

광양만권의 유동장 및 대기오염농도예측

정 용 현
부경대학교 환경공학과
(2000년 7월 1일 접수)

Numerical Simulation of Flow Field and Air Pollutants Concentration in Kwangyang Bay

Yong-Hyun Chung

Dept. of Env. Eng., Pukyong National Univ., Pusan, Korea
(Manuscript received 1 July, 2000)

Numerical simulation model using nesting method and considering topographic features was developed to predict atmospheric environments, atmospheric flow, temperature and diffusion of air pollutants in Kwangyang bay where having complex areas of point sources, Korea.

In addition, developed simulation model was used tracing of spreading range of pollutants when a gas leaks suddenly from Yeo-cheon industrial complex.

By comparing the measured and calculated data on atmospheric flow, temperature and diffusion of air pollutants, the results showed that this model can be well applied and complicated topography affected the diffusion of air pollutants.

Key Words : Numerical Simulation, Nesting Method, Air pollutants, Atmospheric flow, Kwangyang Bay

1. 서 론

60년대 말에 석유화학공업지역으로 조성된 여천공업 단지는 지리·지형적인 조건과 기상조건 등에 대한 정보분석의 결함과 공장규모의 확장 및 신·증설 등으로 인한 대기환경의 변화와 특히 산업체의 다변화와 복합성에 의한 복합 대기오염현상인 광화학 스모그, 악취문제, 유해가스에 의한 농작물의 피해, 지역주민의 건강 및 생활 환경에 미치는 영향으로 이 지역의 사회적인 문제로 크게 부각되고 있다.

또한, 여천공단은 석유화학 공장들이 밀집되어 있어서 누출사고에 대한 위험이 매우 높은 지역과 함께 복잡한 지형적인 영향으로 국지 순환풍인 해륙풍이 발달된 지역이다. 이 지역의 해륙풍은 대기오염 현상과 밀접한 관계가 있으며, 이 지역의 대기 오염을 해결하기 위해서는 해륙풍의 시간적·공간적인 메카니즘이 반드시 규명되어야 한다.

해륙풍의 연구는 Pielke¹⁾에 의해서 플로리다주를 위한 평야지대로 가정하여 수치계산 하였으며, Kiuchi 등²⁾은 지형을 고려한 일본 관동평야에서 수치계산 하였다. 또한, 이상득 등³⁾은 도시 규모의 대기 오염을 예측 하였으며, 지형을 고려한 국지 순환풍인 해륙풍을 비교적 정확하게 재현할 수 있는 해륙풍 모델에 관한 연구

⁴⁾는 다소 보고되고 있으나, 복잡한 지형과 발생원이 밀집된 지역을 대상으로 계산한 예는 극히 드물다. 특히, 오염물질 누출 사고시 지형을 고려한 시간적·공간적인 확산범위를 추적한 예는 없다.

따라서, 본 연구는 해륙풍이 발달한 지역인 광양만권을 대상으로 이 지역의 해륙풍을 나타낼 수 있는 모델을 개발하여 적용하고, 여천공단에서 가스누출에 사고에 의한 시간적·공간적인 확산범위를 추적하였다.

2. 광양만권의 유동장 계산

2.1. 기초 방정식

본 연구에 사용한 기초 방정식은 운동량 보존식, 온도 방정식, 수분 보존식, 연속 방정식 및 정수역학 방정식으로 구성되어 있으며, 좌표계는 z^* 좌표를 이용하였다.

(1) 운동량 보존식

$$\frac{DU}{Dt} = f_c V - C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - s}{s} \frac{\partial z_x}{\partial x} + D(U) \quad (1)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -f_c U - C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{z^* - s}{s} \frac{\partial z_y}{\partial y} + D(V) \quad (2)$$

(2) 온도 방정식

$$\frac{D\theta}{Dt} = D(\theta) \quad (3)$$

(3) 비습방정식

$$\frac{DQ_v}{Dt} = D(Q)$$

(4) 연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z^*} - \frac{1}{s-z_g} \left(U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0$$

(5) 정수역학방정식

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = -\frac{1}{G_1} \frac{g}{C_p \theta}$$

