한국대기환경학회지 제 25 권 제 2 호
J. KOSAE Vol. 25, No. 2 (2009) pp. 167～174
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

기술자료

EUREKA E!3266 (EUROENVIRON WEBAIR SYSTEM)에 의한 대기질 모델링 시스템 (AIRWARE) 개발

Development of AIRWARE System by EUREKA E!3266-EUROENVIRON WEBAIR SYSTEM

이헌창* · 정재칠 · Kurt Fedra[1] · 김동영[2] · 김태진[3]
(주)바이오텔, [1]ESS GmbH, [2]경기개발연구원, [3]수원대학교 화공생명공학과

(2009년 1월 20일 접수, 2009년 4월 9일 채택)

Hern-Chang Lee*, Jae-Chil Jung, Kurt Fedra[1],
Dong-Young Kim[2] and Tai-Jin Kim[3]
BioTel Co. Ltd., [1]*Environmental Software and Service GmbH, Austria,*
[2]*Gyeonggi Research Institute,*[3]*Department of Chemical Engineering, Suwon University*

(Received 20 January 2009, accepted 9 April 2009)

Abstract

The AIRWARE System was developed from one of the EUREKA PROJECT E!3266-EUROENVIRON WEBAIR System. The AIRWARE can nowcast and forecast the air quality of Seoul and Gyeonggi-do regions. To nowcast and forecast concentration of pollutants, MM5, AERMOD/CAMx, and SMOKE Models were used for each meteorologic data, measured data, and emission data. All DB were constructed for 2001 year. The episode analysis and time series analysis were accomplished to analyze the AIRWARE reliability. The simulated results were very well agreed with measured result for measured pollutants and meteorological data. The developed AIRWARE system can analyze with real-time, support web-based air quality information. This information can used with policy data to manage the air quality and prepare reduction plan in air impact assessment or air environmental plan.

Key words : AIRWARE, AQM, AERMOD, CAMx, MM5, EUREKA

1. 서 론

대기환경관리 분야에서 대기질 모형(air quality model)의 역할은 매우 중요하다. 대기질 모형은 오염물질의 배출, 이류 및 확산(advection and diffusion), 반응, 침적(deposition) 등 일련의 과정들을 수식적으로 표현하여 전산화한 것으로 대기오염의 배출(resource)과 수용체(receptor) 사이의 인과관계를 이해하기 위한 핵심적인 도구이다. 대기질 모형은 대기 중 오염물질의 확산과 반응을 이해하는 연구도구(research tool)로서 사용되며, 현재의 대기질을 평가하고 미래의 대기질을 예측하며 각종 관련 정책 실시에 따른 영향을 평가하는 규제도구(regulatory tool)로도 사용

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-222-6166, E-mail : hclee@biotel.co.kr

된다(김동영, 2003).

또한 최근 대기질에 대한 관심이 높아지면서 기상, 배출 및 예측 모델링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 정주희 등(2007)은 기상 모델에 대한 연구로는 MM5, RAMS 그리고 WRF 기상 모델을 이용하여 수도권지역 대기질 예측을 위해 기상장 모델의 바람장과 온도장의 비교를 수행하였으며, 천태훈 등(2008)은 MM5 기상장 개선을 통해 대기질 예측 모델의 영향에 대해 연구하였다. 그리고 구윤서 등(2008)은 수도권지역에 대해 MM5와 WRF 모델을 시계열 분석을 통해 상호 비교를 수행하였다. 또한 배출원 모델에 대한 연구로는 SMOKE 모델의 입력 모듈 변경에 따른 영향(김지영 등, 2008)을 분석하였다. 대기질 모델에서 김유근 등(2007)은 MM5-CAMx 모델을 이용하여 오존농도와 기상조건의 사례를 바탕으로 모델링을 수행하였고, 문난경 등(2008)은 수도권 지역의 오존예측에 대해 CMAQ와 CAMx 결과의 비교를 수행하였다.

그러나 대기질에 대한 정확한 예측을 위해 많은 연구가 진행됨에도 불구하고, 기상 모델, 배출 모델 및 예측 모델을 기반으로 대기질을 예보할 수 있는 시스템의 수준은 아직 미흡한 수준이며, 또한 대기질에 대한 기여도 분석이 체계적으로 이루어지지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 EUREKA PROJECT E!3266-EUROENVIRON WEBAIR System (EUREKA, 2008)의 일환으로 대기질에 대한 기여도 분석이 가능하고 대기질을 예보할 수 있는 대기질 모델링 시스템(AIRWARE)을 개발하였다. 또한 EUREKA PROJECT E!3266에 의해 개발된 AIRWARE 시스템을 이용하여 수도권 일대를 중심으로 대기질 영향평가를 수행하였다.

