국립환경과학원 현업 수치모델을 이용한 에어로졸 광학두께 산출 방법 및 검증에 관한 연구

연세대학교 대학원
지구천문대기학부(대기과학과)
김 혜 진

국립환경과학원 현업 수치모델을 이용한 에어로졸 광학두께 산출 방법 및 검증에 관한 연구

지도교수 박 상 훈

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2020년 06월 24일

연세대학교 대학원

지구천문대기학부(대기과학)

김 혜 진

감사의 글

인턴부터 시작하여 석사과정으로 입학하여 벌써 3년이라는 시간이 지나 학위 논문 제출을 앞두고 있습니다. 지난 2년 반 동안 좋은 경험이었습니다. 어색하게 시작한 인턴생활, 입학하여 대학원 생활에 적응하느냐 정신없었던 1학기, 수업과 과제에 가장 바쁘게 시간을 보냈던 2학기, 논문 주제가 정해지고 분석한 결과를 통하여 기상학회에 가서 처음으로 많은 사람들 앞에서 발표했던 3학기, 분석 결과를 정리하면서 논문을 써 내려갔던 4학기 모두 저에게 소중한 추억과 재산이 되었습니다.

우선, 부족한 저를 선뜻 제자로 받아 주시고, 과학자의 길로 인도해주신 지도교수님, 박상훈 교수님께 큰 감사의 말씀을 감사드립니다. 매번 학생을 먼저 생각해주시고, 연구자로서 교수님 덕분에 좋은 연구를 할 수 있었고, 연구에 대해 즐겁게 많이 배운 것 같습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 심사위원으로 좋은 코멘트를 해주신 김준 교수님과 구자호 교수님께도 감사드립니다. 논문에 대한 유익한 말씀이 많은 도움이 되었습니다. 석사과정동안 좋은 강의를 해주시고 전공 지식을 쌓게 해주신 모든 교수님들께도 감사드립니다.

석사학위 논문을 마무리하면서 생각해 보면, 대학원 수업 그리고 논문 진행에 힘들고 어려운 일들이 많았지만, 제가 이렇게 잘 올 수 있기까지에는 동료들의 도움이 매우 컸습니다. 연구실에서 많은 시간을 함께 보내고 배움의 시간을 나눠 갖은 대기모형 연구실 식구들에게 감사의 마음을 전합니다. 같이 입학해 수업도 같이 듣고 서로 많이 의지했던 수연이, 기운없이 집에 돌아가면 무슨 일 있었는지 걱정해주고 얘기도 많이 들어줬던 지수, 멘탈이 약해서 흔들릴 때 마다 잘하고 있다고 격려해주면서 옆에서 멘탈 케어 해주었던 손승우 오빠, 연구실에서 답답한 일 있을 때마다 커피 한잔하면서 바람 쐬게 해주었던 주엽오빠, 학문적으로 도움도 많이 주고 술 같이 마시면서 고민 들어준 한창오빠, 차근차근 얘기 들어주면서 위로해주고 공감해준 동철오빠, 유리언니,

스스럼없이 다가갔던 저를 받아준 아림언니, 아진이, 장난도 많이 치고 투정도 받아준 동희오빠, 태경언니, 송강이, 매번 밝은 모습으로 저를 반겨주는 소은이, 학교에서 지나가다 만날 때마다 반갑게 인사해준 단비언니, 지희언니, 민지언니, 지섭오빠, 동혁오빠, 경민이에게도 모두 감사의 마음을 전하며, 모두 좋은 연구를 하며, 승승장구 하시길 기원합니다.

저의 대학원 생활을 응원해주고, 힘이 되어준 친구들의 도움도 컸습니다. 서로를 응원하면서 각자의 자리에서 열심히 미래를 준비하고 있는 김박설, 언제 봐도 편하게 만날 수 있는 거지들, 상큼이 민지에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로, 밝고 건강한 모습으로 키워 주시고 제가 가는 길을 항상 응원해주시고 믿어 주신 엄마, 아빠께도 감사드립니다. 앞으로는 제가 아빠, 엄마의 버팀목이 되어드리겠습니다. 그리고 2년 먼저 태어난 언니라고 생각해주고, 응원해준 동생에게도 고마운 마음을 전합니다.

모든 분들의 응원과 도움 덕분에 제가 이렇게 무사히 졸업을 앞두고 있는 것 같습니다. 저를 아끼고 격려해 주셨던 모든 분들께 진심으로 감사하다는 마음을 전하며 석사 학위 논문을 마칩니다. 더욱 정진하며 바른 모습으로 한층 성장해 대기과학 분야에서 꼭 필요한 존재가 되도록 노력하겠습니다.

2020년 6월 24일

김혜진 올림.

차 례

차 례 i

그림 차례 iii

표 차례 vi

국문 요약 viii

제 1 장. 서론 1

1.1 연구 배경 1

1.2 연구 동기 5

1.2.1 CMAQ을 활용한 일반적인 AOD 산출 알고리즘 5

1.2.2 기존 방안의 구름 흡습성장인자의 불확실성 6

1.3 연구 목적 14

제 2 장. 방법론 15

2.1 국립환경과학원의 현업 대기화학모델CMAQ) 15

2.2 새로운 방안의 구름 흡습성장인자 (Kiehl et al., 2000) 17

2.3 CMAQ을 활용한 AOD 산출 알고리즘 (Pitchford et al., 2007) 24

제 3 장. 연구 결과 34

3.1 수치모형의 해상도에 따른 AOD 결과 비교 34

3.1.1 기존 방안의 구름 흡습성장인자(Malm et al., 1994)로 산출된 AOD 35

3.1.2 새로운 방안의 구름 흡습성장인자(Kiehl et al., 2000)로 산출된 AOD 40

3.1.3 새로운 방안(Pitchford et al., 2007)로 산출된 AOD 45

3.1.4 2016년 3월부터 2017년 2월 1년간의 비교 결과 50

3.2 spin-up time에 따른 AOD 결과 비교 57

제 4장. 요약 및 결론 64

참고 문헌 69

Abstract 71

그림 차례

Figure.1. GOCI Aerosol Optical Depth (AOD) 2016.05.21 00:30 UTC, 2016.05.03 00:30 UTC. ····· 1

Figure.2. CMAQ-simulated AOD estimated using coefficients for Relative Humidity function : (a) spring, (b) annual, (c) winter, (d) annual.····· 7

Figure.3. GOCI Aerosol Optical Depth (AOD), estimated CMAQ-simulated AOD used Malm et al. (1994) method. ····· 9

Figure.4. Estimated CMAQ-simulated AOD used Malm et al. (1994) method RH_max = 93%, RH_max = 96%, RH_max = 99%.····· 10

Figure.5. Daily variations in the CMAQ-simulated and AERONET at 3 AERONET sites over South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET. ····· 12

Figure.6. CMAQ model domain and resolution. ····· 15

Figure.7. Comparison of changes in effective learning growth rate for relative humidity. Solid line is suggested by Song et al. (2008), Broken line is suggested by Kiehl et al. (2000). ····· 17

Figure.8. The AOD estimated from the hygroscopic growth factor of the new method and the observed GOCI AOD. ····· 19

Figure.9. The AOD estimated from the hygroscopic growth factor of the new method and the hygroscopic growth factor of the original method. 20

Figure.10. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May 2016, over 2 sites. 22

Figure.11. Water growth curves for small and large size distribution sulfate and nitrate, sea salt and the original algorithm sulfate and nitrate. 29

Figure.12. The AOD estimated from the presented by Pitchford et al. (2007) method and the observed GOCI AOD. 30

Figure.13. The AOD estimated from the presented by Pitchford et al. (2007) method and the hygroscopic growth factor of the original method. 31

Figure.14. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May,2016, at the 2 AERONET sites. 32

Figure.15. Spatial distribution of GOCI observed AOD, the CMAQ-simulated 27km resolution estimated AOD and 09km resolution estimated AOD. 35

Figure.16. Daily variation in the CMAQ-simulated and AERONET AOD at the 3 AERONET sites in South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET. 36

Figure.17. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May,2016, at the 3 AERONET sites. 38

Figure.18. Spatial distribution of GOCI observed AOD, the CMAQ-simulated 27km resolution estimated AOD and 09km resolution estimated AOD. 40

Figure.19 Daily variation in the CMAQ-simulated and AERONET AOD at the 3 AERONET sites in South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET. ····· 41

Figure.20 Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May,2016, at the 3 AERONET sites. ····· 43

Figure.21. Spatial distribution of GOCI observed AOD, the CMAQ-simulated 27km resolution estimated AOD and 09km resolution estimated AOD. ····· 45

Figure.22. Daily variation in the CMAQ-simulated and AERONET AOD at the 3 AERONET sites in South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET. ····· 46

Figure.23. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AEROENT AOD for May,2016, at the 3 AERONET sites. ····· 48

Figure.24. Locations of the 15 AERONET sites. ····· 50

Figure.25. The AOD estimated result according to forecast time. ····· 57

Figure.26. Forecast time of CMAQ model. ····· 58

표 차례

Table.1. Statics of land and ocean AOD comparison between AERONET/SONET and satellite products (Choi et al., 2018). 2

Table.2. Statics values between the CMAQ-simulated and AERONET AODs in spring, 2006 (Park et al., 2011). 3

Table.3. Statistical values between the CMAQ-simulated, MODIS-retrieved, assimilated and AERONET AODs for all four seasons, 2006 (Park et al., 2011). 4

Table.4. Seasonal variation of each coefficient used in f(RH) (Song et al., 2008). 7

Table.5. Configuration for CMAQ model used for air quality forecast. 16

Table.6. Sea salt particle diameter growth and water growth function (Pitchford et al., 2007). 26

Table.7. Water growth for the small and large sized distribution sulfate and nitrate components. 27

Table.8. Information of the 15 AERONET sites. 51

Table.9. Statistical values between using 27km resolution data the AOD estimated method1, method2, method3, method4 and AERONET AODs(15-sites) for all four seasons. 2016.03~2017.02····· 54

Table.10. Statistical values between using 27km resolution data the AOD estimated method1, method2, method3, method4 and AERONET AODs(6-sites) for all four seasons. 2016.03~2017.02····· 55

Table.11. Statistical values between using 09km resolution data the AOD estimated method1, method2, method3, method4 and AERONET AODs(6-sites) for all four seasons. 2016.03~2017.02····· 56

Table.12. Statistical values between the AOD estimated method1, method2, method3, method4 without giving spin-up time and AERONET AODs for all four seasons. 2016.03~2017.02····· 61

Table.13. Statistical values between the AOD estimated method1, method2, method3, method4 with 12-hour giving spin-up time and AERONET AODs for all four seasons. 2016.03~2017.02····· 62

Table.14. Statistical values between the AOD estimated method1, method2, method3, method4 with 21-hour giving spin-up time and AERONET AODs for all four seasons. 2016.03~2017.02····· 63

국문 요약

국립환경과학원 현업 수치 모델을 이용한 에어로졸 광학두께 산출방법 및 검증에 관한 연구

미세먼지에 대한 관심과 사회적 영향이 커짐에 따라 대기오염을 제대로 관측하고 예보하는 과정의 중요성이 커지고 있다. 이를 공간적, 시간적으로 제한을 받지 않고 관측할 수 있는 위성자료를 활용 분석하는 과정은 필수적이다. 하지만 구름이 있는 경우, 특히 깊은 구름이 발달했을 경우, 구름 내부 및 하층의 오염물질의 상태를 예측하기 힘들기 때문에, 에어로졸 광학두께(AOD)의 농도를 파악하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 국립환경과학원의 현업 대기화학모델(CMAQ)을 이용하여 AOD를 추정하고 그 결과를 검증하였다.

일반적으로 널리 사용되는 AOD 산출방법은 구름 흡습성장인자와 밀접한 관련이 있기 때문에, 임의의 방법으로 최대 상대습도 값을 정해주어야 하고, 그 값에 따라 AOD 산출 결과가 민감하게 나타나는 것을 확인하였다. 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 불확실성을 해결하고자 새로운 알고리즘을 적용해보았다. 새로운 알고리즘을 적용하여 계산된 현업모델의 AOD는 기존 방안에 비하여, 구름 흡습성장인자에 크게 민감하지 않은 것을 확인하였다. 크기에 따라 구름 흡습성장인자를 계산하는 다른 알고리즘을 적용하여 AERONET 지상 관측자료와 통계적 분석을 통해 국립환경과학원 현업 모델의 AOD 산출 능력을 검증하였다. 또한 고해상도의 수평 해상도에서 보다 정확한 검증값을 보이는지 확인하였다.

산출 알고리즘에 따라 현업모델의 AOD 결과는 구름이 많은 지역을 중심으로 AOD의 농도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 고농도의 AOD는 구름과 함께 존재하는 경우가 많기 때문에, 흡습성장인자는 구름의 발달과 깊은

연관이 있어 구름이 발달할 수 있는 충분한 spin-up time을 주어야 한다. 수치모형의 spin-up time에 따른 AOD 산출 결과의 민감도도 살펴보고 AERONET 지상 관측자료와 통계적 분석을 통해 검증하였다.

핵심되는 말 : 에어로졸 광학두께(AOD), 대기화학모델(CMAQ), 구름 흡습성장인자, 고해상도, spin-up time

제1장. 서론

1.1. 연구 배경

최근 미세먼지에 대한 관심과 사회적 영향이 커짐에 따라 대기오염을 제대로 관측하고 예보하는 과정의 중요성이 커지고 있다. 이를 공간적, 시간적으로 제한을 받지 않고 관측할 수 있는 위성자료를 활용, 분석하는 과정은 필수적이다. 하지만 구름이 있는 경우, 특히 깊은 구름이 발달했을 경우, 구름 내부 및 하층의 오염물질의 상태를 예측하기 힘들기 때문에, 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)의 농도를 파악하는데 어려움이 있다. 이러한 이유로 환경위성에서 결측된 AOD를 추정하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다.

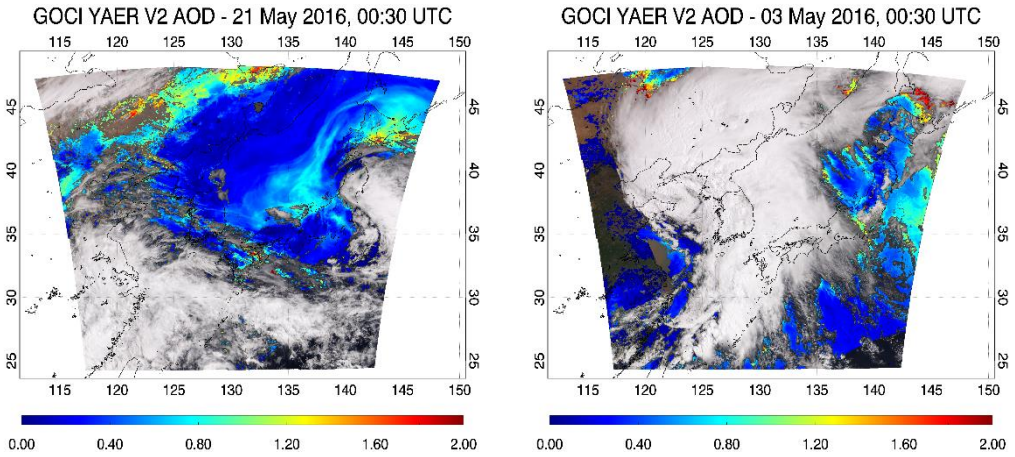

Fig.1. GOCI Aerosol Optical Depth(AOD) 2016.05.21 00:30UTC, 2016.05.03 00:30UTC.

Figure 1에서 보면, 깊은 구름이 발달했을 경우, 한반도의 AOD의 농도를 파악하는데 어려움이 있는 것을 확인하였다. 선행연구에서는 위성자료를 이용하여 AOD를 산출하거나, CMAQ을 활용하여 AOD를 산출하였다. Choi et al. (2018)에서는 GOCI YEAR V2 산출 알고리즘을 통해 기존 GOCI 위성 알고리즘을 통해 산출되는 AOD보다 더 좋은 성능으로 산출하였고, Park et al. (2011)에서는 CMAQ을 활용하여 AOD를 산출하였다.

Table.1. Statics of land and ocean AOD comparison between AERONET/SONET and satellite products (Choi et al., 2018).

Satellite AOD algorithm	N	R	MB	f within EE_{DT}	RMSE
Land AOD comparison with AERONET					
GOCI YAER V1 all QA	47 850	0.86	−0.015	0.49	0.24
GOCI YAER V1 QA3	38 183	0.92	−0.066	0.49	0.18
GOCI YAER V2	45 643	0.91	0.010	0.60	0.16
MODIS DT	3228	0.92	0.043	0.62	0.18
MODIS DB	3463	0.93	0.007	0.73	0.16
Land AOD comparison with SONET					
GOCI YAER V1 all QA	12 974	0.83	−0.048	0.45	0.29
GOCI YAER V1 QA3	10 483	0.88	−0.103	0.42	0.27
GOCI YAER V2	12 238	0.86	−0.021	0.51	0.24
MODIS DT	733	0.82	0.104	0.46	0.29
MODIS DB	1258	0.86	0.000	0.67	0.27
Ocean AOD comparison with AERONET					
GOCI YAER V1 all QA	19 945	0.83	0.056	0.55	0.17
GOCI YAER V1 QA3	18 308	0.88	0.043	0.62	0.13
GOCI YAER V2	18 499	0.89	0.008	0.71	0.11
MODIS DT	680	0.92	0.033	0.73	0.09

Table.2. Statics values between the CMAQ-simulated and AEORNET AODs in spring, 2006 (Park et al., 2011).

