



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

碩士學位論文

제주 고산지역 대기 중
에어로졸 수농도 특성

濟州大學校 大學院

環境工學科

姜 照 奉

2013年 02月

제주 고산지역 대기중
에어로졸 수농도 특성

指導教授 許喆九

姜 照 奉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013年 02月

姜照奉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 起 浩 ①

委 員 趙 恩 一 ①

委 員 許 喆 九 ①

濟州大學校 大學院

2013年 03月

The distribution of Atmospheric Aerosol number concentration at Gosan in Jeju Island

Jo-Bong Kang

(Supervised by professor Chul-Goo Hu)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2012. 12

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Ki-Ho. Lee, Prof. of Environmental engineering
Thesis director, Eun-Il. Cho, Prof. of Environmental engineering
Thesis director, Chul-Goo. Hu, Prof. of Environmental engineering

December. 2012

Department of Environmental engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	vi
I 서론	1
II 이론적 배경	4
2.1 에어로졸의 거동	4
2.2 황사 현상	7
III 연구방법	12
3.1 측정장소 및 기간	12
3.2 수농도 측정장비	13
3.3 측정방법	14
3.4 기상자료	15
IV 결과 및 고찰	16
4.1 대기 에어로졸 수농도 현황	16
4.2 에어로졸 수농도의 경시변화 특성	25
4.3 에어로졸 수농도에 미치는 황사의 영향	34
4.4 에어로졸 수농도에 미치는 기상인자의 영향	50
V 결론	61
VI 참고문헌	63
감사의 글	65

List of Figures

Fig. 1. The dispersion of staple desert in asia	8
Fig. 2. Size distribution curve of aerosol mass concentration	11
Fig. 3. The location of sampling site.	12
Fig. 4. The pictures of measuring instument at Gosan area.	13
Fig. 5. Operating principle of measuring instrument	14
Fig. 6. Aerosol number concentration in the each size range	18
Fig. 7. The comulative frequency of Aerosol number concentration during experimental period.(0.25~1.3 μm)	19
Fig. 8. The comulative frequency of Aerosol number concentration during experimental period.(1.3~12.5 μm)	20
Fig. 9. The size distribution of the entire averaged aerosol number concentration during experimental period.	22
Fig. 10. Time series of total aerosol number concentration and mass concentration of PM ₁₀ during experimental period.	23
Fig. 11. Monthly variation of the aerosol number concentration during experimental period.	27
Fig. 12. Size distribution of the monthly averaged aerosol number concentration during experimental period.	28
Fig. 13. Diurnal variation of the aerosol number concentration during experimental period	30
Fig. 14. Diurnal variation of the aerosol number concentration in Seoul, 2001.	31
Fig. 15. Comparison of aerosol number concentration of 30 seperated section between Daytime and Nighttime during experimental period.	32
Fig. 16. Comparison of the aerosol size distribution between Nighttime and Daytime during experimental period.	33

Fig. 17. The size resolved aerosol number concentration of 30 seperated section during whole period (a) and Asian dust event (b)	36
Fig. 18. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during experimental period	38
Fig. 19. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 03. 15~16±15) ...	40
Fig. 20. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 03. 20~21±15) ...	41
Fig. 21. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 04. 27±15)	42
Fig. 22. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 05. 11±15)	43
Fig. 23. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 11. 11~13±15) ...	44
Fig. 24. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 12. 03±15)	45
Fig. 25. Comparison of aerosol number concentration of 23 seperated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 12. 11±15)	46
Fig. 26. Comparison of aerosol size distribution between Asian dust event and non-Asian dust event during experimental period.	48
Fig. 27. The ratio of AD/NAD, SAD/NAD of 30 seperated section during experimental period.(AD: Asian dust, NAD: non-Asian dust, SAD: severe Asian dust)	49
Fig. 28. The scatter diagram between Aerosol number concentration (0.28~0.80 μm) and weather condition	51
Fig. 29. The scatter diagram between Aerosol number concentration (0.80~6.5 μm) and weather condition	52
Fig. 30. The scatter diagram between Aerosol number concentration (6.5~32.0 μm) and weather condition	53

Fig. 31. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 seperated range and visibility during experimental period.	57
Fig. 32. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 seperated range and cloud amount during experimental period.	57
Fig. 33. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 seperated range and temperature during experimental period.	58
Fig. 34. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 seperated range and rainfall during experimental period.	58
Fig. 35. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 seperated range and humidity during experimental period.	59
Fig. 36. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 seperated range and wind speed during experimental period.	59

List of Tables

Table 1. Number of required time(hours) for the transportation of the Asian dust from origins to Korea	10
Table 2. The number of measuring and absence days during experiment period	14
Table 3. The particle size range seperated 30 section	15
Table 4. The basic statistics of aerosol number concentration of 30 seperated section during experimental period	17
Table 5. Asian dust events occurred during experimental period	34
Table 6. The average, minimum, maximum and standard deviation of meteorological data during experimental period.	50
Table 7. The correlation coefficients for aerosol number concentration and weather condition during experimental period	55

Summary

This study has been performed to clarify the characteristics of the temporal distribution of aerosol number concentration and to understanding the effects of Asian dust and meteorological elements on aerosol number concentration at Gosan site in Jeju island which is known as background area in Korea, from March 2010 to February 2011.

The aerosol number concentration have measured with an aerodynamic particle sizer spectrometer(APS) for 30 size intervals from 0.25 μm to 32.0 μm .

The entire averaged aerosol number concentration during experimental period is about 241 particle/ cm^3 . The aerosol number concentrations during severe-Asian dust event, Asian dust event and non-Asian dust event are dramatically decreased with increased particle size. Most of number concentration are distributed below size range 0.5 μm and the more size diameter are increased, the more aerosol number concentration are decreased. The aerosol number concentration in range of larger than 3.5 μm are almost zero particle/ cm^3 .

The monthly variation in the number concentration in small particle of diameter less than 0.65 μm are observed very different patterns compared with the variations in range of larger than 0.65 μm . And then diurnal variation in the number concentration have generally showed that the concentration in daytime lower than in nighttime over the entire size range, by the way, the difference is smaller size range($< 0.1 \mu\text{m}$) are not much compared with the differences in larger than 1.0 μm .

The entire averaged aerosol number concentration during Asian dust phenomenon in experimental period is about 341 particle/ cm^3 . During asian dust events, the number concentration in small size ranges($\geq 0.4 \mu\text{m}$) are similar to non-asian dust period. however, those in large size ranges($\geq 0.7 \mu\text{m}$) are very higher than non-asian dust period. The ratio of the averaged aerosol number

concentration during weak and severe Asian dust events to those during non-Asian dust period are not high in fine particle size range but they are very high in larger.

The aerosol number concentrations have been hardly correlated with meteorological elements, such as visibility, cloud amount, temperature, rainfall, humidity and wind speed. For example, the correlation coefficient between number concentration of size range $0.50\sim 0.58\ \mu\text{m}$ and visibility has been 0.5 negatively, that is the highest value of correlation coefficient in this study.

I. 서 론

현대문명의 발전을 기점으로 급속하게 인구, 산업, 경제의 발전이 이루어지면서 여러 유형의 환경오염물질이 대기로 방출되어 대기오염의 진행이 급속하고 다양하게 진행되고 있다. 이로 인해 많은 사람들은 인간의 생활에 직,간접적으로 영향을 미치는 대기환경 문제에 대한 관심이 증가하고 있고 대기오염물질에 대한 현상 규명 및 관리방안의 모색을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 대기오염을 유발하는 물질은 보통 아황산가스, 일산화탄소 등의 가스상물질과 해염입자, 분진등의 입자상물질로 분류되어지고 대기중에서 서로 화학, 물리적반응 또는 상호작용으로 인하여 더 복잡하고 새로운 오염물질이 생성되기도 한다.

대기환경을 오염시키는 물질 중 입자상물질은 미스트(mist), 먼지(dust), 연기(smoke), 훈연(fume), 안개(fog), 박무(haze), 스모그(smog)등과 같은 형태로 존재하는데 이와 같이 대기 중에 부유하는 고체 또는 액체상의 입자를 통칭 에어로졸이라 한다.(Green and Lane, 1964) 에어로졸은 우리 주변에서 다양한 경로를 통하여 발생이 되는데 매년 봄이 되면 중국에서 우리나라에 유입되어 큰 피해를 주는 황사나 바람이 불면 꽃에서 흩어져 날리는 꽃가루, 파도가 부서지며 생기는 해염입자 등의 자연적으로 발생하는 경우와 굴뚝에서의 연기, 자동차의 매연, 채석장에서의 먼지등 인간의 생산 활동에 의해서도 에어로졸은 발생한다. 뿐만 아니라 우리가 생활하면서 요리를 할 때, 도보를 걸을 때, 책장을 넘길 때에도 수없이 많은 에어로졸이 발생이 된다.

이렇게 발생되어 대기중에 존재하는 에어로졸은 그 입자의 직경이 약 $0.001\sim 500\mu\text{m}$ 범위에 분포하고 일반적으로 크게 3개의 모드인 삼봉분포로 이루어져 있다. 이 중 입자의 직경이 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 범위인 아이트켄(Aitken) 모드는 주로 가스에서 입자로의 변환과정에서 생성이 되고 이렇게 생성이 된 아이트켄(Aitken)모드 입자가 응집과 응결반응 과정을 통해 입경이 $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ 범위인 적산모드를 형성하게 된다. 보통 아이트켄(Aitken)모드와 적산모드는 인위적인 기원에 의해 발생이 되고 주로 자연적인 기원에 의해 발생하는 경우는 입자의 직경이 $1\sim 2\mu\text{m}$ 이상인 조대입자 영역이다.(정창훈 등, 2002) 에어로졸의 대표적인 조성은 황산염, 질산염과 같은 산성물질과 PAHs 등의 독성이 강한 유기물질, 2차입자의 화학조성 중 음이온 성분(SO₄⁻, NO₃⁻등), 그리고 Cu, Zn, Pb등과 같은 중금속류로 구성이 되어 있다.(서정민 등, 2007)

이러한 에어로졸은 대기에서 입사하는 태양복사를 산란, 흡수하거나 응결핵으로 작용하여 구름의 수명을 결정하는 등의 영향으로 지구 대기의 복사평형에 영향을 줄 뿐 아니라 전지구적 기후변화, 광합성작용 억제, 시정악화, 호흡기질환등 인간 및 생태계에도 영향을 준다.(Kiehl and Briegleb, 1993; Charlson et al., 1992) 에어로졸의 이러한 영향 정도를 판단하는 방법으로는 단위 체적의 기체중에 포함되는 입자상물질의 질량을 나타내는 중량농도, 단위체적의 공기중에 들어있는 입자의 개수를 나타내는 수농도, 그리고 중량농도 또는 개수농도와 상대 관계에 있는 양을 측정하는 상대농도의 세가지 방법으로 나뉜다. 일반적으로 대기오염의 정도를 판단하고 대기환경기준상 지표로 활용하고 있는 것은 중량농도이다. 에어로졸의 중량농도에 대한 연구는 우리나라뿐만 아니라 세계 곳곳에서 예전부터 수없이 많이 진행이 되었다. 하지만 그러한 노력에도 불구하고 오늘날 에어로졸과 같은 대기오염지표인자를 통해 판단한 대기오염도는 상당히 악화되는 추세이고 에어로졸이 가장 큰 대기오염의 요인으로 작용한다.

일반적으로 에어로졸은 생성요인, 입경의 크기, 화학적 성질등에 의해 특성이 크게 변화하는데 특히 입경별 농도분포와 변화는 에어로졸의 가장 중요한 특성으로 앞에서 말한 에어로졸이 대기환경과 인간의 생활에 미치는 영향을 파악하는데 유용한 정보를 확보할 뿐 아니라 이를 해석하는데 있어 중요한 요소이다.(정창훈 등, 2002)

또한 에어로졸 복사강제력을 산출하고 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향을 평가하는데 있어서도 필요한 매개변수가 된다. 이러한 에어로졸의 입경별 농도를 파악하기 위해서는 평가방법으로 수농도를 사용한다. 수농도는 생리학적 기전 상으로는 대기오염의 정도를 판단하는 지표농도로 가장 널리 사용되고 있는 중량 농도보다 더 중요한 지표로 인식(정창훈 등, 2005)됨에 따라 최근에는 수농도에 대한 관심이 높아지고 있다.

이에 따라 에어로졸 수농도에 대한 연구는 오래 전부터 다양한 관점에서 수행되어져 왔다. 주로 에어로졸 수농도의 북태평양 상에서 관측(Uematsu et al., 1983)된 것과 황사 발원지 부근인 중국 Zhangye 에어로졸 수농도의 계절변화(Zaizen., 1995)와 화학분석연구(Okada et al., 1995), 에어로졸 수농도에 영향을 미치는 황사나 기상요소와의 관계에 대해 설명한 황사시 베이징의 에어로졸 특성(Q. Shaohou et al., 1981)과 수농도, 중량농도의 가시도 분석(Fengqi Yan et al., 2004)등에 관한 연구들이 있다. 국내의 연구 동향을 살펴보면 황사시 에어로졸 수농도 분포특성 및 상관성

(정창훈 등, 2005)와 배경지역과 도심지역의 수농도 비교(전영신 등, 1999), 연직 에어로졸 수농도 크기분포(최병철 등, 2005), 에어로졸 수농도의 지역별 비교연구(김지영 등, 2001)등 다수의 에어로졸 수농도에 대한 연구가 수행되었다.

에어로졸에 영향을 미치는 대표적 요소로 황사현상과 기상인자를 들 수 있다. 황사현상은 에어로졸에 영향을 미치는 요소로서 매년 봄철이 되면 주기적으로 발생하여 공기질 저하 및 시정악화와 같은 결과를 초래하기 때문에 가시적인 현상으로 받아들여지고 발생은 그 빈도가 더하고 피해 또한 커지는 실정이다.(김민영 등, 2003) 이처럼 황사는 에어로졸과 관련된 가장 직접적인 자연현상을 대변하는 중요한 요소이다. 따라서 황사와 관련하여 연구함은 에어로졸의 발생 및 이송과 관련된 여러 가지 현상을 규명하는데 도움이 될 것이다. 그리고 에어로졸의 농도 변화는 다양한 기상적인 요소에 의해서 영향을 받기도 하는데 일반적으로 입경 크기별 에어로졸의 수농도는 기상요소들의 의존성에 의해 서로 다르게 나타난다. 이에 기상요소와의 관계를 분석하면 에어로졸의 거동을 예측하는데 보탬이 될 것이다

이에 따라 본 연구에서는 황사등 월경성 대기오염물질의 영향을 파악하기에 유리한 지리적 조건을 갖고 있고 인위적 발생원의 영향을 배제할 수 있어 대기배경지역 알려져 있는 제주도 고산지역에서 2010년 03월부터 2011년 02월까지 연속적으로 관측된 입경별 에어로졸 수농도의 특성을 파악하고자 하였다. 주요연구 내용은 에어로졸 수농도의 현황 및 시·공간적 분포 특성을 파악하였고, 또한 에어로졸이 대량으로 유입되는 황사현상이 수농도에 미치는 영향 및 기상학적 요소들의 변화에 따른 에어로졸 수농도의 변동을 파악하였다.

II 이론적 배경

1. 에어로졸의 거동

1.1 에어로졸의 생성

에어로졸의 생성과정에는 입자로서 직접 대기중으로 방출되는 1차입자와 일단 가스상 물질로서 대기중 방출된 물질이 물리, 화학적 변화를 거쳐 입자화되는 2차입자로 크게 구별된다. 지구규모에서 2차입자는 전체 입자의 40~50 %를 점하고 있으며, 2차 입자의 전이물질인 가스상물질의 오염농도가 높은 오염된 도시 대기중에서는 에어로졸의 농도가 높으며, 특히, 2 μm 이하의 미세입자에서는 2차입자의 기여율이 84 %에 달하고 있다. 또한 기체에서 생성되는 2차입자는 Aitken입자에 해당하나 Brown운동 등으로 다른 입자와 응결하기 때문에 2차 입자가 Aitken입자로 존재하는 시간은 짧고 응집, 응결작용에 의하여 성장한다. 예로 0.002 μm 정도의 입자가 0.01~0.1 μm 정도로 성장하고, 그 후에는 수분과 가스 등을 흡수하여 입자간의 응집을 계속하면서 2 μm 정도로 성장한다.

1차 입자는 연료 및 기타 물질의 연소에 의해 발생하는 입자와 물체의 파쇄, 선별 기타 기계적 처리, 또는 퇴적에 의해 발생, 비산되는 입자등이 있다. 인위기원에 의한 1차입자는 크게 나누어 고정발생원과 이동발생원에서 발생배출되는 입자로 분류된다. 고정발생원으로는 공장의 매연발생시설과 분진발생시설 외에 가정 등 군소발생원이 있다. 이동발생원은 사람과 차, 물체이동에 의해 발생하는 것으로 자동차와 선박, 항공기 등이 대표적이다. 자연기원으로 중요한 입자로는 해염입자와 토양입자를 들 수 있다. 특히 사방이 바다로 둘러싸인 일본에서는 해안선을 따라 도시가 발달되어 있기 때문에 계절 특유의 바람에 의해 날아다니는 해염입자의 영향을 상당히 받게 된다.

2차 생성입자는 대기중에 방출된 가스상 물질이 대기중에서 광화학반응과 중화반응을 거쳐 입자화된 것으로, 황산염(SO_4^{2-} 화합물), 질산염(NO_3^- 화합물), 염산염(Cl^- 화합물) 등이 이에 해당한다. 그리고 인위기원, 자연기원 등의 종류에 상관없이 가스상물질이 전구물질이며 유래에 상관없이 유황화합물, 질소화합물, 염소화합물, 탄화수소화합물이 주요물질이다. 대기환경중에서 가스상물질이 입자상물질로 변환은 다음과 같다.

염화수소가스의 경우 대기중에 방출된 후에 암모니아가스에 의해 중화되고 생성된 염화암모늄은 온도에 따라 입자화된다. 이 과정은 변질과정을 동반하지 않는 단순한 중화반응인데, Gas-to-Particle Conversion으로 2차 생성과정에 포함된다. 그리고 인위적 기원의 가스상 입자는 대부분이 SO₂로 매연발생시설과 디젤기관 등 유황을 함유하는 화석연료 연소에 의한 배기가스 등에 의해 대기중으로 방출된다. 대기중의 질소산화물로서는 NO, NO₂ 이외에 N₂O 등을 들 수 있다. 발생원 가운데 인위기원에 의한 기체에서는 물질연소에 따라 배출되는 NO_x가 중심을 이루며, 공장 등의 생산활동, 사람과 물질의 이동, 일상생활 활동 등의 소위 에너지를 얻기 위한 연소과정에서 발생한다. 염소화합물은 겨울철 에어로졸의 조성성분으로서 자주 관찰된다. 전구물질인 염소는 인위기원에서 염소제조 이용시설 외에 염소물질을 포함하는 석탄(0.07~0.20 %)과 석유(0.10~4.6 %) 등의 연소 및 플라스틱(염화비닐, 폴리염화비닐리덴, 네오프렌 등)과 같이 다량으로 염소를 포함한 물질이 연소되어 배출된다.

자연기원에는 화산과 해염입자 이외에는 거의 존재하지 않지만 해염입자의 경우 질산가스와 반응하여 염화수소를 생성한다.

탄화수소는 탄소와 수소로 구성된 화합물의 총칭으로 대기중에서 비교적 안정된 메탄과, 광화학반응 등에 기여하는 활성된 비메탄탄화수소로 분류된다. 인위기원에 의한 탄화수소는 도료와 유기용제를 사용하는 공장 외에 석유저장 출하 급유시설 및 자동차 배기가스에도 함유되어 있으며 다양한 발생원에서 배출되고 있다. 대표적인 자연기원으로는 식물의 테초펜이 있다.

1.2 에어로졸의 소멸

대기 중 에어로졸은 자연 및 인위적인 기원에 의하여 1, 2차입자가 생성이 되지만 에어로졸의 제거과정에는 입경과 밀접한 관계가 있다. 입경 10 μm이상의 거대입자는 중력낙하에 의해서, Aitken입자는 응집에 의해서 신속하게 대기 중에서 제거되기 때문에, 그 체류시간은 수분~수시간 정도로서 매우 짧다. 이것에 대하여 0.1 μm<dp<1 μm 사이의 입자에 유효한 제거기구는 운핵, 빙정핵 형성에 의한 제거로 대기 중 체류시간은 통상 수일 정도로 길다. 또한, 대기 중에 배출된 에어로졸은 체류시간이 길면 서서히 축적되거나 변질되고 또한 장거리 수송에 의하여 광역오염을 일으킨다. 전형적인 체류시간은 대류권 하부에서 수일에서 몇주되지 않으나 대류권 상부에서는 1개월정도에 달하고 있으며, 성층권에서는 수개월에서 수년이나 소요되어 상층부로

갈수록 체류시간이 길어지는 경향이 있다. 한편, 에어로졸은 발생 후에 대기 중에 확산되면서 복잡한 반응을 거쳐 변환하기도 하고 토양, 산림, 물, 건축물에 침착되어 소멸하기도 한다. 대기중 소멸과정은 크게 습성침착과 건성침착으로 나누어진다.

(1) 습성침착

대기 에어로졸의 입경은 0.001~100 μm 정도의 범위에 걸쳐 존재하므로 빗방울에 의한 입자 포집 메커니즘도 입경별로 차이가 난다. 빗방울과 입자사이의 충돌 메커니즘에는 주로 입경이 0.1 μm 이하의 입자에 대해서는 확산력, 그리고 1 μm 이상의 입자에 대해서는 차단력, 관성력이 크게 작용한다. 여기서 빗방울과 에어로졸 입자 사이의 충돌 메커니즘에 지배적으로 작용하는 브라운확산, 차단력, 관성력만을 고려할 경우 전체 충돌포집효율은 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\text{전체충돌포집효율} = 1 - (1 - \text{브라운확산}) \cdot (1 - \text{차단력}) \cdot (1 - \text{관성력})$$

또한, 빗방울과 입자의 입경별에 따른 충돌 포집효율의 계산결과에서, 입경별 충돌 포집효율은 입경 약 0.1 μm 이하의 범위에서는 브라운확산, 입경 약 2~5 μm 의 범위에서는 차단력, 그리고 5 μm 이상에서는 관성력에 의한 포집효과가 큰 것으로 알려져 있다.

(2) 건성침착

건성침착에서 대기중의 오염물질이 어느정도 지표면 부근으로 침착하는가를 추정하는 것은 오염물질의 대기 중 농도를 예측 또는 침착물의 지표면, 수면 등의 이동량이나 생활환경, 생태계에 주는 부하량을 간접적으로 예측하는 면에서도 매우 중요하다. 반대로 대기 중 오염물질의 농도로부터 침착량을 예측하는 방법 또한 중요한 연구 대상이다. 일반적으로 건성침착에서는 침착량 및 침착속도가 가장 중요한 인자이며, 특히 대기 에어로졸입자의 경우 침착속도는 입경에 크게 의존한다.

2. 황사현상

2.1 정의와 역사

중국과 몽고의 사막지대나 황화중류의 황토지역 등에서 저기압이 통과할 때 한랭전선 후면에서 부는 강한 바람이나 지형에 의해 만들어진 난류등에 의한 영향으로 상층으로 날려 올라가 공중에 부유하고 이송되는 먼지를 황사현상이라 하는데(Lin, 2001) '흄이 비처럼 떨어진다' 하여 우리나라에서는 예로부터 우토(雨土), 토우(土雨)라 적고, '흄비'라 불렀다. '토'는 나무나 풀의 싹이 흄덩이를 뚫고 땅위로 돌아나는 모양을, '우'는 구름에서 비가 떨어지는 모양을 본뜬 것이다. 우리나라는 일제 강점기(1910년 이후)부터 '황사'라 부르고 있다.

중국의 경우 서기 300년 이후부터 황사관측기록이 남아있고, 조선왕조실록에도 황사현상에 대한 기록이 자주 나온다. 태종 11년에는 14일동안 흄비가 내렸다는 기록이 있고, 성종 9년 4월에는 4월, 숙종 4월에도 각각 흄비가 내려 옷에 흔탁한 자국이 남았다는 기록이 있다. 역사시대 이전에도 황사현상이 있었다는 것은 현재 전세계 지표면의 약 10 %정도를 이루고 있다는 퇴스지대의 분포를 통해서도 알 수 있다. 중국의 황토고원은 두께가 약 200 m가 넘는 퇴스 침적지대가 있는 데 이곳은 신장 지방과 타클라마칸 사막 주변경계에 해당한다.

우리 나라와 일본은 아시아 대륙 중심부로부터 비롯되는 황사의 영향을 받고 있으며, 중앙아시아에서 발원한 황사는 하와이나 알래스카 북쪽 해안에도 침적된다. 또한 아프리카의 사하라 사막의 황사는 대서양을 건너 플로리다반도에서도 수차례 관측되었고, 북쪽으로 이동하여 유럽에서도 관측된 바 있다.

2.2 발원지와 발생원인

Fig. 1에서 보듯이 우리나라에 영향을 미치는 황사의 주요 발원지는 중국과 몽골의 경계에 걸친 드넓은 건조지역 (타클라마칸, 바다인자단, 텐겔, 오르도스, 고비지역, 만주)과 황화중류의 황토지대 지역이다. 중국은 서고동저형의 지형 특성을 갖고 있으며 다양한 기후형태를 나타낸다. 연강수량이 400 mm이하이고, 사막이 대부분인 서북 건조지역이 바로 황사의 주요 발원지이다. 타클라마칸 사막은 타림분지 중서부에 있으며, 중국 사막 총면적의 52 %를 차지하는 최대의 사막(1000 km×400 km)이고, 이 사막의 동북방향에 위치한 고비사막은 연강수량이 30 mm밖에 안되는 건조지역으로

바람이 매우 강한 곳이다. 1990년대까지만 해도 황하 상류와 중류지역에서 발원한 황사가 우리나라에 주로 영향을 주었으나, 최근 3년 전부터는 이 지역보다 훨씬 동쪽에 위치한 내몽골고원 부근에서도 황사가 발원하여 우리나라로 큰 영향을 주고 있다. 이것은 황사발원지가 동쪽으로 더 확대되고 한반도로 더 가까워지고 있으며, 우리나라에 지금까지 겪지 못했던 심한 황사가 나타날 가능성이 커진 것을 시사한다.

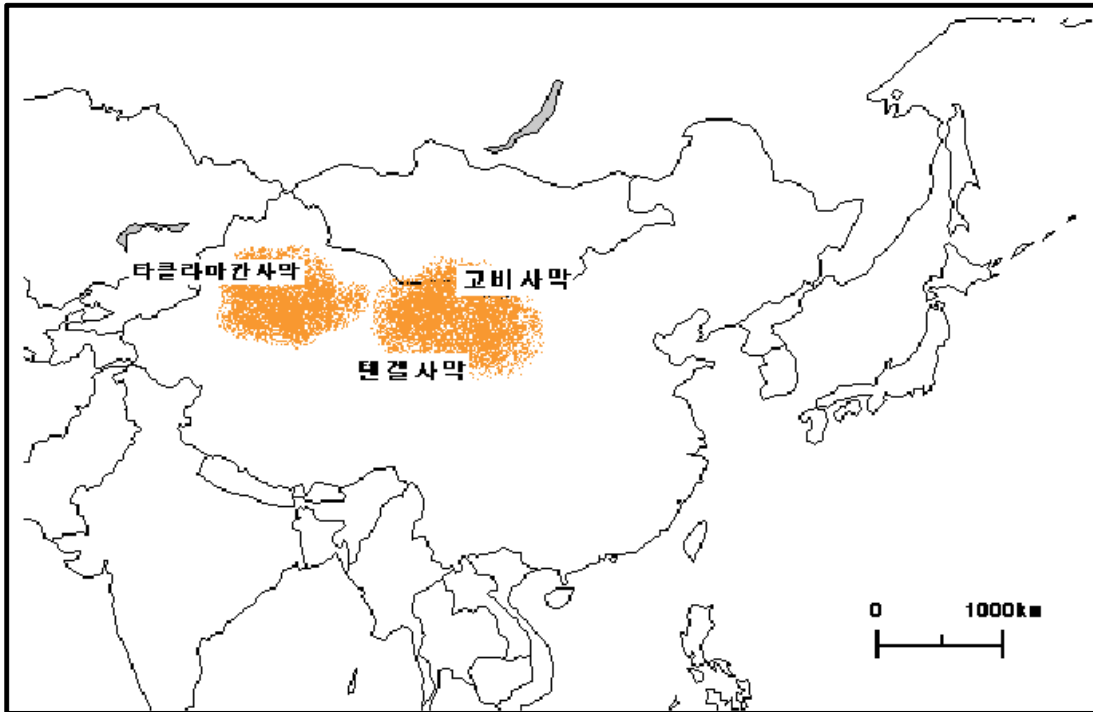


Fig. 1. The dispersion of staple desert in asia.

