

대기질 개선 기술 세미나

기후변화대응연구센터



2019. 1. 28.

세부 프로그램

시 간	내 용	
10:00~10:10 (10')	접수 및 등록	
10:10~10:20 (10')	개회 및 소개	
10:20~10:45 (25')	① 화력발전소가 PM10 농도에 미치는 영향 - 2016년 4월과 6월 사례	박문수
10:45~11:10 (25')	② 라그랑지안입자확산모델(LPDM)을 이용한 방사능 물질 확산 모의 - 화력발전소가 미세먼지 농도에 미치는 기여도 평가 가능성	김상현
11:10~11:35 (25')	③ 도시기상관측자료를 이용한 수도권의 국지 순환 및 대기질 농도 특성	박문수
11:35~11:55 (20')	종합토의	정연양
11:55~12:00 (5')	폐회	

1

화력발전소가 PM 농도에 미치는
영향 - 2016년 4월과 6월 사례

박일수 (한국외국어대학교 한-중남미녹색융합센터)

박문수 (한국외국어대학교 대기환경연구센터)



2016년 4월과 6월 사례를 통한 화력발전소가 PM 농도에 미치는 영향

박 일 수¹ · 박 문 수²

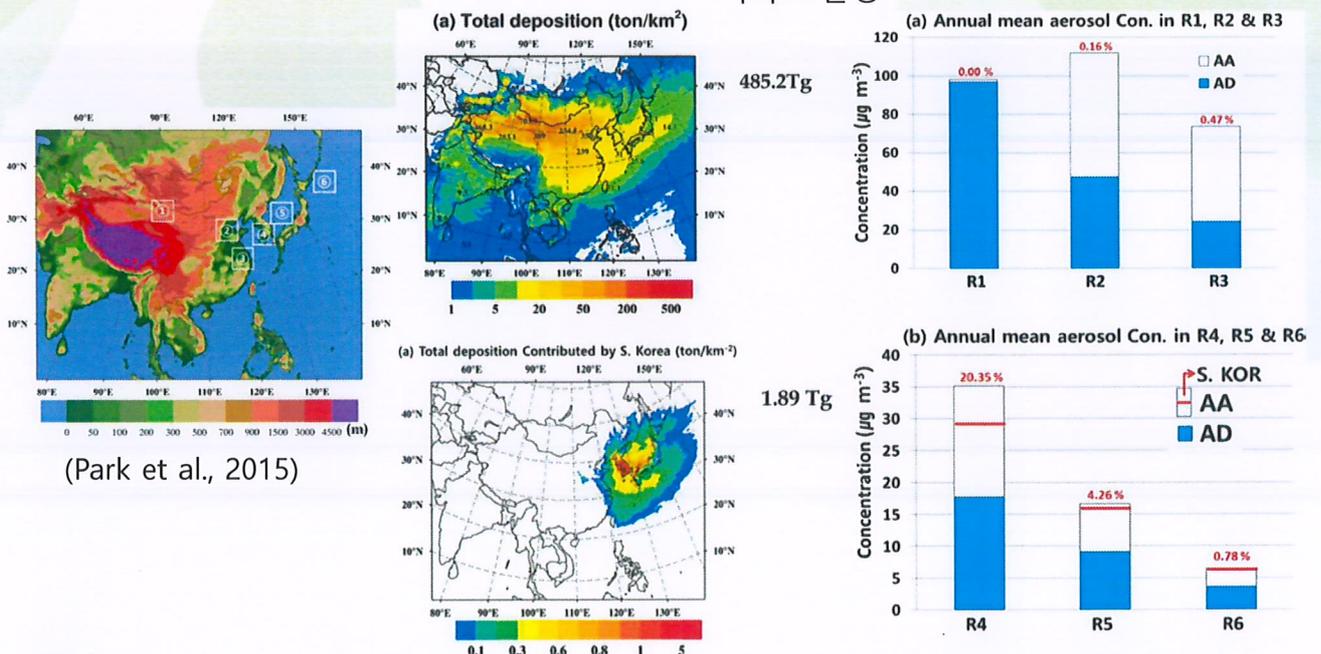
한국외국어대학교 ¹한-중남미녹색융합센터 / ²대기환경연구센터

2019년 1월 28일, 충청남도 서해안기후환경연구소

서론

- ✓ 미세먼지: 배출 + 수송 + 침착
- ✓ 장거리 수송: 각국의 기여도 논란

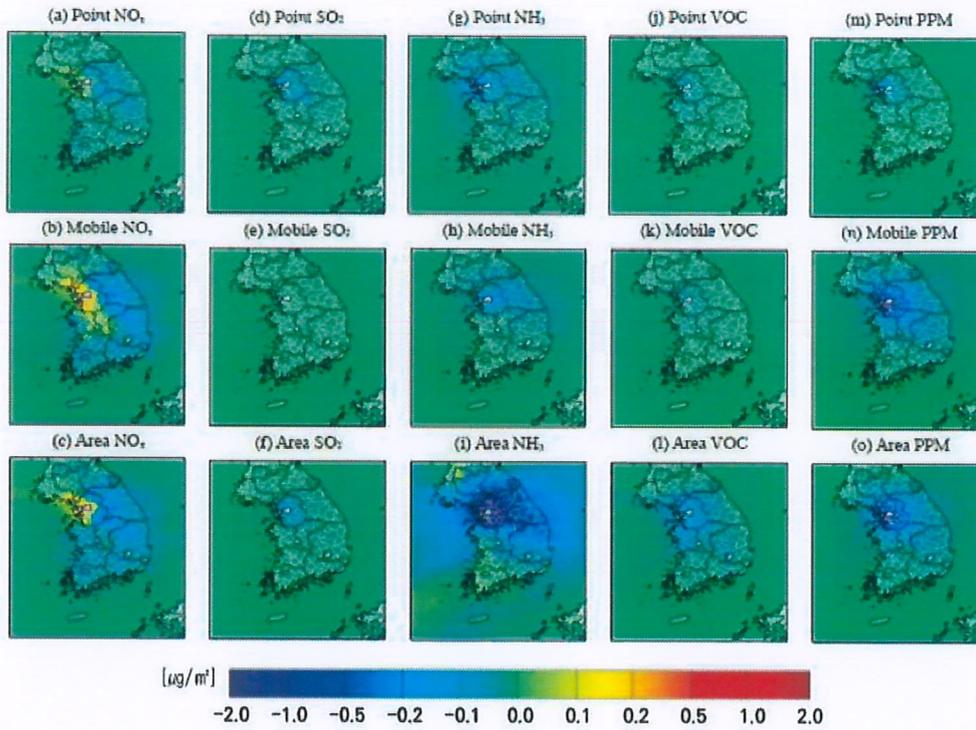
- 2010년/AMS (Aerosol Modeling System)
- 황사와 미세먼지의 기여도 산정
- 우리나라 배출량의 아시아 농도에 미치는 기여도 산정



(Park et al., 2015)



- ✓ 수도권 대기오염 배출 50% 저감 효과 (김순태, 2017)
- ✓ 질소산화물의 배출량 저감은 수도권 초미세먼지 증가 효과, 암모니아 배출 저감의 효과가 큼



3

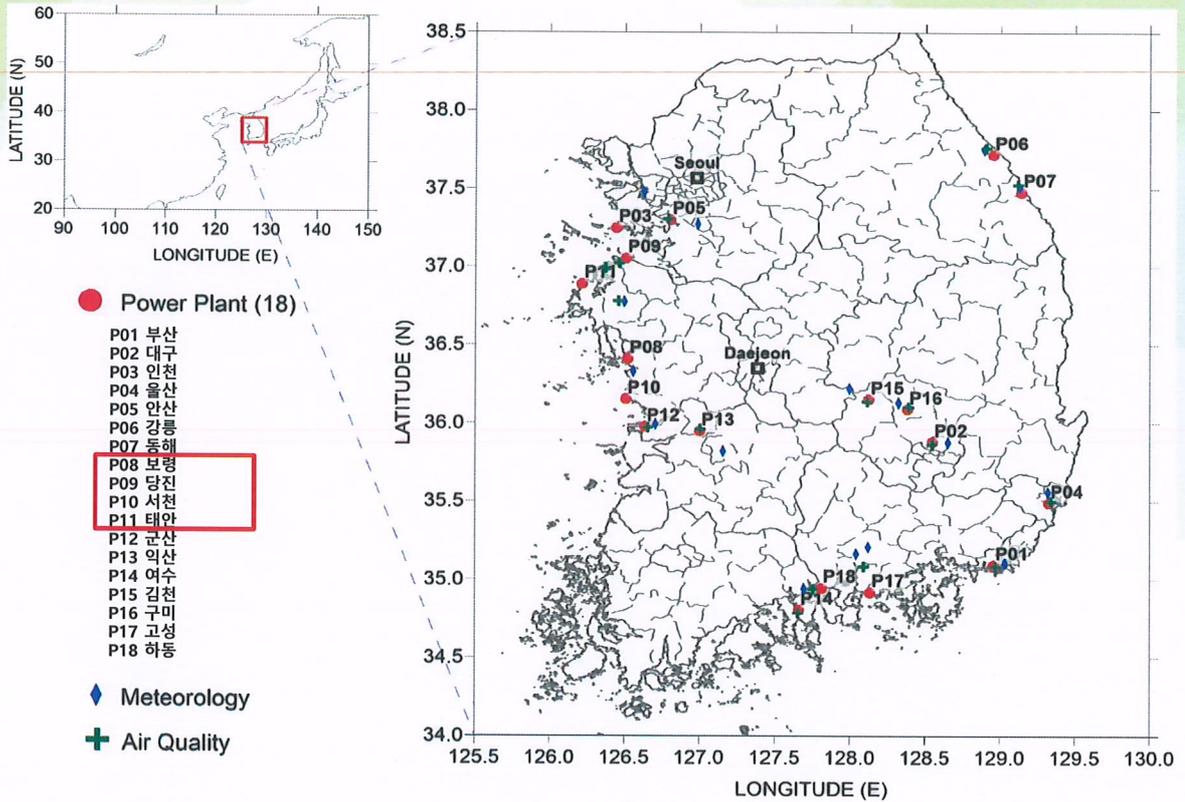


- ✓ 2016년 4월 7-12일 (봄), 6월 1-6일 (여름) 사례
- ✓ TAPM (The Air Pollution Model) 이용
- ✓ 화력발전소가 미세먼지 농도에 미치는 영향



4

발전소, 관측소의 위치



화력발전소

화력발전소	위도	경도	고도 (m)	굴뚝 반경 (m)	배출 온도 (K)	배출 속도 (m/s)	굴뚝수 (ea)*	인접 기상 관측소와의 거리 (km)	인접 대기질 관측소와의 거리 (km)	주연료	
P01	부산	35° 05'	129° 0.5'	100.0	1.09	409.53	8.18	1	8.2	1.1	
P02	대구	35° 53'	128° 32.50'	100.0	1.44	381.24	5.52	3	11.6	0.7	
P03	인천	37° 14.5'	126° 26.57'	199.0	3.23	360.09	33.71	8	25.3	15.0	
P04	울산	35° 30.5'	129° 22.5'	153.5	1.30	371.52	17.81	8	4.9	1.6	
P05	안산	37° 17.5'	126° 48'	123.0	1.27	363.74	4.19	18	20.3	1.7	
P06	강릉	37° 44'	128° 58.5'	80.0	2.49	384.73	12.64	4	7.0	6.0	
P07	동해	37° 29'	129° 8.5'	150.0	2.00	416.82	24.26	5	2.4	4.1	
P08	보령	36° 21'	126° 35'	41.8	2.91	362.1	20.21	10	6.7	25.6	유연탄
P09	당진	37° 2.5'	126° 31'	150.0	2.98	362.84	24.66	32	18.2	5.3	유연탄, 등유
P10	서천	36° 8.5'	126° 29.5'	150.0	2.05	362.25	24.23	10	12.9	19.9	유연탄, 무연탄, B-C유, 등유
P11	태안	36° 45.5'	126° 19'	150.2	2.98	358.97	21.77	14	31.8	18.3	유연탄
P12	군산	35° 58.5'	126° 38'	100.0	1.34	411.44	8.57	16	7.8	1.7	
P13	익산	35° 57'	126° 59'	80.0	0.82	428.51	14.34	8	14.6	1.0	
P14	여수	34° 50'	127° 41'	76.9	1.79	398.89	15.3	25	10.0	1.4	
P15	김천	36° 9'	128° 7'	100.0	1.70	403.72	10.78	4	15.2	1.4	
P16	구미	36° 5.5'	128° 22'	153.0	1.07	366.85	15.59	18	7.3	1.1	
P17	고성	34° 54.5'	128° 6'	200.0	2.58	378.74	19.52	16	19.7	12.2	
P18	하동	34° 57'	127° 49'	150.0	3.26	357.88	15.14	16	13.1	6.4	



발전 용량 및 배출량

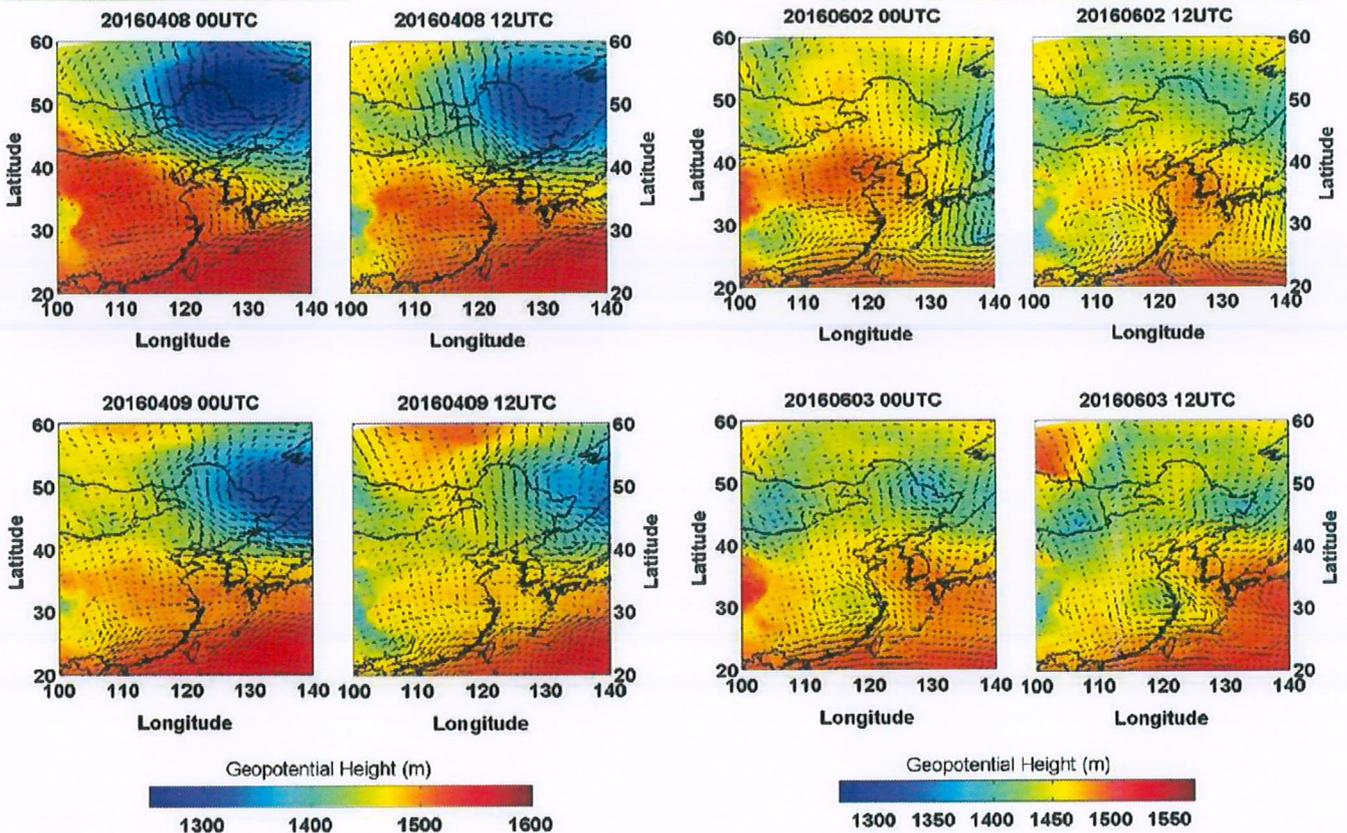
Power Plants		발전용량		배출량 (ton/year)			
		(MWh)	(%)	PM ₁₀	PM _{2.5}	NOx	SOx
P01	부산	166,440	0.1	12.06	9.73	455.09	488.25
P02	대구	638,604	0.3	26.55	21.41	1042.42	1181.48
P03	인천	38,610,719	18.3	207.76	167.58	3862.97	5517.57
P04	울산	343,864	0.2	14.04	11.32	905.46	847.82
P05	안산	674,126	0.3	14.11	11.38	686.03	324.74
P06	강릉	2,102,002	1.0	29.16	19.40	2692.47	910.16
P07	동해	2,924,854	1.4	35.59	25.21	1086.87	2406.16
P08	보령	30,778,882	14.6	560.94	452.46	17454.32	11656.09
P09	당진	32,432,355	15.4	319.95	111.50	17148.32	7223.25
P10	서천	3,370,249	1.6	60.57	41.58	3613.69	1317.73
P11	태안	32,984,153	15.7	835.13	673.63	22168.03	12792.28
P12	군산	810,536	0.4	33.30	26.86	891.38	776.70
P13	익산	183,960	0.1	9.97	7.21	396.49	500.14
P14	여수	7,037,424	3.3	229.13	178.85	6453.28	4074.51
P15	김천	516,840	0.2	2.48	2.0	83.68	69.84
P16	구미	748,980	0.4	29.0	23.39	2059.47	1860.64
P17	고성	24,880,364	11.8	564.47	455.32	23267.45	14531.64
P18	하동	31,494,250	14.9	470.91	379.84	13524.62	11478.44

충남: 전체 화력발전용량의 47%, 배출량의 51%
발전용량대비 배출량이 인천에 비해 3.3배임

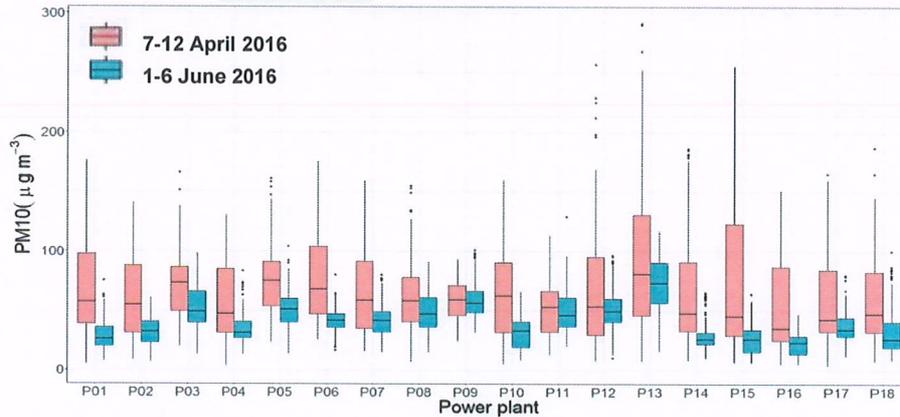
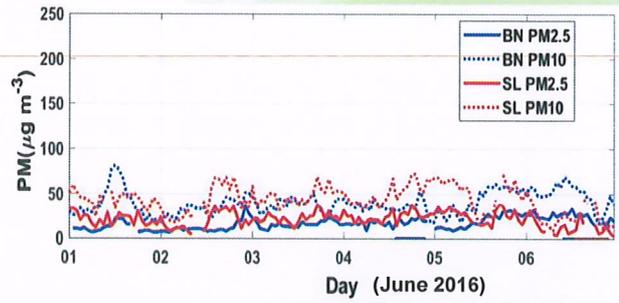
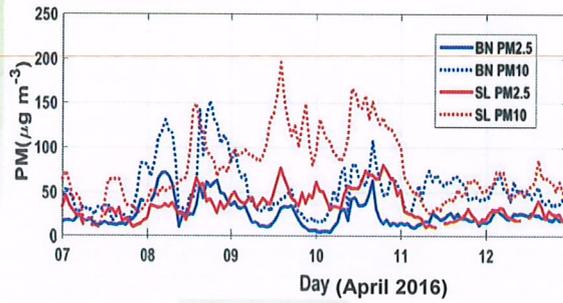
PM_{2.5}/PM₁₀: 대부분 발전소 0.8
(당진 0.35, 서천 0.68)



