

## 수문기상요소 추세에 대한 도시화 영향분석

### Evaluation of Urban Effects on Trends of Hydrometeorological Variables

임창수\*

Rim, Chang-Soo

#### Abstract

This study aimed to figure out the effect of urbanization on meteorological variables (air temperature, wind speed, relative humidity, solar radiation and precipitation) and reference evapotranspiration (RET). The research area of 6 urban areas and 6 rural areas near each urban area was selected. The monthly average daily data were collected from 12 ground stations operated by Korea Meteorological Administration (KMA) and the changes in climate variables were analyzed. Results of annual analysis have shown that the reference evapotranspiration (RET) tends to increase in urban areas while decreasing in rural areas. In particular, due to rising RET in urban areas and decreasing RET in rural areas, we can infer that the urbanization has affected to the RET. Results of monthly analysis showed that the urbanization has effects on the RET of July compared to other months (January, April and October). The yearly and monthly effects of urbanization on RET were closely related to solar radiation, relative humidity and change in temperature, and related to wind speed.

**Keywords** : climate change, reference evapotranspiration, urban effect, natural effect

#### 요 지

본 연구에서는 도시화가 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 일사량, 강수량)와 기준증발산에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 연구지역을 6개의 도시지역과 도시지역 인근에 위치한 6개의 비도시화지역으로 구분하였다. 기상청에서 운영하는 12개 기상관측소에서 관측된 월평균 일 기상자료를 수집하였고, 기상요소의 변화분석을 수행하였다. 본 연구결과에 의하면 도시지역의 경우 뚜렷한 기준증발산의 증가추세를 보이고 있는 반면에 비도시화 지역의 경우 기준증발산이 감소하는 추세인 것으로 나타났다. 특히 도시지역의 기준증발산 증가추세와 비도시화 지역의 기준증발산 감소추세로 인하여 도시화가 기준증발산에 미치는 도시영향은 증가하는 것으로 나타났다. 월별자료 분석결과 여름철에 해당하는 7월의 경우 다른 계절(1월, 4월, 10월)과 비교하여 도시화가 기준증발산에 미치는 도시효과는 증가하였다. 연별 및 월별 도시화가 기준증발산에 미치는 영향은 도시화가 일사량, 상대습도 그리고 기온 변화에 미치는 영향과 밀접한 상관성이 있으며, 도시화가 풍속에 미치는 영향과는 상관성이 적은 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 기상변화, 기준증발산, 도시영향, 자연적 영향

#### 1. 서 론

도시지역은 비도시화지역과 비교하여 수문기상학적으로 많은 차이를 보이며, 그러한 차이는 물수지뿐만 아니라 에너지 수지에도 많은 영향을 미친다. 따라서 도시화가 수문기상학 요소에 미치는 영향을 분석하는 것은 필요하다. 과거 도시화에 따른 많은 수문기상학적 변화에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 연구결과에 의하면 도시화는 도시지역의 기온을 증가시키는 것으로 나타났다(Yague *et al.*, 1991; Chow, 1992; Tayang and Toros, 1997; Choi *et al.*, 2003; Chung *et al.*, 2004; 김광섭과 황보정도, 2005). 도시화가 기온증가에 미치는 영향은 김맹기 등 (1999)에 의하여 수행된 바 있으며, 우리나라 12개 지역에서 과거 40년간(1954-1993)의 자료를

이용하여 분석한 결과 기온은 0.6°C 정도 상승하였으며, 이는 도시화로 인한 기온상승 0.4°C와 온실효과로 인한 기온상승 0.2°C 정도인 것으로 보고하였다. 게다가 도시화는 풍속, 상대습도, 안개일수를 감소시키는 것으로 보고된 바 있다(Bornstein and Johnson, 1977; Chow, 1992).

도시화는 기상변화뿐만 아니라 에너지수지에도 영향을 미친다(Christen and Vogt, 2004). Ichinose *et al.*(1999)에 따르면 도시중심지역에서 에너지의 소비는 도시 열섬현상에 영향을 미치고, 강한 일사량의 영향을 받는 여름보다 겨울에 더 크다고 하였다. Christen and Vogt(2004)에 의하면 잠열 유동의 감소는 도시중심에서 가장 크며, 야간에 토양으로부터의 열유동은 도시중심보다 두 배 정도 크고, 야간 에너지 수지에서 가장 큰 부분을 차지한다고 발표하였다. 또한 야간

\*정회원 · 청운대학교 철도행정토목학과 부교수 (E-mail : csrim@chungwoon.ac.kr)

에 현열유동의 변화는 도시지역 중심부에 위치한 건물들의 영향을 받는다.

FAO(Food and Agriculture Organization)는 Allen *et al.* (1998)에 의해서 제안된 Penman-Monteith(P-M) 기준증발산식을 잠재증발산량을 산정하기 위한 표준방법으로써 제시한 바 있으며, 여러 연구자들은 지역별 기상변화에 따른 FAO P-M 기준증발산식의 변화를 평가한 바 있다(Chen *et al.*, 2005, 2006; Gong *et al.*, 2006; Irmak *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2006; Alkaeed *et al.*, 2006). FAO P-M식의 경우 가상적인 기준식물(잔디)을 가정하여 증발산량을 산정하도록 제안된 기준증발산식으로서 단지 기상요소만이 기준증발산량 산정에 영향을 미친다. 따라서 지표면이나 토양조건에 상관없이 서로 다른 지형특성을 지닌 지역간이나 계절간에 대기 조건에 따른 증발력(evaporating power)의 차이를 비교연구하기 위하여 적용할 수 있다(Allen *et al.*, 1998). 본 연구에서는 위에 언급된 기상적 조건을 바탕으로 도시화가 기상요소와 FAO P-M식으로부터 산정된 기준증발산에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이러한 분석 결과는 산림 및 농지가 도시화함으로써 발생하는 도시지역의 기상변화와 이러한 기상변화가 대기 증발력에 미치는 영향을 파악함으로써 궁극적으로 도시화가 장래 수문순환과정에 미치는 영향을 이해하는데 활용될 수 있다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 도시화가 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 일사량, 강수량)와 기준증발산에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 연구지역을 6개의 도시지역과 도시지역 인근에 위치한 6개의 비도시화지역으로 구분하여 비교분석 하였다. 도시화가 기준증발산에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FAO Penman-Monteith 기준증발산식을 적용하였다. 도시화가 기상요소와 기준증발산에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본

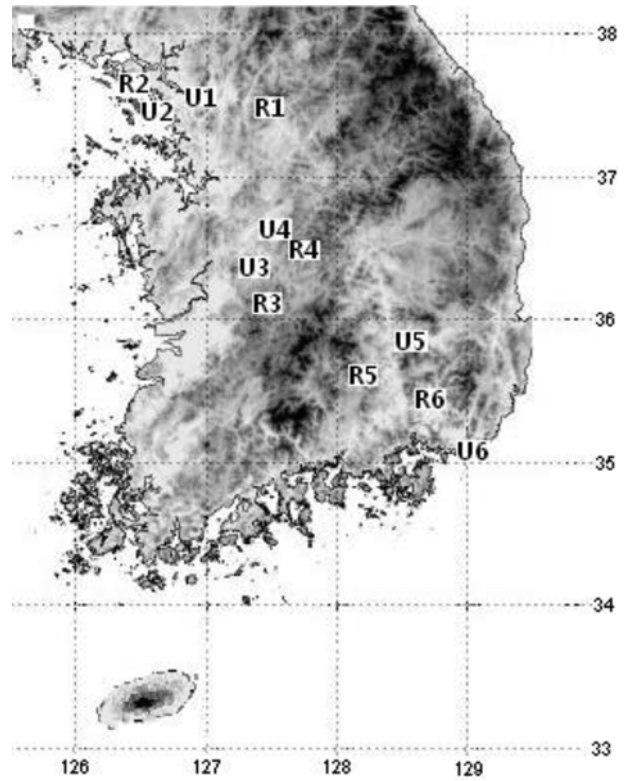


Fig. 1 The climatological stations for this study. Shadings represent topography on the Korean peninsula. Station numbers indicated in map refer to Table 1

연구에서는 Omoto and Hamotani(1979, 1980)에 의해서 제안된 도시화 영향분석 방법을 적용하였다.

### 2.1 연구지역 및 자료

연구지역을 선정하기 위하여 각 관측소에서 관측된 기상자료를 검토하였고, 검토결과를 바탕으로 기상관측지점을 중심으로 반경 10 km에 해당하는 지역에 대해서 서울(U1), 인천(U2), 대전(U3), 청주(U4), 대구(U5), 부산(U6) 등 도시지역

Table 1. Geographical and topographical characteristics of 12 study stations

Station (No.)	Lat. (N)	Long. (E)	Elev. (m)	Geographical and topographical classification										
				Geographical Location		Urbanization rate of year 2000 (%)	Lake and wet land area (%) (6 year average)			Proportion of area with less than 5% inclination (%)				
				Coastal area	Inland area		10~	5~10	~5	0~20	20~40	40~60	60~80	
Urban	Seoul (U1)	37° 34'	126° 58'	86.0		○	59.40		○					○
	Incheon (U2)	37° 28'	126° 38'	68.9	○		52.70	○						○
	Daejeon (U3)	36° 22'	127° 22'	68.3		○	20.0			○			○	
	Cheongju (U4)	36° 38'	127° 27'	57.4		○	13.30			○			○	
	Daegu (U5)	35° 53'	128° 37'	57.6		○	25.60			○			○	
	Busan (U6)	35° 06'	129° 02'	69.2	○		41.0		○				○	
Rural	Yangpyeong (R1)	37° 29'	127° 30'	47.0		○	1.29			○		○		
	Ganghwa (R2)	37° 42'	126° 27'	45.7	○		5.06			○			○	
	Geumsan (R3)	36° 06'	127° 29'	171.3		○	4.11			○		○		
	Boeun (R4)	36° 29'	127° 44'	174.1		○	2.88			○		○		
	Hapcheon (R5)	35° 34'	128° 10'	32.7		○	0.44			○	○			
	Miryang (R6)	35° 29'	128° 45'	12.6		○	1.81			○		○		

Table 2. Urbanization rate at 12 study areas

	A	1975		1980		1985		1990		1995		2000		
		B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	
Urban	U1	314	112.4	35.8	144.6	46.1	163.6	52.1	173.1	55.1	184.5	58.8	186.6	59.4
	U2	193	33.2	17.2	47.4	24.6	63.6	33.0	82.3	42.6	96.4	49.9	101.8	52.7
	U3	314	32.6	10.4	34.1	10.9	38.1	12.1	58.0	18.5	63.0	20.1	62.6	19.9
	U4	314	14.5	4.6	12.2	3.9	14.7	4.7	36.0	11.5	37.5	11.9	41.8	13.3
	U5	314	17.4	5.5	39.2	12.5	54.7	17.4	70.5	22.5	70.6	22.5	80.3	25.6
	U6	198	36.5	18.4	53.7	27.1	70.0	35.4	69.4	35.1	74.2	37.5	80.8	40.8
Rural	R1	314	1.1	0.4	1.6	0.5	2.2	0.7	2.9	0.9	3.3	1.1	4.0	1.3
	R2	270	7.5	2.8	10.0	3.7	11.3	4.2	12.0	4.4	12.8	4.7	13.6	5.0
	R3	314	4.5	1.4	3.7	1.2	9.5	3.0	11.9	3.8	14.3	4.6	12.8	4.1
	R4	314	3.4	1.1	4.5	1.4	6.1	1.9	4.9	1.6	6.8	2.2	9.0	2.9
	R5	314	0.1	0.0	0.3	0.1	0.3	0.1	0.6	0.2	0.6	0.2	1.3	0.4
	R6	314	2.3	0.7	3.5	1.1	2.8	0.9	3.3	1.1	2.7	0.9	5.6	1.8

A: Land area (Km<sup>2</sup>); B: Residential area (Km<sup>2</sup>); C: Urbanization rate (%) (=B/A)

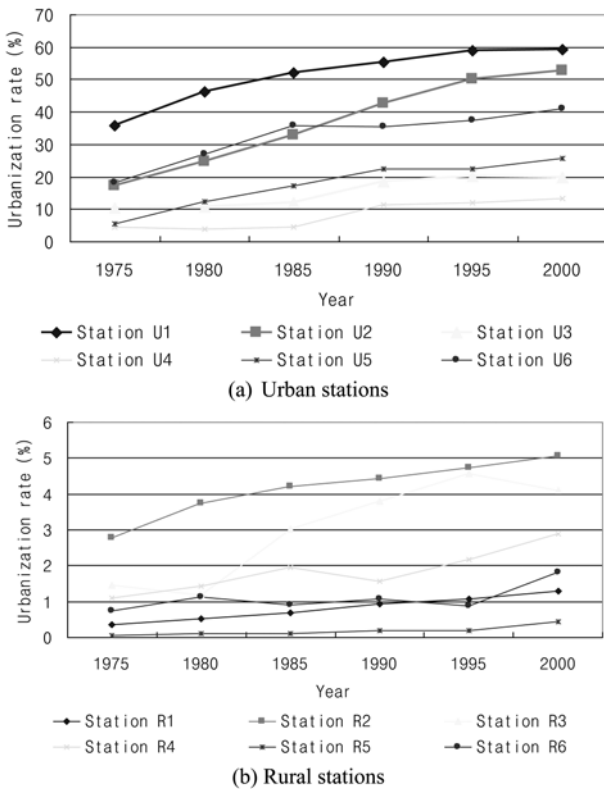


Fig. 2 Urbanization rate of 12 study stations (a) Urban stations (b) Rural stations

6곳과 양평(R1), 강화(R2), 금산(R3), 보은(R4), 합천(R5), 밀양(R6) 등 비도시화지역 6곳을 선정하였다(Fig. 1, Table 1).

선정된 12개 연구 지역에 대해서 기상관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위의 314 km<sup>2</sup>에 대해서 GIS분석을 통하여 1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년 2000년의 6년간의 토지피복현황에 대해서 분석을 실시하였다. 연구 지역의 도시화 정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였다(임창수와 채효석, 2007). 도시화율을 산정하기 위하여 반경 10 km 이내에 위치한 주거지역의 면적을 육지면적으로 나눈 값을 도시화율로 결정하였다(Fig. 2).

도시화가 기상요소와 기준증발산에 미치는 영향을 분석하

기 위하여 기상청에서 운영하는 12개 기상관측지점에서 관측되는 월평균 일별 수문기상 자료를 수집하여 기상요소 변화를 분석하였다. 수집 분석된 수문기상자료는 일별 최고기온, 최저기온, 풍속, 상대습도, 일조시간, 강수량 등이다. 도시지역의 경우 1973년 이전 기상자료가 가용하나, 비도시화지역의 경우 1973년부터 기상자료를 관측하고 있다. 또한, 일조시간 자료의 경우 1999년 이후 중단 일조계 관측자료가 없어 도시화지역과 비도시화지역의 비교분석을 위하여 1973년부터 1999년까지 기상자료를 분석에 활용하였다. 따라서 도시지역의 경우 U1은 1908년부터, U2은 1952년부터, U3은 1969년부터, U4는 1967년부터, U5는 1937년부터, U6은 1934년부터 1999년까지의 자료를 적용하였다. 비도시화지역의 경우 1973년부터 1999년까지의 자료를 적용하였다.

## 2.2 FAO P-M 기준증발산식

기준증발산량을 계산하기 위하여 Allen *et al.*(1998)은 기준작물(잔디)에 대하여 다음 Eq. (1)을 발표하였으며, FAO에 의해서 기준잠재증발산량을 산정하기 위한 유일한 방식으로 추천되고 있다.

$$RET = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_q)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

$$R_o = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

$$A_o = \frac{\gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

$$Q_n = Q_{ns} - Q_{ni} \quad (4)$$

$$Q_{ns} = (1 - \alpha)Q_s \quad (5)$$

$$Q_{ni} = \sigma \left[ \frac{T_{\max, K}^4 + T_{\min, K}^4}{2} \right] [0.34 - 0.14\sqrt{e_a}] \left[ 1.35 \frac{Q_s}{Q_{so}} - 0.35 \right] \quad (6)$$

$$Q_s = \left( 0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) Q_a \quad (7)$$

$$Q_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) Q_a \quad (8)$$

여기서,  $RET =$  기준잡재증발산량(mm/day),  $R_o =$  기준잡재증발산량식의 에너지항(mm/day),  $A_o =$  기준잡재증발산량식의 공기동력항(mm/day),  $T_a = 2$  m 높이에서 일평균기온( $^{\circ}C$ ),  $u_2 = 2$  m 높이에서 풍속(m/s),  $Q_n =$  순방사(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $Q_g =$  토양열 유동밀도(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $e_s =$  포화증기압(kPa),  $e_a =$  실제증기압(kPa),  $(e_s - e_a) =$  대기의 포화증기압 부족량(kPa),  $\Delta =$  포화증기압과 온도곡선의 기울기(kPa/ $^{\circ}C$ ),  $\gamma =$  건습계 상수(kPa/ $^{\circ}C$ ),  $Q_{ns} =$  순단파복사량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $Q_{ni} =$  순장파복사량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $Q_s =$  입사태양복사량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $\alpha =$  태양복사에너지의 반사율( $= 0.23$ ),  $Q_{so} =$  맑은 날 지구표면에 도달하는 태양복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $Q_a =$  지구 대기권에 도달하는 태양방사열량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $Z =$  해수면으로부터의 지반고(m),  $\sigma =$  Stefan-Boltzmann 상수( $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>/day),  $T_{max,K}^4 = 24$ 시간 동안 최대절대온도( $^{\circ}C + 273.16$ ),  $T_{min,K}^4 = 24$ 시간 동안 최소절대온도( $^{\circ}C + 273.16$ ).  $e_a =$  실제증기압(kPa). 여기서 토양열 유동밀도의 경우 일별 기준증발산량을 산정하는 경우 낮과 밤사이의 토양열 유동밀도의 증가와 감소로 인하여 일별 토양열 유동밀도가 미미하여 계산에서 제외하였다.

### 2.3 도시영향 평가

일부 연구자들은 도시화가 이러한 기상요소 변화에 미치는 영향을 분석하려는 연구를 수행한 바 있으며(Lowry, 1977; Omoto and Hamotani, 1979, 1980), 본 연구에서는 Omoto and Hamotani(1979, 1980)에 의해서 수행된 도시화 영향분석 방법을 적용하였다.

#### 2.3.1 비도시화 기간의 자연적 영향 산정

도시지역 및 비도시화 지역에서 관측된 기준증발산 및 기상요소는 Eqs. (9) and (10)과 같이 나타낼 수 있으며 따라서, 기준증발산 및 기상요소에 미치는 도시화에 따른 도시영향은 Eq. (11)로부터 산정할 수 있다.

$$V_o(UB) = V_N(UB) + V_U(UB) \quad (9)$$

$$V_o(R)_{ij} = V_N(R) \quad (10)$$

$$V_U(UB) = V_o(UB) - V(R) \quad (11)$$

여기서 첨자  $i, j$ 는 각각 연과 월을 나타내고, UB는 도시지역, R은 비도시화지역,  $V_o(UB)$ 는 도시지역에서 관측된 기준증발산 및 기상요소,  $V_N(UB)$ 는 도시지역의 자연적 영향에 의한 기준증발산 및 기상요소,  $V_U(UB)$ 는 도시지역의 도시영향에 따른 기준증발산 및 기상요소,  $V_o(R)$ 은 비도시화 지역에서 관측된 기준증발산 및 기상요소,  $V_N(R)$ 은 비도시화 지역에서 자연적 영향에 의한 기준증발산 및 기상요소이다.

하지만 도시지역 UB에서 도시영향을 산정하기 위하여, 도시지역과 비도시화지역 사이의 자연적 영향의 차이가 고려되어야 한다. 그리고 이 차이는 Eq. (12)로부터 산정될 수 있다. 따라서  $k(UB, R)^{\alpha}$ 는 UB와 R에서 기상자료의 관측이 시작된 초기의 관측치의 평균값의 차이이며, 평균기간  $\alpha$ 는 도시영향이 없는 초기 관측기간부터 결정될 수 있다. 따라서  $k(UB, R)^{\alpha}$ 는 도시영향이 존재하지 않으며, 본 연구에서 평균기간  $\alpha$ 는 10년을 적용하였다.

$$k(U, R)^{\alpha} = \overline{V_N(UB)^{\alpha}} - \overline{V_N(R)^{\alpha}} \quad (12)$$

#### 2.3.2 도시화 영향 산정

따라서 Eqs. (11) and (12)로부터 도시지역의 도시영향만을 고려한 기준증발산 및 기상요소 변화를 Eq. (13)으로부터 산정할 수 있다.

$$V_U(UB) = V_o(UB) - \overline{V_o(R) - k(UB, R)^{\alpha}} \quad (13)$$

도시지역 및 비도시화 지역의 기준증발산 및 기상요소의 이동평균 값을 사용하여 도시영향을 산정하는 경우 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_U(UB) = \overline{V_o(UB)^{\beta}} - \overline{V_o(R)^{\beta}} - k(UB, R)^{\alpha} \quad (14)$$

$\overline{V_o(UB)^{\beta}}$ 는 도시지역에서의 기상요소와 기준증발산량의 5년 이동평균이고,  $\overline{V_o(R)^{\beta}}$ 는 비도시화지역에서의 기상요소와 기준증발산량의 5년 이동평균이다. 또한 도시지역의 자연적 영향에 의한 기준증발산 및 기상요소 변화,  $V_N(UB)$ 는 Eqs. (9) and (14)로부터 구할 수 있다. Eq. (14)에서 도시지역의 5년 이동평균 기준증발산이 증가할수록 그리고 비도시화 지역의 5년 이동평균 기준증발산이 감소할수록 도시지역에서의 기준증발산에 미치는 도시영향은 증가하고, 자연적 영향은 감소하는 것을 알 수 있다.

## 3. 연구결과

도시지역과 도시지역 인근에 위치한 비도시화 지역의 연평균 및 월평균 일 기상요소(상대습도, 일사량, 기온, 풍속, 강수량)와 기준증발산, 에너지항 및 공기동력항의 5년 이동평균 추세를 분석하였다. 또한, 도시화가 연평균 및 월평균 일 기상요소와 기준증발산에 미치는 영향을 분석하였다. 월별자료 분석의 경우 계절적인 영향을 고려하여 분석하고자 하였으며, 모든 월의 자료를 분석하기에는 자료가 방대하여 4월(봄), 7월(여름), 10월(가을), 1월(겨울)의 월평균 일 기상요소와 기준증발산 에너지항 및 공기동력항의 추세를 분석하였다.

### 3.1 연별 도시영향 분석

상대습도의 경우 도시지역에 해당하는 6개 모든 지역에서 감소추세를 보이고 있고, 비도시화 지역의 경우 R1, R2 그리고 R6에서 증가추세를 보이고 있으며 나머지 지역에서는 감소추세를 보이고 있다. 상대습도의 경우 도시화에 따른 강수량의 증가추세에도 불구하고 감소추세를 보이고 있다. 도시지역에서의 상대습도의 감소는 지표면의 변화에 따른 강수량의 빠른 유출과 그리고 증발산량을 감소시키는 식생의 감소와 관련이 있다. Figs. 3 and 4는 U1과 R1 그리고 U6과 R6에서 도시지역 및 비도시화 지역에서의 연별 기상요소 변화와 도시화가 기상요소에 미치는 도시효과를 보여주고 있다. U1과 R1의 경우 도시화는 상대습도를 감소시키는 효과를 보여주고 있다.

일사량의 경우 모든 도시지역에서 증가추세를 보이는 반면에 비도시화 지역에서는 감소추세를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 도시화는 일사량을 크게 증가시키는 효과를 나타내고 있다. 이는 도시지역에서의 증발량감소에 따른 대기 중

수분공급 감소에 기인한 것으로 판단된다. Wild *et al.* (2005)에 의하면 최근 도시지역에서 태양복사에너지는 증가 추세를 보이고 있다고 발표한 바 있다. 기온의 경우 도시지역이나 비도시화지역 모두에서 증가하는 추세를 보이고 있으나, 도시지역이 전반적으로 비도시화 지역보다 높은 기온을 보이고 있으며, 또한 증가추세도 큰 것으로 나타났다. 또한 도시화는 기온을 증가시키는 효과를 보이고 있다.

풍속의 경우 대부분의 연구지역에서 도시화지역이 비도시화 지역과 비교하여 더 큰 풍속을 보여주고 있으며, 풍속은 감소하는 추세를 보이고 있다. U1의 경우 도시화는 풍속을 1980년 초까지 증가시키는 효과를 보이다가 그 이후 감소시키는 효과를 보이고 있다. 반면에 U6의 경우 도시화는 1980년 초까지 풍속을 감소시키는 효과를 보이다가 그 이후 증가시킨 후 안정적인 효과를 보이고 있다(Figs. 3 and 4). 과거 수행된 연구결과에 의하면 풍속이 4 m/sec 이상인 경우 도시지역이 비도시화 지역보다 더 작은 풍속을 보이나, 풍속이 4 m/sec 이하인 경우 도시지역이 비도시화 지역보다 더 큰 풍속을 보이는 것으로 발표된 바 있으며, 유사한 연구결과들이 발표된 바 있다(Angell *et al.*, 1971; Wong and Dirks, 1978; Lee, 1979; Draxler, 1986; Xu *et al.*, 2006). 또한 도시화가 진행됨에 따라서 최대 풍속은 지표면 조도효과로 인하여 감소하고, 최소풍속은 열섬현상으로 인하여 증가하는 경향을 보인다(Klink, 1999).

Fig. 3에서 보는 바와 같이 도시화지역인 U1의 경우 기준 증발산량은 도시화의 영향으로 연구기간 초기에 음의 영향 (-0.11 mm/day)을 보이다가 연구기간 후반에는 양의 영향 (+0.28 mm/day)을 보여서 도시화에 따라서 기준증발산량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 상대습도의 경우 도시화가 연구기간 초기에 상대습도에 음의 영향(-2.8%)을 보이고 연구기간 후반에는 더 큰 음의 영향(-9.82%)을 보이고 있다. 일사량의 경우 도시화가 연구기간 초기에 일사량에 음의 영향 (-1.79 MJ/m<sup>2</sup>/day)을 보이다가 후반에는 양의 영향(+0.51 MJ/m<sup>2</sup>/day)을 보이고 있다. 기온의 경우 모든 연구기간에

걸쳐서 도시화가 기온을 증가시키는 양(+)의 영향을 보이고 있으나, 1980년 초기에는 다른 기간에 비해서 영향이 줄어드는 것으로 나타났다. 풍속의 경우 1980년 초기를 제외하고 전 기간에 걸쳐서 음(-)의 영향을 보이고 있으며, 연구기간 초기부터 1980년 초까지 풍속을 증가시키는 경향을 보이다가 그 이후 다시 감소시키는 경향을 보이고 있다. 강수량의 경우 1980년 초기에 도시화가 강수량을 감소시키는 음(-)의 영향을 보이는 것을 제외하고 대부분의 기간에서 양(+)의 영향을 보이고 있다. 특히 연구기간 후반(1980년 후반 이후)에는 도시화가 일정하게 강수량에 양(+)의 영향을 보이는 것으로 나타났다.

에너지항의 경우 모든 도시화지역에서 증가추세를 보이고 있고, 반면에 비도시화 지역에서는 감소추세를 보이고 있다. 공기동력항의 경우 도시지역에서는 U2를 제외한 모든 도시지역에서 증가추세를 보이고 있고, 비도시화 지역에서는 R1, R3 그리고 R6을 제외한 지역에서 증가추세를 보이고 있다. 따라서 전반적으로 에너지항은 대부분의 도시지역에서 증가하고, 비도시화 지역에서는 감소하는 반면에, 공기동력항은 대부분의 도시지역에서는 증가추세를 보이고, 비도시화 지역에서 지역특성에 따라서 증가하거나 혹은 감소하는 추세인 것으로 사료된다(Table 3).

Table 3에서 보는 바와 같이 도시지역의 경우 모든 지역에서 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 뚜렷하게 기준증발산이 증가하는 추세를 보이고 있는 반면에 비도시화 지역의 경우 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 뚜렷하게 기준증발산이 감소하는 추세를 보이는 것으로 나타났다. 도시지역의 기준증발산 증가추세와 비도시화 지역의 기준증발산 감소추세로 인하여 기준증발산에 미치는 도시영향은 증가하고 있으며, 반면에 자연적 영향은 감소하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 도시지역에서 상대습도의 감소, 일사량과 기온의 증가로 인한 기준증발산의 증가에 기인하며, 또한 비도시화 지역에서 일사량의 감소에 따른 기준증발산의 감소에 기인하는 것으로 판단된다 (Figs. 3~5).

Table 3. Trends of 5 year moving average of yearly and monthly RET, energy term and aerodynamic term of RET (Mann Kendall test, Z-score)

Station (No.)	Month	Energy Term					Aerodynamic Term					RET				
		Jan.	Apr.	Jul.	Oct.	Year	Jan.	Apr.	Jul.	Oct.	Year	Jan.	Apr.	Jul.	Oct.	Year
Urban	Station U1	<b>2.30</b>	<b>4.43</b>	<b>2.58</b>	1.32	<b>4.99</b>	<b>1.90</b>	<b>2.93</b>	<b>1.87</b>	0.84	<b>2.72</b>	<b>2.66</b>	<b>4.01</b>	<b>2.79</b>	<b>2.22</b>	<b>4.59</b>
	Station U2	<b>4.39</b>	<b>5.44</b>	<b>2.87</b>	<b>4.91</b>	<b>6.07</b>	<b>1.69</b>	-0.13	<b>-2.42</b>	<b>-3.69</b>	<b>-4.22</b>	<b>3.01</b>	<b>3.69</b>	<b>2.00</b>	-1.08	<b>3.91</b>
	Station U3	<b>4.34</b>	<b>4.57</b>	-0.23	0.95	<b>2.19</b>	<b>2.72</b>	<b>3.20</b>	<b>5.07</b>	<b>4.85</b>	<b>3.77</b>	<b>3.19</b>	<b>4.48</b>	<b>2.32</b>	<b>3.78</b>	<b>5.01</b>
	Station U4	<b>3.28</b>	<b>3.40</b>	0.39	0.58	<b>1.74</b>	<b>3.01</b>	<b>3.77</b>	<b>2.32</b>	<b>4.22</b>	<b>3.51</b>	<b>3.80</b>	<b>5.36</b>	1.32	<b>3.83</b>	<b>5.62</b>
	Station U5	<b>3.24</b>	<b>5.20</b>	1.53	0.47	<b>4.51</b>	1.55	1.50	1.05	<b>3.64</b>	1.32	<b>2.98</b>	<b>3.32</b>	1.00	<b>4.22</b>	<b>2.61</b>
	Station U6	<b>4.33</b>	<b>4.25</b>	<b>2.15</b>	<b>4.20</b>	<b>3.40</b>	0.50	<b>1.90</b>	<b>2.27</b>	<b>1.69</b>	<b>3.40</b>	<b>2.06</b>	<b>4.48</b>	<b>1.90</b>	<b>3.06</b>	<b>3.14</b>
Rural	Station R1	<b>4.55</b>	-0.52	<b>-4.67</b>	<b>-1.95</b>	<b>-4.25</b>	<b>-2.13</b>	-0.29	1.08	<b>-2.11</b>	-1.16	-0.92	-0.07	<b>-4.54</b>	<b>-3.04</b>	<b>-4.20</b>
	Station R2	<b>4.15</b>	<b>-2.45</b>	<b>-5.33</b>	<b>-3.62</b>	<b>-4.75</b>	<b>-1.74</b>	-0.84	<b>2.79</b>	<b>3.40</b>	<b>1.74</b>	-0.95	<b>-2.67</b>	<b>-4.04</b>	<b>2.03</b>	<b>-5.17</b>
	Station R3	<b>4.36</b>	0.87	<b>-4.54</b>	-0.07	<b>-2.74</b>	<b>-2.98</b>	0.58	-0.36	-0.87	-1.00	-0.95	0.63	<b>-3.40</b>	-1.16	<b>-3.91</b>
	Station R4	<b>2.56</b>	-0.87	<b>-4.33</b>	<b>-3.38</b>	<b>-5.09</b>	0.02	<b>2.87</b>	<b>2.42</b>	1.16	<b>2.03</b>	1.32	<b>2.51</b>	<b>-2.53</b>	-0.89	<b>-2.48</b>
	Station R5	-0.47	<b>-3.04</b>	<b>-4.14</b>	<b>-5.17</b>	<b>-6.23</b>	1.18	0.47	<b>2.95</b>	<b>3.61</b>	<b>1.74</b>	<b>1.58</b>	-0.13	0.63	<b>2.40</b>	-0.76
	Station R6	<b>4.17</b>	1.45	<b>-5.64</b>	0.42	<b>-4.14</b>	<b>-4.44</b>	<b>-3.25</b>	0.97	<b>-3.70</b>	<b>-3.88</b>	<b>-3.83</b>	<b>-2.82</b>	<b>-3.61</b>	<b>-2.90</b>	<b>-5.07</b>

\*Numbers in bold indicate significant upward trend (+) or downward trend (-) at the 0.05 level of significance

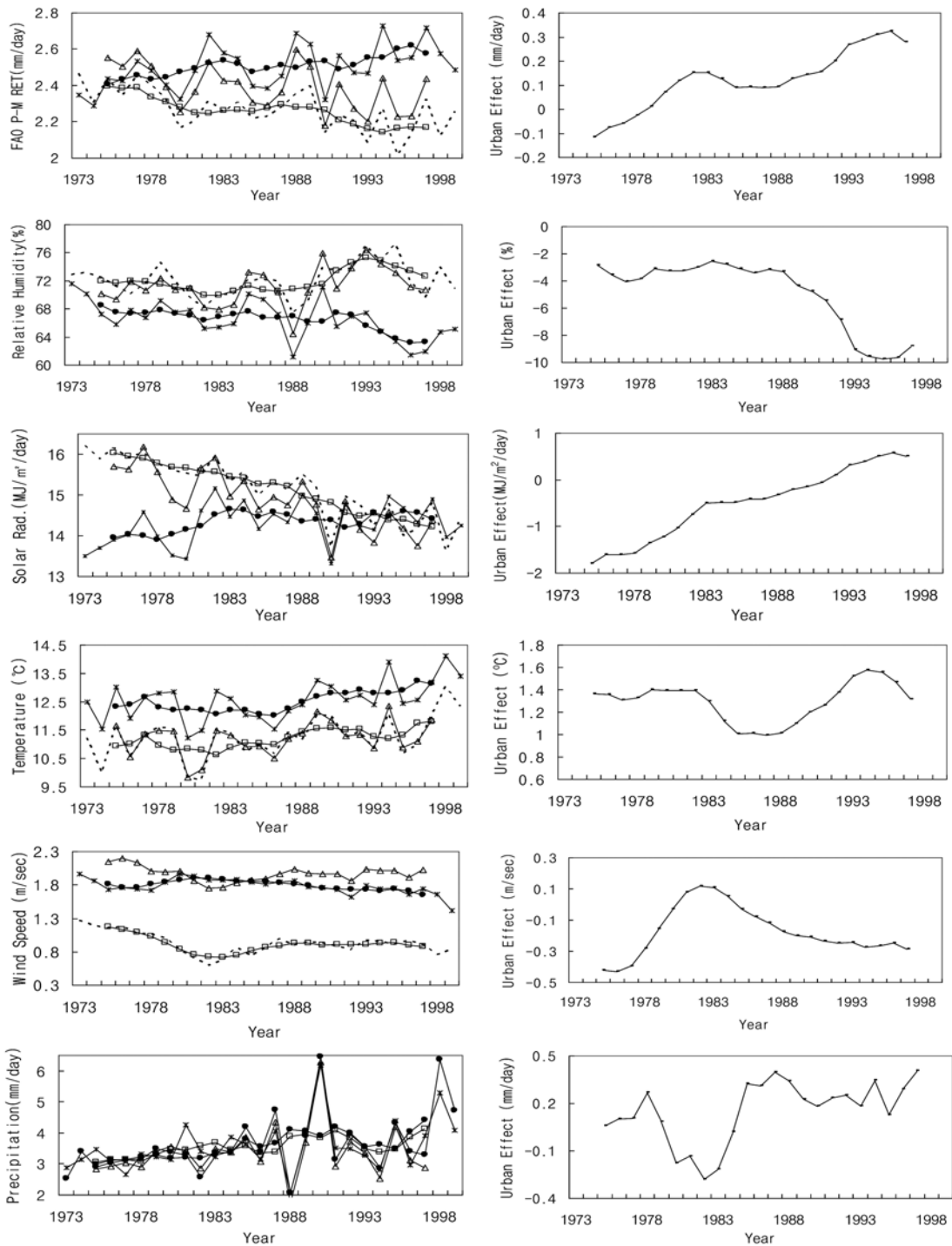


Fig. 3 Annul variation of RET and climatic variables at Stations U1 and R1; Dark circle-line indicates 5 year moving average from urban area; Blank square-line indicates 5 year moving average from rural area; Star-line indicates observed annual average from urban area; Dotted line indicates observed annual average from rural area; Blank triangle-line indicates naturally occurring annul average from urban area

U1, U2, U4 그리고 U6 등의 지역에서는 90년도 이후 도시화가 기준증발산에 미치는 영향이 크게 증가하고 있는 것으로 나타났다. U5를 제외한 모든 다른 지역에서 기준증발산에 미치는 도시영향은 증가하는 반면에 자연적 영향은 감소하는 것으로 나타났다. U5의 경우 분지지역의 지리 및 지형적인 특성으로 인하여 자연 지리적 조건이 기준증발산 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 도시화로 인하여 각각의 도시화 지역에서 기준증발산은 최고 U1에서 0.32 mm/day, U2에서 0.26 mm/day, U3에서 0.26 mm/day, U4에서 0.32 mm/day, U5에서 0.09 mm/day, U6에서 0.22

mm/day 증가한 것으로 나타났다. Figs. 3 and 4에서 보는 바와 같이 도시화가 연별 기준증발산에 미치는 영향은 도시화가 상대습도, 일사량 그리고 기온 변화에 미치는 영향과 밀접한 상관성이 있으며, 도시화가 풍속에 미치는 영향과는 상관성이 적은 것으로 나타났다.

### 3.2 월별 도시영향 분석

상대습도는 도시지역의 경우 U6에서 7월을 제외하고 감소 추세를 보이며, 비도시화 지역의 경우 1월에 R3과 R5를 제외하고 증가추세를 보이고 있고, R6의 경우 1, 4, 7, 10월

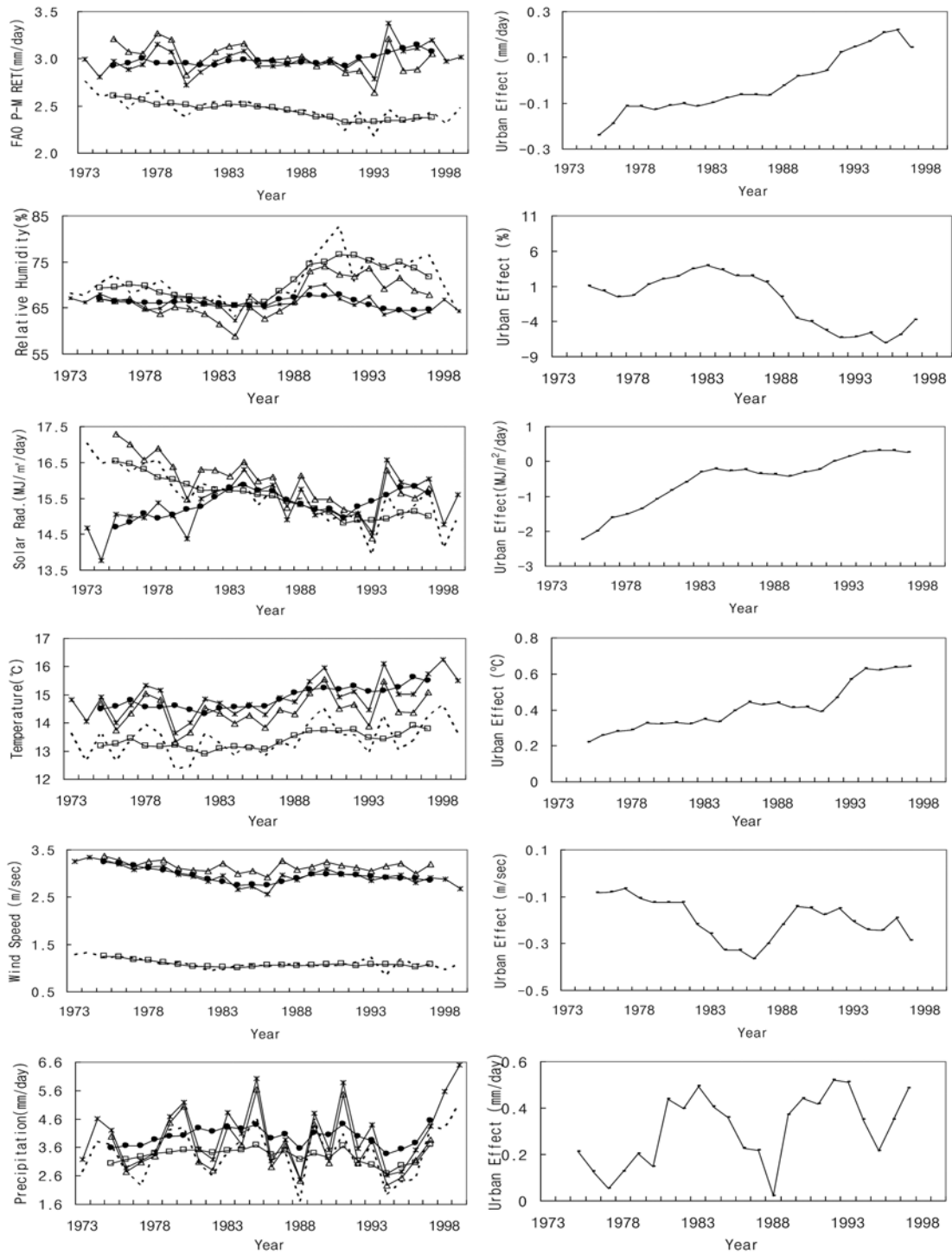


Fig. 4 Annular variation of RET and climatic variables at Stations U6 and R6; Dark circle-line indicates 5 year moving average from urban area; Blank square-line indicates 5 year moving average from rural area; Star-line indicates observed annual average from urban area; Dotted line indicates observed annual average from rural area; Blank triangle-line indicates naturally occurring annul average from urban area

에 증가추세를 보이고 있다. 따라서 전반적으로 도시지역의 경우 모든 월에서 감소추세를 보이나, 비도시화 지역의 경우 1월에 증가추세를 보이고 있다. U1의 경우 1월을 제외하고 1980년 초부터 도시화에 따른 강수량의 증가에도 불구하고 상대습도는 감소하고 있다.

일사량의 경우 1월에 U1과 U5를 제외한 다른 도시지역과 월에서 증가추세를 보이고 있고, 비도시화 지역의 경우 감소 추세를 보이고 있다. U1의 경우 모든 계절에서 도시화는 일사량을 증가시키는 효과를 보이고 있다. 기온의 경우 도시지역에서는 모든 월에서 증가추세를 보이는 반면에 비도시화

지역의 경우 1월에 모든 지역에서 증가추세를 보이고, 4월에 R1, R3, R5을 제외하고 증가추세를 보이고, 7월에 R1, R2, R4, R5을 제외하고 증가추세를 보이고, 10월에는 R2만이 증가추세를 보이고 있다. U1의 경우 도시화는 기온을 증가 (+)시키는 도시효과를 보이고 있으나, 7월을 제외하고 도시화에 따른 도시효과의 증가추세는 보이지 않고 있다. 풍속의 경우 7월과 10월에 증가추세가 뚜렷한 반면에 1월과 4월은 도시지역에서 감소추세를 보이고, 비도시화 지역에서 R4을 제외하고 감소추세를 보이고 있다. U1의 경우 모든 계절에서 1980년 초까지 도시영향은 풍속을 증가시키는 것으로 나

