

배포일시	2019. 2. 27.(수) 10:30 (총 22매)	보도시점	2019. 2. 27.(수) 12시 이후
담당부서	국립기상과학원 응용기상연구과 국립환경과학원 대기환경연구과	담당자	과장 하중철 과장 이상보
		전화번호	064-780-6752 032-560-7253

### 서해상 인공강우 실험 상세 분석결과 발표

- 구름씨 살포 후 강우입자 발달하고 지상 일부에서 강우 감지
- 내륙 강우 없어 의미 있는 미세먼지 저감 효과는 확인 불가

- 기상청(청장 김종석)과 환경부(장관 조명래)는 **2월 27일(수)** 합동브리핑을 열고 **지난달(1월 25일) 서해상에서 진행했던 인공강우 실험에 대한 상세 분석 결과를 발표**하였다.
  - 그간 기상청 국립기상과학원은 기상항공기를 이용한 인공강우 실험을, 환경부 국립환경과학원은 인공강우로 인한 미세먼지 저감 효과를 분석하는 역할을 수행해 왔다.
- **인공강우 실험을 통해 구름씨 살포 후 대기 중 구름발달이 확인**되었고, **일부 섬에서 강우가 감지**되었으나, 지상 부근 대기가 건조하여 **내륙에서는 강우가 감지되지 않았다. [붙임 1]**
  - 기상항공기에 장착된 관측장비로 **구름내부의 변화**를 분석한 결과 **큰 구름과 강우 입자의 수가 증가**하였고[그림1-6], 기상레이더를 통해서도 하층 구름이 발달하는 것이 탐지되었다[그림1-16].
  - **내륙에서는 강우가 감지되지 않았으나 일부 섬(경산도) 지역에서는 감지(2회)** 되었다[그림1-17].
    - 이는 구름씨 살포로 발달한 하층운에서 약하게 강우가 생성되었으나, **내륙은 지상 부근의 대기가 건조하여 낙하하는 강우입자가 증발**했기 때문이다[그림1-19].

- **미세먼지 저감 효과**는 인공강우 영향에측지역인 영광, 나주 등 **내륙 지역에서 강우가 관측되지 않아 확인할 수 없었다. [붙임 2]**
  - 실험시작 후(10~13시) 목포 지역의 초미세먼지 농도는 일시적으로 감소 하였으나 이는 **바람(풍속 증가)에 의한 것으로 판단**되고, **외부 공기 유입으로 14시부터 다시 증가**한 것으로 나타났다[그림2-2].
  - 선박관측지역에서는 초미세먼지 외부유입이 사전에 관측되었고, 실험 시작 후 (10시~15시)에도 해상의 초미세먼지 농도는 계속 증가 하였다[그림2-3].
  - 결론적으로, **실험기간 미세먼지 농도의 감소는 풍속의 증가에 의한 것**이었고 그 이후 다시 **외부공기 유입으로 미세먼지 농도가 증가**하였다.
- 김종석 기상청장은 “내륙 보다는 상대적으로 어려운 **해상 실험에서 인공강우 가능성을 확인**했다.”면서 “**증우량 확보를 위한 기술개발**이 시급한 만큼 향후 **지속적인 연구개발로 선진국과의 기술격차를 줄여 나가겠습니다.**”라고 밝혔다.

- 붙임 1. 인공강우 실험효과 상세분석 결과(기상청)
- 2. 미세먼지 저감효과 상세분석 결과(환경부)

# 붙임 1 인공강우 실험효과 상세분석 결과

## 1. 인공강우 실험 분석방법

- 구름씨 살포부터 해상, 지상까지 확산 단계별 항공기, 레이더, 지상기상관측 등의 자료 특성 분석을 통해 실험효과 검증
  - ※ 인공강우 구름씨 살포 및 효과검증 모의를 위해 인공강우용 수치모델 활용
  - ※ 구름씨 살포 확산 단계는 수치모델결과를 기준으로 구분



