

수치모의를 통한 미세규모 순환과 확산에 대한 예측

Predictions of Local Circulation and Dispersion with Microscale Numerical Model

안 광 득* 이 용 희* 장 동 언** 조 천 호***
Ahn, Kwang-Deuk Lee, Yong-Hee Chang, Dong-Eon Cho, Chun-Ho

ABSTRACT

The prediction of wind field is very important fact in the radioactive and chemical warfare. In spite of advanced numerical weather prediction modelling and computing technology, the high resolution prediction of wind field is limited by the very high integration costs. In this study we coupled the mesoscale numerical model and microscale diagnostic numerical model with minimized integration costs. This coupled model has not only the ability of prediction of high resolution wind field including complex building but also microscale pollutant diffusion fields. For military operation this system can help making a practical and cost-effective decision in a battle field.

주요기술용어 : Microscale diagnostic model(미세규모 진단모델), Mesoscale numerical model
(중규모 수치모델), Microscale pollutant diffusion field(미세규모 오염확산장)

1. 머리말

육군의 육상 작전, 공군의 공중작전 및 해군의 해상 작전에 있어서 기상은 중요한 요인으로 작용한다. 과거 역사적 문헌에서 시사하고 있는 바와 같이 전쟁에서 지리적인 요소와 기상 요인은 전쟁의 승패를 좌우한다 할만큼 그 중요성이 강조되어 왔으며 고전적인 전쟁이래 많은 첨단 무기와 장비의 개발에도 불구하고

여전히 그 중요성은 부각되고 있다^[1].

전쟁에 가장 큰 영향을 미치는 기상 요인으로서 혹은, 토네이도, 강수, 바람 등 인체에 직접적인 영향을 미치는 요인들이 있으며 이 요인들이 무기 등 기계적 전자적 장비에 미치는 영향도 적지 않다. 이러한 기상 요소들 중 바람은 과거에 불을 이용한 작전에 능동적으로 이용되었으며 근래에 와서는 화학 무기의 개발과 함께 중요한 작전인자의 역할을 하고 있다.

바람의 예측은 기상학적 수치모델에 발달과 더불어 그 정확도가 증가되었다. 현재 우리나라 기상학적 중규모 수치모델은 1989년 이후 많은 발전을 거듭하고

* 기상청 기상연구소 예보연구실 기상연구사

** 기상청 기상연구소 예보연구실 기상연구관

*** 기상청 기상연구소 예보연구실 예보연구실장

있으며 The Fifth-Generation Mesoscale Model (MM5)^[2]를 모체로 하여 개발이 이어지고 있다. 그러나 이러한 수치모델을 이용한 바람장 연구는 대부분 수 km~수십 km의 해상도에 머물러 실제적인 바람을 예측하는데는 해상도와 계산비용의 관점에서 한계가 있다. 기상학적으로 볼때 고해상도(수백 m~수십 m) 영역에 대한 바람의 예측, 즉 화학전 등에서 인간이 느끼는 바람을 예측하는데 있어 이용될 수 있는 미세규모의 수치모델은 제한적이며 수치적 불안정과 초기 및 경계조건에서 오는 오차 등 여러 가지 문제를 안고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하고 실제적인 관점에서 미세규모, 즉 인간이 직접적으로 체감할 수 있는 바람장을 예측하고 분석할수 있는 방법을 제시한다. 또한 이러한 바람장 내에서 화학전시 오염물질의 확산을 예측하여 군 작전시 능동적으로 대처할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 모델 개요

미세규모 바람장은 건물, 수목, 지면 거칠기 등 무한히 많은 요소의 영향을 받는다. 이러한 영향을 적절히 고려하는 모델로 본 연구에서는 독일에서 개발된 미세규모 모델을 이용하였다. 이 모델은 1980년 독일의 환경보호 정책의 일환으로 도시기후에 대한 수치모의를 위해 개발된 미세규모 도시 기후 모델인 MUKLIMO(Microscale Urban Climate Model)이며, Sievers and Zunkowski^[3]에 의해서 초기에 2차원 모델로 제안되었다. 이러한 2차원 모델을 Sievers^[4]가 유선함수 방법을 이용하여, 2개의 유선함수 성분을 가

지고 3차원 비발산 바람장을 계산함으로 3차원 바람장 모델로 개선되었다.

이 모델은 1~2 km내의 영역에서 수 m~수십 m의 바람장을 계산할 수 있도록 설계된 진단모델이며 고해상도의 건물과 수목, 지면거칠기 등의 효과를 고려한다. 모델내에서 비발산, 비압축인 이상적 중립대기가 가정되고, 대기 상태가 균질한 수평면 y축위에서 수평좌표 x와 연직좌표 z에 의존하는 변수들을 계산하여 3차원으로 확장하여 3차원 바람장을 구하게 된다. 지표온도는 모델 영역의 모든 지역에서 동일하게 가정되고 건조 단열감율을 이용한다.

바람장 계산을 위해 사용되는 운동방정식은 Bussinesq 근사에 의한 운동방정식이며, 다음과 같다.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nabla \cdot J = -\nabla p - (\rho_0 - \rho') \nabla \phi - 2\rho_0 \vec{\omega} \times \vec{V} \quad (1)$$

ρ_0 는 평균 공기밀도, ρ' 은 평균 공기밀도의 편차, J 는 레이놀즈 텐서, ϕ 는 지오폠펌셜, $\vec{\omega}$ 는 지구의 자전 각속도이다. 식 (1)에서 기압성분 p 를 제거하고, 와도 방정식 형태로 전환하기 위해 다음과 같이 나타내면

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \vec{A} \quad (2)$$

여기서 \vec{A}

$$\vec{A} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla \cdot \vec{J} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - (1 + \frac{\rho'}{\rho_0}) \nabla \phi - 2\vec{\omega} \times \vec{V} \quad (3)$$

