

ORIGINAL ARTICLE

## MODIS 위성 자료를 이용한 동아시아 에어로졸-구름의 통계적 특성

정운선\* · 성현민<sup>1)</sup> · 이동인<sup>2)</sup> · 차주완 · 장기호 · 이철규

국립기상과학원 융합기술연구부, <sup>1)</sup>국립기상과학원 미래기반연구부, <sup>2)</sup>부경대학교 환경대기과학과

### Investigating Statistical Characteristics of Aerosol-Cloud Interactions over East Asia retrieved from MODIS Satellite Data

Woonseon Jung\*, Hyun Min Sung<sup>1)</sup>, Dong-In Lee<sup>2)</sup>, Joo Wan Cha, Ki-Ho Chang,  
Chulkyu Lee

*Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea*

<sup>1)</sup>*Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea*

<sup>2)</sup>*Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 648513, Korea*

#### Abstract

The statistical characteristics of aerosol-cloud interactions over East Asia were investigated using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer satellite data. The long-term relationship between various aerosol and cloud parameters was estimated using correlation analysis, principle component analysis, and Aerosol Indirect Effect (AIE) estimation. In correlation analysis, Aerosol Optical Depth (AOD) was positively Correlated with Cloud Condensation Nuclei (CCN) and Cloud Fraction (CF), but negatively correlated with Cloud Top Temperature (CTT) and Cloud Top Pressure (CTP). Fine Mode Fraction (FMF) and CCN were positively correlated over the ocean because of sea spray. In principle component analysis, AOD and FMF were influenced by water vapor. In particular, AOD was positively influenced by CF, and negatively by CTT and CTP over the ocean. In AIE estimation, the AIE value in each cloud layer and type was mostly negative (Twomey effect) but sometimes positive (anti-Twomey effect). This is related to regional, environmental, seasonal, and meteorological effects. Rigorous and extensive studies on aerosol-cloud interactions over East Asia should be conducted via micro- and macro-scale investigations, to determine chemical characteristics using various meteorological instruments.

**Key words** : Correlation analysis, Principle component analysis, Aerosol indirect effect, Aerosol, Cloud

#### 1. 서론

에어로졸은 구름의 미세물리에 직·간접적 영향을 미치

고 있으며(Kondratyev et al., 2006), 특히 에어로졸 간접 효과는 불확실성이 높다고 알려져 있다(IPCC, 2014). 에어로졸 1차(Twomey, 1977), 2차(Albrecht, 1989) 간접

Received 7 October, 2020; Revised 23 October, 2020;

Accepted 16 November, 2020

\*Corresponding author: Woonseon Jung, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea  
Phone : +82-64-780-6687  
E-mail : wsjung01@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

효과 관련 연구가 관측과 수치모델을 통해서 이루어지고 있지만, 전 세계적으로 관측이 부족한 실정이며 수치모델을 통한 연구도 사례마다 다른 특성을 나타내고 있다 (Levin and Cotton, 2008). 예를 들면, 중국에서는 지난 수십 년 동안 에어로졸의 증가로 인해 구름의 강수효율이 감소했다는 결과를 나타내었고(Rosenfeld et al., 2007), 구름 수 농도 감소는 구름입자 크기를 증가시키고 강수를 증가시키는 연구결과(Kawamoto, 2008)도 있다. 이렇듯 상반되는 연구결과들도 다수 존재하며, 인공 강우 기술의 발전을 위해서도 구름에 대한 기초연구 필요성이 강조되는바(WMO, 2018), 응용기상 분야에서도 에어로졸 효과에 대한 기초연구는 요구가 많은 실정이다.

대기는 변화하기 때문에 수학적으로 설명하기가 쉽지 않으며 불확실성을 내포하고 있다(Wilks, 2006). 그러므로 에어로졸-구름-강수 관계를 전체적으로 설명하기 위해서는 수치모델을 활용하는 방법도 좋지만, 통계적 방법을 통해 정성적인 분석으로도 유의미한 결과를 얻을 수 있다. 남미에서는 에어로졸-구름-강수관계를 통계적으로 분석하였으며(Jones and Christopher, 2010), 인도에서는 MODIS 위성을 이용한 에어로졸과 구름간의 관계를 사·공간적으로 분석한 사례도 있다(Balakrishnaiah et al., 2012). 위성 자료를 이용하여 해양지역 에어로졸의 주성분분석 연구(Zubko et al., 2007)와 다양한 에어로졸 화학자료를 이용한 요인분석 연구(Zhou et al., 2004)도 이루어진 바가 있다.

동아시아 지역의 경우 많은 오염원, 다양한 기상 현상 등이 발생하며, 장기간 자료를 이용한 동아시아 지역의 에어로졸과 구름변수 간의 통계학적 연구는 일부만 이루어졌다(Jung et al., 2013). 또한, 동북아시아 지역의 에어로졸은 다른 지역에 비해 높은 에어로졸 농도를 가지고 있는 특징을 확인하였으나, 상대적으로 구름에 대한 연구는 부족하여 위성, 지상 원격탐사, 수치모델, 항공 관측 등의 연구가 추가로 더 필요한 실정이다(Yum et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 미세물리를 고려하기보다는 에어로졸-구름 변수에 대해 전체적인 변화 경향을 알아보고자 한다. 본 연구의 목적은 동아시아 지역에서 발생하는 에어로졸과 구름변수 간의 통계적 특성을 조사하고자 하는 것이다. 또한, 동아시아 지역에서 나타나는 유형에 따른 에어로졸 간접효과 특성분석을 위하여 연구를 수행

하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

에어로졸과 구름변수의 특징을 알아보기 위하여 2001~2015년 기간의 모디스(moderate resolution imaging spectroradiometer : MODIS) 위성 자료를 이용하여 분석하였다. 에어로졸의 특성을 파악하기 위해 분석한 변수는 에어로졸광학두께(Aerosol Optical Depth : AOD), 미세입자비율(Fine Mode Fraction : FMF)이고, 구름변수는 구름응결핵(Cloud Condensation Nuclei : CCN), 운량(Cloud Fraction : CF), 운정온도(Cloud Top Temperature : CTT), 운정기압(Cloud Top Pressure : CTP), 흐린날 수증기(water vapor in cloudy : WV\_Cloudy), 맑은날 수증기(water vapor in clear sky : WV\_ClearSky), 구름얼음반지름(Cloud Ice Radius : CIR), 구름물반지름(Cloud Water Radius : CWR), 전체구름광학두께(cloud optical depth of total : COD\_Total), 얼음구름광학두께(cloud optical depth of ice : COD\_Ice), 물구름광학두께(cloud optical depth of water : COD\_Water), 얼음구름함량(Cloud Ice Path : CIP), 물구름함량(Cloud Water Path : CWP)를 분석하였다.

본 연구의 주요 관심 지역인 동아시아 지역은 북위 20-50°, 동경 100-150°으로 정의하고 해당 영역을 분석하였다. 이 영역은 한국, 중국, 일본을 포함하는 동아시아 지역이며, 다양한 화학적 조성, 입자 크기 분포, 기상학적 특징을 가지고 있다고 선행연구들에서 주로 언급되었다(Park et al., 2010). Fig. 1은 한반도를 기준으로 4개의 영역을 지정하여 한반도 지역의 에어로졸 간접효과도 분석하였으며, 상세영역은 R1(35-38°N 124-126°E), R2(35-38°N 127-129°E), R3(35-38°N 130-132°E), R4(32-34°N 125-128°E)이다. R1은 서해안 지역으로, 중국과 지리적으로 인접하였기 때문에 편서풍에 의한 에어로졸의 영향을 받는 지역(Chung and Park, 1995)이고, 한반도 내륙인 R2는 다른 지역에 비해 건조하고 내륙지역의 특색을 가지는 에어로졸이 발생(Jung et al., 2014)한다는 특징이 있다. R3 지역은 동해안 지역으로 한국에서 발생한 입자들이 이동하나 내륙보다 상대적으로 청정한 지역(Lee et al., 2010)이며, 남해안 지역인

R4는 상대적으로 따뜻하고 해양기후(Song et al., 2014) 특성을 나타낸다. 상세영역 분석을 통해 한반도 주변의 지역 특성을 고려하여 에어로졸과 구름의 상관관계를 분석하였다.