[그림 1-1] OB : 항공관측 시작점, BS : 선박지점, S1~S2 : 구름씨 살포 지역  
 ※ OB~a : 확산범위의 구간, b: 실험 후 비행관측시 첫 살포물질 도달지역  
 c : 모바일 기상관측지점, d: 확산범위를 고려한 섬지역 지상관측지점

### ○ 구름씨 살포 영역

- 기상항공기 구름물리 측정장비를 이용하여 실험 전·후 구름씨 확산거리를 고려한 실험효과 검증
  - ※ 입자크기관측범위 : 2.5~49 $\mu$ m (작은구름입자(CDP)), 45~210 $\mu$ m(큰구름입자(CIP)), 200~6,100 $\mu$ m(강수입자(PIP))
  - \* CDP : Cloud Droplet Probe, \*\*CIP : Cloud Imaging Probe, \*\*\*PIP : Precipitation Imaging Probe

- 3 -

### ○ 해상 확산 영역

- 기상항공기를 이용한 선박 상공에서 실험 전·후 구름입자크기 분포 변화 분석
- 기상선박의 고층관측자료로 해상에서 하층운 발달 분석

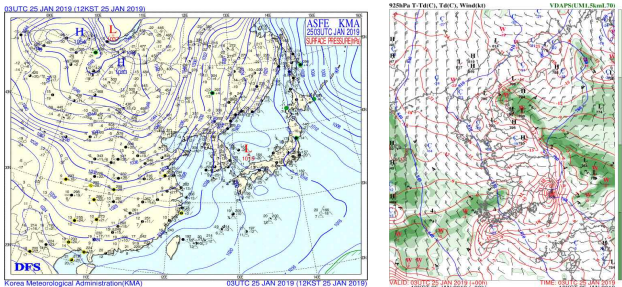
### ○ 지상 확산 영역

- 지상기상관측자료에 의한 실험효과 검증
- 모바일관측차량의 고층관측자료를 이용한 지상 하층운 특성 분석
- 레이더 반사도 등을 이용한 지상 구름발달 과정 및 실험효과 검증

## 2. 기상현황 및 위성자료 분석

### ○ 종관 및 상세 일기도 분석

- 실험지역은 종관적으로 시베리아 고기압권 영역에 있었음 (그림 좌)
- 실험지역 상공(925 hPa)에서 습수(T<sub>td</sub>) 4도 이하의 습윤 영역 존재 (그림 우)

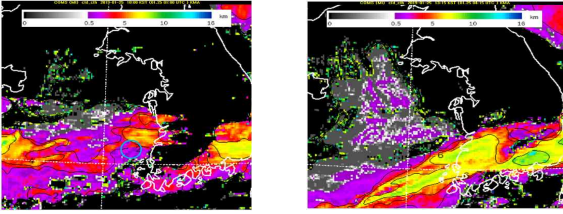


[그림 1-2] 지상일기도(2019. 1. 25. 12:00 LST) 및 925 hPa 일기도

- 4 -

○ 위성영상분석

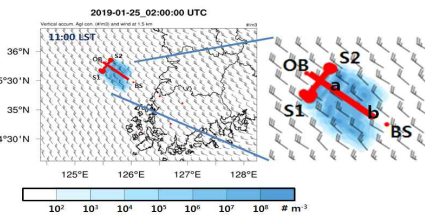
- 구름씨 살포 전(10시)에 구름 상부(운정) 고도 약 1.5 km 이하의 하층운이 존재 (그림 좌)
- 살포 실험 후 구름대가 내륙으로 이동하면서 중상층운 발달 (그림 우)



[그림1-3] 운정고도 분포(10:00 LST / 13:15 LST)

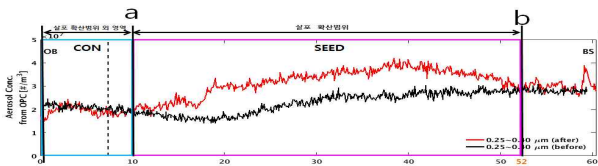
3. 구름씨 살포 영역 분석

- (확산 수치모의) 수치모델은 구름씨 살포 종료 후 인공강우 영향 지역이 선박(BS) 방향으로 확산 중임을 모의(11시 00분)
- ※ a와 b 는 기상항공기에 의해 관측된 구름씨 수농도를 기준으로 확산범위 외 영역을 'OB-a'로 확산범위 영역을 'a- b' 라고 정의



