

비선형 회귀식을 이용한 강우-홍수피해액 추정함수 개발

Development of Rainfall-Flood Damage Estimation Function using Nonlinear Regression Equation

Jongso Lee^{a,1}, Gyu Eo^{b,*}, Changhyun Choi^{a,2}, Jaewon Jung^{c,3}, Hungsoo Kim^{a,4}

^a Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea

^b Research Business Department, NOAA SNC, Seoul, Republic of Korea

^c Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute, Seoul, Republic of Korea

ABSTRACT

Predicting and estimating the disaster characteristics are very important for disaster planning such as prevention, preparedness, response, and recovery. Especially, if we can predict the flood damage before flooding, the predicted or estimated damage will be a very good information to the decision maker for the response and recovery. However, most of the researches, have been performed for calculating disaster damages only after disasters had already happened and there are few studies that are related to the prediction of the damages before disaster.

Therefore, the objective of this study was to predict and estimate the flood damages rapidly considering the damage scale and effect before the flood disaster, For this the relationship of rainfall and damage had been suggested using nonlinear regression equation so that it is able to predict the damages according to rainfall.

We compared the estimated damages and the actual ones. As a result, the damages were underestimated in 14.16% for Suwon-city and 15.81% for Yangpyeong-town but the damage was overestimated in 37.33% for Icheon-city. The underestimated and overestimated results could be occurred due to the uncertainties involved in natural phenomenon and no considerations of the 4 disaster steps such as prevention, preparedness, response, and recovery which were already performed.. Therefore, we may need the continuous study in this area for reducing various uncertainties and considering various factors related to disasters.

KEYWORDS

Climate Change
Disaster Statistic data
Flood Damage
Nonlinear Regression Equation
Damage Prediction

재해가 발생하기 전에 재해의 규모와 이에 따른 영향 및 피해액을 신속하게 추정하는 것은 효율적인 재난관리를 하는데 있어 중요하고, 더불어 정책결정자들이 의사결정을 할 때 도움이 될 수 있다. 하지만 기존의 연구는 재해 발생 후에 그 피해액 혹은 복구액을 산정하고 있어 재해 발생전에 미리 피해액을 추정하는 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 재해 발생 전에 그 피해규모와 영향을 고려하여 이에 따른 피해액을 신속하게 추정하기 위해 비선형 회귀식을 이용해 강우-홍수피해액에 대한 함수를 제시하여 강우에 따른 피해액을 미리 추정할 수 있도록 하고자 하였다.

경기도 3개 지역에 대한 강우-홍수피해액의 비선형 회귀식을 이용한 결과, 수원시 경우 실제 피해액보다 -14.16%, 양평군의 경우 - 15.81%, 이천시의 경우 +37.33%로 과소·과대 추

기후변화
재해통계자료
홍수피해액
비선형 회귀식
피해액 예측

정이 되었다. 과소추정의 원인으로는 지역의 재해대응력증가, 자연재해의 불확실성 및 재해 연보의 부정확성으로 볼 수 있으며, 과대추정의 원인으로는 피해액에 대한 자료의 부족, 강우-홍수피해액간의 낮은 상관성이 원인으로 분석되었다. 이러한 문제점들은 근원적으로 해결하기 어려운 자연현상의 불확실성과 이에 따른 대응능력 또한 지역별로 다르다는 점이다. 따라서 이러한 부분들을 개선하는 연구가 수행된다면 보다 더 신뢰할 수 있는 결과가 도출 될 것으로 기대된다.

© 2016 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-10-7531-7359.

Email. good3437@noaa.co.kr

1 Tel. 82-10-3375-7477. Email. stynrehero@naver.com

2 Tel. 82-10-5429-5271. Email. karesma0cch@naver.com

3 Tel. 82-10-3300-3378. Email. jungjw89@gmail.com

4 Tel. 82-10-3441-1038. Email. sookim@inha.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Mar. 10, 2016

Revised Mar. 22, 2016

Accepted Mar. 28, 2016

1. 서론

최근 기후변화 영향에 따라 대규모 인명피해 및 재산피해를 유발하는 자연재난이 지속적으로 증가하고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제 5차 평가 보고서(Fifth assessment report, AR5)에 따르면, 기후변화로 극한 기상의 발생패턴이 변화 되어 홍수, 폭염, 폭한 등의 기상이변이 더욱 심각해질 것이라고 한다.

우리나라의 과거 자연재해액에 대해 살펴보면, 2002년 태풍 “루사”, 2003년 태풍 “매미” 등 총 피해액 우선순위를 2014년 불변가격으로 환산해보면 상위 10위는 모두 2000년도 이후 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 재해발생 횟수는 호우가 가장 큰 비율을 차지하고 있으며, 그 뒤로 태풍 피해가 많은 실정이다. 이와 같이 2000년대에 들어 홍수 피해액이 증가하고 있으며, 이에 따라 자연재해에 관한 정보의 수요가 급증하고 있다. 그러나 국내에는 체계적이고 일관된 통계기반 정보체계가 미흡하고, 복구비 산정 및 피해액 산정이 어려운 실정이다.

국내 재해통계기반 피해예측 기술은 아직까지 이론적 수준의 개념형성 단계에 있으며 국내·외 논문 및 특허 수준도 매우 미흡한 기초단계에 있다. 실제 재해통계기반 피해예측 기술의 경우 데이터베이스(database)구축이나 개념형성은 되어 있으나, 재해통계 기반의 지역별·시설별 피해유형이나 원인별·지역별 패턴 및 통계분석 기술은 취약한 상태라고 할 수 있다. 호우·태풍피해 예측기술과 관련하여 국외의 경우 Kron(2002)가 홍수위험도에 대해서 자연재해 중 홍수와 관련된 홍수사상 또는 홍수사상의 발생확률을 나타내는 재해위험성, 홍수위험지역에 있는 경제적 자산이나 인명의 노출성(exposure), 그리고 홍수방어능력의 부족을 의미하는 취약성의 세 가지 요소들을 곱함으로써 홍수 위험도를 제시하였다. Joy(2005)는 홍수에 취약한 농촌지역 선별을 위해서 GIS를 이용, 하천범람 지역 분석 및 범람지역의 특성을 추출하여 취약성 평가 요소를 추출하였다. 또한 Jorn(2006)은 재해위험관리를 위해 필요한 취약성 지표의 측정 방법에 대하여 사회적, 경제적 지표 등의 조사 방법론, 구축 방법론 등을 제시하고 2008년에 홍수발생 확률과 그때의 발생되는 피해를 위험도로 보고 취약성과 노출성 그리고 지역의 대응능력을 평가하여 최종 환경적, 사회적, 경제적 위험으로 분석하여 취약성 감소 대책을 제시하였다.

