

서울과 부산에서 관측된 일조 시간 및 강수 강도의 장기 변동 분석

이효정 · 김철희*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학전공

(2009년 7월 7일 접수; 2009년 8월 17일 승인)

Analysis of Long-term Variations of Sunshine Duration and Precipitation Intensity Using Surface Meteorological Data Observed in Seoul and Busan in Korea

Hyo-Jung Lee and Cheol-Hee Kim

Division of Earth Environmental System, Pusan National University

(Manuscript received 7 July 2009; in final form 17 August 2009)

Abstract

In order to interpret the long-term variations of sunshine duration, cloud lifetime, and precipitation intensity observed in and around Seoul and Busan for the period from 1986 to 2005, aerosol indirect effect was employed and applied. For the identification of long-term trend of aerosol concentration, observed visibility and AOT of AERONET sunphotometer data were also used over the same regions. The result showed that the time series of visibility was decreased and those of AOT increased, especially trends were remarkable in 2000s. In both regions, occurrence frequencies of observed cloudiness (cloud amount $\leq 6/10$) and strong precipitation (rain rate $> 0.5 \text{ mm hour}^{-1}$) have been steadily increased while those of cloudiness (cloud amount $> 7/10$) and weak precipitation (rain rate $\leq 0.2 \text{ mm hour}^{-1}$) decreased. These results are corresponding to the trend of both visibility and AERONET data, implying the aerosol indirect effect that makes size of cloud droplet reduce, cloud life-time longer and precipitation efficiency decreased. Our findings demonstrate that, although these phenomena are not highly significant, weather and climate system over Korean urban area have been changed toward longer lifetime of small cloudiness and increasing precipitation intensity as a result of increased aerosol indirect effect.

Key words: aerosol indirect effect, precipitation intensity, sunshine duration reduction, cloud life-time

1. 서 론

우리나라의 연평균 강수량은 수십년의 큰 변동 폭이 보이거나 장기적으로 증가 추세에 있는 것으로 보고되고 있다. 최근 10년간 호우 일수와 평균 강수량은 평년 대비 각각 10% 및 0.8일 증가하는 것으로 나타났으

나 강수일수는 다르게 변화되어 왔다. 강수효율의 변화 또한 온실효과의 증대에 기인하는 강수변화의 한 징후일 수 있으며, 몬순활동이나 엘니뇨 등 기타 여러 가지 요인들의 영향을 받을 수 있다. 그러나 지금까지의 한반도 강수 변화 경향은 몬순 활동 및 엘니뇨와 관계하여 우리나라를 포함한 동아시아 강수변화경향을 분석한 연구들이 활발하게 이루어져 왔다(이동규, 1991; 이은정 등, 2003; 허창희 등, 1999). 이러한 연구들은 특정 계절 (대부분 여름철) 강수기간을 대상으로 진행되었거나 강수량 그 자체의 주기 및 변동성 특성을 살펴보는 연구로서, 실제 강수의 효율의 변화에 대한 이전 연구는 찾아보기 힘들다.

*Corresponding Author: Cheol-Hee Kim, Division of Earth Environmental System, Pusan National University.
Phone: +82-51-510-3687, fax: +82-51-515-1689
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

강수량이 아닌 강수의 효율의 변화에 영향을 주는 요인으로는 에어로졸의 효과를 들 수 있다. 에어로졸은 강수 효율에 영향을 줄 뿐만 아니라 대기 중에서 물리·화학적 반응으로 생성되어 가시거리 감소 및 광합성 작용의 억제로 인한 식물의 고사, 인체의 호흡기 질환 등 건강에 유해한 영향을 주며(이민희 등, 1986; Monn *et al.*, 1997; 최재천 등, 1999), 직·간접 효과를 통해 기후 변화에도 매우 밀접하게 영향을 미치는 물질로서, 그 효과에 대한 불확실성이 크에도 불구하고 기후 변화에 대한 상관성 연구는 매우 다양하고 활발하다(IPCC 보고서, 2007). 즉 대기 중에 부유하고 있는 에어로졸은 지구에 입사되는 태양 복사에너지의 일부를 직접 흡수하거나 산란시키는 효과를 통해 대기의 복사 수지를 변동시킬 수 있다. 간접적으로는 구름 물리 과정에서 에어로졸이 구름응결핵(Cloud Condensation Nuclei, CCN)으로 작용하여 구름의 형성 및 지구 알베도에 영향을 미치게 된다(Twomey, 1974; Changnon, 1981; Coakley *et al.*, 1987; Radke *et al.*, 1989; Liou *et al.*, 1990; Toon, 1995; Liepert, 1997; Rebetez and Beniston, 1998). 만약 주어진 수분양이 일정하다면, 구름 응결핵 역할을 하는 인위적인 오염물질의 증가는 작은 크기의 구름 방울(cloud droplet) 수농도를 증가시켜 구름 알베도를 증가시키고(Twomey, 1977), 미세한 크기의 구름 방울 농도가 증가하게 되면 상대적으로 강수 강도를 강하게 하고, 결과적으로 구름의 대기 중 체류시간을 증가시켜 구름의 운량을 증가시키게 된다(Albrecht, 1989). 이러한 직·간접적 에어로졸 효과는 단기적으로 적용 수 있으나, 장기적으로 기후에 미치는 중요한 인자로 필연적으로 고려되어야 하므로(Twomey, 1974), 에어로졸의 직·간접 효과에 대한 연구는 많은 관점에서 다양하게 이루어지고 있다.

현재까지 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 연구는 매우 활발하였다. Kiehl and Briegleb(1993)과 Charlson *et al.*(1992)은 대규모로 증가된 에어로졸의 광학깊이를 기후학적 측면에서 중요하게 다루었으며, Ramanathan *et al.*(2001)과 김병곤 등(2005)은 에어로졸의 직·간접 효과에 의한 대기 복사 수지의 변화 및 강수효율에 대한 연구를 수행하였고, Liu *et al.*(2002)은 타이완 지역을 대상으로 에어로졸의 증가에 의한 일조시간 감소와 강수강도의 증가 경향을 분석한 바 있다. Rosenfeld *et al.*(2008)은 에어로졸 농도에 의해 구름의 체류기간과 강수의 형태 변화 과정을 열역학적으로 분석하였다. 국내에서는 지

역적인 에어로졸의 농도 특성 및 광학적 특성에 대해서는 연구가 수행된 바가 있으나, 에어로졸이 장기간에 걸쳐 기상변수에 미치는 영향을 정량적으로 연구한 사례는 매우 드물다.