종관 특성



PM10 농도 분포



부산	70.7	29.0
대구	68.8	33.3
인천	70.6	52.5
울산	68.6	36.6
안산	68.7	40.8
강릉	76.9	42.1
동해	71.4	38.2
보령	62.0	49.0
당진	58.4	58.4
서천	62.8	31.8
태안	51.7	50.9
군산	71.1	50.9
익산	90.5	67.7
여수	77.9	33.8
김천	71.9	26.6
구미	54.7	22.5
고성	61.2	37.8
하동	60.4	32.9

- ✓ 평균농도: 67.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ (4월), 40.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ (6월)
- ✓ 최대농도: 90.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ (4월, 익산), 67.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ (6월, 익산)



9

TAPM (The Air Pollution Model)

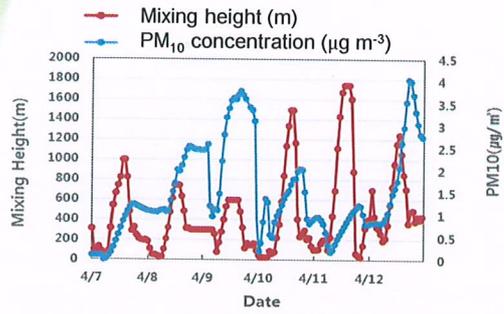
- ✓ 개발자: Dr. Peter Hurley (CSIRO Atmospheric Research)
- ✓ Gaussian Plume or Puff 모델
- ✓ Local-scale 대기오염 모델링 (수평규모 < 1500km)
- ✓ MET: 비압축성 유체 가정, Terrain-following
- ✓ Eulerian Grid Module: 이류, 확산, 화학반응, 건성/습성 침착
- ✓ Lagrangian Particle Module: 오염원 주변의 확산, plume rise
- ✓ 화력발전소의 배출량 만 고려 (중국 배출량 고려되지 않음)



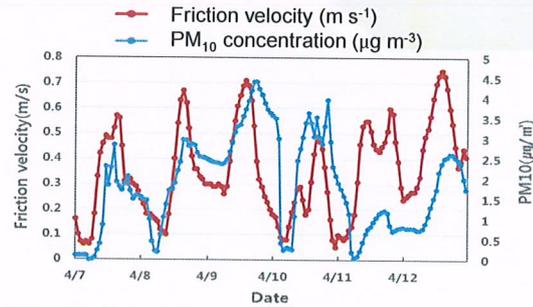
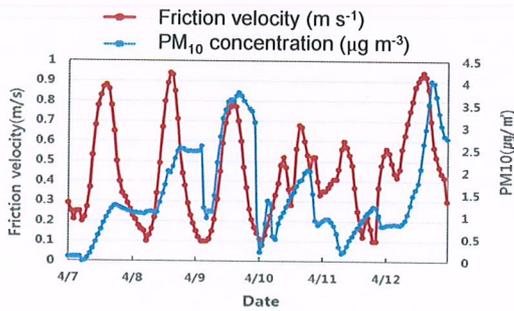
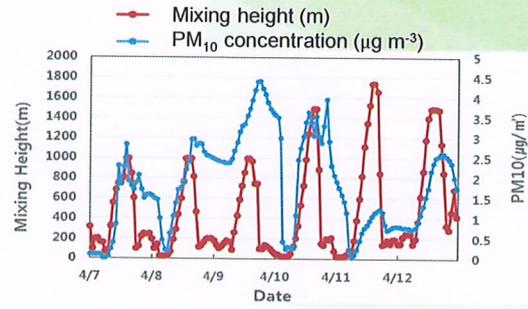
10

모델 결과 (2016년 4월 7-12일)

서울

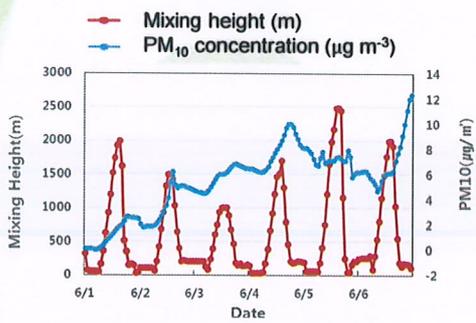


대전

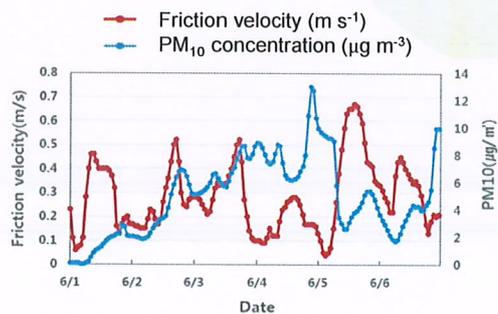
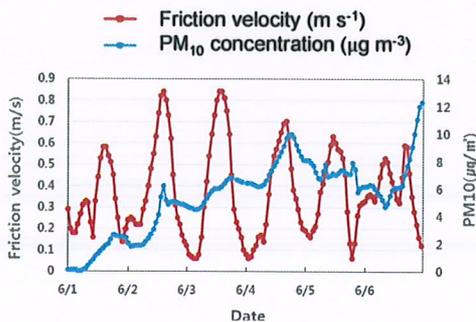
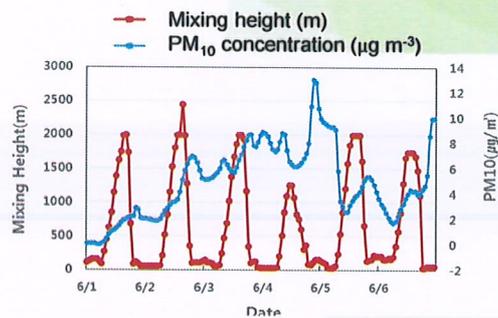


모델 결과 (2016년 6월 1-7일)

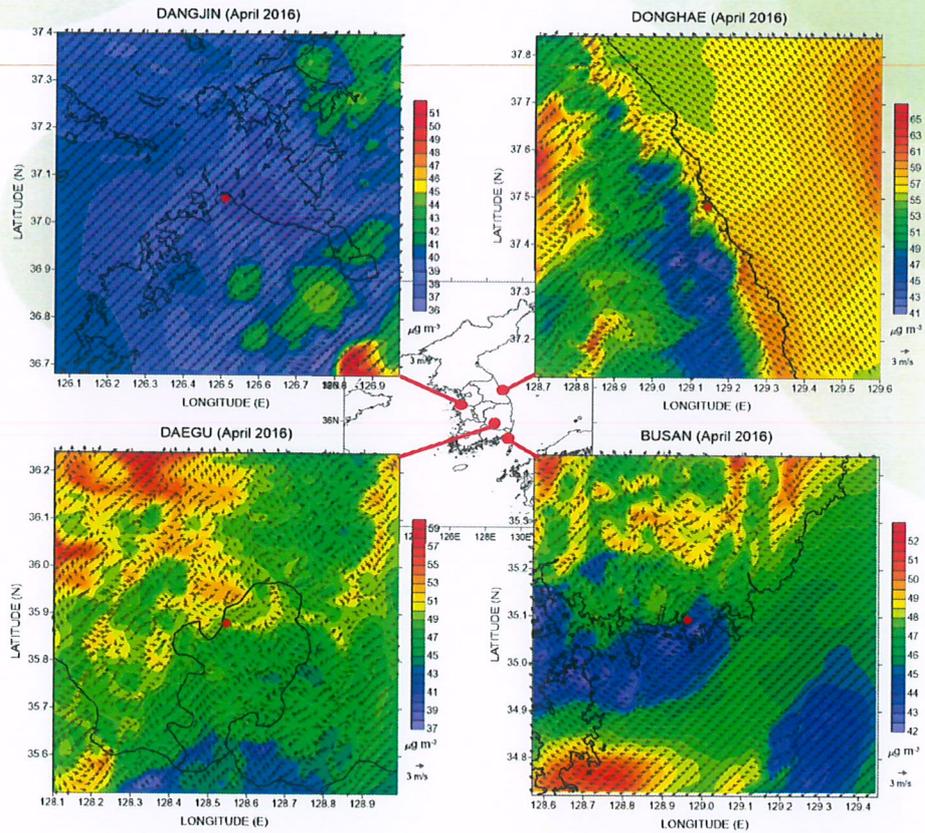
서울



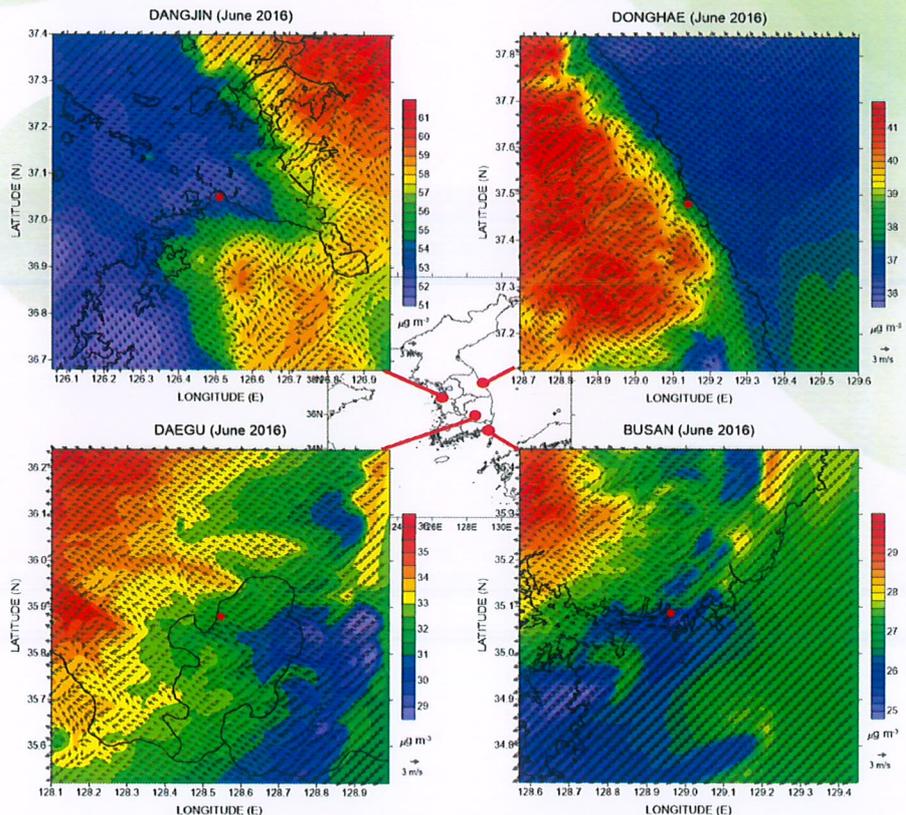
대전



모의된 기간 평균 PM10 농도 (2016년 4월 7-12일)



모의된 기간 평균 PM10 농도 (2016년 6월 1-7일)

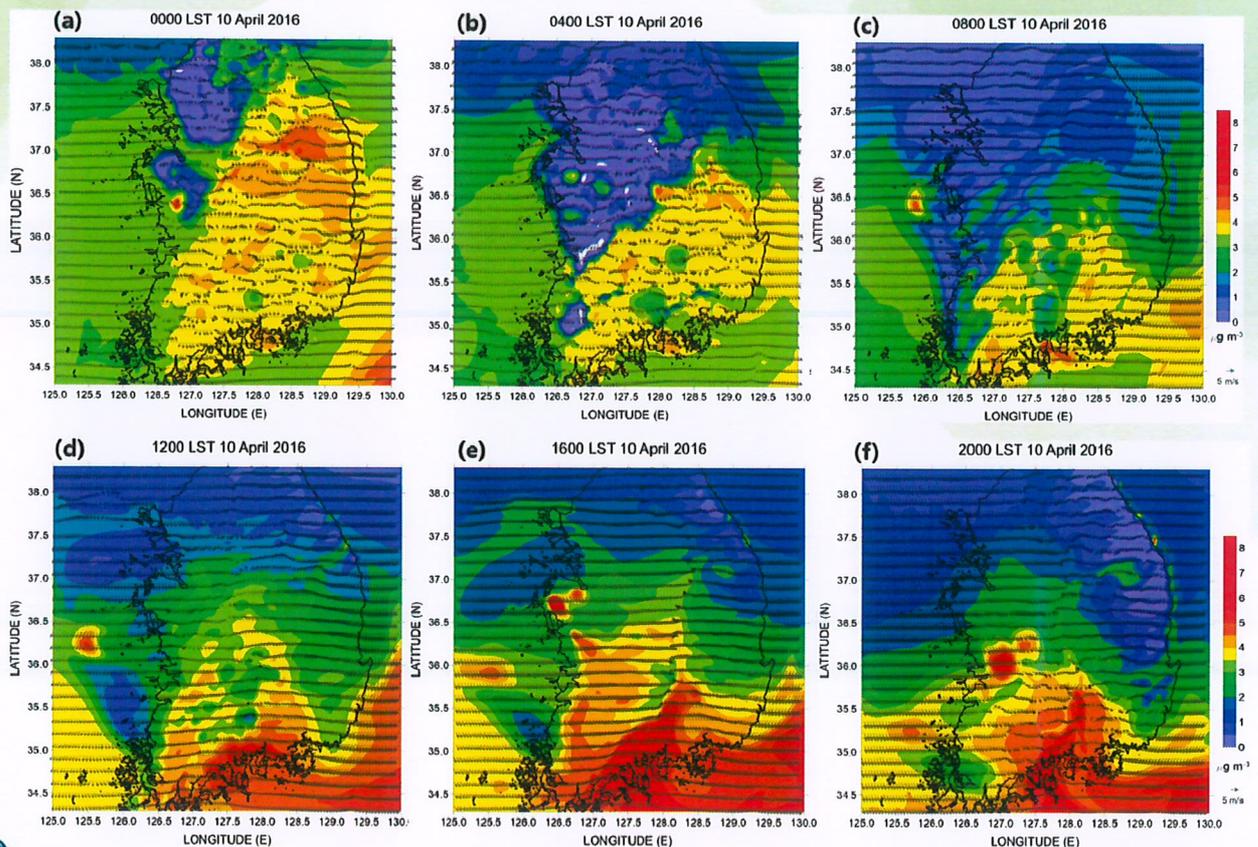


IOA (Index of Agreement)

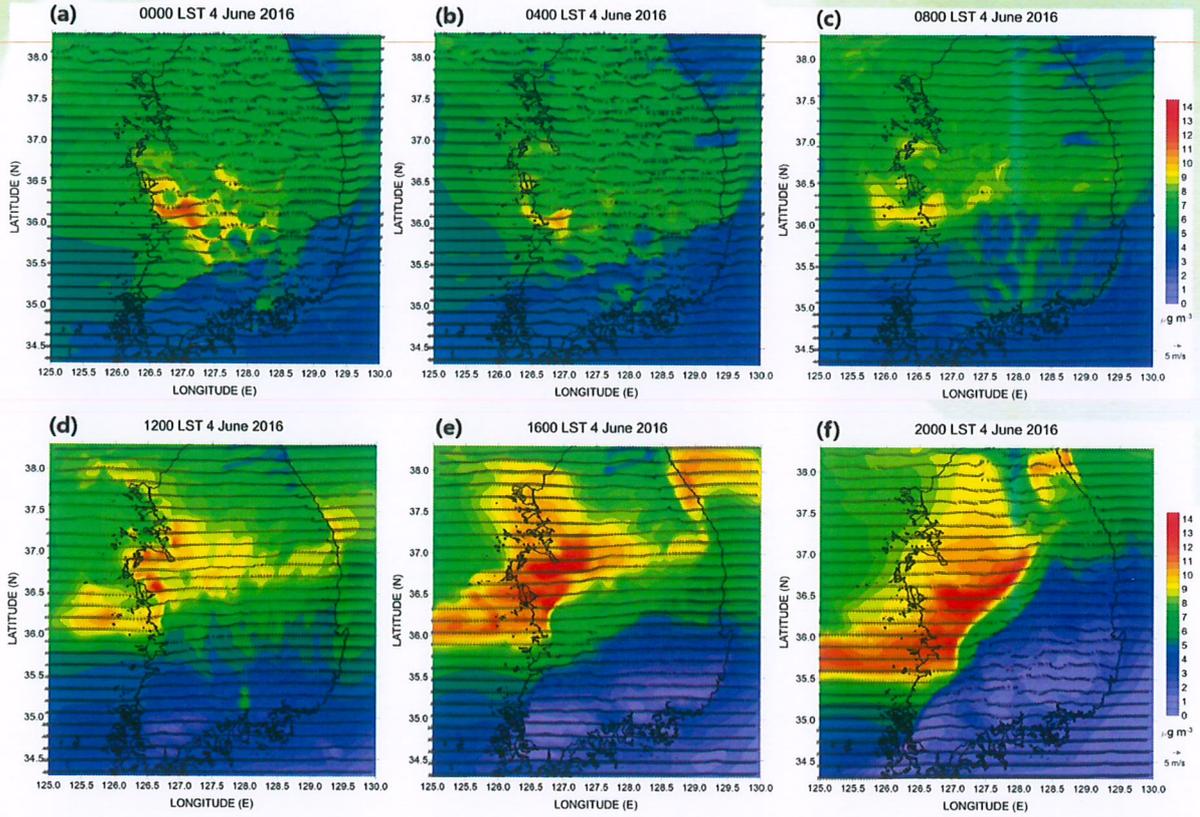
Period	7-12 April 2016				1-6 June 2016			
	PM ₁₀	WS	WD	Temp.	PM ₁₀	WS	WD	Temp.
P01	0.63	0.59	0.91	0.81	0.56	0.53	0.69	0.74
P02	0.58	0.73	0.72	0.92	0.50	0.78	0.68	0.88
P03	0.35	0.64	0.66	0.86	0.48	0.68	0.75	0.88
P04	0.60	0.63	0.68	0.82	0.48	0.70	0.46	0.90
P05	0.37	0.54	0.80	0.88	0.56	0.50	0.60	0.47
P06	0.24	0.49	0.51	0.89	0.25	0.42	0.56	0.92
P07	0.32	0.43	0.60	0.85	0.32	0.59	0.55	0.93
P08	0.36	0.39	0.66	0.91	0.28	0.41	0.62	0.91
P09	0.41	0.58	0.67	0.88	0.46	0.64	0.65	0.91
P10	0.37	0.38	0.63	0.81	0.42	0.40	0.58	0.84
P11	0.41	0.58	0.66	0.93	0.33	0.66	0.80	0.95
P12	0.27	0.72	0.60	0.94	0.27	0.73	0.63	0.89
P13	0.32	0.76	0.53	0.95	0.28	0.77	0.56	0.89
P14	0.47	0.59	0.86	0.81	0.45	0.71	0.55	0.84
P15	0.45	0.64	0.73	0.93	0.45	0.73	0.48	0.85
P16	0.51	0.32	0.65	0.94	0.45	0.28	0.66	0.90
P17	0.58	0.61	0.55	0.92	0.43	0.41	0.46	0.87
P18	0.54	0.63	0.87	0.83	0.42	0.71	0.74	0.86



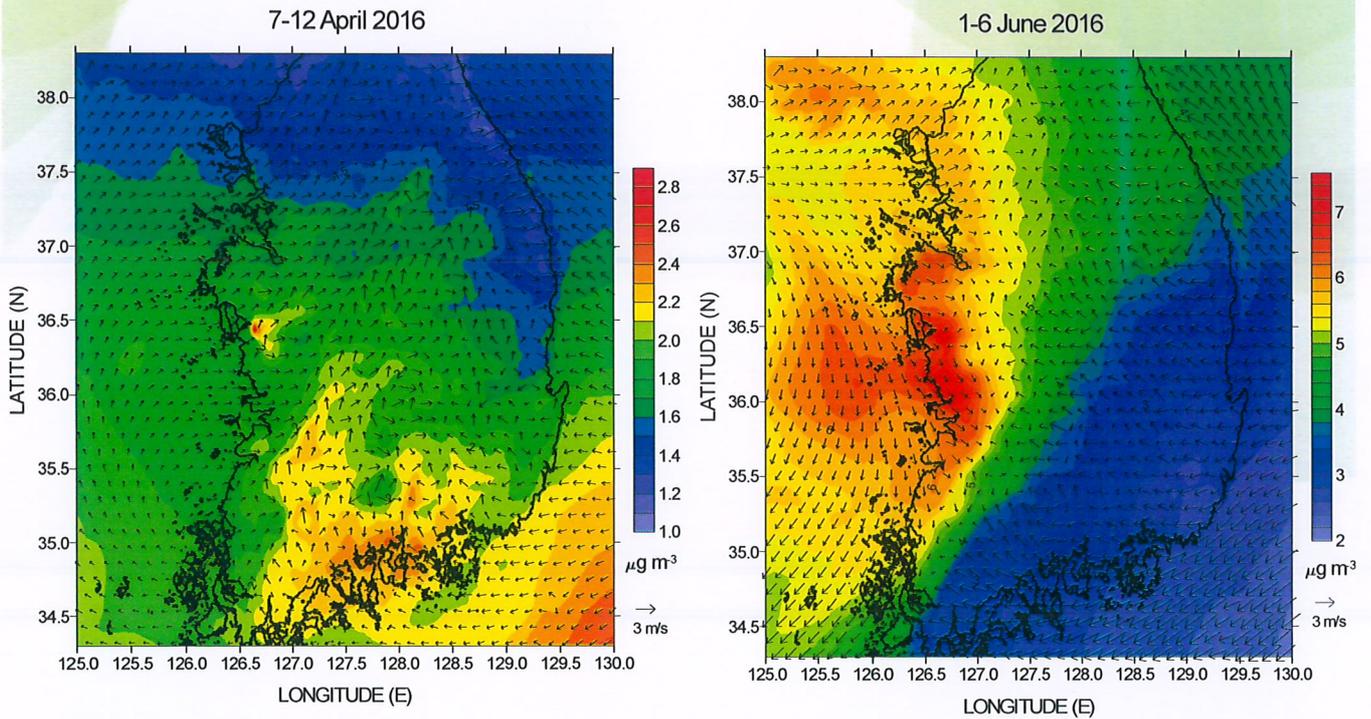
PM₁₀ 농도의 공간 분포 (2016년 4월 10일)



