

연구논문

전산유체역학모형에 근거한 미기상 바람환경 영향평가 시스템

김규랑 · 구해정 · 권태현 · 최영진

국립기상연구소 응용기상연구과

(2011년 3월 8일 접수, 2011년 6월 3일 승인)

An Environmental Impact Assessment System for Microscale Winds Based on a Computational Fluid Dynamics Model

Kyu Rang Kim · Hae-Jung Koo · Tae Heon Kwon · Young-Jean Choi

Applied Meteorology Research Lab., National Institute of Meteorological Research

(Manuscript received 8 March 2011; accepted 3 June 2011)

Abstract

Urban environmental problem became one of major issues during its urbanization processes. Environmental impacts are assessed during recent urban planning and development. Though the environmental impact assessment considers meteorological impact as a minor component, changes in wind environment during development can largely affect the distribution pattern of air temperature, humidity, and pollutants. Impact assessment of local wind is, therefore, a major element for impact assessment prior to any other meteorological impact assessment.

Computational Fluid Dynamics (CFD) models are utilized in various fields such as in wind field assessment during a construction of a new building and in post analysis of a fire event over a mountain. CFD models require specially formatted input data and produce specific output files, which can be analyzed using special programs. CFD's huge requirement in computing power is another hurdle in practical use. In this study, a CFD model and related software processors were automated and integrated as a microscale wind environmental impact assessment system. A supercomputer system was used to reduce the running hours of the model. Input data processor ingests development plans in CAD or GIS formatted files and produces input data files for the CFD model. Output data processor produces various analytical graphs upon user requests.

The system was used in assessing the impacts of a new building near an observatory on wind fields and showed the changes by the construction visually and quantitatively. The

microscale wind assessment system will evolve, of course, incorporating new improvement of the models and processors. Nevertheless the framework suggested here can be utilized as a basic system for the assessment.

Keywords : CFD, EIA, microscale wind

1. 서론

도시환경 문제는 도시화의 진행과 동시에 사회문제로 제기되어 왔으며 비교적 최근에는 도시환경을 고려하여 도시계획과 개발이 추진되기 시작하였다. 도시의 지속적인 발달은 도시 인구의 집중화, 도시 지표 및 토지이용 등의 변화를 심각하게 발생시켰고, 도시의 경관 및 지형 변화, 기온 상승, 풍속 감소, 대기오염 농도의 증가 등 여러 가지 요소의 복합적인 효과로 기온 등 도시지역의 국지기후 변화를 초래하게 되었다(Mitchell, 1953; Oke, 1987). 이렇게 도시의 환경 문제가 고조되고 인간의 활동에 의한 영향이 확대됨에 따라 도시환경 문제에 대한 관심이 더욱 높아지고 여러 가지 방법으로 개발에 따른 환경-영향-평가가 실시되기에 이르렀다(국립기상연구소, 2006; 김운수 등, 2001; 이현영, 1989; 조명희, 2006).

현재 실시되고 있는 환경영향평가에서 기상 분야는 비중이 낮은 평가항목이다. 기상 항목은 수자원 개발사업(댐 건설)과 에너지개발사업(발전소) 등에서 주로 평가되는데, 기상자료 분석 등 현황 조사와 아울러 영향예측 및 대책으로 미기상 변화, 영향 분석 및 대책, 국지기상 변화 예측 및 대책을 조사한다(환경부, 2008). 댐 건설시의 주요 관심 사항인 안개 발생 예측 모형으로 중규모 기상모형을 사용(도화종합기술공사 등, 2010)하거나, 택지개발사업시 건물 배치에 의한 바람통로 예측 모형으로 전산유체역학모형을 사용한 사례(롯데물산 등, 2009) 등이 기상항목을 주요 항목으로 선정하여 평가하는 예이다. 기상 항목의 평가에서는 이와 같이 전문적인 기상모형이 사용되므로 전문 인력에 의한 본격적인 영향-평가가 이루어지기 위해서는 제도의 개편과 아울러 개발에 따른 기상 환경 변화에 대한 영

향 평가를 실시하기 위한 구체적인 기술이 개발되고, 변화량에 대한 평가 기준이 마련되어야 한다.

도시의 바람환경 분석과 예측 기술의 주요 사용 부문으로는 빌딩 사이의 국지적인 강풍에 의한 보행자 환경 고려 평가, 도시 열섬과 오염 물질 확산을 고려한 바람길 유지 및 확대를 위한 도시계획 평가 등이 있다(케이웨더, 2003). 현재 국내에서 바람환경-영향평가를 위하여 사용하고 있는 모형으로는 ENVI-met, MUKLIMO, 국외에서 개발된 상업용 또는 국내 개발 전산유체역학 모형 등이 있다.

ENVI-met(Bruse and Fleer, 1998)은 도시환경에서의 지표-식물-대기의 상호작용을 모사하는 3차원 비-정역학 모형이다. 보통 0.5~10m의 수평 분해능과 1~5m의 수직 분해능, 10초의 시간 분해능으로 수행되며, 주로 도시 기후 분석, 건축 및 건물설계, 환경 계획 등에 사용될 수 있다. 모형은 다음과 같은 여러 세부 모형을 포함한다. 즉, 건물과 식생에 의한 그늘, 반사, 재복사에 따른 장단파 복사 플럭스, 식생에서 대기 중으로의 증발산 및 현열 플럭스, 각 격자점과 벽면의 지표 및 벽면 온도 그리고 평균 복사 온도를 포함하는 생명기상학적 변수 등이 그것이다.

ENVI-met의 장점은 간략하지만 직관적인 그래픽 입출력 인터페이스가 제공되기 때문에 좁은 면적의 건물, 식생 등의 분포 변화를 입력하고 그 변화에 따른 기상변화를 모의하여 확인할 수 있다는 점이다. 또한 인지온도와 같은 생명기상학적 변수를 계산하는 모형이 포함되어 있으므로 도시 개발이 인체에 미치는 영향을 쉽게 계산하여 보여줄 수 있다.

