

지역회귀분석을 이용한 홍수 피해금액 추정

Flood Damage Estimation Using Regional Regression Analysis

장옥재*, 김영오**
Ock-Jae Jang, Young-Oh Kim

요 지

우리 사회가 발전함에 따라 재해의 위험으로부터도 안전하게 살고자 하는 대중들의 욕구 또한 증가하고 있다. 하지만 최근의 기후변화와 이상홍수의 사례에서 볼 때 현재 우리가 처해 있는 자연재해로부터의 위협은 과거와는 상이하다는 것을 알 수 있다. 이러한 위협에 대처하기 위해서는 우리에게 노출된 재해의 특성을 평가하는 과정이 무엇보다 선행되어야 한다. 홍수로 인한 피해는 대부분이 인명이나 재산피해가 주를 이루기 때문에 홍수위험도의 평가결과도 발생 가능한 인명이나 재산피해로 표현되는 것이 적절하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 지역회귀분석을 적용하여 가능 홍수 피해금액을 추산하고, 이를 통해 각 지역별 홍수 위험도를 평가하는 방법을 제안하였다. 지역회귀분석은 강우유출모형이나 확률분포모형의 매개변수들을 유역 특성인자들로 표현하기 위해 수문학 분야에서 사용되어져 왔으며 본 연구에서는 이 방법을 홍수 피해금액 추정에 응용하였다. 지역회귀방법의 절차는 먼저 계측지역에서는 홍수 피해금액과 시강우량 자료를 바탕으로 비선형회귀분석을 실시한 후 이 회귀식의 계수를 다시 해당 지역의 인문·사회 경제학적 인자들로 표현하였다. 이러한 방법을 통해 지역적 인자들이 홍수 피해에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었으며 궁극적으로 미계측지역에서도 지역적 인자들을 통해 특정 빈도에 발생 가능한 홍수 피해금액을 추정할 수 있었다. 최종적으로 추정된 홍수 피해금액과 지역 총 자산의 비를 통해 홍수위험지도도 작성하였다. 본 연구결과를 수자원장기종합계획에서 홍수위험도 평가를 위해 사용된 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage; PFD)과 비교해 보면 PFD에서는 각 인자들의 가중치 산정에서 전문가의 주관이 개입될 수 있다는 단점이 있었으나 과거 피해금액과의 상관관계를 분석한 본 연구에서는 이러한 단점을 극복할 수 있었다.

핵심용어 : 지역회귀분석, 홍수위험지도, 홍수 피해금액

1. 서론

사회가 발전함에 따라 자연재해의 위험으로부터도 안전하게 살고자 하는 대중들의 욕구도 급격하게 증가하고 있다. 하지만 최근 우리 주변에서 발생하고 있는 자연재해들은 기후변화와 이상기후의 영향으로 기존에 경험했던 재해와는 그 성격이 상이하다는 것을 알 수 있다. 이러한 환경에서는 재해 발생 후 땀질식 복구로는 더 이상 대처할 수 없으며 재해 발생 전에 재해에 취약한 잠재위험지역을 색출하고, 이곳에 자원과 예산을 집중하여 재해에 능동적으로 대처해 나가야 한다. 이러한 선진 재해 위험관리를 실시하기 위해서는 무엇보다 대중에게 설득력 있는 재해 위험도 평가방법을 확립하는 것이 우선되어야 한다.

기존까지 재해 위험도 평가는 재해의 종류별로 또는 필요한 목적에 따라 다양한 방법이 발전되어 왔지만 대체적으로 전문가 의견에 기반한 방법(expert-opinions-based method)과 과거 데이터 분석을 통한 방법(historical-data-based method) 두 가지로 분류할 수 있다(Zou, 2009). 먼저 전문가 의견 방법은 재해의 피해를 유발시킬 수 있는 재해 발생요소(press)와 이에 대응할 수 있는 대응요소(response) 그리고 재해 취약지역

* 서울대학교 건설환경공학부 석사과정·E-mail: trial10@snu.ac.kr
** 정회원·서울대학교 건설환경공학부 부교수·E-mail: yokim05@snu.ac.kr

에 위치한 사람이나 구조물의 상태(state)에 해당하는 요소(indicators)를 선정하고, 이들에 적절한 가중치를 주어 잠재위험성을 평가하게 된다. 이 방법은 정량적으로 표현되지 않는 심리적 환경적 피해를 평가에 포함시킬 수 있다는 장점은 있으나 인자별 설득력 있는 가중치 선정에 다소 어려움이 있다.

