

한반도 부근의 강수 및 대기오염의 주기성

유정문^{*1}, 조영준², 이명인³, 이석조⁴, 허영민¹, 이유리¹

¹이화여자대학교 과학교육과(yjm@ewha.ac.kr), ²연세대학교 대기과학과,

³울산과학기술대학교 도시환경공학부, ⁴국립환경과학원 기후대기연구부

요약

본 연구에서는 2005~2007년 여름철(JJAS; 6~9월) 기간에 한반도 부근의 위성관측(TRMM) 및 지상관측(AWS) 강수량 그리고 대기오염 관측 자료를 이용하여 이들의 공간적 분포와 일주기 특성을 분석하였다. 이 기간에 AWS 평균 강수량은 전국적으로 약 5 mm/day 이었고, 제주도, 중부 내륙, 그리고 영·호남 경계 지역에서 9 mm/day 이상으로 많았다. PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 미세먼지의 농도는 27~57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 특히 수도권과 경남의 산업지역에서 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높았다. 위성관측과 지상관측 강수량간의 상관(~ 0.8)은 매우 유의적이었다. AWS는 지점 관측이고 TRMM 관측은 면적평균임을 고려할 때, 위의 상관값은 상당히 높은 것으로 판단된다. 일주기 분석에서 미세먼지는 수도권 지역에서 오전에, 그리고 영남 지역에서는 오후 늦게 많이 발생하였다. AWS 강수량은 영동 및 경북 지역에서 이른 오전(2~8시)에, 이 지역 외에서는 오후 늦게(16~22시) 주로 발생하였다. 중부 지방의 강수 주기는 전선이 오후 3시부터 다음날 오전 4시까지 서해안에서 동해안으로 동진하는 형태를 잘 반영하였다.

주요어

강수(precipitation), 대기오염(air pollution), 일주기(diurnal cycle)

1. 서론

에어러솔 방출과 관련된 강수 세기 및 강수량의 변화는 여전히 많은 관심사가 되고 있다(Bell *et al.*, 2009). 기후 변화에 관련하여 자연적인 에어러솔보다는 인위적으로 생성된 에어러솔이 강수에 미치는 영향이 주요한 초점이 되고 있다. 세부적으로 에어러솔 효과는 복사에너지의 산란과 흡수에 영향을 주는 직접효과와 구름 입자의 크기를 감소시켜 구름 반사도를 증가시키는 1차 간접효과, 그리고 구름의 지속시간을 증가시키는 2차 간접효과의 역할을 한다(Twomey, 1974; Albrecht, 1989). 이러한 효과로 인하여 에어러솔은 구름 특성을 변화시키고, 강수 세기와 지속시간을 변화시킨다. 이것은 전지구적인 물순환에 영향을 주어, 물의 상변화에 따른 대기 중 잠열의 양을 변화시킨다. 또한 변화된 구름 특성은 반사되는 태양 복사에너지 양을 증가시켜 해들리 순환과 같은 전지구 에너지 순환 체계에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 변화는 지역적 편차가 큰 극한 강우·가뭄 또는 폭염·강추위를 유발할 수 있기 때문에 기후학적인 측면에서 인간 또는 생태계 환경에 밀접하게 연관되어 있다.

최근 에어러솔은 대류가 활발한 강우 시스템에서 강수를 증가시키는 효과가 보고되고 있다. Bell *et al.* (2009)의 미국 남동부 지역에 대한 연구에 의하면, 일주일 중에 주중에 발생한 인위적인 에어러솔이 주말에 발생한 것에 비하여 강한 대류의 강수를 유발함을 Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Radar (TRMM PR) 폭풍우 고도의 자료를 이용하여 보인 바 있다. 그러나 이러한 경향은 미국 전역에서가 아니라 특정 지역에서만 나타난다. 이러한 원인은 강수가 국지적인 요인뿐만 아니라 종관 규모의 기압배치 등에 의하여도 발생하는 데에 있다.

에어러솔에 의한 강수 세기의 변화는 층운형 강수보다는 우리나라 여름철에 발생하는 대류성 강수에서 분석하는 것이 효과적이다. 그러나 우리나라 여름철 강수 형태는 대기오염과 거의 무관하게 장마나 태풍에 의하여 지배적인 요인도 있으므로, 이러한 요인을 에어러솔 효과와 분리하는 것이 중요한 일이다. 본 연구의 목적은 동북아시아 및 한반도 부근의 위성관측 (TRMM) 강수, 지상관측(AWS) 강수, 에어러솔 자료를 이용하여 변수들 간의 상관 및 일주기성을 조사하는데 있다.

