

도시 토지이용변화에 따른 수문기상 변화 분석

An Analysis on the Variation of Hydrometeorology due to Land Use Change in Urban Area

안재현*
Ahn, Jae Hyun

요 지

본 연구에서는 도시화가 도시지역의 수문기상변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 토지이용의 변화로 인한 국지 수문기상의 변화를 모의하여 장기적인 변화 특성을 파악하여 이를 평가하고자 하였다. 이를 위해 도시화로 인한 우리나라 강우의 변화 특성을 파악하고자 하였으며, 도시화와 기후변화로 인한 수문환경의 변화를 반영한 대안의 수립 및 설계방안을 제시하였다.

특히, 본 연구에서는 도시화에 따른 수문기상변화의 예측 가능한 모형을 개발하여 다양한 상황에 대한 모의를 실시하고자 하였다. 이를 위해 도시화의 영향 정도를 시공간적으로 정량화 할 수 있는 모형을 개발하고 서울지역에 직접 적용 및 평가하였으며, 이를 통해 도시화로 인한 기상수문학적인 인자의 시공간적 영향을 분석 및 일반화하고, 도시화에 따른 기상수문학적 영향을 최소화할 수 있는 방안을 검토하고자 하였다.

서울 지역 장기 관측자료에 대한 분석을 통해 도시화의 진전에 따라 기온, 습도, 강수량이 증가하며, 일조시간 및 잠재증발량은 감소함을 알 수 있었다. 이는 도시화와 기후변화로 인해 기온이 증가하고 도시화의 특성에 따라 습도 증가 및 일조시간과 잠재증발량의 감소가 나타나며, 이것이 큰 폭의 강수량 증가로 이어진 것으로 판단되었다.

또한, 모형을 통해 분석한 결과 토양수분과 실제증발량 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 이로 인해 내부증발 강수량이 증가하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 도시, 토지이용, 수문기상, 기온, 강수량, 증발량, 토양수분

1. 서 론

도시가 팽창될수록 인구의 증가는 물론이고 산업의 발달과 교통량의 증가 등과 같은 인위적인 요인이 대상 지역의 기후에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향은 대도시 특유의 기후 특성을 갖게 하는데, 도시기후의 특성 중에서 현저하게 나타나는 현상은 도시화에 따른 기온의 상승으로 도시의 열섬(Heat island) 현상이 나타나며, 포장된 불투수 지역에서는 강우가 침투되지 못하고 즉시 배수되어 전체적인 증발량도 감소하게 된다.

이러한 도시화의 영향을 정량적으로 표현할 수 있는 방법은 인구의 변화와 토지이용의 변화 등을 들 수 있으며, 특히 토지이용의 변화는 도시화의 정도를 가늠하기 가장 용이한 인자 중에 하나이다. 본 연구에서는 도시화의 특성을 토지이용의 변화로 정량화 한 후, 이로 인한 수문기상 특성의 변화에 대한 분석을 실시함으로써 도시화로 인한 장기적인 국지기상의 변화를 가늠해볼 수

* 정회원·서경대학교 이공대학 토목공학과 조교수·E-mail : wrr@skuniv.ac.kr

있는 방안을 모색하고자 한다. 따라서, 본 연구의 목적은 도시화가 수문기상변화에 미치는 영향을 분석하고자 하는 것으로써, 토지이용의 변화로 인한 국지 수문기상의 변화를 모의하여 장기적인 변화 특성을 파악하여 이를 평가하고자 한다.

도시화에 따른 수문기상변화의 예측은 다양한 상황을 고려할 수 있는 모형화를 통해 가능할 것이다. 본 연구에서는 모형화를 통하여 도시화에 따른 수문기상변화에 대해 정량화를 수행하고자 하며, 관측자료의 분석에서 나타난 변화를 모형을 통해 재 구현해 보고자 하는 것이다. 이를 위해 도시화의 영향 정도를 시공간적으로 정량화 할 수 있는 모형을 개발하고 서울지역에 직접 적용 및 평가하는 것을 그 목적으로 하고 있다. 이를 통해 도시화로 인한 기상수문학적인 인자의 시공간적 영향을 분석 및 일반화하고, 도시화에 따른 기상수문학적 영향을 최소화할 수 있는 방안을 검토하고자 한다.

