

Filtering 효과를 고려한 중규모 지역기상의 수치해석

이성대* · 양윤모** · 김성득*

〈요약〉

해안선 근방의 해륙풍장을 해석하기 위한 3차원 중규모 지역기상 수치모델을 이용하여 시간 및 계절의 변화에 따른 흐름장의 변동을 해석하였다. 본모델에서는 지표는 온도를 sine함수에 따라 변화한다고 가정하고 측방향 경계와 수평방향 확산계수대신에 Filter를 사용하였다.

접지층에서의 연직방향 확산계수는 Businger의 모델을 그리고 Eckman층에서는 Mellor와 Yamada의 난류모델을 사용하여 계산하였다. 그 결과 해륙풍장의 특성을 해석하는데 있어서 본 모델은 매우 효과적임을 알 수 있었다.

A Numerical Analysis of the Meso-Scale Air-Flow Using the Filtering Effects

이성대* · 양윤모** · 김성득*

〈Abstract〉

Numerical experiments have been employed to simulate the land and sea breezes over the coastal region in a three dimensional mesoscale model.

Spacial attention is paid to effect of diurnal and seasonal variations and of filtering in horizontal diffusivity and lateral boundary condition which allows lateral propagation of wind disturbance out of the model. In this model, the surface temperature of the land was determined through the surface heat budget consideration with the sine function approximation.

* 울산대학교 토목공학과

** 삼화기술단(주)

The vertical diffusion coefficients of the momentum, heat and specific humidity in surface layer are given by Businger and above surface layer are obtained by level 2 model of the turbulence closure proposed by Mellor and Yamada.

The model is proved to be effective in simulating the structure of the land and sea breezes with various characteristics.

I. 서론

1960년대 경제개발계획이 시행된 이후 30여년 동안 우리나라의 산업은 급속히 발전하였으며 그 양적인 측면 뿐만아니라 질적인 면에서도 괄목할 만하게 성장하여 왔다. 지금까지 우리나라는 산업의 발전만을 중시하여 환경보전에 대한 예측과 대책에는 등한시하여 온 것도 사실이다. 하지만 최근에는 환경문제에 대한 관심이 점차 높아져 가고 있으며 이를 무시할 수 없는 단계에 까지 이를 만큼 큰 문제로 대두되었다. 환경문제라는 것은 인간의 건강 및 인간의 생존자체를 감당하고, 자연생태계의 보전을 위한 환경에 악영향을 주는 상황에 관한 문제라고 정의되어지고 있다.¹⁾ 그리고 이 환경문제의 대책으로서 현재까지 문제가 되고 있는 환경악화에 대해 그 영향을 사전에 예측하고 환경악화를 미연에 방지하기 위한 환경영향평가제도가 행해져 오고 있다.

우리나라의 대기오염의 특색은 대기오염원이 임해지역에 집중되어 이들 오염원으로부터 대량의 오염물질이 배출되고 있으며 이들 지역상에서의 오염물질의 거동을 파악하는 것은 환경영향평가를 행하는데 대단히 중요하다. 이를 위해 해안선 근방의 고유의 국지풍 순환인 해륙풍의 기구를 이해하고 그 풍계를 파악하는 것은 매우 중요하다 하겠다. 해륙풍은 바다와 육지사이의 열적성질의 차에 의한 양자사이의 압력차에 의해 발생한다. 낮에는 육지가 바다보다 고온이 되므로 육상의 압력이 해상의 압력보다 낮

게되어 바다로부터 육지로 부는 해풍이 불고, 야간에는 역으로 육풍이 분다. 또 하나의 특색으로서 우리나라는 평야부가 좁고 그 배후지에 산이 존재하는 특수한 지형이 많아서 우리나라의 해륙풍계는 동시에 산곡풍계의 영향을 받는다. 이때문에 해륙풍계의 입체구조자체는 매우복잡하며 이의 이해 또한 매우 어렵다 하겠다.

이같은 해륙풍이나 중규모(Mesoscale) 국지풍계의 해석은 대상이 되는 영역내부의 현상을 나타내는 기본방정식과 적절한 초기조건 및 경계조건을 이용하여 모델화 할 수 있으며, 이에 관해서는 Estoque and Bhumralkar²⁾ 등의 연구가 있다. 이들은 2차원 대상영역을 두개의 층으로 나누어 지표면에 가까운 접지층에서는 constant flux라 가정하여 해석적으로 풍속과 온위의 연직분포를 구하여 기본방정식을 수치적분 하였으며 접지층내의 연직방향 확산계수 K_v 는 접지층내에서의 온도차와 풍속차로서 결정되는 Richardson수 R_i 의 함수로 나타내었다. 그리고 전체영역의 연직방향 확산계수는 접지층에서의 K_v 는 상단에서의 $K_v=0$ 으로 가정하여 높이에 따라 선형적으로 감소한다고 하여 계산하였다. 이 방법은 Sheih³⁾, Kozo⁴⁾등에 의해 연구되어 적용되었으며 특히 Kozo는 열과 운동량의 확산계수를 Businger의 보편함수의 식⁵⁾을 이용하여 해석하였다. 또한 수평확산계수에 관해서는 연직방향 확산계수에 비해 그다지 연구가 이루어져 있지 않으며 단지 계산의 안정을 위해 일정치($10^3 \sim 2 \times 10^4$)를 주는 방법을 주로 사용하고 있다. 하지만 Kozo⁴⁾

등은 수평방향 확산계수를 무시하고 이에 의해 발생하는 계산의 불안정을 배제하기 위해 Filtering을 이용하여 해석하였으나 이들은 2차원 영역에 적용하여 계산하였다. 또한 현실에 가까운 해륙풍의 Model을 위해 일반풍과의 상호작용⁶⁾, 산악의 영향에 관한 연구⁷⁾도 행해지고 있으며 3차원으로 확장한 연구⁸⁾도 이루어지고 있다.

이상과 같이 대기오염원이 해안선 근방에 집중해 있는 곳에서의 여러가지 조건에 따른 해륙풍의 모델을 이해하고 구축하는 것은 대기오염의 특성을 이해하고 예측하는데 매우 중요하다.

본 연구에서는 지표의 온도를 sin함수에 따라 변화한다고 가정하고 측방향경계에 방사조건(radiation condition)으로 알려진 Filtering의 영향을 그리고 수평방향 확산계수에 Filter를 사용하여 내부계수의 변화에 따른 흐름장의 변화를 예측하였다. 그리고 계절에 따른 계절풍의 해석을 행하여 그 영향을 예측하기 위한 지역기상의 수치계산

을 행하였다.

