

도시열섬현상에 따른 인천 항만 지역의 해륙풍 변화 특성 분석

권용범

한국생산기술연구원 국가희소금속센터 연구원

Impact of urban heat island on the sea-land breeze around Incheon port area

Kwon, Yongbum

Researcher, Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, Korea

ABSTRACT

This study investigates the characteristics of the urban heat island by examining the variation in intensity of anthropogenic heat around the Incheon port area. Higher anthropogenic heat due to the accelerated global climate change has an impact on the strength and properties of local wind circulations, particularly in urban areas. Incheon is the second largest port-city in the Republic of Korea and contains diverse air pollution sources such as a large population, major industry, and ample large marine vessels. As a result of the higher intensity of anthropogenic heat around the Incheon region, the sea breeze is gaining strength, while the strength of land breeze is rapidly decreasing. This sea-land breeze pattern created by the increasing anthropogenic heat around the urban area has significant implications because the strong sea breeze can easily transport maritime air emission to deep inland area, whereas the weak land breeze barely disperses and/or dilutes the accumulated air pollution from the port and city to the surrounding areas. In other words, climate change directly influences anthropogenic heat and will affect not only human society, but also the atmosphere, especially in urban areas. Therefore, the considerations of this study are meaningful to provide further understanding between local wind circulation and air quality of urban areas in coastal regions as well as of the development of suitable management strategies.

Key words: Urban Heat Island, Incheon, Sea-Land Breeze, Urban Air Quality Implication, Climate Change

1. 서론

도시는 현대인들에게 사회적, 경제적 활동의 중심이 되는 생활영역으로 각종 인프라가 집약되어 있어 그 중요성이 매우 크다. 지난 반 세기 동안 전 세계적으로 이미 급격한 도시화가 이루어 졌으며, 2050년에는 도시인구가 전 세계 인구의 약 70%에 근접할 것으로 내다보고 있다(UN DESA, 2018). 광범위한 도시화와 에너지 소비, 인구 증가는 환경 오염물질 발생, 기상 및 국지풍의 순환과 같은 기후 특성 변화와 관련이 깊기 때문에 각별한 관심을 요하기도 한다. 특히, 도시열섬(Urban heat island, UHI) 현상

은 도심 특정 지역이 주변 교외 지역에 비하여 더 높은 기온을 나타내는 현상으로 선행연구에서는 기후 변화로 인하여 그 발생 특징이 더욱 복잡해지는 것으로 보고된다(Emmanuel and Krüger, 2012; Halder et al., 2021; McCarthy et al., 2010). 가령 Sachindra et al. (2016)는 기후변화에 따른 극한의 날씨 빈도와 도시열섬현상에 미치는 영향에 대하여 분석하였는데, 그 결과 온실가스 농도가 증가함에 따라 도시 지역의 도시열섬강도(Urban heat island intensity, UHI) 또한 증가하는 경향을 보인다고 밝힌 것이 일례라 할 수 있다. 도시열섬현상의 발생은 도시를 구성하고 있는 아스팔트, 콘크리트와 같은 도시피복,

†Corresponding author : kyb916@kitech.re.kr (194, hogupo-ro, Namdong-gu, Incheon, 21655, Korea. Tel. +82-32-266-1366) ORCID [0000-0002-4356-3108](https://orcid.org/0000-0002-4356-3108) 권용범

표면의 거칠기(모양), 도시의 열용량 등을 주된 원인으로 꼽는다. 뿐만 아니라 도시화로 인한 초고밀도 개발, 녹지면적 감소, 에너지 수요 증가에 따른 온실가스 배출, 여름철 냉방기 실외기의 열기는 기후변화를 더욱 가속화하고 있으며, 이는 곧 도시열섬현상을 심화시키는 악순환으로 연결된다.

도시열섬현상은 도시와 기후변화, 대기환경을 연구하는 다양한 학문에서 도시 미기후(Microclimate) 특성 뿐만 아니라 보다 큰 시공간적 규모인 광역 기후(Macroclimate) 특성의 시각에서 심도 있게 진행되었다. Ahn et al. (2012)은 부산시의 장기적 토지피복변화 분석을 통하여 자연환경이 인공구조물로 변해감에 따라 도시열섬현상이 얼마나 심화되었는지 추정하였다. 그 결과 토지피복도에 따라 산림 및 농업 지역의 열섬포텐셜은 $-6 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 로 도시열섬 유발 가능성이 낮은 반면, 도심 공업 지역 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$, 주거 지역 및 상업 지역은 $0 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 로 토지이용에 따른 기온상승 효과를 정량적으로 제시하였다. Sailor (2011)는 도심 지역 지표면의 높은 거칠기가 지면의 가파른 온도 상승과 높은 난류 혼합에 기여한다고 발표한 바 있다. Hong et al. (2013)는 4년간 서울의 29개소 자동기상관측망(Automatic weather station, AWS) 자료를 활용하여 도시열섬강도와 일교차의 편차를 정량화 하였다. 이를 통하여 서울 지역의 도시열섬강도는 국지기후대 (Local climate zone, LCZ) 분류에 따라 같은 도심 내라도 고층 건물 밀집 지역과 식생 지역 간 도시열섬강도는 최대 4.3°C 까지 차이가 발생한다고 정리하였다. 그동안 도시열섬현상에 대한 대다수의 연구에서 AWS가 활용되었으나 분석 대상 지역에 측정망이 충분히 구축되어 있지 않은 경우 그 특성을 대표하기 어려운 한계가 있었다. 이러한 이유로 Je and Jung (2018)은 소형 측정장비 시스템을 구축하여 기상청 AWS와 함께 서울 지역에 총 239개소로부터 측정된 대규모의 자료를 수집하여 열섬강도분석을 수행하였다. 최근 들어서는 에너지 소비 저감을 통한 기후변화 완화 측면에서 도시열섬현상을 감소함으로써 도시에서 냉방을 위해 소비되는 에너지를 절감하는 방안도 제시되고 있다 (Kondo et al., 2021; Mutani and Todeschi, 2020).