황사발원지에서는 우리나라에서 보이는 안개처럼 뿌연 먼지가 아니라 무시무시한 바람과 함께 나타나는 모래폭풍(沙塵暴; 사천바오)이다. 이 모래폭풍은 갑자기 나타나 1 km 밖을 안보이게 한다. 우리나라와 일본에서 볼 수있는 황사현상은 중국에서 '부진(浮塵)'이라 부른다. 중국북경에서는 이런 모래 폭풍이 최근 50년간 감소하는 추세였으나 2000년부터는 다시 증가하고 있다.

황사의 발생원인은 우선 먼지를 부양시킬 수 있는 상승류가 있어야 하고, 황사 발원지의 강수량이 적고, 증발이 잘 되며, 풍속이 강해야 하는 등의 기후적 특성이 충족되어야 한다. 또한, 봄철 해빙기에 토양이 잘 부서져 부유하기 적당한 20 μm 이하 크기의 먼지가 다량으로 배출되도록 지표면에 식물이 거의 없어야 한다. 중국은 유라시아 대륙의 중부에 있어 서고 동저의 지형 특성을 가지며, 다양한 기후가 존재한다. 자연 지리면에서 동부 계절풍 지역, 서부 건조 지역과 한랭 지역의 발원지로 불

려지고 있다. 중국의 서북 건조 지역은 유라시아 대륙의 중심부이기 때문에 해양과 멀리 떨어져 있어 건조하며 강수량이 적은 고온 건조한 기후적 특성으로 인해 화북 이북 지역의 토양이 상당히 건조하여 이 지역에서 황사 발생이 가능한 상태가 된다.

앞에서 황사가 발생하기 위한 조건으로 고온 건조한 기후를 들었었는데, 황토먼지가 생겼다고 무조건 황사현상이 발생하는 것은 아니다. 우선 토양이 메마르면서 먼지가 많이 발생해야 하고 동시에, 발생한 먼지가 공기 중으로 올라갈 수 있도록 땅 표면과 공기사이의 온도차이가 나서 대기가 불안정해야 한다. 즉, 강한 햇빛이 비추어야 한다. 또한, 이 먼지를 이동시킬 수 있는 강한 바람이 있어야 한다. 강풍이 불면 모래알은 움직이거나 구르다가 조금씩 도약한다. 햇빛이 지표면을 강하게 가열한 상태이면 대류가 생겨 모래알이 부력을 받아 공중에 떠오르게 된다. 이때 상공에 강한 바람이 불면 부유된 모래 먼지가 우리 나라 쪽으로 멀리 날아올 수 있게 된다. 이처럼 강풍이 불게 되는 때는 주로 강한 상승기류(저기압)가 황토지대를 통과할 때이다. 저기압이 통과할 때 한랭전선 후면에서는 차가운 공기가 지표의 복사열로 따뜻해진 공기를 상승시키게 되므로, 강한 상승류가 생기게 된다.

2.3 황사의 수송

황사는 발원지에서 발현하여 주변지역으로 수송되기까지 3가지 수송단계를 갖는다. 우선 지면에서의 Creeping, Saltation, 그리고 공중으로 Suspension이라는 총 3단계의 수송단계를 거친다. 그리고 각 수송단계에서의 입자크기는 Creeping단계에서는 500~1000 μm 이상, Saltation단계는 50~1,000 μm , Suspension단계에서는 50~100 μm 이하이다. 그리고 Saltation 입자는 거리상으로 10 m 이상 이동하지 못하지만 일단 부유상태가 되면 수 Km는 수송된다. 따라서 20~30 μm 입자는 고도 5 Km까지 상승하며 상승한 입자는 한반도 상공부근에서 큰 입자는 작은 입자보다 비교적 침강속도가 빠르고 약 20 μm 입자들은 2,000 Km까지 수송되고 5 μm 보다 작은 입자들은 약 9일 후에 하와이 섬까지 수송된다.(Murayama N et al., 1987)

그리고 황사의 발원지로부터 한반도까지 수송되는데 소요되는 시간을 알기 위하여 지상일기도를 통하여 수송시간을 파악한 결과를 Table 1에 나타냈다. 표에서 보면 알 수 있듯이 가장 멀리 떨어져 위치한 Taklamakan 사막으로 부터는 85.8시간, Gobi 사막으로 부터는 55.3시간, 황하상류역과 A-la shan 사막으로부터는 43.3시간으로 나타났다.(윤용황, 1990)

Table 1. Number of required time(hours) for the transportation of the Asian dust from origins to Korea

Hour	Source Origin			Total
	Taklamakan	Gobi	Yellow river and A-la shan	
96~108	3	-	-	3
84~96	4	-	-	4
72~84	1	1	-	2
60~72	1	1	1	3
48~60	-	4	3	7
36~48	-	1	5	6
24~36	-	-	1	1
Total	772	387	434	1593
Average	85.8	55.3	43.4	61.5

2.4 에어로졸에 미치는 황사의 영향

황사는 많은 양의 조대입자와 미세입자의 먼지를 동반 수송하므로 황사수송로에 위치한 지역에서의 먼지농도는 평상시에 비해 4배~10배 이상으로 높아진다.(최 효 등, 2008) 그리고 금속성분의 경우 황사 현상시 Al의 농도는 비황사시 보다 약 5배정도의 높은 농도를 보이며, Ca은 황사시에 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다.(국립환경연구원, 1989, 1990, 1991)

황사시 에어로졸의 입경분포를 보면 여러 보고된 황사자료들을 종합해봤을 때 대부분이 1.0~10.0 μm 영역으로 나타났고, 0.3~0.5 μm 영역에서는 오히려 입경분포가 감소한다는 결과도 있다. 세부적으로 보면 1.1 μm 이상의 조대입자가 에어로졸 농도의 79.2 % 이고 비황사시에는 약 54.8 %를 차지하여 황사입자가 주로 1.1 μm 이상의 조대입자에 속하는 것으로 나타났다.(신은상 등, 1992) Fig. 2는 황사시와 비황사시 에어로졸 입경분포를 나타낸 것으로 앤더슨 샘플러의 각 단에서 포집된 먼지를 빈도분포로 표현한 방법에 따라 곡선으로 나타낸 것으로 황사기간중 측정된 입경 1.1 μm 이상의 조대입자 구간이 1.1 μm 이하의 미세한 입경보다 크게 나타나 황사에 의한 영향이 큼을 단적으로 보여주고 있다.(신은상과 김희강, 1992)

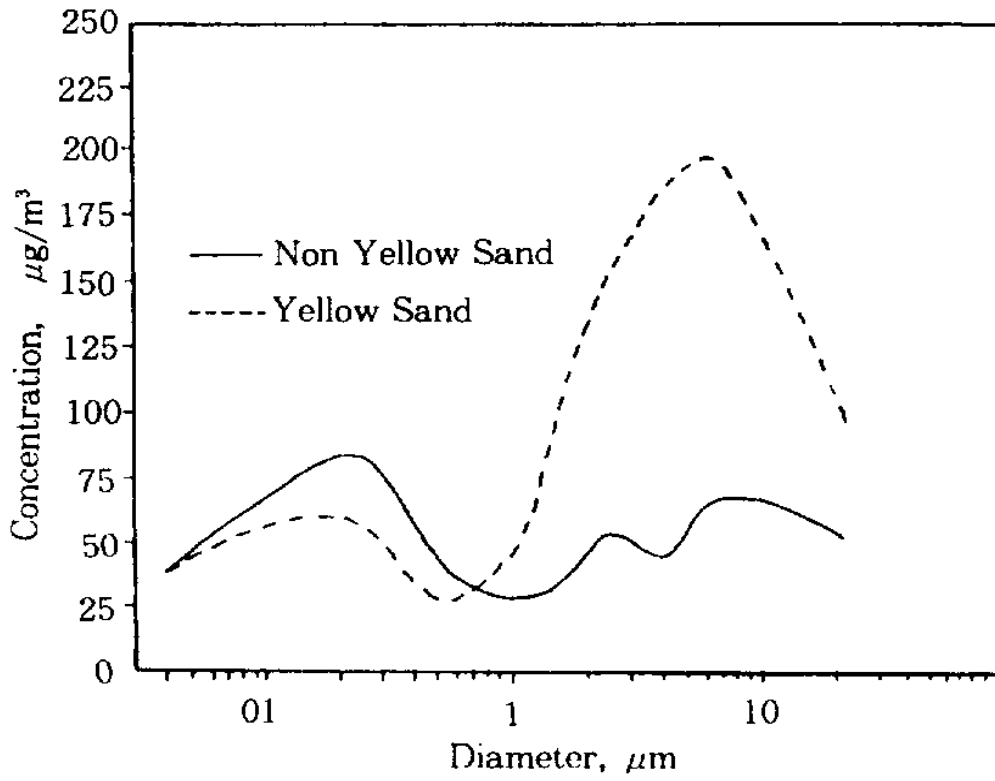


Fig. 2. Size distribution curve of aerosol mass concentration.

Ⅲ 연구방법

1. 측정장소 및 기간

본 연구를 수행한 제주도는 한반도와 100 Km, 중국 상하이와 500 Km, 일본 규수와 250 Km 떨어진 한·중·일 중앙에 위치하여 지형학적으로도 중요하며, 동북아시아 지역의 대기오염물질 장거리 이동현상을 평가하기에 적합하다.

연구를 수행한 측정 장소는 Fig. 3에 보여지듯이 제주특별자치도 제주시 서쪽 끝에 위치한 고산지역(33° 17' N, 126° 10' E)에서 측정하였다. 연구가 이루어진 고산지역은 청정지역으로 국지적인 오염원으로 부터의 영향이 적고 인구밀도가 낮아 인위적인 발생원의 직접적인 영향을 배제할 수 있는 배경지역으로 이 곳으로 유입되는 대기오염물질의 영향을 측정하기에 최적의 지역이다.

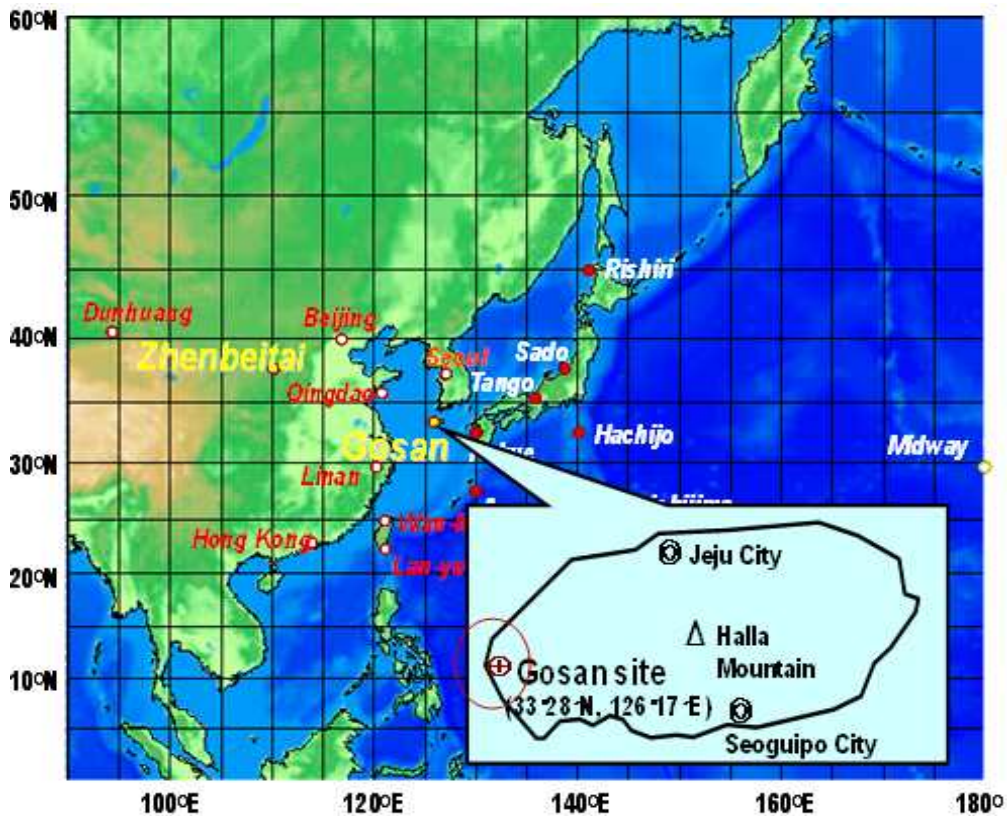


Fig. 3. The location of sampling site.

본 연구에서 에어로졸 수농도를 측정할 기간은 2010년 03월 01일 00시부터 시작하여 2011년 2월 28일 23시까지 1년동안 측정하였다.

2. 수농도 측정장비

본 연구에서는 제주지역의 에어로졸 수농도 특성을 파악하기 위하여 Fig. 4에 그림으로 보여지는 광산란법 분광기인 Aerodynamic particle sizer spectrometer (APS, GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co., Model #179, Germany)에 야외 현장용 미세분진 연속측정 수분제어시스템(GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co., Model #365, Germany)를 부착하여 사용하였다.



Fig. 4. The pictures of measuring instrument at Gosan area.

이 기기의 측정원리는 Fig 5에 보여지듯이 개개의 입자에 대한 산란광의 강도를 측정하여 그 강도와 미리 정해진 강도와 관계에 의해 입자의 크기를 추정하는 것이다. 즉, 펌프로 흡입된 시료 공기가 입자 개개의 산란광의 강도를 특정한 산란각에 대해 측정하고 산란광은 그 양에 비례하는 펄스 형태의 전기적 신호로 변환된다. 이때 전기적 신호의 크기는 입자의 크기와 관계되고, 펄스수는 입자수와 관계되어 에어로졸 입자의 크기별 수농도를 측정할 수 있게 하는 원리이다.

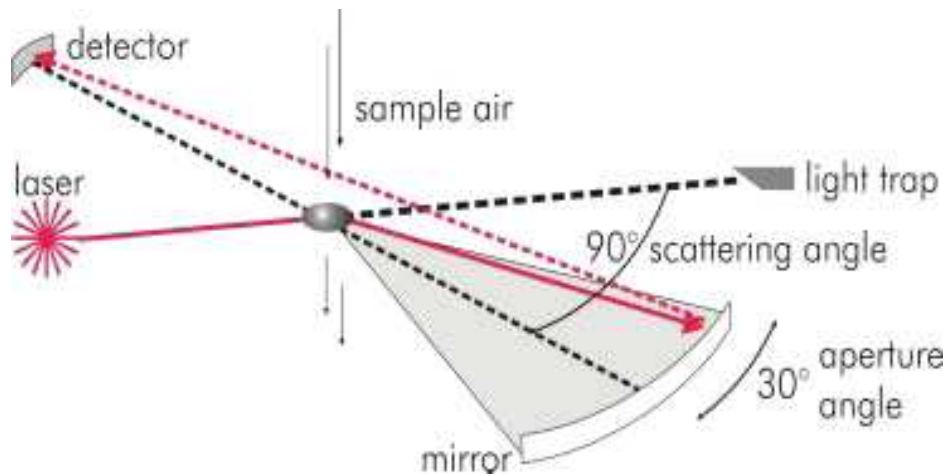


Fig. 5. Operating principle of measuring instrument.

3. 측정방법

수농도 측정장비(APS)로부터 측정되어진 수농도는 TCP/IP to COM port를 사용하여 메모리카드에 저장하고, Cat 5 cable을 이용하여 현장의 컴퓨터에 저장하였다. 그리고 현장의 컴퓨터를 연구실의 컴퓨터로 원격제어하여 연속적으로 실시간 관측이 가능하도록 시스템을 구성하여 측정하였다. 이러한 방법으로 측정된 데이터는 5분 간격으로 수집한 후 1시간단위로 평균하여 에어로졸 수농도를 연속 기록하였다.

측정한 결과는 1시간 간격으로 기록하여 총 8760개(365일)이다. 이 중 1일 데이터로 봤을 때 24시간중 17시간이상(70 %이상) 확보되지 않은 데이터는 결측치로 간주하여 제거하였다. 이렇게 결측치를 제거하고 실제 사용한 데이터를 월별로 Table. 2에 나타내었다. 본 연구에서 실제적으로 사용한 데이터는 총 8760개중 6456개이고, 일년 365일로 봤을때는 269일의 데이터를 사용하였다. 이는 전체 데이터중 73.69 %이다.

Table 2. The number of measuring and absence days during experiment period

Month	Total	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
Measuring days (absence days)	269 (98)	31 (0)	30 (0)	20 (11)	9 (22)	10 (21)	17 (14)	27 (4)	20 (11)	29 (1)	29 (2)	31 (0)	16 (12)

그리고 연구실의 컴퓨터에 기록되어진 에어로졸 수농도 결과는 0.25~32.0 μm 의 입자 상물질 측정 범위를 갖고 Table 3에서 보는 바와 같이 입경구간은 첫 구간인 0.25~0.28 μm 을 시작으로 마지막인 30.0~32.0 μm 구간까지 총 30 range로 구성되어 진다.

Table 3. The particle size range separated 30 section.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.25-0.28	0.28-0.30	0.30-0.35	0.35-0.40	0.40-0.45	0.45-0.50	0.50-0.58	0.58-0.65	0.65-0.70	0.70-0.80
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.80-1.0	1.0-1.3	1.3-1.6	1.6-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-5.0	5.0-6.5
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-10.0	10.0-12.5	12.5-15.0	15.0-17.5	17.5-20.0	20.0-25.0	25.0-30.0	30.0-32.0

4. 기상자료

본 연구에서 기상요소가 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 측정기간동안의 기상상태에 대한 데이터는 제주특별자치도 제주시 한경면 고산리에 위치한 고산 기상관측소의 자료를 이용하였다. 우리나라 남서해안 최서단에 위치한 고산 기상관측소는 월경성 대기오염물질을 모니터링하기에 아주 적합한 배경일뿐 아니라 태풍이 지나가는 길목에 자리잡아 태풍감시에 중요한 역할을 하고 황사가 가장 먼저 관측되는 곳이기도 하다. 이러한 관측조건에서의 기상은 앞으로 본 연구에서 에어로졸 수농도 특성을 다양하게 설명할 수 있는 변수로서 설명력이 크다 할 수 있다. 연구기간동안의 평균기온은 15.4 $^{\circ}\text{C}$, 평균습도는 70.7 %, 일평균 강수량은 3.6 mm, 평균풍속은 7.2 m/s, 주풍향은 북북서, 동남동이었고, 구름조금, 구름많은의 일 기상상태인 날이 많았다.

IV 결과 및 고찰

1. 대기 에어로졸 수농도 현황

본 연구에서 인위적인 발생원의 영향이 적고 이 곳으로 유입되는 대기오염물질의 영향을 파악하기에 최적의 배경지역인 제주도 고산지역의 전반적인 에어로졸 수농도 현황을 분석하기 위하여 APS장비로 측정된 에어로졸 수농도의 평균값과 최대, 최소값등을 정리하여 Table. 4에 나타냈다.

측정된 0.25~32.0 μm 입경에서의 전체적인 에어로졸 수농도 범위는 2~1789 particle/cm³이고, 전체평균은 242 particle/cm³, 표준편차는 241 particle/cm³으로 나타났다. 입경구간별로 자세히 살펴보면 최소입경구간인 0.25~0.28 μm 에서 평균수농도와 최대수농도, 표준편차는 각각 81.51 particle/cm³, 461.48 particle/cm³, 63 particle/cm³으로 다른 입경구간에 비해 평균과 최대값이 가장 높았고 수농도 변동폭도 가장 큰 것으로 나타났다. 입경구간이 커질수록 이러한 수농도 통계값들은 낮아지는 가운데 입경구간이 0.40~0.45 μm 에서 평균수농도가 13.78 particle/cm³을 나타냈고, 0.45 μm 이하의 입경구간까지의 수농도는 수십개가 관측이 되는 것으로 나타났다. 그리고 0.58~0.65 μm 입경구간에서의 평균수농도는 2.02 particle/cm³로 0.45~0.65 μm 입경구간에서는 수개의 수농도가 관측이 되었다. 입경이 0.65 μm 이상 입자 구간의 수농도는 1.0 particle/cm³ 이하로 나타났고, 3.0 μm 이상의 초대입자 구간 평균 수농도는 거의 0에 가까운 수준으로 극미량 존재하는 것으로 나타났다. 그리고 수농도의 표준편차도 입경구간이 커질수록 낮아지는 것으로 나타나 입경별 수농도 분포 변동폭은 크지 않음을 나타낸다.

Table 4. The basic statistics of aerosol number concentration of 30 seperated section during experimental period.

	0.25– 0.28	0.28– 0.30	0.30– 0.35	0.35– 0.40	0.40– 0.45	0.45– 0.50	0.50– 0.58	0.58– 0.65	0.65– 0.70	0.70– 0.80
Mean	81.51	48.96	47.25	35.25	13.78	4.18	4.28	2.02	0.63	0.81
Maximum	461.48	297.91	403.28	478.26	236.15	80.20	65.42	45.01	21.54	61.61
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Standard Deviation	62.84	46.46	53.09	48.43	19.79	6.46	5.84	2.99	1.18	1.92
	0.80– 1.0	1.0– 1.3	1.3– 1.6	1.6– 2.0	2.0– 2.5	2.5– 3.0	3.0– 3.5	3.5– 4.0	4.0– 5.0	5.0– 6.5
Mean	0.68	0.57	0.33	0.31	0.45	0.25	0.13	0.06	0.05	0.02
Maximum	44.93	55.92	43.10	50.95	110.50	84.72	48.04	18.75	11.35	21.92
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Standard Deviation	1.98	2.17	1.58	1.84	4.08	2.77	1.33	0.48	0.37	0.31
	6.5– 7.5	7.5– 8.5	8.5– 10.0	10.0– 12.5	12.5– 15.0	15.0– 17.5	17.5– 20.0	20.0– 25.0	25.0– 30.0	30.0– 32.0
Mean	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Maximum	15.46	6.63	5.46	2.36	0.15	0.04	0.08	0.55	0.01	0.00
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Standard Deviation	0.20	0.09	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

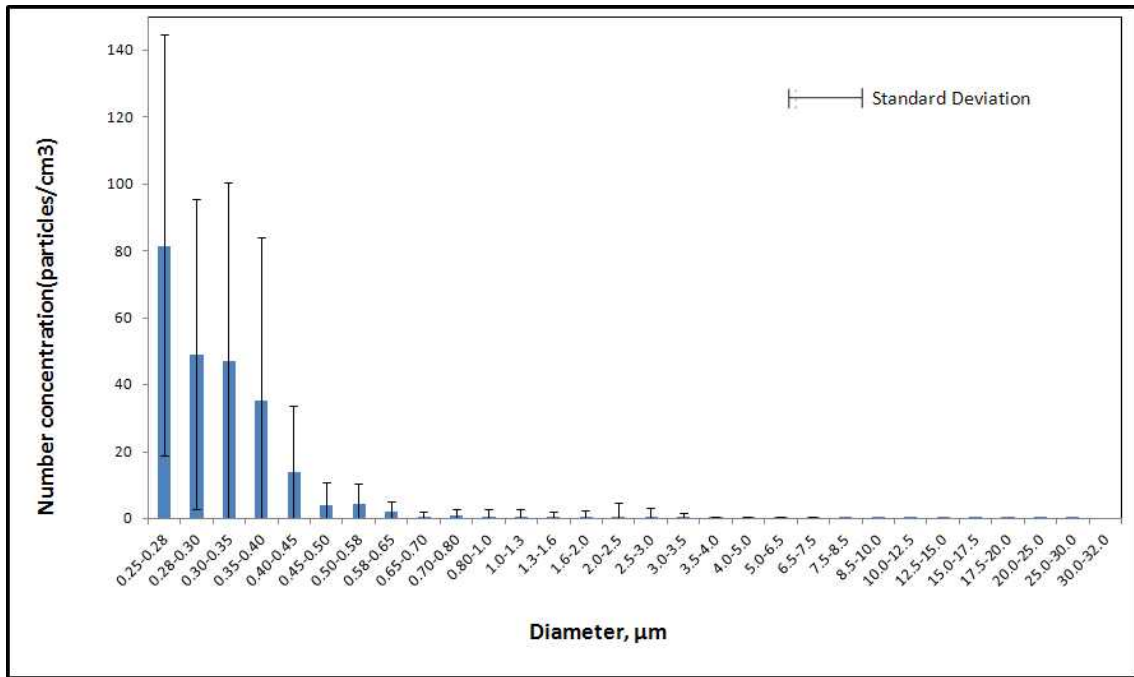


Fig. 6. Aerosol number concentration in the each size range.

Fig. 6은 본 연구 기간 동안 에어로졸 수농도의 분포특성을 알아보기 위해 0.25~32.0 μm 범위의 수농도를 입경별로 평균수농도를 정리하여 나타냈다. 그림에서 보여 지듯이 전반적으로 입경구간이 커질수록 수농도는 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 산악지역인 대관령과 도시지역인 서울, 해안지역인 안면도에서 측정된 결과와 비슷한 경향이다.(김지영 등, 2002; 정창훈 등, 2003; 이명주 등, 2006) 입경별로 구분하여 살펴보면 0.25 ~0.28 μm 범위의 최소입경구간에서 0.58~0.65 μm 범위의 입경까지 에어로졸 수농도는 수개 이상으로 입자의 크기가 증가함에 따라 그 분포범위도 급격히 감소하는 특성을 나타냈다. 그리고 0.65 μm 이상의 입경에서는 평균수농도가 1.0 particle/cm³ 이하로 수농도 분포를 확인하기 어려울 정도의 아주 낮은 수농도를 나타냈다.