2. 도시화의 영향

대도시에서 공기 중에 떠 있는 부유물은 농촌지역보다 평균 10배정도 높게 나타나며, 일사량을 차단하는 역할을 하게된다. 통상적으로 도시의 시간당 일사량은 농촌보다 5~15% 더 적게 나타나며, 특히 겨울의 자외선 방사는 매연에 의해서 약 30%정도가 감소되어 지표면의 열 방출을 방해하게 된다. 그로 인해 방출되지 못한 열에 의해 도시온도가 상승하면서 지표면의 수분증발을 촉진시켜 농촌지역에 비해 운무 또는 안개현상이 5~19% 증가하는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 도시지역 기후의 변화가 강수량에 변화를 유발할 것은 예측 가능하지만 증가 및 감소성향을 단정적으로 언급하기는 쉽지 않다. 그러나, 우리나라의 경우 도시화나 공업화가 되기 전과 후의 강수량을 비교해 보면 도시화 후에 강수량이 증가하는 것으로 분석되고 있다.

이정식(1980)은 도시화 지역(서울)과 비도시화 지역(경기도 광주)에서 월별 강우량을 시대별(1931-1950년, 1960-1978년)로 구분한 후 통계처리 하여, 도시화 지역의 강우량이 증가추세에 있으며 비도시화 지역의 증가치보다 많음을 밝힌 바 있다. 또한, 김광식(1988)은 우리나라 14개 기상청 산하 관측소의 8월강수량 및 연평균강수량의 변화를 분석하여 도시화로 인한 인간활동이 상대적으로 큰 곳일수록 강수량 증가율이 더 큰 경향을 보임을 밝힌 바 있다. 최영은(1998)은 미국 남부 도시지역 중 인구 백만명 이상의 5개 도시에 대해 도시강수 특성에 관한 연구를 수행하여 도시화로 인한 강수량의 증가 현상과 강수빈도의 현저한 증가현상을 밝혔다.

이와 같은 연구내용을 종합해볼 때, 도시화로 인한 강우특성의 변화는 분명하며 대부분의 경우 강우량의 증가를 촉진시키고 있음을 알 수 있다. 특히 최영은(1998)이 밝힌 강수빈도의 증가는 집중호우 발생가능성의 증가로 연결될 수 있으며, 윤용남 등(1999a, b)이 제시한 50mm이 강수일수의 증가경향과 일치하는 것임을 알 수 있다.

3. 모형을 이용한 수문기상 변화 분석

3.1 모형의 개발

본 연구에서 개발한 모형의 구조 및 특성은 식(1)과 같이 Budyko의 모형(1986) 및 그 해석방법을 응용하였으며, 대기와 토양층의 관계를 기본구조로 이용하였다.

$$\Omega = \frac{EL}{2WU} \quad (1)$$

여기서, Ω 는 재순환계수, E 는 실제증발산량(L/T), L 은 통제용적의 범위(L), W 는 가강수량(L), U 는 풍속(L/T)을 의미한다. Ω 를 이용해서 식(2)로부터 P_a 와 P_e 를 산정할 수 있다.

$$P_a = \frac{P}{(1 + \Omega)}, \quad P_e = \frac{\Omega P}{(1 + \Omega)} \quad (2)$$

P_a 가 P 에 비해 상대적으로 작을 경우 Ω 값은 증가하며, 이는 수분의 내부순환이 활발해짐을 의미한다. 반면에, P_a 가 상대적으로 커지는 경우 Ω 값은 감소하며, 외부에서 유입되는 수증기로 인해 발생하는 강수량은 증가하게 된다.

식(1)과 (2)의 이용을 위해서는 Ω 의 산정이 필수적이며, Ω 의 산정에는 실제증발산량 E 의 결정이 필요하다. 그러나 E 의 산정을 위해서는 지역의 토양수분과의 상관성을 고려하여 잠재증발산량에서 결정해야 한다. 유역의 유출을 양적으로 따져본다면 다음 식(3)과 같은 간단한 물수지 방정식의 형태로 표시할 수 있으며, 유역의 물수지는 강수량, 유출량, 증발량 및 토양수분에 의해 결정되어 진다. 본 연구에서는 식(3)을 이용하여 도시화에 따른 토양함수비의 변화를 산정하였으며, 이를 이용해서 실제증발산량 E 를 결정하였다.

$$\frac{dZ}{dt} = (1 - S^2)P - \left(\frac{5S - 2S^2}{3} \right) E_p \quad (3)$$

여기서, Z 는 토양수분량(L), P 는 강수량(L/T), S 는 토양함수비, E_p 는 잠재증발산량(L/T)을 의미하며, 토양함수비 S 는 토양수분량 Z 와 최대 토양수분량 Z_{\max} (L)의 비이다.

3.2 도시화에 의한 기상자료의 변화 분석

본 연구에서는 분석 대상 지역으로 서울지역을 선정하였다. 우리나라의 수도이며 가장 큰 규모의 도시인 서울은 1970년대 이후 급격한 도시화가 이루어진 지역이며, 그로 인한 수문기상학적 영향 또한 작지 않을 것으로 예상되는 지역이다.

