

도시화에 따른 수문기후변화 II (도시화가 기준 증발산량에 미치는 영향) Urbanization Effects on Reference Evapotranspiration

임 창 수*
Rim, Chang-Soo

Abstract

The effects of climatic changes owing to urbanization, geographical and topographical conditions on Penman-Monteith reference evapotranspiration, and energy and aerodynamic terms of Penman-Monteith reference evapotranspiration have been studied. In this study, 56 climatological stations including the Seoul metropolis in South Korea have been selected, and the area of study site was set at 314 km². The climatological station is centrally located in the study area with a 10 km radius. The geographical and topographical characteristics of these sites were examined using GIS analysis. Land use status of the study area was also examined to estimate the extent of urbanization. The study results indicated that the variation of reference evapotranspiration rate is closely related to urbanization in most climatological stations. The level of change in reference evapotranspiration was higher in areas with higher urbanization rates. The change in reference evapotranspiration appears to be caused by temperature rises following heat island phenomena due to urbanization, and by the decrease in humidity, wind speed and sunshine duration due to the increase in residential areas in urban districts. Especially, the humidity decrease causes a significant decrease in evapotranspiration rate. The study results showed that climatic change due to urbanization and proximity to the coast had the greatest effect on reference evapotranspiration.

keywords : Evapotranspiration; Urbanization; FAO Penman-Monteith

요 지

본 연구에서는 도시화에 따른 기후변화가 FAO Penman-Monteith 기준증발산량에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 또한 도시화에 따른 수문기후학적 변화는 다른 지형 및 지리적 조건과도 밀접한 연관성을 가지고 있다. 따라서 도시화가 수문기후에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 이들 지형 및 지리적조건도 동시에 고려되어야 한다. 이러한 지형 및 지리적 조건이 도시화과정과 함께 수문기후변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FAO Penman-Monteith 기준증발산량을 산정하고, 에너지항 및 공기동력항이 FAO Penman-Monteith 기준증발산량에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 위하여 적용된 연구지역은 서울을 비롯한 56개 수문기후관측지점으로써 도시화과정을 분석하기 위하여 반경 10 km를 중심으로 314 km²에 해당하는 면적을 연구지역으로 설정하였다. 연구 지역의 도시화정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였다. 연구결과에 의하면 대부분의 연구지역에서 기준증발산의 변화정도는 도시화율의 정도에 따라서 상관관계를 보이는 것으로 판단된다. 기준증발산량의 변화정도는 도시화율이 클수록 큰 변화

* 청운대학교 철도행정토목학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Chungnam 350-701, Korea
(e-mail: csrim@chungwoon.ac.kr)

를 보이는 것으로 판단된다. 분석결과에 의하면 기준증발산량의 변화정도는 도시화가 진행됨에 따라서 도시지역 내 열섬현상에 따른 기온상승과 도시지역의 주거지면적 증가에 따른 습도의 감소 그리고 풍속의 감소 영향인 것으로 보이며, 특히 습도의 감소가 기준증발산량에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 도시지역 내의 태양복사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다. 또한 연구지역의 지리 및 지형조건이 기준증발산량에 미치는 영향을 분석한 결과 56개 연구지역의 기준증발산량에 미치는 요인은 주로 도시화에 따른 기후변화와 해안 근접성인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 도시화, 기준증발산, 기후변화

1. 서론

지구상에서 도시유역이 차지하는 비율은 낮지만 거주하는 인구가 차지하는 비율은 상당한 부분을 차지한다. 또한 계속되는 산업화로 인하여 농촌 및 산림지역의 도시화는 계속 가속되고 있는 실정이다. 도시지역은 농촌 및 산림지역과 비교하여 수문 기후학적측면에서 상이한 특성을 가지고 있으며 이러한 상이한 특성은 지역 내 에너지수지 및 물수지에 상당한 영향을 미친다. 따라서 농촌 및 산림지역이 도시화되면서 발생하는 기후학적 변화가 증발산에 미치는 변화를 분석 파악하는 것은 필요하다.

많은 연구자들은 도시화가 도시기온을 상승시킨다고 보고한 바 있다 (Yague et al., 1991; Chow, 1992; Choi et al., 2003; 김광섭과 황보정도, 2005). 또한 도시화는 풍속과 상대습도를 감소시키고 그리고 안개일수와 일조시간도 감소시키는 것으로 나타났다 (Bornstein and Johnson, 1977; Chow, 1992). Sailor(1994)는 3차원기상학적 모델 (Colorado State University Mesoscale Model, CSUMM)을 적용하여 도시지역의 albedo변화와 식생밀도의 변화에 따른 기온변화를 연구하였으며, 연구결과 도시지역의 albedo와 식생밀도의 증가는 여름철 기온과 경계층 높이를 낮추는 것으로 나타났다. 도시지역과 비도시지역에서 식생밀도와 토지이용조건이 기온에 미치는 영향을 연구한 결과 식생밀도와 토지이용조건은 도시기후에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 도시지역에서의 식생은 증발산을 통해서 기온을 감소시키고, 비도시지역에서는 식생과 토양수분의 증가에 따라서 기온 감소효과를 저감시키는 것으로 나타났다 (Wilmers, 1990; Shashua-Bar and Hoffman, 2000; Jonsson, 2004). Englehart et al. (2003)은 북아메리카지역에서 장기간의 최대 및 최소기온 자료를 이용하여 도시화가 지역의 기온에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 연구결과에 의하면 대도시지역에 위치한 기후관측지점의 경우 최소기온의 변화가 도시화와 비례관계가

있는 것으로 나타났으며, 최대기온의 경우 최소기온보다는 작지만 따뜻한 기간 동안에 도시화영향이 있는 것으로 나타났다.

도시화는 기후변화뿐만 아니라 에너지수지에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 북아메리카 도시(Mexico City, Miami, Tucson, Sacramento, Los Angeles, Vancouver and Chicago)에서 수행된 연구에서 거주지역에서의 증발산량은 순방사량의 22-37 %정도인 것으로 나타났으며, 도심이나 산업지역에서는 증발산량이 미미한 것으로 나타났다. 또한 하천 등과 같은 지형조건과 도시지역 침투성포장은 증발산량의 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 (Unger, 1999; Andersen, 1999; Ragab et al., 2003), 많은 도시에서 증발산량은 강수량을 초과하는 것으로 나타났다 (Grimmond and Oke, 1998). Ichinose et al.(1999)에 의하면 도심에서 사용되는 에너지의 소비가 열섬효과에 영향을 미치며, 그 효과는 여름철 강한 태양복사량으로 인하여 여름보다 겨울에 더 큰 것으로 나타났다. Christen and Vogt(2004)는 도심지역에서 숨은 열 유동 (latent heat flux)의 감소가 가장 크게 나타났으며, 교외지역에서 야간 토양열유동의 경우 도심지역의 2배정도이고 야간 에너지수지에서 가장 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. 야간 감열유동의 변화는 도시의 건물영향을 받는 것으로 나타났다.

위에서 언급된 도시화나 지역 및 지형적 특성에 따른 기후변화가 수문현상에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 기후변화에 따른 증발산량의 변화를 파악하는 것이 필요하다. FAO(Food and Agriculture Organization)는 Allen et al.(1998)에 의해서 제안된 Penman-Monteith(P-M) reference evapotranspiration 식을 기준증발산량을 산정하기 위한 standard method 로써 제시한 바 있으며, 여러 연구자들은 지역별 기후변화에 따른 FAO P-M reference evapotranspiration 식의 변화를 평가한 바 있다. Chen et al.(2005)은 중국 580개의 기상관측지점에서 FAO P-M reference

evapotranspiration식을 적용하여 Thornthwaite식과 비교 평가한 바 있으며, Gong et al.(2006)은 중국 Changjiing (Yangtz River) basin에 위치한 150개의 연구지역에서 FAO P-M reference evapotranspiration식을 적용하여 지역별 특성에 따른 민감도분석을 실시한 바 있다. Gong et al.(2006)에 의하면 Penman-Monteith식의 경우 상대습도가 가장 민감한 것으로 나타났으며, 태양복사량, 대기온도 그리고 풍속이 뒤를 이었다. 또한, Alkaeed et al.(2006)은 일본 도시지역에서 P-M reference evapotranspiration 식들을 평가한 바 있다.

과거 수행된 연구들에 대해서 검토한 결과 대부분의 경우 일부 한정된 지역의 관측자료를 이용하여 도시화에 따른 국지적인 기후변화나 에너지수지변화를 분석하거나, 혹은 구체적인 도시화나 지역특성자료를 고려하지 않고 여러 지역에서의 기후변화에 따른 잠재증발산량 변화에 대하여 연구를 수행하였다. 하지만 도시화에 따른 수문기후학적 변화는 지리 및 지형적 특성까지 밀접한 연관성을 가지고 있으며, 도시화가 수문기후현상에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 다양하고 구체적인 지리 및 지형적 특성자료를 동시에 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 다양한 지리 및 지형적 특성이 도시화과정과 함께 수문기후변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지리 및 지형적 특성을 고려하여 한반도에 위치한 56개 연구지역을 선정하였으며, 이들 지역에 대해서 GIS분석을 실시하여 지리 및 지형적 특성을 파악하였다. 56개 연구지역으로부터 얻어진 일별 기후자료를 이용하여 지리 및 지형적 특성과 도시화에 따른 기후변화가 증발산량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 FAO P-M reference evapotranspiration 식을 적용하여 증발산량의 변화를 분석하였다. 또한 지리 및 지형적 특성과 도시화가 FAO P-M reference evapotranspiration식의 에너지항 및 공기동력항에 미치는 영향력을 분석하여, 지역적 특성에 따른 기후변화가 FAO P-M reference evapotranspiration에 미치는 물리적 특성도 알아보았다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역 및 자료

연구 지역을 선정하기 위하여 수문기후자료의 가용성을 검증하고, 검증된 결과를 바탕으로 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위에서 56곳의 연구 지역을 선정하였다. 연구 지역을 선정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 수문기후자료 관측지점의 도시화 정도가 증발산에 미치는 영향을 판단하기 위하여

전체 면적에 대한 주거지 면적 비를 이용하여 도시화 정도를 구분하였다. 둘째, 해안과의 거리가 증발산에 미치는 영향을 파악하기 위하여 관측지점의 해안 근접성을 고려하였다. 셋째, 관측지점 인근에 호소, 평야, 산지 등의 지형적 조건이 증발산에 미치는 영향을 고려하였다. 선정된 56개의 연구지역은 우리나라 한반도 전역에 걸쳐서 해안지역 및 내륙지역에 고르게 위치하고 있으며, 또한 연구지역의 지형특성이 평야, 산악, 호소 등에 고르게 분포하여 도시화에 따른 수문기후변화를 분석하는데 적절하리라 판단된다.

본 연구를 위하여 전국 56개 지점에서 관측되는 수문기후 관측자료를 수집하여 기후요소 변화를 분석하였다. 수집 분석된 기후자료는 일별 최고기온, 최저기온, 풍속, 습도, 일조시간 등이며, 전국 56개 기후관측지점 중 서울을 포함한 11개 대도시의 경우 1970년부터 5년 간격으로 2004년까지 8개년에 걸쳐서 분석을 실시하였고, 속초를 포함한 45개 중소도시의 경우 1975년부터 10년 간격으로 4개년에 걸쳐서 분석을 실시하였다. 기온의 경우 모든 지역에서 전반적으로 증가추세를 보이고 있으며, 상대습도의 경우 모든 지역에서 현격한 감소추세를 보이고 있다. 반면에 풍속과 일조시간의 경우 전반적으로 감소추세를 보이나 지역에 따라서 증가추세를 보이는 등 각기 다른 양상을 보이고 있다.

2.2 연구지역의 분류

선정된 56개 연구 지역에 대해서 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위의 314 km²에 대해서 GIS분석을 통하여 1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년 2000년의 6년간의 토지피복현황에 대해서 분석을 실시하였다. 지리 및 지형특성분석의 경우 기후자료와 동일한 모든 기간에 대해서 분석하는 것이 타당하나 1970년 및 2004년 토지피복현황자료의 경우 GIS분석을 위하여 자료 사용에 어려움이 있어 분석자료에서 제외하였다.

56개 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위에서 연구 지역을 선정하였다. 연구 지역의 도시화 정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였다. 56개 지역에 대해서 GIS분석을 이용하여 토지이용조건과 지역 평균고도자료 등을 분석한 결과를 바탕으로 연구지역을 분류하였다. 도시화율을 산정하기 위하여 반경 10 km 이내에 위치한 주거지역의 면적을 육지면적으로 나눈 값을 도시화율로 결정하였으며, 도시화 정도를 판단하기 위하여 1975년도 도시화율과 2000년도의 도시화율의 차이를 도시화 정도의 기준으로 적용하였다. 연구지역의 분류를 위하여 2000년도의 도시화율과 도시화 정도(2000-1975)를 동시에 고려하여 연구지역을 분

류한 결과 1975년부터 2000년에 걸쳐서 도시화율이 변하고 있는 것으로 판단된다. 분석결과에 의하면 서울, 인천, 수원, 대구, 광주, 부산 그리고 제주 등 7개 지역이 2000년도에 21 % 이상의 도시화율과 15 % 이상의 도시화정도를 보이고 있으며, 청주, 대전, 포항, 군산, 울산, 목포, 여수, 서귀포 그리고 성산포 등 9개 지역이 2000년도에 11~21 %의 도시화율과 8.5~15 %의 도시화정도를 보이고 있고, 나머지 40개 지역이 2000년도 11 %미만의 도시화율과 8.5 %이하의 도시화정도를 보이고 있다.

연구지역을 해안 및 내륙지역으로 구분하기 위하여 GIS자료 분석에 따라서 반경 10 km에 해당하는 연구지역에서 바다가 포함되는 지역이 있는 연구지역은 해안지역으로 분류하였으며, 그렇지 않은 지역은 내륙지역으로 분류하였다. 분류된 연구지역에서 18개 지역(속초, 인천, 울진, 포항, 군산, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도, 제주, 서귀포, 강화, 보령, 부안, 고흥, 성산포, 영덕)이 해안지역으로 분류되었으며, 나머지 38개 지역은 내륙지역으로 분류되었다. 6년간의 평균 수역 및 습지면적비의 경우 인천, 목포지역이 10 % 이상의 비율을 보이고 있고, 춘천을 비롯한 8개 지역이 5~10 %의 수역 및 습지면적비를 보이고 있으며, 나머지 46개 지역이 5 %이하의 수역 및 습지면적비를 보이고 있다. 연구지역 내 5 % 이하의 경사도 면적비를 분석한 결과 대관령, 울진, 추풍령, 통영, 여수, 인제, 홍천, 제천, 영주, 영덕, 의성, 거창, 합천, 산청지역이 20 % 이하의 면적비를 보이고 있어 이들 지역이 산악지역으로 분류할 수 있을 것으로 판단된다.

2.3 Penman-Monteith 기준증발산 모형

Penman(1948)에 의해서 제안된 에너지수지와 물질전달과정을 복합적으로 고려한 증발산공식(combination method)은 여러 연구자들에 의해서 수정 보완되어 왔으며, Monteith (1964)는 증발산 표면으로부터 증발을 억제하는 저항의 개념을 도입하여 Penman-Monteith 실제증발산공식을 개발하였다. Penman-Monteith 공식 실제증발산량은 다음 Eq. (1)과 같이 표시된다.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Q_n - Q_g) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (1)$$

여기서, λET = 습은 열 유동(MJ/m²/day), Q_n = 순방사(MJ/m²/day), Q_g = 토양열 유동밀도(MJ/m²/day), ρ_a = 일정한 대기압하의 평균대기밀도(kg/m³), C_p = 대기의

비열(MJ/kg/°C), r_s = 표면저항(sec/m), r_a = 공기동력학적 저항(sec/m).

Eq. (1)로부터 계산된 습은 열유동(MJ/m²/day)을 0.408로 곱함으로써 수문학적인 증발산량(mm/day)을 얻을 수 있다. Eq. (1)에서 공력저항 r_a 는 다음 Eq. (2)로 계산된다.

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad (2)$$

여기서, r_a = 공기동력학적 저항(sec/m), z_m = 풍속측정 높이(m), z_h = 상대습도 측정 높이(m), d = 제로면 변위(m), z_{om} = 운동량 전달과 관련된 조도길이(m), z_{oh} = 열과 수증기 전달과 관련된 조도길이(m), k = von Karman 상수 (≈ 0.41), u_z = 높이 z 에서의 풍속(m/sec)이다.

Eq. (2)에서 일정한 식생의 높이 $h = 0.12$ m를 가정하고, 풍속과 습도의 측정높이를 2 m라고 하면, 공기동력학적 저항 r_a 는 다음 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (3)$$

또한, 표면저항 r_s 는 다음 Eq. (4)로 계산된다.

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (4)$$

여기서, r_l = 기공저항(s/m), LAI_{active} = active (sunlit) leaf area index (m²(leaf area)/m²(soil surface)). 잔디를 기준작물로 간주하는 경우 일반적으로 LAI_{active} 는 0.5 LAI 이고 $LAI = 24$ h의 관계가 있다. 또한 작물높이 $h=0.12$ m 그리고 작물에 충분한 수분이 공급되고 있다는 가정을 하는 경우에 기공저항 $r_l = 100$ s/m가 되고, 따라서 표면저항 $r_s = 70$ sec/m가 된다.

기준증발산량(ET_o)을 계산하기 위하여 Allen 등 (1998)은 Penman-Monteith 공식 (1)과 공식 (3), (4)로부터 FAO Penman-Monteith 공식을 다음 Eq. (5)와 같이 발표하였으며, FAO에 의해서 기준증발산량을 산정하기 위한 유일한 방식으로 추천되고 있다.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

$$R_o = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (6)$$

$$A_o = \frac{\gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

$$Q_n = Q_{ns} - Q_{nl} \quad (8)$$

$$Q_{ns} = (1 - \alpha) Q_s \quad (9)$$

$$Q_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \times \left[0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right] \left[1.35 \frac{Q_s}{Q_{so}} - 0.35 \right] \quad (10)$$

$$Q_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) Q_a \quad (11)$$

$$Q_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) Q_a \quad (12)$$

여기서, ET_o = 기준 증발산량(mm/day), R_o = 기준증발산량식의 에너지항(mm/day), A_o =기준증발산량식의 공기동력항(mm/day), T_a = 2 m 높이에서 일평균기온 (= $T_a = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$, °C), T_{\max} =일 최고기온(°C), T_{\min} =일 최저기온(°C), u_2 = 2 m 높이에서 풍속(m/s), Q_n = 순방사(MJ/m²/day), Q_g = 토양열 유동밀도(MJ/m²/day), e_s = 포화증기압(kPa), e_a = 실제증기압(kPa), $(e_s - e_a)$ = 대기의 포화증기압 부족량(kPa), Δ = 포화증기압과 온도곡선의 기울기(kPa/°C), Y = 건습계 상수(kPa/°C), Q_{ns} =순단파복사량(MJ/m²/day), Q_{nl} =순장파복사량(MJ/m²/day), Q_s = 입사태양복사량(MJ/m²/day), α = 태양복사에너지의 반사율 (= 0.23 사용), Q_{so} = 맑은 날 지구표면에 도달하는 태양복사에너지(MJ/m²/day), Q_a =지구 대기권에 도달하는 태양방사열량(MJ/m²/day), $(a + b)$ = 회귀상수 (일정한 기간동안, n=N일 때, Q_a 가 지구표면에 도달하는 비율), Z =해수면으로부터의 지반고(m), σ = Stefan-Boltzmann 상수(4.903×10^9 MJ/m²/K⁴/day), $T_{\max,K}^4$ = 24시간 동안 최대절대온도(°C + 273.16), $T_{\min,K}^4$ = 24시간 동안 최소절대온도(°C + 273.16). e_a = 실제증기압(kPa). 여기서 토양열 유동밀도의 경우 일별 기준증발산량을 산정하는 경우 낮과 밤사이의 토양열 유동밀도의 증가와 감소로 인하여 일별 토

양열 유동밀도가 미미하여 계산에서 제외하였다.

3. 연구 결과

연구 지역의 도시화에 따른 FAO Penman-Monteith 기준 증발산량의 변화와 기준 증발산량에 대한 에너지항과 공기동력항의 비율 및 정도를 비교 분석하였다. 또한 연구지역의 고도나 저수지, 하천과 같은 수역의 변화 그리고 해안에 근접한 지역의 경우 바다의 영향 등이 기준 증발산량에 미치는 영향도 분석하였다.

3.1 도시화에 따른 FAO Penman-Monteith 기준 증발산 변화

56개 연구지역중에서 도시화가 진행됨에 따라서 속초를 비롯한 33개 지역에서 기준 증발산량의 증가추세를 보이고 있고, 원주를 비롯한 13개 지역에서 기준 증발산량의 감소추세를 보이고 있다. 또한 춘천을 비롯한 10개 지역은 기준 증발산량 변화가 미미한 것으로 판단된다. 도시화정도가 8 % 이상인 17개 도시화지역에서 모두 기준 증발산량의 증가추세를 보이고 있다 (Fig. 1).

분석결과에 의하면 대부분의 연구지역에서 기준 증발산의 변화정도는 도시화율의 정도에 따라서 어느 정도 상관관계를 보이는 것으로 판단된다. 기준 증발산량의 변화정도는 도시화율이 클수록 큰 변화를 보이는 것으로 판단된다. 도시화율이 큰 서울의 경우 2004년과 1975년 사이의 기준 증발산량의 차가 54.9 mm, 인천의 경우 21.2 mm, 수원의 경우 128.2 mm, 청주의 경우 106.5 mm, 대전의 경우 68 mm, 포항의 경우 83.7 mm, 대구의 경우 71.3 mm, 전주의 경우 122.3 mm, 울산의 경우 165.6 mm, 광주의 경우 85.9 mm, 부산의 경우 18.9 mm, 목포의 경우 52 mm, 여수의 경우 87.7 mm, 제주의 경우 78.1 mm 그리고 서귀포의 경우 163.9 mm 등으로 나타났다. 반면에 도시규모가 작은 지역의 경우 도시화가 진행됨에 따라서 대부분 기준 증발산량 증가율이 작거나 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다.