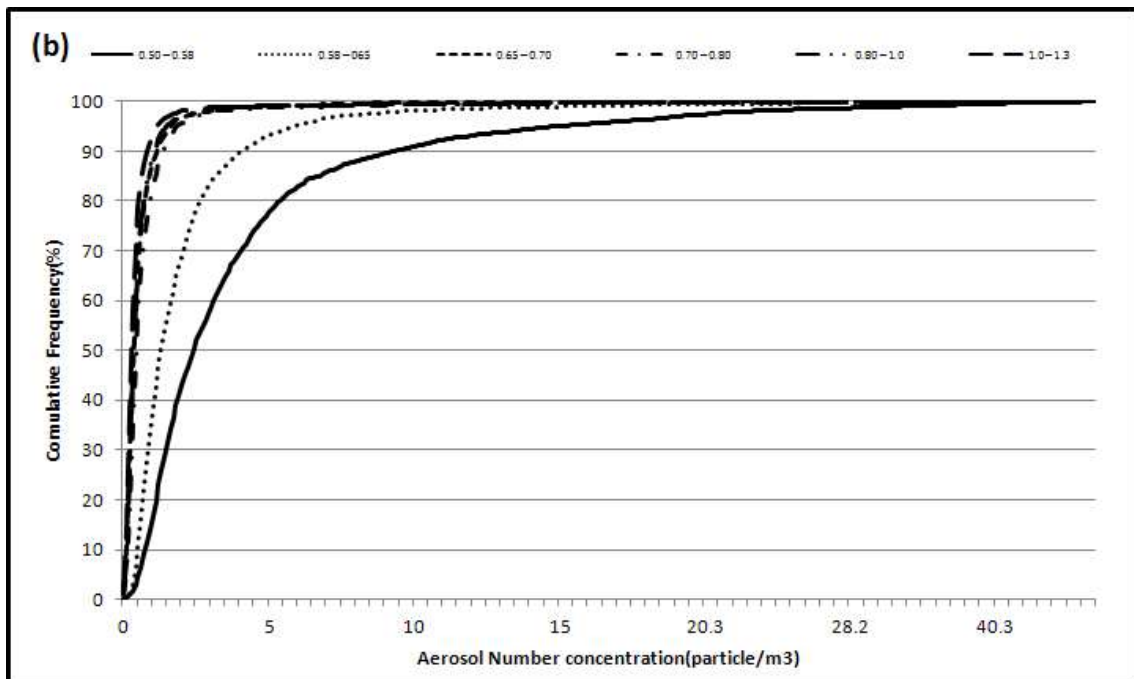
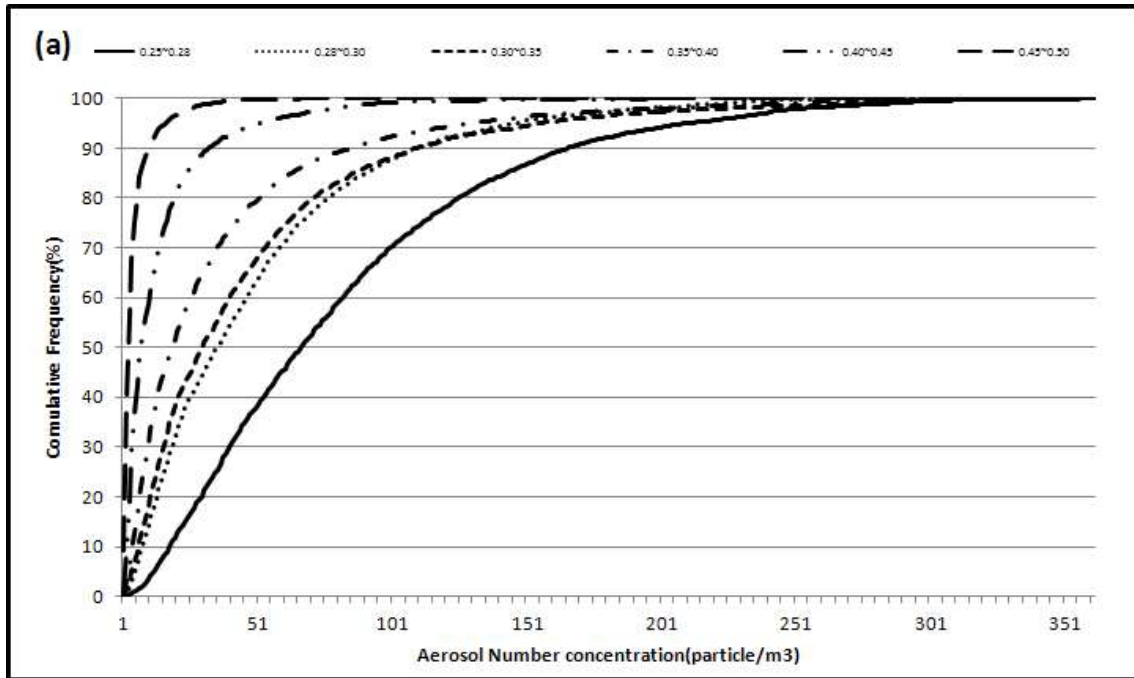


Fig. 7. The cumulative frequency of Aerosol number concentration during experimental period.(0.25~1.3μm)

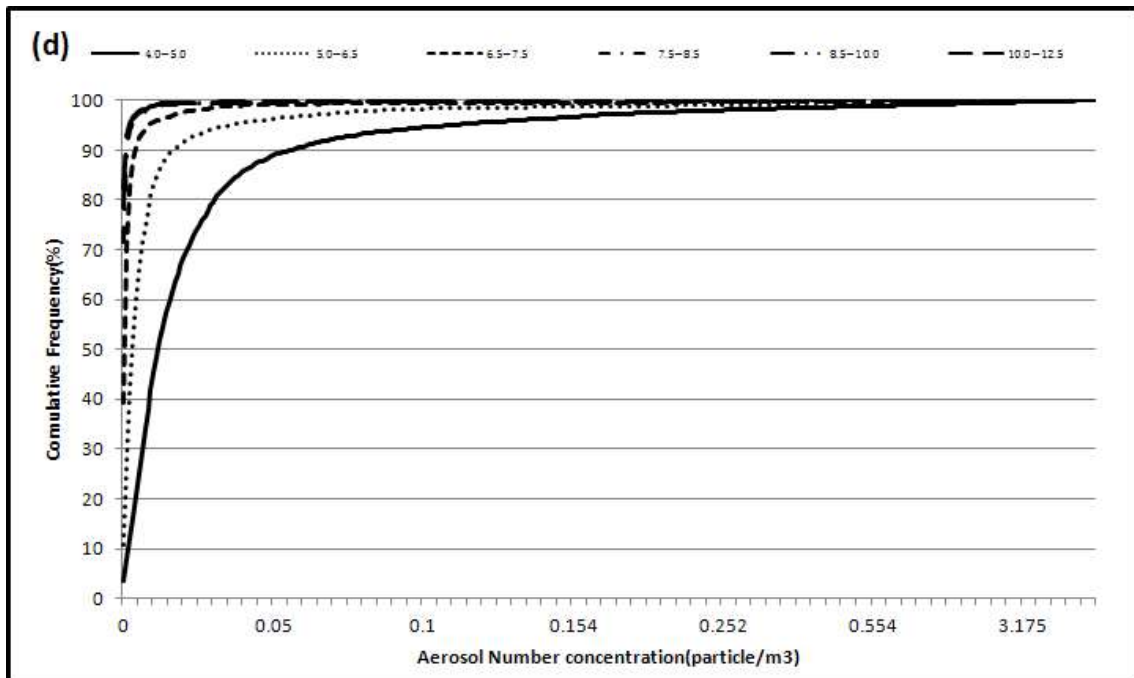
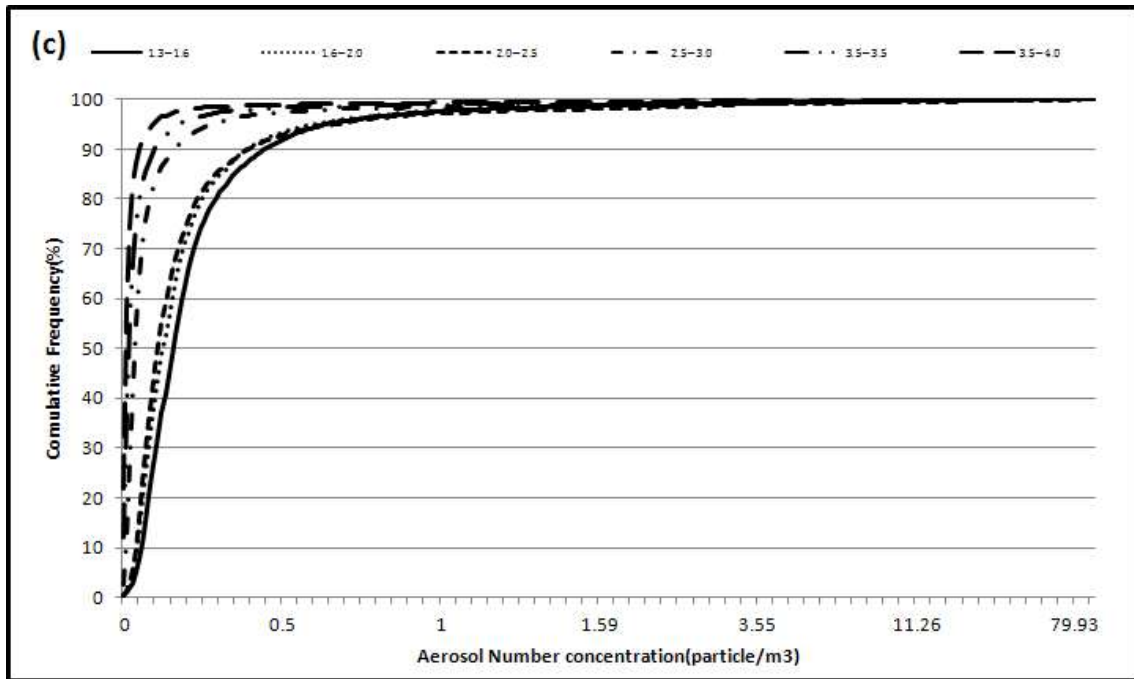


Fig. 8. The cumulative frequency of Aerosol number concentration during experimental period.(1.3~12.5 μ m)

제주 고산지역 대기 중 에어로졸 수농도를 세밀하게 분석하기 위하여 본 측정기간 동안의 측정자료로부터 입경 범위별 출현빈도를 산출하여 누적빈도분포곡선 결과를 Fig. 7~8에 나타냈다. 그리고 입경구간이 0.25~0.5 μm , 0.5~1.3 μm , 1.3~4.0 μm , 4.0~12.5 μm 입경구간의 누적빈도분포를 각각 (a), (b), (c), (d)에 나타냈다. 여기서 12.5 μm 입경 이상의 누적빈도는 수농도 최대값이 거의 0에 가까운 값을 나타내 누적빈도 분포곡선에서 비교가 무의미하므로 그림에서 제외하였다.

(a)는 최소입경구간인 0.25~0.28 μm 에서 0.45~0.50 μm 입경범위까지의 총 6구간의 측정자료 통계분석 결과를 나타낸 것으로 수농도가 각각 66, 35, 30, 18, 7, 2 particle/cm³일 때 전체 수농도의 50 %로 나타났고, 각각 125, 77, 72, 51, 19, 5 particle/cm³ 이하일 때 전체의 80 %로 수농도의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

(b)에서 보면 0.50 μm 에서 0.65 μm 까지의 입경에서는 수농도가 수개 이하이고, 0.65~1.3 μm 입경에서는 1개 이하일 때 전체 수농도의 80%를 차지하였다.

그리고 (c)와 (d)의 경우에서 보면 1.3 μm 이상의 입경부터는 수농도가 0.5 particle/cm³ 이하로 각각의 입경별 전체 수농도의 90 %이상인 것으로 나타났다.

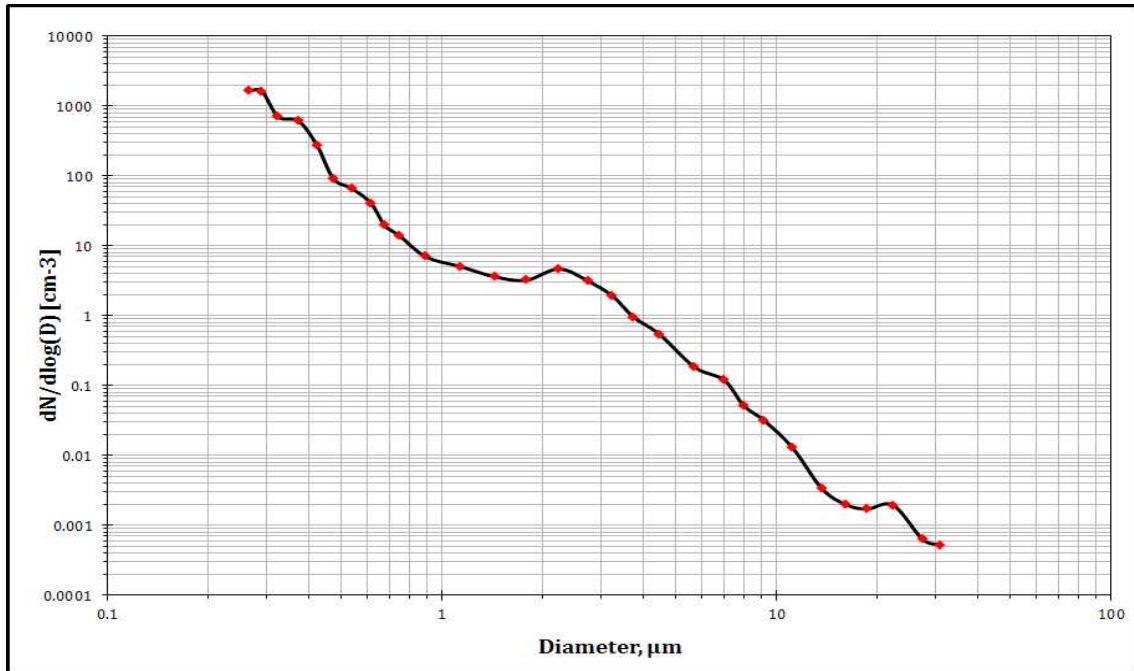


Fig. 9. The size distribution of the entire averaged aerosol number concentration during experimental period.

에어로졸 수농도는 일반적으로 특정 입경 구간의 농도를 측정하기 때문에 입자 개개의 농도와 입경별 분포 특성을 입경분포 $dN/d\log(d)$ 곡선을 만들어 파악하는게 일반적이다.

이에 따라 전체 측정자료를 대상으로 입경분포에 따른 단위입경당 수농도를 log척도로 표시한 입경분포곡선을 Fig. 9에 나타냈다. 그림에서 보면 입경구간에 대한 에어로졸 수농도는 대수적으로 감소하는 경향을 보인다. 하지만 세부적으로 보면 1.0 μm 보다 작은 에어로졸 수농도는 입경이 커짐에 따라 급격히 감소하는 경향을 보였고 1.0~2.0 μm 의 입경에서 완만한 감소를 보이다 2.0~2.5 μm 입경에서 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 2.0 μm 이상의 입경에서는 다시 미세입자 구간에서와 같은 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 한반도의 도시(서울), 해안(안면도), 섬(제주고산), 산악(대관령)지역에서 OPC를 이용하여 0.1~10.0 μm 입경구간에 대한 지역별 에어로졸 입경 분포특성을 파악한 기존 연구(김지영 등, 2002)와 비교하여 볼 때 도시지역인 서울의 경우 0.4 μm 와 2.0 μm 에서 정점이 나타났고 6.0 μm 에서도 약하게 하나의 모드가 나타났으며, 인위적인 오염원을 배제할 수 있는 해안지역과 섬지역, 산악지역의 경우 2.0 μm 입경에서 증가하는 변동폭이 약간 큰 것 외에는 본 연구와 유사한 입경분포특성을 나타냈다.

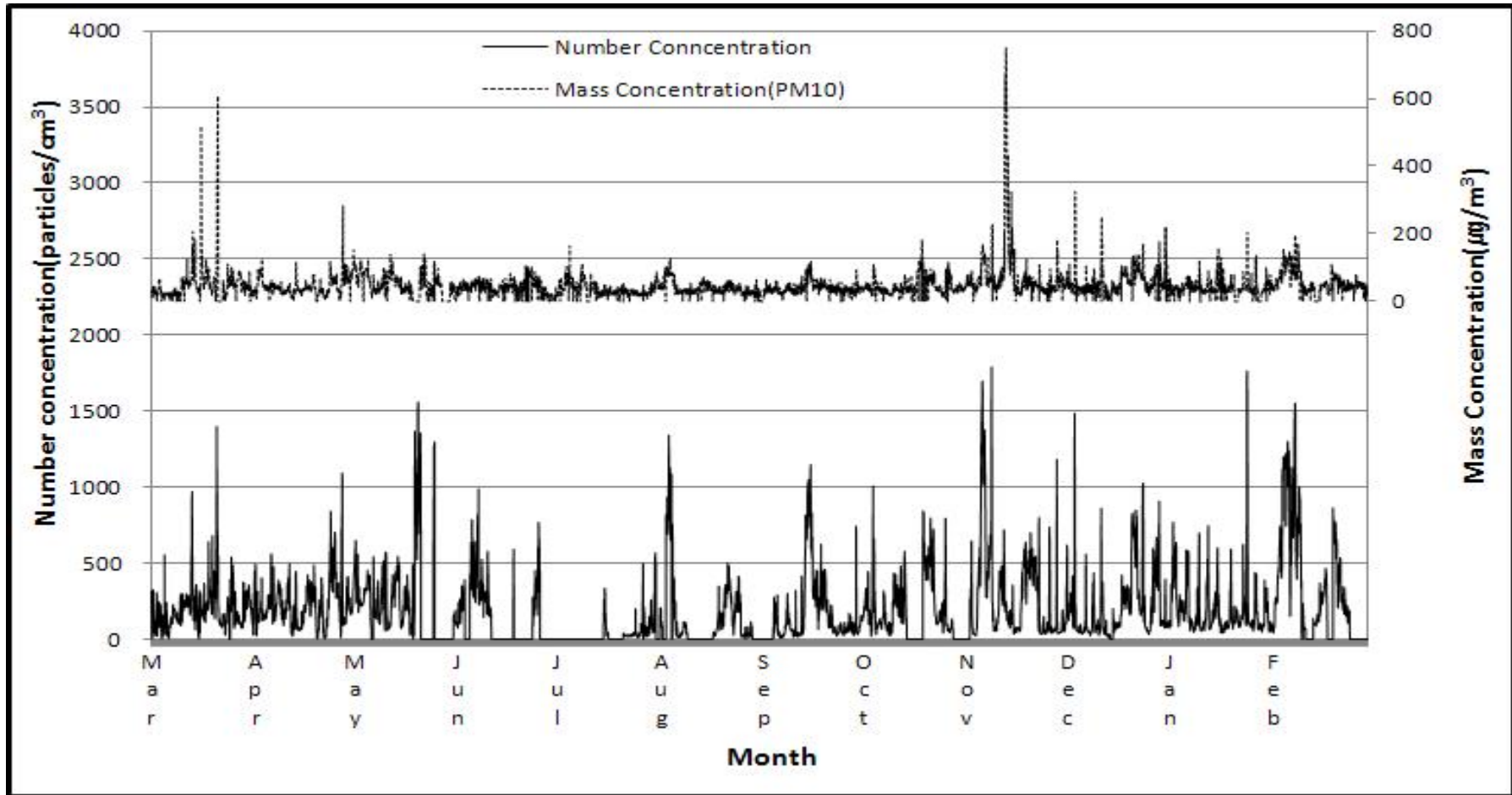


Fig. 10. Time series of total aerosol number concentration and mass concentration of PM₁₀ during experimental period.

에어로졸 수농도와 일반적으로 대기오염의 정도를 판단하고 대기환경기준상 지표로 활용하고 있는 질량농도(PM_{10})의 경시에 따른 변화 추세를 비교, 분석하기 위하여 전 측정기간에 대한 시간평균 농도의 시계열 결과를 Fig. 10에 나타냈다.

본 연구기간동안 PM_{10} 의 농도범위는 $6 \sim 749 \mu g/m^3$ 으로 큰 변화폭을 보였다. 평균 농도는 $52.24 \mu g/m^3$ 으로 나타났고 최대질량농도는 2010년 11월 가을황사가 급격히 강해진 날에 최대치 $749 \mu g$ 로 나타났다. 고산지역의 중량농도는 에어코리아에서 제시된 2010년 제주도 평균농도 $48 \mu g/m^3$ 보다 조금 높았고 인천지역 $55 \mu g/m^3$, 경기지역 $58 \mu g/m^3$, 충북지역 $62 \mu g/m^3$ 보다 낮은농도를 나타냈지만 이외 지역의 평균 농도보다 높은 농도를 나타내 에어로졸의 영향이 큰 특성을 나타낸다.

그림에서 보면 에어로졸 수농도의 시간평균 경시변화 양상은 PM_{10} 보다 상대적으로 변동폭이 크고 평상시 시간평균 농도의 수배에 달하는 일시적인 증가현상이 출현하는 횟수가 PM_{10} 보다 더 많은 경향을 보였다. 이러한 현상은 PM_{10} 의 경우 황사현상의 영향이 반영되어 7차례 정도 고농도 수치가 확인되지만 에어로졸 수농도의 경우 황사현상외에 안개류등의 발생으로 인한 농도가 일시적으로 증가하는 현상이 추가로 수차례 더 나타나는 변화 추세를 나타냈다.

2. 에어로졸 수농도의 경시변화 특성

대기중 에어로졸 수농도는 발생기원, 입경의 물리, 화학적 특징등의 환경여건에 의해 특성이 크게 변화하여 아주 다른 장,단기적인 시간적 변화 특성을 보인다. 이에 따라 제주지역 대기중 에어로졸 수농도의 시계열 변화 추세를 파악하기 위해 2010년 03월부터 2011년 02월까지의 기간 동안에 고산지역에서 측정된 자료를 근간으로 수농도 변화를 분석하였다.

본 연구 기간 동안 에어로졸 수농도의 월별 변동 특성을 살펴보기 위하여 전체 측정 자료로부터 입경별 월평균 수농도를 구하여 Fig. 11에 나타냈다. 여기서 $5.0 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입경 구간에서의 에어로졸 수농도는 거의 비교가 불가능할 정도의 수치이기 때문에 $32.0 \mu\text{m}$ 까지를 하나의 사이즈로 묶어 ' $5.0 \mu\text{m} \sim$ ' 라고 표기하였다. 그리고 입경구간이 $0.25 \sim 0.5 \mu\text{m}$, $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$, $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$, $2.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 이상 입경구간의 수농도는 각각 (a), (b), (c), (d)로 나타냈다.

그림에서 보는 바와 같이 (a)와 (b)에 해당하는 입경범위에서 에어로졸 수농도의 월별 변동 경향은 $0.25 \sim 0.58 \mu\text{m}$ 의 입경구간에서는 2월이 에어로졸 수농도가 가장 높게 나타나고 7월달에 뚜렷하게 낮은 경향을 보인 반면 $0.58 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 의 입경구간에서는 5월의 에어로졸 수농도가 다른 달에 비해 월등히 높은 특징적인 변화양상을 나타냈고 11월에 약간 상승하는 변화를 보였다. 그리고 7~8월에 최소농도를 보였지만 $0.5 \mu\text{m}$ 이하 입경에서의 급격히 낮아지는 경향과는 달리 6월에서 10월까지 수농도는 비슷한 수준으로 그 변화가 미미하였다. (c)와 (d) 입경구간에 대한 에어로졸 수농도의 월별 변동 경향은 $5.0 \mu\text{m}$ 을 경계로 서로 다른 변동 경향을 보이고 있다. $1.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 의 입경구간에서는 5월이 다른 달에 비해 월등한 수농도를 보이고 11월에 약간 상승하는 변화 특성을 보인 반면 $5.0 \mu\text{m}$ 이상의 입경범위를 갖는 에어로졸 수농도는 전체적으로 $1.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 입경범위의 수농도 변화와 비슷하지만 3월에 최대 수농도를 보였다.

측정기간동안 총 30개의 입경구간에서 최대수농도가 측정된 달은 각각 2010년 3월이 9구간, 5월이 13구간, 12월이 1구간, 2011년 2월이 7구간으로 각 입경구간의 수농도에 2010년 5월이 가장 많은 영향을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 입경구간별로 봤을 때 $0.25 \sim 0.58 \mu\text{m}$ 입경구간은 2011년 2월이, $0.58 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 입경구간은 5월이, $5.0 \sim 32.0 \mu\text{m}$ 구간에는 주로 3월에 최대수농도가 나타났다. 이러한 결과로 봤을

때 입경이 5.0 μm 이상의 입경구간은 2010년 3월에 강한황사현상시 수농도가 최대인점으로 미루어보아 다른 달에 비해 황사의 영향을 많이 받는 입경범위임을 알 수 있고, 입경이 미세한 0.25~5.0 μm 의 구간은 2010년 5월, 2011년 2월에는 안개현상이 많이 일어날 때 수농도가 최대인점으로 보아 다른 달에 비해 안개류의 영향을 많이 받는 입경범위임을 알 수 있다.

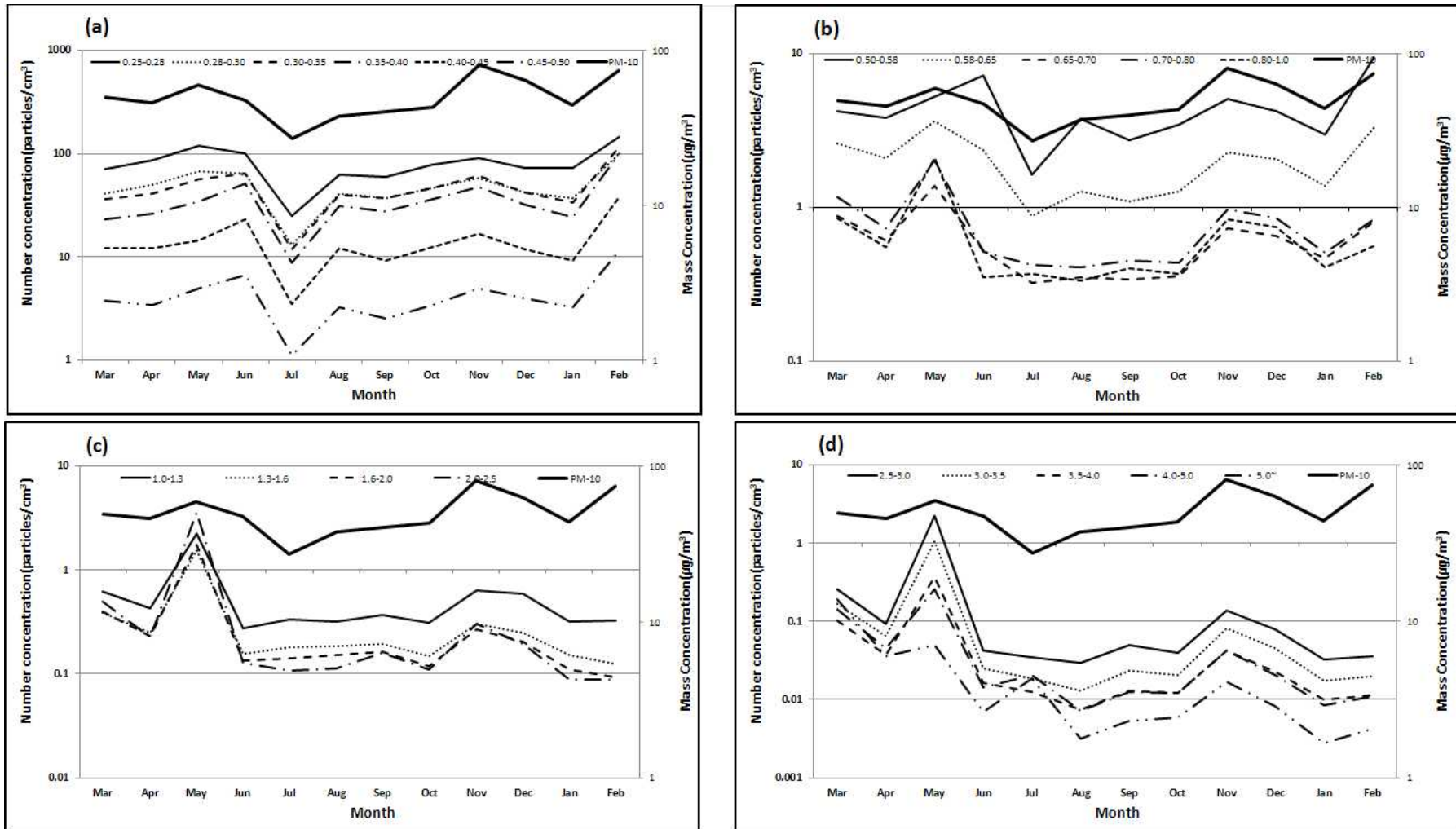


Fig. 11. Monthly variation of the aerosol number concentration during experimental period.