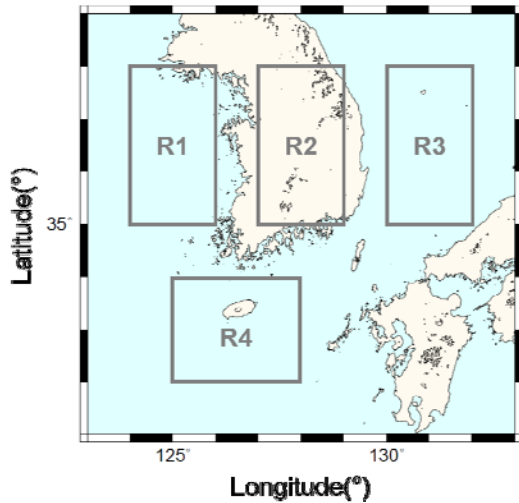


Fig. 1. The map of Korea with selected regions from R1 to R4.

## 2.2. 방법

본 연구에서는 통계적 방법을 통한 상관분석, 주성분 분석을 수행하고, 에어로졸 간접효과를 계산하였다. 상관분석(Correlation Analysis : CA)은 관련 변수들끼리 어느 정도의 관련성을 가지는지 분석하는 통계기법으로서, 많은 연구에서 널리 사용되는 방법이다. 상관계수는 0.9~1.0 범위의 경우는 아주 높은, 0.7~0.9는 높은, 0.3~0.7는 중간, 0.1~0.2는 낮은 상관관계에 있다고 분석하며, 0.0~0.1 범위는 두 변수의 상관관계가 거의 없다고 판단한다. 상관분석의 여러 통계적 방법 중 두 변수의 관련성을 계산하는데 일반적으로 사용되는 피어슨 상관 계수(Pearson correlation coefficient)를 사용하였으며, 이는 두 변수가 함께 변하는 정도와 따로 변하는 정도의 비로 계산된다.

주성분분석(Principle Component Analysis : PCA)은 많은 변수를 분석하는 연구에서 주로 사용되는 통계 분석방법이며, 상관관계의 원리를 이용해서 공통된 것을 묶어 인자를 추출하는 분석방법이다. 이로써 데이터양을 줄여 정보를 요약, 변수들 내부에 존재하는 구조를 파악,

요인으로 묶여지지 않는 변수 중 중요도가 낮은 변수를 제거, 같은 개념을 측정하려고 하는 변수들이 동일한 요인으로 묶이는지 확인할 수 있다. 본 연구에서는 사회과학을 위한 통계 처리(Statistical Package for the Social Sciences : SPSS) 프로그램을 활용하였으며, 배리맥스 법(Varimax method)을 이용하여 에어로졸과 구름과 관련된 다양한 특성 인자들에 대한 상관 정보를 분석하였다.

에어로졸 간접효과(Aerosol Indirect Effect : AIE)는 에어로졸 광학두께와 구름입자반지름간의 비로 계산되는 지수로서 아래와 같은 식으로 계산된다(Feingold et al., 2003).

$$AIE = \frac{d \ln r_e}{d \ln \tau_a}$$

여기서  $r_e$ 는 구름유효반지름이며,  $\tau_a$ 는 에어로졸광학 두께를 의미한다. 구름의 특성을 고려한 정확한 에어로졸 간접효과 계산을 위하여, 에어로졸 간접효과를 계산 시 구름함량(얼음 또는 물)을 일정한 간격으로 나누어 구간별 에어로졸 간접효과를 계산한 뒤 전체 값을 산정하였다. Feingold et al.(2003)에서 언급한 계산방법은 AOD에 민감하게 작용하여 그 불확실도를 내포하고 있으나, 에어로졸 간접효과를 산정하는 유용한 방법으로 본 연구에서 활용하였다.

Houze(2014)는 고도별로 상·중·하층운으로 구름을 구분하여 설명하였다. Rossow and Schiffer(1991, 1999)는 국제 위성 구름 기후 과제(International Satellite Cloud Climatology Project : ISCCP)에서 CTP와 COD로 9개의 구름 종류를 구분하는 방법을 제안하였다. 구름 높이 구분의 경우, CTP 50~440 hPa 범위는 상층운(권운, 권층운, 깊은 대류운), 440~680 hPa 범위는 중층운(고적운, 고층운, 난층운), 680~1000 hPa 범위는 하층운(적운, 층적운, 층운)으로 구분한다. 운형 구분의 경우, COD 0~3.6 범위는 적은 계열(권운, 고적운, 적운), 3.6~23 범위는 중간 계열(권층운, 고층운, 층적운), 23~379 범위는 층운 계열(깊은 대류운, 난층운, 층운)으로 구분한다. 본 연구에서는 구름 특성을 구분하여 에어로졸 간접효과를 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