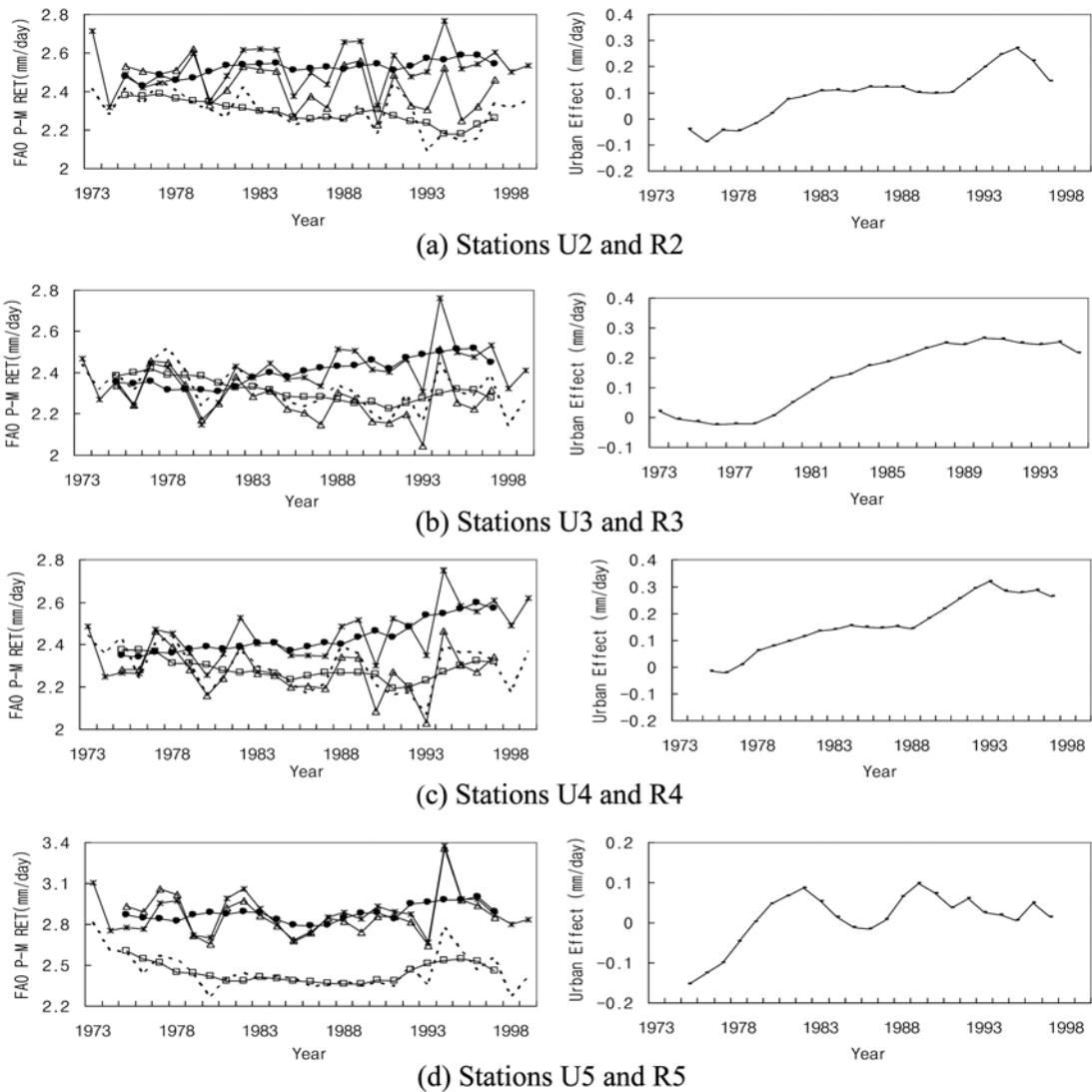


Fig. 5 Annular variation of RET; Dark circle-line indicates 5 year moving average of RET from urban area; Blank square-line indicates 5 year moving average from rural area; Star-line indicates observed annual average from urban area; Dotted line indicates observed annual average from rural area; Blank triangle-line indicates naturally occurring annul average from urban area

타났으나, 그 이후 풍속을 감소시키는 것으로 나타났다.

에너지항의 경우 도시지역에서 모든 월에 전반적으로 증가 추세를 보이고 있으나, 비도시화 지역에서는 1월을 제외하고 전반적으로 감소추세를 보이고 있다. 공기동력항의 경우 도시지역에서 U2의 4, 7, 10월을 제외하고 전반적으로 증가추세를 보이는 반면에 비도시화 지역에서는 1월을 제외하고 전반적으로 증가추세를 보이고 있으며, U6의 경우 7월을 제외하고 1, 4, 10월에 감소추세를 보이고 있다.

Table 3에서 보는 바와 같이 도시지역에서 기준증발산은 대부분의 계절(1, 4, 7, 10월)에 증가추세를 보이는 반면에 비도시화 지역에서는 감소추세를 보이고 있다. 특히 도시지역에서 1월과 4월의 경우 모든 연구지역에서 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 증가추세를 보이고 있다. 반면에 비도시화지역에서 7월의 경우 U5를 제외하고 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 감소추세가 뚜렷한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 U1과 R1에서 도시지역 및 비도시화 지역에서의 RET 변화와 도시화가 RET에 미치는 도시효과를 보여주고 있다. 분석결과 7월의 경우 U5를 제외한 지역에서 다른 월과 비교하여 도시화가 RET에 미치는 도시효과는 증가하고,

반면에 자연적 영향이 뚜렷하게 감소하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 7월의 경우 도시지역의 기준증발산은 증가추세를 보이고, 비도시화 지역의 기준증발산은 감소추세가 뚜렷한 경향을 보이는 것에 기인한다. 7월의 경우 다른 계절과 비교하여 비도시화 지역의 기준증발산과 도시지역의 기준증발산의 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며, 오히려 70년대에는 비도시화지역이 도시화지역보다 더 큰 기준증발산을 보이고 있다. 이러한 분석결과는 도시지역과 비도시화 지역의 기준증발산에 영향을 미치는 기상요소(상대습도, 일사량, 기온, 풍속)들의 차이에서 원인을 찾을 수 있다. 7월의 경우 다른 월에 비하여 비도시화 지역이 도시지역과 비교하여 일사량이 많아서 기준증발산식의 에너지항의 증가에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

U1의 경우 1월을 제외하고 도시화에 따른 강수량의 증가추세에도 불구하고 상대습도는 감소추세를 보이고 있어서 기준증발산식의 공기동력항을 증가시키고 있는 것으로 판단된다. 한편 평균풍속은 도시지역이 비도시화 지역보다 상대적으로 커서 평균풍속의 영향으로 인하여 도시지역이 비도시화 지역보다 상대적으로 큰 공기동력항을 보여주고 있다(Fig. 6).



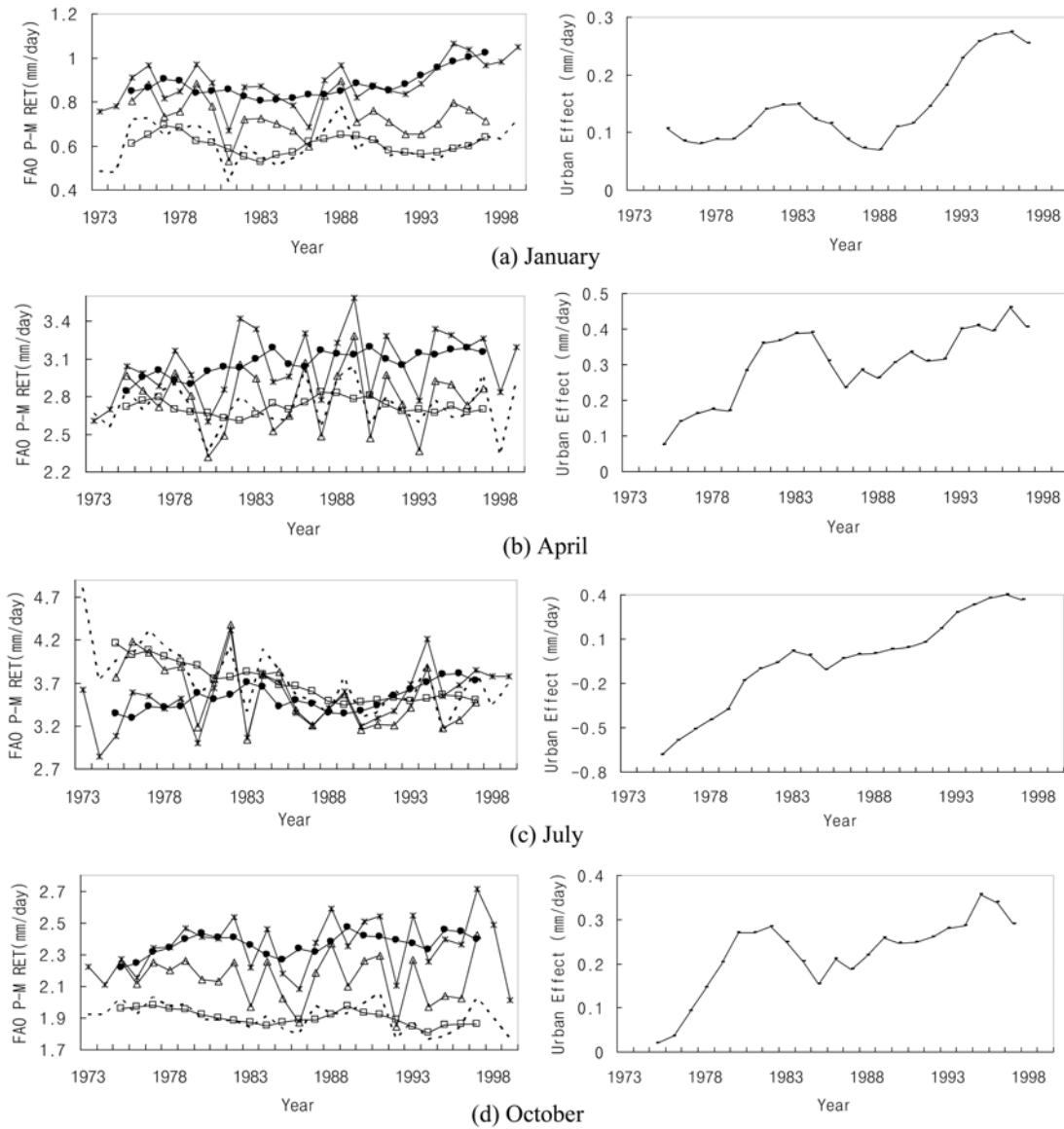


Fig. 6 Monthly variation of RET at Stations U1 and R1; Dark circle-line indicates 5 year moving average from urban area; Blank square-line indicates 5 year moving average from rural area; Star-line indicates observed annual average from urban area; Dotted line indicates observed annual average from rural area; Blank triangle-line indicates naturally occurring annual average from urban area

