

이에도 해양종합과학기지에서의 에어로솔 수 농도 변동

박성화 · 이동인* · 서길종** · 유철환** · 장민** · 강미영** ·
장상민* · 김동철*** · 최창섭**** · 이병걸*****

부경대학교 지구환경공학연합동과정, *부경대학교 환경대기과학과
부경대학교 대기환경연구소, *Science Applications International Cooperation (NCEP/EMC),
****국립해양조사원 해양과, *****제주대학교 토목공학과
(2009년 1월 22일 접수; 2009년 5월 11일 수정; 2009년 7월 21일 채택)

The Fluctuations of Aerosol Number Concentration in the Ieodo Ocean Research Station

Sung-Hwa Park, Dong-In Lee*, Kil-Jong Seo**, Cheol-Hwan You**,
Min Jang**, Mi-Young Kang**, Sang-Min Jang*, Dong-Chul Kim***,
Chang-Sup Choi**** and Byung-Gul Lee*****

*Interdisciplinary Program of Earth Environmental Engineering,
Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

**Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

***Atmospheric Environmental Research Institute, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

****Science Applications International Cooperation, NCEP/EMC, 5200 Auth Road,
Camp Springs, MD 20746-4304, United States*

*****Oceanographic Division, National Oceanographic Research Institute, Incheon 400-800, Korea*

******Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea*

(Manuscript received 22 January, 2009; revised 11 May, 2009; accepted 21 July, 2009)

Abstract

To examine the fluctuations of aerosol number concentration with different size in the boundary layer of marine area during summer season, aerosol particles were assayed in the Ieodo Ocean Research Station, which is located 419 km southwest of Marado, the southernmost island of Korea, from 24 June to 4 July, 2008. The Laser Particle Counter (LPC) was used to measure the size of aerosol particles and NCEP/NCAR reanalysis data and sounding data were used to analyze the synoptic condition. The distribution of aerosol number concentration had a large variation from bigger particles more than 3 μm in diameter to smaller particles more than 1 μm in diameter with wind direction during precipitation. The aerosol number concentration decreased with increasing temperature. An increase (decrease) of small size of aerosol (0.3~0.5 μm in diameter) number concentration was induced by convergence (divergence) of the wind fields. The aerosol number concentration of bigger size more than 3 μm in diameter after precipitation was removed as much as 89~94% compared with aerosol number concentration before precipitation. It is considered that the larger aerosol particles would be more efficient for scavenging at marine boundary layer. In addition, the aerosol number concentration with divergence and convergence could be related with the occurrence and mechanism of aerosol in marine boundary layer.

Key Words : Aerosol number concentration, Laser particle counter, Wind fields, Ieodo Ocean Research Station, Marine boundary layer

1. 서 론

에어로솔은 대기 중에 자연 및 인위적으로 발생된 먼지나 여러 종류의 화학물질들로 구성된 작은 입자를 총칭하여 사용된다¹⁾. 에어로솔은 주로 모래 폭풍이나 화산활동과 같은 자연적 과정이나 화석연료의 연소를 비롯한 산업활동과 같은 인위적 요인에 의해 발생하므로 생성원인이 매우 다양하고 물리화학적 특성이 서로 다를 뿐만 아니라 시공간적으로도 매우 복잡한 양상을 보인다²⁻⁶⁾. 또한 입자의 크기 범위가 0.001~100 μm 로 광범위하며⁷⁾, 기상학적으로는 태양복사를 흡수 또는 산란시키거나, 구름의 형성과정에서 응결핵으로 작용하는 등의 직·간접 효과를 통하여 지구 대기의 복사과정에서 매우 중요한 역할을 한다. 그 중 직경이 1 μm 미만인 에어로솔이 지구냉각화에 기여한다는 에어로솔의 간접적 효과는 불확실성이 가장 크다^{8,9)}. 특히, 대기 중 에어로솔의 크기 분포에 대한 정보는 에어로솔 복사 강제력을 산출하고 기후변화에 미치는 영향을 평가하는 데 중요한 매개변수가 된다는 많은 보고가 있다¹⁰⁻¹³⁾. 또한 에어로솔 수 농도 변화는 태양복사에 의한 지구 온난화에 직접적으로 관련이 있으며 그 발생을 알기 위해서는 관측을 통해 해명하는 것이 매우 중요하다.

Pruppacher와 Klett¹⁴⁾, Wark와 Warner¹⁵⁾, Khemani 등¹⁶⁾은 대기의 에어로솔 농도가 풍향이나 풍속에 의한 기상학적인 상태에 따라 크게 변화한다고 하였으며, 또한 큰 입자의 에어로솔 농도는 풍속과 높은 상관관계를 보여준다고 하였다. Lee¹⁷⁾는 일본 Sapporo 지역에서 동계 계절풍 발달시 해안에서의 에어로솔 총 농도가 증가한 경우 Rebun 해상부근에서 수렴이 있었고, 그로 인한 강한 상승류에 의해 해염입자가 증가하였으며, 반대로 수렴력이 약하였을 때는 에어로솔 수 농도가 적어 에어로솔 수 농도 변동은 고도와 풍계에 따라 변화한다는 연구 결과를 보고하였다. 김 등¹⁸⁾은 제주도 고산에서 강수 시 큰 입자의 에어로솔이 크게 세정된다고 하였으며, 박 등¹⁹⁾은 비강수 시와 강수 시의 먼지 개수 중에서 약 7%정도가 강수에 의하여 세정된다고 하였다. 내륙지역 강설 시 레이더 바람장을 이용한 에어로솔 수 농도 변동²⁰⁾과 남서해안지역 강설 시 바람장 변화에 따른 에어로솔 수 농도 변동²¹⁾에 관한 연구에

서는 강설 시 바람장의 수렴 발산에 의한 지표면 근처 대기 경계층 내 에어로솔 수 농도 변동이 일어났는데, 이는 대기 중 에어로솔 수 농도 변동은 대기 바람장의 수렴 발산과도 크게 상관이 있음을 나타낸다고 하였다.

이전의 대부분의 연구들은 내륙지역과 해안지역에 한정된 에어로솔 수 농도에 관한 연구이며, 해양에서의 에어로솔 수 농도에 관한 연구는 관측의 어려움으로 인하여 부족한 실정이다. 해양에서의 관측^{22,23)}은 주로 관측선의 이동경로, 매연, 선체의 요동, 그리고 이동에 따른 기상변화 등에 따른 관측상의 오차가 크게 나타날 수 있어 분석하기가 어렵다. 국내에서는 1996년부터 충청남도 태안군 안면도에 지구대기감시관측소를 설립하여 강수분석, 대기질감시, 그리고 온실기체 관측을 실시하고 있다. 안면도의 경우, 다른 지역과 비교하여 청정한 대기를 유지하고 있지만, 섬 자체에서의 인간 활동에 의한 인위적인 오염원 발생이 문제가 된다. 그러나 2003년에 완공된 이어도 해양종합과학기지는 한국과 중국 대륙사이의 공해상에 위치한 인위적인 오염원이 전혀 존재하지 않는 배경대기지역이다.