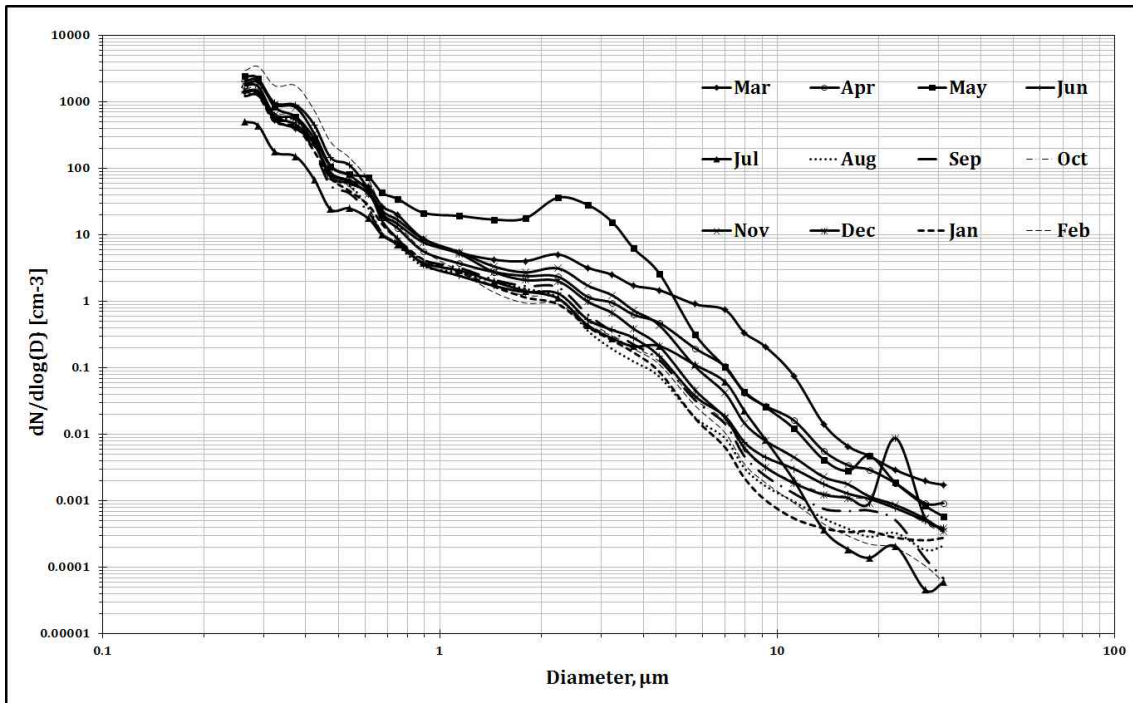


Fig. 12. Size distribution of the monthly averaged aerosol number concentration during experimental period.

전체 연구기간동안 에어로졸 수농도의 입경 분포 특성의 시간적 변화를 파악하기 위해 월평균 농도로부터 얻은 입경분포곡선을 Fig. 12에 나타냈다. 대수적으로 입경에 따른 월별 수농도 분포 특성은 비슷하지만 입경별로 보면 조금 다른 경향을 보인다. 7월의 경우 $0.25 \mu\text{m}$ 의 입경에서부터 $0.6 \mu\text{m}$ 의 입경범위 까지 다른 달에 비해 월등히 낮은 수농도를 나타냈고, 5월의 경우는 그 이상의 입경인 $0.7 \mu\text{m}$ 의 입경에서부터 $4.0 \mu\text{m}$ 까지 다른 달에 비해 월등히 높은 수농도를 나타냈다. 그리고 이보다 큰 초대입자 입경구간인 $5.0 \mu\text{m}$ 이상에서 약 $11.0 \mu\text{m}$ 입경까지는 다른 달에 비해 3월의 수농도가 높게 나타났다. 특징적인 입경범위를 제외하면 모두 비슷한 수농도 경향을 나타냈다.

에어로졸 수농도는 대기 중으로 유입되는 직, 간접적인 요소들로 인해 에어로졸의 활동성에 따라 하루 중에도 시간적인 변화를 보인다. 제주 고산지역의 에어로졸의 일중 경시 변동 특성을 파악하기 위하여 본 연구기간의 전 측정자료로부터 수농도의 시간대별 평균수농도를 구하여 로그눈금간격으로 Fig. 13에 나타냈다.

그림에서 보면 전반적으로 거의 모든 입경구간에서 상대적으로 낮에 감소하는 경향을 나타냈고 밤에 증가하는 경향을 보였다. 이는 야간에 대기혼합층이 비교적 낮

아 에어로졸 수농도가 증가하였고, 낮에는 기온의 상승으로 인해 혼합층이 계속 높아져 감소한 것으로 사료된다. 이러한 결과는 Fig. 14에서 보듯이 낮에 교통소통이 많고 광화학적으로 가스에서 입자로 변환이 이뤄지는 도시지역의 결과와는 다른 경향을 나타낸다.(김필수 등, 1986; K. T. whitby, 1971) 본 연구의 측정지점은 배경지역으로서 도시지역과 달리 인위적인 기원의 영향을 덜 받기 때문에 서로 다른 경향을 보이는 것으로 해석된다. 하지만 질량농도 PM_{10} 과의 일중 경시변화를 비교하여 보면 특히 낮동안에 수농도와는 반대로 낮에 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 측정지점이 해안가와 접해있어 해풍에 의한 해양입자의 영향인 것으로 사료된다. 수농도와 질량농도는 밀접한 관계가 있지만 본 측정지점에서 낮에 반대의 경향을 보이는 점은 소수의 초대입자들로 인해 중량농도가 지배되어진다는 연구결과를 통해 확인할 수 있다.(김필수 등, 1986) 시간의 변화에 따른 입경별 에어로졸 수농도의 상대적인 수농도가 $1.0 \mu m$ 를 기준으로 했을 때 $1.0 \mu m$ 이하의 입경에서 수농도는 상대적 차이가 많이 나지 않지만 $1.0 \mu m$ 입경 이상의 구간에서는 수농도의 상대적인 차이가 많이 나는 특징이 있다.

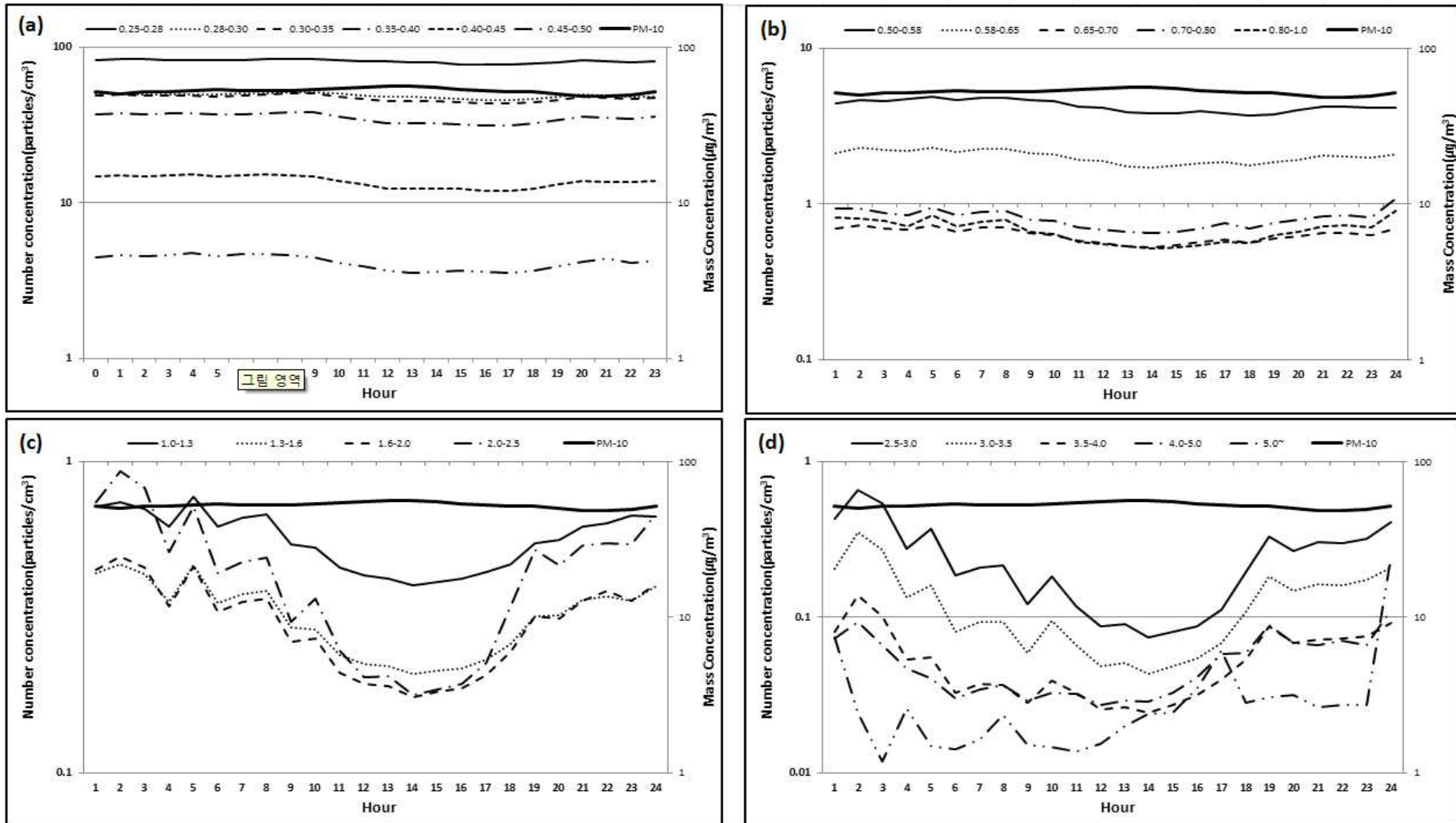


Fig. 13. Diurnal variation of the aerosol number concentration during experimental period.

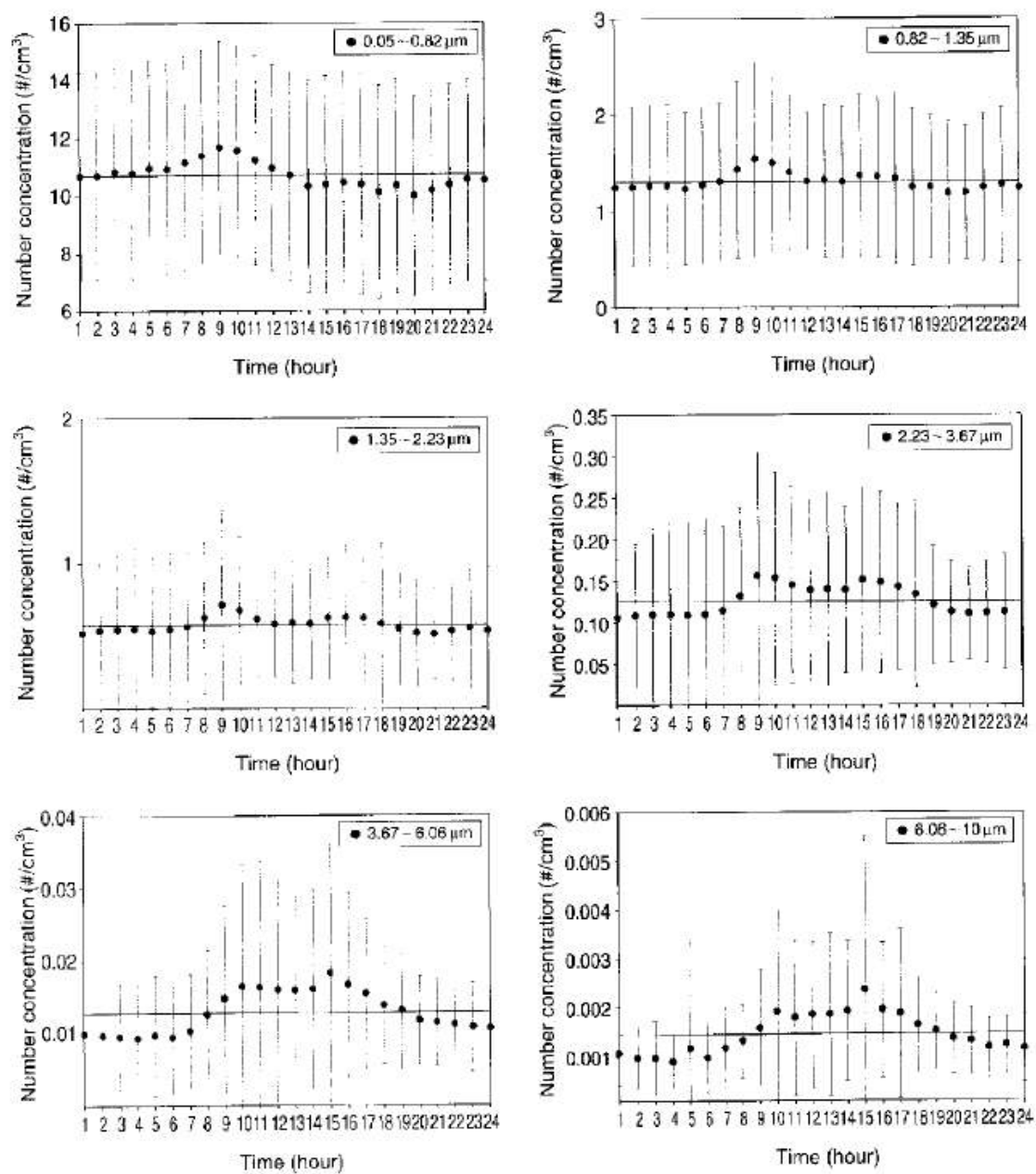


Fig. 14. Diurnal variation of the aerosol number concentration in Seoul, 2001.

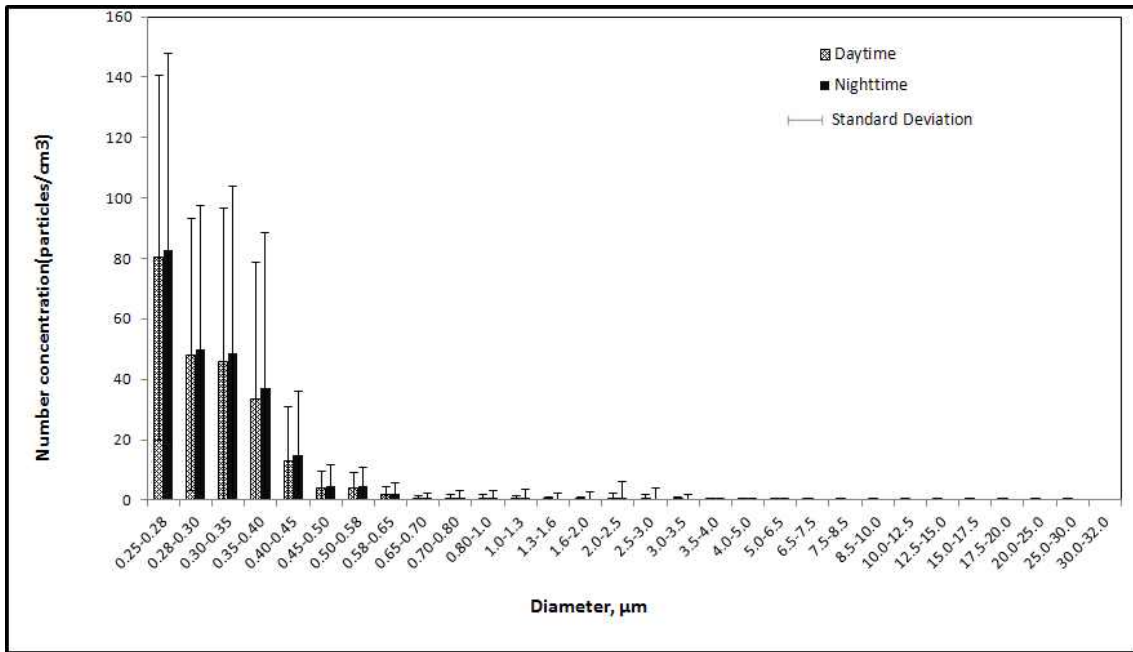


Fig. 15. Comparison of aerosol number concentration of 30 separated section between Daytime and Nighttime during experimental period.

좀 더 명확한 비교를 위하여 Fig. 15에 제주 고산지역 대기 중 에어로졸 수농도의 일중 변화 특성을 파악하기 위해 전 측정자료를 주간과 야간 시간대로 구분하여 입경별 평균수농도를 나타냈다. 여기서 주간은 09~20시, 야간은 21~08시로 구분하였다. 그림에서 보여지듯이 전체적으로 거의 모든 입경구간에서 야간의 평균수농도가 주간에 비해 높은 경향을 나타냈다. 측정된 수농도의 평균과 표준편차는 주간에 평균 7.79 particle/cm³, 17.32/cm³이고 야간의 경우 평균 8.30 particle/cm³, 18.74/cm³ 으로 나타났다. 입경이 1.0 μm 이하에서의 수농도는 야간이 주간보다 경미하게 높게 나타났다. 그 이상의 입경에서 수농도는 일중 주,야간의 비교가 어려울 정도의 0에 가까운 수농도를 나타냈다. 이러한 결과는 앞에서 말했듯이 측정지점이 국지적인 오염 원으로부터의 영향이 적은 배경지역으로서 대기혼합층의 영향과 야간의 기온이 주간보다 낮아 응축에 의해 생성된 자연발생적인 에어로졸에 기인한 것으로 사료된다.(강창희 등, 2012)

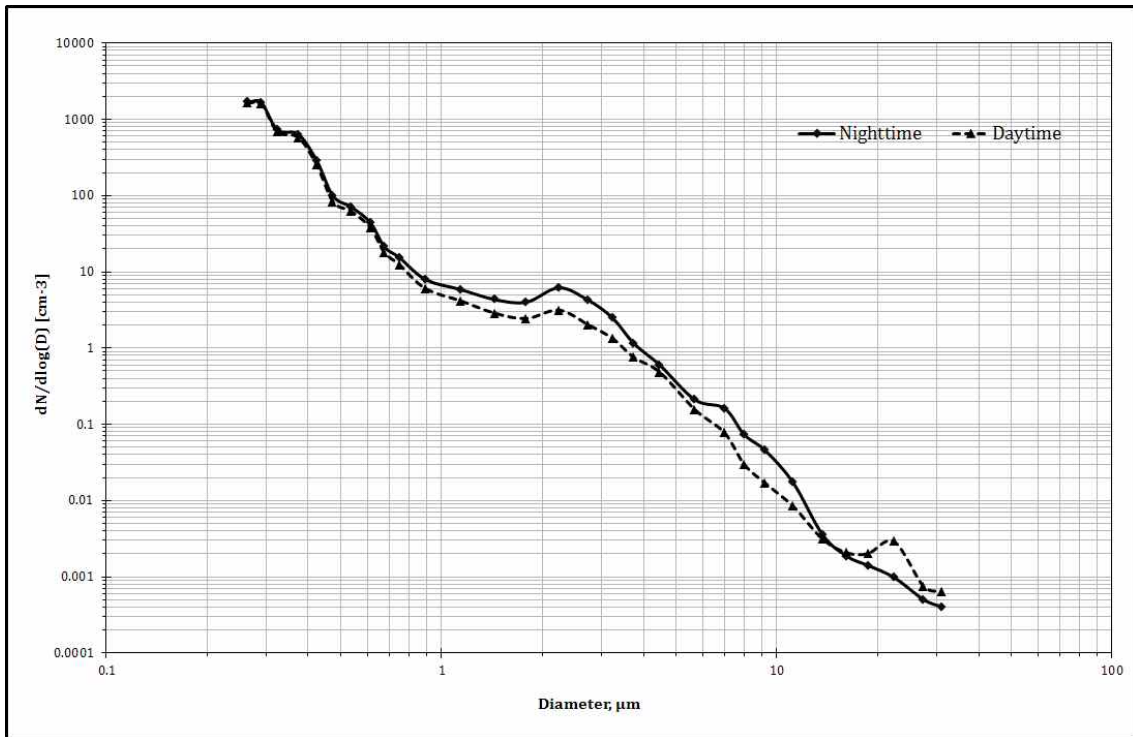


Fig. 16. Comparison of the aerosol size distribution between Nighttime and Daytime during experimental period.

Fig. 16는 전체 측정자료를 대상으로 에어로졸 수농도의 입경분포곡선을 일중 주간과 야간으로 구분하여 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 주간과 야간 모두 대수적으로 감소하는 경향이지만 1.0 μm 이하의 입경에서는 급격한 감소 경향을 보이고 1.0~2.0 μm 입경에서는 완만한 감소를 보였다가 2.0~2.5 μm 입경범위에서 약간 상승하는 경향을 보였다. 그리고 그 이상의 입경에서는 다시 급격히 감소하는 경향이다. 주간과 야간으로 나눠 비교하여 보면 0.25~1.0 μm 이하의 입경구간에서는 주간과 야간의 수농도 차이가 미미하게 야간의 수농도가 높은 경향이였지만, 1.0~15.0 μm 입경 구간에서의 수농도는 야간의 수농도가 확연하게 높은 경향을 보였다. 그리고 특이하게 15.0 μm 이상의 입경에서는 주간의 수농도가 더 높게 나타났다. 이와 같이 특정입경 대상으로 야간에 비해 주간에 높은 수농도 특성을 보인것에 대해 명확한 이유를 확인하지 못했으므로 향후 에어로졸 수농도에 미치는 영향인자에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

3. 에어로졸 수농도에 미치는 황사의 영향

황사는 에어로졸과 관련된 가장 직접적인 자연현상을 대변하는 중요한 요소로 주로 중국의 사막화 지역과 황하 중류의 황토지대에서 발생하여 위도상 중위도 편서풍대에 위치한 동북아시아의 대기 중 에어로졸 농도와 화학적 조성에 영향을 미친다. 이에 따라 본 연구기간동안 에어로졸 수농도를 연속적으로 측정된 결과로부터 황사가 제주 대기 중 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

우선, 본 연구기간인 2010. 03. 01부터 2011. 02. 28까지 제주지방기상청에서 예보한 황사발생일 및 황사지속시간, 황사현상시 PM₁₀농도범위, 강한 황사의 지속시간을 Table. 5에 나타냈다.

Table 5. Asian dust events occurred during experimental period.

Event	Days	Duration(hrs)	Range of PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^{a)}	SAD Duration(hrs)
1	15~16 Mar	12	100~519	1
2	20~21 Mar	14	148~608	8
3	27 Apr	3	76~148	-
4	11 May	2	68~94	-
5	11~13 Nov	29	90~749	17
6	3 Dec	6	38~324	-
7	11 Dec	5	174~250	-

a) PM₁₀ means the concentration of particulate matter less than 10 μm

b) SAD means severe Asian dust (PM₁₀ \geq 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

본 연구기간동안 황사현상은 총 7회에 걸쳐 71시간 동안 진행되었고, 봄과 가을, 겨울에는 황사현상이 있었지만 여름철에는 황사가 발현되지 않았다. 주로 황사의 발생은 95 %이상이 봄에 발현되는 것으로 알려져 있지만(김민영 등, 2003), Table 5에서 보듯이 본 연구기간동안에 황사현상은 가을철인 11월 11~13일과 겨울철인 12월 3일, 12월 11일에도 발현하는 양상을 나타냈다. 이는 전지구적 기상이변의 한 부분으로 황사발생의 계절적 특성이 점차 사라짐을 알 수 있다. 그리고 제주 고산 지역은 황사현상이 해에 따라 매우 다른 출현빈도를 보이고 있지만 전반적으로 20년전부터 황사일수 및 황사지속시간은 증가하는 추세를 보인다.

그리고 본 연구에서는 황사현상이 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 좀 더 구체적으로 알아보기 위하여 황사로 인해 1시간평균 미세먼지(PM_{10}) 농도가 $400\sim 800\ \mu g/m^3$ 정도일 때를 기상청에서 적용한(2007. 02) 용어인 강한황사라고 구분하여 SAD(Severe Asian Dust)라고 표기 하였다. 강한황사시 PM_{10} 의 평균농도는 $569\ \mu g/m^3$ 으로 황사시의 $339\ \mu g/m^3$ 보다 약 1.6배정도 더 높고, 2010년의 연평균과 비교해서는 무려 12배정도 더 높았다. 측정기간동안 강한황사현상은 총 3번 발현하였고 26시간동안 진행되었다.

한편, 황사현상시 대기오염의 정도를 판단하고 대기환경기준상 지표로 활용하고 있는 중량농도인 PM_{10} 현황을 보면 12월 03일 01시 황사시 $38\ \mu g/m^3$ 의 최소농도를, 그리고 11월 12일 10시에 $749\ \mu g/m^3$ 의 최대농도를 기록했다.

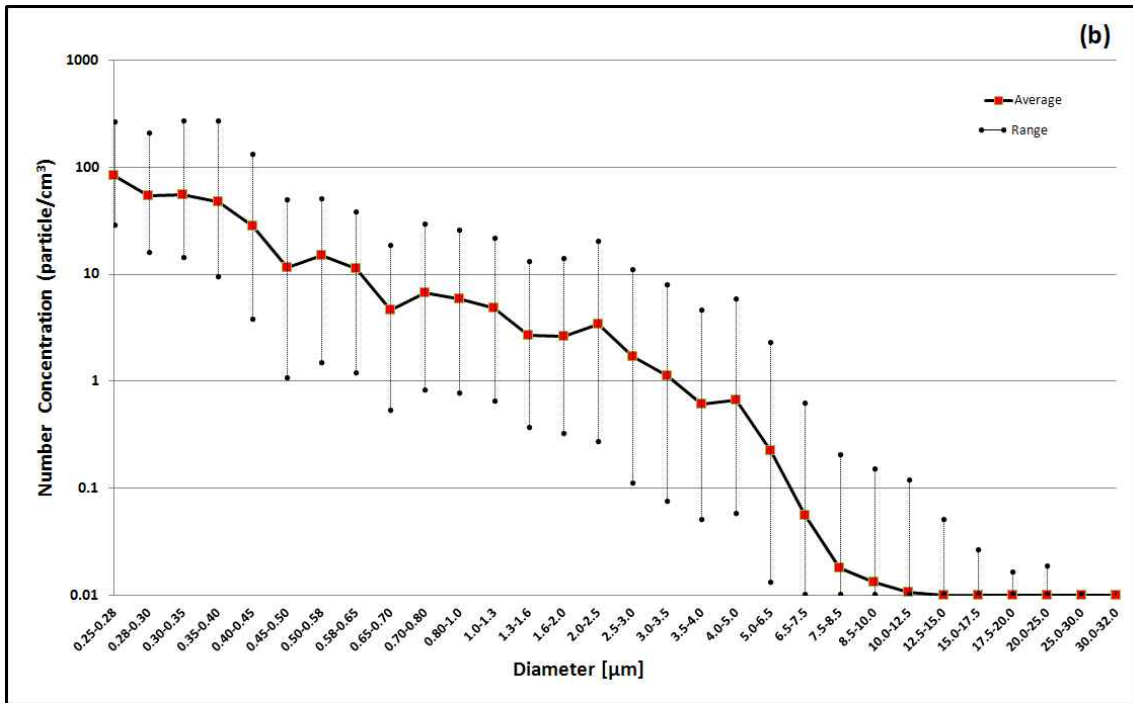
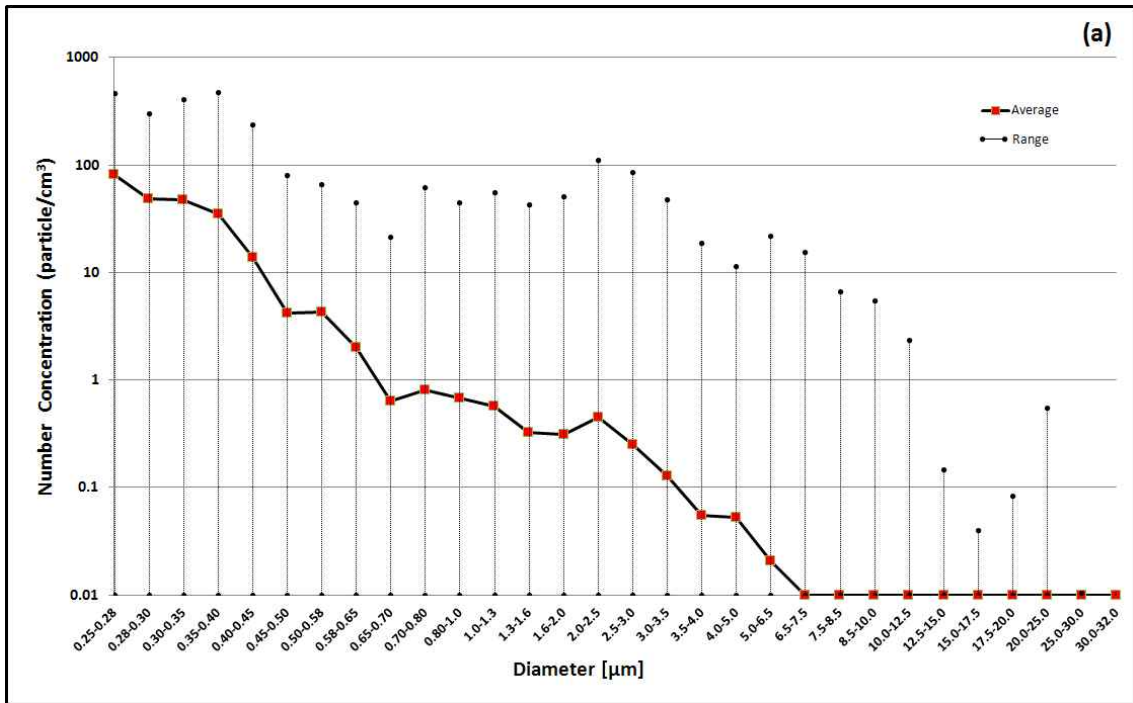


Fig. 17. The size resolved aerosol number concentration of 30 separated section during whole period (a) and Asian dust event (b).

