

# 열쾌적성 등급 분류도의 작성 가이드(안)

## 제1장 총칙

### 제1절 지침의 목적

이 지침은 「환경정책기본법」 제4조제3항, 제18조 및 제19조 등에 따라 「지자체 환경보전계획」을 공간계획으로 수립할 때 필요한 열환경 분야 공간환경 정보지도의 효율적이고 실효성 있는 작성과 운영을 위한 방법 및 기준을 정하는 데 그 목적이 있다.

### 제2절 열쾌적성 등급 분류도의 의의

열쾌적성 등급 분류도는 쾌적한 도시 열환경 조성과 도시 지역의 기후변화 적응을 위하여 도시 열환경 현황을 분석하고 관리 전략을 도출하여 지도화 함으로써 도시계획 수립에 필요한 기초자료로 활용할 수 있다.

### 제3절 용어의 정의

이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

1. “도시기후구역(LCZ, Local Climate Zone)”이라 함은 도시 내 동일한 기후를 지닌 지역으로 건물유형과 피복상태에 따라 분류하고 이를 건축물의 높이와 밀도에 따라 세분화하여 기후적 특성에 따라 유형화한 공간이다.
2. “미기후 실측”이라 함은 도시기후구역을 설정하기 위하여 도시기후를 대표할 만한 지점에서 태양 및 지구복사에너지(단파, 장파), 기온, 상대습도, 풍향, 풍속의 미기후를 측정하는 것을 말한다.
3. “지점”이라 함은 측정 장소를 의미하며, 단일 또는 다수의 측정지점으로 구성될 수 있다.
4. “인간 열쾌적성 지수”는 인체로 흡수되는 에너지양과 인체로부터 주변 환경으로 방출되는 에너지양을 정량적으로 계산하여 열생리학적으로 인간이 느끼는 반응을 분석하여 수치화한 것을 말한다. 본 지침에서는 PET(Physiological Equivalent Temperature) 지수를 따른다.

5. “열쾌적성 등급”은 이 지침에 한정하여 여름철 인간이 체감하는 더위를 쉽게 알 수 있도록 하고 폭염으로부터 피해를 예방하기 위한 환경계획을 수립하기 위하여 개발된 인간 열쾌적성 지수의 등급 표현방식이다.

6. “열쾌적성 등급 분류도”는 도시기후구역별 열쾌적성 등급을 지도형태로 표현한 것을 말한다.

7. “도시기후구역별 공간 및 토지피복 속성”은 하늘시계지수, 건축물간 거리-높이비, 건폐율, 불투수율, 투수율, 건물 등의 높이, 지형거칠기 등으로 각 도시기후구역의 미기후에 영향을 주게 되어 그 지역만의 독특한 열환경을 형성한다.

8. “하늘시계지수”는 하늘을 가리는 장애물들의 영향을 계량화한 지수(SVF, sky view factor)로 어안렌즈, 소프트웨어적인 가상화, GPS(global position system) 신호 등 다양한 기법들을 통해 측정할 수 있다.

9. “건축물간 거리-높이 비”는 각 도시기후구역의 건축물, 수목 등의 평균 높이와 건축물, 수목간의 거리의 비(aspect ratio)를 말한다. LCZ 1-7 경우 평균 건물높이와 거리협곡의 비, LCZ 8-10 경우, 건물높이와 건물간격의 비, LCZ A-G 경우 수목 높이와 수목간 거리의 비를 말한다.

10. “건폐율”은 건축면적의 대지면적에 대한 비율이다.

11. “불투수율”은 각 지역 면적 중 포장이나 건물 등으로 덮여서 빗물이 침투할 수 없는 불투수면적의 비율이다.

12. “투수율”은 각 지역 면적 중 토양, 식생, 수역 등이 투수면적의 비율이다.

## 제2장 열쾌적성 등급 분류도 작성 방법

열쾌적성 등급 분류도 작성 방법은 크게 ① 도시기후 분석 모델을 활용하는 방법, ② 토지피복 등을 고려해 도시기후구역을 구분하고 기상실측을 통해 등급을 부여하는 방법, ③ 토지피복을 고려해 도시기후구역 구분하고 국내외 사례 연구를 참조하여 등급을 부여하는 방법 등으로 구분할 수 있다.

① 도시기후 분석 모델을 활용하는 방법은 다양한 기후 분석 모델을 활용해 과학적으로 기상요소의 공간분포를 예측하는 방법으로 예산과 전문 인력이 충분한 경우 적용 가능하며 바람길 모의, 개발사업의 영향평가 등 보다 심도있는 분석에 활용 가능하다.

② 도시기후구역 구분과 기상실측을 활용하는 방법은 토지피복, 건물이나 수목의 높이와 간격 등을 활용해 기후구역을 구분하고, 각 기후구역별로 열쾌적성 관련 기상 요소(온도, 습도, 풍속, 복사에너지 등) 실측과 열스트레스 지수 산출을 통해 기후구역별로 열쾌적성 등급을 부여하는 방법이다. 실측자료를 기반으로 현지 환경에 맞는 열쾌적성 평가가 가능한 반면, 동시에 장비를 활용해 여러 지점에서 측정이 이루어져야 하므로 많은 인력, 장비, 예산, 시간 등이 소요된다.

③ 도시기후구역 구분과 국내외 사례 연구를 참조하는 방법은 기상실측을 활용하는 방법과 마찬가지로 토지피복 등을 활용해 기후구역을 구분한다. 국내외에서 이루어졌던 기후구역별 사례 연구 결과를 바탕으로 기후구역별 열쾌적성 등급을 추정한다. 기후분석모델이나 기상실측을 수행할 예산이나 인력 등이 충분하지 않은 환경에서 대략적이거나 열쾌적성의 공간 분포 현황을 추정해 볼 수 있으며 지표온도지도, 바람장지도, 방향(aspect) 등의 자료를 보조적으로 활용하여 열쾌적성이 나쁠 것으로 우려되는 지역을 탐색할 수 있다.

### 제1절 도시기후 분석 모델을 활용한 열쾌적성 등급 분류도 작성

기상예측모델을 적용하면 제한된 기상실측지점(기상관측소, AWS 등)의 자료를 이용해 온도, 바람 등 기상요소의 공간 분포를 모의할 수 있다. 여기에 건물 외 높이, 형태, 배치 등으로 인한 바람의 변화를 모의할 수 있는 morphological model, 복사에너지의 변화를 모의할 수 있는 SOLWEIG 모델 등의 상세분석모델을 추가적으로 적용하면 바람이나 복사에너지의 국지적 변화를 예측할 수 있다. 온도, 습도, 풍속, 복사에너지 등의 기상요소를 활용해 열스트레스 지수로 환산하게 되면 열쾌적성을 등급별로 구분하여 지도를 그리는 데 활용할 수 있다.

주요 기상예측모델로는 CAS, UMEP, Envi-met, CALMET 등을 들 수 있으며, 각 모델의 특징과 도시기후분석을 위한 상세분석모델은 다음과 같다.

#### 1. CAS(Climate Analysis Seoul)

- CAS(Climate Analysis Seoul) 모델은 국립기상과학원이 독일 베를린 공대와 공동 개발한 도시기후분석 모델이다. 도시의 지면 정보 및 구조를 반영하여 다양한 도시기후 요소의 공간적 분포 특성을 분석하고, 전자 지도로 산출물을 만들 수 있다(이채연 등, 2011; 이지수 등, 2015; 국립기상과학원, 2015). CAS(version 2014)에서는 국지규모의 도시기후 변화를 예측하는데 중규모 기상모델인 MetPhoMod(METEorology and atmospheric PHOtochemistry mesoscale MODel), SOLWEIG(SOLar and long-Wave Environmental Irradiance Geometry)를 사용한다.
- CAS 모델은 수치 표고 모델(Digital Elevation Model; DEM), 토지 피복 자료를 주요 입력자료로 사용한다. 항공우주연구원의 KOMSAT-2 MSS 영상, 국토지리정보원의 항공 라이다(Light Detection and Ranging, LiDAR)를 이용해 DEM을 생성할 수 있으며, 환경부의 토지피복도, 지자체 도시행태현황지도의 토지피복 자료를 입력자료로 활용할 수 있다. CAS 분석으로 고도, 토지피복 등 도시 지표면 현황분석 결과를 산출할 수 있으며, MetPhoMod 및 SOLWEIG 모의결과를 바탕으로 바람의 흐름, 열환경 등의 결과를 산출할 수 있다.
- MetPhoMod는 기상, 대기의 화학적 변화를 계산하기 위한 3차원 기상

모델이다. 중규모의 바람장, 온도장 산출하기 위하여 사용된다. CAS에서는 MetPhoMod 구동에 필요한 다양한 입력자료를 생성하기 위한 전처리 작업과 모의결과를 확인하고 이를 지도화하는 작업이 이루어진다.



그림 1. MetPhoMOD simulation : 상대 온도 (좌: Base case, 우: Scenario case)

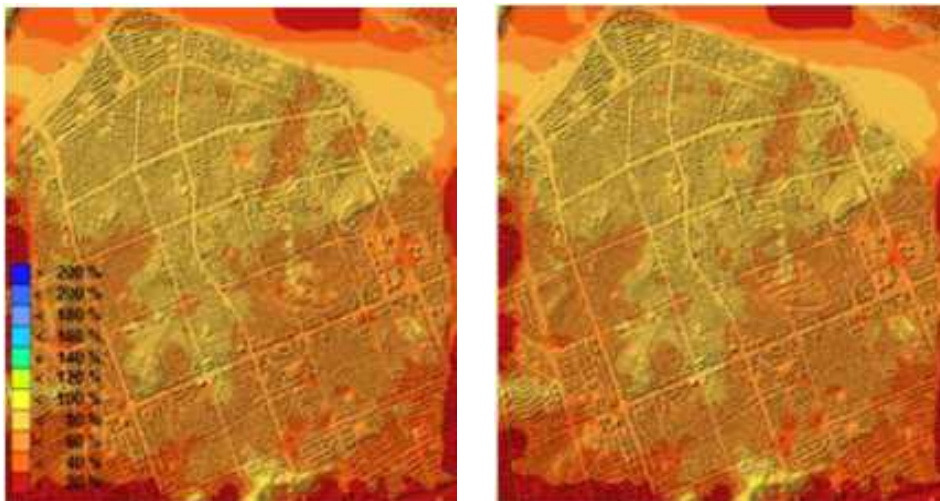


그림 2. MetPhoMOD simulation : 상대 풍속 (좌: Base case, 우: Scenario case)

출처: 국립기상과학원(2015)

- SOLWEIG는 태양복사모델로 3차원 복사플럭스와 평균 복사온도를 산출한다 (Lindberg and Grimmond, 2011; 국립기상과학원, 2015). 태양 고도에 따른 시간별 그림자 효과, 하늘시계지수(Sky View Factor; SVF), 개별 건물의 위

치 및 높이 정보를 이용하여 인간의 열쾌적도를 파악할 수 있는 고해상도 평균복사온도를 산출한다. CAS에 결합된 SOLWEIG는 모의 분석을 위해 필요한 입력자료를 따로 생성할 필요없이 CAS에서 사용되는 자료를 이용한다.

