

서울지점 강우자료에 나타난 도시화의 간섭 분석

Intervention Analysis of Urbanization Effect on Rainfall Data at the Seoul Rain Gauge Station

유철상* / 김대하** / 박상형*** / 김병수**** / 박창열*****

Yoo, Chulsang / Kim, Dae-ha / Park, Sang Hyoung / Kim, Byung su / Park, Changyeol

Abstract

This study estimated the urbanization effect of Seoul, the largest city in Korea, on its rainfall. For a comparative analysis, two different data sets are used: One is the precipitation data at the Jeonju rain gauge station, which has a relatively long record length but least urbanization effect, and the other at the Ichon rain gauge station, which has a short record length but located very near to Seoul with least urbanization effect. Also, the difference of the rainfall between Seoul and Jeonju rain gauge stations, as an indicator of urbanization effect, is quantified by use of the intervention model. As a result, it was found that the maximum rainfall intensity of the annual maximum rainfall events shows the increasing trend, its duration the decreasing trend, and the mean intensity the decreasing trend especially after 1960. Also, the quantification of urbanization effect using the intervention model shows that the increasing trend of rainfall intensity and total volume is still on going.

keywords : Urbanization, rainfall, trend analysis, intervention model

요 지

본 연구에서는 우리나라 최대 도시인 서울지점에서의 도시화의 영향을 강우자료의 분석을 통해 파악하였다. 서울 지점 강우의 도시화 영향을 파악하기 위해 관측길이가 길고 도시화의 정도가 상대적으로 덜한 전주지점과 관측 기록의 길이는 짧으나 서울 인근지점으로 도시화의 영향이 매우 적을 것으로 판단되는 이천지점의 강우자료를 비교 대상으로 이용하였다. 또한 도시화의 영향에 해당하는 서울지점과 전주지점의 강우량 차이를 간섭모형을 이용하여 정량화 하였다. 그 결과, 연최대치 호우사상의 최대강우강도는 점점 증가하는 추세이며, 총지속시간의 경우는 전체기간에 대해 감소하는 경향이고, 특히 1960년 이후에는 그 평균이 과거보다 현저히 감소하는 추세를 확인할 수 있었다. 아울러 간섭분석을 통해 1960년 이후의 도시화가 강우에 미친 영향을 정량화한 결과 도시화에 의한 강우강도 및 강우량의 증가 양상이 지속되고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 도시화, 강우, 추세분석, 간섭모형

- * 고려대학교 건축사회환경공학과 교수·공학박사 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)
Professor., Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
- ** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: violt007@korea.ac.kr)
Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
- *** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: sh79863@korea.ac.kr)
Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
- **** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: keslo@korea.ac.kr)
Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
- ***** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: changyeol@korea.ac.kr)
Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

1. 서론

대규모 도시화 및 산업화는 인근 지역에 여러 가지 기상특성의 변화를 야기하는 것으로 알려져 있다. 특히, 그 변화가 뚜렷한 것이 기온이며 소위 열섬효과(thermal island effect)라는 용어는 우리에게도 친숙한 단어가 되어 있다(Oke, 1981; 1995; Goldreich, 1996; Lo et al., 1997). 기온과 더불어 강우의 경우에도 대체로 강우량의 증가가 보고되고 있다. 조사된 대부분의 도시(영국 London(Atkinson, 1971), 인도 Bombay(Khemani and Murty, 1973), 미국 Phoenix(Balling and Brazel, 1987), 미국 St. Louis(Changnon et al., 1991), 멕시코 Mexico City(Jauregui and Romales, 1996))에서 5~10% 이상의 연 강우량 변화(주로 증가)를 보고되고 있으며, 계절별로는 이 보다 더 커서 30% 이상의 증가를 보고하고 있는 경우도 있다(Changnon et al., 1991; Rosenberger and Suckling, 1989). 강우빈도의 경우에도 있어서는 이 보다 훨씬 큰 변화를 보이는데 100% 이상의 증가를 보이는 곳도 있다(Changnon, 1968; 1969). 이러한 변화는 무엇보다 강우를 입력자료로 사용하는 많은 수문학 및 환경공학적인 문제에 직접적인 영향을 준다. 특히 집중호우로 인해 발생하는 재해의 경우 과연 적절한 수준의 설계강우가 적용되었는지에 대한 판단에 큰 영향을 미칠 수도 있다.

도시화로 인한 열섬효과와 대기마찰의 증가 또한 강우과정의 변화와 밀접한 관련이 있다. 도시화로 인한 열섬효과는 도시 내의 증발을 인근 지역에 비해 월등히 우월하게 만들고, 이는 대기의 불안정과 더불어 강우발생의 한 원인으로 작용하게 된다. 아울러 도시화로 인한 대기마찰의 증가는 대기흐름에 일종의 장벽과 같은 역할을 하게 되어 수분의 집중을 가져오게 되고, 상승 또는 하강기류의 발생으로 강우의 발생을 촉진하게 된다. 아울러 도시 내 높은 건물군에 의한 기류 차단이나 상승 및 하강기류의 발생도 강우특성의 변화와 관련이 깊다. 도시의 불투수층의 증가로 인한 증발량의 증가도 한 원인으로 꼽히고, 이는 도시의 열섬효과로 인해 더욱 가속된다(Landsburg, 1979). 여기에, 산업시설로부터 직접 배출되는 수증기의 양도 도시강우를 촉진하는 한 원인으로 지목되고 있다(Cotton, 1995).

도시화로 인한 강우의 변화와 관련한 물리적 또는 기상학적 근거는 기본적으로 밀도 있는 종관관측을 통해 파악할 수밖에 없다. 그러나 매우 제한적인 규모의 관측사례 만이 존재하는 것이 현실이다(Squires, 1966; Kline and Brier, 1961; Semonin, 1966; Langer et al., 1968). 아울러 강우의 경우에는 아직도 그 변화에 대한

불확실성이 상당히 존재하고 있다. 이는 기본적으로 강우가 시-공간적으로 불연속이며, 아울러 구름의 형성과정이나 강우과정을 지배하는 물리법칙에 대해서 아직도 해결해야 할 문제가 많기 때문이다(Changnon, 1992). 따라서 물리적인 근거를 이용한 강우특성의 변화의 규명은 현 시점에서는 쉬운 문제라 할 수 없다.

현재까지 도시화의 영향은 주로 관측자료에 근거하여 분석되었다. 강우자료를 깊이의 단위로 그대로 이용하거나 아니면 주어진 시간 및 공간적인 규모를 고려한 평균으로 나눈 비율을 사용하여 분석하였다. 아울러 강우량을 평균으로 나누는 단순 정규화(normalization)를 이용한 경우도 찾아볼 수 있으며 이는 도시화의 영향을 공간적으로 파악할 때 유용하게 이용되었다.(Huff and Changnon, 1973; Balling and Brazel, 1987; Jauregui and Romales, 1996). 이와 더불어 시간축에 대한 경향 분석을 위해 2~5년 정도의 월 또는 계절 강우에 대한 이동평균을 이용한 경우도 찾아볼 수 있으며 폭풍의 수(뇌우를 동반한 또는 급격히 발생하는)를 비교하는 것 또한 자주 이용된 방법 중 하나이다(Changnon, 1968). 또한 강우 발생 또는 강우량의 일 주기를 비교한 경우도 찾아볼 수 있다(Balling and Brazel, 1987).

그러나 관측된 강우자료의 부족과 도시지역에 위치한 강우계의 위치 변동 등에 의해 자료만으로 도시화에 따른 강우특성을 조사, 연구하고 아울러 그 인과관계를 규명하는 데에는 여러 가지 한계가 존재한다. 또한 도시화로 인한 강우의 변화를 직접 측정하여 관찰하거나 설명하는 일은 기온, 습도 등과 같은 다른 기상인자에 비해 쉽지 않은 일이다. 우리나라에서도 기온의 변화와 관련해서는 이현영 (1989), 유철상 등 (2000), 기상연구소 (2003, 2004), Oh et al. (2004) 등의 연구를 살펴볼 수 있으나, 강우에 대한 연구는 많이 빈약한 상황이다.