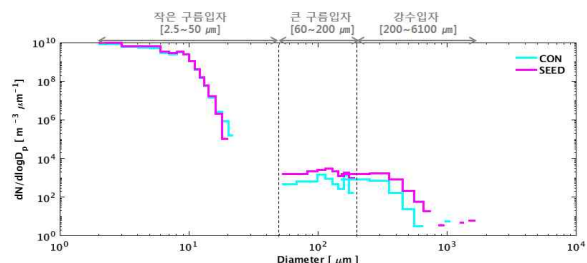
[그림1-4] 구름씨 살포 후 확산장 (11:00 LST)

- (확산분포 항공관측) 구름씨 살포전과 후에 풍상지점(OB)부터 선박지점(BS)까지 이동하며, 광학입자계측기(Sky-OPC)로 구름씨 (0.25-0.4μm) 수농도 분석
- 구름씨의 수농도가 구름씨 살포 이후 증가(그림의 붉은 실선)
- ※ 이번 실험에서는 국내에서 처음으로 구름씨가 확산되는 현상을 Sky-OPC 결과로 확인
- \* Sky-OPC(Optical Particle Counter)



[그림1-5] 구름씨 영향 없는 구름(CON) 및 영향 구름(SEED)의 에어로졸 수농도 비교 (적색 : 실험 전, 흑색 : 실험 후 관측)  
 \*a: 구름 살포 후 비행관측시 첫번째 연소탄의 확산 위치

- (강수입자분석) 구름씨 영향 구름(SEED)의 각 크기별 입자 수농도가 증가하였으며, 특히 큰 입자인 관측범위에서 뚜렷한 변화 확인
- 'a-b' 구간(SEED)은 살포 후 비행관측 범위 내에서 구름이동 속도와 항공관측결과를 고려한 구름씨 살포물질의 확산범위로 산출된 구간



[그림1-6] 구름씨 영향없는 구름(형색) 및 영향구름(적색) 크기별 입자수 비교

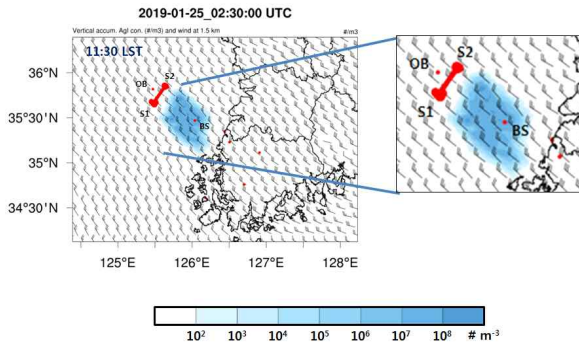
- 작은 구름입자 총수농도는 1.7배, 큰 구름입자 총수농도는 4배, 강수입자 총수농도는 3.4배 증가

	작은 구름입자 (2.5~50 $\mu\text{m}$ )	큰 구름입자 (60~200 $\mu\text{m}$ )	강수입자 (200~6,100 $\mu\text{m}$ )
살포영향 없는구름 (CON)	3,541 $\times 10^6$	1,101	141
살포영향 구름 (SEED)	5,855 $\times 10^6$	4,440	481
증가량	1.7배	4.0배	3.4배

※ LWC 0.2 g/m<sup>3</sup> 이상의 구름 (수농도 단위 : #/m<sup>3</sup>)

