Journal of KIAEBS Vol.16, No.4, August pp. 321-332

RESEARCH ARTICLE

노후 단독주택에서 쿨루프의 적용을 통한 냉난방 요구량 변화에 대한 해석적 연구

황석호*

경남대학교 건축학부 건축공학전공 부교수

An Analytical Study on Heating and Cooling Demand Using Cool Roof System in Deteriorated Single Family House

Hwang, Seok-Ho*

Associate Professor, School of Architecture, Kyungnam University, Changwon, Korea

***Corresponding author:** Hwang, Seok-Ho, Tel: +82-55-249-2399, E-mail: hwangsh@kyungnam.ac.kr

ABSTRACT

A cool roof has the advantage of reducing the urban heat island effect and building cooling requirement by reflecting solar radiation on the roof surface. Therefore, it is being used as a green remodeling technology for deteriorated buildings. However, to evaluate the performance of the cool roof, it is necessary to evaluation of increases of heating demand due to the decrease of solar heat gain in winter. The ratio of heat gain and loss on the roof surface was analyzed according to the insulation level of old buildings. In particular, buildings with good insulation can reduce heat loss in winter, but may increase cooling requirements in summer. Therefore, reducing the heat gain through the cool roof in summer can be a good alternative. It was confirmed that the heat gain in summer through the roof surface decreased rather than the heat gain in winter, so, the heating and cooling demand was reduced by 27% on the flat roof and 30% or more on the slope roof.

주요어 : 쿨루프, 그린리모델링, 평지붕과 경사지붕, 냉난방 요구량

Keywords: Cool roof, Green remodeling, Flat and slope roof, Heating and cooling demand

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2022 August, 16(4): 321-332
https://doi.org/10.22696/jkiaebs.20220028

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: August 11, 2022
Revised: August 25, 2022
Accepted: August 26, 2022

© 2022 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

최근 지구온난화에 의한 기후변화와 그로 인해 발생하고 있는 많은 자연재해들로 지구 환경 변화의 위험성에 대한 인식이 커져가고 있다. 지구온난화는 인간의 여러 활동과정에서 발생한 온실가스의 증가가 주된 원인으로 알려져 있다. 따라서, 이러한 온실가스의 증가를 막기 위해서는 인간의 활동 과정에서 발생하는 온실가스의 양을 줄이는 것이 중요할 것이다. 온실가스 발생량을 줄이기 위한 근본적인 방법은 온실가스가 발생하는 시스템의 사용을 제한하는 것이다. 하지만 현실적으로 온실가스의 발생이 없는 시스템을 구축하는 것에는 여러 한계를 가지고 있다. 따라서, 현재는 온실가스를 발생하는 시스템의 효율을 단계적으로 개선해 나

가는 과정에 있으며, 최종적으로는 온실가스 발생이 없는 시스템만으로도 생활 가능한 환경을 구축하고자 노력하고 있다. 화석에너지를 사용하여 온실가스를 발생하는 분야는 크게 건축, 산업, 운송분야로 구분할 수 있다. Global Alliance for Buildings and Construction (2021)의 보고서에 따르면 건축분야에서는 전 세계에너지의 36%를 사용하고 있으며, 이산화탄소의 37%를 배출하고 있어 지구온난화에 많은 영향을 주고 있다.

최근 국내에서는 2050년까지 탄소중립사회로의 전환을 위하여 탄소중립 2050 시나리오를 발표하였으며(2050 Carbon Neutrality Commission, 2021), 이 시나리오에서 건축분야의 탄소절감 로드맵은 2018년 기준 52.1(백만톤CO_2eq)에서 6.2(백만톤CO_2eq)로 절감하는 안을 제시하고 있다. 이를 위해서는 신축건축물에 대한 에너지 성능기준의 강화뿐만 아니라 기존 노후 건축물의 에너지 성능을 향상시키는 것이 중요해진다. 최근에는 여러 지자체들에서 녹색건축물 지원사업을 실시하여 노후건축물의 그린리모델링에 소요되는 공사비의 일부를 지원하는 제도를 운영하고 있다. 여기에는 단열보완, 기밀강화, 창호성능개선을 기본으로 하고, 고효율보일러, 미니태양광, 옥상녹화, 쿨루프 설치 등과 같이 특정 요소기술의 적용에 추가적인 지원을 하고 있다. 이러한 지자체들의 재정지원은 투입되는 재정에 대한 에너지절감 효과를 객관적으로 검증해야만 된다. 그린리모델링지원사업과 녹색건축물 지원사업의 경우, 에너질 절감효과에 대한 부분을 검증하는 제도적인 장치가 있으며, 단열보완, 창호성능개선 등은 성능개선의 효과가 정량적으로 쉽게 판정할 수 있다. 추가적으로 지원되는 고효율보일러, 미니태양광, 옥상녹화의 경우도 에너지 절감효과에 대한 검증 자료가 많이 있다. 하지만, 쿨루프의 경우에는 쿨루프의 에너지 성능을 검증할 수 있는 국내의 자료가 부족한 상황이다.

쿨루프의 성능 및 효과에 대한 연구는 주로 국외에서 많이 진행되고 있다. 특히, 미국에서 가장 활발한 연구와 적용이 이뤄지고 있다. 미국의 경우 냉방부하가 큰 기후지역에서만 쿨루프의 설치를 장려하고 있으며, ASHRAE의 기준에 의해 지역별로 쿨루프의 설치기준과 성능기준을 제시하고 있다(Park et al., 2017a). 쿨루프로서 인증을 받기 위해서는 지붕의 형태(기울기)에 따라서 일정수준의 최소 반사율, 초기 반사율 또는 설치 3년후의 SRI (Solar Reflectance Index; 태양반사지수)값을 만족하도록 하고 있다(Park, 2019).

