

연안부근 복잡지형의 대기유동장 수치실험 I - 선형이론을 이용한 국지순환모형의 타당성 검토 -

이 화 운 · 김 유 근 · 정 우 식
부산대학교 대기과학과
(1999년 7월 26일 접수)

A Numerical Experiments on the Atmospheric Circulation over a Complex terrain around Coastal Area. Part I : A Verification of Propriety of Local Circulation Model Using the Linear Theory

Hwa-Woon Lee, Yoo-Keun Kim, and Woo-Sik Jung
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
(Manuscript received 26 July, 1999)

A sea/land breeze circulation system and a regional scale circulation system are formed at a region which has complex terrain around coastal area and affect to the dispersion and advection of air pollutants. Therefore, it is important that atmospheric circulation model should be well designed for the simulation of regional dispersion of air pollutants. For this, Local Circulation Model, LCM which has an ability of high resolution is used.

To verify the propriety of a LCM, we compared the simulation result of LCM with an exact solution of a linear theory over a simple topography. Since they presented almost the same value and pattern of a vertical velocity at the level of 1 km, we had a reliance of a LCM.

For the prediction of dispersion and advection of air pollutants, the wind field should be calculated with high accuracy. A numerical simulation using LCM will provide more accurate results over a complex terrain around coastal area.

Key words : a linear theory, exact solution, LCM, propriety

1. 서 론

복잡한 지형을 이루고 있는 지역에서 대기오염물질의 확산과 수송은 국지적 대기순환계의 영향을 많이 받는다. 특히 해안을 끼고 있는 연안도시지역의 경우, 대표적인 국지순환계인 해륙풍계에 의해 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 대기오염물질의 수송과 이류를 정확히 분석하고 예측하기 위해서는 충분한 관측소의 설치와 관측자료의 수집이 필요하지만 이것은 여러 가지 요인에 의해 지극히 제한적일 수밖에 없다. 그리고 복잡한 지형을 이루고 있는 지역이나 해안을 끼고 있는 연안도시지역의 경우 지형적 입지조건에 의해 형성되는 각각의 국지순환계의 영향을 직접적으로 받기 때문에 넓은 지역을 대표하는 관측소의 자료만으로 정확한 분석이나 예측을 하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 대기유동장을 정확히 표현할 수 있는 중규모 수치모형이 우선적으로 필요하다. 하지만 많은 연구에 있어서 이러한 모형의 결과에 대해서 관측값과의 비교를 통해 모형의 결과에 의미를 부여하고 있을 뿐 정확한 수학적,

물리적인 측면에서 비교를 통한 분석은 많이 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 Kikuchi 등²⁾에 의해 개발된 국지순환모형인 LCM(Local Circulation Model)을 이용하여 종형(bell-type)의 단순지형에 대하여 선형이론의 해석해와 LCM의 결과를 비교, 분석하여 모형의 정확성에 대한 타당성을 조사하여 앞으로의 여러 연구에 있어서 모형의 활용가치를 고찰하고자 한다.

2. 선형이론

국지순환모형의 타당성을 조사하기 위하여 종형의 형태를 가진 단순한 지형에 대하여 선형이론의 해석해와 모형의 결과를 비교하였다. 이 선형이론은 많은 연구자들이 분석적 연구에 이용하여 왔는데, 특히 산악파의 해석적 연구에 많은 이용이 있었다. Wurtele³⁾는 처음으로 고립된 산의 후면에서 나타나는 연직속도를 3차원적으로 계산하였고, Smith⁴⁾는 3차원 종형의 산을 대상으로 성층화된 정역학적 흐름의 특성을 규명하는데 선형이론을 이용하였다. Phillips⁵⁾는 타원의 형태를 지닌 산에 대해서

지표기압과 바람장을 분석적으로 나타내었다.