우리나라의 대도시 입자 오염물질 농도는 1990년 이후 계속 증가 추세에 있다. 서울의 2001년 연평균 미세먼지 오염도는 $71 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 런던의 3.5배, 도쿄의 1.7배나 높게 나타났으며(수도권 대기질 개선 특별 대책, 2002), 2002년의 경우 미세먼지 환경기준 초과횟수의 60%가 수도권에 집중되었다. 국토 면적의 12%에 불과한 수도권에서 인구의 46%, 자동차의 50%, 에너지 사용량의 33% 등 이미 적정 환경 용량을 초과한 상황에 이르러, 수도권 이외에서의 각종 시설들과 인구가 밀집된 대도시에서도 빈번히 문제가 대두되어 왔다(경기개발연구원, 2006).

본 연구에서는 대도시의 입자오염물질, 즉 에어로졸의 역할을 기상 변수와 연관시켜 고찰한다는 관점에서 시도되었다. 장기간의 자료분석 측면에서 1986~2005년의 약 20년에 걸친 강수 강도 및 운량을 포함한 기상변수의 변동을 조사하였으며, 특히 대도시 지역인 서울 및 부산 지역에서의 에어로졸 농도 변화에 따른 장기간의 강수 변동과의 상관성 해석을 시도하였다. 따라서 본 연구를 통해 한반도 강수효율 변동에 기여하는 에어로졸의 간접효과의 해석 가능성을 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 강수 변동과 연관되는 인자에는 에어로졸의 영향 외에도 몬순, 엘니뇨 등에 의한 구름 자체의 변동성 등 여러 다양한 요인이 주요 변수가 될 수 있음을 밝혀 둔다.

2. 연구방법

2.1 자료 및 분석 기간

본 연구에 이용된 자료는 서울기상청과 부산지방기상청에서 운영·관측하는 지상기상관측자료 중 에어로졸 농도와 연관되는 시간별 시정 자료, 그리고 에어로졸효과를 설명할 수 있는 기상 변수인 시간별 강수 자료, 일조시간 자료, 운량 자료를 사용하였다. 에어로졸 농도 변화 경향을 분석하기 위해 본 연구에서는 시정 자료 외에도 기상청 산하 안면도 지구배경대기감시소에서 관측된 파장별 AOT(Aerosol Optical Thickness)의 시간변화 경향을 동시에 살펴보았다. AOT는 National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space

Flight Center (NASA/GSFC)에서 운영하는 Aerosol Robotic Network (AERONET) program에서 sun/sky radiometer(이하 선포토포미터)로 관측한 자료이다. 대상 기간은 1986~2005년의 20년이며, AOT 자료는 안면도 지점의 관측이 시작된 기간인 1999년 9월 이후의 자료를 사용하였다.

시정 자료는 장기간의 강수 변동을 도시 이상의 규모에서 고찰한다는 측면에서 수도권 전체 대상, 즉 서울을 포함한 6개의 수도권 인근 지역(수원, 인천, 인천, 강화, 양평, 이천)을 분석하였고, 부산지역은 부산을 포함한 11개 인근 지역(울산, 마산, 통영, 진주, 거창, 합천, 밀양, 산청, 거제, 남해)에서 관측된 지상기상관측 자료 중 시정자료를 토대로 에어로졸의 농도변화를 추론하였다. 이때 안개의 영향을 배제하기 위해 안개 지속 시간이 없는 무 강수일의 시정자료만을 대상으로 하였다. 그 외 강수량과 일조시간, 운량 자료는 특별한 처리과정 없이 관측 자료를 그대로 사용하였으며, 강수효율 분석 시 5년 간격의 네 구간으로 나누어 구간별 변화를 비교분석하였다.

2.2 연구 방법 및 이론적 배경

강수량의 변화는 온실효과 등으로 인한 기후변화가 지구규모의 강수 변화와 함께 지역적, 시간적으로 서로 상이한 강수변화를 야기 시킬 것으로 예상되기 때문에 그 연관성을 유추할 수 있다. 몬순 활동 및 엘니노와 관계하여 우리나라를 포함한 동아시아 강수변화경향을 분석한 연구(이동규, 1991; 이은정 등, 2003; 허창희 등, 1999)들이 활발하였으나 대부분 특정 계절인 여름철 강수기간을 대상으로 진행된 연구로서, 계절, 특정기간에 관계없이 강수 효율의 변화에 미치는 영향은 고려되었다고 보기 어렵다.

본 연구에서는 강수 효율 경향과 에어로졸 효과의 연관성을 해석하는 시도이므로, 우선 에어로졸의 간접효과를 이해할 필요가 있다. 일정기간에 수함량(Liquid Water Path; LWP)의 변화가 크지 않은 경우, 강수효율은 대기 중 부유하는 에어로졸의 농도에 따라 다르게 나타난다. 에어로졸 농도가 작으면 에어로졸과 결합되어 분산된 구름의 수농도 역시 감소하고 이에 따라 구름방울의 크기가 증가하여 강수가 발생하게 된다. 그러나 대기 중의 에어로졸 수농도가 증가하면, 에어로졸은 구름 방울의 크기를 줄이고 대신 구름 방울의 수농도를 증가시켜 강수 발생을 억제하고 대기 중 잔류

시간을 늘리게 되며(Albrecht, 1989; 김병곤 등, 2007), 그 결과 장시간 체류하는 구름이 병합·응결과정을 거치게 되어 단시간의 많은 강수량을 가지는 특성을 보일 수 있다(Fig. 1). 또한 에어로졸에 의한 운량과 구름의 잔류 시간이 늘어나게 되고 지표로 입사되는 태양복사에너지가 반사시킴으로써 일조시간과 강수효율을 감소시키는 결과를 초래하여 지구온난화의 복사강제력을 조절하는 역할을 하게 된다.

이상의 이론적 배경을 토대로 본 연구에서는 앞절에서 대기 중 에어로졸의 영향을 추론하고, 나아가 대기기간동안 관측된 강수 강도와 일조시간 변화 경향이 에어로졸 변화 경향과 얼마나 연관되어 나타났는지 해석하였다. 강수강도는 시간당 강수량을, 일조시간은 시간당 자료를 누적하여 일별 결과를 이용하였다. 강수 형태의 변화에 따른 에어로졸의 영향을 상세하게 분석하기 위하여 일평균 운량의 변화를 몇 개의 구간으로 구분하여 각 구간별 특징을 구름의 체류시간과 연관시켜 분석하였다.

강수 효율의 변화와 에어로졸의 장기간의 농도 경향과의 연관성을 분석하기 위하여 강수자료는 분석기간 중 1986~1990년, 1991~1995년, 1996~2000년, 2001~2005년의 네 구간으로 세분하고, 각 세분된 구간의 강수 강도의 분포를 다음과 같이 강수강도 구간을 구분하여 관측 횟수를 조사하여 분석하였다.