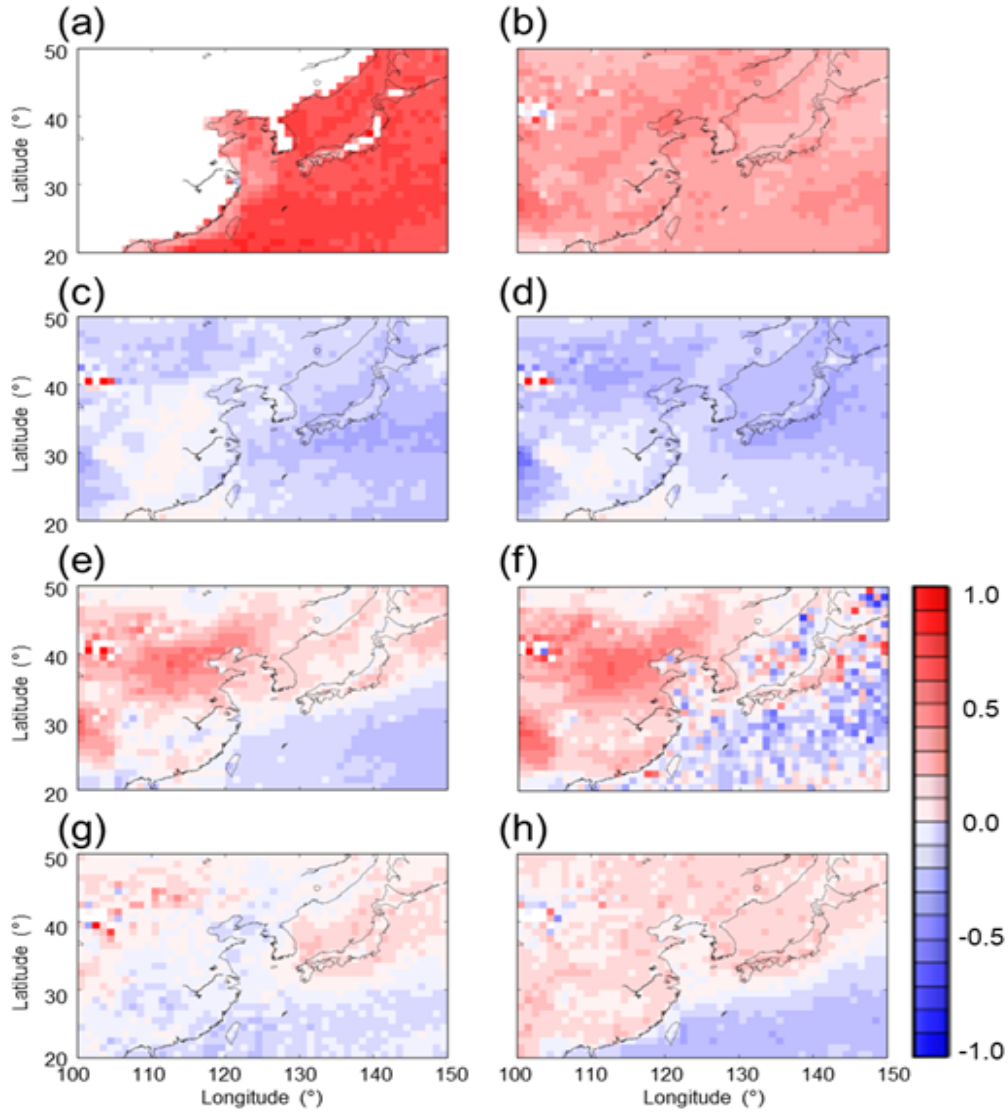
#### 3.1. 상관관계 분석

에어로졸과 구름의 특성 인자들의 상관성을 파악하기 위하여 2.1절에서 언급한 10개의 특성 인자들의 상관분석을 수행하였다. 먼저, AOD와 FMF의 상관관계를 정성적으로 살펴보면, 육지에서는 에어로졸이 많을수록 미세입자비율이 높게 나타나고, 해양에서는 미세입자비율이 낮게 나타났다(not shown). 이는 육지에 작은 인위적 에어로졸, 해양에 자연기원의 큰 에어로졸이 많기 때문이라는 선행연구(Seinfeld and Pandis, 2006)와 비슷한 분석결과이다. 뒷절에서 수행할 주성분분석 결과와 연속성을 위해서 에어로졸 특성 인자인 AOD와 FMF를 기준으로 상관분석을 수행하였다.

Fig. 2는 AOD와 구름변수들간의 상관관계 분포를 나타내며, 각각 AOD와 (a) CCN, (b) CF, (c) CTT, (d) CTP, (e) WV\_Cloudy, (f) WV\_ClearSky, (g) CIR, (h) CWR와의 상관관계 분포를 의미한다. 붉은색은 양의 상관관계, 푸른색은 음의 상관관계를 나타내며, 음영이 진할수록 상관관계가 높음을 의미한다. AOD와 CCN의 상관관계(Fig. 2(a): MODIS CCN 자료는 해양지역에서만 산출됨)는 0.65로 해양에서는 에어로졸이 많을수록 구름응결핵이 증가한다는 것을 의미하며, 에어로졸이 구름을 응결시키는 핵으로써 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다. Fig. 2(b)는 에어로졸이 많을수록 운량이 증가(0.34)함을 의미하며, 인도몬순지역(0.42~0.51) 보다는 다소 작은 값이 나타났지만, 선행연구들과 비슷한 수준의 양의 상관관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다(Quass et al., 2009; Balakrishnaiah et al., 2012). 또한, 에어로졸이 많을수록 운정온도, 운정기압이 내려가 커 큰 구름이 형성되기 쉬운 조건임을 AOD와 CTT, CTP의 음의 상관관계(Fig. 2(c), (d))를 통해 확인할 수 있으며, 선행연구와 일치하는 경향을 보였다(Myhre et al., 2007; Quass et al., 2009; Balakrishnaiah et al., 2012). 일부 중국 고비사막과 내몽골지역(40-42°N, 100-105°E) 인근은 MODIS 산출자료에서 에어로졸이 존재하는 것으로 확인된다(Warner, 2009). AOD와 WV\_Cloudy, WV\_Clearsky의 상관관계(Fig. 2(e), (f))는 육지에서 수증기가 많고(양의 상관관계) 해양에서는 수증기가 적을 때(음의 상관관계) 에어로졸이 증가함을 나타내며, 육

지에서 결과는 기존에 언급된 양의 상관관계와 일치하는 경향을 보인다(Balakrishnaiah et al., 2012). 이는 육지의 소수성 성질을 띄는 먼지(dust) 등도 황산염 또는 다른 흡습성 에어로졸에 의해 코팅이 되면 친수성으로 성질이 바뀌고(Shi et al., 2008), 흡습성 에어로졸은 습도, 풍속, 풍향, 온도와 같은 기상학 변수의 영향을 받아 다른 종류의 입자들과 혼합된다는 특징을 설명한다(Aloysius et al., 2009). 이는 육지에서는 에어로졸이 많을수록 구름입자 크기가 증가하며, 해양에서는 감소하는 상관관계를 가지게 된다(Fig. 2(g), (h)). 에어로졸과 구름 특성 인자의 상관분석을 통해 대기 중의 수분 활동(수증기량의 변화)이 에어로졸 입자의 광학두께, 크기, 화학적 조성 등을 결정하는 중요한 변수가 된다고 할 수 있다(Alam et al., 2010).

Fig. 3은 FMF와 구름 특성 인자들과의 상관관계 분포를 나타내며, 순서대로 (a) CCN, (b) CF, (c) CTT, (d) CTP, (e) WV\_Cloudy, (f) WV\_ClearSky, (g) CIR, (h) CWR와의 상관관계를 나타낸다. FMF와 CCN(Fig. 3(a))은 양의 상관관계로 해양에서는 미세입자가 많을수록 CCN이 증가함을 나타내며, 이는 해양에서 파도의 비말(sea spray) 등이 CCN으로 작용하기 때문으로 추측할 수 있다(Seinfeld and Pandis, 2006). 중국 동부해안과 황해지역에서 음의 상관관계가 나타나는 것은 중국 내륙 지역으로부터 이동해온 에어로졸 중 인위적 미세오염입자의 기여가 크기 때문이다. 이와 관련하여, 육지 지역을 중심으로 미세입자비율과 운량이 양의 상관관계를 보였고, 해양에서는 음의 상관관계를 나타냈다(Fig. 3(b)). FMF와 CTT, CTP(Fig. 3(c), (d))는 대부분 양의 상관관계로 미세입자비율이 높을수록 운정온도와 기압이 높게 나타난다는 의미이며, 키가 작은 구름일수록 운정온도와 기압이 높기 때문에 미세입자비율이 구름의 변화에 영향을 미치는 특성 인자임을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2(c), (d)에서 보였던 AOD의 결과와 차이를 보이는데, 구름응결핵 등 작은 크기의 에어로졸 입자가 구름을 형성하기에 충분한 응결핵의 크기를 갖추지 못한 것으로 판단할 수 있다. FMF와 WV\_Cloudy, WV\_Clearsky(Fig. 3(e), (f))는 육지 지역을 중심으로 수증기가 많을수록 미세입자비율이 증가함을 나타내며, 수증기 등 기상현상의 영향을 받아 에어로졸이 혼합된 것으로 보인다(Aloysius et al., 2009; Balakrishnaiah et al., 2012).



**Fig. 2.** The distribution of correlation coefficient between AOD and cloud parameters (a) CCN, (b) CF, (c) CTT, (d) CTP, (e) WV\_Cloudy, (f) WV\_ClearSky, (g) CIR, and (h) CWR.

구름의 얼음입자와 물입자의 반지름은 미세입자비율이 클수록 작게 나타났으며(음의 상관관계, Fig. 3(g), 2(h)), 이는 인도몬순 지역의 분석결과(Balakrishnaiah et al., 2012)와 유사하지만, 전반적으로 약간 낮은 상관관계를 나타냈다. 이는 중국 내륙으로부터 온 인위적 에어로졸에 의한 영향으로 해석할 수 있다.

