

냉각에너지를 활용한 바람길 구성요소 분류[†]

- 대구광역시를 사례로 -

Classification of Wind Corridor for Utilizing Heat Deficit of the Cold-Air Layer[†]

- A Case Study of the Daegu Metropolitan City -

성옥제*, 엄정희**

*경북대학교 대학원 조경학과 박사과정, **경북대학교 농업생명과학대학 산림과학·조경학부 조경학전공 부교수

Sung, Uk-Je*, Eum, Jeong-Hee**

*Ph.D. Student, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

**Associate Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

Received: August 09, 2023

Revised: September 19, 2023

Accepted: September 20, 2023

3인익명 심사필

Corresponding author :

Jeong-Hee Eum

Associate Professor,

Dept. of Landscape Architecture,

Kyungpook National University,

Daegu 41566, Korea

Tel.: +82-53-950-5780

E-mail: eumjh@knu.ac.kr

국문초록

최근 산림청이 기후 변화 대응 대책으로써 지자체 바람길숲 조성 사업을 시행함에 따라 다양한 바람길에 대한 연구가 수행되어 오고 있다. 바람길숲 조성을 위해서는 바람길 기능에 대한 평가가 선행되어야 한다. 하지만, 현재 바람길을 직접적으로 평가하고, 바람길의 유형에 따라 공간을 구분할 평가 지표가 없어 간접적인 지표를 기준으로 분석을 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 냉각에너지 분석을 찬공기 생성에 대한 평가 지표로 활용함으로써 바람길을 평가 및 분류하는 방법을 제안하였다. Kaltluftabflussmodell_21(KLAM_21)이라는 찬공기 분석 모형을 활용하여 냉각에너지 분석을 하였다. 그리고 시뮬레이션 분석 결과에 따라 바람길을 찬공기 생성지역, 찬공기 취약지역, 찬공기 유동지역으로 분류하였다. 냉각에너지량을 기준으로 상위 5퍼센트를 찬공기 생성지역, 하위 5퍼센트를 찬공기 취약지역으로 분류하였다. 또한 찬공기 유동지역은 찬공기 생성지역에서 이동하는 찬공기의 흐름을 파악하여 분류하였다. 분석 결과, 대구광역시의 바람길 6개의 바람 생성지역이 존재하며, 찬공기 취약지역은 시가지 내부에 집중되어 있었고, 찬공기 유동지역은 대구광역시의 주요 하천과 도로를 따라 형성되어 있었다. 본 연구의 방법론을 통해 바람길의 효과를 정량적 평가 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 바람길숲 조성 사업지 선정에 제시할 수 있는 평가 지표로 활용될 것으로 판단된다.

주제어: KLAM_21, 찬공기, 도시열섬, 환경계획, 탄소중립

ABSTRACT

Recently, the Korea Forest Service has implemented a planning project about wind corridor forests as a response measure to climate change. Based on this, research on wind corridors has been underway. For the creation of wind corridor forests, a preliminary evaluation of the wind corridor function is necessary. However, currently, there is no evaluation index to directly evaluate and spatially distinguish the types of wind corridors, and analysis is being performed based on indirect indicators. Therefore, this study proposed a method to evaluate and classify wind corridors by utilizing heat deficit analysis as an evaluation index for cold air generation. Heat deficit was analyzed using a cold air analysis model called Kaltluftabflussmodell_21 (KLAM_21). According to the results of the simulation analysis, the wind path was functionally classified. The top 5% were classified as cold-air generating Areas (CGA), and the bottom 5% as cold-air vulnerable Areas (CVA). In addition, the cold-air flowing Areas (CFA) were classified by identifying the flow of cold air moving from the cold air generation area. It is expected that the methodology of this study can be utilized as an evaluation method for the effectiveness of wind corridors. It is also anticipated to be used as an evaluation index to be presented in the selection of wind corridor forest sites.

[†]본 논문은 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업의 지원을 받아 작성한 연구의 성과임(2022428B10-2224-0802).

Keywords: KLAM_21, Cold-Air, Urban Heat Island, Environmental Planning, Carbon Neutrality

1. 서론

산업 및 문명의 발전은 에너지와 자원의 소모를 가속화하였고, 특히 화석연료를 활용한 발전에 의해 다량의 탄소가 배출되고 있다(IEA, 2021). 탄소 배출량의 증가는 지구의 탄소순환의 불균형을 불러왔으며, 증가한 대기중의 탄소는 온실효과를 강화하여 지구 온난화를 야기하였다(UNEP, 2021; IPCC, 2021). 특히 도시는 인공피복면적으로 인해 도시의 온도가 상승하는 대표적인 도시 열환경 문제인 도시열섬현상이 함께 심화되고 있어 이러한 환경 문제를 해결하기 위한 노력이 강구되고 있다(Eum et al., 2018).

그 중 바람길을 활용하는 방안이 주목받고 있다. 바람길이란 도시 외곽 산림에서 생성된 차고 신선한 공기(찬공기)를 도심 내부까지 흐르도록 유도하여 공기 순환을 촉진하는 역할을 한다(Eum et al., 2019). 바람길은 그 기능에 따라 3가지 요소로 분류할 수 있는데, 이는 찬공기가 생성되는 지역과 찬공기가 유동하는 지역, 찬공기가 영향을 받는 지역을 말한다. 찬공기는 지표면의 냉각으로 인해 생성되는 주변보다 상대적으로 낮은 온도의 공기를 말하는 것으로, 지표면의 냉각률에 따라 생성량이 달라진다. 지표면의 냉각에너지는 기상학적 현상과 토지이용 및 피복에 따라 결정된다(Eum, 2008). 특히 찬공기 생성이 원활한 피복은 숲과 초지 등 수목이 많은 지역이며, 토지피복에 의해 생성된 찬공기가 도시 내부까지 유동하기 위해서는 지형이 필요하다. 평지보다 경사진 지형이 유리하며, 최소 5도 이상의 경사가 있어야 찬공기의 흐름이 원활하다고 파악된다(Jang et al., 2019; Son et al., 2020). 따라서 바람길 계획은 도시 공간계획의 분야로서, 찬공기 생성지역의 보존 및 강화와 유동을 원활하게 하는 지형과 피복을 관리할 필요가 있다.

초창기 바람길에 대한 연구는 찬공기 생성에 영향을 미치는 도시 공간적 특성을 분석하고, 찬공기 생성 및 유동에 대한 기능을 평가하였다. 또한 도시 내 찬공기 생성 및 유동 현황을 파악하기 위해 기상 분석 모형의 분석 결과를 활용하여 관리지역 및 보존지역에 대한 광역 단위의 도시계획 연구를 진행하였다. Eum and Son(2016)은 찬공기 분석 모형 중 하나인 Kaltluftabflussmodell(KALM)을 활용하여 낙동정맥의 찬공기 생성 및 흐름을 파악하고, 정맥의 찬공기 생성 능력을 보존하기 위한 전략을 제안하였다. 주요 보존 전략은 산림의 계곡지형을 따라 이동하는 찬공기의 특성에 근거하여 계곡 지형의 보존과 계곡 하단부에 인접한 지역의 개발을 제한하는 방식이었다. Son and Eum(2019)은 KALM을 통해 도출한 찬공기 분석 결과를 기상청의 기상관측자료와 비교하여 바람길의 영향 범위를 모의하였다. 모형 분석 결과에 따라 찬공기층이 높게 형성되거나 풍속이 빠른 지역 주변의 기상관측결과를 확인하고, 그렇지 않은 지역 주변의 결과를 비교하여 야간 시간대의 기온 저감 효과를 검증하였다. 이를 통해 바람길의 효과를 보전하기 위해 바람길 영향 범위를 파악하고 보존지역을 선정하고자 하였다. Yi et al.(2012)은 지면냉각과 찬공기 흐름에 따른 기온의 동적 변화를 관찰하고자 기상관측망을 활용하여 수직기온경도를 관찰하였다. 서울 은평구 뉴타운을 대상으로 여러 지점의 수직기온경도를 비교하여 지점별 찬공기의 생성과 유입에 의한 변화를 구분하였다. 또한, 풍속이라는 변수에 따라 지점별 찬공기 자체 생성된 찬공기와 외부에서 유입된 찬공기의 영향력 변화를 분석하였다. 이를 통해 찬공기 및 바람길이 국지기후에 미치는 영향력을 고려하여 도시개발 계획 단계에서 찬공기 특성 변화 분석을 적용할 필요가 있다고 제안하였다.

최근에는 산림청에서 바람길과 도시숲을 결합하여 바람길의 기능을 도시숲에 적용한 바람길숲 조성사업을 진행하였다(Eum et al., 2019; Son et al., 2020; Sung et al., 2021). 바람길의 찬공기 생성 및 유동의 기능을 도시숲에 대입하여, 도시숲의 위치와 형태에 기반하여 바람길숲을 유형화하고, 유형별 맞춤 전략을 수립하는 사업이다. 따라서 바람길숲은 바람길의 기능을 분석하고 분류하는 것이 중요하다. 하지만, 바람길을 기능적으로 분류하는 기준이 부족하고, 찬공기층 높이와 풍속 및 풍향에 대한 바람길의 영향지표를 통해 간접적으로 평가하고 있다. 실제 조성 사업에서 바람길숲을 유형화했던 방법은 공원·녹지의 유형 분류를 바람길숲 기능에 대입하여 수행하였다. 예를 들어 찬공기를 생성하는 지역인 바람 생성숲은 임상DB를 활용하여 산림으로 분류된 지역을 생성숲으로 지정하였고, 찬공기가 이동하는 지역인 연결숲은 시설녹지 DB를 활용하여 하천과 도로에 식재된 수목을 연결숲으로 지정하였다. 이러한 기준은 바람길숲 조성의 신뢰성을 저해할 수 있고, 조성 우선 순위를 선정하는 데 정량적인 기준을 제시할 수 없다는 문제가 있다. 바람길의 기능을 정량적 평가를 위해서 찬공기 생성에 영향을 미치는 형성지표에 대한 연구가 필요하다.