최근에는 보험회사 통계 데이터를 기반으로 하는 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 독일의 경우 Prael(2012)는 보험회사의 피해액 데이터를 기반으로 산정한 식을 갖고 폭풍 사례에 대입하여 비교·검증을 실행한바 있으며, 미국의 경우에도 마찬가지로 Zhai(2014)의 연구를 통해 보험회사 피해 데이터를 바탕으로 자료조사가 진행 되었으며 1988~2012년까지의 73개 열대저기압의 바람 속도와 폭풍 크기에 따른 피해를 조사하였다. 바람과 폭풍의 크기를 동시에 고려한 지수식을 가정하여 검증을 진행하였다.

국내의 경우 건설교통부(2001)와 김정훈과 김영오(2003)는 인구밀도, 자산, 도시화율, 사회기반시설 밀도 등을 이용하여 홍수피해 잠재능(Potential Flood Damage, PFD)을 적용하였다. 국립 방재 연구소(2001)에서는 사전방재 노력이 통계적으로 어느 정도 피해감감효과와 상관관계가 있는지 연구하며, 홍수피해영향변수가 4개 지방자치단체의 홍수피해에 얼마나 영향을 미쳤는지 그 요소의 강약을 연구하였다. 국무총리 국무조정실 수질개선기획단(2003)에서는 국내 물 관련 기초통계 자료 현황을 제시하였고, 국가 수자원관리종합정보 시스템에서도 물관련 기관별 통계연보를 확인할 수 있다.

물 관련 기초통계 개선방안 보고서는 2003년에 작성되었고 통계연보 또한 기관별로 꾸준히 제시되어 공개되고 있다고 하나, 물 및 재해관련 통계에 대한 연구 굉장히 미비하며 통계자료의 개선을 위한 연구가 필요한 실정이다. 국토연구원(2005)에서는 33년간의 시군구별 홍수피해 자료를 토대로 홍수발생빈도와 피해액과의 관계를 빈도분석하여 홍수피해의 발생특성을 확률적 개념에서 분석하고, 홍수피해에 영향을 주는 인자들을 도출하여 그 영향의 정도를 수치화하는 홍수피해지표를 제시한 바가 있으나 재해통계를 기반으로 하여 피해액을 예측하는 방법과는 차이가 있다.

소방방재청(2006)에서는 향후 태풍 위험도 평가기술 개발 방향 결정의 기초 자료로 활용하고자 미국을 중심으로 선진 외국에서 확보하여 적용중인 관련 기술과 핵심 요소 기술과 핵심 요소 기술들을 조사 분석하고 국내의 관련 기술 개발 현황을 파악하였고, 강풍재해분야, 홍수재해분야, 폭풍해일재해분야로 구분하여 이들에 대한 각종시설물과 그 취약성에 기초한 위험성을 분석·평가할 수 있는 알고리즘을 확립하였다. 이 중에서 홍수재해분야에서는 HAZUS-MH 모형을 벤치마킹 대상으로 선정하고 HAZUS 홍수모형 및 HAZUS-MH 보조프로그램에 분석하였다. 박석근(2006)은 홍수피해 잠재능을 도시에 적용하기 위하여 지속기간별 확률강우량, 인구, 지역낙후도 지수, 공시지가를, 취약성으로 빗물펌프장 현황, 하

수관거 현황, 상습침수지역 현황을 이용하여 안양천에 적용하였다.

한국건설기술연구원(2008)에서는 이상홍수 취약성 지수를 개발하고 현재의 강우 추세를 이용 안성천 유역의 이상홍수 취약성을 분석하였고, 국립방재연구소(2009)에서는 국내·외 극한홍수 발생사례를 분석하고 홍수방어 대책 추진시 고려사항을 검토하여 홍수방어 대책의 우선순위 설정시 고려사항 및 문제점을 연구하였다. 박두호 등(2011)은 호우의 강우특성과 홍수피해액과의 관계 연구에서 과거 홍수피해자료와 호우사상의 강우특성을 중심으로 양자간의 히스토그램 분석을 실시하였으며, 지자체별로 조사된 자료를 이용하여 행정구역별로 분석하였다. 위와 같은 연구들은 자연재해를 통해 여러 방면에서 피해액 및 취약성 분석을 실시하였으나 실제 국민안전처에서 집계하는 재해연보 데이터와는 차이가 있고 예상홍수 피해액을 신속하게 추정하기 위한 연구와도 차이가 있다.

이에 본 연구에서는 1994년도 이후의 재난통계 관련 자료를 사용하여 재해 발생 전에 예상 홍수피해액을 신속하게 추정하기 위해 비선형 회귀식을 이용하여 강우-홍수피해액에 대한 함수를 제시하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 비선형회귀분석

비선형회귀식의 매개변수 추정은 선형회귀분석과 같이 정형화되어 있지 않지만 일반적으로 같은 절차를 따르며 (Hamilton, 1992) 상용프로그램을 적용하여 비선형회귀분석을 실시하는 방법은 다음과 같다. 먼저 Table 1 과 같이 적용되는 다양한 비선형 회귀식에서 주어진 독립변수와 종속변수에 가장 적절한 함수를 선택해야 한다. 이 과정에서는 여러 가지 방법을 적용할 수 있는데 만약 독립변수와 종속변수의 상관관계를 아는 경우 해당하는 비선형회귀식을 선택하면 된다. 그렇지만 대부분의 경우 이러한 상관관계를 알지 못하기 때문에 과거의 비슷한 연구결과를 참고하거나 산점도를 그려서 적절한 함수의 형태를 선택한다. 또한 여러 가지 함수를 선택하여 적용한 후 가장 적합도가 좋은 함수를 선택하는 것도 한 가지 방법이다.