2. 지역기상모델의 정식화

지표면 열수지의 지역적인 차이와 지표의 형태에 의해 그 지역의 기상형태가 변화한다. 본 연구에서 사용하는 기본수치모델⁹⁾은 중규모(Mesoscale)국지풍계 중에서도 특히 대륙풍의 예측을 위한 것이며 계산결과에 중요한 요소가 되는 연직방향확산계수를 대기의 상태에 의해 구하도록 하였으며 지표면 온도를 결정하기 위한 열수지 모델은 sin함수 근사를 통해 계산하도록 하였다.

2.1 기본 방정식

3차원 지역기상을 지배하는 대기운동의 기본방정식은 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존법칙에 기초하는 운동방정식, 溫位방정식, 비습방정식, 연속방정식 및 정역학 평형식이며 이들은 각각 다음과 같다.

$$\frac{du}{dt} = fv - C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v^m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fv - C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v^m \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v^{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dq_v}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v^q \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = - \frac{g}{C_p \theta} \quad (6)$$

여기서, $\Pi = \left(\frac{P}{P_{00}} \right)^{R/C_p}$, $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z}$ 이고 x, y, z 는 직교좌표계의 동서, 남

부, 연직방향, u, v, w 는 x, y, z 방향의 속도 성분, t 는 시간, θ 는 온위, q_v 는 비습, f 는 Coriolis parameter, C_p 는 정압비열 ($=1005\text{J/KgK}=239.05\text{Cal/KgK}$), g 는 중력가속도, P 는 압력, P_{00} 는 기준압력 ($=1000\text{mb}$), K_H 는 수평방향 확산계수, K_v^m, K_v^0, K_v^q 는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향 확산계수를 나타낸다.

그리고 지중에서의 온도 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (7)$$

여기서, T_s 는 지중의 온도, K_s 는 흙에서의 열확산계수를 의미한다.

2.2 연직방향 확산계수

지구표면의 영향을 받는, 지표로부터 높

이 1-2Km까지의 대기층을 대기경계층 (Planetary Boundary Layer)이라 하며, 열적·역학적 원인에 의한 난류가 강한 것이 특징이다. 대기경계층 중에서도 표면에서 수십미터까지의 기층은 특히 지표면의 영향이 강하게 작용하여 접지층(Surface Layer)이라고 한다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 대기경계층 중에서 지상에서 50m까지를 접지층, 그 윗부분을 Eckman층이라 하여 각각 다른 모델을 적용하였다. 난류의 영향에 대해서는 여러가지 이론이 제안되고 있으나 여기서는 Yamada에 의한 난류 Closure Model¹¹⁾에 의해 Eckman층에서의 난류확산계수를 나타내었다. 또 접지층내에서의 수송저항¹⁰⁾은 Monin-Obukov의 상사이론에 따른 Businger et al⁵⁾의 무차원 풍속, 온위분포의 식을 이용하여 운동량과 열 Flux 및 연직방향 확산계수를 나타내었다.

Eckman층 - Eckman층에서의 연직방향 확산계수는 Yamada 모델에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q^2 = B_1 l^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] (1 - R_{if}) S_M \quad (8)$$

$$\overline{W}^2 = \left[\frac{1}{3} - 2 \frac{A_1}{B_1} - 6 \frac{A_1}{B_1} \left(1 - \frac{2}{3} C_1 \right) \left(\frac{R_{if}}{1 - R_{if}} \right) \right] q^2 \quad (9)$$

$$-\overline{U'W'} = l_q S_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (10)$$

$$-\overline{W'\theta'} = l_q S_M \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (11)$$

$$-\overline{U'\theta'} = -3A_2 l^2 (S_M + S_H) \frac{\partial \theta}{\partial z} \cdot \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (12)$$

$$\overline{\theta'^2} = B_2 l^2 S_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)^2 \quad (13)$$

여기서 u', w', θ' 는 각각 u, w, θ 의 변동량이고, S_M 및 S_H 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_M = C_M \frac{(R_{ifc} - R_{if})(R_{f1} R_{if})}{(1 - R_{if})(R_{f2} - R_{if})} \quad (14)$$

$$S_H = C_H \frac{R_{ifc} - R_{if}}{1 - R_{if}} \quad (15)$$

여기서 R_{ifc} , R_{f1} , R_{f2} , C_M , C_H 는 실험정수 A_1 , B_1 , A_2 , B_2 로 부터 구해지는 상수이다. 그리고 R_{if} , R_{ifc} 는 각각 Flux Richardson 수, 임계 Flux Richardson 수이고, q^2 은 속도변동의 에너지, l 은 난류의 길이 스케일이다.

(10), (11)식에서부터 난류확산계수는 다음과 같이 된다.

$$K_v^m = l_q S_M \quad (16)$$

$$K_v^q = K_v^\theta = l_q S_H \quad (17)$$

여기서 $l = \kappa Z / (1 + \kappa Z / l_0)$, $l_0 = 0.1 \int_0^\infty z q dz / \int_0^\infty q dz$

$R_{if} = \alpha R_{ig}$ 그리고

$$R_{ig} = \frac{g \frac{\partial \theta}{\partial Z}}{\bar{\theta} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Z} \right)^2 \right]} \quad (18)$$

여기서, α 는 확산계수의 비이며 정의로부터,

$$R_{if} = \frac{K_v^\theta}{K_v^m} \quad R_{ig} = \frac{C_H R_{f2} - R_{if}}{C_M R_{f1} - R_{if}} R_{ig} \quad (19)$$

가 되고, R_{ig} 는 gradient Richardson 수, $\bar{\theta}$ 는 접비층에서의 평균온위, κ 는 Kalman 상수, K_v^m, K_v^θ, K_v^q 는 각각 운동량, 열 및 비습의 확산계수이다.