AERONET vs.	Number of data	R	RMSE	MNGE	MB	MNB
CMAQ (without dust)	41	0.59	0.35	49.55	−0.29	−48.67
CMAQ (with dust)	41	0.70	0.31	45.32	−0.19	−30.09

또한 보다 더 정확한 AOD를 산출하기 위해 대기 화학 모델을 활용하여 AOD를 산출하고, 위성 관측을 통해 산출된 AOD를 자료 동화하여 대기질 재분석 자료를 생성하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Park et al. (2011)에서는 CMAQ을 통해 산출한 AOD에 MODIS를 통해 산출한 AOD를 자료동화를 수행하여 대기질 재분석 자료를 생성하였다. CMAQ을 통해 산출한 AOD의 봄철 RMSE는 0.31의 검증값을 나타냈으며, 자료동화를 수행하여 산출한 AOD의 봄철 RMSE는 0.20으로 CMAQ을 통해서 산출한 AOD의 RMSE값 보다 더 정확한 검증값을 보였다. 논문에서는 자세하게 제시되지는 않았지만, 더 향상되고 개선된 결과를 위하여 CMAQ 모델을 수평해상도 30km×30km로 새로 수행하였으므로, Retrospective, 즉 hindcast로 CMAQ 모델을 수행한 것으로 보인다.

Table.3. Statistical values between the CMAQ-simulated, MODIS-retrieved, assimilated and AERONET AODs for all four seasons, 2006 (Park et al., 2011).

AERONET vs.	period	Number of data	*R*	RMSE	MNGE	MB	MNB
CMAQ	SPRING	41	0.59	0.31	45.24	−0.19	−29.88
	SUMMER	33	0.61	0.30	48.47	−0.13	−22.45
	FALL	37	0.69	0.24	61.08	−0.10	11.84
	WINTER	38	0.79	0.15	34.86	−0.07	−4.78
MODIS	SPRING	41	0.65	0.21	30.18	−0.05	1.76
	SUMMER	33	0.75	0.20	31.43	−0.01	3.98
	FALL	36	0.75	0.20	108.36	0.01	87.81
	WINTER	38	0.72	0.15	49.37	−0.04	17.12
Assimilated	SPRING	41	0.71	0.20	26.41	−0.09	−8.69
	SUMMER	33	0.79	0.19	28.10	−0.06	−5.02
	FALL	36	0.77	0.20	63.15	−0.06	26.05
	WINTER	38	0.80	0.15	35.81	−0.07	−4.77

1.2 연구 동기

1.2.1 CMAQ을 활용한 일반적인 AOD 산출 알고리즘 (Malm et al., 1994)

일반적으로 CMAQ의 결과로부터 계산되어지는 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)는 Malm et al. (1994)이 제안한 방법을 사용한다. 즉, 많은 연구에서 Malm et al. (1994)이 제안한 방법을 사용하여 AOD를 계산하며, 이와 같은 식에 의해 계산되어진다.

$$AOD = \sum_{i=1}^{N} \left(\sigma_{sp} + \sigma_{ap}\right)_i \Delta Z_i \qquad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{sp} = {} & 0.003 \times f(RH) \times [NH_4^+ + SO_4^- + NO_3^-] \\ & +0.004 \times [Organic\ Mass] \\ & +0.001 \times [Fine\ soil] + 0.0006 \times [Coarse\ Mass] \end{aligned} \qquad (2)$$

$$\sigma_{ap} = 0.01 \times [Light\ Absorbind\ Carbon] \qquad (3)$$

여기서, 식 (1)에서 N은 수치모형의 연직층 좌표 개수, ΔZ_i는 각 층의 두

께를 의미하며, $\sigma_{sp,}\ \sigma_{ap}$ 는 에어로졸 소산계수(aerosol extinction coefficient)이다. 식 (2)와 식 (3)에서는 각각의 에어로졸 소산계수의 계산식을 나타낸다. 식 (2)와 식(3)에서의 [ ]의 단위는 mg/m^3 이며, 각각의 계수(0.003, 0.004, 0.001, 0.0006, 0.01)의 단위는 m^2/mg 로 표시된다.

1.2.2 기존 방안의 구름 흡습성장인자의 불확실성

Malm et al. (1994)이 제시한 AOD 산출 알고리즘에서 주목해야 할 부분은 f(RH)이며, f(RH)는 상대습도(Relative Humidity)에 의존하는 함수로, 다음과 같은 방법으로 구해진다.

$$f(RH) = b_0 + b_1\left(\frac{1}{1-RH}\right) + b_2\left(\frac{1}{1-RH}\right)^2 \qquad (4)$$

식 (4)는 Malm et al. (1994)이 제시한 방법에서 가장 불확실성이 높은 부분으로, 구름 흡습성장인자와 연관된 계산 방안이다. 먼저 설정계수들이 경험적으로 도출된 값으로 설정되어 있으며, Table 4와 같이 계절에 따라

다르게 설정되어 이와 관련된 불확실성이 존재한다.

Table.4. Seasonal variation of each coefficient used in f(RH) (Song et al., 2008).

	b_0	b_1	b_2
Spring	−0.01097	0.78095	0.08015
Summer	−0.18614	0.99211	–
Fall	−0.24812	1.01865	0.01074
Winter	0.34603	0.81984	–
Annual	0.33713	0.58601	0.09164

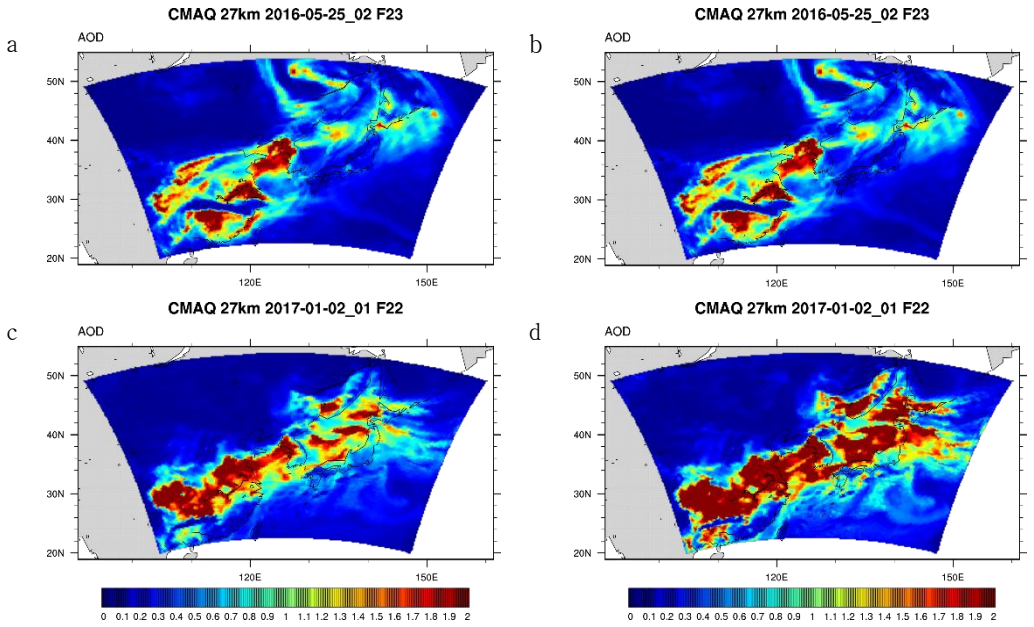

Fig.2. CMAQ-simulated AOD estimated using coefficients for Relative Humidity function : (a) spring, (b) annual, (c) winter (d) annual.

설정계수들(b_0, b_1, b_2)의 계절적 변이를 살펴보기 위하여 봄철과 겨울철에 대하여 설정계수에 따라 비교 분석하였다. Figure 2는 설정계수들(b_0, b_1, b_2)의 계절적 변이를 확인하기 위하여 봄철과 겨울철에 대하여 다른 계절의 계수를 사용하여 AOD를 산출한 것이다. (a),(b)는 2016년 5월 25일 02 UTC에 대하여 봄철, 연중의 값을 넣어 산출한 AOD 이며, (c),(d)는 2017년 1월 2일 02 UTC에 대하여 겨울, 연중의 값을 넣어 산출한 AOD의 결과이다.

5월의 경우, 봄과 연중의 값을 넣어 산출한 AOD의 결과는 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있으며, 1월의 경우 겨울철의 값을 넣어 산출한 AOD보다 연중의 값을 넣어 산출한 AOD가 AOD의 양을 더 많이 모의하는 것을 확인하였다. 이를 통해 Malm et al. (1994)이 제시한 방법을 통해 AOD를 산출할 때, 봄철의 경우 연중의 값을 넣어 계산했을 때와 크게 차이가 발생하지 않지만, 다른 계절의 경우 해당 계절의 계수를 사용하지 않고 연중 계수를 사용하게 되면, 산출되는 AOD의 값이 달라질 것으로 예상한다.

두번째로, 더 큰 불확실성은 식 (4)에서 분모 1-RH와 연관되어 상대습도(RH)의 값이 1에 가까운 값을 가지게 될 때, 분모의 값이 매우 작아지게 된다. 이로 인하여 f(RH)의 값이 무한대로 가게 되어 비현실적으로

커지는 문제가 발생한다. 따라서 임의로 상대습도 최대값을 설정하여 값이 무한대로 계산되지 않도록 해야 한다.

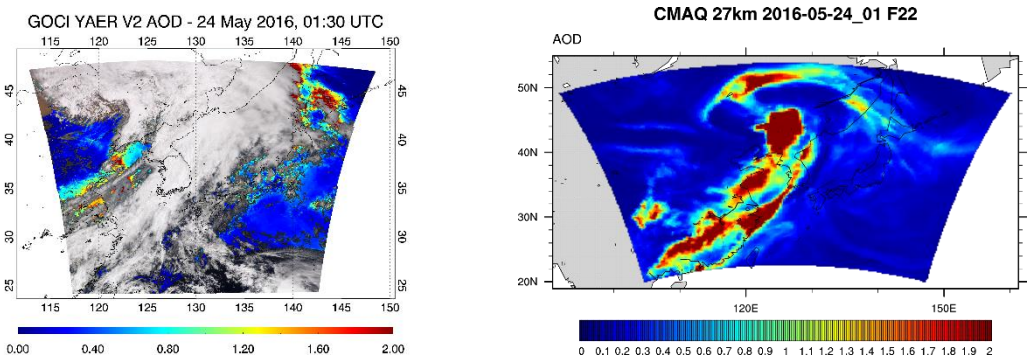

Fig.3. GOCI Aerosol Optical Depth (AOD), estimated CMAQ-simulated AOD used Malm et al. (1994) method.

Figure 3은 AOD의 공간 분포를 살펴보고자 식(4)에서 f(RH)값이 무한대로 가지 않도록 상대습도 최대값을 93%로 설정하여 AOD를 산출한 결과와 같은 시간대의 GOCI의 AOD의 결과이다. 동일한 시간대의 GOCI 위성자료와 비교해보면, 구름이 많은 지역을 중심으로 AOD의 농도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

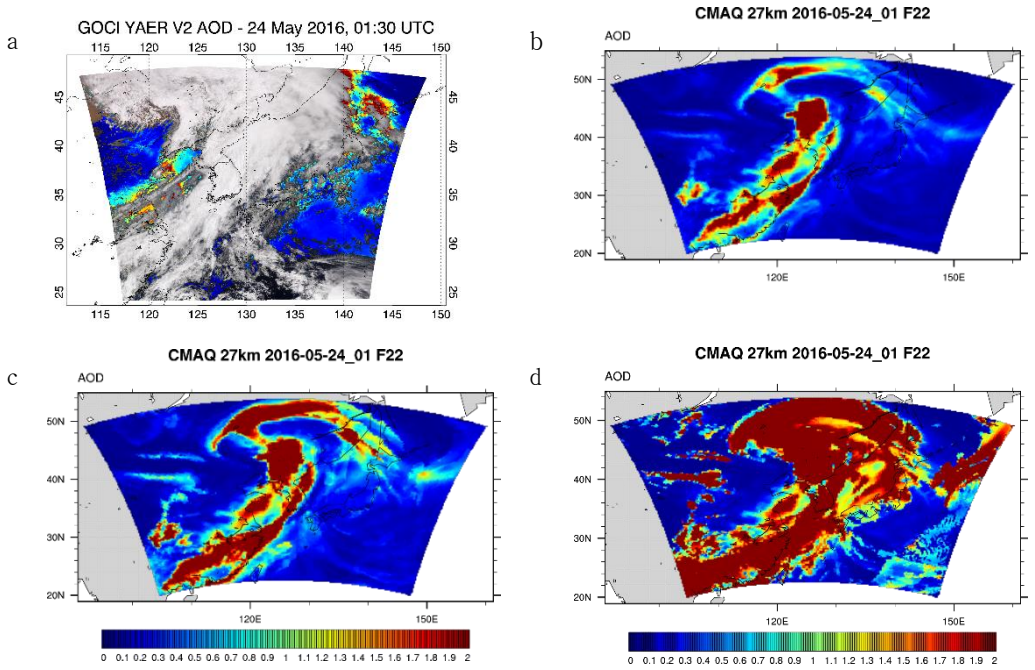

Fig. 4 . Estimated CMAQ-simulated AOD used Malm et al. (1994) method RH_max = 93%, RH_max=96%, RH_max=99%.

최대 상대습도에 대한 민감도를 확인하기 위하여 상대습도 최대값을 93%, 96%, 99%로 설정하여 산출한 결과를 살펴보았다. Figure 4의 (a)는 동일 시간대의 GOCI 위성을 통해 산출한 AOD이며, (b)는 상대습도 최대값을 93%로 정하여 산출한 AOD, (c)는 상대습도 최대값을 96%로 정하여 산출한 AOD, (d)는 상대습도 최대값을 99%로 설정하여 AOD를 산출한 결과이다. 상대습도 최대값의 차이에 따라 산출된 AOD의 결과에도 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있고, 구

름이 많은 지역을 중심으로, 최대 AOD의 농도가 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 최대 상대습도의 값이 커질수록 산출되는 AOD가 고농도 사례에 대한 과대모의가 더욱 심해지는 것을 확인할 수 있으며, 최대 상대습도를 96%로 표현하여 산출한 AOD는 비교적 구름이 얕게 분포하고 있는 지역까지 광범위하게 AOD 농도가 분포하는 것을 확인할 수 있다. 상대습도 최대값을 99%로 정하여 산출한 AOD는 93%의 경우에 비해 약 두 배 이상의 강한 AOD 값이 나타나는 것을 보여주고 있을 뿐 아니라, 아시아 전 영역에 걸쳐 그 양이 과다 모의되고 있는 것을 확인할 수 있다.

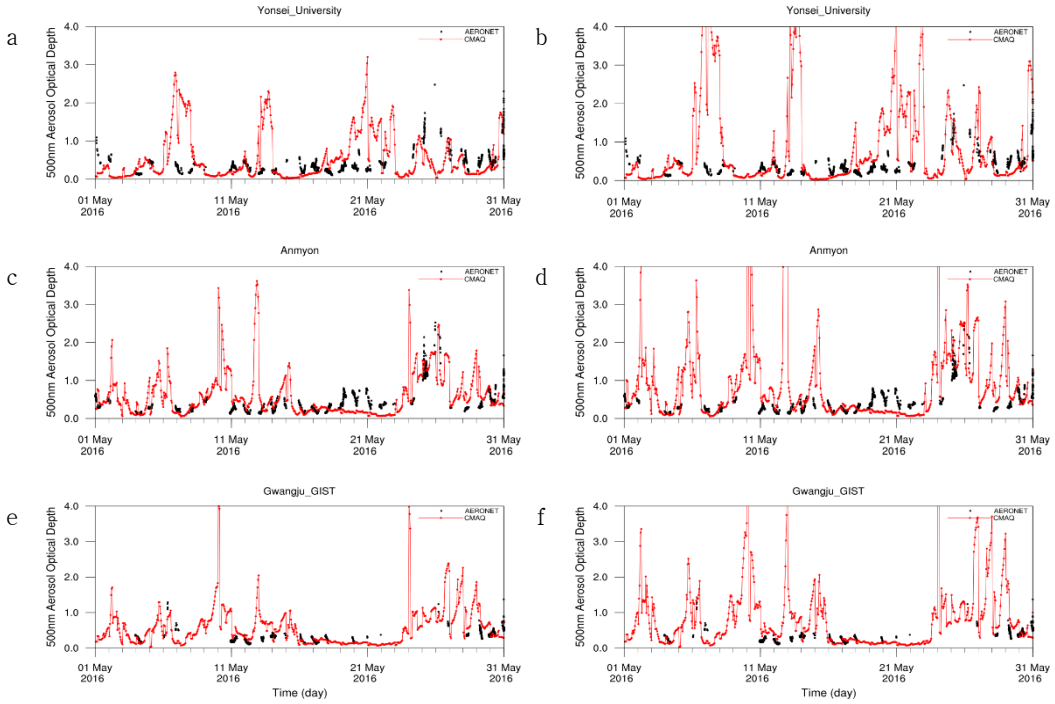

Fig.5. Daily variations in the CMAQ-simulated and AERONET at 3 AERONET sites over South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET.

보다 더 정확하게 비교 분석을 위해 AERONET 관측 값과 CMAQ을 통해 Malm et al. (1994)이 제시한 방법으로 산출한 AOD를 2016년 5월 한달간 우리나라 지상관측지점에 대하여 시계열로 나타내어 분석하였다. Figure 5는 상대습도 최대값을 93%와 96%로 정하여 산출한 AOD와 AERONET 관측자료 AOD를 연세대, 안면도, GIST지점에 대하여 나타낸 시계열 그림이다. Figure 5의 (a),(c),(e)

는 상대습도 최대값을 93%로 표현하여 산출한 AOD이며, (b),(d),(f)는 상대습도 최대값을 96%로 표현하여 산출한 AOD이다. 관측 값과의 시계열 그림을 통해서도 알 수 있듯이 상대습도 값을 93%로 정하여 산출한 AOD보다 96%로 정하여 산출한 AOD값이 두 배 가까이 커지는 것을 확인할 수 있다. 상대습도 최대값을 96%로 표현하는 경우에 고농도 사례에 대한 과대모의가 더욱 심해지는 것을 확인할 수 있다.

