

제138회 한림원탁토론회

미세먼지의 과학적 규명을 위한 선도적 연구 전략

일시 : 2019년 6월 28일(금) 9:30

장소 : 한국프레스센터 외신기자클럽(18층)



초대의 말씀

연일 미세먼지 농도가 위험 수준을 웃돌고 대기오염에 대한 국민적 관심이 높아지면서 정부는 대기환경개선 특별법을 포함해 '미세먼지 관련 5법'을 제·개정하는 등 적극적인 조치를 취하고 있습니다. 하지만 이러한 정책에도 불구하고 증가하는 추세의 고농도 미세먼지 현상은 규제만으로는 효과를 내기 어려움을 보여줍니다.

대기오염은 단순한 규제의 대상이 될 수 없습니다. 동아시아 대기오염에 대해 과학적으로 이해하고 이를 기반으로 저감정책을 수립해야만 미세먼지 문제에 효과적으로 대응 할 수 있습니다.

한국과학기술한림원은 미세먼지를 포함한 대기과학에 대해 가장 효과적인 연구가 이루어질 수 있는 방법은 무엇인지 연구자의 시선으로 살펴보고자 합니다. 이와 관련해서 다양한 분야의 전문가분들을 모시고 중요한 논의가 이뤄질 수 있는 장을 마련하고자 하오니 많은 관심과 참여를 부탁드립니다.

감사합니다.

2019년 6월

한국과학기술한림원 원 장 한 민 구

한림원탁토론회는 국가 과학기술의 장기적인 비전과 발전전략을 마련하고 국가사회 현안문제에 대한 과학기술적 접근 해결방안을 도출하기 위해 개최되고 있습니다.

PROGRAM

시 간	내 용	
09:00 ~ 09:30	등 록	
09:30 ~ 09:45	개 회 사	한민구 한국과학기술한림원 원장
09:45 ~ 10:15	주제발표 1	‘미세먼지의 과학적 과제’ 윤순창 서울대학교 지구환경과학부 명예교수(한림원 이학부 정회원)
10:15 ~ 10:45	주제발표 2	‘국가 미세먼지 대응의 방향과 과제’ 안병옥 국가기후환경회의 운영위원장
10:45 ~ 10:55	Coffee Break	
10:55 ~ 11:45	지정토론 좌 장 토 론 자 (가나다순)	손병주 서울대학교 지구환경과학부 교수(한림원 이학부 정회원) 김 준 연세대학교 대기과학과 교수 송철한 광주과학기술원 지구·환경공학부 교수 장윤석 POSTECH 환경공학부 교수(한림원 이학부 정회원) 하경자 부산대학교 대기환경과학과 교수(한림원 이학부 정회원) 한삼희 조선일보 수석논설위원
11:45 ~ 12:15	종합토론	질의 및 응답
12:15	폐 회	

CONTENTS

I. 주제발표 1 ‘미세먼지의 과학적 과제’	1
• 윤순창 서울대학교 지구환경과학부 명예교수(한림원 이학부 정회원)	
 II. 주제발표 2 ‘국가 미세먼지 대응의 방향과 과제’	41
• 안병옥 국가기후환경회의 운영위원장	
 III. 지정토론 (좌장 손병주 서울대학교 지구환경과학부 교수(한림원 이학부 정회원))	
• 김 준 연세대학교 대기과학과 교수	71
• 송철한 광주과학기술원 지구·환경공학부 교수	75
• 장윤석 POSTECH 환경공학부 교수(한림원 이학부 정회원)	79
• 하경자 부산대학교 대기환경과학과 교수(한림원 이학부 정회원)	85
• 한삼희 조선일보 수석논설위원	91

주제발표 1

I

미세먼지의 과학적 과제

윤 순 창

서울대학교 지구환경과학부 명예교수(한림원 이학부 정회원)

발제자 약력

성 명	윤 순 창	
소 속	서울대학교 지구환경과학부, 한림원 이학부 정회원	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위
1967 ~ 1971	서울대학교 물리학과	학사
1972 ~ 1974	서울대학교 대학원 물리학과	석사
1977 ~ 1983	미국 오리건주립대학교 대학원 대기과학과	박사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
1984 ~ 2014	서울대학교	조교수, 부교수, 교수
1998 ~ 2001	IUAPPA(국제대기환경연합)	수석부회장
2011 ~ 2014	APEC 기후센터	이사장
2012 ~ 2013	한국기상학회	회장/이사장
2015 ~ 2016	한국외국어대학	석좌교수
2016 ~ 2019	한국과학기술한림원	부원장
2015 ~ 현재	Future Earth Asia Center	자문위원
2017 ~ 현재	미세먼지 범부처 프로젝트 사업단 운영위원회	운영위원장

발제 1

미세먼지의 과학적 과제

윤 순 창

서울대학교 지구환경과학부 명예교수(한림원 이학부 정회원)

미세먼지의 과학적 과제:
Aerosol Science & Atmospheric Chemistry

2019.06.28.

윤 순 창

한국과학기술한림원 이학부 정회원

서울대학교 지구환경과학부 명예교수

미세먼지 범부처프로젝트사업단 운영위원장

발표 내용/순서

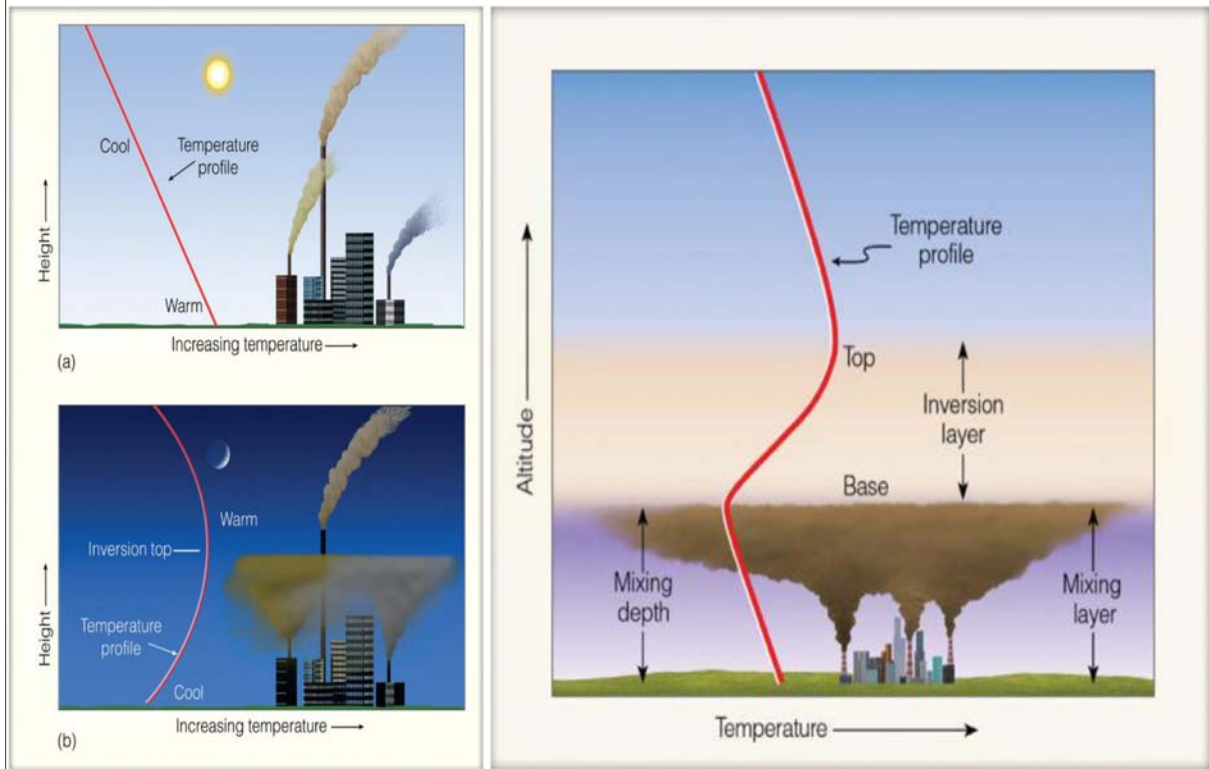
1. 지구 대기는 필름과 같은 매우 얇은 공기 층으로 쉽게 오염 됨: 대류권(8-16km)은 지구반경의 0.2%
2. 미세먼지는 혼합층(100-1,500m)에 축적, washout by rain, 대륙간 장거리 이동 (지상 4-5km 고도)
3. PM2.5(초미세먼지)는 뇌졸중, 심근경색, 폐암, 폐질환, 호흡기질환 등을 유발하여 전세계적으로 연간 700 만명이 조기사망 (한국은 12,000명)
4. 수도권 PM2.5의 약 75%가 NO₂, SO₂, NH₃, Amine, VOCs(toluene, monoterpene 등) 등의 기체가 대기 중에서 화학반응으로 입자로 전환된 2차생성입자 (NPF: new particle formation)
5. 입자생성(NPF) 관련 최근 연구 사례와 미국 과학한림원(NAS)의 “대기화학연구 보고서 2016” 요약/소개
6. 우리나라의 미세먼지 대응과 대기화학 연구 현황
7. 시사점과 결언
Supplements (미국의 대기화학 연구비 통계와 고산관측소 측정 자료)

지구 대기는 필름처럼 매우 얇은 공기 층

- 대류권 두께 8-16km = 지구반경(~ 6,400km)의 0.2%
- 대기오염물질에 의해 매우 쉽게 오염됨
- 대기오염물질은 대기경계층(높이 100m ~1,500m)내에서 잘 섞여 있음 (혼합층)
- 건조 공기의 99.93% 는 N₂(78.1%), O₂(20.9%), Ar(0.93%)
- 온실기체인 CO₂ 는 2019년 6월 현재 415ppm (0.041%)
- 나머지 0.03%가 미량기체 (CH₄, O₃, N₂O, NO₂, SO₂, CO 등)
- 수증기는 극지방~0.00001%, 열대지방~4% 범위 이내로 시간과 공간적 변화가 극심



대기경계층 (atmospheric boundary layer): 100~1,500m



Air pollution is one of the leading global health risks

THE LANCET

Volume 380, Issue 9859, 15 December 2012–4 January 2013, Pages 2224–2260

Articles

A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010

Ranking of risk factors of the Global Burden of Disease Study 2013

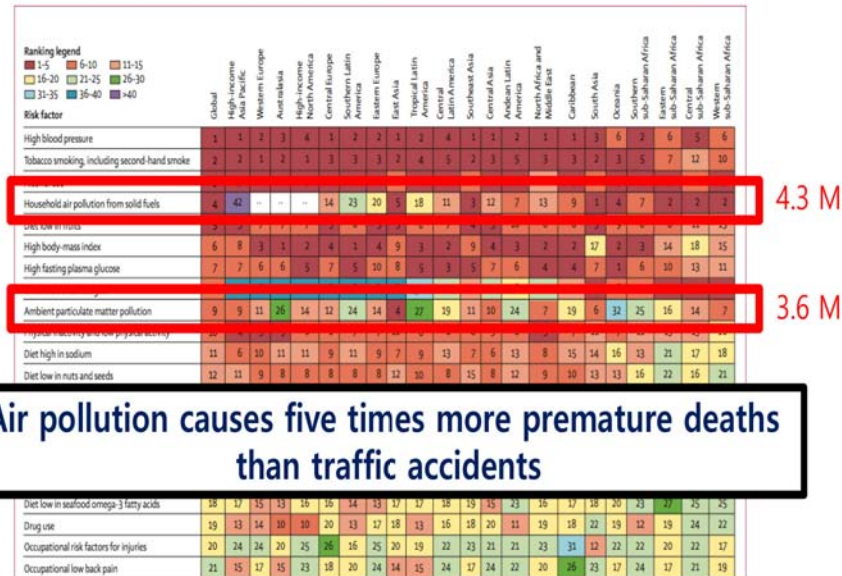


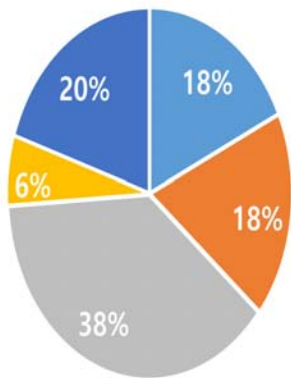
Table 1. Health burden attributable to ambient PM_{2.5} exposure in major cities and provinces of the Republic of Korea

Cities and Provinces	Population ^a	PM _{2.5} (μg/m ³) ^b	Number of deaths attributable to PM _{2.5}					Age-standardized rate (per 100,000)
			Ischemic heart disease	Chronic obstructive pulmonary disease	Lung cancer	Stroke	Total	
Metropolitan cities								
Total 11,924 deaths were attributable to PM _{2.5} exposure in 2015 in the Republic of Korea.								
Chungcheongnam	1,471,674	25.8	144.4 (132.2-156.6)	41.6 (34.7-48.5)	125.3 (105.2-145.3)	266.6 (224.9-308.4)	577.9 (529.5-626.2)	22.3
Jeollabuk	1,313,542	29.1	130.1 (116.1-144.1)	37.4 (30.8-44)	130.1 (107.5-152.8)	340.5 (286.6-394.5)	638.2 (577.7-698.8)	26.1
Jeollanam	1,323,030	22.4	181 (167.6-194.5)	44.9 (37.8-52)	121.1 (102.5-139.7)	286.5 (244.4-328.6)	633.6 (585.1-682.1)	22.3
Gyeongsangbuk	1,960,926	21.6	248.5 (230.4-266.6)	68.9 (58.1-79.6)	167.2 (141.7-192.7)	400.7 (340.4-460.9)	885.3 (816.6-954)	24.4
Gyeongsangnam	2,364,910	25.0	268.9 (249-288.9)	62.5 (53.3-71.8)	182.2 (155.8-208.7)	449.6 (385.5-513.8)	963.4 (890.6-1036.2)	25.9
Jeju	418,612	13.6	18.5 (13.2-23.9)	3.6 (1.2-5.9)	15.1 (5.8-24.3)	27.2 (13.3-41.2)	64.4 (46.6-82.1)	10
Republic of Korea	36,091,362	24.4	3302.6 (3227.9-3377.4)	636.8 (608.2-665.5)	2338 (2234.9-2441)	5646.3 (5404.9-5887.7)	11923.7 (11649.3-12198.1)	22.9

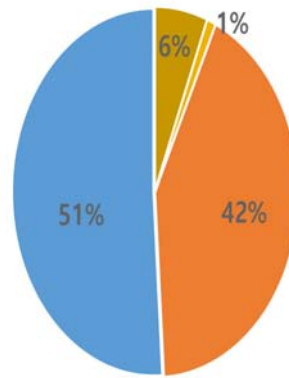
^a Population census data of year 2015 (age over 25) ^b Annual mean PM_{2.5} concentration at year 2015

[출처: 서울대 홍운철교수]

Deaths attributable to AAP in 2016, By disease, age and sex



■ ALRL ■ COPD ■ IHD ■ Lung Cancer ■ Stroke
 호흡기 질환 폐질환 허혈성 심장질환 폐암 뇌졸중



■ Children ≤ 5 yr
 ■ Women ≥ 15 yr

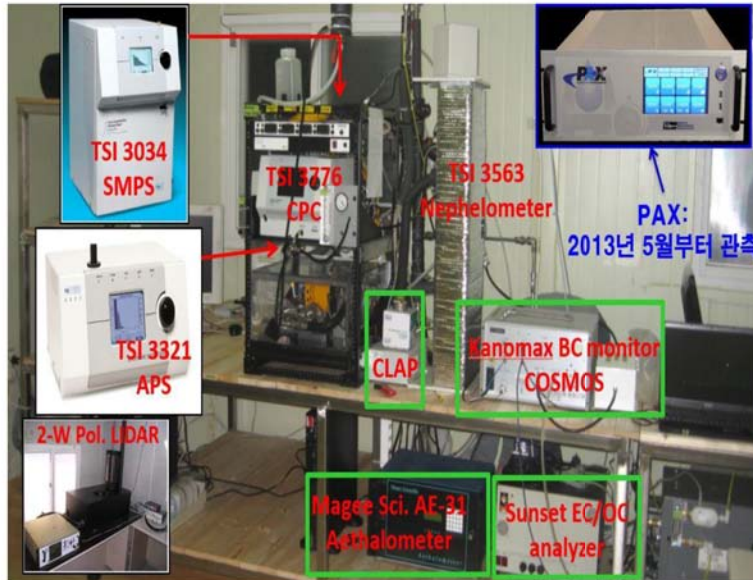
■ Children 5-15 yr
 ■ Men ≥ 15 yr

[출처: 서울대 홍윤철교수]

제주도 고산 서울대 지구환경관측소 (2005)



고산관측소 종합 에어로졸 측정장비



Aerosol inlet size cut: PM_{10} & PM_{10}

CPC: 3nm 이상 입자의 수농도 [$\#/cm^3$]

SMPS: 10~500nm 구간별 수농도

APS: 0.5~20 μm 구간별 수농도

Nephelometer: 산란도

Aethalometer: 파장별 흡수도, BC농도

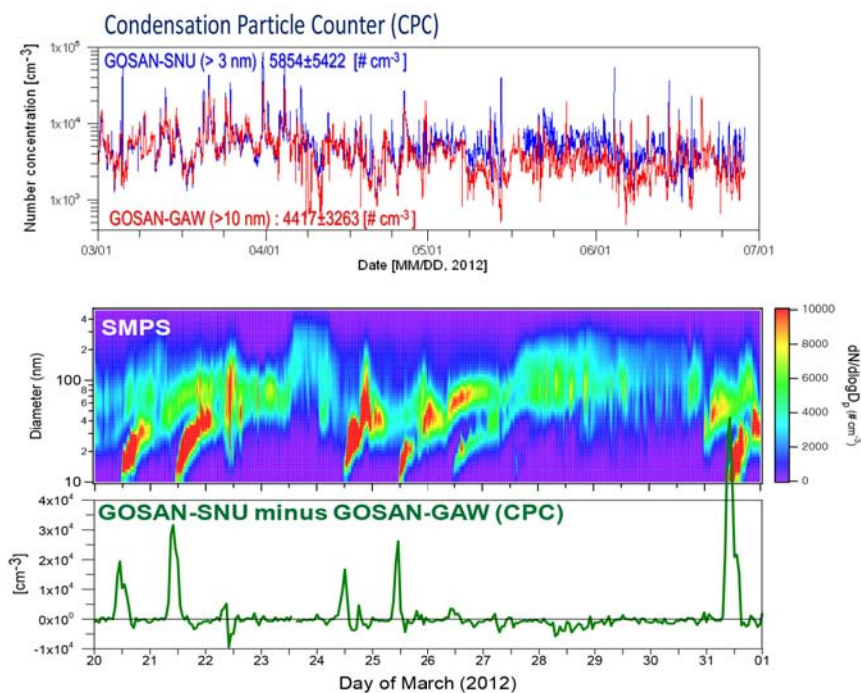
CLAP, COSMOS: 흡수도, BC

PAX: 산란도와 흡수도

Sunset EC/OC Analyser: EC, OC

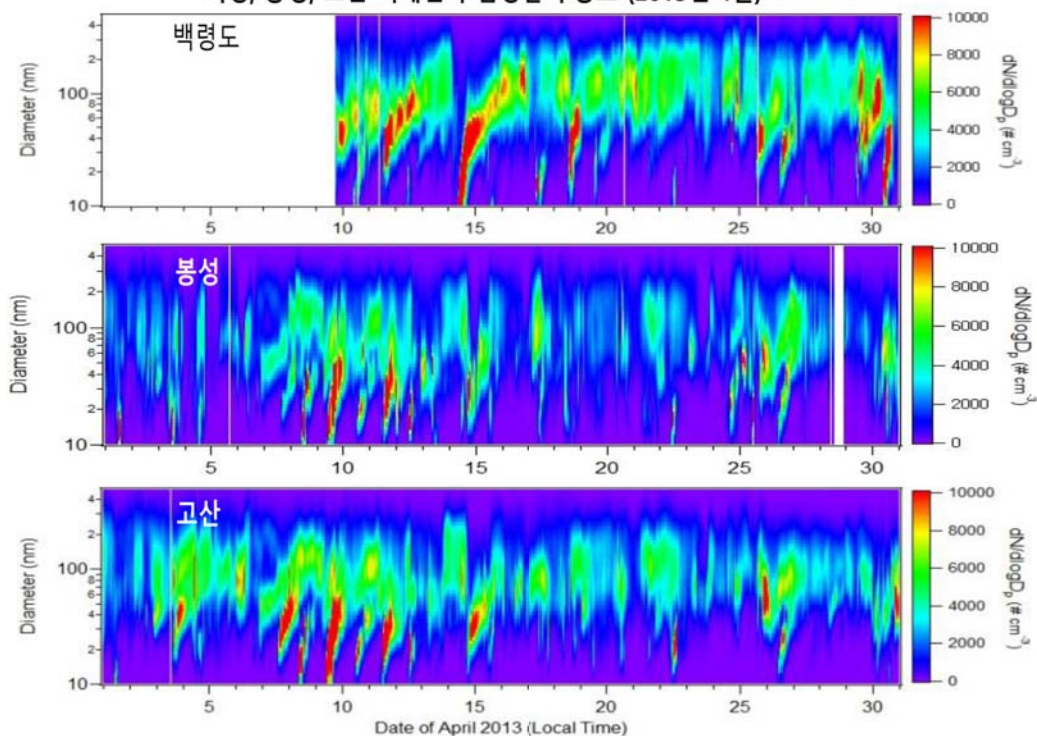
Lidar: aerosol 연직분포 (MPL since 1997)

미세입자의 생성/성장

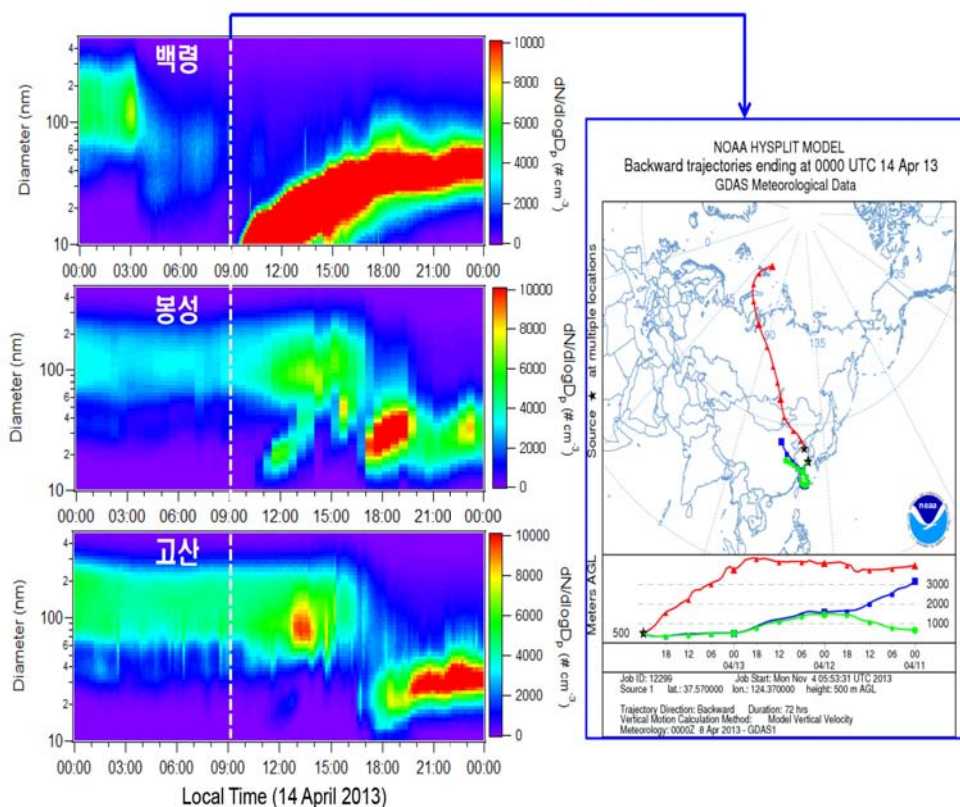


미세입자의 생성/성장

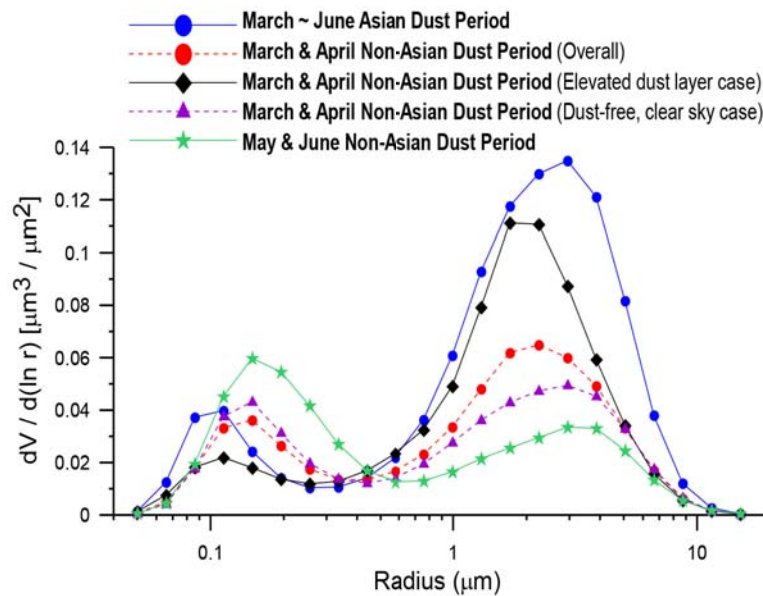
백령, 봉성, 고산 미세먼지 입경별 수농도 (2013년 4월)



미세입자의 생성/성장



Comparison of Aerosol Volume Size Distribution



입자생성(NPF) 관련 최근 연구 사례와

미국 NAS의 대기화학연구 보고서 요약

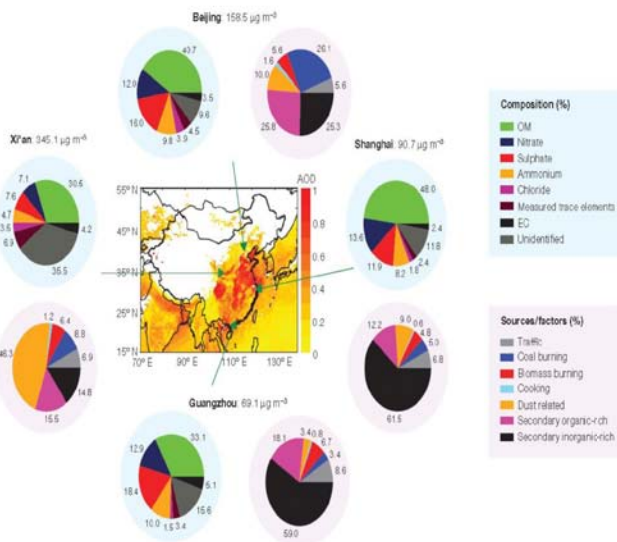
LETTER

9 OCTOBER 2014 | VOL 514 | NATURE

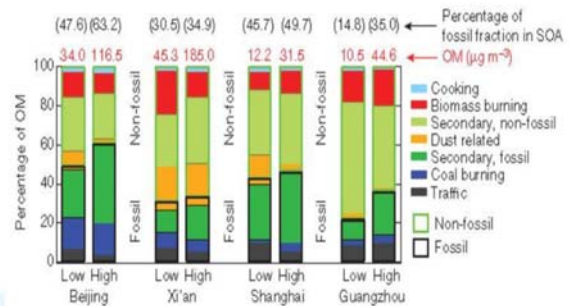
doi:10.1038/nature13774

High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China

Ru-lin Huang^{1,2*}, Vanlin Zhang^{1,4}, Carlo Bozzetti¹, Kin-Pal Ho³, Jun-Ji Cao², Yongming Han², Kanpar R. Dasgupta¹, Jay G. Slowik¹, Stephen M. Platt¹, Francesco Canonaco¹, Peter Zotter¹, Robert Wolf¹, Simone M. Pribet¹, Emily A. Brunst¹, Monica Crippa¹, Giancarlo Ciarelli¹, Andrea Piazzalunga¹, Margit Schwelb^{1,5}, Giulio Abbate^{1,6}, Jürgen Schneider-Kies¹, Ralf Zimmermann^{1,2}, Zhicheng An¹, Sonke Szidat¹, Urs Baltensperger¹, Inad El Haddad¹ & André S. H. Prévôt¹

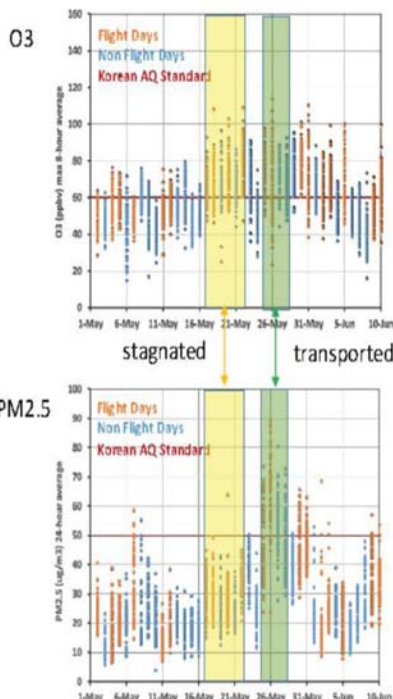


More than 70% of urban $\text{PM}_{2.5}$ are secondary formed aerosols



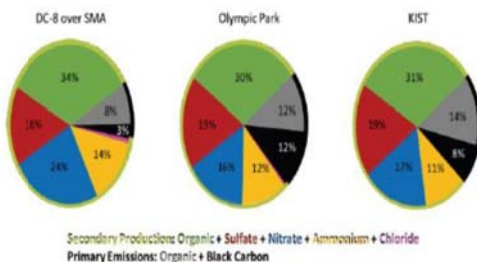
Fossil and non-fossil fractional contributions of each source during low and high $\text{PM}_{2.5}$ levels observed in different cities.