이 된다. \vec{A} 값의 x, y, z 방향의 성분을 A_1, A_2, A_3

로 정의하면 운동방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla_x p + A_1 \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla_y p + A_2 \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla_z p + A_3 \end{aligned} \quad (4)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 위 (4)식을 다음의 와도식

$$\zeta_1 = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = i \cdot (\nabla \times \vec{V}) \quad (5a)$$

$$\zeta_2 = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = j \cdot (\nabla \times \vec{V}) \quad (5b)$$

을 이용하여 와도 방정식 형태로 전환시키면,

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = \frac{\partial A_3}{\partial y} - \frac{\partial A_2}{\partial z} \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \zeta_2}{\partial t} = \frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{\partial A_3}{\partial x} \quad (6b)$$

이 되면서 기압성분이 제거된다. 지표면 $z=0$ 에서 $w=0$ 이라는 조건을 감안하여 비발산 조건에 의한 연직 바람 성분에 관한 다음의 적분식

$$w = - \int_0^z \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz' \quad (7)$$

을 이용하여 식 (5a)과 (5b)에서 연직속도를 제거하면,

$$\zeta_1 = -\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \int_0^z \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz' \quad (8a)$$

$$\zeta_2 = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^z \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz' \quad (8b)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 그리고, 벡터의 유선함수 적

분식

$$\Psi_1 = - \int_0^z v(x, y, z') dz' \quad (9a)$$

$$\Psi_2 = \int_0^z u(x, y, z') dz' \quad (9b)$$

을 이용하여 식 (8a)와 (8b)로부터 유선함수 결정식

$$\zeta_1 = \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y \partial x} \quad (10a)$$

$$\zeta_2 = \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial x \partial y} \quad (10b)$$

을 얻게 된다. 따라서, 식 (10a)과 (10b)의 유선함수 값 Ψ_1, Ψ_2 로부터 u, v, w 를 얻을 수 있다(4).

$$u = \frac{\partial \Psi_2}{\partial z}; v = -\frac{\partial \Psi_1}{\partial z}; w = \left(-\frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x} \right) \quad (11)$$

식 (1)의 레이놀즈 텐서 J 의 발산은

$$\nabla \cdot J = -\rho_0 \nabla \times (K_M \nabla \times \vec{V}) = -\rho_0 \nabla \times K_M \vec{\zeta} \quad (12)$$

으로 모수화된다. 여기서 K_M 은 난류 교환계수 (turbulent exchange coefficient)이며, 중립대기에서 혼합길이와 연직 바람시어에 비례하여 정의되는 양이다. 여기서 혼합길이 l 은 Blackadar^[5]에 의해 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$l = \frac{x(l_0 + z_0)}{1 + \frac{x(l_0 + z_0)}{l_\infty}} \quad (13)$$

여기서 x 는 von Karman 상수, z_0 는 거칠기 길이, l_0 은 모델 각층의 고도, l_∞ 는 모델 상부 한계에서의 혼

합질이 값이다. 하부 경계조건으로는 지면에서 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 0$ 경계조건을 적용한다.

인간에게 직접적인 규모, 즉 기상학적인 미세규모에서의 바람장을 예측하기 위하여 이보다규모가 큰 중규모(수 km-수십 km) 모델에서 예측되어진 바람 예측값을 미세규모 진단 모델의 초기자료로 입력하여 두개의 모델이 연동하는 방법을 이용했다. 미세규모 바람장 진단 모델과 연동을 위한 중규모 예측 모델로는 기상연구소 예보연구실에서 현업에 이용중인 The Fifth-Generation Mesoscale Model(MM5)^[2]을 이용하였다.

MM5는 기상학적인 중규모, 일반적으로 수 km-수십 km의 기상현상을 모의 예측하도록 설계된 비정역학 모델이며, 연직층은 지형을 따르는 시그마 좌표계를

이용한다. MM5 모델은 여러 선행연구에 그 제원이 잘 나타나있으므로 본 연구에 이용된 중규모 모델을 간략히 표 1에 소개하였다.

2.2 실험 방법

두가지 다른 규모의 모델을 연동하는 방법을 이용하는 이유는 규모별 특성을 잘 나타내고 있는 모델들 서로 연동하여 가장 합리적인 예측값을 구하는데 있다. 중규모(수 km-수십 km) 모델의 경계자료는 기후 모델(수십 km이상)로부터 얻어지며 중규모 모델의 1~2km 해상도 자료는 미세규모 모델의 초기자료로 이용된다. 전지구적 기후 관점에서 분석되고 예측된 자료가 중규모 모델에 초기 및 경계자료로 이용되며 이렇게 계산된 중규모 모델의 자료는 미세규모 모델의 초기자료로 이용되어 초기 및 경계자료에서 발생 하던 오차를 해소하게 된다. 또한 미세규모 진단모델의 바람 분석장에 중규모 모델의 예측값을 초기자료로 이용하게 됨으로써 미세규모의 바람장 예측값을 얻을수 있게 된다.

이것과 유사한 방법을 미육군 국방 연구소(U.S Army Research Laboratory)에서도 이용하고 있다. 미육군의 경우 화학전, 미사일 전을 대비한 바람예측을 체계적으로 실시하고있으며, 고해상도의 바람장을 예측하기 위해 기후모델(수백 km이상)과 중규모 모델(수 km-수십 km), 미세규모 모델(수백 m)를 연동으로써 고분해능의 바람장을 예측하고 있다^[6]. 그러나 수백 m의 분해능에서 고해상도의 토지이용도를 이용하여 그 효과를 고려하고는 있으나 건물과 수목 등을 분해해내지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 Ronald and Saba^[6]의 결과보다 더 분해능이 높은 수십m의 건물과 수목이 분해되는 미세규모 기후 모델(MUKLIMO)을 이용하여 기상학적

