

도시 방재를 위한 한강 유역의 강수량 분석



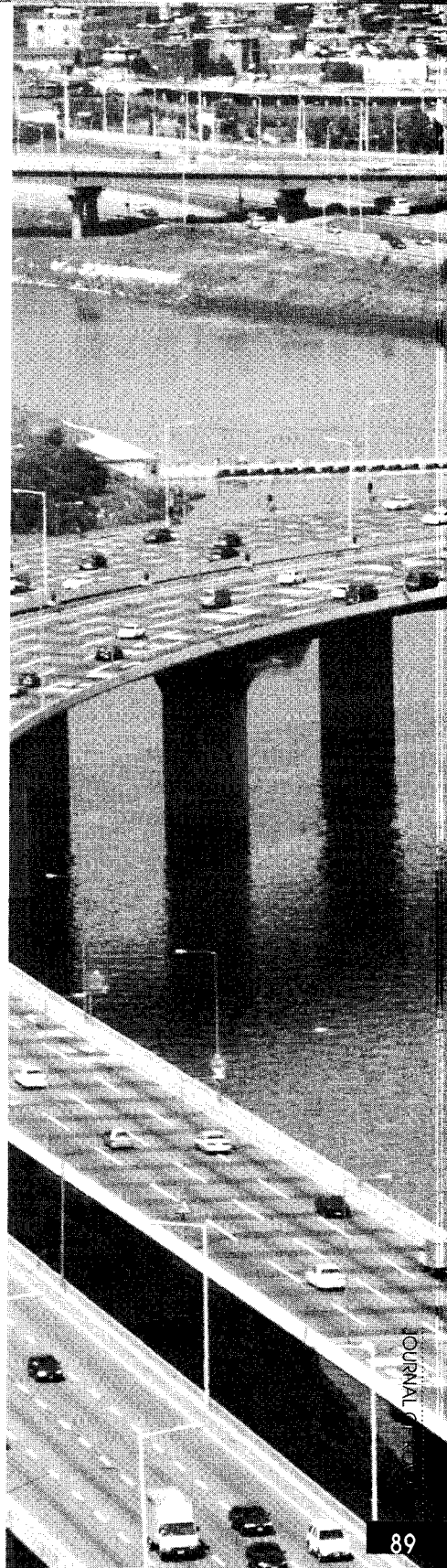
오성남 >
기상청 기상연구소, 원격탐사연구실장

1. 서론

서울을 비롯한 중부 도시지역의 수자원 공급원인 한강유역의 강수량을 살펴봄으로써 이들 지역의 홍수 등 자연재해에 대한 방재 예측에 크게 기여할 수 있다. 한강 상류 지역은 중부지방의 편서풍의 영향을 받는 남북으로 이어진 가파른 산맥과 연결되어 있어 연중 계속된 강수 현상으로 풍부한 수자원을 공급하고 있다. 그러나 인구가 밀집한 유역의 하류 도시 지역은 홍수 등 재해에 대한 의존도가 어느 지역보다 높을 수 있다.

한반도의 연평균 강수량은 1,310 mm로서 과거의 연평균 1,270 mm 보다 높게 나타나 한강유역의 강수량은 최근 들어 증가 추세에 있으나(권태영 등, 1998) 장기간으로 볼 때 아직은 뚜렷한 변화가 나타나지 않고 있다(이준이 등, 1999). 최근 지구 온난화 등 기후 변화에 따른 지역별 강수 변동에 대한 연구가 활발하여(오성남, 등 1998; 김맹기 등, 2000) 이들에 의하면 지구 온난화에 의한 전구적 기온 상승과 달리 강수량은 계절별 변화와 지형특성에 따른 변동성이 심화되어 가고 있어 강수 평균값의 변화에 대한 조사보다는 극값의 변동에 초점을 맞춘 연구가 제안되고 있다.

세계기상기구(World Meteorological Organization)보고(WMO, 2005)에 의하면 일본과 미국의 경우 강수의 극값이 지난 100



년간 증가하는 것으로 나타났으며 (Iwashima 등, 1993) 남아프리카와 호주에서도 연평균 강수량은 감소하지만 극값의 발생빈도는 오히려 증가됨이 파악되었다. 중국의 경우 과거 50년 기간 강수량이 감소하였지만 강수일과 강수의 지속 시간이 감소함에 따라 오히려 강우강도는 높아졌음이 조사된 바 있다(Zhai 등, 1999). 이동규(1999)에 의하면 우리나라도 관측 기록으로 볼 때 1904년부터 1993년까지 약 90년 기간의 집중호우 발생 빈도는 증가하는 추세이다 (기상청, 2003).

