

도시확장에 따른 수문기상장의 변화에 관한 연구

A Study on Hydro-Meteorology Fields Subject to Enlargement of City

이범주* · 이희철** · 김인호*** · 이성대**** · 이은태*****

1. 서론

경제성장과 더불어 도시로의 인구집중 현상은 신도시의 발생을 유발시킨다. 따라서 이들을 구성하고 있는 건축물 및 도로 등과 같은 인공환경은 대부분이 콘크리트 및 아스팔트 등과 같이 물에 비해 열용량이 적은 물질이므로 동일한 일사를 받아도 식물과의 사이에 온도차가 크게 난다. 이것은 도시 구조물의 열용량 및 열전도도가 토양보다 커서 태양에너지를 받는 면적이 교외보다 크고, 화석연료 사용에 의한 도시 자체의 발열량의 증가와 더불어 지표면이 구조물에 덮여서 증발 면적이 적어지고 증발열 손실의 상대적인 감소에 의한 온실효과에 기인하기 때문이다.

따라서 기존의 열수지 해석문제는 식생에 의한 영향을 무시하거나 수분 등을 간단히 상수로 취급하여 왔으나, 본 연구에서는 생물의 다양성과 기상의 다양성 사이에는 어떤 함수관계가 존재한다고 생각되어 이를 새로운 도시수문기상학의 관점에서 접근하고자 한다. 이들 수문기상장의 해석을 위해서는 난류장을 해석하는 것이 필수적이기 때문에, 본 연구에서는 연직방향의 대상영역에 따라 지표면에 가까운 접지층에서는 Moning-Obukhov의 상사법칙에 의한 Businger의 보편함수를 사용하고, 상층부에서는 Yamada의 난류모형을 사용하여 계산하였다.

본 연구에서는 지표면의 열수분수지 변화특성을 고려한 수문기상장 모형을 이용하여, 최근 신도시가 개발 중인 수원 영통지구를 대상영역으로 선정하여 모형의 적용성을 검토하고자 하며, 향후 임의지역에서의 토지 이용개발계획에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 기본방정식

본 연구에서 사용된 기본방정식계는 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존법칙에 기초한 운동방정식, 온도방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학평형방정식 등으로 구성되며, 수치해석을 수행할 때에 사용할 유한차분 근사식을 유도한다. 이 때 차분근사의 시간항은 전진차분법(Forward Difference Scheme), 이류항은 풍상차분법(Up-Wind Difference Scheme), 확산항은 수정 Dufort-Frankel법, 이외의 항은 중앙차분법(Central Difference Scheme)을 사용한다.

(1) 운동방정식

$$\frac{du}{dt} = fv - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial x} + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(m)} \frac{\partial u}{\partial z^*}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial y} + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(m)} \frac{\partial v}{\partial z^*}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (2)$$

* 정회원 · 경희대학교 토목 · 건축공학부 토목공학전공 석사과정
 ** 정회원 · 경희대학교 토목 · 건축공학부 토목공학전공 박사과정
 *** 정회원 · 동해대학 토목과 전임강사
 **** 정회원 · 한라대학교 건설공학부 부교수
 ***** 정회원 · 경희대학교 토목 · 건축공학부 교수

(2) 온위방정식

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s-z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z^*}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \theta}{\partial y}) \quad (3)$$

(3) 비습방정식

$$\frac{dq}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s-z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(q)} \frac{\partial q}{\partial z^*}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial q}{\partial y}) \quad (4)$$

(4) 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s-z_G} (u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y}) + \frac{1}{s-z_G} (\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y}) = 0 \quad (5)$$

(5) 정역학방정식

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = -\frac{s-z_G}{s} \frac{g}{c_p \theta}, \quad \Pi = \left(\frac{P}{P_\infty}\right)^{R/C_p} \quad (6)$$

(6) 지중온도방정식

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

여기서 P는 압력(hecto-Pascal), P_∞는 기준압력(=1000hPa), R은 건조공기의 가스정수, C_p는 정압비열, g는 중력가속도, x,y,z는 직교좌표계의 동서, 남북, 연직방향, u,v,w는 x,y,z방향의 속도성분, t는 시간, θ는 온위, q_v는 비습, f는 코리올리 계수, K_v^m, K_v^θ, K_v^q는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향 확산계수, T_s는 지중온도, K_s는 흙에서의 열확산계수를 나타낸다.