본 연구에서는 육지로부터 독립된 한반도 남서해상의 외해에 위치하고 있는 이어도 해양종합과학기지에서 여름철 해상에서의 에어로솔 수 농도 분포특성을 파악하고자 기상 조건에 따른 해양에서의 대기 중 에어로솔 입자의 직경별 수 농도 변동을 조사하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 조사대상지역 및 분석장비

점오염원이 없는 해양지역에서 여름철 대기 중 에어로솔의 직경별 수 농도 특성을 파악하기 위하여 2008년 6월 23일부터 7월 5일까지 제주도 남쪽 마라도에서 남서쪽으로 149 km, 일본의 도리시마에서 서쪽으로 276 km, 중국의 칭타오로부터 북동쪽으로 247 km 떨어진 곳에 위치한 이어도 해양종합과학기지(높이 36 m, 북위 32°07', 동경 125°10')에서 기상관측과 에어로솔 수 농도 관측을 실시하였고 구조물은 자켓(JACKET), 데크(DECK), 파일(FILE)로 구성되어 있다(Fig. 1). 이어도 해양종합과학기지는 지리적으로 원거리 해상에 위치하고 있으며, 또

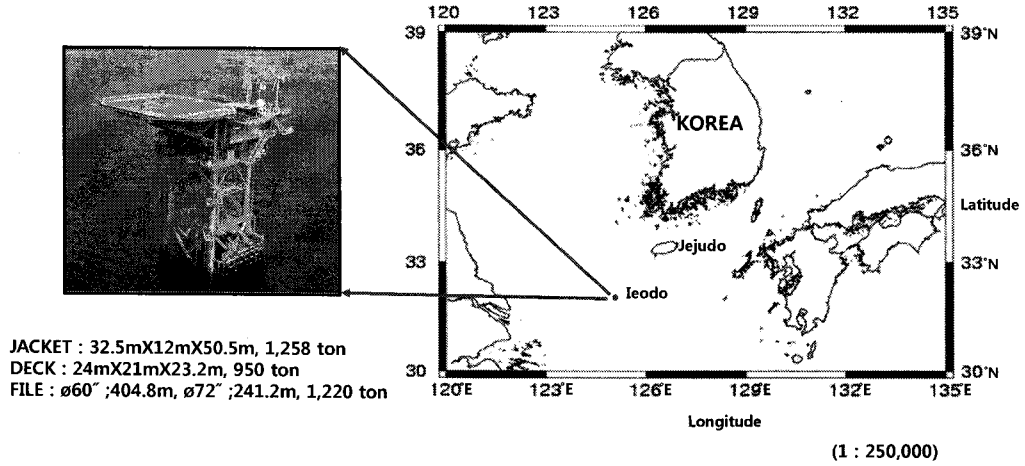


Fig. 1. The map showing the location of study area.

한 태양열과 풍력을 주 에너지원으로 이용하는 무인기지로 국지적인 오염원이 없는 청정 지역에 설치되어 배경 대기의 특성을 정확히 파악할 수 있는 이점이 있다. 관측기간 동안 지상의 기상상태를 파악하기 위하여 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS, DAVIS, USA, Model : Vantage pro)를 설치하여 매 10분마다 지상에서의 기온, 습도, 풍향, 풍속을 관측하였고 0.1 mm와 0.5 mm 진도형 우량계를 이용하여 매 분마다 강수량을 측정하였다. 고층기상상태는 라디오존데(GRAW, Germany, Model : DFM-06)를 이용하여 시간에 따른 고도별 기온, 습도, 기압, 풍향 및 풍속 등을 관측, 분석하였고, NCEP/NCAR 재분석자료를 이용하여 중관 기상상태와 수평 발산장의 변화를 분석하였다. 에어로솔 분석을 위해서 레이저 입자 계수기(Laser Particle Counter, KANOMAX, Japan, Model: TF-500)를 사용하였다. LPC의 제원(specification) 및 각 채널별 입자

의 직경범위는 Table 1과 2에 나타내었다.

2.2. 분석 방법

대기 중 에어로솔은 크기 범위가 매우 폭 넓어 대수적 방법으로 입자의 크기 분포를 표현하였는데, 이때 측정된 에어로솔은 동일한 광학적 성질을 가진 구형의 물질로 구성됨을 가정하였다.

만일 에어로솔 수 농도 $dN = n_N(D_p)dD_p$ 가 크기 범위 $(D_p, D_p + dD_p)$ 내의 에어로솔 입자의 수를 나타

Table 2. The size range of channel of LPC

Channel	Range (µm)
1	0.3~0.5
2	0.5~1.0
3	1.0~3.0
4	3.0~5.0
5	5.0~10.0

Table 1. Specification of an aerosol sampler(Laser Particle Counter, LPC)

Item	Contents
Light collection	Wide-angle light collection by ellipsoidal mirror
Light source	Laser diode; 40 mW, 780 nm wavelength
Particle diameter	Less than 10 µm
Measuring range	Greater than 0.3, 0.5, 1.0, 3.0, and 5 µm
Sample flow rate	1 ℓ/min
Memory	100 data points can be stored for standard functions maximum 2000 data points stored in the IC memory card
Display	Graphic LCD
Power supply	Ni-Cd battery with AC adaptor(standard) dry cell Battery/U2X9(optional)

낸다고 할 때, $n_N(Dp)$ 는 식(1)과 같이 쓸 수 있다⁷⁾. 여기서 N 은 단위 체적(cm^3)당 입자의 개수, Dp 는 입자의 직경을 나타낸다.

$$n_N(Dp) = \frac{dN}{dDp} \quad (1)$$

그리고 에어로솔 크기 별 입자의 수 농도를 상용대수적으로 표현하기 위해서 식(2)를 사용하였다.

$$dN/d\log Dp = 2.303 Dp n_N(Dp) \quad (1/cm^3) \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상상태

2008년 6월 24일 12시(LST : Local Standard Time, 지방표준시)부터 7월 5일 12시까지의 관측기간 동안 이어도 해양종합과학기지의 기온, 습도, 기압, 풍향, 풍속 및 강수량을 조사하였다(Fig. 2). 평균기온은 21.3°C로 나타났으며, 최대기온과 최저기온은 각각 24.7°C와 19.2°C로 관측되었다. 상대습도는 평균 92.9%로 해양의 영향으로 습한 상태를 유지하였으며, 최고습도와 최저습도는 각각 98%, 81%였다. 기

압은 강수가 시작되기 전부터 감소하기 시작하였고 강수 후 상승하였다. 풍향은 6월 27일까지 동풍, 남서풍 계열이었고 첫 번째 강수 후 남풍에서 북서풍 계열로 나타났으며, 이 후 강수 전에는 남동풍, 강수 후에는 남서풍의 풍향을 보였다. 풍속은 최대 21.3 m/s, 최소 0.4 m/s, 평균 8.7 m/s를 기록하였다. 관측 기간 중 강수는 6월 27일 13시 30분에서 6월 28일 11시까지 26.3 mm, 7월 1일 1시 30분에서 8시까지 9.9 mm, 7월 3일 1시에서 3시까지 1.5 mm, 그리고 7월 4일 3시에서 11시 30분까지 3.9 mm를 기록하였다(Table 3). 강수 전·중·후의 에어로솔 수 농도 변동을 비교하기 위해, 강수관측기간 중 최대의 강수량(26.3 mm)이 약 21시간동안 지속된 2008년 6월 27일부터 28일까지의 기상상태에 따른 에어로솔 수 농도 변동을 분석하였다.