2. 대상모델과 연구방법

2.1 모델링 체계 구성

사용이 원활한 모형을 선택하여 입출력자료의 신뢰성이 일정 정도 보장되고 통상적인 운영이 가능한 모형체계로 구성하기 위하여 그림 1과 같이 기상 모델, 배출원 모델, 예보 모델을 이용하여 모델링 시스템을 구성하였다.

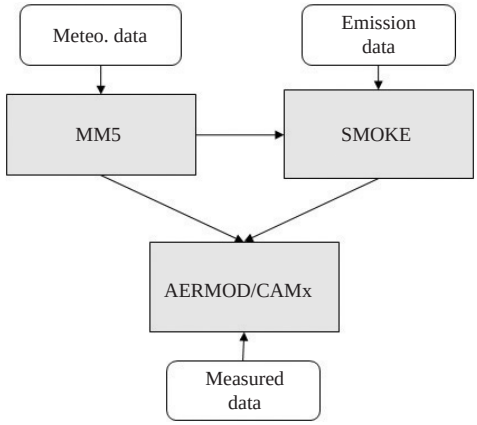


Fig. 1. Modeling system scheme.

2.2 기상 모델

지금까지 사용되고 있는 기상모형 가운데 가장 발달된 것 중의 하나가 펜실베이니아 주립대학(Pennsylvania State University)과 미국 국립 기상연구소(NCAR, National Center for Atmospheric Research, 2003)에서 공동으로 개발해 오고 있는 MM5 (the Fifth-Generation Meso-scale Modeling system, 1995) 모형이다. MM5는 대상공간을 다중둥지격자(multiple nesting)로 취급하고, 대기 중의 물리적 과정을 비정력학적으로(non-hydrostatic dynamics) 다룬다. 또 4차원 자료동화(a four-dimensional data assimilation)를 포함하여 지금까지 정립되어 온 많은 물리적 과정을 선택적으로 모사할 수 있다(NCAR, 2003).

따라서 기상모형으로는 관측 자료에 기반하여 통상적인 운영으로도 쉽게 3차원 기상장을 도출하고, 둥지격자체계를 사용하고 보다 진보된 방법으로 다양하게 미래를 예측할 수 있는 MM5 (Georg Grell *et al.*, 1995) 모형을 채택하였다.

2.3 배출 모델

배출량 자료 계산을 위해서 미국 EPA에서 제공하는 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernal Emissions) version 2.4를 사용하였다. SMOKE는 미국의 Environmental Modeling Center (EMC)에서 개발된 것으로 모델링에 필요한 배출량을 고효율로 계산할 수 있도록 배출량을 Matrix 구조체로 생성하는 배출량 Modeling System이다. SMOKE는 1996년부터 공개되어 왔

으며, 사용자가 원하는 화학종을 선택할 수 있도록 되어 있다. 또 모든 toxic inventory에 대하여 점오염원, 비점오염원, 면오염원, 자연오염원, 도로오염원 등에 의한 배출량을 산정할 수 있다.

배출량 자료는 국립환경과학원의 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 및 미국 IOWA 대학의 ACE-Asia 배출량 자료를 기초로 시간별로 변화하는 기상을 반영하도록 구성하여 SMOKE를 통해 화학수송모델링을 위한 종분류된 1시간 해상도의 배출량 입력자료를 작성하였다.

국내 배출량은 2005년도 CAPSS 자료를 사용하고, 한국을 제외한 동아시아 권역의 배출량 자료는 2006년도 Ace-Asia 배출량 자료를 적용하였다. 또한 자연오염원은 국내 식생분포도 자료를 활용하여 기상에 따른 배출량을 계산하였다.

2.4 예보 모델

대기질 모형은 도시지역의 반응성, 비반응성 물질을 같이 다룰 수 있고, 특히 광화학 반응에 의한 오존 농도의 예측 및 저감대책 수립에 가장 많이 사용되는 미국 EPA의 AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model) (EPA, 2002), CAMx 모델을 사용하였다.

