

# 광화학수치모델을 이용한 부산지역 오존 농도 예측방법에 관한 연구 - CMAQ을 이용한 2006년 8월 부산지역 고농도 오존 사례 수치모의 -

도우곤 · 조정구 · 빈재훈 · 최홍식  
대기보전과

## A Study on Prediction of Ozone Concentration Using Photochemical Model in Busan Area - Numerical Simulation of High Ozone Episode Using CMAQ at August 2006 in Busan -

Woo-Gon Do<sup>†</sup>, Jeong-Gu Jo, Jae-Hun Bin and Hong-Sik Cheigh  
Air Preservation Division

### Abstract

Busan located in the south-east coast of Korea peninsula is surrounded by complex coastal lines and mountain, so it has various local circulations. The ozone concentration was higher in Busan than other cities and the number of ozone warning concentration(hourly ozone concentration exceeding 0.12 ppm) increased. To identify high ozone concentration, it is necessary to determine urban wind field and horizontal ozone concentration.

In this study, to understand highly ozone concentration episode at 7 August, the MM5 and the CMAQ(Community Multiscale Air Quality Model) was simulated from 06 August to 08 August.

The meteorological input data was created by the MM5 and the emissions of CB- $\bullet$  $\geq$  chemical component was generated by CAPSS 2004 and the EPA's speciation profile.

The result of numerical simulation was a little different with real concentration, because of limitation of simulation method using single domain.

Key Words: ozone episode, numerical simulation, CMAQ

### 서 론

우리나라의 남동 연안에 위치한 부산지역의 경우 복잡한 해안선과 도심내부 산악지형의 영향으로 다양한 국지 기상현상이 빈번하게 나타나고 있다<sup>1)</sup>. 최근에는 산업화와 공업화가 진행되면서 자동차의 통행량이 증가하고 질소산화물을 포함한 대기오염물질이 다량으로 배출되면서 오존, NO<sub>x</sub> 등의 대기오염물질 농도가 증가하고 있는 것으로 알려져 있다. 특히 오존의 경우 다른 대도시에 비하여 높은 평균 농도를 보이고 있으며, 매년 2~3회씩 발령되던 오존 주의보(오존 1시간 평균농도 0.12 ppm 이상)발령 횟수도, 2006년에 9회로 급격히 증가하여 고농도 발생 빈도도 크게 증가한 것으로 나타났다.

연안지역에 위치한 부산지역의 경우 내륙도시와는 다르게 여름철 해륙풍이 빈번하게 발생하고, 도심내부의 지형효과와 더불어 다양한 국지 순환이 나타나며, 이는 O<sub>3</sub>의 광화학적 생성과, 이류, 및 재순환에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 고농도 현상을 이해하기 위해서는 도시바람장의 변화와 배출원 분포를 고려한 수평농도 분포 파악이 무엇보다

중요하며 이를 위하여 3차원적 기상요소와 대기오염물질 농도 파악이 선행되어야 한다. 그러나 이는 부족한 기상 및 대기질 관측지점으로 인하여 현실적으로 불가능하며 따라서 광화학 수치모델을 이용한 고농도 발생 사례 분석은 하나의 대안이 될 수 있다.

부산지역의 경우 UAM을 이용한 고농도 발생 사례 분석은 비교적 꾸준하게 이루어져 왔다. 김영주(1999)<sup>2)</sup>가 UAM-IV의 적용 및 민감도 분석을 수행하였고, 김수현(2000), 오인보(2003)<sup>3),4)</sup> 등은 기상장 모델인 MM5와 UAM-IV, V를 이용하여 부산지역의 고농도 발생 사례 분석을 수행 하였다.