PM₁₀ 농도의 공간 분포 (2016년 6월 4일)



17



18

모의 농도 (최대, 평균)

Power Plant #	April 2016						June 2016					
	max. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Direction/Distance (km) from PP		avg. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Direction/Distance (km) from PP		max. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Direction/Distance (km) from PP		avg. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Direction/Distance (km) from PP	
P01	4.3	SE	223.5	1.65	SSE	166.5	6.68	WNW	181.1	3.39	WNW	181.1
P02	4.15	ESE	210.0	1.63	SSE	175.3	7.93	NW	217.8	4.07	NW	223.5
P03	4.09	SSE	215.1	1.55	SSE	167.0	10.8	ESE	31.6	4.86	NW	130.9
P04	4.03	SE	220.6	1.6	SSE	192.5	5.93	NNW	157.2	2.69	N	79.0
P05	3.79	SSE	217.9	1.46	SSE	129.5	9.59	WNW	137.1	4.73	WNW	144.1
P06	5.94	WNW	12.6	1.38	SE	220.6	7.48	WSW	158.5	3.52	WSW	156.8
P07	5.89	WSW	5.7	1.42	SW	220.6	7.38	WSW	156.1	3.49	WNW	156.1
P08	12.1	NE	2.8	3.08	NE	2.8	15.32	NE	2.8	5.9	NE	2.8
P09	4.93	ESE	45.6	1.68	SSE	132.5	12.84	ESE	21.5	5.06	NW	181.0
P10	6.19	ESE	155.8	1.91	SSE	172.6	9.17	SSW	121.5	4.94	WNW	190.9
P11	8.3	NE	11.7	2.23	NE	2.8	17	NE	2.8	5.46	NE	2.8
P12	4.2	ENE	8.6	1.77	ESE	43.6	9.03	SSW	67.7	4.88	NW	190.3
P13	7.43	ESE	108.3	1.89	SW	203.7	8.73	SW	203.7	4.72	WNW	197.2
P14	5.41	WSW	50.1	2.07	ENE	5.7	8.82	WNW	101.0	4.26	NW	192.0
P15	4.14	SE	220.6	1.64	SE	212.4	8.33	NNW	204.1	4.26	WNW	162.6
P16	4.15	SSE	217.9	1.66	SSE	217.9	8.01	NW	212.1	4.16	WNW	177.0
P17	6.03	NE	8.5	2.05	NE	2.8	15.18	NE	2.8	4.24	WNW	180.4
P18	6.09	NE	2.8	2.03	SE	212.1	12.98	WNW	106.6	4.30	WNW	154.0



배출량 시나리오별 PM₁₀ 농도 저감 효과

시나리오		기간	서울	대전	보령	서천
			Max (Δ fraction) Avg (Δ fraction)			
BAU		4월	Max 4.05 (0.0%) Avg 1.52 (0.0%)	Max 4.41 (0.0%) Avg 1.86 (0.0%)	Max 16.99 (0.0%) Avg 2.88 (0.0%)	Max 3.57 (0.0%) Avg 1.87 (0.0%)
		6월	Max 12.33 (0.0%) Avg 5.44 (0.0%)	Max 12.99 (0.0%) Avg 4.97 (0.0%)	Max 25.64 (0.0%) Avg 7.55 (0.0%)	Max 16.17 (0.0%) Avg 6.99 (0.0%)
S I	보령 0%	4월	4.05 (-0.0%) 1.51 (-0.7%)	4.41 (-0.0%) 1.82 (-2.2%)	-	-
		6월	11.79 (-4.4%) 5.39 (-0.9%)	12.24 (-5.8%) 4.78 (-3.8%)	-	-
S II	인천 0% 안산 0% 당진 0% 태안 0%	4월	3.79 (-6.4%) 1.46 (-4.0%)	4.40 (-0.2%) 1.74 (-6.5%)	-	-
		6월	10.00 (-18.9%) 5.26 (-3.3%)	9.89 (-23.9%) 4.59 (-7.6%)	-	-
S III	고성 81% 보령 75% 강릉 0% 서천 0%	4월	4.00 (-1.2%) 1.51 (-0.7%)	4.07 (-7.7%) 1.82 (-2.2%)	11.59 (-31.8%) 2.48 (-13.9%)	3.56 (-0.3%) 1.82 (-2.7%)
		6월	11.97 (-2.9%) 5.39 (-0.9%)	12.57 (-3.2%) 4.85 (-2.4%)	20.21 (-21.2%) 7.15 (-5.3%)	15.39 (-4.8%) 6.81 (-2.6%)
S IV	모든 관측소 PM 100% SO ₂ /Nox 0%	4월	3.79 (-6.4%) 1.49 (-2.0%)	4.35 (-1.4%) 1.81 (-2.7%)	14.94 (-12.1%) 2.69 (-6.6%)	3.65 (-0.3%) 1.81 (-3.2%)
		6월	11.06 (-10.3%) 5.27 (-3.1%)	11.70 (-9.9%) 4.63 (-6.8%)	20.58 (-19.7%) 6.81 (-9.8%)	14.33 (-11.4%) 6.32 (-9.6%)



결론

- ✓ 2016년 4월과 6월 사례에 대한 국내 화력발전소의 배출이 한반도 미세먼지 농도에 미치는 영향을 TAPM을 이용하여 모의하고 분석
- ✓ 모의된 기상변수(기온, 풍속)와 PM₁₀ 농도의 시·공간분포가 관측 자료와 유사함. 시계열의 IOA가 높음
- ✓ 화력발전소의 위치와 풍향, 풍속이 최대 농도 지점을 결정하는데 매우 중요함
- ✓ 발전소의 배출량 저감 시나리오에 따른 서울과 대전의 미세먼지 농도 효과를 살펴 봄. 서울의 고농도 미세먼지를 저감하려면 서해상에 위치한 화력발전소의 배출량 저감이 중요함
- ✓ 미세먼지농도의 전구물질(SO₂/Nox)의 배출량 저감은 직접적인 PM 배출량 못지않게 중요함
- ✓ 배출량 저감의 효과는 불안정한 대기상태(6월)가 정체된 상태(4월)보다 더 크게 나타남



경청해 주셔서 감사합니다!



.....
2

라그랑지안입자확산모델을 이용한
방사능 물질확산 모의 - 화력발전소가
미세먼지 농도변화에 미치는 영향의 평가
가능성

김상헌 (한국외국어대학교 대기환경연구센터)

라그랑지안입자확산모델을 이용한 방사능 물질 확산 모의

- 화력 발전소가 미세먼지 농도 변화에 미치는 영향의 평가 가능성

한국외국어대학교 대기환경연구센터
김상헌

2019년 1월 28일

연구 배경 및 필요성

- 2011년 3월 11일 일본 혼슈 동쪽 180km 떨어진 해상에서 진도 9의 대지진 발생에 따른 거대한 쓰나미에 의해 후쿠시마 원전 내의 전력 공급 차단되어 원전 사고가 발생, 전례없이 많은 양의 방사성 물질이 대기과 해양으로 누출
- 누출된 방사성 물질은 태평양을 건너 북미, 그리고 유럽까지도 확산



Hydrogen and steam explosion
(14 Mar 2011)

영구정지, 운전, 건설중 원전의 세계현황 (2018년 2월 현재)

(출처:IAEA RPIS)

국가	영구정지 원전		가동중 원전		건설중 원전		원전정책	
	기수	순 전기 시설 용량 [MW]	기수	순 전기 시설 용량 [MW]	기수	순 전기 시설 용량 [MW]		
1	남아공		2	1,860				
2	네덜란드	1	55	1	482			
3	대만		6	5,052	2	2,600	2025년까지 탈원전	
4	대한민국	1	576	24	22,501	4	5,360	2022년까지 탈원전
5	독일	29	16,860	7	9,515			2022년까지 탈원전
6	러시아	6	1,171	36	27,122	6	4,509	
7	루마니아			2	1,300			
8	리투아니아	2	2,370					
9	멕시코			2	1,552			
10	미국	34	14,427	99	99,869	2	2,234	
11	방글라데시					1	1,080	
12	벨기에	1	10	7	5,918	2	2,220	2025년까지 탈원전
13	벨라루스							
14	불가리아	4	1,632	2	1,926			
15	브라질			2	1,884			
16	스웨덴	5	2,321	8	8,629			
17	스위스	1	6	5	3,333			2034년 또는 2044년 (연장운전)까지 탈원전
18	스페인	3	1,067	7	7,121			
19	슬로바키아	3	909	4	1,814	2	880	
20	슬로베니아			1	688			
21	아랍에미리트					4	5,380	
22	아르메니아	1	376	1	375			
23	아르헨티나			3	1,632	1	25	
24	영국	30	4,715	15	8,918			
25	우크라이나	4	3,515	15	13,107	2	2,070	
26	이란			1	915			
27	이탈리아	4	1,423					1990년 탈원전
28	인도			22	6,240	6	3,907	
29	일본	18	9,046	42	39,752	2	2,653	
30	중국			39	34,444	18	19,016	
31	체코			6	3,930			
32	카자흐스탄	1	52					
33	캐나다	6	2,143	19	13,554			
34	파키스탄			5	1,320	2	2,028	
35	프랑스	12	3,789	58	63,130	1	1,630	
36	핀란드			4	2,764	1	1,600	
37	헝가리			4	1,889			
	합계	166	66,463	449	392,536	56	57,192	

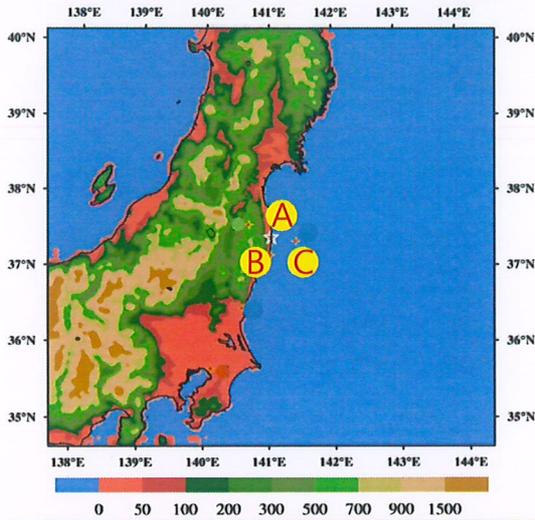
Nuclear Power Plants in China



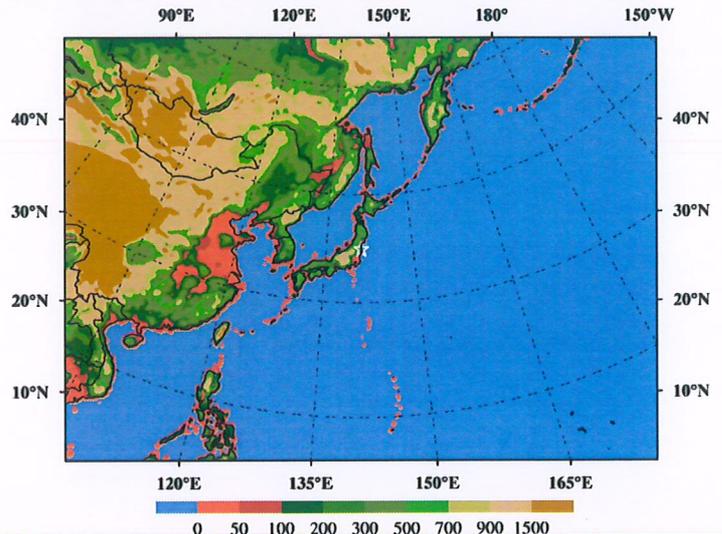
방사성 물질 확산 모델

• 방사성 물질 확산 모델

- 지형 자료 및 토지 이용도 자료
- 원자력 발전소 관련 DB: 위치 및 원자로의 종류
- 방사성 물질 DB: 핵종별 반감기, 가중계수
- 기상 모델: MM5 (WRF) 또는 UM
- 확산 모델: 라그랑지안 (원전 주변) + 오일러리안 (장거리 수송)

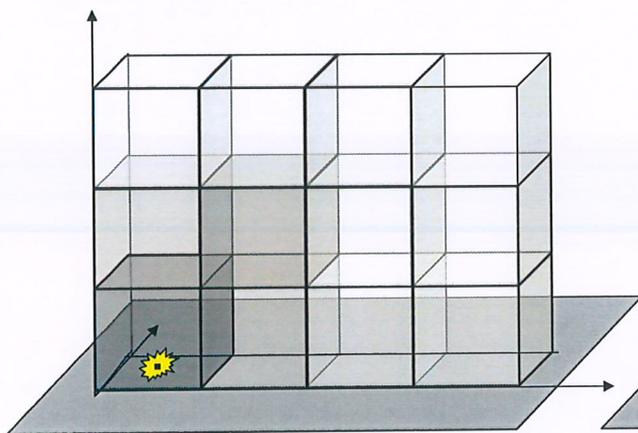


LPDM model domain (600km×600km)

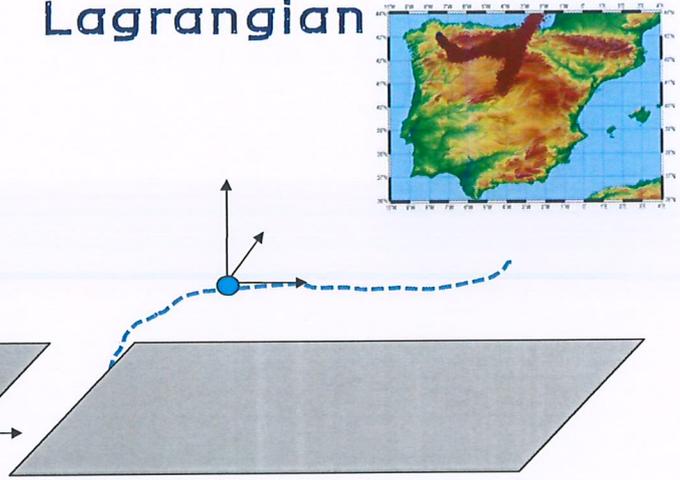


Eulerian Model domain (90E-165W, 10-60N)

Eulerian



Lagrangian



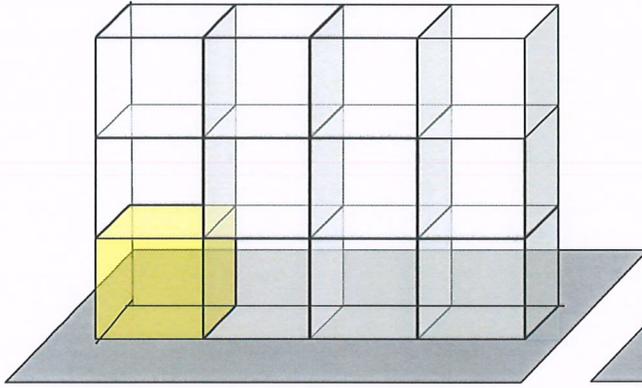
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_i}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_i}{\partial z} \leftarrow \text{Divergence of the advected flux}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + R_i(c_1, c_2, \dots, c_n) + E_i(x, y, z, t) - S_i(x, y, z, t)$$

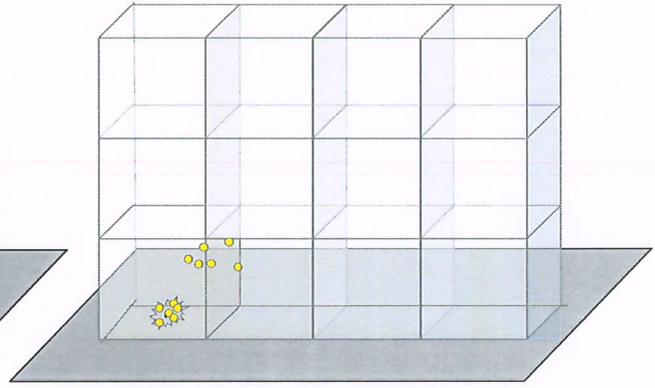
↑ Divergence of the turbulent fluxes
 ↑ Chemical reactions
 ↑ Emissions
 ↑ Sinks

Eulerian

Lagrangian



모델격자 내에서의 급격한 희석
점 오염원에 관한 부 프로그램이 필요함

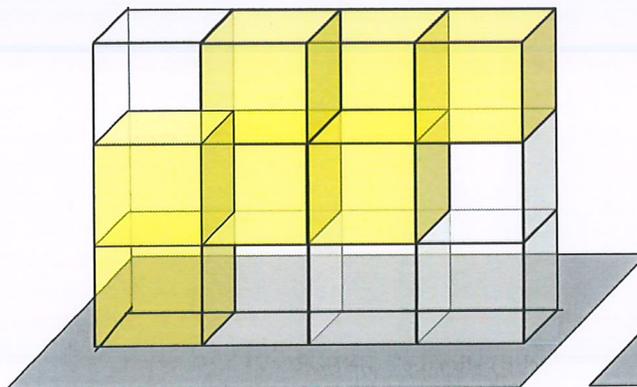


점 오염원을 쉽게 고려할 수 있음
격자는 단지 오염 입자 주변장만을 고려함

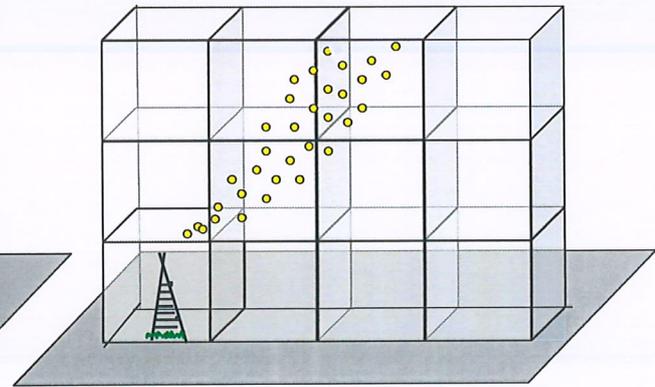
(From FLEXPART training course 2013)

Eulerian

Lagrangian



좁은 형태의 오염확산 표현에 문제가 있음

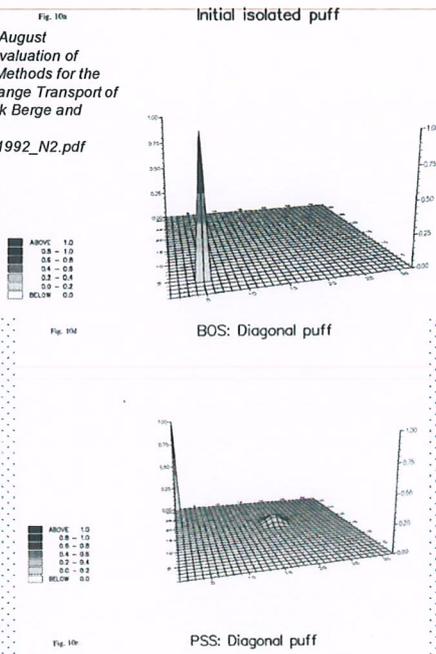


(From FLEXPART training course 2013)

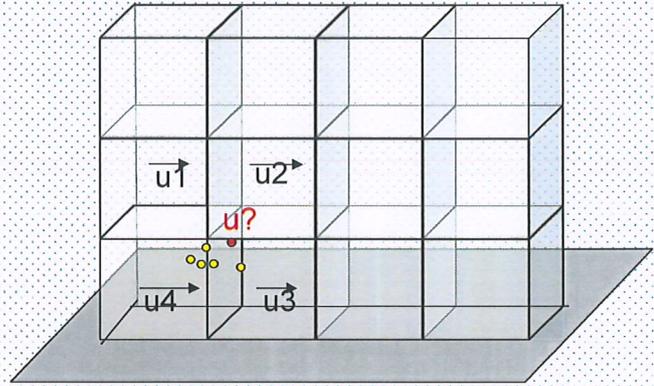
Eulerian

Lagrangian

Fig. 10a
 MSC-W Note 2/92, August
 1992.EMEP: "An Evaluation of
 Eulerian Advection Methods for the
 Modelling of Long Range Transport of
 Air Pollution". By Erik Berge and
 Leonor Tarrasón. EMEP_1992_N2.pdf



이류과정에서의 수치분산 오류 및 차이 발생



입자 위치 상의 모든 변수에 대한 내삽 오류 존재

(From FLEXPART training course 2013)

Why Lagrangian?