이에 반해 과거 데이터를 분석하여 재해 위험도를 평가하는 방법은 정량적인 데이터를 분석하여 위험도를 평가하는 방법으로 전문가의 주관을 배제시킬 수 있다는 장점이 있다. United Nations Development Programme(2004)에서는 과거 재해 발생의 빈도와 해당 지역에 거주하고 있는 인구수 그리고 해당 국가의 인문·사회적 인자들과 회귀분석을 실시하여 과거 자료가 충분하지 않은 지역에서도 동일하게 사망자 수를 계산하고, 이를 통해 재해 위험도를 평가하였다. 이와 같이 정량적인 과거 데이터를 이용하는 방법은 대중에게 재해 위험도의 이해를 높일 수 있으며 향후 이를 기준으로 국가적인 방재도시 설계기준을 설정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 가용한 각종 자료를 토대로 객관적인 홍수 피해금액 추정을 통한 홍수위험도 평가방법을 제안하고자 한다.

2. 홍수위험도 평가

본 연구에서는 다음과 같이 지역회귀기법을 기반으로 한 홍수위험도 평가기법을 제안한다. 기본적인 개념은 먼저 과거 홍수 피해자료와 강우량 자료가 충분한 계측지역에서 이들 인자 간에 비선형회귀식을 구성한다. 다음으로 같은 강우가 발생하더라도 지역적 인문·사회적 인자들에 따라 피해 양상이 달라질 수 있으므로 계측지역에서 회귀식의 계수들과 이들 인자 간에 상관관계를 분석하였다. 과거자료가 부족한 미계측지역에서는 계수와 지역적 인자들을 통해 결정된 회귀식에서 강우량과 피해금액에 관련된 비선형회귀식의 계수를 추정하였다. 이렇게 계측지역과 미계측지역에서 추정된 회귀식에 특정 강우빈도의 강우량을 대입하여 가능 홍수 피해금액(probable flood damage)을 추정하였으며 이와 총 자산의 비로 홍수취약지수(Flood Vulnerability Index, FVI)를 결정하였다. 이와 관련된 자세한 과정은 다음에서 차례대로 설명하겠다.

2.1 과거 홍수 피해금액과 강우량 간의 상관관계 분석

과거 홍수 피해금액과 강우량의 상관관계를 분석하기 위해 본 연구에서는 매년 발행되는 재해연보 자료를 이용하였다. 연보에는 피해가 발생한 날짜와 지역 등에 관한 정보를 제공하고 있다. 피해추정의 최소단위는 군 또는 구 단위로서 본 연구에서는 21년(1985년~2006년) 동안 서울, 부산, 대구, 인천지역 자치구에 대한 자료를 구축하였으며 피해금액은 물가지수를 고려하여 2006년 기준으로 환산하였다. 각 피해가 발생한 시기의 강우량은 각 주변에 분포하고 있는 강우관측소의 자료를 획득하고, 이들로 Thiessen 망을 구축하여 각 자치구별 시강우량 자료를 계산하였다. 만약 자치구가 1985년 이후에 분리된 경우에는 하나의 자치구로 간주하여 분석을 실시하였으며 분석기간 중 피해금액이 15개를 넘지 않는 경우에는 미계측지역으로 간주하였다.

적절한 강우인자와 함수의 형태를 찾기 위해 본 연구에서는 먼저 다양한 강우인자와 피해금액의 상관관계를 분석하였고, 그 결과 지역적으로 다소 차이가 있지만 15 mm 이상 강우량(시강우량이 15 mm를 초과하는 강우량의 합)과 5시간 침투강우량(시강우량이 침투인 지점을 기준으로 5시간 동안의 강우량)이 좋은 상관관계를 나타내었다. 15 mm 이상 강우량은 물리학적으로 매 시간 자연적으로 침투되는 우량을 제외한 초과우량(excessive rainfall)을 나타내고, 5시간 침투강우량은 한 사상에서 가장 큰 강우강도를 나타낸다고 할 수 있다. 적절한 함수 형태로 본 연구에서는 growth function을 적용하였으며 식의 형태는 다음과 같다.

$$y = \frac{c}{1 + \exp[a + b1 \cdot (P_{>15}) + b2 \cdot (P_{peak\ 5hr})]} \quad (1)$$

여기서 y 는 홍수 피해금액(천원), $P_{>15}$ 는 15 mm 이상 강우량(mm), $P_{peak\ 5hr}$ 는 5시간 침투강우량(mm)

각 자치구별로 growth function을 적용하기 위해 관측값에서 함수의 초기값을 결정하였고, SPSS

12(SPSS INC., 2003) 프로그램으로 최종값을 추정하였다. 비선형회귀결과는 표 1과 같으며 4개시, 20개 자치구의 분석결과 대부분 지역의 적합도가 0.9 이상으로 회귀결과가 우수한 것으로 판단된다.

