

한반도 주변에서 MODIS와 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 에어로졸과 구름의 연관성 분석

An Analysis of Aerosol-Cloud Relationship Using MODIS and NCEP/NCAR Reanalysis Data around Korea

김 유 준 · 이 진 화 · 김 병 곤*

강릉원주대학교 대기환경과학과

(2010년 9월 15일 접수, 2010년 11월 17일 수정, 2011년 1월 3일 채택)

Yoo-Jun Kim, Jin-Hwa Lee and Byung-Gon Kim*

Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University

(Received 15 September 2010, revised 17 November 2010, accepted 3 January 2011)

Abstract

MODIS/Terra level 3 and NCEP/NCAR Reanalysis data from 2001 to 2008 have been analyzed to understand long-term aerosol and cloud optical properties, and their relationships around Korea. Interestingly, cloud fraction (CF) has the similar annual variation to aerosol optical depth (τ_a) without any temporal significant trend. Horizontal distributions of τ_a showed the substantial horizontal gradient from China to Korea, especially with the strong difference over the Yellow Sea, which could represent the evidence of the anthropogenic influence from China in the perspective of long-term average. Specifically the negative correlations between τ_a and liquid-phase cloud effective radius (r_e) were shown on the monthly-average basis, only in summer with significant associations over the Yellow Sea, but not in the other seasons and/or specific regions. Relationship between τ_a and CF for the low-level liquid-phase clouds exhibited the overall positive correlation, being consistent with cloud lifetime effect. Meanwhile static stability showed no deterministic relationships with τ_a as well as CF. The dependence of aerosol-cloud relationship on the meteorological conditions should be examined more in detail with the satellite remote sensing and reanalysis data.

Key words : Aerosol, Cloud fraction, Cloud lifetime effect, MODIS

1. 서 론

에어로졸-구름 상호작용은 여전히 기후변화를 예측하거나 복사강제력을 추정하는 데 있어 불확실성이

크기 때문에 전세계적으로 주목을 받고 있다(IPCC, 2007). 특히 에어로졸 및 구름의 짧은 체류시간, 구름 자체의 상대적으로 큰 변동성, 에어로졸의 물리·화학적 특성의 다양성 등을 고려할 때 세밀하고 통합적인 관측이 요구되어진다. 다른 관측적 제한은 에어로졸과 구름의 같은 지점에서 동시 관측(co-location)의 어려움에서 기인한다.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-640-2326, E-mail : bgk@gwnu.ac.kr

지상에서의 구름 원격관측은 제한된 지역에 국한되어 적용된다는 문제는 있지만 시간규모에서 고해상도의 자료를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 지상원격관측을 통해서 구름의 두께, 구름층의 위치, 구름 반사도 등의 거시적 특징과 함께 미세물리 특징으로는 레이더와 복사측정기를 이용하여 낮시간대에 구름광학특성을 얻을 수도 있다(Kim and Kwon, 2006). 위성을 이용한 구름 원격관측으로는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)를 이용한 방법이 있는데(King *et al.*, 2003; Platnick *et al.*, 2003), 적외 및 가시채널 자료를 종합하여 구름 물리 및 복사 특성을 판단하는 것이다. 구름광학두께(τ_c)와 구름방출 유효반경(r_e)을 전지구적으로 6개의 가시채널과 근적외채널을 이용하여 다양한 구름 미세물리 자료를 산출하고 있다.

지상원격탐사를 이용한 기존 연구를 살펴보면, Kim *et al.* (2003), Feingold *et al.* (2003) 등은 Atmospheric Radiation Measurement (ARM) 프로그램을 통해 관측한 지상 에어로졸 부하량(에어로졸의 빛 산란계수 혹은 빛 소산계수)과 원격탐사로부터 추정된 구름의 광학적 특징(LWP: Liquid Water Path, τ_c , r_e)과의 연관성을 분석한 바 있다. 또한 Kim *et al.* (2003)의 연구결과를 3년간(1999~2001년)으로 확장하고 유사한 방법으로 기상조건에 따른 에어로졸의 구름 미세물리 과정에 미치는 영향을 분석한 연구결과도 있다(Kim *et al.*, 2008). Jin *et al.* (2005)은 MODIS 위성 원격관측 자료를 통해 미국 휴스턴 풍하측 지역에서 인위적인 에어로졸의 영향으로 구름방출 유효반경이 작아지는 것을 밝힌 바 있으며, Matsui *et al.* (2006)은 위성(MODIS), Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transportation (GOCART) 모델 등을 통해 해양성 하층운의 전구 및 지역규모에 있어서 에어로졸-구름 연관성을 통계적으로 정량화하였다. 또한 Mukai *et al.* (2008)은 동아시아 지역에서 General Circulation Model (GCM)을 이용하여 산업혁명 이후 에어로졸에 의한 지표 하향 단파 복사강제력의 감소를 모의하였으며, 구름장의 변화는 인위적인 에어로졸과 온실가스(GHGs: Greenhouse Gases) 영향을 모두 받는다고 주장하였다. 인접 국가 일본에서는 최근 2008년 봄철에 일본 케이프 헤도 섬에서 구름레이더를 이용하여 구름규모에서 에어로졸과 구름 상호작용을 분석하였는데(Pandithurai *et al.*, 2009), 미세 에어로졸이 약 30%

증가함에 따라 구름방출 크기가 약 15% 정도 감소한다는 것을 확인하였다. 위성을 통한 동북아시아의 에어로졸 간접효과 연구는 Kawamoto *et al.* (2006)이 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 위성자료를 이용하여 에어로졸 증가에 따른 구름방출 유효반경이 감소하는 결과(Twomey effect)를 확인한 바 있다.

동북아시아 지역에서는 최근 빈번하게 발생하고 있는 황사나 중국의 산업화로 인한 오염물질의 증가로 지역적인 기후변화에 상당한 영향을 미칠 것으로 추정되고 있기 때문에 중요한 연구주제로 부각되고 있으며 국내에서도 기초연구들이 진행되고 있는 상황이다(Kim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007). 하지만 이러한 연구들은 에어로졸 광학특성 등 직접효과 중심의 연구에 주안점을 두었을 뿐 동북아시아 지역에서 에어로졸-구름 상호 작용에 관한 연구결과는 여전히 미흡하다. 또한 에어로졸-기후관련 메커니즘의 관측 및 분석 자체의 어려움이나 에어로졸과 구름관련 자료들의 부족으로 인한 동북아시아 지역의 장기적인 기후변화 예측의 불확실성을 줄이기 위해서 에어로졸-구름 연관성에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 향후 동북아시아에서 에어로졸-구름 상호작용 기반 연구를 위하여 주로 액상 구름과 에어로졸 광학특성을 지상 및 위성원격관측(AERONET: Aerosol Robotic Network 및 MODIS)을 통해 이해하고자 하였다. 특히 한반도를 중심으로 중국의 산둥반도, 황해 상공, 한반도 내륙, 동해 상공 등 지역적인 차이와 계절적인 에어로졸 및 구름의 광학특성의 변동을 살펴보고자 하며, NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 이용하여 주변 기상 상태에 따른 에어로졸과 구름의 연관성 등을 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 전지구적인 분포를 파악하는 데 용이하며 지상관측의 한계를 보완해주는 이점이 있는 MODIS 위성 원격관측 자료를 주로 활용하였다. 그리고 중국으로부터 장거리 이동되는 오염물질의 영향에 따른 구름 변동을 살펴보기 위하여 그림 1과 같

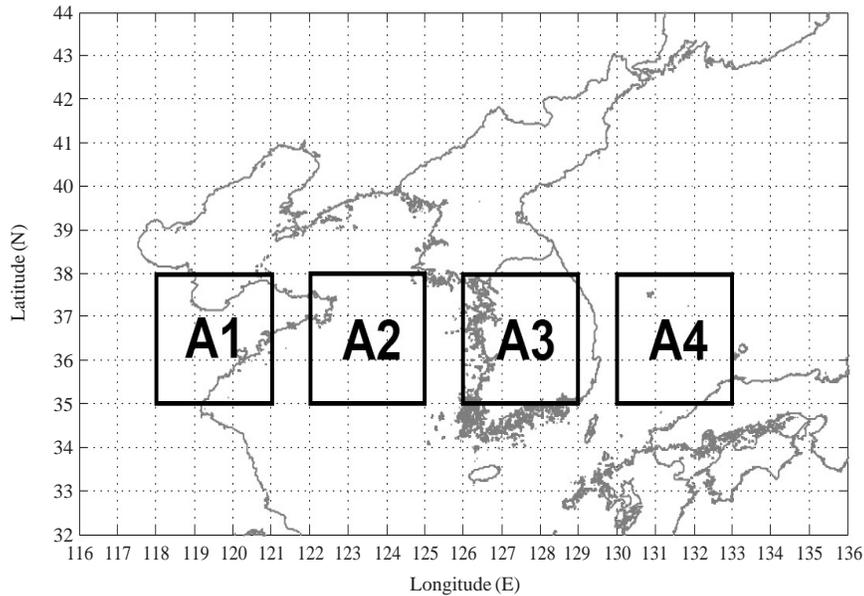


Fig. 1. The map of analysis domain including A1, A2, A3, and A4.

