

농지의 도시화가 폭염상황에서 주변 지역 지상 기상요소에 미치는 영향*

Effects of Conversion of Paddy Field to Urban Use on the Ground
Meteorological Elements of Nearby Area under Heat Wave

김건후 Kim Geonhu**, 인소라 In Sora***, 손철 Sohn Chul****

Abstract

Agricultural land has been vastly converted to urban land in metropolitan areas in Korea even though it provides diverse positive functions such as food production, scenic beauty, and temperature control. Without exactly quantifying the positive functions, we may lose this valuable resource too much beyond socially optimum level. As an effort to more accurately measure the positive functions, in this study, we analyzed the effects that converting paddy fields into urban areas had on weather conditions in the southern Gyeonggi Province area using numerical weather simulation based on Weather Research and Forecasting(WRF). In this simulation, we considered two land use scenarios. The first land use scenario represents a situation in which paddy fields sustain as it is. The second land use scenario represents a situation when paddy fields are all urbanized. Through the simulation, the effects of the urbanization of paddy field area on air temperature and relative humidity during hot summer periods were measured. The results from our simulation showed that the urbanization is closely related to the worsening thermal discomfort during sunset to sunrise period especially in the areas where urbanization occurred. This result suggests that paddy fields in metropolitan areas are valuable resource in the aspect of thermal comfort control and when paddy fields in the metropolitan areas are considered to be changed to urban use, there must be sufficient considerations on adverse weather effects.

Keywords: Paddy Field, Urbanization, WRF, Ground Meteorological Elements, Heat Wave

I. 연구배경 및 목적

자연적인 상태의 토지피복은 일단의 개발이 진행되면 이전과 같은 상태로 복구하는 데 상당한 비용과 시간이 소모되며 대부분 온전한 복구에 미치지 못한다. 또

한 토지의 개발 방향은 산림이나 초지와 같은 투수성 피복에서 콘크리트와 아스팔트 같은 불투수성 피복으로 변화되는 것이 대부분이다. 이러한 토지피복의 변화는 인간의 생활에서는 삶의 질을 높이고 도시에 활력을 불어넣는 긍정적 측면이 주를 이루지만 환경적

* 이 논문은 2015년 정부(국토교통부)의 재원으로 공간정보 융복합 핵심인재 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2015-08-01)

** 강릉원주대학교 공간정보협동과정 박사수료(제1저자) | Ph.D. Candidate, Inter-Department Collaboratory Program in Spatial Information Science, Gangneung-Wonju National Univ. | Primary Author | plan3308@gmail.com

*** 국립기상과학원 연구원 | Researcher, National Institute of Meteorological Sciences | ijhee0106@korea.kr

**** 강릉원주대학교 도시계획부동산학과 교수(교신저자) | Prof., Dept. of Urban Planning and Real Estate, Gangneung-Wonju National Univ. | Corresponding Author | csohn@gwnu.ac.kr

측면에서는 생물 서식지의 소실 등에 따른 생물 다양성의 파괴, 기후변화 초래 등과 같이 부정적인 영향 또한 존재한다(Ricketts and Imhoff 2003; Grimm, Faeth, Golubiewski and Redman et al. 2008).

국내의 토지이용과 관련한 지표 중 국토교통부의 지적통계에 따르면 최근 10년 동안 주요 지목 중에서 논이 가장 많은 비율로 감소한 것으로 보고되었다.¹⁾

시가화 지역으로 대표되는 도로와 대지가 상대적으로 늘어난 것은 산림과 농지에 개발압력이 상당히 존재하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 예상은 자연적인 지표면이 건물과 도로 등 인공 지표면으로 대체될 경우 발생하는 인공폐열의 증가로 인한 도시열섬 발생, 강수패턴의 변화, 기류와 대기질의 변화 등과 같은 다양한 현상을 초래한다(Grimmond, Roth, Oke and Au et al. 2010). 이는 도시개발의 주된 목적과는 다르게 인간에게 체감온도 상승이나 취약계층에게는 질병을 초래하는 등의 직접적인 불편과 위험요인으로 작용할 수 있음을 의미한다(이정미, 유혜진 2007; 이지수, 김만규, 박종철 2016; 정지훈, 김인겸, 이대근, 신진호 외 2014).

토지이용의 상황에 따라 변화하는 기상현상에 대한 이해는 도시개발과정에서 불가피하게 발생하는 부작용들을 최소화하는 수단을 마련하는 데 중요한 역할을 한다. 따라서 본 논문에서는 그간 많은 변화가 있었고 현재에도 개발압력이 존재하는 농지인 논을 중심으로 도시화가 초래하는 기상요소의 변화에 대해 분석하였다. 연구의 목적은 더운 날씨의 대기온도와 상대습도가 농지²⁾의 도시화로 인해 어떠한 영향을 받는지를 분석하는 것이다.

II. 관련 연구

도시지역에는 열섬 현상이 존재한다. 열섬 현상은 도시지역의 지표면 성질과 도심에서의 식생부족 등을 포함한 여러 요인에 기인한다. 도시지역의 지표면은 흡수된 태양 복사열을 대부분 현열(Sensible Heat)로 전환시키고 냉난방열 같은 인간 활동에 의한 추가 열을 발생시킨다. 반면 녹지와 같은 열린 공간(Open Space)에서는 대기 중으로 배출할 수 있는 수분량이 보다 많아 증발산 작용으로 인한 현열로의 전환이 적다. 이는 열린 공간의 대기온도가 도시지역보다 낮다는 것을 의미하며 그 차이는 주간보다 야간에 더 크게 발생하는 것으로 알려져 있다(Hutchison and Taylor 1983; Oke 1987; Yokohari, Brown, Kato and Moriyama 1997).

국내에서 농지와 관련된 기상현상에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 토지피복과 관련한 연구들이 다수 존재하는데 크게 토지피복 특성과 온도와의 관계에 관한 연구와 토지피복 변화에 따른 온도의 변화에 관한 연구로 나눌 수 있다. 토지피복 특성과 온도의 관계에 관한 연구는 기상청 관측자료를 이용한 대기온도나 체감온도와 함께 기상관측소 주변의 토지피복 인자들을 이용해 회귀분석을 수행한 연구(차영화, 김학열, 허태영 2009; 김동현, 송슬기 2016)와 위성영상을 통해 추출된 지표면 도시열섬강도와 도시규모, 지표면 특성, 기상요소들을 이용해 회귀분석을 수행한 연구(박채연, 이동근, 성선용, 박종훈 외 2016)가 있다.

토지피복 변화에 따른 온도 변화에 관한 연구는 위성영상을 이용하여 수행된 나무심기 운동을 통한 도

1) 최근 주요 지목별 변동추이를 살펴보면 2007년을 기준으로 2017년에는 답(6.1%, 11,182km²), 전(3.5%, 7,511km²), 임야(1.2%, 63,734km²)가 감소하였으며 도로(21.7%, 3,151km²), 대지(18.5%, 2,994km²), 하천(1.03%, 2,760km²)이 증가한 것으로 나타남(<http://stat.molit.go.kr/portal/cate/partName.do>).

2) 본 논문에서 서술하는 농지는 논을 의미함.

시의 녹지증가 전후에 따른 온도변화에 관한 연구(윤희천, 김민규, 정갑용 2013)와 도시화 지역 확산에 따른 녹지면적의 감소로 인한 온도 상승에 관한 연구(정환도, 송승근, 조현주, 이재근 외 2014)가 있다. 그리고 공공택지개발사업지구 내의 범위에서 위성영상에서 추출한 불투수면적 비율과 지표면 온도 간의 변화를 살펴본 연구(김지영, 김은정 2018)와 도심하천의 복원이 하천 주변지역의 온도에 미치는 영향을 살펴본 연구(정우식, 도우근 2012) 등이 있다.

국외에서 수행된 농지와 기상현상에 관련된 연구를 살펴보면 다음과 같다. Yokohari, Brown, Kato and Moriyama(1997)는 일본 교토시 주변지역의 농지에 대한 연구를 통해 농지규모가 클수록 주변지역의 온도를 감소시키는 효과가 있는 것을 발견하였다. Yokohari, Brown, Kato and Yamamoto(2001)는 일본 교토시의 농지에 인접한 주거지역 도로의 온도 측정을 통해 농지와 가까울수록 냉각효과(Cooling Effect)가 있는 것을 보고하였다. Cheng, Su, Kuo and Hung et al.(2008)의 연구는 위성영상을 이용해 대만 타오위안시를 대상으로 농지의 토지피복 면적의 감소가 온도 상승과 관계되어 있는 것을 확인하였다. Shimadera, Kondo, Shrestha and Kitaoka et al.(2015)은 일본 오사카 지역에 대한 기상수치모델 시뮬레이션을 통해 농지의 긍정적인 기상학적 역할을 분석하였다. 동 연구는 농지의 도시화는 평균기온과 강수량을 증가시키고 습도를 감소시키는 결과를 보여주었다.