[표 1] Model description

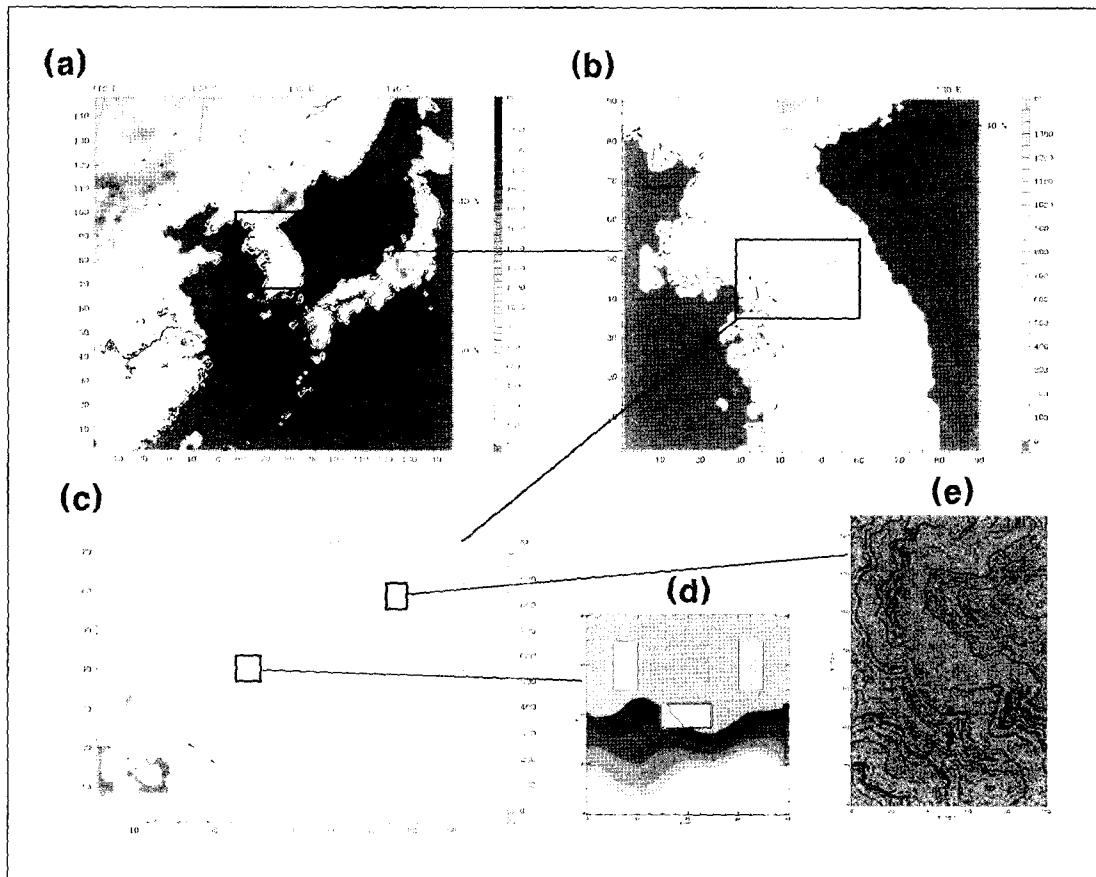
Item	Description
Model equation	Non-hydrostatic equation
Vertical coordinate	Terrain-following σ -coordinate
Lateral boundart condition	Tima and inflow/outflow dependent relaxation
Vertical boundary condition	Radiation
Planetary boundary Layer	MRF
Ground Temperature	Multi-layer model
Radiation	interaction cloud and clear air
Time Integration	Split semi-implicit
soil model	5 layers soil model

중규모 모델과 연동하였다. 기상학적 중규모 모델(수 km)에서 해상풍과 지형, 온도 등이 고려된 바람장 예측 결과를 고해상도 바람장 모델(수십 m)의 초기 자료로 입력하여, 고해상도 바람장 예측 자료를 매 6시간 간격으로 24시간 예측 바람장을 매시간별로 계산하게 된다.

규모별 모델의 연동의 방법과 그 초기 검증 실험은 안광득^[7]에 의해서 이루어진 바 있다. 안광득^[7]은 미세 규모 모델의 단일건물 주변의 바람장 검증 실험을 독

립적으로 다르게 발전된 미세규모 모델과의 비교를 통하여 미세규모 모델의 신뢰도를 검증하였다. Sievers and Zdunkowski^[3]과 Sievers^[4]에서도 미세 규모 기후모델(MUKLIMO)의 검증 실험이 이루어진 바 있으며 이러한 신뢰성을 바탕으로 독일에서는 현업에 이용되고 있다.

중규모 모델과 미세규모 모델의 연동방법은 안광득^[7]에 의해 처음 시도되었으며 복잡한 구조물 내부와 외부의 바람장 변화실험에서 연동된 시스템이 단일



[그림 1] Numerical model domain for (a) 18km resolution(148×148), (b) 6km resolution(142×142), (c) 2km resolution(211×109), (d) 10m resolution(80×80), (e) 10m resolution(100×150). Mesoscale model domain is (a), (b), (c), and Microscale model domain is (d), (e), (f).

중규모 모델에 의한 바람장 결과보다 RMSE의 뚜렷한 감소를 보였다. 다른 규모의 모델 연동을 통한 고해상도 바람예측의 방법은 안광득의 실험^[8]에 의해서 국제 경기대회 기상지원의 일환으로 부산아시아게임 경기장내부 바람장 예측에 지원된 바 있다.

본 연구에서는 고해상도의 바람장과 오염확산 예측이 필요한 군사작전에서 이러한 실험의 적용여부를 살펴보기 위해 가상적인 미세규모 영역에 대해 바람장 예측과 오염확산 예측 실험을 하였다. 안광득^[9]에 시도되었던 바람장 예측에서 더 나아가 오염 확산장에 대한 예측이 체계적으로 시도되었으며 그 적용성 여부를 살펴보았다.

미세규모 모델(MUKLIMO)에서 오염확산은 다음의 식에 의해 계산되어지며

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla c + \frac{1}{\rho_0} \nabla \cdot \vec{f} = \frac{1}{\rho_0} Q^c \quad (14)$$

여기서 c 는 mass concentration, Q^c 는 c 의 Volume source 이고, \vec{f} 는 다음과 같이 모수화된다.

$$\vec{f} = -\rho_0 K_h \nabla c \quad (15)$$

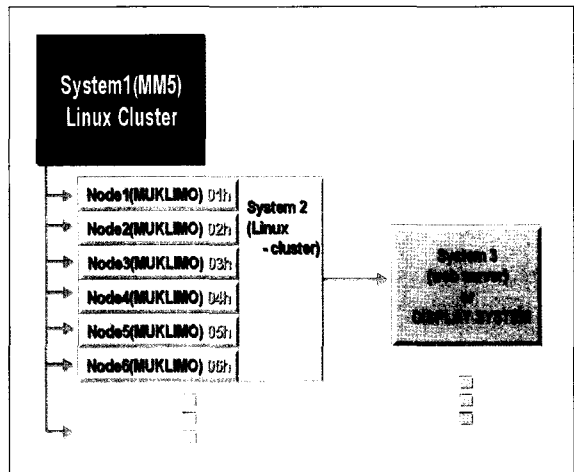
K_h 는 교환계수이며 모델에서 계산되어지는 량이다. 이 확산식은 모델에서 바람장이 계산되어지고 난후 각 격자점에서의 u, v, w 와 K_h 를 가지고 오염 확산을 계산하게 된다. 미세규모 모델(MUKLIMO)는 점오염원과 선오염원, 면 오염원 뿐만아니라 이동식 오염원에 대한 통계자료를 이용한 확산 실험이 가능하도록 설계되어있다.

그림 1의 (a),(b),(c)는 중규모 모델의 영역을 나타낸다. 그림 1의 (a)는 중규모 모델의 가장 큰 영역을 나타내며 2,664km×2,664km의 영역이다. 고해상도 기

상변수 예측값의 정확도 향상을 위해 그림 1의 (a),(b),(c) 세 개의 등격자계를 이용하여 중규모 모델의 해상도를 2km까지 증가시켰다. 우리나라 휴전선 부근의 422km×218km 영역이 중규모 모델의 최종 영역인 2km 해상도 영역이다.

중규모 모델에서 사용된 지형은 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 제공된 토지 이용도, 등고 자료가 이용되었다. 그러나, 미세규모 모델에서는 정확한 건물의 위치와 높이 등의 건물 구조물 정보와 고해상도의 지형고도, 토지이용도 자료가 모델에서 구성된 해상도에 따라 다르게 요구된다. 이러한 건물 및 지형 자료는 GIS(Geographic Information System) 또는 건물 건축시의 전자도면 (AutoCAD)등을 이용한 건물정보와 토목도면등을 이용한 지형, 구조물 정보를 이용하여 생성되며 수목과 지면상태에 대한정보 등도 모델내에서 고려된다.

따라서 본 연구에서 미세규모 모델의 초기자료로 이용한 고해상도의 지형, 건물, 수풀 등의 자료는 가상적인 자료이다. 이 지역은 군사적 기밀지역이므로



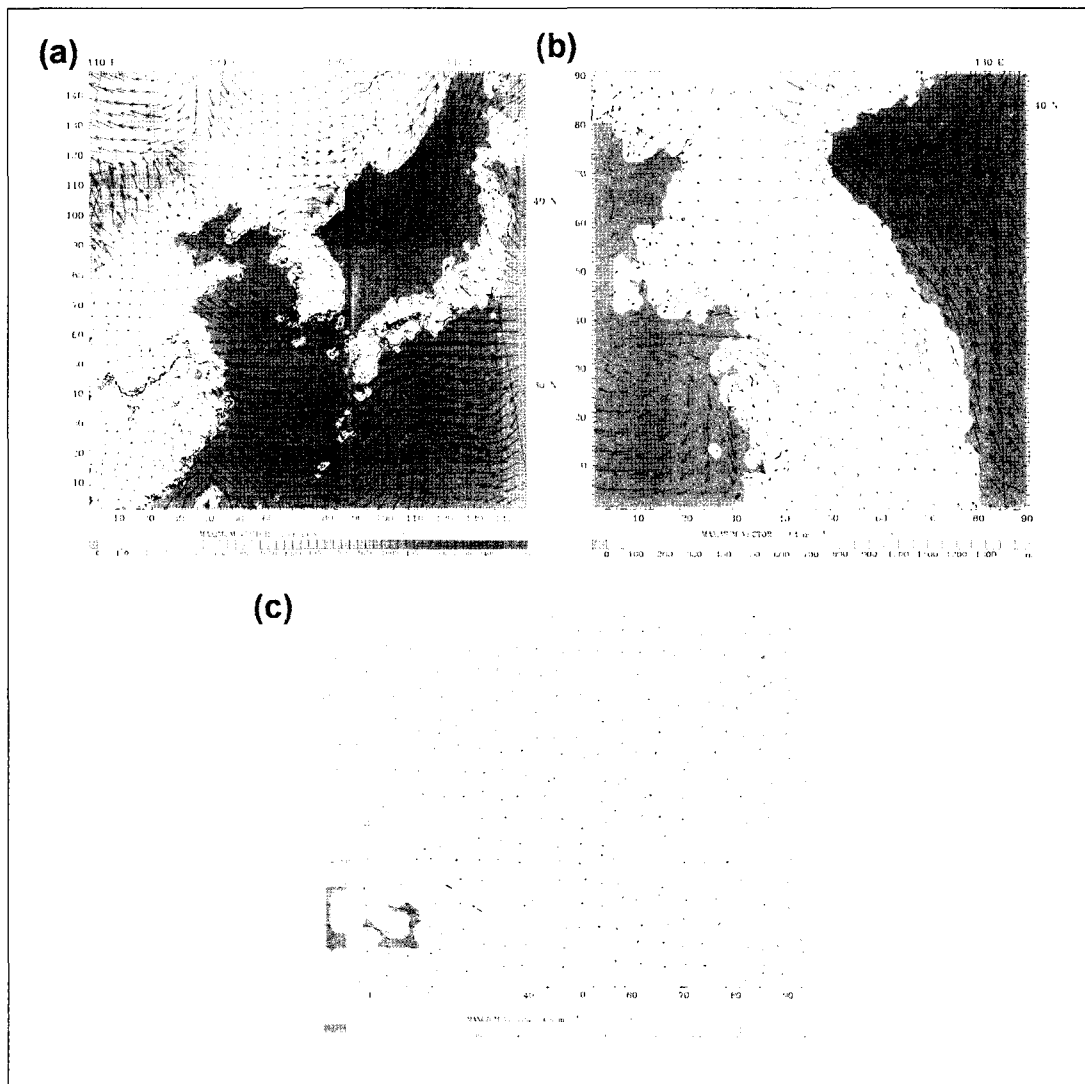
[그림 2] Simple diagram of Micro -scale wind field prognostic system

이러한 고해상도의 GIS 자료를 얻는데 어려움이 있으므로 미세규모 영역에 대해서는 가상적인 수치 실험을 하였다.

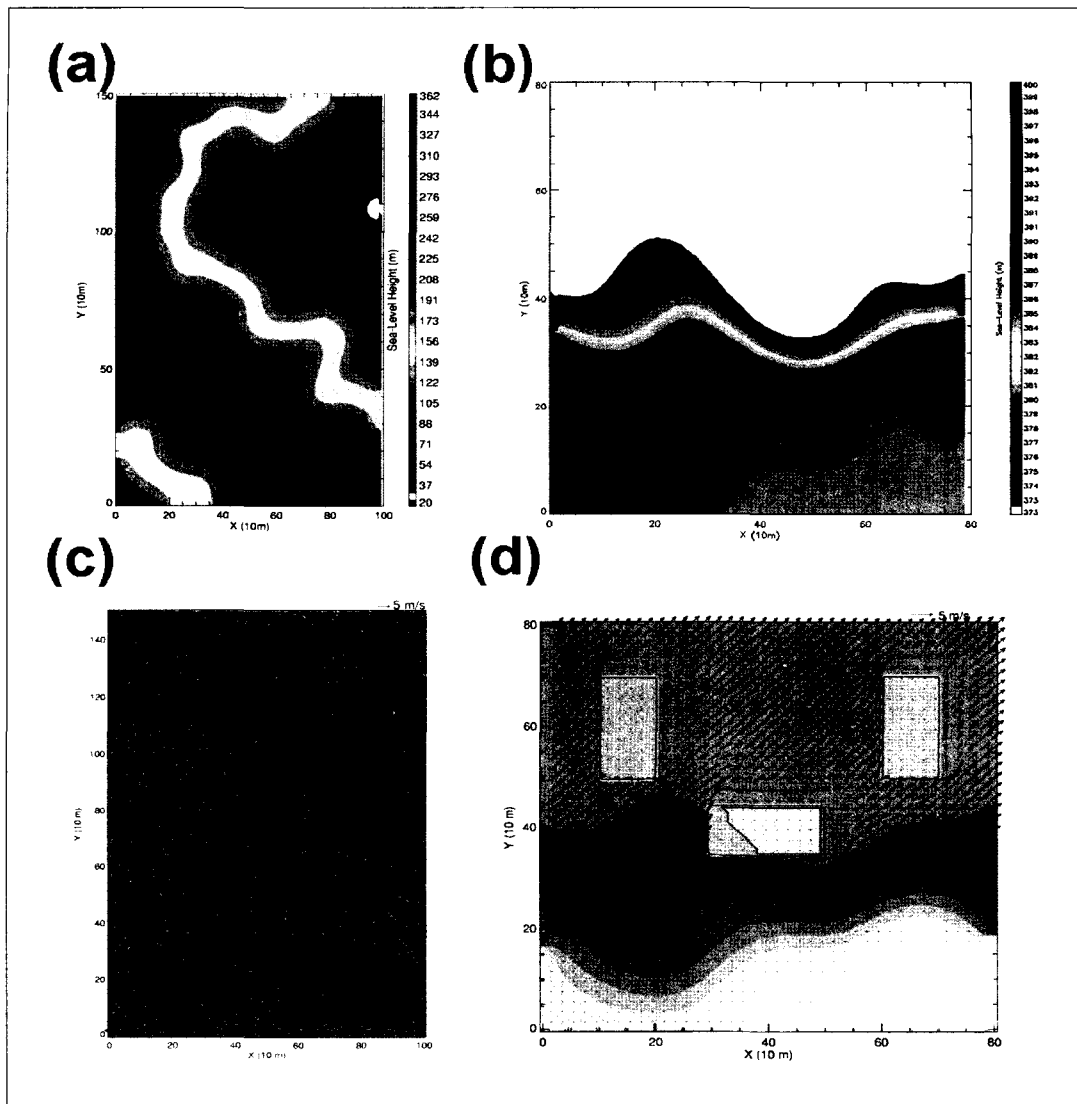
그림 2는 이러한 연동 시스템의 실제적인 적용성 여부를 설명해주는 시스템 구성도이다. 중규모 모델의 경우 리눅스 클러스터에서 수행되며 수행된 2km 결

과를 미세규모 모델을 수행할 지역의 초기 자료로 매 예보시간별로 입력하게 된다. 미세규모 예측 시스템은 중규모 모델의 2km 결과 영역내에서 관심있는 지역 별로 구성할수 있으며 각 지역별로는 24시간의 예측 값을 얻을수 있다.