1960년대 이후 서울특별시에서 발행된 통계연보를 이용하여 서울의 토지이용변화를 분석하고자 하였다. 그러나, 1975년까지의 지목별 토지면적의 변화는 논, 밭, 대지, 임야, 기타 등의 항목으로 분류되어 있어, 1976년 이후의 세분화된 항목과는 그 차이가 있음을 알 수 있었다.

실제 도시화의 정도를 정확히 파악하기 위해서는 대지의 변화 이외에도, 공장, 도로, 주차장 등의 불투수면적의 변화를 함께 분석하여야 하나 이러한 자료상태의 차이로 인해 이와 같은 분석을 실시하기는 어려운 것으로 판단되었으며, 따라서 가장 큰 면적 및 그 영향 정도를 보여줄 수 있는 항목인 “대지”의 변화만을 이용하여 서울지역의 도시화 정도를 분석하였다. 분석결과 서울의 대지면적은 1960년에 12% 불과하다가 70년대에는 23%로 거의 2배 가까이 증가하며, 80년대와 90년대에 지속적인 증가추세를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 특히 60년대와 90년대를 비교하면 거의 3배 가까운 대지면적의 증가를 알 수 있으며, 이는 그 만큼의 급격화 도시화가 이루어졌음을 보여주는 결과라 하겠다.

이러한 서울지역의 급격한 도시화에 따른 수문기상 변화에 대한 영향을 분석하기 위해, 서울 기상관측소의 장기 관측자료를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 자료기간은 1908년부터 2000년까지이며, 한국전쟁 중 결측된 1950-1953년의 기간을 제외한 총 89년의 기간의 자료에 대한 분석을 실시하였다. 특히, 도시화에 의한 서울의 기상변화를 분석하기 위해 결측기간(1950-53년) 전후의

각각 42년(1908-1949년)과 47년(1954-2000년) 동안의 강수량, 기온, 습도, 일조시간 등의 자료를 비교 분석하였다.

먼저 기온의 변화를 살펴보면 결측기간 전의 42년 평균 기온은 10.9℃에 불과했으나, 결측기간 이후의 47년 평균 기온은 13.4℃로서 무려 2.5℃의 연평균 기온 상승이 있는 것으로 나타났다.

기온 외에 다른 인자의 변화를 비교하기 위해 결측 전후의 습도와 일조시간의 평균값을 분석하였다. 습도의 변화를 살펴보면 69.9%에서 75.9%로 6%의 습도가 상승한 것으로 나타났다. 이는 기온의 상승으로 인한 증발량의 상승이 동반된 결과인 것으로 분석되며, 만약 외부에서 유입되는 강수량이 일정하다고 가정했을 경우에 해당 지역내부에 강수로 전환 가능한 수분의 양이 증가하는 것을 의미하는 것으로서 서울지역의 강수량이 상대적으로 증가할 것임을 보여주고 있는 아주 중요한 결과로 판단된다.

일조시간의 변화를 분석한 결과, 예상했던 것처럼 도시화에 따른 대기내 불순물의 증가 및 안개의 증가로 인해 일조시간이 평균 0.4시간 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 이것이 일평균 값임을 감안한다면 이로 인해 잠재증발량의 감소가 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 여러 기상 인자들의 변화 중 가장 중요한 것은 장기적인 강수량의 변화일 것이며, 이는 강수량의 증감이 도시지역내 수문순환에서 제일 큰 의미를 가지기 때문이다. 이러한 강수량의 변화를 비교한 결과, 결측 전후 기간 동안의 강수량 변화는 예상외로 매우 큰 차이를 보여주고 있으며, 1900년대 상반기에 비해 1900년대 후반기 연평균 강수량이 무려 300mm나 증가하는 것으로 분석되었다.

일조시간 변화에서 예상하였듯이 일조시간의 감소는 잠재증발량의 감소를 유발하고 있으며, 연간 약 16mm 정도의 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 상대적으로 동일 기간동안 기온이 증가하는 영향으로 인해 일조시간의 감소에도 불구하고 아주 많은 잠재증발량의 변화는 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

3.3 모형의 적용

도시화에 따른 수문기상 변화를 분석하기 위해 가장 중요한 인자인 실제증발량과 토양수분의 변화는 모델링을 통해서만 가능하며, 본 연구에서 개발한 모형을 적용하여 이를 분석하였다. 이러한 분석을 통해 산정된 서울지역 토양수분과 실제증발량의 변화를 분석하였다.