2. 자료 및 방법

한반도 부근의 강수에 대한 대기오염 영향을 조사하기 위하여, 2005-2007년 여름철(JJAS; 6~9월) 기간에 다음 자료를 수집하였다(Table 1): AWS (Automatic Weather Station) 강수량, 위성관측(TRMM 3B42) 강수량, 그리고 대기 오염. 여기서 지점 관측은 상호 비교를 위하여 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 격자 자료로 전환되었다.

Table. 1. The data of precipitation and air pollution used in this study. In the table, AWS (Automatic Weather Station), KMA (Korea Meteorological Administration), MEK (Ministry of Environment of Korea), and TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). The TRMM rain have been obtained during summer of June, July, and August (JJA).

	Data	Source	Period	Time interval
1	AWS Rain	KMA	2005. 1 ~ 2007. 12	1 min
2	TRMM 3B42 Rain	NASA/DAAC	1998 ~ 2006 (JJA)	3 hour
3	Air Pollution	MEK	2001. 2 ~ 2008. 12	Hourly

3. 결과

Figure 1은 2005년 여름(JJA; 6~8월) 기간에 대하여 (a) 환경부의 283개 대기오염 관측지점과 (b) 지점에서 격자 자료로 전환된 PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 농도의 공간적 분포를 보여준다. 환경부 (MEK)에서는 다섯 종류의 오염물질(PM10, O_3 , NO_2 , SO_2 , CO)의 지상 정보를 제공하고 있다. 미세먼지 PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 농도는 전국적으로 $30 \sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 수도권과 영남 산업지역에서 상대적으로 높았다(약 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

기상청의 613개 AWS 관측소의 1분 강수량을 이용하여 1시간 간격 격자 자료로 전환하였다 (Figs. 2a-b). 2005년 여름 평균 강수량은 중부 내륙과 전북 지역에서 9 mm/day 이상으로

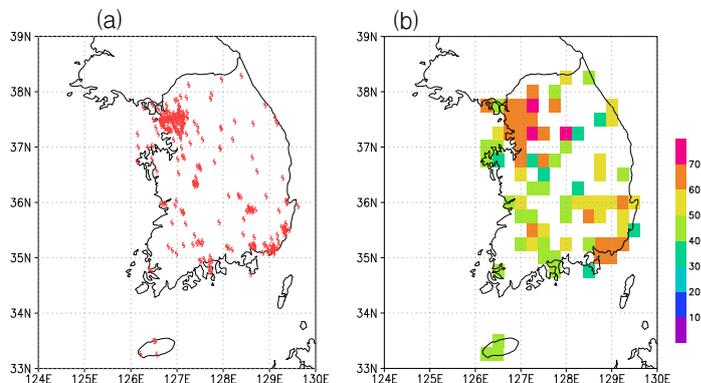


Fig. 1. (a) Location of 283 air pollution monitoring stations of MEK, and (b) summer average of PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) over the Korean peninsula for JJA 2005 in a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ grid.

많았고, 영남과 해안 지역에서는 5-7 mm/day으로 상대적으로 적었다(Fig. 2b). 이는 서해부터 동진하는 전선이 내륙에서 여름철 태양복사에 의하여 더욱 발달함을 의미한다. 같은 기간의 TRMM 강수량(3B42)에서도 유사한 분포를 보였다(Fig. 2c). 위성관측과 지상관측간의 강수량 상관은 약 0.8로 매우 유의적이었다(Fig. 2d). 지점 관측인 AWS와 면적평균(25km×25km)인 위성관측은 서로 독립적임을 고려할 때, 두 종류 자료의 정확도가 높은 것으로 추정된다.