특히 AERMOD 모형의 경우 정상상태 플럼 (steady-state plume) 모델로서, SBL에서 농도분포는 수직과 수평적으로 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 또한 AERMOD는 복잡지형에서 흐름과 확산에 현재 개념에 새로운 간단한 방법을 삽입하였다. 즉 연기는 지형을 넘거나 우회하고, 또한 우회하면서 넘는 모델이 되었다. AERMOD는 현재 정규모델에서 요구하는 단순, 중간, 복잡 지형의 구분을 요하지 않고 물리적으로 사실적이고 간단하게 설계되었다. 결과적으로 AERMOD는 복잡지형 정의를 불필요하게 하였으며, 모든 지형은 일괄되게 연속적인 방법으로 처리된다.

그리고 CAMx 모형은 미국 EPA의 규제모형 (regulatory model) 중의 하나로서, 미국 남캘리포니아 대기질 관리지역 (SCAQMD)에서 상용 (routine) 모형으로 이용되고 있다. 또한 현재 가장 활발하게 이용되고 있는 도시 대기질 모형일 뿐 아니라 첨단 과학기술적 성과가 구현되고 있는 모형 중의 하나이다(김동영, 2003).

2.5 DB 구축

AERMOD 및 CAMx의 대기질 모형을 기반으로 하고, 웹기반 실시간 대기질 모니터링 및 예보가 가능한 AIRWARE 시스템에 수도권의 데이터의 설정 및 모델 적용을 위해 지형, 대기질 관측 데이터, 기상 측정 데이터, 배출 데이터 등에 대하여 2001년을 기준으로 데이터베이스를 구축하였다.

지형 데이터를 구축하기 위하여 행정도시 구역, 인구 정보, 항공, 항만, 철도, 도로망, 도시지역구분 등에 대한 DB를 구축하였다. 그리고 대기질 관측 데이터를 구축하기 위하여 O_3, CO, NO_2, PM_{10}, SO_2에 대한 관측정보를 DB로 구축하였다. 이때 대기질 관측소를 기준으로 각 관측소별 2001년 1월 1일 0시부터 2001년 12월 31일 24시까지의 데이터를 사용하였다.

기상측정 데이터 구축을 위해 80개소의 기상관측소에 대한 정보를 구축하고, 관측소 ID, 관측소명, 영문명, 위도, 경도, 설치 일자에 대한 데이터를 입력하였다. 기상자료는 관측지 이름, 년, 월, 일, 기온, 강수량, 적설량, 풍향, 풍속 등 총 320개의 항목에 대하여 DB로 구축하였다.

배출원 자료는 2001년 '대기오염물질 배출목록 시스템'에서 산정한 배출목록자료를 배출목록의 입력자료 사용하였다. 이 시스템의 배출원 분류체계는 유럽 EEA의 CORINAIR분류체계를 근간으로 하고 미국 EPA의 체계를 참고하여 구성한 것으로 현재 환경부의 대기정책 지원시스템 (CAPSS, 국립환경과학원, 2001)에서 사용되고 있는 분류코드를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 검증

AIRWARE 시스템을 구축하기 위하여 2001년에 대해 CAMx 모델을 사용하여 대기 관측소에서 측정한 오염물질 (O_3, NO, NO_2, CO, SO_2, VOC, PM_{10})과 모사결과를 에피소드 (episode) 분석하였다. 그림 2는 시청 부근에서 측정한 NO_2의 측정결과와 모사결과를 비교한 예로서, 측정된 결과 값에 근접하게 나타나는 것으로 나타났다. 에피소드 분석은 AIRWARE 시스템에서 관측소별로, 오염물질별로 확인이 가능하도록 하였다.

또한 기상 모델에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 바람속도, 온도, 습도, 강수량, 복사열, 층고높이 등에 대하여 수행하였으며, 습도 및 온도에 대한 시계열

