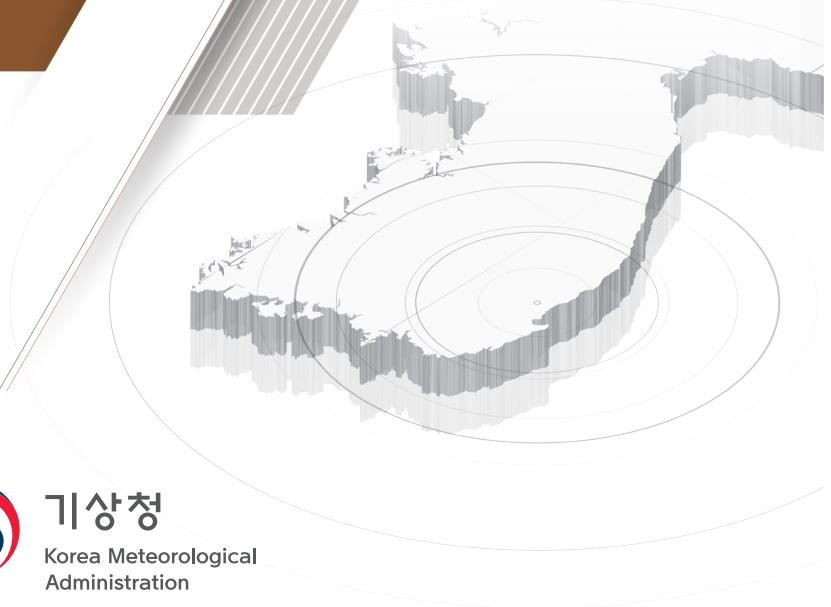
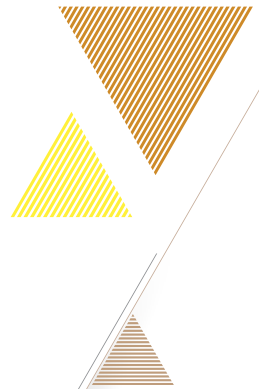


포항지진 분석 보고서



기상청

Korea Meteorological
Administration

포항지진 분석 보고서

CONTENTS

제1장 / 포항지진 개요 • 06

제2장 / 포항지진 진원 분석 • 10

제1절 속도모델에 따른 진원 분석 • 12

1.1. 분석 방법

1.2. 분석 결과

제2절 관측소 분포에 따른 진원 분석 • 21

2.1. 분석 방법

2.2. 분석 결과

2.3. 본진의 진원깊이 분석

제3절 단층면해 분석 • 23

3.1. 분석 방법

3.2. 분석 결과

제3장 / 포항지진 진도 분석 및 부지증폭 효과 • 26

제1절 포항지진 진도 분석 • 28

1.1. 피해지역 상세자료 수집 및 분석

1.2. 진도 분포의 해석

제2절 부지특성조사 • 34

제4장 / 포항지진 지표변위 분석 • 38

제1절 위성 영상레이더 간섭기법을 이용한 지표변위 분석 • 40

1.1. 분석 자료

1.2. 지표변위 관측 결과

제2절 전지구 위성항법시스템을 이용한 지표변위 분석 • 43

2.1. 관측 자료

2.2. 지표변위 분석 결과

제5장 / 포항지진과 9.12지진의 비교 • 46

제6장 / 이동식 지진계 활용 • 56

제1절 포항지진의 여진관측을 위한 이동식 지진계 설치 • 58

제2절 이동식 지진계 설치 및 운영 방법 • 60

2.1. 이동식 지진계 설치 시 고려 사항

2.2. 이동식 지진계 설치 환경 비교

2.3. 이동식 지진계 설치 시점

제3절 이동식 지진계 설치 및 운영 사례 • 68

3.1. 2016년 9.12지진(Kim et al., 2016)

3.2. 2008년 5월 12일 중국 쓰촨성 대지진(Wen et al., 2014)

3.3. 2009년 라퀼라(중부 이탈리아) Mw6.3 지진(Chiarabba et al., 2009)

3.4. 2003년 7월 26일 M6.4 일본 미야기현 북부 지진(Umino et al., 2003)

제4절 이동식 지진계 설치 요약 • 73

참고문헌 • 76



발간사

작년 11월 15일 경북 포항시 흥해읍을 중심으로 규모 5.4의 지진이 발생하였습니다. 2016년 경주에서 계기관측 사상 최대 규모(규모 5.8)의 9.12지진이 발생한지 1년여 만에 또다시 큰 지진이 발생하였고, 포항시를 중심으로 많은 피해를 남겼습니다. 포항지진을 계기로 정부는 9.12지진 이후 수립된 지진방재 종합대책의 미비점을 검토하고 보완하여 지진방재 개선대책을 마련하였습니다.

이 과정에서 무엇보다 선행되어야 했던 것은 포항지진의 발생특성에 대한 과학적인 분석과 지진으로 인해 나타난 다양한 현상을 이해하는 것이었습니다. 이에 기상청은 지진관측자료 분석과 현장조사를 통해 포항지진의 발생특성을 파악하고, 9.12지진과의 차이를 분석하고자 노력하였습니다. 지진자료를 이용한 본진과 여진 정밀분석, 피해조사 자료를 이용한 진도 분석, 원격탐사자료를 이용한 지표변위 분석을 수행하고 9.12지진과 비교하였으며, 포항지진과 9.12지진은 지진이 발생한 지역의 지질환경, 발생 깊이, 지진에너지 특성 등의 차이로 인해 피해의 양상도 다르게 나타난 것으로 파악하였습니다.

이번 「포항지진 분석보고서」는 포항지진에 관한 분석 결과를 정리한 것으로, 포항지진의 발생 양상과 지진의 영향을 이해하는데 도움이 되리라 생각합니다. 또한, 기상청의 「9.12 지진 현장대응팀 활동보고서」를 통해 제시한 주요 지진 발생 시 현장 대응 방안을 보완하기 위하여 이번 포항지진 분석 결과를 토대로 이동식 지진계 활용 방안을 구체적으로

제시하였습니다. 이번 보고서의 결과들을 참고하여 향후 현장 관측과 대응이 필요한 상황이 발생할 경우, 보다 신속하고 효과적으로 대응할 수 있기를 기대합니다.

포항지진에 대한 현장관측을 위하여 수행한 기상청 임시 지진 관측소 설치와 현지 피해조사가 원활하게 이루어질 수 있도록 협조해주신 관계기관 직원들과 주민 여러분께 감사의 말씀을 전합니다. 마지막으로 연이은 지진으로 물리적, 정신적 피해를 입은 지역 주민들께 위로의 말씀을 전하며 지진에 따른 불안감으로부터 하루빨리 회복될 수 있기를 바랍니다.



2018년 7월

기상청장 

제1장

포항지진 개요



제 1 장

포항지진 개요

계기지진 관측이 시작된 1978년 이후의 한반도 지진 발생 분포를 살펴보면 수도권을 포함한 경기도와 강원도에서 지진활동이 저조한 편이지만 대체로 한반도 전역에 걸쳐 산발적으로 지진이 발생하는 것을 알 수 있다(그림 1.1). 최근 10년간의 규모 2.0 이상 지진의 발생 횟수는 연평균 약 50회를 나타내며(2013년 서해 군발지진 제외) 1978년 이후 규모 5 이상의 지진은 총 10회 발생한 것으로 관측되었으나 시간이나 위치에 있어 일정한 경향성을 보이지는 않는다. 그러나 2016년 9월 12일 경주에서 계기지진 관측 사상 최대 규모인 9.12지진(규모 5.8)이 발생함으로써 이후 한반도 지진활동이 활발해진 것으로 나타났으며 이는 특정지역에 국한되지 않았다(그림 1.1). 2017년 하반기부터 주춤해지면서 안정화되는 경향을 보였으나 2017년 11월 15일 규모 5.4의 포항지진이 발생하면서 다시 증가하였다. 그러나 2017년 포항지진 이후 발생한 지진은 한반도 전역에 영향을 준 9.12지진과는 다른 특징을 보여주고 있다.

포항지진은 2017년 11월 15일 14시 29분(KST)경 경북 포항시 북구 북쪽 7.5km 지역(36.11°N, 129.37°E)에서 발생하였다. 2017년 포항지진의 본진은 규모 5.4로 계기지진 관측 사상 두 번째로 큰 지진이며, 진원깊이가 약 7km로 9.12지진(15km)보다 상대적으로 얕은 깊이를 가진다. 이 지진으로 인하여 경북지역에서 최대진도 VI이 기록되었고, 강원, 경남, 대구, 부산, 울산, 충북 지역에서 진도 IV의 진동이 감지되었다. 2018년 5월 31일까지 규모 2.0 이상의 여진은 100회, 미소지진을 포함하면 615회 관측되었다.

2017년 포항 지진은 2017년 11월 15일 대한민국 경상북도 포항시 북구 북쪽 7.5km 지역에서 발생하였다. 본진은 오후 2시 29분 31초에 발생한 규모 5.4의 지진으로서, 1978년 계기 지진 관측 이래 2016년 경주 9.12지진에 이어 두 번째로 큰 규모이다.

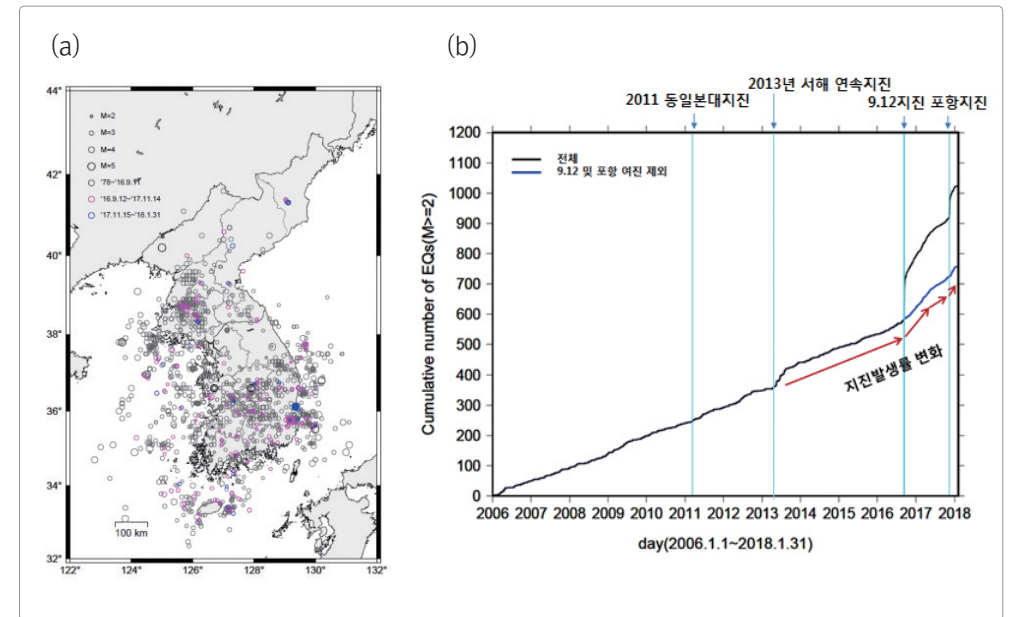


그림 1.1 규모 2 이상 지진의 (a) 진앙 분포(1978~2018.1.31.) 및 (b) 누적 지진 발생 횟수

제2장

포항지진 진원분석



제 2 장

포항지진 진원 분석

포항지진의 전진과 여진을 포함한 일련의 지진은 2018년 5월 31일까지 618회 발생한 것으로 관측되었으나 2017년 11월 30일까지 432회가 발생하여 전체 여진의 약 70%가 본진 이후 보름 동안 발생한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 2017년 11월 15일부터 11월 30일까지 발생한 지진의 진원 분석을 수행하고 여진활동의 시·공간적 변화 및 특성을 분석하였다.

제 1 절 속도모델에 따른 진원 분석

1.1. 분석 방법

포항지진의 진원 분석을 위하여 진앙거리 약 50km 내에 있는 상시 지진관측소와 기상청 임시관측소의 자료를 이용하여 수동으로 P파와 S파 도달시간을 획득하였다. 기상청 임시관측소는 상시 지진 관측소를 보완하고 포항지진의 여진을 관측하기 위하여 진앙 주변의 관공서 및 학교에 설치하였다. 분석에 사용된 관측소의 분포는 그림 2.1에 나타내었고, 기상청에서 설치한 임시 지진 관측소에 대해서는 제 6장 제1절에 기술하였다. 진원요소는 수동으로 획득된 P파와 S파 도달시간을 HYPOINVERSE-2000 (Klein, 2002)과 HypoDD (Waldhauser, 2001)에 적용하여 결정하였다. HYPOINVERSE-2000은 지진 관측소에서 관측되는 지진파 도달시간을 이용하여 진원을 결정하는 프로그램이며, HypoDD는 Waldhauser and Ellsworth (2000)의 이중차분(Double-Difference; DD) 알고리즘을 활용하여 진원을 결정하는 프로그램이다. 이중차분 알고리즘은 진앙거리와 속도의 이질성에 비하여 두 지진 사이의 거리가 작은 경우 지진파의 전파경로가 거의 비슷하다는 사실을 이용하여 동일 지역에서 발생하는 지진에 유용하게 사용된다. 본 연구에서는 기상청 지진 분석시스템에서 사용하는 Iasp91 (Kennett and Engdahl, 1991) 전지구 속도모델과 또 다른 전지구 속도모델인 AK135 (Kennett et al., 1995),

한반도를 대상으로 연구된 속도모델인 김성균(1995), Chang and Baag (2006), Kim et al. (2011) 속도모델을 활용하여 속도모델에 따른 진원 결과를 비교하였다. 분석에 이용된 속도모델은 그림 2.2에 도시하였다.

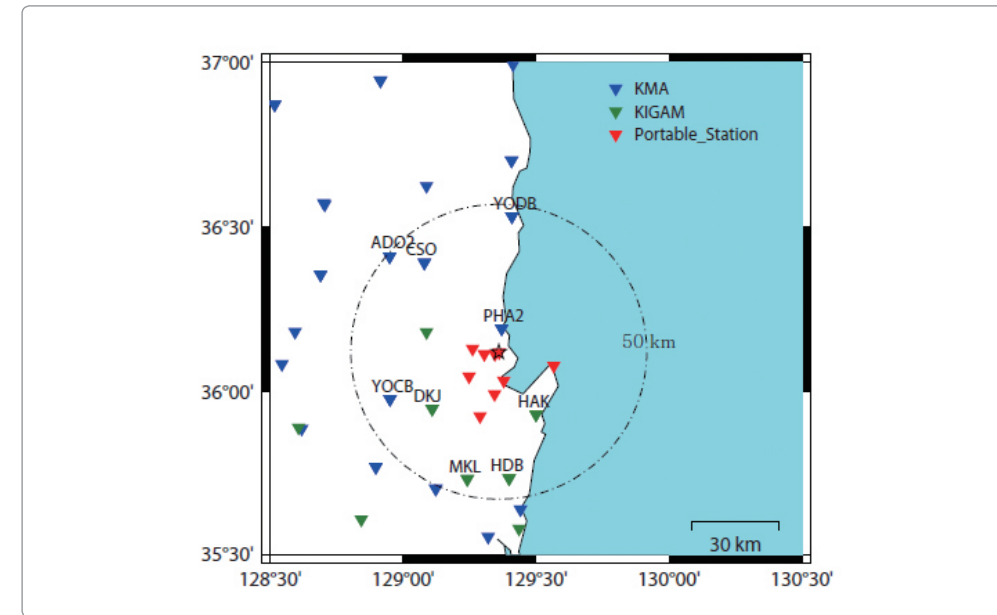


그림 2.1 기상청(파란색) 및 한국지질자원연구원(초록색) 지진관측소와 기상청 임시 관측소(빨간색) 분포, 포항 지진 분석에는 진앙거리 50km 내(파선 원) 관측소 사용

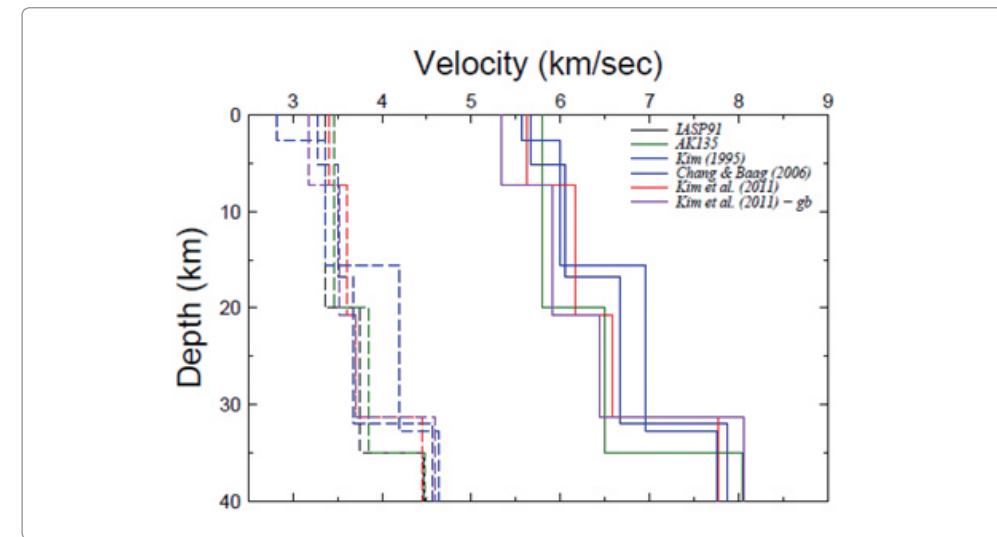


그림 2.2 포항지진 분석에 사용된 속도모델

1.2. 분석 결과

기상청에서 분석한 총 432회 지진의 진앙은 그림 2.3과 같이 북동-남서 방향으로 길게 분포하는 것을 볼 수 있다. 진원깊이는 0.0~15.0km로 폭넓게 계산되었으며, 약 81%가 5.0~10.0km 범위에 분포한다.

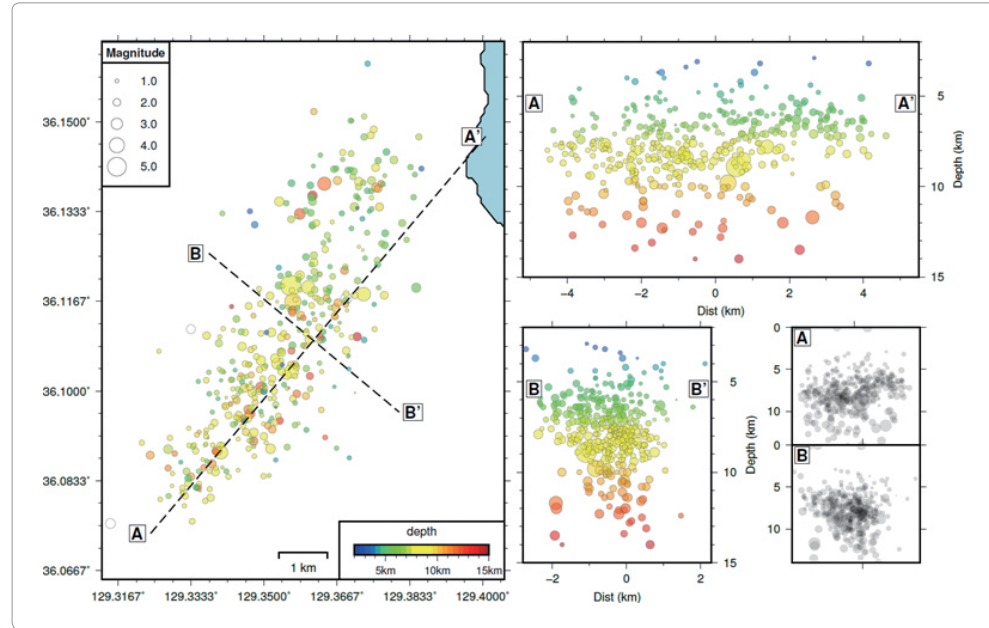


그림 2.3 기상청에서 발표한 포항지진의 진원 분석 결과

전지구 속도모델 및 한반도 속도모델을 적용하여 HYPOINVERSE-2000을 통해 분석된 포항지진의 진원 분포는 그림 2.4a~2.9a에 도시하였다. 진앙의 위치는 북동-남서 방향으로 길게 분포하는 경향을 보이며, 진원깊이는 대부분의 속도구조에서 5.0~10.0km 범위에 분포한다. 그러나 김성균(1995) 속도모델을 사용한 경우는 약 2.5~3.0km의 얇은 깊이에 약 24%의 지진이 밀집하는 현상을 보인다. 이는 천부층의 두께를 2.6km로 얇게 설정한 김성균(1995) 속도모델의 특성으로 보인다.

HypoDD를 이용하여 계산된 진원 결과는 그림 2.4b~2.9b에 비교하였다. 속도모델이 달라지더라도 진앙은 북동-남서 방향으로 길게 분포하며 진원깊이는 5.0~12.0km 범위에 분포한다. 그러나 김성균(1995) 속도모델을 사용한 경우에는 계산 결과가 수렴하지 않아 전체적으로 진앙은 남서쪽으로 이동하고, 진원깊이는 90% 이상이 8~13km로 더 깊어지는 결과를 도출하였다.

HYPOINVERSE-2000과 HypoDD의 결과를 비교하면 분석 알고리즘의 특성에 의해 HypoDD의 결과가 더 밀집하는 것을 볼 수 있지만 진앙 분포의 경향은 큰 차이를 보이지 않는다.