국외에서는 냉각에너지 분석을 통해 찬공기의 생성 능력을 평가하고 도시 계획에 찬공기 평가를 적용하려는 연구가 진행되어 왔다. Grunwald et al.(2019)은 독일 브라운슈바이크를 대상으로 냉각에너지 분석을 진행하여 대상지의 찬공기 이동경로를 분석하였다. 야간에 생성된 찬공기의 양을 냉각에너지로 정량화하여 지역 간 차이를 비교하였고, 냉각에너지 수치가 높은 지역을 찬공기 생성지역으로 분류하였다. 그리고 찬공기 생성지역에서 생성된 찬공기의 흐름을 분석하고, 흐름이 이어지는 바람통로를 선정하였다. 또한, 바람통로는 평가기준을 설정하여 보존이나

활용 우선순위로 지정하였다. 또한 Grunwald et al.(2020)은 바람통로를 선정하는 방식을 활용하여 세 개의 도시를 대상으로 분석하였고, 회귀분석을 통해 각 도시별 냉각에너지의 생성량과 분포를 토지피복 및 지형 등 공간 요소와의 상관성을 분석하였고, 그 결과로 회귀식을 도출하여 도시별 도출된 회귀식을 다른 도시에 적용해봄으로써 분석 지역의 지형적 차이가 찬공기 생성에 미치는 영향을 파악하였다.

따라서 본 연구는 냉각에너지 분석을 통해 찬공기를 정량적으로 평가하고, 기준에 따라 바람길을 분류하고자 한다. 이를 위해 찬공기 분석 및 냉각에너지 분석 시뮬레이션인 KLAM_21(Kaltluftabflussmodell_21)을 활용하여 대상지의 냉각에너지를 분석하였다. 찬공기는 공간에 따라 생성량에 차이를 보이며, 많이 생성된 지역에서 상대적으로 찬공기가 적은 지역으로 이동하며, 찬공기 양에 따른 층의 높이가 평형상태를 유지하려는 성질이 있다. 냉각에너지는 지역 내에서 생성된 찬공기에 주변 지역에서 유입된 찬공기가 포함되어 있으며, 냉각에너지량이 상대적으로 높을수록 지역에서 생성되는 찬공기의 비율이 높을 것이고, 냉각에너지량이 낮을수록 주변지역에서 유입된 찬공기의 비율이 높을 것이라 판단된다. 따라서 분석 대상지 내에서 냉각에너지의 양을 상대적으로 평가하였을 때 냉각에너지가 높은 지역을 찬공기 생성지역으로 분류하였고, 상대적으로 낮은지역이 찬공기 생성이 취약한 지역으로 분류하였다. 그리고 생성지역에서 취약지역으로 이동하는 찬공기의 흐름을 분석하여 찬공기 유동지역으로 설정하였다. 찬공기 유동지역의 경우 찬공기 유동과 관련된 4가지 지표를 활용하여 유동지역 간의 유동 능력을 비교하였다.

이러한 연구는 도시 내 바람길 기능을 평가할 수 있는 정량적인 평가 방법을 제시하고, 바람길 관련 계획의 공간적 분류 체계 구축에 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 바람길숲 조성 사업에서 바람길숲을 분류하고, 각 기능을 평가하는 기준으로 활용되어 조성 대상지 선정 및 조성 전략 수립에 기여할 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지

연구 대상지는 대구광역시로 선정하였다. 대구광역시는 도시 주변부에 산림이 풍부하지만 도시 내에 밀집된 시가지의 열환경이 취약한 도시이다. 대구 기상청은 2020년 기준 전국 평균 폭염 일수가 7.7일이지만, 대구 폭염일수는 31일이었다고 발표하였다. 도심의 열환경 개선을 위해 주변에 위치한 산림에서 생성된 찬공기 유입의 개선이 필요한 지역이라 할 수 있다.

대구광역시는 북위 35° 36′-36° 01′, 동경 123° 21′-123° 46′ 사이에 위치하고 있으며, 지리적으로 한반도 동남권의 중심부에 위치한다(Figure 1 참조). 대구광역시는 칠곡군, 성주군, 경산시, 청도군 등의 시·군에 접해있으며, 지형적으로 남쪽의 비슬산, 북쪽의 팔공산이 위치하고 동서로는 완만한 구릉지가 위치한 분지지형을 갖추고 있다. 또한, 신천이라는 대구 남쪽 산악지에 발원지가 위치한 하천이 대구시의 시가지를 관류하여 금호강과 합류하고 있다. 금호강은 대구광역시의 동에서 서로 시가지를 둘러 흐르는 형태이다. 대구광역시의 총면적은 883.52km²이며, 행정구역은 총 7개의 구, 1개의 군과 6개의 읍, 3개의 면, 132개의 동으로 이루어져 있다. 대구광역시의 인구는 2022년 통계청 자료를 기준으로 약 236만 명이 거주하는 대도시이며, 도시 공간구조가 단핵방사형으로 도시 중심에 시가지가 밀집해 있다. 따라서 도시 외곽에 위치한 산림과 하천의 녹지네트워크가 양호함에도 불구하고, 밀집되어 있는 도시구조에 의해 외곽에서 생성된 찬공기가 도심 내부까지 유동하지 못하고 있다.



Figure 1. Study area

2.2 연구 절차

본 연구는 다음과 같은 절차에 따라 진행되었다(Figure 2 참조). 우선 KLAM_21을 활용한 대구광역시의 냉각에너지 분석을 진행하고, 외곽 산림에서 생성되는 냉각에너지량과 주변으로 생성된 찬공기가 이동하는 흐름, 그리고 이동한 찬공기가 영향을 미치는 지역 등을 파악하였다. 그리고 바람길 분류를 위해 냉각에너지 생산량을 기준으로 찬공기 생성지역과 찬공기 취약지역을 분류하였다. 분류 기준은 냉각에너지 생산량이 상위 5%에 속하는 지역을 찬공기 생성지역으로 분류하였고, 생산량이 하위 5%에 속하는 지역을 찬공기 취약지역으로 분류하였다. 이후에 찬공기 생성지역에서 생성된 찬공기가 이동하여 찬공기 취약지역에 영향을 미칠 때까지의 찬공기 이동통로를 찬공기 유동지역이라 판단하고, Esri ArcGIS pro v3.1.3의 ParticleTrack 기능을 활용하여 찬공기 생성지역에서 발생한 찬공기 입자가 이동하는 경로를 파악하여 찬공기 유동지역을 파악하였다. 유동지역으로 파악된 지역 간의 비교를 통해 관리 중요순위를 선정하였다. 비교 항목은 찬공기 유동지역의 면적, 생성지역에서 취약지역까지의 최단거리, 냉각에너지량, 찬공기 풍속 등 4가지로 구성하였다.

2.3 냉각에너지 분석

본 연구는 야간 산림에서 발생하는 냉각에너지량을 분석하여 바람길의 기능적 평가 및 분류 방법을 정립하는 연구로서 다음과 같이 진행되었다.

2.3.1 분석 모형 설정

산림의 냉각에너지를 분석하기 위해 독일 기상청(Deutscher WetterDienst: DWD)에서 개발한 찬공기 분석 모형인 KLAM_21을 사용하였으며, 이 모형은 찬공기층 높이, 찬공기 풍속 및 풍향, 냉각에너지를 분석할 수 있다. 본 연구는 KLAM_21을 통해 10시간 동안 분석 대상지 내에서 발생하는 시간대별 냉각에너지 발생량을 분석하고, 냉각에너지의 시계열적 변화를 관찰하였다. 냉각에너지는 찬공기층의 평균 공기 밀도와 공기 열용량, 찬공기층의 높이, 냉기층의 온도 변화량에 따라 결과가 산정된다(식 1 참조).