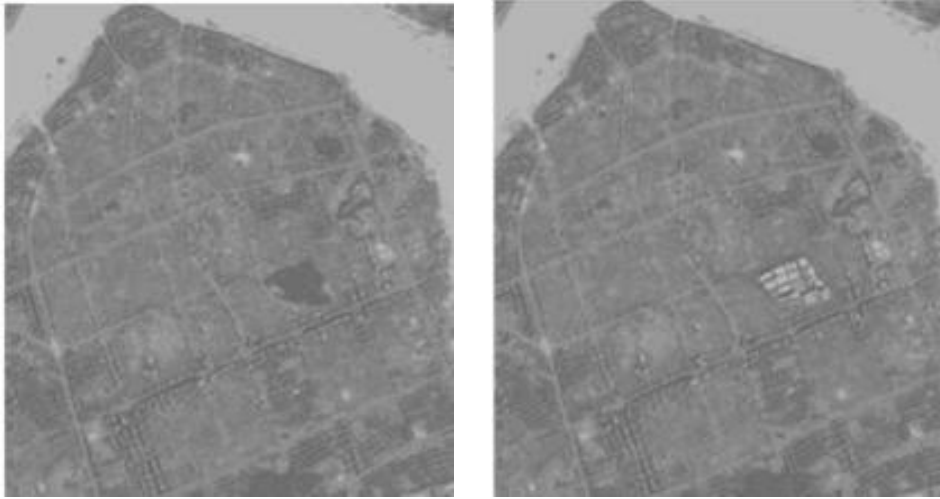


그림 3. SOLWEIG simulation : 주간 평균복사온도 (좌: Base case, 우: Scenario case)

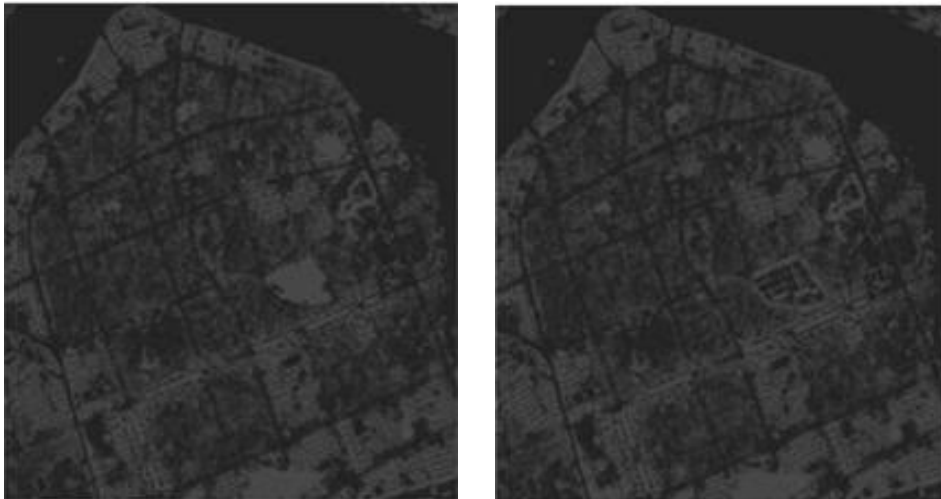


그림 4. SOLWEIG simulation : 야간 평균복사온도 (좌: Base case, 우: Scenario case)

출처: 국립기상과학원(2015)

- CAS는 도시의 지면 정보 및 구조를 반영하여 다양한 도시기후요소의 공간적 분포 특성을 손쉽게 분석 및 평가할 수 있다는 장점이 있지만, 추후 실제 관측자료를 활용한 검증과정이 필요하다.

## 2. UMEP(Urban Multi-scale Environmental Predictor)

- UMEP(Urban Multi-scale Environmental Predictor) 모델은 건축가, 도시계획가, 기후학자 등을 위하여 오픈 소스로 개발된 기후 서비스 모델이다. 모델의 주요 특징 중 하나는 공간 정보를 모델 매개변수로 결정하고, 입력변수와 결과를 편집하고, 시각화할 수 있다는 것이다. 그래서 이 모델은 QGIS 플러그인으로 구성되어 있다. 도시 에너지 소비, 기후 변화 완화 등 다양한 분야에 사용될 수 있다.
- UMEP는 Pre-Processor(기상 및 지표 정보 입력), Processor(Urban Land Surface Model 등 모델링 단계), Post-Processor(개별사례 및 융합 결과, 통계 계산 등)의 세 단계를 거친다. 이와 같은 과정을 통해서 다양한 대기 및 지표 관련 자료를 수집하고, 재분석을 하거나 기후를 예측할 수 있다. 그리고 다양한 기후 지표(열 지수, 강도 높은 강수량, 물/에너지 수요 등) 예측 결과를 시나리오에 따라 비교 및 시각화할 수 있다.
- Pre-Processor 과정은 기상자료, 지표 자료 등 모델 입력자료를 준비하는 과정이다.
- Processor 과정에서 실외 열환경 및 태양복사에너지, 그림자, 도시 에너지 수지 과정을 모델링하며, SUEWS(Surface Urban Energy and Water balance Scheme) 모델링으로 에너지와 물 플럭스를 시뮬레이션한다.
- Post-Processor 과정에서는 모델 결과 자료 중 관심지점에 대한 시계열 자료, 공간장 정보를 제공한다. 후처리 분석은 실외 열환경 분석이 SOLWEIG 모델과 태양 복사 분석을 위한 SEBE, 그 외 SUEWS 분석으로 나뉜다. SOLEIG는 주로 평균적인 자료를 생산하는데 사용되며, SEBE는 플러그인 모델에 의하여 생성된 결과를 3D로 출력하는 게 사용된다. SUEWS는 플러그인에 의하여 생성된 모델 결과에 대하여 기본 분석을 한다.

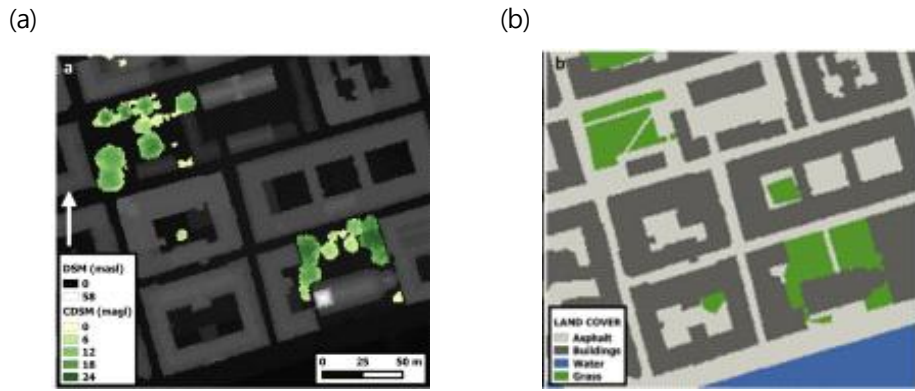


그림 5. SOLWEIG 입력자료 (a) 수치표면지도 (b) 토지피복지도

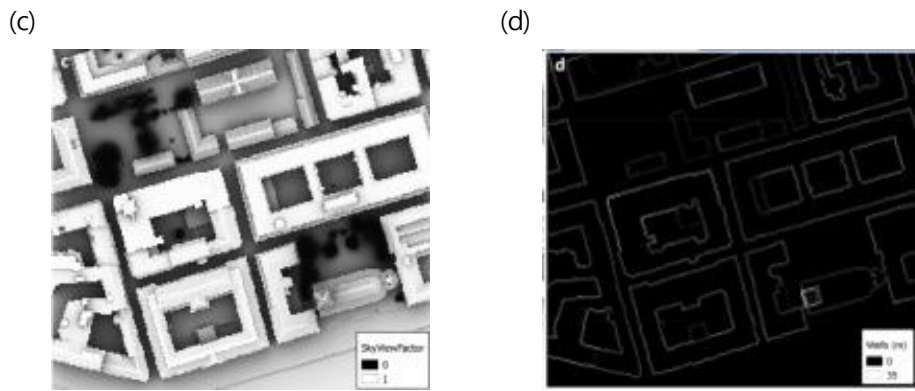


그림 6. SOLWEIG 입력자료 (c) 하늘시계지수 (d) 건물 높이와 기울기

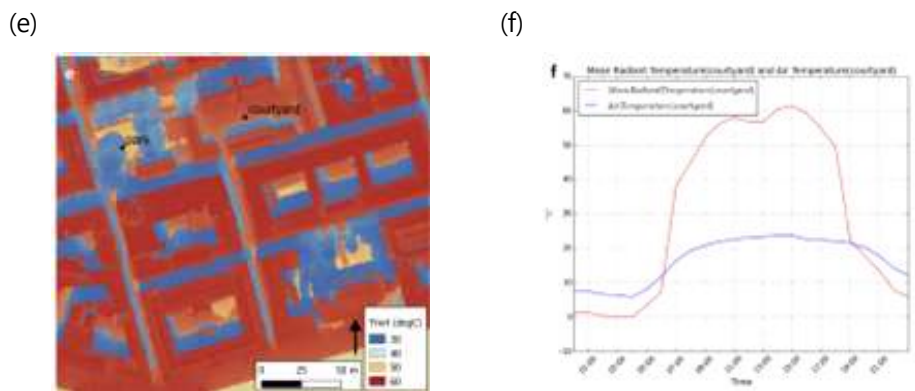


그림 7. SOLWEIG 결과 자료 (e) 오후 1시 평균복사온도 (f) 매시간 평균복사온도와 기온

출처: Linberg et al.(2018)

### 3. Envi-met

- Envi-met 모델은 독일에서 개발된 3차원 미기상 모델로, 지표면, 구조물, 식생 정보를 입력하여 기류, 온도, 복사에너지, 습도, 유체 흐름 등을 예측할 수 있다. 공간해상도 0.5~10m로(송봉근 외, 2014), 도시지역의 지표면, 건물, 식생 및 대기의 상호작용에 관한 미세규모 모델이다.
- 세밀한 미기후 변화를 모델링 할 수 있어 도시지역 고층건물에 의한 주변 주거지역의 미기후를 모델링할 수 있는 장점이 있다(Wilson, 1988; Taesler and Anderson, 1984; 유병로와 고은아, 2010). 또한 도시지역 수 km 이내의 국지 기후변화를 예측할 수도 있는 모델로 3차원 바람장 계산을 수행할 수 있다.
- 대기모델, 식생모델, 토양모델, 그리고 지면과 건축물에 관한 식으로 구성되어 있다. 대기모델은 공기의 평균 흐름, 난류, 복사과정을 고려하여 계산된다. 식생모델은 열과 수증기의 난류흐름, 기공저항, 잎의 에너지 평형식, 식생/토양 물수지 등에 계산된다. 토양모델은 지면으로부터 2m 깊이까지 계산한다. 또한, 지표면과 건축물에 대하여 복사속도, 난류속도, 열속도 등을 고려한다.
- 입력자료로 Area input file과 Configuration file이 있다. Area input file은 대상 지역의 지리적 위치, 건물 높이 및 배열, 지표면 피복 유형, 식생 유형, 토양, 등이다. Configuration file은 모델링 초기 기상 상태, 모델링 시기 등이다.
- 모델 결과는 전용 프로그램으로 시각화할 수 있으며, Ascii 형태로도 추출할 수 있다.