중국의 대륙을 크게 8개의 지역으로 나누어 비교 조사한 결과 지역에 따른 강우강도와 빈도 값이 상반되어 나타나기도 했다. 차은정 등 (1999)은 남한의 강수량 분석에서도 분석기간과 관측 지점 수에 따라서 차이가 있음을 밝힌바 있다. 따라서 강수량의 분석기간과 관측 지점의 선정은 강수분석의 중요한 인자로서 하천 유역의 강수의 확률 분석에도 영향을 미친다 (Krzysztofowicz, 1993).

본 연구는 중부지역 한강유역의 강수량과 강우강도의 추세를 분석하고 강우 극값을 구하여 서울을 중심으로 한강 하천 하류 지역의 강수특성을 밝혀 보고자 한다. 또 이 지역의 강수량과 강우 빈도에 대한 확률 강수를 파악함으로써 자연재해의 가능성을 진단하고자 한다. 이를 위하여 1960년부터 1999년까지 40년 기간의 중부 지역 한강 유역의 강수량 변동 특성과 1976년부터 2005년 기간의 서울 지역 호우에 대한 확률 특성을 조사하였다.

2. 자료 및 분석

호우 및 평균 강수 변동에 대한 분석은 동 기간에 대하여 서울을 비롯한 한강유역의 11개 기상 관측소 (Fig. 1)의 일 강수 값 (Table 1)으로부터 구하여 졌다. 분석기간은 서울의 경우 1960년부터, 춘천 강릉은 1971년 1월부터 그리고 대관령은 1972년 1월부터, 나머지 지역은 1973년 1월부터 모두 1999년 12월까

지의 강수 관측 값이다.

또한 1976년부터 2005년까지의 30년 기간 동안의 강수량 변동을 살펴보기 위해 서울과 강릉 및 대관령의 호우 발생 빈도와 10년 기간별 (70년대, 80년대, 90년대) 월 강수량과 일 강우강도를 각 기간별로 비교하였다. 또한 강수량 극값의 변동을 파악하기 위해 연별 일 최대 강수량과 각 지역의 연평균 일별 및 시간별 강우강도와 최대 연속 강수일의 연별 강우지수와 확률 강수량을 분석하였다.

2.1 강수량 및 강우강도 추세

1971~1999년(29년) 기간의 한강유역 11개 지점의 일 강수량을 분류하여 일 80 mm 이상의 강수 값을 나타내는 경우만 호우로 정하였다. 동 기간의 서울과 강릉 및 대관령의 지역별 비교를 위하여 1976년~2005년 30년 기간의 강수 특성이 사례 조사되었다. 또 한강 유역의 강수의 경년 변화(Inter-annual variation)와 일 최고 및 3일 최고 강수량은 추세분석과 일 강수량 10mm, 50mm, 100mm 이상인 강수일과 일별 강수 극값을 파악하기 위하여 강우 지수 (Rainfall Index, RI)와 함께 식(1)과 같이 계산되었다.

$$RI = \left[\frac{\sum_{i=1}^m P_i}{m} + \frac{k}{m} \right] \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 P : 년별 6~8월의 강우 이상편차 (rainfall anomaly)

R : 1971~1999년 기간의 6~8월의 평균 강우량

m : 강수관측소 수(數)

k : 양의 이상편차(positive rainfall anomaly)를 포함한 관측소의 수

강우지수에 대한 평가로서는 평활한 지형에서 낮은 유출을 나타내는 중국의 경우 평년 강수량의 25%를 기준으로 홍수와 가뭄을 정의하고 35%를 기준으

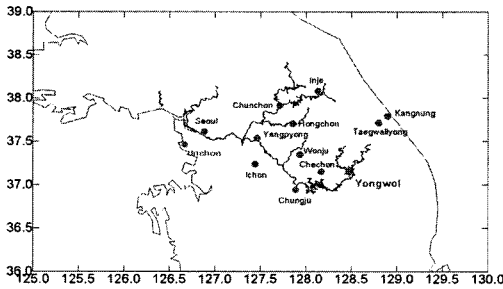


Fig. 1. Han River area and meteorological observation sites

로 극한 홍수와 극한 가뭄으로 구별하는 기준 (Zhai, et al. 1999) 과 비교하였다.