이 한반도를 중심으로 중국 산둥반도로부터 한반도 동해까지 산둥반도(A1: 118~121E & 35~38N), 황해 상공(A2: 122~125E & 35~38N), 한반도 내륙(A3: 126~129E & 35~38N), 동해 상공(A4: 130~133E & 35~38N) 등 4개 영역으로 나눠 각각의 구름 및 에어로졸 광학특성을 비교하였다. 자료는 Jin *et al.* (2005)에서 사용했던 Terra위성에 탑재된 MODIS 관측자료를 1° × 1°로 재계산한 에어로졸 광학두께 (τ_a), Ångström 지수 (\AA), 구름광학두께 (τ_c), 구름방울 유효 반경 (r_e), 운량(CF), 운정 기압(Cloud Top Pressure: CTP), 운정 온도(Cloud Top Temperature: CTT) 등 2001~2008년까지의 장기간 일자료를 사용하였다.

또한 본 연구의 3.3과 3.4절에 제시하게 될 에어로졸과 운량의 연관성 분석을 위해서는 구름의 변동성이 작은 경우 등의 특수한 조건으로 제한하는 것이 필요하다. 따라서 하층의 액상구름으로 한정하기 위해서 운정 기압(CTP)이 700 hPa 이상이고 운정 온도(CTT)가 273 K 이상인 조건의 구름만을 선별하여 에어로졸과 구름물리 특성을 비교하였다.

에어로졸 광학두께 (τ_a)는 대기중에 부유하는 에어로졸이 태양복사를 얼마나 산란 또는 흡수하여 태양 빛을 감쇄시키는지를 정량화한 인자로서, 에어로졸 복사효과를 산정하거나 위성에서 에어로졸 부하량을

추정하는 등에 필요한 중요한 변수이다. τ_a 는 대기 투과도의 역수에 비례하게 되는데, 대기중에 에어로졸 농도가 증가하여 에어로졸 부하량이 많아지면, τ_a 가 증가하고 결국 대기의 투과도는 감소하게 된다. 이는 태양복사를 산란 또는 반사하여 지상에 도달하는 에너지를 감소시키게 되는 것이다.

$$\tau_a = \int_r \int_z Q_{e,\lambda} \pi r^2 N_a(r, z) dr dz \quad (1)$$

여기서 $Q_{e,\lambda}$ 는 파장 λ 에 대한 빛의 소산(extinction) 효율을 의미하고, $N_a(r, z)$ 는 에어로졸의 개수농도, r 은 에어로졸의 반지름, z 는 연직고도를 의미한다. Ångström 지수 (\AA)는 광학두께의 파장대별 의존도를 의미하며 에어로졸 크기를 대변하는 지수로서 에어로졸 크기가 증가할수록 작아진다.

$$\text{\AA} = - \frac{\ln \tau_{a,\lambda_1} / \tau_{a,\lambda_2}}{\ln \lambda_1 / \lambda_2} \quad (2)$$

여기서 λ_1 (440, 550 nm), λ_2 (660, 865 nm)는 서로 다른 두 파장대를 의미하며, 440/660 nm는 육지, 550/865 nm는 해상에서 각각 사용되는 파장이다. 그리고 본 연구에서는 선행연구(Suzuki *et al.*, 2008; Matsui *et al.*, 2006; Nakajima *et al.*, 2001)에서 많이 활용되었던 에어로졸 지수(AI: Aerosol Index)를 아래의 식

과 같이 계산하여 분석하였다.

$$AI = \tau_a \times \mathring{A} \quad (3)$$

즉, AI는 에어로졸의 부하량과 입자크기를 함께 고려한 위성 원격에서 얻어지는 에어로졸을 대변하는 지수라고 할 수 있다.

구름광학변수의 관측은 파장별 반사도를 이용한 Look up 테이블(조건표)을 통해 우선적으로 구름광학두께 (τ_c), 구름방울 유효반경 (r_e)을 추정하게 되고, 소산효율을 고려한 Mie 이론에 근거하여 다음 Min and Harrison (1996) 식과 같이 연직으로 누적된 구름수함량(LWP)을 계산하였다.

$$LWP \cong \frac{2}{3} \rho_w r_e \tau_c \quad (4)$$

여기서 ρ_w 는 물의 밀도이다. 또한 구름광학두께 (τ_c)는 빛의 소산 효율(Q_e), 구름방울 단면적, 구름방울

개수농도에 의해 결정되어진다.

한편 한반도 주변에서 기상상태에 따른 에어로졸과 구름 상호작용 분석을 위해 같은 기간 동안 NCEP/NCAR 재분석 일자료 중 1,000hPa와 700hPa에서의 기온(T) 등을 활용하였는데, 공간적인 해상도가 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 로 MODIS 자료와 공간적으로 불일치하므로 $1^\circ \times 1^\circ$ 로 내삽하여 같은 영역에서 비교가 이루어질 수 있도록 하였다.

대표적 지상원격관측인 연직 에어로졸 자동 탐사 네트워크(AERONET) 자료를 이용하여 MODIS τ_a 를 비교·검증하였다. 우리나라 대표 AERONET 관측소인 서울, 광주, 안면, 고산의 4개 지점에서 τ_a 와 같은 격자의 MODIS τ_a 자료를 비교하였다. MODIS τ_a 가 550nm의 파장의 값이고, AERONET은 440nm와 670nm 파장이기 때문에 AERONET 두 파장 값을 이용한 Ångström 관계식의 내삽을 통해 550nm 파장에 해당하는 τ_a 를 산출하여 비교하였다(그림 2).

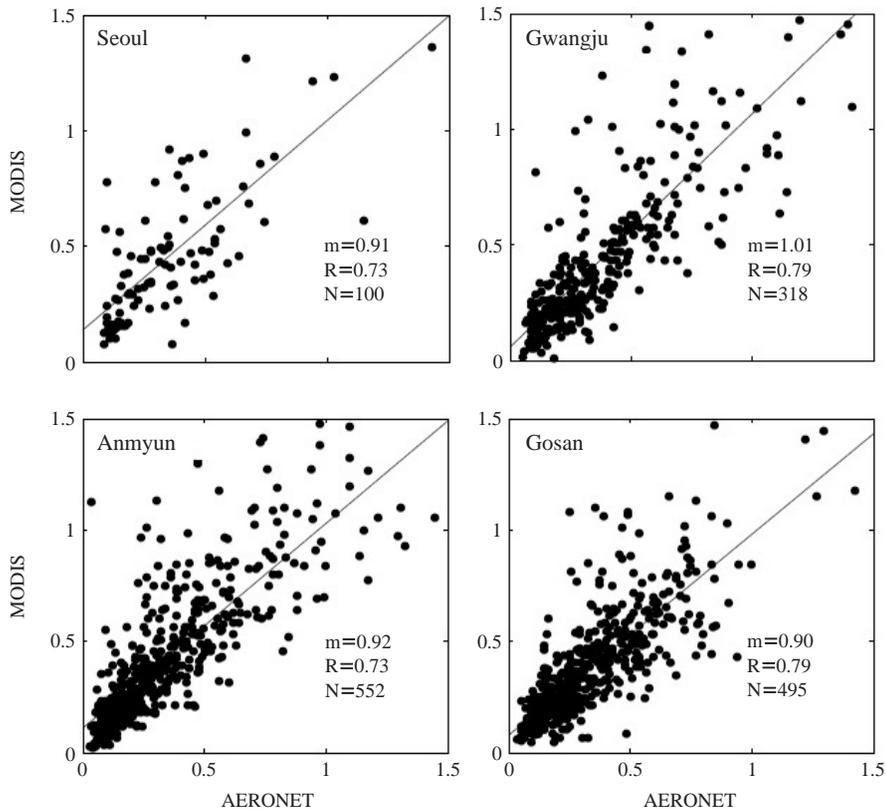


Fig. 2. Comparisons between τ_a from MODIS and AERONET at Seoul, Gwangju, Anmyun, and Gosan.