하지만, 개발도면을 읽어 들여 자동적으로 모형 입력자료를 생산하지 못하고, 지형의 높낮이를 고려하지는 못하기 때문에 넓은 면적에 대한 영향평가를 하기에는 어려움이 따른다. 또한 기온의 일변

화에 대한 고려가 없고, 밤 시간 외부 바람의 유입이 없을 경우 바람길을 따라 고지대의 찬바람이 생성-이동하는 것과 같은 열적효과에 대한 모의가 원활히 진행되지 않는 문제점이 발견되었다.

MUKLIMO는 바람장과 오염물질 확산을 계산하는 모형으로 입력자료로 건물, 지형, 거칠기, 식생, 바람, 오염정보를 사용한다. 모형 계산 영역의 범위는 1~2km로 격자 간격은 4~10m 정도이며, 1차원 바람장을 먼저 계산한 후 3차원 바람장 계산과 확산 모형을 구동한다. 3차원 바람장은 안정도를 고려한 3차원 유선함수를 사용하고, 확산 모형으로는 Euler 모형을 사용한다(Sievers and Zdunkowski, 1986).

MUKLIMO의 장점은 엽면적과 나무의 높이 등 식생이 미기상에 미치는 효과를 추정할 수 있다는 점이지만, 단점으로 열역학적 과정이 고려되지 못하였고 지표이용도 입력자료의 구축을 위한 구성 요소가 모형의 개발 환경인 독일의 환경에 맞추어져 있다는 점이다. 개발처인 독일 기상청에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 열역학적 과정을 포함한 모형 개발을 진행중이며, 독일 이외의 지역에서 모형 테스트를 수행하고 있다. 따라서 MUKLIMO를 국내 환경에 적용하기 위해서는 소스코드 차원의 추가적인 개발이 요구된다.

전산유체역학(CFD) 모형은 도시지역의 복잡한 건축구조물로 인한 기류변화와 온도, 습도 및 각종 대기오염확산 과정을 정교하게 모사할 수 있다. 즉, 건물에 의한 흐름과 확산의 형성 기작을 밝힘으로써 도시 지역의 기상환경영향평가를 위한 기반 기술을 제공하고, 이를 이용하여 최적의 통풍 조건, 바람길, 도시 열섬 효과 감소를 위한 도시 설계 등에 활용될 수 있다.

재규격화군 개념을 도입한 Navier-Stokes 유동 방정식을 이용하는 전산유체역학 모형인 CFD_NIMR_SNU 모형(이하 CFD모형)은 온도, 습도 및 각종 대기 오염 물질의 확산 방정식(스칼라의 수송 방정식)을 0.5~10m 정도의 격자 간격으로 상세히 계산할 수 있다(Baik and Kim, 2002; Baik *et al.*, 2007). 하지만 이전까지 개발된 전산유체역학

모형은 도시 계획이나 건축 설계도를 자료 변환하여 건물구조물 입력자료로 사용하거나 그 출력물을 해석하기 위해 일반 수치해석 프로그램을 사용하는 등, 활용에 많은 노력이 요구되었고, 널리 이용되기에는 한계가 있었다.

본 연구에서는 CFD모형에 기반한 바람환경영향평가를 실용화하기 위한 현재의 기술 수준을 진단하고, 국립기상연구소에서 개발, 활용 중인 국지기상환경영향평가 시스템을 소개하고자 한다. 또한 시스템의 구동 예로서 도시개발에 따른 기상대 바람관측 환경의 변화를 소개함으로써 앞으로의 기술 개발에 대한 공감대와 인식의 확대를 도모하고자 한다. 또한 도시계획과 토지이용계획 수립 과정에서 기상환경영향평가의 응용 가능성을 확대할 수 있는 기술적 기반을 마련하고자 한다.

II. 모형 및 구동시스템

1. 전산유체역학모형 기반의 바람환경 영향평가 모형

도시 지역에서 건물 효과를 조사하는 연구는 흐름과 확산의 형성 기작을 밝히려는 학문적 목적과 도시 지역의 기상환경영향평가를 수행하고 최적의 통풍 조건, 바람길 및 일조 확보 그리고 도시 열섬 효과 감소를 위한 실용적 목적을 추구하며 활발하게 수행되어 오고 있다. CFD모형은 도시지역에서 복잡한 건축구조물로 인한 기류변화와 온도, 습도 및 각종 대기오염확산 과정을 정교하게 모사할 수 있으며, 재규격화군 개념을 도입한 유동 방정식 Navier-Stokes 방정식과 온도, 습도 및 각종 대기 오염 물질의 확산 방정식(스칼라의 수송 방정식)을 계산한다.

1) 지배 방정식

지배 방정식은 유한 체적법(finite volume method)에 의해 엇갈림 격자계(staggered grid system)에서 수치적으로 풀려지고 지배 방정식의 차분화는 Patankar(1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked

Equation)알고리즘을 이용한다. 이 알고리즘에서는 매 수치 적분 단계의 가정된 압력장 하에서 임시적인 수평 및 연직 성분 바람을 구한다. 그리고 바람장의 조정을 통하여 질량 보존 방정식을 만족시키는데 필요한 압력 변화를 계산한다. 이와 같이 계산된 압력 변화량으로부터 수평 및 연직 성분 바람의 섭동량을 구하고 수평 및 연직 성분 바람과 압력장을 계산한다.

본 모형에서 차분화 된 방정식들은 단위 제어 공간(control volume)에서 수치 적분되며, 단위 제어 공간의 경계면 중심에서는 벡터량(U, V, W)이 정의되고 단위 제어 공간의 중심에서는 스칼라량(P, C, k)이 정의된다. 또한 스칼라량은 모형 영역의 경계에서도 정의된다. 모형의 정확도는 풍동실험 및 기존 관측 자료에 의해 검증된다(Kim and Baik, 2004).