다음으로 초기값을 선정하는 것이 필요하다. 대부분 비선형회귀분석은 상용프로그램을 사용하여 이루어지기 때문에 초기값의 선정이 잘못하게 되면 해를 찾기 못하고 발산하게 될 수 있고, 수행과정이 길어질 수 있다. 또한 경우에 따라서는 Local Optimum으로 해가 결정되어 만족할만한 해를 얻을 수 없는 경우도 발생하게 된다. 그러므로 초기값을 설정할 때에는 임의의 값을 선정하기보다는 관측값을 기반으로 선정하는 것이 적절하다. 관측값에서 독립변수 중 하나의 값이 0인 경우에 대해서 적용하고, 순차적으로 다른 매개변수의 초기값을 결정하는 것이 가장 기본적인 방법이며 그렇지 않은 경우에는 관측값을 여러 개 대입하여 연립하여 푸는 방법도 적용된다.

세 번째로 매개변수 추정방법을 선택해야 한다. 일반적으로 매개변수 추정방법은 Sequential Quadratic Programming이나 Levenberg-Marquardt Method를 사용한다. 이 방법 이외에 필요에 따라 Quasi-Newton Method가 적용되기도 한다. 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 Levenberg-Marquardt Method(Levenberg, 1944)를 적용하였다.

비선형회귀식의 매개변수 추정에는 손실함수(Loss Function)가 적합도의 판정기준으로 사용된다. 즉 두 번째 단계에서 가정한 초기값으로 구성된 비선형함수에 관측값을 대입해서 추정값을 구하고, 이 값과 실제 관측값의 차이가 설정된 범위 안에 들어갈 때까지 연산을 계속해 나가게 된다. 여기에 적용가능한 손실함수는 오차제곱의 합이 최소가 될 때를 나타내는 MSE를 사용될 수 있으며 경우에 따라서 다음과 같은 다양한 손실함수의 적용이 가능하다.

Table 1. Nonlinear regression equation type

Model	Equation
Asymptotic Regression	$y = b_1 + b_2^{b_3x}$
Density Function	$y = (b_1 + b_2x)^{(-1/b_3)}$
Gauss Function	$y = b_1(1 - b_3 \times \exp(-b_2x^2))$
Gompertz Function	$y = b_1 \exp[-b_2 \exp(-b_3^2)]$
Johnson Schumagher Function	$y = b_1 \times \exp(-\frac{b_1}{x + b_3})$
Log Modified Function	$y = (b_1 + b_3x)^{b_2}$
Log Logistic Function	$y = b_1 - \ln(1 + b_2 \times \exp(-b_3x))$
Metcherlich Law of Diminishing Returns	$y = b_1 + b_2 \times \exp(-b_3x)$
Michaelis Menten Function	$y = \frac{b_1 \times x}{x + b_2}$
Richards Function	$y = \frac{b_1}{1 + b_3 \times \exp(-b_2 \times x)}$
Growth Function	$y = \frac{b_1}{1 + \exp(b_2 + b_3 \times x)}$
Weibull Function	$y = b_1 - b_2 \times \exp(-b_3 \times x^{b_1})$

마지막으로 적절한 매개변수의 증가폭과 최대반복횟수, 수렴조건을 설정해주는 것이 필요하다. 이들 값은 적절한 범위 내에서 설정하는 것이 필요하며 만약 너무 크거나 또는 작은 값을 설정하게 되면 수렴속도가 너무 느리게 되거나 또는 수렴지점을 지나쳐버리는 경우가 생길 수 있다. 그러므로 적절하게 이러한 값을 조정해 나가면서 안정적으로 매개변수를 추정해 나간다.

2.2 매개변수 추정을 위한 최적화 기법

매개변수 최적화기법(Levenberg-Marquardt Algorithm)은 가장 보편적으로 사용되는 비선형회귀식의 매개변수를 추정하는 방법이다. 다음과 같이 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$, m 개의 관측값이 존재할 때 임의의 함수 $f(x, \beta)$ 의 매개변수 β 를 최적화 시킴으로써 실제 관측값과 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 한다.

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, \beta)]^2 \tag{1}$$

다른 비선형 최적화 알고리즘들과 마찬가지로 반복적인 계산을 통해 최적의 결과에 도달하게 된다. 최적화를 시작하기 위해서는 초기값을 선정해주어야 하는데 사전정보가 없을 경우에는 $\beta^T = [1, 1, \dots, 1]$ 를 대입하기도 한다.

초기값을 대입하고 계산을 진행해 나가면서 매 단계마다 매개변수 행렬 β 는 새로운 추정값 $\beta + \delta$ 으로 대체되게 된다. 여기서 증가행렬 δ 는 다음과 같이 $f(x_i, \beta)$ 으로부터 함수값 $f(x_i, \beta + \delta)$ 의 선형추정으로 결정된다.

$$f(x_i, \beta + \delta) \approx f(x_i, \beta) + J_i \cdot \delta \tag{2}$$

여기서 $J_i = \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial f}$ 는 함수 f 의 행성분에 대한 매개변수 행렬 β 의 gradient

위의 식(1)을 하나의 함수로 생각하고, 행렬 β 에 대한 도함수를 S 라하고 할 때 이 함수값이 최소가 될 때 $S(\beta)$ 의 기울기, 즉 S 는 0이 된다. 그러므로 앞에서 선형추정으로 결정된 $f(x_i, \beta + \delta)$ 를 식(1)에 대입하고, 그 기울기를 0으로 놓으면 다음과 같은 식 (3)이 유도된다.

$$(J^T J)\delta = J^T[y - f(\beta)] \quad (3)$$

여기서 J : 함수 f 의 도함수 행렬의 행 성분 J_i 의 Jacobian matrix

f : 함수 $f(x_i, \beta)$ 의 I 번째 추정값으로 이루어진 행렬

y : 관측값 y_i 로 이루어진 행렬

위 식 (3)은 선형함수의 형태로 δ 에 관해 해석이 가능하며 Levenberg Method(Levenberg, 1944)에서는 다음과 같이 이식을“damped” 형태로 바꾼 것이다.

$$(J^T J + \lambda I)\delta = J^T[y - f(\beta)] \quad (4)$$

여기서 λ = 고유치(Eigenvalue), I = 단위행렬

위 식에서 δ 는 주어진 증가분만큼 증가시키면서 최종적인 β 에 근접하게 된다. damping factor λ 는 매 단계별로 조정하게 되는데 만약 S 가 급하게 된다면 좀 더 작은 값을 사용하고, 만약 여러 번 반복적으로 수행했지만 잔차(Residual)가 잘 줄어들지 않는다면 좀 더 큰 λ 를 사용한다. 여기서 S 의 행렬 β 에 대한 gradient는 $-2(J^T[y - f(\beta)])^T$ 가 된다. 그러므로 큰 damping factor에 대해서는 그 증가분이 도함수의 방향으로 대략 결정된다. 만약 증가분의 크기, δ 나 잔차제곱의 감소량, $\beta + \delta$ 가 처음에 설정된 기준보다 작다면 여기서 반복수행은 마치게 되고, 마지막 행렬 β 가 해로 결정된다.