여기에서,

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R_d/C_p}$$

$$\theta = T\Pi$$

$$f_c = 2\Omega \sin \phi$$

$$W \equiv \frac{\bar{s}}{s-z_g} W + \frac{z^* - \bar{s}}{s-z_g} \left(U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right)$$

$$\begin{aligned} D(X) = & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\ & + G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial}{\partial y} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\ & + G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial}{\partial y} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{1}{G_1} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \end{aligned}$$

$$X = U, V, \theta, Q$$

$$\frac{1}{G_1} = \frac{s}{s-s_g}$$

$$G_2 = \frac{z^* - \bar{s}}{s-z_g} \frac{\partial z_g}{\partial x}$$

$$G_3 = \frac{z^* - \bar{s}}{s-z_g} \frac{\partial z_g}{\partial y}$$

또한, x, y, z 는 z^* 좌표계, u, v, w 는 x, y, z 방향의 속도성분, w^* 는 z^* 좌표계에 대한 연직 방향의 속도성분, t 는 시간, θ 는 온위, Q_v 는 비습, T 는 대기온도, R_d 는 건조공기의 가스상수, C_p 는 정압 비열, P 는 압력, P_0 는 표준압력, \bar{s} 는 Coliorils 매개변수, Ω 는 지구의 회전각속도, ϕ 는 위도, g 는 중력가속도, K_H 는 수평방향의 확산계수를 각각 나타낸다.

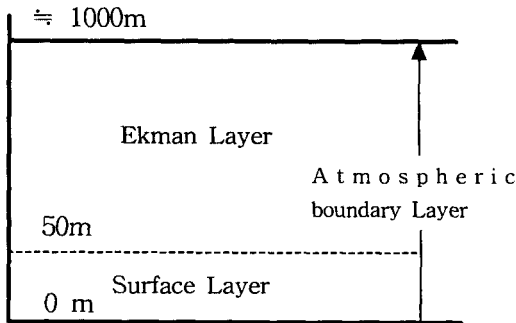


Fig. 1. Atmospheric boundary layer.

2.2. 연직 확산계수

본 연구에 사용한 연직 방향의 확산계수는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 대기 경계층을 접지층과 Ekman 층으로 분리하여 서로 다른 모델을 사용하였다. 접지층에 대해서는 Businger⁶⁾의 보편함수(Universal Function), Ekman 층에 대해서는 Yamada⁷⁾의 Level 2의 난류 Closure 모델을 사용하였다.

2.3. 계산영역

계산영역은 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 넓은 영역(수평방향 91 × 91 Mesh, Mesh 간격 1 km)과 작은 영역(수평방향 61 × 61 Mesh, Mesh 간격 0.5 km)으로 구성되었다. 넓은 영역은 동경 127° ~ 128°, 북위 34° 30' ~ 35° 15'이며, 작은 영역은 동경 127° 35' ~ 128° 53', 북위 34° 43' ~ 35° 59'이다. 연직 방향의 간격은 지표면에 가까울수록 간격이 좁은 15 Mesh의 불균등 Mesh를 이용하였다. 토지 이용율은 환경부 위성자료를 참조하여, 삼림, 수역(하천, 해양), 농경지, 도시, 기타 지역의 5 종류를 고려하였다.

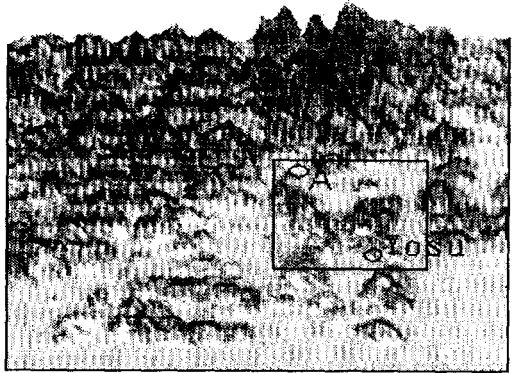


Fig. 2. The range of calculation.