2.2 강수와 기상조건과의 상관성

강수의 발생조건에 따라 지형강수(orographic rainfall)와 기단과 전선 이동에 따른 강수로 분류하여 지형과의 상관성을 조사하였다. 또 16개 자동기상관측시스템으로부터 측정된 강우 값을 이용하여 1920~1990년 기간의 일 강수량을 월별 및 년별 변화 조화분석(Harmonic analysis)을 통한 강우의 패턴을 분석하였다. 기후변화에 의한 강수변화 조사는 강릉, 인제, 원주, 서울, 제천, 인천 등 지역을 중심으로 시간별 강우강도 추세 분석과 과거 70년 기간의 일 강수량 경년 변화 조사 및 1980년~1989년, 1990년~1999년 기간의 강수량(월별 평균)의 변화를 조사하였다.

2.3 표준 강수 지수(Standardize Precipitation Index, SPI) 분석

표준 강수 지수(Standardized Precipitation Index, SPI)는 감마함수로서 근사한 표준화된 강수 지수로서 가뭄의 시기와 강도를 나타내는 지수이다. 이산 파엽 분석(discrete wavelet analysis)은 분해와 재구성을 통해 각 규모별 특이기상의 발생 현황과 기여도를 알아볼 수 있다. 서울의 특이치 발생은 10년 규모 이상의 변동에 의한 것으로 2-4년 규모의 변동성이 10년 기간 규모로 교차하여 나타나고 있다.

3 분석

3.1 강수량 및 강우 강도 추세 분석

3.1.1 호우

기상청의 호우에 대한 정의는 강수량이 80 mm 이상인 경우를 의미하며 이때 호우주의보가 발령 된다 (홍성길, 1999). 호우의 빈도와 강수량의 변화를 살펴볼 때 Fig. 2와 3과 같이 시간에 따른 증가의 경향이 나타났다. 호우 빈도에 대한 시간에 대한 상관성을 살펴보면 한강유역에서의 호우의 양과 빈도에 대한 증가율이 연도별 0.7로서 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 상관성이 0.3으로 낮게 나타나 강수의 증가율에 대한 신뢰는 높게 나타나지 않았다.

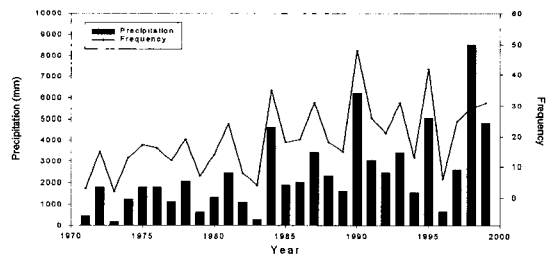


Fig. 2. Total amount of annual precipitation and frequency of heavy rain(over 80mm/day) at 11 sites from 1971 to 1999

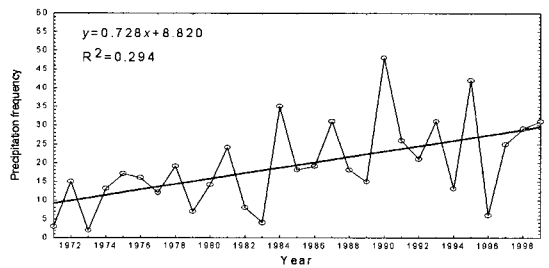


Fig. 3. Annual trend of frequency of heavy rain (over 80mm/day)on Han river area.

3.1.2 월별 강수량과 일별 강우강도

1971년부터 1999년까지의 30년 기간의 월 강수량과 일 강우강도를 각 10년 기간별로 비교하여 살펴본

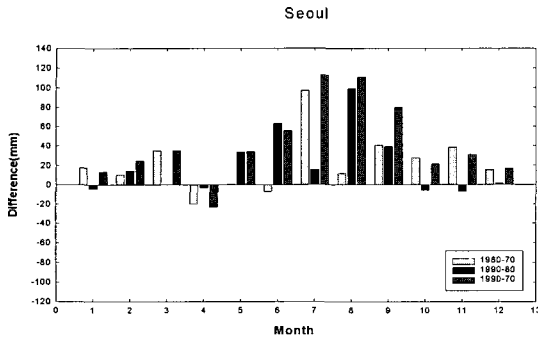


Fig. 4. Differences of monthly precipitation between two decadal years during the period 1980-70, 1990-80, and 1990-70 at Seoul

결과 Fig. 4와 같이 서울의 경우 뚜렷한 증가 경향을 보였다. 이 경우 각 관측소에서의 월 강수량의 10년간 비교에서는 대체로 6월, 7월, 8월에 증가를 보이며, 4월의 경우에는 대체로 감소함을 알 수 있다.