접지층 - Monin-Obukov의 상사법칙¹⁰⁾을 풍속 및 기온의 평균치의 연직분포에 적

용하여 운동량과 열 Flux 및 연직방향 확산계수를 구한다. 수평방향에 따라 일정하다고 하는 전제조건에서 평균풍속 및 기온의 연직경사는 보편함수(universal function)로 나타낼 수 있다. 이 함수를 이용하여 운동량과 열의 연직방향 확산계수를 나타내면 다음과 같이 된다.

$$K_v^m = \frac{\kappa U^* Z}{\phi_m} = \frac{U^{*2}}{\partial \theta / \partial Z} \quad (20)$$

$$K_v^q = K_v^\theta = \frac{\kappa U^* Z}{\phi_h} = \frac{U^* \theta^*}{\partial \theta / \partial Z} \quad (21)$$

여기서 U^* 및 θ^* 는 각각 마찰속도 및 마찰온위를 나타낸다. 보편함수 ϕ_m , ϕ_h 는 여러가지 실험식이 제안되고 있으나, 여기서는 Businger et al⁵⁾의 식을 사용하였다.

$$\phi_m = \begin{cases} 1.14(1 - 13.1\zeta)^{-1/4} & \zeta \leq 0 \text{ 불안정층} \\ 1.14(1 + 4.1\zeta) & \zeta > 0 \text{ 안정층} \end{cases} \quad (22)$$

$$\phi_h = \begin{cases} 0.84(1 - 7.9\zeta)^{-1/2} & \zeta \leq 0 \text{ 불안정층} \\ 1.14(0.74 + 4.1\zeta) & \zeta > 0 \text{ 안정층} \end{cases} \quad (23)$$

여기서 $\zeta = Z/L$ 그리고 L 은 Monin-Obukov의 길이이다. 또한 u^* , θ^* , q_v^* 는 각각 다음과 같다.

$$u^* = \kappa u / [\Psi_m(z/L) - \Psi_m(z_0/L)] \quad (24)$$

$$\theta^* = \kappa(\theta(z) - \theta_0) / [\Psi_\theta(z/L) - \Psi_\theta(z_0/L) + 0.0962(u^* z_0/\nu)^{0.45}] \quad (25)$$

$$q_v^* = \kappa(q_v(z) - q_{v0}) / [\Psi_{q_v}(z/L) - \Psi_{q_v}(z_0/L) + 0.0962(u^* z_0/\nu)^{0.45}] \quad (26)$$

여기서 z_0 는 지표면 조도, θ_0 는 지표면에서의 온위, ν 는 공기의 동점성계수이다.

그리고 무차원 Profile Ψ_m , Ψ_h 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \Psi_m(z/L) - \Psi_m(z_0/L) & (27) \\ & = 1.14 \{ \ln(z/z_0) + [-2\ln(1+x) - \ln(1+x^2) + 2\tan^{-1}(x)]_{x_0}^x \}; \zeta < 0 \\ & = 1.14 \{ \ln(z/z_0) + 4.1 [\zeta] \} & ; \zeta > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Psi_h(z/L) - \Psi_h(z_0/L) & (28) \\ & = 0.84 \{ \ln(z/z_0) - 2[\ln(1+Y)] \} & ; \zeta < 0 \\ & = 1.14 \{ 0.74 \ln(z/z_0) + 4.1 [\zeta] \} & ; \zeta > 0 \end{aligned}$$

여기서 $\zeta_0 = z_0/L$, $X = (1-13.1\zeta)^{1/4}$, $X_0 = (1-13.1\zeta_0)^{1/4}$, $Y = (1-7.9\zeta)^{1/2}$, $Y_0 = (1-7.9\zeta_0)^{1/2}$ 이다.

2.3 수평방향 확산계수

해륙풍 등과 같은 중규모(Mesoscale) 대기운동의 계산에서는 수평방향 확산계수는 대기의 상태에 의해 결정되는 연직방향 확산계수와는 달리 계산을 안정하게 행하기 위한 목적으로 사용하는 경우가 대부분이다. 따라서 수평방향 확산계수는 일정치로서 $10^3-2 \times 10^4(\text{m}^2/\text{S})$ 정도의 값을 주는 방법

^{8),12)}이나 기본방정식에서의 수평방향 확산항을 무시하고 그 기에서 발생하는 계산의 불안정을 배제하기 위해 Filtering을 이용하는 방법^{11,7)} 등이 사용되고 있다.

수평방향 확산계수 대신에 사용하는 Filtering에 관해서는 주로 2차원 해륙풍에 적용된 것이었다. 따라서 여기서는 2차원 기상모델에 사용된 Filtering을 3차원의 경우에도 확장하여 계산을 행하였다.

$$\phi_{i,j} = (1-s)\phi_{i,j} + \frac{s(\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j} + \phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1})}{4} \quad (29)$$

여기서 ϕ 는 u, v, w 등과 같은 물리적인 변수, s는 계산안정에 필요한 적절한 계수, 첨자 i, j는 격자점을 나타낸다. (Fig.1)

이같은 Filtering을 이용하면 상면경계에서 발생한 불규칙 진동에 의한 상층부의 변동을 없애기 위한 흡수층(absorption layer)⁸⁾의 도입을 방지할 수 있는 장점이 있다.

2.4 지표면 열수지

대기유동을 해석하는데 있어서 지표면 열수지의 계산에는 a)접지층 모델과 열수지식을 결합하여 지표의 온도 및 비습을 결정하

는 방법^{8),9)} b)식생환경모델을 이용하여 온도와 비습을 결정하는 방법¹³⁾ c)sine함수 근사법¹⁴⁾ 등이 있으나 a)의 방법은 지표면이 고온(40℃)이 되거나 풍속이 크게되는 경우에는 발산이 되는 경우가 있으며¹⁵⁾ b)는 아직은 실용화 단계에 있지 않아서 여기서는 적운강우현상의 수치해석에 이용되고 있는 c)의 방법을 이용하여 계산하였다.

3 초기 및 경계조건

3.1 초기조건

계산의 초기조건으로서 대상영역 전체가 정상상태라고 가정하여 다음과 같이 나타내었다.

연직방향의 풍속성분은 전체영역에서 $w=0$ 으로 하였다. 수평방향의 풍속성분 u , v 에 대해서는 지형풍이 있는 경우에는 Eckman층의 방정식에서 해석적으로 구한 식을 이용하였고, 지형풍이 없는 경우는 $u=v=0$ 으로 하였다.

온위에 대해서는 $\theta = \theta_{sea} + \Gamma z$ 를 사용하였다. 여기서 θ_{sea} 는 해면에서의 온위, Γ 는 온위의 연직방향구배이다.

압력 Π 에 대해서는 좌표 원점에서의 값을 1.0037로 가정하고 온위의 초기분포를 이용하여 측면상단에서의 지형풍 근사식

$$C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} = fVg \quad (30a)$$

$$C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} = -fVg \quad (30b)$$

를 이용하여 상면에서의 압력 Π 를 구하여 이를 이용하여 전체영역에서의 Π 를 구한다. 여기서 Ug , Vg 는 각각 U 및 V 방향의 지형풍 풍속이다.