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \langle \vec{v}_t \rangle = \langle -\nabla p' - \rho' \nabla \Phi \rangle - \langle \nabla \cdot \mathbf{J} \rangle \quad (\text{식 1})$$

이는 찬공기가 시간적 변화에 따른 수평 바람 벡터를 편미분한 식으로, 지형적 차이를 고려한 찬공기층 높이가 중력의 영향으로 인한 찬공기의 이동으로 산정하는 것이다. ρ_0 는 평균 공기 밀도, $\frac{\partial}{\partial t}$ 는 지역적 시간 변화, p' 는

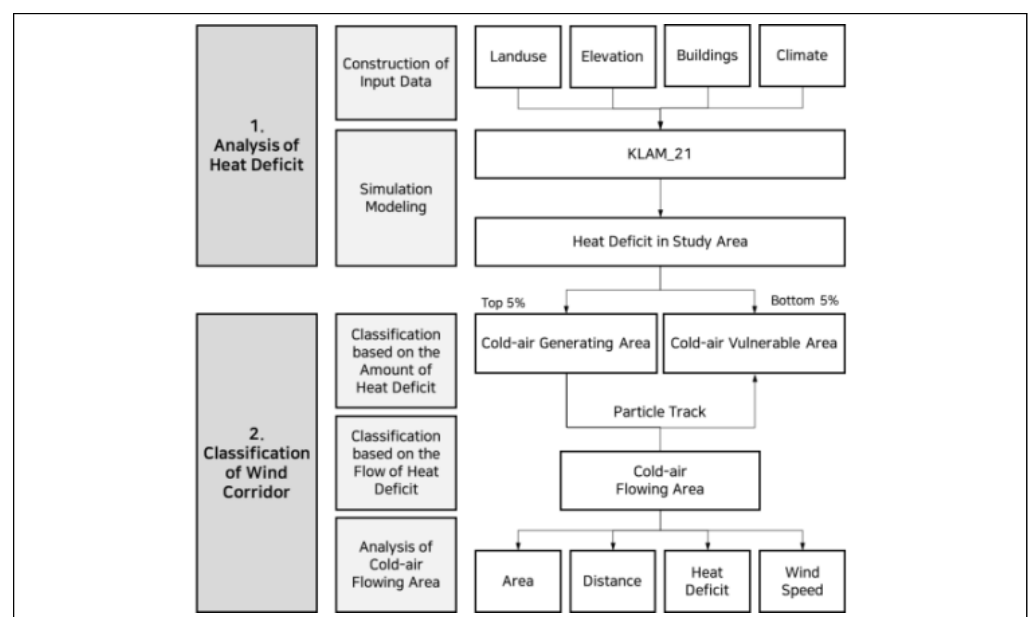


Figure 2. Analysis schemes for classification of wind corridor

대기압의 변동, ρ' 는 공기 밀도의 변동, ϕ 는 중력 잠재력에 대한 값이다. 이를 통해 찬공기층 높이가 높은 지역에서 낮은 지역으로 이동하는 찬공기의 흐름을 풍속 및 풍향 파악할 수 있다(Figure 3 참조). 찬공기층 높이 H에 5/12지점의 찬공기층 높이를 유효 찬공기층 높이 H_{eff} 라 지정하며, 유효 찬공기층 높이가 지형 및 찬공기층 높이의 차이로 인해 중력의 방향으로 흐르는 것을 확인할 수 있다.

찬공기층 높이를 제외한 다른 변수들은 도시 단위에서 큰 지역적 차이가 발생하지 않으므로, 분석 대상지의 냉각에너지량의 변화는 찬공기층 높이에 의해 나타난다고 할 수 있다. 찬공기층 높이는 선행 연구에 따르면 바람길을 평가하는 요소 중 하나로 사용되고 있으며, KLAM_21의 냉각에너지 분석 기능은 본 연구의 목적과 부합한다고 판단하였다.

2.3.2 공간 자료 구축

대구광역시의 냉각에너지 분석 범위는 도시 시가지지역과 도시 외곽의 산림지역까지 포함할 수 있는 40km × 48km로 설정하였다. KLAM_21 분석을 위한 공간 자료는 공간 해상도는 20m인 raster 형식으로 구축하였다. 따라서 총 격자수는 2,000개 × 2,400개이다.

KLAM_21을 분석하기 위해 필요한 공간 입력자료는 다음과 같다. 지형정보와 토지피복정보는 분석을 위해 필수적이며, 건축물 정보는 도시환경에 대한 정밀한 구축을 위해 추가로 입력할 수 있다. 지형정보와 건축물 정보는 국토교통부 산하기관인 국토지리정보원의 연속수치지형도(2019)를 활용하였으며(Figure 4 참조), Esri ArcGIS pro v3.1.3 기능 중 지형 보간법(Create TIN)을 활용하여 지형DEM을 구축하였다. 토지피복정보와 건축물 자료는 환경부가 제공하는 환경공간정보서비스의 세분류 토지피복도(2020)를 활용하였으며, KLAM_21 형식으로 재구축하였다(Figure 5 참조). KLAM_21의 토지피복분류는 기본적으로 9개의 유형이 있으나, 본 연구에서는 숲, 반포장토지, 농업지역, 조정용지, 비포장토지, 포장토지, 수변, 초지, 저층건물, 중층건물, 고층건물로 총 11개 유형으로 분류하였다. 재분류 방법은 다음과 같다. 비건축물 피복과 건축물을 분류하고 비건축물 피복의 경우 토지피복분류 상위 항목과 비교하여 적합한 피복유형을 적용하였으며, 건축물 분류는 건물 높이에 따라 세분화하여 5층 이하 건물은 저

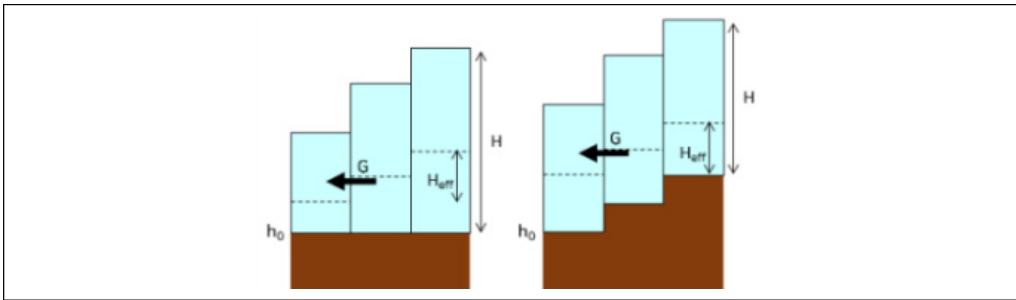


Figure 3. Movement of effective cold-air layer
Source: Deutscher Wetterdienst (2019) Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21

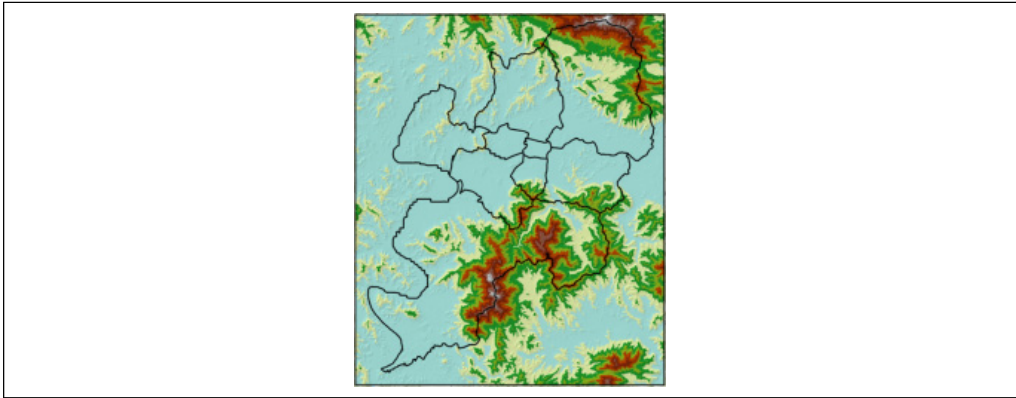


Figure 4. DEM data
Legend: (unit: m)
10 - 141 141 - 272 272 - 403 403 - 534 534 - 665
665 - 796 796 - 927 927 - 1058 1058 - 1190

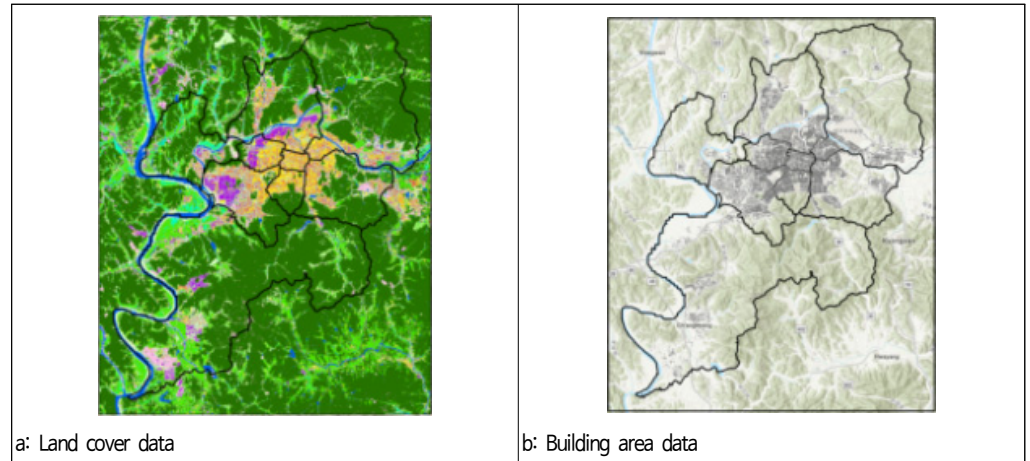


Figure 5. Land cover data

Legend:

Forest	Half Pavement	Industrial Area	Landscape Area
Unpavement Area	Pavement Area	Water	Grassland
Low-rise Building	Middle-rise Building	High-rise Building	Building area

층건물, 6층 이상-16층 이하 건물은 중층건물, 17층 이상 건물은 고층건물로 분류하였다.

건축물 자료는 연속수치지형도의 건물 속성정보에서 건물의 층수에 대한 정보를 활용하였다. 건물의 1층 높이가 4m인 것을 가정하여 건축물의 높이를 m 단위 정보로 변환하였다.