The numbers above the bars represent the average OM concentration and those in parentheses the percentage of the fossil fraction in SOA. Note that the contributions of fossil SOA to total OA mass are 1.1–2.4 times larger for high pollution events than for low pollution events, highlighting the importance of fossil SOA in particulate pollution. The **fossil SOA is a dominant fraction (25–40% of OA mass, or 45–65% of SOA mass) in Shanghai and Beijing**, consistent with the **large emissions of SOA precursors from high traffic flow and large coal usage**. However, **non-fossil SOA is abundant in Xi'an and Guangzhou (30–60% of OA mass, or 65–85% of SOA mass) owing to the enhanced biomass burning activities**.

KORUS-AQ Results : O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ 

2016년 KORUS-AQ (한미공동대기질조사) :

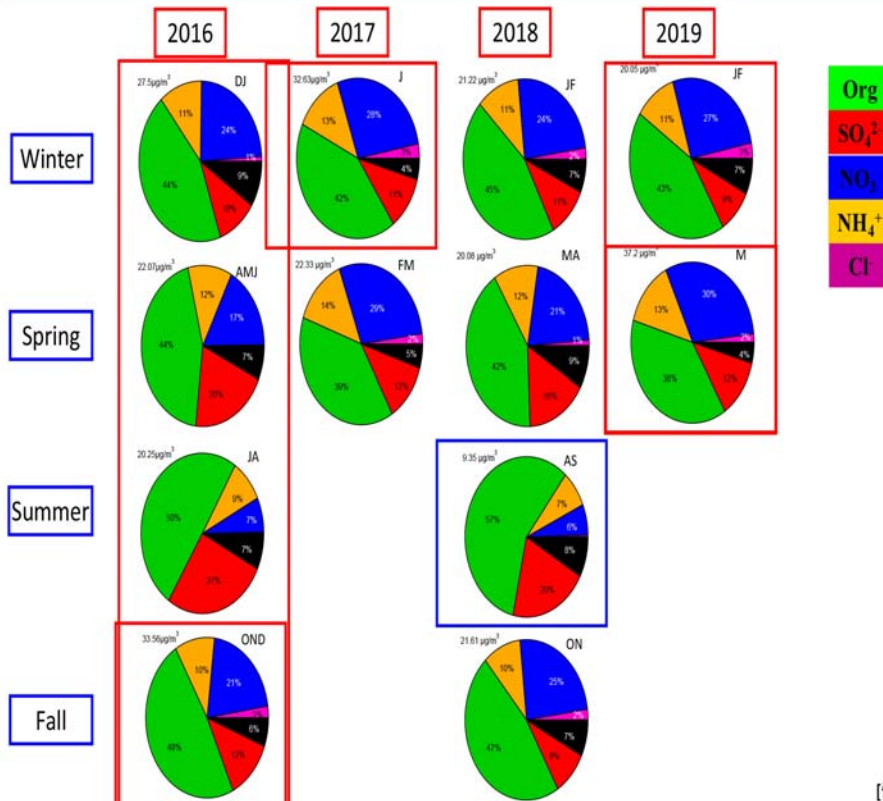
PM_{10} : 직접배출: 24%, 2차 생성입자 : 76%



Average distributions of particle composition observed from the air and ground in Seoul

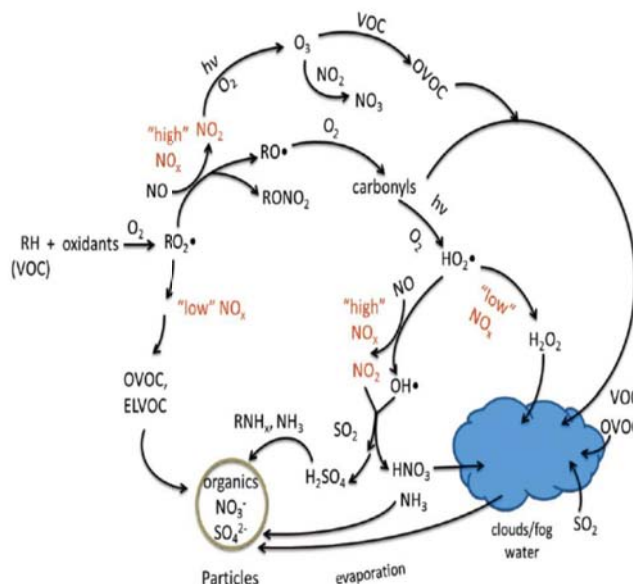
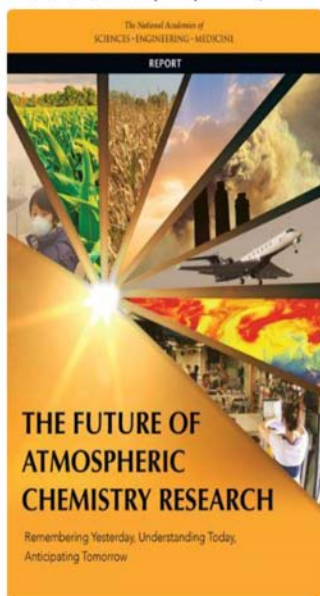
(KORUS-AQ RSSR, 2017) [출처: 연세대 김준교수]

Chemical composition of PM1 in Seoul by AMS*



[출처: KIST 김화진박사]

미국 과학한림원(NAS) 보고서, 2016



- 연소시에 배출되는 NO는 대기 중에서 NO_2 로 전환되어 최종적으로 O_3 , nitric acid, organic nitrates 를 생성
- 황-함유 화석연료 연소시에 배출되는 SO_2 는 대기 중에서 산화반응으로 sulfuric acid & organosulfates 를 생성
- Nitric & sulfuric acids reacts with ammonia and amines to form particles.
(Oxidants include OH, O_3 , NO_3 , and halogen atoms)

LETTER

17 OCTOBER 2013 | VOL 502 | NATURE

OPEN

doi:10.1038/nature12662

Molecular understanding of sulphuric acid-amine particle nucleation in the atmosphere

Jolo Almeida^{1,2}, Siegfried Schobbenberger³, Andreas Kirten⁴, Ismael K. Ortega⁵, Oona Kujala⁶, Mikko Mäkelä⁷, Armand P. Frigoli⁸, Alexey Adamov⁹, Antonio Amorim¹⁰, Federico Bianchi¹¹, Martin Breitenlechner¹², André David¹³, José Dommen¹⁴, Neil M. Donahue¹⁵, Andrew Downard¹⁶, Elmar Dünne¹⁷, Jonathan Dupluy¹⁸, Sebastian Ehrhart¹⁹, Richard C. Flagan²⁰, Alessandro Franzioni²¹, Roberto Guida²², Jani Hakala²³, Armin Hansel²⁴, Martin Heuricha²⁵, Henning Henschel²⁶, Tuija Jokinen²⁷, Heikki Junninen²⁸, Maja Kajava²⁹, Jukka Kangaslahti³⁰, Heidi Keskinen³¹, Agnieszka Kupc³², Theo Kuriyan³³, Alexander N. Kuvshinov³⁴, An Laaksonen³⁵, Kati Lehtipää³⁶, Markus Leininger³⁷, Johannes Löffler³⁸, Ville Loukonen³⁹, Vladimir Malinik⁴⁰, Sergey Mathot⁴¹, Matthew J. McCreath⁴², Tarmo Nieminen⁴³, Tuija Olenius⁴⁴, Antti Orel⁴⁵, Tuija Petäjä⁴⁶, Francesco Riccobono⁴⁷, Ilona Riipinen⁴⁸, Matti Rissanen⁴⁹, Linda Rondo⁵⁰, Tami Ruuskanen⁵¹, Flávia D. Santos⁵², Nina Sarnela⁵³, Simon Schallhart⁵⁴, Ralf Schultschos⁵⁵, John H. Seinfeld⁵⁶, Mario Simon⁵⁷, Mikko Sipilä⁵⁸, Yury Stozhkov⁵⁹, Frank Stratmann⁶⁰, Antonio Toms⁶¹, Jassim Trüdel⁶², Georgios Tsagkogeorgas⁶³, Petri Vainavara⁶⁴, Yrjö Viikari⁶⁵, Annelie Vrtala⁶⁶, Aron Vrtala⁶⁷, Paul E. Wagner⁶⁸, Ernest Weingartner⁶⁹, Heike Wers⁷⁰, Christina Williams⁷¹, Daniela Wimmer⁷², Penglin Ye⁷³, Tami Yli-Juuti⁷⁴, Kenneth S. Carslaw⁷⁵, Markku Kulmala⁷⁶, Joachim Curtius⁷⁷, Urs Baltensperger⁷⁸, Douglas R. Worsnop^{79,80}, Hanna Vehkamäki⁸¹ & Jasper Kirkby⁸²

Here we use the **CLOUD** (Cosmics Leaving Outdoor Droplets) **chamber at CERN** and find that **dimethylamine** above three parts per trillion by volume can **enhance particle formation rates more than 1,000-fold** compared with ammonia, sufficient to account for the particle formation rates observed in the atmosphere. Molecular analysis of the clusters reveals that the faster nucleation is explained by a base-stabilization mechanism involving acid-amine pairs, which strongly decrease evaporation.

CERN: Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire
세계 최대의 입자물리연구소(1954년에 창립)

PNAS | February 27, 2018 | vol. 115 | no. 9

Monoterpenes are the largest source of summertime organic aerosol in the southeastern United States

Haofei Zhang^{1,2}, Lindsay D. Yee³, Ben H. Lee⁴, Michael P. Curtis⁵, David R. Worton^{6,7}, Gabriel Isaacman-VanWertz^{8,9}, John H. Offenberg¹⁰, Michael Lewandowski¹¹, Tadeusz E. Kleindienst¹², Melinda R. Beaver¹³, Amara L. Holder¹⁴, William A. Lonneman¹⁵, Kenneth S. Docherty¹⁶, Mohammed Jaoui¹⁷, Haval O. T. Pye¹⁸, Weiwei Hu¹⁹, Douglas A. Day²⁰, Pedro Campuzano-Jost²¹, Jose L. Jimenez²², Hongyu Guo²³, Rodney J. Weber²⁴, Joost de Gouw²⁵, Abigail R. Koss²⁶, Eric S. Edgerton²⁷, William Brune²⁸, Claudia Mohr²⁹, Felipe D. Lopez-Hilfiker³⁰, Anna Lutz³¹, Nathan M. Kreisberg³², Steve R. Spielman³³, Susanne V. Hering³⁴, Kevin R. Wilson³⁵, Joel A. Thornton³⁶, and Allen H. Goldstein³⁷

¹Department of Environmental Science, Policy, and Management, University of California, Berkeley, CA 94720; ²Department of Chemistry, University of California, Riverside, CA 92521; ³Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle, WA 98195; ⁴Department of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley, CA 94720; ⁵Aerosol Dynamics Inc., Berkeley, CA 94710; ⁶National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711; ⁷National Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711; ⁸Jacobs Technology, Inc., Research Triangle Park, NC 27711; ⁹Department of Chemistry and Biochemistry, University of Colorado Boulder, Boulder, CO 80309; ¹⁰Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, CO 80309; ¹¹School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332; ¹²National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory, Boulder, CO 80505; ¹³Atmospheric Research and Analysis, Corp., NC 27512; ¹⁴Department of Meteorology, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802; ¹⁵Department of Chemistry and Molecular Biology, University of Gothenburg, SE-41296 Gothenburg, Sweden; ¹⁶Chemical Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720; ¹⁷Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA 94720

We provide comprehensive molecular characterization of atmospheric organic aerosol samples from the southeastern United States by combining state-of-the-art high-resolution mass spectrometry techniques. We find that **monoterpene secondary organic aerosol accounts for approximately half of total fine organic aerosol**. More importantly, the monoterpene secondary organic aerosol mass increases with enhanced nitrogen oxide processing, indicating **anthropogenic influence on biogenic secondary organic aerosol formation**.

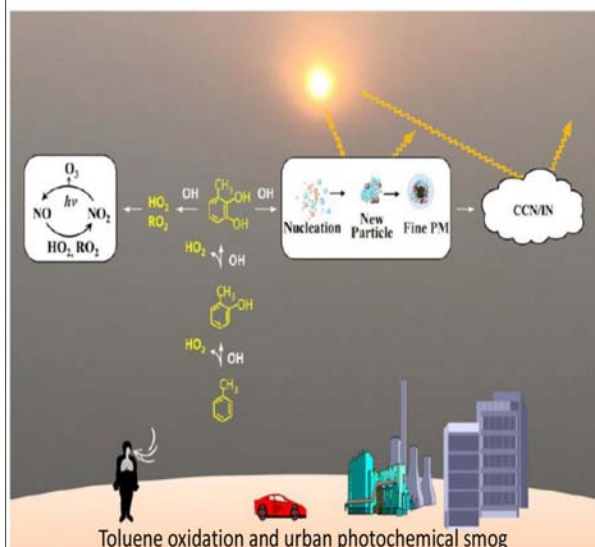
PNAS | August 1, 2017 | vol. 114 | no. 31 | 8169-8174

Reassessing the atmospheric oxidation mechanism of toluene

Yuemeng Ji^{1,2,3}, Jun Zhao^{4,5}, Hajime Terazono^{6,7}, Kentaro Misawa^{8,9}, Nicholas P. Levitt¹⁰, Yixin Li¹¹, Yun Lin¹², Jianfeng Peng¹³, Yuan Wang¹⁴, Lian Duan¹⁵, Bowen Pan¹⁶, Fang Zhang¹⁷, Xidan Feng¹⁸, Taicheng An¹⁹, Wilmarie Marrero-Ortiz²⁰, Jeremiah Secrest²¹, Annie L. Zhang²², Kazuhiko Shibuya²³, Mario J. Molina²⁴, and Renshi Zhang²⁵

¹Institute of Environmental Health and Pollution Control, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; ²Guangzhou Key Laboratory of Environmental Catalysis and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; ³Department of Atmospheric Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ⁴Guangdong Provincial Key Laboratory for Climate Change and Natural Gas Studies, Institute of Earth Climate and Environment System, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; ⁵Department of Chemistry, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8551, Japan; ⁶Department of Chemistry, Texas A&M University, College Station, TX 77843; ⁷Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125; ⁸School of Resource and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200207, China; ⁹State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ¹⁰College of Environmental Science and Engineering, Shanghai University of Agriculture and Engineering, Shanghai 201321, China; ¹¹Department of Chemistry, College of Natural Sciences, The University of Texas at Austin, Austin, TX 78712; ¹²Department of Chemistry and Biochemistry, University of California, San Diego, La Jolla, CA 92037

Contributed by Mario J. Molina, June 8, 2017



[그림 설명] The OH-toluene reactions lead promptly and dominantly to cresol formation, which regulates the impacts on air quality, human health, and climate. The phenolic pathway yields HO₂ and RO₂ that facilitate ozone production by converting NO to NO₂, as photodissociation of NO₂ occurs in the wavelength range of 400 nm to 650 nm. Also, dihydroxymethylbenzenes generated from this pathway undergo subsequent reactions with OH to form the precursors for aerosol nucleation and growth, including small α-carbonyl compounds, organic acids, and other highly oxygenated low volatility products.

Conclusion:

Photochemical oxidation of toluene contributes importantly to ozone and SOA formation in urban environments, with key implications for air quality and human health. Our combined experimental and theoretical results show that the prompt formation of cresols and their subsequent oxidation largely regulate the atmospheric impacts of toluene oxidation, indicating that the representation of the toluene oxidation mechanism should be reassessed in current atmospheric models. Future studies are necessary to incorporate the kinetic and mechanistic results from our present work into atmospheric models, to accurately assess ozone and SOA formation under polluted environments.

Severe haze in northern China: A synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes

Zhisheng An^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Ruijin Huang^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Banyi Zhang^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Xuesi Tian^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Guohui Li^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Junji Cao^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Weiqin Zhou^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Zhongguo Shi^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Yongming Han^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Shaojun Gu^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, and Yueming Ai^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}

¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ²⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ³⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁴⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁵⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁶⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁷⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁸⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹¹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹²State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹³State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁴State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁵State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁶State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁷State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁸State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ⁹⁹State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; ¹⁰⁰State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Contributed by Zhisheng An, March 14, 2019

Conclusion:

To mitigate haze pollution, effective controls in source emissions of primary PM and secondary PM precursor gases from residential coal combustion, biomass burning, fugitive dust, agricultural activities, and vehicular emissions are essential. Considering the facts of decreasing primary PM levels due to strict regulatory controls by central and local governments but continuously increasing contributions of SIA and SOA in China, further reductions in NO_x and SO₂ and, particularly, effective reductions in the currently much less-constrained NH₃ and VOCs are of significant importance. Future research is urgently needed to directly address the following scientific questions:

- the mechanisms leading to secondary PM formation, particularly chemical/physical transformation of primary and secondary PM and the associated variations in the PM properties during haze evolution;
- the interactions and feedback cycles between haze and meteorological/climatic conditions;
- accurate representations of emissions, chemistry, removal, and transport relevant to fine PM as well as the synergetic effects of these processes in atmospheric models; and iv) quantitative assessment of the climatic conditions, ecosystem, and human health effects of haze pollution.

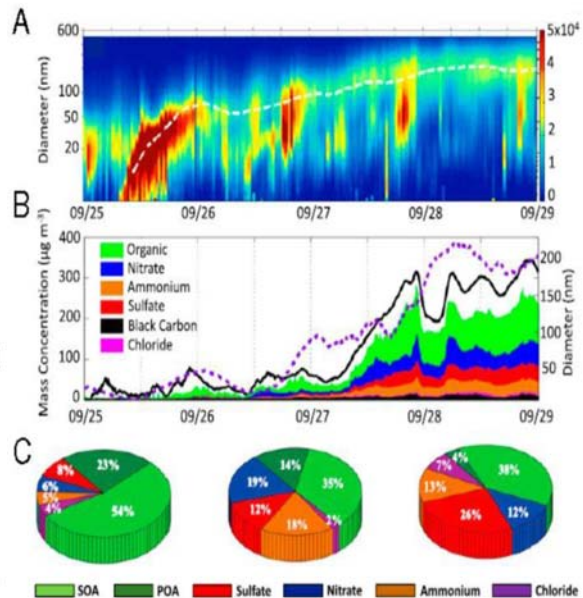
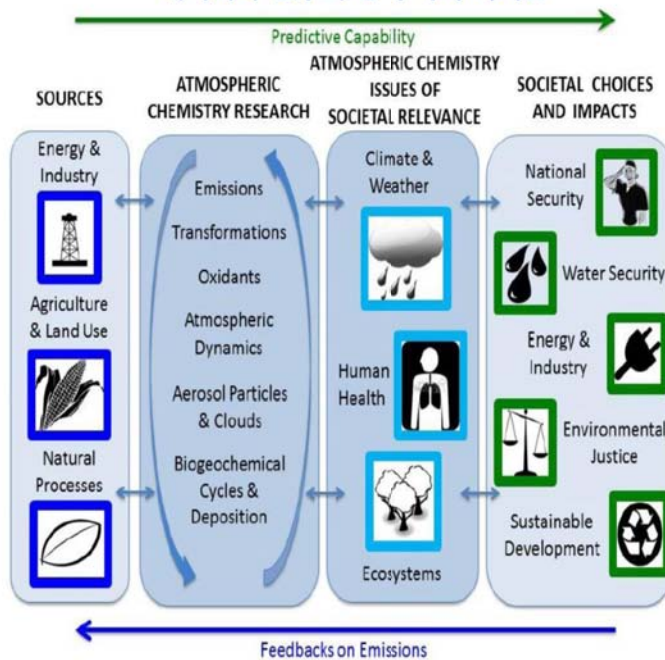


Fig. 3. Aerosol nucleation and growth during a pollution episode (September 25–29, 2013) in Beijing. Temporal evolutions of particle number size distribution and mean diameter (white dashed curve) (A); PM_{2.5} mass concentration (black solid line), mean diameter (purple dashed line), and PM₁ (particulate matter smaller than 1.0 µm) chemical composition (B); evolution of particle chemical composition from clean (Left), transition (Middle), to polluted (Right) periods (C). Modified from ref. 9.

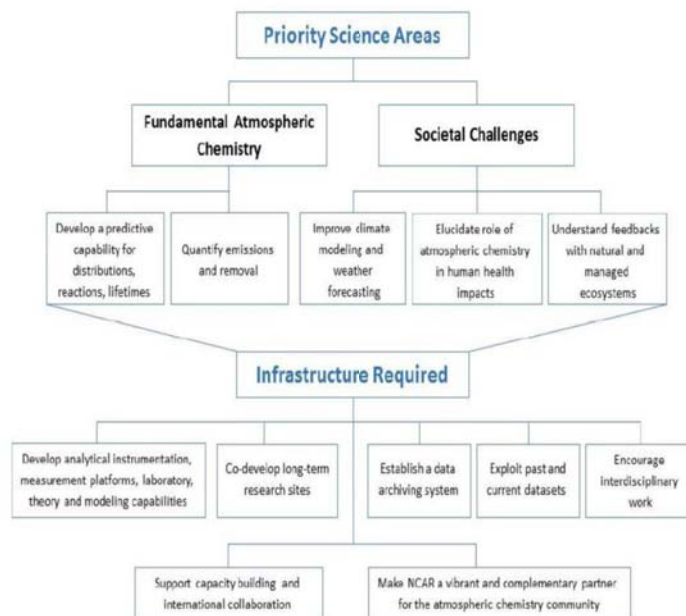
대기화학 연구의 전 주기적 사이클



- The connections among major emission sources to the atmosphere, atmospheric chemistry research, scientific issues of societal relevance, and subsequent societal choices and impact areas.
- Research in atmospheric chemistry helps to build a predictive capability for future environmental conditions that can indicate likely impacts to society of various policy choices.

[출처: 미국 NAS 보고서 2016]

Priority Science Areas and recommended infrastructure



[출처: 미국 NAS 보고서 2016]

NAS가 제시한 대기화학 우선 연구영역 5개

Priority Science Area 1: Advance the **fundamental atmospheric chemistry** knowledge that enables predictive capability for the distribution, reactions, and **lifetimes of gases and particles**.

Priority Science Area 2: **Quantify emissions and deposition of gases and particles** in a changing Earth system.

Priority Science Area 3: Advance the **integration of atmospheric chemistry within weather and climate models** to improve forecasting in a changing Earth system.

Priority Science Area 4: Understand **the sources and atmospheric processes** controlling the species **most deleterious to human health**.

Priority Science Area 5: Understand the **feedbacks between atmospheric chemistry and the biogeochemistry** of natural and managed ecosystems.

Recommended Infrastructures 7개

Development of Tools for Atmospheric Chemistry Research

Instruments used in laboratory experiments and deployed for remote and in situ measurements are key tools used by atmospheric chemists. New analytical techniques, instruments, and instrument platforms are needed to support the 5 Priority Science Areas. Similarly, a range of modeling tools is central to the development of a predictive understanding of atmospheric chemistry. NSF will play an essential role in fostering the development of the next generation of many of these tools, as could industry and other government funding agencies.

NSF's Major Research Instrumentation (MRI) and Small Business Innovation Research/Small Business Technology Transfer Research (SBIR/STTR) programs have produced valuable breakthrough technologies that enabled improvements in atmospheric chemistry research.

NSF could also emphasize endeavors that focus on modeling across spatial scales (urban to global) and temporal scales (weather to climate) to promote collaboration and coordination across agencies and different NSF divisions.

Recommendation 1: NSF should ensure adequate support for the development of the tools necessary to accomplish the scientific goals for the atmospheric chemistry community, including the development of new laboratory and analytical instrumentation, measurement platforms, and modeling capabilities.

Information Collection, Analysis, and Archiving in the Era of “Big Data”

The collection of measurement data over long periods of time allows the discernment of trends that are not apparent in one-time field projects. Established research sites with core measurement capabilities and long-term knowledge about regional photochemistry, meteorology, ecosystem properties, and biosphere–atmosphere exchange processes are a critical resource for making and interpreting new measurements.

Recommendation 2: NSF should take the lead in coordinating with other agencies to identify the scientific need for long-term measurements and to establish synergies with existing sites that could provide core support for long-term atmospheric chemistry measurements, including biosphere–atmosphere exchange of trace gases and aerosol particles.

Recommendation 3: NSF should encourage mining and integration of measurements and model results that can merge and exploit past datasets to provide insight into atmospheric processes, as well as guide planning for future studies.

Recommendation 4: NSF should establish a data archiving system for NSF-supported atmospheric chemistry research and take the lead in coordinating with other federal and possibly state agencies to create a comprehensive, compatible, and accessible data archive system.

Imperative for Collaborations

Understanding and addressing challenges faced by society will rely on close integration of knowledge from multiple disciplines, including the physical, biological, and social sciences and engineering.

Given the important cross-disciplinary aspects of the science priorities for atmospheric chemistry, placing value on a “cross-disciplinary integration” component of proposal evaluation is an option for funding. Both single agency and cross-agency efforts are an essential component of the Priority Science Areas identified above.