AERONET과 MODIS τ_a 간의 기울기가 0.9~1.01이고 상관계수가 0.73~0.79로 높게 나타났다. 최근 연구에 의하면 MODIS τ_a 의 동북아시아 적용에 일부 제한 사항이 있는 것으로 보고되고 있지만 장기간의 평균적인 τ_a 의 증감 경향 및 상대적인 공간분포 분석 등에는 적용 가능할 것으로 판단된다(Engström and Ekman, 2010; Yoon *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2007; Matsui *et al.*, 2006).

3. 결과 및 고찰

3.1 경년변화 및 연변화

우선 한반도 주변에서 에어로졸 및 구름의 장기간 경년변화 경향을 파악하기 위하여 MODIS 에어로졸

광학두께 (τ_a)와 운량(Cloud Fraction: CF)의 A1~A4 영역별로 2001~2008 기간 동안 경년변화를 그림 3과 4에 제시하였다. 먼저 A1의 τ_a 평균이 0.73으로 다른 영역보다 약 1.3~1.6배 수준이었으며, 상위 분위수(95%) 역시 1.78로 가장 높은 값을 보였다. τ_a 의 box plot 변동폭(75-25%)을 보면 A1, A2(0.63, 0.45)가 A3, A4(0.37, 0.27) 영역보다 상대적으로 크게 나타났다. 반면 CF의 평균값은 동해 상공(A4)이 0.9로 가장 높았는데, 나중에 제시하는 τ_a 의 장기간 평균 수평분포에서 겨울철에 높게 나타나는 경향때문으로 추정된다. 그림 3과 4를 비교해 보면 전반적으로 4개 영역 모두 평균 τ_a 의 변화와 함께 CF도 유사한 경년변화 경향을 나타내는 특징을 보였다. 이는 에어로졸 부하량이 많아짐에 따라 구름의 체류시간이 증가하여(Albrecht, 1989) 운량과의 연관성이 있음을 암시

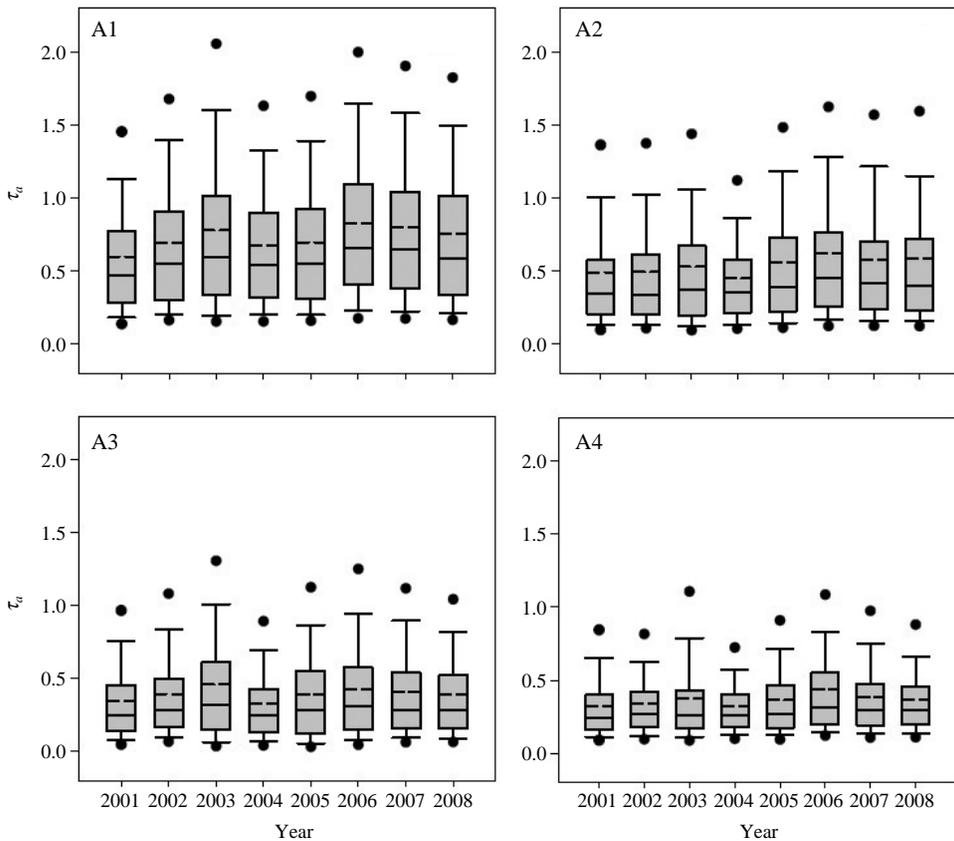


Fig. 3. Annual variations of box plot (1%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, 99%) of τ_a in the 4 regions. The dashed line denotes the mean value and solid line indicates median.

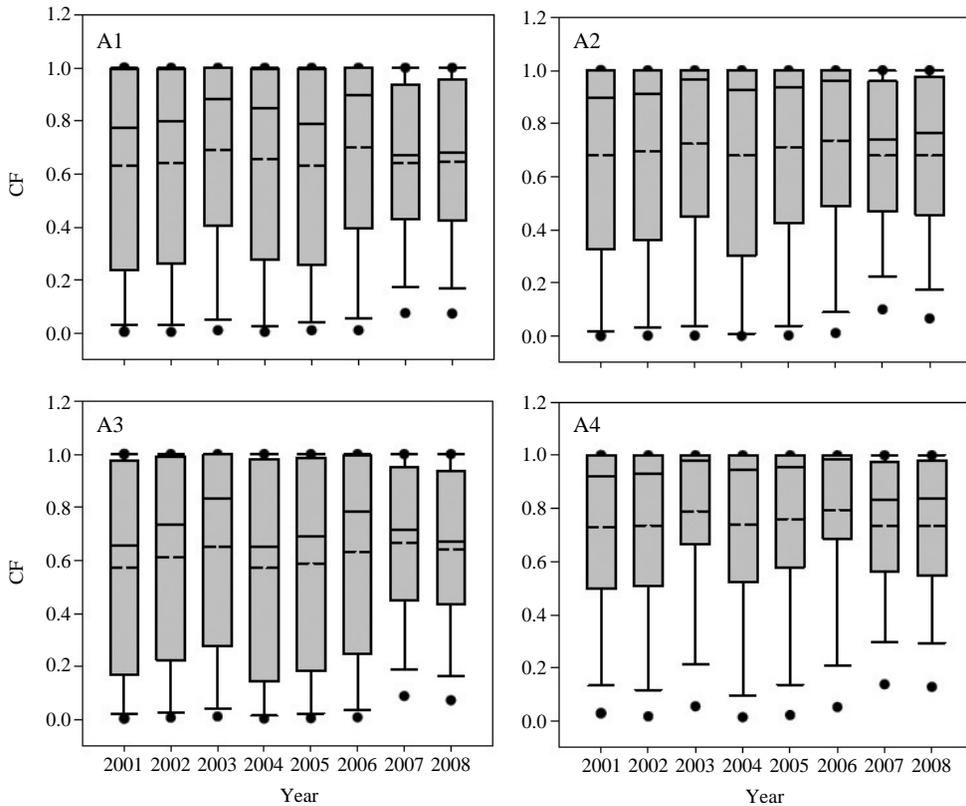


Fig. 4. Annual variations of box plot (1%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, 99%) of CF in the 4 regions. The plot follows the same manner of Fig. 3.

하는 결과이다. 그러나 위성을 통한 8년간의 짧은 기간이기 때문에 한반도 주변에서 τ_a 와 CF의 장기간 경년변화에서 뚜렷한 증가 또는 감소 경향은 나타나지 않았다.

한편 τ_a , τ_c 의 연변화 경향은 통계적인 값을 정리하여 부록 1과 부록 2에 각각 제시하였는데, 우선 τ_a 의 연변화 경향에서 다른 선행연구(Kim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007)의 결과와 유사하게 초여름에 광화학 반응으로 인한 미세 에어로졸 증가에 의해 τ_a 가 전반적으로 높게 나타났다. 중국 산둥반도(A1)에서 한반도 내륙(A3)까지는 평균(1.16, 0.88, 0.74)과 중앙값(0.99, 0.71, 0.74) 모두 6월에 가장 높은 값을 보였으나 동해 상공(A4)은 뚜렷하게 높은 값을 보이지 않았다. 또한 장마가 끝난 후인 늦여름에 갑자기 낮아지는 경향을 보였는데 이는 강수세정효과 때문으로 추정되며, 특히 A2(황해 상공)와 A3(한반도 내륙)

영역에서 더욱 뚜렷한 특징을 보였다. 반면 τ_c 의 연변화를 보면 다른 계절에 비해 여름철(특히 7월) 내륙(A1, A3) 지역의 평균값(14.3, 19.9)이 가장 높게 나타났으며, 겨울철(특히 1월)에는 동해 상공(A4) 영역의 평균값(18.5)이 다른 계절 및 다른 영역에 비해 큰 값을 보였다.

