[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 31, No. 5, 2011
ISSN 1598-6411

시화·반월단지지역의 고농도 오존일에 대한 광화학모델 적용 연구 - 기상특성에 대한 분석 -

안재호*

*한경대학교 환경공학과(jhan@hknu.ac.kr)

A study on high ozone concentration in Shiwha·Banwol industry complex using photochemical air pollution model - Analysis of meteorological characteristics -

AN, Jae-Ho*

*Dept. of Environmental Engineering, Hankyong National University(jhan@hknu.ac.kr)

Abstract

The purpose of this paper is to simulate the high ozone concentration in Shiwha·Banwol indusrial complex. High pollution episodes (ozone alert) of this area are the results of geographical location and its air pollutants emission. This research has used meteorological model (RAMS) and photochemical air pollution Model (CIT model). As first step of the evaluate of this combined model system simulations are done in terms of meteorological characteristics like wind fields, PBL-height, etc.. Numerical simulations are carried out with real meteorological synoptic data on June. 24-25, 2010. In comparison with real measurement and another research the model reflects well local meteorological phenomena and shows the possibility to be utilized to analyse the pollutant dispersion over irregular terrain region. The high ozone concentration is deeply correlated to the ambient air temperature, wind speed and solar radiation. Local meteorological phenomena like sea-land breeze impact on horizontal dispersion of ozone. This analysis of meteorological characteristics can, in turn, help to predict their influences on air quality and to manage the high ozone episodes.

Keywords : 고농도 오존(High Ozone Concentration), 기상특성(Meteorological characteristics), CIT 모델(CIT Model)

투고일자 : 2011년 8월 8일, 심사일자 : 2011년 8월 9일, 게재확정일자 : 2011년 10월 14일
교신저자 : 안재호(jhan@hknu.ac.kr)

기 호 설 명

C_p : 정압비열
C_s : 토양의 비열
f : 코리올리 상수
k : Karman 상수
K_H^m : 운동량 수평난류확산계수
K_V^m : 운동량 수직난류확산계수
L : 잠열
P_0 : 표준대기압
q : 비습
R_l : 지면에서의 장파 일사
R_s : 지면에서의 단파 일사
π : Exner's 함수
θ : 온위
θ_* : 마찰 온위
u : 동서방향 바람성분
u_* : 마찰 바람속도
v : 남서방향 바람성분
w : 수직방향 바람성분

1. 서 론

우리나라 수도권의 경우 도시나 공단 등의 오염발생원들이 대부분 해륙풍과 같은 국지적 기상현상에 크게 영향을 받는 해안지역에 위치하고 있다. 이러한 관점에서 시화·반월 산업단지의 경우 해륙풍의 영향을 최대한 반영을 할 수 있는 오일러방식의 대기오염확산 수치모델의 적용이 필수적이라고 하겠다. 김유근[1] 등은 연안지역을 대상으로 해륙풍에 대한 연구를 하였으며, 장면도[2]는 중규모 기상모델을 이용하여 수도권 지역의 기상장을 수치모의 하였다. 이상득[3] 등은 도시규모의 대기오염 농도예측을 위하여 수치모델을 적용한 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서와 같이 해안에 인접한 지역에서의 정밀한 오염확산의 분석 및 연구를 위한 시간적, 공간적으로 충분한 기상요소를 수치모의하기 위하여 3차원 기상모델의 적용이 필수적이다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 기상영향들을 고려한 모델인 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)을 이용하여 중거리 오염확산 예측에 필수적인 대기층의 시간적, 공간적 변화에 대한 3 차원의 기상자료를 얻고자 한다. 나아가 이를 대기오염확산 모델에 연결하여 해안지역이나 복잡한 지형과 같은 중규모 기상현상에 크게 영향을 받는 시화산업단지 지역에서의 O_3 고농도 오염현상 분석에 이용하고자 한다. 오존경보제의 도입으로 고농도 오존현상에 대한 관심이 높아지고 특히 수도권지역 중에 인천을 포함한 시화·반월 산업단지를 중심으로 한 지역의 오존경보의 발효회수가 현저히 증가하고 있는 추세이다. 특히 수도권인 서울, 경기, 인천의 경보회수가 대부분을 차지하고 있다. 또한 전남의 경우 여수산업단지에서 주로 발효된 것으로 나타나고 있으며,[4] 시화·반월 산업단지의 경우 공장 밀집지역으로 유사한 특징을 나타낼 것으로 사료되며 오존 경보 발령 위험이 특별히 관리할 필요성을 보인다 하겠다. 오인보[5] 등이 수도권 오존현상의 특성에서 배출된 전구오염물질의 이동과 축적이 고농도 오존현상에 중요하게 기여하고 있다고 제시하고 있다. 이러한 기상적 수송과 태양복사에 대한 기상모델을 통한 분석은 수도권 그리고 연구대상 지역인 산업단지의 경우 대단히 중요함을 나타낸다 하겠다. 이러한 고농도 오존 현상의 분석은 대기중의 광화학반응을 통하여 2차 오염물질인 오존, PAN 등을 반영한 광화학모델 적용이 필수적이라 하겠다. 본 연구를 통하여 지역규모의 산업단지와 같은 특정한 지역을 대상으로 국지적인 기상의 특성이 반영된 오존확산 대한 기초 연구를 수행하였다. 기초연구의 하나로 고온도 오존일을 대상으로 기상적 특성과 그 상관성을 분석하고자 하였고, 기상모델 수치모의 결과와 비교분석을 하였다.

2. 연구의 내용 및 방법

2.1 연구대상지역

고농도 오존현상이 문제시 되고 수도권 지역에서 오존경보발령이 가장 빈번한 경기도 지역을 중심으로 영향 등을 분석하기 위한 모델 적용영역은 기상특성 예측을 위한 모델링 지역(TM좌표 : 140-230E, 400-460N (90km*60km))과 광화학반응을 고려한 대기오염모델링을 위한 미세격자 지역(TM좌표 155-200E, 410-440N (45km*30km))으로 나누어 격자를 달리할 것이며, 두 격자지역을 다 포함하는 지역의 지형도를 그림 1에 나타내었다.

