

원격 열화상을 이용한 지붕색상별 겨울철 표면온도 변화추세 비교 평가

Evaluating Changing Trends of Surface Temperature in Winter according to Rooftop Color using Remotely Sensed Thermal Infrared Image

류택형* · 엄정섭**

Ryu, Taek Hyoung · Um, Jung Sup

요 旨

원격 열화상으로 관측된 지붕표면 온도 분포 자료를 활용하여 쿨루프(Cool Roof)에 기인한 겨울철 난방부하에 대한 근거 자료를 확보하는 것이 본 연구의 목적이다. 원격 열화상은 지붕색상(흰색, 검은색, 청색, 녹색)에 따른 지붕표면 온도의 광역 분포패턴을 가지적으로 제시하였는데, 이는 사람의 눈으로 볼 수 있는 범위에 국한된 데이터만을 제시하는 현지조사와는 확연히 다른 특성을 보여주었다. 겨울철에 높은 태양 반사율을 갖는 쿨루프의 표면 온도는 일반 지붕에 비해 3°C~9°C 정도 낮은 것으로 확인되었다. 쿨루프가 여름철에 일반지붕과 비교해서 18.4°C 정도 낮은 표면온도를 보여주었기 때문에 겨울철에 쿨루프로 인해 감소된 온도가 여름철에 비해 현격하게 낮아 쿨루프가 한국의 기후조건에서 상당한 잠재력이 있다는 것이 확인되었다. 본 연구는 원격 열화상을 이용하여 광역 열분포를 정량적으로 제시하였기 때문에 쿨루프로 인한 겨울철 난방 부하를 객관적으로 검증하는 과정에서 중요한 참고 자료로 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 쿨루프, 원격 열화상, 지붕색상, 표면온도

Abstract

A roof surface temperature monitoring, utilizing remotely sensed thermal infrared image has been specifically proposed to explore evidential data for heating load in winter by cool roof. The remotely sensed thermal infrared image made it possible to identify area-wide patterns of changing trends of surface temperature according to rooftop color (white, black, blue, green) which cannot be acquired by traditional field sampling. The temperature difference of cool roof having a higher solar reflectance were ranged from 3°C up to 9°C, compared to the general roofs. It is confirmed that there is a significant potential to the energy saving by introducing the cool roof in a Korean climate since up to 18.46°C difference in cool roof, compared to the general roofs in summer were already identified in Seoul, South Korea.

It is anticipated that this research output could be used as a valuable reference in identifying heating load in winter by cool roof since an objective monitoring has been proposed based on the area-wide measured, fully quantitative performance of remotely sensed thermal infrared image.

Keywords : Cool Roof, Remotely Sensed Thermal Infrared Image, Rooftop Color, Surface Temperature

1. 서 론

지붕의 온도를 낮추기 위한 방법 중 하나로 미국, 일본 등 선진국에서는 지붕의 색을 흰색 또는 밝은 색으

로 도색하는 쿨루프 (Cool Roof)를 도입하고 있다. 건축물의 지붕에 태양복사 에너지의 반사율이 큰 색상의 페인트를 사용할 경우 태양의 가시광선, 적외선, 자외선 등을 반사시켜 건물과 주변 대기로의 열전도를 감소

2013년 2월 1일 접수, 2013년 3월 12일 수정, 2013년 3월 26일 채택

* 정회원 · 경북대학교 공간정보학과 박사과정(Member, Doctoral Student, Dept. of Spatial Information Science, Kyungpook National University, thryu@knu.ac.kr)

** 교신저자 · 정회원 · 경북대학교 지리학과 교수(Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Geography, Kyungpook National University, jsaom@knu.ac.kr)

시키고, 높은 열방사로 인해 건물이 흡수한 태양복사 에너지를 빠르게 발산하여 건물의 냉방효율이 증가된다. 건물 부문의 에너지 사용과 온실가스 배출은 그 배출원의 규모가 작고 다양하게 흩어져 있어 쿨루프가 여타의 에너지 절감방안에 비해 저렴한 비용으로 도시지역 전체에 적용이 가능하다는 점으로 인해 그 활용가치가 더욱 커지고 있다. 급속한 도시성장으로 인해 녹지면적과 수공간이 부족하여 발생하는 도시열섬현상에 대처하는 전략으로 쿨루프는 저렴한 경비로 시행될 수 있는 실용적인 대안으로 부상되고 있다. 미국의 경우, 도시에 밝은 색 계통의 시각적으로 정비된 색채를 적용하여 냉방부하를 낮추는 사례가 확인되고 있다(Akbari, 1998).

우리나라 도시의 건물에서 여러 지붕형태 중 열적으로 가장 취약한 형태인 평지붕은 표면을 단순히 시멘트로 처리하기 때문에 오랜 기간 동안 방치되었을 경우 먼지로 의해 검은색으로 변한다. 혹은 방수제의 페인트색으로 인해 대부분 녹색을 띠는 경우가 많다(Lee, 2002). 지붕의 색이 어두울수록 낮에 태양으로부터 흡수된 열이 건물내부로 대부분 전달되어 여름철 냉방부하를 가중시키고 있다. 특히, 학교 및 관공서 건물은 대부분 태양에너지의 흡수율이 높은 평지붕형태를 차지하고 있어 에너지 절감 방안으로 쿨루프가 시급하게 요청되고 있다.

여름철 도시 열섬은 토지의 개발밀도가 높은 상업지역과 공업지역과 같은 도시지역에 온도가 높게 나타나고 있으며(Jung et al., 2010), 대부분 열 복사에너지가 도시내 지붕표면 방사에너지에 의해 일어나고 있다(Jung, 2008), 쿨루프는 방사에너지를 반사시키므로 도시열섬을 완화시킬 수 있고, 미시적인 관점에서는 각 지붕마다 유입되는 열에너지를 줄임으로써 냉방에너지 절감효과가 입증되고 있다. 그러나, 우리나라는 4계절이 뚜렷하여 쿨루프가 겨울철에 난방부하를 증가시킬 수 있으나 정량적으로 연구한 사례는 아직 확인되지 않는다.

쿨루프의 성능검증 관련 연구는 관점에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 특정 건물을 선정하여 쿨루프 성능에 영향을 미칠 것으로 판단되는 지붕색상, 경사 등 다양한 변수에 대한 정량적 측정을 통해 쿨루프를 설치할 경우 절감되는 에너지 부하를 제시하는 방식의 연구가 가장 많은 것으로 확인된다. 직접조사가 아닌 방법으로 쿨루프의 성능을 분석하지만 실제 건물을 대상으로 하지 않고 개별 건물의 지붕두께, 재질, 외벽 등 냉난방 부하에 영향을 미치는 다양한 변수를 시뮬레이션하는 방식의 연구도 상당수 보고되고 있다.