서울지역의 장기 토양수분의 변화는 결측 전후의 기간에 각각 0.65에서 0.7로 증가하였다. 토양수분의 증가가 의미하는 것은 여러 가지가 있을 수 있으나, 강수량의 증가로 인해 공급 가능한 수분이 많아 졌으며 이로 인해 실제 증발가능한 수분량이 늘어났음이 가장 중요한 것이라 할 수 있다. 대상 지역에 내리는 강수량의 근본은 외부에서 유입되는 수분과 내부에서 증발되는 수분이며, 이러한 토양수분의 증가로 인해 내부증발 수분량이 증가한다면 강수량의 증가로 이어질 수 있는 가능성이 커지는 것을 의미할 것이다.

실제증발량의 비교에서도 이와 같은 내용을 뒷받침하는 결과를 보여주고 있다. 즉, 결측 전후에 실제증발량이 약 16mm 정도 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 아주 큰 증가는 아니지만 시기적으로 이러한 현상이 크게 발생하면서 외부의 대규모 수분유입이 동시에 이루어질 경우 도시지역내 집중호우가 발생할 가능성이 증대할 수 있음을 의미하는 것이라 할 수 있다.

최종적으로 강수량의 근원이 되는 수분의 발생량을 직접적으로 비교할 수 있는 인자인 식(1)의 Ω 를 산정하였다. 서울 기상관측소에는 1961년부터 실측한 이슬점 온도 자료가 존재함으로 Ω 의 산정을 위한 기간은 1961-2000년으로 제한하였으며, 토지이용의 변화를 분석한 기간과 거의 동일한 것임을 알 수 있다. Ω 가 1961-80년까지는 0.4475였으며, 1981-2000년까지 0.455로 증가하는 것으로

산정되었다. 산정결과 1960년 이후 서울지역에서는 지역내에서 증발한 수분으로 인해 내리는 강수량의 비율이 증가하는 것을 알 수 있다.

물론, 이러한 변화가 아주 큰 값의 차이를 보이면서 이루어지지 않는 것은 상대적인 증가는 보여주고 있으며, 여러 다른 기상인자들의 변화 양상과 함께 종합적으로 고려해볼 때 서울지역의 수문기상 특성이 여러 요인들로 인해 변화하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시화가 도시지역의 수문기상변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 토지이용의 변화로 인한 국지 수문기상의 변화를 모의하여 장기적인 변화 특성을 파악하여 이를 평가하고자 하였다.

특히, 본 연구에서는 도시화에 따른 수문기상변화의 예측 가능한 모형을 개발하여 다양한 상황에 모의를 실시하고자 하였다. 이를 위해 도시화의 영향 정도를 시공간적으로 정량화 할 수 있는 모형을 개발하고 서울지역에 직접 적용 및 평가하였으며, 이를 통해 도시화로 인한 기상수문학적 인자의 시공간적 영향을 분석 및 일반화하고, 도시화에 따른 기상수문학적 영향을 최소화할 수 있는 방안을 검토하고자 하였다. 이러한 분석을 통해 나타난 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 서울 기상관측소의 장기 관측자료에 대한 분석결과, 1950년을 전후하여 각각 42년 및 47년간의 연평균 변화에서 기온은 2.5℃, 습도는 6%, 강수량은 300mm 증가하며, 일조시간은 0.4시간, 잠재증발량은 16mm 감소하는 것으로 나타났다. 이는 도시화와 기후변화로 인해 기온이 증가하고 도시화의 특성에 따라 습도 증가 및 일조시간과 잠재증발량의 감소가 나타났으며, 이것이 큰 폭의 강수량 증가로 이어진 것으로 판단되었다.
- 2) 모형을 통해 분석한 결과 토양수분과 실제증발량 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 이로 인해 내부증발 강수량과 외부유입 강수량의 비인 Ω 가 증가하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 내부증발 수분이 증가하는 강수량의 증가와 직접적으로 이어지는 것으로서 이에 대한 좀더 심도 깊은 분석 및 대책의 마련이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김광식(1988). “도시화가 강수현상에 미치는 영향.” 대한토목학회지, 대한토목학회, 제36권, 제2호, pp. 3-7.
2. 윤용남, 유철상, 이재수, 안재현(1999a). “지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여 : 1. 연/월강수량의 변화에 따른 일강수량 분포의 변화 분석.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 617-625.
3. 윤용남, 유철상, 이재수, 안재현(1999b). “지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여 : 2. 지구온난화에 따른 일강수량 분포의 변화 추정.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 627-636.
4. 이정식(1980). “도시화에 의한 강수량 변화에 대한 통계학적 해석.” 학술발표회 논문집, 한국수문학회, pp. 31-37.
5. 최영은(1998). “미국 남부지방의 도시강수 특성에 관한 연구.” 학술발표회 논문집, 대한지리학회, pp. 51-55.
6. Budyko, M. I.(1986). *The evolution of the biosphere*, D. Reidel Publishing Co., Boston.