- 연기의 사이즈에 상관없이 효과적인 오염 확산 수치 모의가 가능함
- 난류 과정을 수치 계산에 반영하기가 Eulerian model 과 비교하여 매우 간편함
- 수치 모델 격자와 관련된 수치분산 오류가 없음
- 수치 모델에서의 격자 관련 자료가 순수하게 결과를 위한 배경자료로만 쓰임
 따라서 수치모의 평균장 형성 과정에서 발생하는 분산 오류가 없음
- 역 궤적 추적 모드로도 쉽게 변환할 수 있음
- 반감기, 건성 침착 및 습성 침착 과정을 비교적 쉽게 고려할 수 있음
- 한 입자 안에 한가지 이상의 화학 종을 고려하여 움직일 수 있음
- 중력에 의한 오염 물질의 지상 낙하과정을 아주 쉽게 고려할 수 있음
- 그러나 : 격자 자료에 의한 비선형 화학 반응을 고려하기 어렵고
 많은 컴퓨터 공간과 빠른 처리 속도가 필요함

(From FLEXPART training course 2013)

건성 및 습성 침착 모듈

- 라그랑지안 입자 확산 모델 (Park, 1998)
 - Source 중심 600 km x 600 km 영역, 25 layers

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + (\bar{u}_i(t) + u_i'(t))\Delta t$$

$$u_i'(t + \Delta t) = R_{L,i}(\Delta t)u_i'(t) + (1 - R_{L,i}(\Delta t))^{1/2}u_i''(t) + \delta_{i,3}(1 - R_{L,i}(\Delta t))W_d$$

$R_{L,i}(\Delta t)$: Lagrangian auto correlation coefficient

- 건성침착속도 (V_d)
$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} + V_T$$

- R_a : aerodynamic resistance
- R_b : quasi-laminar sublayer resistance
- R_c : surface or canopy resistance
- V_T : terminal velocity

- 중력에 의한 낙하속도: 입자상 물질의 경우 (Cs-137) 평균 직경이 0.4 mm이고 표준편차가 0.3인 대수분포인 입자를 4 개의 크기(0.22, 0.3, 0.4, 0.54, 0.73 mm)로 구분

$$V_T = \frac{\rho_p g D_p^2}{18\mu} \quad (\rho_p = 1900 \text{ kg m}^{-3})$$

- The total mass deposition for Δt time

$$Q_d = \exp(-0.693 \frac{t}{\tau}) \frac{Q_k \Delta t \exp[-\frac{(z_k - h)^2}{2\sigma_{kz}^2}]}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{kx} \sigma_{ky} \sigma_{kz}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V_d \exp[-\frac{(x_k - x)^2}{2\sigma_{kx}^2}] \exp[-\frac{(y_k - y)^2}{2\sigma_{ky}^2}] dx dy$$

- Particle' s complete deposition

$$z_k < 0 \text{ and } |z_k| \geq 3\sigma_{kz}$$

- The particle' s mass after Δt time interval

$$Q_k' = Q_k - Q_d$$

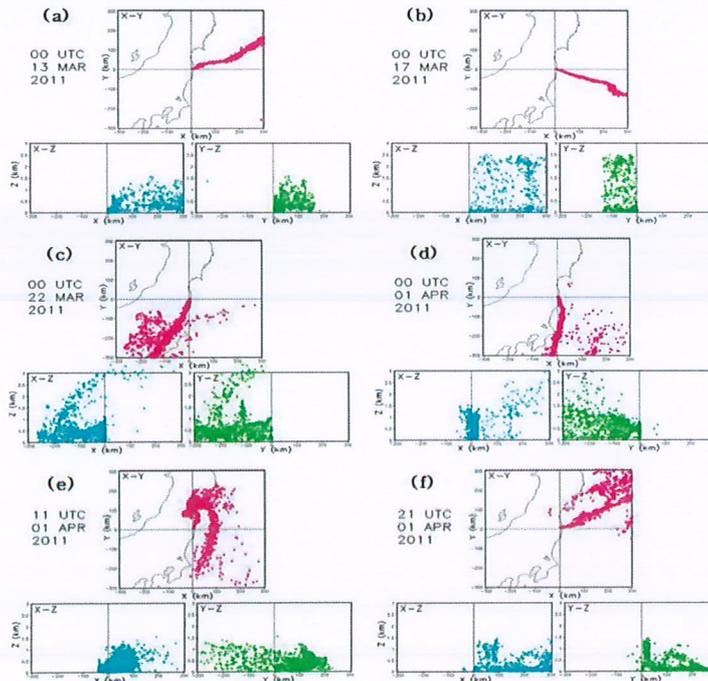
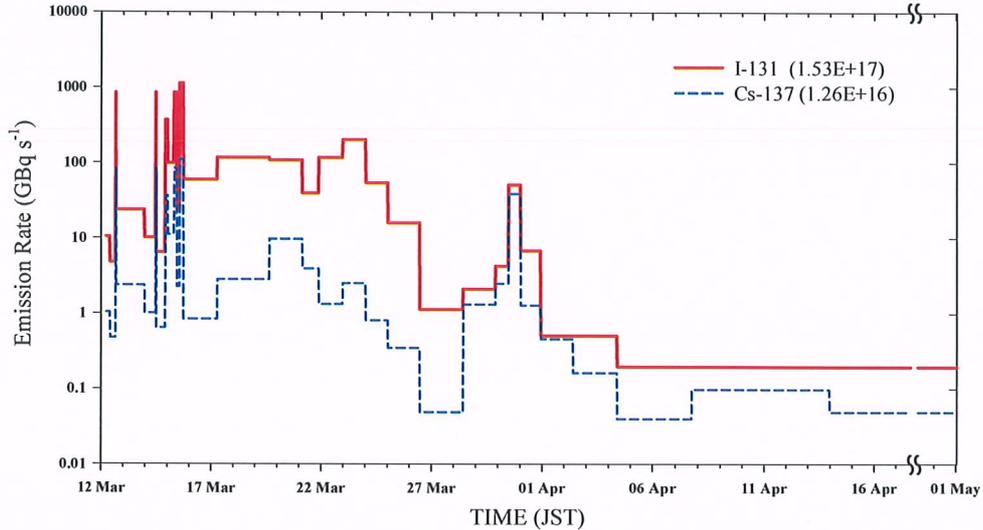
- 오염 농도

$$C_k(x, y, h) = \frac{Q_k'}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{kx} \sigma_{ky} \sigma_{kz}} \exp[-\frac{(x_k - x)^2}{2\sigma_{kx}^2} - \frac{(y_k - y)^2}{2\sigma_{ky}^2} - \frac{(z_k - h)^2}{2\sigma_{kz}^2}]$$

모델 수행

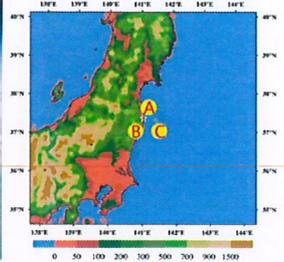
- 사례: 2011년 3월 후쿠시마 원전 사고
 - 방사성 물질 배출량 자료 (Chino et al. 2011; Katata et al. 2011; Tanaka et al. 2012)
 - ^{131}I : 가스상, ^{137}Cs : 입자상 가정
 - 배출률: 1 particle/min, 배출고도: first sigma level

Fukushima Nuclear Plant Accident

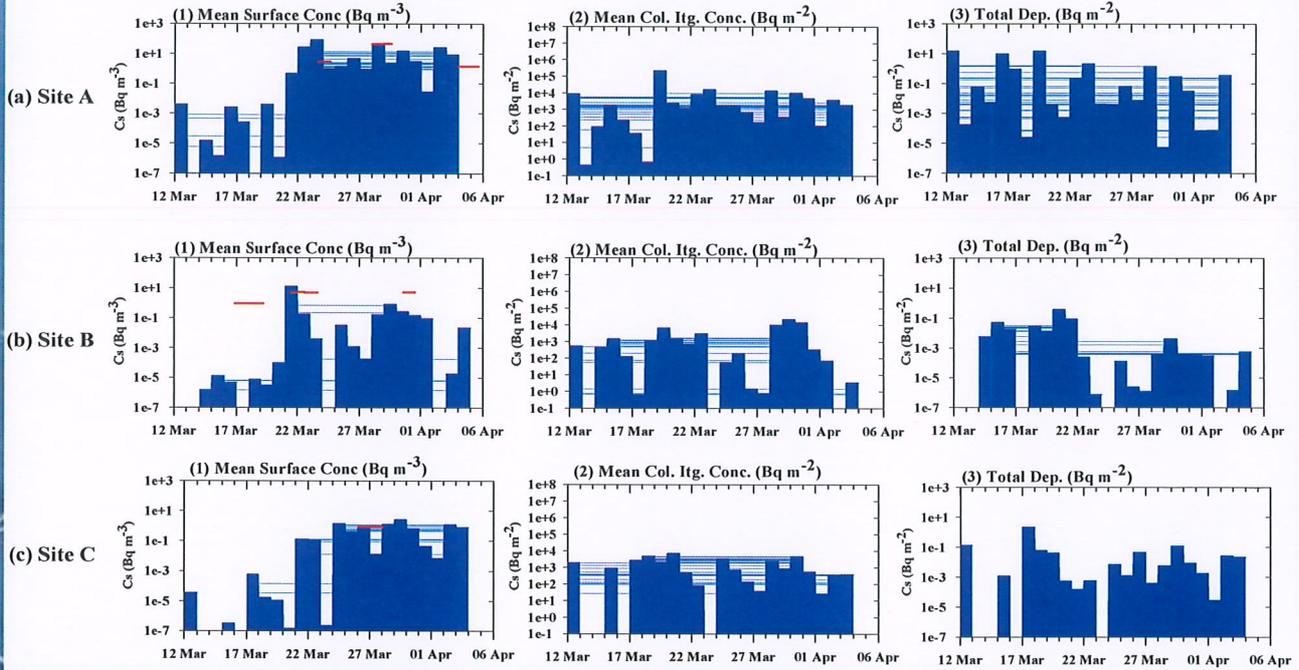


Distributions of Lagrangian particles projected on X-Y, X-Z and Y-Z planes at (a) one day (00 UTC 13 March), (b) 6 days (00 UTC 17 March), (c) 11 days (00 UTC 22 March), (d) 21 days (00 UTC, 1 April), (e) 31 days (00 UTC 11 April) and (f) 41 days (00 UTC 21 April) after the first particle released at the power plant.

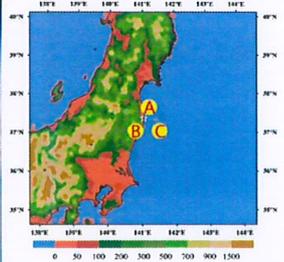
LPDM CS-137 daily



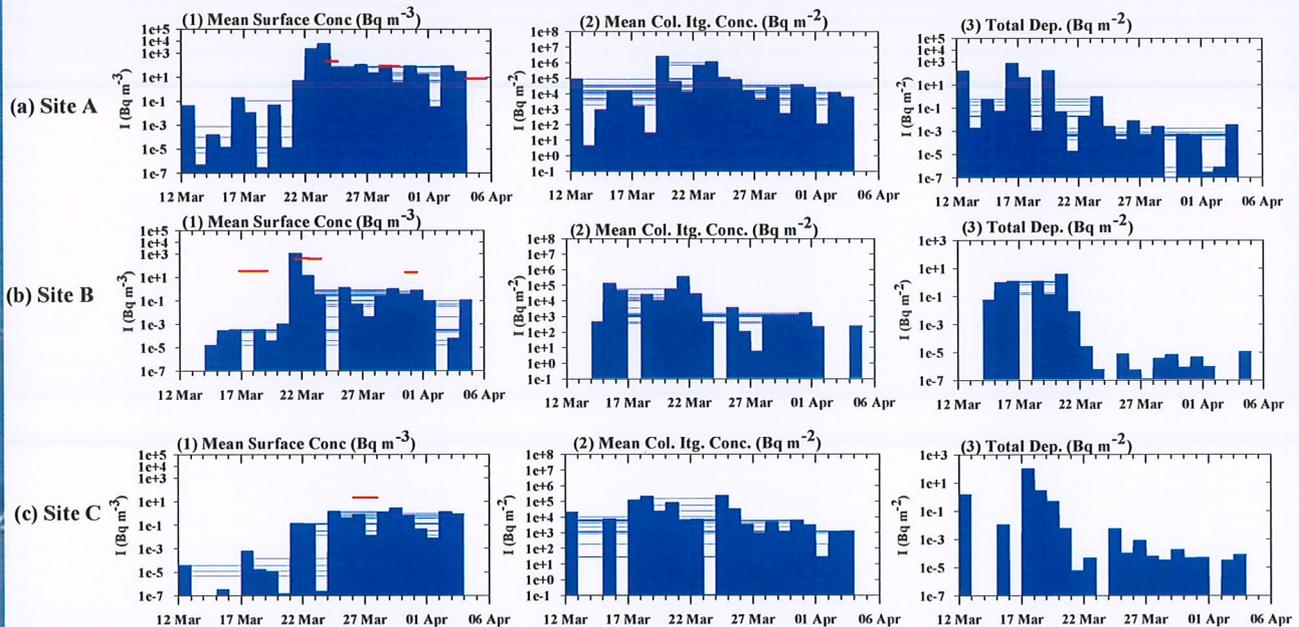
Daily Mean or Total Cs-137 (12 March - 5 April 2011)



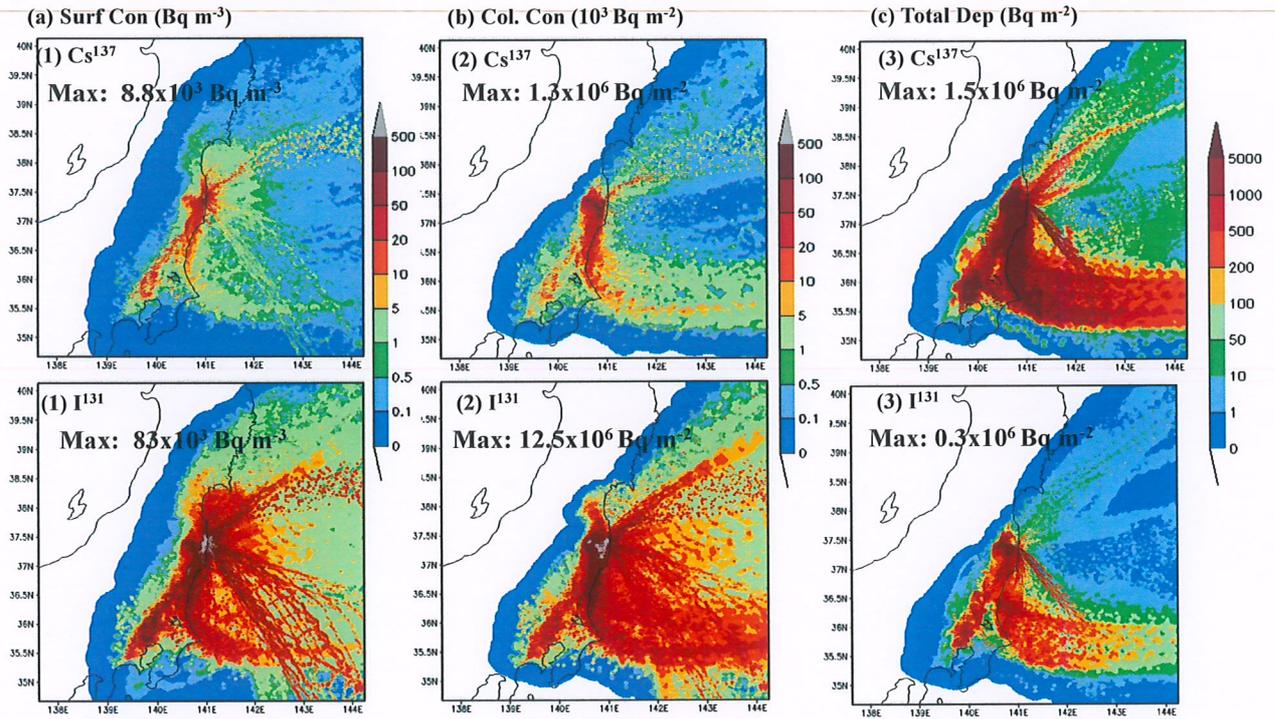
LPDM I-131 daily



Daily Mean or Total I-131 (12 March - 5 April 2011)

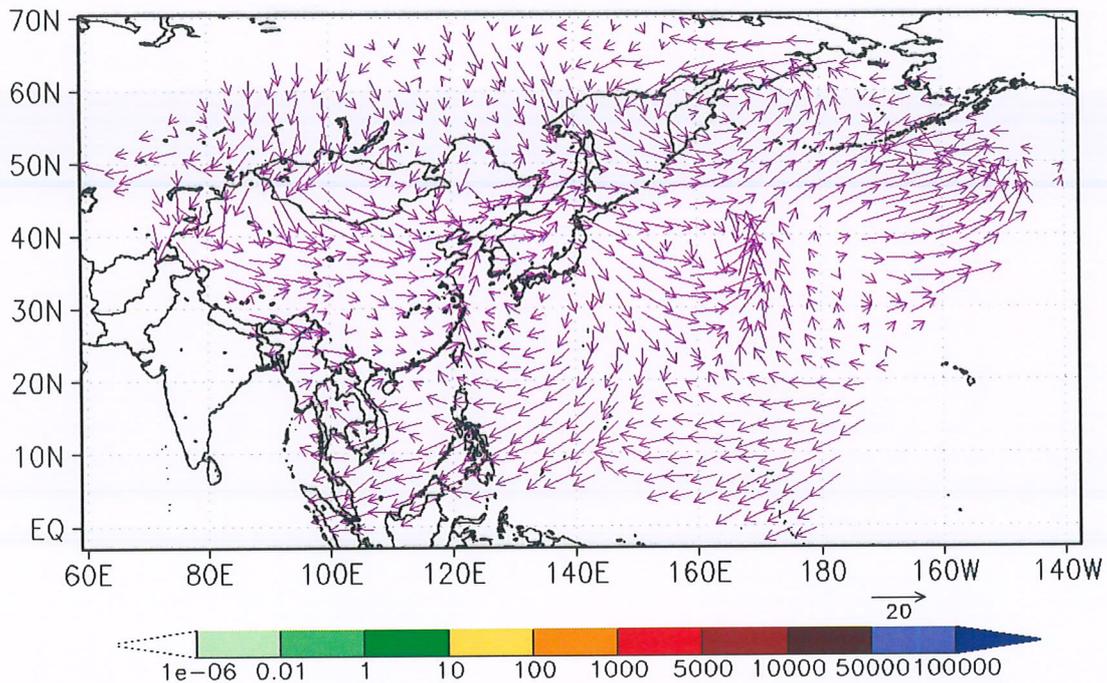


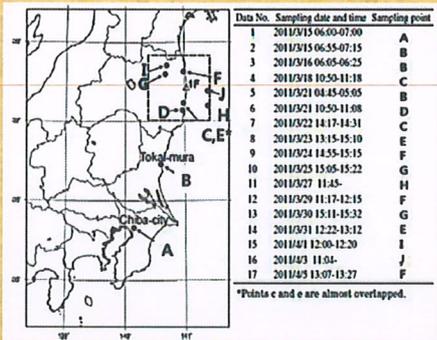
LPDM Cs-137 and I-131 12 to 31 March 2011