Akbari(2005)은 미국 캘리포니아 지역의 초등학교 건물에 쿨루프를 설치하여 데이터로거로 측정 데이터를 실시간으로 취득하여 약 17~18 %의 에너지를 절감할 수 있다는 근거를 제시하였다. Cheung(2005)은 고온 다습한 홍콩의 과밀 도시에서 건물 외벽색을 백색계통으로 도색 후 나타나는 열분포 특성에 대한 정량적인 데이터를 제시하였다. Synnefa(2012)은 UV/VIS/NIR spectrophotometer라는 기기를 사용하여 학교건물, 지붕 표면의 빛반사율을 측정하여 쿨루프 도입 타당성에 대한 근거자료를 제시하였다. 일본 기후현의 한 학교 옥상에 고반사율 도료의 쿨루프를 적용하였을 경우 시공 전 표면온도가 40℃였으나 시공 후에는 22℃로 낮아짐과 동시에 실내온도가 5℃이상 내려간 것을 보고하고 있다(近藤靖史, 2009).

근래에 컴퓨터를 이용하여 에너지 소비를 분석하는 연구가 증가하면서 TRANSYS 등 다양한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 냉난방 부하에 대한 정량화된 분석을 시도하고 있다 (Heiple and Sailor, 2008; Neto and Fiorelli, 2008). Shariyah(1998)는 TRANSYS 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 요르단의 온화한 기후에 속하는 Amman시와 열대기후에 속하는 Aqaba시에 대한 건물 외벽 색상이 태양에너지 흡수에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 국내에서는 모의실험과 에너지해석 프로그램을 이용하여 국내의 쿨루프 성능과 가능성을 검증한 연구(Kim, 2010)와 서울시를 사례로 백색지붕의 알베도 변화를 조절하여 쿨루프 적용 효과를 제시한 연구(KICT, 2010)가 있다.

일반적으로 다양한 형태의 건축물에서 난방 부하에 개입되는 다양한 지표의 유용성을 검증하는 것이 원칙이나 냉난방 부하에 영향을 미치는 변수가 지붕의 두께, 재질 등 매우 다원적이고 복합적이어서 모든 것을 고려하여 쿨루프가 겨울철 난방부하에 미치는 영향을 평가하는 것은 한계가 있다. 지붕의 빛반사율에 의거한 냉난방 부하의 평가는 전통적으로 사용되는 방법이 있다(Hong, 2001; Bohm and Danig, 2004), 반사율은 결국 표면 온도로 그 결과가 도출된다. 선행연구는 다양한 형태의 건물에서 쿨루프가 난방 부하에 미치는 영향에 개입되는 다양한 지표의 유용성을 검증하는 데 도움이 되었으나 난방부하에 영향을 미치는 변수가 매우 다원적이고 복합적이어서 도출된 결과의 객관성에 한계가 있다. 건물 지붕의 표면온도가 높고 낮음에 따라 적정 실내온도 유지를 위해서 에너지 소비를 유발시키기 때문에 지붕 표면 온도가 쿨루프로 인한 냉난방 부하를 평가할 수 있는 가장 직접적이며 핵심변수이다. 그러나, 물리적 주거환경에 대한 표면온도를 거시적인 지표로

활용하여 지붕의 열부하에 대한 정확한 진단과 평가를 통해 쿨루프 도입 타당성을 규명한 연구는 확인되지 않는다.

원격탐사는 실제 관찰하고자 하는 지붕에 접근하지 않고 지붕으로부터 멀리 떨어진 거리에서 열화상 영상을 보다 신속하고 광역적으로 획득할 수 있다. 결국 현재 쿨루프가 실내온도에 미치는 영향을 객관적으로 추정하기 위해서는 실측보다는 원격탐사의 방식으로 통해 다양한 지붕색상별로 지붕표면의 온도를 비교·평가하는 절차가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구는 쿨루프 성능검증에서 겨울철 난방부하에 개입되는 다양한 변수 중 지붕표면온도와 관련하여 그간 직접접촉 조사나, 시뮬레이션에서 지적되어 온 문제점들에 대한 대안을 제시하고자 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 대상지 및 자료 취득

대구는 한국의 대부분의 도시와 마찬가지로 하천 유역의 분지에 입지하고 있으며 하천의 배후 습지가 중요한 주거지역으로 개발되었다. 최근 시외곽의 산자락에 무분별하게 난립하고 있는 고층아파트들은 산골짜기로부터 밤새 불어오는 산바람들을 차단하고 있다. 콘크리트 건물과 아스팔트가 열을 흡수해 쉽게 뜨거워져 열섬현상으로 홍역을 치루고 있다. 해양의 영향을 받지 않는 산으로 둘러싸인 분지지형에 위치하고 있어, 열을 다른 곳으로 배출하지 못해 우리나라에서 여름철 기온이 가장 높은 곳으로 알려져 있어 냉방도일이 가장 높은 도시여서 내륙에 위치한 국내 도시 중 쿨루프 설치 우선순위가 가장 높은 지역이다.

연구대상지역은 대구광역시에 위치한 경북대학교 캠퍼스로 정하였으며, 대구광역시 북구에 소재하고 경위도 상으로 동경 128°36'~128°37'의 동서구간과 북위 35°53'에 위치하며, 지형적인 높이는 약 35~62m로 완만한 구릉지를 이루고 있다. 교내의 면적은 약 782,000 m²이고, 건물은 102개의 동이 있으며 연구지역은 단지 구획이 명확하고, 다양한 색상의 지붕을 가진 건물이 있다. Google Earth 영상을 통해 백색과 흑색계통의 지붕이 가시적으로 구별된다. 2012년 3월 경북대학교의 랜드마크적 이미지를 갖는 지상 17층 연면적 37,277 m²의 글로벌 플라자(Figure 1)가 준공되었다. 이 건물 주변에 위치한 저층 건물이 다양한 색상을 가지고 있어 겨울철 건물의 지붕 표면 온도를 검증하기 위한 원격 열화상 영상을 확보하는 데 최적의 조건을 가지고 있다.



Figure 1. Global plaza building at kyungpook National University

대학건물은 거주인원이 없고 방학기간은 강의실에 상주인원이 거의 없으며 이동인구가 적어, 실내 난방이 이루어지지 않아 내부열기가 지붕표면 온도에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다. 따라서 통제된 조건에서 색상이 지붕 표면온도에 미치는 영향을 평가하는 데 다양한 여건을 충족하고 있다. 다수의 대형건물들이 입지하여 상대적으로 여름철 냉방부하가 커서 쿨루프 설치 우선순위가 높은 지역이기도 하다.

본 연구에서 사용된 적외선 열화상카메라는 피사체의 표면으로부터 복사되는 열에너지를 온도로 환산하여 실시간으로 영상을 제공한다. 열화상 카메라인 FLIR i7(Table 1)은 -20℃~250℃ 범위에서 표면 온도 측정이 가능하며 0.1~1.0의 방사율 선택 및 보정 기능을 가지고 있다. 이미지 분해능은 120×120으로 총 14,400 픽셀의 고해상도 컬러화면으로 표면온도의 측

Table 1. Specification of thermal infrared camera

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Detector Type (Focal plane array) | 120×120 pixel (14,400) |
| Temperature sensitivity | below 0.1℃ |
| Temperature range | -20℃ ~ 250℃ |
| Focus | Focus free |
| Emissivity | 0.1 to 1.0 Adjustable |

정값을 관찰할 수 있다. $\pm 2\%$ 의 높은 정밀도와 0.1°C 이하의 열 민감도를 가지고 있어 상당히 미시적인 열변화를 탐지할 수 있으며 무조점으로 편리한 시야를 확보할 수 있다.

지붕의 색상이 겨울철 난방 부하에 미치는 영향을 분석하는 과정에서 가장 중요한 단계가 조사방법을 선정하는 일이다. 조사자가 조사대상 지붕에 접촉하여 열분포 특성을 조사하는 것은 전통적으로 사용되는 방법이지만, 장치설치에 대한 복잡성과 특정지점만 측정 가능하기 때문에 상당히 원시적인 정보 취득 방식이다. 지붕은 넓은 면적에 걸쳐 다양한 외피 부위를 갖고 있음에 따라 지붕 전체 외피의 열류를 직접 접촉 방법으로 측정하는 것은 비용 측면에서나 시간적으로 많은 제약을 갖고 있다. 현장중심의 열분포 평가의 조사 단위는 조사자가 현장에서 바라볼 수 있는 범위가 한정되어 있다. 즉 사람의 눈으로 볼 수 있는 범위에 한계가 있으므로 광역 열분포 환경에 대한 평가가 불가능하다. 이론상으로는 조사지점을 선정하는 과정에 있어서 지역의 대표성을 고려하여 선정해야 한다고 명시되어 있다. 조사지점의 대표성을 확보하기 위해서는 다양한 유형과 많은 수의 조사 지점을 설정해야 하나 이는 인력과 경비측면에서 쉽지 않다. 건물지붕에서 열분포는 시간적으로, 공간적으로 변화가 심하기 때문에 직접접촉인 방법에 의한 조사는 상당히 제한적이라고 할 수 있다. 직접 접촉 방식의 열분포 조사가 전 세계적으로 정착된 방식이기는 하나 광대한 지역을 현장조사에 의거 열분포 특성을 추적하여 난방부하를 검증한다는 것은 이론적으로 상당한 한계를 내포하고 있는 것으로 사료된다.

원격탐사 영상을 취득하는 경우 자료의 수집 과정에서 여러 가지 요인에 의해 자료의 훼손, 왜곡 등이 발생하게 된다. 본 연구와 같이 수직영상이 아니고 사각(oblique) 영상의 경우 획득된 자료는 영상에 나타나는 각 점의 위치와 실제지상에 존재하는 지형지물과의 상대적인 위치가 왜곡되어서 나타나게 된다. 촬영과정에서 열화상 카메라의 흔들림, 렌즈의 왜곡 등을 삼각대를 이용하여 카메라를 고정하여 최대한 수직을 유지하면서 영상을 취득하여 열분포 조사에 필요한 영상을 확보하는 데 큰 무리가 없었을 것으로 사료된다.

원격 열화상의 촬영과정에서 가장 어려운 점은 일정 계획이다. 일반적인 원격탐사 영상은 태양광에 의존하여 영상을 취득하게 되므로 촬영은 기상조건에 상당히 민감하기 때문에 열은 구름에도 많은 영향을 받는다. 특히 겨울철은 청천공의 외기조건을 확보하기 어려워 많은 주의가 필요하다.

2011~2012년 여름철과 겨울철에서 하루 종일 청천

공인 영상을 확보하는 것은 상당히 난해한 과정이다. 겨울철의 쿨루프 결과에 대한 기준으로 여름철의 지붕 표면 온도를 측정하기 위한 일자는 운량이 가장 적고



(a) Campus view and representative roof color (Google satellite image, 3/8/2011)

| A. white roof | | | B. black roof | | |
|---------------------------------|-----|-----|----------------|-----|-----|
| | | | | | |
| Information and computer center | | | Youngsun dong | | |
| R | G | B | R | G | B |
| 195 | 190 | 187 | 90 | 87 | 85 |
| C. Blue roof | | | D. Green roof | | |
| | | | | | |
| Auditorium | | | Student center | | |
| R | G | B | R | G | B |
| 147 | 162 | 186 | 150 | 177 | 153 |

(b) Field photo of ABCD at Figure 2a

Figure 2. Selected roofs by color at UNIV

(평균운량 6.5) 평균온도가 높은(평균온도 28.9℃) 2011년 8월 16일에 측정하였다. 겨울철인 2012년 2월 2일의 평균운량은 0.0 (KMA, 2012)으로 구름한 점 없는 날(청천공)로 당일 영상이 연구결과로 제시할 수 있을 정도의 품질을 보여주었다. 촬영 당일 대구지역 평균 기온은 -8.7℃이고 낮 최고 최저 기온은 각각 -4.6℃, -12.4℃였다(2011년 11월부터 2012년 2월 기간에 일주기 평균기온이 가장 낮은 것으로 확인됨, KMA, 2012). 청천공의 기상조건이어서 지붕표면 온도변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 외기 일사량으로, 외기의 일사량 변화에 따라 지붕표면 온도가 변화되는 것을 평가하기 위한 최적의 기상조건에서 열화상 영상을 취득하였다. 태양고도의 변화가 명확히 구분되는 2시간 단위로 각 건물의 지붕색에 따라 동시에 촬영이 이루어졌다. 그리고, 일몰시간은 17시 57분으로 적외선 열화상카메라를 이용한 온도측정은 18시 이전인 16시까지 이루어졌다.

구글어스 영상을 통해 다양한 색상을 대표할 수 있는 지붕을 선택하였는데, 관측지점인 글로벌플라자 주변으로 흑색, 백색, 청색, 녹색 네가지 색으로 구분하였다 (Figure 2(a)). 쿨루프를 대표할 수 있는 흰색지붕, 시멘트로 된 지붕이지만 이물질이 묻어서 지붕전체가 검게 보이는 지붕, 그리고 방수제를 칠한 녹색지붕, 청색 지붕을 선정하였다(Figure 2(b)).

여름철 쿨루프의 성능을 비교·확인하기 위해 Figure 3과 같이 일반지붕과 그 위에 쿨루프를 적용한 작은 건물로 실험을 하였다.

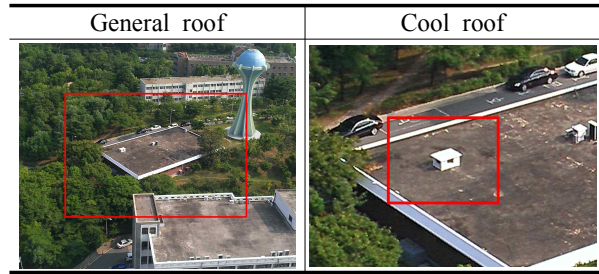


Figure 3. General roof and cool roof

3. 지붕표면온도 비교평가

3.1 여름철 지붕표면온도

여름철 지붕표면의 온도는 Figure 4와 같이 데이터

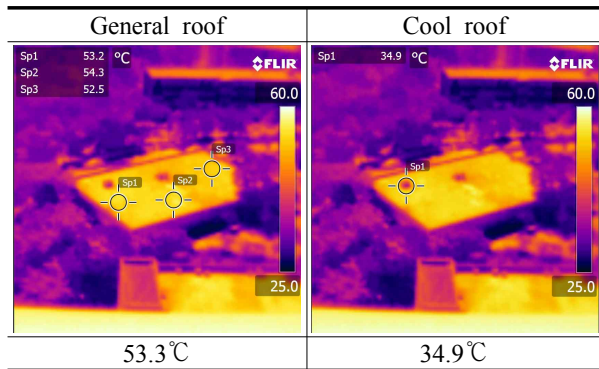
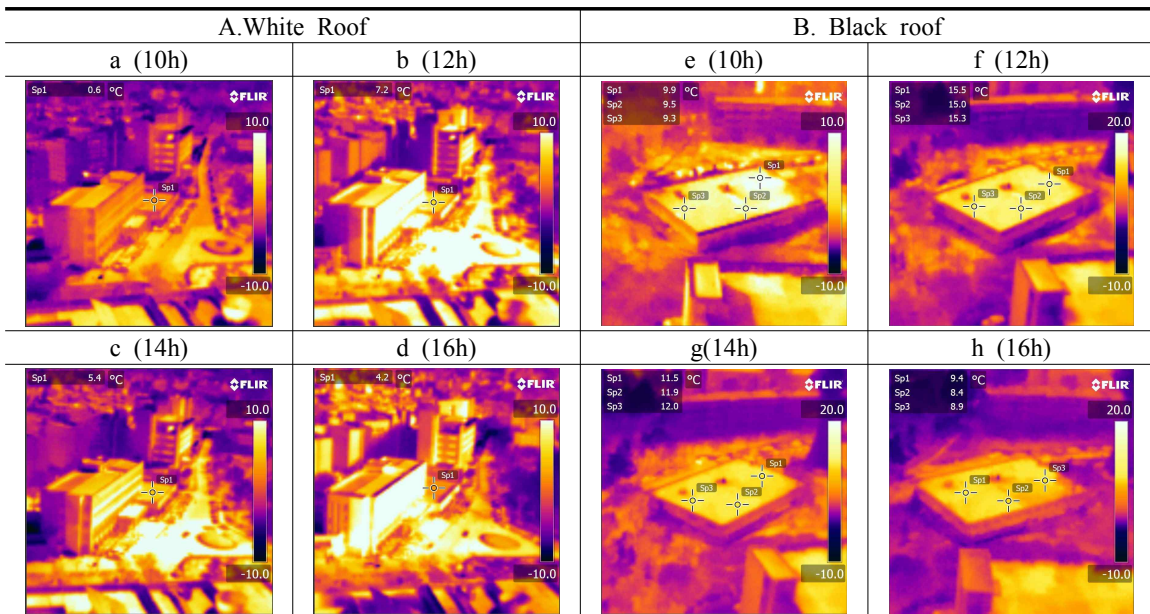


Figure 4. Surface temperature between general roof and cool roof by Infrared camera



※ Sp (top left): Survey point, right condition bar : temperature range(-10 °C ~ 10 °C)

Figure 5. Hourly temperature distribution of white and black roof

를 취득하였다. 2011년 8월 16일에서 표면온도가 가장 높을 때(13시 40분)에 열화상카메라를 이용하여 촬영하였다. 일반지붕과 쿨루프의 표면온도는 각각 50.2°C, 38.6°C으로 두 지붕간의 표면온도는 18.4°C정도 차이를 보였다.

3.2 겨울철 색상별 지붕표면 온도

2012년 2월 2일 오전 10시의 외부온도는 영하 10°C였으며, 태양 빛을 받기 시작하자 색을 가진 지붕들은 주변 온도보다 밝은 색을 띄며 열을 흡수하는 것이 관찰되었다. 촬영 온도범위는 -10 ~ 10°C로 온도가 가장 낮은 -10°C일 때는 진한 보라색을 띄고, 온도가 가장 높은 10°C는 밝은 노란색을 나타낸다. 오전 10시경 색상이 있는 지붕표면(Figure 5 a, e; Figure 6 a, e)은 약 6~9°C를 나타내었다. 0.6°C로 측정된 흰색지붕 Figure 5의 a 보다 10배가 높은 온도 분포를 보였다. 외부 온도가 상당히 낮음에도 불구하고 색깔을 가진 지붕들의 빛 흡수가 매우 강하다는 것이 확인되었다. 태양 고도가 가장 높을 때인 12시에는 지붕과 수직으로 단파 적외선을 최대한 많이 흡수하기 때문에 급격한 온도상승으로 인해 가장 높은 온도분포를 보였다(Figure 5 b, f; Figure 6 b, f)(2012년 2월 2일 대구시 최고 태양고도는 13시: 방위각 : 186도 12분 29.80초, 고도: 36도 55분 30.8초, 한국천문연구원).

경북대학교 내 유일한 흰색지붕인 정보전산원은 고층에서 촬영시 위치의 한계 때문에 흰색지붕의 전체 온

도를 측정하지 못하고 부분만 관측하였다. Figure 5에서 sp1은 온도측정 지점을 나타내며 오전 10시의 지붕 온도 (a)는 0.6°C이고, 12시가 되었을 때(b) 최고온도인 7.2°C까지 올라갔다. 14시와 16시 이후에는(c,d) 5.4°C와 4.2°C로 온도가 떨어지기 시작한다. 흑색인 영선동 건물의 지붕은 상당량의 이물질로 인해 시멘트 바닥이 검게 변한 형태이다. 적외선 영상에서 볼 수 있듯이(e, f, g, h) 각 시간대별 온도가 주변 온도보다 밝게 보여 온도가 높음을 알 수 있다. 넓은 면적에 대한 온도를 한 포인트만 지정할 수 없어 3지점을 찍어 평균온도를 구하였다. 추운날씨에도 불구하고 전체적으로 온도가 상당히 높게 나타났으며, 12시에 (f) 까지 가장 높은 온도(15.3°C)가 관측되었으며 4시(f) 이후에도 온도가 떨어지지 않고 10°C를 유지하였다.

정보전산원 대강당의 지붕은 파란색으로 일반 공장의 지붕에 주로 쓰는 재료인 강판이다. 온도 분포 양상은 검은색 지붕과 유사하게 나타났다 (Figure 6a-d). 10시부터(a) 최대 9.1°C까지 올라갔으며 상당히 밝은 노란빛을 나타냄을 알 수 있다. 12시경에는(b) 최고 15.6°C까지 상승하였는데, 태양 빛을 직접 받으면 주변 건물에 비해 온도가 높다는 것이 확실히 구별된다. 금속성 강판이라 오후 4시경에는(d) 주변건물의 색보다 어두운 6.4°C로 급격히 하락함을 볼 수 있다. 녹색인 학생센터의 지붕은 방수제를 도포하여 녹색을 형성하였지만 도색 후 장기간이 경과하여 심하게 퇴색이 되어있는 것이 확인되었다. 하루 동안 온도 변화의 폭은 크지

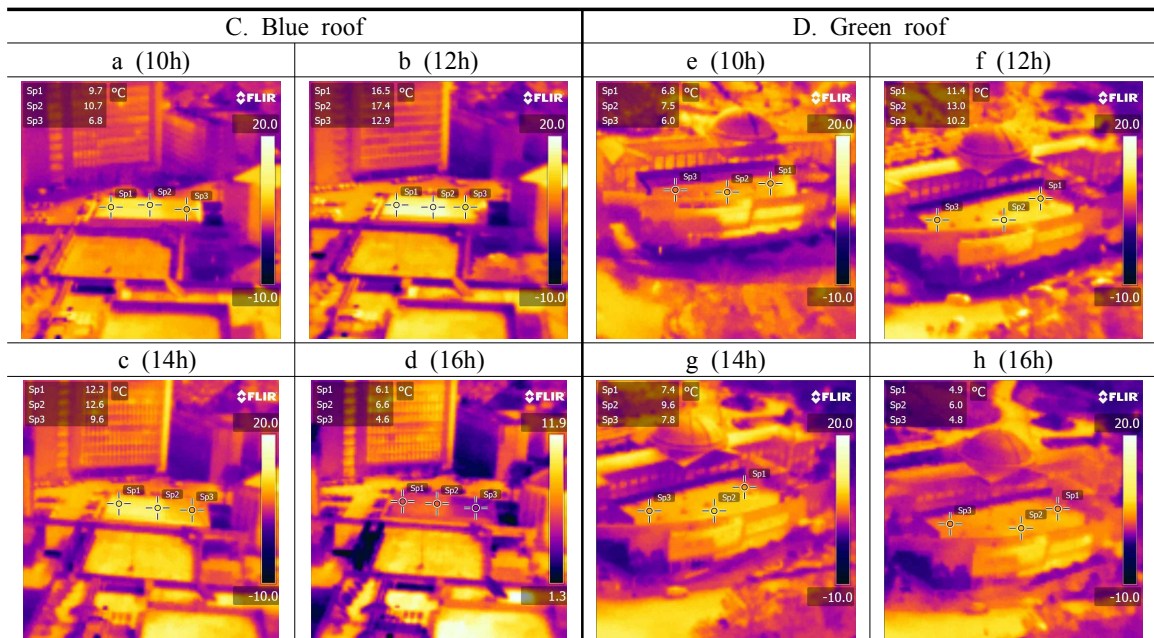


Figure 6. Hourly temperature distribution of blue and green roof

않으나 빛의 흡수량이 있어서 12시에는(f) 11.5℃까지 상승하였다.

3.3 온도변화 추세 비교

지붕 색상에 따라 온도 상승 패턴은 매우 유사하나 하강 폭은 완전히 다르게 나타났다 (Figure 7). 시간에 따른 온도변화 추세를 볼 때 최고 온도를 나타내는 시간은 12시이고, 그 이후 온도가 계속 떨어지고 있다. 2012년 2월의 태양고도는 12시와 13시 사이에 가장 높은 36°에 위치하고 있다. 외부온도는 평균 -8.7℃이며 온도가 서서히 올라간 후 마지막 측정 시점인 16시일 때 최고온도인 -2.9℃를 나타냈다. 지붕의 온도와 외부 온도의 최대차이는 19.2℃이고 최소차이는 5.4℃이다. 검은색 지붕과 녹색지붕의 온도 변화율은 거의 유사한 패턴을 보이며 검은색 지붕이 태양의 복사열을 더 흡수하여 녹색지붕보다 대체로 3℃ 이상 높게 나타났다.

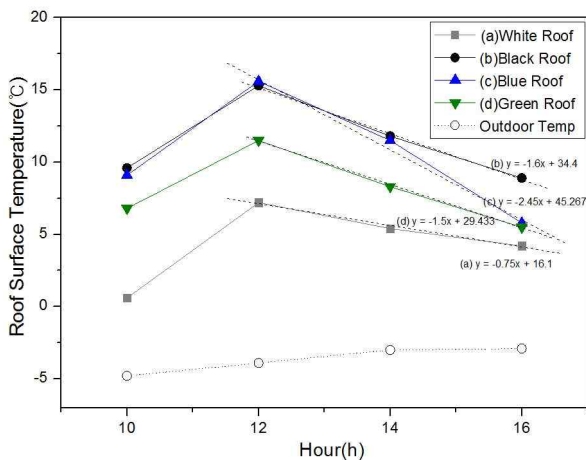


Figure 7. Trend of hourly temperature changes on the surface of respective roof color

Table 2. Surface temperature in accordance with the roof color(°C)

| Surface Temp. (°C) \ Hour(h) | White (a) | Black (b) | Blue (c) | Green (d) | maximal Temp. difference |
|------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|--------------------------|
| 10 | 0.6 | 9.6 | 9.1 | 6.8 | 9 |
| 12 | 7.2 | 15.3 | 15.6 | 11.5 | 8.4 |
| 14 | 5.4 | 11.8 | 11.5 | 8.3 | 3.5 |
| 16 | 4.2 | 8.9 | 5.8 | 5.5 | 4.7 |
| maximal Temp. difference | 6.6 | 6.4 | 9.8 | 6 | |

태양이 남중고도를 지나서 고도가 떨어지면 지붕표면에 흡수한 열은 주변의 낮은 온도로 인해 급격히 열을 잃으면서 지붕표면의 온도가 빠르게 낮아진다. 색이 있는 지붕과 백색지붕간의 온도 하강 기울기에서 백색지붕의 기울기(-0.75)는 다른 색이 있는 지붕과 비교해서 약 2배 (흑색: -1.6; 녹색:-1.5 청색:-2.45) 낮게 나타났다. 온도가 천천히 떨어지는 것을 확인하였다. 색이 있는 지붕은 온도 하강추세로 미루어 일몰(오후 6시) 이후는 백색지붕보다 표면온도가 더 낮아질 가능성이 크다. 색상별 최고온도와 최저 온도의 차이를 비교하면, 청색지붕은 16시에 급격한 온도 하강이 확인되었으며 최고저 온도간의 차이가 다른 색 지붕보다 3℃ 이상 높은 9.8℃를 보인다(Table 2).

이것은 지붕의 재질이 다르기 때문에 나타난 현상으로 드러나며 공장에서 흔히 쓰이는 샌드위치 판넬인 금속재질을 사용하고 있기 때문에 열전도율이 뛰어난 특성으로 인해 태양빛이 줄어들면 지붕의 표면온도가 상당히 떨어진 것으로 판단된다. 시간대별 최고저 온도간의 차이에서는 오전 10시경으로 최고 9℃로 태양의 고도가 상당히 낮음에도 불구하고 색상이 있는 지붕은 열 흡수가 빠르게 시작하기 때문에 온도차이가 가장 높게 나타났다. 14시 이후에는 태양 빛 흡수가 많음에 따라 축열에 의해 온도 차이는 상당히 줄어들었다. 백색지붕은 태양이 있는 낮 시간에 빛 반사율의 효과가 나타날 뿐 해가 진 이후에는 색상을 가진 다른 지붕과 비교할 때 큰 영향이 없을 것으로 사료된다. 오히려 진한 색상을 가진 지붕일수록 낮에 태양에 의해 흡수한 열이 태양의 강도가 약해짐에 따라 더 빠른 속도로 온도가 떨어짐을 확인할 수가 있었다.

4. 결과 고찰 및 시사점

우리나라 동절기는 태양고도가 낮기 때문에 여름철에 비해 태양의 일사영향이 크다. 특히, 천공상태에 따라 온도차이가 크게 나타난다. 겨울철을 90일을 기준으로 조사하였을 때 청천공 36일, 부분담천공 42일, 담천공 12일이므로(Table 3), 쿨루프로 인해 겨울철 난방부하에 직접적으로 영향을 미칠 수 기간은 36일로 확인된다. 청천공이 아닌 겨울철 날씨에는 태양에너지의 반사와 흡수가 혼재되어 나타나기 때문에 쿨루프로 인해 난방부하를 증가시킨다는 추론은 불가능하다. 즉 동절기의 경우, 천공의 상태가 주로 담천공의 상태로 빈번하게 발생하여, 지붕의 반사율로 인해 증가되는 태양에너지량은 미미하다. KASI(2011)의 자료를 살펴봤을 때, 태양고도가 가장 높은 하지일 경우 2011년 대구의

Table 3. Comparison of the sky condition in metropolitan cities(12/1/2009~2/28/2010)

| Section | | Winter(day) | | | Summer(day) | | | Spring(day) | | | Fall(day) | | |
|----------|---------|-------------|-------------------|------------|-------------|-------------------|------------|-------------|-------------------|------------|-----------|-------------------|------------|
| | | Clear sky | Partly Cloudy sky | Cloudy sky | Clear sky | Partly Cloudy sky | Cloudy sky | Clear sky | Partly Cloudy sky | Cloudy sky | Clear sky | Partly Cloudy sky | Cloudy sky |
| Domestic | Seoul | 34 | 43 | 13 | 14 | 53 | 25 | 36 | 39 | 17 | 42 | 40 | 9 |
| | Busan | 47 | 30 | 13 | 15 | 37 | 40 | 41 | 38 | 13 | 34 | 41 | 16 |
| | Daegu | 46 | 37 | 7 | 12 | 42 | 38 | 40 | 37 | 15 | 29 | 46 | 16 |
| | Inchon | 33 | 45 | 12 | 17 | 50 | 25 | 40 | 37 | 15 | 37 | 48 | 6 |
| | Daejeon | 25 | 54 | 11 | 11 | 55 | 26 | 35 | 41 | 16 | 27 | 53 | 11 |
| | Gwangju | 23 | 51 | 16 | 16 | 40 | 36 | 38 | 37 | 17 | 33 | 44 | 14 |
| | Ulsan | 44 | 35 | 11 | 9 | 41 | 42 | 39 | 42 | 11 | 27 | 45 | 19 |

ref. : Modified Korea Meteorological Administration data(2010), <http://www.kma.go.kr/>

남중고도는 76°이지만 가장 낮은 동지인 경우 30°로 겨울철인 경우 태양의 각도가 여름철에 비해 46° 정도 낮아 태양빛에 의한 반사율이 매우 낮아진다. 문창환(2007)에 의하면 동절기에 난방은 외기온도가 낮고 이용자가 증가하는 오후 11시~12시경이 가장 높게 나타나고 주간시간대인 오전 2~3시에 가장 낮은 난방부하를 보인다. Akbari(2004)는 캐나다 토론토 지역에서 겨울동안 쿨루프와 나무의 영향으로 일부 열부하를 증가시킬 수 있지만 그 영향은 미비하다고 발표하였다. 본 실험에서 동절기에 청천공일 때 일사의 영향으로 일반 지붕과 쿨루프와 온도 차이는 약 8.4°C 정도 나타나지만, Kim(2010)은 흐린 날에 태양반사율에 따른 실내 온도차이가 약 0.2°C로 큰 차이가 없어 난방 부하의 증가는 거의 없다고 결론을 내렸다. 원격 열화상을 이용한 지붕표면 온도조사가 현지조사나 시뮬레이션과 유사한 결과가 도출하고 있다는 것이 확인된다. 반면에 여름철에 쿨루프는 지붕 표면온도가 일반지붕과 비교

하여 최대 약 18.46°C 차이가 있음을 실험 결과에서 알 수 있으므로 쿨루프로 인해 줄어드는 냉방부하가 난방 부하보다 훨씬 클 것이라는 것을 정량적으로 확인할 수 있다.

본 연구의 타당성을 검증하기 위해서는 실내온도와 에너지 사용량 등 현지조사를 통하여 수집된 다양한 데이터와 비교하는 것이 필수적이다. 향후 현지조사 기반의 평가에서 사용하는 기법과 원격 열화상 기반의 평가 기법을 통합한 다양한 기법을 지붕색에 따른 열분포 조사와 연계함으로써 본 연구 결과의 실용성을 증진시킬 수 있는 방안에 대해서 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

또한 본 연구에서는 단일시기에 대한 측정자료로써 현장조사와 원격열화상과의 전체적인 관계성을 규명하고자 한다는 점에서 연구 방법론적인 한계성이 내재되어 있다. 1년 동안의 획득 표면온도가 아닌 절기를 대표하는 하루 동안의 표면온도를 비교평가 한 것이다. 다양한 계절의 청천공 열화상을 확보한다면 쿨루프로

Table 4. Comparison of cooling and heating degree day in New York, Tokyo, Korea, Busan metropolitan area

| Section | | Warmest month Mean Temp.(°C) | Coldest month Mean Temp.(°C) | Heating degree day (HDD) | Cooling degree day (CDD) |
|----------|---------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Foreign | Newyork | 25.6 | -3.3 | 3589 | 538 |
| | Tokyo | 27.1 | 4.1 | 1901 | 896 |
| Domestic | Seoul | 25.4 | -2.5 | 2889 | 750 |
| | Busan | 25.7 | 3.0 | 2198 | 696 |
| | Daegu | 26.1 | 0.2 | 2326 | 964 |
| | Inchon | 24.9 | -2.4 | 2813 | 645 |
| | Daejeon | 25.5 | -1.9 | 2799 | 757 |
| | Gwangju | 26.1 | 0.5 | 2486 | 903 |
| | Ulsan | 25.7 | 1.6 | 2198 | 849 |

ref. : Modified Korea Meteorological Administration data(2010), <http://www.kma.go.kr/>.

Baumert and Selman, 2003, Heating and Cooling Degree Days.

인한 냉난방 부하를 평가하는 방안으로 활용될 수 있을 것이다. 향후 위에서 지적한 문제점들을 보완하고 다중 시기의 반복측정을 통한 체계적인 분석이 이루어진다면, 특정지점에 한정된 열분포 측정 및 감시체제와 광역적인 차원에서의 열화상 감시체제가 상당한 상관관계를 가지고 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

본 실험연구는 학술연구라는 자체적인 한계 때문에 단기간에 수행된 단 1개의 사례지역에 걸친 국한된 결과이다. 다양한 지붕색상이 상당히 넓은 범위에서 파악될 수 있는데도 연구의 범위를 축소하여 집중적으로 검토하고자 본 연구에서 사용한 원격 열화상에서 판독 가능한 공간 객체에 의거하여 표면온도를 평가하였다. 다양한 종류의 건물이 있고 지붕도 판상형, 탑상형 등 다양한 형태가 존재하나 연구의 범위를 축소하여 집중적으로 검토하고자 본 연구지역에서 확인되는 지붕색상에 의거하여 표면온도를 평가하였다.

본 연구에서는 경북대학교를 동일한 분류지표에 의거 지붕표면온도 평가하였지만 또한 각 지역이나 장소마다 그 특성이 다를 수 있으므로 한 두가지의 연구나 모형으로 지붕표면온도 평가기법을 확정할 수 없고 향후 보다 많은 지역의 서로 다른 특성들에 대해 연구가 진행되어야 한다. 본 연구의 표면온도 비교평가는 대학캠퍼스 건물만을 대상으로 한 것이므로, 전용주거지역, 일반주거지역, 상업지역, 공업지역 등 다양한 지역의 건물을 대상으로 추가연구가 필요하다. 아울러 단독주택, 집합건물, 탑상형, 판상형 아파트 등 건물 유형별 표면온도 비교평가가 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 비교 평가과정은 즉 전통적으로 현지조사에 의거한 접근보다 훨씬 과학적이고 객관적인 근거를 제공하여 표면온도 분포에 의거한 난방부하를 예측하는 데 중요한 근거자료가 될 것이다.

5. 결 론

본 연구는 원격열화상을 활용하여 지붕색상에 따른 표면온도 조사의 필요성을 제안하는 연구이다. 열화상 영상은 대학캠퍼스의 흑색, 백색, 청색, 녹색 지붕에서 나타나는 표면온도 분포의 주요패턴을 제시하였는데, 이는 전통적인 직접 조사 방식으로는 취득할 수 없는 정보들이었다. 원격열화상의 장점을 최대한 활용할 수 있는 분야가 다양한 시간대의 열화상을 비교하여 오전, 오후 등 태양광도)의 변화에 따른 표면온도 변화를 추

적하는 응용이다. 넓은 지역에 대한 지붕표면 온도의 변화 추세를 파악하는 데 있어서 원격열화상은 기존의 현장조사와 비교하여 경제적이며 광범위한 지역에서 나타나는 시-공간적 변화추세를 분석 평가할 수 있는 장점을 확실하게 보여주었다. 본 연구의 결과는 쿨루프 로 인한 겨울철 난방부하를 여름철 냉방부하와 비교평가하는 과정에서 동일적이고 일관성을 지닌 객관적인 근거로 핵심 역할을 할 수 있을 것이다.

이와 같은 원격열화상을 이용한 평가과정은 캠퍼스 지붕색의 조정과정에서 다양한 국가의 각 대학별로 축적된 노하우와 문제점들을 공유하고 교환할 수 있는 메커니즘으로 작용할 것으로 사료된다. 캠퍼스 지붕색으로 인한 표면온도 평가에 대한 참고가 될 기준이 없는 상황이어서 우리나라에서 냉방일수가 최장기간인 지역에 위치한 경북대학교 대구 캠퍼스의 열화상 분포는 국내 대학의 지붕색을 관리지침을 제시하는 중요한 기초 자료가 될 것이다. 본 연구의 결과에 의거하여 경북대학교는 캠퍼스 고유의 지붕색과 주변 지역의 특성에 부합한 지붕색 관리방향을 설정할 수 있을 것이다. 이는 단순히 대학 캠퍼스의 건물 지붕 열환경을 비교·평가하는 차원을 넘어 향후 캠퍼스의 마스터플랜 수립 등 정책 대안제시를 위하여 활용될 수 있을 것이다.

원격열화상 조사는 현장조사에 소요되는 막대한 인력과 시간을 절감하면서 짧은 기간에 대학캠퍼스의 열분포 특성을 조사할 수 있는 열 환경 데이터를 제시하였다. 대학캠퍼스의 지붕색상별 표면온도 변화양상을 확인할 수 있었으며, 지붕색상이 표면온도 변화의 주요 원인이라는 가시적으로 보여주고 있다. 원격 열화상을 이용한 열분포 평가는 열환경에 대한 전문적인 지식이 없는 사람들도 조사 대상건물 지붕의 전반적인 열분포 실태를 파악할 수 있게 하며, 현지를 방문하여 수평관찰(horizontal point of view)이나 직접 접촉 샘플링조사에서 얻을 수 없었던 데이터를 사각관찰(near vertical or oblique vantage point)로 현장조사의 한계점을 충분히 극복할 수 있다는 점을 확인하였다. 원격열화상의

의미한다. 태양에너지가 대기를 통과하면서 미세먼지와 구름 등에 의해 반사, 흡수되는 등 장애물을 통과하고 지표에 도달된 에너지가 일사량이며 대표적 측정단위는 kcal/m²이다. 하지만 일조시간은 구름, 먼지 등의 장애요인을 고려하지 않고 하루 동안 또는 정해진 기간 동안 햇빛이 지상에 비취졌는가를 측정하기 때문에 일조시간의 단위는 시간이다. 본 연구에서는 일조시간과 일사량을 포괄하는 개념으로 태양광도라는 용어를 사용하고 있다. 태양광도는 단위 시간 동안 태양이 뿜는 에너지의 총량을 의미하며 지상에서는 단위면적에 가해지는 태양에너지로 정의되며 1m²에 도달한 태양광 에너지의 강도로 측정된다.

1) 일사량과 일조시간은 전혀 다른 의미를 가지고 있다. 일사량은 태양 에너지가 지상으로 도착했을 때 에너지의 양을

광역정보를 통해 현장조사 방법에서 직접접촉 조사의 한계성을 확인하면서 열환경 감시에서 원격열화상이 입체적인 지붕 표면 온도 분포감시를 위한 중요한 도구로 사용될 수 있음을 확인하였다.

또한 다년간, 다계절의 열화상 영상 데이터베이스가 구축된다면 캠퍼스의 영년변화(永年變化) 등과 같은 기본적인 정보를 영구적인 기록인 영상으로 확보할 수 있을 것이다. 아울러 가상현실을 통한 원격 열분포 감시로 현장방문과 거의 동일한 효과를 달성할 수 있을 것이다. 또한 과거의 열분포 실태의 확인 필요성이 제기될 때는 영구적인 기록 (Permanent record)으로 보존되고 있는 열화상 영상을 통해 현재의 상황과 비교할 수 있어 에너지 절감 및 악화의 원인을 분석하는데 중요한 도구로 사용 될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 공간정보 전문 인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- Ahn, T. K., 2003, Evaluation for thermal performance of apartment house top floor using roof planting system, the korean society of living environmental system, 10(3), pp. 182-186.
- Akbari, H., 1998, Cool roofs save energy, ASHRAE Transactions, 104(1B), pp. 783-788.
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001, Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality inurban areas. Solar Energy 70 (3), pp. 295-310.
- Akbari H., Konopacki S., 2004, Energy effects of heat-island reduction strategies in toronto, tanada , Energy 29, pp. 191-210.
- Akbari H., Levinson R., Rainer L., 2005, Monitoring the energy-use effects of cool roofs on california commercial buildings, Energy and Buildings 37, pp. 1007-1101.
- Alberto H. N., Flávio A. S., 2008, Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. Energy Build., 40, pp. 2169-2176.
- Bohm B. and Danig, P. O., 2004, Monitoring the energy consumption in a district heated apartment building in copenhagen, with specific interest in the thermodynamic performance, Energy and Buildings, 36(3), pp. 229-236.
- Cheung C. K., Fuller R. J, Luther M. B.. 2005, Energy efficient envelope design for high rise apartments, Energy and Buildings, 37(1), pp. 37-48.
- Choi, G. S., Sohn, J. Y., 2010, Thermal performance evaluation of apartment housing using infra-red camera, korea journal of air-conditioning and refrigeration engineering, 22(6), pp. 404-412.
- Choi, J. H., Um, J. S., 2010, Introducing strategy of cool roofs based on comparative evaluation of foreign cases, Journal of Environmental Impact Assessment. 19(6), pp. 591-605.
- Cool Roof Workshop, 2005, Lisa Gartland, Pacific Energy Center, San Francisco.
- Graveline, S. P., 2009, Benefits of cool roofs on commercial buildings. Retrieved July 10, 2012, from, pp. 15-21.
- Heiple, S. C. and D. J. Sailor, 2008, Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. Energy and Buildings, 40, pp. 1426-1436.
- Hong, S. H., Jang, M. S., Park, H. S., Yang, K. S., 2001, A study on the typical energy consumption of apartment, journal of the regional association of architectural institute of korea, 17(12), pp. 151-160.
- Jeong, J. C., 2008, The spatial factor analysis of urban heat island effect, The Korean Society For Geospatial Information System, pp 97-99.
- Jung, G. S., Yoo, H. H., 2010, Analysis of temperature reduction effect of urban green space, The Korean Society for Geo-Spatial Information System, pp 85-86.
- KASI, 2011 Korea Astronomy and Space Science Institute, <http://www.kasi.re.kr/>
- KICT, 2010, A study on the application of the exterior finishes for energy saving, pp. 23-39.
- Kim, O., 2010, Cool A study on the performance standards and design guidelines of cool roof system, Thesis, Chung-ang University.
- KMA, 2010, Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/>
- Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011, Heat island projects (cool roofing materials database), <http://heatisland.lbl.gov/coolscience/cool-science-cool-pavements>
- Lee, J. S, 2002, A study on the color design

- techniques of residential buildings in U.S.A , Journal of Korean Society of Color Studies. 16(1), pp. 49-59.
23. Lee, T. C., Yoon, S. H., 2012, Review on radiation temperature distribution of a multipurpose high-rise building by infrared rays camera, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, pp. 77-80.
24. Moon, C. H., 2007, Improvement of special facility system using district heating by heat load pattern analysis, Thesis, Hanyang University.
25. Sakagami T., Ogura K., Kubo S. and Farris T.N., 2002, Application of infrared thermography for contact problems, iutam symposium on advanced optical methods and applications in solid mechanics, Solid Mechanics and Its Applications, 82(14), pp. 603-610.
26. Shariah A., Shalabi B., Rousan A., 1998, Tashtoush B., Effects of absorptance of external surfaces on heating and cooling loads of residential buildings in Jordan, Energy Conversion and Management 39 pp. 273-284.
27. Synnefa A., Saliari M., Santamouris M., 2012, Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens, Energy and Buildings, In Press, Corrected Proof, Available online 6 March 2012.
28. Tae, W. J., 2005, A study on the optimum slope of the roof for minimum cooling load, journal of the korean solar energy society, 25(4), pp. 119-123.
29. 近藤靖史, 2009, 都市被覆の日射反射性能向上によるヒートアイランド緩和と冷房負荷低減, 空気調和衛生工學, 83(8), pp. 639-643.