본 연구에서는 우리나라 최대 도시인 서울지점에서의 도시화의 영향을 강우자료의 분석을 통해 파악해 보았다. 서울지점 강우의 도시화 영향을 파악하기 위해 관측길이가 길고 도시화의 정도가 상대적으로 덜한 전주지점과 관측 기록의 길이는 짧으나 서울 인근지점으로 도시화의 영향이 매우 적을 것으로 판단되는 이천지점의 강우자료를 비교 대상으로 이용하였다. 아울러 도시화의 영향에 해당하는 서울지점과 전주지점의 강우량 차이를 간섭모형을 이용하여 정량화 하였다.

2. 대상자료

본 연구에서의 분석 대상지점은 서울 지점이며 도시화의 영향을 판단하기 위해 전주 지점 및 이천 지점을

비교 대상지점으로 선정하였다. 기본적으로 서울지점은 장기간의 강우 기록이 가용하고, 아울러 도시화의 영향이 뚜렷한 지점이다. 반면에, 전주지점은 강우 기록의 보유 기간은 서울 지점과 유사한 정도로 길지만 도시화의 정도는 서울지점에 크게 미치지 못하여 서울지점 강우의 도시화 영향부분을 추출하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단하였다. 이와 같은 도시화의 영향부분 추출은 서울에 인접하여 기후적인 특성은 비슷하나(문영수, 1990, 1996; 박정규와 이승만, 1993; 김성렬과 양진석, 1995; 김용태 등, 2000) 도시화의 영향이 거의 없을 것으로 판단되는 이천지점의 자료를 이용하여 비교·평가될 수 있도록 하였다. 전주시점의 경우는 만경강 유역에 위치하고 있으며, 지역구분에 관한 기존 연구를 보면 강우특성은 한강유역과 구분되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 그 차이의 정도는 낙동강유역 또는 남해안의 여러 작은 유역보다는 훨씬 적으며, 아울러 다른 기상인자를 함께 고려하는 경우 금강유역과 함께 동질

지역으로 구분되기도 한다(김용태 등, 2000). 따라서 전주 지점이 본 연구의 비교 대상지점으로 크게 무리하지는 않은 것으로 판단된다.

3. 자료에 나타난 추세 분석

3.1 일강우량 자료의 추세 분석

본 연구에서의 일강우량 자료로는 서울 지점의 경우 1907년~2002년, 이천 지점의 경우는 1973년~2002년, 전주 지점의 경우는 1919년~2002년까지의 기상청 자료가 이용되었다. 일강우량 자료를 이용한 분석에 사용된 강우특성은 연최대 일강우량, 연강우량, 연최대 호우사상의 총강우량 등이다. 이때 연도별 대표 호우사상은 연최대치 계열(일강우량 자료)이 포함된 호우사상으로 결정하였다.

먼저, 강우 시계열 자료의 이동평균선(moving average line)에서도 살펴볼 수 있듯이(Figs. 1~3) 뚜렷

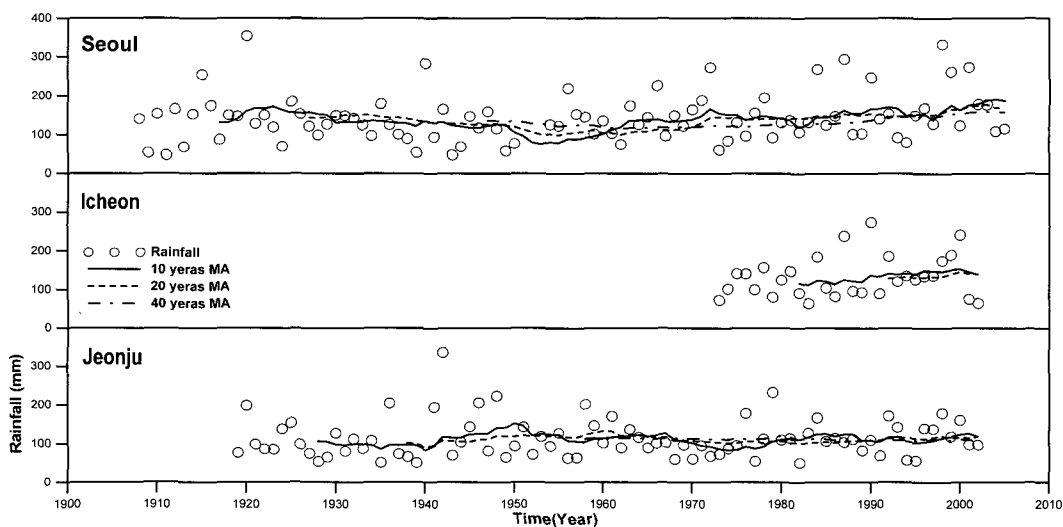


Fig. 1. Annual Maximum Daily Rainfall Data Series and Their Moving Averages

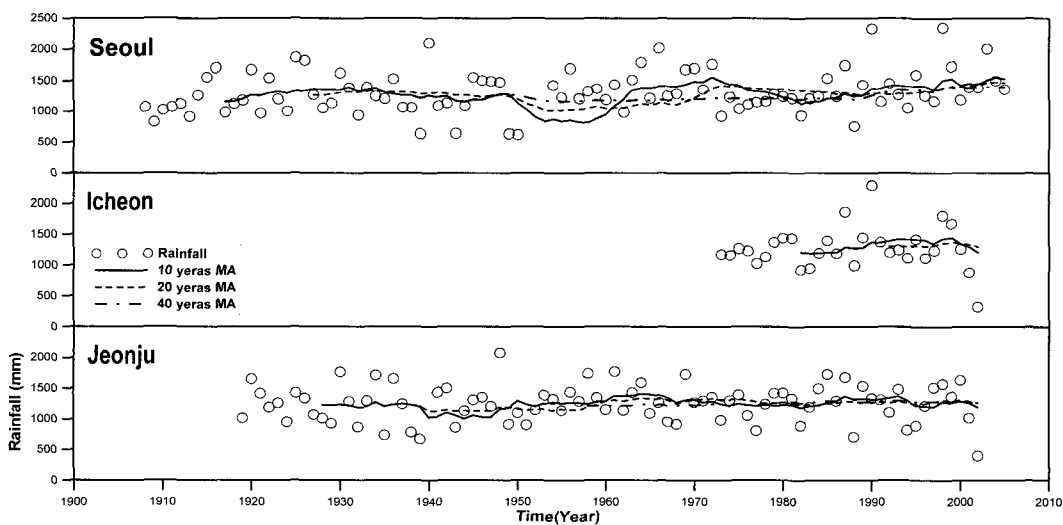


Fig. 2. Annual Rainfall Data Series and Their Moving Averages

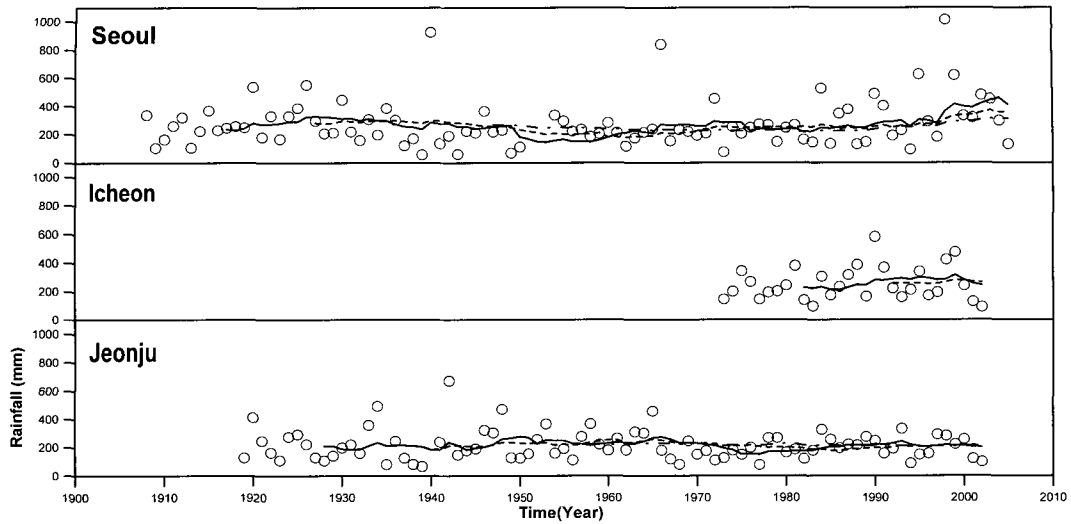


Fig. 3. Time Series of Total Volume of Annual Maximum Rainfall and Their Moving Averages