Recommendation 5: NSF should improve opportunities that encourage interdisciplinary work in atmospheric chemistry and facilitate integration of expertise across disciplines and across academia, institutes, government, and industry. This improvement may include support of focused teams and virtual or physical centers of sizes appropriate to the problem at hand.

Recommendation 6: NSF, in coordination with other agencies, should continue to encourage and support U.S. scientists involved in atmospheric chemistry research to engage with underserved groups, in capacity-building activities, and in international collaborations.

Role of a National Center

Answering today's science questions requires significant resources and expertise to develop, maintain, and operate an array of instruments, platforms and laboratory tools, as well as significant expertise and computational resources to develop and run complex weather, chemistry, and climate models. A national center can be an optimal approach for providing these observational and computational capabilities because (1) dedicated center staff with expertise are most efficient at maintaining these complex capabilities; (2) the center can help foster the collaborative research needed to identify and solve critical science and societal problems. A national center can provide these resources and expertise to investigators in the broader community, while at the same time contributing directly to scientific advancements. The National Center for Atmospheric Research (NCAR) was established as a federally funded national center dedicated to achieving excellence in atmospheric science research, of which atmospheric chemistry is an essential part. Atmospheric chemistry research occurs within many divisions of NCAR, especially the Earth Observing Laboratory and the Atmospheric Chemistry Observations and Modeling (ACOM) Laboratory.

Recommendation 7: NCAR, in conjunction with NSF, should develop and implement a strategy to make NCAR a vibrant and complementary partner within the atmospheric chemistry community. This strategy should ensure that scientific leadership at NCAR has the latitude to set an energizing vision with appropriate personnel, infrastructure, and allocation of resources; and that the research capabilities and facilities at NCAR serve a unique and essential role to the NSF atmospheric chemistry community.

우리나라의 미세먼지 대응과 대기화학 연구 현황

Reviewing National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)

You are here: EPA Home » Reviewing NAAQS » Particulate Matter NAAQS » Table of Historical PM NAAQS

Particulate Matter (PM) Standards – Table of Historical PM NAAQS

History of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter During the Period 1971–2012

Final Rule	Primary/Secondary	Indicator	Averaging Time	Level ⁽¹⁾	Form
1971	Primary	TSP ⁽²⁾	24-hour	260 µg/m ³	Not to be exceeded more than once per year
			Annual	75 µg/m ³	Annual geometric mean
36 FR 8186 Apr 30, 1971	Secondary	TSP	24-hour	150 µg/m ³	Not to be exceeded more than once per year
			Annual	60 µg/m ³	Annual geometric mean
1987	Primary and Secondary	PM ₁₀	24-hour	150 µg/m ³	Not to be exceeded more than once per year on average over a 3-year period
52 FR 24634 Jul 1, 1987			Annual	50 µg/m ³	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years
1997	Primary and Secondary	PM _{2.5}	24-hour	65 µg/m ³	98th percentile, averaged over 3 years ⁽³⁾
62 FR 38652 Jul 18, 1997			Annual	15.0 µg/m ³	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years ⁽⁴⁾
		PM ₁₀	24-hour	150 µg/m ³	Initially promulgated 99th percentile, averaged over 3 years, when 1997 standards for PM ₁₀ were vacated, the form of 1987 standards remained in place (not to be exceeded more than once per year on average over a 3-year period) ⁽⁵⁾
			Annual	50 µg/m ³	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years
2006	Primary and Secondary	PM _{2.5}	24-hour	35 µg/m ³	98th percentile, averaged over 3 years ⁽⁶⁾
71 FR 61144 Oct 17, 2006			Annual	15.0 µg/m ³	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years ⁽⁷⁾
		PM ₁₀	24-hour	150 µg/m ³	Not to be exceeded more than once per year on average over a 3-year period ⁽⁸⁾
2012	Primary	PM _{2.5}	Annual	12.0 µg/m ³	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years ⁽⁹⁾
78 FR 3086 Jan 15, 2013	Secondary		Annual	15.0 µg/m ³	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years ⁽⁷⁾
	Primary and Secondary		24-hour	35 µg/m ³	98th percentile, averaged over 3 years ⁽⁶⁾
	Primary and Secondary	PM ₁₀	24-hour	150 µg/m ³	Not to be exceeded more than once per year on average over a 3-year period ⁽⁸⁾

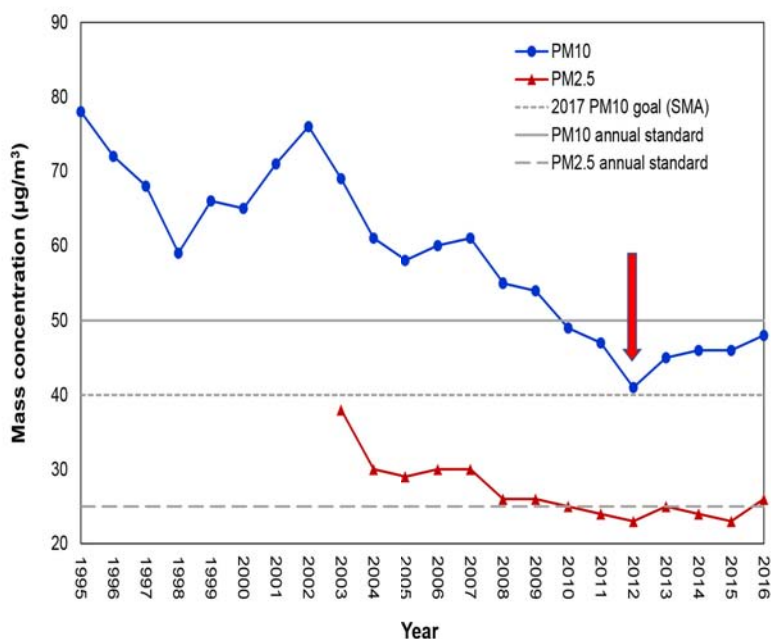
⁽¹⁾ Units of measure are micrograms per cubic meter of air (µg/m³).

국가별 PM2.5규제 연도:

- 미국 1997~
- EU 2005~
- 일본 2009~
- 중국 2012~
- 한국 2015 (2016. 1. 시행)

서울시의 미세먼지 농도변화

2012년 이후 증가!!!

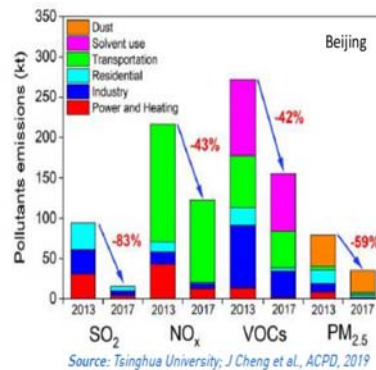


[출처: 이화여대 김용표교수]

UNEP Press Release 09 Mar 2019: "Beijing air improvement provide model for other cities"

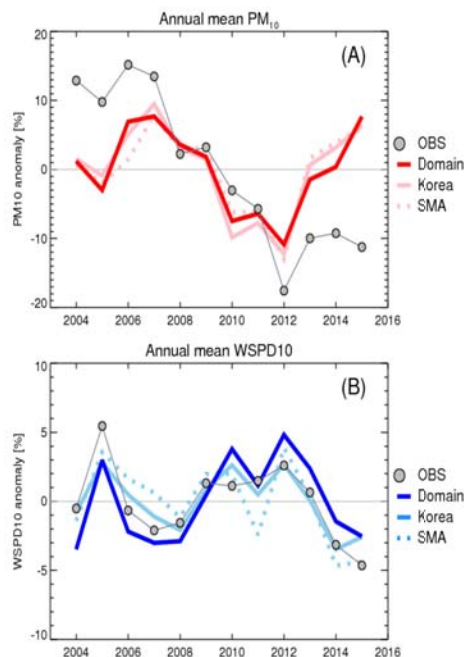


- Air pollutants lowered by **25-83%** since 2013
- Measures include controls on coal-fired boilers, cleaner domestic fuels, and industrial restructuring
- PM_{2.5} concentrations in Beijing still **exceed** levels recommended by WHO



Mr. Liu Jian, UN Environment's Chief Scientist, said the results reflected the Chinese Government's emphasis on environmental protection and the input and intensity of pollution control in recent years

미세먼지와 풍속의 연도별 변화

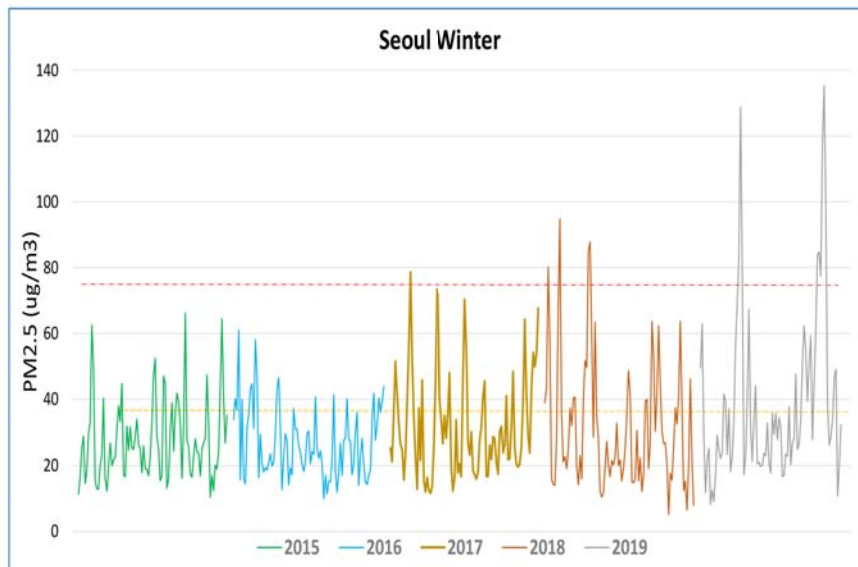


서울의 년평균 미세먼지농도와 풍속

2014	2015	2016	2017	2018	
23.7	23.1	26.2	24.7	22.9	μg/m ³
809	792	992	1233	1284	mm
2.6	2.7	2.3	2.2	1.7	m/sec

[Kim, ..., Park et al., 2017]

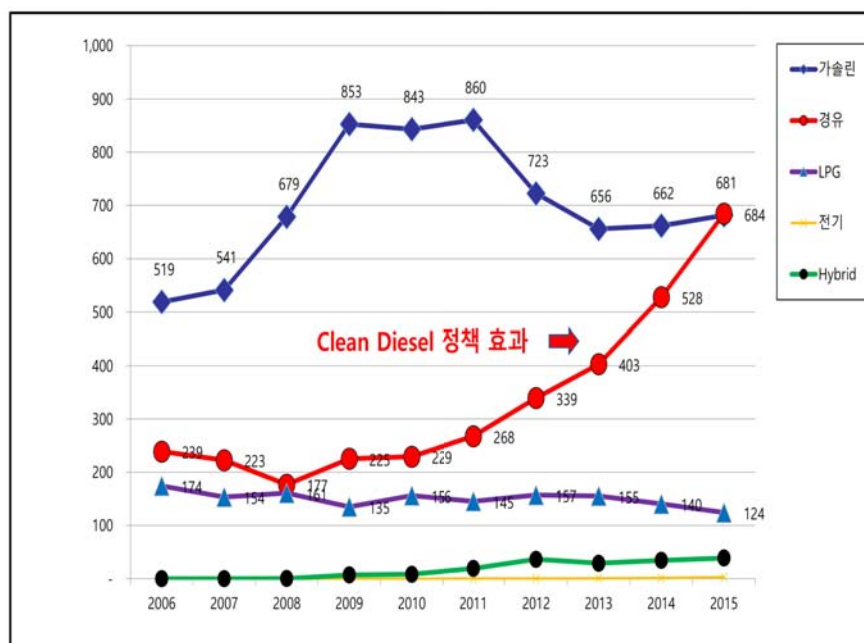
[출처: 서울대 박록진교수]



		2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
	Avg =	25.1	26.3	30.2	31.5	39.0
	Stdev =	11.6	10.4	14.7	18.5	25.8
나쁨	> 35	13	14	22	25	23
매우 나쁨	> 75	0	0	1	4	9

[출처: GIST 김영준교수]

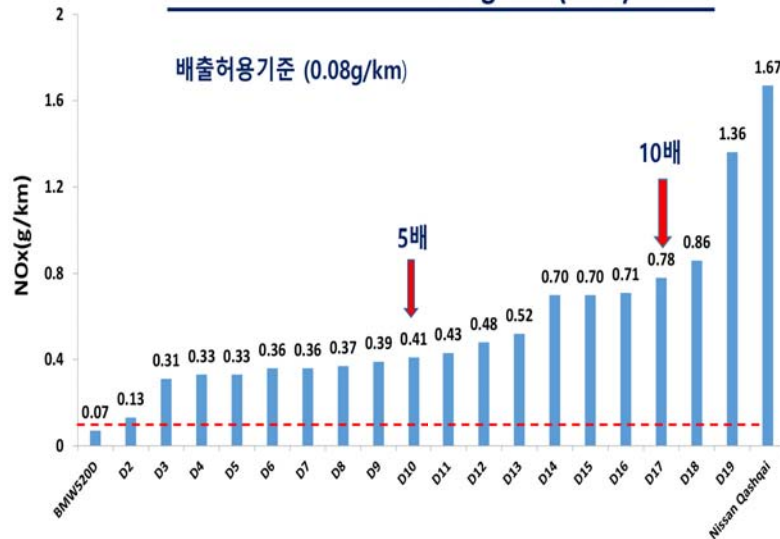
연료별 자동차 신규 등록대수



[출처: 한국자동차환경협회 2016]

Volkswagen Scandal (2015. 9)

Diesel vehicle road driving test (NOx) - 2016



[출처: 국립환경과학원]

보도자료

배포일자	2019. 4. 17.(수)	보도일시	2019. 4. 17.(수) 14시 이후	
제 공	홍보담당관실(2011-2491)	담당부서	국토해양감사국 제3과	총12대

환경부는 2018년 초미세먼지의 주요 원인 물질인 **산업시설**의 질소산화물 배출량이 연간 39만 톤(2015년 기준)이라고 발표하였으나

- 감사결과, 부생(副生)가스' 등의 연소에 따른 배출량과 도
서지역 소규모 발전시설의 배출량 등 연간 11만여 톤(추
산치)의 배출량이 누락되어 관리가 이루어지지 않고 있
었으며,

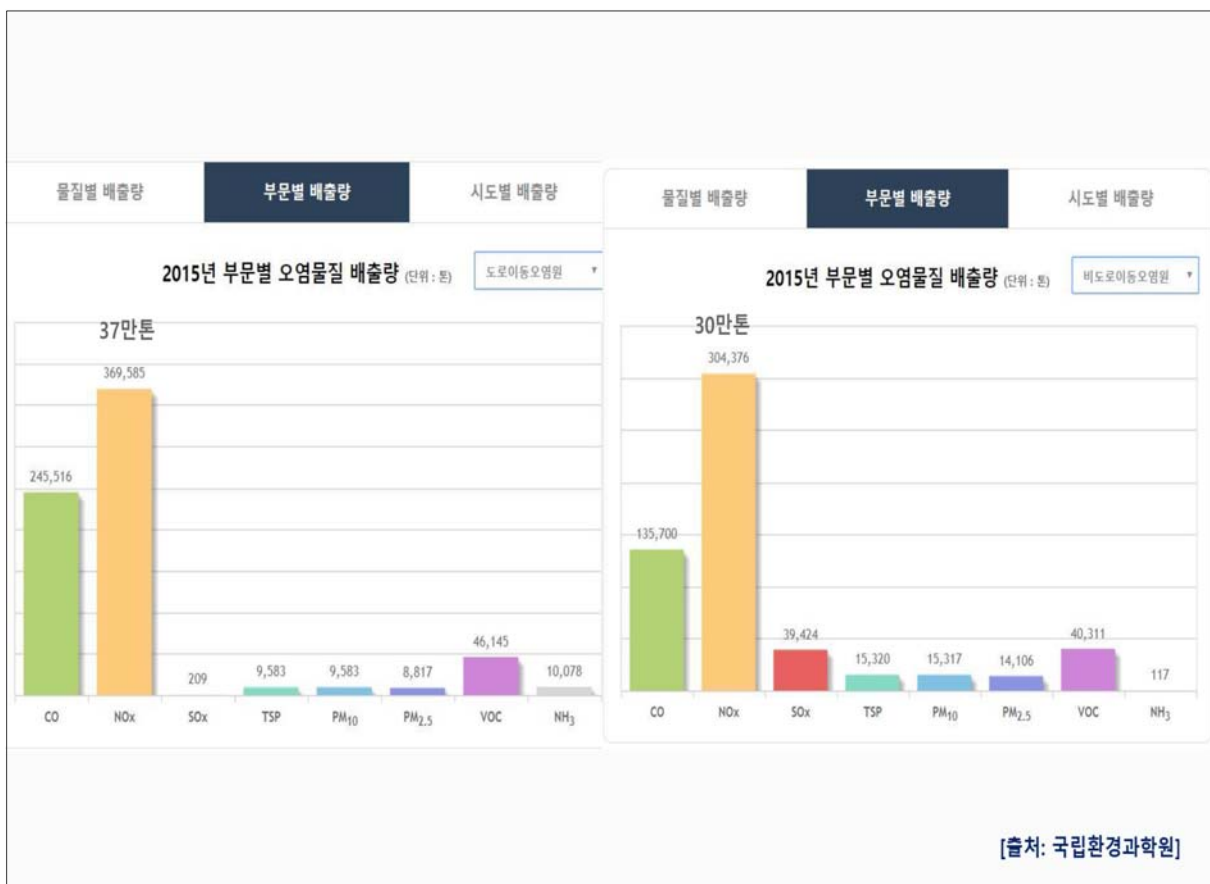
* 철강 생산공정 등에서 발생하는 코크스가스, 고로가스 등
※누락된 11만 톤을 포함하면 실제 질소산화물 발생량은 연간 50만
톤 수준(2015년 기준)인 것으로 추산

LG·한화 여수공장, 미세먼지 물질 배출량 속였다

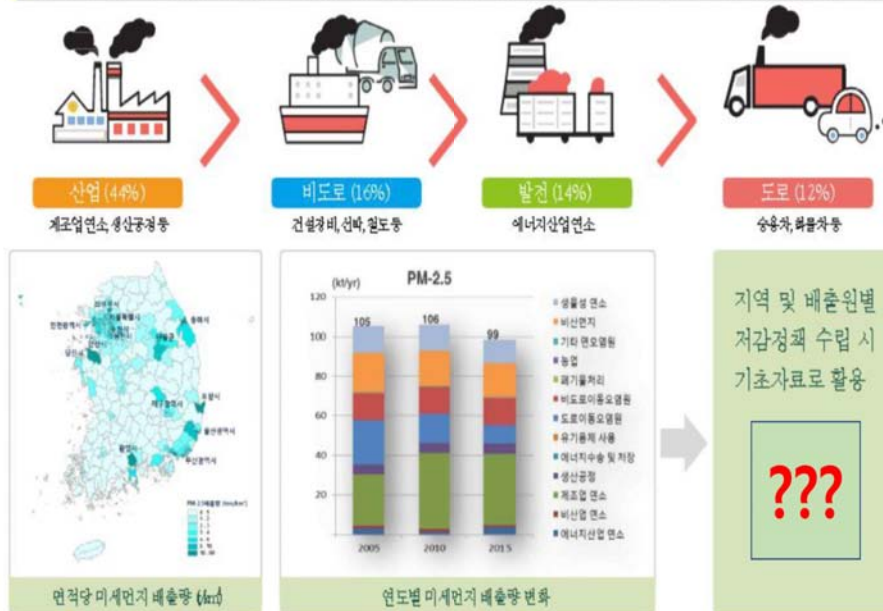
日期: 2019-04-17 15:00



열지(IG)화학이 화학계탈 2000-전년 기업 화학기업업이 4년 동안 특정대상업체와 제고 이세언자를 유발하는
오염물질의 배출 총량기준을 1033건 이상 초과한 것으로 드러났다. 배출 허용 기준을 최대 173분의 1 수준으로
소한 열지화학은 "관련 시설을 폐쇄하겠다". 화학계탈은 "절감 조사에서 소량화했다"고 밝혔다. ▶관련기사 5면



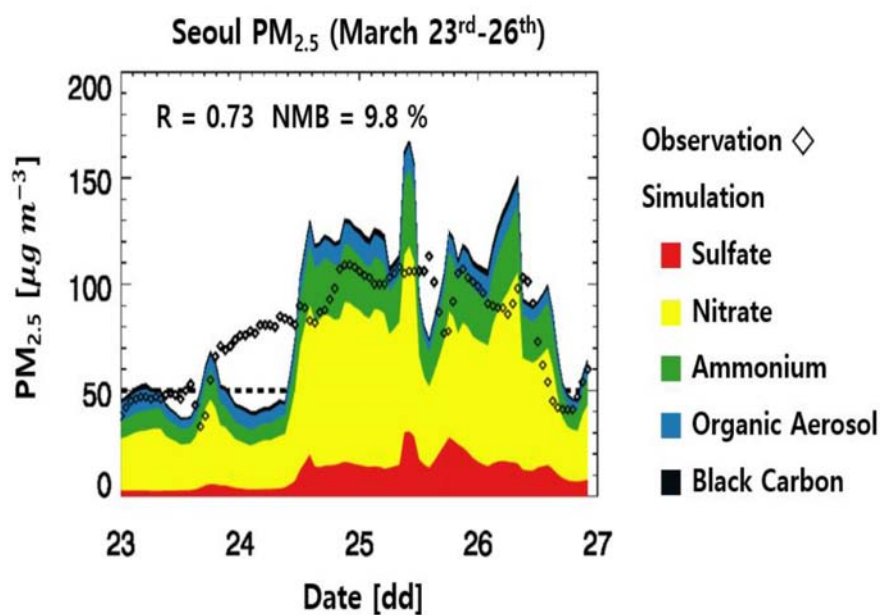
국내 미세먼지 배출량 기여율 (2015년)



2차 생성 PM_{2.5} 산출식 = $0.079 \times (\text{NO}_x \text{배출량}) + 0.345 \times (\text{SO}_x \text{배출량}) + 0.024 \times (\text{VOCs 배출량})$ 근거 ???

[출처: 국립환경과학원]

서울의 미세먼지농도 모델링 (2018년 3월 23-27일)



[출처: 서울대 박록진교수]

시사점

- 배출량 통계의 불확실성이 높고, 특히 암모니아, 아민, VOCs 성분별 배출량 부재
- 초미세먼지의 45%에 달하는 2차생성유기입자의 전구물질에 관한 배출자료 부재
- 대기 중에서의 NPF(New Particle Formation) process에 대한 fundamental 대기화학 연구 부재
- 대학에 AMS(입자질량분석기)와 같은 고가 첨단측정장비 부재 (중국 CAS/IAP는 AMS 7대 운영)
- 박사급 고급 측정기술 인력이 절대 부족 (국립환경과학원, 국립기상과학원)
- 2차생성입자 모델링의 한계 (전구물질 배출량, 실험연구, 이론연구, 현장관측실험 등으로 개선)
- 효과적인 PM2.5 저감정책 수립을 위한 기초자료 부실

미세먼지의 과학적 과제 결언

1. 대학에 첨단 gas/particle 측정기기 도입 지원과 측정기기 개발연구 지원
2. 대학에 fundamental 대기화학 연구 지원 (실험연구, 이론연구, 모델연구)
3. 국가 배출량 산출역량의 강화 (VOCs, 암모니아, 아민 등의 측정과 배출관리제도의 개선)
4. 다양한 research platform (항공/위성관측, 지상종합관측, remote site 장기관측) 지원
5. 장기관측데이터와 piecewise 실험/관측데이터를 모두 수집하여 재분석할 수 있는 big data 관리기구 필요
6. 사회적 현안을 해결하기 위한 big data 와 AI(인공지능) 접목 통합모델링 연구 지원
7. 외국의 저명한 대기화학자들을 초빙, 공동연구 수행으로 국내 대기화학 연구역량을 강화
8. 국제공동 관측/실험 연구의 확대와 지원 예산의 경직성 완화 (글로벌화) 필요
9. 대학이 운영하는 장기관측소와 실험실의 지속성 확보 (현재는 담당교수 퇴임 후 지속불가)
10. 미국의 NCAR(국가대기과학연구소)와 같은 gas/particle의 화학반응부터 기후변화와 사회적 영향까지 총괄하는 국가 대기과학/대기화학 종합연구기관의 설립 필요

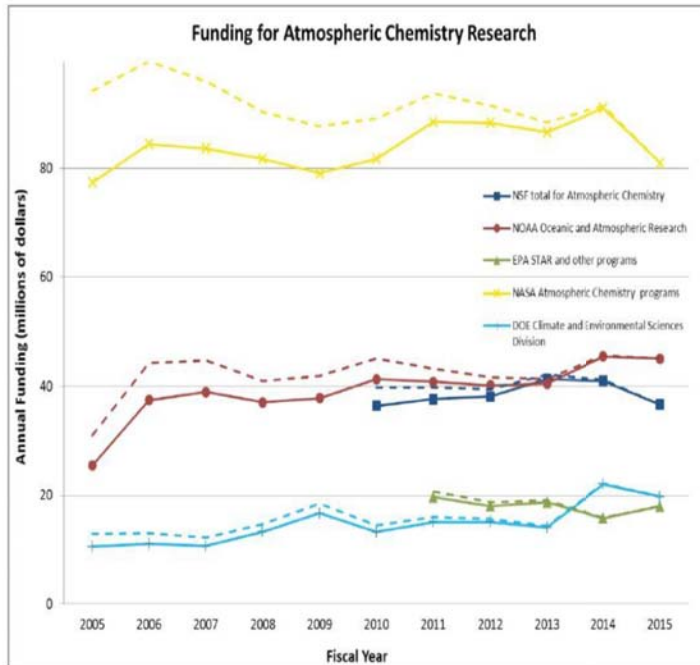
감사합니다

-끝-

Supplements

- ☐ 미국의 대기화학 연구비 통계
- ☐ 고산 관측자료 (AERONET, NOAA, AGAGE)

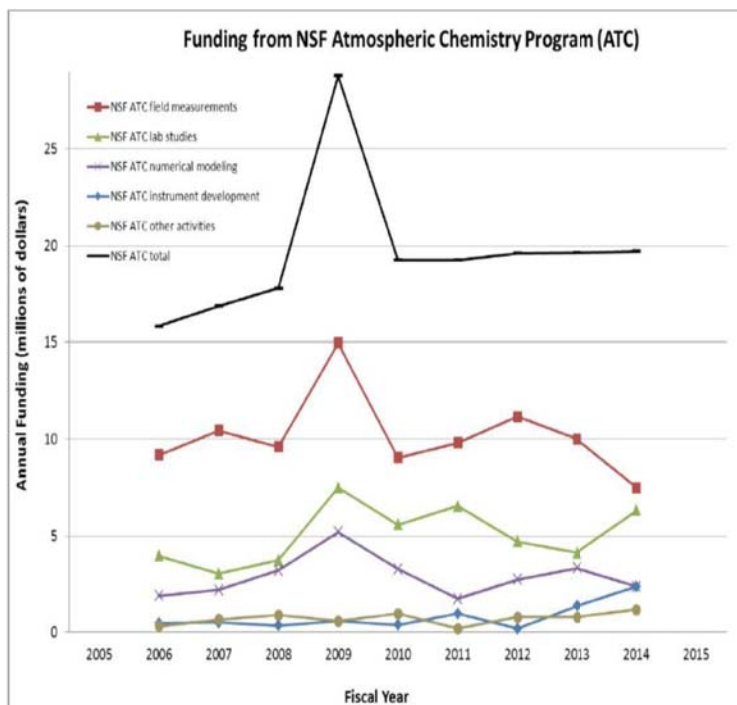
미국의 대기화학 연구비 (2005-2015)



[그림 설명] Millions of U.S. dollars spent on atmospheric chemistry research each year by NSF through the Atmospheric Chemistry Program (ATC) and other sources, NOAA Office of Oceanic and Atmospheric Research, EPA (a sum of Science to Achieve Results [STAR] and other programs), NASA Atmospheric Chemistry programs, and DOE Climate and Environmental Sciences Division between fiscal years 2005–2015. Corresponding dashed lines indicate funding adjusted for inflation (shown in 2015 dollars).