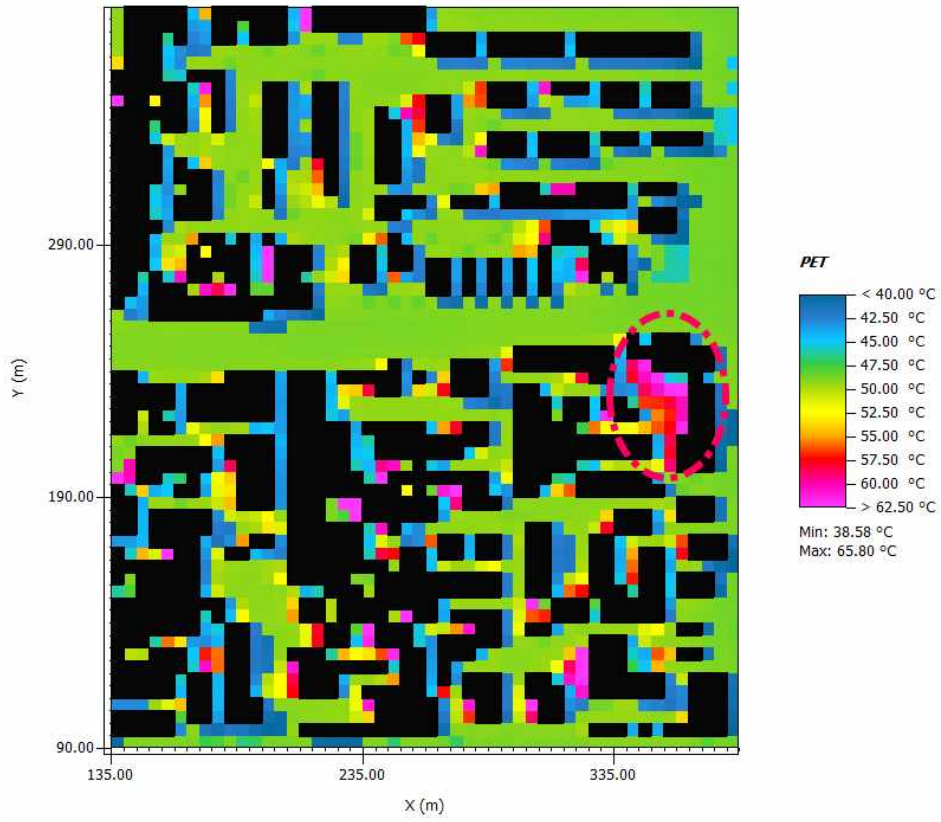
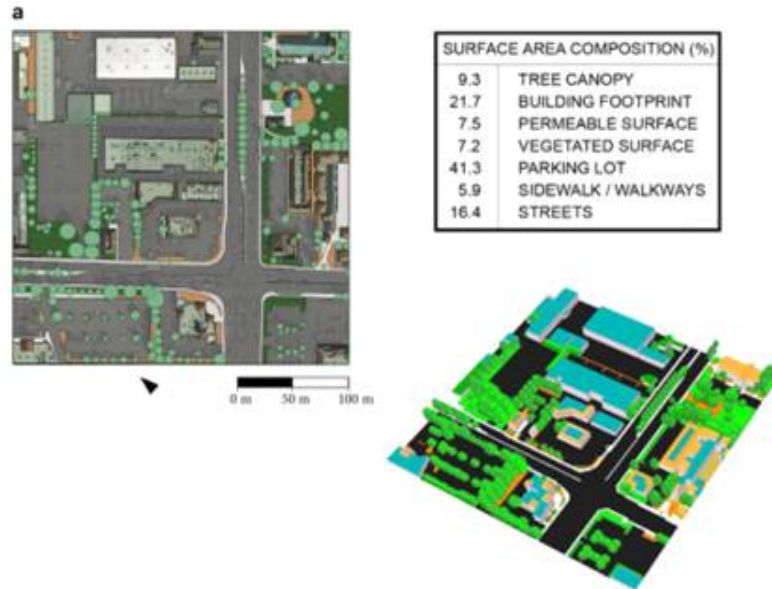


그림 8. Envi-met을 활용한 뉴욕시 PET 분석 결과

출처: Envi-met.com



(a) 현재의 지표면 상태



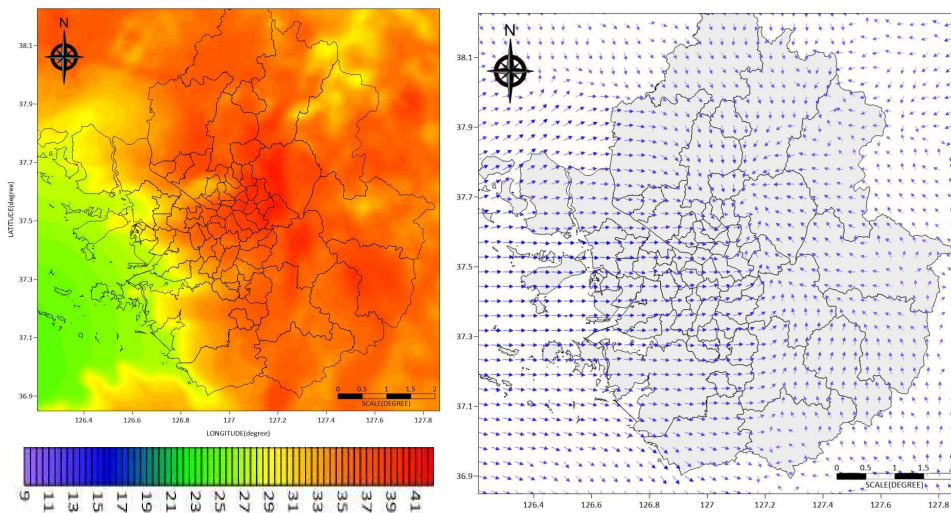
(b) 열완화 전략 적용 후의 지표면 상태

출처: MacRAe et al.(2020)

그림 9. Envi-met 을 이용한 지표의 토지이용/피복 모델링 결과

#### 4. CALMET

- CALMET(California Meteorological Model)은 대기질 예측 모델인 CALPUFF(California Puff Model)을 수행하기 위하여 실측 기상자료를 토대로 임의의 지점의 기상요소(온도, 바람, 상대습도 등)를 산출하는 진단기상장모델이다.
- 다른 모델에 비해 작고 가벼워 윈도우즈와 리눅스 환경에서 모두 수행이 가능하며, CAS나 독일의 KLAM\_21, MUKLIMO-3 등의 모델과는 달리 라이선스 계약 없이 자유롭게 활용할 수 있다.
- 수도권기상청(2017, 2019)에서 수도권 지역의 2014~2018년 상세 온도장 및 바람장 생성에 사용된 바 있으며, 국립환경과학원(2017)의 기후분야 정밀공간환경정보지도 작성지침에서 청주시의 바람장 지도를 시범 제작할 때 사용된 바 있다.



출처: 수도권기상청(2019)

그림 10. CALMET을 활용한 2018년 8월 1일 15시의 기온(좌)과 바람(우) 분포

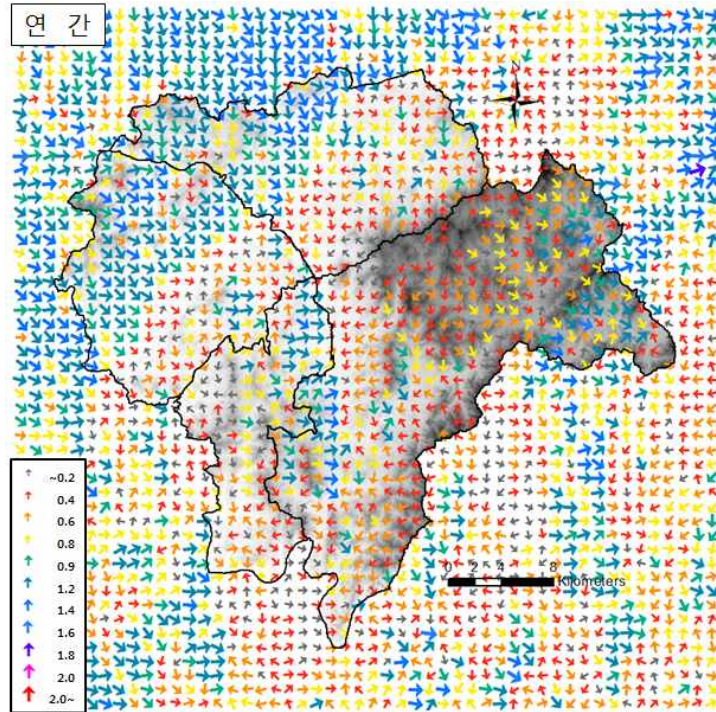


그림 11. CALMET을 활용한 청주시 바람장 지도(국립환경과학원, 2017)

- CALMET 모델만으로는 건물의 배치와 높이, 간격 등의 효과를 반영하기 어렵기 때문에 국지적인 바람길 모델링을 위해서는 Morphological model을 적용한다. 이 모델은 일정 거리 이내의 인접 건물형상에 대한 통계량을 바탕으로 도시 캐노피층의 유동장과 캐노피층 이상의 경계층 유동장과 결합하여 해석하는 모델이다. 개별 건물들 사이의 유동해석까지 수행하는 모델들과 달리 윈도우즈 환경에서도 운용이 가능하며 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다.
- CALMET-Morphological model의 장점에도 불구하고, 건물 정보를 반영한 복사 flux와 그림자패턴, 평균 복사온도의 시공간적 변화를 모의하기 위해서는 별도의 도시 열환경 분석 모델이 필요한데, CAS나 UMEP에 연계되어 있는 SOLWEIG 모델의 적용이 필요하다.