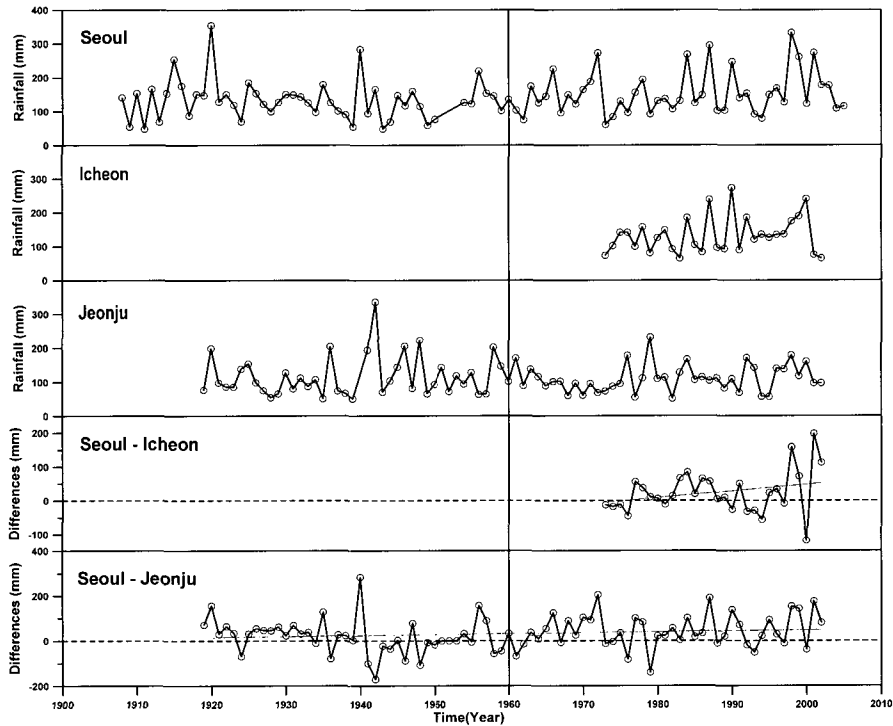


Fig. 4. Differences of Annual Maximum Daily Rainfall among Seoul, Icheon and Jeonju Rain Gauge Stations and Their Trends

하지 않으나 서울은 점차적으로 약간씩 증가하는 추세 (trend)를 보임을 판단할 수 있다. 그러나 이러한 추세가 통계적으로 유의한 수준은 되지 못하는 것으로 파악되었다. 근본적으로 강우의 변동성 자체가 너무 크기 때문이다. 이천과 전주의 경우에는 그러한 추세가 더욱 약하게 나타남을 파악할 수 있다.

이러한 추세의 차이는 Figs. 4~6을 통해 좀 더 자세히 확인할 수 있다. 즉, Figs. 4~6은 Figs. 1~3에서 서울 지점의 자료를 타 지점 자료로 차감하여 나타낸 것으로(즉, 서울지점 강우량과 타 지점 강우량의 차이) 타

지점과 서울지점과의 차이를 보다 명확히 확인할 수 있게 해 준다. 이들 그림을 통해 확인할 수 있듯이 서울지점의 강우량은 1960년을 전후하여 전주 및 이천과 차이를 보이기 시작했으며, 주로 서울지점의 강우량이 더 커지는 방향으로 변화되어 왔음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 서울, 전주 및 이천의 도시화 과정을 고려할 때 1960년을 기점으로 한 서울의 급격한 도시화와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 즉, 도시화의 영향으로 인해 서울지점 강우량의 급격한 증가가 발생했다고 추정할 수 있다.

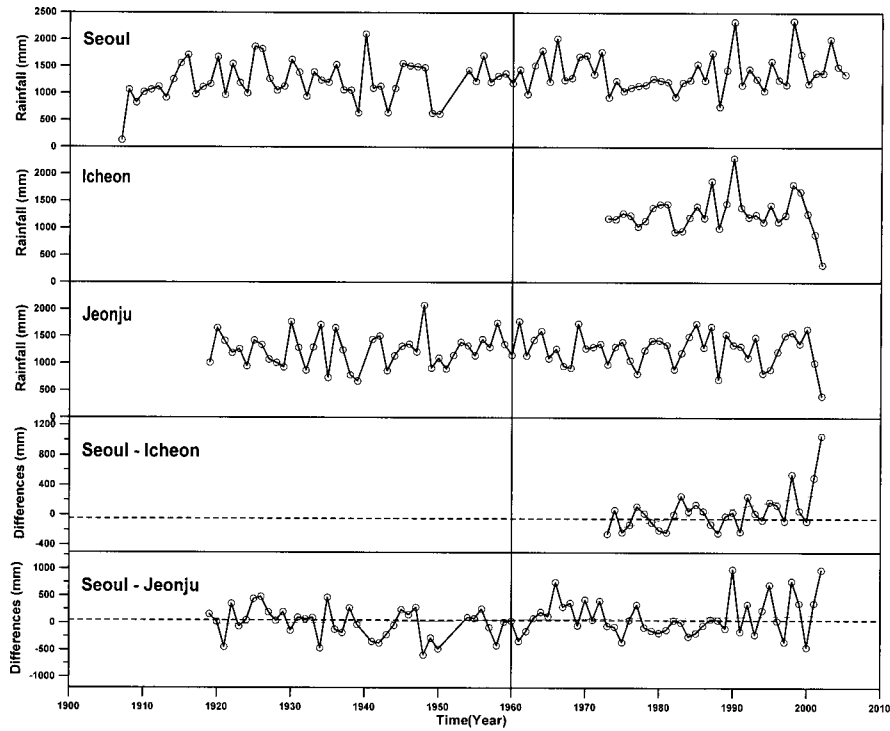


Fig. 5. Differences of Annual Rainfall among Seoul, Icheon and Jeonju Rain Gauge Stations and Their Trends

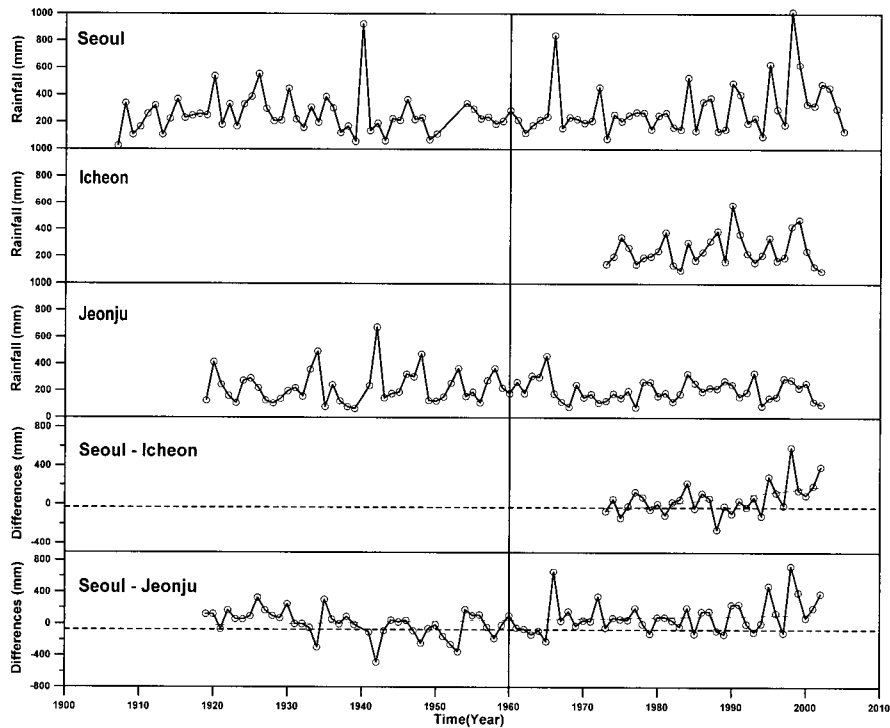


Fig. 6. Differences of Total Volume of Annual Maximum Rainfall Event among Seoul, Icheon and Jeonju Rain Gauge Stations and Their Trends

3.2 호우사상의 추세 분석

도시화로 인한 강우특성의 변화는 강우량의 증감으로만 나타나지는 않는다. 서론에서 살펴본 것처럼 일부 지역의 경우에는 강우량의 감소를 나타내기도 한다.