또한 한반도 주변에서 에어로졸의 크기분포에 대한 계절 변화를 이해하기 위해 옹스트롬 지수(\AA)의 연변화를 살펴보았다. 그 결과 한반도 내륙(A3) 영역의 한여름(7, 8월) 평균값이 뚜렷하게 높은 수치(1.06, 1.31)를 보였으며, 봄철(3, 4월)에 변동폭은 있으나 상대적으로 낮은 값(0.79, 0.80)을 보였다. 이는 여름철 강한 일사로 인한 미세입자의 증가, 봄철 중국의 영향으로 인해 조대입자의 증가와 연관있는 것으로 판단된다. 또한 겨울철 A1(중국 내륙) 영역의 \AA 가 변동폭(0.05~0.07)이 매우 적으며 낮은 평균값(0.64)

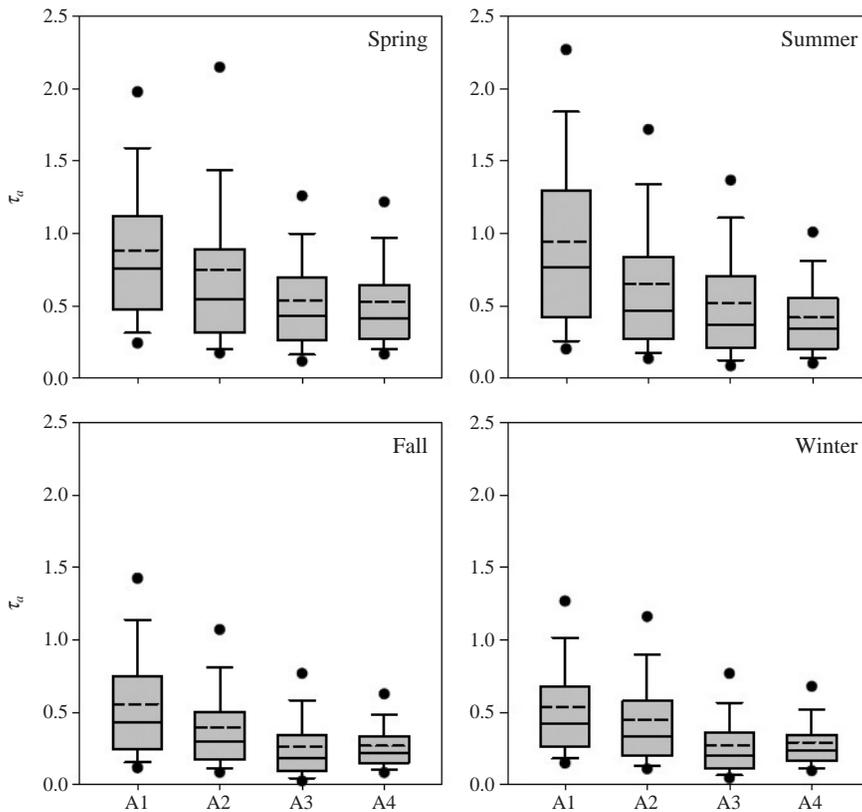


Fig. 5. Box plots of τ_a over each region (A1, A2, A3 and A4) with the different seasons. The plot follows the same manner of Fig. 3.

Table 1. Percentiles of τ_a obtained at 4 regions (A1, A2, A3, A4) for each season of the period of 2001 ~ 2008.

Spring							Summer						
Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
A1	1.97	1.12	0.88	0.76	0.48	0.25	A1	2.27	1.29	0.94	0.77	0.43	0.20
A2	2.13	0.89	0.75	0.55	0.32	0.17	A2	1.72	0.84	0.65	0.47	0.27	0.14
A3	1.26	0.70	0.53	0.43	0.27	0.12	A3	1.37	0.71	0.52	0.37	0.21	0.09
A4	1.22	0.65	0.53	0.42	0.28	0.17	A4	1.01	0.55	0.42	0.34	0.21	0.10
Fall							Winter						
Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
A1	1.42	0.75	0.56	0.43	0.25	0.12	A1	1.27	0.68	0.53	0.42	0.26	0.15
A2	1.07	0.50	0.40	0.30	0.18	0.09	A2	1.16	0.58	0.45	0.34	0.20	0.11
A3	0.77	0.34	0.26	0.18	0.10	0.03	A3	0.77	0.36	0.28	0.20	0.11	0.05
A4	0.63	0.33	0.27	0.22	0.15	0.08	A4	0.68	0.35	0.29	0.23	0.16	0.10

을 나타냈다. 그리고 해양(A2, A4) 영역에서는 두 영역 모두 유사한 계절 변동을 하면서 여름철(8월)에

최대값(1.66, 1.73)을 보였으나 내륙(A1, A3) 영역과의 연관성은 확인할 수 없었다.

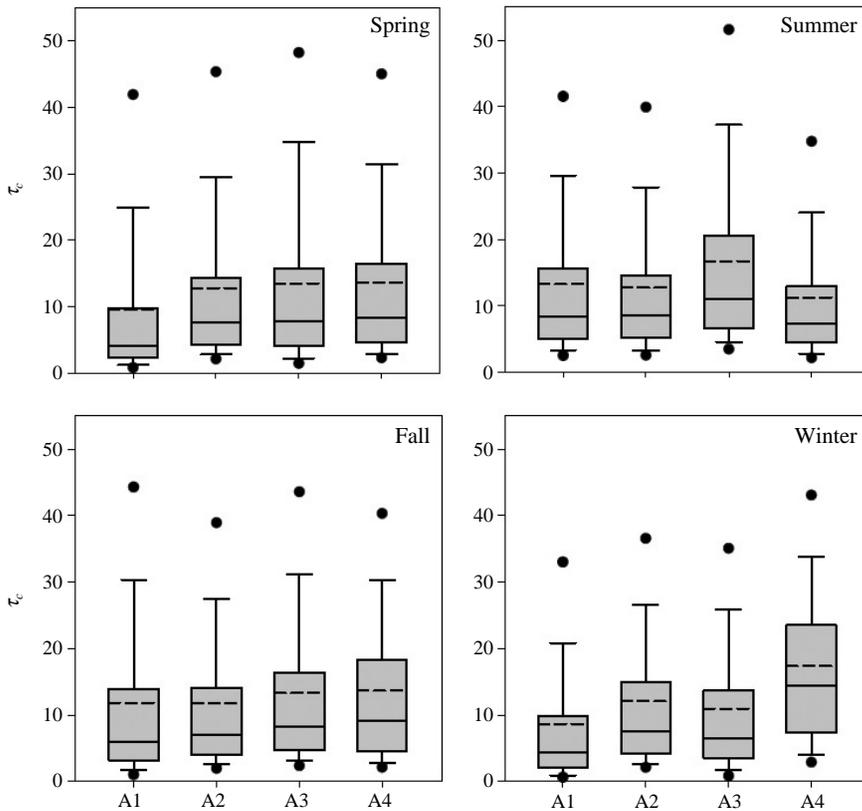


Fig. 6. Box plots of τ_c over each region (A1, A2, A3 and A4) with the different seasons. The plot follows the same manner of Fig. 3.

Table 2. Percentiles of τ_c obtained at 4 regions (A1, A2, A3, A4) for each season of the period of 2001 ~ 2008.

Spring							Summer						
Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
A1	41.80	9.75	9.51	4.08	2.27	0.81	A1	41.47	15.53	13.25	8.45	5.08	2.50
A2	45.18	14.34	12.75	7.67	4.26	2.10	A2	39.87	14.63	12.73	8.51	5.16	2.58
A3	48.16	15.62	13.51	7.74	4.06	1.43	A3	51.56	20.51	16.71	11.01	6.69	3.48
A4	44.95	16.45	13.59	8.31	4.60	2.28	A4	34.73	12.95	11.23	7.37	4.43	2.18

Fall							Winter						
Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Regions	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
A1	44.27	13.94	11.85	5.91	3.15	1.01	A1	33.01	9.80	8.62	4.35	2.07	0.61
A2	38.88	14.06	11.77	7.05	4.04	1.95	A2	36.55	14.98	12.03	7.60	4.15	2.09
A3	43.56	16.40	13.32	8.18	4.71	2.35	A3	34.98	13.67	10.98	6.55	3.49	0.83
A4	40.27	18.21	13.66	9.14	4.60	2.11	A4	43.07	23.52	17.35	14.40	7.31	2.88

3.2 수평분포

우리나라는 다양한 에어로졸의 배출 지역인 중국

의 풍하측 지역에 위치하고 있기 때문에 에어로졸 부하량을 대변하는 τ_c 역시 공간적으로 차이가 있을 것

으로 생각된다. 계절별로 τ_a 의 장기간(2001~2008) 영역별 백분위수(Percentiles)를 그림 5와 표 1에 제시하였다. 전 계절에 걸쳐 중국 산둥반도에서 한반도 내륙까지 서에서 동으로 수평경도가 뚜렷한 것을 확인할 수 있었으며, 표 1에서도 보여주듯이 황해상(A2) 중심으로 τ_a 평균 차이(0.13~0.22)가 크게 나타났는데 이는 한반도 상공보다 황해 상공의 에어로졸 부하량이 기후학적 계절 평균 관점에서 높다는 것을 의미하며 황해 상공이 중국의 풍하측 지역으로 인위적인 영향을 항상 받고 있음을 뜻한다.

