

지역회귀분석을 이용한 홍수피해위험도 산정

Flood Risk Estimation Using Regional Regression Analysis

장옥재* · 김영오**

Jang, Ock-Jae · Kim, Young-Oh

Abstract

Although desire for living without hazardous damages grows these days, threats from natural disasters which we are currently exposed to are quite different from what we have experienced. To cope with this changing situation, it is necessary to assess the characteristics of the natural disasters. Therefore, the main purpose of this research is to suggest a methodology to estimate the potential property loss and assess the flood risk using a regional regression analysis. Since the flood damage mainly consists of loss of lives and property damages, it is reasonable to express the results of a flood risk assessment with the loss of lives and the property damages that are vulnerable to flood. The regional regression analysis has been commonly used to find relationships between regional characteristics of a watershed and parameters of rainfall-runoff models or probability distribution models. In our research, however, this model is applied to estimate the potential flood damage as follows; 1) a nonlinear model between the flood damage and the hourly rainfall is found in gauged regions which have sufficient damage and rainfall data, and 2) a regression model is developed from the relationship between the coefficients of the nonlinear models and socio-economic indicators in the gauged regions. This method enables us to quantitatively analyze the impact of the regional indicators on the flood damage and to estimate the damage through the application of the regional regression model to ungauged regions which do not have sufficient data. Moreover the flood risk map is developed by Flood Vulnerability Index (FVI) which is equal to the ratio of the estimated flood damage to the total regional property. Comparing the results of this research with Potential Flood Damage (PFD) reported in the Long-term Korea National Water Resources Plan, the experts' mistaken opinions could affect the weighting procedure of PFD, but the proposed approach based on the regional regression would overcome the drawback of PFD. It was found that FVI is highly correlated with the past damage, while PFD does not reflect the regional vulnerabilities.

Key words : regional regression analysis, flood risk map, flood damage estimation

요 지

오늘날 재해의 위험으로부터 안전하게 살고자 하는 대중들의 욕구는 증가하고 있지만 최근의 기후변화와 이상홍수의 사례에서 볼 때 현재 우리가 처해 있는 자연재해로부터의 위험은 과거와는 상이하다는 것을 알 수 있다. 이렇게 변화하는 상황에 대처하기 위해서는 우리가 노출된 재해의 특성을 평가하는 과정이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 지역회귀분석을 적용하여 가능 피해금액을 추산하고, 이를 통해 각 지역별 홍수위험도를 평가하는 방법을 제안하였다. 홍수로 인한 피해는 인명이나 재산피해가 주를 이루기 때문에 홍수 위험도평가 결과도 홍수에 취약한 인명이나 재산으로 표현되는 것이 적절하다고 판단된다. 지역회귀분석은 강우-유출모형이나 확률분포모형의 매개변수들을 유역특성인자들로 표현하기 위해 수문학(水文學) 분야에서 널리 사용되어져 왔으며 본 연구에서는 이 방법을 홍수 피해금액 추정에 응용하였다. 지역회귀방법의 절차로는 먼저 계측지역(과거 홍수 피해금액 자료가 충분한 지역)에서는 홍수 피해금액과 시강우량 자료를 바탕으로 비선형 회귀분석을 실시하였고, 다음으로 이 회귀식의 계수를 다시 해당 지역의 인문·사회 경제학적 인자들로 표현하였다. 이러한 방법으로 지역적 인자들이 홍수 피해에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었으며 궁극적으로 미계측지역(과거 자료가 충분하지 않은 지역)에서도 지역적 인자들을 통해 특정 빈도에 발생 가능한 홍수 피해금액을 추정할 수 있었다. 또한 추정된 홍수 피해금액과 지역 총 자산의 비를 Flood Vulnerability Index (FVI)라 하였으며 이를 통해 특정빈도 강우로 인해 도시 내에서 피해를 입을 수 있는 재산의 범위를 추정하고, 홍수위험지도로도 나타내었다. 본 연구 결과를 수자원장기종합계획에서 홍수위험도 평가를 위해 사용된 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage; PFD)과 비교해 보면 PFD에서는 각 인자들의 가중치 산정에서 전문가의 주관이 부분적으로 개입될 수 있다는 단점이 있었으나 지역회귀에 근거한 본 연구에서는 이러한 단점을 극복할 수 있었다. 또한 FVI는 과거 재해피해와 높은 상관관계를 나타냈지만 PFD는 실제 지역별 취약도를 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 지역회귀분석, 홍수위험지도, 홍수 피해금액

*서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석사과정 (E-mail: trial10@snu.ac.kr)

**정회원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 부교수

1. 서 론

사회가 발전함에 따라 어떠한 자연재해의 위험으로부터도 안전하게 살고자 하는 대중들의 욕구도 급격하게 증가하고 있다. 하지만 최근 우리 주변에서 발생하고 있는 재해들은 기후변화와 이상기후의 영향으로 기존에 경험했던 재해와는 그 성격이 상이하다는 것을 알 수 있다. 이러한 상황에서 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.

이미 선진국에서는 댐, 교량 등 중요한 시설물 설계에서 위험도 기반 설계(risk-based design)의 필요성을 제시하였으며(National Research Council, 1995; 이하 NRC) 또한 자연재해와 인적재해로부터 안전한 지역을 건설하기 위해 위험도 평가(risk assessment)와 위험도 관리(risk management)로 연결되는 과정을 체계화하고 있다(Ikeda, 2006). 여기서 위험도 평가는 다시 재해인지(hazard identification), 취약성 분석(vulnerability assessment), 위험도 규정(risk characterization)의 순서로 분류할 수 있는데 먼저 재해인지는 해당 지역이 놓여있는 재해의 규모와 크기를 분석하는 단계이고, 취약성 분석 단계는 해당 지역의 인명이나 자산 그리고 환경적 요소가 발생 가능한 재해에 얼마나 취약한가를 평가하는 것으로 같은 재해에 대해서도 취약성 등급에 따라 피해의 크기는 크게 달라질 수 있다. 마지막으로 위 두 단계의 결과를 연결시켜 해당 지역에 발생할 수 있는 재해의 위험도를 결정하고 이를 알기 쉽게 지도나 문서의 형태로 나타내게 된다. 위험도 평가 단계 다음으로 정량화 된 위험도를 감소시키기 위한 여러 가지 대안을 의사결정자에게 제공하고, 의사결정자가 경제적 사회적 여건을 고려하여 효과적인 대안을 내릴 수 있도록 유도하는 위험도 관리 과정이 수반된다(NRC, 1983). 그러므로 이렇게 체계화된 재해 위험관리를 실시하기 위해서는 무엇보다 대중에게 설득력 있는 재해 위험도 평가체계를 제시해야 한다

