연구논문 「환경정책」 제34권 제3호 2026. 9: 457-487
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2026.34.3.457
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

도시 내 표면 과열과 지표유출 동시저감을 위한 자연기반해법 우선 검토구역 선정: 청주시를 중심으로

Screening Priority Areas for Nature-based Solutions to Simultaneously Mitigate Surface Overheating and Surface Runoff in the City: A Case Study of Cheongju City

배민기* · 이태영**
Min-Ki Bae · Tae-Young Lee

요약: 기후위기로 폭염과 집중호우의 발생이 잦아지면서 두 위해가 같은 도시 공간에 중첩될 가능성이 커지고 있으나, 지자체의 대응은 여전히 위해별로 분리되어 있다. 본 연구의 목적은 주간 표면과열 강도와 불투수면 기반 지표유출 잠재성이 동시에 높은 구역을 식별하여 자연기반해법 적용 우선 검토구역을 찾아내는 것이다. 이를 위해 청주시를 대상으로 위성 지표면 온도에서 대기기온을 차감한 지표-대기 온도차를 표면과열 강도지표로, 불투수면 비율을 내수침수의 물리적 선행요인 지표로 각각 30m 격자 단위에서 산출하였다. 이후 두 지표가 모두 상위 5%에 해당하는 구역의 교집합을 자연기반해법 우선 검토구역으로 도출하였다. 분석 결과, 중첩 구역은 대상지 전체 면적의 약 1.8%에 해당하는 16.85㎢로 나타났으며, 오송·오창 산업단지와 중심 시가지에 집중되어 상위 5개 읍면동이 전체의 65.4%를 차지하였다. 이러한 결과는 청주시에서 표면 과열과 지표유출 잠재성이 높은 불투수면 밀집지가 특정 도시·산업공간에 집중되어 있음을 보여준다. 본 연구는 지자체가 기후위기 적응대책, 도시계획, 방재계획에서 자연기반해법 적용 후보지를 선별하는 데 활용가능한 공간적 의사결정 근거를 제공한다.
핵심주제어: 표면 과열, 지표-대기 온도차, 불투수면, 선행요인, 저영향개발

Abstract: As heatwaves and heavy rainfall become more frequent under the climate crisis, the two hazards are increasingly likely to overlap in the same urban space, yet local government responses remain separated by hazard type. This study aims to identify areas where daytime surface overheating and imperviousness-based runoff potential are simultaneously high and to screen them as priority areas for further NbS consideration. For Cheongju City, the surface-air temperature difference, obtained by subtracting air temperature from satellite land surface temperature, was used as an indicator of surface overheating intensity, and the imperviousness ratio was used as an indicator of the physical precursor of pluvial flooding, both computed at a 30m grid resolution. The intersecting areas where both indicators ranked in the top 5% were then identified as priority areas for further NbS consideration. The analysis showed that the overlapping zone amounted to 16.85km², about 1.8% of the total study area, and was concentrated in the Osong and Ochang industrial

* 주저자, 충북연구원 수석연구위원
** 교신저자, 충청북도 재난안전연구센터 전문연구원

complexes and the central urban area, with the top five administrative districts accounting for 65.4% of the total. These results show that, in Cheongju City, impervious-surface clusters with high surface overheating and high surface-runoff potential are concentrated in specific urban and industrial areas. This study provides a spatial decision-support basis that local governments can use to select candidate sites for NbS in climate-change adaptation measures, urban planning, and disaster-prevention planning.
Key Words: Surface Overheating, Surface-Air Temperature Difference, Impervious Surface, Pluvial-Flooding Predisposing Factor, Low-impact Development

I. 서론

이미 일상화된 기후위기는 최근 발생 형태가 복합재난으로 변화하면서 피해의 규모도 커지고 심각성도 배가되고 있다. IPCC(2021)도 제6차 평가보고서에서 폭염·가뭄의 동시 발생, 복합 홍수 등 복합 극한사상(compound extreme events)의 발생 가능성이 증대되었다고 평가한 바 있다. 특히, 도시는 불투수면의 확대와 다양한 원인의 인공열 배출로 인해 주변 지역보다 기온이 높은 도시열섬 현상과 강우의 지표 침투가 차단되어 발생하는 내수침수 위험에 동시에 노출되어 있다. 따라서 도시의 기후 및 재난안전 정책은 두 가지 이상의 재난을 개별적으로 다루기보다, 위험이 함께 집중되는 공간을 찾아내고 그 곳에 대응 역량을 우선 투입하는 통합적 접근이 요구된다.

이미 우리나라는 폭염과 집중호우로 인한 피해가 해마다 반복되고 있고, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에 따르면 21세기 말 폭염일수가 현재 대비 약 9배 증가하고, 극한강수의 강도와 영역도 확대될 것으로 전망되고 있다(환경부·기상청, 2025). 특정 지역에서 폭염과 집중호우가 빈도·강도 측면에서 동시에 심화되면서 발생 간격도 줄어드는 등 구조적으로 복합재난화되고 있다는 점은 두 재난을 개별적으로 대응하는 기존 방식의 변화가 필요하다는 점을 시사한다. 두 위해를 함께 대응해야 하는 이유는 첫째, 두 위해가 도시화에 따른 불투수면의 확대라는 공통의 물리적 기반을 공유한다는 점이며, 둘째, 자연기반해법은 차양·증발산을 통한 냉각과 침투·저류를 통한 유출 저감에 동시에 작용하는 다기능 수단이므로, 두 수요가 함께 큰 구역에 투입할

때 단위 투자당 편익이 가장 크다는 점이다. 한정된 재원 아래에서 폭염과 침수 대응 사업이 각각의 우선순위에 따라 별도로 추진되면 동일 공간에 대한 중복 투자나 누락이 발생할 수 있는데, 두 수요가 겹치는 구역을 미리 식별해 두면 부서 간 사업을 연계할 공통의 공간적 기준점을 확보할 수 있다.

한편, 정부도 탄소중립기본법에 의거하여 기초지자체 단위까지 5년 단위로 기후위기 적응대책을 수립·시행하고 있으며, 재난 및 안전관리 기본법을 비롯한 관련 개별 법체계 아래 폭염, 집중호우 관련 인프라 설치 등이 제도화되어 있다. 그러나 복합재난 대응의 관점에서 보면 유관 부서가 재난 유형별로 분절되어 대응하는 행정구조로 인해, 폭염 대응 수요와 침수 저감 수요가 공간적으로 중첩되는 지점에 정책 자원을 통합적으로 배분하는 의사결정 기제가 충분히 마련되어 있지 않다. 자연기반해법(NbS)은 폭염 완화와 강우유출 저감에 동시에 기여할 수 있는 수단임에도, 도입의 우선 검토구역을 정하는 객관적·공간적 기준은 여전히 미흡하다. 기후 및 재난안전 재원이 한정된 상황에서 위험요인이 집중된 지역에 자원을 우선 배분하기 위한 근거기반(evidence-based) 정책수단의 부재는 정책의 효율성과 형평성을 동시에 저해하는 공백이라 할 수 있다.

자연기반해법은 폭염과 집중호우로 인한 침수피해 저감의 공동편익(co-benefits)을 동시에 제공하는 적응 수단으로 주목받아 왔으며, 다수의 실증연구를 통해 정량적으로 유출 저감과 더위 완화의 시너지효과가 입증되고 있다(Pace et al., 2025; Wei et al., 2025). 그러나, 정책의 관점에서 더 중요한 것은 자연기반해법이 효과가 있는가를 넘어 '어디에 우선 투입할 것인가'에 있으며, 이는 위험이 집중된 구역을 선별하는 별도의 의사결정단계를 필요로 한다. 이와 관련하여 다기능 그린인프라의 입지를 다기준으로 평가한 연구(Meerow and Newell, 2017), 홍수회복력을 기준으로 입지 우선순위를 도출하는 의사결정 지원모델(Khodadad et al., 2025) 등 GIS 공간분석을 활용하여 도입 우선순위 지역을 선별하고 이를 정책 의사결정의 근거로 제시하는 연구가 확대되고 있다.

한편, 폭염과 집중호우에 대한 위험 평가는 각 분야에서 지속해서 정밀화

되어 왔다. 폭염은 기상모델과 위성 지표면 온도자료에 기반한 열환경 지도, 집중호우는 수리·수문 모델과 침수흔적도 등이 정교하게 구축되어 활용되고 있다. 그러나 이러한 단일 재난 위해지도는 본질적으로 하나의 위해를 정밀하게 묘사하는 데 목적이 있어, 서로 다른 위해가 동일 공간에서 겹치는 양상을 통합적으로 보여주지는 못한다. 기존 연구도 대부분 폭염 완화를 위한 그린인프라 공간 최적화 및 수요·공급 분석연구(배성민·이서영·서지훈, 2025; 홍나은·이동근, 2025), 폭우 대응 그린인프라 평가체계 연구(윤은주·이지우, 2024)와 같이 하나의 위해에 초점을 맞추고 있어, 폭염과 집중호우 관련 선행요인을 동일한 공간 단위에서 중첩하여 자연기반해법의 우선 검토 구역을 도출한 연구는 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구는 청주시를 대상으로 지표면 과열과 집중호우 시 지표유출 잠재성이 동시에 높은 지역, 즉 자연기반해법 적용을 우선 검토할 구역을 도출하는 것을 목적으로 한다. 여기서 도출되는 구역은 적용 수요가 높아 우선적으로 검토할 필요가 있는 구역이며, 실제 적용 가능성은 후속 단계의 평가를 통해 확정된다. 본 연구의 결과는 지자체가 한정된 재원을 위해의 선행요인이 함께 집중된 지역에 우선 배분하기 위한 객관적 근거자료로 활용될 수 있고, 기후위기 적응대책·도시기본계획·방재계획 등 분절된 계획체계를 중첩구역 중심으로 연계하는 통합적 의사결정의 기준을 제공할 수 있으며, 취약계층과의 공간관계분석을 통해 기후환경정의에 부합하는 정책방향을 제시하는 데 도움이 될 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서 활용한 방법은 여타 지자체에서도 적용할 수 있을 것이다.