3.1.3 일 최대 강수량

Fig. 5는 1971년부터 1999년까지의 각 관측소에서의 일 최대강수량의 변화로서 이 기간에 뚜렷한 증가 또는 감소 현상을 보이지 않고 있다.

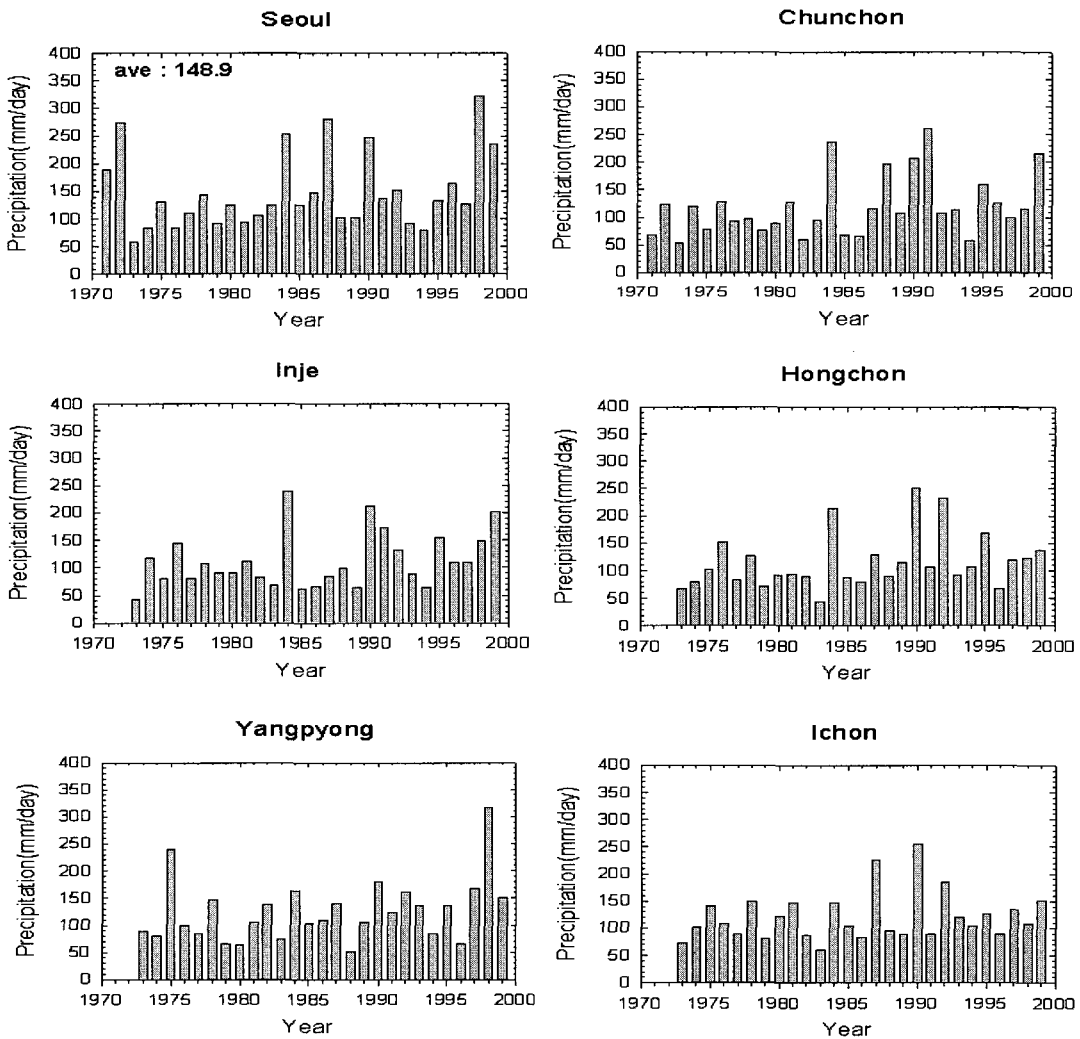


Fig. 5. The maximum daily precipitation in every year during the period from 1971 to 1999 at 11 sites near Han River in Korea.

3.1.4 3일 연속 최대 강수량

Fig. 6은 3일 연속 최대 강수량으로서 주기적으로 증감을 반복하면서 30년 기간동안에는 뚜렷한 증가나 감소를 살펴 볼 수 없다.