### 3.2. 주성분분석

앞 절에서는 상관분석을 통해 정성적으로 에어로졸과 구름의 특성 인자들의 관계를 분석하였고, 본 절에서는 어떤 인자들이 에어로졸과 구름의 특성 인자에 영향을 크게 미치는지 확인하고자 주성분분석을 수행하였다. 주성분분석은 많은 자료를 작은 수의 독립변수로 바꾸어

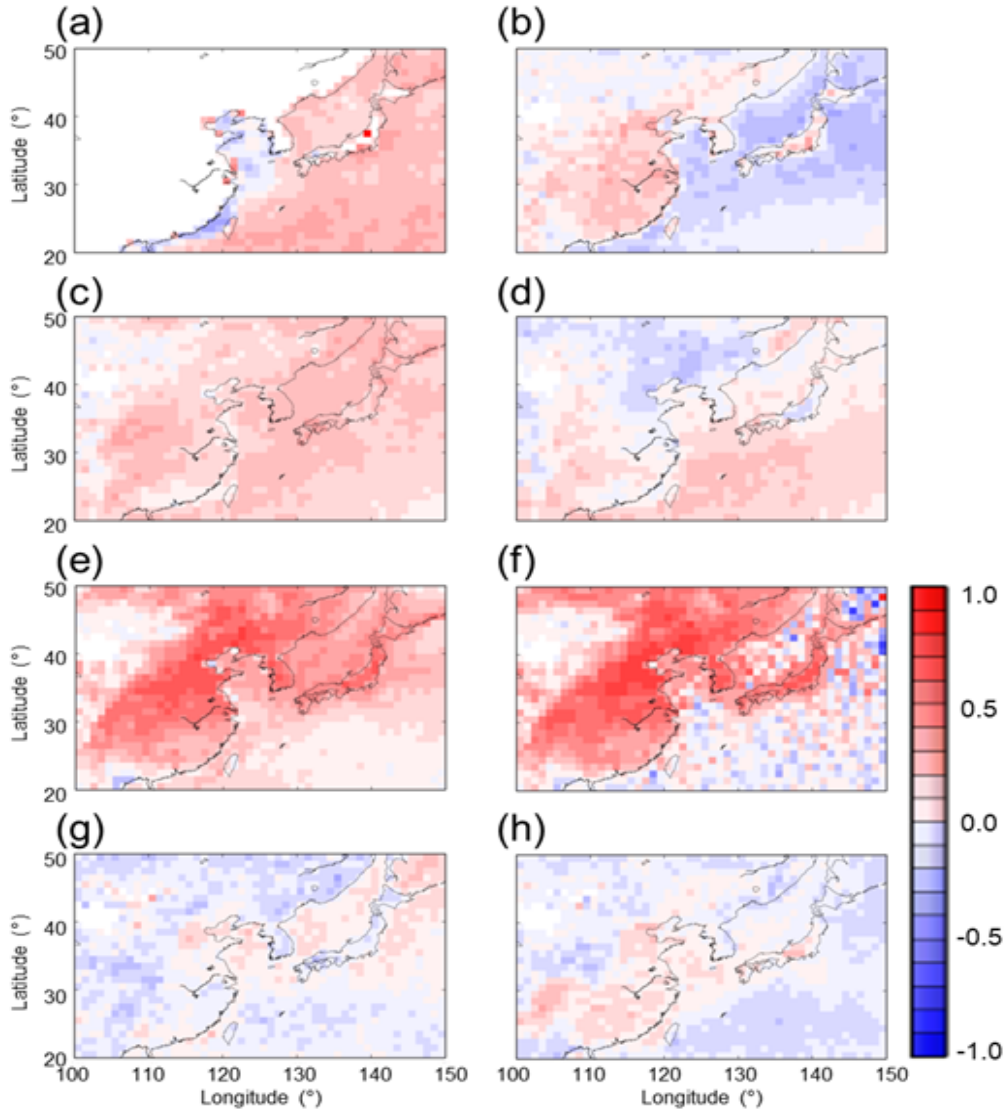


Fig. 3. Same as fig. 2 but for FMF and cloud parameters.

특별한 물리적 해석을 도출할 수 있는 통계적 분석방법이며, 자료의 많은 수에서 생기는 불확실성을 완화할 수 있는 방법이다(Wilks, 2006). 본 연구에서는 주성분분석을 통해 영향인자의 수를 결정하였고 베리맥스법에 의해 산출한 결과로부터 영향인자를 추출하였다. 인자에 따라 에어로졸의 화학적 및 물리적 특징이 다르고 구름과 강수의 형성에 영향을 미치게 되며(Seinfeld and Pandis,

2006), 해양과 내륙의 구름 특성이 다르다고 알려져 있다(Warren et al., 1986; 1988). 이를 바탕으로, 해양과 육지 지역을 구분하여 주성분분석을 수행하였으며, 선행 연구의 방법(Jones and Christopher, 2010)을 참고하여 에어로졸 지표인 AOD와 FMF를 주요성분변수로 지정하여 주성분분석을 수행하였다.

Table 1은 AOD와 구름 특성 인자들의 주성분분석

**Table 1.** Weighting coefficients of AOD produced using PCA that are used to generate the new PC variables. First row of values in the amount of variance explained by the corresponding PC variable

	Total				Land				Ocean			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
Var (%)	31.56	18.63	13.61	9.35	31.93	19.29	13.85	9.33	32.05	17.25	14.80	9.08
COD_Total	0.91			-0.27	0.92			-0.26	0.90			-0.31
COD_Ice	0.89				0.89				0.89			
CIP	0.87			0.21	0.87			0.22	0.86			0.21
CWP	0.83				0.83				0.84			
COD_Water	0.80			-0.40	0.80			-0.41	0.79			-0.42
WV_Cloudy		<b>0.95</b>				<b>0.94</b>				0.95		
WV_ClearSky		<b>0.93</b>				<b>0.92</b>				0.95		
<b>AOD</b>		<b>0.46</b>	-0.25			<b>0.53</b>				0.26	<b>-0.34</b>	
CTT		0.23	0.89			0.21	0.89	-0.22		0.27	<b>0.86</b>	
CTP		-0.20	0.84				0.88			-0.32	<b>0.78</b>	-0.25
CF		0.23	-0.60			0.37	-0.61				<b>-0.72</b>	
CIR				0.80				0.81				0.78
CWR			-0.24	0.75			-0.26	0.75		0.21		0.74

결과를 나타내며, 동아시아, 육지, 해양으로 구분하여 분석한 결과를 정리한 표이다. 먼저, 동아시아 지역에 대해서 AOD의 주성분분석 결과는 4개의 인자로 나타났으며, 전체 인자 중 73.2% 정도 설명할 수 있는 것으로 분석되었다. 이 중 에어로졸 광학두께가 포함된 인자는 총 2가지로 나타났으며, 그 중 비중이 높은 인자는 PC2로 총 18.63%의 비중을 설명할 수 있는 것으로 나타났다. PC2에 해당하는 인자 중에서는 WV\_Cloudy, WV\_ClearSky, AOD 인자들이 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다(순서대로 0.95, 0.93, 0.46). 이 3가지 특성 인자들이 높은 값을 나타내는 것은 Balakrishnaiah et al.(2012)의 선행 연구와 유사한 분석결과이다. 육지지역에서 AOD의 주성분분석 결과는 전체 인자 중 74.4%의 설명 비중이 계산되었으며, 동아시아 전체영역과 유사하게 PC2 인자가 AOD가 포함된 인자 중 높은 영향(19.3%)을 미치는 것으로 분석되었다. 또한, 동아시아 전체영역과 유사하게 WV\_Cloudy, WV\_ClearSky, AOD 인자들이 높은 값을 보였다. 마지막으로, 해양지역에서의 주성분분석 결과는 전체인자 중 73.2%의 설명력을 보였으며, CTT, CTP, CF, AOD가 연결된 PC3 인자가 높은 비중(14.8%)을 보였다. 이 중 CTT, CTP는 양의 값을, CF,

AOD는 음의 값을 나타낸다. 이들이 높은 값을 나타내는 것은 AOD가 클 때 CF는 증가, CTT, CTP는 감소함을 의미하여 키 큰 구름이 많이 형성된다는 것을 설명한다. 그러므로 AOD와 CF는 양의 관계, CTT, CTP는 음의 관계를 나타내며, 이는 Balakrishnaiah et al.(2012)의 선행연구 결과와 비슷하게 나타났다.