본 연구에서는 EPA에서 단기 O<sub>3</sub> 농도 예측모델로 사용 중이며, 수도권 등의 O<sub>3</sub> 오염현상 파악에 빈번하게 사용되고 있는 CMAQ(Community Multiscale Air Quality Model)을 부산지역에 적용하여 고농도 사례를 수치모의 하고, 향후 대기질 모델링 시스템 구축의 기초자료로 삼고자 하였다.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-Mail: dou777@busan.go.kr  
Phone: 051-888-6816, Fax: 051-757-2879

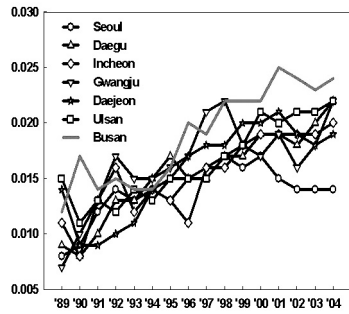


Fig. 1. Annual mean variation of ozone concentration in major cities.(unit:ppm)

연구내용 및 방법

모델 소개

일반적으로 대기오염 모델은 gaussian model, eulerian model, lagrangian model의 세 가지로 분류 할 수 있다. gaussian model은 1960년대 미국 등에서 개발되기 시작한 모델로, 수 km에서 수십 km정도의 규모에서 간단하게 오염원의 영향을 예측할 수 있으나 배출량과 기상장의 시간변화를 고려할 수가 없는 단점이 있다. eulerian model은 도시규모에서 지역규모까지의 범위에 적용이 가능하며, 화학반응을 고려할 수 있어 현재까지 다양하게 개발, 적용이 되고 있으며 UAM(Urban Airshed Model)이 대표적이다.

본 연구에서 사용된 CMAQ는 1998년 6월에 1차 공식버전이 발표되었고, 현재에도 활발하게 개선이 되고 있으며, eulerian model에 기초한 3차원 광화학 모델로 오존, 산성강하, 먼지, 독성물질 같은 대기오염물질을 고려할 수 있으며, 다른 기상장 모델을 연결하여 일반화된 격자 체계를 이용할 수 있다. 또한 기존의 eulerian model과 다르게 모듈구조를 채택하여 각 서브 프로그램 간, 각 전처리 단계간의 상호 호환이 쉽게 이루어지며, 국지규모에서 지역규모까지 동시에 모델링

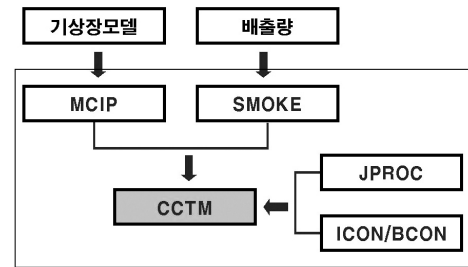


Fig. 2. The structure of the CMAQ modeling system.

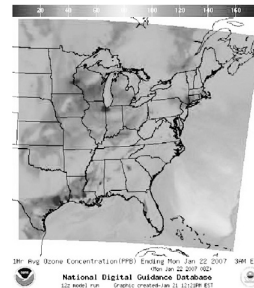


Fig. 3. Example of the real-time air quality forecasts with CMAQ from the National Weather Service.

이 가능하고, 황화합물이나 오존화합물 뿐만 아니라 에어로졸도 동시에 고려할 수 있는 특징이 있다.

CMAQ는 5개의 전처리 과정과 1개의 화학·수송모델(CCTM, CMAQ Chemical Transport Model)로 구성되어 있다. 전처리 과정은 기상장 처리모델인 MCIP (Meteorology Chemistry Interface Processor), 배출량 처리 모델인 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emission Model), 광해리율 산출모델인 JPROC(Photolysis Rate Processor), 초기조건을 생성하는 ICON(Initial Conditions processor)과 경계조건을 생성하는 BCN(Boundary conditions processor)이다<sup>5)</sup>.

Table 1. Number of frequencies exceeding hourly ozone standard(0.1ppm) during May to October at each annual(Numbers in parentheses denote %)

Year	Month	5	6	7	8	9	10	Total
2000		8(0.10)	5(0.06)		16(0.21)	8(0.10)		37(0.08)
2001		2(0.02)		10(0.13)	37(0.48)	3(0.04)		52(0.11)
2002		1(0.01)	10(0.11)			10(0.11)	18(0.19)	39(0.07)
2003		4(0.04)	6(0.07)		1(0.01)	18(0.20)		29(0.05)
2004			4(0.04)	18(0.17)	4(0.04)			26(0.04)
2005		4(0.04)	13(0.12)	26(0.23)	17(0.15)	1(0.01)		61(0.09)
2006		2(0.02)	23(0.19)	1(0.01)	92(0.78)	22(0.19)	3(0.02)	143(0.20)
Total		21	61	55	167	62	21	387

Table 2 . Number of the ozone warning through 2000 to 2006

Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Number	3	2	2	4	3	2	9

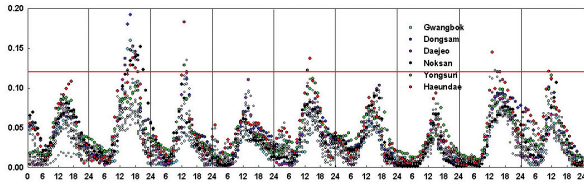


Fig.4. Diurnal variation of hourly ozone concentration at air quality monitoring station from 6 to 14 August 2006.