#### 4. 해상 확산 영역 분석

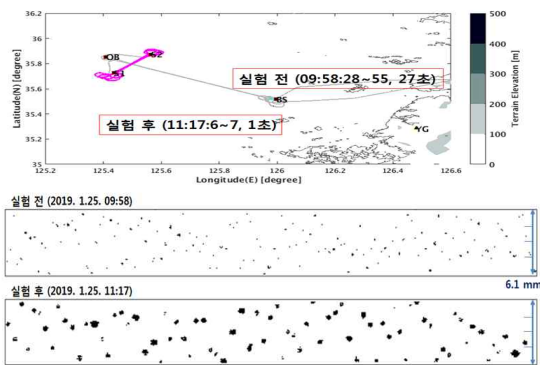
- (확산 수치모의) 살포된 구름씨가 약 11시 10분 ~ 12시 30분 사이에 선박이 있는 BS지역(살포지점(S1~S2)에서 약 53 km, 풍속 : 14 m/s)에 영향



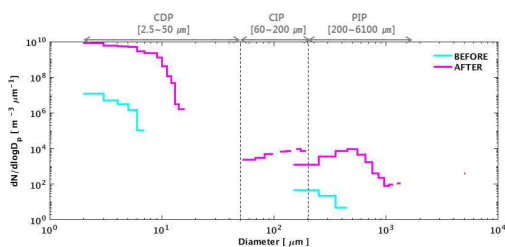
[그림1-7] 구름씨 살포 후 확산장 (11:30 LST)

- 7 -

- (항공관측) 구름씨 살포 후 해상확산영역에서 구름입자 변화 분석  
- 실험 이후 BS 지역에서 실험 이후 구름내 강수입자의 수 증가 확인



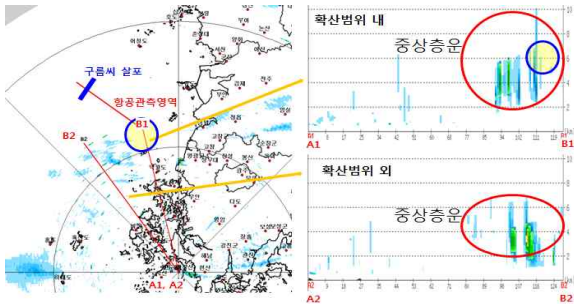
[그림1-8] 실험 전 · 후 관측된 강수입자 비교



[그림1-9] 기상항공관측 실험 전(정색, BEFORE)과 후(적색, AFTER) 선박지역 입자크기별 수농도변화

- 8 -

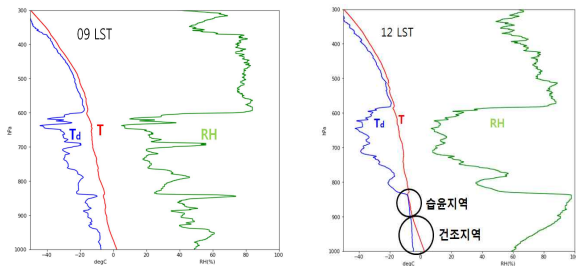
- **(레이더 연직관측)** 진도레이더로 선박지점 남쪽의 강수발달 분석
  - 해상확산영역 내와 밖의 레이더 연직관측은 유사하게 하층운은 거의 발달 하지 않고 중상층운에서 약한 반사도 관측
  - 다만, 해상확산영역 내부에 있던 살포된 구름씨가 북서풍으로 인해 이동되면서 좀 더 내륙으로 접근하는 것으로 분석됨



[그림 1-10] 레이더 연직단면도 분석을 통한 레이더 반사도 특성 분석(11:50 LST)

- **(선박 고층기상관측)** 실험 전인 9시에는 600 hPa 상층이 습윤하였고, 하층은 상대적으로 건조 (그림 좌)
  - 실험 후에 약 900-800 hPa 사이에 습윤지역이 나타났고, 600 hPa상층은 지속적으로 습윤 (그림 우)
  - 실험 후의 최하층 습수(T-Td)는 7.8°C로 건조
    - ※ 일반적으로 습수값이 4°C 이하 인 경우에만 습윤한 것으로 판단
  - 실험은 하층 습윤지역에서 수행되었고, 실험 후 중층운과 하층운이 뚜렷이 구별
  - 실험 전보다 실험 후에 하층운이 더 발달되었음을 확인

