

논문

한국 기후 조건을 고려한 KLAM_21 냉기류 모델의 물리 기반 매개변수 조정

Physics-based Parameter Tuning of the KLAM_21 Cold Airflow Model Considering Korean Climatic Conditions

권용석*

경북연구원 공간환경연구소

Yongseok Kwon *

Spatial Environment Research Division, Gyeongbuk Development Institute, Yecheon,
Republic of Korea

접수일 2026년 4월 2일
수정일 2026년 7월 2일
채택일 2026년 7월 28일

Received 2 April 2026

Revised 2 July 2026

Accepted 28 July 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)54-650-9047

E-mail : kwony@gdi.re.kr

Abstract This study proposes a physically-based framework for adapting the German cold air drainage model KLAM_21 to Korean climate conditions. The core adjustment targets the maximum heat loss rate $P_{\max}$ ($= 30 \text{ W/m}^2$ in the original model), which drives cold air production as $P = a \cdot P_{\max}$. A seasonal factor a ($= L^*_{\text{Korea}} / L^*_{\text{Germany}}$) scales it as $P_{\max\text{Korea}} = a \times 30 \text{ W/m}^2$. The framework has four steps: (1) comparing net longwave radiation loss between Frankfurt (Germany) and Suwon (Korea) via the Stefan-Boltzmann law and Brunt formula; (2) deriving seasonal a from the cooling ratios; (3) a scaling-based sensitivity analysis of the governing equations; and (4) an observational consistency check using MODIS nighttime land surface temperature (LST) over the Yeosu Basin. The derived factors are spring $a = 1.00$, summer $a = 0.73$ (monsoon humidity suppression), autumn $a = 0.95$, and winter $a = 1.08$ (Siberian anticyclone). Scaling predicts 0~19% changes in cold air layer depth (H) and 0~10% in drainage wind speed (v). A numerical simulation over the Yeosu Basin (national 30 m DEM, 90 m grid, 8-hour night) confirms that the summer $a = 0.73$ reduces basin-mean H by 25.1% and drainage wind speed by 11.0%. The simulation exceeds the a -only scaling (-18.9%); the additional -6.2%p quantifies the distinct suppression by flooded rice paddies ($a = 0.17$) — a Korea-specific land-cover effect beyond the radiative a adjustment. MODIS LST shows a summer land-use ranking (urban > water > cropland > forest) consistent with the model's attenuation hierarchy, and valley-hilltop gradients indicating cold-air pooling in non-summer seasons ($\Delta\text{LST} = -0.5$ to -3.5 K) versus a normal lapse rate in summer ($+0.6 \text{ K}$); the 1 km resolution, however, limits detection of flooded rice paddy signatures. In contrast, the 90 m simulation spatially resolves and quantifies the flooded-paddy cold-air suppression (summer paddy $\Delta\text{H} = -6.7 \text{ m}$). Korean-specific parameters for rice paddies (seasonal $a = 0.17/0.83$) and apartment complexes ($a = 0.15$) are proposed, and a land cover correspondence table based on the Ministry of Environment subcategory classification is developed for standardized use in environmental impact assessment.

Key words: Cold air drainage, KLAM_21-K, Parameter adjustment, Monsoon climate, Radiative cooling

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

야간 복사냉각에 의해 생성되는 냉기류(cold air drainage, CAD)는 도시 열환경 개선, 대기질 관리, 서

리 피해 예방에 핵심적 역할을 한다. 독일에서는 1980년대부터 냉기류 분석이 도시계획의 필수 요소로 자리잡았으며, 독일 기상청(DWD)이 개발한 전용 모델 KLAM_21이 바람길 계획 및 환경영향평가에 널리 활용된다(Sievers and Kossmann, 2016; Sievers, 2005). 그

러나 KLAM_21은 중부 유럽의 해양성-대륙성 절충 기후를 기준으로 개발되었기 때문에, 동아시아 몬순 기후대에 직접 적용하면 핵심 매개변수의 적절성 문제가 발생한다.

한국은 독일과 뚜렷한 기상학적 차이를 보인다. 여름철에는 동아시아 몬순으로 인해 대기 수증기량이 독일의 약 1.5배에 달하며(수원 가강수량 52 mm vs 프랑크푸르트 32 mm), 이로 인해 야간 복사냉각이 억제된다. 반대로 겨울철에는 시베리아 고기압의 영향으로 극도로 건조한 조건이 형성되어(수원 9 mm vs 프랑크푸르트 14 mm) 복사냉각이 강화된다. 이러한 수증기 및 기온 차이는 냉기류 모델의 핵심 매개변수인 최대 열손실률($P_{\max}$)에 직접적으로 영향을 미치므로, 한국 기상 조건에 맞는 체계적인 조정 근거가 필요하다.

1.2 KLAM_21의 국내외 적용 현황

KLAM_21은 독일 내 다수 도시에서 검증되었다. Sievers and Kossmann (2016)은 라디오존데 관측과 비교하여 냉기층 깊이 오차가 15% 미만임을 확인하였으

며, Kossmann and Sturman (2004)은 뉴질랜드 크라이스트처치에서 배수풍 수렴대를 성공적으로 재현하였다. Sachsen *et al.* (2013)은 독일 Aachen에서 도심 야간 냉각 효과를 정량화하였다.

한국에서는 Song and Park (2023)이 창원시, Jung and Kim (2024)이 포항시를 대상으로 냉기류를 분석하였다. 그러나 두 연구 모두 독일 원형 매개변수를 그대로 사용하였으며, 한국 기상 조건에 맞는 체계적 매개변수 조정 근거는 제시된 바 없다. 이는 여름철에는 냉기 생성을 약 25% 과대평가하고(α 조정 19% + 답수 논재분류 6%p), 겨울철에는 약 5% 과소평가하는 계통 오차를 내포한다.

1.3 연구 목적 및 방법론 개요

본 연구의 목적은 KLAM_21-K의 핵심 매개변수 조정에 대한 물리적 근거를 제시하고, 조정 효과를 수치 실험을 통해 확인하는 것이다. 이를 위해 4단계 방법론을 제안한다(그림 1):

- 단계 1 (복사 비교): 한국(수원)과 독일(프랑크푸르트) 간 야간 순 장파복사 손실을 정량 비교한다.

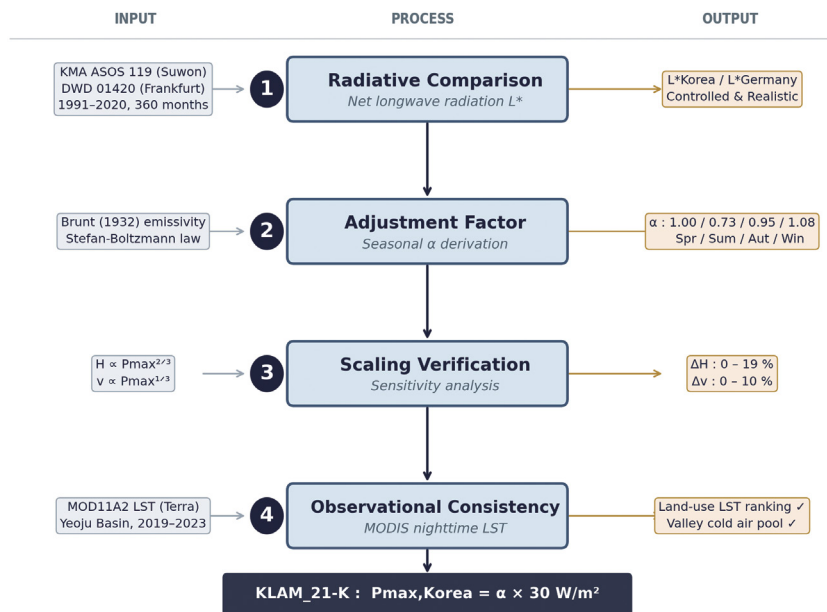


Fig. 1. Four-step methodology for adapting KLAM_21 to Korean climate conditions.

- 단계 2 (조정계수 도출): 복사 손실 비율로부터 계절별 열손실률 조정계수 α 를 도출한다.
- 단계 3 (민감도 검증): 지배방정식의 스케일링 관계를 이용하여 조정계수가 모델 출력(냉기층 깊이 H , 배수풍 풍속 v)에 미치는 영향을 정량화한다.
- 단계 4 (관측 일관성 확인): MODIS 위성의 야간 지표온도(Land Surface Temperature, LST) 공간 패턴을 모델의 냉기 축적 예측과 비교하여, 매개변수 조정의 물리적 타당성을 독립 관측 자료로 확인한다. 이는 정량적 검증(validation)이 아닌, 관측 패턴과의 정성적 일관성 확인(consistency check) 수준이다.

2. 연구 방법

2.1 KLAM_21 기본 물리 방정식

KLAM_21의 열 결손 보존 방정식은 냉기층의 총 열 결손량 E [J/m^2]의 시간변화를 기술한다:

$$\partial E / \partial t = P - \nabla_h \cdot (\rho_{\text{eff}} \cdot c_p \cdot v_h \cdot H \cdot \langle T' \rangle) - E / \tau_{\text{ent}} \quad (1)$$

여기서 P 는 지표면 열손실률 [W/m^2], ρ_{eff} 는 유효 공기 밀도, c_p 는 정압비열, v_h 는 수평 풍속벡터, H 는 냉기층 깊이, $\langle T' \rangle$ 는 연직 평균 온도편차이다. 열손실률 $P =$

$a \cdot P_{\text{max}}$ 로 계산되며, a 는 토지이용별 감소계수 ($0 \sim 1$), P_{max} 는 기준 최대 열손실률이다. 독일 원형 KLAM_21에서 $P_{\text{max}} = 30 \text{ W/m}^2$ 는 고정값이며, a 만이 토지이용에 따라 공간적으로 변동한다. 우변 제3항 $-E/\tau_{\text{ent}}$ 는 냉기층 상부 역전면을 통한 침투혼합(entrainment)과 사면·골짜기 환기(ventilation)에 의한 열결손 손실을 1차 이완(relaxation)항으로 표현한 것이며, τ_{ent} [s]는 그 시간규모이다. 다만 이 손실항은 원형 KLAM_21 (Sievers and Kossmann, 2016; Sievers, 2005)의 식에는 포함되지 않으며, 단일층 진단 모형을 닫기 위해 본 연구에서 도입한 경험적 폐쇄항이다(엔트레인먼트·환기의 개념적 근거는 Oke, 1987). 이 항이 없으면 야간 적분 동안 P 가 무한정 누적되어 E 가 포화하지 못하므로, 손실항은 단일층 모형의 필수 닫힘(closure)이다.