KLAM_21은 피복 유형에 따라 찬공기 생성 및 유동에 영향을 미치는 매개변수가 설정되어 있으며, KLAM_21은 독일의 도시환경에 맞게 설정되어 있다. 독일의 도시 환경은 한국과 동일하지 않기 때문에 대구광역시의 도시환경에 적합한 매개변수를 재설정하였다. 특히 건물의 형태에서 큰 차이가 발생하므로 건물에 관한 매개변수인 총건물면적비율, 평균건물높이, 벽면적지수를 중심으로 재구축하였다(Table 1 참조).

KLAM_21의 분류 유형에 따라 대구광역시의 건축물을 저층건물, 중층건물, 고층건물로 분류하고, 분석 격자(20m) 단위로 각 유형에 해당하는 건축물의 매개변수값을 계산하였다. 총건물면적비율은 피복 유형 중에 건축물 유형으로 분류될 격자 내에서 건물이 차지하는 평균 면적을 계산하였고, 평균건물높이는 격자 내에 해당 유형의 건축물의 평균 높이를 계산하였다. 그리고 벽면적지수는 격자 내에서 해당 유형의 건축물의 측면 벽의 평균 면적을 계산하였다.

Table 1. Reconstruction parameters of KLAM_21 used for this study

Num	Class	$z0^a$	bu^b	hu^c	WAI^d	bv^e	hv^f	LAI^g	a^h	vsg^i
1	Forest	0.4	0	0	0	0.9	20	6	1	0
2	Half Pavement	0.02	0	0	0	0	0	0	0	1
3	Industrial Area	0.08	0.6	12	0.9	0	0	0	0	1
4	Landscape Area	0.1	0	0	0	0.2	6	2	0.75	0
5	Unpavement Area	0.05	0	0	0	0	0	0	0.5	0
6	Pavement Area	0.01	0	0	0	0	0	0	0	1
7	Water	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Grassland	0.2	0	0	0	0	0	0	0.75	0
9	Low-rise Building	0.16	0.4	5.49	1.4	0	0	0	0	1
10	Middle-rise Building	0.22	0.39	26.4	5.53	0	0	0	0	1
11	High-rise Building	0.28	0.34	66.03	22.85	0	0	0	0	1

^a: Surface roughness length, ^b: Building area ratio, ^c: Average building height, ^d: Wall area index, ^e: Tree area ratio, ^f: Average tree height, ^g: Leaf area index,

^h: Heat Isos rate, ⁱ: Degree of space sealing

2.3.3 기상 환경 설정

KLAM_21은 정확한 분석을 위해 대상지의 우세 풍향과 풍속, 운량 등 기상환경 조건을 설정할 수 있다. 이를 위해 찬공기가 가장 원활하게 생성되는 조건을 가진 날을 선정하여 해당 일의 평균 기상 정보를 환경 조건에 반영하였다. 대상지의 기상 정보는 기상청이 관리하는 종관기상관측소(ASOS) 대구(143)지점의 기상데이터를 기준으로 최근 3년간(2019년-2021년) 대상지의 우세 풍향 및 풍속과 운량을 조사하였다. 찬공기는 바람이 없고 구름이 없는 대기가 안정된 날에 가장 원활하게 생성이 되며, 기상 조건을 평가하기 위해 Pasquill의 대기안정도 등급 평가 방법을 참고하였다. Pasquill의 대기안정도 등급은 낮과 밤에 따라 안정도의 평가 기준이 다른데, 낮의 경우 풍속을 기준으로 일사량의 차이를 평가하였고, 밤의 경우 풍속을 기준으로 하여 운량을 평가하였다(Table 2 참조). 해당 기준에 따라 일별 기상 정보를 평가하여 하루 중 대기가 안정된 시간이 가장 많은 날을 추출하였다. 그리고 가장 대기가 안정된 시간이 많은 날과 이를 이상 연속적으로 대기가 안정된 날을 종합하여 가장 적합한 기상 조건을 가진 날을 선정하였다.

그 결과 가장 긴 시간 동안 대기가 안정된 날은 2020년 7월 23일이었으며, 16시간 동안 안정된 기후 상태를 유지하였다. 또한, 14시간 이상 대기가 안정된 날은 총 16일이고, 그 중 2020년 8월 16일-18일까지 3일간 연속적으로 안정된 기후 조건이 나타났다. 본 연구는 연속성이 있는 8월 16일-18일 기간이 가장 적합한 기상 조건이라 판단되어, 본 연구의 분석 기준 시간을 8월 16일-8월 17일 야간 시간대로 설정하였다. 그리고 일몰 및 일출 시간은 각각 오후 7시 14분, 오전 5시 46분이었으므로, 오후 7시와 오전 6시를 기준으로 해당 야간시간대 기상정보를 추출하여 평균값을 기상정보로 활용하였다.

2.4 바람길 구성요소 분류

바람길은 일반적으로 찬공기의 생성이 원활한 산림에서 상대적으로 취약한 도심지역을 향해 흐르는 것으로 평가된다. 이러한 찬공기의 성질은 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르려는 유체의 특성에 기반하고 있으며 천수방정식으로 설명할 수 있다. 또한 평형을 이루고자 하는 에너지의 기본 성질에 기반하여 냉각에너지가 큰 지역에서 작은 지역으로 에너지의 이동하는 것이라 볼 수 있다. 유동성을 바탕으로 찬공기 생성이 원활하여 생성된 찬공기가 주변지역까지 영향을 미치는 지역과 찬공기 생성이 취약하여 주변에서 생성된 찬공기에 의해 영향을 받는 지역, 그리고 생성된 찬공기가 취약한 지역까지 이동하는 중간 지점인 유동지역으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 냉각에너지량을 분석하여 찬공기의 생성능력을 평가하고, 바람길을 찬공기 생성지역, 찬공기 취약지역, 찬공기 유동지역 등 기능적으로 분류하고자 한다. 분류 방법은 선행연구의 냉각에너지 평가 방법과 바람통로 산정 방식을 참고하였다(Grunwald et al., 2019).

2.4.1 냉각에너지량에 따른 바람길 분류

냉각에너지 분석 결과에 기반하여 대상지 범위 내에서 냉각에너지의 분포를 확인하고, 냉각에너지량을 상대적인 기준에 따라 평가하였다. KLAM_21의 냉각에너지 분석결과는 해당 지역에서 생성되는 냉각에너지와 다른 지역에서 유입되는 냉각에너지량이 합산되어 표현된다. 찬공기의 성질을 고려할 때 냉각에너지가 가장 높은 지역은 주변에서 유입되는 찬공기가 없는 지역이라 할 수 있다. 반대로 냉각에너지가 가장 낮은 지역은 지역 내에서 생성되는 찬공기는 거의 없고, 외부에서 유입되는 찬공기가 가장 많은 지역이라 할 수 있다. 따라서 지역별 냉각에너지량을

Table 2. Meteorological conditions that define the Pasquill stability classes

Wind speed (m/s)	Daytime ^a (AM 6-PM 7)			Nighttime ^b (PM 7-AM 6)	
	Strong	Moderate	Weak	> 3/10	≤ 3/10
< 2	A ^c	A-B	B	F	G
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

^a: Amount of insolation, ^b: Cloudiness, ^c: A-very unstable, B-unstable, C-slightly unstable, D-neutral, E-slightly stable, F-stable

백분위로 표현할 때 냉각에너지량이 많은 상위 5% 지역을 찬공기 생성지역으로, 냉각에너지량이 적은 하위 5% 지역을 찬공기 취약지역으로 분류하였다. 그리고 두 유형에 속하지 않는 지역 중에서 찬공기 생성지역에서 취약지역으로 찬공기가 이동하는 지역을 찬공기 유동지역으로 지정하였다(Figure 6 참조). 하지만 찬공기 취약지역은 바람길로서 특별한 기능이 없으며, 찬공기가 생성되지 않는 지역이므로 바람길에 포함되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 찬공기 취약지역에 대한 분류만 진행하고 구체적인 분석은 포함하지 않았다.

2.4.2 냉각에너지 유동에 따른 바람길 분류 및 유동지역 평가

찬공기 유동지역을 분류하고 평가하기 위해서는 찬공기가 유동하는 형태와 지역을 파악해야 한다. 본 연구는 찬공기의 유동을 파악하기 위해 찬공기의 유체역학적 특성에 근거하여 부유 입자가 바람환경에 의해 유동하는 경로를 분석할 수 있는 ArcGIS Particle Track 분석을 활용하였다.

Particle Track은 입력 지점에 위치한 부유 입자가 바람환경에 의해 영향을 받아 유동하여 어디까지 유동하는지 분석하는 도구이며, 분석을 위해 필요한 입력 자료는 입자의 좌표, 분석 범위, 분석 범위에 대한 풍향 및 풍속 등 바람환경 데이터가 있다. 분석을 위해 찬공기 생성지역 내 무작위로 선정한 찬공기 발생 지점에서 입자가 이동한다는 상황을 가정하였다. 또한 입자의 이동에 영향을 미치는 요인인 바람환경은 KLAM_21을 통해 분석된 찬공기 풍속 및 풍향 자료를 활용하여 구축하였다. 풍속 및 풍향 분석은 KLAM_21의 기본 출력자료이며, 냉각에너지 분석 결과와 함께 분석 시간대별 분석데이터가 출력된다. 본 연구에서는 찬공기의 유동이 가장 활발한 시간대이며 가장 높은 풍속값이 나타나는 냉각에너지 분석이 1시간 경과하였을 때의 데이터를 기준 자료로 활용하였다.

