

# 육상지형을 고려한 연안해역에서의 중규모 기상장과 취송류에 관한 수치해석

이성대  
한라대학교 토목공학과

## Numerical Analysis of Wind Driven Current and Mesoscale Air Flow in Coastal Region with Land Topography

SEONG-DAE LEE  
Department of Civil Engineering, Halla University, Wonju, Korea

**KEY WORDS:** Wind-generated circulation 취송류, Meso-scale air flow 중규모지역 기상장, Land topography 육상지형, Surface heat budget 지표면 열수지, Numerical analysis 수치해석

**ABSTRACT:** A quasi depth-varying mathematical model for wind-generated circulation in coastal areas, expressed in terms of the depth-averaged horizontal velocity components and free surface elevation was validated and used to understand the diurnal circulation process. The wind velocity is considered as a dominant factor for driving the current. In this paper, three-dimensional numerical experiments that included the land topography were used to investigate the mesoscale air flow over the coastal regions. The surface temperature of the inland area was determined through a surface heat budget consideration with the inclusion of a layer of vegetation. A series of numerical experiments were then carried out to investigate the diurnal response of the air flow and wind-generated circulation to various types of surface inhomogeneities.

### 1. 서 론

연안해역에서의 흐름은 조류, 해류, 밀도류 및 취송류와 같은 다양한 흐름이 복합적으로 작용하고 있으며, 특히 해난사고에 의한 기름유출과 이에 따른 인근해역에서의 해양환경오염이 관심의 대상이 되는 경우에는 수면부근에서의 흐름이 중요한 역할을 하며, 이때 바람의 영향에 의한 취송류의 해석이 필수적이다. 취송류는 바람의 변동에 의해 영향을 받으므로 연안해역에서의 취송류 해석을 위해서는 바람장 연구가 필수적이다. 연안해역 인근의 바람장 특성에서는 임해지역의 고유국지풍인 해륙풍과 같은 중규모지역 기상장의 영향 뿐 만아니라 육상지형의 변동에 따른 지역풍의 영향을 동시에 받고 있으므로 시·공간에 따른 바람의 변동이 극심하게 나타나고 있다. 따라서 이들의 영향을 고려한 바람장의 해석이 이루어져야 한다. 우리나라 임해지역은 최근 도시화 및 공업화가 진행됨에 따라 지표면에서의 열수지 변화가 이루어지고 있으며, 이같은 지표면경계의 열적특성에 따른 해안역에서의 해륙풍장을 이해하고 그 기구를 파악하는 것이 필요하다. 그리고 지표면 열수지변화에 관해서는 식생환경을 고려한 녹지환경의 중요성이 인식됨에 따라 이에 관한

다양한 연구가 이루어지고 있는 실정이다(Rogers, 1995). 본 연구에서는 취송류해석의 기초자료가 되는 바람장 해석을 위해 연직상향의 대상영역을 두개의 층으로 나누어 지표면에 가까운 접지층에서 연직방향화산계수는 Businger의 보편함수를, 상층부인 Eckman층에서는 Mellor and Yamada의 난류종결모형(Mellor and Yamada, 1982)을 각각 적용하여 계산하였다.

지금까지의 연안해역에서의 취송류 해석을 위한 바람장은 육상지형 및 토지이용상황은 고려하지 않은 상태에서 결정되어진 정상상태의 바람장을 사용하거나, 단순히 일정한 바람장을 입력조건으로 취송류 해석을 수행한 것이 대부분이었다. 따라서 본 연구에서는 취송류 해석을 위해 중규모 지역기상장에 의해 얻어진 1일 동안의 시간에 따른 바람장 해석결과를 사용하였다. 취송류의 수치해석은 유속을 수심으로 평균한 2차원 모델과 수심에 따라 유속분포를 몇 개의 층으로 나누어 근사시킨 3차원 모델 등이 있으나, 2차원모형은 해저지형변동과 관련된 해저부근에서의 흐름을 파악하기 어려우며 3차원 모형은 연산시간에 대한 부담이 증가하게 되는 문제점이 있다(Jin et al., 2002). Koutitas et al.(1986)은 이같은 관점에 착안하여 연안해역에서의 취송류해석을 위해 수면에서 바닥까지 적분하여 평균화한 2차원모형에 흐름의 연직분포를 가정하여 연직방향 유속의 변동해석이 가능하도록 제안하였으며 여기서는 이들의 모형을 적용하였다.