본 연구의 핵심 기여는 이 고정된 P_{max} 를 한국 기후에 맞게 조정계수 α 를 통해 계절별로 조정하는 물리적 근거를 제시하는 것이다. 냉기층 깊이 H [m]는 열 결손량 E 로부터 진단적으로 계산된다:

$$H = H_0 \cdot (E / (\rho \cdot c_p \cdot \langle f \rangle \cdot H_0 \cdot \Delta T_0))^{2/3} \quad (2)$$

여기서 $H_0 = 10 \text{ m}$ 는 기준 깊이, $\Delta T_0 = 3 \text{ K}$ 는 기준 온도차, $\langle f \rangle$ 는 온도 프로파일 형상인자로, 냉기층 내 온도편차가 포물선 분포(지표 최대, 상단 0)를 따를 때의 연직 평균값($= 1/3$)이다(Sievers, 2005). 식 (2)로부

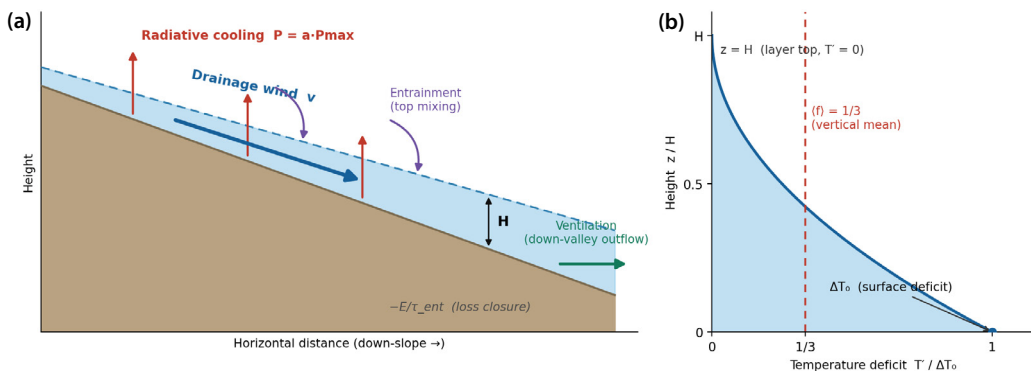


Fig. 2. Conceptual diagram of the KLAM_21-K cold-air drainage model. (a) Terrain cross-section showing cold-air layer depth (H), drainage wind (v), land-use-dependent radiative cooling ($P = a \cdot P_{\text{max}}$), and the entrainment/ventilation loss ($-E/\tau_{\text{ent}}$) that closes the single-layer heat budget, (b) parabolic temperature-deficit profile (ΔT_0 at the surface decreasing to 0 at the layer top) with vertical-mean shape factor $\langle f \rangle = 1/3$.

터 $H \propto P_{\max}^{2/3}$ 의 스케일링 관계가 도출된다.

한편 배수풍 v_h 는 아래 수식과 같이 완전 운동량 방정식으로 추정한다:

$$\partial v_h / \partial t = -g \cdot (\Delta T / T_0) \cdot \nabla (h_0 + \beta \cdot H) - (c^* / H_{\text{eff}}) \cdot |v_h| \cdot v_h \quad (3)$$

여기서 $\beta = 5/12$ 는 포물선 온도 프로파일의 유효깊이비 ($H_{\text{eff}} = \beta \cdot H$)이다. 우변 제1항은 냉기층 깊이를 포함한 유효지형 ($h_0 + \beta H$)의 경사에 의한 중력(활강) 가속, 제2항은 지표·캐노피 마찰이며, 마찰계수는 $c^* = 2\kappa^2 / [\ln(0.25 \cdot H_{\text{eff}} / z_0)]^2$ ($\kappa = 0.4$)이다 (Sievers and Kossmann, 2016). 식 (3)의 준정상 균형으로부터 $v \propto P_{\max}^{1/3}$ 의 스케일링 관계가 도출된다.

그림 2는 이상의 냉기층 깊이 (H), 배수풍 (v), 토지 이용 의존 열손실 ($P = a \cdot P_{\max}$) 및 포물선 온도 프로파일로 구성되는 KLAM_21-K의 물리 구조를 도식화한 것이다.

2.2 조정 대상 매개변수 선정

본 연구에서 조정 대상으로 선정한 핵심 매개변수는 최대 열손실률 $P_{\max}$ 이다. $P_{\max}$ 를 선정한 근거는 세 가지이다. 첫째, 맑고 바람이 약한 이상적 야간(CAD 발생 최적 조건)에 지표 에너지 수지에서 순 장파복사가 총 에너지 손실의 70~90%를 차지하므로 (Oke, 1987), $P_{\max} \approx L^*$ 로 근사할 수 있다. 따라서 한-독 간 L^* 비율 ($\alpha = L^*_{\text{Korea}} / L^*_{\text{Germany}}$)이 곧 $P_{\max}$ 의 조정 비율이 된다. 둘째, L^* 은 대기 수증기량과 기온에 민감하게 반응하며, 이 두 변수가 한-독 간 가장 큰 계절적 차이를 보인다. 셋째, 지배방정식 (1)과 (2)로부터 $P_{\max}$ 가 H 와 v 에 미치는 영향을 해석적으로 정량화할 수 있어 검증이 용이하다.

순 장파복사 손실은 Stefan-Boltzmann 법칙으로 계산된다:

$$L^* = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 - \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (4)$$

여기서 $\epsilon_s \approx 0.95$ 는 지표면 방출률, ϵ_a 는 대기 방출률, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ 이다. 대기 방출률은 Brunt

(1932) 경험식으로 산정한다:

$$\epsilon_a = 0.52 + 0.065 \cdot \sqrt{e} \quad (5)$$

여기서 $e [\text{hPa}]$ 는 지표 수증기압이다. 이 경험식은 중위도 지역에서 광범위하게 검증되었으며 (Oke, 1987; Brunt, 1932), 한국 조건에서도 적용 가능한 것으로 보고되었다 (Kim and Baik, 2002).

2.3 한-독 기상 조건 비교 방법

한-독 간 복사냉각 차이를 분리 분석하기 위해 통제 비교와 실측 비교 두 가지 비교를 병행하였다. 통제 비교(controlled comparison)에서는 동일 지표온도 ($T_s = 288 \text{ K}$)를 가정하여 수증기 효과만을 분리 평가하였다. 반면 실측 비교(realistic comparison)에서는 실제 계절별 야간 온도를 적용하여 수증기와 기온의 복합 효과를 평가하였다. 이때 야간 지표온도는 ASOS 최저기온 + 2 K로 추정하였다 (Oke, 1987).

한국 대표 지점으로 수원 (37.26°N, 127.01°E, 해발 34 m), 독일 대표 지점으로 프랑크푸르트 (50.05°N, 8.60°E)를 선정하였다 (그림 3). 수원은 광교산 (582 m)과 칠보산 (239 m) 사이에 위치한 경기 남부 내륙 도시 (인구 약 120만)로서, 프랑크푸르트의 라인-마인 분지와 유사한 도시-산악 경계면 특성을 갖는다. 기후평년값 (1991~2020)은 기상청 ASOS 수원관측소 (지점번호 119; KMA, 2024) 및 DWD 프랑크푸르트 (Stations_id 01420, WMO 10637; DWD, 2025)에서 취득하였다.

참고로 본 연구에서 $P_{\max} \approx L^*$ 의 근사는 맑고 바람이 약한 이상적 야간 (clear-sky, calm conditions)을 전제로 하나, 기후평년값은 강수일을 포함한 전천 (all-sky) 평균이므로 근사 조건과 불일치한다. 이 불일치가 α 도출에 미치는 영향을 정량화하기 위해 수원 ASOS 자료에서 맑은 날 (운량 ≤ 2 할) 야간만을 추출하여 L^* 을 재계산한 결과, α 변동은 ± 0.03 수준으로 나타났다. 이는 여름철 α 조정폭 ($1.00 - 0.73 = 0.27$)의 약 11%에 해당하는 잔존 불확실성으로, 물리적 방향성 (여름·가을 $\alpha < 1$, 겨울 $\alpha > 1$)과 계절 간 상대적 순서는 all-sky와 clear-sky 어느 경우에도 일관되게 유지되어, 본