3.2. 사례 분석

3.2.1. 종관 기상 상태

화남지방에서 발달한 장마전선은 2008년 6월 27일부터 28일까지 이어도 해양종합과학기지에 영향을 미쳤는데, 6월 27일 14시에 강수가 시작되어 6월

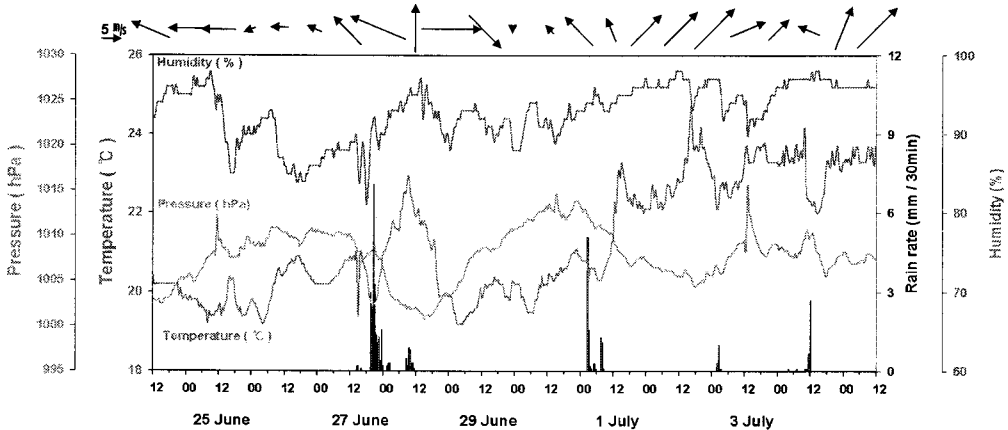


Fig. 2. Temporal variation of pressure, wind direction, wind speed, humidity, temperature, and rain rate at 1200 LST from 25 June to 5 July, 2008.

Table 3. The precipitation time in the Ieodo Ocean Research Station during the study period

Precipitation period	Precipitation amount (mm)
1330 LST 27 June ~ 1100 LST 28 June, 2008	26.3
0130 LST ~ 0800 LST 1 July, 2008	9.9
0100 LST ~ 0300 LST 3 July, 2008	1.5
0300 LST ~ 1130 LST 4 July, 2008	3.9

28일 11시까지 약 21시간 지속되었으며, 강수량은 26.3 mm를 기록하였다.

MTSAT-IR 강조영상을 보면 6월 27일 1시에 이어도 해상을 포함한 한반도 남서지역에 구름이 분포하고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 6월 27일 23시와 6월 28일 01시의 영상에서는 중부지방까지 구름이 뒤덮고 있으며, 이어도 해상으로 강한 강수 시스템이 지나가는 것을 알 수 있다. 6월 28일 17시경 구름이 이어도 해상을 지난 후에는 맑은 날씨를 보이고

있다.

NCEP/NCAR 재분석자료를 이용하여 강수 중인 2008년 6월 28일 3시의 종관 상태를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 Fig. 4(d)까지의 높이는 각각 지표면, 850 hPa, 500 hPa, 300 hPa이며, 실선은 각각 해면기압(sea level pressure, 단위 : hPa), 상등온위(equivalent potential temperature, 단위 : K), 상대와도(relative vorticity, 단위 : $10^{-5}s^{-1}$), 지위고도(geopotential height, 단위 : m)를 나타낸다. 풍향과 풍속은 화살표

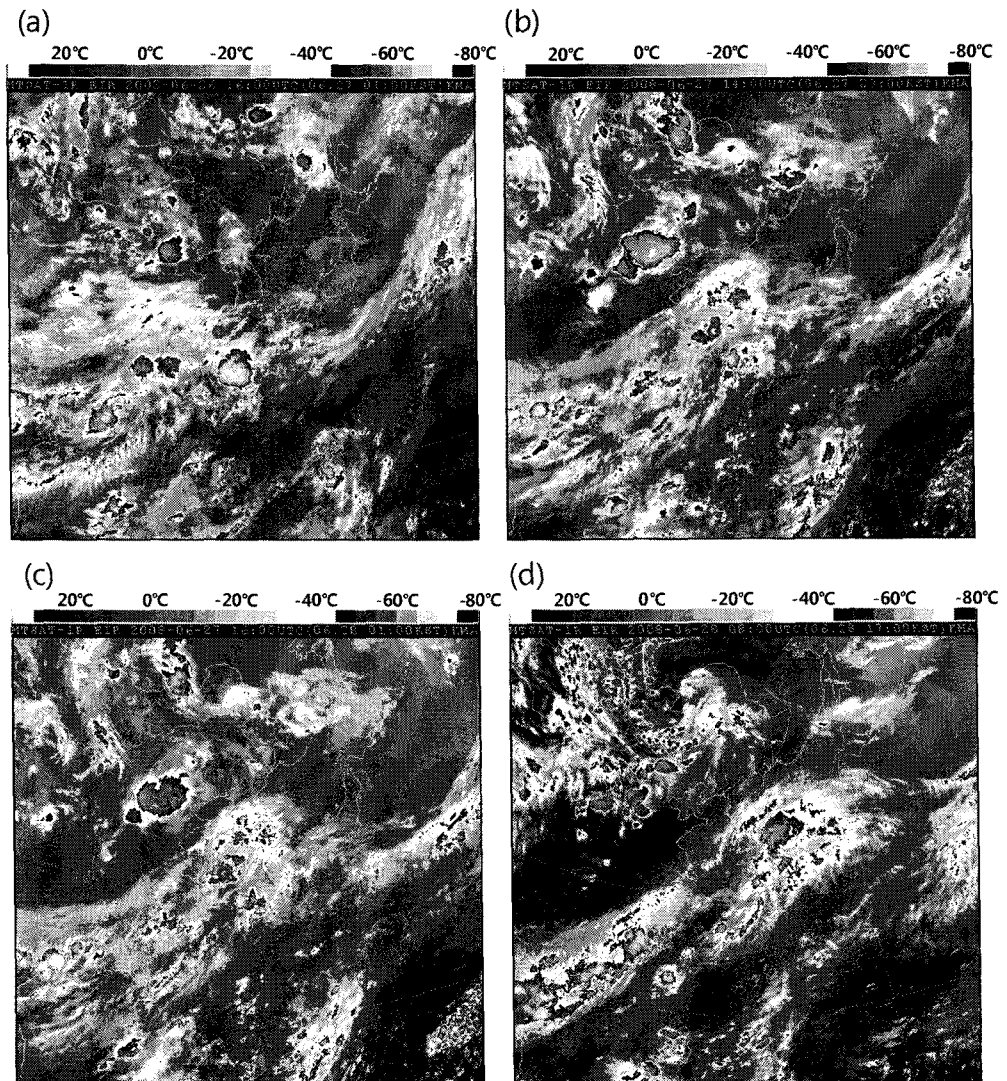


Fig. 3. MTSAT I-R EIR image at 0100 LST (a), 2300 LST (b) 27 June, 0100 LST (c) and 1700 LST (d) 28 June, 2008.

