



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

석사학위논문

도로 방향과 가로수 식재 형태에
따른 여름철 열환경 저감효과
비교·분석

— 제주시를 대상으로 —

제주대학교 대학원

원예학과

임 현 우

2022년 2월



도로 방향과 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 저감효과 비교·분석

- 제주시를 대상으로 -

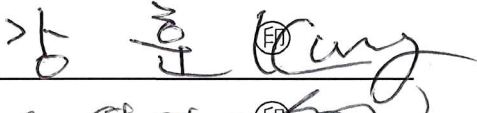


지도교수 박 수 국

임 현 우

이 논문을 농학 석사학위 논문으로 제출함.

2021년 12월

임현우의 농학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 강 훈 (F) 
위 원 조 영열 (F) 
위 원 박 수국 (F) 

제주대학교 대학원

2021년 12월

Comparison and analysis of thermal
environment modification effects of street tree
planting types in summer according to road
directions

- based on Jeju city -

Hyeonwoo Lim

(Supervised by Professor Sookuk Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Science in
Agriculture

2021. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Horticultural Science
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

- 목 차 -

List of Tables	I
List of Figures	II
Abstract	III
I. 서언	1
II. 연구방법	3
1. ENVI-met 시뮬레이션	3
2. 열생리학적 지표	7
3. 시뮬레이션 결과 보정	10
III. 연구결과 및 고찰	12
1. 공간 형태별 차이	12
1-1. 평균값 비교	12
1-2. 시간대별 비교	15
1-2-1. 시간에 따른 변화량	15
1-2-2. 시간에 따른 보도 위치별 차이값	17
2. 수목식재 효과	21
2-1. 수목식재 효과	21
2-2. 시간대별 저감량	24
3. 고찰	28
IV. 결론	30
V. 초록	31
인용문헌	32
Appendix	39
Appendix A	39
Appendix B	45

-List of Tables-

Table 1. Variables of road type and direction	4
Table 2. Tree planting variables and abbreviation	6
Table 3. Weather input data	6
Table 4. The thermal perception and stress levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI)	9
Table A1. Average reduction of air temperature according to scenarios	39
Table A2. Average reduction of relative humidity according to scenarios	40
Table A3. Average reduction of wind speed according to scenarios ·	41
Table A4. Average reduction of mean radiant temperature according to scenarios	42
Table A5. Average reduction of PET according to scenarios	43
Table A6. Average reduction of UTCI according to scenarios	44

-List of Figures-

Figure 1. Description of area input data	4
Figure 2. Energy transfers between a human body and its surrounding environment	8
Figure 3. Polynomial regression analysis between time and differences of measured micro-climatic data and ENVI-met results	11
Figure 4. Average micro-climatic data by the location of sidewalk ..	14
Figure 5. Micro-climatic data according to the location and time of sidewalk	18
Figure 6. Average reduction in micro-climatic data with planting trees	23
Figure 7. Amount of reduction for each space by time with the LWDN scenario	25
Figure B1. Amount of reduction of air temperature for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios	45
Figure B2. Amount of reduction of relative humidity for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios	46
Figure B3. Amount of reduction of wind speed for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios	47
Figure B4. Amount of reduction of mean radiant temperature for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios	48
Figure B5. Amount of reduction of PET for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios	49
Figure B6. Amount of reduction of UTCI for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios	50

ABSTRACT

In this study, the effect of mitigating the thermal environment of urban spaces according to the planting type of street trees and road direction in summer was analyzed. Using the CFD model ENVI-met, the air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature, PET and UTCI were compared according to the road and tree planting types.

In the case of sidewalk spaces without trees, the wind speed and mean radiant temperature differed greatly depending on the road direction. The closer the road direction was to the vertical direction of the wind, the lower the wind speed. The mean radiant temperature changed significantly depending on the sun and the building locations. The daytime average was the highest at the north located sidewalk. In physiological equivalent temperature (PET), northeast sidewalk showed the highest average value, and in universal thermal climate index (UTCI), north sidewalk showed the highest.

With planting trees, PET and UTCI showed the greatest reduction effect in the LWDN (low tree height, wide crown width, dense leaves, narrow planting distance) scenario and the smallest reduction effect in the HNSW (high tree height, narrow crown width, sparse leaves, wide planting distance) scenario. It is the most effective to lower the mean radiant temperature by blocking direct beam solar radiation. The larger the mean radiant temperature reduction by buildings, the less the effect of trees. In the case of wind speed, due to the limitation of the simulation program, the influence of trees at the height of 1.5m could not be properly evaluated. Further research is needed on this.

I. 서언

지난 수십 년간 경제 및 인구성장으로 나타난 급격한 도시화로 인해 여러 문제점들이 이슈화되고 있다. 특히, 산업화 시대 전후로 급증한 온실가스 배출량의 증가로 인한 전 지구적인 기온상승과 맞물려, 급격하게 악화되고 있는 도시 내 열환경은 도시민들의 삶의 질 악화로 이어졌고, 각 국가의 정부 및 정책가에게 해결해야 할 가장 중요한 문제들 중 한 가지로 자리 잡고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 국내에서도 다양한 접근방법을 통해 도시의 열환경에 대한 연구가 이루어지고 있다(Ahn et al., 2010; Ahn et al., 2012; Eum, 2016; Kim et al., 2015; Kim et al., 2016; Kim et al., 2020; Lee et al., 2009; Lee et al., 2010; Lee et al., 2017). 대부분의 연구는 국지적 규모(local scale)에서의 접근으로, 원격탐사 등을 통한 지표온도 분석(Ahn et al., 2012; Kim et al., 2015; Lee et al., 2017; Lee et al., 2020), 열섬현황 파악(Ahn et al., 2010; Eum, 2016; Kim et al., 2016; Kim et al., 2020; Lee et al., 2009) 등 도시의 열환경에 대한 현황분석과 취약지점 평가가 주를 이루고 있다. 이는 계획적인 부분에서 도시 열환경 개선 대상지 파악과 공간결정에 있어 유용하게 활용될 수 있다. 그러나, 이러한 국지적 규모에서의 접근은 열환경 개선 방안에 대해 공간 구성비율(녹피율, 건축물 면적, 토지피복) 등의 정량적인 데이터만 제시할 뿐 구체적인 공간 설계 방안을 설정하는데 한계점이 있다. 그러므로, 도시 열환경과 같은 도시기후 연구에 있어서는 목적에 따라 적합한 접근방식을 통해 해결책을 찾아야 할 것이다(Garuma, 2018).

도시의 열환경은 도시의 형태(구조물, 피복 등)에 따라 다르게 형성된다. 각 공간 구성요소들의 에너지 흡수, 반사, 방출량 등의 물리적인 요인이 다르고, 그 차이에 따라 각 공간에 형성되는 에너지의 차이가 발생한다. 같은 맥락으로 도시중심지역이 외곽, 근교지역보다 높은 열에너지를 보이는 원인을 다음과 같이 정리할 수 있다(Oke, 1982; Stewart and Oke, 2012). 1) 높은 건물높이와 벽에 의한 태양복사에너지 흡수 면적 증가 및 다중 반사(태양복사에너지 흡수량 증가), 2) 인공 구조물에 의한 하늘시계지수(sky view factor, SVF) 감소에 따른 지구복사

에너지 방출 방해(지구에너지 갇힘(trapping) 현상으로 인한 지구복사에너지 흡수량 증가), 3) 에너지 흡수율이 높은 건축자재, 포장재에 의한 비열용량(specific heat capacity) 증가(현열(sensible heat) 방출량 증가), 4) 불투수성 포장에 의한 증발산 작용 억제(잠열(latent heat) 방출량 감소, 현열 방출량 증가), 5) 밀집된 인공 구조물, 건축물 등에 의한 풍속 저감, 대류현상을 통한 열전달 억제(대기 중으로의 잠열과 현열 방출량 감소, 지구복사에너지 방출량 증가). 이외에도 상대적으로 많은 인구에 의한 자동차와 냉·난방 등에 의해 발생하는 인공적인 열에너지(artificial heat flux density) 발생량 증가, 대기오염에 의한 대기 중 지구복사에너지 방출량 증가 등을 원인으로 볼 수 있다. 이러한 관점에서 건축물, 수목 등 도시의 기하학적 형태와 물리적 성질 등이 도시 열환경에 있어서 중요한 요인이 됨을 알 수 있다.

도시 내 열환경에 있어 도시 기하학적 구조에서 가장 큰 비중을 차지하는 건물의 영향에 대한 분석은 다양하게 진행되어왔다(Ali-Toudert and Mayer, 2006, 2007; Lyu et al., 2019; Middel et al., 2014; Holst and Mayer, 2011; Hyun, 2019). 또한, 이러한 도시환경 내에서 수목에 의한 열환경 저감 효과를 분석하고, 표준화하여, 조경분야에서 열환경 저감을 위한 수목식재 방법론을 제시하고자 하는 연구들 또한 다양하게 진행되어왔다(Jo et al., 2017; Lee et al., 2013, 2016; Morakinyo et al., 2017, 2020; Park et al., 2019).

도시 조경계획 시 열환경 개선 방법으로 많이 이용되는 가로수 식재에 대한 최신 연구에서는 다양한 수목요소(수고, 지하고, 수관폭, 지엽밀도)와 Aspect ratio (건물높이와 도로폭의 비율, H/W)에 의해 발생하는 가로공간의 열환경 개선효과를 분석하였다(Morakinyo et al., 2017).

이와 같은 맥락에서, 본 연구에서는 도시의 구조 중 가장 대표되는 가로형태의 공간에서 도로와 건물의 배치 방향에 따라 가로수 식재 형태별 여름철 열환경 저감 효과를 분석해 보고자 한다.

II. 연구방법

1. ENVI-met 시뮬레이션

미기후(micro-climate)에서의 열환경 평가는 실측과 모델링 등을 통하여, 지역 내 세부적인 공간에 대한 평가가 가능하다. 과거 원격탐사, 소규모 물리적 모델링 등 관측 중심의 접근방법이 도시 미기후 연구에 있어 주로 사용되어 왔으며, 시간이 지남에 따라 기술과 자본의 증가로 수치 모델링을 통한 도시 미기후에 대한 평가방법이 발전되고 있다(Toparalr et al., 2017). EBM(energy balance models), CFD(computational fluid dynamics)와 같은 수치모델을 통한 접근방법은 기존 관측 중심의 접근방법에 비해, 서로 다른 형태의 공간 시나리오를 비교 분석할 수 있다. 또한, 측정지점에 대한 정보만을 얻을 수 있는 관측 중심 접근법에 비해, 전체 공간에 대한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 공간형태에 따른 기상요소 및 열환경의 변화를 확인하기 위해, 전 세계적으로 도시 미기후와 인간 열환경 분석에서 가장 많이 이용되고 있는 CFD 모델인 ENVI-met Version 4.4.5(<https://www.envi-met.com>)를 활용하였다(Lenzholzer and Brown, 2016). ENVI-met은 공간을 구성하는 구조물 및 피복재료, 식물체에 따른 복사에너지 교환을 포함하는 3차원 비정역학모델(non-hydrostatic model)로 0.5-10m의 그리드(grid) 해상도로 분석이 가능하다(Bruse and Fler, 1998).

ENVI-met 시뮬레이션을 위한 공간입력자료는 제주특별자치도 내 도시지역을 대상으로 도로 폭과 건물 높이 조사 자료를 참고하여 생성하였다. 도로 폭과 건물높이를 국토지리정보원에서 제공하는 건축물과 도로 자료를 활용하여 지리정보시스템을 통해 조사하였으며, 이를 참고하여 100m 길이의 도로에 대해 각 차선별 도로 폭, 보도 폭, 건물 높이를 설정하였다(Figure 1, Table 1). 3개의 도로 공간에 대해 각각 동-서, 북동-남서, 남-북, 북서-남동 4개 방향으로 총 12개의 도로 공간을 구성하였다.

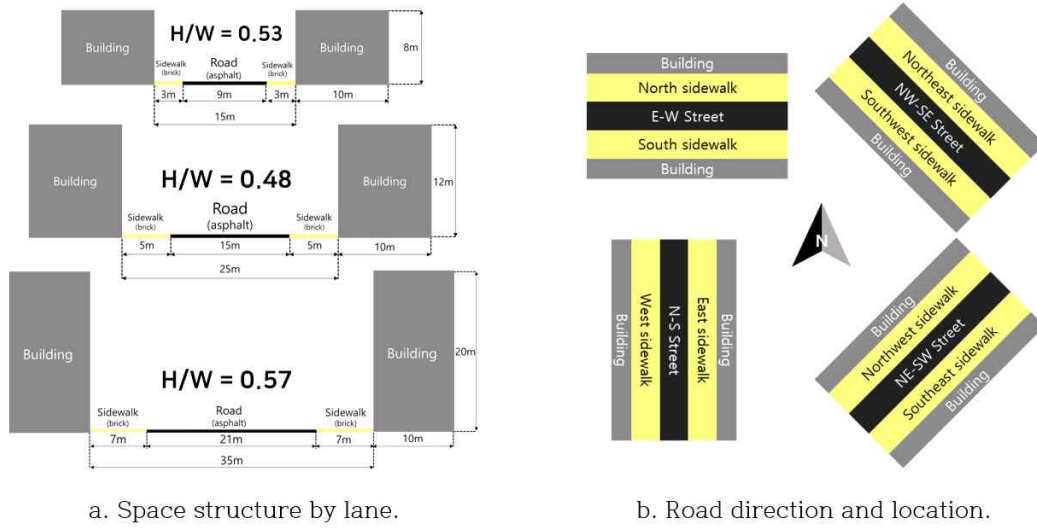


Figure 1. Description of area input data

Table 1. Variables of road type and direction

Variable	
Road type (number of lanes)	2 lanes: road width = 15m, building height = 8m (H/W = 0.53, SVF 0.423)
	4 lanes: road width = 25m, building height = 12m (H/W = 0.48, SVF 0.455)
	6 lanes: road width = 35m, building height = 20m (H/W = 0.57, SVF 0.451)
Road direction	N-S (0°)
	NE-SW (45°)
	E-W (90°)
	NW-SE (135°)

가로수 식재 시나리오는 이전 연구자료를 참고하여 수목 특성인 수고, 수관폭, 엽면적 지수(LAI; leaf area index)와 식재간격을 변수로 설정하였다(Lee and Mayer, 2020; Morakinyo et al., 2020). 수고 6m, 9m, 수관폭 7m, 9m, 엽면적 지수 1.5, 3, 식재간격 8m, 12m의 16개 수목식재방식과 수목이 없는 경우를 합쳐 총 17개의 수목식재 시나리오를 구성하였다. 이후 수목식재 시나리오는 약어를 활용하여 표기하였다(Table 2). 종합적으로 12개의 도로 공간, 17개의 수목식재 시나리오를 합쳐 총 204개의 시뮬레이션을 진행하였다.

기상입력자료는 시간별 기온 및 상대습도와 초기 풍향·풍속으로, 제주시 건입동에 설치된 제주지방기상청 ASOS로부터 2001년부터 2019년까지의 자료를 참고하여 생성하였다. 초기 풍향 자료는 여름철 낮 시간 기준 가장 많은 빈도를 보인 북동풍(45°)으로 설정하였고, 풍속은 여름철 평균값인 2.8ms^{-1} 로 설정하였다(Table 3). 기온과 상대습도는 2001년부터 2019년까지 제주시의 평균값과 가장 유사한 날짜인 2011년 7월 23일 자료를 활용하여 설정해주어 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 시간은 4:00부터 익일 4:00까지 총 24시간을 진행하였으며, 본 연구에서는 하루 중 가장 열환경이 극심한 시간대인 10:00부터 16:00까지의 자료를 분석하였다.

Table 2. Tree planting variables and abbreviation

Height (m)	Crown width (m)	LAI	Planting distance (m)	Abbreviation
6 (Low)	7 (Narrow)	1.5 (Sparse)	8 (Narrow)	LNSN
			12 (Wide)	LSNW
		3 (Dense)	8 (Narrow)	LNDN
	12 (Wide)		LNDW	
	9 (Wide)	1.5 (Sparse)	8 (Narrow)	LWSN
			12 (Wide)	LWSW
3 (Dense)		8 (Narrow)	LWDN	
	12 (Wide)	LWDW		
9 (High)	7 (Narrow)	1.5 (Sparse)	8 (Narrow)	HNSN
			12 (Wide)	HSNW
		3 (Dense)	8 (Narrow)	HNDN
	12 (Wide)		HNDW	
	9 (Wide)	1.5 (Sparse)	8 (Narrow)	HWSN
			12 (Wide)	HWSW
3 (Dense)		8 (Narrow)	HWDN	
	12 (Wide)	HWDW		

Table 3. Weather input data

Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)
00:00	23.8	82	12:00	28.2	65
01:00	23.6	84	13:00	28.4	67
02:00	23.4	84	14:00	27.9	67
03:00	23.3	86	15:00	27.6	70
04:00	23.0	87	16:00	27.8	70
05:00	22.7	86	17:00	27.5	72
06:00	22.7	86	18:00	27.0	75
07:00	23.0	84	19:00	26.4	80
08:00	24.5	78	20:00	25.7	85
09:00	25.7	76	21:00	25.3	87
10:00	26.3	77	22:00	25.0	89
11:00	27.0	71	23:00	24.8	88
Wind Speed : 2.8 ms ⁻¹					
Wind Direction : 45°					

2. 열생리학적 지표

환경 조건 및 도시 내 공간적 구조에 의해 조성된 열환경에 대해, 인간은 열수용체로 열환경 평가의 중요한 지표라고 할 수 있다(Coccolo et al., 2016). 이를 정량화하기 위한 노력은 20세기부터 시작되었다. 1930년대 초 최초로 인체와 주변환경에서의 열 교환작용을 고려한 모델이 개발되었고('2-node-model'; Gagge 1936), 1972년 현재 인간 열환경 연구의 기반이 되는 PMV(predicted mean vote; Fanger, 1972)가 개발되었다. 현재 전 세계적으로 널리 사용되어지고 있는 PMV, PET(physiological equivalent temperature; Höpfe, 1999), UTCI(universal thermal climate index; Bröde et al., 2012a), COMFA(comfort formula; Brown and Gillespie, 1995) 등과 같은 열생리학적 지표들은 인간 에너지 균형 모델 5(human energy balance model)을 기반으로 계산된다. 인간 에너지 균형 모델이란 인체 주변 환경으로부터 인체로 흡수·방출되는 에너지양을 정량적으로 계산해, 열생리학적(thermo-physiological)으로 인간이 수용하는 열적 반응을 분석하기 위한 모델이다(Eq. 1; Park, 2012).

$$R + L^* - L_b + C + E + C_r + E_r + H = S \quad (\text{Eq. 1})$$

위 식에서 M 은 신진대사에너지(metabolic energy), R^* 은 인체에 흡수되는 태양복사에너지(absorbed solar radiation)를 의미하며, 태양 직사광선(direct beam solar radiation, K_b), 건축물 또는 수목에 의해 가려지지 않은 하늘이 보이는 공간(sky view factor, SVF)에서 인체로 흡수되는 분사광선(diffuse beam solar radiation, K_d), 그리고 건축물(solar radiation reflected by buildings, K_{ro}), 수목(solar radiation reflected by trees, K_{rveg}), 지표면(solar radiation by the ground, K_{rg})에서 반사되어 흡수되는 반사광선(reflected solar radiation, K_r)으로 구성된다. L^* 은 인체에 흡수되는 지구복사에너지(absorbed longwave radiation)를 의미하며, 하늘 공간(longwave radiation from the sky, L_a), 건축물(longwave radiation from buildings, L_o), 수목(longwave radiation from trees, L_{veg}), 지표면

(longwave radiation from the ground, L_g)에서 방출되어 인체로 흡수되는 지구 복사에너지와 인체에서 주변 환경으로 방출되는 지구복사에너지(longwave radiation from a human body surface, L_b)로 구성된다. C 는 인체 표면과 주변 공기의 온도 차이에 의해 발생하는 현열(sensible heat flux density), E 는 인체 표면과 주변 공기의 습도 차이에 의해 발생하는 잠열(latent heat flux density), C_r 은 호흡을 통해 교환되는 현열, E_r 은 호흡을 통해 교환되는 잠열을 뜻하며, H 는 전도열(conductive heat flux density)이다. S 는 결과적으로 위의 에너지 교환이 이루어진 후, 인체에 남은 에너지양을 의미하며, S 의 값이 양(+)의 값이면 따뜻함, 더움, 매우 더움 등의 열 생리학적 단계를 나타내며, 음(-)의 값이면 서늘함, 추움, 매우 추움 등의 단계를 나타낸다(Figure 2).