### 5. 모델별 장단점 비교 및 적합한 모델 선정

- 광주지방기상청에서 분석한 각 모델의 장단점과 적용 가능성은 표 1, 표 2 및 그림 12과 같다. (광주지방기상청, 2020)

표 1 국내외 도시기후 분석모델의 장·단점

모델	장점	단점
CAS (MetPhoMod, SOLWEIG)	- 입력자료-기상예측모델-후처리가 한 시스템으로 구동 - 고해상도 도시정보 적용 가능 - 윈도우즈 구동 가능	- 장시간의 모델링 수행 - 기상예측모델은 별도로 수행 - 민간 사용자에게 배포되지 않음
WRF-UCM	- 상세 도시효과 기상 예측 가능 - 도시 공간정보의 쉽게 적용 가능 - 예측성능	- 많은 컴퓨터 자원이 필요 - 모델 수행에 전문적인 지식 필요
CALMET	- 쉬운 자료 적용 : Ascii 형식 - 윈도우즈/리눅스 환경 - 가벼운 모델 구조	- 도시 공간 효과 적용되지 않음 - 100m 이하에서는 낮은 예측성
CALMET- Morphological model	- 도시 공간 효과 적용 가능 - 윈도우즈/리눅스 환경 - 가벼운 모델 구조 - 초고해상도의 예측 수행 가능	- CFD에 비해 유동 해석률이 낮음
KLMA_21	- 초고해상도의 예측 수행 - 도시계획을 위해 개발된 모형 - 윈도우즈 기반의 모델	- 라이선스 구입 - 건물의 입체성 고려하지 않음 - 찬공기 흐름만 고려
UMEP	- 오픈소스 GIS 기반 모델 : QGIS - 소스코드 수정 가능 : 파이썬 사용 - 입력자료-기상예측모델-후처리가 한 시스템으로 구동 - 다양한 공간지표 자료 적용 가능 - 예측 결과의 평균 등 통계자료 제공	- 짧은 예측 시간(5분) - QGIS 플러그인을 통해서만 모델 수행이 가능
Envi-met	- 윈도우즈 기반의 모델 - 초고해상도 기상 예측 가능 - 공간구조 및 지표자료의 쉬운 적용성	- PC 사양에 따른 모델 수행 시간 영향 받음 - 무거운 모델 구조
MUKLIMO_3	- 건물, 단지 개별적 시뮬레이션 가능 - 기상과 건물 복사 및 밀도 등에 따른 모든 현상 예측 가능 - 일반 PC 환경 운용 가능	- 라이선스 구입 - 강수일 예측 불가능
CFD	- 초고해상도 상세 지형 고려 가능 - 기상과 건물 복사 및 밀도 등에 따른 모든 현상 예측 가능 - 윈도우즈 기반의 모델	- 높은 계산 부하 - 전문적인 기술 필요

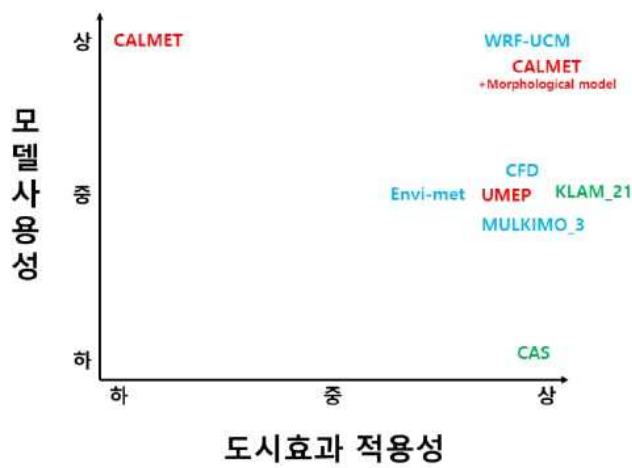
출처 : 광주지방기상청(2020)

표 2. 모델별 현업 가능성 평가

모델	모델 사용성			도시 효과 적용성			현업 가능성		
	보편성	공공 표준	오픈 소스	3차원 공간 정보	바람 환경 분석	열환경 분석	웹 UI	구동 속도	커스터마이징
CAS (MetPhoMod, SOLWEIG)	하	×	×	○	○	○	×	중	하
WRF-UCM	상	○	○	○	○	×	×	하	하
CALMET	상	○	○	×	○	×	○	상	상
CALMET-Morphological model	상	○	○	○	○	×	○	상	상
KLAM_21	중	×	×	○	○	○	×	상	중
UMEP	하	×	○	○	×	○	○	상	상
Envi-met	상	×	×	○	○	○	×	하	중
MUKLIMO_3	중	×	×	○	○	○	×	중	하
CFD	상	×	×	○	○	○	×	하	하

출처: 광주지방기상청(2020)

※ 현업 가능성: 색으로 표시(상, 중, 하)



출처: 광주지방기상청(2020)

그림 12. 모델 선정 기준에 따른 현업적용 가능성 비교

- 광주지방기상청(2020)에서는 광주시의 온도, 바람 등 상세 기상장을 생성하고 바람정체구간 탐색, 찬공기 생성량 산출, 도시계획 시나리오에 따른 기상변화 예측 등을 위해 여러 모형들을 비교 분석한 결과 CALMET 모델과 Morphological model 및 SOLWEIG 모델을 선정함 바 있다.
- CALMET 모델은 앞서 설명한 바와 같이 수도권기상청에서 2014~2018년 상세 기상정보(온도, 바람) 생산에 이용된 바 있으며(수도권기상청 2017, 2019), 국립환경과학원에서 지자체 환경보전계획을 위한 기후분야 환경정보지도 중 청주시 바람장지도의 작성 방법으로 활용된 바 있다(국립환경과학원, 2017). 모델은 가벼워 PC 윈도우즈 환경에서도 구동되며 라이선스 계약이 필요하지 않아 전세계적으로 널리 이용되고 있다. 또한 CALPUFF와 연계하면 대기질 모델에 이용할 수 있는 점이 장점이다.
- 지자체 입장에서 볼 때, 무거운 모델보다는 구동이 쉽고 적은 예산으로 운용가능하며, 범용성과 다양한 연계 분석이 가능하다는 점, 최근 국내에서 널리 활용된다는 점을 고려하면, 광주지방기상청에서 선정한 바와 같이 CALMET을 기반으로 하고 Morphological model과 SOLWEIG 모델을 활용하는 것이 비교적 적용 가능성이 높다고 판단된다.











## 6. 열스트레스 지수 산출을 통한 열쾌적성 등급 평가

- 앞서 설명한 모델들은 기상요소의 공간적 분포와 변화를 예측할 뿐 궁극적으로 인간이 느끼는 열쾌적성을 평가한 것은 아니다.
- 온도, 습도, 풍속, 복사에너지 등을 고려한 열스트레스 지수(PET, UTCI 등)를 산출하여야 열쾌적성 등급을 구분할 수 있게 된다.
- 기상자료를 토대로 열스트레스 지수를 산출하여 열쾌적성 등급을 구분하고 지도로 나타내는 방법은 이어지는 “제2절 도시기후구역 구분과 기상실측을 이용한 열쾌적성 등급 분류”에서 다루고자 한다.

제2절 도시기후구역 구분과 기상실측을 이용한 열쾌적성 등급 구분도 작성








1. 도시기후구역(LCZ, Local Climate Zone) 구분

본 지침에서의 도시기후구역의 분류는 Stewart and Oke(2012)의 LCZ 분류 체계를 따른다. LCZ는 도시 내 공간을 건축물의 유형(LCZ 1~10)과 토지피복유형(LCZ A~G)의 총 17개의 유형으로 분류, 이를 건축물의 높이 및 밀도에 따라 세분화하여 기후적 특성에 따른 공간 유형화 방법이다.

Built types	Definition	Built types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.

출처: Stewart & Oke(2012)

그림 13. 건물 유형에 따른 Local Climate Zone(LCZ) 분류

Land cover types	Definition
<p>A. Dense trees</p> 	<p>Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.</p>
<p>B. Scattered trees</p> 	<p>Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.</p>
<p>C. Bush, scrub</p> 	<p>Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.</p>
<p>D. Low plants</p> 	<p>Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.</p>
<p>E. Bare rock or paved</p> 	<p>Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.</p>
<p>F. Bare soil or sand</p> 	<p>Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.</p>
<p>G. Water</p> 	<p>Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.</p>

출처: Stewart & Oke(2012)

그림 14. 토지피복 유형에 따른 Local Climate Zone(LCZ) 분류

토지피복 유형 외에도 건축물간 높이/거리 비, 건폐율, 불투수 면적률, 건축물 또는 수목 높이 등 공간 및 토지피복 속성을 고려한다. <도시기후구역별 공간 및 토지피복 속성값>에서 각각의 속성을 확인할 수 있으며(표 3), <도시기후구역(LCZ) 분류를 위한 수집자료 종류 및 출처> 표 중 출처에서 속성값을 구할 수 있다(표 4).

표 3. 도시기후구역별 공간 및 토지피복 속성값

도시기후구역 (LCZ)	사태 구분	하늘시계 지수 (1.0=100%)	건축물간 높이/거리비 (1.0=100%)	건폐율 (%)	불투수 면적률 (%)	투수 면적률 (%)	건물 또는 수목 높이 (m)	지형 거칠기
LCZ 1 밀집도 높은 고층지역	S&O	0.2~0.4	>2	40~60	40~60	<10	>25	8
	홍콩	0.1~0.4	2~10	40~70	30~60	0~10	>25	8
	서울			39.9	40.0	2.4	25	
LCZ 2 밀집도 높은 중층지역	S&O	0.3~0.6	0.75~2	40~70	30~50	<20	10~25	6~7
	홍콩	0.2~0.6	1~3	40~70	20~60	0~30	15~25	6~7
	서울			52.4	36.5	2.0	15	
LCZ 3 밀집도 높은 저층지역	S&O	0.2~0.6	0.75~1.5	20~40	20~50	<30	3~10	6
	홍콩	0.2~0.6	0.5~3	40~70	10~60	0~50	5~15	6
	서울			53.8	32.3	3.4	11	
LCZ 4 개방된 고층지역	S&O	0.5~0.7	0.75~1.25	20~40	30~40	30~40	>25	7~8
	홍콩	0.4~0.7	1.5~4	20~40	20~60	10~70	>25	7~8
	서울			31.1	37.8	3.7	27	
LCZ 5 개방된 중층지역	S&O	0.5~0.8	0.3~0.75	20~40	30~50	20~40	10~25	5~6
	홍콩	0.4~0.8	0.5~2	20~40	10~60	10~70	15~25	5~6
	서울			25.4	31.7	3.0	17	
LCZ 6 개방된 저층지역	S&O	0.6~0.9	0.3~0.75	20~40	20~50	30~60	3~10	5~6
	홍콩	0.6~0.9	0.2~2	20~40	10~60	10~70	5~15	5~6
	서울			24.6	32.3	4.3	11	
LCZ 7 경량 저층지역	S&O	0.2~0.5	1~2	60~90	<20	<30	2~4	4~5
	서울			14.8	17.1	5.7	6	
LCZ 8 대형 저층지역	S&O	>0.7	0.1~0.3	30~50	40~50	<20	3~10	5
	서울			41.7	33.9	4.7	12	
LCZ 9 분산된 건물 지역	S&O	>0.8	0.1~0.25	10~20	<20	60~80	3~10	5~6
	서울			16.1	23.5	6.3	15	
LCZ 10 공업지역	S&O	0.6~0.9	0.2~0.5	20~30	20~40	40~50	5~15	5~6
	서울			27.6	26.8	2.1	16	
LCZ A 밀집된 산림	-	<0.4	>1	<10	<10	>90	3~30	8
LCZ B 분산된 산림	-	0.5~0.8	0.25~0.75	<10	<10	>90	3~15	5~6
LCZ C 관목숲	-	0.7~0.9	0.25~1.0	<10	<10	>90	<2	4~5
LCZ D 초지	-	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3~4
LCZ E 암반 혹은 포장지역	-	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1~2
LCZ F 나지	-	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<0.25	1~2
LCZ G 수역	-	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	-	1