Particle Track을 통해 분석된 찬공기 이동 경로는 찬공기 생성지역 내에 위치한 지점에 따라 다양한 이동 경로가 나타난다. 예를 들어 하나의 찬공기 생성지역에서 다수의 찬공기 취약지역으로 이동하거나, 인접한 두 개 이상의 찬공기 생성지역이 이동경로가 합쳐지거나 동일한 찬공기 취약지역으로 이동하였다. 바람길은 찬공기 생성지역, 찬공기 취약지역, 찬공기 유동지역을 포함하는 개념이므로, 냉각에너지를 기준으로 바람길의 기능을 평가하고자 하는 본 연구의 목적에 따라 하나의 찬공기 생성지역은 하나의 찬공기 취약지역 및 찬공기 유동지역과 연결된다고 설정하였다. 이는 찬공기의 유동 범위를 제한한다는 단점이 있지만, 생성지역에서 취약지역으로 이어지는 바람길의 연속성을 명확하게 파악하기 위함이다.

3. 연구 결과

3.1 냉각에너지 분석

시간별 냉각에너지량 변화 분석을 통해 찬공기의 이동 및 확산하는 형태를 간접적으로 확인하였으며, 시간별 냉각에너지 분석을 종합하여 평균적인 생성량을 확인하고 찬공기가 주로 생성되는 지역을 확인하였다.

Figure 7은 일몰 이후 야간 10시간 동안 생성되는 찬공기의 냉각에너지를 분석한 결과이다. 시간이 경과함에 따라 외곽 산림지역의 냉각에너지량의 증가와 하천 및 도로를 따라 유동하는 냉각에너지의 분포 및 확산 형태를 확인하였다. 분석 시작 후 1시간이 경과하였을 때 산림의 계곡지형에서부터 냉각에너지가 생성되고 있는 형태를 보였다. 시간이 지나면서 점차 외곽산림에 냉각에너지량이 증가하며, 금호강, 신천 등 하천을 따라 시가지의 냉각에너지 양이 증가하고 있다. 이는 산림에서 생성된 찬공기가 하천을 따라 시가지 내부로 유입되는 현상으로 분석되었다.

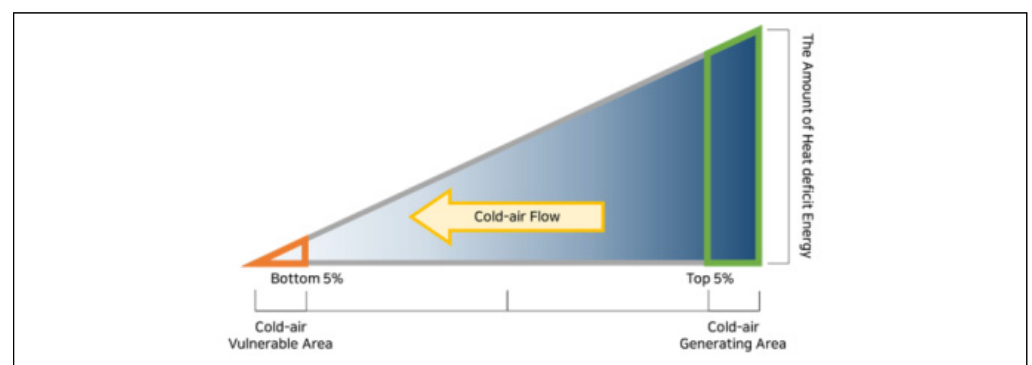


Figure 6. Classification of wind corridors according to the amount of heat deficit energy

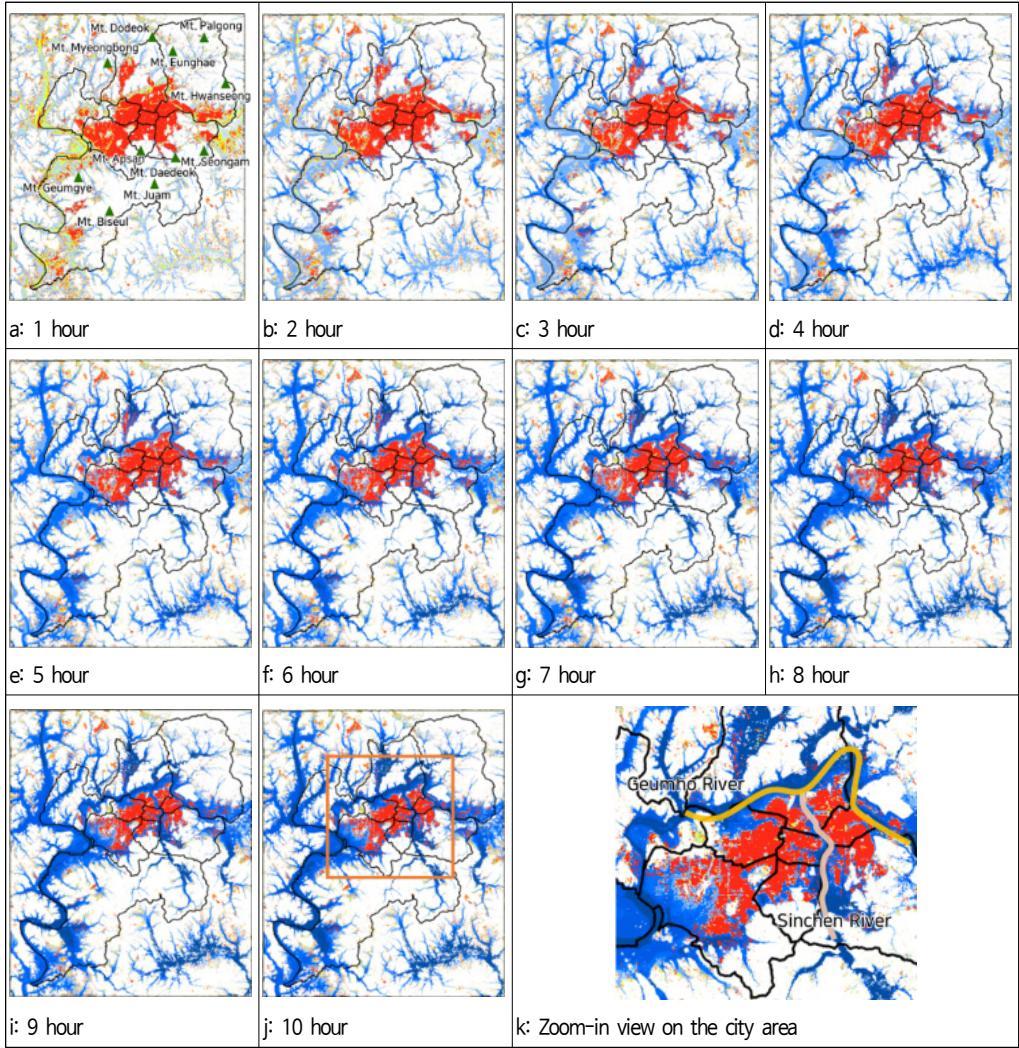


Figure 7. Hourly amount of heat deficit
Legend: 0-4 4-11 11-17 17-27 27-56 56-143 143-392 392-756 756-1,123 1,123-10,961 (100J/m²)

하지만 시가지 내부에 위치한 밀집된 건물들로 인해 찬 공기 흐름이 약해져 도심 내에서 큰 면적이 냉각에너지의 영향을 받지 못하였다.

냉각에너지의 평균 생성량에 대한 결과는 다음과 같다(Figure 8 참조). 대구광역시 내에서 생성되는 냉각에너지는 대구광역시 외곽에 위치한 산림지역에 집중되어 있다. 주요 생성지역은 대구광역시 남쪽에 위치한 비슬산 일대(최정산, 용지봉, 앞산 등)와 북쪽에 위치한 팔공산 일대(도덕산, 응해산, 명봉산 등)이다. 이 지역들은 해발고도가 높은 산이 밀집되어 있으며, 깊은 계곡지형이 형성되어 있어 산림에서 생성된 찬공기가 계곡지형으로 모여드는 곳이다. 반면에 대구광역시의 도심의 경우 밀집된 건물들에 의해 냉각에너지의 생성 및 유동이 원활하지 못하였다. 특히 대구광역시를 남북으로 가로지르는 하천인 신천을 기준으로 대구광역시를 서쪽과 동쪽으로 나누었을 때, 서쪽 지역이 동쪽 지역보다 더욱 냉각에너지 생성 및 유동이 취약하였는데, 이는 서쪽 지역에 위치한 중심시가지와 성서공업단지 등 대규모 공업단지가 위치한 영향인 것으로 판단하였다.

반면, 도심까지 냉각에너지를 유동시켜 열환경을 개선하는 도시공간도 존재하였다. 대구광역시 도심 내에 위치한 도로, 하천과 공원들은 열악한 냉각에너지 환경을 개선하고 있다. 하천은 외곽 산림에서 생성된 찬공기가 유동하는데 가장 큰 역할을 하고 있다. 대구광역시는 신천, 금호강, 낙동강을 도시 중심과 외곽에 보유하고 있으며, 주변 냉각에너지 환경에 큰 영향을 미치고 있다. 그리고 도로 또한 냉각에너지를 유동시키는 찬공기의 주요 이동통로 역할을 하였다. 도로의 폭이 넓은 도로일수록 많은 양의 찬공기가 유동할 수 있으므로 철도 및 달구벌대로와 같은 폭이 넓은 도로일수록 냉각에너지량이 뚜렷하게 관찰되었다.