강우특성의 변화는 강우일수의 변화 또는 강우사상 수의 변화, 강우강도의 변화, 강우지속기간의 변화 등으로 다양하게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 가능한 변화 중 연 최대치 강우사상의 특성변화에 초점을 맞추고자 한다.

본 연구에서 사용한 서울지점의 기상청 시자료는 1908년 이후부터 가용하다. 본 연구에서는 1908년~2002년 사이의 시자료를 이용하였다. 그러나 1908년~1960년의 관측기록은 DB(Database)화 되어있지 않아 기록지를 이용할 수밖에 없다. 아울러 관측시점별로 시자료의 기록방법이 최근자료와의 직접비교가 어려운 문제점도 존재한다. 즉, 일부기간이 2시간, 4시간, 6시간 또는 8시간 간격으로 기록되어 있어 1961년 이후의 1시간 간격과 직접비교하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 관측기록의 특성은 Table 1과 같다.

아울러 연최대치 강우사상의 판단에도 애매한 점이 많다. 특히 단시간 내의 집중호우를 보이는 사상과 장시간에 걸쳐 큰 총강우량을 나타내는 사상의 비교가 쉽지 않다. 이들 사상의 비교는 궁극적으로 재현빈도를 고려하여 수행되어야 하나, 지속기간이 다른 호우사상의 상대적인 비교는 본 연구의 범위를 넘어서므로, 본 연구에서는 최대강우강도를 포함한 강우사상을 연최대치 강우사상으로 결정하여 분석에 이용하였다. 이들 사상을 정리하면 Fig. 7과 같다. 여기서 Fig. 7의 x축은 선정된 연최대치 강우사상들의 발생시간부터 종료시간까지를 나타낸 것이다. 이 그림에서는 기본적으로 1960년 이전 자료와 1961년 이후 자료를 정량적으로 평가하기에는 무리가 있으며(자료의 형태가 다르므로), 아울러 그 형태의 변화도 시각적으로 파악하는 데에 어려움이 있다. 따라서 호우사상의 특성변화를 정량적으로 평가하기 위해서는 호우사상의 특성들을 하나씩 구분하여 분석할 필요가 있다. 아울러, 1961년 이전과 이후의 강우자료를 재구성할 필요가 있다.

본 연구에서는 1961년 기준으로 이전은 8시간 간격으로 이후는 한 시간 간격으로 구성된 자료의 경향을 따로 분석하는 방법과 전체기간에 대해 일괄적으로 8시간 자료로 변환하여 그 경향성을 파악하는 방법을 병행하였다. 이들 결과는 각각 Figs. 8 and 9와 같다.

먼저 Fig. 8에서는, 호우사상의 총 지속시간의 추세를 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 반대로 최대강우강도는 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있

다. 그러나 Fig. 8(b)의 1차 회귀선으로 판단했을 때 1961년을 기준으로 이전과 이후를 분리하여 추세를 파악한 경우에는 1960년까지 호우사상의 총 지속시간은 변동 폭이 크기는 하지만 감소하는 경향을 보이고 있으나, 반대로 이후에는 상대적으로 변동 폭은 줄어들고 아울러 크게 유의한 추세를 나타내지는 않고 있다는 것을 파악할 수 있다. 최대 강우강도의 경우에는 1960년까지는 미미한 감소경향을 이후에는 뚜렷한 증가경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

Fig. 8에서의 경향은 전체자료를 8시간 간격으로 재구성 경우에서도 다시 한번 확인할 수 있다(Fig. 9). 특히 Fig. 9는 관측기록의 시간 간격이 다름으로 해서 발생할 수 있는 왜곡을 제거하고자 자료의 전 기간에 공통적으로 적용할 수 있는 시간 간격인 8시간을 적용하여 유도한 결과이다. Fig. 9에서 살펴볼 수 있는 것처럼 지속시간은 Fig. 8에서와 매우 유사하게 감소하는 경향을 보이고 있으며, 반대로 최대강우강도는 전체적으로 뚜렷한 증가경향을 나타내고 있다. 추가로 Fig. 10은 연최대 호우사상의 평균강우강도와 총 강우량을 나타낸 것이다. 전체적으로 평균강우강도는 증가하는 추세를 보이고 있으며, 총 강우량은 1960년 까지 감소하다가 1961년 이후 다시 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

결론적으로 보면 시강우량에 대한 분석에 있어 1960년대 이전 자료와 이후자료에 대한 차이가 존재하기는 하지만 전체적으로 강우강도가 지속적으로 증가하는 경향이 있음을 파악할 수 있다. 연최대치 호우사상의 최대강우강도는 점점 증가하는 추세이며 총지속시간의 경우는 전체기간에 대해 감소하는 경향이 나타났다. 특히, 1960년 이후에는 그 평균이 과거보다 현저히 감소하였다. 이러한 결과는 극치 강우의 양상이 짧은 시간 동안 많은 양이 내리는 방향으로 변해가고 있음을 나타낸다. 이러한 변화의 원인으로 기후변화 및 도시화를 고려할 수 있으나, 특히 1960년을 전후로 그 변화의 양상이 다른 점으로 미루어 서울의 도시화에 따른 영향이 보다 크게 반영되어 있을 것으로 추측된다.

Table 1. Record Length and Intervals of the Tainfall Data at the Seoul Rain Gauge Station

Record (year)	Interval (hour)	Data Structure(hour)																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1908~1915	8	[Timeline diagram showing 8-hour intervals from year 1 to 22]																					
1916~1919	4	[Timeline diagram showing 4-hour intervals from year 1 to 22]																					
1920~1939	8	[Timeline diagram showing 8-hour intervals from year 1 to 22]																					
1940~1942	2, 4, 6, 8	[Timeline diagram showing mixed intervals from year 1 to 22]																					
1943~1960	8	[Timeline diagram showing 8-hour intervals from year 1 to 22]																					
1961~2002	1	[Timeline diagram showing 1-hour intervals from year 1 to 22]																					