또한, 본 연구에서는 장방향격자에서 수치계산을 행하는 경우, 직교좌표계에서는 임의로 지형을 나타낼 수 없음을 고려하여 凹凸에 따른 Z*좌표계를 이용하였다. Z*좌표계에 의한 변환식은 다음과 같다.(Pielke, 1984)

$$z^* = s \frac{z - z_G}{s - z_G} \quad (8)$$

여기서, z는 높이, z_G는 표고, s는 계산영역의 높이이다.

3. 초기조건 및 경계조건

3.1 초기조건

전체 영역이 정류상태라고 가정하여 계산의 초기조건은 다음과 같이 설정하였다.

- (1) 수평방향 및 연직방향의 풍속성분은 전 영역에서 $u = v = w = 0$ 로 설정하였다.
- (2) 일반풍이 없는 경우에 온위의 초기조건은

$$\theta = \theta_{water} + \Gamma \{z^* [\bar{s} - z_G(x, y)] \bar{s}^{-1} + z_G(x, y)\} \quad (9)$$

여기서, Γ는 연직방향의 온위구배이다.

- (3) 압력 Π에 대해서는 좌표 원점에서의 값을 1013 hpa로 가정하고 온위의 초기분포를 사용해서 측면 상단의 값을 결정했다
- (4) 비습에 대해서는 다음의 식을 사용했다.

$$q = q_{g0} + \Gamma_q \{z^* [\bar{s} - z_G(x, y)] \bar{s}^{-1} + z_G(x, y)\} \quad (\text{무풍}) \quad (10)$$

여기서, q_{g0}는 지표면에서의 초기비습, Γ_q는 연직방향의 비습구배이다.

- (5) 토양온도의 초기조건은 다음과 같이 정의하였다.

$$T_s = \theta_g = \theta_{sea} \quad (11)$$

3.2 경계조건

(1) 지표면에서의 온위 및 비습에 대한 경계조건은 식생의 영향을 고려하여 계산하였다.

$$\theta_{\text{land}} = \sigma_f \theta_f + (1 - \sigma_f) \theta_g \quad (12)$$

$$\theta_{\text{water}} = 300[K] \quad (13)$$

$$\theta_g = \frac{\theta_{\text{water}} + \theta_{\text{land}}}{2} \quad (14)$$

$$u = v = w = 0 \quad (15)$$

여기서, θ_g 와 θ_f 는 식생모형에서의 T_g 와 T_f 를 온위로 변환한 지면 및 잎에서의 대표 온위이다.

(2) 지표면 가열에 의해 발생하는 일변화는 상층부에는 영향을 미치지 않는다고 가정하여 상층부 경계조건은 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

(3) 측면에서의 경계조건

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 \quad (\text{유입}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (\text{유출}) \quad (18)$$

여기서, c 는 교란의 위상속도(celerity)로서 Brunt-Väisälä frequency의 함수(Durran et. al, 1982)이고 $\partial/\partial n$ 은 측면의 법선 방향의 미분이다.

3.3 확산계수의 선정

본 모형에 사용된 가장 적절한 상수를 결정하기 위해 연직방향 확산계수는 대기가 매우 안정된 대기층내에서는 이론상으로 $K_v = 0$ 이 되지만 실제로는 여러 가지 원인에 의해 난류가 존재하기 때문에 미소 크기의 난류 확산계수를 설정해야 한다. 따라서 대기 흐름장의 계산에서는 일반적으로 $K_{v \min}$ 값을 일정하게 하는 경우가 대부분이므로 본 연구에서는 $K_{v \min} = 5.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 설정하였다. 또한 수평방향 확산계수는 계산이 불안정하게 되지 않을 정도의 큰 값인 $K_H = 1000 \text{ [m}^2/\text{s]}$ 로 설정하였다.

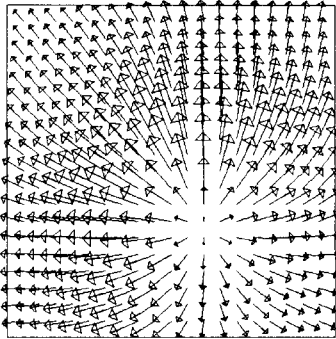
4. 모형의 적용

본 모형의 적용 대상지는 대단위 택지조성으로서 수도권 주택난 완화와 계획적인 도시개발을 통한 합리적인 도시공간구조 형성, 그리고 기존 도시구조와 연계한 신시가지 조성으로서의 보완적인 기능 수용을 목적으로 하며, 계획수용인구는 10만명이고 계획수용호수는 25,000호의 규모를 갖고 있는 영통지구를 선정하였다. 인근에는 수원시와 접하여 있고, 또한 해발 150m이내의 야산을 기준으로 1km 이격하여 신갈저수지가 위치하고 있다.

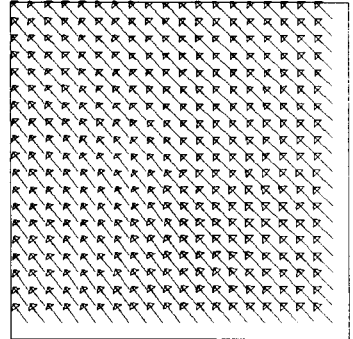
금번 연구에서는 이들 실제 지형을 적용하기 위한 초기작업으로, 모형의 적용성을 검토하기 위하여 대상 영역을 단순화하였으며 대상영역을 수직방향의 동일한 격자간격($\Delta X = \Delta Y = 500\text{m}$), 20×20 로 분할하여 격자점을 사용하였으며, 연직 방향은 3050 m를 10층으로 나누고, 지층 구조는 1m를 14층으로 분할하여 적용하였다.

계산은 특정한 날의 오전 08:00시부터 2일간 계산을 수행하여 풍속 및 온위 등을 계산하였다.

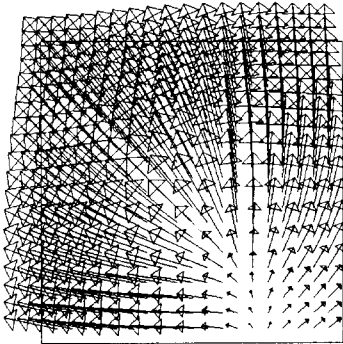
5. 적용결과 및 논의



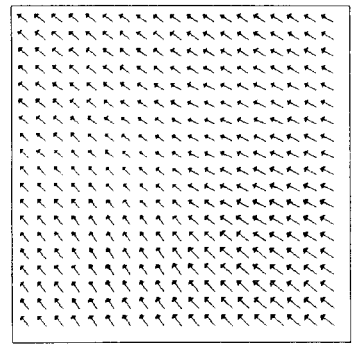
(1) 1200 LST



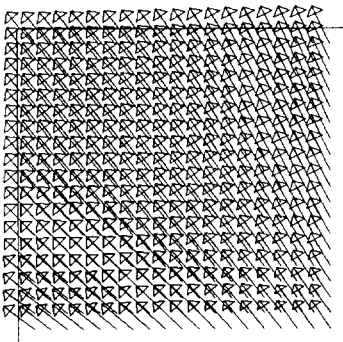
(4) 2400 LST



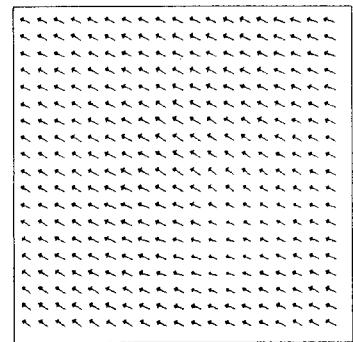
(2) 1600 LST



(5) 0400 LST

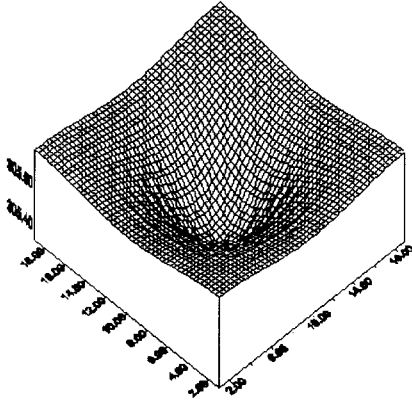


(3) 2000 LST

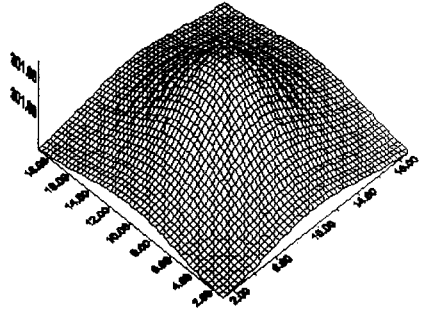


(6) 2400 LST

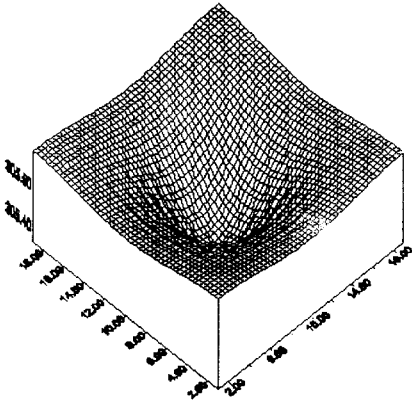
그림 1. 4시간별 풍향도



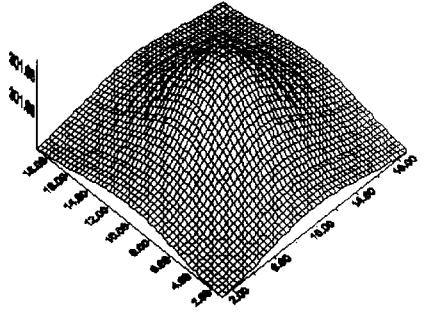
(1) 1200 LST



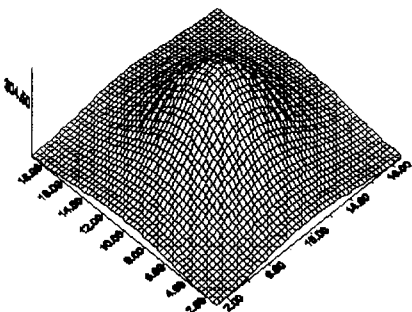
(4) 2400 LST



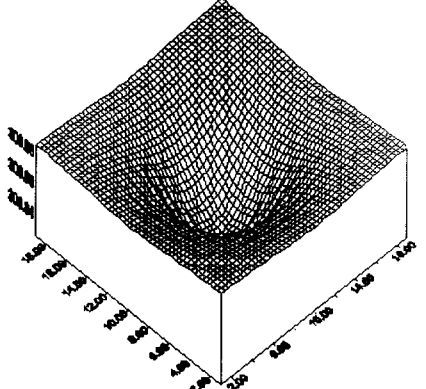
(2) 1600 LST



(5) 0400 LST



(3) 2000 LST



(6) 0800 LST

그림 2. 4시간별 온위도

그림1.은 대상영역의 풍향도에 대한 실험 결과를 4시간별로 도시하였다. 이 결과 일출이 시작되면서 도시영역에서의 바람장이 형성되기 시작하였으며 일몰이 되면서부터 반대의 현상이 재현되고 있다. 그림 2.는 4시간별 온위도의 결과를 도시하였다. 이 결과 낮동안에는 도시영역보다 도시이외의 지역이 온도장이 높게 형성되었으며 일몰이 시작되면서 도시지역의 온도장이 주위의 온도보다 크게 나타났다. 