3.1.5 일 초과 강수량 (10, 30, 50, 100 mm/day)

한강 유역의 호우 발생 가능성을 파악하기 위하여 호우의 한계를 10mm, 30mm, 50mm, 100mm 일 강수량으로 분류하여 이들 강수량에 대한 년별 강수일 빈도를 나타내어 보았다. 서울의 경우 일강수량이 10mm 이상인 강수일은 평균 28.1일이었고, 1990년의 경우 46일로 최대로 나타났다. 100mm 이상인 강수일은 평균 1.1일로 전체 초과 강수량의 3.9%로 낮게 나타났다.

3.1.6 연평균 일 강우강도와 시간별 강우강도

한강유역의 11개 관측소에서의 각 10년간 일 강우강도의 월별 변화를 비교 분석한 결과를 나타내는 것으로 방법은 각 10년 기간별 월 강수량 차이에서와 같다. 여기서 각 10년 기간별 강우강도 차이는 강수량의 경우와 같다.

연 평균 일 강우강도의 평균값은 서울 13.1mm/day, 춘천 12.6mm/day, 인제11.2mm/day, 홍천 13.4mm/day, 양평 13.5mm/day, 이천 13.8mm/day

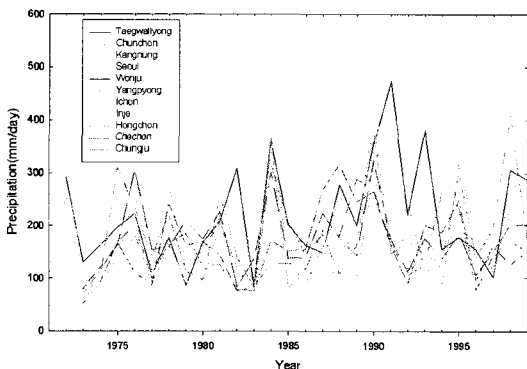


Fig. 6. The maximum precipitation for 3 consecutive days at each year during the period from 1971 to 1999 at 11 sites near Han River in Korea

day 원주 11.0 mm/day, 제천 12.7mm/day, 충주 12.2mm/day, 대관령 11.9mm/day, 강릉 12.0mm/day로, 최소 8mm/day에서 최대 20mm/day로 나타났다. 30년 기간동안의 경년변화에서도 뚜렷한 증가나 감소를 살펴보기가 어려웠다.

Fig. 7은 각 지역에서의 연평균 시간별 강우강도를 나타내며, 평균이 0.5mm/hour로 최소 0.2mm/hour에서 최대 0.9mm/hour의 강도를 가진다. 각 지역에서 시간별 강우강도가 다소 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

3.1.7 최대 연속 강수일

한강 유역 11개 관측소에서의 연별 최대 연속 강수일은 평균 6.6일로 최단 3일에서 최장 19일 까지 분포하며, 70년대 하반기, 80년대 하반기 그리고 최근에 강수의 지속일이 최대로 나타났다. 그러나 최근 30년 동안 뚜렷한 증가의 경향은 살펴보기 어렵다.

3.1.8 강우지수(Rainfall Index)

한강 수계의 강수는 연중 6~8월까지의 하절기에 집중되어 있으므로 이 기간의 강우에 의한 홍수 발생을 강우지수 분석으로 파악하여 보았다. 선정된 11개 관측소에 대하여 1973년부터 1999년까지의 연별 하절기의 강우지수(RI)를 구하였다 (Fig. 8). Panmao Zhai 등(1999)은 중국에서의 강우지수(RI)가 25% 이상일 때를 홍수로, -25% 이하일 때를 가뭄으로 보았고, 35% 이상일 때를 이상(severe) 홍수로, -35%

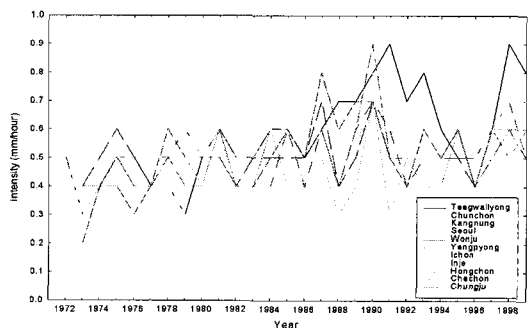


Fig 7. Hourly rainfall intensity at 11 sites during the period from 1971 to 1999.