1, 4, 10월의 경우 7월과 비교하여 기준증발산에 영향을 미치는 도시효과는 작은 것으로 나타났다. 이는 Table 3에서 보는 바와 같이 1, 4, 7, 10월에 도시지역의 기준증발산은 증가하는 반면에 1, 4, 10월과 비교하여 7월의 비도시화 지역의 기준증발산은 크게 감소하고 있는 것에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 계절별 도시화가 기준증발산에 미치는 영향은 도시화가 상대습도, 일사량 그리고 기온에 미치는 영향과 밀접한 상관성이 있고, 도시화가 풍속에 미치는 영향과는 상관성이 적은 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도시화가 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 일사량, 강수량)와 기준증발산에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 연구지역을 6개의 도시지역과 도시지역 인근에 위치한 6개의 비도시화지역으로 구분하여 도시화가 기상요소와 FAO Penman-Monteith 기준증발산에 미치는 영향을

분석하였다.

연별자료 분석결과, 도시지역의 경우 뚜렷한 기준증발산의 증가추세를 보이고 있는 반면에 비도시화 지역의 경우 기준증발산이 감소하는 추세인 것으로 나타났다. 특히 도시지역의 기준증발산 증가추세와 비도시화 지역의 기준증발산 감소추세로 인하여 기준증발산에 미치는 도시영향은 증가하고 있으며, 반면에 자연적 영향은 감소하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 도시지역에서 상대습도의 감소, 일사량과 기온의 증가로 인한 기준증발산량이 증가하고 있으며, 이러한 원인은 거의 대부분의 지역이 점진적인 도시화로 인하여 강수-유출의 증가와 실제증발산의 감소에 따른 기온증가와 상대습도의 감소(포화미흡량 증가), 대기 중 수분공급의 감소 그리고 그에 따라서 기준증발산량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 분석 결과는 도시화로 인한 도시지역의 대기증발력이 증가하고 있다는 것을 의미하며, 이러한 대기증발력의 증가는 수문순환과정에 직접적인 영향을 미친다.

월별자료 분석결과 여름철에 해당하는 7월의 경우 다른 계

절(1월, 4월, 10월)과 비교하여 도시화가 기준증발산에 미치는 도시효과는 증가하고, 반면에 자연적 영향이 뚜렷하게 감소하고 있는 것으로 나타났다. 이는 도시지역과 비도시화 지역의 기준증발산에 영향을 미치는 기상요소(상대습도, 일사량, 기온, 풍속)들의 차이 때문에, 7월의 경우 다른 월에 비하여 비도시화 지역이 도시지역과 비교하여 일사량이 많아서 기준증발산식의 에너지항의 증가에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 결론적으로 연별 및 월별 도시화가 기준증발산에 미치는 영향은 도시화가 일사량, 상대습도 그리고 기온 변화에 미치는 영향과 밀접한 상관성이 있으며, 도시화가 풍속에 미치는 영향과는 상관성이 적은 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년도 청운대학교 학술연구조성비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술혁신사업(03산학연 C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단으로부터 연구비를 지원받아 수행한 연구성과입니다.

## 참고문헌

김광섭, 황보정도(2005) 남한지역 기온 변화의 연추세 및 월추세 분석, 2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 920-923.

김맹기, 강인식, 곽중흠(1999) 최근 40년간 한반도 도시화에 따른 기온 증가량의 추정, 한국기상학회지, 한국기상학회, 제35권, 제1호, pp. 118-126.

임창수, 채효석(2007) 도시화에 따른 수문기상변화 I (연 물수지 변화 분석). 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 555-570.

Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., and Tsutsumi, A. (2006) Comparison of several reference evapotranspiration methods for Ito-shama Peninsula area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty Engineering*, Kyushu University, Vol. 66, pp. 1-14.

Allen, R.G., Peretira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper 56*, FAO, ISBN 92-5-104219-5.

Angell, J.K., Pack D.H., Dickson C.R., and Hoecker, W.H. (1971) Urban influence on nighttime airflow estimated from tetron flights. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 10, pp. 194-205.

Bornstein, R. and Johnson, D.S. (1977) Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment*, Vol. 11, pp. 597-604.

Chen, D., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., and Ren, G. (2005) Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, Vol. 28, pp. 123-132.

Chen, S., Liu, Y., and Axel, T. (2006) Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential evapotranspiration trends from 1961-2000. *Climatic Change*, Vol. 76, pp. 291-319.

Choi, Y.-G., Jung, H.-S., Nam, K.-Y., and Kwon, W.-T. (2003) Adjusting urban bias in the regional mean surface temperature series of South Korea, 1968-99. *Int. J. of Climatol.*, Vol. 23, pp. 577-591.

Chow, S.D. (1992) The urban climate of Shanghai. *Atmospheric Environment*. Vol. 26B, No. 1, pp. 9-15.

Chung, U., Choi, J., and Yun, J.-I. (2004) Urbanization effects on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change*, Vol. 66, pp. 127-136.

Christen, A. and Vogt, R. (2004) Energy and radiation balance of a central European city. *Int. J. of Climatol.* Vol. 24, pp. 1395-1421.

Draxler, R.R. (1986) Simulated and observed influence of the nocturnal urban heat island on the local wind field. *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 25, pp. 1125-1133.

Gong, L., Xu, C.-Y., Chen, D., Halldin, S., and Chen, Y.D. (2006) Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *J. of Hydrology*, Vol. 320, pp. 620-629.

Ichinose, T., Shimodozono, K., and Hanaki, K. (1999) Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3897-3909.

Irmak, S., Payero, J.O., Martin, D.L., Irmak, A., and Howell, T.A. (2006) Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, pp. 564-578.

Klink, K. (1999) Trends in mean monthly maximum and minimum surface wind speeds in the coterminous United States, 1961 to 1990. *Climate Research*, Vol. 13, pp. 193-205.

Lee, D.O. (1979) The influence of atmospheric stability and the urban heat island on urban-rural wind speed differences. *Atmos. Environ.*, Vol. 13, pp. 1175-1180.

Lowry, W.P. (1977) Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteor.*, Vol. 16, pp. 129-135.

Omoto, Y. and Hamotani, K. (1979) A proposed method of eliminating urban effects from climatological data obtained at stations in big cities. *J. of Agricultural Meteorology*, Vol. 35, pp. 93-96.

Omoto, Y. and Hamotani, K. (1980) A proposed method of eliminating urban effects from climatological data obtained at stations in big cities(2). *J. of Agricultural Meteorology*, Vol. 36, pp. 203-206.

Tayang, M. and Toros, H. (1997) Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey. *Climatic Change*, Vol. 35, pp. 501-524.

Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Chmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., and Tsvetkov, A. (2005) From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, Vol. 308, No. 5723, pp. 847-850.

Wong, K.K. and Dirks R.A. (1978) Mesoscale perturbations on airflow in the urban mixed layer. *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 17, pp. 677-688.

Xu, M., Chang, C.-P., Fu, C., Qi, Y., Robock, A., Robinsin, D., and Zhang, H.-M. (2006) Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurement of wind speed. *J. of Geophysical Research*, 111(D24111), doi:10.1029/2006JD007337.

Yague, C., Zurita, E., and Martinez, A. (1991) Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, Vol. 25B, pp. 327-332.

(접수일: 2009.10.8/심사일: 2009.11.6/심사완료일: 2009.11.25)