국내에서 쿨루프가 보급된 출발점은 여름철 도시열섬효과의 완화와 취약계층의 여름철 폭염 피해를 방지하지 위해서였다. 서울시의 기후환경본부 에너지시민협력반에서 시작하여 열섬현상 완화와 냉방에너지 절약을 위한 사업으로 시작하였고, 창원시, 대구시, 부산시의 경우에도 여름철 폭염피해를 예방하기 위한 시범사업으로 진행하였다(Park, 2019). 이러한 쿨루프는 시공과정의 단순함과 투입되는 예산이 저렴하기 때문에 많은 지자체들이 지원제도를 운영하고 확대하려 하고 있다. 서울시에서는 2014년부터 도시열섬완화와 여름철 건물온도 저감대책으로 진행하고 있으며, 경상남도와 경상남도내의 여러 지차체들과 경기도 광주시와 의왕시 등은 기후위기대응사업의 일환으로 쿨루프 지원사업을 운영하고 있다. 현재까지 국내에서 진행된 여러 연구들을 보면 쿨루프를 통해서 도시열섬의 완화와 여름철 냉방부하를 줄이는데 효과가 있는 것으로 알려졌다(Byun, 2018). 특히, 냉방부하의 절감 부분에서는 주로 쿨루프를 통한 실내온도 저감효과를 실험을 통해 검증하는 연구들이 있었다(Song et al., 2016; Lee et al., 2019). 또한, 쿨루프의 소재로 PCM (Phase Change Material; 상변화물질)

을 활용하는 방법에 대해서도 연구가 진행되고 있다.(Lee et al., 2017; Bang et al., 2019) 하지만, 지금까지의 국내 연구에서는 쿨루프의 적용 성능을 검증하는데 있어 난방에너지를 포함한 종합적인 건물의 에너지 성능에 대한 분석결과가 부족하였다. 특히, 현재 쿨루프 지원사업의 주된 대상이 노후한 주거용 건물임을 감안할 때 쿨루프로 인한 난방에너지가 증가되는 것에 대한 검토가 반드시 수행되어야 된다.

따라서, 본 연구에서는 쿨루프를 통한 냉방에너지 절감효과 뿐만 아니라 난방에너지를 포함한 냉난방에너지 성능에 대하여 검토하고자 한다. 해석에는 ISO13790을 기반으로 개발된 에너지샵(Energy#) 프로그램을 활용하였으며(Hwang, 2021), 다양한 지붕조건에서 건물의 에너지 성능을 검증하고자 한다.

쿨루프 시스템의 에너지 해석

건물 지붕 구조체의 복사열 해석

Figure 1은 지붕구조체 표면에서의 열수지 관계를 보여준다. 지붕면에 태양일사에너지가 유입되며, 지붕면에서 반사되거나 흡수된다. 흡수된 에너지는 지붕재료의 방사율과 열관류율에 의해 외부로 재방사되거나 실내로 유입된다. 지붕 재료의 반사율과 방사율에 따라 실내로 유입되는 에너지가 결정된다.

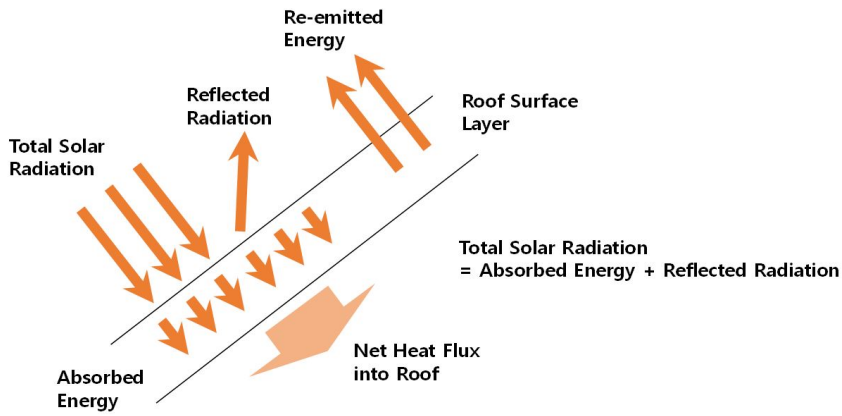

Figure 1. Schematic heat flow on roof

ISO13790에서는 지붕면에서의 일사열에너지의 유입과 유출을 다음과 같이 해석하고 있다. 지붕면을 통해 건물에 유입되는 태양복사에너지(Φ_{sol})는 식 (1)과 같이 지붕면에서 유입되는 태양복사에너지(첫번째 항)에서 지붕면에서 천공으로 방사되는 복사에너지(두번째 항)를 제외하여 구할 수 있다.

$$\Phi_{sol} = F_{sh,ob} A_{sol} I_{sol} - F_r \Phi_r \tag{1}$$

여기서, $F_{sh,ob}$는 차양에 의한 일사 감소율(-), A_{sol}은 태양복사에너지가 유입되는 지붕의 유효 면적

(식 (2))(m^2), I_{sol}은 지붕면에 도달하는 일사량(W/m^2), F_r은 지붕면과 천공 사이의 형태계수(수평면 1, 수직면 0.5), Φ_r은 지붕면에서 천공으로의 방사량(W)으로 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$A_{sol} = \alpha_s R_{se} UA \tag{2}$$

여기서, α_s는 지붕표면의 태양복사에너지 흡수율(-), R_{se}는 지붕표면의 열전달저항((m^2·K)/W), U는 지붕구조체의 열관류율(W/(m^2·K)), A는 지붕의 투영면적(m^2)이다.

$$\Phi_r = R_{se} UA h_r \Delta\theta_{er} \tag{3}$$

여기서, h_r는 지붕면의 복사열전달계수(식 (4))(W/(m^2·K)), $\Delta\theta_{er}$는 외기온도와 천공온도의 차이(K)이다.

$$h_r = 4\epsilon\sigma(\theta_{ss} + 273)^3 \tag{4}$$

여기서, ε는 지붕면의 방사율(-), σ는 스테판볼츠만 상수(5.67×10^{-8} W/(m^2·K^4)), θ_{ss}는 지붕면과 천공 온도의 평균값(℃)이다.