이를 통해, Malm et al. (1994)이 제시한 AOD 산출 알고리즘을 이용하기 위해서는 상대습도가 100%에 가까운 값을 가질수록, 식 (4)의 분모 값이 0에 가까워지는 문제점이 발생하므로, 임의의 방법으로 최대 상대습도 값을 정해주어야 한다. 최대 상대습도 값을 어떻게 정하는지에 따라 결과가 달라지며, 산출되는 AOD값의 불확실성이 커지는 것을 확인할 수 있다.

정리하면, 구름이 있는 곳에서, 구름 안에서 흡습성장인자들이 어떻게 성장하는지는 상대습도와 연관 있으므로, f(RH)는 AOD 산출 알고리즘에서 중요하다. Malm et al. (1994)이 제시한 AOD 산출 알고리즘은 대부분 연구에서 많이 사용되고 있으며, 환경과학원에서도 사용하고 있다. 대부분 연구에서 알고 있지만 사용자의 입장으로서 주관적으로 최대 상대습도 값을 정하여 사용한다.

1.3 연구 목적

본 연구에서는 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 불확실성을 해결하고자 새로운 알고리즘을 적용해보고자 하며, 비교 분석을 통해 국립환경과학원의 현업 대기화학모델(The Community Multi-scale Air-quality Modeling System, CMAQ)의 AOD 산출 능력을 검증하고자 한다.

새로운 알고리즘을 적용하여 계산된 현업모델의 AOD는 기존 AOD 산출 알고리즘에 비하여 구름 흡습성장인자에 민감하게 반응하는지 살펴보고자한다. 흡습성장인자를 크기에 따라 계산하는 다른 방안의 AOD 산출 알고리즘을 적용하여 기존 방안의 구름 흡습성장인자와 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD를 비교 분석하고자 한다.

해상도에 따른 AOD 산출 결과를 비교 분석하고자 고해상도의 수평해상도에서 보다 정확한 검증값을 보이는지 분석하고자 하며, 수치 모형의 spin-up time에 따른 AOD 산출 결과도 분석하고 검증하고자 한다.

제2장. 방법론

2.1 국립환경과학원의 현업 대기화학모델(CMAQ)

대기화학모델(CMAQ)은 국립환경과학원에서 현업으로 수행 중인 대기질 예보 모형으로 WRF(Weather Research Forecasting)로부터 기상장을 모의하고, 이를 바탕으로 CMAQ으로부터 대기질 모형을 모의하는 기상모형과 대기 오염 모형이 각개 존재하는 오프라인 모형(offline operational system)이다.

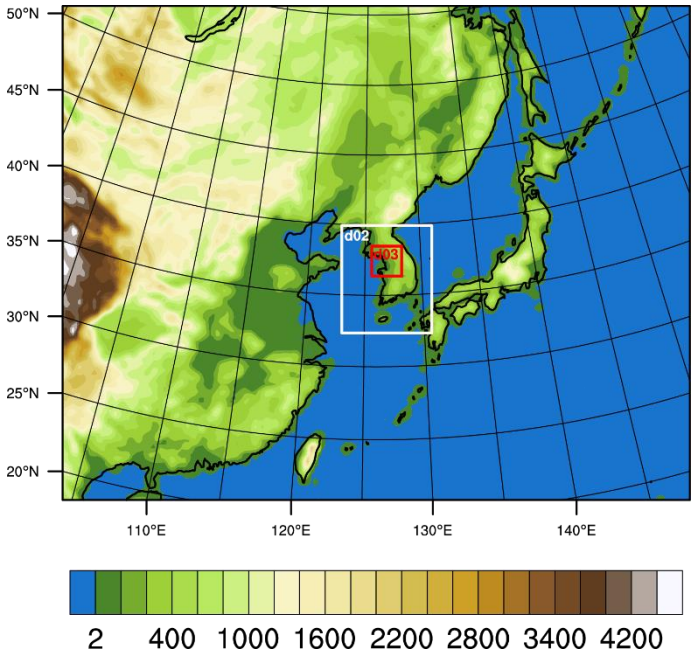

Fig.6. CMAQ model domain and resolution.

Figure 6은 CMAQ 모델의 domain을 나타내며, domain 해상도는 27km, 9km, 3km로 각각 동아시아 영역, 한반도 영역, 수도권 영역을 모의한다. Table 5는 추가적인 모델 세팅을 나타내며, 본 연구에서는 동아시아 영역의 27km 격자와 한반도 중심의 9km 격자에 대해 분석하였다.

Table.5. Configuration for CMAQ model used for air quality forecast.

Configuration	Description
Integration time	76 hours
Horizontal resolutions	27 km
Model levels	15
Cumulus	Kain-Fritch
Microphysics	WSM3
Longwave radiation	RRTM
Shortwave radiation	Goddard
PBL scheme	YSU

2.2 새로운 방안의 흡습성장인자(Kiehl et al., 2000)

기존 방안에서 흡습성장인자의 상대습도 최대값 설정에 따른 불확실성을 제거하기 위해 Kiehl et al. (2000)이 제시한 새로운 방안의 흡습성장인자를 사용하였다. 새로운 방안의 흡습성장인자 계산 방법은 식 (5)와 같다.

$$f(RH) = \exp\left(-1 - \frac{0.6}{RH-1.2} - \frac{0.75}{RH-1.5}\right) \qquad (5)$$

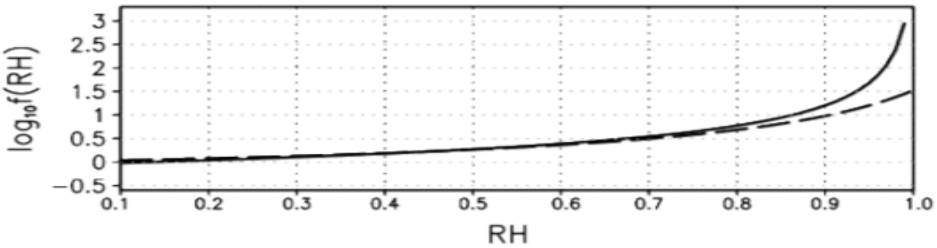

Fig.7. Comparison of changes in effective learning growth rate for relative humidity. Solid line is suggested by Song et al. (2008), Broken line is suggested by Kiehl et al. (2000).

이 식은 Chand et al. (2012)에서 사용된 식을 바탕으로 하며, 이 식은 본

래 황산염 에어로졸의 흡습성장인자로써 Kiehl et al. (2000)의 방안에 기초한다. Kiehl et al. (2000)은 NCAR CCM3 전 지구 모델을 활용하여 에어로졸에 따른 복사 강제력을 계산하여 복사와 연관된 광학적 특성들이 상대습도에 따라 어떻게 변하는지 나타내었다. Kiehl et al. (2000)이 제시한 방법은 기존 알려진 방법이 아니라 CCM3를 통해 계산되어진 것으로 CMAQ의 결과에는 처음 적용하여 AOD를 산출하였다.

새로운 방안의 흡습성장인자는 건조한 황산염 에어로졸의 크기 분포를 대수정규분포(Lognormal size distribution)을 따른다고 가정하고 흡습성장의 효과가 계산되며, 에어로졸 분포의 기하학적 반지름은 $0.05\mu m$이며, 표준편차는 2로 가정한다. 주어진 상대습도에 대해 성장의 평형에 도달하는 반지름은 $Köhler$ 방정식을 통해 얻어진다. 새로운 방안의 흡습성장인자는 해석적 솔루션을 통해 얻어졌으므로, Figure 7에서 나타나는 것처럼 실선으로 나타내는 기존의 f(RH)보다 파선으로 나타내는 새로운 방안의 f(RH)값의 변화가 적게 나타난다.

새로운 방안의 흡습성장인자 계산 방법은 상대습도가 100%에 가까운 값을 갖더라도 식 (5)의 분모 값들이 무한대로 가지 않는다. 따라서 분모의 값이 무한대로 가는 것을 피하기 위하여 수치모형에서 구해진 상대습도의 최대값을 설정할 필요가 없을 뿐 만 아니라, 계절에 따라 다른 값을 갖는 설정계수들 (b_0, b_1, b_2)의 계수에 대한 설정이 필요 없다.

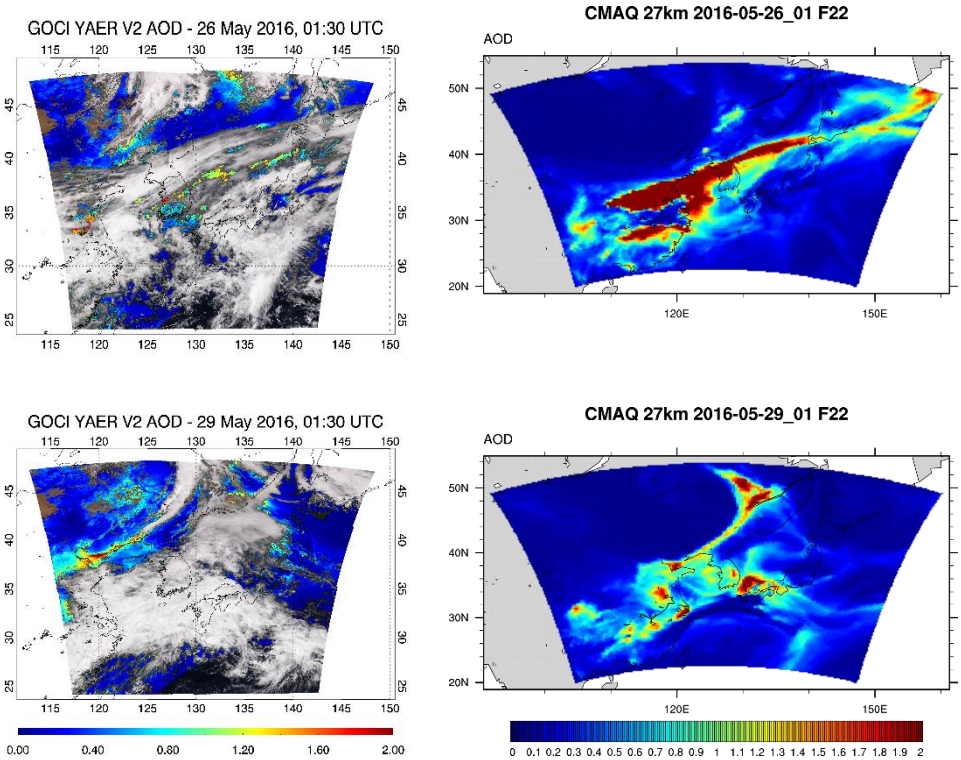

Fig.8. The AOD estimated from the hygroscopic growth factor of the new method and the observed GOCI AOD.

불확실성을 제거한 새로운 방안의 흡습성장인자(Kiehl et al., 2000)를 통해 산출된 AOD 값이 현실적인 값을 산출하는지 확인하고 분석하고자 27km 해상도의 결과를 GOCI 위성자료를 통해 관측된 AOD와 비교 분석하였다. Figure 8은 새로운 방안의 흡습성장인자를 도입하여 산출한 AOD 결과와 GOCI로 관측한 AOD를 같은 시간대에 나타낸 것이다. GOCI 위성자료에서 구름 층이 두터운 지역을 중심으로 결측된 지역이 많은 것을 확인할 수 있지만, 수치예

보 자료를 통한 산출 값은 모든 영역의 값들이 잘 산출된 것을 확인할 수 있다. 동아시아 영역의 수평 분포를 통해 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD는 GOCI 위성관측자료의 패턴과 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD는 상대습도가 100%에 가깝게 큰 값을 갖더라도 현실적인 값의 AOD 값이 산출되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 수치모형에서 상대습도가 1이 넘을 때가 종종 있는데, 이것을 잘 반영해주는 것을 확인할 수 있다.

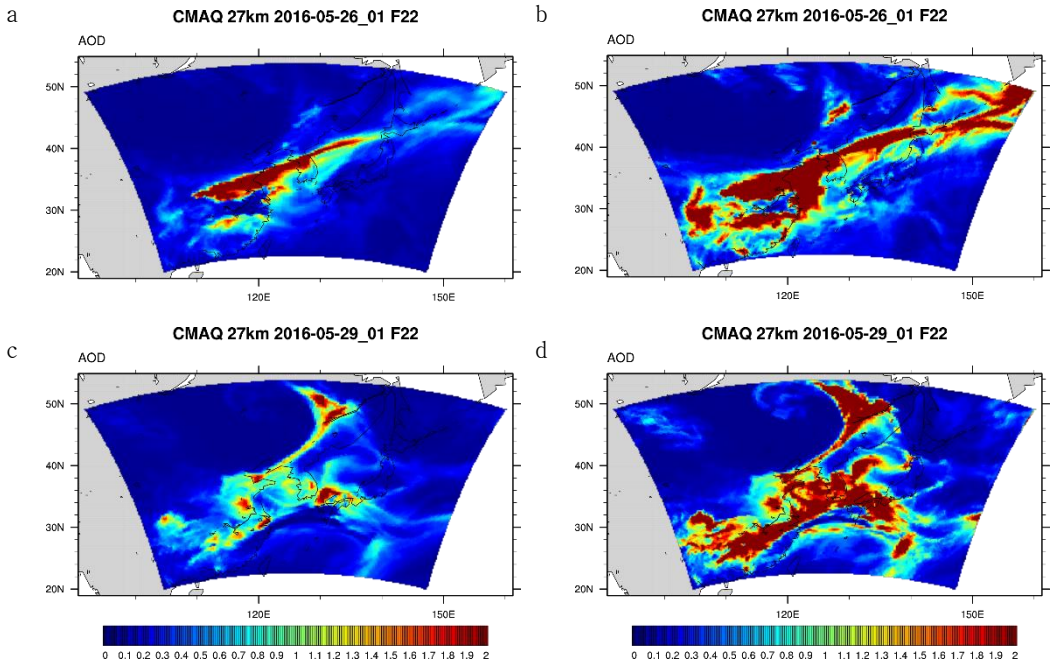

Fig.9. The AOD estimated from the hygroscopic growth factor of the new method and the hygroscopic growth factor of the original method.

Figure 9는 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD와 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD를 2016년 5월 26일 01 UTC와 2016년 5월 29일 01 UTC에 대하여 각각 나타낸 것이다. (a),(c)는 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD이며, (b),(d)는 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 최대 상대습도를 96%로 정하여 산출한 AOD이다.

위성자료에서 구름이 껴 결측으로 표현되는 부분에서 고농도 AOD를 표현하는 양이 상당히 다른 것을 확인할 수 있다. 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 결과에 비해 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 결과가 전반적으로 고농도 AOD의 양 자체를 감소하여 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 구름이 얕게 분포하고 있는 지역까지 광범위하게 AOD 농도를 포함하는 문제점이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

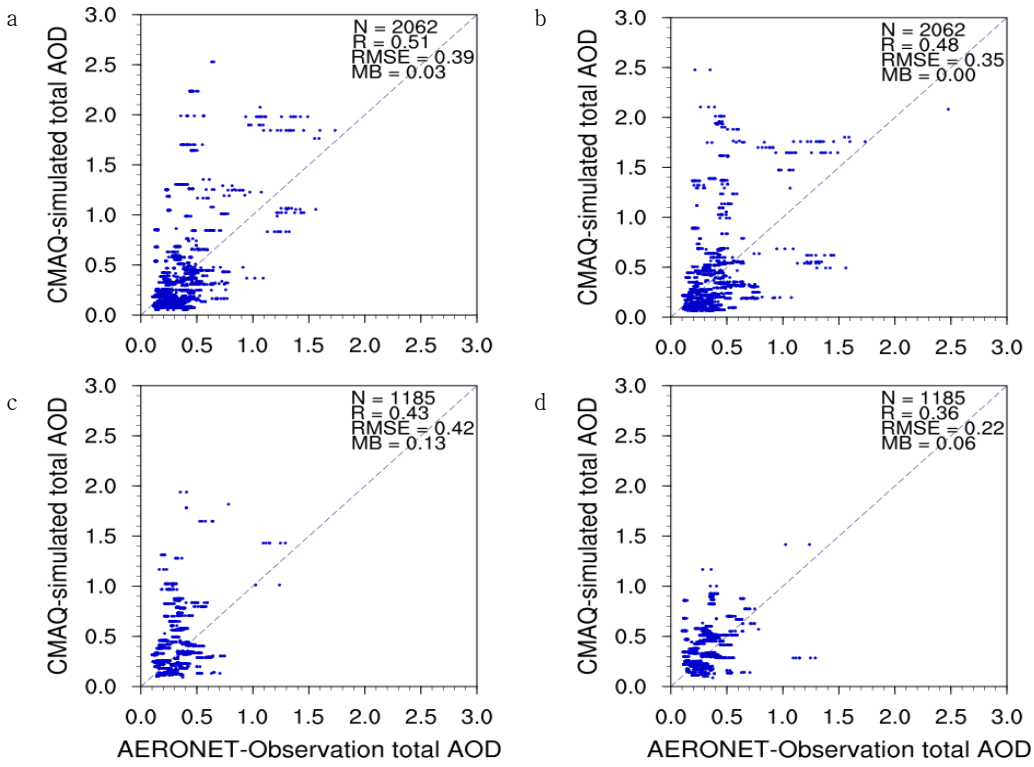

Fig.10. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May 2016, over 2 sites.

기존 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD와 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 산포도 분석을 하였다. Figure 10의 (a),(c)는 Malm et al. (1994)이 제시한 방법으로 상대습도 최대값을 96%로 표현하여 산출한 AOD와 AERONET AOD의 산포도이며, (b),(d)는 Kiehl et al. (2000)이 제시한 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD와 AERONET AOD 산포도를 나타낸 것이다. Figure 10의 (a),(b)는 서울 지점이며, (c),(d)는 GIST 광주지점

을 나타낸다. 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 상대습도 최대값을 96%로 두고 산출한 AOD의 RMSE값과 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD의 RMSE를 비교한 결과, 서울 관측지점의 경우 RMSE값이 0.39에서 0.35로 더 정확해졌으며, GIST 관측지점의 경우 RMSE값이 0.42에서 0.22로 더 정확한 검증값을 나타냈다.