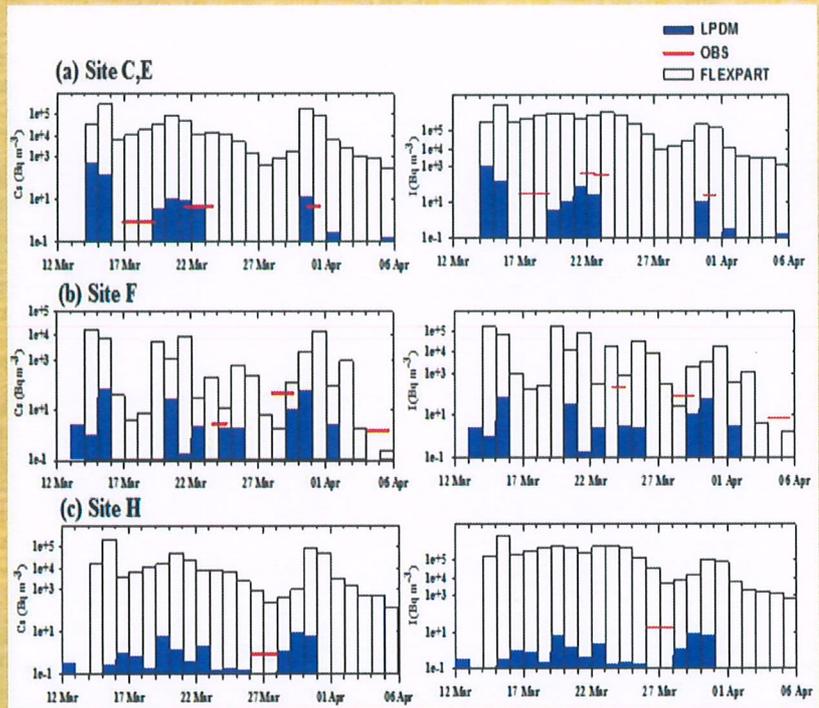
I-131 Col. Itg. Conc. (Bq m^{-2})

2011/03/12 01UTC

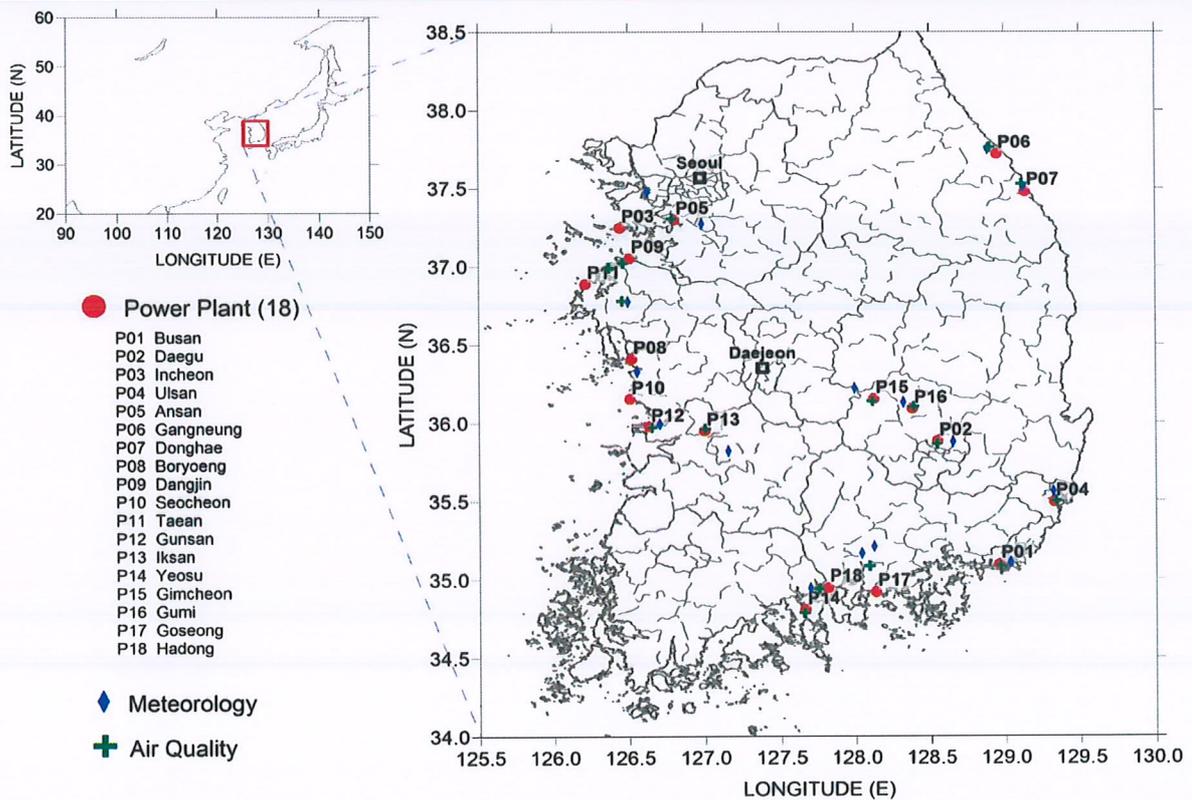




Time variations of model simulated daily mean Cs-137 and I-131 concentration (Bq m⁻³) by the FLEXPART (white column; ◯) and the CAEMLPDM (blue column; ■) with the observed concentration (red line) at (a) Site C, E, (b) Site F and (c) Site H.



Location of Power Plants, Meteorological and Air Quality Stations



Stack characteristics

Power Plants	Latitude	Longitude	height (m)	radius (m)	exiting temp. (°K)	exiting speed (m/s)	# of stacks (ea)*	Distance from the nearest meteorological station (km)	Distance from the nearest air quality station (km)	
P01	Busan	35° 05'	129° 0.5'	100.0	1.09	409.53	8.18	1	8.2	1.1
P02	Daegu	35° 53'	128° 32.50'	100.0	1.44	381.24	5.52	3	11.6	0.7
P03	Incheon	37° 14.5'	126° 26.57'	199.0	3.23	360.09	33.71	8	25.3	15.0
P04	Ulsan	35° 30.5'	129° 22.5'	153.5	1.30	371.52	17.81	8	4.9	1.6
P05	Ansan	37° 17.5'	126° 48'	123.0	1.27	363.74	4.19	18	20.3	1.7
P06	Gangneung	37° 44'	128° 58.5'	80.0	2.49	384.73	12.64	4	7.0	6.0
P07	Donghae	37° 29'	129° 8.5'	150.0	2.00	416.82	24.26	5	2.4	4.1
P08	Boryeong	36° 21'	126° 35'	41.8	2.91	362.1	20.21	10	6.7	25.6
P09	Dangjin	37° 2.5'	126° 31'	150.0	2.98	362.84	24.66	32	18.2	5.3
P10	Seocheon	36° 8.5'	126° 29.5'	150.0	2.05	362.25	24.23	10	12.9	19.9
P11	Taeon	36° 45.5'	126° 19'	150.2	2.98	358.97	21.77	14	31.8	18.3
P12	Gunsan	35° 58.5'	126° 38'	100.0	1.34	411.44	8.57	16	7.8	1.7
P13	Iksan	35° 57'	126° 59'	80.0	0.82	428.51	14.34	8	14.6	1.0
P14	Yeosu	34° 50'	127° 41'	76.9	1.79	398.89	15.3	25	10.0	1.4
P15	Gimcheon	36° 9'	128° 7'	100.0	1.70	403.72	10.78	4	15.2	1.4
P16	Gumi	36° 5.5'	128° 22'	153.0	1.07	366.85	15.59	18	7.3	1.1
P17	Goseong	34° 54.5'	128° 6'	200.0	2.58	378.74	19.52	16	19.7	12.2
P18	Hadong	34° 57'	127° 49'	150.0	3.26	357.88	15.14	16	13.1	6.4

Emission rate of Power Plants

Power Plants	Emission Rate (ton/year)				
	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x	
P01	Busan	12.06	9.73	455.09	488.25
P02	Daegu	26.55	21.41	1042.42	1181.48
P03	Incheon	207.76	167.58	3862.97	5517.57
P04	Ulsan	14.04	11.32	905.46	847.82
P05	Ansan	14.11	11.38	686.03	324.74
P06	Gangneung	29.16	19.40	2692.47	910.16
P07	Donghae	35.59	25.21	1086.87	2406.16
P08	Boryeong	560.94	452.46	17454.32	11656.09
P09	Dangjin	319.95	111.50	17148.32	7223.25
P10	Seocheon	60.57	41.58	3613.69	1317.73
P11	Taeon	835.13	673.63	22168.03	12792.28
P12	Gunsan	33.30	26.86	891.38	776.70
P13	Iksan	9.97	7.21	396.49	500.14
P14	Yeosu	229.13	178.85	6453.28	4074.51
P15	Gimcheon	2.48	2.0	83.68	69.84
P16	Gumi	29.0	23.39	2059.47	1860.64
P17	Goseong	564.47	455.32	23267.45	14531.64
P18	Hadong	470.91	379.84	13524.62	11478.44

결론

- 방사성 물질 확산 및 침착 모델
 - 원자력 발전소 주변: 라그랑지안입자확산모델
 - 장거리 수송 및 침착: ADAM2 모델을 개조한 오일러리안 모델
- 후쿠시마 원전 사고 사례에 적용하여
 - 방사성 물질의 농도, 침착량, 대기중 총 부유량을 추정
 - 농도장은 관측값과 유사하게 상당히 잘 모의
- 사고 이후 4일 내에 충분히 알래스카나 미서부 지역까지 방사성 물질이 장거리 수송될 수 있었으며, 중관규모의 대기대순환에 의해 북서쪽 러시아로 수송된 물질이 북서풍에 의해 한반도까지 영향을 미칠 수 있음을 보였고, 남서쪽으로 수송된 방사성 물질은 필리핀까지 영향을 미칠 수 있음을 발견
- 화력발전소가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 더 정확하게 평가하기 위해서는 오일러리안모델보다 라그랑지안입자확산모델을 활용하는 것을 추천

감사합니다

3

도시기상관측자료를 이용한 수도권의
국지순환 및 대기질 농도특성

박문수 (한국외국어대학교 대기환경연구센터)



도시기상관측자료를 이용한 수도권의 국지순환 및 대기질 농도 특성

박문수

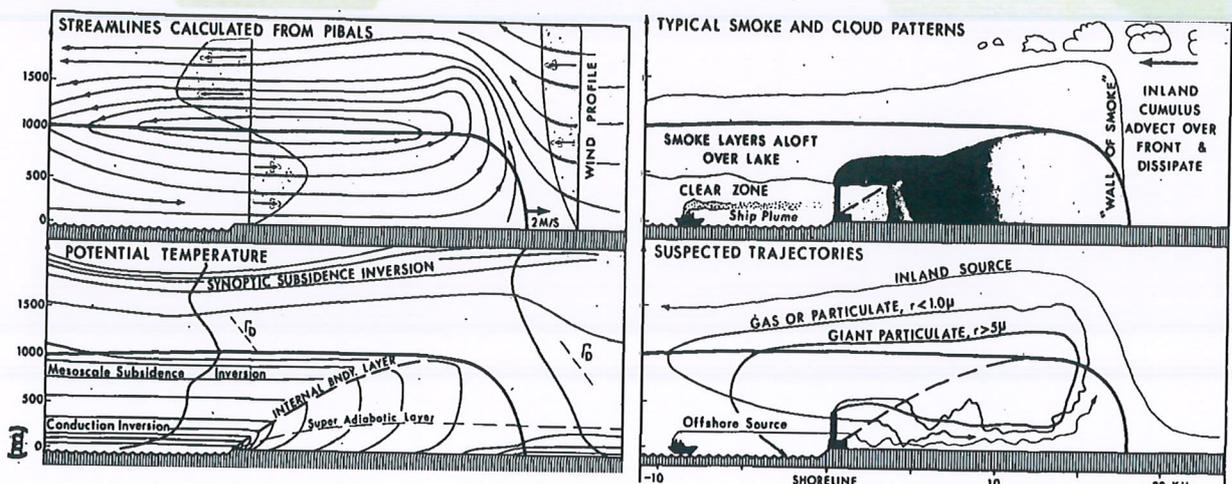
한국외국어대학교 대기환경연구센터

2019년 1월 28일, 충청남도 서해안기후환경연구소

서론

국지순환

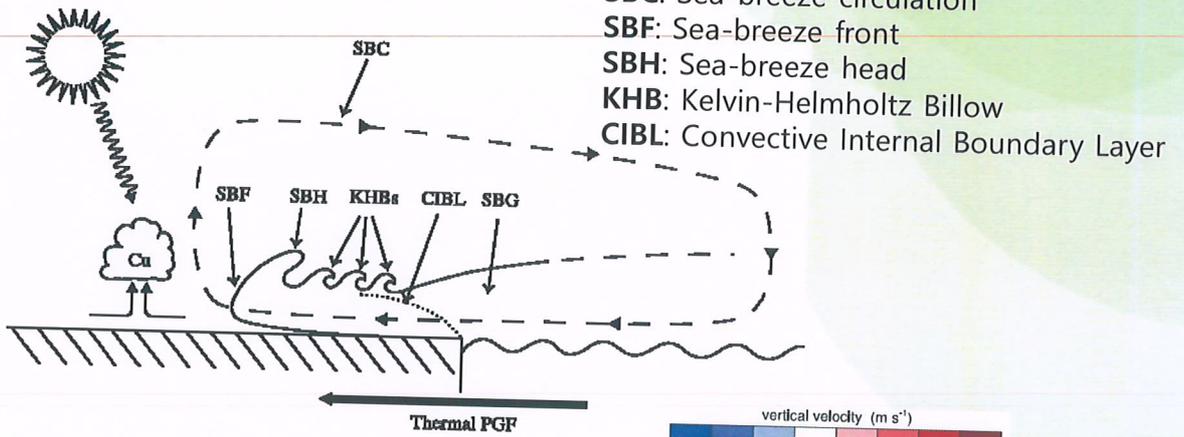
- 국지순환은 고해상도 기상정보와 대기질 정보 산출에 중요한 역할을 함
- 국지순환의 시간에 따른 성장, 수평 규모 등과 관련된 많은 관측 및 모델 연구들이 있어 왔음. 그 결과가 문헌에 따라 매우 다르게 나타남. 수도권에서의 모델 연구들은 많이 있으나, 관측기반 연구는 많지 않음



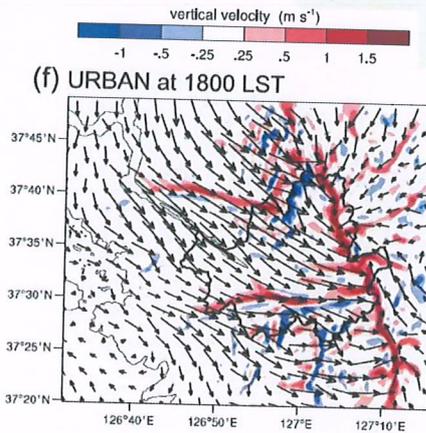
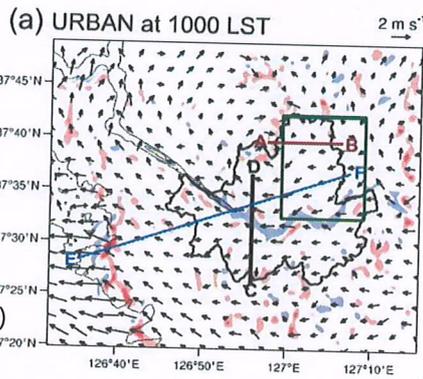
(Lyons and Olsson, 1972)



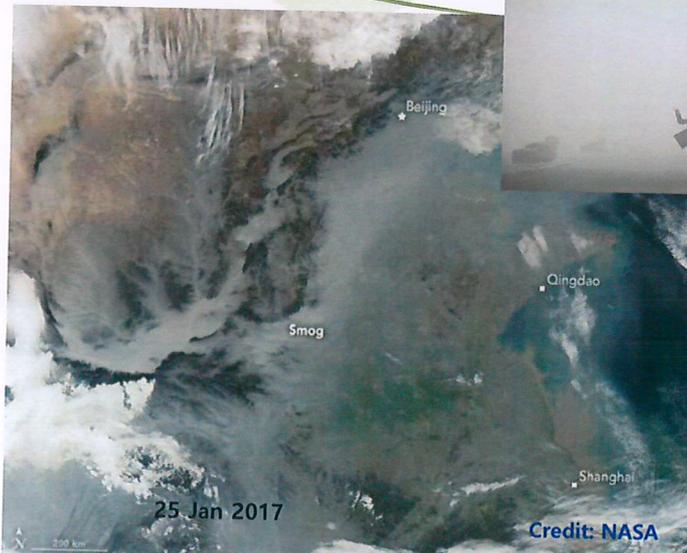
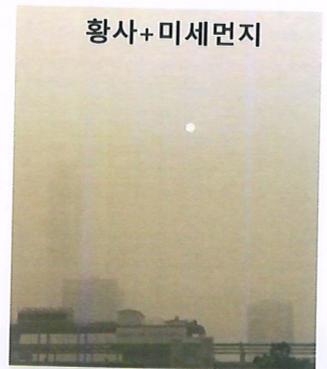
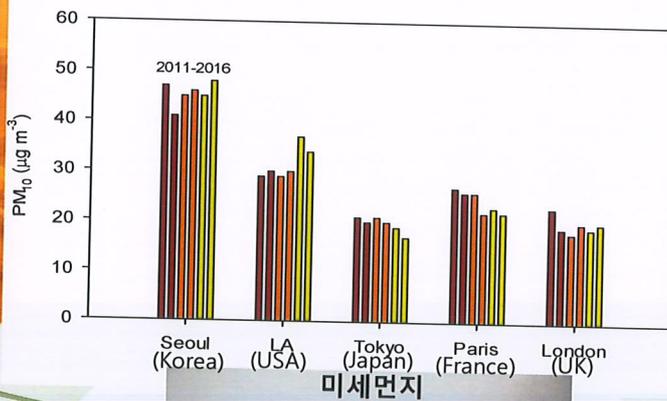
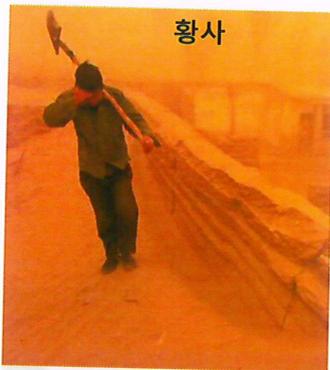
해풍의 구조



SBC: Sea-breeze circulation
 SBF: Sea-breeze front
 SBH: Sea-breeze head
 KHB: Kelvin-Helmholtz Billow
 CIBL: Convective Internal Boundary Layer



(Ryu and Baik, 2013)

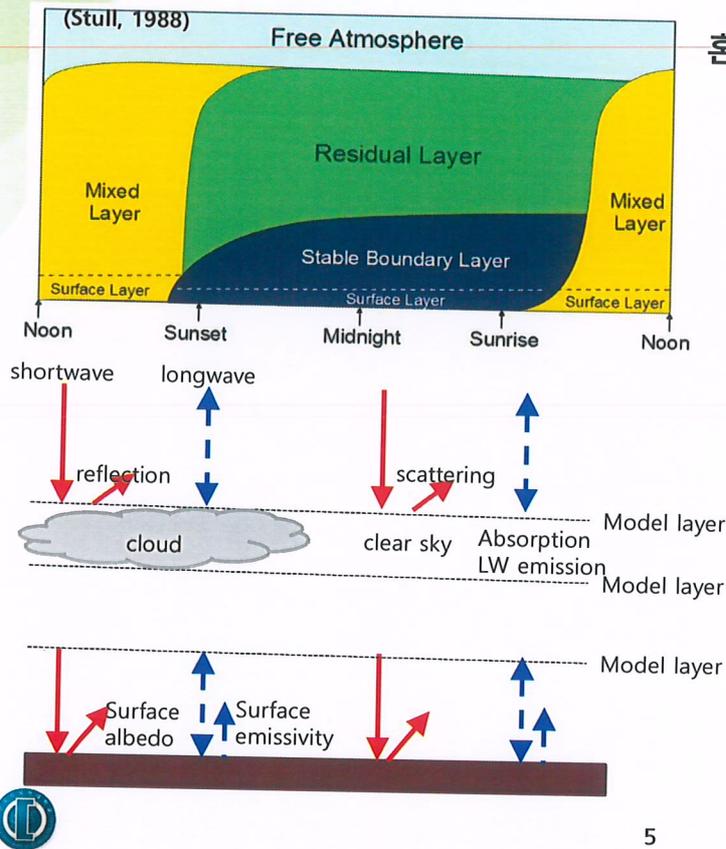


25 Jan 2017

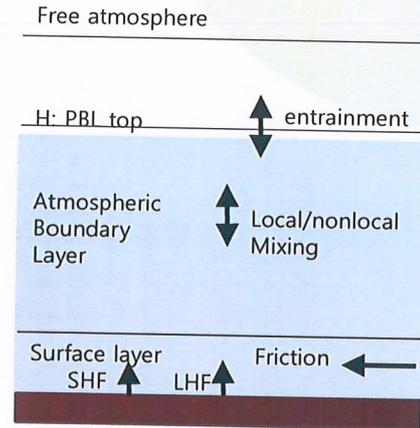
Credit: NASA

Credit: Jeff Schmaltz

구름(에어로졸)과 대기경계층 구조



혼합층(대기경계층): 오염물질의 난류 혼합에 의해 연직 확산이 일어나는 층 (Emeis et al., 2008)



5



January 2012, Ulaanbaatar, Mongolia

연구 목적

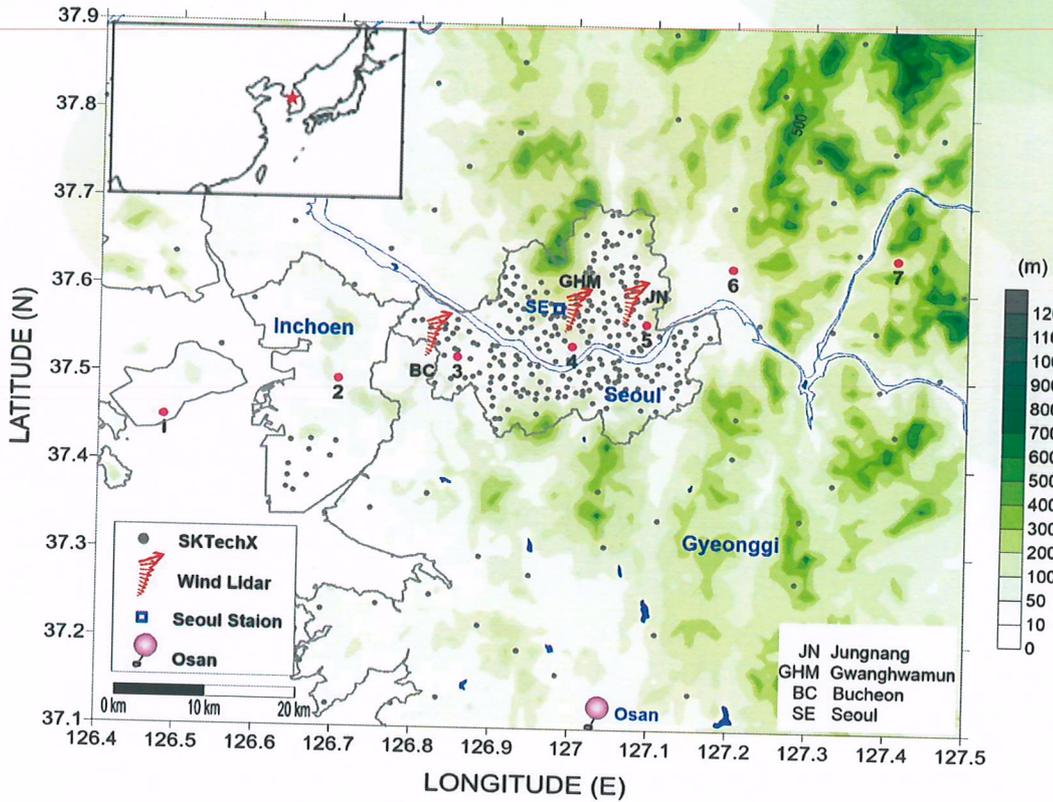
- 2016년 5월 17일부터 22일 동안 UMS-Seoul 관측 자료를 사용하여 6일 평균 지상 기상의 분포와 바람의 연직구조를 분석함으로써 수도권에서 국지순환의 시간 변화·수평 분포·연직 구조 특성을 살펴 보고자 함
- 해풍전선이 통과하는 순간 기상 변수들의 시·공간 분포 특성 분석
- 2017년 5월 18일부터 6월 13일 자료 이용 연무/박무, 구름이 대기경계층 고도에 미치는 영향 분석



6

관측소와 자료

관측소



7

장비 1- SKTechX 복합기상센서 관측망



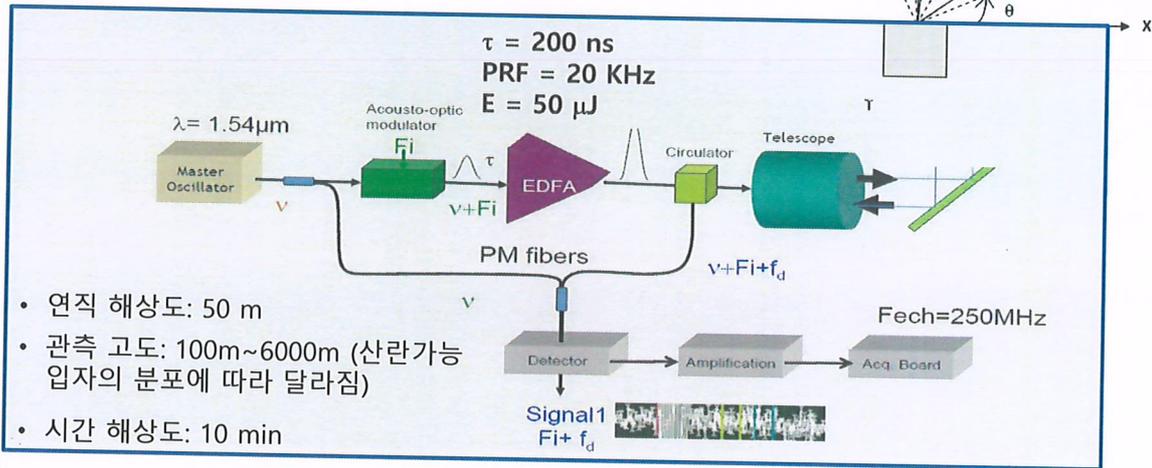
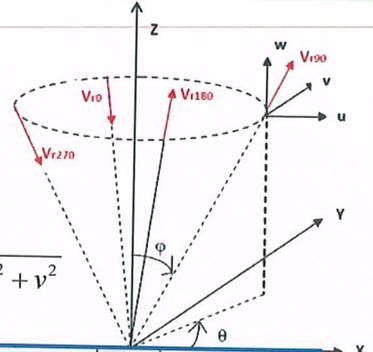
- ✓ 설치 지점: 대부분 건물 옥상 위의 통신시설물
- ✓ 자료: 기온, 습도, 풍향 · 풍속(초음파), 기압, 강수
- ✓ 관측소: 381
- ✓ 자료 수집 주기: 1 min



장비 2- 도플러 펄스 윈드라이다

- 공기 중 입자(먼지, 수적, 에어러솔 등)에 의해 후방산란되는 펄스파의 도플러 변이 이용하여 풍속, 풍향 측정
- 측정 방향: E → S → W → N → E

$$u = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2 \sin \theta} \quad v = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2 \sin \theta} \quad w = \frac{V_{rN} + V_{rS} + V_{rE} + V_{rW}}{4 \cos \theta} \quad V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$$



- 연직 해상도: 50 m
- 관측 고도: 100m~6000m (산란가능 입자의 분포에 따라 달라짐)
- 시간 해상도: 10 min



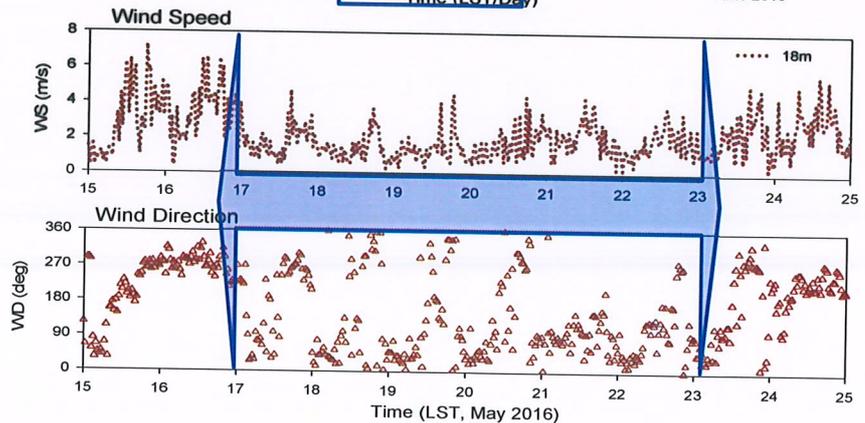
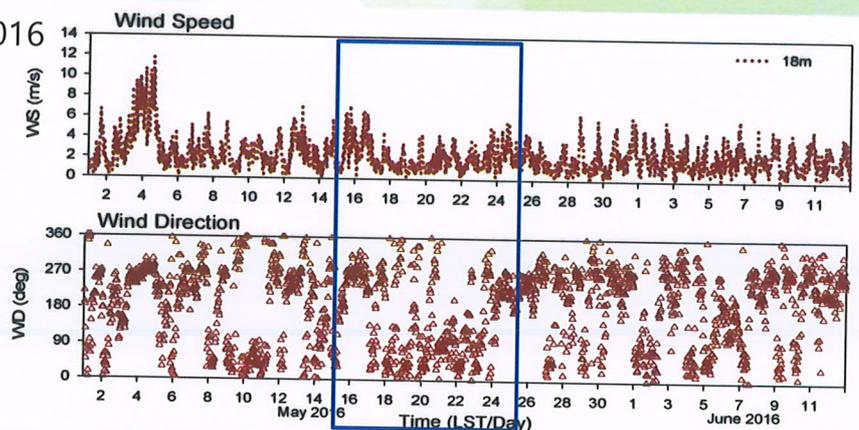
9

결과

분석 기간: 17-22 May 2016

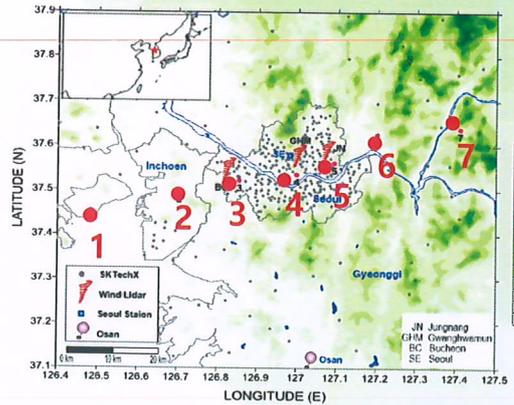
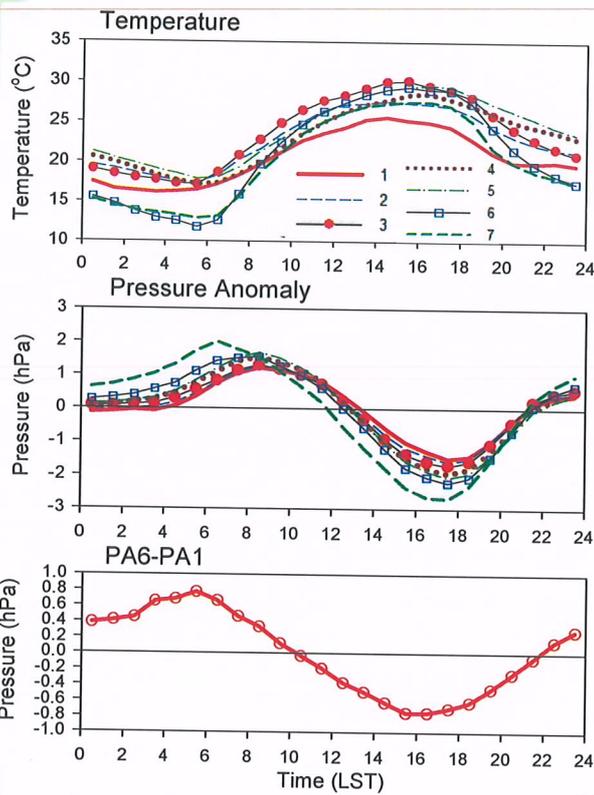
- ✓ 850 hPa 풍속 : 2 – 5 m/s (오산)
- ✓ 일평균 풍속: 1.6 – 2.0 m/s (월평균 2.4 m/s)
- ✓ 일평균 운량: 0 – 28 % (월평균 46%)

→ 국지순환이 발생하기 좋은 조건인 **종관 바람**이 약하며 맑은 연속 6 일을 선정

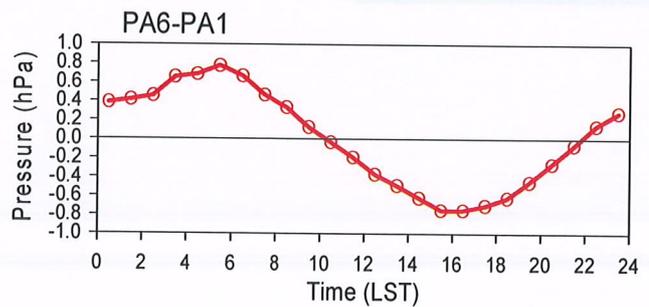
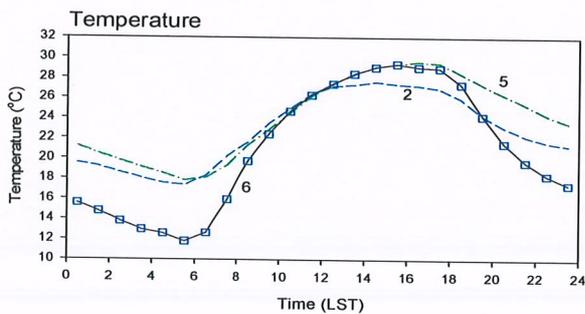
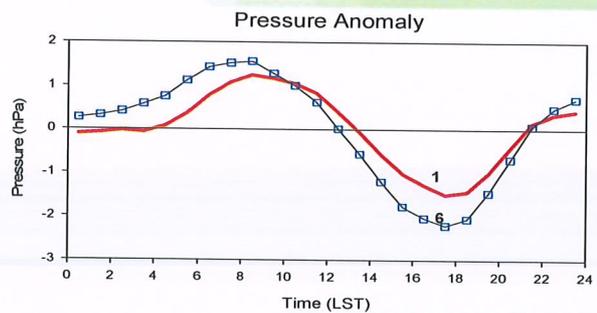
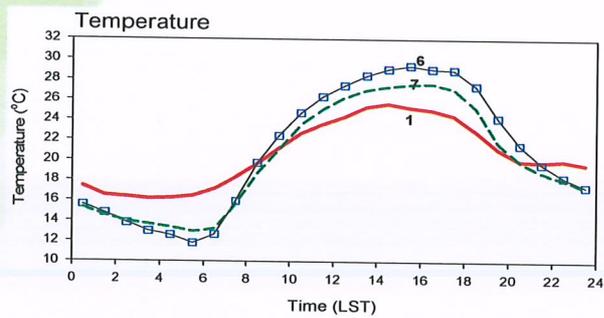


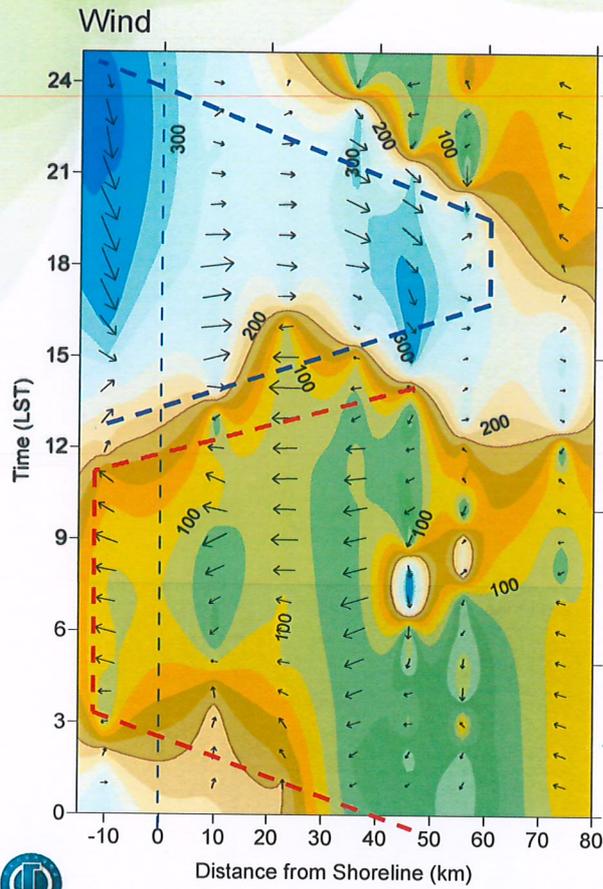
10

지상 기상 변수들



- ✓ 바다와 육지 사이에 기온의 차가 주간과 야간에 따라 다름.
- ✓ 바다와 육지 사이에 Pressure Anomaly (PA) 차가 주간과 야간에 따라 다름.
- ✓ 양의 PA차가 육풍을 유발하며, 음의 PA차가 해풍을 유발함





해풍

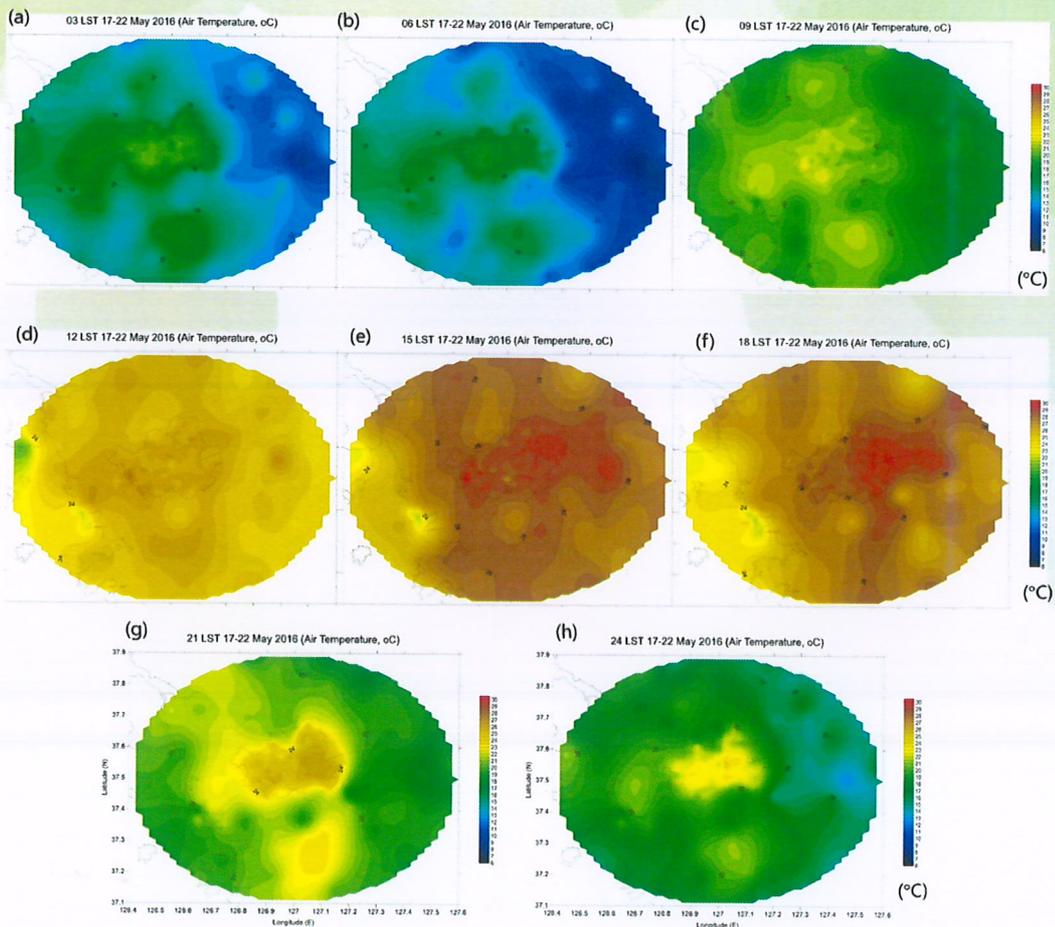
- ✓ 1200 LST에 해안선 부근에서 시작하며, 1700-1900 LST에 해안선에서 60km 떨어진 지점까지 영향을 미침
- ✓ 해풍이 육지로 진행하는 속도는 약 10 km h⁻¹.

육풍

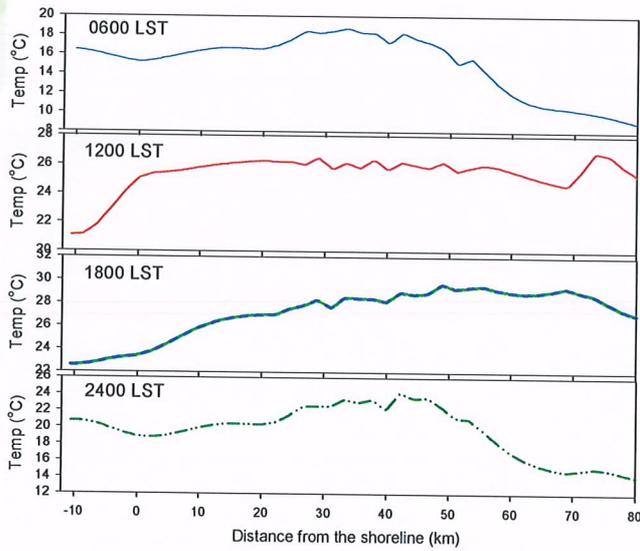
- ✓ 육풍은 해안선에서 50 km 이내의 영역에서 발생함.
- ✓ 육풍은 5번 관측소에서는 2300 LST에 시작하며 1300 LST까지 지속되며, 1번 관측소에서는 0400 LST에 시작하여 1100 LST까지 지속됨.