이상의 연구결과들을 살펴보면 농지와 녹지는 시가화 지역과는 다른 기상학적 기여를 하는 것을 보여준다. 현재 우리나라의 경우 수도권 지역에서 신규택지에 대한 수요가 점점증하고 이를 위해 점점 더 많은 면적의 농지가 신규택지로 전환되고 있다. 그러나 이 과정에서 농지의 감소가 가져오는 기상학적 영향에 대한 고려는 찾아보기 힘들다.

III. 연구방법

1. 연구 설계

본 논문에서는 농지의 도시화가 주변지역의 기상에 미치는 영향을 평가하기 위해 경기도 남부지역의 현재 토지이용 상황과 이 지역의 농지가 도시용지로 전환되었을 상황을 가정해 각각의 시나리오별로 기상수치모델을 통해 모의된 기상변수를 이용하여 비교 평가하였다.

토지이용 시나리오는 현재를 기준으로 한 시나리오1(PADDY)과 농지가 도시용지로 변한 시나리오2(P2U)를 고려하였다. 시나리오별 모의와 비교는 각각의 시나리오를 대표하는 토지피복도를 기상수치모델에 초기 자료로 입력하여 모의된 결과값을 비교하는 방법을 통해 이루어졌다. 본 논문에서는 시나리오1을 반영하기 위해 환경부 중분류 토지피복자료를 사용하였고 시나리오2는 시나리오1에서의 농지를 모두 도시지역으로 변경하여 반영하였다(<Figure 1> 참조).

시나리오1과 시나리오2의 모의결과를 비교하기 위해서 경기도 남부지역에 설치되어 운영 중인 기상청 자동기상관측소(Automatic Weather System: AWS) 위치 가운데 반경 1km 이내의 상호 중첩성을 고려하여 중첩되지 않는 61개의 AWS를 추출하였다. 이 61개의 AWS에 대해 반경 1km 이내의 농지면적을 계산하여 그 비율이 상위 75%ile 이상에 해당하는 지점 12개(Class1)와 농지가 존재하지 않는 12개 지점(Class2)을 선정하였다. 최종적으로 이들 위치 주변의 기상모의 값이 어떻게 다른지를 비교하는 방법을 택하였다.

우리나라의 AWS 지점 주변은 지난 30년 동안 농업 및 산림지역이 감소되면서 도시화가 진행된 지역의 인근에 주로 위치한다(박충선, 이광률 2017). 연구에 사용된 AWS의 설치지역은 주로 관공서나 학교 등

Figure 1_ Change of Land Cover for Land Use Scenario Setting

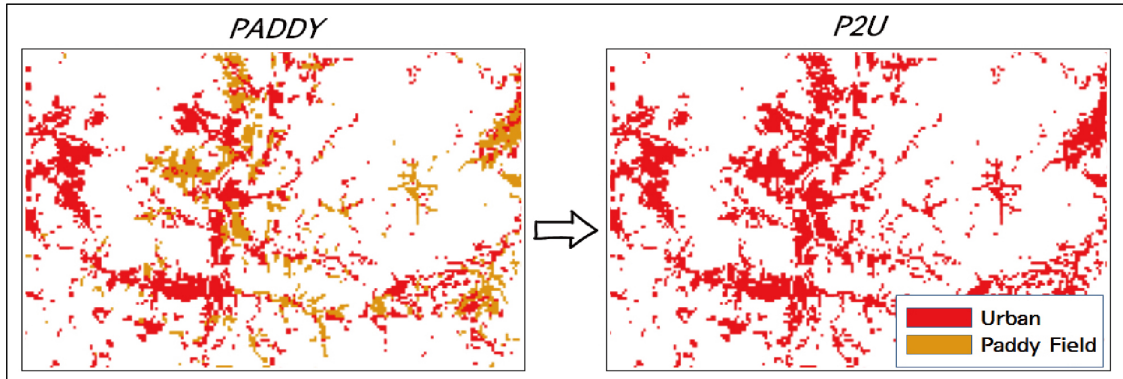


Table 1_ AWS Location Attributes

Station ID	Station name	Latitude	Longitude	Location	District	Class
358	Hyeondeok-myeon	36.9672	126.9214	Public office	Myun	1
374	Cheongbuk	37.0467	126.9706	Public office	Myun	1
443	Bogae	37.0197	127.2919	Public office	Myun	1
447	Bungnae	37.3262	127.6813	Public office	Myun	1
462	Moga	37.1691	127.4823	Public office	Myun	1
463	Heungcheon	37.3327	127.5412	Public office	Myun	1
467	Yangseong	37.0598	127.1945	Public office	Myun	1
468	Seoun	36.9431	127.2592	Public office	Myun	1
470	Gosam	37.0827	127.2634	Public office	Myun	1
495	Hgaejeong	36.9613	127.1887	Public office	Myun	1
515	Unpyeong	37.0845	126.7737	School	Eup	1
547	Yang-dong	37.4159	127.7549	Public office	Myun	1
364	Bundang-gu	37.3828	127.1189	Public office	Dong	2
365	Seoksu-dong	37.4089	126.8953	Public office	Dong	2
371	Giheung-gu	37.2772	127.1164	Public office	Eup	2
430	Gyeonggi	37.2718	127.0118	Public office	Dong	2
433	Bucheon	37.4976	126.7666	Public office	Dong	2
434	Anyang	37.3916	126.9589	Public office	Dong	2
435	Gojan	37.3243	126.8212	Public office	Dong	2
437	Gwangmyeong	37.4758	126.8665	Public office	Dong	2
438	Gunpo	37.3587	126.9375	Public office	Dong	2
546	Gwangju	37.4325	127.2614	Public office	Dong	2
572	Seongnam	37.4209	127.1247	Public office	Dong	2
590	Gwacheon	37.4404	127.0024	National Science Museum	Dong	2

Note: The locations was confirmed through the portal maps.

Source: <http://afso.kma.go.kr> (accessed May 1, 2018).

과 같이 사람의 통행이 빈번한 지역 주변에 위치한다 (<Table 1> 참조).³⁾

2. WRF 수치모델 설정

본 논문에서는 미국 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 기상수치모델인 WRF(Weather Research and Forecasting) V3.7.1을 사용하였다(Skamarock, Klemp, Dudhia and Gill et al. 2008). 실험 영역은 경기도 남부지역을 중심으로 설정하였으며 도메인의 해상도는 450m이다. 실험을 위한 초기·경계장은 기상청의 현업 모델인 UM(Unified Model)의 LDAPS(Local Data Assimilation Prediction System) 분석장을 사용하였다. 지형자료는 국토지리원의 DEM, 국립농업과학원의 수치정밀토양도, 환경부의 토지피복도 중분류 자료를 초기자료로 입력하였다. 토지피복도는 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)

의 LULC(Land Use and Land Cover) 24-Categories 체계에 따라 재분류하였다. 변경된 초기 입력 자료들은 모두 90m 해상도를 가진다. 모델 적분 시간은 2017년 8월 2일 09KST부터 2017년 8월 5일 09KST까지 총 72 시간이다. 실험을 위한 WRF 물리과정은 <Table 2>에 정리하였다(Lim and Hong 2010; Iacono, Delamere, Mlawer and Shephard et al. 2008; Tewari, Chen, Wang and Dudhia et al. 2004; Hong, Noh and Dudhia 2006).

3. 연구 범위

본 논문의 공간적 범위는 수도권에서 환경부 토지피복도를 통해 온전한 영역을 추출할 수 있는 경기도 남부지역을 중심으로 선정하였다. 시간적 범위는 WRF 적분시간과 동일한 기간에서 출력되는 73개의 시간단위이다. 이 기간에는 경기도 남부지역을 포함해 폭염주의보⁴⁾ 이상의 기상특보 발표가 지속되었고 장마와 태풍이 존재하지 않았다.