동아시아 전체영역과 육지지역의 AOD는 수증기와 관련된 특성 인자의 영향을 받은 반면, 해양지역의 AOD는 구름과 직접적으로 관련된 변수인 운량, 운정온도, 운정기압과 같은 인자에 의해 영향을 받은 것을 확인할 수 있다. 이는 Myhre et al.(2007)이 설명한 에어로졸의 증가가 강수억제를 일으키고 구름 지속시간을 증가시켜, 운정기압을 변화시키는 결과와 연관된다.

Table 2는 FMF와 구름 특성 인자들의 주성분분석 결과를 나타내며, 마찬가지로 동아시아 전체영역, 육지, 해양을 구분하였다. 전체지역에서 FMF의 주성분분석 결과는 전체인자 중 74.1%의 설명력을 보였으며, 이 중 2번째 인자는 18.2%의 설명력을 보였고, 영역구분에 상관없이 FMF는 WV\_Cloudy, WV\_ClearSky 성분이 비교적 높은 값을 나타낸다. 이는 미세입자와 수증기 또는 습도가 어떠한 인자에 의해 영향을 받고 있음을 의미한다.

Table 2. Same as table 1 but FMF

	Total				Land				Ocean			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
Var(%)	32.33	18.17	14.34	9.24	33.28	18.74	14.61	9.18	31.81	17.18	15.10	9.09
COD_Total	0.91			-0.28	0.91			-0.27	0.90			-0.31
COD_Ice	0.89				0.89				0.89			
CIP	0.87			0.20	0.88				0.87			0.21
CWP	0.82				0.82				0.83			
COD_Water	0.80			-0.41	0.79			-0.42	0.79			-0.43
WV_Cloudy		<b>0.93</b>				<b>0.93</b>				<b>0.93</b>		
WV_ClearSky		<b>0.93</b>				<b>0.93</b>				<b>0.94</b>		
<b>FMF</b>		<b>0.59</b>				<b>0.67</b>				<b>0.37</b>		
CTT		0.30	0.87			0.27	0.87	-0.23		0.29	0.87	
CTP			0.87				0.89			-0.28	0.81	-0.25
CF			-0.59			0.28	-0.63				-0.71	
CIR				0.80				0.81				0.78
CWR			-0.25	0.75			-0.25	0.76				0.75

미세입자비율을 에어로졸로 본다면 이는 Balakrishnaiah et al.(2012)의 인도 결과와 비슷하게 나타났다. 에어로졸의 미세입자비율은 수증기와 관련된 특성 인자뿐만 아니라, 온정온도, 운량 및 온정기압의 구름 특성 인자들과도 높은 상관관계를 가지고 있음을 의미한다. 이는 Shi et al.(2008)이 설명한 소수성 성질을 띠는 작은 크기의 에어로졸 등이 황산염 또는 흡습성 에어로졸에 의해 코팅되면 친수성으로 성질이 바뀌어 구름의 성장에 영향을 미친다는 선행연구의 결과들과 유사한 분석결과이다.

주성분분석을 통하여 에어로졸, 구름, 기상상태는 서로 관계가 있음을 확인하였다. AOD와 FMF의 주성분분석 결과, 주로 수증기와 관련된 특성 인자의 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해양지역의 AOD는 구름과 직접적으로 관련된 변수인 운량, 온정온도, 온정기압과 같은 인자에 의해 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 에어로졸과 구름 연구를 위한 전체적인 통계 분석을 위해서는 주성분분석 방법이 유용할 것으로 생각된다.

### 3.3. 구름의 에어로졸 간접효과

구름 특성에 대한 에어로졸의 간접효과를 설명하기 위해, 주성분분석을 통해 얻은 주요 인자들과 구름 특성 인자들간의 상관관계를 먼저 분석하였다. 한반도를 중심

으로 4개의 영역을 설정하여, 영역별로 특성을 고려하여 분석하였다. Fig. 4는 영역별 (a) CF-AOD, (b) CF-CIR, (c) CF-CWR, (d) CTP-CIR, (e) CTP-CWR, (f) CIR-COD, (g)CWR-COD 특성 인자들의 분포를 나타낸다. Fig. 4(a)를 통해 에어로졸 농도가 증가할수록 운량이 많아짐을 의미하며, 특히 R1(황해지역), R2(한반도 내륙) 지역에서 운량이 1.0인 경우 에어로졸광학두께는 0.8로 높은 값이 나타났다. 이는 중국 동부지역의 공업지대로부터 유입된 인위적 에어로졸 입자의 영향이라고 할 수 있다. 이는 R1과 R2지역의 운량증가에 따른 구름얼음입자의 크기가 큰 쪽으로 작아지는 경향(Fig. 4(b))에도 영향을 미친다. R3(동해지역), R4(남해지역) 지역에서는 상대적으로 중국에서 유입되는 에어로졸의 영향이 적은 것으로 판단된다. 하지만, 구름물입자의 크기가 운량에 미치는 영향은 구름얼음입자와 다소 다르게 나타났다. R2지역에서는 운량의 증가와 구름물입자의 증가가 선형 관계로 나타났으나 기타 지역에서는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 해양과 다른 한반도 내륙지역의 환경으로 인해 구름물입자가 점점 성장하여 구름지속시간을 늘리고 운량을 증가시키는데 역할을 하였을 것으로 판단된다. 온정기압과 구름얼음입자 및 물입자 크기와의 관계를 분석해보면(Fig 3(d), 3(e)), 온정기압이 높을수록(구