기존까지 재해 위험도 평가는 재해의 종류별로 또는 필요한 목적에 따라 다양한 방법이 발전되어 왔지만 대체적으로 전문가 의견을 통한 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 피해가 인간의 심리나 특정 집단의 복지와 같이 비경제적인 요소에 대한 평가에 유리한 방법이다. 이 방법은 주로 재해의 피해를 유발시킬 수 있는 재해 발생요소(pressure)와 이에 대응할 수 있는 대응요소(response) 그리고 재해 발생지역에 위치하여 피해를 입을 수 있는 사람이나 구조물의 상태(state)에 해당하는 요소(indicators)를 선정하고, 이들에 적절한 가중치를 주어 잠재위험성을 평가하게 된다. 이 방법에서 가장 중요한 요소는 각 인자별로 가중치를 할당하고, 이를 통해 요소들을 하나의 지표로 통합하는 과정으로 Munich Re (2003)에서는 매해에 평균적으로 발생하는 피해(Annual Average Loss, ALL)에 80%의 가중치를, 그리고

가능최대피해(Probable Maximum Loss, PML)에 20%의 가중치를 주는 방법을 사용하였다. 또한 SCEMD (2005)은 재해를 발생시킬 수 있는 재해별 그리고 평가에 사용된 인자별로 가중치를 선정할 수 있는 방법이 명확하지 않기 때문에 모두 같은 가중치를 적용하였고, Schmidt-Thome (2005)은 유럽지역에 발생 가능한 재해의 가중치를 전문가들의 의견이 일치될 때까지 반복적인 설문을 실시하는 delphi method를 이용하여 결정하였다. 이와 같이 전문가 의견에 의한 방법은 정량적으로 표현되지 않는 심리적이거나 환경적 재해피해를 평가에 포함시킬 수 있다는 장점은 있으나 인자별 설득력 있는 가중치 선정에 다소 어려움이 있으며 인자 선정과정과 가중치 결정과정에 전문가들의 주관이 개입될 수 있다.

이에 반해 과거 데이터를 분석하여 재해 위험도를 평가하는 방법은 정량적인 데이터를 분석하여 위험도를 평가하는 방법으로 전문가의 오판을 배제시킬 수 있다는 장점이 있다. Disaster Risk Index (UNDP, 2004)에서는 각 국가별 재해 위험도를 전체 인구 중 재해로 인해 발생할 수 있는 사망자의 숫자로 규정하였다. 그래서 과거 재해 발생의 빈도와 해당 지역에 거주하고 있는 인구수 그리고 해당국가의 인문 사회적 인자들과 회귀분석을 실시하여 과거자료가 충분하지 않은 지역에서도 동일하게 사망자 수를 계산하고 이를 통해 재해 위험도를 평가하였다. 또한 영국의 DEFRA (2006)에서는 과거에 발생한 홍수 침수심, 유속 그리고 이로 인한 사망자의 수를 분석하여 국가적인 홍수위험도 평가에 적용하고 있다. 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.

본 연구에서는 먼저 국내 수자원장기종합계획에서 홍수위험도 평가에 적용되고 있는 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage; 이하 PFD)을 분석하고, 과거 홍수 피해금액을 활용한 홍수 피해위험도를 평가할 수 있는 방안을 제안하고자 한다. 이를 위해 과거 홍수 피해금액과 강우량 그리고 해당 지역의 인문·사회, 경제학적 인자들과의 회귀분석을 실시하였으며 이를 다른 지역에 전이하는 지역회귀 방법을 적용하였다. 이와 같은 방법으로 같은 빈도의 강우가 도시 전체 지역에 동일하게 발생하였을 때 재해 피해금액을 추정하고 이와 지역 전체 자산의 비로 홍수취약도를 나타내었다.

2. 홍수위험도 평가

2.1 홍수피해잠재능 분석

먼저 국내 수자원장기종합계획(건설교통부, 2006a)에서 사용하고 있는 PFD는 수문(水文)요소뿐만 아니라 사회·경제적인 요소까지 포괄하여 특정 치수 단위구역의 홍수에 대한 잠재적인 취약도를 나타내는 지수로 단위구역별 치수특성을 파악하고 단위구역 간 투자우선순위를 산정하거나, 대규모 단위의 치수종합계획을 수립하기 위한 필요성으로 만들어졌다. PFD는 정성원 등(2001)이 전국 150개 유역에 처음 적용하였으며 이를 2001년 수자원장기종합계획(건설교통부, 2001) 수

표 1. PFD 구성요소 및 산정식 (건설교통부, 2006a)

요소	잠재성, F_{PO}	위험성, F_{RI}	
		가능성	방어능력
세부 항목	<ul style="list-style-type: none"> • 인구밀도 (F_{PD}, $\beta_1 = 0.4$) • 자산 (F_{PF}, $\beta_2 = 0.3$) • 도시화율 (F_{RUB}, $\beta_3 = 0.2$) • 사회기반시설 (F_{SOC}, $\beta_4 = 0.1$) 	<ul style="list-style-type: none"> • 홍수피해액밀도 (F_{PD}, $\beta_5 = 0.3$) • 확률강우량 (F_{PR}, $\beta_6 = 0.2$) 	<ul style="list-style-type: none"> • 외수방어능력 (F_{CI}, $\beta_7 = 0.3$) • 댐 및 저수지 (F_{DAM}, $\beta_8 = 0.1$) • 내수방어능력 (F_{PUMP}, $\beta_9 = 0.1$)
PFD 산정식	$PFD = F_{PO}^{\alpha_1} \times F_{RI}^{\alpha_2}$ $= [\beta_1 F_{PD} + \beta_2 F_{PF} + \beta_3 F_{RUB} + \beta_4 F_{SOC}]^{\alpha_1}$ $\times [\beta_5 F_{PD} + \beta_6 F_{PR} + \beta_7 F_{CI} + \beta_8 F_{DAM} + \beta_9 F_{PUMP}]^{\alpha_2}$		

립에서 전국 117개 단위유역에 대해 적용하였다. 이 때 사용된 산정식은 표 1에서 나타내고 있는 것과 같다. 가중계수의 산정에 있어서 PFD는 임의적으로 α_1 과 α_2 의 상대적 비중을 0.5로 같게 놓았고, 세부항목별 가중계수 β_i 의 결정은 전문가의 판단에 의해 초기값을 부여한 후 시행착오법으로 결정하였으나 어떤 종속변수와 일치하도록 β_i 를 조정하였는가에 대한 신뢰성 있는 설명이 부족하다. 그리고 PFD를 구성하는 세부항목들이 유역 내 치수단위구역별로 수집된 자료의 범위 안에서 설정된 상대적인 값을 가지게 되므로 이는 지수의 절대적 평가를 불가능하게 하고, 현재 상태에서부터 PFD의 변화 정도로 미래의 목표치수안전도를 설정할 수 없다는 단점이 있다(김정훈, 2004).