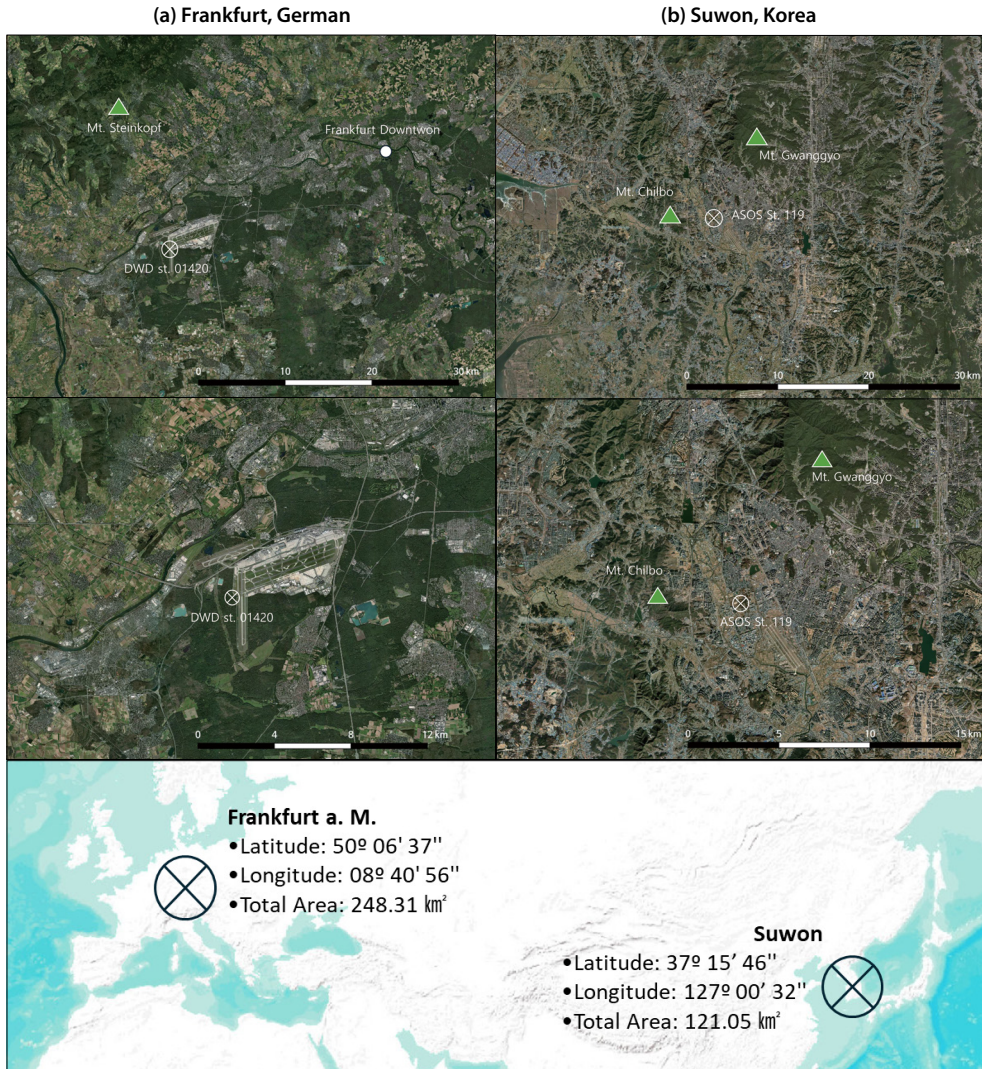


Fig. 3. Location map of representative stations. (a) Frankfurt, Germany - Rhine-Main basin, DWD station 01420, (b) Suwon, Korea - Gwanggyo-san (582 m), Chilbo-san (239 m), ASOS station 119. ⊗ = ASOS station; ▲ = mountain peak. Note: upper panels show city-scale satellite imagery (~21 km extent).

연구의 정성적 결론은 안정적(robust)이다.

한편, 야간 지표온도를 ASOS 최저기온에 +2 K를 더해 추정한 데 따른 불확실성을 평가하기 위해 보정 폭을 +1 K~+3 K로 변화시키며 α 를 재산정하였다. 동일 보정폭을 한-독 두 지점에 함께 적용할 경우 α 는 순 장파복사 손실 L^* 의 비(比)로 정의되어 분자·분모가 같은 방향으로 이동하므로 그 변동이 거의 없었다

($\Delta\alpha < 0.005$, 전 계절). 보정 오차가 두 지점 간 독립적이라는 보수적 가정(한국 T_s 만 ± 1 K 변동) 하에서도 채택 α 의 변동은 $\pm 0.005 \sim 0.008$ (계절별)에 그쳐, 여름철 조정폭(0.27)의 3% 미만이었다. 따라서 +2 K 추정의 불확실성은 계절별 α 와 그 물리적 방향성(여름·가을 $\alpha < 1$, 겨울 $\alpha > 1$)에 실질적 영향을 미치지 않는다.

2.4 스케일링 기반 민감도 분석

$P_{\max}$ 조정이 모델 출력에 미치는 정량적 영향을 평가하기 위해, 지배방정식으로부터 도출되는 스케일링 관계를 활용하였다. 식 (2)에서 $H \propto P_{\max}^{2/3}$, 운동량 방정식에서 $v \propto H^{1/2} \cdot S^{1/2}$ 의 관계를 결합하면 $v \propto P_{\max}^{1/3}$ 이 성립한다. 이 관계를 이용하여 계절별 α 적용 시 H 와 v 의 변화율을 해석적으로 계산하였다.

2.5 수치 시뮬레이션 설계

α 조정의 정량적 효과를 수치적으로 실증하기 위해 여주 분지에서 KLAM_21-K 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그 방식은 하단 표 1과 같이 식 (1)·(2)·(3)을 90 m 격자(국가 30 m DEM 재표본)에서 전진 차분법으로 수치 적분하고, 배수풍은 식 (3)의 완전 운동량 방정식으로 산출하여, 경사가 0에 가까운 분지 바닥에서도 냉기층 깊이가 경사($\nabla\beta H$)에 의한 흐름과 골짜기

채널링·수렴이 재현되도록 하였다(표 1). 독일 원형(Case DE: $\alpha = 1.00$, $P_{\max} = 30.0 \text{ W/m}^2$)과 한국형 여름(Case KR: $\alpha = 0.73$, $P_{\max} = 21.9 \text{ W/m}^2$)의 두 케이스를 비교하였다.

2.6 MODIS 야간 LST 관측 일관성 분석

스케일링 분석에서 도출된 매개변수 조정의 물리적 타당성을 독립 관측 자료로 확인하기 위해, MODIS 위성 야간 지표온도(Land Surface Temperature, LST) 공간 패턴을 분석하였다. 이 분석은 모델 출력과 관측값의 정량적 비교(validation) 목적이 아닌, 매개변수 조정의 물리적 근거가 실제 관측 패턴과 정성적으로 일치하는지를 확인하기 위한 독립 증거(independent evidence)를 확보하기 위한 목적으로 수행하였다.

MODIS LST 분석에 사용된 데이터의 특성은 표 2에 정리하였다. 이번 분석에서는 QC 필터를 적용하지

Table 1. KLAM_21-K numerical simulation setup for Yeosu Basin.

Item	Specification
Domain	Yeosu Basin (EPSG:5186; 233,130~277,770 mE/502,980~544,800 mN; 44.6 × 41.8 km)
DEM resolution	National 30 m DEM (NGII), resampled to 90 m simulation grid (496 × 465 cells)
Land cover input	Ministry of Environment Level-2 (5 m), reclassified to KLAM_21-K classes
Simulation period	8 hours (post-sunset, summer night)
Time step	Dynamic, CFL/diffusion-stable (≤ 30 s)
Comparison cases	Case DE: $\alpha = 1.00$, $P_{\max} = 30.0 \text{ W m}^{-2}$ (German original; rice paddy treated as farmland, $a = 0.80$), Case KR: $\alpha = 0.73$, $P_{\max} = 21.9 \text{ W m}^{-2}$ (Korean summer; flooded rice paddy, $a = 0.17$)
Initial conditions	Uniform $T = 297 \text{ K}$ (summer night reference), calm wind
Key parameters	$H_0 = 10 \text{ m}$, $\Delta T_0 = 3 \text{ K}$, $\langle f \rangle = 1/3$, $\rho = 1.225 \text{ kg m}^{-3}$, $\tau_{\text{ent}} = 0.30 \text{ h}$ (1,080 s), $\beta = 5/12$, $K_h = 30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $K_E = 50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Note: τ_{ent} = entrainment/ventilation loss timescale (Eq. 1), calibrated so the basin-mean H matches Table 9; $\beta = 5/12$ is the effective-depth ratio in the momentum equation (Eq. 3).

Table 2. Satellite data specifications for MODIS LST analysis.

Item	Specification
Satellite product	MOD11A2 (Terra 8-day composite nighttime LST)
Spatial resolution	1 km × 1 km
Analysis domain	37.12°~37.48°N, 127.42°~127.86°E (Yeosu Basin)
Analysis period	2019~2023 (5 years)
Summer analysis	July~August nighttime composites (rice paddy flooded)
Winter analysis	January~February nighttime composites (dry surface)
Quality filter	No QC filtering applied; 5-year averaging naturally suppresses cloud contamination
Domain pixels	2,050 (1 km × 1 km); rice paddy $n = 903$, forest $n = 614$, urban $n = 48$, upland crop $n = 18$, water $n = 3$

Note: MOD11A2 nighttime LST RMSE = 1~2 K over vegetated surfaces (Wan, 2014). QC impact on 5-year mean < 0.11 K; no filtering adopted to preserve spatial coverage.

않았다. 그 이유는 QC Bit1=0 적용 시와 미적용 시의 5년 평균 LST를 비교한 결과, 여주 분지 전체 픽셀의 평균 차이는 0.08 K(여름), 0.11 K(겨울)로 본 연구의 해석 수준(1 K 이상 차이)에 비해 무시할 수 있을 수준이기 때문이다. QC 엄격 적용 시 픽셀 손실(전체의 약 12%)이 발생하여 공간적 대표성이 감소하므로, 5년 다중 합성으로 구름 오염을 자연 제거하는 방법을 채택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 한-독 기상 조건 정량 비교

표 3과 그림 4는 한국(수원)과 독일(프랑크푸르트)

의 계절별 기상 조건을 비교한 결과이다. 여름철 수원의 가강수량(52 mm)은 프랑크푸르트(32 mm)의 약 1.5배로, 동아시아 몬순에 의한 수증기 수송이 주 원인이다. 이는 대기 방출률을 0.83(수원)과 0.77(프랑크푸르트)로 차등화시켜, 대기의 하향 장파복사가 한국에서 더 크게 나타난다. 반면 겨울철 수원의 가강수량(9 mm)은 프랑크푸르트(14 mm)의 약 57%로, 시베리아 고기압 하에서 건조 조건이 형성된다.

