

도시열섬 완화를 위한 캠퍼스 Cool Surfaces 비교 연구*

Comparative Analysis of Campus Cool Surface Distribution for Urban Heat Island Mitigation

오상원** · 정주철***
Sangwon Oh · Juchul Jung

요약: 본 연구는 부산대학교(Pusan National University, PNU)와 매사추세츠공과대학교(Massachusetts Institute of Technology, MIT) 캠퍼스를 대상으로 토지피복 특성과 알베도 등급(IG1~IG3, PG1~PG4)에 기반한 쿨표면 구조를 비교하여 도시 열환경 차이를 분석하였다. ESA WorldCover 2021과 Google Earth Engine을 활용해 불투수·투수 표면을 재분류한 결과, 두 캠퍼스 모두 저반사 불투수면(IG3)이 지배적이어서 알베도 개선 잠재력이 큰 것으로 나타났다. PNU는 수목 중심(PG2) 숲형 투수 구조가, MIT는 수목(PG2)과 초지·농경지(PG3)가 혼재된 개방형 초본녹지 구조가 특징으로 확인되었다. 이를 토대로 PNU에는 저반사 포장의 쿨포장 전환과 수역·초본녹지 다양화, MIT에는 수목 식재 확대와 투수포장 도입이 우선 전략으로 제시되며, 위성 기반 쿨표면 분석이 캠퍼스 열섬 완화 계획 수립의 기초 도구가 될 수 있음을 보여준다.

핵심주제어: 도시열섬, 알베도, 불투수면, 투수면, 열환경

Abstract: This study compares the cool-surface structure of PNU and MIT campuses using ESA WorldCover 2021 and Google Earth Engine to reclassify impervious and pervious surfaces by albedo and functional type. Both campuses are dominated by low-reflectance impervious surfaces (IG3), indicating substantial potential for albedo improvement, but PNU shows a forest-oriented pervious structure (PG2), whereas MIT has a more open herbaceous green structure with similar shares of tree (PG2) and grass/cropland (PG3) areas. Accordingly, cool-pavement conversion and diversification of water and herbaceous green areas are suggested for PNU, while tree-planting expansion and pervious pavements are prioritized for MIT. The study highlights satellite-based cool-surface analysis as a practical tool for campus heat-island mitigation and thermal-comfort-oriented planning.

Key Words: Urban Heat Island, Albedo, Impervious Surface, Pervious Surface, Thermal Environment

* 이 논문은 4단계 두뇌한국21 사업 (4단계 BK21 사업)에 의하여 지원되었음.

** 주저자, 부산대학교 도시공학과 박사과정

*** 교신저자, 부산대학교 도시공학과 정교수

I. 서론

도시 열섬(Urban heat island, UHI) 현상은 전 지구적 도시화와 토지피복 변화에 따라 도시 지역의 지표면온도(LST)를 지속적으로 상승시키는 대표적인 환경 문제로, 특히 불투수 포장과 저반사(저알베도) 표면의 확대가 여름철 고온 노출과 냉방에너지 부담을 심화시키는 주요 요인으로 지적된다(Mashhoodi, Stead and van Timmeren, 2020). 이러한 온도 증가는 냉방 에너지 소비 증가, 오존 및 미세먼지 농도 상승에 따른 대기질 악화, 열 관련 질환 및 사망 위험 증대 등 다층적인 도시 환경·보건 문제로 이어지며, 기후변화 적응 및 완화 전략의 핵심 과제로 논의되고 있다(Ward, Lauf, Kleinschmit and Endlicher, 2016). 특히 위성 기반 온도 자료와 고해상도 토지피복 자료를 결합한 선행연구들은 불투수 포장 비율, 표면 알베도, 인공피복의 3차원 형태가 국지적 열섬 강도와 밀접하게 연관됨을 반복적으로 입증하고 있다(유영희·백종진, 2012). 이러한 점에서 불투수·저알베도 표면을 고알베도·고방출율 쿨표면으로 전환하는 물리적 개입은 도시 차원의 UHI 완화와 건물 에너지 수요 관리를 동시에 달성하기 위한 핵심 수단으로 부각되고 있다(U.S. Environmental Protection Agency, 2021) 도시 열환경과 에너지 문제를 미시 규모에서 정밀하게 관찰·관리하기에 적합한 공간 단위 중 하나가 대학 캠퍼스이며, 명확한 경계를 가지면서도 강의동, 연구동, 기숙사, 상업·지원시설 등 다양한 건물용도와 녹지·포장 공간이 혼재한 복합 구조로 이러한 토지피복 구성과 3차원 공간형태에 따라 미기후가 민감하게 변화하는 것으로 보고된다(Qiao and Yan, 2024; Rahman and Das, 2024). 캠퍼스 내부에서 건물 배치, 가로 공간의 개방도, 녹지·수변·그늘 공간의 유무는 보행 동선의 열환경과 야외활동의 열쾌적성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 야외 이용행태와 학습·연구 활동의 질, 나아가 캠퍼스 생태계 서비스 제공 수준에까지 파급될 수 있다(Cho, Ha, and Lee, 2017; Wang, de Groot, Bakker, Wörtche and Leemans, 2017). 이러한 선행연구 결과는 대학 캠퍼스가 도시 차원의 열환경과 에너지 문제를 축소 모형처럼 관찰하고, 다양한

물리적 개선 전략을 실험하기에 적절한 연구 단위임을 시사한다(Cho et al., 2017; Qiao and Yan, 2024). 에너지 관점에서도 대학 캠퍼스 건물군은 중요한 대상으로 국내 연구에 따르면 대학 건물은 병원, 호텔, 공공청사 등 다른 에너지 다소비 건물 유형과 비교해 단위면적당 에너지 사용량이 높은 수준을 보이며, 특히 전력 사용 비중이 크고 이 중 상당 부분이 강의실·연구실·강의 지원시설의 냉난방 및 공조 설비 운전에 소모되는 것으로 나타났다(박기현, 2016). 국제 문헌에서도 도시열섬으로 인한 외기 온도 상승이 건물 냉방 에너지 수요를 증가시키는 메커니즘이 수치모형과 계량 분석을 통해 반복적으로 제시되고 있어(Li et al., 2019), 도시열섬 완화와 대학 건물의 에너지 효율 개선을 통합적으로 다루는 연구의 필요성이 강조된다(Leal Filho, Echevarria Icaza, Neht, Klavins and Morgan, 2018). 따라서 캠퍼스 단위에서 토지피복과 표면 특성, 특히 알베도와 불투수·투수 표면 구성비가 열환경 및 에너지 수요에 미치는 잠재적 영향을 규명하는 것은, 도시 차원의 에너지·기후 적응 전략을 수립하는 데 있어 의미 있는 기초 단계로 볼 수 있다(박기현, 2016). 이러한 맥락에서 쿨 루프(cool roof)와 쿨 파브먼트(cool pavement)는 지붕 및 포장 표면의 알베도와 방출율을 높여 지표면온도 및 인접 공기온도를 저감하는 대표적 물리적 대응 전략으로 주목받고 있다(Mohajerani, Bakaric and Jeffrey-Bailey, 2017; U.S. Environmental Protection Agency, 2021). Mohajerani et al.(2017)은 포장재의 열용량·알베도 특성이 UHI 기여도에 미치는 영향을 종합 정리하면서, 고반사 포장과 수분 증발형 포장의 결합이 국지적 열섬 완화에 효과적임을 제시하였다(Mohajerani, Bakaric and Jeffrey-Bailey, 2017). U.S. Environmental Protection Agency(2021)는 쿨 루프와 쿨 파브먼트를 도시 열섬 완화와 건물 냉방 부하 저감을 동시에 달성할 수 있는 핵심 수단으로 제시하며, 고알베도 지붕·포장이 기존 표면에 비해 낮은 표면온도와 더 적은 태양복사 흡수를 보인다고 보고한다(U.S. Environmental Protection Agency, 2021). Li et al.(2019)은 이러한 쿨표면 도입이 건물 에너지 소비와 온실가스 배출 저감 측면에서 유의한 잠재력을 가진다고 평가하며, 쿨 루프·쿨 파브먼트·녹지

확대를 결합한 전략의 중요성을 강조한다(Li et al., 2019). 이와 같은 논의를 고려할 때 대학 캠퍼스 단위에서 지붕과 포장 표면의 반사율·열특성을 개선하는 쿨표면 전략을 정량적으로 평가하는 것은, 열환경 개선뿐만 아니라 에너지·기후정책의 실증 기반을 제공하는 측면에서 중요하다. 국내의 캠퍼스 단위의 경우 환경부의 그린 캠퍼스 조성 가이드라인이 2011년부터 시행되어 국내 대학의 지속가능한 캠퍼스 구축을 위한 제도적 틀을 제공하고 있지만 이 프로그램이 명시적으로 다루는 영역은 쿨루프/쿨포장 기술은 구체적 평가항목이나 의무사항으로 포함되지 않았으며, 기술 도입 기준도 마련되어 있지 않다. 해외 주요 연구중심 대학들은 기후·에너지 계획과 연계하여 쿨루프·쿨 파브먼트 도입이 정책·제도적으로 지붕·포장 전략을 체계적으로 수립하고 있다는 점에서, 국내·외 캠퍼스를 아우르는 정량 비교 연구의 필요성이 제기된다(MIT Office of Sustainability, 2020; U.S. Environmental Protection Agency, 2021). 부산대학교 캠퍼스는 환경부가 발표한 2013년 그린캠퍼스 대학으로 선정된 대학으로 대표적인 국내 국립대 캠퍼스 사례로서, 교육·연구·지원시설과 광범위한 포장·녹지 공간이 혼재하는 전형적인 물리적 구조를 보이는 것으로 알려져 있으나, 현재까지는 제도화된 쿨루프·쿨 파브먼트 프로그램이 제도 등이 부재한 상황이다. 이에 반해 MIT 캠퍼스는 기후행동계획과 연동된 “Sustainable Roof Study & Planning Tool” 등을 통해 지붕의 반사율·단열·녹화·태양광 도입을 체계적으로 평가하고, 콘크리트 지속가능성 허브 등을 중심으로 쿨 파브먼트 연구를 선도해 온 사례로 평가된다(MIT Office of Sustainability, 2020). 따라서 본 연구는 국내 국립대 캠퍼스의 대표 사례인 부산대학교와 쿨루프·쿨 파브먼트 전략을 선도적으로 추진해 온 미국 MIT 캠퍼스를 비교 대상으로 설정하여, 위성자료와 토지피복 정보를 활용해 두 캠퍼스 간 쿨표면 구성과 반사율(알베도) 구조의 차이를 정량적으로 규명하고자 한다(황영석·엄정섭, 2015; MIT Office of Sustainability, 2020). 이러한 비교 분석을 통해 쿨표면 제도가 부재한 국내 캠퍼스가 선도 캠퍼스(MIT)에 비해 어느 정도의 쿨표면 비율·알베도 격차를 보이는지 진단함으로써, 향후 국내 대학 캠퍼스의 기후탄력적 공간계획 및

쿨표면 도입 전략 수립을 위한 계량적 기준과 개선 여지를 제시하는 데 학술적·실무적 의의를 두고자 한다.

II. 선행연구

1. Cool Surface의 개념 및 기준설정

도시 열섬(Urban Heat Island, UHI) 현상을 완화하기 위한 대표적인 전략 가운데 하나는 태양복사 에너지의 반사를 극대화하는 고반사율 ‘쿨 서피스(cool surface)’를 도시 전반에 도입하는 것이다(Synnefa, Santamouris and Akbari, 2007). 쿨 서피스의 성능을 규정하는 핵심 요소는 지표가 입사 태양 에너지를 얼마나 흡수 또는 반사하느냐에 있으며, 이는 도시의 표면 에너지 수지와 대기·지표면 온도, 나아가 열섬 강도를 직접적으로 좌우하는 것으로 평가된다(U.S. EPA, 2020). 도시 지표면의 구성과 불투수면의 환경적 영향으로는 도시 지표면은 건물 옥상, 도로, 주차장 등 인공 포장과 공원·수체·비포장 토양 등 자연·반자연적 지면으로 구성되며, 기능적으로는 강우 침투 가능 여부에 따라 불투수면과 투수면으로 구분된다(Synnefa, Santamouris and Akbari, 2007). 불투수면은 콘크리트·아스팔트 포장, 옥상 방수층, 포장 주차장 등으로 이루어져 강우 시 침투가 거의 발생하지 않고 지표 유출과 열 저장을 동시에 증가시켜, 도시 열섬과 홍수 취약성을 함께 심화시키는 것으로 보고된다(U.S. EPA, 2020). 반면 투수면은 녹지, 수체, 비포장 토양과 같이 빗물이 토양과 지하수로 침투할 수 있고 증발·증산을 통해 잠열 교환이 활발히 일어나는 지면으로, 기후조절과 열완화 기능을 수행하는 주요 생태 기반으로 간주된다(엄정섭, 2009). Cool Surface의 평가 기준으로 불투수면과 투수면의 차이를 살펴보면 불투수면에서의 Cool Surface 성능 기준은 알베도 수준에 중점을 두어 평가한다. 입사 태양복사 에너지 중 지표에서 반사되는 비율을 의미하는 물리량으로써 지표 에너지수지와 지표면온도(LST)를 결정하는 핵심 복사 매개변수로 간주된다(Liang et al., 2003; Bonafoni, 2017). 또

한, 동일한 불투수면이라 하더라도 지붕·포장의 알베도 수준에 따라 흡수되는 태양에너지와 지표면온도가 크게 달라지며, 알베도 저하가 도시 열섬 강화와 열쾌적성 저하로 이어진다는 점이 반복적으로 보고되고 있다(Baldinelli et al., 2015). 위성에서 계산한 것은 알베도(Broadband solar albedo)를 사용하는 방식이다. 반면 투수면에서는 투수 지표면의 면적 비율과 식생의 밀도가 주요 평가 기준이며, 최근에는 Cool Surface의 범주에 태양에너지를 흡수하여 증발산을 통해 열환경을 개선시키는 녹지와 수공간을 포함시키고 있다. 이는 고반사 재료뿐만 아니라 식생과 수체를 활용한 통합적 도시 열섬 완화 전략의 가능성을 시사한다. 이에 따라 본 연구에서는 이를 고려하여 분석을 진행하였다.

2. 불투수면 개념 및 측정에 관한 연구

불투수 표면은 아스팔트 도로, 콘크리트 포장, 건물 지붕 등 물 침투가 불가능한 인공 피복 면적을 의미한다. 도시 지역의 불투수 표면 증가는 지표면 온도 상승의 주요 원인이다. 불투수 표면은 일반적으로 낮은 알베도(0.04~0.35)를 가지고 있어 입사 태양 복사의 대부분을 흡수하여 열을 방출한다. 선행연구들을 토대로 불투수 표면의 알베도를 세 가지 등급으로 분류하여 살펴보았다. 첫 번째, G1등급인 고반사 Cool Surface의 알베도 등급은 미국 ENERGY STAR 프로그램은 저경사 지붕의 쿨루프 요건을 초기 알베도가 0.65 이상을 규정하고 있으며, 알베도 0.65 수준 이상이면, 기존 암색 지붕(0.05~0.20)과는 질적으로 다른 수준의 고반사 Cool Surface으로 간주할 수 있다. 즉, G1은 정책·설계 차원에서 이미 '쿨 표면'으로 인정되는 밝은 지붕·포장(백색 코팅, 고반사 콘크리트 등)을 포착하는 구간이다. 다음으로 G2등급의 경우 실측 자료에서 도시 평균 알베도는 대략 0.15 수준, 표준 콘크리트 포장은 약 0.20~0.35, 고반사 콘크리트 및 쿨 코팅은 0.50 이상(풍화 후 0.40~0.60) 수준으로 군집을 형성하고 있으며, 따라서 0.40은 한편으로는 표준 포장(아스팔트·회색 콘크리트)과 다른 한편으로는 쿨 코팅·고반사 콘크리트 등 개선된 불투수면을 가르는 실질적인 경계로 해석할 수 있다. 또한, 도시 유효 알베도

를 약 0.25에서 0.40 수준으로 상향할 경우, 여름철 대기온도가 감소하고, 건물 냉방에너지 및 피크부하가 크게 저감되는 것으로 보고된다(Rose, Akbari, and Taha, 2003). 도시 전체 차원에서 관측된 유효 알베도는 대체로 0.10~0.30 범위에 머무르며, 특히 많은 도시의 평균값이 0.15 내외에 형성된다는 점에서(Akbari, Rosenfeld and Taha, 1992), $\alpha \approx 0.40$ 수준은 도시 평균 표면(0.15 전후)을 현저히 상회하는 고반사 상태를 나타내는 임계값으로 해석될 수 있다. 이러한 실측·모의 결과를 종합하면, $\alpha \approx 0.40$ 은 한편으로는 전형적인 도시 포장(아스팔트·회색 콘크리트 등)의 상한을 넘어서는 수준이자, 다른 한편으로는 쿨 코팅·고반사 콘크리트·백색 또는 금속 쿨루프 등 개선된 Cool Surface에 진입하는 실질적인 분기점으로 이해할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 $0.40 \leq \alpha < 0.65$ 구간을 G2로 설정하여, 표준 도시 표면보다 분명히 높은 알베도를 가지면서도, ENERGY STAR 쿨루프 최상위 기준(0.65)에는 다소 못 미치는 중간 수준의 고알베도 불투수면을 포착하도록 하였다. 다음으로 G3(관행적 저알베도 불투수표면)등급의 경우 선행된 포장 재료실측 연구에서, 새·노후 아스팔트 및 상당수 회색 콘크리트 포장은 알베도 0.40에 크게 미치지 못하며, 대체로 0.05~0.30 범위에 분포하는 것으로 보고된다(Gilbert, 2017; Grdić et al., 2014). 이는 도시 전체 유효 알베도가 약 0.15 전후에서 형성된다는 관측 결과와도 정합적이며, 해당 범위의 표면이 도시 열섬과 냉방부하에 가장 크게 기여하는 관행적 불투수면 집단임을 시사한다(Akbari et al., 1992). 이에 따라 본 연구에서는 $\alpha < 0.40$ 인 불투수 픽셀을 G3로 정의하고, 열섬 기여도가 크고 고반사 개입의 잠재적 개선 여지가 큰 표면(아스팔트 도로, 일반 콘크리트 포장, 암색 지붕 등)으로 분류하였다. 따라서 위성 기반 알베도 값이 0.40 미만인 불투수 픽셀을 열섬에 크게 기여하는 관행적 불투수면 집단으로 간주하고, 고반사 개입의 잠재적 대상(개선 여지가 큰 표면)으로 구분할 수 있다. 요약하면, 본 연구의 불투수 표면 알베도 등급은 다음과 같이 정의된다. G1은 $\alpha \geq 0.65$: 국제 쿨루프 기준을 충족하는 최상위 고반사 불투수면이고, 다음으로 G2는 $0.40 \leq \alpha < 0.65$: 표준 도시 표면보다 분명히 높은 알베도를 가지며, 쿨 코팅·고반사 콘크리트·밝

은 금속 지붕 등 개선된 고알베도 불투수면에 해당하는 중간 등급이다. 마지막으로 G3는 $\alpha < 0.40$: 아스팔트·회색 콘크리트 등 관행적 불투수면으로 간주되는 저알베도 집단이다. 이러한 3단계 분류는 실측 자료의 군집 구조, 국제 정책 기준에서 제시되는 임계값, 그리고 도시 열환경 개선의 효과 크기를 동시에 반영함으로써, 도시 불투수표면의 알베도 변화와 지표면온도 개선 간의 관계를 객관적이고 정량적으로 평가할 수 있는 근거를 제공한다.

3. 투수면 개념 및 측정에 관한 연구

투수면(perVIOUS surface)은 식생, 노출 토양, 수역과 같이 강우의 침투, 저류, 증발산이 가능한 자연 또는 준자연 지표 피복으로 정의되며(Shuster, Bonta, Thurston, Warnemuende, and Smith, 2005; Oswald et al., 2023), 단순히 물의 물리적 통과성뿐만 아니라 수문학적 기능(hydrological function), 열환경 특성(thermal property), 생태계 서비스(ecosystem services)를 동시에 제공한다는 점에서 도시 설계와 기후 연구의 핵심 요소이다(Guthrie & Deniseger, 2001; Brabec et al., 2002). ESA WorldCover는 유럽우주청(European Space Agency)에서 Copernicus 프로그램의 일환으로 개발한 글로벌 토지피복 분류 지도로, 다음의 11개 클래스로 전 지구 토지피복을 분류한다(Zanaga et al., 2021, 2022). ESA WorldCover 공식 문서에서도 명시되어 있듯이, 이 분류 체계는 별도의 투수 클래스(perVIOUS class)구조를 정의하지 않고 단순히 11개 토지피복 클래스만을 제공하고 있다(Van De Kerchove, Zanaga, Xu, Tsendbazar and Lesiv, 2022; Zanaga et al., 2022). Built-up (Code 50)을 제외한 나머지 대부분은 자연 또는 준자연 토지피복이지만, 투수면 구분이라는 기능적 분류(functional classification)는 불충분하다. 이는 도시 열환경·수문·알베도 분석을 수행하는 연구자가 원본 분류를 활용 목적에 맞게 재분류할 필요성을 시사한다(Zanaga et al., 2021, Arnold and Gibbons, 1996). 이러한 개념을 WorldCover 클래스에 적용하면, Built-up(50)은 비침투성 인공 구조물이 대부분을 차지하므로 도시 불투수면에 해당하고, Tree cover(10), Grassland(30), Cropland(40), Bare/sparse

vegetation(60), Permanent water bodies(80)는 다양한 유형의 투수면 또는 자연 피복 유형으로 분류할 수 있다(Zanaga et al., 2022; Arnold and Gibbons, 1996). 본 연구의 대상인 중위도 내륙 대학 캠퍼스(서울·부산 및 북미·유럽 도시 캠퍼스)는 눈·빙설(Snow and ice, 70), 맹그로브(Mangroves, 95), 이끼·지의류(Moss and lichen, 100), 습지(Herbaceous wetland, 90)의 공간적 비중이 극히 제한적이거나 사실상 존재하지 않는 입지 특성을 가진다. 이러한 조건에서 실제로 캠퍼스의 지표 열환경과 수문 과정에 유의미한 영향을 미치는 WorldCover 클래스는 Built-up(50)을 제외한 Tree cover(10), Grassland(30), Cropland(40), Bare/sparse vegetation(60), Permanent water bodies(80) 다섯 가지로 수렴하며, 이는 도시기후·도시 열섬 연구에서 수역·수목·초본녹지·맨땅을 핵심 자연 피복으로 다루는 선행 연구 경향과도 부합한다(Arnold and Gibbons, 1996; Stewart and Oke, 2012). 수문·열환경 기능 측면에서 수역, 수목, 초지·농경지, 맨땅은 서로 다른 역할을 수행한다. 수역(Permanent water bodies, 80)은 토양 침투보다는 저류와 증발을 통해 물순환을 매개하고 국지 기온 완화에 기여하며(Brabec et al., 2002; Guthrie and Deniseger, 2001), 수목(Tree cover, 10)은 깊은 뿌리와 조밀한 수관으로 강우 차단(interception)과 토양 침투 촉진·증발산을 동시에 담당하여 도시 열섬 완화의 핵심 수단으로 평가된다(Liu et al., 2022). 초지와 농경지(Grassland 30, Cropland 40)는 상대적으로 키가 낮은 초본식생이 우점하는 구조로 토양 침투와 증발산에 기여하며, 맨땅·공터(Bare/sparse vegetation, 60)는 피복이 없는 토양 표면으로 강우 강도에 따라 침투와 표면 유출이 크게 변동하는 피복 유형으로 구분된다(Guthrie and Deniseger, 2001; Shuster, Bonta, Thurston, Warnemuende and Smith, 2005).

이러한 기능적 차이를 반영하여 본 연구는 WorldCover 토지피복을 수역(PG1), 수목(PG2), 초지·농경지(PG3), 맨땅·운동장(PG4)의 네 개 투수 등급으로 재분류하였다. 이는 각 등급이 서로 상이한 열적(알베도, LST)·수문학적(침투·저류·증발산) 특성을 가지면서도, 캠퍼스 규모(수백 ha 내외)에서

충분한 픽셀 수를 확보할 수 있도록 하는 절충적 체계라는 점에서 방법론적 타당성을 가진다(Zanaga et al., 2022; Stewart and Oke, 2012; Demuzere et al., 2022). 계획·디자인 관점에서도 수역(PG1)-수목(PG2)-초지·농경지(PG3)-맨땅·운동장(PG4)이라는 네 개 투수 등급은 캠퍼스 물리적 계획의 실질적인 관리 단위와 직접적으로 대응된다. 수역(PG1)은 인공 연못, 생태수로, 저류지 등 수공간 설계의 대상으로, 수목(PG2)은 교내 숲·가로수·수림대 조성의 대상으로, 초지·농경지(PG3)는 잔디광장·실험농장 등 저층 녹지 관리의 대상으로, 맨땅·운동장(PG4)은 향후 쿨 포장 또는 녹지로 전환 가능한 잠재 후보지로 해석할 수 있다. 따라서 이들 클래스는 별도 분석 대상에서 제외하고, 도시 캠퍼스에서 실제로 관측되는 주요 토지피복을 중심으로 투수면 4등급(PG1-PG4)을 구성하는 것이 분석 효율성과 해석 가능성 측면에서 타당한 접근으로 판단된다.

III. 측정방법

본 연구는 쿨표면기술 도입에 대한 정책·제도 환경이 상이한 두 대학 캠퍼스의 쿨표면 구조를 정량적으로 비교하고, 이들의 공간 배치 전략의 차이를 분석했다. 공간적 범위로는 PNU와 MIT로 선정하였다. 두 캠퍼스는 국가·기후·도시구조는 상이하지만, 대규모 종합대학 캠퍼스로서 고밀도 건축물과 광범위한 포장면을 보유하고 있으며, 교육·연구시설의 밀집으로 냉난방 에너지 수요가 크고 미기후 조절이 중요한 공간이라는 공통점을 가진다. 또한 MIT는 설계 기준과 캠퍼스 개발 체계에서 열섬 저감형 지붕·포장 전략을 상대적으로 명시적으로 다루는 사례로 알려져 있어, MIT캠퍼스를 준거로 PNU의 쿨표면 구조를 비교·진단하는 것은 도시계획적 관점에서 알베도 기반 표면 특성이 열환경 개선 잠재력에 미치는 상대적 함의를 도출하는 데 유의미하다. 시간적 범위로는 쿨표면의 공간적 패턴을 정량화하기 위해 유럽우주국(European Space Agency, ESA) Sentinel-2 Level-2A Surface Reflectance(SR)를 주 자료

로 활용하였다(ESA, 2021). 토지피복은 ESA WorldCover 10 m 제품을 기준으로 하였으며, 2025년 12월 기준 최신 공식 공개된 WorldCover 토지피복 지도는 2020(v100)과 2021 (v200)로 제공된다(ESA WorldCover Project, 2021; Zanaga et al., 2022). 이에 토지피복 지도(2021)와 알베도 영상 간 연도 불일치를 최소화하기 위해 2022년을 분석연도로 설정하였다. 영상의 시간 범위는 2022년 5-9월로 한정하여 식생이 활발하고 기상 조건이 비교적 안정적인 하절기 영상을 사용함으로써 그림자와 토양 수분에 따른 잡음을 최소화하였다. MIT캠퍼스가 있는 보스턴 시가 발표한 공식 보고서인 [Boston Heat Resilience Plan] (City of Boston, 2022)에 따르면, 보스턴 지역에서 화씨 90°F(약 32.2°C)를 초과하는 고온일은 역사적으로 주로 5월에서 9월 사이에 집중되어 발생하며, 또한, 한반도의 기후 특성상 5월에서 9월은 하절기 고온기이며, 여름철 몬순의 영향으로 장마의 영향을 배제하기 위해 장면 선택 시 구름 비율 10% 이하의 영상만을 선별한 뒤, 기간 내 영상은 중앙값을 합성하여 시점별 편차와 순간 기상잡음을 동시에 완화하였다.

분석 대상 밴드는 10m 해상도의 Blue(B2), Green(B3), Red(B4), Near-Infrared(B8) 밴드와 20 m 해상도의 Short-Wave Infrared(B11, B12) 밴드로 구성하였으며, SWIR 밴드는 10m 해상도로 최근접 이웃법을 이용해 재보간하였다. 공간분석도구로는 Google Earth Engine (GEE)를 활용하였다. GEE는 클라우드 기반의 위성영상 분석 플랫폼으로, 대규모 다중시계열 자료의 접근과 밴드 연산을 웹 환경에서 자동화할 수 있다. 본 연구에서는 GEE를 이용하여 Sentinel-2 SR 영상의 불량화소 제거, 밴드조합, 반사율(Albedo) 계산 및 픽셀 단위 통계치 도출을 일괄적으로 수행하였다. 특히 Liang et al(2003)의 연구에서 사용된 협대역-광대역 변환식(narrow- to broadband conversion formula)을 적용하여 각 밴드의 반사율을 가중평균함으로써 지표 Albedo를 산정하였다. 측정방법으로는 첫 번째, 캠퍼스 경계 및 격자 자료 구축으로 Google Earth Pro 및 학교에서 제공하는 캠퍼스 평면도를 참조하여 각 캠퍼스의 법적·물리적 경계를 구축하여 이를 GEE 상에 일치시켰다. 이후 각 경계 폴리곤의 면적은 WGS84 타원체를 기준으로 GEE의 함수를 이용해 산정하였다.

두 번째, 불투수·투수 표면 분류 및 재범주화단계로 지표 피복 분류에는 ESA WorldCover 2021 v200(공간해상도 10 m)을 활용하였다. WorldCover는 Tree cover(10), Shrubland(20), Grassland(30), Cropland(40), Built-up(50), Bare/sparse vegetation(60), Snow and ice(70), Permanent water bodies(80), Herbaceous wetland(90), Mangroves(95), Moss and lichen(100)의 11개 클래스를 제공한다(Zanaga et al., 2022). 연구 대상인 중위도 내륙 캠퍼스(PNU, MIT)의 공간적 특성과 WorldCover의 분포 특성을 검토한 결과, 눈·빙설(70), 맹그로브(95), 이끼·지의류(100), 습지(90)는 연구 범위 내에 사실상 존재하지 않는 것으로 확인되어 분석 대상에서 제외하였다. 이에 따라 Built-up(50)을 불투수 표면, Tree cover(10), Grassland(30), Cropland(40), Bare/sparse vegetation(60), Permanent water bodies(80)를 투수 표면으로 간주하였다(Arnold and Gibbons, 1996; Zanaga et al., 2022). 투수 표면은 수문·열환경 기능의 차이를 반영하기 위해 네 개 기능군(Pervious surface functional groups, PG)으로 재범주화하였다. 수역(Permanent water bodies, 80)은 PG1, 수목(Tree cover, 10)은 PG2, 초지·농경지(Grassland 30 + Cropland 40)는 저층 초본녹지로 통합하여 PG3, 맨땅·공터(Bare/sparse vegetation, 60)는 PG4로 정의하였다. 초지와 농경지를 단일 군으로 통합한 것은 두 피복이 모두 낮은 초본식생(herbaceous vegetation)이 우점하는 구조를 가지며, 알베도·LST·증발산 특성이 유사하다는 LCZ 및 도시녹지 선행연구에 근거한다(Stewart and Oke, 2012; Liu et al., 2022). 세 번째로 알베도 기반 불투수 Cool Surface 등급화 단계로 불투수 표면(Built-up, 50)에 대해서는 위성 반사율로부터 광대역 알베도(broadband albedo)를 산정한 뒤, 알베도 수준에 따라 세 개 등급으로 구분하였다. 알베도 산정에는 Landsat 및 Sentinel 계열 위성자료에 대한 Liang (2000)과 Liang, Fang and Chen (2001)의 밴드 조합식을 적용하였다. 단파 복사 영역의 반사율을 이용해 각 픽셀의 광대역 알베도를 계산한 후, 세계 쿨루프·쿨지붕 기준 및 선행연구에서 제시하는 임계값을 참고하여 고반사 Cool Surface(IG1), 중간 반사도 불투수면(IG2), 저반사 일반 불투수면(IG3)으로 재분류하였다(Synnefa et al., 2007).

IV. 분석결과

본 연구는 PNU(부산대학교)캠퍼스와 MIT(매사추세츠공과대학교) 캠퍼스의 Cool Surface 특성을 비교 분석하였다. 두 캠퍼스의 전체 면적은 각각 530,654.8 m²(PNU), 814,887.1 m²(MIT)로, MIT가 약 1.5배 넓지만, 분석의 초점은 절대면적이 아니라 각 캠퍼스 내부에서 차지하는 비율 구조에 두었다. <표 1>과 <표 2>는 부산대학교(PNU)와 MIT 캠퍼스를 대상으로 산정한 불투수·투수 Cool Surface의 면적 및 면적비율을 비교한 결과이다.

1. 불투수 표면(IG) 분석결과

불투수 표면은 알베도 값에 따라 IG1(고반사 Cool Surface), IG2(중간 반사도 불투수면), IG3(저반사 일반 불투수면)으로 구분하였고, 투수 표면은 PG1(수역), PG2(수목), PG3(초본녹지: 초지+농경지), PG4(맨땅·공터)의 네 등급으로 재분류하였다.

<표 1> 캠퍼스별 알베도 등급 및 면적

전체 면적 (m ²)	캠퍼스명	IG1등급 면적 (m ²)	IG1등급 면적율(%)	IG2등급 면적 (m ²)	IG2등급 면적율(%)	IG3등급 면적 (m ²)	IG3등급 면적율 (%)
530654.8	PNU	0	0	2933.884	0.55288	337539.2	63.60805
814887.1	MIT	1181.589	0.145	41116.56	5.045676	567168.2	69.60083

두 캠퍼스의 불투수면적을 비교해 보면, 또는 불투수면적에 대해 비교했을 때, PNU 캠퍼스의 불투수 포장 비율은 전체 면적 중 64.16%로 나타나며, 이는 아스팔트 도로, 콘크리트 포장, 건물 옥상 등과 같은 다양한 인공 표면이 주된 공간을 차지함을 의미한다. 이에 비해 MIT 캠퍼스는 전체 면적의 74.79%가 불투수 면적으로 구성되어 있어, PNU보다 10.63%p 더 높은 불투수 포장 비율을 보이고 있다. 이러한 결과는 MIT가 PNU에 비해 더욱 높은 수준의 도시화와 인공 포장 비중을 가지고 있음을 시사한다. 불투수면적의 유

형별로 살펴보면 먼저, PNU 캠퍼스는 0.00%로 IG1 등급의 고반사 쿨루프가 전무하며, MIT 캠퍼스는 0.145%로 극소량의 IG1 등급만 존재하였다. 두 캠퍼스 모두 국제 에너지 효율 기준(Energy Star)을 충족하는 고반사 쿨루프가 거의 없는 상태이다. 이는 기존의 건축물이 주로 저반사 재료로 마감되어 있음을 의미하고 있다. 다음으로 IG2 등급의 경우 PNU 캠퍼스는 0.553%로 제한적 규모를 가지고 있고, MIT 캠퍼스는 5.046%로 PNU의 약 9.1배 수준의 규모를 보유하고 있다. MIT 캠퍼스에서 IG2 등급의 비율이 높은 이유는 MIT 일부 콘크리트 포장에 새로운 재료로 개선, 부분적인 회색 콘크리트(PCC) 포장 존재, 개선된 포장 기술의 부분 적용 등으로 설명된다(Santamouris, 2013). 그러나 여전히 불투수면의 대부분이 IG2 이하의 중간~저반사 등급에 속하고 있다. IG3 등급은 아스팔트 도로, 일반 시멘트 지붕, 경시변화된 포장 등 관행적 저반사 포장을 대표한다. 이는 열섬현상에 부정적인 영향관계를 가진 특성이다. PNU 캠퍼스는 63.608%의 면적을 차지하고 있고 불투수면의 99.1% 차지한다. MIT 캠퍼스는 69.601%를 차지하며, 불투수면의 93.0% 차지하는 결과를 보이며, 두 캠퍼스 모두 IG3이 불투수면의 절대 다수를 차지하고 있다.

2. 투수 표면(PG) 분석결과

전체 투수면 비율은 PNU 캠퍼스의 경우 35.84%로 상대적으로 높은 녹지 비율을 가지고 있으며, MIT 캠퍼스의 경우 25.21%로 투수면이 PNU보다 10.63%p 낮은 것으로 나타났다.

〈표 2〉 투수면적 비율 결과비교

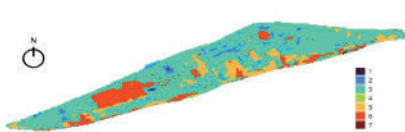
전체 면적 (m ²)	캠퍼스	PG1 수역 면적 (m ²)	PG1 수역 면적율 (%)	PG2수목 면적 (m ²)	PG2수목 면적율(%)	PG3 초본녹지 면적(m ²)	PG3 초본녹지 면적율(%)	PG4맨땅·공터 면적 (m ²)	PG4맨땅·공터 면적율(%)
530654.8	PNU	0	0	182051.3	34.30692	6337.445	1.194269	1792.956	0.337876
814887.1	MIT	1669.273	0.204847	95918.19	11.77073	106511	13.07065	1322.27	0.162264

투수표면의 유형별 분포를 살펴보면 먼저, PG1 등급인 수표면 면적은 PNU 캠퍼스는 0.000%상설 수역이 전무한 것으로 나타났다. MIT 캠퍼스의 경우 0.205%를 차지하며 극소량의 인공 연못 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 두 캠퍼스 모두 상설 수역이 거의 없는 상황으로, 생태수로, 빗물 저류지, 인공 연못 등의 조성을 통한 냉각 기능 강화의 필요성이 매우 높다. 다음으로 PG2 등급은 수목면적으로 PNU 캠퍼스의 경우 34.307%로 매우 높은 수목 비율을 보유하고 있으며, MIT 캠퍼스는 11.771%로 PNU의 약 2.91배 차이로 상대적으로 낮은 수준의 결과를 보였다. PG3 등급에서는 PNU 캠퍼스가 전체 면적의 1.194%로 극소량임에 비해, MIT 캠퍼스는 13.071%로 PNU의 약 10.9배에 달하는 높은 비율을 보인다. 한편, PG4 등급 비율은 양 캠퍼스 모두에서 극히 낮게 나타났다. 이러한 결과는 캠퍼스의 공간이 대부분 용도에 따라 포장되거나 녹지 등 기능적으로 정형화되어 있으며, 미개발 또는 비정형적인 맨땅 공간이 거의 남아 있지 않음을 시사한다. 이는 현대 대학 캠퍼스의 토지 이용이 고도화되고 있으며, 관리 효율성 및 이용 안전성을 중시하는 설계 및 관리 방식이 두 공간 모두에 적용되고 있음을 의미한다.

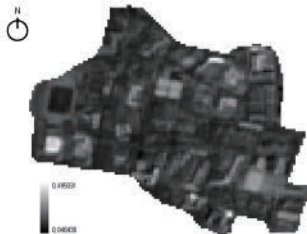
〈그림 1〉 MIT캠퍼스-Albedo결과



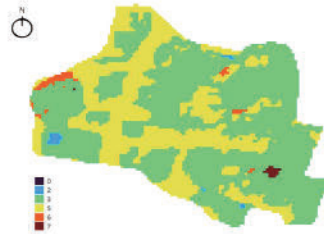
〈그림 2〉 MIT캠퍼스-Coolsurface결과



〈그림 3〉 PNU캠퍼스-Albedo결과



〈그림 4〉 PNU캠퍼스-Coolsurface결과



V. 토론

1. 토지피복 구성의 차이: 정량적 비교

본 연구가 밝혀낸 가장 중요한 차이점은 저반사 불투수면(IG3)의 절대적 지배이다. PNU캠퍼스 63.608%, MIT캠퍼스 69.601%로 두 캠퍼스 모두 저반사 포장인 불투수면의 2/3 이상을 차지하고 있다. 이는 기존의 아스팔트 도로, 시멘트 지붕, 일반 콘크리트 포장 등 관행적 저반사 재료가 캠퍼스 건설 초기부터 적용된 결과로 해석된다. 다만 미국 MIT캠퍼스는 현대화된 캠퍼스 개선 프로젝트를 통해 부분적이거나 포틀랜드 시멘트 콘크리트(PCC) 포장을 도입한 결과, 중간 반사율 포장(IG2)이 5.046%에 달하고 있으며, 이는 PNU캠퍼스의 0.553%보다 9.1배 높다. 이러한 차이는 단순한 통계치가 아니라 캠퍼스 현대화의 진행 정도와 쿨포장 정책 도입의 선진성을 반영한다. 더욱 심각한 문제는 국제 기준(Energy Star, $\alpha \geq 0.65$)을 충족하는 고반사 쿨루프(IG1)의 거의 전무한 현황이다. PNU캠퍼스 0%, MIT캠퍼스 0.145%로, 두 캠퍼스 모두 국제 에너지 효율 기준을 만족하는 쿨루프가 사실상 존재하지 않는다. 이는 기존 건축물의 대규모 개보수 없이는 불가능한 구조적 제약을 의미하며, 향후 신축 건물 또는 노후 건축물 리모델링 시 쿨루프 기술의 의무화가 절실함을 시사한다. MIT캠퍼스의 경우 0.145%의 미미한 수치라도 기록된 것은 일부 현대식 건물이나 식당, 체육관 등 특정 시설에 쿨루프가 도입되었음을 의미하며, PNU캠퍼스의 0%는 이러한 시범적 도입조차 이루어지지 않았음을 의미한다. 투수 표면의 구성에서 가장 극적인 차이는 수목 피복도(PG2)이다. PNU캠퍼스 34.307% vs MIT캠퍼스 11.771%로, PNU캠퍼스가 약 2.9배 높다. 이는 단순한 면적 차이를 넘어 캠퍼스의 열환경 관리 전략의 근본적 차이를 나타낸다. 반면, 초지·농경지(PG3)에서는 정반대 패턴이 나타난다. MIT캠퍼스 13.071%, PNU캠퍼스 1.194%로 MIT캠퍼스가 약 11배 높다. 이는 미국은 미식축구장, 크리켓장과 같은 대학의 스포츠 필드 전통과 개방적 캠퍼스 설계 문화가 반영된 결과로 볼 수 있다. PNU캠퍼스의 극소 비율(1.194%)은 산악 지형에 캠퍼스를 조성한 결과로 보인다. 즉, PNU캠퍼스

는 수목을 이용한 Cool shadow 형성을 선택했고, MIT캠퍼스는 초지와 고반사 포장을 이용한 복사열 감소를 선택했다는 의미이다. 수표면(PG1)은 두 캠퍼스에서 모두 극히 낮다. PNU캠퍼스 0%, MIT캠퍼스 0.205%로, 수공간을 통한 직접적 냉각과 습윤 기능이 실질적으로 방기된 상태이다. 이는 향후 캠퍼스 열환경 개선의 필요성을 시사한다. MIT캠퍼스의 우수사례성은 쿨요소의 총량 자체보다, 이용공간 인접부에 쿨표면 요소가 분산되어 열노출을 직접 완화할 가능성이 크다는 점에서 도출된다. 따라서 PNU캠퍼스는 외곽 수목 자원의 보전·강화를 전제로 하되, 중앙부 IG3 연속 구역을 우선 대상으로 포장 재료 전환과 투수화, 그늘 요소의 분산 배치를 결합하는 전략이 필요하다. 고알베도 포장의 확대는 표면온도 저감에 유리할 수 있으나 보행자 복사부하를 악화시킬 수 있으므로, PNU캠퍼스에서는 고알베도 적용 구역에 수목·캐노피·차광 구조를 함께 배치하는 방식이 고려되어야 한다. 본 연구의 한계점으로 단일 연도(2022년) 여름철 Sentinel-2 영상과 WorldCover 2021 자료만을 사용하였으며, 실제 지표면 온도(LST)나 기상관측자료와의 직접적인 인과 관계는 분석하지 못했다는 한계를 가진다. Sentinel-2는 열적외선 밴드가 없어 단독으로 LST를 산출할 수 없으며, 대안인 Landsat/ECOSTRESS LST는 70~100 m급 공간해상도로 캠퍼스 내부의 보행로·소규모 포장 패턴(10 m)과 스케일이 달라 직접 결합 시 공간 불일치가 발생한다. 다음으로 Sentinel-2 기반 알베도는 대기보정, 반사 이방성Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF), 밴드-광대역 변환 모델 선택에 따라 불확실성이 달라질 수 있어 쿨포장 등급 구분을 위한 알베도 임계값 설정 과정에서 일부 주관적 판단이 개입된 한계점이 있다. 또한, 위성 공간해상도(10 m)의 제약으로 인해 소규모 포장 패턴과 건물 디테일이 충분히 반영되지 못했을 가능성이 있다. 따라서 향후 연구에서 캠퍼스 현장 관측 등을 통해 쿨표면 유형·배치별 실제 냉각 효과를 검증할 필요가 있다.

2. 공간 배치(Spatial Arrangement)의 차이

정량적 구성의 차이만큼 중요한 것은 쿨표면이 캠퍼스 공간에 어떻게 배

치되어 있는가이다. PNU와 MIT는 동일한 쿨표면 비율(PNU 36%, MIT 30%)을 보유하고 있음에도 불구하고, 그 배치 방식이 상이하다.

PNU의 쿨표면은 중앙 광장과 주요 진입로를 따라 선형으로 분포되어 있으며, 나머지 캠퍼스는 고밀도 수목 숲 형태로 둘러싸여 있다. 특히 남동쪽 산림 지역이 연속적인 그늘막 역할을 하고 있으며, 강의실과 실험실이 집중된 중앙부는 포장 중심의 저반사 표면으로 이루어져 있다. 이는 열 취약 지역(중앙)과 열 완화 지역(주변)의 공간적 분리 구조로 해석된다. 즉, 가장 많은 사람이 머무르는 건물 주변이 저반사 포장으로 되어 있고, 실제 사람들이 걷는 광장, 진입로에만 제한적으로 쿨표면이 배치되어 있다.

MIT의 쿨표면은 캠퍼스 전역에 분산 배치되어 있다. 초지(13.1%)가 건물군 사이의 오픈스페이스에 산재되어 있고, 고반사 포장(5.046%)이 산책로, 광장, 주차장 등 주요 이동 경로에 전략적으로 배치되어 있다. 수목(11.8%)은 건물 주변과 경계부에 집중되어 있으나, 캠퍼스 내부의 초지와 포장이 더 높은 비율을 차지한다. 이는 열에 취약한 지역에 대한 직접적 냉각 전략으로 해석된다. 사람들이 실제로 머무르는 강의실, 카페, 벤치 주변을 초지나 포장으로 조성하여 즉각적인 냉각 효과를 제공하는 방식이다. 이러한 배치 차이는 실제 사용자가 경험하는 열환경에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

VI. 결론

본 연구는 ESA WorldCover 2021과 Sentinel-2 알베도를 결합하여 부산대학교(PNU)와 매사추세츠공과대학(MIT) 캠퍼스의 쿨표면 구조를 정량적으로 비교하고, 이들의 공간 배치 전략의 차이를 분석했다. 본 연구의 분석결과를 비교하였을 때, 주요 발견사항은 첫 번째, 두 캠퍼스의 토지피복 구성에서 나타나는 반사율과 녹지 유형의 차이이다. 불투수 표면의 경우 양 캠퍼스 모두 저반사 포장(IG3)이 지배적이었다(PNU 63.608%, MIT 69.601%). 그러나 중간 반사율 포장(IG2)에서 MIT 5.046%가 PNU 0.553%보다 9.1배 높다는 점

은 MIT의 포장 현대화가 진행 중임을 명확히 보여준다. 더욱 주목할 점은 국제 기준(Energy Star, $\alpha \geq 0.65$)을 충족하는 고반사 쿨루프(IG1)의 거의 전무한 현황이다. PNU 0%, MIT 0.145%로, 두 캠퍼스 모두 국제 에너지 효율 기준을 만족하는 시설이 사실상 존재하지 않으며, 이는 향후 신축 건물 및 노후 건축물 리모델링 시 쿨루프 기술의 도입이 절실함을 의미한다. 투수 표면의 구성에서는 더욱 극단적인 대조가 나타난다. 수목 피복도에서 PNU 34.307%가 MIT 11.771%보다 약 2.9배 높다. Smith, Ford, Kim, Vautard, and Bellouin (2024)의 정량화에 따르면, PNU의 수목 커버는 약 -3.05 K의 냉각 효과를 제공하는 반면, MIT는 약 -1.05 K의 냉각 효과만 제공한다. 이러한 차이는 단순한 통계치가 아니라 캠퍼스 설계 철학의 근본적 차이를 반영한다. 초지·농경지(PG3)에서는 정반대 패턴이 나타났으며(PNU 1.194% vs MIT 13.071%), 이는 미국 대학의 스포츠 필드 전통과 개방 공간 설계 문화가 MIT에 반영되었음을 의미한다. 반면 PNU의 극소 비율은 산악 지형의 물리적 제약과 숲 중심의 녹지 설계 철학을 명확히 보여준다. 이러한 토지피복 구성의 차이는 각 캠퍼스가 서로 다른 지형·기후·문화적 맥락에서 이루어진 의도적 선택의 결과로 해석된다.

두 번째로 정량적 구성 이상으로 공간 배치방식의 상이함이다. PNU의 배치 특성은 중앙 고밀도 포장과 주변부 수목 집중 배치 구조로 특징지어진다. 강의실과 실험실이 집중된 중앙부는 저반사 포장(IG3)의 고밀도 지역이며, 남동쪽 산림 지역의 연속적인 수목대가 열환경 완화의 주요 역할을 담당하고 있다. 이는 열이 취약한 지역(중앙)과 열 완화 지역(주변)의 공간적으로 분리된 형태로, 가장 많은 사용자가 머무르는 중앙부가 오히려 높은 열 스트레스에 노출되는 역설적 구조를 의미한다. 반면 MIT의 배치 특성은 캠퍼스 전역에 초지·포장 분산하여 배치되어있고 경계부 수목대를 연속 배치하였다. 초지(13.1%)와 고반사 포장(5.046%)이 건물군 사이의 오픈스페이스, 산책로, 광장에 전략적으로 분산되어 있으며, 수목(11.8%)은 건물 주변과 캠퍼스 경계부에 연속적으로 배치되어 있다. 이러한 배치는 직접적으로 이용자에게 복사열을 저감할 수 있으며, 경계부의 연속적 수목대는 캠퍼스 외부의 열 유

입을 차단하는 역할을 수행할 수 있다. MIT 캠퍼스는 다음의 세 가지 점에서 쿨서피스 정책의 우수사례로 평가된다. 첫째, 포장 현대화의 선도성이다. IG2 비율 5.046%는 이미 포틀랜드 시멘트 콘크리트(PCC) 포장을 시범 도입하고 있음을 의미하며, 이는 MIT 소재 보스턴의 도시 쿨포장 정책과의 연계를 시사한다. 둘째, 초지의 다원적 활용이다. 13.1%의 초지는 단순한 녹지가 아니라 스포츠 시설, 휴게 공간, 우수 저류지, 생물 다양성 서식처 등 여러 기능을 동시에 수행함으로써, 열환경 개선과 캠퍼스 활용성을 극대화한다. 셋째, 경계부 수목대의 열 차단 기능이다. 낮은 수목 비율(11.8%)에도 불구하고 미기후 악화가 극심하지 않은 것은 캠퍼스 경계부에 연속적인 수목대를 유지하여 외부 열 유입을 억제하기 때문이다. 반면 PNU는 다음의 과제를 가지고 있다. 첫째, 중앙부 포장의 높은 저반사율(63.6%)로 인한 열 취약성이다. 비록 높은 수목 비율(34.3%)을 보유하고 있으나, 이는 주변부에 집중되어 있어 중앙부 사용자의 열 스트레스 완화에는 직접적 효과가 제한된다. 둘째, 초지의 부재로 인한 다원적 기능 손실이다. 극소의 초지 비율(1.194%)은 단순히 냉각 기능의 손실뿐 아니라 우수 관리, 생물 다양성, 휴게 공간 제공 등 다원적 기능을 방기한 것을 의미한다. 셋째, 쿨포장 도입의 전무이다. PNU에서 IG2 비율 0.553%는 국제 기준 이상의 현대적 포장이 거의 없음을 의미하며, 이는 포장 현대화에서 MIT보다 상당히 뒤떨어져 있음을 시사한다. 그러나 이러한 과제는 동시에 개선의 큰 잠재력을 의미한다. PNU는 이미 보유한 높은 수목 비율(34.3%)을 자산으로 활용하면서, MIT의 우수사례를 참고하여 중앙부 포장의 선택적 현대화, 초지 도입, 쿨포장 확충 등을 통해 열환경 관리의 효율성을 획기적으로 개선할 수 있다.

■ 참고문헌 ■

- 박기현, 2016, 대학 캠퍼스 건물의 에너지 효율개선 방안 연구, 『정책 이슈페이퍼』 16-16, 울산: 에너지경제연구원.
- 엄정섭, 2009, "Google Earth를 이용한 경북대와 홍콩대 캠퍼스의 불투수율 비교평가," 『한국지역지리학회지』, 15(3), pp.421-433.

- 유영희·백종진, 2012, “도시열섬 강도에 기여하는 요소들의 정량적 분석,” 『응용기상학회지』, 51(5), pp.842-854, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-098.1>.
- 황영석·엄정섭, 2015, “대학 캠퍼스의 쿨표면 비율 비교평가: 경북대학교와 UC Davis를 사례로,” 『KIEAE Journal』, 15(1), pp.117-127.
- Akbari, H., A. H. Rosenfeld, and H. Taha, 1992, The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-31721, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Arnold, C. L. Jr. and C. J. Gibbons, 1996, “Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator,” *Journal of the American Planning Association*, 62(2), pp.243-258.
- Baldinelli, G., S. Bonafoni, R. Anniballe, A. Presciutti, B. Gioli, and V. Magliulo, 2015, “Spaceborne detection of roof and impervious surface albedo: Potentialities and comparison with airborne thermography measurements,” *Solar Energy*, 113, pp.281-294.
- Bonafoni, S., G. Baldinelli, and P. Verducci, 2017, “Sustainable strategies for smart cities: Analysis of the town development effect on surface urban heat island through remote sensing methodologies,” *Sustainable Cities and Society*, 29, pp.211-218, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.11.005>.
- Brabec, E., S. Schulte, and P. L. Richards, 2002, “Impervious surfaces and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning,” *Journal of Planning Literature*, 16(4), pp.499-514.
- Cho, J., J. Ha, and S. Lee, 2017, “Spatial and temporal effects of built environment on urban air temperature in Seoul City, Korea: An application of spatial regression models,” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(1), pp.123-130.
- City of Boston. (2022). Heat Resilience Solutions for Boston. Boston, MA: Environment Department. Retrieved from
- Demuzere, M., J. Kittner, A. Martilli, G. Mills, C. Moede, I. D. Stewart, J. Van Vliet, and B. Bechtel, 2022, “A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science,” *Earth System Science Data*, 14(8), pp.3835-3873.
- Gilbert, H. E., P. J. Rosado, G. Ban-Weiss, J. T. Harvey, H. Li, B. H. Mandel, D. Millstein, A. Mohegh, A. Saboori, and R. M. Levinson, 2017, “Energy and environmental consequences of a cool pavement campaign,” *Energy and Buildings*, 157, pp.53-77.

- Grdić, Z., G. Topličić-Ćurčić, N. Ristić, D. Grdić, and P. Mitković, 2014, "Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete," *Gradjevinar*, 66(1), pp.11-20.
- Guthrie, R. and J. Deniseger, 2001, Impervious surfaces in French Creek, Technical report, Ministry of Water, Land and Air Protection, Vancouver Island Region, British Columbia.
- Leal Filho, W., L. Echevarria Icaza, A. Neht, M. Klavins, and E. A. Morgan, 2018, "Coping with the impacts of urban heat islands: A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context," *Journal of Cleaner Production*, 171, pp.1140-1149.
- Li, X., Y. Zhou, S. Yu, G. Jia, H. Li, and W. Li, 2019, "Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings", *Energy*, 174, pp.407-419.
- Liang, S., 2000, "Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms," *Remote Sensing of Environment*, 76(3), pp.375-392.
- Liang, S., H. Fang, and M. Chen, 2001, "Atmospheric correction of landsat ETM+ land surface imagery - Part II: Validation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(12), pp.2737-2745.
- Liang, S., C. J. Shuey, A. L. Russ, H. Fang, M. Chen, C. L. Walthall, C. S. T. Daughtry, and R. Hunt, 2003, "Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation," *Remote Sensing of Environment*, 84(1), pp.25-41, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00068-8).
- Liu, W., B. Jia, T. Li, Q. Zhang, and J. Ma, 2022, "Correlation analysis between urban green space and land surface temperature and analysis of spatial heterogeneity: A case study within the Sixth Ring Road of Beijing," *Sustainability*, 14(20), 13492, <https://doi.org/10.3390/su142013492>.
- Mashhoodi, K., D. Stead, and A. van Timmeren, 2020, "Land surface temperature and households' energy consumption: Who is affected and where?," *Applied Geography*, 116, 102151.
- MIT Office of Sustainability, 2020, MIT Office of Sustainability: Report to the President, 2019-2020, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Mohajerani, A., J. Bakaric, and T. Jeffrey-Bailey, 2017, "The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete," *Journal of Environmental Management*, 197, pp.522-538.
- Oswald, C. J., C. Kelleher, S. H. Ledford, K. G. Hopkins, A. Sytsma, D. Tetzlaff, L.

- Toran, and C. B. Voter, 2023, "Integrating urban water fluxes and moving beyond impervious surface cover: A review," *Journal of Hydrology*, 618, 129188.
- Qiao, L. and X. Yan, 2024, "Analysis of the correlation between spatial morphological elements and microclimate in the higher education teaching center area," *Atmosphere*, 15(11), 1330.
- Rahman, I. and S. Das, 2024, "An analytical study on campus street types considering sustainable landscape microclimate," *European Journal of Creative Practices in Cities and Landscapes*, 7(1), pp.98-121.
- Rose, L. S., H. Akbari, and H. Taha, 2003, "Characterizing the fabric of the urban environment: A case study of Greater Toronto area," *Landscape and Urban Planning*, 62(3), pp.181-194.
- Santamouris, M., 2013, "Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp.224-240.
- Shuster, W. D., J. V. Bonta, H. Thurston, E. A. Warnemuende, and D. R. Smith, 2005, "Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review," *Urban Water Journal*, 2(4), pp.263-275.
- Smith, C. J., Ford, B., Kim, J., Vautard, R., & Bellouin, N. (2024). Variation in the relationship between urban tree canopy cover and air temperature across times of day and cloud conditions. *Urban Climate*, 53, 101730.
- Stewart, I. D. and T. R. Oke, 2012, "Local climate zones for urban temperature studies," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), pp.1879-1900.
- Synnefa, A., M. Santamouris, and H. Akbari, 2007, "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions," *Energy and Buildings*, 39(11), pp.1167-1174.
- Van De Kerchove, R., D. Zanaga, P. Xu, N.-E. Tsendbazar, and M. Lesiv, 2022, Product user manual: WorldCover (Version 2.0), European Space Agency.
- Wang, Y., de Groot, R., Bakker, F., Wörtche, H. J., & Leemans, R. 2017, Thermal comfort in urban green spaces: A survey on a Dutch university campus. *International Journal of Biometeorology*, 61(1), 87-101.
- Ward, K., S. Lauf, B. Kleinschmit, and W. Endlicher, 2016, "Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers," *Science of the Total Environment*, 569-570, pp.527-539.

웹사이트

- U.S. Environmental Protection Agency, 2020, Reducing urban heat islands: Compendium of strategies – Cool roofs, U.S. Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/heatislands>, [2025.12.20.]
-
- _____, 2021, Reducing urban heat islands: Compendium of strategies – Cool pavements, Washington, D.C.: U.S. EPA, <https://www.epa.gov/heatislands/using-cool-roofs-reduce-heat-islands>, [2025.12.20.]
- Zanaga, D., R. Van De Kerchove, D. Daems, W. De Keersmaecker, C. Brockmann, G. Kirches, J. et al., 2022, ESA WorldCover 10 m 2021 v200 (Data set), European Space Agency, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>, [2025.12.18.]
- Zanaga, D., R. Van De Kerchove, W. De Keersmaecker, N. Souverijns, C. Brockmann, R. Quast, et al., 2021, ESA WorldCover 10 m 2020 v100 (Version 1.0) (Data set), European Space Agency, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>, [2025.12.18.]

오상원: 부산대학교 도시공학과 박사과정으로 재학중이며, 주요 관심연구분야는 기후변화, 탄소중립, 지속가능한 발전, 균형발전 등으로 이에 관한 연구를 수행하고 있다 (ohssang1006@pusan.ac.kr).

정주철: 도시 및 지역계획학 박사학위를 취득하고 현재 부산대학교 교수로 재직 중이다. 주요 관심 분야로는 토지이용계획, 성장관리, 스마트성장, Sustainable Development, 환경재난관리, 환경영향평가/전략환경평가, 환경정책관리 및 사회영향평가, 탄소중립 도시계획 등이 있다(jcjung@pusan.ac.kr).

투 고 일: 2025년 12월 01일
심 사 일: 2025년 12월 07일
게재확정일: 2026년 02월 11일