II. 이론적 고찰

1. 자연기반해법의 개념과 공동 편익

자연기반해법은 자연 생태계와 그 기능을 활용하여 사회적 과제를 해결하려는 통합적 접근으로, 회색 기반시설 중심의 대응에 대한 보완적·대안적 패

러다임으로 등장하였다. 국제자연보전연맹(IUCN, 2016)은 자연기반해법을 사회적 과제를 효과적이고 적응적으로 해결하는 동시에 인간의 복지와 생물다양성에 편익을 제공하는, 자연 또는 변형된 생태계를 보호·지속가능하게 관리·복원하는 행동으로 정의하였다. 도시에서 자연기반해법은 도시숲·가로수·옥상녹화·벽면녹화와 같은 식생 기반 기법, 생물저류지·식생수로·빗물정원과 같은 저영향개발(LID) 기법, 습지·저류지 등 청색기반시설을 포괄하며, 식생의 차양과 증발산을 통한 기온 저감, 투수면 확보와 저류를 통한 강우유출 저감, 대기질 개선, 탄소 흡수, 생물다양성 증진 등 다양한 생태계서비스를 동시에 제공한다(UNEA, 2022).

폭염과 집중호우 등의 복합위해 상황에서 자연기반해법의 중요한 강점은 여러 위해에 동시에 대응하는 공동편익(co-benefits)을 제공한다는 점이다. 폭염 저감 측면에서, 자연기반해법은 폭염기간 중 기온을 평균 약 2℃ 낮추며, 근린 규모의 적용에서 냉각효과가 크고 식생 기반의 녹색인프라가 수면 기반의 청색인프라보다 우수하다(Wei et al., 2025). 폭염과 강우를 함께 고려한 도시 모델링 연구 역시 수목피복 복원을 통한 녹색인프라가 강우유출 저감과 극한더위 완화를 동시에 달성하는 시너지 효과가 있음을 정량적으로 입증하였다(Pace et al., 2025). 또한 투수성 포장과 생물저류시설을 결합한 조합은 강우유출을 90% 저감하는 동시에 표면온도를 최대 2.75℃ 낮추는 공동편익을 보고한 바 있다(Xu, Wu, Ye, Qin and Zhang, 2026). 다만 이러한 효과는 입지 조건에 따라 크게 달라지므로, 공동편익을 극대화하기 위해서는 어떤 기법을 어디에 적용할 것인가에 대한 공간적 판단이 선행되어야 한다.

2. 자연기반해법 입지에 관한 선행연구 고찰

자연기반해법의 입지를 선정하는 선행연구는 어떤 지표로 적지를 판단할 것인가에 초점이 맞춰져 있다. 다수의 연구는 지표를 위험 요인, 물리·환경적 요인, 사회적 형평성 요인으로 구분하고, 이를 지리정보체계 기반 다기준 의사결정분석으로 통합하여 적지를 도출해 왔다. 위험 요인은 대응하려는 재난의 강도와 노출을 나타내는 지표로 폭염의 지표면온도, 침수의 불투수면 비율·저

지대·경사 등이 활용된다. 물리·환경적 요인은 입지 여건으로 토지이용, 토양 침투능, 지하수위, 경사 등이며, 시공의 물리적 제약 요인으로 적용되기도 한다(Khodadad et al., 2025). 사회적 형평성 요인은 편익의 수혜 대상에 관한 것으로 취약계층의 분포가 기후환경정의의 관점에서 입지 평가에 활용되고 있다. Meerow and Newell(2017)의 GISP(Green Infrastructure Spatial Planning) 모델은 우수관리, 사회적 취약성, 녹지 접근성, 대기질, 도시열섬 완화, 경관 연결성의 6개 기준을 GIS로 중첩하여 다기능 그린인프라의 우선순위 구역을 도출하였다. Goodspeed, Liu, Gounaridis, Lizundia and Newell (2022)은 공간 다기준분석에 기반한 우선순위화 방안을 제시하였다. 이들 연구는 본 연구가 복수 지표의 공간적 중첩으로 우선순위 구역을 도출하는 방법론적 기반을 제공한다.

한편, 본 연구가 다루는 두 재난간의 관계에 대해, Pappalardo, Zanetti and Todeschi(2023)은 이탈리아 파도바에서 지표 도시열섬강도가 불투수면 비율과 뚜렷한 양의 상관을 가지며 불투수율이 10% 증가할 때마다 열섬강도가 약 0.3℃ 상승함을 정량적으로 제시하였다. 이는 폭염과 내수침수가 불투수면이라는 공통 기반에서 함께 발생함을 뒷받침하며, 두 위해를 동일 공간에서 함께 평가할 근거가 된다. Fahy, Brenneman, Chang and Shandas(2019)은 미국 포틀랜드에서 침수 위험과 폭염 위험을 GIS로 결합하고 국지공간자기상관 분석으로 두 위험이 함께 높은 구역의 군집을 규명하였으며 자연기반해법이 두 재난을 동시에 완화할 수 있다고 하였다. 국내에서는 그린인프라의 수요·공급을 분석한 연구들이 축적되어 왔으나(이혜민·유수진·박사무엘·전진형, 2018; 윤은주·이지우, 2024; 홍나은·이동근, 2025), 이들은 홍수 또는 폭염 가운데 하나의 단일 재해를 대상으로 하여 두 위험을 통합한 공간 우선순위 도출에는 이르지 못하였다.

3. 복합위해의 개념과 선행 요인

복합 극한사상(compound events)은 여러 기상·기후 인자나 위해가 결합하여 단일 사상보다 큰 영향을 유발하는 현상을 가리킨다(IPCC, 2021).

Zscheischler et al.(2020)은 이를 선행조건형(preconditioned), 다변량형(multivariate), 시간중첩형(temporally compounding), 공간중첩형(spatially compounding)의 네 가지로 유형화하였다. 이 가운데 다변량형은 동일한 지역과 시기에 여러 요인 또는 위해가 함께 작용하여 영향을 키우는 경우를 가리킨다. 복합사상의 위험은 개별 사상의 위험을 단순히 합한 것보다 크게 나타날 수 있으며, 개별 위해를 분야별로 나누어 평가하는 방식으로는 이러한 결합을 포착하기 어렵다는 점이 지적되어 왔다(Zscheischler et al., 2018). 본 연구가 다루는 것은 다변량형에 해당한다. 도시의 불투수면 확대는 증발산을 차단하여 표면 과열을 심화시키는 동시에 강우의 지표 침투를 막아 유출을 증가시키므로, 하나의 물리적 조건이 두 위해의 선행요인으로 함께 작용한다. 폭염과 침수가 도시 내에서 공간적으로 중첩된다는 점은 실증연구로도 확인되어 왔다. Fahy et al.(2019)은 미국 포틀랜드를 대상으로 침수 위험과 극한 열 위험이 함께 높은 구역이 존재함을 보였고, Yu, Zhu, Zhou and Wang(2024)은 중국 선전을 대상으로 열 스트레스와 침수의 통합위험을 근린 단위로 산출하여 두 위험의 결합 정도가 공간적으로 크게 이질적임을 제시하였다. 다만 이들 연구는 위험의 분포를 진단하는 데 초점이 있으며, 도출된 구역을 자연기반해법의 적용 우선순위와 직접 연결한 사례는 제한적이다.

4. 본 연구의 의의와 차별성

폭염과 침수에 대한 공간분석은 각 분야에서 활발히 이루어져 왔고, 두 위험을 함께 다룬 해외 연구도 일부 존재한다(Fahy et al., 2019). 다만 국내에서는 두 위험의 물리적 선행요인을 동일한 공간 단위에서 결합하여 자연기반해법의 우선 검토구역을 선별한 연구를 찾아보기 어렵다. 본 연구는 대기기온을 보정한 표면 과열강도(SATD)와 강우 시 지표유출 잠재성을 나타내는 불투수면 비율을 동일한 30m 격자에서 산출하여, 두 저감 수요가 함께 높은 구역을 식별하였다.

본 연구가 도출한 구역은 인공 포장과 건물이 집약되어 표면 과열과 지표유출 잠재성이 함께 높게 나타나는 곳으로, 회색 인프라를 녹색 인프라로 전

환할 때 냉각과 유출 저감의 공동편익을 기대할 수 있는 구역이다. 다만 이는 폭염과 침수가 실제로 발생한 위험지역이나 자연기반해법의 최종 적용 적지를 의미하지 않는다. 본 연구의 의의는 개별 재난의 위험지도를 더 정밀하게 만드는 데 있는 것이 아니라, 분야별로 분절되어 구축된 두 위해정보를 하나의 공간 단위에서 연결하여 지자체가 한정된 예산을 우선 배분할 대상지를 좁혀 주는 데 있다. 도출된 구역을 대상으로 사회적 취약성, 토지이용 여건, 토양·경사, 가용부지와 사업비를 추가로 검토하면 실제 적용 가능성과 적합한 기법 유형을 확정할 수 있다.