- 하늘시계지수(SVF, Sky View Factor): 하늘을 가리는 장애물들의 영향을 계량화한 지수
- 건축물간 높이/거리 비: 평균 건물높이와 거리협곡의 비(LCZ 1-7), 건물높이와 건물간격의 비(LCZ8-10), 수목 높이와 수목간 거리의 비(LCZ A-G)
- 건폐율 : 건축면적의 대지면적에 대한 비율
- 불투수면적률 : 포장이나 건물 등으로 덮여서 빗물이 침투할 수 없는 불투수면적비
- 투수면적률 : 토양, 식생, 수역 등이 투수면적비
- 건물 또는 수목 높이: 건물높이(LCZ 1-10), 수목 높이(LCZ A-F)
- 지형 거칠기 :Davenport et al (2000)의 지형거칠기
- 사례 구분 출처 :
  - S&O : Stewart&Oke(2012), 홍콩 : Zheng et al.(2018), 서울 : 김권 등(2017)

표 4. 도시 기후구역(LCZ) 분류를 위한 수집자료 종류 및 출처

공간 및 지표속성	수집자료	출처
건축물간 거리-높이 비	건축물폴리곤	국토정보플랫폼, 직접입력(미반영 신축 건축물)
	건축물높이	건축물대장(정부24), 브이월드, 직접입력(미반영 신축 건축물)
	주동간격	항공사진(지자체(수원), 다음지도, 브이월드), 직접측정
건폐율	건축물폴리곤	국토정보플랫폼, 직접입력(미반영 신축 건축물)
불투수율	불투수	토지피복도(환경부), 지자체(도시생태현황도)
건물 등의 높이	건축물높이	건축물대장(정부24), 브이월드, 직접입력(미반영 신축 건축물)

각각의 속성은 미기후에 영향을 주게 되어 그 지역의 독특한 열환경을 형성하게 된다. 지리적·문화적·역사적·기후적 영향으로 <도시기후구역별 공간 및 토지피복 속성값>표에서 제시되지 않은 형태의 도시기후구역이 있을 경우 추가로 분류할 수 있다. 또한, 두 가지 유형이 혼재될 경우 넓은 면적을 차지하는 유형을 앞에 적고 적은 면적을 차지하는 유형은 작게 아래 첨자로 표시한다. 일례로 우리나라의 고층아파트 가운데 주차장을 지하로 보내고 지상을 수목이 있는 공원으로 조성한 경우 “1<sub>B</sub>”로 표시할 수 있다. 도시기후구역의 특성을 정확히 구분하기 위해서는 건축물간 거리-높이 비, 건폐율, 불투수 면적비율, 건축물 또는 수목 높이 등 공간 및 토지피복 속성값을 유형화하여 분류하는 것이 필요하다.

## 2. 측정지점 선정

도시기후구역을 구분하기 위하여 고층주거지역, 저층주거지역, 단독 주거지역, 상업지역, 공원, 산림, 수변지역, 농업지역 등 도시의 기후를 대표할 만한 지역을 선택한다. 미기후 실측을 위한 기기 설치 지점은 가급적이면 그 지역의 중심 위치로 하고 측정 기간 동안 그늘이 지지 않는 곳으로 한다. 이는 낮 동안 해당 지점의 미기후를 가장 잘 측정하기 위함이다.

## 3. 미기후 실측

서 있는 신체의 중력중심점인 지표면에서 1.1m 높이에서 순복사센서(net radiometer), 온·습도센서, 풍향·풍속센서 등을 이용하여 태양 및 지구복사 에너지, 기온, 상대습도, 풍향, 풍속을 측정한다. 인간 활동의 주 시간대이며 도시기후구역별 열환경 차이가 가장 크게 나는 낮 12시에서 16시까지 측정한다. 태양 및 지구복사에너지는 5초 단위로, 기온, 상대습도, 풍향, 풍속은 1분 단위로 측정한다.

표 5. 미기후 측정 장비 제원

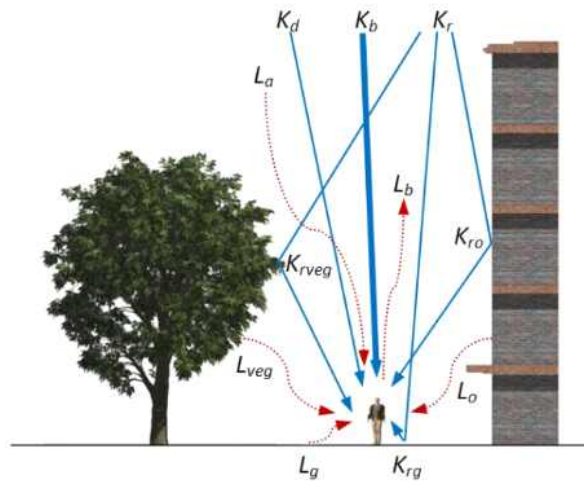
미기후자료	장 비	
	장비명	장비정확도
복사에너지	순복사센서	≤ 1% (-40-80°C)
온도 및 상대습도	온습도센서	· 기온: ±0.3°C(-80-60°C) · 상대습도: 2% (0-90%), 3% (90-100%)
풍향 및 풍속	풍향 및 풍속센서	· 풍속: ±0.1 ms <sup>-1</sup> (≤ 10.1 ms <sup>-1</sup> ) ±1.1% (≥ 10.1 ms <sup>-1</sup> ) · 풍향: ± 4°
자료저장	자료저장장치	±0.06% (0-40°C)

## 4. 열쾌적성 지수 산출

신체에 흡수되는 태양 및 지구복사에너지를 기온의 형태로 계산한 평균복사온도 ( $T_{mr}$ , Mean radiant temperature)를 식. 1을 이용하여 계산한 후, 측정된 미기후인 기온, 상대습도, 풍속과 함께 인간 열환경지수인 PET(Physiological

Equivalent Temperature, PET : Höppe, 1999; Matzarakis et al., 1999)를 다양한 프로그램(예: Rayman Pro(<http://www.urbanclimate.net/rayman>))를 이용하여 산출한다.

$$T_{mrt} = \left[ \frac{f_p K_b (1 - \alpha) + (K_d + K_r)(1 - \alpha) + \epsilon L}{\epsilon \sigma} \right]^{0.25} - 273.15 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{식. 1})$$



출처 : Park(2012)

그림 15. PET 계산시 사람의 열 흡수 및 방출 개념도

$f_p$ 는 태양의 위치에 따라 직사광선이 미치는 인체 표면적(projected area factor)이며,  $K_b$ ,  $K_d$ 와  $K_r$ 는 태양직사광선, 하늘에서 발생된 태양분사광선, 건물벽·수목표피·지표면에서 반사된 태양반사광선을 뜻한다.  $K_b$ 는 30분마다 주먹으로 순복사센서의 하늘을 향해 있는 pyranometer를 1분간 가려 계산한다.  $L$ 은 지구복사에너지를 뜻하며,  $\sigma$ 와  $\epsilon$ 는 인체의 태양복사에너지 반사율(보통 0.3)과 지구복사에너지 방출율(보통 0.97)을 뜻한다.

### 5. 열쾌적성 등급 구분

산출된 PET는 표<열쾌적성 등급 구분>의 기준으로 열쾌적성 등급을 구분할 수 있다. 지방자치단체별 각 도시기후구역의 특징에 따라 각 등급의 범위를 변형하여 표현할 수 있다.

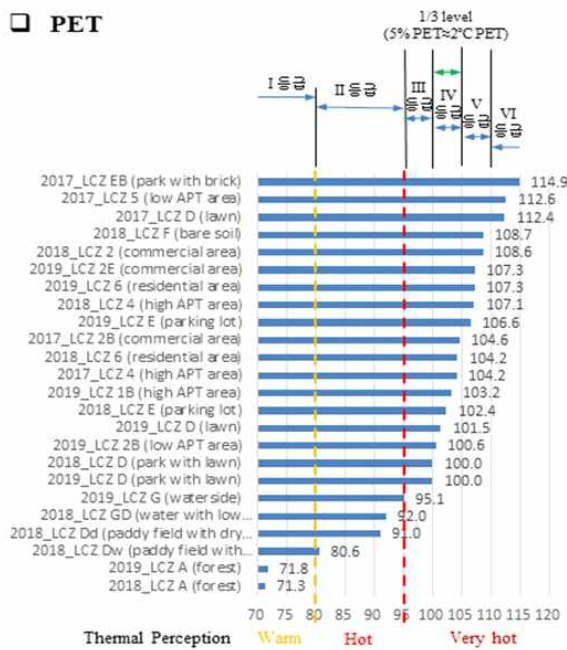
표 6. PET 기준 열쾌적성 등급 구분

열쾌적성 등급	인간 열환경 상태	PET(°C)
1	쾌적함(comfortable)	18~23
2	약간 따뜻함(pleasant)	23~29
3	따뜻함(warm)	29~35
4	더움(hot)	35~41
5	매우 더움(very hot)	>41

출처: Höpfe(1999) ; Matzarakis et al.(1999)

국립환경과학원에서는 이상의 방법을 적용하여 2017~2019년 수원시와 용인시의 23개소를 대상으로 도시기후구역별 기상실측을 실시하고 열쾌적성 지수(PET)를 산출한 바 있다. 선행연구들과 마찬가지로 개방된 초지인 LCZ D를 기준으로 삼아 100으로 놓고 다른 LCZ들의 열쾌적성 지수를 상대비교하면 다음과 같다.