또한 입자의 크기를 대변하는 \AA 의 수평분포와 영역별 백분위수를 보면 여름철 한반도 내륙(A3)이 가장 크고 봄철 중국 내륙(A1) 영역에서 대체적으로 낮은 값을 보였다. 이러한 특징은 앞서 3.1절에서도 언급하였듯이 여름철의 한반도 내륙의 광화학 반응으로 인한 미세입자 증가와 봄철 중국 내륙의 황사로 인한 조대입자 에어로졸 증가의 영향일 것이라고 판단된다. 특히 \AA 의 수평분포에서 여름과 겨울철의 계절적인 차이를 더욱 뚜렷이 볼 수 있었고, 백분위수의 평균을 통해 전반적으로 황해 상공(A2)이 동해 상공(A4)보다 입자 크기가 작다는 것을 확인할 수 있었다.

한편 τ_c 의 영역별 백분위수를 분석한 결과(그림 6, 표 2) 각 영역에서 에어로졸과의 연관성은 확인할 수 없었다. 그러나 가장 뚜렷한 특징으로는 여름철 한반도 내륙(A3)과 겨울철 동해 상공(A4)의 τ_c 가 각각 평균(16.71, 17.35)과 중앙값(11.01, 14.40) 모두 다른 영역에 비해 큰 값을 보였다. 95%의 상위 분위수 역시 다른 영역에 비해 각각 1.2~1.5, 1.2~1.3배 수준으로 크게 나타났다. 이것은 여름철 한반도 내륙의 빈번하고 강한 대류현상과 겨울철 따뜻한 동해수온과 연관지어 설명될 수 있다(국립해양조사원 연안수온 통계자료, 미국 국립해양대기청 해수면 온도 위성영상). 이러한 현상은 구름 특성이 기상이나 지역적인 기후 변동성에 일차적으로 영향을 받는다는 것을 제시한 결과이기도 하다.

3.3 월평균 τ_a 와 r_e 의 비교

에어로졸이 구름방울 크기에 어떻게 영향을 주는지를 장기적인 월평균 관점에서 살펴보았다. 전체 계절에 대해 각 영역별(A1~A4) τ_a 와 r_e 의 일평균자료를 월평균하여 상호 비교하였으며, 그 중 여름과 겨울철의 산포도(scatterplot)를 그림 7에 제시하였다. 전반적으로 두 변수 간의 상관성이 뚜렷하지 않았지만 여름철 황해상(A2)에서 r^2 (0.26)가 다른 영역에 비해 가장 유의한 수준의 음의 상관성을 보였다. 이는 에어로졸-구름 상호작용의 계절적인 의존도가 크다는 점을 시사하고 있다. 하지만 다른 계절에 대해서는 에어로졸과 구름방울 크기와의 뚜렷한 연관성을 확인할 수 없었다.

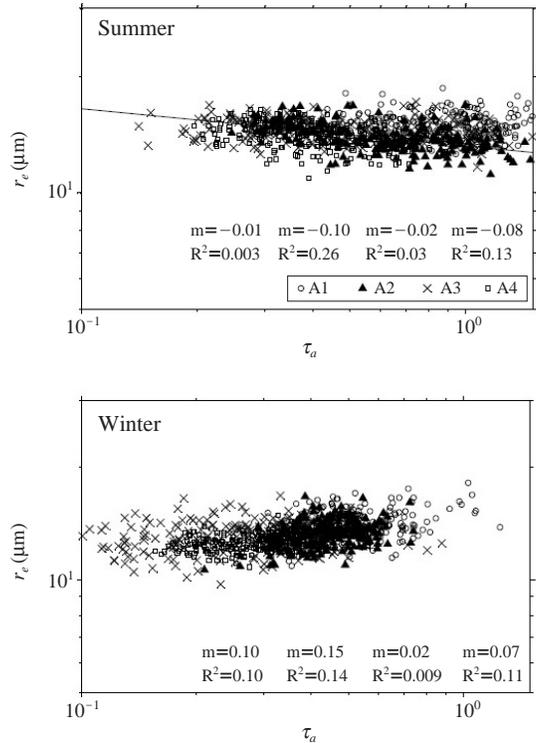


Fig. 7. Comparisons of r_e with τ_a on the monthly basis for the different regions in summer (upper panel) and winter (lower panel), respectively. Data for each region is distinguished by symbol type.

에어로졸과 구름 연관성 분석을 위해서는 각각의 변동성에 대한 이해가 필요하다. 그래서 에어로졸과 구름의 상대적인 변동성(Relative Variability: RV)을 다음 식의 방법에 따라 계산해 보았다.

$$RV_x = \frac{x_{75\%} - x_{25\%}}{x_{50\%}} \quad (5)$$

여기서 x_q 는 x 의 q 백분위수를 의미한다. 참고로 RV는

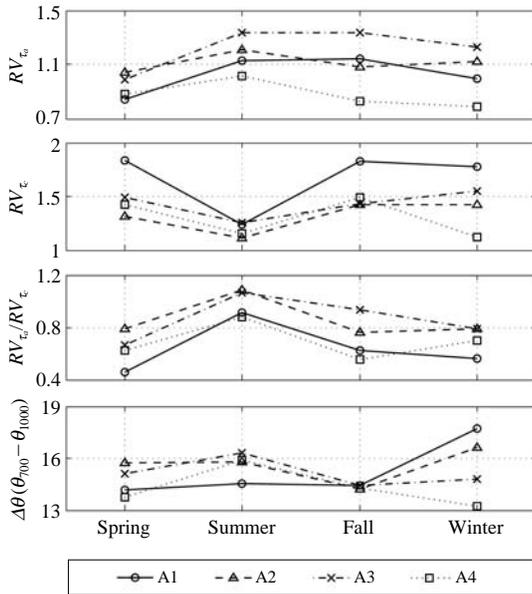


Fig. 8. Relative variability (RV) of τ_a and τ_c , the ratio of both RV, and $\Delta\theta$ for each season and each region.

x의 변동 폭(75-25%)을 평균으로 나눴으로써 정규화된 interquartile range를 의미한다. 또한 구름 변동성에 대한 에어로졸 변동성의 상대적인 비(RV_{τ_c}/RV_{τ_a})를 RV_{τ_a} , RV_{τ_c} 와 함께 그림 8에 제시하였다. 추가적으로 대기 안정도의 에어로졸과 구름 특성과의 연관성을 알아보기 위하여 정적 안정도($\Delta\theta$)를 700 hPa, 1,000 hPa 고도 각각의 온도(θ) 값을 구한 후 그 차이($\theta_{700} - \theta_{1000}$)로 정의하였다. 여기서 온위는 어떤 고도의 공기를 건조단열적으로 이동시켰을 때의 온도를 의미한다. 우선 τ_c 의 상대적인 변동성(RV_{τ_c})이 여름철 A2 영역에서 전 영역과 전체 기간에 비해 가장 낮은(1.1) 반면에 τ_a 의 상대적 변동성(RV_{τ_a})은 여름철이 다른 계절에 비해 큰 것을 알 수 있었다. 또한 안정도 역시 겨울철 A1, A2 영역을 제외하고는 전반적으로 여름철이 상대적으로 높은 값을 보였다. 즉, 에어로졸 변동성이 상대적으로 크고 안정도가 상대적으로 강한 여름철에 황해 상공(A2) 영역의 구름 자체 변동성이 작은 조건에서 에어로졸과 구름 미세물리 특성 간의 연관성이 크게 나타난 것으로 생각된다. 이는 중국의 에어로졸 변동이 황해 상공에서 구름특성을 변화시켜 한반도 지역기후 변동을 초래할 가능성이 있음을 암시한다.

