영해왔다. 미국에 비해 일본은 지진해일이 연근해에서 발생하고 대응 시간이 부족한 것이 우리나라 실정과 유사하다고 할 수 있다. 다만 우리나라는 해저 지진대가 가까이 있지 않은 점이 다르다. 이러한 상황에서 수치모델을 통해 가능한 모든 시나리오에 대해 예측한 결과를 토대로 예·경보를 실시하는 것은 타당하다. 다만 예측의 정확도를 개선하기 위해 미국, 일본처럼 관측자료가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 외해 관측장비를 설치하는 것이 중요한데, 조기탐지의 목적에서 가장 최적

의 지역에 설치해야 한다. 이를 위해 최적 관측지역 선정에 관한 연구를 수행했고, 이제는 RTK-GPS 부이와 같은 장비를 통해 지진해일을 조기에 탐지하고, 파원을 역추정하는 것이 필요하다. 또한 연안지역의 피해에 대한 영향예보를 위해 연근해 관측장비 설치도 제안한다. HF-RADAR는 해외에서도 연구와 시범 도입을 추진하고 있는 실정이므로, 국내에서도 이에 대한 융합연구가 바람직할 것으로 판단된다.

## 참고문헌


Ghent, J.N., and B.W. Crowell, 2022: Spectral Characteristics of Ionospheric Disturbances Over the Southwestern Pacific From the 15 January 2022 Tonga Eruption and Tsunami. Geophysical Research Letters, doi:10.1029/2022GL100145

Lee, E., T. Jung,, and S. Shin, 2020: Numerical and Probabilistic Study on the Optimal Region for Tsunami Detection Instrument Deployment in the Eastern Sea of Korea. Applied Sciences, 10(17), 6071, doi: 10.3390/app10 176071

Kim, S.-K., E. Lee, J. Park, and S. Shin, 2021: Feasibility Analysis of GNSS-Reflectometry for Monitoring Coastal Hazards. Remote Sensing, 13(5), doi:10.3390/rs13050976

Meza, J., P. Catalan, and H. Tsushima, 2018: A Methodology For Optimal Designing Of Monitoring Sensor Networks For Tsunami Inversion. Natural Hazards and Earth System Sciences, doi:10.5194/nhess-2018-269

Mulia, I.E., A.R. Gusman, and K. Satake, 2017: Optimal Design for Placements of Tsunami Observing Systems to Accurately Characterize the Inducing Earthquake. Journal of Geophysical Research Letters, 44(24), 106-115. doi:10.1002/2017GL075791

Ogata, K., S. Seto, R. Fuji, T. Takahashi, and H. Jinata, 2018: Real-Time Tsunami Detection with Oceanographic Radar Based on Virtual Tsunami Observation Experiments. Remote Sensing, 10, 1126, doi:10.3390/rs10071126.

Okada, Y., 1985: Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. Bulletin of the Seismological Society of America, 75, 1135-1154.

Omira, R., Baptista, M. A., Matias, L., Miranda, J. M., Catita, C., Carrilho, F., Toto, E., 2009: Design of a Sea-level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1327–1338. doi:http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-1327-2009

Percival, D.B., D.W. Denbo, M.C. Eble, E. Gica, H.O. Mofjeld, M.C. Spillane, and V. Titov, 2011: Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART buoy data. Natural Hazards, 58(1), 567-590. doi:10.1007/s11069-010-9688-1

Reid, J.A., and W.D. Mooney, 2022: Tsunami Occurrence 1900?2020: A Global Review with Examples from Indonesia. Pure and Applied Geophysics, doi:10.1007/s00024-022-03057-1.

Savastano, G., A. Komjathy, O. Verkhoglyadova, A. Mazzoni, M. Crespi, Y. Wei, and A.J. Mannucci, 2017: Real-Time Detection of Tsunami Ionospheric Disturbances with a

Stand-Alone GNSS Receiver: A Preliminary Feasibility Demonstration. Scientific Reports, 7:46607, doi: 10.1038/srep46607.

Schindele, F., A. Loevenbruck, and H. Hebert, 2008: Strategy to design the sea-level monitoring networks for small tsunamigenic oceanic basins: The Western Mediterranean case. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 1019-1027, doi:10.5194/nhess-8-1019-2008.

# 화산기술과 화산특화연구센터

**윤성효** 부산대학교 지구과학교육과 교수 yunsh@pusan.ac.kr

Ⅰ. 서언
Ⅱ. 화산활동과 화산재해
Ⅲ. 화산전조현상과 화산감시기술
Ⅳ. 화산특화연구센터 연구내용
Ⅴ. 맺음말

2022년 초 남태평양 통가 화산 분화로 인한 쓰나미 발생, 2010년 아이슬란드 에이야프얄라요쿨 화산의 분화와 화산재구름으로 인한 유럽의 항공기 운항 중단, 1815년 탐보라 화산의 분화가 원인으로 지목되는 1816년 '여름이 없는 해(The Year Without a Summer)' 등 화산 분화는 전 세계 범위에서의 피해를 초래할 수 있다. 미국 스미소니언 연구소는 우리나라의 백두산, 제주도, 울릉도를 활화산으로 분류하고 있어 화산 피해 저감을 위한 기술 개발이 요구된다고 할 수 있다. 화산특화연구센터는 백두산 화산 감시체계 개선 고도화 및 백두산 분화 대응 연구 등을 진행하고 있으며, 한반도 및 주변 화산의 분화 발생 시 영향범위를 예측하고 국외 화산기술 선진국의 대응 체계를 분석하여 우리나라의 화산대응수준을 고도화하기 위한 연구를 수행할 예정이다. ■

“미국 GVP 기준으로 백두산, 제주, 울릉도는 활화산”

## Ⅰ. 서언

2010년 아이슬란드 에이야프얄라요쿨 화산의 분화로 발생한 화산재(volcanic ash)로 인하여 유럽 전역에 초래된 항공대란은 유럽뿐만 아니라 전 세계에 큰 경제적 피해를 입혔다. 일본이나 러시아 캄차카 반도 등에는 우리나라에 영향을 줄 수 있는 많은 활화산들이 존재한다. 우리나라에는 현재 활동 중인 화산이 존재하지 않으나, 미국 스미소니언 연구소의 Global Volcanism Program (GVP)에서는 홀로세(Holocene), 즉 1만 1천 7백 년(11.7 ka) 이내에 활동한 이력이 있는 화산들을 활화산(active volcano)으로 분류하여 역사시대 분화기록을 가진 백두산(Mt. Baekdu)을 포함하여 제주도와 울릉도를 활화산으로 분류하고 있다. 백두산은 2002년부터 2005년 사이 화산 불안정(volcanic unrest)을 보였으며 최근의 연구 결과는 제주도와 울릉도 지하에 부분용융의 결과로 해석될 수 있는 지진파 저속도층의 존재를 발견하였다. 따라서 우리나라도 언제든지 화산활동으로 인한 영향을 받을 수 있음을 이해하고 화산감시 및 대응기술을 철저히 준비해야 할 것이다. 이에 현재 국내외의 화산기술 동향 및 화산특화연구센터를 소개하고자 한다.

## Ⅱ. 화산활동과 화산재해

### 1. 화산

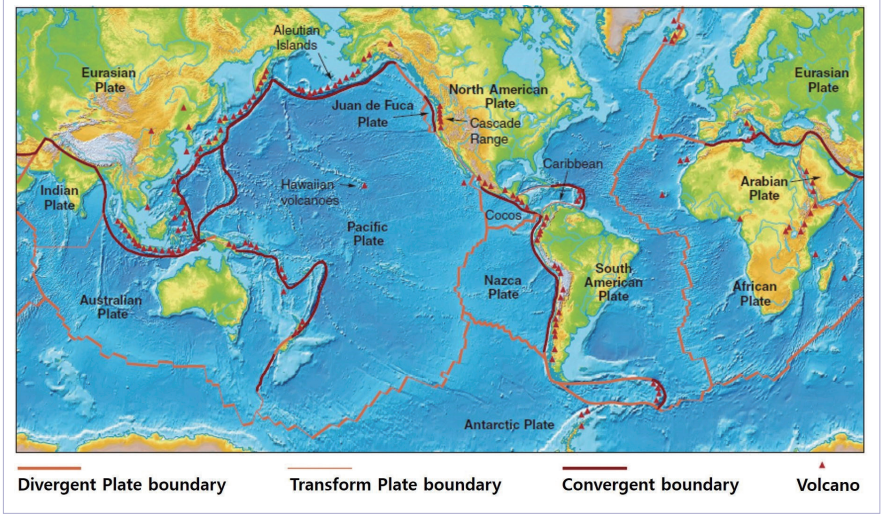
일반적으로 화산은 지구 내부의 마그마(magma)라고 부르는 녹아 있는 암석물질이 지표에 도달하여 분화(eruption)가 발생한 결과 만들어지는 원뿔형의 언덕이나 산을 일컫는다. 그러나 화산활동은 꼭 원뿔형 화산에서만 발생하는 것은 아니다. 화산활동은 지표면의 갈라진 틈새(또는 열극; fissure)을 따라, 또는 화도관(火導管; conduit)을 따라 상승하여 원통형의 화구(vent)를 통해 마그마 또는 마그마에 용해되어 있던 휘발성 유체들이 지표면 밖으로 빠져나오는 현상이다. 이러한 화

“화산은 수렴경계(80%), 발산경계(15%), 열점(5%)에서 생성”

산활동은 때로는 인간에게 큰 인명과 재산 피해를 입히지만, 화산지대나 인근의 온천지역은 관광지로 인기가 높으며, 높은 지열유량은 지열발전에 이용되기도 한다.

지구 내부에서 마그마가 생성되고 지표면까지 도달할 수 있는 곳은 제한적이다. 따라서 화산은 대부분 판의 경계에 해당하는 특정한 곳에만 위치한다. 전 세계 화산의 대부분(80%)은 판과 판이 충돌하여 소멸하는 수렴경계, 특히 해양판이 대륙판 아래로 가라앉는 섭입대 환경에 위치한다. 태평양판을 둘러싼 섭입대 위에는 수많은 화산들이 존재하고 있으며, 이를 일명 ‘불의 고리(ring of fire)’라고 부른다. 나머지 화산들은 판이 갈라지면서 새로운 지각이 만들어지는 발산경계에 위치(15%)하거나, 하와이와 같이 판의 내부에 위치한(5%) 열점에 의해 만들어진다[그림 1].

[그림 1] 판의 경계 근처에 위치한 화산들(Hyndman and Hyndman, 2017)

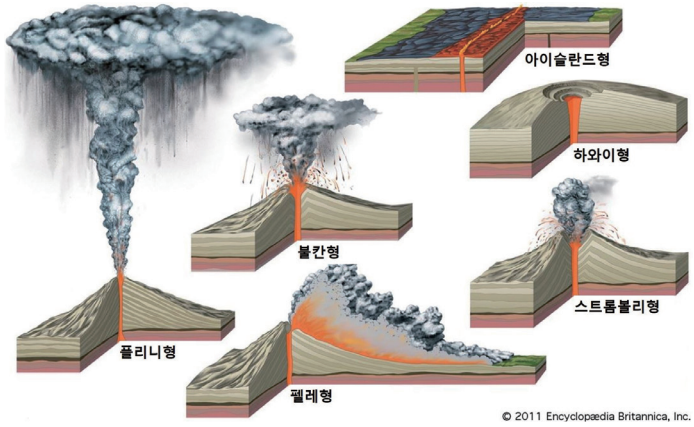



화산의 분화가 발생하면 다양한 물질들이 지표면 밖으로 나오게 된다. 뜨거운 액체상태의 마그마가 지표면에 도달한 액체 상태의 물질을 용암(lava)이라고 부른다. 마그마가 상승하다가 마그마 안의 휘발성 유체가 빠져나오면서 화도관 내부에서 마그마의 파쇄작용이 발생하고, 급격히 식으면서 고체 상태의 화성쇄설물(火成碎屑物; pyroclastic materials)이 만들어진다. 마그마에 용해되어 있던 수증기나 이산화탄소 등의 유체들이 마그마가 지표면으로 상승하면서 빠져나오는 기체가 화산가

스(volcanic gases)이다.

화산활동 하면 흔히들 원뿔형의 화산 꼭대기에서 분연주(噴煙柱; eruption column)라고 하는 화산재 기둥(ash plume)과 그 상부에 버섯구름 형태의 화산재구름이 존재하고, 화구에서 용암이 흘러나오는 것을 상상하기 쉽다. 그러나 화산활동에는 다양한 유형이 존재하며, 각각의 분화 유형에 따라 주로 만들어지는 분출물들이 달라진다[그림 2]. 지표면의 갈라진 틈새를 따라 유동성이 큰 현무암질 마그마가 조용히 흘러나오는 틈새 분화를 아이슬란드형(Icelandic) 분화라고 한다. 중앙의 원통형 화도를 통해 현무암질 마그마가 흘러나와 거대한 순상화산(shield volcano)을 형성하는 하와이형(hawaiian) 분화는 상대적으로 조용하다. 그러나 마그마의 점성이 높아지고 유체를 많이 포함하고 있으면 점점 폭발력이 증가한다. 용암과 화성쇄설물들이 소규모로 튀어나오는 스트롬볼리형(strombolian) 분화에서부터 용암 대신 화성쇄설물들이 점점 많아지고 폭발력이 증가할수록 분화의 유형은 불칸형(vulcanian), 펠레형(pelean), 그리고 플리니형(plinian)으로 전환된다. 플리니형 분화는 폭발적으로 발생하며 서기 79년 로마의 폼페이 시를 매몰시킨 베수비우스(Vesuvius) 화산의 분화를 목격한 소 플리니우스(Pliny the Younger)의 이름을 따온 것이다. 이 외에도 마그마가 지하수나 해수와 반응하여 수증기가 만들어지면서 폭발적인 분화가 발생하는 경우 수성화산활동(hydrovolcanic eruption)이라고 하는데, 여기에는 수증기 분화(phreatic eruption), 수증기마그마성 분화(phreatomagmatic eruption)가 해당된다.

[그림 2] 화산의 분화 유형(Britannica, 2022)




화산을 활동상황에 따라 활화산 또는 사화산으로 분류하기도 한다. 현재 활발한 분화활동을 보이고 있거나 분화 가능성이 있는 화산을 활화산(active volcano)

"946년 VEI 7의 천년 분화라 불리는 폭발적 분화가 발생했던 백두산"

이라고 하며, 더 이상 마그마의 공급이 일어나지 않아 분화 가능성이 없는 화산을 사화산(extinct volcano)이라고 한다. 분화가 오랫동안 중단된 화산을 휴화산(dormant volcano)이라고 분류하기도 하였으나 학술적으로는 더 이상 사용하지 않으며, Decker and Decker(1991)는 홀로세(Holocene)에 해당하는 최근 1만 년 내 분화 이력을 가진 화산을 활화산으로 분류하였다. 이 기준에 따라 미국 스미소니언 연구소(Smithsonian Institute)의 Global Volcanism Program은 한라산과 울릉도를 활화산으로 분류한다.

고려사에는 고려 목종 시기에 해당하는 1002년과 1007년에 수중화산분화를 묘사한 것으로 보이는 기록(안웅산, 2016)이 있으며, 송악산(Sohn et al., 2002)과 일출봉(Cheong et al., 2006), 울릉도(황상구와 조인화, 2016)의 방사선 연대측정 결과는 해당 지역에서의 마지막 분화가 약 4~5천 년 전에 발생한 것임을 나타낸다. 또한 최근에는 제주도 하부에 P파의 속도이상대가 분포하고(Song et al., 2018), 동해 해저에는 폭 300㎞, 깊이 100㎞ 규모의 저속도층이 존재한다는 연구결과가 발표되기도 하였다(Simute et al., 2016).

또한 백두산에서는 서기 946년 화산폭발지수(Volcanic Explosivity Index; VEI, Newhall and Self, 1982) 7에 해당하는 이른바 천년 분화(Millennium eruption)라고 하는 폭발적 분화가 발생하였다(Xu et al., 2013). 분화 시기가 발해의 멸망 시기와 비슷하여 발해 멸망에 백두산의 분화가 영향을 주었다는 주장도 존재한다.

## 2. 화산재해

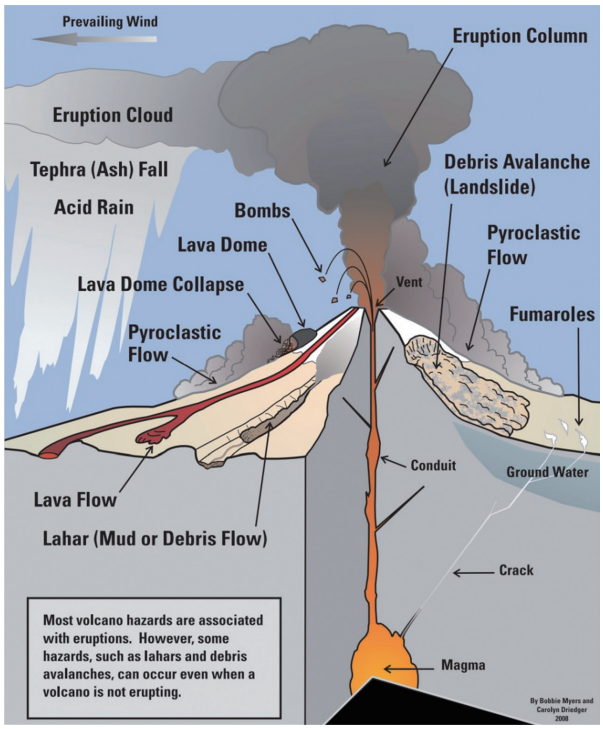
화산의 활동으로 인해 발생하는 화산재해는 근접화산재해와 광역화산재해로 나눌 수 있다[그림 3]. 근접화산재해는 화산활동에 의해 화산체 및 화산의 인근 지역에서 발생하는 재해로, 용암이 산사면을 타고 흘러내려가는 용암류(熔岩流; lava flow), 뜨거운 화성쇄설물과 가스가 섞여 산사면을 타고 흘러내려가는 화성쇄설밀도류(pyroclastic density currents(PDCs) = 화성쇄설류(pyroclastic flow) = 화

> “화쇄류는 1600년대 이후 가장 많은 인명피해 유발 화산재해”

쇄류(ash flow)), 화성쇄설물들이 화산 인근의 물 또는 강우와 함께 섞여 계곡을 타고 사면을 흘러가다가 넓은 범위에 퇴적되는 라하르(화산이류, lahar or volcanic mudflow), 화재(fire) 등이 해당된다. 이들 화산재해는 일반적으로 분화가 임박하거나 또는 분화와 동시에 발생하지만, 라하르의 경우는 분화가 발생하고 시간이 지난 이후에도 강우에 의해 발생하는 경우가 있다. 화산재가 탁월풍을 타고 멀리까지 이동하여 떨어지는 강하화산재(tephra fall = ash fall)나 화산재 또는 화산가스에 의해 발생하는 산성비는 멀리 떨어진 지역에도 영향을 줄 수 있는 광역화산재해에 해당한다. 2022년 초 남태평양 통가 화산 분화처럼 화산섬 또는 수중에서 발생한 분화로 쓰나미가 발생하여 먼 지역까지 영향을 주는 경우도 있다.

근접화산재해 중 화쇄류나 라하르는 강력한 에너지를 가지고 있으며 주변 지역을 휩쓸고 지나가 인근 지역에 큰 인명 및 재산 피해를 줄 수 있다. 특히 화쇄류는 1600년대 이후 가장 많은 인명피해를 발생시킨 화산재해이다(Auker et al., 2013). 강하화산재가 발생하면 자동차나 비행기 등의 운송수단에 큰 영향을 줄 수 있으며, 특히 화산재 발생 지역을 통과하는 항로의 항공기 운항은 금지된다. 2010년 아이슬란드 에이야프얄라요쿨 화산의 분화로 발생한 화산재 구름이 유럽으로 흘러가면서 항공기 운항이 중단된 약 한 달 정도의 기간 동안, 국제항공운송협회(IATA)는 전 세계 항공사가 하루에 약 1억 4,800만 유로의 경제적 손실을 입은 것으로 추정하였다(wikipedia).

[그림 3] 화산에서 발생하는 화산재해(Myers and Driedger, 2008)




대규모의 분화는 기후에 영향을 줄 수도 있다. 분화한 화산재나 에어로졸은 대기 중에 길게는 수년까지 부유하면서 태양복사에너지를 차단시켜 기온을 낮추기도

“화산활동 예측은 화산전조현상의 감시로 이루어진다”

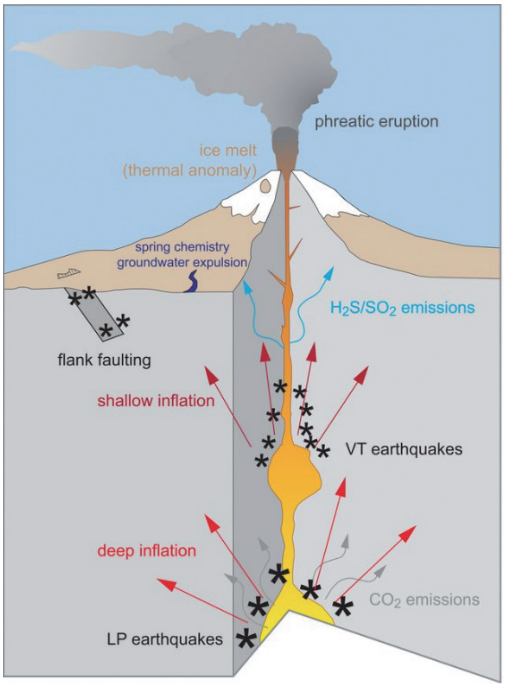
한다. 대표적으로 1815년 탐보라 화산의 분화는 그 이듬해인 1816년을 일명 ‘여름이 없는 해(The Year Without a Summer)’로 만들어 전 세계적인 피해를 초래하였다. 분화가 발생할 경우 이산화탄소 등의 온실기체가 다량으로 대기 중에 방출되긴 하지만, 인간의 활동에 의한 지구온난화 영향보다는 미약하다(Gerlach, 2011).

## Ⅲ. 화산전조현상과 화산감시기술

### 1. 화산전조현상

대규모의 화산재해는 강력한 에너지를 수반하며, 따라서 인류의 힘으로 막는 것은 거의 불가능하다. 과학기술의 발전은 자연재해에 의한 피해 저감에 큰 역할을 하지만, 자연재해의 예측 및 피해 저감은 여전히 어려운 일이다. 화산활동의 예측은 마그마의 활동에 수반되어 발생하는 화산전조(前兆) 현상(eruption precursors)의 감시를 통하여 이루어진다[그림 4].

[그림 4] 화산에서 발생하는 전조현상의 종류(Poland and Anderson, 2020)




지하 깊은 곳의 마그마가 상승하여 마그마 방(또는 마그마 챔버)에 축적되는 경우 장주기 지진(long-period earthquake; LPs)이 발생하며, 지진의 빈도와 규모가 증가하게 된다. 이 과정에서 화산체가 미세하게 부풀어 오르는 등의 지표변형이 발생하고 이산화탄소($CO_2$)와 같은 용해도가 낮은 화산가스의 방출량이 증가하거나 새로운 분기공(fumarole)이 출현하게 된다.

마그마가 지표면 근처로 더욱 상승하면 압력이 감소하면서 마그마의 용해도가 더욱 낮아지고 지하수에 의한 가수분해 등으로 화산가스에서 황화수소(H2S)가 차지하는 비율이 증가할 수 있다. 증가한 마그마의 부피는 인근 지각에

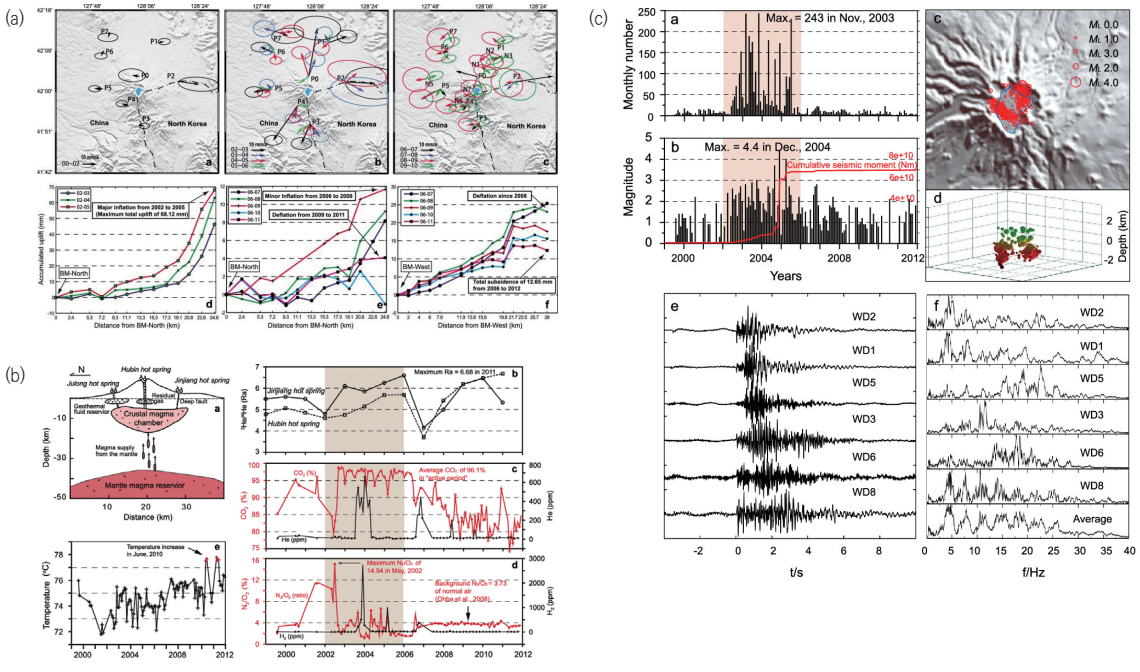
> “ 예상되는 분화 유형이나 규모를 전조현상이 대표하지는 않는다 ”

응력을 축적시켜 화산구조성지진(volcano-tectonic earthquakes; VTs)을 발생시킬 수 있다. 마그마로 인한 비정상적인 열유량의 증가로 인하여 지표면의 온도가 상승하거나, 지하수를 포함한 근처 수계의 온도 상승으로 이어질 수 있다.

분화가 임박하면 마그마 방의 상부가 파열되고 마그마가 화도를 따라 상승하면서 조화진동(harmonic tremor 또는 미동) 등의 지진과 함께 지표면의 급격한 변형과 이로 인한 지진이 발생할 수 있다. 진원의 위치는 화도를 따라 점점 지표면 가까이로 상승할 것이며 이산화황($SO_2$)의 비율이 점점 증가하게 된다. 마그마가 지표면 근처의 지하수와 접촉하며 수증기 분화가 발생하게 된다.