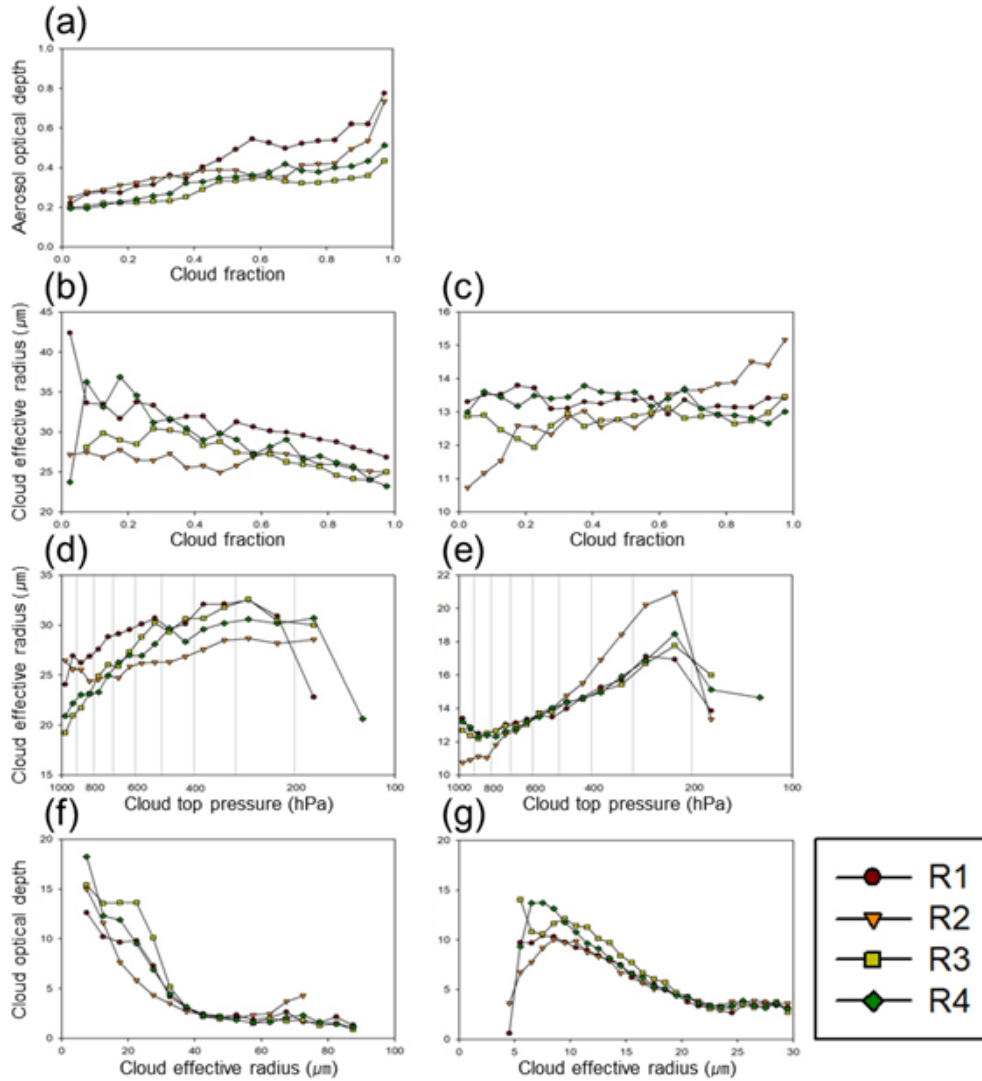


Fig. 4. The variation of (a) cloud fraction and aerosol optical depth, cloud fraction and cloud effective radius in (b) ice and (c) liquid phases, cloud top pressure and cloud effective radius in (d) ice and (e) liquid phases, cloud effective radius and cloud optical depth in (f) ice and (g) liquid phases.

름의 키가 작을수록) 구름입자 크기가 증가함을 나타내며, 운정기압 200~300 hPa 부근에서 얼음입자는 33  $\mu\text{m}$ , 물입자는 21  $\mu\text{m}$  최대입자크기를 나타낸다. 운정기압에 대한 구름얼음입자의 성장은 지역별로 유사하게 나타났으나, 구름물입자의 성장은 특히 R2지역에서 다른 지역보다 가파른 상승 경향을 나타냈다. 이는 Fig 3(c)와 마찬가지로 육지와 해양의 차이인 것으로 볼 수 있다.

비슷하게, 구름입자(Fig. 4(f), (g))가 성장할수록 구름광학두께는 감소하는 경향은 모든 지역에서 유사하게 나타났으나, R2 지역에서 구름물입자(입자크기 40  $\mu\text{m}$  이하)의 성장에 따라 구름광학두께의 감소 경향이 두드러지게 나타났다.

많은 선행연구에서 에어로졸과 구름간의 관계를 알아보는 방법의 하나로 에어로졸 광학두께와 구름입자반지

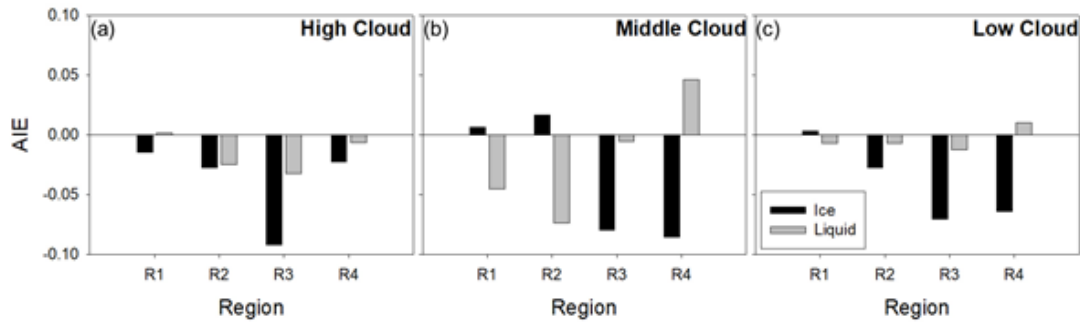


Fig. 5. Regional climatological mean aerosol indirect effect of ice(black) and liquid phase(grey) by cloud layer (a) high, (b) middle, and (c) low cloud.

름간의 비로 계산되는 지수인 에어로졸 간접효과를 언급하였다(Twomey, 1977; Feingold et al., 2003). 에어로졸 간접효과는 에어로졸 수 농도의 증가가 구름입자 수 농도 증가, 구름입자 크기 감소, 구름지속시간 증가, 강수 효율 감소를 일으킨다고 알려져 있다. 앞서 수행한 상관 분석이나 주성분분석에서는 수평적인 분포에서의 구름과 에어로졸의 인자들간의 분석을 통해 에어로졸이나 구름입자의 크기가 구름의 성장, 운량에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로, 구름의 높이와 운형을 구분하여 에어로졸의 간접효과 분석을 추가적으로 수행하였다.

Fig. 5는 (a) 상층운, (b) 중층운, (c) 하층운에서의 구름의 상태별(물상태, 얼음상태), 영역별 에어로졸의 간접효과를 나타내는 그림이다. R1과 R2 지역에서는, 중층운 하층운의 얼음입자의 경우에만 양의 값이 나타나고, 그 외의 모든 고도에서 에어로졸 간접효과가 주로 음의 값을 나타내었다. 이는 에어로졸이 증가하면 작은 구름입자들의 수가 증가하여 평균적인 구름입자크기의 감소 경향이 나타난다는 Twomey 이론과 일치하는 결과이다. 하지만, 중층운과 하층운의 경우에 Anti-Twomey 효과가 함께 일어나 복잡한 양상이 나타나는 것으로 보이며, 보다 자세한 특성연구가 필요한 부분으로 판단된다. R1과 R2지역에 비해서 R3, R4 지역에서의 에어로졸의 간접효과는 주로 음의 값이 나타났다. 반면에, R4지역에서 중-하층운의 에어로졸 간접효과가 양의 값(중층운 0.05, 하층운 0.01)으로 나타났는데, 이는 상대적으로 위도가 낮은 지역에서 지역적 특징이라는 선행연구들과 유사한 연구결과이다(Yuan et al., 2008; Dipu et al., 2013;

Jung et al., 2013).

구름을 9가지 종류로 구분하여 상태별(물상태, 얼음 상태), 영역별 에어로졸 간접효과를 추가적으로 분석하였다(Fig. 6). 상층운으로 분류되는 권운(Fig. 6(a))과 권층운(Fig. 6(b))과 Fig. 5(a)의 비교를 통해 에어로졸 간접효과를 살펴보면, 구름얼음입자의 경우에는 두 종류의 구름에서 모두 음의 값을 나타냈다. 하지만, 구름물입자의 경우에는 권운에서 양의 값이, 권층운에서 음의 값이 나타났다. 상층운이 형성되는 고도는 높기 때문에, 기온이 낮고 건조한 대기 상태를 가지고 있다. 구름입자의 상태도 얼음형태가 대부분이기 때문에 얇은 구름일수록 Twomey 효과가 지배적이며, 권운이 상대적으로 두께를 가지는 상층운이기 때문에 양의 에어로졸 간접효과가 나타난 것으로 보인다. 중층운으로는 대류운(Fig. 6(c)), 고적운(Fig. 6(d)), 고층운(Fig. 6(e)), 난층운(Fig. 6(f))의 구름에 대해서 분석하였다. Fig. 5(b)와 비교해보면, R3, R4지역에서 얼음상태 구름의 간접효과는 주로 고층운과 난층운에서 나타났다. 층운형태의 구름은 두께가 얇고 넓게 퍼지는 경향을 보이기 때문에 Twomey 효과가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단되며, R1과 R2지역의 양의 간접효과는 중국 동부 해안지역에서 유입되는 인위적 입자들과의 반응의 영향이라고 할 수 있다. 한편, R3지역에서의 대류운에 뚜렷하게 나타나는 양의 간접효과는 지역적 특색의 영향을 받은 것으로 보인다. R3(동해)지역은 바다와 높은 산맥이 가까운 거리에 있어, 강한 상승 기류가 동반되는 대류운의 형성이 자주 일어나기 때문에 Anti-Twomey 효과가 복합적으로 나타난 것으로 보인다. 이는 지역적, 환경적 요인으로 인해 Twomey효과가

