

대구 도심에 위치한 대규모 녹지공간의 냉섬 강도 : 계절변화와 기상조건에의 관련성

박명희·김해동

계명대학교 환경대학

(2009년 9월 17일 접수; 2009년 10월 8일 수정; 2009년 11월 16일 채택)

Cool Island Intensity in a Large Urban Green in Downtown Daegu: Seasonal Variation and Relationship to Atmospheric Condition

Myong-Hee Park and Hae-Dong Kim

College of Environment, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Manuscript received 17 September, 2009; revised 8 October, 2009; accepted 16 November, 2009)

Abstract

Cool island intensity urban green space was investigated based in Dalsung Park, that is one of the largest parks in Daegu. Cool island intensity(CII), which is defined as the temperature difference between the green space and its surrounding built-up areas, shows time variations. A through-year measurement(2008-2009) of ground level air temperature revealed seasonal variation and relationship to the atmospheric condition of CII. The temperature variation in the park and the reference downtown Daegu was as same order as CII. The noontime CII is larger in summer than that in winter due to the leaf fall of the park trees. On the other hand, seasonal variation of nighttime CII is not so clear. The nighttime CII was larger under the stable atmosphere.

Key Words : Cool island intensity, Green space, Remote sensing, Stable atmosphere

1. 서론

오늘날 급속한 도시화로 인하여 도시환경이 악화되어 감에 따라 이를 완화시켜줄 수 있는 역할을 할 수 있는 대상으로 도시의 녹지공간이 높은 관심을 모으고 있다. 특히 도시의 녹지공간이 가져오는 여름철 도시열섬 억제효과가 주목받고 있다¹⁻³. Kanda 등은 일정 면적내의 녹지 피복율과 기온 간에는 음의 상관관계가 있다고 지적한 바 있는데, 이것을 녹지의 기후완

화효과 또는 열섬완화효과라고 한다⁴. 이러한 녹지의 기후완화효과에 관해서는 국내외적으로 야외관측⁵⁻⁷과 수치실험⁸⁻¹⁰을 이용하여 이를 검토하는 연구가 활발하게 수행되어 왔으며, 그 결과는 환경 친화적 도시계획에 기초자료로 이용되고 있다^{11,12}. 도시의 녹지공간이 열섬을 억제하는 것은, 공원 녹지가 주변 시가지보다 기온이 낮게 형성되기 때문인데 이를 냉섬 현상이라고 부른다¹³. 이들 결과에 의하면, 녹지공간과 주변 시가지 간의 기온차이(냉섬 강도)는 대체로 1~3℃ 내외인데, 바람이 약한 야간에 크게 나타나는 경향을 보인다. 또 일반풍이 약한 여름철 야간에는 냉기가 녹지공간에서 주변 시가지로 유출되어 가는

Corresponding Author : Hae-Dong Kim, College of Environment,
Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-053-580-5930
E-mail: khd@kmu.ac.kr

현상이 나타나기도 한다. 기상조건에 따른 냉섬 강도의 변화는 낮보다 야간에 크게 나타난다는 보고도 있다¹⁴⁾. 이러한 현상은 냉섬 현상이 식생종과 규모 등과 같은 녹지의 형태 및 기상조건에 강하게 영향을 받는다는 사실을 의미한다.