방법론적으로는 두 지표를 하나의 종합점수로 합산하지 않고, 각각의 상위 구간이 동시에 충족되는 구역을 교집합으로 도출한 점에 특징이 있다. 이 방식은 지표별 가중치를 설정할 필요가 없어 자의성을 피할 수 있고, 두 지표가 각각 설정된 기준을 동시에 충족하는지를 명확하게 확인할 수 있어 해석에 유리하다. 또한, 분석 기준과 절차가 단순하고 명시적이어서 동일한 자료를 확보할 수 있는 다른 지자체에도 비교적 쉽게 적용할 수 있다. 따라서 본 연구의 방법은 자연기반해법의 최종 입지를 확정하는 적지분석이라기보다, 상세 검토가 필요한 구역을 먼저 찾아내는 1차 공간 스크리닝 도구로서 의미를 가진다.

Ⅲ. 연구방법론

1. 연구 대상지

본 연구는 충청북도 청주시를 대상으로 한다. 첫째, 청주시는 오송·오창 등 고도로 개발된 산업단지와 조밀한 시가지가 외곽의 산림·농경지와 한 행정구역 안에 공존하는 도농복합 도시이다. 이는 불투수면과 표면 과열이 집중된 지역과 그렇지 않은 지역의 대비를 뚜렷하게 만들어, 선행요인의 공간적 중첩을 식별하고 정책적 시사점을 도출하기에 적합한 조건을 제공한다. 둘째, 청주시는 오송 제2·제3생명과학단지와 오창 과학산업단지 등 대규모

산업단지의 조성과 확장이 계속되고 있어 불투수면이 지속적으로 증가하는 지역이다. 신규 개발과 노후 단지 정비가 동시에 진행되는 시점은 자연기반해법을 계획 단계에서부터 반영할 수 있는 정책적 개입 여지가 큰 시기이므로, 우선순위 검토의 실효성이 높다. 셋째, 청주시는 기초지자체 단위 기후위기 적응대책과 도시기본계획, 자연재해저감 종합계획을 각각 수립·운영하고 있어, 본 연구가 제시하는 중첩구역을 계획 간 연계의 공통 기준으로 활용할 수 있는 제도적 여건을 갖추고 있다.

2. 분석의 범위와 용어의 정의

본 연구는 두 지표를 다음과 같이 한정하여 사용한다. 첫째, 지표-대기 온도차(SATD)는 위성 지표면온도에서 같은 시각의 대기기온을 차감한 값으로, 인공피복에 의한 상대적인 표면 과열강도를 나타내는 지표이다. 이는 위성이 관측하는 표면의 물리적 상태를 기술하는 값이며, 도시민이 실제로 경험하는 폭염 노출이나 온열질환 위험을 직접 대변하지 않는다. 따라서 본 연구는 이를 폭염 위해 지표가 아니라 표면 과열강도 지표라 한다. 둘째, 불투수면 비율은 강우 시 지표유출을 증가시키는 물리적 조건의 밀집도를 나타내는 지표유출 잠재성 지표이다. 동일한 불투수율을 가진 지역이라도 지형적 저점, 유역면적, 배수관망 용량, 강우강도, 하천 수위에 따라 실제 침수 가능성은 크게 달라지므로, 본 연구는 이를 내수침수 위해 지표가 아니라 내수침수의 물리적 선행요인이라 한다. 셋째, 두 지표가 모두 상위 구간에 해당하는 구역을 본 연구는 자연기반해법 적용 우선 검토구역이라 한다. 이는 자연기반해법의 적용이 적합하다고 검증된 구역이 아니라, 두 위험의 물리적 선행요인이 함께 집중되어 있어 적용 수요가 크다고 판단되는 구역이다. 실제 적용 가능성은 토지 소유관계, 경사, 토양 침투능, 가용부지, 지하매설물 등을 검토하는 후속 단계에서 확정된다.

자연기반해법 입지 결정은 두 위해의 선행요인이 함께 높은 구역을 식별하는 단계, 취약계층 분포와 수혜 인구를 고려한 우선순위 조정 등 사회적 필요성을 평가하는 단계, 토지 여건과 시공 제약의 검토 등 물리적 실현 가능성

평가라는 세 단계로 구조화할 수 있으며, 본 연구는 이 가운데 첫 번째 단계에 해당한다.

본 연구에서 우선 검토구역으로 도출된 지역은 주간 표면 과열이 크고, 불투수 포장면의 열 저장 특성으로 야간에도 냉각 저하의 가능성이 있으며, 집중호우 시 지표유출 잠재성이 큰 불투수면 밀집지역이다. 이 지역은 기존 불투수면을 걷어내고 자연의 생태적 기능(증발산+침투)을 복원하는 자연기반해법의 적용을 통해 두 위해수준을 동시에 줄일 수 있는 효과(co-benefits)가 크게 나타날 수 있는 후보지라고 할 수 있다.

3. 자료의 수집

본 연구는 세 종류의 자료를 수집하였다. 첫째는 대기기온장 산출을 위한 지상 기상관측 자료, 둘째는 지표면온도 산출을 위한 위성영상, 셋째는 불투수면 산출을 위한 공간정보이다. 수집한 자료의 세부 내역은 표 1과 같다.

〈표 1〉 분석에 사용한 자료의 개요

구분	자료명	출처	시점·해상도	용도
기상관측	종관기상관측(ASOS) 방재기상관측(AWS) 총 29개 지점	기상청 기상자료 개방포털	2025.8.1 10~11시 평균 지점 단위	정규크리깅을 통한 대기기온장 산출
위성영상	Landsat 9 ST_B10(Collection 2 Level-2 Surface Temperature)	미국 지질조사국 (USGS)	2025.8.1 오전 통과시각 30m	지표면온도(LST) 산출
공간정보	건물 75,495개 도로 137,476개 주차장·산업·상업·철도용지 6,648개	OpenStreetMap 한국 데이터	2025년 기준 10m 이진화 → 30m 집계	불투수면 비율 산출
토지피복	토지피복지도 중분류(폴리곤 111,467개)	환경부 환경공간정보서비스	2025년 사업	불투수면 산출 결과 검증 및 자료원 강건성 검증
행정경계	청주시 4개구 읍면동 경계 95개 (법정구역)	국가공간정보포털	2026년 5월 기준	분석 범위 설정 및 읍면동별 집계

주: 모든 공간자료는 좌표계를 UTM 52N(EPSG:32652)으로 통일하여 분석에 사용하였다.

기상관측 자료는 기상청이 운영하는 종관기상관측(ASOS)과 방재기상관측(AWS) 관측소를 합한 총 29개 지점의 자료를 활용하였다. 분석 시점은 위성 통과시각에 맞추어 2025년 8월 1일 10~11시의 평균기온을 사용하였으며, 관측값의 범위는 29.8~32.0℃로 도심 지점이 산간 지점보다 높게 나타나 열섬 패턴과 일관된 분포를 보였다. 위성영상은 미국 지질조사국(USGS)이 제공하는 Landsat 9호의 지표면온도 밴드(ST_B10, Collection 2 Level-2 Surface Temperature) 산출물을 사용하였다. 8월 1일 영상을 선택한 중요한 이유는 2025년 여름철 영상 중 해당 날짜가 구름이 10% 이하인 깨끗한 영상을 얻을 수 있었기 때문이다. 단일 시점 영상이라는 한계가 있으나, 본 연구의 목적은 특정 폭염일의 절대적 지면온도를 규명하는 것이 아니라 인공 피복에 따른 상대적 열 방출 패턴의 공간적 편차를 확인하는 데 있다. 본 연구에서는 해당 시점을 대표적인 여름철 맑은 날의 공간적 사례로 활용하였으며, 계절적·경년적 변동을 반영한 다시점 분석은 후속 과제로 제시하였다. 불투수면 산출을 위한 공간정보는 OpenStreetMap에서 제공하는 한국 지역 데이터를 내려받아, 건물 75,495개, 도로 137,476개, 주차장·산업상업·철도 용지 6,648개의 피처를 추출하여 활용하였다. 모든 공간자료는 좌표계를 UTM 52N(EPSG:32652)으로 통일하여 분석에 사용하였다.

4. 분석 방법

1) 표면 과열강도 지표: 지표-대기 온도차(SATD)

먼저, 점 형태로 관측되는 기상자료를 면 형태의 연속적 대기 기온장으로 변환하기 위하여 정규크리깅(Ordinary Kriging)을 적용하였다(Webster and Oliver, 2007). 정규크리깅은 관측지점 간 공간적 상관구조를 변동도(variogram)로 모형화하여 미관측 지점의 값을 최적 선형 불편추정하는 방법으로, 기온과 같이 공간적 연속성을 갖는 환경변수의 보간에 널리 사용되어 왔다(Stahl, Moore, Floyer, Asplin and McKendry, 2006). 관측자료의 공간적 분포를 가장 잘 설명하는 모형으로 가우시안 모형을 적용하였다. 모형

의 주요 추정값은 너깃(nugget) 0, 문턱값(sill) 0.26, 상관거리(range) 13.2km였으며, 실질적인 공간적 영향 범위는 약 22.9km로 나타났다. 기온을 보간할 때에는 각 지점에서 가까운 12개 관측소의 자료를 이용하였다. 보간 결과의 정확성을 확인하기 위해 관측지점을 하나씩 제외한 뒤 해당 지점의 기온을 다시 예측하는 교차검증을 실시하였다. 그 결과 평균제곱근오차는 0.470℃, 평균절대오차(MAE)는 0.358℃, 평균오차(ME)는 +0.086℃로 나타나, 전반적으로 실제 관측값과 예측값의 차이가 크지 않았다. 따라서 대기기온 보간 과정에서 발생하는 오차가 최종 우선 검토구역 선정 결과에 큰 영향을 미칠 가능성은 낮은 것으로 판단하였다. 한편 고도와 토지피복은 추가 설명변수로 사용하지 않았다. 산간 고지대의 관측지점이 충분하지 않은 상황에서 이들 변수를 함께 사용할 경우 일부 관측지점의 영향이 지나치게 커져, 관측자료가 부족한 지역의 기온을 오히려 불안정하게 추정할 가능성이 있기 때문이다.