비습 q_v 는 $q_{vG_0} + \Gamma_q Z$ 를 이용하여 계산한다. 여기서 q_{vG_0} 는 지표면에서의 초기비습, Γ_q 는 비습의 연직방향 구배이다.

그리고 지중온도 T_s 는 다음과 같이 한다.

$$T_s = \theta_G = \theta_{sea} \quad (31)$$

여기서 θ 는 지표면에서의 온위.

3.2 경계조건

지표면에서의 경계조건 - 연직방향의 풍속에 대해서는 $w=0$ 으로 한다. 그리고 수평방향의 풍속 u , v 는 지표면에 가까운 점에서의 접지층의 마찰속도로 부터 구하여 그

값을 경계치로 하였다.

온위에 대해서는 해면과 육지로 나누어 해면에서는 $\theta = \theta_{sea}$ 로 하고 육지표면에서는 다음 식을 사용하였다.

$$\theta = \theta_{land} = \theta_{sea} + \Gamma Z + A \sin(2\pi \frac{T-8}{24}) \quad (32)$$

여기서 A 는 온도진폭 parameter(일중의 해륙 온도차의 최대치), T 는 계산개시 시간(08:00)을 기준으로 한 시간.

비습에 대해서는 지면의 습윤도, 온도 등의 함수로 나타낸 다음 식을 이용하였다.

$$q_{vG} = F_w q_{vG_{sat}} + (1 - F_w) q_v(Z_2) \quad (33)$$

여기서 F_w 는 지표면의 습도, $q_v(Z_2)$ 는 Z_2 에서의 비습, $q_{vG_{sat}}$ 는 지면온도에서의 포화비습이다.

그리고 지중온도의 경계조건은 $Z_{G_0} = 100\text{cm}$ 에서 $\partial T_s / \partial Z = 0$ 으로 하였다.

상면에서의 경계조건 - 지표면 가열에 의한 일변화는 상면에는 미치지 않는다고 가정하였다. u , v 는 상면에서의 지형풍과 일치한다고 하여 경계조건을 나타내었으며 전변수에 대해서,

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q_v}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 \quad (34)$$

로 하였다.

측면에서의 경계조건 - 측면경계조건은 유입측과 유출측으로 나누어 취하였으며, 유입측에서는

$$\frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\partial q_v}{\partial X} = \frac{\partial \Pi}{\partial X} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial q_v}{\partial Y} = \frac{\partial \Pi}{\partial Y} = 0$$

로 하였고 유출측에서는 벡터량(u , v)과 스

칼라량(θ, q_v)로 나누어 고려하였다.

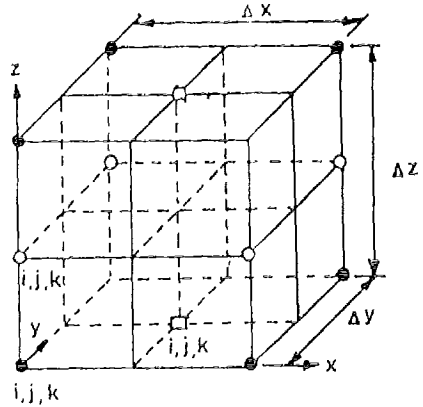
일반적으로 측면경계조건은 내부영역에서의 기복 등과 지면의 상황에 의해 발생한 교란 등이 미치지 않는 가능한 한 멀리 떨어져 있는 것이 좋다. 중규모 국지풍계의 해석에서 발생할 수 있는 오차는 측면경계의 위치에 의해 발생한다고 알려져 있다. 하지만 격자의 크기나 연산시간 등과 같은 수치계산의 제약에 의해 적절한 위치에 측면경계를 위치하지 않으면 안되며 이를 위해 방사조건(radiation condition)으로 알려진 Filtering을 사용하여 해결할 수 있다. 여기서는 Klemp and Wilhelmson이 사용한 경계조건식을 사용하였다.

$$\frac{\partial V_n}{\partial t} + C \frac{\partial V_n}{\partial n} = 0 \quad (36)$$

여기서, $a/\partial n$ 은 측면의 법선방향미분, C 는 교란의 위상속도(celerity)이다.

4 유한차분 근사법

기본방정식을 이산화하여 수치적분을 통해 근사해를 구하는 유한차분법은 대상이 되는 문제와 안정성 등에 의해 여러가지 방법이 사용되고 있다. 여기서는 Fig.1에 나타난 바와 같이 대상이 되는 변수의 지지점의 위치가 다른 Staggered 격자망을 사용하였다. 이 방법은 미지점의 해를 얻기 위해 지지점에서 선형내삽을 통해 구하여야 하는 등 복잡한 면도 있으나 격자점의 수가 작아도 합리적인 해를 얻을 수 있어서 널리 이용된다. 본 계산에서는 이류항은 풍상차분(up-wind difference scheme)을, 확산항은 양해법인 신 Dufort-Frankel법, 시간에 대해서는 전진차분법(forward-difference scheme)을 각각 이용하였으며 기타 항은 중심차분(central difference scheme)을 사용하여 중규모 지역기상 예



○ ; u, v, π, K_H

● ; θ, q_v, K_v

□ ; w

Fig.1 Meshes of Staggered Scheme

측에 적용된 모델⁹⁾을 기본으로 하였다.

일반적으로 시간 Δt 의 차에 따라 계산 결과에 약간의 변동이 있다고 알려져 있으나 여기서는 계산비용과 안정성 등을 고려하여 $\Delta t = 120\text{sec}$ 로 하였다. 그리고 수평방향(X-Y 평면)의 격자간격은 5Km, 20×20 의 격자점을 사용하였으며 연직방향은 높이 3000m까지를 10층으로 분할하고 u, v 의 2번째 격자점의 높이 50m를 접지층이라 가정했다. 지중은 1m까지를 14층으로 나누고 지중 1m에서의 경계조건은 Flux=0으로 하였다. 그리고 수평방향의 격자간격은 $\Delta X = \Delta Y$ 로 균등격자를, 연직방향은 지표면에 가까울수록 격자간격이 작은 불균등 격자를 사용하였다.