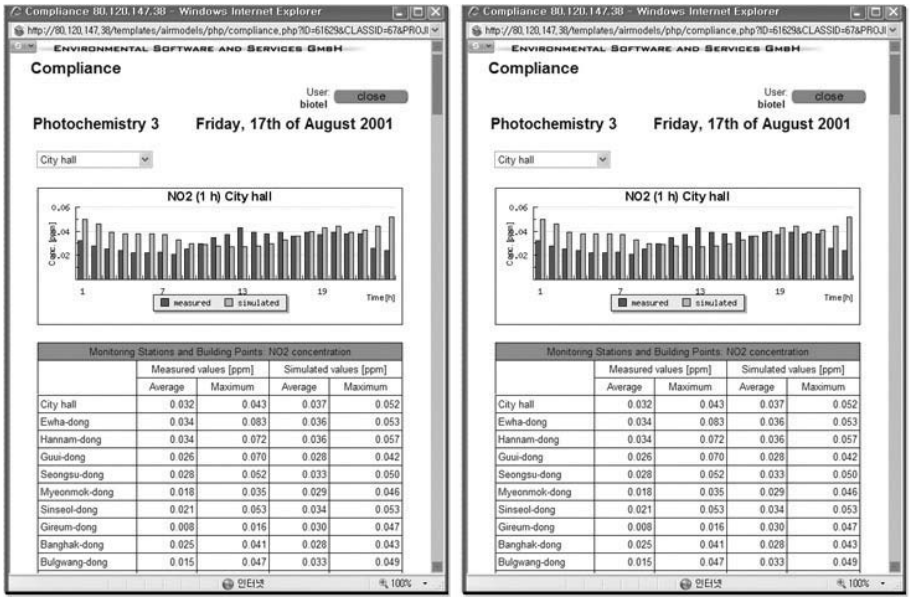
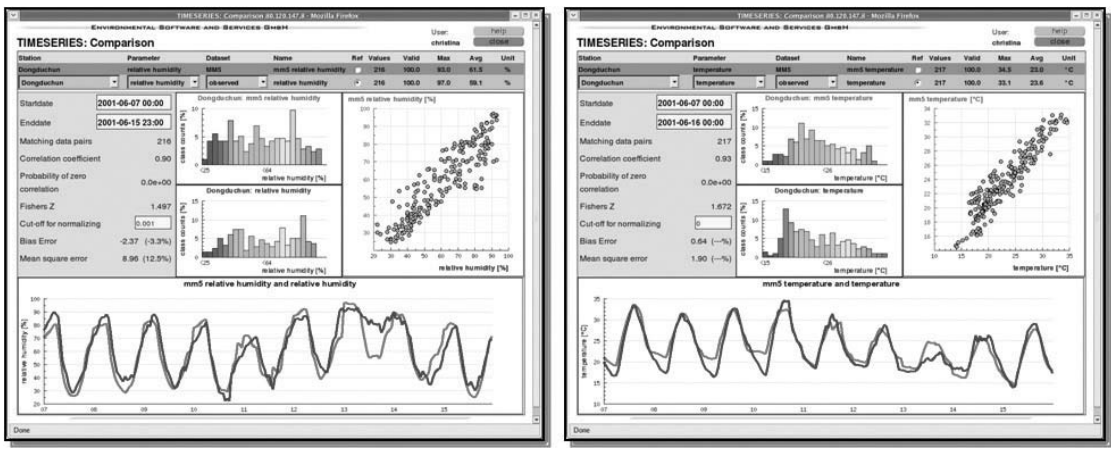


Fig. 2. Episode analysis for measured and simulated pollutants.



(a) Humidity (b) Temperature

Fig. 3. Time series analysis for meteorological data.

분석의 결과는 그림 3과 같다. 측정된 기상결과와 모사결과는 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 특히 습도 및 온도가 높은 곳 및 낮은 곳에서도 잘 일치하였다.

3. 2 AIRWARE 시스템 개요 및 DB 구축

웹기반 실시간 대기질 모니터링 시스템인 AIRWARE 시스템은 AERMOD와 CAMx의 대기질 모형을 이용하여 MM5의 기상 모델에 의해 실시간으로 현재의 대기질 상태를 나타내고, 예측이 가능한 시스템이다. 그림 4는 웹기반 실시간 대기질 모니터링 시스템의 메인 화면으로 우측에 위성사진을 배경으로 오염물질의 농도 분포를 나타내고 좌측의 상단에 선

Fig. 4. Main windows of Web-based Air Quality Monitoring system (AIRWARE).

Fig. 5. List of monitoring DB.

택메뉴와 단축아이콘으로 구성되었다.