쿨루프 에너지 해석 조건

해석 대상은 서울에 위치한 단층 단독주택으로 하였다. 건물의 형상은 기존 연구의 건물 형상을 단순화하여 모델링하였으며, 철근콘크리트구조로 연면적은 82 m^2, 천장고는 2.3 m, 층고는 2.63 m, 장단비는 1.5, 남측 창면적비는 40%, 북, 동, 서측 창면적비는 20%로 하였다(Han and Yoon, 2021). 내부발열은 '건축물에너지효율등급인증제도운영규정'의 주거공간 용도프로필을 인용하여 인체발열 2.21 W/m^2, 기기발열 2.17 W/m^2를 적용하였다. 환기횟수는 공동주택의 환기기준인 0.5 ACH로 하였다. 건물의 침기는 건축 연도와 유지관리 및 시공정밀도, 그리고 개보수 정도에 따라 n50에서 5~40 사이의 값을 보인다(Kim et al., 2013). 이에 본 연구에서는 동일한 침기조건으로 하며, 침기에 대한 영향이 과대 평가되는 것을 막기위하여 n50에서 5의 기밀도로 하며, 건축 외벽의 노출정도와 건물 주변의 차폐정도를 반영한 차폐계수를 0.07로 하여 침기율을 0.35 ACH로 하였다(ISO 13789, 2007 Table C-4). 이상의 입력조건은 모든 해석케이스에 동일하게 적용하였다. 하지만, 건물의 단열성능의 경우, 지붕면에서의 열의 흡수와 방사에 영향을 주는 요인이기 때문에 건물의 노후도에 따라 차이를 두어 '건축물의 에너지절약설계기준'의 단열기준의 변화가 발생하는 시점의 건축물의 단열성능을 분석 대상으로 하였다. 건물의 지붕은 평지붕과 남북방향으로 경사진 지붕을 대상으로 하였다. 경사지붕은 경사도는 수도권 제2기 신도시의 주거용지 중 단독주택용지를 대상으로 한 지구단위계획에서 단독주택의 지붕 경사도 기준범위(1:1 (45°) ~ 1:3 (18.4°) 또는 0.3 (16.7°) ~ 0.7 (35°))를 참고하여 20°, 25°, 30°의 경우에 대하여 분석하였다(Kim and Park, 2020). 지붕 재료의 일사흡수율과 방사율에 대한 자료는 기존 연구문헌을 참조하였으며, 쿨루프재료는 제조업체의 기술자료를 참고하여 설정하였다. 이상의 해석조건을 정리하면 Table 1~3과 같다.

Table 1. Simulation conditions (U-Value of building elements; W/(m^2·K))

Area		1987[1)]	2001[1)]	2011[1)]	2022[2)]
Central Regine 2	External Wall	0.58	0.47	0.36	0.17
	Roof	0.41	0.29	0.20	0.15
	Floor	0.58	0.35	0.30	0.17
	Window	3.37	3.84	2.10	1.00

1) Kim et al. (2013)
2) Energy Saving Design Standards of Buildings (MOLIT Notification No. 2017-881, Sep. 1, 2018)

Table 2. Simulation conditions (Monthly weather data from Energy#)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total/ Avg.
Outdoor air temperature (°C)	-1.8	1.2	5.8	12.6	18.2	22.4	24.7	25.7	21.7	15.3	7.5	0.2	12.8
Sky temperature (°C)	-19.7	-16.1	-10.4	-2.1	5.7	11.6	15.4	16.3	10.7	2.2	-7.9	-17.2	-1.0
Global radiation (kWh/m^2)	61	78	108	131	145	131	101	112	106	94	62	53	1181

Table 3. Simulation conditions (Roof materials)

	Flat roof	Slope roof material			Cool roof		
Surface No.	Surf-01	Surf-02	Surf-03	Surf-04	Surf-05	Surf-06	Surf-07
Roof surface material	Waterproof paint (Green)[1)]	Asphalt shingle roof[2)]	Clay roof tile[2)]	Zinc roof[2)]	Energy Saver (R) (Green)[3)]	Energy Saver (R) (Gray)[3)]	Energy Saver (R) (White)[3)]
Solar reflectance	0.11	0.09	0.16	0.22	0.29	0.57	0.77
Infrared emittance	0.82	0.97	0.92	0.91	0.89	0.88	0.88

1) Kim (2016)
2) Park et al. (2017b)
3) Energy Saver Catalog (NOROO Paint & Coatings co.,Ltd, https://www.noroopaint.com/)

해석 결과 및 고찰

단열수준에 따른 냉난방 요구량

Figure 2는 건축 연도에 따른 냉난방기간의 부하요소별 열획득와 열손실량을 보여준다. 난방기간에서의 열손실은 1987년의 단열기준에서는 전체 열손실의 44.5%가 창호와 문을 제외한 외피구조체를 통해서 발생하였다. 구조체의 단열성능을 개선한 2022년의 단열기준에서는 열손실이 1987년 대비 29.4% 줄어들었으며, 외피구조체만을 대상으로는 66.1%의 열손실이 감소되었다. 구조체의 열손실부분에서 지붕을 통한 열손실의 비율은 외벽과 지붕의 열관류율 기준과 면적의 차이에 의해서 1987년 기준에서는 36.6%로 비율이 가장 높았고, 2011년 기준에서 31.3%로 최소 비율을 보인다. 본 계산에서는 외벽, 바닥, 지붕 구조체의 단열성능 이외의 변수는 동일하게 적용하였기 때문에 창호, 환기와 침기에 의한 열손실량은 동일한 결과를 보이고 있다. 또한, 외피의 단열성능이 강화될수록 열손실에서 외피가 차지하는 비중

보다는 창호를 통한 관류열손실과 환기와 침기에 의한 열손실의 비중이 증가함을 알 수 있으며, 이에 대한 대응이 필요하다는 것을 확인하였다. 단열 상태에 따른 난방 요구량은 1987년 기준의 10,110 kWh에서 2022년 기준의 5,985 kWh로 감소되었다.

여름철 냉방기간에서는 단열 강화로 인한 열획득량의 감소보다 단열 강화로 인한 열손실의 감소량이 많아 오히려 단열기준이 높은 상황에서 냉방 요구량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 여름철 열획득량의 많은 부분이 창호를 통한 일사열획득에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 여름철 냉방요구량을 줄이기 위해서는 창호의 일사차단과 적절한 환기를 통하여 내부 발열을 외부로 배출하는 전략이 필요하다는 것을 알 수 있다.

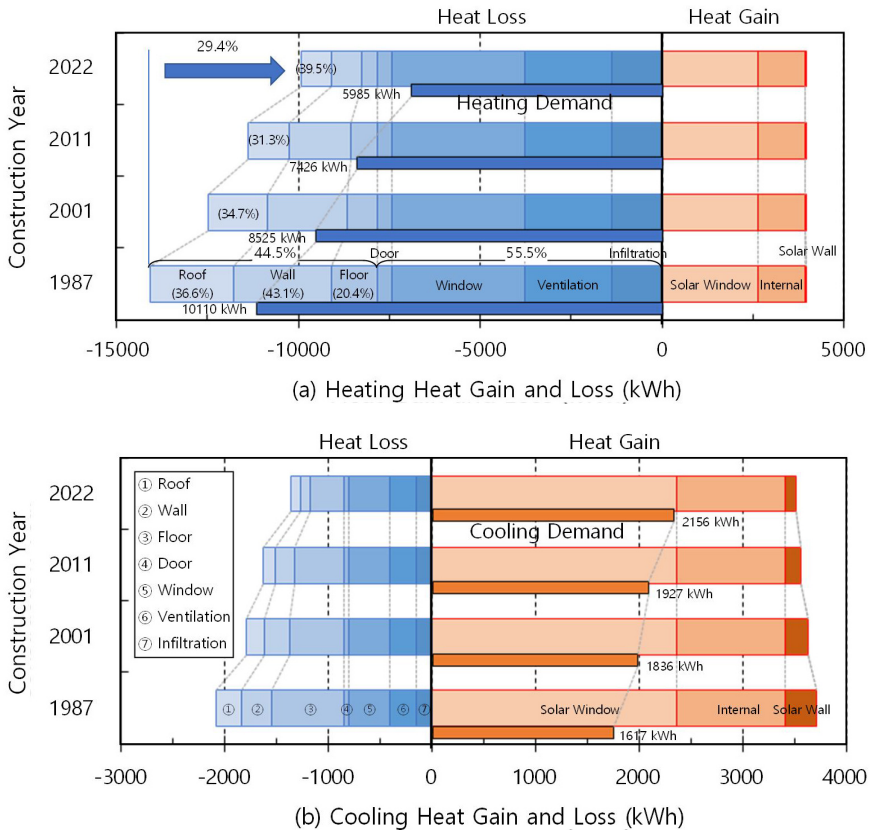

Figure 2. Annual heating and cooling demand by construction year

단열수준에 따른 평지붕에서의 열수지

Figure 3은 단열수준에 따른 평지붕에서의 일사흡수에 의한 열획득량과 복사방사에 의한 열손량을 보여준다. 지붕의 단열수준이 향상됨으로 인하여 지붕면의 일사흡수량과 복사방사량이 동시에 줄어든다. 지붕면에서의 복사방사량은 단열수준이 향상될수록 방사량이 줄어들지만 계절에 따른 차이가 크게 발생하지 않는다. 여름철이 겨울철보다 복사방사량이 적은 이유는 여름철 지붕표면온도가 겨울철보다 높아져서 지붕표면과 천공과의 온도차이가 줄어들기 때문이다. 반면에, 태양의 고도에 따라 지붕면이 받는 일사량의 차이에 의해서 생기는 지붕면의 일사흡수량은 태양고도각이 낮은 겨울보다는 태양고도각이 높은 여름철이 지붕면이

받는 일사량이 많아져서 일사흡수량이 증가하게 된다. 지붕면에서의 순 에너지이동량은 단열수준의 향상에 따라서 겨울에는 방사량보다 흡수량이 많아 손실되는 에너지가 줄어들고 있다. 반면에 다른 계절에서는 방사되는 에너지보다 흡수되는 에너지의 감소량이 많아 흡수되는 순 에너지가 줄어듦을 알 수 있다.