3.4 에어로졸과 운량의 연관성

한반도 주변에서 MODIS 분석결과 앞서 3.3절에서 언급하였듯이 계절별로는 여름철이, 지역구분으로는 황해 상공에서 에어로졸과 구름 연관성이 크게 나타나는 등 지역별·계절별 에어로졸 간접효과와 중요도가 다르게 나타나고 있다. 하지만 분석 자체가 월평균 관점에서 이루어졌기 때문에 에어로졸 증가에 따른 구름방울 유효반경(r_e)이 작아지는 등의 구름 미세물리(microphysical) 관점의 분석에는 시·공간적인 규모 차이의 한계가 있을 수 있다. 고로 위성 원격관측을 통한 에어로졸 간접효과 분석은 에어로졸이 구름의 운량 증가 및 LWP에 주는 영향을 파악하는 등 에어로졸 2차 간접효과(구름의 lifetime 효과) 중심의 거시적(macroscopic) 비교 방법이 필요하다.

우선 MODIS 위성을 통해 산출되어진 τ_a 와 CF 일 자료 중 2001~2008 기간 동안 τ_a 를 구간별로 나누어 같은 격자에 해당되는 CF 값을 선별하여 평균과 표준편차를 그림 9와 같이 제시하였다(Kawamoto *et al.*, 2006; Breon *et al.*, 2002; Nakajima *et al.*, 2001). 또한 앞서 연구 방법에서도 언급하였듯이 하층의 액상구름으로 한정하기 위해서 운정 기압(CTP)이 700 hPa 이상(대략 해발고도 3 km 이하)이고 운정 온도(CTT)가 273 K 이상인 조건의 구름만을 선별하였다.

연평균 관점에서 각 영역별 τ_a 가 증가함에 따라 CF도 증가하는 경향을 보였는데, 특히 황해 상공(A2) 영역에서는 계절과 관계없이 τ_a 와 CF의 양의 상관성이 가장 뚜렷하게 나타나는 특징을 보였다. 이는 앞서 경년변화 경향에서도 볼 수 있듯이 일관성 있는 에어로졸 간접효과와 증거로서 한반도 주변에서 에어로졸과 구름의 연관성을 확인할 수 있었다. 동해 상공(A4)에서는 높은 τ_a 구간(0.8 이상)에서 CF와의 기울기가 완만해지는 특징을 보였으며, 계절적으로는 가을철이 τ_a 증가에 따른 CF 증가의 경향성이 다른 계절에 비해 뚜렷하게 나타났다. 한편 에어로졸 지수(AI)와 CF의 상관성 비교에서도 τ_a 와 마찬가지로 양의 상관성을 잘 확인할 수 있었다. τ_a 와 CF, AI와 CF 간의 연관성의 통계적 유의성을 검토하기 위하여 p값을 계산한 결과 계절에 상관없이 모두 0.05 이하로 나타나 두 변수 간의 선행적인 양의 상관성이 모두 약 5% 유의수준에서 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

에어로졸(τ_a , AI)과 LWP의 비교에서는 예상했던 것과는 달리 에어로졸 증가에 따른 구름 수함량의

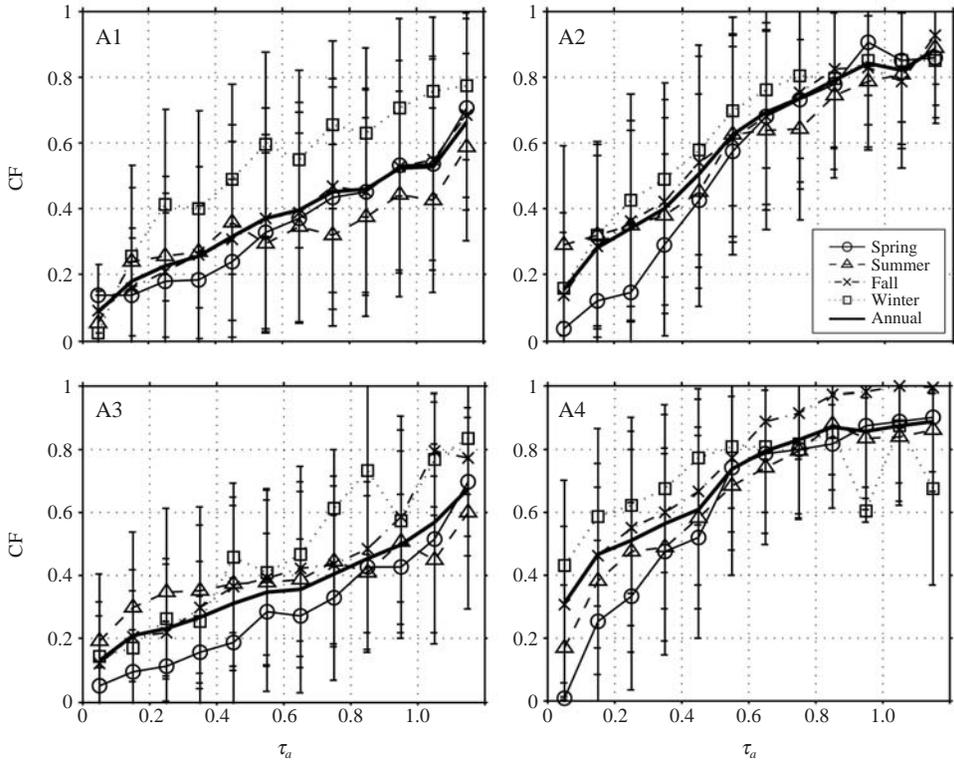


Fig. 9. Relationship between aerosol optical depth (τ_a) and cloud fraction (CF) over each region (A1, A2, A3 and A4) with the different seasons on low-level (CTP > 700 hPa) liquid phase (CTT > 273 K) clouds.

증가/감소하는 경향은 확인할 수 없었다. 기존의 연구를 살펴보면, Sekiguchi *et al.* (2003)과 Quaas *et al.* (2004)은 에어로졸과 LWP의 양의 상관성을 확인한 바 있으며, 반대로 Matsui *et al.* (2006)은 에어로졸 지수(AI)의 증가에 따라 LWP가 감소하는 경향을 관측을 통해 밝힌 바 있다. 이러한 음의 연관성에 관한 가능성을 빗방울 세정 효과(Suzuki *et al.*, 2004) 뿐만 아니라 준 직접효과(Hansen *et al.*, 1997)로 설명하였다.

Matsui *et al.* (2006)은 에어로졸과 구름의 연관성 분석을 위해서는 주변 대기의 기상상태, 특히 안정도가 중요하다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 한반도 주변에서 안정도가 에어로졸과 구름의 연관성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 그림 10과 같이 x축을 에어로졸(τ_a), y축을 안정도($\Delta\theta$), z축을 구름(CF)으로 3차원 그래프로 나타내었다. 계

산방법은 전체 계절에 대해 각 영역별 τ_a , $\Delta\theta$, CF 각각의 일평균 자료를 같은 격자에 대해 구간별로 나누어 표시하였다. 에어로졸(τ_a)과 구름(CF) 모두 안정도($\Delta\theta$)의 구간별 차이와는 상관없이 통계적으로 유의한 수준의 연관성을 찾기 어려웠다. 하지만 그림 9에서도 보였듯이 뚜렷하지는 않지만 4개 영역 모두 τ_a 가 증가함에 따라 CF도 증가하는 경향을 잘 보이고 있다. 황해 상공(A2)은 일관성 있게 다른 영역에 비해 τ_a 가 증가함에 따라 CF도 증가하는 양의 상관성이 가장 뚜렷이 나타났다. 이러한 결과는 에어로졸 지수(AI)와 CF의 3차원 비교 결과에서도 확인할 수 있었다. 한편 동해 상공(A4)은 τ_a 와 $\Delta\theta$ 와는 상관없이 운량(CF)이 높은 수준을 보였다. 이상의 결과에서 한반도 주변에서 구름(CF)의 변동성은 안정도($\Delta\theta$)보다는 에어로졸(τ_a)과 더욱 연관성이 잘 나타남을 확인할 수 있었다.