공원은 도심 내 녹지공간으로 냉각에너지를 생산할 수 있다. 공원은 주변에 위치한 주거지, 상업지, 공업지 등

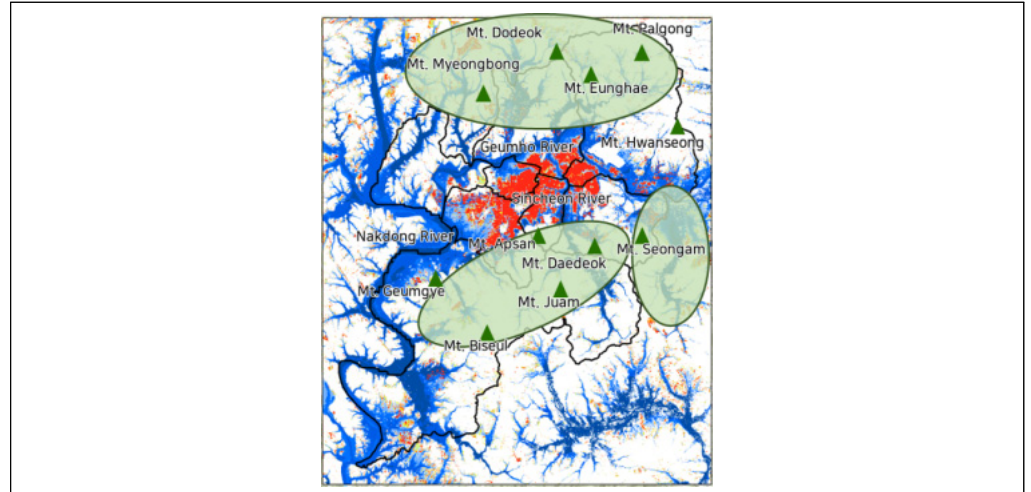


Figure 8. Average amount of heat deficit

Legend: (unit: 100J/m²)



도시 주요 생활지역에 위치하여 생산된 냉각에너지를 해당 지역으로 유동시킨다. 특히 두류공원, 달성공원, 범어공원, 야시골공원 등 산지형 공원은 평지에 위치한 공원보다 냉각에너지량이 높게 나타났다. 산지형 공원은 경사에 의해 생성된 찬공기는 공원 주변에 위치한 취약한 도시지역으로 유동하였다.

3.2 바람길 구성요소 분류

3.2.1 찬공기 생성지역과 찬공기 취약지역의 분류

본 연구의 바람길 분류 기준에 따라 냉각에너지량 상위 5%에 속하는 지역을 찬공기 생성지역으로 분류하였으며, 생성된 찬공기가 대구광역시 내부에 영향을 미치는 6곳을 선정하여 선정지역의 세부 현황을 파악하였다(Figure 9 참조).

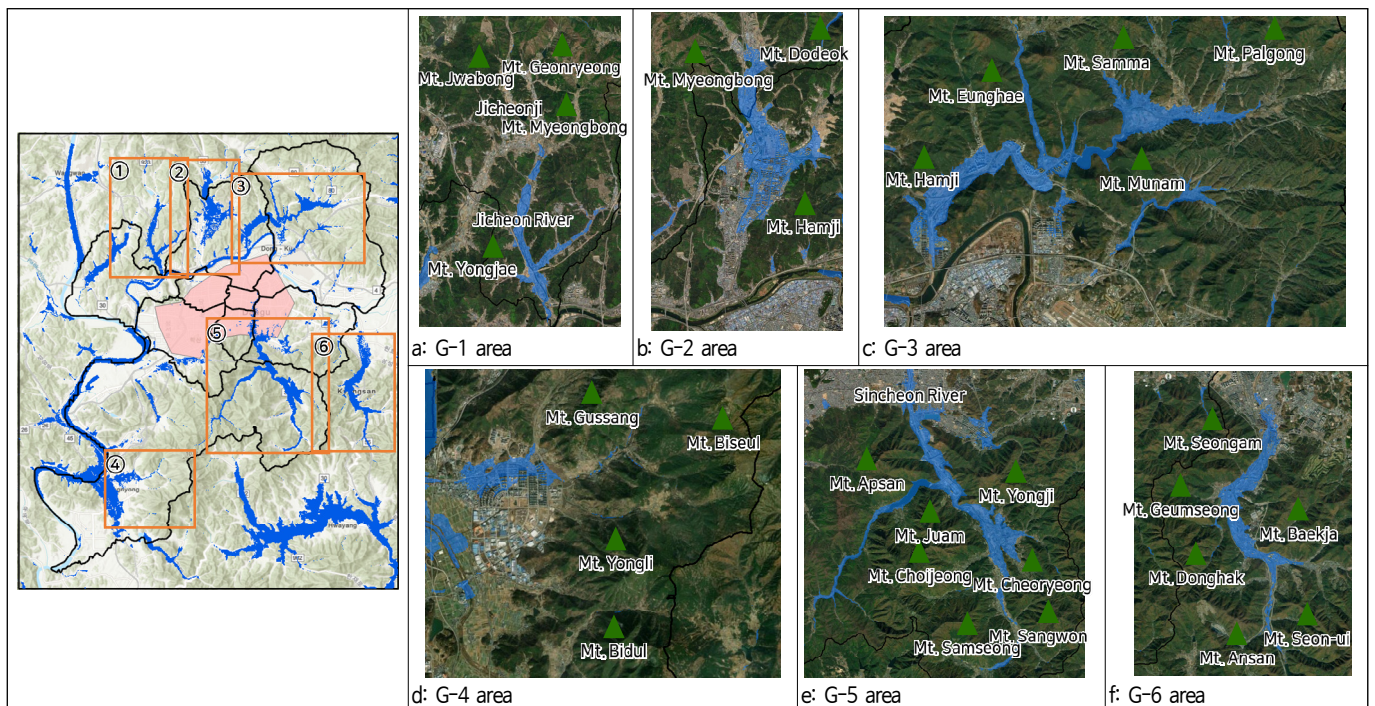


Figure 9. Cold-air generating areas (CGAs)

Legend: Cold-air generating area (top 5%) Cold-air vulnerable area (bottom 5%)

G-1번 지역은 경상북도 칠곡군 지천면에 위치한 지천 유역 일대이다. 대상 지역은 북쪽에 위치한 좌봉산, 건령산, 명봉산 등 산림에서 생성된 찬공기가 계곡지형을 따라 지천유역으로 모이고 있다. G-1번 지역에서 생성된 찬공기는 지천을 따라 금호강으로 합류하여 동쪽으로 흐르는 형태를 보였다.

G-2번 지역은 대구광역시 북구 동천동 일대이다. 명봉산, 도덕산, 함지산 등 산림에서 생성된 찬공기가 계곡지형을 따라 합류하였으나 산림 하부에 밀집되어 있는 건축물이 찬공기의 흐름을 방해하였다. 따라서 G-1번 지역과 달리 생성지역이 금호강과 직접적으로 연결되지 않았다.

G-3번 지역은 대구광역시 동구 지묘동 일대이다. 팔공산에서 생성된 찬공기가 합류하며, 지묘동 주변의 삼마산, 문암산, 웅해산 등의 산림에서 생성된 찬공기가 이어지고 있다. 이 지역은 계곡지형을 따라 길게 이어져 있는 것이 특징이며, 생성지역이 금호강과 직접 연결되어있다.

G-4번 지역은 대구광역시 달성군 유가읍 테크노폴리스지구이다. 비슬산을 비롯한 구쌍산, 용리산 그리고 비둘산 등의 산림에서 생성된 찬공기가 합류한 지역으로 짧은 계곡지형과 넓은 농지에 형성된 것이 특징이다.

G-5번 지역은 대구광역시 수성구 파동 일대이다. 달성군 가창읍에서부터 이어진 찬공기 생성지역은 대구광역시 남쪽에 위치한 대규모 산림에 의해 가장 큰 영향을 받는 계곡지형이다. 삼성산, 상원산에서 최정산, 청령산을 지나 앞산과 용지봉까지 이어져 신천을 따라 대구광역시의 중심시가지로 이어진다. 찬공기 생성량이 많고, 대구광역시 시가지로 연결성이 좋아서 가장 중요한 찬공기 생성지역으로 판단된다.

마지막으로 G-6번 지역은 경상북도 경산시 옥곡동 일대이다. 안산, 선의산에서 시작한 생성지역은 동학산, 백자산을 이어 금성산 성암산까지 이어진다. 이후 찬공기의 흐름은 남천을 따라 유동하며 인근에 위치한 대구광역시 시지구에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

생성 지역은 외곽 산림에 위치한 계곡지형을 따라 형성된 것을 확인할 수 있었으며, 계곡지형에 집중된 냉각에너지는 주변 산림에서 생성된 찬공기의 영향이라 볼 수 있다. 하지만 냉각에너지 분석 결과에서는 주변 산림지역이 생성지역에 포함되어 있지 않는데, 실제 생성지역에 대한 조성 및 관리전략을 수립할 때에 계곡지형에 형성된 냉각에너지의 근원지역인 유역범위를 포함하여 계획해야 할 것이다.