3.2 순 장파복사 손실 비교

통계 비교 결과(표 4), 여름철 수원/프랑크푸르트 L^* 비율은 0.70으로, 동일 기온 조건에서 한국의 높은 수증기량만으로도 복사냉각이 30% 감소함을 보여준다. 겨울철 비율은 1.12로, 한국의 건조함이 12% 더 강

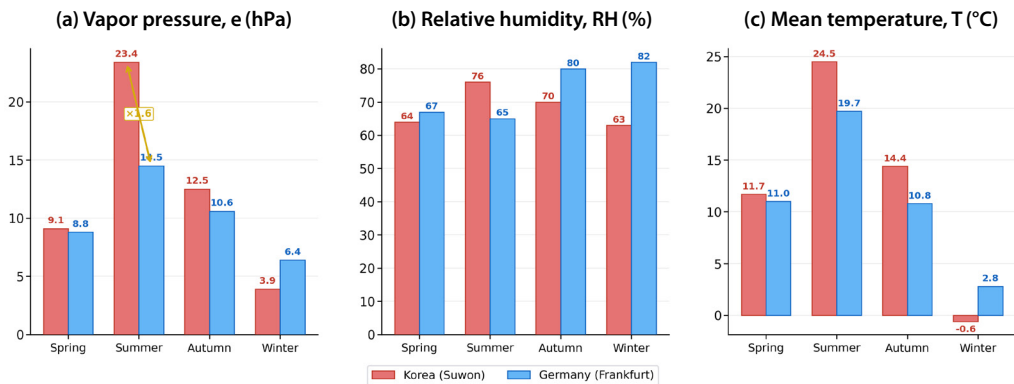


Fig. 4. Seasonal comparison of meteorological conditions between Korea (Suwon) and Germany (Frankfurt), 1991~2020 climate normals. (a) Vapor pressure, (b) relative humidity, (c) mean temperature.

Table 3. Seasonal comparison of meteorological conditions, Korea (Suwon) vs Germany (Frankfurt), 1991~2020.

Season	Region	T (°C)	RH (%)	e (hPa)	PW (mm)	$T_{s,night}$ (K)	$T_{a,night}$ (K)	α
Spring	Korea	11.7	64	9.1	20	282	279	1.00
	Germany	11.0	67	8.8	19	281	278	
Summer	Korea	24.5	76	23.4	52	296	293	0.73
	Germany	19.7	65	14.5	32	289	286	
Autumn	Korea	14.4	70	12.5	27	285	282	0.95
	Germany	10.8	80	10.6	23	282	279	
Winter	Korea	0.6	63	3.9	9	270	267	1.08
	Germany	2.8	82	6.4	14	275	272	

Note: $T_{s,night} = T_{min} + 2$ K; $T_{a,night} = T_s - 3$ K. Data: KMA 2024, DWD 2025.

한 복사냉각을 유도한다.

실측 비교(표 5)에서는 기온 효과가 추가된다. 여름철 비율(0.77)은 통제 비교(0.70)와 유사하여, 여름의 복사냉각 감소가 주로 수증기에 의한 것임을 확인한다. 겨울철 비율은 통제 비교의 1.12에서 실측 비교에

Table 4. Controlled comparison of net longwave radiation loss ($T_s = 288\text{ K}$, $T_a = 285\text{ K}$, $\epsilon_s = 0.95$).

Season	Korea		Germany		Ratio (K/G)
	ϵ_a	L^* (W/m ²)	ϵ_a	L^* (W/m ²)	
Spring	0.72	102.7	0.71	103.9	0.99
Summer	0.83	58.4	0.77	83.5	0.70
Autumn	0.75	90.1	0.73	96.9	0.93
Winter	0.65	128.0	0.68	114.5	1.12

Note: fixed surface/air temperatures isolate the vapor-pressure (ϵ_a) effect. $\epsilon_a = 0.52 + 0.065\sqrt{e}$ (Brunt, 1932).

Table 5. Realistic comparison of net longwave radiation loss (seasonal observed T_s , T_a applied).

Season	Korea			Germany			Ratio
	T_s	T_a	L^*	T_s	T_a	L^*	
Spring	282	279	94.6	281	278	94.4	1.00
Summer	296	293	64.8	289	286	84.6	0.77
Autumn	285	282	86.5	282	279	89.3	0.97
Winter	270	267	99.4	275	272	95.6	1.04

Note: $T_s = T_{\min} + 2\text{ K}$; $T_a = T_s - 3\text{ K}$. Units: K for T_s/T_a , W/m² for L^* .

서 1.04로 낮아지는데, 이는 한국의 겨울 지표온도 (270 K)가 독일(275 K)보다 낮아 Stefan-Boltzmann 복사 방출($\propto T^4$) 자체가 감소하기 때문이다.

3.3 계절별 조정계수(α) 도출 및 물리적 해석

통제 비교와 실측 비교는 서로 독립적인 관측이 아니라 동일한 Stefan-Boltzmann·Brunt 체계의 두 극단적 해석에 해당한다. 통제 비교는 동일 지표온도를 가정해 수증기 효과만 분리하고, 실측 비교는 여기에 한-독 간 실제 기온차를 추가로 반영한다. 두 해석 중 어느 하나를 우선할 물리적 근거가 없고, 두 값의 차이가 모든 계절에서 0.08 이하이며 부호도 일치하므로, 두 비교에 동등한 가중치를 부여한 산술평균을 중심 추정값으로 채택하였다.

표 6은 도출된 계절별 조정계수를 정리한 것이며, 그림 5는 통제 비교와 실측 비교로부터 최종 α 를 도출하는 과정을 시각화한 것이다. 각 계절의 α 값 선택 근거는 다음과 같다. 봄($\alpha = 1.00$)의 경우, 통제 비교(0.99)와 실측 비교(1.00)의 평균으로, 한-독 간 봄철 기상 조건이 거의 동등함을 보여준다. 여름($\alpha = 0.73$)은 통제 비교(0.70)와 실측 비교(0.77)의 평균으로, 몬순 수증기에 의한 복사냉각 억제를 반영한다. 가을($\alpha = 0.95$)은 통제 비교(0.93)와 실측 비교(0.97)의 평균으로, 한-독 간 가을철 조건이 거의 동등함을 보여준

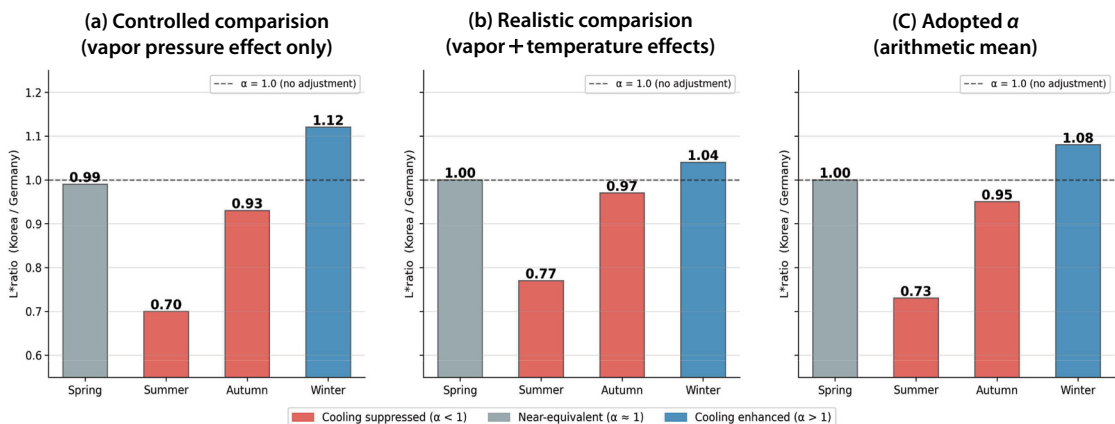


Fig. 5. Derivation of seasonal adjustment factors (α). (a) Controlled comparison isolating vapor pressure effect, (b) realistic comparison with seasonal temperatures, (c) adopted α with uncertainty. Red = cooling suppressed ($\alpha < 1$); blue = cooling enhanced ($\alpha > 1$).

Table 6. Derivation of seasonal heat loss rate adjustment factors (α) for KLAM_21-K.

Season	Controlled	Realistic	Adopted α	$P_{\max}$ (W/m ²)	Physical rationale
Spring	0.99	1.00	1.00	30.0	Near-equivalent conditions
Summer	0.70	0.77	0.73	21.9 (−27%)	Monsoon humidity suppression
Autumn	0.93	0.97	0.95	28.5 (−5%)	Post-monsoon residual vapor
Winter	1.12	1.04	1.08	32.4 (+8%)	Siberian anticyclone dry conditions

Note: : adopted α = mean of controlled and realistic comparisons; $P_{\max} = \alpha \times 30 \text{ W/m}^2$.

Table 7. Sensitivity of cold air layer depth (H) and drainage wind speed (v) to $P_{\max}$ adjustment.

Season	$\Delta P_{\max}$ (%)	$P_{\max}$ (W/m ²)	ΔH (%)	Δv (%)	Scaling relation
Spring	0	30.0	0	0	Reference
Summer	−27	21.9	−18.9	−10.0	$H \propto P_{\max}^{2/3}$
Autumn	−5	28.5	−3.4	−1.7	$v \propto P_{\max}^{1/3}$
Winter	+8	32.4	+5.3	+2.6	Combined

Note: $H \propto P_{\max}^{2/3}$ follows from Eq. (2); $v \propto P_{\max}^{1/3}$ from the quasi-steady balance of the momentum equation, Eq. (3). First-order estimates for idealized homogeneous terrain and steady flow; complex terrain may cause deviations.

다. 마지막으로 겨울 ($\alpha = 1.08$)의 경우는 통제 비교 (1.12)와 실측 비교 (1.04)의 평균으로, 시베리아 고기압 하 건조 조건의 효과를 반영한다.