그림 3은 그림 1의 중규모 모델 영역에 대한 바람



[그림 3] Simulated horizontal wind fields (a),(b),(c) by Mesoscale meteorological model(MM5).
Domain of (a),(b),(c) are same as (a),(b),(c) of Fig. 1

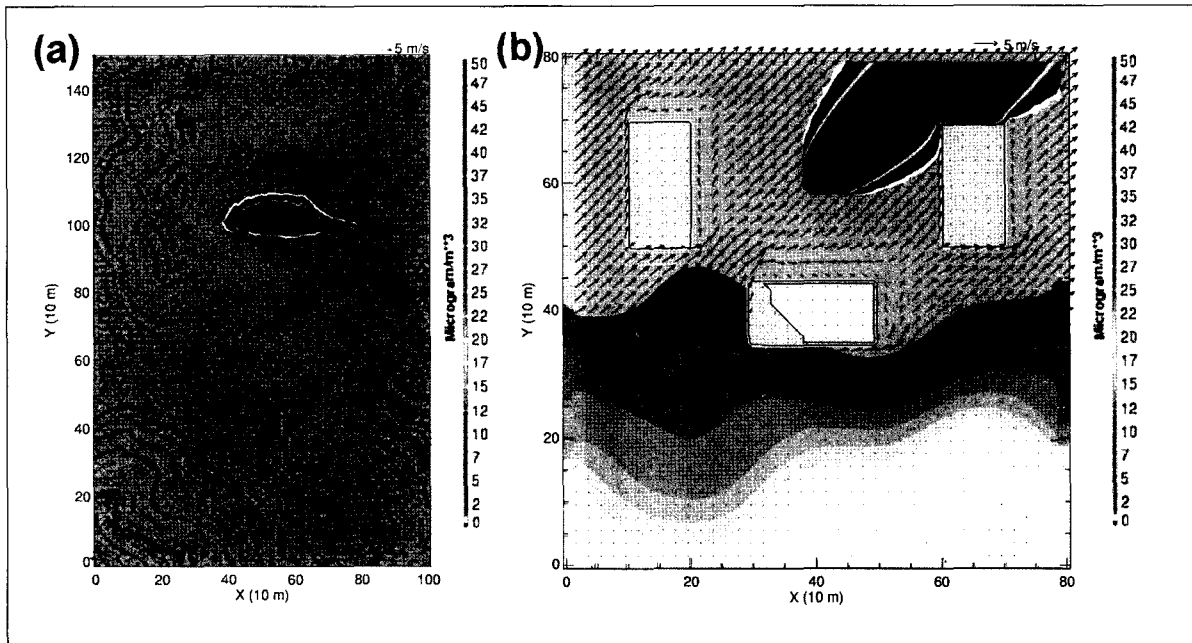


[그림 4] Terrain of high-resolution model domain (a), (b) and Predicted microscale wind fields (c),(d) by coupled meso-microscale model (MM5- MUKLIMO). Domain of (a),(c) are same as (e) of Fig. 1, and domain of (b),(d) are same as (d) of Fig. 1

장 예측 결과이다. 규모감소에 의한 바람장의 해상도 증가는 효과적으로 나타나고 있다. 즉, 그림 3 (a)의 18km 해상도에서 우리나라 동해상으로 나타나는 남동풍 계열의 바람이 그림 3 (b)의 6km에서 해상도 증가와 함께 에서 남동풍 계열의 바람을 유지하면서

더욱 자세히 보여지고 있다. 그림 3 (c)의 2km 영역에서는 휴전선 부근의 고해상도 바람장이 산악의 효과와 함께 잘 묘사되어있다.

그림 4는 휴전선 부근의 몇 개 가상적인 영역에 대한 미세규모 바람장 예측의 결과이다. 그림 3의 (c)에



[그림 5] Wind and pollutant diffusion fields at (a) same domain as Fig. 1. (d) and (b) same domain as Fig. 1. (e). Pollution source emitted with $0.1\mu\text{/sec}$ for 5 minute