따라서 본 연구에서는 이러한 PFD의 단점을 극복할 수 있는 홍수위험도 평가 방법을 제시하고자 한다. 그래서 유역 내에서의 상대적인 지표가 아닌 전국 어느 지역에서도 동일한 기준에서 홍수 피해금액을 추정할 수 있으며 향후 예상 피해금액을 토대로 목표치수안전도를 지방자치단체 별로 결정할 수 있는 평가 기법을 제안하겠다.

2.2 홍수위험도 분석 절차

본 연구에서 제안하는 홍수위험도 분석의 기본개념은 그림 1과 같이 두 함수로 나타낼 수 있다.

만약 한 도시의 홍수위험도를 분석한다면 먼저 첫 번째 함수는 ‘이 도시에서 홍수가 얼마나 자주 발생하는가?’와 ‘홍수가 발생한다면 몇 년 빈도의 홍수가 발생할 것인가?’에 대한 함수이다. 이는 그 동안 많은 연구자들에 의해서 연구된 홍수빈도분석과 관련된 내용이다. 본 연구의 핵심은 같은 홍수가 발생했을 때에 도시 내 지역들이 취약도에 따라 달리 나타내는 피해양상에 대한 사항으로 이는 분명 두 지역 간 차이가 있는 물리적, 인문·사회적 요인에 기인할 것이다. 예를 들어 한 지역이 다른 지역보다 배수설비나 우수펌프장 설비를

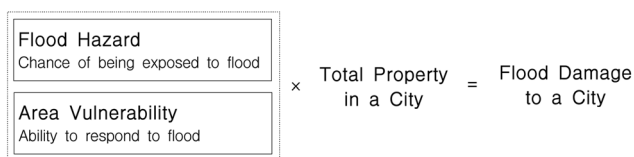


그림 1. 홍수위험도 분석의 기본 개념(DEFRA (2006)를 수정하여 도시)

잘 갖추고 있다면 같은 홍수가 발생하더라도 피해를 입는 지역은 현저하게 줄어든 것이다.

지역적 특성 차이로 인해 발생할 수 있는 홍수 피해금액의 차이를 추정하기 위해 본 연구에서는 그림 2와 같은 절차로 연구를 수행하였다. 여기에서는 편의상 과거 홍수 피해금액과 강수량 자료 등 분석에 필요한 자료가 충분한 지역을 계측지역, 그렇지 못한 지역을 미계측지역이라고 부르도록 하겠다. 먼저 계측지역에서 식(1)과 같이 과거 홍수 피해자료와 강수량 사이에 회귀분석을 실시한다.

$$(\text{홍수 피해금액}) = f_1 (\text{총 강수량, 강우강도, ...}) \quad (1)$$

다음으로 회귀식 f_1 에서 계수를 a, b, c 라고 한다면 이들 과 계측지역에서의 지역적 변수들과 다중회귀분석을 실시한다.

$$a, b, c = f_2 (\text{계측지역의 인문·사회 경제학적 인자}) \quad (2)$$

계측지역에서 다중회귀분석을 실시한 결과를 이번에는 미계측지역에 적용한다. 이는 미계측지역의 유출량을 결정할 때 강우-유출모형에서 매개변수들을 지역적 특성으로 회귀분석하고 이를 다른 지역에 전이하여 사용하는 것과 비슷한 개념이다. 즉 미계측지역에서는 지역적 특성값을 식(2)에 대입하여 식(1)의 계수를 찾고 이를 통해 최종적으로 미계측지역에서도 회귀식 f_1 을 결정하는 것이다. 마지막으로 홍수빈도분석에서 결정된 강우량을 계측지역에서는 홍수 피해금액과 강수량의 관계에서 유도된 회귀식에 바로 대입하고, 미계측지역에서는 지역회귀를 통해 결정된 회귀식에 적용하여 가능 홍수 피해금액을 추정한다. 이 값과 지역 전체 자산의 비율을 통해 각 지역별로 홍수에 취약한 자산의 비율을 파악할 수 있다.

2.3 홍수 피해금액과 강우량의 상관관계 분석

2.3.1 분석자료

과거 홍수 피해금액과 강우량의 상관관계를 분석하기 위해 본 연구에서는 매년 발행되는 재해연보 자료를 이용하였다. 홍수 피해와 관련된 통계자료는 홍수백서 또는 각 지자체에서 발간하는 재해백서 등이 있지만 그 발간 시기가 큰 재해가 발생한 이후로 한정되어 있어서 다년간의 자료를 순차적으로 확보할 수 없었다. 이에 반해 재해연보는 국회전자정보관(<http://u-lib.nanet.go.kr>)에서 확인할 수 있으며 연보에는 피해가 발생한 날짜와 지역 등에 관한 정보를 제공하고 있다.

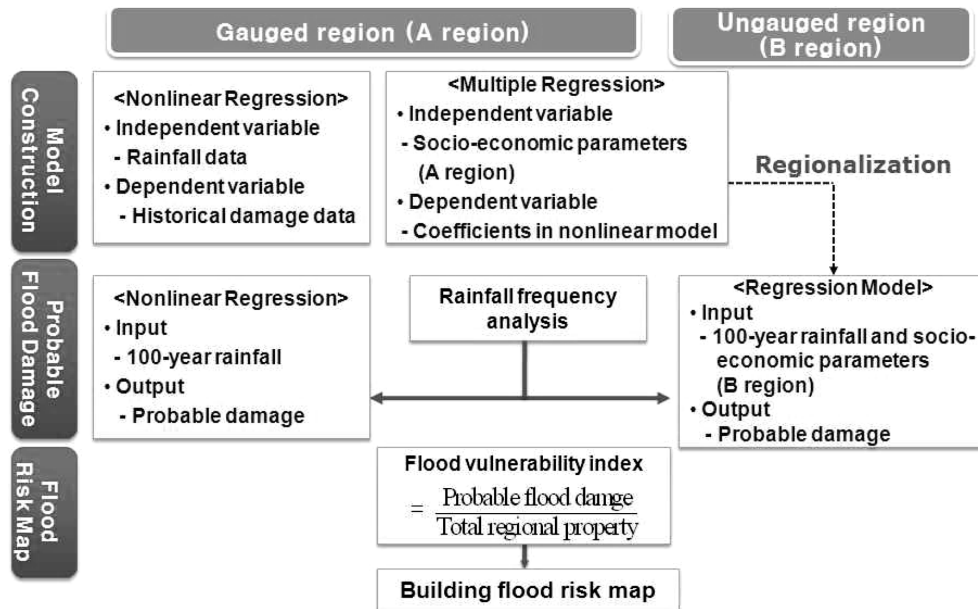


그림 2. 홍수위험도 분석 절차

피해측정의 최소단위는 군 또는 구로서 본 연구에서는 22년 (1985년~2006년) 동안 서울, 부산, 대구, 인천지역에서 발생한 피해에 대한 자료를 구축하였으며 피해금액은 2006년 기준으로 환산하였다. 각 피해가 발생한 시기의 강우량은 각 도시 주변에 분포하고 있는 강우관측소의 자료¹⁾를 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. 15개의 자료도 정확한 회귀분석을 실시하기 위해 많은 자료는 아니지만 가용한 자료의 수를 고려할 때 적절한 기준으로 판단된다.

현재 재해연보에서는 각 원인별 재해피해를 집계할 때 태풍에서 강풍으로 인한 피해와 강우로 인한 피해를 구분하고 있지 않지만 태풍으로 인한 피해에서는 적절한 재해원인을 판단하는 것이 일관성 있는 자료 수집에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 특히 다른 지역과 다르게 부산은 해안지방에 위치해 있어서 강풍에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 그 이유는 태풍 발생시 순간최고풍속이 20 m/sec를 넘는 경우가 종종 관찰되었기 때문이다. Saffir-Simpson tropical cyclones 분류법에 의하면 순간최고풍속이 17 m/sec 이상이면 열대성폭풍(tropical storm)이라고 부르며 33 m/sec 부터는 지역에 따라 hurricane, typhoon 등으로 부르게 된다 (UNDP, 2004). 그런데 2003년 태풍 ‘매미’가 부산지역에 상륙하였을 때 9월 11일부터 9월 12일까지 2일 동안 내린 총 강우량은 100 mm 내외였지만 이로 인해 발생한 피해는 부산지역 최고피해금액을 경신하였다. 이는 순간최고풍속이 26.1 m/sec에 이르는 강한 바람으로 인한 해안지역의 해일과 해안

침수에 의한 영향이 지배적이었던 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 강우로 인해 발생하는 홍수위험도 분석에 초점을 맞추고 있기 때문에 순간최고풍속이 17 m/sec를 초과하는 사상들²⁾은 분석에서 제외하였다.

2.3.2 상관관계 분석

다음으로 적절한 강우인자와 함수의 형태를 찾는 과정이 필요하다. 먼저 강우인자에 관한 사항으로 홍수로 인한 피해는 내린 총 강우량에 영향을 받기도 하지만 그 강도에도 영향을 받을 것이다. 그래서 본 연구에서는 총 강우량, 강우강도, 10 mm 이상 강우량, 15 mm 이상 강우량, 3시간 침투강우량, 5시간 침투강우량을 강우인자로 선정하고 이들 값과 피해금액과의 상관관계를 분석하였다. 결과적으로 지역적 차이가 다소 나타나기는 하였지만 15 mm 이상 강우량(시강우량이 15 mm를 초과하는 강우량의 합)과 5시간 침투강우량

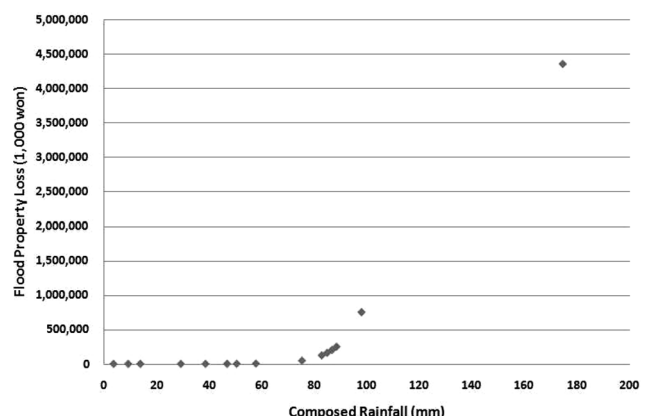


그림 3. 강우량과 홍수 피해금액의 산점도 (서울특별시 강서구)

¹⁾ 서울에는 서울, 김포, 낙생, 의정부, 낙생, 금곡, 남한산성, 반월 관측소의 자료가 부산에는 부산, 명지, 상북 관측소 자료가, 인천에는 인천과 강화 관측소 자료가 대구에는 대구 관측소 자료가 적용되었음

²⁾ 분석에서 제외된 경우는 모두 부산지역으로 그 시기와 순간최고풍속은 다음과 같으며 매해 재해연보에 기록된 데이터를 기준으로 하였음. 1985.10.5 (26.8 m/sec), 1986.8.28~1986.8.29 (21.7 m/sec), 1987.7.12~1987.7.16 (25.7 m/sec), 1987.8.30~1987.8.31 (43.0 m/sec), 1995.7.22~1995.7.24 (22.5 m/sec), 2000.9.12~2000.9.16 (18.7 m/sec), 2002.8.30~2002.9.1 (17.5 m/sec), 2003.9.11~2003.9.12 (26.1 m/sec)

표 2. 재해 피해금액과 강우량의 비선형 회귀 결과

시	자치구	c	a	b ₁	b ₂	R 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
	종로구	803,309	9.7327	-0.0398	-0.0041	0.886
부산광역시 (7개 지역)	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
	해운대구	2,723,609	6.8263	-0.0039	-0.0319	0.970
대구광역시	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

주) 서울 강북구와 도봉구와 같이 1985년 이후에 분리된 자치구는 자료의 일관성을 위해 '강북+도봉구'와 같이 하나의 자치구로 분석

표 3. 지역회귀분석에 적용된 지표

구 분	지 표	출 처
인구/주택지수	총 인구수/총 가옥수	통계청 인구 총 조사 (1985년~2005년) (http://www.nso.go.kr/)
	인구밀도(인/km ²)	
	기초생활수급자 수	
	15세 미만/65세 이상 인구수	
	층별 가옥수 (지상, 반지하, 옥탑방 등)	
	가옥의 평균연령	
	주택의 점유형태 (자가, 무보증 월세, 사글세 등)	
자산지수	재정 자립도(%)	각 지자체별 통계연보
	제조업 생산액(백만원)	
	재산세액(백만원)	
토지이용지수	토지지목별현황 (도시면적, 녹지면적, 중요시설면적 등)	국가수자원 종합정보 홈페이지 (http://www.wamis.go.kr/)
	유출관련 인자 (불투수층 면적, 평균경사 등)	
홍수방어지수	배수면적(ha), 모터용량(HP), 유수지 면적(m ²) 등	소방방재청 홈페이지 (http://www.nema.go.kr/)

(시강우량이 침투인 지점을 기준으로 5시간 동안의 강우량)이 좋은 상관관계를 나타내었다. 이들 인자의 물리학적 의미를 살펴보면 15 mm 이상 강우량은 매 시간 자연적으로 침투되는 우량을 제외한 초과우량(excessive rainfall)을 나타내고, 5 시간 침투강우량은 한 사상에서 가장 큰 강우강도를 나타낸다고 할 수 있다. 다음으로 적절한 함수 형태로 본 연구에서는 growth function을 사용하는데 다음 식(3)과 같은 형태를 나타낸다.

$$y = \frac{c}{1 + \exp[a + b_1 \cdot (P_{>15}) + b_2 \cdot (P_{peak \ 5hr})]} \quad (3)$$

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

Growth function을 사용한 이유는 적은 수의 변수로 3차 함수나 exponential 함수보다 좋은 적합도를 나타낼 수 있기 때문이다. 만약 높은 차수의 다항식을 사용하면 관측값에는

더 좋은 적합도를 나타낼 수 있지만 다른 새로운 관측값에는 잘 맞지 않은 문제를 일으킬 수 있으므로 여기에서는 적은 계수를 추정하여 모형에 적합시키도록 하였다. 또한 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 15 mm 이상 강우량과 5시간 침투 강우량에 적절히 가중치를 줄 경우 더 잘 적합되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 물리적으로 어느 지역은 장시간 많은 비가 내리는 경우에 더 취약할 수 있고, 다른 지역은 단시간의 집중호우에 더 취약할 수 있다는 것으로 지역회귀분석에서 좀 더 자세하게 설명할 예정이다.

각 자치구별로 growth function을 적용하기 위해 관측값에서 매개변수 초기값을 결정하였고, SPSS 12(SPSS INC., 2003) 프로그램으로 최종값을 추정하였다. 목적함수로는 RMSE가 최소가 되는 경우를 선택하였으며 비선형 회귀식 추정방법으로 Levenberg-Marquart 방법(Marquart, 1963)을 적용하였다. 비선형 회귀결과는 표 2와 같으며 4개시, 20개 자치구의 분석결과 대부분 지역의 적합도가 0.9 이상으로 회귀결과가 우수한 것으로 판단된다.

2.4 지역회귀분석

재해 피해금액과 강우량 사이의 비선형 회귀결과와 지역적 특성의 상관관계 분석을 위해서는 먼저 적절한 지역변수를 선정해야 한다. 본 연구에서는 표 3과 같이 피해를 입을 수 있는 대상을 인구·주택, 자산지수로 표현하였으며 피해를 가중 또는 저감시킬 수 있는 토지이용도와 홍수방어시설을 각각의 지수로 분류하였다. 이들 인자의 선택과 분류는 선행 연구를 바탕으로 수행되었다(건설교통부, 2006b; 최충익, 2004; 국토연구원, 2006). 또한 앞에서 강우량과 홍수 피해금액의 상관관계를 나타내는 식이 과거 22년 동안 하나로 표현되기 때문에 지역적 특성값 역시 이를 통합할 수 있는 과거 자료의 평균값을 사용하는 것이 타당하다고 판단되었다.

표 3에 나타난 인자들 중 토지의 지목별 이용현황을 바탕으로 본 연구에서는 도시 내 토지의 이용면적을 도시면적, 녹지면적, 중요시설면적으로 분류하였다. 먼저 도시면적에는 대지, 공장용지, 도로, 철도 등이 포함되었으며 녹지면적은 전체 지역 중 도시면적을 제외한 지역을 모두 포함하도록 하였다. 또한 도로와 철도이용지역을 중요시설지역으로 간주하였다. 그리고 65세 이상 노년인구 비율이나 재정자립도 등은 0~1까지의 비율로 표현되나, 다른 지수들처럼 0~∞까지로 표현하기 위해 다음 식으로 변환을 실시하였다(UNDP, 2004).

$$V_i' = \frac{V_i}{1+V_i} \quad (4)$$

여기서 V_i' 는 변환된 비율 지수, V_i 는 사회경제적 비율 지수

각 계수들의 수학적 의미를 고려하여 다중회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다. 다중회귀분석은 각 인자들을 독립변수로 총 20개 지역의 비선형회귀식 계수들을 종속변수로 하여 실시하였으며 각 변수를 포함했을 때와 포함하지 않을 때 유의수준이 0.1 이상 증가하는 변수들을 포함하는 단계압입법(stepwise selection method)을 사용하였다. 독립변수의 선

택에 있어서는 독립변수 간의 상관관계가 커서 팽창지수(Variation Index Factor; VIF)가 10 이상 인 경우 종속변수와의 상관관계를 고려하여 상관관계가 작은 독립변수를 제거하였다. 즉 독립변수 중 총 가옥수와 총 인구수의 상관관계는 0.944로 두 변수를 회귀식에 동시에 사용할 수 없으며 식(5)~(9)와 같이 둘 중 종속변수에 더 영향을 많이 미치는 인자 하나만을 사용하였다. 이와 같은 절차로 독립변수의 팽창지수가 10미만이 되도록 모든 회귀식을 조정하였다. 또한 이상치와 영향치는 다중회귀분석에서 제외하는 것이 적절하며 이때에는 스튜던트 잔차와 Leverage, Cook's distance, DFFITS 등을 고려하였다.

먼저 계수 c 는 대체적으로 과거 최대홍수 피해금액과 거의 일치하는 것으로 나타났으며 이는 각 지역별로 홍수에 취약한 총 자산의 크기에 비례할 것으로 판단된다.

$$c = 9.520 \cdot SP + 341.309 \cdot PH - 308.465 \cdot AHA + 15,533 \cdot UA + 36.15 \cdot UH + 5,607,598 \quad (5)$$

($N = 17, R^2 = 0.965$)

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

식(5)에서 각 계수들의 표준화계수를 살펴보면 65세 이상 인구수가 0.036, 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.

다음으로 분자에 위치한 a , b_1 , b_2 는 홍수 피해를 저감 또는 증가시키는 지역적 특성을 나타내는 인자들로 이들 값과 지역적 특성과의 회귀식에서 지역적 인자가 홍수 피해를 감소시킨다면 양의 부호를 가지게 되고, 반대로 증가시킨다면 음의 부호를 가지게 된다. 또한 수학적으로는 계수 a 값이 크면 피해금액이 급격히 증가하는 시점이 그림 3에서 우측으로 이동하게 되고, 계수 b_1 과 b_2 는 표 2에서와 같이 일반적으로 음의 값을 가지게 되므로 이 둘의 상대적인 크기에 따라서 각 지역이 강우총량에 더 취약한지 아니면 높은 강우강도에 취약한지 판단할 수 있다.

$$a = -0.1 \times 10^{-4} \cdot TP - 2.64 \times 10^{-4} \cdot PD - 114.484 \cdot SR + 9.592 \times 10^{-5} \cdot Tax + 2.18 \times 10^{-4} \cdot UH + 21.499 \quad (6)$$

($N=16, R^2=0.906$)

$$b_1 = 0.807 \cdot SR + 3.793 \times 10^{-7} \cdot TH + 2.372 \times 10^{-6} \cdot PH - 1.12 \times 10^{-6} \cdot UH - 0.010 \cdot AHA + 0.005 \cdot Pump - 0.025 \cdot IA + 0.086 \quad (7)$$

($N=17, R^2=0.863$)

$$b_2 = 4.225 \times 10^{-7} \cdot TP - 9.04 \times 10^{-6} \cdot PP + 2.777 \cdot SR - 4.23 \times 10^{-6} \cdot UH - 0.195 \cdot UR + 0.015 \cdot PR - 2.228 \cdot IR - 0.003 \cdot Pump - 0.460 \quad (8)$$

($N=17, R^2=0.912$)

여기서 TP 는 총 인구수, PD 는 인구밀도(인/km²), SR 는 65

표 4. 강우 특성 및 빈도분석 결과 (대상지역: 기상청 서울관측소)

		지속시간 19~24 hr 강우	지속시간 25~36 hr 강우
강우시간	1분위	30	65
	2분위	23	68
	3분위	27	74
	4분위	15	40
강우빈도분석	분포형	GEV	Gumbel
	location parameter	62.571	66.825
	scale parameter	32.230	54.744
	shape parameter	-0.193	-
	100년 빈도 총 강우량 (mm)	301.3	285.3
강우시간분포 결과	15 mm 이상 강우량 (mm)	181.2	59.5
	5시간 침투강우량 (mm)	143.2	73.6

세 이상 인구비율, Tax 는 재산세 납부액(백만원), UH 는 반지하가옥수, TH 는 총 가옥수, PH 는 취약가옥수, AHA 는 가옥 평균연령, $Pump$ 는 우수펌프장의 수, LA 는 중요시설면적, PP 는 기초생활수급자 수, UR 은 도시면적 비율, PR 은 녹지면적 비율, IR 은 중요시설면적 비율

식(6)에서 계수들의 표준화계수는 65세 이상 인구비율이 -0.867, 총 인구수가 -0.732로 이들 변수의 값이 증가할수록 취약도를 크게 증가시키는 것으로 나타났으며 재산세 납부액의 표준화 계수는 0.488로 재산세가 증가하면 지자체의 풍부한 재정으로 홍수에 능동적으로 대처할 수 있는 것으로 나타났다. 나머지 계수 b_1 , b_2 에 관한 식에서 공통적으로 반지하가옥수의 증가는 홍수취약성을 증가시키며 녹지면적의 증가는 직접유출량을 감소시켜 홍수방어에 효과적인 것으로 나타났다.

위에서 결정된 다중회귀식은 비교적 좋은 보정결과를 나타내고 있지만 그 관측값이 많지 않기 때문에 새로운 관측값이 투입될 경우 잘 맞지 않을 수 있다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 각 계수에서 이상치로 생각되는 3~4개의 관측값을 제외한 나머지 관측값들에 대해 leave-one-out cross validation을 실시하였다. 즉 계수 c 의 경우 16개 데이터로 회귀식을 구성하고, 나머지 하나의 데이터로 검정을 실시하는 과정을 반복적으로 모든 관측값에 대해 수행하는 것이다. 그 결과는 4가지 계수에 대해서 0.760~0.850 범위의 검정결과를 나타내어 관측값과 상당부분에서 일치하는 추세를 따르고 있으므로 위 식을 미계측지역도 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

2.5 강우 빈도분석

본 연구의 최종 결과는 각 지역별로 특정빈도 강우에 의해 발생 가능한 홍수 피해금액을 추정하는 것으로 합리적인 강우량의 추정이 선행되어야 한다. 여기에서는 많은 실무와 연구에서 적용되고 있는 건설교통부(2000)의 Huff 무차원 우량 시간분포곡선을 적용하였다. Huff(1967)는 미국 Illinois주에 위치한 유역면적 400 mi^2 까지의 다양한 하천유역에서 발생한 호우에 대해 호우기간 중 내린 총 우량의 시간분포 양

상을 분석하여 강우의 시간분포 모형을 제시하였으며 침투강우의 발생시간에 따라 1~4분위 호우로 분류하였다. 다음으로 각 분위에 속하는 호우의 시간별 누가우량 기록을 호우별 총 지속시간과 총 우량을 사용하여 다음과 같이 무차원하였다.

$$PT(i) = \frac{T(i)}{T_0} \times 100\% \quad (9)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{R_0} \times 100\% \quad (10)$$

여기서 $PT(i)$ 는 총 강우지속시간 T_0 에 대한 임의시간 $T(i)$ 에서의 강우지속시간 백분율(%)이며 $PR(i)$ 는 총 강우량 R_0 에 대한 임의시간 $T(i)$ 까지의 누가우량 $R(i)$ 의 백분율(%)

하지만 이에 앞서 강우분석을 위한 강우 지속시간과 빈도를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 강우지속시간을 19~24시간인 강우와 25~36시간인 강우 두 가지를 적용하였으며 강우 빈도분석을 통해 이와 같은 지속시간을 가진 강우의 100년 빈도 총 강우량을 추정하였다. 앞서 제시한 강우량과 피해금액의 회귀식은 어떠한 강우를 대입하더라도 피해금액을 추정할 수 있도록 구성되었기 때문에 위와 같은 강우의 기준은 지역적 특성이나 관심 있는 강우의 특성에 따라 변경될 수 있다. Huff의 무차원 강우시간 분포곡선은 각 분위별로 초과발생확률이 10%~90%의 9가지 형태가 존재하지만 본 연구에서는 침투강우량이 해당 분위의 중심에 위치하는 초과발생확률 50%를 적용하였다.

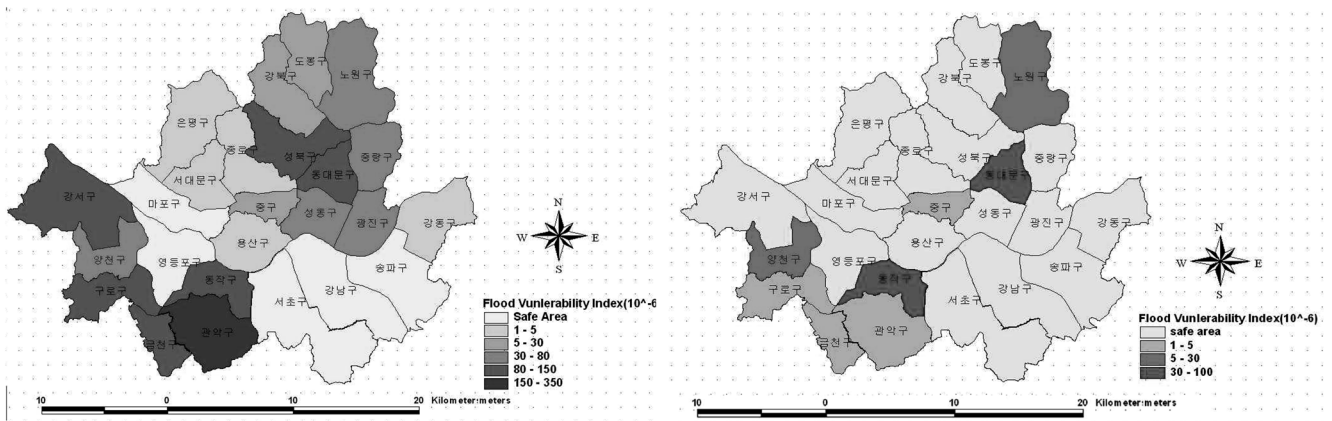
3. 시범적용 결과

본 연구에서는 앞서 획득한 강우분석결과와 과거 홍수 피해의 비선형회귀 결과 그리고 이를 지역회귀 시킨 결과를 서울특별시 25개 자치구에 시범적으로 적용하여 지역회귀식의 적용성을 평가하였다. 과거 홍수 피해데이터가 충분한 계측지역은 14개 자치구이지만 자료의 동질성 유지를 위해 1985년 이후에 분리된 3개 자치구는 하나의 지역으로 분석하였으며 이 지역에서는 홍수 피해금액과 강우량 간의 비선형회귀 결과로 가능 피해금액을 산출하였다. 나머지 11개 미계측지역

표 5. 서울지역 가능 홍수 피해금액 계산 결과

	c ($\times 10^6$)	a	b_1	b_2	표준공시지가 (천원/m ²)	지속시간 19~24시간 강우		지속시간 25~36시간 강우	
						가능 피해금액 (백만원)	FVI	가능 피해금액 (백만원)	FVI
계측지역									
강 동	1,787	11.669	-0.041	-0.015	2,153	197	3.722E-06	0.2	4.095E-09
강북+도봉구	19,016	8.060	-0.020	-0.008	759	612	1.820E-05	22	6.550E-07
강 서	4,363	14.237	0.001	-0.130	1,182	4.3	8.780E-05	15	3.211E-07
관 악	19,775	12.377	0.009	-0.097	1,005	9.8	3.283E-04	37	1.245E-06
광진+성동구	3,807	11.832	-0.018	-0.061	1,082	2.1	5.763E-05	3	9.047E-08
구로+금천구	8,397	8.158	0.002	-0.071	1,416	7.0	1.486E-04	234	4.993E-06
서대문	1,581	4.902	-0.011	0.002	1,732	60	1.969E-06	16	5.167E-07
성 북	4,201	11.755	-0.009	-0.090	1,387	3.9	1.159E-04	19	5.444E-07
용 산	8,822	8.577	-0.007	-0.026	3,329	238	3.273E-06	12	1.673E-07
은 평	2,016	5.268	-0.016	0.005	1,079	93	2.928E-06	14	4.508E-07
종 로	803	9.733	-0.040	-0.004	1,952	101	2.174E-06	0.3	6.703E-09
미계측지역									
강 남	2,784	27.120	-0.057	0.000	4,612	0	8.098E-13	0	2.559E-16
노 원	1,811	6.030	-0.036	-0.063	854	1.8	5.984E-05	746	2.466E-05
동 작	3,059	7.337	-0.003	-0.133	2,049	3.1	9.131E-05	2.5	7.573E-05
동대문	3,158	6.099	0.007	-0.250	2,484	3.2	8.944E-05	3.2	8.943E-05
마 포	2,712	9.876	-0.008	0.012	2,336	0.1	2.125E-09	0.1	1.614E-09
서 초	1,746	20.870	-0.068	0.020	2,317	0.1	1.845E-10	0	5.792E-14
송 파	2,689	17.536	-0.039	-0.010	3,263	0.3	2.748E-09	0	5.545E-12
양 천	2,337	9.105	-0.022	-0.114	1,999	2.3	6.715E-05	814	2.339E-05
영등포	2,230	11.576	-0.035	0.001	2,718	11	1.671E-07	0.1	1.245E-09
중 구	1,508	10.970	0.001	-0.124	6,039	1.5	2.504E-05	86	1.432E-06
중 랑	3,080	9.447	-0.013	-0.049	1,156	1.5	7.188E-05	11	5.107E-07

주) FVI값의 E는 10의 거듭제곱을 의미



(a) 100년 빈도, 지속시간: 19~24 시간 강우

(b) 100년 빈도, 지속시간: 25~36 시간 강우

그림 4. 서울지역 홍수위험지도

은 계측지역에서 유도된 지역회귀식을 바탕으로 비선형회귀식의 계수를 결정하였고, 이를 바탕으로 가능 피해금액을 산정하였다. 산정결과는 표 5와 같으며 전체적으로 같은 100년 빈도 강우이지만 지속시간 19~24시간 강우에서 더 큰 피해가 발생하였으며 관악구나 구로+금천구 등은 5시간 침투강우

량에 민감하게 반응하여 두 가지 경우의 피해금액이 크게 차이나는 것을 알 수 있었다.

통상적으로 재해의 복구속도는 특정 지역의 자산정도에 비례하며 또한 특정 지역의 총 자산과 기능 홍수 피해금액을 비교하면 어느 정도의 자산이 홍수에 취약한가를 측정할 수 있

다. 따라서 본 연구에서는 홍수취약도지수(Flood Vulnerability Index, FVI)의 계산 방법을 다음과 같이 제안한다.

$$FVI = \frac{\text{가능 홍수 피해금액}}{\text{지역 총 자산}} = \frac{\text{가능 홍수 피해금액}}{(\text{표준공시지가}/\text{m}^2) \times (\text{자치구 총면적}, \text{m}^2)} \quad (11)$$

FVI의 계산결과는 각 자치구별로 특정 빈도 강우에 취약한 자산의 비율을 나타내고 있어서 향후 연구를 통해 도시의 목표안전도 설정에 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 임의적으로 이 값이 10^{-6} 보다 작은 경우에 대해서는 그림 4와 같이 safe area로 나타내었으며 FVI를 바탕으로 홍수에 가장 취약한 지역 또한 나타내었다. 그림 4(a)를 보면 지속시간이 19~24시간인 경우에는 마포구, 영등포구, 송파구, 강남구, 서초구가 홍수에서 안전한 지역으로 판단되며 관악구가 가장 취약한 지역으로 결정되었다. 그러나 그림 4(b)를 살펴보면 대부분의 지역이 재해에 안전하지만 노원구, 동대문구, 동작구, 양천구가 홍수에 더 취약한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과와 수자원장기종합계획에서 제시하고 있는 PFD를 서울지역을 대상으로 비교하면 PFD는 서울 대부분의 자치구가 1018 중권역 하나에 모두 포함되어 있어서 실제적으로 PFD를 이용하여 홍수취약지역을 구분하는 것은 쉽지 않다. 그러나 본 연구에서 제시한 FVI와 2001년 7월 14일부터 15일까지 서울지역에 24시간 동안 내린 강우에 대한 침수 가옥수(서울시정개발연구소, 2002)와의 상관관계를 살펴보면 0.444로서 FVI 값이 높은 지역이 실제로도 홍수에 취약한 지역으로 나타나는 경향이 있었다. 하지만 선행 연구결과인 홍수 잠재 위험도(건설교통부, 2006b)와 침수 가옥수의 상관관계는 0.011로서 잠재 위험도가 높은 지역과 실제 피해가 일어나는 지역에는 다소 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구 결과를 활용한다면 정량적으로 각 자치구별 홍수 피해금액을 계산할 수 있으며 이를 통해 취약지역을 쉽게 색출할 수 있고, 향후 취약지역에 투자를 우선할 수 있도록 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 전문가 의견에 의한 재해 위험도 평가에서 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위해 과거 재해 자료를 분석하는 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 지역회귀분석을 적용하였다. 이를 통해 과거 홍수 피해자료가 충분하지 않은 지역에서도 지역적 특성들로 회귀식을 구성하고, 이로부터 피해금액을 추정할 수 있었다. 또한 PFD에서는 전문가의 오판이 전체적인 가중치 산정에 영향을 미칠 수 있다는 단점이 있었던 반면 본 연구에서는 각 인자들의 영향을 정량적으로 분석할 수 있었다. 특정 빈도의 강우로 인해 발생할 수 있는 피

해금액을 계산한 후 본 연구에서는 이 예상 피해금액과 지역 전체의 자산을 비교하여 홍수취약도지수를 산정하는 방안을 제안하였다. 이 지수를 이용한다면 특정 빈도 강우에 대해 각 자치구 별로 어느 정도의 자산이 홍수로부터 취약한지 대중과 의사결정자에게 쉽게 이해시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 방법을 서울특별시 25개 자치구에 적용하여 100년 빈도 강우가 발생했을 때 각 자치구 별로 예상되는 피해금액과 홍수취약도지수를 계산하였다. 다른 두 지속시간의 강우가 발생했을 때 홍수 피해금액은 단기간 집중강우와 장기간 다량의 강우 중 좀 더 취약한 성격에 따라 다른 양상을 나타내었으나 홍수취약도지수를 도시한 홍수위험지도를 통해 가장 홍수에 취약한 자치구를 쉽게 색출할 수 있었다. 이는 서울 대부분의 자치구가 하나의 중권역에 포함되어 위험도가 평가되는 PFD보다 훨씬 더 정밀하게 위험지역을 식별할 수 있는 장점이 있다고 할 수 있다.

본 연구의 결과를 좀 더 보완하기 위해 향후에는 앞서 결정된 지역회귀식에 어떤 빈도의 강우를 대입할 것인가?와 어느 정도 지속시간의 강우를 대입하여 홍수 피해를 결정하는 것이 적절한가?에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 FVI 결정에 있어서 사용된 표준공시지가는 간접적으로 지역적 생활수준을 반영한다고 볼 수 있으나 이는 부동산의 실거래 가치만을 고려한 것이기 때문에 산업시설과 같은 고가의 설비나 채고자산의 가치를 반영하기에는 무리가 있다. 따라서 향후에는 Apel 등(2004)의 연구에서 사용한 것처럼 차량이나 고가의 자산에 대해서는 등록된 보험의 가치를 함께 반영할 수 있는 방안을 고려해보는 것이 필요하다. 마지막으로 효율적인 방재예산 집행을 위해서는 각 지역별 중요도에 따라 목표안전도를 높게 또는 낮게 설정하고, 해당지역이 목표안전도를 만족시키지 못하는 경우 이를 만족시켜 나갈 수 있도록 구조적/비구조적 대책을 세워야 한다. 하지만 이러한 목표안전도는 공학적인 기준 이외에 사회·경제적인 요소를 모두 고려해야 하기 때문에 공학자, 의사결정자, 재정전문가 등이 포함된 그룹토의에서 결정되어야 하며 이는 향후 연구로 남긴다.

감사의 글

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

참고문헌

- 건설교통부 (2000) 지역적 설계강우의 시간적 분포. 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서 - 제2권 「한국가용최대강수량 추정」, 별책 2권.
- 건설교통부 (2001) 수자원장기종합계획 (2001-2020) 보고서. 조사 보고서.
- 건설교통부 (2006a) 수자원장기종합계획 (2006-2020) 보고서. 조

- 사보고서.
- 건설교통부 (2006b) 도시홍수 잠재위험도 및 피해액 산정(II). 기술보고서.
- 국토연구원 (2006) 홍수피해특성 분석 및 홍수피해지표 개발에 관한 연구. 연구보고서.
- 김정훈 (2004) 유역 치수안전도 설정에 관한 연구, 석사학위 논문, 서울대학교.
- 서울시정개발연구소 (2002) 서울시 상습침수구역 관리시스템 구축 방안. 시정연 2002-12-36.
- 정성원, 이대희, 문용주, 김규호 (2001) 홍수피해 잠재능(PFD) 평가. 한국수자원학회 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 601-606.
- 최충익 (2004) 패널모형을 이용한 도시지역 수해결정요인에 관한 고찰. 박사학위 논문, 서울대학교.
- Apel, H., Thielen, A.H., Merz, B., and Blöschl, G. (2004) Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, European Geoscience Union, Vol. 4, pp. 295-308.
- DEFRA (Department of the Environment, Food and Rural Affairs) (2006) *Flood risks to people: Guidance document*. FD2321/TR2, Environment Agency, London.
- Huff, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, AGU, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Ikeda, S. (2006) *An integrated risk analysis framework for emerging disaster risks: Toward a better risk management of flood disaster in urban communities*. Terrapub, Tokyo.
- Marquart, D. (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, Vol. 11, pp. 431-441.
- Munich Re (2003) *Topics-Annual review: Natural catastrophes 2002*. Munich Reinsurance Company, Germany.
- National Research Council (1983) *Risk assessment in the federal government: Managing the process*. National Academy Press, Washington D.C.
- National Research Council (1995) *Flood risk management and the American river basin: An evaluation*. National Academy Press, Washington D.C.
- SCEM (2002) *State of South Carolina hazards assessment*. South Carolina Emergency Management Division, South Carolina.
- Schmidt-Thome, P. (Ed.) (2005) *The spatial effects and management of natural and technological hazards in general and in relation to climate change*. ESPON Project 1.3.1, Geological Survey of Finland, Finland.
- SPSS INC. (2003) *SPSS base 12.0 user guide*. Chicago.
- UNDP (2004) *Reducing disaster risk: A challenge for development*. United Nations Development Programme, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York.
- Zou, L., and Wei, Y. (2009) Impact assessment using DEA of coastal hazards on social-economy in Southeast Asia. *Natural Hazards*, Springer, Vol. 48, pp. 167-189.

◎ 논문접수일 : 09년 03월 24일

◎ 심사의뢰일 : 09년 03월 27일

◎ 심사완료일 : 09년 07월 20일