

# 육상지형을 고려한 연안해역에서의 취송류에 관한 수치해석

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

이성대\*, 김인호\*\*, 홍창배\*  
Seong Dae Lee, In Ho Kim, Chang Bae Hong

### 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 wind generated 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 was determined through the surface heat budget consideration with 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.

*Key words:* Wind-Generated Circulation, Meso-scale Air Flow, Land Topography, Surface Heat Budget, Numerical Analysis

### 요 지

흐름의 연직분포를 가정하여 수면에서 바닥까지 적분하여 평균화한 방정식에 기초한 준2차원 흐름모형을 연안해역에서의 취송류해석을 위해 적용되었다. 바람장의 변동에 따른 취송류장의 변동이 크게 나타나므로 본 연구에서는 육상지형의 영향을 고려할 수 있는 3차원 중규모 지역기상장 모형을 통해 연안해역에서의 시간에 따른 바람장변동을 수치해석 하였다. 육상에서의 지표면 열수지 변화를 위해 식생모형을 적용하였다. 기상장과 취송류 해석을 위한 수치모형실험결과 바람장의 변동에 따른 연안역에서의 흐름특성을 효과적으로 예측하고 있음을 확인하였다.

**핵심용어:** 취송류, 중규모 지역기상장, 육상지형, 지표면 열수지, 수치해석

## 1. 서 론

연안해역에서의 흐름은 조류, 해류, 밀도류 및 취송류와 같은 다양한 흐름이 복합적으로 작용하고 있으며 특히 해난사고에 의한 기름유출과 이에 따른 인근해역의 해양환경오염이 관심의 대

\* 정회원 · 한라대학교 토목공학과 교수 · E-mail : sdlee@hit.halla.ac.kr  
\*\* 정회원 · 강원대학교 소방방재학부 교수 · E-mail : kimih@kangwon.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 한라대학교 산업대학원 석사과정

상이 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 특성은 해륙풍과 같은 중규모 지역 기상장의 영향을 받고 있을 뿐 아니라 육상지형의 변동에 따른 지역풍의 영향을 동시에 받고 있으므로 시공간에 따른 바람의 변동이 극심하게 나타나고 있다. 따라서 이들의 영향을 고려한 바람장의 해석이 이루어져야 한다. 우리나라의 임해지역은 최근 도시화 및 공업화의 진행에 따라 지표면에서의 열수지 변화가 이루어지고 있으며, 이같은 지표면경계의 열적특성에 따른 해안선 부근의 국지풍 순환인 해륙풍 변동상황을 이해하고 그 풍계를 파악하는 것이 필요하다. 그리고 지표면 열수지 변화에 관해서는 식생환경을 고려한 녹지환경의 중요성이 인식됨에 따라 이에 관한 다양한 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 취송류해석의 기초자료가 되는 바람장 해석을 위해 연직상향의 대상영역을 두개의 층으로 나누어 지표면에 가까운 접지층에서 연직방향확산계수는 Businger의 보편함수를, 그리고 상층부인 Eckman층에서는 Yamada의 난류closure모형을 각각 적용하여 계산하였다.

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 1일동안의 시간에 따른 바람장 해석결과를 사용하였다. 취송류의 수치해석은 유속을 수심으로 평균한 2차원모델과 수심에 따라 유속분포를 몇 개의 층으로 나누어 근사시킨 3차원 모델 등이 있으나, 2차원모형은 해저지형변동과 관련된 해저부근에서의 흐름을 파악하기 어려우며 3차원 모형은 연산시간에 대한 부담이 증가하여 실용성 측면에서 부담이 되고 있다. Koutitas et al.(1985)은 이같은 관점에 착안하여 연안해역에서의 취송류해석을 위해 흐름의 연직분포를 가정하여 수면에서 바다까지 적분하여 평균화한 방정식에 기초한 준2차원 흐름모형을 제안하였으며 여기서는 이들의 모형을 적용하였다.

본 연구에서는 일정수심의 연안모형을 대상으로 지표면의 열수지 변화 특성을 고려할 수 있는 식생모형을 적용한 중규모지역(수평방향크기;10~100km)에 대해 정역학평형을 가정한 기상장모형을 이용하여 연안해역에서의 육상지형 변동에 따른 바람장의 시간적 변동을 해석하고 이의 결과를 취송류장 해석의 입력자료로 사용하여 시간에 따른 연안해역의 바람장 변화에 따른 취송류장의 변동을 준2차원 흐름장 모형에 적용하여 수치해석하여 임해지역의 개발 및 토지이용 계획수립을 위한 기초자료를 제공하는 것이다.

## 2. 기본방정식

### 2-1. 중규모 지역기상장 모형

중규모 지역 기상장 예측을 위한 기초방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

여기서  $P$  는 압력(mb),  $P_{oo}$ 는 기준압력(=1000mb),  $R$ 은 건조공기 가스정수,  $C_p$ 는 정압비열,  $\theta$ 는 온위,  $q_v$  는 비습,  $f$  는 Coriolis 계수,  $K_H$  는 수직방향 확산계수,  $K_v^m$ ,  $K_v^e$ ,  $K_v^q$  는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향 확산계수를 나타낸다.

본 모델에서는 장방형 격자에서 수치계산을 행하는 경우, 직교좌표계에서는 임의로 지형을 나타낼 수 없음을 고려하여 다음과 같은  $Z^*$ 좌표계를 이용하였다.

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

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 Profile 을 이용하여 운동량과 열의 연직확산계수를 결정하였으며, Eckman층에서는 Yamada의 난류 Closure Model 을 이용하여 연직방향확산계수를 계산하도록 하였다.

지표면 열수지의 계산은 식생을 고려한 모델을 사용하였으며, 식(8)과 같은 식생상에서의 열 수지식에서 부터 식생내 온도  $T_{af}$ 와 비습  $q_{af}$ 를 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 장파반사이며 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,  $af$ 는 식생내부 그리고  $g$ 는 지면을 각각 나타내고 있다.

본 연구에서 적용하는 모형은 해륙풍이나 지형의 영향을 고려하는 산곡풍장을 해석하는데 적용하는 수평방향의 크기 10 ~ 100km범위를 가지는 중규모 기상장 모델을 기본으로 하였다.

## 2-2. 취송류장 모형

취송류 해석을 위해 흐름의 연직방향 분포를 가정하여 자유수면에서 바닥까지를 적분하여 평균화한 방정식을 계산 모형으로 적용하였으며 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \left(0.2U + \frac{a_x}{40}\right) \frac{\partial U}{\partial x} + \left(0.2V + \frac{a_y}{40}\right) \frac{\partial U}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fV + \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \left[0.18 \frac{U}{h} \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} - 0.5 \frac{\tau_{sx}}{\rho h}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \left(0.2U + \frac{a_x}{40}\right) \frac{\partial V}{\partial x} + \left(0.2V + \frac{a_y}{40}\right) \frac{\partial V}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fU + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \left[0.18 \frac{V}{h} \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} - 0.5 \frac{\tau_{sy}}{\rho h}\right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uh) + \frac{\partial}{\partial y}(Vh) = 0 \quad (11)$$

초기조건으로는  $U, V, \eta$ 를 0으로 두었으며 경계조건으로서는 경계면에 대해 수직인 방향의 유속은 0, 평행한 유속성분에 대해서는 활동조건을, 외해측 경계에서는 방사조건을 적용하였다.

(9), (10) 및 (11)식으로 부터  $U, V, \eta$ 를 얻어 가정한 (13)식의 연직분포식으로부터 수심방향의 속도성분을 계산할 수 있다.

$$\vec{\alpha} = \left( \frac{3\vec{a}}{4} - \frac{3\vec{U}}{2} \right) \left\{ \left( \frac{z}{h} \right)^2 - 1 \right\} + \vec{a} \left( \frac{z}{h} + 1 \right) \quad (12)$$

여기서  $\vec{a}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{a} = \frac{h\vec{\tau}_s}{\rho\nu_s} \quad (13)$$

그리고, 표면유속  $u_o$ 는  $z/h=0$ 에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_o = \frac{3}{2}\vec{U} + \frac{1}{4}\vec{a} = \frac{3}{2}\left( U + \frac{a_x}{6} \right)\vec{i} + \frac{3}{2}\left( V + \frac{a_y}{6} \right)\vec{j} \quad (14)$$

### 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 풍상차분을, 확산항은 양해법인 신 Dufort-Frankel법, 시간에 대해서는 전진차분법을 각각 이용하였으며 기타 항은 중심차분을 사용하였다. 그리고 시간step  $\Delta t$ 는 계산비용과 안정성 등을 고려하여  $\Delta t = 120\text{sec}$ 로 하였다. 그리고 수평방향(X-Y 평면)의 격자간격은  $\Delta x = \Delta y = 3.0\text{Km}$ 인 균등격자를, 격자점은  $30 \times 30$ 을 사용하였으며 연직방향은 높이 3000m까지를 10층으로 분할하고  $u, v$ 의 2번째 격자점의 높이 50 m를 접지층이라 가정하였다. 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 전단응력은 격자의 경계에 나타내었다. 그리고 차분화는 시간항에 대해서는 전진차분을 공간항에 대해서는 중앙차분을 사용하였으며 경계조건으로서 외측경계상에 일정크기의 가상격자를 설치하였다.