본 연구에서는 먼저 지표면의 열수지 변화 특성을 고려할

교신저자 이성대: 강원 원주시 흥업면 흥업리 66

033-760-1264 sdlee@halla.ac.kr

수 있는 식생모델을 적용한 중규모지역(수평방향크기; 10~100km)에 대해 정역학평형을 가정한 바람장모형을 이용하여 연안해역에서의 육상지형 변동에 따른 바람장의 시간적 변동을 해석한다. 그리고 이의 결과를 취송류장 해석의 입력자료로 사용하여 연안해역에서의 비정상상태의 바람장에 의한 취송류장의 변동 특성을 해석하기 위한 모형을 개발하였다.

본 모형의 타당성을 검토하기 위하여 일정수심의 연안모형을 대상으로 적용하고, 그리고 강릉시를 중심으로 동해시에서 속초에 이르는 실제 동해안 연안해역에 적용하여 육상지형 및 기복에 따른 중규모 기상장을 해석하고 시간에 따른 기상장의 변동에 대한 취송류장을 계산하여 본 모형의 현지 적용성을 검토하였다.

## 2. 기본방정식

### 2.1 중규모 지역기상장 모형

본 연구에서 적용하는 모형은 지형의 영향을 고려하는 해륙풍을 해석하는데 적용하는 중규모 기상장모형을 기본으로 하였다. 중규모지역 국지풍계의 해석은 대상이 되는 영역내부의 현상을 나타내는 기본방정식과 적절한 초기조건 및 경계조건을 이용하여 모델화할 수 있으며 특히 지표면에서의 경계조건은 연안역의 급격한 토지이용 변화에 따른 지표면 열수지의 지역적인 차이와 지형의 형상을 고려하도록 하였다(Yamaguchi et al., 1992; 이성대, 2000).

3차원 지역기상을 지배하는 대기운동의 기본방정식은 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존법칙에 기초하는 운동방정식, 온위방정식, 비습방정식, 연속방정식 및 정역학 평형식을 사용하며 이들은 각각 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

여기서  $\Pi = (P/P_{00})^{R_0/C_p}$ 이며,  $P$ 는 압력(mb),  $P_{00}$ 는 기준압력(=1000mb),  $R_0$ 는 건조공기 가스정수,  $C_p$ 는 정압비열,  $\theta$ 는 온도,  $q_0$ 는 비습,  $f$ 는 Coriolis 계수,  $K_H$ 는 수직방향 확산계수,  $K_v^m$ ,  $K_v^\theta$ ,  $K_v^q$ 는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향 확산계수를 나타낸다.

본 모형에서는 장방형 격자에서 수치계산을 행하는 경우, 직교좌표계에서는 임의로 지형을 나타낼 수 없음을 고려하여 다음과 같은  $Z^*$ 좌표계를 이용하였다(Pielke, 1984).

$$Z^* = S \frac{Z - Z_G}{S - Z_G} \quad (7)$$

여기서  $Z$ =높이,  $Z_G$ =표고,  $S$ =계산영역의 높이이다.

난류 확산계수는 대기경계층을 크게 2층으로 나누어 지상에서 50m까지를 접지층, 그 윗부분을 Eckman층이라 하여 각각 다른 모델을 적용하였다. 접지층에서는 Businger의 무차원 Profile을 이용하여 운동량과 열의 연직확산계수를 결정하였으며, Eckman층에서는 난류종결모형을 이용하여 연직방향확산계수를 계산하였다(Mellor and Yamada, 1982).

육상에서의 지표면 열수지 계산은 식생을 고려한 모형(Deardorff, 1978)을 사용하였으며, 이의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 본 모형에서는 식 (8)과 같은 식생상에서의 열수지식에서 부터 식생내 온도와 비습을 결정한다.

$$S_h \downarrow + R_h \downarrow - S_h \uparrow - R_h \uparrow - (S_g \downarrow + R_g \downarrow - S_g \uparrow - R_g \uparrow) = H_f + L_w E_f \quad (8)$$

여기서,  $S$ 는 태양의 단파방사,  $R$ 은 장파방사이며 화살표는 Flux의 방향,  $H$ 는 현열(전도)Flux,  $E$ 는 잠열(증발)Flux이고  $L_w$ 는 잠열을 나타내고 있다. 또 첨자 $h$ 는 식생의 상공,  $f$ 는 엽상 그리고  $g$ 는 지면을 각각 나타내고 있다.