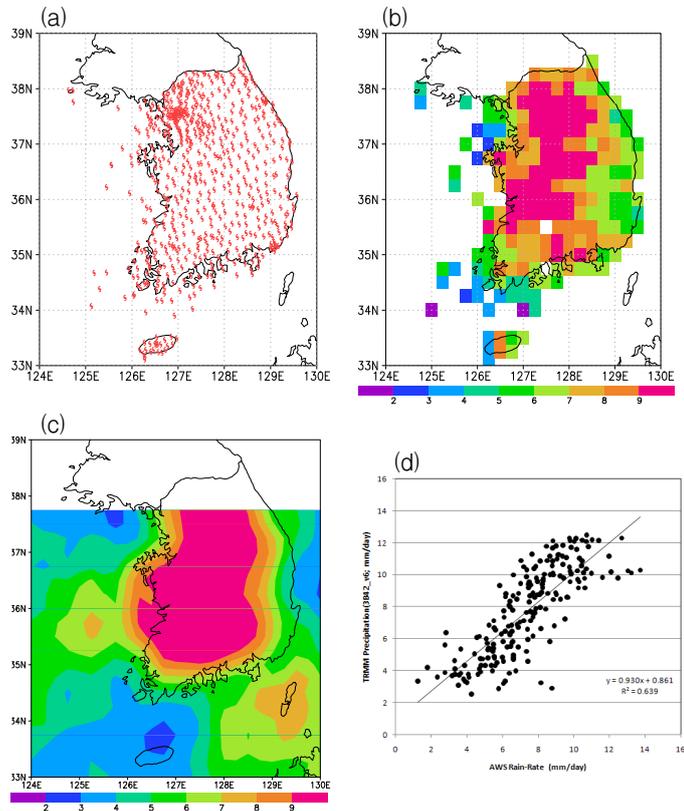


Fig. 2. (a) Location of 613 AWSs of KMA, (b) average AWS rain-rate (mm/day), (c) precipitation (mm/day) of TRMM 3B42 V6, and (d) scatter diagram in rain-rate of AWS vs TRMM 3B42 over the Korean peninsula for JJA 2005. The results in figs. 2b-d have been derived in a $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ grid.

Figure 3은 한반도에서 2005~2007년 6~9월 기간에 AWS 강수량(mm/day), PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), O_3 (ppb), NO_2 (ppb), SO_2 (ppb), 그리고 CO (ppb)의 빈도 분포를 보여준다. 이들 분포는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 격자 내의 평균값(%)으로 조사되었다. AWS 강수량은 20 mm/hr 이하에서 ~35%의 빈도분포를 보였고, 결측수는 3,576,628개로 약 65%이었다(Fig. 3a). 집중호우는 110~120 mm/hr, 150~160 mm/hr, 그리고 330~340 mm/hr 구간에서 각각 1개를 보였다. PM10은 50~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 전체 발생수에 대하여 약 12%의 빈도를 보였다(Fig. 3b). 미세먼지 고농도는 450~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 900~950 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 각각 1개 이었다.

Figures 4a-b는 2005~2007년 6~9월 기간에 한반도 부근에서 AWS 강수율과 PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 농도의 평균값에 대한 공간 분포를 보여준다. 강수량은 전국적으로 약 5 mm/day의 평균값을 보였다(Fig. 4a). 제주도, 중부 내륙, 그리고 영·호남 경계 지역이 9 mm/day 이상으로 여름철 다우 지역이었다. 반면에 영남 지역과 서해안 도서 지역에서는 강수량이 적어서 여름철 가뭄 대비가 필요하다. 미세먼지 농도는 27~57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 수도권과 영남 산업 지역에서 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높았다(Fig. 4b).