그러나 전조현상은 예상되는 분화의 유형이나 분화 규모를 나타내지는 않는다. 전조현상이 미약하여 배경수준(background level)과 구분하기 어려울 경우 또는 분화가 임박해서야 발생하는 경우도 있다. 대표적으로 2014년 일본 온타케 화산의 분화는 화산폭발지수 2 정도의 작은 규모의 분화였으나(윤성효 외, 2014), 전조

[그림 5] 2002-2005년 백두산의 다양한 전조현상들((a) GPS 지표변형 데이터, (b) 온천수 온도 및 화산가스 성분 변화, (c) 화산성지진의 빈도와 규모, 진원 위치 및 지진파형)(Xu et al., 2012)

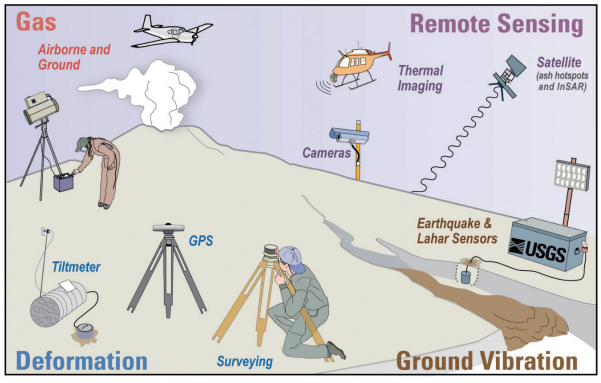


“ 실시간 데이터 획득 여부, 비용, 설치 및 유지관리 고려한 다양한 화산감시 기법 활용 필요 ”

현상이 확연히 나타나지 않아 분화경보 단계가 조정되지 않은 결과 58명의 사망자가 발생하였다. 또한 전조현상이 지속적으로 발생하지만 분화로 이어지지 않는 경우도 있다. 이탈리아의 캄피 플레그레이(Campi Flegrei) 화산은 불안정(unrest)이 60년 이상 지속적으로 나타나고 있지만, 큰 분화가 발생하지는 않고 있다. 전조현상이 화산활동에 의한 것인지, 어느 수준에 도달해야 분화 가능성이 있는지를 알아내는 것 또한 화산에 대한 장기적인 관측자료의 축적과 전문가의 분석이 필요하다.

백두산은 서기 946년 11월~947년 2월에 이르는 기간 동안 이른바 밀레니엄 분화라고 하는 화산폭발지수 7에 해당하는 인류역사상 가장 큰 분화 중 하나로 손꼽히는 엄청난 규모의 폭발성 분화(explosive eruption)가 발생하였으며 2002-2005년 동안 화산성 지진의 증가 및 화산체의 팽창으로 인한 지표변형, 온천수 온도 상승 등의 화산 불안정이 지속되었다(Xu et al., 2012)[그림 5].

[그림 6] 미국지질조사소(USGS)에서 사용하고 있는 다양한 화산감시기법(USGS, 2022)




## 2. 화산기술 동향

화산 분화의 전조현상은 종류에 따라 그 정도가 다르게 나타날 수 있기 때문에, 화산의 감시에는 다양한 기법을 동원하여 지속적으로, 그리고 실시간으로 감시할 필요가 있다. 화산전조현상과 화산재해를 감시하기 위하여 다양한 기법이 사용되고 있으며, 이들은 상호 보완적으로 작용하게 된다. 즉 특정 전조현상이 발생하지 않는 경우라도 다른 전조현상의 관측을 통해 분화를 예측할 수 있으며, 각각의 기법은 실시간 데이터 획득 여부, 비용, 설치 및 유지 관리 등의 장단점을 다르게 가지고 있으므로, 화산이 갖는 다양한 환경 조건에 맞게 감시기법들을 적용하게 된다[그림 6].

지하 심부의 상태를 직접 눈으로 확인할 수는 없기 때문에, 일반적으로 지진파를 이용한 화산감시기법이 가장 널리 사용된다. 화산체 인근에 다수의 지진계 네트워

> 화산가스 감시는 육안확인, 포집법, 전자기파 흡수선 분석, 위성 관측 기법 등이 활용

크를 구성하여 다양한 종류의 화산성지진을 기록하고 마그마의 거동을 추적한다. 지진파의 특성을 분석하여 마그마의 현재 상태를 파악하고, 진원깊이를 알아내서 현재 마그마의 활동이 가장 활발한 곳을 파악하게 된다.

화산체 아래에 마그마가 주입되어 마그마 방이 형성되면 화산체가 팽창하는 등의 지표변형이 발생하여, 일반적으로 화산체 위의 두 지점 사이의 거리가 증가한다. 화산체의 지표변형은 측량 또는 경사계(tiltmeter)를 이용하여 정밀하게 측정된다. 측량에는 전자기파 등을 이용하여 거리를 측정하는 EDM(electronic distance measurements) 기법을 이용한다. 경사계를 사용하면 팽창하는 화산체 사면의 미세한 경사 변화를 정밀하게 측정할 수 있다. GPS가 보급된 이후에는 이를 이용하여 3차원 지표변형 데이터를 얻을 수 있게 되었다(윤성효와 이정현, 2013).

화산가스 감시기법은 화산가스의 방출량을 육안으로 확인하거나, 화산가스의 성분 변화를 측정하기 위하여 분기공의 가스를 직접 채집하여 분석하는 포집법 또는 온천 하부의 자연 또는 인공적인 분기공에서 나오는 기포를 공병에 모으는 Giggenbach Bottle법 등이 사용되고 있다(이상철과 윤성효, 2017). 이러한 기법들은 현장에서 직접 성분을 알아내거나 혹은 실험실로 운반하여 가스 크로마토그래피 등을 통해 분석한다. 그러나 화산가스는 인체에 유해하고 화산지대에 대한 접근이 어려운 경우가 많으므로 원거리에서 측정할 수 있는 방법 또한 개발되었다. 화산가스를 통과하는 전자기파의 흡수선을 분석하여 화산가스 내의 성분을 알아내는 방식인 푸리에 변환 적외선분광계(FTIR), 자외선대비분광계(COSPEC) 등의 장비를 사용한다.

최근에는 인공위성을 이용한 화산가스 및 지표변형 관측 기법이 적용되고 있다. 유럽우주국(ESA)이나 미항공우주국(NASA) 등에서는 다수의 위성을 이용하여 이산화황이나 오존, 에어로졸 등을 검출하여 화산 분화를 감시하고 방출되는 화산가스의 성분 및 배출량, 확산방향 등을 거의 실시간으로 알아낼 수 있다. 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar; SAR) 영상을 이용한 간섭영상기법(Interferometric SAR; InSAR)은 정확하게 같은 궤도를 지나는 인공위성이 시간

“백두산 화산활동 감시를 위해 2018년 화산특화연구센터 개소”

간격을 두고 찍은 두 장 이상의 사진을 이용하여 넓은 지역의 지표변형을 측정한다. 인공위성의 영상레이더 센서는 지상 관측에서 발생하는 여러 문제가 발생하지 않으며, 수증기 등 구름을 투과할 수 있는 마이크로파 대역을 이용하기 때문에 시각, 기상 조건 등에 영향을 받지 않으므로 매우 효율적인 원격탐사 방법이다.

이 외에도 중자력탐사를 이용하여 지하 마그마 상태를 연구하거나 공중음파(infrasound)를 이용한 화산감시 및 분화 탐지, 드론을 이용한 화구 내부 탐사나 뮤온과 같은 소립자를 이용하여 화산의 내부를 탐사하려는 연구가 세계 각국에서 수행중이다.

## Ⅳ. 화산특화연구센터 연구내용

2002~2005년 화산성지진이 증가한 이후 백두산 화산분화 가능성에 대한 위기감이 고조되어 백두산 화산감시의 강화가 요구되었다. 그러나 현재 백두산의 지정학적 위치 등으로 인하여 위성자료를 이용한 원격관측에 의존하고 다양한 화산감시기법이 적용되지 못하는 한계가 존재한다. 원격 관측자료는 현지 관측자료를 통한 보정 및 검증이 필요하고, 직접적인 화산활동 모니터링을 위해 현지에서의 지표 변위 및 변형, 화산성지진, 화산가스, 중력 등 지구물리·화학 변동량 관측 및 자료 획득이 요구된다.

[그림 7] 백두산 천지화산관측점에 설치되어 계측 중인 화산특화연구센터 EDM 장비

이에 2018년 5월 2일 기상청 특이기상연구센터로서 화산특화연구센터가 개소식을 가졌다. 화산특화연구센터는 백두산 화산활동 감시를 위해 중국지진국 활동화산연구중심(活动火山研究中心: Research Center of Active Volcanoes of China Earthquake Administration)과 MOU를 체결하고, 길림성지진국 장백산화산관측소(National Field Scientific Observation and Research

> “백두산 및 한반도 인근 발생 화산의 화산재해 영향 범위 연구도 수행중”

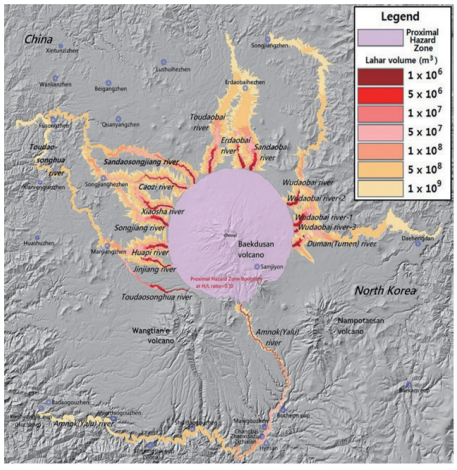
Station on the volcano at the Changbaishan Mountains in Jilin Province)와의 긴밀한 국제공동협동연구 관계를 유지하여 현지에서의 관측자료 획득을 통한 화산 원격 관측 분석 자료의 보완을 목적으로 하고 있다.

화산특화연구센터의 연구진은 백두산을 주기적으로 방문해 화산가스와 온천수 등을 채집·분석하고, EDM 및 인공위성영상 간섭기법을 이용한 원격탐사를 통해 백두산 화산 감시체계 개선 고도화 및 백두산 분화 대응 연구 등을 진행하고 있다. 백두산 현지 천지화산관측소에 설치된 EDM장비를 이용하여 백두산 북파지역의 지표변형을 측정, 백두산 천지 외륜산의 지표 융기/침강을 2014년부터 측정하고 있다[그림 7].

화산가스의 경우 백두산 북파지역의 주룡온천에서 매년 1회 이상 샘플을 채집하여 중국지진국 활동화산연구중심의 가스 크로마토그래피를 이용, 성분을 측정하고 있으며 온천수는 국내로 가져와 분석을 실시한다. 지속적인 백두산 현지 관측자료 획득 및 누적된 자료를 바탕으로 이상 징후 발생 시 관측자료를 근거로 지하마그마 거동을 파악하기 위하여 노력하고 있다. 2014년 이후부터 백두산 일대를 촬영한 ALOS-2 이미지를 사용한 InSAR기법 분석 역시 수행중이며, GNSS를 이용한 지표변형 분석연구와 중력 및 자력 탐사자료를 활용한 화산 내부 마그마 거동 분석 기법의 연구 및 적용을 통해 화산분화 전조현상 감시체계 기술을 선진국 수준까지 상승시키기 위한 노력 또한 진행 중이다.

또한 백두산 및 한반도 인근 화산 지역에서 발생하는 화산재해의 영향 범위에 대한 연구 역시 수행중이다. 화쇄류, 라하르 등의 근접화산재해 발생으로 인한 영향 범위 파악은 방재대책 마련에 아주 중요한 자료로 사용될 수 있다[그림 8]. 백두산을 비롯한 한반도 인근 활화산의 분화로 발생하는 화산재는 대부분의 경우 우리나라에는 영향을 주지 않지만, 특정 기상장에서는 한반도로 화산재가 유입될 수 있으므로 분화 발생 시 화

[그림 8] 백두산의 라하르 영향지역 수치모의 결과 (윤성효와 장철우, 2017



“ 백두산 및 일본의 화산 폭발시 기상 조건에 따라 화산재 한반도 유입 가능 ”

산재 확산에 대한 실시간 수치모의를 실시하여 화산재 확산 및 침적 가능성을 파악하기 위한 연구 역시 중요하다. 화산특화연구센터에서는 백두산, 제주도, 울릉도 및 한반도 주변 화산의 분화 발생 시 영향범위를 예측하고 국외 화산기술 선진국의 대응 체계를 분석하여 우리나라의 화산대응수준을 고도화하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

## Ⅴ. 맺음말

백두산에서는 점성이 큰 조면암질 내지 알칼리 유문암질 마그마에 의한 분화가 발생할 수 있다. 또한 백두산 천지 내부에는 약 20억 톤의 물이 존재하므로 폭발성 분화 시 이 물로 인하여 더욱 큰 폭발이 발생할 가능성이 크다[그림 9]. 백두산에서 폭발적인 분화가 발생할 경우 용암류, 화쇄류, 라하르, 화재에 의한 인근 지역의 직접적 피해뿐만 아니라 화산재의 한반도 지역 유입 가능성이 존재한다. 또한 일본에는 100여 개 이상의 활화산이 존재하며 이들 중 한반도에 인접한 화산이 분화할 경우 기상조건에 따라 한반도로 화산재가 확산될 가능성이 있다. 2010년 유럽

[그림 9] 백두산 서파에서 바라본 전경(백두산 천지 칼데라 호수에는 20억 톤의 물이 담겨 있어 칼데라 내로 마그마가 상승하는 경우 매우 강력한 폭발력을 가진 수증기마그마성 분화(phreato-magmatic eruption)가 발생 가능)

> “화산활동 정보 수집·분석과 조기 경보체계 수립, 대응계획 마련 필요”

항공대란의 경우처럼 멀리 떨어진 화산의 활동으로 인한 피해가 우리나라에 영향을 줄 수 있음을 유의해야 한다. 한국인 관광객의 피해나 한반도 주변국 화산의 분화로 인한 화산재 확산으로 발생할 수 있는 피해의 저감을 위해서는 화산활동 정보의 상시 수집과 신속한 분석이 이루어져야 한다. 그리고 우리나라에서도 화산활동과 그로 인한 화산재해가 얼마든지 발생할 수 있으므로 이에 대한 조기경보체계의 수립 및 대응계획 마련을 위한 지속적인 연구개발과 그에 대한 지원이 이루어져야 할 것이다.



## 참고문헌


안웅산, 2016: 고문헌에 기록된 제주도 최후기 화산활동에 관한 연구. 광물과 암석, 25(1), 69-83.

이상철, 윤성효, 2017: 백두산 화산활동 평가를 위한 화산가스 및 온천수에 대한 연구. 자원환경지질, 50(2), 171-180.

윤성효, 이정현. 2013: EDM 을 활용한 지표변화율과 마그마 활동 양상 변화 연구. 광물과 암석, 22(1), 71-81.

윤성효, 이정현, 장철우, 2014: 일본 온타케 화산의 2014 년 분화와 전조현상. 암석학회지, 23(4), 405-418.

윤성효, 장철우. 2017: LAHARZ_py 프로그램을 이용한 라하르 범람지역의 예측: 백두산 화산에 적용. 자원환경지질, 50(4), 277-286.