본 연구에서는 표면 과열의 강도를 평가하기 위한 지표로서 기존 열환경 분석에서 많이 활용한 지표면온도(LST) 대신 지표-대기 온도차(Surface-Air Temperature Difference: SATD)를 선택하였다. 이는 지형적 기온차의 영향을 일부 보정하고, 인공피복에 따른 상대적 표면 과열 패턴을 보다 명확히 파악하기 위함이다. 지표면온도는 도시 내에서 어디가 더 뜨거운지를 넓은 면적에 걸쳐 일관되게 파악할 수 있으나, 고도가 높아 시원한 곳과 도시화로 인위적으로 과열된 곳이 구분되지 않는다. 본 연구가 주목하는 것은 후자, 즉 인공적 요인으로 주변보다 과열된 지역이다. 이를 가려내기 위해 본 연구는 SATD를 지표면온도에서 같은 시각의 대기기온을 차감한 값(LST-T_air)으로 정의하였다. 즉, 이 지점의 지표가 그 지역의 공기보다 얼마나 더 뜨거운가를 나타내는 상대적 과열 강도이다. 표면과 대기의 온도를 함께 고려할 때 도시열섬을 보다 정확히 기술할 수 있다는 점은 다수의 선행연구가 뒷받침한다(Voogt and Oke, 2003; Schwarz, Schlink, Franck and Großmann, 2012). 이는 본 연구가 관심을 두는 주변 대기 대비 상대적인 표면 과열을 파악한다는 분석개념에 보다 직접적으로 부합한다.

다만 SATD는 위성이 관측한 표면의 상태를 기술하는 값으로, 관측소가 측정하는 대기기온과는 측정 대상과 공간 대표성이 서로 다르다. 따라서 본 연구는 SATD를 도시민의 폭염 노출이나 도시열섬 강도를 대변하는 지표로 사용하지 않으며, 인공피복에 의한 상대적 표면 과열강도를 나타내는 지표로 한정하여 해석한다. SATD는 본 연구의 분석개념에 보다 부합하였지만 청주시 사례에서는 대기기온의 공간변동이 상대적으로 작아 LST와 SATD의 차이는 제한적으로 나타났다. 실제로 어떤 차이가 발생하는지는 지표면온도 기준 결과와 직접 비교하여 제시한다.

산출 절차는 지표면온도인 Landsat 9 ST_B10 산출물의 디지털 수치를 USGS 공식 변환계수로 절대온도로 변환한 뒤 섭씨로 환산하였다(USGS, 2023). 물리적으로 비현실적인 값(0~70℃ 범위 밖)을 제거하고, 품질 밴드(QA_PIXEL)의 비트마스킹으로 구름·구름그림자·눈·물 화소를 분석에서 제외하였다(Foga et al., 2017). 구체적으로는 QA_PIXEL의 구름(bit 3), 구름그림자(bit 4), 눈(bit 5), 물(bit 7) 비트가 설정된 화소를 제외하였으며, 결측(fill) 화소는 디지털 수치가 0 이하인 값으로 판정하여 사전에 제거하였다. 결측으로 처리된 화소는 보간하지 않고 분석에서 제외하였으며, 원자료의 30m 격자를 그대로 분석 격자로 사용하여 재배열에 따른 값의 왜곡이 발생하지 않도록 하였다. 해당 격자의 SATD 값이 높다는 것은 해당 격자의 지표면이 같은 시각의 대기보다 상대적으로 강하게 과열되어 있음을 의미하며, 불투수 포장·건물지붕 등 인공피복의 열 저장·방출 특성이 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다.

2) 지표유출 잠재성 지표: 불투수면 비율

본 연구에서는 강우 시 지표유출 잠재성이 클수록 내수침수가 발생할 물리적 조건이 갖추어진 것으로 보고, 이를 공간적으로 평가하기 위해 불투수면 비율을 지표로 사용하였다. 이는 침수가 일어나기 쉬운 물리적 조건이 얼마나 갖추어져 있는가를 판단하기 위해서이다. 불투수면 비율은 도시의 강우-유출 과정을 설명하는 핵심 예측변수로 활용되어왔다(Arnold and Gibbons,

1996; Shuster, Bonta, Thurston, Warnemuende, Smith, 2005 ; Yao, Chen, Wei, 2017). 다만 불투수면 비율은 지표유출을 좌우하는 여러 조건 가운데 하나이며, 실제 침수 가능성은 지형적 저점·배수관망 용량·강우강도에 따라 달라진다. 따라서 본 연구는 이를 내수침수 위해 지표가 아니라 내수침수의 물리적 선행요인으로 한정하여 사용한다. 그럼에도 이를 단일 지표로 채택한 것은 본 연구의 목적이 실제 침수위험을 정밀하게 예측하기 위한 것이 아니라, 자연기반해법을 통한 침투·저류 기능의 회복 필요성이 큰 지역을 1차적으로 선별하는 데 목적이 있기 때문이다. 불투수면은 강우의 지표 침투를 제한하여 표면유출을 증가시키는 구조적 선행요인이며, 동시에 투수성 포장, 생물저류시설, 녹지 확충 등 자연기반해법을 통해 개선 가능한 물리적 조건이라는 점에서 본 연구의 목적과 직접적으로 연결된다. 또한 하수관망 자료와 침수흔적도는 지자체별 공개 수준이 달라 방법의 확장 적용이 어려운 반면 불투수면 정보는 전국적으로 동일 기준으로 확보되기 때문이다. 불투수면 자료로 OpenStreetMap을 선택한 것은 두 가지 이유에서이다. 첫째, 본 연구가 측정하려는 것은 토지의 용도가 아니라 강우의 침투를 차단하는 물리적 피복의 면적비율이다. OpenStreetMap은 건물 윤곽과 도로, 포장 용지 등 개별 불투수 객체를 표현하므로, 용도 단위로 구획된 자료보다 이 개념에 직접 대응한다. 둘째, 개별 객체 기반의 자료는 30m 격자 안에서 불투수면이 차지하는 비율을 연속적인 값으로 산출할 수 있어 상위 구간을 가려내는 스크리닝에 적합하다.

산출 절차는 OpenStreetMap에서 건물 폴리곤, 도로(보행로 제외), 주차장·산업·상업·철도·건설용지를 불투수 객체로 추출하였다. 도로는 선형 자료이므로 도로 등급별로 서로 다른 반폭(半幅)의 완충구역을 생성하여 면적을 부여하였다. 반폭은 고속도로 15m, 국도급 12m, 주요도로 10m, 보조간선도로 8m, 집산도로 6m, 주거·기타도로 4m, 서비스도로 3m를 적용하였고, 보행로·계단·자전거도로·산책로 등 불투수 포장으로 보기 어려운 등급은 제외하였다. 건물·용지·도로는 서로 중복될 수 있으나, 이후의 이진화 단계에서 하나 이상의 불투수 객체가 존재하는 화소를 모두 1로 부여하므로 중복 계상은 발생하지 않는다. 이들을 10m 해상도로 이진화(불투수=1, 투수

=0)한 뒤 3×3 화소를 평균하여 30m 격자별 불투수 면적비율을 산출하였다. 이때 이진화는 불투수 객체가 조금이라도 걸치는 화소를 모두 불투수로 판정하는 방식을 적용하였으므로, 폭이 좁은 도로에서는 불투수 면적이 다소 과대 추정될 수 있다. OpenStreetMap의 객체 등록 수준은 지역에 따라 차이가 있을 수 있으므로, 산출된 불투수면 비율을 환경부 토지피복지도와 대조하여 검증하였다. 검증자료로는 2025년 사업으로 구축된 청주시 토지피복지도의 중분류 자료(폴리곤 111,467개)를 사용하였으며, 불투수면 산출과 동일한 절차(10m 이진화 후 3×3 평균)로 시가화건조지역(주거·공업·상업·문화체육휴양·교통·공공시설지역)의 면적비율을 격자별로 산출하여 비교하였다.

3) 중첩 분석과 임계값의 설정

본 연구는 표면 과열과 지표유출 잠재성을 동시에 고려하기 위해 SATD와 불투수율 두 지표를 하나의 점수로 합산하지 않고 각각에서 값이 큰 상위 5% 지역을 추출한 뒤, 두 지역이 공간적으로 겹치는 교집합만을 우선 검토구역으로 도출하였다. 상위 5% 기준은 절대적 위험기준이 아니라 자연기반해법 적용에 관한 합리적 정책의사결정을 위한 상대적 스크리닝 기준이다. 상위 5%라는 기준은 임계값을 3%, 5%, 10%로 변화시키는 민감도 분석을 거쳐 결정하였다. 교집합으로 정의하는 방식을 선택한 이유는 본 연구가 찾으려는 것이 자연기반해법을 투입했을 때 도시 내 폭염과 내수침수 두 위해를 동시에 줄일 수 있는 곳, 즉 회색 인프라를 녹색 인프라로 전환할 때 한계 효용과 공동편익이 큰 지역에 해당하기 때문이다. 그 지역은 식생과 투수면을 함께 확보하는 자연기반해법의 다기능 특성이 크게 발휘될 수 있는 지점이라고 할 수 있다. 이러한 교집합 추출은 두 위험요인을 동일한 공간 단위에서 중첩하는 다기준 중첩분석(overlay analysis)에 해당한다(Malczewski, 2006).