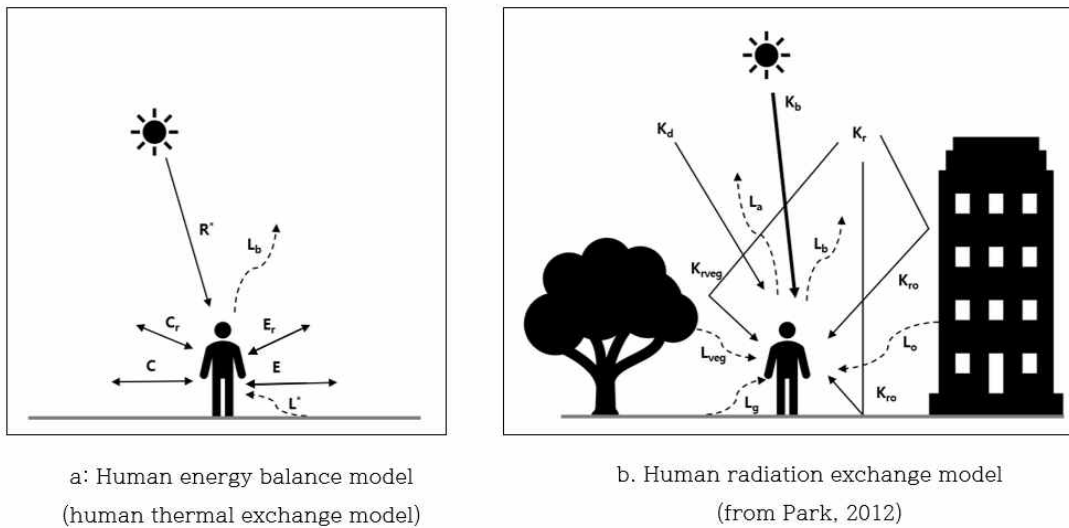


Figure 2. Energy transfers between a human body and its surrounding environment

본 연구에서는 PET와 UTCI를 통해 도시의 열환경을 분석하였다. PET는 열 지각(thermal perception) 정도를 나타내기 위한 지수로, 앞서 개발된 PMV에 적용된 Fanger(1972)의 방정식에서 인체의 에너지 교환 조건에 대해 현실적인 설명 부족에 대한 문제점을 보완하여 보다 실질적인 예측이 가능한 열생리학적 균형 모델인 MEMI(Munich energy-balance model for individuals; Höpfe, 1993)를 기반으로 계산된다. 단위는 온도(°C)로 표현되며, PET에 대한 열 지각 분류는

9단계로 구분할 수 있다(Matzarakis and Mayer, 1996). UTCI는 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology, ISB)에서 전 세계적으로 보편화하여 적용 가능한 열생리학적 지수 개발을 위한 프로젝트에 의해 개발되었다(Błażejczyk et al., 2013). PET, PMV와 같이 에너지 균형 모델을 기반으로 하며 심부, 피부 온도를 기반으로 동적인 열 감각에 대한 예측이 가능한 다중 노드 모델이 적용되었다(Bróde et al., 2012a; Fiala et al., 2003). UTCI의 단위도 온도(°C)로 표현되며, 열 스트레스(thermal stress) 표현을 중심으로 개발되었으며, UTCI는 10단계로 구분할 수 있다(Bróde et al., 2012b). PET와 UTCI의 열 지각 및 열 스트레스 단계는 Table 4와 같다.

Table 4. The thermal perception and stress levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI) (as cited in Jo et al., 2018)

Thermal perception	PET (°C)	UTCI (°C)	Grade of physiological stress
very cold	< 4	< -40	extreme cold stress
		-27 ~ -40	very strong cold stress
cold	4 ~ 8	-13 ~ -27	strong cold stress
cool	8 ~ 13	0 ~ -13	moderate cold stress
slightly cool	13 ~ 18	9 ~ 0	slight cold stress
neutral	18 ~ 23	9 ~ 26	no thermal stress
slightly warm	23 ~ 29		slight heat stress
warm	29 ~ 35	26 ~ 32	moderate heat stress
hot	35 ~ 41	32 ~ 38	strong heat stress
very hot	> 41	38 ~ 46	very strong heat stress
		> 46	extreme heat stress

열생리학적 지표인 PET와 UTCI의 계산을 위한 기상요소로는 기온, 상대습도, 풍속, 태양과 지구복사에너지량이 일반적으로 고려된다. 본 연구에서는 ENVI-met 결과로 얻어진 기온, 상대습도, 풍속 및 평균복사온도 값을 이용해 RayMan Pro. Version 2.2 (Matzarakis et al., 2007, 2010) 프로그램을 통해 PET와 UTCI를 계산하여 분석하였다.

3. 시뮬레이션 결과 보정

시뮬레이션 결과는 불확실성과 오차가 존재하기 때문에 검증과정과 값에 대한 보정을 실시해 주었다. 본 연구에서의 공간은 실존하는 공간이 아니기 때문에 직접적인 검증은 불가능하다. 대신 이전에 연구된 5개 가로공간에서의 측정 자료와 이에 대한 시뮬레이션을 실행하여 결과값을 비교하였다(Jo et al., 2017). 직접적인 상관성은 높지 않았으나, 실측값과 시뮬레이션 결과값의 차이값에 있어서 시간에 따른 일정한 패턴이 나타나는 것을 확인하였다. 이를 통해 5개 지점의 차이값들의 평균으로 시간에 따른 보정식을 산출하고, 본 연구 결과에 적용하여 값들을 보정해 주었다(Figure 3, Eqs. 2-7).

$$T_{a_new} = T_{a_old} + 0.0105t^3 - 0.3538t^2 + 3.5699t - 10.656 \text{ (Eq. 2)}$$

$$RH_{new} = RH_{old} - 0.1164t^3 + 4.2646t^2 - 50.018t + 190.25 \text{ (Eq. 3)}$$

$$U_{new} = U_{old} - 0.012t^3 + 0.4639t^2 - 5.9348t + 25.506 \text{ (Eq. 4)}$$

$$T_{mrt_new} = T_{mrt_old} + 0.0212t^3 - 1.3505t^2 + 23.821t - 120.02 \text{ (Eq. 5)}$$

$$PET_{new} = PET_{old} + 0.0467t^3 - 2.0513t^2 + 29.034t - 131.82 \text{ (Eq. 6)}$$

$$UTCI_{new} = UTCI_{old} + 0.0165t^3 - 0.7396t^2 + 10.566t - 47.255 \text{ (Eq. 7)}$$

위 식에서 T_a , RH , U , T_{mrt} 는 각각 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도를 뜻하며, t 는 시간을 의미한다. new 는 보정된 값, old 는 기존 시뮬레이션 결과 값이다.

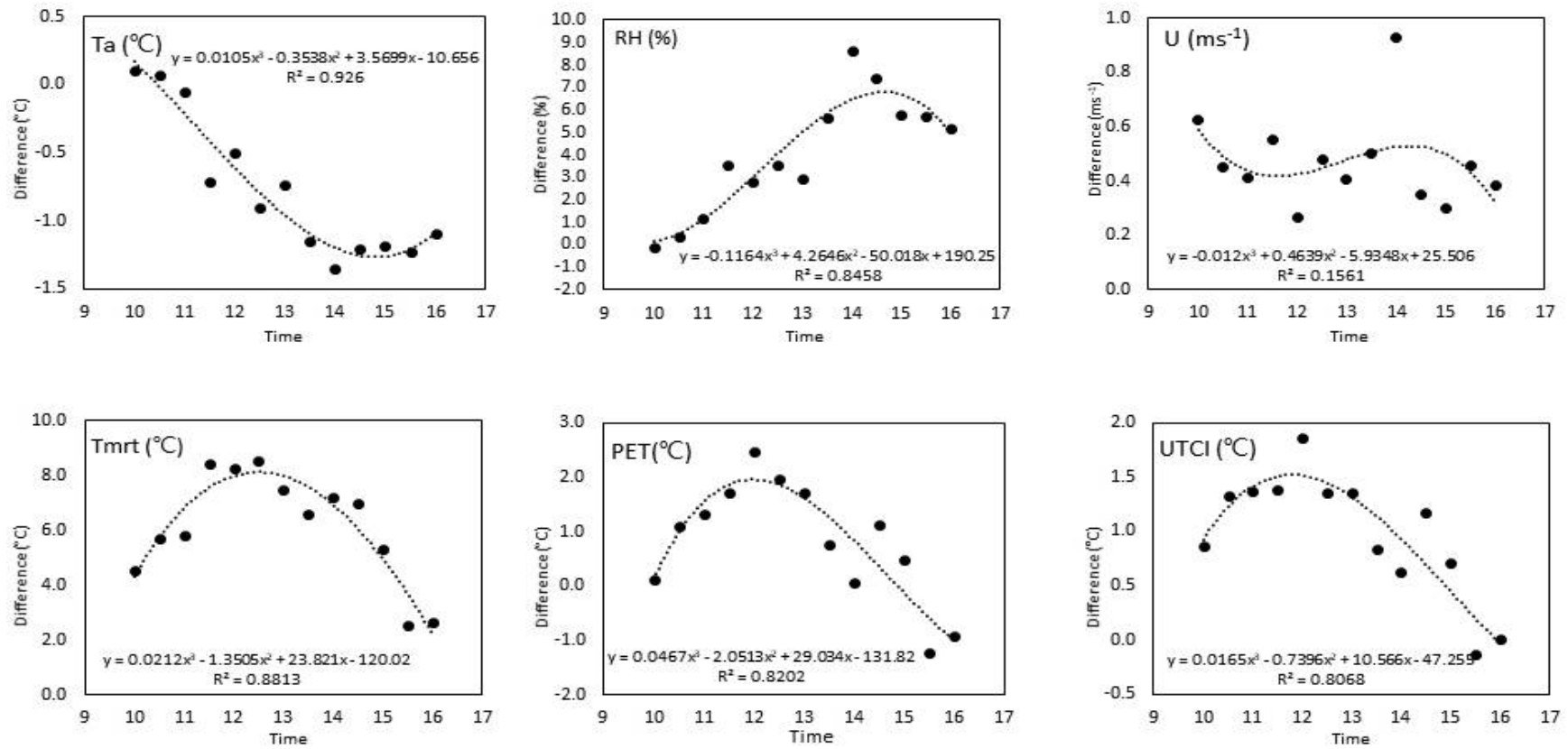


Figure 3. Polynomial regression analysis between time and differences of measured micro-climatic data and ENVI-met results

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. 공간 형태별 차이

1-1. 평균값 비교

수목이 없는 공간에 대한 기상요소 및 열환경을 차선과 방향에 따른 도로형태별로 비교해 보았다(Figure 4).

기온은 6차선의 경우 남측 보도에 가까울수록 낮은 값을, 북측 보도에 가까울수록 높은 값을 보이는 경향을 확인하였지만, 2차선과 4차선에서는 이러한 패턴이 나타나지 않았다(Figure 4a). 또한, 풍향에 수직방향으로 위치해 풍속 저감이 많아 평균 풍속이 낮은 북서-남동 방향 도로의 공간에서 기온값이 낮게 나타났다. 6차선의 경우 남측 보도에서 28℃로 최소값을, 북측 보도에서 30.2℃로 최대값을 보였고, 2차선과 4차선의 경우 남서측 보도에서 각각 28℃, 28.5℃로 최소값을, 남측 보도에서 30.2℃, 30.3℃로 최대값을 보였다.

상대습도의 경우 기온이 낮을수록 높은 상대습도 값을, 기온이 높을수록 낮은 상대습도 값을 보였다(Figure 4b).

풍속은 전체적으로 초기입력풍속인 2.8ms^{-1} 보다 낮은 값을 보였다(Figure 4c). 특히, 입력 풍향의 수직방향으로 위치한 북서-남동 방향의 도로의 보도에서는 $0.5\text{-}0.7\text{ms}^{-1}$ 로 매우 낮은 풍속을 보였다. 풍향의 45°로 위치한 동-서, 남-북 방향 도로의 보도에서는 $1.3\text{-}1.7\text{ms}^{-1}$, 수평방향으로 위치한 북동-남서 방향의 도로의 보도에서는 $1.8\text{-}1.9\text{ms}^{-1}$ 로 가장 높은 풍속을 보였다.

평균복사온도의 경우 평균값은 모든 차선에서 북측 보도가 66.1-66.6℃로 가장 높은 값을, 남서측 보도가 56.5-58.2℃로 가장 낮은 값을 보였다(Figure 4d). 차선간 비교해 보았을 때, 6차선이 모든 방향에서 2차선과 4차선에 비해 낮은 값을 보였으며, 그 차이는 남측에 위치한 보도일수록 커지는 경향을 보였다. 2차선과 4차선의 차이는 방향별 약 0.7℃ 이하로 거의 유사한 수치를 보였다.

PET는 평균복사온도가 가장 높았던 동-서 방향의 북측 보도와, 풍향과 수직방

향으로 위치해 풍속저감이 큰 북서-남동 방향 도로에서 모든 차선이 41℃ 이상으로 ‘매우 더움’ 수준의 열 지각(thermal perception) 단계를 보였고, 2차선 동측 보도에서도 41.1℃로 같은 수준의 열 지각을 보였다(Figure 4e). 이를 제외한 나머지 보도에서는 한 단계 낮은 ‘더움’ 수준의 열 지각 단계를 보였다. UTCI는 평균복사온도 결과와 매우 유사한 패턴을 보였다(Figure 4f). 북측, 북동측, 동측 보도에서 모든 차선이 ‘매우 강한 열 스트레스’ 수준을 보였으며, 남측, 북서측, 서측에 위치한 2차선, 4차선 보도에서 또한 ‘매우 강한 열 스트레스’ 수준을 보였다. 각 보도 위치별 PET와 UTCI의 평균값을 다른 기상요소들과 비교해 보았을 때, PET와 UTCI 모두 평균복사온도의 영향을 가장 크게 받는 것으로 보인다. PET의 경우 평균복사온도가 2번째로 높고, 풍속 저감이 큰 북동측 보도에서 가장 높은 값을 보인 반면, UTCI에서는 평균복사온도가 가장 높았던 북측 보도에서 가장 높은 값을 보였다. 이를 통해 PET가 UTCI보다 풍속에 의한 영향을 더 잘 설명하는 것으로 판단되며, 이는 이전 연구들에서 언급된 내용과 같은 결과를 보인다(Jung et al., 2016; Jo et al., 2018).

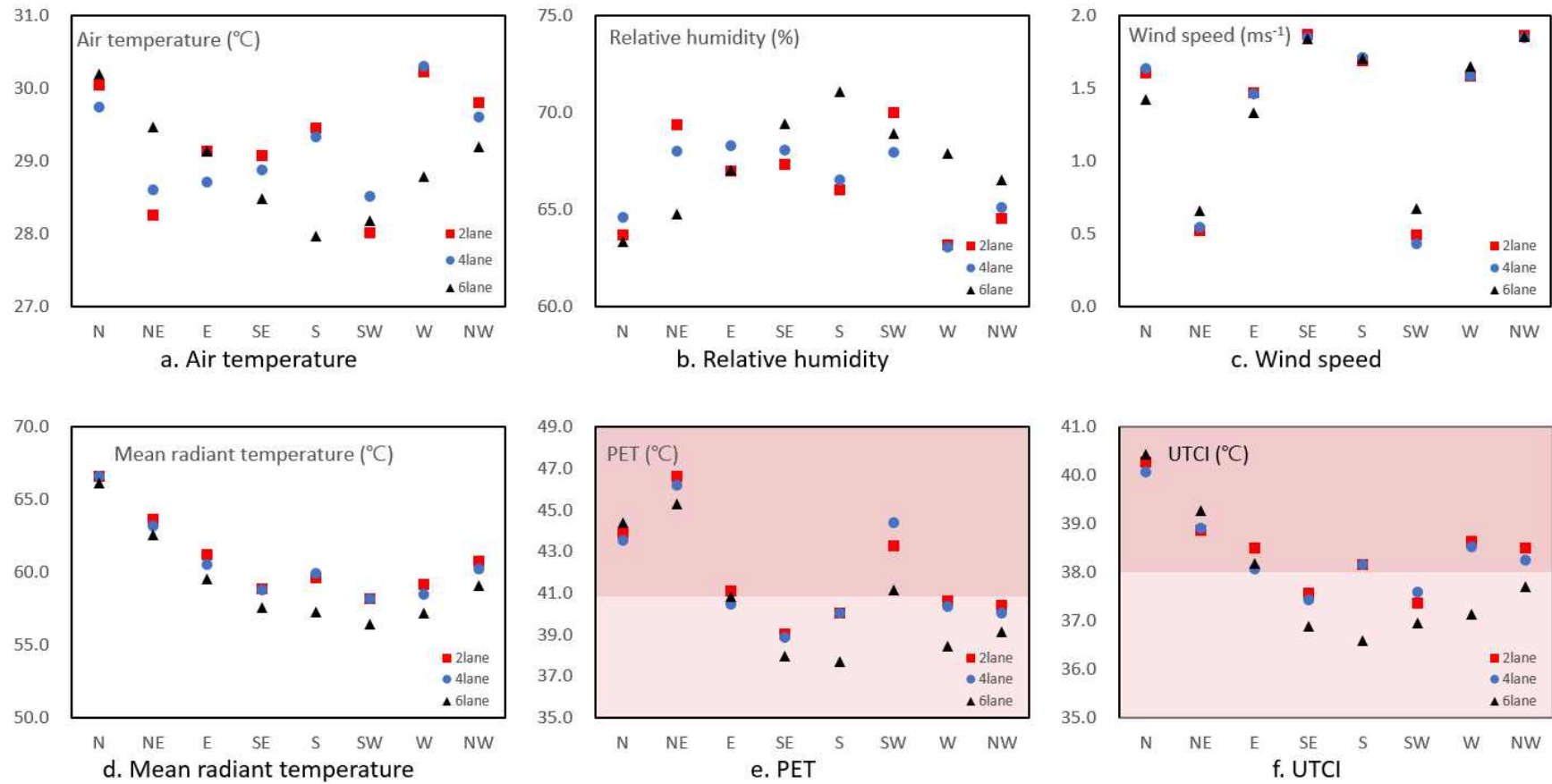


Figure 4. Average micro-climatic data by the location of sidewalk

1-2. 시간대별 비교

1-2-1. 시간에 따른 변화량

기온은 동측에 위치한 보도의 경우 점차 상승하는 경향을 보였고, 서측에 위치한 보도의 경우 13:00까지 상승하다가 이후 감소하는 경향을 보였다(Figure 5a). 시간별 변동폭은 남서측 보도에서 차선별로 1.2-1.4℃로 가장 적었으며, 동측 보도에서 3.6-3.9℃로 가장 넓은 변동폭을 보였다. 상대습도는 기온이 증가하는 시간대에는 감소하고, 감소하는 시간대에는 증가하는 경향을 보였다(Figure 5b).

시간대별 비교에 있어 풍속은 초기 설정값이 유지되기 때문에 큰 변동 폭을 보이지 않았으며, 공간별 차이값은 평균값에서의 차이와 크지 않았다(Figure 5c).

평균복사온도는 북측에 위치할수록 높은 값을, 남측에 위치할수록 낮은 값을 보였으며, 서측에 가까이 위치할수록 오전시간에 높은 값을, 동측에 가까이 위치할수록 오후시간에 높은 값을 보였다(Figure 5d). 시간대별 변동폭은 동-서 방향 도로의 북측과 남측 보도에서 6.6-14.8℃로 가장 적었으며, 동측 방면의 보도들에서 29.7-33℃로 19.4-23.3℃의 변동폭을 보이는 서측 방면의 보도들보다 높은 변동폭을 보였다.

PET는 시간이 지날수록 서측 방향 보도에서는 감소, 동측 방향 보도에서는 증가하였다(Figure 5e). 북측, 남측보도는 시간이 지날수록 서서히 증가하였으나, 변동폭은 다른 위치의 보도에 비해 크지 않았다. 열 지각 단계로 구분지어 보면 북동측 보도 11:00, 동측 보도 13:00를 기준으로 ‘더움’ 수준에서 ‘매우 더움’ 수준으로 1단계 높은 열 지각 단계로 변화하였고, 남동측 보도는 10:00에는 ‘따뜻함’ 수준의 열 지각 단계를 보이다 11:00를 지나 ‘더움’ 수준, 14:00 이후에는 ‘매우 더움’ 수준으로 변하여 분석시작시간과 비교하여 2단계 높은 열 지각 단계를 보였다. 서측 보도는 14:00, 북서측, 남서측 보도는 15:00를 기준으로 ‘매우 더움’ 수준에서 ‘더움’ 수준으로 1단계 낮아진 열지각 단계로 변화하였다. 북측 보도의 경우 11:00 이후에 지속적으로 ‘매우 더움’ 수준의 열지각 단계를 보였으며, 남측 보도의 경우 2차선과 4차선은 15:00, 6차선 도로의 보도는 분석 마지막 시간인 16:00가 되어서 ‘더움’에서 ‘매우 더움’ 수준의 열 지각 단계로 변화하였다. 전체적으로

북측 보도에서 높은 값을 보였으며, 풍속이 낮은 북동, 남서측 보도에서도 높은 PET 값을 보였다.

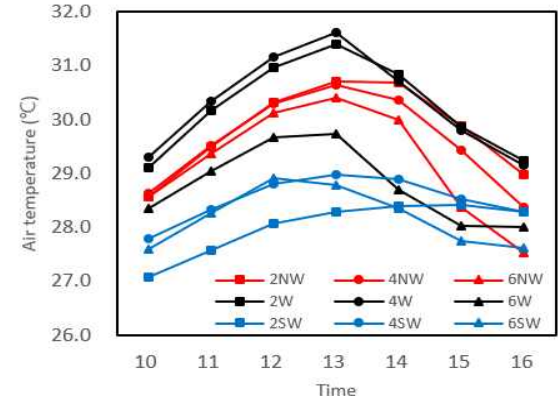
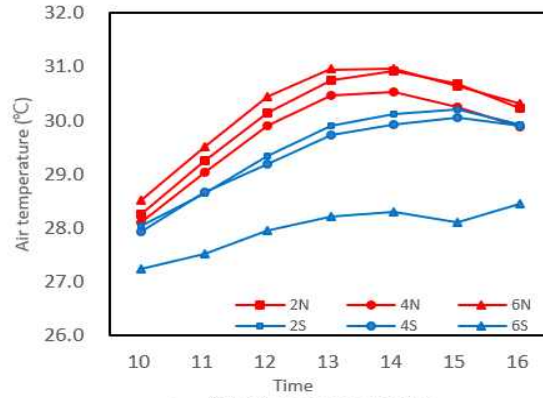
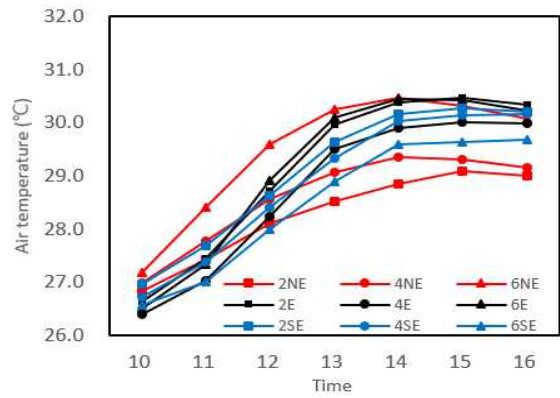
UTCI는 전체적으로 평균복사온도, PET와 유사한 경향을 보였다(Figure 5f). 북측에 가까울수록 높은 값을, 남측에 가까울수록 낮은 값을 보였다. 동측에 가까울수록 오전에 낮은 값을 보이다 시간이 지날수록 높은 값을, 서측에 가까울수록 높은 값을 보이다 시간이 지날수록 감소하는 경향을 보였다. 하지만 PET와는 다르게 풍속이 낮은 북동측, 남서측 보도에서 다른 공간에 비해 상대적으로 높은 UTCI값을 보이진 않았다. 열 스트레스 단계별로 살펴보면 먼저 북측 보도의 경우 모든 시간대에 ‘매우 강한 열 스트레스’를 보였고, 남측 보도의 경우 ‘강한 열 스트레스’를 보이다 시간이 지나면서 한 단계 상승한 ‘매우 강한 열 스트레스’ 단계를 보였다. 서측에 가까이 위치한 북서측, 서측, 남서측 보도에서는 ‘매우 강한 열 스트레스’를 보이다 시간이 지나면서 1단계 낮은 ‘강한 열 스트레스’ 단계를 보였다. 동측에 가까이 위치한 보도 중 북동측과 2차선 도로의 동측 보도에서는 ‘강한 열 스트레스’에서 ‘매우 강한 열 스트레스’로 1단계 높아졌으며, 남동측 보도와, 4차선과 6차선의 동측 보도에서는 분석 시작시간인 10:00에 ‘적당한 열 스트레스’에서 분석 마지막 시간인 16:00에 ‘매우 강한 열 스트레스’를 보이며 2단계 높아지는 경향을 보였다.

1-2-2. 시간에 따른 보도 위치별 차이값

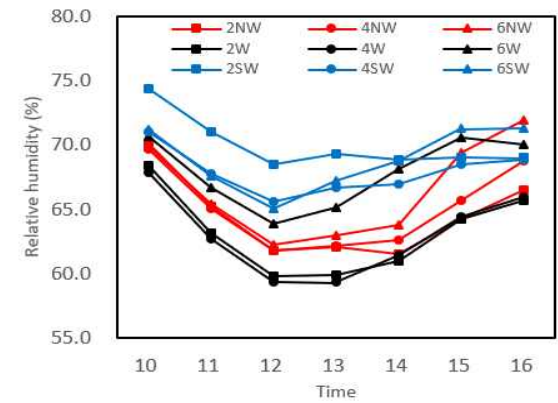
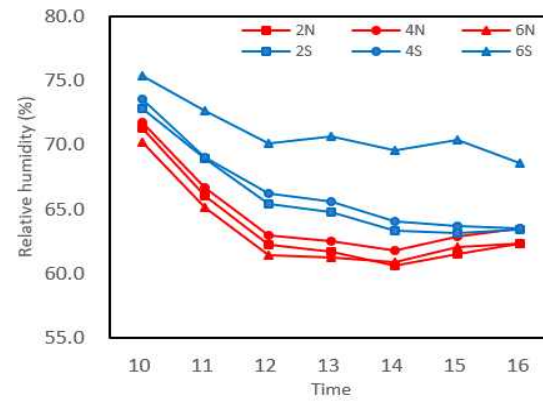
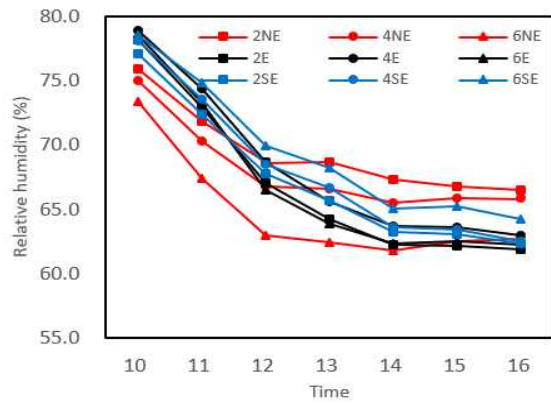
시간에 따른 변화량 에서 가장 큰 특징을 보이는 평균복사온도, PET, UTCI 에 있어 보도 위치별 차이값을 비교해 보았다. 차이값은 10:00와 16:00에 가장 크게 나타났다. 먼저 평균복사온도의 경우 10:00 2차선에서는 서측 보도에서 68.2℃로 최대값을, 북동측 보도에서 41.1℃로 최소값을 보여 27.1℃의 차이를 보였고, 4차선 공간에서는 서측 보도에서 67.4℃로 최대값을, 남동측 보도에서 40.6℃로 최소값을 보여 26.8℃의 차이값을 보였다(Figure 5d). 6차선 공간에서는 서측 보도에서 66.7℃, 남동측 보도에서 40.0℃를 보여 4차선과 마찬가지로 26.7℃의 차이값을 보였다. 16:00에는 2차선 북동측 보도 73.2℃, 북서측 보도 44.7℃로 28.5℃의 차이를, 4차선 북동측 보도 72℃, 북서측 보도 43.7℃로 28.3℃의 차이를, 6차선 동측 보도 70.9℃, 북서측 보도 42.6℃로 28.3℃의 차이를 보였다.

PET는 10:00에 2차선 남서측 보도 48.3℃, 동측 보도 29℃로 19.3℃의 차이값을 보였고, 4차선 남서측 보도 49.6℃, 남동측 보도 28.5℃로 21.1℃의 차이값을, 6차선에서는 남서측 보도 45.9℃, 남동측 보도 28.2℃로 17.7℃의 차이를 보였다(Figure 5e). 16:00에는 2차선 공간의 경우 북동측 보도 53.7℃, 남서측 보도 32.9℃로 20.8℃의 차이를, 4차선 북동측 보도 52.7℃, 남서측 보도 32℃로 20.7℃의 차이를, 6차선 북동측 보도 51℃, 남서측 보도 30.7℃로 20.3℃의 차이값을 보였다.

UTCI는 10:00에 2차선 공간에서는 서측 보도 40℃, 남동측 보도 31.9℃로 8.1℃의 차이를, 4차선 서측 보도 40℃, 남동측 보도 31.5℃로 8.5℃의 차이값을, 6차선 서측 보도 39.1℃, 남동측 보도 31.3℃로 7.8℃의 차이를 보였다(Figure 5f). 16:00에는 2차선 동측 보도 42.3℃, 북서측 보도 34.2℃로 8.1℃의 차이를, 4차선 동측 보도 41.8℃, 북서측 보도 33.6℃로 8.2℃의 차이를, 6차선 북동측 보도 41.9℃, 북서측 보도 32.7℃로 9.2℃의 차이를 보였다.

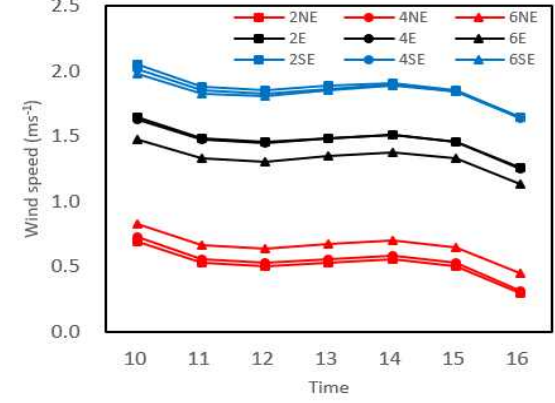
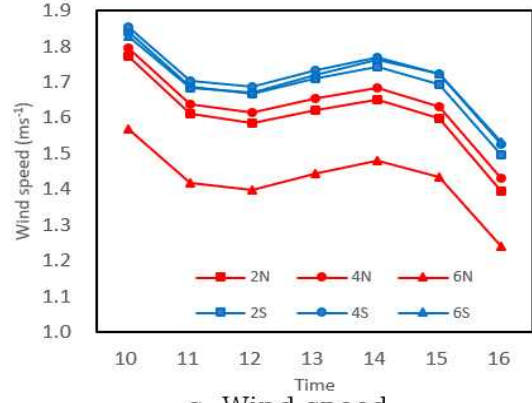
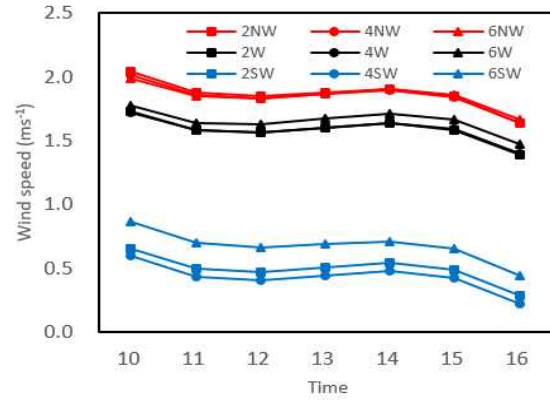


a. Air temperature

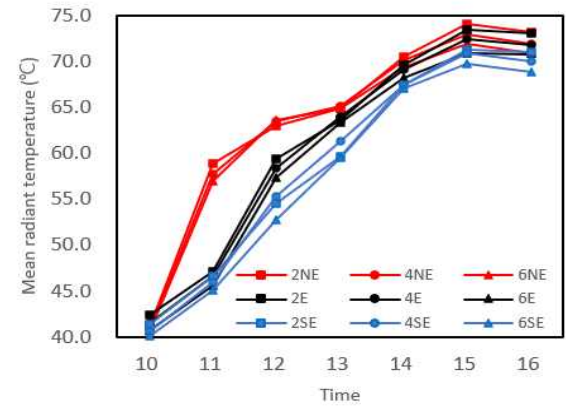
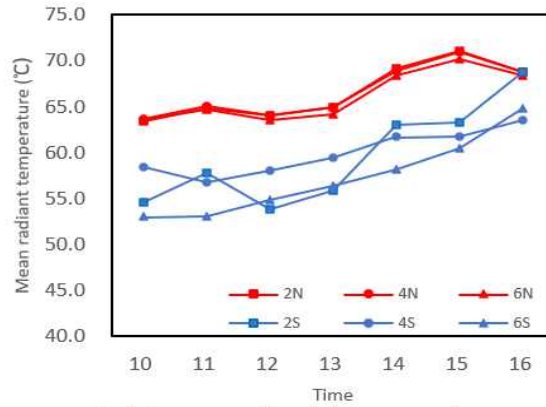
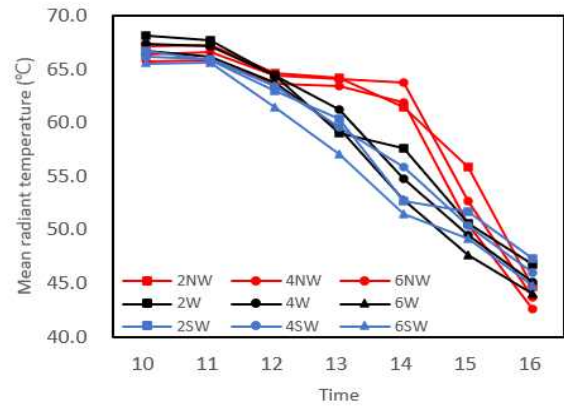


b. Relative humidity

Continued



c. Wind speed



d. Mean radiant temperature

Continued

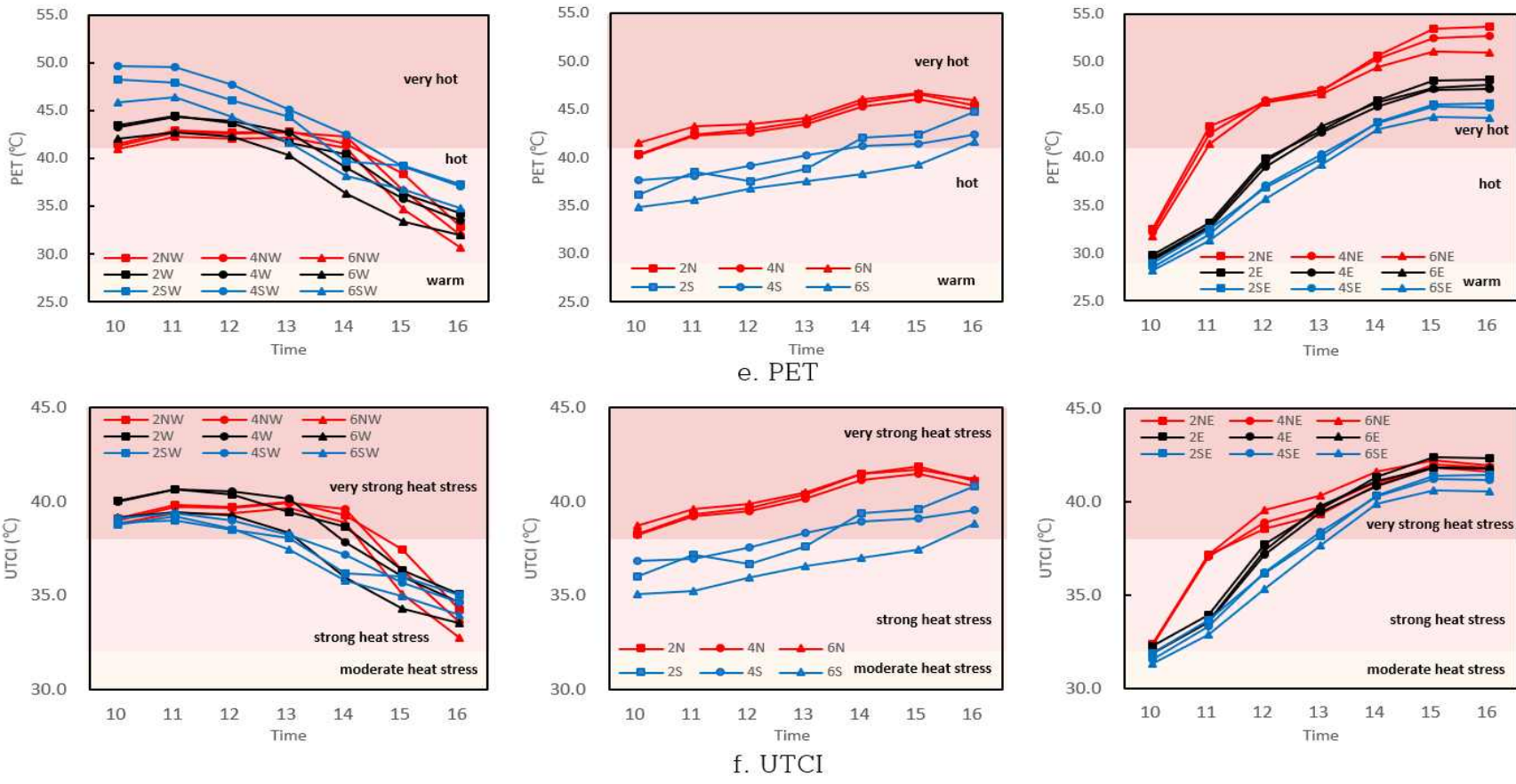


Figure 5. Micro-climatic data according to the location and time of sidewalk (2, 4 and 6 mean number of lanes; and, N, NE, E, SE, S, SW, W and NW indicate the location of sidewalk)

2. 수목식재 효과

2-1. 수목식재 효과

총 16개 수목식재 시나리오를 통해 수목식재 시 각 기상요소 및 열생리학적 지표 변화를 분석하였다(Appendix A). 각 시나리오별 평균값을 보았을 때 기온은 대부분의 공간에서 수목 식재 시 감소하였다(Figure 6a). 4차선 서측 보도 LWDN 시나리오에서 1.6°C로 가장 크게 감소하였으며, 다른 공간에서도 LWDN 시나리오에서 가장 큰 기온 감소를 보였다. 남서측, 북동측 보도의 경우 2차선에서는 수목 식재 시 오히려 기온이 약간 증가하는 경향을 보였고, 4차선과 6차선에서는 기온변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

상대습도는 전체적으로 증가하였으며, 기온과 마찬가지로 2차선 도로의 남서측, 북동측 보도에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다(Figure 6b). 수목식재 시나리오별로 비교해 보았을 때 기온과 마찬가지로 LWDN 시나리오에서 가장 큰 효과가 있는 것으로 보였다. 공간별로 보았을 때 2차선 도로의 서측 보도 LWDN 시나리오에서 6.2% 증가하여 가장 큰 변화량을 보였다.

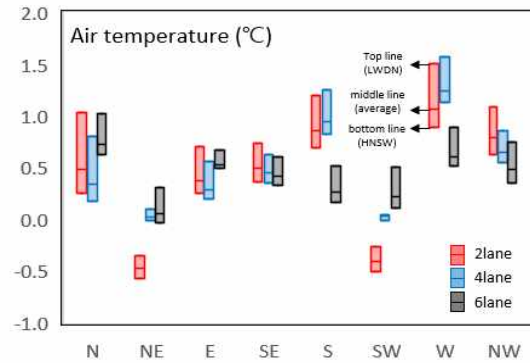
풍속은 수목 식재 시 0.2ms^{-1} 내외의 변동을 보이며 큰 변화를 보이지 않았다(Figure 6c).

평균복사온도는 수목 식재 시 감소하며, 그 값 또한 도로의 형태와, 식재 시나리오별로 큰 차이를 보였다(Figure 6d). 모든 공간에서 LWDN 시나리오 적용 시 6.0-15.1°C의 감소로 큰 저감효과를 보였으며, 반대로 HNSW 시나리오에서 1.3-3.8°C 감소하여 시나리오 중 가장 적은 저감효과를 보였다. 수목에 의한 평균 복사온도 저감효과를 보도위치별로 보았을 때 북측 보도에 수목 식재 시 가장 높은 저감효과를, 남서측 보도에 수목 식재 시 상대적으로 적은 효과를 보였다.

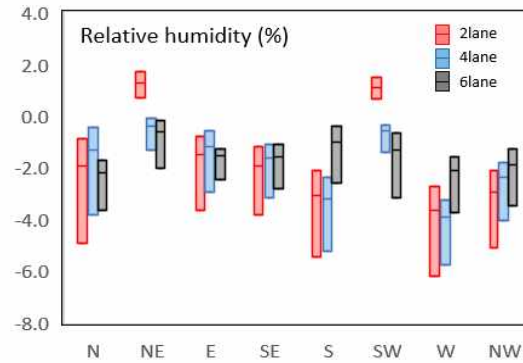
PET와 UTCI도 LWDN 시나리오에서 PET 3.3-7.7°C, UTCI 1.1-4.2°C로 가장 큰 저감효과를, HNSW 시나리오에서 PET 0.3-2.2°C, UTCI 0.1-1.4°C로 가장 적은 저감효과를 보였다(Figure 6e, f).

수목식재 시 기온은 감소하고, 상대습도는 증가하는 효과를 보였고, 풍속의 경우 분석높이인 1.5m 높이에서의 변화는 거의 없었다. 평균복사온도, PET, UTCI

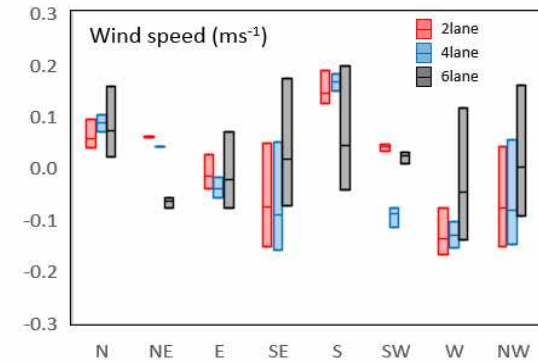
는 크게 감소하는 경향을 보였으며, 수목식재 시나리오별 차이값도 크게 나타났다. 수목식재 시나리오에서는 전체적으로 LWDN 시나리오 적용 시 가장 큰 효과를, HNSW 시나리오 적용 시 가장 적은 효과를 보였다.



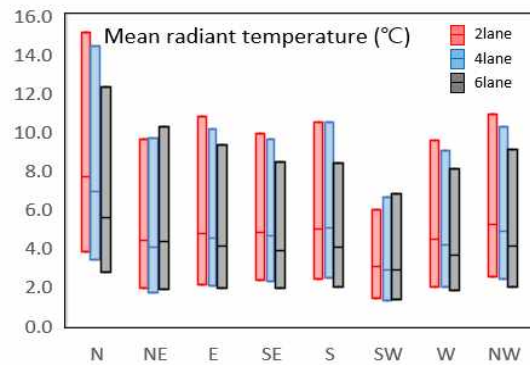
a. Air temperature



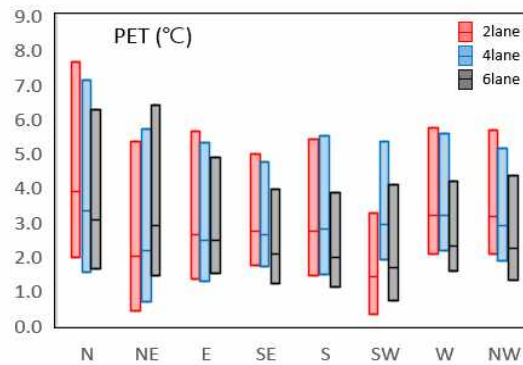
b. Relative humidity



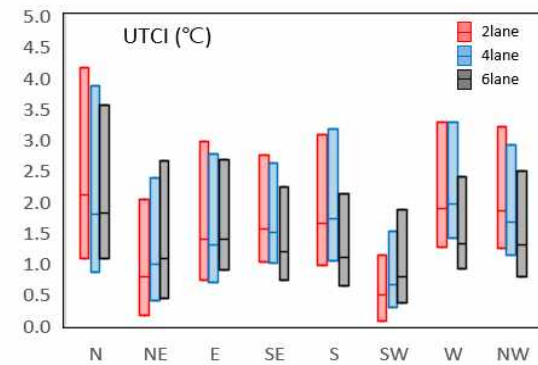
c. Wind speed



d. Mean radiant temperature



e. PET



f. UTCI

Figure 6. Average reduction in micro-climatic data with planting trees (Top line is maximum reduction among scenarios (LWDN), middle line is average of scenarios, and bottom line is minimum reduction among scenarios (HNSW))

2-2. 시간대별 저감량

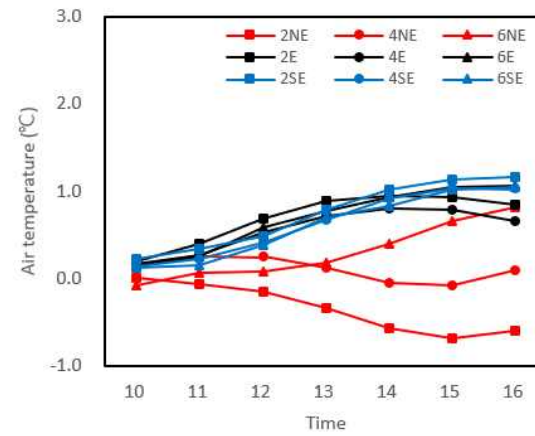
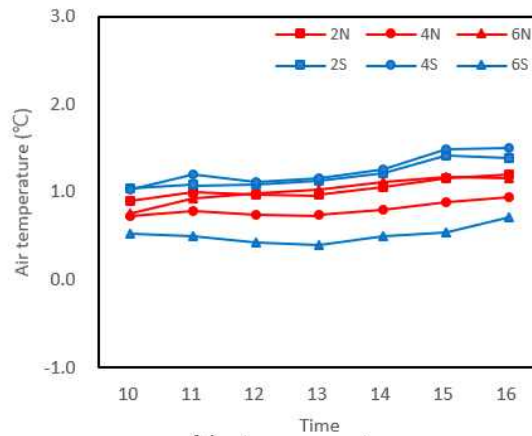
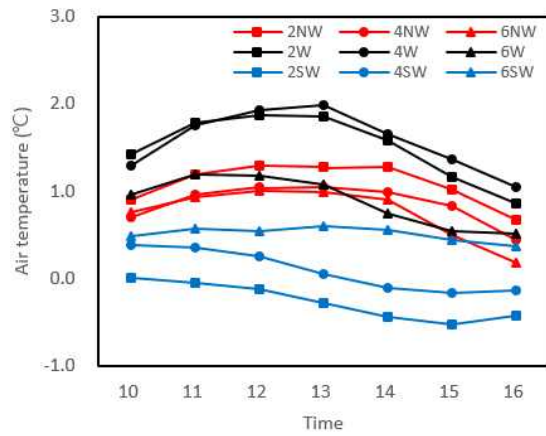
수목이 없는 공간과 비교하였을 때 가장 효과가 큰 LWDN 시나리오 적용 시 변화량을 시간별로 분석하였다.

기온과 상대습도의 경우 동쪽에 가까이 위치한 북동측 6차선 보도와 남동측, 동측 보도, 동-서 방향 도로의 남측, 북측 보도는 시간이 지날수록 수목에 의한 변화량이 증가하였다(Figure 7a, b). 서쪽에 가까이 위치한 북서측, 서측 보도의 경우 13:00 이후로 수목에 의한 효과가 감소하는 것을 확인하였다. 풍향과 수직방향으로 위치한 북동측, 남서측 보도는 4차선의 경우 수목에 의한 효과가 미비했으며, 2차선의 경우 오히려 수목에 의해 기온은 증가하였고, 상대습도는 감소하는 결과를 보였다.

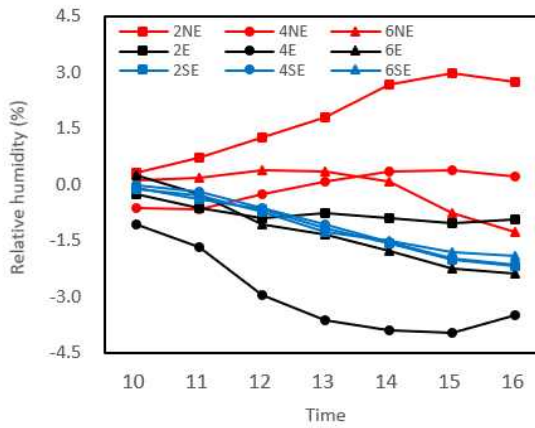
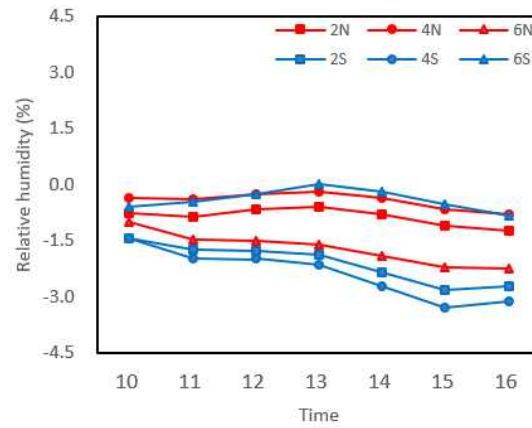
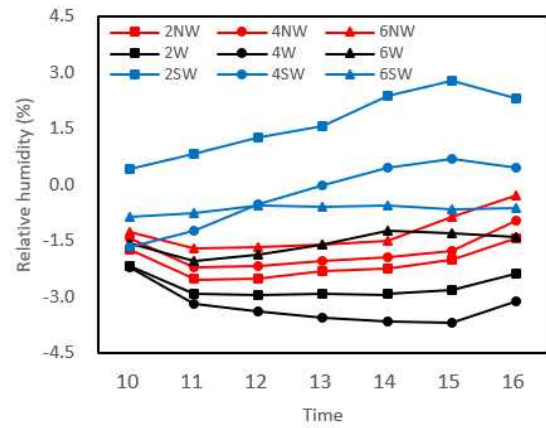
풍속의 경우 풍향과 도로방향이 일치하여 건물에 의한 풍속저감이 적을수록 수목에 의한 효과가 크게 나타났지만, 그 차이는 0.3ms^{-1} 이하로 수목에 의한 효과가 미비하였다(Figure 7c).

평균복사온도는 보도 위치에 따라 수목식재에 따른 저감량의 차이가 뚜렷하게 나타났다(Figure 7d). 동쪽에 가까이 위치한 북동측, 동측, 남동측 보도의 경우 10:00에는 $0.8\text{--}3\text{C}^{\circ}$ 의 적은 저감량을 보였지만, 시간이 지나면서 증가하여 16:00에는 $18\text{--}21\text{C}^{\circ}$ 까지 저감되는 결과를 보였고, 서쪽에 가까이 위치한 북서측, 서측, 남서측 보도의 경우 반대로 10:00에 $16.8\text{--}19.4\text{C}^{\circ}$ 의 큰 저감효과를 보였지만, 점차 감소하여 16:00에는 $0\text{--}3.9\text{C}^{\circ}$ 정도까지 저감효과가 낮아졌다. 동-서 방향 도로의 북측과 남측에 위치한 보도는 13:00를 기준으로 13:00 이전에는 시간이 지날수록 수목의 저감효과가 줄어들다가 13:00 이후 다시 증가하는 경향을 보였다.

열생리학적 지표인 PET와 UTCI의 경우 평균복사온도와 가장 유사한 패턴을 보였다(Figure 7e, f). 북서측, 서측, 남서측 보도에서는 10:00에 최대 차이를 보였고, 북동측, 동측, 남동측 보도에서는 16:00에 최대 차이를 보였다. 수목에 의한 저감효과가 큰 시간대에는 PET의 경우 $8.1\text{--}13.1\text{C}^{\circ}$, UTCI의 경우 $4\text{--}5.5\text{C}^{\circ}$ 의 큰 값을 보인 반면, 차이가 적은 시간대에는 PET 2C° 이하, UTCI 1.5C° 이하의 매우 적은 차이값을 보였다.

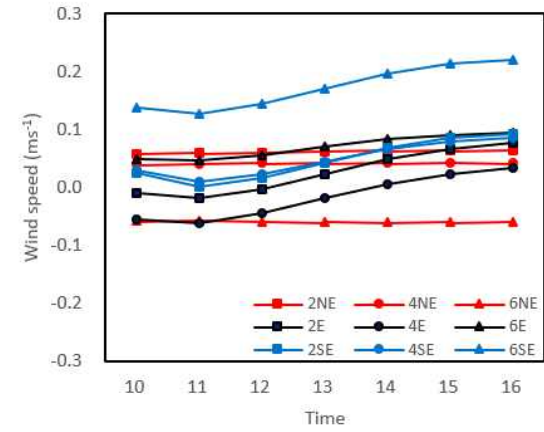
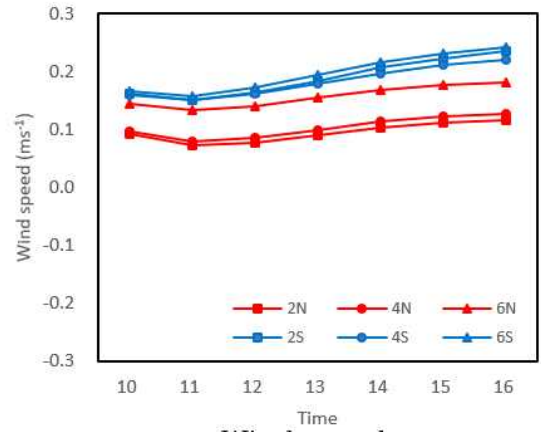
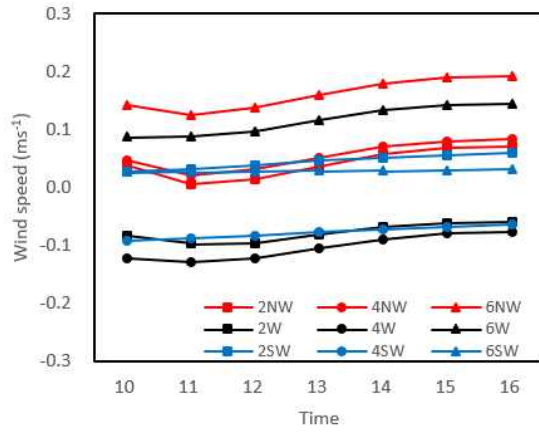


a. Air temperature

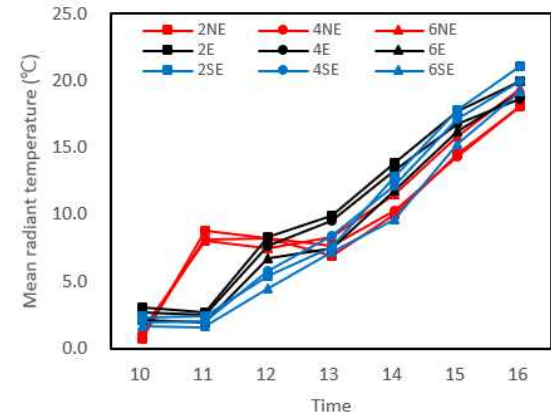
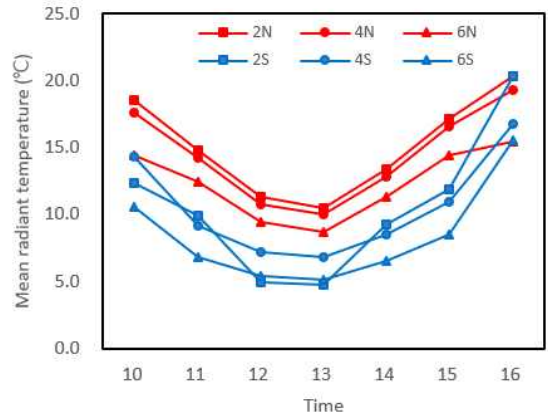
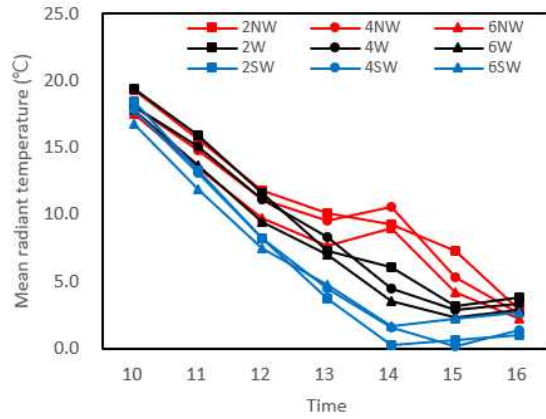


b. Relative humidity

Continued



c. Wind speed



d. Mean radiant temperature

Continued

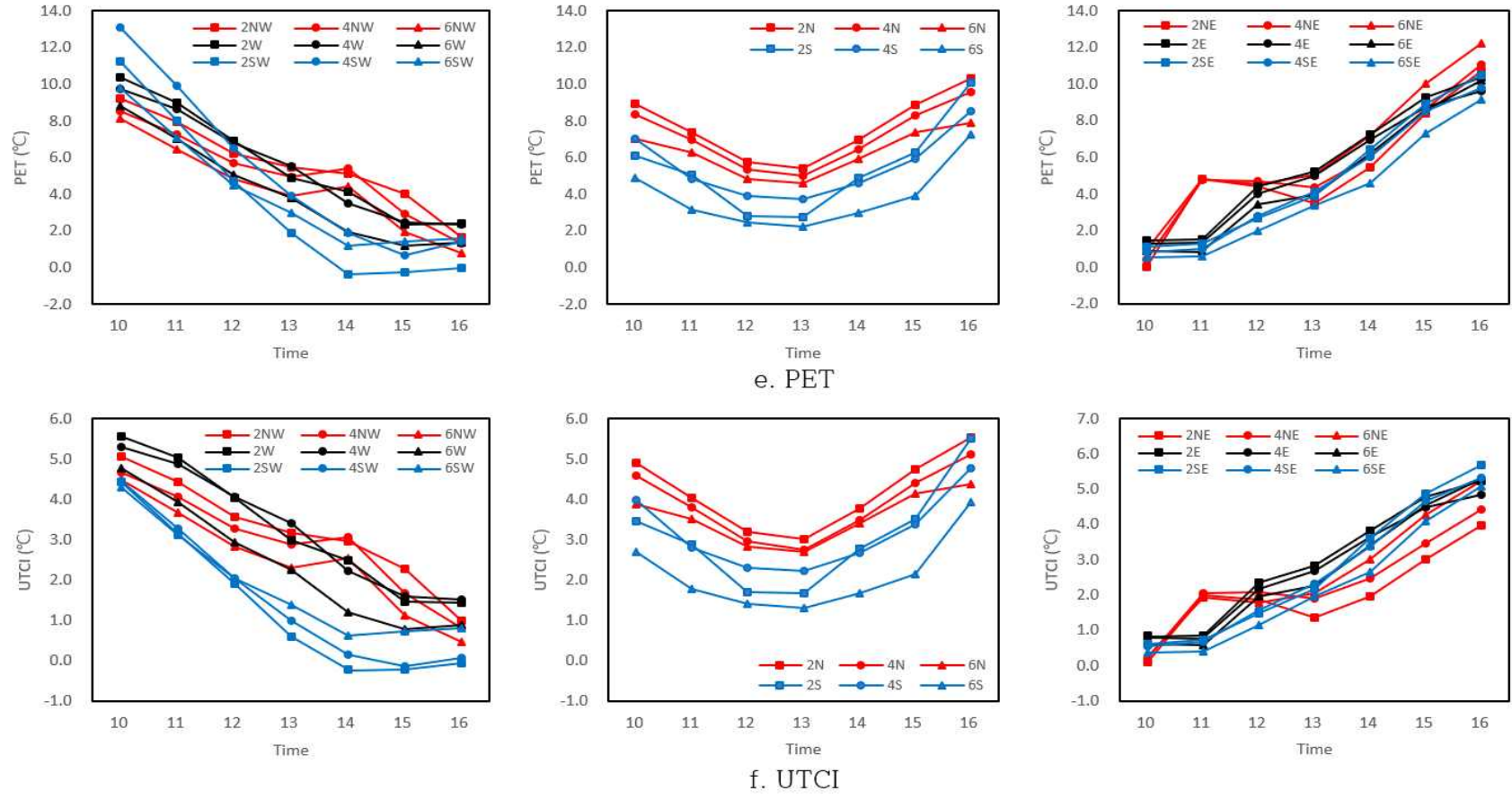


Figure 7. Amount of reduction for each space by time with the LWDN scenario (y axis is the difference of base map - LWDN scenario; 2, 4 and 6 mean number of lanes; and, N, NE, E, SE, S, SW, W and NW indicate the location of sidewalk)

3. 고찰

본 연구에서는 도로의 방향과 그에 따른 수목식재특성별 열 저감효과의 차이를 비교분석하였다. 먼저 수목이 없는 경우에는 Ali-tourdert and Mayer (2006)의 연구 결과와 같이 동-서 방향 도로의 북측 보도에서 가장 높은 평균복사온도 값을 보였다. 이에 따라 UTCI 또한 모든 차선에서 평균복사온도가 가장 높게 나타난 북측 보도에서 가장 높은 값을 보였지만 PET의 경우 평균복사온도가 2번째로 높게 나타나고, 풍속이 낮은 북동측 보도에서 가장 높은 값을 보였다. 이러한 결과를 통해 PET에서 UTCI 보다 풍속에 대해 더 민감하게 작용하는 것을 알 수 있으며, 이는 이전 연구에서 언급된 내용과 동일한 결과를 보인다(Jo et al., 2017; Jung et al., 2016). 따라서 제주도와 같이 풍속이 강한 지역의 경우 열 생리학적 지표를 통한 열환경 분석에 있어 PET를 적용하는 것이 더 적합하다.

수목 식재 시 기온, 상대습도, 풍속의 변화는 크지 않은 반면 평균복사온도는 크게 저감되었으며, 열생리학적 지표인 PET, UTCI 또한 수목 식재 시 큰 저감 효과를 보였다. 따라서 열 저감을 위한 수목 식재 시 평균복사온도를 낮추는 것이 중요하다. 평균복사온도 저감에 있어 수목의 가장 큰 역할은 태양복사에너지를 차단해 주는 것이며, 이를 위해 수고가 낮고, 수관폭이 넓고, 엽면적 지수가 높은 수종을 좁은 간격으로 식재하여 효율적으로 태양복사에너지를 차단해주는 것이 열 환경 완화에 있어 더 큰 효과를 얻을 수 있다.

시간별 수목에 의한 저감효과를 보았을 때 평균복사온도, PET, UTCI가 높게 나타날 때 더 큰 저감량을 보였으며, 수목식재 시나리오간 차이값도 커지는 경향을 보였다(Appendix B). 평균복사온도의 경우 건물에 의해 태양복사에너지가 차단이 되면 수목에 의한 영향이 줄어든다(Morakinyo and Lam, 2016). 이러한 이유로 PET와 UTCI 에서도 수목에 의한 영향이 줄어드는 결과를 보였다.

본 연구에서는 수목의 수형을 원정형 으로만 설정하여 분석을 진행하였다. 하지만 수형이 다를 경우 수목 하부 그림자 형태가 달라지며, 열환경 저감효과가 다르게 나타날 수 있다. 또한, 수목식재 관련 변수인 수고, 수관폭, 엽면적 지수, 식재간격을 각 요인별 2가지로 설정하여 상대적으로 비교하였기 때문에 각 요인별 수치가 증가 또는 감소 시 열환경 변화량을 파악할 수 없다는 것이 본 연구의

한계점으로 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

풍속의 경우 열환경 평가에 있어 중요한 요인으로 작용하지만 본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램의 한계로 풍속의 영향에 대한 평가가 부적합하다고 판단된다. ENVI-met 시뮬레이션에서는 측류 방식의 계산으로 난류를 제대로 해결하지 못하기 때문에, 분석 지점인 1.5m 높이에서 수목에 의한 풍속변화가 거의 없다는 결과에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

IV. 결론

가로 공간의 열환경 완화에 중점을 둔 가로수 식재 방법에 있어 각 도로 방향의 변화에 따른 열저감 효과의 차이를 분석해보고자 했다. 연구 결과에 따르면 도로의 방향의 가장 큰 영향은 도로변 건물에 의한 태양복사에너지 차단효과인 것으로 보이며, 건물에 의한 영향이 커질수록 수목에 의한 영향은 줄어들게 된다. 이를 잘 활용하여 건물의 그림자 효과에 의해 수목의 태양복사에너지 차단이 거의 없는 경우 지구복사에너지 방출과 환기작용에 용이하게 풍속저감이 적은 수종을 심는 것이 열환경 저감에 있어 유리할 것이다. 반면에, 건물에 의해 풍속이 크게 차단되는 지역의 경우 그늘 제공에 유리한 수종을 선택해 식재하는 등의 전략적인 식재방식을 도입하면, 가로수를 통한 보다 나은 열환경 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 종횡비(Aspect ratio)를 0.48-0.57로 도시화된 지역에 비해 낮은 값으로 설정하였기 때문에, 도시화된 지역과 비교하였을 때, 지구복사에너지 방출의 방해, 태양복사에너지 차단효과 등 건물의 영향이 과소평가 되었을 수 있고, 또한 시뮬레이션 프로그램의 한계로 풍속에 대한 평가가 부적합한 것으로 보이며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

V. 초록

본 연구에서는 여름철 도로의 방향과 가로수 식재형태에 따른 도시공간의 열환경 완화 효과를 분석하였다. 도로 형태와 수목 식재형태를 변수로 적용하여 CFD 모델인 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 기상요소인 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도와 열 생리학적 지표인 PET, UTCI를 계산하여 비교 분석하였다.

수목이 없는 도로공간의 경우 도로 방향에 따라 풍속과 평균복사온도가 큰 차이를 보였다. 풍속은 도로 방향이 풍향과 수직에 가까울수록 낮은 풍속을 보였다. 평균복사온도는 태양과 건물 위치에 따라 크게 변화하였으며, 낮 시간 평균값에서는 북측 보도가 가장 높은 값을 보였다. 이에 따라 PET에서는 북동측 보도가, UTCI에서는 북측 보도가 낮 시간 동안 가장 높은 평균값을 보였다.

수목 식재 시 PET와 UTCI는 LWDN (낮은 수고, 넓은 수관폭, 높은 LAI, 좁은 식재간격) 시나리오에서 가장 큰 저감효과를, HNSW (높은 수고, 좁은 수관폭, 낮은 LAI, 넓은 식재간격) 시나리오에서 가장 적은 저감효과를 보였다. 태양복사를 차단하여 평균복사온도를 낮춰주는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 평균복사온도 저감에 있어 건물에 의한 영향이 클수록 수목에 의한 영향이 줄어들었다. 풍속의 경우 시뮬레이션 프로그램의 특성상 1.5m 높이에서 수목에 의한 영향을 제대로 평가할 수 없었으며, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

인용문헌

Ahn, J., H. Kim and S. Kim (2010) Effect of difference of land cover conditions on urban thermal environment in Daegu using satellite and AWS data. *Journal of Environmental Science International* 19 (3): 281-293.

Ahn, J., J. Hwang, M. Park and Y. Suh (2012) Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using landsat-7 ETM+ and AWS Data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15 (4): 65-77.

Ali-Toudert, F. and H. Mayer (2006) Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41 (2): 94-108.

Ali-Toudert, F. and H. Mayer (2007) Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy* 81 (6): 742-754.

Błażejczyk, K., G. Jendritzky, P. Bröde, D. Fiala, G. Havenith, Y. Epstein, A. Psikuta and B. Kampmann (2013). An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica* 86 (1): 5-10.

Brown, R. D. and T. J. Gillespie (1986) Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model. *International Journal of Biometeorology* 30 (1): 43-52.

Bröde, P., E. L. Krüger, F. A. Rossi and D. Fiala (2012a) Predicting urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index UTCI – a case study in southern Brazil. *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 471-480.

Bröde, P., D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz and G. Havenith (2012b). Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 481-494.

Bruse, M. and H. Flerer (1998) Simulating surface - plant - air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13 (3-4): 373-384.

Coccolo, S., J. Kämpf, J. L. Scartezzini and D. Pearlmutter (2016) Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18: 33-57.

Eum, J. (2016) Vulnerability assessment to urban thermal environment for spatial planning – a case study of Seoul, Korea. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 44 (4): 109-120.

Fanger, P. O. (1972) *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.* McGraw-Hill, New York.

Fiala, D., K. J. Lomas and M. Stohrer (2003) First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE Transactions* 109: 179-186.

Gagge, A. P. (1936) The linearity criterion as applied to partitional calorimetry. *American Journal of Physiology* 116 (3): 656-668.

Garuma, G. F. (2018) Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. *Urban Climate* 24: 830-851.

Holst, J. and H. Mayer (2011) Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables. *Meteorologische Zeitschrift* 20 (5): 541-552.

Höppe, P. R. (1993) Heat balance modelling. *Experientia* 49 (9): 741-746.

Höppe, P. R. (1999) The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43 (2): 71-75.

Hyun, C. (2019) Analysis of human thermal environments in the apartment complex by computer simulation - Goduck-gangil area, Gandon-gu, Seoul metropolitan city. Master thesis, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea.

Jo, S., C. Hyun and S. Park (2017) Analysis of the influence of street trees on human thermal sensation in summer. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 45 (5): 105-112.

Jung, L., Y. Jin, Y. Jeun, K. Ko, H. Park and S. Park (2016) A case study of human thermal sensation (comfort) in plastic houses. *The Korean Environmental Sciences Society* 25 (8): 1115-1129.

Kim, K., Y. Kang, S. Song, D. Kim and J. Yu (2020) A study on the spatial strategies in response to heat waves through analyzing urban thermal environment by UAV: based on the urban regeneration project in Yeongdo-gu, Busan. Association of Korean Geographers 9 (1): 191-203.

Kim, K., Y. An and S. Lee (2016) A study on direct and indirect effect of the urban compositional elements on urban heat or energy consumption. The Seoul Institute 17 (1): 125-145.

Kim, J., D. Lee, S. Sung, S. Jeong and J. Park (2015) Study of vulnerable district characteristics on urban heat island according to land use using normalized index - focused on Daegu metropolitan city residential district. Korea Planning Association 50 (5): 59-72.

Lee, K., J. Ryu, S. Jeon, H. Jung and J. Kang (2017) Analysis of the effect of heat island on the administrative district unit in Seoul using LANDSAT image. Korean Journal of Remote Sensing 33 (5): 821-834.

Lee, H., H. Mayer and L. Chen (2016) Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, southwest Germany. Landscape and Urban Planning 148: 37-50.

Lee, H. and Mayer, H. (2020) Solar elevation impact on the heat stress mitigation of pedestrians on tree-lined sidewalks of E-W street canyons - analysis under central european heat wave conditions. Urban Forestry & Urban Greening. 126905.

Lee, H., J. Holst and H. Mayer (2013) Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. *Advances in Meteorology* 2013: 312572.

Lee, W., S. Jung, K. Park and K. Kim (2010) Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13 (1): 142-154.

Lee, H., K. Lee, G. Won and H. Lee (2009) Application of the latest land use data for numerical simulation of urban thermal environment in the Daegu. *Korean Society for Atmospheric Environment* 25 (3): 196-210.

Lenzholzer, S and R. D. Brown (2016) Post-positivist microclimatic urban design research: a review. *Landscape and Urban Planning* 153: 111-121.

Lyu, T., R. Buccolieri and Z. Gao (2019) A numerical study on the correlation between sky view factor and summer microclimate of local climate zones. *Atmosphere* 10 (8): 438.

Matzarakis, A. and H. Mayer (1996). Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO newsletter* 18 (January 1996): 7-10.

Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer (2007) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51 (4): 323-334.

Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer (2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 54 (2): 131-139.

Middel, A., K. Häb, A. J. Brazel, C. A. Martin and S. Guhathakurta (2014) Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix local climate zones. *Landscape and Urban Planning* 122: 16-28.

Morakinyo, T. E. and Y. F. Lam (2016) Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment* 103: 262-275.

Morakinyo, T. E., L. Kong, K. K. L. Lau, C. Yuan and E. Ng (2017) A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment* 115: 1-17.

Morakinyo, T. E., W. Ouyang, K. K. L. Lau, C. Ren and E. Ng (2020) Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation-development and evaluation. *Science of The Total Environment* 719: 137461.

Oke, T. R. (1982) The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108: 1-24.

Park, C., D. Lee, E. S. Kravenhoff, H. Heo, J. Hyun, K. Oh and T. Park (2019) Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees. *Sustainable Cities and Society* 48: 101521.

Park, S. (2011) Human-urban radiation exchange simulation model. Doctoral dissertation, University of Victoria, Victoria, B.C., Canada.

Stewart, I. D and T. R. Oke (2012) Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12): 1879-1900.

Toparlar, Y., B. Blocken, B. Maiheu and G. J. F. Van Heijst (2017) A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 1613-1640.

Appendix

Appendix A.

Table A1. Average reduction of air temperature according to scenarios

	2N	2S	2NW	2SE	2W	2E	2NE	2SW	4N	4S	4NW	4SE	4W	4E	4NE	4SW	6N	6S	6NW	6SE	6W	6E	6NE	6SW
LNSN	0.34	0.77	0.67	0.41	0.95	0.28	-0.40	-0.33	0.25	0.89	0.59	0.39	1.18	0.26	0.01	0.03	0.65	0.24	0.40	0.37	0.58	0.50	-0.01	0.16
LNSW	0.25	0.69	0.63	0.36	0.89	0.25	-0.55	-0.47	0.17	0.83	0.55	0.35	1.14	0.22	-0.01	0.02	0.63	0.18	0.36	0.33	0.54	0.50	-0.03	0.12
LNDN	0.53	0.92	0.75	0.49	1.07	0.38	-0.55	-0.48	0.40	1.01	0.64	0.44	1.27	0.33	0.01	0.01	0.73	0.33	0.49	0.43	0.66	0.53	0.07	0.26
LNDW	0.35	0.78	0.65	0.39	0.96	0.29	-0.57	-0.49	0.26	0.89	0.57	0.37	1.18	0.26	-0.02	0.01	0.67	0.24	0.40	0.37	0.59	0.51	0.01	0.18
LWSN	0.61	0.92	0.85	0.54	1.18	0.44	-0.52	-0.47	0.46	1.02	0.69	0.47	1.33	0.36	0.03	0.02	0.79	0.35	0.52	0.45	0.70	0.56	0.11	0.29
LWSW	0.40	0.77	0.69	0.41	1.01	0.32	-0.55	-0.48	0.29	0.89	0.59	0.39	1.21	0.27	0.00	0.02	0.71	0.25	0.40	0.37	0.60	0.53	0.03	0.20
LWDN	1.04	1.20	1.09	0.73	1.51	0.70	-0.47	-0.48	0.80	1.25	0.86	0.63	1.58	0.56	0.10	0.03	1.02	0.51	0.75	0.61	0.89	0.67	0.31	0.51
LWDW	0.63	0.92	0.79	0.50	1.18	0.45	-0.56	-0.51	0.48	1.02	0.65	0.45	1.34	0.37	0.00	-0.01	0.84	0.35	0.52	0.45	0.70	0.58	0.14	0.33
HNSN	0.41	0.81	0.81	0.50	1.02	0.33	-0.50	-0.41	0.25	0.90	0.65	0.45	1.19	0.23	0.02	0.04	0.68	0.21	0.47	0.41	0.55	0.51	0.01	0.15
HNSW	0.30	0.71	0.73	0.44	0.93	0.28	-0.52	-0.44	0.17	0.83	0.60	0.40	1.14	0.20	0.00	0.03	0.65	0.17	0.41	0.36	0.52	0.50	-0.02	0.11
HNDN	0.63	0.99	0.92	0.61	1.17	0.43	-0.45	-0.36	0.42	1.03	0.71	0.52	1.29	0.29	0.04	0.04	0.77	0.29	0.56	0.48	0.61	0.54	0.10	0.26
HNDW	0.43	0.82	0.79	0.49	1.02	0.33	-0.51	-0.43	0.26	0.90	0.64	0.44	1.19	0.23	0.01	0.03	0.70	0.22	0.46	0.40	0.55	0.51	0.03	0.18
HWSN	0.44	0.83	0.83	0.52	1.04	0.34	-0.35	-0.27	0.27	0.91	0.66	0.46	1.21	0.24	0.03	0.05	0.69	0.21	0.48	0.41	0.55	0.51	0.02	0.16
HWSW	0.32	0.72	0.75	0.45	0.95	0.29	-0.38	-0.31	0.18	0.84	0.61	0.41	1.15	0.21	0.00	0.04	0.65	0.17	0.42	0.37	0.52	0.50	-0.01	0.12
HWDN	0.70	1.02	0.96	0.64	1.22	0.46	-0.44	-0.36	0.46	1.06	0.75	0.54	1.33	0.32	0.05	0.04	0.80	0.30	0.59	0.50	0.63	0.56	0.12	0.28
HWDW	0.47	0.84	0.82	0.51	1.05	0.35	-0.37	-0.29	0.29	0.92	0.65	0.45	1.21	0.25	0.01	0.03	0.72	0.22	0.47	0.41	0.56	0.52	0.04	0.19
Mean ±SD	0.49 ±0.2	0.86 ±0.13	0.79 ±0.12	0.5 ±0.1	1.07 ±0.15	0.37 ±0.11	-0.48 ±0.07	-0.41 ±0.08	0.34 ±0.16	0.95 ±0.11	0.65 ±0.08	0.45 ±0.07	1.25 ±0.11	0.29 ±0.09	0.02 ±0.03	0.03 ±0.01	0.73 ±0.1	0.26 ±0.09	0.48 ±0.1	0.42 ±0.07	0.61 ±0.09	0.53 ±0.04	0.06 ±0.08	0.22 ±0.1

Table A2. Average reduction of relative humidity according to scenarios

	2N	2S	2NW	2SE	2W	2E	2NE	2SW	4N	4S	4NW	4SE	4W	4E	4NE	4SW	6N	6S	6NW	6SE	6W	6E	6NE	6SW
LNSN	-1.38	-2.69	-2.46	-1.52	-3.13	-1.14	1.15	0.95	-0.93	-2.89	-2.08	-1.36	-3.60	-0.95	-0.23	-0.43	-1.87	-0.83	-1.53	-1.31	-1.93	-1.39	-0.31	-0.94
LNSW	-0.86	-2.17	-2.11	-1.17	-2.74	-0.82	1.74	1.53	-0.52	-2.47	-1.81	-1.08	-3.33	-0.67	-0.10	-0.33	-1.71	-0.52	-1.28	-1.11	-1.69	-1.30	-0.15	-0.70
LNDN	-2.44	-3.69	-3.14	-2.21	-3.94	-1.86	1.43	1.24	-1.79	-3.71	-2.59	-1.87	-4.18	-1.55	-0.49	-0.64	-2.28	-1.41	-2.06	-1.74	-2.42	-1.63	-0.79	-1.61
LNDW	-1.47	-2.77	-2.43	-1.53	-3.21	-1.23	1.68	1.47	-1.02	-2.95	-2.07	-1.36	-3.65	-1.02	-0.23	-0.43	-1.95	-0.87	-1.57	-1.35	-1.97	-1.44	-0.45	-1.13
LWSN	-2.68	-3.64	-3.46	-2.35	-4.32	-2.02	1.39	1.24	-2.01	-3.71	-2.79	-1.98	-4.43	-1.66	-0.49	-0.64	-2.56	-1.50	-2.23	-1.87	-2.61	-1.78	-0.93	-1.75
LWSW	-1.60	-2.73	-2.58	-1.59	-3.41	-1.30	1.64	1.44	-1.14	-2.94	-2.16	-1.42	-3.78	-1.08	-0.24	-0.43	-2.12	-0.92	-1.63	-1.40	-2.07	-1.52	-0.50	-1.19
LWDN	-4.93	-5.47	-5.08	-3.80	-6.21	-3.64	0.70	0.67	-3.81	-5.26	-4.03	-3.17	-5.76	-2.96	-1.33	-1.40	-3.64	-2.57	-3.49	-2.83	-3.74	-2.45	-2.04	-3.15
LWDW	-2.85	-3.78	-3.40	-2.38	-4.43	-2.18	1.39	1.23	-2.19	-3.84	-2.77	-2.02	-4.53	-1.81	-0.57	-0.71	-2.76	-1.58	-2.32	-1.95	-2.70	-1.91	-1.20	-2.10
HNSN	-1.39	-2.59	-2.69	-1.64	-3.17	-1.08	1.47	1.22	-0.81	-2.76	-2.15	-1.42	-3.52	-0.76	-0.26	-0.44	-1.89	-0.65	-1.64	-1.35	-1.75	-1.36	-0.32	-0.87
HNSW	-0.89	-2.11	-2.33	-1.30	-2.78	-0.80	1.65	1.40	-0.44	-2.39	-1.89	-1.15	-3.27	-0.55	-0.12	-0.33	-1.73	-0.41	-1.40	-1.14	-1.58	-1.28	-0.16	-0.66
HNDN	-2.40	-3.50	-3.32	-2.24	-3.94	-1.68	1.08	0.80	-1.62	-3.51	-2.59	-1.88	-4.04	-1.23	-0.51	-0.64	-2.31	-1.13	-2.12	-1.74	-2.13	-1.59	-0.77	-1.51
HNDW	-1.48	-2.66	-2.69	-1.65	-3.23	-1.13	1.46	1.20	-0.89	-2.82	-2.14	-1.42	-3.55	-0.80	-0.26	-0.44	-1.97	-0.70	-1.65	-1.36	-1.78	-1.40	-0.43	-1.06
HWSN	-1.53	-2.68	-2.80	-1.72	-3.28	-1.16	0.95	0.71	-0.91	-2.83	-2.22	-1.48	-3.59	-0.82	-0.29	-0.46	-1.95	-0.69	-1.70	-1.39	-1.79	-1.39	-0.36	-0.93
HWSW	-0.98	-2.16	-2.39	-1.35	-2.84	-0.84	1.16	0.93	-0.49	-2.43	-1.94	-1.19	-3.31	-0.58	-0.15	-0.34	-1.76	-0.43	-1.42	-1.16	-1.59	-1.29	-0.19	-0.70
HWDN	-2.67	-3.65	-3.52	-2.40	-4.15	-1.84	0.98	0.72	-1.81	-3.64	-2.74	-2.00	-4.19	-1.35	-0.57	-0.68	-2.44	-1.22	-2.23	-1.82	-2.22	-1.66	-0.88	-1.63
HWDW	-1.64	-2.76	-2.81	-1.74	-3.35	-1.23	0.93	0.69	-1.00	-2.90	-2.22	-1.49	-3.64	-0.88	-0.30	-0.46	-2.04	-0.75	-1.71	-1.40	-1.82	-1.43	-0.49	-1.13
Mean ±SD	-1.95 ±1.03	-3.07 ±0.86	-2.95 ±0.72	-1.91 ±0.65	-3.63 ±0.87	-1.5 ±0.72	1.3±0 .31	1.09± 0.3	-1.34 ±0.86	-3.19 ±0.73	-2.39 ±0.54	-1.64 ±0.51	-3.9 ±0.63	-1.17 ±0.61	-0.38 ±0.3	-0.55 ±0.26	-2.19 ±0.49	-1.01 ±0.55	-1.87 ±0.54	-1.56 ±0.43	-2.11 ±0.55	-1.55 ±0.3	-0.62 ±0.49	-1.32 ±0.64

Table A3. Average reduction of wind speed according to scenarios

	2N	2S	2NW	2SE	2W	2E	2NE	2SW	4N	4S	4NW	4SE	4W	4E	4NE	4SW	6N	6S	6NW	6SE	6W	6E	6NE	6SW
LNSN	0.06	0.15	-0.07	-0.07	-0.13	-0.01	0.06	0.04	0.10	0.18	-0.08	-0.09	-0.12	-0.03	0.04	-0.09	0.08	0.05	0.02	0.03	-0.04	-0.01	-0.06	0.03
LNSW	0.06	0.14	-0.11	-0.10	-0.14	-0.02	0.06	0.04	0.10	0.17	-0.11	-0.12	-0.13	-0.04	0.04	-0.08	0.06	0.01	-0.03	-0.01	-0.08	-0.04	-0.06	0.03
LNDN	0.08	0.17	-0.01	-0.00	-0.10	0.01	0.06	0.04	0.10	0.18	-0.02	-0.03	-0.11	-0.02	0.04	-0.10	0.12	0.11	0.08	0.09	0.02	0.02	-0.07	0.02
LNDW	0.07	0.16	-0.05	-0.05	-0.12	-0.01	0.06	0.04	0.10	0.18	-0.06	-0.07	-0.11	-0.03	0.04	-0.09	0.09	0.06	0.03	0.05	-0.03	-0.01	-0.07	0.02
LWSN	0.07	0.16	-0.03	-0.03	-0.12	-0.00	0.06	0.04	0.09	0.17	-0.04	-0.05	-0.12	-0.03	0.04	-0.10	0.12	0.13	0.09	0.11	0.04	0.03	-0.07	0.02
LWSW	0.06	0.15	-0.07	-0.06	-0.13	-0.01	0.06	0.04	0.10	0.18	-0.07	-0.08	-0.12	-0.03	0.04	-0.09	0.09	0.08	0.04	0.06	-0.01	-0.00	-0.07	0.02
LWDN	0.09	0.19	0.04	0.05	-0.08	0.03	0.06	0.03	0.09	0.17	0.05	0.05	-0.10	-0.02	0.04	-0.12	0.16	0.20	0.16	0.17	0.12	0.07	-0.08	0.01
LWDW	0.08	0.17	0.00	0.01	-0.10	0.01	0.06	0.04	0.10	0.18	-0.01	-0.01	-0.11	-0.02	0.04	-0.10	0.13	0.15	0.11	0.13	0.06	0.04	-0.07	0.02
HNSN	0.04	0.12	-0.13	-0.13	-0.17	-0.04	0.06	0.04	0.08	0.16	-0.13	-0.14	-0.15	-0.05	0.04	-0.08	0.04	-0.02	-0.07	-0.05	-0.11	-0.06	-0.06	0.03
HNSW	0.04	0.12	-0.15	-0.15	-0.17	-0.04	0.06	0.04	0.08	0.16	-0.15	-0.16	-0.15	-0.05	0.04	-0.08	0.02	-0.04	-0.09	-0.07	-0.14	-0.08	-0.06	0.03
HNDN	0.05	0.13	-0.08	-0.08	-0.15	-0.03	0.06	0.04	0.07	0.15	-0.09	-0.10	-0.15	-0.06	0.04	-0.09	0.06	0.02	-0.03	-0.01	-0.07	-0.04	-0.06	0.02
HNDW	0.04	0.13	-0.12	-0.12	-0.16	-0.04	0.06	0.04	0.08	0.16	-0.12	-0.13	-0.15	-0.05	0.04	-0.08	0.04	-0.01	-0.06	-0.04	-0.10	-0.06	-0.06	0.03
HWSN	0.04	0.12	-0.13	-0.13	-0.17	-0.04	0.06	0.04	0.08	0.16	-0.13	-0.14	-0.15	-0.06	0.04	-0.08	0.04	-0.02	-0.07	-0.05	-0.11	-0.06	-0.06	0.03
HWSW	0.04	0.12	-0.15	-0.15	-0.17	-0.04	0.06	0.04	0.08	0.16	-0.15	-0.16	-0.15	-0.05	0.04	-0.08	0.02	-0.04	-0.09	-0.07	-0.13	-0.08	-0.06	0.03
HWDN	0.05	0.13	-0.08	-0.08	-0.15	-0.03	0.06	0.04	0.07	0.15	-0.08	-0.09	-0.15	-0.06	0.04	-0.09	0.06	0.03	-0.03	-0.01	-0.06	-0.03	-0.06	0.02
HWDW	0.04	0.13	-0.11	-0.11	-0.16	-0.03	0.06	0.04	0.08	0.16	-0.12	-0.13	-0.15	-0.05	0.04	-0.09	0.04	-0.00	-0.06	-0.04	-0.10	-0.06	-0.06	0.03
Mean ±SD	0.06 ±0.02	0.14 ±0.02	-0.08 ±0.06	-0.08 ±0.06	-0.14 ±0.03	-0.02 ±0.02	0.06 ±0	0.04 ±0	0.09± 0.01	0.17 ±0.01	-0.08 ±0.06	-0.09 ±0.06	-0.13 ±0.02	-0.04 ±0.02	0.04 ±0	-0.09 ±0.01	0.07 ±0.04	0.04 ±0.07	0 ±0.08	0.02 ±0.08	-0.05 ±0.08	-0.02 ±0.04	-0.07 ±0.01	0.02 ±0.01

Table A4. Average reduction of mean radiant temperature according to scenarios

	2N	2S	2NW	2SE	2W	2E	2NE	2SW	4N	4S	4NW	4SE	4W	4E	4NE	4SW	6N	6S	6NW	6SE	6W	6E	6NE	6SW
LNSN	6.42	4.23	4.66	4.31	3.99	4.30	3.74	2.40	5.45	4.16	4.13	3.91	3.54	3.83	3.19	2.08	4.17	3.24	3.23	3.03	2.93	3.32	3.25	2.03
LNSW	4.14	2.74	3.12	2.89	2.67	2.86	2.24	1.40	3.50	2.68	2.77	2.64	2.38	2.57	1.99	1.30	2.74	2.15	2.14	2.03	2.01	2.25	2.09	1.33
LNDN	10.50	6.92	7.41	6.80	6.33	6.86	6.24	4.07	9.01	6.87	6.54	6.16	5.60	6.09	5.73	3.96	6.82	5.25	5.20	4.84	4.60	5.24	5.64	3.66
LNDW	6.75	4.47	4.87	4.48	4.17	4.50	3.92	2.56	5.78	4.41	4.32	4.08	3.71	4.01	3.57	2.46	4.43	3.44	3.38	3.18	3.07	3.47	3.60	2.37
LWSN	9.47	6.55	6.94	6.39	6.12	6.87	5.46	3.16	8.97	6.53	6.55	6.20	5.78	6.47	5.37	3.41	7.63	5.36	5.72	5.37	5.17	5.96	6.13	3.93
LWSW	6.21	4.31	4.62	4.28	4.06	4.53	3.43	1.99	5.85	4.27	4.37	4.17	3.86	4.28	3.34	2.11	5.02	3.55	3.76	3.57	3.47	3.96	3.90	2.52
LWDN	15.14	10.49	10.90	9.93	9.59	10.79	9.60	5.99	14.46	10.52	10.28	9.63	9.04	10.14	9.68	6.62	12.31	8.37	9.10	8.45	8.09	9.34	10.28	6.79
LWDW	10.01	6.95	7.22	6.64	6.33	7.08	6.03	3.78	9.50	6.94	6.81	6.45	5.99	6.67	6.01	4.09	8.12	5.68	5.94	5.59	5.36	6.13	6.61	4.43
HNSN	5.84	3.61	3.70	3.46	3.00	3.11	3.07	2.32	5.18	3.72	3.51	3.36	2.92	3.02	2.65	2.04	4.09	2.91	2.98	2.80	2.58	2.80	2.90	1.98
HNSW	3.82	2.37	2.49	2.34	2.01	2.08	1.95	1.49	3.38	2.43	2.38	2.29	1.98	2.04	1.66	1.29	2.73	1.97	2.00	1.90	1.78	1.91	1.88	1.32
HNDN	9.92	6.24	6.10	5.70	4.99	5.18	5.61	4.31	8.92	6.42	5.73	5.48	4.81	4.98	4.88	3.83	6.93	4.90	4.94	4.65	4.19	4.58	5.18	3.59
HNDW	6.48	4.08	4.01	3.77	3.28	3.40	3.53	2.74	5.81	4.20	3.81	3.67	3.19	3.30	3.05	2.41	4.58	3.27	3.24	3.09	2.81	3.05	3.32	2.35
HWSN	6.33	3.78	3.94	3.68	3.21	3.34	3.46	2.68	5.49	3.98	3.77	3.59	3.14	3.24	2.88	2.18	4.44	3.14	3.23	3.02	2.79	3.03	3.16	2.14
HWSW	4.15	2.49	2.64	2.48	2.14	2.22	2.25	1.78	3.59	2.61	2.55	2.44	2.12	2.18	1.80	1.38	2.97	2.13	2.16	2.05	1.92	2.06	2.05	1.42
HWDN	10.69	6.51	6.51	6.07	5.35	5.56	5.95	4.58	9.41	6.82	6.17	5.87	5.18	5.35	5.28	4.08	7.53	5.28	5.36	5.03	4.56	4.97	5.64	3.88
HWDW	7.02	4.28	4.27	4.01	3.51	3.63	3.94	3.11	6.16	4.48	4.10	3.92	3.43	3.53	3.30	2.57	4.99	3.53	3.52	3.34	3.05	3.30	3.62	2.54
Mean ±SD	7.68 ±3.03	5 ±2.13	5.21 ±2.19	4.83 ±1.98	4.42 ±1.97	4.77 ±2.26	4.4 ±1.98	3.02 ±1.25	6.9 ±2.93	5.06 ±2.13	4.86 ±2.05	4.62 ±1.91	4.17 ±1.83	4.48 ±2.1	4.02 ±2.06	2.86 ±1.4	5.59 ±2.51	4.01 ±1.69	4.12 ±1.84	3.87 ±1.7	3.65 ±1.63	4.09 ±1.92	4.33 ±2.18	2.89 ±1.43

Table A5. Average reduction of PET according to scenarios

	2N	2S	2NW	2SE	2W	2E	2NE	2SW	4N	4S	4NW	4SE	4W	4E	4NE	4SW	6N	6S	6NW	6SE	6W	6E	6NE	6SW
LNSN	3.19	2.31	2.82	2.44	2.90	2.35	1.67	1.05	2.55	2.31	2.53	2.29	2.86	2.14	1.66	2.46	2.29	1.60	1.77	1.62	1.95	2.04	2.26	1.15
LNSW	2.04	1.56	2.15	1.82	2.27	1.64	0.62	0.33	1.57	1.57	1.95	1.74	2.32	1.51	0.89	1.92	1.65	1.13	1.32	1.22	1.57	1.58	1.55	0.72
LNDN	5.15	3.60	3.95	3.47	3.98	3.57	3.17	2.03	4.30	3.62	3.50	3.20	3.82	3.22	3.22	3.63	3.50	2.44	2.57	2.34	2.62	2.89	3.67	2.15
LNDW	3.28	2.38	2.81	2.43	2.95	2.41	1.67	1.06	2.66	2.38	2.53	2.29	2.91	2.19	1.86	2.66	2.39	1.63	1.78	1.63	1.96	2.09	2.44	1.36
LWSN	4.82	3.50	3.91	3.41	4.03	3.69	2.75	1.51	4.40	3.53	3.60	3.29	4.00	3.48	3.06	3.36	4.01	2.51	2.84	2.60	2.89	3.29	4.00	2.36
LWSW	3.13	2.35	2.79	2.41	2.97	2.48	1.40	0.73	2.77	2.35	2.61	2.37	3.03	2.36	1.76	2.49	2.73	1.68	1.95	1.80	2.13	2.35	2.65	1.48
LWDN	7.66	5.42	5.66	4.97	5.73	5.64	5.35	3.27	7.14	5.51	5.16	4.74	5.58	5.30	5.71	5.35	6.27	3.84	4.36	3.94	4.19	4.89	6.40	4.10
LWDW	4.97	3.60	3.85	3.37	4.04	3.70	3.03	1.85	4.57	3.65	3.57	3.28	4.04	3.52	3.38	3.72	4.20	2.57	2.85	2.62	2.90	3.33	4.24	2.65
HNSN	3.05	2.13	2.63	2.27	2.58	1.88	1.16	0.96	2.49	2.16	2.40	2.19	2.65	1.79	1.33	2.41	2.41	1.58	1.88	1.73	1.91	1.92	2.06	1.12
HNSW	1.98	1.46	2.06	1.74	2.06	1.34	0.42	0.40	1.55	1.49	1.89	1.70	2.18	1.29	0.68	1.91	1.76	1.16	1.44	1.33	1.57	1.52	1.44	0.70
HNDN	5.07	3.45	3.67	3.24	3.55	2.90	2.78	2.22	4.36	3.52	3.33	3.09	3.57	2.76	2.72	3.56	3.76	2.45	2.74	2.53	2.58	2.73	3.41	2.11
HNDW	3.30	2.32	2.70	2.34	2.68	1.99	1.43	1.19	2.76	2.36	2.47	2.27	2.76	1.90	1.55	2.63	2.63	1.71	1.95	1.82	1.98	2.03	2.29	1.34
HWSN	3.31	2.22	2.75	2.38	2.69	2.01	1.48	1.24	2.66	2.30	2.52	2.30	2.77	1.91	1.48	2.51	2.59	1.69	2.00	1.83	2.00	2.03	2.22	1.22
HWSW	2.16	1.52	2.14	1.81	2.13	1.42	0.68	0.64	1.67	1.58	1.97	1.78	2.25	1.37	0.78	1.97	1.88	1.23	1.51	1.39	1.63	1.59	1.54	0.77
HWDN	5.49	3.60	3.88	3.43	3.76	3.11	3.01	2.40	4.63	3.73	3.54	3.27	3.78	2.96	2.98	3.73	4.08	2.62	2.94	2.70	2.75	2.94	3.69	2.29
HWDW	3.59	2.42	2.83	2.47	2.80	2.12	1.75	1.49	2.94	2.50	2.61	2.39	2.88	2.03	1.72	2.74	2.84	1.82	2.08	1.93	2.08	2.16	2.47	1.46
Mean ±SD	3.89 ±1.52	2.74 ±1.05	3.16 ±0.93	2.75 ±0.84	3.19 ±0.94	2.64 ±1.11	2.02 ±1.26	1.4 ±0.79	3.31 ±1.48	2.78 ±1.06	2.89 ±0.85	2.64 ±0.79	3.21 ±0.88	2.48 ±1.03	2.17 ±1.29	2.94 ±0.9	3.06 ±1.19	1.98 ±0.71	2.25 ±0.77	2.06 ±0.69	2.3 ±0.68	2.46 ±0.87	2.9 ±1.29	1.69 ±0.89

Table A6. Average reduction of UTCI according to scenarios.

	2N	2S	2NW	2SE	2W	2E	2NE	2SW	4N	4S	4NW	4SE	4W	4E	4NE	4SW	6N	6S	6NW	6SE	6W	6E	6NE	6SW
LNSN	1.71	1.41	1.63	1.37	1.70	1.23	0.68	0.39	1.38	1.46	1.46	1.29	1.76	1.12	0.78	0.48	1.41	0.89	1.02	0.94	1.13	1.18	0.77	0.55
LNSW	1.11	1.02	1.27	1.04	1.37	0.88	0.22	0.07	0.88	1.08	1.15	1.00	1.47	0.80	0.48	0.29	1.07	0.63	0.78	0.73	0.92	0.94	0.48	0.37
LNDN	2.78	2.10	2.25	1.93	2.30	1.86	1.19	0.70	2.33	2.16	1.99	1.78	2.29	1.68	1.39	0.91	2.07	1.37	1.48	1.36	1.51	1.63	1.39	0.99
LNDW	1.79	1.46	1.63	1.37	1.74	1.27	0.62	0.34	1.47	1.51	1.47	1.30	1.80	1.16	0.86	0.56	1.49	0.93	1.04	0.97	1.15	1.21	0.86	0.65
LWSN	2.58	2.02	2.22	1.89	2.32	1.92	1.02	0.48	2.35	2.09	2.04	1.83	2.38	1.80	1.32	0.78	2.31	1.38	1.61	1.48	1.65	1.82	1.53	1.08
LWSW	1.69	1.43	1.61	1.35	1.75	1.31	0.51	0.20	1.51	1.48	1.50	1.34	1.86	1.23	0.81	0.47	1.65	0.94	1.12	1.05	1.24	1.34	0.95	0.69
LWDN	4.17	3.07	3.21	2.74	3.29	2.96	2.03	1.13	3.87	3.16	2.92	2.62	3.28	2.77	2.38	1.52	3.55	2.13	2.49	2.24	2.39	2.67	2.65	1.86
LWDW	2.71	2.11	2.20	1.88	2.35	1.96	1.12	0.60	2.49	2.18	2.04	1.83	2.43	1.85	1.44	0.92	2.45	1.44	1.64	1.51	1.68	1.87	1.67	1.21
HNSN	1.64	1.32	1.56	1.31	1.55	1.01	0.45	0.33	1.35	1.38	1.41	1.26	1.66	0.93	0.66	0.48	1.45	0.86	1.10	1.01	1.09	1.09	0.71	0.54
HNSW	1.09	0.97	1.25	1.02	1.27	0.73	0.16	0.11	0.86	1.03	1.13	1.00	1.40	0.68	0.40	0.30	1.11	0.63	0.85	0.79	0.91	0.89	0.44	0.36
HNDN	2.75	2.04	2.15	1.85	2.10	1.54	1.09	0.82	2.35	2.11	1.93	1.76	2.17	1.43	1.21	0.90	2.18	1.34	1.59	1.46	1.47	1.52	1.31	0.98
HNDW	1.81	1.43	1.61	1.36	1.62	1.07	0.55	0.42	1.51	1.50	1.46	1.31	1.72	1.00	0.74	0.56	1.58	0.94	1.14	1.06	1.14	1.16	0.81	0.64
HWSN	1.78	1.37	1.63	1.37	1.62	1.07	0.63	0.49	1.43	1.45	1.48	1.32	1.72	0.99	0.71	0.51	1.54	0.91	1.16	1.06	1.14	1.15	0.77	0.59
HWSW	1.18	1.00	1.29	1.06	1.31	0.77	0.32	0.26	0.92	1.08	1.17	1.04	1.44	0.72	0.44	0.32	1.17	0.67	0.89	0.82	0.94	0.92	0.48	0.39
HWDN	2.99	2.13	2.26	1.95	2.22	1.66	1.18	0.89	2.50	2.22	2.05	1.86	2.29	1.54	1.31	0.96	2.34	1.43	1.70	1.55	1.56	1.63	1.43	1.06
HWDW	1.96	1.49	1.68	1.43	1.69	1.14	0.74	0.58	1.61	1.57	1.53	1.38	1.79	1.06	0.81	0.60	1.69	1.00	1.21	1.12	1.19	1.22	0.89	0.70
Mean ±SD	2.11 ±0.83	1.65 ±0.56	1.84 ±0.51	1.56 ±0.45	1.89 ±0.52	1.4 ±0.57	0.78 ±0.47	0.49 ±0.29	1.8 ±0.79	1.72 ±0.56	1.67 ±0.46	1.49 ±0.43	1.97 ±0.49	1.3 ±0.54	0.98 ±0.51	0.66 ±0.32	1.82 ±0.64	1.09 ±0.4	1.3 ±0.43	1.2 ±0.39	1.32 ±0.38	1.39 ±0.46	1.07 ±0.57	0.79 ±0.39

Appendix B.

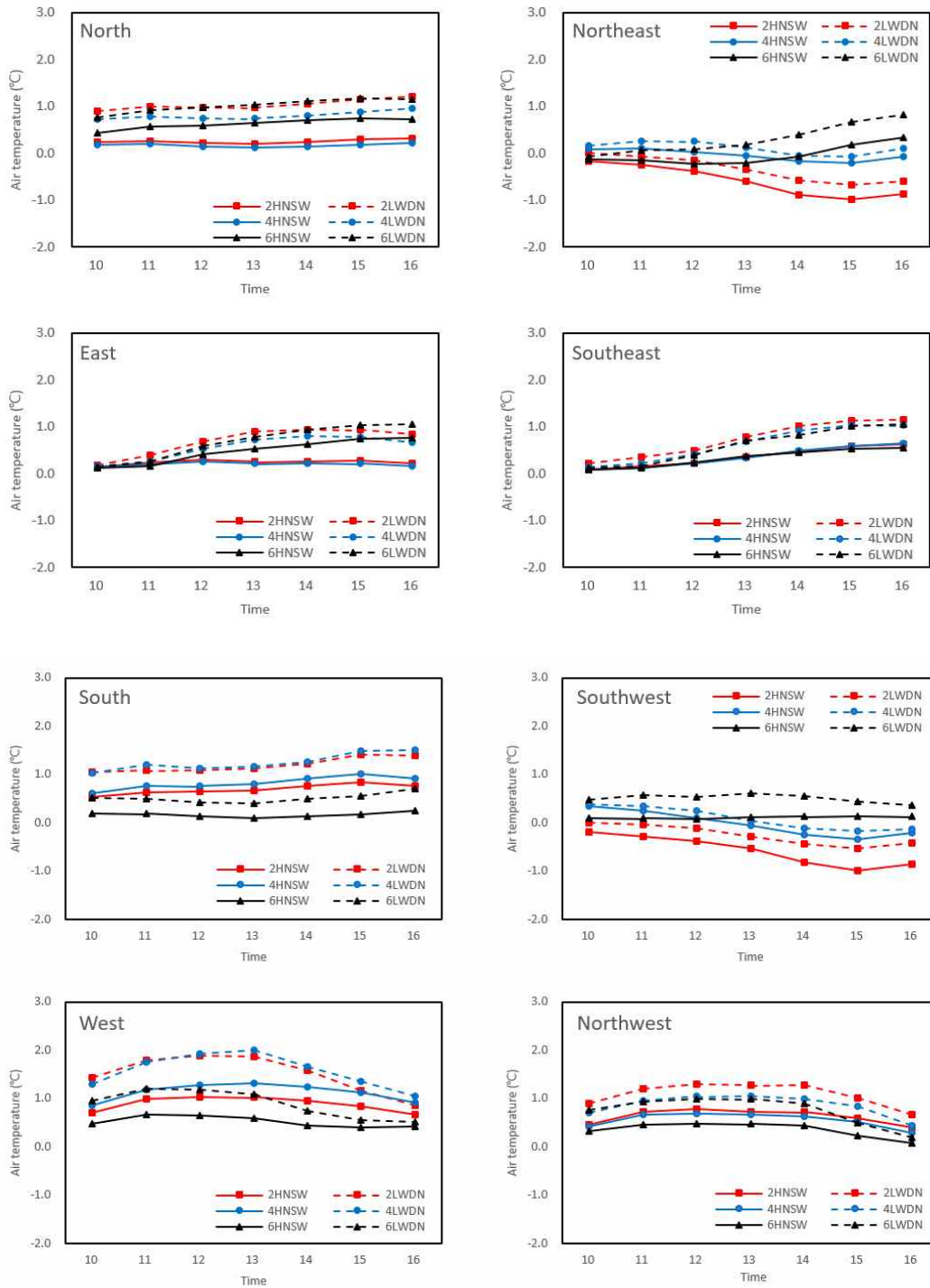


Figure B1. Amount of reduction of air temperature for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios

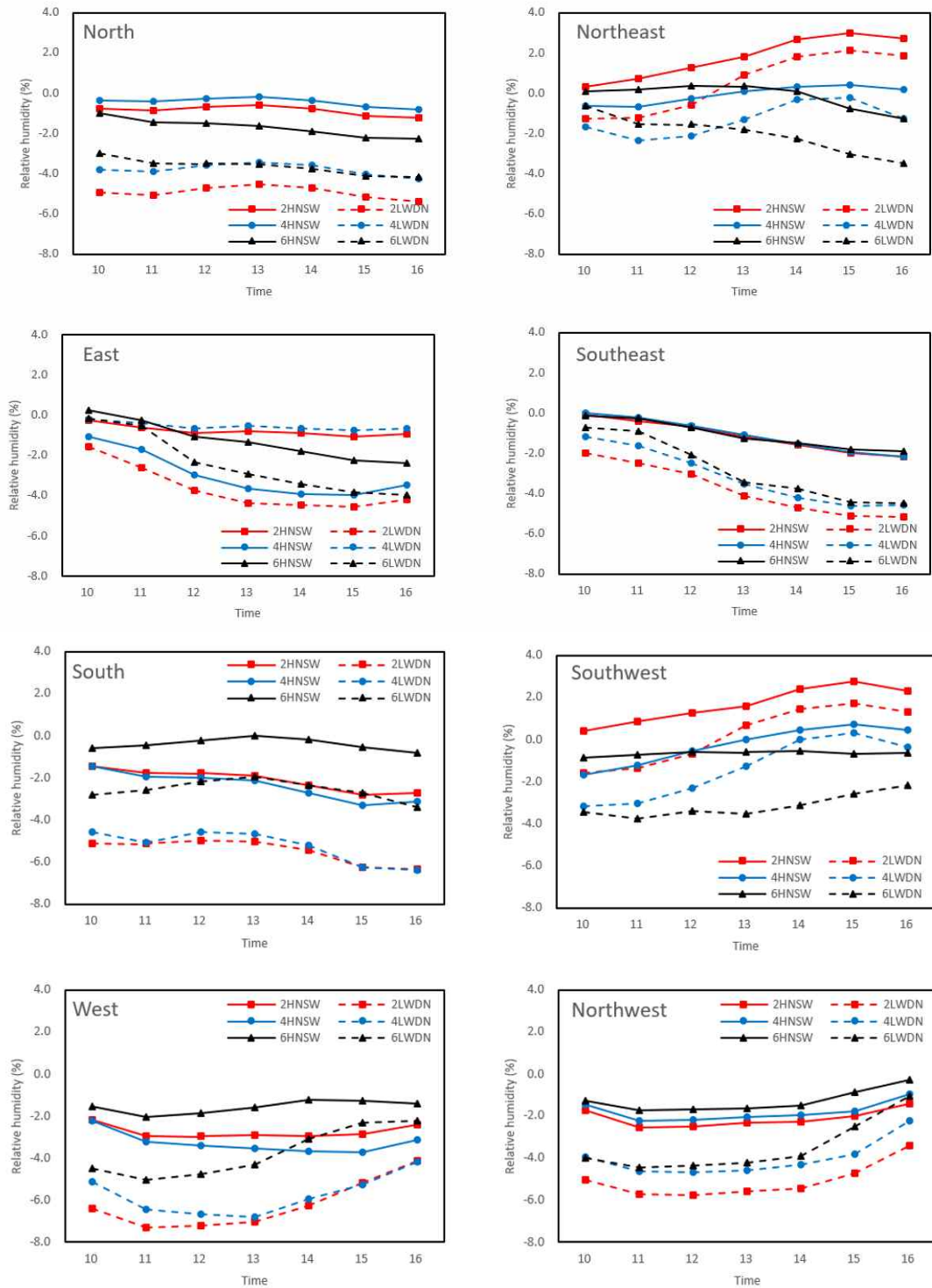


Figure B2. Amount of reduction of relative humidity for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios

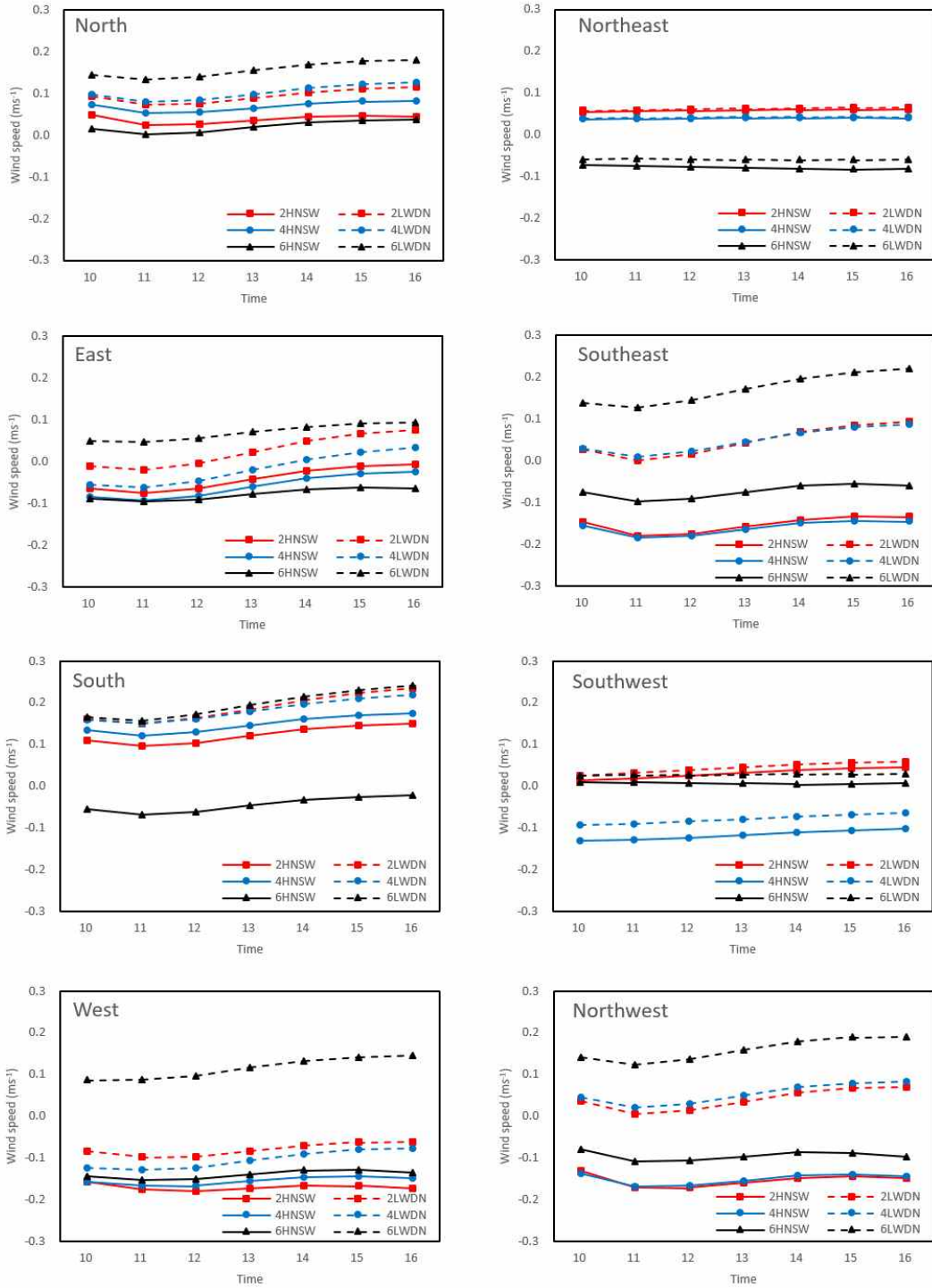


Figure B3. Amount of reduction of wind speed for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios

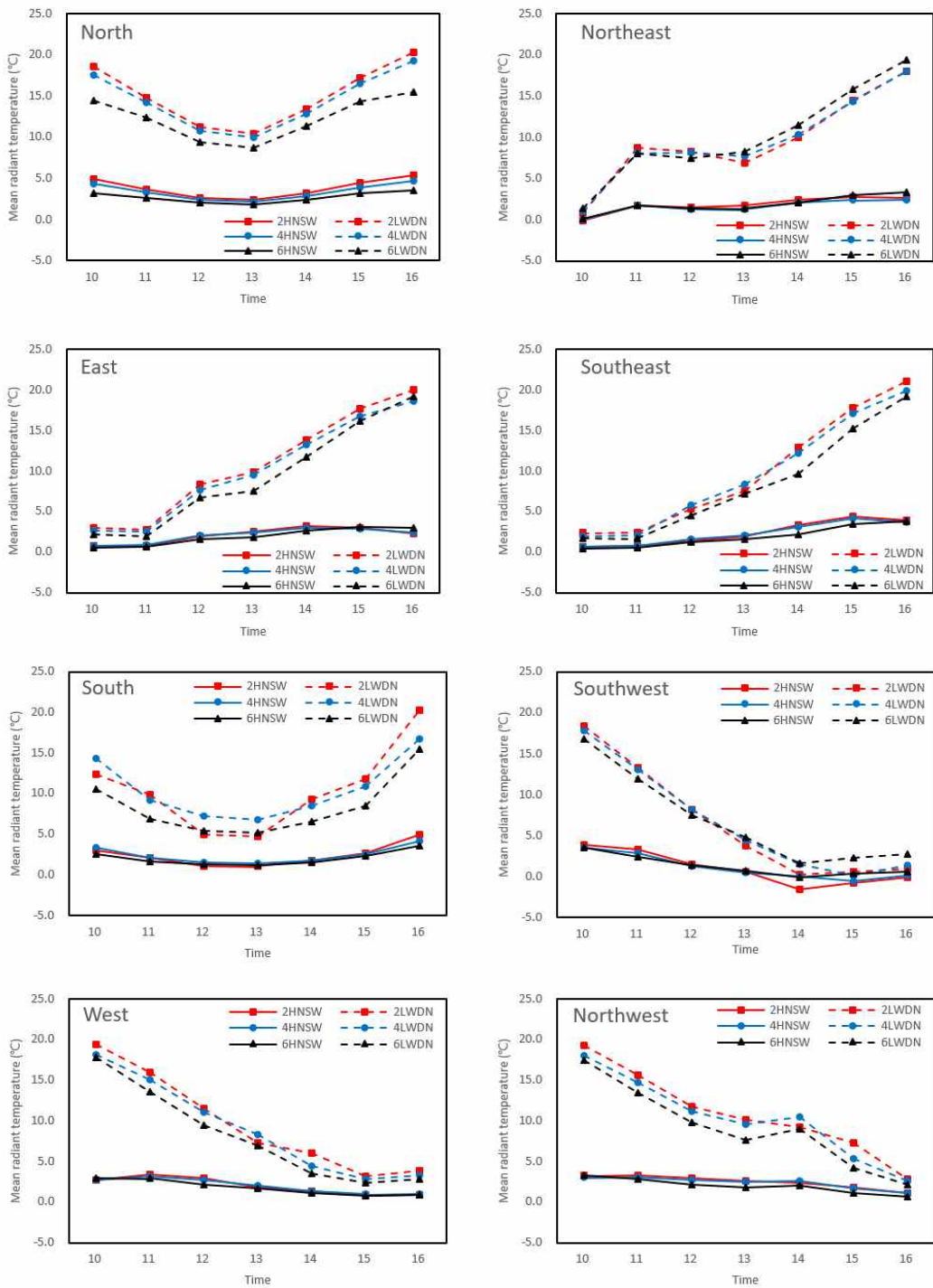


Figure B4. Amount of reduction of mean radiant temperature for each space by time with the LWDN and HNSW scenarios

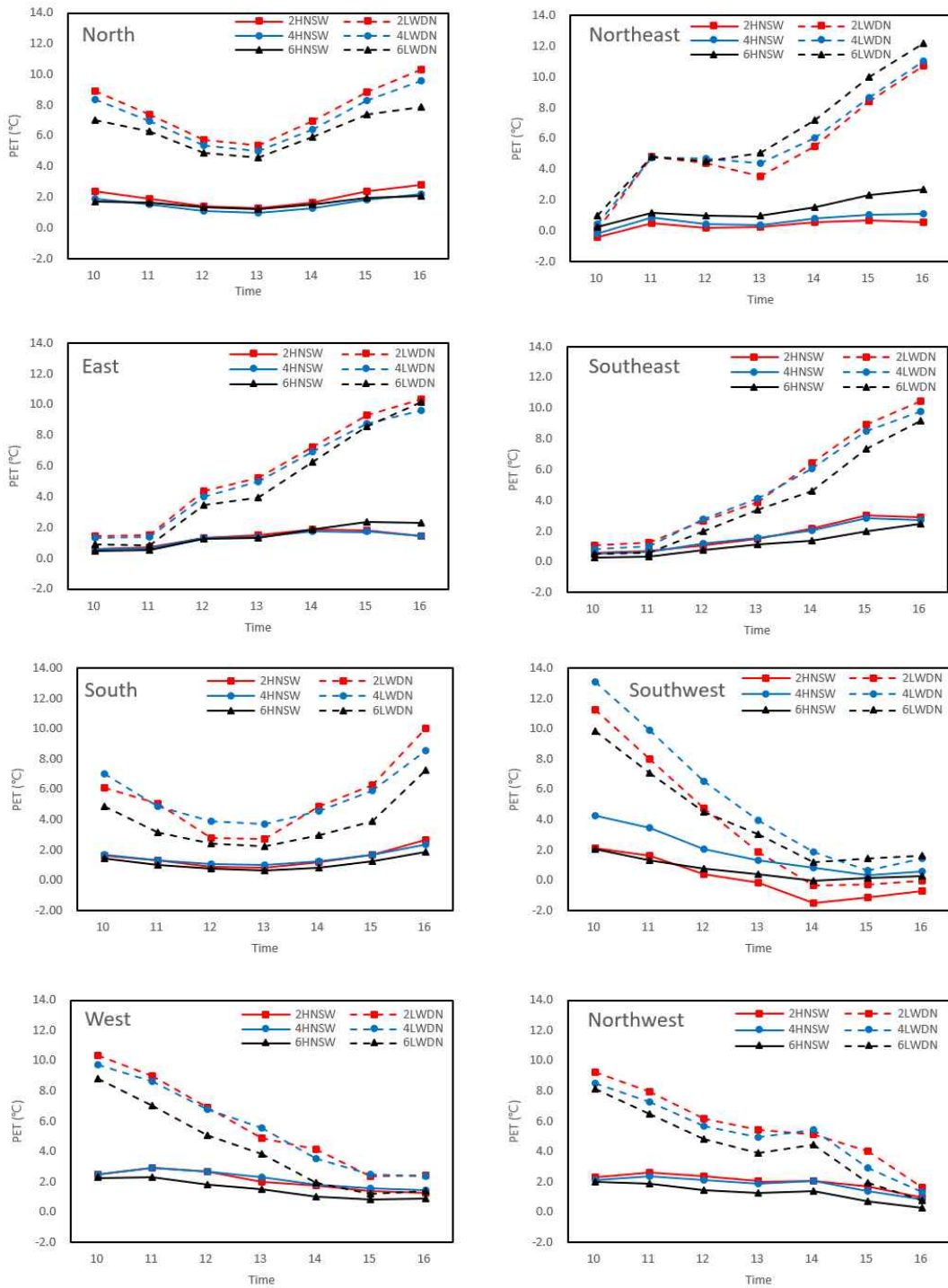


Figure B5. Amount of reduction of PET for each space by time with applying the LWDN and HNSW scenario.

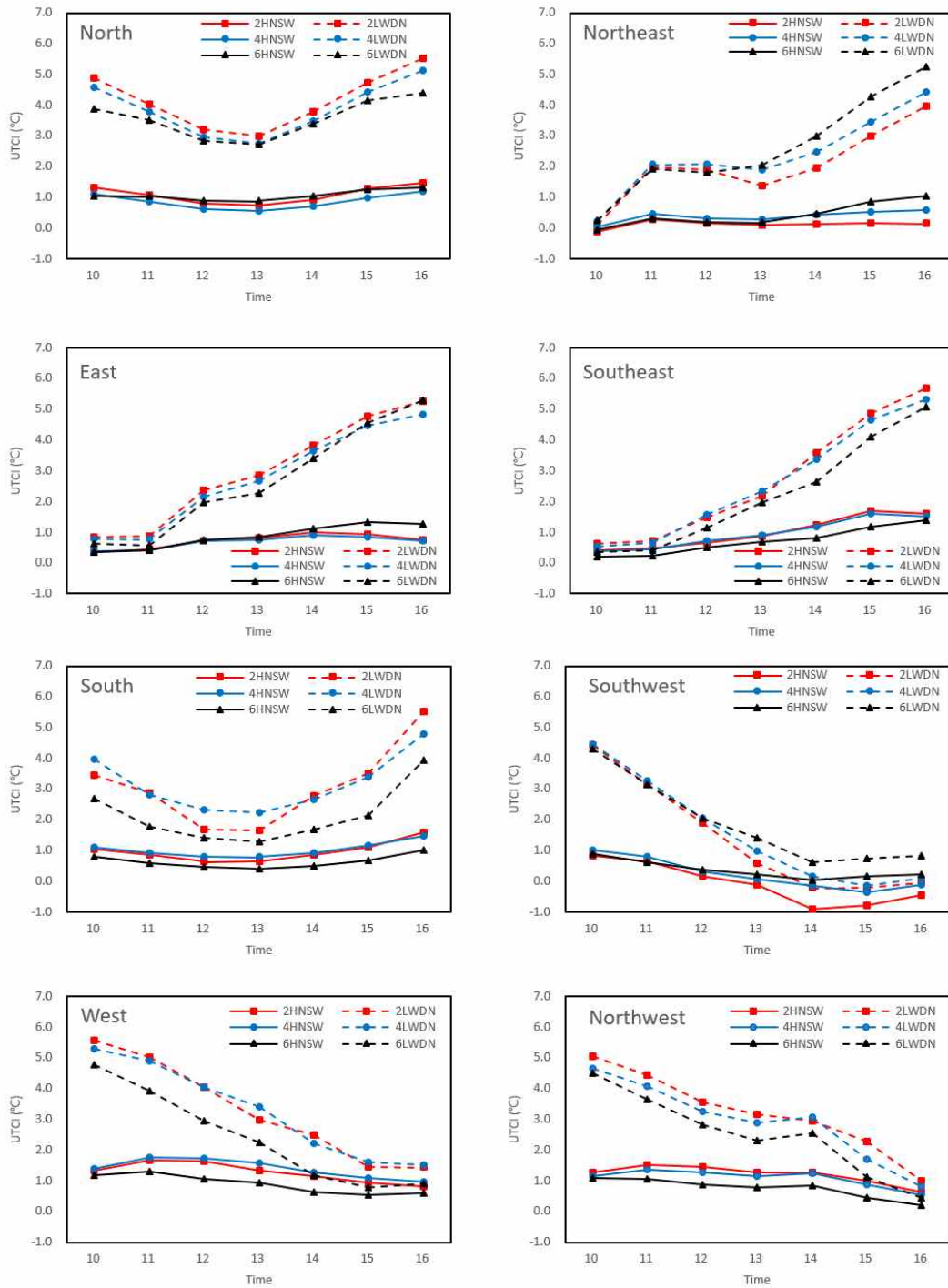


Figure B6. Amount of reduction of UTCI for each space by time with applying the LWDN and HNSW scenario.