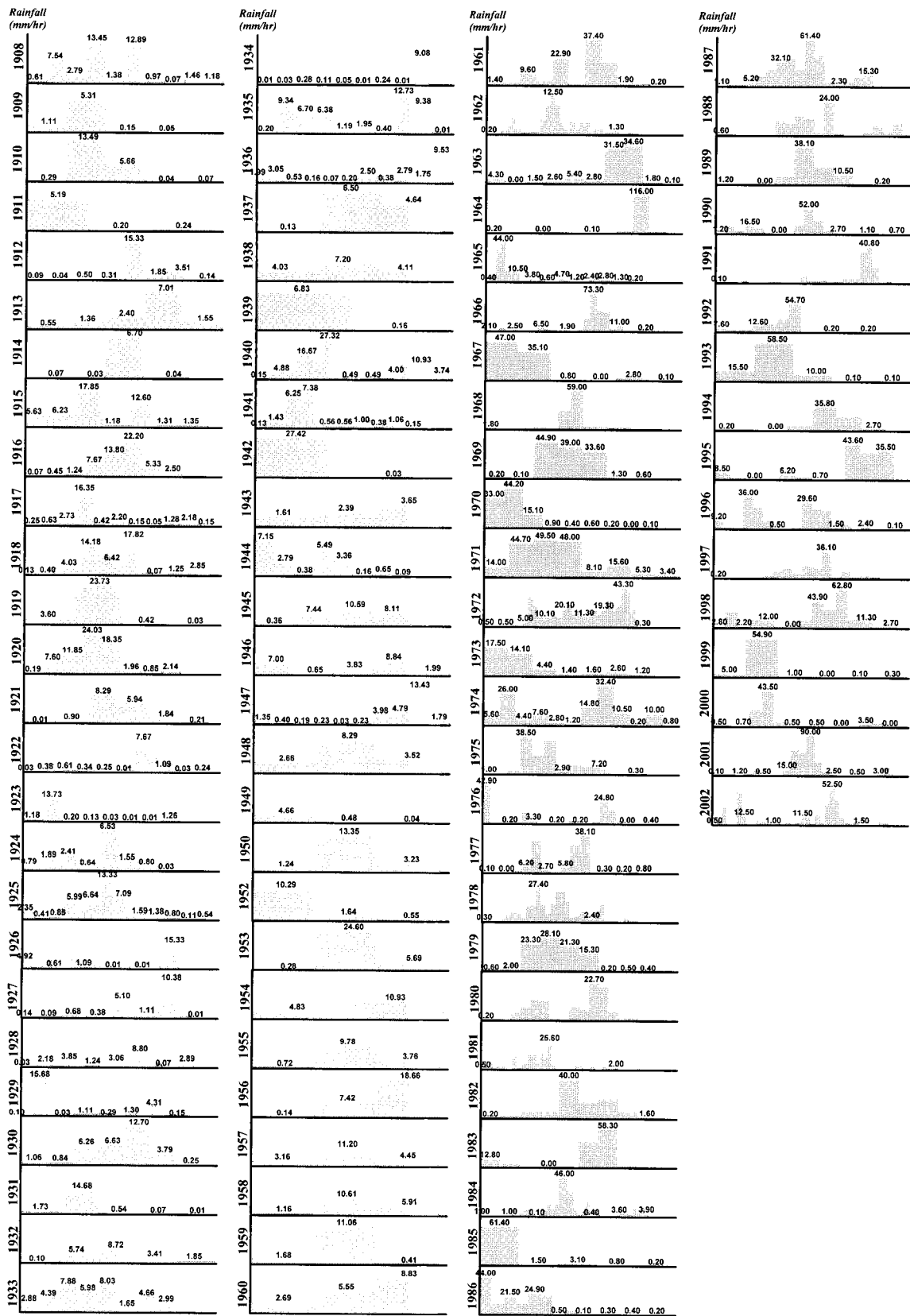
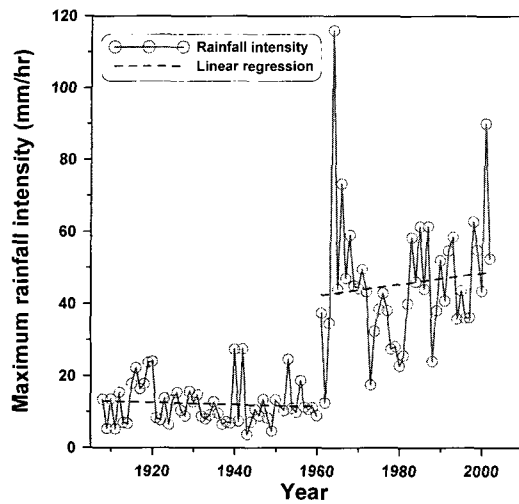
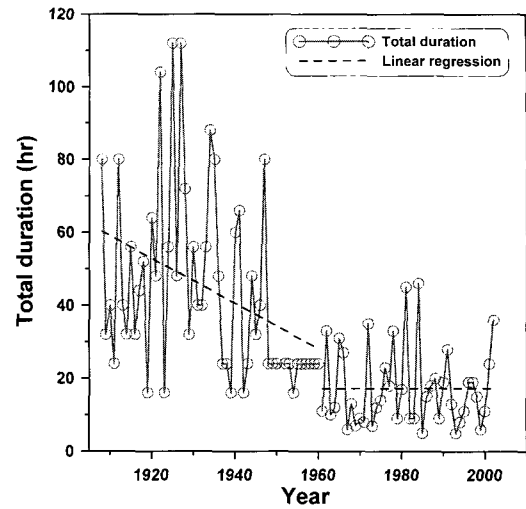


Fig. 7. Rainfall Hyetograph of Annual Maximum Rainfall Events

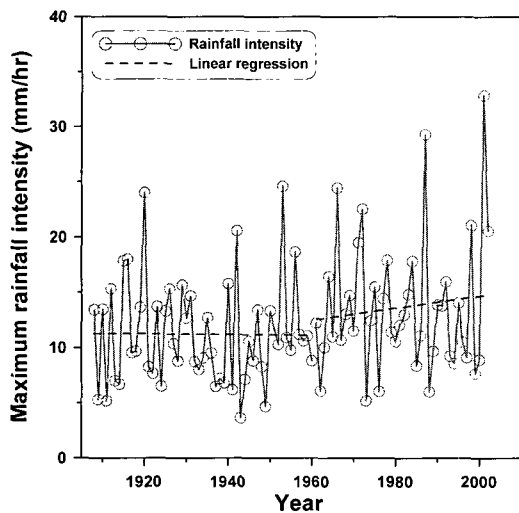


(a) Maximum rainfall intensity

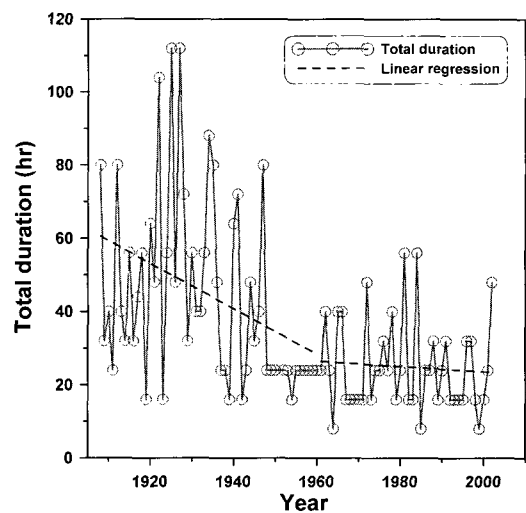


(b) Total duration

Fig. 8. Changes in characteristics of annual rainfall events

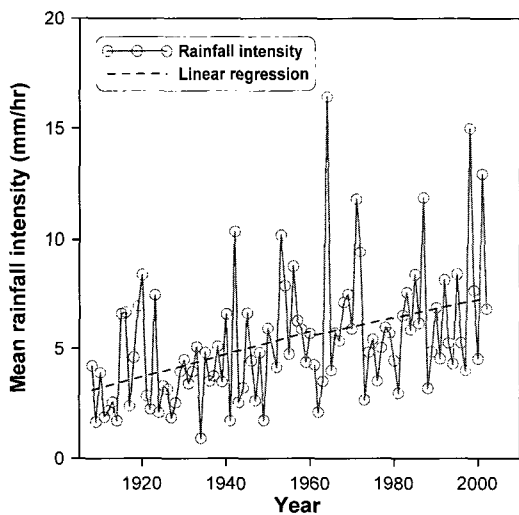


(a) Maximum rainfall intensity

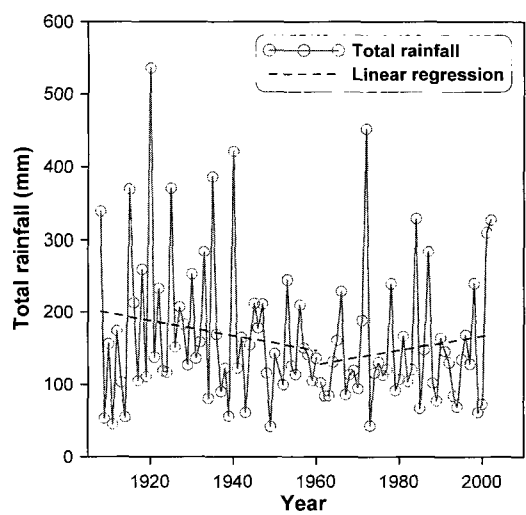


(b) Total duration

Fig. 9. The Same as Fig. 8, but the Data Structure Reorganized as to Have Eight Hour Recording Interval



(a) Mean rainfall intensity



(b) Total volume of rainfall

Fig. 10. Trends of Mean Rainfall Intensity and Total Volume of the Annual Maximum Rainfall Events

4. 강우특성에 대한 도시화의 간섭분석

4.1 간섭분석

간섭분석(intervention analysis)이란 인간에 의한 인위적인 간섭이나 자연현상에 의한 간섭이 어떤 시계열의 평균수준에 끼친 영향을 분석하는 것을 의미한다. 이러한 간섭으로 인해 그 평균수준이 달라진 시계열을 모형화한 것을 간섭모형이라 부른다. 본 연구에서는 도시화로 인한 강우특성의 변화를 간섭모형을 이용하여 정량화 하여 설명해 보고자 한다.