5 계산결과 및 비교분석

5.1 계산대상 영역 및 정수

본 계산은 해륙풍이나 도시열도(Heat

Isalnd)현상과 같은 중규모 지역기상의 시간변화에 따른 영향을 예측하기 위하여 Fig. 2와 같이 지형의 기복을 무시한 이상적인 지역을 대상영역으로 하였다. 토지이용(Land Use)상황은 도시부(Urban), 반도시부(Suburban), 전원지역(Rural)으로 구분하여 계산을 행하였으며 도시부는 해안선에서 육지측 5Km까지를 그리고 반도시부는 육지측 5Km까지를 설정하고 나머지는 전원지역으로 하였다. 각 토지이용에 대한 열수지 파라메타의 값은 Table 1에 제시하였다.¹⁸⁾

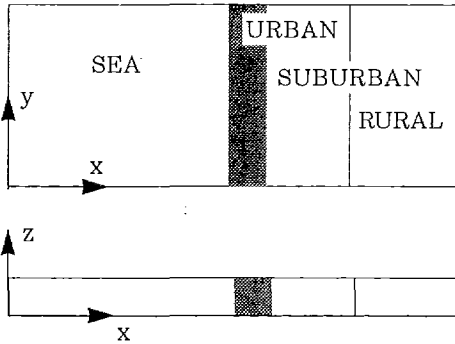


Fig. 2 Definition of Land-Use

중규모 지역기상모델의 흐름장은 1)확산계수 2)대기안정도 3)경계조건 4)시간(계산대상일) 등의 변화에 따라 그 성질이 변화한다. 여기에서는 Filtering의 영향이 고려되는 수평방향 확산계수 및 측면경계조건에 따른 효과를 주대상으로 하였으며 또 계산대상일(계절)의 변화에 따른 대기흐름패턴을 해석하였다. 이를 위해 8월의 청천일을 기본대상으로 하여 계산대상일이 2월, 5월로 변화하는 경우에 대한 흐름패턴의 변동을 해석하였으며 수평확산계수 K_H 에 Filtering으로 바꿈에 따른 영향 및 측면경계조건에 Filtering효과(방사조건)의 영향을 각각 계산하였다.

8월의 청천일에 대해 본 연구에서 사용한 기본정수는 다음과 같다.

- $g = 9.81(m^2/sec)$
- $C_p = 239.05(cal/kg \cdot K)$
- $\rho = 1.226(Kg/m^3)$
- $L_w = 588.7(cal/g)$
- $R_o = 323.3(cal/m^2s)$
- $\phi_{lon} = 135(deg)$
- $\phi = 35(deg)$
- $e = -3(min)$

Table 1. Heat Budget Parameter of the Land-Use

Symbols	Units	Model Value		
		Rural	Suburban	Urban
Albedo	-	0.2	0.2	0.2
대기 투과율	-	0.85	0.7	0.664
지표면습도	-	0.1	0.08	0.05
배열량	$Cal m^{-2}s^{-1}$	0.0	5.95	16.36
조도	cm	10.0	30.0	100.0
K_s	cm^2s^{-1}	0.005	0.007	0.01

Table 2. Coefficients Used to this computation

	기본			비고
계산대상일	8월	2월	5월	
측면경계조건	$C=5.0$	무시	$C=10.0$	Eq. 36
수평확산계수	$K_H=10000$	$K_H=20000$	$K_H=50000$	
	$S=0.15$	$S=0.20$	$S=0.25$	Eq. 29

$$\delta = 11.723(\text{deg})$$

여기서, ϕ lon은 경도, ϕ 는 위도, e 는
 균시차, δ 은 적위이다.

그리고 계산내용 및 정수는 Table 2에
 나타내었다.

5.2 계산결과

계산은 오전 08:00부터 24시간 행하여
 오후 04:00와 다음날 오전 04:00의 계산
 영역 전역에서의 풍속, 온위 등을 계산하였
 다.

계산대상일의 변화 - 여기서는 계산대상
 일(계절)의 변화에 따른 영향을 조사하기
 위해 여름, 겨울, 봄의 청천일(운량=0)을
 그 대상으로 계산을 행했다. 각각의 계산조
 건은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Conditions of Seasonal Variation

	August	February	May
바다의 온위 K	300.0	290.0	295.0
적 위 deg	11.723	11.723	20.28
균시차 min	-3.0	-13.8	1.7

상기 3종류의 계절변화에 관해 행한 계산
 결과로 부터 해안선상 높이 80m에서의 풍
 속 u 의 변화를 Fig.3에 나타내었다.

8월의 경우는 16시 근방에서 해풍의 최대
 풍속 u 는 1.18m/sec, 육풍의 최대풍속은
 0.74m/sec이고 2월의 경우는 해풍의 최대
 풍속 0.3m/sec, 육풍의 최대풍속 1.
 2m/sec로 겨울에 비해 여름에 해풍이 탁월
 함을 알 수가 있다. 이 결과로 부터 임해공
 업이 발달한 곳에서는 해풍의 영향이 큰 여
 림에 대기오염의 상황이 악화됨을 예측할
 수 있다.

그리고 Fig.4(a)-(d)에 Y-Z평면상에
 16시와 04시의 8월과 2월의 풍계도를 각각

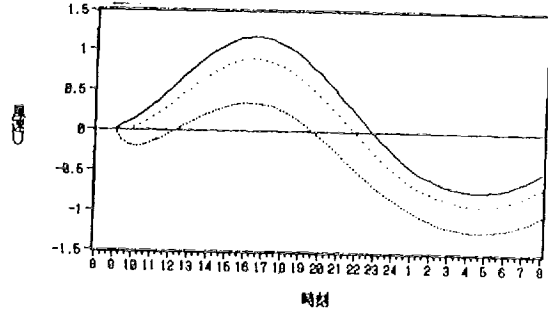


Fig.3 Calculation Results of Sea and Land
 Breeze for the Change of Season
 (—: Summer: Winter
 - · - · - : Autumn)

도시하였다. 그림에서 실선은 등온위선을
 그리고 화살표는 풍속 u 의 분포를 나타내고
 있다. Fig.4(a)의 8월의 16:00의 풍계도
 에서 보는 바와 같이 지면상 400m(격차점
 5)까지 강한 해풍이 작용하고 있으며 그 상
 방에는 보상풍이 나타나 순환을 형성하고
 있음을 보이고 있다. Fig.4(b)의 2월의
 16:00 풍계도에서도 동일한 경향을 보이고
 있으나 크기가 2월에 비해 8월이 강한 것을
 알 수 있다. 또한 Fig.4(c), (d)에는 각각
 8월과 2월의 04:00 풍계도를 나타내고 있
 으며 이 그림에서는 2월의 경우에 육풍이
 탁월함을 보여주고 있다.

