

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 27, No. 2, 2007

# 도시 확장에 따른 온열환경의 변화

김상진\*

\*전주대학교 건축공학과(kimsj@jj.ac.kr)

## Change of Thermal Environment with Urban Expansion

Kim, Sang-Jin\*

\*Dept. of Architectural Engineering, Jeonju University(kimsj@jj.ac.kr)

### Abstract

The surface changes due to urban expansion and the increase of artificial heat releases have brought significant climate changes such as heat island phenomenon in urban area. Furthermore, these changes also have brought serious problems such as air temperature increase, wind changes, and air pollution in urban area. Comprehensive analytical technologies considering various effects are required to analyse complicated mechanism of climate changes, and review the efficient measures. In this research, the effect of the urban expansion in Tokyo and Bangkok area on urban environment will be discussed. By using CFD, urban development and the mechanism of global warming and wind change are studied in those two cities. As a result of numerical research, the surface changes of city could bring the environmental changes in urban area.

**Keywords** : 도시기후(Urban Climate), 온열환경(Thermal Environment), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 도시확장(Urban Expansion)

### 1. 서 론

최근, 한국을 포함한 아시아는 급격한 도시화에 따라 토지 피복의 변화(녹지면적의 감소, 조도장의 증대 등)와 인공 배열량의 증대 등으로, 열섬(heat island)과 같은 도시 고유의 기후가 현저하게 나타

나고 있다.

대도시는 기온 상승에 편승하여 연쇄적으로 도심부의 풍환경이 변하고, 대기 오염 등의 심각한 환경문제를 일으키고 있다(문헌 1, 2). 이러한 기후 변화에는 다방면에 걸친 변수가 복잡하게 관여하고 있다. 이러한 기후변화의 메커니즘을 분석하

접수일자 : 2007년 5월 1일, 심사완료일자: 2007년 5월 25일  
교신저자 : 김상진(kimsj@jj.ac.kr)

고, 대책을 검토하기 위해서는 각종 요인의 영향을 고려한 종합적인 해석 기술의 확립이 요망된다. 본 논문에서는 전형적인 대도시인 일본 동경과 열대환경기후이면서 최근 급속히 발달하고 있는 방콕을 선정하여 도심의 발달에 따른 온열환경문제를 비교하려 한다. 본 논문에서 소개할 두 도시에는 몇 가지의 일치하는 특징이 존재한다. 두 도시 모두 그림에 나타난 것처럼 대규모로 확장되었다는 점, 해안에 인접하여 있어 해풍이라는 냉기류의 도입이 용이하다는 점, 대규모 인구 증가로 인한 인공폐열 등의 소비가 대폭 증가했다는 점 등의 공통 요소를 가지고 있다.

국내에는 아직 토지이용에 대한 database가 충분히 확보되어 있지 않아, 먼저 토지이용 등의 database가 준비된 일본과 방콕을 대상으로 도시화의 영향을 분석하기로 한다. 본 연구는 수치기후 해석을 이용하여 도시의 발달과 온난화에 동반하는 온열환경과 풍환경 변화의 메커니즘을 통한 검토 결과를 소개한다.

여기서 사용하는 수치기후 모델은 관측 데이터와 그 결과를 비교하여 정밀도가 입증된 것을 이용하였다(문헌 3). 도심의 현재와 과거의 토지이용에 따른 계산을 하고, 도시화의 과정이 이 지방의 유동장, 온도장에 준 영향을 분석한 결과를 나타낸다. 그리고 냉기원이 되는 해풍의 도시로의 유입이 기온저하에 미치는 영향을 분석한다.

## 2. 도시발달과 기온변화

그림 1에 과거 100년 전부터 현재에 이르기까지의 일본 동경의 도시화의 변천(문헌 4)을, 그림 2에 1980년부터 1990년에 이르는 동안 방콕의 도시권 확대상황을 나타낸다. 그림 3은 최근까지의 동경의 기온 상승을 나타낸다(문헌 5). 급속한 도시화의 진행은 대도시 기온의 급격한 상승을 야기했으며(그림 3), 이는 지구 온난화 현상에 의한 기온상승보다 빠른 속도로 증가하고 있다.

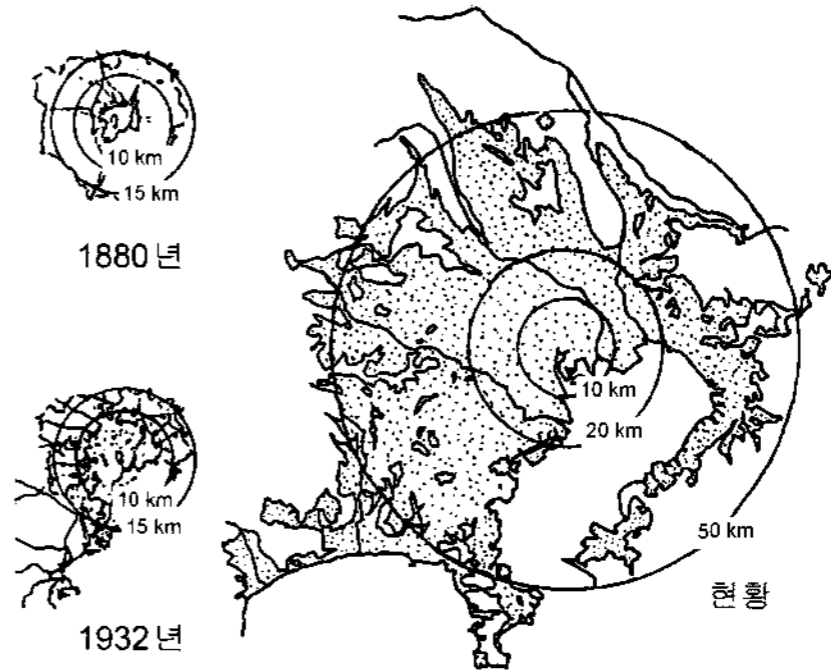
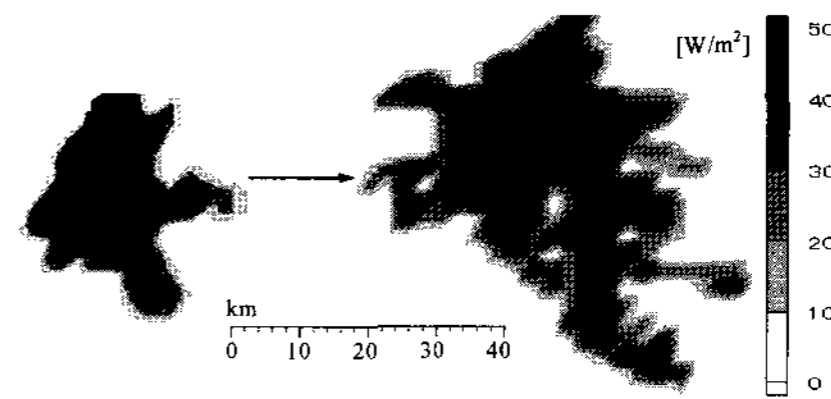


그림 1. 동경의 도시발달 사례



(1) 1980년 (2) 1990년

그림 2. 방콕의 도시발달

이러한 현상은 개발의 일변도를 달리고 있는 아시아의 국가들, 특히 서울, 동경, 상하이, 방콕 등에서 현저히 나타나고 있다.

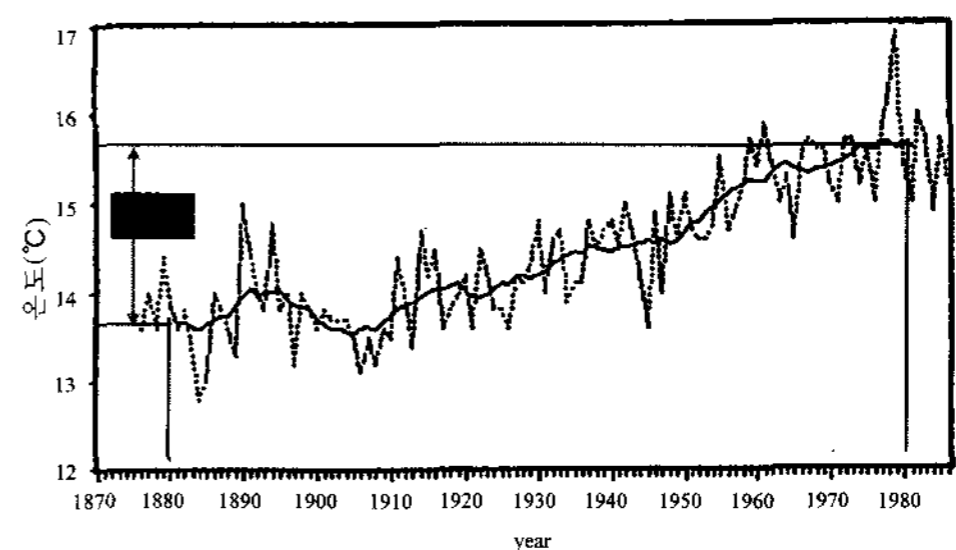


그림 3. 동경의 기온의 증가 (높이 1.5m에서의 기온)

## 3. 해석의 개요

### 3.1 난류모델

복잡한 지형에 적용 가능한 형태로 확장시킨 Mellor-Yamada 모델의 level 2.5(문헌 6~10)를 이용하였다. level 2.5 모델은 공학분야에서 이

용되고 있는 난류 모델로는 간이형 대수응력 방정식 모델 (ASM)에 대응하고 이것은 k-ε형 2방정식 모델의 정밀도를 향상시킨 것이다.

이 방정식계에서는 정역학평형을 가정하고 Coriolis력에 관한 항을 포함하고 있다. 또한 총수분혼합비  $Q_w$  (수증기혼합비와 액체혼합비의 합, 문헌 11~13)의 방정식을 연성시키고 있다.

모델의 방정식 등에 대한 자세한 내용은 문헌 8을 참조하기로 한다.

### 3.2 계산의 개요

그림 4에 동경의 해석영역, 그림 5에 방콕의 해석영역을 나타내고, 표 1에 해석영역 및 Mesh 분할을 나타낸다.

표 1. 계산영역 및 mesh분할

|        | 계산영역<br>(X)×(Y)×(Z) | Mesh<br>분해 | 수평방향<br>Mesh size |
|--------|---------------------|------------|-------------------|
| Grid 1 | 280km×280km×5km     | 35×35×20   | 8km               |
| Grid 2 | 104km×104km×5km     | 26×26×20   | 4km               |
| Grid 3 | 64km×64km×5km       | 32×32×20   | 2km               |

수평 방향에는 등간격(8km격자), 연직 방향에는 지표면으로부터 고도 5km까지의 대기를 20개의 부등간격 격자로, 지하는 깊이 50cm까지를 5개의 부등간격 격자로 분할하였다.

특히 방콕의 경우 3개의 중첩 Grid를 사용하여 도심부 근방을 더욱 상세하게 해석하였다.

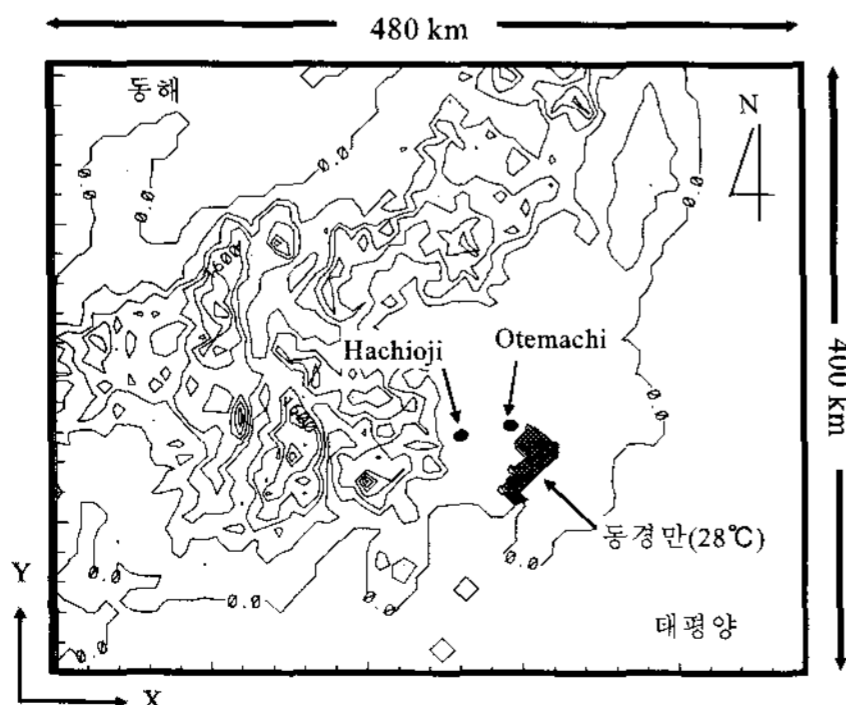


그림 4. 동경의 해석영역

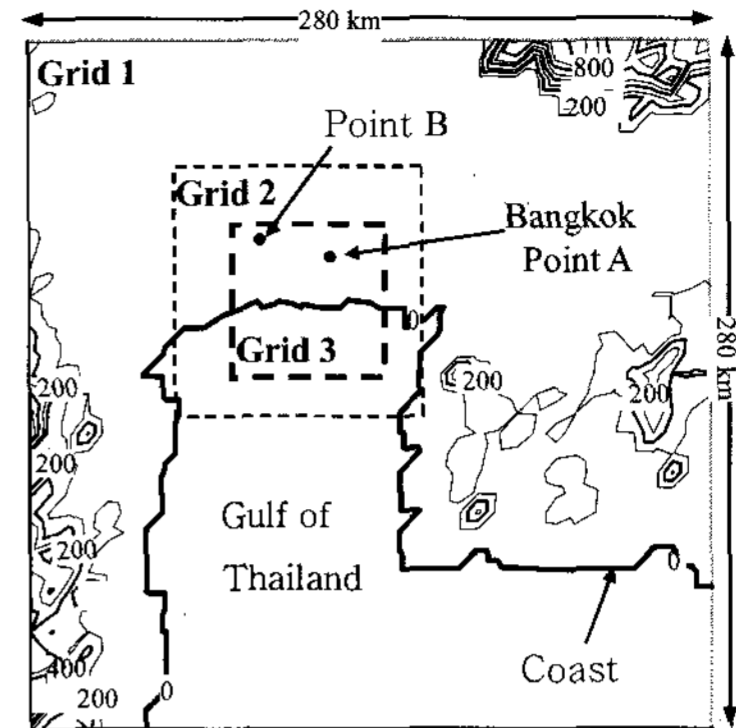


그림 5. 방콕의 해석영역

계산 시기는 동경의 경우 가장 더운 8월 초, 방콕의 경우 본격적인 장마에 들어가기 전인 5월을 대상으로 하였다. 계산은 오전 6시부터 다음날 오후 3시까지의 33시간의 시간적분을 행하였다.

### 3.3 계산 case

표 2에 계산 case를 나타낸다. 비교계산을 위하여 Case1과 Case2는 동경 현재와 과거의 토지이용현황을 이용한 계산, Case3과 Case4는 방콕의 현재와 과거의 토지이용현황을 이용한 계산으로 나누었다.

Case2는 동경의 도시화의 영향을 종합적으로 조사하기 위해, 에도시대 (천보년간, 1830~1844)의 토지이용상황(문헌 14, 15)을 가정하여 계산을 행하였다. 방콕의 토지이용데이터는 Department of land development의 조사데이터를 이용하였다. 이는 위성데이터에 근거해서 토지피복을 분류한 것이다. 이들 토지이용을 각각 15가지의 분류로 나누고 토지이용상황에 따른 각 파라메타의 값은 동일하다고 가정하였다.

표 2. 계산 case

| case  | 토지이용 상태              |
|-------|----------------------|
| Case1 | 동경의 현재의 토지이용(1990년)  |
| Case2 | 동경의 과거의 토지이용(1830년대) |
| Case3 | 방콕의 과거의 토지이용(1980년)  |
| Case4 | 방콕의 현재의 토지이용(1990년)  |

## 4. 계산결과

### 4.1 동경의 기후변화

그림 6은 8월 상순의 오후 3시의 지표면의 온도 분포의 비교를 나타낸 것이다.



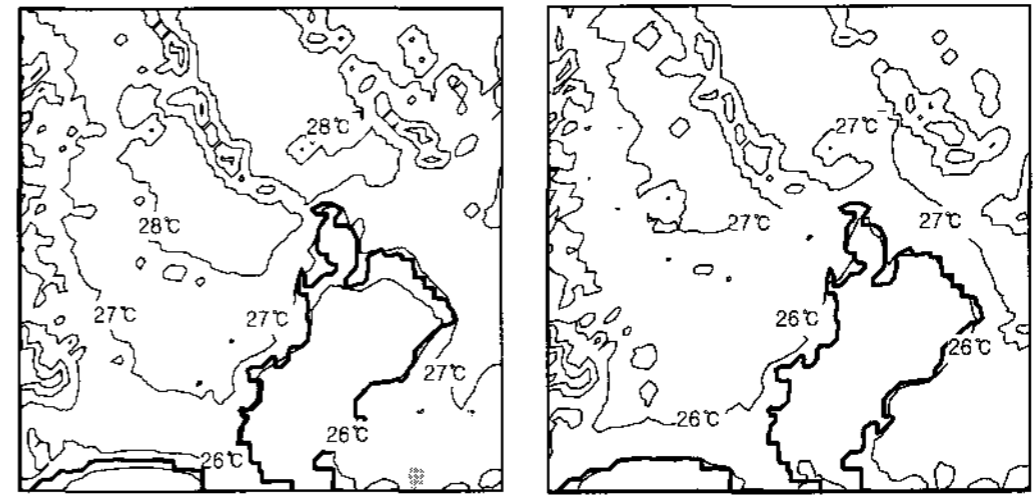
(1) Case1 (2) Case2  
그림 6. 동경의 지표면 온도분포 비교 (오후 3시)

현재 토지이용에 따른 지표면의 피복, 인공폐열 등을 반영하여 한 Case1에서는 동경 중심부의 최대 기온이 약 34°C(8km×8km mesh의 평균값)로 나타나고 있다. mesh의 크기를 고려한 평균값으로서의 이 예측결과는 기존의 관측결과와 잘 일치하고 있다.

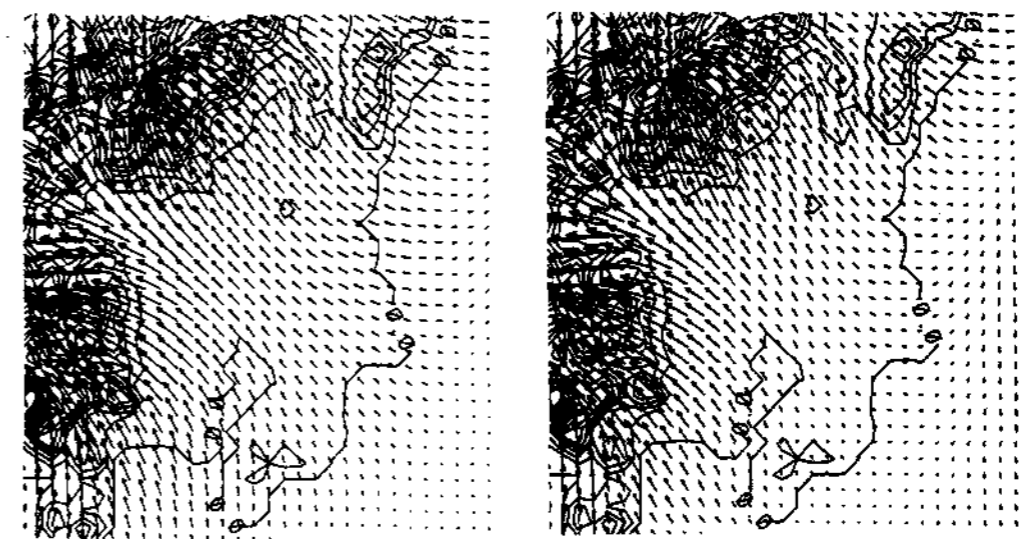
한편, Case2의 에도시대의 결과에서는 도심중심부가 30°C로서, 현재의 도심 지표면의 온도가 약 4°C 상승된 결과를 보이고 있다.

그림 7에 높이 10m에서의 기온분포를 나타낸다. 과거와 비교하여 현재의 높이 10m에서의 기온 상승은 약 1°C이다. 이것은 지표면 1.5m에서의 약 100년간의 기온상승이 2°C라는 그림 3의 관측결과와 상대적으로 잘 대응한다고 볼 수 있다. 이러한 기온의 상승은 이 기간 중에 인공피복의 증대로 인한 수증기 발생량의 감소와 인공폐열의 증대 등에 의한 것으로 판단된다.

그림 8에 동경 부근의 지표면 100m 상공의 풍속분포를 나타낸다.



(1) Case1 (2) Case2  
그림 7. 동경의 기온분포 (높이 10m)



(1) case1 (2) case2  
그림 8. 동경의 풍속분포 (오후 3시, 높이 100m)

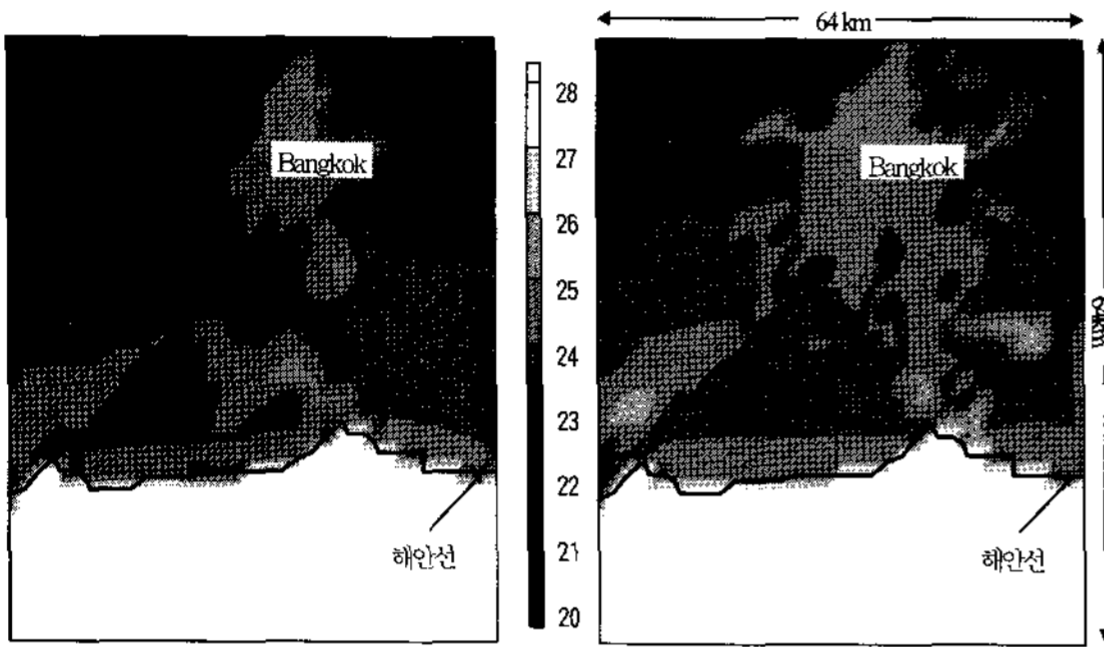
그림에서 보는 바와 같이 현재 상태(그림 8(1))가 과거(에도시대, 그림 8(2))보다 해풍발생시의 도심부의 풍속이 증가됨을 볼 수 있다. 이것은 과거에 비하여 현재의 지표면의 인공피복에 의한 수증기량의 감소, 인공폐열, 조도장 그리고 albedo(일사반사율)를 비롯한 각종 요인에 의하여 지표면 온도가 상승하고, 이로 인하여 해풍의 구동력이 되는 지표면과 해수면의 온도차가 크게 된 것이 그 원인이라 생각된다.

이상으로 Case1과 Case2의 결과의 사이에는 현저한 차이가 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 수증기량 감소, 인공폐열 증가, albedo, 조도장 등의 각각의 파라메타에 관한 영향은 파악하지 않았다. 이에 대해서는 향후 그 영향을 하나씩 분석할 필요가 있다고 생각된다.

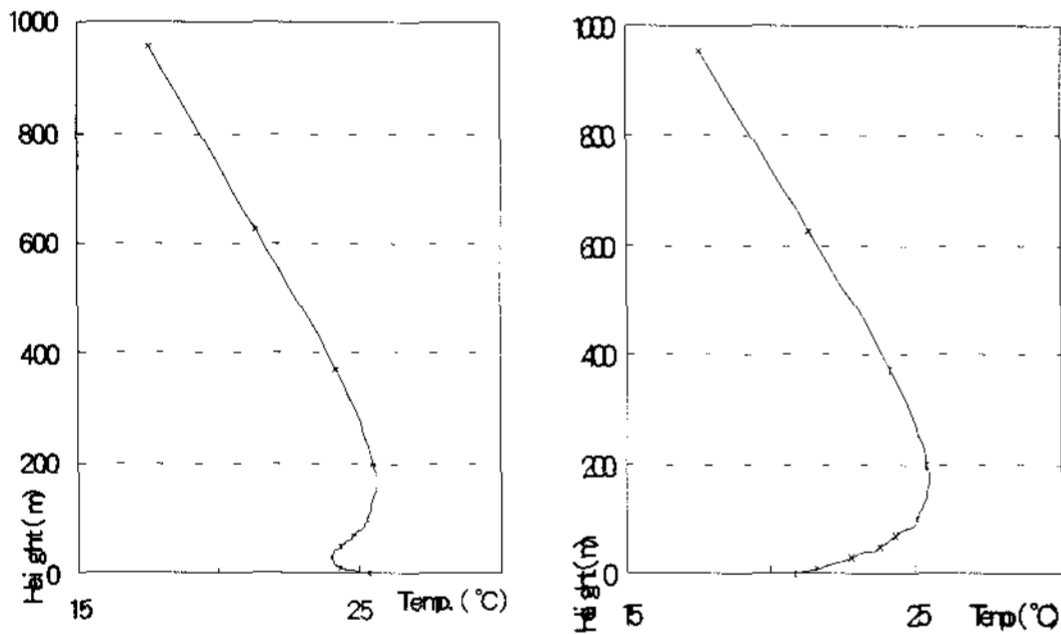
### 4.2 방콕의 기후변화

다음은 방콕의 경우이다. 방콕의 경우는 동경의 경

우와는 달리 단시간에 광범위한 도시발달이 이루어졌다. 1980년부터 1990년에 걸친 약 10년 사이에 그림 2에 타나낸 것처럼 도심 면적이 약 2배 이상 커지면서, 대량의 인구 유입을 통한 거대도시로 성장하였다.



(1) Case3 (1980년) (2) Case4 (1990년)  
 그림 9. 지표면의 온도분포 (방콕, 오전 4시, Grid 3)



(1) Bangkok central part (Point A) (2) suburban (Point B)  
 그림 10. 수직 온도분포 (Grid 3, Case4 (1990))

그림 9에 계산시작 다음날 오전 4시의 Grid 3 내의 지표면온도 분포를 나타낸다. 1980년 (Case3)에 비해 1990년 (Case4)에는 도시역의 확대에 수반해 고온 영역이 확대하고 있다. 야간임에도 불구하고 이 시기에 열섬현상이 발생하고 있는 것이 확인된다.

그림 10에 Case4 (1990년)의 오전 4시에 있어서의 연직 온도분포를 나타낸다. 야간에 도심부에 비하여 교외에서는 지표 부근의 기온이 현저히

저하되고 있기 때문에 높이 0m~200m의 범위에서 강한 역전층이 생긴다.

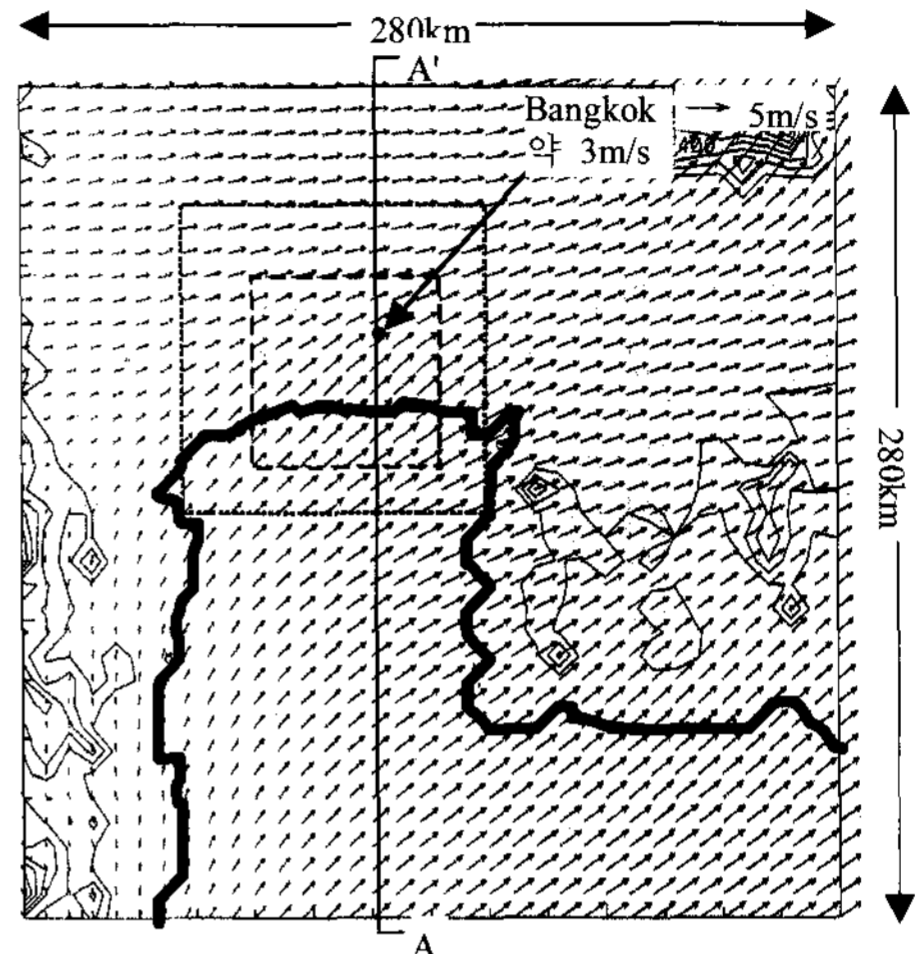


그림 11. 수평방향 풍속 (높이 100m, Case4)

그림 11에 Case4 (1990년)의 정오의 높이 100m에서의 수평 방향 풍속분포를 나타낸다. 낮 시간대에는 육지와 바다의 온도차가 심하여 강한 해풍이 내륙을 향하여 불어오고 있는 것을 알 수 있다. 특히 서풍의 발달로 인하여 좌측의 해안부근은 거의 무풍에 가까울 정도로 약한 바람만 존재하고, 방콕으로 표시되는 도시부 및 우측의 육지면을 향하여 바람의 방향이 급작스럽게 바뀌고 있음을 볼 수 있다.

또, 그림 12에, A-A'단면의 수직 풍속분포를 나타낸다. 바다에서 육지를 향한 해풍이 잘 발생하고 있으며, 방콕 상공에서는 도시의 기온상승으로 인하여 순환류가 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다. 풍속은 방콕 상공 100m로 약 3m/s정도이며, 높이 10m에 대해 약 1m/s이다. 방콕의 실측치 (문헌 16)에서는 높이 약 70m에서 약 2m/s 정도의 해풍이 되고 있어 본 계산 결과는 이것과 대체로 대응하고 있다고 말할 수 있다. 여기에는 나타내지 않지만 이 지역은 야간을 포함하여 해풍이 지속적으로 불고 있다.

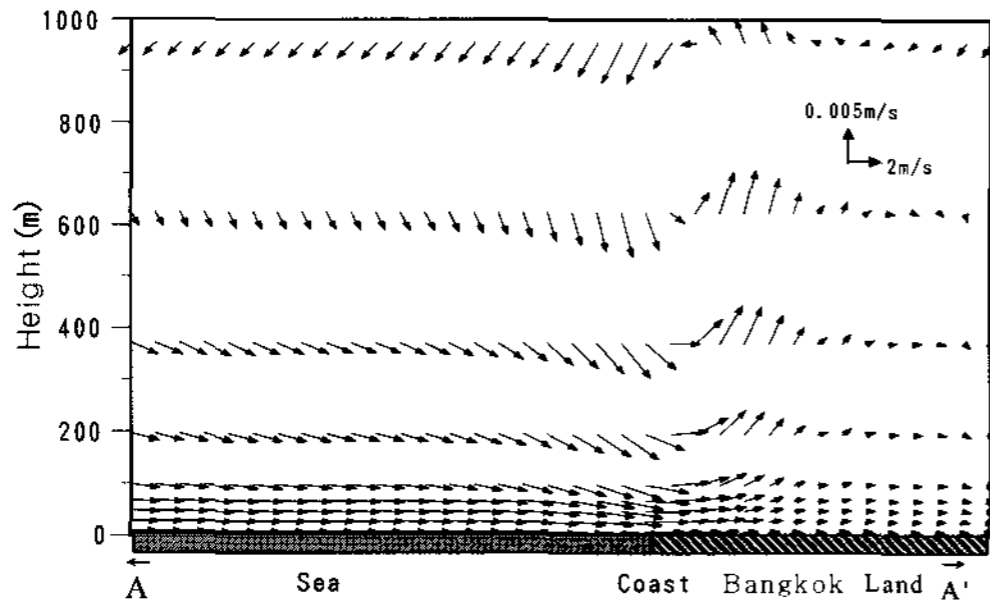


그림 12. 수직방향 풍속분포 (A-A' section, Case4)

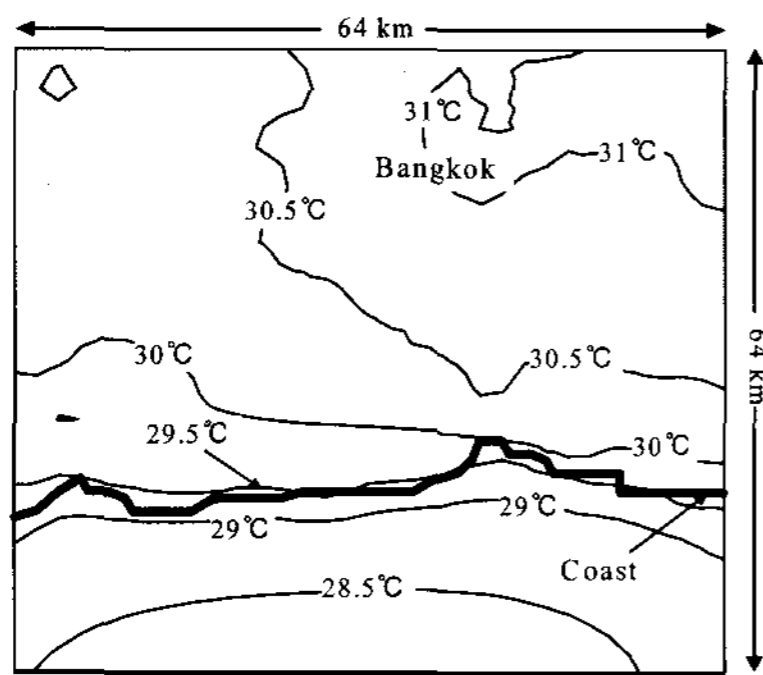


그림 13. 기온분포 (Grid3, height 10m, Case4)

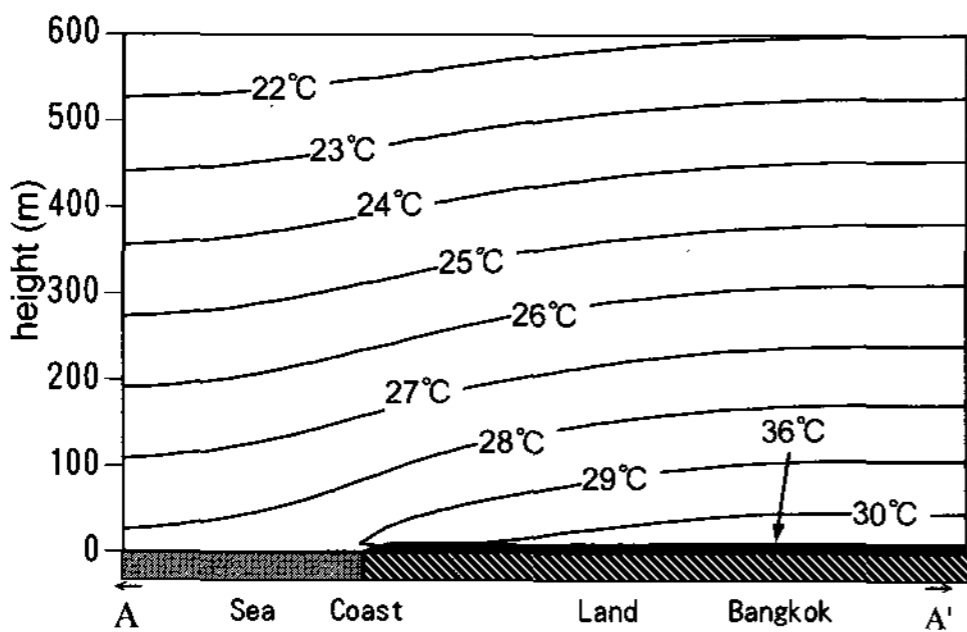


그림 14. 수직방향 온도분포 (A-A' section, Case4)

그림 13과 그림 14에 각각 Case4 (1990년)에 있어서의 Grid 3내의 정오의 수평방향의 기온분포와 수직방향의 기온분포를 나타낸다. 본 계산에서는 방콕에서의 기온은 약 31°C이며, 실측치(문헌 16)의 32°C와 대체로 비슷한 값을 나타내고 있다. 그림 13의 28.5°C~30°C의 등온선을 보면, 해안선에 거의 평행하게 나열되어 있어서 내륙방향으로 갈수록 고온이 되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 내

륙보다 저온인 해상의 공기가 해수면과의 온도차로 인하여 육지로 강하게 유입된 결과의 하나라 생각할 수 있다. 이로써 해풍은 방콕과 같은 해안에 가까운 도시의 온열환경에 중요한 냉열원이 되고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

이상의 결과들을 종합하여 아래에 정리하였다.

- (1) 현재의 Case1의 경우 에도시대의 Case2에 비하여 도심부의 지표면 온도가 약 4°C 정도 상승하고, 이것에 동반하여 해풍발생시의 풍속이 상승하는 결과가 되었다.
- (2) 도시화로 인하여 녹지 면적의 감소와 인공폐열의 증대 등의 온도를 상승시키는 요인뿐만 아니라, 조도장의 증가에 동반하는 지표에서의 열유출의 증가 등의 효과도 종합적으로 평가할 필요가 있다고 말할 수 있다.
- (3) 방콕은, 1980년과 1990년의 10년간에 급격하게 도시지역이 확대되었고 이것에 수반하여 야간의 열섬현상이 현저히 발달하고 있다.
- (4) 방콕의 옥외의 무더운 온열 환경은, 종일 부는 해풍에 의해 상당히 완화되고 있어 적절한 온열 환경 제어를 위해서는, 발달한 해풍을 포함한 바람의 적극적 이용이 중요하다.

이상에서 나타난 것처럼 해변가의 도시 확장의 경우, 도심온도의 상승으로 인하여 해풍의 유입을 유도하는 결과를 얻게 되었다. 두 도시 모두 도심의 갑작스런 확장으로 해풍의 유발은 유도되었지만, 유입되는 해풍이 잘 통과할 바람길을 만들 필요성도 대두되고 있다. 이에 대해서는 향후 바람길에 대한 영향을 분석할 필요가 있다고 생각된다. 본 연구에 사용한 수치해석 기법을 이용하여, 향후 건축분야에서 응용할 수 있는 도시환경 및 설계분야의 기초데이터 베이스를 마련할 필요가 있다. 본 연구를 지속시켜 한국형 도시환경 및 설비계획의 대책에 이용할 수 있는 계기를 마련하고 싶다.

## 참고 문헌

1. 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三, 吉田伸治, 1997, 數値モデルによる關東地方の都市氣候の研究—都市化のもたらす氣候變化に關する檢討—, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 877-880.
2. 吉門洋 외5인, 1993, 工業技術院資源環境技術總合研究所第6號, 1~136.
3. 金相璣, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 吉田伸治, 1997, 數値モデルによる關東地方の夏季の都市氣候解析(その1, 2), 空氣調和・衛生工學會學術講演會講演論文集, 1257-1264.
4. T. Ojima, Changing Tokyo Metropolitan Area and its Heat Island Model, 1991, Energy and Buildings, 15, 191-203
5. 環境廳企畫調整局, 首都圏・その保存と創造に向けて, 平成2年
6. Mellor, G.L., and Yamada, T., 1974, J of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, 179-1806.
7. Mellor, G.L., and Yamada, T., 1982, Rev. Geophys. Space Phys., Vol.20, No.4, 851~875.
8. Yamada, T., and S. Bunker, 1989, J of Applied Meteorological Society of Japan, 28, 545~554.
9. 持田灯, 村上周三, 金相璣, 1996, CFDを用いた都市氣候モデルによる關東地方の局地風解析, 日本風工學會誌, No.67, 71-78.
10. 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三, 1997年, 關東地方における土地利用狀況の變化と流れ場・溫度場の關係, Mellor-Yamada型の都市氣候モデルによる局地氣象解析, 日本建築學會計畫系論文集, No.491, 31-39.
11. 福岡, 張, 鳥居, 1990.11, 水田と畑における熱收支の違い, 中國・四國の農業氣象, 第3號, 1~9.
12. 大上 외 2인, 1993.4, 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面における熱收支特性と溫度環境, 農業土木學會論文集, 164號, 97~104.
13. 淺枝, 柴原, 藤野, 村瀬, 和氣, 1994, 浸透性舗装の水分・移動特性と冷却効果, 水工學論文集, 第38卷, 235~240.
14. 田畑貞壽 외4인, 1984, 綠被地からみた江戸と東京の都市構造に關する研究, 造園雜誌 47(5), 298~303.
15. 田畑貞壽, 都市のクリトツスA鹿島出版會.
16. Center for Climate System Research, 1997, University of Tokyo, Enhanced Rawinsonde Observation In Thailand.