Aggregate budget and funding information were provided through personal communication with representatives from NSF, EPA, NOAA, DOE, and NASA, and data were subject to availability.

미국 과학재단(NSF)의 대기화학 영역별 연구비



[그림 설명] Annual funding in millions of U.S. dollars for the NSF Atmospheric Chemistry Program (ATC) that has been allocated to field measurements (red line), laboratory research (green line), numerical modeling studies (purple line), instrument development or facilities and infrastructure (dark blue line), and "other" projects (brown line) between fiscal years 2005–2015.

Note the peak in NSF ATC total funding in 2009 corresponds to a one-year increase provided by Recovery Act stimulus funding.

Gosan Observatory



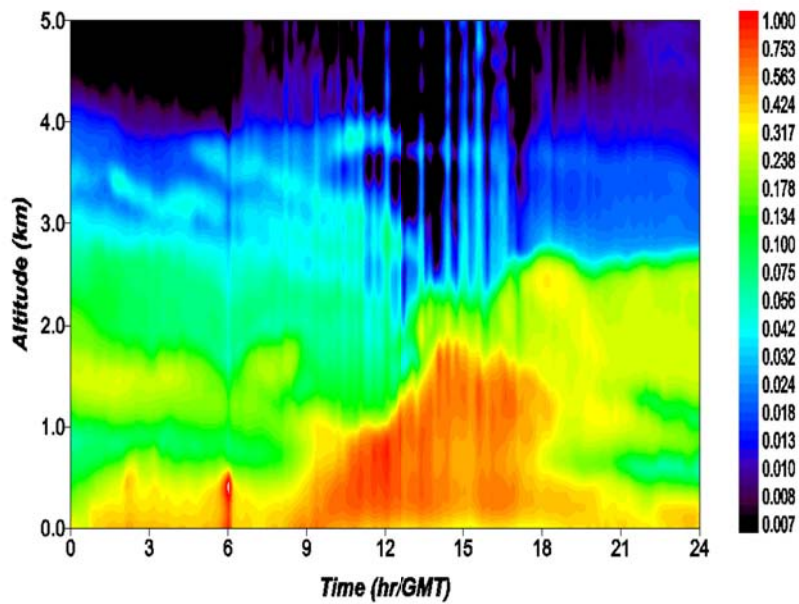
Micro Pulse Lidar
(Single channel 523.5 nm)

NASA MPL-NET
(<http://mpinet.gsfc.nasa.gov/>)
Operating at Gosan since 1998

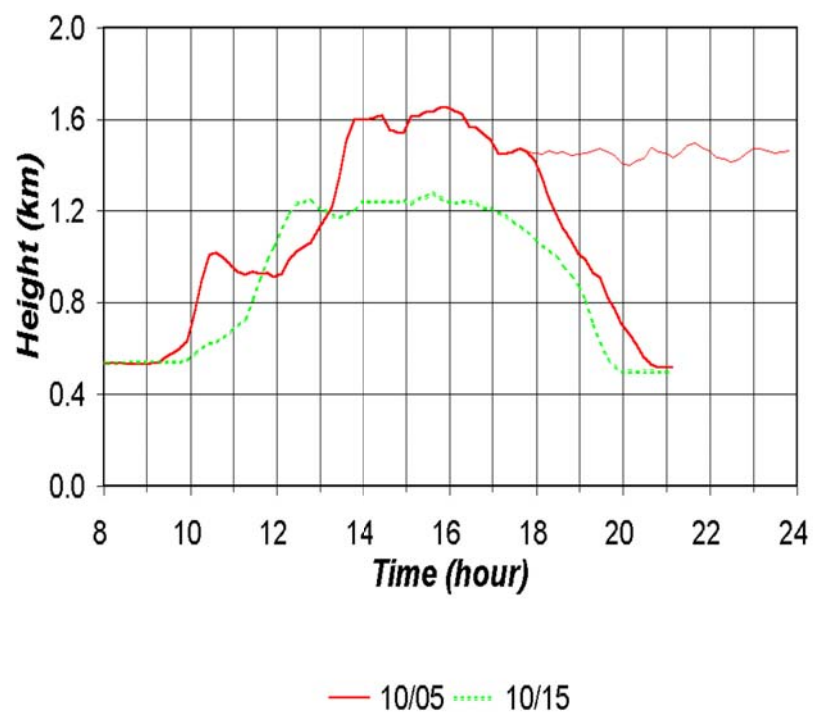
Compact Mie-scattering Lidar
(532 & 1064 nm : 532nm - depolarization)

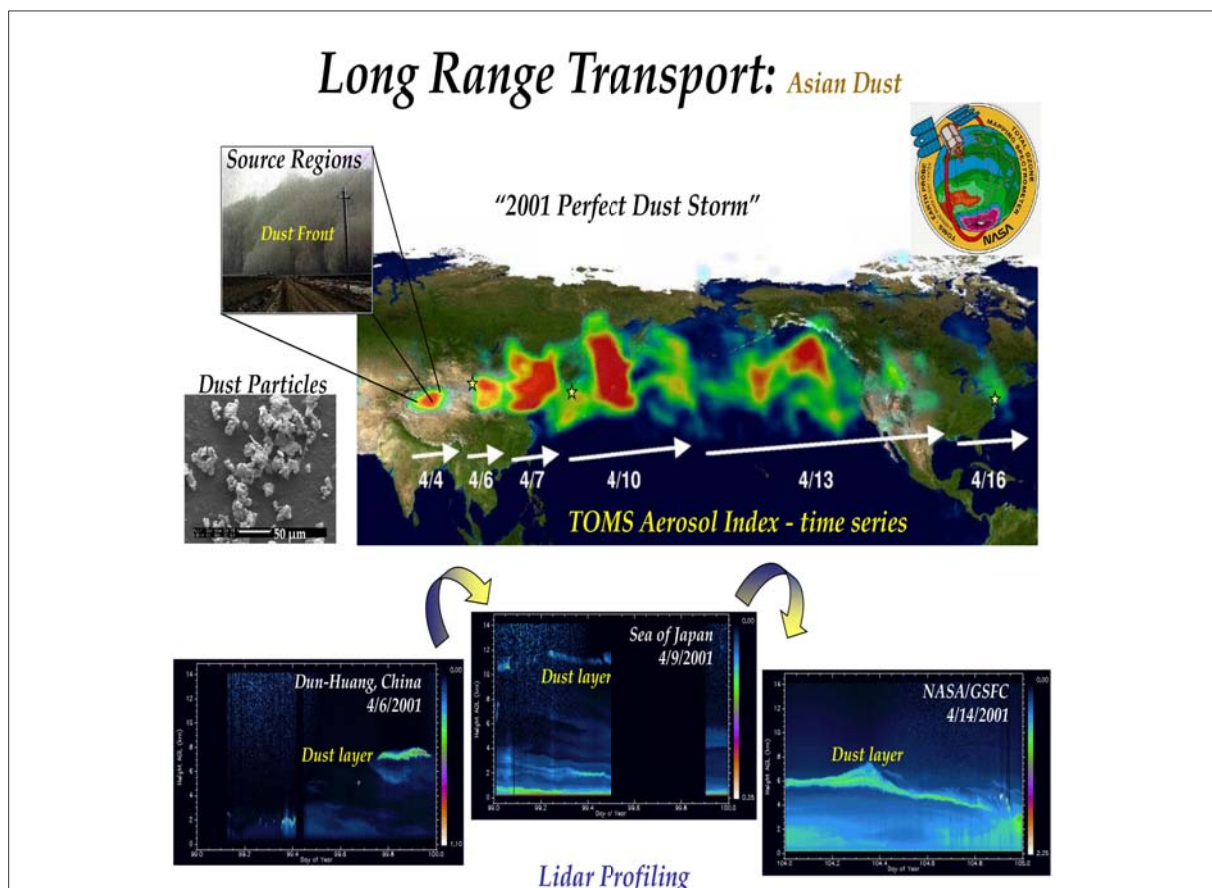
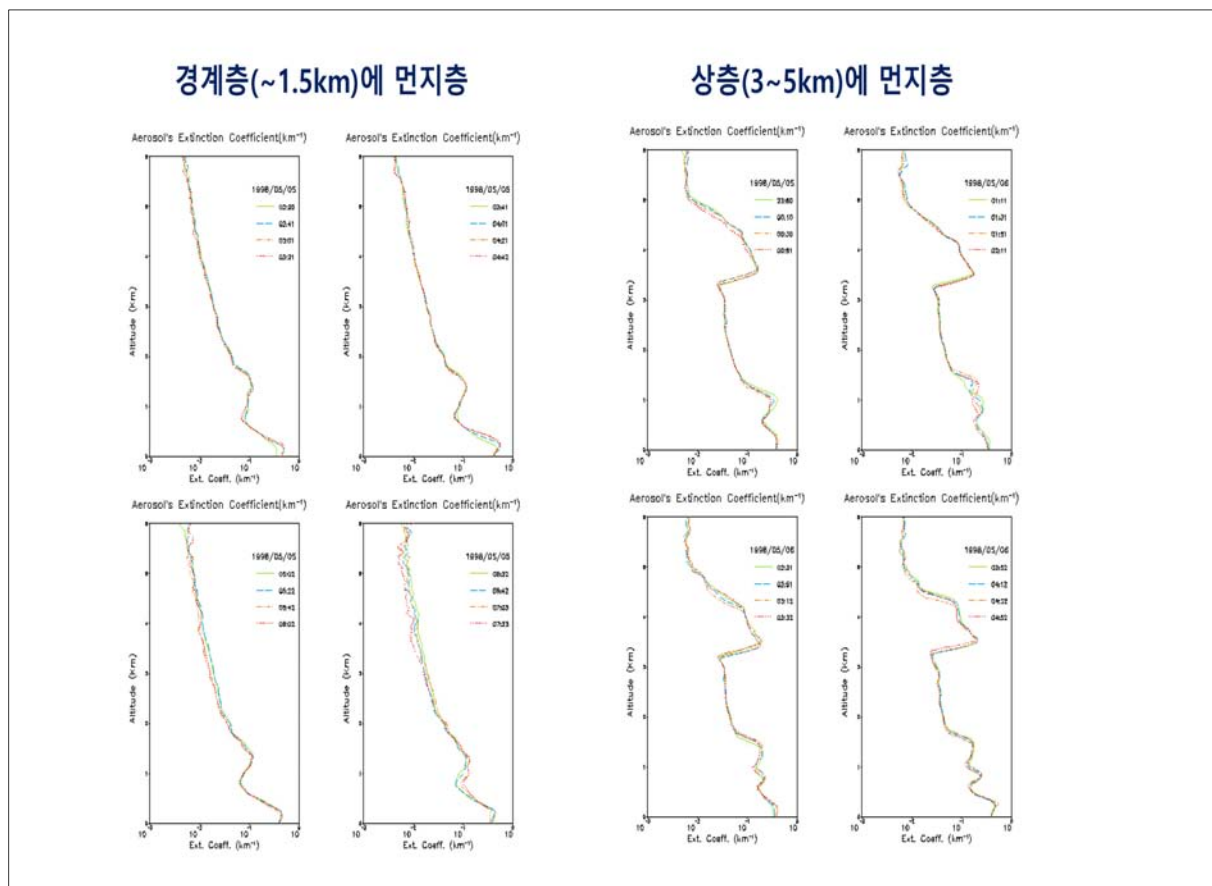
NIES-NET
(<http://www-lidar.nies.go.jp/>)
Operating at SHU campus, Seoul

Aerosol Extinction Coefficient (/km)
(1997/09/30, SNU, Seoul)



Mixed Layer Height (일변화)





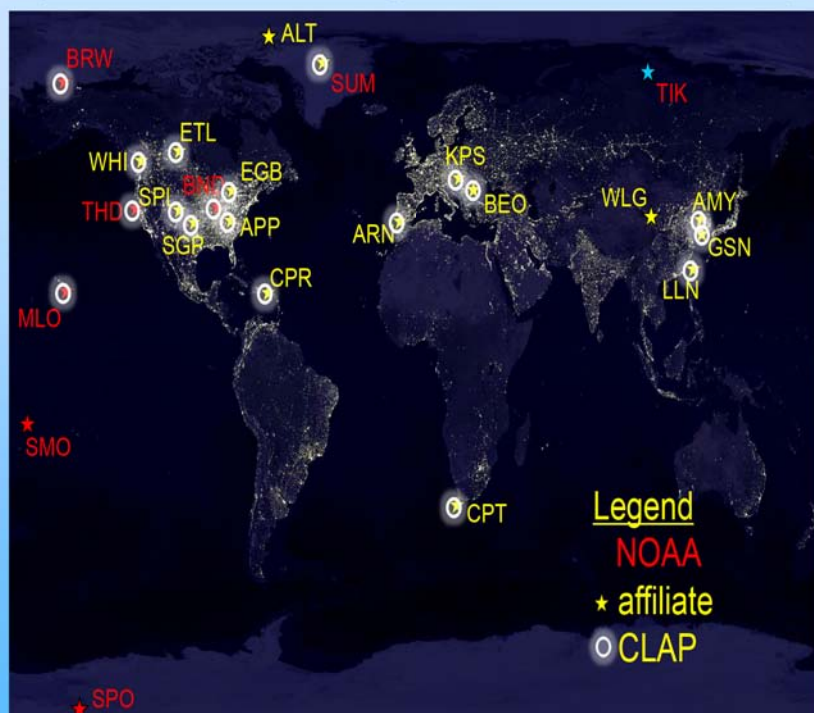
Radiation Instruments at Gosan

Radiation Platform

By 윤순창/김상우(서울대)



NOAA-federated Long-term Aerosol Network

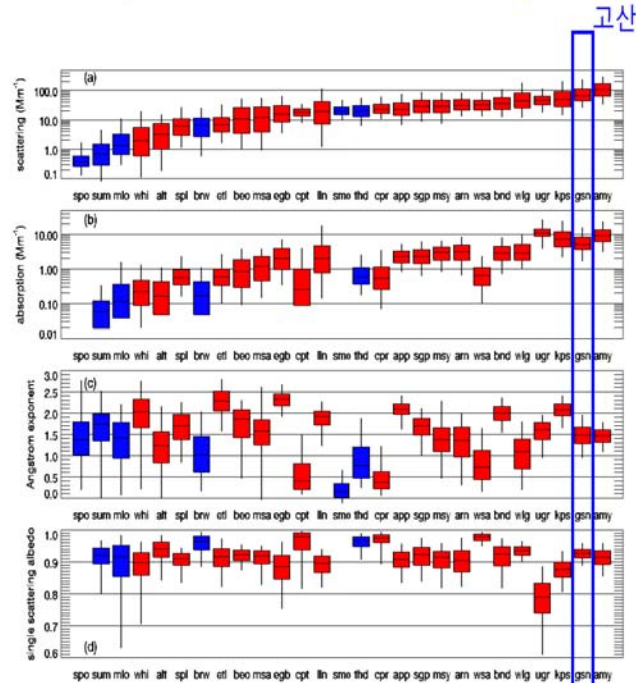


June, 2012

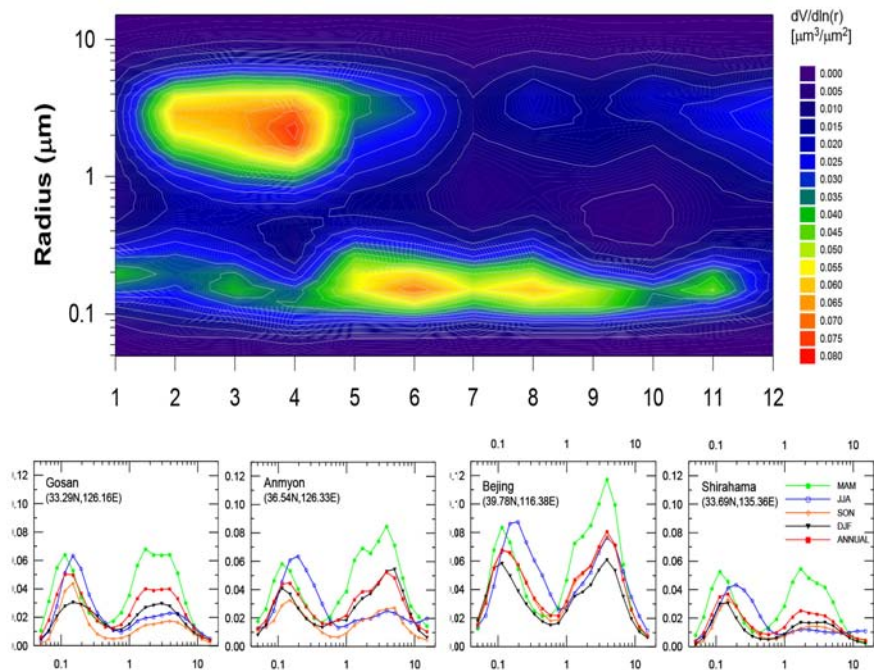
[출처: J. Ogren, NOAA/GMD]



Aerosol scattering and absorption Properties (NOAA Federal Aerosol Network)



Monthly variation of aerosol volume size distribution (AERONET Sun/sky radiometer, Gosan, 2001-2006)



[Kim & Yoon, 2007]

Gas Instruments at Gosan

Gas Lab.

By 김경렬(서울대)/박선영(경북대)



LOFLO NDIR CO₂ Analyzer (continuous, since 2007)

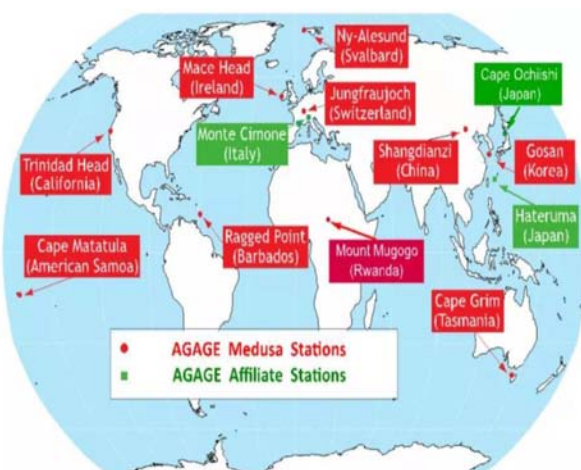


Medusa GC-MS: Measurement of ~40 species of halocarbons (CFCs, HCFCs, HFCs, PFCs, SF₆, etc.)
Operated since Nov., 2007



Advanced Global Atmospheric Gases Experiment

Sponsored by NASA's Atmospheric Composition Focus Area in Earth Science



“AGAGE is distinguished by its capability to measure over the globe at high frequency almost all of the important species in the Montreal Protocol to protect the ozone layer and almost all of the significant non-CO₂ gases in the Kyoto Protocol to mitigate climate change.” (AGAGE brochure)

LETTER

23 MAY 2019 | VOL 569 | NATURE | 549

https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4

Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations

M. Rigby^{1,2,3}, S. Park^{1,2,3,4}, T. Saito^{1,2,3}, L. M. Western^{1,2,3}, A. L. Redington^{1,2,3}, X. Pang^{5,6,7}, S. Henne⁸, A. J. Manning⁹, R. G. Prinn⁵, G. S. Dutton¹⁰, P. J. Fraser¹¹, A. L. Ganesan¹², B. D. Hall¹³, C. M. Harth¹⁴, J. Kim¹⁵, K.-R. Kim¹⁶, P. B. Krummel¹⁷, T. Lee¹⁸, S. Li¹⁹, Q. Liang²⁰, M. F. Lunt²¹, S. A. Montzka²², J. Mühle²³, S. O'Doherty²⁴, M.-K. Park²⁵, S. Reimann²⁶, P. K. Salameh²⁷, P. Simmonds²⁸, R. L. Turnnicle²⁹, R. F. Weiss³⁰, Y. Yokouchi³¹ & D. Young³²

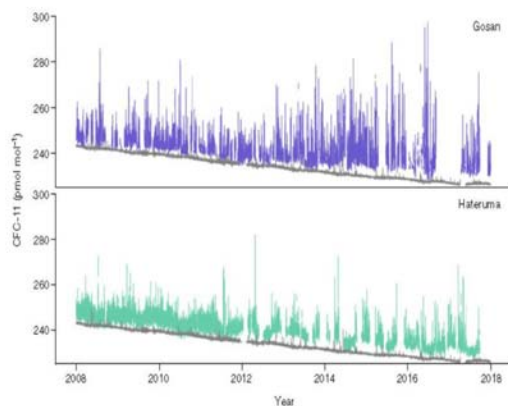


Fig. 1 | Observations of atmospheric CFC-11 at Gosan and Hateruma. Dry-air mole fractions measured for CFC-11 in discrete air samples at Gosan, Jeju Island, South Korea (33.3°N, 126.2°E) and Hateruma, Japan

(24.1°N, 123.8°E). The grey lines show the mole fraction observations at Cape Grim, Tasmania, Australia (40.7°S, 144.7°E) for comparison.

중국발 미세먼지 이어...이젠 프레온가스

입력 2019.05.23 02:00 | 수정 2019.05.23 09:52 | 지면 A2

박선영 경북대 교수팀 밝혀

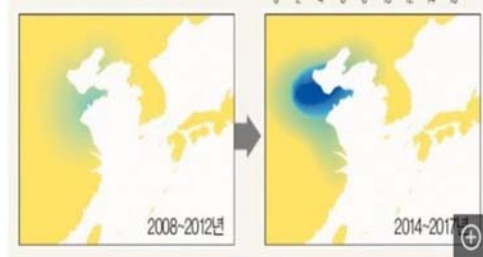
국제적으로 생산·사용 금지됐지만

중·동부지역서 年 7000t 배줄

10년간 추적해 네이처에 게재

국제적으로 생산과 사용이 금지된 프레온가스(CFC-11)가 중국에서 매년 수천t씩 발생하고 있는 것으로 나타났다. CFC-11은 오존층을 파괴해 지구 생태계를 교란하는 물질이다.

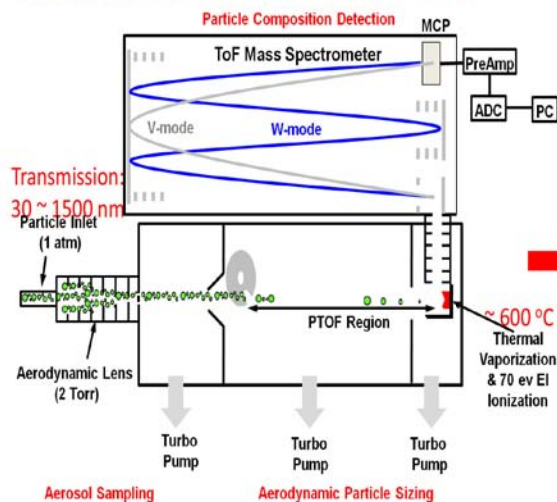
중국 동부지역의 CFC-11 배출 농도 변화



한국연구재단은 박선영 경북대 지구시스템과학부 교수 연구팀이 이 같은 사실을 확인해 네이처지 23일자에 게재했다고 22일 밝혔다.

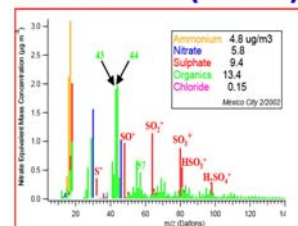
Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer (AMS)

High Resolution Time-of-Flight AMS (HR-ToF-AMS)

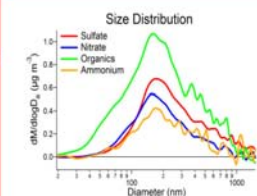


Jayne et al., *AST*, 2000; DeCarlo et al., *Anal. Chem.* 2006

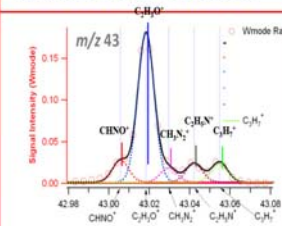
- Real-time measurement (sec – min resolution)
- Extreme sensitivity/Universal detection/Field deployable
- Non-refractory submicron PM (NR-PM₁)



1. Quantitative composition



2. Size-resolved composition



주제발표 2

II

국가 미세먼지 대응의 방향과 과제

안 병 옥

국가기후환경회의 운영위원장

발제자 약력

성 명	안 병 옥	
소 속	미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후환경회의	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위
1980 ~ 1984	서울대학교 자연과학대학 해양학과	이학사
1984 ~ 1986	서울대학교 자연과학대학 해양학과	이학석사
1992 ~ 1998	독일 뒤스부르크-에센대학 응용생태학부	디플롬(Diplom)
1998 ~ 2002	독일 뒤스부르크-에센대학 응용생태학부	이학박사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
2019 ~ 현재	국회기후변화포럼 부설 기후변화정책연구소	소장
2019 ~ 현재	호서대학교 융합과학기술학과	특임교수
2017 ~ 2018	환경부	차관
2016 ~ 2017	기상청 정책평가위원회	위원
2015 ~ 2017	아시아기후변화교육센터 (ACCEC)	이사
2014 ~ 2017	시민환경연구소	소장
2007 ~ 2008	환경운동연합	사무총장
2007 ~ 2008	에너지시민연대	공동대표

발제 2

국가 미세먼지 대응의 방향과 과제

안 병 옥

국가기후환경회의 운영위원장

국가 미세먼지 대응의 방향과 과제

한국과학기술한림원 한림원탁회의

2019. 6. 28



미세먼지 문제 해결을 위한
국가기후환경회의
National Council on Climate and Air Quality

운영위원장 안 병 옥

발표순서

I 미세먼지 현황 및 영향 요인

II 정부 정책과 국민 인식

III 미세먼지 대응의 방향과 과제

IV 참고자료

1. 국가기후환경회의의 구성 및 활동계획
2. 에너지전환과 미세먼지 발생의 관계
3. 2019년 추경 효과 분석

I 미세먼지 현황 및 영향 요인

대기오염의 재발견

- 세계 인구의 90%가 대기오염의 위험에 노출
- 매년 700만명(매시간 약 800명)이 대기오염으로 조기 사망, 이중 60만명은 어린이
- 아시아에서는 매년 70세 미만 460만명이 대기오염으로 사망
- 대기오염 피해비용은 매년 5조 달러
- 지층의 오존 농도 증가로 2030년까지 농작물 수확량이 26% 감소할 것으로 전망

— 유엔 인권과 환경 고등판무관 (2019. 3. 4) / 유엔환경계획(UN Environment)



AIR POLLUTION DEATHS IN ASIA

4.6 mil. under-70s die annually from air pollution in Asia

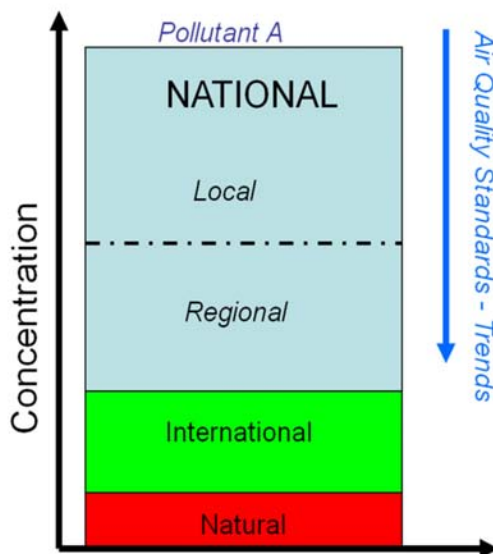
4

미세먼지 농도 결정의 3대 요인

1. 국내 배출

2. 국외 영향

3. 기상 조건



$$\text{농도} = f \left(\frac{\text{배출}}{\text{기상확산}} \right)$$

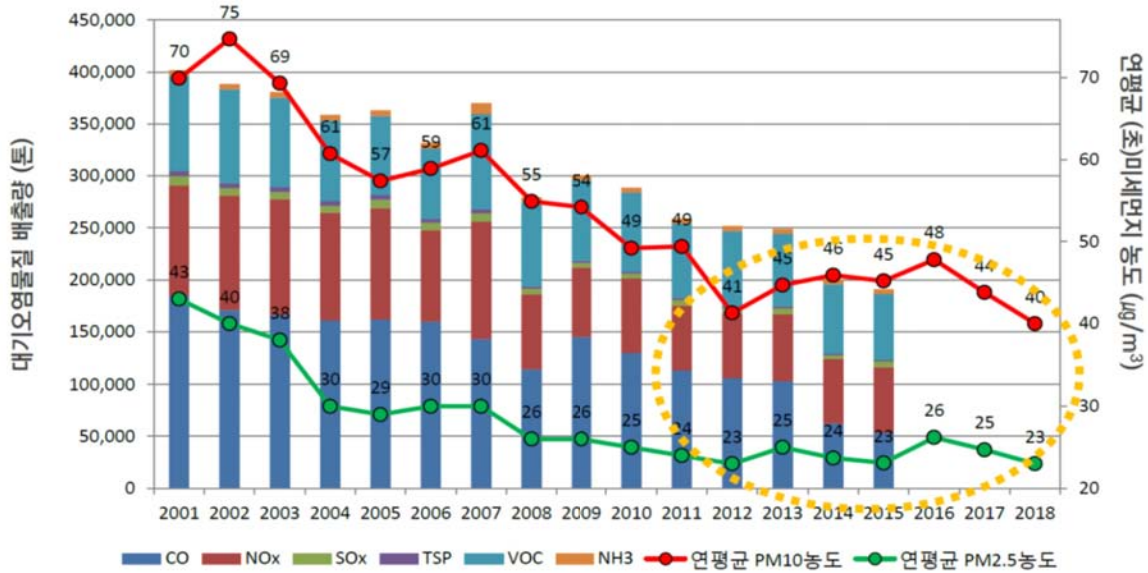
그리고...