AIRWARE 시스템은 시간별 현재의 상태를 나타내는 오염물질과 일자별 예보가 가능한 오염물질로 구분되어 있다. NO_x에 대해서는 AERMOD 모형과 CAMx 모형에 의해, 그리고 SO_2에 대해서는 AERMOD 모형에 의해 현재 시간별 오염정도를 모델링하였으며, 일자별 예보를 위해서 MM5 모형에 의한 기상 상태, CAMx 모형에 의한 NO_x, O_3에 대해 모델링하였다.

AIRWARE 시스템에서 대기질 모니터링 시스템을 구축하기 위하여 사용된 DB는 객체 (object) DB, 모니터링 DB, 지형 DB, 배출 DB이다.

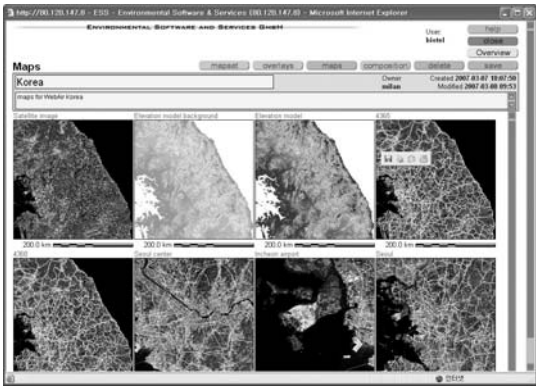


Fig. 6. GIS DB of AIRWARE system.

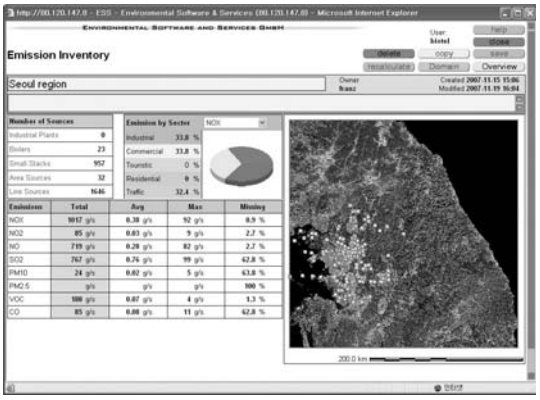


Fig. 7. Details windows of emission inventory list.

AIRWARE 시스템은 개별의 객체를 통하여 오염물질의 농도를 나타내도록 하고 있다. 객체 DB는 AIRWARE 시스템에서 서울, 경기, 인천 지역의 대기질 모니터링 시스템을 구축하기 위해 사용된 객체의 분류를 나타낸 것이다. 등록된 객체 목록은 “Area Source”, “Boilers and Stacks”, “Building Points”, “Climate Stations”, “Emission Factors Combustion”, “Emission Factors Traffic”, “Emission Patterns”, “Emission Report”, “Fleet Compositions”, “Industrial Plants”, “Line Sources”, “MM5 Scenario”, “Model Domains”, “Monitoring Sensors”, “Monitoring Stations”, “Receptor Areas”, 그리고 “Small Stacks”로 구성되어 있다.

모니터링 데이터베이스는 AIRWARE 시스템에서

서울, 경기, 인천 지역의 대기질 모니터링 시스템을 구축하기 위하여 사용된 대기오염 관측소의 오염원 정보를 입력한 결과를 나타낸 것이다. 모니터링 데이터베이스를 실행하면 그림 5와 같이 좌측에 관측소 목록이 나타나고 우측에는 위성사진을 중심으로 관측소의 위치를 나타내게 된다. AIRWARE에서는 향후 확장성을 고려하여 전국의 관측소에 대한 정보를 모두 DB화 하였으며, 2001년 관측 데이터를 기준으로 구축되었다.

AIRWARE 시스템은 오염물질의 측정 데이터를 모델링하여 현재 예보 및 예측 예보의 결과를 나타내기 위하여 지형 DB를 사용한다. 그림 6은 현재 등록된 지형 DB의 예를 나타낸 것이다.

대기질은 배출원으로부터 발생되는 오염물질의 생성량에 의해 결정된다. AIRWARE 시스템에 입력된 배출 인베토리는 서울지역을 중심으로 형성하였으며, 구축된 배출 인벤토리는 Seoul Region에 Boilers, Stacks, Area, Line에 대해 23, 957, 32, 1,646개로 총 2,658개의 인벤토리를 그림 7과 같이 구성하였다. 좌측에 배출원수를 나타내고, 이를 배출물질별 (NO_x, SO_2, PM_{10}, VOC, CO)로 파이그래프에 나타내었다. 또한 좌측 하단에 배출물질별 배출속도를 총, 평균, 최대로 분석하여 나타내고, 우측에는 위성사진 위에 배출지역을 표시하였다. 또한 배출원을 클릭하면 “Industrial Plants”, “Boilers”, “Small Stacks”, “Area Sources”, 그리고 “Line Source”에 대하여 좌측에는 데이터베이스 목록을 나타내고 우측에 위치를 나타내도록 하였다.