도시화율이 큰 지역의 경우 기준 증발산량의 규모도 도시화율이 작은 지역보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 도시화율이 큰 포항지역(도시화율 12.79), 대구지역(도시화율 20.04), 울산지역(도시화율 11.37), 광주지역(도시화율 18.24), 부산지역(도시화율 22.8), 목포지역(도시화율 14.77), 여수지역(도시화율 11.81), 제주지역(도시화율 18.88), 서귀포지역(도시화율 10.94) 그리고 성산포지역(도시화율 10.87) 등에서 2004년 기준 증발산량이 1000 mm를 초과하였으며, 그 이외에 서울(도시화율 23.6), 인천(도시화율 35.5), 수원(도시화율 19.57), 청주(도시화율 8.67), 대전(도시화율 9.6) 등에서도 2004년

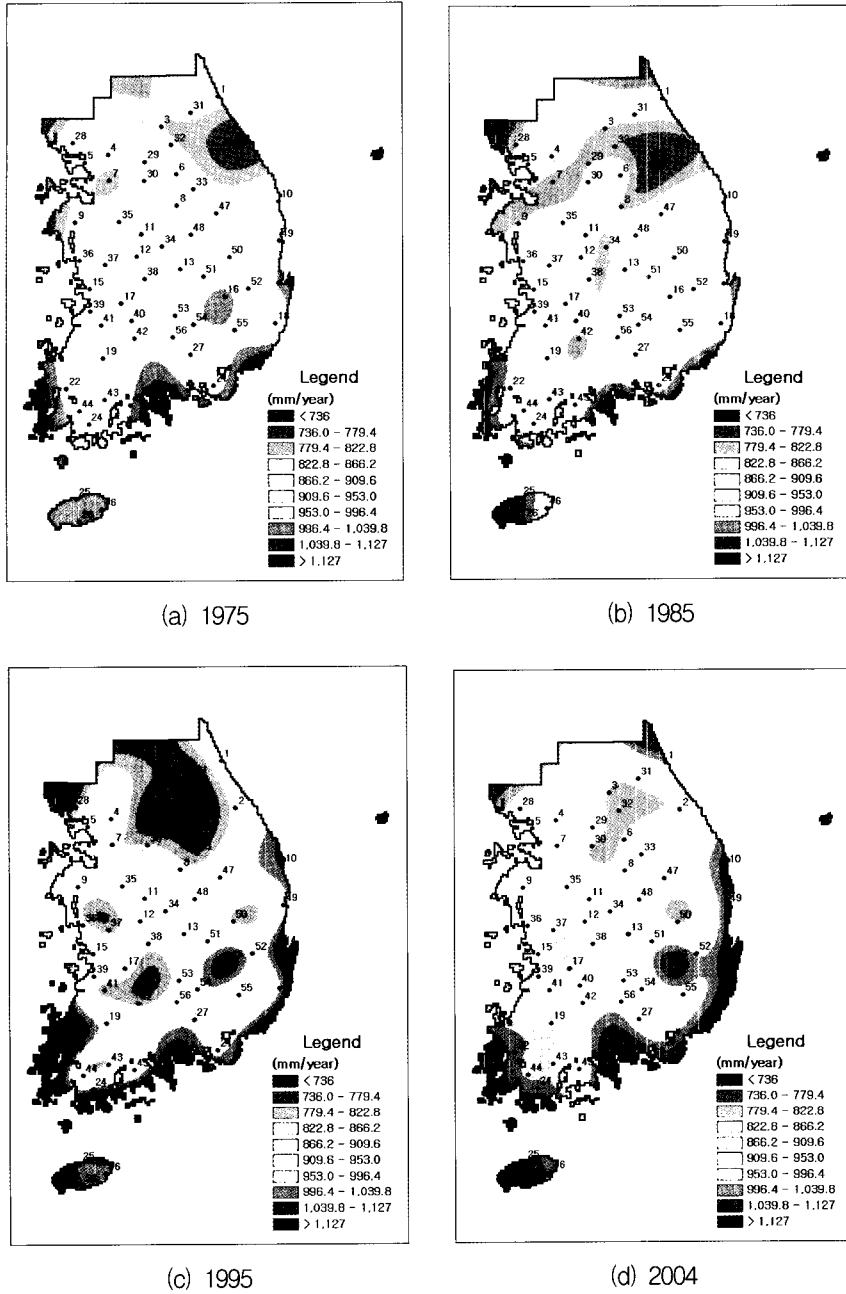


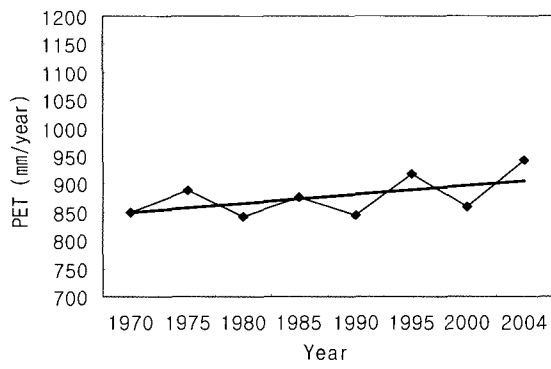
Fig. 1. Geographical Distribution of Reference Evapotranspiration

기준 증발산량이 900 mm를 초과하여 그 이외의 도시화가 덜된 지역과 비교하여 상대적으로 큰 기준 증발산량을 보여주었다. 이들 도시화율이 큰 지역들이 대부분 대도시인 점을 고려할 때 기준 증발산량은 지역의 도시 규모와도 상관이 있는 것으로 판단된다.

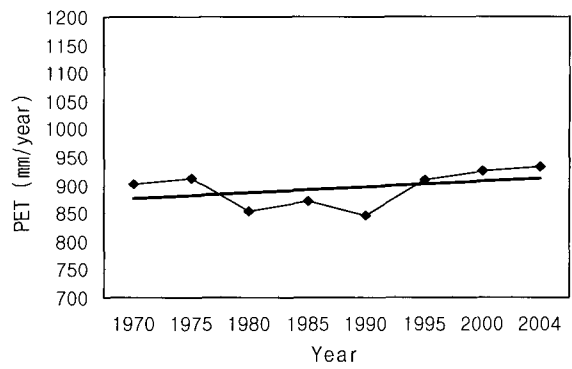
Fig. 2는 도시화율이 상대적으로 큰 도시에서의 1970년부터 2004년까지 기준증발산량의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 모든 지역에서 2004년과 1975년을 비교하였을 때 기준증발산량의 증가를 보여주고 있다. 특히 포항지역이 가장 큰 221 mm

의 차이를 보였으며, 제주의 경우 217 mm의 차이를 보이고 있다.

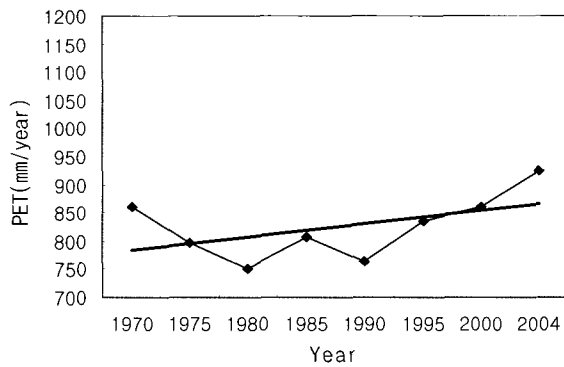
도시와 도시간의 기준 증발산량 상관성을 파악하기 위하여 Spearman 순위상관분석을 실시하였다. 분석 결과에 의하면 지역적으로 가까운 도시간의 상관계수가 그렇지 않은 도시에 비해서 비교적 높은 것으로 나타났다. 포항지역과 대구지역의 경우 상관계수가 0.905로 가장 높은 상관을 보여주었고, 대구지역과 수원지역의 경우 상관계수가 0.143으로 가장 낮은 상관계수를 보여주었다.



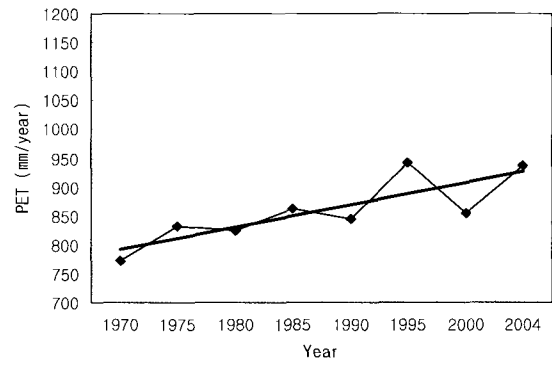
(a) Seoul



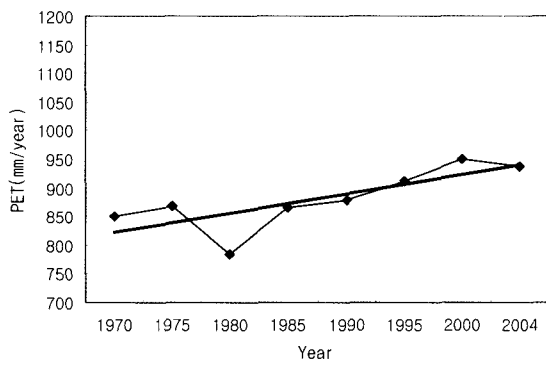
(b) Incheon



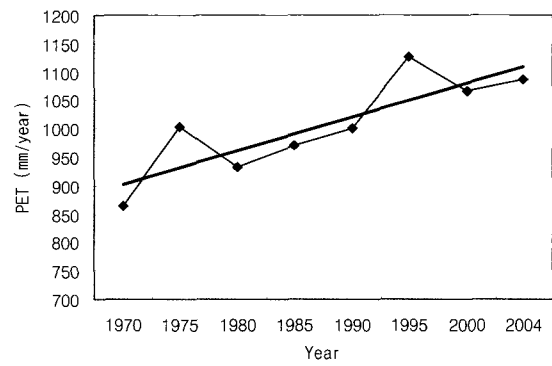
(c) Suwon



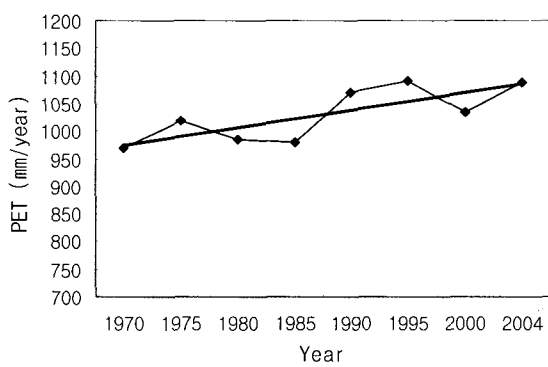
(d) Cheongju



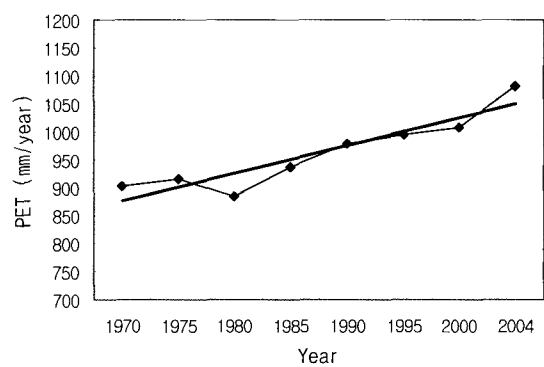
(e) Daejeon



(f) Pohang

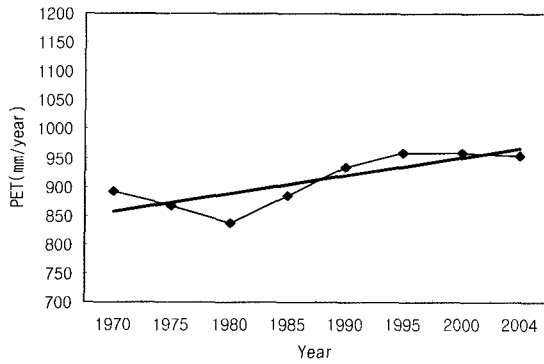


(g) Daegu

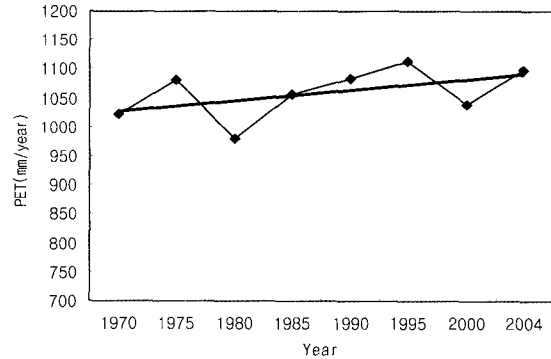


(h) Ulsan

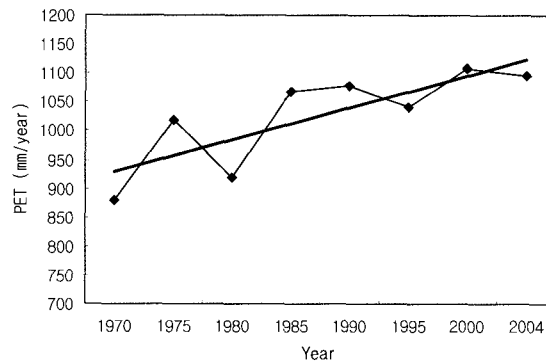
Fig. 2. Variation of FAO Penman-Monteith Reference Evapotranspiration



(i) Kwangju



(j) Busan



(k) Cheju

Fig. 2. Variation of FAO Penman–Monteith Reference Evapotranspiration (continued)

Table 1. Trend of FAO Penman–Monteith Reference Evapotranspiration According to Urbanization

Study Location	Spearman rank test				Linear regression analysis($\alpha=0.05$)			
	N	α	ρ	Trend	sl	r	F	SRE
Seoul	8	0.1	0.476	↑ (NS)	1.659	0.543	2.515	↑ (NS)
Incheon	8	0.1	0.476	↑ (NS)	1.014	0.371	0.955	↑ (NS)
Suwon	8	0.1	0.381	↑ (NS)	2.305	0.483	1.824	↑ (NS)
Cheongju	8	0.025	0.810	↑ (S)	3.889	0.822	12.537	↑ (S)
Daejeon	8	0.01	0.857	↑ (S)	3.401	0.788	9.172	↑ (S)
Pohang	8	0.025	0.786	↑ (S)	6.019	0.848	15.422	↑ (S)
Daegu	8	0.025	0.786	↑ (S)	3.200	0.776	9.108	↑ (S)
Ulsan	8	0.01	0.929	↑ (S)	4.982	0.922	34.008	↑ (S)
Kwangju	8	0.025	0.762	↑ (S)	3.177	0.810	11.416	↑ (S)
Busan	8	0.1	0.571	↑ (S)	1.833	0.499	1.984	↑ (NS)
Cheju	8	0.01	0.881	↑ (S)	5.691	0.818	12.178	↑ (S)