□ PET



자료 : 국립환경과학원(2017, 2018, 2019)

그림 16. 기상실측자료를 토대로 한 LCZ별 열쾌적성 지수 비교

**제3절 도시기후구역 구분과 국내외 사례를 이용한 열쾌적성 등급 구분도 작성**

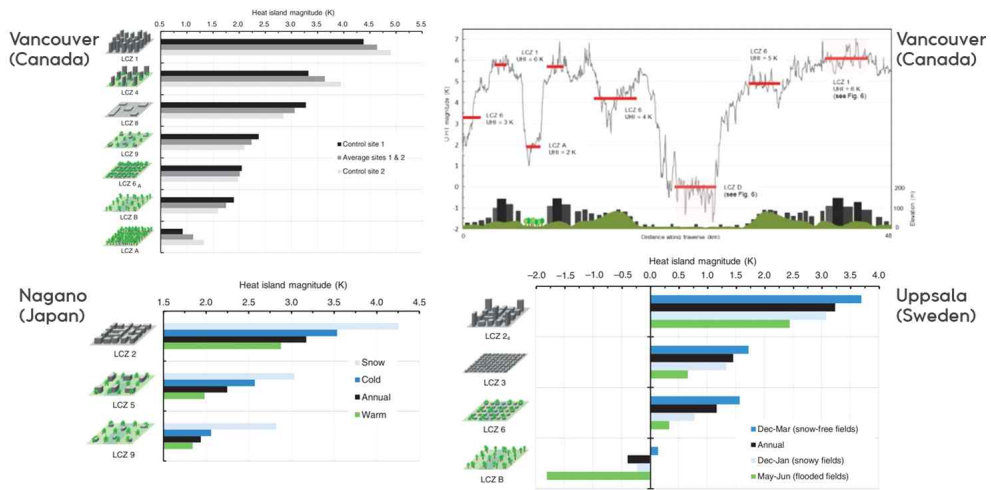
1. 열쾌적성 지도 작성을 위해 국내·외 연구 사례를 기준으로 기후구역별 등급 분류(안)를 마련해야 한다. 국외의 LCZ별 기후인자값 비교 자료 분석 결과는 다음과 같다.

- LCZ별 열섬강도, 기온편차, 주야간 지표온도 편차 등을 5등급으로 구분

표 8. 열쾌적성 관련 항목(열섬강도, 기온편차, 지표온도 편차)의 기후구역별 비교

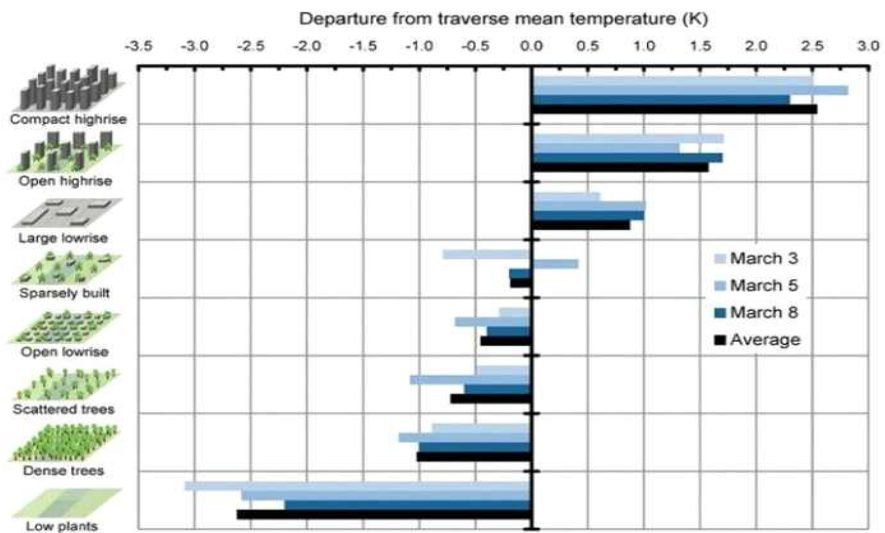
비교항목 (기간)	지역 (국가)	매우 낮음	낮음	보통	높음	매우 높음
열섬강도 (연중)	Nagano (일본)	D,B		3,6		24
열섬강도 (연중)	Uppsala (스웨덴)	D		9	5	2
열섬강도 (12~3월, 비적설)	Nagano (일본)	B,D		3,6		24
열섬강도 (겨울, 한랭)	Uppsala (스웨덴)	D			9,5	2
열섬강도 (12~1월, 적설)	Nagano (일본)	B,D		6,3		24
열섬강도 (겨울, 적설)	Uppsala (스웨덴)	D			9,5	2
열섬강도 (3월)	Vancouver (Canada)	D		A,6A,B,9	8,4	1
열섬강도 (5~6월, 범람)	Nagano (일본)	B,D	6,3		24	
열섬강도 (온난)	Uppsala (스웨덴)	D		5,9	2	
기온편차 (3월)	Vancouver (Canada)	D	A,B	6,9	8	4,1
지표온도편차 (야간)	Las Vegas, Phoenix	D	9,F	G,6,7	5,10	E,4,8
지표온도편차 (주간)	Las Vegas, Phoenix	G,D	B,A	4,5	6,9	10,C,4,8

출처: Stewart & Oke(2012); Stewart et. al.(2013); C. Wang et. al.(2018)



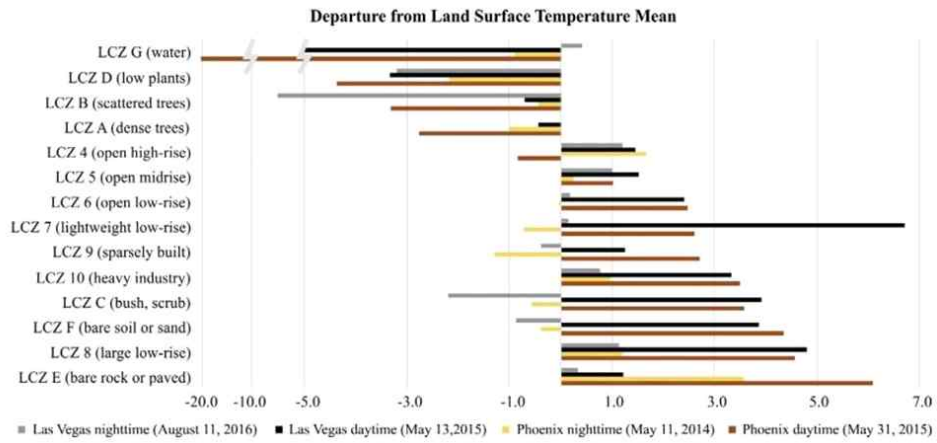
(출처 : Stewart et al., 2013)

그림 17. Vancouver(Canada), Nagano(Japan) 및 Uppsala(Sweden)의 열섬 강도



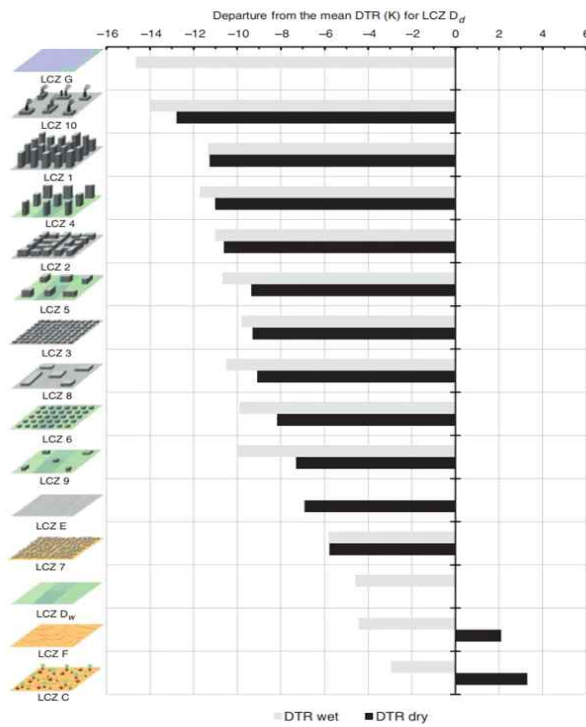
(출처 : Stewart et al., 2013)

그림 18. Vancouver(Canada)의 평균기온 대비 LCZ별 기온 편차



(출처: C. Wang et al., 2018)

그림 19. Las Vegas 및 Phoenix의 LCZ별 지표온도 편차



(출처 : Stewart et al., 2013)

그림 20. LCZ Dd 대비 기후구역별 일교차 모델링 예측치

2. 해외사례 분석 결과를 고려한 LCZ별 열쾌적성 등급 분류(안)은 다음과 같다.

표 9. 해외 연구사례를 토대로 한 열쾌적성 등급 분류(안)

LCZ types	Built types	등급	LCZ types	Land cover types	등급
LCZ 1	Compact high-rise	5	LCZ A	Dense trees	2
LCZ 2	Compact midrise	5	LCZ B	Scattered trees	1.5
LCZ 3	Compact low-rise	3	LCZ C	Bush, scrub	-
LCZ 4	Open high-rise	4.5	LCZ D	Low plants	1
LCZ 5	Open midrise	3.5	LCZ E	Bare rock or paved	5
LCZ 6	Open low-rise	3	LCZ F	Bare soil or sand	5
LCZ 7	Lightweight low-rise	-	LCZ G	Water	2
LCZ 8	Large low-rise	4.5	LCZ Dw	Paddy field	2
LCZ 9	Sparsely built	-			
LCZ 10	Heavy industry	5			

3. 해외사례 분석 결과와 함께 국내 실정에 맞는 효과적인 분류 방안 검토가 필요하다. 국내의 경우 앞절(제2절)에서 취득한 기상실측자료를 토대로 분석하였으며, 분류(안)은 다음과 같다(표 안의 숫자는 해당 분류군 측정 지점 수).

표 10. 기상실측자료를 토대로 한 토지이용유형별 열쾌적성등급 분류(안)

등급	토지이용유형									
	상업 지역	고층아파트 지역	저층아파트 지역	단독주택 지역	주차장	나지	공원 (잔디)	수변 지역	논	산림 지역
1										2
2								1	2	
3							2	1		
4	1	2	1	1	1		1			
5	2	1		1	1	1				

(자료: 국립환경과학원의 2017~2019 수원-용인 23개소 기상실측자료)

4. 해외사례 분석결과 및 국내 실측자료 결과에 따른 열쾌적성 등급 분류도를 비교·작성한다.

□ 열쾌적성 등급 분류도 작성 순서는 다음과 같다.

- ① 열쾌적성 등급 분류를 위한 지도 작성을 위해 다음과 같은 기초 자료를 수집해야 한다.

표 11. 토지피복도 및 도시생태현황지도의 활용 기준

자료명	비고
토지피복도 (환경부)	시가화건조지역 외 대분류 기준
도시생태현황도 (지자체)	시가화지역 중분류 기준

- ② 기초데이터에서 작성하고자 하는 해당 지역을 추출한다.
  - 토지피복도, 도시생태현황도에서 지역 선택 후 추출(Export Data).
- ③ 추출된 데이터에서 도시생태현황도의 시가화 지역, 토지피복도(중분류)의 시가화 외 지역을 공간분석기법을 통해 병합(Merge)한다.
  - LCZ별 국내 실측자료, 해외 사례 분석자료 분류 결과에 상응하는 데이터 세부 항목은 다음과 같다.