황상구, 조인화, 2016: 울릉도 화산암류의 분화이력과 분출량에 따른 위험도 분석. 자원환경지질, 49, 181-191.

Auker, M.R., Sparks, R.S.J., Lee Siebert, L., Crosweller, H.S., and Ewert, J., 2013: A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. Journal of Applied Volcanology, 2:2, 1-24.

Britannica, 2022: Major types of volcanic eruption. https://www.britannica.com/science/volcano/Six-types-of-eruptions

Gerlach, T., 2011: Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. Eos, Transactions American Geophysical Union, 92(24), 201-202.

Global Volcanism Program, National Museum of Natural History, Smithsonian Institution. http://volcano.si.edu/

Hyndman, D., and Hyndman, D., 2017: Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition. Cengage Learning.

Myers, B., and Driedger, 2008: Geologic Hazards at Volcanoes, USGS General Information Product 64, https://pubs.usgs.gov/gip/64/

Newhall, C.G. and Self, S., 1982: The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. Journal of Geophysical Research, 87, 1231-1238.

Poland, M. P. and Anderson, K. R., 2020: Partly cloudy with a chance of lava flows: Forecasting volcanic eruptions in the twenty-first century. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(1), e2018JB016974.

USGS, 2022: Volcanic monitoring types and methods employed by the USGS Volcano Hazards Program, https://www.usgs.gov/media/images/volcanic-monitoring-types-and-methods-employed-usgs-vhp

Wikipedia, 2022: Air travel disruption after the 2010 Eyjafjallajokull eruption, https://en.wikipedia.org/wiki/Air_travel_disruption_after_the_2010_Eyjafjallaj%C3%B6kull_eruption

Xu, J., Liu, G., Wu, J., Ming, Y., Wang, Q., Cui, D., Shangguan, Z., Pan, B., Lin, X. and Liu, J., 2012: Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: A precursor of a future eruption. Geophysical Research Letters, 39, L16305, 7.

Xu, J.D., Pan, B., Liu, T.Z., Hajdas, I., Zhao, B., Yu, H.M., Liu, R.X., and Zhao, P., 2013: Climatic impact of the Millennium eruption of Changbaishan volcano in China: new insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating, Geophysical Research Letters. 40(1), 54-59.

# 백두산 화산 재해

이윤수 전 포항공대 교수 leeys.magmab@gmail.com

Ⅰ. 백두산은 활화산인가?
Ⅱ. 백두산이 터지면, 과연 무슨일이 일어날까?
Ⅲ. 천지 마그마의 현황과 초심도 융합연구의 중요성
Ⅳ. 제언: 백두산 화산분화문제 해결을 위한 기상청의 역할

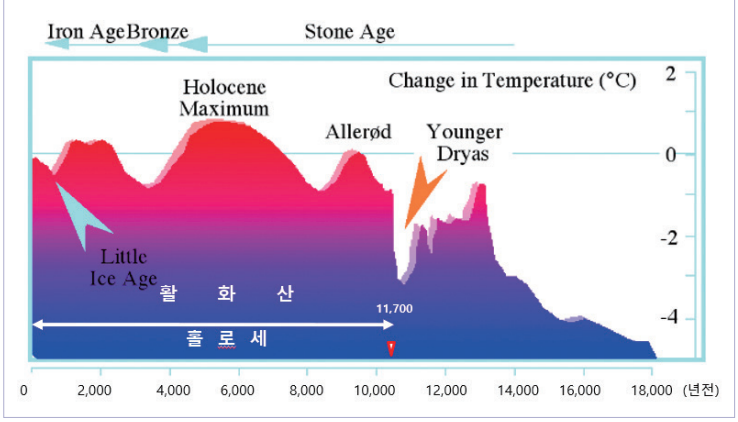
오늘날 도시화, 산업화, 정보화 사회는 활화산, 지진, 지진해일과 같은 초대형 자연지질재해에 대해 충분히 취약하다. 초대형 자연지질재해는 환태평양 불의고리에서 대부분 발생하지만, 한반도에서 백두산은 유일한 예외이다. 서기 946년 발생한 백두산 천년대분화(ME)는 홀로세(11,700년~현재) 지구상 최대급(분화지수 VEI 7)의 화산분화로 밝혀졌다. 국제학계에서도 백두산 화산분화의 위험성에 대해 경고하고, 백두산 화산 남북국제공동연구를 강권하고 있다. 화산분화 본질인 마그마의 거동에 대한 문제는 아직 풀지 못한 극한지구 과학기술의 난제이다. 천지직하에 존재하는 마그마의 핵심 정보에 대해 민·관·학의 소통과 이해가 필요하다. 서기 62년 전조현상을 잊었던 로마인들이 17년 후인 서기 79년, 폼페이 화산분화(VEI 5)로 큰 재해를 겪었다. 2002년 7월부터 2005년 12월말까지 백두산에 심각한 화산징후가 있었다. 우연히도 2023년은 백두산 천지에서 화산징후가 잦아진 뒤 17년째 되는 해이다. ■

# Ⅰ. 백두산은 활화산인가?

## 1. 활화산이란?

지질학적으로 신생대(Cenozoic Era)는 고신생대(Paleogene Period: 6,600만 년 전부터 2,300만 년 전까지), 신신생대(Neogene Period: 2,300만 년 전부터 259만 년 전까지), 제4기(Quaternary Period: 259만 년 전부터 현재)로 삼분된다. 이 중 제4기는 북반구에 광범위하게 빙하기의 영향이 나타나는 시점부터 현재에 이르는 기간으로써, 빙하기와 간빙기가 반복되는 것이 특징이다. 오늘날 우리 인류는 바로 직전의 빙하기(마지막 빙하기라고 부름)가 끝나고 시작된 간빙기에 살고 있는데, 이를 홀로세(Holocene Epoch: 11,700년 전부터 현재)라고 부른다[그림 1]. 이는 이전의 플라이스토세(Pleistocene Epoch: 259만 년 전부터 11,700년 전까지)와 구분된다. 활화산은 홀로세가 시작되는 11,700년 전 이후 단 한 번이라도 화산활동의 이력이 있는 화산으로 정의되며, 우리나라에는 경계부를 따라 북쪽의 백두산(천지)을 비롯하여, 동쪽의 울릉도(나리분지)와 남쪽의 제주도(백록담)를 합쳐 총 3곳의 활화산이 있다.

[그림 1] 활화산의 정의와 홀로세(출처: http://www2.pvc.maricopa.edu/ssd/geog/outlines/GPH213/change.html).




## 2. 물리탐사로 확인된 활화산 백두산

화산을 일으키는 근원 물질은 마그마다. 마그마란 지하의 암반이 녹은 액상의 물질로 다량의 용존 가스를 포함한다. 즉, 활화산 아래에는 반드시 마그마가 존재해야 한다. 초음파를 통해 태아 상태를 확인하는 것처럼, 오늘날 현대과학은 지진파(seismic), 중력(gravity), 자기 지전류(MT, magneto-telluric) 등의 다양한 물리탐사 방법을 통해 땅속의 마그마를 영상화하여 그 분포를 확인할 수 있다.

(1) 지진파 연구에 따르면, 백두산 아래 대륙지각의 두께는 약 40㎞로써, 주변보다 수 ㎞ 더 두

껍다. 아직 학계의 논란이 있지만, 일부 중국지진학자들은 백두산 지각 내에 4개의 마그마방이 존재한다고 해석한 바 있다.

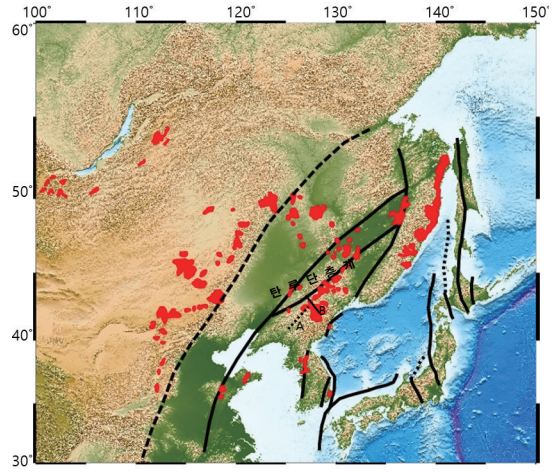
(2) 한편, 태양풍이 지구의 자기권에 침투하거나, 대류권 내에서 강한 벼락이 치는 경우, 자연적으로 다양한 주기의 전자기파들이 발생되어 지구 내부를 통해 전달된다. 마그마의 경우, 주변 암석보다 매우 낮은 비저항값을 갖기 때문에, MT탐사방법이 매우 탁월하다. 백두산 천지에서 북파계곡을 향해 천부의 MT 이상구조가 발견되었으며, 이는 북파일원에 뜨거운 열수작용이 활발하게 활동하고 있음을 암시한다.

(3) 또한 중력모델 연구를 통해, 백두산 아래에는 주변보다 비중이 작은 물질로 차 있다는 것이 알려졌는데, 이는 액상의 가벼운 마그마가 존재한다는 것을 지시한다. 모델링을 통하여, 천지 직하 약 7㎞(해발 심도 약 5㎞)에 마그마의 존재를 규명한 바 있다.

### 3. 백두산의 형성 원인과 메커니즘

우리나라가 속한 중한지괴는 소지괴들이 모여 형성된 복합지괴로서 중생대에 걸친 충돌 및 봉합과정을 통해 심각한 지각침식을 겪으면서, 암권지각이 얇다(Lee et al., 1999a, 2011). 이 과정에서 북중한지괴와 남중한지괴를 관통하는 암권단위의 초대형 구조선이 탄루단층계로, 백두산단열대도 이에 속한다. 고신생대 초 북상하는 인도판은 유라시아판과 충돌을 일으켜 유라시아판 아래로 섭입하여 들어가면서 히말라야조산운동과 동아시아의 지각변형을 주도하고 있다. 이윽고 2,300만년 전(고신생대와 신신생대의 경계), 히말라야조산운동은 중한지괴를 동쪽으로 밀어내면서 탄루단층계를 재활성시키게 된다(Lee et al., 1999b). 이 결과, 암권 아래에 위치한 연약권의 압력을 떨어트려 부분용융을 일으키면서 연약권의 상승을 초래하게 되었다. 이로부터 탄루단층계 광범위에 걸쳐 인장균열이 일어나 대규모의 화산활동이 발생한다[그림 2]. 백두산화산활동을 일으킨 백두산단열대도 탄루단층계에 수반된 열극대에 속한다. 중한지괴(한반도, 동중국, 서남일본)신신생대에 들어서며 탄

[그림 2] 동북아 신신생대의 초대형 화산활동(적색)
(A: 압록강단층, B: 백두산단열대)

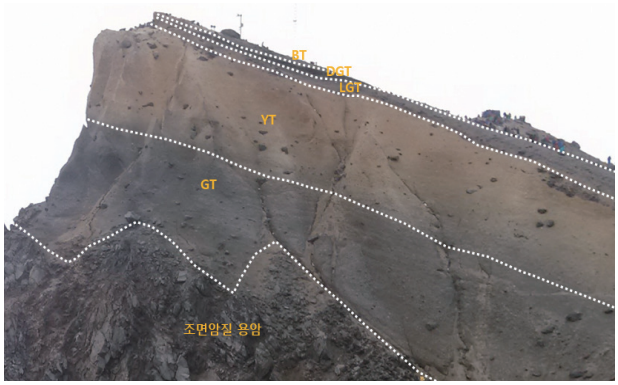


루단층계의 열곡 무리를 따라 대량의 현무암이 분출하여 거대한 용암대지가 형성되었다(Wei et al., 2013). 그 후 열곡의 이곳저곳에서 화산 분출이 멈추고, 500만 년 전부터 몇 곳의 화산에 국한하여 분출하게 되며, 그중 현재까지 잔존한 대표적인 화산체가 백두산이다.

### 4. 백두산 화산체, 대분화의 증거

상술한 백두산 일대의 화산활동은 남한의 반만한 면적에 필적한다. 백두산 화산체는 낮은 점성의 현무암질 마그마가 중심분출로 형성된 넓은 순상지(방패모양의 지형, 표면적 약 12,000㎢, 두께 100-400m, 총 용적이 1,200-4,800㎥)를 기반으로 이루어진 산이다(Zhang et al., 2018). 백두산은 약 60만년 전부터 중간 점성질의 조면암질 마그마의 화산활동이 우세하게 되며, 용암과 응회암이 교호하여 쌓인 원추형의 화산체를 만든다. 이 응회암층 내에는 빈번하게 유문암질 테프라가 협재한다. 마지막 빙하기가 끝나는 홀로세에 들어서, 백두산 화산체의 정상부에서는, 이제까지 없었던, 격한 폭발성 화산활동이 발생한다. 그 이유는 동해저를 누르고 있던 바닷물의 하중이 제거되면서, 백두산 마그마 상승을 유발하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 마그마의 지속적인 분결작용과 지각물질의 혼입으로 규질화 된 것도 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 마그마 함량에 SiO2가 증가하면 마그마의 점성(끈적끈적한 정도)이 급증하여 그만큼 고압의 화산가스를 잡아둘 수 있기 때문이다.

[그림 3] 백두산 천문봉 절벽에 나타나는 5매의 홀로세 테프라층




천지 정상부에 올라가면 중국측 천문봉 절벽에 노출된 5매의 화쇄성 홀로세 테프라층들이 나타나는데, 이들은 조면암을 기반으로 하부로부터 회색테프라층(GT), 연황색테프라층(YT), 회백색테프라층(LGT), 흑회색테프라층(DGT), 흑색테프라층(BT)으로 구성된다(Chen et al., 2016)[그림 3]. 이 중에서 회백색테프라층(하부 유문암질)과 흑회색테프라층(상부 조면암질)은 서기 946-947년 천년대분화(분화지수 7)가 만든 지층으로서 상부층에 하부층의 것이 섞여 나온다. 이는 상부에 위치했던 유문암질 마그마가 먼저 분화하고 뒤이어 하부의 조면암질 마그마가 뒤이어 터졌다는 것을 지시해 준다.