2.3 CMAQ을 활용한 AOD 산출 알고리즘 (Pitchford et al., 2007)

2.2에서는 기존의 Malm et al. (1994) 방법의 불확실성 요소를 제거하기 위하여 Kiehl et al.(2000)이 제시한 새로운 방안의 흡습성장인자 방안을 도입하였다. 또 다른 AOD 산출 방법, Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출 알고리즘을 적용해보았다. Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출 알고리즘은 다음과 같다.

$$\mathrm{AOD} = \sum_{i=1}^{N} (b_{ext})_i \Delta Z_i \qquad (6)$$

이때, 식 (6)에서 N은 수치모형의 연직 층의 개수를 나타내며, ΔZ_i는 각 층의 두께를 의미하며, b_{ext} 는 에어로졸 소산계수(aerosol extinction coefficient)이다. 따라서 AOD는 각 층에서 계산된 에어로졸 소산계수를 연직 격자의 두께만큼 곱한 뒤 모두 더하는 방법으로 계산할 수 있다. 에어로졸 소산계수는 Pitchford et al. (2007)이 제시한 방법으로 계산하였으며, 에어로졸 소산계수 계산 식은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
b_{ext} \approx\ & 2.2 \times f_s(RH) \times [Small\ Sulfate] \\
& +4.8 \times f_L(RH) \times [Large\ Sulfate] \\
& +2.4 \times f_s(RH) \times [Small\ Nitrate] \\
& +5.1 \times f_L(RH) \times [Large\ Nitrate] \\
& +2.8 \times [Small\ Organic\ Mass] \\
& +6.1 \times [Large\ Organic\ Mass] \\
& +10 \times [Elemental\ Carbon] + 1 \times [Fine\ Soil] \\
& +1.7 \times f_{ss}(RH) \times [Sea\ Salt] \\
& +0.6 \times [Coarse\ Mass] \\
& +Rayleigh\ Scattering\ (Site\ Specific) \\
& +0.33 \times [NO_2(ppb)] \qquad (7)
\end{aligned}
$$

식 (7)의 [ ]의 단위는 mg/m^3이며, 각각의 계수(2.2, 4.8, 2.4, 5.1, 2.8, 6.1, 10, 1, 1.7, 0.6, 0.33)의 단위는 m^2/mg 으로 표시된다. $f_s(RH)$, $f_L(RH)$, $f_{ss}(RH)$는 각각 작은 입자와 큰 입자 그리고 해염입자의 흡습성장인자 함수를 나타내며, 이는 상대습도에 대한 함수이다. 각각의 흡습성장인자 함수는 LUT(Look-Up Table)에 의해 값이 계산되어진다. Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출 알고리즘은 흡습성장인자를 입자의 크기에 따라 다르게 계산되어 보다 더 정확한 검증값을 나타낼 것으로 예상한다.

Table.6. Sea salt particle diameter growth and water growth function (Pitchford et al., 2007).

RH (%)	Growth Factor[a]	*f*(*RH*)	RH (%)	Growth Factor	*f*(*RH*)
1–46	1.0000	1.0000	71	1.8434	3.1269
47	1.5922	2.3584	72	1.8589	3.1729
48	1.6001	2.3799	73	1.8751	3.2055
49	1.6081	2.4204	74	1.8921	3.2459
50	1.6162	2.4488	75	1.9100	3.2673
51	1.6245	2.4848	76	1.9288	3.3478
52	1.6329	2.5006	77	1.9488	3.4174
53	1.6415	2.5052	78	1.9700	3.5202
54	1.6503	2.5279	79	1.9925	3.5744
55	1.6593	2.5614	80	2.0166	3.6329
56	1.6685	2.5848	81	2.0423	3.6905
57	1.6779	2.5888	82	2.0701	3.8080
58	1.6875	2.6160	83	2.1001	3.9505
59	1.6974	2.6581	84	2.1328	4.0398
60	1.7075	2.6866	85	2.1684	4.1127
61	1.7179	2.7341	86	2.2077	4.2824
62	1.7286	2.7834	87	2.2512	4.4940
63	1.7397	2.8272	88	2.2999	4.6078
64	1.7511	2.8287	89	2.3548	4.8573
65	1.7629	2.8594	90	2.4174	5.1165
66	1.7751	2.8943	91	2.4898	5.3844
67	1.7877	2.9105	92	2.5749	5.7457
68	1.8008	2.9451	93	2.6769	6.1704
69	1.8145	3.0105	94	2.8021	6.7178
70	1.8286	3.0485	95	2.9610	7.3492

Table.7. Water growth for the small and large sized distribution sulfate and nitrate components.

RH (%)	$f_S(RH)$	$f_L(RH)$	RH (%)	$f_S(RH)$	$f_L(RH)$	RH (%)	$f_S(RH)$	$f_L(RH)$
0–36	1.00	1.00	56	1.78	1.61	76	2.60	2.18
37	1.38	1.31	57	1.81	1.63	77	2.67	2.22
38	1.40	1.32	58	1.83	1.65	78	2.75	2.27
39	1.42	1.34	59	1.86	1.67	79	2.84	2.33
40	1.44	1.35	60	1.89	1.69	80	2.93	2.39
41	1.46	1.36	61	1.92	1.71	81	3.03	2.45
42	1.48	1.38	62	1.95	1.73	82	3.15	2.52
43	1.49	1.39	63	1.99	1.75	83	3.27	2.60
44	1.51	1.41	64	2.02	1.78	84	3.42	2.69
45	1.53	1.42	65	2.06	1.80	85	3.58	2.79
46	1.55	1.44	66	2.09	1.83	86	3.76	2.90
47	1.57	1.45	67	2.13	1.86	87	3.98	3.02
48	1.59	1.47	68	2.17	1.89	88	4.23	3.16
49	1.62	1.49	69	2.22	1.92	89	4.53	3.33
50	1.64	1.50	70	2.26	1.95	90	4.90	3.53
51	1.66	1.52	71	2.31	1.98	91	5.35	3.77
52	1.68	1.54	72	2.36	2.01	92	5.93	4.06
53	1.71	1.55	73	2.41	2.05	93	6.71	4.43
54	1.73	1.57	74	2.47	2.09	94	7.78	4.92
55	1.76	1.59	75	2.54	2.13	95	9.34	5.57

에어로졸의 크기분포가 대수정규분포를 따른다고 가정하고, 해염입자는 분포의 기하학적 지름은 2.5μm이며, 표준편차는 2로 가정한다. 황산염과 질산염의 작은 입자의 분포의 기하학적 지름은 0.2μm, 표준편차는 2.2로 가정하며, 큰 입자의 분포의 기하학적 지름은 0.5μm, 표준편차는 1.5로 가정한다.

해염입자의 흡습성장인자는 Tang et al. (1997)이 제안한 흡습성장곡선을 참조하여 계산되었다. 해염입자의 흡습성장률은 NaCl의 흡습성장률과 거의 일치하며, 상대습도가 46%일 때 흡습성장인자가 1이 되도록 설정 되어있다. 즉,

건조상태에서의 해염입자와 상대습도가 46%이하일 때의 입자 크기는 동일하다고 설정되었으며, 상대습도 값이 증가함에 따라 흡습성장인자도 가파르게 증가하도록 설정되었다. 흡습성장인자는 주어진 상대습도에서 해염입자의 소산계수를 건조공기에서 해염입자의 소산계수로 나누었으며, 따라서 상대습도가 높은 환경에서 더 많은 양의 빛을 소산시키는 것으로 설정되었다.

황산염과 질산염의 흡습성장인자는 큰 입자와 작은 입자를 분리하여 서로 다른 성장인자를 갖도록 하였다. 흡습성장률은 AIM 열역학 평형 모델을 통하여 계산되었으며, 상대습도가 36% 이하일 경우에는 건조공기의 소산계수와 습윤공기의 소산계수가 같도록 설정되었다. 상대습도가 36% 이상일 경우에서는 해염입자와 마찬가지로 흡습성장인자가 가파르게 증가하였으며, 이는 작은 입자에서 성장률이 더 큰 것으로 나타난다. 황산염과 질산염의 작은 입자는 동일한 흡습성장인자를 사용하며, 황산염과 질산염의 큰 입자도 동일한 흡습성장인자를 사용하도록 설정되어 있다.

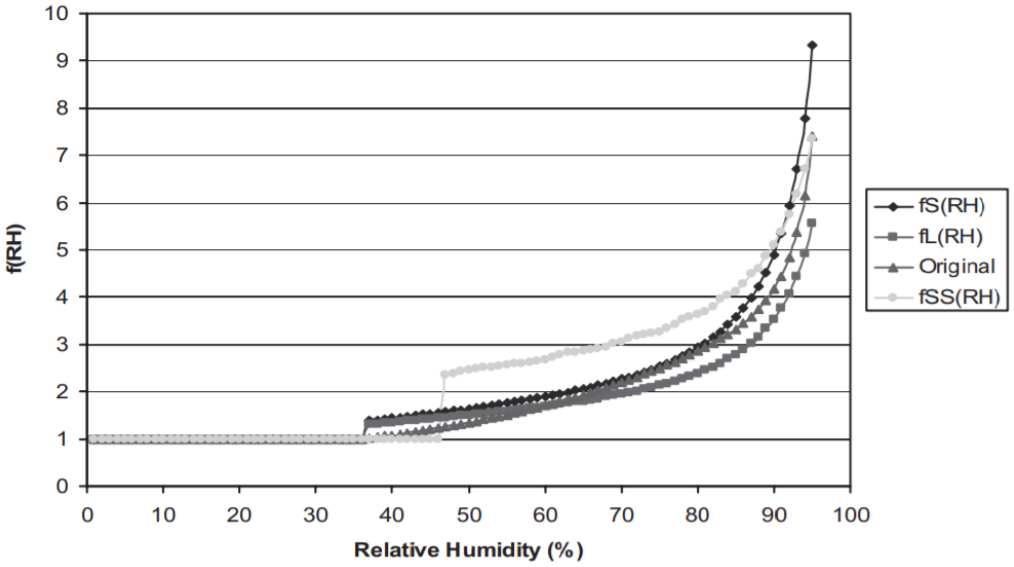

Fig.11. Water growth curves for small and large size distribution sulfate and nitrate, sea salt and the original algorithm sulfate and nitrate.

Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출방법은 NO_2에 의한 소산계수도 고려하였다. 유기물(Organic mass)은 작은 입자와 큰 입자로 분리하여 계산하였으며, 탄소화합물(Elemental carbon)과 토양입자(Fine soil), 그리고 Coarse Mass에 대해서도 계수를 통해 소산계수를 계산하여 AOD를 산출하도록 하였다. 각 요소에 곱해진 계수는 관측을 통하여 경험적으로 계산된 값으로 설정되었다.

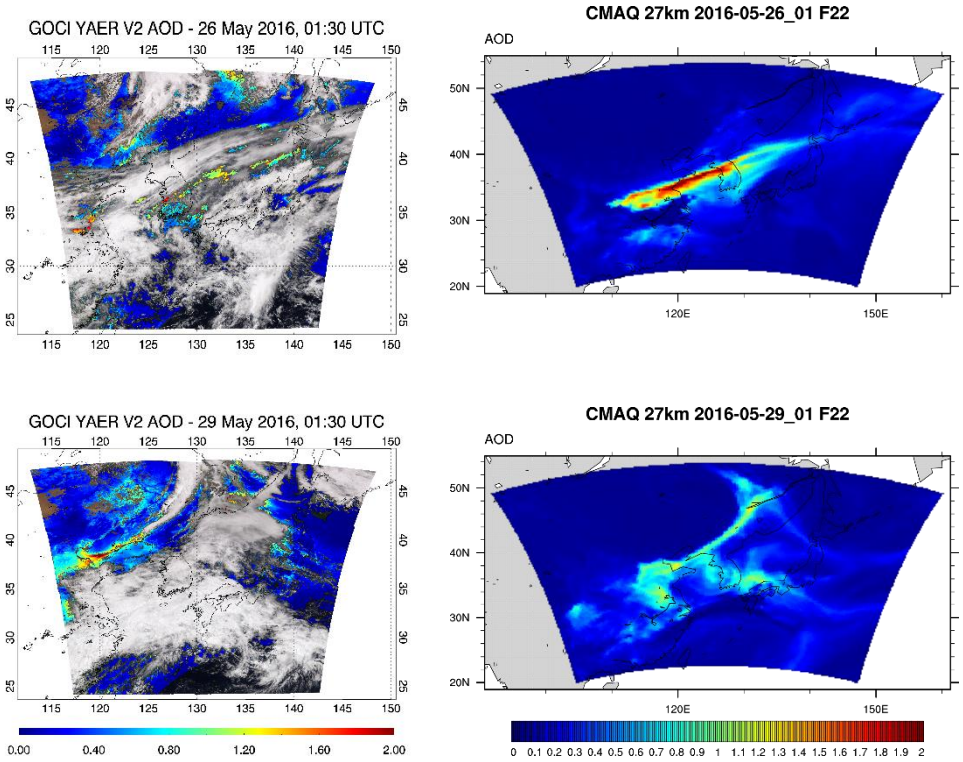

Fig.12. The AOD estimated from the presented by Pitchford et al. (2007) method and the observed GOCI AOD.

Pitchford et al. (2007)이 제시한 방안이 현실적인 AOD값을 산출하는지 살펴보기 위하여 동아시아 영역의 수평분포를 살펴보았다. Figure 12는 Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출방법을 이용하여 산출한 AOD와 GOCI 위성자료를 통해 산출된 AOD를 같은 시간대에 대하여 나타낸 것이다. 수치예보 자료를 통해 산출된 AOD는 모든 영역의 값이 잘 산출된 것을 확인할 수 있다. GOCI 위성자료에서 관측된 AOD와 수치 예보 자료를 통해 산출된 AOD

는 유사한 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있지만, 모의하는 AOD의 양이 적게 모의되는 것을 확인할 수 있다.

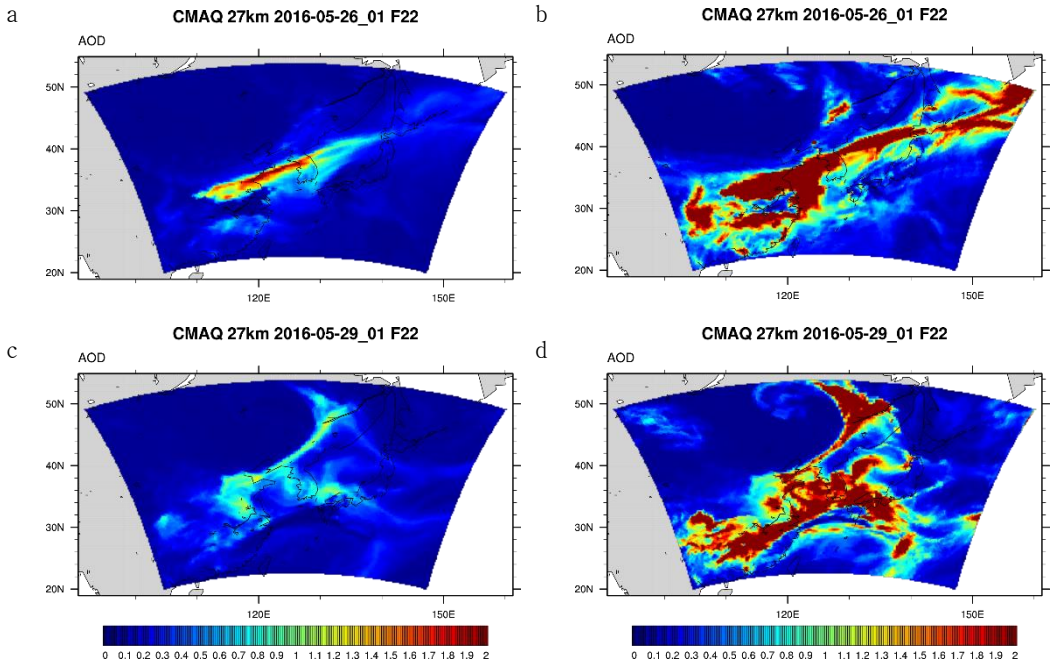

Fig.13. The AOD estimated from the presented by Pitchford et al. (2007) method and the hygroscopic growth factor of the original method.

Figure 13은 Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출방법을 통해 산출된 AOD와 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 최대 상대습도 96%로 두고 산출한 AOD를 2016년 5월 26일 01 UTC와 2016년 5월 29일 01 UTC에 대하여 각각

나타낸 것이다. 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD와 비교하였을 때, 구름이 있는 부분에 대하여 전반적으로 고농도 AOD 양을 많이 감소하여 표현하는 것을 확인할 수 있다.

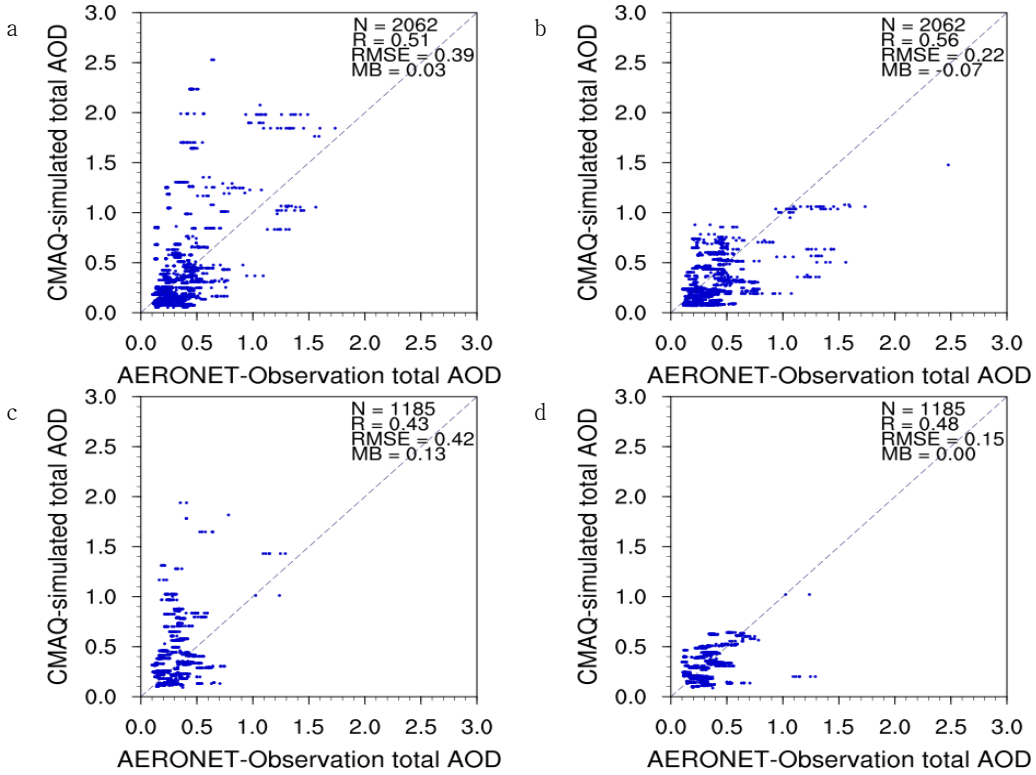

Fig.14. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May 2016, at the 2 AERONET sites.