표 1. 재해 피해금액과 강우량의 비선형회귀식의 매개변수 추정결과

시	자치구	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>R</i> ²
서울특별시 (11 지역)	강동구	1,787,087	11.6693	-0.0411	-0.0149	0.996
	강북&도봉구	19,016,110	8.0602	-0.0197	-0.0076	0.998
	강서구	4,363,684	14.2370	0.0011	-0.1304	0.993
	관악구	19,775,505	12.3773	0.0085	-0.0970	0.997
	광진&성동구	3,807,285	11.8323	-0.0184	-0.0609	0.973
	구로&금천구	8,397,435	8.1583	0.0020	-0.0706	0.920
	서대문구	1,581,116	4.9020	-0.0108	0.0020	0.969
	성북구	4,201,446	11.7550	-0.0089	-0.0900	0.971
	용산구	8,822,412	8.5768	-0.0074	-0.0255	0.906
	은평구	2,016,934	5.2676	-0.0162	0.0048	0.998
부산광역시 (7개 지역)	중로구	803,309	9.7327	-0.0398	-0.0041	0.886
	강서구	1,755,198	4.1358	-0.1108	0.1239	0.985
	금정구	1,479,117	8.0010	-0.0586	0.0232	0.994
	남구&수영구	2,077,606	3.0536	-0.0174	0.0145	0.915
	동래&연제구	1,121,685	9.2772	-0.0681	0.0000	0.983
	부산진구	1,384,116	5.9460	-0.0085	-0.0249	0.986
	서구	237,479	6.0831	-0.0072	-0.0441	0.917
대구광역시	해운대구	2,723,609	6.8263	-0.0039	-0.0319	0.970
	동구	3,439,035	4.7650	0.0020	-0.0677	0.911
인천광역시	남구&연수구	20,238,554	8.5000	-0.0045	-0.0310	0.987

2.2 지역회귀분석

다음으로는 계측지역에서 결정된 비선형회귀식을 미계측지역에서도 결정하기 위해 계측지역에서 결정된 회귀식의 계수와 인문·사회적 인자들의 회귀분석을 실시하겠다. 여기에 사용된 인자들은 크게 지역적으로 피해를 입을 수 있는 대상에 대한 인자로 인구지수(총 인구수, 65세 이상 인구수, 인구밀도 등), 주택지수(평균 가옥연령, 반지하가옥수 등), 자산지수(재산세 납부액, 재정자립도 등)를 포함하였다. 또한 홍수로 인한 피해의 증가 또는 감소에 영향을 미칠 수 있는 토지이용(불투수층 면적, 평균경사 등)과 홍수방어 구조물(우수저류지 용량, 빗물펌프장 용량 등) 현황을 각각의 지수로 나타내었다. 비선형회귀식에서 각각의 계수와 이들 인자들의 다중회귀식은 다음과 같다.

먼저 계수 *c*는 식 (1)에서 볼 때 홍수취약지역에 위치한 총 자산의 가치를 나타내는 것이다. 각 독립변수들의 표준화계수를 살펴보면 취약가옥수가 0.727, 가옥평균연령이 -0.117, 반지하가옥수가 0.185, 도시면적이 0.168을 나타내고 있어서 취약가옥수가 계수 *c* 산정에 가장 많은 영향을 미치고 있으며 시간이 지나면서 가옥의 가치가 떨어지기 때문에 가옥평균연령은 음의 부호를 가지는 것으로 판단된다.

$$c = 9,520 \cdot SP + 341,309 \cdot PH - 308,465 \cdot AHA + 15,533 \cdot UA + 36.15 \cdot UH + 5,607,598 \quad (2)$$

(N = 17, R² = 0.965)

여기서 *SP*는 65세 이상 인구수, *PH*는 취약가옥수(사글세 가옥수), *AHA*는 가옥평균연령, *UA*는 도시면적(km²), *UH*는 반지하가옥수