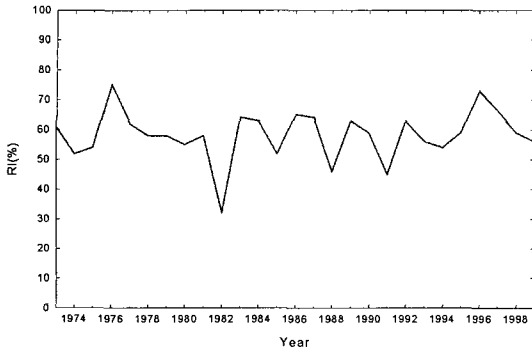


Fig. 8. Rainfall index (RI) of Han river area during the period from 1973 to 1999.

이하인 경우를 이상 가뭄으로 보았다. Tab분석된 기간은 모두 홍수나 이상 홍수에 해당한다. 우리나라의 경우 호우의 기준이 80mm인데 비하여 중국의 경우 50mm 이상을 호우로 보며, 경사가 가파르고 유역이 길이가 짧고 지형과 토양 및 지표상태가 중국과 다르므로 강우지수에 의한 홍수의 기준은 다르다. 따라서 우리나라의 강수량 특성에 따른 기준이 필요하다고 생각되어진다. 여기에 사용된 관측지점이 중국의 경우보다 적은 것도 하나의 문제점이 될 수 있다.

3.1.9 확률 강수량

한강유역에서 호우(일 강수량 80mm 이상)가 내릴 확률을 지난 30년 기간동안의 강수분석을 통하여 분

석하였다. 강수 확률식은 식 (2)와 (3)과 같다. 분석된 값은 Table 1에 나타난다.

$$PPF(\%) = \frac{\text{전 기간의 일별 80mm이상인 강수일 수}}{\text{전 기간의 각 관측 지점의 총 강수일 수}} \times 100 \quad (2)$$

$$PPF(\%) = \frac{\text{전 기간의 일별 80mm이상인 총 강수량}}{\text{전 기간의 각 관측 지점의 총 강수량}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, PPF는 지난 30년 기간 자료의 분석을 통한 확률 강수량으로서 그 기간 동안에 한강유역에서 호우빈도에 대한 확률을 의미하며 백분율로 표시된다. 또한 PPA는 총 강수량에 대한 호우의 강수량의 비율로서 또한 백분율로 표시된다. Table 3에서 event는 호우의 빈도수, k는 비가 온 날의 수를 나타내며, p_event는 호우가 온 날의 총 강수량, p_total은 30년 기간동안의 총 강수량을 나타낸다. 분석된 확률강수의 결과(Table 3)를 살펴보면 PPF는 약 2% 내외의 낮은 범위를 가지며, PPA는 약 20%내외로 나타난다. 즉, 호우가 있을 확률은 100번 중 2번 정도로 적은 반면 그 때 내리는 강수량 전체 양의 20% 즉 1/5의 비가 내리는 것을 알 수 있다.

3.1.10 남한의 기후변화와 한강 유역의 강수량의 변화 지구 온난화 등에 의한 남한의 기후변화에 대한 강

Table 1. The precipitation probability for heavy rain (over 80mm/day) at 11 sites near Han River in Korea during the period from 1971 to 1999

	PPF(%)	event	k	PPA(%)	p_event	p_total
서울	2.5	63	2494	23.6	7720.7	32680.4
춘천	2.2	52	2414	19.8	5979.8	30217.0
인제	1.7	36	2175	17.1	4174.4	24474.3
홍천	2.5	54	2153	20.6	5907.6	28705.0
양평	2.7	57	2151	22.7	6625.5	29135.0
이천	2.5	54	2155	19.8	5809.0	29355.0
원주	1.7	45	2649	16.9	4943.8	29249.0
제천	1.9	42	2253	16.8	4733.5	28231.8
충주	1.8	40	2191	17.0	4395.8	25903.6
대관령	2.2	70	3154	23.2	8778.1	37855.0
강릉	2.0	51	2600	19.7	6175.5	31363.4

수량의 변화를 파악하기 위하여 박정수 등(1999)은 남한의 6개 관측소 자료를 1919년부터 1997년까지 79년간의 자료를 3개월 이동 평균한 연별 총강수량을 13개 시계열 분석 방법으로 검토하였고 그 결과 어느 계절에도 강수량의 통계적으로 유의미한 증가가 탐지되지 않았다. 연구 대상의 강수량 관측 값을 통해서 볼 때 지구 온난화와 한반도 강수량과는 특별한 관계를 파악하지 못했다. 일부 계절에 증가량이 상당히 많은데 의미 있는 증가라고 할 수 없는 것은 연별 변동이 매우 높아 통계적 의미를 갖지 못하기 때문이다.