- 9 -



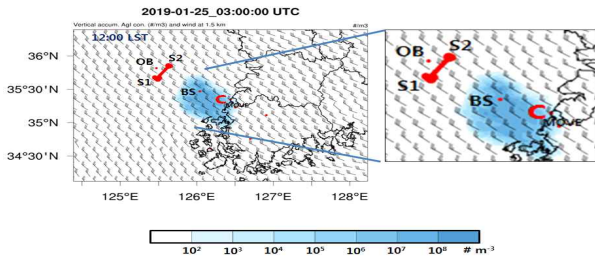
[그림 1-11] 선박관측(BS)지점의 실험 전(좌,0900 LST) 실험 후(우, 1200 LST) 고층기상관측 비교



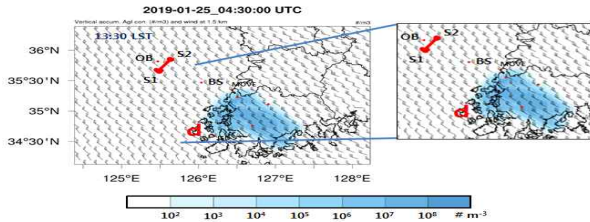
[그림 1-12] 기상선박 주위 해상에 비를 포함한 구름

## 5. 지상 확산영역 분석

- **(확산 수치모의)** 살포된 구름씨는 약 12시 00분부터 14시 30분까지 모바일 관측지점(c), 장산도(d)에 순차적으로 영향
  - ※ 살포된 구름씨는 살포지점(S1-S2)에서부터 직선거리로 c 지점(약 93km)에 약 12시, d 지점(약 140 km)에 약 13시 00분에 도착(평균풍속 14m/s)
  - \* d 지점인 경우 기류흐름과 살포물질의 확산특성 등을 고려할 경우 직선거리에 비해 공기이동 거리는 약 ±10 km 변동이 있음



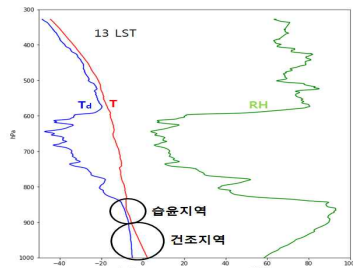
[그림1-13] 구름씨 살포 후 확산장 (12:00 LST)



[그림1-14] 구름씨 살포 후 확산장 (13:30 LST)

○ (모바일 관측)

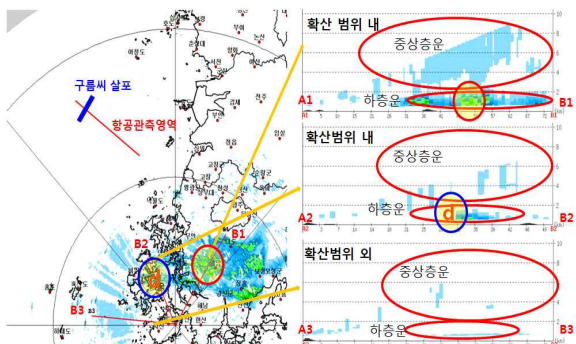
- 모바일 관측지점(영광군 가마미해수욕장, c)에서 13시에 고층관측이 수행됨. 약 900~800 hPa 사이에 하층에 습윤지역이 존재하였고, 수치모의 확산 시간과 유사
- 최하층 습수(T-Td)는 7.3℃로 건조
- ※ 하층운의 발달이 지상 모바일 관측에서도 확인됨에 따라 수치모의 구름씨 분포 확산범위와 시간의 정확도가 높음을 알 수 있음



[그림1-15] 영광 가마미해수욕장 모바일관측(c)에서의 고층기상관측 결과

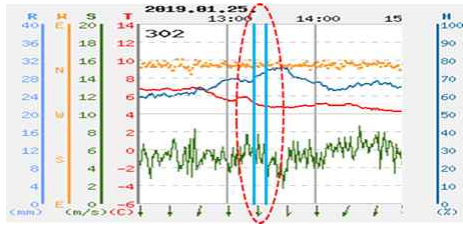
○ (레이더 연직관측)