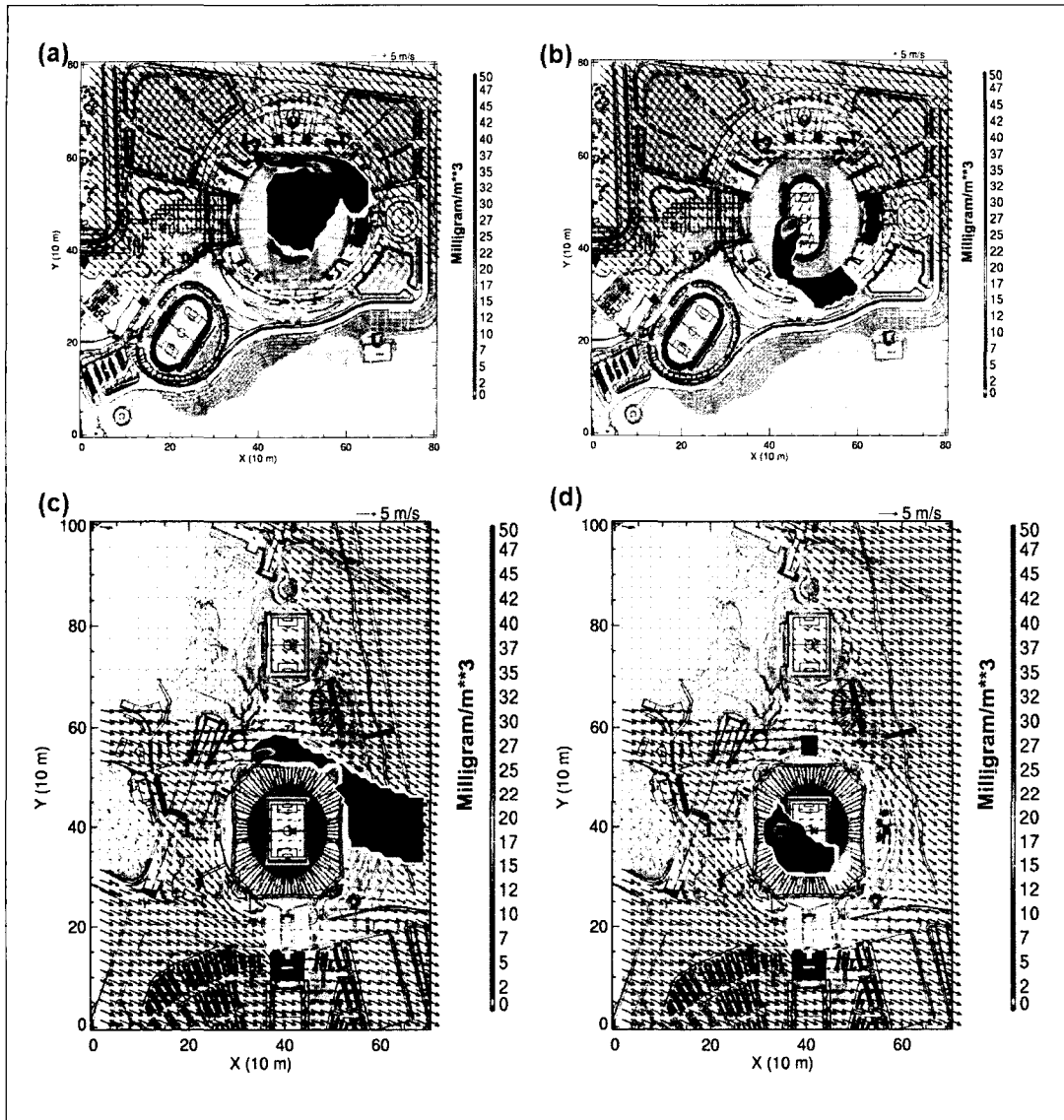
서 얻어진 2km 해상도의 바람자료를 미세규모 모델 (MUKLIMO)의 초기자료로 이용한 예측치이며, 그림 4의 (a)와 (b)는 미세규모 영역의 지형도를 (c)와 (d)는 예측된 바람장을 나타낸다.

그림 4 (a)와 (c)에서 고해상도 지형에 의한 바람장의 효과를 보기위해 지형을 따르는 좌표계에서의 바람장 예측 결과를 나타내었으며 모델영역 북동쪽에 위치한 계곡부근에서 지형에 의한 바람장 변화가 잘 나타나고 있다. 그림 4 (c)와 (d)에서는 고해상도 지형과 건물들이 존재하는 미세규모 영역에서의 바람 예측결과를 2m 고도의 모델층에서 나타낸 결과이다. 건물에 의한 바람장 변화효과가 잘 나타나고 있으며 그 양상은 영역 전체의 바람이 변화함에 따라 달라진다.

그림 5의 (a)와 (b)에서는 그림 1의 (d)와 (e) 지역

을 대상으로 오염확산 실험을 하였다. 초당 방출량은 $0.1 \mu\text{/sec}$ 로 하여 대상지역의 임의의 지점에서 5분간 방출되는 확산실험을 하였다. 그림 4의 미세규모 예측 바람장과 같은 결과에서 점오염원에 의한 오염확산의 예측결과이다. 그림 5의 (a)에서 확산오염원의 중심이 된 x격자 80과 y격자 100지점은 고도 낮은 골짜기 부근이다. 이 영역에서는 계곡을 타고 산등성으로 불어오르는 바람이 나타나며 오염물질은 산등성이를 넘어 흐르지 못하고 산등성이를 타고 모이면서 골지역에 누적되는 형태로 나타난다. 그림 5의 (b)에서는 건물 영역의 중앙부근인 x격자 40과 y격자 60인 지점에서 점오염원에 의한 확산 예측결과이다. 그림 4의 (d)와 같은 바람장에서 확산은 북서쪽으로 이루어지며 동쪽에 위치한 건물에 영향을 주고 있다.

실제 군사작전의 관점에서 이러한 고해상도의 오염



[그림 6] Wind and pollutant diffusion fields (a),(b) at the daegu worldcup stadium and (c),(d) at the seoul worldcup stadium. Pollution source emitted with $0.1\mu\text{/sec}$ for 3 minute

확산장의 예측은 매우 의미가 있다. 그림 5의 (a) 또는 (b)와 같은 지역에 작전이 있는 경우 지역별 바람장을 미리 예측할수 있고 능동적으로 군사작전에 이용할수 있다.

그림 5의 (a)와 같은 지역에서 예측된 바람장이 이

와같은 경우에는 북서쪽에 위치한 골 지점은 위험에 노출될 가능성이 많은 지역이라 할수 있다. 이러한 고해상도 오염예측에 대한 능동적 이용 가능성을 대테러전의 경우를 가정하고 살펴보았다.

그림 6에서는 안광득^[9]에 의해서 시도되었던 경기장

지역의 바람장예측에서 더 나아가 본 연구에서 오염 확산 실험을 한 예측결과이다. 그림 6에서 건물구조물의 특성에 따른 오염확산의 차이가 뚜렷하게 나타나며 오염원의 위치에 따라 다른 양상을 보인다. 그림 6의 (a)와 (c)에서는 건물 외부에 오염원이 존재할 때 확산 결과이며 그림 6 (a)의 대구월드컵 경기장의 경우 그 구조적 특성에 의해 외부에 존재하는 오염원에 의해 내부에 까지 그 영향이 나타남을 볼수 있다. 오염원의 위치는 x 격자 40, y 격자 60 지점의 지표이며 0.1 micro-gram 의 양을 3 분간 방출을 실험하였다. 그림 6 (c)에서는 건물 외부의 지표면에서 방출된 물질이 건물 구조물의 특성에 의하여 내부로 유입되지 못하는 것을 볼수 있다.