측면경계에서의 Filtering(방사조건)의
 영향 - 여기서는 Klemp와 Wilhelmson¹⁷⁾
 에 의해 정식화된 측면경계상의 Filtering
 (방사조건)에 의한 영향을 조사하기 위해
 방사조건을 무시한 경우와 고려한 경우로
 나누었으며 고려한 경우는 (36)식에서의 교
 란의 파속 c 를 5와 10으로 나누어 각각 계
 산하였다. 또한 이 결과는 해안선상 높이
 80m에서의 풍속 u 의 경시변화도로 Fig.5
 에 나타내었다. 그림에서 방사조건을 무시
 한 경우와 고려한 경우의 풍속 u 의 변화는
 대체로 일치하고 있음을 보이고 있다. 이는

지형의 기복이 무시된 이상화된 지역에 적용된 때문이라 판단된다.

수평방향확산계수의 Filtering의 영향 - 계산의 안정 등을 위해 사용되는 수평확산계수는 일반적으로 $10^3 - 2 \times 10^4 (m^2/sec)$ 의 범위내에서 적절한 값을 취하여 계산을 행해왔다. 여기서는 먼저 K_H 가 5000, 10000, 20000의 값으로 변화하는 경우에 대해 풍속 u 의 경시변화를 조사하였다. Fig.6에서 보는 바와 같이 K_H 가 5000인 경우 해풍의 최대풍속 1.4m/sec에서 K_H 가 2000으로 커지면 그 최대풍속은 0.82m/sec로 40%이상 감소하는 경향을 보여주고 있으며 최대풍속

의 발생시간도 점차로 늦어지는 경향을 보여주고 있다. 그리고 Filtering을 사용한 경우(29)식에서의 계수 S 가 0.15, 0.20, 0.25로 변화하는 경우 풍속의 경시변화를 Fig.7에 도시하였으며 이들의 변화를 K_H 가 일정한 경우($K_H=1000$)와 비교하기 위해 함께 도시하였다. 이 경우에서도 계수 S 가 변화함에 따라 최대풍속 또한 약간씩 늦어지는 동일한 경향을 보여주고 있다. 따라서 수평확산계수와 Filtering을 사용하는 경우에는 대상지역의 실측결과 등을 통해 수평확산계수의 값 등을 결정하여 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

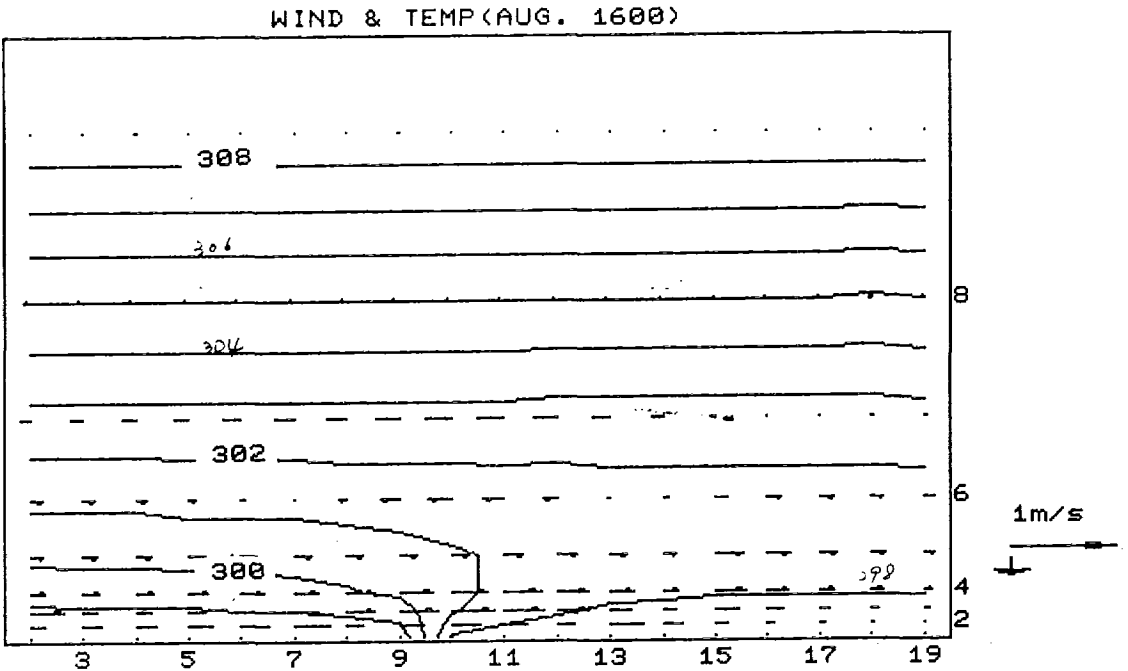


Fig.4a Calculation Results of Sea and Land Breeze Circulation(August 16:00)