표 12. 토지피복도와 도시생태현황지도를 활용한 수원 호매실지구의 LCZ 분류

실측위치	LCZ분류		토지피복	도시생태현황도		비고
			중분류	대분류	중분류	
고층 아파트	LCZ 4	open high-rise	주거지역	주거지	고층공동주택지	높이(밀도)에 따른 Aspect Ratio, Sky view factor 추가 검토 필요
단독 주택	LCZ 6	open low-rise			도시단독주택지	
상업	LCZ 2	compact mid-rise	상업지역	상업 및 업무지		
교통지역 (주차장)	LCZ E	paved	교통지역	교통시설지		
나지	LCZ F	bare soil	나지	-	-	
산림	LCZ A	dense trees	산림지역			
수변	LCZ G <sub>D</sub>	water with low plants	수역			
논	LCZ D <sub>w</sub>	low plants with wet ground	농업지역			
공원 (초지)	LCZ D	low plants	초지			

- ④ 작성하고자 하는 지역의 병합된 공간자료에 해외사례·실측자료 분석을 통해 산정한 1등급(Comfortable)에서부터 5등급(Very hot)까지의 5단계 등급을 각각 부여한다.

표 13. 해외사례와 기상실측자료에 의한 열쾌적성 등급 분류 비교표 예시

구분		등급	
		(a)해외사례 적용	(b)실측자료 적용
시가지	상업지역	5	5
	나지	5	5
	고층아파트	4.5	5
	주차장 ①	5	4
	단독주택 ②	3	4
녹지	공원 ③	1	3
	수변	2	2
	논	2	2
	산림 ④	2	1

- ⑤ 등급분류 기준에 따라 5단계로 구분한 데이터를 등급에 따라 색을 구분 (Symbology)하여 표현한다.

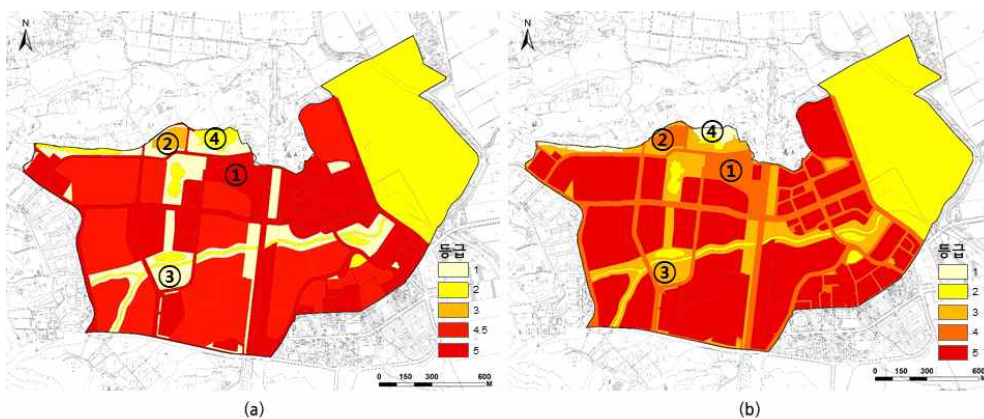


그림 21. 해외사례(a)와 기상실측자료(b)에 의한 열쾌적성(PET) 등급 지도 비교

- ⑥ 해외사례와 실측자료의 차이점(①~④)을 다음과 같이 비교·분석한다.
- 우리나라의 주택지구는 밀집되고 녹지가 적은 편이어서 해외의 기준에 비해 높은 값을 갖는 것으로 보이며, 건물 밀도나 포장 소재, 녹지 비율 등에 따라 주차장 및 도로 보다 높은 열스트레스를 보일 수 있다고 판단됨.
  - 토지이용유형이 동일하더라도 도시 내 위치(location), 건축물 높이와 거리 폭의 비율(aspect ratio), 하늘시계지수(Sky View Factor, SVF)에 따라 상이한 결과를 보일 수 있으므로, 동일한 토지이용 유형이더라도 위치에 따라 다른 기후등급을 부여할 수 있음.
  - 고층아파트 지역은 같은 블록에서도 건물의 방향, 건물간의 그림자 효과 등에 따라 영향을 받는 것으로 보이며, 이러한 경향은 다음의 지표 온도지도에서 확인됨.

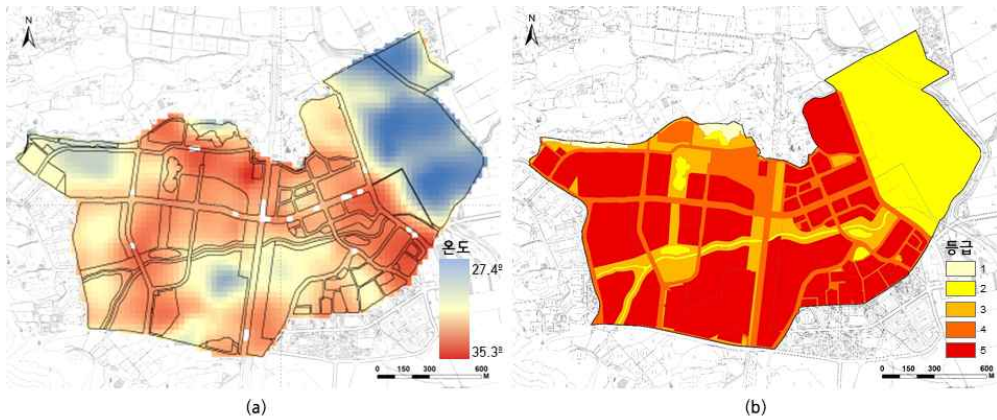
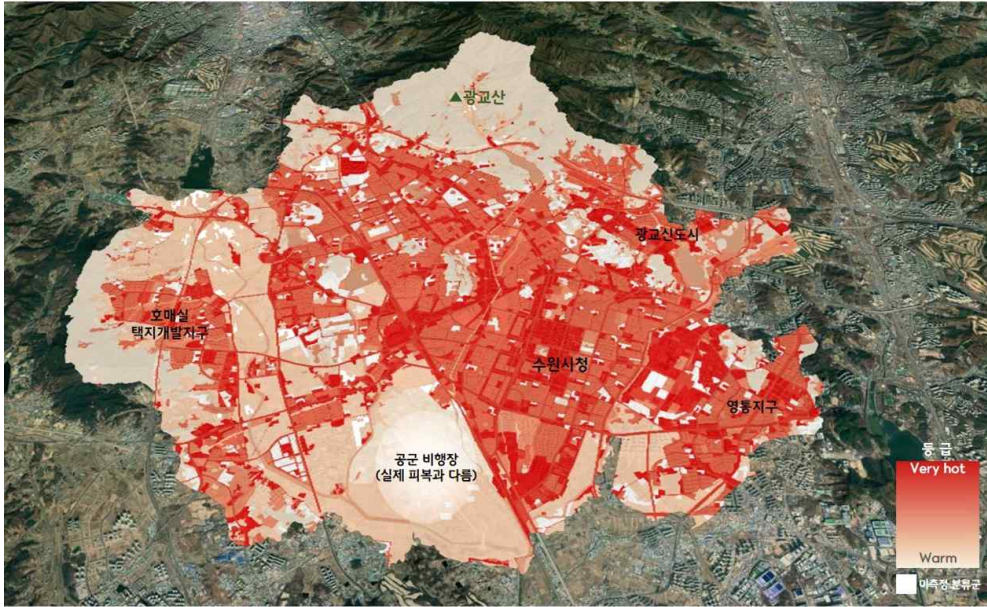


그림 22. 지표온도지도(a), 기상실측자료를 기반으로 한 열쾌적성 등급 분류도(b) 비교

이상의 방법을 적용하여 수원시 전역의 열쾌적성 등급도를 시범적으로 그려보면 그림 23과 같다.



(배경 위성지도 출처 : Google Earth)

그림 23. 수원시의 열쾌적성 등급 분류도 작성 예시

#### 제4절 지표온도지도 등 관련자료를 활용한 열쾌적성 우려지역 추가 탐색

앞서 설명한 세 가지 열쾌적성 등급 분류도 작성 방법 가운데 도시기후구역을 구분하고 기상실측 또는 국내외 사례를 적용해 기후구역별 열쾌적성 등급을 부여하는 두 가지 방법(제2절 및 제3절)의 경우 시가화지역(상업지구, 공업지구, 주택지구 등)이 모두 열쾌적성 4~5등급으로 구분된다. 같은 기후구역에서도 지표온도 또는 평균복사온도, 실제 풍속, 사면의 방향, 인접 건물에 의한 그림자 효과, 지면 피복 상태 및 피복 재질의 영향에 따라 차이를 보이게 된다.

기후분석모델에서는 이러한 영향이 고려가 되나 모델 적용 대신 간이로 기후구역 분류와 기후구역별 등급 부여를 하는 방법에서는 이러한 영향까지 고려할 수 없다. 예산, 시간, 인력 등의 제약으로 모델을 적용할 수 없더라도 열쾌적성 등급 분류도가 열쾌적성이 불량할 것으로 예측되는 지역에 폭염대응 및 열쾌적성 개선 사업을 집중시키기 데 기여하기 위해서는 다른 자료들을 활용하여 열쾌적성 우려 지역을 추가적으로 탐색하는 것이 필요하다.

표 14. 지표온도지도 등 관련자료를 활용한 열쾌적성 우려지역 추가탐색 예시

항목	사례지 (조정전 등급) 조건	주거지역		상업지역	
		A	B	C	D
		4~5	4~5	4~5	4~5
지표온도	지표온도지도에서 시가화지역 지표온도의 상위 25% 이내	○	○	○	×
평균복사온도	평균복사온도 자료에서 시가화 지역의 상위 25% 이내	-	-	-	-
바람정체지역	바람장 지도상의 예상 풍속이 (평균풍속-표준편차) 이하	×	×	○	○
경사 방향 (aspect)	DEM 활용 8방향 분류에서 남, 남동, 남서로 분류되는 곳	×	○	×	○
하늘시계지수 (SVF)	고층 주거지역 중 SVF 0.5 이상	○	×	-	-
높이/거리 비 (aspect ratio)	상업지역(업무지역) 중 높이/ 거리비가 1 이상	-	-	○	×
건폐율	40% 이상	×	×	×	×
불투수면적률	50% 이상	○	×	×	×
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
기타	-	-	-	-	-
해당항목수 / 전체항목수		3/6	2/6	3/6	2/6
조정 등급		5	4	5	4

지표온도 : 국립환경과학원에서 생산한 전국 기초지자체별 여름철지표온도지도를 국토  
환경성평가지도 시스템에서 다운로드 가능

평균복사온도 : 광주지방기상청 등 일부 지역기상청 또는 지자체에서 생산

바람정체지역 : 수도권기상청, 광주지방기상청 등에서 생산한 바람장 정보 활용

경사 방향 : DEM을 활용한 8방향 분석 자료 활용

하늘시계지수(SVF) 및 높이/거리 비(aspect ratio) : 수치지도 및 브이월드 건물정보 활용

건폐율 및 불투수면적률 : 수치지도, 브이월드의 건물정보 또는 도시생태현황지도 활용

추가 탐색에는 표 14와 같이 지표온도지도 등 관련 자료를 활용할 수 있으며, 열쾌적성 우려지역과 관련된 많은 항목에 해당되는 지역은 열쾌적성 등급을 5등급으로 조정하여 분류할 수 있다.