간섭모형의 적용을 위해서는 몇 가지 전제가 따른다. 먼저, 간섭모형을 적절하게 구축하기 위해서는 간섭 발생 전·후의 자료가 필요하다. 또한, 아직 일어나지 않은 간섭이 미래에 일어날 경우 그 영향을 예측하는 것은 불가능하다. 그러나 서울지점의 경우에는 간섭 전후의 시계열이 길이가 모두 상당히 긴 편이므로 간섭모형의 적용으로 그 정량화가 가능할 것으로 판단된다.

먼저, 간섭모형을 수식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$y_t - \mu_y = f_t + N_t \quad (1)$$

여기서 y_t 는 반응된 시계열, t 는 특정시간, μ_y 는 y_t 시계열 전체의 평균을 나타낸다. 또한 f_t 는 동태모형(dynamic model)이며 N_t 는 잡음항 모형으로 표현되므로 간섭모형은 동태모형과 잡음항 모형이 결합된 형태로 나타낼 수 있게 된다. 아울러, 잡음항 모형은 '백색 잡음'이 아니라 간섭의 효과를 배제한 시계열의 특성

을 나타내는 모형으로서 간섭 전·후의 동일한 특성을 가진다고 보고 ARMA(Autoregressive Moving Average)모형을 이용해 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

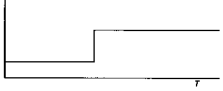

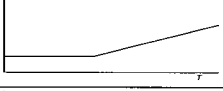
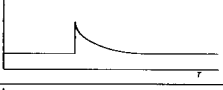
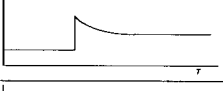
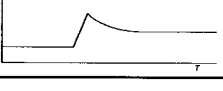
$$N_t = \frac{\theta(B)}{\phi(B)} \quad (2)$$

여기서 $\phi(B)$ 와 $\theta(B)$ 는 각각 AR 및 MA 연산자를 나타낸다.

간섭시계열은 계단간섭시계열(step intervention series)과 순간간섭시계열(impulse intervention series)로 분류할 수 있다. 계단간섭시계열은 하천에 댐이 건설된 경우와 같이 간섭이 일어난 시점 즉, 댐이 건설된 시점 이후 계속해서 영향이 가해지는 경우에 적용된다. 순간간섭시계열은 하천에 오염물질을 순간적으로 방류한 경우와 같이 그 간섭이 지속적인 것이 아니라 순간적인 경우에 적용되며, 계단간섭시계열을 1차 차분하면 순간간섭시계열로 표현된다.

간섭시계열의 유형은 Box and Tiao(1975)의 연구를 통해 정리할 수 있다. Box and Tiao(1975)는 총 여섯 가지의 기본적인 동태모형을 제시하고 있으며, 이들의 조합으로부터 다른 간섭모형의 도출도 가능하다. 이들 여섯 가지 동태모형들은 간섭시점 T 까지는 평균이 0을 나타내며, 간섭시점에서 계단간섭이나 순간간섭입력을 받아 시점 $T+1$ 에서부터 반응을 나타내는 형태를 갖는다. 이들 여섯 가지의 동태모형을 정리하면 Table 2와 같다. Table 2의 ω , ω_0 , ω_1 , ω_2 , δ 는 동태모형의 매개변수이고 B 는 후진연산자, S_t 와 P_t 는 각각 계단입력

Table 2. Six Basic Dynamic Models of Intervention Proposed by Box and Tiao (1975)

Types	Equation of dynamic models	Shapes of dynamic models
Case 1	$f_t = \omega B S_t^{(T)}$	
Case 2	$f_t = \frac{\omega B}{1 - \delta B} S_t^{(T)}$	
Case 3	$f_t = \frac{\omega B}{1 - B} S_t^{(T)}$	
Case 4	$f_t = \frac{\omega B}{1 - \delta B} P_t^{(T)}$	
Case 5	$f_t = (\frac{\omega_1}{1 - \delta B} - \frac{\omega_2}{1 - B}) B P_t^{(T)}$	
Case 6	$f_t = (\omega_0 + \frac{\omega_1}{1 - \delta B} - \frac{\omega_2}{1 - B}) P_t^{(T)}$	

함수 및 순간입력함수이다. 이들 식에 대한 구체적인 설명은 Box and Tiao(1975) 및 최병선(1995) 등에서 살펴볼 수 있다.

4.2 서울지점 강우자료에의 적용

본 절의 간섭분석에는 서울과 전주의 연최대 일강우량의 차이 및 연최대 호우사상의 총강우량 차이를 나타내는 시계열로 한정하였다. 이들 두 자료는 다른 자료에 비해 그 추세가 명확한 것들이다. 아울러 도시화의 경우는 지속적인 현상으로 볼 수 있으므로 계단입력이 가해지는 동태모형을 사용하는 것이 적절하다고 판단하였다.

간섭모형의 적용을 위해 필요한 간섭시점의 결정에는 3장에서 추세분석결과를 이용하였다. 즉, 서울과 전주지점 간의 강우시계열이 차이를 보이기 시작하는 시점인 1960년을 그 시점으로 결정하였다. 본 연구에서의 간섭형태인 도시화는 어느 시점에서의 급격한 변화로 보기에 어려운 측면이 있다. 특히 그 진행속도가 완만하므로 그 시점도 바라보는 각도에 따라서 매우 다르게 바뀔 수 있음이 사실이다. 그러나 1960년대에 이르러 정부의 정책에 따라 공업화가 급속히 이루어진 것이 사실이고 아울러 수도권에 인구유입이 이 시점 이후 급격히 진행되었으므로 1960년을 간섭의 시점으로 잡는 것에 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

먼저 서울과 전주의 연최대일강우량 차이 및 총강우량 차이 시계열에 대한 잡음향의 차수를 판단하기 위해 간섭시점(1960년) 이전 자료의 자기상관함수 및 부분자기 상관함수를 이용하였다. 이는 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 두 경우 모두 자기상

관함수 및 부분자기상관함수 모두 유의한 상관을 보이는 지체시간이 없는 것으로 판단된다. 이는 시계열 자체가 백색잡음 과정에 근접한 것을 의미하며, 이는 BIC(Bayesian Information Criteria)를 이용한 경우에 있어서도 동일하게 판단되었다(Table 3).