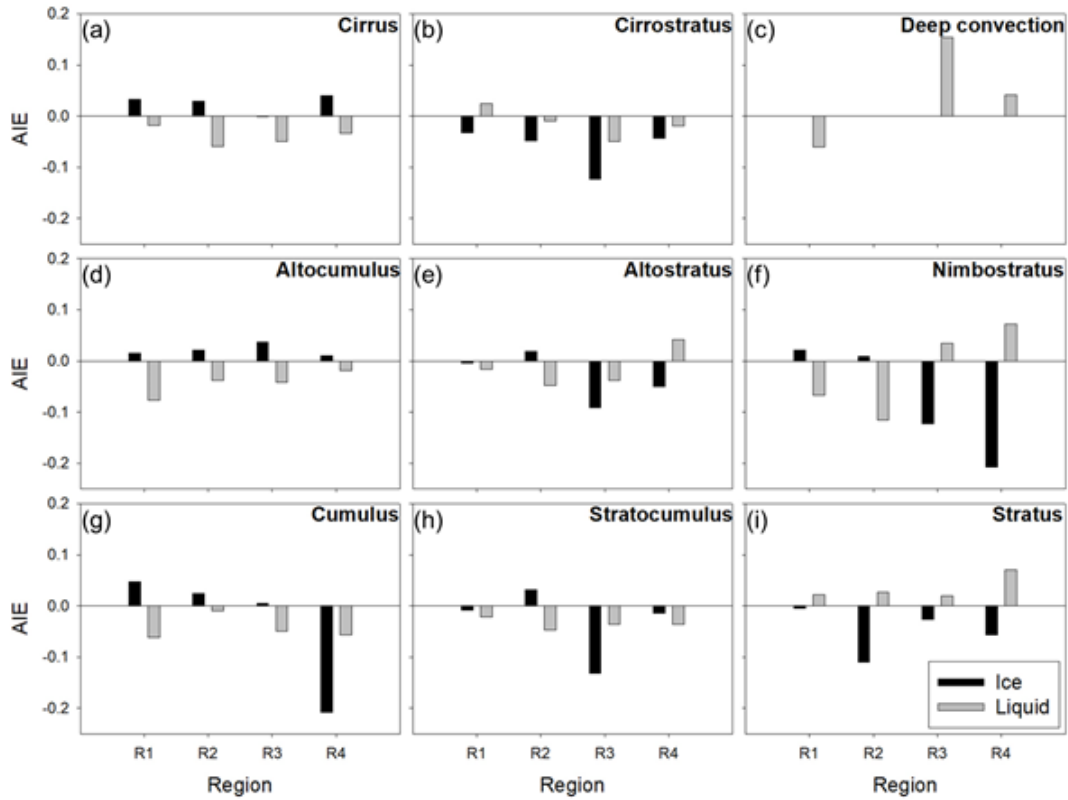


Fig. 6. Same as Fig. 5 but for cloud type (a) cirrus, (b) cirrostratus, (c) deep convection, (d) altostratus, (e) altostratus, (f) nimbostratus, (g) cumulus, (h) stratocumulus, and (i) stratus.

반대로 작용할 수 있다는 선행연구들의 내용과도 일치한다(Yuan et al., 2008; Dipu et al., 2013; Jung et al., 2013). 마지막으로 하층운으로 분류되는 적운(Fig. 6(g)), 층적운(Fig. 6(h)), 층운(Fig. 6(i))의 경우에서도 주로 음의 에어로졸 간접효과가 지배적으로 나타났다. R1과 R2지역 적운의 양의 간접효과는 지역 특징에 따른 인위적 요인의 영향이다. R4지역에서 나타나는 층운의 뚜렷한 양의 간접효과는 해양의 영향으로 보인다. 층운은 지면에 도달하지 않는 구름으로 강수가 없거나 아주 약한 형태로 나타나는 구름이다. 지면에서 가까운 구름 형태이기 때문에 인위적 요인의 영향이 많고, 지역적 특성(해양)을 많이 받는 R4 지역의 경우 Anti-Twomey 효과가 나타난 것으로 보이며, 선행연구의 결과들로 해석할 수 있다(Yuan et al., 2008; Dipu et al., 2013; Jung et al., 2013).

#### 4. 결론

본 연구에서는 동아시아 지역에서 발생하는 에어로졸과 구름변수간의 통계적 특성을 알아보았으며, 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 상관분석 결과에서 AOD와 CCN이 강한 양의 상관관계, AOD와 CF가 중간 상관관계를 보였으며, 이는 인도의 결과와 비교했을 때 전체적으로 낮은 값이며 동아시아 지역의 다양한 기상 변화의 결과로 유추할 수 있다. AOD와 CTT, CTP는 음의 상관관계로 에어로졸이 많을수록 키 큰 구름이 존재함을 나타낸다. FMF와 CCN은 양의 상관관계로, 이는 해양에서 파도의 비말(sea spray) 등이 CCN으로 작용하기 때문으로 여겨진다.

2. 주성분분석 결과에서 전체적으로 AOD와 FMF는 수증기와 같은 인자에 의해 영향을 받은 것을 확인하였

으나, 해양지역의 AOD는 구름과 직접적으로 관련된 변수인 운량, 운정온도, 운정기압과 같은 인자에 의해 영향을 받은 것을 확인할 수 있다. 이는 기존에 언급된 에어로졸의 증가가 강수억제를 일으키고 구름지속시간을 증가시켜, 운정기압을 변화시키는 결과와 연관된다.

3. 구름높이별, 운형별 에어로졸 간접효과는 대부분 음의 값인 Twomey 효과가 나타나지만 반대로 양의 값인 Anti-Twomey 효과가 혼합된 복잡한 양상이 나타났다. 동해와 남해지역에서 각각 대류운과 층운형태 구름에서 뚜렷하게 Anti-Twomey 효과가 나타났으며, 지역적 영향(내륙의 높은 산맥에 따른 상승기류와 해양)으로 해석된다. 이는 지역적, 계절적, 기상학적, 환경적 영향으로 Twomey 효과와 반대되는 Anti-Twomey 효과가 함께 나타나기도 한다는 선행연구결과로 설명할 수 있다.

본 연구를 통하여 다양한 변수가 복합적으로 영향을 미치는 동아시아 지역에서의 에어로졸과 구름변수간의 관계에 대해 통계적으로 알아보았다. 많은 선행논문을 통하여 에어로졸 광학두께와 구름응결핵, 에어로졸 광학두께와 미세입자비율, 에어로졸 광학두께와 운량의 관계를 밝힌 바 있으며, 본 연구결과에서는 동아시아 특히 한반도 주위를 목표로 하여 변수들간의 관계를 분석하였다. 이는 기존에 언급된 인도에서의 결과와 비슷한 양상을 보였으며, 다른 지역에 비해 동아시아 지역에서 낮은 상관관계, 주성분분석 결과, 복잡한 에어로졸 간접효과 값이 나타난 것은 동아시아 지역이 다양한 기상 현상 변화로 인하여 영향을 받기 때문으로 판단된다. 그러므로 복잡한 동아시아 지역의 에어로졸과 구름간의 특성연구가 더욱 필요하며, 또한 에어로졸 성분별 특성분석, 다양한 기상관측 장비를 이용한 상세 규모의 에어로졸과 구름간의 관계에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상항공기 활용 기술 개발연구」(KMA2018-00222)의 지원으로 수행되었습니다. 연구에 사용한 MODIS 자료는 NASA-GES-DISC의 Giovanni 온라인 시스템을 통해 제공받았습니다.