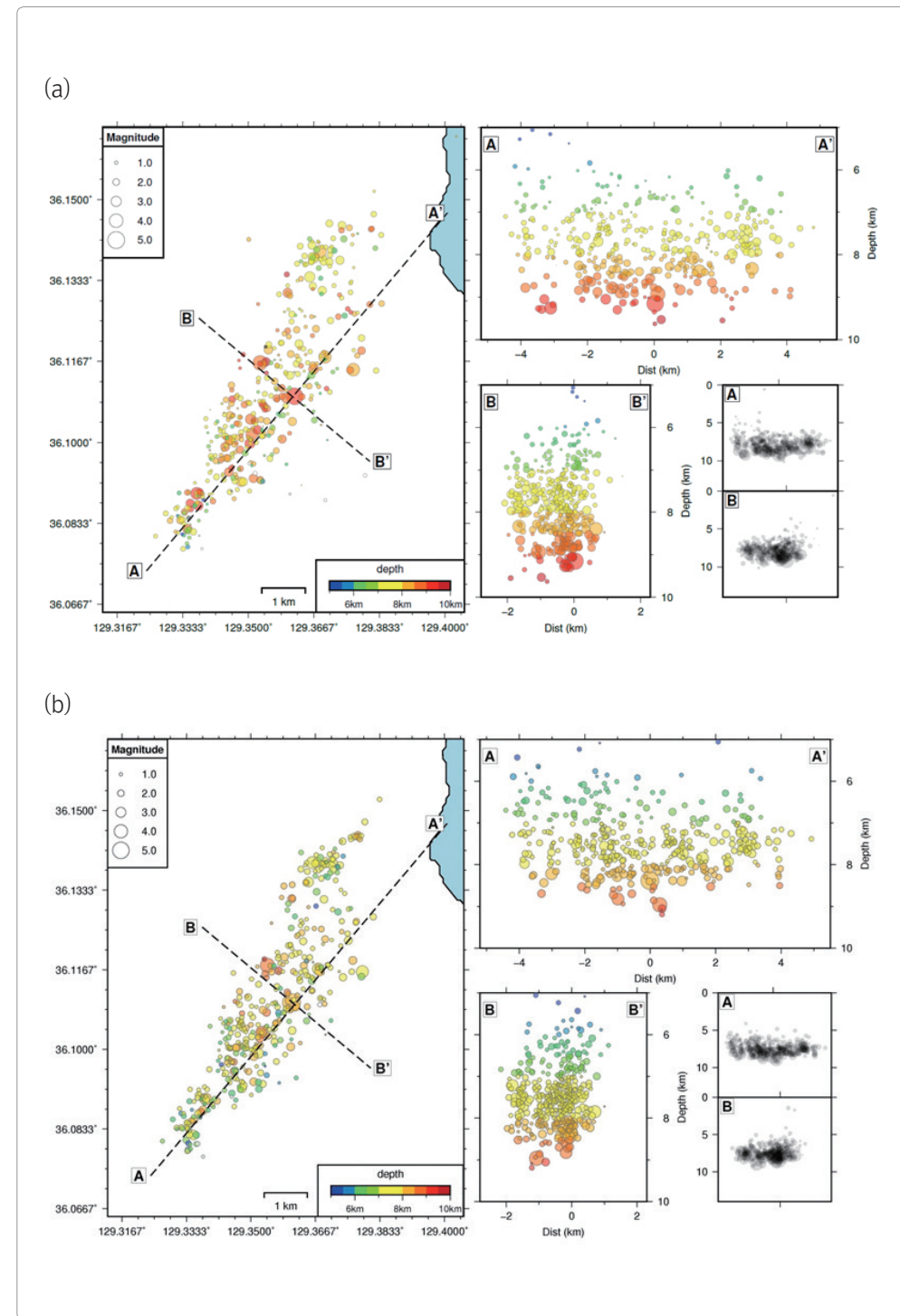


그림 2.4 lasp91 속도모델을 사용한 (a) HYPOINVERSE-2000과 (b) HypoDD 진원 결정 결과

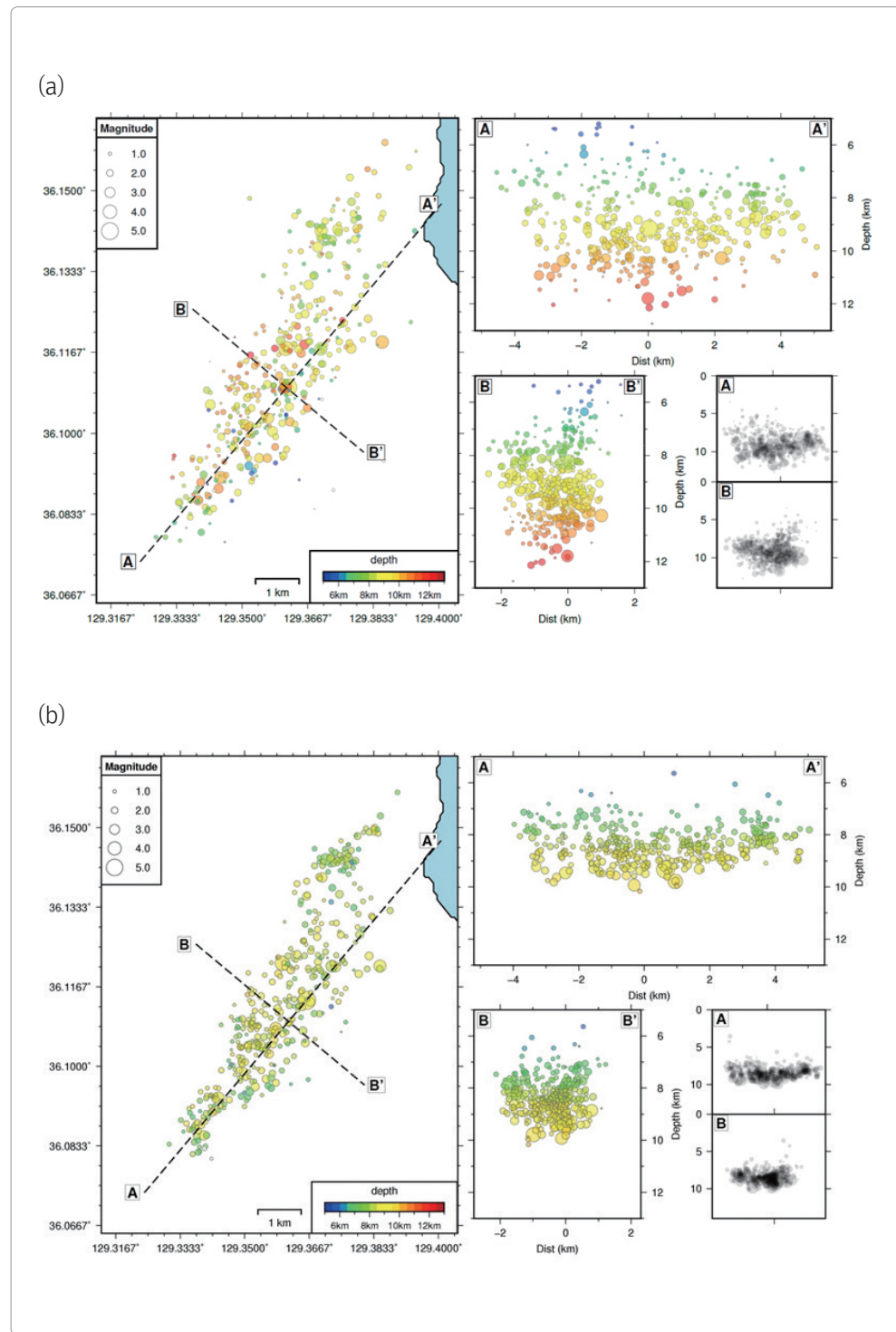


그림 2.5 AK135 속도모델을 사용한 (a) HYPOINVERSE-2000과 (b) HypoDD 진원 결정 결과

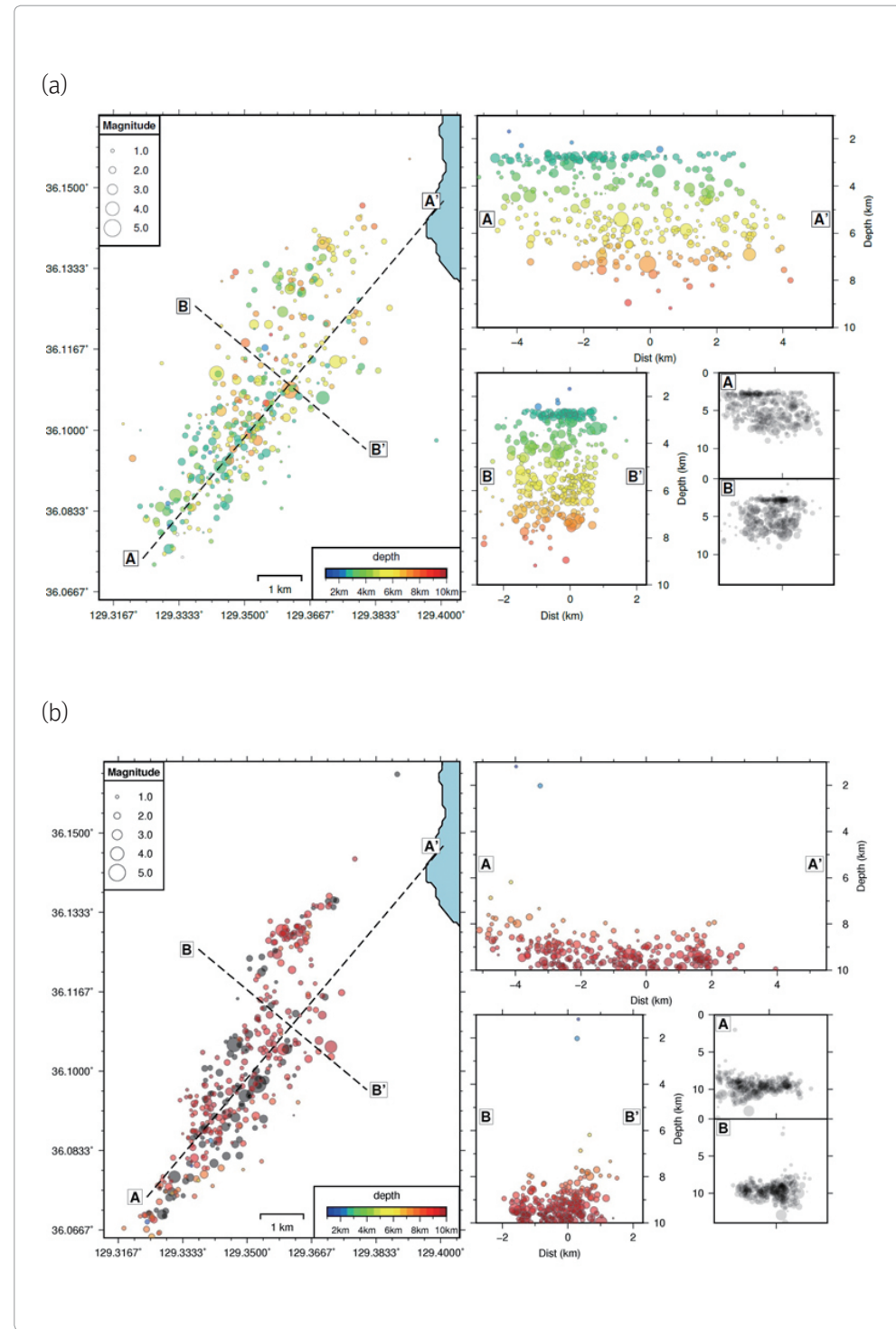


그림 2.6 김성균(1995) 속도모델을 사용한 (a) HYPOINVERSE-2000과 (b) HypoDD 진원 결정 결과

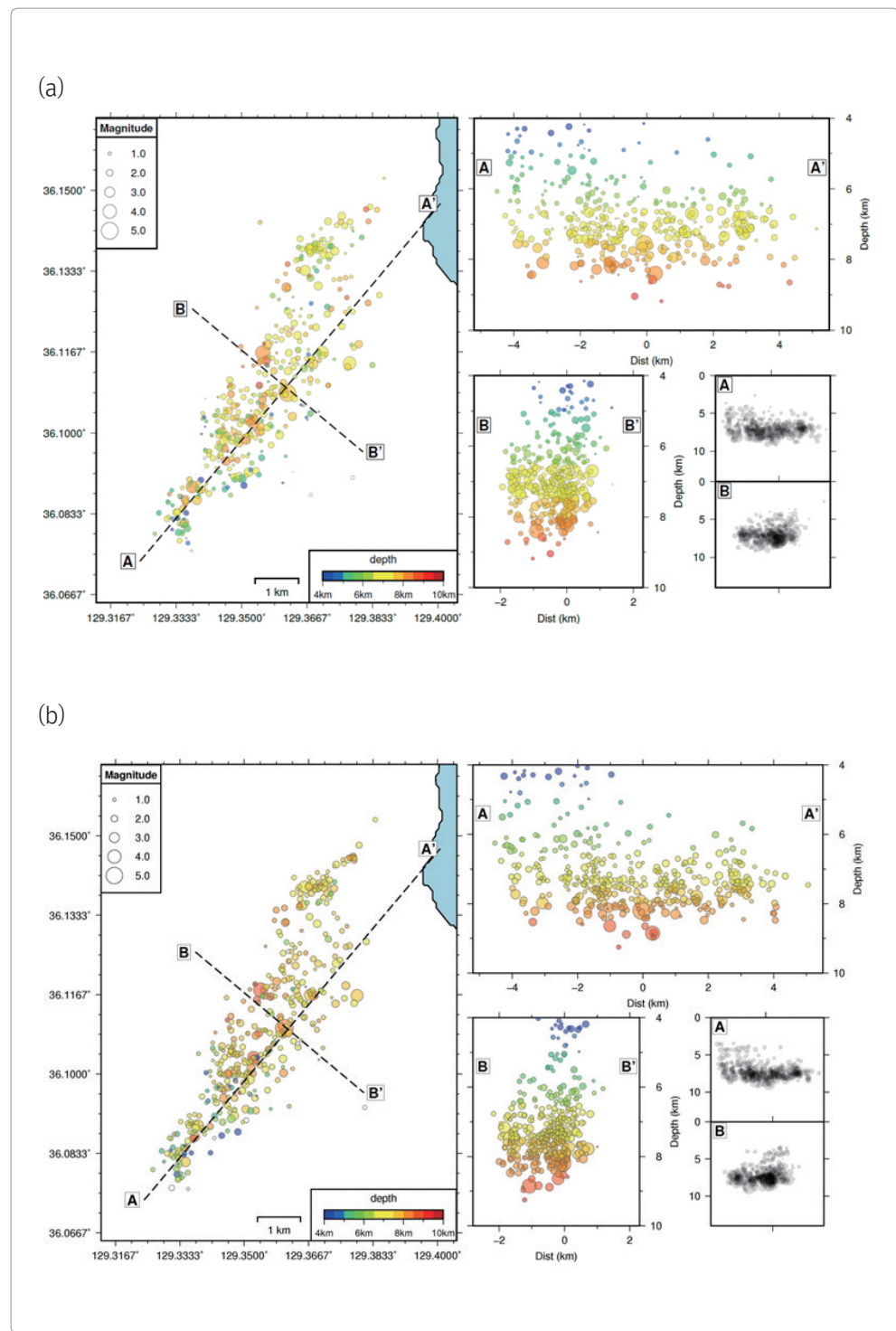


그림 2.7 Chang and Baag (2006) 속도모형을 사용한 (a) HYPOINVERSE-2000과 (b) HypoDD 진원 결정 결과

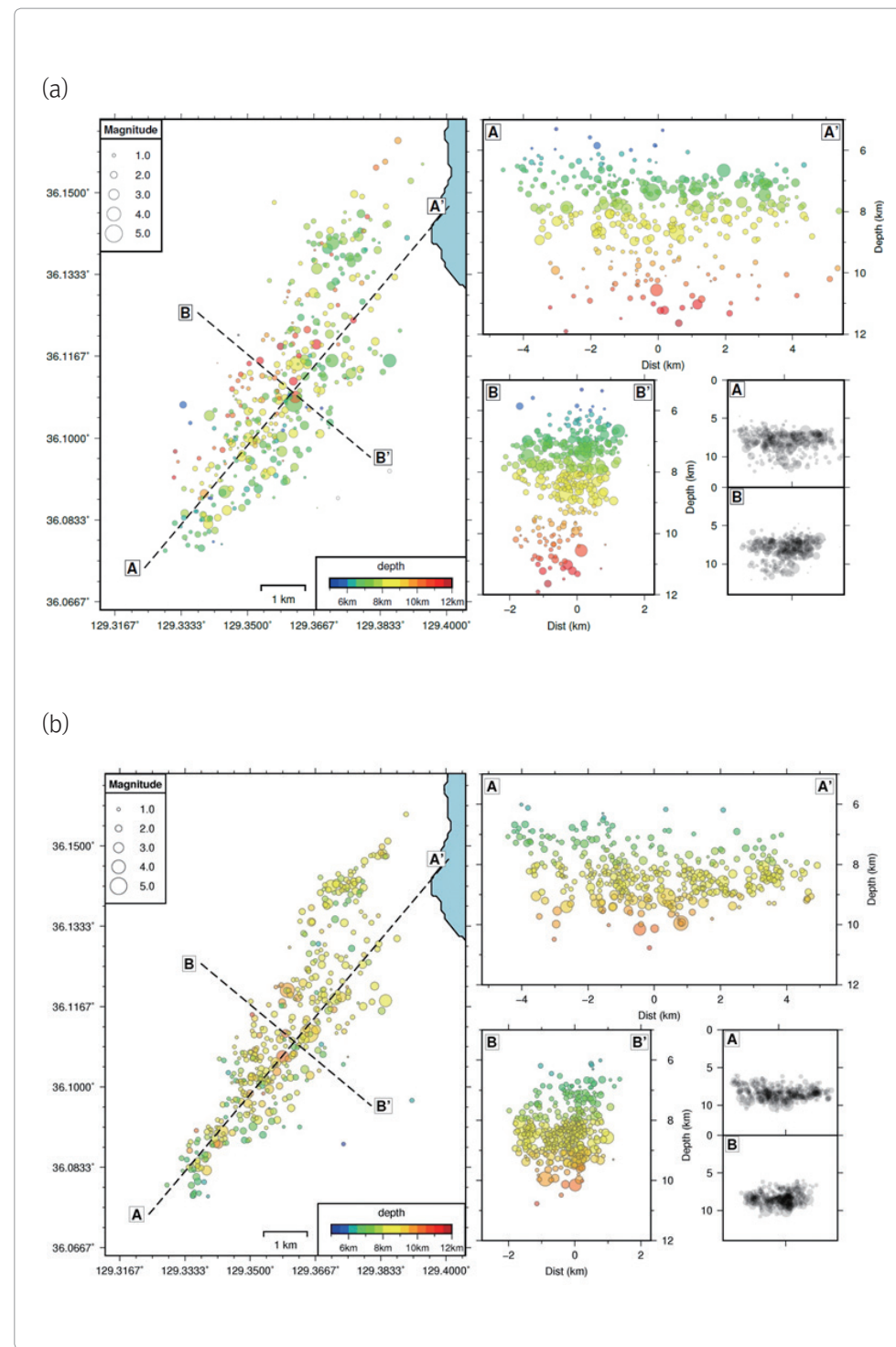


그림 2.8 Kim et al. (2011) 속도모형을 사용한 (a) HYPOINVERSE-2000과 (b) HypoDD 진원 결정 결과

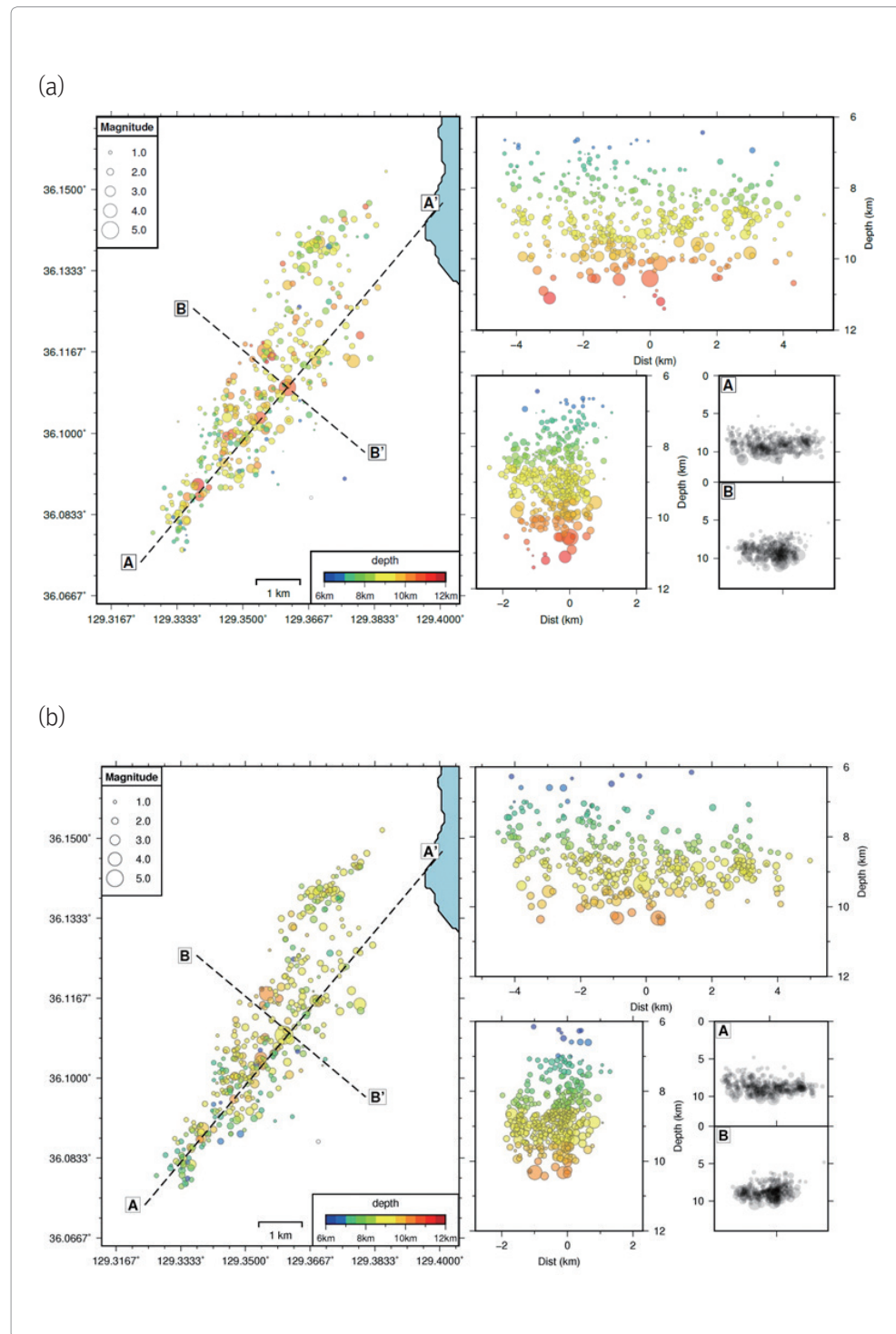


그림 2.9 Kim et al. (2011)의 경상분지 속도모형을 사용한 (a) HYPOINVERSE-2000과 (b) HypoDD 진원 결정 결과

제 2 절 관측소 분포에 따른 진원 분석

2.1. 분석 방법

제2장 제1절의 분석 결과와 같이 진앙거리 50km 범위 내의 기상청 상시 및 임시 지진 관측소와 한국 지질자원연구원 상시 관측소만을 사용하였을 때는 진앙 분포를 통해 단층면의 주향은 추정할 수 있지만 진원깊이가 일정한 경향을 보이지 않아 경사를 추정하기는 어려웠다. 따라서 한국지질자원연구원에서 11월 16일부터 12월 26일까지 진앙거리 10km 내에 설치한 임시 지진 관측소의 자료를 제공받아 제2장 제1절과 동일한 방법으로 진원 재분석을 수행하였다. 분석에 사용된 지진 관측소는 그림 2.10에 도시하였다.

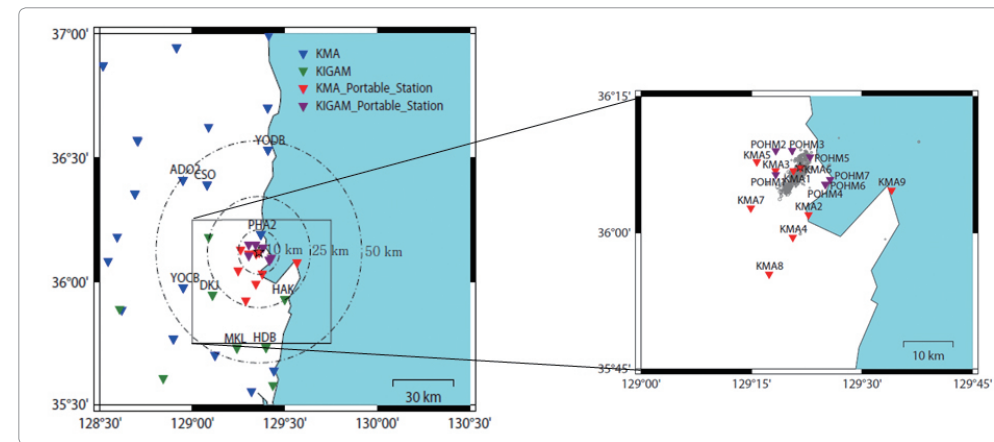


그림 2.10 포항지진 분석에 사용된 지진관측소 분포. 오른쪽 그림은 기상청(빨간색) 및 한국지질자원연구원(보라색) 임시 지진 관측소 위치를 나타내며, 여진 분포를 회색으로 표시함

2.2. 분석 결과

속도모델에 따른 진원 분석 결과(제1 절)는 김성균(1995) 속도모델 외에는 큰 차이를 보이지 않았으므로 여기서는 Kim et al. (2011)의 경상분지 속도모델을 사용하여 진원 분석을 수행하였다. 그 결과, 진앙은 앞서 분석한 결과와 동일하게 북동-남서 방향으로 길게 분포한다. 그리고 진원깊이는 6~10km의 범위를 가지며 북서방향으로 깊어지는 경향을 보인다. 일부 북쪽 지역에서 발생한 여진은 따로 군집화하는 형상을 보인다.

본진 이후 발생한 지진에 대하여 기상청과 한국지질자원연구원의 상시 및 임시 지진관측소를 이용하여 분석한 진원결과는 그림 2.11에 도시한다. 두 경우에서 진앙 분포는 큰 차이를 보이지 않지만 진원 깊이는 한국지질자원연구원의 임시 지진 관측소를 추가한 경우 북서 방향으로 깊어지는 경향성을 보이며 단층면의 경사를 추정하는데 도움이 되었다. 이는 한국지질자원연구원의 임시 지진 관측소가 분

석에 추가되면서 포항지진 단층을 기준으로 서로 다른 방향에 근거리 관측소가 증가하여 분석 정확도를 향상시킨 것으로 생각된다.

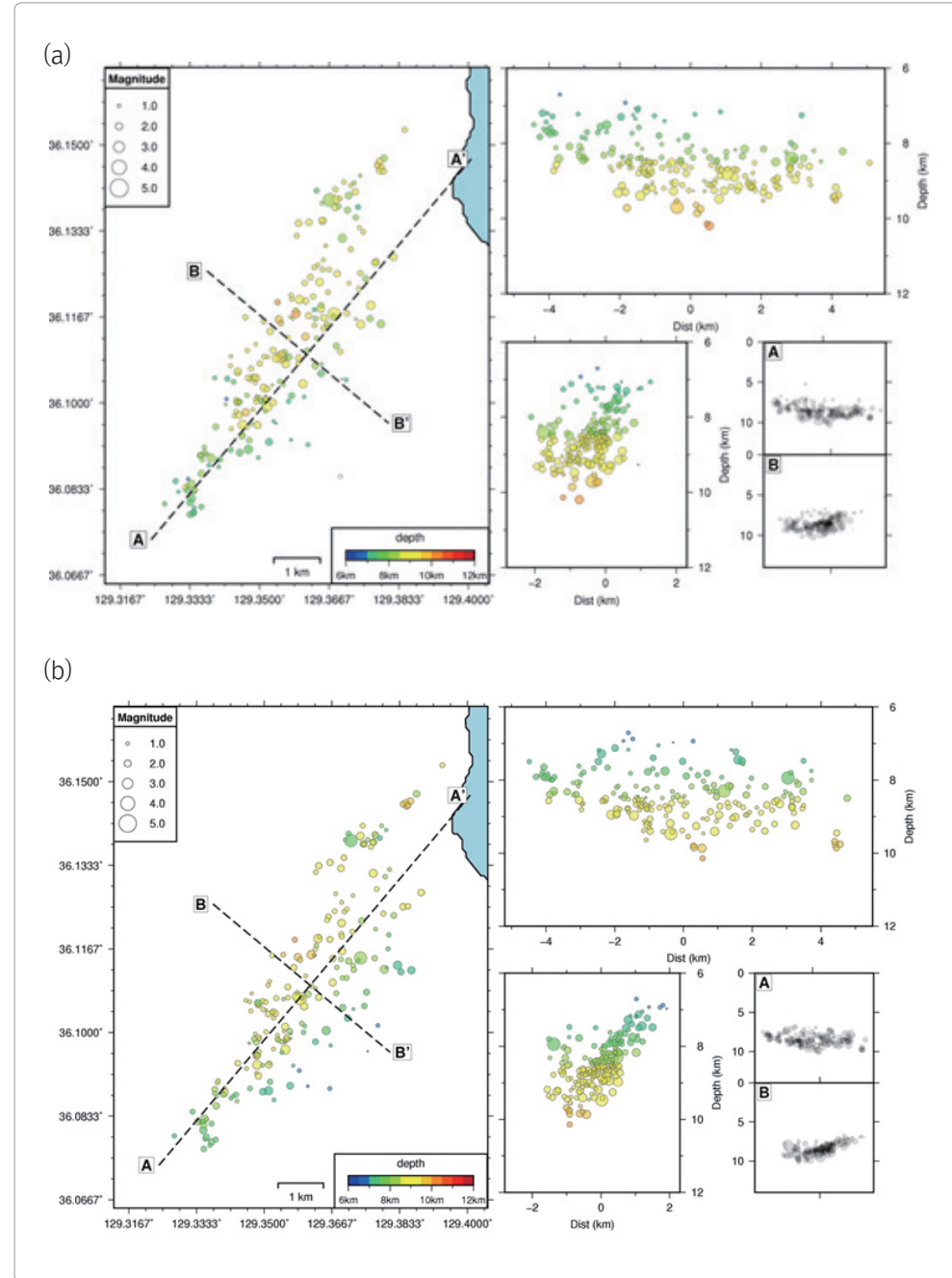


그림 2.11 Kim et al. (2011)의 경상분지 속도모델을 사용하여 (a) 기상청 상시 및 임시 지진 관측소와 한국지질자원연구원 상시 지진 관측소 자료를 분석한 진원 결정 결과와 (b) 한국지질자원연구원 임시 지진관측소 자료를 추가하여 분석한 진원 결정 결과

2.3. 본진의 진원깊이 분석

진앙거리 10km 내에 설치한 한국지질자원연구원 임시 지진 관측소 자료를 추가하였을 경우, 진원깊이가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 관측소 범위를 진앙거리 15km와 50km로 구분하고, 관측소 분포 및 속도모델, 분석 방법에 따라 포항지진 본진의 진원깊이 변화를 확인하고자 하였다. 진앙거리 15km와 50km 범위 내의 관측소 사용 시 진원깊이 변화는 그림 2.12에 도시하였다. 동일한 범위 내의 관측소를 사용한 경우는 관측소 분포, 속도 모델, 분석 방법의 차이에 따라 최대 약 4km의 깊이 차이를 보인다. 진앙거리 15km 이내 지진 관측소를 사용할 경우 진원깊이는 2~5km로 계산되며, 진앙거리 50km 이내 지진 관측소를 사용할 경우는 진원깊이 7~10km로 결정되어 관측소의 거리 분포에 따라 분석된 깊이가 뚜렷하게 달라짐을 알 수 있었다.