화학반응 및
침적

출처: 우중헌 (2019), 중국, 북한 및 우리나라의 배출변화 경향

5

1. 국내 배출량 변화



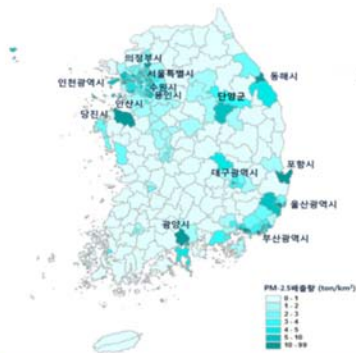
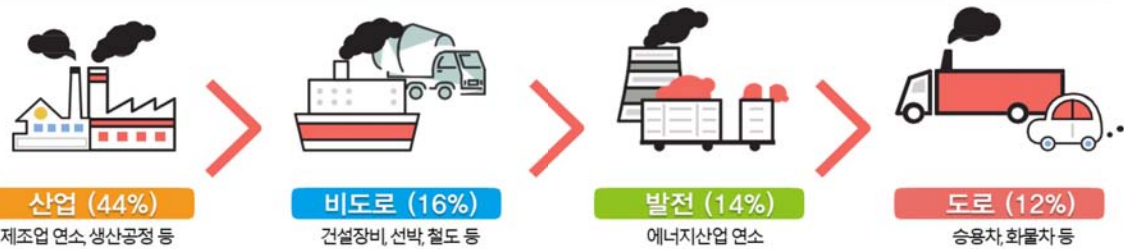
미세먼지 연평균 농도는 2001년 이래 개선 추세에 있으나,
기후·기상 여건의 악화로 고농도 발생 일수는 증가

PM2.5 농도 : 2016년 26μg/m³ → 2018년 23 μg/m³ vs. 고농도 발생 일수(50 μg/m³ 초과): 2016년 10일 → 2018년 18일

6

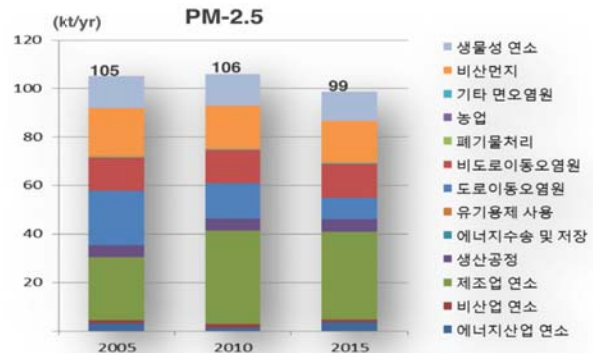
참고 – 국내 미세먼지 배출원

국내 미세먼지 배출량 기여율 (2015년)



면적당 미세먼지 배출량 (t/km²)

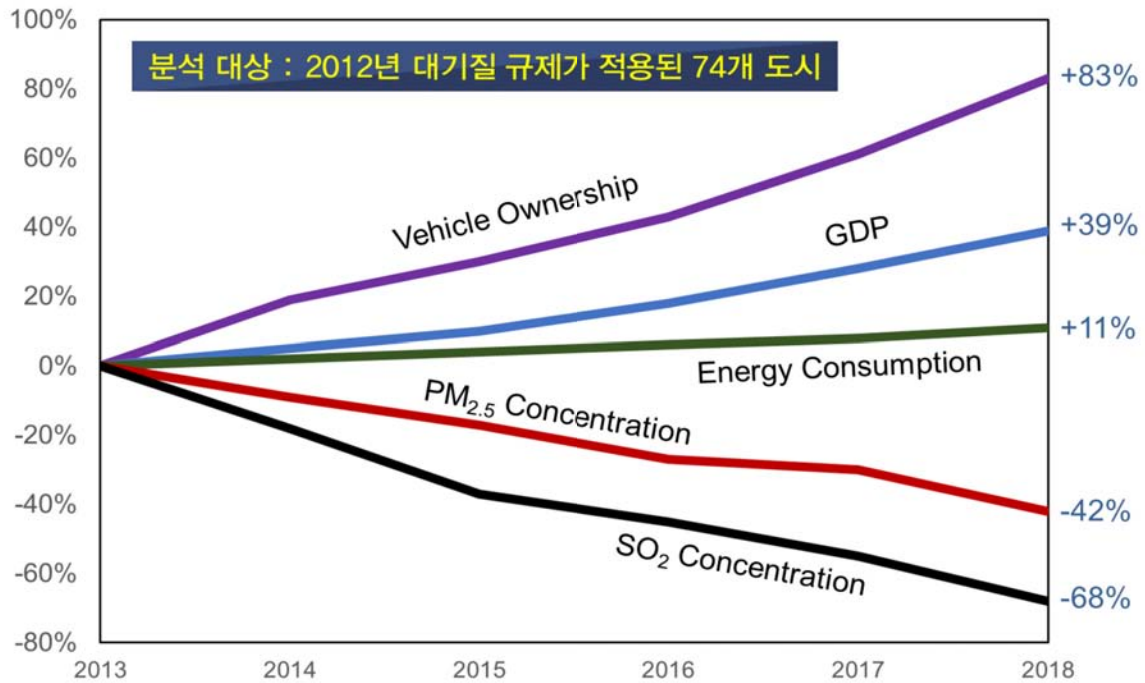
출처: 국립환경과학원(2019)



연도별 미세먼지 배출량 변화

7

2. 중국 PM_{2.5} 및 SO₂ 배출량 변화 (2013~2018)



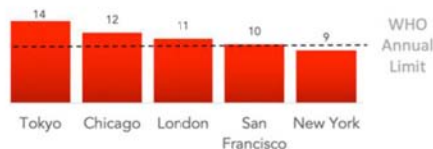
출처 : 중국 환경생태부 (2019), China Air Quality Improvement Report (2013~2018)

8

참고 - 중국 15개 도시의 PM_{2.5} 농도 (2018년 평균)



출처 : Smart Air



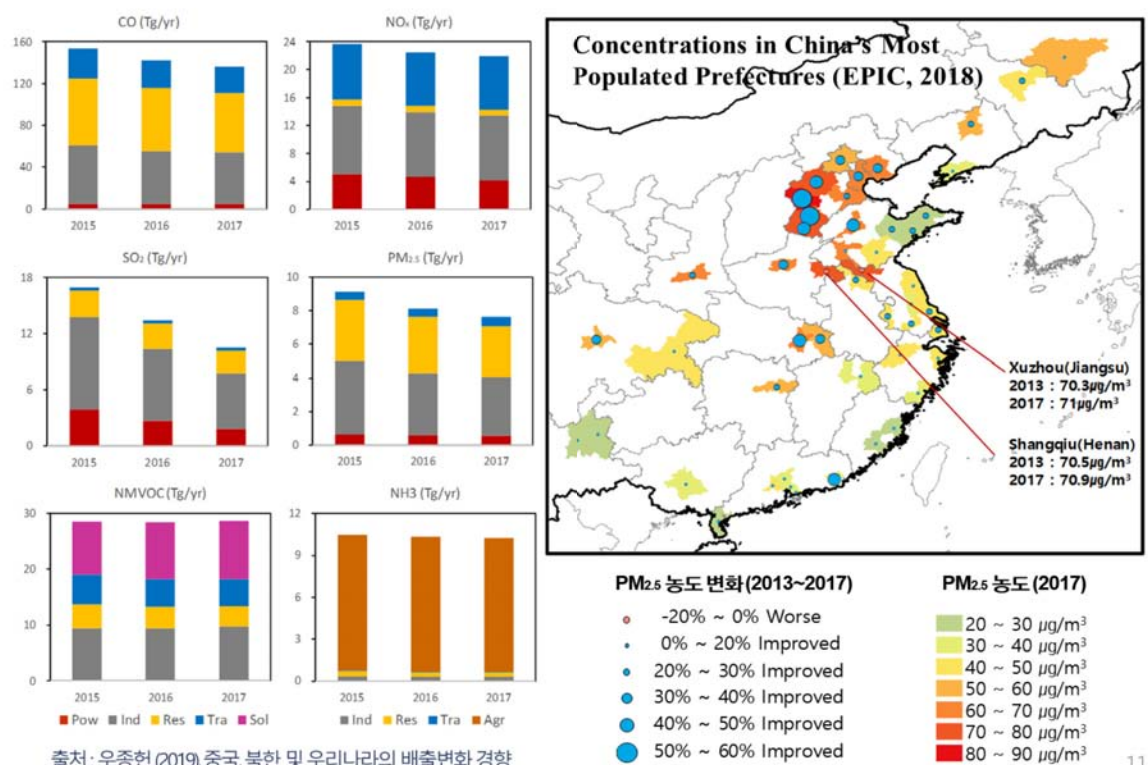
9

참고 - 2018년 국가별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 순위

1	Bangladesh	97.1	26	Chile	24.9	51	Puerto Rico	13.7
2	Pakistan	74.3	27	South Korea	24.0	52	Belgium	13.5
3	India	72.5	28	Serbia	23.9	53	France	13.2
4	Afghanistan	61.8	29	Poland	22.3	54	Germany	13.1
5	Bahrain	59.8	30	Croatia	22.2	55	Japan	12.0
6	Mongolia	58.5	31	Turkey	21.9	56	Netherlands	11.7
7	Kuwait	56.0	32	Macau	21.2	57	Switzerland	11.6
8	Nepal	54.2	33	Mexico	20.3	58	Russia	11.4
9	United Arab Emirates	49.9	34	Czech Republic	20.2	59	Luxembourg	11.2
10	Nigeria	44.8	35	Hong Kong	20.2	60	Malta	11.0
11	Indonesia	42.0	36	Cambodia	20.1	61	United Kingdom	10.8
12	China Mainland	41.2	37	Romania	18.6	62	Spain	10.4
13	Bosnia & Herzegovina	40.9	38	Israel	18.6	63	Portugal	10.3
14	Uganda	40.8	39	Taiwan	18.5	64	Ireland	9.5
15	Macedonia	35.5	40	Slovakia	18.2	65	USA	9.1
16	Uzbekistan	34.3	41	Cyprus	17.6	66	Canada	7.9
17	Vietnam	32.9	42	Lithuania	17.5	67	New Zealand	7.7
18	Sri Lanka	32.0	43	Hungary	16.8	68	Norway	7.6
19	Kosovo	30.4	44	Brazil	16.3	69	Sweden	7.4
20	Kazakhstan	29.8	45	Austria	15.0	70	Estonia	7.2
21	Peru	28.0	46	Italy	14.9	71	Australia	6.8
22	Ethiopia	27.1	47	Singapore	14.8	72	Finland	6.6
23	Thailand	26.4	48	Philippines	14.6	73	Iceland	5.0
24	Bulgaria	25.8	49	Ukraine	14.0			
25	Iran	25.0	50	Colombia	13.9			

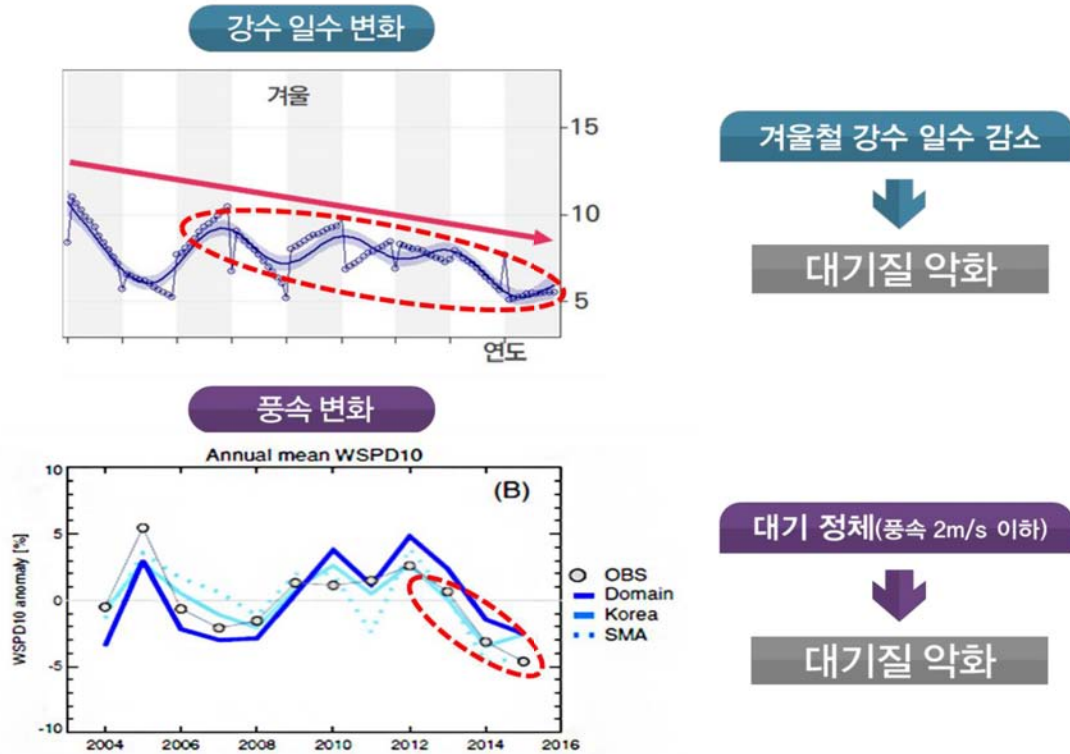
출처 : AirVisual(2019) : 2018 World Air Quality Report.

10

참고 - 중국 대기오염물질 배출량 및 PM_{2.5} 농도 변화

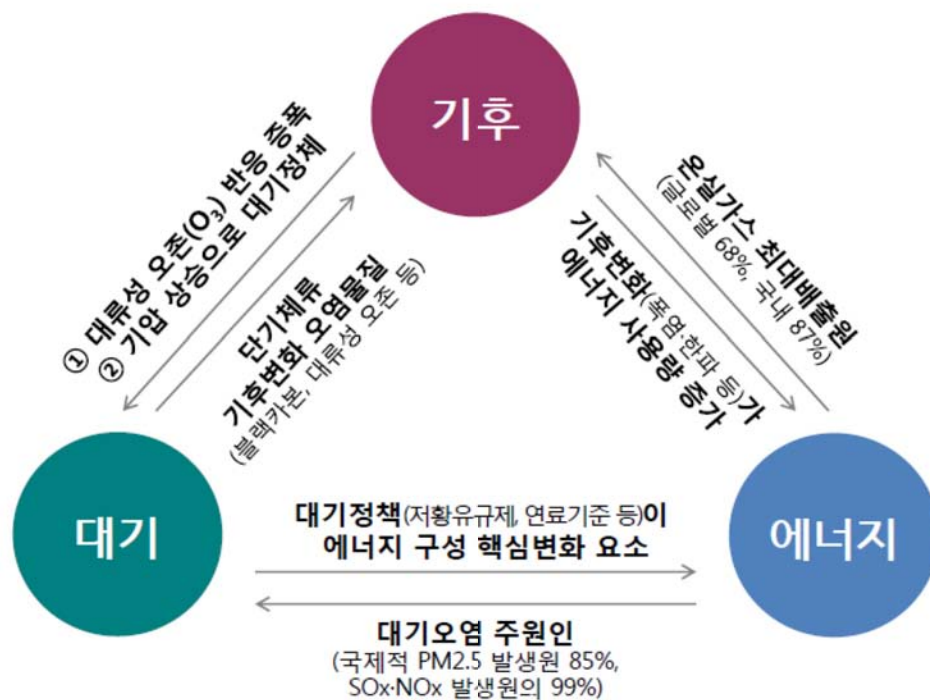
11

3. 기상 조건의 변화



12

참고 - 기후 / 대기 / 에너지 넥서스 (Nexus)

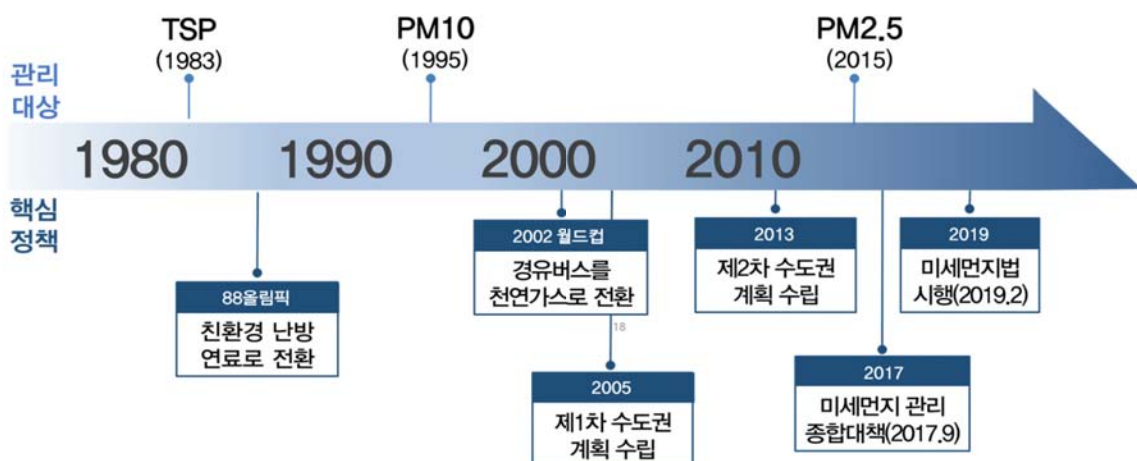


13

Ⅱ 정부 정책과 국민 인식

우리나라 대기정책의 발자취

- 88올림픽과 2002년 월드컵을 계기로 난방 및 수송 연료 대체를 추진하면서 특히 SO₂ 농도가 획기적 감소
- 사업장, 석탄발전, 경유차 등 국내 배출원의 지속적인 증가, 국외 영향 및 기후변화에 따른 대기정체 등이 복합적으로 작용하면서 미세먼지 문제 대두



미세먼지 대응 정책의 변화

과거

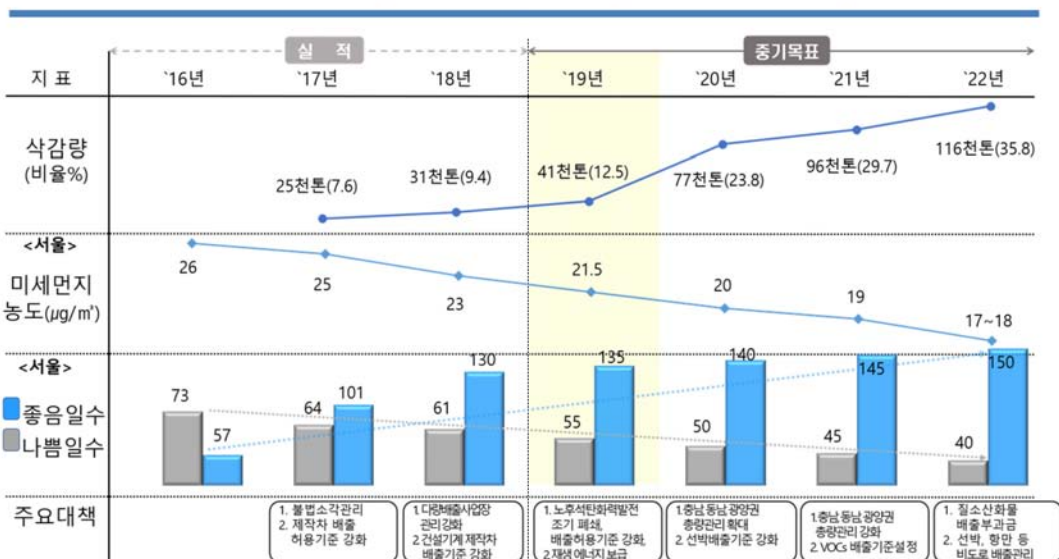
현재

감축	12% 목표	»»»»	35.8% 목표
성역	<ul style="list-style-type: none"> 경유차량 증가 석탄화력 증가 	»»»»	<ul style="list-style-type: none"> 클린 디젤 정책 폐기 석탄발전(공정률 10% ↓) 재검토
대응	환경부	»»»»	<ul style="list-style-type: none"> 범 부처, 범국가적 대응 〈국가기후환경회의, 미특위〉
중국	공동연구 중심의 협력사업 추진	»»»»	“불가능해 보이는” 협약체결 추진(약속)

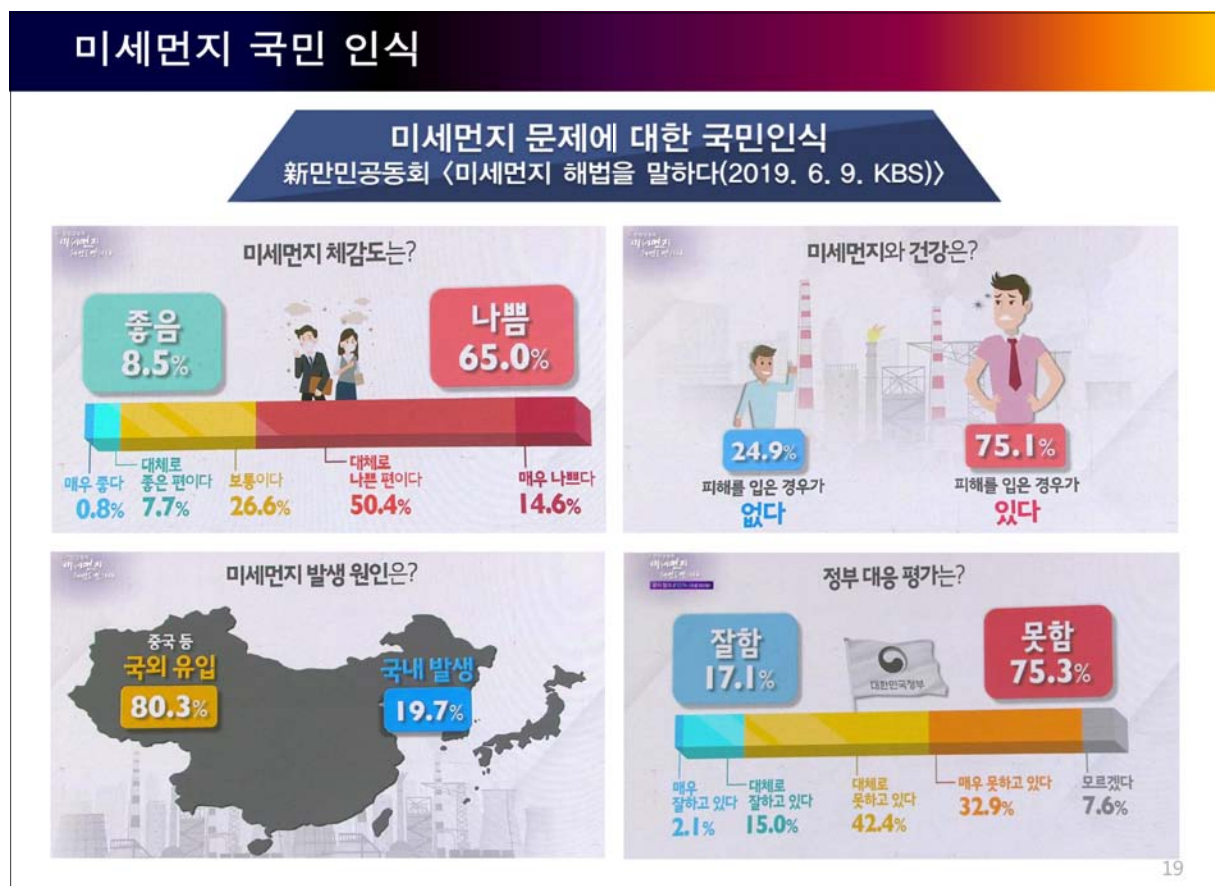
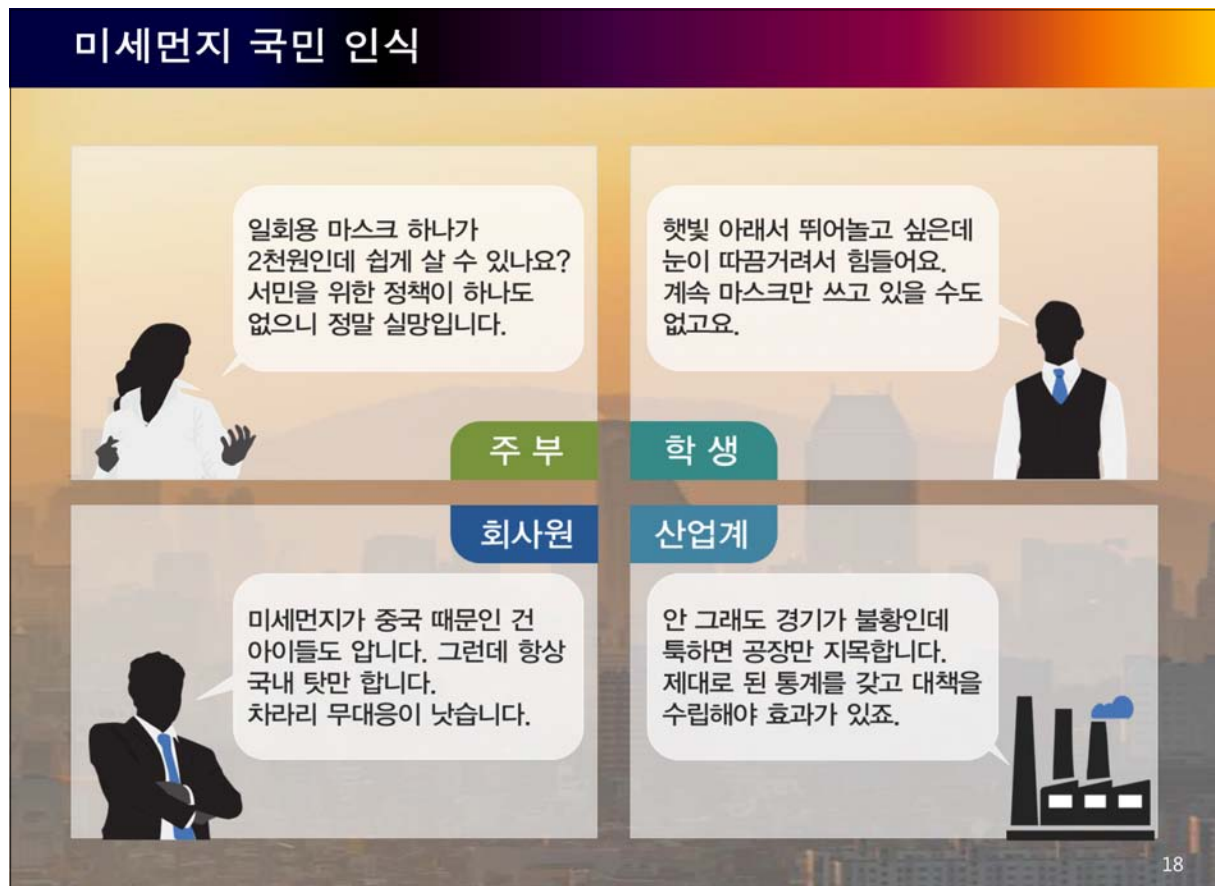
16