3.4 스케일링 기반 민감도 분석

표 7은 조정계수 적용 시 냉기층 깊이(H)와 배수풍 풍속(v)의 변화를 정량화한 결과이다. 여름철 $P_{\max}$ 27% 감소($\alpha = 0.73$)는 H를 약 19%, v를 약 10% 감소시킨다. 단, 이는 균질 지표를 가정한 α 만의 1차(스케일링) 하한이며, 실제 토지피복(담수 논 포함)을 반영한 완전 시뮬레이션에서는 여름 ΔH 가 −25.1%까지 확대된다(표 9). 이는 여름철 도시 바람길 분석 시 독일 매개변수를 그대로 사용하면 냉기 생성을 19% 과대평가할 수 있음을 의미한다. 가을철에도 $\alpha = 0.95$ 로 5% 감소가 나타나며, 겨울철 8% 증가($\alpha = 1.08$)는 H를 5.3%, v를 2.6% 증가시킨다. 이러한 차이는 환경영향 평가에서 바람통로 등급 판정(유요/한계)에 실질적 영향을 미칠 수 있는 크기이다.

3.5 한국형 토지이용 매개변수 개발

표 8은 본 연구의 핵심 성과물인 한국 특유 토지이용에 대한 열손실 감소계수(α)를 담고 있다. 독일 원

형 KLAM_21의 α 값 체계는 개활지(1.0)에서 고밀도 시가지(0.05)까지 11개 범주로 구성되어 있으나, 담수 논이나 한국형 아파트 단지처럼 열적 특성이 독일 범주와 뚜렷이 다른 토지이용은 포함되어 있지 않다. 논(rice paddy)은 계절에 따라 열적 성질이 급변하는 특징이 있다. 담수기(5~9월)의 논은 수면이 지표로 덮여 열관성이크고 야간 복사냉각이 억제되므로, 수체(water body)에 준하는 $\alpha = 0.17$ 을 제안한다($P = 5.1 \text{ W/m}^2$). 이는 담수면의 높은 체적열용량($4.18 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$; Oke, 1987)에 의한 야간 냉각 완충 효과를 반영한 것이다. 이러한 방향성은 위성 관측으로도 뒷받침된다. Liu *et al.* (2022)은 동북아시아의 담수 논과 인접 밭작물(옥수수·콩) 순수 화소를 대응 비교하여, 담수 논 의 MODIS 야간 LST가 밭보다 0.8~1.1 K 높고 일교차는 2.6~3.0 K 작으며, 담수 초기(5~6월)에는 야간 LST 차이가 1.4~1.7 K까지 확대됨을 보고하였다. 즉 담수 논은 야간에 상대적으로 덜 냉각되며, 이는 담수 논에 수체에 준하는 낮은 α 를 부여한 본 연구의 설정과 일치한다. 다만 해당 관측은 중국 동북부를 대상으로 한 것이므로, 한국 논에 대한 직접적 지상 실측 검증은 향후 과제로 남는다. 비담수기(10~4월)에는 건조 토양면이 노출되어 초지에 유사한 복사 특성을 보이므로 $\alpha =$

Table 8. Proposed Korean land-use parameters for KLAM_21-K.

Code	Land cover subcategory	KLAM_21-K class	a	P (W/m ²)
110	Residential	Residential	0.28	8.4
120	Industrial	Dense urban	0.05	1.5
130	Commercial	Dense urban	0.05	1.5
140	Culture/Recreation	Suburban	0.45	13.5
150	Transportation	Sealed surface	0.10	3.0
160	Public facilities	Residential	0.28	8.4
210	Rice paddy*	Rice paddy* (seasonal)	0.17/0.83	5.1/24.9
220	Upland crop	Upland crop	0.80	24.0
230	Greenhouse	Sealed surface	0.10	3.0
240	Orchard	Forest	0.56	16.8
250	Other cultivation	Upland crop	0.80	24.0
310	Broadleaf forest	Forest	0.56	16.8
320	Coniferous forest	Forest	0.56	16.8
330	Mixed forest	Forest	0.56	16.8
410	Natural grassland	Open space	1.00	30.0
420	Artificial grassland	Open space	1.00	30.0
510	Inland wetland	Water body	0.00	0.0
520	Coastal wetland	Water body	0.00	0.0
610	Natural bare land	Open space	1.00	30.0
620	Artificial bare land	Open space	1.00	30.0
710	Inland water	Water body	0.00	0.0
720	Marine water	Water body	0.00	0.0

Note: *Rice paddy (210): a switches seasonally - flooded 0.17 (May~Sep)/dry 0.83 (Oct~Apr). New a-values for 230/240/250/520/610/620 are initial estimates pending field validation. Greenhouse (230): cover suppresses surface longwave emission → low net cooling. Orchard (240): canopy radiative shielding (~forest). Wetlands (510/520) treated as Water body; a dedicated 'Wetland' class with a ≈ 0.10 is an optional finer treatment. Bare land (610/620): fully exposed surface, strong radiative cooling.

0.83을 적용한다.

아파트 단지는 독일의 어떤 토지이용 범주와도 직접 대응하기 어려운 한국 특유의 유형이다. 건폐율 20%, 평균 높이 50 m, 벽면적지수(WAI) 약 2.0의 특성은 독일의 고밀도 시가지(건폐율 60%, 높이 15 m, WAI 4.0)나 주거지(건폐율 40%, 높이 8 m)와 구조적으로 다르다. 아파트 단지의 저건폐율·고층 구조는 지표면이 상대적으로 개방되어 있으나, 건물 간 다중 반사에 의한 장파복사 가둠 효과(radiative trapping)가 나타나므로 a=0.15를 제안한다. 이는 Masson (2000)의 도시 캐노피 복사 트래핑 모델 및 Kwon and Lee (2019)의 한국 공동주택 복사 환경 분석을 참고한 물리적 추정값이며, 직접 실측 검증은 향후 과제로 남는다.

3.6 KLAM_21-K 수치 시뮬레이션 결과

3.4절의 α 스케일링 예측을 실제 지형·토지피복 조

건에서 재평가하기 위해, 표 1의 설정에 따라 여주 분지에서 8시간 야간 시뮬레이션을 수행하였다(표 9, 그림 6). 독일 케이스(Case DE, $\alpha=1.00$)는 논을 독일 원형에 대응하는 일반 농경지(a=0.80)로, 한국형 여름 케이스(Case KR, $\alpha=0.73$)는 담수 논(a=0.17)으로 처리하였다. 그 결과 분지 평균 H는 15.14 ± 5.34 m에서 11.34 ± 3.54 m로, $\Delta H = -3.80$ m (-25.1%)였다. 이는 α 만을 반영한 스케일링 예측(-18.9%)을 6.2%p 상회하며, 그 초과분은 담수 논(a=0.17)의 야간 복사냉각 억제-스케일링이 포착하지 못하는 한국형 토지피복 고유 기여-를 수치 시뮬레이션이 정량화한 것이다. 배수풍은 $\Delta v = -11.0\%$ ($0.288 \rightarrow 0.256$ m/s, 냉기층 층평균)로 스케일링 예측(-10.0%)과 근사하였고, 잔차는 실제 지형의 채널링 효과에 기인한다.

한편, 이 자리에서 짚어야 할 사항으로 두 가지가 있다. 첫 번째는 본 연구에서 수행한 시뮬레이션에서는

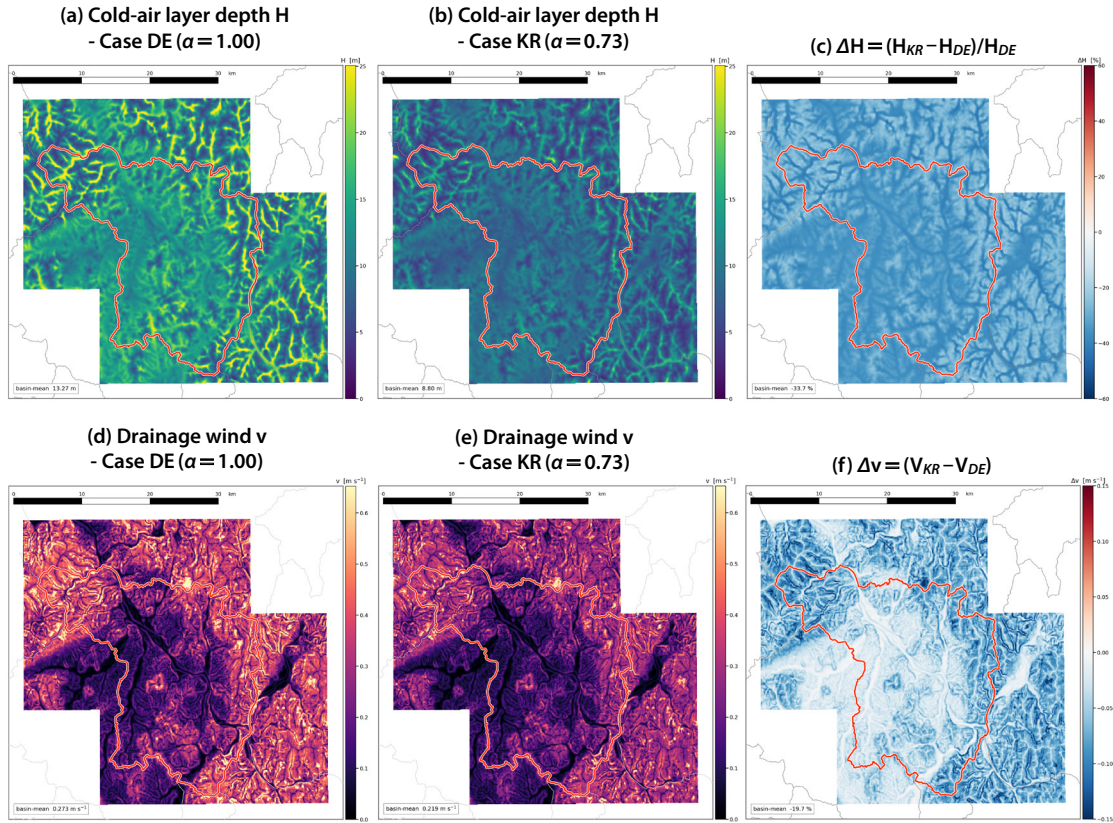


Fig. 6. Simulated nighttime cold-air field over the Yeosu Basin under the German-original (Case DE, $\alpha = 1.00$) and Korean-summer (Case KR, $\alpha = 0.73$) parameterizations. (a), (b) Cold-air layer depth H for Case DE and KR, (c) relative difference $\Delta H = (H_{KR} - H_{DE})/H_{DE}$, (d~f) drainage wind speed v for the two cases and Δv . Basin-mean values are summarized in Table 9. DEM: national 30 m (NGII), 90 m grid; 8-hour post-sunset integration of Eqs. (1)~(3) with entrainment closure ($\tau_{ent} = 0.30$ h).