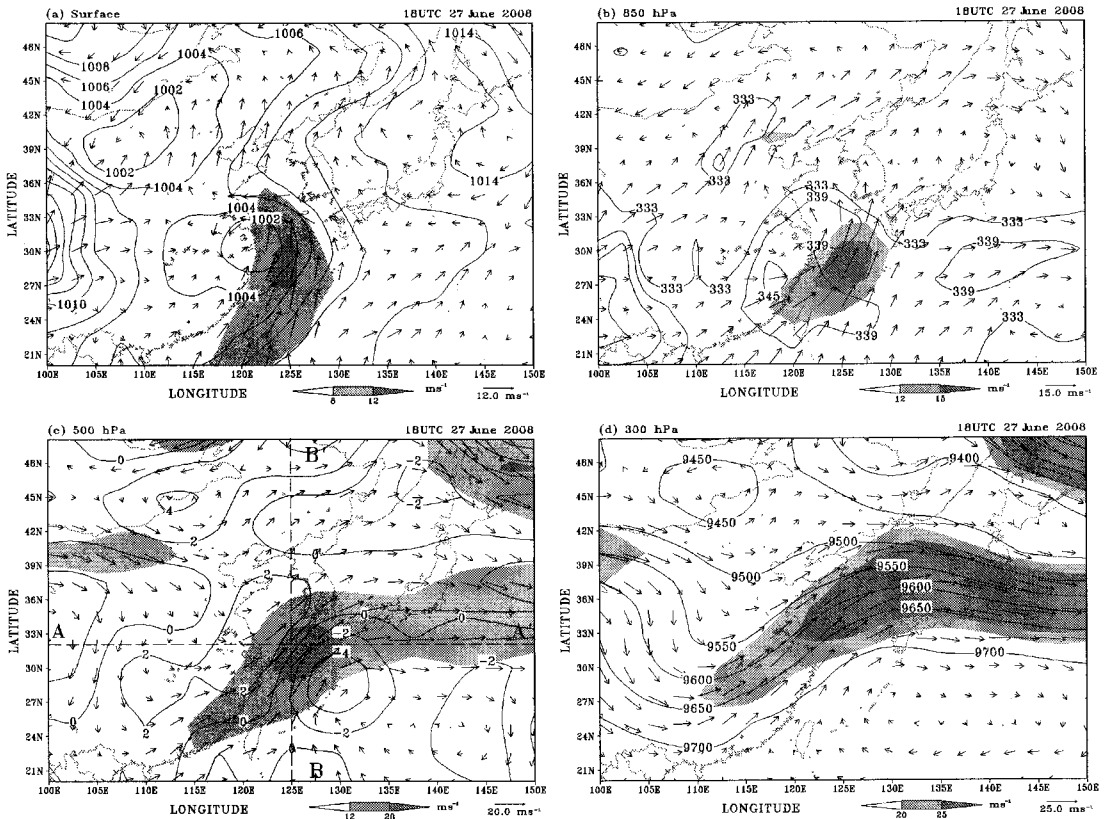


Fig. 4. Synoptic weather conditions using NCEP/NCAR reanalysis data at 0300 LST 28 June, 2008. (a) Pressure and wind vector at the surface, (b) equivalent potential temperature and wind vector at 850 hPa, (c) relative vorticity and wind vector at 500 hPa, (d) geopotential height and wind vector at 300 hPa.

로 나타내었으며, 음영으로 나타낸 영역은 풍속이 각각 8, 12, 16, 20 m/s 이상인 지역을 나타낸다. 이어도 지점에서 지표면은 저기압의 영향을 받고, 12 m/s 이상의 강한 남풍계열의 바람이 유입되고 있다. 850 hPa에서 상당온위는 339 K 이상의 매우 습하고, 15 m/s 이상의 강한 남풍계열의 바람이 나타났다. 500 hPa에서는 저기압성 회전인 양의 상대와도와 20 m/s 이상의 강한 남동풍이 나타났으며, 300 hPa에서는 제트류가 나타났다. 풍향은 지표면에서는 남동풍이 불다가 상층으로 갈수록 남서풍으로 변하며 연직으로는 시계방향으로 순전(veering)의 흐름을 보였다.

Fig. 5는 Fig. 4(c)의 A-A'와 B-B' 선의 연직단면을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 (b)에서 실선은 상대와도를 나타내고, Fig. 5(c)와 (d)에서는 수렴(convergence,

단위: 10^{-6}s^{-1})을 나타내었다. Fig. 5(a)와 (b)에서 음영표시 영역은 풍속이 10 m/s 이상인 곳을 나타내며, Fig. 5(c)와 5(d)에서는 상당온위가 300 K 이상인 영역을 나타내었다.

Fig. 5(a)와 (b)에서 이어도 해상의 상대와도는 약 500 hPa 이하의 하층에서는 양의 값으로 반시계 방향의 저기압성 회전을 보였고, 상층에서는 음의 값으로 시계 방향의 고기압성 회전을 보였다. 풍속은 상층에서 10~30 m/s로 나타났다. Fig. 5(c)와 (d)에서 이어도 해상의 수렴값은 약 700 hPa 이하의 하층에서 $-3 \sim -15 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 인 반면, 상층에서는 $0 \sim 12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 로 양의 발산값이 나타났다. 상당온위는 지표에서는 335 K 이상으로 나타났고, 900~600 hPa 사이에서는 335~340 K, 600 hPa 이상에서는 340 K 이상의 값이었다. NCEP/NCAR 재분석자료를 통해 하

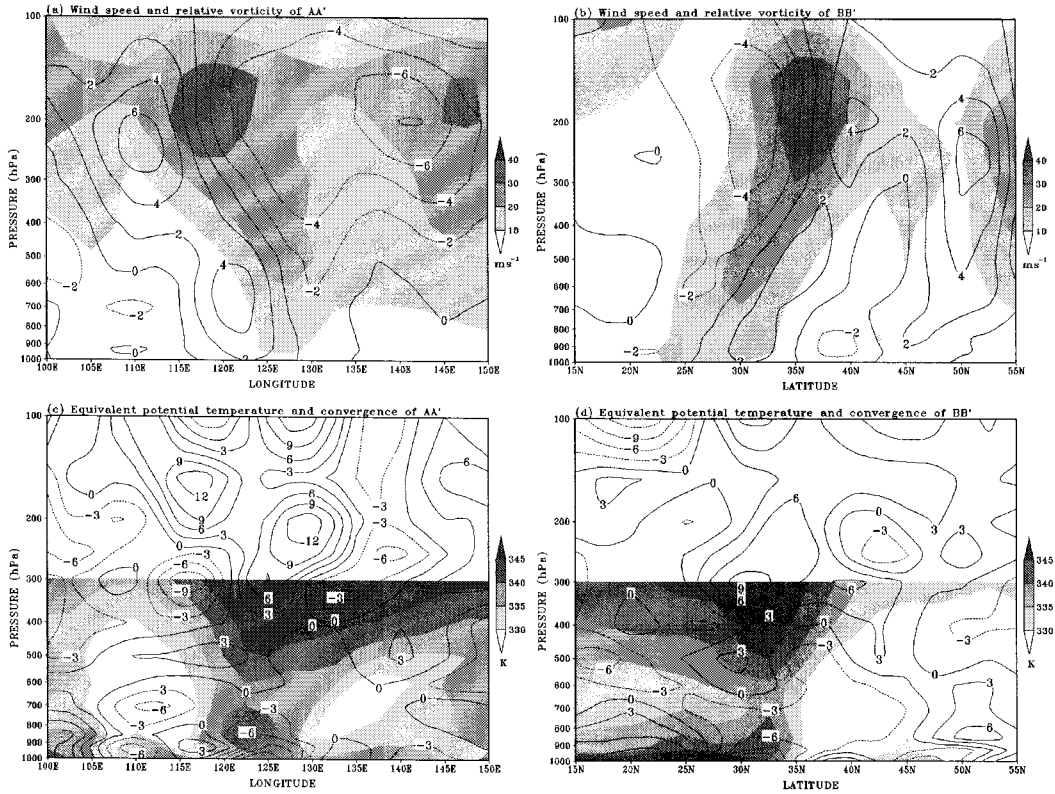


Fig. 5. Vertical cross section along the line A-A' and B-B' at each longitude and latitude (refer to Fig. 4.) using NCEP/NCAR reanalysis data at 0300 LST 28 June, 2008. (a) wind speed, (b) relative vorticity, (c) equivalent potential temperature, (d) convergence.