Fig. 12은 서울과 전주의 연최대일강우량 및 총강우량의 차이에 대한 간섭모형의 적용결과를 나타낸다. 여기서 Dynamic model 1과 2는 각각 Table 2의 Case 1과 Case 2를 의미한다. 도시화의 경우는 지속적으로 이루어지는 현상이므로 계단입력함수 $S_t^{(T)}$ 를 충격함수로 사용하는 동태모형을 사용하였다. 이와 같은 경우는 Case 1, Case 2, Case 3가 해당하나 Case 3의 경우는 간섭이후의 시계열이 발산하게 되는 경우이므로 Case 1과 Case 2만을 사용하였다. 그 결과는 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 간섭시점 전후 시계열의 평균은 연최대 일강우량 시계열의 경우 각각 11.57mm, 44.37mm 이고 연최대 호우사상의 총강우량의 경우 0.43mm, 94.28mm 이다. 이와 같은 결과는 1960년대 이후의 도시화가 극한 호우사상에 상당한 영향을 미쳤음을 나타낸다. 특히 연최대 호우사상, 즉, 강우강도가 최대인 호우사상이 특히 큰 도시화의 영향을 받았음을 알 수 있다. 아울러, Case 2는 간섭시점 이후 간섭의 효과가 점진적으로 수렴하여 안정상태에 도달하는 모형이다. 각 경우에 대한 결과 모두 이러한 현상을 잘 나타내고 있으며 이에 대한 결과 식은 Table 4와 같다. 이 결과에 의하면 안정상태에 도달하기까지는 아직 상당한 시간이 소요될 것으로 나타나며, 이는 도시화의 영향이 상당기간 좀 더 증폭될 수 있음을 의미한다.

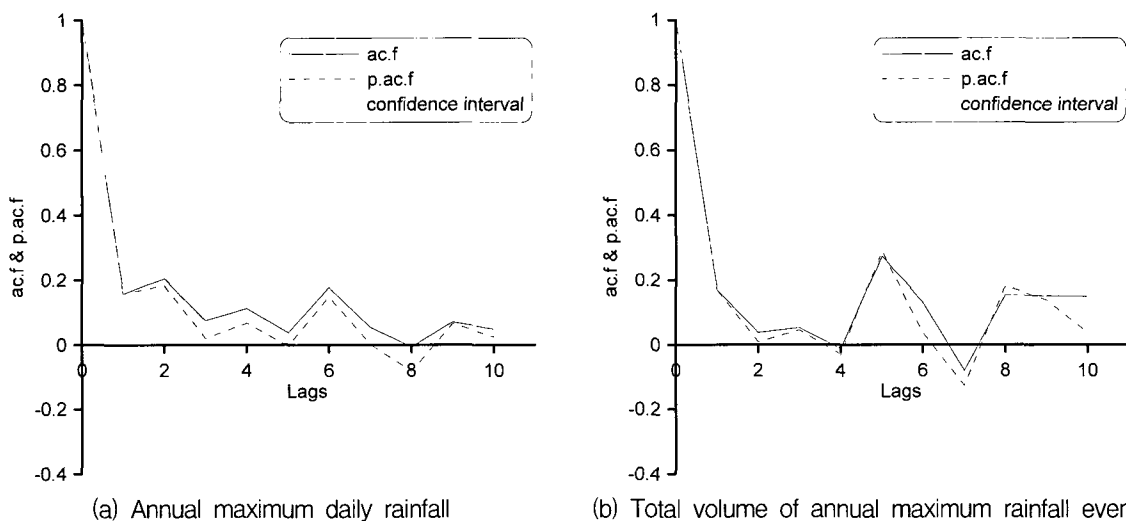


Fig. 11. Autocorrelation and Partial Autocorrelation Functions of the Differences of Annual Maximum Daily Rainfall and Total Volume of Annual Maximum Rainfall Event between Seoul and Jeonju Rain Gauge Stations

Table 3. Various BICs of the Differences of Annual Maximum Daily Rainfall and Total Volume of Annual Maximum Rainfall Event between Seoul and Jeonju Rain Gauge Stations

(a) Annual maximum daily rainfall

Lags	MA0	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
AR0	8.1985	8.2786	8.3038	8.3886	8.4446	8.5106
AR1	8.2692	8.3446	8.3898	8.4754	8.5348	8.5982
AR2	8.2903	8.3808	8.4690	8.5531	8.6254	8.6888
AR3	8.3758	8.4656	8.5538	8.6216	8.6959	8.7724
AR4	8.4403	8.5287	8.6054	8.6851	8.7619	8.8367
AR5	8.5193	8.6048	8.6780	8.7652	8.8393	8.8604

(b) Total volume of annual maximum rainfall event

Lags	MA0	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
AR0	9.9408	9.9896	10.0716	10.1456	10.0865	10.0967
AR1	9.9896	10.0796	10.1622	10.2359	10.1771	10.1806
AR2	10.0707	10.1607	10.2407	10.3164	10.2430	10.2393
AR3	10.1558	10.2451	10.3195	10.3674	10.2748	10.2694
AR4	10.1257	10.2152	10.2756	10.3105	10.3599	10.3560
AR5	10.0750	10.1620	10.1783	10.2052	10.2953	10.3598

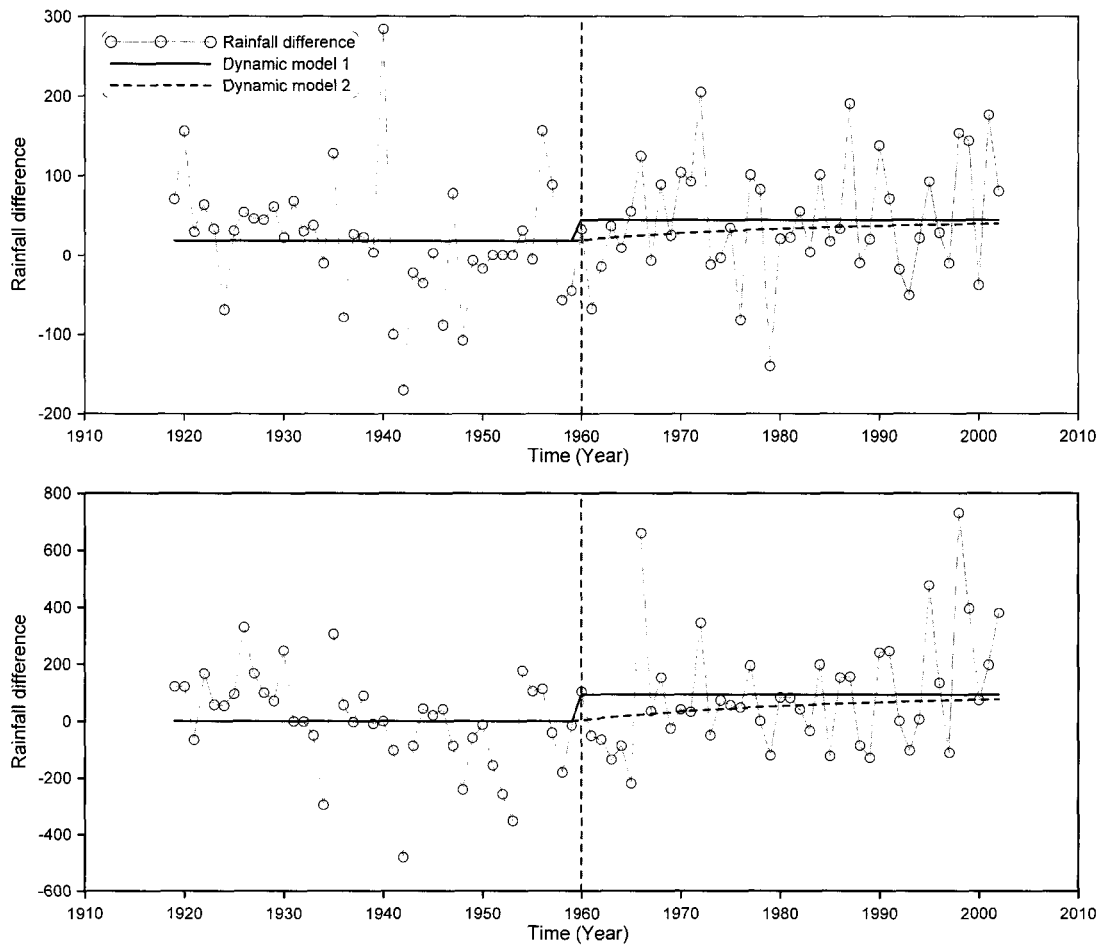


Fig. 12. Application Results of Intervention Models Derived to the Difference of Rainfall between Seoul and Jeonju Rain Gauge Stations (Top: Annual Maximum Daily Rainfall, Bottom: Total Volume of Annual Maximum Rainfall Event)

Table 4. Intervention Models Derived for the Difference of Rainfall between Seoul and Jeonju Rain Gauge Stations (Case 2)

Case	Annual maximum daily rainfall	Total volume of annual maximum rainfall event
Dynamic model 2	$f_t = \frac{1.036B}{1-0.96B} S_t^{(T)}$	$f_t = \frac{3.772B}{1-0.96B} S_t^{(T)}$

5. 결 론

본 연구에서는 서울지점의 강우자료에 대한 분석을 통해 도시화가 강우 특성의 변화에 어떤 영향을 미치는지 파악해 보았다. 이를 위해 관측길이가 상대적으로 길며, 도시화의 정도가 상대적으로 덜한 전주지점 및 기록의 길이는 짧으나 서울 인근지점으로 도시화의 영향이 매우 적을 것으로 판단되는 이천지점의 강우자료를 비교 대상으로 이용하였다. 아울러 간섭분석을 통하여 이에 대한 정량화를 수행하였다.