<Figure 2>는 앞서 설명한 WRF의 초기입력 자료인 재분류된 토지피복자료와 WRF를 통해 모의한 영역(Domain)을 나타낸다. 그리고 시간적 범위 안에 가동 중인 AWS 지점과 연구 분석을 위해 최종적으로 선택된 AWS 지점의 위치를 나타낸다.

4. 연구영역 특성분류

연구영역 특성은 단일의 AWS 주변지역에 대한 토지이용 상황을 이용해 분류하였다. 또한 WRF를 통한 모의값은 단일의 AWS 주변에서 추출된 격자점들을 평균하여 추출하였다. AWS 주변에 대한 토지이용 상

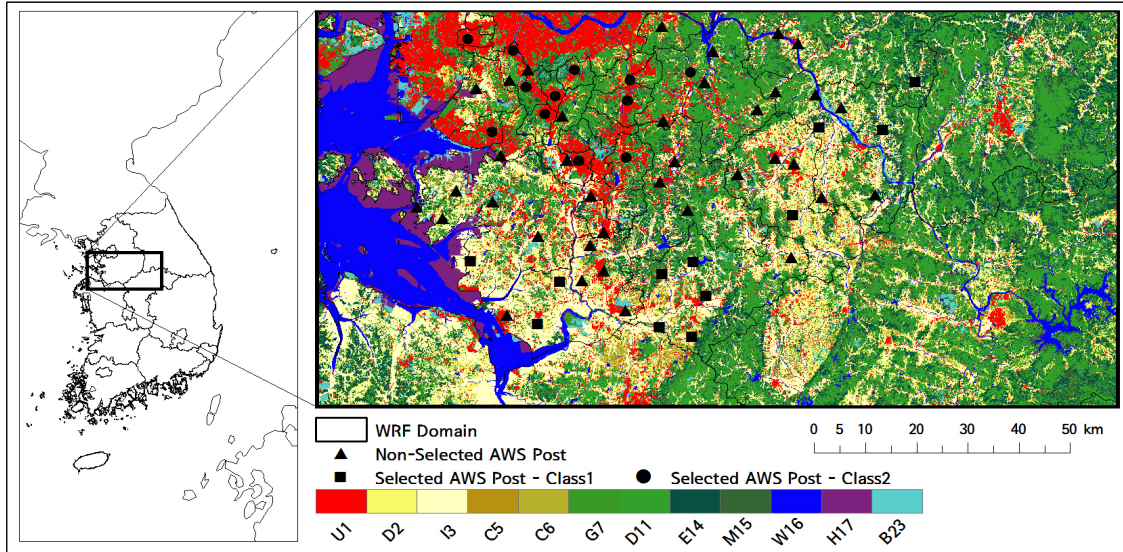
Table 2_ Detail Setting for WRF

Domain		
Scenarios	PADDY	P2U
Land Use Class Conversion	Paddy Field	Paddy Field → Urban
Horizontal Grid Size	450m(340×180)	
Vertical Layer/Model Top	31/50hPa	
Time Steps	3s	
Forecast Time	2017.08.02,09~2017.08.05,09KST	
Initial and Boundary Condition	KMA LDAPS (UM 1.5km L70)	
Micro Physics	WDM 6-class Scheme	
Radiation	RRTMG Scheme	
Surface Physics	Unified noah Land-Surface Model	
PBL	YSU Scheme	

3) 수치모의값 비교를 위해 AWS 위치를 이용한 것은 사나리오의 변화에도 반경 1km 이내 토지피복이 변하지 않는 경우(Class2)와 토지피복이 상당히 변화는 경우(Class1)를 구체적으로 구분하여 비교하기 위함임.

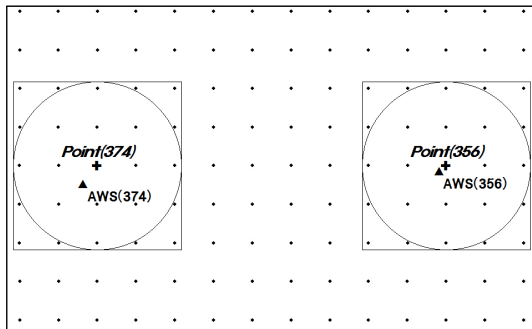
4) 기상청에서는 폭염과 관련한 기상특보를 일정 수준 이상의 일 최고기온이 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 발표하며, 주의보의 경우 33℃ 이상, 폭염경보의 경우 35℃ 이상을 기준으로 하고 있음(<http://www.weather.go.kr/weather/warning/standard.jsp>).

Figure 2_ WRF Domain, Reclassified Land-Use Categories and AWS Stations Position



Note: KME land cover data were reclassified into the USGS 24-land use categories. [U1(Urban and Built-Up land), D2(Dryland Cropland and Pasture), I3(Irrigated Cropland and Pasture), C5(Cropland/Grassland Mosaic), C6(Cropland/Woodland Mosaic), G7(Grassland), D11(Deciduous Broadleaf Forest), E14(Evergreen Needleleaf Forest), M15(Mixed Forest), W16(Water Bodies), H17(Herbaceous Wetland), B23(Bare Ground Tundra)]

Figure 3_ Concept of a Data Extraction Grid Range



항과 WRF를 통한 기상변수별 모의값은 <Figure 3> 과 같은 개념으로 추출하였다. 환경부 토지피복자료는 Raster 형식으로 구축되어 Cell 단위로 지리정보를 추출할 수 있다. WRF는 기상변수별 모의값을 Cell이 아닌 격자기반의 격자점(Point)으로 저장한다. 본 논문에서는 AWS 지점의 경위도 정보에서 최근거리의 WRF 격자점 위치정보를 기준으로 반경 1km 이내의 격자에 해당하는 Cell을 포괄하는 영역을 최종 연구영

역으로 설정하였다. 예를 들면 374번 AWS 지점(청북)의 경위도 지점(126.9706, 37.0467)에서 WRF 격자점 중 최근거리 격자점(126.9725, 37.0487)을 선택하고 반경 1km 내에서 WRF 출력자료의 해상도에 해당하는 Cell을 포괄할 수 있는 사각형을 최종적으로 작성하는 것이다. 최종적으로 선택된 WRF 격자점은 AWS 지점마다 25개(5×5)이고 토지피복도의 Cell은 625개(25×25)가 된다.

<Table 3>은 분석에 사용된 자료의 변수와 연구영역 특성 분류에 따른 정의이다. 연구영역의 특성은 Class1과 Class2로 구분하였다.

III. 분석결과

1. 기초통계량

<Table 4>는 AWS 특성에 따른 농지면적의 비율, 농

Table 3 _ Definition of Variables

Category		Definition
Variables	PaddyR	Ratio of agricultural area in grid area within 1km rectangle
	AricR	Ratio of agricultural land in the agricultural development region in grid area within 1km rectangle
	Ta_PADDY	Average 2m temperature of land use scenario1 in grid area within 1km rectangle
	Ta_P2U	Average 2m temperature of land use scenario2 in grid area within 1km rectangle
	RH_PADDY	Relative humidity of scenario 1 in grid area within 1km rectangle
	RH_P2U	Relative humidity of scenario 2 in grid area within 1km rectangle
AWS Classification	Class1	More than 75th percentile of paddyr without the class2
	Class2	No paddy fields in grid area within 1km rectangle

Table 4 _ Summary Statistics

Category	Variable	Observation	Mean	Standard Deviation	Min	Max
Class1	PaddyR	876	47.38	9.31	36.98	69.21
	AricR	876	62.58	17.36	20.11	90.27
	Ta_PADDY	876	28.94	4.69	20.53	37.05
	Ta_P2U	876	30.25	3.71	22.70	37.22
	RH_PADDY	876	64.12	20.10	25.56	96.75
	RH_P2U	876	58.76	17.15	26.56	90.78
Class2	PaddyR	876	0	0	0	0
	AricR	876	0	0	0	0
	Ta_PADDY	876	30.12	3.51	20.89	36.52
	Ta_P2U	876	30.20	3.45	21.02	36.50
	RH_PADDY	876	61.48	16.73	30.62	98.39
	RH_P2U	876	61.66	16.94	30.23	97.17
Total	PaddyR	1,752	23.69	24.60	0	69.21
	AricR	1,752	31.29	33.62	0	90.27
	Ta_PADDY	1,752	29.53	4.18	20.53	37.05
	Ta_P2U	1,752	30.23	3.58	21.02	37.22
	RH_PADDY	1,752	62.80	18.54	25.56	98.39
	RH_P2U	1,752	60.21	17.11	26.56	97.17

업진흥지역 안에 포함된 농지면적의 비율, 토지이용 시나리오별로 모의된 2m 지상온도와 상대습도에 대한 기초통계량을 나타낸다. Class1은 농지면적 비율이 높고 농업진흥지역 내 농지가 다수 분포해 비교적 우량농지가 많이 분포하는 특성을 가진다. Class2에서는 농지가 없는 것으로 나타났다.