관측값과의 비교를 위해 AERONET 관측지점인 서울과 GIST에 대해 산포도 분석을 하였다. Figure 14의 (a),(c)는 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 최

대 상대습도를 96%로 설정하여 산출한 AOD와 AERONET AOD의 산포도이며, (b),(d)는 Pitchford et al. (2007)이 제시한 새로운 방안을 통해 산출한 AOD와 AERONET AOD의 산포도를 나타낸 것이다. Figure 14의 (a),(b)는 서울 지점이며 (c),(d)는 광주 지점을 나타낸 것이다. 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD의 RMSE 값보다 Pitchford et al. (2007)이 제시한 방안으로 산출한 AOD의 RMSE 값이 서울 관측지점의 경우 0.39에서 0.22로 더 정확한 값을 나타내며, GIST 관측지점의 경우 0.42에서 0.15로 더 정확한 값을 나타낸다. 또한 Kiehl et al. (2000)이 제시한 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD에서 R값의 개선이 나타나지 않았지만, Pitchford et al. (2007)의 방안으로 산출한 AOD의 R값은 서울 관측지점의 경우 0.51에서 0.56으로 개선되었으며, GIST 관측지점의 경우 0.43에서 0.48로 개선되었다.

제3장. 연구 결과

3.1 수치모형의 해상도에 따른 AOD 결과 비교

국립환경과학원에서 현업으로 이용되고 있는 대기화학모델(CMAQ)은 동아시아지역의 27km 격자와 한반도 지역의 9km 격자와 서울, 경기의 수도권 지역의 3km 격자로 이루어져 있다. 3km 격자는 수도권을 중심으로 모의 영역이 잡혀 있어 domain3 자료는 사용하지 않고, 27km 해상도와 09km 고해상도 자료를 비교 분석하였다. 고해상도에서 더 정확한 검증값을 보이는지 Malm et al. (1994), Kielh et al. (2000), Pitchford et al. (2007)의 AOD 산출 알고리즘에 대하여 각각 분석하였다. Malm et al. (1994)이 제시한 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD는 최대 상대습도의 값을 96%로 설정하여 산출한 AOD는 너무 과대 모의하여 93%로 설정하여 산출한 AOD의 결과를 해상도에 따라 비교하였다.

3.1.1 기존 방안의 흡습성장인자 (Malm et al., 1994)로 산출된 AOD

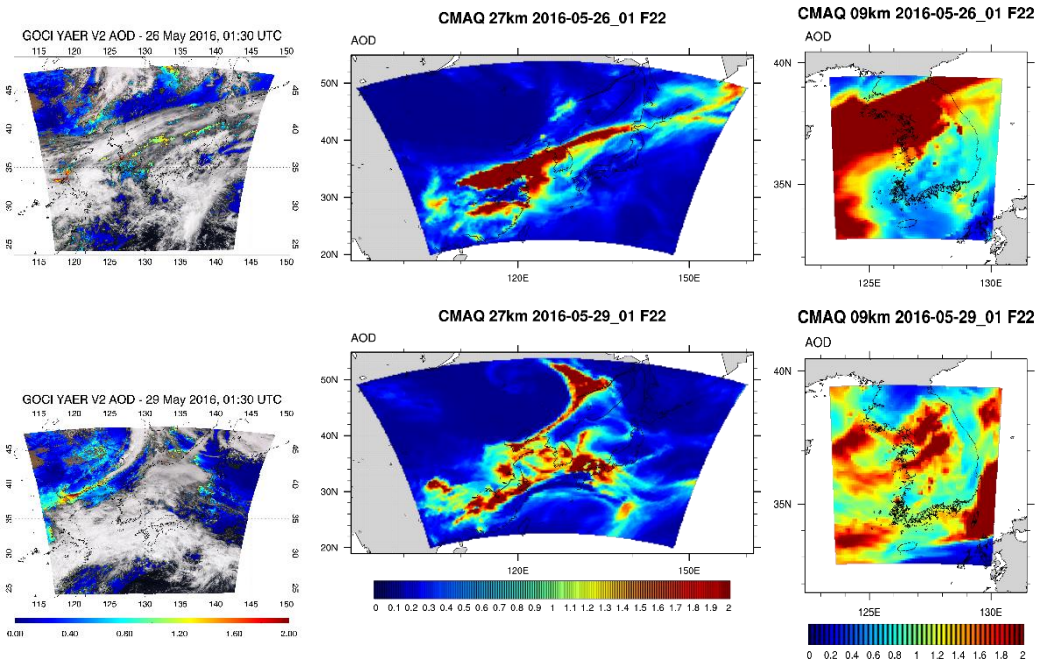

Fig.15. Spatial distribution of GOCI observed AOD, the CMAQ-simulated 27km resolution estimated AOD and 09km resolution estimated AOD.

Figure 15는 기존의 방안 (Malm et al., 1994)으로 상대습도 최대값을 93%로 정하여 산출한 AOD를 27km 해상도와 09km 해상도에 대하여 각각 나타낸 것이다. 09km 고해상도의 AOD는 27km 해상도의 AOD보다 한반도 주변의 자세한 농도 분포를 잘 표현하고 있으며, 전반적인 농도의 분포는 27km 해상도의 결과 및 GOCI 위성자료를 통해 산출된 값과 유사한 것을 확인할 수 있다.

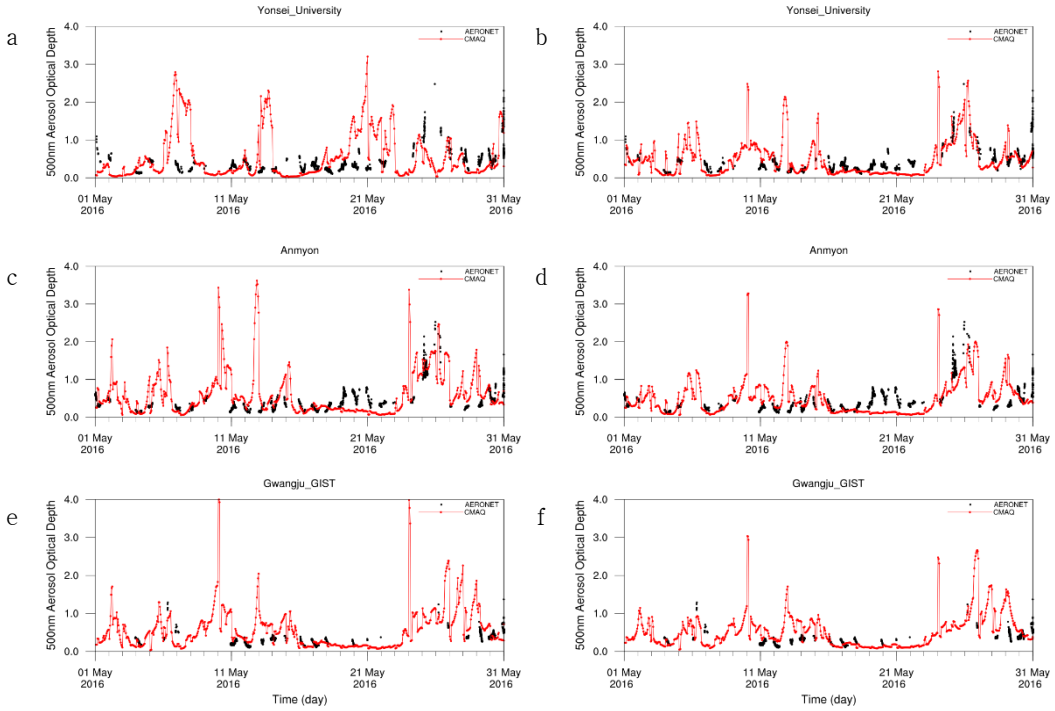

Fig.16. Daily variation in the CMAQ-simulated and AERONET AOD at the 3 AERONET sites in South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET.

각각 해상도에 따른 결과를 우리나라 지상관측 자료와 비교를 위하여 2016년 5월 한달에 대하여 시계열로 서울, 안면, GIST 관측지점에 대하여 나타냈다. 이때, CMAQ의 결과는 해당 관측 지점의 위도와 경도의 정보를 이용하여 Cressman 기법을 통해 interpolation하여 계산하였다. Figure 16은 (a),(c),(e)는 27km 해상도의 결과를 (b),(d),(f)는 09km 해상도의 결과를 나타낸 것이다. 앞서 Figure 15에서 2차원 분석장을 통해 수행된 결과와 유사한

결과를 보이며, 전반적인 수치모형의 AOD 산출결과는 관측결과의 패턴을 잘 표현하고 있다. 27km 해상도의 결과와 09km 해상도의 결과가 고농도 AOD를 표현하는 양이 상당히 다른 것을 확인할 수 있다. 하지만, 고농도 사례의 경우, 구름과 함께 존재하는 경우가 많기 때문에 결측이 많아 보다 더 정확하게 분석하기에는 어려움이 있다. 관측값의 결측으로 표현되는 부분에서 CMAQ을 통해 산출된 AOD가 고농도를 표현하는 양의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

27km 해상도의 결과, 서울 관측지점의 경우 5월 18일부터 22일까지의 고농도 사례를 과대모의하며, 안면과 GIST 관측지점의 경우 고농도 사례를 잘 모의하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

09km 해상도의 결과, 서울, 안면, GIST 관측지점 모두 5월 18일부터 22일까지의 고농도 사례를 잘 모의하지 못하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 5월 4일부터 27일까지의 고농도 사례는 세 관측지점 모두 어느 정도 잘 모의하고 있는 것을 확인할 수 있다.

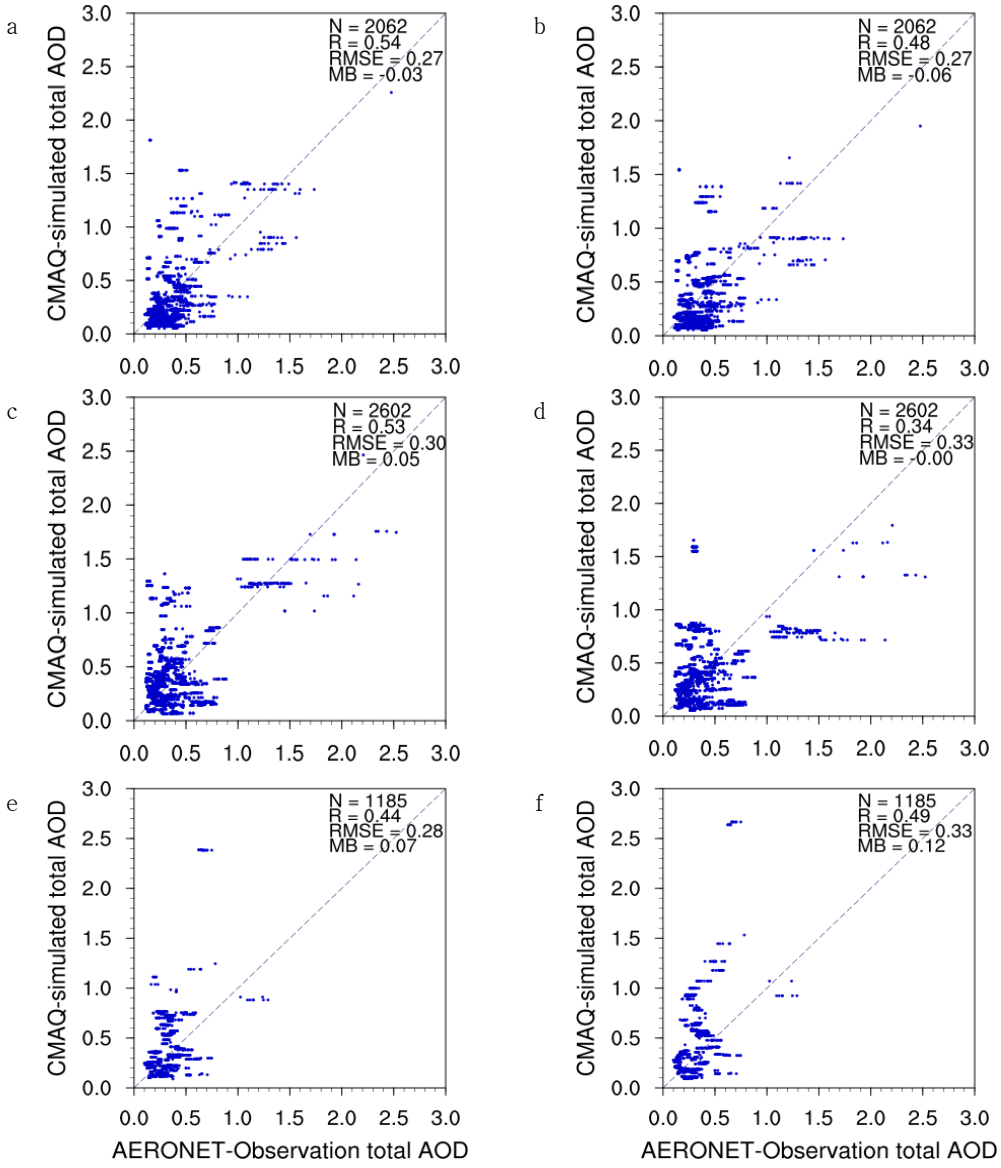

Fig.17. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May 2016, at the 3 AERONET sites.

같은 관측지점에 대하여 보다 더 정확하게 분석하기 위해 산포도 분석 결과를 살펴보았다. Figure 17의 (a),(c),(e)는 27km 해상도의 결과를 (b),(d),(f)는 09km 해상도의 결과를 나타낸 것이다. 27km 해상도의 결과와 09km 해상도의 결과를 살펴본 결과, 서울 관측지점의 경우 27km 결과와 09km 결과의 RMSE 값이 0.27로 같다. GIST 관측지점의 경우 RMSE 값이 27km 해상도의 결과보다 0.28에서 0.33으로 조금 나빠졌지만, R 값이 0.44에서 0.49로 개선된 것을 확인할 수 있다.

3.1.2. 새로운 방안의 흡습성장인자(Kiehl et al., 2000)로 산출된 AOD

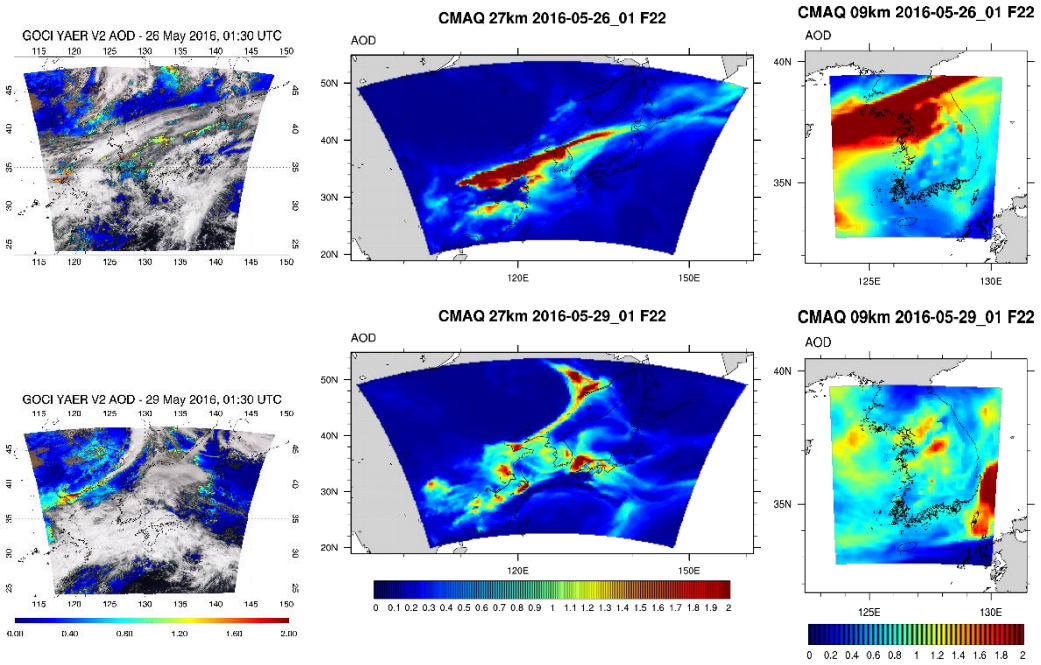

Fig.18. Spatial distribution of GOCI observed AOD, the CMAQ-simulated 27km resolution estimated AOD and 09km resolution estimated AOD.