Fig. 17은 황사현상시 에어로졸 수농도의 입경범위별 농도분포를 알아보기 위하여 제주 고산지역에서 2010. 03월부터 2011. 02월까지 측정된 전체자료(a)와 전체측정자료 중 황사발현시(b)의 평균수농도를 입경별로 나타낸 것이다.

황사발현시 전체 에어로졸 수농도의 평균은 341 particle/cm³로 전체자료의 수농도 평균인 241 particle/cm³ 보다 약 1.4배 더 높게 나타났다. 입경별로 구분하여 봤을 때 전체측정자료(a)와 황사현상시자료(b)의 최소입경구간인 0.25~0.28 μm 에서 평균수농도는 각각 81.51 particle/cm³, 83.32 particle/cm³ 로 가장 높게 나타났고, 전반적으로 입경이 커질수록 수농도는 낮아지는 경향을 보였다. 수농도가 10 particle/cm³ 이상 존재하는 입경범위는 전체 측정자료에서는 0.45 μm 보다 작은 구간인 반면에 황사시는 0.65 μm 이하 구간으로 나타났다. 그리고 수농도가 1.0 particle/cm³ 이상 존재하는 입경범위는 전체측정자료에서는 0.65 μm 보다 작은 구간인 반면에 황사시는 3.5 μm 이하 구간으로 나타났다. 황사시 에어로졸 수농도는 전체측정기간의 수농도에 비해 입경범위가 커질수록 감소하는 정도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 황사현상시 토양성분을 함유한 대량의 조대입자 유입으로 인해 조대입자구간의 수농도가 증가하는 것으로 나타난 일반적인 연구결과와 일치한다.(전영신 등, 1999; 김지영 등, 2002; 정창훈 등, 2005)

Fig. 17에서 수직한 점선들은 수농도 분포 범위로 입경별 최대, 최소수농도를 나타낸 것이다. 전체측정자료의 경우 수농도는 넓은 분포범위를 보이지만 황사시는 상대적으로 분포범위가 좁게 나타났다. 이는 황사시 제주도 고산지역으로 유입이 되는 에어로졸의 영향으로 수농도의 변동폭이 적어짐을 알 수 있다.

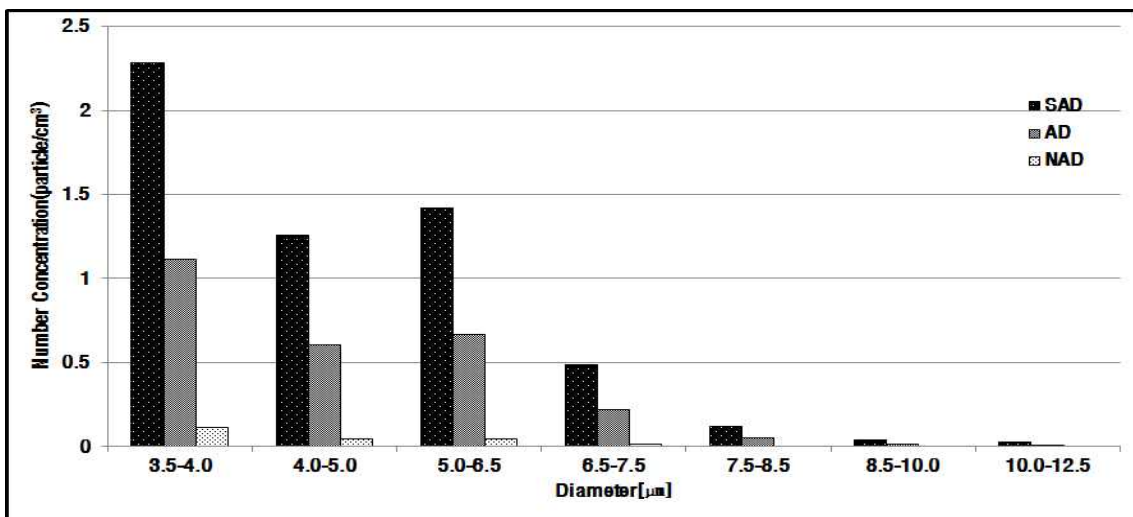
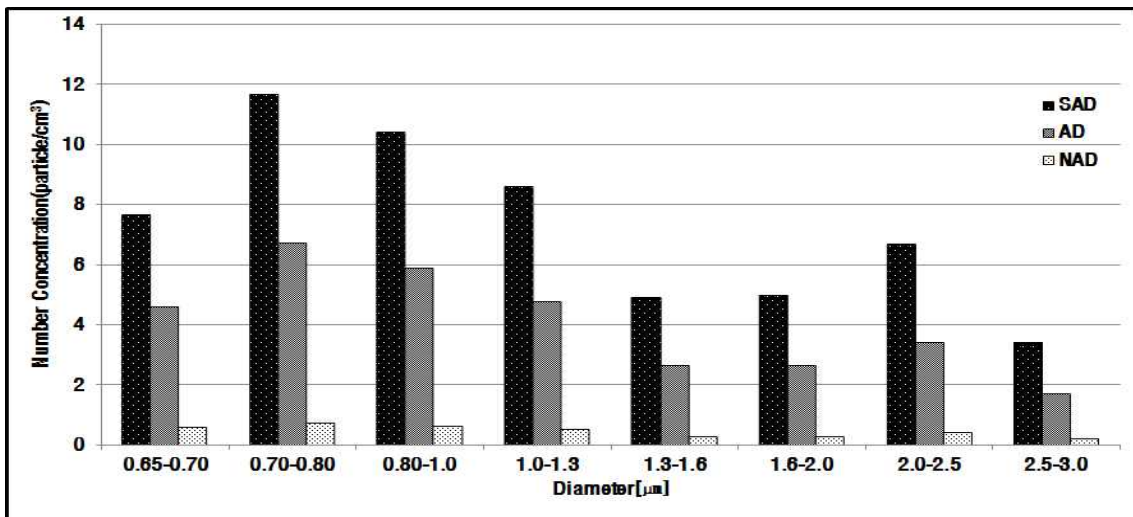
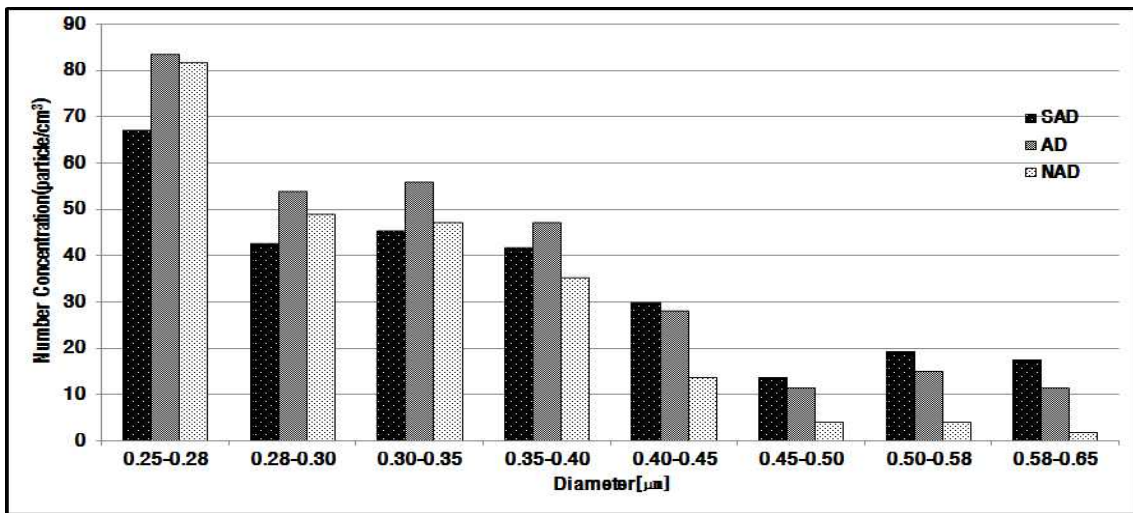


Fig. 18. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during experimental period.

Fig. 18은 황사가 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 좀 더 구체적으로 파악하기 위하여 황사시(AD)와 황사기간내 강한황사시(SAD), 그리고 황사현상을 배제한 기간인 비황사시(NAD)의 입경별 에어로졸 수농도의 상대적인 비교를 나타냈다. 여기서 입경이 10.0 μm 이상일 경우 에어로졸 수농도가 거의 0에 가까운 수준으로 자료에서 제외하여 나타냈다.

그림에서 보는 바와 같이 본 연구의 측정 범위에서 강한 황사시와 황사시, 비황사시의 에어로졸 평균수농도는 최소입경구간인 0.25~0.28 μm 범위에서 각각 67.05, 83.32, 81.49 particle/ cm^3 로 비황사시와 황사시에 비해 강한황사시 낮은 수농도를 나타냈고, 황사시 수농도는 비황사시와 비슷한 수준이지만 약간 높은 농도를 보였다. SAD, AD, NAD 세 경우 모두 입경이 커질수록 에어로졸 수농도가 감소하는 경향을 보인 가운데 에어로졸의 유입이 극대화되는 강한 황사시 에어로졸 수농도가 황사시와 비황사시보다 높게 측정이 된 입경구간은 각각 0.35~0.40 μm , 0.40~0.45 μm 로 나타났고, 0.40~0.45 μm 입경구간의 경우 SAD, AD 의 에어로졸 수농도가 NAD 보다 약 2배 이상의 차이를 나타냈다. 그리고 0.45 μm 이상의 입경에서 조대입자로 갈수록 에어로졸 수농도는 SAD, AD, NAD 차례로 높아지는 일반적인 경향을 볼 수 있었다. 입경구간이 1.0~1.3 μm 에서는 황사시와 심한황사시의 수농도가 약 2배 이상의 차이를 보였고, 그 이상의 입경범위인 1.3 μm 에서부터는 황사시와 강한황사시의 수농도는 약 2배 정도를 유지하며 입경이 커짐에 따라 감소하였고 비황사시는 그 이상의 격차로 감소하는 경향을 나타냈다. 그리고 입경범위 6.5 μm 이상부터는 세 경우 모두 에어로졸 평균수농도가 0에 근접한 낮은 수치를 기록하였다.

이러한 결과들로 볼 때 강한 황사시에 미세입경구간(0.3~0.5 μm)에서 에어로졸 수농도가 오히려 감소한다는 기존 연구결과(전영신 등, 1999)와 부합하고, 그 이유는 황사를 수송하는 기단의 성질이 건조함으로 인한 것으로 사료된다. 또한 황사시 에어로졸 수농도에 영향을 미치는 입경구간이 타 연구들과 비슷한 수준인 1.0~10.0 μm 임을 본 연구결과를 통해 확인할 수 있었다.

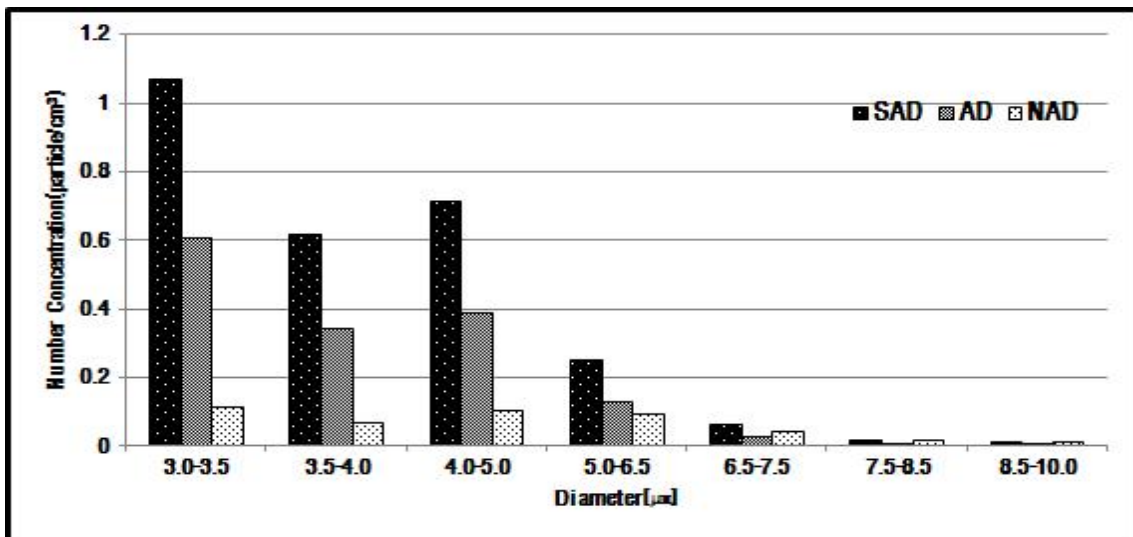
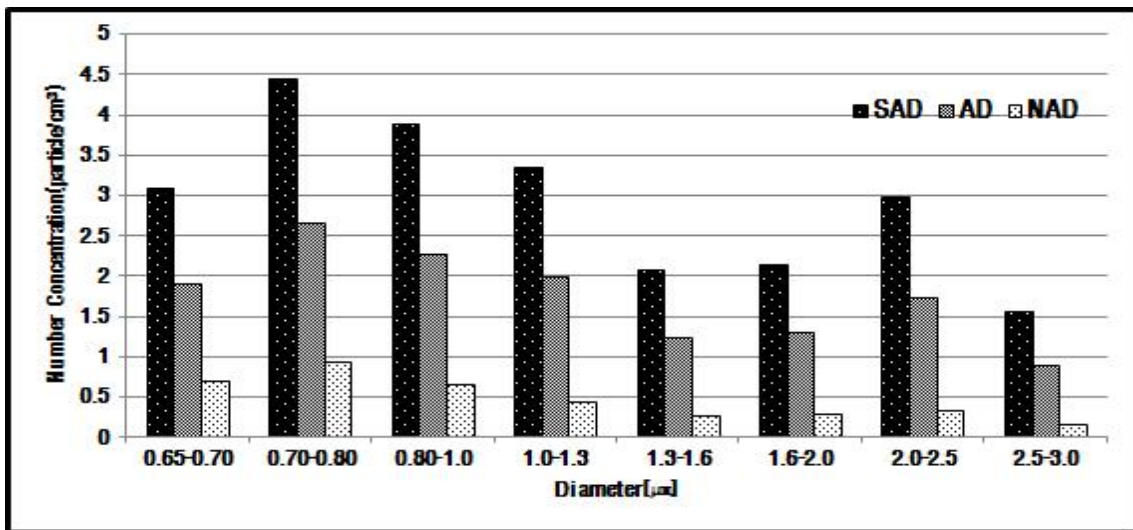
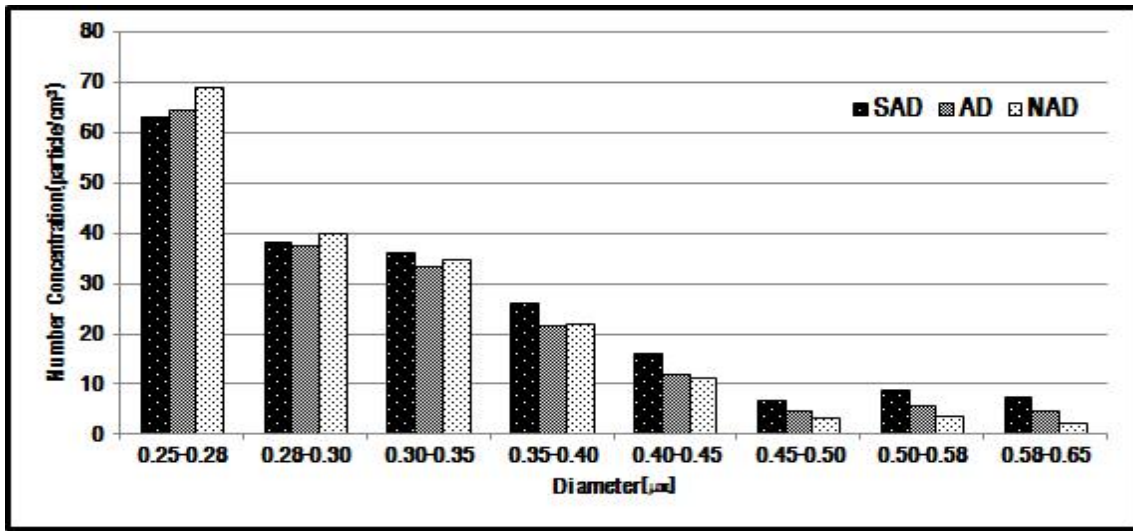


Fig. 19. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 03. 15~16±15)

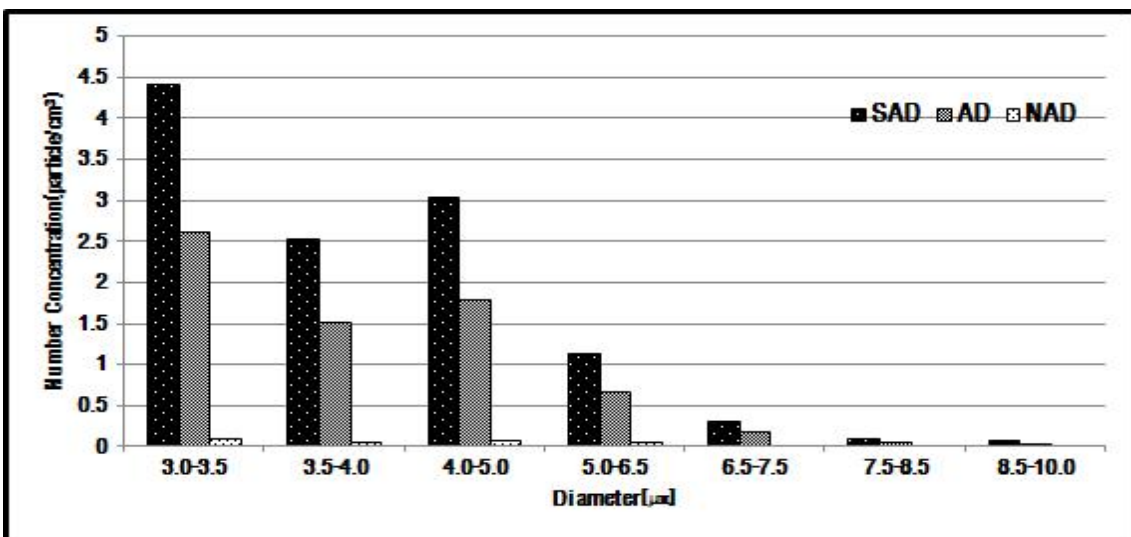
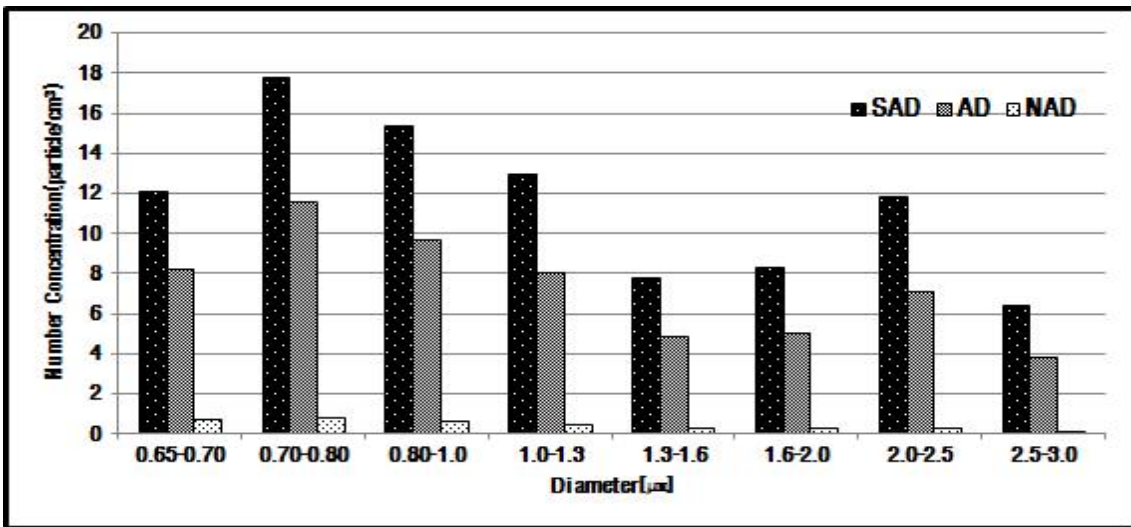
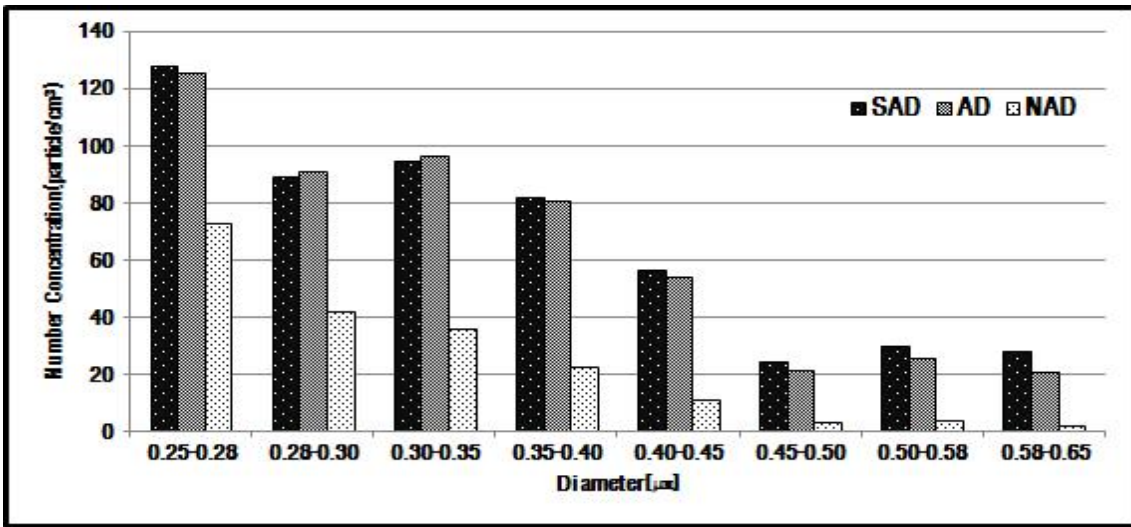


Fig. 20. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 03. 20~21±15)

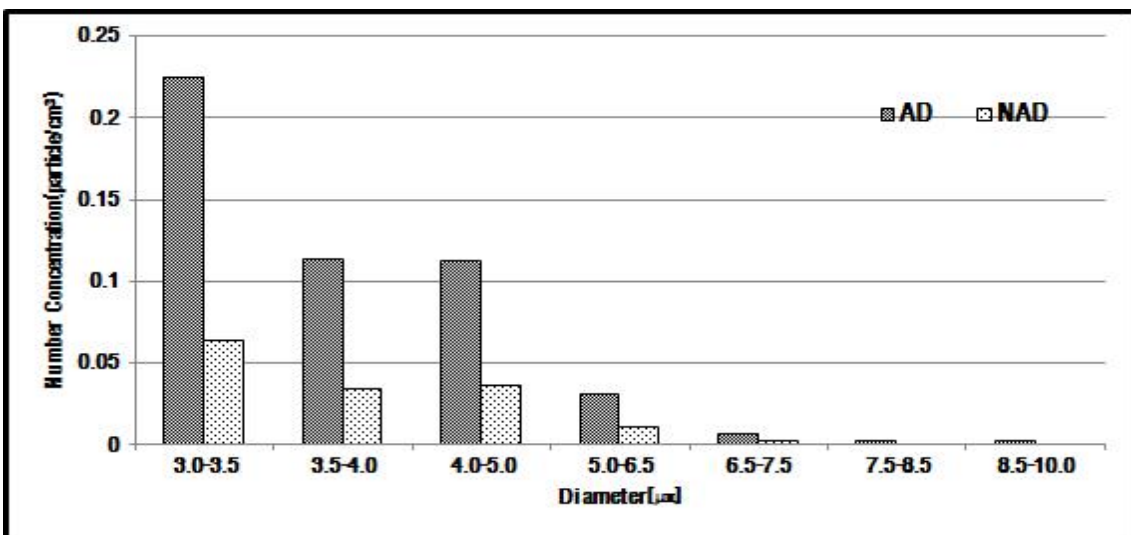
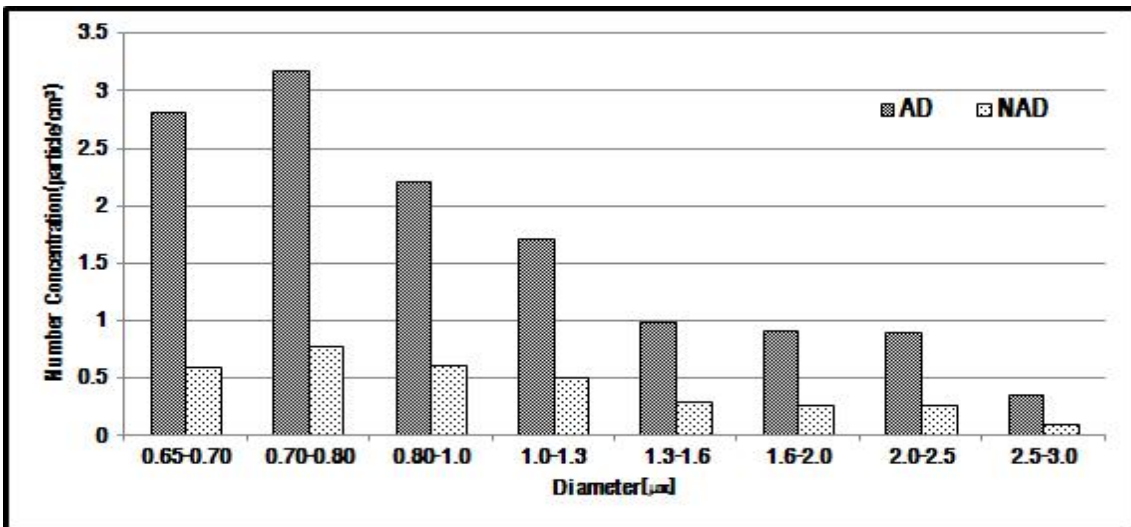
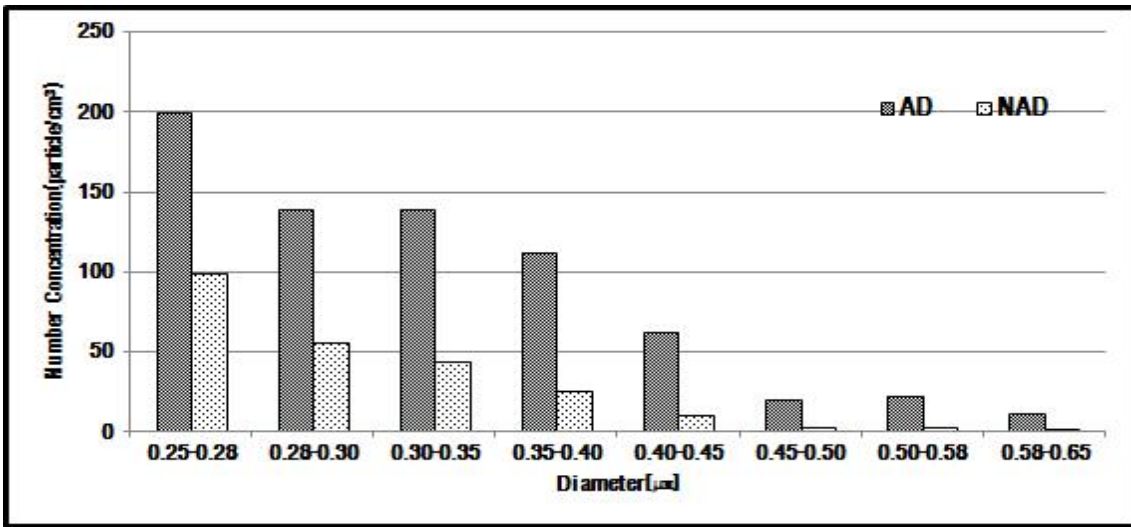


