한강하류의 홍수 피해와 강우량의 관계에 관한 연구

장지원 · 이승호

건국대학교 지리학과

(2014년 8월 13일 접수, 2014년 9월 2일 수정, 2014년 9월 10일 게재 확정)

Relationships between Rainfall and Flooding Disaster in the Downstream Areas of Han River

Jiwon Jang · Seungho Lee

Department of Geography, Konkuk University

(Received 13 August 2014, Revised 2 September 2014, Accepted 10 September 2014)

Abstract : This study was aimed to investigate the relationship between flood damage and rainfall in the downstream areas of Han River. We used flooding damage and daily rainfall data observed in the 12 downstream areas during 2000-2012. Rainfall variables were analysed which include total rainfall over the basin of downstream areas in the Han River for flooding periods, maximum accumulative rainfall over 1 hours, 3 hours, 6 hours and 12 hours, and rainfall in the upper regions of the Han River. Flooding damages of the study areas have significant positive correlations with rainfall variables. The most significant variable that affect the amount of damage is 3 hour accumulative precipitation. It means that the more three-hour precipitation increases, the more the amount of damage also increases. We found that there is a high possibility of floods when a heavy rainfall day continues for more than 2 days by comparing heavy rainfall days between with and without flooding disasters. The possibility of flood decreases when interval of just before a heavy rainfall day and flooding period increase.

Key Words : flooding disaster, characteristics of rainfall, downstream areas of Han River, rainfall, three-hour precipitation

주요어 : 홍수 피해, 강우 특성, 한강 하류, 강우량, 3시간 강우량

1. 서론

우리나라에서 발생하는 자연재해의 90% 정도는 기상현상과 관련된 것이며(Sim, 2005), 호우, 태풍, 폭풍에 의한 재해가 대부분을 차지한다. 최

근의 적극적인 방재 노력에도 불구하고 홍수에 의한 인명 및 재산 피해가 매년 되풀이 되고 있다. 2003년부터 2012년까지 최근 10년간 11조원의 자연재해 피해액 중 30% 이상이 호우에 의한 것이고, 매년 1조원 이상의 피해가 지속적으로 발생하

였다(NEMA, 2013). 태풍은 내습 시 강풍을 동반한다는 점에서 호우와 차이가 있지만 단시간에 많은 강우가 재해 발생에 결정적 역할을 하고, 그 때문에 태풍과 호우에 의한 피해액은 기상재해에 의한 전체 피해액의 80%에 이른다.

재해의 발생에는 강우 특성 등의 자연적 요인과 인구밀도, 방재시설, 산업시설의 입지 등 인위적인 요인이 복합적으로 작용하므로 동일한 호우 사상이라 할지라도 지역별로 재해 발생 가능성이 다르다(Roger *et al.*, 2000; Changnon, 1996; FIFMTF, 1992). 따라서 정교한 방재시스템을 구축하기 위해서는 이미 구축된 방재시스템의 수준이나 인프라의 발전 정도와 같은 지역적 특성에 따라, 재해를 유발할 수 있는 재해 발생 요인과 그 한계를 파악하는 것이 중요하다.

우리나라에서 홍수피해는 여름철에 집중되어 내리는 강우 특성과, 유역면적이 좁다는 지형적 특성이 복합적으로 작용하여 주로 여름철에 발생한다(Kwon *et al.*, 1998; Cha, 2006). 최근의 연구에서는 전구적인 경향과 비슷하게 우리나라에서도 강우량과 강우강도가 증가하는 강수 특성 변화가 있다고 밝혔으며, 변화의 정도는 지역별로 차이를 보인다고 하였다(Groisman *et al.*, 2005; Choi, 2004; Lee *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2013). 이와 더불어 최근에는 급경사면에서의 택지개발과 도로건설 등으로 인해 호우에 의한 재해의 위험성이 높아지고 있다(Ministry of Environment, 2003). 이와 같은 환경변화에 대비한 방재시스템을 구축하기 위해서는 소규모 유역별로 홍수와 관련된 강우 특성을 파악할 필요가 있다.

홍수피해와 관련된 국내의 연구는 적절한 호우특보 기준을 제시하기 위한 것에 집중되었다. Hong(1999)은 여러 시간 간격의 최대 누적 강우량과 피해액과의 관계를 이용하여 3시간 강우량

80mm, 12시간 강우량 100mm, 24시간 강우량 110mm를 호우특보에 적절한 시간간격과 기준으로 제시하였다. Kim *et al.*(2009)는 지역별로 호우특보 기준에 따른 강우와 피해액의 관계를 조사하여, 대비시스템에 따라 지역별로 다르게 나타나는 재해 발생 가능한 강우량을 산출하고자 하였다. 그 결과 방재 시스템이 비교적 잘 구축된 서울, 인천, 경기, 대전 등의 도시에서는 강우량이 증가함에 따라 홍수 피해액이 서서히 증가하지만, 그렇지 않은 지역에서는 주의보 이상의 강우 발생 시 홍수 피해액이 급격히 증가함을 보였다. 또한 Kim *et al.*(2011)은 최근의 기후변화로 인해 바뀐 강우 특성을 반영하고 강우 강도 개념을 도입하여, 새로운 호우특보 기준을 6시간 강우량 80mm와 12시간 강우량 100mm로 제시하였다. Park *et al.*(2011)은 지역별로 강우 특성과 홍수 피해액간의 관계를 밝히고, 극한 강우사상이 큰 피해를 야기하긴 하지만 빈도를 고려하면 피해액 중 많은 비중을 차지하는 강우량 구간에 초점을 맞추어 치수대책을 수립하는 것이 바람직하다고 제안하였다.

강우로 인한 재해와 강우 특성에 대한 기존연구에서는 지역적 차이가 상세히 고려되지 못하였고, 강우 특성을 재해 기간 동안의 총 강우 또는 강우 강도에만 국한시켜 그 외의 다양한 강우 특성이 고려되지 못하였다는 한계를 갖는다. 본 연구에서는 소규모 유역인 한강 하류 지역에 연구범위를 한정시켜 특정 지역에서 발생한 재해와 강우량의 관계를 밝히고자 하였다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 자료는 기상청의 기상관측소와 자동기상관측소에 측정한 시간별 강우량,

분석기간은 2000년부터 2012년까지 13년 동안이며, 시기는 6월부터 9월 사이이다. 2000년부터 자동기상관측소에서 의미 있는 강우량 자료가 축적되기 시작하였으므로 연구지역에서 가능한 한 여러 관측지점의 강우량 자료를 사용하기 위하여 분석기간을 최근 13년으로 한정하였다.

재해연보의 호우 피해액 자료는 행정구역으로 구축되어 있지만 점자료이기 때문에 행정구역별로 대응하기 어렵다는 문제점을 안고 있다. 이러한 한계를 극복하고자 주요 댐을 기준으로 유역의 경계를 구분하여 분석하였다. 즉, 팔당댐 하류의 한강유역을 한강 하류유역으로 정하였고, 북한강 유역의 경우 의암댐 상류를 의암댐 상류유역, 그 하류를 의암댐 하류유역, 남한강 유역의 경우 충주댐 상류를 충주댐 상류유역, 그 하류를 충주댐 하류유역으로 정하였다. 이에 따라 연구지역은 총 5개의 유역으로 구분되었다. 이 때 하나의 시·군이 두 개의 유역에 걸쳐 있는 경우는 행정구역의 중심지가 포함된 유역으로 분류하였으며, 남양주, 충주, 춘천이 이에 해당한다.

한강 하류유역에는 서울특별시를 포함하여 12개 시·군이 해당하며, 이 유역 내의 기상관측소는 서울, 김포, 의정부, 고양, 남양주, 군포, 성남, 과천, 구리 등 9개 지점이다. 이 유역의 면적은 국토의 2%에 불과하지만, 전국 인구의 30%와 총사업체의 30%가 집중되어 있어서 어느 지역보다도 홍수피해가 클 수 있는 지역이다.

의암댐 하류유역에는 가평과 홍천 2개의 기상관측지점이 포함되며, 의암댐 상류유역에는 춘천, 인제, 화천, 해안 등 4개의 기상관측지점이 포함되었다. 충주댐 하류 유역에는 원주, 충주, 괴산, 음성, 양평, 이천, 여주, 광주, 용인 등 9개 기상관측지점이 포함되었고, 충주댐 상류유역에는 영월, 평창, 단양, 제천, 횡성 등 5개 기상관측지점이 포함되었다. 각 유역의 평균 강우량은 유역 내 모든 분석지점의 값을 산술평균한 것이다. 본 연구에서 구분한 유역과 유역 강우량 산출에 사용된 기상관측지점은 Figure 1에 표시된 바와 같다.

한강 하류에 발생한 홍수 피해액과 유역 내 강우량과의 관계를 파악하기 위하여 홍수 피해액과 재해발생 시기의 강우량 사이의 상관관계를 분석

하였다. 또한 선행 강우량의 영향을 파악하기 위하여 재해발생 이전 5일 동안과 30일 동안 강우량과 홍수 피해액의 상관관계를 분석하였다. 각각의 회귀식을 구하여 강우량 변동과 홍수 피해액 변동의 관계를 정량적으로 파악하고, 식을 통해 예측된 값과 차이가 큰 사례에 대하여 잔차분석을 시행하였다. 즉, 잔차값이 예외적으로 큰 이례값을 발취하여 그 특성을 파악하였다. 홍수 피해액과 강우강도와의 관계는 한강 하류유역의 기상관측지점 중에서 1, 3, 6, 12 시간 기준별로 누적인 총 강우량 중 시간별 최댓값을 기준시간 최대 강우량으로 정의하고, 각 재해기간의 총 피해액과의 상관관계를 분석하였다. 기준시간은 호우특보 기준과 강우시간 등을 이용하여 설정하였다 (Hong, 1999; KMA, 2004). 상류 강우량과 홍수 피해액의 관계는 상류유역별 평균 강우량과 한강 하류유역의 홍수 피해액과의 상관관계를 분석하였다.

앞에서 제시된 강우량 변수 중 재해발생에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 찾기 위해 다중회귀분석을 실시하여, 한강 하류의 홍수 피해액을 가장 적합하게 설명할 수 있는 회귀모형을 구축하였다. 재해가 발생한 호우일과, 발생하지 않은 호우일의 특성을 비교하기 위하여 한강 하류유역에서 1지점 이상 일강우량 80mm 이상을 기록한 날을 호우일로 정하고, 호우지속일수, 직전 호우일과의 간격 등을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 토의

1) 강우에 의한 재해 발생 현황

한반도에서는 연강우량의 50% 이상이 여름철에 집중되어 있어서 호우로 인한 재해 역시 대부분 여름철에 발생한다. 대체로 6월과 7월에는 장

마전선에 의한 호우가 주요 재해원인이며, 8월에는 온대성 저기압과 태풍 등에 의하여 발생하는 호우가 재해를 일으킨다. 9월에도 늦장마와 태풍, 온대성 저기압 등의 영향으로 호우가 발생할 수 있다(Lee and Lee, 1992).

연구기간 동안 한강 하류에서 호우로 인한 재해의 총 사례는 28회이다. 이중 7월과 8월에 각각 13회와 9회로 두 달의 발생빈도가 높으며, 6월과 9월의 발생 빈도는 각각 3회로 낮다(Figure 2). 연구기간 동안 호우에 피해액은 약 1,130억 원으로 같은 기간 기상재해의 약 30%를 차지하였다. 이와 같이 호우피해 비율이 낮은 것은 연구기간동안 한반도에 심각한 재해를 유발한 두 개의 태풍(루사, 매미)이 피해를 끼쳤기 때문이다. 즉, 두 개의 태풍에 의한 피해액을 제외하면 호우로 인한 피해액의 비율이 더 높아진다.

월별로 보면, 장마전선이 본격적으로 영향을 미치는 7월에 발생한 피해액이 약 727억 원(64.5%)으로 압도적으로 높다. 7월의 재해발생 건당 피해액은 약 55.9억 원으로 발생빈도와 발생 건당 피해액이 모두 높다(Figure 3). 8월에는 재해 발생빈

도에 비하여 피해가 적은 편이어서 재해발생 건당 피해액은 약 18.7억 원이며, 총 피해액은 약 168억 원이었다. 늦장마와 태풍 등의 영향을 받는 9월에는 재해의 사례에 비하여 피해액이 많은 편이었다. 재해발생 건당 피해액은 77.5억 원이며, 총 피해액 약 233억 원(20.9%)으로 두 번째로 많은 달이다. 9월에 재해발생 건당 피해액이 많은 것은 호우의 규모뿐만 아니라 이미 우기를 지나온 시기이므로 지표면이 포화상태에 가까워서 나타나는 결과라 판단된다. 이에 반하여 6월은 호우로 인한 피해액이 약 1천 700만 원으로 분석기간 중 가장 적은 달이다. 이는 한반도의 월별 강우분포 특성을 반영한 것이라 할 수 있다. 즉, 장마 전의 건기를 지난 후이므로 호우가 발생한다 하여도 재해를 일으키는 요인이 되지 않았다고 판단된다.

연구기간 중 한강 하류에서 하나 지점 이상에서 일 강우량 80mm 이상인 날의 빈도를 보면, 전체 호우일 중에서 6월에 발생한 것은 7일(13%)에 불과하며, 주로 하순에 발생하는 경향이 뚜렷하다. 이는 6월 초, 중순에는 홍수를 일으킬 만한 강우가 드물다는 것을 의미한다. 5월의 호우빈도도 연

Figure 2. Monthly flooding damage amounts and the frequency in the downstream area of Han River.

Figure 3. Monthly average of flooding damage amounts in the downstream area of Han River.

구기간 중 3일로 6월은 수문환경이 포화되지 않아 지중에 많은 양의 수분을 포함시킬 수 있는 상태이기 때문에 재해발생 가능성이 낮아졌을 것이라 판단된다. 대부분의 호우는 7월과 8월에 집중되어 각각 19일(37%), 13일(25%) 발생하였다. 따라서 6월에 발생한 재해빈도가 낮은 것은 재해를 발생시킬 수 있는 호우빈도 자체가 다른 달에 비해 적기 때문이라고 판단된다.

2) 홍수 피해액과 유역 내 강우량과의 관계

홍수가 발생하기 위해서는 기본적으로 유역 내에 많은 강우가 있어야 한다. 한강 하류에서는 호우가 발생하면, 김포평야 등 범람원 상에 발달한 농경지와 대도시, 대규모의 산업시설이 입지하고 있어서 침수 등에 의한 큰 피해를 입을 수 있다.

분석기간 동안 한강 하류에 내린 강우량과 홍수 피해액 사이의 관계를 밝히기 위해 재해기간 동안의 총 강우량과 홍수 피해액 사이의 상관관계를 분석하였다. Figure 4는 한강 하류지역의 재해기간 동안 총강우량과 홍수 피해액 사이의 관계

를 나타낸 것이며, 홍수 피해액은 액수의 차이가 커서 두 변수에 로그를 취하였다. 두 변수 사이에는 상관관계수(r)는 0.693의 비교적 높은 정의 관계가 있으며, 이는 유의 수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의하다. 즉, 유역 내의 강우량이 증가하면서 홍수 피해액이 증가한다고 할 수 있다.

유역내의 총 강우량(x)과 홍수 피해액(y) 사이에는 ' $\log y=3.289+2.386\log x$ '의 관계가 있으며, 이 식의 결정계수(r^2)는 0.481이다. 즉 이 유역내의 강우량이 홍수 피해액의 48% 정도를 설명한다고 할 수 있다. 이 식에서 홍수 피해액에 대한 유역 내 강우량의 탄력성계수는 2.386으로 유역 내의 강우량이 1% 증가할 때마다 홍수 피해액은 약 2.4% 증가한다. 바꾸어 말하면 유역 내의 강우량에 대하여 홍수 피해액은 상당히 탄력적이다.

총 강우량에 비해 피해액이 과대 또는 과소평가된 사례를 파악하기 위하여 앞의 관계식에 대한 잔차분석을 시행하였다. Table 1은 잔차분석 결과 잔차의 제공이 1 이상인 것을 정리한 것이며, Figure 4에 빈 원을 추가로 표시하였다. Table 1에서

Figure 4. Relationship between rainfall and flooding damage amounts in the downstream area of Han River (● indicates that square of residuals is larger than 1).

Table 1. Residual of the rainfall and the flooding damage relation.

	Date	Residuals
over estimate	2012/6/30	-1.94
	2004/6/19	-1.27
	2009/8/11	-1.13
under estimate	2000/7/22	1.25
	2010/9/5	1.28
	2010/9/21	1.71

볼 수 있듯이 2012년 6월 30일과 2004년 6월 19일, 2009년 8월 11일은 잔차가 -1 이하로 두 변수 사이의 관계식이 실제보다 과대평가된 사례이다. 반면, 2000년 7월 22일과 2010년 9월 5일, 2010년 9월 21일은 관계식이 실제보다 과소평가된 사례에 해당한다. 이런 두 가지의 경우는 총 강우량 외에 다른 요인이 홍수 피해에 더 큰 영향을 미쳤다고 할 수 있다. Table 1에서 보듯, 6월과 8월에 발생한 홍수의 경우 실제보다 과대평가되었고, 7월과 9월에 발생한 홍수는 과소평가되었다. 이는 지표면의 포화된 정도에 따라서 피해규모가 달라질

수 있음을 보여준다고 할 수 있다. Figure 5는 한강 하류지역에서 발생한 홍수 피해액과 유역 내의 강우량 사이에서 구한 관계식의 잔차를 시계열로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 6월에는 잔차가 ‘-’값을 나타내며, 9월에는 ‘+’값을 나타낸다. 대체로 6월에는 관계식이 과대 추정되었고, 9월에는 과소추정되었음을 보여준다. 7월과 8월에는 잔차 값이 음과 양이 혼재하지만, 7월에는 양의 값이 우세하고, 8월에는 음의 값이 우세하다.

2004년 6월 19일의 경우는 장마 전 건기에 해당하는 시기이다. 2004년의 장마는 6월 22일에 시작되었으므로(KMA, 2011), 홍수가 발생한 6월 19일은 저수지나 지표면이 물을 상당히 흡수할 수 있는 상태라고 판단된다. 그러므로 호우가 내린다 하더라도 그로 인한 피해가 강우량에 비하여 적을 수 있다. 2012년 6월 30일의 경우도 그 해 장마가 시작된 첫날에 해당하여 앞의 경우와 비슷한 상황이라 판단된다. 2009년 8월 11일의 경우는 장마가 종료되고 20일 정도 경과한 후로 저수지나 지표 상태가 어느 정도 호우를 수용할 상태가 되

Figure 5. Residuals of regression time series of rainfall and flooding damage relation in the downstream area over Han River.

었다고 판단된다. 이날은 이틀에 걸쳐 팔당댐 하류에 200mm의 강우가 있었지만, 과천과 하남 두 지역에서 피해액 약 4천만 원 정도의 재해가 발생하였다. 이 시기의 강우 특징을 보면 강우대가 중부지방의 북서쪽으로 치우쳐 주로 임진강 유역과 한강 하류 내에서도 북서쪽에 많은 강우량이 집중되었다. 즉 많은 양의 강수가 잠재적 시설이 집중된 지역에 영향을 미치지 못하고 곧바로 서해상으로 유출되어 큰 피해가 발생되지 않았을 것으로 판단된다.

실제 홍수 피해액보다 과소평가된 경우는 장마 기이거나 늦장마기에 발생한 경우이다. 2000년 7월 22일은 장마가 종료된 직후 한반도의 북쪽을 지나는 강한 저기압에 동반된 한랭전선의 영향으로 전국적으로 많은 비가 내리면서 홍수를 유발하였다. 장마기 직후이므로 저수지나 지표면이 상당히 포화된 상태라고 판단된다. 2010년 9월 5일의 홍수는 늦장마기에 발생한 것이다. 9월에 두 차례의 태풍이 한반도에 영향을 미치며 지표가 포화상태인 상황에서 발생한 홍수라 피해액이 컸다

고 판단된다. 그 달 21일의 경우도 늦장마의 영향으로 포화된 상태에서 많은 비가 내려 피해가 더 커졌을 것으로 판단된다.

시기에 따라서 홍수 피해 정도의 차이가 있으므로 홍수일 이전 시기에 내린 선행강우량과 홍수 피해액의 관계를 파악할 필요가 있다. 이를 위하여 단기간인 선행 5일강우량과 비교적 장기간인 선행 30일 강우량과 홍수 피해액 사이의 상관관계를 분석하였다. 피해액과 재해 발생일 5일 선행 강우량의 상관계수(r)는 -0.061 , 30일 선행 강우량과의 상관계수(r)는 -0.153 이며, 두 결과 모두 통계적으로 유의하지 않다. 즉, 선행 강우량과 홍수 피해액 사이의 직접적인 상관관계를 정량적으로 포착하기는 어렵다. 다만, 피해액과 재해발생 시기의 유역 강우량과의 상관분석에서 과대, 과소평가된 사례들을 검토하였을 때, 재해가 발생하는 시기가 피해의 증·감에 영향을 미칠 수 있을 것이다. 그러므로 선행 강우량 이외의 강우강도, 상류 강우량 등 다른 요인이 홍수 피해액에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

3) 홍수 피해액과 강우강도의 관계

기상청에서는 예상되는 재해의 규모에 따라 호우에 의한 기상특보를 주의보와 경보로 나누어 발표하며, 재해 우려를 사전에 경고하기 위해 기상특보의 기준으로 강우 강도를 사용한다. 즉, 주의보는 6시간 강우량이 70mm 이상 예상되거나 12시간 강우량 110mm 이상 예상될 때, 경보는 6시간 강우량이 110mm 이상 예상되거나, 12시간 강우량이 180mm 이상 예상될 때 발표한다(KMA). 이와 같이 특보 발령 기준시간이 6시간과 12시간으로 나누어진 것은 6시간 기준을 통해서만 단시

간 이내에 발생하는 호우 사상을 고려하여 돌발성 호우로 인한 피해에 대비하고, 12시간 기준을 통해 지속적으로 많은 양이 내린 강우에 대비하기 위한 것이다(Kim *et al.*, 2011). 특보 발령 시에는 예보의 효율성 등의 이유로 1시간 강우량을 고려하지 않지만 본 연구에서는 단시간에 발생하는 호우의 영향을 상세히 파악하기 위해 1시간과 3시간 강우량을 분석에 추가하였다.

재해기간 동안 각 관측지점별로 각 시간별(1시간, 3시간, 6시간, 12시간) 강우량을 이동 누적하고 그 중 유역 내의 최댓값을 재해 기간 동안의 기

Figure 6. Relationships between the flooding damage and the maximum rainfall amount over time (a) one hour, (b) three hours, (c) six hours, and (d) twelve hours.

준시간별 최대강우량으로 정하였다. 즉, 3시간 최대강우량은 매 3시간별로 이동 누적한 값 중 유역 내에서 최대값을 의미한다. 같은 방법으로 6시간 최대강우량과 12시간 최대강우량을 구하였다. 이렇게 산출된 기준시간별 최대강우량과 홍수 피해액 사이의 상관관계를 분석하였다.

Figure 6은 홍수 피해액과 각 기준시간별 최대강우량 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 한강 하류의 홍수 피해액은 유역 내의 3시간 최대강우량과 상관계수(r) 값이 0.707로 가장 크다. 이어서 홍수 피해액과 1시간 최대강우량, 6시간 최대강우량, 12시간 최대강우량 사이의 상관계수 값은 각각 $r=0.672$, $r=0.590$, $r=0.541$ 이다. 이 값은 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 모두 유의하다. 대체로 기준 시간이 길어질수록 홍수 피해액과 기준시간 최대 강우량 사이에 상관계수 값이 작아지며, 홍수 피해액은 시간별 강우량 중 3시간 최대강우량과 상관관계가 가장 높다. 그러나 홍수 피해액과 각 기준시간별 최대 강우량 사이의 상관계수 값의 차이가 통계적으로 유의한 차이는 아니다. 즉, 3시간 최대 강우량과 홍수 피해액 사이의 상관계수가 높지만, 그것이 두 변수 사이에 상관관계가 가장 높다는 것을 의미하는 것은 아니다.

Figure 6에서 볼 수 있듯이 한강 하류유역의 홍수 피해액과 각 시간별 최대강우량의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log y = 2.098 + 3.862 \log x_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\log y = 0.847 + 3.955 \log x_3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\log y = 1.743 + 3.278 \log x_6 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\log y = 2.335 + 2.829 \log x_{12} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 y 는 한강 하류유역의 홍수 피해액을 나타내며, x_1 , x_3 , x_6 , x_{12} 는 각각 1시간, 3시간, 6시간, 12시간 최대 강우량을 나타낸다. 앞의 식

(1), 식 (2), 식 (3), 식 (4)의 결정계수(r^2)는 각각 0.451, 0.499, 0.348, 0.293이다. 그러므로 각 시간별 최대 강우량으로 한강 하류유역의 홍수 피해액의 변동 설명량은 각각 45.1%, 49.9%, 34.8%, 29.3%이다. 즉, 3시간 최대 강우량으로 홍수 피해액의 49.9%를 설명할 수 있다. 각 식의 잔차제곱의 총합은 각각 19.22, 17.53, 22.81, 24.75로 식 (2)의 값이 가장 적다. 그러므로 본 연구에서는 식 (2)를 중심으로 기술하였다.

식 (2)에 의하면, 탄력성계수는 3.955로 유역 내의 3시간 최대강우량이 1% 증가할 때 유역 내의 홍수 피해액은 약 4% 증가한다고 할 수 있다. 이는 재해기간중의 총 강우량에 대한 홍수 피해액의 변동 폭 2.4%에 비해 더 높은 값이다. 즉, 한강 하류유역에서 홍수 피해액은 유역내의 총 강우량의 변동보다 3시간 최대 강우량의 변동에 더 탄력적으로 반응한다고 할 수 있다.

총강우량과 피해액의 상관분석을 실시한 것과 같은 방식으로 회귀식을 통해 예측된 피해액과 실제 피해액의 차이인 잔차가 큰 사례의 발생시기를 파악하였다. 3시간 최대 강우량의 경우도 실제 피해액에 비해 예측 값이 과소평가된 사례는 주로 7월과 9월에 발생한 반면, 실제 피해액에 비해 예측 값이 과대평가된 사례는 주로 6월과 8월에 발생하였다. 이는 총 강우량과 피해액의 상관관계를 분석한 앞의 결과와 일치한다. 재해 발생에는 총강우량, 강우강도와 같은 호우사상의 규모도 중요하지만 호우가 발생한 시기도 중요한 요인임을 보여준다. 잔차분석에서 과소평가된 사례 중 2000년 8월 4일의 경우는 재해기간이 8일로 집계되었고, 그 중 5일 동안 지속적으로 비가 내려 총 400mm의 강우량이 기록되었다. 이는 짧은 시간에 집중되는 강우량뿐만 아니라 장기간에 누적된 강우량도 홍수피해에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주는 것으로, 잔차의 값이 크다. 이상의

분석을 통해 단시간에 내린 강우량 즉 강우강도 또한 피해규모를 결정하는데 중요한 변수이긴 하지만 비슷한 조건의 강우라면 해당 강우가 우기를 기준으로 선행된 것인지 후행하는 것인지도 피해 규모에 중요하게 영향을 미친다고 할 수 있다.

4) 홍수 피해액과 상류 강우량의 관계

호우에 의한 피해는 해당 유역에 내리는 강우에 의한 직접적인 것뿐만 아니라 상류의 호우로 인한 하류의 범람으로 발생하기도 한다(Hong, 1999). 본 연구지역인 한강 하류도 상류의 강우가 누적되어 홍수발생에 영향을 받을 수 있다. 상류의 강우량이 하류의 홍수피해에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 한강유역 중 팔당댐 하류의 홍수 피해액과 같은 시기 상류의 강우량 간에 상관관계를 분석하였다.

상류에서 강우가 발생한 뒤 팔당댐 하류까지의 도달시간을 고려하여 재해일 하루 전 강우량도 상류 강우량에 포함하였다. 또한 하천의 유량은 댐에 의해서 조절되고 있으므로 각 댐을 기준으로 상류유역을 구분하였다. 즉, 북한강 유역은 의암댐 상류유역과 그 하류유역, 남한강 유역은 충주댐 상류유역과 그 하류유역으로 구분하였다.

팔당댐 하류 지역에서 발생한 홍수 피해액과 상류 유역 강우량과의 상관계수(r) 값은 Table 2에

제시되었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 두 변수 간의 상관계수(r)는 모두 양의 값으로 상류의 강우량이 증가할수록 한강 하류 유역의 홍수 피해액이 커지는 정의 관계가 있다. 이 중 의암댐 상류, 의암댐 하류, 충주댐 하류의 강우량과 한강 하류의 홍수 피해액 사이의 r 값은 통계적으로 유의하다(유의수준 $\alpha=0.01$). 그러나 각 상류 유역의 강우량과 한강 하류유역의 홍수 피해액 사이의 상관계수의 차이가 통계적으로 의미 있는 차이는 아니다. 다만, 상류의 강우량 중 한강 하류유역의 홍수 피해액과 상관관계가 높은 의암댐 하류 및 충주댐 하류의 강우량을 중심으로 설명하였다.

Table 3은 한강 하류유역의 강우량과 상류의 강우량 간의 상관계수를 구한 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 북한강 유역의 강우량은 한강 하류유역의 강우량과 $r=0.8$ 이상의 높은 상관관계가 있다. 반면 남한강의 경우 충주댐 하류의 강우량은 한강 하류유역의 강우량과 $r=0.680$ 으로 비교적 높은 상관관계가 있지만, 충주댐 상류의 강우량은 하류 유역의 강우량과 $r=0.404$ 로 비교적 두 변수 사이의 관계가 낮다. 즉, 북한강 유역의 강우량은 한강 하류유역의 강우 패턴과 비교적 유사하다고 할 수 있지만, 남한강 유역 특히 충주댐 상류의 강우량은 패턴 자체가 한강 하류와 구별된다고 할 수 있다. 이는 여름철 한반도에 남서기류가 유입

Table 2. Correlation coefficients between rainfall and the flooding damage in the downstream Areas of Han River.

Area	Correlation Coefficient(r)
Upper Area of Uiam Dam	0.513**
Down Area of Uiam Dam	0.602**
Upper Area of Chungju Dam	0.312
Down Area of Chungju Dam	0.570**

** significant at level $\alpha=0.01$

Table 3. Correlation coefficients between rainfall over down area and rainfall over upper areas of Paldang Dam.

Area	Correlation Coefficient(r)
Upper Area of Uiam Dam	0.818**
Down Area of Uiam Dam	0.904**
Upper Area of Chungju Dam	0.404*
Down Area of Chungju Dam	0.680**

** significant at level $\alpha=0.01$

* significant at level $\alpha=0.05$

되면서 강우대가 주로 남서에서 북동쪽으로 이동하기 때문인 것으로 판단된다. Table 3에 제시된 한강 하류유역의 강우량과 충주댐 상류 강우량 사이의 상관계수는 다른 유역에서 구해진 상관계수와 통계적으로 유의한 차이이다. 이는 한강 하류유역의 홍수 피해액과 북한강 유역의 강우량과 남한강 유역의 강우량 사이의 상관계수의 차이가 각 유역에서 물 관리 등의 차이에 의한 것보다 강우량 패턴 자체의 차이에 기인한다고 할 수 있다.

Figure 7은 한강 하류유역의 홍수 피해액과 의암댐 하류 강우량 사이의 관계를 나타낸 것이다. 의암댐 하류에는 가평과 홍천, 춘천시의 일부 지역 등이 포함된다. 두 변수 사이의 관계식은 $\log y = 4.22 + 1.995 \log x$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 y 는 한강 하류유역의 홍수 피해액이며, x 는 의암댐 하류의 강우량을 나타낸다. 이 식의 결정계수(r^2)는 0.362이다. 즉 의암댐 하류의 강우량 변동으로 한강 하류유역 홍수 피해액의 36% 정도를 설명할 수 있다고 할 수 있다. 이 식을 통해서 의암댐 하류의 강우량이 1% 증가하면 한강 하류 유역의 홍

수 피해액은 약 2.0% 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 두 변수 사이에서 구해진 식의 탄력성계수가 한강 하류유역에 내리는 강우량에 비하여 적은 값이지만, 그 값이 1보다 커서 의암댐 하류의 강우량 증·감에 대하여 한강 하류유역의 홍수 피해액이 민감하게 반응하는 편이라고 할 수 있다.

한강 하류의 홍수 피해액(y)과 충주댐 하류 강우량(x) 사이의 관계식은 $\log y = 3.398 + 2.474 \log x$ 로 나타낼 수 있다. 이 식의 결정계수(r^2)는 0.323으로 충주댐 하류의 강우량 변동으로 한강 하류유역 홍수 피해액의 32% 정도를 설명할 수 있다고 할 수 있다. 이 식을 통해서 충주댐 하류의 강우량이 1% 증가하면 한강 하류유역에서 홍수 피해액은 약 2.5% 증가한다는 것을 알 수 있다. 홍수 피해액과의 상관계수는 의암댐 하류 강우량이 충주댐 하류의 경우보다 더 크지만, 탄력성계수는 충주댐 하류의 강우량의 경우가 더 크다. 즉, 충주댐 하류의 강우량이 의암댐 하류의 강우량보다 한강 하류 홍수 피해액에 미치는 영향이 더 클 수 있음을 보여준다.

Figure 7. Relation between the damage in the downstream area of Han River and rainfall over down area of Uiam Dam (● indicates that the square of residuals larger than 1).

의암댐 하류 강우량과 한강 하류유역의 홍수 피해액 간의 회귀식으로 예측된 피해액과 실제 피해액간의 차이가 큰 사례의 강우 특성을 파악하였다. 잔차 제곱이 1이상인 사례를 Figure 7에 빈 원을 추가하여 표시하였다. 의암댐 상류의 강우량과의 관계에서도 실제 피해액에 비해 예측 값이 과대평가된 사례는 앞의 분석 결과와 같이 6월과 8월에 나타났으며, Table 1에 제시된 날짜와 같다. 과소평가된 사례 중 2010년 9월 21일 또한 앞의 분석에서와 같이 잔차가 큰 이례 값으로 나타났다. 이날은 홍수일의 총강우량, 3시간 최대 강우량 등 분석에 사용된 모든 강우량이 많아 피해가 더욱 커진 것으로 판단된다. 2011년 7월 26일에서 7월 29일의 경우는 상류에 내린 강우량보다 한강 하류유역에 많은 강우가 집중되어 회귀식이 과소평가된 것이다.

이상에서 상류 강우량의 증가는 한강 하류에서 발생하는 홍수 피해액의 증가와 관련이 있으며, 이는 한강 하류유역에서의 호우발생 시 상류에서도 비슷한 강우패턴이 나타나 하류로 유입되기 때문이라고 판단된다.

5) 고찰 및 토의

앞에서 분석된 강우관련 변수 중 한강 하류의 피해액에 가장 결정적으로 영향을 미치는 변수를 찾기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. Table 4

는 앞에서 분석한 변수를 사용하여 구한 한강 하류유역의 홍수 피해액 사이의 관계를 나타낸 것이다.

Table 4에서 보듯이 여러 개의 독립변수를 추가할수록 결정계수가 커지고 있어서 한강 하류 홍수 피해액의 변동 설명력이 커진다. 특히 홍수가 발생하는 한강 하류의 강우량과 3시간 최대 강우량, 6시간 최대 강우량, 충주댐 하류의 강우량을 독립변수로 채택하였을 경우에 결정계수가 가장 크다. 뿐만 아니라 다른 독립변수를 그대로 채택하고 상류의 강우량을 충주댐 하류의 것으로 채택하였을 경우 의암댐 하류의 경우보다 결정계수가 더 높다. 이는 의암댐 하류의 강우량과 한강 하류유역의 강우량 사이의 상관계수가 충주댐 하류의 경우보다 더 크기 때문이라 판단된다. 즉, 한강 하류의 강우량 자체에 의암댐 하류의 강우량의 특성이 상당히 반영된 것이라 할 수 있다.

여기서 3시간 최대 강우량만을 독립변수로 채택한 경우의 F 통계량이 가장 크다는 것이 주목할 만한 점이다. 표에서 보듯 네 개의 독립변수를 사용하여 구한 식보다 F값이 두 배가량 더 높다. 이는 3시간 최대 강우량 하나만으로도 한강 하류유역의 홍수 피해액 50% 정도를 설명할 수 있으며, 본 연구에서 구한 최적의 식이라고 평가할 수 있다¹⁾. Table 4에서 제시한 식으로 설명할 수 없는 부분은 댐 등에 의한 물 관리 등 인위적 요인에 의

Table 4. Equations and their statistics of linear regression models of flood damage in the downstream area of Han River using precipitation variables.

Independent Variables*	Estimation Regression Equation	F-value	R-squared
x_{3h}	$y=0.487+3.995x_{3h}$	24.93	0.499
x_t, x_{3h}, x_{ud}	$y=1.012+1.468x_t+2.395x_{3h}-0.159x_{ud}$	10.06	0.567
x_t, x_{3h}, x_{cd}	$y=0.382+0.917x_t+2.398x_{3h}+0.732x_{cd}$	10.68	0.582
$x_t, x_{3h}, x_{6h}, x_{cd}$	$y=1.370+1.304x_t+1.342x_{3h}+7.038x_{6h}-5.863x_{cd}$	12.96	0.702

* x_t : total rainfall, x_{3h} : 3hours maximum rainfall, x_{6h} : 6hours maximum rainfall, x_{ud} : precipitation over lower area of Uiam-dam, x_{cd} : precipitation over lower area of Chungju-dam.

Figure 8. Monthly frequency of heavy rainfall day by flooding disaster.

해서 설명될 수 있을 것이다. 기상 특보 발표 시 3시간 강우량을 새로운 기준으로 채택함으로써 홍수 피해를 저감시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

앞의 분석에서 사용된 한강 하류유역의 홍수 피해액과 독립변수(강우량) 간의 상관분석에서는 어떤 경우든 강우량이 많아질수록 홍수 피해액이 증가 한다는 공통된 상관성을 찾을 수 있었다. 하지만 재해가 발생한 경우의 평균 강우량을 상회하는 호우가 발생하였을 때에도 피해가 발생하지 않은 사례가 있다. 재해 발생 가능성이 높다고 판단되는 호우일 중, 재해가 발생하지 않은 사례들을 재해가 발생한 경우를 비교 분석하였다.

Figure 8은 연구지역의 기상관측지점 중 1곳 이상에서 집중호우 판단의 기준이 되는 일 강우량 80mm 이상의 강우가 기록된 날을 호우일로 정의하고, 재해기간에 포함된 날과 그렇지 않은 날을 기준으로 구분하여, 월별 호우일 발생 빈도를 나타낸 것이다. 호우일은 재해가 집중된 7월과 8월에 각각 40회와 27회로 높은 빈도이다. 5월은 3

일의 호우일이 기록되었지만 재해가 발생한 경우는 없다. 6월에는 총 7일의 호우일 중 6일이 재해를 기록하여 재해 발생 비율이 높다. 그러나 6월의 1회 평균 피해액은 1천 700만원으로 매우 낮다 (Figure 3참조). 7월과 8월은 호우일의 빈도도 높을 뿐만 아니라 재해 발생율이 각각 70%, 74%로 높다. 9월은 6월 다음으로 호우일 빈도가 낮으며, 재해가 발생하지 않은 날의 비율이 높은 것이 특징이다. 이는 다른 달에 비해 9월에 내리는 강우에 의한 재해 발생 가능성이 낮을 수 있음을 시사한다.

재해를 유발할 가능성이 높은 호우 일에 재해가 발생하지 않은 경우의 조건을 정량적으로 파악하기 위해서 연속 호우일, 직전 호우일과의 간격을 호우일별로 파악하고, 재해가 발생하였을 때와 그렇지 않은 경우의 조건을 비교하였다(Table 5). 재해 발생한 경우의 평균연속호우일수는 1.48일이며, 재해가 발생하지 않은 경우의 평균연속호우발생일은 1일이다. 분석기간 중 호우일이 2일 이상 이어진 사례는 14회이며, 시기에 관계없이

Table 5. Comparing heavy rainfall day with flooding disaster and without flooding disaster.

	Heavy Rainfall Day with Flooding Disaster	Heavy Rainfall Day without Flooding Disaster
Average continuous heavy rainfall day	1.48	1.0
Intervals of just before heavy rainfall day	8.50	17.9

100% 재해가 발생하였다. 반면, 호우일이 1일에 그치는 사례는 58회이며, 이 중 재해가 발생한 경우는 48%인 28회이다. 호우일이 1일인 경우는 발생 시기에 따라 재해 발생여부가 구분되는 것으로 판단된다. 월별로 보면, 7월에는 1일 호우일 26회 중 61%인 16회에 재해가 발생하였고, 8월에는 15회 중 46%인 7회, 9월에는 9회 중 22%인 2회 발생하였다.

또한 선행강우의 영향도 재해 발생에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 호우일과 직전 호우일의 간격을 비교해 보면, 재해가 발생한 경우가 발생하지 않은 경우보다 2배정도 짧다(Table 5 참조). 즉, 직전 강우량이 유출될 시간적 여유가 주어질 경우 재해가 발생할 확률이 낮아짐을 의미한다. 호우 발생 빈도가 높아 호우일간 간격이 짧고 호우가 연속으로 지속되는 경우가 빈번한 7월과 8월에 많은 재해가 발생하였다. 9월의 호우는 연구기간 13년 중 절반 정도의 빈도인 6개년에서만 나타났다. 그 중 2010년 9월 세 번의 호우가 발생한 것은 매우 이례인 경우라 할 수 있다. 이는 2010년 9월 21일에 발생한 홍수 피해액을 증가시키는 데에 영향을 주었을 것이다. 2010년을 제외하고는 대체로 9월에는 호우의 발생빈도가 낮고 2일 이상 연속되는 경우가 드물며, 대부분 8월 마지막 호우와의 간격이 20일 이상인 경우이다. 그러므로 우기를 지난 시기이지만 재해가 발생하지 않는 것으로 보인다. 따라서 9월은 다른 시기에 비해 재해가 발생할 가능성은 낮지만, 재해가 발생할 경우 포화된 지표의 영향 등으로 피해 규모가 커질 수

있다.

9월의 재해발생 경향은 최근 한반도에서의 강우 특성 변화도 반영된 것이라 할 수 있다. Heo *et al.*(2014)에 의하면, 1980년대 한강유역에서 50억 원 이상 발생하던 9월의 홍수 피해액이 최근 급격히 감소하는 경향이 뚜렷하다. Lee and Kwon (2004)과 Park *et al.*(2008)의 여름철 강우량의 분포 변화를 파악한 선행 연구에서 지적하였듯, 9월 강우량이 감소하고, 7월초의 장마와 9월의 늦장마로 2번의 강우량 극값이 나타나던 과거와는 달리 8월의 강우량이 증가하여 7월부터 9월까지가 1회의 우기로 이어지는 것으로 최근의 강우 특성이 변화하고 있다. 이는 여름철 강우량의 시기별 분포 변화에 따라 9월 호우가 감소하고 8월 초의 강우량이 증가하면서 9월 호우시 이전 호우와의 간격이 길어진 영향이라 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 한강하류의 홍수 피해액과 강우량 사이의 관계를 밝히고자 하였다. 이를 위해 재해기간 동안 한강 하류유역 내의 총 강우량과, 1시간, 3시간, 6시간, 12시간 간격의 최대 강우량, 상류유역의 강우량 등의 강우 관련 변수들과 한강하류 유역의 홍수 피해액과의 관계를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 재해기간 동안 한강 하류유역의 총 강우량과 홍수 피해액 간에는 양의 관계가 있으며, 유

역 내 강우량이 1% 증가할 때 홍수 피해액은 약 2.4% 증가한다고 할 수 있다. 총 강우량과 홍수 피해액 간의 회귀식을 통해 예측된 값은 7월과 9월에는 과소 추정되는 경향이, 6월과 8월에는 과대 추정되는 경향이 나타났다. 이는 우기를 전후로 하여 동일한 강우량에서 피해규모가 상이할 수 있음을 보여준다.

