

도시건설에 따른 수문기상장 변화 예측을 위한 수치모형의 개발

이 범 주 (한국종합기술개발공사 수자원개발부)

이 성 대 (한라대학교 건축·토목공학부 교수)

김 인 호 (동해대학교 건설·환경공학부 교수)

이 은 태 (경희대학교 토목·건축공학부 교수)

1. 서론

1.1 연구의 배경

1.2 연구의 내용

2. 수치해석기법

2.1 기본방정식

2.2 연직방향 확산계수

2.3 수평방향의 확산계수

2.4 지표면 열수지 모형

2.5 초기조건 및 경계조건

2.6 기본방정식의 유한차분 근사식

3. 검증실험

3.1 적용대상 및 자료의 선정

3.2 계산 정수

3.3 모의 결과

4. 모의 실험

4.1 녹지공원의 위치 이동

4.2 녹지공원의 확장

4.3 모의 결과

5. 결론

5.1 결론

5.2 향후 연구과제

참고문헌

1. 서론

1.1 연구의 배경

최근 우리나라가 고도의 산업화사회로 발전하면서 토지이용의 변화가 불가피함에 따라 자연식생환경이 파괴되고 그 대신 콘크리트, 아스팔트 등과 같은 인공환경이 들어서고 있으며 이에 따른 지역기상장의 변동 및 도시공간내 열수지양상이 변화할 것으로 예상된다.

이러한 도시의 확대와 도시기능의 고도화는 전원지역의 감소를 초래하여 대기의 고온화를 유발시킨다. 따라서, 급격한 도시화 및 공업화에 따라 대단위 녹지가 상실되고 그 대신 인공환경이 들어선다는 것은 식생에 의한 적절한 온열 환경의 유지기능과 대기의 정화기능이 상실되고 있는 것을 의미하고 있는 것이다.

육지와 해양, 호수는 입사 복사의 원인은 동일하지만 조도 및 표면의 방사 특성, 비열, 열전도율 등과 같은 열적 성질의 차이로 표면의 온도 및 비습 등의 일변화가 달라지게 되고 이 같은 지표면에서의 열 및 수분 수지 변화에 따라 도시규모의 기상장 변동으로 나타나게 된다. 그리고 대기 오염이 심한 도시 지역은 전원 지역보다 태양으로부터 입사되는 복사 에너지가 상대적으로 적지만 지구 복사 에너지는 더 잘 흡수된다. 이런 원인들에 의해 도시는 전원 지역보다 높은 온도를 유지하게 되는데 이를 도시 열섬 효과(urban heat island effect)라 한다.

도시열섬 현상을 예측하는 것은 도시에서 대량으로 소비되는 에너지 배출열과 콘크리트, 아스팔트 등의 축열효과, 도시개발에 의한 식생면적의 감소 등에 의해 형성되는 것으로 대기환경 영향 평가 및 저감대책 수립에 매우 필요한 문제가 되며, 또한 최근 경향으로도 도시 주변 지역의 도시화에 따른 토지이용 변화가 대기환경에 어떠한 영향을 미치는가를 조사·연구하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되고 있어서, 지역개발계획의 사전·예측평가에서도 중요한 문제로 제기되고 있다.

본 연구에서는 광범위한 도시개발이 중규모 기상장에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3차원 중규모 기상장모형을 개발하고 이의 검증을 위해 도시개발이 진행되고 있는 수원·영통지역을 대상으로 적용하였으며, 도시개발이 기상장에 미치는 영향을 평가하여 지역개발계획에 보다 나은 환경의 창조를 위한 시스템을 제공하고자 한다.

1.2 연구의 내용

본 연구에서는 도시개발에 따른 기상장 변동을 예측하기 위해 3차원 수치모형을 개발하였으며, 이의 검증을 위하여 수원·영통지역을 대상으로 모형을 적용하였다.

본 연구는 모형의 적용성 검증을 위한 실측값과의 비교·검증실험과 도시내의 녹지공원 위치에 따른 기상장의 영향 검토를 주 내용으로 한다.

상기의 연구내용에 대하여, 제2장에서는 연직방향 확산계수 및 수평방향 확산계수에 대한 기초방정식을 유한차분식으로 유도한 중규모 기상장 모형에 대하여 서술했다. 제3장에서는 수치모형을 검증하기 위하여 초기조건으로 사용되는 각종 변수들의 변환을 통해서 현장에서의 적용성을 검토하기 위해 수원·영통지역을 대상으로 본 수치모형을 적용시켜 관측치와의 비교 검토를 행함으로써 모형의 적용여부를 검토하고, 제4장에서는 도시내의 녹지공원의 변화에 따른 기상장 변동의 영향을 검토하기 위해 수원·영통지역 녹지공원의 위치를 임의적으로 이동하거나 확장하여 실험을 실행하였다.

끝으로 제5장에서는 본 연구로부터 얻어진 결론과 향후 과제에 대하여 언급하였다.

2. 수치해석기법

본 연구에서 적용하는 모형은 수평방향으로 크기가 10~100 km 범위를 가지는 중규모 기상장 모형을 기본으로 하였다.(Yamaguchi et al, 1992)

중규모 기상장의 해석은 대상이 되는 영역내부의 자연현상을 나타내는 기본방정식과 적절한 초기조건 및 경계조건을 이용하여 모형화할 수 있으며 특히 지표면에서의 경계조건은 급격한 도시화 및 공업화, 그리고 대규모 댐 건설 등과 같은 토지이용 변화에 따른 지표면 열수지의 시·공간적인 차이와 지형의 형상 등을 고려하였다.

2.1 기본방정식

기본방정식계는 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존법칙에 기초한 운동방정식, 운위방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식 등으로 구성된다. 지형의 기록 영향을 고려하기 위하여 직교 좌표계에서의 기본방정식을 지표면이 임의로 바뀔 경우에도 표현할 수 있는 z^* 좌표계로 변환시킨 기본방정식을 사용하였다. 직교 좌표계(z)와 변환 좌표계(z^*)의 관계는 다음과 같다

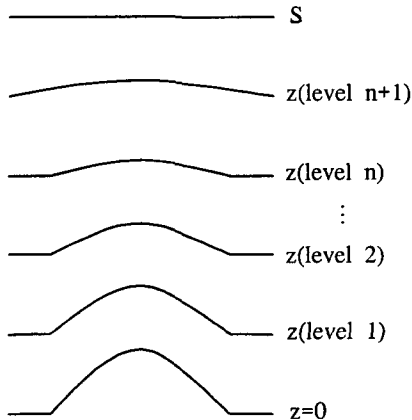


그림 2.1 z 좌표계

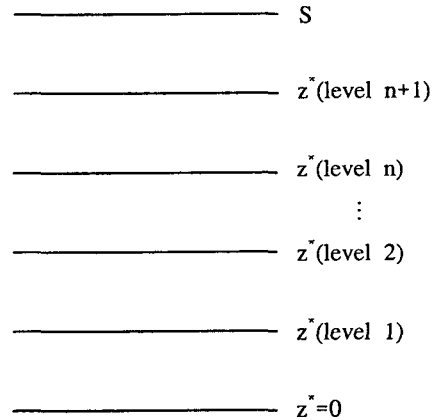


그림 2.2 z^* 좌표계

$$z^* = \bar{s} \frac{z - z_G(x, y)}{s(x, y, t) - z_G(x, y)} \quad (2.1)$$

여기서 z 는 높이, z_G 는 표고, \bar{s} 는 계산영역 최상층의 높이이다. 이 식에 의해 그림 2.1과

그림 2.1과 같이 직교 좌표계가 z^* 좌표계로 변환되어 임의 형태의 지형을 비교적 간단하게 나타내어 계산할 수 있다.

z^* 좌표계에서의 3차원 증규모 기상장을 지배하는 기본방정식은 다음식과 같이 표현된다.

운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & f v - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial x} \\ & + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & -f u - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial y} \\ & + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

온위방정식

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

비습방정식

$$\frac{dq}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(q)} \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial q}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

정역학방정식

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = - \frac{s - z_G}{s} \frac{g}{c_p \theta} \quad (2.6)$$

연속방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \\ + \frac{1}{s - z_G} \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

지중온도방정식

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

2.2 연직방향 확산계수

본 연구에서는 그림 2.3과 같이 대기 경계층을 크게 2개로 나누어 지상에서 50 m까지를 접지층, 그 위의 부분을 Ekman 층이라 하여 각각 다른 모형을 적용하였다. 즉, Ekman 층에서의 난류확산계수는 대기의 상태에 따른 현상을 대체적으로 잘 나타내고 있는 난류 Closure Model (Mellor와 Yamada, 1982)을 사용하였고, 접지층내에서는 Monin-Obukhov의 상사법칙을 기초로 한 Businger 등(1971)의 풍속 및 기온의 평균치의 연직분포를 적용하여 운동량과 열 flux 및 연직방향 확산계수를 구하였다.