Fig. 21. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 04. 27±15)

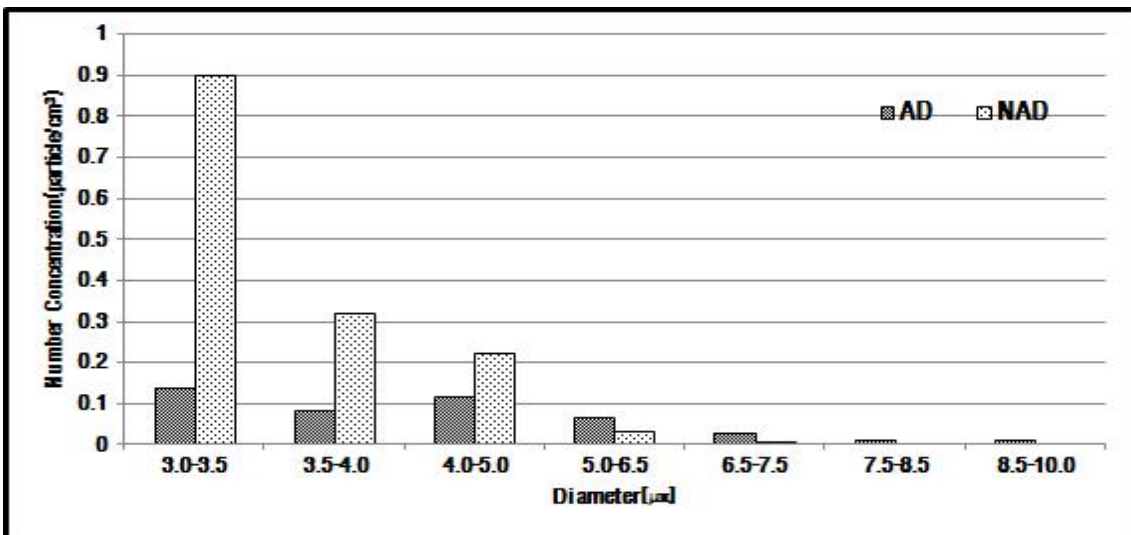
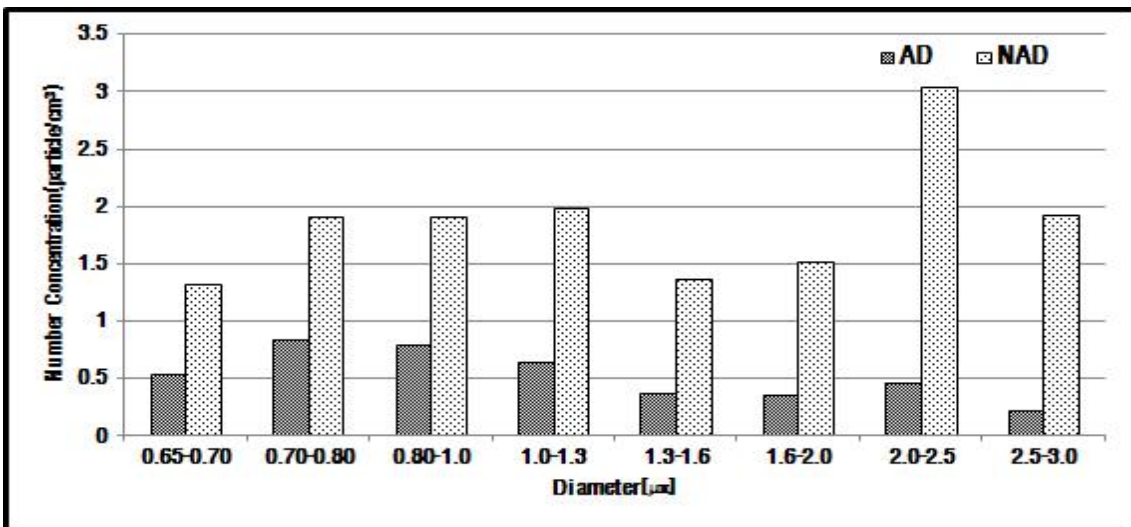
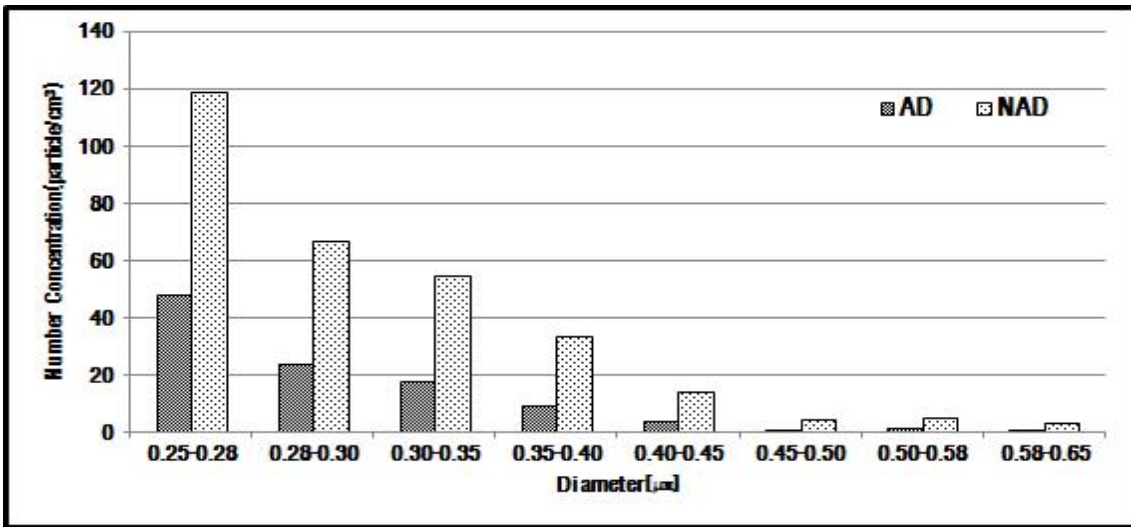


Fig. 22. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 05. 11±15)

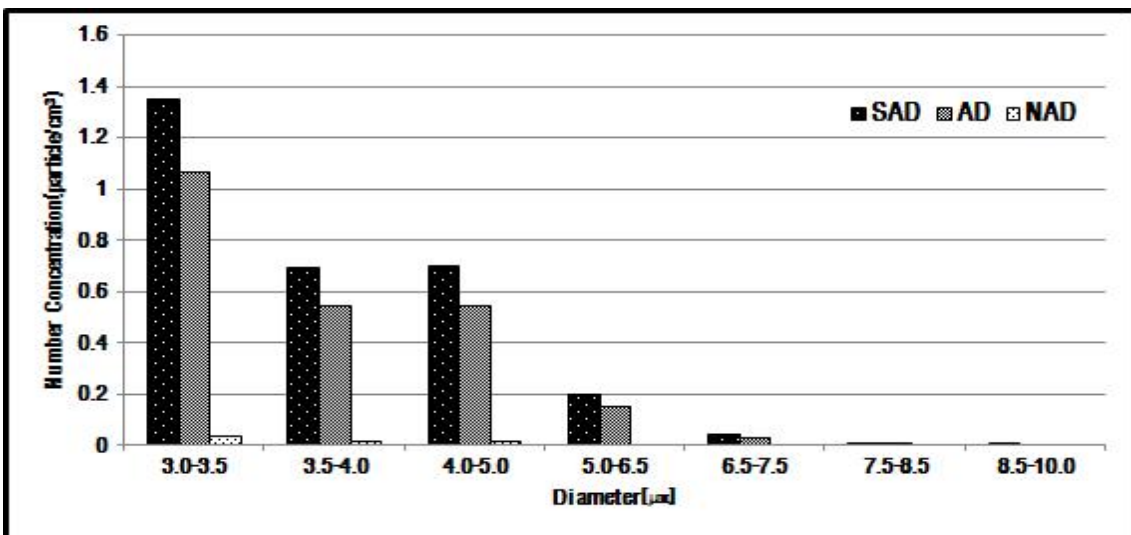
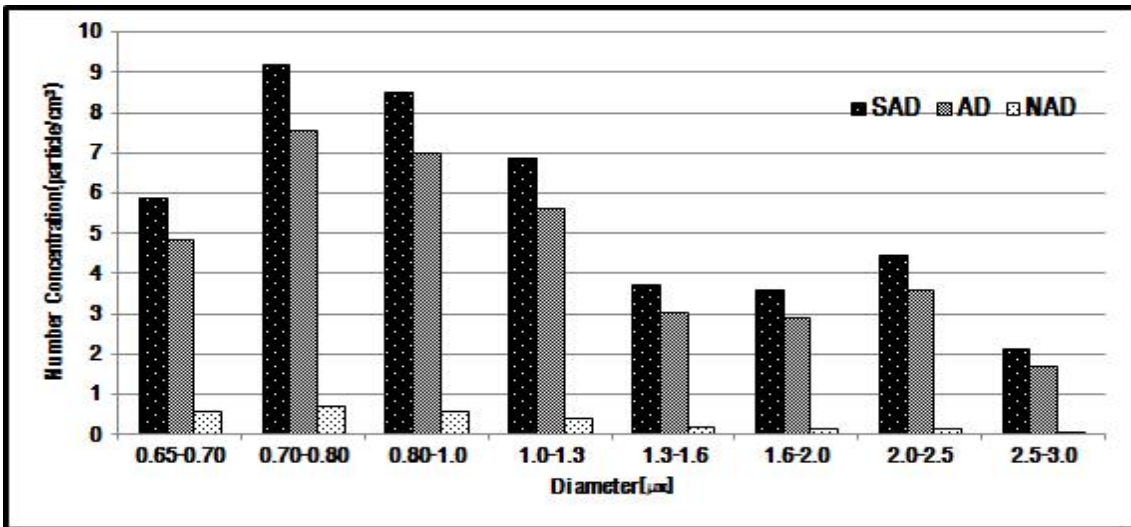
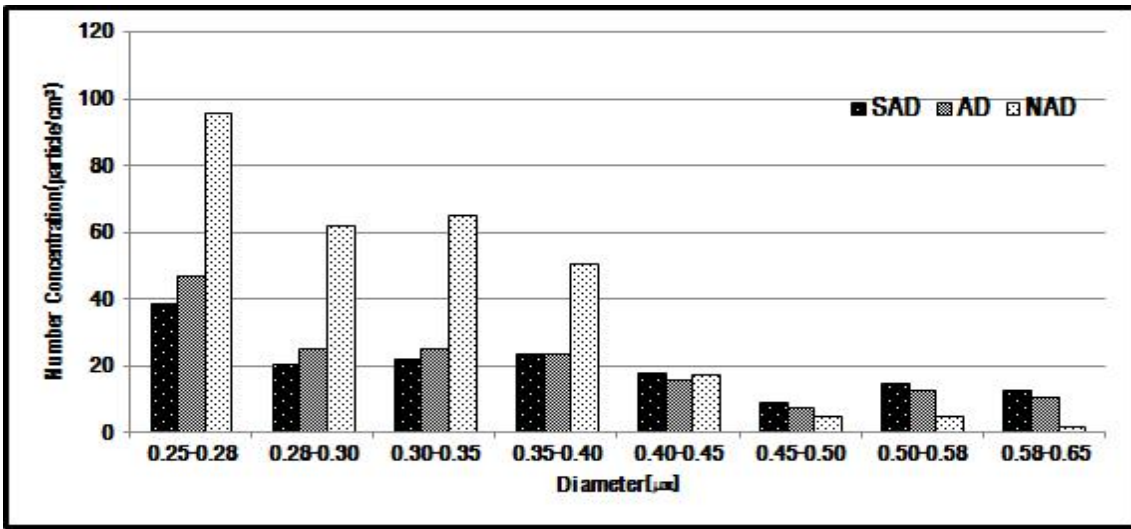


Fig. 23. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 11. 11~13±15)

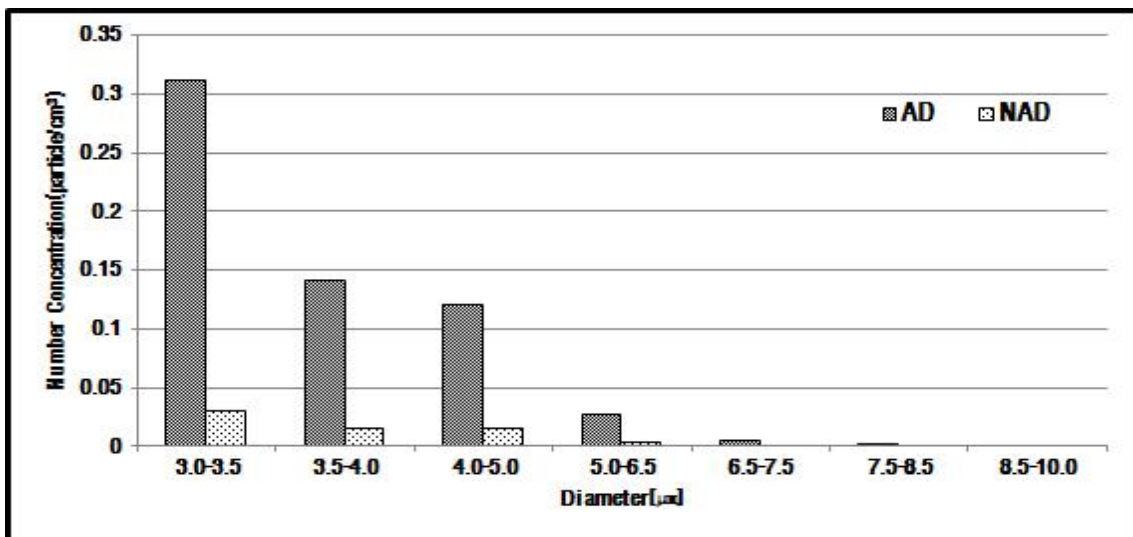
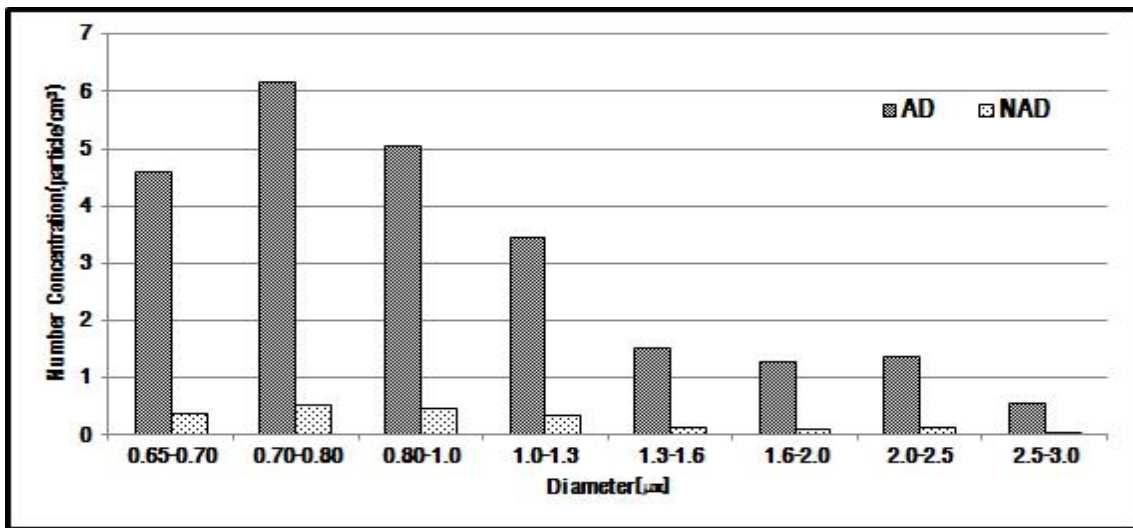
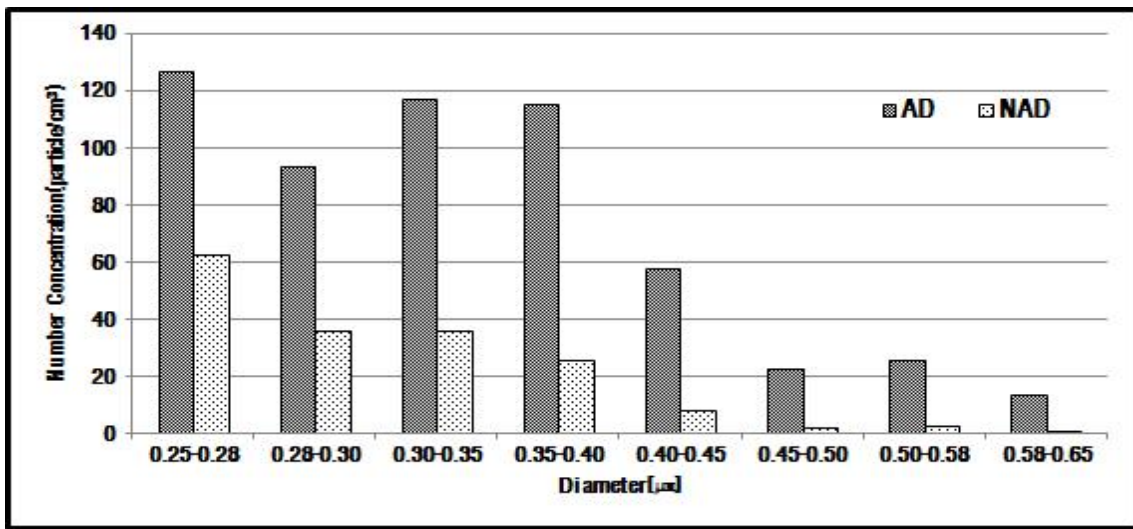


Fig. 24. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 12. 03±15)

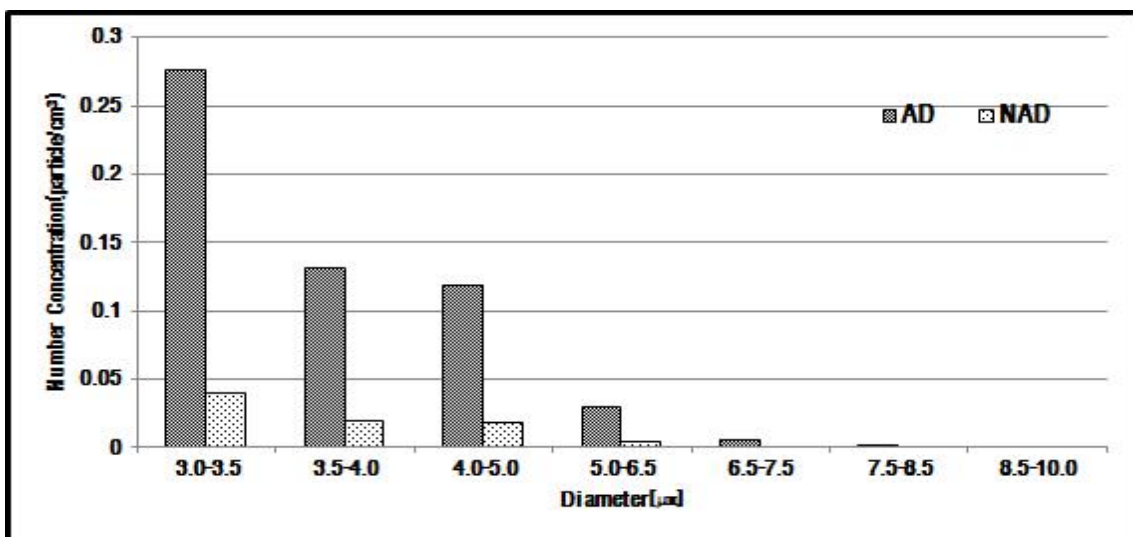
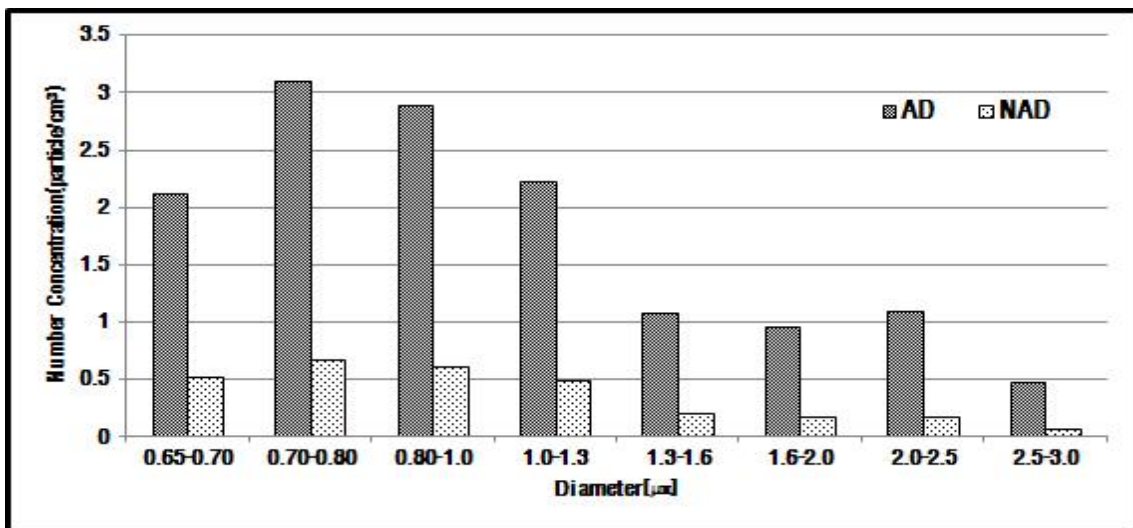
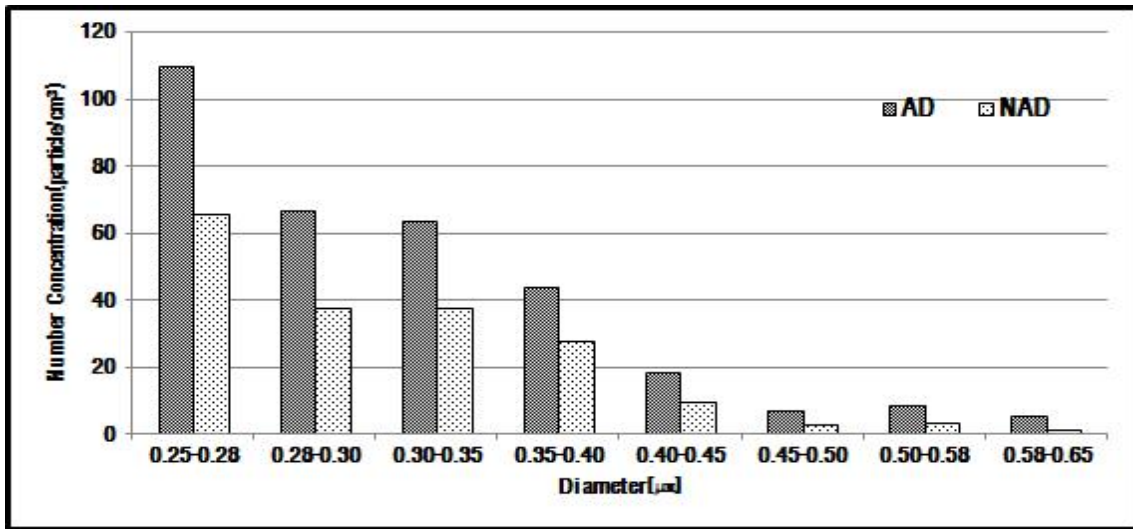


Fig. 25. Comparison of aerosol number concentration of 23 separated section in 3 different event during Asian dust event(2012. 12. 11±15)

본 연구기간동안 황사현상은 총 7번 발현하였다. 이에 황사가 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 좀 더 세부적으로 파악하기 위하여 각각의 이벤트별 전후 15일 자료들로 에어로졸 수농도를 상대적으로 비교하여 Fig. 19~25에 차례로 나타내었다.

전반적으로 강한 황사시, 황사시, 비황사시의 에어로졸 수농도는 이벤트별로 서로 다른 농도를 나타냈다. 이는 이벤트별 황사의 강도가 각각 다른 이유에서일뿐 아니라, 이벤트별 황사전후 15일동안 에어로졸 수농도에 또다른 큰 영향을 주는 인자들에 의한 것으로 생각된다. 예를 들어 5월 11일 황사현상시 전후 15일에 대한 수농도 비교에서는 비황사시의 수농도가 입경 5.0 μm 까지 황사시보다 높게 나타났는데 이는 5월중 강한 안개류의 지배적 영향을 받기 때문으로 사료된다. 그리고 11월 11~13일 황사시 전후 15일에 대한 수농도 비교에서도 미세입자구간인 0.25~0.40 μm 까지 비황사시 수농도가 황사시와 강한 황사시의 수농도에 비해 2배이상을 나타냈는데 이는 에어로졸 수농도에 박무의 영향이 11월 황사의 영향보다 더 크게 작용한 것으로 나타났다. 이러한 경우를 제외하면 대부분 미세입자에서 조대입자로 입경이 커질수록 강한황사시> 황사시> 비황사시 순으로 수농도가 높게 나타났다.

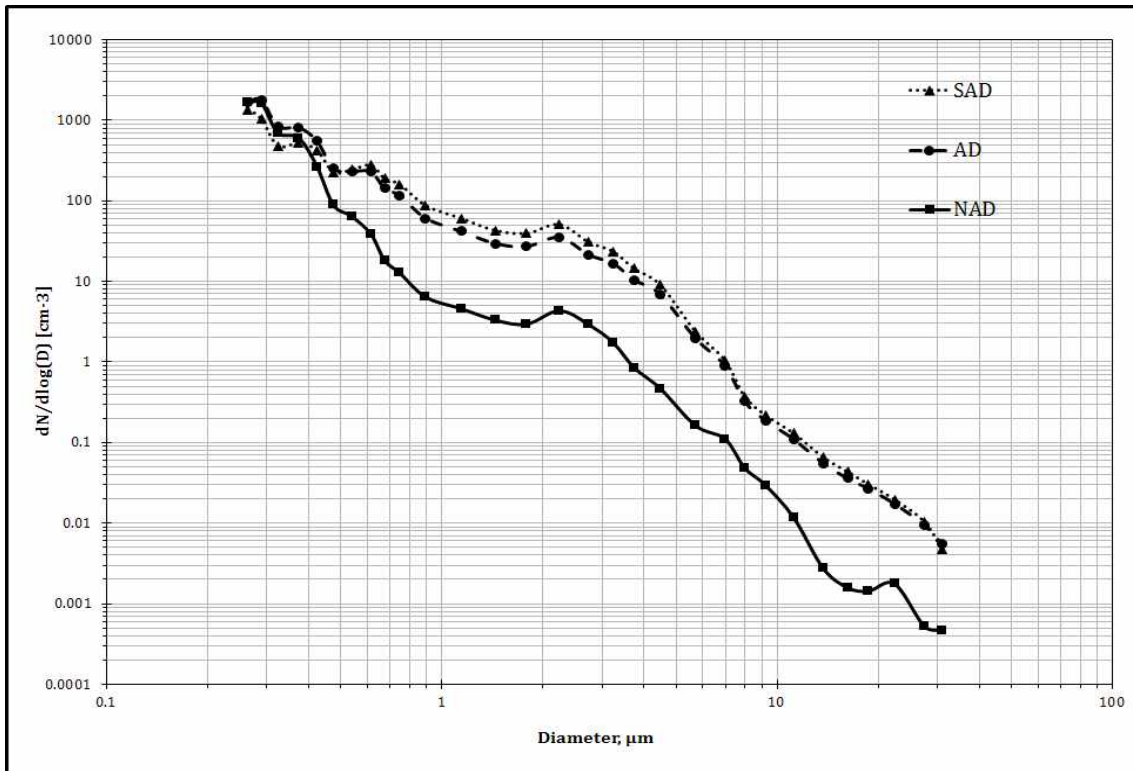


Fig. 26. Comparison of aerosol size distribution between Asian dust event and non-Asian dust event during experimental period.