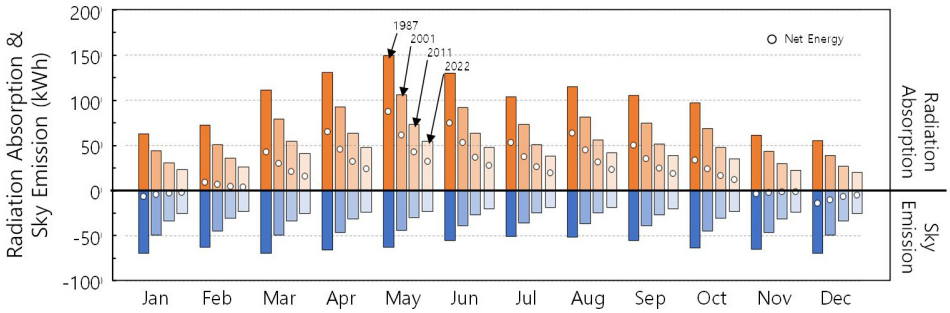

Figure 3. Monthly heat gain and loss on flat roof surface by construction year

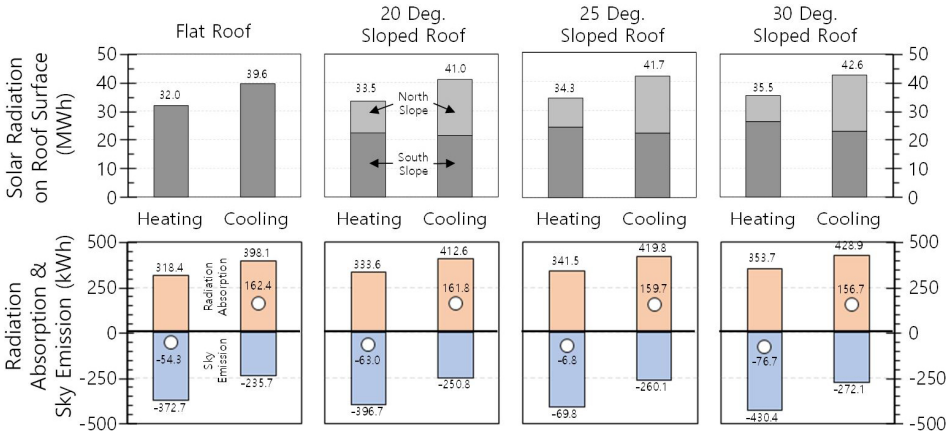

Figure 4. Heating/cooling period solar radiation and absorption/emission energy on roof (1987)

지붕 경사도에 따른 지붕면의 열수지

Figure 4는 1987년의 건물에서 지붕 형태에 따라 지붕면에 도달하는 일사량과 지붕면에서의 열수지 결과를 보여준다. 난방기간은 1, 2, 3, 11, 12월, 냉방기간은 6, 7, 8, 9월로 하였다. 지붕면이 받는 일사에너지를 보면 평지붕보다는 경사도가 큰 경사지붕에서 일사량을 많이 받는 것을 알 수 있다. 이는 경사지붕일수록 지붕면에서의 태양고도각이 크고, 경사도에 따라 같은 수평투영면적에서 실제 지붕면적이 커졌기 때문이다. 태양고도가 낮은 겨울철에는 경사지붕의 북측면보다는 남측면에서 많은 일사량을 받음을 알 수 있다. 또한, 겨울철에는 지붕의 경사도가 커질수록 남측면이 받는 일사량은 증가하지만 북측면에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 반면에 여름철에는 태양고도가 높게 되어 남측면과 북측면이 받는 일사량의 차이가 작아지며, 남측면과 북측면 모두 지붕의 경사도가 커질수록 증가하고 있다. 하지만, 평지붕 대비 경사지붕의 경사도 증가에 따른 지붕면에 도달하는 전체 일사량의 증가율은 여름철보

다는 겨울철이 높게 나타난다. 이는 겨울철에서 남측면이 받는 일사량의 증가율이 북측면에서의 감소율보다 크기 때문이다.

평지붕과 경사지붕에서의 지붕면 열수지 결과를 보면, 겨울철에는 경사도가 증가할수록 일사흡수율의 증가보다 복사방사율이 더 많이 증가하여 전체적으로 열손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 반면에 여름철에는 복사방사율의 증가보다는 일사흡수율이 더 많이 증가하여 전체적으로 열획득량이 증가하고 있다.

쿨루프 적용에 따른 지붕면의 열수지 및 건물 냉난방 부하 분석

Table 4는 건축 연도와 지붕형태에 따른 쿨루프 적용을 통한 지붕면의 열수지 결과를 보여준다. (-)값은 지붕면에서의 열손실을 의미하고 (+)값은 열획득을 의미한다. 평지붕에서 일반적인 방수페인트 마감을 한 경우에는 겨울철에는 열획득이 되어 난방부하를 줄이는데 도움을 준다. 하지만, 여름철에는 많은 열획득을 발생하여 냉방부하를 증가시키는 요인이 된다. 표면 반사율이 높은 쿨루프 재료로 마감했을 경우, 겨울철에는 반사시키는 일사열이 많아 열손실이 증가하며, 여름철에도 일사열 흡수보다는 방사량이 더 많아, 열손실이 증가하여 냉방부하를 줄이는데 도움을 준다. 난방부하를 줄이는 열획득과 냉방부하를 줄이는 열손실량을 동시에 고려했을 경우, 겨울철에는 열손실이 부하요소가 되고, 여름철에는 열획득이 부하요소가 될 것이다. 이 부분을 고려하여 지붕이 건물의 부하에 미치는 영향을 비교하면, 반사율이 큰 쿨루프 마감재(Surf-07)를 적용할수록 부하절감에 효과가 있는 것을 보여준다.

Table 5는 쿨루프의 적용에 따른 지붕면에서의 열획득량의 변화율을 보여준다. 평지붕의 경우 방수페인트 마감(Surf-01), 경사지붕은 아스팔트 싱글 마감(Surf-02)을 기준으로 하여 상대적으로 비교하였다. 평지붕에서는 반사율이 77%인 쿨루프 마감재(Surf-07)를 사용한 경우 지붕을 통한 열부하가 27.2% 줄어든다. 경사지붕은 경사도에 따라 약간의 차이가 있지만 약 30% 초반의 절감율을 보이고 있어, 평지붕과 경사지붕 모두 쿨루프의 열부하 저감효과가 있음을 알 수 있다.

Table 6은 건물 냉난방 부하의 절감효과에 대한 결과를 보여준다. Table 6에서 H는 난방기간, C는 냉방기간, A는 연간을 의미한다. 또한, 결과값이 (+)이면 부하가 증가한 것이고, (-)이면 부하가 감소한 것이다. Table 5에서와 같이 지붕면 열수지의 저감효과가 높게 나왔어도 건물의 연간 냉난방 부하가 절감되는 비율은 낮은 결과를 보였다, 이는 Figure 2의 결과에서와 같이 지붕면이 전체 건물 부하에 영향을 주는 비율이 크지 않기 때문이다. 지붕면의 반사율이 클수록 건물의 난방부하는 증가하였고, 냉방부하는 감소하였다. 하지만, 난방부하의 증가량보다 냉방부하의 감소량이 많아 연간으로 보면 적지만 부하가 감소됨을 확인할 수 있다. 또한, 평지붕보다는 경사지붕에서의 절감효과가 높게 나타났다. 건축 연도의 경우, 지붕의 형태에 따라 다른 결과가 나왔다. 평지붕과 경사도 30도의 경우는 최근에 건축된 건물의 연간 부하 절감량이 높았다. 경사도 20과 25도에서는 2001년 단열기준에서 부하 절감량이 높게 나타났다. 이는 지붕경사도에 따른 지붕면의 일사량의 차이가 원인인 것으로 보인다.

Table 4. Annual radiation heat gain and energy benefit on roof (kWh)

	Surface No.	Heating Net Demand[1)]	Cooling Net Demand[2)]	Annual Net Demand[3)]	Heating Net Demand[1)]	Cooling Net Demand[2)]	Annual Net Demand[3)]
		1987 year insulation standard			2001 year insulation standard		
Flat Roof	Surf-01	27.5	241.8	-214.4	19.4	171.1	-151.6
	Surf-05	-74.7	131.8	-206.5	-52.8	93.3	-146.1
	Surf-06	-184.9	-8.5	-176.4	-130.8	-6.0	-124.8
	Surf-07	-266.6	-110.5	-156.0	-188.5	-78.2	-110.4
Slope Roof 20°	Surf-02	-33.6	214.0	-247.6	-23.7	151.4	-175.1
	Surf-03	-41.7	190.8	-232.5	-29.5	134.9	-164.5
	Surf-04	-63.0	161.8	-224.8	-44.6	114.4	-159.0
	Surf-05	-84.2	130.3	-214.5	-59.6	92.2	-151.7
	Surf-06	-199.7	-15.1	-184.6	-141.2	-10.7	-130.6
	Surf-07	-285.2	-120.9	-164.3	-201.7	-85.5	-116.2
Slope Roof 25°	Surf-02	-40.0	212.6	-252.5	-28.3	150.3	-178.6
	Surf-03	-48.0	189.2	-237.2	-34.0	133.8	-167.8
	Surf-04	-69.8	159.7	-229.5	-49.4	113.0	-162.3
	Surf-05	-91.4	127.8	-219.2	-64.6	90.4	-155.0
	Surf-06	-209.5	-20.1	-189.4	-148.2	-14.2	-134.0
	Surf-07	-297.0	-127.7	-169.3	-210.1	-90.3	-119.8
Slope Roof 30°	Surf-02	-46.1	210.2	-256.4	-32.6	148.7	-181.3
	Surf-03	-54.2	186.7	-240.9	-38.3	132.1	-170.4
	Surf-04	-76.7	156.7	-233.4	-54.2	110.8	-165.1
	Surf-05	-99.0	124.2	-223.2	-70.0	87.9	-157.9
	Surf-06	-221.2	-26.8	-194.5	-156.5	-18.9	-137.5
	Surf-07	-311.9	-136.7	-175.2	-220.6	-96.7	-123.9
		2011 year insulation standard			2022 year insulation standard		
Flat Roof	Surf-01	13.4	118.0	-104.6	10.0	88.5	-78.4
	Surf-05	-36.4	64.3	-100.7	-27.3	48.2	-75.6
	Surf-06	-90.2	-4.1	-86.1	-67.6	-3.1	-64.6
	Surf-07	-130.0	-53.9	-76.1	-97.5	-40.4	-57.1
Slope Roof 20°	Surf-02	-16.4	104.4	-120.8	-12.3	78.3	-90.6
	Surf-03	-20.4	93.1	-113.4	-15.3	69.8	-85.1
	Surf-04	-30.7	78.9	-109.7	-23.1	59.2	-82.3
	Surf-05	-41.1	63.6	-104.6	-30.8	47.7	-78.5
	Surf-06	-97.4	-7.4	-90.0	-73.0	-5.5	-67.5
	Surf-07	-139.1	-59.0	-80.2	-104.3	-44.2	-60.1
Slope Roof 25°	Surf-02	-19.5	103.7	-123.2	-14.6	77.8	-92.4
	Surf-03	-23.4	92.3	-115.7	-17.6	69.2	-86.8
	Surf-04	-34.0	77.9	-112.0	-25.5	58.4	-84.0
	Surf-05	-44.6	62.3	-106.9	-33.4	46.7	-80.2
	Surf-06	-102.2	-9.8	-92.4	-76.6	-7.3	-69.3
	Surf-07	-144.9	-62.3	-82.6	-108.7	-46.7	-61.9
Slope Roof 30°	Surf-02	-22.5	102.6	-125.1	-16.9	76.9	-93.8
	Surf-03	-26.4	91.1	-117.5	-19.8	68.3	-88.1
	Surf-04	-37.4	76.4	-113.9	-28.1	57.3	-85.4
	Surf-05	-48.3	60.6	-108.9	-36.2	45.4	-81.6
	Surf-06	-107.9	-13.1	-94.9	-80.9	-9.8	-71.1
	Surf-07	-152.2	-66.7	-85.5	-114.1	-50.0	-64.1

1) Heating period heat gain on roof (Absoption − Emission) (kWh)
2) Cooling period heat gain on roof(Absoption − Emission) (kWh)
3) Annual heat gain benefit (Heating Net Demand − Cooling Net Demand) (kWh)

Table 5. Saving rate of heating and cooling demand on roof by roof surface types (%)

	Flat Roof						Slope Roof 20°					
Surface No.	Surf -01	Surf -05	Surf -06	Surf -07			Surf -02	Surf -03	Surf -04	Surf -05	Surf -06	Surf -07
Saving Rate	-	3.7	17.7	27.2			-	6.1	9.2	13.4	25.5	33.6
	Slope Roof 25°						Slope Roof 30°					
Surface No.	Surf -02	Surf -03	Surf -04	Surf -05	Surf -06	Surf -07	Surf -02	Surf -03	Surf -04	Surf -05	Surf -06	Surf -07
Saving Rate	-	6.1	9.1	13.2	25.0	33.0	-	6	9	12.9	24.1	31.7

Table 6. Saving rate of heating/cooling and annual demand by roof surface types and construction year (%)

		Flat Roof						Slope Roof 20°					
Surface No.		Surf -01	Surf -05	Surf -06	Surf -07			Surf -02	Surf -03	Surf -04	Surf -05	Surf -06	Surf -07
1987	H	-	0.98	2.03	2.82			-	0.08	0.28	0.47	1.56	2.36
	C	-	-5.25	-11.85	-16.57				-1.13	-2.53	-4.05	-10.98	-15.93
	A	-	0.03	-0.07	-0.12				-0.10	-0.14	-0.19	-0.28	-0.32
2001	H	-	0.82	1.70	2.35			-	0.06	0.23	0.40	1.31	1.98
	C	-	-3.66	-8.29	-11.63				-0.78	-1.76	-2.81	-7.66	-11.16
	A	-	-0.01	-0.15	-0.23				-0.09	-0.13	-0.18	-0.31	-0.39
2011	H	-	0.64	1.34	1.85			-	0.05	0.18	0.31	1.03	1.57
	C	-	-2.53	-5.73	-8.06				-0.54	-1.21	-1.94	-5.28	-7.71
	A	-	-0.02	-0.15	-0.23				-0.07	-0.11	-0.15	-0.28	-0.35
2022	H	-	0.59	1.23	1.71			-	0.05	0.17	0.29	0.95	1.44
	C	-	-1.80	-4.09	-5.75				-0.38	-0.86	-1.38	-3.76	-5.50
	A	-	-0.04	-0.18	-0.27				-0.07	-0.10	-0.15	-0.28	-0.37
		Slope Roof 25°						Slope Roof 30°					
Surface No.		Surf -02	Surf -03	Surf -04	Surf -05	Surf -06	Surf -07	Surf -02	Surf -03	Surf -04	Surf -05	Surf -06	Surf -07
1987	H	-	0.07	0.28	0.48	1.58	2.39	-	0.07	0.28	0.48	1.61	2.45
	C	-	-1.14	-2.56	-4.10	-11.15	-16.19		-1.15	-2.60	-4.17	-11.37	-16.52
	A	-	-0.10	-0.14	-0.19	-0.27	-0.30		-0.10	-0.13	-0.18	-0.25	-0.27
2001	H	-	0.06	0.23	0.40	1.32	2.01	-	0.06	0.24	0.41	1.35	2.06
	C	-	-0.79	-1.78	-2.85	-7.79	-11.34		-0.79	-1.81	-2.90	-7.94	-11.58
	A	-	-0.09	-0.13	-0.18	-0.31	-0.38		-0.09	-0.13	-0.18	-0.29	-0.35
2011	H	-	0.05	0.18	0.32	1.05	1.59	-	0.05	0.19	0.32	1.07	1.63
	C	-	-0.54	-1.22	-1.96	-5.37	-7.84		-0.55	-1.24	-1.99	-5.48	-8.00
	A	-	-0.07	-0.11	-0.15	-0.27	-0.35		-0.07	-0.10	-0.15	-0.26	-0.33
2022	H	-	0.05	0.17	0.29	0.97	1.47	-	0.05	0.17	0.30	0.99	1.51
	C	-	-0.39	-0.87	-1.40	-3.83	-5.59		-0.39	-0.88	-1.42	-3.90	-5.71
	A	-	-0.07	-0.10	-0.15	-0.28	-0.37		-0.07	-0.10	-0.15	-0.27	-0.36

결 론

본 연구는 노후건축물의 그린리모델링과 관련하여 쿨루프를 적용하였을 경우 냉난방 부하에 영향을 미치는 요인에 대해 분석하였다.