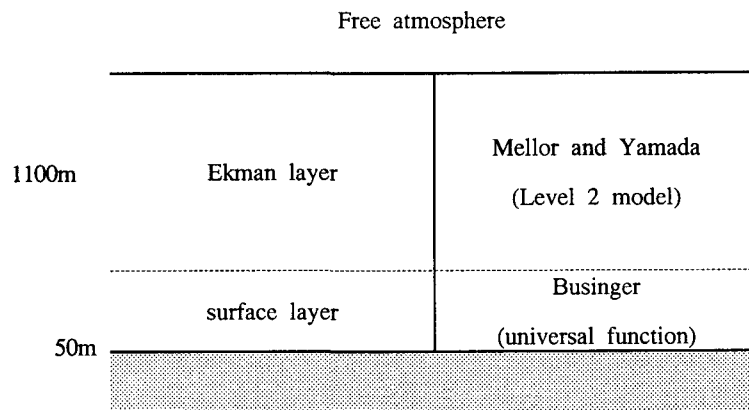


그림 2.3 대기 경계층 모식도

연직방향 확산계수는 대기가 매우 안정된 경우에는 이론상으로 0이 되어야 한다. 하지만 실제 대기 중에서는 여러 가지 원인에 의해 난류가 존재하고, 다양한 가정, 실험식 및 실험상수를 사용하여 계산할 때 여러 종류의 오차가 발생하기 때문에 미소 난류의 크기는 정식화할 수 없으며, 대기가 안정한 경우에도 매우 미소한 크기의 난류 확산계수의 값이 요구된다. 따라서, 임의 크기의 최소치로 연직방향 확산계수를 제한하여 작은 규모의 대류에 의한 난류를 나타내었다. 본 연구에서는 운동량, 열 및 비습의 연직방향 확산계수에 대해 다음과 같이 동일한 최소치를 가정하였다.

$$K_V^{(m)}, K_V^{(\theta)}, K_V^{(q)} \geq K_{V \min} \quad (2.9)$$

여기서 $K_{V \min}$ 은 연직방향 확산계수의 최소값이다.

2.3 수평방향의 확산계수

해륙풍 등과 같은 중규모 기상장의 계산에서 수평방향 확산계수는 대기의 상태에 의해 결정되는 연직방향 확산계수와는 다르게 안정된 수치계산을 수행하기 위한 목적으로 사용되는 경우가 대부분이다. 따라서, 수평방향 확산계수는 $10^3 \sim 2 \times 10^4 (m^2/s)$ 범위의 일정한 값으로 주는 방법(Ozoe, 1983) 또는, 기본방정식에서 수평방향 확산항을 무시하고 이로부터 발생하는 계산의 불안정을 배제하기 위해 다음과 같은 filtering을 이용하는 방법(이성대, 1992) 등이 있다.

$$\phi_{i,j} = (1-s)\phi_{i,j} + \frac{s(\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j} + \phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1})}{4} \quad (2.10)$$

여기서 ϕ 는 u, v, w 등과 같은 물리적인 변수, s 는 안정된 계산에 필요한 적절한 계수, 첨자 i, j 는 격자점을 나타낸다. 이와 같은 filtering을 이용하면 상면 경계에서 발생한 불규칙 진동에 의한 상층부의 변동을 없애기 위한 흡수층(absorption layer)의 도입을 방지할 수 있다는 장점(Takano, 1977)도 있지만 이 방법은 일정한 값을 주는 경우와 거의 차이가 없는 것으로 분석되었다.

따라서, 본 연구에서는 계산이 불안정하게 되지 않을 정도의 충분히 큰 값을 정수로 주었다.

$$K_H = 10000 [m^2/s] \quad (2.11)$$

2.4 지표면 열수지 모형

대기운동을 해석하는데 있어서 지표면 열수지 계산에는 (a) 접지층 모형과 열수지식을 결합하여 지표온도·비습을 결정하는 방법(이화운, 1987), (b) sine함수 근사법(Oochouchi, 1978), (c) 식생모형을 이용하여 온도·비습을 결정하는 방법(Yamaguchi 등, 1992) 등이 있다.

(a)방법은 지표면이 고온(40 °C)이거나 풍속이 클 때 발산하는 경우가 있으며, (b)방법은 실제 지역에서의 적용에는 문제점이 있는 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 식생모형을 지표면 열수지 모형에 적용하여 해석하였다.

2.5 초기조건 및 경계조건

2.5.1 초기조건

전체 영역을 정상상태로 가정, 계산의 초기조건은 다음과 같이 설정하였다.

가. 풍속

연직방향의 풍속성분은 전 영역에서 다음과 같다.

$$w = 0 \quad (2.12)$$

지형풍이 없는 경우의 u 와 v 의 초기조건은 0으로 설정하였다.

나. 온위

일반풍이 없는 경우에 온위의 초기조건은 다음과 같다.

$$\theta = \theta_{sea} + \Gamma \{ z^* [\bar{s} - z_G(x, y)] \bar{s}^{-1} + z_G(x, y) \} \quad (2.13)$$

일반풍이 있는 경우에는 풍속에 대한 초기조건의 설정이 어려우므로 Mahrer 와 Pielke(1975)의 방법에 따라 지형에 관계없이 다음식을 사용하였다.

$$\theta = \theta_{sea} + \Gamma \cdot z \quad (2.14)$$

여기서 Γ 는 연직방향의 온위구배이다.

다. 압력

압력 Π 에 대해서는 좌표 원점에서의 값을 1013 hpa로 가정하고 온위의 초기분포를 사용해서 식 (2.7)에 의해 측면 상단에서의 값을 결정하였다. 상층에서 지형풍 근사는 다음의 관계가 성립되므로 이 식으로부터 압력 Π 값을 결정한다.

$$c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} = f V_g \quad (2.15)$$

$$c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} = -f U_g \quad (2.16)$$

라. 비습

비습에 대해서는 일반적으로 바람의 유·무에 따라 다음의 두 식을 사용할 수 있다. 일반적으로 바람이 없는 경우에는 식 (2.17)을 적용하고 바람이 있는 경우에는 식 (2.18)을 적용한다.

$$q = q_{g0} + \Gamma_q \{z^*[\bar{s} - z_G(x, y)]\bar{s}^{-1} + z_G(x, y)\} \quad (2.17)$$

$$q = q_{g0} + \Gamma_q \cdot z \quad (2.18)$$

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

마. 토양온도

토양온도의 초기조건은 다음과 같이 정의하였다.

$$T_s = \theta_g = \theta_{sea} \quad (2.19)$$

2.5.2 경계조건

지표면에서의 온위 및 비습에 대한 경계조건은 식생의 영향을 고려하여 계산하였다.

가. 지표면에서의 경계조건

육지측에서의 온위의 경계조건은 다음과 같다.

$$\theta_{land} = \sigma_f \theta_f + (1 - \sigma_f) \theta_g \quad (2.20)$$

여기서 θ_g 와 θ_f 는 식생모형의 T_g 와 T_f 를 온위로 변환한 지면 및 잎에서의 대표 온위이다. 해면에서의 온위의 경계조건은 실험 대상일에 대응하여 각기 다르게 다음과 같이 계산하였다.

$$\theta_{\text{sea}} = 297, 295[K] \quad (2.21)$$

해안선상에서는

$$\theta_g = \frac{\theta_{\text{sea}} + \theta_{\text{land}}}{2} \quad (2.22)$$

풍속에 대해서는

$$u = v = w = 0 \quad (2.23)$$

나. 상층부에서의 경계조건

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 \quad (2.24)$$

다. 측면에서의 경계조건

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 : \text{유입측} \quad (2.25a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial u}{\partial n} = 0 : \text{유출측} \quad (2.25b)$$

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

2.6 기본방정식의 유한차분 근사식

기본방정식을 이산화하여 수치적분을 통해 근사해를 구하는 유한차분법(Finite Difference Method) 대상이 되는 문제와 안정성 등을 고려하여 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 여기서는 그림 2.4에 나타낸 바와 같이 대상이 되는 변수의 기지점 위치가 서로 다른 교호 격자망

(Staggered Grid)을 사용하였다. 이 방법은 미지점의 해를 얻으려면 기지점에서의 선형내삽을 통해야만 가능하다는 등의 복잡한 측면도 있으나 격자점의 수가 작아도 합리적인 해를 얻을 수 있다는 점 때문에 널리 이용된다. 본 계산에서 이류항은 풍상차분법(Up-Wind Difference Scheme)을 사용하였고, 확산항은 양해법인 수정 Dufort-Frankel법을, 시간에 대해서는 전진차분법(Forward Difference Scheme)을 각각 이용하였으며 기타항은 모두 중앙차분법(Central Difference Scheme)을 적용하여 계산을 수행하였다. 모의실험을 수행할 대상영역을 그림 2.4와 같이 입체적인 격자망으로 구성하여 연직 방향의 풍속과 수평방향 풍속, 비습, 온위등을 각각 위에서 설명한 방법에 근거하여 계산을 수행하였다.

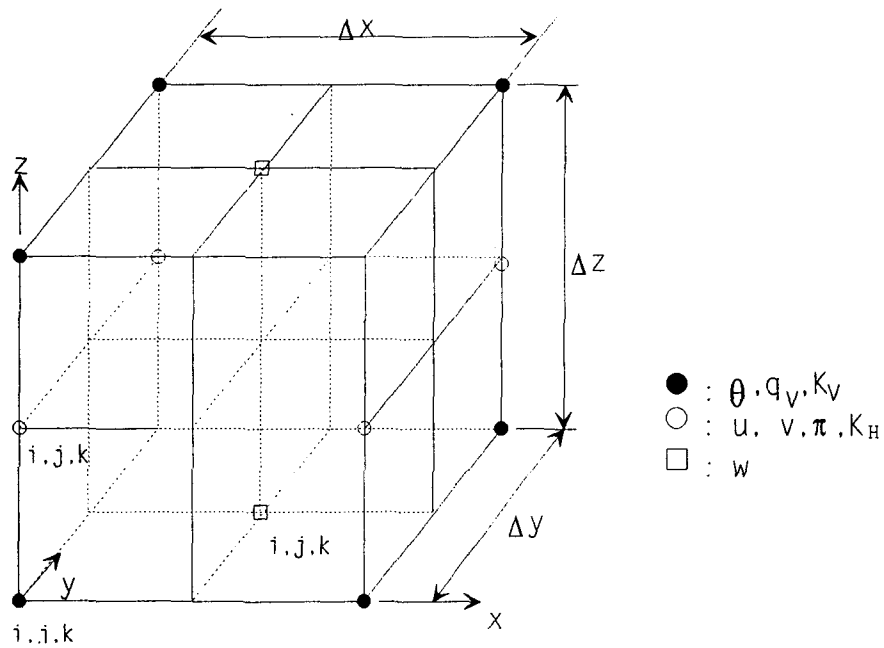


그림 2.4 교호 격자망

3. 검증실험

3.1 적용대상 및 자료의 선정

본 장에서는 중규모 기상장 모형의 현지 적용성을 위한 검증과 도시개발에 따른 기상장 변화의 평가를 위해 수원·영통지역을 검증 대상지역으로 모형을 적용하였다.

계산 대상지역인 수원·영통지역은 대단위 택지조성사업으로서 수도권의 주택난 완화를 해결하고, 계획적인 도시개발을 통해서 도시공간구조 형성을 도모하며 기존도시구조와 연계한 신시가지 조성으로 보완적인 기능 수용을 주목적으로 하고 있다. 계획수용인구는 10만명이고 계획수용호수는 26890호로서 대부분 주거지역으로 계획이 수립되어 있다.

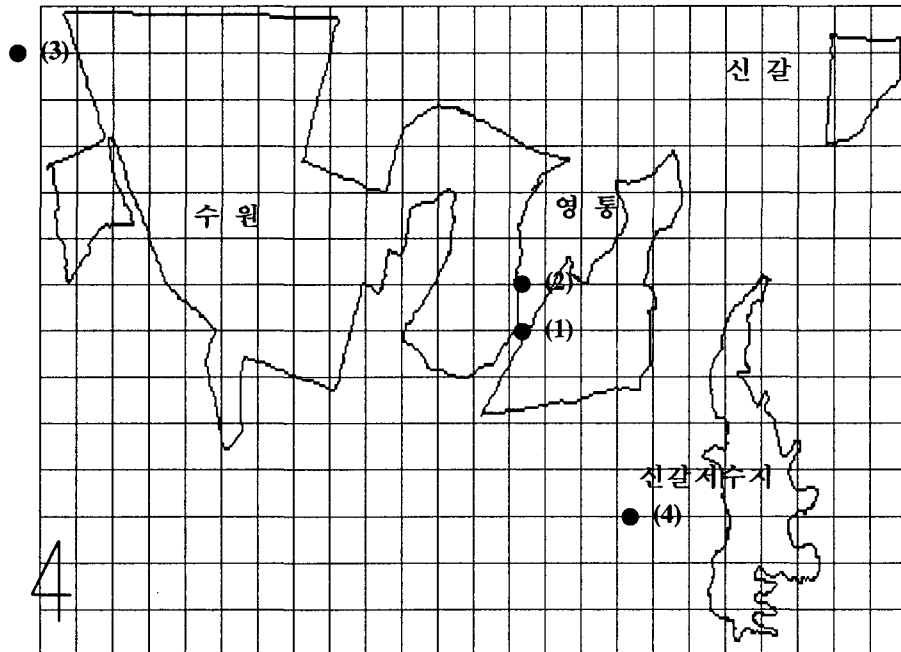


그림 3.1 수원·영통지구 지형도

본 계산을 수행하기 위하여 8월의 청천일(운량; $C_{cloud}=0$)을 기본 대상으로 설정하였다. 수평방향의 격자 간격($\Delta X=\Delta Y$)은 500 m , 25×15 의 격자점을 이용하였으며, 연직방향으로는 높이 3050m 까지를 10층으로 분류하고, 지중은 1 m 를 14층으로 나누어 오전 8시부터 하루 동안 계산을 수행하였고 계산의 검증을 위해 실측자료를 사용하고 있는데, 이 자료는 8월의 청천일을 선정하여 도시지역과 식생으로 피복되어 있는 녹지공원지역을 같은 시각에 한시간

단위로 실측해서 (Weather-Monitor를 이용하여 동시에 두 지점에서 각각 온도, 풍속, 비습을 측정) 측정된 2일의 자료를 기준으로 각각 비교하여 사용하고 있다. 실측한 기상자료의 내용은 온도, 습도등으로 모형의 실행후 결과에 대응하는 항목으로 선정했다.

실험일자는 8월 19일, 25일로 모두 쾌청하게 맑은 날로서 양호한 상태의 기상을 보여 모형의 검증에 정확성을 더했다. 또한, 대상영역을 확대하여 신뢰성있는 자료를 가지고 검증하기 위해 수원 기상대의 3시간 단위 시기상자료를 사용하여 모형의 검증에 이용하였다.

모의실험 대상영역인 수원·영통지역의 지형도를 간략하게 살펴보면 그림 3.1과 같이 나타난다. 모의실험 대상영역의 총면적은 84 km^2 으로서 가운데 부분에 새롭게 건설된 영통 신시가지 부분을 나타내고 있다. 그림 3.1에서 보면 각각 네 개의 모의지점이 표시되어 있는데 먼저 (1)지점은 영통 신시가지 내의 한 지점을 나타내고 있고, (2)지점은 영통 신시가지 내의 녹지공원지역을, (3)지점은 수원 기상대지점을 표시하고 있으며, 마지막으로 (4)지점은 신갈저수지 부근으로 선정하였다.

여기서, (1)지점과 (2)지점은 관측을 했던 위치로서, 모형의 검증을 위해 두 지점에서 8월 19일과 8월 25일에 각각 실측자료를 수집하여 계산결과와 비교하는 데 사용하였다.

여기에서는 모형을 실제지역에 적용하여 수치계산을 수행한 후 관측치와의 비교·검토로 모형의 적용성을 검토하고, 이 결과로부터 대상 영역에서의 전체적인 온도양상과 도시지점과 녹지공원지점에서 각각의 온도와 습도를 도시개발 전과 후로 나누어 비교·검토하였다.

3.2 계산 정수

도시 규모의 기상장 수치 실험은 지배방정식과 적절한 초기 및 경계조건을 통해 해석이 가능하다. 이 같은 초기 및 경계조건의 결정에는 지표면 및 토양의 특성 그리고, 대기상태 등의 역학적 성질 등에 의해 결정된다. 이같은 지표면 열수지에 영향을 주는 정수로는 Albedo(단파방사의 반사율), 대기투과율, 토양 열확산계수, 조도, 지표면 습도 및 토지이용 변화에 따른 인공배열량 등이 있으며 본 연구에서는 토지이용 구분을 도시부, 반도시부, 식생지역으로 구분하여 열수지 정수를 표 3.1과 같이 나타내어 적용하였다. 중규모 기상장 모형의 흐름장은 확산 계수, 대기 안정도, Coriolis force, 시간(계산 대상일)등의 변화에 따라 그 성질이 변화한다. 여기서에서는 모의실험을 행한 8월의 청천일을 기본 대상으로 하여 이들의 특성을 규명하기 위해 기본적인 계산정수를 표 3.2에 나타내었으며 이를 토대로 수치해석을 수행하였다.

표 3.1 토지이용변화에 따른 열수지 정수

Symbol	unit	rural	suburban	urban
Albedo	-	0.18	0.2	0.2
Transmission factor	-	0.85	0.7	0.664
Soil heat diffusion	cm^2/s	0.005	0.007	0.01
Surface roughness	cm	0.5	0.3	1.0
Surface wetness	-	0.1	0.08	0.05
Discharge of artificial heat	$calm^{-2}s^{-1}$	0.0	5.95	16.36

표 3.2 모형 실험에 사용된 기본 정수

Date	$f[s^{-1}]$	$\Gamma[K/m]$	$A_1[K]$	Innitial Degree (°C)
8.19	8.4×10^{-5}	0.010	10	24° C
8.25	8.4×10^{-5}	0.010	5	22° C

3.2.1 초기 정수 산정

본 모형에 사용된 가장 적절한 상수를 결정하기 위해 기본 상수를 다음과 같이 결정하였다. 우선 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 $K_{v\ min} = 5.0\ m^2/s$ 의 값을 설정하였다. 수평방향 확산계수는 계산이 불안정하게 되지 않을 정도의 큰 값인 $K_H = 1000\ m^2/s$ 로 설정하였다. 또한, 북위 38° 인 수원·영통지역을 본 수치 계산의 대상 구역으로 설정하였으므로 Coriolis force는 $f = 0.84 \times 10^{-5}\ s^{-1}$ 로 설정했고, 온위구배는 $\Gamma = 0.010\ K/m$ 로 설정하여 중규모 기상장의 특징을 검토하였다.

3.3 모의 결과

3.3.1 8월 19일에 대한 검증 실험

8월 19일 오전 8시를 시작으로 다음날인 8월 20일 오전 8시까지 한시간단위로 기상자료를 측정, 수집하였다. 기상대 자료는 3시간단위로 측정되어있어서 영통 신시가지의 다른 지점들과는 다른 시간 간격으로 수집되어있다.

먼저 초기 온도 측정값을 실측된 결과에 근거하여 24 ℃로 설정하였고 하루의 온도진폭을 10K로 설정하였다.

그림 3.2-3.4의 결과를 보면 계산된 결과가 실측한 결과에 대해서 대체로 잘 모의하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 영통내에서의 도시지점과 녹지공원의 모의실험결과는 거의 일치하는 것을 알 수 있으며 기상대지점에서의 결과는 실측시간자료가 세시간 단위로 되어있어서 10분 단위로 모의한 모형의 결과와 약간의 차이를 나타내고 있지만 온도 변화의 양상은 거의 같은 것으로 나타났다.

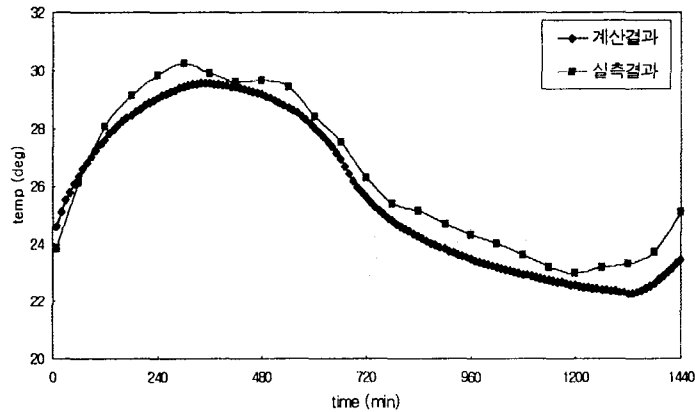


그림 3.2 영통 도시지점의 온도 실측비교

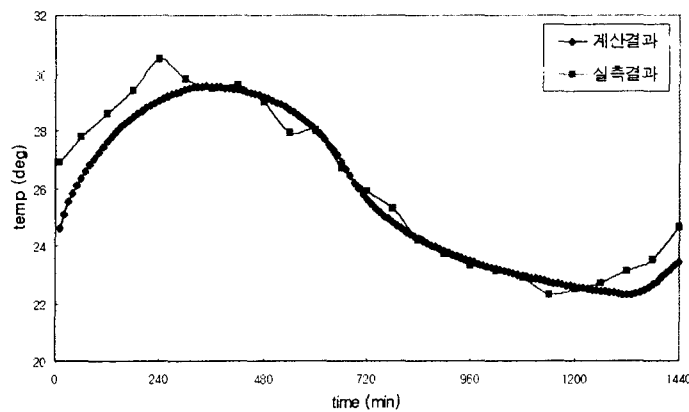


그림 3.3 영통 녹지공원지점의 온도 실측비교

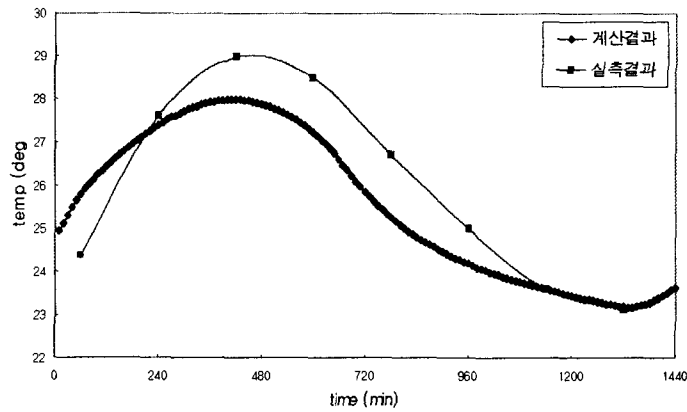


그림 3.4 기상대지점의 온도 실측비교

그림 3.5는 영통 신시가지의 도시지점에서 개발전과 개발후의 온도 자료를 비교한 그래프이다. 그림 3.5에서 보듯이 정오인 12시경에 가장 높은 온도를 나타내고 있고, 온도 차이는 약 1℃ 정도로서 개발후가 개발전에 비해 높고 저녁이 되면서 온도차이가 거의 나타나고 있지 않는 것으로 나타났다.

그림 3.6은 영통 신시가지의 녹지공원지점에서 개발전·후의 온도 자료를 비교한 그래프이다. 그림을 살펴보면 그림 3.5와 거의 같은 결과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 3.7은 기상대지점의 개발전·후의 온도 자료를 그래프로 나타냈는데 역시 거의 같은 결과를 나타내고 있고, 그림 3.8은 영통 신시가지 인근에 위치하고 있는 신갈 저수지에서의 개발전·후의 온도 자료를 비교했는데 개발전과 개발후가 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

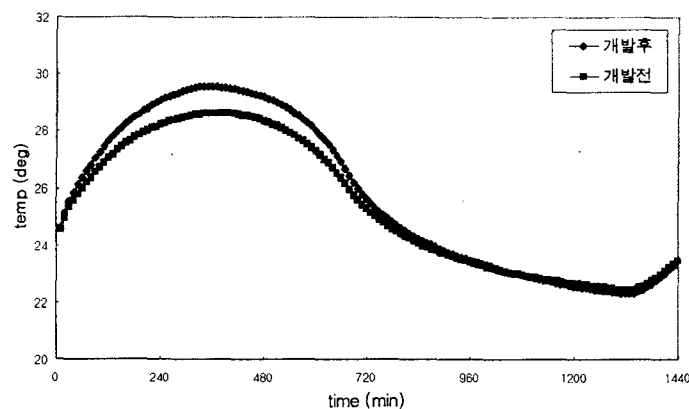


그림 3.5 영통 도시지점의 개발전·후의 비교

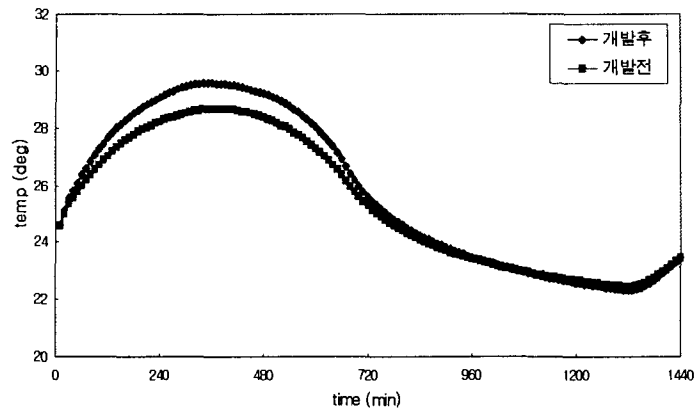


그림 3.6 영통 녹지공원지점의 개발전·후의 비교

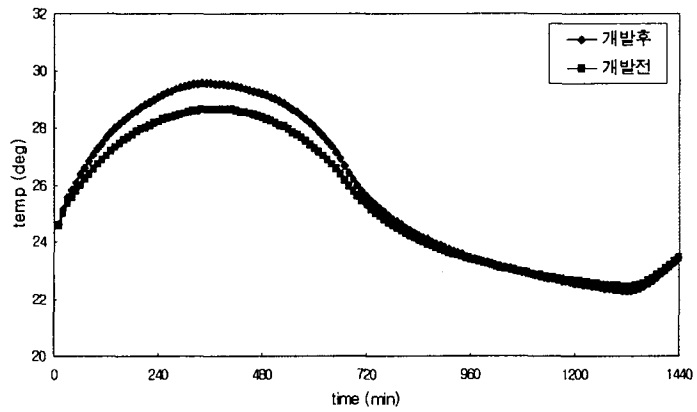


그림 3.7 기상대지점의 개발전·후의 비교

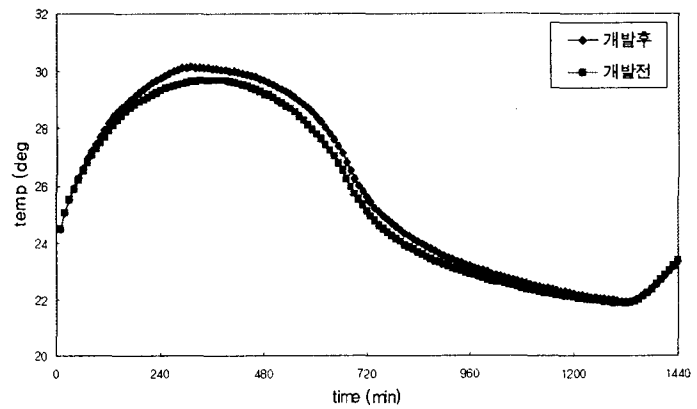


그림 3.8 신갈 저수지지점의 개발전·후의 비교

따라서, 개발전과 개발후의 온도차가 수변지역에서는 도시지점이나 녹지공원에서와는 달리 큰 온도차이 없이 0.5 °C 정도의 차이를 보이고 있으므로, 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3.3.2 8월 25일에 대한 검증 실험

8월 19일과 같은 방법으로 계산을 수행했으나, 8월 25일의 실험은 8월 19일의 모의 실험보다 약간 낮은 온도 변화 양상을 나타내고 있으므로 실측된 자료에 근거하여 초기온도 설정을 8월 19일의 모의실험보다 2 °C 낮게 설정하였고, 온도 진폭도 실측자료에 근거하여 5K로 설정하여 계산을 수행하였다.

그림 3.9-3.11에서 보면 8월 19일의 실험결과와 마찬가지로 실측결과와 거의 일치하게 모의하고 있는 것을 알 수 있다. 다만, 수원기상대지점에서 8월 19일의 결과와 비슷하게 시간 간격이 다른 자료를 비교함으로써 차이가 있지만 온도 변화 양상은 대체로 잘 모의하고 있다.

그림 3.12-3.15는 각 지점에서의 개발전과 개발후의 계산값을 각각 비교한 그래프로서 8월 19일 실험 결과와 다름없이 같은 양상을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

또한, 그림 3.16은 8월 25일의 결과를 기초로 하루동안의 일온도 변화에 대해서 도시개발전과 도시개발후로 각각 나누어 대상영역의 전체적인 온위의 분포를 알아보기 위해 4시간 간격의 등온위선도로 나타내었다.

그림 3.16에서 보듯이 도시개발 후에 도시형성으로 인하여 도시개발전보다 온위가 전체적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있고, 특히 새롭게 형성된 영통 신시가지에서는 등온위선의 간격이 조밀하게 분포되어 있는 것을 알 수 있었다.

또한, 낮에는 약 2° C 정도 높게 모의되었고, 밤에는 0.5° C 정도 모의된 것을 근거로 해서 볼 때 도시 형성으로 인한 도시 열섬효과는 밤보다 낮의 온위 분포 변화에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

결과적으로, 8월 19일의 실측값과 8월 25일의 실측값을 이용하여 모의해 본 결과 본 모형은 모의 결과를 기초로 해석해 보면 실측결과에 거의 일치하는 것으로 미루어 볼 때, 실제 지형에 적용하는 데 있어서 적용성이 충분히 있다고 할 수 있다.

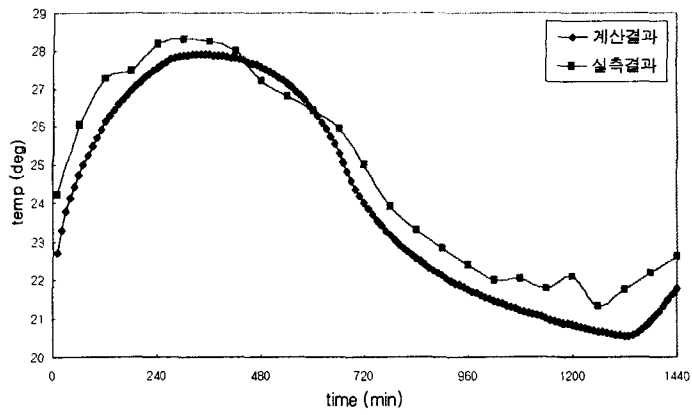


그림 3.9 영통 도시지점의 온도 실측비교

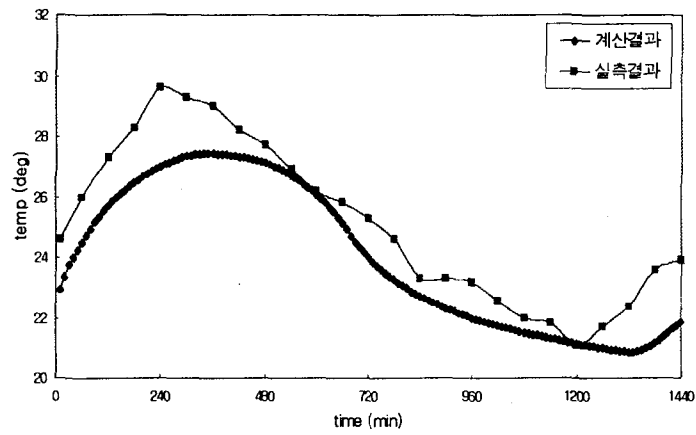


그림 3.10 영통 녹지공원지점의 온도 실측비교

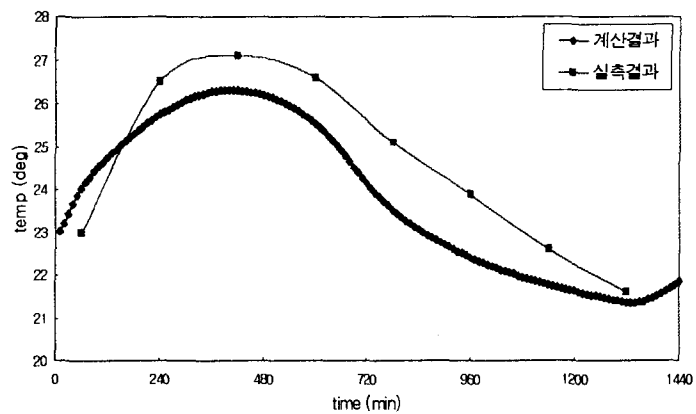


그림 3.11 기상대지점의 온도 실측비교

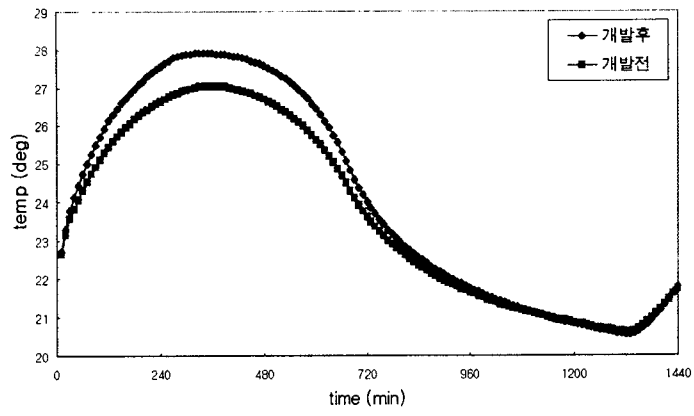


그림 3.12 영통 도시지점의 개발전·후의 비교

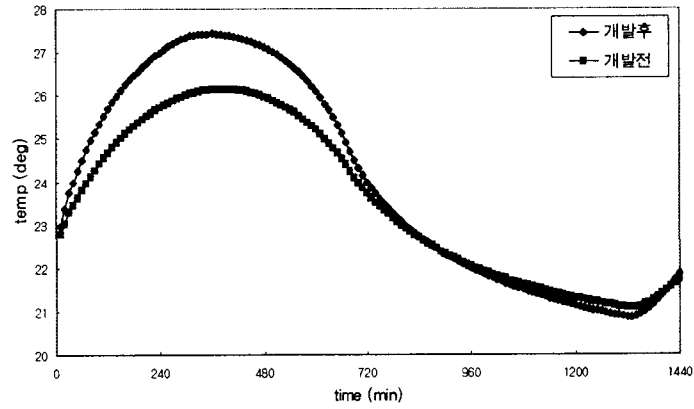


그림 3.13 영통 녹지공원지점의 개발전·후의 비교

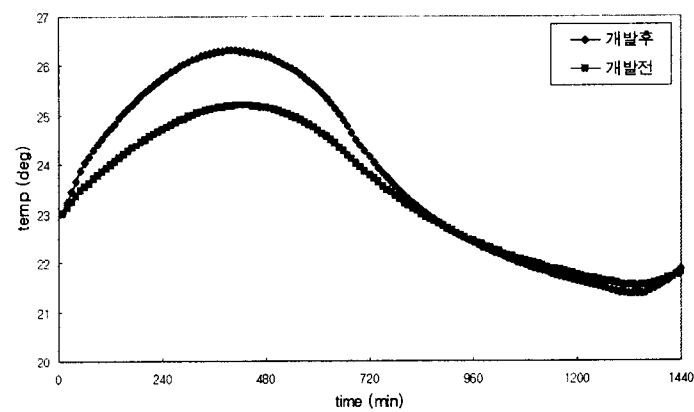


그림 3.14 기상대지점의 개발전·후의 비교

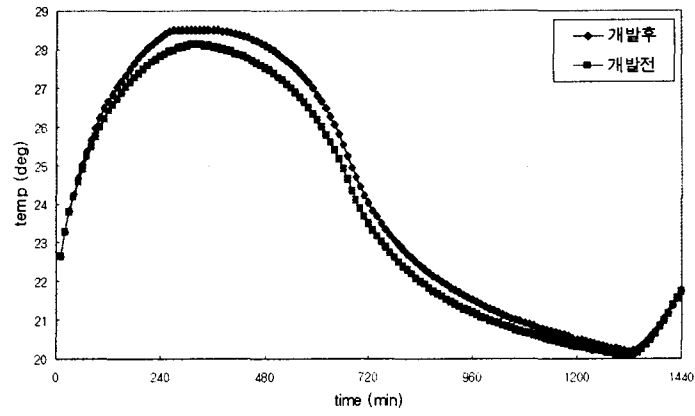
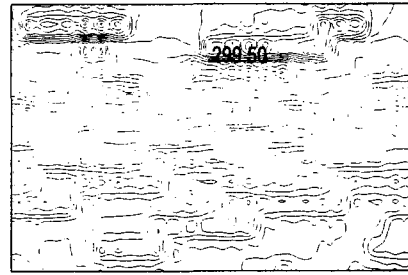
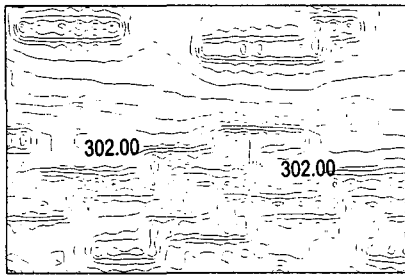
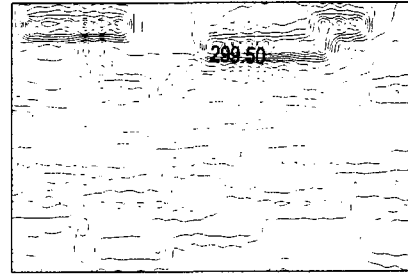
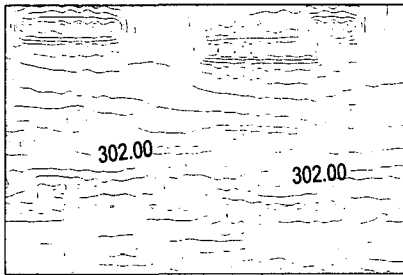


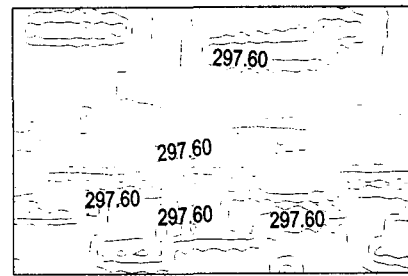
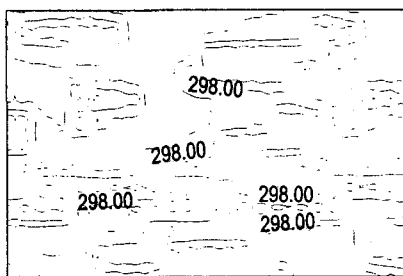
그림 3.15 신갈 저수지지점의 개발전·후의 비교



(a) 1200LST



(b) 1600LST

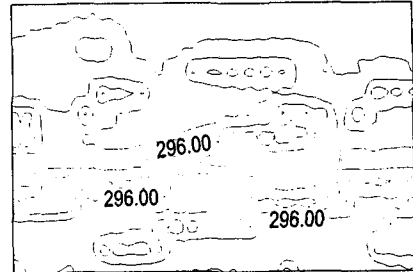
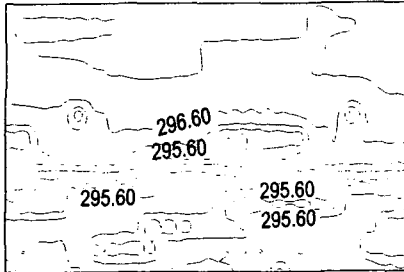


(c) 2000LST

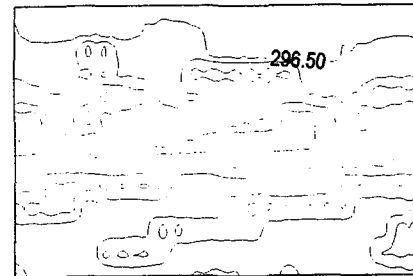
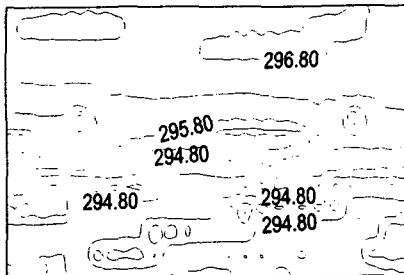
(1) 개발후 온위도

(2) 개발전 온위도

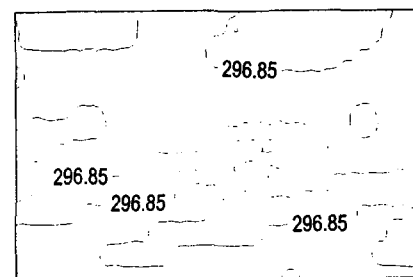
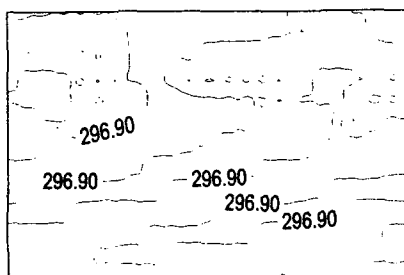
그림 3.16 개발전후의 일온위 변화



(d) 2400LST



(e) 0400LST



(f) 0800LST

(1) 개발후 온위도

(2) 개발전 온위도

그림 3.16 (계속)

4. 모의실험

현재 영통 신시가지 내에 위치하고 있는 녹지공원은 신시가지 외곽부에 자리잡고 있는데, 신시가지 내에서 녹지공원의 위치와 규모는 신시가지가 건설되고 난 이후, 기상장 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 예상하고 그림 4.1에서 보는 바와 같이 네 가지의 경우로 나누어 모의 실험을 하였다. 먼저, 대상영역을 영통 신시가지를 중심으로 축소하여 설정하였으며, 대상영역은 수평방향의 격자 간격($\Delta X = \Delta Y$)을 250 m, 10×10의 격자망을 이용하였다. 그림 4.2는 현재 상태(Case 1)에서 모의하여 얻은 일온위 변화를 나타내고 있다. 따라서, 현재 위치하고 있는 녹지공원을 확대했을 경우와 녹지공원의 위치를 현재와 다르게 배치했을 경우를 각각 비교해서 개발전과 가장 흡사한 양상을 보이는 경우가 이상적인 경우로서 도시개발에 의한 환경변화를 최소화한 경우라고 볼 수 있고, 이러한 모의실험을 통해서 기상장에 미치는 영향을 평가하여 보다 나은 개발계획수립을 도모하고자 한다.

4.1 녹지공원의 위치 이동

현재 위치하고 있는 녹지공원을 각각 두가지 경우로 위치 이동시켜 각 경우에 대한 기상장의 변화를 모의하였다. 그림 4.3은 녹지공원을 영통 신시가지 위쪽으로 배치했을 경우이고 (Case 2), 그림 4.4는 녹지공원을 아래쪽으로 편중하여 배치했을 경우(Case 3) 각각의 4시간간격의 일온위 변화를 나타내고 있다.

4.2 녹지공원의 확장

대상영역인 영통 신시가지에서 신시가지 내에 현재 위치하고 있는 녹지공원을 확대했을 경우(Case 4), 기상장의 변화를 모의해 보았다. 그림 4.5는 녹지공원 확장에 따른 4시간간격의 일온위 변화를 나타내고 있다.

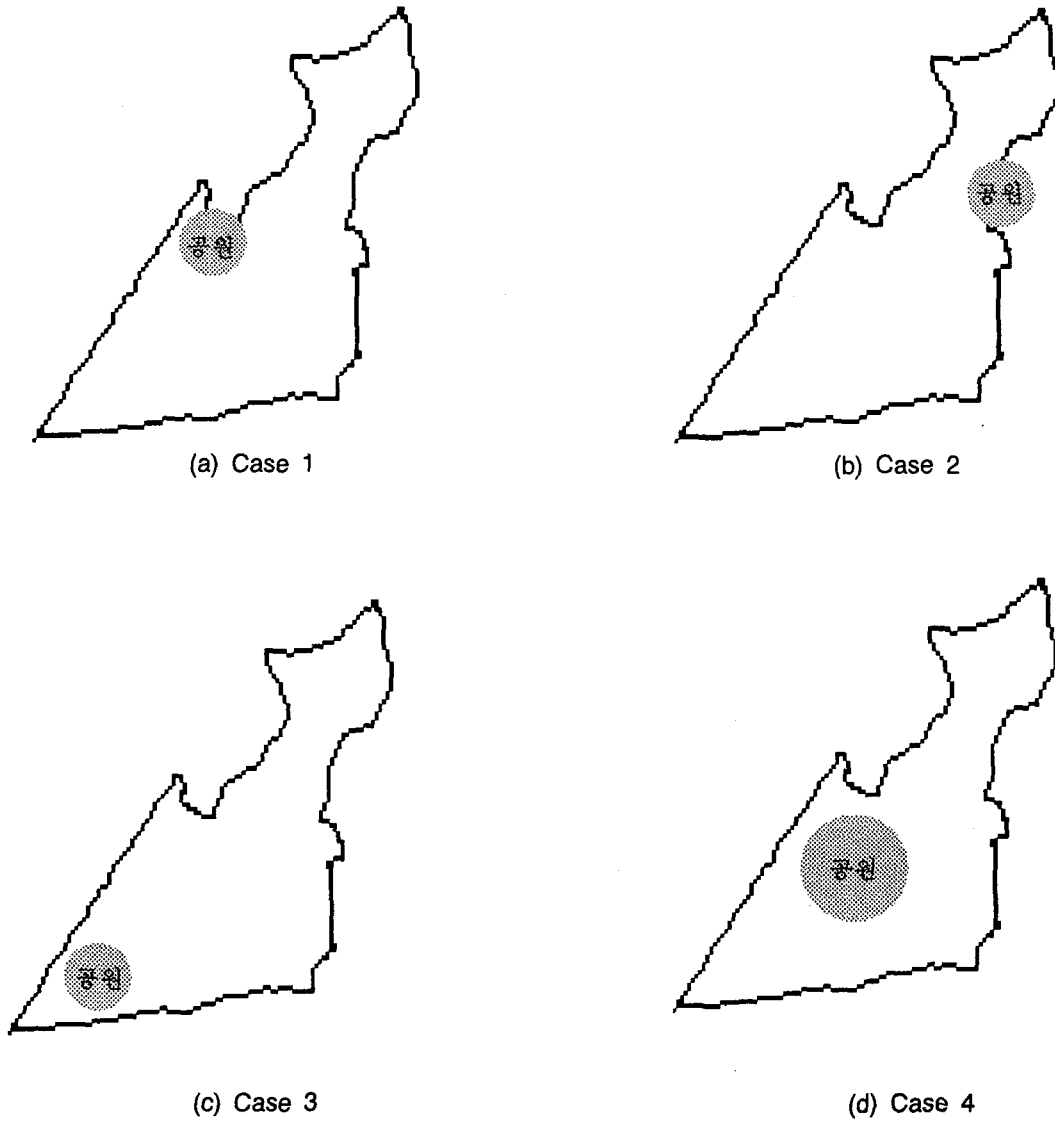
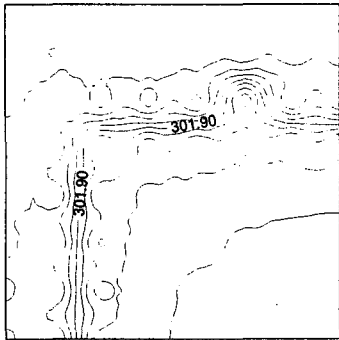
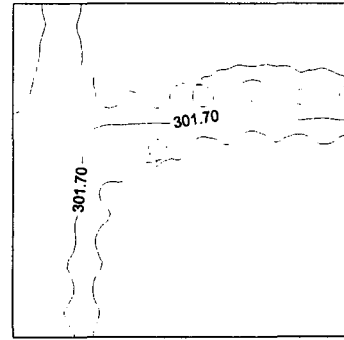


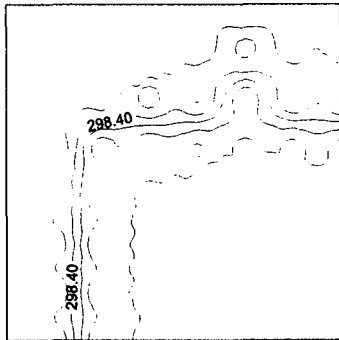
그림 4.1 실험 대상영역의 지형도



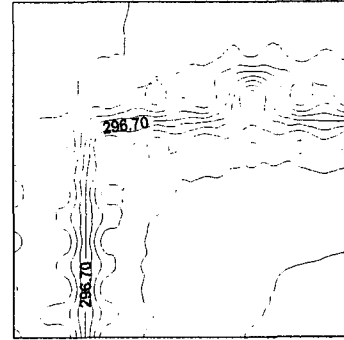
(a) 1200LST



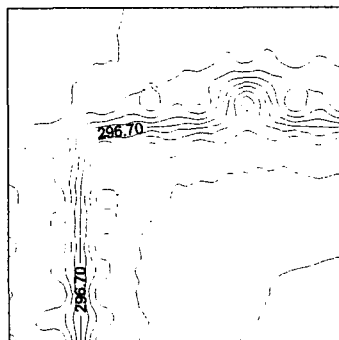
(b) 1600LST



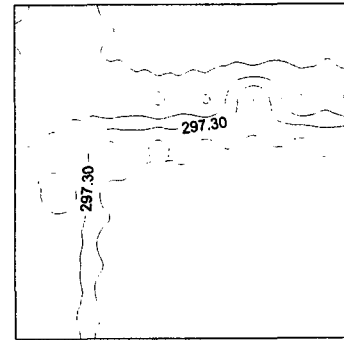
(c) 2000LST



(d) 2400LST

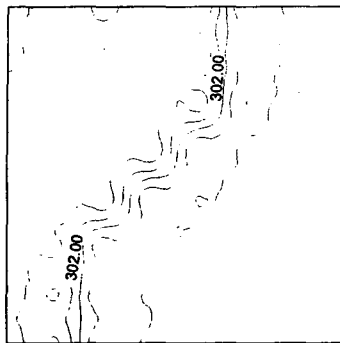


(e) 0400LST

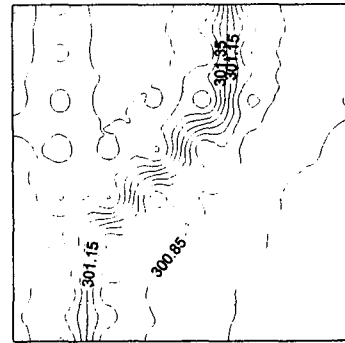


(f) 0800LST

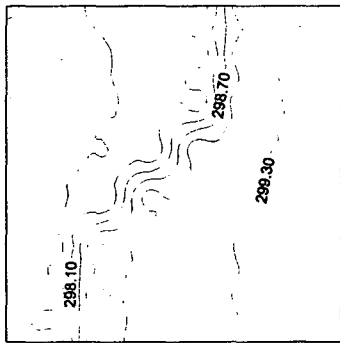
그림 4.2 현재 상태의 일은위 변화 (Case 1)



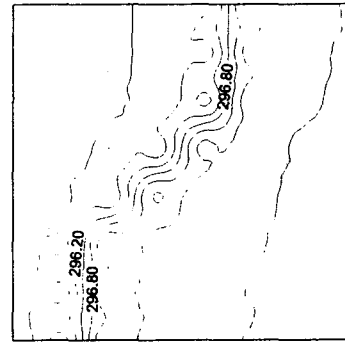
(a) 1200LST



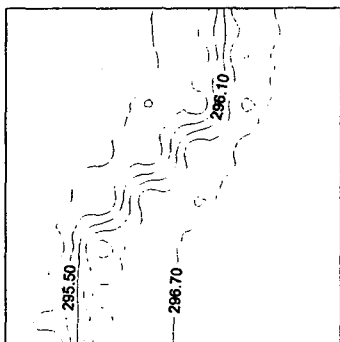
(b) 1600LST



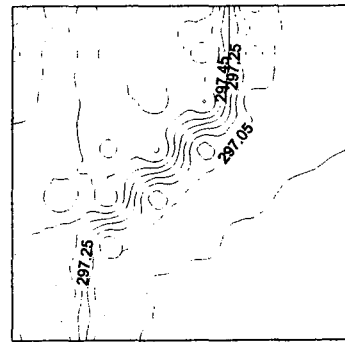
(c) 2000LST



(d) 2400LST

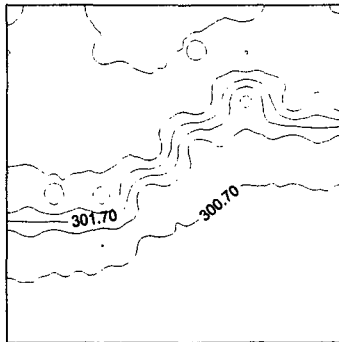


(e) 0400LST

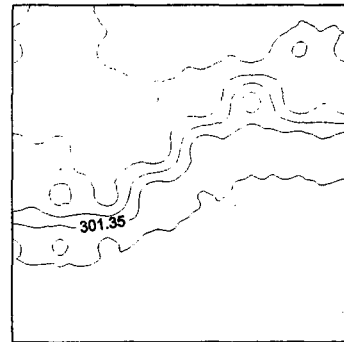


(f) 0800LST

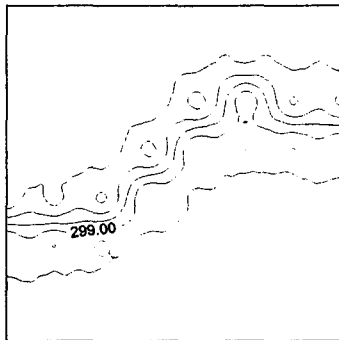
그림 4.3 녹지공원 위치이동에 따른 일은위 변화 (Case 2)



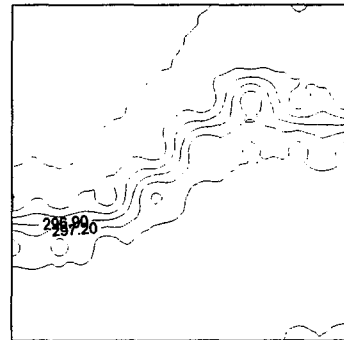
(a) 1200LST



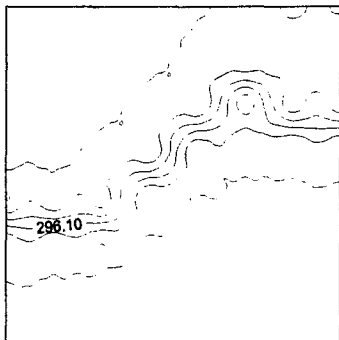
(b) 1600LST



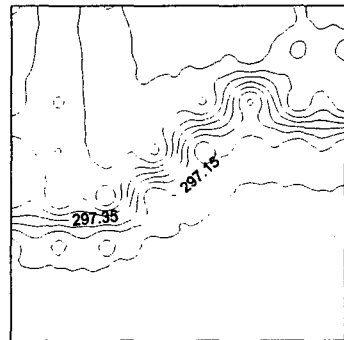
(c) 2000LST



(d) 2400LST

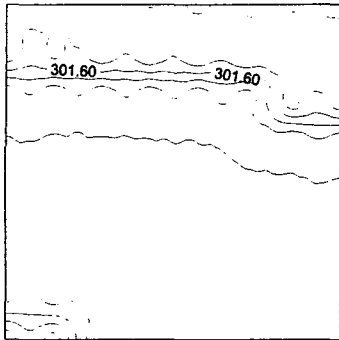


(e) 0400LST

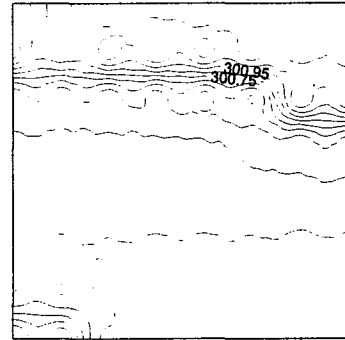


(f) 0800LST

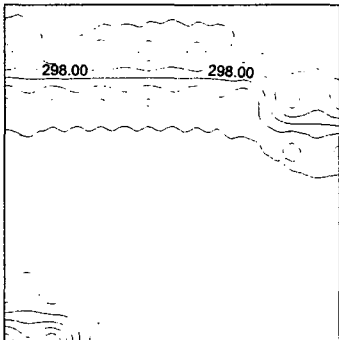
그림 4.4 녹지공원 위치이동에 따른 일은위 변화 (Case 3)



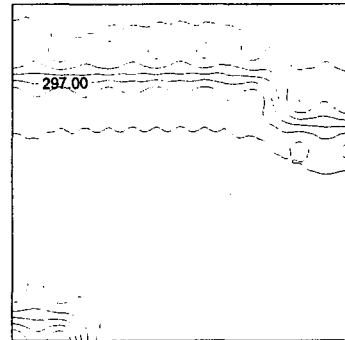
(a) 1200LST



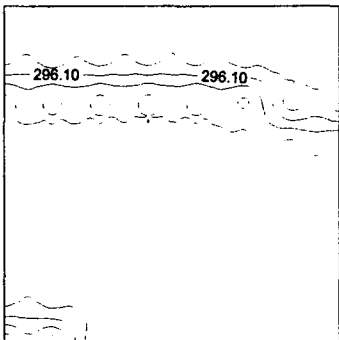
(b) 1600LST



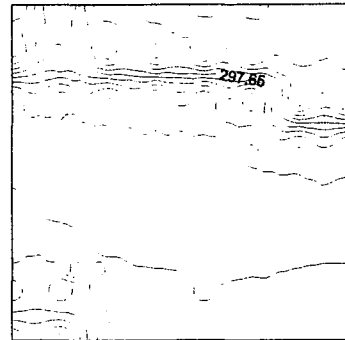
(c) 2000LST



(d) 2400LST



(e) 0400LST



(f) 0800LST

그림 4.5 녹지공원 확장에 따른 일온위 변화 (Case 4)

4.3 모의 결과

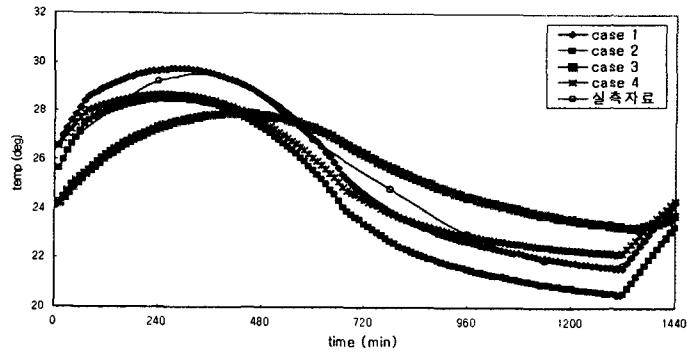


그림 4.6 영통 도시지점의 온도변화

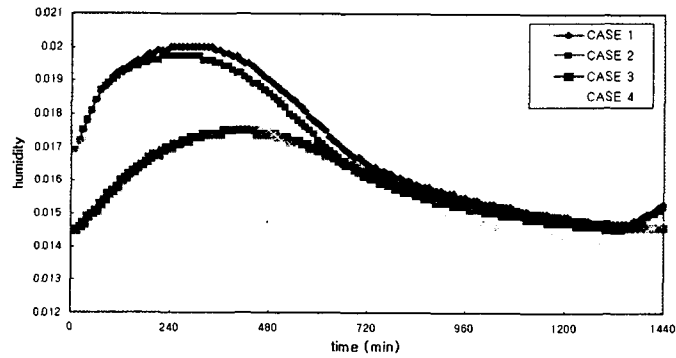


그림 4.7 영통 도시지점의 습도변화

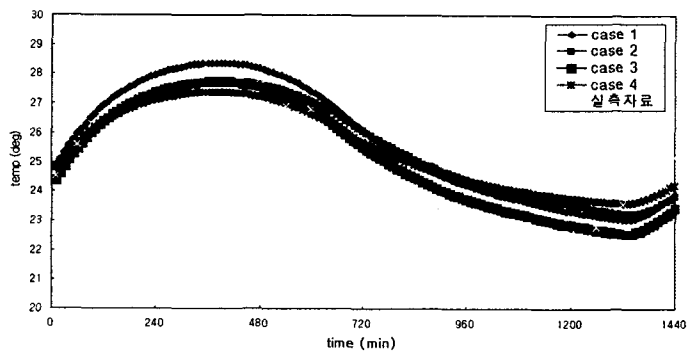


그림 4.8 영통 외곽부의 온도변화

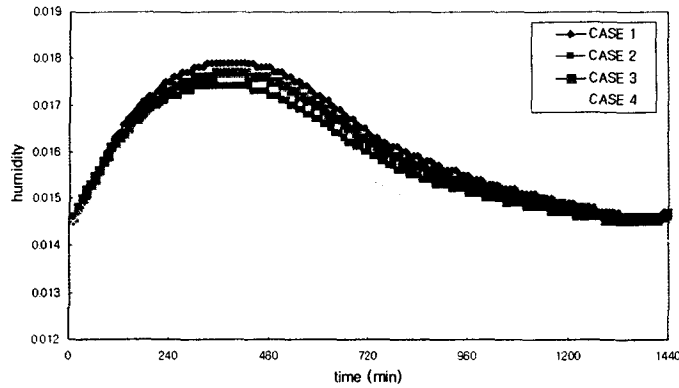


그림 4.9 영통 외곽부의 습도변화

각기 네 가지의 경우에 대해서 영통 신시가지 내에서 한 지점을 선정하고, 영통 외곽부의 식생지역에서 한 지점을 선정하여 각각 온도와 비습을 비교하여 그래프로 나타내었다. 그림 4.6은 영통 도시지점에서의 일온도변화를 나타내고 그림 4.7은 같은 지점에서의 비습변화를 보여주고 있다. 또한 그림 4.8은 영통 외곽부의 식생지점에서의 일온도변화를, 그림 4.9는 같은 지점에서의 비습변화를 보이고 있는데, 먼저 그림 4.6에서 보면 실측자료와 가장 비슷한 양상을 보이는 것이 Case 4로서 녹지공원을 확장하였을 경우가 이상적으로 모의되었다. 불가피하게도 개발전의 실측자료를 얻을 수가 없으므로 기상대의 자료를 근거로 비교해보면 이와 같은 결론을 내릴 수 있다. 반면에 그림 4.7에서 보면, 모든 경우가 비슷한 양상으로 일변화를 보이고 있고, 식생지역에서 모의할 결과이므로 같은 식생지역에서 실측한 결과를 토대로 비교해 본 결과, 계산결과와 실측결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

5.1 결론

도시의 산업화에 따른 녹지 공간의 감소 및 신도시 건설에 따른 기상장 변동을 수치해석기법을 사용하여 수원·영통지역에 적용해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

5.1.1 식생환경

지표면 경계에 식생환경을 고려한 3차원 중규모 기상장 모형을 개발하여 수원·영통지역을 대상으로 실측치와의 비교를 통해 검토한 결과, 본 3차원 중규모 기상모형의 운용으로 인위적 또는 자연적 지형변화 및 토지이용 변화에 대한 기상흐름의 거동을 예측할 수 있었다.

5.1.2 열섬효과

모의 실험한 결과, 도시 개발에 따른 도시 열섬효과의 재현을 잘 보여주었고, 또한 각 지점에서 실측한 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 향후 도시개발에 따른 환경영향평가에 적용이 가능하고 이를 바탕으로 환경영향평가 또는 환경개선에 필요한 방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

5.1.3 도시개발계획

도심내 녹지공원의 위치와 규모에 따라 다른 기상변화를 보이고 있는 것을 알 수 있었고, 이 결과에 근거하여 도시개발에 따른 환경변화를 개발전과 다름없이 거의 동일하게 최소화할 수 있는 도시개발계획수립을 도모할 수 있었으며, 따라서 가장 이상적인 도시개발을 제시할 수 있었다.

본 3차원 중규모 기상장 모형은 대상지역의 광범위한 토지이용 형태의 변화가 대기 기상장에 미치는 영향을 잘 평가하고 있으며 본 모형에 의해 지역 개발 계획에 보다 나은 대기 환경의 창조를 위한 시스템을 제공하게 될 것으로 판단된다.

5.2 향후 연구과제

5.2.1 토지이용의 구분

본 3차원 수치모형을 보다 엄밀하게 적용하기 위해서는 토지이용 구분의 분류가 더 세부적

으로 검토되어야 하며 수평격자점의 간격을 세분화함으로써 지형 및 지표면 상태를 보다 현실적으로 재현하도록 한다.

5.2.2 계산정수의 산정

본 3차원 수치모형의 적용성을 넓히기 위해서 계산에 필요한 계산정수와 기상변수에 대한 구체적인 산정이 요구되고, 특히 각 지형에 가장 적합한 계산정수와 변수를 최적화하여 계산 실행에 적용하는 것이 요구된다.

참고문헌

- 윤용남 (1998). 공업수문학. 청문각.
- Erwin Kreyszig (1993). 공업수학.
- 금성악인 (1989). “식생환경에 있어서의 열수분수지 및 대기오염물질의 침착에 관한 연구,” 대판대학.
- 김인호, 이은태, 이성대 (1996). “지표면상에서의 열 및 수분수지 특성의 관한 연구.” 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
- 이범주, 이희철, 김인호, 이성대, 이은태 (1999). “도시와장에 따른 수문기상장의 변화에 관한 연구.” 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
- 이성대 (1992). “Filtering 효과를 고려한 중규모 지역 기상의 수치해석.” 울산대학 연구논문집.
- 이화운 (1988). “Numerical Modeling for predicting on Regional Atmospheric Environment,” Osaka University
- 죽내·근등 (1981). 지표에 가까운 대기. 동경대학 출판회.
- 중광태종 (1995). : 대판만 주변역 대기환경의 수치예측, 대판대학
- Greenspan, D., and Casulli, V. (1988). *Approximate solution of boundary value problems for ordinary differential equation.*
- Mahrer, Y., and Pielke, R.A. (1977). “A numerical study of the air flow over irregular terrain.” *Beit. Phys. Atmos.*, Vol. 50, pp. 998-113.
- Mahrer, Y., and Pielke, R.A. (1977). “The effects of the topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model.” *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 105, pp. 1151-1162.
- Mellor, G.L., and Yamada, T. (1974). “A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layer.” *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, pp. 1971-1806.
- 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.
- Monin, A.S., and Obukhov, A.M. (1954). “Basic turbulent mixing laws in the atmospheric surface layer.” *Trudy Geofiz. Inst, AN SSSR*, Vol. 24, pp. 163-187.