새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD를 27km 해상도와 09km 해상도에 대하여 분석하였다. Figure 18는 새로운 방안의 (Kiehl et al., 2000) 흡습성장인자로 산출한 AOD를 27km 해상도와 09km 해상도에 대하여 각각 나타낸 것이다. 09km 해상도의 AOD는 27km 해상도의 AOD보다 한반도 주변의 자세한 농도 분포를 잘 표현하고 있으며, 전반적인 농도의 분포는 27km 해

상도의 결과 및 GOCI 위성자료를 통해 산출된 값과 유사한 것을 확인할 수 있다. 기존의 (Malm et al., 1994) 방안으로 산출된 AOD결과와 대부분 유사한 결과를 보이고 있으나, 관측값의 결측으로 표현되는 부분에서 고농도 AOD를 과소모의 한다는 것을 09km 해상도 결과에서도 확인할 수 있다.

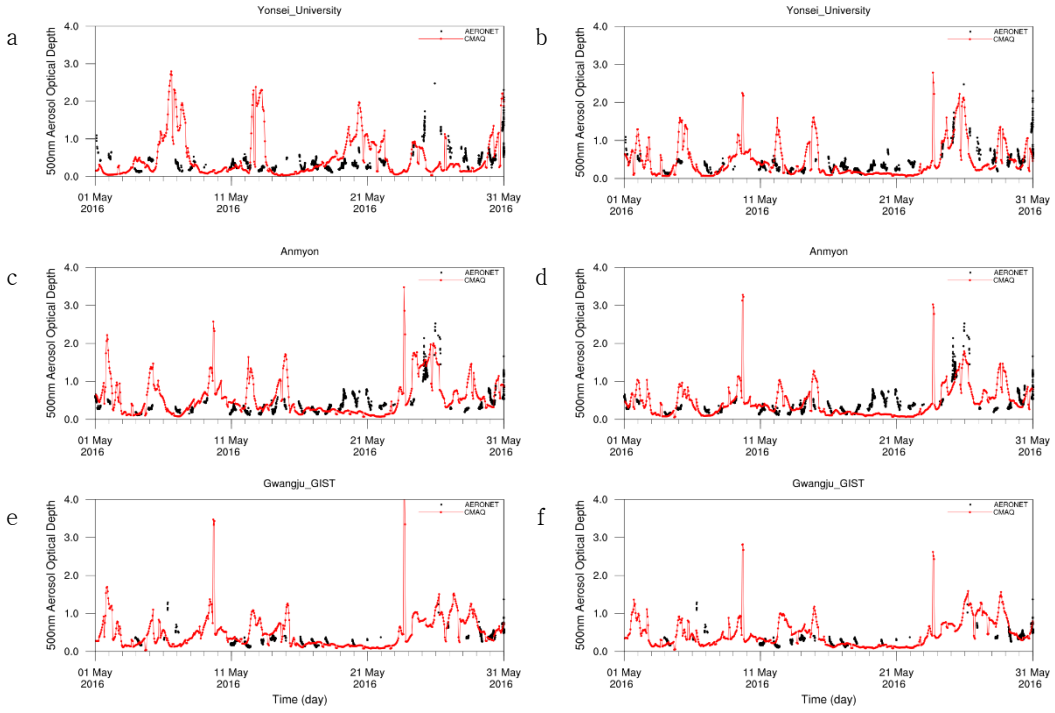

Fig.19. Daily variation in the CMAQ-simulated and AERONET AOD at the 3 AERONET sites in South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET.

각각의 해상도에 따른 결과를 우리나라 지상관측 자료와 비교를 위하여 2016년 5월 한달에 대하여 시계열로 서울, 안면, GIST 관측지점에 대하여 나타내었다. Figure 19의 (a),(c),(e)는 27km 해상도의 결과를 (b),(d),(f)는 09km 해상도의 결과를 나타낸 것이다. 앞서 Figure 18에서 2차원 분석장을 통해 수행된 결과와 유사한 결과를 보이며, 전반적인 수치모형의 AOD 산출결과는 관측결과의 패턴을 잘 표현하고 있다. 27km 해상도의 결과와 09km 해상도의 결과가 고농도 AOD를 표현하는 양의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 관측값의 결측으로 표현되는 부분에서 CMAQ을 통해 산출된 AOD가 고농도를 표현하는 양의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

27km 해상도의 결과, 서울 관측지점의 경우 5월 18일부터 22일까지의 고농도 사례를 과대 모의하고, 5월 24일부터 27일까지의 고농도 사례를 24일만 모의하고 그 이후의 고농도를 모의하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

09km 해상도의 결과, 서울, 안면, GIST 관측지점 모두 5월 18일부터 22일까지의 고농도 사례를 잘 모의하지 못하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 5월 24일부터 27일까지의 고농도 사례는 세 관측지점 모두 어느정도 잘 모의하고 있지만 관측 값보다는 과소 모의하는 것을 확인할 수 있다.

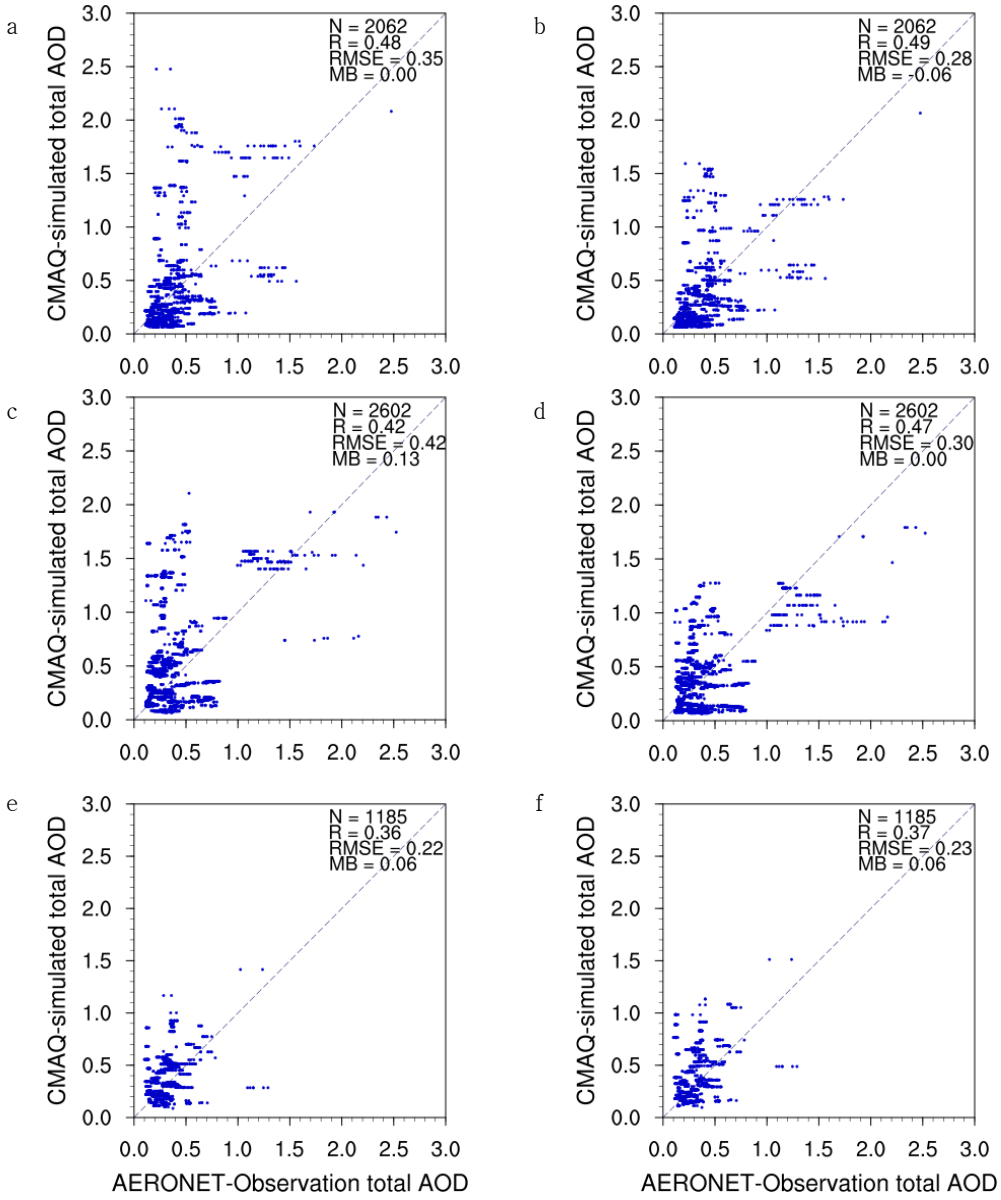

Fig.20. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May,2016, at the 3 AERONET sites.

같은 관측지점에 대하여 보다 더 정확하게 분석하기 위해 산포도 분석 결과를27km 해상도와 09km 해상도에 대해 모두 살펴보았다. Figure 20의 (a),(c),(e)는 27km 해상도의 결과를 (b),(d),(f)는 09km 해상도의 결과를 나타낸 것이다. 27km 해상도 결과와 09km 해상도의 결과를 살펴본 결과, 서울 관측지점의 경우 27km 해상도 결과와 09km 해상도 결과의 RMSE 값은 0.35에서 0.28로 개선되었고, 안면 관측 지점의 경우 27km 해상도 결과와 09km 해상도 결과의 RMSE 값은 0.42에서 0.30으로 더 정확한 검증값을 나타냈다. 또한 R 값도 안면 관측지점의 경우 0.42에서 0.47로 개선된 것을 확인할 수 있다.

3.1.3. 새로운 방안 (Pitchford et al., 2007)으로 산출된 AOD

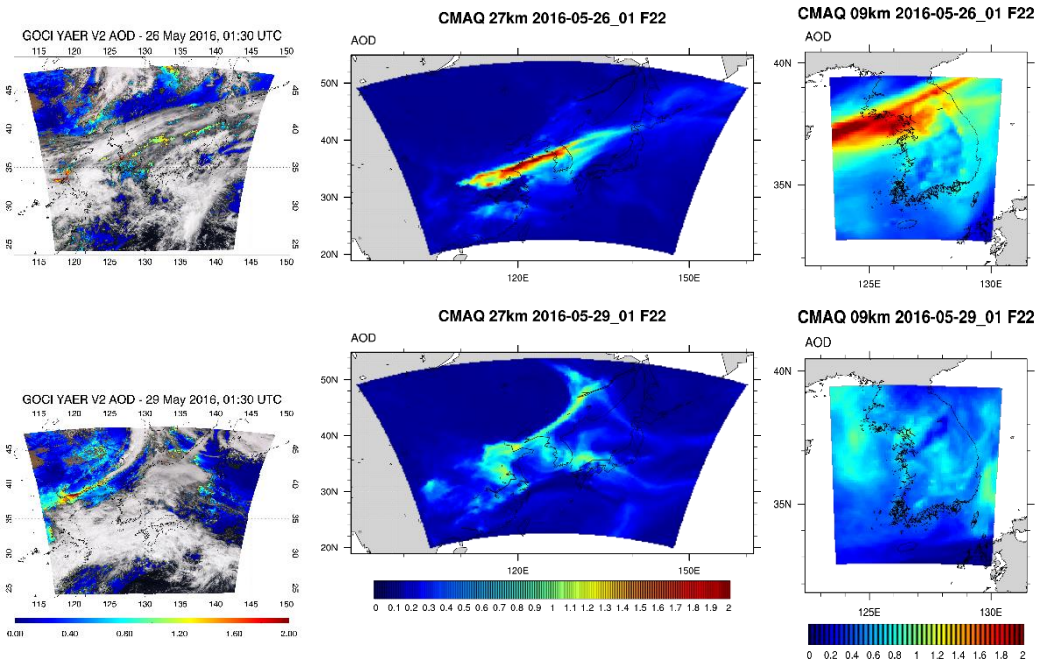

Fig.21. Spatial distribution of GOCI observed AOD, the CMAQ-simulated 27km resolution estimated AOD and 09km resolution estimated AOD.

Pitchford et al. (2007)이 제시한 방안을 통해 산출한 AOD를 27km 해상도와 09km 해상도에 대하여 분석하였다. Figure 21은 새로운 방안 (Pitchford et al., 2007)으로 산출한 AOD를 27km 해상도와 09km 해상도에 대하여 각각 나타낸 것이다. 09km 해상도의 AOD는 27km 해상도의 AOD보다 한반도 주변의 자세한 농도 분포를 잘 표현하고 있으며, 전반적인 농도의 분포는 27km 해상

도의 결과 및 GOCI 위성자료를 통해 산출된 값과 유사한 것을 확인할 수 있다. 27km 해상도 결과와 09km 해상도 결과에서 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD 농도와 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD 농도와 비교하였을 때, AOD 농도를 가장 과소 모의하는 것을 확인할 수 있다.

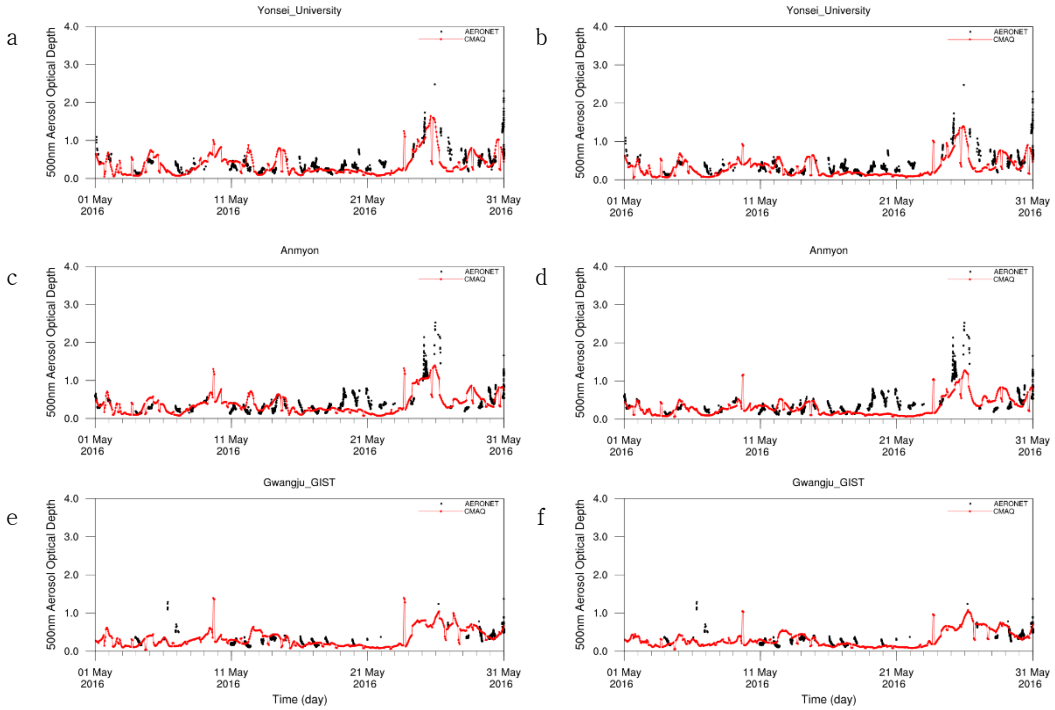

Fig.22. Daily variation in the CMAQ-simulated and AERONET AOD at the 3 AERONET sites in South Korea for May 2016. Red line, Black dot represent AODs obtained from CMAQ and AERONET.

각각 해상도에 따른 결과를 우리나라 지상관측 자료와 비교하기 위해 2016년 5월 한달에 대하여 시계열로 서울, 안면, GIST 관측지점에 대하여 나타냈다. Figure 22의 (a),(c),(e)는 27km 해상도의 결과를 (b),(d),(f)는 09km 해상도의 결과를 나타낸 것이다. 앞서 figure 21에서 2차원 분석장을 통해 수행된 결과와 유사한 결과를 보이며, 전반적인 수치모형의 AOD 산출결과는 관측결과의 패턴을 잘 표현하고 있다. 27km 해상도의 결과와 09km 해상도의 결과에서 고농도 AOD를 표현하는 양의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

기존 방안의 흡습성장인자(Malm et al., 1994)로 산출한 AOD, 새로운 방안의 흡습성장인자(Kiehl et al., 2000)로 산출한 AOD 결과에 비해 전반적으로 tone down되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 광주의 관측지점에서는 고농도 사례를 잘 모의한 것으로 보이지만, 몇몇의 고농도 사례에서는 오히려 과소모의를 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

27km 해상도의 결과와 09km 해상도의 결과에서 서울, 안면, GIST 세 관측지점 모두 5월 18일부터 22일까지의 고농도 사례를 잘 모의하지 못하고 있으며, 5월 24일부터 27일까지의 고농도 사례를 어느 정도 모의하고 있지만, 관측값 보다 과소 모의하고 있는 것을 확인할 수 있다.