## II. 백두산이 터지면, 과연 무슨 일이 일어날까?

백두산 화산 분화구에 형성된 천지는 표면적 9.82㎢, 최대수심 384m의 아름다운 칼데라호수이다. 천지를 둘러싼 외륜봉들은 영구동토로, 동토 아래 지열로 조금씩 녹은 지하수가 끊임없이 천지로 공급되는데, 북쪽으로 열린 장백폭포를 통해 천지 호수표면은 항상 해발 2,189m의 고도를 유지하고 있다. 이러한 특수한 지질 및 지형학적 특성을 가지고 있는 백두산에 화산폭발이 일어나면 어떤 일이 일어날까? 백두산 천지의 지형은 적어도 5번 이상의 화산분화가 있었음을 암시한다. 이는 유사시 백두산 화산폭발이 다양하게 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 특히 천지직하 천부에 위치한 유문암질 마그마방과 조면암질 마그마방, 그리고 심부의 현무암질 마그마방들이 배관구조로 연계되어 있어 분화 시나리오의 경우의 수는 더욱 복잡하며, 분화 규모나 강도, 장소, 형태, 계절, 심도 등에 따라 재해 발생이 크게 다를 수 있다. 여기서는 백두산에서 화산분화지수 5(서기 946년 백두산 천년대분화의 1%) 이상의 큰 분화가 발생할 때(이하 '유사시 대분화'), 어떤 일들이 초래될 수 있는지 대표적인 요인들에 대해서만 언급한다.

### 1. 화쇄류(pyroclastic flow)

상기하였듯이, 백두산과 같이 고점성질의 유문암질/조면암질 마그마는 매우 격렬한 폭발성 분화(Plinian type)를 초래한다. 분출물의 대부분은 성층권까지 올라가지만, 일부는 백두산의 급한 경사면을 따라 뜨거운 화쇄류가 특정 방향을 따라 고속(100-200㎞/h)으로 밀려 내려온다. 경사가 낮아지는 순상지에 다다르게 되면 화쇄류의 속도는 급격히 떨어지지만, 부채처럼 넓게 확산되기 때문에, 화산에서 최대한 멀리 피해야 한다.

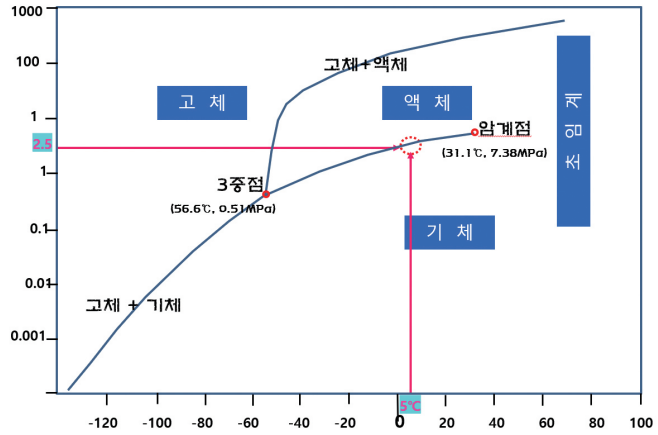
### 2. 라하류(lahar flow)

천지에는 약 2.1㎦(2.1조 리터, 21억 톤)의 엄청난 양의 물이 담겨있다. 특히 중요한 사실은, 백두산 화산체 계곡 사이에 이전의 화산분화 활동에 의해 두터운 비고화 화산 퇴적층으로 덮여있다는 것이다. 유사시 천지나 백두산 화산채 측면에서 폭발이 일어날 경우, 무너진 외륜봉 계곡 사이로 천지물이 한꺼번에 쏟아져 연약한 화산재층을 분해시켜 거대한 화산이류인 라하류가 급속도(~100㎞/h)로 쏟아져 내리면서 마침내 압록강이나 두만강, 혹은 송화강 등 기존의 수계로 합류한다. 이 과정에서 마을이 이류에 묻히고 댐이나 다리, 도로 등 기간시설은 철저히 파괴된다.

### 3. 화산가스

1986년 8월, 서아프리카 카메룬 니오스화산 호수지대에서 그 일대 1,746명의 주민과 3,500마리의 가축 등 무수한 동물들이 모두 질식사한 사건이 있다. 조사에 참여한 과학자들은 당시 홍수로 니오스호수(최대 수심 208m)의 칼데라 벽이 무너져 호수로 떨어졌는데, 호수 바닥에 가라앉아 있던 액상의 이산화탄소가 기화되어 호수 밖으로 넘쳐 주변 25㎞ 반경 일대가 약 100만 톤의 이산화탄소로 덮여버렸기 때문이라고 결론을 내렸다. 백두산 천지에는 일련의 열극을 따라 용출하는 백두온천(장군봉)과 백암온천(천문봉)이 있으며, 호수 아래에서 끊임없이 이산화탄소가스가 올라온다. 이산화탄소는 수증기 다음으로 많은 화산가스로 전체의 약 15%를 차지하며, 온도-압력 조건에 따라 쉽게 상변화를 한다. 천지호수는 약 2~3MPa의 수압을 받고 있으며, 4-5℃에서 액체와 기체의 중간 특성인 초임계유체 상태에 놓인다[그림 4]. 니오스호수의 용량은 0.15㎦로, 천지(2.1㎦)의 14분의 1에 불과하다. 1903년 이래로 120년동안 천지에서는 분화가 없었기 때문에, 천지 호수저에 대량의 이산화탄소가 액상화되어 가라앉아 있을 가능성이 있다. 만일 천지에서 유사시 화산분화가 발생한다면, 천지에서 1시간 이내에 50km 반경 내에 있는 귀중한 생명체의 질식사를 초래할 수 있다. 천지에 대한 본격적인 이산화탄소 탐사가 시급한 이유이다. 한편, 유사시 화산분화가 발생하면, 이산화탄소($CO_2$) 외에도 이산화황($SO_2$), 황화수소($H_2S$), 황(S), 일산화탄소(CO), 메탄($CH_4$), 염화수소(HCl), 불화수소(HF), 헬륨(He) 등 다량의 화산가스가 방출되어 생태계에 영향을 미친다.

[그림 4] 이산화탄소의 온도(횡축, ℃) 및 압력(종축, MPa)에 대한 상변화




### 4. 테프라

테프라는 화산활동으로 대기에 방출된 매질로 정의되며, 입자의 크기에 따라, 화산재/화산진(〈2㎜), 라필리(2-64㎜), 화산탄/화산괴(〉64㎜)로 구분된다. 백두산과 같이 점성질의 유문암질-조면암질 마그마가 주도하는 화산은 유사시 엄청난 양의 테프라를 방출한다. 특히 유사시 백두

산 화산재는 양강도-함경도-만주-연해주-동해를 지나 일본열도를 덮는다. 화산재는 얇은 유리 성분으로 일단 성층권으로 올라가면 공중에 떠서 태양 빛을 차단해 일시적으로 지구 대기의 온도를 떨어뜨리는 역할을 하는 반면, 항공기 엔진에 들러붙어 자칫 항공대란을 일으킬 수 있다(분화 규모가 6 이상일 경우, 지구촌 식량 작황 전반에 영향을 미칠 수 있음). 동해에 떨어진 화산재가 한류와 난류를 타고 동해안으로 이동할 수 있는데, 이 경우 항공엔진과 비슷한 원리로 원전용수 공급시스템에 치명적인 차질을 일으킬 수 있다. 또한 송전시설을 살짝 덮인 화산재에 비가 내리면, 합선을 일으켜 큰 손실을 입힌다. 역사서에 따르면, 백두산은 11세기 초(1014-1019년)와 15세기 초(1401-1405년)에 5년 가까이 일련의 단속적인 화산활동이 일어나기도 했다(윤성효, 2013).

한편 화산재와 화산가스는 독성을 갖는 미세먼지와 초미세먼지를 포함하기 때문에, 인체에 치명적인 호흡기 질환을 일으킨다. 화산재는 얇은 유리포로 날카로운 표면을 갖기 때문에, 일단 몸속에 들어오면 좀처럼 밖으로 배출되기 어렵다. 화산재가 식수원에 들어가 식수의 수질을 떨어뜨려 주민들에게 고통을 주며 생활의 질을 떨어뜨린다. 또한 화산재가 초목을 덮게 되면 초목을 먹이로 하는 초식동물들의 몸속에 축적되는 등 생태계 전반에 악영향을 미친다.

## Ⅲ. 천지 마그마의 현황과 초심도 융합연구의 중요성

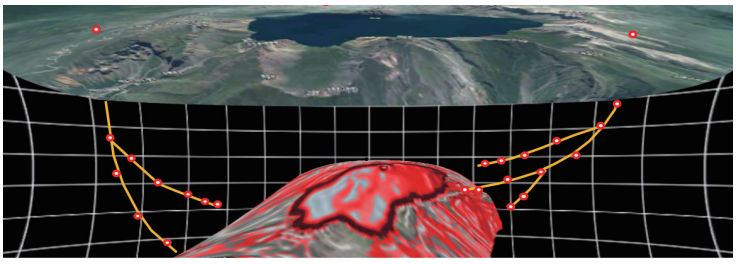
### 1. 백두산 마그마 어디에 있나?

백두산 마그마 위치와 분포를 직접 탐색하기 위한 어떠한 물리탐사도 북한 혹은 중국 당국의 협력과 UN의 승인이 없이는 불가능하다. 백두산 마그마 탐사는 1999년부터 중국지진국을 중심으로 탄성파탐사를 시도한 것이 처음으로, 중력탐사, MT탐사, 지진파토모그래피 등의 모델이 제안되었다(Zhang et al., 2002; Qiu et al., 2018; Yang et al., 2021; Guan et al., 2020). 북한은 2013-2015년 북·영·미 국제연구그룹이 북한쪽에서 지진파토모그래피 결과를 제시하였는데, 기존 중국에서의 탐사결과와 일치된다(Ri et al., 2016; Hammond et al., 2021).

천지직하에 있는 마그마는 북한과 중국 국경에 놓여 있다. 북중당국의 협력과 UN의 승인을 구한 경우, 북한과 중국을 통과하는 천지 탐사의 측선 확보가 필요하다[그림 5]. 더욱이 한정된

탐사 기간, 접근 조건, 장비 활용뿐만 아니라, 기존의 탐사 결과 해석을 검토할 수 있는 원시자료에 대한 접근도 한계가 있다. 결론적으로 기존의 지진파, MT 및 중력탐사 결과들로부터 구한 천지직하의 마그마(이하 M0)는 해발심도 5.4(±2.9)㎞~10.4(±4.6)㎞에 분포한다. 연구자에 따라서는 M0 아래에 2~3곳의 마그마방을 추가로 제시하고 있는데, 북한측 측선에서 상대적으로 뚜렷하지 않기 때문에 향후 검증을 위한 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.

[그림 5] 백두산 천지직하의 마그마(중앙 하부, 적색 부분) 및 마그마 거동 모니터링 융합연구(황색선: 초심도 과학시추공, 적색원: 초심도용 모니터링 장비 Array) 모식도(출처: MAGMAB)



한편, teleseismic 수신함수 분석 연구에 따르면, 백두산 천지직하 지각의 두께는 약 40㎞로 천지에서 수평길이 30㎞ 반경의 랜즈형으로 부풀어 있다(Hammond et al., 2021). 이는 주변 함경도 일대의 두께 35-36㎞에 비하여 4-5㎞ 정도 두꺼운 데, 이는 중국측 연구결과와 일치된다.

## 2. 2002-2005 백두산 화산징후 이벤트

10시 방향으로 운동하는 태평양판은 일본열도 아래로 연간 100㎜의 속도로 섭입 하강한다. 섭입된 태평양판은 동해를 지나 10시 방향으로 갈수록 점점 깊어지다가, 북·중·러 3국의 국경 부근에서 약 500-600㎞ 심도, 즉, 섭입판이 평평하게 꺾이는 지점에서 심발지진이 20년에 한 번꼴로 규모 7이상으로 발생한다. 지난 2002년 6월 29일, 북·중·러 국경 부근 심도 566㎞에서 규모 7.3의 심발지진이 발생했다. 공교롭게도 당해 7월부터 2005년 말까지 백두산 천지직하에서 일련의 화산징후 이벤트가 나타났다. 화산지진의 경우 3년 반 동안 총 8,000여 회의 화산지진이 해발심도 1-3㎞(천지직하 3-5㎞)에서 집중적으로 일어났다.

학자들간 이견이 있지만, 상기 심발지진의 저주파 성분이 천지직하 심도 5.4~10.4㎞에 위치했던 마그마(M0)를 흔들게 된 것으로 판단된다(이윤수, 2022). 직후 마그마(M0)에서의 응력변화로 화산가스가 발생하고 초임계유체의 활동이 활발해지면서, 마그마(M0)가 부력을 받아 천지를 향해 상승하게 되었다고 해석된다. 마그마(M0)가 상승하면, 화산가스로 포화된 고온의 초임계

유체가 천지직하 주변 지하수계를 활성화시키며, 주변암석에도 열적 스트레스(thermal stress)를 가하게 되는데, 이 현상이 바로 천지직하에서 발발한 화산지진인 것으로 해석된다.

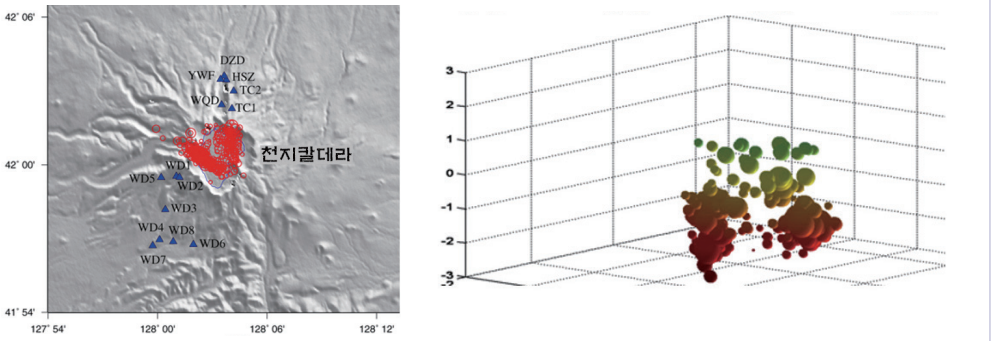
### 3. 백두산 화산 마그마 초심도 융합연구의 중요성

화산분화를 일으키는 본질은 마그마이다. 따라서 화산분화를 예측하는 지름길은 마그마의 활동을 초심도 과학시추를 통해 마그마 가까이 근접하고, 첨단 심부모니터링과 모델링을 통해 마그마의 작은 거동 변화와 상호작용 과정 및 결과를 직접 관찰하는 것이다[그림 6].