둘째, 재해기간동안의 1, 3, 6, 12시간 최대 강우량과 홍수 피해액과의 양의 상관관계가 있으며, 3시간 최대 강우량과 한강 하류유역의 홍수 피해액 사이의 상관관계가 가장 높다. 3시간 최대 강우량이 1% 증가하면 홍수 피해액은 약 4% 증가하였다.

셋째, 상류 강우량과 한강 하류의 홍수 피해액 사이에도 양의 상관관계가 있다. 남한강 유역보다는 북한강 유역이, 상류보다는 하류와의 상관관계가 더 높고, 충주댐 하류의 강우량 변동에 따른 한강 하류 홍수 피해액의 변동이 가장 크다.

마지막으로 일 강우량 80mm 이상의 호우일이 2일 이상 지속될 경우 재해가 발생하였으며, 호우일이 1일에 그치는 경우에는 발생 시기에 따라 차이가 있어 7, 8월에 재해 발생 비율이 높은 것으로 나타났다. 직전 강우와의 간격이 길어질수록 호우 시 재해가 발생하지 않을 가능성이 크다. 최근의 한반도 강우패턴의 변화로 9월의 호우 발생 시 직전 호우일과의 간격이 길어지는 경향이다.

앞에서 분석된 강우관련 변수들을 이용하여 다중 회귀분석을 실시한 결과 3시간 최대 강우량만을 독립변수로 채택한 식이 본 연구 범위 내에서의 최적 식으로 도출되었다. 따라서 현재 6시간과 12시간 기준으로 설정되어 있는 기상 특보 발표 기준에 3시간 강우량을 새로 채택함으로써 홍수 피해액 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 차후 지역별로 자연과 인문환경이 반영되어 다양하게 나타날 수 있는 재해 시의 강우 특성을 규명

함으로써 보다 상세한 재해 발생을 예측할 수 있게 하고 이를 통해 재난 대비 시스템의 구축에 도움을 줄 수 있을 것이다.

사사

이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013S1A3A2052995). 본 연구 수행에서 통계분석에 도움을 준 건국대 응용통계학과 김상익 교수께 감사드린다. 아울러 이 논문을 위하여 토의에 응하여준 허인혜 박사에게 감사하며, 세심하고 적절한 지적을 하여주신 익명의 세분 심사위원회도 깊은 감사의 뜻을 전한다.

주

- 1) 기상청에서 호우 특보를 발표하기 위해서 사용하고 있는 6시간 최대 강우량을 독립변수로 채택한 경우 관계식의 결정계수는 0.348이며, F값은 13.37이다.

References

- Cha, E. J., 2006, The meaning of Changma, water for the future, *Journal of Korea Water Resources Association*, 39(7), 69-72 (in Korean).
- Changnon, S. A., 1996, *The great flood of 1993: Causes, impacts, and responses*, Westview Press.
- Choi, Y. E., 2004, Trends on temperature and precipitation extreme events in Korea, *Journal of Korean Geographical Society*, 39(5), 711-721.
- FIFMTF, 1992, *Floodplain management in the United States: An assessment report, Volume 2: Full Report*, L. R. Johnston Associates, Washington.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easteriling, D. R.,

- Karl, T. R., Hegerl, G. C., and Razuvaev, V. N., 2005, Trends in intense precipitation in the climate record, *Journal of Climate*, 18(9), 1326-1350.
- Heo, I. H., Jeong, J. H., and Lee, S. H., 2014, Changes of disaster regions by heavy rainfall in South Korea, *Journal of Climate Research*, 9(2), 93-106 (in Korean).
- Hong, S. G., 1999, A study on the threshold values of heavy rain warning in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35(2), 178-192 (in Korean).
- Kim, E. S., Lee, J. H., Park, M. J., and Chung, G. H., 2013, Analysis of the disaster environmental change: 1. Analysis of flood elevation, *Journal of the Korean society of hazard mitigation*, 13(4), 207-217 (in Korean).
- Kim, Y. H., Choi, D. Y., Chang, D. E., Yoo, H. D., and Jin, G. B., 2011, An improvement on the criteria of special weather report for heavy rain considering the possibility of rainfall damage and the recent meteorological characteristics, *Atmosphere*, 21(4), 481-495 (in Korean).
- Kim, Y. H., Kim, M. K., Lee, W. S., and Baek, E. S., 2009, Return period of heavy rainfall and disaster damage in Korea, *Journal of Climate Research*, 4(2), 96-109 (in Korean).
- KMA, 2011, *White paper for Changma in Korea*, Korea Meteorological Administration (in Korean).
- KMA, 2004, *Planning for improvement of weather warning*, KMA (in Korean).
- Kwon, T. Y., Oh, S. N., and Park, S. W., 1998, Long-term variability and regional characteristics of summer rainfall in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35(2), 178-192 (in Korean).
- Lee, H. Y. and Lee, S. H., 1992, A study on the heavy rainfall over central Korea, *Geography*, 27(3), 193-207 (in Korean).
- Lee, S. H. and Kwon, W. T., 2004, A variation of summer rainfall in Korea, *Journal of Korean Geographical Society*, 39(6), 819-832 (in Korean).
- Lee, S. H., Kim, E. K., and Heo, I. H., 2011, A study on variability of extreme precipitation by basin in South Korea, *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 19(5), 505-520 (in Korean).
- Ministry of Environment, 2003, *Study on establishing planning for a national territorial environmental plan*, Korea Environment Institute, Seoul.
- National Emergency Management Agency, 2013, *The 2012 annual natural disasters report*, NEMA (in Korean).
- Park, C. Y., Moon, J. Y., Cha, E. J., Yun, W. T., and Choi, Y. E., 2008, Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea, *Journal of Korean Geographical Society*, 43(3), 324-336 (in Korean).
- Park, D. H., Ahn, J. H., Choi, Y. J., 2011, Correlation between storm characteristics and flood damage, *Journal of Korean Wetlands Society*, 219-229 (in Korean).
- Roger, A. Pielke, Jr. and Mary, M. D., 2000, Precipitation and damaging floods: trends in the United States, 1932-97, *Journal of climate*, 13(20), 3625-3637.
- Sim, W. B., 2005, Natural disaster leaded by weather accident and city disaster prevention, *Territory*, 281, 39-49 (in Korean).
- <http://www.kma.go.kr/weather/warning/standard.jsp>

책임 편집: 이승호

영문 교열: 이은걸