### 2.2 취송류장 모형

연안에서의 다양한 흐름 가운데 취송류는 표면 유동장에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이의 해석법은 유속을 수심으로 평균한 2차원모형과 수심에 따라 유속 분포를 몇 개의 층으로 나누어 근사시킨 3차원 모형 등이 있다. 그러나 저층에서의 흐름은 2차원 흐름으로는 충분히 표현할 수 없으며, 3차원 모형을 사용하면 연산시간 등의 부담이 상대적으로 크게 나타나므로 본 연구에서는 흐름의

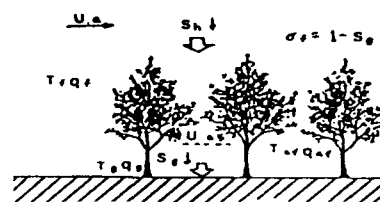


Fig. 1 Model of vegetation environment

수심방향에 대한 연직 분포를 가정하여 연직방향의 속도변화를 해석할 수 있도록 한 Koutitas et al.(1986)의 취송류장 모형을 사용하였다.

취송류의 기초방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f v \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f u \quad (11)$$

여기서,  $u(x,y,z,t)$ ,  $v(x,y,z,t)$ 는 수평방향 속도성분,  $\eta(x,y,t)$ 는 정수면상에서의 자유수면높이,  $\nu$ 는 와동점성계수이다.

바람의 영향은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{zx}}{\rho}, \quad \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{zy}}{\rho} \quad (12)$$

자유수면에서의 전단력  $\tau_s$ 는 풍속  $W$ 를 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = K W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (13)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = K W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (14)$$

여기서, 계수  $K$ 는 다음의 식을 사용하였다.

$$K = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-6} & W < 7.0 \\ 1.1 \times 10^{-6} + 2.5 \times 10^{-6} \left( 1 - \frac{7.0}{W} \right)^2 & W > 7.0 \end{cases} \quad (15)$$

상기한 3차원 모형에서 흐름의 연직방향 분포를 가정하여 자유수면에서 바다까지를 적분하여 평균화한 방정식을 계산 모형으로 적용하였다.

그리고 흐름장의 수심방향 연직 속도분포를 다음과 같이 가정한다.

$$\vec{u} = \vec{\alpha}(x,y)z^2 + \vec{\beta}(x,y)z + \vec{\gamma} \quad (16)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 각각 저면에서의 경계조건, 자유수면 경계조건 및 수심 평균한 속도로부터 결정되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{\alpha} = \frac{3}{4} \frac{\vec{\tau}_s}{\rho h \nu_s} - \frac{3}{2} \frac{\vec{U}}{h^2}, \quad \vec{\beta} = \frac{\vec{\tau}_s}{\rho \nu_s}, \quad \vec{\gamma} = \frac{3}{2} \vec{U} + \frac{h \vec{\tau}_s}{4 \rho \nu_s} \quad (17)$$

여기서  $\nu_s$ 는 자유수면에서의 와동점성계수이다. 그리고, 저면에서의 전단력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho} = \nu_b \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \Big|_{z=-h} = \nu_b \left( \frac{3 \vec{U}}{h} - \frac{\vec{a}}{2h} \right) \quad (18)$$

여기서  $\vec{a}$ 는 다음과 같다.

$$\vec{a} = \frac{h \vec{\tau}_s}{\rho \nu_s} \quad (19)$$

이들을 고려하면 운동방정식과 연속방정식, 식 (9)~(11)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \left( 0.2U + \frac{a_x}{40} \right) \frac{\partial U}{\partial x} + \left( 0.2V + \frac{a_y}{40} \right) \frac{\partial U}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f V + \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \left[ 0.18 \frac{U}{h} \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} - 0.5 \frac{\tau_{sx}}{\rho h} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \left( 0.2U + \frac{a_x}{40} \right) \frac{\partial V}{\partial x} + \left( 0.2V + \frac{a_y}{40} \right) \frac{\partial V}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f U + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \left[ 0.18 \frac{V}{h} \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} - 0.5 \frac{\tau_{sy}}{\rho h} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + \frac{\partial}{\partial y} (Vh) = 0 \quad (21)$$

초기조건으로는  $U, V, \eta$ 를 0으로 두었으며 경계조건으로는서는 경계면에 대해 수직인 방향의 유속은 0, 평행한 유속성분에 대해서는 활동조건을, 외해측 경계에서는 방사조건을 적용하였다. (19), (20) 및 (21)식으로 부터  $U, V, \eta$ 를 얻어 가정한 (16)식의 연직분포식으로부터 수심방향의 속도성분을 계산할 수 있다.