마그마는 성분-온도-압력에 따라 자유로이 상변화를 하며, 마그마의 점성, 탄성계수 등의 물성에 따라 다양한 거동 변화를 보인다. 주변 지각이나 맨틀, 그리고 이웃하는 마그마들과의 상호작용에 대한 지식과 경험이 중요하다. 특히 마그마의 양, 마그마방의 기하학적인 분포와 심도, 화산가스(주로 수증기)의 함량, 초임계유체의 상태 및 거동 등, 화산분화의 메커니즘은 매우 복잡하며, 오늘날 극한 지질학 최고의 난제를 포함한다(이윤수, 2022).

백두산 지표에서 화산지진, 지열과 지면경사 변화, 화산가스 등의 화산 징후를 꼼꼼히 감시하는 기존의 시스템을 구축하는 것은 매우 중요한 일이다. 이는 상기 화산분화 문제 해결에 반드시 필요하지만, 결코 충분하지는 않다. 현대 천문학의 혁명을 가져온 James Webb project와 같은 혁신적인 방법과 접근도 함께 필요하다. 국제사회의 다양한 이공학 관련 분야 전문가들이 협력하여, 백두산 화산 문제를 해결하고 검증하는 국제공동 융합연구(MAGMAB; Multidisciplinary Advanced research Group on Magma Activity in Baekdu)가 필요한 이유이다.

[그림 6] 2002-2005년 백두산 화산징후이벤트의 진원 도시((좌)2D 음영기복도, (우)3D 단면도, 수직단위는 해발심도(㎞))(출처: Liu et al., 2011)



## Ⅳ. 제언: 백두산 화산분화문제 해결을 위한 기상청의 역할

### 1. 관련분야 전문가 양성:

- 활화산 분화문제 해결 프로젝트의 핵심 중 핵심은 국제수준의 젊은 전문가 육성임
- 연구비 2억당 1인의 신진 연구자를 발굴, 교육, 훈련(활화산 연구현장 파견) 장려
- 국제공동연구(ICDP, IODP, 국제화산연구그룹 등)에 적극 참여 유도
- 연관 분야와의 협력연구 능력 확립
- 약 30여 개 관련 분야 전문가들과 소통하고 이끌 수 있는 리딩과학자 육성

### 2. 지속적 연구예산 확보

- 연구의 지속성은 국제공동에 참여하는 top-level의 해외전문가 확보의 기본조건
- 연구자들이 최대한 연구에 전념할 수 있는 시스템 구축
- 연구의 독립성 확보를 위해 백두산 전문 사업단 등 고려

### 3. 정책적 지원

- 백두산 남북공동연구를 정책적 차원에서 적극 추진
- 백두산 첨단융합연구 과학기지 설계 TFT 구성
- 대관업무 및 감사 전담위원 확보
- 통일부: 대북접촉, 전략장비 승인절차, 남북공동연구시 문제 해결 등
- 외교부: 유엔 안보리 대북제재위원회, 인도적 차원 협력, 국제공동연구 협력 등
- 과기부, 행안부 등과 협업, 관계, 대처 등 설정

### 참고문헌

윤성효, 2013: 백두산의 역사시대 분화기록에 대한 화산학적 해석. 지구과학회지, 34, 456-469.

이윤수, 2022: [긴급 점검] 제7차 북핵실험, 과연 백두산은 안전할까? KBS 재난포털. 전문가 기고. https://d.kbs.co.kr/prepare/column.

Guan, Y.W., Choi, S.C., Yang, G.D., Liu, J.Q., Lee, Y.S., Oh, C.W., Jin, X., Wu, Y.G., 2020: Changbaishan Tianchi volcano crustal magma chambers modeling with gravity profile. Acta Petrologica Sinica, 36(12), 3840-3852.

Hammond, J., Wu, J.-P., Ri, K.-S., Wei, W., Yu, J.-N., & Oppenheimer, C., 2020: Distribution of partial melt beneath Changbaishan/Paektu volcano, China/Democratic People's Republic of Korea. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21, e2019GC008461.

Lee, Y.S., Han, H.-C., Hwang, J.-H., Kee, W.-S., Kim, B.C., 2011, Evidence for significant clockwise rotations of the Korean Peninsula during Cretaceous. Gondwana Research. v.20, 904-918. doi:10.1016/j.gr.2011.05.002.

Lee, Y.S., Nishimura,S., and Min,K.D., 1999a: The Phanerozoic Apparent Polar Wander Path for the Korean Peninsula and its tectonic implication, Gondwana dispersion and Asian accretion, Edited by I. Metcalfe, A.A.Balkema pub. Co., Rotterdam, p.197-209.

Lee, Y.S.., Ishikawa, N., and Kim, W.K., 1999b: Paleomagnetism from the Tertiary rocks in Korean Peninsula: tectonic implications for the East Sea, Tectonophysics, v.304, p.131-149.

Ri, K.-S., Hammond, J., Ko, C.-N., Kim. H., Yun. Y.-G., Pak, G.-J., Ri, C.-S., Oppenheimer, C., Liu, K., Iacovino, K., Ryu, K.-R., 2016: Evidence for partial melt in the crust beneath Mt. Paektu (Changbaishan), Democratic People's Republic of Korea and China. Sci. Adv., 10.1126/sciadv.1501513.

Liu, G., Yang, J., Wang, L., and Sun, J., 2011: The active level analysis of Changbaishan volcano, in China National Report on Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, for the 25th General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 28 June - 7 July 2011 (prepared by the Chinese National Committee for the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI)), pgs. 19-43.

Qiu, G., Fang, H., Zhang, J., Pei, F., Lv, Q., Peng, Y., 2018: Electrical Resistivity Structure of Changbai Volcanic Mountain: Results from Magnetotelluric Exploration Methods. In Proceedings of the International Workshop on Environment and Geoscience (IWEG 2018), pages 344-352.

Yang, B., Lin, W., Hu, X., Fang, H., Qiu, G., Qang, G., 2021: The magma system beneath Changbaishan-Tianchi Volcano, China/North Korea: Constraints from three-dimensional magnetotelluric imaging. J. Vol. & Geother. Res. 419, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107385.

Wei, H., Liu, G., Gill, J., 2013: Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions. Bull. Volcanol. 75, 706 (2013). https://doi.org/10.1007/s00445-013-0706-5.

Zhang, X.K., Zhang, C.K., Zhao,.R., Yang, Z.X., Li, S.L., Zhang, J.S., Liu, B.F., Cheng, S.X., Sun, G.W., Pan, S.Z., 2002: Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan Tianchi volcanic region. Acta Seismologica Sinica, 24(2), 135-143.

Zhang, M., Guo, Z., Liu, J., Liu, G., Zhang, L., Lei, M., Zhao, W., Ma, L., Sepe, V., and Ventura, G., 2018: The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): A review on eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamics and potential hazards. Earth Sci. Rev. 187, 19-52.

# 기상기술정책지 발간 목록

## 창간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할 | 권원태 | 3-11 |
| 정책초점 | • 기후변화감시 발전 방향 | 김진석 | 12-18 |
| | • 미국의 기상위성 개발현황과 향후전망 | 안명환 | 19-38 |
| | • 기상산업의 위상과 성장가능성 | 김준모 | 39-45 |
| | • 최적 일사 관측망 구축방안 | 이규태 | 46-57 |
| | • 국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의 | 김백조, 김경립 | 58-61 |
| 논 단 | • A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities | L.S. Kalkstein, S.C. Sheridan, Y.C.Au | 62-68 |
| 해외기술동향 | • 프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술 | 김상우 | 69-79 |
| | • 일본의 우주기상 기술 | 김지영, 신승숙 | 80-84 |


## 기상산업의 현황과 전략, 제1권 제2호(통권 제2호), 2008년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기후변화시대, 기상산업 발전상 | 봉종헌 | 1-3 |
| 정책초점 | • 기상산업의 중요성과 전략적 위치 | 이중우 | 5-13 |
| | • 기후변화가 산업에 미치는 경제적 영향과 적응대책 | 한기주 | 14-22 |
| | • 기후경제학의 대두와 대응 전략 | 임상수 | 23-33 |
| | • 기후변화와 신재생에너지 산업 | 구영덕 | 34-45 |
| | • 기상산업 육성을 위한 정책대안 모색 | 김준모, 이기식 | 46-54 |
| | • 미국 남동부의 응용기상산업 현황 | 임영권 | 55-64 |
| | • 최근 황사의 특성 및 산업에 미치는 영향 | 김지영 | 65-70 |
| 논 단 | • A brief introduction to the European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST) | Radan Huth | 71-81 |
| | • 우주환경의 현황과 전망 | 안병호 | 82-92 |
| 해외기술동향 | • 유럽의 기후변화 시나리오 불확실성 평가 : EU(유럽연합) 기후변화 프로젝트를 중심으로 | 임은순 | 93-103 |
| | • 미국 NOAA의 지구 감시 현황 | 전영신 | 104-107 |


## 항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기상 관측·연구용 항공기 도입과 활용 | 정순갑 | 1-4 |
| 정책초점 | • 무인항공기 개발 현황 및 응용 방안 | 오수훈, 구삼옥 | 6-18 |
| | • 해외 기상관측용 항공기 운영 및 활용 실태 | 김금란, 장기호 | 19-34 |
| | • 항공기를 이용한 대기물리 관측 체계 수립 방안 | 오성남 | 35-45 |
| | • 효과적인 항공기 유지 관리 방안 | 김영철 | 46-56 |
| | • 공군에서의 항공관측 현황과 전망 | 김종석 | 57-66 |
| | • 항공기를 이용한 대기환경 감시 | 김정수 | 67-74 |
| | • 항공/위성 정보를 활용한 재해 피해 조사 | 최우정, 심재현 | 75-84 |
| 논 단 | • 유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시 | 윤순창, 김지영 | 85-93 |
| 해외기술동향 | • 미국의 첨단 기상관측 항공기(HIAPER) 운영 현황 | 김지영, 박소연 | 94-99 |
| | • 미국의 탄소 추적자 시스템 개발 현황 및 전략 | 조천호 | 100-108 |
| | • 미국의 우주기상 예보와 발전 방향 | 곽영실 | 109-117 |
| 뉴스 포커스 | • 한국, IPCC 부의장국에 진출 | 허 은 | 118-119 |

# 기상기술정책지 발간 목록

## 전지구관측시스템 구축과 활용, 제1권 제4호(통권 제4호), 2008년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 전지구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성 | 정순갑 | 1-4 |
| 정책초점 | • GEO/GEOSS 현황과 추진 계획 | 엄원근 | 6-21 |
| | • GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안 | 김병수 | 22-31 |
| | • GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안 | 허 은 | 32-39 |
| | • 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안 | 신동철 | 40-41 |
| | – 재해 분야 | 박덕근 | 42-44 |
| | – 보건 분야 | 이희일 | 45-47 |
| | – 에너지자원 분야 | 황재홍, 이사로 | 48-50 |
| | – 기상 및 기후 분야 | 이병렬 | 51-53 |
| | – 수문 및 수자원 분야 | 조효섭 | 54-56 |
| | – 생태계와 생물다양성 분야 | 장임석 | 57-58 |
| | – 농업 분야 | 이정택 | 59-62 |
| | – 해양 분야 | 김태동 | 63-67 |
| | – 우주 분야 | 김용승, 박종욱 | 68-71 |
| 논 단 | • Taking GEOSS to the nest level | José Achache | 72-75 |
| 해외기술동향 | • GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향 | 강용성 | 76-83 |
| | • 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황 | 이경미 | 84-95 |
| 뉴스 포커스 | • 한국, GEO 집행 이사국 진출 | 이용섭 | 96-97 |


## 기상장비의 녹색산업화 전략, 제2권 제1호(통권 제5호), 2009년 3월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향 | 전병성 | 1-2 |
| 정책초점 | • 기상장비의 산업여건과 국산화 전략 | 김상조 | 4-13 |
| | • 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략 | 이종국 | 14-21 |
| | • 기상레이더 국산화 추진 방안 | 장기호, 석미경, 김정희 | 22-29 |
| | • 기상라이더의 상용화 현황과 육성 방안 | 조성주 | 30-41 |
| | • 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향 | 이부용 | 42-51 |
| 논 단 | • 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언 | 이규원 | 52-72 |
| 해외기술동향 | • 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로 | 방기석 | 73-80 |
| | • 세계의 기상장비 및 신기술 동향 | 김지영, 박소연 | 81-89 |


## 기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향 | 전병성 | 1-2 |
| 정책초점 | • 기후변화와 물환경정책 | 김영훈 | 4-15 |
| | • 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향 | 노재화 | 16-27 |
| | • 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰 | 김문모, 정창삼, 여운광, 심재현 | 28-37 |
| | • 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안 | 문영일, 오태석 | 38-50 |
| | • 수문기상학적 기후변화 추세 | 강부식 | 51-64 |
| | • 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책 | 배덕효 | 65-77 |
| | • 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안 | 차기욱 | 78-89 |
| 논 단 | • 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안 | 양용석 | 90-110 |
| 해외기술동향 | • 미국의 기상-수자원 연계기술 동향 | 정창삼 | 111-121 |
| | • NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황 | 김지영·박소연 | 122-131 |
| | • 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기 | 김용상 | 132-140 |