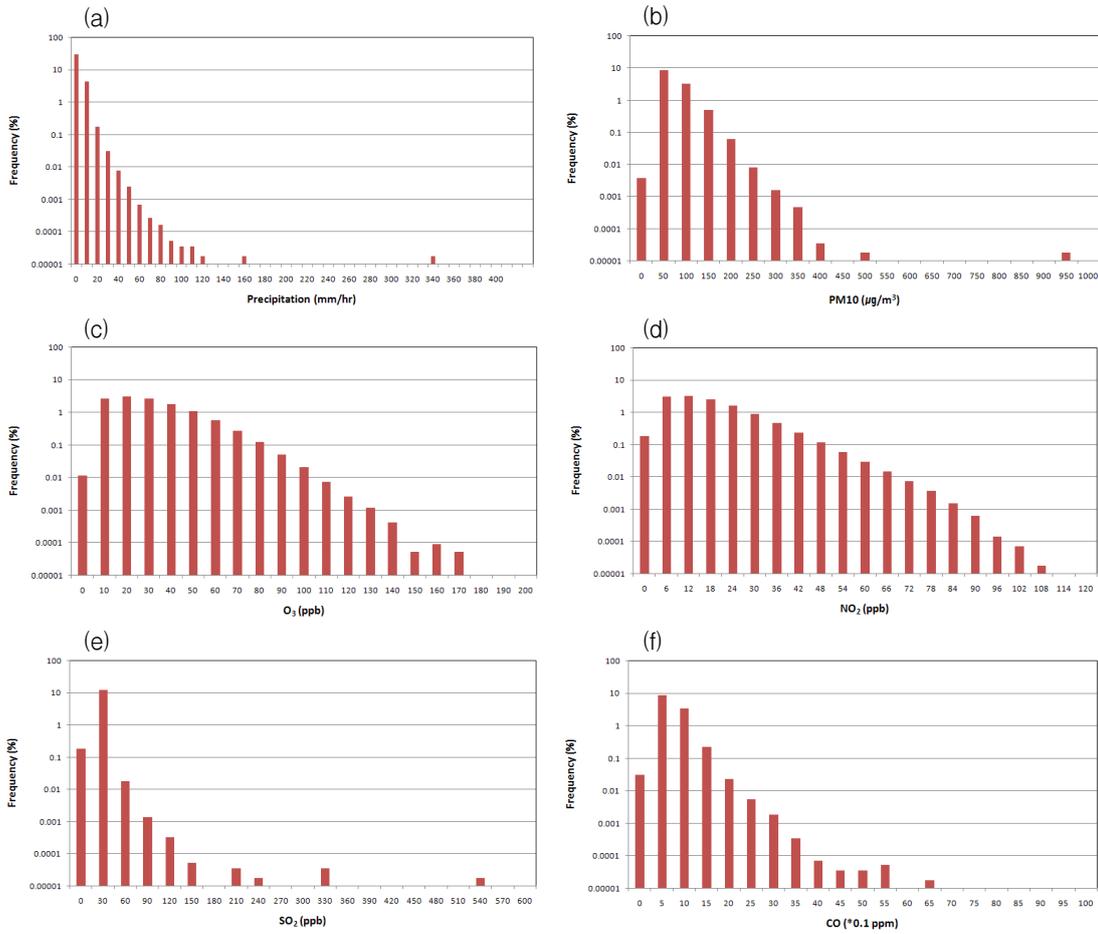


Fig. 3. Frequency distributions (%) of (a) AWS precipitation (mm/hr), (b) PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), (c) O3 (ppb), (d) NO2 (ppb), (e) SO2 (ppb), and (f) CO (0.1ppb) for June ~ September of the years 2005 ~ 2007. The Frequency in the ordinate was shown in the log10 scale.

일변화 분석에서 AWS 강수는 영동 및 경북 지역에서 이른 오전(2~8시)에, 그리고 다른 지역에서는 오후 늦게(16~22시) 주로 발생하였다(Fig. 5a). 다시 말해, 강수는 육지에서 늦은 오후에 대체로 발생하였으나, 영동 지역에서는 태백산맥 지형과 동풍의 영향으로 이른 오전에 발생하였다. 육지에서 여름철에 AWS 강수량의 16-22시의 일주기 특성은 유정문 등(2007)이 분석한 육지에서의 구름의 시간별 발생 빈도와 고도 특성의 결과와 일치한다. 주목할 만한 사항은 강수 일변화 분석에 중부 지방에서는 강수 동반 전선이 오후 3시부터 다음날 오전 4시까지 서해안에서 동해안으로 동진하는 형태를 잘 반영하는 데에 있다. 이러한 결과는 집중호우를 동반한 전선의 이동 상태를 어느 정도 대비할 수 있어서 약기상 예측에 도움을 줄 수 있다.

미세먼지는 전국적으로 오후에 비하여 오전(6~12시)에 주로 발생하였으며, 이러한 경향은 수도권 지역에서 뚜렷하였다(Fig. 5b). 이러한 결과는 여름철에 대기가 상대적으로 안정한 오전에 미세먼지가 지표부근에 많이 존재함을 보여준다. 대기오염과 강수의 일변화 주기 분석에서는 두 변수 간에 유의적인 상관관이 나타나지 않았다(Figs. 5a~b). 여름철 강수는 일반적으로 장마, 태풍 등의 영향을 받으므로, 대기오염에 의한 강수 효과를 분석하기 위해서는 이들 경우를 현재 연구에서 분리하는 것이 필요한 것으로 조사되었다.

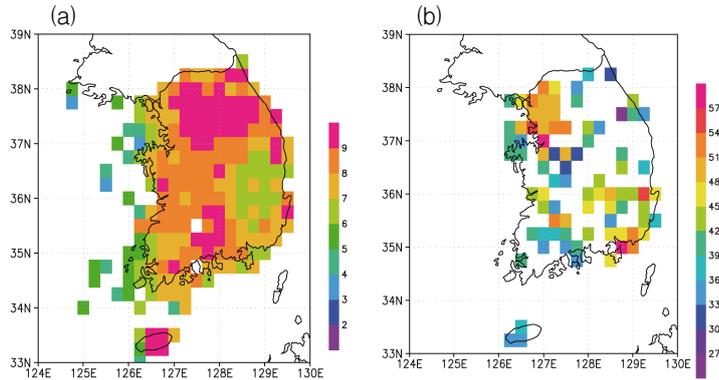


Fig. 4. Summer average of (a) AWS rain-rate (mm/day), and (b) PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) over the Korean peninsula for June~September of the years 2005~2007 in a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ grid.