13



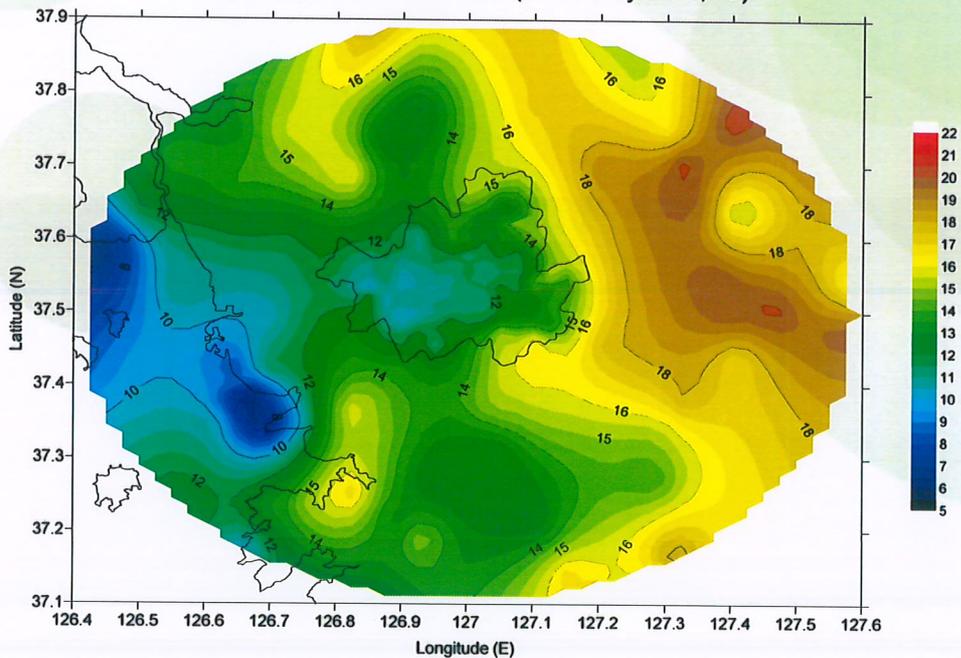
14



- ✓ 야간 (2400, 0600 LST)의 경우 서쪽 (바다쪽)의 기온이 동쪽(내륙쪽)의 기온보다 높음.
- ✓ 1200 LST의 경우 육지에 있는 대부분의 지점에서 기온이 거의 같음.
- ✓ 1800 LST의 경우 해안선에서부터 거리가 멀어질수록 기온이 증가함.
- ✓ 야간에 서울 지역은 주변보다 기온이 1~3 °C 가량 높음.

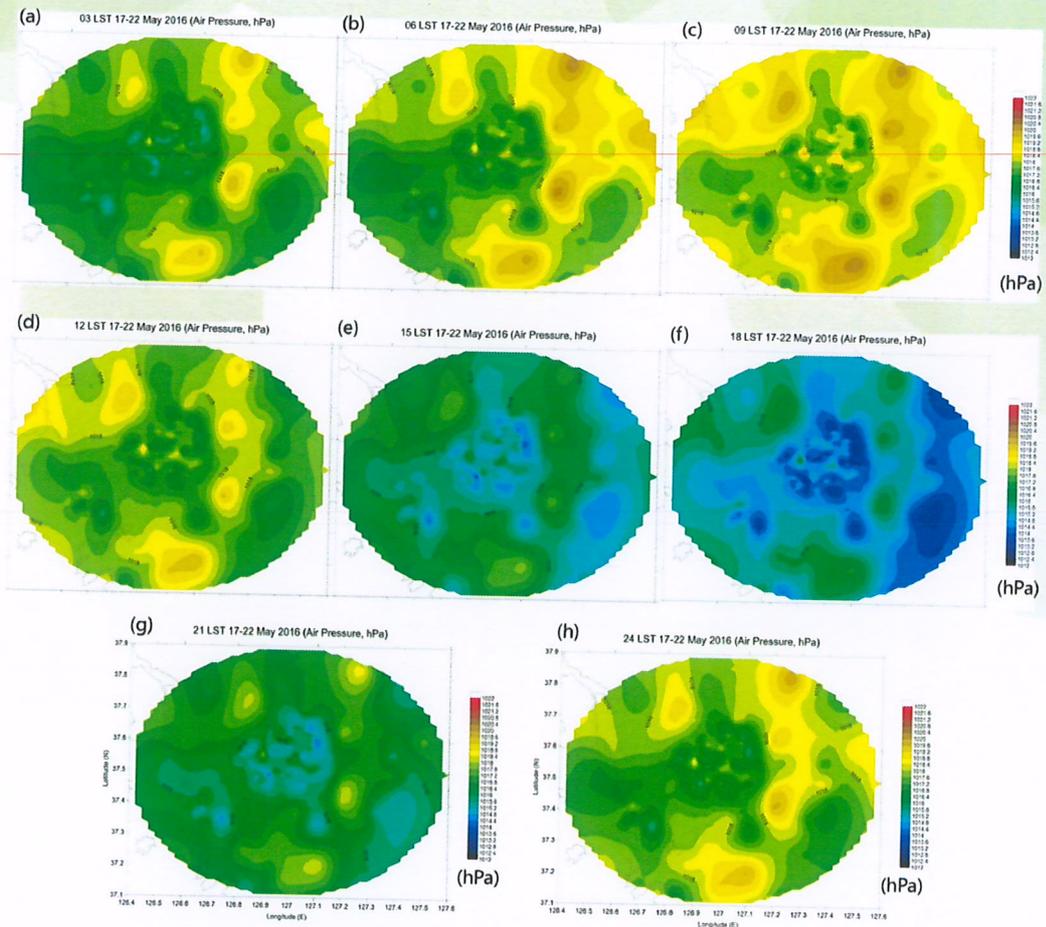


Daily Temperature Difference (17-22 May 2016, °C)

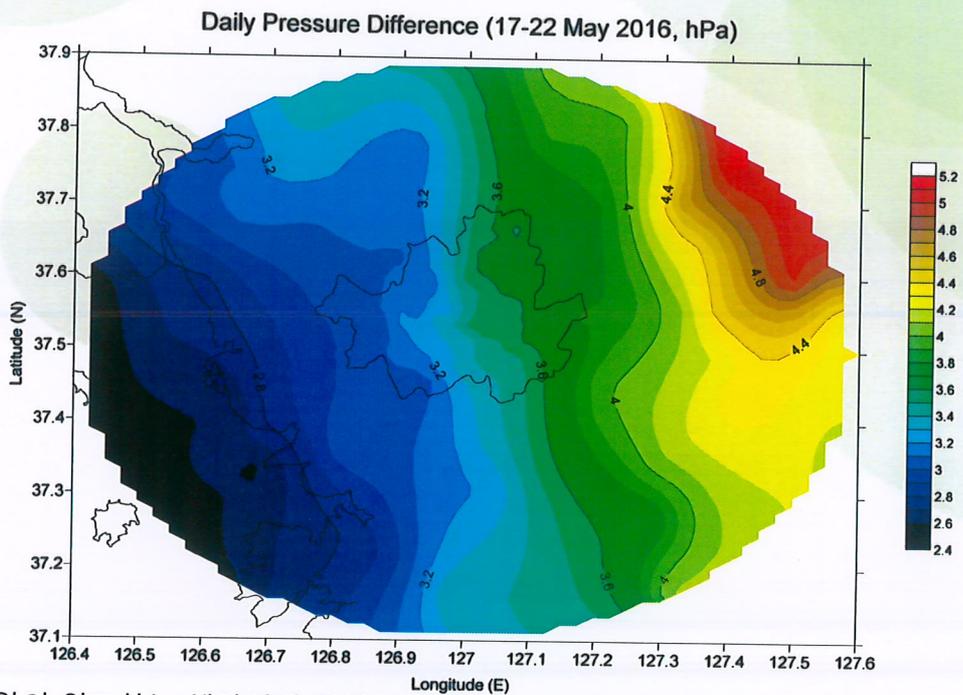


- ✓ 온도의 일교차는 바다에서는 10 °C 이하이며, 해안선으로부터 거리에 따라 커져 동쪽 끝에는 20 °C 이상의 일교차를 보임.
- ✓ 도시에서 야간의 높은 기온으로 인해 서울, 인천, 경기 남부의 도시 지역은 주변에 비해 온도의 일교차가 낮음.





17

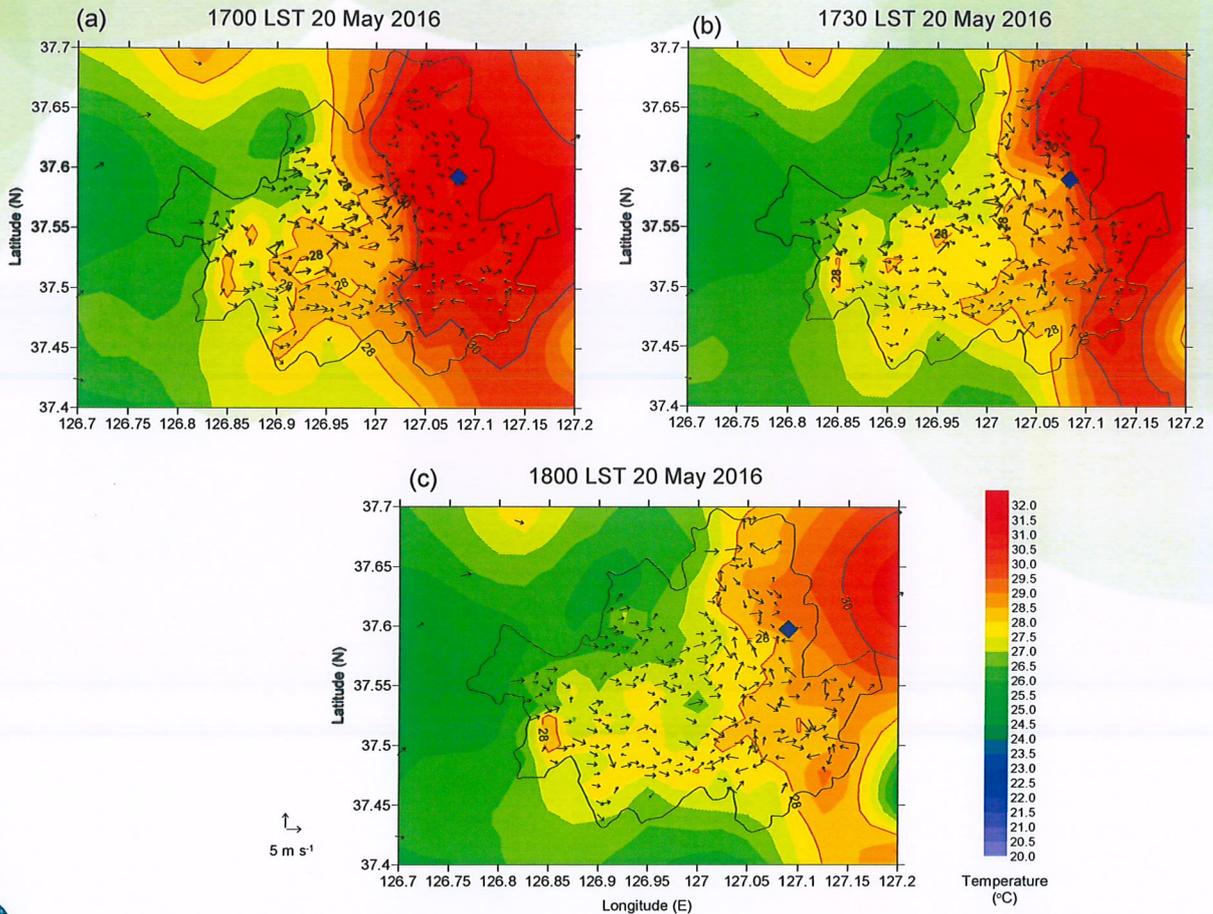
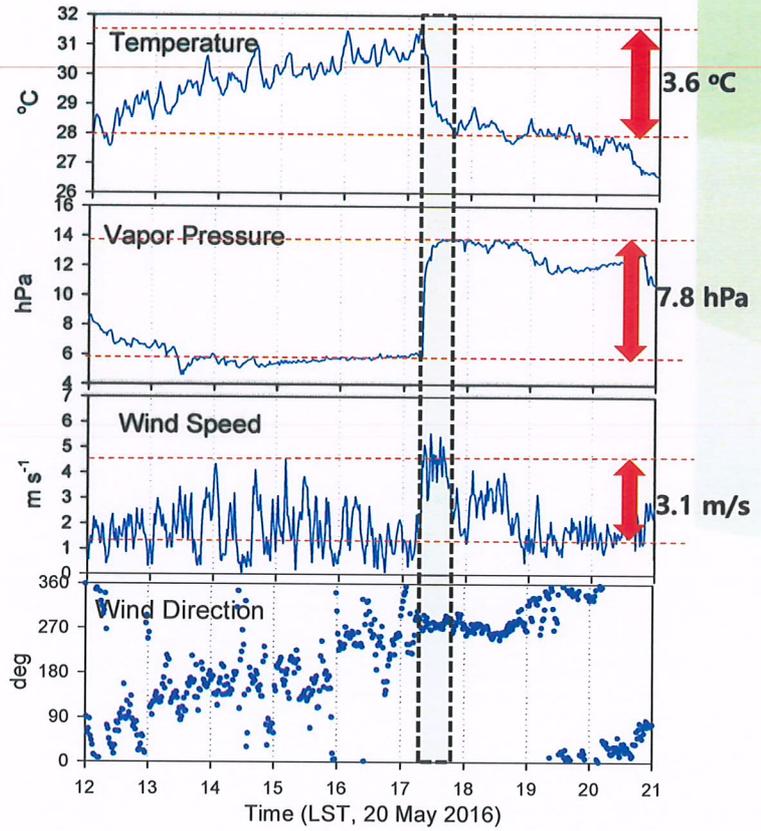


- ✓ 기압의 일교차는 해안선에 평행하게 서쪽부터 동쪽으로 가며 증가함. 최소 일교차는 바다에서 2.5 hPa를, 최대 일교차는 동쪽 끝지점에서 5.1 hPa를 기록함.
- ✓ 도시에서 기압의 일교차는 주변과 크게 다른 특징을 보이지 않음.

18

해풍 전선의 통과

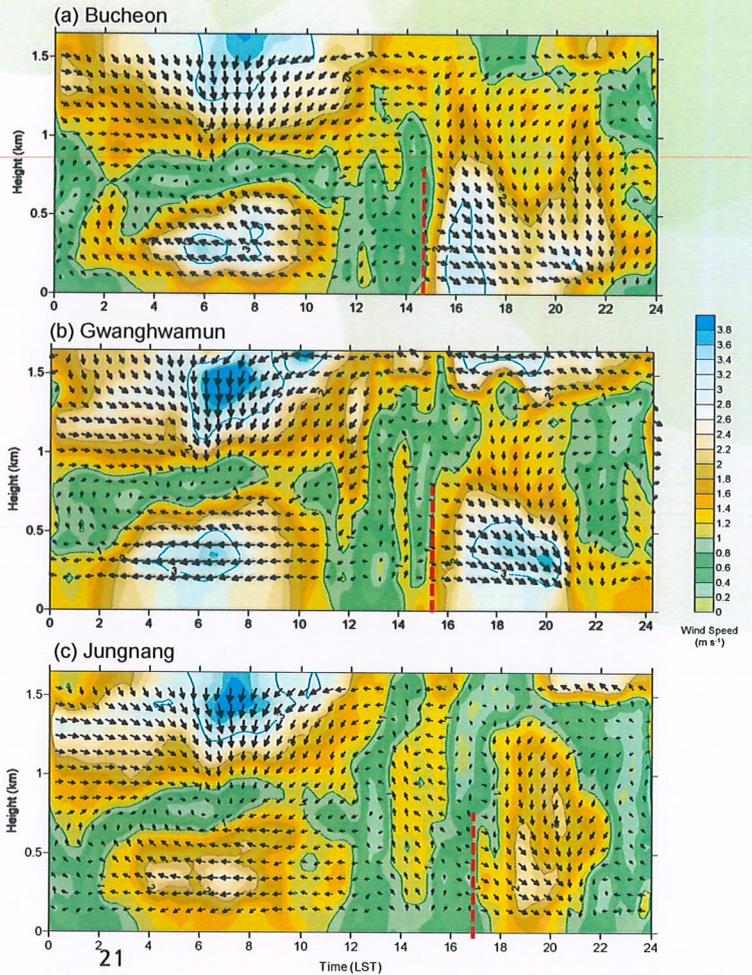
- ✓ 2016년 5월 20일 17시 18분 경에 갑작스런 온도 감소, 수증기압 증가, 풍속 증가, 일정한 풍속이 관측.
- ✓ 해풍전선이 통과했음을 의미



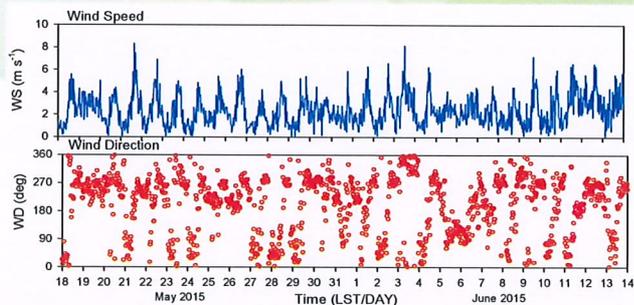
바람의 연직 프로파일

	부천	광화문	중랑
시작	1500 LST	1530 LST	1700 LST
종료	2200 LST	2100 LST	2030 LST
고도	1.5km	1.3km	1.3km
	2 cells	1 cell	1 cell

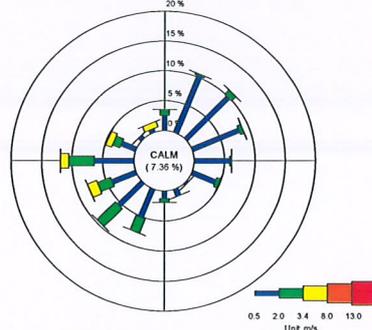
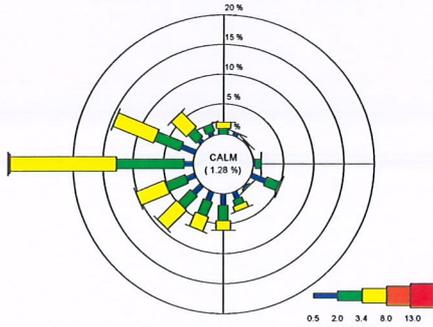
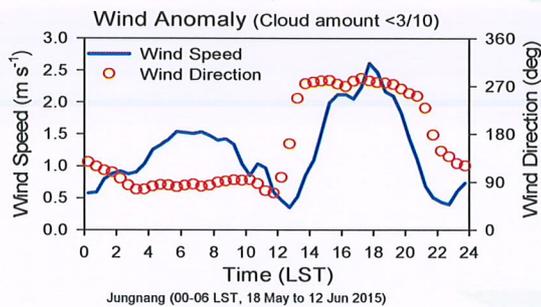
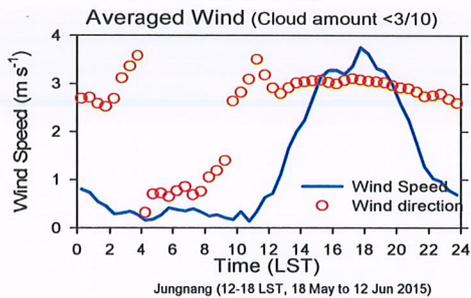
	부천	광화문	중랑
시작	0300 LST	0200 LST	0200 LST
종료	1100 LST	1100 LST	1130 LST
고도	0.7 km	0.8 km	0.8 km
최대 풍속	250m	350m	400m
	0600 LST	0630 LST	0700 LST



2015년 5월 18일~6월 13일 (바람)



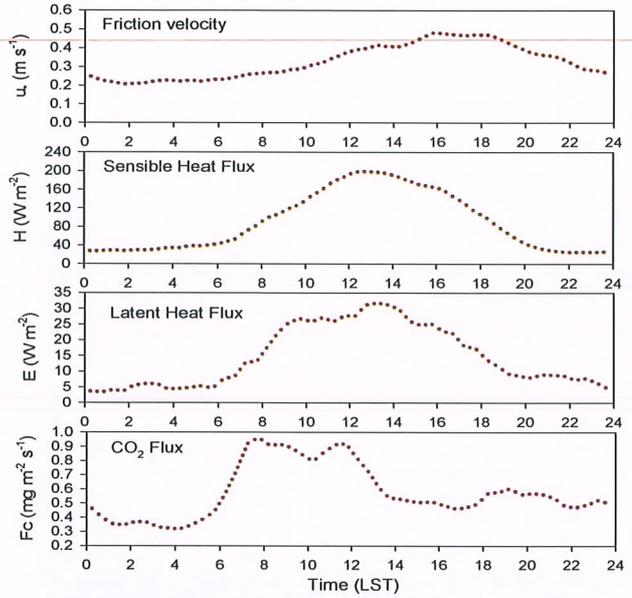
U=1.16 m/s
V=0.05 m/s



운량과 기상 현상

Day (in 2015)	운량 (%)	기상 현상
18 May	84	Mist
19 May	94	Rain (1.0), Mist
20 May	20	Mist
21 May	25	
22 May	29	
23 May	19	
24 May	0	
25 May	0	Mist
26 May	1	Mist, Haze
27 May	20	
28 May	28	
29 May	73	
30 May	61	Rain, Mist
31 May	30	Mist, Haze
1 June	56	
2 June	78	
3 June	26	
4 June	46	
5 June	93	Rain (1.0)
6 June	35	
7 June	34	
8 June	79	
9 June	41	Mist
10 June	26	Mist, Haze
11 June	73	Rain (7.5), Mist
12 June	58	Rain (0.5), Mist, Haze
13 June	71	Rain (0.5), Mist

플럭스



발생 빈도

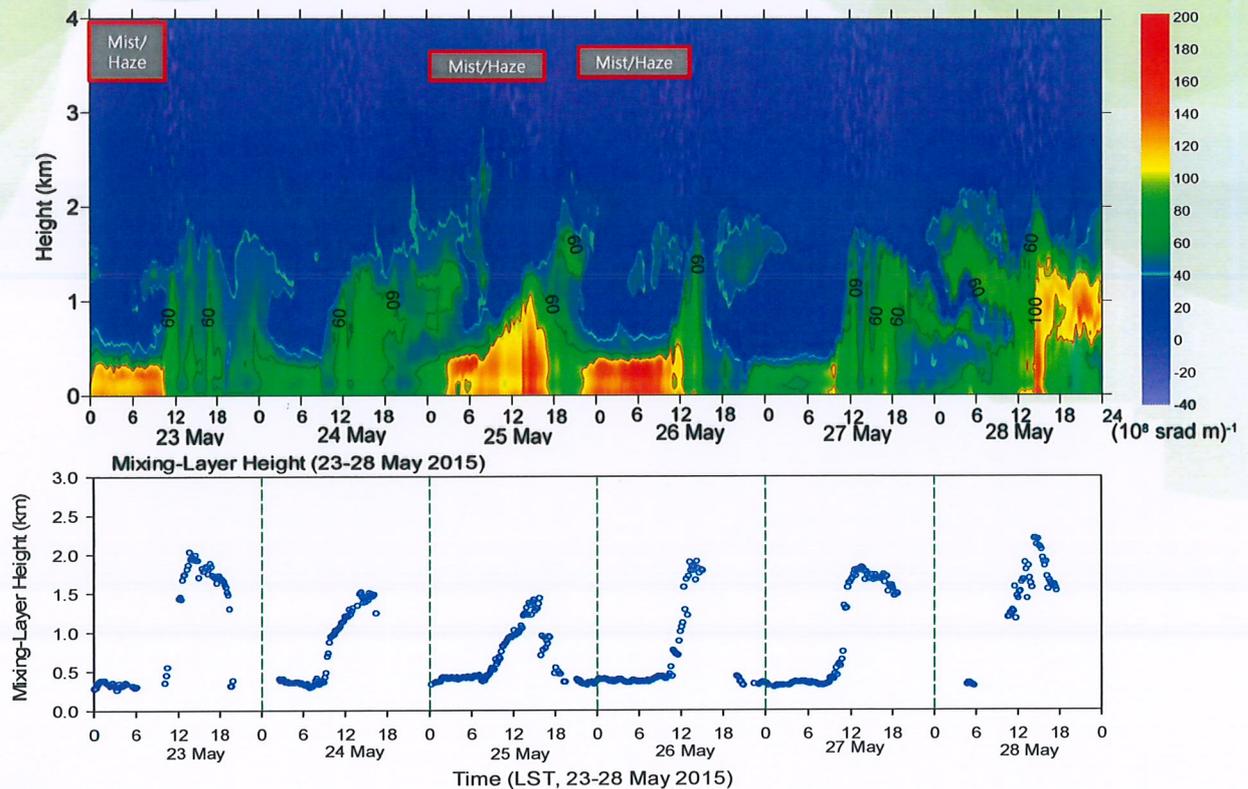
Total	Cloud Cover (CC)		Mist/Haze	
	Clear (CC ≤ 30%)	Cloudy (CC > 30%)	Mist/Haze	No-Mist/Haze
27	12	15	12	15



23

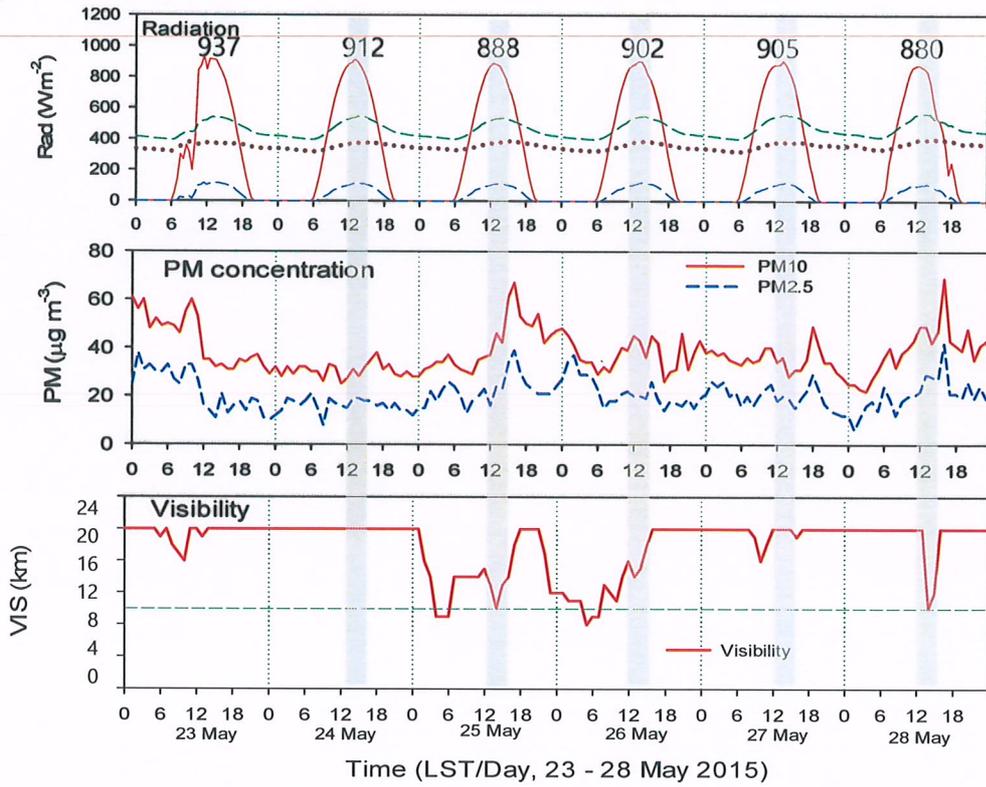
대기경계층 구조와 혼합층고도 (맑은기간, 23-28 May 2015)

Attenuated Backscatter (Ceilometer, Jungnang Station, 23 - 28 May 2015)

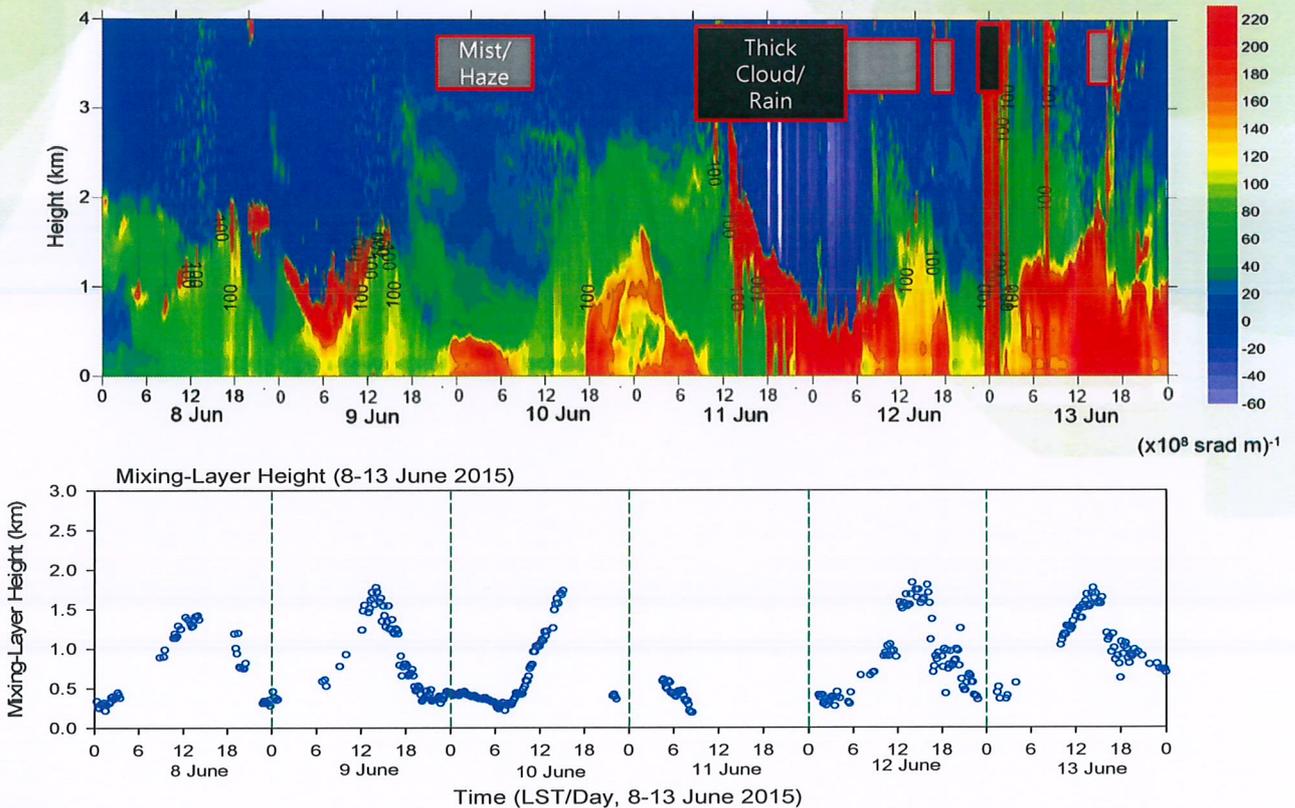


24

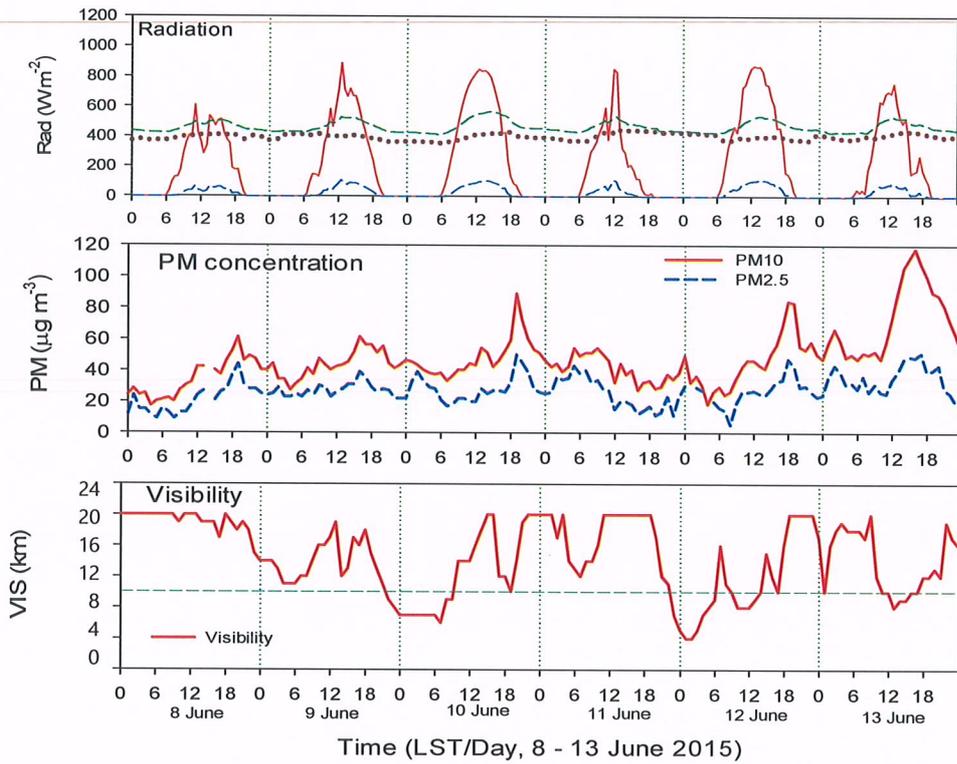
지표 변수들 (23-28 May 2015)



대기경계층구조와 혼합층고도 (흐린기간, 8-13 June 2015)

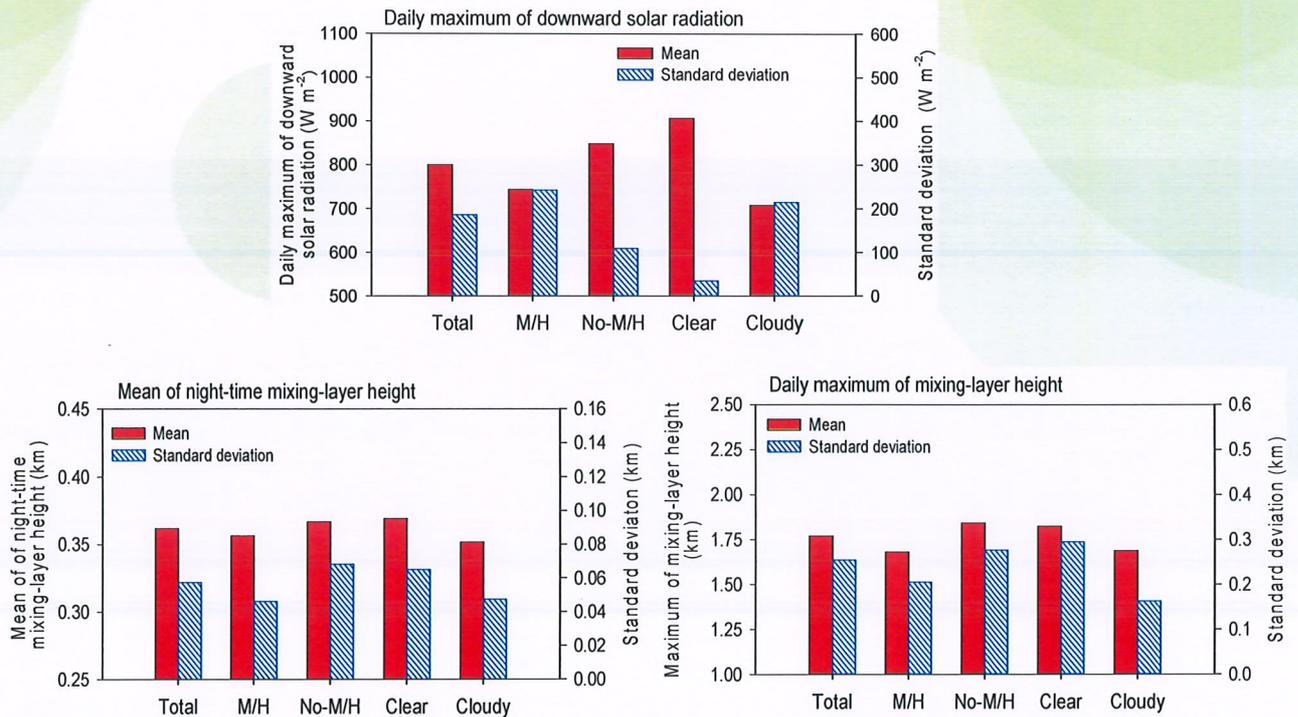


지표 변수들 (8-13 June 2015)



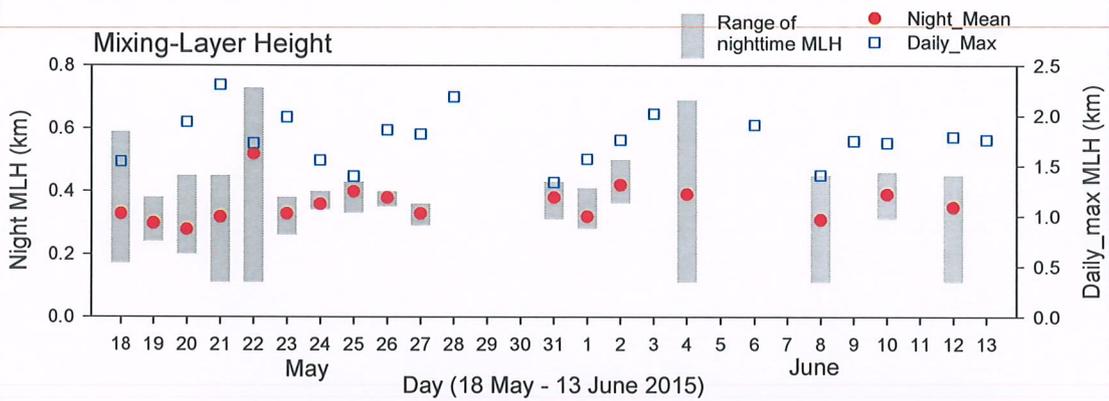
27

미세먼지가 태양복사와 혼합고에 미치는 영향



28

혼합층고도



통계

변수	전체	윤량 (CC)		연무/박무	
		맑음 (CC ≤ 30%)	흐림 (CC > 30%)	연무/박무	연무/박무 없는날
일최대 S _{down}	27	12	15	12	15
일최대 혼합고	19	12	7	8	11
야간평균 혼합고	17	10	7	8	9



요약

- 수도권도시기상관측망의 고해상도 지상기상관측소와 윈드라이다 자료를 이용하여 수도권 국지 순환의 상세한 지표기상과 연직 프로파일 특성을 살펴봄.
- 육지와 해양의 기온 차이가 기압 차를 만들고, 해안선에서부터 거리에 따른 기압의 진폭과 위상 차이가 해풍과 육풍을 만들 수 있음을 확인함.
- 해풍은 해안선 부근에서 1200 LST에 발생하여, 육지쪽으로 약 10km h⁻¹의 속도로 이동하며, 1700-1900 LST에는 내륙 60km 지점까지 이동함. 반면에, 육풍은 50 km 이내에서 발생하여 늦은 밤 또는 새벽부터 오전까지 영향을 미침.
- 바다와 육지 사이 뿐 아니라 도시와 외곽지역 사이에도 온도 차이가 존재함. 이는 해륙풍뿐 아니라 도시풍의 존재 가능성을 암시함. 최대 온도는 늦은 오후에 서울의 동쪽에서 나타나는데, 이는 해륙풍 후면의 기온 강하와 관련됨.
- 해풍전선은 급격한 온도경도를 가진 등온선으로 판단이 가능하며, 통과할 때 급격한 온도의 감소, 수증기압과 풍속의 증가를 동반함.



- 해풍은 최대 1.5 km 높이까지 도달하며, 육풍은 0.8 km 높이까지 도달함. 해풍과 육풍시 최대 풍속은 0.3-0.4 km 고도에서 늦은 오후와 이른 아침에 각각 나타남. 육풍 셀 위에는 북풍 계열의 바람이, 해풍 셀 위에는 returning (easterly) flow가 관측됨.
- 2015년 5월 18일부터 6월 13일까지 운고계에서 관측된 후방산란계수를 이용하여 수도권 기상 특성과 대기경계층구조 추정함. 수도권은 해륙풍과 같은 국지순환에 의해 영향을 받는 것으로 나타남.
- 미세먼지가 있는 날의 일최대혼합고는 미세먼지가 없는날에 비해 낮게 추정됨. 이는 미세먼지가 있는 날은 하향태양복사에너지가 낮아지고 이로 인해 현열속이 낮아지고 이로 인해 대기경계층고도 성장이 저해되기 때문이다.



경청해 주셔서 감사합니다!