또한, 계산 대상 일은 해륙풍이 발달하기 쉬운 8월의 일의 날로 설정하여 2일간을 계산하여 2일째의 값을 사용하였다.

2.4. Nesting 방법

광양만과 같이 작은 영역을 1일의 시간 Scale로 계산할 경우에는 경계조건의 설정이 문제가 된다. 비교적 긴 시간의 계산에는 계산영역의 유입 측에서 풍속, 온위 등에 관측값을 부여하며, 유출에는 선형의삽 또는 경계값이 0인 방법을 사용하고 있다.

그러나, 해안선 부근과 같이 해륙풍이 발달한 지역의 국지순환풍을 계산할 경우에는 유입과 유출이 경계에서 변화되므로 경계값의 설정이 매우 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 Meso Scale 모델인 전남지방과 경남지방의 일부를 계산(CMG)하는 모델과 광양만을 계산하는 모델(FMG)로 구분하여, CMG의 계산값을 FMG의 경계값으로 Nesting 방법⁸⁾을 이용하였다.

Nesting 방법은 아래 식과 같다.

$$\theta = E_- \phi_- + E_0 \phi_0 + E_+ \phi_+ \quad (15)$$

여기에서,

$$E_- = \epsilon(\epsilon - 1)/2 + \alpha \quad (16)$$

$$E_0 = (1 - \epsilon^2) - 2\alpha \quad (17)$$

$$E_+ = \epsilon(\epsilon + 1)/2 + \alpha \quad (18)$$

$$\alpha = [(\Delta l / \Delta L)^2 - 1]/24 \quad (19)$$

ϵ 는 -1 과 1 사이를 변화하는 표준화된 거리이며, $\epsilon = -1, 0, 1$ 은 CMG의 ϕ_- , ϕ_0 , ϕ_+ 의 격자에 대응하는 FMG의 격자 장소를 나타낸다. Fig. 3에 CMG와 FMG의 격자 위치와 그 관계를 나타내고 있다.

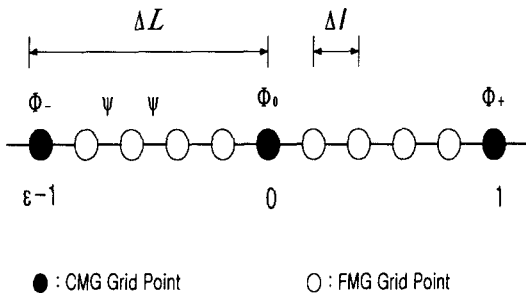


Fig. 3. The relationships of ϕ , ψ and ϵ .

2.5. 계산결과

Fig. 4와 Fig. 5는 넓은 영역(CMG)의 높이 20m에서 15시와 03시의 벡터를 나타낸 것이다. 03시의 계산결과 는 광양만과 순천만 및 고흥반도를 중심으로 육풍이 발달하고 있으나, 풍속은 1~2m/s 정도이다. 내륙지방보다 육해안 부근의 육풍이 발달함을 알 수 있다. 15시 경우에는 광양만의 북쪽에 지리산이 존재하므로, 지리산을 향해 해풍이 발달하고 있다. 또한, 광양만과 순천만 및 고흥반도를 중심으로 해안선 부근에서 해풍이 매우 발달하고 있다.

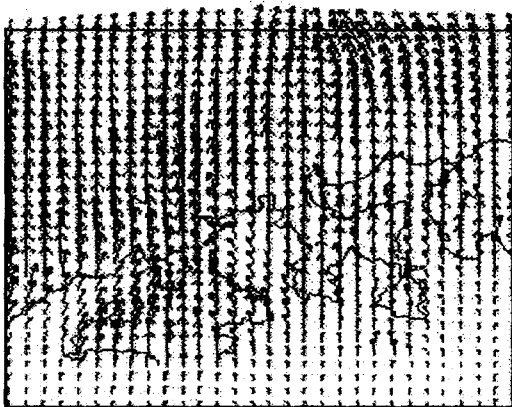


Fig. 4. Wind fields on 15:00(CMG).

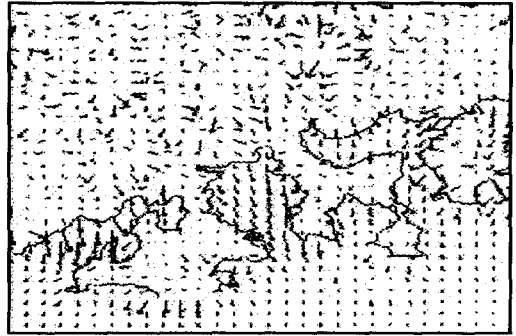


Fig. 5. Wind fields on 03:00(CMG).

Fig. 6과 Fig. 7은 CMG의 계산결과를 작은 영역(FMG)의 측면 경계조건으로 하여 계산한 FMG를 계산한 결과를 15시와 03시의 벡터를 나타낸 것이다. 15시에는 남해안인 넓은 영역의 영향을 받아 남쪽에서 광양만 및 광양시를 향해 일정한 방향으로 바람이 불고 있으며, 풍속은 3~4m/s로 불고 있다. 또한, 03시의 경우에는 남해도와 광양시 및 여수반도를 중심으로 광양만을 향해 육풍이 발달하고 있으나, 여수시 부근에서는 육풍이 거의 발달하지 않고 있다. 이것은 여수시 및 여천공단의 주변은 인공열 및 공단에서 배출되는 폐열의 영향으로 말미암아 육풍이 발달하지 못하며, 풍속도 1~2m/s로 비교적 약하게 불고 있다.

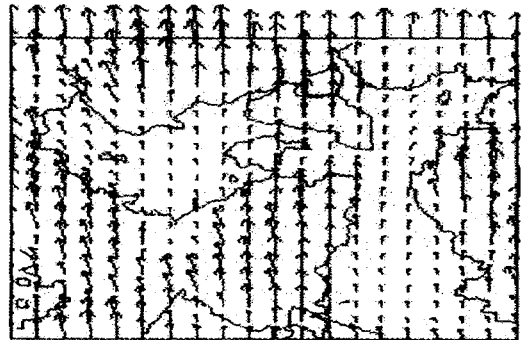


Fig. 6. Wind fields on 15:00(FMG)

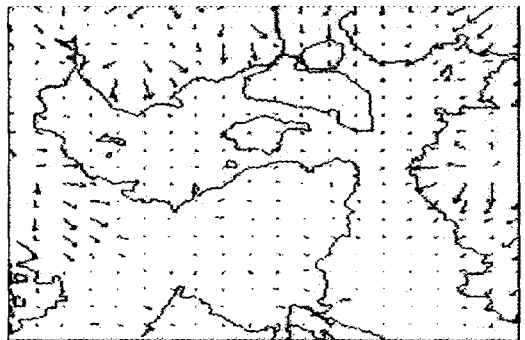


Fig. 7. Wind fields on 03:00(FMG)

2.6. 계산결과와 관측값의 비교

개발한 모델을 광양만권에 적용할 때에 대상지역의 기상장의 재현성을 알아 보기 위하여 여수 기상대에서 관측한 풍속 및 온도를 계산결과와 비교, 검토하였다. 관측한 데이터는 1997년부터 1999년까지 3년간의 자료 중에서 광양만권의 해륙풍이 발달한 6월부터 9월까지의 자료를 아래와 같은 조건으로 선별하였다. 첫째는 강수가 없는 날, 1시간 평균 최고 풍속이 5m/s 이하 날, 1시간 평균 최고 기온이 27℃ 이상인 날의 3가지 조건을 만족한 날의 시간별 자료를 선별하여, 평균한 자료를 계산결과와 비교하였다.