그러나 Levenberg Method은 damping factor λ 가 큰 경우 $J^T J + \lambda I$ 로 바뀔 수 없다는 단점이 있다. 그래서 Marquardt(1963)는 이 문제를 곡률에 따라 gradient의 크기를 조정해나가는 방법을 제안하였다. 그래서 gradient가 작으면 그 방향을 따라 움직이는 증가분의 크기는 커지게 된다. 이러한 방법으로 작은 gradient로 인해 수렴속도가 느린 문제를 해결할 수 있었으며 Marquardt는 식(4)에서 단위행렬이 포함된 항을 $J^T J$ 의 Hessian Matrix로 변경하여 다음과 같은 Levenberg-Marquardt Algorithm을 완성하였다.

$$(J^T J + \lambda \cdot \text{diag}(J^T J))\delta = J^T[y - f(\beta)] \quad (5)$$

3. 적용 및 모의 결과

본 연구에서는 경기도 3개 지역(이천시, 수원시, 양평군)을 대상지역으로 선정하였고, 1994년 ~ 2012년까지의 홍수피해 자료와 재해연보의 데이터를 기반으로 홍수피해액 분석을 실시하였다.

3.1 대상지역

(1) 이천시

이천시는 경기도 최동남쪽에 위치하고 있으며, 동서 길이 27km, 남북 길이 36km로 남북으로 긴 표주박형을 이룬다. 하천은 남한강의 지류인 북하천·송곡천·청미천 등이 흘러 유역에 소규모 총적평야가 발달하였다. Fig 1은 이천시의 행정 구역도를 나타낸다.

(2) 수원시

수원시는 경기도의 도청소재지로서 동쪽은 용인, 서쪽은 안산시, 남쪽은 화성시, 북쪽은 의왕시에 접하고 있으며, 기온차가 심한 대륙성 기후이다. 연평균 기온이 11.6°C이며, 연평균강수량은 1,268.1mm이다. Fig2 는 수원시의 행정구역도를 나타낸다.

(3) 양평군

양평군은 북쪽은 가평군과 강원도 홍천군, 서쪽은 북한강을 사이에 두고 위치하고 있으며, 대표 하천으로는 북한강의 지류인 수입천·문호천·흑천 등이 있다. 경기도 동부 내륙지방에 있어 겨울과 여름의 기온 차가 매우 심하며, 연평균기온은 10.8°C이다. 연평균강수량은 1,300.7mm이나 강수는 여름에 집중된다. Fig 3 은 양평군의 행정구역도를 나타낸다.



Fig 1. Icheon political boundary



Fig 2. Suwon political boundary

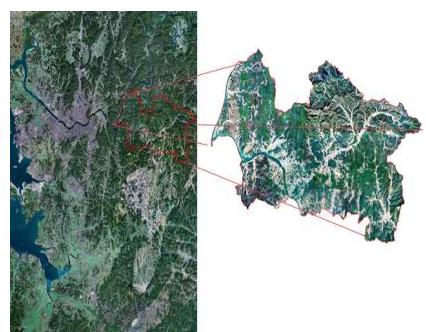


Fig 3. Yangpyeong political boundary

3.2 대상지역별 피해현황

(1) 피해액 자료 구축

본 연구에서 개발하고자 하는 강우-홍수피해액 추정함수는 지역별, 기간별 피해함수이므로, 피해지역에 대한 정확한 구분과 피해 시설물에 대한 분류가 체계화되어 있어야 가능하다. 현재 국가에서 제공하고 있는 체계화된 자료는 1994년 이후부터 제공하고 있는 재해연보자료이며, 이후에 많은 행정구역 개편을 진행하여 행정구역도의 재구축이 필요하다. 이를 토대로 본 연구에서는 1994년부터 2012년까지의 재해연보 자료를 확보하여 분석에 이용하였다. 재해연보에서 공공시설물에 대한 구분은 도로 및 교량, 하천, 소하천, 상하수도, 항만시설, 어항, 학교, 철도, 수리 및 방조시설, 사방임도, 군사시설, 소규모 시설물, 기타로 구분되며, 피해원인별, 시군구별로 구분하여 조사되어 있으며, 사유시설물에 대한 구분 역시 이재민, 건물, 선박, 농경지 등으로 피해별 원인별, 시군구별로 구분하여 구축하였다.

(2) 화폐가치를 고려한 재해연보데이터의 피해액 환산

20년간의 화폐가치는 변화하였기 때문에 이를 고려하지 않고는 정확도 높은 피해함수를 산정하기는 어렵다. 화폐가치를 변환하여 과거의 피해액을 현재 화폐가치로 환산하는 방법에는 이자율을 이용한 방법, 할인율을 이용한 방법, 소비자 물가지수를 이용한 방법, 생산자 물가지수를 이용한 방법 등 다양한 방법이 있다. 이자율을 이용한 방법은 투자효율인 B/C를 산정할 때, 즉 현재 투자한 재원의 미래가치를 산정하기 위한 방법으로 적용되는 경우가 대부분이며, 본 연구와 같이 과거 화폐가치를 현재 가치로 환산하는 데는 어려움이 있다. 다차원법과 같은 손실함수의 산정에서는 할인율을 이용한다. 소비자 물가지수나 생산자 물가지수는 생활 전반에 사용되는 통계자료에 적용가능한 방법이다. 경기도 3개 지역에 대한 화폐가치를 현재화한 데이터는 Table 2,3,4 와 같으며, 총 피해액에 대한 데이터는 Table 5와 같다.

Table 2. Icheon damage cost

(단위 : 천원)

시작일시	끝	구 분	
		기존 총 피해액	2014년 기준 현가화 총 피해액
1994-06-30 0:00	1994-07-01 0:00	42,100	80,243
1994-08-28 0:00	1994-08-30 0:00	331,859	632,523
1997-08-03 0:00	1997-08-05 0:00	266,791	444,207
1998-07-31 0:00	1998-08-18 0:00	11,214,087	17,370,621
2000-07-22 0:00	2000-07-24 0:00	18,188,645	27,937,759
2001-07-21 0:00	2001-07-24 0:00	1,139,654	1,645,660
2001-07-29 0:00	2001-08-01 0:00	142,472	205,730
2002-08-04 0:00	2002-08-11 0:00	10,712,952	15,469,503
2004-06-19 0:00	2004-06-21 0:00	280,452	367,392
2005-08-02 0:00	2005-08-11 0:00	136,994	174,667
2006-07-09 0:00	2006-07-29 0:00	3,755,791	4,683,471
2008-07-23 0:00	2008-07-26 0:00	916,337	1,064,784
2009-07-11 0:00	2009-07-16 0:00	4,477,195	5,063,708
2010-09-09 0:00	2010-09-12 0:00	107,668	118,219
2010-09-21 0:00	2010-09-22 0:00	1,556,036	1,708,528
2011-06-21 0:00	2011-07-03 0:00	485,598	512,791
2011-07-07 0:00	2011-07-16 0:00	148,468	156,782
2011-07-26 0:00	2011-07-29 0:00	5,023,072	5,304,364
2011-08-16 0:00	2011-08-16 0:00	323,167	341,264
2012-07-05 0:00	2012-07-06 0:00	19,562	20,208

Table 3. Yangpyeong damage cost

(단위 : 천원)

시작일시	끝	구 분	
		기존 총 피해액	2014년 기준 현가화 총 피해액
1995-07-09 0:00	1995-07-10 0:00	19,733	37,611
1995-08-08 0:00	1995-08-09 0:00	1,053,485	2,007,942
1996-07-26 0:00	1996-07-28 0:00	2,000	3,478
1998-07-31 0:00	1998-08-18 0:00	30,441,781	47,154,319
2001-07-05 0:00	2001-07-15 0:00	36,000	51,984
2001-07-21 0:00	2001-07-24 0:00	6,524,969	9,422,055
2002-08-04 0:00	2002-08-11 0:00	8,706,394	12,572,033
2003-08-23 0:00	2003-08-27 0:00	1,157,596	1,671,569
2005-06-26 0:00	2005-06-28 0:00	84,310	107,495
2005-06-30 0:00	2005-07-02 0:00	236,740	301,844
2005-08-02 0:00	2005-08-11 0:00	1,582,626	2,017,848
2006-07-09 0:00	2006-07-29 0:00	4,955,244	6,179,189
2008-07-23 0:00	2008-07-26 0:00	132,016	153,403
2009-07-09 0:00	2009-07-09 0:00	527,619	596,737
2009-07-11 0:00	2009-07-16 0:00	6,916,630	7,822,709
2010-09-09 0:00	2010-09-12 0:00	26,367	28,951
2010-09-21 0:00	2010-09-22 0:00	4,215,574	4,628,700
2011-06-21 0:00	2011-07-03 0:00	505,152	533,441
2011-07-07 0:00	2011-07-16 0:00	226,623	239,314
2011-07-26 0:00	2011-07-29 0:00	12,600,950	13,306,603
2012-07-05 0:00	2012-07-06 0:00	41,948	43,332
2012-08-14 0:00	2012-08-16 0:00	41,543	42,914
2012-08-20 0:00	2012-08-23 0:00	141,148	145,806

Table 4. Suwon damage cost

(단위 : 천원)

시작일시	끝	구 분	
		기존 총 피해액	2014년 기준 현재화 총 피해액
1998-07-31 0:00	1998-08-18 0:00	665,543	1,030,926
2000-07-22 0:00	2000-07-24 0:00	12,218,552	18,767,696
2001-07-29 0:00	2001-08-01 0:00	82,616	119,298
2006-07-09 0:00	2006-07-29 0:00	128,295	159,984
2009-07-11 0:00	2009-07-16 0:00	1,222,779	1,382,963
2010-09-21 0:00	2010-09-22 0:00	259,746	285,201
2011-06-21 0:00	2011-07-03 0:00	77,520	81,861
2011-07-07 0:00	2011-07-16 0:00	428,599	452,601
2011-07-26 0:00	2011-07-29 0:00	238,200	251,539
2012-07-05 0:00	2012-07-06 0:00	1,558,173	1,609,593

Table 5. 3 areas damage cost

(단위 : 천원)

구 분	이천시	양평군	수원시
총 피해액	59,268,900	80,176,448	16,880,023
2014기준 현재화	83,302,424	109,069,277	24,141,661

3.3 기상자료 구축

대상지역의 강우량 분석을 위해 이천, 수원, 양평 기상관측소를 선정하였다. 그리고 피해자료와 동일 기간에 대하여 Thiessen 망을 형성하여, Thiessen 계수를 산정하였다. Thiessen 계수를 가지고 경기도 3개 지역에 대한 면적강우를 산정하였으며, Fig. 4는 대상지역의 기상관측소 현황을 나타낸다.

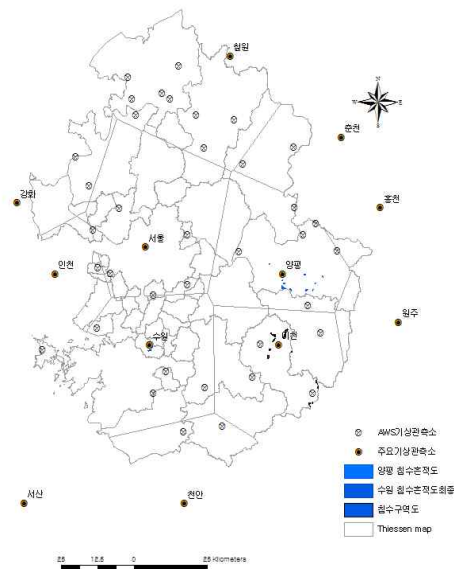


Fig 4. Weather station

3.4 회귀분석에 의한 강우-홍수피해액 추정함수 개발

(1) 강우분석

집중호우에 대한 피해를 기간별로 나누어 분석하였다. Table 6 은 피해액과 지속시간별 상관계수를 나타낸 결과이며, 지속시간 12시간 최대강우량과 지속시간 24시간최대강우량이 상대적으로 높은 상관계수의 값을 보인다. 강우-홍수피해액에 대해 살펴보면, 평균적으로 12시간일 때 0.51, 24시간일 때 0.48로 상관성이 나타났다.

Table 6. Correlation coefficient of between damage cost and duration

구 분	지속시간(hr)				
	1	3	6	12	24
수원	0.51	0.65	0.56	0.56	0.50
이천	0.26	0.24	0.30	0.35	0.37
양평	0.21	0.37	0.45	0.61	0.58
평균	0.33	0.42	0.44	0.51	0.48

(2) 비선형 회귀함수 선정

본 절에서는 강우량과 피해액간의 상관관계 분석을 위한 비선형 회귀함수를 선정하였다. 일반적으로 산포도를 그려 적절한 회귀함수를 구하거나 타 연구 성과를 바탕으로 적정 회귀함수를 구한다. 본 연구에서는 여러 가지 비선형 회귀식에 대하여 산포도를 그려서 적정 회귀함수를 선택하였다. 이를 위해 SPSS 모형을 이용하였고, 매개변수 추정방법은 일반적으로 많이 사용하는 함수최적화 기법을 사용하였다. Fig 5, Table 7은 양평군에 대하여 12시간 최대강우량과 24시간 최대강우량의 피해액간의 적정함수를 찾기 위해 비선형 회귀식을 나타내었다.

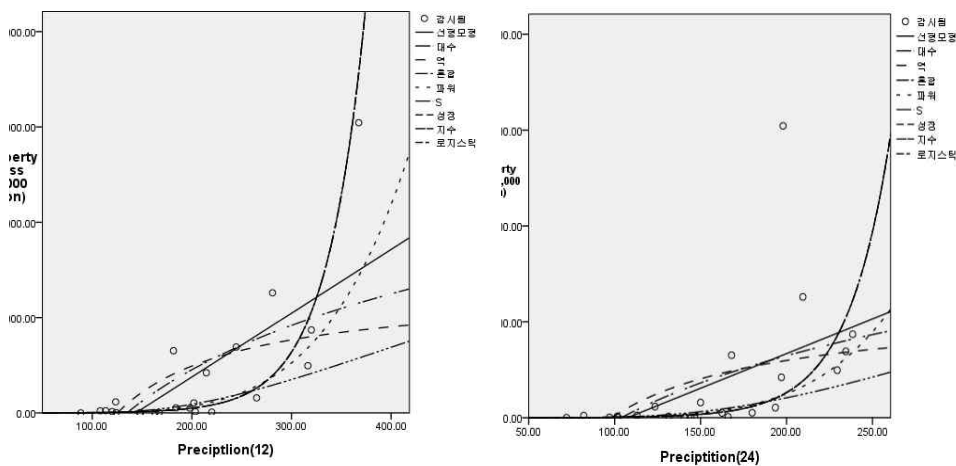


Fig 5. Nonlinear regression equation of precipitation - duration (Yangpyeong)

수원시와 이천시에 대해서도 살펴본 결과 전반적으로 성장함수(Growth function)를 사용하였을 경우에 상관계수가 높게 나오는 것을 볼 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 성장함수를 회귀곡선식으로 하는 피해 함수를 선정하였다. 성장함수의 경우 일정 강우량 이상의 경우 피해액이 무한대로 발산할 수 있어서 해당 식에 적용 가능한 강우량 조건을 반드시 명시하여야 할 것으로 보인다. 그로인해 복합강우 개념을 도입하였다.

Table 7. Correlation coefficient (Yangpyeong)

Equation	Correlation Coefficient
선형모형	0.271
대수	0.240
역	0.194
혼합	0.549
과워	0.596
S	0.549
성장	0.654
지수	0.549
로지스틱	0.549

(3) 복합강우와 피해액의 비선형 회귀 결과

기존 검토한 연구에서는 15mm 이상 강우량과 5시간 침투강우량에 일정 가중치를 곱하여 계산한 복합강우라는 개념을 사용하였다(장옥재, 2009). 이는 단일 강우량만 사용하는 경우 강우에 따른 피해액 추세를 전반적으로 반영하지 못하기 때문이라고 설명하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 두 가지의 강우를 회귀식에 반영하는 복합강우를 산정하고자 하였다.

경기도 3개 지역에 대한 12시간 최대강우량, 24시간 최대강우량을 복합강우로 사용하였다. 이는 앞에서 살펴본 것과 같이 경기도 3개 지역에 상관분석을 통해 12시간 최대강우량과 24시간 최대강우량이 피해액과의 상관계수가 높은 것으로 나타났기 때문이다. Fig 6 은 양평군에 대한 12시간 최대 강우량 및 24시간 최대강우량과 피해액간의 산포도를 나타냈다. Fig 7 은 12시간 최대 강우량 과 24시간 최대강우량을 합성하여 복합강우를 산정하였다.

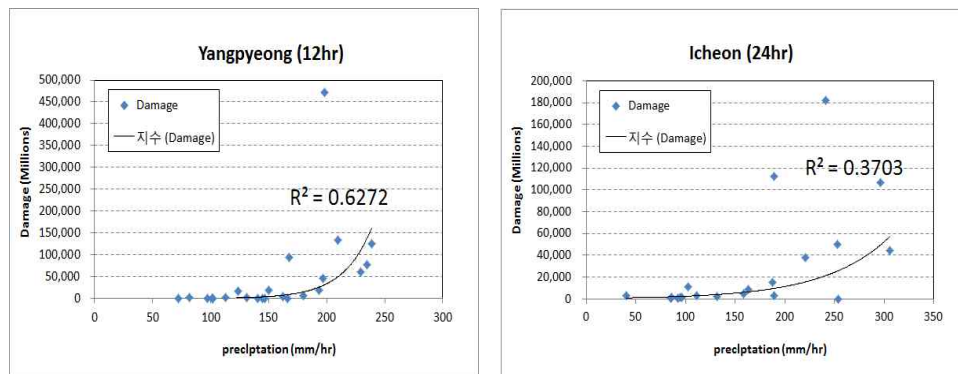


Fig 6. Degree of Scattering of precipitation - damage cost

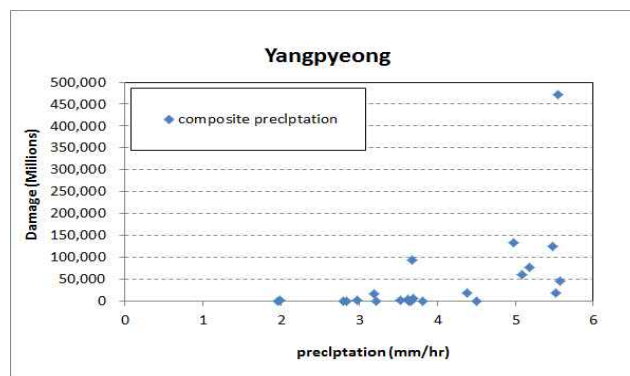


Fig 7. Degree of Scattering of complex precipitation - damage cost

12시간 최대강우량과 24시간 최대강우량에 일정한 가중치를 곱하여 생성된 복합강우와 피해액 간에 대한 비선형회귀분석을 실시하였다. 경기도 3개 지역에 대하여 복합강우를 산정한 식은 다음과 같다.

$$y = \exp^{(a + b_1x_1 + b_2x_2)}$$

여기서, a : 상수

b₁ : 12시간 최대강우량의 회귀 계수

b₂ : 24시간 최대강우량의 회귀 계수

설명변수 중에 서로 상관이 높은 것이 포함되어 있을 때는 분산-공분산 행렬의 행렬식이 0에 가까운 값이 되어 회귀 계수의 추정 정밀도가 매우 나빠지는 일이 발생하곤 하기 때문에 다중공선성 평가를 실시하였다. 다중공선성 분석 결과는 Table 8 과 같다. 다중공선성 분석 VIF(variance inflation factor)는 변량의 팽창정도를 의미하는데, 팽창의 정도가 클수록 다중공선성의 문제가 있는 것으로 본다. 그 기준은 10으로 보면 10이상 넘어가면 다중공선성이 있는 것으로 예상되지만 본 연구에서는 10이하로 다중공선성이 없는 것으로 판단되었다.

Table 8. Analysis of multicollinearity

시군구	시군구	공차	VIF
수원시	상수		
	X ₁	0.481	7.081
	X ₂	0.481	7.081
양평군	상수		
	X ₁	0.294	3.407
	X ₂	0.294	3.407
이천시	상수		
	X ₁	0.1	8.033
	X ₂	0.1	8.033

Table 9는 복합강우와 피해액의 비선형 회귀 결과이다. 복합강우 함수에 사용된 회귀계수인 b₁ 과 b₂ 간의 값을 살펴보면, b₂ 계수가 큰 경우 도시화가 된 지역이 크게 나왔고 도시화가 작은 지역은 b₁값이 크게 나온 것을 알 수 있다.

Table 9. Result of complex precipitation and damage cost

시군구	a	b1	b2	12시간 최대강우	24시간 최대강우	R2
수원시	5.21	0.001	0.006	328.1	333.2	0.75
양평군	8.81	0.002	0.002	238.5	367.5	0.65
이천시	6.11	0.004	0.004	298.5	306	0.53

3.5 피해액 추정 함수의 적용

지역단위 피해함수가 적절한지에 대한 적용을 실시하였다. 경기도에서 2013년 7월 11일~7월 15일까지 집중호우로 인한 피해가 발생한 바 있다. 당시 피해액을 살펴보면 경기도 지역에 약 305.7 억원 피해가 발생한 것으로 조사되었다. 앞에서 제시한 추정함수의 검증을 위해서 경기도 3개 지역에 대하여 피해 기간별 강우자료와 피해액을 분석하였다.

우선 신뢰구간에 대한 검증을 실시해야 한다. 신뢰구간이란 과거의 경험으로부터 자료가 근사적으로 정규인지 아닌지 판단하므로 모수가 어느 범위 안에 있는지를 확률적으로 보여주는 방법이라 할 수 있다. Fig 8은 신뢰구간 95%에 대한 구간이며, 예측값이 범위에 들어간다면 신뢰할 수 있는 자료라 할 수 있다. 경기도 3개 지역 모두 신뢰구간 범위안에 있는 것을 확인할 수 있었다.

12시간 최대강우량, 24시간 최대강우량을 산정하여 본 논문에서 제시한 함수로 피해액을 추정하여 Table 10과 같은 결과를 도출하였다. 추정 피해액과 실제 피해액 비교 결과 수원시의 경우 실제 피해액보다 - 13.31%, 양평군의 경우 - 15.81%, 이천시의 경우 +37.33%로 과소·과대 추정이 되었다.

Table 10. Result of damage cost

(단위 : 천원)

시군구	12시간 최대강우	24시간 최대강우	추정 피해액	실제 피해액	차액	%
수원시	77.5	89.9	3,204,286	3,696,156	-491,870	-13.31
양평군	195	202	21,210,354	25,194,322	-3,983,968	-15.81
이천시	171	174.5	5,768	4,200	+1,568	+37.33