- 1) 강수강도가 약한 강수; 시간당 강수량 $\leq 0.2 \text{ mm hour}^{-1}$
- 2) 강수강도가 보통인 강수; $0.2 \text{ mm hour}^{-1} < \text{시간당 강수량} \leq 5 \text{ mm hour}^{-1}$
- 3) 강수강도가 강한 강수; $5 \text{ mm hour}^{-1} < \text{시간당 강수량}$

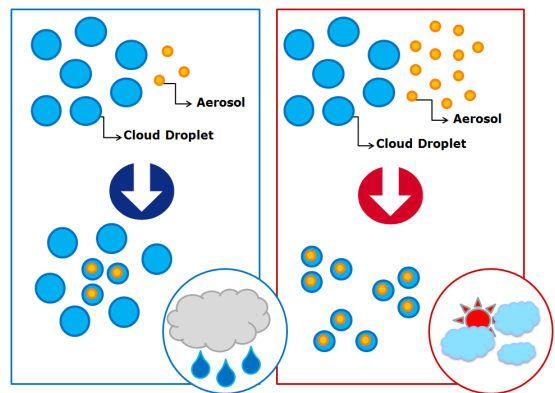


Fig. 1. Schematic diagrams of Secondary Indirect effect of aerosol (Kim et al., 2007)

이 때 총 강수량의 연도별 차이에 의해 초래되는 오차를 줄이기 위하여 총 강수시간에 대한 각 구간별 강수 강도의 분포를 백분율로 환산하여 각 구간별 분포 변화를 조사하였다.

일조시간 역시 관측된 자료를 하루 누적량(hour day^{-1})으로 환산하고 그 연평균을 구하고 시계열을 구성하여 그 변화를 분석하였다. 운량(단위: 1/10)은 일평균 운량을 계산하고 0.2(2/10) 간격으로 나누고 각 구간 별 운량의 발생 빈도의 변화를 1986~2005년간의 시계열 자료로 구성하였다. 아울러 운량의 발생빈도가 증가하는 경향을 보인 구간에 대하여 구름의 지속시간을 분석하여 그 변화 경향을 해석하였고, 나아가 이상의 분석 결과를 토대로 에어로졸에 의한 기후변화 양상을 기술하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 시정의 변화 경향 분석 및 AOT 비교 분석

에어로졸은 대기 중에 부유하면서 입사되는 태양의 전자기파를 산란·반사를 통해 시정을 악화시키므로 앞 절에서 제시한 관측소들의 시정 자료를 이용하여 우선적으로 서울과 부산의 에어로졸의 변화 경향을 간접적으로 추론하였고, 비록 최근에 국한된 기간의 자료이지만 안면도 지구배경대기감시소에서 관측된 파장별 AOT의 변화경향을 통해 한반도 에어로졸의 변화를 살펴보았다.

Fig. 2a는 서울과 그 인근지역에서의 시정의 연평균 변화 경향을 나타낸 것이다. 서울지역은 1986년부터 2005년까지 분석기간 전반에 걸쳐 감소추세를 보이는 가운데 1988년 올림픽기간에 시정이 최고치를 보였다. 특히 1990년대 후반부터는 시정이 급격하게 감소하는 추세를 확인할 수 있다. 반면 부산과 그 인근지역의 시정의 연평균 변화(Fig. 2b)는 전체적인 평균 가시거리는 서울보다 2~3 km 높게 나타났지만 시간에 따른 감소추세는 오히려 서울보다 더 현저하였음을 알 수 있다.

Fig. 3은 안면도 지구배경대기감시소에서 관측된 파장별 AOT의 시계열 변화경향을 나타낸 것인데, 결국이 포함된 2003년을 제외하고 안면도 지점의 관측이 시작된 기간인 1999년 9월부터 2005년까지 4개의 파장영역(675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm)에 대한 AOT의 연평균 변화를 나타낸 그림이다. 여기서도

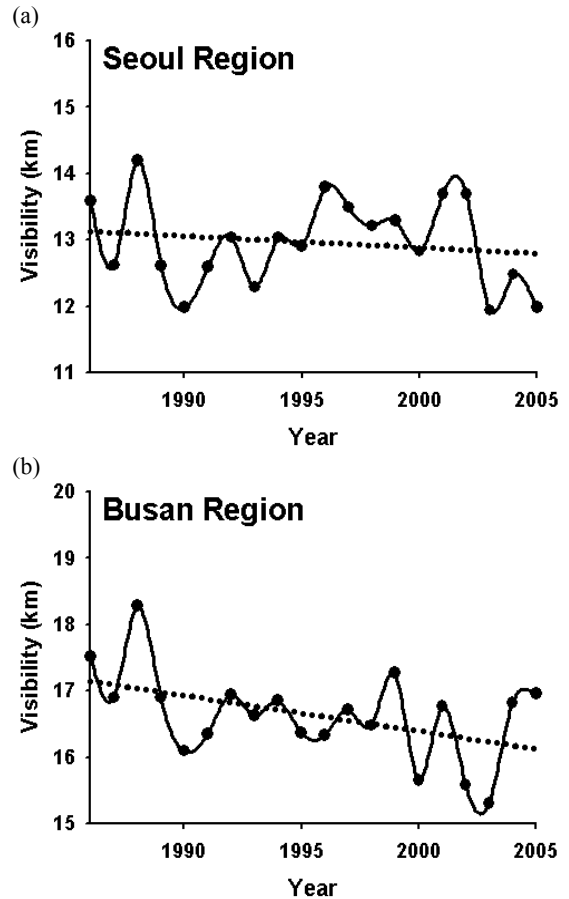


Fig. 2. Annual variations of visibilities in (a) Seoul and (b) Busan.

AOT의 시계열 변화가 점점 증가하는 추세를 확인할 수 있어 에어로졸의 영향은 계속 증가하였음을 알 수 있으며, 따라서 장기적인 관점에서 우리나라의 에어로졸은 전체적으로 증가하였음을 추론할 수 있다.

이러한 추세는 서울에서 나타난 2000년대의 시정 감소경향과 연관시켜 볼 때, 에어로졸의 농도가 최근 증가되었음을 추정할 수 있고, 본 연구에서 그림으로 제시하지는 않았지만 서울의 연평균 미세먼지 농도 역시 2000년 들어서 계속 심각해지고 있음을 확인할 수 있다(경기개발연구원, 2006).

3.2 일조시간 변화 경향 분석

대기 중의 에어로졸의 장기적인 농도 변화는 기후 시스템과 연관되어 나타날 수 있는데, 에어로졸의 1차 간접 효과인 Twomey effect(Twomey, 1974)에 대한

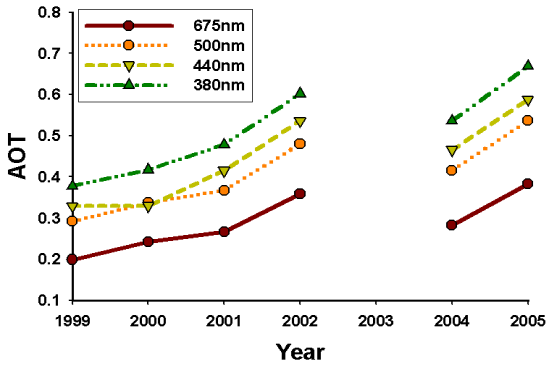


Fig. 3. Annual variations of Aerosol Optical Thickness from AERONET program in Anmyon.