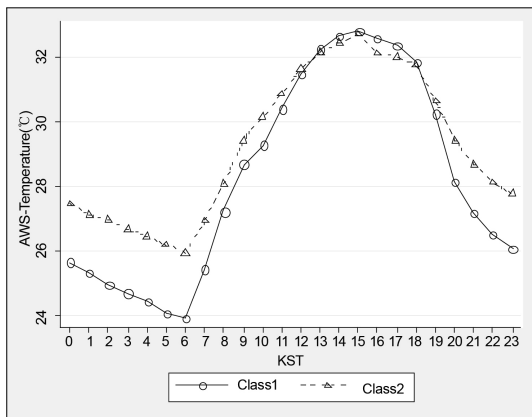
Class1의 경우 2m 지상온도는 시나리오1에 비해 시나리오2의 값이 1.31℃ 높게 증가하였다. 상대습도는 시나리오1에 비해 시나리오2의 값이 5.36%p 적게 나타났다. Class2의 경우 2m 지상온도는 시나리오1에 비해 시나리오2의 값이 0.08℃로 높게 나타났다. 상대습도는 시나리오1에 비해 시나리오2의 값이 0.18%p

높게 나타났다.

이는 농지가 존재하는 시나리오1과 농지를 도시용지로 전환한 시나리오2에서 모의된 결과가 도시지역에서 관찰되는 지표면에 의한 높은 온도와 건조한 대기를 설명하는 이론적인 틀에서 벗어나지 않아 기상모델의 모의값이 일반적인 수준에서 해석 가능한 것으로 사료되는 결과이다. 하지만 주변에 농지가 없어 토지피복에 변화를 주지 않은 Class2에서 발생한 온도와 습도의 차이는 더 넓은 영역의 녹지나 농지 또는 시가지 등과 상호 작용되는 결과로 이해된다.

이와 관련해 연구기간 동안 AWS 지점들에서 실제 관측된 시간별 평균온도를 나타내면 <Figure 4>와 같다. Class1과 Class2로 구분된 AWS 지점들에서 관측된 평균온도의 차이는 일몰시간(19KST) 이후 시간에서 일출시간(06KST) 이전 시간대까지 Class2에 비해 Class1의 평균온도가 낮지만 일출시간 이후 온도가 급격하게 상승하여 낮 시간에는 그 차이가 거의 없거나 오히려 Class1의 평균온도가 높게 나타나는 현상이 관측되었다. 또한 실제 풍속은 Class별로 대부분 차이가 없었다.5)

Figure 4 _ Average Temperature Observed on AWS



5) 상대습도는 결측값이 상당수 존재하여 분석에서 제외하였음. 시간당 풍속은 Class1이 0.68ms-1~1.91ms-1이며 Class2는 0.65ms-1~1.73ms-1으로 관측됨.

이는 분석범위 내에 발생한 실제 관측값 역시 AWS 주변지역의 다양한 지리적 환경에 의한 영향이 존재하는 것으로 볼 수 있다.

2. 기온과 상대습도의 모의결과 비교

토지이용 시나리오에 따라 모의된 기상변수 값들이 어느 정도 차이를 가지고 있는지 비교·분석하였다. 비교된 기상변수는 2m 지상온도, 상대습도이다. 시나리오별로 산포도 작성과 상관계수 그리고 통계분석을 위해 <식 1>과 <식 2>를 이용한 평균편의(Mean Bias: MB)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error: RMSE)를 산출하였다.

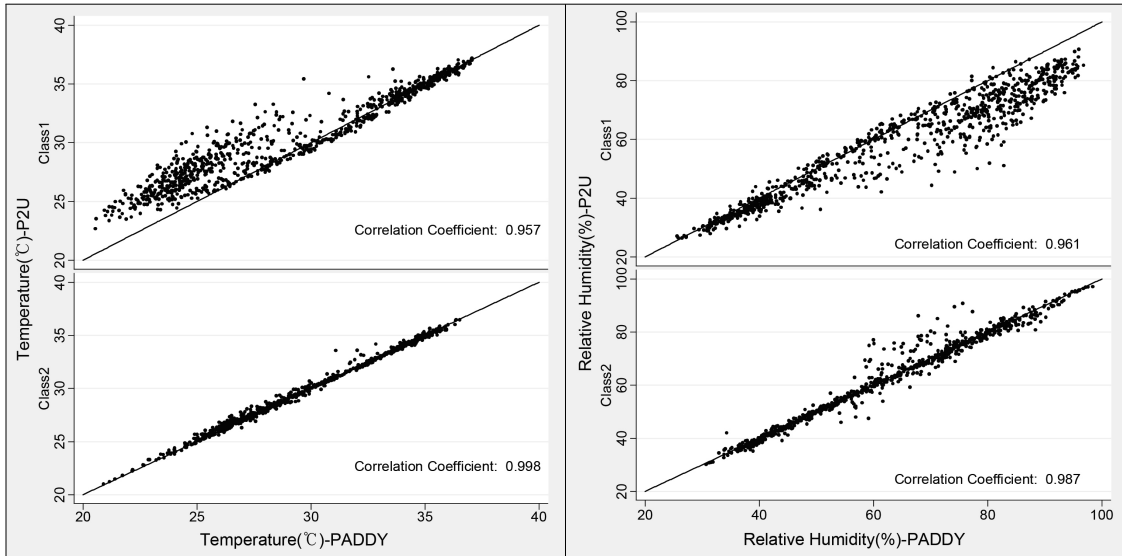
$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_{it} - m_{it}) \quad \text{<식 1>}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_{it} - m_{it})^2} \quad \text{<식 2>}$$

n은 시간별 모의값을 나타내고 m_{it} 는 시나리오1의 모의값, e_{it} 는 시나리오2의 모의값이다. 이 둘의 편차는 온도의 경우 양(+의 방향으로 커질수록, 상대습도의 경우 음(-의 방향으로 커질수록 농지가 주변지역 기상에 미치는 영향에서 온도를 낮추고 상대습도를 높이는 데 크게 기여하는 것으로 볼 수 있다.

<Figure 5>는 영역특성별로 모의된 온도와 상대습도에 대해 시나리오 간의 산포도와 상관계수를 나타낸다. x축은 시나리오1의 값이고 y축은 시나리오2의 값이다. Class1의 경우 2m 지상온도는 주로 30℃

Figure 5_ Comparison of 2m Temperature and Relative Humidity between Scenario1 and Scenario2



이하에서 시나리오2가 시나리오1보다 온도가 높게 모의된 것으로 나타났으며 그 이상 고온에서의 차이는 보다 미미한 것으로 나타났다. 상대습도는 주로 60% 이상 수준에서 시나리오2가 시나리오1보다 낮게 분포하는 것으로 확인되었다. Class2의 경우 2m 지상 온도는 시나리오 간 크게 차이가 나지 않는 것으로

확인되고, 상대습도에서는 60% 이상의 수준에서 변동하여 분포하는 것으로 나타났다. 상관계수는 기상 변수별로 Class2(0.998, 0.987)가 Class1(0.957, 0.961)보다 크게 나타나 주변지역의 토지이용 전환에 따른 기상변수에 영향이 비교적 적은 것으로 나타났다.