문재인 정부 미세먼지 개선 로드맵

목표	감축량	평균농도	나쁨일수	좋음일수
17년 ↓ 22년	116천톤 (35.8%)	25 17 ~ 18	64 40	101 150

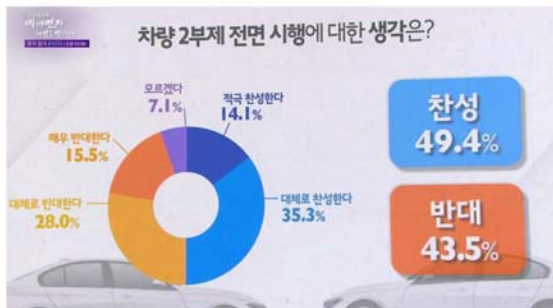
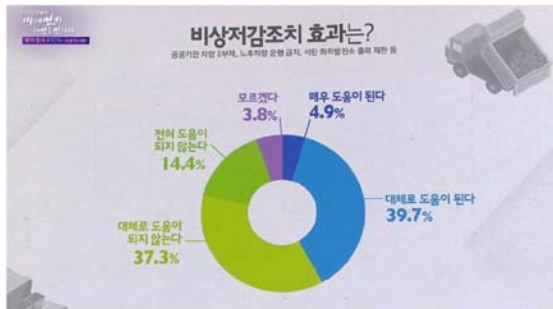


17



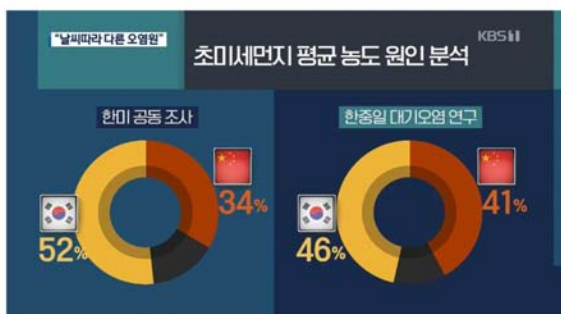
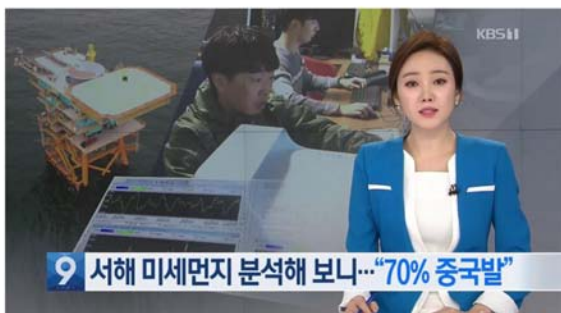
미세먼지 국민 인식

미세먼지 문제에 대한 국민인식 新만민공동회 〈미세먼지 해법을 말하다(2019. 6. 9. KBS)〉



20

국민 인식에 영향을 주는 요인



21

국민 인식에 영향을 주는 요인



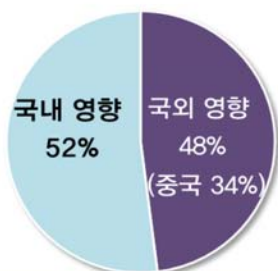
22

국내 미세먼지 농도에 대한 국내·외 기여율

- 국내 미세먼지 농도에 대한 국내·외 기여율은 시기, 공간적 범위, 분석방법에 따라 큰 변화를 보임
- 2019년 11월 한·중·일 환경장관회의에서 <동북아 장거리이동 대기오염물질에 대한 공동조사 보고서>가 발간되면 국내·외 기여율 논란은 상당 부분 해소 전망

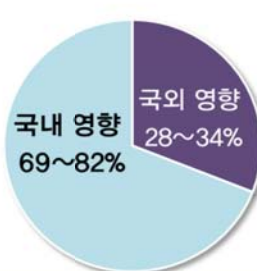
평상시

NASA 공동연구 KORUS-AQ
(2016.5~6)



고농도 발생 시기

국내 영향이 큰 사례
(2018.11)



국외 영향이 큰 사례
(2019.1)



- 최근 수년간 중국의 배출량이 감소했다는 사실을 감안하면 국외 기여율은 지금까지의 평가에 비해 다소 낮을 것으로 예상

23

III 미세먼지 대응의 방향과 과제

5대 핵심 과제



핵심 과제 1

과제 1

과학기술 기반 확충



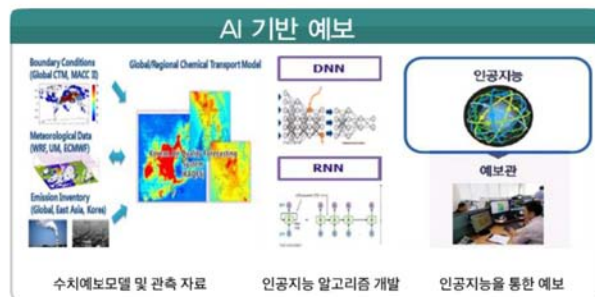
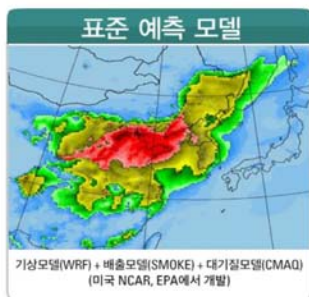
과학연구
(R&D) 강화



예보 방식 및
정확도 제고

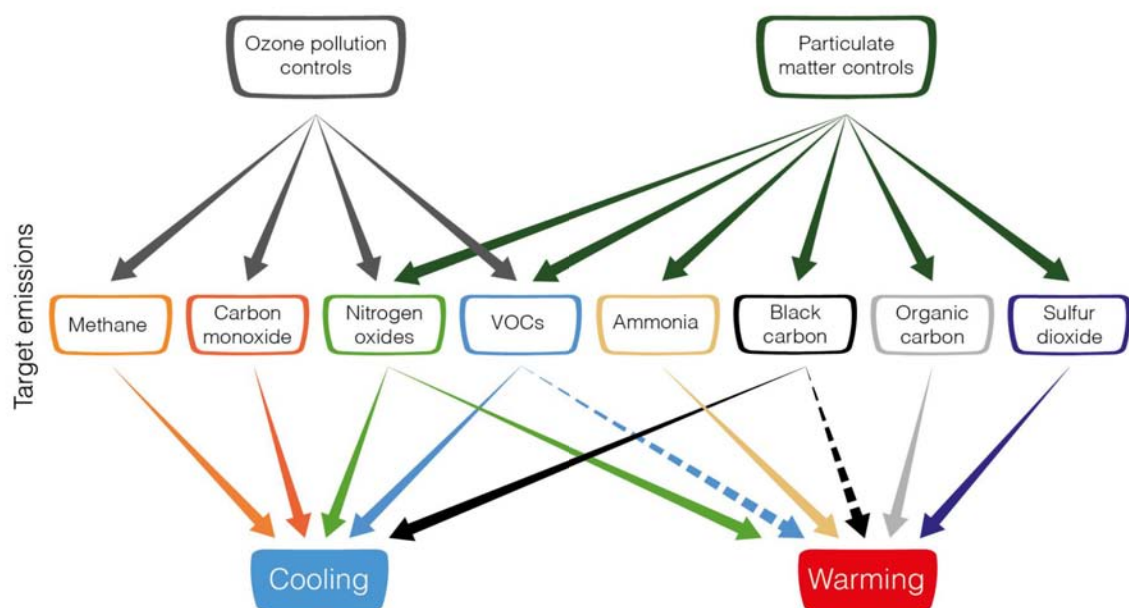


기후·대기 통합
연구체제 구축



26

참고 - 오존 및 PM 저감정책이 기후변화에 미치는 영향

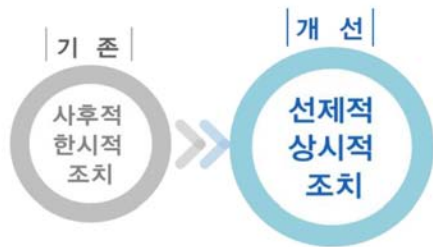


Source : IPCC(2013), AR5 WG1.

27

핵심 과제 2

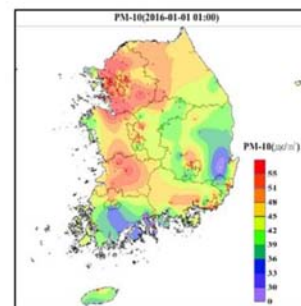
과제 2 고농도 발생 시기 선제적 대응



미세먼지 일주일 예보 시행

고농도 계절관리제 도입(겨울-봄)

비상저감조치 전국 확대



28

핵심 과제 3

과제 3 핵심 배출원 및 사각지대 중점 관리



핵심 배출원 관리



사각지대 관리 (선박, 농업 등)



드론을 활용한 미세먼지 배출 감시 및 감축 효과



배출 사업장 감시체계 강화 - 원격모니터링

29

2018년 대기질 국가별 순위 - 연평균 PM_{2.5} 농도

과제 4 국제협력 다변화 및 내실화



공동연구 및
과학 협력 강화



정부 고위급 논의와
민간 협력 병행



동북아 협약
체결 추진



30

2018년 대기질 국가별 순위 - 연평균 PM_{2.5} 농도

과제 5 정보 제공 및 소통·참여 강화



미세먼지 정보 포털
구축·운영



쌍방향
의사소통 강화




민·관·학 네트워크
활성화



31

V 참고 자료

참고자료 1. 국가기후환경회의의 구성 및 활동계획



**“미세먼지를 재난에 준하는 상황으로 인식해야...
미세먼지 해결로 국민의 건강권을 지킬 것”**

- 대통령 국무회의 발언(2019.1.22)

- 2019. 3. 1~7

7일 연속 수도권에 고농도 초미세먼지 비상저감 조치 시행 등 최악의 미세먼지 기승
- 2019. 3. 8

바른미래당, 미세먼지에 대한 초당적·범국민적 대처를 위한 범국가적 기구 구성 제안, 초대 위원장으로 반기문 전 UN 사무총장 추천
- 2019. 3. 12


대통령, 바른미래당 제안 적극 수용 지시
- 2019. 3. 21

반기문 전 총장, 위원장직 수락 기자회견
"미세먼지에서 자유로운 일상을 돌려드리도록 노력"
- 2019. 4. 1

"미세먼지 문제 해결을 위한 범국가기구" 설립추진단 발족
- 2019. 4. 29

미세먼지 문제 해결을 위한 "국가기후환경회의" 출범

청와대



참고자료 1. 국가기후환경회의의 구성 및 활동계획



위원 43명

위원장 1

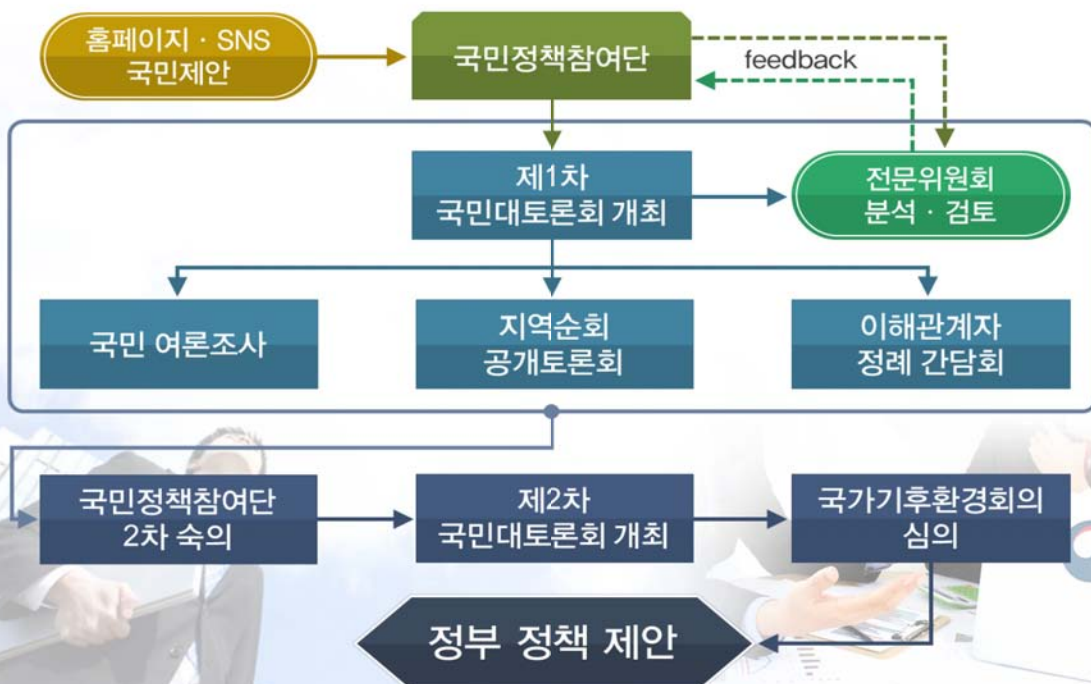
당연직 위원 10

위촉직 위원 32

- 당연직 : 정부, 정부위원회
- 위촉직 : 정당추천, 지자체, 산업계, 사회단체, 학계, 종교계, 국제협력, 시민대표

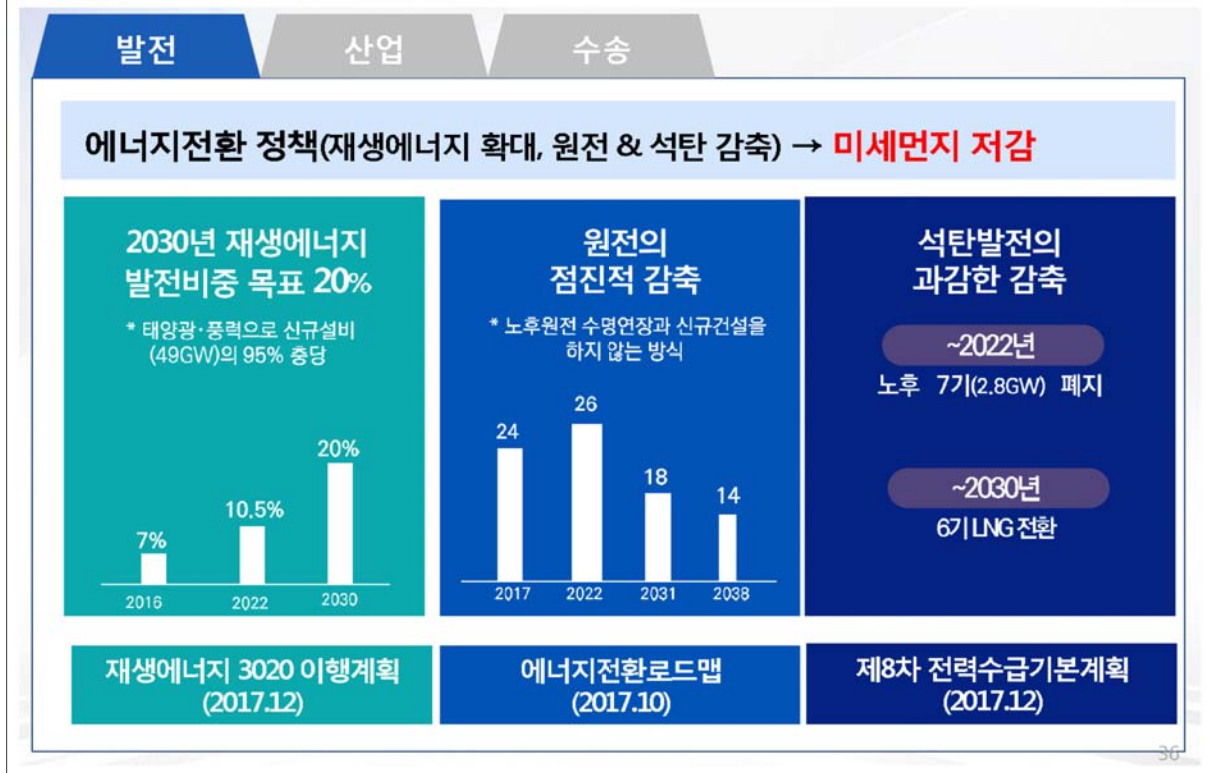
34

참고자료 1. 국가기후환경회의의 구성 및 활동계획



35

참고자료 2. 에너지전환과 미세먼지



참고자료 2. 에너지전환과 미세먼지

➤ 원전 발전 비중 축소 : 부실시공에 따른 보정조치로 안전정비 일수 증가

- 일시적인 원전 정지로 인한 발전 비중 축소로 에너지전환 정책과 무관
- 원전발전 비중 감소는 LNG 발전으로 대체하였으며, 예방정비를 마친 원전이 재가동되면서 발전 비중 증가 추세

* 원전비중 : (17.1Q) 27.2% → (17.4Q) 24.1% → (18.1Q) 18.9% → (18.4Q) 26.1%
 LNG비중 : (17.1Q) 21.9% → (17.4Q) 25.8% → (18.1Q) 29.4% → (18.4Q) 26.2%

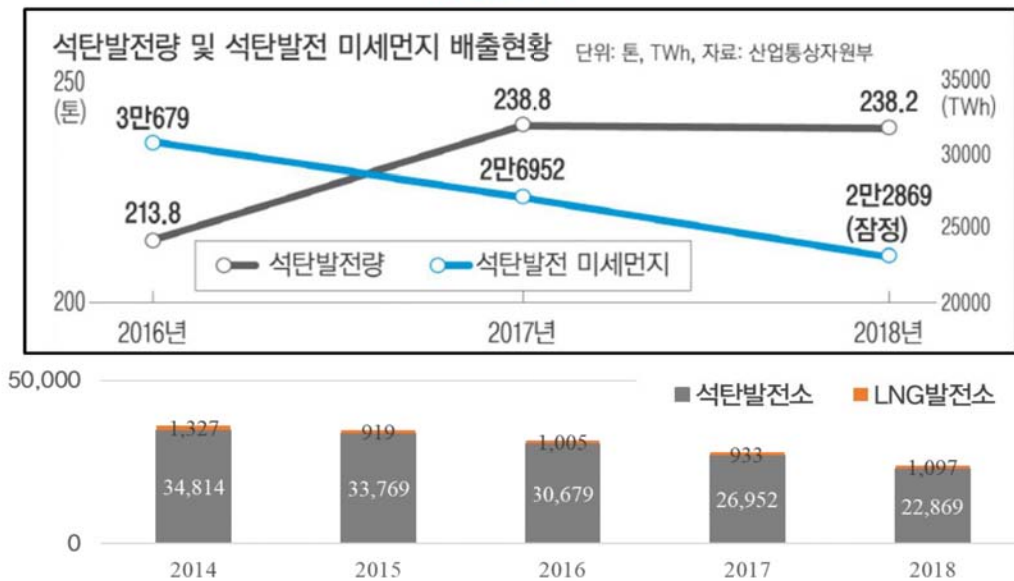
➤ 에너지 전환의 목표 : 장기간에 걸쳐 원전 및 석탄을 단계적으로 감축하는 동시에 재생에너지 등 친환경 전원을 확대

- 최근까지 과거 정부에서 인허가 완료된 신규 석탄발전소 11기 추가 진입
(16년 신규 4.7GW, 17년 신규 4.9GW)
- 당분간 원전 설비 용량도 증가할 전망 (19년 22.5GW → 22년 26.0GW)

참고자료 2. 에너지전환과 미세먼지

➤ 14~18년 석탄 및 LNG발전소의 PM_{2.5} 배출량은 **연평균 9.8% 감소**

– 특히, 석탄발전소는 2019년부터 배출허용기준이 강화됨에 따라 2018년도 방지 시설 개선 등으로 17년 대비 **15.1% 저감**

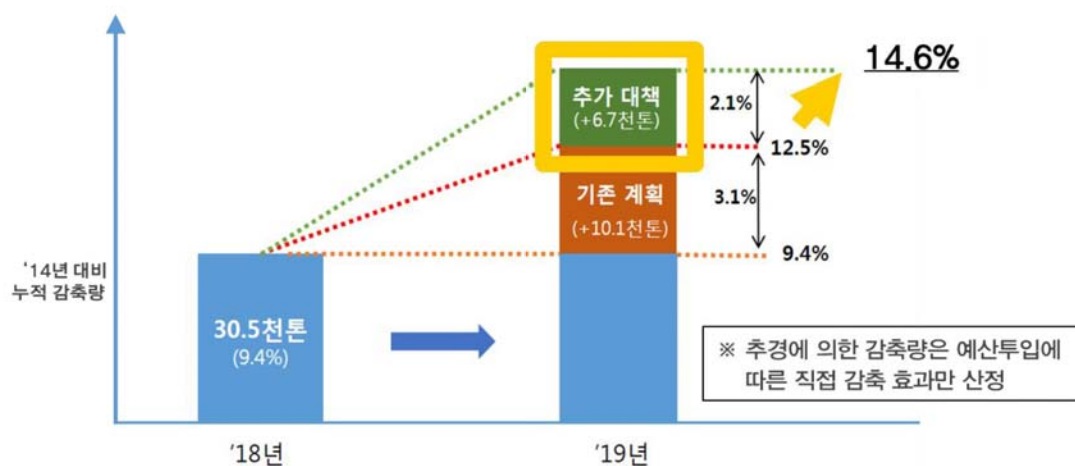


38

참고자료 3. 2019년 추경 효과 분석

➤ 2019년 저감 목표 **66.4% 상향**
(10.1천 톤→16.8천 톤)

- 경유차 대책 (조기 폐차 등)
- 소규모사업장 지원
- 항만육상전력 공급시설
- 가정용 저녹스 보일러 교체
- 친환경차 보급 등



39



감사합니다

III

지정토론

좌장 약력

성 명	손 병 주		
소 속	서울대학교 지구환경과학부, 한림원 이학부 정회원		
1. 학 력			
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위	
1976. 03. ~ 1980. 02.	서울대학교	학사	
1983. 09. ~ 1985. 08.	서울대학교	석사	
1986. 08. ~ 1990. 04.	미국 플로리다 주립대학교	박사	
2. 주 요 경 력			
기 간	기 관 명	직위, 직책	
1993 ~ (현)	서울대학교	교수	
2014 ~ 2015	서울대학교 지구환경과학부	학부장	
2009. 03. ~ 2010. 02.	일본 동경대학교	객원교수	
2019 ~ (현)	한국연구재단	지구과학 책임전문위원	
2017 ~ (현)	IUGG/IAMAS 국제대기복사학회	회장	
2016 ~ 2017	한국기상학회	회장	
2018 ~ (현)	WCRP/GEWEX Science Steering Group	위원	
2012 ~ 2017	국제기상대기과학연합회 (IAMAS)	한국대표	

토론자 약력

성 명	김 준	
소 속	연세대학교 대기과학과	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위
1982 ~ 1986	서울대학교 대기과학과	학사
1986 ~ 1987	Univ of Michigan-Ann Arbor 대학원 대기해양과학과	석사
1988 ~ 1991	Univ of Michigan-Ann Arbor 대학원 대기해양우주과학과	박사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
2003 ~ 현재	연세대학교 대기과학과	교수
1991 ~ 2003	한국항공우주연구원 우주기술연구부	책임연구원/선임연구원
2019 ~ 현재	국가기후환경회의 과학기술전문위원회	위원
2018 ~ 현재	Remote Sensing	부편집인
2017 ~ 현재	International Radiation Commission	위원
2017 ~ 현재	WMO GAW 도시기상환경연구(GURME)	과학자문위원
2016 ~ 2017	Harvard Smithsonian Center	방문과학자
2016	한미공동대기질조사 KORUS-AQ	추진위원
2014 ~ 현재	WHO 전지구대기질 및 대중보건프로그램	자문위원
2012	한미 DRAGON 미세먼지조사캠페인	지역책임자
2009 ~ 2010	NASA Jet Propulsion Lab	방문과학기술고문

토론문

김 준

연세대학교 대기과학과 교수

◆ 미세먼지 관련 현황 :

- 우리나라의 미세먼지 농도는 PM10, PM2.5 기준으로 볼때, 그 연평균 및 95 percentile 의 값은 장기간에 걸쳐 감소해왔음
- 그러나, 최근 2015년 이후 서울의 경우, 연평균 값의 감소추세가 정체를 보이고 있으며, 95 percentile 값의 경우 증가추세를 보임.