도시열섬현상은 단순히 도심 특정 지역에 국한되어 온도만 상승시키는 것에 그치지 않는다. 도시열섬현상이 발생됨에 따라 도심 지역의 국지적 대류 기능은 줄어들거나 단절되기 때문이다. 이는 결국 교외 녹지에서 발생한 상대적으로 기온이 낮고 신선한 공기의 도심 내 유입을 차단함과 동시에 도시에서 기인하는 다량의 대기오염물질이 외부로 확산되는 것을 방해함으로써 도시 지역 시민들

의 건강과 삶의 질에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 현상은 해륙풍이나 산곡풍과 같이 독특한 국지풍 특성을 갖는 해안도시, 분지나 산간 지역에서 더욱 분명하게 나타난다. 특히, 해안도시의 경우 황함유량이 비교적 높은 병커유 등의 연소에서 발생하는 다량의 선박 기인 대기오염물질의 영향을 직접적으로 받을 수 있기 때문에 보다 체계적인 관리가 필요하다(Kwon, 2022; Kwon et al., 2019). 우리나라 대표적 항구도시인 인천은 인천항, 경인고속도로, 인천국제공항, 국가산업단지 등 풍부한 도시 인프라를 기반으로 하고 있어 환경적 측면에서 바라보았을 때 다양한 대기오염물질 배출원의 존재로 이해할 수 있다. 발생한 대기오염물질은 주변으로 확산과 외부의 깨끗한 대기 유입으로 농도 저감이 가능하겠으나, 도시열섬현상이 인천 지역의 해륙풍 발생 특성에 영향을 미친다면 자연 확산과 같은 자정 작용에 따른 도시 대기질 개선을 기대하기 어렵다. 더욱이 항만에서 발생하는 대규모의 선박 기인 대기오염물질들이 해륙풍에 의하여 도심까지 침투한다면 도시 대기질은 더욱 심각해질 수 있다. 때문에 도시열섬현상과 항구도시 대기 흐름 특성을 이해하기 위한 연구는 매우 중요하다.

그러나 그동안 대부분의 연구에서는 그 대상지역이 서울에 국한되어 왔고, 그 범위가 경기와 인천을 포함한 수도권으로 확대되었다 할지라도 지역별 토지 이용에 따른 열섬강도 산정이 주를 이루어 도시열섬현상이 국지풍에 어떠한 영향을 끼쳤는지에 대한 정량적인 분석은 드물었다. 본 연구에서는 대기 모델링을 통하여 도시열섬강도가 인천 지역의 해륙풍에 미치는 영향을 예측하고 그에 따라 기후·대기환경적 시각에서 고찰하고자 하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역 및 기간

인천($37^{\circ}29'N$, $126^{\circ}38'E$)은 수도 서울과 접하고 있는 인구 약 300만명의 대도시로 부산에 이어 우리나라 제2의 항구도시로 여겨진다(Fig. 1). 그 중에서도 인천항(Fig. 1 (★))은 1883년 개항하여 오랜 기간 수도권 해운물류의 중심지로 자리잡아 지역 경제에 기여해 왔다. 최근에는 선박 기인 대기배출에 대한 사회적·환경적 우려가 증가됨에 따라 선박 기인 대기오염물질의 항만 지역 영향에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있다. 인천 지역은 독특한 지리적 특성으로 인하여 선박 기인 대기 배출을 포함한 지역

내·외부에서 발생된 대기오염물질이 해륙풍에 의하여 바람 방향에 따라 이동 및 확산하게 된다.

본 연구의 대상 기간은 인천 지역에 도시열섬현상이 발생하기 쉬우며, 해수면과 지면의 온도차가 커지게 되는 여름철 고온 기간 중 선정하고자 하였다. 이에 인천 지역에 위치한 종관기상관측장비(ASOS, Automated synoptic observing system)로부터 수집된 2013년부터 2022년 까지의 자료를 분석하여 10년 평균 기온이 가장 높은 날을 꼽았다. 그 결과 8월 5일이 직전 10년 동안 평균 기온이 가장 높은 것으로 확인되었고, 해당일을 포함한 1주일(8월 1일부터 8월 7일) 해륙풍 모사 기간으로 설정하였다.