CMAQ 모델은 NOAA의 National Weather Service의 1 시간 오존 평균 농도의 실시간 예측에 사용되고 있으며, 국내에서도 국립환경과학원의 대도시 대기질 관리방안 조사 연구<sup>6)</sup> 등, 수도권지역 VOCs, O<sub>3</sub> 농도 평가<sup>7)</sup>에 사용된 바가 있다.

사례일 선정

2006년 부산지역의 오존 주의보(1시간 평균농도 0.12ppm 이상)는 7일 9회 발생하였고, 그 중 8월 7~14일간 7회가 집중적으로 발생하였다. 특히 7, 8일은 9개 지점 이상에서 환경기준 초과가 발생하여 거의 전 지역이 고농도 오존에 노출되었음을 알 수 있었으며, 특히 7일에는 오존 관측사상 가장 높은 농도인 0.192ppm/hr이 동삼동 측정소에서 기록되기도 하였다. 이후 10, 13, 14일에도 오존 주의보가 발령되었으며, 4개 지점 이상에서 환경기준 초과가 발생하였다.

이러한 연속적인 고농도 현상은 낮은 운량과 약한 풍속, 낮 최고 기온이 32℃를 넘는, 오존 형성에 유리한 기상조건이 수일간 지속되었고, 이것이 우리나라의 동쪽 해상에 위치한 정체성 고기압에 의하여 쉽게 확산하지 못한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 고농도 오존의 영향이 심각하였던 8월 7일을 중심으로 하여 6일 09시~8일 21시까지를 모델링 기간으로 선정하여 기상장 및 광화학 수치모델링을 수행하였다.

입력자료 구성 및 계산방법

기상입력자료 구성 : 기상입력자료를 생성하기 위하여 현재

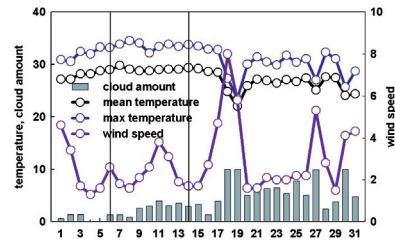


Fig. 5. Daily mean variations of temperature(℃), cloud amount(1/10) and wind speed(m/s) on August.

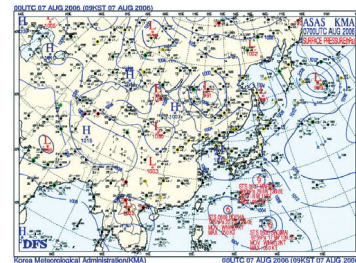


Fig. 6. Synoptic weather maps at 0900 LST on 7 August.

중규모 기상예측에 가장 많이 사용되고 있는 MM5 기상장 모델을 사용하였다. MM5(PSU/NCAR Mesoscale meteorological Model Version3)는 중규모 기상모델로서 미국 기상연구소(National Center for Atmospheric Research)와 펜실베니아 주립대학이 공동 개발한 후 지속적으로 개선되어 온 모델이다<sup>8)</sup>. 모델 적용에 대한 자세한 내용은 2004년 보건환경연구원보를 참고하기 바란다.

본 연구에서는 부산지역의 상세 기상상 산정을 위하여 그림과 같이 총 4개의 domain을 구성하였으며, NCEP/NCAR 재분석 전구자료를 사용하고, 기상청에서 운영하는 부산지역의 12개 AWS 자료를 이용하여 domain 4에서 자료동화를 수행하였다. 산정된 domain 4의 상세기상자료는 CMAQ의 기상장 전처리 모델인 MCIP를 이용하여 기상장 입력자료로 변환

Table 3. The list of ozone warning

Date	Section	Ozone alert start	Ozone alert end	Max concentration
6/5	west	녹산동 16 0.128 ppm	녹산동 18 0.099 ppm	녹산동 16~17 0.128 ppm
8/7	south	등삼동 14 0.137 ppm	등삼동 20 0.074 ppm	등삼동 16 0.192 ppm
8/7	west	대저동 14 0.129 ppm	녹산동 22 0.097 ppm	대저동 17 0.153 ppm
8/8	east	용수리 13 0.129 ppm	용수리 14 0.086 ppm	용수리 13 0.129 ppm
8/8	south	해운대 13 0.183 ppm	해운대 15 0.060 ppm	해운대 13 0.183 ppm
8/10	south	해운대 13 0.122 ppm	해운대 15 0.109 ppm	해운대 14 0.137 ppm
8/13	south	해운대 13 0.145 ppm	해운대 17 0.110 ppm	해운대 13 0.145 ppm
8/14	south	해운대 11 0.121 ppm	해운대 13 0.083 ppm	해운대 11 0.121 ppm
9/29	south	등삼동 15 0.138 ppm	등삼동 19 0.088 ppm	등삼동 16 0.151 ppm

Table 4. Days of exceeding hourly ozone standard(0.1ppm) on August 2006

Date	8/06	8/07	8/08	8/09	8/10	8/11	8/13	8/14	8/24	8/29
Number of site	1	10	9	1	4	1	5	5	1	1

Table 5. MM5 configurations

PBL scheme	Pleim-Xiu
Cumulus scheme	Kuo
Explicit moisture scheme	Mixed phase with graupel(Reisner2)
Radition scheme	RRTM longwave scheme

Table 6. MM5 domain structure

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Vertical grid			23	
Horizontal grid	73×73	73×73	40×40	34×34
Horizontal resolution	40.5km	13.5km	4.5km	1.5km

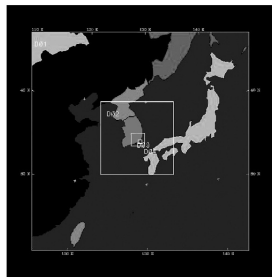


Fig. 7. Map depicting of horizontal domain(left) and topography of domain 4(right).

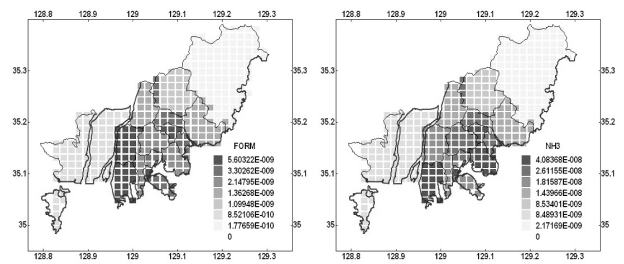


Fig. 8. Spatial distributions of Formaldehyde(left) and NH3(right) from CAPSS(unit : moles/s).

되어진다.

**배출량입력자료 구성** : 정확한 배출량 산정은 대기질 모델링의 가장 기본적인 조건이나 현실적으로 많은 어려움이 있다. 따라서 대기질 모델링 시 사용되는 배출량자료에는 기본적인 오차를 포함하고 있으며 이는 결과에 상당한 영향을 미친다.

본 연구에서는 대기보전 정책시스템(CAPSS : Clean Air Policy Support System)의 일환으로 산정된 부산지역의 2004년 물질별 배출량 자료를 사용하였다. 부산지역 각 구,

군별 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOC, NH<sub>3</sub>, PM-10의 연간 총 배출량을 MM5 기상장 모델링에서 설정된 domain 4의 격자체계로 분할하였으며, EPA에 제시된 CB-V 화학반응 메커니즘의 VOCs 중분류 방법을 이용하여 VOCs 중분류를 수행하고 모델에 입력하였다.

**계산방법** : CMAQ는 3차원 광화학 격자모델로서 다중 격자 체계를 지원하고 있으나 본 연구에서는 광역 격자의 배출량 자료 구축이 용이치 않아 부산지역에 대한 상세 격자에 대하여

Table 7. CAPSS emission data by district in Busan(unit : ton/year)

	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM-10	VOC	NH <sub>3</sub>
Jung-gu	1,021	1,271	517	69	392	28
Seo-gu	1,824	5,491	4,618	214	772	73
Dong-gu	1,745	4,861	3,244	210	713	57
Yeongdo-gu	1,782	2,353	2,139	109	1,875	85
Busanjin-gu	4,608	3,799	130	196	2,198	177
Dongnae-gu	3,091	2,879	1,203	146	1,615	134
Nam-gu	4,185	4,536	132	251	2,108	315
Buk-gu	3,486	3,272	104	162	1,737	155
Haeundae-gu	4,636	3,858	148	181	2,041	193
Saha-gu	8,510	20,115	4,632	512	6,292	328
Geumjeong-gu	3,023	2,951	106	154	1,910	133
Gangseo-gu	2,549	7,396	4,193	282	4,390	391
Yeonje-gu	2,787	2,614	65	137	1,401	103
Suyeong-gu	2,091	1,901	48	91	1,187	84
Sasang-gu	3,696	3,955	278	191	5,371	156
Gijang-gun	1,153	2,234	996	87	1,011	111
sum	50,187	73,486	22,554	2,994	35,014	2,522

Table 8. CMAQ modeling configurations

Horizontal resolution	1.5km
Horizontal grid	31 × 31
Vertical grid	23
Simulation period	60 hours
Emission type	CAPSS 2004
Chemical mechanism	CB-V
MM5 input domain	Domain 4

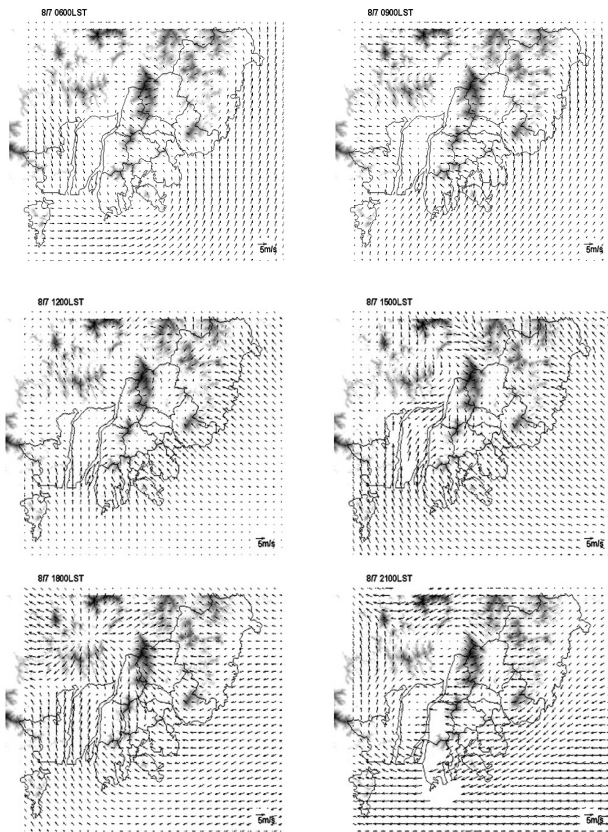


Fig. 9. Horizontal distributions of the simulated wind from MM5.

모델링을 수행하였다.

모델링 영역내에서의 대기오염물질 초기농도자료와 경계농도자료는 수치모의를 시작하는 시간의 각 격자에서의 초기농도로서 모델실행 시 초기 오염물질 농도에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 모델링 초기 24시간은 모델의 적응시간으로 설정하여 초기 농도 부정확성의 영향을 줄였으며, 단일 격자에 대한 농도 계산을 수행하므로 CMAQ에서 제공하고 있는 농도 profile을 초기 및 경계농도로 사용하였다.