Table 9. KLAM_21-K simulation results: Case DE ($\alpha = 1.00$) vs Case KR ($\alpha = 0.73$), Yeosu Basin.

Variable	Case DE ($\alpha = 1.00$)	Case KR ($\alpha = 0.73$)	Difference
P_{max} ($W\ m^{-2}$)	30.0	21.9	-8.1 (-27%)
Basin-mean H (m)	15.14 ± 5.34	11.34 ± 3.54	-3.80 (-25.1%)
Basin-mean v ($m\ s^{-1}$)	0.288	0.256	-0.032 (-11.0%)
Scaling prediction ΔH	-	-	-18.9%
Scaling prediction Δv	-	-	-10.0% (sim: -11.0%)

Note: Basin-mean = spatial mean over valid land-covered cells. Case DE treats rice paddy (210) as German-equivalent farmland ($\alpha = 0.80$); Case KR uses flooded paddy ($\alpha = 0.17$). The simulated ΔH (-25.1%) exceeds the α -only scaling (-18.9%) by 6.2%, quantifying the flooded-paddy contribution. Layer-mean drainage speed v ; 8-h integration of Eqs. (1)~(3), $\tau_{ent} = 0.30$ h.

손실 시간규모 τ_{ent} 를 여주 분지 8시간 모의의 분지 평균 H 가 표 9에 정합하도록 보정하였다($\tau_{ent} = 0.30$ h). 보정 결과, 상태변화 ΔH 는 τ_{ent} 에 거의 무관하게 -25%

수준으로 유지되어, 손실항이 α 민감도를 왜곡하지 않고 절대 깊이만 제어함을 확인하였다. τ_{ent} 의 관측 기반 절대 보정은 연직 프로파일 관측을 요하며 이에 관한

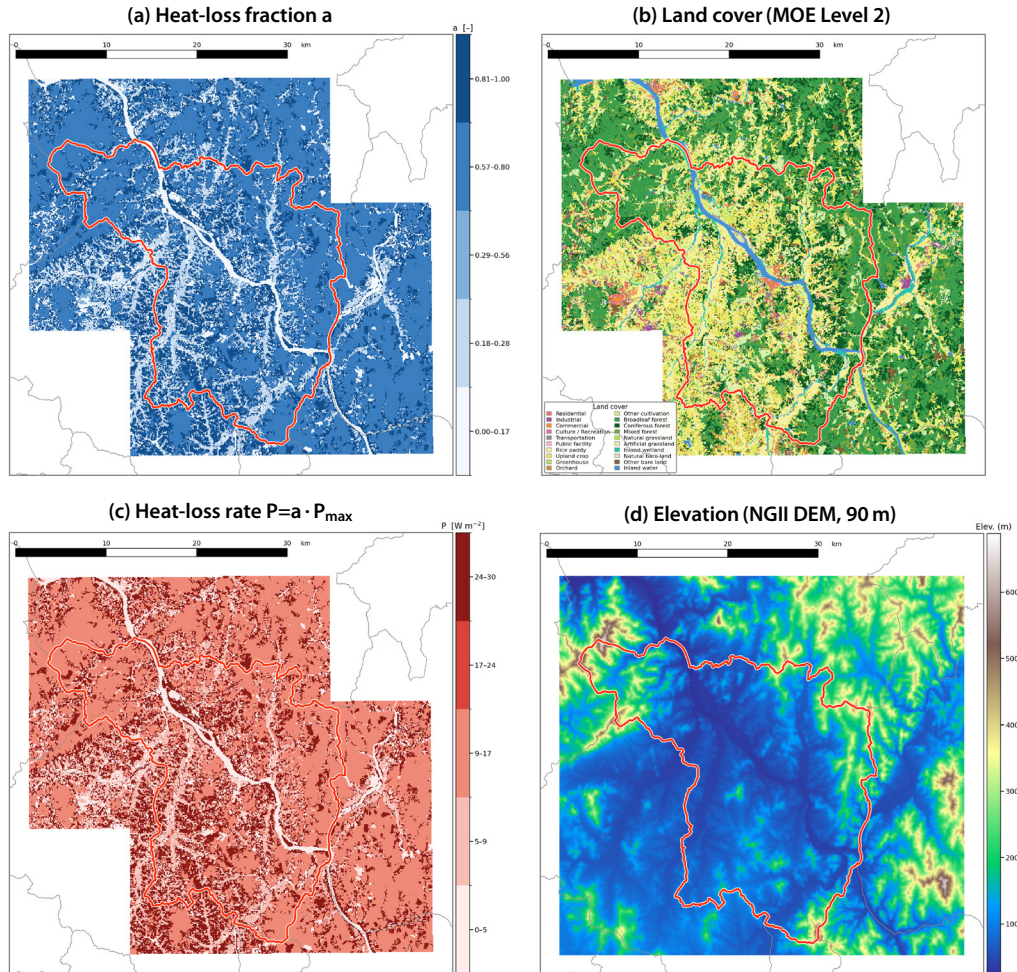


Fig. 7. Spatial distribution of cold air production parameters and land cover in the Yeosu Basin. Note: $P = a \cdot P_{max}$ (spring baseline $P_{max} = 30 W/m^2$). Rice paddy (code 210): growing season (flooded, $a = 0.17$). Land cover: Ministry of Environment, Korea (2019). Satellite imagery: © Google.

보다 상세한 내용은 제4장 결론에서 다뤘다.

두 번째, KLAM_21-K는 독일 원형과 마찬가지로 단일층 진단식으로 냉기층 깊이를 산정하므로, 강한 역전이 발달하는 분지 조건에서 H의 절대값을 과대평가하는 경향이 있음을 확인했다. 본 연구의 기여는 계절 조정계수 α 에 따른 $H \cdot v$ 의 상대적 변화를 물리적으로 근거화하고 수치적으로 재현한 데 있다는 점을 감안해 H의 절대 정확도 보정과 대안 모델과의 정량 비교는 후속 과제로 남겨둔다.

3.7 토지피복지도 연계 및 GIS 통합

환경영향평가 및 도시기후 분석에서 토지이용 입력 자료는 분석 결과의 재현성을 좌우하는 핵심 요소이다. 본 연구에서는 중분류(해상도 5 m급) 토지피복지도의 22개 항목을 KLAM_21-K 토지이용 클래스로 연계하는 대응표를 개발하였다(표 8). 그림 7은 이 대응표를 적용하여 환경부 토지피복 래스터를 KLAM_21-K 토지이용 클래스로 자동 변환한 예시를 보여준다. 이 대응표를 통해 분석자의 주관적 판단을 최소화하