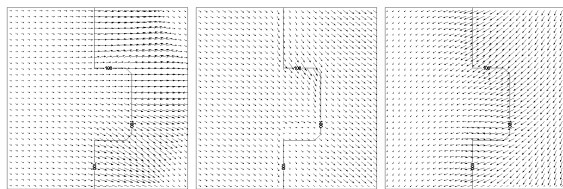
## 4. 계산결과

### 4-1. 중규모 지역기상장 계산결과

임해지역에서의 토지이용의 변화 및 육상지형의 기복에 따른 해안지역의 고유 국지풍계인 해륙풍의 변동과 일반풍이 존재하는 경우 중규모 지역기상장의 시간변화에 따른 영향을 예측하기 위해 육상 지형의 기복을 무시한 경우와 고려한 경우에 대해 단순한 연안해역을 대상영역으로 계산을 수행하였다. 토지이용 상황은 대상지역 전체를 전원지역으로 하여 지표면 열수지 계산은 식생을 고려한 모형을 사용하였다. 중규모 지역기상장의 변화특성은 계절 및 기상특성에 따라 크게 달라지는 경향을 보이고 있으나 여기서는 운량이 0인 경우를 대상으로 하였으며 계산은 오전08:00 부터 4일간 수행하여 마지막 1일동안의 바람장 결과를 사용하였다.

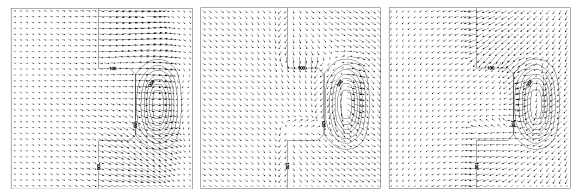
임해지역에는 해면에서의 온도와 육지의 지표면온도와의 차에 의해 낮 동안에는 지표면 온도가 해면 온도보다 높기 때문에 해풍이 그리고 야간에는 육풍이 분다. 일반풍이 거의 없는 청천일인 경우 이같은 해륙풍장은 매우 발달하는 경향이 있으며, 해륙풍장이 일반풍과 만나는 경우 국부적으로 매우 강한 바람장 변동이 나타나기도 한다. 따라서 이같은 바람의 특성을 이해함으로써 연안해역에서의 시간 및 공간적 바람장 변동 및 취송류의 예측이 가능하다.

Fig. 1, Fig. 2에서는 일반풍이 없는 상태에 지형의 기복을 무시한 경우와 고려한 경우에 대한 바람장의 변동을 수치계산개시 4일째의 계산결과 중 지표로부터 높이 10m의 풍속분포(해상풍)를 8시간 간격으로 각각 1일분을 나타내었다. 그림에서 보듯이 주간에는 해풍이 강하게 나타나고 있으나 야간에는 육풍이 다소 나타나고 있고, 전체 대상영역내에서 지상풍의 변화가 나타남을 알 수 있다. 그리고, Fig. 3에서는 외해측으로부터 10m/s의 일반풍이 존재하는 경우 지형 기복의 유무에 따른 바람장의 변동을 제시하였다. 계산결과에서 알 수 있듯이 일반풍의 영향에 해륙풍의 영향이 상대적으로 감소하고 있으며 특히 육상지형을 고려한 경우 지형의 영향에 의해 다소 복잡한 풍계의 특성이 나타나고 있다.



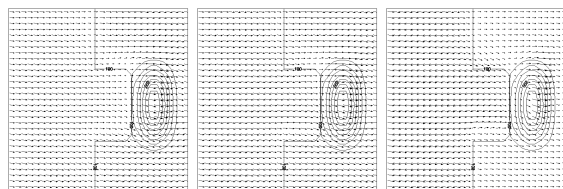
(a) 16:00LST (b)20:00LST (c)08:00LST

Fig. 1 Wind vectors without land topography

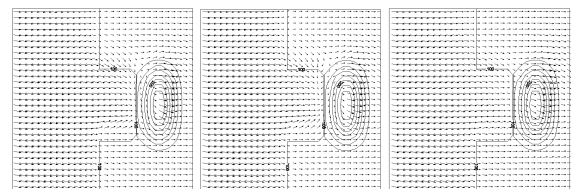


(a) 16:00LST (b)20:00LST (c)08:00LST

Fig. 2 Wind vectors with land topography



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



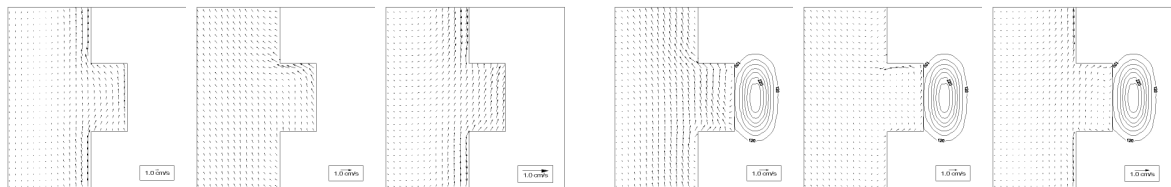
(d) 24:00LST (e)04:00LST (f)08:00LST

Fig. 3 Horizontal wind vectors with the effects of terrain and geostrophic wind

### 4-2. 취송류장 계산결과

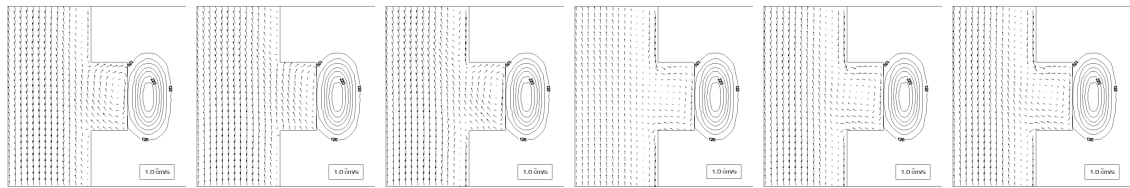
중규모지역 기상장 모형으로부터 얻어진 1일중의 중규모 지역기상장의 시간변화에 따른 바람

장의 결과로부터 각 시간단계별 취송류의 변동상황을 육상지형의 기복을 무시한 경우와 고려한 경우의 일정수심을 가진 단순모형의 연안해역에 대해 수치해석하였다. 본 수치계산에서는 취송류의 발달상황과 이에 따른 표층과 저층 뿐 만 아니라 평균류 흐름, 취송류에 따른 수위상승량을 각각 계산하였으며 여기에서는 표층에서의 흐름분포를 도시하였다. 그림에서 보듯이 육상지형의 기복에 따라 바람장의 변동이 크게 나타나고 있으며 이에 따른 취송류의 변동이 나타나고 있다. 특히 1일중에서도 취송류의 양상이 육풍이 강하게 되는 야간에는 외해측으로 그리고 해풍이 지배하는 동안에는 해안측으로의 취송류 특성이 나타나고 있다. 상층부에 외해측에서 해안역으로 10m/sec의 일반풍이 존재하는 경우, 육상지형의 영향을 고려한 취송류 계산결과에서 보듯이 육상지형을 강하게 받고 있으며 이에 따라 연안에서의 취송류 양상이 시간에 따라 크게 변화하고 있음을 확인하였다.



(a) 16:00LST (b)20:00LST (c)08:00LST (a) 16:00LST (b)20:00LST (c)08:00LST

Fig. 4 Current vectors without land topography Fig. 5 Current vectors with land topography



(a) 12:00LST (b)16:00LST (c)20:00LST (d) 24:00LST (e)04:00LST (f)08:00LST

Fig. 6 Wind generated current vectors with the effects of terrain and geostrophic wind

## 5. 결 론

육상지형이나 지표면 경계에서의 열수지 변화 특성을 고려할 수 있는 식생모델을 적용한 중규모 모지역에 대해 정역학적 평형을 가정한 기상장모형을 이용하여 연안해역에서의 바람장의 시간적 변동을 해석하였다. 그리고 이의 결과를 취송류장 해석의 입력자료로 사용하여 시간에 따른 취송류장의 변동을 Koutitas(1986)의 모형에 적용하여 수치해석하였다. 그 결과 육상에서의 지형효과 및 식생의 영향을 고려한 기상장의 결과 연안해역의 전형적인 바람장의 특성을 잘 재현하였다. 그리고 취송류 해석결과 바람장의 변동에 따른 연안역에서의 흐름특성을 효과적으로 예측하고 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

Koutitas, C and Koutita, M.(1986). A comparative study of three mathematical models for wind-generated circulation in coastal areas, Coastal Engineering, 10, pp. 127-138.