층에 남쪽으로부터 습하고 따뜻한 공기가 유입되며, 강한 바람쉬어(wind shear)와 함께 강력한 수렴이 있음을 알 수 있었다.

3.2.2. 라디오존데 관측

6월 27일부터 28일까지 이어도 해양종합과학기지에서 라디오존데를 이용하여 관측된 기온, 노점 온도, 풍향 및 풍속을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 강수가 시작되기 2시간 전으로 지상의 기온이 20.8℃였고, 10 km까지의 평균 기온감률은 5.9℃/km로 불안정하였으며, 습수(T - Td)는 4.8 km까지 약 6.06℃로 건조하였다. 지상의 풍향은 동남동풍에서 1 km까지 남동풍으로 변하며 연직으로는 시계방향의 순전이었었고, 1 km에서 3 km까지 동풍계열로 변하며 반전(backing)이 나타났다. 3 km이상의 상층으로 갈수록 서풍계열로 변하며 다시 순전의 흐름이 나타났다. 풍속은 지상에서 약 600 m까지에서는 9.6

m/s부터 15.7 m/s까지 증가하였고, 4.5 km이하에서는 0.9 m/s까지 감소하였다가 4.5 km이상 상층으로 갈수록 풍속이 상승하였다. Fig. 6(b)는 첫 번째 약한 강수시간에서의 측정값으로 지상에서의 기온은 19.4℃로 강수 전보다 감소하였고, 고도 10 km까지의 평균 기온감률은 4.96℃/km로 불안정한 층을 나타내었다. 습수(T - Td)는 2 km까지 5.91℃로 나타났다. 풍향은 지상에서 500 m까지 남동풍에서 동남동풍으로 약한 반전이 나타났고, 1.2 km까지 남풍, 3.2 km까지 북동풍, 그 이후 상층에서는 고도가 상승함에 따라 남서풍계열로 변화하였다. 풍속은 Fig. 4(a)와 비슷한 패턴을 보였다. Fig. 6(c)는 6월 27일 21시 강수 중인 시간에서의 측정값으로 지상 기온이 20.4℃였고, 10 km까지의 평균 기온감률은 5.3℃/km이었다. 지상에서 700 m까지 습수(T - Td)는 5.84℃/km로 하층에서는 건조한 층을 보였다. 풍향은 하층에서

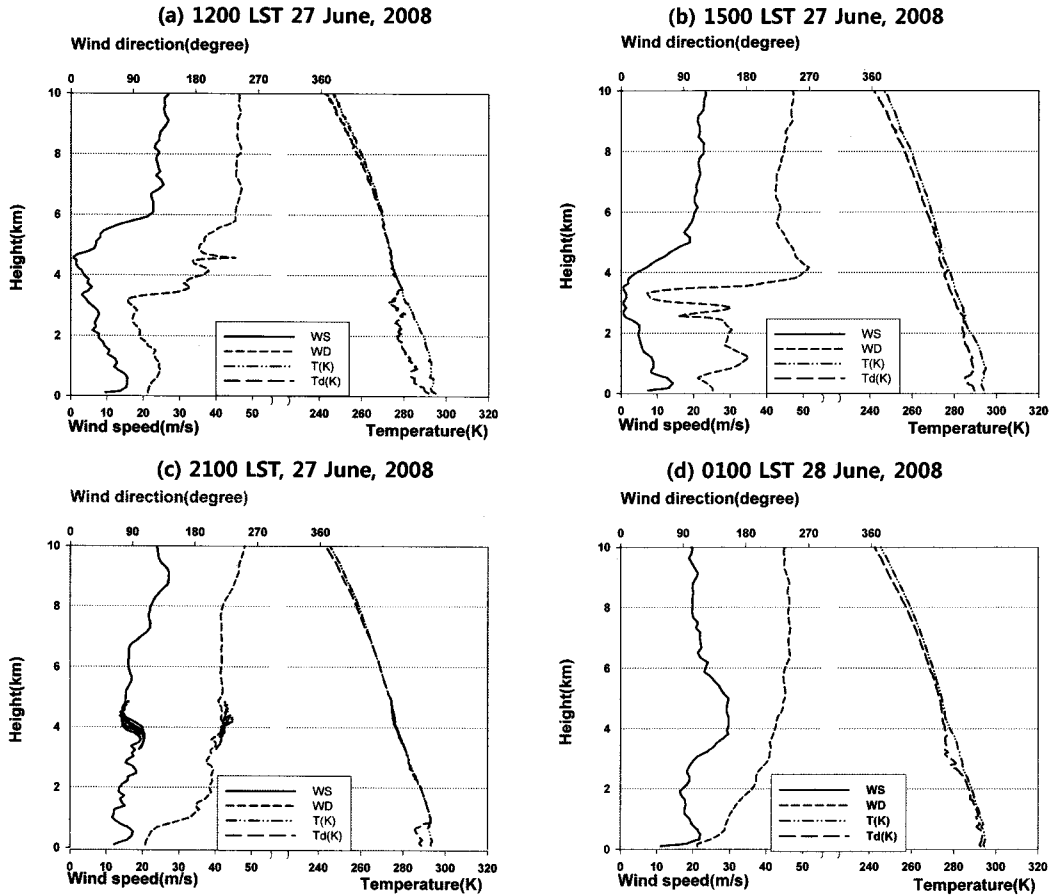


Fig. 6. Vertical profiles of wind direction (WD), wind speed (WS), temperature (T) and dew-point temperature (Td) measured by radiosonde at 1200 LST (a), 1500 LST (b), 2100 LST (c) on June 27, and 0100 LST (d) 28 June, 2008.

부터 연직적으로 남동풍에서 서풍계열로 순전이였다. 풍속은 지상에서는 12.2 m/s였으며, 550 m까지 풍속이 17.4 m/s까지 증가하였고, 10 km까지 높이에 따른 풍속의 변화가 있었다. 약 1 km와 9 km에서 각각 11.7 m/s와 27.2 m/s의 최소값과 최대값이 나타났다. Fig. 6(d)는 첫 번째 강수의 후기인 6월 28일 1시의 측정값으로 지상기온은 21.1°C였다. 고도 10 km까지의 평균 기온감률은 5.2°C/km이며, 3 km에서 3.3 km 사이의 상층에서 습수가 평균 6.42°C/km로 건조하게 나타났다. 풍향은 Fig. 6(c)와 비슷한 패턴의 순전을 보였고 풍속은 지상에서 11 m/s로 나타났다. 약 500 m까지는 22 m/s로 상승하였고 4 km에서 5 km까지의 높이에서 29.7 m/s의 최대값이 나타났다.

3.2.3. 지상 기상과 에어로솔 수 농도 변화

2008년 6월 27일부터 28일까지의 지상 기온, 상대 습도, 기압, 풍향, 풍속, 입경크기별 에어로솔 수 농도 및 강수량은 Fig. 7과 같다. 기온의 변화를 보면 강수 전 27일 13시 30분까지 평균 20.5°C로 조사되었고 강수가 있었던 시각에는 평균 21.1°C로 나타났다. 강수 후 평균 온도는 20°C로 강수 전과 중에 비하여 낮게 나타났다. 상대습도는 강수 시와 비강수 시 뚜렷하게 차이를 나타내었다. 강수 전 평균 87.8%, 최대 89%였으며, 강수 시 평균 90.7%, 최대 96%로 나타났으나, 강수 후에는 평균 93%로 다소 낮아졌다. 기압은 강수 시작 1시간 전인 6월 27일 12시부터 감소하였고, 강수 후 4시간인 6월 28일 15

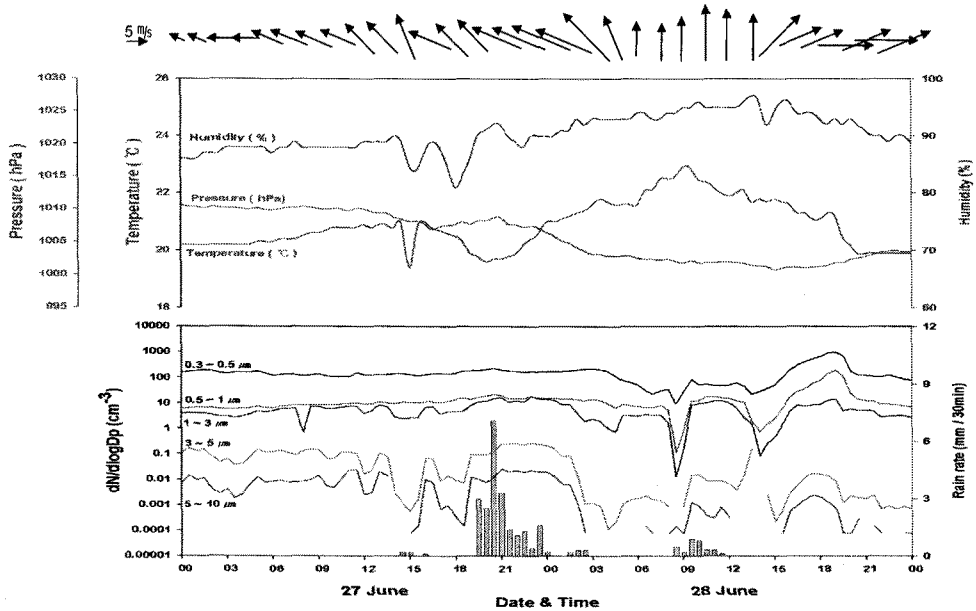


Fig. 7. Time variation of pressure, wind direction, wind speed, humidity, temperature, rain rate, and number concentration of aerosol particles at each channel from 27 to 28 June, 2008.

시부터 증가하였다. 풍향의 변화를 보면 강수 전 6월 27일에는 동풍 계열이, 강수 초기에는 남동풍 계열이 지속되었으나, 강수 후기에는 남풍 및 남서풍 계열이 나타났다. 강수가 끝나는 28일 12시부터 서풍과 북서풍 계열의 바람이 지속되었다. 풍속은 평균 10.1 m/s로 강하게 나타났는데, 6월 28일 11시에 18.9 m/s로 최대 풍속이 나타났다. 그러나 6월 27일 0시에는 4 m/s로 최소 풍속이 나타났다.

전체적인 에어로솔 수 농도 분포는 1~10 μm 범위에서 입자의 크기가 증가함에 따라 수 농도가 감소하는 경향을 보였고, 특히 3~10 μm 범위의 큰 입자에서 강수 시 강한 변동 경향을 나타내었다. 또한, 0.3~1 μm 범위의 에어로솔 수 농도는 강수 중 풍속이 강해지고, 풍향이 남동풍에서 서풍으로 변하는 6월 28일 3시부터 15시까지 강한 변동이 나타났다. 강수 시와 소강 시에서는 시간에 따른 수 농도의 변동이 서로 다르게 나타났는데, 특히 큰 입자일수록 그 경향이 보다 뚜렷하게 나타났다. 강수 중인 6월 27일 20시부터 6월 28일 8시 30분까지 1 μm 이하의 입자영역에서는 시간에 따라 에어로솔 수 농도가 감소하였는데, 이 때 기온은 19.6°C에서 22.6°C로 지속적으로 증가하였다. 이러한 사실은 기온 상승으

로 인해 대기의 혼합층이 상승하고 따라서 대기확산과 희석이 잘 되어 대기 중 부유하는 에어로솔 수 농도의 감소가 일어났기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 8과 Table 4에서는 시간에 따른 강수 시와 비강수 시의 입경별 입자의 수 농도 분포를 나타내었다. 전체적으로 에어로솔 수 농도 분포를 보면 0.3~10 μm 크기 이내 범위에서는 입자의 크기가 증가함에 따라 수 농도가 감소하는 경향을 보였다. 약 0.3~3 μm 영역(채널 1, 2, 3)에서 입자들의 농도변화는 가장 작았고, 그 외 채널 4, 5의 입자영역에서는 강수 전, 소강 시, 강수 후에 농도변화가 크게 나타났다. 첫 번째 0.5 mm 강수 시 3~10 μm 영역의 입자들이 약 98% 이상 감소하는 경향이 나타났다. 그 후 2시간 30분간의 소강 시 모든 입자영역에서 증가하였고, 특히 3~10 μm 입자영역에서는 약 40배 이상 증가하였다. 두 번째 강수 시의 에어로솔 수 농도 분포는 첫 번째 소강 시보다 모든 입자영역에서 큰 증가를 보였다. 이 때 강수량은 22.7 mm를 기록하였다. 두 번째 소강 시에서는 모든 채널의 입자들이 감소하였고, 특히 채널 1, 4, 5에서 에어로솔 수 농도 분포가 최소값을 나타내었다. 세 번째 3.1 mm 강수 시 채널 3, 4, 5의 입자영역에서 다시 증가하였고,

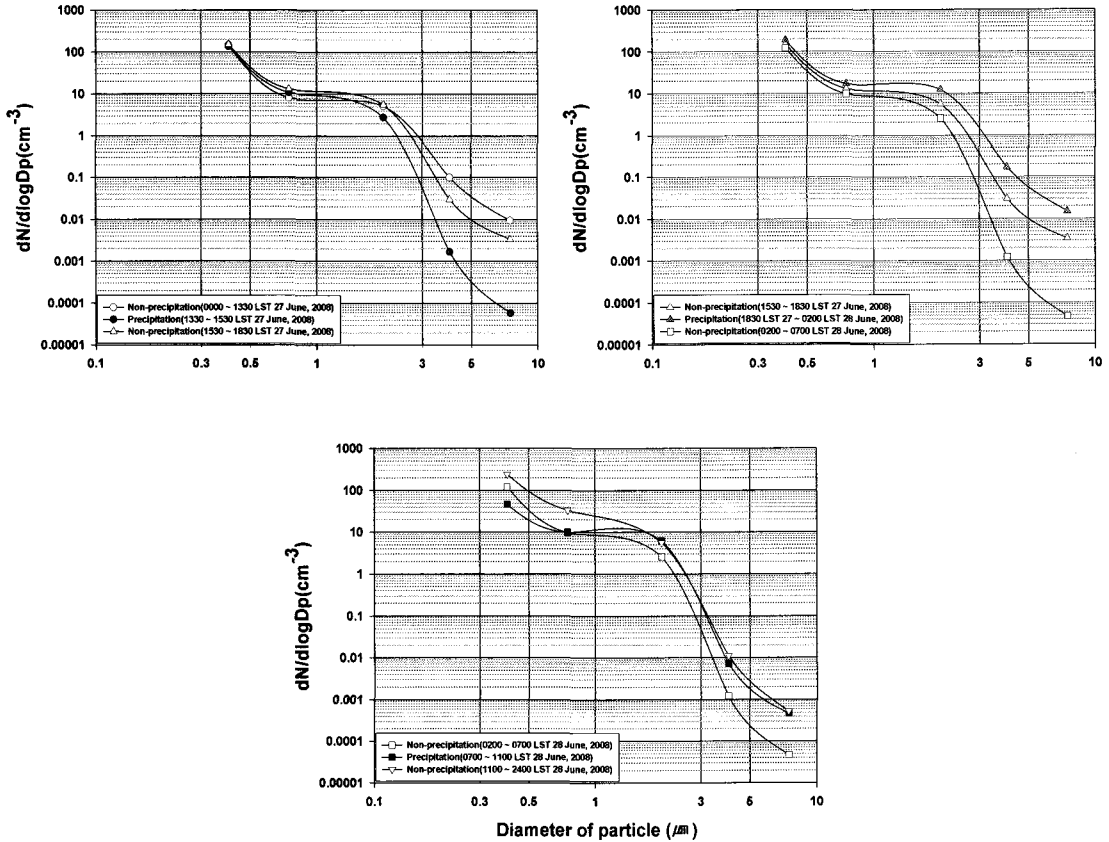


Fig. 8. Comparison of size distribution between non-precipitation and precipitation period from 27 June to 28 June, 2008.