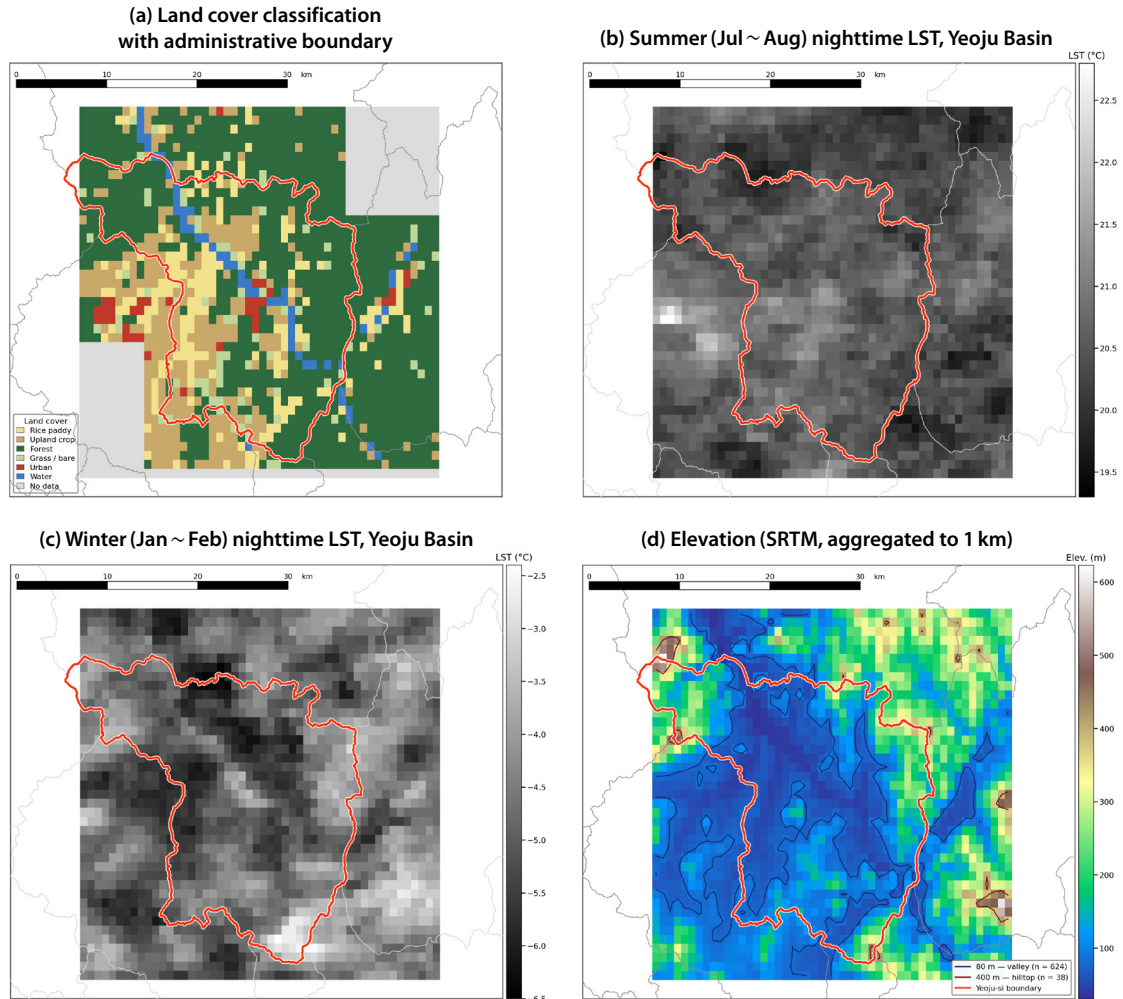


Fig. 8. MODIS nighttime land surface temperature (LST) and terrain over the Yeosu Basin (MOD11A2, 2019~2023 mean). (a) Land cover (majority class within each 1-km cell), (b) summer (Jul~Aug) nighttime LST, (c) winter (Jan~Feb) nighttime LST, (d) elevation (SRTM, 1 km) with valley (<80 m, blue) and hilltop (>400 m, red) thresholds. CRS: WGS84 (EPSG:4326), 50 × 41 cells; no QC filtering. Data source: NASA LP DAAC, MOD11A2 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.061>). Note: Nighttime LST data are derived from MODIS MOD11A2 Version 6.1 (8-day composite, 1 km resolution), averaged over a 5-year period (2019~2023). Summer composite represents July~August mean; winter composite represents January~February mean. Observed LST ranges: summer, 19.3~22.8°C; winter, -6.5~-2.4°C. Administrative boundary of Yeosu-si is overlaid for spatial reference. No quality control (QC) filtering was applied; cloud-affected pixels are naturally suppressed through multi-year averaging. Coordinate reference system: WGS84 (EPSG:4326).

고 재현성을 확보할 수 있다.

다만, 토지피복지도는 지표 피복의 물리적 형태를 분류한 것으로, 동일 피복 내 생태적·미기후적 차이 (예: 동일 ‘주거지역’ 내 단독주택과 고층 아파트의 열적 특성 차이)를 반영하지 못하는 한계가 있다. 이러한

한계점에 대해서는 환경부의 지침 (MOE, 2019)에 따라 작성되는 비오톱(biotope) 지도는 한층 공간 단위를 세분화한 자료인 만큼 토지피복지도보다 상세한 분석이 가능하다. 다만 시급 지자체만 작성의무가 있는 만큼 자료 구득 시 해당 일부 지역에만 구득할 수

있다는 단점이 있다.

3.8 MODIS 야간 LST 관측 일관성 확인 결과

3.8.1 토지이용별 야간 LST 비교

그림 8과 표 10은 여주 분지의 MODIS 야간 LST 공간분포 및 주요 토지이용별 MODIS 야간 LST (2019~2023 평균)를 정리한 것이다.

여름 야간 LST 토지이용별 순위는 도시(20.45°C) > 수체(19.98°C) > 밭(19.41°C) ≈ 논(19.29°C) > 산림(19.07°C)으로, 냉기류 모델의 a 값 체계(도시·수체는 낮은 a 를 가져 약한 냉기 생성, 개방 농경지는 높은 a 를 가져 강한 냉기 생성)와 전반적 방향이 일치한다. 특히 도시($a=0.15\sim0.40$)가 도메인 평균(19.20°C)보다 1.25 K 따뜻한 야간 도시열섬(UHI) 효과가 명확히 확인된다.

그러나 여름 담수 논(19.29°C)과 밭(19.41°C) 간 LST 차이는 -0.1 K로, 독립표본 t -검정 결과 통계적으로 유의하지 않다($t=0.31$, $p=0.76$). 이는 MODIS 1 km 격자 내 논 면적 비율이 평균 63%에 불과하여 담

수면의 열관성 신호가 혼합 화소(mixed pixel) 효과로 약 37% 희석되었기 때문으로 추정된다. 게다가 밭 기준 픽셀($n=18$)의 소표본 문제도 기준값의 불확실성을 증가시킨다. 따라서 담수 논 $a=0.17$ 의 MODIS 기반 직접 위성 검증은 불가능하며, 향후 Landsat (30 m) 등 고해상도 열적외선 자료가 필요하다. 실제로 Liu *et al.* (2022)이 보고한 담수 논-밭 야간 LST 차는 담수 초기(5~6월) 1.4~1.7 K에서 생육 후기(7~9월) 0.3~0.6 K로 크게 감소한다. 본 연구의 여름 합성 창(7~8월)은 이 저신호 구간에 해당하며, 여기에 약 37%의 혼합 화소 희석을 적용하면 기대 신호는 0.2~0.4 K 수준으로 MODIS 1 km 자료의 검증 한계에 근접한다. 따라서 본 연구에서 유의한 차이가 나타나지 않은 것은 담수 논의 열관성 효과가 없기 때문이 아니라, 관측 해상도와 시기의 제약에 기인한 것으로 판단된다.

한편 여름과 달리 겨울의 경우, 건조 논(-6.11°C)은 밭(-5.70°C)보다 0.4 K 차가운데, 혼합 화소 효과 범위 내의 미소한 차이로 사실상 유사한 냉각 특성을 보인다. 건조 논에 $a=0.83$ (밭 $a=0.80$ 과 유사)을 부여한 것과 방향이 일관된다.

Table 10. MODIS nighttime LST comparison by land use (Yeoju Basin, 2019~2023, 5-year mean).

Land use	n	Summer LST (°C)	Δ LST vs dry crop	Winter LST (°C)	Δ LST vs dry crop	Model a value
Rice paddy (flooded)	903	19.29	-0.1			0.17
Rice paddy (dry)	903			-6.11	-0.4	0.83
Upland crop	18	19.41	0.0 (ref)	-5.70	0.0 (ref)	0.80
Forest	614	19.07	-0.3	-5.30	+0.4	0.56
Urban	48	20.45	+1.0	-5.24	+0.5	0.15~0.40
Water	3	19.98	+0.6	-5.82	-0.1	0.00

Note: Δ LST = land-use LST - upland crop LST (K). Summer rice paddy vs upland crop difference (-0.1 K) is not statistically significant ($t=0.31$, $p=0.76$); mixed pixel effect estimated ~37% signal dilution. Upland crop $n=18$ is small; caution regarding reference value representativeness.

Table 11. Seasonal valley-hilltop nighttime LST gradient in Yeoju Basin (MODIS MOD11A2, 2019~2023).

Season	Valley LST (°C)	Hilltop LST (°C)	Δ LST (K)	Model consistency
Summer (Jul~Aug)	19.32	18.68	+0.6	$a=0.73$ (weak cooling, no inversion)
Autumn (Oct~Nov)	-0.70	2.76	-3.5	$a=0.95$ (strong inversion)
Winter (Jan~Feb)	-6.13	-5.08	-1.1	$a=1.08$ (inversion)
Spring (Apr~May)	11.90	12.39	-0.5	$a=1.00$ (weak inversion)

Note: Δ LST < 0 = valley colder than hilltop (cold air accumulation). Δ LST > 0 = valley warmer (normal lapse rate).

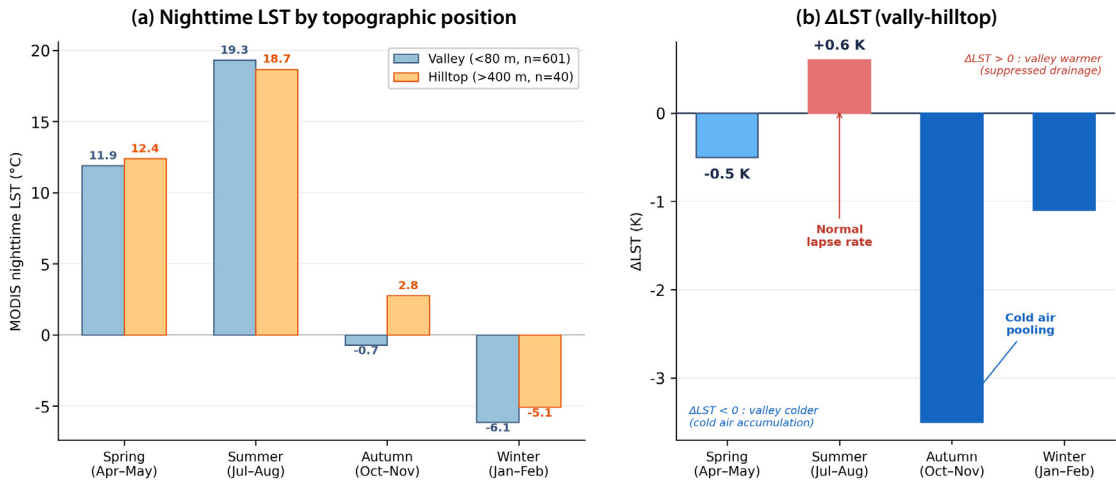


Fig. 9. Seasonal variation of valley-hilltop nighttime LST gradient in the Yeosu Basin (MODIS MOD11A2, 2019~2023). (a) LST by topographic position, (b) Δ LST showing cold air pooling (negative) in non-summer seasons.

3.8.2 하곡-산정 야간 LST 구배의 계절 변화

그림 9와 표 11은 여주 분지 내 하곡(남한강 범람원, 고도 < 80 m; n = 601)과 산정(고도 > 400 m; n = 40) 픽셀 간 야간 LST 차이를 계절별로 정리한 것이다. 가장 주목할 결과는 여름과 비여름의 명확한 대비이다. 여름($\alpha = 0.73$)에는 하곡(19.32°C)이 산정(18.68°C)보다 0.6 K 따뜻하여, 정상 환경감률이 지배하고 냉기 축적이 억제되었음을 보여준다. 반면, 가을(Δ LST = -3.5 K), 겨울(-1.1 K), 봄(-0.5 K)에는 하곡이 산정보다 차가운 온도역전이 나타나, 야간 냉기배수에 의한 하곡 냉기 축적을 확인하였다. 특히 가을의 역전이 겨울보다 강한 것은 주목할 만하다. 이는 가을(10~11월)이 장마 후 건조기로서 맑은 밤의 빈도가 높고, 아직 지표 온도가 상대적으로 높아(도메인 평균 0.3°C) 복사냉각에 의한 하곡-산정 온도차가 극대화될 조건을 갖추기 때문으로 해석된다. 겨울에는 $\alpha = 1.08$ 로 단위면적당 냉기 생성률은 더 크지만, 극저온 조건(도메인 평균 -5.7°C)에서 복사 평형까지의 온도 강하 여유가 작아 Δ LST의 절대값은 오히려 감소한다. 또한 겨울 MODIS 8일 합성에 적설·박무 조건이 일부 포함되어 역전 신호가 희석되었을 가능성도 있다.