### 3. 수치계산

#### 3.1 중규모 지역기상장 모형의 수치해석

기본방정식을 이산화하여 수치적분을 통해 근사해를 구하는 유한차분법은 대상이 되는 문제와 안정성 등에 의해 여러가지 방법이 사용되고 있다. 여기서는 대상이 되는 변수의 기지점의 위치가 다른 교호 격자망을 사용하였다.

본 계산에서는 이류항은 풍상차분(Up-wind difference)을, 확산항은 양해법인 신 Dufort-Frankel법, 시간에 대해서는 전진차분법을 각각 이용하였으며, 기타 항은 중심차분을 사용하였다. 그리고 시간 Step  $\Delta t$ 는 계산비용과 안정성 등을 고려하여  $\Delta t=120\text{sec}$ 로 하였다. 연직방향은 높이 3000m까지를 10층으로 분할하고  $u, v$ 의 2번째 격자점의 높이 50m를 접지층이라 가

정하였다. 그리고 연직방향은 지표면에 가까울수록 격자간격이 작은 불균등 격자를 사용하였다.

3.2 취송류장 모형의 수치해석

취송류장의 수치해석은 중규모 지역기상장의 격자체계와 동일한 격자망을 구성하였으며, 격자의 중심에 수위, 수심과 같은 스칼라량을 배치하고 벡터량인 속도성분 및 바람에 의한 전달용력은 격자의 경계에 나타내었다. 그리고 차분화는 시간항에 대해서는 전진차분을 공간항에 대해서는 중앙차분을 사용하였으며, 경계조건으로서 외측경계상에 일정크기의 가상격자를 설치하였다.

4. 계산결과 및 토의

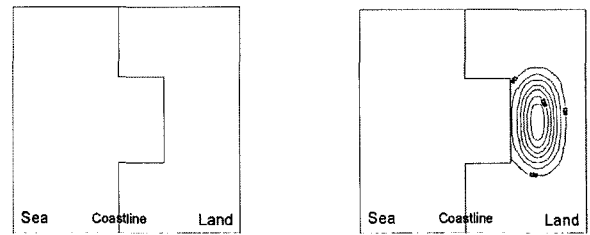
4.1 단순지형 모델에의 적용

4.1.1 중규모 지역기상장 계산결과

임해지역에서의 토지이용의 변화 및 육상지형의 기복에 따른 해안지역의 고유 국지풍계인 해륙풍의 변동과 지형풍이 존재하는 경우 중규모 지역기상장의 시간변화에 따른 영향을 예측하기 위해 육상 지형의 기복을 무시한 경우와 고려한 경우에 대해 단순한 연안해역을 대상영역으로 계산을 수행하였다. 계산을 위한 대상영역은 Fig. 2에 각각 도시하였으며, Fig. 2(a)에서는 지형의 기복을 무시한 이상적인 지역을 그리고 Fig. 2(b)에서는 대상영역의 중앙부에 표고 400m인 타원형의 산이 존재하는 영역을 대상으로 하였다. 토지이용 상황은 대상지역 전체를 전원지역으로 하여 육상에서의 지표면 열수지 계산은 식생을 고려한 모형을 사용하여 계산을 수행하였으며, 본 모형에 적용된 전원지역의 열수지 파라메타의 값은 Table 1에 제시하였다. 그리고 수평방향(X-Y 평면)의 격자간격은  $\Delta x = \Delta y = 3.0\text{km}$ 인 균등 격자를, 격자점은  $30 \times 30$ 을 사용하였으며, 연직방향은 3050m까지를 불균등격자의 10개층으로 나누어 계산하였다.

중규모 지역기상장의 변화특성은 계절에 따라 크게 달라지는 경향을 보이고 있으나 여기에서는 8월의 맑은날을 기본 대상으로 하였다. 본 수치모형을 이용하여 대상영역을 중심으로 기상장을 해석하였으며, 계산은 개시일 오전 08:00부터 4일간 수행하여 마지막 1일동안의 바람장 결과를 사용하였다.

임해지역에는 해면에서의 온도와 육지의 지표면온도와와의 차에 의해 해륙풍이 발생하는데 낮 동안에는 지표면 온도가 해면 온도보다 높기 때문에 해역에서 육지측을 향해 바람이 불고, 야간에는 역으로 된다. 일반풍이 거의 없는 맑은 날인 경우 해륙풍장이 발달하는 경향이 있으며, 해륙풍장이 일반풍과 만나는 경우 국부적으로 강한 바람장 변동이 나타나기도 한다. 따라서 이같은 바람장의 특성을 이해함으로써 연안해역에서의 시간 및 공간적 바람장 변동 예측과 항내 선박의 안전을 위한 최적의 외곽시설이나 계류시설의 평면배치 결정에 이용될 수 있다. 특히 비정상 바람장(Unsteady wind field)은 연안해역에서의 취송류를 야기하며, 시간에 따른 취송류장의 변동은 연안해역에서의 흐름특성을 체계적으로 파악할 수 있다.



(a) Without land topography (b) With land topography  
Fig. 2 Definition sketch of coastal region

Table 1 Parameters used in numerical experiments

Parameters	Land
Surface roughness(m)	0.5
Transmission factor(-)	0.85
Shielding factor(-)	0.9
Albedo(-)	0.18
Discharge of artificial heat (cal/m <sup>2</sup> sec)	0.0

Fig. 3, Fig. 4에서는 일반풍이 없는 상태에 지형의 기복을 무시한 경우와 고려한 경우에 대한 바람장의 변동을 수치계산개시 4일째의 계산결과 중 지표로 부터 높이 10m의 풍속분포 (해상풍)를 4시간 간격으로 각각 1일분을 나타내었다. 그림에서 보듯이 주간에는 해풍이 강하게 나타나고 있으나 야간에는 육풍이 나타나고 있고, 전체 대상영역내에서 시간에 따른 지상풍의 변화가 나타남을 알 수 있다. Fig. 3과 4로부터 12:00시경부터 해풍이 불기 시작하여 16:00시 이후에는 대상영역 전체로 확대된다. 육풍은 04:00시경부터 풍향이 점차 완만히 변화하여 08:00시경까지 이어짐을 알 수가 있다. 따라서 전체적인 바람장의 변동은 해륙풍의 전형적인 특성을 잘 보여주고 있으나 해풍에 비해 육풍의 크기가 상대적으로 약하게 나타나고 있는데 이는 토지이용변화 특성을 전원지역으로 단순화하였으며 지표면 열수지에 식생모형을 고려하여 낮동안의 바다와 육지측에서의 온도차가 크게 된 때문이라 판단된다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 육지부에서의 기복의 영향을 나타내기 위해 육지부의 중앙부에 표고 400m의 타원형 산악지형을 고려한 것이다. 그림에서 보듯이 지형의 영향에 의해 산곡풍의 영향이 나타나고 있으며, 특히 20:00시 이후의 야간에 이같은 경향이 나타나고 있으며, 지형의 기복을 무시한 Fig. 3의 결과와 비교하여 상대적으로 다소 복잡한 바람장의 특성을 보여주고 있다.

여기에서는 연안역에서의 중규모 지역기상장 변동을 예측하기 위한 3차원 수치모형의 적용시도에 중점을 두었기 때문에 수치모형에 포함되는 많은 변수의 적절한 선정과정은 이루어지지 않았으나, 대체로 타당성 있는 결과를 얻었다. 따라서 본 3차원 중규모 지역기상모델의 운용으로 인위적 또는 자연적 지형기복변화 및 토지이용변화에 대한 기상흐름의 거동을 예측할 수 있을 것이다.

4.1.2 취송류장 계산결과

중규모지역 기상장 모형으로부터 얻어진 1일 중의 중규모 지역기상장의 시간변화에 따른 바람장의 결과로부터 각 시간 단계별 취송류의 변동상황을 육상지형의 기록을 무시한 경우와 고려한 경우의 일정수심을 가진 단순모형의 연안해역에 대해 수치해석하였다.

본 수치계산에서는 취송류의 발달상황과 이에따른 표층과 저층 뿐 만아니라 평균류 흐름, 취송류에 따른 수위상승량을 각각 계산하였으며, 여기에서는 표층에서의 흐름분포를 도시하였다. 그림에서 보듯이 육상지형의 변화에 의해 바람이 크게 달라지게 되며 이의 결과로 취송류가 변하고 있다. 특히 1일중에서도 취송류의 특성이 육풍이 강하게 되는 야간에는 외해측으로 그리고 해풍이 지배하는 동안에는 해안측으로의 취송류 특성이 강하게 나타나고 있다. Fig. 6에 육상지형의 영향을 고려한 취송류 계산결과를 시간별로 제시하였으며 그림에서 보듯이 취송류의 특성이 육상지형에 의한 영향을 강하게 받고 있으며 이에 따라 연안에서의 취송류 양상이 시간에 따라 그리고 Fig. 5의 육상지형을 무시한 취송류의 결과와 다소 차이가 나타나고 있으며 육상지형의 영향에 크게 변화하고 있음을 확인하였다.

4.2 실제해역에의 적용

실제 연안해역에서의 지형의 기록과 토지이용상황에 따른 중규모 지역(Meso scale) 기상장의 특성과 이에 따른 취송류장의 변동을 해석하기 위해 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 강원도 영동지방을 대상으로 강릉을 중심으로 남측으로는 동해시에서 북으로는 속초시까지의 범위를 계산대상 지역으로 하였으며, 서측으로는 태백산맥의 전체영역이 포함되도록 하였다. 본 영동지방은 평야부가 좁고 그 배후에 해발 1200m 이상의 태백산맥이 존재하고 있어 해륙풍계는 물론 산곡풍계의 영향을 동시에 받게 된다. 이때문에 해륙풍계의 입체구조 자체는 매우 복잡하며 기구의 이해 또한 매우 어렵다. 일반풍이 거의 없고 맑아 해륙풍이 발달하여 입해지역을 덮고 있는 폐쇄형 순환류가 형성되는 경우 중규모지역 바람장의 입체구조는 복잡하고 높이에 따라 풍향과 풍속이 크게 변화하여 흐름양상이 하루를 통해 역전하고 시간과 장소에 따른 변화가 복잡하므로 이의 특성을 이해하는 것이 중요하다.

본 수치계산을 수행하기 위하여 수평격자 간격( $\Delta x = \Delta y$ )은 500m, 110×150의 격자점을 이용하였으며 연직방향으로 10층으로 나누어 오전 08시부터 4일동안 계산을 수행하여 마지막 1일 동안의 바람장 결과를 사용하였다.

Fig. 8(a) ~ Fig. 8(f)에는 지상 10m 상공에서의 바람장을 3일째 12시부터 4일째 08시까지 4시간 간격으로 도시하였다. 그림에서 보듯이 주간에는 해풍과 곡풍이 탁월하며 야간에는 육풍과 산풍이 탁월하게 나타났다. 또한 전체 영역내에서 지상풍의 변화가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그림에서 보듯이 12시

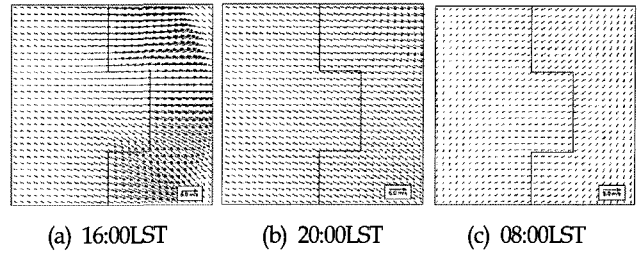


Fig. 3 Horizontal wind vectors without land topography

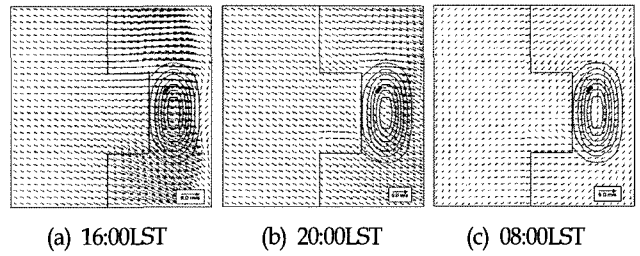


Fig. 4 Horizontal wind vectors with land topography

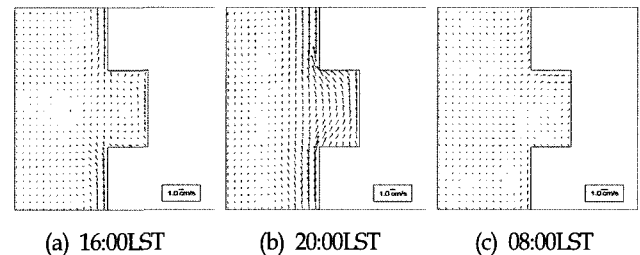


Fig. 5 Surface flow of wind driven current without land topography

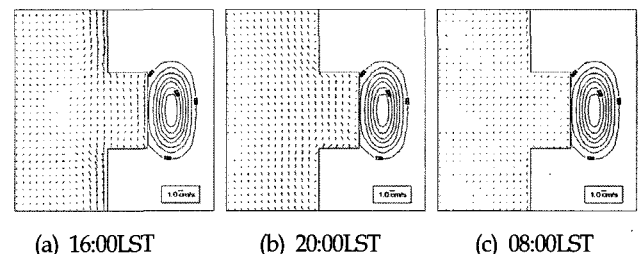


Fig. 6 Surface flow of wind driven current with land topography

경부터 대상영역 전체에 E계열의 해풍이 불기 시작하여 16시 경에 풍속이 최대가 되어 24시 경에는 산지에서 육풍이 발생하여 이같은 현상은 08시까지 이어짐을 알 수 있었다. 전체적인 풍향은 해풍이 강한 주간에는 E 계열이 강하며 육풍이 나타나는 야간에는 해안선 부근에서 SE 및 S 계열의 풍향이 강한 것으로 예측되었다.

그리고 중규모지역 기상장 모형으로부터 얻어진 바람장의 결과로부터 각 시간단계별 취송류의 변동상황을 동일한 격자망의 동해안 대상해역에 대해 적용하였다. 본 수치계산의 결과는 Fig. 9, 10에 각각 표층류와 평균류에 대한 흐름분포를 도시하였다. Fig. 9에서 보듯이 해륙풍장의 변동에 따라 표층류 양상이 약간씩 다르게 나타나고 있다. 12시 경에는 전체해역에서

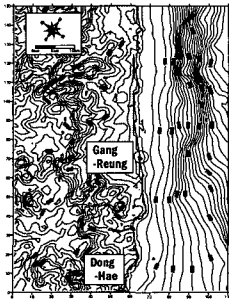


Fig 7 Map of Yeongdong Area used in the experiment

E계열의 표면류가 나타나고 있으며, 20시 경에는 표면류가 SE 계열로 변화하여 해안선을 따라 흐르며, 그리고 04시에는 해안선 부근에서는 육풍의 영향에 의해 외해측으로의 흐름이 나타나고 있음을 보여주고 있다. Fig. 10에는 취송류에 의한 평균류의 흐름 특성을 제시하였으며, 해안선부근에 지형적 특성에 따라 다소 복잡한 흐름양상을 보이고 있다. 전체적으로 E 및 SE 계열의 흐름이 나타나고 있으며 해안선의 지형적인 영향에 따라 시계방향의 흐름셀이 국부적으로 나타나고 있다.

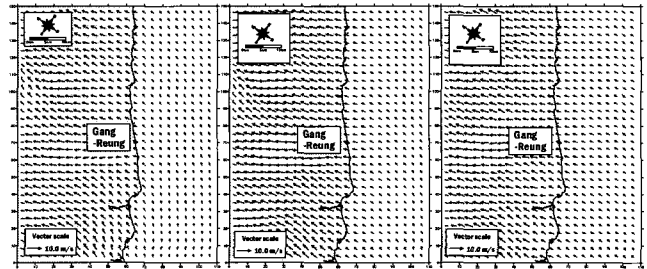
5. 결 론

본 연구에서는 연안해역에서의 고유한 국지풍계인 해륙풍장에 의한 취송류의 특성을 파악하기 위한 수치모형을 개발하였으며, 해륙풍장의 해석은 육상지형과 지표면 경계에서의 열수지 변화 특성을 고려할 수 있는 단층의 식생모형을 적용한 중규모지역 기상장 모형을 적용하여 해석하였다.

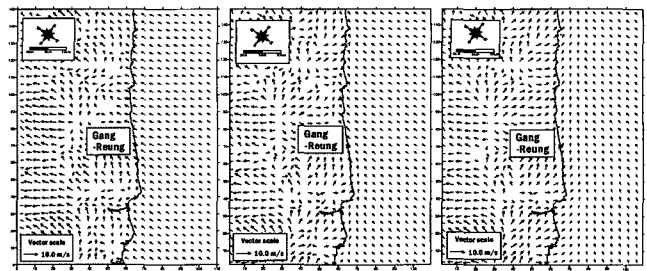
바람장 모형은 정역학적 평형을 가정하였으며 시간에 따른 풍향, 풍속의 변동특성을 해석하고 이의 결과를 취송류장 해석의 입력자료로 사용하여 바람장 변동에 따른 취송류장의 1일 동안의 변동을 Koutitas(1986)의 모형에 적용하여 수치해석하였다. 그 결과 본 수치모형은 임해지역의 고유국지풍인 해륙풍장의 특성을 타당성있게 예측하였으며, 해상풍은 해안선 근방에서는 해안선에 거의 수직으로 나타났다. 전체적으로 해풍에 비해 육풍의 크기가 상대적으로 약하게 나타났으며, 이는 육지의 지형기복과 토지이용변화 특성을 전역지역으로 단순화하므로서 주간과 야간의 바다와 육지측에서의 온도차가 크게 된 때문이라 판단되었다. 특히 우리나라 동해안 지역에 적용한 결과 이같은 특성이 매우 잘 나타나고 있으며, 특히 야간에 육풍과 산풍이 결합하여 육지측에서 다소 복잡한 바람특성이 예측되었다.

그리고 바람장의 결과를 통해 취송류장을 해석하였으며, 해륙풍장의 변동에 따른 취송류의 변동을 대체로 잘 예측하고 있으며, 특히 우리나라 동해안 연안에서의 취송류장은 해안선을 따라 북측으로 발생하고 있으며, 지형적인 영향에 의해 시계방향의 흐름셀이 형성되고 있음을 예측하였다.

본 연구에서는 연안역에서의 중규모 지역기상장에 따른 취송류장의 예측을 위한 수치모형의 적용시도에 중점을 두었기 때문에 수치모형에 포함되는 많은 변수의 적절한 선정과정은

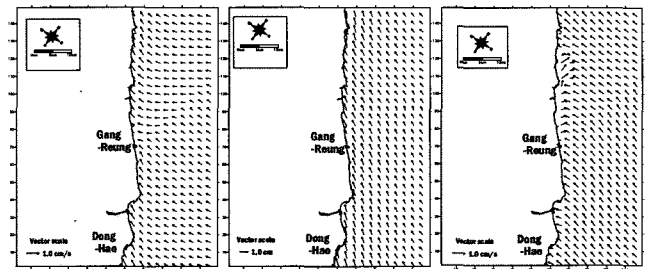


(a) 12:00LST (b) 16:00LST (c) 20:00LST



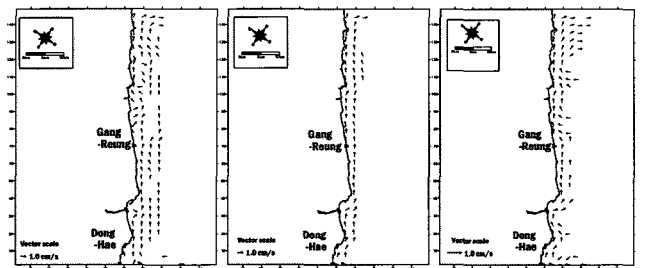
(d) 24:00LST (e) 04:00LST (f) 08:00LST

Fig. 8 Horizontal wind vectors over Yeongdong Area in Gangwon-Do



(a) 12:00LST (b) 20:00LST (c) 04:00LST

Fig. 9 Surface flow of wind driven current



(a) 12:00LST (b) 20:00LST (c) 04:00LST

Fig. 10 Mean flow of wind driven current

이루어 지지 않았다. 따라서 본 수치모형이 보다 실제에 근접한 합리적인 모형이 되기 위해서는 파라미터의 검토와 현장관측자료와 연계하여 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되며 이에 관해서는 계속적인 연구과제로 남겨둔다.

## 참 고 문 헌

- 이성대 (2000). "대규모 해안매립에 따른 기상장 변동의 수치해석", 한국해양공학회논문집, 제14권, 제3호, pp 46-54.
- Deardorff, J.W. (1978). "Moisture with inclusion of a layer of vegetation", J. Geophys. Res., Vol 83, pp 1898-1903.
- Jin, K., Ji, Z. and Hamrick, J.H. (2002). " Modeling winter circulation in lake Okeechobee, Florida", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrng., Vol 128, No 3, pp 114-125.
- Koutitas, C and Koutita, M. (1986). "A comparative study of three mathematical model for wind-generated circulation in coastal areas", Coastal Engineering, Vol 10, pp 127-138.
- Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). "Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems", Rev. Geophys. Space Phys., Vol 20, pp 851-875.
- Pielke, R.A. (1984). Mesoscale meteorological modeling, Academic Press.
- Rogers, D.P. (1995). "Coastal Meteorology", US. National Report to IUGG , Rev. Geophys., Vol 33.
- Yamaguchi, K., Kondo, A. and Lee, S.D. (1992). "Three-dimensional numerical simulation of land and sea breezes at Ulsan, Korea", Tech. Rep. of Osaka Univ., Vol 42, pp 207-214.

---

2006년 7월 13일 원고 접수

2006년 9월 22일 최종 수정본 채택