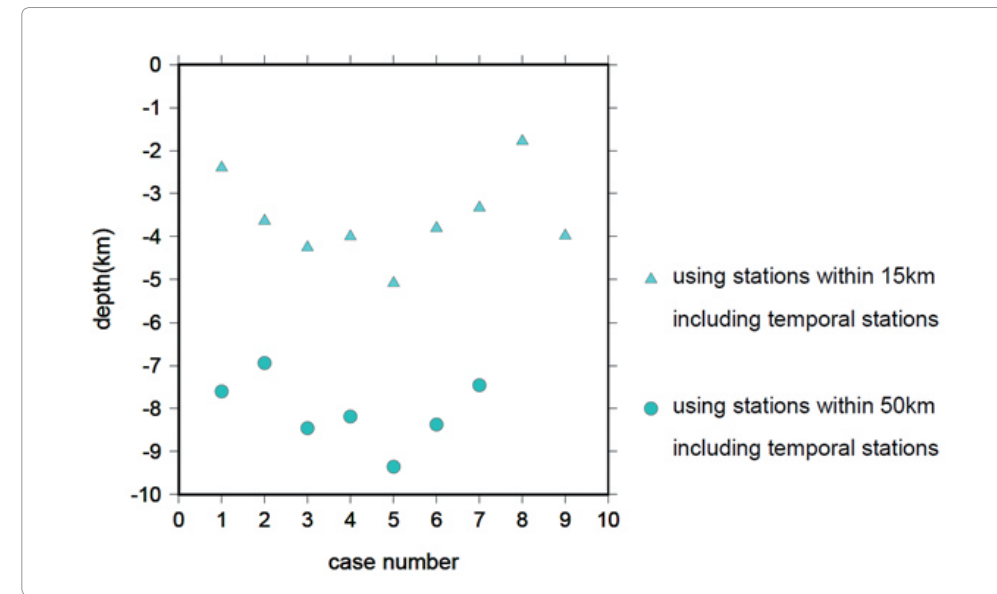


그림 2.12 관측소 범위 및 분포, 속도 모델, 분석 방법에 따른 본진의 진원깊이 비교

제 3 절 단층면해 분석

3.1. 분석 방법

포항지진의 진원 분석 결과, 진원 분포를 통해 북동-남서 방향의 주향을 가지고, 북서방향으로 경사하는 단층면을 추정할 수 있었다. 포항지진의 본진과 주요 여진의 단층운동을 파악하기 위하여 FOCMEC (Snoko, 2003)과 TDMT_INV (Dreger, 2003)를 사용하여 규모 3.5 이상의 지진에 대한 단층면해 분석을 수행하였다. FOCMEC은 관측된 파형의 P파 초동방향을 이용하여 단층면해를 구하는 프로그램이

다. 진원에서 P파가 관측소로 이동하는 파선에 대한 방위각(Azimuth)과 사출각(Take-off angle)에 따라 P파 초동 방향의 압축(Compressional)과 신장(Extensional)을 스테레오넷(Stereonet)에 투영하여 단층면해를 구한다. TDMT_INV는 지진의 메커니즘을 역산하는 프로그램으로 각 관측소의 3성분 지진파형 자료와 이론 파형을 이용하여 시간영역에서 역산을 수행함으로써 모멘트텐서를 결정하는 방법이다.

3.2. 분석 결과

본진을 포함한 규모 3.5 이상의 지진에 대하여 FOCMEC과 TDMT_INV를 이용하여 계산된 단층면해를 그림 2.13과 표 2.1에 도시하고, 그 결과를 비교하였다. 파형 분석을 통해 얻어진 단층면해는 역단층 또는 주향이동단층을 나타낸다. 역단층은 상반이 하반 위로 밀려 올라가는 운동을 하는 단층이고 주향이동단층은 단층면을 따라 수평으로 운동하는 단층이다. 단층면해 분석 결과는 진원 분포를 통해 추정된 단층면과 유사하게 대체로 북동-남서 방향의 주향을 가지고, 북서방향으로 경사하는 단층면을 나타내었다. 또한 포항 본진을 제외하고는 FOCMEC과 TDMT_INV를 사용한 단층면해의 결과는 유사하게 나타났다.

표 2.1 포항지진에 대한 FOCMEC과 TDMT_INV를 이용한 단층면해 결과

| 날짜 | 규모 | FOCMEC | | | TDMT_INV | | |
|------------|-----|--------|-------|---------|----------|----|------|
| | | 주향 | 경사 | 면선각 | 주향 | 경사 | 면선각 |
| 2017/11/15 | 5.4 | 5.02 | 45.22 | 82.95 | 230 | 69 | 152 |
| | | 194.98 | 45.22 | 97.05 | 331 | 64 | 24 |
| 2017/11/15 | 4.3 | 5.00 | 30.00 | 90.00 | 202 | 67 | 105 |
| | | 185.00 | 60.00 | 90.00 | 349 | 28 | 59 |
| 2017/11/16 | 3.6 | 146.06 | 81.69 | -18.26 | 239 | 80 | 165 |
| | | 238.79 | 71.94 | -171.26 | 332 | 75 | 10 |
| 2017/11/19 | 3.5 | 125.45 | 77.05 | -7.63 | 220 | 75 | -152 |
| | | 217.17 | 82.56 | -166.94 | 122 | 63 | -17 |
| 2017/11/20 | 3.6 | 138.99 | 65.41 | -4.63 | 135 | 78 | -18 |
| | | 230.92 | 85.79 | -155.33 | 229 | 73 | -167 |

포항지진 본진의 경우, FOCMEC을 통한 결과는 역단층으로 계산되었으나 TDMT_INV를 사용하면 역단층 성분을 포함하는 주향이동단층으로 계산되었다. 이는 본진의 파형 특성과 분석 프로그램의 차이에 의해 발생한 것으로 생각된다. FOCMEC은 P파 초동의 극성에 의해 단층면해를 결정하여 지진에 의한 초기파열과정을 반영하는 반면 TDMT_INV는 저주파 대역의 지진파를 통해 단층면해를 역산함으로써 단층의 주요 파열과정을 반영하는 것으로 해석할 수 있다. 그림 2.14에 도시된 각 관측소의 P파 구간을 살펴보면, 큰 진동이 도달하기 약 0.5초 전에 작은 진동이 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 작은 진동은 FOCMEC 계산에 영향을 주고, 0.5초 후 이어진 큰 진동은 TDMT_INV 분석에 영향을 주어 각기 다른 단층면해를 계산하게 한 것으로 판단된다.

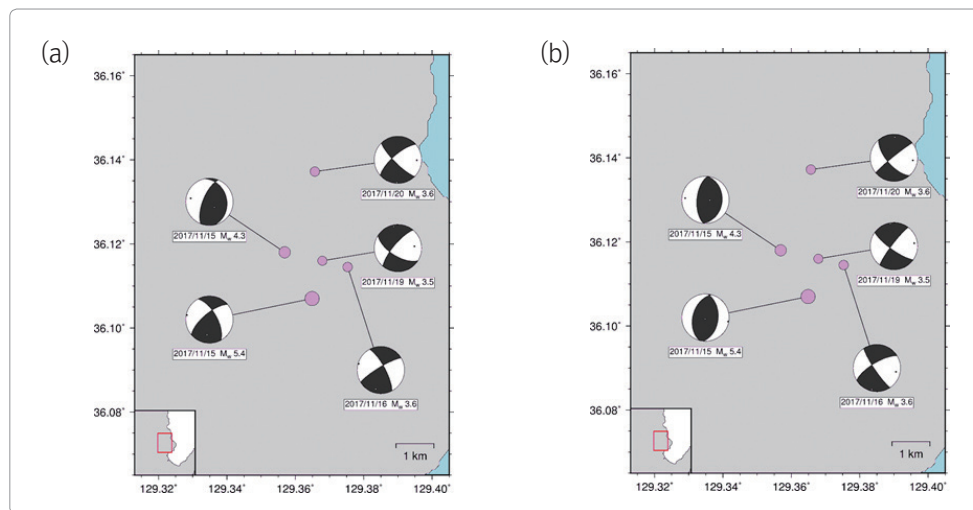


그림 2.13 포항지진에 대한 (a) FOCMEC과 (b) TDMT_INV를 이용한 단층면해 결과

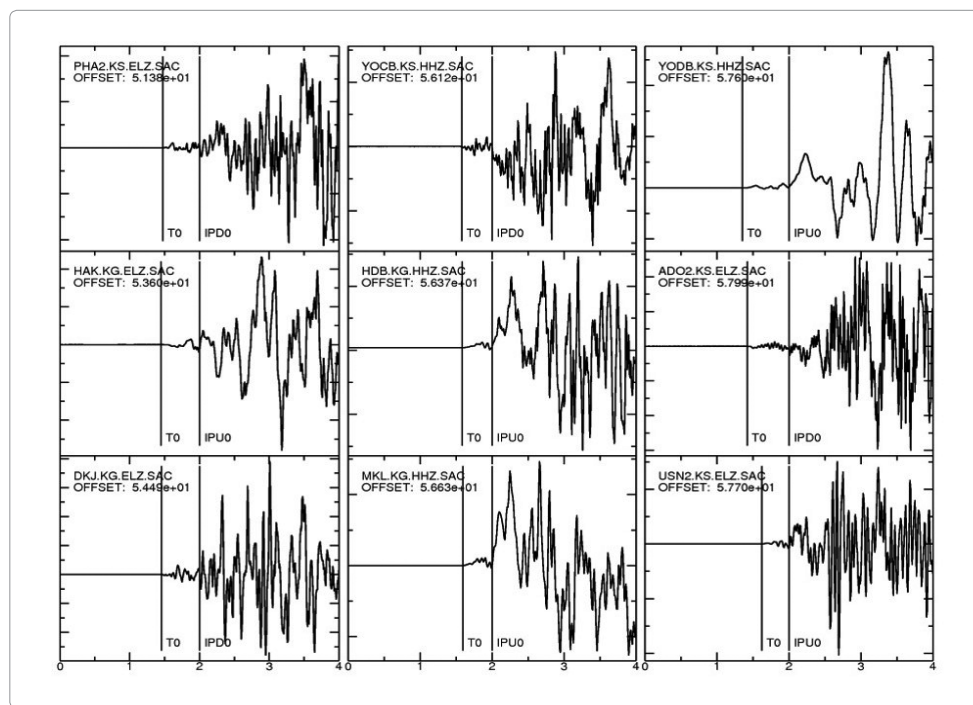


그림 2.14 포항지진 본진의 P파 파형

진원 분석 결과와 단층면해 분석 결과를 통해 포항지진의 단층면이 북동-남서 방향의 주향을 가진 북서방향으로 경사하는 단층면임을 추정할 수 있었다. 그러나 모든 지진이 동일한 단층면해를 가지지 않고, 각기 다른 단층운동 양상을 보이는 것으로 보아 복잡한 단층구조를 가지는 것으로 추정된다.

제3장

포항지진
진도 분석 및
부지증폭 효과



제 3 장

포항지진 진도 분석 및 부지증폭 효과

진도는 지진이 발생하였을 때 사람의 느낌이나 주변의 물체 또는 구조물의 흔들림과 피해 정도를 수치로 나타낸 것으로 지진의 규모, 진앙 거리, 진원깊이뿐만 아니라 지진 피해가 발생한 지역의 지질구조와 구조물의 형태에 따라 다르게 나타난다. 2017년 11월 15일 포항에서 규모 5.4의 본진이 발생한 이후 지진의 피해를 조사하기 위하여 현장조사를 실시하였으며 지방자치단체 피해조사를 바탕으로 진앙 주변 지역의 진도를 산정하였다. 그리고 지진파의 증폭 혹은 감쇠의 원인이 되는 지질구조를 파악하기 위하여 이동식지진계에 관측된 상시미동 자료를 이용하여 포항지진 진앙주변의 부지특성을 분석하였다.

제 1 절 포항지진 진도 분석

1.1. 피해지역 상세자료 수집 및 분석

포항지진의 진도 분석에는 지진 발생 후 실시한 현장 조사와 지방자치단체의 피해조사 자료를 사용하였다. 현장조사는 지진이 발생한 진앙과 주변 지역을 중심으로 실시하였다. 진앙 지역과 그 주변은 오래된 가옥, 저층 건물, 최근에 지어진 고층 아파트와 필로티 구조의 건물들이 많이 분포하고 있다. 포항 지진에 의한 대부분의 피해는 내·외벽 파손, 담장 붕괴와 같은 1차 피해와 벽 외장재의 탈락에 의한 차량 파손과 같은 2차 피해였으며 건물 피해 이외에도 모래와 진흙이 분출되는 액상화 현상도 관찰되었다. 포항지진에 의한 진도를 평가하기 위하여 기상청에서 사용하고 있는 수정메르칼리진도계급 (Modified Mercalli Intensity Scale, MMI Scale; Wood and Neumann, 1931)을 적용하였다. 수정메르칼리진도계급은 사람의 유감 정도에 따라 진도 II~IV로 분류되며 진도 V 이상은 사람의 유감 정도뿐만 아니라 건물의 피해 정도에 따라 구분된다. 진도 V~VIII의 수정메르칼리진도계급에 대한 피해 설명은 표 3.1과 같다.

표 3.1 진도 V~VIII의 수정메르칼리진도계급에 대한 피해 설명

| 진도 | 피해 설명 |
|------|---|
| V | 거의 모든 사람들이 지진동을 느끼며 많은 사람들이 잠에서 깬다. 약간의 그릇과 창문 등이 깨지고 어떤 곳에서는 회반죽에 금이 가며 불안정한 물체는 넘어진다. |
| VI | 모든 사람들이 느끼며 많은 사람들이 놀라서 밖으로 뛰어나간다. 무거운 가구가 움직이기도 하며 벽의 석회가 떨어지기도 한다. |
| VII | 모든 사람들이 밖으로 뛰어 나온다. 설계 및 건축이 잘 된 건물에서는 피해가 무시할 수 있는 정도이지만, 보통 건축물에서는 약간의 피해가 발생한다. 설계 및 건축이 잘못된 부실 건축물에서는 상당한 피해가 발생한다. |
| VIII | 특별히 설계가 잘된 구조물에는 약간의 피해가 있고, 일반 건축물에서는 부분적인 붕괴와 더불어 상당한 피해를 일으키며, 부실 건축물에는 아주 심하게 피해를 준다. 또한 창틀로부터 창문이 떨어져 나가며 모래와 진흙이 약간 분출된다. |

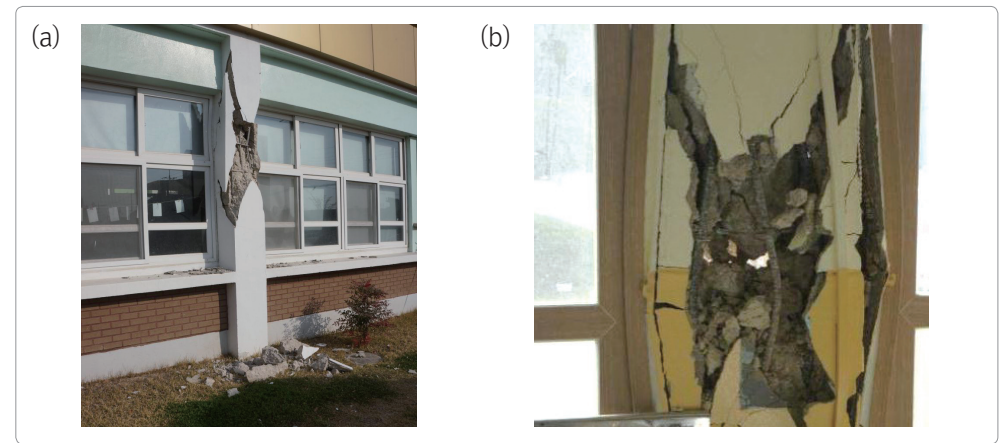


그림 3.1 포항지진 피해. 건물 피해(흥해초등학교)

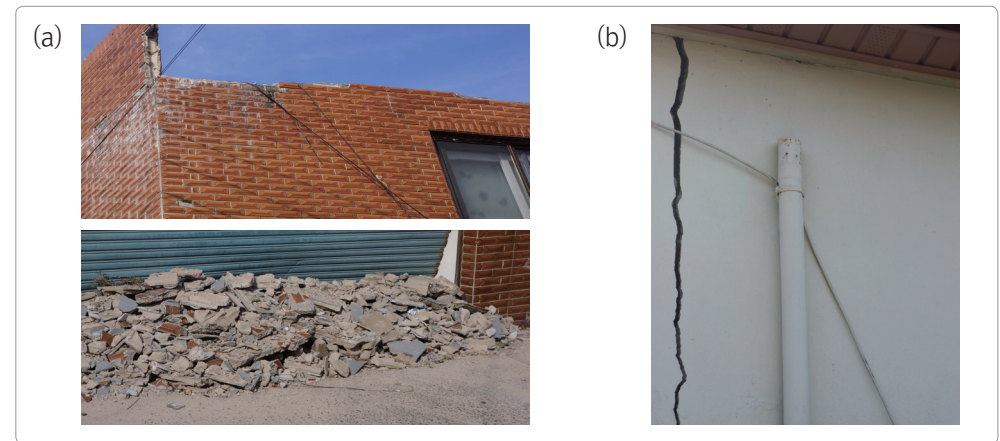


그림 3.2 포항지진 피해. (a) 건물의 난간파손(흥해읍), (b) 건물의 외벽파손(흥해읍)



그림 3.3 포항지진 피해. 건물피해(흥해읍 대성아파트)



그림 3.4 포항지진 피해. 액상화 현상(흥해읍)

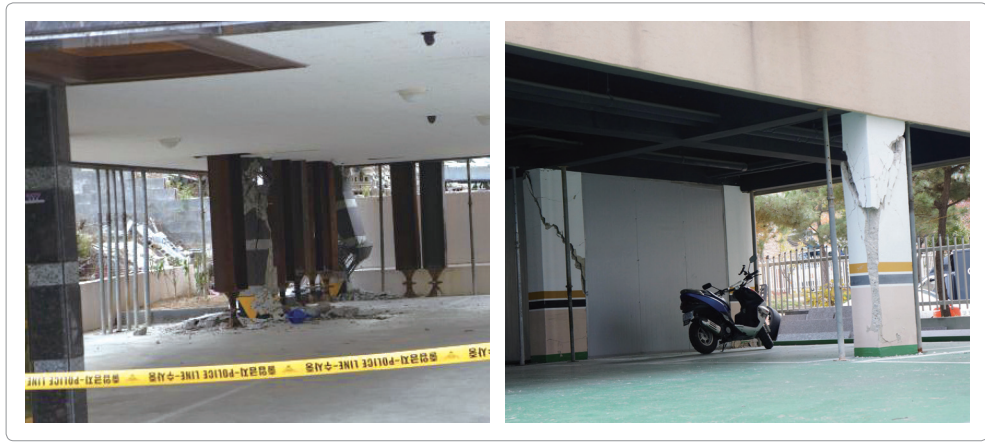


그림 3.5 포항지진 피해. 필로티 구조 기둥 파손(장량동)



그림 3.6 포항지진 피해. 고층아파트 외벽 균열(흥해읍, 장성동)



그림 3.7 포항지진 피해. 창문 탈락 및 파손(한동대학교)

그림 3.1에서 그림 3.7은 현장조사를 통해 확인된 피해 사진이며 확인된 피해 현상은 진도 Ⅷ에 의한 현상과 일치한다.

피해 진도는 지방자치단체에서 수집한 피해조사를 중심으로 평가하였으며 중복피해신고 등을 제외한 20,074건의 피해내용에 대하여 피해정도에 따라 진도 Ⅴ에서 진도 Ⅷ로 산정하였다. 지방자치단체 피해조사 내용에 근거해 진도 Ⅴ로 산정된 피해는 경미한 건물 균열이 대부분이었으며, 진도 Ⅵ의 피해는 벽체의 균열이 많고 물건이나 타일의 탈락에 의한 파손과 담장 파손, 소파 이상의 피해 등이 나타났다.

그리고 반파와 소규모의 액상화로 피해가 있을 시 진도 Ⅷ의 등급을 산정하였다. ‘2017년 자연재난조사 및 복구계획수립 지침(중앙재난안전대책본부, 2017)’에 따르면 주택의 소파와 반파는 지진피해에 한정된 피해로 소파는 기둥·벽체·지붕 등 주요 구조부가 50% 미만 파손되었으나 수리하지 않고는 주택 사용이 불가능한 경우이며, 반파는 기둥·벽체·지붕 등 주요 구조부가 50% 이상 파손되어 수리하지 않고는 주택 사용이 불가능한 경우를 말한다. 진도 Ⅷ의 유형은 안전점검 결과 ‘위험’ 판정을 받은 건물들이다.

그림 3.8은 지방자치단체 피해조사를 기반으로 산정한 진도를 지도에 나타낸 것으로 주소로 표기된 조사 지점을 위·경도로 변환하여 나타내었다. 진도 분포는 아파트와 같은 공동 주거지역이 많아 조사된 피해 건수에 비해 실제 조사지점이 적게 나타났다. 대부분의 지진피해는 반경 30km 내외에서 발생하였으며, 경주 주변 지역에서 피해가 일부 나타나기도 하였다. 피해조사 자료에 근거한 최대진도는 진도 Ⅷ로 주로 진앙에서 반경 15km 이내에 발생하였다. 진도 V는 11,920건으로 가장 많았고 진도 Ⅷ은 337건으로 193건의 진도 Ⅷ보다 더 많이 조사되었는데 이는 아파트와 같은 공동 주거지역에서 심각한 피해가 발생하였기 때문이다. 실제 발생한 피해를 바탕으로 분석한 진도 결과를 통해 구조물의 형태에 따라 피해 유형이 다르게 나타날 수 있다.

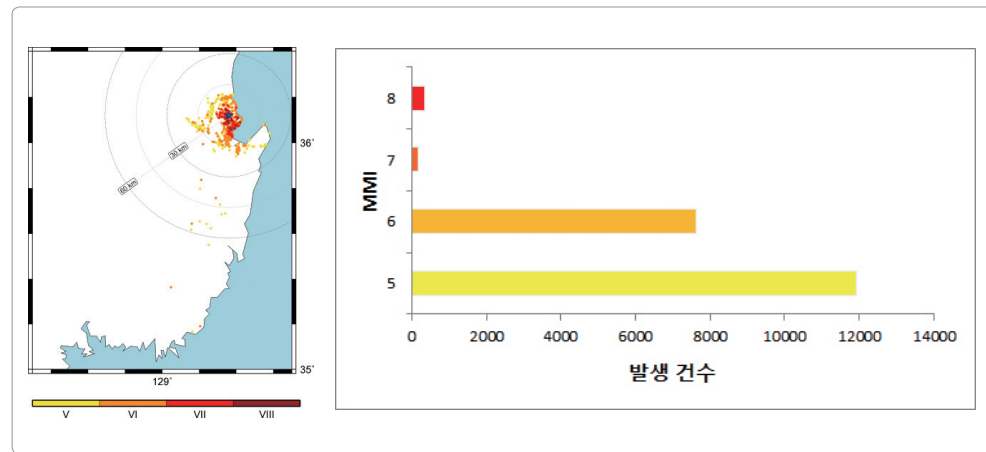


그림 3.8 지방자치단체 피해조사에 근거해 산정한 진도 분포

1.2. 진도 분포의 해석

포항 지진피해 분포와 토지피복도를 중첩하여 지진피해 분포를 비교하였다. 토지피복도란 토지의 피복과 토지 활용 특성을 나타내는 자료이다. 이를 통해 토지 이용, 건축물 상세정보 등 사회·문화적 요소를 고려한 진도 분포 해석을 시도하였다. 토지피복도의 대분류 항목은 시가지/건조지역, 농업지역, 산림지역, 기타초지, 습지, 나지, 수역으로 나뉘고 중분류는 7개의 대분류 항목에서 세분화하여 총 23개의 피복으로 나뉜다. 토지 이용 상태와 피해 현황과의 관계를 파악하기 위해 환경부의 중분류 토지피복도를 활용하였다. 그림 3.9는 진도 분포를 토지피복지도에 중첩하여 나타낸 것이다.

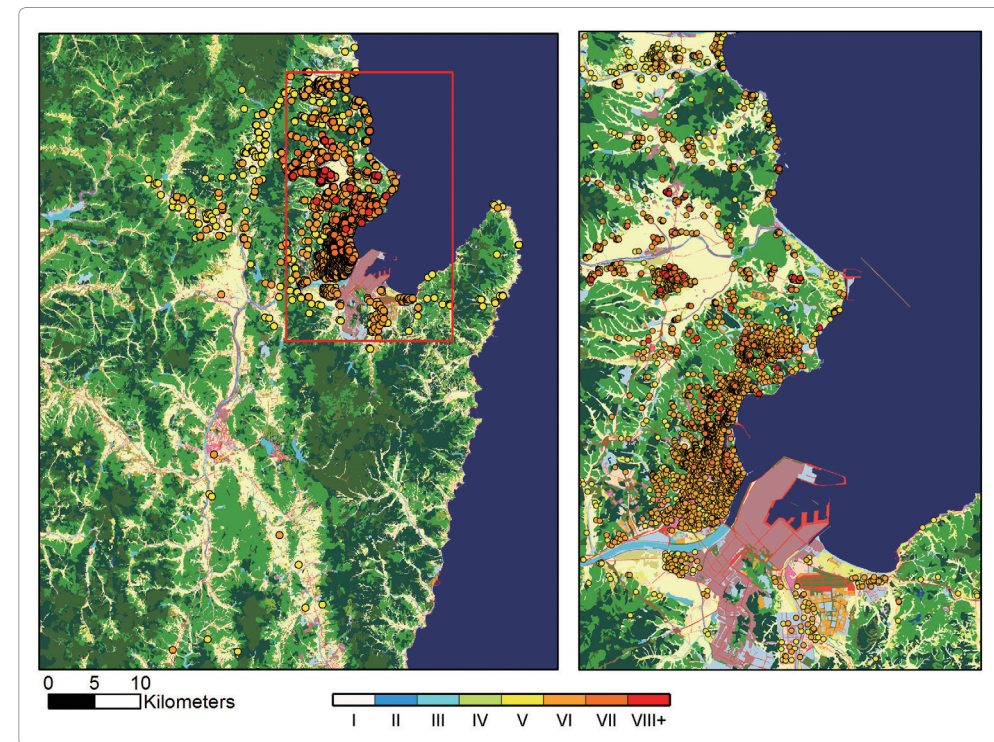


그림 3.9 토지피복도에 중첩한 포항 지진 진도 분포도

포항지진의 피해는 주로 진도 V에서 Ⅷ까지 분포하며 시가지/건조지역, 농업지역, 산림지역, 나지 등에서 피해가 발생하였고 이 중 주거지역의 피해가 가장 크게 나타났다. 포항의 총 20,074건의 지진피해 중 66%는 주거지역에서 발생하였으며 그 외 기타나지 12%, 침엽수림 9%, 상업지역 8%, 논 1% 순으로 발생하였다. 진도 분포가 커질수록 주거지역의 분포도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 진도 Ⅷ의 경우 피해지역 99%가 주거지역인 것으로 나타났다. 그 외의 특징으로는 진도 Ⅷ의 경우에만 침엽수림(1%)보다 논(2%)의 피해 분포가 더 크게 나타났다. 진도 분포별 토지 피해 비율은 표 3.2에 표기하였다.