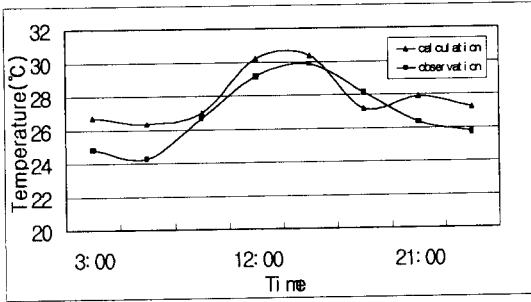


Fig. 8. Comparison between observed temperature and calculated results

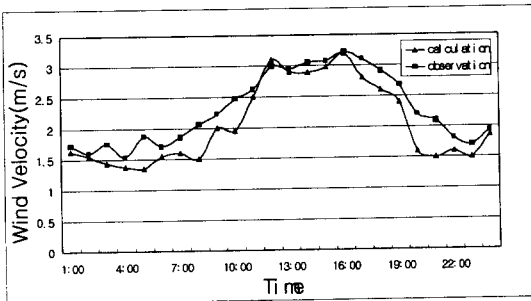


Fig. 9. Comparison between observed wind velocity and calculated results.

Fig. 8은 온도, Fig. 9는 풍속을 각각 비교한 것이다. 온도는 새벽과 오전 중에는 관측한값보다 계산값이 약간 높은 경향을 나타내고 있으나, 전반적으로 계산값과 관측값이 일치하고 있다. 또한, 풍속인 경우에도 계산값이 관측값보다 약간 낮은 값을 나타내고 있으나, 일주기의 패턴은 거의 일치하고 있다. 따라서, 개발한 기상장 모델을 광양만권에 적용한 결과, 광양만권의 대기 흐름을 비교적 잘 표현하였다. 이 모델을 이용하여 광양만권의 대규모 개발에 따른 기상장의 시간별, 공간적인 변화를 예측할 수 있다.

3. 광양만권의 농도 확산 계산

농도 확산은 여천공단의 가스 누출사고에 따른 확산 범위를 추적하기 위하여 광양만권의 실제의 지형을 고

려한 경우와 지형이 없는 평평한 상태를 가상하여 계산하였다. 대상 대기오염물질은 광화학반응이 거의 없는 황산화물을 대상으로 하였다.

3.1. 기초식

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} + \left(\frac{s}{s-z_g}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v^{(c)} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q_i \quad (20)$$

여기에서, c 는 오염물질의 농도, u, v, w 는 x, y, z 의 풍속, s 는 높이, z_g 는 표고, $K_v^{(c)}$ 는 연직확산계수, Q_i 는 Point Source항을 각각 나타낸 것이다.

3.2. 계산조건

작은영역(FMG)을 대상으로 높이 56m의 지점으로부터 연속적으로 배출량 1이 배출된다는 가정하에서 농도를 계산하였다.

3.3. 계산결과

Fig. 10과 Fig. 11은 광양만권의 실제의 지형을 고려하지 않은 평평한 상태에서의 15시와 03시의 계산결과를 각각 나타낸 것이다. 또한, Fig. 12와 Fig. 13은 실제의 지형을 고려한 15시와 03시의 계산결과를 각각 나타낸 것이다. 그림 중의 흰점은 여천공단의 발생원, 검은색 점은 여수시를 나타내었다.

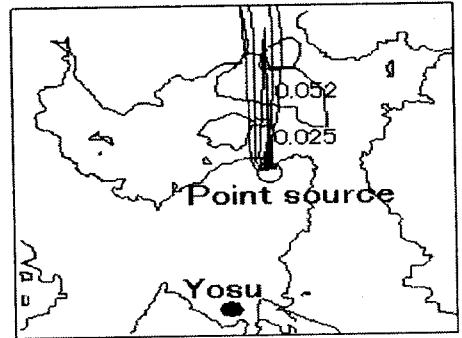


Fig. 10. Simulated results not considering geographical features(at 15:00)

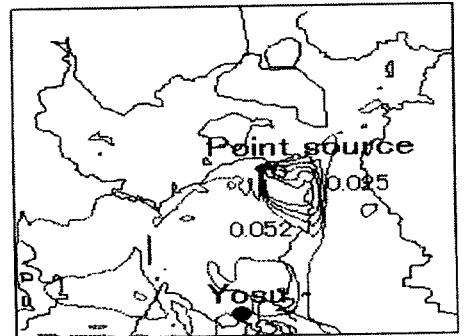


Fig. 11. Simulated results not considering geographical features(at 03:00).

