

최 중  
연구보고서

T0024640

원격탐사와 GIS를 이용한 도시주변산림의  
도시열섬현상 영향효과파악

Identifying UHI Decreasing Effects of Urban  
Forests Using RS and GIS

주관연구기관 : 성균관대학교  
협동연구기관 : 서울대학교

농림부

## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “원격탐사와 GIS를 이용한 도시주변산림의 도시열섬현상  
영향효과 파악에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2007년 5 월 일

주관연구기관명 : 성균관대학교

총괄연구책임자 : 이규석

세부연구책임자 : 송영배

연 구 원 : 서애숙

연 구 원 : 엄향희

연 구 원 : 신동훈

연 구 보 조 원 : 이상화

연 구 보 조 원 : 김재철

연 구 보 조 원 : 장은수

협동연구기관명 : 서울대학교

협동연구책임자 : 임규호

연 구 보 조 원 : 김백민

연 구 보 조 원 : 박수현

## 요 약 문

### I. 제 목

원격탐사와 GIS를 이용한 도시주변산림의 도시열섬현상 영향효과 파악

### II. 연구개발의 목적 및 필요성

원격탐사와 GIS를 이용한 도시주변산림의 도시열섬현상 영향효과 파악에 관한 연구는 1970년대부터 인공위성 원격탐사자료의 가시광선, 근적외선 밴드 자료 및 열적외선 밴드 자료를 활용하여

(1) 도시 내 토지이용의 변화와 도시산림 및 녹지의 감소를 파악하고 이를 GIS를 이용하여 도시녹지 및 기후데이터베이스를 구축하고

(2) 토지이용의 변화 특히 도시림의 감소가 열섬현상의 증가에 미치는 영향 및

(3) 도시열섬 현상효과를 저감시키는 도시근교산림으로부터의 바람통로의 파악과 건강한 도시환경을 위해 필요한 도시림의 열섬저감현상을 파악하여 도시 및 도시림의 경관생태학적 지침을 제시하는 데에 본 연구의 목표가 있다

### III. 연구개발 내용 및 범위

#### (1) 1년차 연구개발 내용 및 범위

- ① 원격탐사 이용 열섬현상 파악
- ② AWS이용 국지기상관측
- ③ 한국도시기상모델 연구

#### (2) 2년차 연구 개발 내용 및 범위

- ① Aster 위성영상 이용 열섬 현상 파악
- ② 도시열분포도 작성
- ③ AWS이용 이동기상관측

④ 한국도시 지형, 식생 자료 입력 모델 시험 적용

(3) 3년차 연구개발 내용 및 범위

① 도시립의 열섬현상 영향효과 파악

② 열섬현상 저감을 위한 도시립 및 녹지의 관리이용 지침제시

③ 한국도시 지형, 식생 자료 입력 모델 시험 적용

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

도시의 온난화는 한국의 경우 지난 100년간 1.5°C 이상 진행돼 세계 평균 0.6°C를 2.5배 이상 상회하고 있어 도시열섬현상을 저감시키는 것은 대단히 중요하며 이를 위해 도시산림의 열섬현상저감효과를 파악하기 위해 본 연구를 수행하였다. 본 연구결과 원격탐사 (remote sensing, RS)에 의한 열섬현상 파악은 위성영상에서 얻는 온도가 대기온도 (air temperature) 가 아닌 표면방사 온도 (surface radiant temperature) 이므로 이를 열섬현상파악에 바로 이용하기에는 제약이 따름을 외국 학자들과의 교류로 확인하였다. 이를 보완하기 위해 자동기상관측장비 (Automatic Weather Station, AWS) 및 온습도계 (Temperature-Humidity Sensor, T-H sensor)를 활용하여 실측을 수행하였고 이 결과 도시립의 열섬현상 파악을 보다 객관적으로 수행할 수 있게 되었다. 이를 활용하여 Klimatop 분류를 바탕으로 도시기후지도를 작성하였으며 이는 향후 친환경도시계획에 활용할 수 있으리라고 판단된다.

해당지역의 공기 이동에 따른 오염물질의 확산을 파악하기 위하여 바람장 모델을 이용하여 오염물질 확산의 경로 및 분포를 파악하였다.

외국의 도시지형기후모델을 이용한 미세기후도시모델을 작성하기 위하여 처음에는 MUKLIMO3을 분석하고 후에 MM5를 이용하여 일부 source code를 수정에 맞게 변형, 대상지에 적용, 실험하여 이를 개발하였다.

## SUMMARY

(영문 요약문)

This study is to identify Urban Heat Island (UHI) decrease using remote sensing and GIS , which utilizes the visible and infrared band data of the satellite since 1970s. It performs the following subjects.

- (1) To identify the urban land use change and urban forest decrease and to establish the urban green space database using these information
- (2) Land use change, especially the effect of UHI increase by the urban forest decrease
- (3) To identify the air corridor which helps the identification of UHI decrease and to suggest the guideline in urban land use and forest management.

## CONTENTS

Chapter 1	Synopsis of research project -----	7
Chapter 2	Domestic and oversea technological development situation ---	8
Chapter 3	Research output contents and results -----	9
Chapter 4	Degree of objective achievement and contribution to the related field -----	90
Chapter 5	Research output application plan -----	91
Chapter 6	Oversea scientific and technological information during study -----	94
Chapter 7	References -----	96

## 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ----- 7

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ----- 8

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ----- 9

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ----- 90

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ----- 91

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ----- 94

제 7 장 참고문헌 ----- 96

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

1960년대 이후 도시화, 산업화로 인한 도시의 팽창과 대도시 환경의 악화는 도시의 공기가 오염되고 주위의 농촌지역이나 도시외곽 산림보다 기온이 증가하는 도시열섬(urban heat island) 현상을 보여주고 있다. 이러한 도시 열섬현상은 지표면에 흡수된 장파복사량의 증가에 따른 지표면온도 상승에 기인한다. 도시림이나 농경지는 지표면으로부터의 장파복사에너지 방출로 표면 온도가 상대적으로 낮아 비하여 도심지는 도시 내 콘크리트, 아스팔트와 같은 불투수포장의 증가로 인한 태양에너지 흡수 감소, 도시열섬을 완화시킬 수 있는 식생의 증발산작용 감소로 인해 주변 지역보다 기온이 높은 열섬현상이 나타난다. 열섬현상이 나타나는 도심의 하늘은 뜨거운 공기가 뚜껑처럼 덮고 있어 오염된 도시공기가 상승기류를 타고 주변으로 확산되지 못하고 도심주변 상공의 찬 공기에 눌러 정체되게 된다. 이에 따라 배기가스를 포함한 대기 오염물질들도 함께 도심상공에 체류하면서 오염농도가 높아지게 되며 이는 도시민들의 삶의 질을 떨어뜨리고 국가적으로는 도시환경의 악화로 인한 보이지 않는 국제경쟁력 약화를 초래하고 있다. 일례로 미국에서 소비되는 연간 전기에너지의 1/6은 도시의 냉방에 사용되며 도시 내 대기온도를 섭씨 몇 도만 내려도 에너지 사용의 절감으로 인한 전력사용료의 절약은 수십억 불에 이른다. 한국도 매년 혹서기에 도시 내 냉방 전기에너지의 증가는 전력가용용량의 한계치에 육박하고 있는 실정이다.

이러한 열섬 현상을 저감시키는 방안으로 최근에는 옥상녹화 등 도시 내 지표면의 식생피복 증가, 도시 공원녹지의 확충 등의 대책을 구미 각국에서는 강구하고 있다. 한국의 대도시는 서울의 경우 북한산국립공원, 관악산, 청계산, 대모산과 같은 천혜의 도시림을 주변에 가지고 있으며 도시민의 산소공장인 주변의 도시림으로부터 유입되는 찬 공기의 바람통로를 유지, 관리하면 도시 내 냉방에너지 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 도시주변산림은 산소공급원으로서 뿐만 아니라

- (1) 휴양 및 생물종다양성 유지를 위한 생물 유전자 보존지 역할,
- (2) 도시민의 상수원 확보를 위한 대수층
- (3) 녹지축의 거점 등의

친환경적 공익 기능 역할을 하고 있다.

도시림으로부터 유입되는 찬 공기에 의한 도시 내 열섬현상의 저감은 또한 지표면의 오존(O<sub>3</sub>)량을 감소시킬 수 있으므로 도시민의 건강 향상에 기여할 수 있으므로 도시주변의 산림을 효과적으로 계획, 관리하면 도시열섬 현상을 저감시키는데 기여한다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

도시의 열섬현상은 일차적으로 콘크리트 빌딩의 밀집과 아스팔트 도로 포장 등 도시구조에 기인하며 이차적으로는 자동차 배기가스로 열섬현상이 심화된다. 도시에서는 농촌이나 산림과 달리 태양열을 식혀 주는 녹지가 부족한 것도 한 원인이다.

도시기온의 급격한 상승은 생태계나 인간환경에 악영향을 주는데다 대기오염을 가중시키는 이차적인 악순환을 일으키므로 열섬현상을 하나의 열 오염원으로 다루어 적극적인 대응을 해야 하는데 이를 위해 정확한 열섬현상 파악이 선행되어야 한다. 외국에서는 이를 바탕으로 열섬현상이 심한 지역별로 도시계획 시

- (1) 각종 열 발생원의 사용을 제한하고
- (2) 도시 내 녹지훼손을 막으면서 장기적으로는 녹지 공간 확충을 하는 등의 대책을 시행하고 있다. 도시로의 집중화로 인해 도시 열섬 현상 자체에 대한 완전해결은 불가능하나 열섬 실태의 정확한 진단을 통해 열섬현상을 최소화하는데 주력하고 있는 실정이다.

이러한 열섬현상의 파악은

- (1) 기상관측장비를 통한 관측과
  - (2) 원격탐사 영상의 열적외선 밴드를 이용한 간접 측정 방식이 있다.
- 미국 등에서는 Landsat ETM, NOAA기상위성 등을 이용해 광역의 열섬현상을 주기적으로 파악하고 있으나 한국에서는 도시 내 토지이용의 세분화, 고밀도 집적으로 인해 60m의 해상도로는 도시 내 토지이용에 따른 세부적인 현상을 파악하기에는 조악한 면이 있다.

본 연구과제의 수행자들은 Landsat영상의 열적외선 밴드를 이용한 도시열섬현상을 파악하고 있으며 AWS관측에 의한 기상자료를 바탕으로 도시 내 Klimatop 분류지도를 작성하여 이를 바탕으로 도시 내 산림으로부터의 바람통로가 도시 내 열섬현상을 저감시키는 연구를 수행하고 있다.

기술도입의 타당성

열섬현상은 해당 국가, 도시의 자연환경, 사회문화 환경과 토지이용에 따른 현상이므로 이를 해결하는 범세계적(universal)인 방법은 존재하지 않고 대상지역의 토지이용, 지형, 식생 및 바람통로, 녹지의 분포에 따른 대책과 처방 및 지침이 미국, 일본, 유럽연합 등에서 연구되고 있으므로 한국에서도 국내 환경에 맞는 열섬현상 저감에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### RS를 이용한 도시림의 cooling effect 파악

주관연구책임자 성균관대학교 이 규 석

#### 1. 서론

현재 세계 대부분의 국가는 경제성장의 결과 도시화에 직면해 있으며 이러한 도시화 현상은 다양한 환경문제를 야기 시킨다. 1960년대 이후 우리나라에서도 급속한 도시화와 산업화가 이루어 졌으며, 그 결과 농경지와 산림 면적이 감소하고 도시지역이 10배 이상 증가하였다 (Lee, 1995). 이러한 급속한 도시 확장의 결과는 도시열섬 (urban heat island, UHI), 대기오염, 수질 오염등과 같은 다양한 환경 문제를 동반하게 되며 (Yokohari, 2000), 더 나아가 인구의 도시 집중현상에 의해 이러한 도시화 문제점들은 더욱 악화되었다. 도시열섬 (UHI)은 도시의 인공적인 구조물에 의한 태양에너지의 흡수와 저장 그리고 공업적이고 상업적인 과정으로부터 대기 중으로 방출되는 열로 인해 발생된다 (Janina, 1987). 도시표면의 대부분을 차지하는 아스팔트와 콘크리트와 같은 인공물질은 주간에는 열을 저장하고 야간에는 천천히 냉각된다. 이것은 자동차 배기가스와 주택 난방열과 함께 도시 열섬의 중요한 요인이 된다. 본 연구의 대상지는 서울시 한강 이남의 강남구, 송파구, 서초구와 주변 청계산, 광교산, 관악산 등을 포함하는 지역으로, 연구지역에서 토지이용은 매우 급속하게 변화되었다.

도시 열섬현상을 관측하는데 있어서 가장 큰 문제점은 기후관측 자료가 부족하다는 것이다. 현재 서울에서는 26곳의 자동기상관측장비 (automatic weather station, AWS)를 통해 1시간 간격으로 기상이 상시 관측되고 있으나 서울시 전역의 열섬현상 파악에는 크게 부족한 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 원격탐사 위성영상의 열적외선 (thermal infrared, TIR) 밴드의 방사자료를 활용하여 지표면 열 분포의 파악이 가능하다. 원격탐사 영상은 광범위한 지역의 주기적인 반복을 통해 관측되므로 지상 기후관측 자료가 부족한 우리나라에서 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 SRT는 실질적인 대기온도가 아니기 때문에 보다 정밀한 실측자료를 이용한 대기온도의 측정이 필요하다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 연구대상지

본 연구의 대상지인 강남구 타워팰리스 주변지역은, 서울의 한강 이남에 위치하는 강남구의 대모산, 구룡산, 양재천, 탄천, 선릉공원, 매봉산 등의 도시녹지를 포함하는 지역으로, 1970년대부터 주거단지 개발을 목표로 대규모 택지개발사업이 추진된 지역이다. 대모산과 구룡산의 북부지역은 1970년대 초부터 개발되기 시작한 영동택지개발지구와 1989년과 1993년 사이 개발된 수서 택지개발지구를 포함하는 지역으로, 급속한 토지이용 및 지형의 변화가 이루어진 지역이며, 반면에 대모산과 구룡산 남부지역은 상대적으로 녹지가 잘 보전되어 있는 지역으로 최근 세곡지구 등의 택지개발사업이 추진되고 있다 (Figure. 3-1-1).



Figure 3-1-1. 연구 대상지

### 2.1.1. 지형특성

서울은 한반도의 서측 중앙부, 동경 126°59', 북위 37°34'에 위치하고 있으며, 면적은 605.4km<sup>2</sup>로, 도심 중심부의 동서방향으로 한강이 흐르고, 중앙에는 남산이 위치하고 있으며, 북한산, 관악산, 도봉산, 우면산, 불암산 등 24개의 산이 외곽을 둘러싸고 있는 분지형태를 이루고 있으며, 도시 내부에 크고 작은 구릉지역이 많이 산재하여 토지의 기복이 심하고, 구릉지 사이로 한강의 지류인 중랑천, 청계천, 홍제천, 불광천, 탄천, 안양천, 양재천 등의 하천이 흐르고 있다.

본 연구대상지의 지질은 주로 경기-편마암-복합체의 일부인 선캄브리아기의 편마암류와 중생대 백악기에 관입된 화성암류로 구성되며, 저부평지는 신생대 4기의 충적층이 부분적으로 분포하고 있다 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1972; 1975; 1982).

### 2.1.2. 기후 특성

겨울철 대륙의 한랭고기압, 여름에는 고온다습한 해양기단의 상호작용으로 기온의 연교차가 30℃에 이르는 대륙성 기후를 보이며, 남부지방의 온대성 기후와 북부지방의 한대성 기후의 중간적 성격을 가지고 있다. 강수의 계절적 분포는 하절기에 집중호우 현상이 나타나고, 동절기에는 갈수 현상이 나타나 강수량의 계절적 변동이 심하다. 사계절이 뚜렷하고 기온의 차가 크게 나타나고 있으며 지형적인 영향을 강하게 받아 겨울철에는 삼한사온의 대륙성 기후를 보인다.

1971년부터 2000년 동안의 30년간 기상청 측정 자료에 의하면, 기상요소별 평균값을 살펴보면 평균기온 12.2℃, 평균풍속 2.4m/sec, 평균상대습도 66.9%, 평균 강수량 1344.3mm, 평균운량 5.1로 나타났다. 월평균기온은 1월이 -2.5℃로 가장 낮게 나타났으며 8월이 25.4℃로 가장 높게 나타났으며, 월평균 강수량 여름철인 6월-8월 사이에 809.2mm로 연강수량의 60.2%가 집중되어 나타나고 있으며, 겨울철인 12월-2월 사이에는 70.1mm의 연평균 강수량을 보이고 있어 갈수기와 홍수기 사이의 강수량의 편차가 크게 나타났다 (Table 3-1-1).

Table 3-1-1. 1971년 - 2000년 서울지역 월평균기온 및 강수량

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
월평균 기온 (℃)	-25	-03	52	121	174	219	249	254	208	144	69	02	122
월평균 강수량 (mm)	21.6	23.6	45.8	77.0	102.2	133.3	327.9	348.0	137.6	49.3	53.0	24.9	1344.3

1995년-2004년 동안의 10년간 기상청 측정 자료에 의하면, 서울지역의 평균기온은 12.9℃, 평균상대습도는 63%, 강수량 1,562mm, 평균풍속 2.1m/s, 운량 4.8로 나타났다. 2004년의 연평균기온은 1995년 대비 1℃ 이상 상승했으며, 1995-2004년 까지 서울지역의 연평균 강수량은 1,562mm로 과거 1985-1995년까지의 연평균 강수량은 1,423mm에 비해 100mm 이상 증가 하였다.

## 2.2. 연구자료

본 연구에서는 도시열섬 현상의 파악을 위해 1999년 5월 21일 획득된 Landsat Thematic Mapper (TM) 영상을 사용하여 지표면 온도분포(SRT) 분석을 실시하였다. 지표면의 방사온도는 기상과 밀접한 관계가 있으므로 영상취득 전후 이틀 동안 (1999년 5월 19일 - 1999년 5월 23일)의 일기상자료를 기상청으로부터 획득하여 위성촬영시간인 10:30분경의 기상자료를 검토하였다. 또한 1:5,000과 1:25,000 축척의 수리지형도를 사용하여 지상기준점 (Ground Control Points, GCP)을 선정하였으며, 2000년에 제작된 1:3,000 축척의 서울시 생태현황도의 토지이용현황을 참조하여 Klimatop map을 작성하였다. Table 3-1-2와 3-1-3은 각각 본 연구에서 사용된 원격탐사 (Remote sensing, RS) 자료와 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS) 자료를 보여주고 있다.

Table 3-1-2. RS data used in this study

Data Source	Spatial Resolution	Date	Data Type
Landsat TM	visible: 30m×30m TIR: 120m	1999, 05, 21	Digital

Table 3-1-3. Other thematic data used in this study

Data Source	Scale	Date	Data type	Publisher
Topographic map	1:5,000	1996	Digital	Korea National Geography Institute
	1:25,000	1999		
Seoul Metropolitan Biotop Map	1:3,000	2000	Digital	Seoul Development Institute

### 2.2.1. 원격탐사자료

본 연구에서는 위성영상 Landsat TM을 사용하였다. Landsat 위성은 지구관측을 위한 위성 중에서 일반인들에게 공개된 최초의 위성영상으로 육상관측 및 연구에 주목적을 두고 육지의 자원탐사, 주제도 제작을 위해 널리 사용되고 있다. 1972년 Landsat 1호가 발사되었고 1999년 Landsat 7호가 발사되어 현재 Landsat 5호와 Landsat 7호가 가동 중에 있다.

Landsat 5호에 탑재된 TM 센서는 기존 Landsat 위성의 Multi-Spectral Scanner (MSS) 센서에 비해 분광밴드 개수, 방사 및 기하학적 설계가 향상된 센서로서, 가시광선 파장대에서 청색, 중적외선 (mid infrared, MIR)밴드, 열적외선 (thermal infrared, TIR)밴드 등이 새롭게 포함되었으며, 또한 Landsat MSS 자료에 대한 경험과 방사량 조사 결과를 바탕으로 7개의 밴드로부터 자료를 수집하여 분광해상력이 향상되었다. TM 밴드들의 파장범위 및 위치는 주요 지표 물질들의 분광 해상력을 향상시킬 수 있도록 선택되었다. TM 자료는 해상도 120m인 열 밴드를 제외한 모든 밴드는 30m 공간해상도로 수집되고 몇 가지 설계 변화가 자료의 측량적인 위치 정확도를 향상시키기 위해 TM 자료에 적용되었다.

TM 밴드는 MSS 밴드들보다 식생구분에 많은 장점을 가지고 있다. TM의 녹색 및 적색 밴드 (밴드 2와 3번)는 MSS보다 밴드 폭이 좁고, TM의 근적외선 밴드 (4번)는 MSS의 조합된 밴드들보다 밴드 폭이 좁고, 식생 활력에 대해 가장 민감한 파장대의 중앙에 위치해 있어 식생 구분에도 많은 장점을 가지고 있다. TM의 중적외선 밴드 (5와 7번)를 이용하여 식물과 수분의 상관관계에 대한 민감도 관찰이 가능한데, 식물 스트레스를 식별을 위해서는 TM 청색밴드 (1번) 자료가 이용된다 (Lillesand and Kiefer, 1999). Table 3-1-4는 Landsat 4호부터 7호까지의 분광 범위와 공간해상도를 보여준다.

Landsat 7 ETM+는 이전의 Landsat 4, 5의 TM과 Landsat 6에 장착되었던

ETM을 보다 발전시킨 sensor로 TM과 비교해서 TIR밴드의 해상도가 120m에서 60m로 향상되었으며, TM sensor 보다 지구의 환경 변화 연구와 육상 표면 관찰에 효율성을 높이기 위해 15m 공간해상력을 가진 전 파장 (panchromatic) 밴드를 포함하여 더욱 향상된 영상의 제공이 가능하다.

Table 3-1-4. Sensors Used on Landsat TM and ETM+

Sensor	Mission	Nominal Spectral Location	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Resolution (m)
TM	4, 5	Blue	0.45-0.52	30
		Green	0.52-0.60	30
		Red	0.63-0.69	30
		Near IR	0.76-0.90	30
		Mid IR	1.55-1.75	30
		Thermal IR	10.4-12.5	120
		Mid IR	2.08-2.35	30
ETM*	6	Above TM bands		30 (120m thermal band)
		panchromatic	0.50-0.90	15
ETM+	7	Above TM bands		30 (60m thermal band)
		panchromatic	0.50-0.90	15

\* Landsat 6 launch failure (source : Lillesand T. M. and R. W. Kiefer, 1999)

## 2.2.2. 주제도

### 1) 수치지형도

지형도는 다른 주제도를 만드는데 기본이 되는 지도로 등고선으로 표현되는 지형기복, 교통로, 취락, 하천 등의 내용을 포함하고 있으며, 그밖에 식생이나 토지이용상황, 행정경계선 등이 포함된다. 수치지형도는 내용면에서 일반종이 지형도의 내용을 모두 포함하고 있으며 지도정보를 계량적으로 분석하고 필요한 정보를 통합, 분리하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 1980년대 중반부터 수치지도 제작을 추진하여 NGIS 기본계획에 의거하여 2000년까지 1/1,000, 1/5,000, 1/25,000 축척의 수치지형도 제작을 완료하였으며, 수정 및 갱신작업이 이루어지고 있다.

## 2) 서울시 도시생태현황도

서울시 전역에 대한 도시생태현황을 조사하고 지도화하여 향후 도시계획 수립에 활용을 위한 목적으로 2000년 서울시정개발연구원에서 작성되었으며 5년 주기로 갱신되어 현재 2005년에 제작된 도시생태현황도가 활용되고 있다. 도시계획입안을 위한 검토자료 및 자연환경보전법에 의한 생태계보전지역의 설정 및 관리등과 같은 도시계획 및 환경관리 측면에서 활용이 가능하며, 토지이용현황도, 불투수포장도, 현존식생도, 비옴유형도, 비옴유형평가도, 개별비옴평가도의 6개 주제도면으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 2000년 작성된 도시생태현황도 주제도면 중 토지이용현황도면을 참조하여 Klimatop map을 작성하여 1999년 5월 21일 영상을 이용하여 생성된 표면온도분포도와의 비교를 통한 도시열섬지역 확인의 자료로 사용하였다.

## 2.3. 연구방법

### 2.3.1. RS 자료 및 GIS 자료

1999년 5월 21일 획득된 Landsat TM 영상은 각각 30m 공간해상도로 기하보정하였다. 이때 각각의 TM 영상들은 원자료의 수치값을 유지하기 위해 2차 polynomial nearest-neighbour 방법으로 재배열하였다. 그런 후 기하 보정된 위성영상은 원격탐사 소프트웨어인 PCI 7.0을 사용하여 지표면 방사온도 추출을 위한 전처리과정을 실행한 후 토지이용분류를 실시하였다.

전 처리된 Landsat TM 위성영상에서 토지이용분류를 위해 우선적으로 하천 및 호수에 해당되는 부분을 masking 한 후 혼합분류 방법 (hybrid classification method)을 실시하였다. 1999년 토지이용분류에서는 분류 정확도를 높이기 위해 2000년 제작된 서울시 도시생태현황도의 토지이용현황도를 참조하여 오류 부분에 대한 보정이 이루어졌다. 최종적으로 1999년 5월 21일 영상의 토지이용분류는 각각 산림, 경작지, 시가지지역, 나대지, 하천 및 호수의 5등급으로 분류하였으며, 1999년 토지이용을 파악하여 지표면방사온도 추출을 위한 방사율 산정의 자료로 활용하였다.

또한 GIS 소프트웨어인 ArcView 3.2를 사용하여 지표면 방사온도 분포, 도시기후지도 (Klimatop map) 등의 GIS 자료를 구축하였으며, 1:5,000 수치지도와 1:25,000 수치지도에서 대상지역의 도로, 하천, 등고선, 건물 등의 레이어별로 추출하여 GIS 자료를 구축하였다.

### 2.3.2. 지표면 방사 온도 추출

Landsat TM 영상의 TIR 자료로부터 지표면 방사온도 추출을 위해서 우선 Landsat TM TIR 밴드의 spectral radiance의 digital number (DN)를 spectral radiance로 변환하는 식 (1)을 사용하였다 (Landsat science data users hand book).

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \times (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

여기에서,

$L_{\lambda}$ : Spectral Radiance at the sensor's aperture in  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

$Q_{cal}$ : The quantized calibrated pixel value in Digital Number(DN)

$Q_{calmin}$ : The minimum quantized calibrated pixel value (DN=0) corresponding to  $LMIN_{\lambda}$

$Q_{calmax}$ : The maximum quantized calibrated pixel value (DN=255) corresponding to  $LMAX_{\lambda}$

$LMIN_{\lambda}$ : The spectral radiance that is scaled to  $Q_{calmin}$  in  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

$LMAX_{\lambda}$ : The spectral radiance that is scaled to  $Q_{calmax}$  in  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

표 3-1-5는 Landsat TM을 위한 시기별  $LMAX_{\lambda}$  와  $LMIN_{\lambda}$  매개변수 값을 보여준다.

Table 3-1-5. Landsat 5 TM post-calibration dynamic ranges for U.S. processed NLAPS data

Processing Date	From March 1, 1984 to May 4, 2003		After May 5, 2003	
	$LMIN_{\lambda}$	$LMAX_{\lambda}$	$LMIN_{\lambda}$	$LMAX_{\lambda}$
band				
1	-1.52	152.10	-1.52	193.0
2	-2.84	296.81	-2.84	365.0
3	-1.17	204.30	-1.17	264.0
4	-1.51	206.20	-1.51	221.0
5	-0.37	27.19	-0.37	30.2
6	1.2378	15.303	1.2378	15.303
7	-0.15	14.39	-0.15	16.5

source : Chander G. and Markham B. 2003, Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Ranges, p.4

식 (1)에서 추출된 spectral radiance는 식 (2)를 통해 표면방사온도 (surface radiant temperature)로 변환 되었다. Landsat TM을 위한 K1과 K2 값은 각각 607.76과 1260.56 이다 (Chander and Markham, 2003).

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

여기에서,

T : effective at-satellite temperature in K

K2 : pre-launch calibration constant 2 in K

K1 : pre-launch calibration constant 1 in W/(m<sup>2</sup>.sr.μm)

L<sub>λ</sub> : spectral radiance at the sensor's aperture

그러나 위 공식 (2)에서 획득된 온도는 흑체 (black body)와 관련된 온도이므로, 토지 피복의 성질에 따른 방사율 (emissivity)에 대한 보정이 필요하다. 표면 방사온도에 대한 방사율 보정은 공식 (3)에 의해 계산되었다 (Weng *et al.*, 2004). 이때 계산된 값은 절대온도 (K) 값을 가지게 되므로, 최종적으로 섭씨온도 (°C)로 변환하였다. 이때 계산된 값은 절대온도 (K) 값을 가지게 되므로, 최종적으로 섭씨온도 (°C)로 변환하였다.

$$S_t = \frac{T_b}{1 + (\lambda \times T / \rho) \times \ln \varepsilon} \quad (3)$$

여기에서,

S<sub>t</sub> : emissivity corrected SRT

λ : wavelength of emitted radiance,

ρ : s  $h \times c / \sigma$

(σ = Boltzmann constant, h = Plank's constant, c = velocity of light)

T<sub>b</sub> : at-satellite bright temperature,

ε : emissivity value

본 연구에서는 시가화지역 0.955, 산림지역 0.975, 경작지역 0.970, 나대지 0.930 그리고 물 지역 0.985의 방사율 값을 사용하였다 (Table 3-1-6).

Table 3-1-6. 본 연구에서 사용된 토지이용 유형별 방사율 값

Land use class	urban	forest	agriculture	bare soil	water
Emissivity value	0.955	0.975	0.970	0.930	0.985

(source: Lillesand and Kiefer, 1999; 채효석 외, 2002)

### 2.3.3. 도시기후탑 지도 작성

기후탑지도는 도시기후, 특히 미기후와 대기오염을 측정 및 분석하고, 도시 대기환경의 질을 개선하기 위해 도시 및 환경계획에의 적용방안과 계획수립자, 정책입안자, 정책결정자에게 필요한 지식과 국지기상 및 기후에 대한 분석내용을 담고 있다.

독일에서는 이미 1950년대부터 도시기후와 녹지에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 1980년대에 들어와서는 여러 지방자치단체에서 도시기후와 대기위생에 대한 연구결과를 Landscape Planning과 환경계획 분야에 적용시켜 왔다.

기후탑이란 가장 작은 기상학적 공간단위로서 동일한 지형적 특성을 갖는다. 이 공간단위 내에서는 대기와 지표면간의 물리적인 상호교환과정이 동일하게 진행되며 전체적인 기후체계에 동일한 영향을 미친다.

기후 지도를 구성하는 주요소는 대상지역의 기후탑으로서, 관련자료의 수집과 현지조사를 통해 동일한 기후적 특성을 갖는 최소공간 단위인 기후탑(Klimatop)을 설정하게 된다. 이와 함께 기후탑 분류기준을 정립하고, 수집된 지형 및 토지이용현황자료 등을 바탕으로 GIS를 활용하여 수치지도에 기후탑을 제시한다. 또한 차고 신선한 공기의 생성지역은 작성된 기후지도를 바탕으로 도출되며, 현지 이동 기상관측 자료를 바탕으로 차고 신선한 공기의 이동경로를 파악하게 된다. 이와 함께 대기오염 측정을 통해 연구 대상지에 위치한 대기오염원에 의한 잠재적인 위험성 등 기타 사항을 파악하여 도시기후지도에 명기한다.

본 연구에서는 연구대상지인 서울시 강남구의 대모산, 구룡산과 양재천, 테헤란로 등 도시 녹지와 도시상업지구가 밀집된 곳을 대상으로 Klimatop을 분류하고 도시기후지도를 작성하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 원격탐사이용 열섬현상 파악

Landsat TM 열적외선밴드를 이용한 지표면 열 분포변화를 파악한 결과 대모산, 구룡산 지역과 광교산 지역이 가장 큰 변화를 보인 것으로 나타났다. Table 3-1-7은 대모산 주변지역에서의 1987년과 1999년 사이의 토지피복 변화를 나타내며 도시 지역은 9.84km<sup>2</sup>가 증가된 반면, 산림 지역과 경작지, 나대지는 각각 0.27km<sup>2</sup>, 5.82km<sup>2</sup>, 3.51km<sup>2</sup> 감소되었다. 이는 수서택지 개발에 의한 도시화가 가장 큰 원인이라고 판단된다. Table 3-1-7에서 경작지에서 산림으로의 변화가 1.28km<sup>2</sup>에 달했는데 이는 양재 시민의 숲 조성과 달터근린공원의 식생증가 및 탄천주변부의 식생증가에 기인하는 것으로 나타났다.

Table 3-1-7. Trend of land cover changes at Mt. Dae-mo and surrounding area  
(unit: km<sup>2</sup>)

		Land use (1987)						
		green			non green		sum	
		forest	agriculture	water	urban	bare soil		
Land use (1999)	green	forest	9.99	1.28	0.07	0.56	0.11	12.01
		agriculture	0.72	1.62	0.04	1.15	0.31	3.84
		water	0.00	0.05	0.06	0.08	0.00	0.19
	non green	urban	1.54	6.54	0.26	19.67	3.67	31.68
		bare soil	0.03	0.17	0.00	0.38	0.23	0.81
sum		12.28	9.66	0.43	21.84	4.32	48.51	
Changed area		-0.27	-5.82	-0.24	+9.84	-3.51		
		-6.33			+6.33			

Table 3-1-8 는 광교산 주변지역에서 1987년과 1999년 사이 토지피복 변화를 보여준다. 토지피복유형의 가장 큰 변화는 도시화 지역이 33.72km<sup>2</sup> 증가된 반면 경작지와 산림지역은 각각 15.25km<sup>2</sup>와 14.88km<sup>2</sup>가 감소되었다. 도시지역증가는 용인시 수서택지 개발과 같은 신도시 개발과 서울외곽순환도로, 신갈-안산 고속도로 그리고 과천-의왕 고속도로 등 도로 건설에 의해 경작지와 산림지역이 도시화 지역으로 토지이용이 변화된 것이 주원인이었다.

Table 3-1-8. Trend of land cover changes at Mt. Gwang-kyo and surrounding area

(unit: km<sup>2</sup>)

		Land use (1987)						sum
		green			non green			
		forest	agriculture	water	urban	bare soil		
Land use (1999)	green	forest	90.58	3.21	0.16	2.38	0.05	96.38
		agriculture	6.37	4.76	0.11	4.02	0.33	15.59
		water	0.05	0.09	0.49	0.20	0.01	0.84
	non green	urban	13.75	22.02	1.00	32.04	4.84	73.65
		bare soil	0.51	0.76	0.02	1.29	0.42	3.00
	sum		111.26	30.84	1.78	39.93	5.64	189.46*
Changed area		-14.88	-15.25	-0.94	+33.72	-2.65		

\* : round error

Table 3-1-9는 1987년부터 1999년 사이 토지이용 변화에 의한 SRT 차이를 보여준다.

대모산 주변지역 전체적으로 SRT는 +1.00℃ 증가하였으며 이는 대모산 주변지역에서 1987년과 1999년 사이 평균 온도가 상승했다는 것을 의미한다. 결과를 보면, 산림지역 에서는 0.32℃ 감소하였으며, 물 지역은 1.88℃ 감소되었고, 나대지, 도시지역과 농경지는 각각 4.06℃, 1.53℃, 0.25℃ 증가되었다.

Table 3-1-9. SRT difference by land use change from 1987 to 1999

(unit : ℃)

Land use in 1999		SRT change (87 - 99)			
site	land use	minimum	maximum	mean	S.D.
Mt. Dae-mo surrounding area	forest	-7.80	+5.73	-0.32	1.11
	urban	-6.43	+11.00	+1.53	1.84
	agriculture	-6.56	+7.31	+0.25	1.94
	bare soil	-1.78	+12.46	+4.06	2.30
	water	-7.17	+3.19	-1.88	3.39
	whole area	-7.80	+12.46	+1.00	1.94
Mt. Gwang-kyo surrounding area	forest	-8.97	+9.55	+0.19	0.88
	urban	-8.41	+17.75	+2.34	2.01
	agriculture	-5.96	+9.50	+0.58	1.61
	bare soil	-5.24	+13.36	+4.63	2.36
	water	-8.66	+12.91	+0.64	1.95
	whole area	-8.97	+17.75	+1.13	1.88

대모산 주변지역의 토지이용별 SRT 변화를 살펴보면 SRT 가장 높게 증가된 지역은 송파구의 가락동 농수산물 시장으로서 +12.46℃ 증가하였다 (Figure 3-1-2). 이것은 상업적 유통과정에서 방출되는 열과 표면 물질에 의한 태양열 복사에 의한 증가가 토지이용변화에 가장 민감했던 것으로 판단된다. SRT가 가장 감소한 곳은 강남구와 송파구의 경계를 형성하는 탄천지역으로서 -7.80℃ 감소하였다.

특히, 강남구의 양재인터체인지와 수서 지하철 차량관리기지의 SRT 차이는 표면 피복물질에 의한 태양열 복사와 차량으로부터 방출되는 열로 인해 주변 도시 지역보다 상대적으로 10℃에서 12℃ 높게 나타났다. 그리고 경작지는 다른 녹지보다 평균 SRT가 +0.25℃로 증가하였는데 이것은 계절적인 경작활동으로 인해 식생이 아직 정착하지 않았기 때문으로 판단된다. 산림의 내부지역에서는 산림의 가장자리보다 SRT가 감소하였으며 이것은 이지역이 비교적 산림이 잘 보존된 지역으로 주변의 도시지역으로부터의 영향이 적었기 때문이다.

양재천의 경우 SRT 차이는 주변 지역보다 -5.2℃ 에서 -1.1℃ 낮았으며, 양재천의 도시열섬 저감 효과의 범위는 약 120m에서 300m 정도로 파악되었다. 이것은 1990년대 중반 자연형 하천공사 이후 하천변의 식생증가와 더불어 개포동 근린공원, 달터근린공원과 같은 도시 근린공원 그리고 양재천 주변의 교육시설에서의 녹지가 증가했기 때문으로 판단된다.

광교산 주변지역 전체적으로 SRT는 +1.13℃ 증가하였으며 이는 대모산 주변지역에서 1987년과 1999년 사이 평균 온도가 상승했다는 것을 의미한다. 결과를 보면, 산림지역에서는 0.19℃ 증가하였으며, 물 지역은 0.64℃ 증가되었고, 나대지, 도시지역과 농경지는 각각 4.63℃, 2.34℃, 0.58℃ 증가되었다.

광교산 주변지역에서는, SRT가 +17.75℃로 가장 높게 증가된 지역은 광교산 내부에 위치한 수지 택지 개발지구였다. 이 지역은 도시화에 의해 산림지역에서 도시지역으로 토지이용이 변화된 지역이다. SRT가 가장 감소한 지역은 광교산 내부의 용인시 신봉동 지역의 산림지역에서 확인되었다 (Figure 3-1-3).

특히, 안양시와 성남시 분당구 그리고 광교산 내부에서 산림지역이 도시 또는 나대지로 토지이용이 변화된 지역에서는 도시 확장과 토지이용 유형의 변화에 의해 주변 도시 지역보다 10℃에서 15℃ 높은 SRT 증가를 나타내었다.

대모산 주변지역은 산림지역과 물 지역의 평균 SRT가 감소되었으나, 광교산 주변지역에서는 모든 토지이용유형에서 평균 SRT가 증가하였다. 이것은 광교산 주변지역에서 도시 확장과 도로건설에 의해 산림이 절편화되고 물 지역이 감소된 것 때문이다.

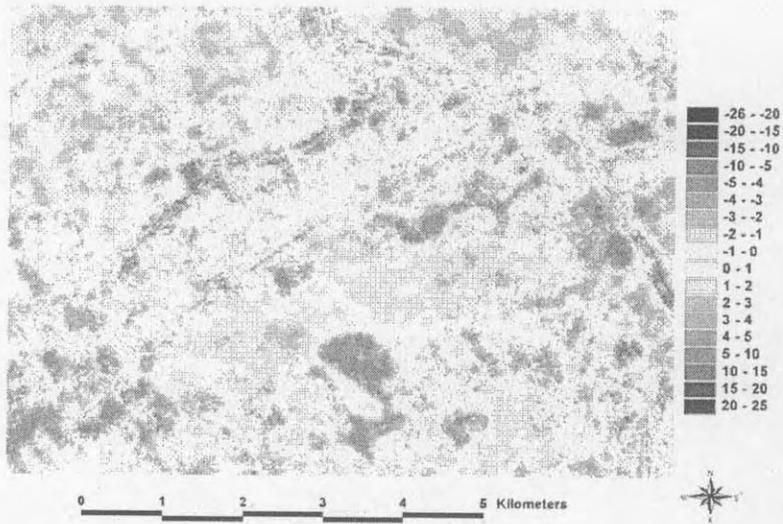


Figure 3-1-2. SRT difference at Mt. Dae-mo and surrounding area

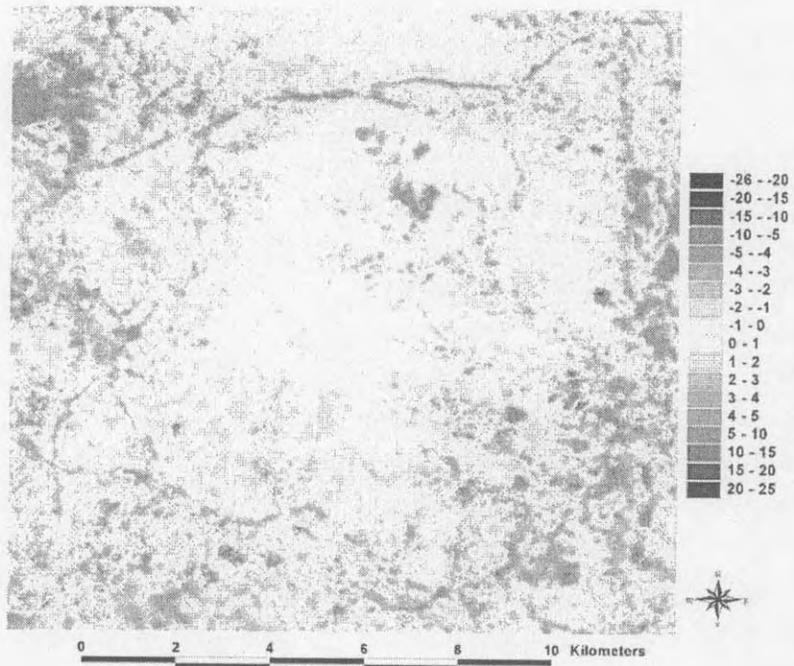


Figure 3-1-3. SRT map at Mt. Gwang-kyo and surrounding area

Table 3-1-10은 대모산 주변 지역에서 녹지 변화에 의한 SRT 변화를 보여 준다. 녹지에서 비 녹지로 변화된 지역에서는 평균 SRT가 2.94℃ 증가된 것으로 확인되었으며, 반면에 비녹지지역에서 녹지로 변화된 지역에서는 평균 SRT가 1.48℃ 감소된 것으로 확인되었다.

Table 3-1-10. SRT difference due to green space change at Mt. Dae-mo and surrounding area

(unit : ℃)

		1999							
		Green area				Non green area			
		minimum	maximum	mean	S.D	minimum	maximum	mean	S.D
1987	Green area	-5.46	+7.30	0.00	1.21	-2.40	+12.46	+2.94	1.84
	Non green area	-7.80	+5.49	-1.48	1.82	-6.34	+11.72	+1.11	1.68

녹지에서 녹지로 변화된 지역의 경우, SRT 차이는 강남구 수서 지하철 차량 관리기지에서 +7.30℃로 최대를 나타내었고, 최소값은 탄천의 소하천 합류지점에서 -5.46℃, 그리고 평균 SRT 차이는 0.00℃로 파악되었다. 녹지에서 비녹지로 변화된 지역의 경우, SRT 차이는 최대 +12.46℃로 도시지역에 산재되어 확인되었으며, 최소 차이는 탄천에서 최소 -2.40℃로 나타났으나 이 지점은 봄철 갈수기의 수량변화로 인해 하천변 토지이용의 오분류로 판단되며, 평균 SRT 증가는 2.94℃로 파악되었다. 비녹지에서 녹지로 변화된 지역의 경우, SRT 차이는 국가정보원 주변지역에서 최대 +5.49℃로 나타났다. 녹지지역에서 비녹지지역으로 변화된 지역에서는, SRT 차이는 송파구의 가락동 농수산물 시장에서 +11.72℃로 최대를 나타내었고, 최소값은 탄천에서 -6.34℃, 그리고 평균 SRT 차이는 +1.11℃로 파악되었다. SRT 차이가 최소를 나타내는 지역은 1987년 토지이용 분류에서 물 지역의 오분류 때문으로 판단된다. 또한, 서울무역전시장 주변지역은 SRT 차이가 +3.4℃에서 +9.96℃로 뜨거운 지역을 형성하는 것으로 확인되었다.

Table 3-1-11은 광교산 주변 지역에서 녹지 변화에 의한 SRT 변화를 보여 준다. 녹지에서 비녹지로 변화된 지역에서는 평균 SRT가 3.32℃ 증가된 것으로 확인되었으며, 반면에 비녹지지역에서 녹지로 변화된 지역에서는 평균 SRT가 1.18℃ 감소된 것으로 확인되었다.

Table 3-1-11. SRT difference due to green space change at Mt. Gwang-kyo and surrounding area

(unit: °C)

		1999							
		Green area				Non green area			
		minimum	maximum	mean	S.D	minimum	maximum	mean	S.D
1987	Green area	-6.18	12.91	0.37	0.83	-4.01	17.75	3.32	1.85
	Non green area	-8.97	5.46	-1.18	1.58	-8.41	12.37	1.55	1.89

비녹지에서 녹지로 변화된 지역의 경우, SRT 차이는 분당 인터체인지 주변에서 +12.91°C로 최대를 나타내었고, 최소값은 용인시 신봉동 산림지역에서 -6.18°C, 그리고 평균 SRT 차이는 +0.34°C로 파악되었다. 녹지에서 비녹지로 변화된 지역의 경우, SRT 차이는 최대 +17.75°C로 도시지역에 산재되어 확인되었으며, 최소 차이는 -4.01°C, 평균 SRT 차이는 +3.32°C로 파악되었다. SRT 차이가 최대를 나타내는 지역은 수지와 분당과 같은 신도시 개발과 서울의 확산순환도로, 신갈안산 고속도로, 과천의왕 고속도로와 같은 도로 건설로 인해 산림이 절편화 된 지역이며, SRT 차이가 최소를 나타내는 지역은 산림이 절편화되고 주거단지 개발 중인 나대지 지역이다. 비녹지에서 녹지로 변화된 지역의 경우, SRT 차이는 안양시 중앙공원에서 +5.46°C로 최대를 나타내었고, 최소 차이는 -8.97°C, 평균 SRT 차이는 -1.18°C로 파악되었다. SRT가 낮게 분포하는 지역은 주변이 산림으로 이루어진 용인시 신봉동 지역에서 볼 수 있다. 비녹지지역에서 비녹지지역으로 변화된 지역에서는, SRT 차이는 지하철 4호선 평촌역 부근에서 +12.37°C로 최대를 나타내었고, 최소값은 -8.41°C, 그리고 평균 SRT 차이는 +1.55°C로 파악되었다. SRT가 가장 증가한 지역은 도시 확장이 이루어진 지역이며, 상업적 (수원시 대형할인매장 건설현장) 또는 주거용 목적으로 개발중 (용인 수지구 개발)인 나대지 지역으로 확인되었다.

NDVI와 SRT를 이용한 평가에 있어 현존 식생의 양은 중요한 요인이 되며, NDVI는 보편적인 식생 상태를 나타내는 것에 사용될 수 있다 (Weng and Lu, 2004).

Table 3-1-12는 1987년과 1999년 사이 NDVI 변화에 의한 SRT 차이를 보여준다. 대모산 주변지역에서는, NDVI가 증가된 지역의 SRT 차이는 최대 +11.72°C, 최소 -7.80°C, 그리고 평균 SRT 차이는 +0.27°C로 나타났다. 반면에, NDVI가 감소된 지역의 SRT 차이는 최대 +12.46°C, 최소 -7.17°C, 그리고

평균 SRT 차이는 +1.86℃로 나타났다. 광교산 주변지역에서는, NDVI가 증가된 지역의 SRT 차이는 최대 +12.96℃, 최소 -8.97℃, 그리고 평균 SRT 차이는 +0.38℃로 나타났다. 반면에, NDVI가 감소된 지역의 SRT 차이는 최대 +17.75℃, 최소 -8.66℃, 그리고 평균 SRT 차이는 +2.41℃로 나타났다. 대모산 주변지역에서는 NDVI가 감소된 지역은 NDVI가 증가된 지역보다 평균 SRT가 1.59℃ 낮게 나타났으며, 광교산 주변지역에서는 NDVI 감소된 지역이 NDVI가 증가된 지역보다 2.03℃ 낮게 나타났다 (Table 3-1-12).

Table 3-1-12. SRT difference by NDVI change between 1987 and 1999

(unit : ℃)

Site	NDVI increase area				NDVI decrease area				Δmean value
	maximum	minimum	mean	S.D.	maximum	minimum	mean	S.D.	
Mt. Dae-mo surrounding area	+11.72	-7.80	+0.27	1.62	+12.46	-7.17	+1.86	1.94	-1.59
Mt.Gwang-kyo surrounding area	+12.96	-8.97	+0.38	1.26	+17.75	-8.66	+2.41	2.05	-2.03

선형 회귀분석의 결과, SRT와 NDVI 사이에는 음(-)의 상관관계를 확인할 수 있었다. Table 3-1-13은 추출된 SRT와 NDVI 사이의 선형 회귀분석 결과를 보여준다. 이 분석에서 물 지역은 낮은 SRT 분포지역에서 낮은 NDVI 분포를 보이기 때문에 제외하였다. 분석 결과, SRT와 NDVI 사이에는 명확한 음(-)의 상관관계가 확인되었으며, 1987년에는 약 68%, 1999년에는 약 75%의 설명력이 있었다.

Table 3-1-13. regression analysis between extracted SRT and NDVI

regression	year	regression model	R <sup>2</sup>
SRT and NDVI	1987	$y = -11.424x + 26.099$	0.68
	1999	$y = -10.669x + 27.393$	0.74

### 3.2. Aster 영상분석을 통한 열섬분포도 작성

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)는 NASA와 일본 국제 통상 산업부 (Ministry of International Trade and Industry)가 합동으로 개발하였다. ASTER는 지표면 온도, 방출도, 반사도 및 고도에 대해 상세한 정보를 수집할 수 있다. 이것은 Terra 위성에 탑재된 높은 공간해상도 장치이며, 낮은 공간해상도로 지구를 관측하는 MODIS, MISR, CERES 센서와 결합되어 사용된다. ASTER는 TIR (thermal infrared) 하부 시스템은 위치가 고정된 하나의 연직방향 망원경을 사용하여 열적외선 영역의 5개 밴드에서 공간 해상도가 90×90m인 자료를 수집한다.

Aster 영상의 열적외선밴드(2004. 4.17. 오전)를 이용 대상지의 열분포현황도면은 Figure 3-1-4와 같다. Figure 3-1-4에서 보듯이 대모산과 구룡산은 표면방사온도가 주위 도시지역에 비해 현저히 낮은 데 비해 매봉산은 차이가 크게 나타나지 않고 있다. 이는 도시립의 면적과 크기가 도시열섬저감에 미치는 영향을 보여주고 있으며 가락동농수산물시장, 서울무역전시관, 구룡마을에서 온도가 높게 나타나 1차년도 Landsat 이용 열분포현황과 같은 현상을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 대상지는 주거지, 상업지 모두 열섬현상이 높게 나타나고 있으며 대모산, 구룡산, 탄천, 양재천 그리고 매봉산에서 상대적으로 낮은 현상을 보여주고 있다. 이 가운데 대모산, 구룡산을 제외하고는 주변도시지역과 큰 차이를 나타내고 있지 않다.

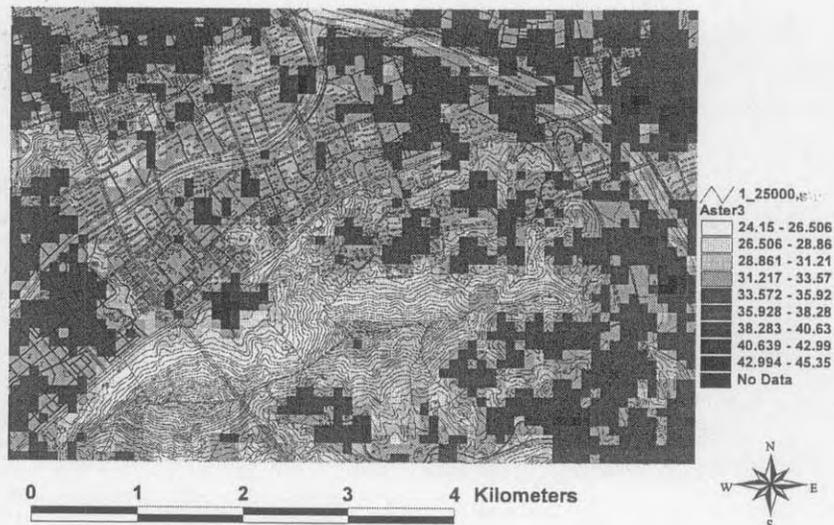


Figure 3-1-4 대상지의 Aster영상 이용 열분포도

### 3.3. 고층건물 주변의 빌딩바람 및 열섬현상

본 연구를 수행하면서 고층빌딩의 주변 환경에 대한 피해가 심한 것을 알 수 있었으며 열섬현상 관측을 하면서 고층빌딩 주변도 같이 수행하였다. 연구대상 지에는 5층, 12층, 17층 및 20층 이상의 공동주택이 조밀하게 입지해 있으며, 특히 69층높이의 타워펠리스는 고도 261m로서 해발고도 95m의 매봉산보다 높다. 타워펠리스 주변으로 높은 건물이 조밀하게 위치해 있어 바람장 및 주변 기온변화에 큰 영향을 미치는 것으로 예상된다.

대상지역에 AWS와 풍향풍속계를 설치해 관측한 결과 타워펠리스 풍상면은 겨울철 동풍이 건물에 막혀 전혀 불지 않는 경향을 보이고 있다 (Figure 3-1-5). Figure 3-1-5는 뷰포트 등급 6등급의 강풍이 불던 2006년 3월13일의 시간대별 풍향을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 동풍이 전혀 없으며 이는 도곡동 고층건물군에 의해 바람이 차단되는 것으로 파악된다. 이와는 상대적으로 서울지방의 겨울철 주풍향인 북서풍이 고층건물군에 막혀 하강풍을 형성하면서 풍상면이 접하는 지역에 대기냉각효과를 가속화시키는 결과를 초래하고 있다. 현지 답사결과 풍상면의 가로수 보호마대가 바람에 찢겨 제 구실을 하지 못하고 국기 게양대가 바람에 휘청거리는 전형적인 빌딩바람 현상을 보이고 있어 고층건물에 의한 빌딩 바람에 대한 구체적이고 추가적인 연구가 시급하다고 판단된다.

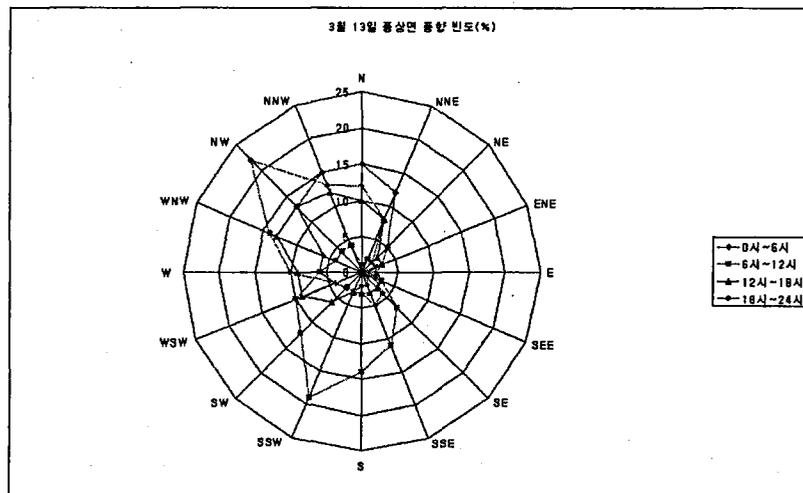


Figure 3-1-5 . 풍상면의 시간대별 풍향빈도

뷰포트 등급 5이상의 풍속을 나타내는 Figure 3-1-6에서는 풍상면은 북서-북풍이 주풍향이며 풍하면은 남풍이 주풍향을 이루고 있다. 이는 풍하면이 남산보다 높은 건물군에 막혀 일종의 진공상태를 형성해 저지대 평탄면인 남쪽에서 바람이 유입되는 것으로 추정된다. 고층건물의 풍하면에 대한 난류장 형성에 대한 좀더 심도있는 연구가 필요하다고 판단된다.

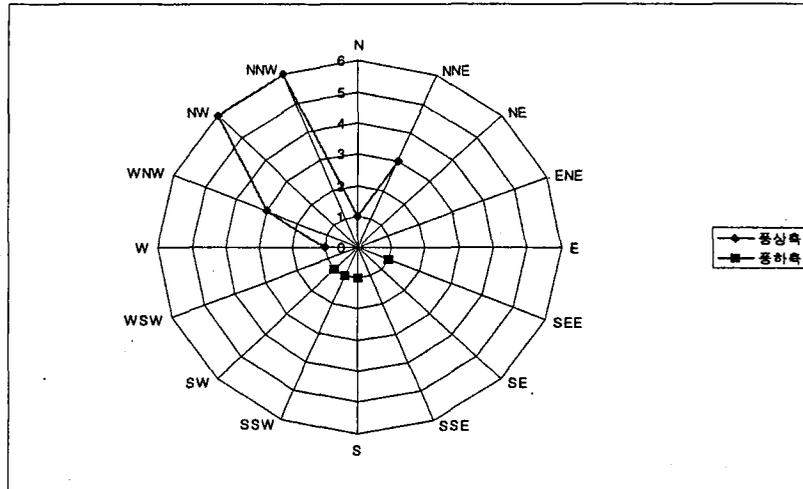


Figure 3-1-6. 풍상, 풍하면의 뷰포트등급 5등급 이상일 때의 풍향빈도

뷰포트 등급 5이상의 1분 단위 순간최대풍속에 대한 강풍을 시간대별로 분석한 결과 (2005.12.20 - 2006.3.17) 풍상면은 낮 시간대에 주로 발생하고 풍하면은 밤 시간대에 주로 발생하였다. 풍하면은 앞서 언급했듯이 남풍위주의 바람이라 주변에 난류장이 형성되고 있다고 판단된다. 풍상면이 빈도, 강도에 있어 풍하면보다 높고 자주 발생해 고층건물군에 의한 도시미기후적 특성이 분명 존재함을 확인하였다. 대상지역은 고밀도 주거지와 매봉산, 양재천이 위치한 지형이다. 매봉산 자연지형보다 도곡동 고층건물군이 3배정도 높아 바람의 소통을 막고 있으며 이는 대기오염물질의 정체를 야기하고 있다.

종합적으로 대상지역에서는 매봉산의 경우 주변 고층건물군에 의해 바람이 차단되고 있음을 보여주고 있다. 역으로 여름철의 남동풍이 고층건물에 막혀 풍상면은 더 더운 체감온도를 경험하리라 판단된다. 대상지는 도시림보다는 고층건물군이 도시미기후 특성을 결정짓고 있으며 이는 주변 도시림보다 건물이 월등히 높을 경우 발생하는 현상으로 파악된다.

고층빌딩과 도시림사이의 열섬강도를 측정된 결과 연구대상지 내 타워펠리스와 구룡산 남쪽 구룡마을의 열섬강도의 차이가 가장 심하게 나왔으며 2007년 7월 22일 오후 10시 50분 타워펠리스는 25.8°C, 염곡동은 19.7°C로서 열섬강도의 차이는 6.1°C였다. Figure 3-1-7은 이 시각의 열섬분포현황을 보여주고 있다.

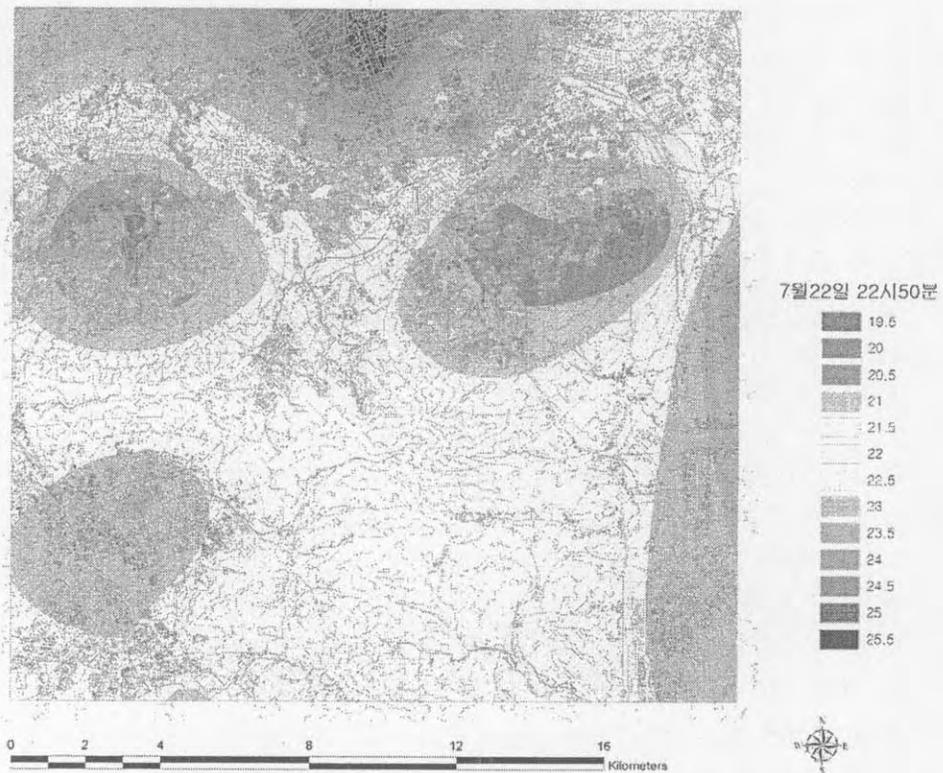


Figure 3-1-7. 연구대상지 주변지역의 열섬분포도 (2007년 7월 22일, 22시 50분)

### 3.4. Klimatop Map 작성

1999년 Landsat TM 위성영상에서 추출된 지표면 방사온도분포도 (Figure 3-1-8)와 도시기후지도 (Figure 3-1-9)를 비교 분석한 결과, 연구 대상지 전지역의 평균 지표면 방사온도는 26.0°C로 나타났으며, 가장온도가 높은 지역은 상업업무 유형 지역인 학여울역 인근의 서울무역전시관 부근 에서 36.8°C로 나

타났으며, 가장 낮은 지표면 방사온도는 상업업무 유형 지역인 아셈타워 지역에서 6.6℃로 가장 낮게 나타났으나, 이는 1999년 위성영상 획득 당시에 건축이 한창 진행중인 상태 (200년 8월 완공)에서 일시적인 반사율 (Albedo)의 차이에 의한 태양복사열이 표면에서 흡수되지 못하고 반사되었기 때문인 것으로 판단된다.

다음으로 각 Klimatop 유형별 평균지표면 방사온도의 분포를 살펴본 결과, 평균지표면 방사온도가 가장 낮은 Klimatop 유형은 자연산림 유형으로 21.7℃로 나타났으며, 다음으로 조림지 유형 23.1℃, 수체 유형 24.3℃, 논 경작유형 25.0℃, 초지 유형 26.1℃의 순으로 나타났으며, 평균지표면 방사온도가 가장 높은 Klimatop 유형은 공업지 유형 29.8℃, 1층에서 4층 주거지 유형 28.4℃, 상업업무유형 28.2℃, 도로 유형 27.7℃의 순으로 나타났다. 특이한 점은 5층에서 15층 사이의 주거지 유형과 16층 이상의 주거지 유형에서의 평균 지표면 방사온도가 각각 26.9℃와 27.0℃로 낮게 추출되었으나 이는 고층건물의 그림자의 영향으로 인해 그늘진 지역에서의 지표면 방사온도가 태양복사열이 직접적으로 유입되는 다른 Klimatop 유형보다 상대적으로 낮게 추출되었기 때문인 것으로 생각된다 (Table 3-1-14).

Klimatop map과 지표면 방사온도 (SRT)를 중첩하여 비교한 결과 자연산림지역 - 인공조림지역 - 수체 - 논 경작지 - 초지 - 공원 - 학교 - 도로 - 상업업무지역 - 주거지역 - 공업지역의 순으로 열섬현상이 심화되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 위성영상에서 추출된 지표면 방사온도값은 주거지역에서 보는 바와 같이 실제적인 대기온도와는 차이가 발생되게 되는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 실제 대기 온도 (air temperature)를 파악을 위해 온습도 센서를 설치하여 도시 외곽의 산림지역에서 도심지내로의 fresh cold air corridor를 파악하였다.

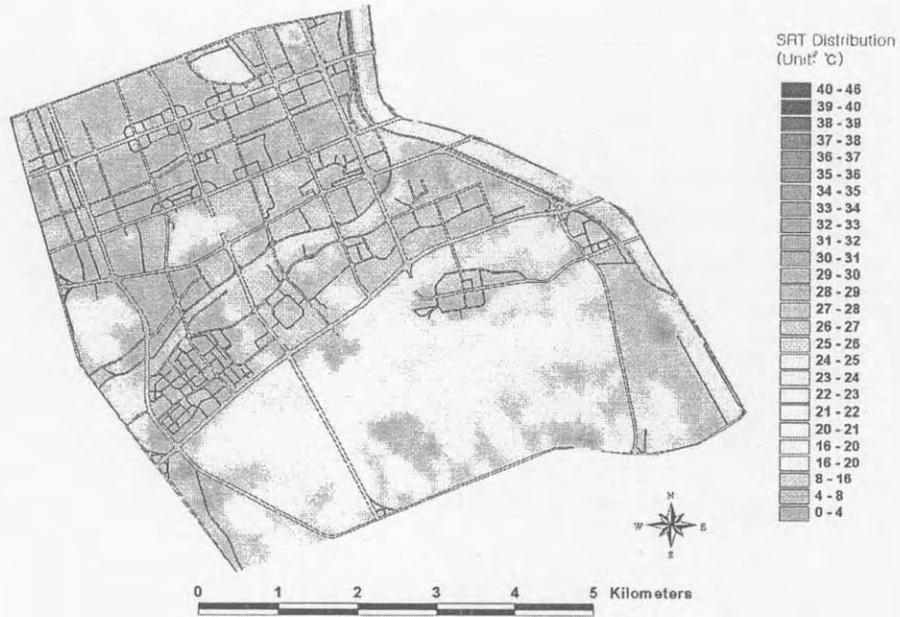


Figure 3-1-8. 1999년 지표면방사온도 분포도

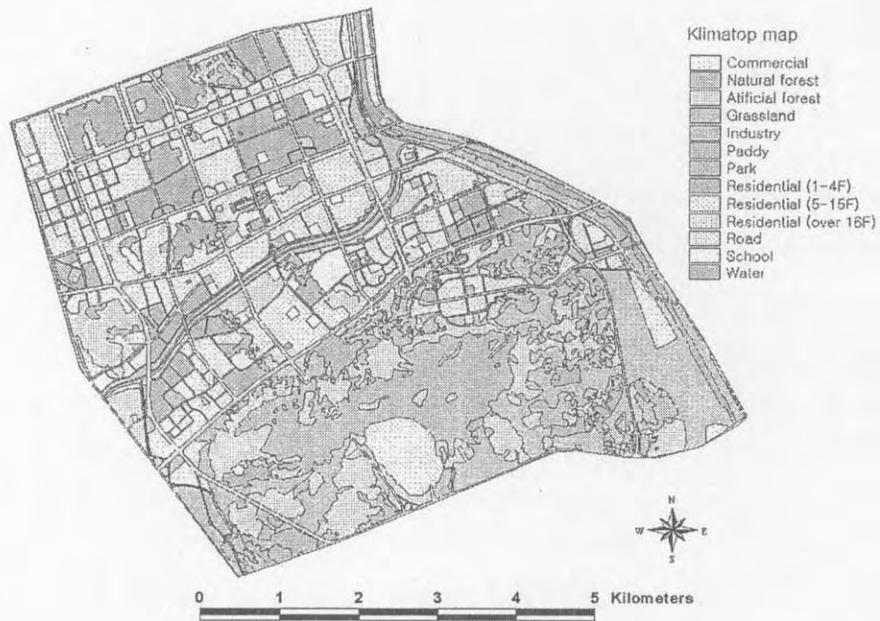


Figure 3-1-9. 연구대상지의 도시기후지도

Table 3-1-14. 1999년 도시기후지도 유형별 표면방사온도 분포

Klimatop			SRT in 1999 (°C)			
class order	type	area (km <sup>2</sup> )	minimum	maximum	mean	standard deviation
1	natural forest	4.99	18.95	28.90	21.74	1.60
2	artificial forest	5.92	19.41	32.54	23.11	2.35
3	paddy	0.24	20.32	29.92	25.02	1.80
4	grassland	6.66	20.32	33.84	26.13	2.11
5	residential (1-4F)	4.40	22.12	32.55	28.45	1.23
6	residential (5-15F)	4.62	20.32	32.11	27.09	1.57
7	residential (over 16F)	0.19	22.12	29.76	26.89	1.17
8	commercial	5.62	6.62	36.81	28.28	2.02
9	road	3.92	21.22	33.41	27.68	1.45
10	park	0.15	23.01	30.80	26.71	1.48
11	water	0.72	20.08	30.19	24.33	1.88
12	school	1.25	22.57	33.41	27.29	1.25
13	industry	0.03	28.03	31.90	29.84	1.28
whole area			6.62	36.81	25.96	2.99

### 3.5. 지상관측을 통한 도시림의 열섬저감현상 파악

본 연구에서는 원격탐사와 GIS를 이용한 도시림의 열섬저감현상의 정량화된 효과 파악과 아울러 지상관측을 통한 도시림의 열섬저감현상 파악을 시도하였다. 이 과정에서 식생 또는 숲의 형태에 따른 열섬현상관계를 알아보려고 하였다.

#### 3.5.1 숲의 형태와 식생에 관한 조사

식생은 다양한 식물종으로 이루어진 식물사회학적 단위로 정량화 및 정성화를 통하여 명명된 식물사회의 총칭으로서 이웃하는 식물군락들과 종조성적 공유를 통하여 연속적 상호관계를 유지하면서도 서식환경의 상이성 수준에 따라 제각기 독특한 종조성을 가지며 그 기능과 구조에 있어서도 뚜렷한 차이를 보인다. 이러한 식생의 차이는 식물 군락의 유형분류에서 확인되며 식생분류의 궁극적인 목적은 식물군락을 토지의 입지성 평가에 이용하는 것으로 알려져 있다.

2005년에 제작된 서울시의 도시생태현황도의 현장조사 주제도를 활용하였고 현지조사를 통한 확인을 하였다. 본 연구에서는 GIS를 이용하여 본 연구의 대상지인 강남구 대모산과 매봉산의 식생현황을 파악하였으며 Table 3-1-15와 Table 3-1-16은 각각 이를 보여 주고 있다. 대모산은 참나무림이 3.6km<sup>2</sup>로서 전체 식생면적 8.0km<sup>2</sup>의 45.3%를 차지하며, 그 뒤를 이어 아까시나무림이 1.4km<sup>2</sup> (17.3%), 리기다소나무림이 1.2km<sup>2</sup> (14.7%) 등의 순으로 나타났다. 또한 매봉산은 참나무림이 0.2km<sup>2</sup>로서 전체 식생면적 0.3km<sup>2</sup>의 83.6%를 차지하며, 그 뒤를 이어 초지가 0.02km<sup>2</sup> (5.8%), 아까시나무림 0.01km<sup>2</sup> (4.7%) 등의 순으로 나타났다.

Table 3-1-15. 대모산지역의 식생 면적 및 비율

대모산 식생범례	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
참나무림	3.6	45.3
아까시나무림	1.4	17.3
리기다소나무림	1.2	14.7
공공시설지역	0.7	8.9
초지	0.3	3.1
현사시나무림	0.2	2.9
밤나무림	0.2	2.0
기타산림	0.1	1.5
소나무림	0.1	1.3
오리나무림	0.1	0.8
잣나무림	0.1	0.8
일본잎갈나무	0.1	0.7
물박달나무림	0.1	0.6
물오리나무림	0.0	0.1
총 계	8.0	100

Table 3-1-16. 매봉산지역의 식생 면적 및 비율

매봉산 식생범례	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
참나무림	0.24	83.6
초지	0.02	5.8
아까시나무림	0.01	4.7
소나무림	0.01	1.9
물오리나무림	0.00	1.5
잣나무림	0.00	1.4
현사시나무림	0.00	1.3
총 계	0.29	100

상기 정보를 확인하기 위해 현지답사를 병행하였다. 답사는 2007년 7월 서울시 강남구 대모산 4곳과 매봉산 2곳을 대상으로 식물사회의 종조성을 강조하는 Zuerich-Montpellier학파의 Braun-Blanquet 방법과 방형구법을 이용하여 식생 조사를 실시하였다. 조사지 방형구 크기는 15m × 15m로 설정하였다.

#### 1) 대모산

조사지 고도범위는 101m~254m, 평균고도는 180.5m 이었으며, 대상지 사면 방향 범위는 20~357도 이며, 대부분 북사면이었다.

교목층에는 대부분 참나무림이었으며, 팔배나무, 상수리나무, 신갈나무, 떡갈나무, 물박달나무, 밤나무가 혼효림 형태로 서식하는 것으로 나타났다. 그 외, 조사지점은 아니지만 아까시나무, 리기다소나무, 일본잎갈나무 군락이 일부 산재하였다. 교목층의 평균식피율은 92.5%, 평균수고는 13m 이었으며, 대체적으로 상부식생의 피도가 높은 것으로 나타났다.

아교목층에는 팔배나무가 우점 하였고, 평균 식피율은 31.25%이었으며 평균 수고는 6m 이었다. 나타나는 종으로는 생강나무, 때죽나무, 떡갈나무, 개웃나무, 신갈나무 등이었다.

관목층에는 때죽나무와 진달래가 우점 하였고, 관목층의 평균식피율은 40% 정도이며, 평균수고는 1.9m이었다. 나타나는 종으로는 때죽나무, 진달래, 국수나무, 작살나무, 누리장나무, 개웃나무, 산초나무, 산철쭉, 신갈나무, 개암나무, 은사시나무, 아까시나무 등이 조사되었다.

교목층과 아교목층에서 참나무류가 대부분 우점하고 있으며, 숲의 천이는 한 반도의 극상림인 참나무림으로 천이가 이루어졌다고 판단된다. 일부 대모산의 숲가장자리에는 일본잎갈나무군락, 아까시나무군락과 은사시나무군락이 산재하였고, 나무의 흉고직경이 30cm 이상 되는 조림수종이 나타나는 것으로 볼 때

60년 조림사업에 의해 조성되어졌다고 생각된다.

초본층에는 특정한 종이 우점하는 것이 없었고, 피도율이 23.8%로 대체로 낮았다. 출현 종으로는 담쟁이덩굴, 밀나물, 노린재나무, 닭의장풀, 참마, 김의털, 칩, 때죽나무, 아까시나무, 청미래덩굴, 신갈나무, 개고사리, 생강나무, 개웃나무, 진달래, 대사초, 김의털, 파리풀, 선밀나물, 팔배나무, 산철쭉, 국수나무, 개암나무, 밤나무, 청가시덩굴, 은사시나무, 큰기름새 등이 나타났다.

## 2) 매봉산

조사지 평균고도는 75m이었으며, 대상지 사면방향 대부분 남사면이었다.

교목층의 평균수고는 13m정도이었으며, 평균식피율은 90%정도였다. 대체적으로 참나무가 우점하고 있었으며, 남사면은 대부분 상수리나무가 출현하였고 북사면은 신갈나무가 우점하고 있다. 대상지에 출현한 종은 신갈나무, 상수리나무, 떡갈나무, 갈참나무, 리기다소나무 등이었다. 교목층을 이루고 있는 상수리나무는 대체적으로 흉고직경이 25cm 이상이 많이 출현하였다. 이는 상수리나무가 구황식물로 알려져 있어 예전, 매봉산 인근 주민들에 의해 식재되었다고 생각된다.

아교목층의 평균수고는 6m정도이었으며, 평균식피율은 43%정도였다. 출현하는 종으로는 아카시나무, 떡갈나무, 생강나무, 팔배나무, 갈참나무 등이었다.

관목층의 평균수고는 1.8m정도이며, 평균식피율은 45%정도이었다. 출현하는 종으로는 생강나무, 갈참나무, 노린재나무, 조록싸리, 칩, 사철나무, 잣나무, 떡갈나무, 개웃나무, 산벚나무 등이 조사되었다.

초본층의 평균식피율은 43%정도이며, 출현하는 종으로는 서양등골나물, 붉나무, 난티개암, 선밀나물, 산벚나무, 청미래덩굴, 독활, 갈참나무, 칩, 땃땃이덩굴, 개고사리, 떡갈나무, 아카시나무, 팔배나무, 김의털, 때죽나무, 큰기름새, 장구채, 상수리나무, 참싸리 등이 조사되었다. 특히 이 중 서양등골나물은 매봉산의 전역에 걸쳐 퍼져있는 귀화식물로서 대부분 한국에 들어와 있는 귀화종의 특성이 나지에 자라지만, 울창한 숲속에서는 나타나지 않는 경향이 있는데, 귀화식물인 서양등골나물은 음지에서도 잘 자라는 특성으로 인해 자생종을 밀어내는 역할을 하고 있다. 서울지역 전역에 서양등골나물의 폐해가 보고되고 있는 가운데, 확산을 경계해야 할 귀화식물이다.

이상과 같이 서울시 현존식생도와 현지답사를 통해 대상지인 매봉산과 대모산은 신갈나무를 비롯한 참나무류가 우점종으로 서식하고 있는 식생발달의 역사가 긴 온대중부 산지형 활엽수림대로서 도시림으로서는 비교적 보존이 잘된

지역임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구 대상지인 매봉산과 대모-구룡산의 숲의 형태는 기본적으로 참나무림의 형태를 취하고 있다.

### 3.5.2. 녹지의 열섬효과

열섬현상의 지상관측을 위하여 Hioki T-H sensor를 23곳에 설치하여 관측 조사 중에 있다. 본 연구에서는 2005년 5월부터 Davis-Pro AWS와 Hobo T-H sensor를 설치, 관측하였으며 2006년부터 T-H sensor는 Hioki sensor로 교체, 양재천 및 주변을 측정하였으며 2007년부터 대모산부터 테헤란로까지의 본격적인 관측을 시작하였다. 열섬현상은 측정된 온도에서 열섬강도를 산출하였으며 열섬강도가 가장 높게 나타난 도심지역과 도시림의 차이를 열섬분포도를 작성, 비교, 고찰하였다. 열섬분포도는 관측된 지점사이의 기온은 보간법을 이용하여 작성하다. 열섬분포현상을 보다 명확하게 파악하기 위해 기상청에서 제공하는 강남, 송파, 서초, 과천, 의왕, 안양, 군포, 성남 등 연구대상지 인근 8개 지역의 AWS 기상 자료를 활용하였다.

열섬현상은 계절적으로는 겨울에, 낮보다는 밤에, 바람이 없고 맑은 날 심한 것으로 알려져 있다. 본 연구의 관측 결과 최대 열섬강도는 2007년 6월 16일 오전 3시 24분에 강남구 테헤란로와 대모산기슭 구룡마을 사이에서 나타났다. 이때의 테헤란로는 22.6℃, 구룡마을은 15.3℃로서 7.3℃의 차이를 보였다 (Table 3-1-17). 이 시각 매봉산은 17.9℃로서 열섬강도는 4.7℃였다. 매봉산의 열섬강도차이가 가장 높은 시각은 같은 날 오전 2시44분으로서 테헤란로는 23.0℃, 매봉산은 17.4℃로서 열섬강도는 5.6℃였다. 이 시각 대모산 구룡마을은 7.0℃를 보여 두 시각 모두 매봉산이 대모산보다는 열섬저감현상이 약한 것으로 나타났다. 이는 두 산의 면적이 0.3km<sup>2</sup>, 8.0km<sup>2</sup> 인 차이가 있고 매봉산 주변의 도시 토지이용강도가 고밀화되고 위치가 도심에 보다 가깝기 때문으로 판단된다. 이때의 각 관측 지점에서 측정된 온도를 기준으로 열섬분포도 (Figure 3-1-13)를 작성하였다. 열섬강도가 역으로 가장 크게 나타난 시각은 2007년 5월18일 오후 2시 14분으로서 이때 테헤란로는 15.0℃, 구룡마을은 17.0℃로서 -2℃의 차이를 보여주고 있다. 한낮은 도시의 녹지 및 수목이 아스팔트나 콘크리트와 같은 인공폐열을 방출하는 물질과는 달리 태양복사열을 그대로 반사하기 때문에 하천 및 녹지와 같은 오픈스페이스가 도심지보다 온도가 높은 현상이 발생하게 된다. 반면에 도심지는 낮동안 아스팔트와 콘크리트는 태양복사열을 흡수하고 대기 중으로 방출률이 미미하므로 대기 중 온도는 주

변 자연녹지보다 다른 조건이 같다면 훨씬 낮게 된다. 밤동안 낮에 흡수됐던 태양복사열이 대기 중으로 방출될 때 이때의 복사는 낮의 태양복사와 같은 단파복사가 아니라 장파복사로서 대기 중의 이산화탄소, 수증기와 같은 온실개스에 의해 지상으로 다시 반사되 옴으로 도심지의 기온이 밤동안에 농촌, 교외지역보다 증가해 밤에 도시열섬현상을 가중시키는 결과를 초래하는데 본 연구결과의 관측 자료도 이를 뒷받침하고 있다.

Table 3-1-17. 테헤란로와 대모산, 구룡마을 및 매봉산과의 열섬강도비교

날짜	시간	테헤란로	매봉산	구룡마을	UHI	
					테헤란로-매봉산	테헤란로-구룡마을
2007.06.16	3:24 AM	22.6	17.9	15.3	4.7	7.3
2007.06.16	2:44 AM	23.0	17.4	16.0	5.6	7.0

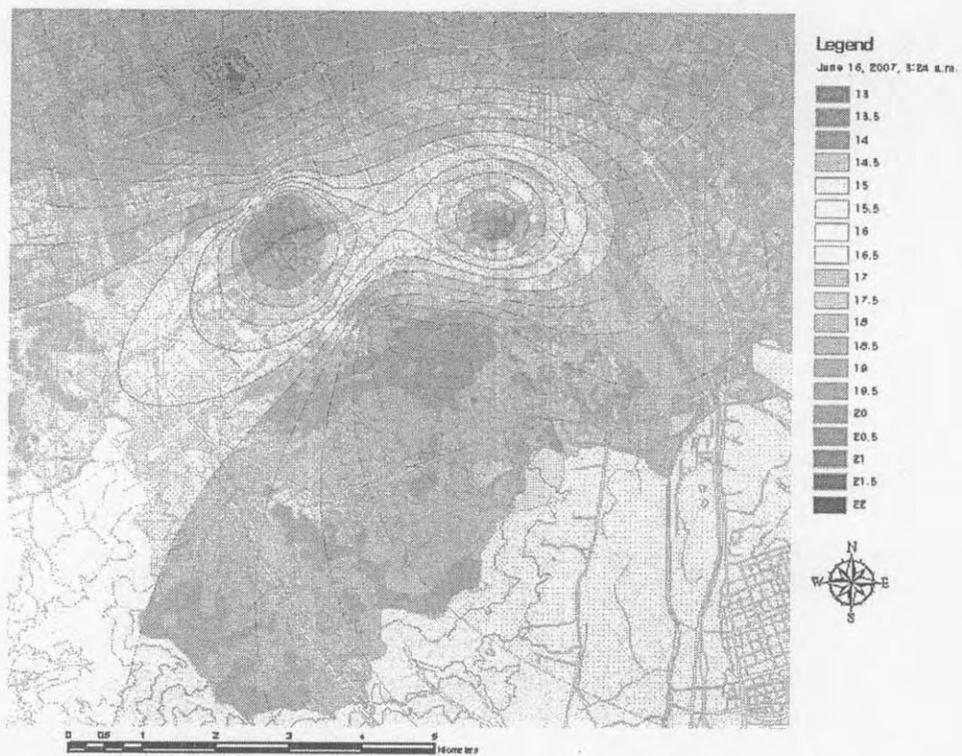


Figure 3-1-10. 테헤란로와 대모산구룡마을 및 매봉산과의 열섬분포도  
(2007년 6월 16일, 03시 24분)

### 3.5.3 도시립으로부터의 바람길을 이용한 단지 계획 및 설계 지침

#### 3.5.3.1. 외국의 바람길을 이용한 도시계획 사례

독일의 Stuttgart시는 2차 세계대전으로 전도시가 파괴된 이후, 다임러-벤츠의 본사가 위치한 자동차공업도시로서 북동쪽을 제외한 주위의 3면이 산으로 둘러싸여 있는 전형적인 분지지형으로 지형적인 영향으로 인해 평균 풍속이 0.8m/s ~ 3.1m/s로 다른 지역에 비해 바람의 흐름이 약하고 온도의 역전층이 형성되기 때문에 오염된 대기를 정화하는데 어려움을 겪고 있었으며, 도시의 발전과 함께 대기환경의 질이 악화되는 현상에 직면하고 있었다. 이러한 환경적인 문제점 개선의 수단으로 대기확산 분석을 통한 도시기후 분석에 관심을 가지게 되었으며, 오랫동안 도시기후 요소를 도시 및 건축계획에 반영하고 있다.

1970년대 후반부터 도시 내로 신선한 공기를 유입하기 위한 '바람길 계획'을 수립하여 실제 도시재건에 적용하고, 숲이 만들어 내는 신선하고 차가운 공기가 계곡을 타고 내려오는 '바람길'의 존재를 인식하고 이러한 자연현상을 적극적으로 도시계획에 활용하였다.

'바람길' 확보를 위하여 녹지를 보전하고 바람이 불어오는 방향에는 건물 조성을 제한하고 찬 공기의 흐름, 지역풍향 등을 조사하여 도시전체를 3등급으로 표시한 지도를 제작하여, 도심 가까운 곳의 구릉지는 녹지의 보전·조성 이외의 신규건축행위를 금지하고 바람길이 되는 폭 넓은 도로나 소공원은 100m 폭을 확보하도록 하고 있다. Stuttgart시에서 바람길을 도시계획에 활용한 결과, 독일 슈투트가르트시 교외의 로레카계곡으로부터 도심부가 위치한 네카계곡으로 시간당 약 1억9천만m<sup>3</sup>의 차고 신선한 바람이 유입되는 것으로 조사되고 있다.

#### 3.5.3.2. 바람길을 이용한 단지 계획 적용

주거 단지계획 시 바람길 성능을 고려하는 것은 단지 내부로 신선한 공기유입과 오염물질 배출 성능에 중요한 요소가 된다. 바람길 파악을 위한 방법으로는 실제 지형 및 건물 모델을 이용한 풍동실험에 의한 방법과 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용한 전산유체역학 (Computation Fluid Dynamics, CFD) 분석 방법이 사용되고 있다. 풍동실험에 의한 바람길 파악은 비용과 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있으므로 최근 들어 바람길 파악 및 예측을 위해 CFD 시뮬

레이션 방법이 활용되고 있다. 이는 컴퓨터 CPU의 고성능화 및 메모리용량의 증가에 따라 개인용 컴퓨터에서도 과거에 대형컴퓨터에서만 가능했던 CFD simulation이 가능해졌기 때문이다. 특히 공동 주택단지 계획 시 지역의 미시 기후와 지형조건을 고려하여 바람길을 분석하는 것은 건물의 위치, 방향, 형태에 따라 다르게 형성되는 바람길의 예측과 분석을 통해 여름철 열섬현상을 일으키는 기류정체나 오염 물질의 배출성능에 대한 예측이 가능하기 때문에 매우 중요하다. 또한 CFD를 이용해 국지적인 바람길을 파악을 통해 주어진 경계조건에 따라 기류가 형성되는 형태, 속도, 방향 등을 예측할 수 있어 몇 가지 조건의 결과 값에 대한 비교 분석이 가능하기 때문에 바람의 이동통로와 오염물질 확산을 위한 최적의 마스터안의 도출이 가능하다.

본 연구에서는 CFD를 이용한 바람길의 파악을 위해 연구대상지 인근의 우면동 택지개발지구와 세곡동 택지개발지구를 대상으로 CFD 소프트웨어인 'Stream for Windows V6'을 사용하여 바람길 분석을 실시하였다. 바람길 분석을 위해 지형을 수치모델링 하였으며, 분석에 필요한 건물 레이어는 SH공사의 택지개발기본계획도면을 참고하여 대상지의 주택단지를 모델링하였다. 바람길 분석을 위한 조건으로 풍향은 연구대상지의 겨울철 주풍향인 북서풍 (315°)으로 설정하였고, 풍속은 300m 높이에서 15m/sec로 입력하였다. Figure 3-1-11은 우면동 택지개발지구에서의 바람길 파악의 결과를 보여주고 있다. Figure 3-1-11에서 보듯이 북서풍의 바람이 우면동 골짜기에서는 산풍으로 바람이 역풍현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 산 능선과 계곡의 지형 변화에 의한 지형미기후 현상으로서 전통적으로 한국의 택지는 이와 같은 점을 고려하여 주거지와 마을을 입지하였다. 본 연구에서는 바람기를 고려하여 건물을 배치시켰으며 이러한 바탕위에 전체 단지계획을 하였다.

본 연구결과 건물의 크기, 형태 및 배치는 바람과 직교하는 면적이 작을수록 건물의 풍압이 적으므로 단지 내 건물배치는 건물과 직교하지 않고 바람기를 따라 배치하는 것이 바람직하다고 판단된다. 건물이 바람길과 직교하는 배치는 단지 내 오염물질 소통 및 배출에 장애가 되므로 가능한 피하는 것이 바람직하다. 따라서 이상적인 주거단지의 입지는 건물이 바람길과 접하는 면적이 최소화하면서 남향으로 배치될 수 있는 입지가 바람직한 장소로 판단된다.

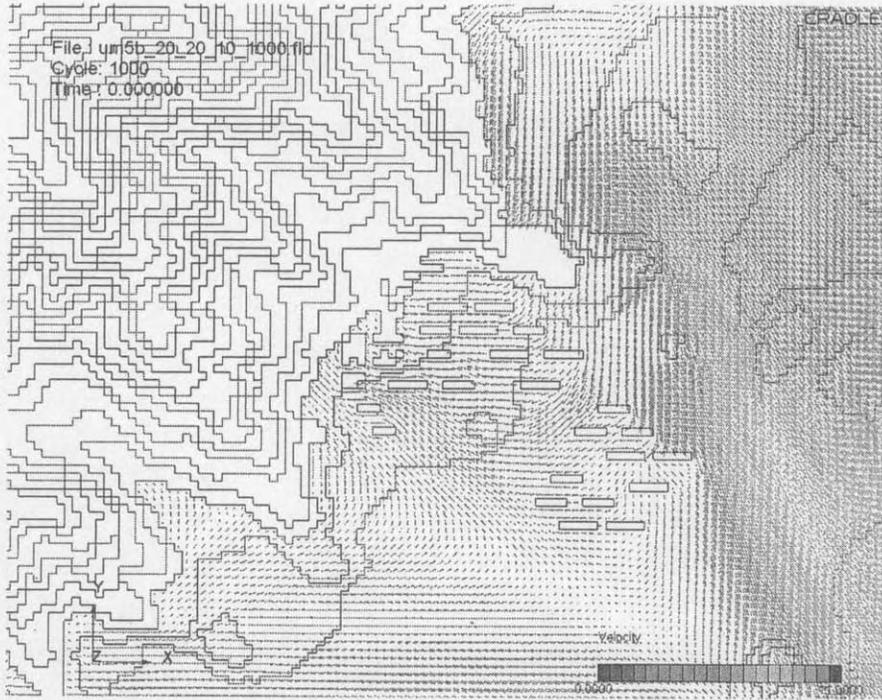


Figure 3-1-11. 우면동 택지개발지구에서의 CFD를 이용한 바람길 분석결과

한국의 지형 특성상 남향을 선호하는 기후조건 때문에 바람길과 접하는 건물의 각도가 클 경우 wind-barrier 효과를 위한 교목 식재를 고려할 수 있다. 허나, 이 경우 30m 이상의 고층에서는 효과가 거의 없다.

본 연구 결과 건물 배치에서 가장 고려해야 할 것은 밀집된 건물사이로 부는 venturi effect를 피해야 하며 특히 고층건물이 밀집되고 인동간격이 좁을수록 이와 같은 현상이 발생하여 본 연구대상지내에서는 Beaufort 등급 7등급의 초속 15m 이상의 강풍이 발생하는 것이 관측되었다. 현재 한국의 도시 및 단지 계획에서 밀집된 초고층의 주택을 선호하는 경향이 있는데 이는 거주민과 주변 주민에게 건강에 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 신중히 고려해야 한다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 원격탐사기법과 실측자료를 이용하여 도시산림지역에서의

도시열섬현상의 완화효과를 확인하기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 Klimatop 유형과 SRT 변화 검출을 위해 Landsat TM 영상이 사용되었다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 1987년과 1999년 SRT 변화를 보면, 대모산 주변지역에서는 1.00℃ 증가하였으며, 광교산 주변지역에서는 전체적으로 1.13℃ 증가하였다.

(2) 대모산 주변 지역의 경우, 토지이용변화의 경향은 도시지역이 9.84km<sup>2</sup> 증가된 반면, 산림지역과 경작지역은 도시 확장의 결과 감소되었다. 광교산 주변 지역의 경우, 토지이용 변화의 경향은 도시지역이 33.72km<sup>2</sup> 증가된 반면, 도시 확장과 도로 건설의 영향으로 경작지는 15.25km<sup>2</sup>, 산림지역은 14.88km<sup>2</sup> 감소되었다. 산림, 물, 경작지역은 다른 토지이용지역보다 낮은 SRT 차이를 보였다. 이것은 도시 녹지가 도시열섬현상을 완화시키는 것을 의미한다.

(3) 대모산 주변지역의 경우, 산림의 내부지역은 비교적 산림이 잘 보전되어 있어 주변 도시지역으로부터의 영향이 적기 때문에 산림의 가장자리 보다 SRT가 감소하였다. 반면에 광교산 주변지역의 경우, 도시 확장과 도로 건설의 영향으로 산림의 내부지역에서 SRT가 증가하였다. 이것은 도시 녹지 관리의 중요성을 보여준다. 양재천의 SRT는 주변지역보다 -5.2℃에서 -1.1℃ 낮았으며, 도시열섬 저감 효과의 범위는 약 120m에서 300m 이었다.

(4) NDVI 증가 지역은 NDVI 감소 지역 보다 대모산 주변지역에서는 1.59℃ 낮은 평균 SRT를 나타내었으며, 광교산 주변지역에서는 2.03℃ 낮은 평균 SRT를 나타내었다. 양재천의 경우에는 1990년대 중반 자연형하천공사 이후 주변의 NDVI가 증가하여 SRT가 감소된 것으로 확인되었다.

(5) 도시기후지도와 지표면 방사온도를 중첩하여 비교한 결과 자연산림지역 - 인공조림지역 - 수체 - 논 경작지 - 초지 - 공원 - 학교 - 도로 - 상업업무지역 - 주거지역 - 공업지역의 순으로 열섬현상이 심화되는 것을 확인하였다.

(6) 대기온도 측정, 분석결과 도시림에서 멀리 떨어질수록 열섬현상이 심화되는 것을 확인하였으며 도심지 (테헤란로) 와 구룡산, 도심지와 매봉산 사이의 최대열섬강도는 각각 7.3℃, 5.6℃를 보여 대모산이 구룡산보다

열섬저감효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 대모산이 구룡산보다 산림 면적 (8.0 vs. 0.3km<sup>2</sup>), 위치, 토지이용강도에 있어 열섬현상을 더 저감시키는 역할을 하고 있는 것으로 판단되며 두 산림의 종조성은 기본적으로 참나무림 이었다. 고층빌딩과 도시림기슭 마을과의 열섬강도도 6.1°C를 나타내 고층빌딩의 인공폐열이 도시열섬현상을 가중시키는 걸 확인할 수 있었다.

(7) 단지 설계 시 도시림의 바람길 고려할 사항

- a. 건물의 크기, 형태 및 배치는 가능한 바람과 직교하는 면적이 작도록 설계 해야 한다.
- b. 바람길만 고려할 경우 모든 지형이 남향 배치가 어려우므로 이 경우 wind-barrier 역할을 위한 교목식재를 고려할 필요가 있다. 이 경우 30m 이상의 고층에서는 풍속 저감효과가 없다.
- c. 고층건물 특히 고층주상복합건물은 강한 상공풍이 항시 불며 지상은 강한 상공풍이 건물에 막혀 수직 하강하는 난류장을 형성해 빌딩바람을 일으키고 특히 고층건물이 밀집되고 인동간격이 좁을수록 골바람 현상이 발생하는 venturi effect를 피해야 이는 거주민과 주위 주민에게 도시기상측면에서 건강에 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 신중히 고려해야 한다고 판단된다.
- d. 바람 하부의 방풍효과가 미치는 범위를 넓히기 위해서는 숲의 밀도를 너무 높게 하지 않는 것이 좋다. 너무 조밀하지 않을 정도로 수림을 관리하여 바람의 흐름을 변화시켜 줄 수도 있다는 점을 고려하여 이상적인 숲의 밀도는 50-60% 정도가 적당하다고 알려져 있다.

# AWS를 이용한 국지·이동기상관측 및 대기오염도 조사

세부연구책임자 성균관대학교 송 영 배

## 1. 바람과 녹지의 대기오염 조절기능

녹지와 함께 바람은 도시지역에서 발생한 대기오염물질을 주변지역으로 확산시키는 결정적인 요소로 작용한다. 따라서 공원녹지의 대기오염 저감효과는 주변지역의 토지이용 형태와 함께 바람의 역할이 매우 밀접하게 관련되어 있다.

대기오염 저감을 위한 녹지대의 조성 시 풍향과 풍속의 고려는 녹지에 의해 풍속이 어느 정도 약화될 수 있으며, 이는 도시에서 발생한 대기오염물질의 확산을 억제시킬 수 있기 때문이다. 녹지대에 의한 풍속의 약화기능은 녹지를 구성하는 숲의 구조(높이, 밀도) 등에 의해 차이가 있지만 일반적으로는 80% 이상 바람을 약화시키는 것이 가능하다.

### 1) 수고 (樹高)

녹지대의 방풍효과에 미치는 범위(wind shadow)는 바람 상층부에서는 수고의 2~5배까지, 바람 하층부에서는 15~20배 거리까지 영향범위에 속한다. 그러므로 이것을 기준으로 대기오염 저감형 식재를 하고자 하는 수목의 높이를 결정할 수가 있다. 목본성 식물은 높게 자라면 자랄수록 지하고가 높아져 공극이 생기게 되므로 단순히 몇 그루 정도의 열식에 의해서는 대기오염물질의 확산을 방지할 수 없으며, 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 단순하게 교목만을 식재하는 것이 아니라 중교목, 관목 등과 같이 다양한 식물을 포함하는 다층림을 구성하는 것이 효과적이다. 또한 식재된 수목의 선단부도 일정한 것보다는 약간 불규칙한 것이 효과적일 수 있다.

### 2) 수림폭

조성된 녹지대는 수림밀도와 관련이 크지만 그 폭이 직접적으로 방풍이나 대기오염물질의 확산차단에 영향을 미치는 것은 아니다. 그러나 녹지대에 있어서 방풍이나 대기오염물질의 차단효과가 가장 크게 나타나는 곳은 숲의 내부

에서 나타난다. 그 이유는 녹지대의 수림밀도가 조밀할 경우 단일의 기후층을 형성하며, 외부와의 공기의 흐름을 크게 차단한다. 따라서 바람으로부터 보호하고자 하는 대상물은 수목으로 둘러싸게 조성하는 것이 이상적이나, 대기오염의 경우 확산에 의한 침강이 이루어질 경우 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

### 3) 수림밀도

바람 하부의 방풍효과가 미치는 범위를 넓히기 위해서는 숲의 밀도를 너무 높게 하지 않는 것이 좋다. 조밀하고 수고가 높은 녹지대(수고: 20m, 엽면적 지수: 0.9)에서의 방풍 또는 차단효과 보다는 수고가 낮은 녹지대(수고: 5m, 엽면적 지수: 0.5)에서의 차단 효과가 높은 것으로 나타났다. 가장 이상적인 숲의 밀도는 50-60% 정도가 적당하다고 알려져 있으며, 이 정도 수림밀도라면 너무 조밀하지 않을 정도로 수목을 식재하여도 무관하다고 할 수 있다. 특히 바람의 흐름을 변화시켜 줄 수도 있다는 점을 활용할 필요가 있다.

## 2. 대기오염도 조사

### 1) Passive Sampler 설치 및 측정개요

#### 가) 설치개요

연구대상지 및 주변지역의 NO<sub>2</sub> 및 VOC의 전반적인 대기오염물질 공간분포 및 주변지역으로의 확산경향, 대기확산모델 결과의 검증 및 보정에 활용하기 위하여 Passive Sampler를 설치하여 대기 오염도를 측정하였다.

설치위치는 차량과 사람의 접근이 가능한 도로변으로 한정하였다. Passive Sampler에 의해 측정되는 대기오염물질은 차량통행이 많은 도로변과 차량통행이 적은 공동주택단지로 구분할 수 있으나, 이산화질소와 VOC(휘발성 유기화합물)의 발생은 대부분 차량에 의해 발생하므로 대상지에서 설치지점에 대한 구분을 하지 않았다.

#### 나) 설치기간

NO<sub>2</sub> 오염도 조사를 위한 패시브 샘플러 설치지점은 Figure 3-2-1과 같다. 1차 설치기간은 2005년 11월 9일부터 11월 10일까지 약 2일간이며 10개 지점이며, 2차 조사는 2005년 11월 17일부터 11월 19일까지 약 3일간이며 13개 지점이다.

다) 1차 측정결과와 확산분포 (2005.11.09 ~ 11.10)

NO<sub>2</sub>의 1차 측정결과와 확산분포는 Figure 3-2-4과 같다. 이산화질소의 주요 발생지인 도로변에서 오염농도가 높은 것으로 나타났으며, 24시간 기준치인 80ppb를 초과하는 것으로 나타났다. 이산화질소의 24시간 평균 기준치를 초과하는 지역은 매봉역 사거리와 도곡역 사거리로서 차량의 통행이 빈번하며, 교통정체시 정거와 출발에 따른 이산화질소의 발생이 많기 때문이다.

이산화질소의 기준치는 2007년도에 현행 80ppb/24시간에서 60ppb/24시간으로 강화될 예정이며, 위의 강화된 기준치를 적용할 경우 오염지역은 크게 확대된다 (Figure 3-2-1 참조).

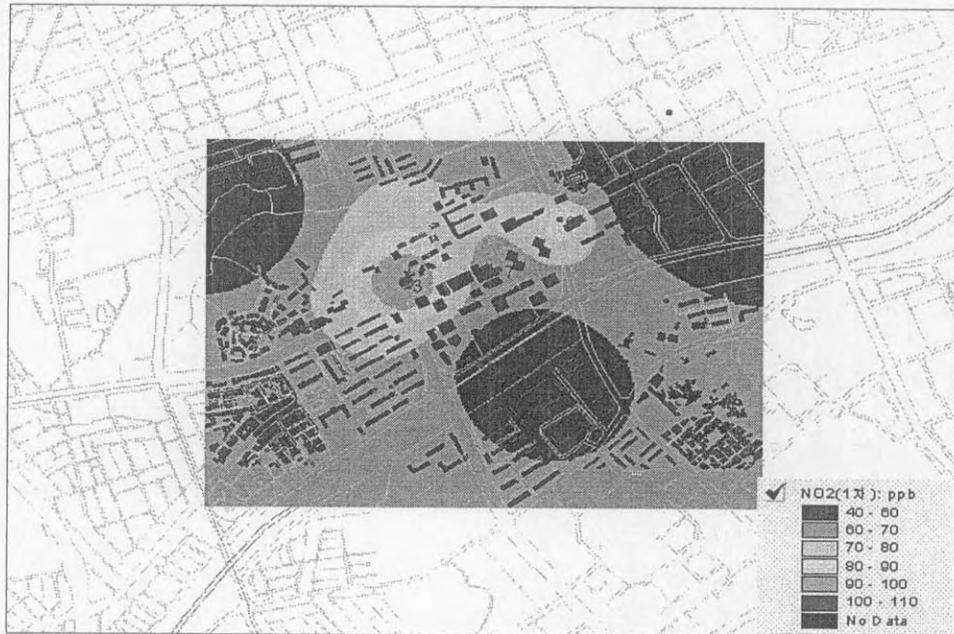


Figure 3-2-1. NO<sub>2</sub> 확산분포도 (1차: 2005.11.09 ~ 11.10, 현행 기준적용 시)

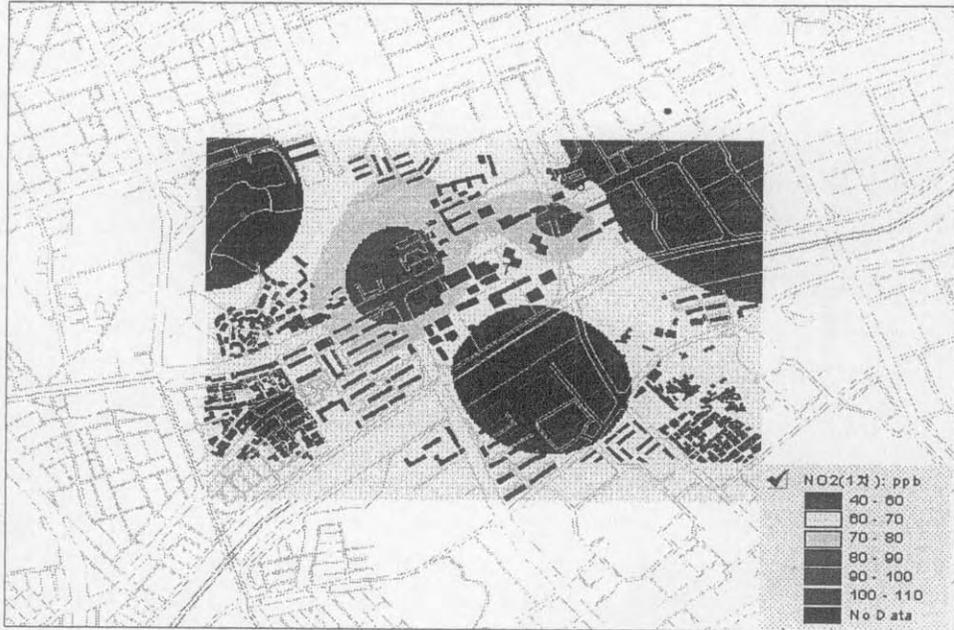


Figure 3-2-2. NO<sub>2</sub> 확산분포도 (1차: 2005.11.09 ~ 11.10, 신규 기준적용 시)

라) 2차 측정결과와 확산분포 (2005.11.17 ~ 11.19)

NO<sub>2</sub>의 2차 측정결과와 확산분포는 Figure 3-2-3와 같다. 1차 측정결과와 같이 이산화질소의 주요 발생지는 도로변으로 나타났으며, 특히 사거리 지역에서 오염도가 높게 나타났다. 그러나 2차 대기오염도 측정시 2005년 11월 18일 야간부터 11월 19일 새벽까지 일시적으로 강우가 발생함으로써 대기오염의 세척 효과가 발생하였다고 판단되며, 전체 측정지점에서의 평균 저감효과는 약 7.7%로 분석되었다 (Figure 3-2-4 참조).

이산화질소의 확산경향은 Figure 3-2-3에서 나타난 바와 같이 지형이나 건물에 의한 차단과 확산효과 보다는 주요 발생지점을 중심으로 사방으로 확산되다가 자연적으로 소멸되는 경향을 나타내었다.

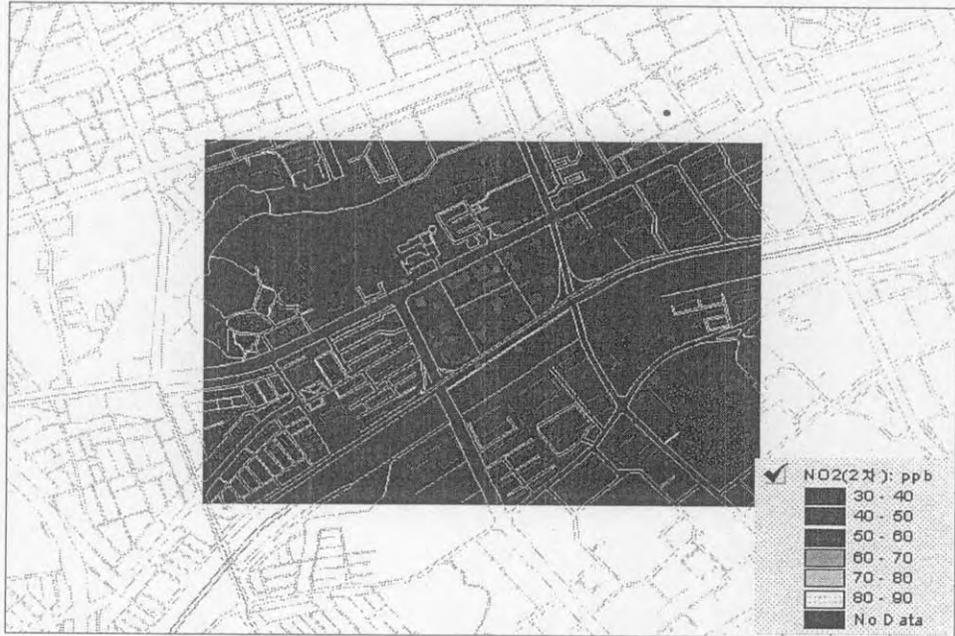


Figure 3-2-3. NO<sub>2</sub> 확산분포도 (2차: 2005.11.17 ~ 11.19)



Figure 3-2-4. NO<sub>2</sub> 오염물질 등농도 분포도 (1차)

## 2) VOC(벤젠) 오염도 측정 및 확산분석

도시지역에서 벤젠은 주로 자동차, 주유소, 인쇄과정 등에서 발생한다. VOC 오염도에 대한 패시브 샘플링은 2차례로 구분하여 수행하였으며, 측정 및 확산 분석 결과는 다음과 같다.

### 가) 설치기간

VOC 오염도 조사를 위한 패시브 샘플러 설치지점은 Figure 3-2-3와 같다. 1차 설치기간은 10개 지점에 설치하여 2005년 11월 10일부터 11월 16일까지 7일간 패시브 샘플러를 대기 중에 노출시켰으며, 2차 조사는 2005년 11월 12일부터 11월 17일까지 약 6일간이며 13개 지점이다.

### 나) 1차 측정결과와 확산분포 (2005.11.10 ~ 11.16)

벤젠의 1차 측정결과와 확산분포는 그림 8과 같다. 벤젠의 주요 발생지점은 도로이며, 따라서 차량통행이 많은 도로를 따라 벤젠 오염도가 높은 것으로 나타났다. 벤젠 오염도는 국내기준은 없으며, 일본의 경우 0.94ppb를 기준으로 정하고 있다.

Figure 3-2-5은 벤젠의 확산분포도로서 오염도 기준치인 0.94ppb를 기준으로 초과되는 오염도를 %-point로 표시한 것이다. 벤젠의 분포도에서 나타난 바와 같이 조사대상지 전 지역에서 오염물질 기준치를 초과하는 것으로 분석되었다. 특히 오염도가 높은 지역은 차량통행과 정체가 빈번한 매봉역 사거리는 기준치의 53%를 초과하였으며, 도곡역 사거리는 62%, 타워팰리스 지역은 38%의 기준치를 초과하는 것으로 분석되었다.

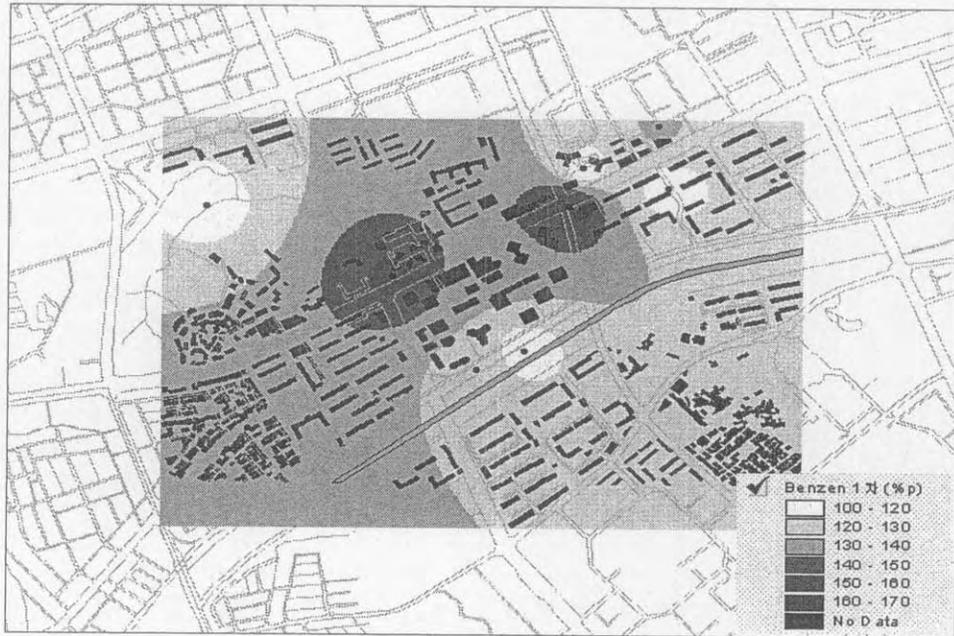


Figure 3-2-5. 벤젠 확산분포도 (1차: 2005.11.10 ~ 11.16)

다) 2차 측정결과와 확산분포 (2005.11.17 ~ 11.19)

벤젠 오염도의 2차 측정결과와 확산분포는 Figure 3-2-6와 같다. 1차 측정결과와 비교할 때, 매봉사거리는 12.2% 및 타워팰리스 지역은 11.1%의 기준치를 초과하는 것으로 나타났으며, 전반적으로 오염도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 이는 2차 대기오염도 측정 시 2005년 11월 18일 야간부터 11월 19일 새벽까지 일시적으로 강우가 발생함으로써 대기오염의 세척효과가 발생하였다고 판단되며, 강우에 의한 저감효과는 평균적으로 29.1%로 나타났다.

2차 벤젠 오염도 조사 시 대조군으로 테헤란로의 선릉역, 역삼역, 강남역 사거리, 강남구 도곡동 지역에 국지적으로 벤젠 오염도가 11~16% 높게 검출되었으며, 강우에 의한 세척효과는 크게 나타나지 않았다.

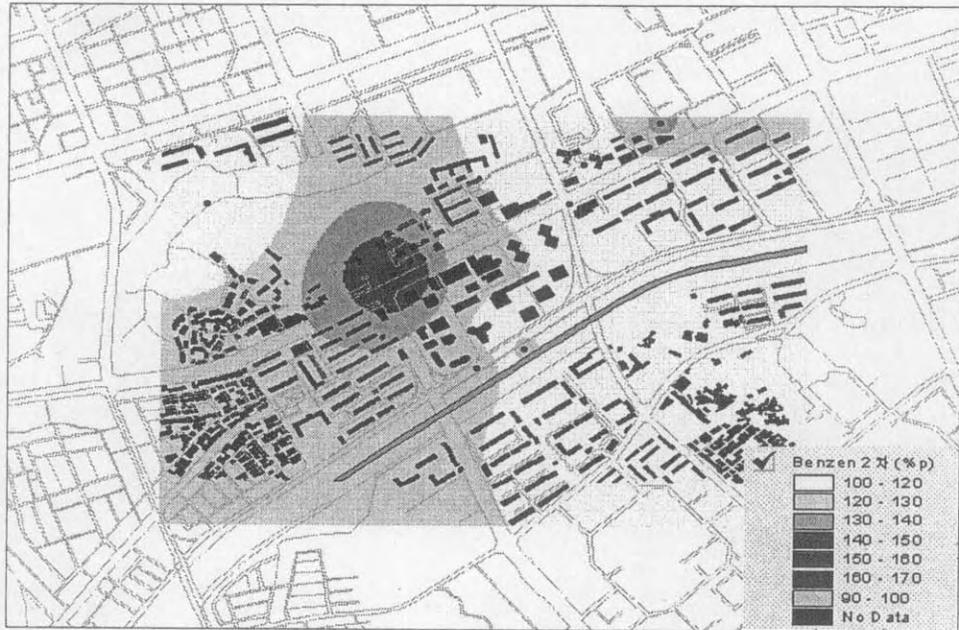


Figure 3-2-6. 벤젠 확산분포도 (2차: 2005.11.12 ~ 11.17)

라) 벤젠 오염도의 강우에 의한 세척 및 지형에 의한 저감효과

벤젠은 이산화질소와는 달리 도시 대기 중에서 소멸되지 않으며, 따라서 대기 중에서 최대 약 9일간 정체한다. 따라서 차량통행량이 많은 주요 도로변과 인접한 주거지역에서는 차량에서 배출된 벤젠이 대기 중에 가중되면서 도시의 대기 오염도를 악화시키게 된다.

Figure 3-2-7과 Figure 3-2-8은 조사지역에서 측정한 벤젠 오염도등 농도 곡선으로서 강우 전의 오염분포와 강우 후의 세척 효과를 비교하였을 때, 강우에 의한 세척효과와 지형에 의한 저감효과가 크게 발생하지 않는 것으로 판단된다. 따라서 벤젠의 주요 발생지인 매봉역 사거리에서는 강우에 의한 세척효과가 발생하였음에도 불구하고 기준치를 50% 이상 초과하는 것으로 분석되었다.



Figure 3-2-7. 벤젠 오염물질 등농도 분포도 (1차, 강우 전)



Figure 3-2-8. 벤젠 오염물질 등농도 분포도 (2차, 강우 후)

## 바람장 예측 모델링 분석결과

### 1) 바람장 모델링

조사대상지에 대한 바람장 분석은 1차적으로 AWS를 이용한 지표면에서의 풍향·풍속 측정 및 분석을 수행하며, 분석된 대상지의 주풍향 및 평균풍속을 바탕으로 대상지 전 지역에 대한 바람장을 3차원 공간적으로 해석하기 위한 수치 모델링을 수행한다.

바람장 시뮬레이션의 목적은 조사대상지의 현재 상태에서의 바람장 제시와 기타 도시개발에 따른 바람장 변화 및 기후부담을 예측하고, 이를 향후 토지이용계획, 지구단위계획, 상세설계 및 제반 환경계획의 입안과 실행에 적용시키는데 있다.

### 2) 바람장 수치모델링 방법

연구대상지에 대한 바람장 변화를 분석하고 예측하기 위해 현 상태에서의 바람장 시뮬레이션을 수행하였다. 일반적으로 도시지역 내 고층건물의 입지에 따른 온도, 습도 등과 같은 미기후 변화를 시뮬레이션 할 수 있는 이론적 근거와 수단은 미비하며, 따라서 관측된 자료를 바탕으로 등곡선도를 작성하며, 영향을 예측하게 된다. 그러나 바람장에 대한 변화 예측이나 영향분석은 AWS 관측자료를 입력자료로 활용하여 수치모델링을 통한 가상 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 바람장의 변화를 분석하고 예측하기 위해 미세규모 바람장 수치모델링 프로그램(ENVIMET)(Bruse 2005)를 활용하여 영향분석 및 예측을 수행하였다.

Oke(1987)에 의하면 고층건물 입지에 의한 바람장의 변화는 건물높이의 3배가 되는 지점에서부터 발생하며, 그 영향범위는 10-15배가 되는 지점까지 나타나는 것으로 알려져 있다 (Oke 1987, p.243). 따라서 수치모델링을 위한 대상지역은 Oke(1987)에 의거 강남구 도곡동을 중심으로 1.8km × 1.3km로 설정하고, 모델 격자의 크기는 10m×10m로 하여 가로 180셀 × 세로 130셀로 구성하였다.

### 3) 바람장 수치모델링 입력자료

연구대상지에 대한 현재 상태에서의 바람장을 시뮬레이션하기 위한 입력자료는 앞에서 수행한 기상관측 분석결과와 시간별 기상자료 분석결과를 바탕으로 하였다.

#### 가) 혼합고

혼합고는 대기의 수직적인 대류운동과 대기오염물질의 확산에 큰 영향을 미친다. 높은 위치의 굴퍽에서 배출되는 대기 가스는 속도가 빠르고 유효고가 높은 점오염원이기 때문에 대기질 예측은 혼합고의 영향이 비교적 큰 비중을 차지하며, 혼합고의 높낮이가 최대 착지거리 및 농도에 기여함에 따라 혼합고의 산출이 필요하다.

본 조사기간 동안 서울시 강남구 지역에서 측정된 상층기상관측자료는 없으며, 따라서 연평균 혼합인 1000m를 기준으로 설정하였다.

#### 나) 지형자료

조사대상지에 위치한 건축물의 경우 수치모델링의 격자 크기가 10m × 10m로서 단독주택이나 공동주택, 상업시설 등 현 상태의 건축물 크기와 고도현황을 재구성하여 표현하였다. 또한 현재의 토지피복 상태와 주풍향에서의 바람통로를 연계하여 분석함으로써 기후 생태적 우선지역의 설정이 가능하며, 이로 인해 도시 기후적으로 좋은 효과를 볼 수 있는 지역과 이와는 반대로 대기오염물질이 주풍향을 따라 이동함으로써 위대한 영향을 받는 지역에 대한 분석이 가능하다. 위에서 분석된 결과를 바탕으로 신규개발이나 재개발 계획 수립시 건축물의 향, 배치형태, 층고에 따른 국지적인 바람의 영향을 고려할 수 있게 된다.

### 4) 바람장 수치모델링 분석 결과

#### 가) 동풍 (조건: 오후, 저녁, 풍속: 5.0m/s, 연직고도: 2.0m)

Figure 3-2-9는 동풍이 초속 5.0m/s로 유입되는 경우를 가정하였을 때, 연구대상지의 바람장 모델링 결과이다. 결과에서 보이는 바와 같이 지상 2m의 고도에서는 양재천의 경우 풍속이 감속되지 않고 지속적으로 유입되다가 타워팰리스의 고층 공동주택에 의해 일부 차단되며, 또한 측면에서는 약 40%까지 가속되며 이러한 영향이 양재천의 반대편 제방에 까지 영향을 미쳐 초기풍속의 20% 정도까지 가속시키는 것으로 나타났다.

이와는 달리 도시 건물 군에서의 바람은 고층건물에 의해 크게 차단되는데, 동풍과 직각으로 교차하는 건물사이에서는 초기풍속의 20%까지 감속되는 것으로 나타났다으며, 일부지역에서는 무풍현상이 발생한다. 고층 건물 군에 의한 체트기류현상이

발생하는 지역이 있으며, 풍속은 5~7m/s에 이르며, 순간적으로 가속되었다가 감속되는 현상이 발생한다 (Figure 3-2-10 참조).

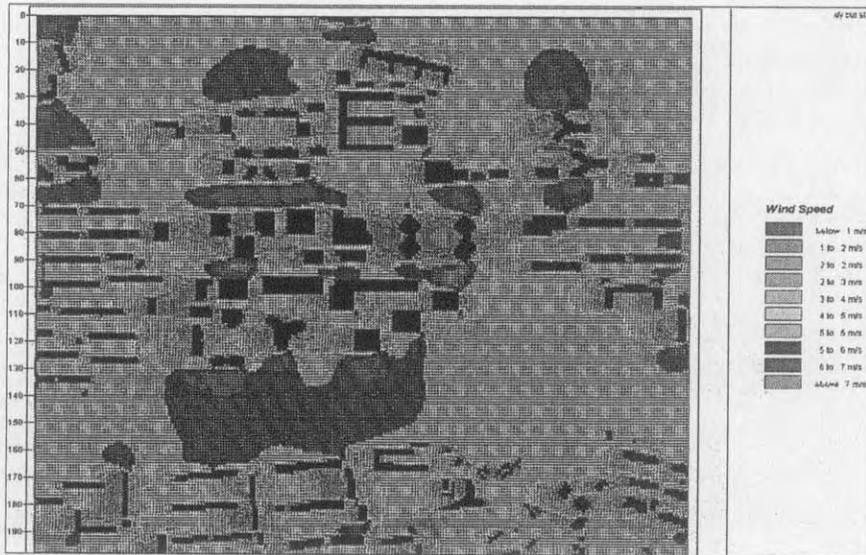


Figure 3-2-9. 바람장 수치 모델링 (동풍, 연직 2m)

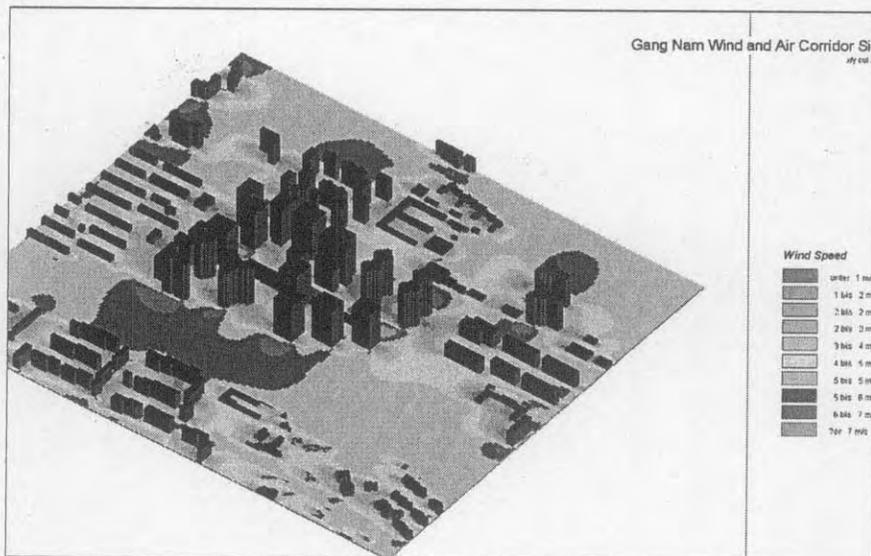


Figure 3-2-10. 3차원 바람장 수치 모델링 결과 (동풍, 연직 2m)

나) 동풍 (조건: 주간, 풍속: 5.0m/s, 연직고도: 12.0m)

Figure 3-2-11는 아파트 4층 높이(지상 12.0m)에서의 바람장 분석 결과로서 양재천 지역에서는 초기풍속보다 20%(6m/s) 이상 가속되어 유입되며, 고층건물의 측면이나 인접한 지역에서는 최대 80%(9m/s)까지 강한 바람이 형성되는 것으로 분석되었다. 그러나 풍향과 직각으로 배치된 고층건물 사이의 지역에서는 고도가 높아짐에도 불구하고 1m/s 내외의 바람장이 형성되는 것으로 나타났으며, 일부 고층건물 사이로 초기풍속의 80% 가속된 기류가 형성되었다가 소멸되는 것으로 분석되었다.

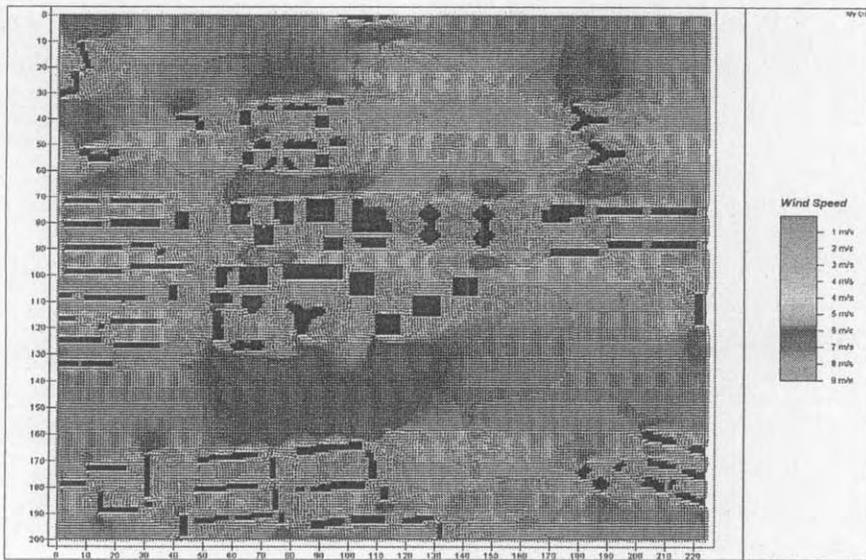


Figure 3-2-11. 바람장 수치 모델링 (동풍, 연직 2m)

# 기상, 지형 및 식생 자료를 이용한 도시기상 모델 수립

협동과제책임자 서울대학교 임규호

한국형 도시 기후 모델 개발의 기초 작업으로 현재 국지 도시 기후 모델의 전형으로 인식되어지는 MUKLIMO\_3 에 대한 정밀 분석을 수행하였다. 또한, MUKLIMO\_3의 수행능력을 검증하기 위하여 환경부에서 제공하는 정밀 3초 지형자료를 MUKLIMO\_3 모형에 입력하는 함수를 구현하였다. 최종적으로 구축된 시스템을 활용하여 양재천 주변 지역에 대한 지형에 따른 바람장의 변화를 살펴보았다.

## 1. MUKLIMO\_3 소스코드 분석

본 연구에서 사용할 프로토타입 미세규모 도시기후모델은 Sievers (1986)가 개발한 MUKLIMO\_3이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 모델은 바람장 및 온도장의 역학적 열역학적 평형상태를 산출하게 된다. 현재 MUKLIMO\_3는 교환 계수의 바람장 변화에 따른 평형상태로의 수렴을 통하여 역학적 평형상태를 산출하고 있다. 1차년도 계획에서는 MUKLIMO\_3의 수치 수렴해를 찾아가는 과정을 정밀 분석하여, 빌딩에 의한 난류 생성 및 소멸 과정을 2차년도 연구에서 이식하고자 한다. MUKLIMO\_3는 비압축, 비발산 가정 하에 유선 함수를 도입하고, 부시네스크 근사가 적용된 기본 운동 방정식계를 풀게 된다. 유선 함수를 도입함에 따라 건물 주변을 지나는 바람장을 아주 좁은 지역까지 계산해내는 장점이 있다. 또한 이 바람장을 이용하여 건물 등에서 배출되는 오염 물질의 이동을 모의할 수 있다. 따라서 이 모델을 이용하면 종래의 모델들에서 계산할 수 없는 세밀한 지역의 기류를 파악하여, 건물 구조나 식생등이 복잡한 도시 지역에서 주변환경 변화에 의한 기류의 변화 및 대기오염 물질의 확산 분포를 평가할 수 있다.

### 1.1 유선 함수 방법

MUKLIMO\_3는 바람장을 모의하기 위해 다음과 같은 부시네스크 근사가 도입된 운동방정식을 푼다.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \frac{1}{\rho_0} \nabla p = g \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_0}\right) - \frac{1}{\rho_0} \nabla \cdot J - f \vec{k} \times \vec{v} \quad (6)$$

여기서,  $\rho_0$ 는 상수로서 평균 밀도를 대표하는 값이다. 부시네스크 근사는 더불어 아래의 비압축성 근사를 요구한다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (7)$$

$J$ 는 전단 응력 (stress tensor)으로서, 경도 법칙 (gradient law)에 따르면 아래와 같이 매개된다.

$$J = -\rho_0 K_m (\nabla \vec{v} + \vec{v} \nabla) \quad (8)$$

여기서,  $K_m$ 은 에디 확산 계수 (eddy diffusion coefficient)이다. 한편,  $J$ 의 발산  $\nabla \cdot J$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot J = -\rho_0 \nabla \times (K_m \nabla \times \vec{v}) = -\rho_0 \nabla \times K_m \vec{\zeta} \quad (9)$$

따라서, 식을 다시 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{\partial \rho_0 \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \rho_0 \vec{v} + \nabla p = \vec{g}(\rho_0 + \rho') + \nabla \times A_m \vec{\zeta} - f \vec{k} \times \rho_0 \vec{v} \quad (10)$$

비압축성 근사를 활용하여 벡터 포텐셜 함수  $\vec{\Psi} = (\psi_1, \psi_2, 0)$ 를 도입한다. 이때, 3차원 바람장  $\vec{v}$ 와 벡터 유선함수  $\vec{\Psi}$  사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\rho_0 \vec{v} = -\nabla \times \vec{\Psi} \quad (11)$$

기술상 편의를 위하여 다음의 가중 속도장 및 가중 와도장을 도입한다.

$$\vec{v} = \rho_0 \vec{v} \quad (12)$$

$$\vec{\zeta} = \rho_0 \vec{\zeta} = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) = \rho_0 (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) \quad (13)$$

여기서, 와도장의 세 성분은 다음과 같이 속도장과 연결된다.

$$\zeta_1 = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \zeta_2 = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \zeta_3 = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (14)$$

MUKLIMO\_3에서는 열역학 방정식을 고려하지 않으며, 따라서, 밀도 섭동  $\rho'$  을 무시하여 역학 방정식계에 난류 매개화만을 포함하여 방정식을 구성한다. 즉, MUKLIMO\_3는 기상학 현상 보다는 도시 경계층 내 빌딩 숲을 포함한 복잡한 하부 구조물이 존재할 때 기본적인 이류와 빌딩 주변의 난류 생성에 따른 유선장의 변화를 기술하는 데 적합한 모델이다. 위 역학 방정식을 이용하여 x,y 와도 성분을 기술하는 방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\zeta}_1}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{v}\zeta_1 - \bar{u}\zeta_2)}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}\zeta_1 - \bar{u}\zeta_3)}{\partial z} - \frac{\partial(\frac{\partial(A_m\zeta_1)}{\partial y} - \frac{\partial(A_m\zeta_2)}{\partial x})}{\partial y} - \frac{\partial(\frac{\partial(A_m\zeta_1)}{\partial z} - \frac{\partial(A_m\zeta_3)}{\partial x} + f(\bar{u} - \bar{u}'))}{\partial z} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{\zeta}_2}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{u}\zeta_2 - \bar{v}\zeta_1)}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{w}\zeta_2 - \bar{v}\zeta_3)}{\partial z} + \frac{\partial(\frac{\partial(A_m\zeta_2)}{\partial x} - \frac{\partial(A_m\zeta_1)}{\partial y})}{\partial x} + \frac{\partial(\frac{\partial(A_m\zeta_2)}{\partial z} - \frac{\partial(A_m\zeta_3)}{\partial y} + f\bar{v})}{\partial z} \quad (16)$$

한편, 정의에 의해  $\bar{\zeta}_1$ 과  $\bar{\zeta}_2$ 는 벡터 유선 함수와 다음의 관계를 만족한다.

$$-(\nabla \times \nabla \times \vec{\Psi})_1 = \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x \partial y} = \bar{\zeta}_1 \quad (17)$$

$$-(\nabla \times \nabla \times \vec{\Psi})_2 = \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial x \partial y} = \bar{\zeta}_2 \quad (18)$$

유선 함수법은 위에 기술된 타원 방정식을 적합한 경계조건을 이용하여 풀게 된다. 즉, 매 반복(iteration)동안 유한 차분으로 계산된 와도항들을 강제력으로 하여서, 유선함수들을 풀게되고, 이로부터 다시 (17), (18)을 이용하여 바람장을 구하고 다음 반복으로 넘어간다.

## 1.2 교환 계수 및 마찰 속도의 결정

교환 계수 (exchange coefficient)  $A_m$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$A_m = \rho_0 l^2 |\bar{\zeta}| \quad (19)$$

여기서,  $l$ 은 혼합 길이이다. 이러한 정의는 1차원 모델의 경우 기본장의 연직 쉬어에 비례한다는 가정에 대한 3차원적 확장으로서, 빌딩과 같은 지면에 수직인 벽의 존재를 고려해야 하는 경우 보다 타당한 정의이다. 초목 및 모델 해상도 기준으로 분해되지 않는 빌딩이 없는 경우, 혼합 길이는 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_0} + \frac{1}{l_\infty} \quad (20)$$

1차원 모델에서  $l_0$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$l_{0,k} = l_{0,k-1} + \kappa dz_k \quad (21)$$

$$l_{0,1} = 0 \quad (22)$$

여기서,  $\kappa$ 는 칼만 상수이다. 이로부터 다음이 성립한다.

$$l_0 = \kappa(z - h_{\text{ground}}) \quad (23)$$

3차원에서는, 그러나,  $l_0$ 는 빌딩을 포함하는 하부 바닥면을 기준으로 계산되어야 하므로,

$$l_{0,ijk} = l_{0,ijk-1} + (\kappa d_{ijk} - \kappa d_{ijk-1}) \quad (24)$$

$$l_0 = \kappa d \quad (25)$$

여기서,  $d$ 는 빌딩을 포함하는 하부 바닥면 기준으로 계산된 고도의 증분을 의미한다.

MUKLIMO\_3에서 거칠기 길이는 바닥면으로의 운동량 속 (momentum flux)의 결정을 위해 모든 바닥면(수평 혹은 수직 벽 포함)에 대해 미리 결정되어 있어야 하는 매개 변수에 해당한다. 이 거칠기 길이와 인접 격자에서 수평 혹은 수직 벽에서의 접선 속도값을 이용하여, 다음 식으로 마찰 속도  $u_*$ 를 구한다.

$$v_t = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{d}{z_0}\right) \quad (26)$$

$v_i$ 는 벽면에 대한 접선속도,  $d$ 는 면으로부터의 법선을 향한 거리이며,  $u_*$ 는 마찰 속도(frictional velocity) 즉, 벽면을 통한 운동량 속에 해당하는 물리량이며,  $z_0$ 는 거칠기 길이를 나타낸다.

## 2. MUKLIMO\_3 양재천 모의 결과 및 고찰

### 2.1 실험 설정

실험영역은 양재천의 상류 부분을 실험영역으로 설정하였다. MUKLIMO\_3 프로그램 특성상, 영역이 넓어짐에 따라 필요 이상의 많은 메모리를 사용하도록 되어 있다. 이는 MUKLIMO\_3를 활용하여 광범위한 도시 기후 모델을 함에 있어 큰 제약으로 판단되며 차후 보완되어야 할 부분이라 판단된다. 본 연구에서의 실험영역은 위도 37° 26' 41"~위도 37° 28' 20", 경도 127° 00' 01"~127° 02' 18" 을 선택하였다. 이 지역은 양재천의 상류에 해당한다. 이 영역의 지형특성은 남서에서 북동방향으로 양재천이 자리를 잡고 있고 양재천을 기준으로 하여 북쪽으로 최고 높이가 약 280m인 우면산의 일부분이 자리를 잡고 있고 남쪽으로 약 170m 높이로 청계산의 일부분이 포함이 되어 있는 영역이다.

모델의 격자 간격을 x방향으로 30m간격, 총 길이를 4110m로 잡았고, y방향으로 30m간격으로 2970m, z방향으로는 해면고도로부터 8m의 간격으로 400m를 모사했다. 혼합층의 최상층은 300m로 설정하였고, 지표의 기본적인 거칠기 길이(roughness length)는 0.01m로 설정하였다. 다음으로 주풍의 방향을 8방 즉, 북풍, 북동풍, 동풍, 남동풍, 남풍, 남서풍, 서풍, 북서풍으로 각각 8개의 실험을 하였다. 이때의 각각의 실험에서 바람의 초기 속도는 5m/s로 주었다.

### 2.2 모의 결과

Fig. 3-3-1와 3-3-2은 각각 남풍, 남서풍을 주풍으로 5m/s로 주었을 때 MUKLIMO\_3의 3차원 바람장 모의 결과이다. 그림에서 등고선은 8m 간격이며 해발 48m의 고도에서 각각의 주풍의 방향에 따른 바람장을 나타낸 그림이다. 지상 48m에서부터 등고선을 그렸다. 모의 결과를 살펴 볼 때, 상세 지형자료가 감안된 바람장이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 보다 상세하고 정확한 바람장의 모의를 위해서는 토지 피복 특성 자료와 빌딩 자료가 제

공되어야 한다.

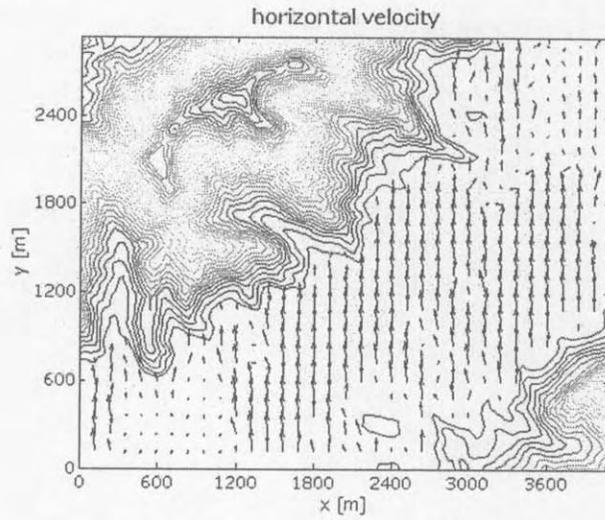


Figure 3-3-1. 주풍을 남풍으로 주었을 때, 지상 48m에서의 지형에 따른 바람장(vector) 및 고도장(contour)

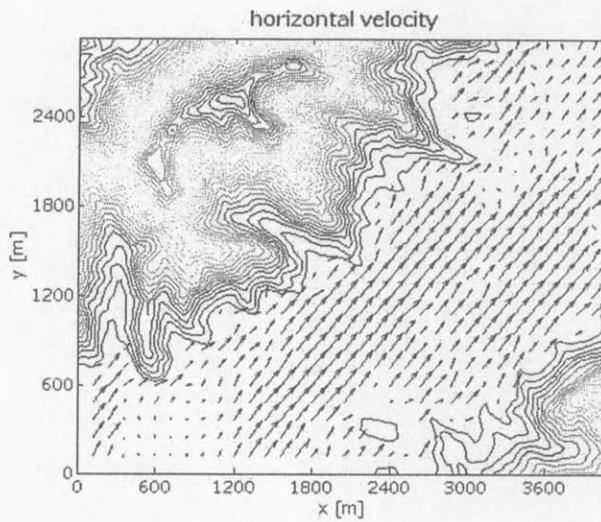


Figure 3-3-2. 주풍을 남서풍으로 주었을 때, 지상 48m에서의 지형에 따른 바람장(vector) 및 고도장(contour)

### 3. 한국도시 지형, 식생 자료 입력 모델 시험 적용

#### 1) 연구 수행에 사용된 자료

##### a) 한반도 식생자료 생산 및 도시지역 식생분포의 조사

본 연구에서 사용한 식생자료는 미국 지질조사소 (U.S. Geological Survey (USGS))에서 25개로 분류한 30" 해상도를 가지는 전지구 자료(이후 USGS-VEG 30")이다.

##### b) 기상 자료

FNL 자료는 NCEP에서 GDAS(Global Data Assimilation System)의 생성해 내는 재분석 자료이다. 1999년 9월부터 제공하기 시작한 분석 자료로서 종관 시간으로부터 6시간 동안 모아진 관측값을 통해 만들어진다. 현재까지 가장 높은 해상도인 T254L64을 통해 만들어지는 이 자료는 전구역을 포함하는 1°×1° 간격의 6 hourly 자료로서 10mb까지 26개의 연직층을 가지고 있다. 상층의 자료들은 상층에서의 3차원의 바람장, 온도, 상대습도를 포함하고 있으며, 지표면에서의 자료들은 기압, 10m 높이에서의 바람, 2m 높이에서의 온도, 상대습도와 운동량속과 열속을 포함하고 있다. FNL은 높은 해상도의 자료로서 동일 해상도를 지니는 AVN 자료에 비해 긴 자료 수집 시간을 가짐으로써 보다 정확한 초기 자료로 사용되어질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 민감도 수행에 필요한 초기 및 수렴 경계자료로 FNL을 사용하였다.

##### c) 모델 수행에 필요한 지형 자료

2001년에 생산된 환경부 DEM(Digital Elevation Model) 지형자료(이하 DEM1sec)는 각 타일당 900×900 픽셀로 구성되어 있고, 한 픽셀의 크기는 가로 세로 각각 1초이다.

#### 2) 기상모델의 경계층 코드 분석

MM5에서의 Blackadar의 PBL 모델의 수정된 버전은 연직혼합의 수평 바람 ( $u$ 와  $v$ ), 온위( $\theta$ ), 혼합비( $q_v$ ), cloud water ( $q_c$ ), 와 ice ( $q_i$ )를 예보를 하였

다. 지표면의 열과 수분 플럭스는 상사 이론에 의하여 계산되어진다. 먼저 마찰속도,  $u_*$ ,는 아래 식의 기본으로 계산되어진다.

$$u_* = \text{MAX}\left(\frac{kV}{\ln \frac{z_a}{z_0} - \psi_m}, u_{*0}\right) \quad (1)$$

여기에서  $u_{*0}$ 는 배경값 (땅위에서는  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ 이고 물위에서는 0)이고  $V$ 는  $V = (V_a^2 + V_c^2)^{1/2}$ 이다.  $V_a$ 는 모델층에서 가장 낮은 층에서의 풍속이고,  $V_c$ 는 대류속도이다. 대류속도는 낮은 평균 풍속의 상태에서 중요하고 불안정과 중립상태에서는  $V_c = 2(\theta_g - \theta_a)^{1/2}$ 로서 정의되어지는 반면에 안정상태에서는 0이된다. 지표면 열 플럭스는 아래와 같이 계산되어진다.

$$H_s = -C_{pm} \rho_a k u_* T_* \quad (2)$$

여기에서

$$T_* = \frac{\theta_a - \theta_g}{\ln \frac{z_a}{z_0} - \psi_h} \quad (3)$$

이고  $z_0$ 는 거칠기 변수이고  $z_a$ 는  $\sigma$ -층에서 가장 낮은 층의 높이이다.  $\theta_g$ 는 지표면의 온위이다.  $\psi_m$ 와  $\psi_h$ 는 무차원 안정도 변수이다. 이 무차원 변수들은 리차든 수,  $R_{iB}$ ,의 함수이다. 이는

$$R_{iB} = \frac{gz_a}{\theta_a} \frac{\theta_{va} - \theta_{vg}}{V^2} \quad (4)$$

이다. 아래첨자  $v$ 는 가운데위를 나타낸다.

### 3) 기상 모델 및 도시 기후 모델을 활용한 수치실험 및 결과분석

#### a) 기상 모델을 활용한 도시화 진행에 따른 기상요소 변화의 평가

기상모델로 사용될 모델은 PSU (Pennsylvania State University)/NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 3차원 비정수 역학 모형인 MM5V3 이다. 모형의 수평격자 간격은 각각 27 Km, 9 Km, 3 Km이며 수평격자 개수는 각각  $40 \times 39$ ,  $55 \times 58$ ,  $52 \times 55$ 이다. 지형 고도 및 지표면 피복 및 식생자료는 모든 모형에 30" 해상도의 자료를 사용하였다. 습윤 과정은 Simple Ice, 적운 모수화 과정은 Grell (첫 번째 격자에서만 실행), 행

성경계층 과정은 MRF, 그리고 복사 물리과정은 CCM2, 지표면 모수화 과정은 Five-Layer Soil model을 사용하였다. 초기장과 경계자료는  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 해상도의 NCEP Final Analysis data( 이후 FNL 자료)를 사용하였고, 적분 시간은 2005년 7월 21일 12 UTC에서 2005년 7월 23일 18 UTC까지이며, 하위 등지격자로 갈수록 6시간의 적분 시작 시간의 지연을 주었다. 피복에 따른 기상장의 변화를 알아보기 위해 먼저 대조 실험(이후 CTR)을 수행하였다. 그리고 앞에서 언급한 NOAA/AVHRR자료를 바탕으로 VEG-USGS30" 토지피복자료에서 서울 지역과 인천지역의 도시영역을 확대 하여 실험(이후 UB(urban))하였다. 세 번째 실험은 UB실험에서 서울지역과 인천지역의 도시 피복 자료를 잔디 피복자료로 바꾸어 실험(NU(non-urban) 하였다. NU실험에서 도시피복을 잔디피복으로 바꾸는 이유는 UB실험에서 도시 피복자료로 바뀌어진 영역의 대부분이 잔디 피복자료였기 때문이다. 그리고 거칠기 길이에 따른 기상장의 변화를 알아보기 위해 NU실험에서 거칠기 길이를 각각 25cm, 50cm, 80cm, 100cm, 200cm로 변화하여 실험하였다.

식생의 변화에 따라 하부층의 기상장변화가 어떻게 일어나는지 알아보기 위하여 대조실험(CTR), 도시영역을 더 크게 한 실험(UB)과 UB의 도시의 영역을 잔디로 지표면 피복을 바꾸었을 때의 실험(NU)에서 하부층 온도분포와 바람 분포를 살펴보았다. Fig. 3-3-3은 2005년 7월 23일 14 LST때에 CTR, UB, NU 실험의 2 m높이에서의 수평 온도장이다. CTR과 UB실험의 공통점은 대부분의 도시영역에서 온도가  $37^{\circ}\text{C}$  이상이다. 두 실험의 차이점은 CTR실험에는 도시의 일부분만  $37.5^{\circ}\text{C}$ 로써 높게 나타나지만 UB실험에는 도시의 대부분의 영역에서  $37.5^{\circ}\text{C}$ 를 넘는다. NU의 경우에는 도시영역이 전체적으로  $36.5^{\circ}\text{C}$  이상으로 나타나지만 CTR이나 UB실험처럼 온도가 높게 나타나지 않았다. Fig. 3-3-4는 4 LST때의 각각의 실험군과 대조군의 편차이다. (a)는 넓혀준 도시지역에서 약  $2^{\circ}\text{C}$ 의 양의 편차가 나타나고 (b)는 도시영역이 없는 곳에서 도시가 있는 지역보다  $2^{\circ}\text{C}$  낮게 나타난다. 즉 이 결과를 통하여 도시의 영역의 넓어질수록 대기의 온도가 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 도시의 유·무에 따라 최고  $2^{\circ}\text{C}$  이내의 온도 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

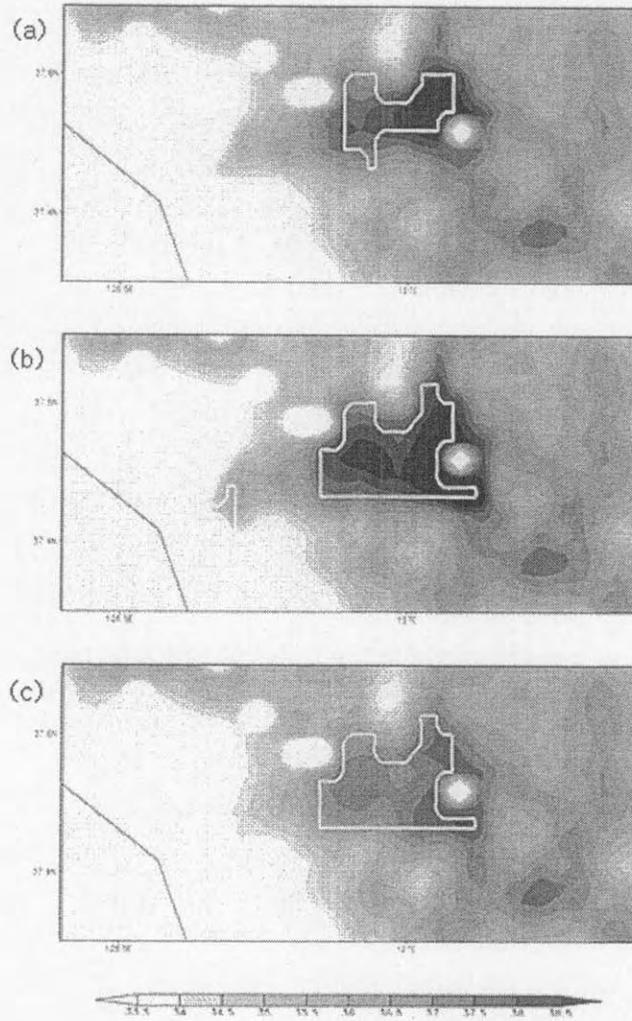


Figure 3-3-3. 7월 23일 14 LST일 때에 2m에서 온도( $T_{2m}$ ) (a) CTR, (b) UB, (c) NU. 흰 선은 도시의 영역을 나타낸다.

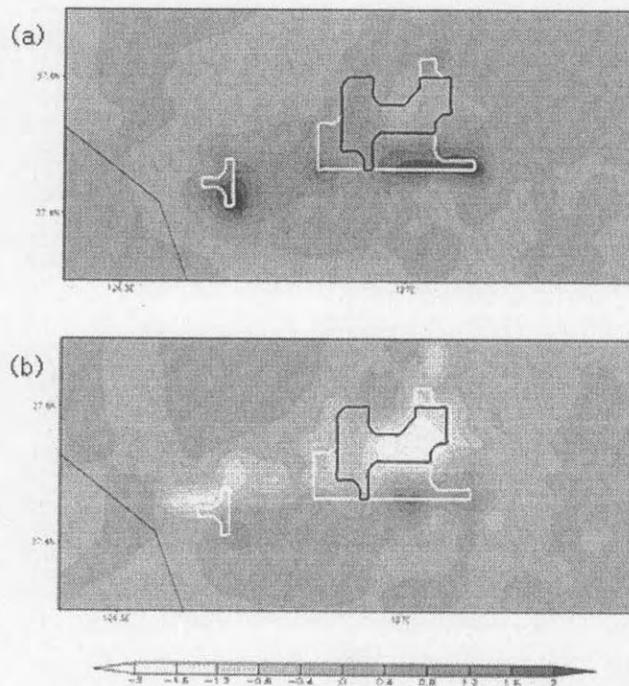


Figure 3-3-4. 2005년 7월 23일 14 LST일 때에 2m 높이에서 UB와 CTR, NU와 CTR의 수평온도의 차이. (a) 7월 23일 14 LST, UB-CTR, (b) 7월 23일 14 LST, NU-CTR. (검은선은 CTR의 도시영역을 나타내고, 흰선은 변형된 도시영역이다.)

b) 도시 기후 모델을 활용한 프로젝트 지역 바람장 산출

본 연구에서 사용할 프로토타입 미세규모 도시기후모델은 Sievers (1986)가 개발한 MUKLIMO\_3이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 모델은 바람장 및 온도

장의 역학적 열역학적 평형상태를 산출하게 된다. 이 모델을 이용하면 종래의 모델들에서 계산할 수 없는 세밀한 지역의 기류를 파악하여, 건물 구조나 식생 등이 복잡한 도시 지역에서 주변 환경 변화에 의한 기류의 변화 및 대기오염 물질의 확산 분포를 평가할 수 있다.

실험영역은 양재천을 중심으로 실험을 하였다. 초기 입력 자료는 앞에서 언급한 지형 자료, 빌딩 자료, 거칠기 길이 자료를 사용하였다. 풍속과 풍향에 따른 바람의 분포를 알기 위하여 초기풍속이 2m/s일때에 풍향이 남서풍, 서풍, 북서풍, 북풍일때의 실험과 초기풍속이 7m/s일때에 풍향이 남서풍, 서풍, 북서풍, 북풍일때의 실험을 하였다. 그리고 거칠기 길이에 따른 바람의 크기와 방향을 알아보기 위하여 첫 번째 실험으로는 앞에서 만든 거칠기 길이의 자료를 초기 입력자료로 사용하였다. 두 번째 실험으로는 앞에 사용한 거칠기 길이에서 건물이 있는 지역만 거칠기 길이를 원래의 거칠기 길이에서 50%를 줄여 실험을 하였다. 거칠기 길이 실험에서는 초기 풍속은 5m/s이고 풍향은 북서풍이다.

주풍의 풍속 및 풍향 변화에 따라 도출되는 미세 도시 규모 모델의 바람장을 산출하기 위하여 주풍의 풍속의 크기는 2m/s와 7m/s를 주었다. 풍향은 남서풍, 서풍, 북서풍, 북풍, 4가지 방향을 선정하여 총 8가지 실험을 하였다. 이 실험 중에 바람의 방향이 북풍과 북서풍일 때 흥미로운 결과를 발견하였다. 따라서 실험들 중에 2m/s와 7m/s일 때 북서풍과 북풍의 바람의 특징을 50m에서의 높이와 140m의 높이에서 비교하였다.

2m/s일 때에 50m의 높이에서 북서풍과 북풍의 수평 바람장을 살펴보면 북서풍의 초기장 바람이 주어졌을 때 그 크기가 북풍에 비하여 훨씬 그 크기가 작음을 알 수 있다. 그리고 같은 초기장 바람에서 140m에서의 북서풍 바람일때와 북풍의 바람장을 살펴보면 바람의 크기가 크게 차이가 나지 않는다. 초기 풍속이 7m/s인 경우에도 2m/s인 경우와 비슷하다. 이는 상층보다는 하층에서의 바람장이 풍향에 의하여 바람의 크기가 달라짐을 알 수 있고, 바람의 방향과 건물이 어떻게 대칭하는지에 따라 도시 내에 바람의 크기가 달라질 것을 예상 할 수 있다.

그리고 초기 바람 풍향이 북서풍에서 40m에서 2m/s와 7m/s의 수평바람장을

비교해 보면 예상할 수 있는 대로 7m/s인 경우의 바람의 크기가 조금 더 크게 나타나고, 140m에서의 두 바람장을 비교하면 초기 풍속이 7m/s인 경우 바람의 크기가 더 크고 상승하는 공기의 크기가 더 큼을 알 수 있다.

거칠기 길이에 따라서 하부층의 바람이 어떻게 영향을 받는지 알아보기 위하여 먼저 기존의 거칠기 길이를 이용하여 실험한 경우와 (이후 CTR) 두 번째로는 CTR에 이용한 거칠기 길이를 녹지지역, 개발제한지역, 공원, 도로 및 평지를 제외한 지역에서의 거칠기 길이를 원래의 길이보다 50%를 줄여 실험 (이후 LRL(low roughness length))을 하였다. 초기 풍속은 5m/s를 주었고 초기 풍향은 북서풍을 주었다. 50m에서의 수평바람장을 살펴보면 거칠기 길이가 작은 LRL실험에서의 수평바람장이 CTR 실험에서의 수평바람장보다 풍속이 강하게 나오고 건물과 건물사이에 바람이 잘 통하여 순환이 잘 되고 있음을 알 수 있다. 140m에서의 바람장은 거칠기 길이가 작은 경우인 LRL이 상대적으로 CTR보다 상승의 바람이 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

A. 도시 생성에 의한 도시 및 인근 지역의 하부경계층 순환 수치 모의

지표면의 피복 변화에 따른 민감도를 조사하여 도시화 및 도시생성에 의한 도시 및 도시 인근 지역 하부 경계층의 대기 순환을 연구하는 것이 이번 과제의 목표의 하나이다. 따라서 지표면 근처의 온도 변화 및 잠열속, 현열속, 순복사속의 관계를 분석하고, 지표면의 피복을 결정짓는 알베도, 방출율, 거칠기 길이, 수분함량, 열관성 중 거칠기 길이와 수분함량의 민감도 실험을 통하여 잠열속, 현열속, 순복사속의 관계 및 행성경계층의 하부온도의 변화와 하부층의 바람운동의 특성을 분석하고자 한다.

1) 방법

사용된 기상 수치 모형은 중규모 기상 모델인 MM5이다. 기상 수치 모형에서 대기의 하부경계층을 모사하는 스킴으로 MRF를 사용했다. 이다. MRF에서 이용된 지표면 에너지 수지식(Surface Energy Budget, 이후 SEB)은 아래의 (1)식과 같다. SEB는 지표면의 물리적 과정을 통해 결정된다.

$$(1-\alpha)S_{\downarrow} + LW_{\downarrow} - \varepsilon\sigma T_g^4 + SH + LE + G = 0 \quad (1)$$

$\alpha$ 는 알베도,  $S_{\downarrow}$ 는 하향 태양복사 [ $W/m^2$ ],  $LW_{\downarrow}$ 는 하향 지구복사 [ $W/m^2$ ],  $\varepsilon$ 는 방출율,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만의 상수 [ $W/m^2K^{-4}$ ],  $T_g$ 는 지표면의 온도 [K], SH는 현열속 [ $W/m^2$ ], LE는 잠열속 [ $W/m^2$ ], G는 지표 열속 [ $W/m^2$ ]이다. (1)에서 첫 번째항  $(1-\alpha)S_{\downarrow}$ 는 지표면에 들어오는 태양복사, 세 번째항  $\varepsilon\sigma T_g^4$ 는 지표면에서부터 나가는 지구복사이다. 이 항은 방출율, 지표면의 온도에 의해 정해지게 된다. 지표면 피복 특성에 따라 지표면 에너지 수지식에 영향을 미치는 물리적 변수들은 수분 함유량, 거칠기 길이, 알베도, 방출율, 열관성이다. 지표면 온도는 지표면 온도에 대한 예단 방정식을 이용하여 얻어진다. 지표면온도를 결정짓는 식은 식 (2)와 같다.

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = R_n - SH - LE - G \quad (2)$$

$C_g$ 는 지표면의 열용량 [ $Jkg^{-1}K^{-1}$ ],  $R_n$ 는 순 복사속이다. 식 (2)에서 지표면 피복에 따라 값이 달라지는 물리적 변수들은 지표면의 온도를 변화시키는 데 중요한 역할을 한다. 물리적 변수 중 알베도와 방출율은 지표면에서 들어오는 복사 및 지표면에서 방출하는 복사 에너지를 변화시키는 역할을 한다. 잠열속은 식 (3)과 같다.

$$LE = \lambda E = \lambda \rho_a C_\theta C_u M [q_s(T_g) - q_{va}] V \quad (3)$$

$\lambda$ 는 수증기의 잠열 [ $JKg^{-1}$ ],  $E$ 는 지표면 수분속 [ $kgm^{-2}s^{-1}$ ]이다.  $\rho_a$ 는 공기 밀도 [ $kgm^{-3}$ ],  $C_\theta$ 는 열적 난류 교환계수,  $C_u$ 는 운동량 난류 교환계수,  $M$ 은 수분 함유량,  $q_s(T_g)$ 는  $T_g$ 일 때의 포화 혼합비,  $q_{va}$ 는 모델 최하층 상단의 높이 ( $z_a$ )에서의 수증기의 혼합비이고,  $V$ 는  $V = (V_a^2 + V_c^2)^{0.5}$  정의 되는데,  $V_a$ 는 모델 최하층 상단의 높이에서의 풍속 [ $ms^{-1}$ ]이고,  $V_c$ 는 대류속도 [ $ms^{-1}$ ]이다. 지표면과 대기사이의 현 열속은 식 (5)로 표현된다.

$$SE = \rho_a c_p C_\theta C_u (\Theta_g - \Theta_a) V \quad (4)$$

$\Theta_g$ 는 첫 번째 토양층의 온위 [ $K$ ]이고,  $\Theta_a$ 는 모델 최하층 상단의 높이의 온위 [ $K$ ]이다.  $c_p$ 는 공기의 열용량 [ $Jkg^{-1}K^{-1}$ ]이다. (Grell et al. 1995) 순 복사속은 식 (6)으로 표현이 된다.

$$R_n = (1 - \alpha) S_\downarrow + LW_\downarrow - \epsilon \sigma T_g^4 \quad (5)$$

$$G = \lambda (T_0 - T_{-1}) / \Delta Z \quad (6)$$

여기서  $\lambda$ 는 물질의 열전도이다.  $T_{-1}$ 는 토양 첫 번째 층의 온도이고  $\Delta Z$

는 지표면에서 첫 번째 토양층까지의 거리이고  $T_0$ 는 물이 포화된 지표면의 온도이다. 다음으로 지표면에서 2m높이의 온도는 모델의 결과 중 모델 최하층 상단의 높이의 공기의 온도와 모델에서 모의된 지표면의 온도를 Monin-Obukhov 상사이론에 의해 진단적으로 구해진다. 2m에서의 온도를 계산 하는 방법은 식 (8)과 같다.

$$T_{2m} = T_g + [T_g - T(z_a)] \times \Phi_T(2m) / \Phi_T(z_a) \quad (7)$$

$$u_{10m} = u(z_a) \times \Phi_m(10m) / \Phi_m(z_a), \text{ and} \quad (8)$$

$$v_{10m} = v(z_a) \times \Phi_m(10m) / \Phi_m(z_a)$$

10m에서의 수평 바람장은 식(9)와같이 표현이 된다.  $\Phi_T(z)$ 와  $\Phi_m(-)$ 는 높이에 따라 변하는 대기의 열적 안정도 함수와 운동량 전달 안정도 함수이다.

## 2). 실험방법

도시화에 따른 하부 경계층 내의 순환을 이해를 쉽게 하기 위하여 가상실험을 실시하였다. 도시의 영향을 최대로 하기 위하여 도시의 영역을 인천과 서울 영역을 합한 크기만큼 설정하고, 지형을 평편하게 설정하였다. 모델의 설계에서 복사강도는 정오로 고정을 하였다. 이 이유는 낮이 밤 보다 도시에 의한 대기 순환을 잘 살펴 볼 수 있기 때문이다. 매 6시간마다 모델 영역의 경계면에 재분석 자료의 값을 넣어 주게 설정하였다. 동일한 기상장이 모델 영역의 경계층에 입력을 시키기 위하여 6시간 마다 들어가는 재분석 자료의 값은 동일한 값으로 설정하였다. 격자간격은 6km이고 격자수는 가로로 36개 세로로 20개이다. 수분 모수화는 Simple ice를 사용하였고 적운 모수화는 Grell을 사용하였고 경계층 모수화는 MRF를 사용하였다. 복사 모수화는 CCM2와 토양 모수화는 5-layer를 사용하였다. 도시화에 따른 하부경계층 대기 순환을 연구하기 위하여 두 종류의 지표면을 설정하였다. 실험영역에 지표면 종류가 잔디만 있는 경우(IGR)와 실험영역에 지표면 종류가 잔디와 도시가 존재하는 경우(IUB)인 2가지의 지표면을 설정하였다.

Table. 3-3-1 물리매개변수 민감도 실험 설계

IUB영역에서 도시영역의 물리매개변수 값		
거칠기 길이 민감도 실험	거칠기 길이변수를 25cm로	IR25
	거칠기 길이 50cm로	IR50
	거칠기 길이 100cm로	IR100
	거칠기 길이 200cm로	IR200
수분함량 민감도 실험	수분함량변수를 15%로	IM15
	수분함량변수를 10%로	IM10
	수분함량변수를 5%로	IM5

도시의 영역은 직사각형으로 붉은 영역이다. 이와 같은 실험 설정으로 도시 존재 또는 도시화에 따른 지표면 근처의 대기 순환을 알 수 있다. 각각의 지표면의 종류에 따라서 물리매개변수들인 알베도, 방출율, 거칠기 길이, 수분함량, 열관성의 값들이 달라진다. 즉, 물리매개변수들의 값에 따라 지표면의 특성이 달라진다. 물리매개변수들 중에 알베도와 방출율과 열관성은 순 복사속과 관계 있는 파라미터들인 반면에 거칠기 길이와 수분함량은 지표면의 특성과 관계 있는 파라미터들이다. 두 번째 실험으로는 지표의 특성과 관련된 파라미터들의 민감도 실험을 수행하였다. IUB지표면에서 도시영역인 빨간 박스영역에 거칠기 길이 수분함량의 값들을 다양하게 설정하여 실험을 실시하였다. Table 3-3-1에 거칠기 길이 및 수분함량 민감도 실험설계에 대해 자세하게 제시하였다. Table 3-3-1에서 알 수 있듯이 각각의 설정에 따라 7개의 실험을 수행하였다. 거칠기 길이는 Davenport-Eieringa의 거칠기 길이 분류에 따라 거칠기 길이를 설정하여 민감도 실험을 수행하였다.

### 3) 실험결과

(가) 하부경계층 내의 온도

(a) 지표면 민감도 실험 결과

지표면의 종류에 따라 지표면 근처 공기의 성격이 어떻게 달라지는지, 도시와 잔디의 지표면에 따라 하부 경계층 내의 공기의 순환이 어떻게 일어나는지 알아보기 위하여 지표면을 잔디인 경우와 도시인 경우로 나뉘어 실험을 실시하였다. Figure 3-3-9는 IUB와 IGR의 2m 높이의 온도 차이를 나타낸다. 2m 높이에서의 온도는 지표면이 도시일 때 잔디 지역보다 온도가 최고 1.6C 높게 나타났다.

지표면이 잔디에서 도시로 변할 때 평균적으로 1,032 °C 상승하였다. 2m 높이에서의 온도는 모델에서 식 (7)에 의해 결정이 되어진다. 2m 높이의 온도는 약 지표면 온도와 모델 최하층 온도의 차이에 비례하게 된다.

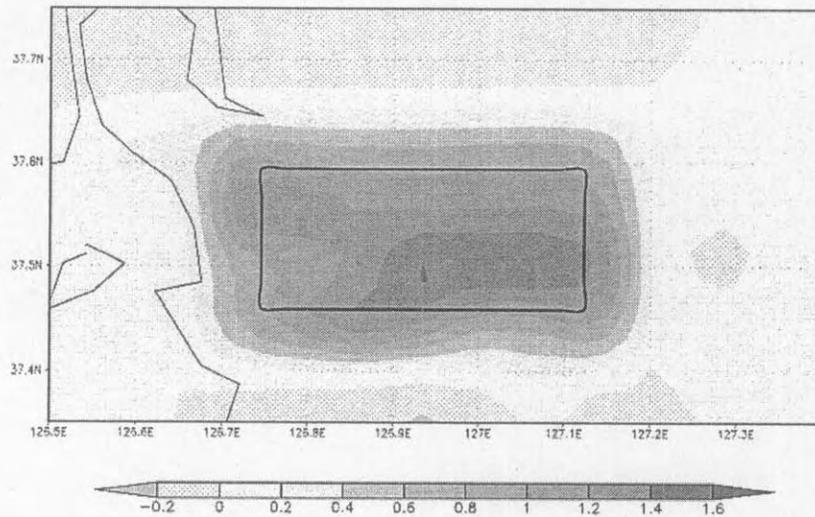


Figure 3-3-9 IUB와 IGR의 2m 높이에서의 온도차이. 검은색의 직사각형의 안쪽은 도시영역을 나타냄.

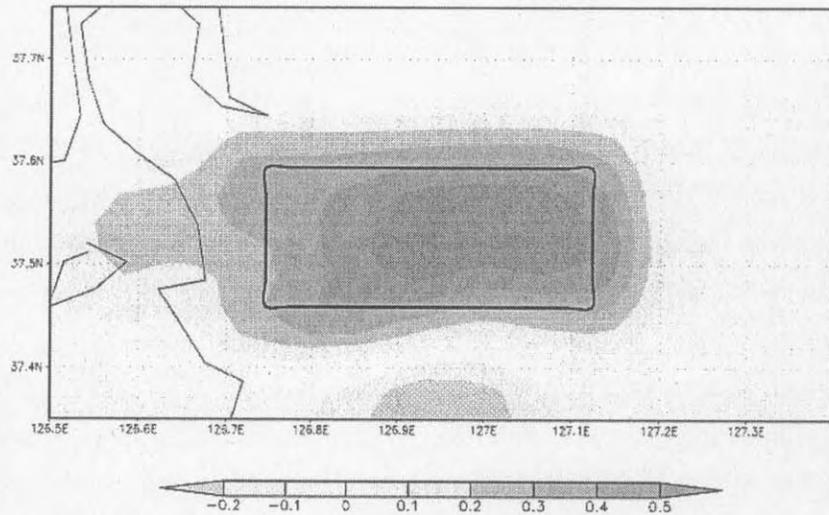


Figure 3-3-10 IUB와 IGR의 모델 최하층 온도의 차이. 검은색 직사각형 안쪽은 도시영역을 나타냄.

모델 최하층 IUB와 IGR의 온도 차이는 Fig. 3-3-10에 나타내었다. 도시 생성에 따라 도시 영역 및 도시 인근지역까지 대기 하층의 온도가 최대 0.59℃까지 상승 한다. 2m 높이의 온도를 계산하기 위해 필요한 지표면 온도는 식 (2)에 의해 결정이 된다. 식 (2)에 필요한 잠열, 현열, 순 복사속의 도시영역 평균값은 Table 3-3-2와 같다. 지표면 온도는 순 복사속 보다는 현열속과 잠열속의 영향을 많이 받는다.

Table 3-3-2 IUB와 IGR의 도시영역에서 순 복사속, 잠열속, 현열속 평균값의 차이.

Mean value over modified urban area	$R_n$ [ $W/m^2$ ]			SH [ $W/m^2$ ]	LE [ $W/m^2$ ]
	SW ↓	LW ↓	LW ↑		
IUB - IGR	+ 10.527	- 9.158	- 5.321	+ 68.761	- 49.050

(b) 거칠기길이 민감도 실험

물리적 파라미터 중에 지표면의 특성이 도시로 변할 때 중요하게 작용하는 파라미터는 거칠기 길이이다. 왜냐하면 도시가 형성이 되면 높은 건물들이나 아파트 및 주택들이 건축이 되면서 지표면의 요철이 커지기 때문이다. 앞에서 언급하였듯이 Fig. 3-3-13 (b)의 지표면에서 빨간 박스 도시영역의 거칠기 길이를 25cm(IR25), 50cm(IR50), 100cm(IR100), 200cm(IR200)로 각각 설정하여 실험을 수행 하였다. 이때 다른 물리매개변수는 각각의 실험마다 동일한 값을 가진다. 실험 결과들에서 필요한 변수들에 대해 IR50과 IR25의 차이, IR100과 IR25의 차이, IR200과 IR25의 차이를 Table. 3-3-3에 나타내었다. 이 값들은 직사각형 도시영역의 값들을 평균 한 값들이다. 거칠기 길이가 길어질수록 도시영역의 2m 높이의 온도의 차이가 최대 1.06°C 높아졌다. 그리고 지표면의 온도는 거칠기 길이가 길어질수록 최대 1.03°C 낮아졌다.

Table 3-3-3 거칠기 길이 민감도실험에서 2m높이에서의 온도와 지표면 온도, 순 복사속, 잠열속, 현열속 도시 영역의 평균값 차이.

Mean value over modified urban area	$T_{2m}$ [°C]	$T_g$ [°C]	$R_o$ [ $W/m^2$ ]			SH [ $W/m^2$ ]	LE [ $W/m^2$ ]
			SW ↓	LW ↓	LW ↑		
IR50 - IR25	+ 0.21	- 0.60	+ 1.26	- 1.32	- 3.68	+ 6.74	- 1.20
IR100 - IR25	+ 0.52	- 0.99	+ 11.23	- 2.77	- 6.08	+ 15.99	+ 3.96
IR200 - IR25	+ 1.06	- 1.03	+ 36.31	- 5.18	- 6.31	+ 23.46	+ 14.66

이는 지표면 온도를 계산하는 식 (2)에서 현열속과 잠열속 거칠기 길이가 길어짐에 따라 큰 값을 가지기 때문이다. 그리고 지표면의 요철이 커질수록 지표면에 입사하는 태양복사 에너지가 커진다. 거칠기 길이는 모델 내에서 열적 난류 교환계수, 및 운동량 난류 교환계수에 영향을 미치고, 이 교환계수들은 식 (3), (4)에서 알 수 있듯이 잠열속과 현열속에 직접적으로 영향을 미친다. Fig. 3-3-11은 여러 실험 중 IR200과 IR25의 2m에서의 온도 차이를 나타낸 그림이다. 도시 내에서 온도가 다른 지역보다 높다. 즉, 지표면에 높은 건물이 많고 도시가 복잡할수록 도시 근교지역보다 도시지역에 온도가 더 높게 나타남을 확인 할 수 있다.

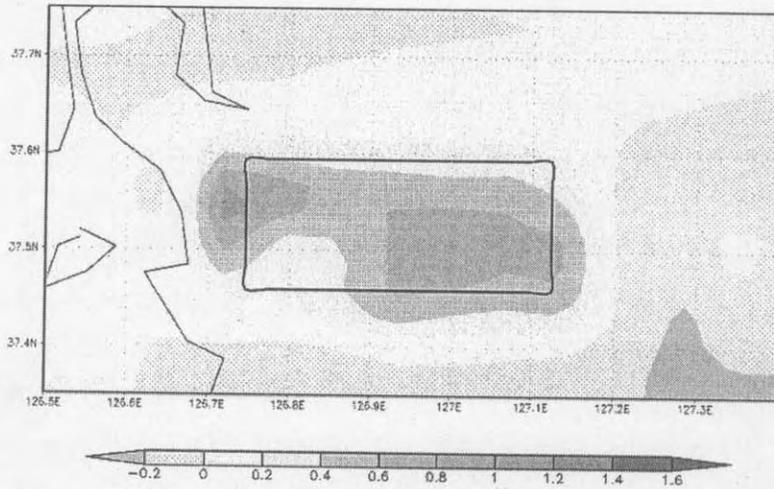


Figure 3-3-11 IR200과 IR25의 2m 높이에서 온도차이. 검은 색의 직사각형의 안쪽은 도시영역을 나타냄.

(c) 수분함량 민감도 실험

지표면이 잔디에서 도시로 변할 때 지표면의 성격이 달라진다. 그 중에 하나는 지표면이 아스팔트, 시멘트 등 인공의 물질로 변화되면서 지표면의 수분함량이 크게 변화된다. 지표면이 도시로 변함에 따라 수분함량의 값들이 변하게 되는데, 수분함량에 따른 하부 경계층의 민감도를 알아보기 위해 이와 같은 실험을 실시하였다. Figure 3-3-13 (b)에 나타난 직사각형의 도시영역에 수분함량의 값을 달리 주는 실험으로 설정하였다. 각각의 실험의 수분함량은 5%(IM5), 10%(IM5), 15%(IM5)로 설정하여 실험을 하였다. 그리고 실험 시 다른 물리매개변수는 각각의 실험마다 동일한 값을 가진다. 아래의 Table 3-3-4은 실험 IM10과 IM15의 결과 차이와 IM5와 IM15의 결과의 차이를 도시영역의 평균값으로 나타내었다. 2m높이에서의 온도는 지표면의 수분함량이 작을수록 최대 0.88℃ 높아진다. 그리고 지표면의 온도는 지표면의 수분함량이 작을수록 최대 1.32℃로 높아진다. 지표면 온도를 결정짓는 순 복사속, 현열속, 잠열속을 비교하면 수분함량이 작아질수록 잠열속, 현열속, 순 복사속 순으로 값이 크게 변한다. 수분함량 민감도 실험에서 잠열속과 현열속의 값이 지표면 온도를 결정짓는데 크게 영향을 미친다. 두 변수 중 지표면 온도는 잠열속의 영향을 가장 크게 직접적으로 받는다. 이는 식 (3)에서 알 수 있듯이 수분 함량

매개변수가 잠열속에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. Figure 3-3-12은 IM5와 IM15의 2m에서의 온도의 차이를 나타낸 그림이다. 도시 영역 내에 온도가 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 3-3-4 수분함량 민감도실험에서 2m높이에서의 온도와 지표면 온도, 순 복사속, 잠열속, 현열속 도시 영역의 평균값 차이.

Mean value over modified urban area	$T_{2m}$ [°C]	$T_g$ [°C]	$R_n$ [W/m <sup>2</sup> ]			SH [W/m <sup>2</sup> ]	LE [W/m <sup>2</sup> ]
			SW ↓	LW ↓	LW ↑		
IM10 - IM15	+ 0.41	+ 0.61	+ 14.47	+ 1.58	+ 3.76	+ 37.45	- 54.84
IM5 - IM15	+ 0.88	+ 1.32	+ 9.37	+ 2.94	+ 8.55	+ 91.11	125.16

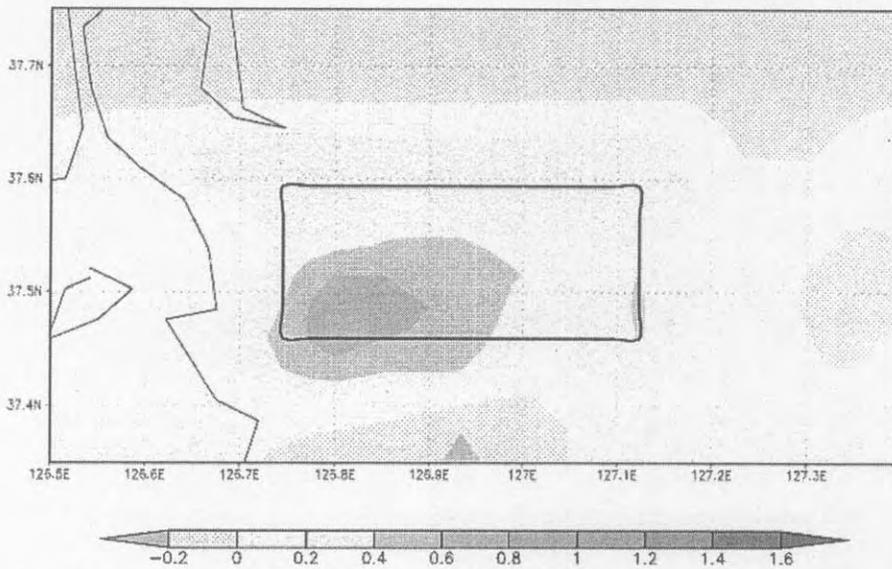


Figure 3-3-12 IM5과 IM15의 2m 높이에서 온도차이. 검은색의 직사각형의 안쪽은 도시영역을 나타냄.

(d) 각 실험의 온위 프로파일

온위는 공기덩이를 단열적으로 압력이 1000hPa가 될 때까지 압축하였을 때의 온도를 말한다. Figure 3-3-13은 지표면 민감도 실험, 거칠기 길이 민감도 실험, 수분함량 민감도 실험의 하부경계층의 온위 프로파일을 나타낸 그림이다.

Table 3-3-5는 지표면 민감도 실험, 거칠기 길이 민감도 실험, 수분함량 민감도 실험의 정적안정도와 기상 수치 모형에서 열에 대한 안정도 함수의 비를 나타낸 것이다. 정적 안정도는 지표면 근처인 모델의 아래에서 두 번째 층 사이의 값이다. 먼저 지표면 민감도 실험인 IGR과 IUB인 경우 하부 경계층의 온위는 하부 경계층에서 IUB의 온위가 IGR 보다 더 높다. 그리고 지표면 근처의 IGR과 IUB의 온위 기울기가 차이가 있다. 하부 경계층에서 온위의 차이가 가장 큰 부분은 지표면 근처에서 가장 크고 상층으로 올라갈수록 온위 차이가 줄어들다가 하부 경계층의 중간 부분에는 온위 차이가 일정하고 하부 경계층의 상부에는 온위의 차이가 거의 나지 않는다. 즉, 지표면의 변화에 따른 온도 변화는 지표면 근처에서 가장 크게 영향을 받는다. Table 3-3-5에서 지표면 민감도 실험에서 정적안정도의 값을 비교해 보면 IUB인 경우에 -5.25의 값을 가지고 IGR인 경우에는 -2.89의 값을 가진다. 즉 IUB의 기울기가 크고 이는 대기 하부층의 정적 불안정도가 지표면이 잔디인 경우 보다 도시인 경우에 대기가 불안정함을 나타낸다. 모델에서 열에 대한 안정도 함수의 비는 도시인 경우의 값이 잔디의 경우보다 크게 나타난다. 이는 도시영역의 2m 높이 온도와 지표면 온도 값의 차이가 잔디영역보다 더 크게 차이가 나타나기 때문이다. 거칠기 길이 민감도 실험인 경우에는 지표면 근처에서 거칠기 길이가 길수록 온위가 높게 나타나고 그 기울기 또한 커진다. 하지만 하부 경계층의 중간 부분은 거칠기 길이가 길수록 온위가 낮게 나타난다. 그리고 하부 경계층의 상부에는 온위의 차이가 거의 없다. 지표면 근처에서 IR200 실험의 정적 안정도는 -7.58 이고, 정적안정도의 값은 거칠기 길이가 길어질수록 정적 안정도의 값은 점점 불안정해진다. 지표면의 거칠기 길이가 길어지면 하부 경계층에서 지표면 근처의 공기가 하부 경계층의 다른 부분보다 불안정해 열적 난류 및 운동량 난류가 커지게 된다. 모델에서의 열에 대한 안정도 함수의 비는 거칠기 길이가 길어질수록 그 비가 커지는 것을 알 수 있다. 이 역시 2m 높이 온도와 지표면 온도의 차이가 거칠기 길이가 길어질수록 커짐을 알 수 있다.

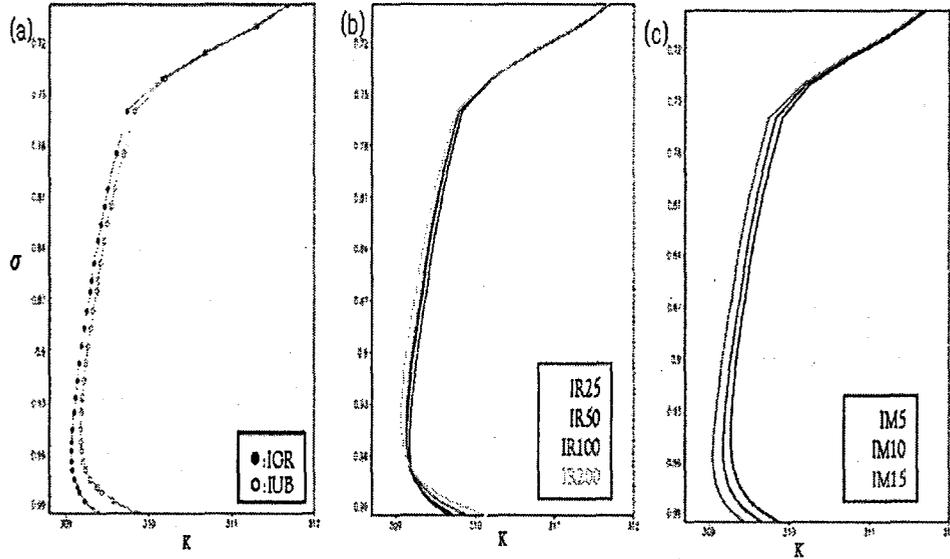


Figure 3-3-13 (a) 지표면 민감도 실험, (b) 거칠기 길이 민감도 실험, (c) 수분함량 민감도 실험의 온위 프로파일

Table. 3-3-5 각각의 실험에서 하부층의 정적 안정도와 열에 대한 안정도 함수의 비

	UG	GR	IR25	IR50	IR100	IR200	IM15	IM10	IM5
$\frac{\theta_2 - \theta_1}{z_2 - z_1}$ [K/km]	- 5.25	- 2.89	- 4.02	- 4.67	- 5.61	- 7.58	- 3.37	- 4.02	- 4.81
$\frac{\phi_2(z_2)}{\phi_1(z_1)} = \frac{T_{2a} - T_a}{T_a - T(z_1)}$	- 0.225	- 0.589	- 0.484	- 0.345	- 0.168	+ 0.034	- 0.480	- 0.484	- 0.491

수분함량 민감도 실험에서는 수분함량이 작을수록 지표면 근처 및 대기 경계층에서 온위가 높게 나타난다. 높이에 따라서 온위의 크기는 점차 줄어드는데 각각의 프로파일이 일정하게 줄어들고, 하부 경계층 상부에는 각각의 실험의 온위 차이가 없다. 수분함량 민감도 실험에서 각각의 정적안정도의 값은 다른 민감도 실험처럼 차이가 크게 차이 나지 않는다. 또한 모델에서의 열에 대한 안정도의 함수의 비도 크게 차이가 없다. 이 결과로 보아 지표면의 근처의 온도 프로파일은 수분함량보다는 거칠기 길이에 의한 영향을 많이 받는 반면 하부

경계층의 중간부분에는 수분함량의 영향을 크게 받는다.

(나) 바람

(a) 지표면 민감도 실험 결과

지표면이 도시로 변함에 따라 지표면 근처 및 대기 하부층의 순환은 영향을 받는다. Figure 3-3-14은 IUB와 IGR의 모델 최 하부층 수렴과 발산 및 수평 바람장 차이를 나타낸다. 음의 값이 수렴을 나타내고 양의 값이 발산을 나타낸다. 도시 내에서 풍상측에 발산이 발생하고 풍하측에 수렴이 발행함을 알 수 있다. 잔디와 도시의 지표면 특성에 따라 대기 하부 경계층의 순환이 차이가 있다. Figure 3-3-15은 상승운동을 나타낸 그림이다. 양의 값은 상승운동이 일어나는 지역이고 음의 값은 하강운동이 일어나는 지역이다.

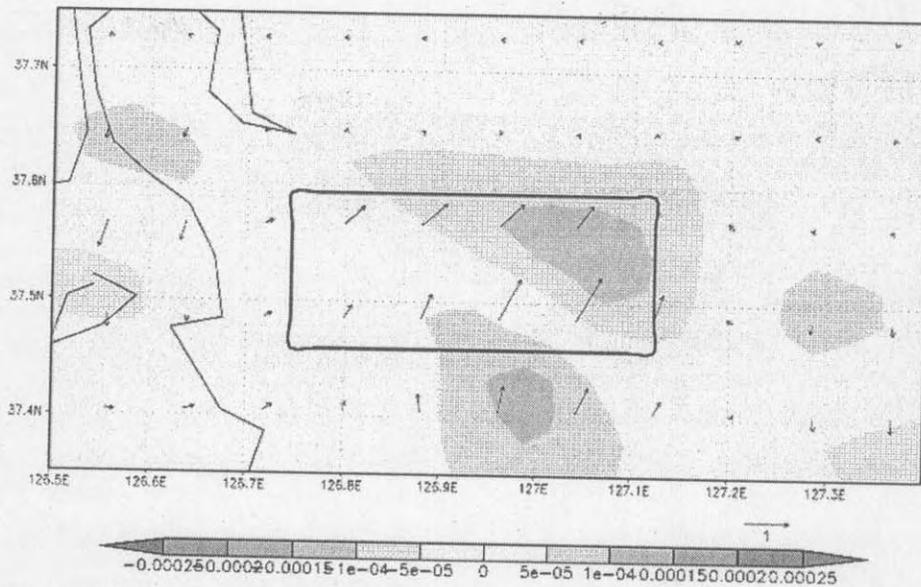


Figure 3-3-14 IUB와 IGR의 모델 최 하부층에서의 수렴과 발산의 차이

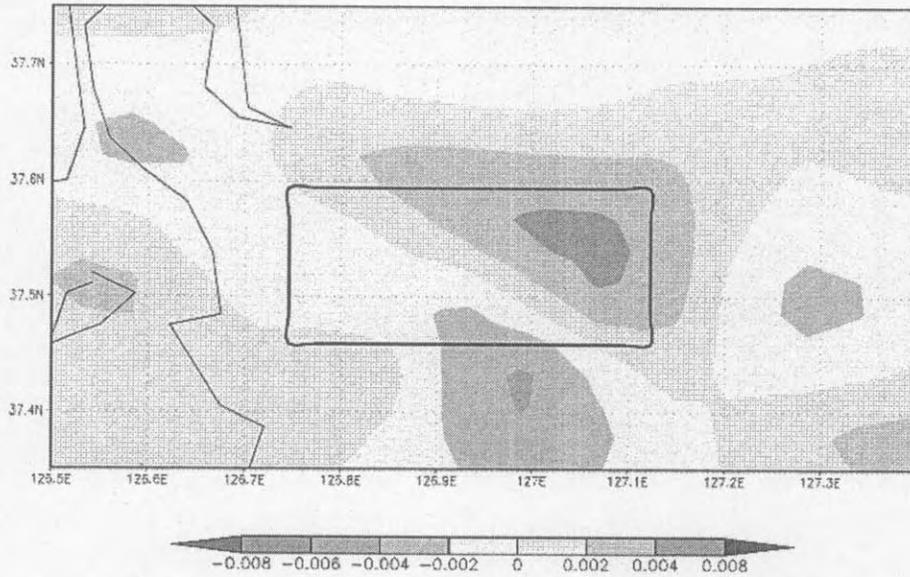


Figure 3-3-15 IUB와 IGR의 모델 최 하부층에서의 상승운동 차이

수렴과 발산의 분포와 상승운동의 분포는 일치한다. 즉, 수렴이 되는 지역에서 상승운동이 발생하고 발산이 있는 지역에서는 하강운동이 발생하는 것을 알 수 있다. 지표면이 잔디에서 도시로 변함에 따라 하부 경계층의 순환이 달라진다. 그리고 도시 내의 풍하측에 상승운동, 풍상측에 하강운동이 발생한다.

(b) 거칠기 길이 민감도 실험

거칠기 길이 민감도 실험 중에서 현상이 가장 뚜렷한 IR200과 IR25의 차이 결과를 나타내었다. Figure 3-3-16는 모델 최 하부층의 IR200과 IR25의 수렴과 발산 및 수평 바람장의 차이를 나타낸다. 풍상측에 발산이 발생하고 풍하측에 수렴이 발생한다.

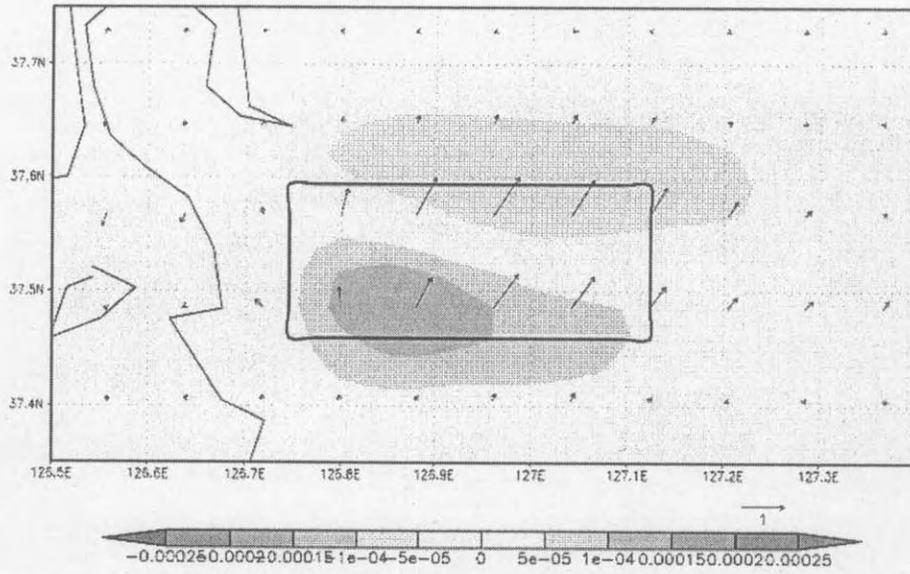


Figure 3-3-16 IR200과 IR25의 모델 최 하부층에서의 수렴과 발산의 차이

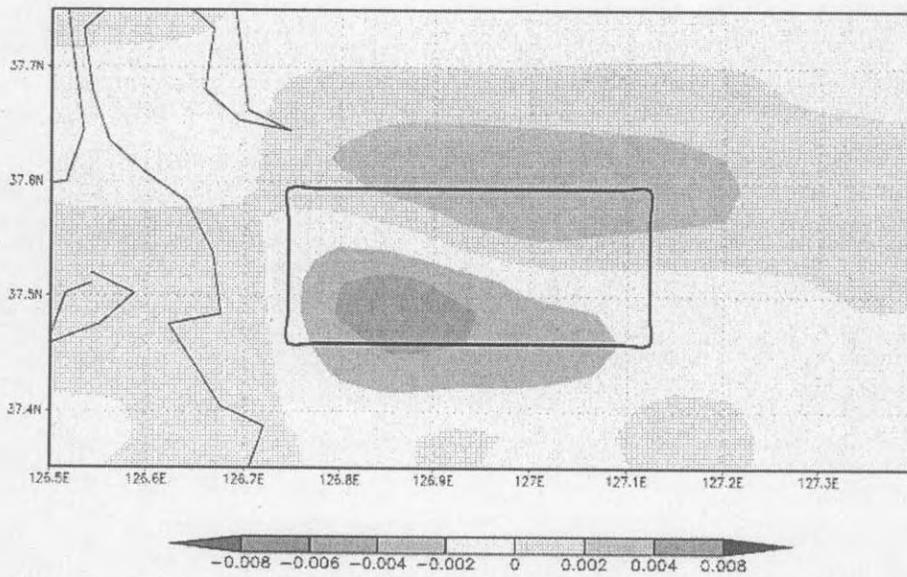


Figure 3-3-17 IR200과 IR25의 모델 최 하부층에서의 상승운동 차이

수평바람장의 크기의 차이가 크다. Figure 3-3-17은 상승운동을 나타낸 그림이다. 수렴과 발산의 분포와 상승운동의 분포는 같다. 즉, 수렴이 되는 지역에서 상승운동이 발생하고 발산이 있는 지역에서는 하강운동이 발생하는 것을 알 수 있다.

(c) 수분함량 민감도 실험

수분함량 민감도 실험 중에서 현상이 뚜렷한 IM5와 IM15의 실험을 예시로 들었다. Figure 3-3-18는 IM5와 IM15의 모델 최하층의 수렴과 발산 및 수평바람장의 차이를 나타낸다. Figure 3-3-19는 모델 최하부층의 IM5와 IM15의 상승운동 차이를 나타내었다.

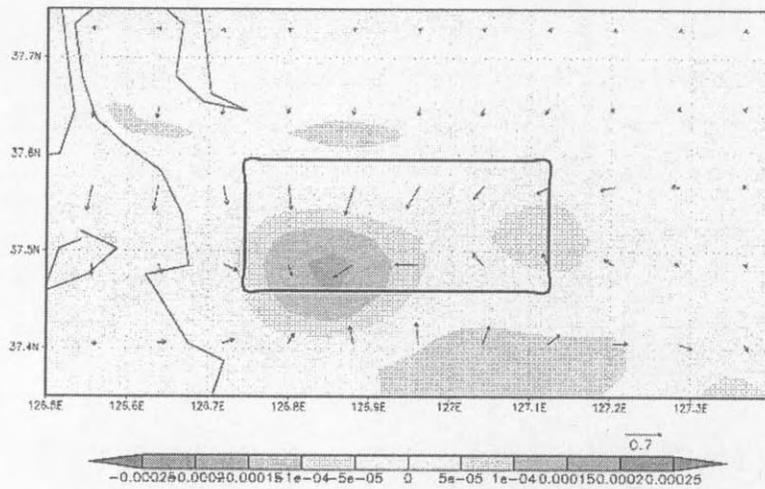


Figure 3-3-18 IM5와 IM15의 모델 최하부층에서의 수렴과발산의 차이

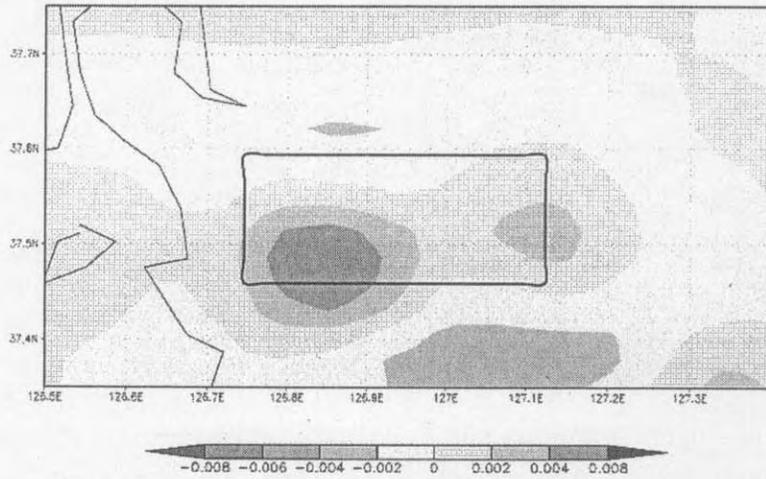


Figure 3-3-19 IM5와 IM15의 모델 최 하부층에서의 상승운동 차이

수렴과 발산의 분포와 상승운동의 분포는 같다. 즉, 수렴이 되는 지역에서 상승운동이 발생하고 발산이 있는 지역에서는 하강운동이 발생한다. 수분함량이 변했을 때에 상승운동이 거칠기길이가 변화했을 때 상승운동 보다 크게 나타난다.

(d) 각 실험의 연직속도 프로파일

Figure 3-3-20은 지표면, 거칠기 길이, 수분함량 민감도 실험의 w 프로파일이다. 도시영역의 가장 강한 연직속도 지점의 프로파일이다. Table 3-3-6은 각각의 민감도 실험에서의 모멘트에 대한 안정도 함수의 비를 나타낸 것이다. 지표면 민감도 실험 경우의 IUB와 IGR 상승운동의 차이는 지표면 근처 약 1.5km지점에서 가장 강하게 나타난다. 최대 지점에서 두 실험의 상승운동 차이는 약 1.2 m/s이다. 모델에서 모멘트에 대한 안정도의 함수의 비는 잔디인 경우보다 도시인 경우에 0.71로 작게 나타난다. 이 이유는 IUB 모델 최하층의 수평 바람장이 IGR 보다 크기 때문이다. 지표면의 특성이 잔디에서 도시로 바뀔 때 따라 하부 경계층의 상승운동은 하부경계층 내에 약 1.2 m/s의 변화를 일으킨다. 거칠기 길이 민감도 실험 경우 IR50과 IR25의 상승운동 차이, IR100과 IR25의 상승운동 차이, IR200과 IR25의 상승운동 차이를 높이에 따른 프로

파일을 나타내었다. 하부 경계층에서 거칠기 길이 값의 크기가 차이가 클수록 최대 상승운동의 값은 점차 크게 나타나고 하부 경계층 내에서 최대 약 1.3m/s까지 차이가 나타난다. 모델에서 모멘트에 대한 안정도의 함수의 비는 거칠기의 길이가 커질수록 작은 값을 가지고 있다. 이는 거칠기 길이가 길어질수록 모델 최하층의 높이의 수평 바람장이 커지기 때문이다. 수분함량 민감도 실험의 경우 IM10과 IM15의 상승운동 차이와 IM5와 IM15의 상승운동 차이를 높이에 따른 프로파일로 나타내었다. 지표면의 수분함량의 차이가 클수록 하부 경계층에서의 상승운동의 차이가 크게 나타난다. 상승운동의 최대값은 약 1.3m/s가 되며 그 높이는 거칠기 길이 민감도 실험의 결과의 높이보다 높게 나타난다. 거칠기 길이 민감도 실험 결과에서는 상승운동이 급속도로 높이에 따라 증가하여 상승속도 최대 지점이 약 1km 나타난다. 이 이유는 열적 난류 교환계수 및 운동량 난류 교환계수의 값이 크기 때문에 상승 운동이 높이에 따라 빠르게 증가한다. 반면 수분함량 민감도 실험에서는 상승운동이 상대적으로 거칠기 길이 상승운동에 비해 완만하게 상승운동이 증가하고 상승운동의 최대 지점을 지나 상승운동이 완만하게 감소한다. 최대 상승운동 지점을 중심으로 서로 대칭이 된다.

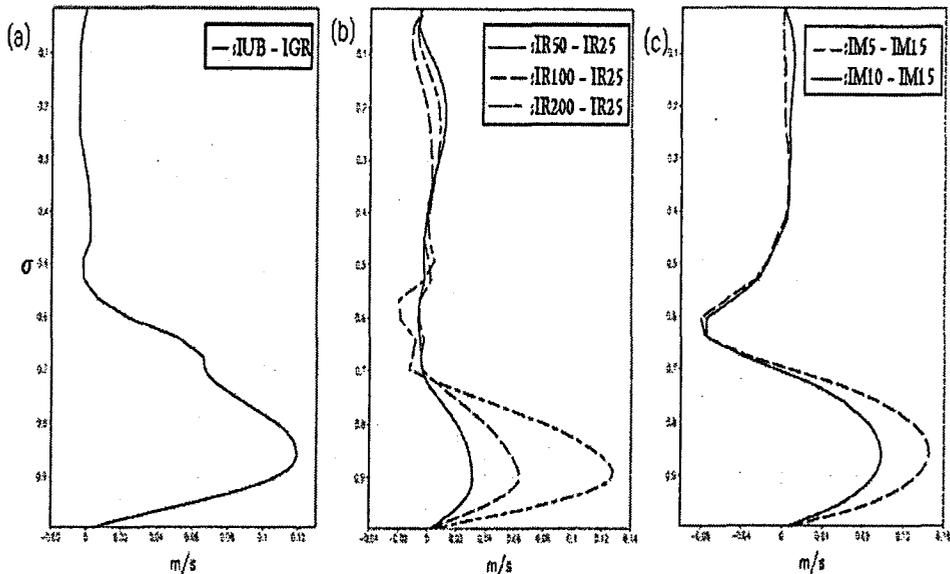


Figure 3-3-20 (a) 지표면 민감도 실험의, (b) 거칠기 길이 민감도 실험, (c) 수분함량 민감도 실험의 상승운동 차이의 프로파일

Table 3-3-6 각각의 민감도 실험에서 하부층의 모멘트에 대한 안정도 함수의 비

	UG	GR	IR25	IR50	IR100	IR200	IM15	IM10	IM5
$\frac{\phi_m(z_m)}{\phi_m(z_a)} = \frac{v_{16m}}{v(z_a)} = \frac{v_{16m}}{v(z_a)}$	0.71	0.83	0.79	0.75	0.67	0.56	0.67	0.73	0.75

## B. 도시기후 모델

### 1) 방법

본 실험은 기존의 MM5V3에 도시로 인해 발생하는 인공열을 추가함으로써 도시 영역의 지표면 근처 및 하부 경계층 대기 순환의 성격이 어떻게 달라지는지 알고자 한다.

#### (가) 인공열

도시 생성에 의해 발생하는 인공열( $Q_a$ )이 존재한다. 인공열은 자동차에 의해 발생하는 열이나 에어컨 등의 전기 제품에서 발생하는 열 등이다. 도시 내에서 그 열은 자연적이 아닌 인위적으로 생성이 된다. 기상 수치 모형에 인공열을 나타내는 항을 추가함으로써 도시 생성에 의한 하부 대기층의 순환을 좀 더 자세히 모의할 수 있다. 거주자 및 근로자 인구밀도에 의해 계산되어지는  $Q_a$ 는 시간에 따른 프로파일이다. 먼저 교통량으로부터 발생하는 인공열  $Q_{a,v}$ 는 시간  $h$ 에 따른 함수이다.  $Q_{a,v}$ 는 아래의 식 (9)와같이 계산되어진다.

$$Q_{a,v}(h) = \rho_{pop}(h) \times F_t(h) \times DVD_c \times EV/3600 \quad (9)$$

여기에서  $\rho_{pop}(m^{-2})$ 는 도시영역에서의 평균 인구 밀도이다. 서울특별시청 자료에 의하면 2004년 서울특별시의 인구 밀도는  $1km^2$ 당 약 1만7000명이다. 즉 평방미터당 0.017명이 된다.  $DVD_c$ 는 한 사람당 매일 평균 차 이동거리를 나타낸다.  $F_t$ 는 하루 총 교통량과 매 시간마다 교통량의 비율을 나타내는 값이고 시간에 따른 프로파일이다.

$EV$ 는  $DVD_c$ 의 값에 따른  $m$ 당, 자동차 한 대당 방출되는 에너지이다.  $EV$ 는

아래의 식 (10)에 의해 구해진다. (Sailor and Lu, 2004)

$$EV = \frac{NHC \cdot \rho_{fuel}}{FE} \quad (10)$$

NHC는 가솔린의 순 연소열 ( $Jkg^{-1}$ )이고,  $\rho_{fuel}$ 는 연료 밀도 ( $kg l^{-1}$ )이다. FE는 평균 열효율 ( $kml^{-1}$ )이다. 만약 평균 열효율이  $8.5\text{ }kml^{-1}$ 이면, 일반적인 열 연소는  $45 \times 10^6\text{ }Jkg^{-1}$ 이다. 그리고 보통 연료 밀도가  $0.75\text{ }kg l^{-1}$ 이다. 그렇다면 EV의 값은  $3975\text{ }Jm^{-1}$ 이다. 그리고 식 (9)에 3600으로 나누어준 이유는  $Q_{a,v}$ 의 단위를 평방미터당 단위 시간당 줄에서 평방미터당 와트로 바꾸기 위해서이다. 아침 출근 시간 6시 부터 퇴근 시간 19시까지  $Q_{a,v}$ 는 계속 높은 값을 가진다. 새벽 3시와 4시경에  $Q_{a,v}$ 가 낮게 나타났다. 다음으로 전기 소비량을 통해 방출된 인공열 은 아래의 식 (11)과 같이 계산 되어 진다.

$$Q_{a,e}(h) = \rho_{pop}(h) \times F_e(h) \times E_c / 3600 \quad (11)$$

$E_c$  ( $J\text{ day}^{-1}$ )는 매 달 서울 지역 사용된 전기 소비량의 평균값을 매일 사용된 전기 소비량으로 으로 바꾼 값이다.  $F_e$ 는 하루 총 전기 소모량과 매 시간 전기 소모량의 비로 시간에 따른 값을 가진다. (Sailor and Lu,2004) 여름철의 값을 사용한 이유는 모델의 초기자료가 여름이기 때문이다. 새벽 4시경에 가장 낮은 비율을 가지고 오후 4시경에 가장 높은 비율을 가진다. 사용된 수치는 한국 전력 공사의 자료를 분석 하였다. 식 (11)에 3600으로 나누어준 이유는 단위를 평방미터당 단위 시간당 줄에서 평방미터당 와트로 바꾸기 위해서이다. 총 매 시간 인공열은  $Q_a$ 는  $Q_{a,v}$ 와 의 합으로 계산되어진다.

$$Q_a = Q_{a,v} + Q_{a,e} \quad (12)$$

서울시의 인공열은 새벽 4시경에 가장 낮은 값을 가지고 오후 2시부터 오후 6시까지 높은 인공열을 가진다.

인공열은 도시 캐노피의 공기에 직접적으로 방출되어 대기 하부 경계층에 영향을 미친다. 따라서 인공열 소스를 MM5V3 중규모 모델의 MRF 경계층 스킴에서 최하층 온도 지배식에 첨가하였다. 아래의 식 (13)으로 표현된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho_a c_p} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + V \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{C_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_T + \frac{1}{\rho_a c_p} \frac{\partial Q_a}{\partial z} \quad (13)$$

V는 수평 바람 벡터이고 w (m s<sup>-1</sup>)는 상승속도, p'(Pa)는 섭동 기압이고 아래첨자가 0인 것은 배경장을 말 하는 것이다. Q (J kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)은 비단열 과정으로부터 열비율이다. D<sub>T</sub>는 수평 수직 확산항이다. 이 식에서 첫 번째 항은 수평과 수직 이류항이고, 반면 두 번째 항의 괄호안은 단열 가열을 표현한다.

## 2) 실험 설계 및 실험 결과

도시화에 따른 하부 경계층 내의 순환의 이해를 위하여 가상 실험을 실시하였다. 지표면의 종류는 Fig. 3-3-13 (b)을 사용하였다. 새로 구축된 도시 기후 모델을 이용한 실험을 IAH라 한다. 인공열이 대기 하부 경계층의 순환에 어떻게 영향을 미치는지 IGR, IUB 실험들과 비교하고자 한다.

Figure 3-3-25는 IGR, IUB, IAH의 모델 최하층의 온도와 IAH와 IGR의 온도의 차이와 IAH와 IUB의 온도 차이이다. 인공열을 포함한 실험인 IAH의 모델 최하층의 온도는 도시영역에서 최대 39℃까지 올라갔으며 도시영역에 열섬의 형태가 강하게 나타났다. IGR은 도시영역에 열 중심이 생기지 않았고, IUB는 도시영역에 열섬의 형태가 IAH보다 약하게 생겼다. IAH와 IGR의 온도 차이는 최대 약 1.6℃ 나고, IAH와 IUB의 온도 차이는 최대 약 1.2℃가 난다.

## C) 당해연도 연구에서 도출된 결론

1. 중규모의 스케일로 본 도시기상은, 도시 생성에 따라 도시의 하부 경계층에 상승기류가 발생하고, 도시 내의 지표면 근처 온도 및 하부 경계층내의 하부영역의 온도가 도시 생성에 따라 증가한다.

2. 도시 내의 거칠기길이가 길어질수록, 즉 건물이 밀집되고, 높이가 높아질수록, 수평 바람장의 풍향이 기울어지는 정도가 커진다. 그리고 하부 경계층의 상승기류가 더 강하게 발생된다. 그리고 거칠기길이가 길어질수록 하부 경계층의 하부 영역의 온도가 높게 상승한다.

3. 도시 내의 수분함량이 작아질수록, 즉 지표면이 아스팔트나 시멘트로 덮여지는 경우, 하부 경계층의 상승기류가 더 강하게 발생된다. 그리고 지표면의 수분 함량이 작아질수록 하부 경계층 영역의 온도가 증가하고 특히 하부 경계층의 하부 영역의 온도가 크게 증가한다.

4. 도시 생성에 따른 인공열 발생을 고려 한 실험 결과 도시의 대기 경계층의 하부 영역에 열섬현상이 강하게 모의가 되었다. 또한 하부 경계층의 하부 영역의 온도가 크게 상승 되었고 하부 경계층에 상승 기류가 더 강하게 모의 되었다.

## 제 4 장    목표달성도 및 관련분야에의 기여도

구분	연도	세부연구목표	연구개발목표의 달성도 및 기술발전 기여도
1차 연도	2004	Landsat 위성영상을 이용한 열섬현상파악	Landsat 활용 surface radiant temperature 추출 및 녹지 변화와의 관계 파악
		AWS이용 국지기상관측	열섬분포도와 기상 변동모델을 결합하여 열분포 및 이동을 파악
		ENVI를 활용한 DEM·식생자 료, 위성탐측 자료 복원을 통 한 식생 및 토지 피복 특성 자 료 구성  프로토타입 미세규모 도시기 후모델인 MUKLIMO_3 소스 코드 분석	최종 한반도 식생 및 토지 피복 특성 DB 구축 완료  한국도시기상모델 연구의 가정, 관련연구 조사
2차 연도	2005	Aster 위성영상을 이용한 열섬 현상파악	토지피복상태 변화로 인한 대상지 표면온도의 상대적 변화 비교와 도시화된 지역의 열섬 분포 패턴 및 강도 특성을 파악
		도시열분포도 작성 대기오염확산모델 시험	대상지역의 미기후적 특성 측정 대기오염물질의 확산
		건물을 고려한 미세 도시기후 모델의 와도 방정식 정밀 분 석	미세 도시 기후 모델의 방정식을 활용하여 프로젝트 수행영역(양재천 인근 도심지역) 건물을 고려한 바람장 산출 및 분석
3차 연도	2006	도시림의 cooling effect파악	도시림의 cooling effect파악
		도시기후지도 작성	Klimatop 분류 기준 작성, 이를 바탕으로 도시기후지도 작성
		2차년도 연구를 바탕으로 기 상 수치 모델과 미세규모 도 시기후 모델을 최적화된 수준 으로 조합하여, 정밀 미세규 모 도시 기후 모델을 완성	도시기상모델 개발 도시화에 따른 대기 운동 및 열섬 효과에 관한 연구 결과 제시

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### (1) 친환경적인 생태도시 계획, 건설

도시계획, 또는 도시재개발시 도시내 열섬현상저감과 신선한 공기 유입으로 도시계획시 필요한 경관생태학적 지침을 활용할 수 있다. 현재 한국은 도시의 건물이 대형화, 고층화함에 따라 열섬현상도 이에 비례하여 증가하고 있는 실정이므로 본 연구에서 얻은 결과를 활용하여 도시열섬현상을 감소시키는 도시산림녹지계획에 활용할 수 있으리라고 판단되며 연구진은 이에 대한 추가연구를 계속하고 있다.

### (2) 사전환경성검토에 활용

도시열섬현상을 미기상검토항목으로 추가하여 개발에 따른 도시내 기온상승과 생태적 위험분석을 함으로써 도시계획시 사전환경성 검토의 논리적 근거 제공이 가능하다.

### (3) 환경영향평가에 적용

환경영향평가지 미기상 및 대기질 적용항목에 도시열섬현상을 추가함으로써 도시내 오염물질축적 방지와 정확한 대기환경영향평가에 기여할 수 있다.

### (4) 도시녹지기본계획에 활용

녹지기본계획 수립시 도시림의 정확한 기능이 도면에 명확하게 표시되지 않으나 녹지의 친환경공익기능을 도시림별로 파악이 가능하므로 도시림의 특성 평가가 가능하게 됨

### (5) 환경기본계획과 자연환경보전에 기여

도시림의 공익기능 파악은 도시환경기본정책에 반영됨으로써 도시자연환경보전에 기여할 수 있다.

\* 추가연구의 필요성

본 연구를 수행하면서 처음에 기대하지 않았던 도시미기후에 대한 자료 및 정보를 수집하게 되었으며 이는 다음과 같다.

### (1) 고층빌딩에 의한 빌딩바람 및 열섬현상 심화

연구대상지는 국내의 최고층빌딩 25개중 9개가 밀집된 곳이며 이들 고층빌딩 주변에서는 자주 강풍이 발생하고 있다. 고층빌딩 주변에서 이와 같은 강풍이 발생하는 이유는 상공에서 부는 바람이 고층건물에 부딪쳐 난류를 형성해 순간돌풍을 일으키는 현상으로 미국의 영화배우 마릴린먼로의 치마를 들춘 것에 비유해 일명 먼로풍으로도 불린다.

도시에서는 건축물때문에 바람이 급속히 약해지지만 높이 올라갈수록 농촌지역과 같은 강한 상공풍이 분다 - 고층아파트가 안전상 창문을 15도 이상 열지 못하는 것도 이러한 상공풍의 풍압을 무시못한다 -. 이 바람은 상공풍속보다는 약하지만 고층건물에 의한 난류를 형성해 건물이 없을 때의 지상 바람보다는 훨씬 속도가 빠른 돌풍이 자주 발생하곤 한다. 이로 인해 고층빌딩 주변에는 회오리바람과 함께 먼지와 소음이 자주 발생해 주변에 사는 사람들이 호흡곤란과 불쾌감, 보행곤란 등을 겪고 있는 것을 확인하였으며 본 연구진이 답사시에도 자주 경험하였다. 본 연구대상지에서 빌딩바람의 풍속은 심할 때는 초속 10m를 넘어 보행에 불편을 주고 인근 상가 진열대에 전시한 물건들이 떨어지고 길가에 세워둔 오토바이가 넘어지기도 한 것을 건물 경비원들에 의해 확인하였으며 이러한 빌딩바람은 1년내 부는 게 아니라 그 지역에 강한 바람이 불때 다른 곳보다 심한 돌풍이 부는 특성이 있는 것을 발견하였다. 연구대상지에서는 초속 15m를 돌파하는 순간돌풍이 발생한 기록이 있다. 서울시가 계속 고층건물을 허가하고 있어 이와 같은 빌딩바람은 앞으로 자주 강도가 심하게 발생하리라 본다.

미국의 Prudential 보험회사가 회사 본부 건물을 높이 지었는데 준공 후 이 회사 근처를 지나가던 노인들이 병원 응급실에 실려 오는 일이 발생했다. 조사결과 빌딩이 들어 선후 빌딩주변에 순간돌풍이 발생해 젊은이들은 비교적 빨리 피하는데 기동성이 떨어지는 노인들이 돌풍에 낙상하는 사고가 발생해 미국정부는 빌딩바람에 대한 규제를 하기 시작했다. 이러한 바람을 빌딩바람 또는 먼로풍이라고 한다. 영국에서는 1972년 고층건물 코너에서 노부인이 순간돌풍으로 인해 뇌진탕으로 사망하는 사건이 발생하기도 하였다. 외국에서는 빌딩바람에 대해 환경영향평가지 이를 적극 반영하도록 하고 있으나 국내에서는 요식

행위에 그치고 있어 이에 대한 보완이 필요하다고 판단된다. 국내에서는 본 연구대상지 외에 목동, 잠실역 주변 등이 빌딩바람이 자주 부는 곳으로 조사되었다.

본 연구를 수행하면서 고층빌딩에 의한 주변 환경변화에 대해 관해 관심을 가지게 되었으며 그 후 다른 연구과제로 계속되어 현재 수행 중이다

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구를 수행하면서 도시기후를 활용한 도시계획으로 잘 알려져 있는 독일 Stuttgart시를 방문하여 담당 박사와 함께 쉬투트가르트시가 조성해 놓은 도시 열섬 저감 시설과 도시공원녹지를 둘러 볼 수 있는 좋은 기회를 가졌다. 도시 교외의 산림에서 불어는 차고 시원한 공기의 바람길에 가능한 건축물을 조성하지 않고 바람이 통할 수 있는 공원을 조성한 것은 (Figure 6-1) 도시계획초기에 고려할 중요한 사항이라고 판단된다. 도시열섬현상을 저감하기 위해 철로에 야생초화류를 식재한 것이나 (Figure 6-2) 건물옥상녹화에 한국처럼 많은 비용을 들여 교목이나, 연못, 퍼골라 등을 설치하지 않고 경량토를 뿌린 후 야생초화류가 자연스럽게 식재되 저비용, 저관리형 옥상녹화를 시행하면서 본래의 도시열섬현상 저감효과를 유도하는 것은 (Figure 6-3) 한국에서도 현재의 옥상녹화방식을 재고해야 될 것으로 파악되었다.



Figure 6-1 Stuttgart시의 바람길에 위치한 도시공원



Figure 6-2 도시열섬현상을 저감시키기 위한 도시철로의 야생초화류 피복

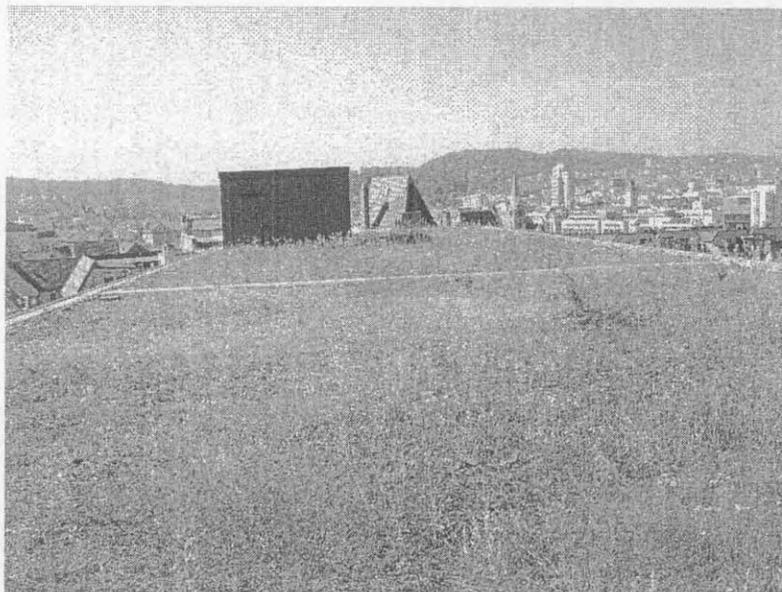


Figure 6-3 건물 옥상녹화

## 제 7 장    참고문헌

경기도 시흥환경기술개발센터, 2003, 시화공단지역 환경개선을 위한 산업단지 시범 녹화사업 마스터 플랜, 워크샵, 2003. 2. 28.

김수봉, 2002, 도시열섬현상의 원인, 도시문제, 37(405):26-46.

김수봉, 김기호, 조진희, 2001, 도시열섬현상의 원인과 대책, 환경과학논집, 6(1):63-89.

김수봉, 김해동, 2002, 도시의 수목이 기온의 조절에 미치는 영향, 한국조경학회지, 30(3):25-34.

김운수, 2002, 도시열섬현상의 완화방안, 도시문제, 37(405):58-73.

도후조, 이정민, 나정화, 2007, 도시 지표면 온도분포 특성 및 열섬완화방안, 한국환경과학회지, 16(5):611-622.

문운섭, 이혜란, 정주희, 최병철, 2006, 서울 지역에서의 열대야 현상 분석 및 도시열섬의 수치모의, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, pp.267-268.

민경덕, 장금희, 1993, 한국 주요 도시의 도시화에 의한 기온 변화, 경북대학교 환경과학연구소논문집, 7(1):119-138.

박인환, 장갑수, 김종용, 박종화, 서동조, 2000, 대도시에 있어 냉섬의 유형별 온도완화효과 -대구광역시의 사례 연구-, 한국조경학회지, 28(1):11-18.

손정목, 1998, 서울도시계획이야기, 강남개발계획의 전개(I), -제1·제2 영동 지구 구획정리사업-, 월간국토, Vol. 205:87-99.

송영배, 2002, 도시기후지도의 작성 -상계4동을 중심으로-, 한국조경학회지, 29(6):27-36.

- 안영희, 2001, 녹지환경학, 태림문화사, 서울
- 안지숙, 김해동, 2006, 대구지역의 기상조건에 따른 도시열섬강도의 계절별 변화 특성, 한국환경과학회지, 15(6):527-532.
- 윤용한, 김은일, 송태갑, 1998, 공원녹지가 기온저하에 미치는 영향 -일본 동경부 석신정 공원을 중심으로-, 한국조경학회지, 26(2):259-268.
- 이은엽, 문석기, 심상렬, 1996, 도시녹지의 기온 및 지온 완화효과에 관한 연구, 한국조경학회지, 24(1):65-78.
- 이종범, 김용국, 김태우, 1992, 춘천지역의 도시열섬 관측과 대기질에 미치는 영향 분석, 한국대기환경학회 학술대회논문집, Vol. 2:45-47.
- 장영기, 김정욱, 1991, 서울지역의 도시열섬현상과 대기오염도의 관계에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(1):49-53.
- 조경두, 2002, 도시열섬현상의 실태와 부작용, 도시문제, 37(405):12-25.
- 조용현, 신수영, 2002, 도시림의 여름 대기온도 저감효과 -서울시를 대상으로-, 한국조경학회지, 30(4):28-36.
- 한국수자원공사, 1998, 시화지구 대기오염 저감방안 수립(완충녹지대) 보고서
- 홍재주, 2005, 도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구, 한양대학교 도시대학원 석사학위논문
- 차재규, 2006, 도시열섬현상 완화를 위한 녹지 네트워크 구축 - 대구광역시 중구, 남구를 대상으로 -, 계명대학교대학원 석사학위논문
- 채효석, 김광은, 김성준, 김영섭, 이규성, 조규성, 조명희 역, 2002, 환경원격탐사, 서울, 시그마프레스, p 264. John R. Jensen, 2000, *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, Prentice Hall, Pearson Education.

Alonso, M. S., J. L. Labajo and M. R. Fidalgo, 2003, Characteristics of the Urban Heat Island in the City of Salamanca, Spain, *Atmosfera*, 16(3):137-148.

Baik, J. J., J. J. Kim, and H. Fernando, 2004: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *Journal of Applied Meteorology*, 42(11):1636-1648.

Bruintjes, R. T., T. L. Clark, and W. D. Hall, 1994, Interaction between topographic airflow and cloud/precipitation development during the passage of a winter storm in Arizona. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(1): 48-67.

Chander, G. and B. Markham, 2003, Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11):2674-2677.

Civerolo, K., G. Sistla, S. T. Rao, and D. J. Nowak, 2000, The effects of land use in meteorological modeling: implications for assessment of future air quality scenarios, *Atmospheric Environment*, 34(10):1615-1621.

Clark, T. L., W. D. Hall, and J. L. Coen, 1996, Source Code Documentation for the Clark-Hall Cloud-scale Model, Code Version G3CH01, NCAR Technical Note.

DCAUL (Design Center for American Urban Landscape), 2003, Urban Green Space: Effects on Water and Climate, 1 Rapson Hall, Minneapolis, MN.

DTLR (Department for Transport, Local Government and the Regions), 2002, Green Space, Better Places - Final Report of the Urban Green Space Taskforce -, Eland House, Bressenden Place, London.

Eliasson, I., 1996, Urban Nocturnal Temperature, Street Geometry and Land Use, *Atmospheric Environment*, 30(3):379-392.

Gallo, K. P., J. D., Tarpley, A. L., McNab and T. R., Karl, 1995, Assessment of Urban Heat Islands: A Satellite Perspective, *Atmospheric Research*, 37(1):37-43.

Han, Y-H., B-H. Kim, D-I. Lee, 1993, A Study on the Urban Heat Island in Pusan, *Journal of Korea Meteorological Society*, 29(3):205-216.

Ichinose, T., S. Kazuhiro and H. Keisuke, 1999, Impact of Anthropogenic Heat on Urban Climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 33(24):3897-3909.

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. 1972 (Suwon), 1975 (Anyang) and 1982 (Doojeon). Geological Atlas of Korea. Daejeon city.

Kwon, Y-A. and H-Y. Lee, 2001, Spatial Distribution of Temperature in and around Urban Parks - A Case Study of around Changgyeong Palace, Changdeok Palace and Jongmyo in Seoul *Journal of the Korean Geographical Society*, 36(2):126-140.

Levinska J., 1987, The Expansion of a Heat Island Resulting from the Development of a City, *Landscape and Urban Planning*, 14(1):219-224.

Lillesand, T. and R. Kiefer. 1999, Remote Sensing and Image Interpretation(4th Edition), New York, John Wiley and Sons Inc., p.330; pp.373-451.

Lim, G-H. and H-S. Jung, 1992, Interannual Variation of the Annual Precipitations at Seoul, 1771-1990, *Journal of Korean Meteorological Society*, 28(2):125-132

Lim, G-H, 1997, The linear relationship between monthly precipitation amounts of Korea and time variation of the geopotential heights in east

Asia and the Pacific during the summer seasons., *Journal of Korean Meteorological Society*, 33(1); 63-74.

Lim, G-H. and H-J. Kwon, 1998: Diurnal variation of Precipiations over south Korea and its implication., *Journal of Korean Meteorological Society*, 34(2); 222-237

Luley, C.J. and J. Bond, 2002, A plan to integrate management of urban trees into air quality planning. 6050 Hicks Road, Naples, NY 14512: Davey Resource Group. p.61.

McPherson, E.G. and D.J. Nowak. 1993. Value of urban greenspace for air quality improvement: Lincoln Park, Chicago. *Arborist News*. 2(6):30-32.

Mikami, T., 2005, Heat Island, *Japan Geoscience Letters*, 1(2): 1-3.

Shin, D-H. and K-S. Lee, 2005, Use of Remote Sensing and Geographical Information Systems to Estimate Green Space Surface-Temperature Change as a Result of Urban Expansion, *Landscape and Ecological Engineering*, 1(2):169-176.

Sievers, U. ,2003, Description of the MUKLIMO\_3, Frankfurt

Taha H., 1997, Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic Heat, *Energy and Buildings*, 25(2):99-103.

Yokohari. M., *et al.*, 2000, Beyond greenbelts and zoning: A New Planning Concept for the Environment of Asian Mega-Cities, *Landscape Urban Planning*, 47(3):159-171.