Fig. 26은 강황사시와 황사시, 비황사시의 입경별 에어로졸 수농도 분포 특성을 파악하기 위하여 $N(D)=dN/d\log(D)$ 값을 나타냈다. SAD, AD, NAD의 경우 모두 에어로졸 수농도는 입경이 커짐에 따라 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 변화경향을 구분하여 비교하여 보면 최소입경범위인 $0.25\sim 0.28 \mu\text{m}$ 에서 시작하여 $0.4 \mu\text{m}$ 입경까지는 세 경우 모두 급격하게 감소하는 경향이 있지만 $0.4\sim 1.0 \mu\text{m}$ 입경구간에서는 SAD와 AD의 경우 에어로졸 수농도는 이전 입경에서와 비슷한 감소경향인데 반해 NAD의 경우는 감소하는 정도가 더 급격한 분포경향을 보였다. 그리고 입경이 $0.4 \mu\text{m}$ 이상일 때부터 SAD와 AD의 경우가 NAD의 보다 에어로졸 수농도가 많아 지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구의 측정지점인 제주 고산지역과 비슷한 해안지역인 안면도에서의 연구결과와 유사하다.(전영신 등, 1999)

한편, $1.0\sim 2.0 \mu\text{m}$ 입경에서는 세 경우 모두 완만한 감소경향을 보였고, $2.0\sim 2.5 \mu\text{m}$ 입경구간에서 약간 상승하였다가 $2.5 \mu\text{m}$ 이상의 입경에서 다시 급격히 감소하는 경향을 나타냈다.

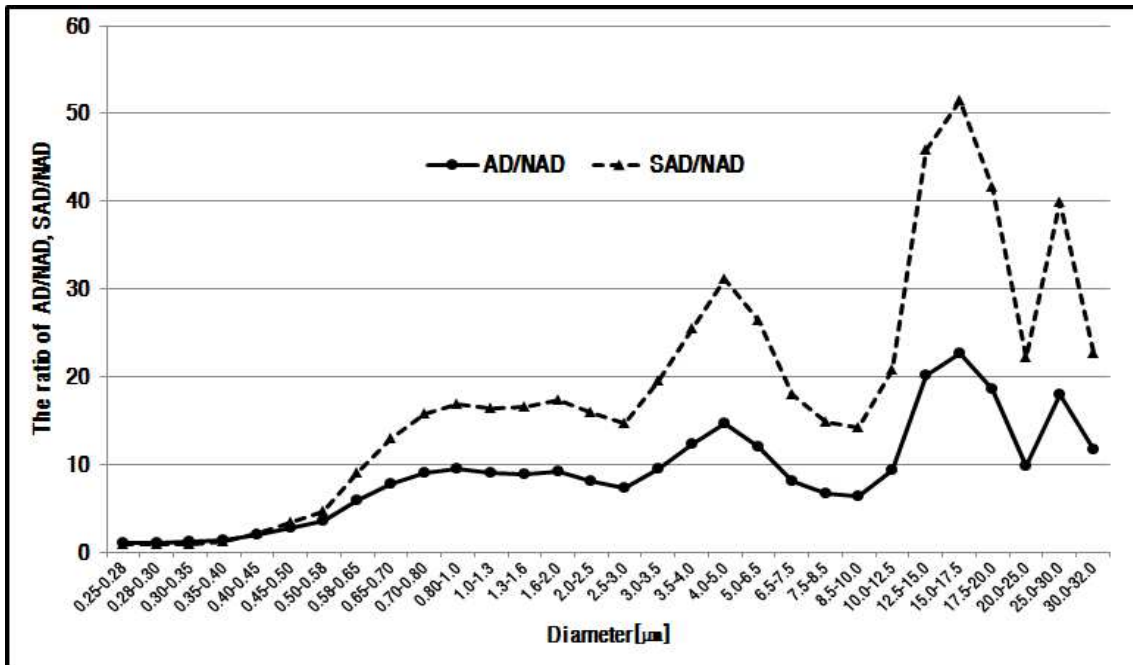


Fig. 27. The ratio of AD/NAD, SAD/NAD of 30 separated section during experimental period.(AD: Asian dust, NAD: non-Asian dust, SAD: severe Asian dust)

Fig. 27에는 황사현상이 입경별 에어로졸 수농도에 미치는 영향정도를 파악하기 위하여 황사를 강한황사와 황사로 구분하여 황사현상을 배제한 비황사시와의 상대적인 비율을 나타냈다. 전반적으로 황사현상이 에어로졸 수농도에 미치는 영향은 입경이 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타냈고, 특히 강한 황사의 경우 그 정도가 더 큼을 알 수 있다. 그림에서 보면 AD/NAD와 SAD/NAD는 최소입경구간인 0.25~0.28 μm 에서 각각 약 1.0배, 0.8배로 황사의 영향은 무시해도 될 수준으로 나타났고, 입경이 커질수록 0.58 μm 입경까지 수농도비는 4배, 5배로 미세하게 증가하였다. 하지만 0.58~0.8 μm 입경구간에서 SAD/NAD의 비율은 급격히 증가하여 0.7~0.8 μm 입경에서 약 16배를 나타냈고 AD/NAD의 비율은 이보다 적은 약 9배의 수농도비를 보였다. 그리고 0.8~3.0 μm 입경까지 AD/NAD, SAD/NAD 비율은 특이한 변화없이 유지되다가 3.0 μm 이상의 입경에서 다시 급격히 수농도비가 증가하여 4.0~5.0 μm 입경구간에서는 AD/NAD와 SAD/NAD의 비율이 각각 약 15배, 31배를 나타냈다. 이후 에어로졸 수농도비는 감소하는 경향을 보이다 8.5 μm 입경구간부터 다시 증가하여 최대 수농도비는 입경구간 15.0~17.5 μm 에서 AD/NAD가 23배, SAD/NAD가 51배를 나타냈다.

4. 에어로졸 수농도에 미치는 기상인자의 영향

대기 중 입경구간에 대한 에어로졸의 농도는 대기의 복사에너지 효과와 구름의 생성 및 기후변화와의 연관하여 그 영향이 매우 중요하다. 특히 최근에는 강수현상과 연결되는 기상방재에 뿐만 아니라 기후변화에 따른 지구환경의 변화에 있어 에어로졸 수농도가 한 요소로 작용함에 따라 기온, 강수량, 습도등 기상요소와 관련한 에어로졸 연구에도 관심이 높아지고 있다.(김필수 등, 1986; 이명주 등, 2006) 이에 따라 에어로졸 수농도와 기상요소간의 전반적인 이해가 필요함에 따라 국지적인 오염원을 배제할 수 있는 배경지역인 제주도 고산지역에서 기상인자와 입경별 에어로졸 농도와의 상관관계를 파악하였다. 일반적으로 기존에 연구되었던 결과들을 보면 상대습도의 경우 에어로졸 농도와 입경이 1.0 μm 이하의 미세입자의 경우 양의 상관관을 갖고 그 이상의 입경인 조대입자의 경우 음의 상관관을 갖는다.(정창훈 등, 2003) 그리고 시정같은 경우 에어로졸의 농도가 낮을수록 길어지는 음의 상관관을 보인다. 특히 입경구간이 0.1~1.0 μm 의 에어로졸이 상관성이 높은 것으로 알려졌다.(배귀남 등, 2003)

본 연구에서 기상현상이 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 파악하기 위해 앞서 측정 기간 동안의 제주 고산 기상 관측소에서 관측한 시정, 운량, 기온, 강수량, 습도, 풍속 등 총 6개의 기상상태 현황에 대하여 Table. 6에 나타냈다. 표에서 보듯이 본 연구기간동안의 평균기온은 15.4 $^{\circ}\text{C}$ 로 고산지역의 30년 관측(1981~2010년) 평년값인 15.5 $^{\circ}\text{C}$ 보다 약 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 낮게 나타났고, 상대습도는 76 %로 약 5.3 % 더 낮게 나타났으며 평균풍속은 6.9 m/sec 로 본 연구기간의 풍속보다 0.3 m/sec 더 높은 차이가 나타났다.

Table. 6. The average, minimum, maximum and standard deviation of meteorological data during experimental period.

	Visibility	Cloud amount	Temperature	Rainfall	Humidity	Wind Speed
Mean	16.6	6.4	15.4	3.6	70.7	7.2
Max	30.0	10.0	32.8	100.5	98.0	28.3
Min	0.1	0	-3.2	0	21.0	0
Std	7.5	3.4	8.2	11.1	15.9	4.8

The units of Visibility : Km, Cloud amount : (1/10), Temperature : $^{\circ}\text{C}$, Daily Rainfall : mm, Humidity : %, Wind Speed : m/sec.

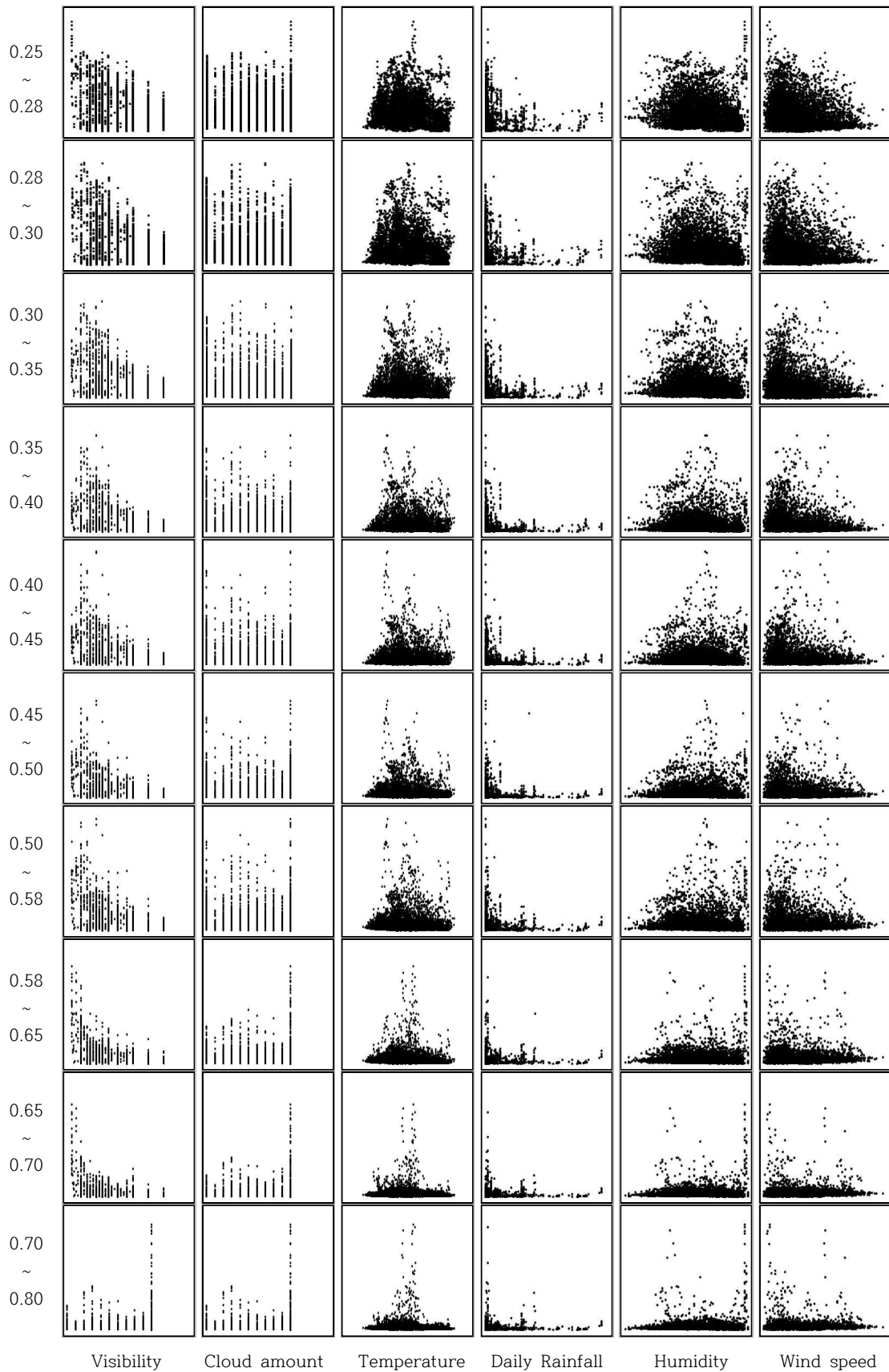


Fig. 28. The scatter diagram between Aerosol number concentration(0.28~0.80 μm) and weather condition

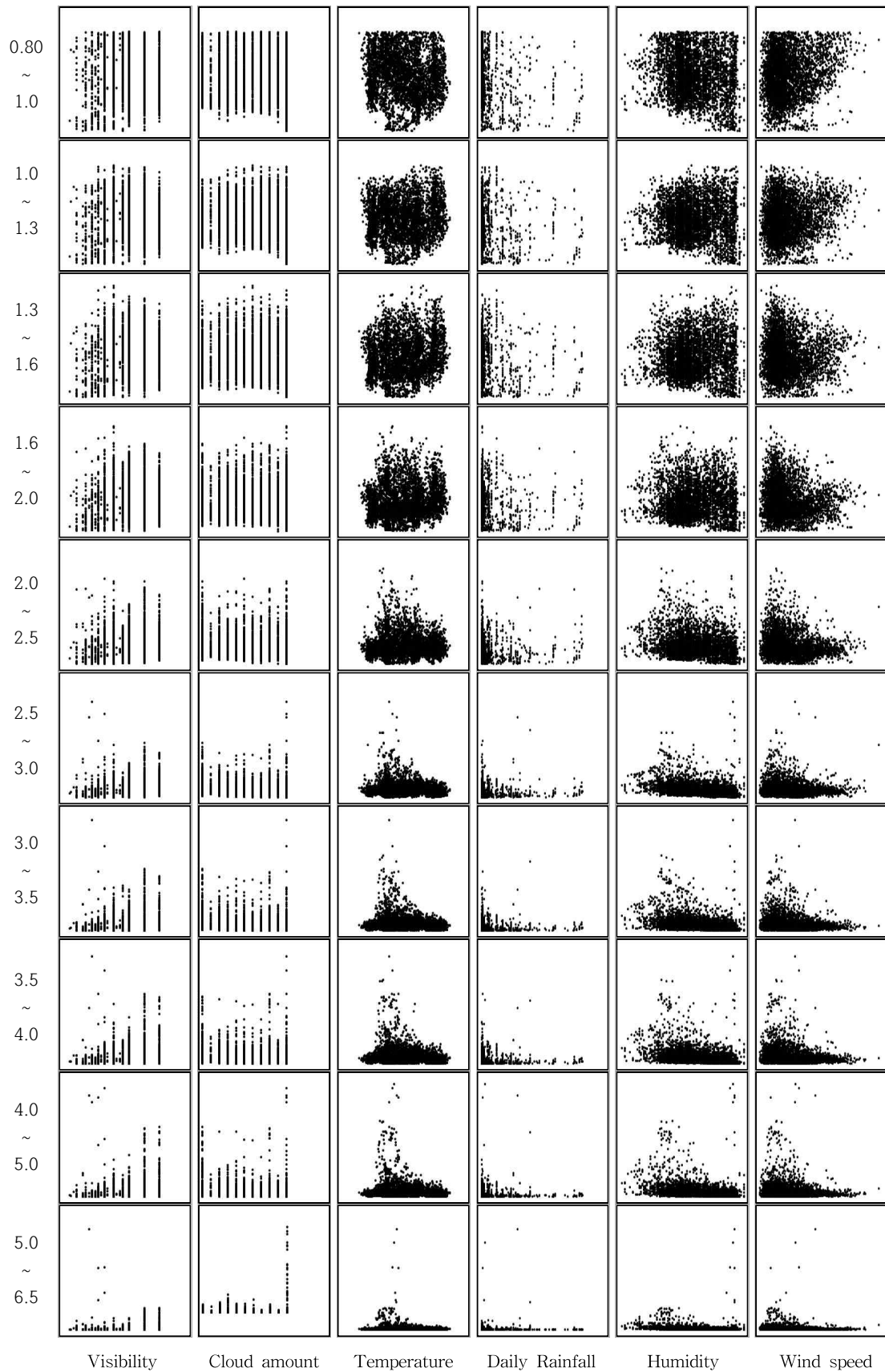


Fig. 29. The scatter diagram between Aerosol number concentration(0.80~6.5 μ m) and weather condition

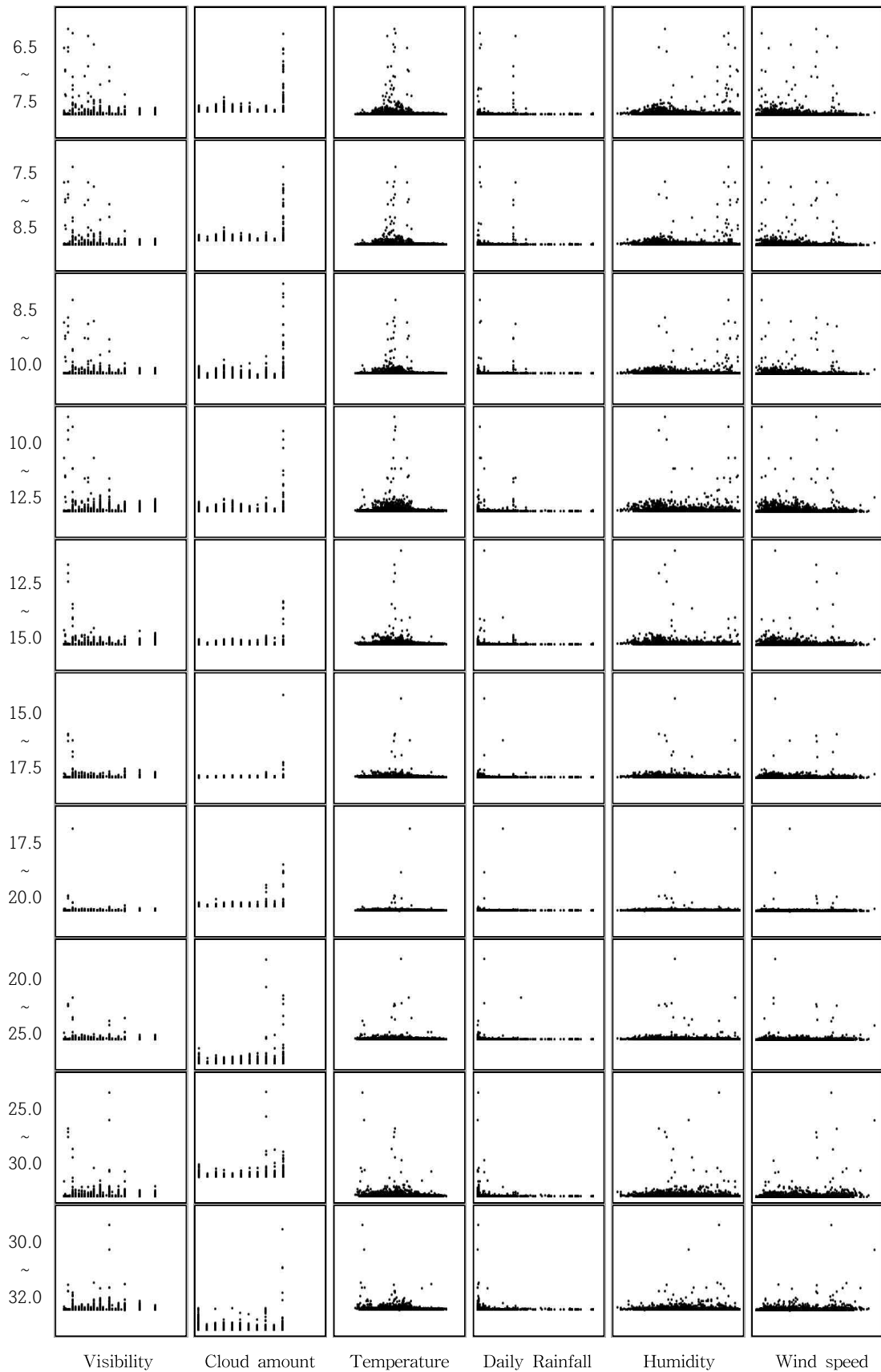


Fig. 30. The scatter diagram between Aerosol number concentration(6.5~32.0 μ m) and weather condition

우선 본 연구기간동안의 기상요소들이 구간별 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 파악하고 설명하기 위한 첫단계로 변수들의 선형적 관계여부를 확인하기 위하여 기상요소들의 변화에 따른 입경별 에어로졸 수농도의 산점도 행렬을 Fig. 28~30에 나타냈다. 그림에서의 산점도는 변수들간의 어떠한 경향이나 형태가 존재하는지를 파악하는 것이 목적이기 때문에 수치값은 별로 중요하지 않아서 도표에서의 눈금은 따로 표시하지 않았다.

총 6개의 기상인자 각각의 변화에 대한 수농도 분포를 살펴보면 수농도와 가시도, 풍속의 경우는 미세입자구간에서는 가시도가 증가할수록 수농도가 낮아지는 음의 경향성이 나타났지만, 조대입자로 갈수록 경향성이 약해지는 모습을 나타냈다. 그리고 수농도와 기온의 경우 정규분포의 형태로 최대, 최소기온 구간보다는 평균기온인 15.4 °C 주변에 수농도가 많이 분포한 형태이고, 수농도와 습도의 경우도 평균습도인 70.7 % 주변에 수농도가 집중되어 있는 정규분포 형태를 보였다. 하지만 이러한 형태는 미세입자구간에서 확인이 될 뿐 조대입자로 갈수록 그 형태는 많이 소실하는 경향을 보였다. 수농도와 가시도, 풍속의 경우에는 미세입자구간에서는 가시도가 증가할수록 수농도가 낮아지는 음의 경향성이 나타났고 조대입자로 갈수록 경향성이 많이 사라지는 모습을 나타냈다 그리고 수농도와 운량, 강수량의 경우 산점도에서 특별한 분포형태가 나타나지 않았다.

전반적으로 입경에 따른 에어로졸 수농도와 기상요소와는 확연하게 드러나는 선형적 경향을 찾아 볼 수 없었다. 그리고 최소입경인 0.25 μm 에서 5.0 μm 까지는 어느정도 형태파악이 가능하였지만 5.0 μm 이상의 입경에서는 에어로졸 수농도가 대부분 0으로 어떠한 경향을 확인하기 어려운 분포형태를 나타냈다.

Table. 7. The correlation coefficients for aerosol number concentration and weather condition during experimental period

	Visibility	Cloud amount	Temperature	Rainfall	Humidity	Wind speed
0.25-0.28	-0.43	-0.09	-0.05	-0.13	-0.08	-0.17
0.28-0.30	-0.46	-0.11	-0.01	-0.11	-0.06	-0.18
0.30-0.35	-0.47	-0.11	0.00	-0.10	-0.04	-0.17
0.35-0.40	-0.47	-0.09	0.00	-0.09	-0.02	-0.15
0.40-0.45	-0.48	-0.05	-0.01	-0.09	0.02	-0.12
0.45-0.50	-0.47	-0.02	-0.05	-0.07	0.03	-0.06
0.50-0.58	-0.50	-0.02	-0.02	-0.09	0.05	-0.05
0.58-0.65	-0.48	0.04	-0.05	-0.06	0.07	0.02
0.65-0.70	-0.41	0.05	-0.04	-0.04	0.07	0.04
0.70-0.80	-0.37	0.06	-0.02	-0.02	0.08	0.02
0.80-1.0	-0.32	0.06	0.00	-0.02	0.09	0.01
1.0-1.3	-0.27	0.06	0.01	-0.02	0.10	-0.02
1.3-1.6	-0.24	0.07	0.02	-0.02	0.11	-0.04
1.6-2.0	-0.22	0.07	0.02	-0.01	0.11	-0.05
2.0-2.5	-0.19	0.07	0.02	-0.01	0.11	-0.06
2.5-3.0	-0.19	0.07	0.02	0.00	0.11	-0.06
3.0-3.5	-0.20	0.07	0.01	0.00	0.10	-0.05
3.5-4.0	-0.20	0.07	0.01	0.00	0.09	-0.04
4.0-5.0	-0.17	0.07	0.00	0.02	0.08	-0.03
5.0-6.5	-0.12	0.06	-0.01	0.02	0.04	0.00
6.5-7.5	-0.09	0.05	-0.01	0.00	0.03	0.00
7.5-8.5	-0.07	0.05	-0.01	0.00	0.03	0.00
8.5-10.0	-0.06	0.04	-0.01	0.00	0.03	0.00
10.0-12.5	-0.05	0.04	-0.01	0.00	0.03	0.00
12.5-15.0	-0.09	0.03	-0.02	0.01	-0.03	0.02
15.0-17.5	-0.09	0.02	-0.02	0.00	-0.08	0.06
17.5-20.0	-0.06	0.02	0.00	0.01	-0.02	0.03
20.0-25.0	-0.08	0.03	-0.02	-0.01	-0.01	0.03
25.0-30.0	-0.08	0.04	-0.05	-0.04	-0.07	0.15
30.0-32.0	-0.07	0.04	-0.06	-0.03	-0.03	0.15

Table. 7은 앞에서 산점도를 통해 기상요소의 변화에 따른 에어로졸 수농도 분포 형태 및 선형적 관계에 대한 그 강도를 나타낸 것으로 상관분석 결과이다. 여기서 상관계수값의 해석은 절대값을 기준으로하여 최소 0에서 최대 1 까지이다. 절대값이 0인 경우는 무상관이라 볼 수 있고 1에 가까울수록 상관성이 강하다고 볼 수 있다.

본 연구에서 입경별 에어로졸 수농도와 기상요소간의 상관분석 결과를 보면 전체적으로 봤을 때 최고 -0.50, 최저 0의 상관계수를 나타냈다. 전반적으로 수농도는 미세입경인 0.25~1.0 μm 에서 시정과의 상관계수가 -0.32에서 -0.50범위의 음의 상관관계를 보인 것을 제외하면 전 구간에서 기상요소들과 상관계수는 0.3이하의 낮은 상관성을 나타냈다. 분석 결과를 기상요소별로 살펴 보면 수농도와 가시도의 상관관계는 전체입경에서 음의상관을 갖고 있고 상관계수값이 최고 -0.50, 최소 -0.05 범위로 미세입자에서 조대입자로 갈수록 상관정도가 적어지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 가시도가 입경별 에어로졸 수농도에 미세입자구간에서 약하지만 어느정도의 영향을 미치는 것으로 확인 되었다. 그리고 운량과의 상관분석 결과를 보면 입경 0.28~0.35 μm 에서 상관계수가 -0.11로 가장 높은 상관성을 보였지만 그 정도는 무상관에 가까운 수준을 나타냈고, 온도와 강수, 습도, 풍속과의 상관분석에서도 운량과 마찬가지로 에어로졸 수농도 전입경구간에서 상관계수가 거의 0에 가까운 수준으로 전혀 상관이 없는 것으로 나타났다. 시정과의 상관분석 결과와는 달리 운량과 온도, 강수, 습도, 풍속은 입경별 에어로졸 수농도와 음,양의 상관경향도 뚜렷하지 않고 상관정도도 거의 없는 것으로 나타났다.

이러한 상관분석 결과는 기존의 타연구들과 비교했을 때 다른 경향을 나타내고 있는데, 명확한 이유를 확인할 수 없기 때문에 앞으로 장기적인 관측을 통한 종합적인 연구가 필요할 것이라 사료된다.