연구 결과

기상모델링 결과

새벽시간대에 해상에서 다소 강한 바람이 불었으며, 09시경

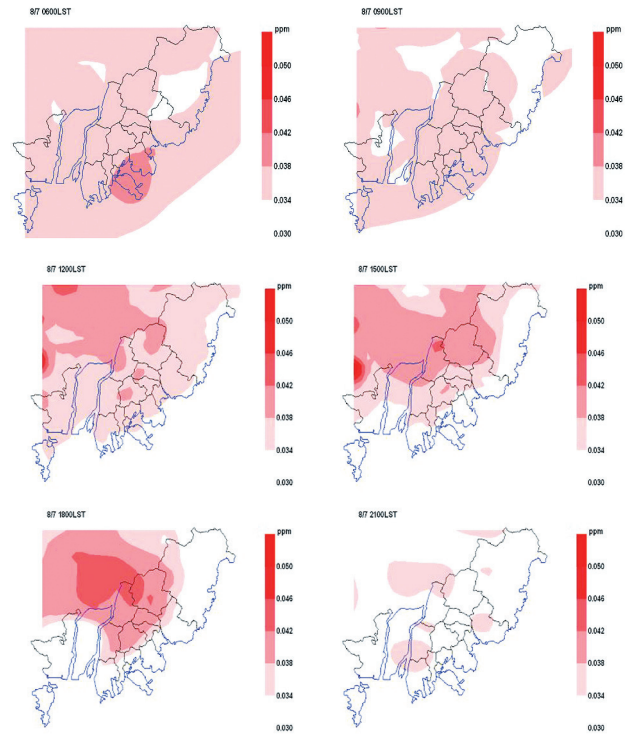


Fig. 10. Horizontal distributions of the simulated ozone concentration from CMAQ.

부터는 해안지역을 중심으로 해풍이 나타나기 시작하여 15시까지 지속되었다. 오후 시간대 내륙에서의 불균등한 지표 가열 등으로 인한 국지 적인 순환이 형성되어 해풍이 내륙으로 진행하지는 못하였으며, 18시부터 해안지역을 중심으로 동풍계열의 바람이 형성되는 것이 보였다.

광화학모델링 결과

모델링결과는 실측치와 다소 차이를 보였다. 이는 부산지역의 배출량 자료만 입력된 결과로 판단된다. 광역 배출량 자료를 이용하여 상세격자의 초기, 경계조건 자료를 생성시키는 nesting 기법은 모델링 결과의 정확성을 증가 시킬 수 있는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 광역배출량 자료의 구축이 용이치 않아, 모델에서 제공하는 초기, 경계조건을 사용하였으며, 부산광역시와 인접한 지역의 배출량이 고려되지 않아

모델링 영역의 농도가 전반적으로 낮게 나타났다. 다만 새벽시간대에 동삼동을 비롯한 해안지역에서 고농도가 나타났고, 오후 시간대에 풍속이 약한 내륙을 중심으로 비교적 높은 농도가 나타났으며, 해가지면서 야간시간에 전반적으로 낮은 농도를 보여 기상조건에 따른 농도 변화는 어느 정도 설명한 것으로 판단된다.

### 결론 및 문제점

CMAQ 모델링 결과 실측 자료와 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났으며 이는 단일 격자체계를 이용한 모델링 방법의 한계로 판단된다. 다만 기상조건에 따른 농도 변화는 어느 정도 반영하고 있는 것으로 나타났다. 초기, 경계조건의 영향을 감소시키기 위해서는 동아시아와 북태평양 지역을 대상으로 한 국제 공동 관측프로그램(ACE-Asia, Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment)등의 광역배출량 자료를 이용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 부산광역시, 부산광역시 대기환경개선 실천계획 수립 결

과 보고서(2002)

2. 김영주, 부산지역에서의 UAM(Urban Airshed Model) 적용 및 민감도 분석, 부산대학교 대학원 석사학위논문(1999. 8.)
3. 오인보, 대도시지역 고농도 오존발생의 기상학적 메카니즘 : 관측자료 분석과 수치모델링, 부산대학교 대학원 박사학위논문(2003. 8.)
4. 김유근, 오인보, 황미경, UAM-V를 이용한 부산지역 고농도 오존사례 수치모의, 한국대기환경학회지 제19권 제1호(2003).
5. U. S. Environmental Protection Agency, Science algorithms of the EPA Model-3 Community Multiscale Air Quality(CMAQ) modeling system(2006).
6. MMM, NCAR, PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide(2003)
7. 이강열, 기상모델의 개선을 통한 대기질 모델링 시스템 구축에 관한 연구, 부산대학교 대학원 석사학위논문(2005. 2.)
8. 이종범, 송은영, CMAQ을 이용한 수도권 풍하지역의 고농도 오존 현상 모사, 환경영향평가 제15권 제13호(2006).