### REVERENCES

- Alam, K. K., Iqbal, M. J., Blaschke, T., Qureshi, S., Khan, G., 2010, Monitoring spatio-temporal variations in aerosols and aerosol-cloud interactions over Pakistan using MODIS data, *Adv. Space Res.*, 46, 1162-1176.
- Albrecht, B. A., 1989, Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, 245, 1227-1230.
- Aloysius, M., Monhan, M., Babu, S. S., Parameswaran, K., Moorthy, K. K., 2009, Validation of MODIS derived aerosol optical depth and an investigation on aerosol transport over the South East Arabian Sea during ARMEX-II. *Ann. Geophys.*, 27, 2285-2296.
- Balakrishnaiah, G., kumar, K. R., Reddy, B. S. K., Gopal, K. R., Reddy, R. R., Reddy, L. S. S., Swamulu, C., Ahammed, Y. N., Narasimhulu, K., KrishnaMoorthy, K., Babu S. S., 2012, Spatio-temporal variations in aerosol optical and cloud parameters over Southern India retrieved from MODIS satellite data, *Atmos. Env.*, 47, 435-445.
- Chung, K. Y., Park, S. U., 1995, Characteristics synoptic features associated with the transport of Yellow sand to Korea, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 31, 45-63.
- Dipu, S., Prabha, T. V., Pandithurai, G., Dudhia, J., Pfister, G., Rajesh, K., Goswami, B. N., 2013, Impact of elevated aerosol layer on the cloud macrophysical properties prior to monsoon onset, *Atmos. Env.*, 70, 454-467.
- Feingold, G., Eberhard, W. L., Veron, D. E., Previdi, M., 2003, First measurements of the Twomey indirect effect using ground based remote sensors, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1287.
- Houze, R. Jr., 2014, *Cloud dynamics*, Academic Press 2014, 1-496.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Pachauri, R. K. Meyer, L. A., 2015, *Climate change 2014: Synthesis report*, Cambridge University Press, IPCC, 1-151.
- Jones, T. A., Christopher, S. A., 2010, Statistical properties of aerosol-cloud-precipitation interactions in South America, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2287-2305.
- Jung, W. S., Panicker, A. S., Lee, D. I., Park, S. H., 2013, Estimates of aerosol indirect effect from Terra MODIS over Republic of Korea, *Adv. Meteorol.*, 2013, 976813.
- Jung, W. S., Park, S. H., Kang, D. D., Lee, D. I., Kim, D.,

- 2014, Characterization of chemical properties of precipitation at Busan, Korea, 2009, *J. Environ. Sci. Int.*, 23, 275-289.
- Kawamoto, K., 2008, Effect of precipitation on water cloud properties over China, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20811.
- Kondratyev, K. Y., Ivlev, L. S., Krapivin, V. F., Varostos, C. A., 2006, *Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1-572.
- Lee, Y. G., Kim, B. J., Park, G. U., Ahn, B. Y., 2010, Characteristics of precipitation and temperature at Ulleng-do and Dok-do, Korea of recent four years (2005 ~2008), *J. Environ. Sci. Int.*, 19, 1109-1118.
- Levin, Z., Cotton, W. R., 2008, *Aerosol pollution impact on precipitation: A Scientific Review*, Springer, 1-386.
- Myhre, G., Stordal, F., Johnsrud, M., Kaufman, Y. J., Rosenfeld, D., Storelvmo, T., Kristjánsson, J. E., Berntsen, T. K., Myhre, A., Isaksen, I. S. A., 2007, Aerosol-cloud interaction inferred from MODIS satellite data and global aerosol models, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3081-3101.
- Panicker, A. S., Pandithurai, G., Dipu, S., 2010, Aerosol indirect effect during successive contrasting monsoon seasons over Indian subcontinent using MODIS data, *Atmos. Env.*, 44, 1937-1943.
- Park, S. H., Panicker, A. S., Lee, D. I., Jung, W. S., Jang, S. M., Jang, M., Kim, D., Kim, Y. W., Jeong, H., 2010, Characterization of chemical properties of atmospheric aerosols over Anmyeon (South Korea), a super site under Global Atmosphere Watch, *J. Atmos. Chem.*, 67, 71-86.
- Quass, J., Ming, Y., Menon, S., Takemura, T., Wang, M., Penner, J. E., Gettelman, A., Lohmann, U., Bellouin, N., Boucher, O., Sayer, A. M., Thomas, G. E., McComiskey, A., Feingold, G., Hoose, C., Kristjánsson, J. E., Liu, X., Balkanski, Y., Donner, L. J., Ginoux, P. A., Stier, P., Grandey, B., Feichter, J., Sednev, I., Bauer, S. E., Koch, D., Grainger, R. G., Kirkevåg, A., Iversen, T., Seland, Ø., Easter, R., Ghan, S. J., Rasch, P. J., Morrison, H., Lamarque, J. F., Iacono, M. J., Kinne, S., Schulz, M., 2009, Aerosol indirect effects-general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8697-8717.
- Rosenfeld, D., Dai, J. X., Yu, Z., Yao, X., Xu, X. Y., Du, C., 2007, Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation, *Science*, 315, 1396-1398.
- Rossow, W. B., Schiffer, R. A., 1991, ISCCP cloud data products, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 2-20.
- Rossow, W. B., Schiffer, R. A., 1999, Advances in understanding clouds from ISCCP, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 80, 2261-2288.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2006, *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 1-1232.
- Shi, Z., Zhang, D., Hayashi, M., Ogata, H., Ji, H., Fujie, W., 2008, Influences of sulfate and nitrate on the hygroscopic behavior of coarse dust particles, *Atmos. Env.*, 42, 822-827.
- Song, S. K., Han, S. B., Kim, S. W., 2014, Analysis of meteorological characteristics related to changes in atmospheric environment on Jeju island during 2010-2012, *J. Environ. Sci. Int.*, 23, 1889-1907.
- Twomey, S., 1977, The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149-1152.
- Warner, T. T., 2009, *Desert meteorology*, Cambridge University Press, 1-620.
- Warren, S. G., Hahn, C. H., London, J., 1986, Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land, NCAR Technical Note, NCAR/TN-273 +STR, DOI: 10.5065/D6GH9FXB.
- Warren, S. G., Hahn, C. H., London, J., 1988, Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over the ocean, NCAR Technical Note, NCAR/TN-317 +STR, DOI: 10.5065/D6QC01D1.
- Wilks, D. S., 2006, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Elsevier academic press publication, 1-627.
- World Meteorological Organization (WMO), 2018, Peer review report on global precipitation enhancement activities, WWRP 2018-1, WMO, 1-129.
- Yuan, T., Li, Z., Zhang, R., Fan, J., 2008, Increase of cloud droplet size with aerosol optical depth: an observation and modeling study, *J. Geophys. Res.*, 113, 1-16.
- Yum, S. S., Kim, B. G., Kim, S. W., Chang, L. S., Kim, S. B., 2011, A review of clouds and Aerosols, *Clim. Change Res.*, 2, 253-267.
- Zhou, L., Hopke, P. K., Paatero, P., Ondov, J. M., Pancras, J. P., Pekney N. J., Davidson, C. I., 2004, Advanced factor analysis for multiple time resolution aerosol composition data, *Atmos. Env.*, 38, 4909-4920.

Zubko, V., Kaufman, Y. J., Burg, R. I., Martines, J. V., 2007, Principal component analysis of remote sensing of aerosols over oceans, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45, 730-745.

- 
- Research scientist. Woon-Seon Jung  
Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences  
wsjung01@korea.kr
  - Research scientist. Hyun-Min Sung  
Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences  
sunghml22@korea.kr

- 
- Professor. Dong-In Lee  
Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University  
leedi@pknu.ac.kr
  - Senior research scientist. Joo-Wan Cha  
Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences  
jwcha@korea.kr
  - Senior research scientist. Ki-Ho Chang  
Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences  
khchang@korea.kr
  - Director. Chul-Kyu Lee  
Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences  
chulkyu.lee@korea.kr