우선, 건물의 노후도에 따른 난방과 냉방 요구량과 지붕면을 통한 열획득과 열손실을 분석하였다. 냉난방 요구량에 영향을 주는 다른 변수들은 모두 동일하게 하고 외벽의 단열기준만을 가지고 분석을 수행하였으며, 최근 건축법규기준으로의 단열성능을 가졌을 경우 1987년의 단열기준보다 난방 요구량에서 29.4%가 저감됨을 확인하였다. 반면, 냉방 요구량은 단열강화로 인해 열획득의 감소보다 열손실의 감소가 적어 요구량이 증가하였다.

지붕의 마감재료를 변경하여 쿨루프의 성능을 검토한 결과, 지붕의 일사반사율이 증가하면 할수록 지붕면을 통한 겨울철 열획득량이 줄어들어 난방요구량이 증가하는 것을 알 수 있다. 반면에 여름철에는 냉방요구량이 감소한다. 이를 연간 냉난방요구량으로 분석하면, 지붕면을 통한 연간 냉난방 요구량의 변화는 반사율 77%의 쿨루프의 경우, 평지붕에서는 27.2%, 경사지붕에서는 약 30% 초반의 절감효과가 있음을 확인하였다.

쿨루프의 적용을 통한 냉난방 요구량의 절감효과가 있음을 확인하였으나 쿨루프를 통한 겨울철 열손실이 크게 증가한다는 것도 확인하였다. 또한, 해석적 분석을 이용한 연구방법의 한계로 인하여 건물의 축열효과와 건물의 노후도에 따른 기밀성능의 변화와 같이 실제 건물의 냉난방에 영향을 미치는 요인과 실제 건물에서의 결과와의 분석 등이 부족하다는 한계를 가지고 있다. 이에 후속연구를 통하여 쿨루프의 적용에 따른 냉난방부하의 실측결과와의 비교, 건물의 축열효과를 고려하기 위한 쿨루프의 동적열해석 분석를 진행할 예정이다. 또한, 쿨루프의 적용 성능을 개선하기 위해 쿨루프 재료의 반사율과 방사율의 조합에 관한 연구와 국내 지역에 따른 부하조건의 차이를 반영한 최적의 쿨루프 성능기준를 제시할 수 있는 후속연구를 진행할 예정이다.

References

1. Bang, S.K., Park, J.C., Chung, M.H. (2019). Experimental Study on PCM (Phase Change Material) Cool Roof System for Reducing Building Energy Demand and Urban Heat Island. KIEAE Journal, 19(4), 45-52.
2. Byun, K.H. (2018). A Literature Review for the Effects of Painted Cool Roof Research in Korea. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 30(10), 487-495.
3. Han, D.I., Yoon, S.H. (2021).An Analysis of Energy Saving Effect of Deteriorated Detached House through Green Remodeling - Focusing on Nam-gu, Busan -. Journal of the Architectural Institute of Korea, 37(9), 145-154.
4. Hwang, S.H. (2021). The Analysis of Energy Saving for Domestic Hot Water Using Drain Water Heat Recovery System. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 15(6), 747-756.

5. Kim, D.W., Chung, K.S., Kim, Y.I., Kim, S.M. (2013). A Comparative Study on Heating Energy Consumption for Apartment Based on the Annually Strengthened Criteria of Insulation. Journal of Energy Engineering, 22(2), 83-89.
6. Lee, H.E., Yang, Y.K., Chung, M.H., Park, J.C. (2017). Simulation Analysis of Thermal Insulation Performance of PCM for Mitigating Urban Heat Island Effect. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 33(6), 79-86.
7. Lee, K.R., Seong, J.H., Han, Y.K., Lee, W.H. (2019). Comparison of Rooftop Surface Temperature and Indoor Temperature for the Evaluation of Cool Roof Performance according to the Rooftop Colors in Summer - Using Thermal Infrared Camera Mounted on UAV -. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 37(1), 9-18.
8. Park, M.Y. (2019). Cool Roof Status and Improvement Plan for Cooling Load Reduction. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 13(2), 142-152.
9. Park, S.H., Kong, K.B., Min, H.J. (2017a). 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, 33(4), 55-62.
10. Park, S.W., Yang, J.M., Lee, E.T. (2017b). A Study on the Required Performance of Roof Panels Using Stainless Steel Based on Cool Roof Database Analysis. Journal of Korean Society Of Hazard Mitigation, 17(1), 313-322.
11. Song, B.G., Kim, G.A., Park, K.H. (2016). Reduction in Indoor and Outdoor Temperature of Office Building with Cool Roof. KIEAE Journal, 16(6), 95-101.
12. Kim, J.I., Park, C.B. (2020). Characteristics of District Units Plan related with Architecture of the New-City in the Capital Area - focused on Detached Residential Area of the Second New City-. Proceeding of Autumn Annual Conference of AIK, 40(2), 341-342.
13. 2050 Carbon Neutrality Commission. (2021). 2050 Carbon Neutrality Scenarios.
14. Global Alliance for Buildings and Construction. (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction, UN Environment Programme.
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018). Korea’s Building Energy Code (MOLIT Notification No 2017-881), Korean government.
16. Kim, G.A. (2016). Analysis on Urban Heat Island Mitigation and Building Energy Saving of the Cool Roof. Master’s thesis. Changwon University, Changwon, Korea.
17. ISO 13789 (2007). Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method.