찬공기 취약지역의 경우 냉각에너지 하위 5%에 해당하는 지역으로 대구광역시 중구를 비롯한 주변 지역이 포함된 중심시가지에 밀집되어 있었으며, 본 연구에서는 중심시가지 지역을 찬공기 취약지역으로 분류하고, 찬공기 생성지역에서 중심시가지로 이동하는 찬공기의 흐름을 평가하였다.

3.2.2 찬공기 유동지역 분류

찬공기 유동지역은 찬공기 생성지역에서 생성된 찬공기가 냉각에너지가 낮고 취약한 지역으로 이동하는 경로를 의미한다. 따라서 Particle Track 분석에 따라 찬공기 생성지역에서 발생한 입자 형태의 찬공기가 유동하고 전달되는 이동 경로를 찬공기 유동지역으로 선정하였다(Figure 10 참조). 앞서 분석한 찬공기 생성지역 6곳의 찬공기 유동지역을 선정한 결과는 다음과 같다.

찬공기 유동지역은 생성지역에서 취약지역까지 연결이 되어있는지에 따라 분류하였다. F-1번, F-2번과 F-6번 찬공기 유동지역은 취약지역까지 연결되기 전에 생성된 찬공기의 흐름이 약해졌다. F-1번 지역은 금호강을 따라 찬공기가 유동하다가 낙동강과 합류하는 지점에서 연결이 약해졌으며, 달성읍지에서 진천천으로 흐르는 미약한 흐름이 나타났다. F-2번 지역은 칠곡 주변 산림에서 생성된 찬공기가 건축물에 의해 가로막혀 금호강과 합류하기 전에 흐름이 약해졌다. 이 지역은 찬공기 생성은 원활하지만 찬공기가 흐를 수 있는 공간이 부족하고 주요 찬공기 유동지역인 하천과의 연결성이 부족하였다. F-6번 지역도 경산의 남천을 따라 흐름이 나타나 건축물에 의해 취약지역으로 연결되기 전에 흐름이 약해졌다.

반면에 F-3번, F-4번 그리고 F-5번 지역은 생성된 찬공기가 취약지역까지 비교적 원활한 흐름을 보였다. F-3번 지역은 계곡에서 금호강으로 이어지는 흐름이 원활하게 나타났으며, 금호강에서 신천을 따라 흘러 찬공기 취약지역인 침산동, 산격동 등 북구에 위치한 주요 시가지로 유입되었다. F-4번 지역은 테크노폴리스지구의 시가지 전역에 뚜렷한 찬공기 유동지역이 형성되어 있고, 낙동강까지 흐름이 원활하였다. F-5번 지역은 주변에 위치한 산림에 의해 형성된 계곡지형을 중심으로 찬공기의 유동이 찬공기 취약지역인 수성구의 파동 및 상동, 황금동 지역으로 영향을 미치고 있다. 또한 찬공기 생성지역에서 생성된 찬공기가 남북방향으로 이어진 신천과 범어천로를 따라 시가지 내부로 유입되며, 달구벌대로와 철도와 만나는 지점에서 동서 방향의 흐름으로 이어졌다.

찬공기 유동지역은 시가지 내부에 위치한 찬공기 취약지역으로 연계되는 바람길 유형이다. 따라서 찬공기의 흐름이 방해받지 않고 취약지역으로 연결되는 것이 가장 중요한 요소인데, F-1, F-2, F-6번 지역처럼 유동이 원활하지 못한 경우에 흐름을 개선해줄 전략을 중심으로 바람길 조성 전략을 제안해야 한다.

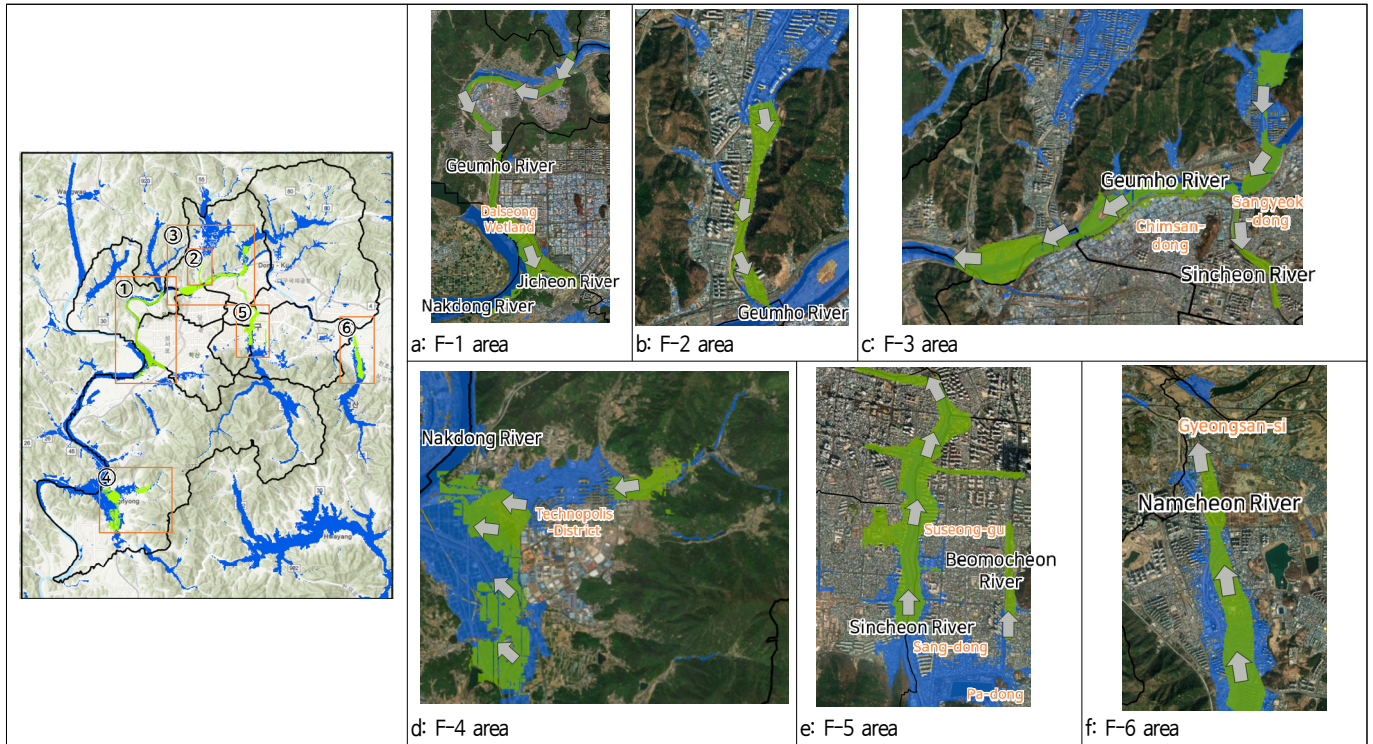


Figure 10. Cold-air generating areas (CGAs)

Legend: ■ Cold-air generating area ■ Cold-air flowing area ➔ Cold-air flow

찬공기 유동지역의 가능성 현황을 파악하고, 생성지역에서 취약지역으로 잘 유동하는지 분석하기 위해 바람길 특성을 비교하였다. 바람길 특성 평가 항목은 찬공기 유동지역의 면적, 생성지역에서 취약지역까지의 최단거리, 냉각에너지량, 찬공기 풍속이다.

찬공기 유동지역의 면적을 분석하였을 때, F-1번 지역의 찬공기 유동지역이 5.06km^2 으로 가장 넓은 면적을 가졌다. 이후 F-3번(4.75km^2), F-4번(4.49km^2), F-5번(2.67km^2), F-6번(2.05km^2) 순이었으며, F-2번의 면적이 0.57km^2 으로 가장 작았다. F-1번, F-3번, F-5번, F-6번의 경우 하천을 따라 넓은 면적을 차지하고 있었지만, F-4번의 경우 넓은 농경지가 찬공기 유동지역으로 기능을 하고 있었다. F-2번 지역은 찬공기 생성지역과 시가지지역이 인접해 있어 유동지역이 발달하지 못하고, 시가지의 도로 및 하천을 따라 좁게 형성되었다.

찬공기 생성지역에서 찬공기 취약지역까지의 최단거리를 비교하였을 때, F-5번 지역이 3.2km 로 가장 짧았고, F-2번(3.8km), F-4번(5.0km), F-6번(6.8km), F-3번(10.8km), F-1번(14.3km)으로 분석되었다. 찬공기 유동지역은 거리가 짧을수록 생성지역에서 생성된 찬공기가 취약지역으로 유입될 가능성이 높은 것으로 판단하고, 거리가 짧은 지역이 찬공기 유동지역으로서 가치가 높다고 판단하였다.

다음으로 냉각에너지량을 비교하였다. 에너지는 F-3번 지역이 $1,353.7 \times 100\text{J}/\text{m}^2$ 로 가장 냉각에너지의 양이 많았으며, F-6번($1,282.7 \times 100\text{J}/\text{m}^2$), F-4번($1,208.4 \times 100\text{J}/\text{m}^2$), F-1번($1,155.9 \times 100\text{J}/\text{m}^2$), F-5번($1,059.9 \times 100\text{J}/\text{m}^2$), F-2번($710.7 \times 100\text{J}/\text{m}^2$) 순으로 많았다. F-3번은 팔공산 일대에서 생성된 찬공기를 금호강의 넓은 강변으로 원활하게 이동시켰으므로 냉각에너지의 양이 가장 많았다. F-5번은 냉각에너지의 유동이 원활하나 유동지역의 주변이 찬공기 취약지역이 많아 주변의 영향에 의해 냉각에너지의 양은 비교적 적게 나타났다.

찬공기 풍속은 F-1번 지역이 0.14m/s 로 가장 높게 나타났다. 이후 F-3번(0.13m/s), F-4번(0.12m/s), F-6번(0.1m/s), F-2번(0.07m/s), F-5번(0.05m/s)이다. F-1번과 F-3번 지역은 금호강을 따라 흐르는 찬공기 유동지역이며 건축물의 영향을 받지 않고 원활한 흐름을 보였다. 하지만 F-2번과 F-5번은 주변 건축물과 취약지역으로 분석된 지역에 의해 찬공기의 흐름이 방해받고 있어 가장 낮은 풍속이 나타났다.

각 평가항목 순위를 종합하여 기능이 원활한 찬공기 유동지역에 대한 순위를 선정하였다. 가장 원활한 지역은 F-3번(10점)으로 분석되었다. 이는 찬공기 생성지역에서 금호강으로 바람통로 연결성이 좋고 신천을 통한 찬공기 취약지역으로의 접근이 원활한 점이 높은 평가를 받았다. 이후 F-1과 F-4번 지역이 같은 점수(12점)를 받으며 원활한 지역으로 평가받았고, F-6번(15점), F-5번(16점), F-2번(19점) 순으로 평가되었다(Table 3 참조).

Table 3. Comparison of wind corridor characteristics in cold-air flowing areas

Area	Area (km ²)	Distance (km)	Heat deficit (100J/m ²)	Velocity of cold-air (m/s)	Total	Rank
1st	1 (5.06)	6 (14.3)	4 (1,155.9)	1 (0.14)	12	2
2nd	6 (0.57)	2 (2.8)	6 (710.7)	5 (0.07)	19	6
3rd	2 (4.75)	5 (10.8)	1 (1,353.7)	2 (0.13)	10	1
4th	3 (4.49)	3 (5.0)	3 (1,208.4)	3 (0.12)	12	2
5th	4 (2.67)	1 (3.2)	5 (1,059.9)	6 (0.05)	16	5
6th	5 (2.05)	4 (6.8)	2 (1,282.7)	4 (0.12)	15	4

4. 결론

본 연구는 야간 산림에서 생성되는 찬공기의 양을 정량적으로 평가하기 위해 냉각에너지를 활용하였다. 대구광역시를 대상으로 냉각에너지 생성량을 기준으로 찬공기의 생성능력을 판단하였으며, 냉각에너지 생성량에 따라 바람길을 분류하였다. 찬공기 분석 모형인 KLAM_21을 활용하여 대구광역시의 냉각에너지를 분석하였고, 분석 범위 내의 냉각에너지 생산량을 나열하고 상위 5%와 하위 5%를 산정하여 각각 찬공기 생성지역과 찬공기 취약지역으로 설정하였다. 또한 ArcGIS Pro의 Particle Track 기능을 활용하여 생성지역에서 취약지역으로 냉각에너지가 이동하는 찬공기 유동지역을 분석하였다. 찬공기 유동지역은 생성지역과 취약지역을 일대일 대응이 되도록 생성된 찬공기 가 유동경로 중에 가장 우세한 바람길을 판단하였다.

냉각에너지 분석 결과에 따라 찬공기 생성지역은 총 6곳으로 파악되었다. 대구광역시의 외곽을 따라 남북으로 각각 3곳이 위치하며 주변 산림에 의해 생성된 찬공기가 모이는 계곡지형에 분포하고 있다. 6개의 지역은 경상북도 칠곡군 지천면 일대, 대구광역시 북구 동천동 일대, 동구 지묘동 일대, 달성군 유가읍 테크노폴리스지구, 수성구 파동 일대, 경산시 옥곡동 일대의 산림으로 파악되었다. 찬공기 유동지역은 찬공기 생성지역과 연결되어 계곡지형에서 하천과 도로로 이어지는 형태를 보였다. 찬공기 유동지역 역시 주변 파복 상태에 따라 원활한 흐름을 보이는 지역도 존재하였으나, 건축물에 의해 흐름이 끊어져 유동지역이 발달하지 못한 지역도 존재하였다. 동구 지묘동 일대, 달성군 유가읍 테크노폴리스지구, 수성구 파동 일대 지역은 비교적 찬공기의 유동이 원활한 지역으로 나타났고, 경상북도 칠곡군 지천면 일대, 대구광역시 북구 동천동 일대, 경산시 옥곡동 일대의 산림지역은 흐름이 원활하지 못하였다.

본 연구는 찬공기 및 바람길을 평가할 정량적인 지표를 활용하였다는 점에 의의가 있다. 바람길의 기능을 냉각에너지 분석을 통해 수치적으로 표현하였고, 바람길의 연속성을 파악하였다. 또한 국내에서 활발하게 진행되고 있는 바람길숲 조성사업에서 바람길숲 조성 대상지를 선정하는 데에 바람길의 기능을 평가하는 요소로서 활용될 수 있음을 확인하였으며, 이에 바람길숲 조성에 대한 과학적 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 바람길숲 유형 중 바람 생성숲에 대한 조성 전략을 수립하기 위해 냉각에너지량이 상대적으로 많은 찬공기 생성지역을 조성 대상지로 선정하고, 찬공기 생성지역에 영향을 미치는 주변 산림 유역을 파악하여 공간 관리 방안을 제안할 수 있다. 냉각에너지라는 정량적 지표가 제시됨에 따라 바람길 유형이나 대상지에 따라 상대적으로 더 취약한 지역을 파악할 수 있고, 대상지 세부 전략을 수립하기에 활용된다.

하지만 본 연구는 KLAM_21의 찬공기 산정 방식과 냉각에너지 계산식에 의존하고 있으며, 과학적 근거로 활용하기 위해서 산출된 냉각에너지가 기온 저감 효과와 얼마나 관련이 있는지 검증할 필요가 있다. 또한, 분석 결과가 찬공기 생성지역이 산림에 편중되어 있고, 유동지역의 연결성을 평가하는 취약지역은 중심시가지에 밀집된 형태로 분석이 되었다. 이대로 바람길숲 조성 사업에 적용된다면 외곽에 위치한 취약지역은 소외될 우려가 있고, 사업의 지역적 불균형이 발생할 수 있다. 따라서 추후 연구를 통해 외곽지역에 대한 보정방식이 고안되어야 할 것이다. 한계점을 개선하기 위해 바람길 분석의 행정단위를 세분화하여 소규모 취약지역도 고려할 수 있는 전략을 마련하거나, 바람길 유형으로 분류하는 면적 단위를 포함하는 방법이 있을 것이다. 찬공기 취약지역의 최소 면적을 설정하여, 기준을 초과하는 대상지들은 동일하게 취약지역으로 포함하여 외곽지역의 취약지역을 포함하는 전략이라 할 수 있다.

References

1. Deutscher Wetterdienst(2019) Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21.
2. Eum, J. H.(2008) Integration of climate information into spatial planning in Seoul, South Korea. Ph.D.

- Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany.
3. Eum, J. H. and J. M. Son(2016) Management of the Nakdong-Jeongmaek based on the characteristics of cold air – Focused on Busan, Ulsan, Pohang. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 44(5): 103–115.
 4. Eum, J. H., J. H. Oh, J. M. Son, K. Kim and C. H. Lee(2019) Analysis schemes of wind ventilation forest types – A case of wind ventilation forest types – A case study of Deagu Metropolitan City -. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 22(4): 12–23.
 5. Eum, J. H., J. M. Son, K. H. Seo and K. H. Park(2018) Management strategies of ventilation paths for improving thermal environment –A case study of Gimhae, South Korea-. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(1): 115–127.
 6. Grunwald, L., A. K. Schneider, B. Schroeder and S. Weber(2020) Predicting urban cold-air paths using boosted regression trees. *Landscape and Urban Planning* 201: 103843.
 7. Grunwald, L., M. Kossmann and S. Weber(2019) Mapping urban cold-air paths in a Central European city using numerical modelling and geospatial analysis. *Urban Climate* 29: 100503.
 8. IEA(2021) World Energy Outlook.
 9. IPCC(2021) Climate Change.
 10. Jang, G. S., J. H. Eum, J. M. Son, J. B. Baek, W. J. Sung, J. E. Kim and S. H. Kim(2019) Application of Wind Ventilation Corridor Model in Urban Forest Planning and Management. *National Institute of Forest Science*. pp. 1–82.
 11. Son J. M., J. H. Eum, U. J. Sung, J. B. Baek, J. E. Kim and J. H. Oh(2020) A proposal of direction of wind ventilation forest through urban condition analysis – A case study of Pyeongtaek-si -. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 23(4): 101–119.
 12. Son, J. M. and J. H. Eum(2019) Analysis and management strategies of the cold air characteristics in Hannamgeumbuk –Jeongmaek and Geumbuk-Jeongmaek. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 22(2): 152–171.
 13. Sung, U. J., J. H. Eum, J. M. Son and J. H. Oh(2021) Planning strategies of wind corridor forests utilizing the properties of cold air. *Land* 10(6): 607.
 14. UNEP(2021) Emissions Gap Report.
 15. Yi, C. Y., S. M. An, K. R. Kim and Y. J. Choi(2012) Improvement of air temperature analysis by precise spatial data on a local-scale –A case of study of Eunpyeong New Town in Seoul-. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1): 144–158.