지구 온난화 기후변화와 연관된 우리나라의 강수량은 기후변화 예측모형을 이용하여 분석할 수 있다. 현재까지 개발되어 이용할 수 있는 예측모형은 미국, 일본, 독일 등이 개발한 대기대순환 모형(General Circulation Model : GCM)으로서 본 연구에서는 일본 기상연구소(MRI)의 해양 대기 접합 대기대순환 모형(CGCM)이 계산한 기후 예측 시나리오를 Fig. 9와 같이 분석하여 보았다. MRI-CGCM에서는 매년 CO₂가 1%씩 증가하는 가정으로 향후 100년까지 이를 점증시켰다. 이 결과 향후 70년 후인 서기 2070년에는 대기 중의 CO₂가 약 660 ppm으로 현재의 2배가 될 것이며, 이 경우 8월의 강수량이 한반도 중·남부 지역에서 약 2~4 mm/day 증가하는 것으로 나타났다. 또 CO₂만의 순수한 증가치에 따른 강수량 변화만을 산출하기 위하여 CO₂ 농도를 고정시킨 기후상태와 비교하여 보면 더욱 명확히 알 수 있다. 이것은 한반도에서 향후 80년까지는 약 1 mm/day 정도의 강수량 증가가 예상되며, 향후 91년에서 100년에는 1.5~2 mm/day의 강수량의 증가가 예측되었다. 그러나 강수 증가 지역이 북한 지역으로 나타나 한강유역과는 다소 차이가 있다.

4. 결론

국내의 강수량 분석의 과거 연구에서 강수량의 통계적으로 유의한 증가가 탐지되지 않았다(기상연구소, 1999)는 결과와 같이 본 연구의 강수량 분석결과에서도 연별 강수량의 뚜렷한 증가는 나타나지 않았다. 한강유역을 중심으로 중부지방의 호우현상의 분석에서도 호우 강도와 그 빈도가 약간의 증가를 보였지만 그 변화량의 정도에 있어서 홍수와는 뚜렷한 상관성을 발견할 수 없었고 일 최대강수량과 3일 연속 최대강수량의 분석에서도 30년 동안 뚜렷한 증가나 감소를 나타내지 않았다. 또한 하루 중 10 mm 이상 강수의 빈도는 대부분 증가를 보이고 있지만 50 mm 혹은 100 mm 이상 강수의 빈도는 증가현상을 보이

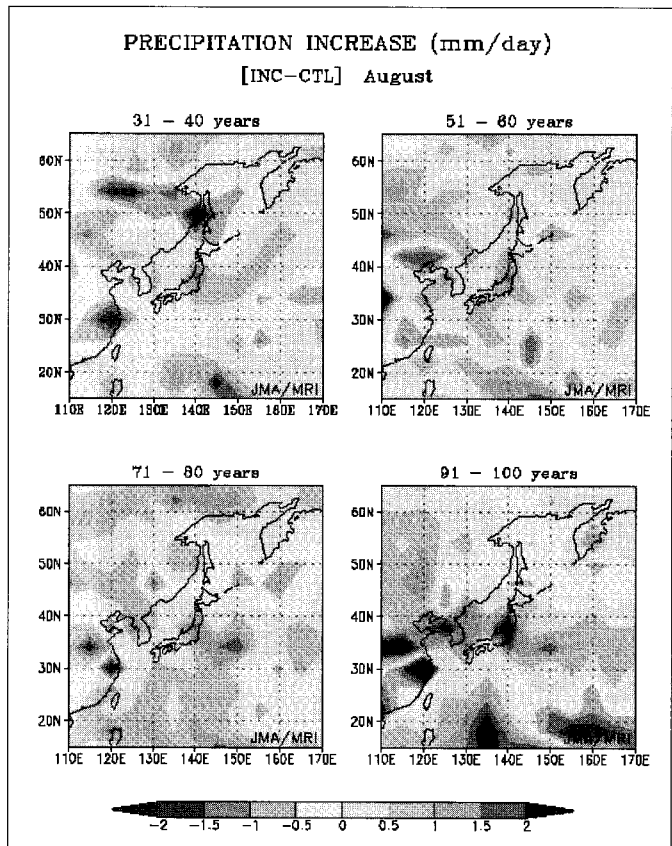


Fig. 9. The difference between transient experiment(INC) and fixed CO₂ experiment results(CTL) using MRI-CGCM.