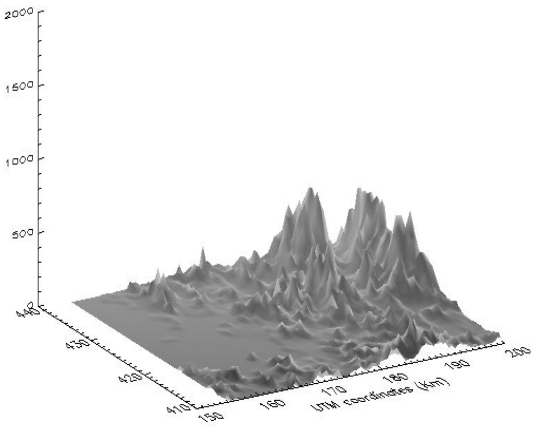

그림 1. 연구 대상지역의 지형도

2.2 연구방법

대기오염문제 중 오존경보제 등을 통하여 알려진 바와 같이 여름철 고농도 오존으로 대표되는 광화학반응을 고려한 대기오염모델이 절실히 요구되나 이에 대한 연구는 상당히 미흡한 상태이다. 본 연구를 통하여 광화학적 반응기작에 대한 이해뿐 만 아니라, 기상과 대기오염확산이 연결된 모델을 이용하여 오존농도변화예측을 위한 연구를 진행하고자 한다. 미국 Colorado State University 의 Pielke 교수가 개발하여 미국 등에서 중규모 기상장의 수치모의에 활발히 이용되는 RAMS 모델로 수치모의 된 기상부분과 광화학오염 확산모델인 CIT모델을 연계하는 모델을 적용하고자 한다.

RAMS 모델은 Pielke[6] 에 의해 Florida 해안의 해륙풍 해석에 이용되었고, 이후에 이태리 Barbados 지역[7] 과 북부 독일의 해안지역[8] 의 국지적인 기상현상을 분석하기 위해 적용되었다. 최근에는 이 모델에서 예측된 기상자료에 오염확산 모델을 연결하여 중거리 오염확산 분석에 많이 적용되었다. Segal[9]에 의해 실제 지역 Greater Chesapeake Bay에 적용되었다. 또한 남부 Florida 지역에서 약 100km 쯤 떨어진 주위의 대규모 발전소들이 자연공원에 주는 영향을 분석하기 위하여 Segal et al.[10] 는 중거리 이동과 $S0_2$ 농도 예측을 위해 이 모델을 적용하여 영향을 분석해 보았다. 그리고 중간규모의 대기순환 현상이 오염확산에 미치는 영향이 Robinsohn et al.[11] 에 의해 이스라엘 남부 해안 지역에서 연구되어 졌다.

본 연구에서는 광화학적 오염현상이 심각한 반월·시화 산업단지를 대상으로 이 지역의 지형과 해륙풍과 같은 지역적 기상현상이 충분히 고려된 오염확산을 분석하고자 하였다. 실제의 예를 분석하기 위하여 2010년 6월 24-25일을 선택하여 일차적으로 지역적 기상현상을 분석하였다. 수평적 바람장의 분포와 혼합층 및 대기온도의 일중 변화를 예측하여 분석을 하였고, 몇 곳의 기상측정지점에 대하여 실측자료와 모델의 결과를 비교분석하였다.

2.3. 기상수치모델의 기본방정식

이 모델은 3차원 격자모델로 각 격자점 마다 대기안정도에 따른 난류확산계수를 고려하여 풍향, 풍속, 기압, 수증기의 혼합비, Planetary Boundary Layer (PBL) 등을 계산하고 시간적인 변화를 예측하게 된다.

운동량 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z^*} \right) + fv - fv_g - \theta\frac{\partial \pi}{\partial x} + g\frac{z^* - s'}{s'}\cdot\frac{\partial z_G}{\partial x} - g\frac{z^*}{s'}\cdot\frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H^m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{s'}{s - z_G} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^m \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z^*} \right) + fu - fu_g - \theta\frac{\partial \pi}{\partial y} + g\frac{z^* - s'}{s'}\cdot\frac{\partial z_G}{\partial y} - g\frac{z^*}{s'}\cdot\frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H^m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{s'}{s - z_G} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^m \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \quad (2)$$

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G}\left(u\frac{\partial z_G}{\partial x} + v\frac{\partial z_G}{\partial y} \right) + \frac{1}{s - z_G}\left(\frac{\partial s}{\partial t} + u\frac{\partial s}{\partial x} + v\frac{\partial s}{\partial y} \right) = 0. \quad (3)$$

$$w^* = \frac{s'}{s - z_G}w - \frac{z^*}{s - z_G}\left(\frac{\partial s}{\partial t} + u\frac{\partial s}{\partial x} + v\frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{z^* - s'}{s - z_G}\left(u\frac{\partial z_G}{\partial x} + v\frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \quad (4)$$

온위 보존 방정식

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{s'}{s - z_G} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^\theta \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H^\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\theta = \left(\frac{P_n}{P} \right)^{R/C_P}(1 + 0.61q). \quad (6)$$

습기 보존 방정식

$$\frac{dq}{dt} = \left(\frac{s'}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^q \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^q \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H^q \frac{\partial q}{\partial y} \right) \quad (7)$$

정정상태 방정식

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = -\frac{s - z_G}{s'}\cdot\frac{g}{\theta} \quad (8)$$

$$\pi = c_P\left(\frac{p}{p_n} \right)^{R/c_P} \quad (9)$$

2.5 열평형 방정식

혼합고산정시 가장 중요한 요소인 온도분포를 나타내기 위한 열평형방정식에 대하여 다음의 공식을 사용하였다. 이 방정식에는 단파장과 장파장의 태양광선에 의한 열이동, 지면에서의 열전달, 습기의 기화 또는 응축열, 난류에 의한 열이동 그리고 지면에서의 복사열이 고려되었으며, Pielke[6] 에 구체적으로 설명되어 있다.

$$R_S + R_\ell - \rho L u_* q_* - \rho C_P u_* \theta_* - \rho_S C_S K_S \frac{\partial T_S}{\partial z}/_G - \sigma T_G^4 = 0 \quad (10)$$

$\rho L u_* q_*$ 습기의 기화 또는 응축열

$\rho C_P u_* \theta_*$ 난류에 의한 열이동

$\rho_S C_S K_S \frac{\partial T_S}{\partial z}/_G$ 지면에서의 열전달

σT_G^4 지면에서의 복사열

2.5 대기오염확산 모델

본 연구에서 사용한 대기오염확산 모델은 CIT 모델을 적용하였다. CIT 모델은 광화학 메커니즘으로 SAPRC99 (Statewide Air Pollution Reaserch Center 1999)을 포함하고 있다. 국내 기존의 연구들이 CB4 (Carbon Band 4)을 적용한 연구가 많이 있으나, 광화학 반응에 적용하는 VOC 등의 종류가 SAPRC99가 31종을 반영하여 엄밀한 광화학 반응을 고려하였다.[12]

표 1. SAPRC99 메카니즘에 적용되는 화학종

	SAPRC99	CB4
CO	CO	CO
NO_x	NO, NO_2	NO, NO_2
VOC	CH4, C2H6, C3H8, ALK1, ALK2, ALK3, C2H2, ETHE, OLE1, OLE2, BUTD, ISOP, TRP1, C6H6, ARO1, ARO2, MEOH, ETOH, MTBE, HCHO, CCHO, RCHO, BALD, ACET ,MEK, NH3, SO2, SULF	ALD2, ETH, FORM, ISOP, NR, OLE, PAR, TOL, XYL

3. 결과 및 고찰

3.1 시흥·안산지역 고농도 오존일 분석

경기도에서 최근 오존경보가 발령현황을 보면 2007년에 5회, 2008년에 16회, 2009년에는 22회로 증가 추세에 있으며 경기도 지역의 고농도 오존의 심각성을 보여 준다. 본 연구에서는 경기도 남부 일원의 고농도 오존의 분포특성과 기상조건과 고농도 오존일의 상관성을 분석하였다. 본 연구에서는 2010년을 기준으로 일사량과 기온이 높아 고농도 오존이 나타나는 5월에서 10월을 대상으로 분석을 하였다. 시화·반월산업단지 지역의 오존주의가 발령된 기간을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 시화·반월산업단지의 시간대별 오존농도 현황

날짜	발령시간	발령농도	발령지역
2010-05-21	14-18	0.137	안산, 안양권
2010-05-21	14-18	0.137	수원, 용인권
2010-06-10	13-19	0.128	안산, 안양권
2010-06-10	14-19	0.123	수원, 용인권
2010-06-24	14-19	0.126	안산, 안양권
2010-06-24	14-19	0.120	수원, 용인권
2010-06-25	14-17	0.137	안산, 안양권
2010-06-25	14-17	0.120	수원, 용인권

연구 대상지역 이외의 경우 오존 경보발령이 9월-10월에 있었으나 시화·반월산업단지 인근지역에서는 6월에 집중이 되어있었다. 이중에서 6월 24일과 25일에 걸쳐 강하게 고농도 오존현상이 발생하였고 본 연구에서 대상일로 하여 수치모의를 수행하였다. 대상기간의 기상특성을 분석하기 위하여 기상모델링지역 내의 수원기상대(TM좌표 : 198.5, 418.6)와 인천기상대(TM좌표 : 166.1, 440.9)의 실측자료와 비교 검증 하였다. 2010년 6월에 고농도 오존일이 많았던 이유는 경기남부 지역의 30℃ 이상인 날이 많았고 특히 24, 25일은 6월 평균 풍속 보다 약한 2.0 m/s 내외의 미풍이 발생하여 24-25일 고농도 오존이 발생하는 기상조건을 보여 주었다.

표 3. 인천, 수원 기상관측소의 기상관측 현황

	인천시		수원시	
날짜	6월24일	6월25일	6월24일	6월25일
평균기온(℃)	22.1	25.5	23.7	26.7
최고기온(℃)	27.1	30.6	30.5	33.3
최저기온(℃)	18.0	19.0	17.2	18.4
평균운량	0.0	4.0	0.0	6.0
풍속(m/sec)	2.2	2.0	1.3	2.0
상대습도	63.4	58.6	67.1	60.9
최저초상온도	15.8	17.4	15.3	16.3
일사(MJ/㎡)	26.21	21.93	26.17	23.25

3.2 기상인자와 고농도 오존의 상관성 분석

오존농도에 영향을 미치는 기상요소와의 상관성을 분석하기 위하여 고농도 오존일이 발생한 6월 22일부터 6월 27일의 6일간의 기상인자와 고농도 오존생성과의 관계를 보면 기온, 일사량과 풍속과의 상관관계를 분석한 결과 다음의 결과를 얻었다. 시간별 풍속, 풍향, 습도를 시흥 및 안산 지역과 지역적 여건이 비슷한 수원, 인천 기상대 측정값의 상관성 결과를 나타내었다. 오존은 기온과의 상간성을 분석해 보면 R= 0.80-0.90로 매우 높은 상관성을 보여주었고, 풍속과는 R= 0.6-0.7의 상관성을 나타내었다. 또한 일사량은 오존생성에 중요한 기인요소로 R=0.76의 아주 높은 상관성을 보여 주었다. 또한 바람의 경우 수

원과 인천 측정소의 풍속과의 상관성은 각각 R=0.54와 R=0.48로 상관성이 비교적 낮게 나타났다. 오존발생과 직접적인 관계에 있는 일사량의 오존농도와의 상관성은 인천과 수원에서는 두 지역 모두 R=0.70으로 일사량의 경우 지역적이 차이 없이 비교적 높은 상관성을 보여 주었다. 이들 기상적 요소를 잘 활용한다면 고농도 오존일의 예보 및 경보에 활용이 가능할 것으로 사료된다. 고농도가 발생하였던 기간의 풍속, 온도, 일사량의 상관성을 보여주기 위하여 그림 2-4에 오존농도 일변화 추이와 기온, 풍속 그리고 일사량의 일변화 추이를 비교하여 나타내었다. 다른 날에 비해 온도는 높고, 일사량이 강한 날에 고농도가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과는 서울지역의 고농도 오존일과 기상과의 상관성을분석한 박수진[13]의 연구결과 기온과의 상관성 0.80-0.89, 일사량의 경우 0.49-079의 결과와 매우 유사한 상관성을 보여주었다. 고미연[14]은 대구지역의 각 측정망을 대상으로 오존 월평균 농도와 월평균 기온과의 상관성을 비교하여 0.92의 높은 상관성을 제시하였으며 이는 매월의 평균값 간을 비교하므로 좀 더 높은 상관성을 보이는 것으로 사료된다. 봉 연구 대상 지역인 시흥과 안산 지역의 경우도 기상적인 요소와 고농도 오존 발생은 유사한 특성을 보인다고 사료된다. 그러므로 고농도 오존의 수치모의에서는 다음에 제시하고 있는 바람장이나 온도장 그리고 대기혼합층의 일변화 등이 고농도 오존일 분석에 필수적이 요소이며, 아주 유용하게 이용이 가능하리라 사료된다.

그림 2. 2010년 6월 22- 27일의 시흥, 안산지역의 오존농도와 기온의 변화추이

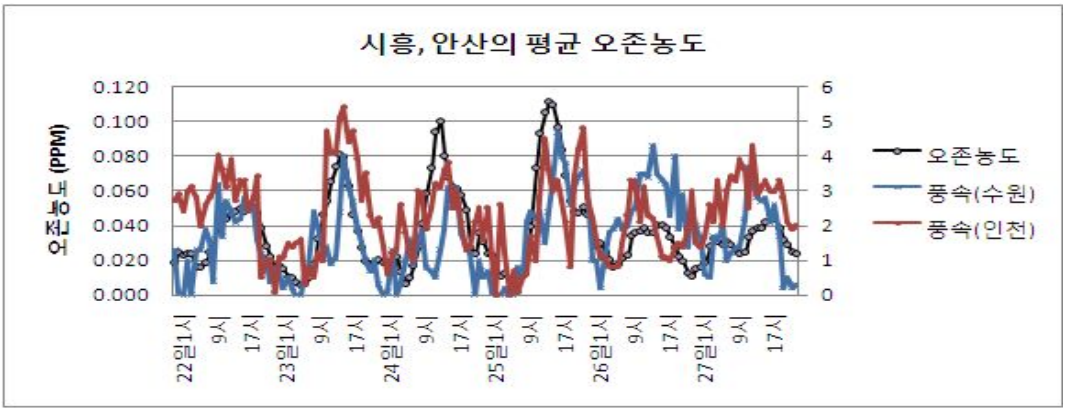

그림 3. 2010년 6월 22- 27일의 시흥, 안산지역의 오존농도와 풍속의 변화추이

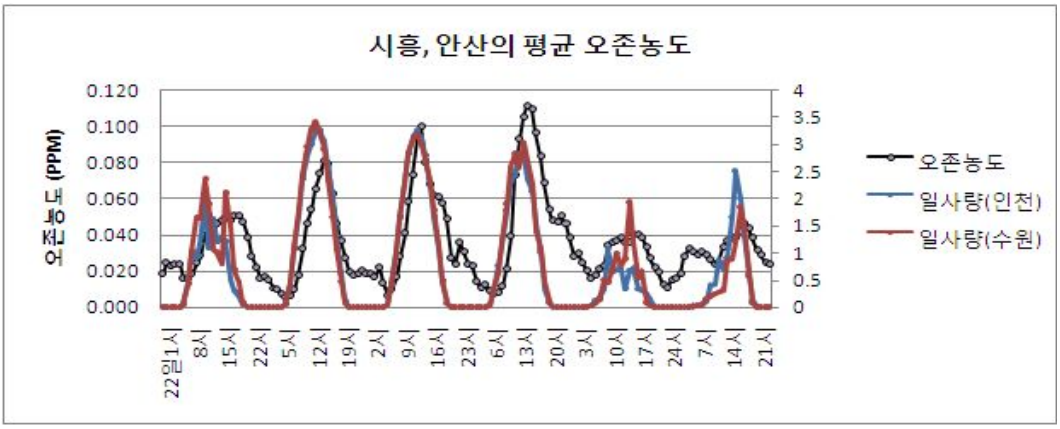

그림 4. 2010년 6월 22- 27일의 시흥, 안산지역의 오존농도와 일사량의 변화추이

3.3 지표면의 바람장

시흥 및 안산 지역을 포함한 수도권 지역을 대상으로 RAMS 모델을 이용한 상세 바람장 수치모의 결과는 그림 5-8에 나타내었다. 이 지역적 바람장의 변화는 매시간 그래픽으로 출력하여 분석을 하였으며, 2010년 6월 22일부터 27일의 기간 중 일최고 오존농도를 나타난 25일 10시, 13시, 16시, 19시의 낮 시간 대의 바람장을 매 3시간 간격으로 나타내었다. 2010년 6월 25일의 경우 850 hPa 의 기압 배치도를 통한 지균풍의 방향을 보면 북서풍의 주풍이 발달한 것을 알 수 있다. 오전 10시 경에는 지면의 온도가 수면에 비해 높아져 열적 차이로 인한 기압차가 발생하므로 해안지역을 중심으로 해풍이 시작된다. 하지만 내륙에는 영향을 못 미쳐 육지의 대부분 지역에 약한 바람만을 보여주고 있다. 시간이 지나며 해풍이 강하게 발달하여 오후 1시 경에는 모든 해안지역에 잘 나타나고 있다. 종관 기상상태에서 주풍이 남서풍이었으나 해풍이 발달함에 따라 초기 남서풍 방향의 지균풍이 내륙의 대부분이 서풍계열의 바람으로 바뀐 것을 볼 수 있었다. 육지에서는 지면 거칠기의 영향으로 바다에서의 보다 약한 바람을 보이고 있다. 주풍인 지균풍의 남서방향과 해풍의 방향이 합쳐져 해안가 지역을 중심으로 바람의 세기가 강화되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 다만 육지의 경우 해안선의 방향에 따라 화성 지역의 경우 내륙 깊숙이 북서풍이 강하게 나타나고 있다.

13시와 16시의 경우 관측된 바람은 전체적으로 서풍이 지배를 하고 있으며, 지형의 영향으로 해안선을 따라서 바람이 발산하며 북북서 내지 남남서풍의 발달을 볼 수 있다. 19시의 경우 대기의 안정화와 함께 바람이 약화되는 것을 보이며 낮 시간에 발달했던 해풍현상이 현저하게 줄어드는 것을 보이고 있다. 지면 관계로 본 논문에 나타내지는 못 하였으나 22시와 다음 날인 26일 새벽 1시의 경우에는 관측된 바람은 대기안정화에 따라 풍속이 현저하게 줄어들어 아주 약한 바람을 보여 주고 있었다. 산에 인접한 지역에서 밤이 깊어질수록 서풍의 바람이 강화되는 것을 보여 주는데 이는 산풍의 영향으로 사료된다. 본 연구의 모델의 지역의 바람장을 비교적 합리적으로 모사하고 있음을 알 수 있었다.

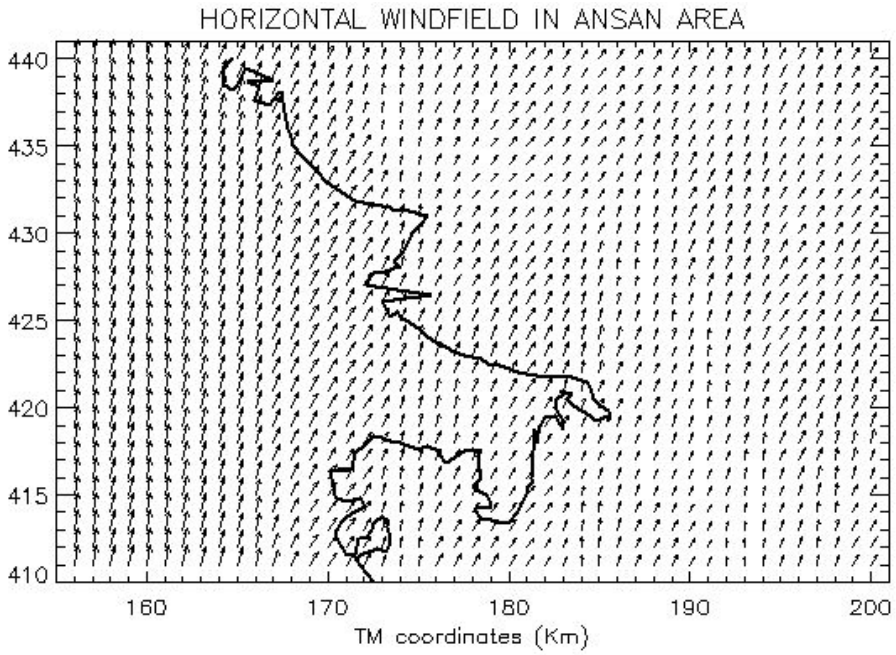

그림 5. 2010년 6월 25일 10시 바람장

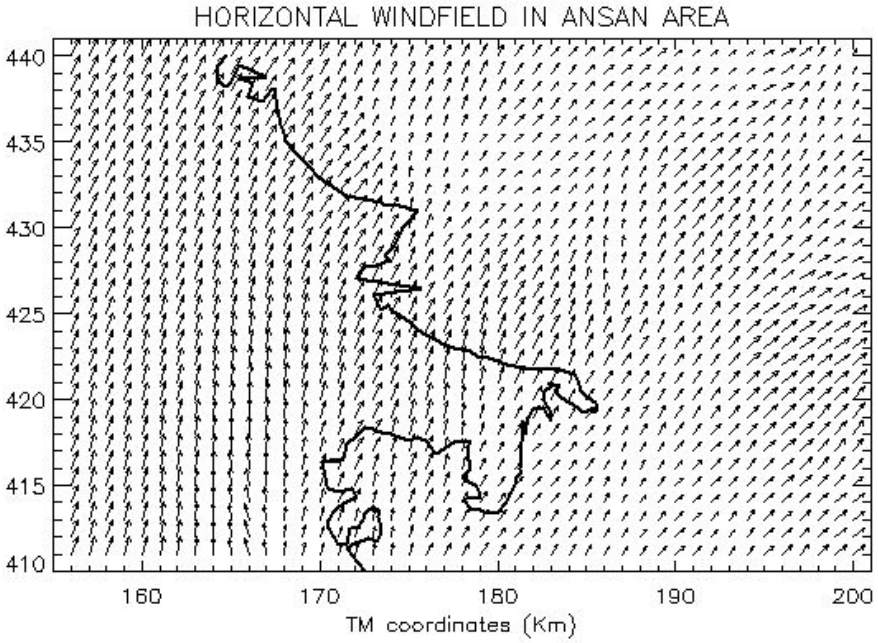

그림 6. 2010년 6월 25일 13시 바람장

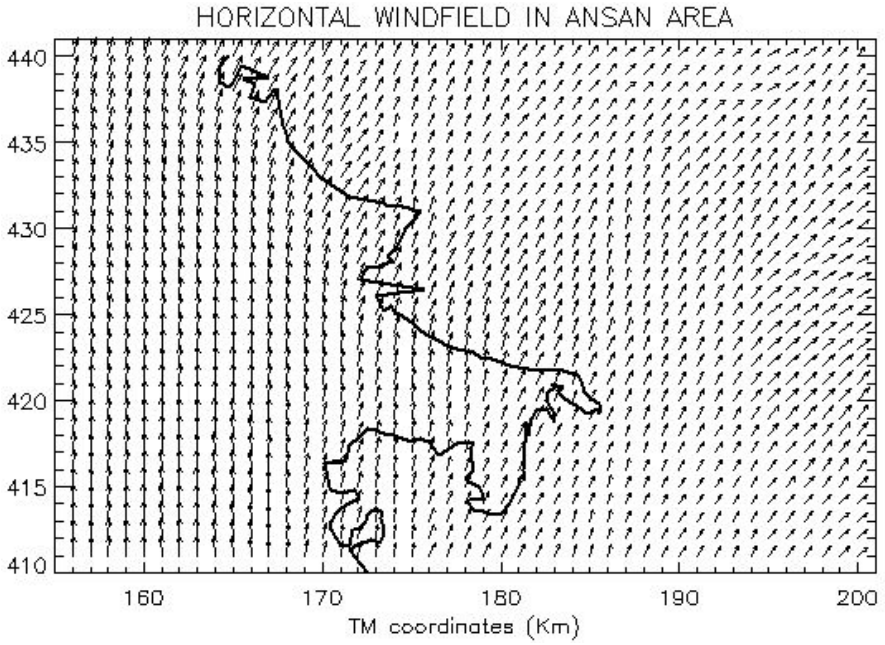

그림 7. 2010년 6월 25일 16시 바람장

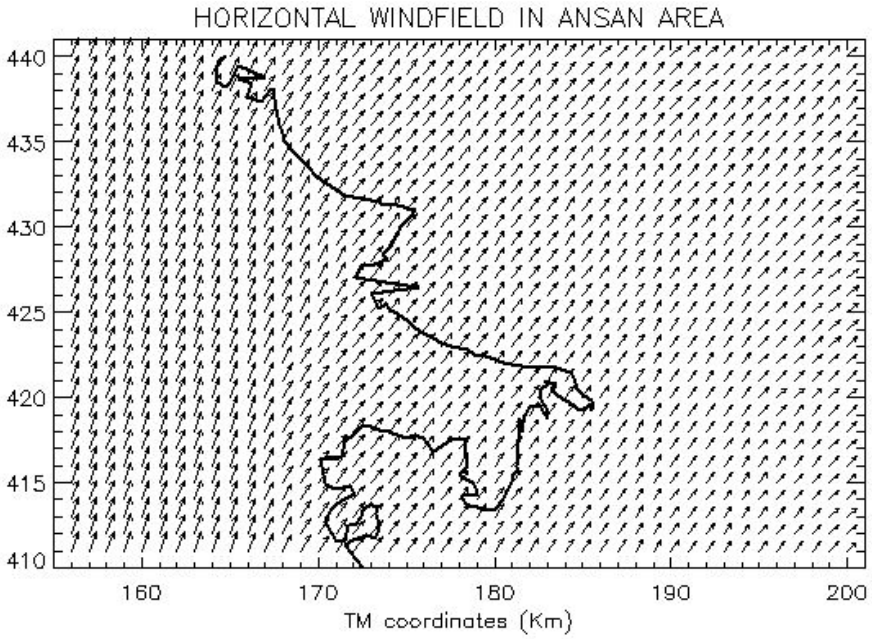

그림 8. 2010년 6월 25일 19시 바람장

3.4 행성 경계층 (PBL) 높이의 일변화

행성경계층에 대한 연구는 기상예측에서 뿐만 아니라 오염물질의 농도예측에 있어서 그 중요성이 점점 부각되고 있다. 대기층이 불안정한 경우는 오염물질이 난류확산에 의해 행성경계층의 최상단까지 혼합되며, 대기층이 안정한 경우는 기온역전이 일어나는 역전층의 높이까지 오염물질의 혼합이 이루어지므로 행성경계층 높이의 예측은 대기오염확산을 분석할 때 혼합고의 산정에 매우 중요하다.[15] 실제의 예를 분석하기 위하여 2010년 6월 24-25일을 택하여 매 시간별 시흥지역에서의 행성경계층의 변화를 수치 계산하여 그림 12.에 나타내었다. 오전 중에는 안정층이 점차 불안정화 되어가며 이에 따라 행성경계층의 높이도 높아진다. 오후 4시경에 행성경계층의 높이가 1328m에 달해 최고치에 도달하며, 이후 일사량의 감소에 따라 점차 낮아지게 된다. 늦은 밤에는 지면이 냉각되며 대기의 안정화가 가속되어 해뜨기 직전 대기층이 가장 안정화되며 약 600m 의 최저 행성경계층 높이를 보여 준다.

오산측정소의 고층대기자료를 토대로 Holtzworth 방법으로 2010년 6월24일과 25일의 평균적 온위의 수직적 분포를 분석하여 일중 최고혼합고를 상정한 대기환경월보 각각 1600m-1700m의 행성경계층 높이를 보여주고 있다.[16] 이는 본 연구의 결과가 시화·반월지역이 해안에 가까운 지역임을 고려할 때 비교적 내륙에 위치한 오산고층기상측정소와 비교할 때 다소 낮은 혼합층의 발달을 보여준다 하겠다. 그러나 이러한 지역적인 특성이 비교적 합리적으로 반영이 된 혼합층의 일변화추이의 결과를 보여준다 하겠다. 또한 오존 농도의 일변화추이와 비교해 볼 때 태양복사로 인하여 지면 가까운 대기층의 온위가 상승하여 혼합층의 높이가 높아짐과 함께 태양복사가 강해짐에 따른 오존형성을 위한 광화학반응이 활발히 이루어져 상당히 유사한 일변화 추이를 보여준다 하겠다.

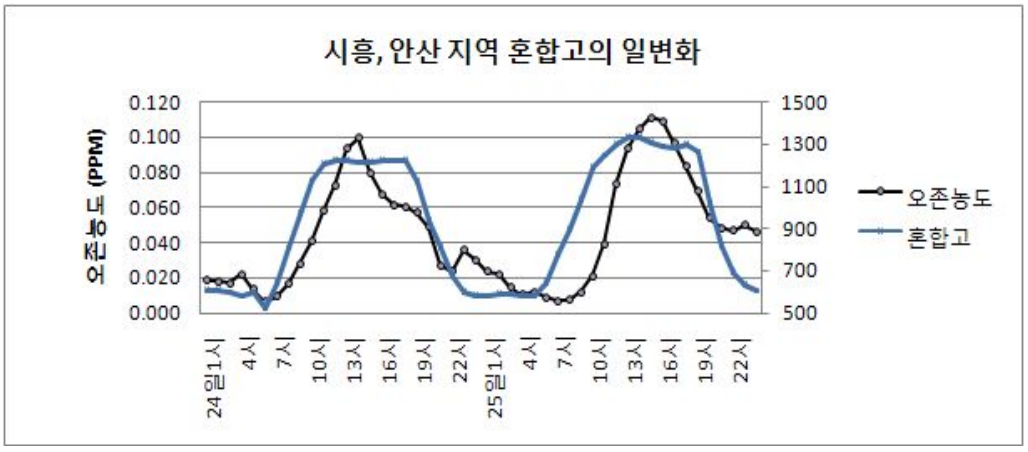

그림 9. 2010년 6월 24- 25일의 시흥, 안산지역의 오존농도와 기온의 일변화추이

3.5 시흥·반월 지역의 태양복사량의 일변화

대기오염확산과 특히 오존과 같은 광화학반응성이 높은 오염물의 농도에 중요한 영향을 미치는 기상요소의 하나인 태양복사량의 일변화에 대하여 수치 계산한 결과를 분석하였다. 고농도 오존일의 일사량의 직접 실측이 있으면 좋을 것으로 사료되나

보통 고농도 오존 발생일을 미리 알 수 없는 관계로 대상지역의 직접적인 자료를 활용하여 검증하지 못하는 한계가 있습니다. 그러므로 본 연구에서는 가장 인접한 기상대의 자료를 이용하였으나, 추후 연구에서는 대상지역의 실측값과의 기상자료의 검증이 필요할 것으로 사료됩니다. 본 연구에서 이용한 모델이 지역의 특성을 잘 반영하고 있는지를 확인하기 위하여 다른 연구자의 연구결과와 비교분석을 하였다. 수치모의 결과를 대기층을 통과한 후의 지면에서의 순복사량은 그림 13.에서와 같이 해가 뜬 6 시 이후 해가 지는 18시까지 최대 3.5 MJ/m^2 의 값을 나타내었다.

태양의 복사량을 조사한 Sozzi[17] 의 경우에는 1992년 5월의 20일부터 28일까지의 일변화를 보고하였는데 태양복사량은 오후 1시를 전후하여 약 1000 W/m^2을 보이며 순복사량의 경우 오후 1시를 전후하여 약 700 W/m^2 내외의 값을 보여 주며 약 1개월의 시차를 고려하면 상당히 유사한 일변화 추이결과를 보여 주었다. 그림 13에서 나타낸 바와 같이 인근 수원과 인천의 기상관측소에서의 실측값과 본 모델의 수치결과값을 비교하였다. 다소 수치모의 값이 실측값에 비해 야간 높게 예측이 되었으나 매우 신뢰성 있는 결과를 보여 준다 하겠다. 또한 일변화 추이는 상관계수값이 R=0.99 에 이를 정도로 아주 정확히 일변화 추이를 나타내었다. 이상의 기존 연구결과 및 실측값과 비교해 볼 때 본 연구의 모델이 이 지역의 태양복사량 및 순복사량의 특성을 매우 합리적으로 반영함을 알 수 있었다.

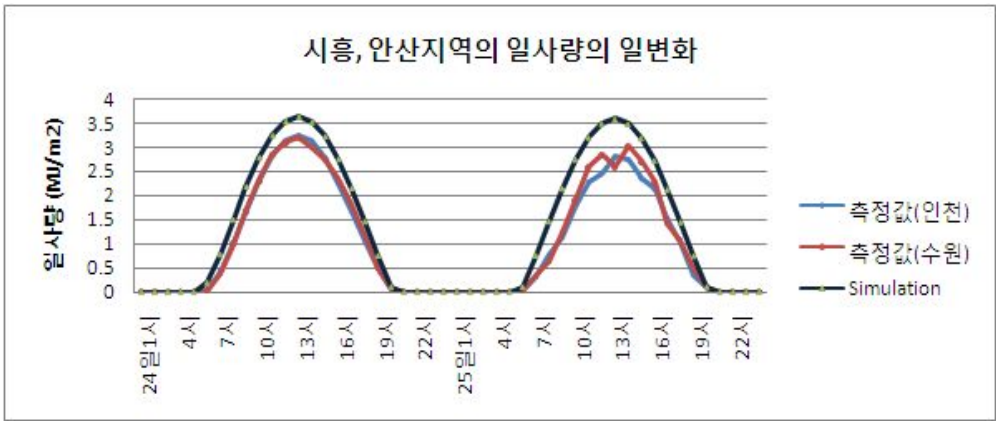

그림 10. 2010년 6월 24- 25일의 시흥, 안산지역의 일사량의 일변화추이

5. 결 론

본 연구에서는 기상모델인 RAMS에 광화학모델인 CIT model을 연결하여 대기오염확산을 예측하기 위한 연구 중 기상부분에서 대해서 수행된 부분을 분석하여 다음과 같은 결과를 구하였다. 실제의 예를 분석하기 위하여 2010년 6월 24-25일을 선택하여 지역적 기상현상의 특징을 수치모사하였고, 인천과 수원의 기상측정지점에 대하여 실측자료와 모델의 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체적으로 24시간 바람장을 분석하며 계산된 바람장이 실측값에 비하여 강하게 나타났으며 이는 수치모의 대기층의 높이가 25m의 값이고 실측값은 10m의

값이므로 이러한 편차가 발생한 것으로 사료된다. 그러나 지역적 바람 특성인 오후 시간대의 서쪽으로부터의 바람유입 그리고 오후 시간대의 해풍 등의 지역적 바람 특성은 잘 모사가 되었다.

(2) PBL 층의 일변화 산정은 지형적 특성으로 인해 오후 4시 경에 최고 높이 1200m가 수치모의 되었으며 다른 연구자의 결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이는 6월 평균 약 1200-1300m 를 보이는 것과 비교해 혼합층의 높이가 낮게 형성되는 것은 바다에 인접하여 내륙애 비하여 낮은 혼합층을 형성하는 특성을 나타낸다고 사료된다.

(3) 고농도 오존일이 발생한 6월 22일부터 6월 27일의 6일간의 기상인자와 고농도 오존생성과의 관계를 보면 기온과의 상간성을 분석해 보면 R= 0.80-0.90로 매우 높은 상관성을 보여주었으며, 일사량은 오존생성에 중요한 기인요소로 R=0.76의 아주 높은 상관성을 보여 주었다. 또한 바람의 경우 수원과 인천 측정소의 풍속과의 상관성은 각 각 R=0.54와 R=0.48로 상관성이 비교적 낮게 나타났다.

(4) 광화학적 반응에 있어서는 태양광선의 일사량, 혼합고의 일변화추이 등이 중요하게 작용을 하는데 실제의 측정값과 다른 연구자의 결과와도 잘 일치함를 보여 주었다. 본 연구에서 수행된 지역특성이 충분히 반영된 3차원 기상장은 반월·시화산업단지에 있어서 O_3 고농도 현상에 대한 정확한 분석과 예측에서 잘 활용이 될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2010년도 한경대학교 교내연구비의 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

1. 김유근, 문요섭, 오인보, 황미경, 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표고농도 오존발생에 미치는 영향, 한국기상학회지, 38권, pp. 307-317, 2002.
2. 장명도, 광화학모델을 이용한 수도권지역 오존농도의 시공간 거동에 관한 연구, 강원대학교 대학원, 박사학위논문, 2004.
3. 이상득, 정일현, 도시규모의 대기오염 농도 예측, 한국대기보전학회지, 제13권, pp. 137-145, 1997.
4. 환경부, 대기환경연보, 2009.
5. 오인보, 김유근, 황미경, 수도권지역 오존오염 패턴과 기상학적 특성, 한국대기환경학회지 21권, pp. 277-401 2005.
6. Pielke, R. A., A three - dimensional numerical model of the sea-breeze over south Florida, Mon. Weather Review, Vol. 102, pp. 115 - 139, 1974.
7. Mahrer, Y. and Pielke, R. A., Numerical simulation of the air flow over Barbados, Mon. Weather Review, Vol. 104, pp. 1392 - 1402, 1976.
8. Rohner, H., Beschreibung und Uebernahme des University of Virginia Mesoscale Model sowie eine exemplarische Anwendung auf das norddeutsche Kuestengebiet, Diplomarbeit, Freien Universitaet Berlin, 1977.
9. Segal, M., McNider, R. T., Pielke, R. A. and McDougal, D. S., A numerical model study of regional air pollution meteorology of the Greater Chesapeake Bay area - summer day case study, Atmospheric Environment, Vol. 16, pp. 1382 - 1397, 1982.
10. Segal, M., Pielke, R. A., Arritt, R. W., Moran, M. D., Yu, C. H. and Henderson

D., Application of a Mesoscal atmospheric dispersion modeling system to the estimation of sulfur dioxide concentrations from major elevated sources in southern Florida, Atmospheric Environment, Vol. 22, pp. 1319 - 1334, 1988.
11. Robinsohn, J., Mahrer, Y. und Wakshal, E., The effects of mesoscale circulation on the dispersion of pollutants (SO2) in the eastern Mediterranean southern coastal plain of Israel, Atmospheric Environment, Vol. 26B, pp. 271 - 277, 1992.
12. W. P. L. Carter, documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment, Final Report to California Air Resources Board Contract No. 92-329, 2000.
13. 박수진, 서울지역 고농도 오존 분포 시 기상특성에 관한 연구, 서울시립대학교 도시과학대학원, 석사논문, 2005.
14. 고미현, 대구지역의 오존발생에 미치는 영향인자에 관한 연구, 영남대학교 대학원, 석사논문, 2009.
15. Ossing, F. J., Ein Ansatz zur Berechnung der Mischungshoehe, Amtsblatt des Institut fuer Meteorologie der Freien Universittaet Berlin, 1987.
16. 환경부, 대기환경월보, 2010년 6월, 2009
17. Sozzi R., Salcido A., Flores R. S., Georgiadis T., Daytime net radiation parameterisation for Mexico City suburban areas, Atmospheric Research, Vol. 50, pp. 53 - 68, 1999.