2) 일반적 응용분야

CFD는 일반적으로 공학 분야에서 파이프라인 내부의 유체 흐름, 자동차 엔진 냉각, 자동차 디자인의 공기역학적 검증, 하수관의 흐름 등 제한적인 공간 범위에서 유체의 흐름을 모의하기 위하여 사용되어 왔다. 한편 기상학에서 다루는 공기의 흐름을 CFD를 이용하여 해석하는 것은 근래에 새롭게 시

도되는 분야이다. 건물이나 도시 구역을 건설하기 전에 그 개발로 인하여 생겨나는 공기 흐름의 변화를 미리 예측하여 문제점을 파악한다. 이를 통하여 보행자나 건물의 안전, 오염물질의 축적 등을 방지하도록 설계를 개선하며, 각 설계 단계의 효과를 가시적으로 검증할 수 있다.

3) 국립기상연구소 CFD모형의 특징 및 기상학적 응용분야

(1) 열역학적 특성을 고려한 CFD모형

국립기상연구소에서 개발중인 CFD모형인 CFD_NIMR_SNU는 일반적인 CFD모형의 기능과 아울러 지면과 건물의 표면 온도를 고려하고 열역학적 특성을 계산할 수 있는 모형이다(Baik *et al.*, 2007). 특히 산악화재 사후분석 사례에서는 열역학적 특성을 고려함으로써 지면의 차등적 가열에 의하여 열적으로 생성되는 난류 강도의 증가를 잘 모의하였다(구해정 등, 2009).

(2) CFD모형의 구동 예

Fig. 1은 CFD모형을 이용한 국지기상환경 분석의 예로서 청계천 지역의 건물 사이로 흐르는 바람장을 10m 해상도로 모의한 결과이다. Terra위성의 ASTER 센서가 2004년 4월 17일 오전 11시 22분

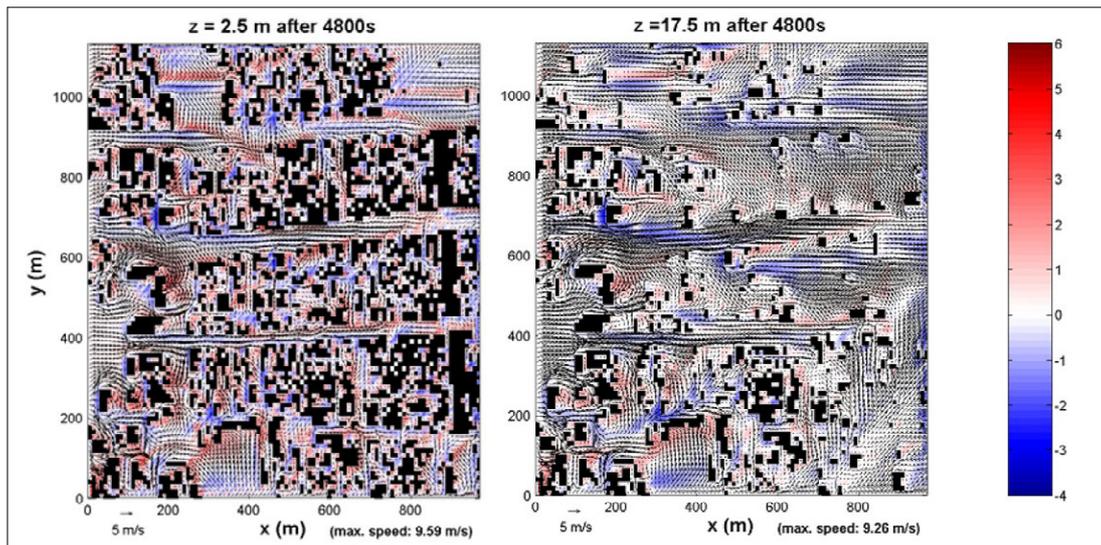


Fig. 1. Wind fields (shading: vertical velocity) at $t=80\text{min}$ at two heights with surface heating observed by Terra on Apr. 17, 2004.

에 90m 해상도로 관측한 실험 영역의 지표 온도를 건물 옥상과 도로 바닥 및 건물 벽의 온도로 CFD모델에 입력하였다. 또한 계산 영역 안에 위치한 서울시 송월동 관측소에서 관측한 기온(19.5°C)과 풍향(250°), 풍속(3.4 m s⁻¹)을 초기 및 경계조건으로 이용하여 지면에서 2.5 m와 17.5 m의 바람장을 계산하였다. 이 연구를 통하여 실제 도시에서 관측한 지표 가열 및 기상 조건이 CFD모형에 입력되어 도시의 건물에 의한 복잡한 공기의 흐름과 지면의 열적 가열에 의한 연직 흐름을 계산할 수 있음을 보여주었다. 또한 모의된 바람장 정보는 도심의 오염물질 흐름을 예측하기 위한 입력 기상정보 자료로 사용될 수 있음을 확인하였다.

이 외에도 기상대의 바람관측환경 분석(국립기상연구소, 2007), 산악화재 사후분석(구해정 등, 2009), 도심개발에 따른 바람환경 영향평가(Koo *et al.*, 2009) 등 여러 용도에 CFD모형이 사용되었다.

(3) 앞으로의 국립기상연구소 CFD모형의 개발 방향

열적 효과를 반영한 CFD_NIMR_SNU 모형은 도시계획에서 점차 중요도가 높아지고 있는 바람길, 옥상녹화, 녹지공간 확충 및 오염물질 저감 등 식생-지표환경의 열-바람-오염확산 통합평가에서도 활용될 수 있을 것이다. 실제 상황에서의 모형 활용도를 향상시키기 위해서 도시 캐노피 모형을 접합하는 개발이 진행 중이며, 이를 통하여 태양 고도와 건물 그림자에 의한 태양 복사의 차등적 가열이 모의되었다(국립기상연구소, 2009). 앞으로 도시 캐노피 모형의 추가 개선을 통하여 식생에 의한 태양복사와 운동에너지 분배를 모의하는 등 실제 환경의 정밀한 모사를 위한 기능이 추가 개발될 계획이다.