선형이론에서 바람, 기압, 밀도장에 대한 요란은 다음의 선형화된 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$U \frac{\partial u'}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} \quad (1)$$

$$U \frac{\partial v'}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y} \quad (2)$$

$$U \frac{\partial w'}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\rho'}{\rho_0} g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\rho' = \frac{d\bar{\rho}}{dz} \eta \quad (5)$$

여기서 x, y, z 는 각각의 좌표계 방향을 나타내며 u', v', w', ρ', p' 는 속도성분과 밀도, 기압의 변화를 나타내며 η 는 밀도면으로부터 공기과의 연직변위를 나타낸다. 그리고 $\rho_0, U, d\bar{\rho}/dz$ 는 대기의 밀도, 평균풍속, 연직밀도변화를 나타낸다.

균일류(steady flow)에 대한 운동학적(kinematic) 조건을 적용하고 U 를 상수로 놓으면

$$w' = U \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (6)$$

로 나타내어지며 식(1)~식(5)의 선형화된 방정식계는 다음의 하나의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\nabla^2 \eta) + \frac{N^2}{U^2} \nabla^2 \eta = 0 \quad (7)$$

여기서, $N^2 \left(\equiv -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\bar{\rho}}{dz} \right)$ 은 Brunt-Väisälä 진동수로서 상수로 두었으며 식(7)의 일반해는 다음과 같다.

$$\eta(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \hat{h}(k, l) e^{im(k, l)z} e^{i(kx + ly)} dk dl \quad (8)$$

여기서, m 과 \hat{h} 는 다음과 같다.

$$m = \frac{N}{U} \frac{(k^2 + l^2)^{1/2}}{k^2}$$

$$\hat{h} = \frac{1}{4\pi^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-i(kx + ly)} dx dy$$

3. 국지순환모형

본 연구에서 사용한 모형의 기초방정식과 격자계는 Kikuchi 등²⁾이 개발하여 Kimura와 Arakawa⁶⁾가 개선한 것으로 지형좌표계를 고려한 Boussinesq 정역학 방정식계를 채택하고 있다. Boussinesq 근사는 국지순환계의 연직규모가 2~3 km 보다 작은 규모에서 타당한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 또한 정역학 근사는 국지순환의 수평규모가 연직규모보다 대단히 큰 경우에 타당한 결과를 보여주는 것으로 중형의 지형에 대한 수평규모와 연직규모가 각각 약 10 km와 0.1 km인 점을 고려할 때, Boussinesq 정역학 근사는 타당하다고 볼 수 있다.

모형에 사용한 운동방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvw}{\partial y} + \frac{\partial hww^*}{\partial z^*} \\ = -h\Theta \frac{\partial \Pi'}{\partial x} + h \frac{Z_T}{Z_T - Z_G} \frac{\partial Z_G}{\partial x} \frac{\partial \Pi'}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial u}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_v \frac{\partial u}{\partial z^*}) \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hvu}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} + \frac{\partial hvw^*}{\partial z^*} \\ = -h\Theta \frac{\partial \Pi'}{\partial y} + h \frac{Z_T}{Z_T - Z_G} \frac{\partial Z_G}{\partial y} \frac{\partial \Pi'}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial v}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_v \frac{\partial v}{\partial z^*}) \quad (10) \end{aligned}$$

으로 나타낼 수 있으며 연속방정식은

$$\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial hww^*}{\partial z^*} = 0 \quad (11)$$

이고, 열역학 방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\theta'}{\partial t} + \frac{\partial h\theta' u}{\partial x} + \frac{\partial h\theta' v}{\partial y} + \frac{\partial h\theta' w^*}{\partial z^*} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial \theta'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial \theta'}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_v \frac{\partial \theta'}{\partial z^*}) \quad (12) \end{aligned}$$

으로 나타낼 수 있다. 정역학 근사는

$$\frac{\partial \Pi'}{\partial z^*} = \frac{h}{z_T} \frac{g\theta'}{\Theta^2} \quad (13)$$

로 표현할 수 있다. 여기서, $z^* = z_T \frac{z - z_G}{h}$, $h = z_T - z_G$ 로 정의되는데 z_T 와 z_G 는 모형 상면의 고도와 지형의 고도를 나타낸다.