- 구름씨의 영향을 받은 하층운이 내륙에 상륙하여 하층의 반사도가 강화됨(13시 20분)
- 구름씨 영향을 받지 않았던 중층운도 반사도가 증가하는 경향을 보였지만 주로 영향을 받은 하층운은 최대 10dBZ까지 증가



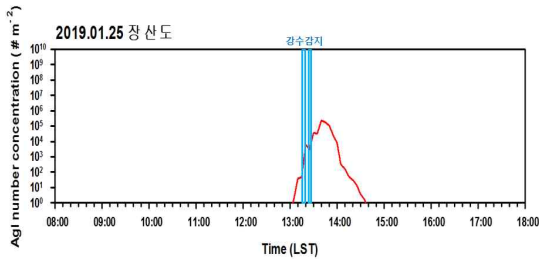
[그림1-16] 레이더 연직단면도 분석을 통한 레이더 반사도 분석(13시 20분)

- **(지상 AWS 관측)** 장산도에 구름씨 물질의 영향 추정되는 시간을 수치모의 한 결과 장산도는 13시 10분~14시 30분
  - 이 시간대에 장산도 AWS에서는 13시 17분과 25분에 강수가 감지되었지만, 내륙 지역의 AWS에서는 강수가 관측되지 않음



[그림 1-17] 장산도 AWS 시계열 및 강수감지

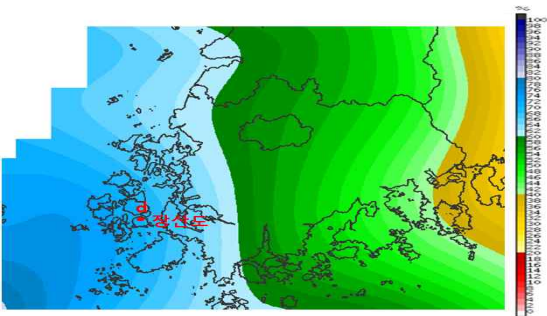
- 수치모의에서도 장산도 AWS에서 강수감지가 이루어진 13시 17분 및 25분 부근에 구름씨 살포 물질의 농도가 증가되어 장산도에서 강수감지는 인공강우 실험의 영향으로 판단됨



[그림 1-18] 장산도의 구름씨 살포 영향시간에 대한 연직 누적 구름씨(붉은선)

- 13 -

- **(강수감지 차이 원인분석)** 내륙지역과 장산도 강수감지 유무의 차이 분석을 위해 지상관측장비(AWS) 상대습도를 분석함
  - 내륙지역은 13시~14시 사이 상대습도가 50~60%였고, 장산도는 70~80%였음
  - 구름씨 살포효과가 내륙보다 장산도가 작았지만, 내륙은 상대적으로 건조하여 강수입자가 증발하였고, 장산도는 증발이 약하여 강수가 감지된 것으로 판단됨



[그림 1-19] 지상 AWS 상대습도 분포(13:25 LST)

## 6. 요약 및 결론

- **구름씨 살포영역에서 구름발달 확인**
  - 기상항공기를 이용한 구름씨 살포 후 영향을 받은 구름을 추적한 결과 큰 구름입자( $60\mu m$  이상)의 수가 증가
  - 입자크기별 수농도 증가를 통해 실험에 의한 구름 발달 확인
  - ※ 구름의 이동을 고려한 실험 검증 및 분석기술 적용

- 14 -

- **해상 확산영역에서** 구름발달 및 하층의 습도 증가 확인
  - 해상 비행기 관측지점의 실험 전·후 구름입자 크기분포에서도 **큰 입자수가 증가**하였고, 선박의 고층기상관측자료에서 **하층 상대습도 증가** 확인
- **지상 확산영역 섬에서** 강수감지, 내륙하층 대부분이 건조하여 증발
  - 구름씨 살포 영향을 많이 받은 영광, 영암등 내륙지역에서는 강수감지가 없고, 섬지역인 **장산도에서 강수감지** 발생
  - 하층의 낮은 상대습도로 **실험 후 하층운이 발달** 했지만 내륙은 건조하여 **강수가 나하하면서 증발**한 것으로 판단
- **(결론 및 제언)**
  - 인공강우 실험 후 **기상항공기, 레이더 관측으로 대기 중 구름 발달** 확인
  - 발달한 구름 및 강수 입자가 **지상 부근이 건조하여 낙하 시 대부분 증발**
  - 하층 대기 건조에 대해 미리 고려하지 못하여 지상강수량 증가를 유발하지 못함
  - 향후, 구름 분포뿐만 아니라 **대기 하층의 연직 특성** 등을 고려한 실험 설계 필요
  - **구름씨 살포 효과**를 사전에 평가할 수 있는 **수치모델 개선** 등 인공강우 기술 향상 필요

## 붙임 2 미세먼지 저감효과 상세분석 결과

### 1. 미세먼지관측자료 분석 방법

- **(오염도)** 인공강우 분석지역의 대기오염측정망 5개소\* 관측결과 및 인공강우 풍하지역 서해 해상 선박 측정결과 분석
  - \* 목표지역인 전남 영광군과 주변지역인 전남(목포시 용당동, 나주시 빛가람동, 장흥군 장흥읍, 전북(고창군 심원면)
- **(기상)** 대기오염측정소에 설치 운영 중인 기상관측 결과 활용
  - ※ 기상관측항목 : 풍향, 풍속, 기온, 습도, 강수, 일사 등 \*\*항목
- **(외부유입)** 대기질 모델(CMAQ, EPA), 역궤적 분석(Hysplit, NOAA), 위성관측(GOCI AOD\*) 활용 검토
  - ※ AOD : Aerosol Optical Depth
- 분석지역
  - **(해상)** 인공강우 풍하지역의 서해해상(기상청 기상 1호 선박 관측)
  - **(내륙)** 목표지역인 전남 영광군과 주변지역 대기오염 측정망



[그림2-1] 목표지역(영광군 영광읍) 인근 측정소 분포

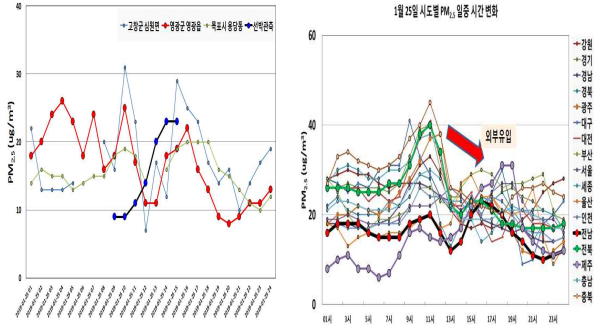
\* 적색 : 서해안 인접 측정소, 주황색 : 공기계 이동 경로에 위치한 대기오염 측정소



2. 미세먼지관측자료 분석 결과

□ [초]미세먼지 오염도

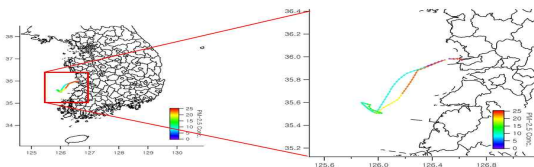
- **(목표지역)** 실험시작 후(10~13시) 분석지역 초미세먼지 오염도 감소, 14시부터 외부 유입에 의해 15시까지 오염도 증가
  - ※ (PM<sub>2.5</sub> 농도) 25μg/m<sup>3</sup>(10시) → 17μg/m<sup>3</sup>(11시) → 11μg/m<sup>3</sup>(12시) → 11μg/m<sup>3</sup>(13시) → 18μg/m<sup>3</sup>(14시) → 19μg/m<sup>3</sup>(15시)
- **(타지역)** 순차적으로 충북→전북→전남→제주로 초미세먼지 농도가 증가



[그림2-2] 서해안 인접 측정소 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 변화 및 전국 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 시간 변화