분석 격자를 30m로 통일한 것은 지표면온도가 산출되는 Landsat 열적외 자료의 제공 격자가 30m이기 때문이며, 이보다 세밀한 격자로 재배열하면 실재하지 않는 공간적 세부를 만들게 된다. 불투수면은 건물·도로 형상을 반

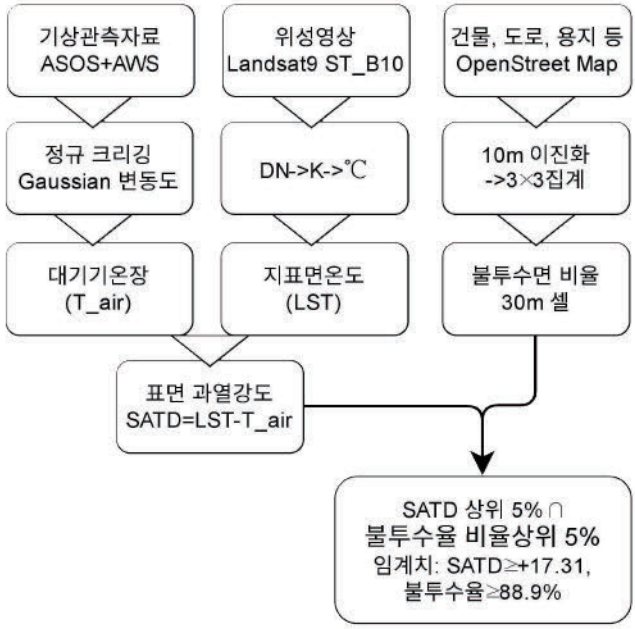
영하기 위해 10m로 이진화한 뒤 3×3 화소를 집계하였고, 경계에 걸치는 격자는 중심점이 청주시 내부에 포함되는 경우에만 분석하였다.

한편 SATD와 불투수율은 모두 도시의 인공피복과 관련이 있으므로 두 지표가 서로 완전히 독립적이라고 보기 어렵다. 이에 두 지표의 관계를 일반 상관분석으로 확인하였다. 또한 상위 5% 교집합이라는 방법 선택이 타당한지 검토하기 위하여 국지 공간자기상관(LISA) 분석을 통해 표면 과열과 불투수율이 모두 높은 지역이 주변에 군집되어 나타나는지를 확인하였다. 다만 30m 격자 전체를 대상으로 국지 분석을 수행하면 계산량이 지나치게 커지므로, 30m 격자 5×5개를 평균하여 만든 150m 격자를 사용하였다.

최종적인 우선 검토구역은 공간자기상관 분석에서 나타난 군집지역이 아니라, SATD와 불투수율이 각각 상위 5%에 해당하는 지역의 교집합으로 선정하였다. 이 방식은 기준과 절차가 단순하고 명확해 다른 지역에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 두 지표가 모두 높은 지역을 직접 확인할 수 있다는 장점이 있다. 국지 공간자기상관 분석은 교집합 방식과 군집 방식이 같은 지역을 가리키는지, 그리고 각각이 도출하는 구역의 규모가 우선 사업 대상지로 삼기에 적절한지를 비교하는 보조적 검증수단으로 활용하였다. 또한 두 지표가 동시에 높은 지역뿐 아니라 하나의 지표만 높은 지역도 구분하였다. 이에 따라 대상지역을 ① 표면 과열과 지표유출 잠재성이 모두 높은 지역, ② 표면 과열만 높은 지역, ③ 지표유출 잠재성만 높은 지역, ④ 두 지표 모두 높지 않은 지역으로 구분하였다. 이러한 구분을 통해 두 문제가 모두 큰 지역은 공동편익을 고려한 자연기반해법을 우선 검토하고, 표면 과열만 높은 지역은 차양·증발산 중심의 기법을, 지표유출 잠재성만 높은 지역은 침투·저류 중심의 기법을 우선 검토할 수 있다.

이상의 분석은 통계분석 환경 R에서 수행하였으며, 공간자료 처리에는 terra, sf, gstat, osmextract 등의 패키지를 활용하였다. 전체 분석의 체계와 흐름은 그림 1과 같다.

〈그림 1〉 연구의 분석 체계 및 흐름도

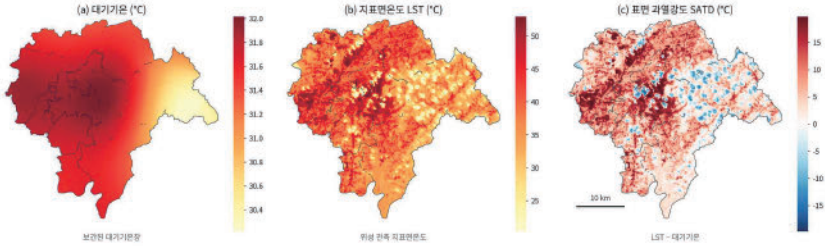


Ⅳ. 분석 결과 및 고찰

1. 표면 과열강도에 관한 분석

Landsat 9호 ST_B10 산출물로부터 변환한 청주시의 지표면온도(LST)와, 여기에서 정규크리깅으로 보간한 대기기온을 차감하여 산출한 표면 과열강도(SATD)의 분포는 그림 2와 같다. 분석 시점인 2025년 8월 1일 오전 위성 통과시각 기준으로 지표면온도는 평균 37.64℃, 최저 14.23℃에서 최고 68.61℃에 이르는 넓은 분포를 보인 반면(표 2 참조), 보간된 대기기온의 변동폭은 1.87℃에 그쳤다. 최고 지표면온도가 관측된 격자는 토지피복지도에서 시가화건조지역으로 분류된 지점이며, 65℃를 넘는 격자는 전체의 0.003%(29개)에 불과하여 상위 5% 임계값(49.10℃) 설정에 미치는 영향은 거의 없었다.

〈그림 2〉 대기기온·지표면온도(LST)·표면 과열강도(SATD)의 공간 분포 비교



〈표 2〉 청주시 열환경 지표 기초 통계량

지표	평균	표준편차	최솟값	중앙값	최댓값	상위 5%
지표면온도 LST(℃)	37.64	6.65	14.23	37.40	68.61	49.10
지표면 과열강도 SATD(℃)	6.14	6.49	−17.37	5.87	37.01	17.31
불투수율(0~1)	0.14	0.29	0.00	0.00	1.00	0.89

〈그림 2〉의 세 지도를 비교하면 SATD의 의미가 드러난다. 지표면온도(b)만 보면 동부 산지가 낮게 나타나는데, 이는 고도가 높아 기온 자체가 낮기 때문이다. 대기기온(a)을 기준선으로 제거한 SATD(c)에서는 동부 산지가 강한 신호로 나타나지 않는 반면, 서부·중부의 시가화 지역과 산업단지는 주변 대기조건 대비 과열이 뚜렷하게 드러난다. 즉 SATD는 단순히 표면이 뜨거운 곳이 아니라 같은 시각의 대기 대비 상대적으로 과열된 지역을 가려낸다. SATD의 평균은 6.14℃, 표준편차는 6.49℃로 지역 간 편차가 크게 나타났다(표 2 참조).

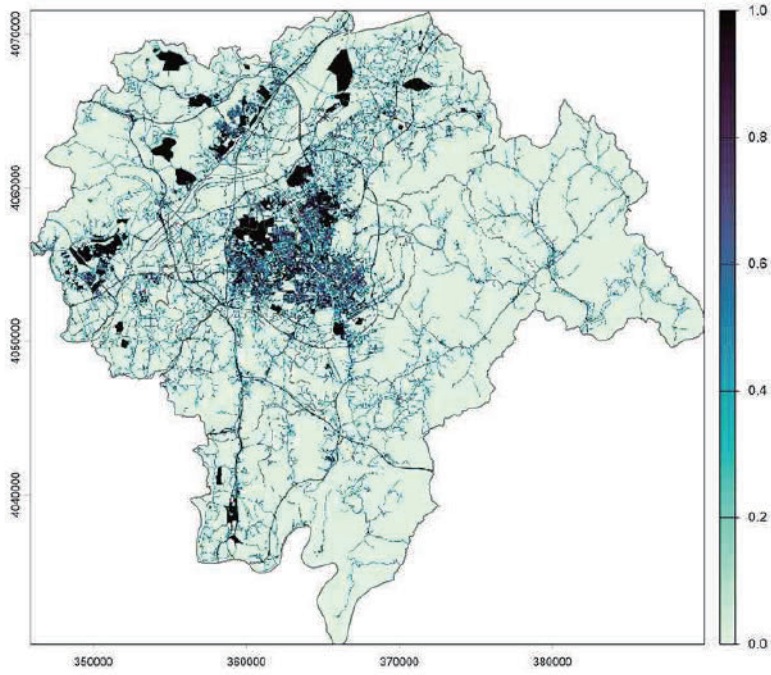
SATD 채택이 지표면온도를 그대로 사용하는 것과 어떤 차이를 만드는지 확인하기 위해 두 지표 각각의 상위 5% 구역을 비교하였다. 두 집합은 97.6%가 일치하였는데(Jaccard 계수 0.954), 이는 단일 도시 내부에서는 대기기온의 공간 변동(1.87℃)이 지표면온도의 변동(54.4℃)에 비해 작아 순위는 대체로 달라지지 않기 때문이다. SATD 기준에서만 상위 5%에 포함된 격자는 1,245개였고, 반대로 지표면온도 기준에서만 포함된 격자도 1,245개였다. 두 집단의 지표면온도는 각각 평균 48.9℃와 49.2℃로 거의 차이가 없었지만, 해당 지역의 대기기온은 각각 31.40℃와 31.95℃로 달랐다. 즉 지표면온

도만 보면 비슷하게 뜨거운 곳이라도, 주변 공기의 온도까지 함께 고려하면 상대적인 과열 정도는 달라질 수 있다. SATD를 사용하는 의미는 전체 결과를 크게 바꾸는 데 있다기보다, 각 지역의 대기조건을 고려해 표면이 주변보다 얼마나 더 과열되어 있는지를 구분하는 데 있다. 특히 고도와 지형 차이가 큰 넓은 지역에 적용할 경우 이러한 보정의 의미가 더 커질 수 있다.

2. 지표유출 잠재성에 관한 분석

OpenStreetMap 기반으로 산출한 30m 해상도 불투수면적 비율의 분포는 그림 3과 같다. 불투수면은 빗물이 땅으로 스며드는 것을 제한하여 지표유출을 증가시키는 내수침수의 물리적 선행요인이다.

〈그림 3〉 고해상도(30m) 불투수면적 비율 공간 분포



분석 결과 청주시의 불투수율은 평균 0.14, 95백분위수 0.89로 나타나, 대

부분 지역은 빗물이 잘 스며드는 녹지·농지인 반면 시가지와 산업단지 핵심부에 불투수면이 극단적으로 집중되는 양상이 확인되었다. 그림 3에서 검게 표시된 곳일수록 땅이 포장·건물로 덮여 빗물이 스며들지 못하는 지역이고, 옅은 연두색은 빗물이 잘 흡수되는 녹지·농경지이다. 청주시 중심 시가지와 서부의 산업단지(오창·오송 일대)에서 불투수면이 짙게 집중되어 나타나며, 도로망을 따라 선형으로 이어지는 모습도 확인된다. 불투수율 상위 5% 지역의 임계값이 0.89라는 것은, 가장 심한 지역에서는 30m 격자 한 칸의 약 89% 이상이 빗물을 흡수하지 못하는 표면이라는 의미이다. 이러한 지역은 집중호우 시 지표유출 잠재성이 크므로, 침투·저류 기능을 회복하는 NbS 적용 검토 필요성이 높다.

〈표 3〉 주요 읍면동별 불투수율 80% 이상 격자 분포 (상위 10개)

순위	읍면동	불투수 격자 수	면적(㎢)	비중(%)
1	오창읍	8,453	7.61	12.3
2	오송읍	6,555	5.90	9.5
3	옥산면	5,355	4.82	7.8
4	북이면	5,005	4.50	7.3
5	내수읍	3,201	2.88	4.6
6	현도면	2,801	2.52	4.1
7	남이면	2,217	2.00	3.2
8	송정동	1,788	1.61	2.6
9	강내면	1,602	1.44	2.3
10	율량동	1,553	1.40	2.3

주: 불투수율 0.80 이상 30m 격자의 읍면동별 집계. 청주시 전체 고불투수 격자 68,868개 기준 비중. (셀당 900㎡)

OpenStreetMap 기반 불투수면 비율을 환경부 토지피복지도 중분류와 대조하였다. 총량 수준에서는 두 자료가 잘 부합하여 불투수 면적 128.1㎢, 시가화건조지역 121.0㎢로 차이는 5.8%에 그쳤다. 격자 단위 상관은 0.571로, 총량은 부합하되 개별 격자에서는 차이가 나타났다. 이는 두 자료가 서로 다른 단위를 기술하기 때문이다. OpenStreetMap은 건물·도로 등 개별 불투수 객체를 표현하는 반면, 중분류의 시가화건조지역은 블록 단위 피복 구분이

어서 필지 내부의 마당과 골목을 함께 포함한다. 실제로 격자 전체가 시가화 건조지역으로 분류된 88,761격자에서 불투수율의 평균은 0.582로 나타났다. 불투수율이 0으로 산출된 격자는 연결군집의 65%가 1~2격자에 그치는 파편 형태로 분포하여, 넓은 면적의 체계적 누락이라기보다 블록 내부의 공지에 해당하는 것으로 판단된다. 반대로 시가화건조지역이 포함되지 않은 격자 중 6.2%는 불투수율이 0.5 이상이었는데, 농경지·임야를 통과하는 도로가 중분류에서 별도로 구분되지 않는 데 따른 것으로 보이며, 도로 완충구역의 걸침 판정에 따른 일부 과대 산출 가능성은 남는다. 읍면동별 분포는 표 3과 같다. 불투수면은 오창읍·오송읍·옥산면 등 서부 산업단지·시가화 지역에 집중되어 있다. 상위 3개 읍면동이 전체 고불투수 격자의 약 30%를 차지하여, 지표유출 잠재성이 특정 지역에 편중되어 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

3. 중첩 분석과 우선 검토구역의 도출

우선 검토구역을 도출하기에 앞서 스크리닝 임계값을 결정하기 위하여, 상위 3%·5%·10%의 세 기준에 대해 동일한 절차를 반복하였다(표 4 참조). 분석 결과, 기준을 완화할수록 우선 검토구역의 면적은 9.90㎢에서 41.08㎢까지 증가하였다. 그러나 상위 3% 지역은 모두 상위 5% 지역에 포함되고, 상위 5% 지역은 모두 상위 10% 지역에 포함되어 공간적 분포는 일관된 경향을 보였다. 읍면동별 순위도 서로 유사하였으며, 세 기준 모두에서 오송읍·오창읍·옥산면이 상위 3개 지역으로 동일하게 나타났다. 따라서 임계값을 다르게 적용하더라도 어느 지역을 우선적으로 검토할 것인지에 대한 전체적인 판단은 크게 달라지지 않았다. 한편, 불투수율은 10m 격자 9개를 평균하여 30m 격자로 계산하였기 때문에 값이 일정한 단계로만 나타난다. 따라서 상위 3%, 5%, 10%를 적용하더라도 실제 선택되는 면적 비율은 정확히 같은 비율로 나타나지 않았으며, 이는 격자 집계 방식에서 발생하는 구조적인 차이이다.

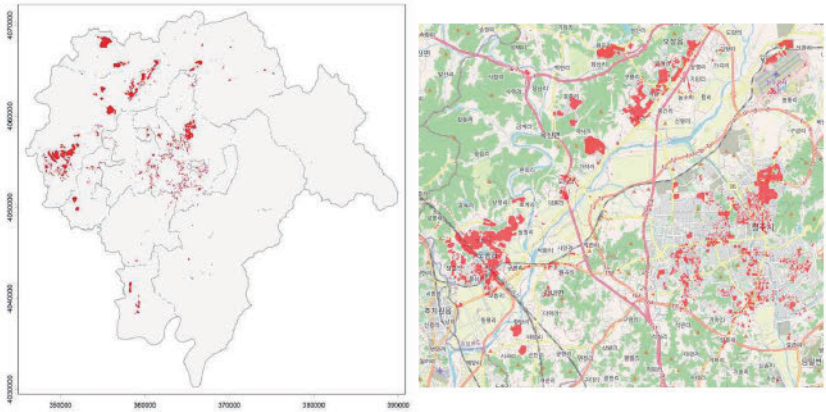
〈표 4〉 임계값 변화에 따른 우선 검토구역의 민감도

기준	SATD 임계값	불투수율 임계값	도출 면적	시 전체 대비	상위 3개 읍면동 누적 비중
상위 3%	18.77 ℃	100.0 %	9.90 ㎢	1.05 %	66.8 %
상위 5%	17.31 ℃	88.9 %	16.85 ㎢	1.79 %	56.7 %
상위 10%	14.67 ℃	66.7 %	41.08 ㎢	4.35 %	40.4 %

세 기준 가운데 상위 3%는 도출 면적이 9.90㎢(청주시의 1.05%)로 좁아 시 가지·산업단지의 일부 핵심부만 포착되고, 상위 10%는 41.08㎢(4.35%)로 확대되어 대상지를 좁혀 나간다는 스크리닝의 목적에 부합하기 어렵다. 이에 본 연구는 도출 면적의 정책적 적정성과 공간적 분포의 안정성을 함께 고려하여 상위 5%를 최종 기준으로 채택하였으며, 이하의 결과는 모두 이 기준에 따른 것이다.

SATD와 불투수율이 모두 상위 5%에 해당하는 구역을 공간적으로 중첩하여 도출한 자연기반해법 적용 우선 검토구역은 그림 4와 같다. 본 연구에서 우선 검토구역은 지표면이 대기보다 17.31℃ 이상 높고(SATD 상위 5%), 동시에 셀 면적의 88.9% 이상이 불투수면인(불투수율 상위 5%) 곳이다. 이는 주간 표면 과열 완화 수요와 집중호우 시 지표유출 저감 수요가 동시에 큰 구역으로 해석할 수 있다. 불투수 포장면은 흙·식생과 달리 증발냉각 효과가 작아 주간 표면 과열을 심화시키고, 열 저장에 따른 야간 냉각 저하 가능성도 높인다. 따라서 이 지역은 투수성 포장, 생물저류시설, 가로수·도시숲 등 자연기반해법 적용을 우선 검토할 필요가 있는 지역으로 볼 수 있다.

〈그림 4〉 자연기반해법 적용 우선 검토구역



분석 결과, 우선 검토구역은 총 16.85㎢(30m 격자 18,718개)로, 청주시 전체 면적 940㎢의 약 1.8%에 해당하였다. 그림에서 붉게 표시된 구역이 SATD와 불투수율이 동시에 상위 5%에 해당하는 중첩구역으로 청주시 서부의 오송·오창 산업단지와 중심 시가지 일대에 집중적으로 분포한다. 이는 사람과 산업시설이 밀집한 도시·산업 핵심부에서 표면 과열과 지표유출 잠재성이 함께 높게 나타남을 의미한다.