그림 6의 (b)와 (d)의 경우는 건물 내부에 오염원이 존재할 경우에 오염확산의 예측결과이다. 그림 6 (d)에서는 건물 구조물의 특성으로 인하여 내부의 오염물질이 외부 확산되지 못하는 것을 볼수 있다.

이러한 오염확산에 대한 예측은 군사작전 및 대테러전에 매우 의미가 있다. 그림 6의 (a), (b)와 같은 대구월드컵경기장의 경우는 내부와 외부의 순환으로 인하여 외부의 오염원만으로 내부에 피해를 초래할수 있다. 즉, 외부의 연막탄 등에 의해 내부의 시야를 장악할수 있으며 내부에서의 시야를 장악하기 위한 내부에서의 연막탄 등은 그리 도움이 되지 않는 경우가 발생한다.

그러나 그림 6의 (b)와 (d)의 서울 월드컵 경기장의 경우에는 외부에서의 오염원은 내부에 아무런 영향을 끼치지 않을것이며 내부에 오염원은 외부로 빠져나가지 않을 것이다. 내부 오염원 하나를 발생시킴으로써 외부에서는 내부의 시야를 완전히 장악할수 있을 것이다. 이러한 양상은 바람장의 변화에 따라 조금씩 차이를 보인다.

그림 6과 같은 실제적 적용성 실험에서도 고해상도의 바람장과 오염확산에 대한 예측은 실제 군사작전에서 상당한 이득 뿐만 아니라 피해의 감소 등 군사작전에 능동적인 효과를 기대할수 있을 것이다. 그러면 이러한 예측 시스템에 대한 실제 군사작전의 적용성 여부를 살펴볼필요가 있다. 실제 군사작전의 특성상 휴대성과 신속성을 고려해야한다.

본 연구에 이용된 고해상도 바람장 연동 시스템은 두가지 부분으로 나누어진다. 그림 2에 나타난 개념적인 시스템구성을 실제 하드웨어적인 시스템 구성에 적용한다. 중규모 모델의 예측 부분과 미세규모 기후 모델의 예측부분의 시스템이 빠른 계산 속도를 지니는 컴퓨터에 설치되어 지역별 주요기지의 작전 지휘부에 존재하고, 실제 야전 지역에 병사들은 휴대용 단말기 등을 휴대하고 바람장 예측을 원하는 지역의 정보를 이용하여 미세규모 모델의 결과를 볼수 있게 된다. 중규모 모델에 의한 예측으로 작전지역 전반에 대한 기상 정보를 특성화시켜 얻을수 있으며 이를 바탕으로 실 작전지역의 고해상도 바람장과 원하는 지역의 오염확산장을 예측값으로 얻게되고 이에 따른 능동적 작전이 수행되게 된다.

3. 맺음말

본 연구에서는 안광득^[9]이 수행했던 것과 같은 형태의 기상학적 중규모-미세규모 수치모델의 결합을 이용하여, 실시간으로 인간에게 직접적으로 영향을 줄수 있는 바람장과 이에 더 나아가 오염확산장을 예측 할수 있는 방법을 제시하였다.

군사작전에서 인간에게 직접 영향을 끼칠수있는 바람장을 예측하는 문제는 전쟁의 승패가 달려있는 중

요한 요소중의 하나이며, 최근의 화학전에 있어 그 중요성은 더욱더 강조된다. 고도의 컴퓨팅 기술의 발달과 기상학적인 수치모델의 발전에 기인하여 이러한 바람장 예측은 현재 기술적으로 진보되고 있으며 실제 군사작전에도 적용할수 있게 되었다.

본 연구에서는 이렇게 개발된 기상학적 수치모델의 바탕위에서 보다 진보된 고해상도 바람을 예측하고 이를 실제적으로 활용할수 있는 방법을 제시하였으며 이러한 방법은 군 작전과 피해감소 등의 화학전 관점에서의 측면과 미사일, 항공기 등의 고해상도의 바람장과 확산장의 예측과 분석이 필요한 분야에 이용 가능하리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상연구소 예보연구실의 주요사업과제인 "슈퍼컴을 활용한 예보능력 향상 연구 ; 단시간 분석 및 예측시스템 개발" 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 책자 : 이지형, "역사적 문헌 및 전사를 통해 살펴본 기상이 작전에 미치는 영향", 육군(The Army), 1999, 243호.
 [2] 책자 : Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, "A description of the Fifth-

Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5)", Tech. Note NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1995, 122pp.
 [3] 저널 : Sievers, U. and W. G. Zdunkowski, "A microscale urban climate model", Beitr. Phys. Atmosph., 1988, Vol.69, 13~40.
 [4] 저널 : Sievers, U., "Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode", Meteorol. Zeitschrift, 1995, N. F. 4, 3~15.
 [5] 저널 : Blackadar, A. K., "The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere, J. Geophys. Res., 1962, Vol.67, 3095~3102.
 [6] 저널 : Ronald M. and Saba A, "Coupled mesoscale-microscale model to compute neighborhood scale wind fields", Fourth Symposium on the Urban Environment, 2002.
 [7] 논문 : 안광득, "미세규모 기후모델을 이용한 대구 종합운동장 주변의 국지순환 모의", 경북대석사학위논문, 2002. 8., 63pp.
 [8] 저널 : 안광득, 이용희, 장동연, 조천호, 민경덕, "부산 아시안게임 지원을 위한 미세규모 바람장 예보 시스템 구축", 한국기상학회지 '대기'지, 가을학술회의. 2002. 10., 556~559.
 [9] 저널 : 안광득, 이용희, 민경덕, 조천호 "미세규모 기후모델을 이용한 2002 월드컵 경기장 주변의 국지순환 모의", 한국기상학회지 심사완료, 2003. 10.