3. 3 현재 예보

AERMOD 모형에 의해 NO_x 및 SO_2의 농도 분포를 나타낼 수 있도록 그림 8과 같이 구성하였다. 그림 8의 우측에는 서울의 위성사진을 바탕으로 AERMOD 모형에 의해 NO_x의 농도 분포를 나타내고 있으며, 좌측에는 배출정보, 관측소의 기상정보, 대기질 정보를 나타낸다. 배출정보에는 NO_x, SO_2, VOC, CO, PM_{10}, $PM_{2.5}$의 배출속도, 관측소의 기상정보에는 대기온도, 바람속도, 바람방향, 그리고 대기질 정보에서는 모사된 NO_x와 계산된 NO_2의 농도를 나타내도록 하였다. 또한 SO_2에 대해서도 NO_x와 동일한 방법으로 AERMOD 모형을 이용하여 현재 예보를 가능하도록 구성하였다.

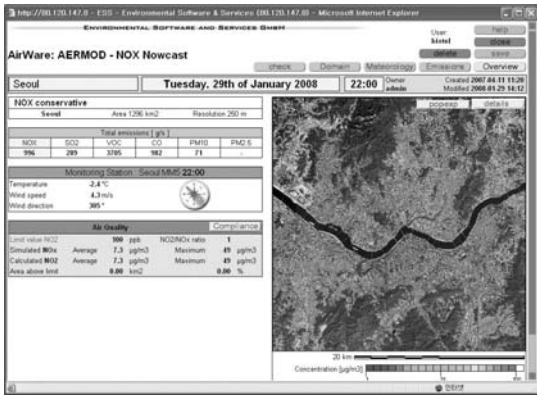


Fig. 8. NO_x nowcast of Seoul by AERMOD model.

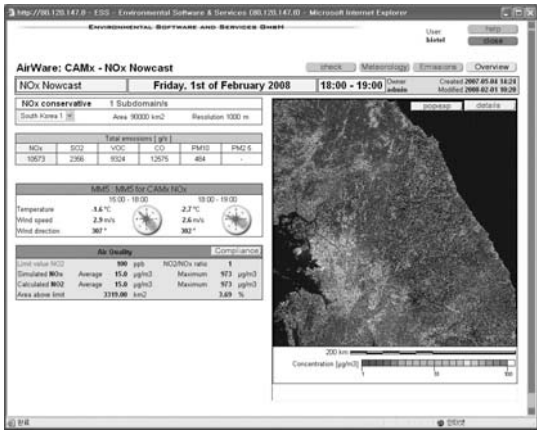
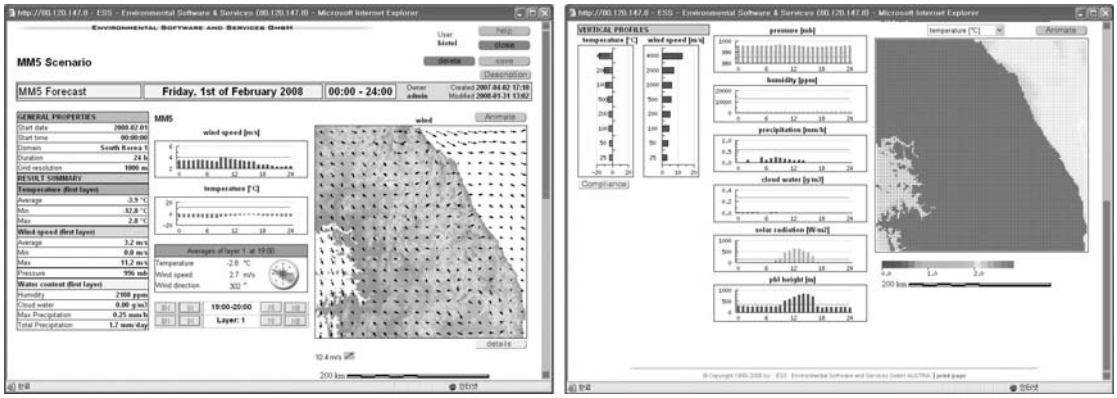


Fig. 9. NO_x nowcast of Seoul by CAMx model.