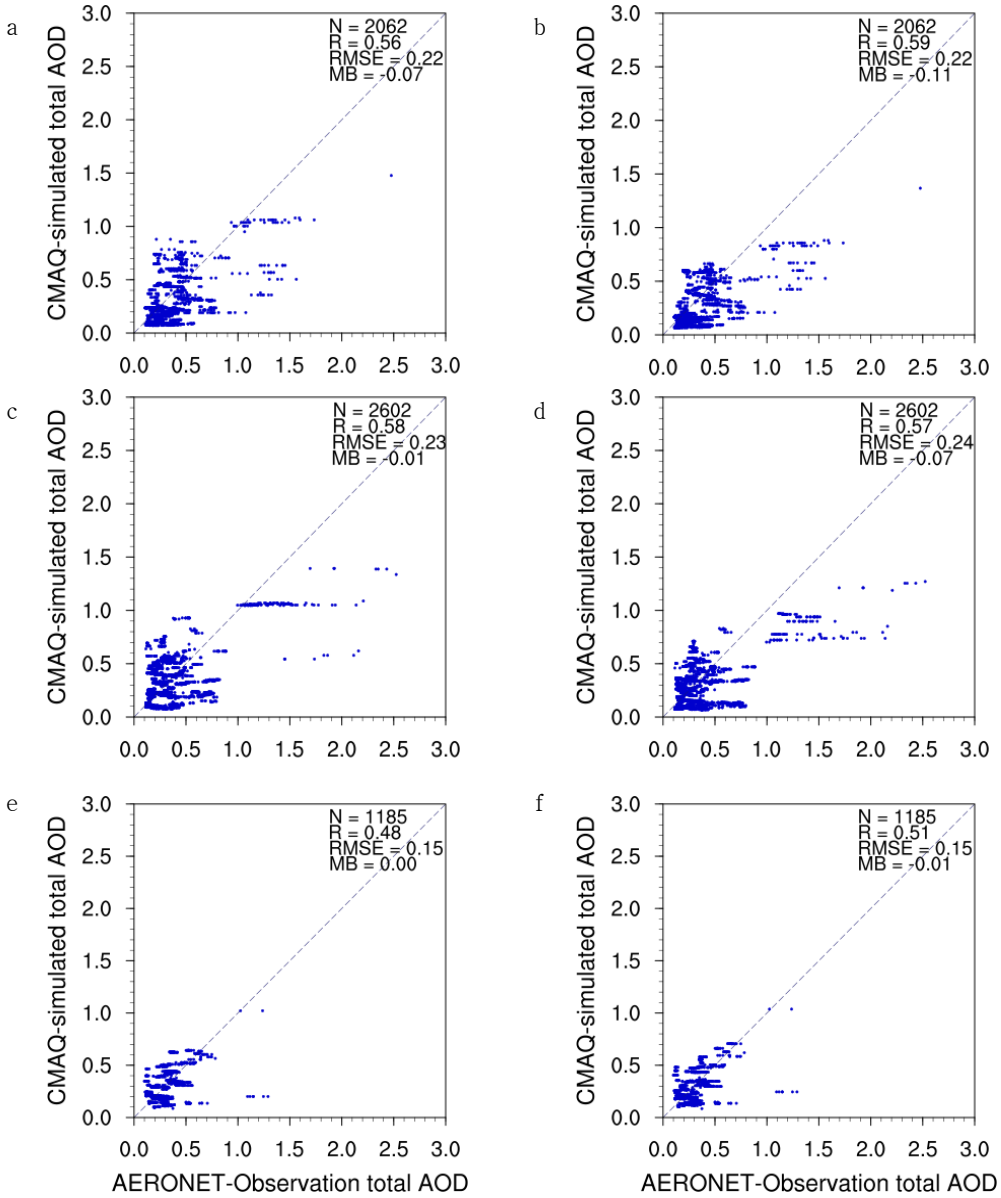

Fig.23. Scatter plots between the CMAQ-simulated and AERONET AOD for May 2016, at the 3 AERONET sites.

같은 관측지점에 대하여 보다 더 정확하게 분석하기 위해 산포도 분석 결과를27km 해상도와 09km 해상도에 대해 살펴보았다. Figure 23의 (a),(c),(e)는 27km 해상도의 결과를 (b),(d),(f)는 09km 해상도의 결과를 나타낸 것이다. 27km 해상도의 결과와 09km 해상도의 결과를 살펴본 결과, 서울 관측지점의 경우 27km 해상도 결과와 09km 해상도 결과의 RMSE 값은 0.22로 같고, 안면 관측지점의 경우 27km 해상도 결과와 09km 해상도 결과의 RMSE 값은 0.15로 같은 것을 확인할 수 있다. 앞서 분석한 기존 방안의 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD, 새로운 방안의 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD와 RMSE 값을 비교하였을 때, GIST 관측지점이 0.15의 값으로 가장 정확한 검증값을 보이는 것을 확인하였다.

3.1.4 2016년 3월부터 2017년 2월 1년간의 비교 결과

각각의 방법에 대해 2016년 5월 한달에 대하여 비교 분석한 것을 계절적으로 분석하기 위하여 2016년 5월을 포함한 1년으로 확장하여 2016년 3월부터 2017년 2월까지 AERONET 지상관측 자료의 관측지점을 정하여 분석하였다. AERONET 관측자료를 살펴보았을 때, 2016년 3월부터 2017년 2월까지 3개월 이상의 결측이 없는 관측지점을 찾아 중국 2개, 대만 3개, 일본 3개, 러시아 1개, 한반도 6개를 지정하였다. 27km 해상도는 동아시아 지역의 영역으로 15개의 관측지점과 비교하고, 한반도 영역으로 6개의 관측지점과도 비교하였다. 09km 고해상도는 한반도 중심의 영역으로 6개의 관측지점과 비교하였다.

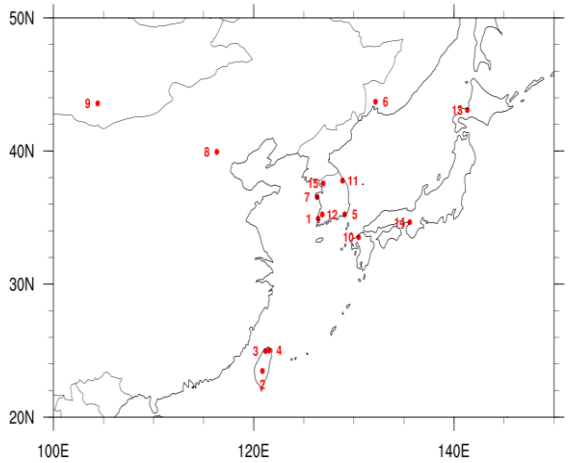

Fig.24. Locations of the 15 AERONET sites.

Table.8. Information of the 15 AERONET sites.

Site (site number)	Latitude	Longitude	Data period
Mokpo (1)	34.9134	126.437	2016년 3월 ~ 2017년 2월
Lulin (2)	23.4686	120.874	
EPA-NCU (3)	24.9675	121.185	
Taipei-CWB (4)	25.0147	121.538	
Pusan_NU (5)	35.2354	129.082	
Ussuriysk (6)	43.7004	132.163	
Anmyon (7)	36.5385	126.330	
Beijing-CAM (8)	39.9333	116.317	
Dalanzadgad (9)	43.5772	104.419	
Fukuoka (10)	33.5240	130.475	
Gangneung_WNU (11)	37.7710	128.867	
Gwangju_GIST (12)	35.2283	126.843	
Hokkaido_University (13)	43.0755	141.341	
Osaka (14)	34.6509	135.591	
Yonsei_Unibersity (15)	37.5644	126.935	

1년으로 확장하여 27km 해상도에 대하여 계절에 따라 분석한 결과를 Table 9에 나타냈다. 동아시아 영역의 15개 관측지점과 CMAQ을 통해 각각의 방법을 통해 산출한 AOD를 비교한 결과를 Table 9에 나타냈다. 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 최대 상대습도 96%로 두고 산출한 AOD의 봄철 RMSE 값은 0.41에서 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD 봄철 RMSE 값이 0.37로 불확실성이 해결된 것을 확인할 수 있다. Pichford et al. (2007)이 제시한 방안을 통해 산출한 AOD는 봄철에 0.30의 RMSE 값으로 가장 정확한 검증값을 나타낸 것을 확인할 수 있다. 겨울철에는 0.24의 RMSE 값으로 가장 정확한 검증값을 나타내며, R 값도 기존 방안의 최대 상대습도 96%로 설정하여 산출한 AOD보다 0.55에서 0.61로 개선된 것을 확인할 수 있다.

27km 해상도의 결과에 대하여 한반도 영역의 6개 관측 지점과 비교 분석한 결과를 Table 10에 나타냈다. 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 최대 상대습도 96%로 두고 산출한 AOD의 봄철 RMSE 값은 0.38에서 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD 봄철 RMSE 값이 0.31로 불확실성이 해결된 것을 확인할 수 있다. Pitchford et al. (2007)이 제시한 방안을 통해 산출한 AOD는 봄철에 0.23의 RMSE 값으로 보다 가장 정확한 검증값을 나타내며, R 값도 0.44로 보다 더 개선된 것을 확인할 수 있다. 겨울철에는 0.23의 RMSE 값으로 보다 더 정확한 검증값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

09km 해상도의 결과에 대하여 한반도 영역의 6개 관측 지점과 비교 분석한

결과를 Table 11에 나타냈다. 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 최대 상대습도 96%로 두고 산출한 AOD의 봄철 RMSE 값은 0.43에서 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD 봄철 RMSE 값이 0.28로 불확실성이 해결된 것을 확인할 수 있다. Pitchford et al. (2007)이 제시한 방안을 통해 산출한 AOD는 봄철에 0.22의 RMSE 값으로 보다 가장 정확한 검증값을 나타내며, R 값도 0.45로 보다 더 개선된 것을 확인할 수 있다.

한반도 영역의 6개 관측지점과 비교한 결과, 27km 해상도 결과와 9km 해상도 결과를 비교하였을 때, 두드러지게 RMSE 값과 R 값이 고해상도일 때 개선되는 결과를 보여주지는 않지만, 27km 해상도의 결과는 한반도 영역 이외에 동아시아 영역을 포함하여 관측값과 비교하였을 때는 봄철 Pitchford et al. (2007) 방안의 RMSE 값이 27km 일 때 0.30에서 09km 일 때 0.22로 더 정확한 검증값을 나타내며, 09km 해상도의 결과가 더 좋은 RMSE 값을 보이는 것을 알 수 있다.

Table.9. Statistical values between using 27km resolution data the AOD estimated method1, method2, method3, method4 and AERONET AODs(15-sites) for all four seasons. 2016.03~2017.02

AERONET vs.	Period	Number of data	R	RMSE	MB
Method 1 :	Spring	36696	0.35	0.34	-0.08
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.66	0.33	-0.10
Max_RH = 93%	Fall	33015	0.60	0.29	0.01
	Winter	31425	0.57	0.24	0.03
Method 2 :	Spring	36696	0.30	0.41	-0.03
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.63	0.34	-0.08
Max_RH = 96%	Fall	33015	0.55	0.32	0.04
	Winter	31425	0.55	0.25	0.05
Method 3 :	Spring	36696	0.33	0.37	-0.04
(Kiehl et al., 2000)	Summer	44088	0.60	0.35	-0.01
	Fall	33015	0.54	0.37	0.09
	Winter	31425	0.48	0.37	0.10
Method 4 :	Spring	36696	0.43	0.30	-0.10
(Pitchford et al., 2007)	Summer	44088	0.68	0.33	-0.11
	Fall	33015	0.68	0.26	-0.01
	Winter	31425	0.61	0.24	0.03

Table.10. Statistical values between using 27km resolution data the AOD estimated method1, method2, method3, method4 and AERONET AODs(6-sites) for all four seasons. 2016.03~2017.02

AERONET vs.	Period	Number of data	R	RMSE	MB
Method 1 :	Spring	18036	0.43	0.28	-0.03
(Malm et al., 1994)	Summer	22512	0.45	0.31	-0.11
Max_RH = 93%	Fall	16981	0.60	0.25	0.05
	Winter	18013	0.50	0.23	0.06
Method 2 :	Spring	18036	0.39	0.38	0.04
(Malm et al., 1994)	Summer	22512	0.44	0.31	-0.08
Max_RH = 96%	Fall	16981	0.56	0.30	0.09
	Winter	18013	0.49	0.25	0.08
Method 3 :	Spring	18036	0.38	0.31	-0.01
(Kiehl et al., 2000)	Summer	22512	0.41	0.33	-0.00
	Fall	16981	0.50	0.37	0.14
	Winter	18013	0.39	0.39	0.13
Method 4 :	Spring	18036	0.44	0.23	-0.07
(Pitchford et al., 2007)	Summer	22512	0.47	0.31	-0.13
	Fall	16981	0.61	0.21	0.02
	Winter	18013	0.47	0.23	0.06

Table.11. Statistical values between using 09km resolution data the AOD estimated method1, method2, method3, method4 and AERONET AODs(6-sites) for all four seasons. 2016.03~2017.02

AERONET vs.	Period	Number of data	R	RMSE	MB
Method 1 :	Spring	18036	0.38	0.29	-0.01
(Malm et al., 1994)	Summer	22512	0.37	0.31	-0.08
Max_RH = 93%	Fall	16981	0.50	0.25	0.05
	Winter	18013	0.42	0.23	0.06
Method 2 :	Spring	18036	0.34	0.43	0.07
(Malm et al., 1994)	Summer	22512	0.36	0.31	-0.04
Max_RH = 96%	Fall	16981	0.46	0.31	0.10
	Winter	18013	0.40	0.26	0.08
Method 3 :	Spring	18036	0.37	0.28	-0.01
(Kiehl et al., 2000)	Summer	22512	0.32	0.34	0.02
	Fall	16981	0.46	0.34	0.13
	Winter	18013	0.38	0.35	0.12
Method 4 :	Spring	18036	0.45	0.22	-0.07
(Pitchford et al., 2007)	Summer	22512	0.41	0.32	-0.13
	Fall	16981	0.56	0.21	-0.01
	Winter	18013	0.46	0.22	-0.05

3.2 Spin-up time에 따른 AOD 결과 비교

수치 모형의 spin-up time에 따른 결과를 살펴보기 위해 27km 해상도의 결과를 예보시간에 따라 살펴보았다.

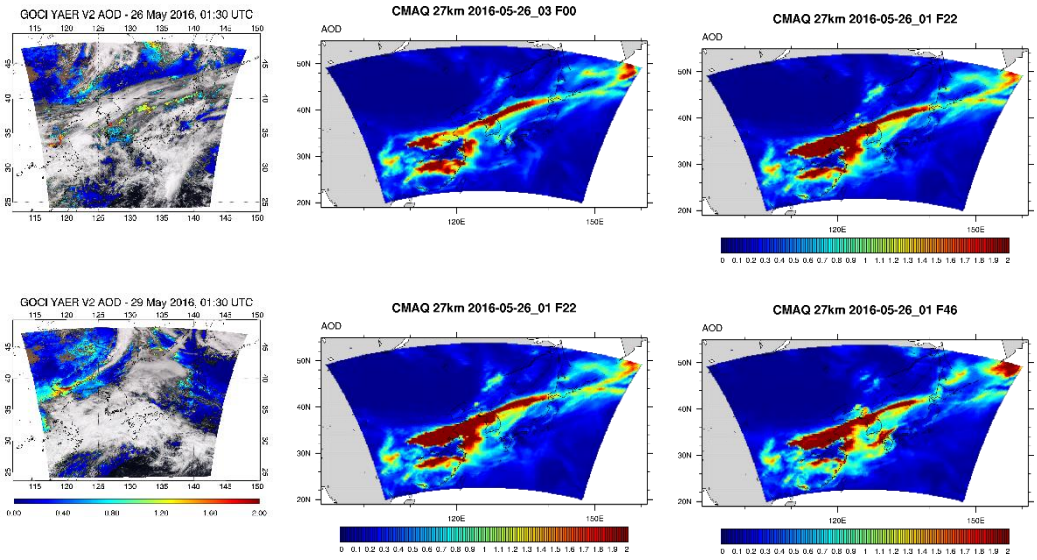

Fig.25. The AOD estimated result according to forecast time.

Figure 25는 27km 해상도의 결과를 예보시간에 따라 2016년 5월 26일 03 UTC와 2016년 5월 26일 01 UTC에 대하여 나타낸 것이다. 위성자료에서 구름이 잘 발달되어 있는 지역을 중심으로 예보시간에 따라 AOD 값이 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 00 Forecast time의 AOD 결과는 모델 자체에서 구름

이 발달할 수 있는 충분한 spin-up time이 보장되지 않아, 24 forecast time의 AOD보다 과소 모의하는 것을 확인할 수 있다. 또한 46 Forecast time의 AOD 결과는 예보시간이 길어져 22 forecast time의 AOD 결과와 구름 모의 능력에 따라 결과의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 고농도의 AOD는 구름과 함께 존재하는 경우가 많기 때문에, 흡습성장인자는 구름의 발달과 깊은 연관이 있어 모델에서 구름이 발달할 수 있는 충분한 spin-up time을 주어야 한다.

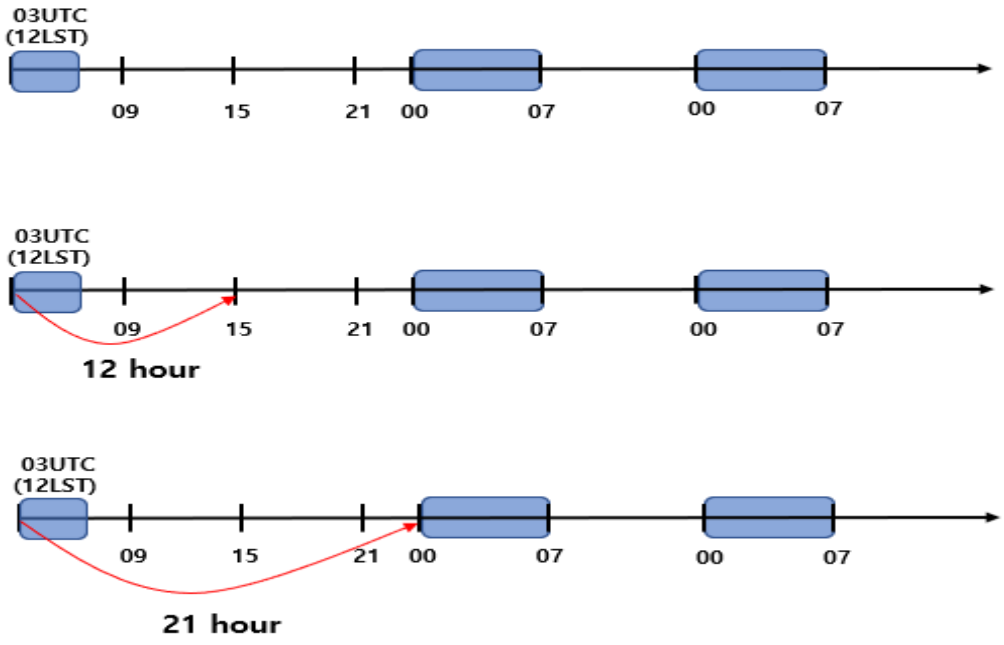

Fig.26. Forecast time of CMAQ model.