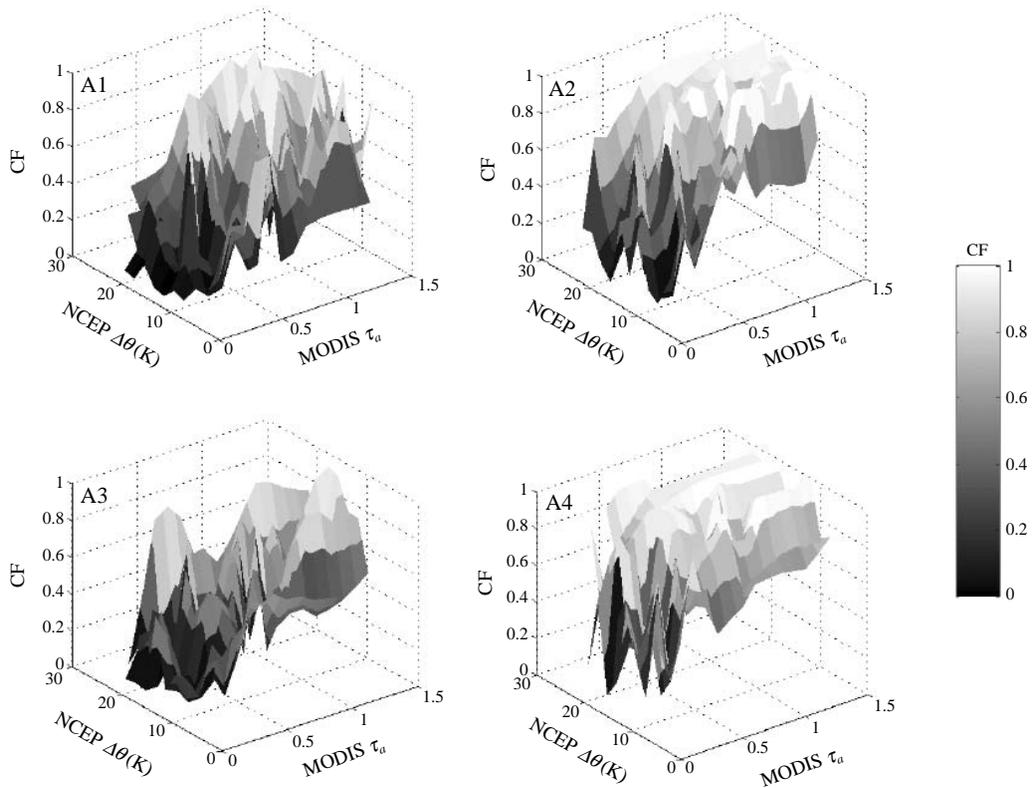


Fig. 10. Regional (A1, A2, A3 and A4) statistics of daily mean CF as functions of $\Delta\theta$ and τ_a on low-level (CTP>700 hPa) liquid phase (CTT>273 K) clouds.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2001~2008년까지의 MODIS 위성 자료 및 NCEP/NCAR 재분석 자료를 활용하여 한반도 주변에서 장기간의 에어로졸과 구름 광학특성 및 에어로졸-구름 간의 연관성을 분석하였다. 에어로졸-구름 특성의 지역적인 특성을 파악하기 위하여 한반도를 중심으로 중국 산둥반도로부터 한반도 동해까지 4개 영역(A1~A4)으로 분석영역을 나누었으며, 각 영역별 계절적인 특성을 분석하였다.

에어로졸 광학두께(τ_a)와 운량(CF)의 장기간 경년 변화에서 뚜렷한 증가 또는 감소 경향은 나타나지 않았지만 유사한 변화 경향을 나타내는 특징을 보였다. 구름광학두께(τ_c)의 연변화를 보면 여름철 내륙(A1, A3) 영역과 겨울철 동해 상공(A4)에서 높은 값을 보였다. 이는 여름철 한반도 내륙의 빈번하고 강한 대류현상과 겨울철 따뜻한 동해수온과 관련있는 것으

로 보이며 이러한 특징은 τ_c 의 수평분포에서도 확인할 수 있었다. 또한 τ_a 의 수평분포 및 지역적인 편차를 살펴본 결과, 전 계절에 걸쳐 중국 산둥반도에서 한반도 내륙까지 수평 경도가 뚜렷하게 나타났는데, 이는 한반도 상공보다 황해 상공의 에어로졸 부하량이 기후학적 계절 평균 관점에서 높다는 것을 의미하며 황해 상공이 중국의 인위적인 오염물질 영향을 받고 있음을 의미한다. 한편 월평균 τ_a 와 r_e 의 비교 결과, 여름철 황해상(A2)에서 가장 유의한 수준의 음의 상관성을 보였으나 다른 계절 또는 영역에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 이는 구름자체의 변동성이 동북아시아 지역에 상대적으로 크게 나타나 에어로졸 효과가 묻히는 효과(Masking effect)와 연관성이 있을 것으로 추정된다. 또한 거시적(macroscopic) 관점의 τ_a 와 CF 연관성을 살펴본 결과 τ_a 가 증가함에 따라 CF도 증가하는 양의 상관성을 확인할 수 있었으며, AI와 CF의 비교에서도 유사한 경향성이

나타났다. 하지만 기상조건으로 활용한 대기안정도 ($\Delta\theta$)는 에어로졸과 구름과의 뚜렷한 연관성을 확인할 수 없었으며, CF는 $\Delta\theta$ 보다는 τ_a 와의 연관성이 훨씬 큰 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 한반도 주변에서 에어로졸과 구름의 경년변화 및 연변화 경향, 수평분포, 월평균 τ_a 와 r_c 의 비교, 에어로졸과 구름의 연관성 분석 등을 통해 에어로졸 간접효과와의 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 본 연구결과를 기초자료로 활용하고 정적 안정도 이외에 연직운동뿐만 아니라 최근 발표된 Engström and Ekman (2010)에서 언급된 수평 풍속, 그리고 수증기량(습도) 등과 에어로졸-구름 상호작용의 관련성 분석을 지속적으로 연구할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상기술개발사업 (CATER 2009-3211)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Albrecht, B.A. (1989) Aerosol, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Sci.*, 245, 1227-1230.
- Bréon, F.M., D. Tanre, and S. Generoso (2002) Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite, *Sci.*, 295, 834-838.
- Engström, A. and A.M.L. Ekman (2010) Impact of meteorological factors on the correlation between aerosol optical depth and cloud fraction, *Geophys. Res. Lett.*, 37(L18814), doi:10.1029/2010GL044361.
- Feingold, G., W.L. Eberhard, D.E. Veron, and M. Previdi (2003) First measurements of the Twomey indirect effect using ground-based remote sensor, *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), 1287, doi:10.1029/2002GL016633.
- Hansen, J.E., M. sato, and R. Ruedy (1997) Radiative forcing and climate response, *J. Geophys. Res.*, 102, 6831-6864.
- Intergovernment Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007: The Scientific Basis*, Cambridge Univ. Press, NY, 1056pp.
- Jin, M., J.M. Shepherd, and M.D. King (2005) Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study of New York and Houston, *J. Geophys. Res.*, 110(D10S20), doi:10.1029/2004JD005081.
- Kawamoto, K., T. Hayasaka, I. Uno, and T. Ohara (2006) A correlative study on the relationship between modeled anthropogenic aerosol concentration and satellite-observed cloud properties over east Asia, *J. Geophys. Res.*, 111, D19201, doi:10.1029/2005JD006919.
- Kim, B.G. and T.Y. Kwon (2006) Aerosol indirect effect studies derived from ground-based remote sensing, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(2), 235-247. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.G., M.A. Miller, S.E. Schwartz, Y. Liu, and Q. Min (2008) The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect, *J. Geophys. Res.*, 113(D05210), doi: 10.1029/2007JD008961.
- Kim, B.G., S.E. Schwartz, M.A. Miller, and Q. Min (2003) Effective radius of cloud droplets by ground-based remote sensing: Relationship to aerosol, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2003JD003721.
- Kim, B.G., Y.J. Kim, and S.H. Eun (2008) An analysis of aerosol optical properties around Korea using AERONET, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(6), 629-640. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.W., S.C. Yoon, J.Y. Kim, and S.Y. Kim (2007) Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements, *Atmospheric Environment*, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.10.044.
- King, M.D., W.P. Menzel, Y.J. Kaufman, D. Tanré, B.C. Gao, S. Platnick, S.A. Ackerman, L.A. Remer, R. Pincus, and P.A. Hubanks (2003) Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 41, 442-458.
- Matsui, T., H. Masunaga, S.M. Kreidenweis, R.A. Pielke Sr., W.K. Tao, M. Chin, and Y.J. Kaufman (2006) Satellite-based assessment of marine low cloud variability associated with aerosol, atmospheric stability, and the diurnal cycle, *J. Geophys. Res.*, 111, D17204, doi:10.1029/2005JD006097.
- Min, Q. and L.C. Harrison (1996) Cloud properties derived from surface MFRSR measurements and comparison with GOES results at the ARM SGP site, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1641-1644.
- Mukai, M., T. Nakajima, and T. Takemura (2008) Anthropogenic impacts on the radiation budget and the cloud field in East Asia based on model simulations with GCM, *J. Geophys. Res.*, 113(D12211), doi:10.1029/