4. 결 론

4.1 연구 성과

본 연구는 독일 냉기류 모델 KLAM_21을 한국 기상 조건에 적용하기 위한 핵심 매개변수(최대 열손실률 $P_{\max}$) 조정의 물리적 근거와 MODIS 야간 지표온도(LST) 패턴과의 관측 일관성을 다음과 같이 제시하고 확인하였다.

첫째, Stefan-Boltzmann 법칙과 Brunt 경험식을 적용한 한-독 비교 결과, 한국 여름철의 순 장파복사 손실은 독일 대비 30% 적고, 겨울철에는 12% 많았다. 통계 비교와 실측 비교를 병행하여 수증기 효과와 기온 효과를 분리 분석함으로써 조정계수의 물리적 근거를 강화하였다.

둘째, 계절별 열손실률 조정계수(봄 1.00, 여름 0.73, 가을 0.95, 겨울 1.08)를 도출하였다. 여름과 가을에는 한국의 높은 수증기량이 복사냉각을 억제하고($\alpha < 1$), 겨울에만 시베리아 고기압에 의한 건조함이 냉각을 강화한다($\alpha > 1$). 스케일링 분석 결과, 이 조정은 냉기층 깊이에 0~19%, 배수풍 풍속에 0~10%의 변화를 유발한다.

셋째, KLAM_21-K 수치 시뮬레이션(여주 분지, 8시

간)에서 한국형 여름 처리($\alpha=0.73$, 담수 논 $a=0.17$)를 독일 원형 처리(논=일반 농경지 $a=0.80$)와 대조한 결과, 분지 평균 냉기층 깊이가 -25.1% ($15.14 \rightarrow 11.34$ m), 배수풍 풍속이 -11.0% ($0.288 \rightarrow 0.256$ m/s) 감소함을 확인하였다. 이 -25.1% 는 α 만의 스케일링 예측(-18.9%)을 6.2%p 상회하며, 그 초과분은 한국형 담수 논의 야간 냉각 억제 효과를 정량화한 것이다.

넷째, MODIS 야간 LST 패턴 분석을 통해 매개변수 조정의 물리적 타당성을 독립 관측 자료를 통해 확인하였다. 토지이용별 분석에서 여름 야간 LST는 도시 > 수체 > 농경지 > 산림 순으로, 모델의 a 값 체계와 전반적으로 일치하였다. 하곡·산정 LST 구배는 여름에 정상감률($\Delta LST = +0.6$ K), 가을·겨울·봄에 온도역전($\Delta LST = -3.5 \sim -0.5$ K)을 보여, 냉기 축적의 계절 변동이 조정계수의 물리적 방향성과 일치함을 독립적으로 확인하였다.

다섯째, 논·아파트 단지 등 한국 특유 토지이용에 대한 물리적 매개변수를 제안하고, 환경부 중분류 토지피복지도와의 대응표를 개발하여 환경영향평가 실무에서의 표준화된 적용 기반을 마련하였다.

4.2 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다.

첫째, 열손실을 조정계수는 순 장파복사 손실 비율에 기초하며, 현열·잠열·지중열 플럭스를 명시적으로 고려하지 않았다. 다만 맑고 바람이 약한 야간(CAD 최적 조건)에 장파복사가 총 에너지 손실의 70~90%를 차지하므로 본 연구의 접근은 합리적임에도 여전히 불확실성은 존재한다.

둘째, MODIS LST 기반 일관성 확인은 지표면 온도(skin temperature)의 공간 패턴을 활용한 정성적 비교이며, 냉기층 깊이(H)나 배수풍 속도(v)의 정량적 검증은 아니다.

특히 MODIS 1 km 해상도에서 담수 논의 열적 신호는 혼합 화소에 의해 희석되며, 밭 기준 픽셀($n=18$)의 소표본 문제도 존재한다.

셋째, α 를 복사 비교로 도출하고 MODIS LST (복사

과정의 결과)로 일관성을 확인하는 구조는 동일 물리 과정의 입·출력을 비교하는 측면이 있어, 완전한 독립 검증으로 보기 어렵다. 향후 드론 열화상, 지상 AWS, 테더존데 등 복사 과정과 독립적인 관측변수(2 m 기온, 냉기층 깊이)를 활용한 정량적 검증이 필요하다.

넷째, 수원-프랑크푸르트 비교는 한국 전체를 대표하지 않으며, 다양한 기후대에서 별도 비교가 필요하다. 구체적으로 (a) 서해 연안(인천·목포) 같은 해양성 수증기 증가로 여름 α 가 0.73보다 낮은 유형, (b) 동해안(강릉·포항)과 같이 된 효과로 건조하여 α 가 수원보다 높을 유형, (c) 내륙 산악(대관령)과 같이 기온 효과 지배, 수증기 효과가 미비한 유형 등이 있다. 이와 같은 지역 편차의 정량화는 향후 다지점 비교 연구가 필요하다.

다섯째, 하곡·산정 구배 분석에서 가을 역전이 겨울보다 강한 것은 계절별 α 크기 순서(겨울 $1.08 >$ 가을 0.95)와 완전히 일치하지 않는다. 이는 MODIS 8일 합성의 계절별 구름 혼입 차이 및 복사냉각의 비선형적 온도 의존성이 추가적 물리 과정으로 작용함을 시사하며, 단순 α 스케일링으로는 포착되지 않는 영역이다.

향후 연구에서는 여주시에서 테더존데 및 다지점 AWS 관측을 통한 정량적 검증을 수행하고, 분지(수원), 해안(포항), 산악계곡(창원) 등 다양한 지형 조건으로 확장하여 매개변수를 정밀 보정할 계획이다.

Code and Data Availability

KLAM_21-K Python 구현 코드, QGIS 플러그인, 비오톱 연계표는 GitHub 저장소(<https://github.com/vomseok/klam21-korea>)에서 MIT 라이선스로 공개 예정이다. 본 연구에 사용된 기상 원시 자료는 다음에서 접근 가능하다: 한국 수원(119) ASOS 월별 자료(<https://data.kma.go.kr>), 독일 프랑크푸르트(01420) 일별 KL 자료(https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/his)

torical/). MODIS MOD11A2 야간 LST 자료는 Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>)을 통해 접근 가능하다.

References

- Brunt, D. (1932) Notes on radiation in the atmosphere, I, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 58, 389-418. <https://doi.org/10.1002/qj.49705824704>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2025) Daily climate observations (KL product) for station 01420 (Frankfurt/Main-Flughafen, WMO 10637), 1991-2020, DWD Climate Data Center. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/ (accessed on Mar. 7, 2026).
- Jung, W., Kim, G. (2024) Reduction of fine dust and alleviation of heat island effect: an analysis of cold air flow in Pohang City, South Korea, Land, 13(3), 347. <https://doi.org/10.3390/land13030347>
- Kim, Y.H., Baik, J.J. (2002) Maximum urban heat island intensity in Seoul, Journal of Applied Meteorology, 41, 651-659. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2)
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) ASOS monthly climate data for station 119 (Suwon), 1991-2020, Korea Meteorological Administration Open Data Portal. <https://data.kma.go.kr> (accessed on Mar. 7, 2026).
- Kossmann, M., Sturman, A.P. (2004) The surface wind field during winter smog nights in Christchurch and coastal Canterbury, New Zealand, International Journal of Climatology, 24, 93-108. <https://doi.org/10.1002/joc.981>
- Kwon, Y.J., Lee, D.K. (2019) Thermal comfort and longwave radiation over time in urban residential complexes, Sustainability, 11(8), 2251. <https://doi.org/10.3390/su11082251>
- Liu, W., Dong, J., Du, G., Zhang, G., Hao, Z., You, N., Zhao, G., Flynn, K.C., Yang, T., Zhou, Y. (2022) Biophysical effects of paddy rice expansion on land surface temperature in Northeastern Asia, Agricultural and Forest Meteorology, 315, 108820. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108820>
- Masson, V. (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Boundary-Layer Meteorology, 94, 357-397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Guidelines on the preparation of urban ecological maps (biotope maps), Ministry of Environment Notification No. 2019-47, Sejong, Korea, (in Korean). <https://www.law.go.kr/LSW/adm-RulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000176310> (accessed on Aug. 7, 2026).
- Oke, T.R. (1987) Boundary Layer Climates, 2nd ed., Routledge, London, U.K., 435pp. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- Sachsen, T., Ketzler, G., Knörchen, A., Schneider, C. (2013) Past and future evolution of nighttime urban cooling by suburban cold air drainage in Aachen, Die Erde, 144(3-4), 274-289. <https://doi.org/10.12854/erde-144-19>
- Sievers, U. (2005) Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21: Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 227, Offenbach am Main, Germany, 101pp, (in German). <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201207186729>
- Sievers, U., Kossmann, M. (2016) The cold air drainage model KLAM_21 - model formulation and comparison with observations, Weather and Climate, 36, 2-24. <https://doi.org/10.2307/26779385>
- Song, B., Park, K. (2023) Mountain valley cold air flow interactions with urban morphology: a case study of the urban area of Changwon, South Korea, Landscape and Urban Planning, 233, 104703. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104703>
- Wan, Z. (2014) New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product, Remote Sensing of Environment, 140, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>

Author Information & Contribution

권용석 (경북연구원 공간환경연구실 연구위원, kwony@gdi.re.kr) Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing