



## 쿨루프 적용에 따른 건물의 레이어별 온도 변화 - 창원대학교를 사례로

*Temperature Change in Building Layers according to Cool Roofs Application  
- A Case Study at Changwon National University*

김경아\* · 박경훈\*\*

Kim, Gyeong-Ah\* · Park, Kyung-Hun\*\*

\* Dept. of Environmental Engineering, Changwon National Univ., South Korea (wing1128@naver.com)

\*\* Coauthor, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National Univ., South Korea (landpkh@changwon.ac.kr)

### ABSTRACT

**Purpose:** Recently, cities have suffered thermal problems such as increases in energy consumption and the number of heat-wave-induced patients and tropical nights. To mitigate these kinds of problems, the use of cool roofs with high reflective coating as an effective intercept of solar radiation from the roof in order to reduce building temperature was investigated in this work. Actual buildings in a southern area of Korea were used in this case study. **Method:** The experimental buildings had similar locations, sizes, and aspects and were divided into those with cool roof application (CR) and no cool roof application (NCR). Temperature of the roof surface, ceiling surface, ceiling air, and room air layers using contact-type thermometers and thermo-hygrometers; thermal emittance; and solar reflectance were measured. **Result:** First, the thermal emittance, on average, was 0.85 with NCR and 0.95 with CR. Solar reflectance was 0.15 with NCR and 0.15 before and 0.75 after CR. Second, roof surface temperature with CR was 8.4 °C (August) and 6.6 °C (September) cooler than with NCR. Third, on a weekend in September, maximum ceiling and room air temperatures were 3.7 °C and 1.7 °C cooler, respectively, with CR than with NCR. Weekend data were compared because air conditioning was not used at that time.

### KEYWORD

고반사 지붕  
알베도  
지붕 시스템  
건물 온도

High Reflective Roof  
Albedo  
Roof System  
Building Temperature

### ACCEPTANCE INFO

Received Aug 6, 2018  
Final revision received Aug 22, 2018  
Accepted Aug 22, 2018

© 2018 KIEAE Journal

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

기후변화로 인한 지구의 기온 상승은 폭염 발생을 증가시키고 있으며, 국내에서도 폭염특보를 주의보와 경보로 구분하여 6~9월에 일최고기온이 2일 이상 33°C 이상 지속될 것으로 예상될 때를 주의보, 35°C 이상 지속될 것으로 예상될 때를 경보로 안내함으로써 폭염 피해를 예방하고자 노력하고 있다[1, 2].

폭염으로 인한 피해는 폭염특보 발생일수가 증가할수록 온열질환자, 냉방 에너지 소비량이 증가하는 것으로 알려져 있다[3, 4]. 특히 냉방 에너지 소비량의 경우 건물을 구성하는 콘크리트, 시멘트 등과 같은 인공 재질의 특성과 관련되어 있다. 인공 재질은 열 용량이 크기 때문에 주간에 유입된 태양 복사에너지가 축적되었다가 야간까지 건물을 높은 온도로 유지시키고 다음 날 주간에 에너지가 다시 축적되는 현상이 반복됨으로써 건물의 온도가 장기간 높게 유지되어 건물 내 열 쾌적성이 감소하여 냉방 에너지 소비량이 더욱 증가한다[5]. 따라서 주간에 유입되는 태양 복사 에너지를 감소시켜야 야간에 건물의 온도가 떨어지게 되고 건물이 고온으로 장기간 유지되

는 것을 방지할 수 있다.

폭염이 발생하는 여름은 태양의 높은 고도로 인해 건물의 구조체 중 옥상으로 유입되는 에너지의 양이 가장 많다. 또한 국내 건물의 대부분이 평지붕으로 되어있어 일사에 의한 영향을 직접적으로 받게 된다. 따라서 건물의 온도 상승을 감소시키기 위해서 옥상으로 유입되는 태양 복사에너지를 감소시켜 건물 내부의 열환경을 쾌적하게 만들고 냉방에너지 소비량을 저감시킬 수 있는 방법이 효과적이다. 특히 신축건물과 달리 노후 건물의 경우 단열성능이 감소하여 옥상으로 유입되는 일사의 영향이 크기 때문에 노후 건물부터 우선적으로 방안 적용이 필요하다[6].

옥상으로부터 유입되는 태양 복사에너지를 감소시키는 방안으로 쿨루프, 옥상녹화 등의 방법들이 제안되었다. 그러나 옥상녹화의 경우 하중 증가, 유지관리 등의 경제성 문제들로 인해 노후 건물에 적용하기에 부적절하므로 건물 구조체를 그대로 유지하면서 적용할 수 있는 쿨루프가 적합하다. 쿨루프, 옥상녹화를 옥상에 적용하여 건물 온도 및 에너지 감소 효과 등을 비교한 연구는 Santamouris, Zinzi and Agnoli, Takebayashi and Moriyama 등이 있다[7, 8, 9].

쿨루프는 Fig. 1.과 같이 태양 반사율과 열 방사율 또는 태양반사율지수(SRI)이 높은 도료를 지붕에 도포하여 유입되는 태양복사에너지를 감소시키는 시스템을 말한다[10, 11].

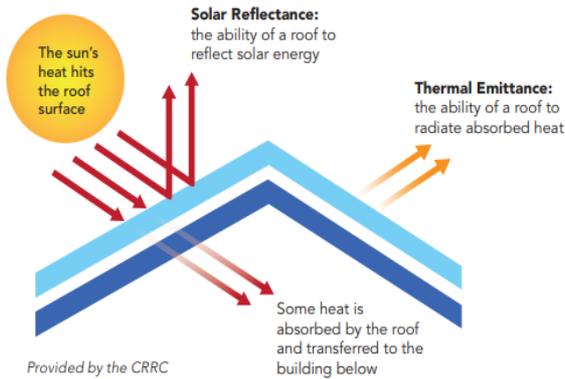


Fig. 1. Working principle of Cool Roofs (Source: CRCC, Available at: <https://coolroofs.org/>)

쿨루프는 국외에서 Table 1.과 같이 USGBC(U.S. Green Building Council)의 LEED(Leadership in Energy and Environmental Design), EPA(U.S. Environmental Protection Agency)의 ENERGY STAR등에서 지붕 경사 2:12를 기준으로 SRI 또는 태양 반사율 및 열 방사율 값을 기준으로 평가하여 쿨루프 제품으로 인정하고 있으며, 국내는 아직 기준이 없는 상태이다[12].

국외에서는 쿨루프의 효과가 증명되어 그와 관련된 연구가 활발하게 진행되었다. 그 중 실제 건물을 대상으로 쿨루프를 적용하였을 때 레이어별 건물 온도 감소 효과를 실측 및 시뮬레이션을 활용하여 증명한 연구는 Bozonnet et al., Kolokotroni et al., Stavrakakis et al., Remeo and Zinzi 등이 있다[13-16]. 국내에서는 김옥, 김준우와 엄정섭, 김경아가 쿨루프 도입을 위하여 모형 또는 시뮬레이션을 활용한 연구를 진행하였으며[17-20], 일부 실제 건물에 적용하여 효과를 확인한 연구 송봉근, 박경훈 외, 박소희 외[21-23]가 존재하나 1개의 건물 옥상의 일부에 쿨루프를 적용하여 그 효과를 확인하였기 때문에 건물 구조체를 통해 전도되는 열의 이동에 따른 영향을 배제하지 못하였다.

따라서 본 연구는 쿨루프 적용에 따른 건물 온도 감소 효과를 알아보기 위하여 위치, 크기, 향, 등이 유사한 2개의 건물을 대상으로 쿨루프 적용 건물과 미적용 건물(대조군)로 구분하여 실험을 진행하였다. 결과 비교를 위하여 옥상 표면 온도에 영향을 미치는 옥상 도료의 물리적 특성인 반사율과 방사율을 확인한 후, 옥상 표면온도부터 건물의 최상층 실내온도까지 레이어별로 온도 변화를 확인하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구의 범위

#### 1) 시간적 범위

2016년 8월 1일부터 건물의 레이어별 온도 데이터를 수집하기 시작하여 현재까지 진행 중이며, 쿨루프 적용은 2016년 8월 10일~16일 사이에 진행되었다. 수집된 데이터 중 본 연구에서는 건물 옥상에 쿨루프가 적용되기 전과 후인 2016년 8월, 9월 데이터를 활용하여 분석하였다.

Table 1. Typical minimum Cool Roofs requirements (Source: Urban and Roth, 2010. rewrite by author)

Program	Roof slope	Solar reflectance		Thermal emittance	Solar Reflectance Index(SRI)		
		initial	3-years aged	new or aged	initial	3-years aged	
LEED	Low sloped ( $\leq 2:12$ )	-	-	-	OR	82	64
	Steep sloped ( $> 2:12$ )	-	-	-		39	32
ENERGY STAR	Low sloped ( $\leq 2:12$ )	0.65	0.50	-	-	-	
	Steep sloped ( $> 2:12$ )	0.25	0.15	-	-	-	

#### 2) 공간적 범위

연구대상지는 Fig. 2.와 같이 국내 남부지역에 위치한 창원시로서 2015~2017년 연간 평균기온 14.5~14.9°C, 최저 기온 -11.3~-8.9°C, 최고 기온 35.3~37.2°C에 해당하는 여름의 기온이 높은 도시 중 하나이며, 인구가 밀집되어 있어 폭염과 같은 열환경 문제가 발생할 경우 피해가 크게 발생할 수 있는 곳이다.

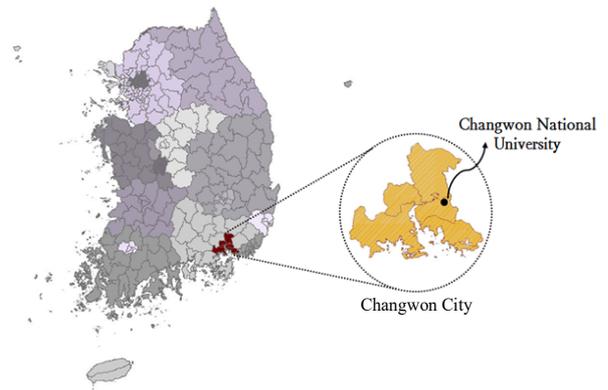


Fig. 2. Study area (source: Kim, 2016)

실험은 창원시에 위치한 창원대학교 캠퍼스의 공과대학 건물 2개를 선정하여 Fig. 3.과 같이 진행하였다. 건물은 위치, 크기, 향 등이 유사한 건물 2개를 선정하였으며, Fig. 3.(a)는 대조군으로써 쿨루프를 미적용한 건물(NCR), Fig. 3.(b)는 쿨루프를 적용한 건물(CR)이다.



Fig. 3. (a) Non-application of cool roofs (NCR) - left, (b) Application of cool roofs (CR) - right

쿨루프 미적용 건물은 가로 84m, 세로 18.3m, 높이 11.7m의 건물이며, 센서를 설치한 방(304호)은 가로 12.6m, 세로 8.1m이다

(Fig. 4.). 쿨루프 적용 건물은 가로 88.4m, 세로 18.6m, 높이 14.4m의 건물이며, 센서를 설치한 방(402호)은 가로 12.6m, 세로 7.8m이다 (Fig. 5.).

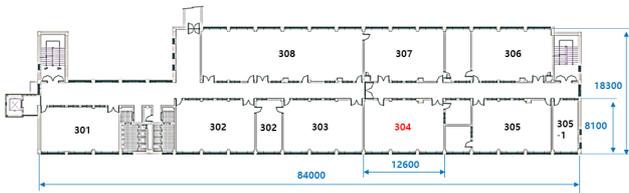


Fig. 4. Plan view of NCR



Fig. 5. Plan view of CR

3) 쿨루프 적용

쿨루프 적용은 옥상에 방수 시공을 한 지 얼마 되지 않아 우레탄 방수가 된 녹색 옥상위에 “N”사 제품을 하도와 상도 처리하였다. 하도는 옥상방수용 탄성우레탄 하도인 크린탄 1000을 사용하였다. 상도는 ENERGY SAVER 우레탄(R)상도 백색(주제)를 경화제와 8:1의 비율로 혼합하여 사용하였으며, 해당 제품은 미국 CRCC(Cool Roof Rating Council), 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 ENERGY STAR 에서 인증을 받은 제품으로 초기 태양반사율/풍화된 태양반사율이 0.77/0.73, 초기 열방사율/풍화된 열방사율이 0.88/0.88이다. 시공과정은 Fig. 6.과 같다.

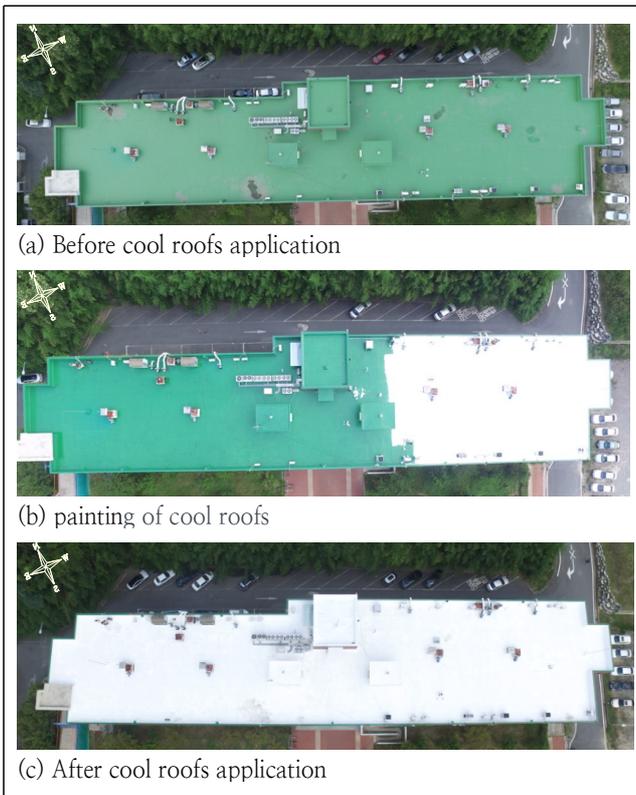


Fig. 6. Painting process of CR

2.2. 측정항목

측정항목은 총 6가지로써 옥상 도료의 특성(반사율, 방사율), 건물 레이어별 온도(옥상 표면, 천장표면, 천장내부, 방내부)이다. 건물 레이어별 온도 측정은 레이어마다 센서를 설치하여 측정하였다.

첫 번째, 쿨루프는 옥상 표면의 물리적 특성 중 반사율이 0.65과 방사율이 0.80이상일 경우를 의미하므로, 이와 같은 옥상 도료의 물리적 특성을 확인하기 위하여 2개의 건물 옥상표면의 반사율과 방사율을 측정하였다. 반사율은 CNR4 Net-radiometer(Kipp & Zonen사), CR1000 datlogger를 사용하여 옥상 표면으로부터 10~20cm 를 띄운 뒤 1시간동안 측정하여 데이터를 수집하였다. 방사율은 비접촉식 온도계(Testo 830-T1)와 방사율 보정 테이프(Testo, ε=0.93)를 사용하여 측정하였다(Fig. 7.).



Fig. 7. Measurement of rooftop characteristics(NCR-left, CR-right)

두 번째, 옥상표면과 천장표면의 경우 접촉식 표면온도 측정계(Testo 175 T3)를 이용하여 측정하였다. 옥상표면의 측정위치는 강우 시 빗물이 고이지 않고 그림자, 실외기 등 온도에 영향을 줄 수 있는 인자들의 영향이 최소로 되는 지점으로 선정하여 설치하였다. 또한 센서를 주기적으로 관리하여 측정단면에서 발생하는 습기, 먼지 등으로 인한 오류를 최소한으로 하였다. 천장표면의 측정위치는 단열재에 부착하였으며, 센서가 떨어지지 않도록 설치하였다. 세 번째, 천장내부와 방내부의 경우 온도습도계(Testo 175 H1)을 이용하여 측정하였다. 실내 공간을 대표할 수 있는 위치에 설치하였으며, 방내부의 경우 냉·난방기, 출입문 등의 영향을 고려하여 설치하였다(Fig. 8.).

그 외 창은 CR과 NCR이 동일하게 크기가 가로 3.6m, 세로 1.8m,

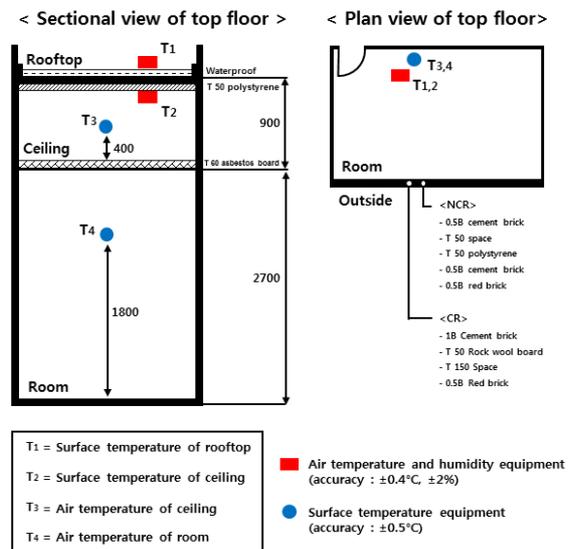


Fig. 8. Measurement points of layers in building

재료는 12mm 복층유리, 창틀은 100mm 칼라 알루미늄으로 구성되어 있었다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1. 태양 반사율 및 열 방사율

옥상 표면온도 등 건물 온도에 영향을 주는 옥상 도료의 열 방사율, 태양 반사율 측정 결과는 다음과 같다. 열 방사율의 경우 NCR, CR이 각각 0.85, 0.95의 값으로 나타나, CR이 쿨루프 적용 전에도 NCR 보다 방사율이 0.1 높은 것으로 나타났다. 태양 반사율의 경우 NCR과 쿨루프 적용 전 CR이 모두 0.15의 값으로 나타났으며, CR은 쿨루프 적용 후 0.75의 값으로 약 0.6이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 CR이 쿨루프 적용 후, 태양 반사율이 0.6이 증가함으로 인해 감소하는 건물 레이어별 온도를 확인할 수 있었다.

Table 2. Thermal emittance and solar reflectance of rooftop

	Non-application of cool roofs (NCR)	Application of cool roofs (CR) (before / after)
Thermal emittance	0.85	0.95 / 0.95
Solar reflectance	0.15	0.15 / 0.75

#### 3.2. 옥상 표면온도

쿨루프 적용 전인 8월 5일부터 9일까지 옥상표면온도( $T_1$ )는 두 개의 건물이 주간에 비슷한 경향을 보였으며, 야간에 NCR의 온도가 약  $1^{\circ}\text{C}$  이상 높은 경향을 보였다(Fig. 9.). 8월 10일부터 16일까지는 쿨루프 적용이 이루어졌으며, 해당 기간 동안 측정을 중단하였다. 9월의 경우 태풍으로 인해 15~23일까지 측정을 중단하였다. 8월 17일부터 9월까지 쿨루프 적용 후의 옥상표면온도를 확인한 결과, 주-야간 모두 CR의 온도가 NCR 보다 낮은 경향을 보였다. 또한 기온이 높을수록 두 건물의 옥상표면온도 차이가 증가하고 강우가 발생하여 일사가 차단될 경우 온도 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 온도 차이(NCR-CR)는 8월의 경우 최대  $8.4^{\circ}\text{C}$ (19일 12시), 평균  $3.1^{\circ}\text{C}$ (17일~31일), 최소  $-2.5^{\circ}\text{C}$ (30일 7시), 9월의 경우 최대  $6.6^{\circ}\text{C}$ (24일 16시), 평균  $2^{\circ}\text{C}$ (태풍 기간을 제외한 1~30일), 최소  $-0.6^{\circ}\text{C}$ (30일 15시)로 나타났다(Fig. 9., 10.).

Fig. 11은 기온에 따른 옥상표면온도 증가 기율기를 확인한 것으로 (a) 쿨루프 적용 전 NCR, CR의 기율기가 비슷하게 나타났으며, (b) 쿨루프 적용 후 CR이 NCR에 비해 기율기가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 쿨루프 적용 후 기온이 증가할 때 옥상 표면온도 증가 폭이 적용 전에 비해 완만해진 것을 의미한다.

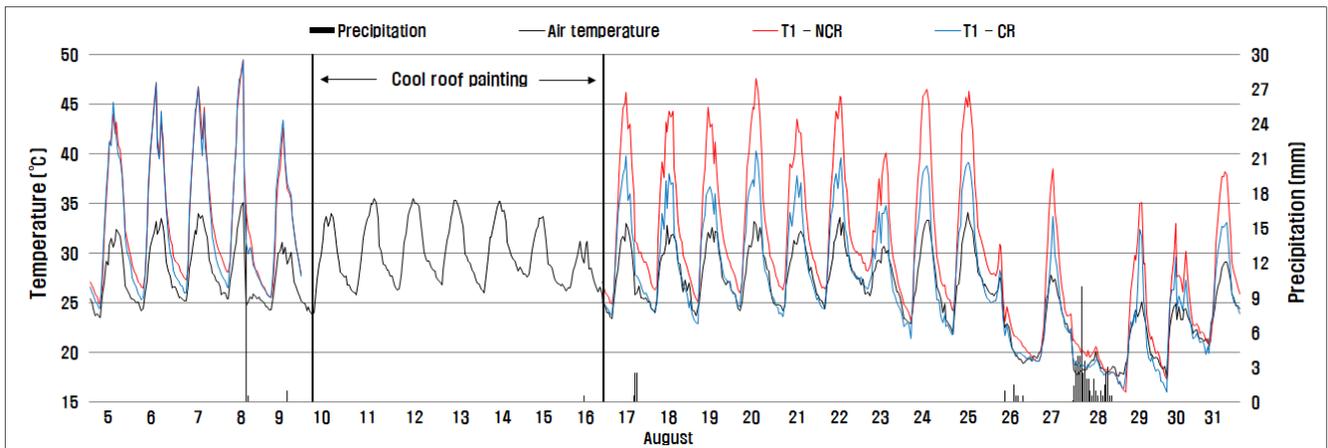


Fig. 9. Surface temperature( $T_1$ ) of rooftop in August

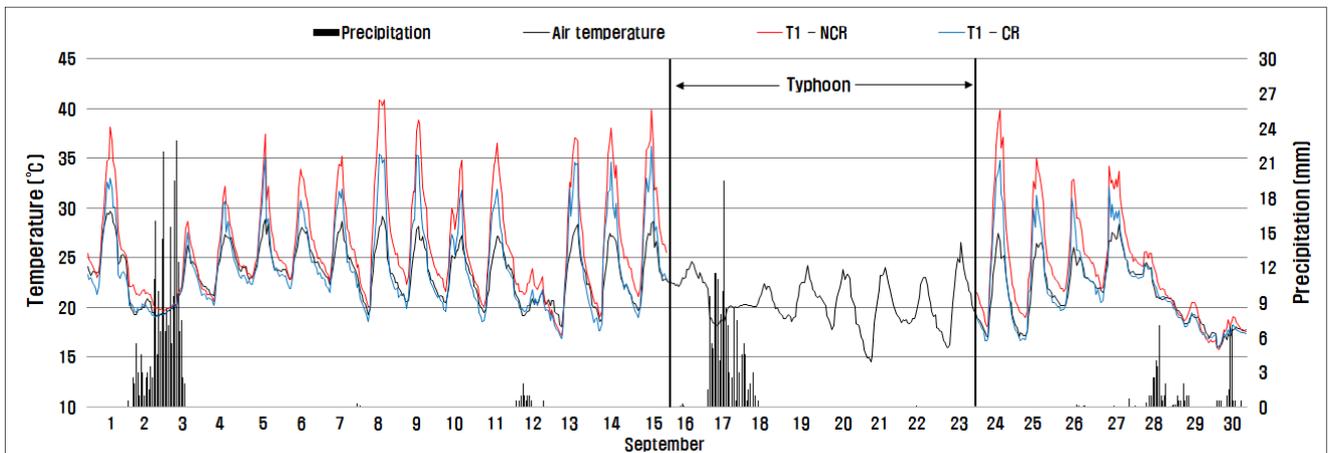
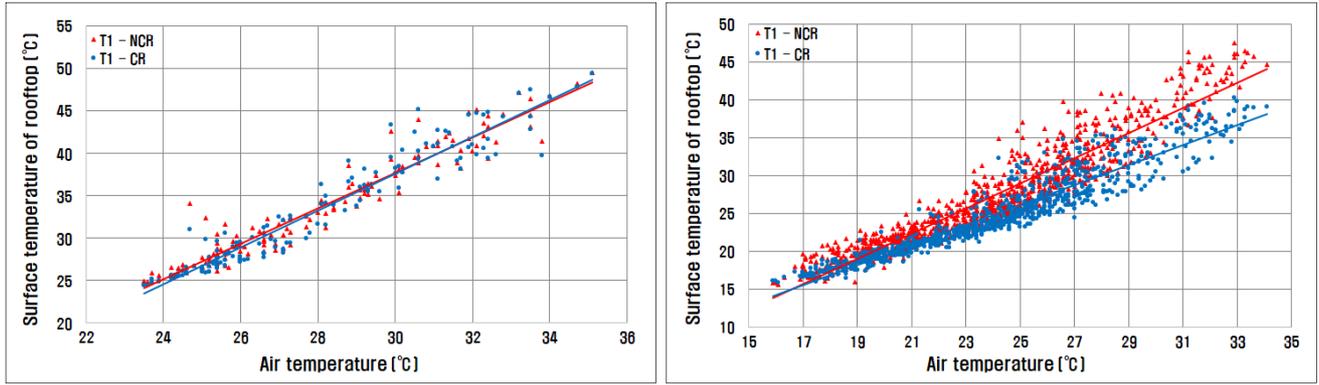


Fig. 10. Surface temperature( $T_1$ ) of rooftop in September



(a) Before painting of cool roofs

(b) After painting of cool roofs

Fig. 11. Correlation of air temperature and surface temperature of rooftop(before and after painting) in CR

### 3.3. 천장 표면온도 및 천장 내부온도

Fig. 12., 13.을 살펴보면 NCR과 CR의 천장 표면온도( $T_2$ )와 천장 내부온도( $T_3$ )는 온도 차이는 최대  $1.1^{\circ}\text{C}$ 로써 비슷한 온도 분포를 확인하였다. 다음으로 쿨루프 적용여부에 따른 온도 패턴을 확인하였다. 그 결과 쿨루프 적용 전의 경우, CR이 NCR보다 온도가 높은 것으로 나타났으며 쿨루프 적용기간동안 점차 온도가 비슷해지다가 적용 완료 후 온도가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 8월 25일 이후 기온 감소로 인해 천장 표면온도 및 내부온도가 감소하였으나, NCR과 CR의 온도 차이는 더욱 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 기온은 감소하였으나 그 동안 일사에 의해 유입된 열이 건물 내부에 축적되어 외부로 빠져나가지 않고 유지되는 상태에서 쿨루프 적용으로 인해 지속적으로 유입되는 복사에너지가 NCR에 비해 CR이 적음으로써 그 차이가 증가한 것으로 판단된다.

결과적으로 NCR과 CR의 온도차이는 8월에 비해 9월에 증가한 것을 확인할 수 있었으며 천장 표면온도( $T_2$ )와 천장 내부온도( $T_3$ ) 차이는 CR의 센서가 설치된 방에서 평일에 냉방기를 가동하여 정확한 온도 차이를 구하기가 불가능하였다. 따라서 이후 주말을 따로 분류하여 온도 차이를 확인하였다.

### 3.4. 방 내부온도

Fig. 14., 15.의 결과를 살펴보면 방 내부온도( $T_4$ )는 쿨루프 적용 전에 CR이 NCR 보다 약  $2^{\circ}\text{C}$ 가량 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 건물 외벽을 구성하고 있는 레이어의 차이인 것으로 판단되며, Fig.8.을 살펴보면 NCR이 CR보다 0.5B 시멘트 벽돌과 단열재가 추가로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 쿨루프 시공 전에 CR과 NCR의 옥상 표면온도는 비슷하였으나(Fig. 9.), 천장 표면온도, 천장 내부온도, 방 내부온도는 건물 외벽의 레이어 구성 차이에 의해 CR이 NCR보다 온도가 높은 것으로 판단된다(Fig. 12., 14.). 이후 쿨루프 적용하는 기간 동안 두 건물의 온도차이가 점차 감소하였고 쿨루프 적용 완료이후 CR이 NCR보다 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 8월에 비해 9월에 쿨루프 적용여부에 따라 온도 차이가 더 커지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 천장 표면온도 및 천장 내부온도에서 나타난 결과와 마찬가지로 8월 동안 건물에 축적된 열이 9월에 더 큰 온도차를 야기한 것으로 판단된다. NCR과 CR의 방 내부 온도 차이는 천장 표면온도 및 천장 내부온도 결과와 마찬가지로 이후 주말을 따로 분류하여 온도 차이를 확인하였다.

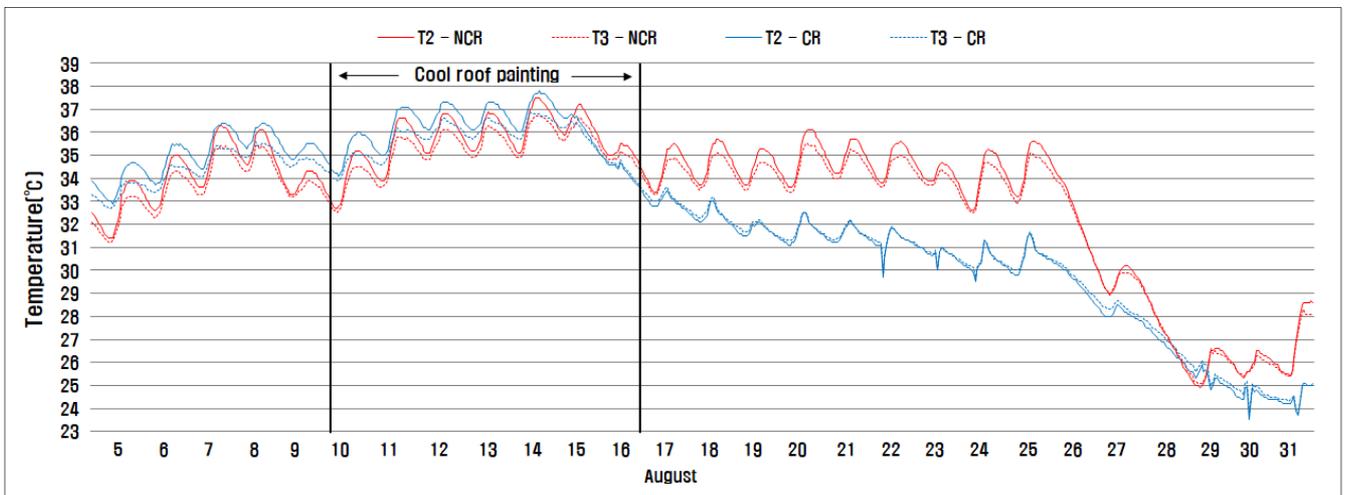


Fig. 12. Surface and air temperatures of ceiling( $T_2$ ,  $T_3$ ) in August

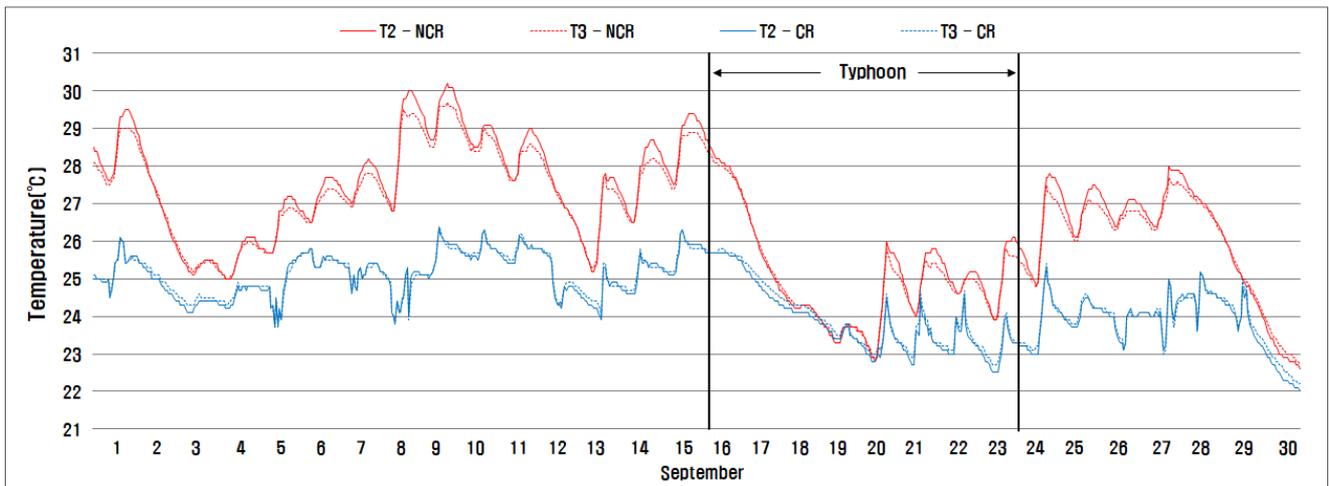


Fig. 13. Surface and air temperatures of ceiling( $T_2$ ,  $T_3$ ) in September

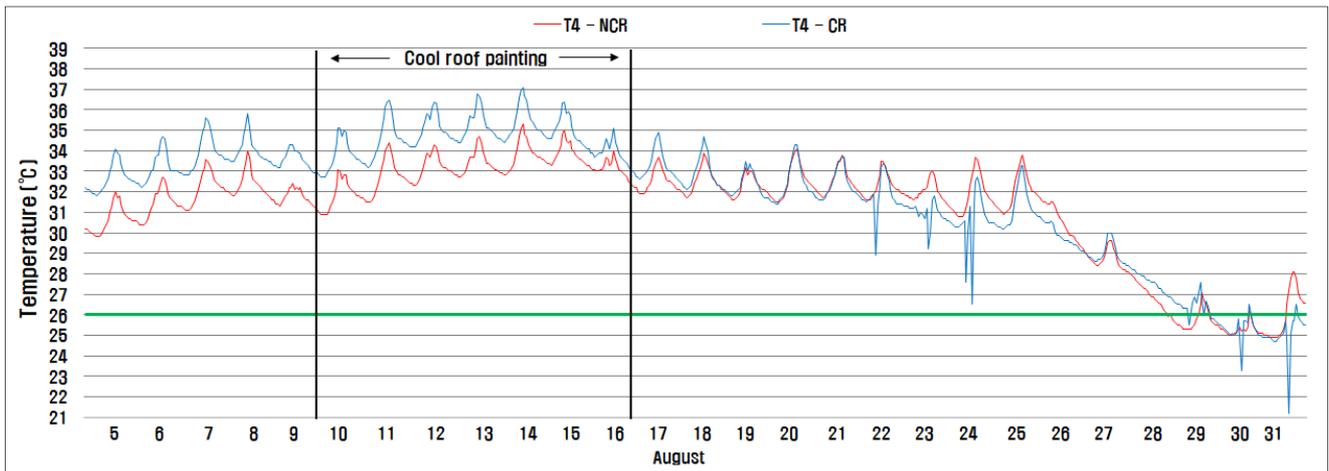


Fig. 14. Air temperatures of room( $T_4$ ) in August

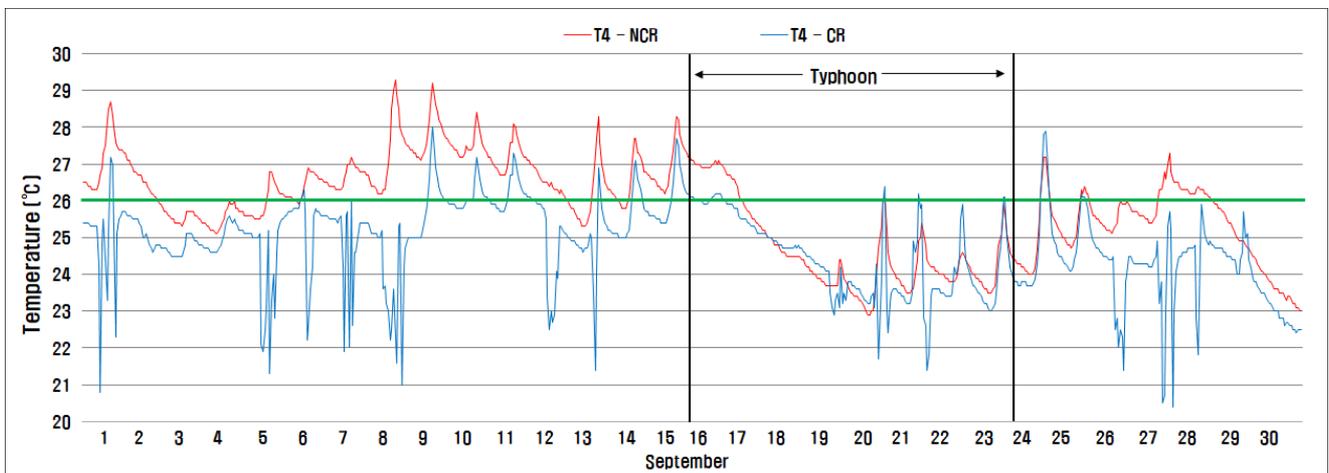


Fig. 15. Air temperatures of room( $T_4$ ) in September

### 3.5. 쿨루프 적용 전·후 주말의 천장 및 방 내부온도 비교

평일에 냉방기가 가동된다는 점을 고려하여 강의실을 사용 안하는 주말의 천장 내부온도, 방 내부온도 그리고 각 항목에 대한 NCR과 CR의 온도 차이를 확인하였다(Fig. 16.).

주말의 기온을 살펴본 결과, 쿨루프 적용 전 8월 6일~7일 최대 34°C, 평균 28.79°C, 최소 24.2°C로 나타났다. 쿨루프 적용 직후인 8월 20일~21일은 최대 33.2°C, 평균 28.38°C, 최소 24.2°C로 나타났다. 쿨루프 적용의 약 3주 후인 9월 10일~11일은 최대 27.2°C, 평균 23.44°C, 최소 19.5°C로 나타났다.

천장 내부온도를 살펴본 결과, 8월 6일~7일의 대부분이 NCR보다 CR의 온도가 높은 것으로 나타나 온도 차이 값(NCR-CR)이 대부분 음의 값으로 나타났다. 온도 차이는 최대 0.1°C, 평균 -0.57°C, 최소 -1.1°C로 나타났다. 8월 20일~21일은 전 기간 동안 CR이 NCR보다 온도가 낮게 나타났으며 온도 차이는 최대 3.6°C, 평균 2.83°C, 최소 2.1°C로 나타났다. 9월 10일~11일도 CR이 NCR보다 전 기간 동안 온도가 낮게 나타났으며, 최대 3.7°C, 평균 2.67°C, 최소 1.9°C로 나타났다. 따라서 쿨루프 적용 직후인 8월 20일~21일에 비해 쿨루프 적용의 약 3주 후인 9월 10일~11일의 기온이 평균 4.94°C가 감소하였음에도 불구하고 NCR과 CR의 온도 차이가 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 예상한 것과 마찬가지로 8월 동안 건물에 축적된 열이 외부로 빠져나가지 않은 상태에서 쿨루프 적용으로 인해 CR이 NCR보다 유입되는 복사에너지양이 적어 온도 차이가 유지되는 것으로 확인된다.

방 내부 온도를 살펴본 결과, 8월 6일~7일의 대부분이 CR이 NCR보다 온도가 높은 것으로 나타났으며 온도 차이는 최대 -1.4°C, 평균 -1.77°C, 최소 -2.1°C로 나타났다. 8월 20일~21일은 온도 차이가 거의 없었으며 최대 0.4°C, 평균 0.12°C, 최소 -0.3°C로 나타났다. 이는 같은 기간에 온도 차이가 크게 나타난 천장 내부온도의 결과와 상이한 부분으로써, 쿨루프 적용의 효과가 천장 내부부터 방 내부까지 순차적으로 영향을 주고 있는 것으로 확인된다. 마지막으로 9월 10일~11일 온도 차이 확인 결과, 최대 1.7°C, 평균 1.19°C, 최소 0.

8°C로 나타났다. 따라서 천장 내부온도와 마찬가지로 8월에 비해 9월의 기온이 크게 감소하였으나, 쿨루프 효과로 인해 NCR과 CR의 방 내부온도 차이는 증가한 것으로 확인되었다.

### 3.6. 쿨루프 효과 고찰

본 연구는 쿨루프 적용 건물(CR)과 쿨루프 미적용 건물(NCR)을 대상으로 쿨루프 적용에 따른 레이어별 온도 변화를 확인하였다.

분석 결과, 두 건물의 온도 차이(NCR-CR)는 옥상표면온도( $T_1$ )가 8월의 경우 최대 8.4°C, 평균 3.1°C, 최소 -2.5°C, 9월의 경우 최대 6.6°C, 평균 2°C, 최소 -0.6°C로 나타났다. 천장 내부온도( $T_3$ ) 및 방 내부온도( $T_4$ )는 냉방기가 가동되지 않은 주말 중 쿨루프 적용 직후와 3주 후인 날을 분석하였다. 천장 표면온도( $T_2$ ) 및 내부온도( $T_3$ )는 쿨루프 적용 직후 최대 3.6°C, 평균 2.83°C, 최소 2.1°C, 적용 3주 후 최대 3.7°C, 평균 2.67°C, 최소 1.9°C로 나타났다. 방 내부온도( $T_4$ ) 쿨루프 적용 직후 최대 0.4°C, 평균 0.12°C, 최소 -0.3°C, 적용 3주 후 최대 1.7°C, 평균 1.19°C, 최소 0.8°C로 낮게 나타났다.

그리고 본 연구결과를 선행 연구결과와 비교·검증하기 위하여 두 개의 건물(CR, NCR)을 대상으로 쿨루프 적용 효과를 레이어별로 확인한 연구들을 분석하였다. Bozonnet et al.은 냉방 시스템이 없고 단열이 된 건물을 대상으로 시뮬레이션을 통해 쿨루프 건물(CR)이 쿨루프 미적용 건물(NCR)에 비해 옥상 표면온도가 평균 12.5°C, 다락의 온도가 평균 8.4°C, 방 온도가 약 1°C 낮은 것을 확인하였다 [14]. Stavrakakis et al.은 두 개의 학교 건물을 대상으로 쿨루프 적용 건물(CR)이 미적용 건물(NCR)보다 옥상 표면온도가 최대 9~14.8°C 낮은 것을 확인하였다. 또한 주간 평균 천장 표면온도가 쿨루프 시공 전 기간에 CR이 NCR보다 1.8°C 높다가 쿨루프 시공 후 기간에 NCR이 CR보다 1.5°C 높은 것으로 나타났다[16]. 그 외 1개 건물을 대상으로 쿨루프 적용 효과를 레이어별로 확인한 연구 등이 있었다[15, 17].

따라서 쿨루프 적용에 따른 온도 효과를 선행 연구들과 비교·검증한 결과, 옥상표면온도는 선행연구들에 비해 낮았으나 방 내부온도

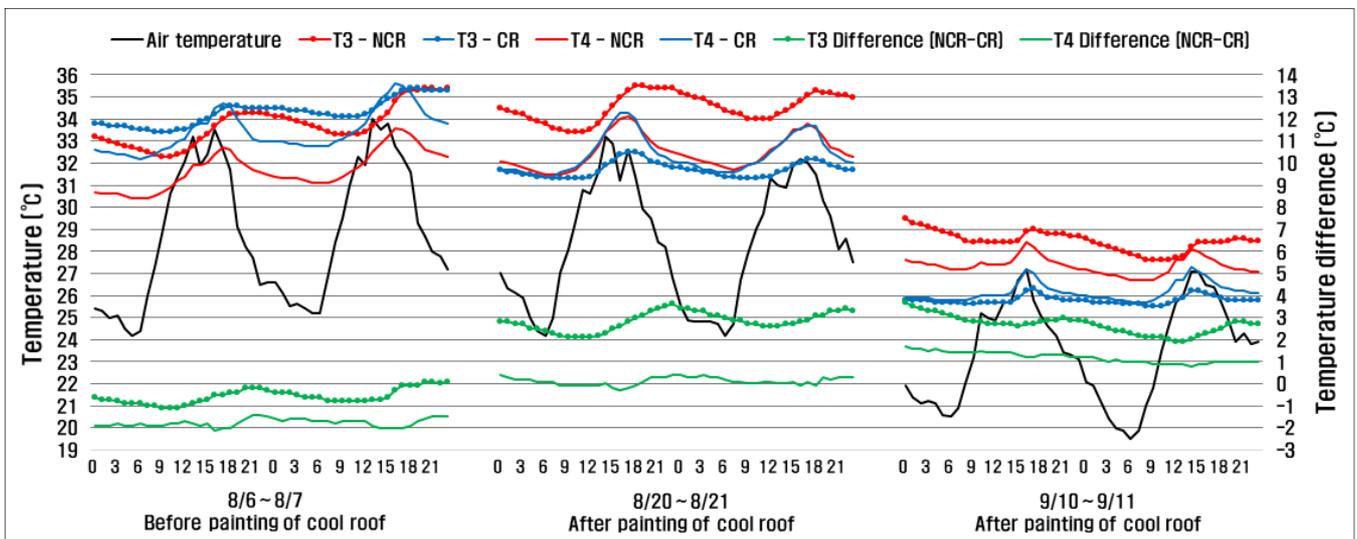


Fig. 16. Air temperatures of ceiling( $T_3$ ) and room( $T_4$ ) on weekends

는 1~2°C 사이로써 비슷한 것으로 나타나 쿨루프의 적용이 실제 건물의 온도 감소 효과가 있는 것으로 확인되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 폭염, 열대야 등으로 인해 야기되는 냉방 에너지 소비량, 온열질환자 증가 등 국내 도시의 열 환경 문제를 완화시키기 위하여 옥상으로부터 유입되는 태양 복사에너지를 효과적으로 차단하여 건물 온도 상승을 저감시키는 쿨루프 시스템의 효과를 실제 건물에 적용하여 검증하였다.

연구 대상지는 국내 남부지역에 위치한 창원시 창원대학교 캠퍼스이며 크기, 향, 위치 등이 거의 동일한 건물 2개를 대상으로 쿨루프 적용 건물(CR; Application of cool roofs)와 효과 비교의 대조군인 쿨루프 미적용 건물(NCR; Non-application of cool roofs)로 구성하여 실험하였다. 측정은 2016년 8월 1일부터 시작하여 현재까지 진행되고 있으며, CR은 2016년 8월 10일~16일에 쿨루프 적용하여 쿨루프 적용 전·후 건물 레이어별 온도 변화를 확인하였다.

결과를 살펴보면, 옥상 도료의 특성 중 열 방사율은 쿨루프 미적용 건물, 쿨루프 적용 건물이 0.85, 0.95로써 높게 나타났으며 태양 반사율은 쿨루프 미적용 건물이 0.15, 쿨루프 적용 건물은 쿨루프 적용 전 0.15에서 쿨루프 적용 후 0.75로써 0.6이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 쿨루프 적용에 따른 옥상 도료의 태양 반사율 증가가 건물 온도에 미치는 영향을 레이어별로 확인할 수 있었다.

쿨루프 적용 건물이 미적용 건물보다 옥상 표면온도의 경우, 8월과 9월에 각각 최대 8.4°C, 6.6°C 낮게 나타났다. 또한 쿨루프 적용 후 옥상 표면온도가 기온이 증가하더라도 적용 전보다 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. 천장 및 방 내부온도의 경우 8월보다 기온이 감소한 9월에 두 건물의 온도차이가 증가하였으며, 이는 8월동안 건물 내부에 축적된 열이 외부로 빠져나가지 못하여 9월에 차이가 증가시킨 것으로 판단된다. 냉방기가 가동되지 않는 주말의 온도를 비교한 결과 쿨루프 적용 건물이 미적용 건물보다 천장 및 방 내부온도가 각각 9월에 최대 3.7°C, 1.7°C 낮게 나타났다. 그러나 쿨루프 적용 전에 쿨루프 적용 건물이 미적용 건물보다 온도가 높았기 때문에 쿨루프 적용 후 방 내부온도가 약 1°C 이상이 감소한 것은 결과적으로 쿨루프 적용으로 인해 방 온도가 약 2°C 가량 감소한 것으로 볼 수 있다. 또한 두 건물의 방 내부온도가 국내 냉방 기준 온도인 26°C를 8월~9월 중순까지 대부분 넘는 것으로 확인되어 건물의 면적 및 냉방가동시간 등을 고려한다면 쿨루프 적용으로 인한 경제적 효과가 클 것으로 예상된다.

본 연구는 쿨루프를 모형, 시뮬레이션이 아닌 실제 건물에 적용하여 건물 온도 감소 효과를 객관적으로 증명한 것에 의의가 있으며, 연구 결과는 국내 쿨루프 도입에 대한 근거 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구는 한 해 여름을 대상으로 분석되었기 때문에 겨울에 발생할 수 있는 건물 온도 감소효과로 인한 난방 에너지 증가와 장기간 적용에 따른 도료의 반사율 저하 등 쿨루프의 부정적인 영향들에 대해 추후 장기간의 현장 모니터링과 시뮬레이션을 통해 확인할 필요가 있다.

## Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(No.2016R1A2B4015460).

## Reference

- [1] 기상청 위험기상정보포털 // (Korea Meteorological Administration). Available at: <http://www.kma.go.kr/aboutkma/intro/hiw/index.html>.
- [2] 보건복지부, 질병관리본부 // (Ministry of Health and Welfare, Centers for Disease Control&Prevention). Available at: <http://www.nih.go.kr/CDC/info/CdcKrInfo0203.jsp?menuIds=HOME001-MNU1130-MNU1359-MNU1360-MNU1361>.
- [3] Naughton, M.P., Henderson, A., Mirabelli, M.C., Kaiser, R., Wilhelm, J.L., Kieszak, S.M., and McGeehin, M.A. 2002. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago. *American journal of preventive medicine*, 22(4):221-227.
- [4] Frank, T. 2005. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and buildings*, 37(11):1175-1185.
- [5] Alvarado, J.L., Terrell Jr, W., and Johnson, M.D. 2009. Passive cooling systems for cement-based roofs. *Building and Environment*, 44(9):1869-1875.
- [6] Agrawal, P.C. 1989. A review of passive systems for natural heating and cooling of buildings. *Solar & wind technology*, 6(5):557-567.
- [7] Santamouris, M. 2014. Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, 103:682-703.
- [8] Zinzi, M. and Agnoli, S. 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55:66-76.
- [9] Takebayashi, H. and Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8):2971-2979.
- [10] Taha, H., Sailor, D.J., and Akbari, H. 1992. High-albedo materials for reducing building cooling energy use.
- [11] Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3):295-310.
- [12] Urban, B. and Roth, K. 2010. Building technologies program, Guidelines for selecting Cool roofs. V.1.2. U.S. Department of Energy.
- [13] Bozonnet, E., Doya, M., Allard, F. 2011. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings*, 43(2011):3006-30112.
- [14] Kolokotroni, M., Gowreesunker, B.L., and Giridharan, R. 2013. Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. *Energy and Buildings*, 67(2013):658-667.
- [15] Stavrakakis, G.M., Androutsopoulos, A.V., and Vyörykkä, J. 2016. Experimental and numerical assessment of cool-roof impact on thermal and energy performance of a school building in Greece *Energy and Buildings*, 130(2016):64-84.
- [16] Romeo, C. and Zinzi, M. 2013. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*, 67(2013):647-657.
- [17] 김옥, 2010, 쿨루프 시스템의 성능기준 및 설계지침에 관한 연구, 중앙대학교 대학원 박사학위논문 // (O. Kim, 2010, A study on the performance standards and design guidelines of cool roof system. Ph.D's thesis of Chungang University).

- [18] 김준우, 엄정섭, 2012, 설비 투자비용의 관점에서 쿨루프와 옥상녹화의 비교 평가: 경북대학교 캠퍼스 사례를 중심으로, 환경영향평가, 제 21권 6호 927-939쪽 // (J.W. Kim and J.S. Um, 2012, Comparative Evaluation between Cool Roof and Green Roof in terms of Installation Cost: a Case Study of KNU Campus, Journal of Environmental Impact Assessment, Vol.21 No.6 pp.927-939).
- [19] 김경아, 최정민, 박경훈, 2016, 자붕 색상 변화에 따른 건축물의 열환경 및 쿨루프 적용가능성 분석, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제 10권 6호 409-415쪽// (G.A. Kim, J.M. Choi, K.H. Park, 2016, Analysis of Thermal Environment in Buildings according to Color Change of Roof and Applicability of Cool Roof, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol.10 No.6 pp.409-415).
- [20] 김경아, 2016, 쿨루프의 도시열섬 완화 및 건물에너지 저감 효과 분석, 창원대학교 대학원 석사학위논문 // (G.A. Kim, 2016. Analysis on Urban Heat Island Mitigation and Building Energy Saving of the Cool Roof. Master's thesis of Changwon National University).
- [21] 송봉근, 김경아, 박경훈, 2016, 쿨루프 적용에 따른 업무용 건물의 내·외부 온도 저감 효과, 한국생태환경건축학회 논문집, 제 16권 6호 95-101쪽 // (B.G. Song, G.A. Kim, and K.H. Park, 2016, Reduction in Indoor and Outdoor Temperature of Office Building with Cool Roof, KIEAE Journal, Vol.16 No.6 pp.95-101).
- [22] 박경훈, 송봉근, 최철현, 김경아, 정다인, 최진환, 2014, 기후변화 대응 도시열섬완화를 위한 쿨루프(Cool Roof) 시범설치 및 효과 분석, 경남 녹색환경지원센터 // (K.H. Park, B.G. Song, C.H. Choi, G.A. Kim, D.I. Jeong, and J.H. Choi, 2014, GyeongNam Green Environment Center).
- [23] 박소희, 공경배, 민현준, 2017, 도시열섬 완화를 위한 쿨루프 성능평가, 대한건축학회 논문집, 제 33권 4호 55-62쪽 // (S.H. Park, K.B. Kong, and H.J. Min, Performance evaluation of cool roof for mitigating urban heat island effects -case study of "GangNam-gu Public Health Center" in Seoul, South Korea-, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.33 No.4 pp.55-62).