4. 계산영역과 경계조건

국지순환모형의 타당성을 조사하기 위하여 중형의 형태를 가진 단순한 지형에 대한 선형이론의 해석해와 국지순환모형의 계산결과를 비교하였다. 비교를 위해 설정한 지형의 형태와 계산영역은 Table. 1과 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 수평방향으로는 격자간격 3 km로 하여 110격자점과 66격자점을 사용하였으며 연직방향으로는 40층으로 나누어 지표부근에서는 조밀한 간격으로, 상층으로 갈수록 넓어지도록 두었다.

국지순환모형의 지면경계조건은 미끄럼(free-slip) 경계조건을 사용하였으며 풍상, 풍하측의 경계조건은 Orlanski⁸⁾의 복사(radiation) 경계조건을 사용하였다. 이곳 경계에서 생성되는 계산오차를 억제하기 위해 수평확산계수는 경계로 갈수록 지수적으로 증가시켰다. 하지만 최대값은 모형 중앙부값의 10배를 초과하지는 않도록 하였는데, 이는 지나치게 큰 값은 다시 계산을 불안정하게 할 수 있기 때문이다. 그리고 나머지 측면경계에 대해서는 주기(periodic) 경계조건을 사용하였다. 상면경계조건으로는 상층으로 진행되는 내부중력파를 반사하지 않고 효과적으로 흡수할 수 있는 Klemp와 Durran⁹⁾의 복사조건을 사용하였다.

Table 1. The Simple Topography (bell type mountain)

$Z_G = \frac{h}{(1 + r^2/a^2)^{3/2}}$	
Height (h)	100 m
Half width (a)	10000 m (10 km)
r^2	$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$
x_0, y_0	Coordinates of the center of the mountain

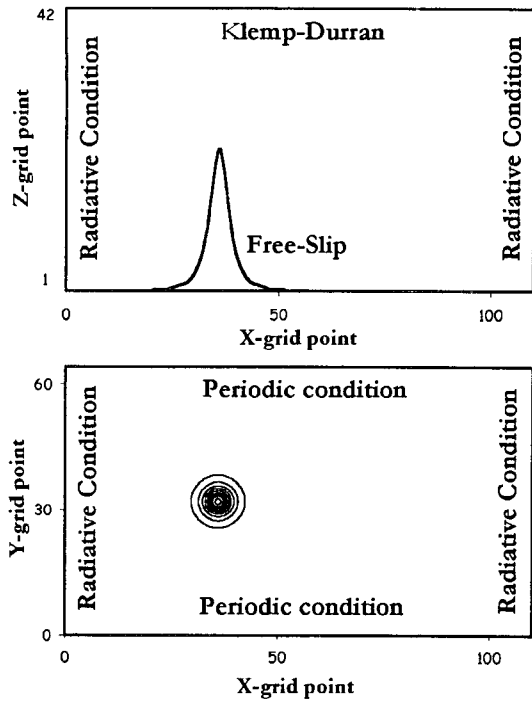


Fig. 1. Model Domain and Boundary Conditions.

5. 국지순환모형의 타당성 검토

국지순환모형의 타당성을 알아보기 위하여 모형의 왼쪽경계에서 바람이 10 m/s로 유입되고 있는 경우, 국지순환모형의 수치모의결과와 선형이론의 해석해의 결과를 비교하였다. Fig. 2는 각각의 y 방향의 중심 1km 상층에서의 연직속도성분을 나타낸 것이다. 산의 풍상측에서는 상승기류가 뚜렷하게 나타나고 산정상부근에서는 강한 하강기류가, 풍하측에서는 다시 강한 상승기류가 나타나는 모습을 나타내었는데 이러한 경향을 살펴보면 해석해와 국지순환모형의 결과가 좋은 일치를 보이고 있다. 또한 선형이론의 해석해와 국지순환모형의 값을 살펴보면, 산 정상에서 각각 -0.0755 m/s와 -0.0715 m/s의 값을 나타내어 값의 차이가 0.004 m/s로서 거의 차이가 나타나지 않고 있다. Fig. 3은 연직 1km 상층에서의 연직속도의 수평분포를 나타낸 것으로 (a)는 선형이론의 해석해이고 (b)는 국지순환모형의 수치모의 결과이다. 두 경우를 서로 비교해 보면, 산의 풍하측에 나타난 말굽모양의 분포형태와 크기가 두 모형에서 유사하게 잘 나타났다. Fig. 4는 두 경우의 1km 상층에서의 연직속도성분의 분포를 입체적으로 나타낸 것으로 Fig. 3에서의 수평분포에서는 보이지 않았던 국지순환모형의 비선형성에 의한 풍하측에서의 약간의 불일치를 제외하면 두 결과가 잘 일치하는 것을 알 수가 있다.