# 기상기술정책지 발간 목록

## 기상·기후변화와 경제, 제2권 제3호(통권 제7호), 2009년 9월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향 | 전병성 | 1-2 |
| 정책초점 | • 기후변화에 따른 에너지정책 | 박현종 | 4-18 |
| | • 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향 | 박종현 | 19-29 |
| | • 기후변화가 농업경제에 미치는 영향 | 김창길 | 30-42 |
| | • 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정 | 김정인 | 43-52 |
| | • 기상산업 활성화와 과제 | 이만기 | 53-59 |
| | • 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언 | 김동식 | 60-69 |
| 논 단 | • 기후변화와 새로운 시장 | 이명균 | 70-78 |
| 해외기술동향 | • 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정 | 김지영 | 79-85 |
| | • 강수의 경제적 가치 평가 방법론 | 유승훈 | 86-96 |
| 뉴스 포커스 | • 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기 | 이영곤 | 97-103 |


## 날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 날씨공감포럼의 의의와 발전방향 | 전병성 | 1-2 |
| 정책초점 | • [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향 | 고상백 | 4-19 |
| | • [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향 | 이재학 | 20-29 |
| | • [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안 | 차두송 | 30-41 |
| | • [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향 | 김의근 | 42-50 |
| | • [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성 | 조명희, 조윤원, 김성재 | 51-60 |
| | • [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성 | 김정배 | 61-72 |
| | • [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안 | 김명주 | 73-88 |
| 논 단 | • 국민과의 '소통' – 어떻게 할 것인가? | 김연종 | 89-97 |
| 뉴스 포커스 | • 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기 | 김정윤 | 98-101 |


## 기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책 | 박광준 | 1-2 |
| 정책초점 | • 기상이변의 경제학 | 이지훈 | 4-11 |
| | • 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고 | 한기주 | 12-21 |
| | • 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언 | 이종인 | 22-32 |
| | • 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향 | 이상현, 정상기, 이상훈 | 33-45 |
| | • 기후변화와 건설 산업 | 강운산 | 46-56 |
| | • 코펜하겐 어코드와 탄소시장 | 노종환 | 57-66 |
| | • 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영 | 이서원 | 67-77 |
| | • 이산화탄소($CO_2$) 저감기술 개발동향: DME 제조기술 | 조원준 | 78-84 |
| 논 단 | • 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로 | 양용석 | 85-99 |
| | • 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임 | 김창섭 | 100-109 |
| 뉴스 포커스 | • 기후변화미래포럼 개최 후기 | 김정윤 | 110-115 |

# 기상기술정책지 발간 목록

## 국가 기후정보 제공 및 활용 방안, 제3권 제2호(통권 제10호), 2010년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 국가기후자료 관리의 중요성 | 켄 크로포드 | 1-2 |
| 정책초점 | • 기후변화통합영향평가에대한 국가기후정보의 역할 | 전성우 | 4-11 |
| | • 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안 | 권영아 | 12-22 |
| | • 기상정보의 농업적 활용과 전망 | 심교문 | 23-32 |
| | • 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스 | 원명수 | 33-45 |
| | • 경기도의 기상·기후정보 활용 | 김동영 | 46-57 |
| | • 국가기본풍속지도의 필요성 | 권순덕 | 58-62 |
| | • 국가기후자료센터 구축과 기상산업 활성화 | 김병선 | 63-74 |
| | • 국가기후자료센터 설립과 민간의 역할 분담 | 나성준 | 75-83 |
| | • 가치있는 기후정보 | 김윤태, 정도준 | 84-99 |
| 논 단 | • 기상청 기후자료 활용 증대 방안에 관한 제언 | 최영은 | 100-110 |
| 뉴스 포커스 | • 국가기후자료센터의 역할 | 임용한 | 111-119 |


## 장기예보 정보의 사회경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 장기예보 투자 확대해야 | 박정규 | 1-2 |
| 정책초점 | • 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용 | 정응수 | 4-15 |
| | • 기상 장기예보에 대한 소고 | 박창선 | 16-23 |
| | • 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용 | 손미영 | 24-33 |
| | • 장기예보의 사회·경제적 가치와 서비스 활성화 방안 | 김동식 | 34-43 |
| | • 기상 장기예보의 농업적 가치와 활용 | 한점화 | 44-53 |
| | • 장기예보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용 | 우수민, 김태국 | 54-64 |
| | • 기상예보와 재해관리 | 박종윤, 신영섭 | 65-81 |
| | • 장기예보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래 | 김지영, 이현수 | 82-89 |
| 해외기술동향 | • 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후 영향에 관한 서비스 현황 | 조경숙 | 90-101 |
| | • WMO 장기예보 다중모델 앙상블 선도센터(WMO LC-LRFMME) | 윤원태 | 102-106 |
| 뉴스 포커스 | • 영국기상청과의 계절예측시스템 공동 운영 협정 체결 | 이예숙 | 107-109 |


## 사회가 요구하는 미래기상서비스의 모습, 제3권 제4호(통권 제12호), 2010년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 시대의 요구에 부응하는 기상·기후서비스 | 권원태 | 1-3 |
| 정책초점 | • 기상학의 역사 | 윤일희 | 6-16 |
| | • 지질학에서 본 기후변동의 과거, 현재, 그리고 미래 | 이용일 | 17-29 |
| | • 예보기술의 성장 촉진을 위한 광각렌즈 | 변희룡 | 30-44 |
| | • 전쟁과 기상 | 반기성 | 45-55 |
| | • 날씨와 선거 | 유현종 | 56-64 |
| | • 기후변화와 문학 | 신문수 | 65-74 |
| | • 기후변화와 문화 I (문명의 시작과 유럽문명을 중심으로) | 오성남 | 75-87 |
| | • 비타민 D의 새로운 조명 | 김상완 | 88-96 |
| | • G20서울정상회담과 경호기상정보 생산을 위한 기상청의 역할 | 이선제 | 97-105 |
| 논 단 | • 기상정보의 축적과 유통 활성화를 통한 국부 창출 | 김영신 | 106-115 |
| | • 날씨의 심리학 | 최창호 | 116-122 |
| 해외기술동향 | • 기상정보의 사회·경제적 평가에 관한 해외동향 | 김정윤, 김인겸 | 123-130 |

# 기상기술정책지 발간 목록

## 신규 시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안, 제4권 제1호(통권 제13호), 2011년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 발 간 사 | • G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향 | 조석준 | 1-3 |
| 칼 럼 | • 대학과 공공연구소의 기상기술 이전 활성화 및 사업화 촉진을 위한 기술이전센터(TLO) 발전 방안 | 박종복 | 4-13 |
| | • 새로운 기상산업 시장창출과 연계된 금융시장 활성화에 대한 소고 – 보험산업의 입장에서 | 조재린, 황진태 | 14-23 |
| 정책초점 | • 신규 기상시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안 연구 | 국립기상연구소 정책연구과 | 26-63 |


## 도시기상관측 선진화방안, 제4권 제2호(통권 제14호), 2011년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 발 간 사 | • 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다. | 조석준 | 1-3 |
| 칼 럼 | • 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래 | 최광용 | 6-18 |
| | • 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안 | 박민규, 이석민 | 19-30 |
| | • 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안 | 김해동 | 31-42 |
| | • 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계 | 이순환 | 43-50 |
| | • 도시 기상 관측 연구 현황 | 박영산 | 51-62 |
| 정책초점 | • 도시기상 관측 선진화 방안 연구 | 이영곤 | 64-73 |


## 원격탐측기술(레이더, 위성, 고층) 융합정책 실용화 방안, 제5권 제1호(통권 제15호), 2012년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 원격탐측의 융합정책과 기상자원 가치 확산 | Kenneth Crawford | 3-8 |
| 정책초점 | • 레이더-위성 융합 강수정보 생산 기술 | 신동빈 | 10-18 |
| | • 위성과 첨단기술 융합을 통한 미래 기상서비스 발전 방향 | 은종원 | 19-27 |
| | • 라이다 관측기술 활용 방안 | 김덕현 | 28-41 |
| | • 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책 | 배덕효, 이병주 | 42-53 |
| | • 위성자료의 해양 환경감시 활용 | 황재동 | 54-65 |
| 논 단 | • 우리나라의 융합기술발전 정책 방향 | 이상현 | 66-72 |
| 해외기술동향 | • 일본의 원격탐사 활용 및 융합정책 | 윤보열, 장희욱, 임효숙 | 73-85 |
| 포 커 스 | • 레이더 융합행정 포럼 : 레이더운영과 | 송원화 | 86-93 |


## 해양기상서비스의 현황 및 전망, 제5권 제2호(통권 제16호), 2012년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 해양기상서비스의 의미 및 가치 확산 | 박관영 | 3-7 |
| 정책초점 | • 해양기상 융합서비스의 필요성 | 김민수 | 10-20 |
| | • 수자원 변동에 따른 해양기상서비스의 강화 | 김희용 | 21-29 |
| | • 해양기상정보 관리의 선진화 방안 | 정일영 | 30-39 |
| | • 해양기상·기후변화 대응을 위한 정책제언 | 양홍근 | 40-47 |
| 논 단 | • 해양기상서비스 현황과 정책 방향 | 김유근 | 48-57 |
| 해외기술동향 | • 선진 해양기상기술 동향 | 우승범 | 58-67 |
| 포 커 스 | • 제4차 WMO/IOC 해양학 및 해양기상 합동기술위원회(JCOMM) 총회 | 해양기상과 | 68-73 |

# 기상기술정책지 발간 목록


| 국민의 행복 증진을 위한 "기상기후서비스 3.0", 제6권 제1호(통권 제17호), 2013년 6월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 국민이 원하는 기상기후서비스 | 이일수 | 3-4 |
| 정책초점 | • 기상기후분야 과학과 서비스 발전 방향 | 전종갑 | 6-14 |
| | • 지진조기경보 역량 강화를 위한 정책적 제언 | 최호선 | 15-30 |
| | • 기상기후 서비스 혁신을 위한 기술경영 전략 | 박선영 | 31-47 |
| | • 자연재해 대응 서비스 기술 및 정책변화 | 허종완, 손홍민 | 48-59 |
| 논 단 | • 수요자 맞춤형 서비스를 위한 기상기술 고도화 방안 | 김영준 | 60-72 |
| 포 커 스 | • 국민행복서비스 포럼 개최 후기 | 국립기상연구소 정책연구과 | 73-78 |

| 빅데이터 활용 기상융합서비스, 제6권 제2호(통권 제18호), 2013년 12월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 정부3.0에 따른 기상기후 빅데이터 활용 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • [정책] 정부3.0 지원을 위한 빅데이터 융합전략 | 안문석 | 6-13 |
| | • [정보] 스마트국가 구현을 위한 빅데이터 활용방안 | 김현곤 | 14-31 |
| | • [서비스] 빅데이터 분석 기반 기상예보의 신뢰도 향상 방안 | 이기광 | 32-46 |
| | • [경영] 빅데이터 기반 날씨경영 성과 제고 방안 – 공항기상정보 활용사례 – | 방기석 | 47-58 |
| | • [농업] 기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략 | 김창길, 정지훈 | 59-76 |
| | • [재난] 재난관리의 새로운 해결방안, 빅데이터 | 최선화, 김진영, 이종국 | 77-87 |
| 논 단 | • 기상기후데이터를 품은 빅데이터 | 이재원 | 88-97 |
| | • 한국형 복지국가의 전략적 방향성안 | 안상훈 | 98-111 |

| 기상기후 빅데이터와 경제, 제7권 제1호(통권 제19호), 2014년 6월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기상기후 빅데이터를 활용한 날씨경영 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 기상기후정보의 사회경제적 역할 | 안중배 | 6-11 |
| | • 미래 재난재해 해결을 위한 기상기후 서비스 | 김도우, 정재학 | 12-19 |
| | • 빅데이터의 사회경제적 파급효과 | 김진화 | 20-30 |
| | • 기상기후 빅데이터의 산업경영 활용과 전략 | 김정인 | 31-41 |
| | • 기상기후 빅데이터 기반 기상산업육성 | 송근용 | 42-56 |
| 논 단 | • 빅데이터 기반의 미래 산업 | 황종성 | 57-71 |
| | • 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구 | 이성종 | 72-77 |
| 포 커 스 | • 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용 | 국립기상연구소 정책연구과 | 78-93 |

| 위성 기술과 활용, 제7권 제2호(통권 제20호), 2014년 12월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 위성을 활용한 전 지구적 관측 방안 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 기상위성 운영기술의 선진화 방안 | 김방엽 | 6-15 |
| | • 관측위성기술의 현황 및 전망 | 김병진 | 16-24 |
| | • 연구개발용 위성의 현업 활용성 제고 방안 | 안명환 | 25-43 |
| | • 위성을 이용한 국가재난감시 체계 구축 | 윤보열, 염종민, 한경수 | 44-56 |
| | • 위성영상서비스 시장 빅뱅과 새로운 관점 | 조황희 | 57-67 |
| 논 단 | • 우주기상의 연구 현황 및 발전 방향 | 김용하 | 68-81 |
| 해외기술동향 | • 기상위성 기술·정책 정보 동향 | 국가기상위성센터 위성기획과 | 82-92 |
| | • 위성기반 작전기상 소개 | 안숙희, 김백조 | 93-100 |