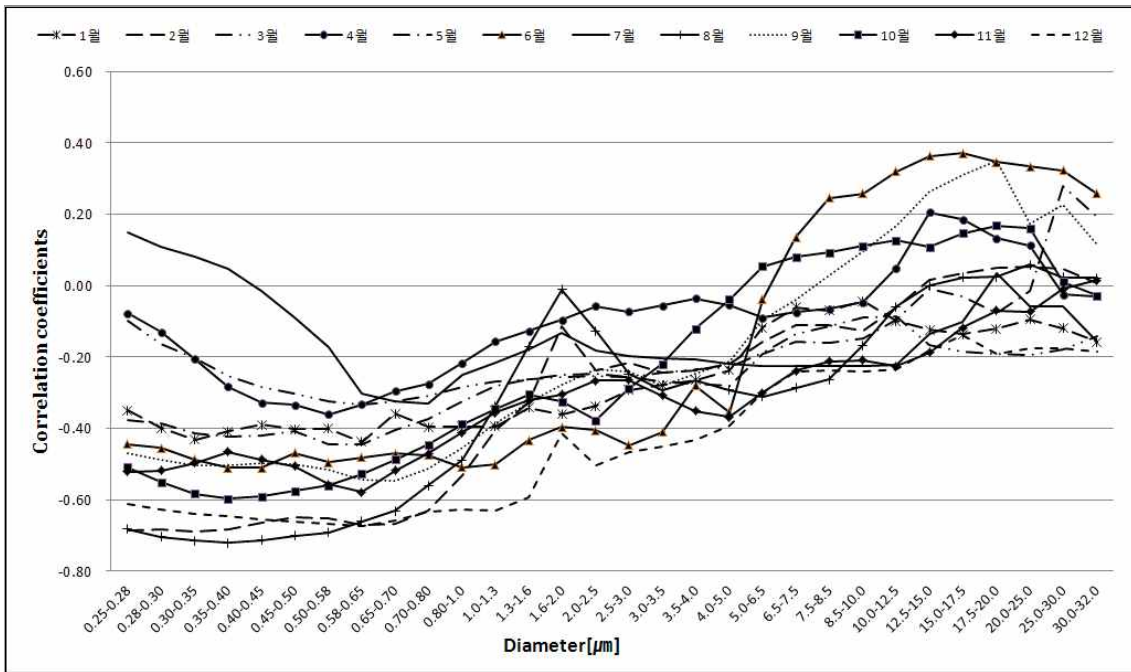


Fig. 31. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 separated range and visibility during experimental period.

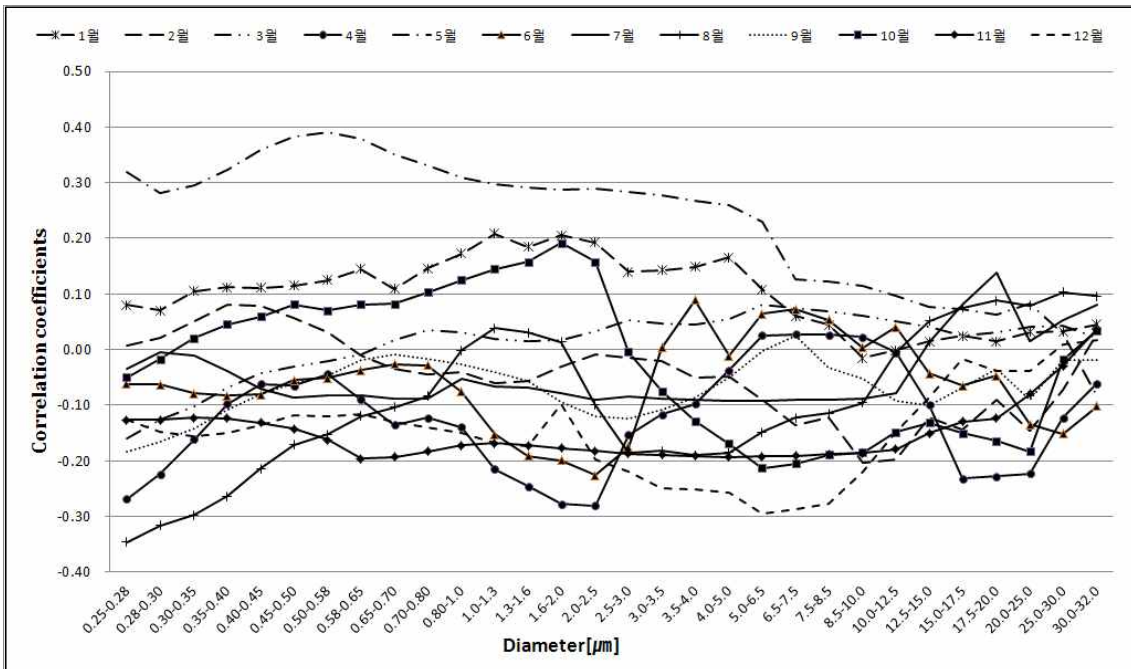


Fig. 32. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 separated range and cloud amount during experimental period.

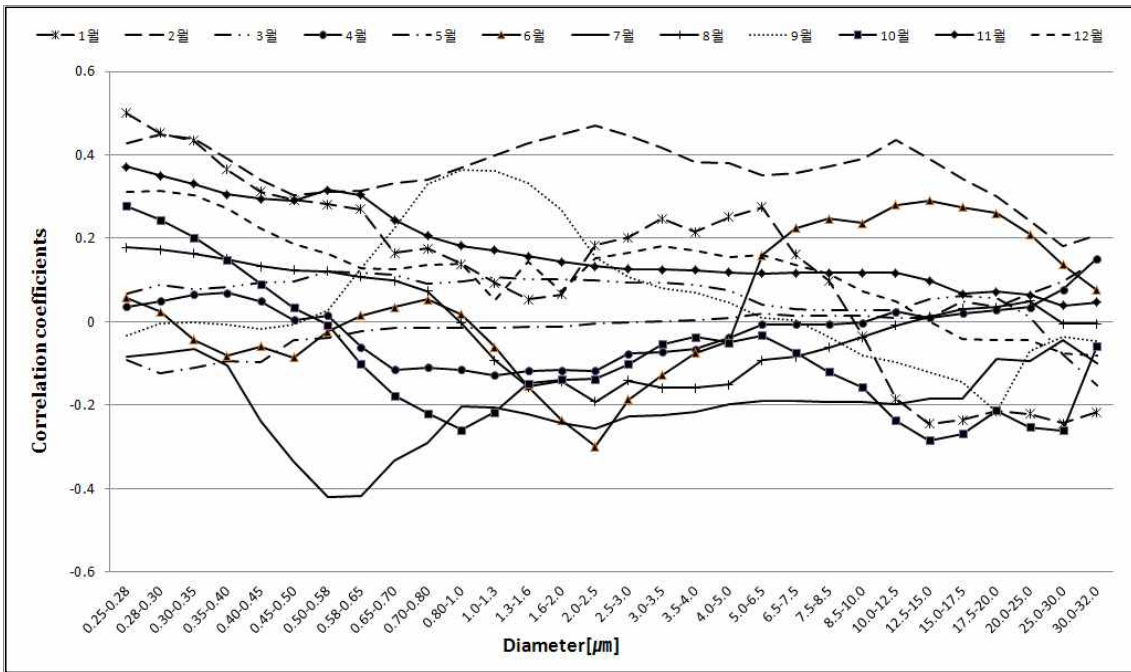


Fig. 33. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 separated range and temperature during experimental period.

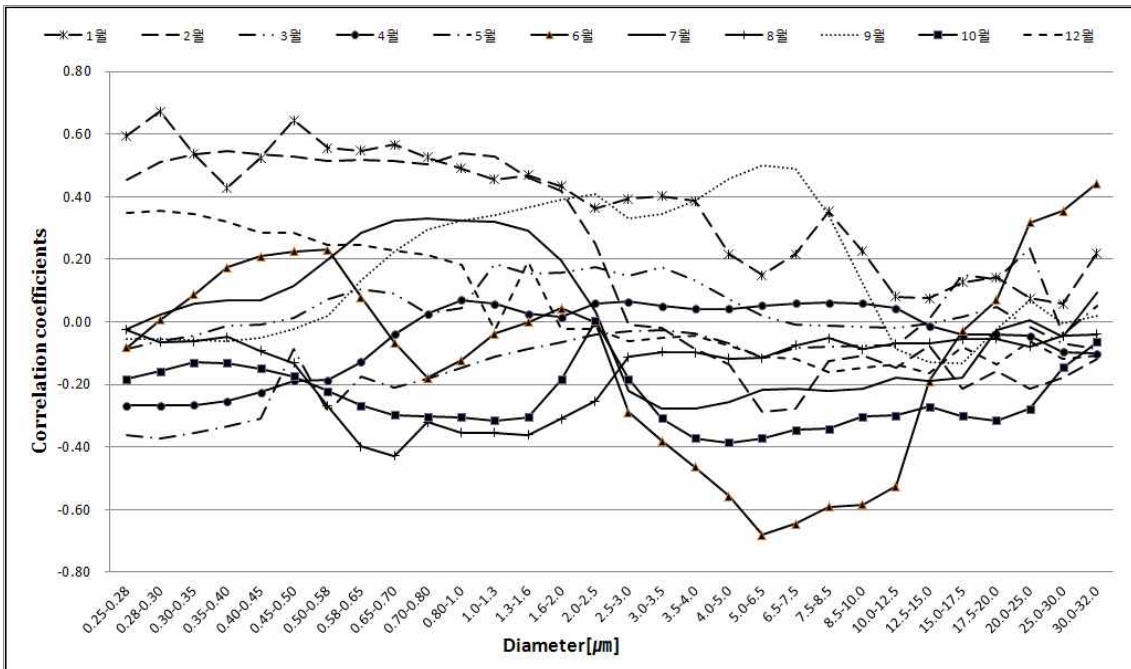


Fig. 34. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 separated range and rainfall during experimental period.

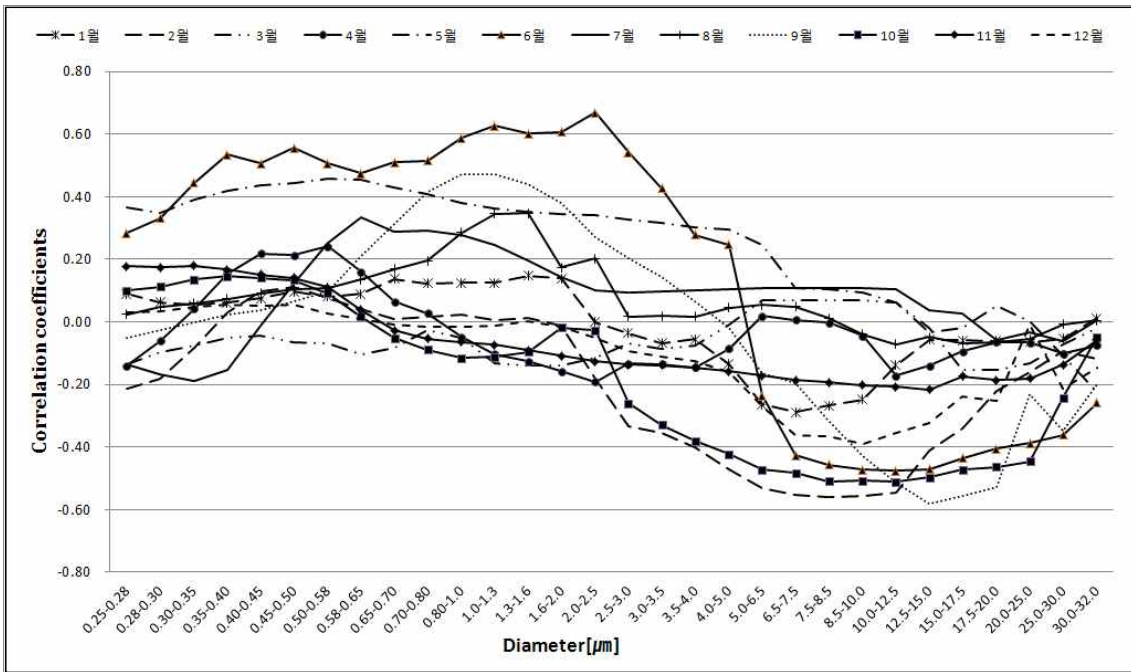


Fig. 35. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 separated range and humidity during experimental period.

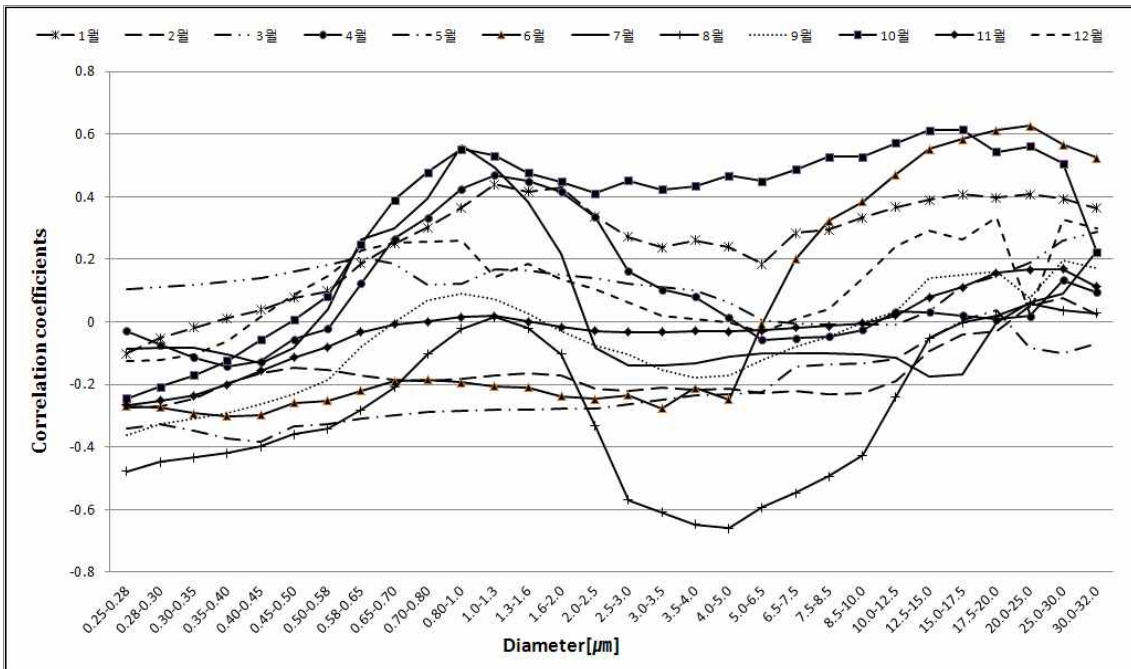


Fig. 36. The correlation coefficients graph monthly for aerosol number concentration of 30 separated range and wind speed during experimental period.

앞에서 제시한 Fig. 30의 전체측정자료기준 에어로졸 수농도와 기상인자간의 상관성은 전반적으로 낮은 경향을 보임에 따라 계절적 특성 여부 확인등의 좀 더 구체적인 파악을 위하여 기상인자가 에어로졸 수농도에 미치는 영향을 월별로 구분하여 Fig. 31~36에 나타냈다.

Fig. 31의 에어로졸 수농도와 시정의 월별 상관관계를 보면 전반적으로 미세입자구간에서 조대입자로 갈수록 음의 상관성은 약해지는 경향을 보였다. 8월의 경우 0.25~1.0 μm 입경구간에서 평균 0.7정도의 강한 음의 상관관계를 보였는데 이는 빛을 잘 산란시키는 0.1~1.0 μm 입경범위의 수농도는 시정과 상관성이 높다는 기존의 연구와 비슷하다.(배귀남 등, 2003) 그리고 4월, 6월, 9월, 10월의 경우 조대입자구간에서 수농도는 시정과 양의 상관성을 나타내는 특징도 보이기도 하였다.

Fig. 32~34에서는 각각 월별 에어로졸 수농도와 운량, 기온, 강수량과의 상관성을 나타낸 것인데 전반적으로 특별한 변화경향은 나타나지 않았고, 상관계수도 0에 근접한 아주 약한 상관을 보였다. Fig. 34에서 12월, 1월, 2월의 겨울철에는 최소입경구간인 0.25~0.28 μm 에서 양의 상관을 보인 반면 이외의 달은 음의상관을 갖는 특징을 나타냈다.

Fig. 35와 Fig. 36은 각각 수농도와 습도, 풍속과의 상관관계를 나타낸 것으로 서로 반대의 입경별 상관성을 보였다. 우선 습도와의 상관성을 보면 미세입자구간에서 약한 양의 상관관계를 보인 반면 조대입자로 갈수록 음의 상관관계를 나타내는 경향을 보였고, 풍속과는 미세입자구간에서는 약한 음의상관을 나타냈지만 조대입자로 갈수록 양의 상관성을 띠는 경향을 보였다. 하지만 두 경우 모두 상관계수가 모두 0에 근접한 거의 무상관에 가까운 수준을 나타냈다. 이러한 결과는 에어로졸 수농도가 습도와 풍속과의 상관관계가 정반대의 경향을 보인다는 기존의 연구결과 (Marcazzan et al., 2002)에 어느정도 부합하는 결과이다.

V. 결 론

우리나라의 대표적인 청정지역으로 국지적인 오염원으로부터의 영향이 적고 월경성 대기오염물질의 이동현상을 평가하기에 적합한 배경지역으로 제주지역에서 2010년 3월부터 2011년 2월까지 Aerodynamic particle sizer spectrometer를 이용하여 에어로졸 수농도 현황 및 변화추이를 알아보고 황사현상 및 기상인자들이 수농도에 미치는 영향을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구기간동안 제주 고산지역에서 측정한 에어로졸 수농도의 전체평균값은 $241 \text{ particle/cm}^3$ 이고, 수농도의 대부분이 미세입자들로서 99%가 $1.0\mu\text{m}$ 이하의 입경에 존재하는 것으로 나타났다. 전반적으로 입경구간이 커질수록 수농도는 감소하는 경향을 보였고, 입경별로 구분하였을 때 최소입경인 $0.25\sim 0.28\mu\text{m}$ 에서 $81.51\text{particle/cm}^3$ 로 가장 많았고 최대입경인 $30.0\sim 32.0\mu\text{m}$ 에서는 거의 0에 가까운 극미량의 수농도를 나타냈다.
2. 에어로졸 수농도의 월별 변동 특성을 보면 $0.58\mu\text{m}$ 를 경계로 이보다 미세한 입경에서는 2월달이 가장 높게 나타나고, 7월달에 급격하게 낮아지는 특성을 보인 반면 $0.58\mu\text{m}$ 보다 큰 입경에서는 5월달의 수농도가 다른달에 비해 월등히 높고 11월달에 한차례 상승하는 특징을 보였다. 그리고 에어로졸 수농도의 일중 경시 변동 특성을 보면 전반적으로 거의 모든 입경구간에서 낮에는 감소하고 밤에는 증가하는 경향을 보였다 이는 도심지역과 다른 결과로 배경지역의 특징이 잘 반영되었다..
3. 경시에 따른 에어로졸 수농도와 질량농도의 변화경향을 보면 곳곳에서 고농도 수치를 보이는 서로 비슷한 패턴을 나타냈지만 수농도의 경우 안개,박무등의 영향으로 수차례 더 peak가 나타나는 것으로 나타났다. 최대 질량, 수농도는 황사가 대량유입이 되는 황사시에 최대질량농도 $749\mu\text{g/m}^3$ 과 최대수농도 $478 \text{ particle/cm}^3$ 를 나타냈다.

4. 에어로졸 수농도를 비황사시, 황사시, 심한황사시로 구분하여 비교했을 때 최소 입경구구간인 $0.25\sim 0.28\mu\text{m}$ 에서 평균 수농도가 각각 81.49, 83.32, 67.05 particle/cm³로 심한황사시가 서로 비슷한 농도수준인 황사시와 비황사시보다 낮게 나타났다. 하지만 그 이상의 조대입경에서부터는 심한황사시가 황사, 비황사시의 수농도 보다 높게 나타났고, 심한황사시와 황사시, 비황사시의 농도격차범위는 많이 커지는 경향을 나타냈다.

5. 에어로졸 수농도와 수농도에 영향을 미치는 기상인자(기온, 습도, 강수량, 시정, 풍속, 운량)들의 상관관계 파악한 결과 수농도와 시정의 경우 최소입경구간인 $0.25\sim 0.28\mu\text{m}$ 에서 상관계수가 -0.5로 음의 상관을 나타냈고, 월별로 구분하여 보면 8월에 입경구간이 $0.25\sim 1.0\mu\text{m}$ 에서 -0.7의 강한상관을 보였다. 하지만 입경이 커짐에 따라 상관성은 낮아지는 것으로 나타났다. 그리고 시정을 제외한 기상인자들과의 에어로졸 수농도 상관성은 아주 약한 것으로 나타났다.

6. 제주 대기중 에어로졸 수농도의 특성을 좀 더 명확하게 규명하기 위해서는 앞으로 지속적인 관측을 통한 모니터링과 수농도에 영향을 미치는 변수들에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

VI. 참고문헌

- 강공언, 김남송, 김경숙, 김미경, 이현주, 2007, 익산지역에서 황사발생시 $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP의 농도 특성, 한국환경보건학회지, 33(5), 408-421.
- 김민영, 조석주, 김광래, 이민환, 2003, 황사기간 중 $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP 농도 특성에 관한 연구, 한국지구과학회지, 24(4), 315-324.
- 김유미, 김상우, 윤순창, 장임석, 이석조, 이미혜, 김지형, 2011, 제주 고산에서 2009년 가을에 관측된 입자 생성 및 성장 현상의 특성, 한국기상학회지, 21(1), 35-44.
- 김지영, 최병철, Anne Jefferson, 문길주, 2003, 2001년 봄철 제주 고산에서 측정된 에어로솔의 광 산란 및 흡수 특성, 한국기상학회지, 39(2), 239-250.
- 김지영, 최병철, 2002, 한반도에서 측정된 에어로솔의 크기 분포와 지역별 특성, 한국기상학회지, 38(2), 95-104.
- 김필수, 김운장, 이양호, 조수현, 안승태, 1986, 도시대기 Aerosol의 입자입경 0.01~1.0 μm 범위의 농도변화 특성, 한국대기보전학회지, 2(2), 41-50.
- 박경윤, 이호근, 장광미, 서명석, 박종세, 박송자, 강창희, 허철구, 김영준, 1992, 한반도 지역 대기오염 배경농도 모니터링을 위한 제주도 고산 측정소 설치 및 운영, 한국대기환경학회지, 2, 74-79.
- 서정민, 김영식, 전보경, 최금찬, 류재용, 박정호, 2007, 밀양지역의 $PM_{2.5}$ 농도 및 성분 특성, 한국환경과학회지, 16(12), 1355-1367.
- 신은상, 김희강, 1992, 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보전학회지, 8(1), 52-57.
- 안지원, 김기현, 김성천, 2005, 전국 주요 행정구역별 PM_{10} 성분의 시·공간적 농도 분포의 특성조사, 한국지구과학회지, 26(7), 652-660.
- 이명주, 오성남, 김은연, 장기호, 2006, 제주 고산지역의 에어로졸 수농도 변동과 기상요소와의 상관성 연구: 2001-2003, 한국방재학회지, 6(3), 47-56.
- 이순봉, 강창희, 정덕상, 고희정, 김행범, 오용수, 강혜림, 2010, 제주도 고산지역 TSP, $PM_{2.5}$ 대기에어로졸의 조성 및 오염 특성, 한국분석과학회, 23(4), 371-382.

- 임주연, 전영신, 조경미, 이상삼, 신혜정, 2004, 2003년 5월의 연무 관측시 에어로졸의 기상·물리·화학 특성, 한국대기환경학회지, 20(5), 697-711.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식, 1999, 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.
- 정창훈, 조용성, 이종태, 2005, 광학적 입자계수기를 이용한 2004년 황사기간 인천지역 에어로졸 특성, 한국환경과학회지, 14(6), 565-575.
- 정창훈, 전영신, 최병철, 2003, OPC(광학적 입자 계수기)로 측정된 2001년 서울지역 에어로졸의 입경 분포, 한국대기환경학회지, 19(5), 515-528.
- 최 효, 2008, 봄철황사 전후 산악연안도시, 강릉시에서 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10} 의 농도 비교, 한국환경과학회지, 17(6), 633-645.
- 최병철, Y. Iwasaka, 임재철, 정상부, 김윤석, T. Dmitri, T. Nagatani, M. Yamada, 김상백, 홍기만, 이영곤, 유희정, 2005, 광학적입자계수기를 이용한 안면도 연직 에어로졸 크기분포 특성, 한국기상학회지, 15(3), 149-153.
- 한진석, 김병곤, 정일록, 2002, 우리나라에서 관측된 황사현상에 관한 고찰, 한국환경보전협회, 24(339), 10-18.
- Chung, Y. S., and Yoon, M. B., 1996, On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings. Atmospheric Environment, 30, 2387-2397
- G. M. Marcazzan, G. Valli, R. Vecchi., 2002, Factors influencing mass concentration and chemical composition of fine aerosols during a PM high pollution episode, The science of the Total Environment, 298, 65-79.
- H. L. Green, W. R. Lane, 1964, Particulate Clouds, Spon's General & Industrial Chemistry Series, 4-5
- J. T. Kiehl, B. P. Briegleb, 1993, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, Science, **260**, 311-314.
- R. J. Charlson, S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley Jr., J. E. Hansen, D. J. Hofmann, 1992, Climate forcing by anthropogenic aerosols, Science, **255**, 423-430.

감사의 글

어느덧 짧지 않은 대학원 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌이켜보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 학업적 성취에 있어서의 아쉬움만이 아닌, 고마운 많은 분들께 감사의 마음을 제대로 전하지 못했기에 더욱 그러한 것 같습니다. 제가 이렇게 성장하기까지 오랜 시간이 걸렸지만 그 세월 속에서 직·간접적으로 힘이 되고 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 본 논문이 완성되기까지 모든 과정을 지켜봐주시고 세심한 지도뿐만 아니라 많은 격려로 부족한 저를 이끌어 주신 허철구 교수님께 깊이 감사드리고 항상 마음속에 간직했던 존경의 마음을 표현합니다. 그리고 제 논문에 대한 지속적인 관심뿐 아니라 물심양면의 지도를 해주신 이기호 교수님께도 깊이 감사의 말을 드리고 존경합니다. 또한 논문 심사 과정에서 제 논문에 면밀한 검토와 자상한 가르침을 주신 감상규 교수님, 조은일 교수님, 김진근 교수님께도 감사드립니다.

대학원생활을 하면서 많은 추억과 보람을 함께 나누었던 태권선배, 명찬, 룬용, 은석, 태현, 성록 학우들에게 감사의 말을 전하고 앞으로 하고자 하는일에 행복이 함께하길 기원하겠습니다.

대기공학실험실의 강선철실장님, 유라, 범수, 태용, 성준, 창진, 지훈, 윤지, 창환 후배님들 제가 선배로서 많은 도움을 드려야 하는데 그러지 못한점 죄송하고 모두 진심으로 감사합니다. 그리고 실험실을 나와 사회에서 활동하고 있는 영준이형과 우창이에게도 감사의 말을 전합니다.

논문에 집중할수 있도록 배려해주시고 이 논문이 완성될수 있도록 체력적으로 무장시켜주신 제남아 김민영 회장님과 김대준 경기사님, 그리고 회원님들 모두 감사합니다.

제주녹색환경지원센터의 병현선배, 현정누나, 경호선배님에게도 논문이 완성되기까지 저에게 무한배려와 관심을 주신데 대한 감사의 말을 전합니다. 파라슈트등아리의 원석이형, 우진이형, 혜선이, 은영이에게도 항상 고마운 마음을 전합니다. 그리고 환경공학과 사무실의 기호형과 선영이에게도 그동안 많이 귀찮게 해서 죄송하고 여러 도움을 받는데 대한 감사의 말을 전합니다.

소중한 친구 용유, 창림, 정용, 보필, 경훈, 성필, 우용, 성민, 진영, 지현, 승협에게 언제나 고맙지만 다시 한번 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 주말이면 언제나 함께 행복한 시간을 보냈던 퍼스트 친구들에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 제곁에서 든든한 버팀목이 되어주시고 못난자식을 믿고 묵묵하게 지켜봐주신 부모님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 말 안해도 항상 저를 이해해주는 누나에게도 감사의 말을 전합니다. 항상 제편이 되어 힘을 주시고 바르게 생각하고 행동할 수 있도록 키워주신 가족에게 누가 되지 않도록 더욱 성장하도록 노력하겠습니다.

그리고 감사의 글을 쓰고 있는데 미처 생각나지 않아 거론하지 못한 분들께도 죄송하다는 말씀과 함께 감사의 인사를 전합니다.

2013년 01월 08일
대기공학실험실에서 강 조 봉