- 2007JD009325.
- Nakajima, T., A. Higurashi, K. Kawamoto, and J.E. Penner (2001) A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1171-1174.
- Pandithurai, G., T. Takemura, J. Yamaguchi, K. Miyagi, T. Takano, Y. Ishizaka, S. Dipu, and A. Shimizu (2009) Aerosol effect on cloud droplet size as monitored from surface-based remote sensing over East China Sea region, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13805, doi: 10.1029/2009GL038451.
- Platnick, S., M.D. King, S.A. Ackerman, W.P. Menzel, B.A. Baum, J.C. Riedi, and R.A. Frey (2003) The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sen.*, 41, 459-473.
- Quaas, J., O. Boucher, and F.-M. Bréon (2004) Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and the Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom (LMDZ) general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 109, D08205, doi:10.1029/2003JD004317.
- Sekiguchi, M., T. Nakajima, K. Suzuki, K. Kawamoto, A. Higurashi, D. Rosenfeld, I. Sano, and S. Mukai (2003) A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite data sets of aerosol and cloud parameters, *J. Geophys. Res.*, 108(D22), 4699, doi: 10.1029/2002JD003359.
- Suzuki, K., T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi (2004) A study of the aerosol effect on a cloud field with simultaneous use of GCM modeling and satellite observation, *J. Atmos. Sci.*, 61, 179-194.
- Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T.Y. Nakajima, and G.L. Stephens (2008) Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- Yoon, S.C., S.W. Kim, S.J. Choi, and I.J. Choi (2010) Regional-scale relationships between aerosol and summer monsoon circulation, and precipitation over Northeast Asia, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 46(3), 279-286, doi:10.1007/s13143-010-1002-3.

Appendix 1. Monthly percentiles of τ_a (550 nm) obtained at 4 regions (A1, A2, A3, A4) for the period of 2001 ~ 2008.

A1							A2						
Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
Jan.	1.32	0.64	0.53	0.40	0.26	0.15	Jan.	1.12	0.57	0.44	0.32	0.20	0.11
Feb.	1.42	0.80	0.61	0.50	0.29	0.17	Feb.	1.37	0.64	0.50	0.37	0.22	0.12
Mar.	1.82	1.05	0.82	0.70	0.39	0.22	Mar.	1.81	0.83	0.70	0.51	0.30	0.17
Apr.	1.98	1.11	0.90	0.78	0.51	0.30	Apr.	1.81	0.89	0.74	0.60	0.35	0.18
May	2.05	1.21	0.93	0.77	0.51	0.26	May	2.63	1.05	0.83	0.56	0.31	0.17
Jun.	2.51	1.52	1.16	0.99	0.61	0.27	Jun.	2.16	1.10	0.88	0.71	0.44	0.18
Jul.	2.24	1.29	0.97	0.79	0.45	0.22	Jul.	1.72	0.95	0.71	0.52	0.32	0.16
Aug.	1.66	0.90	0.68	0.51	0.32	0.17	Aug.	1.01	0.49	0.41	0.31	0.21	0.11
Sep.	1.40	0.73	0.55	0.43	0.26	0.11	Sep.	0.91	0.42	0.35	0.28	0.18	0.09
Oct.	1.53	0.84	0.61	0.46	0.26	0.12	Oct.	1.08	0.54	0.41	0.31	0.17	0.08
Nov.	1.21	0.67	0.51	0.41	0.24	0.12	Nov.	1.15	0.52	0.41	0.30	0.18	0.09
Dec.	1.09	0.60	0.47	0.38	0.23	0.14	Dec.	0.95	0.53	0.41	0.32	0.19	0.10

A3							A4						
Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
Jan.	0.78	0.38	0.28	0.21	0.12	0.05	Jan.	0.68	0.33	0.29	0.23	0.15	0.10
Feb.	0.90	0.43	0.34	0.24	0.15	0.08	Feb.	0.85	0.43	0.36	0.29	0.20	0.13
Mar.	1.13	0.64	0.48	0.39	0.23	0.09	Mar.	1.18	0.59	0.48	0.38	0.26	0.16
Apr.	1.25	0.71	0.54	0.46	0.28	0.13	Apr.	1.29	0.70	0.60	0.47	0.32	0.19
May	1.40	0.74	0.58	0.45	0.28	0.14	May	1.22	0.63	0.51	0.40	0.26	0.16
Jun.	1.71	1.00	0.74	0.63	0.36	0.15	Jun.	1.27	0.71	0.54	0.48	0.26	0.12
Jul.	1.32	0.68	0.52	0.38	0.23	0.11	Jul.	1.01	0.61	0.46	0.40	0.24	0.13
Aug.	0.75	0.37	0.30	0.24	0.15	0.07	Aug.	0.63	0.38	0.30	0.25	0.17	0.09
Sep.	0.74	0.34	0.26	0.19	0.11	0.03	Sep.	0.64	0.33	0.27	0.23	0.16	0.08
Oct.	0.87	0.36	0.29	0.20	0.10	0.03	Oct.	0.65	0.33	0.27	0.22	0.15	0.08
Nov.	0.69	0.32	0.24	0.17	0.09	0.02	Nov.	0.61	0.33	0.26	0.21	0.15	0.08
Dec.	0.64	0.28	0.22	0.15	0.09	0.04	Dec.	0.49	0.28	0.23	0.20	0.14	0.09

Appendix 2. Monthly percentiles of τ_c obtained at 4 regions (A1, A2, A3, A4) for the period of 2001 ~ 2008.

A1							A2						
Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
Jan.	29.30	8.87	7.86	4.16	1.95	0.57	Jan.	36.41	15.48	12.46	8.40	4.34	2.23
Feb.	28.57	8.86	7.86	3.55	1.83	0.56	Feb.	36.60	11.17	10.21	6.03	3.42	1.72
Mar.	26.93	7.04	6.91	3.30	1.89	0.66	Mar.	29.73	11.67	9.63	6.18	3.74	2.05
Apr.	43.37	9.81	9.78	4.21	2.29	0.80	Apr.	47.51	14.13	13.37	7.73	4.35	2.11
May	49.04	12.70	11.94	5.26	2.87	1.10	May	53.25	17.14	14.91	9.05	4.99	2.19
Jun.	39.97	13.84	11.73	7.41	4.15	2.04	Jun.	42.24	14.00	12.69	8.85	5.36	2.84
Jul.	44.16	17.51	14.31	9.27	5.73	2.87	Jul.	41.45	15.80	13.66	9.02	5.68	2.91
Aug.	41.12	15.10	13.40	8.43	5.39	2.95	Aug.	35.95	14.20	11.78	7.61	4.61	2.17
Sep.	52.14	17.87	14.50	7.76	4.02	2.08	Sep.	39.89	14.42	11.89	6.94	3.92	1.88
Oct.	41.16	13.31	11.20	5.75	3.08	0.87	Oct.	42.61	14.09	12.10	6.81	4.01	1.92
Nov.	36.85	10.47	9.67	4.73	2.42	0.72	Nov.	34.98	13.69	11.37	7.33	4.20	2.02
Dec.	36.59	11.45	10.00	5.27	2.54	0.66	Dec.	37.14	17.15	12.96	8.79	4.56	2.25

A3							A4						
Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%	Months	95%	75%	Mean	Median	25%	5%
Jan.	33.06	13.19	10.71	6.40	3.30	0.68	Jan.	44.14	24.64	18.61	15.64	8.59	3.60
Feb.	36.61	13.05	10.67	6.11	3.31	0.70	Feb.	40.65	19.46	14.58	10.86	5.70	2.39
Mar.	36.60	12.81	10.73	6.50	3.56	1.03	Mar.	40.65	16.13	13.03	8.87	4.73	2.32
Apr.	53.26	15.95	14.21	7.63	3.76	1.33	Apr.	53.45	16.93	14.48	7.97	4.52	2.38
May	54.59	18.99	15.78	9.33	5.02	2.16	May	43.26	16.80	13.40	8.12	4.38	2.12
Jun.	46.76	17.45	14.58	9.38	5.85	2.70	Jun.	31.89	13.07	11.00	7.67	4.60	2.21
Jul.	58.87	25.97	19.90	13.45	7.93	4.26	Jul.	40.60	15.33	13.00	8.44	5.02	2.44
Aug.	44.26	18.24	15.10	10.21	6.47	3.51	Aug.	30.76	10.80	9.62	6.30	3.86	2.06
Sep.	45.62	18.62	14.79	9.62	5.56	3.24	Sep.	41.85	15.18	12.72	8.00	4.24	1.96
Oct.	39.83	14.72	12.36	7.51	4.32	2.31	Oct.	34.81	16.57	12.03	7.94	3.92	1.76
Nov.	43.77	15.47	12.61	7.37	4.31	1.79	Nov.	43.12	21.84	16.15	12.26	6.32	2.61
Dec.	35.14	14.85	11.51	7.40	3.80	1.21	Dec.	42.69	25.28	18.46	16.22	8.26	2.96