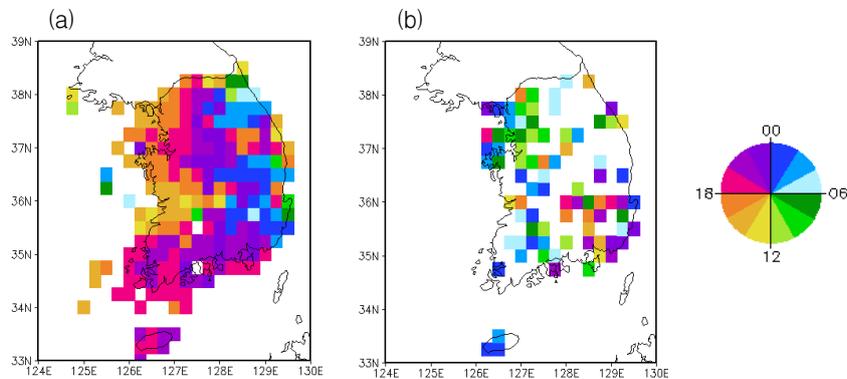


Fig. 5. Phase of diurnal cycle of (a) AWS rain-rate (mm/day), (b) PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) over the Korean peninsula for June~September of the years 2005~2007 in a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ grid.

4. 결론

본 연구에서는 2005~2007년 여름철 기간에 한반도 부근의 위성관측(TRMM) 강수량, 지상관측(AWS) 강수량과 대기오염 관측 자료를 이용하여 이들의 여름철 공간적 분포와 일주기 특성을 분석하였다. 이 기간의 AWS 평균 강수량은 전국적으로 5 mm/day 이상을 보였고, 제주도, 중부 내륙, 그리고 영·호남 경계 지역에서 9 mm/day 이상으로 많았다. PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 미세먼지의 평균 농도는 수도권과 영남의 산업 지역에서는 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높았다. 위성관측과 지상관측간의 강수량 상관은 약 0.8로 매우 유의적이었다. 지점 관측인 AWS와 면적평균 ($25\text{km} \times 25\text{km}$)인 위성관측 자료가 서로 독립적임을 고려할 때, 이들 자료의 정확도가 높은 것으로 추정되었다.

일주기 분석에서 미세먼지는 대기 안정도와 관련하여 수도권 지역에서 오전(6~12시)에, 그리고 영남 산업 지역에서는 오후 늦게 많이 발생하였다. AWS 강수량은 영동 및 경북 지역에서 이른 오전(2~8시)에, 그리고 다른 지역에서는 오후 늦게(16~22시) 대체로 발생하였다. 중부 지방의 강수 일변화 분석은 강수를 동반한 전선이 오후 3시에서 다음날 오전 4시까지 서해안에서 동해안으로 동진하는 형태를 잘 반영하였다. 이러한 결과는 집중호우를 동반한 전선의 이동을 어느 정도 예측할 수 있으므로 악기상 대비에 도움을 줄 수 있다. 일주기 분석에서 미세먼지와 강수 간에 뚜렷한 상관이 나타나지 않았다. 장차 연구에서 두 변수 간의 인과 관

계를 조사하기 위하여는 여름철 강수에 큰 영향을 주는 장마, 태풍 등의 효과를 배제하는 것이 필요한 것으로 조사되었다.

감사의 글

이 연구는 학술진흥재단 기초연구사업(2009-0073800)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

유정문, 이명인, 허영민, 이주은, 2007, TRMM 강수 레이더에서 조사된 한반도 부근의 폭풍우 고도. 한국기상학회 2007년도 춘계 학술대회 논문집, 4, 96-97.

Albrecht, B. A., 1989, Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. Science, 245, 1227-1230.

Bell, T. L., Yoo, J.-M., and Lee, M.-I., 2009, Note on the weekly cycle of storm heights over the southeast United States. Journal of Geophysical Research, 114, D15201, doi:10.1029/2009JD012041.

Twomey, S., 1974, Pollution and the planetary albedo. Atmospheric Environment, 8, 1251-1256.