지 않았다. 일 강우강도와 최대 연속 강수일 역시 주
기별 증감을 계속하면서도 전체 분석기간에 걸쳐 뚜
렷한 증가나 감소의 경향을 살펴보기 어려웠다. 그러
나 시간별 강우강도는 최근 30년간 다소의 증가를 보
였으며 월 강수량과 일 강우강도의 각 10년 기간별
비교에 있어서 지역에 따라 여름철과 초가을의 월 강수
량과 일별 강우강도의 증가를 보여 호우발생이 증가
할 수 있는 가능성을 보였다.

한반도에서 강수에 의한 홍수현상은 크게 세 가지
로 볼 수 있다. 첫째 장기간 정체되는 아시아 몬순 전
선(장마)형 홍수와 둘째 여름이나 가을에 주로 발생하
는 국지적 정체전선의 집중호우와 태풍에 의한 홍수,
셋째는 기후변화 또는 이상기상패턴(El Niño, La
Niño 등)에 의한 국지 기상장 변동에 따른 집중호우
이다. 여기서 장마와 국지성 정체전선에 의한 홍수는
하천 폭이 좁은 지형적 조건을 가진 우리나라 지역에
서는 홍수발생이 더 가중될 우려가 있다. 태풍에 의
한 영향은 지금까지 한강유역 하류지역에서는 높게
나타나지 않았으나 산악효과와 증첩될 때 태풍에 의
한 간접적인 호우형상이 가중될 수 있다. 지구온난화
기후변화 등에 의해 발생하는 기단의 정체성(북태평
고기압 등) 효과는 그 강도가 증가하여 한반도 특히
북한의 강수 증가를 보였다. 한강 하천유역에도 강수
량과 호우의 증가 영향을 줄 것으로 보이나 크게 높
지 않을 것으로 모의되었다.

또 주위가 개발되어지지 않은 지역의 강수 현상은
대도시 등의 도시기후 효과와 무관하나 서울과 같은
대도시의 열적 효과가 남서기류를 동반한 도시스콜
(Urban Squall)현상이 도시의 동쪽 고기압의 영향으
로 정체 될 때 발생하는 연쇄성 정체저기압이 집중호
우를 유발시킬 수 있다. 한강유역의 호우의 발생 확
률은 도시의 동쪽에 높게 나타난다.

참고문헌

1. 기상청, 1998: 집중호우 종합분석집. 98 예보기술

발표회.
2. 기상연구소, 2000: 기후변화 탐지 기술. 기후변화
시그널 검출 기술 개발(I), 35-43.
3. 권태영, 오성남, 박상욱, 1998: 한반도 여름 강우
의 장기변동과 지역적 특성, 한국기상학회. Vol.
34, No.1, 23-35.
4. 김맹기, 강인식, 허창희, 2000: CO₂ 점증 실험의
광역 규모 예측인자를 이용한 한반도 겨울철 강수
시나리오, 한국기상학회지, Vol. 36, No. 1, 65-74.
5. 오성남, 김정우, 하경자, 김기영, 1998 : 배증 이
산화탄소 기후에 따른 동북아시아 지역의 수문 영
향, 한국기상학회지, Vol. 34, No. 2, 293-305.
6. 이동규, 1999: 집중호우. 물리학과 첨단기술, Vol.
8, No. 6, 19-24.
7. 이준이, 강인식, 허창희, 1999: 통계적 방법을 이
용한 한반도 봄철 기온의 장기예측, 한국기상학회
지, Vol. 35, No. 3, 372-383.
8. 차은정, 전종갑, 정효상, 1999: 엘니뇨/라니냐 해
의 우리 나라 기후 특성에 관한 연구. 한국기상학
회지, Vol. 35, No.1, 98-117.
9. Cha E. J., Y. J. Choi, and J. H. Oh, 1999: A
Study on the climate characteristics 1998
summer and 1997/98 El Niño. China-Korea
joint Workshop on the East Asian
Monsoons, May. 19. 기상청.
10. Zhai P, A. Sun, F. Ren, and X. Liu, 1999:
Bo Gao and Qiang Zhang, Changes of
Climate Extremes in China. Climatic
Change, Vol. 42, 203-218.
11. Iwashima T. and R. Yamamoto, 1993: A
Statistical Analysis of the Extreme Events.
Long-Term Trend of Heavy Daily
Precipitation, Meteor. Soc. of Japan, Vol.
71, No.5, 637-640.
12. WMO, 2005: WMO Bulletin, Vol. 11, No1,
22-27.