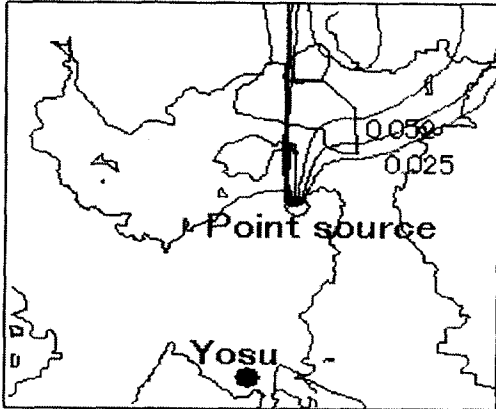


Fig. 12. Simulated results considering geographical features(at 15:00).

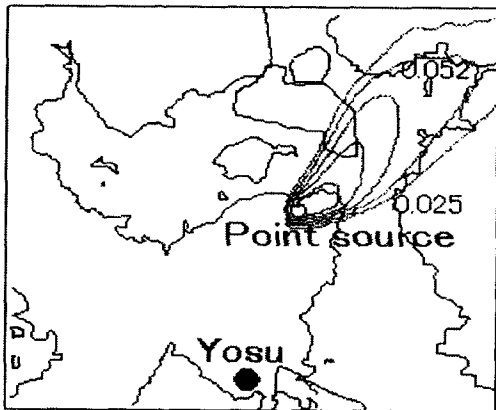


Fig. 13. Simulated results considering geographical features(at 03:00).

15시의 계산결과는 CMG의 영향으로 남해안(남쪽)에서 광양시를 향해 바람이 불고 있는 관계로 광양만 방향으로 대기오염이 수송되고 있으며, 03시의 계산에는 발생원 남쪽에 비교적 높은 영취산(510m)이 동서 방향으로 길게 자리잡고 있기 때문에 대기확산이 확산되지 않고 정체되고있는 것을 알 수 있다. 또한, 지형이 없는 경우의 계산에는 농도 확산이 비교적 원만하게 진행되고 있다. 따라서, 광양만권의 가스 누출에 의한 대기오염의 확산은 복잡한 지형에 의해 형성된 기상장의 영향

을 받고 있는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

광양만권의 대기환경을 예측하기 위하여 지형 및 Nesting 방법을 도입한 기상장 모델을 개발하였다. 개발한 모델은 해륙풍이 발달한 광양만권의 풍속과 온도의 기상장을 재현하였다. 또한, 개발한 모델을 사용하여 여천공단의 가스누출에 사고에 의한 시간적·공간적인 확산범위를 추적하였다. 계산한 결과는 광양만권의 가스누출에 의한 대기오염의 확산은 복잡한 지형에 의해 형성된 기상장의 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Pielke, R. A., 1974, A Three-dimensional numerical model of the sea breeze over south florida, Mon. Wea. Rev., 102, 115~139.
- 2) Kikuchi, Y., S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki, and Y. Nagano, 1981, Numerical Study on the effects of mountains in the land and sea breeze circulation in the Kanto district, J. Meteorol. Soc. Japan, 59, 723~737.
- 3) 이상득, 정일현, 1997, 도시규모의 대기오염 농도예측, 한국대기환경학회지, 13(2), 137~145.
- 4) Kondo A., K. Yamaguchi, E. Nishikawa, T. Hara, and R. Okazaki, 1999, Influence of Ship Emission on Atmospheric Pollutants Concentration around Osaka Bay Area, J. Kansai Soc. N. A., Japan, No.231, 101-109.
- 5) 이화운, 김유근, 장은숙, 1996, 중규모 국지순환에서 이산화황의 농도예측에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(3), 277~284.
- 6) Businger, J. A. et al., 1971, Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181~189.
- 7) Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysics fluid problems, Reviews of geophysics and physics, 20, 851~875.
- 8) Clark, T. L. and R. D. Farley, 1984, Severe downslope windstorm calculation in two and three spatial dimensions using unelastic interactive grid nesting, A possible mechanism for gasteress, J. Atmos. Sci., 41, 329~350.