이상에서와 같이 국지순환모형의 수치모의 결과에 나타난 연직속도성분의 크기 및 수평분포의 결과와 선형이론에서 구한 해석해의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 특히, 수평속도성분의 약 1/10의 크기를 가지는 연직속도성분의 정확한 모사는 대기유동장을 수치모의 하는

데 있어서 본 연구에서 사용한 국지순환모형을 적용하는 것이 타당하다는 것을 제시하는 것이라고 볼 수 있다.

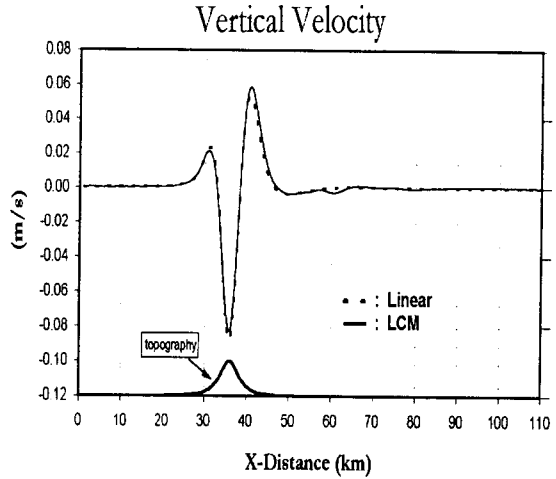


Fig. 2. Comparison of a result of the linear theory with numerical simulation.

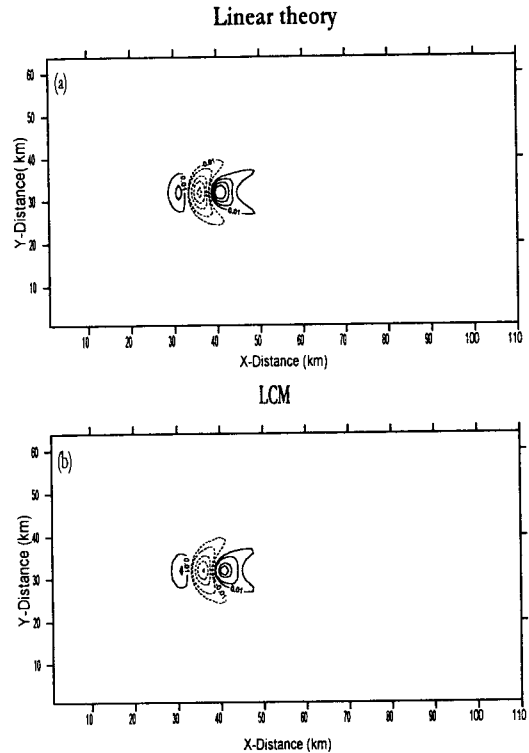


Fig. 3. Horizontal distribution of the vertical velocity at the level of 1 km given (a) the linear theory, (b) LCM.