그림 9는 CAMx 모형에 의한 NO_x의 현재 예보 화면으로, AERMOD 모형에서의 예보 화면과 동일하나 단지 대기질을 분석하는 방법에서만 차이가 있다. 즉 적용되는 시간 스텝을 고려하여 화학물질의 반응성을 고려하여 NO_x의 농도를 예측하게 된다.

3. 4 예측 예보

AIRWARE에서는 예측 예보를 위해 MM5 모형에 의해 기상 예측 예보, CAMx 모형에 의해 NO_x, O_3의 예측 예보가 가능하다. 예측 예보는 향후 적용 오염물질 및 영역의 확장을 위해 서울, 경기, 인천 지역을 중심으로 구축되었다.



(a) Wind (b) Temperature and precipitation

Fig. 10. Meteorology forecast by MM5 model.

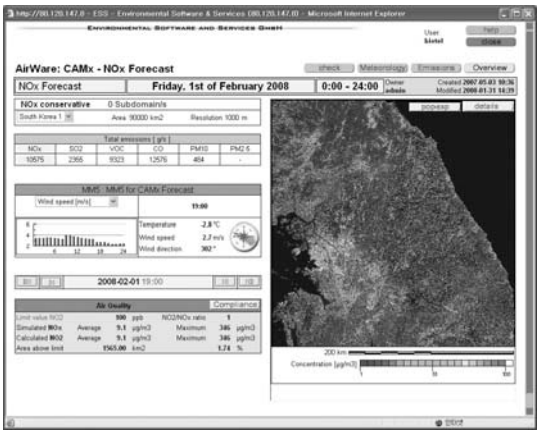


Fig. 11. NO_x forecast of CAMx model.

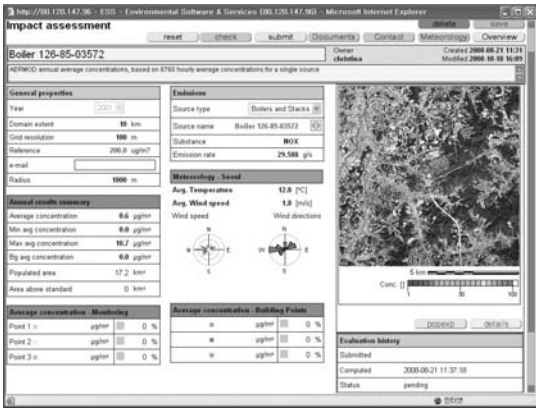


Fig. 12. Impact assessment for emission source.

3.4.1 MM5 모형에 의한 기상 예측 예보

MM5 모형에 의한 기상 예보는 좌측에 고층별 바람속도, 온도, 습도, 강수량, 운량, 복사열, PBL 높이 등을 나타내도록 하였으며, 우측에는 바람장 방향, 온도 및 강수량에 대한 애니메이션(animation)으로 나타낼 수 있도록 그림 10과 같이 구성하였다. 특히 기상 예측 예보는 120시간까지 기상 정보를 예측할 수 있도록 하였으며, 이를 바탕으로 오염물질에 기상정보를 적용할 수 있도록 하였다.

특히 그림 10(a)의 바람방향을 나타내는 지도 하단의 "Detail"을 선택하면 바람 방향에 대한 상세한 내용을 나타내게 된다. 이때 경계층 별(총 8개 층)로 바람에 대한 방향을 나타낼 수 있으며, 또한 바람의 방향을 나타내는 지도를 위성사진, 디지털 모드 등으로 나타낼 수 있다.

3.4.2 CAMx 모형에 의한 NO_x 및 O_3 예측 예보

CAMx 모형에 의한 NO_x 및 O_3의 예측 예보는 그림 11과 같으며, CAMx 모형의 현재 예보 화면과 유사한 형태를 나타낸다. 그림 11의 좌측에 오염물질 배출 농도, CAMx 모형에 의한 MM5 기상 상태, 탐색자(Navigator)에 의한 대기질을 나타내는 부분으로 구분된다. 탐색자에서 좌우측의 버튼을 누르게 되면 시간별 NO_x 및 O_3의 모사값과 계산값을 나타내어 예측하게 된다. 또한 탐색자 버튼을 누름으로써 시간

에 따라 우측의 위성사진에 나타내어지는 NO_x 및 O_3의 농도 분포 등고선도 달라진다. NO_x 및 O_3의 예측 예보는 96시간에 대하여 예측 예보가 가능하다.