Table 4. The number of aerosol particle from 27 June to 28 June, 2008

Date & Time	Number concentration (particles/30 ℓ)				
	0.3~0.5 μm	0.5~1.0 μm	1~3 μm	3~5 μm	5~10 μm
0000 ~ 1330 LST 27 June, 2008	1,259,734	104,442	33,618	868	122
1300 ~ 1530 LST 27 June, 2008	1,177,475	139,352	17,997	15	1
1530 ~ 1830 LST 27 June, 2008	1,314,067	169,317	36,321	259	44
1830 LST 27 ~ 0200 LST 28 June, 2008	1,645,973	221,615	80,605	1,461	194
0200 ~ 0700 LST 28 June, 2008	984,927	124,911	17,220	11	1
0700 ~ 1100 LST 28 June, 2008	400,346	130,057	40,396	63	6
1100 ~ 2400 LST 28 June, 2008	2,106,555	436,557	36,644	97	7

강수 후에는 채널 1, 2, 4의 입자영역에서 증가를 보였으며 채널 3에서는 비슷하게 나타났다. 전체적으로 첫 번째 0.5 mm 강수를 제외하고 22.7 mm의 두 번째, 3.1 mm의 세 번째 강수 시 에어로솔 수 농도가 비강수 시보다 증가하였다. 특히 에어로솔 수 농도 분포가 두 번째 강수 시 최대값, 두 번째 소강수 시 최소값을 보였다. 이는 해양에서 강수 시 해염입

자(대부분 1 μm 이상의 에어로솔 입자)의 수 농도가 저기압에 의한 상승류로 인하여 높아진다는 사실을 나타내는 것으로 추측된다.

3.2.4. 에어로솔 수 농도 분포와 수평 발산장의 관계

Fig. 9는 강수 시인 6월 27일 15시부터 6월 28일 21시까지 NCEP/NCAR 재분석자료를 이용하여 시

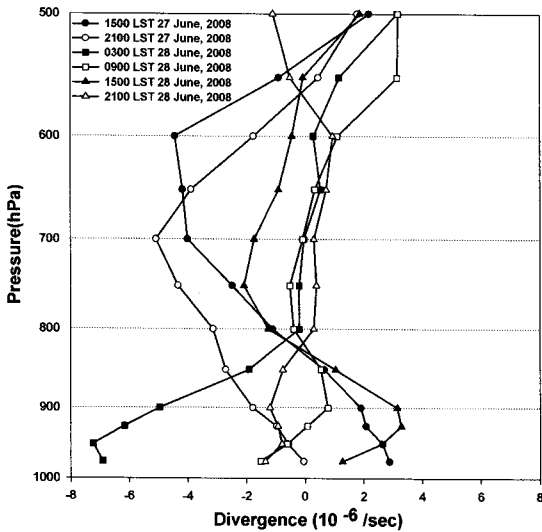


Fig. 9. Time-height vertical distribution of horizontal divergence field from 1500 LST 27 June to 2100 LST on 28 June, 2008.

간-고도에 따른 수평발산값의 변화를 나타낸 것이다. 6월 27일 15시에서 21시까지 900 hPa 이하의 하층에서의 발산값은 약 $2 \sim 2.5 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 에서 $-2 \sim 0 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 로 감소하였고, 이 때 모든 입자영역의 에어로솔 수 농도가 상대적으로 15시에 비해 21시경에 증가하였다. 이후 6월 28일 3시까지 900 hPa 이하의 하층에서의 발산값은 약 $-6 \sim -8 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 로 강한 수렴을 나타내었다. 그러나 $1 \mu\text{m}$ 이상 크기의 입자영역의 에어로솔 수 농도는 6월 27일 21시에 비하여 상대적으로 감소하였다. 이는 지표온도의 상승과 6월 27일 18시 30분부터 6월 28일 2시 30분까지의 22.7 mm의 강수에 의한 $1 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자영역에서의 에어로솔 수 농도 감소에 기인한 것으로 사료된다. 6월 28일 9시까지의 발산값은 $-2 \sim 1 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 로 음의 값인 수렴에서 상대적으로 양의 값인 발산으로 변하면서 에어로솔 수 농도가 3시와 비교하여 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 입자영역에서 상대적으로 감소하였다.

그러나 6월 28일 15시까지 다시 발산값이 약 $1 \sim 3 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 로 커지면서 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 입자영역의 에어로솔 수 농도가 증가하였다. 한편 6월 28일 21시까지의 발산값은 $-2 \sim 1 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 로 15시에 비해 낮은 값으로 나타났으나 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 입자영역의 에어로솔 수 농도가 증가하였다. 따라서 6월 27일 21시에서 6월 28일 3시까지 강수가 있었던 시간의 NCEP/NCAR 재분석자료(시간-고도에 따른 수평발산값)에서 하층바람의 수렴이 상층으로까지 강할 경우 수평 바람장은 모든 입자크기영역에서의 에어로솔 수 농도증가에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3.2.5. 강수 전과 후의 에어로솔 수 농도 변화

Table 4는 사례분석 중에서 강수 전(B.P.)과 강수 후(A.P.)의 입경별 에어로솔 수를 비교한 것이다. $5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 범위의 에어로솔 수가 강수 전에 비해 각각 약 94%, 89%로 크게 감소하였고, $3 \mu\text{m}$ 보다 작은 영역의 에어로솔 수는 증가하였다. 특히, $0.5 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 범위의 에어로솔 수는 약 4.2배 증가하였다. 사례분석에서 강수 후 에어로솔 수 농도는 $3 \mu\text{m}$ 보다 작은 입자에서는 증가하였고, 큰 입자에서는 크게 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 여름철 해상에서의 에어로솔 수 농도 분포 특성을 알아보기 위하여 2008년 6월 23일부터 7월 5일까지 한반도 남서해상에 위치한 이어도 해양종합과학기지에서 기상 및 에어로솔 수 농도 관측을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

2008년 6월 24일 12시부터 7월 5일 12시까지의 관측기간 동안 이어도 해양종합과학기지의 평균기온은 21.3°C 이었으며, 최대기온과 최저기온은 각각 24.7°C 와 19.2°C 로 관측되었다. 상대습도는 해양의 영향으로 평균 92.9%를 유지하였으며, 최고습도와 최저습도는 각각 98%와 81%로 나타났다. 기압은

Table 5. The number of aerosol particle before (B.P.) and after precipitation (A.P.)

	Number concentration (particles/30 ℓ)				
	0.3 ~ 0.5 μm	0.5 ~ 1 μm	1 ~ 3 μm	3 ~ 5 μm	5 ~ 10 μm
B.P.	1,259,734	104,443	33,618	868	122
A.P.	2,106,555	436,557	36,644	97	7
A.P. / B.P.	1.67	4.18	1.09	0.11	0.06

강수가 시작되기 전부터 감소하기 시작하였고 강수 후 상승하였다. 풍향은 6월 27일까지 동풍, 남서풍 계열로 나타났고, 첫 번째 강수 후 남풍에서 북서풍 계열로 나타났으며, 이 후 강수 전에는 남동풍, 강수 후에는 남서풍의 풍향을 보였다. 풍속은 최대 21.3 m/s, 최소 0.4 m/s, 평균 8.7 m/s를 기록하였다.

입경이 3~10 μm 범위인 큰 입자영역에서의 에어로솔 수 농도는 강수 시 강한 변동이 나타났고, 0.3~1 μm 범위인 작은 입자영역에서의 에어로솔 수 농도 분포는 풍속과 풍향이 급격히 변하는 시간에 강한 변동이 나타났다. 첫 번째 강수를 제외하고 두 번째, 세 번째 강수 시 에어로솔 수 농도가 비강수 시보다 모든 영역에서 증가하였고, 두 번째 강수 시 최대값, 두 번째 소강 시에서 최소값을 보였다. 강수가 강하게 지속되는 6월 28일 3시에 강한 수렴이 나타났고, 이 때 0.3~0.5 μm 입자영역의 에어로솔 수 농도는 높은 값으로 나타났다. 강수 후 바람의 발산 값이 증가함에 따라 0.3~0.5 μm 의 작은 입경 영역에서의 에어로솔 수 농도가 감소하였다. 또한 강수가 소강 시 온도 증가에 따라 에어로솔 수 농도가 감소하였다. 강수 후 에어로솔 수 농도는 3 μm 영역의 작은 입자에서는 강수 전에 비해 증가하였으나, 큰 입자에서는 감소하였다. 3~5 μm 와 5~10 μm 범위의 입자에서는 약 89%와 94% 감소하였으나, 0.5~1 μm 범위의 입자에서는 약 4.2배 증가하였다.

해상에서 에어로솔 수 농도는 강수 시 대부분의 해양입자가 저기압에 의한 상승류의 영향으로 1 μm 보다 큰 입자영역에서 증가하였고, 작은 입자영역에서는 비슷하게 유지되었다.

지표온도의 상승과 풍속의 증가에 의한 에어로솔의 대기 확산과 희석은 에어로솔 수 농도를 감소시켰다. 또한 해상에서도 바람장의 수렴과 발산에 따라 에어로솔 수 농도의 변동이 일어났는데, 이는 대기 중 에어로솔 수 농도 변동이 대기의 수렴과 발산에 영향을 미쳤음을 보여주는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로부터 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. K20607010000)이며, 일부는 2009

년도 국립해양조사원의 “이어도종합해양과학기지 집중기상관측” 과제에 의하여 지원되었습니다.

참고 문헌

- 1) Willeke K., Baron P. A., 1993, Aerosol measurement principles: Techniques and Applications, Van Nostrand Reinhold, 876.
- 2) Arao K., Ishizaka Y., 1986, Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity, J. Meteor. Soc. Japan, 64, 79-94.
- 3) Carlson T. N., Caverly R. S., 1997, Radiative characteristics of Saharan dust at solar wavelengths, J. Geophys. Res., 82, 3141-3152.
- 4) Duce R. A., Umni C. K., Ray B. J., Prospero J. M., Merrill J. T., 1980, Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability, Science, 209, 1522-1524.
- 5) Dutton E. G., Reddy P., Ryan S., DeLuisi J. J., 1994, Features and effect of aerosol optical depth observed at Mauna Loa, Hawaii: 1982-1992, J. Geophys., 99, D4, 8295-8306.
- 6) Smirnov A., Holben B. N., Slutsker I., Welton E. J., Formenti P., 1998, Optical properties of Saharan dust during ACE-2, J. Geophys. Res., 103, D21, 28079-28092.
- 7) Seinfeld J. H., Pandis S. N., 1998, Atmospheric Chemistry and Physics-From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, Inc., 132.
- 8) 김지영, 최병철, 2002, 한반도에서 측정된 에어로솔의 크기분포와 지역별 특성, 한국기상학회지, 38, 2, 95-104.
- 9) IPCC, 1995, Climate Change 1995, In: The science of climate change, Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callender B. A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K(eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 572pp.
- 10) Penner J. E., Charlson R. J., Hales j. M., Laulainene N., Leifer R., Navakov T., Ogren J., Radke L. F., Schwartz S. E., Travis L., 1994, Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols, Bull. Amer. Meteor. Soc., 75, 3, 375-400.
- 11) Ogren J. A., 1995, A systematic approach to in situ observations of aerosol properties, In: Charlson R. J., Heintzenberg J.(eds.), Aerosol Forcing of Climate, Wiley & Sons, New York, 215-226.
- 12) Nemesure S., Wagener R., Schwartz S. E., 1995, Direct shortwave forcing of climate by the anthropogenic sulfate aerosol: Sensitivity to particle size,

- composition, and relative humidity, *J. Geophys. Res.*, 100, 26105-26116.
- 13) Alpert P., Kaufman Y. J., Shay-El Y., Tanre D., da Silva A., Schubert S., Joseph Y. H., 1998. Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere, *Nature*, 395, 367-370.
 - 14) Pruppacher H. R., Klett J. D., 1978, *Microphysics of clouds and precipitation*, D. Reidel Publishing Company, 202-218.
 - 15) Wark K., Warner C. F., 1976, *Air Pollution: Its Origin Control*, Harper and Row Pub., New York, 153.
 - 16) Khemani L. T., Momin G. A., Naik M. S., 1987, Influence of atmospheric pollutants on cloud microphysics and rainfall, *boundary-layer meteorology*, 41, 367-380.
 - 17) Lee D. I., 1991, On the atmospheric aerosol particles in the relation to wind systems, *J. Korean Meteor. Soc.*, 27, 333-352.
 - 18) Kim J. Y., Jung C. H., Choi B. C., Oh S. N., Brechtel F. J., Yoon S. C., Kim S. W., 2007, Number size distribution of atmospheric aerosols during ACE-Asia dust and precipitation events, *Atmos. Environ.*, 41, 4841-4855.
 - 19) 박기준, 조경숙, 최병철, 김지영, 최재천, 2001, 기상인자에 따른 서울에서의 에어로솔 수 농도 특성, *한국기상학회 대기지*, 11, 399-401.
 - 20) 강미영, 2003, 내륙지역 강설시 레이더 바람장을 이용한 에어로솔 농도 변동, 석사학위논문, 환경대기과학과, 부경대학교, 부산.
 - 21) 이동인, 강미영, 서길중, 유철환, 박성화, 김부경, 박남식, 2008, 남서해안지역 강설시 바람장 변화에 따른 에어로솔 수 농도 변동, *한국환경과학회지*, 17, 699-709.
 - 22) 김종환, 염성수, 최경섭, 2005, 남해, 황해 상에서의 미세 에어로솔 크기별 수농도 분포 관측, *한국대기환경학회 춘계학술대회논문집*, 5, 203-205.
 - 23) Peng L., Min H., Zhijun W., Yuwen N., Tong Z., 2007, Marine aerosol size distributions in the spring-time over China adjacent seas, *Atmos. Environ.*, 41, 6784-6796.