이 결과는 도시건설에 따른 지표면의 열수지특성의 시간적 변화에 기인하고 있는 것으로 사료된다. 또한 전원지역보다 도시지역에서 야간에 온도장이 높게 형성되는 것은 본 모형의 초기조건으로 도시에서의 인공배출량이 크게 주어진 것에 의한 것으로 사료된다. 따라서 본 모형은 도시수문기상장의 재현에 정성적으로 타당성이 있다고 보이며, 지표면의 열수지특성을 더욱 세분화하면 보다 더 정확한 정량적인 결과를 재현할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 참고 문헌

- 今成岳人(1989) : 植生環境に おけるしなは 熱水分收支 および 大氣汚染物質の 沈着に 關する 研究, 大阪大學
 竹内・近藤(1981) : 地表に亘る大氣, 東京大學 出版會, 219
- Allen L. H. and Lemon E. R.(1972) : Net Radiation Frequency Distribution in a Corn Corp, *Boundary Layer Meteorol.*, 3, , 246-254
- Bhumralkar C. M. (1975) : Numerical Experiments on the Computation of Ground Surface Temperature in an Atmospheric General Circulation Model, *J. Appl. Meteor.*, 14, , 1246-1258
- Deardorff J. W.(1978) : Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture with Inclusion of a Layer of Vegetation, *J. Geophys. Res.* , Vol. 83, c4, , 1889-1903
- Idso S. B., Jackson R. D., Reginato R. J., Kimball B. A. and Nakayama F. S.(1975) : The Dependence of Bare Soil Albedo on Soil Water Content, *J. Appl. Meteor.*, 14, , 109-113
- Yamada T. : A Numerical Model Study of Turbulent Airflow In and Above a Forest Canopy, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, No. 1, (1982), 429-454