3.5 영향평가

AIRWARE에서는 누출원과 기상모델을 이용하여 현재의 누출원에 대하여 영향을 받는 범위를 예측할 수 있도록 그림 12와 같이 구성하였다. 영향평가(impact assessment) 화면은 좌측에 일반적인 특성, 연간 바람장 및 바람속도 등을 나타내고, 우측에 위험사진을 바탕으로 누출원으로부터 농도를 나타내도록 하였다.

4. 결 론

EUREKA PROJECT E!3266-EUROENVIRON WEBAIR System을 이용하여 서울 및 수도권을 중심으로 대기질의 실시간 모니터링 및 예측 경보시스템을 구현하고자 하였다. 오염물질의 예측을 위해 기상 모델은 MM5, 대기질 모델은 AERMOD 및 CAMx 모델을 사용하였다. AERMOD 및 CAMx의 대기질 모형을 기반으로 하고, 웹기반 실시간 대기질 모니터링 및 예보가 가능한 AIRWARE 시스템에 수도권의 데이터의 설정 및 모델 적용을 위해 지형, 대기질 관측 데이터, 기상 측정 데이터, 배출 데이터 등에 대하여 2001년을 기준으로 데이터베이스를 구축하였다.

대기질 측정에 대해서 에피소드 분석을 수행하였고, 기상 측정에 대해서는 시계열 분석을 수행하였다. 그 결과 측정결과와 예측결과가 유사한 수준으로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이를 바탕으로 개발된 AIRWARE 시스템의 대기질 예측에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다. 뿐만 아니라 CAMx 모델의 대기질 예측에 따른 기여도 분석할 수 있도록 구성되어 있어 대기질 오염의 원인을 쉽게 파악할 수 있는 기능을 갖도록 하였다.

또한 개발된 AIRWARE 시스템은 지역의 기상조건, 지형, 오염물질의 농도에 근거하여 실시간 통신 및 분석 보고가 가능하고 인터넷을 통하여 대기질의 정보를 제공함으로써 대기환경평가 및 대기환경 기본계획 등의 정책 자료로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

구윤서, 윤희영, 윤민지, 최대련, 고경진 (2008) 수도권지역에 MM5와 WRF 모델 간 비교연구, 한국대기환경학회 2008년 춘계학술대회논문집, pp. 564-565.

국립환경과학원 (2001) 2001년 CAPSS 데이터베이스, 국립환경과학원.

김동영 (2003) 수도권 대기질 모델링체계 구축방안, 2003-24, 경기개발연구원.

김유근, 오인보, 강윤희, 황미경 (2007) MM5-CAMx를 이용한 대기오염물질의 재순환현상 모델링, 한국대기환경학회지, 23(3), 297-310.

김지영, 김정수, 홍지형, 정동일, 반수진, 이용미 (2008) SMOKE 모델의 입력 모듈 변경에 따른 영향 분석, 한국대기환경학회지, 24(3), 284-299.

문난경, 이강열, 김순태 (2008) 수도권 지역의 오존예측에 대한 CMAQ과 CAMx 결과 비교, 한국대기환경학회 2008년 추계학술대회논문집, pp. 383-385.

정주희, 김유근, 문윤섭, 황미경 (2007) 수도권지역 대기질 예측을 위한 기상장 모델의 바람장과 온도장 비교연구, 한국대기환경학회지, 23(6), 640-652.

천태훈, 김재철, 이종범 (2008) MODIS자료를 이용한 MM5 기상장 개선에 따른 Model/CMAQ 모델의 영향, 한국대기환경학회 2008년 추계학술대회논문집, pp. 149-150.

ENVIRON (2007) http://www.camx.com/

EUREKA (2008) European Research Cooperation Agency, http://www.eureka.be/home.do

Georg, G., D. Jimy, and S. David (1995) A description of the Fifth-Generation Penn Stat/NCAR Mesoscal Model (MM5), National Center for Atmospheric Research, http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html.

NCAR (2003) PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Note and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.

U.S. EPA (2002) User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD.