

도시화에 따른 수문기상변화 II (도시화가 기준 잠재증발산량에 미치는 영향)

Urbanization Effects on Reference Evapotranspiration

임창수*
Chang-Soo Rim

요 지

본 연구에서는 도시화와 지형 및 지리조건에 따른 기상변화가 FAO Penman-Monteith 기준 잠재증발산량에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 또한 기상변화가 FAO Penman-Monteith 기준 잠재증발산량공식의 에너지항 및 공기동력항에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 위하여 적용된 연구지역은 서울을 비롯한 56개 수문기상 관측지점으로써 도시화과정을 분석하기 위하여 반경 10 km를 중심으로 314 km^2 에 해당하는 면적을 연구지역으로 설정하였다. 연구 지역의 도시화정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였다. 분석결과에 의하면 대부분의 연구지역에서 잠재증발산의 변화정도는 도시화율의 정도에 따라서 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 잠재증발산량의 변화정도는 도시화율이 클수록 큰 변화를 보이고 있다. 분석결과에 의하면 잠재증발산량의 변화는 도시화가 진행됨에 따라서 도시지역 내 열섬현상에 따른 기온상승과 도시지역의 주거지면적 증가에 따른 습도의 감소영향 그리고 풍속의 감소에 따른 것으로 보이며, 특히 습도의 감소가 잠재증발산량에 가장 크게 영향을 미치고 있다. 또한 도시지역 내의 일사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다. 또한 연구지역의 지리 및 지형조건이 잠재증발산량에 미치는 영향을 분석한 결과 56개 연구지역의 잠재증발산량에 미치는 요인은 주로 도시화에 따른 기상변화와 해안 근접성인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 도시화, 기준증발산, 기후변화

1. 서 론

도시지역은 농촌 및 산림지역과 비교하여 수문 기상학적측면에서 상이한 특성을 가지고 있으며 이러한 상이한 특성은 지역 내 에너지수지 및 물수지에 상당한 영향을 미친다. 따라서 농촌 및 산림지역이 도시화되면서 발생하는 기상학적 변화가 증발산에 미치는 변화를 분석 파악하는 것은 필요하다. 본 연구에서는 도시화에 따른 기상변화가 Penman-Monteith 증발산량에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

도시화가 진행됨에 따라서 도시화에 따른 도시지역에서의 수문기상학적 변화에 대한 많은 연구가 수행된 바 있다. 과거 수행된 연구 결과들은 일부 제한된 지역의 관측자료를 이용하여 도시화에 따른 국지적인 기상변화와 그에 따른 잠재증발산량의 변화나 강우량의 변화 등과 같은 수문학적 변화에 대하여 연구를 수행하였다. 또한 도시화에 따른 기후변화에 대한 연구가 전 세계에서 많은 연구자들에 의해서 수행되었으며 그들은 도시화가 도시기온을 상승시킨다고 보고한 바 있다 (Chow, 1992; 김광섭 등, 2005). 또한 도시화는 풍속과 상대습도를 감소시키고 그리고 암개일수와 일조시간도 감소시키는 것으로 나타났다 (Chow, 1992). 하지만 도시화에 따른 수문기상학적 변화는 다른 지형 및 지리적 조건과도 밀접한 연관성을 가지고 있다. 따라서 도시화가 수문기상에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 이들 지형 및 지리적조건도 동시에 고려되어야 한다. 이러한 지형 및 지리적 조건이 도시화과정과 함께 수문기상변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FAO Penman-Monteith 잠재증발산량을 산정하고, 지형 및 지리적 조건과 도시화에 따라서 에너지항 및 공기동력항이 잠재증발산량에 미치는 영향을 분석하였다.

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

2. 연구 지역

2.1 연구지역 선정

연구 지역을 선정하기 위하여 수문기상자료의 가용성을 검증하고, 검증된 결과를 바탕으로 기상관측지점을 중심으로 반경 10km 범위에서 56곳의 연구 지역을 선정하였다. 연구 지역을 선정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 수문기상자료 관측지점의 도시화 정도가 증발산에 미치는 영향을 판단하기 위하여 전체 면적에 대한 주거지 면적 비를 이용하여 도시화 정도를 구분하였다. 둘째, 해안파의 근접성이 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, 호수 등에 고르게 분포하여 도시화에 따른 수문기상변화를 분석하는데 적절하리라 판단된다.

2.2 수문기상 자료

본 연구를 위하여 수집 분석될 자료는 강수, 기온, 풍속, 습도, 운도, 일조시간, 증발량자료 등이며, 전국 56개 기상관측지점 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.

전국 56개 지점에서 관측되는 수문기상 관측자료를 수집하여 도시화에 따른 기상요소 변화를 분석하였고 특히 도시화가 상당히 진행된 대도시지역을 중심으로 분석하였다. 기온자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 기온은 증가추세를 보이고 있는 것으로 판단된다. 기온은 대구지역이 전반적으로 가장 높고, 인천과 수원지역이 비교적 낮은 기온을 보이고 있다. 따라서 이러한 기온의 증가추세는 FAO Penman-Monteith식에서 에너지항을 증가시켜 잠재증발산량을 증가시키는 영향을 미친다. 강수자료를 검토한 결과 대부분의 지역에서 그 정도는 미약하지만 도시화 정도에 따라 강수량의 증가추세를 보이고 있다.

풍속자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 풍속의 감소추세를 보이고 있으며 감소추세는 인천지역이 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 이러한 풍속의 감소추세는 FAO Penman-Monteith식에서 공기동력항을 감소시켜 잠재증발산량을 감소시키는 영향을 미친다. 상대습도 자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 현격한 상대습도의 감소추세를 보이고 있다. 따라서 이러한 현격한 상대습도의 감소추세는 FAO Penman-Monteith식에서 공기동력항을 증가시켜 잠재증발산량을 증가에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

일조시간 자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 일조시간의 감소추세를 보이고 있다. 따라서 이러한 일조시간의 감소추세는 FAO Penman-Monteith 식에서 에너지항에 영향을 미쳐 잠재증발산량을 감소시키는 영향을 미친다. 운량 자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 일조시간의 감소추세를 보이고 있고, 일조시간이 감소함에 따라서 운량은 증가하여야 하나 이는 도시화가 진행됨에 따라서 대기오염으로 인한 운량관측에 영향을 미쳐 발생되는 것으로 판단된다. Gong 등 (2006)이 중국 Changjiang 유역에서 수행한 연구에 의하면 Penman-Monteith식의 경우 상대습도가 가장 민감한 것으로 나타났으며, 일사량, 대기온도 그리고 풍속이 뒤를 이었다.

2.3 연구 지역 분류

56개 기상관측지점을 중심으로 반경 10km 범위에서 연구 지역을 선정하였다. 연구 지역의 도시화정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였다. 56개 지역에 대해서 GIS분석을 이용하여 토지이용조건과 지역평균고도자료 등을 분석한 결과를 바탕으로 연구지역을 분류하였다. 도시화율을 산정하기 위하여 반경 10km 이내에 위치한 주거지역의 면적을 육지면적으로 나눈 값을 도시화율로 결정하였다. 도시화정도를 판단하기 위하여 1975년도 도시화율과 2000년도의 도시화율의 차이를 도시화 정도의 기준으로 적용하였다.

3. 수문기상 자료 수집 분석

전국 56개 지점에서 관측되는 수문기상 관측자료를 수집하여 도시화에 따른 기상요소 변화를 분석하였고 특히 도시화가 상당히 진행된 대도시지역을 중심으로 분석하였다. 수집된 자료를 바탕으로 본 연구의 궁극적 목표인 도시화에 따른 기상변화가 물수지에 미치는 영향 평가를 위하여 자료의 적절성을 분석하였다. 본 연구를 위하여 분석된 기상자료는 기온, 풍속, 습도, 운도, 일조시간 등이다.

4. 잠재증발산 변화 비교

4.1 도시화에 따른 잠재증발산 변화

연구 지역별 도시화에 따른 Penman-Monteith 잠재증발량의 변화와 잠재증발산량대비 에너지항과 공기동력항의 비율 및 정도를 비교 분석하였다. 또한 연구지역의 고도나 저수지, 하천과 같은 수역의 변화 그리고 해안에 근접한 지역의 경우 바다의 영향 등이 잠재증발산량에 미치는 영향도 분석하였다.

56개 연구지역중에서 도시화가 진행됨에 따라서 속초를 비롯한 33개 지역에서 잠재증발산량의 증가추세를 보이고 있고, 원주를 비롯한 13개 지역에서 잠재증발산량의 감소추세를 보이고 있다. 또한 춘천을 비롯한 10개 지역은 잠재증발산량 변화가 미미한 것으로 판단된다. 도시화정도가 8%이상인 16개 도시화지역에서 모두 잠재증발산량의 증가추세를 보이고 있다.

분석결과에 의하면 대부분의 연구지역에서 잠재증발산의 변화정도는 도시화율의 정도에 따라서 어느 정도 상관관계를 보이는 것으로 판단된다. 잠재증발산량의 변화정도는 도시화율이 클수록 큰 변화를 보이는 것으로 판단된다. 반면에 도시규모가 작은 지역의 경우 도시화가 진행됨에 따라서 대부분 잠재증발산량 증가율이 작거나 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면에 도시화율이 큰 지역의 경우 잠재증발산량의 규모도 도시화율이 작은 지역보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

도시와 도시간의 잠재증발산량 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 보여주었으며, 대구지역과 수원지역이 가장 낮은 상관을 보이고 있다.

Spearman 순위상관분석을 이용하여 각 도시별 잠재증발산량의 변화추이를 알아보았다. 12개 지역에서 모두 도시화에 따른 잠재증발산량의 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.

4.2 에너지항 및 공기동력항 변화

잠재증발산량 대비 에너지항과 공기동력항의 비율을 분석한 결과 춘천, 인천, 군산, 부산 그리고 양평지역을 제외하고는 모두 에너지항의 감소와 공기동력항의 증가 추세를 보이고 있다. 에너지항은 일사량, 기온 그리고 장파복사량과 밀접한 관계를 가지고 있고, 공기동력항은 습도 및 풍속과 밀접한 연관을 가지고 있다. 분석결과에 의하면 잠재증발산량의 변화는 도시화가 진행됨에 따라서 도시지역 내 열섬현상에 따른 기온상승과 도시지역의 주거지면적 증가에 따른 습도의 감소영향 그리고 풍속의 감소에 따른 것으로 보이며, 특히 습도의 감소가 잠재증발산량에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 도시지역 내의 일사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다.

2004년도 잠재증발산량 대비 에너지항의 비율을 비교한 결과 도시화가 덜 이루어진 지역에서 비교적 큰 값을 보이고 있고, 도시화가 비교적 많이 이루어진 지역에서 비교적 작은 값을 보이고 있다. 반면에 잠재증발산 대비 공기동력항의 비율의 경우는 도시화가 덜 이루어진 지역에서 비교적 작은 값을 보이고 있고, 도시화가 비교적 많이 이루어진 지역에서 비교적 큰 값을 보이고 있다. 도시화가 이루어질수록 일사량의 감소에 따라서 에너지항의 영향력이 감소하고, 반대로 습도는 감소하여 공기동력항의 영향은 증가하는 것으로 판단된다. 56개 지역에 대하여 상관분석을 이용하여 2004년도 잠재증발산량과 에너지항 그리고 잠재증발산량과 공기동력항의 상관성분석을 실시한 결과 상관계수가 각각 -0.110 과 0.882 를 보여 56개 지역에서 잠재증발산량과 에너지항간에는 미미한 상관관계를 가지고 있으나 잠재증발산량과 공기동력항간에는 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 잠재증발산량과 에너지항의 경우 도시화가 많이 이루어진 지역에서는 그렇지 않은 지역과 비교하여 잠재증발산량이 큰 반면 에너지항이 비교적 작은 값을 보이기 때문이다. 또한 공기동력항의 경우 도시화가 많이 이루어진 지역에서는 그렇지 않은 지역과 비교하여 잠재증발산량과 공기동력항이 비교적 큰 값을 보이기 때문이다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 도시화에 따른 상대습도의 감소와 일사량의 감소가 주 원인인 것으로 판단된다.