〈표 5〉 자연기반해법 적용 우선 검토구역의 읍면동별 분포 (상위 5개)

순위	읍면동	중첩 격자 수	면적(㎢)	비중(%)
1	오송읍	4,511	4.06	24.1
2	오창읍	3,874	3.49	20.7
3	옥산면	2,225	2.00	11.9
4	내덕동	943	0.85	5.0
5	내수읍	695	0.63	3.7
	상위 5개 합계	12,248	11.03	65.4

주: SATD·불투수율 동시 상위 5%, 30m 격자의 읍면동별 집계. 전체 18,718격자(16.85㎢) 기준 비중

읍면동별 분포를 보면 이러한 집중 경향이 더욱 뚜렷하다(표 5 참조). 우선 검토구역의 24.1%가 오송읍, 20.7%가 오창읍에 집중되어 있으며, 옥산면을 포함한 상위 3개 읍면동이 전체의 56.7%, 상위 5개 읍면동이 65.4%를 차지하

는 것으로 나타났다. 이는 분석 대상 행정구역 중 일부 지역에 표면 과열과 불투수면 고집중 구역이 크게 편중되어 있음을 보여준다. 따라서 자연기반해법을 비롯한 대응 역량은 모든 지역에 균등하게 배분되기보다, 이러한 중첩 구역을 우선 검토한 뒤 실제 시공 가능성과 토지 여건을 결합하여 단계적으로 추진할 필요가 있다.

도출된 검토구역의 시가화건조지역 면적비율은 평균 0.717이고 72.8%가 50% 이상이었으며, 우세 피복은 교통지역 22.6%, 인공나지 19.7%, 주거지역 14.6%, 공업지역 13.5%, 상업지역 11.6% 순이었다. 동시 상위 조건을 요구하는 과정에서 불투수율만 과대 산출된 농경지·임야 통과 구간이 대부분 배제되어, 앞서 확인된 산출 오차가 검토구역 도출에는 크게 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. 다만 9.2%는 골프장·공원 잔디 등 인공초지가 우세하여 후속 단계에서 제외 여부를 검토할 필요가 있다.

주요 우선 검토구역의 공간적 특성은 서로 다르다. 오송읍과 오창읍은 대규모 산업단지가 조성된 지역으로 대형 건축물의 지붕면과 광폭 포장면이 연속적으로 분포하여 단일 필지 단위의 개입만으로도 넓은 면적의 개선 효과를 기대할 수 있다. 반면 내덕동과 같은 중심 시가지는 소규모 필지가 조밀하게 밀집되어 있어 개별 부지 단위의 개입보다는 가로 단위의 선형적 접근이 적합하다. 옥산면은 산업단지와 농경지가 접하는 경계부에 중첩구역이 나타나, 기존 농경지와 수로를 활용한 저류 기능 확보가 상대적으로 용이할 것으로 판단된다. 이러한 공간적 성격의 차이는 후속 단계에서 적용 기법을 선택할 때 고려되어야 한다.

임계값과 함께 자료원의 선택이 결과에 미치는 영향도 확인하였다. OpenStreetMap 기반 불투수면 비율 대신 환경부 중분류 토지피복지도의 시가화건조지역 면적비율을 지표유출 잠재성 지표로 대체하여 동일한 절차를 반복한 결과, 도출 면적은 27.01㎢로 확대되었고 격자 단위의 일치도는 Jaccard 계수 0.320에 그쳤다. 그러나 읍면동별 격자수의 순위상관은 0.923이었고 상위 3개 읍면동은 오송읍·오창읍·옥산면으로 동일하였다. 즉 자료원의 차이는 도출 구역의 경계와 규모에는 영향을 주지만, 어느 지역을 우선

검토할 것인가라는 정책적 결론은 바뀌지 않았다. 면적의 차이는 토지피복지도의 시가화건조지역이 블록 단위의 피복 구분이어서 필지 내부의 마당과 소규모 공지를 함께 포함하는 데서 비롯된 것으로 판단되며, 이는 앞 절에서 확인된 두 자료의 격자 단위 불일치와도 일관된다.

SATD와 불투수율의 일반 상관계수는 0.367로 나타나, 표면 과열이 강한 곳일수록 불투수면 비율도 높은 경향이 확인되었다. 다음으로 상위 5% 교집합이라는 방법 선택이 타당한지 검토하기 위하여, 국지 공간자기상관(LISA) 방식으로 두 지표가 함께 높은 구역을 별도로 추출하여 비교하였다. 150m 격자 단위로 분석한 결과, 본 연구의 검토구역을 포함하는 격자의 89.3%가 이에 해당하여 두 방법이 대체로 같은 지역을 가리켰다. 다만 이 방식으로 추출된 구역은 119.5㎢로 청주시 면적의 12.7%에 이르러 우선 사업 대상지로 삼기에는 지나치게 넓다. 본 연구가 상위 5% 교집합을 주 방법으로 유지한 것은 이러한 이유에서이다. 두 지표의 결합이 개별 격자에 국한되지 않고 근린 규모의 군집으로 나타난다는 점은, 자연기반해법 역시 개별 필지보다 일정 규모의 구역 단위로 적용할 때 효과를 기대할 수 있음을 시사한다. 이러한 결합은 두 위해 모두 불투수면이라는 공통의 물리적 기반에서 비롯된다는 점을 고려하면 충분히 예상되는 것이며, 폭염과 침수를 별개로 대응해 온 기존 방식보다 두 위험을 함께 다루는 통합적 접근이 타당함을 시사한다.

V. 결론

본 연구는 폭염과 집중호우가 동일한 도시 공간에서 중첩될 가능성이 커지는 상황에 대응하기 위하여, 청주시를 대상으로 자연기반해법을 우선 검토할 구역을 도출하였다. 이를 위해 위성 지표면온도에서 대기기온을 보정한 지표-대기 온도차(SATD)를 표면 과열강도 지표로, OpenStreetMap 기반 불투수면 비율을 지표유출 잠재성 지표로 각각 30m 격자 단위에서 산출하였다. 이후 두 지표가 모두 상위 5%에 해당하는 구역의 교집합을 자연기반해법

우선 검토구역으로 정의하였다. 분석 결과 중첩 구역은 청주시 전체 면적의 약 1.8%에 해당하는 16.85㎢로 도출되었으며, 그 분포는 오송·오창 산업단지와 시가지 핵심부에 집중되어 상위 5개 읍면동이 전체의 65.4%를 차지하였다. 이는 청주시에서 표면 과열과 불투수면 집중이라는 두 선행요인이 특정 도시·산업공간에 함께 나타나는 경향이 있음을 보여준다.

본 연구의 결과로부터 도출되는 정책적 시사점은 다음과 같다. 분석 결과가 직접 뒷받침하는 시사점으로는 첫째, 우선 검토구역은 청주시 면적의 1.8%에 불과하며, 표면 과열과 불투수면이 동시에 집중된 지역으로 회색 인프라를 녹색 인프라로 전환할 때 폭염 저감과 침수 방어의 공동편익이 기대되는 곳이다. 이들 구역을 기후·재난안전 자원 배분의 우선 검토 대상지로 설정함으로써 표면 과열 완화와 지표유출 저감의 공동편익을 함께 추구할 수 있다. 둘째, 우선 검토구역이 소수 읍면동, 특히 오송·오창 산업단지에 집중된다는 결과는 산업단지를 대상으로 한 선제적·제도적 대응의 필요성을 보여준다. 신규 산업단지 조성이나 노후 산업단지 정비 시 투수성 포장, 생물저류시설, 완충녹지 등 자연기반해법과 저영향개발 등을 반영하도록 계획수립 지침이나 개발 인허가 과정에서 권고할 수 있을 것이다. 다만, 의무화 여부는 단지별 여건 조사와 비용효과 분석을 거쳐 판단하여야 한다. 셋째, 이 구역은 기후위기 적응대책 세부시행계획, 공원녹지 기본계획, 자연재해저감 종합계획이 공통 레이어로 공유할 수 있는 공간적 기준점이 되어, 부서별 사업의 중복과 누락을 조정하는 토대를 제공할 수 있다. 넷째, 도출된 우선 검토구역의 특성에 따라 적용 가능한 기법의 유형이 결정되어야 한다. 대형 건축물과 광폭 포장면이 연속되는 구역에서는 투수성 포장과 생물저류시설 등 침투·저류 계열 기법의 적용 여지가 상대적으로 크고, 소규모 필지가 밀집한 상업·주거지역에서는 가로수와 도시숲 등 차양·증발산 계열의 선형적 기법이 현실적이다. 다만 어떤 기법을 어느 규모로 적용할 것인지는 부지별 토양 침투능, 지하매설물, 유지관리 주체를 확인한 뒤에 확정되어야 한다. 이때 단일 기법보다 여러 기법을 조합한 포트폴리오 방식이 효과적이라는 점은 선행연구가 뒷받침한다. 여러 자연기반해법을 통합할 경우 기후위험 저감효과가

그렇지 않은 경우의 약 두 배에 이르며(Prado et al., 2024), 침투·저류 계열과 차양·증발산 계열을 함께 배치하는 접근이 단일 기법보다 우수한 공동편익을 보인 바 있다(Xu et al., 2026). 또한 본 연구의 결과는 스마트 그린도시, 도시 바람길숲 조성사업, 그린인프라·저영향개발 사업 등 기존 국비지원 사업의 대상지 선정 단계에서 객관적 우선순위 설정 근거로 활용될 수 있다. 동일한 예산을 투입하더라도 표면 과열과 지표유출 잠재성이 함께 높은 구역을 우선 검토하면, 개별 사업의 효과를 복합재난 대응 관점에서 연계할 수 있다.

본 연구의 방법은 기상관측 자료, 열적외 밴드를 포함한 위성영상, 불투수면 산출용 공간정보만 확보되면 다른 지자체에도 적용할 수 있다. 다만 상위 5%는 대상지 내부의 상대적 기준이므로 도시 간 직접 비교에는 적합하지 않다.