정성적 경향 분석을 위해 장기간의 일조시간의 변동성을 살펴보았다. Twomey effect는 대기 중 수분함량이 일정한 경우, 입자의 크기를 감소시키거나 초기에 입자 농도가 증가하게 되면 에어로졸의 복사강제력으로 구름 알베도가 증가하는 현상을 말하는데, 그 결과로 지표에서 관측되는 일조시간은 감소하는 현상을 유도하게 된다.

Fig. 4a 와 b는 1986년부터 2005년까지의 연평균 일조시간을 나타낸 그림으로서, 서울과 부산 모두 일조시간이 감소하였으며, 특히 2000년 이후 그 감소 경향이 두 지역 모두 현저하게 감소하였음을 확인할 수 있다. 그러나 최근의 현저한 감소 추세는 2001년 1월부터 조단 일조계에서 회전반사경일조계로 관측기기 변경함으로써 그에 따른 오차일 가능성을 고려하여, 1986~2000년 기간 동안의 증감 추세를 파선으로 나타내었다. 그 결과, 서울은 감소추세가 뚜렷하나 부산은 극소한 감소추세를 보였다.

그 추세가 급감하는 시기는 도시별로 다르게 나타났는데, 서울은 1994~2000년까지는 완만히 감소하는 경향을 보였고(Fig. 4a), 부산은 1990년대 초반부터 완만하지만 꾸준히 감소하는 경향을 보였고 특히 1994~2000년까지 서울에 비해 상대적으로 더 뚜렷하게 급감하였음을 알 수 있다(Fig. 4b).

특히, 2000년대의 일조시간의 관측 자료를 제외하더라도, 최근인 1990년대 후반이 두 지역 모두 감소 추세에 있음을 감안하면 향후에도 일조시간의 변화는 계속될 것으로 전망된다.

3.3 운량의 변화 분석 및 구름의 체류시간 경향의 추정

감소된 일조시간은 대기 중 운량의 변화와 연관되

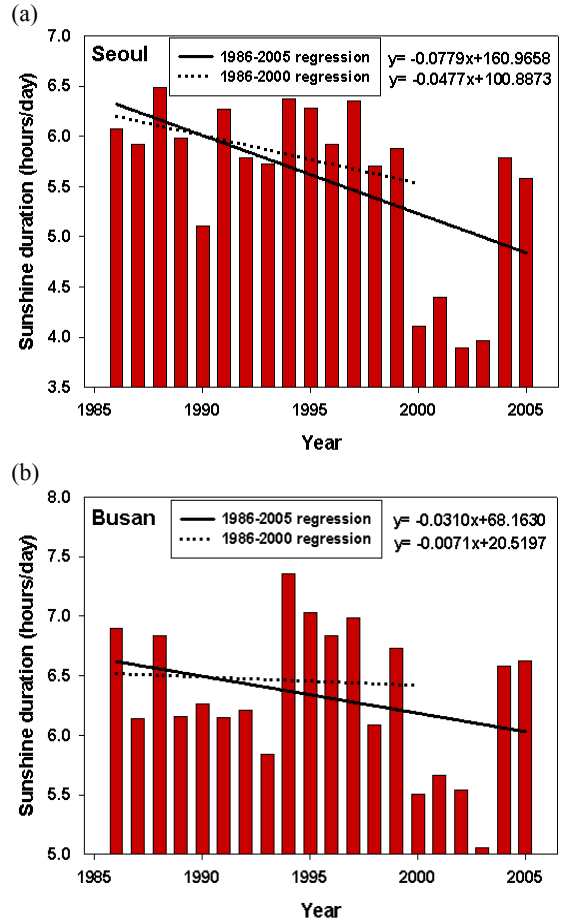


Fig. 4. Annual variations of sunshine duration for the period of 1986-2005 in (a) Seoul and (b) Busan, respectively.

어 있음을 추론해 볼 수 있으며, 보다 근본적인 원인으로서는 운량의 장기 변화 경향이 에어로졸의 증가와 연관되어 있을 것으로 판단된다. 이러한 경향을 살펴보기 위하여 서울과 부산지역에서 관측된 운량의 변화를 살펴보았다.

Fig. 5a와 b는 1986~2005년간 서울과 부산지역의 운량 1/10 이상 관측된 시간을 합하여 그 경년변동의 편차를 도시한 그림이다. 본 연구에서는 강수일을 모두 제외한 무강수일을 대상으로 하였다. 그 결과 강수일을 제외한 운량이 1/10 이상으로 관측된 누적 시간이 서울에서는 증가하였지만(Fig. 5a), 부산지역의 경우 총 누적 시간의 경년변화는 오히려 감소한 것으로 나타났다(Fig. 5b). 이러한 대조적인 현상이 나타난 원인을 살펴보기 위하여, 운량을 2/10 간격으로 세분하여 세분된 운량별로 그 경향을 각각 살펴보았다. Fig.

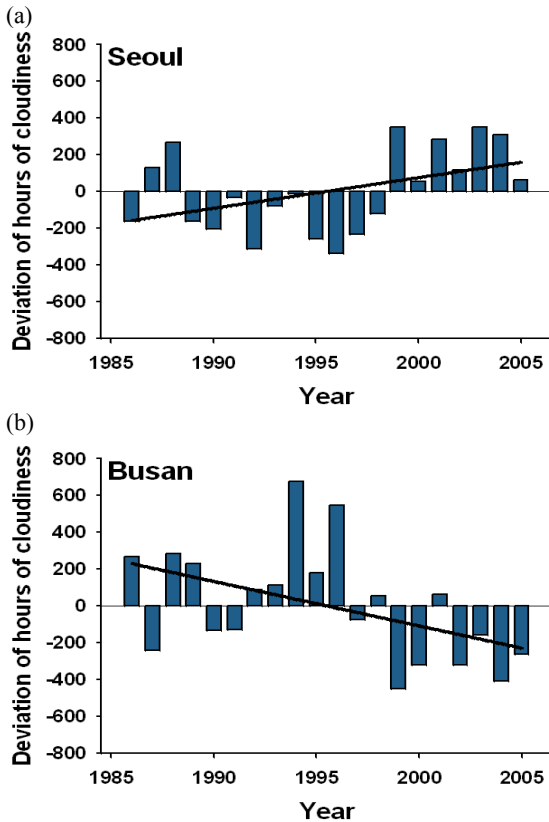


Fig. 5. Annual change in deviations of accumulated hours of cloudiness for the period of 1986-2005, in (a)Seoul and (b)Busan, respectively.