표 3.2. 포항지진 진도 분포별 토지 피복 비율

| 토지피복 | 포항지진 진도 분포 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------|--------------|-----------|---------------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | 진도 V (건) | 비율 (%) | 진도 VI (건) | 비율 (%) | 진도 VII (건) | 비율 (%) | 진도 VIII (건) | 비율 (%) | 전체 (건) | 비율 (%) | |
| 시가화/ 건조 지역 | 주거지역 | 8,089 | 67.86 | 4,766 | 62.51 | 141 | 73.06 | 332 | 98.52 | 13,328 | 66.39 |
| | 공업지역 | 6 | 0.05 | 6 | 0.08 | 1 | 0.52 | 0 | - | 13 | 0.06 |
| | 상업지역 | 911 | 7.64 | 742 | 9.73 | 26 | 13.47 | 3 | 0.89 | 1,682 | 8.38 |
| | 위락시설지역 | 38 | 0.32 | 55 | 0.72 | 0 | - | 0 | - | 93 | 0.46 |
| | 교통지역 | 15 | 0.13 | 14 | 0.18 | 0 | - | 0 | - | 29 | 0.14 |
| | 공공시설지역 | 59 | 0.49 | 22 | 0.29 | 1 | 0.52 | 0 | - | 82 | 0.41 |
| 농업 지역 | 논 | 141 | 1.18 | 82 | 1.08 | 5 | 2.59 | 0 | - | 228 | 1.14 |
| | 밭 | 82 | 0.69 | 68 | 0.89 | 3 | 1.55 | 0 | - | 153 | 0.76 |
| | 하우스재배지 | 1 | 0.01 | 1 | 0.01 | 0 | - | 0 | - | 2 | 0.01 |
| | 과수원 | 8 | 0.07 | 8 | 0.10 | 0 | - | 0 | - | 16 | 0.08 |
| | 기타재배지 | 9 | 0.08 | 9 | 0.12 | 3 | 1.55 | 1 | 0.30 | 22 | 0.11 |
| 산림 지역 | 활엽수림 | 5 | 0.04 | 9 | 0.12 | 0 | - | 0 | - | 14 | 0.07 |
| | 침엽수림 | 1,032 | 8.66 | 822 | 10.78 | 2 | 1.04 | 0 | - | 1,856 | 9.25 |
| | 혼효림 | 12 | 0.10 | 8 | 0.10 | 0 | - | 0 | - | 20 | 0.10 |
| 기타 초지 | 자연초지 | 1 | 0.01 | 2 | 0.03 | 0 | - | 0 | - | 3 | 0.01 |
| | 골프장 | 1 | 0.01 | 0 | 0.00 | 0 | - | 0 | - | 1 | 0.00 |
| | 기타초지 | 17 | 0.14 | 9 | 0.12 | 0 | - | 0 | - | 26 | 0.13 |
| 습지 | 내륙습지 | 0 | - | 1 | 0.01 | 0 | - | 0 | - | 1 | 0.00 |
| | 연안습지 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| 나지 | 채광지역 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| | 기타 나지 | 1,493 | 12.53 | 1,000 | 13.12 | 11 | 5.70 | 1 | 0.30 | 2,505 | 12.48 |
| 수역 | 내륙수 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| | 해양수 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |

제 2 절 부지특성 조사

부지의 증·감폭 특성을 파악하기 위해서는 지반조사를 수행하여 깊이별 전단파속도와 지질특성을 파악해야 하지만 이에 대한 수행이 어려울 경우 지진 관측기록을 통해 부지효과를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 포항지진 발생 이후 신속하게 진앙 인근에 임시 지진 관측소를 설치하여 상시 지진동 자료를 수집하였다. 수집된 여진 기록을 통해 수평 대 수직 스펙트럼비(Horizontal and Vertical Spectrum

ratio, HVSR)분석을 수행하였으며 이를 통하여 하부 지반특성을 추정하였다. 임시 지진 관측소 설치 위치는 그림 3.10에 도시하였다(관측 좌표 및 장비의 정보는 표 6.1참조).

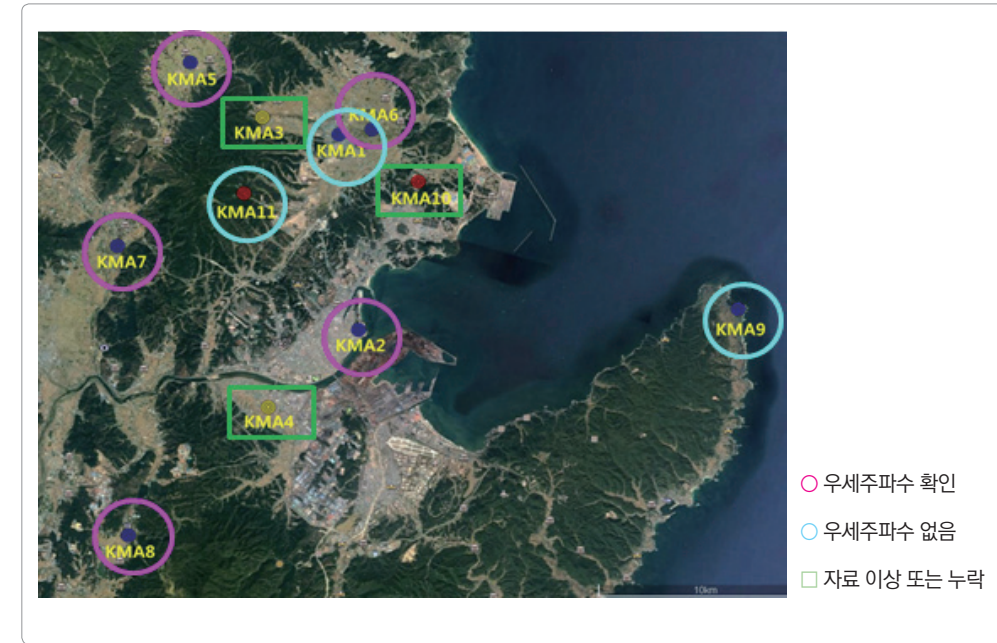


그림 3.10 이동식 지진계 설치 지점

수평 대 수직 스펙트럼 비 분석 시 SESAME 유럽연합에서 개발된 GEOPSY 프로그램을 사용하였다 (Wathelet et al., 2004). 상시미동에 대한 수평 대 수직 스펙트럼 비의 첨두 주파수를 통해 Vs30(지표 아래 30m 범위의 평균 전단파속도)과 z_{1.4}(Vs ≥ 1.4km/s) 심도를 추정할 수 있다(Kwak and Seyhan, 2018). 스펙트럼 비에서 1~20Hz 범위에 최대값을 갖는 주파수를 우세주파수(f_{peak})라 하며, 토층이 깊거나 연약할수록 저주파수영역에서 관측된다. 토층의 심도가 깊은 경우 스펙트럼 비에서 두 개의 첨두주파수가 나타날 수도 있다. 이때 우세주파수 보다 낮은 주파수 영역에서 발생하는 첨두주파수를 기본주파수(f₀)라 한다. Kwak and Seyhan (2018)은 우세 주파수와 Vs30과 z_{1.4}심도의 상관식을 제안하였다. 제안된 식은 아래와 같다:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad f_{peak} &= \frac{1}{0.05 + \sqrt{1 + \left(\frac{0.85}{Vs30}\right)^6}} \\
 (2) \quad f_0 &= \begin{cases} f'_0 = \exp\left(2 - \log\left(\frac{Z_{1.4} + 25}{25}\right)\right), & f'_0 < f_{peak} \\ f_{peak}, & f'_0 \geq f_{peak} \end{cases}
 \end{aligned}$$

수평 대 수직 스펙트럼 비 분석 결과와 이를 바탕으로 추정되는 토층 정보를 그림 3.11에 나타내었다. 이때 토층정보의 추정치는 Kwak and Seyhan (2018)의 제안식을 통해 계산된 값이다. KMA2(포항 기상대, 송도동)의 경우 포항지진 이후 관측된 기간 동안의 자료의 품질이상으로 토층정보 파악이 어려웠으나 이전 2016년 9.12지진 후 설치된 이동식 지진계에 기록된 자료(관측기간: 2017년 1월 2일 ~10일)를 사용하여 결과를 도출하였다. KMA2(포항기상대, 송도동)와 KMA6(지하댐2양수장, 흥해읍)은 저주파 대역에서 우세주파수가 나타났으며 Vs30이 260 m/s이하로 추정되어 장주기 진동의 증폭효과가 크게 나타날 것으로 파악된다. KMA5(신광초등학교, 신광면), KMA7(다산보건진료소, 강동면)과 KMA8(화산보건진료소, 현북면)은 단주기 대역에서 우세주파수가 나타나며 앞선 두 지역보다 상대적으로 장주기 진동의 증폭이 적을 것으로 판단된다. KMA1(영일공공도서관, 흥해읍), KMA9(국립등대박물관, 호미곶면), KMA11(도음산 산림문화 수련장, 흥해읍)은 특정한 우세주파수를 찾기 어려웠다. 이와 같은 관측소 지표 아래 30m까지의 평균 전단파 속도(Vs30)를 통해 포항지진의 영향으로 대상부지에 나타난 증폭특성을 간접적으로 확인할 수 있었으며, 보다 정확한 해석을 위해서는 지질학적 구조와 관측 환경에 대한 상세한 정보가 더 필요할 것으로 판단된다.

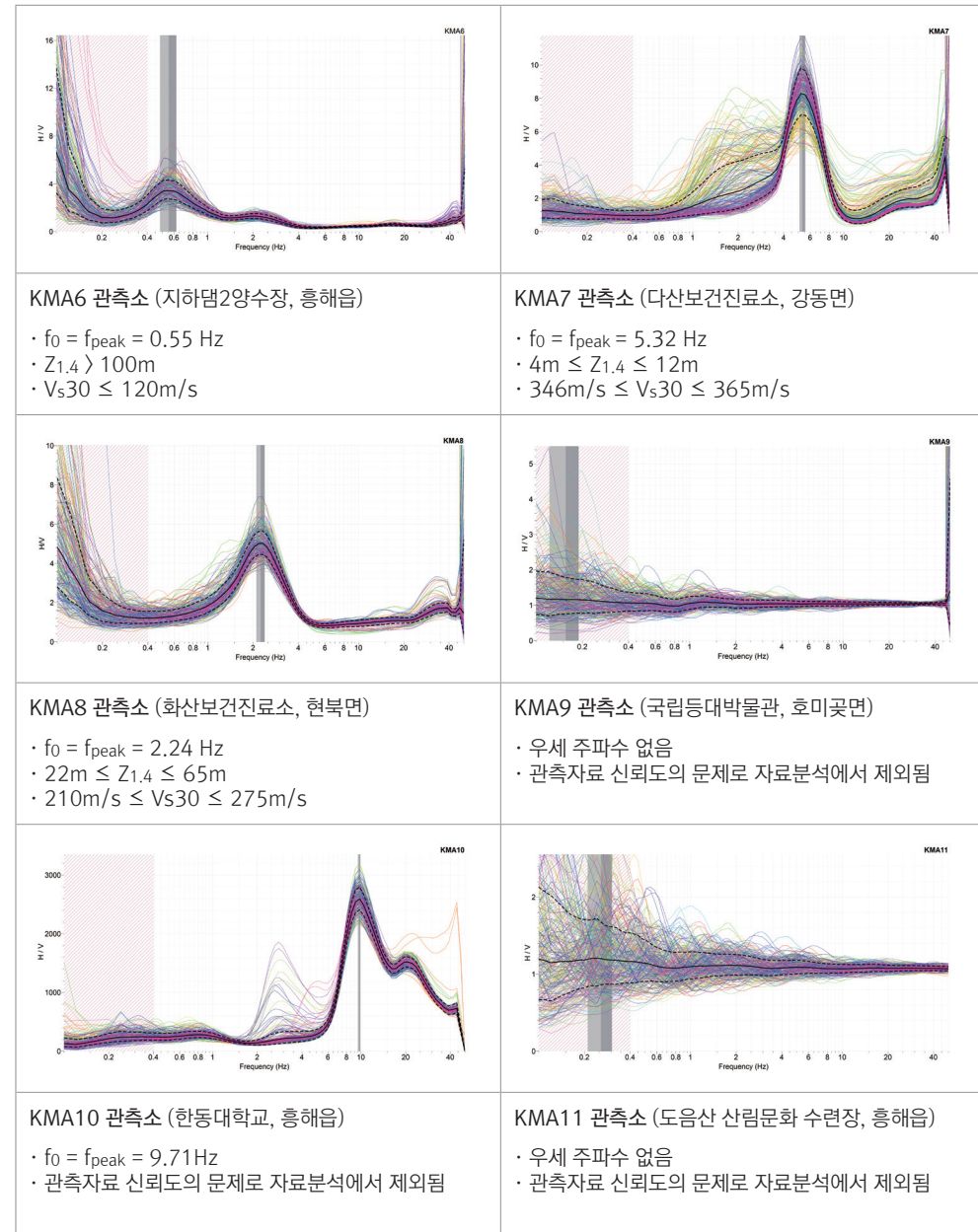
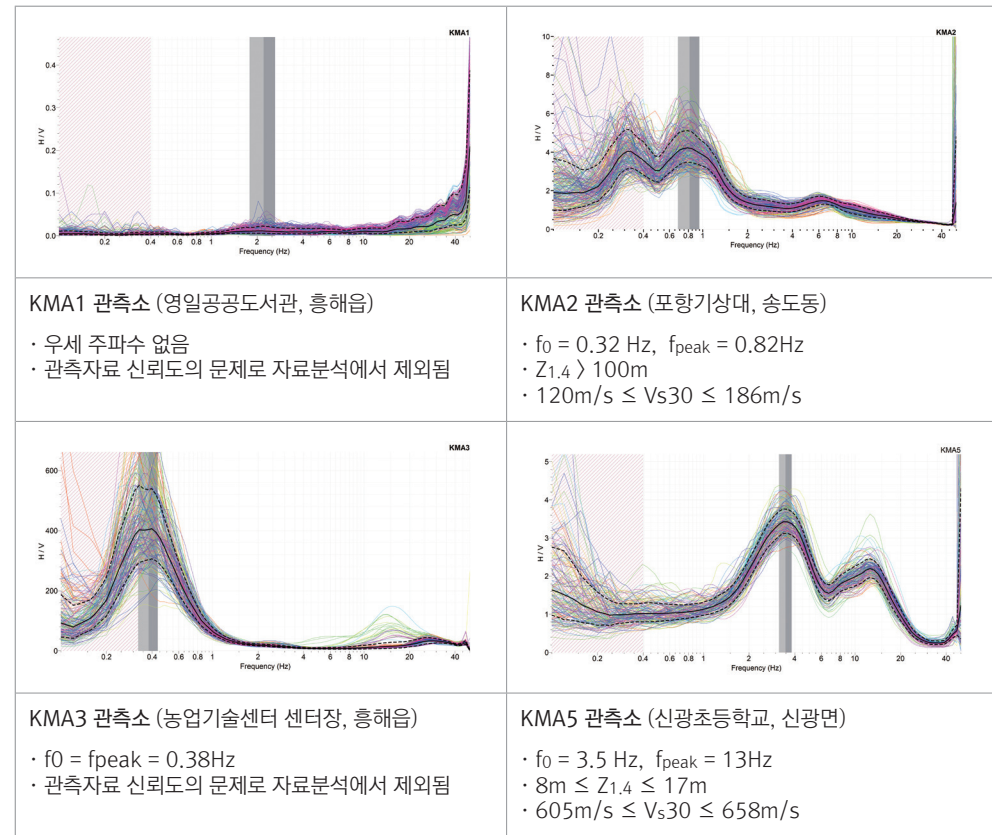


그림 3.11 임시 관측소의 수평 대 수직 스펙트럼 비 분석 결과

제4장

포항지진 지표변위 분석



제 4 장

포항지진 지표변위 분석

지진 발생에 따른 지표변위는 지진 규모와 진원깊이에 따라 달라진다. 일반적으로 매우 얇은 곳에서 발생하는 지진을 제외하고 규모 5 이하에서는 지진에 의한 지표변위가 발생하지 않는 것으로 알려져있다. 9.12지진의 경우 포항지진보다 큰 규모로 지진이 발생하였지만 진원깊이가 깊었기 때문에 특별한 지표변위가 발생하지 않았다(Park et al., 2018). 이에 반해 포항 지진의 경우 9.12지진보다 발생 깊이가 얇기 때문에 지표 변위가 발생할 확률이 높다. 그러므로 포항 지진에 의한 지표변위 관측을 위해 위성 영상레이더 간섭기법과 전지구위성항법시스템 자료를 이용하여 포항 지진에 의한 지표변위를 분석하였다.

제 1 절 위성 영상레이더 간섭기법을 이용한 지표변위 분석

위성 영상레이더(SAR: Synthetic Aperture Radar)는 마이크로파를 이용하여 위성과 지표의 거리를 관측하는 것으로 서로 다른 시기에 획득된 두 장의 영상을 이용하면 전후의 지표변위 관측이 가능하다. 이러한 기법을 위성 영상레이더 간섭기법(InSAR: SAR Interferometry)이라고 하며 미세한 지표변위 관측에 많이 활용되고 있다. 특히 규모 5~6 정도의 지진에 의한 지표변위는 지진 발생 깊이에 따라 달라지며 변위량도 작기 때문에 이를 정밀하게 관측할 수 있는 위성 영상레이더 간섭기법이 많이 활용되고 있다(Lee et al., 2017).

1.1. 분석 자료

포항 지진에 의한 정밀 지표변위 관측을 위해 유럽항공우주국(European Space Agency, ESA)에서 운용중인 Sentinel-1 SAR 위성 자료와 이탈리아 위성인 CSK (CosmoSky-Med) SAR 위성 자료를

활용하였다. Sentinel-1 SAR 위성은 C-band 위성으로 14일마다 한 번씩 같은 지역을 촬영하게 되며 공간해상도는 약 10m이다. 이와 더불어 CSK 위성 자료의 경우 X-band 위성으로 공간해상도는 약 1m이다. 또한 지표 고도에 의한 위상 변화를 없애기 위해 TanDEM-X로 제작된 10m급 고해상도 수치표고모델(World Digital Elevation Model)을 사용하였다. 분석 자료의 요약은 표 4.1과 같다.

표 4.1 위성 영상레이더 분석 자료

| 사용된 자료 | 주파수대역 | 공간해상도 | 주영상 촬영날짜 | 부영상 촬영날짜 | 촬영날짜 차이 | 수직기선거리 |
|---------------------|--------|-------|-------------|-------------|---------|--------|
| Sentinel-1 SAR 위성자료 | C-band | 약 10m | 2017.11.04. | 2017.11.16. | 12일 | 약 100m |
| CSK SAR 위성자료 | X-band | 약 1m | 2017.11.12. | 2017.11.20. | 8일 | 약 65m |
| World DEM | X-band | 약 12m | - | - | - | - |

1.2. 지표변위 관측 결과

CSK와 Sentinel-1 SAR 자료를 이용하여 위성 영상레이더 간섭기법을 적용하고 지표변위를 관측하였다. 위성 영상레이더를 기반으로 관측된 지표변위는 그림 4.1과 같다.

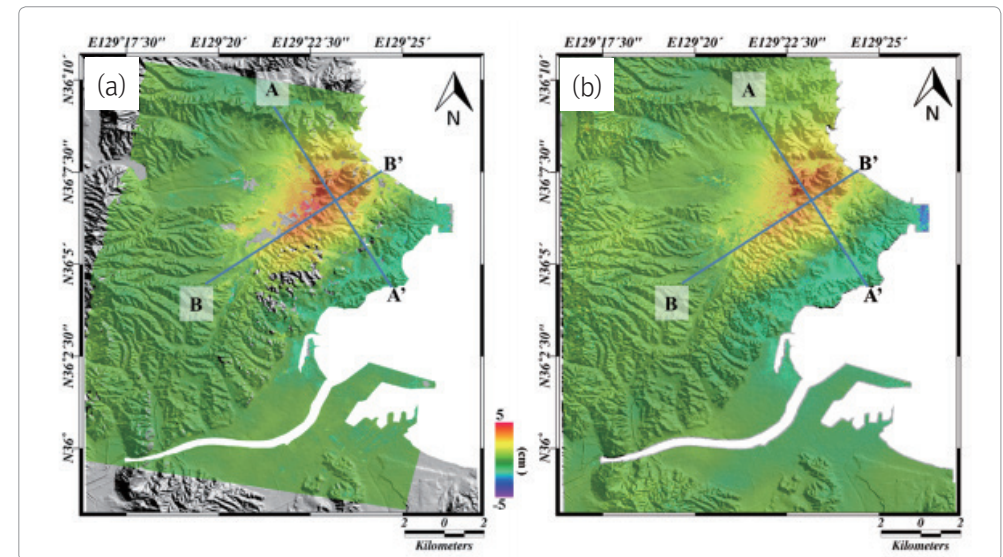


그림 4.1 지표변위 관측 결과. (a) CSK 자료: 2017.11.12.~2017.11.20., (b) Sentinel-1 자료: 2017.11.04.~2017.11.16.

두 개의 서로 다른 센서로 획득된 자료에서 유사한 지표변위 패턴이 관측되었다. 이를 통해 포항 지진에 의해 지표변위가 발생하였음을 확인하였으며 지표 변위에 대한 프로파일은 그림 4.2와 같다.

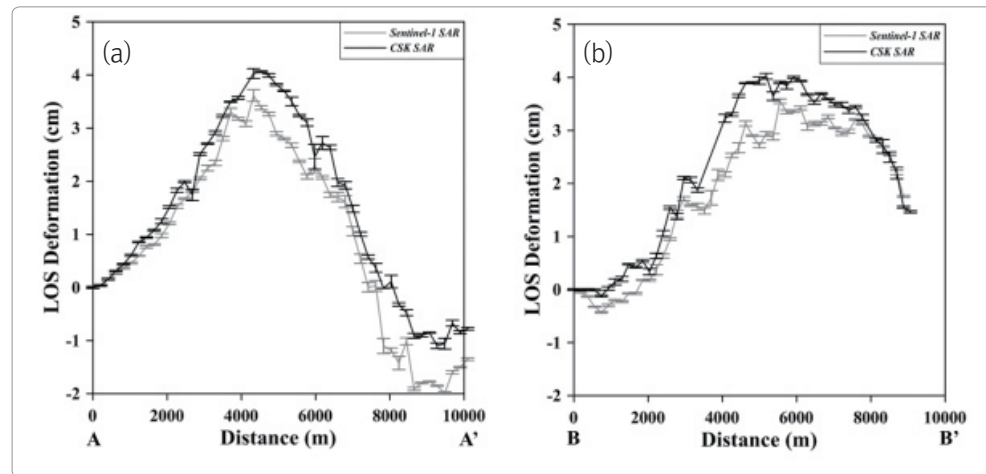


그림 4.2 지표변위 프로파일 결과. 그림 4.1의 (a) AA' (b) BB' 에 대한 프로파일

약 8km × 10km에 해당하는 지역에서 지표변위가 발생하였음을 확인하였으며 최대 지표변위량은 약 4cm로 계산되었다. 관측된 지표변위량을 이용하여 단층 모델링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 4.3에 도시하였다.

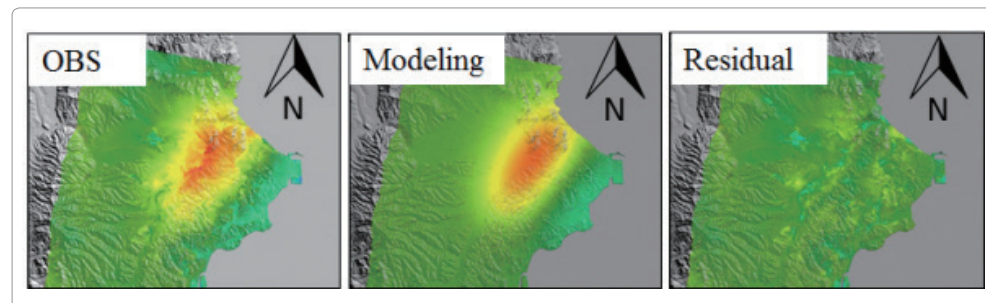


그림 4.3 지표변위량을 이용한 단층 모델링, OBS는 모델링 수행을 위해 사용된 입력값이며 Modeling은 모델링 수행 결과, Residual은 입력값과 모델링 수행 값의 차이임

모델링 결과값을 바탕으로 단층의 크기는 약 6.6km × 1.1km로 추정되며 이러한 단층에서 약 70cm의 slip이 발생하였을 것으로 추정된다. 향후 지진계 자료에서 관측된 정보와 비교 검증의 과정을 통해 단층 모양 추정이 필요할 것이다. 또한 위성 영상레이더 간섭기법을 통해 관측된 지표변위는 기본적으로 LOS (Line-Of-Sight) 방향의 지표변위로 정확한 수직-수평방향의 지표변위가 아니며, 이를 확인하기 위해서는 수직-수평방향으로 변환이 필요하며 현재 사용된 Ascending 자료에 Descending 자료를 추가 사용한 지표변위 관측이 필요하다. 수직-수평방향으로의 구분이 가능해지면 좀 더 정확한 단층 모양 추정이 가능할 것으로 기대된다.

제 2 절 전지구 위성항법시스템을 이용한 지표변위 분석

전지구 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)은 지구 주위를 선회하는 GNSS 위성으로부터 송신된 전파신호를 지구표면에서 수신하여 수신기의 위치정보를 결정하는 시스템이다. 수신기의 위치정보를 시간에 따라 계산함으로써 관측지점의 이동속도, 이동방향, 시간당 변화율 등을 산출할 수 있다. 특히 지진이 발생했을 때, 지진 발생 전후의 특정기간 자료를 이용하여 산출한 위치를 상호 비교함으로써 지진에 의한 영향과 변위를 분석할 수 있다.

2.1. 관측 자료

2017년 11월 15일에 발생한 포항 지진을 대상으로 지진에 의한 지표면의 움직임을 관측하기 위해 포항 인근지역의 GNSS 상시기준국 자료를 이용하였다(그림 4.4). 이때 진앙 주변에서 운영 중인 기관별 상시기준국 중에서 국토지리정보원의 영덕, 청송, 대구, 그리고 한국천문연구원의 보현산 관측 자료를 처리하였다. 표 4.2는 대상 관측소의 운영기관, 진앙거리, 주변 전경을 정리한 것이다. 이들 관측소는 진앙으로부터 평균 45km 떨어져 있다. 진앙과 가장 인접한 국립해양측위정보원의 호미곶 관측소(진앙거리 19.0km)의 경우에는 안테나가 7m 높이의 육각철탑 위에 설치되어 있어 이번 분석에서 제외하였다.

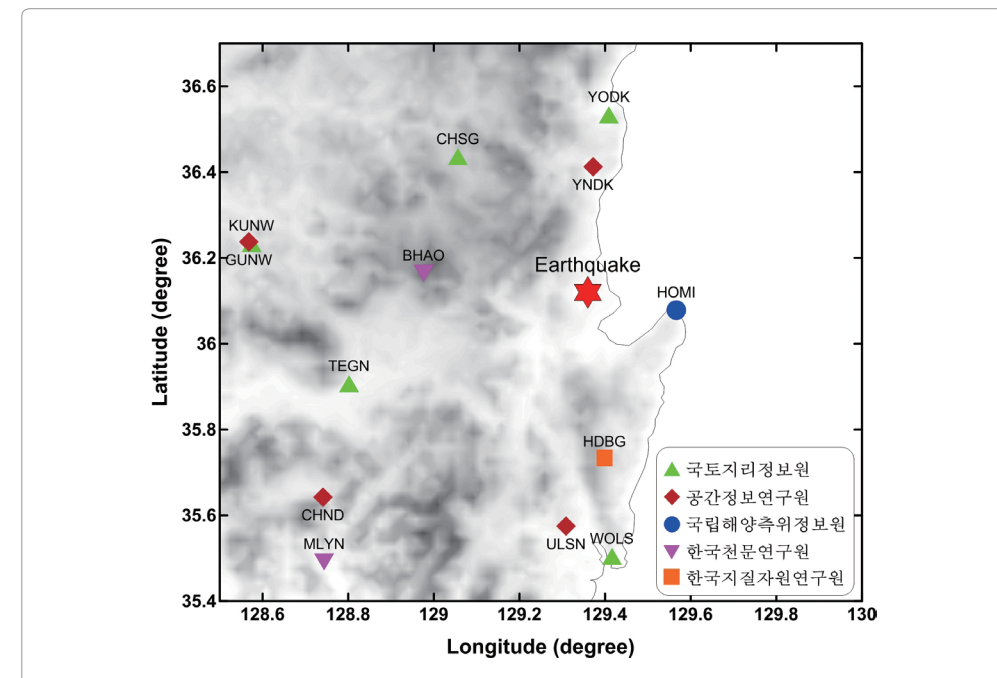


그림 4.4 진앙주변의 기관별 GNSS 상시기준국 (국토지리정보원: 삼각형, 공간정보연구원 : 마름모, 한국천문연구원 : 역삼각형, 국립해양측위정보원: 원, 한국지질자원연구원: 사각형)

표 4.2 사용 기준국

| 기준국 | YODK (영덕) | CHSG (청송) | BHAO (보현산) | TEGN (대구) |
|------|---|---|--|---|
| 운영기관 | 국토지리정보원 | 국토지리정보원 | 한국천문연구원 | 국토지리정보원 |
| 진앙거리 | 46.0km | 44.5km | 35.0km | 55.6km |
| 전경사진 |  |  |  |  |

2.2. 지표변위 분석 결과

지진 발생일 이전 일주일 동안의 자료(2017.11.9.~11.15.)를 이용하여 포항지진에 의한 영향을 분석하였다. 자료처리는 스위스 베른대학에서 개발한 고정밀 GNSS 자료처리 소프트웨어인 Bernese v.5.2를 사용하여 수행되었고, 일일 평균좌표를 산출하였다. 그림 4.5는 지진발생 일주일 전부터 지진 발생 당일까지 일주일간 각 기준국별 동서, 남북, 수직 방향의 일일좌표를 표시한 것으로 오른쪽 위쪽 그림부터 시계방향으로 영덕(YODK), 보현산(BHAO), 대구(TEGN), 청송(CHSG)을 각각 나타낸다.

지진이 발생한 당일(319일) 대상 기준국들의 일일좌표는 이전 일주일간 좌표의 오차범위 내에 분포하였다. 이러한 결과는 포항지진이 35km 이상 떨어진 GNSS 관측지점까지 영향을 주지 않았음을 보여준다. 이는 위성 영상레이더를 기반으로 관측된 지표변위가 직경 10km 이내에만 영향을 미친 결과와 부합한다. 결론적으로 포항지진이 진앙 주변의 지표변동을 야기하였지만, 수 십 km 떨어진 먼 지역까지 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

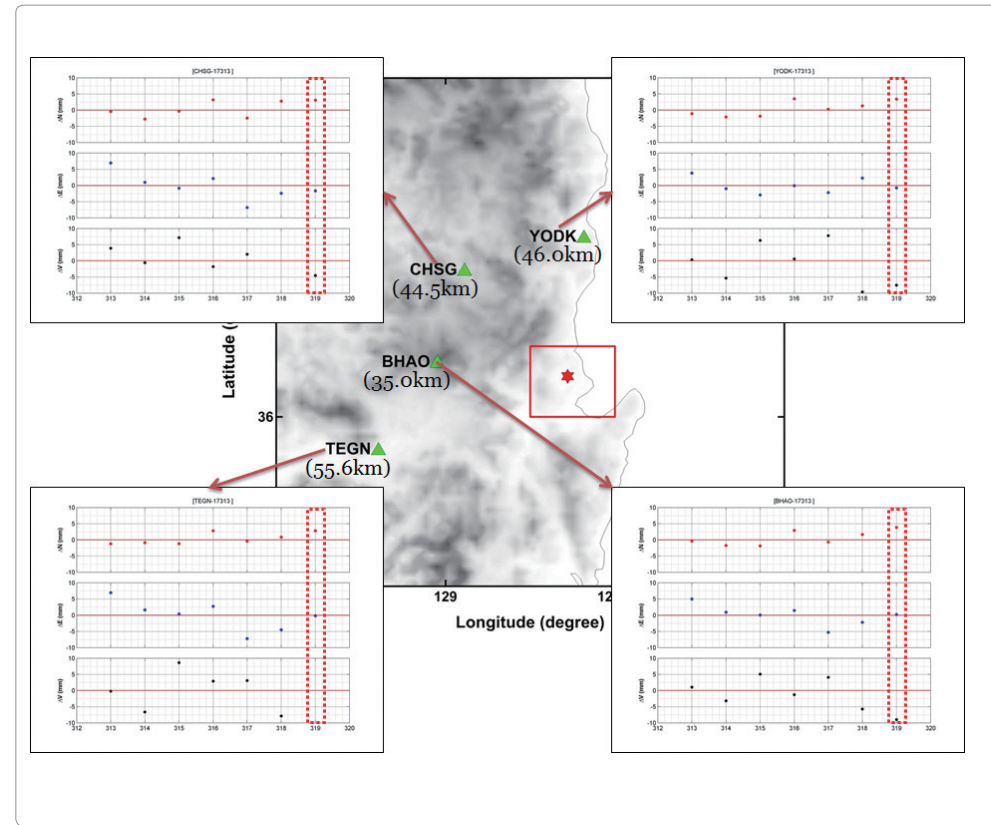


그림 4.5 지진발생 전부터 일주일간 관측소별 동서, 남북, 수직방향 좌표변동. 오른쪽 위쪽 그림부터 시계 방향으로 영덕(YODK), 보현산(BHAO), 대구(TEGN), 청송(CHSG)

제5장

포항지진과 9.12지진의 비교



제 5 장

포항지진과 9.12지진의 비교

포항지진(규모 5.4)은 2016년 발생한 9.12지진(규모 5.8) 다음으로 한반도 계기지진 관측 사상 두 번째로 큰 규모의 지진에 속한다. 두 지진은 발생 위치가 다를 뿐 아니라 여러 가지 지진학적으로 다른 특성을 보인다. 이 장에서는 그 주요 특성을 비교하고자 하며, 표 5.1에 간단하게 정리하였다.

표 5.1 포항지진과 9.12지진의 특성 비교

| 구분 | 포항지진 | 9.12지진 |
|---------------------------------|--|--|
| 주요 지진 규모 | 본진(°17.11.15.14:29) ML5.4, Mw5.4 여진(°17.11.15.16:49) ML4.3, Mw4.3 여진(°18.02.11.05:03) ML4.6, Mw4.6 | 전진(°16.09.12.19:44) ML5.1, Mw5.0 본진(°16.09.12.20:32) ML5.8, Mw5.5 여진(°16.09.19.20:33) ML4.5, Mw4.4 |
| 본진 진앙 | 36.11°N, 129.37°E 포항 북구 북쪽 7.5km 지역 | 35.77°N, 129.18°E 경주 남남서쪽 8.7km 지역 |
| 본진 진원깊이 ¹⁾ | 7km | 15km |
| 주요 지진 단층운동 | 역단층, 주향이동단층 혼재 | 대부분 주향이동단층 |
| 본진 발생 후 1개월 간 여진 횟수 (규모 2.0 이상) | 70회 | 142회 |
| 일별 여진횟수 (규모 1.0 이상) | 약 45일 이후 1회 이하로 감소 | 약 6개월 후 1회 이하로 감소 |
| 본진 최대지반가속도 ²⁾ | 0.3739g 포항관측소(PHA2) | 0.6092g 울산관측소(USN2) |
| 본진 최대 계기진도 ³⁾ | VI (경북) | VI (경북) |
| 피해범위 (진도 V 이상 범위) | 약 15km 이내 주로 분포 | 약 30km 이내 주로 분포 |
| 지진파 특성 | 상대적으로 저주파(0.1~5Hz) 에너지가 강함 | 고주파(5~10Hz) 에너지가 강함 |
| 지표변위 | 최대 4cm의 지표변위 발생 | 지표변위 없음 |

1) 진원깊이는 분석에 사용된 관측소 분포, 분석 방법, 속도구조 등에 따라서 달라질 수 있음
 2) 기상청 관측소 중 가장 가까운 곳에서 관측된 가속도 값으로 수평성분의 백터합
 3) 속도/가속도 관측 값을 지반 기준으로 보정한 후 가중치를 적용하여 결정된 계기진도

포항지진과 9.12지진은 경상북도 내에서 발생한 지진으로 약 40km의 진앙거리 차이를 가진다. 지진 파 역산을 통해 얻어진 두 지진의 모멘트규모(Mw)는 포항지진이 5.4이고 9.12지진이 5.5로 유사하게 나타났다. 그러나 포항지진은 역단층과 주향이동단층이 혼재한 단층운동 양상을 나타낸 반면 9.12지진은 대부분 주향이동운동을 보였다. 포항지진과 9.12지진의 시간에 따른 여진 발생 경향을 그림 5.1에 도시하였다. 포항지진 발생 후 한 달간 발생한 규모 2.0 이상의 여진 횟수는 70회로 9.12지진의 142회에 비해 적었다. 또한 포항지진은 약 45일 후에 일별 여진 횟수가 1회 이하로 줄어들었으나, 9.12지진의 경우 약 6개월 후에 1회 이하로 줄어들어 포항지진의 여진 발생률이 9.12지진에 비하여 단기간에 감소하였다.

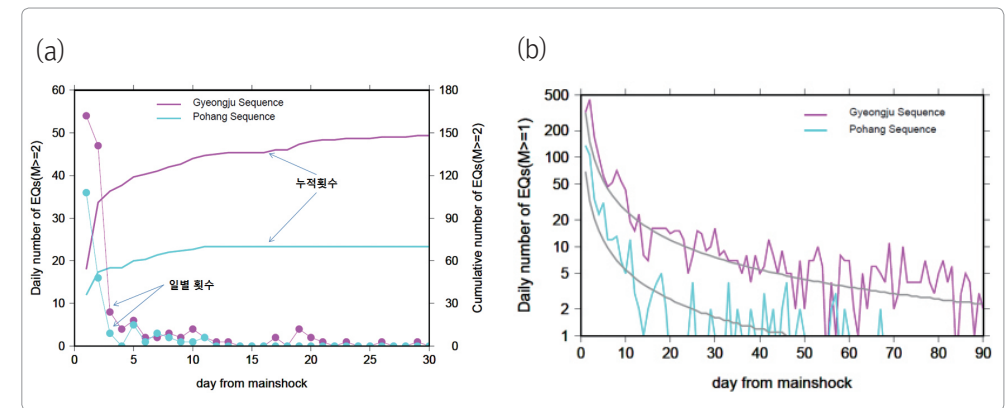


그림 5.1 (a) 시간경과에 따른 규모 2.0 이상 지진의 일별 발생횟수(원) 및 누적 횟수, (b) 규모 1.0 이상 지진의 일별 발생 횟수 분포 (하늘색: 포항지진, 분홍색: 9.12지진)

지진관측소의 기록에 기반한 본진의 최대 계기진도는 포항지진과 9.12지진 모두 경북에서 VI로 분석되었다. 본진의 위치에서 가장 가까운 지진관측소(진앙거리 약 9km)의 최대지반가속도를 비교하면, 포항지진의 경우 포항관측소(PHA2)에서 0.3739g, 9.12지진의 경우 울산관측소(USN2)에서 0.6092g로 관측되었다. 두 관측소의 진앙거리는 유사하지만 최대지반가속도는 약 2배의 차이를 보인다.

그림 5.2는 지진피해를 근거로 진도를 분류한 결과를 비교한 것으로 진도 V 이상 지역은 포항지진의 경우 반경 약 15km 이내에 분포하며, 9.12지진은 반경 약 30km 범위에 분포하여 포항지진이 9.12지진 보다 좁은 범위에 피해가 집중된 것을 확인할 수 있다. 9.12지진은 5천 건 이상의 피해신고 중 진도 VII인 지점이 7 지점이지만(기상청, 2017), 포항지진의 경우 약 2만 건의 피해신고 중 총 337 지점이 진도 VII로 평가되었다. 포항지진 및 9.12지진의 피해 분포의 지역별 특징을 비교하기 위하여 토지피복도에 포항지진과 9.12지진의 진도 분포도를 중첩하여 그림 5.3에 나타내었으며, 진도 분포별 토지피복 비율을 표 5.2에 정리하였다. 진도는 그림에 표시한 동일한 영역 내에서만 비교하였으며 그림 5.3의 토지피복도 영역 밖에서 나타난 9.12지진 피해 842건이 제외되어 전체 5,157건 중 4,316건

의 피해를 비교하였다. 9.12지진의 피해는 주로 시가화/건조지역과 농업지역에 분포한다. 총 4,316건의 지진피해 중 68%는 주거지역에서 발생했으며, 그 외에는 상업지역 7%, 공공시설지역 7%, 논 5%, 밭 3% 순으로 나타났다. 포항지진과 9.12지진에 대한 동일 영역에서의 피해 수는 각각 2만 여건과 4,300 여건으로 차이가 있지만 모두 주거지역 피해가 65% 이상으로 가장 크게 나타났다. 포항지진과 9.12지진에 대한 지진피해 지역의 토지피복율은 그림 5.4와 같다. 포항지진은 주거지역, 기타나지, 침엽수림 외에는 뚜렷한 피해지역이 나타나지 않았지만 9.12지진은 주거지역, 상업, 공업지역, 공공시설지역, 논, 밭 등 다양한 토지 피복에서 피해가 발생하였다.

포항지진 및 9.12지진의 전체 피해지역 중 90% 이상을 차지하는 상위 5개의 피해지역을 진도 분포별로 비교하여 그림 5.5에 도시하였다. 포항지진은 9.12지진에 비해서 산림지역과 나지의 비율이 높게 나타나고 9.12지진은 시가화/건조지역과 농업지역에만 분포하는 것으로 나타났다. 또한 대부분의 진도 분포는 V와 VI이며, 두 지진 모두 상위 5개의 피해지역이 진도 분포별로 일치하였다. 9.12지진의 경우, 진도 V보다 VI에서 주거지역의 비율이 증가하고 그 외 지역의 비율은 감소하였다. 포항지진의 경우, V보다 VI에서 주거지역의 비율이 감소하면서 기타 나지, 침엽수림, 상업지역의 비율이 소폭 증가하였다.

두 지진 모두 주로 주거지역과 상업지역, 논이 모든 지진피해 지역에서 공통적으로 나타났다. 9.12지진 진도 VIII의 피해지역에 대한 토지피복의 경우 다른 진도 피해 보다 논 비율이 25%로 크게 나타났다.

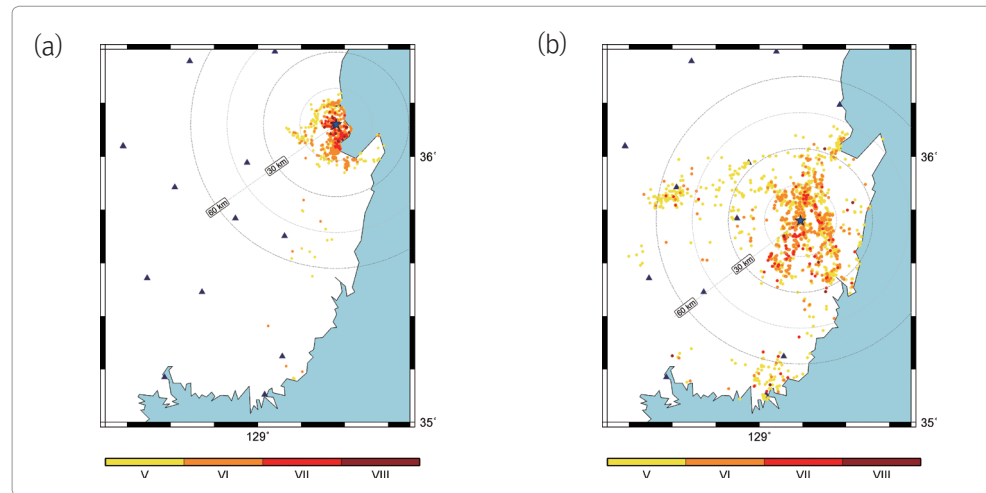


그림 5.2 (a) 포항지진과 (b) 9.12지진의 지진피해를 근거로 분류한 진도 분포

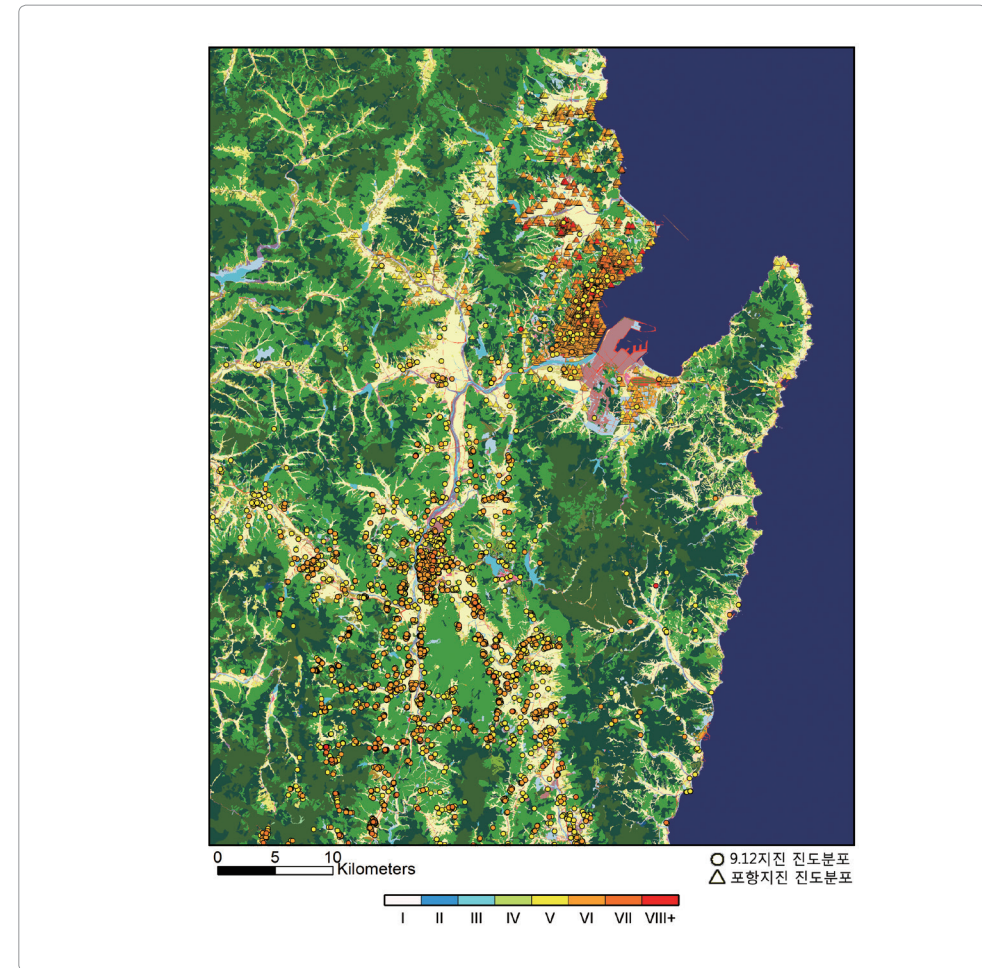


그림 5.3 토지피복도에 중첩한 포항지진 및 9.12지진의 진도 분포도

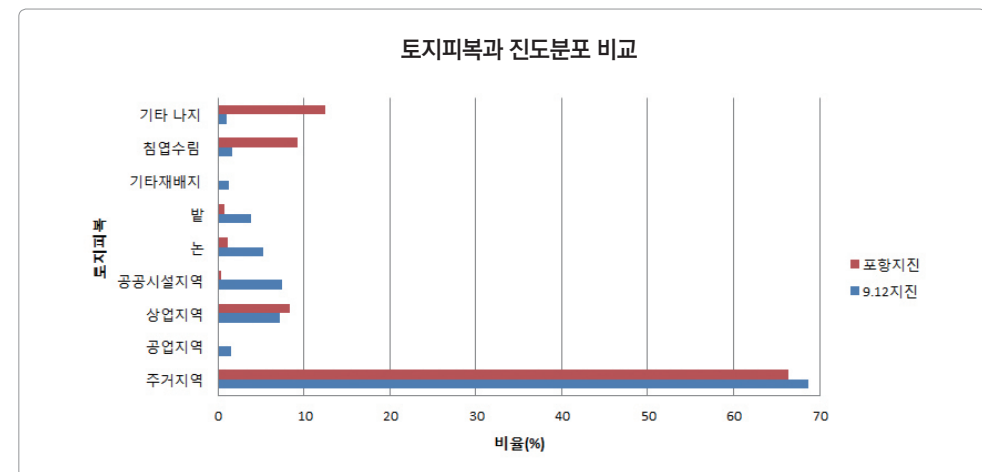


그림 5.4 지진피해 지역의 토지피복 비율

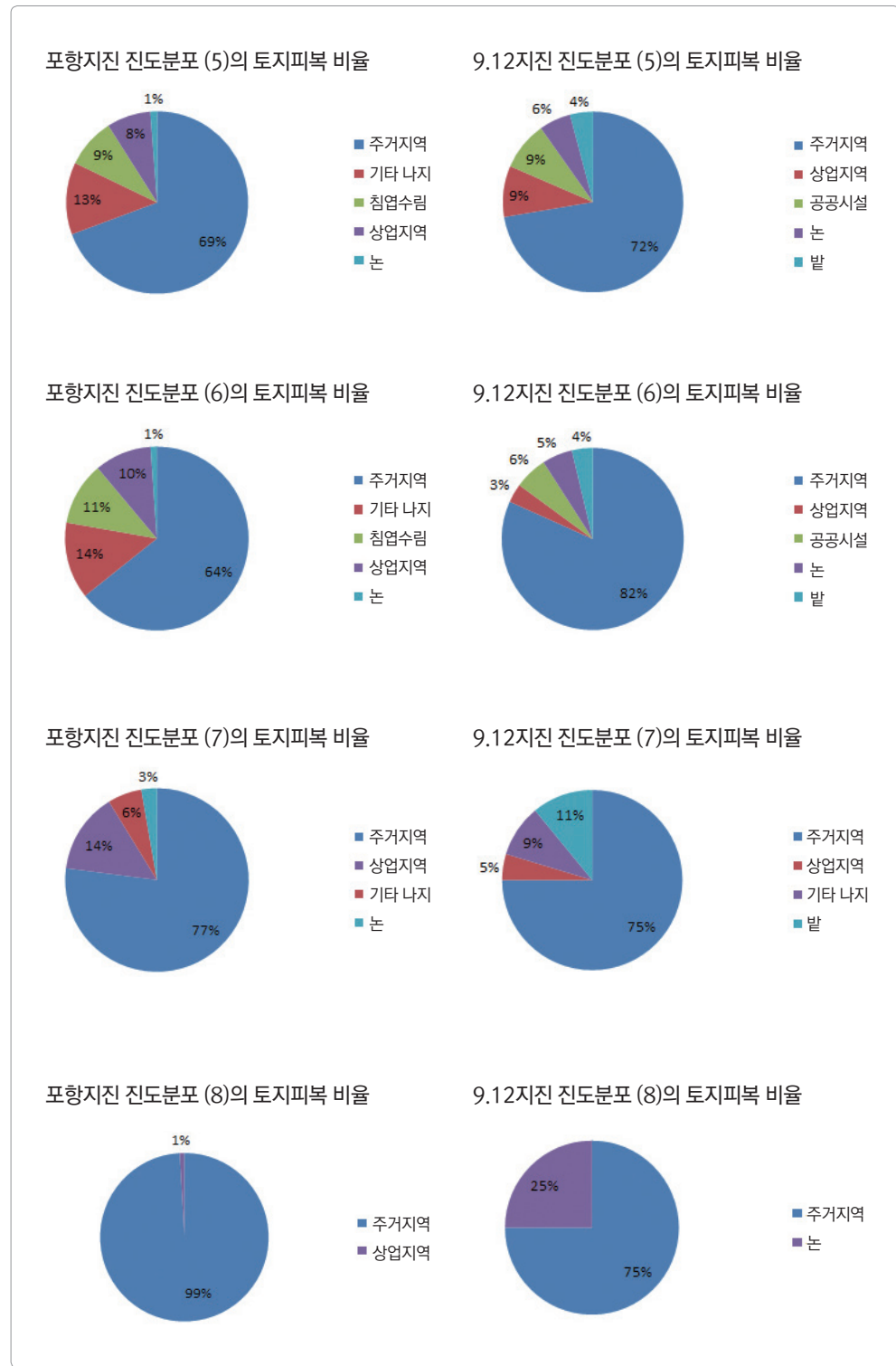


그림 5.5 포항지진 및 9.12지진 진도 분포별 피해지역의 토지피복 비율

표 5.2 9.12지진 진도 분포별 토지 피복 비율

| 토지피복 | 9.12지진 진도 분포 | | | | | | | | | | |
|----------|--------------|--------|-----------|--------|------------|--------|-------------|--------|--------|--------|-------|
| | 진도 V (건) | 비율 (%) | 진도 VI (건) | 비율 (%) | 진도 VII (건) | 비율 (%) | 진도 VIII (건) | 비율 (%) | 전체 (건) | 비율 (%) | |
| 시가화/건조지역 | 주거지역 | 2,230 | 66.55 | 684 | 76.85 | 48 | 67.61 | 3 | 75.00 | 2,965 | 68.70 |
| | 공업지역 | 53 | 1.58 | 10 | 1.12 | 0 | - | 0 | - | 63 | 1.46 |
| | 상업지역 | 282 | 8.42 | 28 | 3.15 | 3 | 4.23 | 0 | - | 313 | 7.25 |
| | 위락시설 지역 | 6 | 0.18 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 6 | 0.14 |
| | 교통지역 | 24 | 0.72 | 5 | 0.56 | 0 | - | 0 | - | 29 | 0.67 |
| | 공공시설 지역 | 269 | 8.03 | 49 | 5.51 | 1 | 1.41 | 0 | - | 319 | 7.39 |
| 농업 지역 | 논 | 175 | 5.22 | 45 | 5.06 | 6 | 8.45 | 1 | 25.00 | 227 | 5.26 |
| | 밭 | 127 | 3.79 | 31 | 3.48 | 7 | 9.86 | 0 | - | 165 | 3.82 |
| | 하우스 재배지 | 2 | 0.06 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 2 | 0.05 |
| | 과수원 | 15 | 0.45 | 3 | 0.34 | 2 | 2.82 | 0 | - | 20 | 0.46 |
| | 기타재배지 | 47 | 1.40 | 7 | 0.79 | 2 | 2.82 | 0 | - | 56 | 1.30 |
| 산림 지역 | 활엽수림 | 3 | 0.09 | 2 | 0.22 | 0 | - | 0 | - | 5 | 0.12 |
| | 침엽수림 | 56 | 1.67 | 14 | 1.57 | 2 | 2.82 | 0 | - | 72 | 1.67 |
| | 혼효림 | 5 | 0.15 | 2 | 0.22 | 0 | - | 0 | - | 7 | 0.16 |
| 기타 초지 | 자연초지 | 0 | - | 1 | 0.11 | 0 | - | 0 | - | 1 | 0.02 |
| | 골프장 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| | 기타초지 | 11 | 0.33 | 4 | 0.45 | 0 | - | 0 | - | 15 | 0.35 |
| 습지 | 내륙습지 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| | 연안습지 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| 나지 | 채광지역 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| | 기타 나지 | 41 | 1.22 | 3 | 0.34 | 0 | - | 0 | - | 44 | 1.02 |
| 수역 | 내륙수 | 3 | 0.09 | 1 | 0.11 | 0 | - | 0 | - | 4 | 0.09 |
| | 해양수 | 2 | 0.06 | 1 | 0.11 | 0 | - | 0 | - | 3 | 0.07 |

포항지진과 9.12지진 본진에 대해 진앙거리가 비슷한 포항관측소(PHA2)와 울산관측소(USN2)의 지진파형 및 스펙트럼 비교 결과, 상대적으로 9.12 지진에서 고주파 에너지가 크고 포항지진은 저주파 에너지가 크게 나타났다(그림 5.6, 그림 5.7). 주파수 대역에 따른 지진파 에너지의 차이는 지진 피해 유형과도 관련된다. 건물의 고유주기를 고려해야 하지만 일반적으로 저주파 에너지가 우세할 경우 고층 건물에 더 크게 영향을 주고, 고주파 에너지가 우세할 경우는 저층 건물에 피해를 입힐 수 있다. 이

와 같이 고주파 에너지가 강하게 나타나는 9.12지진에서는 지붕 및 담장 파손, 건물 균열이 주를 이루며, 1~2층의 저층 건물피해가 많았다. 그리고 상대적으로 저주파 에너지가 강한 포항지진은 학교, 아파트 등 고층건물 피해가 두드러지게 나타났다.

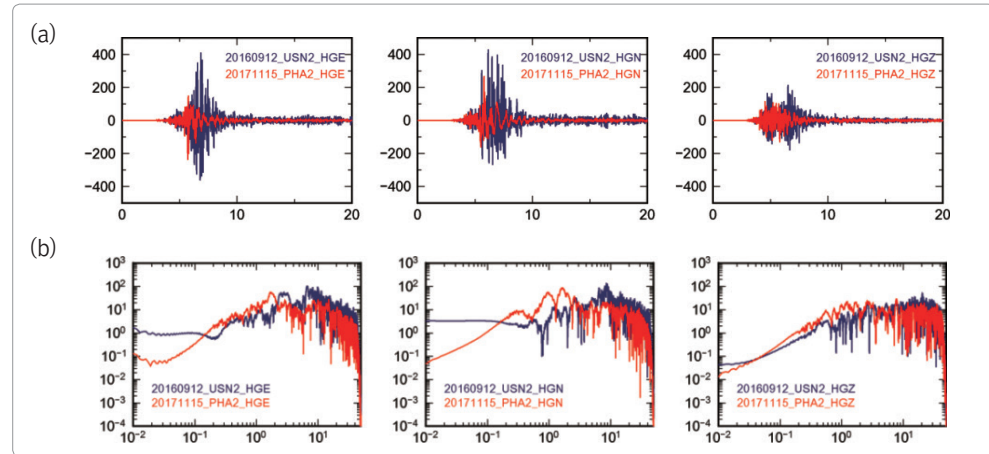


그림 5.6 포항지진(빨간색) 및 9.12지진(파란색) 본진의 (a) 지진파형 및 (b) 주파수 대역 진폭 비교

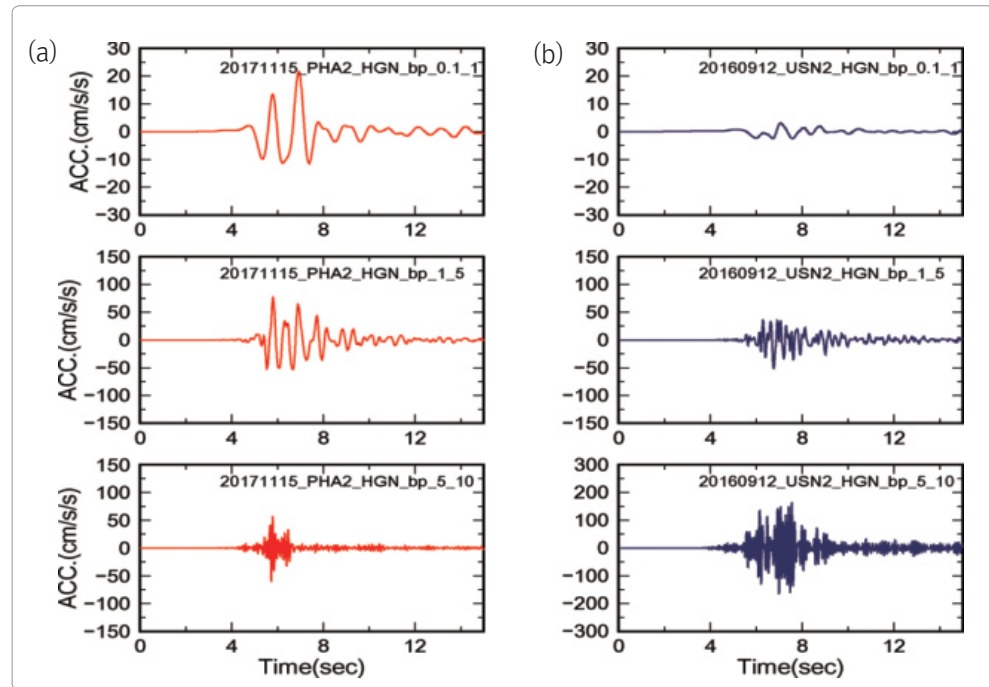


그림 5.7 (a) 포항관측소에 기록된 포항지진의 주파수 대역별 지진파형과 (b) 울산관측소에 기록된 9.12지진의 주파수 대역별 지진파형 (상) 0.1~1Hz, (중) 1~5Hz, (하) 5~10Hz

위성영상 분석 및 GNSS 관측 자료를 이용하여 지표변위를 분석하였다. 포항지진과 9.12지진의 지표 변위 분석 결과는 그림 5.8과 그림 5.9에 도시하였다. 포항지진의 경우, 위성영상 분석을 통해 진앙 주변에서 최대 4cm의 지표변위가 관측되었으며 GNSS 상시 관측소는 진앙거리가 멀어 변위가 관측되지 않았다. 9.12지진은 위성영상과 GNSS 분석 결과 모두 지표변위가 관측되지 않았는데, 이는 진원 깊이가 약 15km로 깊었기 때문으로 판단된다. 이렇게 지진에 의해 발생한 지표변위가 포항지역의 피해발생에 영향을 주었을 것으로 생각된다.

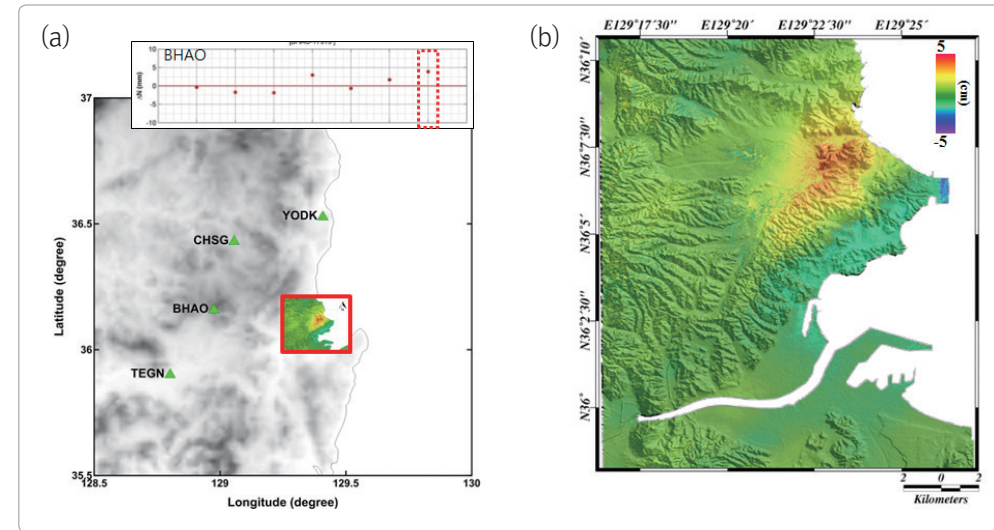


그림 5.8 포항지진에 대한 (a) GNSS 관측점에서의 지표변위 및 (b) SAR 위성자료를 이용한 지표변위 분석 결과

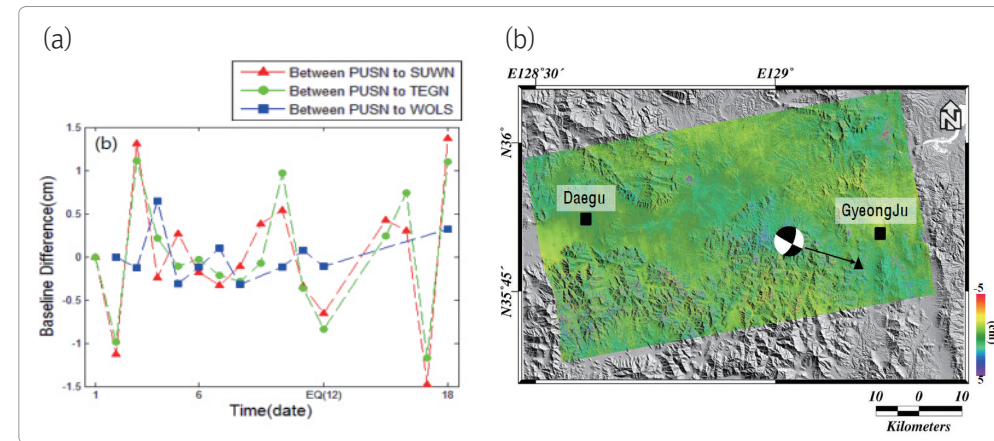


그림 5.9 9.12지진에 대한 (a) GNSS 자료에 의한 지표변위 및 (b) SAR 위성자료를 이용한 지표변위 분석 결과 (Park et al., 2017)

제6장

이동식 지진계 활용



제 6 장

이동식 지진계 활용

제 1 절 포항지진의 여진관측을 위한 이동식 지진계 설치

2017년 11월 15일 포항에서 규모(M_L) 5.4의 본진이 발생한 이후 기상청에서는 여진활동 추이 및 부지종폭 특성을 분석하기 위하여 임시 지진 관측소를 구성하였다. 임시 지진 관측소는 포항 본진을 중심으로 주변을 잘 둘러싸도록 위치를 잡았고, 지진 장비를 보호하기 위하여 관공서 및 학교의 지원을 받아 설치하였다. 기상청에서 포항 본진 인근에 설치한 임시 지진 관측소는 지진 발생 다음날인 2017년 11월 16일부터 12월 31일까지 운영되었다. 포항지역에 설치한 임시 지진 관측소 목록은 표 6.1에 표기하였고, 그림 6.1에 기상청 임시 지진 관측소의 위치와 지진계 설치 사진을 도시하였다.

표 6.1 기상청에서 설치한 포항 임시 지진 관측소 목록

| 코드 | 기록계 | 센서 | 위도(°) | 경도(°) | 고도(m) | 비고 |
|-------|-------|--------------|---------|----------|-------|----------------|
| KMA1 | Q330 | CMG-3T | 36.1136 | 129.3452 | 0 | 경상북도립영일공공도서관 |
| KMA2 | Q330 | CMG-3T | 36.0328 | 129.3792 | 51.7 | 포항기상대 |
| KMA3 | Q330 | CMG-3T | 36.1134 | 129.3047 | 91.5 | 포항시 농업기술센터 센터장 |
| KMA5 | Q330S | CMG-40T | 36.1297 | 129.2619 | 124.5 | 신광초등학교 |
| KMA6 | Q330 | CMG-3T | 36.1189 | 129.3611 | 65.6 | 지하댐2양수장 |
| KMA7 | Q330S | CMG-40T | 36.0451 | 129.2484 | 0 | 다산보건진료소 |
| KMA8 | Q330S | CMG-40T | 35.9239 | 129.2898 | 148.9 | 화산보건진료소 |
| KMA9 | Q330S | CMG-40T/ES-T | 36.0779 | 129.5672 | 50.7 | 국립등대박물관 |
| KMA10 | Q330 | CMG-3T | 36.1013 | 129.3907 | 81.3 | 한동대학교 |
| KMA11 | Q330 | CMG-3T | 36.0795 | 129.3050 | 134.1 | 도음산 산림문화 수련장 |

* 단, 위치에 따라 설치기간이 상이함.

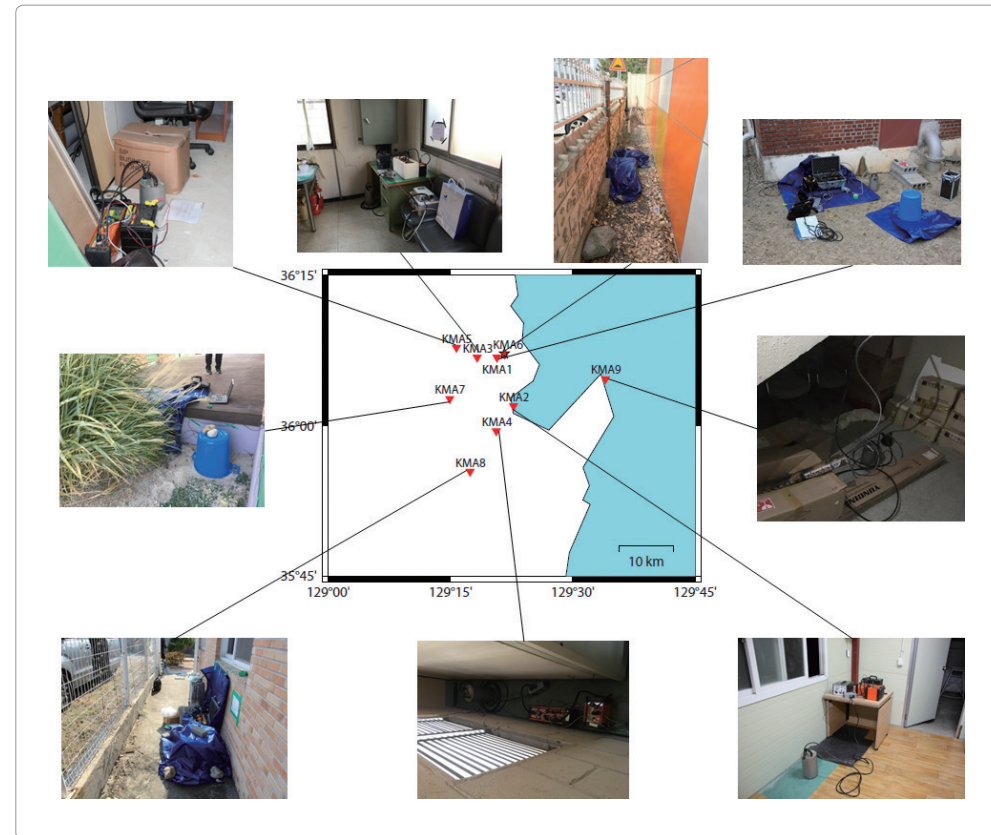


그림 6.1 기상청 임시 지진 관측소의 위치와 지진계 설치 사진

본진 이후 발생하는 여진의 횟수는 시간에 따라 감소한다. 포항지진의 경우 본진 발생 후 하루 동안에 미소지진을 포함하여 149회의 여진이 발생하였다. 그리고 다음날은 106회, 셋째 날은 34회의 지진이 발생하여 여진의 발생 횟수는 시간의 흐름에 따라 급격한 감소를 보였다. 그림 6.2에 시간에 따른 포항 지진의 여진 발생 추이를 도시하였다. 포항지진의 여진을 관측하기 위하여 이동식 지진계를 설치하였지만, 행정적인 처리 및 지진장비를 준비하고 포항까지 이동하면서 하루의 시간을 소모하게 되어 2018년 5월 31까지 발생한 총 615회의 지진 중 약 35%의 여진을 관측하지 못하는 결과를 가져왔다. 포항지진 발생 후 즉시 대응한 대학교나 연구소에 비하면 뒤늦은 대응이었다. 추후 포항지진과 같은 지진이 발생할 경우, 여진 관측을 위해서는 신속한 이동식 지진계 설치가 우선시 되어야한다. 따라서 지진 장비의 세트를 구성하여 보관하고 이에 대한 주기적인 점검 및 관리가 필요할 것으로 생각된다. 추가적으로 비상상황 발생 시 출장 처리 및 차량 대여 등 예산 사용에 대한 행정 절차를 간단히 할 수 있는 방안이 필요하다.

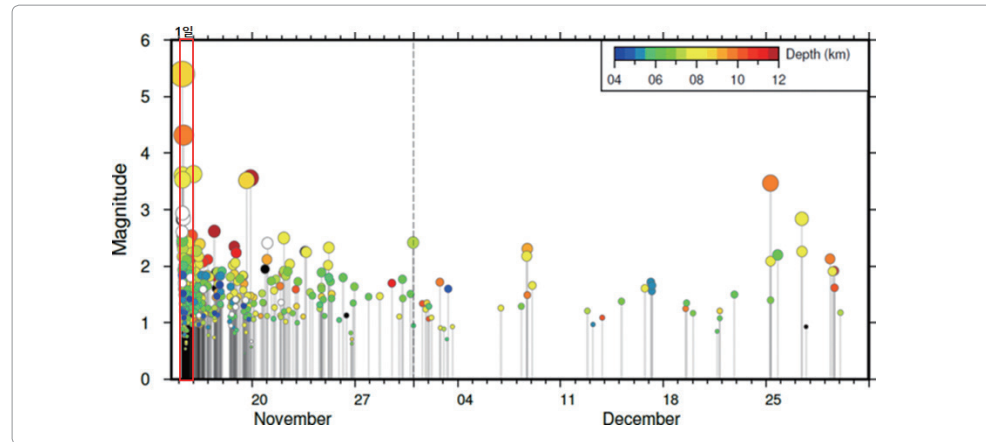


그림 6.2 포항지진 발생 후 시간에 따른 여진 발생 추이. 본진 발생 후 하루 동안 149회의 여진발생

지진계 설치 시 적은 인력으로 빠른 설치에만 집중하면서 관측소 별 코드 및 채널명 등에 대하여 상황에 적합하게 적용하지 않아 지진자료 분석 시 코드 및 채널명 등의 수정 절차를 거쳐야 하는 수고로움이 있었다. 또한 이동식 지진계 설치 시 상시 전원을 연결하지 못하여 100Ah 자동차 배터리를 사용함에 따라 약 10일 이후 배터리 방전으로 인해 지진 자료의 기록이 중단되어 여진 분석에 어려움을 겪었다. 이동식 지진계 설치 시 발생하는 실수 및 문제점을 해결하기 위해서는 지진 장비를 다루는 인력에 대한 주기적인 교육을 통해 갑작스러운 상황에도 신속하게 효율적으로 대응할 수 있도록 상시 준비할 필요가 있다.

제 2 절 이동식 지진계 설치 및 운영 방법

제2장에서 기술한 포항지진 진원분석을 통해 근거리에 위치한 임시 지진 관측소의 중요성을 확인할 수 있었다. 일반적으로 이동식 지진계는 상시 지진 관측망의 능력을 보완하여 고밀도 지진 관측망의 운영이 필요한 지역에 설치하게 된다. 따라서 이 절에서는 이동식 지진계 설치 및 운영 방법에 대해 기술하여 향후 주요 지진 발생 시 임시 지진 관측소의 효율적인 설치가 가능하도록 한다.

2.1. 이동식 지진계 설치 시 고려 사항

이동식 지진계를 설치하여 임시 지진 관측소를 구성할 경우에도 상시 지진 관측소와 동일한 고려가 필요하다. 이동식 지진계 설치 시 고려할 사항으로는 배경잡음, 지형, 지질, 전원 공급, 접근성, 보안, 통신, 날씨 등이 있다(Bormann, 2012; Havskov and Alguacil, 2004).

이동식 지진계를 설치할 때는 안정된 지면의 기반암에 설치하거나 미고결 퇴적층에 설치하게 될 경우

땅에 묻는 것이 좋다. 그리고 지진계 보호 등을 생각할 때는 지하실에 설치하는 것이 좋다. 그리고 보호 장치나 상자 등으로 사람이나 동물로부터 보호할 수 있는 환경에 설치하여야 한다. 대형 전력선이나 변전소가 근처에 있을 경우, 50~60Hz의 잡음이 발생하므로 수 백 m 정도 떨어진 거리에 지진계를 설치한다. 그리고 잡음원의 영향을 감소시키기 위해서는 잡음원으로 부터의 거리가 총적층 두께보다 멀어야 한다(Bormann, 2012).

지진계 센서의 방위각은 오차 $\pm 2^\circ$ 이내로 맞추어야 하며, 수평 및 수직을 유지하는 것도 중요하다. 지진 기록계는 방수 처리가 되어 있지만 마모 가능성 및 낙뢰로부터 보호하기 위해서도 상자에 넣어서 보관하는 것이 좋다. 그리고 지진계 센서는 온도 및 기압 변화, 자기, 습도, 전자기로부터의 보호도 중요하다. 특히 광대역 지진계의 경우, 온도 및 압력 변화에 민감하므로 설치 시 단열재 등을 통한 보호가 필수적이다.

이동식 지진계 설치 시 상시 전원을 사용하는 것이 가장 좋지만 상시 전원의 사용이 어려운 경우가 빈번하다. 이 경우 태양 전지 패널을 이용하여 배터리를 충전하며 사용하는 것이 가장 좋은 방법의 하나이다. 태양 전지 패널을 사용하기 위해서는 이동식 지진계 설치 지역의 위도와 기상조건, 평균 전력 소비량에 대한 고려가 필요하다. 태양 전지 패널은 태양 광선을 직접적으로 받는 것이 중요하므로 설치 지역의 위도를 고려하여 설치하는 것이 중요하다. 한반도의 경우 중위도 지역으로 수평으로부터의 경사각을 위도+ 10° 로 설치하는 것이 가장 좋다(Havskov and Alguacil, 2004). 그리고 태양 전지 패널이 바람이나 야생 동물 등 주변 환경에 영향을 받지 않도록 고정될 수 있는 장소가 마련되어야 한다. 태양 전지 패널을 이용하여 배터리를 충전할 수 있는 설비가 준비되지 않은 경우 충전 설비 없이 자동차 배터리만을 사용하여 전력을 공급받게 된다. 배터리는 온도의 영향을 크게 받기 때문에 20°C 일 때와 비교하여 -10°C 에서 절반의 성능을 가진다. 따라서 배터리는 온도의 영향을 적게 받도록 절연상자 안에 설치하는 것이 바람직하다. 지진계는 보통 12V를 사용하지만 최대 10V까지 사용이 가능하다. 12V 배터리의 경우, 충전 직후 12.9V 이상 측정되며, 1시간 이후 전압을 측정하여 배터리 상태를 확인할 수 있다. 그리고 충전된 배터리가 11.8V 미만이면 단시간 작동이 가능하며, 배터리를 재사용하는 것보다는 가격이 저렴한 배터리를 현지에서 조달하여 사용하는 것을 추천한다. 표 6.2에는 납 축전지의 전압과 충전량 사이의 관계를 나타낸다.

표 6.2 납축전지의 전압과 충전량 사이의 관계(Havskov and Alguacil, 2004)

| Voltage | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| %charge | 100 | 91 | 82 | 73 | 64 | 55 | 46 | 37 | 28 | 19 | 10 | 1 |

임시 지진 관측망을 구성하기 위해서는 최소 3개 이상의 지진계가 필요하다. 이상적인 지진 관측망은 방위각의 공백이 200° 미만이어야 하고, 진앙을 중심으로 동심원 상으로 대칭되게 배치되어야 한다. 만약 4개의 지진계를 사용한다면, 진앙 근처에 1개의 지진계를 설치하고, 등거리에 3개의 관측소를 설

치하는 것이 이상적이다. 그리고 진원깊이의 신뢰도를 높이기 위해서는 가장 가까운 관측소가 진원깊이의 1~2배 내에 위치하여야 한다(Hardt and Scherbaum, 1994; Havskov and Alguacil, 2004; Rabinowitz and Steinberg, 1990).

제2장의 포항지진 진원 분석에서도 알 수 있지만, 일반적으로 진원 결정에는 속도모델보다 관측소의 수와 배치가 더 큰 영향을 끼친다(Uhrhammer, 1980). 따라서 이동식 지진계 설치 시 주의 사항을 잘 고려하여 이동식 지진 관측소를 구성함으로써 분석에 유용한 자료를 생산해야 한다.

2.2. 이동식 지진계 설치 환경 비교

기상청 국립기상연구소(현 국립기상과학원)는 이동식 지진관측소의 관측 자료 품질 검증 및 최적화 방안을 제시하기 위하여 지진계 설치 환경 비교 연구를 수행한 바 있다(국립기상연구소, 2014). 이 연구에서는 2014년 6월 16일부터 7월 18일까지 약 한달 간 제주도에 위치한 국가태풍센터 노장에 설치 유형을 4가지로 나누어 광대역 지진계(CMG-3T)를 설치하였다. 관측 유형은 터파기 후 퇴적층 내에 센서 설치(BB1), 표층에 센서 설치(BB2), 기반암 노두에 센서 설치(BB3), 표피층에 센서를 파묻어 설치(BB4)한 것으로 그림 6.3에 도시하였다. 그리고 설치 위치와 사진은 표 6.3과 그림 6.4에 나타내었다.