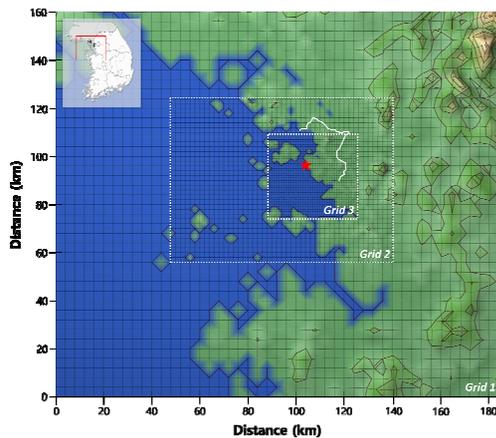


Fig. 1. Study domain around Incheon port (★) and grid design for sea-land breeze modeling

2.2. 도시열섬현상에 따른 해륙풍 모사

해륙풍의 발달 특성은 그 지역의 기후조건, 바다와 육지 간 표면의 온도차, 표면의 물리적 성질 등 다양한 영향 요인에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 인천 항만 지역에서 발생하는 해륙풍 모사를 위하여 연구 대상 지역의 알베도, 표면 온도, 비열, 토지 이용도, 토양 내 수분 함유량, 인공열과 같이 지형 정보가 고려 가능한 Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation-Random Puff Transport and Diffusion (HOTMAC-RAPTAD) 프로그램을 활용하였다. HATMAC-RAPTAD는 라그랑지안(Lagrangian puff) 모델을 기반으로 하며 지역 단위의 대기 움직임을 비선형(Non-linear) 및 비정상(Unsteady) 특성과 함께 구현하는데 적합하다. 때문에 가우시안 모델(Gaussian plume model)이 해륙풍이나 산곡풍과 같은 국지 순환풍을 모사하는데 갖는

한계의 보완이 가능하다. 또한 프로그램 내에서 계산된 바람장을 시간 변화에 따라 구현할 수 있어 지역풍 영향 범위에 대한 이해가 용이하다.

연구 대상 지역의 지형정보는 미국 지질조사국(USGS, United States Geological Survey)에서 제공하는 자료를 입력하였으며, 지표온도, 습도, 기압과 같은 기상 정보는 우리나라 기상청(www.weather.go.kr)의 통계자료를 적용하였다. 본 연구에서는 인천 지역 열섬현상에 따른 해륙풍 변화 특성을 살펴보기 위하여 도시열섬현상 발생에 직간접적으로 영향을 미치는 인공열(AH, Anthropogenic heat) 입력값에 변화를 주었다. USGS에서 제공하는 토지정보에 따르면 도심 지역의 AH 기본 권장값은 50 W/m^2 이지만, 도시열섬강도에 따른 표면 온도 변화와 해륙풍 발생 특성을 살펴보고자, AH 입력값을 0, 50, 100, 150, 200 W/m^2 으로 변화시켜 5단계의 UHI강도에 따른 바람장 모사 결과를 비교 분석하였다. 다시 말하자면 AH 입력값이 50 W/m^2 에서 0으로 줄어들게 된다면, 도심 지역에 도시열섬현상이 발생하지 않거나 기존보다 감소하는 상태를 나타내며, 반면 기존의 AH보다 더 큰 AH이 발생하는 경우 도시 열섬현상이 심화되는 상태로 간주하였다. 이를 통하여 도시열섬현상에 따른 해륙풍 변화 모사가 가능하였으며, 그에 따른 항구도시 대기질에 미칠 수 있는 가능성을 기후·대기환경적 시각에서 고찰할 수 있었다. 이미 기존 연구에서는 특정 지역에서의 AH에 따른 도시열섬현상 발생 변화 연구가 수행된 바 있으나(Chen et al., 2009; Li et al., 2021; Shahmohamadi et al., 2011), 인천과 같은 항만 도시에서 나타날 수 있는 도시열섬현상 영향에 따른 국지풍 변화 특성을 분석한 사례는 드물다.

2.3. 해륙풍 영향 범위 해석

AH 변화에 따라 그 특성이 달라지는 인천 항만 지역의 해륙풍 모사 결과를 활용하여 수학적 해석을 통한 해륙풍의 영향 범위 산정이 가능하다. 이를 활용하여 도심 내에서 발생되거나 혹은 외부로부터 연구 대상 지역에 유입된 대기오염물질이 지역 국지풍을 따라 어느 범위까지 순환하게 되는지 미루어 짐작할 수 있다. 수식 1은 해풍과 육풍의 침투 거리 계산을 위한 수학적 식으로 Haurwitz (1947)가 소개한 이후 다양한 연구에서 널리 활용되고 있다(Jeong et al., 2008; Kwon and Cho, 2021; Pokhrel and Lee, 2011).

$$L = \frac{0.3429 \times 10^5 h}{T_m \bar{V}} (T_a - T_b) \quad (1)$$

이때 L 은 해풍 또는 육풍이 발생한 지점으로부터 육지 또는 바다로의 침투거리[km], h 는 상공 높이[km], T_m 은 지표면과 혼합고에서의 평균 기온[°C], \bar{V} 는 해륙풍 평균 풍속 [m/s], 그리고 T_a 와 T_b 는 각각 바다와 지표에서의 기온 [°C]을 의미한다. 정리하자면, 바다와 육지의 해륙풍 침투 거리의 합이 L 이므로 해안선으로부터 해풍 또는 육풍의 거리는 $L/2$ 가 된다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. AH에 따른 표면 온도 변화

도시열섬현상이 해륙풍에 미치는 영향을 파악하고자 인천 지역을 중심으로 최근 10년 동안 일평균 기온이 가장 높은 8월 5일의 바람장 모사를 진행하였다. 또한, 보다 실효성 있는 예측을 위하여 실제로는 해당일 전후 수 일을 포함하여 총 1주일 (8월 1일~7일)을 모사 기간으로

설정하였다. 그 결과 도심지역의 AH강도에 따른 바다와 육지의 지표 온도(지상 0 m) 변화 추이를 Fig. 2와 같이 도출할 수 있었다. 먼저 바다의 경우 AH 변화에 따라서 시간에 따른 표면온도가 매우 미미하게 변화하였다(Fig. 2 (a)). 반면 육지는 일출이 시작되는 6시경 표면 온도가 증가하여 오후 12~14시경 최고 온도가 지속되다가 일몰 이후 다시 낮아지는 패턴을 보였다(Fig. 2 (b)). 특히, 도심 AH이 증가할수록 표면의 온도가 더욱 높아지는 것으로 분석되었다. 자세히 살펴보면 AH값이 0, 50, 100, 150, 200 W/m²으로 변화함에 따라 육지의 최저 표면 온도는 각각 22.9°C, 23.9°C, 24.7°C, 25.6°C, 26.5°C로 나타났으며, 최고 표면 온도는 각각 35.6°C, 36.0°C, 36.4°C, 26.8°C, 37.1°C로 최저 표면 온도와 최고 표면 온도 모두 AH 값이 증가함에 따라 함께 높아지는 것으로 확인되었다. 그러나 AH 증가에 따른 표면 온도 증가 폭은 최고 온도보다 최저 온도가 가파르게 나타나 AH이 증가할수록 최고와 최저 표면온도의 차이는 점차 줄어드는 것으로 분석되었다.

바다 표면 10m와 지상 10m에서의 기온 변화 추이는 표면에서의 온도보다 전반적으로 높은 분포를 보였다. AH 변화에 따른 바다 표면 10m 기온을 살펴보면 일최저

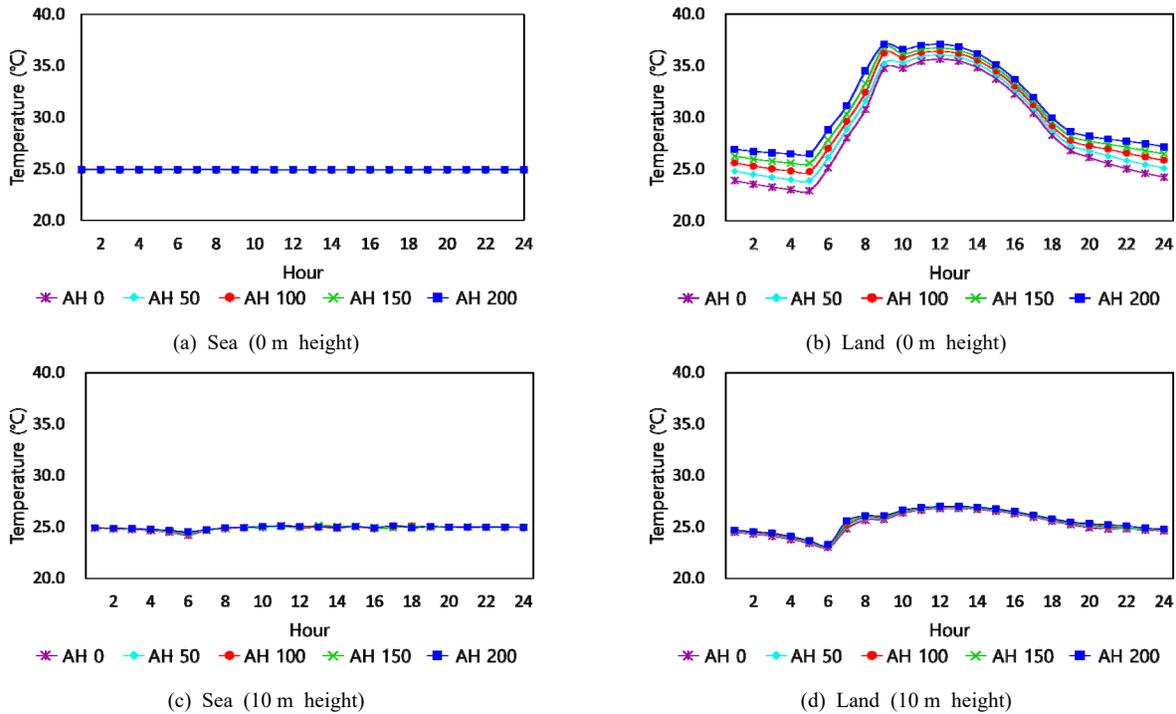


Fig. 2. Comparison of temperature variation of sea and land surfaces at 0 m and 10 m heights as AH different intensities

기온이 24.2℃, 24.3℃, 24.3℃, 24.4℃, 24.5℃로, 최고 기온이 25.1℃, 25.0℃, 25.1℃, 25.1℃, 25.1℃로 각각 AH값이 0, 50, 100, 150, 200 W/m²으로 증가함에 따라 근소한 차이로 증가되었다(Fig. 2 (c)). 지상 10 m의 경우 최소 기온이 23.0℃, 23.1℃, 23.1℃, 23.2℃, 23.2℃, 최고 기온이 26.8℃, 26.8℃, 26.9℃, 26.9℃, 27.0℃로 바다 표면 10 m와 유사한 추세로 증가하였으나, 육지 표면(지상 0 m)과 비교하였을 때 온도 범위와 변화 추이는 상대적으로 낮은 수준으로 확인되었다(Fig. 2 (d)).

3.2. AH에 따른 해륙풍 발생 특성

앞서 언급된 바와 같이 해륙풍은 바다와 육지 사이의 온도 차이로부터 기인한다. 다시 말하자면 두 지점의 온도 차이에 따라 그 발생 특성이 달라지게 되며, 온도 변화 추이가 달라지게 되면 해륙풍의 강도, 지속시간 등이 함께 영향을 받는다. 예를 들어 시간에 따른 바다 표면 온도는 AH이 변화하여도 그 차이가 매우 작은 반면, 육지의 경우 AH이 증가할수록 최고, 최저 온도는 물론 일평균 표면온도가 비교적 크게 증가하는 패턴을 보였다. 또한, 지상 10 m 높이 기온 변화는 전반적으로 지표면에서의 변화보다는 그 정도가 작지만, 바다 표면 10 m 높이에서 자정 이후 ~ 일출 전까지 온도는 AH이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 확인되었다. 결국 AH이 증가하면서 낮 시간 육지에서는 높은 온도가 나타나 해풍의 영향이 증가하게 되며, 해가 지고서도 육지 지점의 온도가 계속해서 높은 상태를 나타냄과 동시에 바다 표면 10 m 높이에서 일출 직전 시간대의 기온이 점차 증가하는 양상에 따라 육풍의 발생이 방해된다. AH 증가에 따른 해륙풍 발생 특성은 시간대별 풍속 변화에서도 잘 나타난다. Fig. 3에서는

본 연구에서 수행한 인천 지역 해륙풍 모사를 통하여 도출된 인천항 지점에서의 풍속 변화를 나타낸 것이다. 먼저 인천항 지점에서의 전반적인 해륙풍 발생 경향에 대하여 살펴보면 일출 이후 비열이 큰 바다 지점보다 육지 지점에서 온도 상승이 가파르게 나타나 그로인한 두 지점의 온도 차이로 오전 9~10시부터 해풍이 발달하기 시작한다. 오후 2~3시 동안 해풍은 최대로 형성이 되며, 이후 일몰로 향할수록 육지의 온도가 내려감에 따라 해풍의 풍속은 작아진다. 자정 전후부터는 반대로 바다의 온도가 육지의 온도보다 상대적으로 높게 형성되면서 육풍이 발달하게 되며 일출 직전 육풍은 최대 풍속을 나타낸다. 이러한 양상을 바탕으로 AH 강도 변화에 따른 인천항 지점에서의 해륙풍 발생 특성을 살펴보면, 도심 내 AH이 증가할수록 즉, 도시열섬현상이 심화될수록 해풍의 발달이 점차 고조되고 반대로 육풍은 그 강도가 약해지는 것을 확인하였다. AH 강도에 따라 육풍과 해풍의 최대 풍속을 비교해보면 AH이 발달하지 않은 경우(AH = 0 W/m²)에는 각각 2.32 m/s, 2.27 m/s로 모사되었다. 그러나 AH값이 50, 100, 150, 200 W/m²으로 증가 (도시열섬현상이 심화) 될수록 육풍의 하루 최대 풍속은 2.20, 2.08, 1.95, 1.79 m/s로 감소하는 반면, 해풍의 하루 최대 풍속은 2.30, 2.32, 2.34, 2.36 m/s로 증가하였다. 또한 육풍의 최대 풍속 감소폭이 해풍의 최대 풍속 증가폭보다 비교적 크게 나타나 인천 지역의 AH이 0 W/m²인 경우 육풍의 최대 풍속이 해풍보다 0.45 m/s 더 크게 발달하지만, 인천 지역의 AH이 200 W/m²로 증가하게 되면 해풍의 최대 풍속이 육풍보다 0.57 m/s 더 크게 발달하는 것으로 확인되었다.

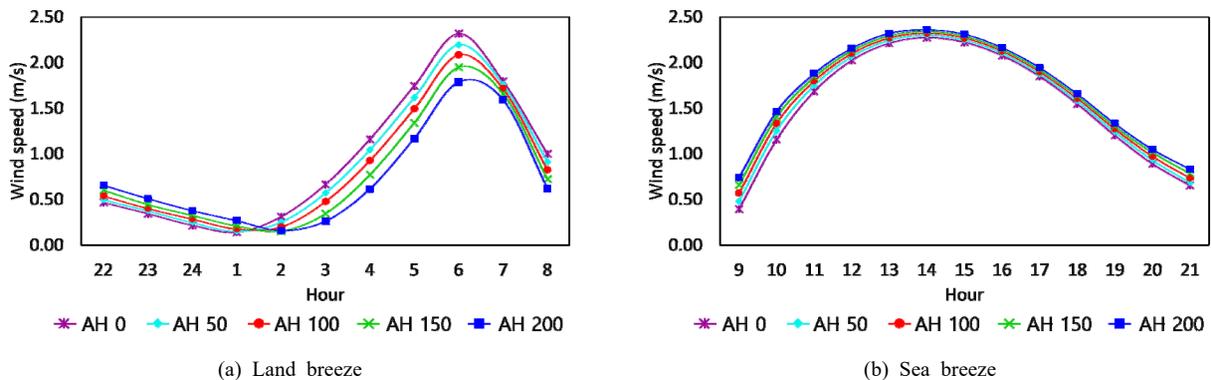


Fig. 3. Estimation of sea-land breeze wind speed above 10 m height as AH intensity in the Incheon Port area

Table 1. The penetration lengths (km) of the sea-land breeze as changing the anthropogenic heat around Incheon port area

L/2	AH 0	AH 50	AH 100	AH 150	AH 200
Land breeze (6 a.m.)	0.59	3.66	6.55	9.64	13.84
Sea breeze (2 p.m.)	24.98	25.49	25.93	26.33	26.78

3.3. 해륙풍 영향 범위 산정

본 연구에서는 인천 항만 지역을 중심으로 AH변화에 따라 다르게 나타나는 해륙풍의 발생 특성에 대하여 분석하고자 하였다. 이때 해륙풍 모델링을 통하여 도출되는 연구 대상지역의 표면온도, 고도별 풍속 및 기온 등의 값은 해륙풍 침투 거리 산정을 위한 수학적식에 적용할 수 있다. 물론 본 연구에서 활용한 HOTMAC-RAPTAD에서도 국지풍의 영향 범위가 시각적으로 구현되지만, 수학적 해석 기법을 추가로 활용한다면 프로그램에서 모사한 모델링 결과 값의 검증도 가능하게 된다. 해륙풍의 침투 거리 산정은 항구 도시의 대기환경관리 측면에서도 의미가 있다. 인천 지역의 경우 선박 배출을 포함한 다양한 대기오염원이 존재하며, 주변 국가(지역)에서부터 유입되는 오염물질 또한 도시 대기질에 영향을 끼친다. 이 때 대기오염물질은 육풍 및 해풍의 영향으로 풍하 방향으로 확산하게 되며, 해륙풍의 침투 거리에 따라 대기오염물질 영향 범위가 결정된다.

수식 1은 해륙풍 발생의 증명을 위하여 Haurwitz (1947)로부터 소개되어 이후 Hsu (1970) 등 선행연구를 통하여 도출되기에 이른다. 여기에 본 연구의 모델링으로부터 예측된 값들을 수식에 적용하면 인천 지역에서의 해륙풍 영향 범위를 산정할 수 있다. 따라서 AH에 따라 얻어진 모델링 결과값(풍속, 지표온도, 고도 별 기온 등)을 활용하여 해안선으로부터의 해륙풍 침투 거리(L/2)를 산정해본 결과 Table 1과 같이 정리할 수 있었다. 산출된 해륙풍의 침투거리(km)를 살펴보면 AH이 증가할수록 해안선을 기준으로 육풍과 해풍의 풍하 방향의 영향 범위가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. AH에 상관없이 해풍의 영향 범위가 육풍의 영향 범위보다 대체로 넓게 산정되었으나, AH이 증가함에 따라 넓어지는 영향 범위의 폭은 육풍이 더욱 가파르게 나타났다.

4. 고찰 및 시사점

본 연구에서는 도심의 AH 증가에 따른 해안 도시 해륙풍의 변화 특성을 이해하고 항구 도시 대기 환경에 끼칠 수 있는 영향 가능성을 파악하고자 하였다. 그 결과 도심의 AH이 증가할수록 육풍은 약해지는 반면, 해풍의 강도(풍속)는 증가하는 경향을 나타냈다. 이때 육풍이 가장 잘 발달하는 시간대는 일출 직전 육지의 표면 온도가 낮게 나타나는 오전 6시 경으로, 해풍이 가장 잘 발달하는 시간대는 한낮 육지의 표면 온도가 높게 나타나는 오후 2시 경으로 확인되었다. 또한, 수학적 해석을 통하여 해륙풍의 영향 범위를 도출해본 결과 AH이 증가할수록 육풍과 해풍의 침투 거리가 함께 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 도심 내 AH이 증가할수록 해풍과 육풍의 영향 범위는 모두 증가하게 되지만, 이와는 별개로 해륙풍의 강도(풍속) 변화 측면에서 미루어 보면 해풍은 증가하고, 육풍은 점차 감소하는 것으로 정리할 수 있었다.

AH 증가에 따른 해안 지역 국지풍 변화 특성은 항구 도시의 대기 관리 측면에서도 중요한 고려 요소로 작용할 수 있다. 인천과 같이 항구 도시에서 발달하는 해륙풍은 항만으로 접근하거나 정박 중인 선박의 대기오염물질을 직접적으로 도시 내부에 침투시킬 수 있기 때문이다 (ICCT, 2007; Kwon, 2022; Kwon et al., 2019; Williams et al., 2009). 또한, 주변 국가(지역)에서 발생된 장거리 대기오염물질도 함께 인천 지역으로 유입되어 해륙풍 순환 범위 내에서 일정 기간 머물게 된다면 항구 도시 대기질 관리에 있어 도시열섬현상과 해륙풍 발생 특성 대한 중요성은 더욱 커지게 된다. 이와 관련하여 Papanastasiou and Melas (2009)는 해풍이 강하게 발달한 기간 동안 해안에 인접한 지역 내 미세먼지와 오존의 농도가 증가한다는 것을 밝혔다. 또한, Lo et al. (2006)와 Zhao et al. (2022)는 해륙풍이 그 영향을 미치는 일정 범위 안에 다양한 대기오염물질을 집중시키는 울가미(Trap)로써 작용한다고 분석하였다. 결국 도시화와 기후변화로 인한 토지이용 변화, 에너지 사용 증가는 도시열섬현상에 직접적으로 관여하

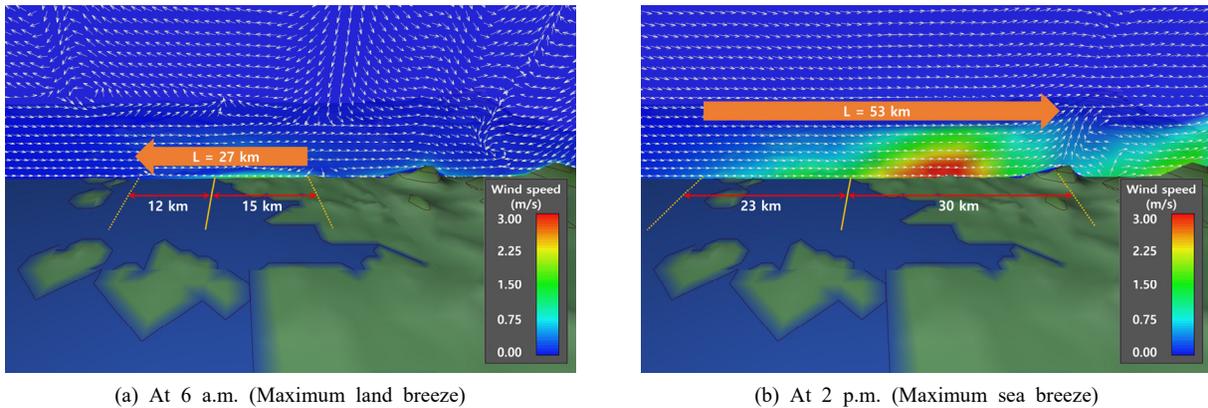


Fig. 4. Vertical cross section of sea-land breeze at Incheon port area and their penetration length estimations when AH is 200 W/m^2 in the urban area

게 되며, 이 때문에 발생 특성이 변화된 해륙풍은 인천과 같은 항구 도시의 대기질에 까지 영향을 줄 수 있게 되는 것이다.

Fig. 4는 HOTMAC-RAPTAD 프로그램의 시각적 구현 기능을 통하여 인천 도심의 AH이 200 W/m^2 인 경우 해륙풍이 가장 잘 발달하는 시간대의 풍속과 영향 범위를 인천 항만 선상에서 수직 단면으로 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 4 (a)를 살펴보면, 육풍이 가장 발달하는 오전 6시의 경우 인천 항만을 기준으로 약 15 km 내륙으로부터 육풍이 형성되어 인천항에서 해상으로 약 12 km 거리까지 발달하는 것으로 나타났다. 반면, 해풍이 가장 발달하는 오후 2시 경에는 먼 바다 약 23 km 부근에서 형성된 해풍이 인천항을 지나 인천 도심 내륙으로 약 30 km 불어 들어오는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4 (b)). 이러한 해륙풍 순환 패턴이 지속적으로 반복된다면 주변 지역 유입 및 인천항에서 발생하는 대기오염물질이 해풍과 함께 도심 내부에 더 깊게 침투하게 되지만, 약화된 육풍으로 인하여 도심 내부의 대기오염물질과 바다에서 불어 들어온 오염물질들을 다시 도심 밖으로 내보내기에는 한계가 발생할 수 있다. 결국 본 연구에서 도출된 바와 앞서 살펴본 선행연구를 함께 종합해 본다면 인천의 도시열섬현상으로 인하여 강화된 해풍과 약화된 육풍이 미치는 범위 만큼은 다양한 대기오염물질이 집중하게 되는 울가미(Trap)구역으로 더욱 세심한 관리가 필요할 것이다.

본 연구에서는 인천 도심 내 AH이 최대 200 W/m^2 인 경우로 단정 지어 항만 지역의 해륙풍 변화 특성을 분석하였으나, Ichinose et al. (1999)는 한여름 에어컨의 가동으로 인하여 뉴욕이나 도쿄와 같은 대도시의 인공열은

$1,000 \text{ W/m}^2$ 을 초과할 수 있을 것으로 예측하기도 하였다. 또한, Bae and Park (2021)는 우리나라 수도권 지역의 AWS 기온데이터를 활용하여 2005년도부터 2020년 사이 도시열섬 강도와 분포 변화를 분석해본 결과 온도 분포와 열섬 면적이 모두 증가한 것을 확인하였다. 이러한 결과로 미루어 보았을 때 도심 지역의 열섬현상은 본 연구에서 분석한 열섬 강도 범위 보다 더욱 증가할 수 있을 것이며, 그에 따라 발생 특성이 변화된 해륙풍에 의하여 항구 도시 대기질 영향이 더욱 심화될 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 인천 지역을 중심으로 도시열섬현상이 심화할수록 변화되는 해안 지역의 해륙풍 발생 특성을 분석하고, 그로 인한 도시 대기질 영향 가능성에 대하여 고찰해보고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 항구 도시의 열섬현상 (인공열 발생)이 증가할수록 육지 표면 온도 분포는 전반적으로 높아지며, 이로 인하여 주간에 해풍의 발달이 강해지는 반면, 야간에 육지의 온도는 내려가지 않고 고온이 지속되어 육풍 발달은 감소하는 경향을 나타냈다.
2. 항만 지역의 도시열섬현상은 발달된 해풍을 통하여 외부에서 유입된 장거리 대기오염물질과 선박으로부터 기인한 대기오염물질을 도심으로 쉽게 집중시키지만, 약해진 육풍으로 인하여 유입된 오염물질을 외부로 유출시키기 어려운 환경을 조성한다.

3. AH이 증가할수록 발달이 강해진 해풍이 육지 내에서 미치는 범위는 증가하는 반면, 약화된 육풍이 미치는 반경 또한 증가하여 대기오염물질이 집중하게 되는 올라미(Trap)구역 또한 비례하여 확장된다. 따라서 본 연구에서 고찰하는 바는 향후 도시열섬현상으로 인한 항만 지역의 대기질 특성 연구에 대한 적절한 방향을 제시하고, 효과적인 대기환경 관리방안 마련을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

References

- Ahn JS, Hwang JD, Park MH, Suh YS. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using landsat-7 ETM+ and AWS data (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 15(4): 65-77. doi: 10.11108/kagis.2012.15.4.065
- Bae W, Park S. 2021. Deriving heat island vulnerable areas according to changes in heat island distribution characteristics and strength cluster analysis (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Seoul Urban Res* 22(4): 43-63.
- Chen Y, Jiang W, Zhang N, He X, Zhou R. 2009. Numerical simulation of the anthropogenic heat effect on urban boundary layer structure. *Theor Appl Climatol* 97(1-2): 123-134. doi: 10.1007/s00704-008-0054-0
- Emmanuel R, Krüger E. 2012. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Build Environ* 53: 137-149. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.020
- Halder B, Bandyopadhyay J, Banik P. 2021. Evaluation of the climate change impact on urban heat island based on land surface temperature and geospatial indicators. *Int J Environ Res* 15: 819-835. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00356-8>
- Haurwitz B. 1947. Comments on the sea-breeze circulation. *J Atmos Sci* 4(1): 1-8.
- Hong J, Hong J, Lee S, Lee J. 2013. Spatial distribution of urban heat island based on local climate zone of automatic weather station in Seoul metropolitan area (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos* 23(4): 413-424.
- Hsu SA. 1970. Coastal air-circulation system: Observations and empirical model. *Mon Weather Rev* 98(7): 487-509.
- ICCT (International Council on Clean Transportation). 2007. Air pollution and greenhouse gas emissions from ocean-going ships: Impacts, mitigation options and opportunities for managing growth. *Maritime Stud* 2007(153): 3-10.
- Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos Environ* 33(24-25): 3897-3909.
- Je MH, Jung SH. 2018. Urban heat island intensity analysis by landuse types (in Korean with English abstract). *J Korea Contents Assoc* 18(11): 1-12. doi: 10.5392/JKCA.2018.18.11.001
- Jeong JW, Lee Ih, Lee HK. 2008. Estimation of the effective region of sea/land breeze in west coast using numerical modeling (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 24(2): 259-270.
- Kondo K, Mabon L, Bi Y, Chen Y, Hayabuchi Y. 2021. Balancing conflicting mitigation and adaptation behaviours of urban residents under climate change and the urban heat island effect. *Sustain Cities Soc* 65: 102585. doi: 10.1016/j.scs.2020.102585
- Kwon Y. 2022. High-resolution spatial distribution of marine vessel emission and its significance in sustainable port air quality management: A case study of Port of Incheon. *Ocean Eng* 258: 111799. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111799
- Kwon Y, Cho I. 2021. Dispersion of maritime air pollutants from harbor area into major port cities considering characteristics of local wind circulation in Korea -A case study of sea and land breezes during summer- (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Mar Environ Saf* 27(6): 721-730.
- Kwon Y, Lim H, Lim Y, Lee H. 2019. Implication of activity-based vessel emission to improve regional air inventory in a port area. *Atmos Environ* 203: 262-270.

- doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.01.036
- Li J, Sun R, Liu T, Xie W, Chen L. 2021. Prediction models of urban heat island based on landscape patterns and anthropogenic heat dynamics. *Landsc Ecol* 36: 1801-1815. doi: 10.1007/s10980-021-01246-2
- Lo JCF, Lau AKH, Fung JCH, Chen F. 2006. Investigation of enhanced cross-city transport and trapping of air pollutants by coastal and urban land-sea breeze circulations. *J Geophys Res: Atmos* 111(D14). doi: 10.1029/2005JD006837
- McCarthy MP, Best MJ, Betts RA. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophys Res Lett* 37(9). doi: 10.1029/2010GL042845
- Mutani G, Todeschi V. 2020. The effects of green roofs on outdoor thermal comfort, urban heat island mitigation and energy savings. *Atmosphere* 11(2): 123. doi: 10.3390/atmos11020123
- Papanastasiou DK, Melas D. 2009. Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment. *Int J Climatol* 29(2): 305-315. doi: 10.1002/joc.1707
- Pokhrel R, Lee H. 2011. Estimation of the effective zone of sea/land breeze in a coastal area. *Atmos Pollut Res* 2(1): 106-115. doi: 10.5094/APR.2011.013
- Sachindra DA, Ng AWM, Muthukumar S, Perera BJC. 2016. Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures: A case-study. *Q J R Meteorol Soc* 142(694): 172-186. doi: 10.1002/qj.2642
- Sailor DJ. 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *Int J Climatol* 31(2): 189-199. doi: 10.1002/joc.2106
- Shahmohamadi P, Che-Ani A, Maulud K, Tawil NM, Abdullah N. 2011. The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. *Urban Stud Res* 2011: 497524. doi: 10.1155/2011/497524
- UN DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs). 2018. World urbanization prospects: The 2018 revision. New York, NY: Author. ST/ESA/SER.A/420.
- Williams EJ, Lerner BM, Murphy PC, Herndon SC, Zahniser MS. 2009. Emissions of NO_x, SO₂, CO, and HCHO from commercial marine shipping during Texas Air Quality Study (TexAQS) 2006. *J Geophys Res: Atmos* 114(D21). doi: 10.1029/2009JD012094
- Zhao D, Xin J, Wang W, Jia D, Wang Z, Xiao H, Liu C, Zhou J, Tong L, Ma Y, Wen T, Wu, F, Wang L. 2022. Effects of the sea-land breeze on coastal ozone pollution in the Yangtze River Delta, China. *Sci Total Environ* 807(Part 2): 150306. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150306