6a와 b는 세분한 운량의 경년변화를 서울과 부산에서 각각 나타낸 그림이다. 두 도시에서 모두 1/10~6/10 구간의 운량은 증가한 추세를 보였고, 반면 7/10~10/10 구간의 운량은 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 운량이 적은 구간의 빈도가 늘어났기 때문에 연평균 운량(Fig. 5)이 감소하였음을 알 수 있다. 즉 두 도시에서 관측된 구름의 변화 양상은 에어로졸의 농도가 증가함에 따라 에어로졸이 구름 방울을 분산시켜 크기가 줄어들고 반면 수농도가 증가한 구름의 출현이 많았음을 추론해 볼 수 있다. 또한 이러한 결과는 결과적으로 일조시간의 감소(Fig. 4)로 이어진 것으로 해석할 수 있을 것이다.

이상의 에어로졸 2차 간접 효과(Albrecht effect, 1989)와 관련된 현상을 더 자세히 살펴보기 위해 관측 자료로부터 구름의 체류시간을 분석하였다. Albrecht effect는 구름 입자크기를 감소시키는 인위적 에어로졸의 증가로 인해 복사 강제력은 강수 효율을 감소시

Table 1. Averaged total precipitation hours for the period of 1986-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005, respectively, in (a)Seoul and (b)Busan.

Region	Period categories	Average of total precipitation hours
Seoul	1986-1990	935.2
	1991-1995	823.2
	1996-2000	862
	2001-2005	914.2
Busan	1986-1990	884.8
	1991-1995	803.6
	1996-2000	939.2
	2001-2005	846

키고 구름의 양, 구름 두께, 구름의 체류시간을 모두 변화시키는 현상을 말한다. 본 연구에서는 증가 추세를 보인 6/10 이하의 운량이 지속되는 시간을 구름 체류시간으로 정의하고, 관측 자료 중에서 1/10~6/10의 운량이 연속되는 경우의 시간을 누적하여 구하였다. 이때, 7/10이상 혹은 맑은 날(0/10)이 관측된 경우가 관측되면 구름의 체류시간이 끝난 것으로 간주하였다.

Fig. 7은 두 지역별 운량 6/10 이하이며 동시에 12시간 이상 체류한 구름이 발생한 횟수이다. 그 결과 서울과 부산 모두 구름의 체류 시간은 증가한 것을 확인할 수 있으며(Fig. 7a,b), 이것은 6/10 이하의 운량을 가진 작은 물방울로 구성된 구름의 체류시간이 12시간이상 지속되는 횟수가 점점 증가하였음을 의미한다. 그 증가 경향은 서울지역이 부산지역보다 더 강하게 나타났고, 서울지역에서는 2000년대 그리고 부산지역은 1990년 중반에 그 경향이 현저하였다. 따라서 이러한 구름 형성과 운량, 운형, 그리고 구름의 체류 시간의 변화는 증가되는 에어로졸의 영향과 연관되어 나타난 것으로 해석할 수 있으며 나아가 에어로졸에 의한 간접효과가 한반도 기후에 미치는 영향이 커지고 있음을 반증하는 결과로 해석된다.

3.4 강수강도 변화의 비교 및 강수효율 분석

대기 중 에어로졸은 구름 방울의 크기를 줄이고 강수 발생을 억제하고 구름의 잔류시간을 증가시켜 구름이 병합·응결과정을 거치는 시간이 증가하여 단시간의 많은 강수량을 가지는 특성을 갖는다. 이러한 사실이 실제 관측된 자료로부터 구름의 형성과 체류시간 변화가 강수효율의 변화를 확인할 수 있는지 분석하기