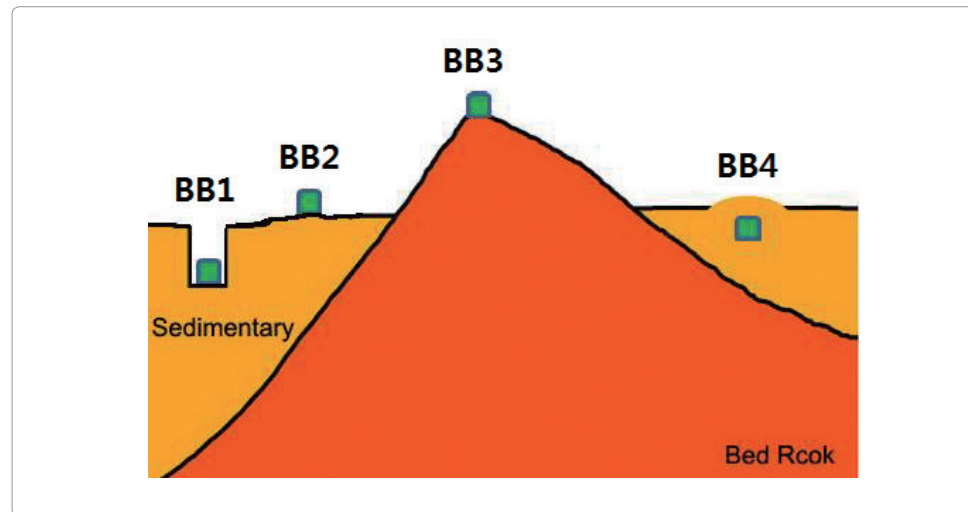


그림 6.3 지진계 설치 유형 모식도

표 6.3 지진계 설치 유형의 영향 비교를 위한 지진계 설치 위치

| 지점명 | 위도(°) | 경도(°) |
|-----|---------|----------|
| BB1 | 33.3308 | 126.6796 |
| BB2 | 33.3305 | 126.6796 |
| BB3 | 33.3308 | 126.6798 |
| BB4 | 33.3306 | 126.6799 |

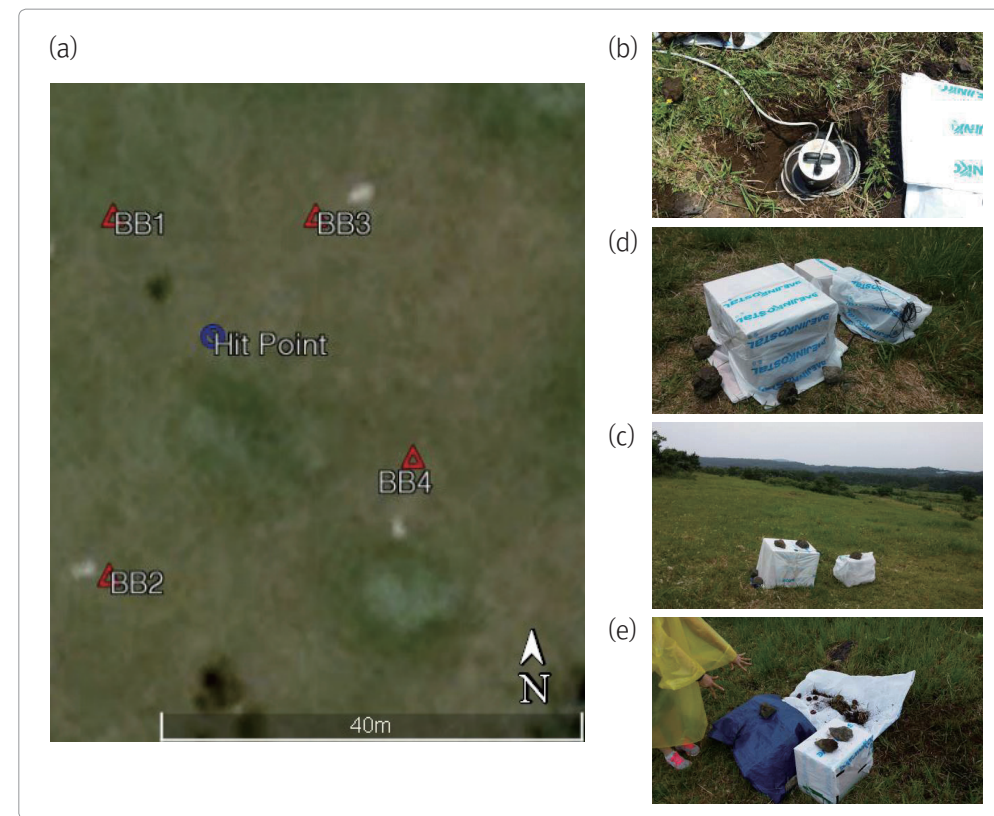


그림 6.4 지진계 설치 유형의 영향 비교를 위한 (a) 설치 위치와 (b) BB1, (c) BB2, (d) BB3, (e) BB4 설치유형 사진

수집된 관측 자료에 대해 부지 특성을 평가하기 위한 수평 대 수직 스펙트럼 비(Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR) 분석, 잡음수준 평가를 위한 배경잡음(Background Noise) 분석과 진동에 의한 기기 반응을 판단하기 위한 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR) 분석을 실시하여 가장 안정적이며 양질의 자료를 생산할 수 있는 최적의 이동식 지진계 설치 형태를 선정하였다.

지진파가 지표로 전달될 때 층간의 임피던스 차이가 큰 경우 최상부 층의 우세주파수가 나타난다. 특히 최상부 층이 연질의 토양으로 구성되어 있을 경우 뚜렷한 피크 값을 가지게 된다(Nakamura, 1989). 그리고 토층의 S파 속도정보를 알고 있다면 피크 값을 통해 토층의 두께를 역산할 수 있다(Okamoto, 1984). 수평 대 수직 스펙트럼 비 분석을 수행한 결과는 그림 6.5에 도시한다. 수평 대 수직 스펙트럼 비 분석 결과, 모든 관측점의 약 0.4Hz 부근에서 공명주파수가 나타났다. 평균 S파 속도 260m/s를 적용하여 토층 두께를 추정하면 162.5m로 계산되며, 이는 제주지역 평균 토층 두께인 100~200m에 부합되는 결과로 보인다. 또한 BB1과 BB2에서는 15Hz 부근에서도 피크가 나타나는데 이는 10m 내외의 얇은 화산재 층에 기인한 것으로 추정된다.

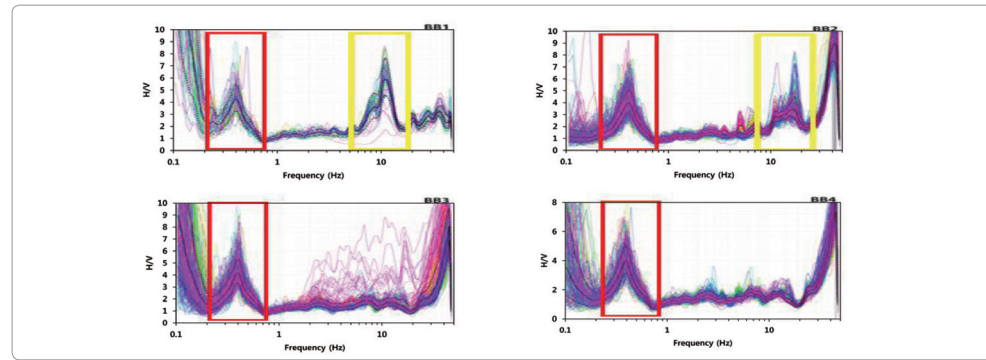


그림 6.5 지진계 설치 유형에 따른 수평 대 수직 스펙트럼 비 분석 결과

배경잡음 분석 결과는 그림 6.6에 도시하였으며, 모든 관측점이 USGS 배경잡음 모델 범위 내에 분포하고 있으나 1초에서 3초 사이 값은 기준을 약간 상회한다. 맥동(microseism)은 2~20초(0.05~0.5Hz) 주기 대역으로 해안에서의 파도, 미기압 변화, 해양파 사이의 비선형 상호작용으로 유발되며 이 주파수 대역의 영향은 해안에서 멀어질수록 약화된다. 맥동에서 10~16초(0.06~0.1Hz)의 잡음은 파도가 직접적으로 해안선에 미치는 영향에 의해 생성되며, 4~8초(0.125~0.25Hz)의 잡음은 해안선에서 반사된 파도가 계속 전파되는 파도와 중첩되어 만들어진 정상파가 해저면과 비선형적으로 반응하여 생성된다(McNamara and Buland, 2004). 제주해역에 직접 접해 있어 USGS 표준모델보다 맥동 대역이 단주기 대역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 0.02초에서 1초 사이 주기는 자연적 지진동과 인간생활에 의한 진동 등에 의해 영향을 받는 주기대역이므로 잡음 수준이 높을수록 자연지진의 기록이 왜곡될 수 있다. 이 주기대역에서는 기반암 노두에 센서를 설치한 BB3와 표피층에 센서를 묻은 BB4가 터파기 후 퇴적층 내에 센서를 설치한 BB1과 표층에 센서를 설치한 BB2에 비해 낮게 나타난다. 그리고 노두에 설치된 BB3 관측점은 0.02초와 1초 사이의 배경잡음 수준이 가장 낮게 나타나지만 10초 이후 높은 수준의 배경잡음을 나타낸다. 이는 별도의 보호 장치 없이 기압과 기온에 노출된 영향으로 생각된다.

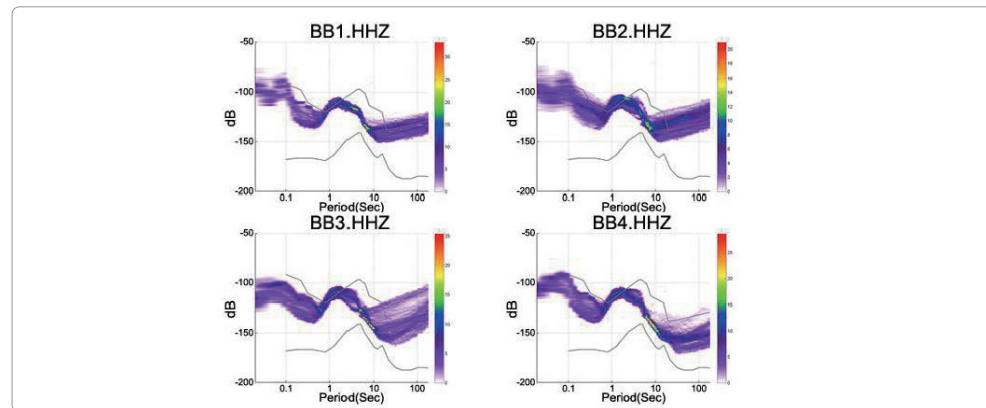


그림 6.6 지진계 설치 유형에 따른 배경잡음 분석 결과

신호 대 잡음비는 지진동에 의한 기기 반응을 판단하는데 유용한 방법이다. 이벤트를 포함하지 않은 영역에서 일정 시간 범위의 자료를 평균으로 기준을 선정하고 기준과 같은 구간에서의 시간 간격 평균값을 비교하는 방법으로 신호 대 잡음비를 계산하였다(Enescu, 1996). 그림 6.7은 인공적으로 생성한 타격신호에 의한 신호 대 잡음비의 결과이다. 동일한 이벤트에 의해 기록된 자료라고 하더라도 이벤트 발생시각의 잡음수준, 매질 상태 등의 변수가 다르게 적용되므로 상대적 비교로 관측점의 반응성을 평가하였다. 타격신호에 의한 비교에서는 표피층에 센서를 파묻은 BB4가 가장 높은 반응성을 보였다. 그리고 현장관측기간 동안 기록된 2014년 7월 12일 일본해역에서 발생한 규모 7.0의 지진에 대한 분석 결과는 그림 6.8에 도시하였으며 기반암 노두에 설치한 BB3가 가장 높은 반응성을 보이는 것으로 확인되었다.

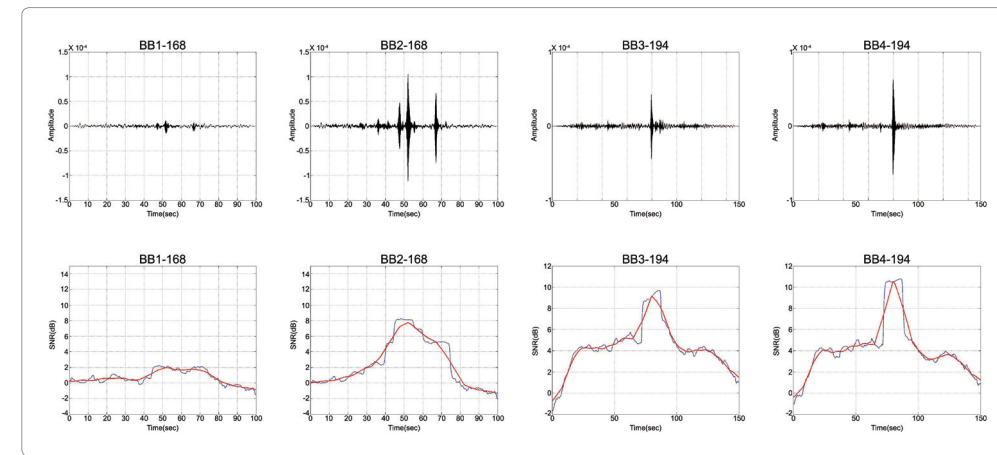


그림 6.7 지진계 설치 유형에 따른 타격신호에 의한 신호 대 잡음비 분석 결과

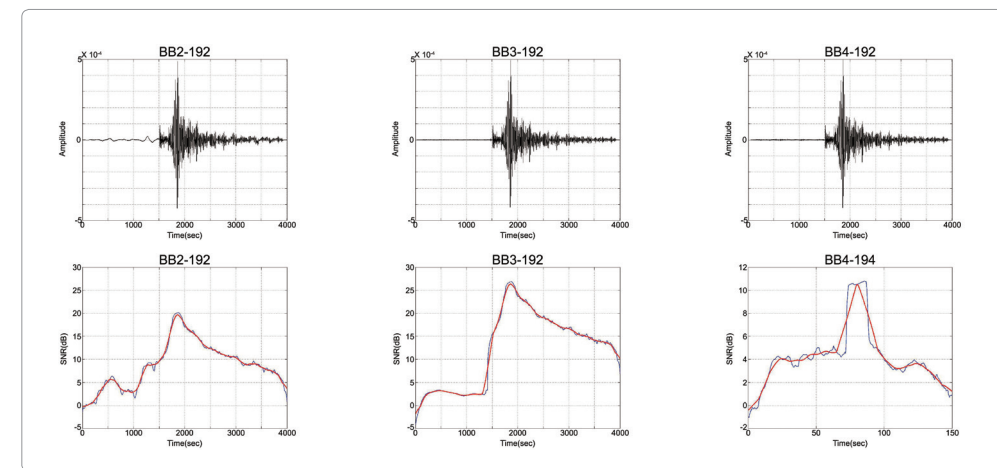


그림 6.8 지진계 설치 유형에 따른 자연지진에 의한 신호 대 잡음비 분석 결과

이상의 결과에서, 일반적으로 노두에 설치된 관측점 BB3이 가장 안정적인 관측환경으로 평가되었고, 표피층에 센서를 묻어 설치한 BB4 또한 높은 신호 수신율과 신호 대 잡음비 값을 가지는 것으로 보인다. 그러므로 기존에 알려진 대로 이동식 지진계 설치 시 노두를 찾아 설치하는 것이 가장 우선시 되어야 한다. 그러나 노두를 찾을 수 없는 경우에는 센서를 매설하는 방법이 가장 안정적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 노두에 직접 센서를 설치할 경우 기압과 온도의 영향을 최소화 할 수 있도록 지진계 보호 장치를 구비해야 할 것으로 생각된다.

2.3. 이동식 지진계 설치 시점

이동식 지진계 설치 목적은 주로 상시 지진 관측망의 관측 능력을 보완하여 주요 지진 이후 발생하는 여진을 관측하기 위함이다. 따라서 신속한 이동식 지진계의 설치가 중요하다. 제6장의 제1절 포항지진의 여진관측을 위한 이동식 지진계 설치에서 언급하였듯이 행정적인 처리 및 지진장비 준비 등으로 본진 발생 약 26시간 후 지진계 설치를 시작할 수 있었다. 그림 6.9와 같이 포항지진의 여진 발생 횟수를 일별로 도시하면 본진 발생 이후 당일에 149회의 여진이 발생하였고, 다음날 106회의 여진이 발생하였다. 그리고 여진의 발생 횟수는 시간에 따라 급격히 줄어들어 셋째 날은 34회의 여진이 발생하였다. 일반적으로 시간에 따른 여진의 발생 빈도는 오모리 법칙(Omori's law: Omori, 1894)으로 설명된다. 오모리 법칙은 큰 지진이 발생한 이후 여진의 발생 빈도가 시간이 경과함에 따라 줄어든다는 것을 통계적으로 표현한 경험식이다. 오모리 법칙에 의하면 여진의 발생 빈도는 시간에 역수로 줄어들게 된다. 따라서 여진 관측을 위한 이동식 지진계의 설치는 가능한 신속하게 수행되어야 여진을 놓치지 않고 관측할 수 있다.

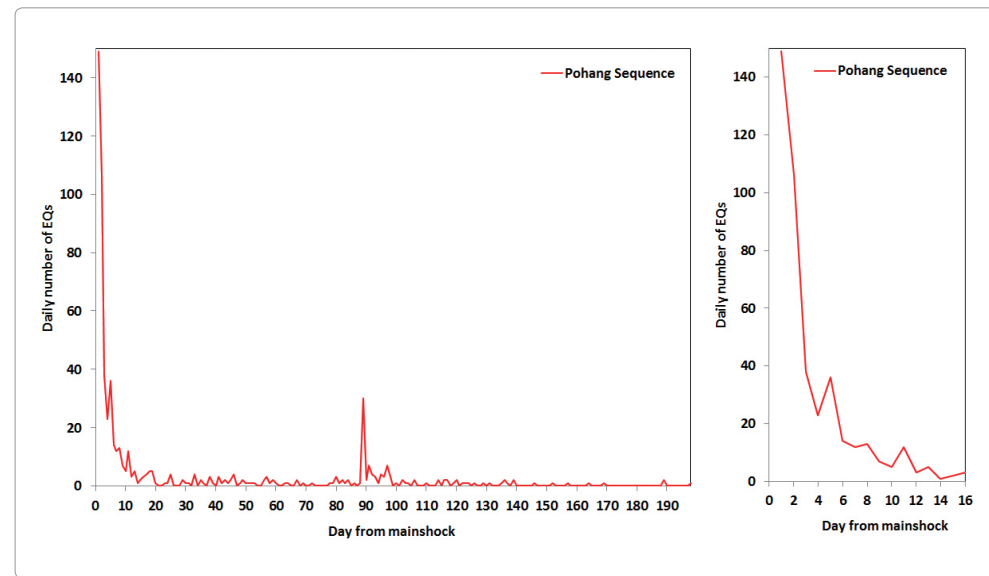


그림 6.9 포항지진의 일별 여진 발생 횟수

큰 지진이 발생하게 되면 시간의 경과에 따라 여진의 발생 빈도도 변화하지만, 발생 위치도 이동하게 된다. 그림 6.10에 포항지진과 9.12지진의 여진에 대하여 2018년 5월 31일까지 발생한 시간 경과에 따른 진앙 변화를 도시하였다. 포항지진의 경우, 시간에 관계없이 포항지역에 전반적으로 지진이 발생하고 있지만 2018년 2월 이후 발생한 여진들은 여진 분포 중 남서쪽에 위치하고 있다. 그리고 9.12지진의 경우, 본진을 중심으로 발생하던 여진들이 시간이 지남에 따라 점차 멀어지면서 동쪽으로 이동하여 발생하였다. 이렇게 여진의 발생 위치가 이동하게 되면 초기에 설치한 이동식 지진계의 위치도 효율적인 여진 관측을 위해 이동여부를 고려해야 한다. 따라서 큰 지진 이후 이동식 지진계는 시·공간적으로 급변하는 여진 분포를 고려하며 설치해야 한다.

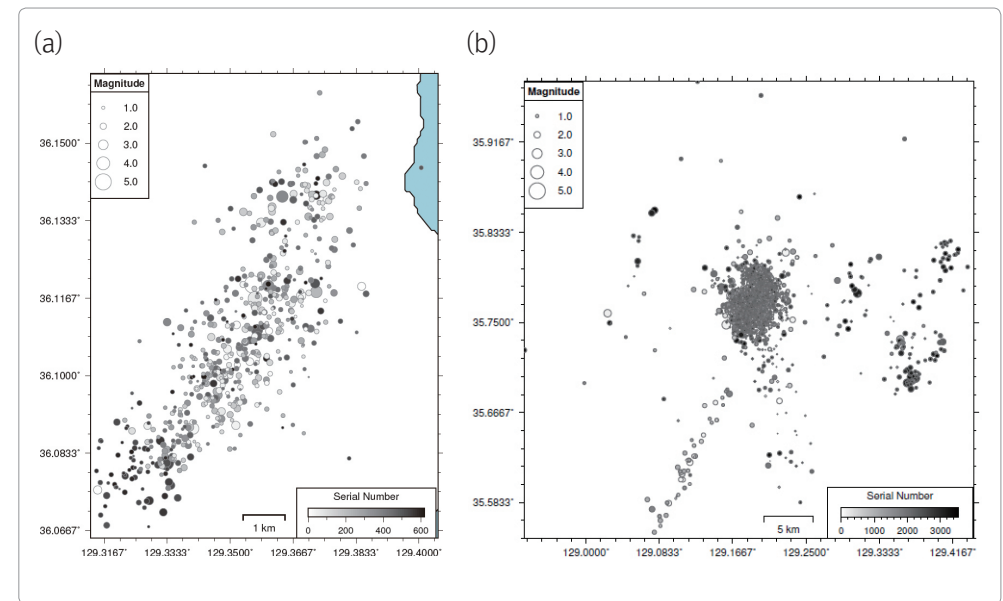


그림 6.10 2018년 5월 31일까지 발생한 (a) 포항지진과 (b) 9.12지진 여진의 시간 경과에 따른 진앙 분포

제 3 절 이동식 지진계 설치 및 운영 사례

본 절에서는 국내외에서 지진이 발생한 후 이동식 지진계를 사용하여 대응 및 분석한 사례를 기존에 발표된 논문들에서 발췌하여 제시하고, 이동식 지진계 활용 방안 및 효율성에 대하여 정리하였다.

3.1. 2016년 9.12지진(Kim et al., 2016)

2016년 9월 12일 10:44:32 (UTC)에 ML 5.1의 지진이 발생하였고, 뒤이어 11:32:54(UTC)에 계기 지진 사상 가장 큰 규모(ML 5.8)의 지진이 발생하였다. 이에 따라 부경대학교와 부산대학교는 합동으로 9.12지진 본진에서 동쪽으로 1.5km 떨어진 내남초등학교에 본진 발생 1시간 이내에 지진계 2조를 설치하였다. 그리고 서울대학교와 극지연구소에서도 추가적으로 이동식 지진계를 설치하여 약 38km × 32km 지역에 27대의 광대역 지진계를 설치하여 임시 지진 관측망을 구성하였다. 설치된 임시 지진 관측망은 그림 6.11에 도시한다. 지진계는 중소 규모의 건물(학교, 박물관, 교회, 사원, 개인 또는 공공기관 및 주택 등)에 보조전력을 연결한 상시 전원을 사용하여 설치하였다. 본진으로부터 가까운 임시 지진계는 진앙거리 2~4km 범위 내에 설치되었고, 관측소 간 간격은 6~7km로 설치되었다. 지진 자료는 3~4주에 한 번씩 현장을 방문하여 직접 획득하였다.

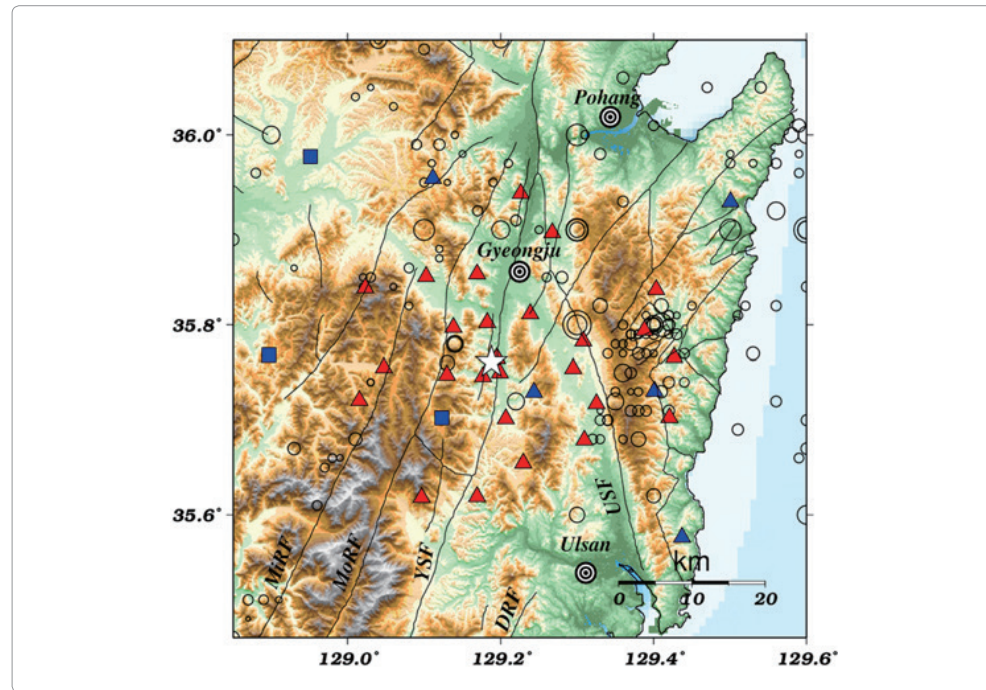


그림 6.11 9.12지진의 여진 관측을 위한 임시 지진 관측망(붉은 삼각형)과 기상청(파란 사각형)과 한국지질자원연구원(파란 삼각형)에서 운영하는 상시 지진 관측망 분포(Kim et al., 2016에서 발췌)

본진 발생 후 10일 동안 기록된 자료를 이용하여 총 803회의 9.12지진의 여진을 식별하였고, hypoellipse earthquake location package (Lahr, 1999)와 Kim (1999)의 속도 모델을 이용하여 진원 결정을 수행하였다. 진원 결정 결과는 그림 6.12에 도시한다.

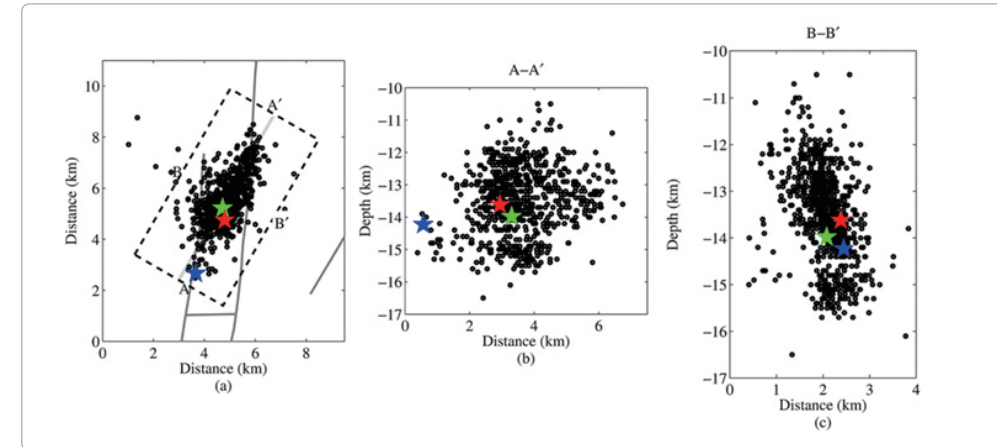


그림 6.12 9.12지진 이후 발생한 803회 여진의 (a) 진앙 및 (b) A-A'과 (c) B-B' 선에 대한 진원 분포 단면도 (Kim et al., 2016에서 발췌)

임시 지진 관측망을 운영하게 되면 조밀한 근거리 관측 자료를 확보할 수 있게 되어 진원 결정 정밀도를 향상시킬 수 있다. 그리고 진원 및 단층과 지진 발생의 상관관계, 응력 변화와 지구 내부구조 등에 대한 연구를 수행할 경우 도움이 된다.