먼저, 일강우량에 대한 분석에서는 연최대일강우량, 연최대 호우사상의 총강우량 및 연총강우량의 경우, 서울지점과 전주지점의 차이, 서울지점과 이천지점의 차이 모두 증가하는 경향이 나타났다. 이는 서울지점 강우에 도시화의 영향이 점점 증가하는 형태로 나타나고 있는 결과로 이해할 수 있다.

아울러 시강우량에 대한 분석에 있어 1960년대 이전의 자료와 이후자료에 대한 차이가 존재하기는 하지만 전체적으로 강우강도가 지속적으로 증가하는 경향이 있음을 파악할 수 있었다. 연최대치 호우사상의 최대강우강도는 점점 증가하는 추세이며 총지속시간의 경우는 전체기간에 대해 감소하는 경향이 나타났다. 특히, 1960년 이후에는 그 평균이 과거보다 현저히 감소하였다. 이러한 결과는 극치 강우의 양상이 짧은 시간 동안 많은 양이 내리는 방향으로 변해가고 있음을 나타내며 이는 서울의 도시화에 의한 강우 특성의 변화를 의미한다.

이와 더불어 이러한 서울의 강우자료의 특성을 이용하여 도시화에 대한 강우 특성의 변화분이라 판단할 수 있는 서울과 전주지점의 강우량의 차이를 간섭모형에 적용하였다. 추세분석 결과 나타난 1960년을 간섭시점으로 판단하고 Case 1 및 Case 2 동태모형에 적용한 결과 연최대 일강우량 보다는 연최대 호우사상의 총강우량이 간섭의 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 도시화의 영향이 극한호우사상에 상당한 영향을 미치고 있음을 의미한다. 아울러 연최대 일강우량, 연최대 호우사상 모두 여전히 증가상태에 있으며 따라서 간섭분석의 결과만으로 판단할 경우, 도시화에 의한 강우특성의 변화는 향후에도 계속될 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 도시화에 의한 강우특성의 변화 분석은 자료 내에 또 다른 변화요인이란 할 수 있는 기후변화의 영향이 배제되어 있는 결과이다. 따라서 지구온난화의 영향을 추가로 분리한 후 분석을 수행한다면 도시화의 영향과 기후변화의 영향이 함께 고려된 변화를 정량화할 수 있을 것이다. 하지만 이 과정은 또다른 연구가 필요하므로 추후 연구과제에 남기기로 한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 기상연구소 (2003). 도시대기특성 예측 및 응용기술 개발(I). 연구보고서.
- 기상연구소 (2004). 도시대기특성 예측 및 응용기술 개발(II). 연구보고서.
- 김성렬, 양진석 (1995). "한국의 온대저기압성 강수지역 구분." **한국지역지리학회지**, 한국지역지리학회, 제1권, 제1호, pp. 45-60.
- 김용태, 이동률, 김선권, 이시현 (2000). "군집분석을 이용한 동질 강수지역 구분." **2000 한국수자원학회 발표회 초록집**, 한국수자원학회, pp. 75-78.
- 문영수 (1990). "클러스터분석에 의한 한국의 강수지역 구분." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제24권, 제4호, pp. 203-215.
- 문영수 (1996). "일조시간의 연변화에 따른 한국의 지역구분." **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제5권, 제3호, pp. 253-263.
- 박정규, 이승만 (1993). "연강수량에 의한 남한의 강수 지역구분." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제29권, 제2호, pp. 117-126.
- 유철상, 이재수, 백경록, 김중훈 (2000). "중복간섭모형을 이용한 대구시의 4월 기온변화 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제4호,

- 1226-6280.
- 이현영 (1989). “원격탐사기법에 의한 도시열섬연구.” *대한지리학회지*, 대한지리학회, Vol. 40, pp. 1-13.
- 최병선 (1995). *다변량시계열분석*. 세경사.
- Atkinson, B. W. (1971). “The effect of an urban area on the precipitation from a moving thunderstorm.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 10, pp. 47-55.
- Balling, R. C. and Brazel, S. W. (1987). “Recent change in Phoenix, Arizona summertime diurnal precipitation patterns.” *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 38, pp. 50-54.
- Box, G.E.P., and Tiao, G.C. (1975). “Intervention analysis with applications to economic and environmental problems.” *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 70, No. 349, pp. 70-79.
- Changnon, S. A. (1968). “The La Porte weather anomaly—fact or fiction?” *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 49, pp. 4-11.
- Changnon, S. A. (1969). “Recent studies of urban effects on precipitation in the United States.” *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 50, pp. 411-421.
- Changnon, S. A. (1992). “Inadvertent weather modification in urban areas: lessons for global climate change.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 73, pp. 619-627.
- Changnon, S. A., Shealy, R. T., and Scott, R. W. (1991). “Precipitation change in Fall, Winter, and Spring caused by St. Louis.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 30, pp. 126-134.
- Cotton, W. R. (1995). *Human Impacts on Weather and Climate*. Cambridge University Press.
- Goldreich, Y. (1996). “Urban topoclimatology.” *Progress in Physical Geography*, Vol. 8, pp. 336-364.
- Huff, E. A. and Changnon, S. A. (1973). “Precipitation modification by major urban areas.” *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 54, 1220-1232.
- Jauregui, E. and Romales, E. (1996). “Urban effect on convective precipitation in Mexico City.” *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 20, pp. 3383-3389.
- Khemani, L. T. and Murty, B. V. R. (1973). “Rainfall variations in an urban industrial region.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 12, pp. 187-194.
- Kline, D. B. and Brier, G. W. (1961). “Some experiments on the measurements of the natural ice nuclei.” *Monthly Weather Review*, Vol. 89, pp. 263-272.
- Landsberg, H. E. (1979). “Atmospheric changes in a growing community.” *Urban Ecology*, Vol. 4, pp. 53-81.
- Langer, G., Biter, C., and Dascher, A. (1968). “An automated aircraft instrumentation system for cloud nucleation studies.” *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 49, pp. 914-917.
- Lo, C. P., Quattrochi, D. A., and Luvall, J. C. (1997). “Application of high resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect.” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, pp. 287-304.
- Oh, S., Kim, Y. and Hyun, M. (2004). “Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973-2002.” *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 4, No. 6, pp. 725-740.
- Oke, T. R. (1981). “Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations.” *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp. 237-254.
- Oke, T. R. (1995). “Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area.” *Progress in Physical Geography*, Vol. 19, pp. 107-113.
- Rosenberger, M. S. and Suckling, P. W. (1989). “Precipitation climatology in the Pittsburgh urban area during late spring and summer.” *Southeastern Geographer*, Vol. 29, pp. 75-91.
- Semonin, R. G. (1966). “Observations of giant chloride particles in the Midwest.” *Journal of Atmospheric Research*, Vol. 2, pp. 251-260.
- Squires, P. (1966). “An estimation of the anthropogenic production of cloud nuclei.” *Journal of Atmospheric Research*, Vol. 2, pp. 297-307.

(논문번호:06-100/접수:2006.10.12/심사완료:2007.07.30)