◆ 원 인 :

- 1인당 에너지 사용량: 우리나라(5.4 toe), 북한(0.47 toe), 중국(2.2 toe), 일본(3.4 toe)
- 자동차 등록대수: 우리나라 (20백만대), 북한 (0.3백만대), 중국 (332백만대), 일본 (77백만대)
- 디젤차량비율: 우리나라(44.7%), 일본(<1%), 미국(2.7%), 유럽(48~62%)
 - NO_x 배출량기준 (승용차;g/km): [디젤] 0.25 (Euro 4) → 0.08 (Euro 6)
 - PM 배출량기준 (승용차;g/km): [디젤] 0.025 (Euro 4) → 0.0045 (Euro 6)
- PM2.5 대분류별 배출량 기여율 :
 - (전국) 제조업(37%), 비도로이동오염원(26%), 비산먼지(18%), 생물성 연소(12%)
 - (서울) 비산먼지(44%), 비도로이동오염원(23%), 도로이동오염원(23%), 비산업연소 (7%)
- 장거리 수송영향 : (연평균 기준) 30%, (고농도사례 기준) 60%
- 장거리 수송영향을 고려하면, 위의 PM2.5 대분류별 배출량 기여율은 더 줄어듬.

◆ 고농도사례와 장거리 수송 영향 :

- 국민들은 미세먼지 고농도사례에 많은 우려를 표하고 있음
- 고농도사례에는 외부로부터의 장거리 수송이 수반됨.
- 고농도 사례의 빈도를 줄이기 위해서는 외부로부터의 장거리수송도 저감되어야 함.

◆ 과학적 이해에 기반한 정책수립 :

- 미세먼지 문제의 해결을 위해서는 과학적 이해를 바탕으로 한, 환경정책의 수립이 필수.
- 이를 위해서는 국가차원의 환경과학과 정책의 체계적 연구체제 수립이 매우 중요.

◆ 향후 대책 :

미세먼지의 저감은 단기적으로는 국내 배출을 줄여야하며, 중장기적으로는 주변국들과의 협력으로 외부유입 요인을 줄여 나가야 함.

(정부)

- 단기 대책 : 대상, 지역, 시기, 기상상황별, 평균상태 및 고농도사례 등 세분화된 대책
- 중기 대책 : 지역내 장거리이동 오염물질 저감 협정체결 및 대기질 개선도 공동평가
- 장기 대책 : 친환경 에너지 확대 및 지역내 오염물질 저감 공동 노력 지속

(국민)

- 에너지 및 수자원 등 절약, 소유경제에서 공유경제로의 사회적 행동방식 변화 등

토론자 약력

성 명	송 철 한	
소 속	광주과학기술원 지구·환경공학부	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전공 및 학위
1984 ~ 1988	서울대학교 화학공학과	학사
1988 ~ 1990	서울대학교 대학원 화학공학과	석사
1995 ~ 1999	The Univ. of Iowa Chemical & Biochemical Engineering	박사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
2017 ~ 현재	미세먼지 국가전략 프로젝트 한국형 대기질 예보 모델 개발 사업단	단장
2012 ~ 현재	지구·환경모델링센터 (CEMOS)	센터장
2004 ~ 현재	광주과학기술원(GIST) 지구·환경공학부	교수
2002 ~ 2004	Georgia Institute of Technology School of the Earth and Atmospheric Sciences	연구 조교수
2000 ~ 2002	Georgia Institute of Technology School of the Earth and Atmospheric Sciences	박사후연구원
1994 ~ 1995	한국과학기술연구원(KIST) 환경연구센터	연구원
1993 ~ 1994	서울대학교 공학연구센터	연구원
1989 ~ 1993	LG화학 공정R&D센터	연구원

토론문

송 철 한

광주과학기술원 지구·환경공학부 교수

1. 앞서 두 분(윤순창 서울대 명예 교수, 안병옥 전 환경부 차관/국가 기후환경회의 운영위원장)의 연사께서 현재 우리나라(초)미세먼지의문제의 현황과 우리나라 대기화학의 연구 현황에 대해 잘 요약된 발표를 해 주셨다고 생각됨.
2. 윤순창 교수님께서 현재 과학계(대기 화학 계) 연구 동향 및 향후 과제에 대한 발표를 해주셨는데, 현재 “국가전략미세먼지 과제”가 기 진행 중에 있음에도 불구하고, 우리나라 대기화학 분야의 과학적 역량이 선진국에 비해 떨어지는 것이 사실임 (선진국 대비 75% 수준). 이런 상황을 감안하여 과학적역량의 제고가 필요함. 특히, 기초 연구 분야인 대기 중 화학반응 및 (초)미세먼지 형성 과정 연구, 측정 기술 개발, 측정 기기 개발, 대기화학-기후 연관 관계 파악을 위한 대기 모델링 연구, 인공위성을 활용한 측정 및 알고리즘 개발 등의 연구가 필요.
3. 뒤떨어진 대기화학 분야 연구 역량의 심화,확충을 위한 한국대기연구소(가칭)설립이 필요하다고 생각되고, 이를 “과기정통부 산하 출연연구소”로 만드는 노력이 필요하다고 생각됨.
4. 대한민국 (초)미세먼지 문제 해결을 위해서는 환경부 또는 국가 기후환경회의의 확실한 주도 하에 체계적이고 일관된 저감 기획과 저감 집행, 저감 평가, 홍보 등의 노력이 일관된 체계 하에 진행되어야 한다고 생각됨. 현재 진행되고 있는 행정적, 정책적, 연구 등 분야의 노력들은 컨트롤 타워가 없이매우 산만하게 관리, 진행되고 있다는 생각임. 특히, 지자체와 중앙 정부의 공조 노력이 필요함!

5. (초)미세먼지에 관한 중국의 영향을 논할 때는 각 수치들이 갖는 의미에 대한 이해가 필수 임. 만약, 수치만을 갖고 논의가 이루어진다면 국민들의 혼란을 가중시킬 수 있음. 예를 들어, 미국 NASA가 발표한 KORUS-AQ기간 중 연구를 기반으로 발표한 중국 기여도 수치인 34%는 “연평균이 아닌 5-6월 평균 수치”임. 각 수치가 갖는 맥락에 대한 올바른 인식이 매우 중요함.

토론자 약력

성 명	장 윤 석	
소 속	POSTECH 환경공학부, 한림원 이학부 정회원	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위
1983	연세대학교 화학과	학사
1990	미국 오레곤주립대학교 환경화학	박사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
2018 ~ 현재	환경부 국립환경과학원	원장
1997 ~ 현재	POSTECH 환경공학부	조교수, 부교수, 교수
2011 ~ 2015	POSTECH 환경공학부	학부장 겸 해양대학원장
1995 ~ 1997	한양대학교 화학과	조교수
1993 ~ 1995	한국기초과학지원연구원	그룹장
1992 ~ 1993	MIT	연구교수

토론문

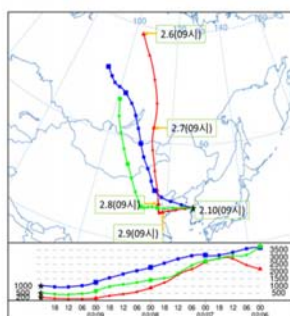
장 윤 석

POSTECH 환경공학부 교수(한림원 이학부 정회원)

고농도 미세먼지 발생 유형

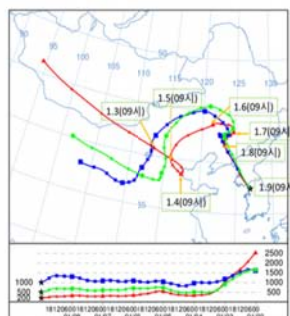


서해 경유 유입 ('15.2.10)



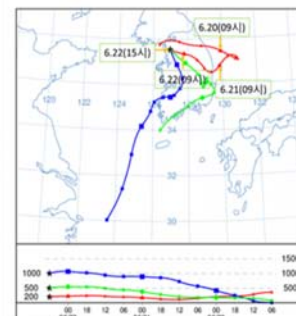
서해상공 200/500/1000m 로
유입 되는 기류

북한 경유 유입 ('17.1.9)



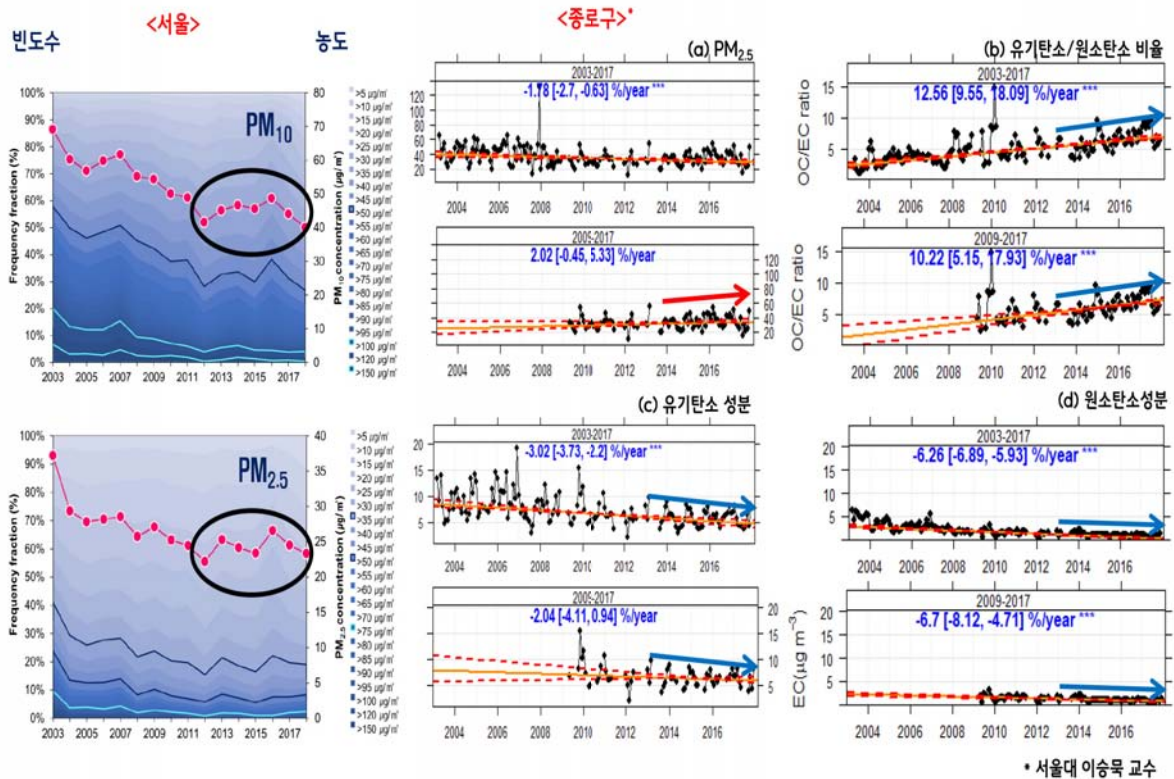
북경 부근에 머물렀던 기류가
만주로 이동 후 북서풍을 따라 북한
통과 후 수도권으로 유입

기류정체 국내요인 ('16.6.22)

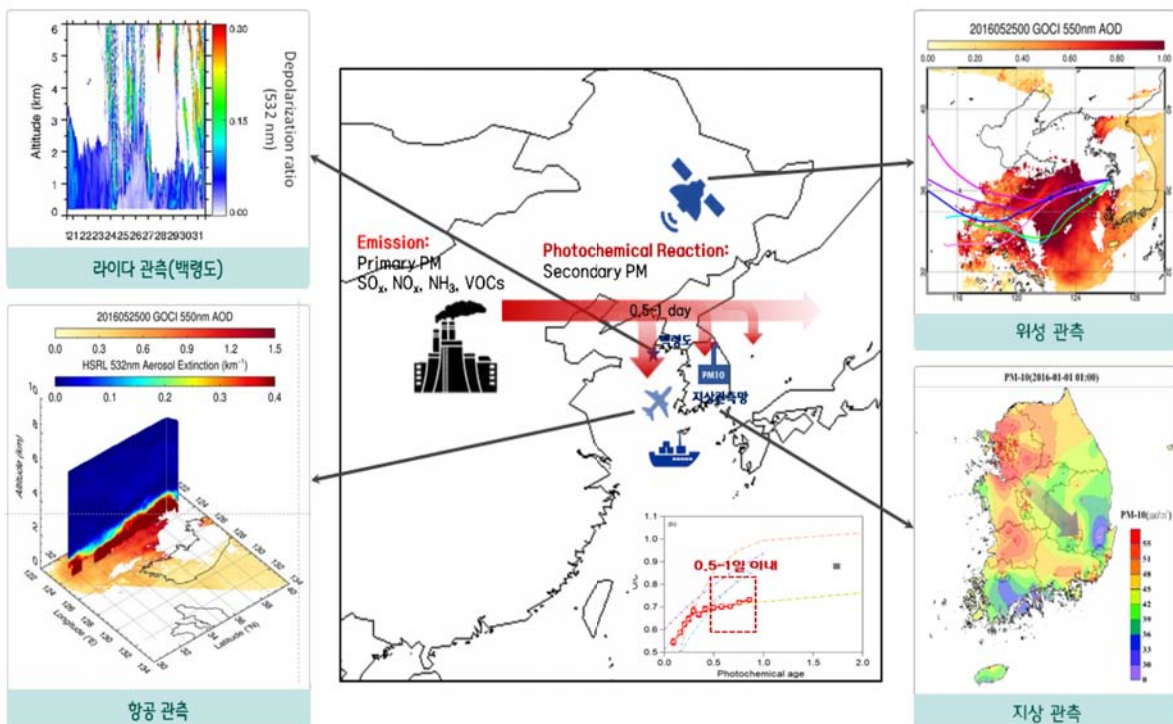


기류정체 조건에서 주로 국내
배출과 2차 생성으로 고농도
미세먼지 발생 (여름철)

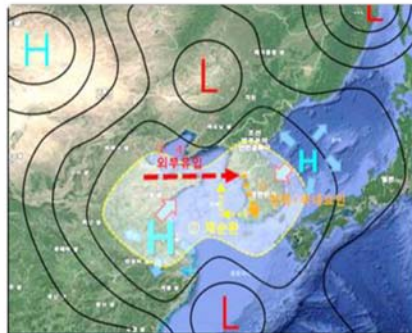
서울지역 미세먼지 장기농도 변동

국립환경과학원 ^{+Pride}
National Institute of Environmental Research

미세먼지 이동경로와 입체관측 체계 (서해 유입)

국립환경과학원 ^{+Pride}
National Institute of Environmental Research

최근 고농도 미세먼지 사례 분석(2019 2.19~3.7)



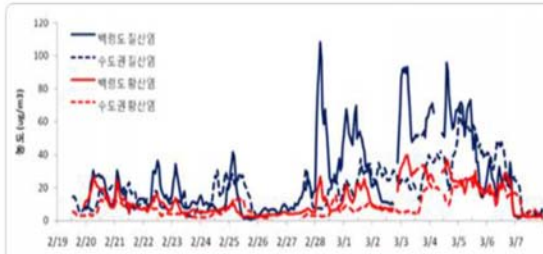
동북아 지역의 고기압 형성, 대기정체 유발

[2/19~23]

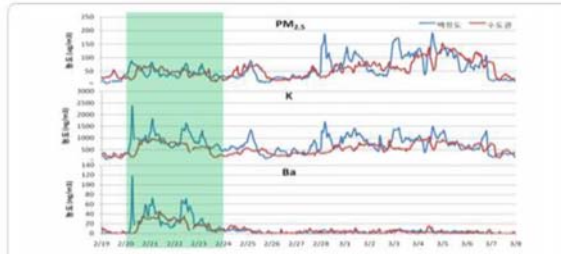
[2/28~3/7]



전국 시도별 PM₁₀ 농도 시간 변화(국내외 영향분석)



국의 유입 질산염 농도의 변화분석



"중국 원소철 폭죽물질 (Ba)장거리아동 검출"

토론자 약력

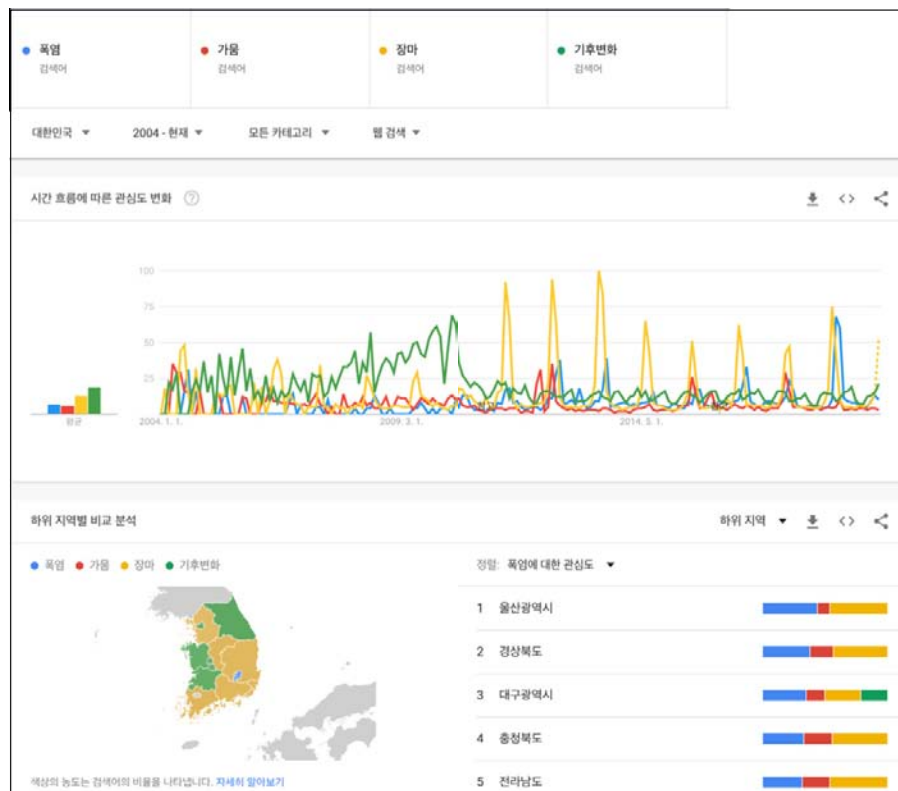
성 명	하 경 자	
소 속	부산대학교 대기환경과학과 교수, 한림원 이학부 정회원	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위
1978 ~ 1982	부산대학교 과학교육학과	지구과학, 이학사
1982 ~ 1984	서울대학교 대학원 기상학과	기상학, 이학석사
1986 ~ 1992	연세대학교 대학원 천문대기과학과	대기과학, 이학박사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
2017 ~ 현재	IBS 기후물리단	교수
2018 ~ 현재	국립부산과학관	이사
2018 ~ 현재	한국지구과학연합회(KGU)	부회장
2014 ~ 현재	부산대 기후과학연구소	소장
2011 ~ 2014	(재)APEC 기후센터	이사
2002 ~ 2004	부산대 여성연구소	소장
1999 ~ 2000	오레곤주립대학	초빙조교수
1993 ~ 1994	일본기상연구소	박사후연구원

토론문

하 경 자

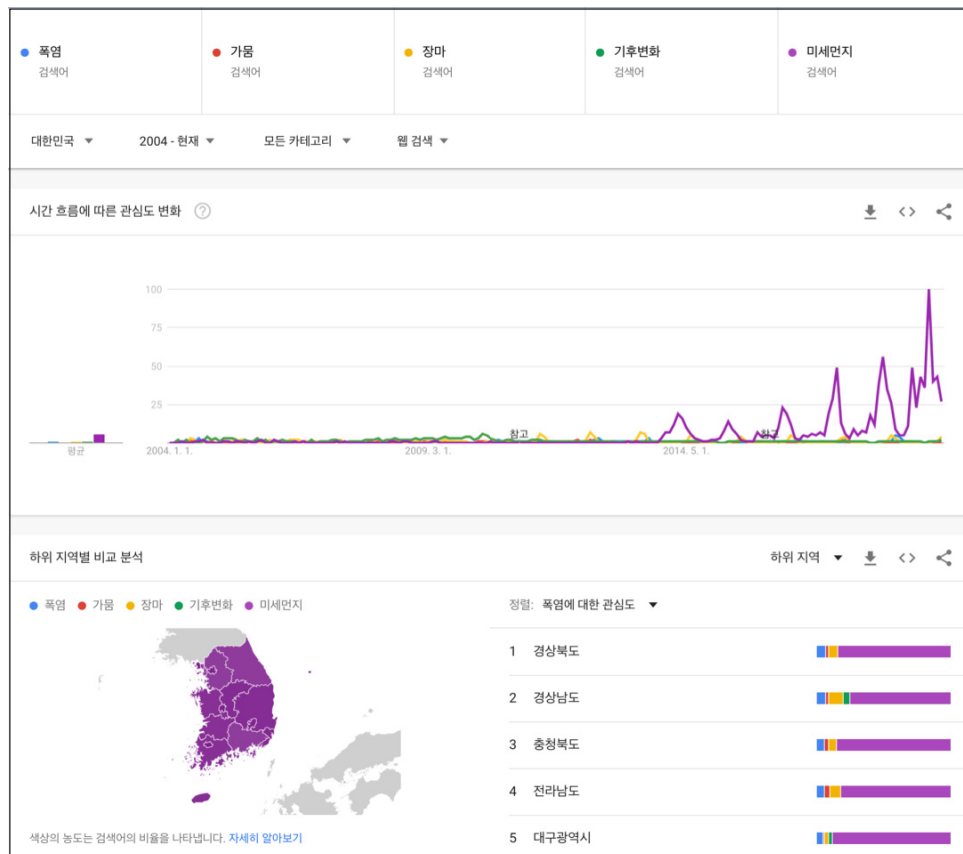
부산대학교 대기환경과학과 교수(한림원 이학부 정회원)

- ◆ 발제자의 발표를 통하여 보면, 몇 가지 주요한 포인트가 있다:
 - 1) 2013년 이후 국민 관심이 매우 증가된 점, 2) 체감농도와 실제농도 차이가 있는 점, 3) 최근 6년간 농도 개선 정체되는 점, 4) 한국이 EPI 랭킹에서 좋아짐에도 대기오염 국으로 인식되고 있는 점 들은 매우 우려되는 상황임을 보여준다.
- ◆ 구글 트렌드 분석을 통하여 보면 우리 국민은 기후변화에 대한 관심은 상대적으로 줄어드는 반면, 장마는 지속적으로 중요하며, 작년 2018년에는 폭염이 엄청 큰 관심대상이었다. 그로부터 ‘미세먼지’, 키워드를 넣게 되면 2014년부터 2019년 오늘까지 어느 다른 <그림 1>의 키워드 보다 큰 관심도임을 알 수 있다.



〈그림 1〉 Google 트렌드를 활용한 검색어 통계분석(가뭄, 폭염, 장마, 기후변화)

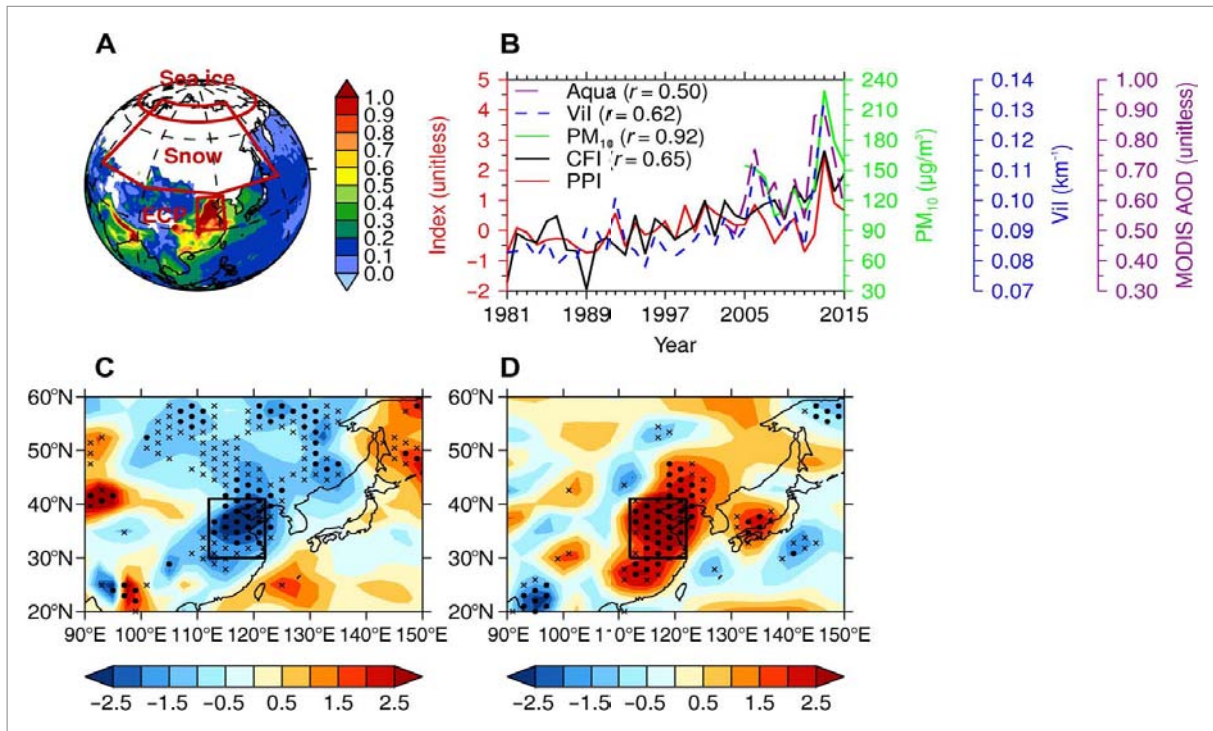
〈그림 1〉 Google 트렌드를 활용한 검색어 통계분석(가뭄, 폭염, 장마, 기후변화). 기후 변화에 대한 관심을 더했을 때, 2010년까지 기후변화에 대한 관심이 더 크게 나타났으나 이후 관심이 줄어들었다. 지역적으로 서울, 강원, 충남, 전북과 대전의 경우 기후변화에 대해 매우 관심이 많은 지역인 것으로 나타났다.



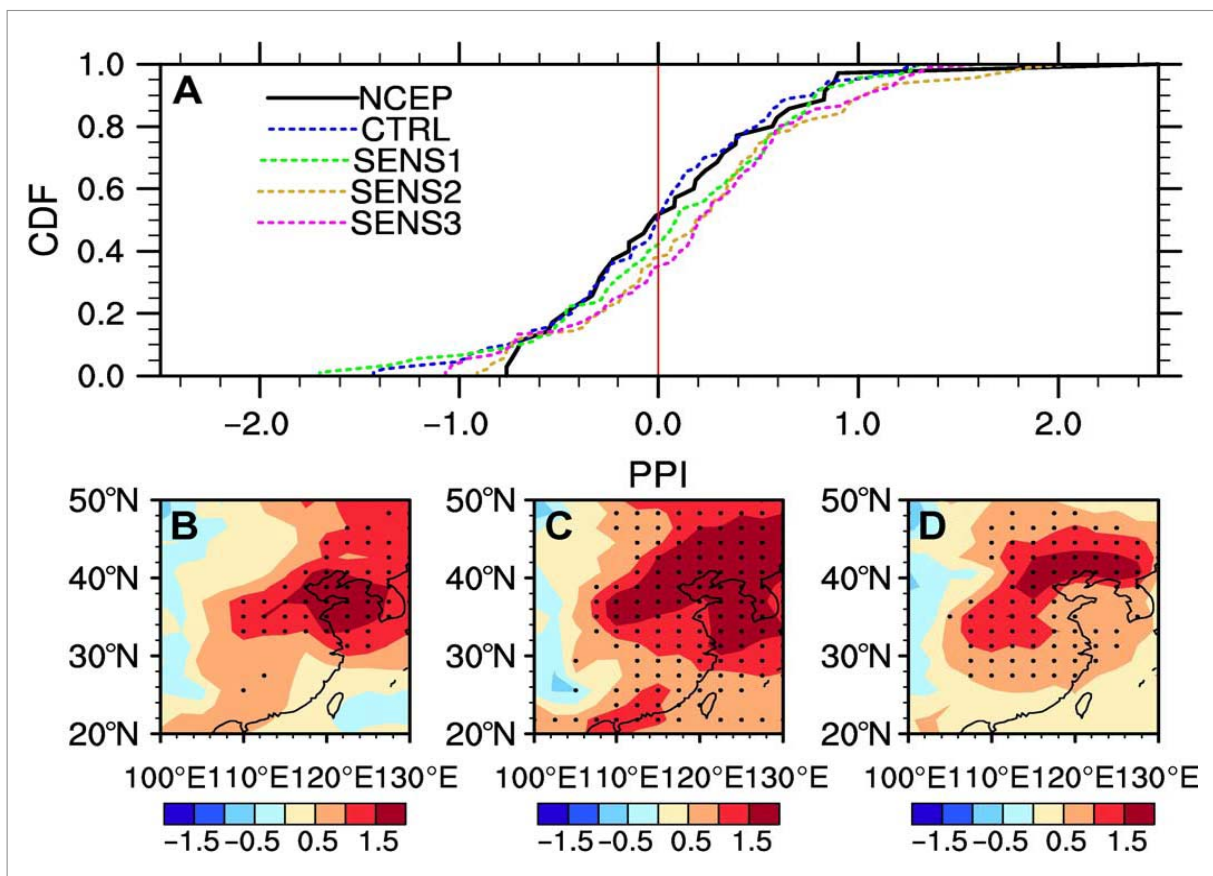
〈그림 2〉 Google 트렌드를 활용한 검색어 통계분석(가뭄, 폭염, 장마, 기후변화, 미세먼지)

마지막으로, 미세먼지에 대한 관심을 살펴보았을 때, 2014년 이후로 검색 빈도가 급격히 증가하는 특징이 나타난다. 지역적으로 살펴보았을 때 전국적으로 다른 키워드에 비해 미세먼지에 대한 관심이 압도적인 것을 확인 하였다.

- ◆ 기상 및 기후 측면에서 보면 우리나라는 편서풍대 위치로 주변국 영향 크며, 강수 여름철 집중으로 건조시기가 길어 대기에 의한 세정효과 낮고, 대륙성 고기압 대기정체 영향 및 편서풍대 위치로 주변국 영향 큼. Citation: Y. Zou, Y. Wang, Y. Zhang, J.-H. Koo, Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. Sci. Adv. 3, e1602751 (2017).



〈그림 3-1〉 (a), (b), © 그리고 (d)



〈그림 3-2〉 (a), (b), © 그리고 (d)

〈그림 3-1〉 (a), (b), © 그리고 (d), 〈그림 3-2〉 (a), (b), © 그리고 (d). 이 그림들은 중국을 중심으로 지역에서의 PM pollution index를 조사하면 특히 겨울철 연무의 경우에 왜 대기가 정체하는가, 기후변화 요인은 없는가가 중요하며, 이러한 대기상태는 북극의 빙하면의 감소, 유라시아 대륙의 적설을 보여주는 것으로 증가하며 특히 미래전망에서 보면 〈그림 3-2〉의 ©에서 유라시아 적설이 PPI를 증가시킬 가능성을 보이고 있음.

- ◆ 국민에게 ‘미세먼지’를 주제로 미세먼지에 대한 해결방안과 정책적 방향 논의를 중심으로 개최되는 과총 미세먼지 국민포럼과는 차별화하여 ‘미세먼지, 바로알기’의 개념으로 자료제공, 정보 공유, 연구주체의 센터화를 추구하여야 함. 미세먼지의 발생원인, 위험성, 효과적인 대처방안 등을 국민들이 이해하기 쉬운 형식으로 알려주고 일반인의 궁금증 해소, 대중과의 소통을 중심으로 구성하고 연구의 집중과 집적으로 과학기술 기반의 해결방법을 연구하는 구심적 연구센터의 필요성이 대두됨.
- ◆ 현 시점에서 출연(연)은 하고 싶은 하고 싶은 연구가 아닌 해야만 하는 연구를 하는 국가연구소이며 다음의 세 가지 성과가 필요. 첫째 수요 중심의 사업화와 신산업을 창출해 기업이 반기는 성과를 이루거나, 둘째, 국민이 체감할 수 있는 국가 현안을 해결해 국민들에게 신뢰를 주는 명확한 성과를 내거나, 셋째, 미래를 대비하고 국격을 높이는 연구를 해 국민들에게 자긍심을 주는 국제적인 대형 성과를 내야함.
- ◆ 현재 가시화된 미세먼지 주요 포인트를 기반으로 살펴보면 기상 및 기후변화의 연구와 연계된 연구조직이 필요하며 국가의 3020신재생 정책이나 에너지 전환 목표나 정책이 얼마나 미세먼지 저감에 기여하는가의 정확한 수치를 얻기 위하여 학계와 산업, 정부조직에서 충분히 검토되어야 할 것임.
- ◆ 미세먼지 연구나 정책에 이미 엄청난 예산이 투자되고 있으나, 체계적 집중 연구조직이 요구됨. 현실적으로 우리나라의 과학기술력으로 어려운 부분이 정확한 2차 오염생산에 대한 이해의 부족과 미세먼지 관측장비 개발기술 등 부족한 부분의 해소 없이 결코 미세먼지 저감에 관한 해결이 어렵다고 보아, 연구예산의 효율적 집행 방향을 모색하는 것이 절실히 요구됨.

토론자 약력

성 명	한 삼 희	
소 속	조선일보사 선임논설위원	
1. 학 력		
기 간	학 교 명	전 공 및 학 위
1976 ~1981	서울대 사회학과	학사
2000 ~ 2002	쓰쿠바대 환경과학연구과	석사
2. 주 요 경 력		
기 간	기 관 명	직위, 직책
2003 ~ 현재	조선일보 논설실	선임논설위원
2002 ~ 2003	조선일보 편집국	사회부장
1993 ~ 1999	조선일보 편집국	환경팀장

토론문

한 삼 희

조선일보 수석논설위원

◆ 한국 미세먼지 행정의 세 가지 실패

- 1) 초미세먼지(PM2.5)모니터링 2015년에야 시작(서울시는 2007년부터)
 - PM10 기준치를 만든 것이 1993년. 1995년부터 측정.
 - 초미세먼지 관해선 과거 데이터 알 수 없어.
 - PM10으로는 분명히 수치 개선됐는데 PM2.5는 좋아졌는지 나빠졌는지 말 못해.
 - 요즘은 극미세먼지(PM0.1), 나노먼지(PM0.05) 거론 시작
- 2) 경유차를 친환경차로 우대
 - 이산화탄소 배출이 상대적으로 적고,
 - 직접 배출 입자 오염물질 줄였다는 이유로 환경부담금 등 면제 혜택.
 - 폴크스바겐 조작 사건으로 디젤차의 허구 폭로.
- 3) 2차 생성 메커니즘에 대해 무지
 - 뒤늦게 질소산화물 등 가스 물질이 대기 중에서 입자로 바뀌는 2차 생성 중요성 확인.
 - 75%가 2차 생성이라고. 2016년 KORUS AQ(한미협력 대기질 공동조사).
 - 과연 이견 사실인지.

◆ 극초미세먼지 모니터링 빨리 시작해야

- 초미세먼지 분포는 직경 2.5 μ m와 0.15 μ m에 집중.
 - 두 종류 입자의 농도(중량값)는 같더라도 위해도는 크게 차이날 수.
 - 두 입자가 같은 밀도라면 직경 2.5 μ m 짜리 한 개가 0.15 μ m짜리 4629개 해당.
 - 표면적은 0.15 μ m짜리 4629개가 2.5 μ m짜리 하나에 비해 16배.

- 흡착 독성물질도 그만큼 많을 것.
- 입자 작아 허파파리 통과 가능성도 훨씬 클 것.

◆ 미세먼지 농도(중량값)는 개선돼 왔지만 건강 위해성 더 나빠진 것은 아닌가.

- 나노, 극미세먼지는 대부분 자동차에서 나온다고.
- 실린더 연소온도(2000도)가 높고 연소실 분사압력(2000기압) 높아 타지 않고 남는 탄소 알갱이가 극단적으로 작아져.
- 디젤차 배출입자 분포곡선의 중앙값은 $0.08\mu\text{m}$.
- 가스 형태 배출물이 입자를 2차 생성할 때도 극미 알갱이 형성.
- 결국 디젤차 등으로 인해 굵은 알갱이는 획기적으로 줄었지만 눈에 안 보이는 미세 알갱이는 훨씬 많아졌을 수.
- 따라서 미세먼지 중량만 아니라 개수까지 측정해야 하는 것 아닌지.
- 기술적으로 당장 적용 어렵더라도 모니터링은 계속해야. 피터 드러커 “측정하지 않으면 관리할 수 없다”

◆ 미세먼지는 정치가 아니라 과학으로 접근해야

- 올 1월 대통령이 “창의력과 상상력 발휘해 특단 대책” 주문하자 사흘 뒤 서해 인공강 우 실험.
- 3월 대통령이 ‘긴급 대책’ 요구하자 환경부는 “야외용 공기정화기 설치 검토”
- 2월 15일 미세먼지특별법 근거 국무총리 직속 미세먼지특별대책위원회 발족.
- 3월 8일 바른미래 손학규 대표 “대책 기구 필요, 위원장에 반기문 전 총장 추천”.
- 3월 12일 대통령 “손 대표 제안 수용” 지시.
- 4월 29일 미세먼지 국가기후환경회의 출범.
- 토론회, 여론조사, 정책참여단 숙의 등 공론화 과정.
- 미세먼지가 국민 여론 조성으로 해결하는 문제인가.
- 리더의 전문성 문제, 모양 갖추기 캠페인 느낌.

◆ 수도권 급증 공장단지가 미세먼지 원인 중 하나 아닌지

- 경기도 경우 2006년 6월 3만7864곳이던 등록공장 수가 2019년 3월 6만9210개소로. (팩토리온 통계)
- 계획관리지역에 작은 공장도 환경성 검토 없이 들어갈 수 있게 허용하면서 급증.
- 주택, 농가와 섞여 난개발. 수도권 전체가 공장단지 돼버려.
- 입지 제한 풀면 규제망 와르르. 과거 팔당특별대책지역 규제 완화, 최근 태양광 규제 완화도 마찬가지.
- 이런 상황에서 중국 탓만 하면 먹혀 들어가겠나.

한림원탁토론회는...

한림원탁토론회는 국가 과학기술의 장기적인 비전과 발전전략을 세우고, 동시에 과학기술 현안 문제에 대한 해결방안을 모색하기 위한 목적으로 개최되고 있는 한림원의 대표적인 정책토론 행사입니다.

지난 1996년 처음 개최된 이래 지금까지 100여회에 걸쳐 초중등 과학교육, 문·이과 통합문제, 국가발전에 미치는 기초과학 등 과학기술분야의 기본문제는 물론 정부출연연구소의 발전방안, 광우병의 진실, 방사능, 안전 방제 등 국민생활에 직접 영향을 미치는 문제에 이르기까지 광범위한 주제를 다루고 있습니다.

한림원은 과학기술 선진화에 걸림돌이 되는 각종 현안문제 중 중요도와 시급성에 따라 주제를 선정하고, 과학기술 유관기관의 최고책임자들을 발제자로 초빙하여, 한림원 석학들을 비롯해 산·학·연·정의 전문가들이 심도 깊게 토론을 진행하고 있습니다.

토론결과는 책자로 발간, 정부, 국회와 관련기관에 배포함으로써 정책 개선방안을 제시하고 정책 입안자료를 제공하여 여론 형성에 기여하도록 힘쓰고 있습니다.

《 한림원탁토론회 개최실적 (1996년 ~ 2018년) 》

회수	일 자	주 제	발제자
1	1996. 2. 22.	초중등 과학교육의 문제점 초중등 과학교육의 문제점	박승재
2	1996. 3. 20.	과학기술분야 고급인력의 수급문제	서정헌
3	1996. 4. 30.	산업계의 연구개발 걸림돌은 무엇인가?	임효빈
4	1996. 5. 28.	과학기술 행정과 제도, 무엇이 문제인가?	박우희
5	1996. 7. 9.	연구개발 평가제도, 무엇이 문제인가?	강계원

회수	일 자	주 제	발제자
6	1996. 10. 1.	정부출연연구소의 역할과 기능에 대하여	김훈철
7	1996. 11. 4.	21세기 과학기술비전의 실현과 정치권의 역할	김인수
8	1997. 2. 25.	Made in Korea, 무엇이 문제인가?	채영복
9	1997. 4. 2.	산업기술정책, 무엇이 문제인가?	이진주
10	1997. 6. 13.	대학교육, 무엇이 문제인가?	장수영
11	1997. 7. 22.	대학원 과학기술교육, 무엇이 문제인가?	김정욱
12	1997. 10. 7.	과학기술 행정체제, 무엇이 문제인가?	김광웅
13	1998. 1. 22.	IMF, 경제위기 과학기술로 극복한다.	채영복
14	1998. 3. 13.	벤처기업의 활성화 방안	김호기, 김영대, 이인규, 박금일
15	1998. 5. 29.	국민의 정부의 과학기술정책	강창희
16	1998. 6. 26.	정보화시대의 미래와 전망	배순훈
17	1998. 9. 25.	과학기술정책과 평가제도의 문제	박익수
18	1998. 10. 28.	경제발전 원동력으로서의 과학기술의 역할	김상하
19	1999. 2. 12.	21세기 농정개혁의 방향과 정책과제	김성훈
20	1999. 3. 26.	지식기반 경제로의 이행을 위한 경제정책 방향	이규성
21	1999. 5. 28.	과학기술의 새천년	서정욱
22	1999. 9. 10.	신 해양시대의 해양수산정책 발전방향	정상천
23	2000. 2. 10.	21세기 환경기술발전 정책방향	김명자
24	2000. 4. 14.	경제발전을 위한 대기업과 벤처기업의 역할	김각중

회수	일 자	주 제	발제자
25	2000. 6. 16.	과학·기술발전 장기 비전	임 관
26	2000. 9. 15.	국가 표준제도의 확립	김재관
27	2000. 12. 1.	국가 정보경쟁력의 잣대: 전자정부	이상희
28	2001. 5. 4.	환경위기 극복과 지속가능 경제발전을 위한 과학 기술개발전략	박원훈, 류순호, 문길주, 오종기, 한무영, 한정상
29	2001. 7. 18.	국가 과학기술발전에 미치는 기초과학의 영향	임관, 명호철, 장수영
30	2001. 9. 21.	산업계에서 원하는 인재상과 공학교육의 방향	임관, 한송엽
31	2001. 10. 31.	적조의 현황과 앞으로의 대책	홍승룡, 김학균
32	2001. 12. 5.	광우병과 대책	김용선, 한홍율
33	2002. 7. 19.	첨단기술 (BT,ET,IT,NT)의 실현을 위한 산업화 대책	한문희, 이석한, 한송엽
34	2002. 9. 13.	우리나라 쌀 산업의 위기와 대응	이정환, 김동철
35	2002. 11. 1.	생명윤리 - 과학 그리고 법: 발전이냐 규제냐?	문신용, 이신영
36	2003. 3. 14.	과학기술분야 졸업생의 전공과 직업의 연관성	조황희, 이만기
37	2003. 6. 18.	국내 농축산물 검역현황과 발전방안	배상호
38	2003. 6. 27.	대학과 출연연구소간 연구협력 및 분담	정명세
39	2003. 9. 26.	그린에너지 기술과 발전 방향	손재익, 이재영, 홍성안
40	2004. 2. 20.	미래 고령사회 대비 국가 과학기술 전략	오종남
41	2004. 10. 27.	고유가시대의 원자력 이용	정근모
42	2004. 12. 7.	농산물 개방화에 따른 국내 고추산업의 현황과 발전전략	박재복
43	2005. 9. 30.	과학기술윤리	송상용, 황경식, 김환석

회수	일 자	주 제	발제자
44	2005. 11. 25.	과학기술용어의 표준화 방안	지제근
45	2005. 12. 1.	융합과학시대의 수학의 역할 및 수학교육의 방향	정근모, 최형인, 장준근
46	2005. 12. 15.	해양바이오산업, 왜 중요한가?	김세권, 김동수
47	2006. 11. 7.	첨단과학시대의 교과과정 개편방안	박승재
48	2006. 12. 22.	과학기술인 복지 증진을 위한 종합 대책	설성수
49	2007. 6. 29.	선진과학기술국가 가능한가? - Blue Ocean을 중심으로	김호기
50	2007. 11. 9.	우리나라 수학 및 과학교육의 문제점과 개선방향	김도한, 이덕환
51	2008. 5. 9.	태안반도 유류사고의 원인과 교훈	하재주
52	2008. 5. 8.	광우병과 쇠고기의 안전성	이영순
53	2008. 6. 4.	고병원성조류인플루엔자(AI)의 국내외 발생양상과 우리의 대응방안	김재홍
54	2008. 10. 8.	High Risk, High Return R&D, 어떻게 해야 하는가	김호기
55	2008. 11. 11.	식량위기 무엇이 문제인가?	이정환
56	2008. 12. 11.	초중고 수학 과학교육 개선방안	홍국선
57	2008. 12. 17.	우리나라 지진재해 저감 및 관리대책의 현황과 개선방안	윤정방
58	2009. 2. 19.	21세기 지식재산 비전과 실행 전략	김영민
59	2009. 3. 31.	세계주요국의 나노관련 R&D 정책 및 전략분석과 우리의 대응전략	김대만
60	2009. 7. 20.	국가 수자원 관리와 4대강	심명필
61	2009. 8. 28.	사용후핵연료 처리 기술 및 정책 방향	송기찬, 전봉근
62	2009. 12. 16.	세종시와 국제과학비즈니스벨트	이현구

회수	일 자	주 제	발제자
63	2010. 3. 18.	과학도시와 기초과학 진흥	김중현
64	2010. 6. 11.	지방과학기술진흥의 현황과 과제	정선양
65	2011. 2. 28.	국제과학비즈니스벨트와 기초과학진흥	민동필, 이충희
66	2011. 4. 1.	방사능 공포, 오해와 진실	기자회견
67	2012. 11. 30.	융합과학/융합기술의 본질 및 연구방향과 국가의 지원시스템	이은규, 여인국
68	2013. 4. 17.	한미원자력협정 개정협상에 거는 기대와 희망	문정인
69	2013. 6. 11.	통일을 대비한 우리의 식량정책 이대로 좋은가?	이철호
70	2013. 7. 9.	과학기술중심사회를 위한 과학기술원로의 역할과 의무	이원근
71	2013. 7. 22.	대학입시 문·이과 통합, 핵심쟁점과 향후 과제는?	박재현
72	2014. 1. 17.	국가안보 현안과제와 첨단과학기술	송대성
73	2014. 3. 4.	융합과학기술의 미래 -인재교육이 시작이다	강남준, 이진수
74	2014. 5. 9.	과학기술연구의 새 지평 젠더혁신	이혜숙, 조경숙, 이숙경
75	2014. 5. 14.	남북한 산림협력을 통한 한반도 생태통일 방안은?	김호진, 이돈구
76	2014. 5. 22.	창조경제와 과학기술	이공래, 정선양
77	2014. 5. 29.	재해·재난의 예방과 극복을 위한 과학기술의 역할은?	이원호, 윤정방
78	2014. 6. 10.	벼랑 끝에 선 과학·수학 교육	정진수, 배영찬
79	2014. 6. 14.	문학과 과학, 그리고 창조경제	정종명, 최진호
80	2014. 6. 25.	‘DMZ세계평화공원’과 남북과학기술협력	정선양, 이영순, 강동완
81	2014. 7. 24.	국내 전통 발효식품산업 육성을 위한 정책 대안은?	신동화

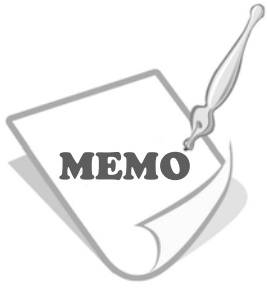
회수	일 자	주 제	발제자
82	2014. 9. 17.	'과학기술입국의 꿈'을 살리는 길은?	손경한, 안화용
83	2014. 9. 30.	한국 산업의 위기와 혁신체제의 전환	이 근
84	2014. 11. 14.	경제, 사회, 문화, 산업 인프라로서의 사물인터넷(IoT): 그 생태계의 실현 및 보안방안은?	김대영, 김용대
85	2014. 11. 28.	공유가치창출을 위한 과학기술의 나아갈 길은? 미래식품과 건강	권대영
86	2014. 12. 5.	창발적 사고와 융합과학기술을 통한 글로벌 벤처 생태계 조성 방안	허석준, 이기원
87	2015. 2. 24.	구제역·AI의 상재화: 정부는 이대로 방치할 것인가?	김재홍
88	2015. 4. 7.	문·이과 통합 교육과정에 따른 과학·수학 수능개혁	이덕환, 권오현
89	2015. 6. 10.	이공계 전문가 활용 및 제도의 현황과 문제점	이건우, 정영화
90	2015. 6. 25.	남북 보건의료 협정과 통일 준비	신희영, 윤석준
91	2015. 7. 1.	메르스 현황 및 종합대책	이종구
92	2015. 7. 3.	'정부 R&D 혁신방안'의 현황과 과제	윤헌주
93	2015. 9. 14.	정부 R&D예산 감축과 과학기술계의 과제	문길주
94	2015. 10. 23.	사회통합을 위한 과학기술 혁신	정선양, 송위진
95	2015. 11. 4.	생명공학기술을 활용한 우리나라 농업 발전방안	이향기, 박수철, 곽상수
96	2015. 11. 9.	유전자가위 기술의 명과 암	김진수
97	2015. 11. 27.	고령화사회와 건강한 삶	박상철
98	2015. 12. 23.	따뜻한 사회건설을 위한 과학기술의 역할: 국내외 적정기술을 중심으로	박원훈, 윤제용
99	2016. 2. 29.	빅데이터를 활용한 의료산업 혁신방안은?	이동수, 송일열, 유희준
100	2016. 4. 18.	대한민국 과학기술 미래 50년의 도전과 대응	김도연

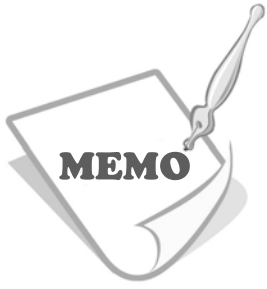
회수	일 자	주 제	발제자
101	2016. 5. 19.	미세먼지 저감 및 피해방지를 위한 과학기술의 역할	김동술, 박기홍
102	2016. 6. 22.	과학기술강국, 지역 혁신에서 답을 찾다	남경필, 송종국
103	2016. 7. 6.	100세 건강과 장내 미생물 과학! 어디까지 왔나?	김건수, 배진우, 성문희
104	2016. 7. 22.	로봇 기술과 미래	오준호
105	2016. 8. 29.	융합, 융합교육 그리고 창의적 사고	김유신
106	2016. 9. 6.	분노조절장애, 우리는 얼마나 제대로 알고 있나?	김재원, 허태균
107	2016. 10. 13.	과학기술과 미래인류	이광형, 백종현, 전경수
108	2016. 10. 25.	4차 산업혁명시대에서 젠더혁신의 역할	이우일, 이혜숙
109	2016. 11. 9.	과학기술과 청년(부제: 청년 일자리의 현재와 미래)	이영무, 오세정
110	2017. 3. 8.	반복되는 구제역과 고병원성 조류인플루엔자, 정부는 이대로 방치할 것인가	류영수, 박최규
111	2017. 4. 26.	지속가능한 과학기술 혁신체계	김승조, 민경찬
112	2017. 8. 3.	유전자교정 기술도입 및 활용을 위한 법·제도 개선방향	김정훈
113	2017. 8. 8.	탈원전 논란에 대한 과학자들의 토론	김경만, 이은철, 박홍준
114	2017. 8. 11.	새롭게 도입되는 과학기술혁신본부에 바란다	정선양, 안준모
115	2017. 8. 18.	ICT 패러다임을 바꿀 양자통신, 양자컴퓨터의 부상	허 준, 최병수, 김태현, 문성욱
116	2017. 8. 22.	4차 산업혁명을 다시 생각한다	홍성욱, 이태익
117	2017. 9. 8.	살충제 계란 사태로 본 식품안전관리 진단 및 대책	이향기, 김병훈
118	2017. 11. 17.	미래 과학기술을 위한 정책입법 및 교육, 어떻게 해야 하나	박형욱, 양승우, 최윤희
119	2017. 11. 28.	여성과기인 정책 업그레이드	민경찬, 김소영

회수	일 자	주 제	발제자
120	2017. 12. 8.	치매국가책임제, 과학기술이 어떻게 기여할 것인가?	김기웅, 묵인희
121	2018. 1. 23.	항생제내성 수퍼박테리아! 어떻게 잡을 것인가?	정석훈, 윤장원, 김홍빈
122	2018. 2. 6.	신생아 중환자실 집단감염의 발생원인과 환자 안전 확보방안	최병민, 이재갑, 임채만, 천병철, 박은철
123	2018. 2. 27.	에너지전환정책, 과학기술자 입장에서 본 성공 여건	최기련, 이은철
124	2018. 4. 5.	과학과 인권	조효제, 민동필, 이중원, 송세련
125	2018. 5. 2.	4차 산업혁명시대 대한민국의 수학교육, 이대로 좋은가	권오남, 박형주, 박규환
126	2018. 6. 5.	국가 R&D 혁신 전략 - 국가 R&D 정책 고도화를 위한 과학기술계 의견 -	류광준, 유욱준
127	2018. 6. 12.	건강 100세를 위한 맞춤 식품 필요성과 개발 방향	박상철, 이미숙, 김경철
128	2018. 7. 4.	제1회 세종과학기술포럼	성창모, 박찬모, 이공래
129	2018. 9. 18.	데이터 사이언스와 바이오 강국 코리아의 길	박태성, 윤형진, 이동수
130	2018. 11. 8.	제10회 국회-한림원 과학기술혁신연구회 포럼(미래과학기술 오픈포럼) - 미래한국을 위한 과학기술과 정책 -	임대식, 문승현, 문 일
131	2018. 11. 23.	아카데미 캐피탈리즘과 책임 있는 연구	박범순, 홍성욱
132	2018. 12. 4.	여성과학기술인 정책, 4차 산업혁명 시대를 준비하는가	이정재, 엄미정
133	2019. 2. 18.	제133회 한림원탁토론회 -제17회 과총 과학기술혁신정책포럼 수소경제의 도래와 과제	김봉석, 김민수, 김세훈
134	2019. 4. 18.	혁신성장을 이끄는 지식재산권 창출과 직무발명 조세제도 개선	하홍준, 김승호, 정지선
135	2019. 5. 9.	제135회 한림원탁토론회 - 2019 세종과학기술인대회 과학기술 정책성과와 과제	이영무
136	2019. 5. 22.	효과적인 과학인재 양성을 위한 전문연구요원 제도 개선 방안	곽승엽
137	2019. 6. 4.	마약청정국 대한민국이 흔들린다 마약류 사용의 실태와 대책은?	조성남, 이한덕









www.kast.or.kr

본 사업은 과학기술진흥기금 및 복권기금의 지원으로 시행되고 있습니다.