3.2. 2008년 5월 12일 중국 쓰촨성 대지진(Wen et al., 2014)

2008년 5월 12일에 중국 쓰촨성 대지진(Ms 8.0, Mw 7.9)이 발생하였고, 수천 회의 여진이 발생하였다. 중국지진청(China Earthquake Administration, CEA)에서는 여진 감시를 목적으로 상시 지진 관측망을 보완하기 위하여 임시 강진동 관측망을 설치하였다. 본진이 발생한 후 24시간 이내에 설치를 시작하여 지진이 발생한 용문산 단층을 따라 92개의 임시 강진동 관측망을 구성하였다. 설치된 임시 강진동 관측소들은 여진의 발생 위치가 남서부에서 북동부로 이동함에 따라 위치 조정이 이루어졌다. 쓰촨성 대지진을 관측하기 위한 임시 및 상시 지진 관측망은 그림 6.13에 도시하였다. 92개소의 임시 강진동 관측소를 이용하여 949개의 여진을 감지하였으며, 부지분류 기준을 개정하는 자료로 사용하였다.

중국의 상시 지진 관측소는 이격 거리가 50~수 백km로 근거리 지진동의 감지가 어렵다. 따라서 대규모 지진이 발생할 경우, 임시 강진동 관측망을 이용하여 적은 비용으로 상시 지진 관측소를 보완하고, 효율적으로 근거리 지진동을 수집하여 근거리 지반 운동과 지진 발생 및 전파에 대한 연구에 활용할 수 있다.

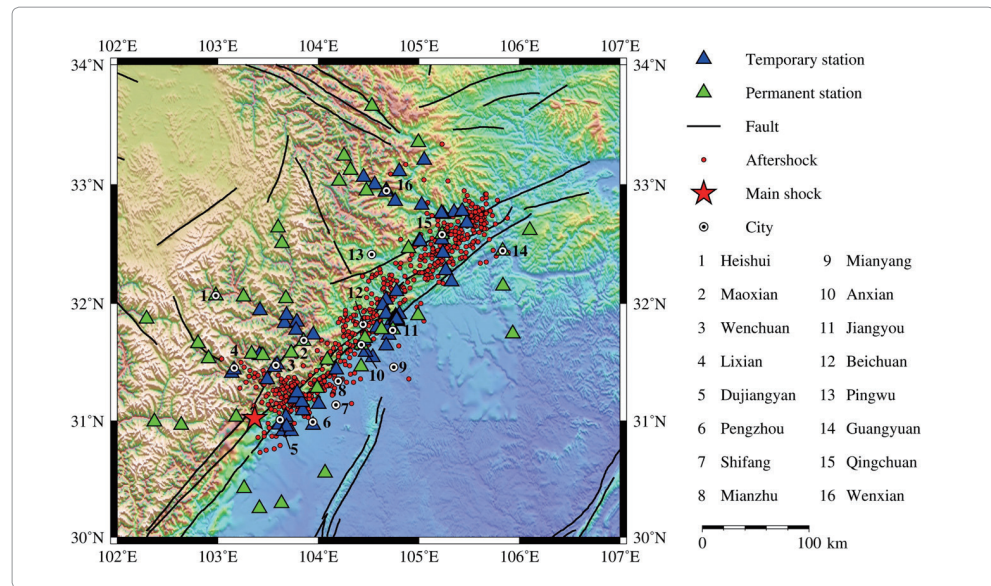


그림 6.13 쓰촨성 대지진 지진 분포와 임시 및 상시 강진동 관측망(Wen et al., 2014에서 발췌)

3.3. 2009년 라퀼라(중부 이탈리아) Mw6.3 지진(Chiarabba et al., 2009)

2009년 4월 6일 1:36 (UTC) Mw6.3의 지진이 아브루초주(Abruzzi) 지역(이탈리아 중부)에서 발생하여 라퀼라 마을과 주변 지역에 큰 피해를 입혔다. 아브루초주 지역은 수십 년 동안 지진이 거의 발생하지 않은 지역으로 동부와 서부에 정단층계로 된 sub-parallel set의 단층을 가진다. Mw6.3의 본진 발생 이후, Mw5.6과 Mw5.4의 여진이 주 구조의 경계에서 발생하였다.

이 지역의 임시 지진관측소는 본진 발생 직후 설치하였으며, 분석에 사용된 상시 및 임시 지진 관측망은 그림 6.14에 도시한다. 본진이 발생한 이후 5월 15일까지 6,000여건의 여진을 감지하였으며, 10개 이상의 관측소에 기록된 약 3,200개의 지진에 대하여 진원 결정을 실시하였다. 여진의 진앙은 북서 방향으로 약 40km 길이의 연장선에서 발생하였으며, ML2.3 이상 여진 712회에 대한 진앙은 그림 6.15에 도시하였다. 여진의 위치는 잘 알려지지 않은 정단층인 파카니카(Paganica) 단층의 지표 흔적과 일치한다.

이 연구에서는 라퀼라 지역에 설치된 상시 및 임시 관측소를 이용하여 2009년 라퀼라 지진 여진의 진원을 결정하고 단층 기하를 추정하였다. 그리고 지진 발생의 시·공간적 변화를 분석함으로써 지진활동이 아펜니네(Apeninnes) 지역으로 확대됨을 밝혔고 미래에 발생 가능한 큰 지진의 단층을 추정하였다.

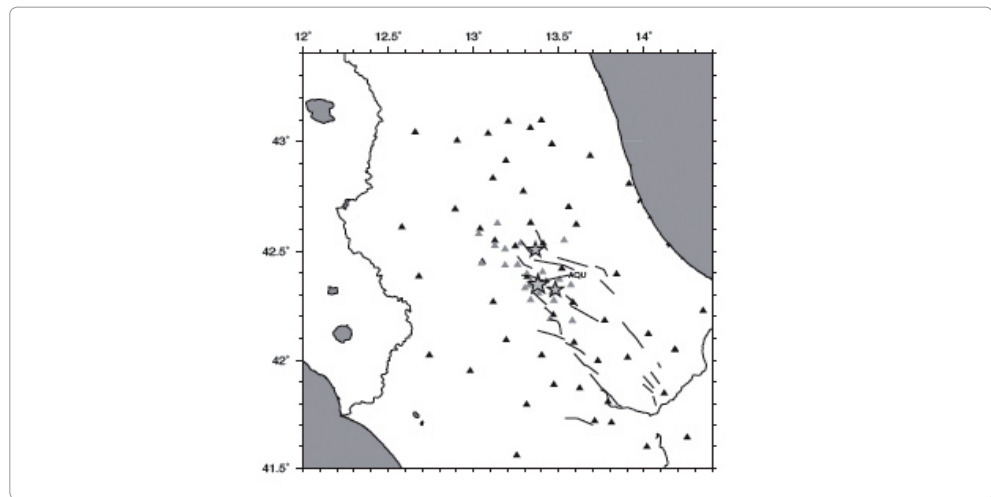


그림 6.14 2009년 라퀼라 지진 분석에 사용된 상시 및 임시 지진 관측망(삼각형) (Chiarabba et al., 2009에서 발췌)

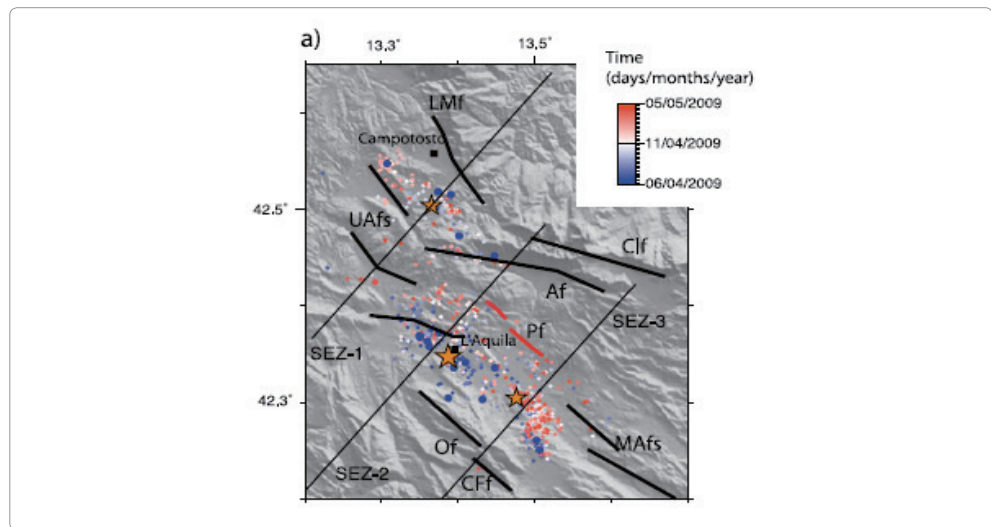


그림 6.15 본진 이후 시간대 별 여진 분포(Chiarabba et al., 2009에서 발췌)

3.4. 2003년 7월 26일 M6.4 일본 미야기현 북부 지진(Umino et al., 2003)

2003년 7월 26일 규모 6.4의 지진이 일본 미야기현 북부에서 발생하였다. 이에 따라 정확한 여진의 진원 결정을 위하여 본진 주변에 13개의 임시 지진 관측망과 1개의 위성 통신 원격 기지(Satellite communication telemetry station)를 설치하였으며 최대 여진 발생(2003년 7월 26일 16:56 UTC, M5.5) 직후 관측을 시작하였다. 여진의 진원 및 단층면해 분석에는 본진의 진앙 인근에 설치된 도호쿠 대학교, 방재 과학 기술 연구소(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention; NIED)와 일본 기상청(Japan Meteorological Agency; JMA)의 상시 관측소와 임시 지

진 관측망 자료를 사용하였으며, 그림 6.16에 분석에 사용된 관측소와 본진(M6.4), 최대 규모의 전진(M5.6) 및 여진(M5.5)을 도시하였다.

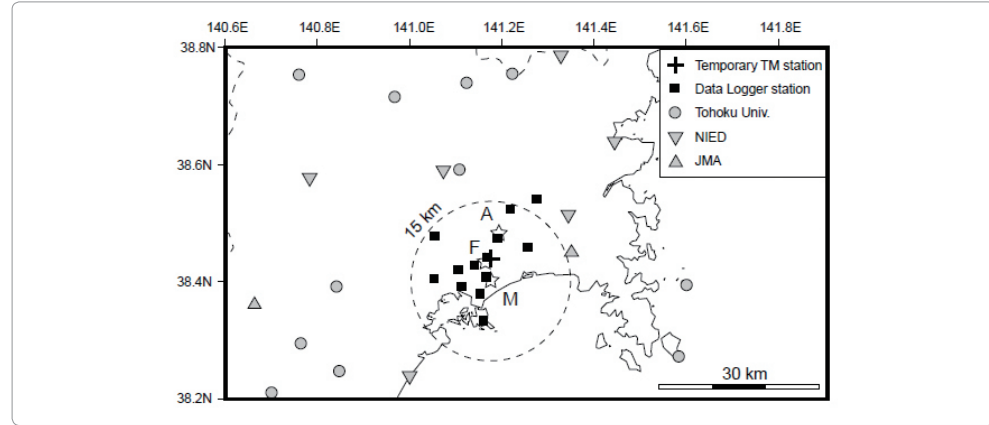


그림 6.16 2003년 7월 26일 발생한 미야기현 북부 지진의 본진(M)과 최대 규모 전진(F) 및 여진(A)의 진앙과 임시 지진 관측망 및 상시 지진 관측소(Umino et al., 2003에서 발췌)

여진의 진원 분석은 도호쿠 대학교 지진 관측망의 통상적 절차로 채택된 P파와 S파의 속도모델을 적용한 single event location method (Hasegawa et al., 1978)를 사용하였다. 이를 통해 결정된 여진의 진원은 그림 6.17에 도시한다. 여진의 분포를 통해 본진의 단층면을 추정할 수 있을 것으로 생각된다. 여진의 진원깊이는 3~12km 범위에 있으며, 여진 분포의 북부 지역은 서쪽으로 약 50° 경사하며, 남부지역은 북서쪽으로 약 40° 경사한다. 분석된 진원 분포와 이 지역의 지질구조와의 관계를 살펴보면 이시노마키-만 단층(Ishinomaki-wan fault)의 구부러진 부분을 따라 지진이 발생하였을 것으로 예상된다.

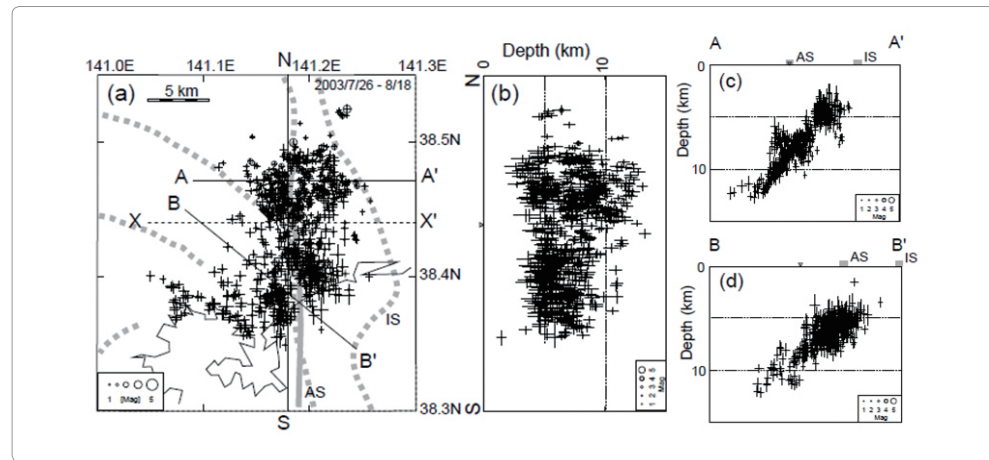


그림 6.17 2003년 7월 26일 발생한 미야기현 북부 지진의 여진 진원 분포(Umino et al., 2003에서 발췌)

여진에 대해 초동 P파의 극성을 이용하여 단층면해를 분석하였다. 여진들의 주요 단층면해 결과는 역 단층으로 나타났으며, 단층활동은 총 3그룹으로 분류할 수 있다. 여진이 발생한 지역의 남부 지역을 시작으로 중부와 북부 지역으로 가면서 P축의 방향이 북서-남동 방향, 동-서 방향, 북동-남서 방향으로 계산되었다. 남부 지역에서 발생한 여진의 P축 방향은 최대 규모 전진의 P축 방향과 동일하고, 중부 지역은 본진의 주 단층의 움직임과 동일하며, 북부 지역의 여진은 최대 규모 여진과 동일한 단층 움직임을 보인다. 단층면이 구부러지거나 단층면 바깥 부분에서 발생한 몇몇 여진은 정단층으로 나타났다. P 파 극성을 이용하여 계산된 여진의 단층면해 결과는 그림 6.18에 도시하였다.

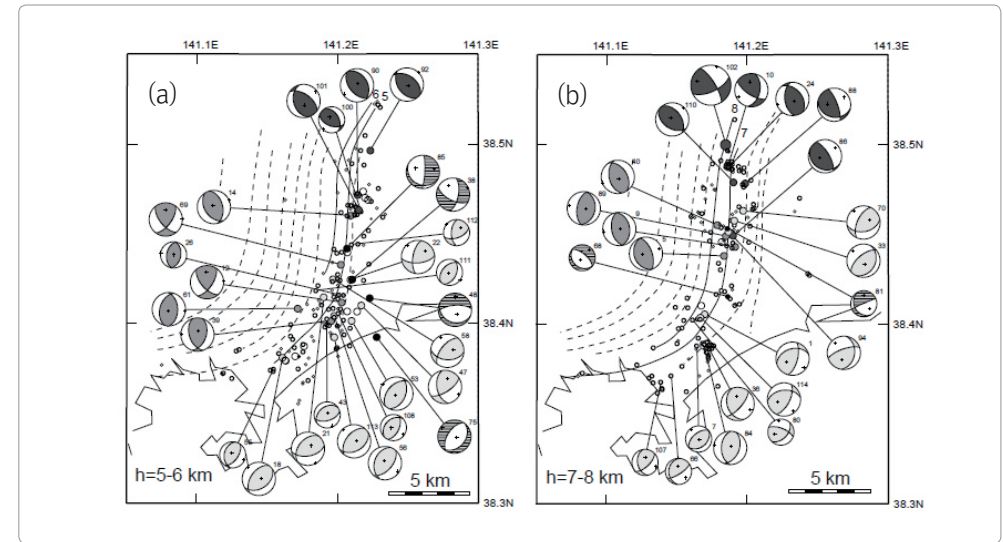


그림 6.18 진원깊이 (a) 5~6km와 (b) 7~8km를 가지는 여진의 단층면해 결과(Umino et al., 2003에서 발췌)

2003년 7월 26일에 발생한 일본 미야기현 북부 지진에 대해서는 진앙거리 15km 범위 내에 상시 지진 관측소가 없어 정확한 진원 결정이 어려웠다. 그러나 임시 지진 관측망 설치로 인하여 여진의 진원 결정 및 단층면해 분석의 정확도 향상에 도움을 주었으며, 지진을 발생시킨 지질 구조와의 연관성도 도출할 수 있었다.

제 4 절 이동식 지진계 설치 요약

주요 지진이 발생하였을 때 이동식 지진계를 설치함으로써 상시 지진 관측소를 보완하여 효율적으로 근거리 지진 자료를 확보할 수 있다. 이 자료들을 통해 진원 결정의 정밀도를 향상시키고 단층기하를 추정하여 진원 및 단층과의 상관관계를 밝히는데 도움을 줄 수 있다. 본진 발생 후 여진의 발생횟수가

시간이 지남에 따라 급격하게 감소하므로 이동식 지진계 설치가 결정되면 신속하게 설치를 시작하여야 한다. 그리고 이동식 지진계는 최소 3개 이상을 설치하며, 4개를 설치할 수 있는 경우 1개는 진앙 부근에 설치하고 3개는 방위각 공백이 200° 미만인 되도록 동심원상의 등거리에 배치한다. 또한 기반암 노두나 표피층에 센서를 묻어서 지진을 잘 감지할 수 있도록 하며, 기압 및 기온 변화의 영향을 적게 받도록 지진계 보호 장치를 구비하도록 한다. 이와 더불어 이동식 지진계 설치 시 유의 사항은 표 6.4에 기록해 두었으며, 이동식 지진계 설치를 위해 준비해야 할 목록 및 설치 시 기록 사항을 각각 표 6.5와 그림 6.19에 제시한다.

표 6.4 이동식 지진계 설치 시 유의 사항(국립기상연구소, 2013)

- 노트북 및 배터리는 항상 충전해 둔다.
- 노트북 사용 시 USB 케이블의 드라이버가 설치되어 있어야 한다.
- 현장관측 시 여분의 케이블과 노트북을 준비한다.
- 지진계 센서를 이동시킬 때에는 수평을 유지하며 조심히 다룬다.
- 케이블 연결 시 연결부위의 흠을 잘 맞추어 연결한다.
- 지진계 센서 설치 시 지진계 센서에서 1m정도 떨어진 지점에서 나침반으로 남-북 방향을 확인하고 지진계 센서를 남-북 방향에 맞추어 놓는다.
- 지진계 센서 밑의 높이 조절부이나 삼발이를 이용하여 수평을 조절한다.
- 전원은 반드시 모든 케이블을 연결한 후 가장 나중에 연결한다.
- 지진계 센서 분리 시 반드시 전원을 먼저 해제한 후 케이블을 분리한다.
- 광대역 지진계 센서 사용 시 지진계 센서 잠금-해제를 확인한다.
- 현장관측 장소에는 경고 문구를 부착한다.
- 우천을 대비하여 지진계 센서 및 기록계 보호를 위해 덮개를 사용한다.
- 관측 후, 지진계 센서 및 케이블의 흠과 먼지를 반드시 제거한다.
- 실행과정 중 에러가 발생할 경우, 모든 장비의 전원을 끄고 다시 실행한다.

표 6.5 이동식 지진계 설치 시 필요한 준비물(국립기상연구소, 2013)

| | 장 비 명 | 준비 확인 | 회수 확인 | 비 고 |
|----------------------------|----------------------|-------|--------------|---------------------|
| 이 동 식 지 진 계 | 지진계 센서 | | | |
| | 기록계 | | | |
| | 저장소 | | | |
| | 배터리 | | | |
| | 노트북 | | | Willard.exe 프로그램 설치 |
| | 나침반 | | | |
| | 지진계 센서-기록계 연결 케이블 | | | |
| | 기록계-저장소 연결 케이블 | | | |
| | GPS 케이블 | | | |
| | 기록계-노트북 연결 케이블 | | | USB선 연결 |
| 저장소-노트북 연결 케이블 | | | LAN선과 전원선 연결 | |
| 기록계-전원 연결 케이블 | | | | |

| | 장 비 명 | 준비 확인 | 회수 확인 | 비 고 |
|--------|--------------------|-------|-------|-----|
| 기 타 | 경고 문구 | | | |
| | 카메라 | | | |
| | 테스터기 | | | |
| | 기록계 덮개용 천막 | | | |
| | 삽 | | | |
| | 각종 공구 | | | |
| | 이동식 GPS 및 네비게이션 | | | |
| | 절연테이프 | | | |
| | 목장갑 | | | |
| 우천시 | 우의 및 우산 | | | |
| | 장비 덮개용 방수천막 | | | |

| 다음산 산림문화 수련장 KMA11 | | 관측시작일 | 2017.11.28. - | | |
|-----------------------|---------|-----------------------|--|--------|-------|
| | | 관측장비 (Serial No.) | 광대역(CMG-3T) + 기록계(Q330) (T36395 + 1613) | | |
| 위도 (°) | 36.0795 | 경도 (°) | 129.3050 | 고도 (m) | 134.1 |
| 설치위치 | | 다음산 산림문화 수련장 입구 원편 건물 | | | |
| 담당자 연락처 | | - | | | |
| 비고 | | | | | |



그림 6.19 이동식 지진계 설치 시 기록 사항 예시(다음산 산림문화 수련장)

참고 문헌

- 국립기상연구소, 2013, 현장관측을 위한 지진관측장비 활용 매뉴얼, 11-1360395-000384-01, 국립기상연구소, 서울.
- 국립기상연구소, 2014, 관측·지진기술 지원 및 활용 연구 (III), 11-1360000-001120-10, 국립기상연구소, 제주.
- 기상청, 2017, 9.12지진 현장대응팀 활동보고서, 11-1360000-001393-01, 기상청, 서울.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구, 대한지질학회, 31(4), 393-403.
- 김현진, 송인선, 장찬동, 이희권, 김태희, 2013, 북평분지와 포항분지 시추코어의 물리적 성질과 역학적 성질간의 관계. 지질공학, 23(4), 329-340.
- 중앙재난안전대책본부, 2017, 2017년 자연재난조사 및 복구계획수립 지침: 중앙재난안전대책본부 보고서, 304.
- Bormann, P., 2012, New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), 10.2312/GFZ.NMSOP-2, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam.
- Chang, S.-J. and Baag, C.-E., 2006, Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Regional Broadband Waveforms and Travel Times, Bull. Seismol. Soc. Am., 96(3), 856-870.
- Dreger, D.S., 2003, TDMT_INV: Time Domain Seismic Moment Tensor INVersion, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, 81B, 1627.
- Enescu, N., 1996, Seismic Data Processing Using Nonlinear Prediction and Neural Networks, IEEE NORSIG Symposium, Espoo, Finland, 1-4.
- Hardt, M. and Scherbaum, F., 1994, The design of optimum networks for aftershock recordings, Geophys. J. Int., 117, 716-726.
- Havskov, J. and Alguacil, G., 2004, Instrumentation in earthquake seismology.
- Kwak, D.Y. and Seyhan, E., 2018, Development of Peak Frequency-Site Condition Correlation Models using H/V Spectral Ratio, Geotech. Earthq. Eng. Soil Dyn. V (GEESD V), Jun 10-13, 2018, Austin, Texas.
- Kennett, B.L.N. and Engdahl, E.R., 1991, Travel times for global earthquake location and phase association, Geophys. J. Int., 105, 429-465.
- Kennett, B.L.N. Engdahl, E.R., and Buland R., 1995, Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times, Geophys. J. Int., 122, 108-124.
- Kim, K.H., Kang, T.S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kang, S.Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U., Lee, S.-H., and Kim, J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks, Geosc. J., 20(6), 753-757.
- Kim, M., Yoon, B., Lee, C., Park, K.G., Yoon, W. S., Song, Y., and Lee, T.J., 2017, December, Microseismic monitoring during hydraulic stimulation in Pohang (Korea) for EGS pilot project. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Kim, S., Rhie, J., and Kim, G, 2011, Forward waveform modelling procedure for 1-D crustal velocity structure and its application to the southern Korean Peninsula, Geophys. J. Int., 185(1), 453-468.
- Kim, W., 1999, P-wave velocity structure of upper crust in the vicinity of the Yangsan Fault region. Geosc. J., 3, 17 - 22.
- Klein, F.W., 2002, User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes: U.S. Geological Survey Open-File Rep. 02-171, 123.
- Lahr, J.C., 1999, HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern (Y2K Compliant Version). Open-file report 99-23, U.S. Geological Survey, Denver.

Lee, W.-J., Lu, Z., Jung, H.-S., and Ji, L., 2017, Measurement of small co-seismic deformation field from multi-temporal SAR interferometry: application to the 19 September 2004 Huntoon Valley earthquake, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1241–1257.

McNamara, D.E. and Buland, R.P., 2004, Ambient Noise Levels in the Continental United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94(4), 1517–1527.

Nakamura, Y., 1989, A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *Quarterly Report of RTRI*, 30:1, 25–33.

Okamoto, S., 1984, Introduction to earthquake engineering, 2nd ed. University of Tokyo Press, 629.

Omori, F., 1894, On the aftershocks of earthquakes, *J. of the Coll. of Sci., Imp. Uni. of Tokyo*, 7, 111–200.

Park, S.-C., Yang, H., Lee, D.K., Park, E.H., and Lee, W.-J., 2018, Did the 12 September 2016 Gyeongju, South Korea earthquake cause surface deformation?, *Geosc. J.*, 22(2), 337–346.

Rabinowitz, N. and Steinberg, D.M., 1990, Optimal configuration of a seismographic network: a statistical approach, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80(1), 187–196.

Snoke, J. A., 2003, FOCMEC: FOcal MEchanism determinations, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Volume 81B, 1627.

Uhrhammer, R.A., 1980, Analysis of small seismographic station networks, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 70(4), 1369–1379.

Umino, N., Okada, T., Nakajima, J., Hori, S., Kono, T., Nakayama, T., Uchida, N., Shimizu, J., Suganomata, J., Gamage, S.S.N., Hasegawa, A., and Asano, Y., 2003, Hypocenter and focal mechanism distributions of aftershocks of July 26 2003 M6.4 northern Miyagi, NE Japan, earthquake revealed by temporary seismic observation, *Earth Planets Space*, 55, 719–730.

Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L., 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, *Bull. Seismol.*

Soc. Am., 90(6), 1353–1368.

Waldhauser, F., 2001, HypoDD: A computer program to compute double-difference earthquake locations, *USGS Open File Rep.*, 01–113.

Wathelet, M., Jongmans, D., and Ohrnberger, M., 2004, Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, *Near Surface Geophysics* 2, 211–221.

Wen, R., Ren, Y., Zhou, Z., and Li, X., 2014, Temporary strong-motion observation network for Wenchuan aftershocks and site classification, *Eng. Geology*, 180, 130–144.

Wood, H.O. and Neumann, F., 1931, Modified Mercalli Intensity Scale of 1931, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 21(4), 277–283.

포항지진 분석 보고서

2018년 7월 인쇄

2018년 7월 발행

발행처 기상청 지진화산국

인쇄 (사)한국시각장애인연합회