본 연구의 결과를 해석할 때에는 다음의 한계를 고려하여야 한다. 첫째, 본 연구는 침수 위험을 불투수면 비율이라는 하나의 선행요인으로 대리하였다. 이는 본 연구의 목적이 실제 침수위험의 정밀 평가가 아니라 자연기반해법 투입 이전의 상대적 선별에 있기 때문이다. 그러나 실제 내수침수 위험은 지형적 저점, 하수관망 용량, 하천 인접성, 과거 침수 이력이 함께 작용하여 결정되므로, 본 연구의 결과는 실제 침수위험도를 대체하는 것이 아니라 이를 정밀하게 평가하기 위한 1차 공간선별 결과로 활용되어야 한다. 향후 연구에서는 수치표고모형과 하수관망 자료, 침수흔적 자료를 결합하여 본 연구의 선행요인 기반 스크리닝을 실제 침수위험 평가로 발전시킬 수 있을 것이다. 둘째, 불투수면을 OpenStreetMap 기반으로 추정하였다. 환경부 토지피복지도와 대조한 결과 총량 수준에서는 두 자료가 부합하였으나 격자 단위에서는 차이가 나타났으며, 이는 두 자료가 각각 개별 불투수 객체와 블록 단위 피복이라는 서로 다른 단위를 기술하는 데서 비롯된다. 자료원을 대체하여 동일 절차를 반복하였을 때에도 읍면동 우선순위가 유지되어 결론의 강건성은 확인되었으나, 개별 격자의 불투수율을 절대적 수치로 해석하는 데에는 유의가 필요하다. 보다 정밀한 불투수면 산출이 요구되는 경우에는 1m 해상도의 세분류 토지피복지도에서 도로·철도·건축물 항목을 직접 추출하는 방식을 후속 연구에서 검토할 수 있다. 셋째, 분석이 단일 시점의 위성·기상 자료

에 기반하므로 계절적·시간적 변동을 충분히 반영하지 못하였다. 향후 다시점 자료를 활용하여 계절적·경년적 변동을 반영하는 연구로 확장할 필요가 있다. 넷째, 본 연구는 위험 선행요인에 초점을 두어 취약계층 분포와 같은 사회적 형평성 지표를 우선순위 도출에 결합하지 않았고, 토지 소유관계·경사·가용부지 등 시공 가능성도 평가하지 않았다. 환경정의 관점의 우선순위 정교화와 자연기반해법 최적 조합·비용효율 평가가 후속 과제로 남는다.

▮참고문헌▮

배성민·이서영·서지훈, 2025, "도시열섬현상 완화를 위한 분석 기반 그린인프라 공간 최적화," 「*한국정보기술학회논문지*」, 23(3), pp.117-126, DOI:10.14801/jkiit.2025. 23.3.117.

윤은주·이지우, 2024, "폭우에 대한 도시 기후탄력성 제고를 위한 그린인프라 평가체계 구축방안 연구," 「*한국기후변화학회지*」, 15(4), pp.551-563, DOI:10.15531/KSCCR. 2024.15.4.551.

이혜민·유수진·박사무엘·전진형, 2018, "도시 리질리언스 향상을 위한 재해별 그린인프라 유형 고찰," 「*국토계획*」, 53(1), pp.215-235, DOI:10.17208/jkpa.2018.02.53.1.215.

홍나은·이동근, 2025, "폭염 및 인구변화에 따른 그린인프라 수요·공급 분석," 「*국토계획*」, 60(7), pp.188-206, DOI:10.17208/jkpa.2025.12.60.7.188.

환경부·기상청, 2025, 「*한국 기후위기 평가보고서 2025*」, (세종: 환경부·기상청)

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, DOI:10.1080/01944369608975688.

Fahy, B., E. Brenneman, H. Chang, and V. Shandas, 2019, "Spatial analysis of urban flooding and extreme heat hazard potential in Portland, OR," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 39, 101117, DOI:10.1016/j.ijdrr.2019.101117.

Foga, S., P. L. Scaramuzza, S. Guo, Z. Zhu, R. D. Dilley, T. Beckmann, et al. 2017, "Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products," *Remote Sensing of Environment*, 194, pp.379-390, DOI:10.1016/j.rse. 2017.03.026.

Goodspeed, R., R. Liu, D. Gounaridis, C. Lizundia, and J. Newell, 2022, "A regional spatial planning model for multifunctional green infrastructure," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(3), pp.815-833, DOI:10.1177/23998083211033610.

IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge: Cambridge University Press, DOI:10.1017/9781009157896.

IUCN, 2016, *Defining Nature-based Solutions (WCC-2016-Res-069-EN)*, Hawaii: International Union for Conservation of Nature, World Conservation Congress.

Khodadad, M., M. Sanei, I. Aguilar-Barajas, L. E. Cárdenas-Barrón, A. I. Ramírez-Orozco, A. Rizzo, et al, 2025, "Green infrastructure site prioritization to improve urban flood resilience in Monterrey and Brussels using a decision support model," *Scientific Reports*, 15, 10744, DOI:10.1038/s41598-025-94851-z.

Malczewski, J., 2006, "GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature," *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), pp.703-726, DOI:10.1080/13658810600661508.

Meerow, S. and J. P. Newell, 2017, "Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit," *Landscape and Urban Planning*, 159, pp.62-75, DOI:10.1016/j.landurbplan.2016.10.005.

Pace, R., T. A. Endreny, M. Ciolfi, M. Gangwisch, S. Saha, N. K. Ruehr, et al. 2025, "Mitigation potential of urban greening during heatwaves and stormwater events: A modeling study for Karlsruhe, Germany," *Scientific Reports*, 15, 5308, DOI:10.1038/s41598-025-89842-z.

Pappalardo, S. E., C. Zanetti, and V. Todeschi, 2023, "Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies," *Landscape and Urban Planning*, 238, 104831, DOI:10.1016/j.landurbplan.2023.104831.

Prado, H. A., T. Rodrigues, S. Manes, T. Kasecker, M. M. Vale, F. R. Scarano, et al. 2024, "Designing nature to be a solution for climate change in cities: A meta-analysis," *Science of the Total Environment*, 954, 176735, DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.176735.

Schwarz, N., U. Schlink, U. Franck, and K. Großmann, 2012, "Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban

heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany)," *Ecological Indicators*, 18, pp.693-704, DOI:10.1016/j.ecolind.2012.01.001.

Shuster, W. D., J. Bonta, H. Thurston, E. Warnemuende, and D. R. Smith, 2005, "Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review," *Urban Water Journal*, 2(4), pp.263-275, DOI:10.1080/15730620500386529.

Stahl, K., R. D. Moore, J. A. Floyer, M. G. Asplin, and I. G. McKendry, 2006, "Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density," *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(3-4), pp.224-236, DOI:10.1016/j.agrformet.2006.07.004.

UNEA, 2022, *Nature-based Solutions for Supporting Sustainable Development (Resolution UNEP/EA.5/Res.5)*, Nairobi: Fifth Session of the United Nations Environment Assembly.

USGS, 2023, *Landsat 8-9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide (LSDS-1619)*, U.S. Geological Survey.

Voogt, J. A. and T. R. Oke, 2003, "Thermal remote sensing of urban climates," *Remote Sensing of Environment*, 86(3), pp.370-384, DOI:10.1016/S0034-4257(03)00079-8.

Webster, R. and M. A. Oliver, 2007, *Geostatistics for Environmental Scientists (2nd ed.)*, Chichester: John Wiley & Sons, DOI:10.1002/9780470517277.

Wei, H., X. Bai, Q. Lu, J. Wu, S. Fengmin, H. Tianzhen, et al. 2025, "Urban cooling and energy-saving effects of nature-based solutions across types and scales," *Nature Cities*, 2, pp.1194-1204, DOI:10.1038/s44284-025-00349-0.

Xu, H.-S., S. Wu, Y. Ye, X. Qin, and P. Zhang, 2026, "Optimizing runoff control–cooling co-benefits of green stormwater infrastructure: Insights from high-density residential areas," *Sustainable Cities and Society*, 142, 107305, DOI:10.1016/j.scs.2026.107305.

Yao, L., L. Chen, and W. Wei, 2017, "Exploring the linkage between urban flood risk and spatial patterns in small urbanized catchments of Beijing, China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(3), 239, DOI:10.3390/ijerph14030239.

Yu, W., J. Zhu, W. Zhou, and W. Wang, 2024, "Spatial heterogeneity of the integrated risks of urban heat stress and flooding strike," Science of the Total Environment, 954, 176517, DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.176517.

Zscheischler, J., S. Westra, B. J. J. M. van den Hurk, S. I. Seneviratne, P. J. Ward, et al. 2018, "Future climate risk from compound events," *Nature Climate*

Change, 8(6), pp.469-477, DOI:10.1038/s41558-018-0156-3.

Zscheischler, J., O. Martius, S. Westra, E. Bevacqua, C. Raymond, R. M. Horton, et al. 2020, "A typology of compound weather and climate events," *Nature Reviews Earth & Environment,* 1(7), pp.333-347, DOI:10.1038/s43017-020-0060-z.

배민기: 충북연구원에서 기후위기 적응, 재난안전, 환경정책 분야를 담당하고 있다. 충청북도 재난안전연구센터장을 맡아 지역내 다양한 재난안전 이슈에 대응하고 있다 (mkbae@cri.re.kr).

이태영: 충북대학교 일반대학원 도시공학과 박사과정에 재학 중이다. 공간불평등, 도시기능에 대한 접근성 분석 관련 연구를 수행하고 있다(young@cri.re.kr).

투 고 일: 2026년 06월 24일
심 사 일: 2026년 07월 16일
게재확정일: 2026년 09월 08일