추가 탐색에 쓰이는 주요 항목으로는 다음과 같은 것들을 활용할 수 있다.

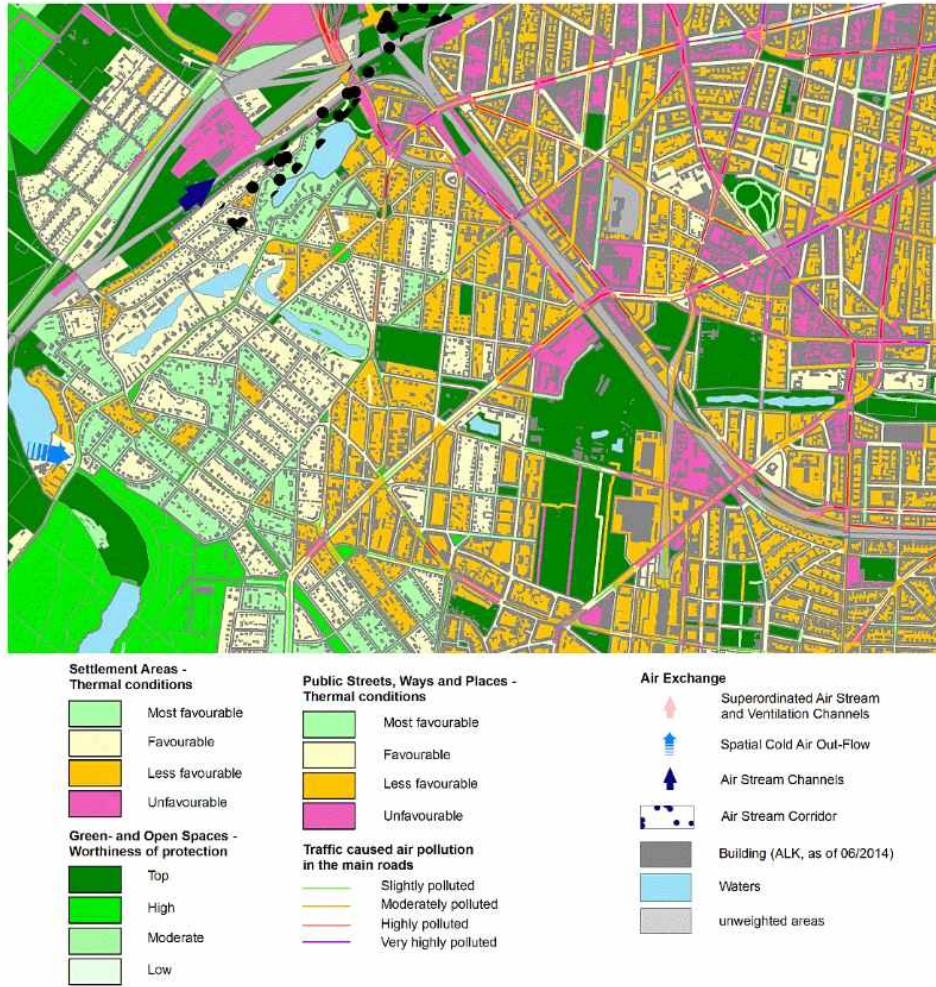
- 지표온도지도 : 국립환경과학원에서 2016~2018년 Landsat 8호 열적외선 위성영상을 토대로 최고 온도를 조합하여 전국기초지자체별 여름철 지표온도지도를 생산하였으며, 국토환경성평가지도 시스템(<http://ecvam.neins.go.kr>)에서 다운로드할 수 있다.
- 평균복사온도 : 광주지방기상청 등 일부 지역기상청과 일부 지자체에서는 도시기후분석모델을 적용하여 평균복사온도를 생산하기도 함.
- 바람정체지역 : 일부 지역기상청에서는 관내의 상세 바람장 정보를 생산한다. 수도권기상청(2017, 2019)에서는 수도권 전역의 2014~2018년 바람장 정보를 생산하였으며, 광주지방기상청(2020)에서도 광주시의 바람장 정보를 생산 중이다.
- 경사 방향 : 수치지도의 표고 정보로 생산한 DEM을 기준으로 8방향 분석
- 하늘시계지수(Sky View Factor) 및 높이/거리 비(aspect ratio) : 수치지도의 건물 정보를 활용하며, 도시기후구역 분류에서 활용했던 수치를 이용한다. 국립환경과학원의 2017~2019년 수원·용인의 기후구역별 기상 실측 및 열스트레스 지수 산출 결과 주거지역은 하늘시계지수가 높을수록, 상업지역은 높이/거리비가 높을수록 높은 열스트레스를 보이는 것으로 나타남(국립환경과학원, 2020).
- 건폐율 및 불투수면적률 : 수치지도의 건물 정보를 활용할 수 있으며, 지역에 따라서는 도시생태현황지도에서 해당정보를 얻을 수도 있다. 표3의 LCZ 1(고밀도 고층지역)의 분포 범위를 참고하여 분류 조건을 정할 수 있음.

### 제3장 열쾌적성 등급 분류도의 환경보전계획 활용

열쾌적 등급 분류도는 도시의 각 지역에서 인간이 느끼는 열 스트레스의 크기를 등급화하여 보여줌으로써 어느 지역이 폭염 피해 등 열스트레스에 취약할 것인지를 예측하게 해 준다. 이 지도는 폭염 피해 우려지역에 열쾌적성 향상 대책과 재원을 집중하는 데 기여할 수 있다. 녹지 확충, 옥상녹화, 지붕 소개 변경, 열반사 페인트 도색 등 복사온도를 낮추는 대책은 물론 그늘막 쉼터나 쿨링 포크(cooling fog) 설치 등에 제한된 자원(인력, 예산, 장비 등)을 효율적으로 투입할 수 있을 뿐만 아니라 야외 작업 또는 야외 활동 계획을 조정할 수 있게 해 준다.

이 지도는 바람장 지도, 바람정체지역 분포, 냉기생성량 지도 등과 함께 바람길 조성을 위한 개방공간 입지 선정에 참고자료로 활용될 수 있다.

그림 24는 독일 베를린시 서부 Charlottenburg-Wilmersdorf의 도시기후 계획 참고도면으로서 도시의 각 지역의 열쾌적성을 4개의 등급으로 구분해 표시하고 있다. 이 지도에서는 냉기가 생성되는 도시 남서쪽의 산림 및 수변지역에서 도시내의 열쾌적성이 불량한 곳(지도의 분홍색 지역)으로 냉기 흐름을 유도할 수 있는 바람길 조성 방향이 표시되어 있다.



([http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/edb410\\_06\\_zusatz.htm#Abb22](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/edb410_06_zusatz.htm#Abb22))

그림 24. 베를린시 서부 Charlottenburg-Wilmersdorf의 도시기후 계획 참고도면

## 참고문헌

- 공간정보오픈플랫폼. 2019. [http://www.vworld.kr/v4po\\_main.do](http://www.vworld.kr/v4po_main.do).
- 광주지방기상청. 2020. 도시환경변화에 따른 기후영향정보 생산기술 개발.
- 국립기상과학원. 2015. 도시기후분석을 위한 CAS(version 2014) 구동방법
- 국립환경과학원. 2019. 국토-환경계획 통합관리를 위한 공간환경정보 및 그린 인프라 적용 연구(Ⅱ) - 열환경 개선을 중심으로
- 김권, 엄정희. 2017. WUDAPT Protocol을 활용한 Local Climate Zone 분류. -서울특별시 사례로-. 한국조경학회지. 45(4). 131-142.
- 박수국. 2012. 인간 열환경 지수(Human Thermal Sensation)를 이용한 조경계획 및 디자인 방법. 한국조경학회지. 40(1). 1-11.
- 송봉근, 박경훈, 정성관. 2014. 토지이용 유형별 공간특성을 고려한 ENVI-met 모델의 현장측정자료 기반의 검증. 한국지리정보학회지 17(2):156-172
- 수도권기상청. 2017. 경기서해안 바람정보 생산 및 활용체계 구축.
- 수도권기상청. 2019. 수도권 상세 기상정보 생산 기술 개선 연구.
- 유병로, 고은아. 2010. Envi-MET에 의한 바람길 해석 및 건물배치 계획. 한국환경기술학회지 11(4):207-215
- 이채연, 엄정희, 최영진, 김규량, Dieter Sherer, Ute Fehrenbach, 김근희. 2011. 토지이용도와 기상모델을 이용한 서울기후분석(CAS) 지도 개발. 한국지리정보학회지 14(1):12-25
- 이지수, 홍선옥, 이대근, 이영곤, 김백조. 2015. 도시기후분석모델(CAS)을 이용한 은평 뉴타운 지역의 역 환경 분석 연구. 한국기상학회 봄 학술대회.
- Davenport, A. G., S. B. Grimmond, T. R. Oke, and J. Wieringa, 2000. Estimating the roughness of cities and sheltered country. Preprints, 12th Conf. on Applied Climatology, Asheville, NC, Amer. Meteor. Soc., 96-99.
- Höppe, P. R. 1999. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology 43: 71-75.

- Lindberg, F. and Grimmond, CSB. 2011. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*. 105: 311-323.
- Lindberg, F., Grimmond, CSB., Gabey, A., Huang, Kent, G.W., Sun, T., Theeuwes, N.E., Jarvi, L., Ward, H.C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K.F.G., Tan, J., Wastberg, D., Xue, L., Zhang, Z. 2018. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*. 99: 70-87
- Matzarakis, A., H. Mayer and M. G. Iziomon. 1999. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*. 43: 76-84
- McRae, I., Freedman, F., Rivera, A., Li, X., Dou, J., Cruz, I., Ren, C., Dronova, I., Fraker, H., Bornstein, R. 2020. Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. *Building and Environment*. 184: 107180
- Stewart, I.D., Oke, T.R. 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12): 1879-1900
- Stewart, I.D., Oke, T.R. and Krayenhoof, E.S. 2013. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* 34: 1062-1080
- Tesler, R., Anderson, C. A 1984. method for solar radiation computations using routine meteorological observation. *Energy and Buildings*. 7: 341-352
- UTCI. 2019. <http://www.utci.org>
- Wang, C., Middel, A., Myint, S. W., Kaplan, S., Brazel, A. J., and

- Lukasczyk, J. 2018. Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 141, 59-71
- Wilson, J.D. 1988. A second order closure model for flow through vegetation. *Boundary Layer Meteorology* 42; 371-392
- Zheng, Y., Chao R., Xu Y., Wang R., Ho J., Lau K., Ng E.. 2018. GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong, *Urban Climate*, 24, 419-448