CFD_NIMR_SNU 모형의 적용 범위를 더 넓히기 위해서는 중규모 모형과의 접합과 모형의 병렬화 등 두 가지 접근 방법이 사용될 수 있다. WRF 등 중규모 기상모형을 사용하여 큰 규모의 바람 흐름을 모사한 후 CFD 모형의 입력 값으로 사용하게 되면 도시의 여러 지역 중 관심 있는 여러 부분에

대한 상세 바람의 흐름을 분석, 평가할 수 있다. 또한 중규모 모형과의 접합기술 개발을 통하여 더욱 사실적인 경계조건을 이용한 모형 구동이 가능해질 것이다(국립기상연구소, 2005). 아울러 기상청 중규모 예보 모형의 출력값을 이용하는 시스템을 구축함으로써 실시간 바람장 영향평가와 아울러 과거 바람환경의 신속한 영향 분석이 가능할 것이다.

모형 자체의 계산 영역(도메인) 확장을 위하여 모델의 코드 및 수행을 병렬화 하고, 분산 메모리 환경을 이용하도록 함으로써 모형의 수행 시간을 단축하고 적용 가능 영역을 확대하기 위한 연구가 진행 중이다. 앞으로도 CFD_NIMR_SNU 모형의 활용도를 높이기 위한 여러 방면의 개발이 추진될 것이다.

2. 지형자료 처리 시스템

1) 지형자료 처리 시스템의 필요성

CFD는 지형과 건물 사이의 바람을 직접 모사하는 모형이므로 지형과 건물의 형태를 모형에서 인식할 수 있는 형태로 가공하여 입력하여야 한다. 기존에는 CAD(Computer-Aided Design) 정보에서 지형 없이 건물 정보만 추출하는 프로그램을 개발하거나(국립기상연구소, 2005), 평면상에서 목표가 되는 건물만 입력(국립기상연구소, 2007)하여 CFD의 입력 자료로 사용하였었다. 한편 ENVI-met의 경우에는 건물 단위의 수치 모델링을 하거나, 범위가 넓은 경우에는 개발 구획 도면으로부터 단지 중심의 개략적인 지형 입력 자료를 수동 생산하여 모의하기도 하였다(금호엔지니어링, 2004).

2) 개발된 지형자료 처리 시스템

지형, 건물의 원시 자료로 사용되는 자료는 국토지리정보원의 GIS 자료와 개발지역의 CAD 도면 등이 있다(국토지리정보원, 2006; 김충식, 2006). 여러 포맷의 자료를 원활히 읽어 들이고 변환하며, 경우에 따라서는 지형 또는 건물을 개발 조건에 맞추어 편집하여야 한다. 본 연구를 통하여 한국의 도시 개발 환경에서 사용할 수 있는 지형자료 처리 시스템으로 CAD와 GIS의 공통 자료 교환 포맷인



Fig. 2. Data processing steps of the input data processing system: Automated topographic data extraction and building placement from the digital topographic map, which is publicly available from the National Geographic Information System.

.dxf 파일 형식을 사용할 수 있는 지형자료 처리 시스템을 구축하였다(Fig. 2).

지형자료는 건물과 분리하여 처리가 가능하도록 함으로써 토지 개발, 건물 신축 등 기본도의 편집이 가능하도록 하였다. 개발 전후의 도면을 입력, 편집한 후 CFD모형에서 직접 사용하게 될 입력 자료인 그리드 파일을 추출하여 저장한다. 이 때 각 격자점의 위치, 해상도, 전체 도메인 범위는 자유롭게 지정할 수 있다. 또한 이 시스템은 현재 사용 중인 CFD모형 뿐만 아니라 관련된 다른 모형에서도 사용할 수 있도록 ASCII 텍스트 파일 형식으로 각 격자점의 지형 및 건물 높이를 저장하도록 하였다.

3) 앞으로의 추가 개발 방향

입력자료의 원활한 처리를 위한 지형자료 처리 시스템에서 앞으로 개선되어야 할 사항으로는 대단위 개발 지역을 위한 처리 능력 향상, GIS툴을 이용한 좀 더 다양하고 넓은 영역에 대한 처리, 열화상과 인공위성 이미지 자료 등 다양한 공간적인 열적 자료를 이용한 입력 자료로의 활용 등이다.

3. CFD모형에 근거한 바람환경 영향평가

1) 슈퍼컴을 이용한 모형 구동 시스템

초기 모형의 개발 과정에 사용된 컴퓨터는 DEC workstation이었고, 컴퓨터 언어는 포트란이었다. 상세 바람장 모형을 이용한 바람환경 영향평가는

대상 지역의 주 풍향을 포함한 여러 풍향 각도와 풍속에 대하여 동시에 구동하여야 하지만, DEC workstation 개발 환경에서는 하드웨어의 구조상 각 입력 풍향 및 풍속이 순서적으로 구동되므로 모형의 구동 시간이 매우 길었다. 또한 입력 자료 처리시스템부터 모형 구동 및 결과 처리 단계에 이르기까지의 각 단계에서 입력 풍향, 풍속 사례별로 소스 코드의 수정이 필요하며, 동일한 변수값이 여러 파일에서 동일하게 설정되어야 하기 때문에 사용자 오류의 가능성을 가지고 있다.

이 문제를 해결하기 위하여 기상청 슈퍼컴을 활용한 자동화된 모형 구동 시스템을 개발하였다. 이 시스템에서는 풍향과 풍속 단계에 따른 여러 독립적인 케이스를 기상청 Cray X1E 상에서 한 번에 구동할 수 있도록 모형의 구동 시스템을 구조화 하였다. 아울러 모형 소스 코드의 여러 곳에서 지정된 입력바람 경계조건, 격자수 등의 입력 변수와 여러 파일로 구성된 모형의 계산 결과를 하나의 Perl 스크립트를 이용하여 일관성 있는 디렉토리 구조 아래에 저장, 관리할 수 있도록 하였다.

모형 구동 시스템의 운영 결과 12가지 입력 바람 테스트의 수행에 기존 방법으로는 100시간 이상 소요되었지만, 개발된 시스템을 통해서 6시간 소요되는 것으로 나타났다. 이는 실험 사례 증가에 따른 모형 구동 시간의 증가를 최소화 할 수 있음을 나타낸다.

추가적으로 모형의 입력 및 표출 시스템과의 연동성을 강화하며, 오염 물질의 확산을 모의하기 위한 여러 추가적인 변수의 입력과정을 관리하는 것이 필요하다. 또한 소스 코드 자체의 병렬화를 통하여 일반적인 리눅스 클러스터에서 구동속도를 향상시키고, 계산 도메인 영역을 확대하도록 개발하고 있다.

2) 관측소 주변 바람환경영향평가 예

CFD모형을 이용하여 다양한 형태의 바람환경에 관한 영향평가를 수행하였다(국립기상연구소, 2006, 2007, 2008, 2009). 여기서는 관측소 주변의 개발로 인한 바람 관측환경의 변화에 대한 영향평가 결과를 소개한다.

관측소 주변에 신축되는 건물로 인한 기상관측환경의 영향을 분석하기 위하여 대상지역을 중심으로 주변 240 m×160 m 범위를 모형 구동 영역으로 설정하여 입력하였다(Fig. 3). 모형을 구동하기 위한 시험 조건은 Table 1과 같다. 입력 풍향은 대상

지역의 주풍향인 북서풍과 서풍으로 설정하였고, 연직 풍속분포는 로그분포를 적용하였다. 모형은 신축건물(Fig. 3 (b))의 유무에 따라 구동되고 높이별 바람장이 비교되었다.

모형의 구동 결과는 3차원 바람장으로 출력된다. 10 m s⁻¹의 서풍 및 북서풍이 유입되었을 경우 신축건물의 유무에 따른 전체 도메인의 바람장은 Fig. 4와 같다. 유입 풍향이 서풍인 경우 신축건물에 의하여 풍속의 저하와 북서풍 계열로의 풍향 변화가 나타났다. 또한 수직으로는 건물 풍하측 후면에서의 바람 세기가 감소하여 재순환 영역이 관찰되었다. 북서풍이 유입될 경우에도 건물 풍상측 풍속 증가와 풍하측 풍속 감소가 나타났다. 또한 지형과 신축건물 사이에는 채널류가 형성되었고, 이로 인하여 서풍의 경우에 나타나던 건물 동쪽 후면의 공동과 재순환 현상은 건물의 남쪽 후면에서 나타나고 있다.

이러한 바람장 변동의 원인은 신축 건물의 가로 막음에 의한 풍속 감소와 신축 건물 측면에서의 질량 보존 법칙에 의한 난류 확산 및 풍속 증가로 해석할 수 있다. 이러한 효과는 입력 바람의 세기가 클수록 풍하측 바람의 세기가 더 크게 감소하는 것으로 확인하였다.

Table 2와 3은 신축 건물 존재 유무에 따른 유입 풍속별(1, 10, 20, 30 m s⁻¹) 풍속계 설치 위치인 지면 15.85 m에서의 평균 풍속의 변화를 각 풍향 조건에 따라 계산한 것이다. 서풍이 부는 경우(Table 2)

Table 1. Experimental conditions of the CFD_NIMR_SNU model

항목	내용
모형 영역	240 m×160 m×150 m
격자간격 및 수	2.5 m (96×64×100)
적분 간격 및 적분시간	0.5 sec, 7200 sec
지형고도	53.4 m
관측고도	56.4 m
형성경계층 높이	1000 m

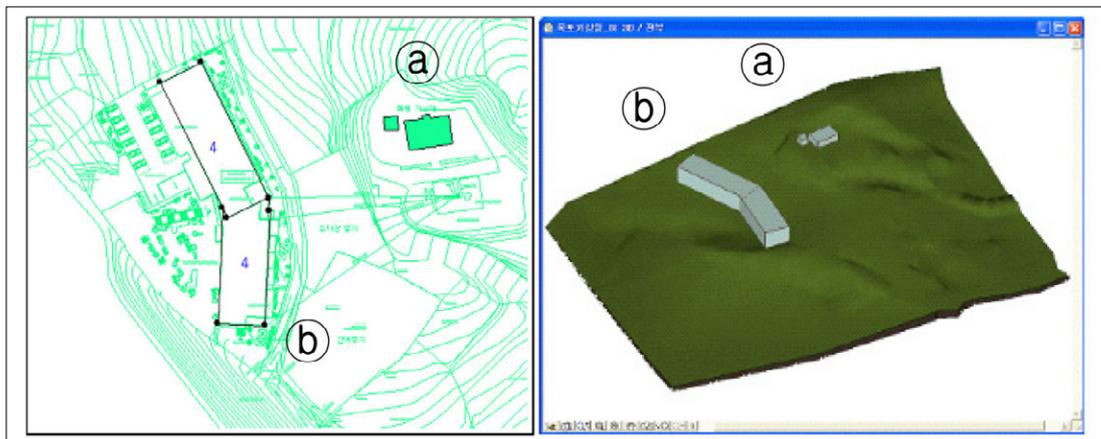
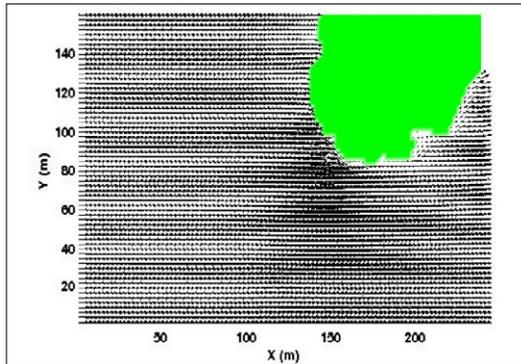


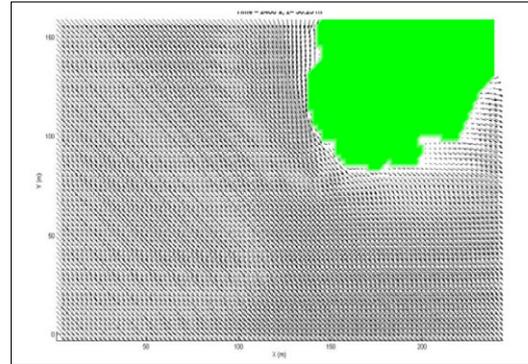
Fig. 3. GIS map (left) and digital elevation model (right) of the experimental domain. Observatory (a) and nearby buildings (b)

유입 풍속이 1 m s^{-1} 로 바람이 거의 불지 않을 때 평균 풍속 감소가 27.2%로 가장 컸으며 20 m s^{-1} 일 때 15% 감소가 가장 작았다. 한편 북서풍이 부는 경우(Table 3)에는 유입 풍속이 1 m s^{-1} 일 때는 풍속 감소가 나타나지 않았으며 유입 풍속이 10 m s^{-1} 인

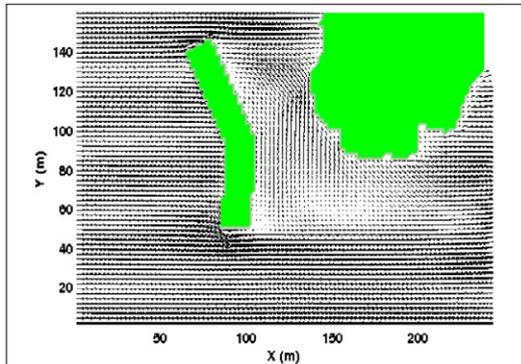
경우에는 2.1%가 증가하였다. 그러나 관측 지점의 주 풍향인 북서풍의 풍속 증가는 서풍의 풍속 감소 효과보다는 훨씬 적게 나타났다. 이러한 영향평가 결과로부터 바람관측에 영향을 주는 영역이 건물 높이의 10배 거리라는 점이 모형을 통한 분석을 통해 다시 한 번 확인되었다.



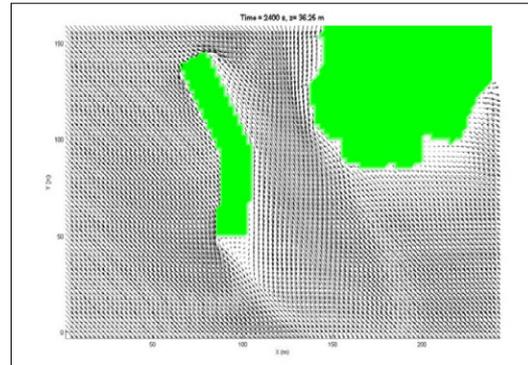
(a) W wind without the new building



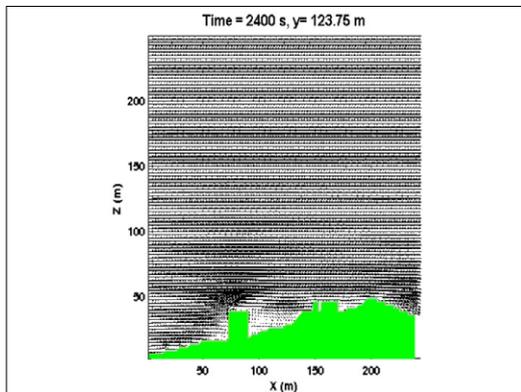
(b) NW wind without the new building



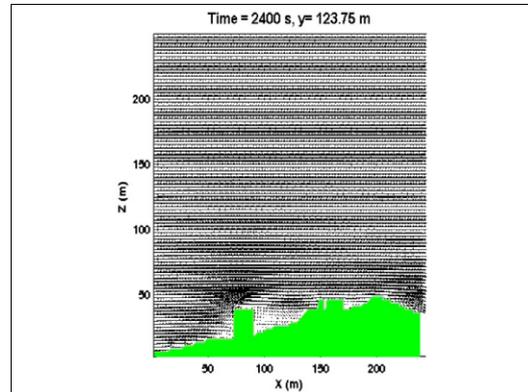
(c) W wind with the new building



(d) NW wind with the new building



(e) W wind with the new building



(f) NW wind with the new building

Fig. 4. Horizontal (a, b, c, d) and vertical (e, f) wind vector fields at 2400s at $z=36.25\text{m}$ without (a, b) or with (c, d, e, f) the new building in the case of west (a, c, e) and north-west (b, d, f) wind.

Table 2. Simulated wind speeds and differences depending on the existence of the new building and inflow wind speeds by CFD_NIMR_SNU in the case of west wind

Input Wind Field	1 m s ⁻¹			10 m s ⁻¹			20 m s ⁻¹			30 m s ⁻¹		
	New Building		WS change (m s ⁻¹) (%)	New Building		WS change (m/s) (%)	New Building		WS change (m/s) (%)	New Building		WS change (m/s) (%)
	no	yes		no	yes		no	yes		no	yes	
Mean Wind Speed (WS)	0.9	0.7	-0.2 m s ⁻¹ -27.2%	9.2	7.6	-1.6 m s ⁻¹ -18.4%	18.3	15.6	-2.7 m s ⁻¹ -15.0%	27.4	23.6	-3.8 m s ⁻¹ -19.2%

Table 3. Simulated wind speeds and differences depending on the existence of the new building and inflow wind speeds by CFD_NIMR_SNU in the case of NW

Input Wind Field	1 m s ⁻¹			10 m s ⁻¹			20 m s ⁻¹			30 m s ⁻¹		
	New Building		WS change (m/s) (%)	New Building		WS change (m/s) (%)	New Building		WS change (m/s) (%)	New Building		WS change (m/s) (%)
	no	yes		no	yes		no	yes		no	yes	
Mean Wind Speed (WS)	1.0	1.0	0 m s ⁻¹ +0.0%	9.1	9.3	+0.2 m s ⁻¹ +2.1%	18.3	18.6	+0.3 m s ⁻¹ +1.7%	27.4	27.9	+0.5 m s ⁻¹ +1.6%

3) 향후 바람환경 영향평가 시스템의 개선 방향

모형의 적용 지역을 넓히기 위해서는 분산메모리 모델 등 CFD모형 코드 자체의 메모리 한계를 극복할 필요가 있다. 또한 넓은 지역의 개발에 대한 바람 및 열 환경 영향평가를 위해서는 중규모 모형과의 결합이 필요하다. 중규모 모형을 이용하여 (준)실시간 CFD 모형의 구동이 가능하게 된다면 도심 건물 사이의 오염물질 이동 예측 및 경보 등 여러 가지 다른 용도로 사용할 수 있게 된다. 본 연구에서 개발 중인 CFD 모형은 이미 열적 효과를 고려하고 있는 모형이므로 중규모 모형에서 계산된 지표나 건물 표면의 온도와 기온과의 차이를 이용하여 관심 지역의 열적 흐름 및 오염물질의 이동을 상세 모사할 수 있다.

또한 바람환경 영향평가의 자동화를 통한 기상영향평가 기술의 보급이 필요하다. 즉, 관심 지역의 주풍향과 풍속을 고려한 CFD 모형의 구동 조건을 결정하여 구동하고, 그 지역의 개발 전후 풍향, 풍속의 변화량과 개발의 영향에 대한 객관적 정보가 가시적으로 표출, 제공되어야 한다. 이러한 자동화 시스템을 통하여 도시계획 및 개개의 건물배치에 대한 객

관적 기상영향평가가 수행될 수 있을 것이다.

4. 출력자료 표출 및 분석 시스템

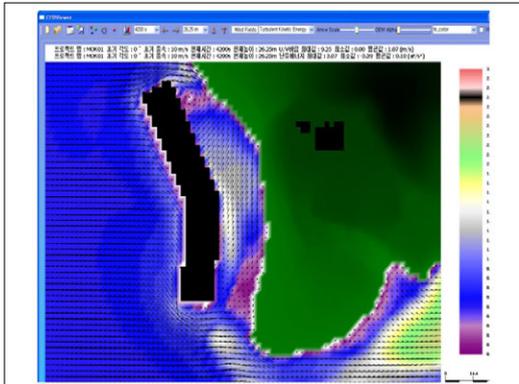
1) 필요성

본 연구에서 사용되는 CFD모형의 결과 값을 분석하고 표출하기 위하여 기존에는 상용 프로그램(Matlab)을 사용하였다. Matlab은 범용 자료분석 및 표출 프로그램으로 전세계적으로 다양한 응용분야에서 사용되고 있으나, 프로그램의 수행 속도와 사용권 등의 문제로 국지기상영향평가의 바람환경 분야에서 범용으로 사용하기에는 어려움이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 CFD모형에서 생산되는 대용량 자료의 신속한 분석과 표준적인 표출을 위한 전문 처리 프로그램과 시스템의 개발이 필요하였다.

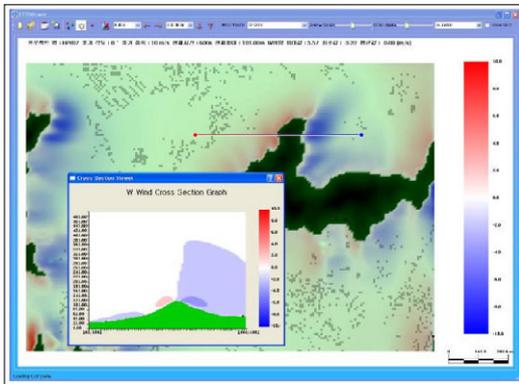
2) 개발된 출력자료 표출 시스템

본 연구에서 개발된 출력자료 표출 시스템은 CFD모형에서 저장한 이진 파일 형식의 자료를 직접 이용하여 별도의 변환과정 없이 바람장과 오염장 등의 자료를 2차원 평면에서 표현하도록 하였다. XY평면의 고도(level)와 아울러 XZ 및 YZ평면의 절편에 대해서도 원하는 지점의 자료 절편을 분석

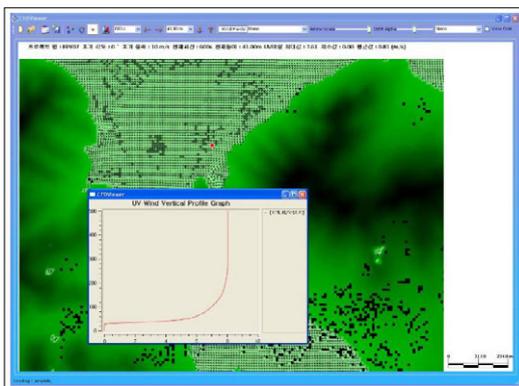
하고 표출할 수 있도록 하였다. 또한 CFD모형이 모의하여 저장한 자료의 시간축을 따라서도 간편하게 원하는 시간으로 이동할 수 있도록 개발하였다(기상청, 2007).



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Screens from the output data processing program for the CFD_NIMR_SNU model. (a) Horizontal wind vector and TKE in color shading, (b) XZ plane cross section graph of vertical wind speed, and (c) Vertical profile of horizontal wind speed.

바람장 이외에도 난류에너지 또는 오염물질의 농도 등을 동시에 표출할 수 있으며, 건물과 지형은 모형 결과 자료와 중첩하여 표출함으로써 자료를 좀 더 쉽게 분석할 수 있도록 개발하였다(Fig. 5)

3) 향후 개발 방향

앞으로 추가 개발할 사항으로는 3차원적인 자료 표출 기법을 도입하고, X, Y, Z 임의의 방향으로의 절편자료 생성과 분석 등 자료의 표출과 분석을 좀 더 편리하게 개선할 계획이다. 또한 모형 출력 자료 포맷 변화에 대응한 유연한 자료 처리, 병렬 클러스터, 슈퍼컴 등 모형 구동 시스템과 좀 더 유기적으로 연계하는 개발이 추진될 계획이다.

III. 결론 및 토의

개발 계획에 대한 환경영향평가에서는 국지기상에 대한 영향평가를 중점적으로 다루지는 않으나, 서울시의 기상영향평가 등 도시 내부에서의 영향 평가는 보행자 등 생활환경의 개선을 위하여 부분적으로 시행되고 있다(롯데물산 등, 2009). 앞으로는 개발 과정 및 개발 후의 국지기상환경이 도시민의 생활환경에 미치는 영향을 미리 분석하여 문제점을 밝혀 해결하려는 요구가 더욱 커질 것으로 예상되며 이를 뒷받침하기 위한 기술이 개발되어야 할 것이다.

또한 환경영향평가의 평가항목 중 대기질, 자연생태환경 및 생활환경분야의 경우 개발에 따른 기상환경의 변화에 의해 크게 영향을 받을 수 있으나 아직까지는 기상환경의 변화 수준이 직접적으로 그러한 평가항목에서 활용되고 있지는 못하는 실정이다. 최근 들어 기상영향평가의 중요성이 부각됨에 따라 기상영향평가를 효율적으로 수행하고 평가 결과를 잘 활용하는 것이 필요하게 되었다. 이를 위해서는 우선적으로 기상환경 변화를 정확히 예측할 수 있는 기상기술이 개발되어야 하고, 환경영향평가 관련 법령에 개선된 기상 기술의 활용 방법이 명시되도록 하는 등 제도적 개선이 필요하다.

본 연구를 통하여 개발하고 있는 CFD_NIMR

SNU 등 국지규모 바람장 모형과 인터페이스 프로그램들은 이러한 기대를 만족시킬 수 있는 기본적인 환경을 제공할 것으로 판단된다. 아직은 기술적으로 국지기상 바람영향평가를 위한 기술이 개발 중인 단계이지만, 시스템 개발과 검증을 통하여 우리나라의 택지개발, 단지계획, 건물 신축 등에 사용 또는 생산되는 전자지도, 문서, 계획도를 잘 활용하여 평가할 수 있는 시스템이 구축될 것이다.

본 연구 개발을 통하여 바람환경에 대한 기상영향평가의 개념과 실증이 이루어졌다. 앞으로의 추가 연구를 통하여 CFD_NIMR_SNU 모형의 실제 도시환경에서의 정확도 평가, 태양 복사과정, 건물, 식생, 토양, 수면 등 다양한 표면의 열적 특성과 거칠기, 건물 자체의 열 생산, 여러 오염물질의 확산 및 반응 등 앞으로 도시계획과 건축을 고려하는 여러 방향으로의 모형 개선이 연구되고 추진될 것이다. 또한 중규모 기상모형 계산시스템과의 접목을 통하여 자동화된 분석과 아울러 최종적으로는 도시 내부의 기온, 바람장 및 오염장 예보의 자동화된 생산까지도 담당할 수 있게 될 것이다.

사 사

본 연구는 국립기상연구소 기본연구과제인 “국지 기상 특성진단 및 기상환경영향평가 기술개발 연구” 및 “신·생활산업기상기술개발 연구”의 지원으로 수행되었습니다. Fig. 1과 관련하여 위성자료를 제공해 주신 경일대학교 조명희 교수님과 이 자료를 이용한 CFD 모형의 모사 결과를 제공해 주신 서울대학교 백종진 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

구해정, 최영진, 김규량, 변재영, 2009, 계산유체역학모형 CFD_NIMR_SNU를 이용한 국지적으로 가열된 산악지역의 상세 바람 흐름 모사 - 화왕산 산불 사례, 한국농림기상학회지, 11, 192-205.

국립기상연구소, 2005, 도시 대기특성 예측 및 응용기술 개발(III), 국립기상연구소.
 국립기상연구소, 2006, 국지기상 특성진단 및 기상환경영향평가 기술개발 연구(I), 국립기상연구소.
 국립기상연구소, 2007, 국지기상 특성진단 및 기상환경영향평가 기술개발 연구(II), 국립기상연구소.
 국립기상연구소, 2008, 국지기상 특성진단 및 기상환경영향평가 기술개발 연구(III), 국립기상연구소.
 국립기상연구소, 2009, 국지기상 특성진단 및 기상환경영향평가 기술개발 연구(IV), 국립기상연구소.
 국토지리정보원, 2006, 공공측량성과 세계측지계 전환 기술지침서, 국토지리정보원
 도화종합기술공사, 삼안, 건일엔지니어링, 2010, 보현산다목적댐 건설사업 환경영향평가서, 국토해양부.
 금호엔지니어링, 2004, 은평 뉴타운 도시개발사업 환경영향평가서, 서울시.
 기상청, 2007, 웹기반 기상분석시스템 개발(II), 기상청.
 김운수, 김학열, 엄정희, 조명희, 오성남, 2001, 기 후특성을 고려한 도시계획제도의 도입과 적용 가능성에 관한 연구, 서울시정개발연구원, 1-22.
 김충식, 2006, GIS와 CAD기술을 접목한 도시경관시뮬레이터의 개발, 대한건축학회논문집.
 롯데물산, 롯데쇼핑, 호텔롯데, 2009, 제2롯데월드 건축허가 변경에 따른 환경영향평가서, 서울시.
 이현영, 1989, 원격탐사 기법에 의한 도시열섬 연구. 지리학, 40, 1-13.
 조명희, 2006, ASTER 위성영상과 GIS를 이용한 청계천 복원 전의 도시 지표 열 환경 특성, 한국기상학회 봄철 학술대회 논문집, 260-261.

- 케이웨더, 2003, 고해상도 미기상 모델을 활용한 기상영향평가 기술 개발, 케이웨더.
- 환경부, 2008, 환경영향평가법, 법제처.
- Baik, J.-J. and J.-J. Kim, 2002, On the escape of pollutants from urban street canyons, *Atmospheric Environment*, 36, 527-536.
- Baik, J.-J., Y.-S. Kang, and J.-J. Kim, 2007, Modeling reactive pollutant dispersion in an urban street canyon, *Atmospheric Environment*, 41, 934-949.
- Bruse, M. and H. Fler, 1998, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environmental Modelling and Software*, 13, 373-384.
- Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 2004: A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k- ϵ turbulence model, *Atmospheric Environment*, 38, 3039-3048.
- Koo, H.-J., K. R. Kim, Y.-J. Choi, T. H. Kwon, Y.-H. Kim, and C.-Y. Choi, 2009, Impact assessment on local meteorology due to the land use changes during urban development in Seoul, *Proceedings of the 88th AMS Annual Meeting*
- Mitchell, J. M. Jr., 1953, On the causes of instrumentally observed secular temperature trends. *Journal of Meteorology*, 10, 244-261.
- Oke, T. R., 1987, *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. Routledge, 435pp.
- Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 126-131.
- Sievers, U., W. G. Zdunkowski, 1986, A microscale urban climate model, *Beitr. Phys. Atmos.*, 59, 13-40.