6. 결 론

지형에 의해 형성되는 국지순환계와 연안지역에서 형

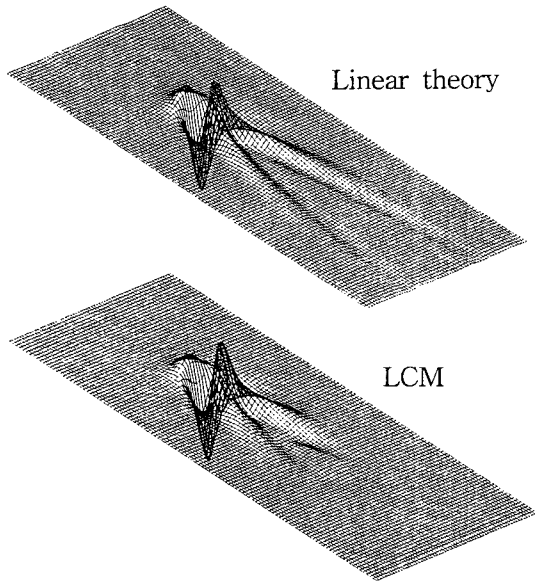


Fig. 4. Distribution of the vertical velocity at 1km from the linear theory and LCM.

성되는 해륙풍을 정확히 묘사하기 위한 대기유동장 모형이 무엇보다도 필요하다. 이에 본 연구에서는 앞으로의 연구에 적용할 국지순환모형의 타당성을 조사하기 위하여 단순한 중형의 지형에 대하여 선형이론의 해석해와 국지순환모형의 결과를 비교하여 보았다.

고도 1 km에서의 연직속도성분값을 비교한 결과, 산정상을 기준으로 풍상측 산사면의 상층에서는 상승기류가 나타났고 산정상부근의 상층에서는 강한 하강기류가 나타났으며 풍하측 산사면에서는 다시 강한 상승기류가 나타나는 모습을 나타내었는데 두 모형의 결과가 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 연직속도성분의 수평분포를 살펴본 결과, 풍하측방향으로 나타난 말굽모양의 분포형태가 두 모형에서 유사하게 잘 나타났다. 일반적으로 연직속도성분의 경우, 수평속도성분의 약 1/10 크기를 가지므로 이들 값이 잘 일치하는 것으로 보아 본 연구에서 사용하는 국지순환모형이 타당한 결과를 나타낼 수 있음을 보여주었다.

이상에서 이러한 접근을 통해 앞으로 여러 연구에서

복잡한 지형을 포함하고 있는 연안도시지역에서의 대기유동장 예측 모형의 타당성을 조사하여 모형의 신뢰성을 구축하는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 실제 지역에서의 대기유동장 수치모의의 결과값과 관측값과의 비교를 통해 결과값의 유의성을 살펴본다면 정확한 대기유동장이 필요한 대기오염물질의 수송과 확산을 예측하는데 많은 기여를 할 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Kawamura, T., 1979, Toshi no Taiki-kankyo (Atmospheric Environment in Urban), Todai Shuppan-kai, 185.
- 2) Kikuchi, T., S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki and T. Nagano, 1981, Numerical study on the effects of mountains on the land and sea breeze circulation in the Kanto district, J. Meteor. Soc. Japan, 59, 723~737.
- 3) Wurtele, M., 1957, The three-dimensional lee wave, Beitr. Phys. Frei. Atmos., 29, 242~252.
- 4) Smith, R. B., 1980, Linear theory of stratified hydrostatic flow past an isolated mountain, Tellus, 32, 348~364.
- 5) Phillips, D. S., 1984, Analytical surface pressure and drag for linear hydrostatic flow over three-dimensional elliptical mountains, J. Atmos. Sci., 41, 1073~1084.
- 6) Kimura, F. and S. Arakawa, 1983, A numerical experiment of the nocturnal low level jet over the Kanto Plain, J. Meteor. Soc. Japan, 61, 848~861.
- 7) Ogura, T. and N. A. Phillips, 1962, Scale analysis of deep and shallow convection in the atmosphere, J. Atmos. Sci., 19, 173~179.
- 8) Orlandi, I., 1976, A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, J. Comp. Phys., 21, 2513~269.
- 9) Klemp, J. B. and D. R. Durran, 1983, An Upper Boundary Condition Permitting Internal Gravity Wave Radiation in Numerical Mesoscale Models, Mon. Wea. Rev., 111, 430~444.