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 일사량과 기온에 직접적인 영향을 받으나, 공기동력항의 지역적인 영향에 덜 민감한 습도 및 풍속에 영향을 받기 때문으로 사료된다.

또한 Spearman 순위상관분석을 이용하여 각 도시별 에너지항과 공기동력항의 변화추이를 알아보았다. 11개 도시지역에서 에너지항의 경우 서울, 수원, 대전을 제외한 8개 지역에서 에너지항의 증가추세를 보이고 있으며, 특히 인천, 포항, 대구 등에서는 유의수준 $\alpha=0.05$ 이상에서 유의한 증가추세를 보이고 있다. 11개 도시지역에서 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.

4.3 지리적 특성 영향

연구지역의 지형조건이 잠재증발산량의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 56개 지역에 대해서 해안근접성, 수역의 유무 그리고 연구지역의 평균고도에 따른 잠재증발산량의 크기를 비교하였다. 56개 연구지역의 잠재증발산량에 미치는 요인은 주로 도시화에 따른 기상변화와 해안 근접성이 것으로 판단되며, 그 이외의 수역이나 지형조건이 잠재증발산량에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 따라서 실제증발산량에 미치는 영향 또한 도시화과정에서 발생되는 거주지역의 증가와 농경지 및 산림의 감소 그리고 도시화에 따른 기상변화에 의해서 영향을 받을 것으로 기대된다. 하지만 도시화에 따라서 잠재증발산량이 증가하는 추세임에도 불구하고, 도시화와 잠재증발산량간의 상관성은 그리 크지 않아 지상 기상관측소의 위치가 연구지역 중심부에 위치하여 있고 연구지역 중심이 대부분 도시지역이 형성되어 있어 도시화 정도가 증발산량 변화에 미치는 영향이 크게 반영되지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 도시화에 따른 기상변화가 FAO Penman-Monteith 기준증발산량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 또한 도시화가 수문기상에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 이들 지형 및 지리적조건도 동시에 고려하였다. 이러한 지형 및 지리적 조건이 도시화과정과 함께 수문기상변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FAO Penman-Monteith 기준증발산량을 산정하고, 에너지항 및 공기동력항이 FAO Penman-Monteith 기준증발산량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과에 의하면 잠재증발산량의 변화는 도시화가 진행됨에 따라서 도시지역 내 열섬 현상에 따른 기온상승과 도시지역의 주거지면적 증가에 따른 습도의 감소영향 그리고 풍속의 감소에 따른 것으로 보이며, 특히 습도의 감소가 잠재증발산량에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 도시지역 내의 일사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다. 또한 연구지역의 지리 및 지형조건이 잠재증발산량에 미치는 영향을 분석한 결과 56개 연구지역의 잠재증발산량에 미치는 요인은 주로 도시화에 따른 기상변화와 해안 근접성이 것으로 판단된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 김광섭 등 (2005). “도시화 등 환경변화에 따른 지역기후변화 특성 분석.” 한국수자원학회 학술발표회
2. Chow S.D. (1992). "The urban climate of Shanghai." Atmospheric Environment 26B(1), 9-15.
3. 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 320, 620-629.