다음으로 분자에 위치한 a , $b1$, $b2$ 는 홍수 피해를 저감 또는 증가시키는 지역적 특성을 나타내는 인자로 이들 값과 지역적 특성과의 회귀식에서 지역적 인자가 홍수 피해를 감소시킨다면 양의 부호를 가지게 되고, 반대로 증가시킨다면 음의 부호를 가지게 된다. 또한 계수 $b1$ 과 $b2$ 의 상대적인 크기에 따라서 각 지역이 총 강우량에 더 취약한지 아니면 높은 강우강도에 취약한지 판단할 수 있다.

$$a = -0.1 \times 10^{-4} \cdot TP - 2.64 \times 10^{-4} \cdot PD - 114.484 \cdot SR + 9.592 \times 10^{-5} \cdot Tax + 2.18 \times 10^{-4} \cdot UH + 21.499 \quad (N = 16, R^2 = 0.906)$$

(3)

$$b1 = 0.807 \cdot SR + 3.793 \times 10^{-7} \cdot TH + 2.372 \times 10^{-6} \cdot PH - 1.12 \times 10^{-6} \cdot UH - 0.010 \cdot AHA + 0.005 \cdot Pump - 0.025 \cdot IA + 0.086 \quad (N = 17, R^2 = 0.863)$$

(4)

$$b2 = 4.225 \times 10^{-7} \cdot TP - 9.04 \times 10^{-6} \cdot PP + 2.777 \cdot SR - 4.23 \times 10^{-6} \cdot UH - 0.195 \cdot UR + 0.015 \cdot PR + 2.228 \cdot IR - 0.003 \cdot Pump - 0.460 \quad (N = 17, R^2 = 0.912)$$

(5)

여기서 TP 는 총 인구수, PD 는 인구밀도(인/km²), SR 는 65세 이상 인구비율, Tax 는 재산세 납부액(백만원), UH 는 반지하가옥수, TH 는 총 가옥수, PH 는 취약가옥수, AHA 는 가옥평균연령, $Pump$ 는 우수펌프장의 수, IA 는 중요시설면적(km²), PP 는 기초생활수급자 수, UR 은 도시면적 비율, PR 은 녹지면적 비율, IR 은 중요시설면적 비율

식(3)에서 65세 이상 인구비율의 표준화계수는 -0.867로 65세 이상 인구의 증가가 홍수취약도를 크게 증가시키는 것으로 나타났으며 나머지 계수 $b1$, $b2$ 에 관한 식에서는 공통적으로 반지하가옥수의 증가가 홍수취약성을 증가시키며 녹지면적의 증가는 직접유출량을 감소시켜서 홍수방어에 효과적인 것으로 나타났다.

위에서 결정된 다중회귀식은 많지 않은 관측값을 통해 산출되었기 때문에 다른 지역에 적용성을 판단해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 leave-one-out cross validation을 실시하였으며 그 결과 4가지 계수에 대해 0.760 ~ 0.850 범위의 검정결과를 나타내어 위 식을 미계측지역에서도 적용할 수 있는 것으로 판단되었다.

2.3 시범적용

본 연구에서 제안한 방법은 서울특별시 25개 자치구에 적용되었으며 그 결과는 그림 1과 같다.

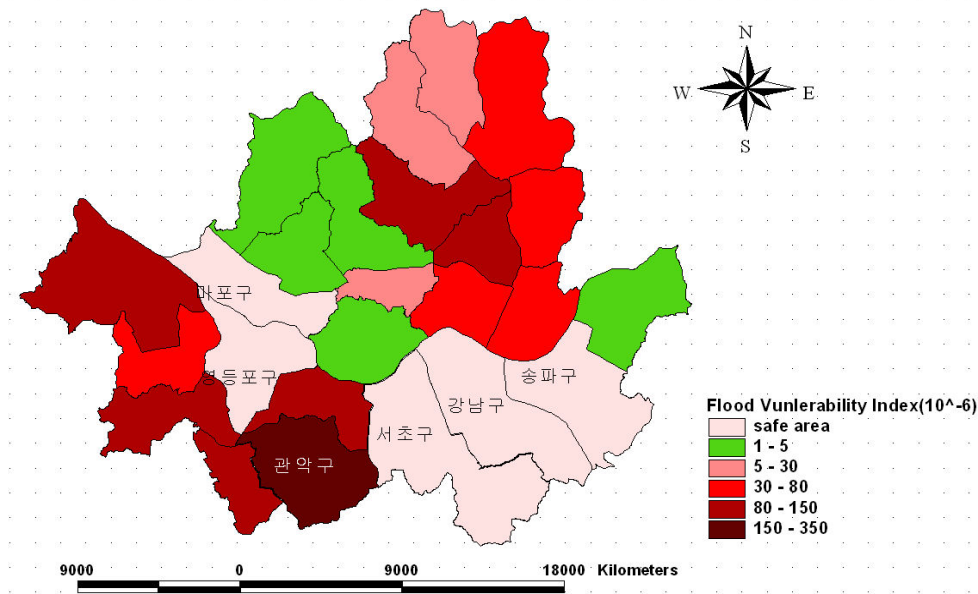


그림 1 . 서울지역 홍수위험지도 (100년 빈도, 강우지속시간: 19~24시간)