그런데 도시의 냉섬에 관한 관측연구는 국내는 물론이고 해외에서도 대부분이 여름철만을 대상으로 하고 있고, 연중 변화를 파악하고자 한 연구는 대단히 적다¹³⁾. 최근 도시 내에 녹지와 수변 공간의 면적을 확대하여 여름철 도시의 열 환경을 개선하는 방법이 활발하게 논의되고 있다^{2,14,15)}. 이 때, 도시의 녹지 공간 확대가 도시의 열 환경 개선에 미치는 효과를 평가하려면 여름만이 아니라 다른 계절에 대해서도 녹지가 도시 열 환경에 미치는 영향을 파악할 필요가 대두된다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 대구 도심 부근에 위치하면서 규모가 큰 달성공원에 기온과 습도를 관측할 수 있는 온습도 로그 장치를 설치하여 1년간 자료를 수집하였다. 그리고 냉섬 강도 평가에 사용한 시가지 기온자료로는 달성공원에 인접한 도심에서 장기간 관측해 오고 있는 자동기상관측시스템의 기상자료를 이용하였다. 이 자료를 이용하여, 냉섬 강도의 계절 변화와 기상조건에 따른 냉섬 강도의 변화를 조사하였다. 본 연구결과는 도시의 녹지공간 조성이 도시의 연중 열 환경에 미치는 효과를 파악하는 데에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 대기의 연직 관측과 대기복사 관측이 동시에 이루어진다면 도시의 녹지공간이 갖는 열적인 특성과 기류변화에 미치는 영향까지도 정량적으로 파악할 수 있을 것이다. 아울러 공원에서 주변 시가지를 따라서 기상요소를 관측하게 되면 공원에서 생성된 냉기류로 인한 도시열섬 완화효과도 정량적으로 파악할 수 있을 것이다. 이러한 연구결과는 환경 친화적 도시개발을 위해 필요한 녹지공간의 계획에 중요한 기초자료로서의 역할을 할 수 있을 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1. 기온의 관측

도심 녹지공간의 냉섬 현상을 관측하기 위하여 대구의 도심에 위치해 있는 달성공원을 선택하였다. 달

성공원은 전체 면적 126,576 m² 중에서 숲의 면적이 46,338 m²로 약 36%를 차지하고 나머지는 중앙의 잔디와 공원관리시설 및 산책로로 구성되어 있다(Fig. 1). 그리고 공원의 주변은 주거와 상업시설로 둘러싸여 있어서 대규모 공원이 갖는 냉섬 현상을 관측하기에 양호한 입지조건을 갖추고 있다. 온습도로그는 공원 내의 A지점에 설치하였다. 관측 장치를 지상에서 약 1.5 m 높이의 나무줄기에 고정시켰다. 관측 장치를 설치할 나무를 선택할 때에는 가급적 공원 내의 평균적 온도를 대표하도록 하기 위하여 중앙의 넓은 잔디광장에 가깝게 위치하고 있는 것을 선택하였다. 달성공원에 식재되어 있는 수종은 대부분이 활엽수이어서 여름과 겨울에 증발산량과 그늘효과가 뚜렷하게 대비된다. 관측기간은 2008년 6월 13일부터 2009년 7월 19일까지로 약 1년이다. 다만, 2008년 12월과 2009년 5월의 관측 자료는 자료 관리의 소홀로 자료가 소실되어 분석대상에서 제외되었다. 관측 간격은 10분이었고, 1개월 간격으로 현장을 방문하여 자료를 수거하는 방식으로 수행되었다.

냉섬 강도는 주변 시가지기온과 공원 내의 온도 간의 차이로 계산하였다. 주변 시가지의 기온은 다음과 같은 방법으로 구하였다. 일반적으로 시가지의 지상기온은 공간 편차가 대단히 크다. 그래서 냉섬 강도는 주변 시가지 기온의 측정지점 선정에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다^{16,17)}. 이러한 문제를 회피하기 위한 방법으로 가능한 한 여러 지점의 시가지에서 관측된 값을 평균하여 사용하는 것이 바람직하다고 한다^{13,17)}.



Fig. 1. Photograph of Dalseong Park. A indicates the observation point.

냉섬 강도변화의 메커니즘을 최대 가능 냉각량 파라메타를 이용하여 조사하였다. 최대 가능 냉각량의 추정은 Kondo를 따라서 계산하였다¹⁸⁾. 최대 가능 냉각량(cooling potential(°C))은 복사냉각으로 하루 밤 동안에 나타날 수 있는 기온 저하의 최대치를 이론적으로 나타낸 것이다. 이것은 운량 또는 하향 장파복사보다도 지표면의 복사냉각 강도를 더 적절하게 나타내는 것으로 알려져 있어 관련 연구에서 널리 이용되고 있다¹³⁾.

최대 가능 냉각량 δT_{\max} 는, 저녁 시간대의 기온 T_0 와 태양에너지의 유입이 없는 야간 대의 시간이 무한히 계속되어 지표면이 대기와 복사평형에 도달하였을 시의 지표면 온도 T_{lim} 와의 차이로 정의된다.

$$\delta T_{\max} = T_0 - T_{\text{lim}} \quad (1)$$

T_{lim} 는 하향 장파복사량 L 로부터 얻어진다.

$$T_{\text{lim}} = (L/\sigma)^{1/4} \quad (2)$$

여기서, σ 는 스테판-볼츠만 상수로 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 이다. 하향 장파복사량 L 은 Kondo의 식¹⁸⁾을 이용하여, 야간 평균의 지상 기온, 지상 비습, 운량(21시부터 다음 날 03시까지의 대구기상대 관측 자료)을 이용하여 매일에 대해서 계산하였다.

$$\frac{L}{\sigma T_a^4} = 1 - (0.49 - 0.066 \times e^{0.5})(1 - n \times C \times h) \quad (3)$$

여기서, C 와 h 는 식(3)과 (4)로 주어진다.

$$C = 0.75 - 0.005 \times e \quad (4)$$

$$h = [(n_1 + 0.85 \times n_2 + 0.5 \times n_3)/n] + 0.1 \times N_r/N \quad (5)$$

$$e_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_s}{T_s + 273 - 35.86}\right) \quad (6)$$

$$e = e_s \cdot \text{RH} \div 100 \quad (7)$$

여기서, e_s 는 포화수증기압이고, T_c 는 기온에 대한 섭씨온도(°C)이다. 그리고 실제로 공기가 포함한 수증기가 나타내는 수증기압은 위에서 계산한 포화수증기압에 자동기상관측장치에서 측정된 상대습도를 곱하여 구할 수 있다.

여기서 e 는 일평균의 수증기압(hPa), N_r/N 은 하루 중에 강수가 지속된 시간, n , n_1 , n_2 그리고 n_3 은 각각

일평균의 전 운량, 하층 운량, 중층 운량 그리고 상층 운량을 가리킨다. 본 연구에서는 다음과 같이 Ishi와 Kondo의 근사식¹⁹⁾을 적용하였다.

$$n_2 = n_3 = (n - n_1)/2 \quad (8)$$

$$N_r/N = 0, \text{ for } n_1 < 1 \quad (9)$$

$$= 0.5, \text{ for } n_1 = 1$$

T_0 는 일몰 시각의 기온(시가지와 공원 공간 내 기온의 평균치)을 이용하였다.

3. 결 과

3.1. 기상조건의 계절변화

냉섬 강도에 영향을 미치는 기상조건(최대 가능 냉각량, 풍속, 운량)의 계절변화를 조사하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 최대 가능 냉각량이 큰 날은 겨울에 많았다. 값의 크기는 여름철 맑은 날에는 평균 1.3°C 이상에 이르렀고, 겨울에는 운량이 3이하로 낮은 날에는 평균 30.2°C 정도까지 크게 평가되었는데, 이는 Sugawara 등¹³⁾이 일본의 신주쿠 공원을 대상으로 조사한 값과 거의 일치하였다. 또, 최대 가능 냉각량과 운량의 대응 관계는, Fig. 3을 보면 한후기(leafless)에는 최대 가능 냉각량이 20°C 이상으로 큰 값을 나타낼 때에는 적어도 운량이 6이하로 맑은 날이었다는 것을 알 수 있다.

풍속은 야간보다 주간에 컸고, 계절별로는 가을에 낮고 겨울에 큰 경향을 보였다. 운량은 겨울에 작고 여름철에 큰 경향을 보였다. 일반적으로 대기안정도를 평가하는 데에 널리 이용되는 bulk-Richardson 수는 지상과 상층 간의 온도 차이와 풍속이 작을수록 큰 값을 가져 보다 안정한 상태를 가리키게 된다. 따라서 운량이 적어 야간 지표면 복사냉각이 크고, 풍속이 약한 겨울철이 이와 상반된 기상조건을 갖는 여름보다 대기가 안정한 조건에 있을 것이라는 점을 추정할 수 있다.

3.2. 냉섬 강도의 계절변화

Fig. 4에 냉섬 강도의 계절변화를 나타내었다. (a)는 야간의 평균치, (b)는 주간의 평균치를 나타내었는데, 바람이 강하고(평균 풍속 3 m/s 이상) 흐린 날(운량 6 이상)과 바람이 약하면서(평균 풍속 3 m/s 이하) 맑은

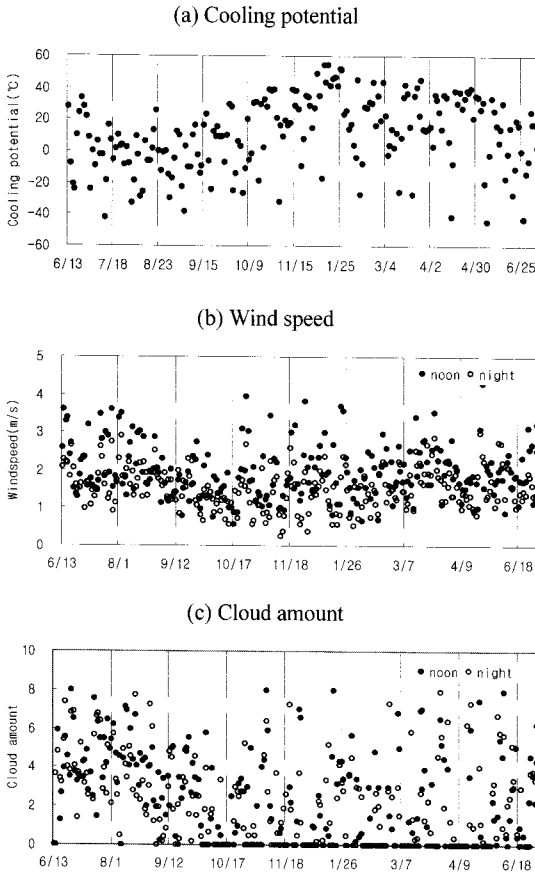


Fig. 3. Annual variation of (a) Cooling potential, (b) Wind speed and (c) Cloud amount. (a) Nighttime(21~01 h) average, (b) Noontime(11~15 h) average.

날(운량 6 이하)로 나누어 표시하였다. 달성공원의 냉섬 강도는 여름철 낮에는 약 0.6°C, 야간에는 0~2°C로 나타났다. 겨울철에는 낮에 -3°C~0°C, 야간에는 0~3°C로 나타났다. 야간에는 계절변화의 경향이 명확하지 않지만 다른 계절에 비하여 겨울철 야간에 냉섬 강도가 강하다는 점은 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 3에 나타나 있듯이, 야간 복사냉각이 겨울철 야간에 강하다는 사실에 기인한다. 아울러 Fig. 4(a)에서 바람이 약하고 맑은 날에 냉섬 강도가 컸다는 사실로부터 겨울철 야간의 강한 냉섬 강도는 야간에 큰 복사냉각에 기인한다는 사실을 추정할 수 있다.

한편 낮의 냉섬 강도(Fig. 4(b))는 여름에 크고 겨울에 작게 나타났다. 이것은, Sugawara 등¹³⁾이 지적

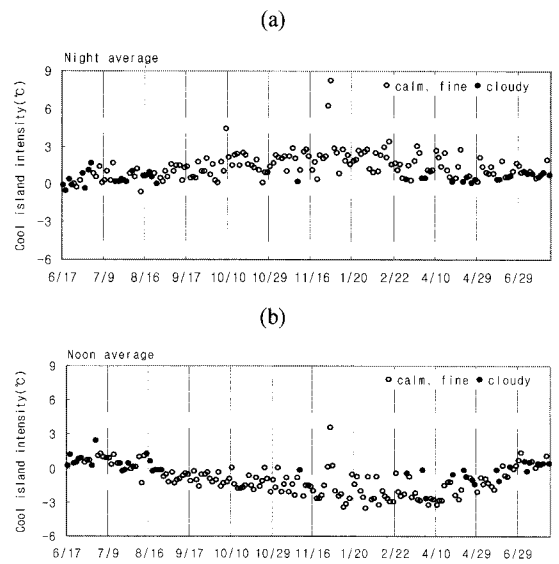


Fig. 4. Seasonal variation of cool island intensity(=T_{urban} - T_{park}). (a) Nighttime(21~01 h) average, (b) Noontime(11~15 h) average.

한 비와 같이 겨울에는 낙엽이 떨어져서 식물의 잎이 일사를 차단하는 음지효과와 식물의 증발산 효과가 모두 작아지는 것에 기인한다. 또 겨울에 녹지 쪽이 고온(음의 냉섬 강도)으로 되어 있는데, 이것은 낙엽이진 공원이 고층건물의 일사차단 효과가 큰 시가지보다 태양 일사를 받기에 더 유리한 조건에 있다는 것이 가장 큰 이유로 판단되지만¹³⁾, 이에 관해서는 장래 추가적인 확인 작업이 요구된다.

3.3. 냉섬 강도의 기상조건에의 의존성

Fig. 5에 풍속과 냉섬 강도의 관계를 야간(a)과 주간(b)으로 나누어 나타내었다. 나뭇잎의 광합성이 활발한 시기(5~10월)와 그렇지 않은 시기(11~4월)로 나누어 구분하였는데, ○(leafless)는 광합성이 활발한 시기, ●(leaf-covered)는 그렇지 않은 시기를 나타낸다. 그 결과를 살펴보면, 야간(Fig. 5(a))에는 잎의 유무에 관계없이 바람이 약할수록 열섬강도가 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 Sugawara 등¹³⁾과 Narita 등¹⁴⁾이 지적한 바와 같이, 도시공원 숲의 야간 기온은 나무 잎의 증발산에 따른 기온 저하보다 지표면 냉각이 빠르게 나타나는 넓은 잔디밭에서 생성된 냉기의 이류에 의해 결정되기 때문으로 판단된다. 반면에 주

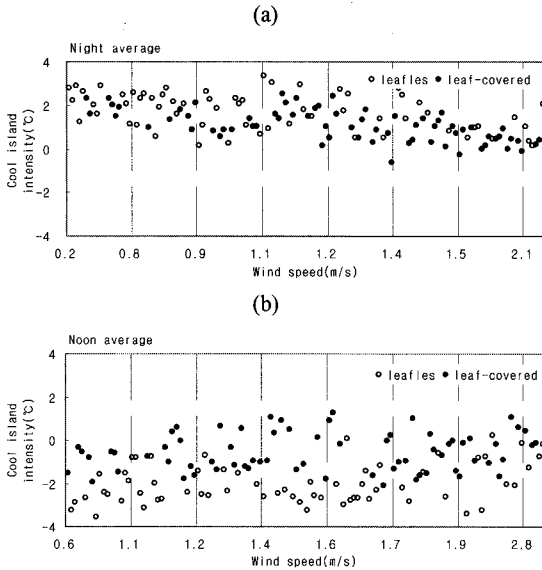


Fig. 5. The relationship between cool island intensity and wind speed. (a) Nighttime(21~01 h) average, (b) Noontime(11~15 h) average.

간(Fig. 5(b))에는 나무 잎이 있어서 광합성이 활발하게 나타나는 시기와 그렇지 않은 시기에는 확연하게 차이가 있는 것을 볼 확인할 수 있다. 그리고 풍속이 강하면 시기에 관계없이 냉섬 강도가 제로에 근접하는 것을 볼 수 있다.

지표면의 복사냉각 정도에 따른 냉섬 강도의 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 6에 최대 가능 냉각량과 야간의 평균 냉섬 강도의 관계를 나타내었다. 최대 가능 냉각량과 냉섬 강도는 양의 상관관을 보였는데, 이는 하늘이 맑아서 복사냉각이 강할 때에 냉섬 강도가 커진다는 것을 말한다. 이러한 사실은 야간의 냉섬 현상은 시가지와 녹지 사이에 존재하는 지표면의 복사냉각차이로 발생한다는 것을 의미한다⁽⁴⁾. 이것은 운량이 적

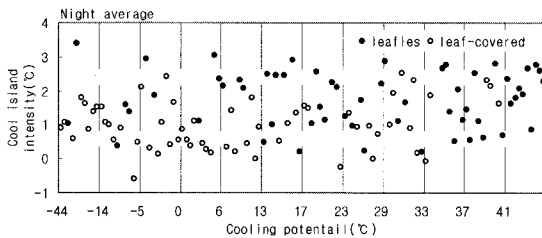


Fig. 6. The relationship between cool island intensity and cooling potential.

을수록 냉섬 강도가 커진다는 앞서 수행된 연구결과들^(3,6)과도 일치하며, 여름철 도시의 열대야 현상이 지표면의 포장화에 주로 기인한다는 사실을 알려주는 것이다⁽¹²⁾. 냉섬 강도는 시가지와 녹지 공간 간의 기온 차로 정의되기 때문에 시가지에서 배출되는 인공열도 냉섬 현상의 원인이 된다. 이를 확인하기 위해서는, 냉섬 강도의 평일·휴일의 차이를 비교해 보는 방법이 많이 이용되고 있다. Sugawa 등⁽¹³⁾은 일본 동경의 대규모 공원을 대상으로 이를 조사하였는데, 95% 유의수준에서 통계적으로 인정할만한 차이점이 발견되지 않았다고 한다. 본 연구에서도 주중과 주말의 냉섬 강도의 차이를 조사해 보았으나, 차이가 나타나지 않았다.

4. 결 론

대구의 대표적인 대규모 도심공원인 달성공원을 대상으로, 도시 내 녹지공간과 시가지 간의 기온 차(냉섬 강도)를 약 1년간에 걸쳐서 측정하여 냉섬 강도의 계절변화와 기상조건과의 관계를 조사하였다.

달성공원의 냉섬 강도는 여름의 낮에는 약 0.6°C, 야간에는 약 0~2°C, 겨울의 야간에도 약 0~3°C로 평가되었다. 이 냉섬 강도의 값은 대구의 열섬 강도⁽²⁰⁾의 약 50%에 상당한다. 냉섬 강도의 계절변화는 야간에 뚜렷하게 나타났으며, 주간에는 여름보다 겨울에 작아지는 경향을 보였다. 이는 녹지공간의 수목의 증발산과 햇빛 차단으로 인한 기온저하 기능을 입증하는 것이다. 한편, 겨울철 낮에는 달성공원의 기온이 더 높게 나타나는 경우도 있었는데, 이는 Sugawara 등⁽¹³⁾이 지적한 바와 같이 낙엽이 진 달성공원의 지면도달 일사량이 고층건물의 영향을 많이 받는 시가지보다 더 많은 것에 기인하였을 것으로 추정되었다.

복사 냉각의 강도를 나타내는 최대 가능 복사량과 냉섬 강도는 양의 상관관을 보였다. 이 조사를 통하여 도시의 여름철 야간 기온의 고온화는 주로 시가지가 인공구조물로 피복되어 열용량이 커지는 것에 기인한다는 것을 확인할 수 있었다.

도시의 녹지공간은 도시의 고온화를 억제하는 기능 이외에도 경관 개선과 인간의 심리적 안정화 효과, 대기오염 물질의 흡수효과 등으로 다양하다. 따라서 도시 녹지가 도시환경에 미치는 영향을 이런 다방면

에 걸쳐 평가하여 공원 녹지 확충 정책을 뒷받침할 수 있는 연구가 이루어질 필요성이 높다고 판단된다. 본 연구에서 제시한 도시 녹지 공간의 기온저하 기능과 시가지의 포장화로 인한 야간 고온화 현상 유발에 대한 평가결과가 대구의 환경 친화적 도시계획에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구(단독)(KRF-2008-313-C00937) 사업입니다. 재정지원을 해 주신 한국연구재단 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Hirano Y., Y. Yasuoka and T. Ichinose, 2004, Evaluation of Effect of Vegetation on Urban Heat Island by Using Satellite Remote Sensing data and Mesoscale Meteorological Model, *J. of Environmental Science*, 17(5), 343-358.
- 2) Sailor D. J., 1995, Simulated urban climate response to modification in surface albedo and vegetative cover, *J. Appl. Meteor.*, 34, 1694-1704.
- 3) Hamada T. and T. Mikami, 1994, Cool Island Phenomena in Urban Green Spaces: A Case Study of Meiji Shrine and Yoyogi Park, *Geographical Review of Japan* 67A-B, 518-529.
- 4) Kanda M. and Hirano, 1994, Organized structure in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using large eddy simulation, *Bound.-Layer Meteor.*, 69, 237-257.
- 5) Narita K., 1997, Annual observation on the temperature field in Hiroshima city, *Proc. the Second Japanese-German Meeting*, 243-246.
- 6) Kanda M., Moriwaki R. Takayanagi Y., Yokoyama H. and Hamada T., 1997a, Environmental effect of Meiji shrine forest as a sink for atmospheric energy and pollutants(1) Field observation in summer 1996, *Tenki*, 44, 713-722.
- 7) 안지숙, 김해동, 김상우, 2007, 대구의 토지이용도 유형에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 추정연구, *한국환경과학회지*, 16(1), 65-71.
- 8) Avissar R., 1996, Potential effects of vegetation on the urban thermal environment, *Atmo. Environ.*, 30, 437-448.
- 9) Sailor D., 1998, Simulations of annual degree day impacts of urban vegetative augmentation, *Atmos. Environ*, 32, 43-52.
- 10) Ichinose T., 2003, Regional Warming Related to Land Use Change During Recent 135 Years in Japan, *J. Global Environment Engineering*, 9, 19-39.
- 11) Baumuller J., 1986, The introduction of climatology into the administration and development of planning in the city of Stuttgart, *Urban Climatology and its applications with special regard to tropical areas*, WMO, 652, 451-460.
- 12) Ichinose T., 2001, Counteractions for Urban Heat Island in Regional Autonomies: Activities in Councils of MoE, Japan, *J. Atmospheric Environmental Science of Japan*, 37(6), A71-A84.
- 13) Sugawara H., K. Narita and T. Mikami, 2006, Cool Island Intensity in a Large Urban Green : Seasonal variation and Relationship to Atmospheric Condition. *Tenki*, 53(5), 393-404.
- 14) 成田健一, 2003, Heat Island 対策としての緑地の機能 - 緑地での冷氣生成・分布と都市氣候への影響, *緑の讀本*, 66, 26-31.
- 15) 서울특별시, 2000, 서울시 기상특성을 고려한 도시 계획기법 연구, 176-214pp.
- 16) Grimmond C., T. Oke and H. Cleugh, 1993, The role of rural in comparisons of observed suburban-rural flux differences, *IAHS Publ.*, 212, 165-174.
- 17) Sugawara H., K. Narita and T. Mikami, 2004, Representative air temperature of thermally heterogeneous urban areas using the measured pressure gradient, *J. Appl. Meteor.*, 43, 1168-1179.
- 18) 近藤純正, 1994, 水環境の氣象學, 朝倉書店, 128-159pp.
- 19) Ishi T. and J. Kondo, 1987, Seasonal variation of heat balance in the East China Sea, *Tenki*, 34, 29-38.
- 20) 안지숙, 김해동, 2006, 대구지역의 기상조건에 따른 도시열섬강도의 계절별 변화특성, *한국환경과학회지*, 15, 527-532.