MB와 RMSE에 대해 <Figure 6>은 시계열 자료로

Figure 6_ MB and RMSE of the Variables by the Class

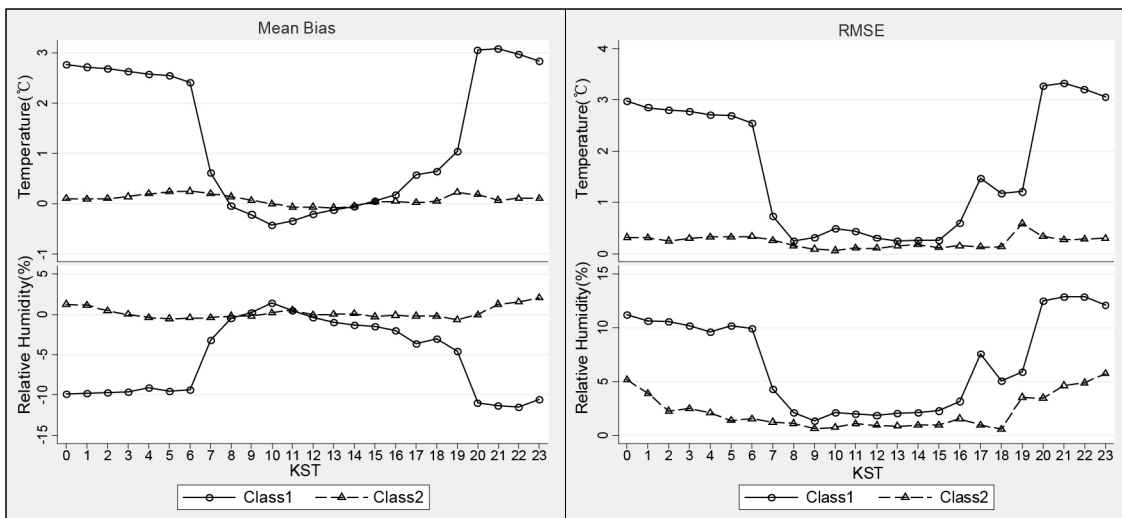


Table 5 _Time Series MB and RMSE in Sunrise and Sunset Time Zones

Time Zone	KST	Class1				Class2			
		Temperature(°C)		Relative Humidity(%)		Temperature(°C)		Relative Humidity(%)	
		MB	RMSE	MB	RMSE	MB	RMSE	MB	RMSE
Sunrise	05	2.55	2.69	-9.58	10.20	0.24	0.33	-0.55	1.36
	06	2.41	2.55	-9.37	9.96	0.25	0.33	-0.45	1.51
	07	0.62	0.73	-3.24	4.31	0.20	0.26	-0.42	1.21
Sunset	18	0.65	1.17	-3.07	5.04	0.05	0.14	-0.24	0.56
	19	1.05	1.21	-4.57	5.89	0.22	0.58	-0.67	3.51
	20	3.06	3.27	-11.02	12.48	0.18	0.34	-0.06	3.45

나타낸 것이고 <Table 5>는 일출과 일몰시간 전후의 시간대에 대한 통계량을 나타낸다. Class1의 경우 2m 지상온도는 주로 야간과 새벽 시간에 농지가 있는 시나리오1에서 낮게 유지되다가 일출시간(06KST, MB: 2.41, RMSE: 2.55)과 직후시간(07KST, MB: 0.62, RMSE: 0.73) 사이에 급격히 높아지고 다시 일몰시간(19KST, MB: 1.05, RMSE: 1.21)과 직후시간(20KST, MB: 3.06, RMSE: 3.27) 사이에 그 온도가 낮아진다. 상대습도는 일출시간(06KST, MB: -9.37, RMSE: 9.96)과 직후시간(07KST, MB: -3.24, RMSE: 4.31) 사이에 크게 감소하고 일몰시간(19KST, MB: -4.57, RMSE: 5.89)과 직후시간(20KST, MB: -11.02, RMSE: 12.48) 사이에 크게 증가한다. 반면 Class2는 시나리오의 구분에 의한 모의값의 차이에 의한 특징이 크게 나타나지 않았다.

Class1에서 낮 시간대에 기온과 상대습도가 유사하거나 역전하는 경우는 예상치 못한 결과이다. 그러나 실제 관측된 기상현상이 그렇듯 연구기간의 기상관측 값이 무더운 날씨(<Figure 4> 참조)와 낮은 풍속을 기록한 것을 고려할 수 있다. 이는 농지에서는 낮 시간 동안 덥고 습한 성질을 가진 공기가 정체되어 주변 지역으로의 분산이 쉽게 이뤄지지 않았거나 도시지역에서는 주변의 녹지나 산림과 같은 열린 공간으로부터

더 비교적 시원한 바람이 불어오는 이류현상이 발생하는 등의 미기상적 현상에 대한 가능성을 배제할 수 없는 내용이다.

3. 체감온도에 따른 통계분석

여름철 사람이 느끼는 온도를 제시하는 체감온도인 열지수(Heat Index: HI)는 Steadman(1979)에 의해 고안된 겉보기 온도(Apparent Temperature: AT)를 보완한 것으로 1985년부터 미국 기상청에서 여름에만 사용하고 있다. 우리나라 기상청에서도 고온다습한 환경에서 기온과 습도 간의 관계에 따라 실제 느끼는 더위를 지수화해 사용하고 있다.

열지수는 열파에 미리 대응할 수 있도록 하는 지표로서 온도와 습도를 이용해 인간이 직접 체감하는 열적 쾌적성을 나타내고 있다. 26.7°C(80°F) 이상은 주의, 32.2°C(90°F) 이상은 매우 주의, 39.4°C(103°F) 이상은 위험, 51.7°C(125°F) 이상은 매우 위험으로 구분하여 신체에 대한 영향을 정의하고 있다(김동현, 송슬기 2016; <https://www.weather.gov/ama/heatindex>).

분석에 사용한 HI 계산식은 <식 3>과 같다. 계산에 사용된 온도는 화씨(°F)이고 이후 섭씨(°C)로 변환하여 결과를 도출하였다.

$$\begin{aligned}
 HI(^{\circ}F) = & -42.379 + 2.04901523 \times T \\
 & + 10.14333127 \times RH - 0.22475541 \\
 & \times T \times RH - 6.83783 \times 10^{-3} \times T^2 \\
 & - 5.481717 \times 10^{-2} \times RH^2 + 1.22874 \\
 & \times 10^{-3} \times T^2 \times RH + 8.5282 \times 10^{-4} \\
 & \times T \times RH^2 - 1.99 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2
 \end{aligned}$$

T=Temperature(°F)

RH=Relative Humidity(%) <식 3>

설정된 시나리오1과 시나리오2에 따른 HI의 평균에 대한 차이 검증을 위해 종속변수가 연속변수인 두 독립표본 T검정(Two Independent Samples T-test)을 수행하였다. T검정에 앞서 분산의 동질성(Homogeneity of Variance)에 대한 기본 가정은 Bartlett's Test를 통해 검토하고 귀무가설이 기각될 경우 이에 대응할 수 있는 Welch's Approximation을 통한 검정결과를 도출하였다. 모든 검정과정에 평균의 차이가 없다는 귀무가설에 대한 기각 여부는 95% 신뢰구간($\alpha=0.05$)에서 검토되었다. 이 과정을 통해 수행된 결과는 <Table 6~10>과 같다. T검정에 대한 연구가설은 다음과 같다.

$$H_0 : \text{mean}(PADDY) - \text{mean}(P2U) = 0$$

$$H_a : \text{mean}(PADDY) - \text{mean}(P2U) \neq 0$$

분석결과 전체 영역에 대한 평균의 차이는 통계적으로 유의한 수준($t=-7.10$, $p<0.001$)에서 검토되었다. 연구영역 특성에 따른 구분에서는 Class1만이 통계적으로 유의($t=-8.45$, $p<0.001$)하게 나타났고 Class2는 시나리오 간의 차이가 없는 것으로 나타났다($t=-1.07$, $p>0.05$).

시간별 차이에 대한 검증에서는 전체 영역에 대한 평균의 차이는 일몰 직후의 시간대(20KST)부터 일출 직후의 시간대(07KST)까지 통계적으로 유의한 수준에서 차이가 검증되었다. Class1의 경우 시나리오별 평균의 차이는 일몰 직후의 시간대부터 일출 직후의 시간대까지 전체 영역과 동일하게 시간대별로 유의미한 차이가 나타났으나 특이하게 10KST와 11KST에서도 평균의 차이가 양(+)의 방향으로 존재하는 것으로 확인되었다. Class2에서는 모든 시간대에서 통계적으로 유의미한 차이가 존재하지 않는 것으로 나타났다.

Table 6_T-test Analysis Results of Total Observations

Category	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value
Total	HI_PADDY	31.44	5.02	-7.10	0.000*
	HI_P2U	32.51	3.84		
	Difference	-1.07	-0.78		

Note: HI unit=°C, Observation=1,752, *p<0.05.

Table 7_T-test Analysis Results of Total Observations and by the Class

Category	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value
Class1	HI_PADDY	30.36	5.66	-8.45	0.000*
	HI_P2U	32.30	3.79		
	Difference	-1.94	-1.49		
Class2	HI_PADDY	32.52	4.02	-1.07	0.285
	HI_P2U	32.72	3.89		
	Difference	-0.20	0.17		

Note: HI unit=°C, Observation(Class1=876, Class2=876), *p<0.05.