N: Number of data pairs; α : Level of significance; ρ : Spearman rank correlation coefficient; sl: Slope of the linear regression; r: Correlation coefficient; SRE: Significance of Regression Equation; S: Significant; NS: Not Significant; ↑: Increase; ↓: Decrease

Spearman 순위상관분석과 선형회귀분석을 이용하여 각 도시별 기준 증발산량의 변화추이를 알아보았다 (Table 1). 11개 지역에서 모두 도시화에 따른 기준 증

발산량의 증가추세를 보이고 있다. 서울, 인천 그리고 수원을 제외하고 다른 9개 지역(청주, 대전, 포항, 대구, 울산, 광주, 부산, 제주, 전주지역)에서 유의수준 $\alpha=0.1$

이상에서 유의한 증가추세를 보이고 있다. 특히 대전, 울산, 제주지역의 경우 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의한 증가추세를 보여 도시화에 따른 증가추세가 뚜렷한 것으로 나타났다.

3.2 도시화, 지리 및 지형조건에 따른 에너지항 및 공기동력항 변화

56개 연구지역에서 기준 증발산량 대비 에너지항과 공기동력항의 비율을 분석한 결과 춘천, 인천, 군산, 부산 그리고 양평지역을 제외하고는 모두 에너지항의 감소와 공기동력항의 증가 추세를 보이고 있다. 에너지항은 태양복사량과 기온과 밀접한 관계를 가지고 있고, 공기동력항은 습도와 풍속과 밀접한 연관을 가지고 있다. 분석결과에 의하면 기준 증발산량의 변화는 도시화가 진행됨에 따라서 도시지역 내 열섬현상에 따른 기온 상승과 도시지역의 주거지면적 증가에 따른 습도의 감소 영향 그리고 풍속의 감소에 따른 것으로 보이며, 특히 습도의 감소가 기준 증발산량에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 도시지역의 태양복사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다.

56개 연구지역에서 2004년도 기준 증발산량 대비 에너지항의 비율(에너지항/기준 증발산량)을 비교한 결과 도시화가 덜 이루어진 지역에서 비교적 큰 값을 보이고 있고, 도시화가 비교적 많이 이루어진 지역에서 비교적

작은 값을 보이고 있다. 반면에 기준 증발산 대비 공기동력항의 비율(공기동력항/기준 증발산량)의 경우는 도시화가 덜 이루어진 지역에서 비교적 작은 값을 보이고 있고, 도시화가 비교적 많이 이루어진 지역에서 비교적 큰 값을 보이고 있다. 이는 기준 증발산량과 에너지항의 경우 도시화가 많이 이루어진 지역에서는 그렇지 않은 지역과 비교하여 기준 증발산량이 큰 반면 에너지항이 비교적 작은 값을 보이기 때문이다. 또한 공기동력항의 경우 도시화가 많이 이루어진 지역에서는 그렇지 않은 지역과 비교하여 기준 증발산량과 공기동력항이 비교적 큰 값을 보이기 때문이다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 도시화에 따른 상대습도의 감소와 태양복사량의 감소 그리고 풍속의 감소가 주 원인인 것으로 판단된다. 따라서 도시화가 이루어질수록 태양복사량의 감소에 따라서 에너지항의 영향력이 감소하고, 반대로 습도는 감소하여 공기동력항의 영향은 증가하는 것으로 판단된다. 11개 지역에 대해서 각 도시별 기준 증발산량에 대한 에너지항비(energy term/ ET_0)와 기준 증발산량에 대한 공기동력항비(aerodynamic term/ ET_0)에 대한 변화추이를 알아보았다. (energy term/ ET_0)의 경우 인천과 부산을 제외하고 나머지 9개 지역에서 감소 추세를 보이고 있고, (aerodynamic term/ ET_0)의 경우 그 반대의 경향을 보이고 있다. 특히 수원, 청주, 대전, 울산지역에서 그 변화가 큰 것으로 나타났다 (Table 2).

56개 지역에 대하여 상관분석을 이용하여 2004년도 기준 증발산량과 에너지항의 상관성분석을 실시한 결과

Table 2. Trend of (Energy Term/ ET_0) and (Aerodynamic Term/ ET_0) According to Urbanization (Linear Regression Analysis, $\alpha=0.05$)

Study Location	Energy term/ ET_0					Aerodynamic term/ ET_0			
	N	sl	r	F	SRE	sl	r	F	SRE
Seoul	8	-0.001	0.495	1.949	↓ (NS)	0.001	0.495	1.949	↑ (NS)
Incheon	8	0.001	0.480	1.794	↑ (NS)	-0.001	0.480	1.794	↓ (NS)
Suwon	8	-0.004	0.837	14.066	↓ (S)	0.004	0.837	14.066	↑ (S)
Cheongju	8	-0.003	0.768	8.626	↓ (S)	0.003	0.768	8.626	↑ (S)
Daejeon	8	-0.003	0.714	6.255	↓ (S)	0.003	0.714	6.255	↑ (S)
Pohang	8	-0.002	0.541	2.486	↓ (NS)	0.002	0.541	2.486	↑ (NS)
Daegu	8	-0.001	0.328	0.722	↓ (NS)	0.001	0.328	0.722	↑ (NS)
Ulsan	8	-0.003	0.845	15.012	↓ (S)	0.003	0.845	15.012	↑ (S)
Kwangju	8	-0.002	0.609	3.540	↓ (NS)	0.002	0.609	3.540	↑ (NS)
Busan	8	0.001	0.330	0.731	↑ (NS)	-0.001	0.330	0.731	↓ (NS)
Cheju	8	-0.001	0.424	1.317	↓ (NS)	0.001	0.424	1.317	↑ (NS)

N: Number of data pairs; α : Level of significance; sl: Slope of the linear regression; r: Correlation coefficient; SRE: Significance of Regression Equation; S: Significant; NS: Not Significant; ↑: Increase; ↓: Decrease

상관계수가 -0.110을 보이고 있고, 기준 증발산량과 공기동력항과는 상관계수가 0.882($p=0.000$)이고 상관계수는 0.01(양쪽)에서 유의한 것으로 나타났다. 따라서 56개 지역에서 기준 증발산량과 에너지항간에는 미미한 상관관계를 가지고 있으나 기준 증발산량과 공기동력항간에는 매우 높은 상관성이 있는 것으로 판단된다.

연구지역의 지리 및 지형조건이 공기동력항 및 에너지항에 미치는 영향을 분석하기 위하여 56개 연구지역에 대해서 2004년도 해안근접성, 수역의 유무 그리고 지형특성과 공기동력항 및 에너지항과의 상관성을 검토하였다. 2004년도 공기동력항과 해수면적과는 상관계수가 0.680이고 유의수준 0.01에서 유의한 것으로 나타났으며, 2000년 도시화율을 통제변수로 적용하는 경우 상관계수는 0.656으로 나타났다. 하지만 2004년 공기동력항과 평지면적, 5 % 경사분포 (경사도 5도 이하) 그리고 평균고도와는 각각 -0.150, -0.122 그리고 -0.235를 보이고 있고, 2000년 도시화를 통제변수로 설정하는 경우 상관계수는 각각 -0.329, -0.363 그리고 -0.089로 나타났다.

2004년도 에너지항과 해수면적과는 상관계수가 -0.259이고, 2000년 도시화율을 통제변수로 적용하는 경우 상관계수는 -0.195로 나타났다. 또한 2004년 에너지항과 평지면적, 5 % 경사분포 그리고 평균고도와는 각각 -0.233, 0.086 그리고 -0.048을 보이고 있고, 2000년 도시화를 통제변수로 설정하는 경우 상관계수는 각각 -0.141, 0.268 그리고 -0.203 으로 나타났다. 따라서

해안근접성, 수역의 유무 그리고 지형특성과 공기동력항 및 에너지항과의 상관성을 검토한 결과에 의하면 공기동력항은 해안근접성과 유의한 상관관계를 보이고 있고, 그 이외의 지리 및 지형조건은 공기동력항이나 에너지항과 큰 상관성을 보이지 않고 있다.

Spearman 순위상관분석과 선형회귀분석을 이용하여 도시화가 많이 이루어진 11개 지역에 대해서 각 도시별 에너지항과 공기동력항의 변화추이를 알아보았다 (Tables 3~4). 11개 도시지역에서 에너지항의 경우 서울, 수원, 대전을 제외한 8개 지역에서 에너지항의 증가추세를 보이고 있으며, 특히 인천, 포항, 제주 등에서는 유의수준 $\alpha=0.05$ 이상에서 유의한 증가추세를 보이고 있다. 공기동력항의 경우 인천을 제외한 10개 지역(서울, 수원, 청주, 대전, 포항, 대구, 울산, 광주, 부산, 제주)에서 증가추세를 보이고 있다. 증가추세를 보이는 10개 지역 중 7개 지역(수원, 청주, 대전, 포항, 울산, 광주, 제주)에서 유의수준 $\alpha=0.05$ 이상에서 유의한 증가추세를 보이고 있다.

도시간에 에너지항과 공기동력항의 상관분석을 위하여 Spearman 순위상관분석을 실시한 결과 에너지항의 경우 동일 지역간에 더 높은 상관성을 보이는 경향이 있으나, 공기동력항의 경우 지역간의 거리가 미미한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는 에너지항의 경우 지역적으로 차이를 보이는 태양복사량과 기온에 직접적인 영향을 받으나, 공기동력항의 지역적인 영향에 덜 민감한 습도 및 풍속에 영향을 받기 때문으로 사료된다.

Table 3. Trend of Energy Term of FAO P-M Reference Evapotranspiration According to Urbanization

Study Location	Spearman rank test				Linear regression analysis($\alpha=0.05$)			
	N	α	ρ	Trend	sl	r	F	SRE
Seoul	8	0.1	-0.071	↓ (NS)	0.085	0.042	0.011	↑ (NS)
Incheon	8	0.025	0.810	↑ (S)	1.783	0.725	6.631	↑ (S)
Suwon	8	0.1	-0.524	↓ (S)	-1.775	0.647	4.309	↓ (NS)
Cheongju	8	0.1	0.214	↑ (NS)	0.289	0.146	0.131	↑ (NS)
Daejeon	8	0.1	-0.214	↓ (NS)	-0.614	0.213	0.284	↓ (NS)
Pohang	8	0.05	0.643	↑ (S)	1.955	0.758	8.086	↑ (S)
Daegu	8	0.1	0.548	↑ (S)	1.308	0.639	4.150	↑ (NS)
Ulsan	8	0.1	0.310	↑ (NS)	0.663	0.355	0.868	↑ (NS)
Kwangju	8	0.1	0.143	↑ (NS)	0.150	0.068	0.028	↑ (NS)
Busan	8	0.1	0.405	↑ (NS)	1.741	0.536	2.417	↑ (NS)
Cheju	8	0.025	0.786	↑ (S)	2.477	0.698	5.686	↑ (NS)

N: Number of data pairs; α : Level of significance; ρ : Spearman rank correlation coefficient; sl: Slope of the linear regression; r: Correlation coefficient; SRE: Significance of Regression Equation; S: Significant; NS: Not Significant; ↑: Increase; ↓: Decrease

Table 4. Trend of Aerodynamic Term of FAO P-M Reference Evapotranspiration According to Urbanization

Study Location	Spearman rank test				Linear regression analysis($\alpha=0.05$)			
	N	α	ρ	Trend	sl	r	F	SRE
Seoul	8	0.1	0.595	↑ (S)	1.577	0.606	3.479	↑ (NS)
Incheon	8	0.1	-0.095	↓ (NS)	-0.767	0.273	0.483	↓ (NS)
Suwon	8	0.05	0.690	↑ (S)	4.079	0.789	9.866	↑ (S)
Cheongju	8	0.01	0.881	↑ (S)	3.601	0.804	10.941	↑ (S)
Daejeon	8	0.025	0.810	↑ (S)	4.014	0.757	8.070	↑ (S)
Pohang	8	0.05	0.690	↑ (S)	4.065	0.723	6.584	↑ (S)
Daegu	8	0.1	0.571	↑ (S)	1.892	0.615	3.641	↑ (NS)
Ulsan	8	0.01	0.881	↑ (S)	4.317	0.907	27.805	↑ (S)
Kwangju	8	0.05	0.714	↑ (S)	3.025	0.697	5.655	↑ (NS)
Busan	8	0.1	0.095	↑ (NS)	0.092	0.036	0.008	↑ (NS)
Cheju	8	0.05	0.690	↑ (S)	3.213	0.689	5.411	↑ (NS)

N: Number of data pairs; α : Level of significance; ρ : Spearman rank correlation coefficient; sl: Slope of the linear regression; r: Correlation coefficient; SRE: Significance of Regression Equation; S: Significant; NS: Not Significant; ↑: Increase; ↓: Decrease

3.3 지리 및 지형적 특성에 따른 FAO Penman-Monteith 기준증발산 변화

연구지역의 지리 및 지형조건이 기준 증발산량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 56개 지역에 대해서 연구지역의 해안근접성, 수역의 유무 그리고 지형특성에 따른 기준 증발산량의 차이를 비교하였다. 해안근접성이 기준 증발산량의 변화에 미치는 영향을 분석한 결과 해안지역으로 분류된 속초 등 18개 지역들의 1975년 기준 증발산량은 속초지역 865.1 mm에서 부산지역 1080.6 mm정도이고, 2004년 기준 증발산량은 부산지역 870.2 mm에서 여수지역 1171.3 mm까지 분포하고 있다. 56개 지역에 대해서 1975년과 2004년의 기준 증발산량의 차이와 2004년 해수면적과의 상관성분석을 수행한 결과 상관계수는 -0.350 ($P=0.008$)으로서 육지면적이 증가함에 따라서 기준 증발산량은 감소하는 결과를 보여주었고, 상관계수는 0.01 유의수준(양쪽)에서 유의한 것으로 나타났으며, 2004년 해수면적과의 상관계수는 0.350으로 상관계수는 유의수준 0.01(양쪽)에서 유의한 것으로 나타났다. 또한 2000년 도시화율을 통제변수로 설정하고 2004년 해수면적과 기준 증발산량 변화(2004-1975)간의 상관분석 결과 상관계수는 0.318($P=0.018$)로 나타났다. 2004년 해수면적과 2004년 기준 증발산량과의 상관성을 분석한 결과 상관계수는 0.672($P=0.000$)로서 유의수준 0.01에서 유의한 것으로 나타났다. 또한 2000년 도시화율을 통제변수로 설정하고 2004년 해수면적과 2004년 기준 증발산량간의 상관분석 결과 상관계수는 0.647