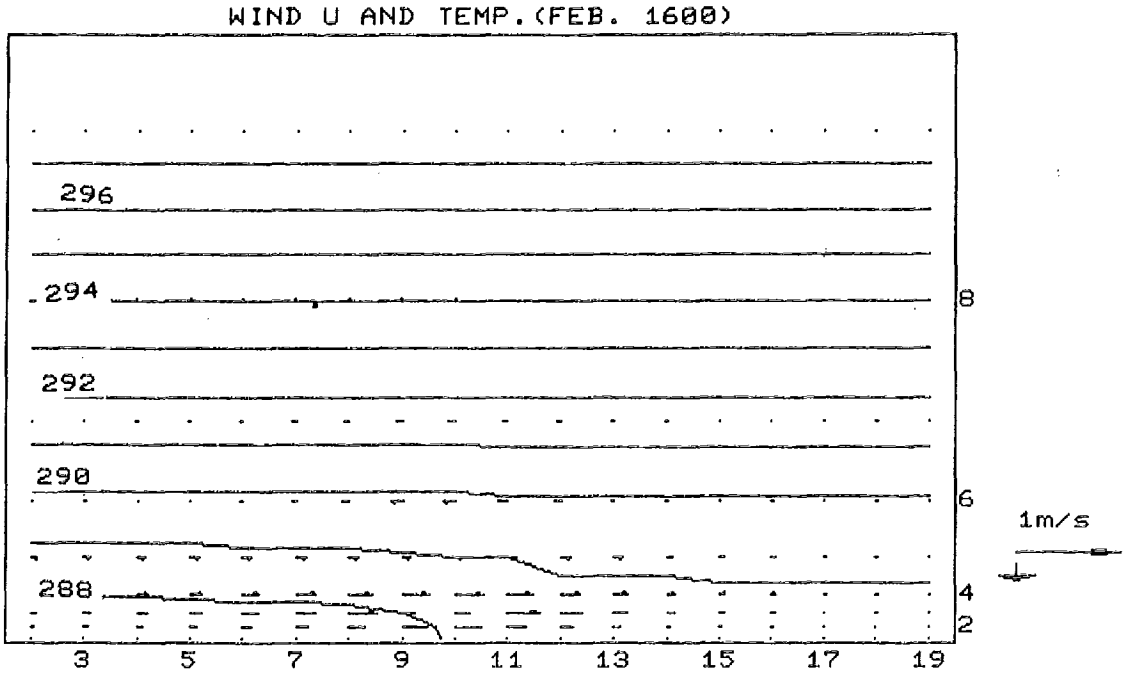


Fig.4b Calculation Results of Sea and Land Breeze Circulation(Feburary 16:00)

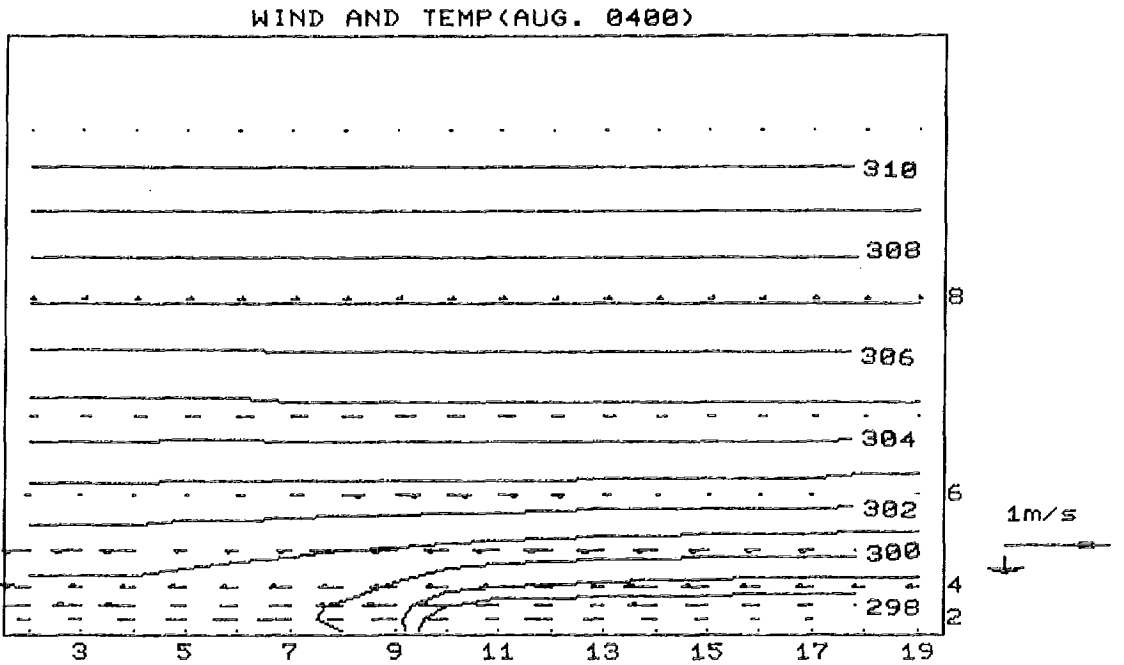


Fig.4c Calculation Results of Sea and Land Breeze Circulation(August 04:00)

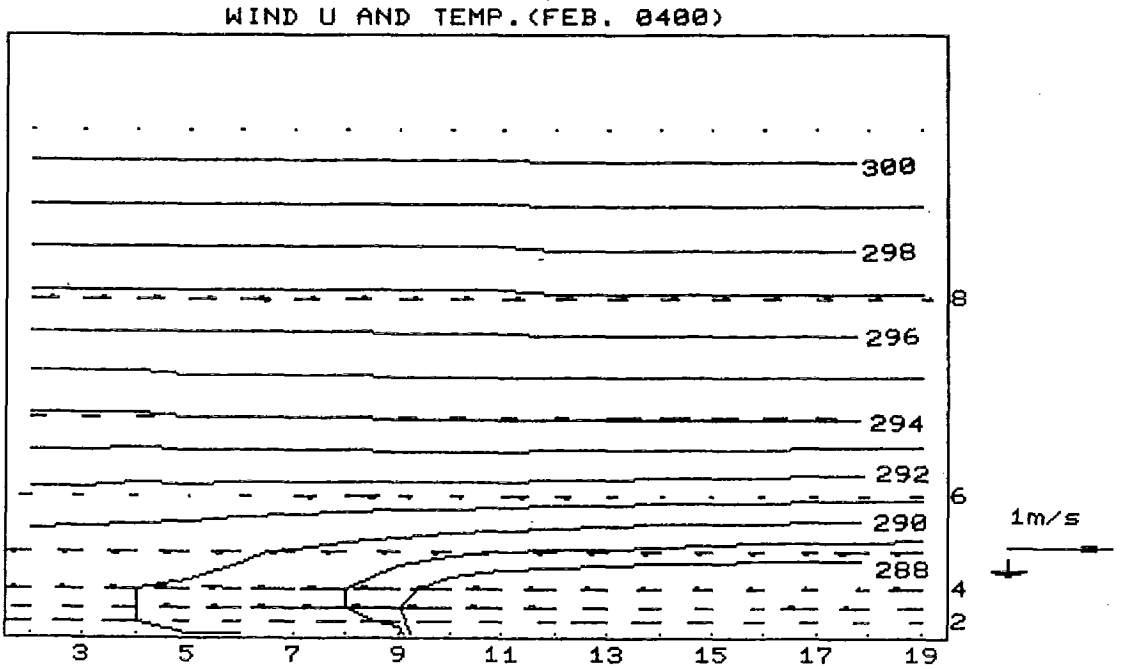


Fig. 4d Calculation Results of Sea and Land Breeze Circulation (February 04:00)

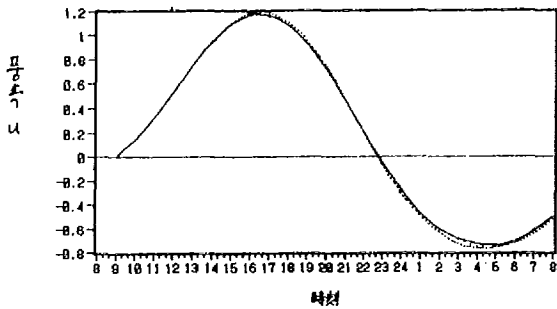


Fig. 5 Calculation Results of Sea and Land Breeze by Radiation Condition
 (---: C=5 : C=0 - · - · : C=10)

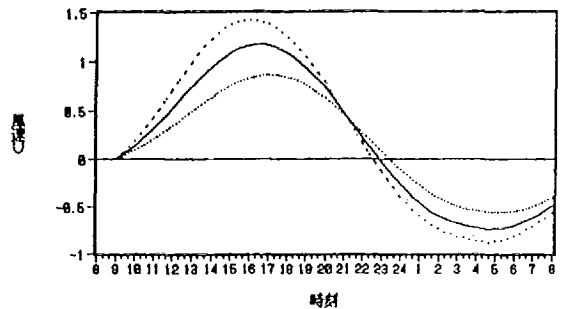


Fig. 6 Calculation Results of Sea and Land Breeze for the Change of Horizontal Diffusivity
 (---: $K_H=10000$: $K_H=20000$
 - · - · : $K_H=5000$)

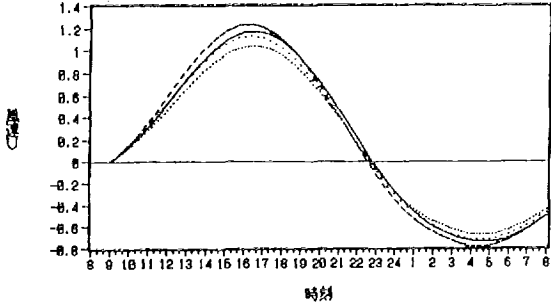


Fig.7 Calculation Results of Sea and Land Breeze by Filtering
 (—: $K_H=10000$ - - - : $s=0.15$
 ·····: $s=0.20$ - · - · : $s=0.25$)

6 결 론

본 연구에서는 지표의 온도를 sin함수에 따라 변화한다고 가정하고 측방향경계에 방사조건으로 알려진 Filtering의 역할을 그리고 수평방향 확산계수에 Filter를 사용하여 계수의 변화에 따른 흐름장의 변화를 예측하고 계절에 따른 해륙풍장의 해석을 통하여 그 영향을 예측하기 위한 지역기상의 수치계산을 행하였다. 그 결과 본 수치모델은 해륙풍장의 특성을 대체로 잘 예측하였고 특히 동계에 비해 하계에 해풍이 강한 것을 알 수 있었다. 또한 측방향 경계조건과 수평방향 확산계수에 Filtering의 영향을 조사한 결과 수평확산계수 및 Filtering을 실제지역에 고려하기 위해서는 대상이 되는 지역의 풍속 등에 관한 실제 관측결과와 비요하여 적절한 계수의 크기를 결정하여야 한다. 측방향경계에 Filter를 사용하여 계산한 결과 Filter를 무시한 경우와 고려한 경우의 결과의 차이는 거의 보이지 않고 있으며 이는 지형의 기복을 무시한 때문이라 판단되며 이에 관해서는 차후의 연구과제로 남긴다.

본 수치모델은 열수지 변화에 따른 중규모 지역기상 예측을 위한 것이므로 대규모 도시역이나 내륙지방의 열도(Heat Island)현상 또한 예측 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 蔣司 光, 鐵川精 : 環境論序說, 法律文化史, 1975, 209pp
2. Estiqyem M.A. and bhumralkar, C.M.: Flow over a Localized Heat Source, Monthly Weather Review, Vol.97, 1969, pp 850-859
3. Shieh, C.M. and Moroz, W.J.: Mathematical Modelling of Lake Breeze, J. Atm. Env., Vol.9, pp 575-586
4. Kozo, T.L.: A Mathematical Model of Sea Breeze Along the Alaskan Beauyour Sea Coast Pt. 2, appl. Meteor., Vol.21, 1982, pp 906-934
5. Businger, J.A. et al: Flux-Profile Relationship in the Atmospheric Surface layer, J. Atm. Sci., Vol. 28, 1971, pp.181-189
6. Estoque, M.A.: The Sea Breeze as a Function of the prevailing Synoptic Situation, J. Atm. Sci., Vol.19, 1962, pp 244-250
7. Mahrer, Y. an Pielke, R.A.: The effects of the Topond Land Breezes in a two-Dimensional Numerical Model, Mon. Wea. Rev., Vol.105, 1977, pp.1151-1162
8. Takano, K.: Three-Dimensional Numerical Modelling of the

- Land and Sea Breezes and the Urban heat Island in the Kanto Plain, Submitted to boundary Layer Meteor., 1985
8. Takano, K.: Three-Dimensional Numerical Modelling of the Land and Sea Breezes and the Urban Heat Island in the Kanto plain, Submitted to boundary layer Meteor., 1985
 9. Yoshikawa, A. et al.: Three-Dimensional Simulation of Land and Sea Breeze over the Osaka Plain, Tech. Reports of Osaka Univ., Vol. 37, 1987, pp. 381-395
 10. 竹内清秀, 近藤純正: 大氣科學講座 1. 地表に近い大氣, 東大出版社, 1981
 11. Yamada, T.: The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model, J. Atm. Sci., Vol. 32, 1975, pp. 926-933
 12. Ozoe et al.: Characteristics of Air Pollution in the Presence of Land and Sea breeze - A Numerical Simulation, Atm. Envi., Vol. 17, 1983, pp. 35-42
 13. 吉川暉, 山口克人, 今成岳人: 植生を考慮した地表面の熱及び水分収支の計算, 空氣調和 衛生工學研究會論文集, 1989, pp. 99-102
 14. Oockochi, Y. et al.: A Numerical Study on the Effects of a Mountain on the Land and Sea Breezes, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 56, 1978, pp. 368-386
 15. 山口克人: 大氣擴散論, 講義 note, 大阪大學, 1990
 16. Pielke, R.A.: Mesoscale Meteorological Modeling, Academic press, 1984
 17. Klemp, J.B. and Wilhelmson, R.B.: The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm dynamics, J. Atm. sci., Vol. 35, 1978, pp. 1070-1096
 18. 末石富太郎: 大氣汚染, 水質汚濁現象を綜合した都市環境制御の研究, 文部省科學研究報告書, No. 60460167, 1980, 233pp