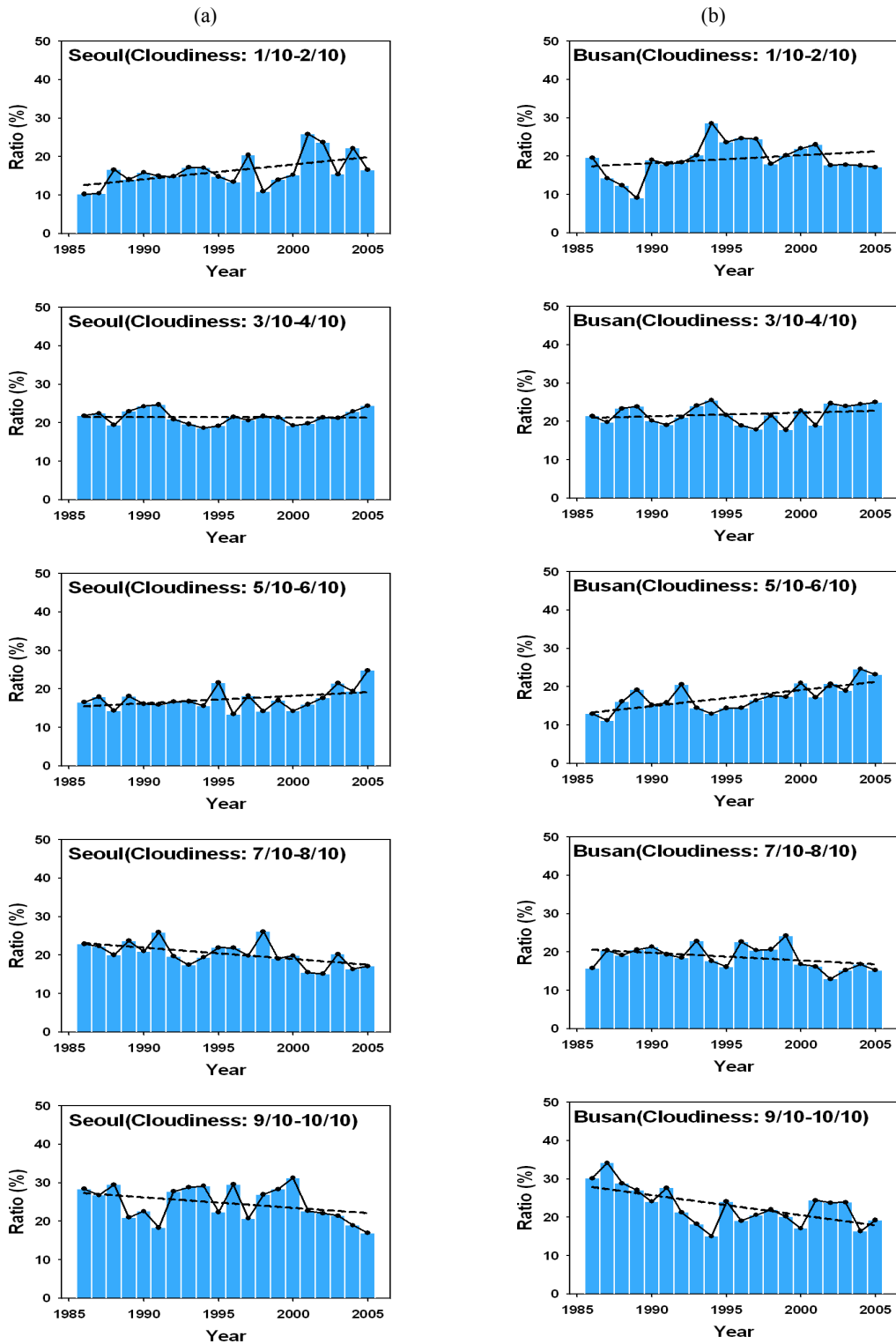


Fig. 6. Annual variations of accumulated hours of categorized cloudiness for the period of 1986-2005 in (a)Seoul and (b)Busan, respectively.

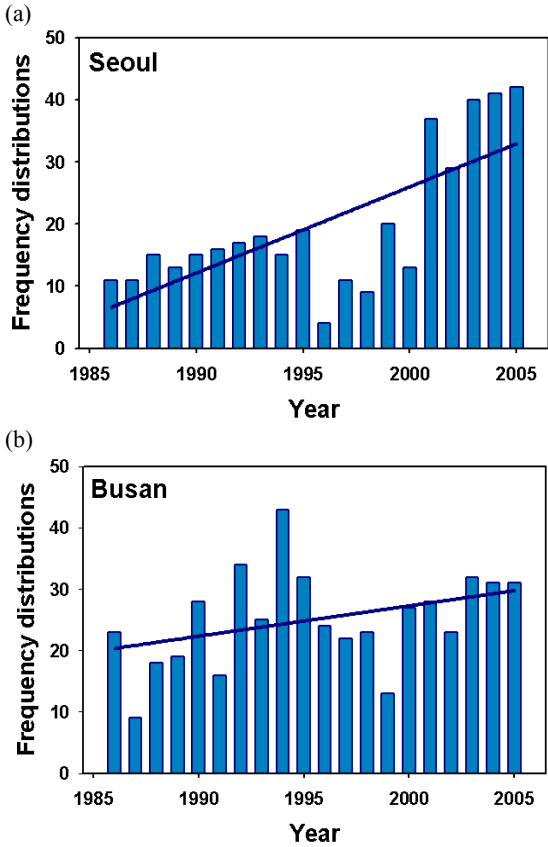


Fig. 7. Number of frequencies with the lasting hour of more than 12 hours for the cloudiness of less than 6/10 in (a)Seoul and (b)Busan, respectively.

위해 강수효율 장기 변화 경향을 살펴보았다.

Table 1는 서울과 부산지역의 연도별 총 강수시간을 나타낸 것이다. 서울지역은 1980년대 후반에, 그리고 부산지역은 1990년대 후반에 강수가 관측된 시간이 많았음을 알 수 있다. 각 연도별 총 강수 시간을 강수 강도별로 구분하기 위하여 강수 강도를 세 구간(강수율 0.2 mm hour⁻¹ 이하, 0.2~0.5 mm hour⁻¹, 0.5 mm hour⁻¹ 초과)으로 구분하여 그 분포를 조사하였다. Fig. 8a와 b는 강수 강도별 관측 횟수(시간)의 누적량을 5년씩 평균하여 나타낸 그림인데, 이 때 연도별 강수량의 차이에 의한 오차를 제거하기 위하여 각 강수강도별 5년간 총 강수누적시간에 대해 각 구간별 강수누적시간을 백분율(%)로 환산하여 Fig. 9a와 b에 함께 나타내었다.

서울지역의 경우 Fig. 8a에서 알 수 있듯이 1986~1990년 보다는 1991~2000년에는 강도가 상대적으로

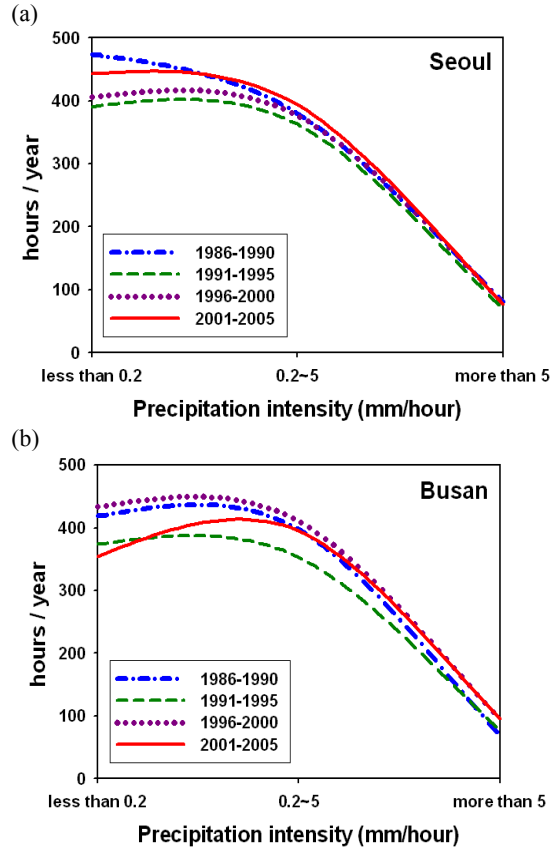


Fig. 8. Averaged total precipitation hours for the period of 1986-1990, 1991-1995, 1996-2000 and 2001-2005, respectively, in (a)Seoul and (b)Busan

약한 강수(0.2 mm hour⁻¹ 이하), 보통인 강수(0.2~0.5 mm hour⁻¹), 상대적으로 강한 강수(0.5 mm hour⁻¹ 초과) 모두 감소한 것으로 나타났다. 이것은 1991~1995년과 1996~2000년도는 다른 기간에 비해 총 강수시간이 적은 것에 기인한 것으로 판단된다(Table 1). 그러나 자료를 총 강수량에 대하여 백분율로 표시한 Fig. 9a의 결과를 살펴보면, 1986~1990년보다 1991~2005년에 강수강도가 상대적으로 약한 강수(0.2 mm hour⁻¹ 이하)는 감소하였고, 강수강도가 보통인 경우(0.2~0.5 mm hour⁻¹)는 증가하였음을 알 수 있다.

부산지역의 경우도, Fig. 8b에서 알 수 있듯이 1986~1990년에 비해 2000~2005년에 강도가 약한 강수가 감소한 대신 강도가 강한 강수가 증가하였고, 1991~1995년과 1996~2000년은 각각 전체구간에서 감소, 증가하였으나, 이 결과 역시 각 연도별 강수량의 차이에 의한 결과에 기인한 것으로 보인다. 그러나 Fig. 9b

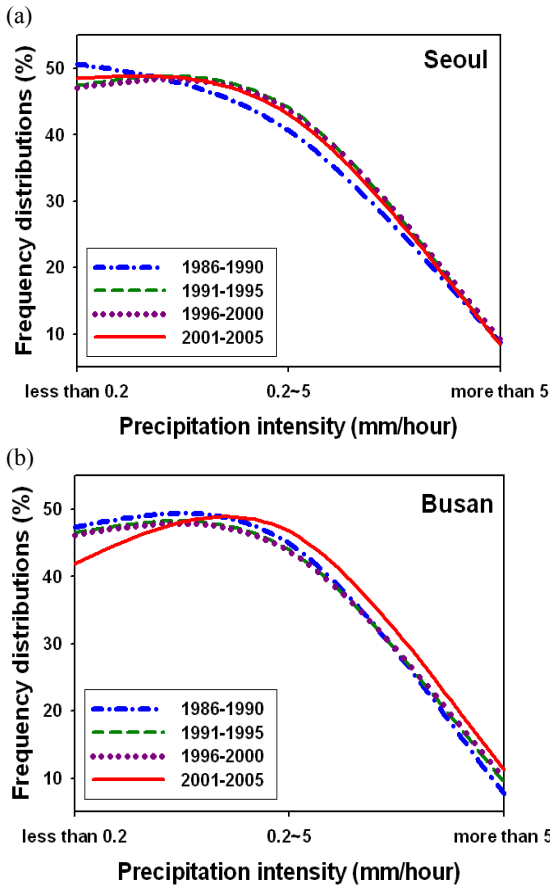


Fig. 9. Ratio of precipitation hours to total precipitation hours for the categorized 5 years (1986-1990, 1991-1995, 1996-2000 and 2001-2005) in (a) Seoul (b)Busan, respectively.

에 나타난 백분율 결과로 비교하면, 1991~1995년과 1996~2000년은 비슷한 수준의 강수 강도 분포결과가 나타났으나, 1986~1990년에 비해 1991~2000년은 0.2 mm hour⁻¹이하의 강수강도가 약한 구간과 0.2~5 mm hour⁻¹의 강수강도가 보통인 구간에서 그 관측 횟수가 소폭 감소하였고, 반면 5 mm hour⁻¹ 초과되는 강수강도가 강한 구간에서는 증가경향을 보였다. 특히, 2001~2005년에는 0.2 mm hour⁻¹ 이하 구간에서 다른 기간에 비해 급감하였고 0.2 mm hour⁻¹ 초과되는 두 구간에 있어서는 급증했음을 알 수 있다.

따라서 서울지역과 부산지역 모두 강도가 약한 강수가 줄어드는 경향이 확인되었고, 특히 서울지역은 1990년대 중 후반부터 강도가 강한 강수가 증가한 추세를 보였으며 이후 증가된 추세가 유지되는 형태를 보였다. 부산지역에서도 이와 유사한 경향을 보였으나

강도가 약한 강수는 2000년대에 들어와서야 감소하였고 동시에 강한 강수가 증가하고 있는 추세가 확인되었다. 따라서 지역별 시간의 차이는 존재하였으나 강수율이 큰 경우는 증가하고 강수율이 적은 경우는 줄어들어 결국 강수효율은 시간에 따라 낮아지고 있음을 두 지역에서 모두 확인하였다. 즉, 우리나라 대도시의 강수형태는 에어로졸에 의한 강수 효율 감소와 적은 운량을 보이는 구름 체류시간의 증가와 발생횟수의 증가가 관측되었으며, 이로 인해 구름 알베도의 증가와 일조시간이 감소하는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

이상에서 서울과 부산의 강수 효율의 경향을 살펴 보았는데, 두 도시 모두 최근에는 강수효율이 낮아지고 있었으며, 이것은 에어로졸의 증가 및 그 간접효과와 부합되는 결과이다. 이러한 강수 강도 및 시정 변화 경향은 전국지역을 대상으로 분석했을 때에도 동일하였으며, 강수 강도의 변화 정도는 특히 서울과 부산에서 상대적으로 크게 나타났다. 따라서 본 연구 결과로부터 우리나라 강수 특성과 한반도 기후변화는 에어로졸의 영향을 받고 있음을 간접적으로 확인하였으며, 현 추세로 볼 때 에어로졸이 대기에 미치는 영향은 계속될 것으로 판단된다. 그러나 이상에서 살펴본 구름과 강수의 특성은 일정기간 대기 중의 수증기 함량이 일정하다는 가정 하에서 에어로졸의 간접 효과와 연관해서 분석한 결과이다. 그러나 대도시의 열섬(heat island) 현상 혹은 대기 중 여러 요인에 의해 대기 중 수증기의 증가 경향이 존재할 수 있고 이에 따른 한반도 강수 특성의 해석이 가능할 수 있어, 다양한 분석적 연구가 향후 계속되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

우리나라 대도시의 강수 효율 및 운량 등 몇 가지 기상 인자에 대한 장기 변동성을 에어로졸 간접효과로 해석하였다. 서울과 부산의 지상기상관측자료 중에서 1986~2005년간 관측된 일조시간과 전운량, 시간당 강수량 자료를 추출해내어 그 시간 변화 특성을 에어로졸의 변동과 연관시켜 그 상관성 해석을 시도하였다.

먼저, 에어로졸의 시간 변화 경향을 알아보기 위해, 서울과 인근지역(6개의 관측소), 그리고 부산과 그 인근지역(11개 관측소) 시정의 연평균 자료와 AERONET에서 제공하는 안면도 AOT 자료를 분석 하였다. 그 결과 우리나라 대도시에서 시정이 감소하는 추세를 보이

고, 안면도에서는 AOT가 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 에어로졸의 간접효과로서, 복사 강제력에 의한 구름 알베도 증가에 의한 기후학적 변화를 확인하기 위해 장기간의 일조시간을 분석해 본 결과, 서울과 부산지역 모두 일조시간이 감소하는 추세를 보이는 것으로 나타났다. 또한 구름 물리 과정에 관련된 간접효과를 분석을 하기 위해 운량을 몇 개의 구간별로 세분하여 분석을 하였다. 그 결과, 서울, 부산지역의 전운량 중 6/10 이하의 운량을 가지는 횡수(시간)는 증가하고, 7/10 이상의 운량을 가지는 횡수(시간)은 감소하는 추세를 보였으며, 따라서 에어로졸이 운량의 변화 양상에도 영향을 미치고 있음을 추론할 수 있었다.

강수효율의 변화를 알아보기 위해 강수 강도를 0.2 mm hour^{-1} 이하(강도가 약한 강수)과 $0.2\sim 5 \text{ mm hour}^{-1}$ (강도가 보통인 강수)와 5 mm hour^{-1} 초과(강도가 강한 강수)로 구분하여 그 시간 변화를 살펴본 결과, 서울은 1990년대 강도가 약한 강수가 급감하였고 강도가 강한 강수가 증가한 추세를 보였으며 2000년에 들어서는 약한 강수가 소폭 증가하고 $0.2\sim 5 \text{ mm hour}^{-1}$ 의 강수가 감소한 것으로 나타났으나 그 폭이 크지 않고 1990년대와 비슷한 추세를 보였다. 부산은 2001년에 들어, 1986~2000년 동안의 추세보다 0.2 mm hour^{-1} 이하의 비율이 현저히 감소하였고 0.2 mm hour^{-1} 초과되는 강수의 비율은 증가한 것으로 나타났다. 결국, 우리나라의 대표적 두 대도시인 서울, 부산은 강수효율이 과거보다 낮아졌거나 낮아지고 있는 추세를 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 경향을 에어로졸 간접효과에 따른 구름과 강수의 변화로 설명하였다. 그러나 대도시 지표 특성 변화, 열섬효과, 대기 중 파악하기 어려운 수증기 증가 등 여러 불확실성이 많이 존재하는 만큼 향후 보다 자세하고 장기적 자료를 이용한 분석적 연구가 요구될 것으로 판단된다.

에어로졸은 일시적으로 인체에 유해하거나, 환경을 오염 시킬 뿐 아니라, 직접효과, 혹은 구름 응결핵(CCN)으로 작용하여 구름 알베도를 높여 일조시간을 감소시키거나, 혹은 구름의 체류시간을 증가시키는 결과를 초래하여, 복사강제력을 변화시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 한반도에서도 에어로졸은 여러 형태로 강수와 연관되어 나타나고 있음을 관측 자료를 통해 유추할 수 있었다. 따라서 향후 보다 장기간의 관측 자료를 이용한 에어로졸 효과 분석뿐만 아니라, 에어로졸이 복사 강제력에 미치는 영향 평가를 위한 모델링 연구도 함께 병행하여 에어로졸의 영향을 직간접

적으로 연구할 예정이다.

감사의 글

이 연구에 이용된 AERONET program의 안면도 AOT 자료를 제공해주신 안면도 지점의 책임 연구자(Brent_Holben)께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3212)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김동영 외, 2006: 경기도 대기질 개선 시행계획, 경기개발연구원, 820 pp.
- 김병곤, Stephen Schwartz, Mark Miller, Qilong Min, 2005: 에어로졸-구름 상호작용이 기후변화에 미치는 영향, *한국 대기환경학회 2005 춘계학술대회 논문집*, 264-266.
- _____, 김유준, 은승희, 최민혁, 2007: 서울의 일교차 주말효과와 에어로졸과의 연관성, *한국대기환경학회지*, **17**, 147-157.
- 이동규, 1991: 1985년 한반도 강우와 관련된 동아시아 몬순 순환의 특징, *한국기상학회지*, **37**, 205-219.
- 이민희, 한의정, 원양수, 1986: 황사 현상이 우리나라에 미치는 영향, *한국대기보전학회지*, **2**, 34-44.
- 이은정, 전종갑, 권민호, 임한철, 2003: 동아시아 여름 몬순 지수를 이용한 여름 몬순 특성 분석, *한국기상학회지*, **13**, 398-401.
- 최재천, 조하만, 전영신, 박기준, 1999: 1998 봄철 서울에서 관측된 에어로졸의 금속 성분에 관한 연구, *한국기상학회지*, **35**, 263-271.
- 허창희, 이준이, 강인식, 1999: 한반도 8월과 9월 강수량의 장기 변동, *한국기상학회 1999 춘계학술대회 논문집*, 255-259.
- 환경부, 2002: 수도권 대기질개선 특별 대책, 2002 환경부 보고서.
- Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, **245**, 1227-1230.
- Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. H. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakly, Jr. J. E. Hansen, and D. J. Hofman, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, **255**, 423-430.
- Changnon, S. A., Jr., 1981: Midwestern cloud, sunshine and temperature trends since 1901: Possible evidence of jet contrail effects. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 496-508.
- Coakley, J. A., R. L. Bernstein, and P. A. Durkee, 1987: Effect of ship-track effluents on cloud reflectivity. *Science*, **237**, 1020-1022.
- International Panel on Climate Change, 2007: *Climate Change 2007, The Physical Science Base*.
- Kiehl, J. T. and B. P. Briegleb, 1993: The relative roles of

- sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, *Science*, **260**, 311-314.
- Liepert, B., 1997: Recent changes in solar radiation under cloudy conditions. *Int. J. Climatology*, **17**, 1581-1593.
- Liou, K. -N., S. C. Ou, and G. Koenig, 1990: An investigation of the climatic effect of contrail cirrus. In U. Schumann (ed.): *Air Traffic And Environment: background, Tendencies, and Potential Global Atmospheric Effects*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp.154-169.
- Monn, C. H., V. Carabias, M. Junker, R. Waeber, M. Karrer and H. U. Wanner, 1997: Small-scale spatial variability of particulate matter <math><10\mu\text{m}</math>(PM10) and nitrogen dioxide. *Atmos. Environ.*, **31**(15), 2243~2247.
- Radke, L. F., J. A. Coakely, Jr., and M. D. King, 1989: Direct and remote sensing observations of the effects of ships on clouds. *Science*, **246**, 1146-1148.
- Rebetz, M., and M. Benison, 1998: Changes in sunshine duration are correlated with changes in daily temperature range this century: An analysis of Swiss climatology data. *Geophys Res. Lett.*, **25**, 3611-3613.
- Rosenfeld, D., U. Lohmann, Graciela B. Raga, Colin D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell, M. O. Andreae, 2008: Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation?, *Science*, **321**, 1309-1313.
- Shaw Chen Liu, Chung-Ho Wang, Chein-Jung Shiu, Hsiu-Wu Chang, Chang-Keng Hsiao, Shuh-Haung Liaw, 2002: Reduction in sunshine duration over Taiwan: Causes and Implication. *TAO.*, **13**(4), 523-545.
- Toon, O. B., 1995: Modeling the relationships between aerosol properties and the direct and indirect effects of aerosols on climate, *Aerosol forcing of climate*, 197-213.
- Twomey, S., 1974: Pollution and the planetary albedo. *Atmos. Environ.*, **8**, 1251-1256.
- _____, 1977: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149-1152.
- V. Ramanathan, P.J. Crutzen, J. T. Kiehl, D. Rosenfeld, 2001: Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*, **294**(7), 2119-2124.