Spin-up time에 따른 AOD 산출 결과의 민감도를 살펴보기 위하여 Figure 26에서 나타낸 것처럼 spin-up time을 주지 않았을 때, 12시간 spin-up time을 주었을 때 그리고 21시간 spin-up time을 주었을 때의 Malm et al. (1994), Kielh et al. (2000), Pitchford et al. (2007)의 AOD 산출 알고리즘에 대하여 각각 분석하였다. 보통 수치모형의 충분한 적응시간(spin-up time)은 12시간에서 24시간 정도로 정해준다. 하지만, 현업 대기 화학 모형은 03 UTC부터 예보를 하기 때문에 GOCI 위성자료와 비교를 위하여 21시간의 spin-up time을 주어서 결과를 살펴보았다.

Table 12은 spin-up time을 주지 않았을 때의 결과이고, Table 13는 12시간 spin-up time을 주었을 때의 결과이며, Table 14은 21시간 spin-up time을 주었을 때의 결과를 나타낸다. 이때 결과는 모두 27km 해상도의 결과이다.

Spin-up time을 주지 않았을 때의 결과를 살펴보면, 모델에서 구름 발달의 충분한 시간이 주어지지 않아 높은 RMSE 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 상대습도 96%로 두고 산출한 AOD는 봄철에 0.77로 높은 RMSE 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. Spin-up time을 12시간을 주고 분석한 결과에서는 모델에서 구름 발달이 충분한 시간이 주어져 spin-up time을 주지 않았을 때 보다 더 정확한 검증값을 보이는 것을 확인할 수 있다. Spin-up time을 주지 않았을 때, 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 상대습도 96%로 두고 산출한 AOD는 봄철에 0.77로 높은 RMSE 값을 보였

지만, 12시간 spin-up time을 준 결과 RMSE 값이 0.41로 많이 개선되는 것을 알 수 있다. 특히 Malm et al. (1994)이 제시한 기존 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 검증값이 보다 더 정확해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 구름이 있는 곳에서, 구름 안에서 흡습성장인자들이 어떻게 성장하는지는 상대습도와 연관이 있으므로 가장 큰 민감도를 보인다.

Spin-up time을 21시간을 주고 분석한 결과, 12시간 spin-up time을 주어 AERONET과 비교한 결과와 비교하였을 때 Pitchford et al. (2007)이 제시한 방안의 봄철 RMSE 값은 0.30으로 같으며, 겨울철 RMSE 값은 0.24, 0.23으로 비슷한 것을 확인할 수 있다. 21시간 spin-up time을 주어 AERONET과 비교 분석한 결과도 좋은 검증값을 보이고 있지만 예보시간이 길어지게 되어 예보의 정확도가 떨어지는 문제가 발생할 수 있다.

Table.12. Statistical values between the AOD estimated method1, method2, method3, method4 without giving spin-up time and AERONET AODs for all four seasons. 2016.03~2017.02

AERONET vs.	Period	Number of data	R	RMSE	MB
Method 1 :	Spring	36696	0.21	0.46	-0.02
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.60	0.35	-0.08
Max_RH = 93%	Fall	33015	0.46	0.42	0.05
	Winter	31425	0.45	0.30	0.04
Method 2 :	Spring	36696	0.12	0.77	-0.08
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.54	0.37	-0.05
Max_RH = 96%	Fall	33015	0.38	0.60	0.11
	Winter	31425	0.37	0.36	0.07
Method 3 :	Spring	36696	0.36	0.33	-0.07
(Kiehl et al., 2000)	Summer	44088	0.62	0.34	-0.04
	Fall	33015	0.65	0.30	0.06
	Winter	31425	0.48	0.32	0.06
Method 4 :	Spring	36696	0.44	0.30	-0.09
(Pitchford et al., 2007)	Summer	44088	0.70	0.32	-0.11
	Fall	33015	0.72	0.24	-0.01
	Winter	31425	0.59	0.24	0.02

Table.13. Statistical values between the AOD estimated method1, method2, method3, method4 with 12-hour giving spin-up time and AERONET AODs for all four seasons. 2016.03~2017.02

AERONET vs.	Period	Number of data	R	RMSE	MB
Method 1 :	Spring	36696	0.35	0.34	-0.08
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.66	0.33	-0.10
Max_RH = 93%	Fall	33015	0.06	0.29	0.01
	Winter	31425	0.57	0.24	0.03
Method 2 :	Spring	36696	0.30	0.41	-0.03
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.63	0.34	-0.08
Max_RH = 96%	Fall	33015	0.55	0.32	0.04
	Winter	31425	0.55	0.25	0.05
Method 3 :	Spring	36696	0.33	0.37	-0.04
(Kiehl et al., 2000)	Summer	44088	0.60	0.35	-0.01
	Fall	33015	0.54	0.37	0.09
	Winter	31425	0.48	0.37	0.10
Method 4 :	Spring	36696	0.43	0.30	-0.10
(Pitchford et al., 2007)	Summer	44088	0.68	0.33	-0.11
	Fall	33015	0.68	0.26	-0.01
	Winter	31425	0.61	0.24	0.03

Table.14. Statistical values between the AOD estimated method1, method2, method3, method4 with 21-hour giving spin-up time and AERONET AODs for all four seasons. 2016.03~2017.02

AERONET vs.	Period	Number of data	R	RMSE	MB
Method 1 :	Spring	36696	0.36	0.35	-0.05
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.67	0.32	-0,07
Max_RH = 93%	Fall	33015	0.59	0.29	0.02
	Winter	31425	0.57	0.24	0.04
Method 2 :	Spring	36696	0.33	0.45	0.01
(Malm et al., 1994)	Summer	44088	0.65	0.33	-0.04
Max_RH = 96%	Fall	33015	0.55	0.33	0.06
	Winter	31425	0.55	0.26	0.05
Method 3 :	Spring	36696	0.33	0.39	-0.08
(Kiehl et al., 2000)	Summer	44088	0.58	0.36	0.00
	Fall	33015	0.50	0.38	0.09
	Winter	31425	0.48	0.37	0.11
Method 4 :	Spring	36696	0.44	0.30	-0.09
(Pitchford et al., 2007)	Summer	44088	0.69	0.33	-0.11
	Fall	33015	0.67	0.26	-0.01
	Winter	31425	0.61	0.23	0.03

제4장. 요약 및 결론

본 연구는 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 불확실성을 해결하고자 새로운 알고리즘을 적용하고, 비교 분석을 통해 환경과학원 현업 모델의 AOD 산출 능력을 검증하였다.

Malm et al. (1994)이 제시한 방법의 가장 불확실성이 높은 부분은 식 (4)의 f(RH)와 관련된 항으로 구름 흡습성장인자에 해당하는 부분이다. 첫 번째는 상대습도가 100%에 가까운 값을 가질수록, 식 (4)의 두번째 항과 세번째 항의 분모 값이 0에 가까워지는 문제점이 발생하여, 임의의 방법으로 최대 상대습도 값을 정해주어야 하며, 상대습도 값에 따라 산출되는 AOD 값의 불확실성이 커진다. 두번째는 설정계수들(b_0, b_1, b_2)과 연관되어, 계수들이 경험 값이나 통계 값 등을 통해 설정되어 계절적 변이를 가지게 된다. 최대 상대습도 값을 93%와 96%, 99%로 정하여 산출한 AOD를 분석한 결과, 최대 상대습도에 따라 고농도 사례에 대한 AOD의 과대모의가 심해지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 구름 흡습성장인자를 통해 산출된 AOD의 불확실성을 해결하기 위해 Kiehl et al. (2000)이 제시한 새로운 방안의 흡습성장인자를 도입하였다.

새로운 방안의 흡습성장인자 계산 방법은 상대습도가 100%에 가까운 값을

갖더라도 식 (5)의 분모 값들이 무한대로 가지 않는다. 따라서 분모의 값이 무한대로 가는 것을 피하기 위하여, 수치모형에서 구해진 상대습도의 최대값을 설정할 필요가 없을 뿐 더러, 계절에 따라 다른 값을 갖는 설정계수들 (b_0, b_1, b_2)의 계수에 대한 설정이 필요 없다. Kiehl et al. (2000)이 제시한 식 (5)의 f(RH) 식을 이용하여 대기질 예보 모형을 통해 산출된 AOD는 상대습도 최대값을 93%로 정하여 산출한 AOD와 유사한 결과를 나타냈다. 또한 구름이 얕게 분포하고 있는 지역까지 광범위하게 AOD 농도가 포함되는 문제점이 나타나지 않았다. 산포도 분석을 통하여 Malm et al. (1994)에 의해 제시된 AOD 산출방법보다 Kiehl et al. (2000)이 제시한 AOD 산출방법을 통한 결과의 RMSE 값이 더 정확한 검증값을 보이는 것을 확인하였다.

또 다른 AOD 산출 알고리즘으로 크기에 따라 흡습성장인자를 계산하는 방법으로 Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출 방안을 적용하였다. Pitchford et al. (2007)이 제시한 AOD 산출 알고리즘은 흡습성장인자를 입자의 크기에 따라 다르게 계산하며, 해염입자의 흡습성장인자는 Tang et al. (1997)이 제안한 흡습성장곡선을 참조하여 계산되어진다. GOCI 위성자료와 산출한 AOD 결과를 분석한 결과 Malm et al. (1994)와 Kiehl et al. (2000)이 제시한 방법으로 산출한 AOD보다 과소모의 하는 것을 확인할 수 있었다. 2016년 5월 한달간 우리나라 지상 관측자료와의 비교를 위해 시계열로 나타낸 그

림자료를 분석한 결과 Malm et al. (1994)와 Kiehl et al. (2000)이 제시한 방법으로 산출 AOD와 전반적으로 패턴은 유사하지만, 값이 tone down된 것을 확인할 수 있었다.

고해상도의 수평해상도에서 보다 정확한 검증값을 보이는지 분석하고자 27km 해상도의 결과와 09km 고해상도의 결과를 Malm et al. (1994), Kielh et al. (2000), Pitchford et al. (2007)의 AOD 산출 알고리즘에 대하여 각각 시계열과 산포도 분석을 통하여 전반적인 결과를 비교하였다. Malm et al. (1994)와 Kiehl et al. (2000)이 제시한 방법으로 산출한 AOD보다 Pitchford et al. (2007)이 제시한 방법으로 산출한 AOD가 더 적은 RMSE를 나타내고, 고해상도를 수행하였을 경우에도 더 적은 RMSE를 나타냈다. 또한 현업자료에서 한반도 영역의 6개 AERONET 관측지점과 비교를 통해 27km 해상도와 09km 해상도의 결과를 비교하였을 때 두드러지게 RMSE 값과 R값이 고해상도의 결과에서 개선되는 결과가 나타나지 않았지만, 27km 해상도의 결과 한반도 영역 이외에 동아시아 영역을 포함하여 관측값과 비교하였을 때는 09km 해상도의 결과가 보다 더 정확한 검증값을 가지는 것으로 판단된다.

수치모형의 spin-up time에 따른 민감도를 확인한 결과, 흡습성장인자는

구름의 발달과 연관이 있으므로 수치모델에서 구름이 발달할 수 있는 충분한 시간이 필요하다. Malm et al. (1994)이 제시한 방안으로 상대습도 최대값을 96%로 산출한 00 forecast time의 AOD 결과는 모델 자체에서 충분히 구름이 발달할 수 있는 spin-up time 이 보장되지 않아 24 forecast time의 AOD 결과보다 과소모의 하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 46 forecast time의 AOD 결과보는 예보시간이 길어져 22 forecast time의 AOD의 결과와 구름 모의 능력에 따라 결과가 차이나는 것을 확인하였다.

Spin-up time에 따른 AOD 산출 결과의 민감도를 자세히 분석하고 살펴보기 위해 Malm et al. (1994), Kielh et al. (2000), Pitchford et al. (2007)의 알고리즘에 대하여 각각 분석하였다. Spin-up time을 주지 않았을 때, 12시간 spin-up time을 주었을 때, 21시간 spin-up time을 주었을 때로 나누어 분석하였다. 12시간 spin-up time을 주어 산출한 AOD의 결과는 Spin-up time을 주지 않았을 때의 결과보다 더 정확한 검증값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Malm et al. (1994)이 제시한 방안으로 산출한 AOD의 spin-up time에 대한 민감도가 가장 크게 나타났다.

본 연구 결과, 기존 방안의 구름 흡습성장인자의 불확실성을 제거하고자 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 도입하여 불확실성이 해결된 것을 확인하였다. 또 다른 AOD 산출 알고리즘 (Pitchford et al., 2007)을 적용하여 기존

방안의 구름 흡습성장인자와 새로운 방안의 구름 흡습성장인자를 통해 산출한 AOD의 결과가 보다 정확한 RMSE, R값의 검증값을 보이는 것을 확인하였다. 하지만, AERONET 관측지점과의 산포도 분석 결과를 통해 Pitchford et al. (2007)의 결과가 AERONET 관측값의 변화를 잘 따라가지 못하는 것을 확인하였고, 해상도에 따른 민감도도 나타나지 않아 이에 대한 자세한 분석이 필요하다.

자료동화를 수행하지 않고, 기존 AOD 산출 알고리즘의 불확실성을 해결하고, 다른 AOD 산출 알고리즘을 적용한 결과, 겨울철 0.24로 가장 정확한 RMSE 검증값을 보였다. 선행연구 Park et al. (2007)에서 CMAQ 모델을 개선하여 기존 구름흡습성장인자를 통해 산출한 AOD에 MODIS AOD를 자료 동화하여 겨울철 0.15의 RMSE 검증값을 보였다. 기상장 자료동화를 통해 기상 분석장을 생성하고, 화학모형에서도 관측값이 동화된 결과를 통해 더 정확한 수치 자료를 가지고 AOD를 산출한다면 선행연구에서 보인 RMSE의 검증값 만큼 더 정확한 검증값을 보일 것으로 예상된다.

참고 문헌

Chand, D., Wood, R., Ghan, S. J., Wang, M., Ovchinnikov, M., Rasch, P. J. Miller, S., Schichtel, B., and Moore, T. (2012). Aerosol optical depth increase in partly cloudy conditions, J. Geophys. Res., 117, D17207, doi:10.1029/2012JD017894.

Kiehl, J. T., Schneider, T. L., Rasch, P. J., Barth, M. C., and Wong, J. (2000). Radiative forcing due to sulfate aerosol from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3, J. Geophys. Res., 105, 1441-1457, doi:10.1029/1999JD900495.

Malm, W.C., J. F. Sisler, D. Huffman, R. A. Eldred, and T. A. Cahill(1994). Spatial and seansonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States, J. Geophys. Res., 99, 1347-1370, doi:https://doi.org/10.1029/93JD02916

Park, R. S., Song, C. H., Han, K. M., Park, M. E., Lee, S.-S., Kim, S.-B., and Shimizu, A.(2011). A study on the aerosol optical properties over East Asia using a combination of CMAQ-simulated aerosol optical properties and remote-sensing data via a data assimilation eique,Atmos.Chem.Phys.,11,12275-12296,doi:10.5194/acp-11-12275-2011

Pitchford, M., W. Malm, B. Schichtel, N. Kumar, D. Lowenthal, and J. Hand. (2007). Revised Algorithm for Estimating Light Extinction from IMPROVE Particle Speciation Data. Journal of the Air & Waste Management Association, 57(11), 1326-1336.doi:https://doi.org/10.3155/1047-

3289.57.11.132

Roy, B., R. Mathur, A. B. Gilliland, and S. C. Howard(2007), A comparison of CMAQ-based aerosol properties with IMPROVE, MODIS, and AERONET data, J. Geophys. Res., 112, D14301, doi:10.1029/2006JD008085

Song, C.H., Park, M. E., Lee, K. H., Ahn, H.J., Lee, Y., Kim, J. Y., Ham, K. M., Kim, J., Ghim, Y. S., and Kim, Y. J.: An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosol roperties,Atmos.Chem.Phys.,8,6627-6654,doi:10.5194/acp-8-6627-2008,2008

Tang, I. N., A. C. Tridico, and K. H. Fung. (1997). Thermodynamic and Optical Properties of Sea Salt Aerosols. J. Geophys. Res. 102, 23269-23275 doi: https://doi.org/10.1029/97JD01806

ABSTRACT

Aerosol Optical Depth estimated method and validation using National Institute of Environment Research operational numerical forecast model (WRF-CMAQ)

Kim, Hye Jin

Dept. of Earth System Sciences-Astronomy-Atmospheric Sciences

The Graduate School

Yonsei University

An interest and social impact on fine dust increases, the process of observing and predicting air pollution becomes more important. The process of utilizing and analyzing satellite data that can be observed without any spatial or temporal restrictions is essential. However, in the presence of clouds, it is difficult to predict the state of pollutants inside and below the clouds, especially when deep clouds have developed, making it difficult to estimate the concentration of aerosol optical depth(AOD). In this study, AOD was estimated using the operational atmospheric chemistry model(CMAQ) of the National Institute of Environment

Research, and the result were verified.

Generally used AOD calculation method is closely related to the cloud hygroscopic growth factor, so the value of the maximum relative humidity must be determined, and it was confirmed that the AOD calculation result is sensitive according to the value. In order to solve the uncertainty of AOD calculated through cloud hygroscopic growth factor, a new algorithm was applied. The AOD of model calculated by applying the new algorithm was found to be less sensitive to the cloud hygroscopic growth factor than the original method. By applying different algorithms to calculate the cloud hygroscopic growth factor according to the size, the AOD of the field model was verified through AERONET ground observation data and statistical analysis. In addition, it was confirmed that a more accurate verification value was displayed at a high horizontal resolution.

According to the calculation algorithm, it was confirmed that the concentration of AOD was large in the area of the cloud. Since the high concentration of AOD is often present with the cloud, the cloud hygroscopic growth factor is closely related to the development of the cloud, so it must give sufficient spin-up time for the cloud to develop. The sensitivity of the AOD calculation result according to the spin-up

time of the numerical model was examined and verified through AERONET ground observation data and statistical analysis.

Keyword : Aerosol Optical Depth(AOD), The Community Multi-scale Air-quality Modeling System(CMAQ), hygroscopic growth factor, resolution, spin-up time