Table 8 T-test Analysis Results by the Time in Total Observations

KST	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value	KST	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value
00	HI_PADDY	28.08	3.15	-5.29	0.000*	12	HI_PADDY	35.99	1.05	1.78	0.077
	HI_P2U	30.48	2.20				HI_P2U	35.68	1.04		
	Difference	-2.39	-1.50				Difference	0.31	0.66		
01	HI_PADDY	27.31	3.21	-5.25	0.000*	13	HI_PADDY	36.71	1.13	1.80	0.073
	HI_P2U	29.74	2.26				HI_P2U	36.39	1.03		
	Difference	-2.43	-1.51				Difference	0.32	0.68		
02	HI_PADDY	26.57	3.29	-5.23	0.000*	14	HI_PADDY	37.20	1.15	1.54	0.127
	HI_P2U	29.04	2.31				HI_P2U	36.92	1.03		
	Difference	-2.48	-1.54				Difference	0.28	0.64		
03	HI_PADDY	25.84	3.31	-5.30	0.000*	15	HI_PADDY	37.38	1.14	1.08	0.284
	HI_P2U	28.37	2.34				HI_P2U	37.18	1.05		
	Difference	-2.53	-1.59				Difference	0.20	0.56		
04	HI_PADDY	25.22	3.29	-5.35	0.000*	16	HI_PADDY	37.27	1.20	0.54	0.591
	HI_P2U	27.78	2.38				HI_P2U	37.17	1.21		
	Difference	-2.56	-1.61				Difference	0.11	0.50		
05	HI_PADDY	24.54	3.27	-5.50	0.000*	17	HI_PADDY	36.83	1.45	-0.31	0.758
	HI_P2U	27.16	2.38				HI_P2U	36.89	1.24		
	Difference	-2.62	-1.68				Difference	-0.07	0.37		
06	HI_PADDY	24.13	3.21	-5.37	0.000*	18	HI_PADDY	36.14	2.08	-0.86	0.389
	HI_P2U	26.66	2.38				HI_P2U	36.39	1.38		
	Difference	-2.53	-1.60				Difference	-0.25	0.33		
07	HI_PADDY	28.03	1.73	-2.41	0.017*	19	HI_PADDY	35.06	1.72	-1.94	0.054
	HI_P2U	28.72	1.73				HI_P2U	35.58	1.48		
	Difference	-0.69	-0.13				Difference	-0.52	0.01		
08	HI_PADDY	30.53	1.54	-0.27	0.791	20	HI_PADDY	31.33	2.62	-5.32	0.000*
	HI_P2U	30.60	1.57				HI_P2U	33.33	1.82		
	Difference	-0.07	0.44				Difference	-2.00	-1.26		
09	HI_PADDY	32.61	1.48	0.60	0.551	21	HI_PADDY	30.25	2.84	-5.39	0.000*
	HI_P2U	32.48	1.48				HI_P2U	32.41	1.87		
	Difference	0.13	0.55				Difference	-2.16	-1.37		
10	HI_PADDY	33.88	0.95	1.56	0.121	22	HI_PADDY	29.46	2.88	-5.48	0.000*
	HI_P2U	33.63	0.99				HI_P2U	31.74	2.02		
	Difference	0.25	0.57				Difference	-2.28	-1.45		
11	HI_PADDY	35.02	0.96	1.63	0.106	23	HI_PADDY	28.79	3.01	-5.50	0.000*
	HI_P2U	34.76	0.97				HI_P2U	31.20	2.21		
	Difference	0.26	0.58				Difference	-2.42	-1.55		

Note: HI unit= $^{\circ}\text{C}$, Each observation=72, * $p<0.05$.

Table 9 T-test Analysis Results by the Time in the Class2 Observations

KST	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value	KST	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value
00	HI_PADDY	30.33	2.49	-0.63	0.531	12	HI_PADDY	36.28	0.88	0.67	0.508
	HI_P2U	30.71	2.60				HI_P2U	36.13	0.97		
	Difference	-0.38	0.82				Difference	0.15	0.58		
01	HI_PADDY	29.64	2.66	-0.50	0.620	13	HI_PADDY	36.97	0.92	0.70	0.487
	HI_P2U	29.95	2.76				HI_P2U	36.82	0.95		
	Difference	-0.32	0.96				Difference	0.15	0.59		
02	HI_PADDY	28.96	2.74	-0.41	0.683	14	HI_PADDY	37.25	0.88	0.28	0.784
	HI_P2U	29.23	2.81				HI_P2U	37.19	0.94		
	Difference	-0.27	1.04				Difference	0.06	0.49		
03	HI_PADDY	28.25	2.73	-0.46	0.648	15	HI_PADDY	37.22	0.85	0.14	0.890
	HI_P2U	28.55	2.80				HI_P2U	37.19	0.87		
	Difference	-0.30	1.00				Difference	0.03	0.43		
04	HI_PADDY	27.56	2.76	-0.61	0.546	16	HI_PADDY	37.04	0.88	-0.25	0.806
	HI_P2U	27.96	2.84				HI_P2U	37.09	0.96		
	Difference	-0.40	0.92				Difference	-0.05	0.38		
05	HI_PADDY	26.91	2.73	-0.70	0.483	17	HI_PADDY	36.83	1.02	0.12	0.906
	HI_P2U	27.37	2.82				HI_P2U	36.80	1.00		
	Difference	-0.46	0.84				Difference	0.03	0.50		
06	HI_PADDY	26.39	2.76	-0.76	0.448	18	HI_PADDY	36.39	1.14	-0.06	0.951
	HI_P2U	26.89	2.80				HI_P2U	36.41	1.11		
	Difference	-0.50	0.81				Difference	-0.02	0.51		
07	HI_PADDY	28.71	1.53	-1.01	0.314	19	HI_PADDY	35.41	1.43	-0.72	0.476
	HI_P2U	29.08	1.57				HI_P2U	35.65	1.47		
	Difference	-0.37	0.36				Difference	-0.24	0.44		
08	HI_PADDY	30.70	1.09	-0.95	0.347	20	HI_PADDY	33.09	2.13	-0.55	0.585
	HI_P2U	30.95	1.12				HI_P2U	33.37	2.14		
	Difference	-0.25	0.27				Difference	-0.28	0.73		
09	HI_PADDY	32.71	1.08	-0.41	0.681	21	HI_PADDY	32.27	2.17	-0.59	0.555
	HI_P2U	32.80	1.08				HI_P2U	32.58	2.21		
	Difference	-0.09	0.35				Difference	-0.31	0.72		
10	HI_PADDY	34.00	0.80	-0.19	0.846	22	HI_PADDY	31.49	2.15	-0.85	0.397
	HI_P2U	34.04	0.84				HI_P2U	31.94	2.29		
	Difference	-0.04	0.35				Difference	-0.45	0.60		
11	HI_PADDY	35.19	0.88	-0.03	0.974	23	HI_PADDY	30.88	2.31	-1.02	0.313
	HI_P2U	35.19	0.91				HI_P2U	31.46	2.54		
	Difference	-0.01	0.41				Difference	-0.58	0.56		

Note: HI unit= $^{\circ}\text{C}$, Each observation=36, * $p < 0.05$.