($P=0.000$)로 나타났다. 따라서 해안근접성이 있는 지역일수록 기준 증발산량을 증가시키는데 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

연구지역 지형조건(산악 혹은 평야)이 기준 증발산량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상관분석을 이용하여 기준 증발산량 변화(2004-1975)와 2004년 평지면적, 경사분포(경사도 5도 이하) 그리고 평균고도와의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수는 각각 -0.200, -0.120, -0.016으로 나타났다. 또한 2000년 도시화율을 통제변수로 설정하고 기준 증발산량 변화(2004-1975)와 2004년 평지면적, 경사분포, 그리고 평균고도와의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수가 -0.287, -0.234 그리고 0.069를 보이고 있다. 2004년 기준 증발산량과 2004년 평지면적, 경사분포, 평균고도와의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수가 평지면적과는 상관계수가 -0.314 ($p=0.019$)이고 상관계수는 0.05수준(양쪽)에서 유의한 것으로 나타났고, 경사분포와는 상관계수가 -0.098, 그리고 평균고도와는 -0.310($p=0.02$)이고 상관계수는 0.05수준(양쪽)에서 유의한 것으로 나타났다. 또한 2000년 도시화율을 통제변수로 설정하고 2004년 기준 증발산량과 2004년 평지면적, 경사분포, 그리고 평균고도와의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수가 -0.460, -0.268 그리고 -0.218을 보이고 있다.

연구지역 인근에 위치한 저수지나 하천 습지 등과 같은 수역의 유무가 기준 증발산량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석을 위하여 수역의 면적비가 5% 이상인

춘천, 서울, 인천, 충주, 군산, 부산, 목포, 완도, 부안, 해남지역 등 10개 지역의 기준 증발산량을 검토하였다. 1975년 기준 증발산량이 춘천의 경우 825.6 mm, 부산이 1080.6 mm 정도이고, 2004년 기준 증발산량은 춘천의 경우 821.6 mm에서 부산의 경우 1099.5 mm 정도를 보이고 있다. 상관분석을 이용하여 기준 증발산량 변화(2004-1975)와 2000년 수역면적과의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수가 -0.188를 보여 아주 미미한 역 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 2004년 기준 증발산량과 2000년 수역면적과의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수는 -0.167을 보이고 있다. 2000년 도시화율을 통제변수로 설정하고 기준 증발산량 변화(2004-1975)와 2000년 수역면적과의 상관성분석을 실시한 결과 기준 증발산량변화와 수역 사이에는 상관계수가 -0.265를 보이고 있다. 또한 2000년 도시화율을 통제변수로 설정하고 2004년 기준 증발산량과 2000년 수역과의 상관성분석을 실시한 결과 기준 증발산량변화와 수역 사이에는 상관계수가 -0.284를 보이고 있다. 따라서 56개 연구지역의 해안근접성, 수역(lake and wet land)의 유무 그리고 지형특성이 reference evapotranspiration에 미치는 영향을 분석한 결과 주로 해안근접성이 가장 큰 요인인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 지형 및 지리적 조건이 도시화과정과 함께 수문기후변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FAO Penman-Monteith 기준증발산량을 산정하고, 에너지항 및 공기동력항이 FAO Penman-Monteith 기준 증발산량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과에 의하면 대부분의 연구지역에서 기준 증발산의 변화정도는 도시화율의 정도에 따라서 상관관계를 보이는 것으로 판단된다. 기준 증발산량의 변화정도는 도시화율이 클수록 큰 변화를 보이는 것으로 판단된다.

분석결과에 의하면 기준 증발산량의 변화는 도시화가 진행됨에 따라서 도시지역 내 열섬현상에 따른 기온상승과 도시지역의 주거지면적 증가에 따른 습도의 감소영향 그리고 풍속의 감소에 따른 것으로 보이며, 특히 습도의 감소가 기준 증발산량에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 도시지역 내의 태양복사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다. 또한 연구지역의 지리 및 지형조건이 기준 증발산량에 미치는 영향을 분석한 결과 56개 연구지역의 기준 증발산량에 미치는 요인은 주로 도시화에 따른 기

후변화와 해안 근접성인 것으로 판단된다. 또한 해안근접성, 수역의 유무 그리고 지형특성과 공기동력항 및 에너지항과의 상관성을 검토한 결과에 의하면 공기동력항은 해안근접성과 유의한 상관관계를 보이고 있고, 그 이외의 지리 및 지형조건은 공기동력항이나 에너지항과 큰 상관성을 보이지 않고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고 문헌

- 김광섭, 황보정도 (2005). "남한지역 기온 변화의 연 추세 및 월 추세 분석." 2005년 한국수자원학회 학술 발표회 논문집, 한국수자원학회.
- Alkeed, O., Flores, C., Jinno, K., Tsutsumi, A. (2006). "Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshama 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.
- Andersen, C.T., Foster, I.D.L. and Pratt, C.J. (1999). "The role of urban surface (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment." *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 597-609.
- 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.
- Chow, S.D. (1992). "The urban climate of Shanghai." *Atmospheric Environment*, Vol. 26B, No. 1, pp.

- 9-15.
- Christen, A. and Vogt, R. (2004). "Energy and radiation balance of a central European city." *Int. J. of Climatology*, Vol. 24, pp. 1395-1421.
- Englehart, P.J. and Douglas, A.V. (2003). "Urbanization and seasonal temperature trends: Observational evidence from a data-sparse part of North America." *Int. J. of Climatology*, Vol. 23, pp. 1253-1263.
- 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. 329, pp. 620-629.
- Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R. (1998). "Urban evapotranspiration rates." American Meteorological Society, 2nd Urban Environment Symposium. 247-250.
- Ichinose, T., Shimodozono, K. and Hanaki, K. (1999). "Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo." *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3897-3909.
- Jonsson, Per (2004). "Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone, Botswana." *Int. J. of Climatology*, Vol. 24, pp. 1307-1322.
- Monteith, J. L. (1964). "Evaporation and environment." *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. XIX, pp. 205-234.
- Penman, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp.120-146.
- Ragab, R., Rosier, P., Dixon, A., Bromley, J. and Cooper, J.D. (2003). "Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation." *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 2423-2437.
- Sailor, D.J. (1994). "Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, pp. 1694-1704.
- Shashua-Bar, L. and Hoffman, M.E. (2000). "Vegetation as a climatic component in the design of an urban street, An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees." *Energy and Buildings*, Vol. 31, pp. 221-235.
- Unger, J. (1999). "Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary." *Int. J. of Climatology*, Vol. 19, pp. 1509-1515.
- Wilmers, F. (1990/91). "Effects of vegetation on urban climate and buildings." *Energy and Buildings*, Vols. 15-16, pp. 507-514.
- Yague, C., Zurita, E. and Martinez, A. (1991). "Statistical analysis of the Madrid urban heat island." *Atmospheric Environment*, Vol. 25B, No. 3, pp. 327-332.

(논문번호:07-33/접수:2007.04.04/심사완료:2007.07.16)