적용절차를 살펴보면 먼저 표 1에서와 같이 과거 데이터가 충분한 14개 자치구에 대해서는 성립된 비선형회귀식을 적용하였으며 그렇지 않은 나머지 11개 자치구에 대해서는 식 (2)~(5)의 다중회귀식을 적용하여 비선형회귀식의 계수를 추정하였다. 계측지역과 미계측지역 모두에 추정된 강우량과 피해금액에 대한 비선형회귀식에 대입할 강우량은 건설교통부(2000)에서 전국 기상청 강우자료를 토대로 Huff의 무차원 강우분포 방법을 적용한 것과 같은 방법으로 산정하였다. 서울기상청의 1961년부터 2008년까지 자료로 강우를 분석한 결과 지속시간이 19~24시간 강우에 대해서 가장 적합한 GEV분포로부터 추정된 100년 빈도 강우의 총량은 301.3 mm 였다. 이로부터 15 mm 이상 강우량(181.2 mm)과 5시간 침투강우량(143.2 mm)을 계산하였다. 이 강우량을 대입하여 구한 가능 홍수 피해금액은 지역의 총 공시지가로 나누어 홍수취약지수(FVI)를 구하였고, 이를 토대로 그림 1에 서울특별시 25개 자치구의 홍수취약도를 나타내었다. FVI가 10^{-6} 인 서초구를 비롯한 5개 자치구는 safe area로 표현하였으며 100년 빈도 24시간 강우에 대해서는 관악구가 가장 취약한 것으로 나타났다.

$$FVI = \frac{\text{가능 홍수 피해금액}}{\text{지역 총 자산}} = \frac{\text{가능 홍수 피해금액}}{(\text{표준공시지가, 천원/m}^2) \times (\text{자치구 총 면적, m}^2)} \quad (6)$$

3. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 기존에 전문가 의견에만 의존하여 재해 위험도 평가를 실시할 때 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위해 과거 재해 피해를 분석하여 위험도 평가를 실시하는 방법을 제안하였다. 홍수의 피해는 인명 또는 재산피해가 주를 이루기 때문에 본 연구에서는 홍수로 인한 과거 피해금액을 분석하고, 평가결과를 가능 피해금액으로 나타내었다. 분석방법은 먼저 과거 피해금액과 강우량 자료를 이용하여 비선형회귀를 실시하고, 이 회귀식의 계수를 다시 지역적 특성들과 회귀분석을 실시하는 지역회귀기법을 적용하였다. 이를 통해 과거 홍수 피해자료가 충분하지 않은 지역에서도 지역적 특성들로 회귀식을 구성하고, 피해금액도 추정할 수 있었다. 추정된 피해금액과 지역 전체 자산의 비로 홍수취약지수를 산정하였으며 이 지수를 이용한다면 특정 빈도 강우에 대해 각 자치구 별로 어느 정도의 자산이 홍수로부터 취약한지 대중과 의사결정자에게 쉽게 이해시킬 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구로는 결정된 지역회귀식에 대입하여 홍수 피해를 결정할 때 적정 강우빈도와 강우의 지속시간을 결정하는 것이 필요하다. 또한 홍수취약지수를 바탕으로 미래 지역적 중요도에 따라 목표안전도를 제시하

고, 도시를 개발해 나간다면 자연재해에 안전한 도시 건설에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2008년도 첨단도시개발사업 (과제 번호:07도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 서울대학교 공학연구소를 통해 계약되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2000) **지역적 설계강우의 시간적 분포**. 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서 - 제 2권 「한국가능최대강수량 추정」, 별책 2권
2. UNDP (2004) Reducing disaster risk: a challenge for development. United Nations Development Programme, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York.
3. Zou (2009) Impact assessment using DEA of coastal hazards on social-economy in Southeast Asia. Natural Hazards, Springer Netherlands, Vol. 48, pp. 167-189.