Table 10 _T-test Analysis Results by the Time in the Class1 Observations

KST	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value	KST	Scenario	Mean	Std. Dev.	t	p-value
00	HI_PADDY	25.83	1.90	-10.38	0.000*	12	HI_PADDY	35.71	1.15	1.95	0.055
	HI_P2U	30.24	1.71				HI_P2U	35.24	0.92		
	Difference	-4.41	-3.56				Difference	0.48	0.96		
01	HI_PADDY	24.99	1.66	-11.72	0.000*	13	HI_PADDY	36.45	1.26	1.90	0.062
	HI_P2U	29.53	1.63				HI_P2U	35.95	0.93		
	Difference	-4.54	-3.77				Difference	0.50	1.02		
02	HI_PADDY	24.17	1.62	-12.05	0.000*	14	HI_PADDY	37.15	1.37	1.73	0.089
	HI_P2U	28.85	1.68				HI_P2U	36.65	1.06		
	Difference	-4.69	-3.91				Difference	0.50	1.08		
03	HI_PADDY	23.43	1.68	-11.69	0.000*	15	HI_PADDY	37.53	1.36	1.20	0.236
	HI_P2U	28.19	1.78				HI_P2U	37.17	1.22		
	Difference	-4.76	-3.95				Difference	0.36	0.97		
04	HI_PADDY	22.88	1.77	-11.11	0.000*	16	HI_PADDY	37.51	1.42	0.80	0.424
	HI_P2U	27.60	1.84				HI_P2U	37.24	1.42		
	Difference	-4.72	-3.88				Difference	0.27	0.94		
05	HI_PADDY	22.17	1.66	-11.50	0.000*	17	HI_PADDY	36.82	1.79	-0.43	0.666
	HI_P2U	26.96	1.87				HI_P2U	36.99	1.46		
	Difference	-4.79	-3.96				Difference	-0.17	0.60		
06	HI_PADDY	21.88	1.69	-10.83	0.000*	18	HI_PADDY	35.88	2.71	-0.94	0.352
	HI_P2U	26.44	1.88				HI_P2U	36.37	1.62		
	Difference	-4.56	-3.72				Difference	-0.49	0.56		
07	HI_PADDY	27.34	1.65	-2.48	0.016*	19	HI_PADDY	34.71	1.92	-1.95	0.056
	HI_P2U	28.36	1.83				HI_P2U	35.51	1.51		
	Difference	-1.02	-0.20				Difference	-0.79	0.02		
08	HI_PADDY	30.36	1.89	0.25	0.806	20	HI_PADDY	29.57	1.74	-9.80	0.000*
	HI_P2U	30.26	1.87				HI_P2U	33.29	1.47		
	Difference	0.11	0.99				Difference	-3.72	-2.97		
09	HI_PADDY	32.50	1.80	0.96	0.341	21	HI_PADDY	28.24	1.82	-10.28	0.000*
	HI_P2U	32.16	1.74				HI_P2U	32.25	1.48		
	Difference	0.35	1.06				Difference	-4.02	-3.24		
10	HI_PADDY	33.76	1.07	2.25	0.028*	22	HI_PADDY	27.44	1.95	-9.45	0.000*
	HI_P2U	33.22	0.97				HI_P2U	31.54	1.73		
	Difference	0.54	1.02				Difference	-4.11	-3.24		
11	HI_PADDY	34.85	1.03	2.40	0.019*	23	HI_PADDY	26.69	1.99	-9.44	0.000*
	HI_P2U	34.32	0.84				HI_P2U	30.94	1.83		
	Difference	0.53	0.97				Difference	-4.25	-3.36		

Note: HI unit= $^{\circ}\text{C}$, Each observation=36, * $p<0.05$.

이상의 결과를 종합하면 농지가 도시적 용도로 전환될 경우 온도와 상대습도에 영향을 미치며 동시에 인간이 체감하는 열적 쾌적성을 나타내는 지표인 HI에도 영향을 미친다. 그리고 이러한 효과는 농지가 도시적 용도로 전환되는 지역에 집중적으로 나타난다. 온도, 상대습도와 함께 HI는 일출시간부터 일몰시간까지의 시간대와 매우 밀접한 관계에 있다. 농지는 온도를 낮추고 상대습도를 높이는 역할을 하며 HI와도 연결되어 주로 일몰시간에 발현되어 일출시간까지 지속된다. 하지만 농지가 많이 존재하는 지역에서 낮 시간 동안에 온도가 증가하거나 대기가 건조해지는 현상 그리고 오전의 일부 시간에 통계적으로 유의미한 수준에서 열적 쾌적성을 감소시키는 결과는 일반적인 결과는 아니다. 이는 연구사례가 고온 현상이 지속된 시기인 점과 실제 관측된 온도값과 모의된 값의 시계열 패턴이 유사한 점으로 미루어 볼 때 실제 관측 자료나 기상수치모델을 통한 모의결과에서 보다 더 다양한 기상요소들의 변화에 대한 면밀한 관찰이 필요한 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 논문에서는 농지 중 논을 중심으로 농지가 도시용지로 전환되었을 경우를 가정하여 농지가 주변지역의 온도와 상대습도 그리고 열지수에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 기상수치모델인 WRF를 통해 기상변수를 모의하였고 이 모델에 적용한 토지이용 시나리오는 농지가 현재 상태로 존재하는 것과 농지가 도시용지로 토지피복이 전환되었을 경우로 구분하여 입력하였다. 효과적인 농지효과 측정을 위해 기상청 AWS 지점의 주변에서 농지가 많은 지역과 농지가 없는 지역으로 영역 특성을 구분하였다.

연구 범위 내에서의 분석결과는 농지의 도시화로

인해 농지가 많았던 지역은 온도가 1.31℃ 증가하였다. 이는 30℃ 이하의 온도 분포에서 많은 차이가 있고 그 이상의 온도에서는 차이가 미미하였다. 상대습도는 5.36%p 감소되었고 주로 60% 이상 수준에서 차이가 나타났다. 농지가 없어 토지피복의 변화가 없는 지역에서의 온도와 상대습도에 대한 미미한 차이는 더 넓은 영역에서의 토지피복 변화로 인한 효과로 판단된다. 특히 상대습도의 경우 60% 이상 수준에서 소수의 시간대에서 변동하는 것은 온도에 미치는 영역보다 더 넓은 영역에서의 효과가 민감하게 작용할 수 있는 것으로 보여 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

농지의 도시화에 의한 효과는 주로 일몰시간부터 일출시간 무렵의 시간대까지 깊은 관계를 가진다. 농지의 도시화는 농지로 토지를 이용하는 경우보다 야간과 새벽 시간에 온도가 높게 유지되고 상대습도는 낮게 유지하는 것으로 분석되었다. 열지수 역시 주로 일몰시간과 일출시간 사이의 시간대에서 통계적으로 유의미한 수준으로 차이가 나타났다. 시나리오 간 차이가 음(-)의 방향으로 나타나 농지의 도시화로 인해 야간과 새벽 시간에 열적 쾌적성이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 대규모 농지가 도시적 용도로 전환되는 지역에 집중되어 나타난다.

농지의 도시화는 대기온도를 높이고 상대습도를 낮추며 열지수에 부정적인 역할을 한다. 폭염과 관련된 사례를 대상으로 한 연구에서 실제 관측된 낮 시간의 대기온도는 주변 토지피복의 영향에서 농지가 많은 지역이 도시지역보다 온도가 높게 나타나는 현상은 일반적이지 않다. 이러한 현상은 고온의 사례에서 도시지역과 농지에 대해 토지피복으로부터 나타나는 시계열상 열적 특성과 종관규모의 기상학적 분석 등의 추가적인 연구를 통해 살펴볼 필요가 있다.

결론적으로 본 논문은 택지개발과 같은 도시화에 의해 농지가 도시용지로 이용될 경우 이것이 가져올

기상 측면의 부작용에 대한 고려가 필요하다는 것을 보여준다. 이는 대규모 개발 사업 시 고려되는 전략환경영향평가, 사전재해영향성 검토, 환경영향평가 등과 같이 도시개발계획 수립을 위한 행정절차상에서 토지이용 변화로 인한 기상학적 영향을 면밀하게 검토할 필요가 있음을 시사한다.

참고문헌 •••••

1. 국토교통부 통계누리. 지적통계. <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/partName.do> (2018년 10월 9일 검색). Ministry of Land, Infrastructure and Transport Statistics Nuri. Cadastral Statistics. <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/partName.do> (accessed October 9, 2018).
2. 기상청 날씨누리. 기상특보 발표기준. <http://www.weather.go.kr/weather/warning/standard.jsp> (2018년 10월 9일 검색). Korea Meteorological Administration Weather Nuri. Weather Warning Criteria. <http://www.weather.go.kr/weather/warning/standard.jsp> (accessed October 9, 2018).
3. 기상청 방재기상정보시스템. <http://afso.kma.go.kr> (2018년 5월 1일 검색). Korea Meteorological Administration Meteorological Information Portal Service System. <http://afso.kma.go.kr> (accessed May 1, 2018).
4. 김동현, 송슬기. 2016. 도시 고온현상에서의 토지피복 유형과 체감온도 간 관계분석. 국토계획 51권, 1호: 137-152. Kim Donghyun and Song Seulkii. 2016. Analyzing the relationships between land cover type and sensible temperature in urban heat wave. *Journal of Korea Planning Association* 51, no.1: 137-152.
5. 김지영, 김은정. 2018. 서울시 공공택지개발 사업지구에서의 지표면 온도변화 분석. 국토연구 97권: 77-91. Kim Jiyeong and Kim Eunjung. 2018. Analysis of land surface temperature change in public residential development districts of Seoul, Korea. *The Korea Spatial Planning Review* 97: 77-91.
6. 박채연, 이동근, 성선용, 박종훈, 정승규. 2016. 지표면 도시 열섬강도의 공간간적 분포와 영향을 주는 변수 분석: 국내 30개 도시를 대상으로. 국토계획 51권, 1호: 125-136. Park Chaeyeon, Lee Dongkun, Sung Sunyong, Park Jonghoon and Jeong Seunggyu. 2016. Analyzing the diurnal and spatial variation of surface urban heat island intensity distribution: Focused on 30 cities in Korea. *Journal of Korea Planning Association* 51, no.1: 125-136.
7. 박충선, 이광률. 2017. 우리나라 기상 관측소 주변 토지 피복 변화 경향. 기후연구 12권, 2호: 165-179. Park Chungsun and Lee Gwangryul. 2017. Patterns in land cover changes around weather stations in South Korea. *Journal of Climate Research* 12, no.2: 165-179.
8. 윤희천, 김만규, 정갑용. 2013. 도시열섬 완화를 위한 녹지증가에 따른 온도변화 분석. 한국측량학회지 31권, 2호: 143-150. Yun Heecheon, Kim Mingyu and Jung Kapyong. 2013. Analysis of temperature change by forest growth for mitigation of the urban heat island. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 31, no.2: 143-150.
9. 이경미, 유혜진. 2007. 여름철 고온현상이 사망자 증가에 미치는 영향: 서울시를 사례로. 기후연구 2권, 2호: 118-127. Lee Kyoumni and Yu Hyejin. 2007. The impact of high temperature on the increase of mortality in summertime: the case of Seoul. *Journal of Climate Research* 2, no.2: 118-127.
10. 이지수, 김만규, 박종철. 2016. 서울의 사회·경제적 요인이 고온현상 발생 시 사망자에 미치는 영향. 한국지역지리학회지 22권, 1호: 195-210. Lee Jisu, Kim Mankyu and Park Jongchul. 2016. The effects of socioeconomic factors on mortality under high temperature in Seoul, South Korea. *Journal of The Korean Association of Regional Geographers* 22, no.1: 195-210.
11. 정우식, 도우근. 2012. 부산지역 도심하천 복원에 따른 기온 변화 효과 분석. 한국환경과학회지 21권, 8호: 939-951. Jung Woosik and Do Woogon. 2012. An analysis of the temperature change effects of restoring urban streams in Busan area. *Journal of the Environmental Sciences* 21, no.8: 939-951.
12. 정지훈, 김인겸, 이대근, 신진호, 김백조. 2014. 우리나라 지역별 고온 극한 현상에 의한 사망 취약도 비교. 대한지리학회지 49권, 2호: 245-263. Jung Jihoon, Kim Ingyum, Lee Daegeun, Shin Jinho and Kim Baekjo. 2014. Study on the vulnerability regarding high temperature related mortality in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 49, no.2: 245-263.

13. 정환도, 송승근, 조현주, 이재근, 이소라, 이은재, 이아마 요시노부. 2014. 대도시 토지피복의 변화와 기온 상승의 관계에 대한 시계열적 연구. *지역정책연구* 25권, 1호: 23-34. Jong Hoando, Song Seungkeun, Cho Hyunju, Lee Jaekune, Lee Sora, Lee Eunjae and Yosinobu, Y. 2014. Time sequential research to relationship of temperature rise and variation of land cover in metropolis. *Regional Policy Review* 25, no.1: 23-34.
14. 차영화, 김학열, 허태영. 2009. 토지이용·토지피복 특성이 서울시 도시기온에 미치는 영향. *서울도시연구* 10권, 4호: 107-120. Cha Younghwa, Kim Hagyeol and Heo Taeyoung. 2009. The effects of urban land use and land cover characteristics on air temperature in Seoul metropolitan area. *Seoul Studies* 10, no.4: 107-120.
15. Cheng, K., Su, Y., Kuo, F., Hung, W. and Chiang, J. 2008. Assessing the effect of landcover changes on air temperature using remote sensing images: A pilot study in Northern Taiwan. *Landscape and Urban Planning* 85, no.2: 85-96.
16. Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X. and Briggs, J. M. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science* 319, no.5864: 756-760.
17. Grimmond, C. S. B., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R. and Carmichael, G et al. 2010. Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities(Producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences* 1: 247-274.
18. Hong, S., Noh, Y. and Dudhia, J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* 134, no.9: 2318-2341.
19. Hutchison, B. A. and Taylor, F. G. 1983. Energy conservation mechanisms and potentials of landscape design to ameliorate building microclimates. *Landscape Journal* 2, no.1: 19-39.
20. Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A. and Collins, W. D. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research* 113, D13103.
21. Lim, K. S. and Hong, S. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review* 138, no.5: 1587-1612.
22. National Weather Service. What is the Heat Index?. <https://www.weather.gov/ama/heatindex> (accessed August 31, 2018).
23. Oke, Tim R. 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. London: Methuen.
24. Ricketts, T. and Imhoff, M. 2003. Biodiversity, urban areas, and agriculture: Locating priority ecoregions for conservation. *Conservation Ecology* 8, no.2: 1-15.
25. Shimadera, H., Kondo, A., Shrestha, K. L., Kitaoka, K. and Inoue, Y. 2015. Numerical evaluation of the impact of urbanization on summertime precipitation in Osaka, Japan. *Advances in Meteorology* 2015: 1-11.
26. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G. and Huang, X. et al. 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. Colorado: NCAR.
27. Steadman, R. G. 1979. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology* 18, no.7: 861-873.
28. Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K. and Ek, M. et al. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. In *Proceedings of 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction*, January 11-15. Seattle: American Meteorological Society.
29. Yokohari, M., Brown, R. D., Kato, Y. and Moriyama, H. 1997. Effects of paddy fields on summertime air and surface temperatures in urban fringe areas of Tokyo, Japan. *Landscape and Urban Planning* 38, no.1-2: 1-11.
30. Yokohari, M., Brown, R. D., Kato, Y. and Yamamoto, S. 2001. The cooling effect of paddy fields on summertime air temperature in residential Tokyo, Japan. *Landscape and Urban Planning* 53, no.1-4: 17-27.

- 논문 접수일: 2018. 10. 17.
- 심사 시작일: 2018. 10. 25.
- 심사 완료일: 2018. 11. 21.

요약

주제어: 논, 도시화, 기상수치모델, 기상요소, 폭염

우리나라 대도시지역에서 농지는 식량생산, 경관, 온도조절 등 다양한 기능을 제공하지만 이러한 기능에 대한 충분한 고려 없이 광범위하게 도시적 용도로 전환되고 있다. 농지가 제공하는 긍정적 기능에 대한 정확한 평가가 이루어지지 않는다면 도시화 과정에서 우리는 사회적으로 최적인 수준보다 더 많은 농지를 잃을 수 있다. 농지의 긍정적 기능에 대한 보다 정확한 이해를 돕기 위해 본 논문에서는 경기도 남부 지역을 대상으로 개발압력이 높은 농지인 논이 도시화가 주변지역의 기상요소에 미치는 영향을 WRF (Weather Research and Forecasting)를 이용하여 수치 모의하였다. 더운 날씨의 대기온도와 상대습도에 농지의 도시화가 미치는 영향을 측정하였으며 이를 위해 토지이용 시나리오를 통한 비교·분석으로 결과를 도출하였다. 시나리오의 구성은 현재 상태의 농지가

존재하는 것과 농지를 모두 도시화한 것이다. 시나리오별 기상변수 모의를 위해 기상수치모델을 이용하였고 모델의 초기입력 자료를 시나리오별로 작성된 토지피복자료의 변경으로 그 결과를 비교하였다. 분석결과 농지의 도시화는 일출과 일몰 시간대와 깊게 관계되어 온도와 상대습도에 인간이 느끼는 열적 쾌적성을 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다. 일몰시간대 이후에서 일출시간대까지 농지의 도시화로 인해 발생하는 부정적인 효과는 지속되며 낮 시간 동안에는 보다 복합적인 요소가 작용할 수 있음을 나타냈다. 본 논문의 결과는 농지는 도시 내에서 열적 쾌적성을 조절하는 소중한 자원이라는 것을 보여주며 농지가 도시화로 인해 용도가 변경될 경우 기상 측면에서의 부작용에 대해 충분한 고려가 이루어져야 함을 시사한다.