# 기상기술정책지 발간 목록


| 장마의 사회경제적 영향, 제8권 제1호(통권 제21호), 2015년 6월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 장마와 날씨경영 | 고윤화 | 3-5 |
| 정책초점 | • 수자원 확보에 있어서 장마의 역할 | 박정수 | 8-16 |
| | • 장마가 농업생산에 미치는 영향 | 최지현 | 17-24 |
| | • 장마의 변동성과 예측성 향상 | 서경환 | 25-30 |
| | • 장마기간 유통산업 영향 및 전략 | 김정윤 | 31-40 |
| | • 장마철 유의해야할 건강 상식 | 이준석 | 41-51 |
| 논 단 | • 장마-몬순 예측기술 향상 방안 | 하경자 | 52-59 |
| 해외기술동향 | • 동아시아 여름강수 예측기술 현황 | 권민호 | 60-65 |

| 겨울철 위험기상의 영향과 대응, 제8권 제2호(통권 제22호), 2015년 12월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 겨울철 위험기상 예보의 중요성 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책 | 김두천 | 6-17 |
| | • 한국의 동절기 도로제설 현황 | 양충헌 | 18-29 |
| | • 한파가 농업에 미치는 영향 | 심교문 | 30-41 |
| | • 겨울철 한파 대비 건강관리 | 송경준 | 42-56 |
| 논 단 | • 겨울철 위험기상의 예측능력 향상 | 김주홍 | 57-68 |
| | • 미래 겨울철 위험기상의 변화 | 차동현 | 69-75 |

| 영향예보의 현황 및 응용, 제9권 제1호(통권 제23호), 2016년 6월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 영향예보를 통한 기상재해 리스크 경감 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 영향예보 비전과 추진 방향 | 정관영 | 6-22 |
| | • 재해기상 영향예보시스템 현황 소개 | 최병철 | 23-31 |
| | • 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향 | 김동준 | 32-40 |
| | • 영향예보를 위한 수문기상정보 지원 | 이은정 | 41-51 |
| 논 단 | • 재해영향예보의 효과 | 손철, 김건후 | 52-63 |
| 포 커 스 | • 확률 예보를 위한 앙상블예측 기술 소개 및 현황 | 강지순 | 64-74 |

| 인공지능을 접목한 기상 분야 활용, 제9권 제2호(통권 제24호), 2016년 12월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기상서비스를 변화시키는 인공지능 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 인공지능의 발달이 몰고 오는 변화상 | 진석용 | 6-20 |
| | • 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신 | 최혜봉 | 21-30 |
| | • 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은? | 구본권 | 31-50 |
| | • 인공지능의 기상정책 개발 활용 | 국립기상과학원 | 51-63 |
| 논 단 | • 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보 | 고한석 | 64-77 |

# 기상기술정책지 발간 목록

## 영향예보 서비스 확대, 제10권 제1호(통권 제25호), 2017년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 영향예보 서비스 개발과 활성화 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 영향예보 서비스 확대를 위한 제언 | 예상욱 | 6-17 |
| | • 교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용 | 손영태 | 18-30 |
| | • 태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보 | 이은주 | 31-40 |
| | • 기상, 기후 그리고 숲과 사람 | 박주원 | 41-55 |
| | • KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개 | 조민수 | 56-70 |
| 논 단 | • 기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보 | 최진용, 홍민기, 이성학, 이승재 | 71-81 |
| | • 화재 기상예보 서비스 | 류정우, 권성필 | 82-92 |
| 포 커 스 | • 오픈데이터와 일본기상비즈니스 컨소시엄 | 정효정 | 93-107 |


## 4차 산업혁명과 미래 기상기술, 제10권 제2호(통권 제26호), 2017년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기후변화 저감을 위한 미래 기상기술 | 남재철 | 3-4 |
| 정책초점 | • 4차 산업혁명과 미래 기후변화 대응기술 | 김형주 | 6-15 |
| | • 4차 산업혁명 시대의 기후변화 대응 | 채여라 | 16-25 |
| | • 인공지능 기술 발전을 위한 제도 및 정책 | 김윤정 | 26-43 |
| | • 기후변화 대응을 위한 에너지 정책 | 전재완 | 44-54 |
| 논 단 | • 기후변화에 대응하기 위한 농업과 과학기술의 융합 | 이현숙 | 55-65 |
| 포 커 스 | • 4차 산업혁명과 미래 전문직 | 윤상후 | 66-73 |


## 여름철 위험기상의 영향과 대응, 제11권 제1호(통권 제27호), 2018년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 국민의 안전을 위협하는 여름철 폭염과 대응 | 남재철 | 3-4 |
| 정책초점 | • 기후변화로 심화되는 폭염 대응을 위한 경보체계의 개발 | 이명인 | 6-18 |
| | • 재난정보관리 표준화 기술 개발 | 김병식 | 19-34 |
| | • 지표홍반자외선정보 제공 및 향후 대응 | 박상서 | 35-43 |
| | • 스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할 | 권용석 | 44-53 |
| | • 인공지능을 활용한 재해기상 저감·예측 기술 | 김동훈 | 54-69 |
| 논 단 | • 미래 여름철 기온변화에 의한 건강영향 예측 | 이재영, 김호 | 70-77 |
| 포 커 스 | • 폭염 피해와 정책 동향 | 김도우 | 78-85 |


## 기상정보 활용 확대와 기상청의 역할, 제12권 제1호(통권 제28호), 2019년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 날씨, 국민 생활의 시작과 끝 | 김종석 | 3-4 |
| 정책초점 | • 기상조건에 따른 이동수요의 변화 | 이재호, 전재영 | 6-14 |
| | • 기상데이터로 알려주는 국민건강 알람서비스 | 한성욱, 전예슬 | 15-23 |
| | • 신재생에너지 발전량 예측에서의 기상정보 활용 | 이영미, 박다빈 | 24-32 |
| | • ICT수목원과 기상기술 | 이상용 | 33-43 |
| | • 기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향과 대응 | 문경환 | 44-57 |
| | • 4차 산업혁명 기술을 활용한 친환경 건축/도시 설계 기술 | 이호영 | 58-69 |
| | • 실시간 수(水)재해 예측을 위한 기상정보 활용 방안 | 이병주 | 70-80 |
| 포 커 스 | • 복합재난대응 연구사례 중 도심지 침수 현상을 중심으로 | 백용, 이동섭, 김형준 | 81-87 |

# 기상기술정책지 발간 목록


| 겨울철 위험기상의 사회경제적 영향, 제12권 제2호(통권 제29호), 2019년 12월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 겨울철 안심사회 건설과 기상청의 기여 | 김종석 | 3-4 |
| 정책초점 | • 도로에서의 기상정보 활용 및 시스템 구축 사례 | 윤덕근 | 6-16 |
| | • 정확한 산불위험 예보를 위한 노력 | 이병두 | 17-24 |
| | • 기해년 4월 산불 이후, 「산불극복 뉴딜 전략」 제안 | 김경남 | 25-39 |
| | • 미세먼지 개선을 위한 국가 정책 및 기술 방향 | 심창섭 | 40-48 |
| | • 2019년 겨울철 대설·한파 종합대책 | 최병진 | 49-59 |
| | • 건강한 겨울나기, 겨울철 질환에 대한 예방 및 대응 | 임도선 | 60-68 |
| 논 단 | • 서울시 미세먼지 저감정책의 효과: 차량 배출량 관점 | 허창회 | 69-80 |

| 중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응, 제13권 제1호(통권 제30호), 2020년 6월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다 | 김종석 | 3-4 |
| 정책초점 | • 코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측 | 홍진규 | 6-23 |
| | • 도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합 | 황석환, 이동률 | 24-40 |
| | • 기후변화 대응과 소하천 계측기술 | 정태성 | 41-52 |
| 논 단 | • 돌발 기상 예보와 과제 | 이우진 | 53-65 |
| | • 중규모 대류계의 예측 | 이동규 | 66-79 |
| | • 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단 | 손병주 | 80-90 |
| | • 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언 | 이규원 | 91-105 |
| 포 커 스 | • 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험 | 이보영 | 106-112 |

| 유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황, 제13권 제2호(통권 제31호), 2020년 12월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다 | 박광석 | 3-4 |
| 정책초점 | • 국립해양조사원 해양예보서비스 현황 | 이준식 | 6-16 |
| | • 동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템 | 신충훈 | 17-31 |
| | • 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언 | 경기원 | 32-43 |
| | • 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용 | 권오순 | 44-54 |
| | • 국가대기오염측정망 운영과 명예대기관리원 제도 | 박지해 | 55-63 |
| | • 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측 | 손성원 | 64-72 |
| | • 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측기술 | 홍석영 | 73-86 |
| | • 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황 | 현명숙 | 87-98 |

| 미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책, 제14권 제1호(통권 제32호), 2021년 6월 | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 '기상정보' | 박광석 | 3-4 |
| 정책초점 | • 도심항공교통을 위한 기상관측 제언 | 이규원 | 6-19 |
| | • 도심항공기상을 위한 중미기상학 | 강성락 | 20-31 |
| | • 안전한 UAM을 향한 제언 | 홍진규 | 32-41 |
| | • 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템 | 박문수 | 42-55 |
| 논 단 | • K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용 | 김재진 | 56-66 |
| 포 커 스 | • UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언 | 구성관 | 67-76 |

# 기상기술정책지 발간 목록

## 2050 탄소중립 대응 전략, 제14권 제2호(통권 제33호), 2021년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 탄소중립을 위한 청량음료 한 모금 | 박광석 | 3-4 |
| 정책초점 | • 2050년 탄소중립 달성 전략 | 노동운 | 6-18 |
| | • 2050 탄소중립 추진전략(에너지기술) | 김현구 | 19-25 |
| | • '2050 탄소중립'과 기후변화 과학 | 전의찬 | 26-32 |
| | • 탄소중립 이행을 위한 신재생에너지 발전 분야의 이음새 없는(Seamless) 기후예측정보의 활용 제언 | 오지현 | 33-44 |
| | • 2050 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할 | 이동근 | 45-55 |
| | • 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리 | 이우균 | 56-65 |
| 포 커 스 | • 기후위기 극복을 위한 탄소중립과 기후변화 적응 | 박진한 | 66-74 |


## 기상특보의 사회경제적 효과, 제15권 제1호(통권 제34호), 2022년 6월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 기상재해 리스크 경감을 위한 기상청의 도전 | 유희동 | 3-4 |
| 정책초점 | • 폭염특보 현황 및 선진화 | 이명인 | 6-20 |
| | • 폭염과 건강영향, 그리고 대응정책 | 홍윤철 | 21-29 |
| | • 폭염(열파)이 국민 건강에 미치는 영향을 고려한 폭염특보 개선 방향 제언 | 최광용 | 30-41 |
| | • 호우특보와 재난관리 | 조재웅 | 42-54 |
| | • 도시 기후변화 재해취약성분석 제도의 이해와 기상분야 과제 | 권용석 | 55-62 |
| 논 단 | • 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안 | 문일주 | 63-73 |
| 포 커 스 | • 자연재난에 안전한 지자체 구축을 위한 기상특보의 활용 | 허종배 | 74-83 |


## 지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향, 제15권 제2호(통권 제35호), 2022년 12월


| | | | |
|---|---|---|---|
| 칼 럼 | • 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다 | 유희동 | 3-4 |
| 정책초점 | • 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측 | 이준기 | 6-16 |
| | • 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진 | 김광희 | 17-25 |
| | • 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제 | 손상영 | 26-42 |
| | • 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언 | 신성원 | 43-55 |
| | • 화산기술과 화산특화연구센터 | 윤성효 | 56-70 |
| 포 커 스 | • 백두산 화산 재해 | 이윤수 | 71-81 |

# 『기상기술정책』 투고 안내

## 투고방법

1. 본 정책지는 기상기술 분야와 관련된 정책적 이슈나 최신 기술정보 동향을 다룬 글을 게재하며, 투고된 원고는 다른 간행물이나 단행본에서 발표되지 않은 것이어야 한다.
2. 원고의 특성에 따라 다음과 같은 5종류로 분류된다.
   (1) 칼럼 (2) 정책초점 (3) 논단 (4) 해외기술동향 (5) 뉴스 포커스
3. 본 정책지는 연 2회(6월, 12월) 발간되며, 원고는 수시로 접수한다.
4. 원고를 투고할 때는 투고신청서, 인쇄된 원고 2부, 그림과 표를 포함한 원본의 내용이 담긴 파일(hwp 또는 doc)을 제출하며, 일단 제출된 원고는 반환하지 않는다. 원고접수는 E-mail을 통해서도 가능하다.

## 원고심사

1. 원고는 편집위원회의 검토를 통하여 게재여부를 결정한다.

## 원고작성 요령

1. 원고의 분량은 A4용지 10매 내외(단, 칼럼은 A4용지 3~5매 분량)로 다음의 양식에 따라 작성한다.
   1) 워드프로세서는 '아래한글' 또는 'MS Word' 사용
   2) 글꼴 : 신명조
   3) 글자크기 : 본문 11pt, 표·그림 10pt
   4) 줄간격 : 160%
2. 원고는 국문 또는 영문으로 작성하되, 인명, 지명, 잡지명과 같이 어의가 혼동되기 쉬운 명칭은 영문 또는 한자를 혼용할 수 있다. 학술용어 및 물질명은 가능한 한 국문으로 표기한 후, 영문 또는 한문으로 삽입하여 표기한다. 숫자 및 단위의 표기는 SI규정에 따르며, 복합단위의 경우는 윗 첨자로 표시한다.
3. 원고 첫 페이지에 제목, 저자명, 소속, 직위, E-mail 등을 명기하고, 저자가 다수일 경우 제1저자를 맨 위에 기입하고, 나머지 저자는 그 아래에 순서대로 표시한다.
4. 원고의 계층을 나타내는 단락의 기호체계는 I, 1, 1), (1), ①의 순서를 따른다.
5. 표와 그림은 본문의 삽입위치에 기재한다. 표와 그림의 제목은 각각 원고 전편을 통하여 일련번호를 매겨 그림은 아래쪽, 표는 위쪽에 표기하며, 자료의 출처는 아랫부분에 밝힌다.
   예) 〈표 1〉 〈표 2〉 [그림 1] [그림 2]
6. 참고문헌(reference)
   1) 참고문헌 표기 양식
      - 참고문헌은 본문의 말미에 첨부하되 국내문헌(가나다 순), 외국문헌(알파벳 순)의 순서로 정리한다.
      - 저자가 3인 이상일 경우, '등' 또는 'et al.'을 사용한다.
      - 제1저자가 반복되는 경우 밑줄(_)로 표시하여 작성한다.
   2) 참고문헌 작성 양식
      - 단행본 : 저자, 출판년도: 서명(영문은 이탤릭체). 출판사, 총 페이지 수.
      - 학술논문 : 저자, 출판년도: 논문명. 게재지(영문은 이탤릭체), 권(호), 수록면.
      - 학술회의(또는 세미나) 발표논문 : 저자, 발표년도: 논문명, 프로시딩명(영문은 이탤릭체), 수록면.
      - 인터넷자료 : 웹 페이지 주소