- **(선박관측)** 분석지역 초미세먼지 외부유입을 바다에서 사전 관측, 실험시작 후(10시~15시) 해상의 초미세먼지 농도 계속 증가
  - ※ (PM<sub>2.5</sub> 농도) 9μg/m<sup>3</sup>(10시) → 11μg/m<sup>3</sup>(11시) → 14μg/m<sup>3</sup>(12시) → 20μg/m<sup>3</sup>(13시) → 23μg/m<sup>3</sup>(14시) → 23μg/m<sup>3</sup>(15시)

- 17 -



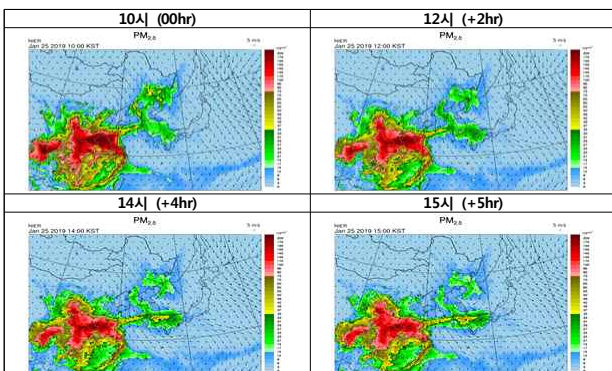
[그림2-3] 선박관측 농도 분포

□ 기상변화

- **(강 수)** 분석지역 강수는 관측되지 않음
- **(바 랫)** 실험시작 후 풍속 증가(10시 0.3m/s → 12시 3.4m/s)
- **(습 도)** 실험시작 후 습도 감소(10시 68% → 12시 49%)

□ 외부유입

- **(모델예측)** 내륙 미세먼지가 바람(풍속증가)의 영향으로 10시~13시 까지 해소된 후 14시~16시에 서해상 오염물질이 유입되어 농도가 상승

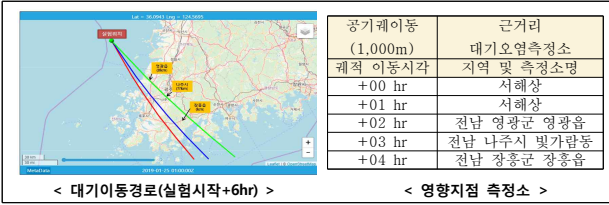


- 18 -

- (역제적 분석) 실험 시작 후 영광군(2hr 후) → 나주시(3hr 후) → 장흥군(4hr 후) → 남해안(5hr 후) 으로 이동

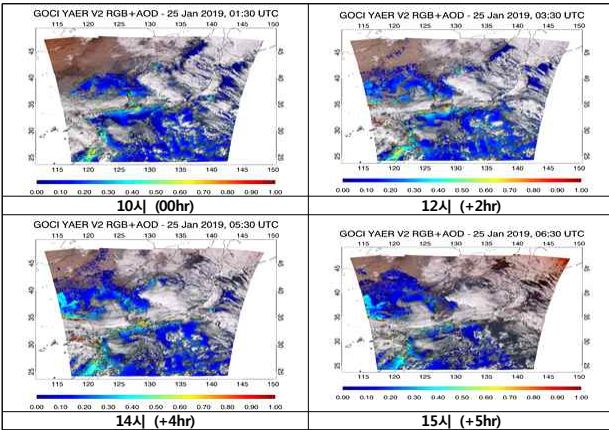
※ 상공의 대기는 강하 없이 6시간 내에 빠르게 우리나라를 벗어남

< 시간별 공기케 이동 위치 및 근거리 대기오염 측정소 >



\* 적색 : 100m, 청색 : 500m, 연두색 : 500m 대기이동경로

- (위성관측) 모델예측과 유사하게 미세먼지 감소 후 서해상 미세먼지 유입 확인



### 3. 요약 및 결론

- (강 수) 인공강우 예상 지역인 전남 영광군과 그 주변지역에서의 강수는 관측되지 않음
- (오염도) 강수가 관측되지 않아 미세먼지 오염도 개선 효과는 확인할 수 없음
  - 실험기간 미세먼지 농도가 감소 후 증가는 풍속 증가로 미세먼지가 원활히 확산된 후 외부유입 영향으로 분석