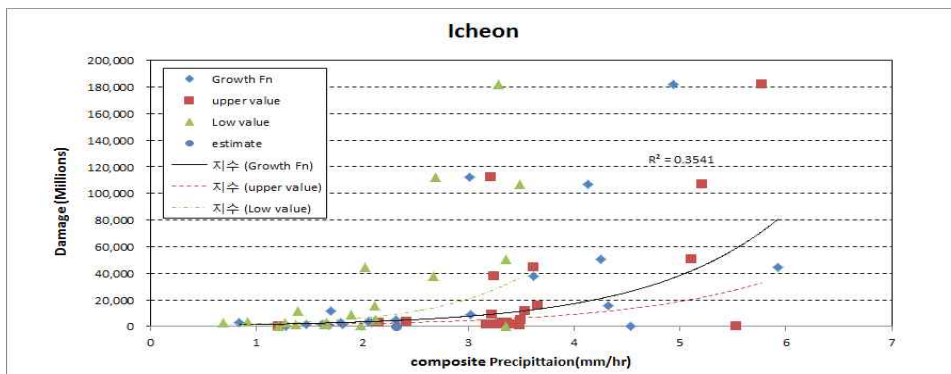
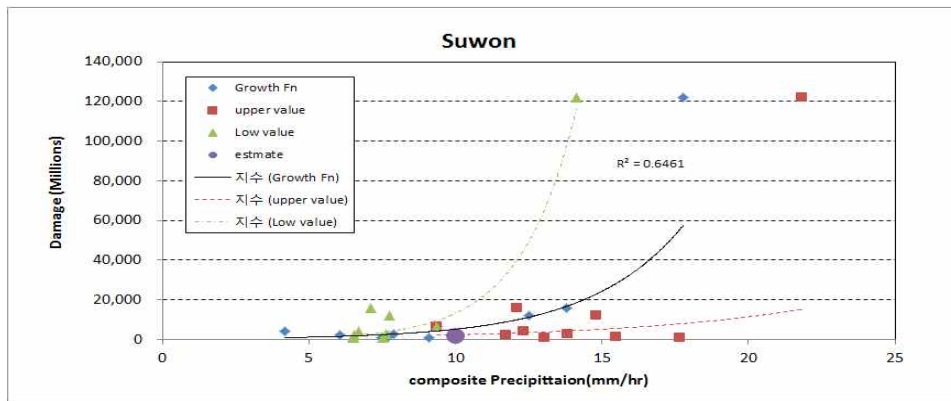
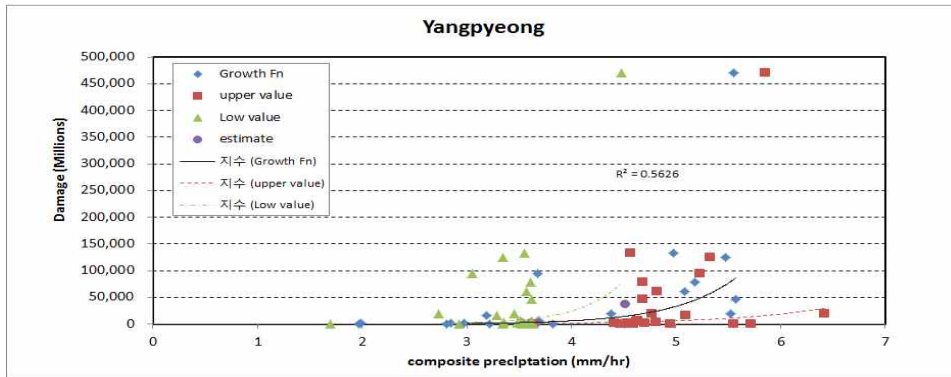


Fig 8. 경기도 3개 지역에 대한 신뢰도 분석

4. 결과 및 분석

본 연구는 국내 재해연보에 수록된 피해금액을 기준으로 회귀식을 만들어 피해액을 추정하기 위한 연구이다. 이러한 회귀 분석을 바탕으로 한 피해액 추정방법론은 사용하기는 간단하고 결과 산출도 빠른 반면, 정확도에 있어서는 다소 의문이 있는 방법론이다. 그러나 아무리 좋은 물리적, 경험적 이론을 바탕으로 한다 해도 사실상 사전에 피해액을 예측한다는 것은 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는 경기도 3개 지역에 한정하여 추진하였으며, 추정된 피해액과 실제 피해액을 비교하였다.

경기도 3개 지역에 대한 비선형 회귀식을 이용한 강우-홍수피해액 간의 추정 피해액 결과, 수원시에는 추정금액이 실제 피해액보다 -13.31%, 양평군에서는 -15.81% 적게나오는 등 전반적으로 과소 추정된 양상을 보였다. 이는 피해발생의 불확실도이다. 재해는 자연적인 원인에 의해서만 발생하는 것이 아니라 인위적인 원인에 의해서도 피해가 발생한다는 것이다. 즉, 시설물의 노후화, 시공불량 등으로 인해 발생하는 피해의 불확실도가 높다고 할 수 있다. 또한 지역의 재해대응력 증가이다. 다시 말하자면 복구사업, 즉 예방사업으로 인해 재해대응력이 커진 경우 동일한 강우에도 큰 피해가 발생할 확률이 낮아질 수 있다. 마지막으로 재해연보 상의 피해액의 불확실성이다. 재해연보의 피해액은 사유시설의 경우 신고된 자료를 바탕으로 피해액을 산정하고, 공공시설의 경우 별도의 단가기준을 설정하여 반영한다. 그러나 각 시도에서 조사하는 피해액은 조사당시 조사자의 주관에 많이 의존하고 있어, 피해액 산정의 객관화를 위한 노력이 필요하다는 전문가 의견들이 많이 있다.

이천시의 경우에는 실제 피해액보다 과대 추정이 되고 있는 것을 볼 수 있다. 이천시에 사용된 데이터의 경우 주로 적은 피해액의 자료는 많은 반면에 큰 피해액에 대한 데이터 개수가 부족함에 따른 것으로 판단된다. 앞에서 분석한 바와 같이 이천시의 상관도는 0.5에 미치지 못함에 따라 통계적 분석에 따른 어려움이 존재하기 때문이다. 이러한 문제점들은 근원적으로 해결하기 힘든 부분이 있으나, 몇몇 부분에서 개선할 수 있는 부분들을 살펴보고자 하였다.

각 지점별로 다양하게 있는 AWS강우자료 또는 레이다 강우 등 품질개선을 통해 접근을 고려한다면 충분히 좋은 결과가 있을 것으로 판단된다. 또한 지역별 재해대응력 증가된 부분을 반영하거나, 시군별 복구비 투자현황 등 관련 자료가 어느 정도 누적된 이후 이러한 부분을 개선할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론

최근 기후변화와 급격한 도시화로 인해 집중호우 발생빈도가 증가하고 있고, 불투수층 증가로 홍수량은 커지고 있어 인명 및 재산 피해가 심각해지고 있다. 그러나 만약 예측한 호우에 따라 그 피해를 예측 또는 추정할 수 있다면 재난 정책 결정권자는 재난 대응과 복구에 대해 신속하고 효율적으로 계획을 수립할 수 있을 것이다. 그러므로 효율적인 재해관리를 위해서는 재난이 발생하기 전에 재해의 규모와 그에 따른 영향을 신속하게 추정하는 것이 필요하고, 이것은 정책 결정권자들의 의사결정에 중요한 역할을 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 재난이 발생하기 전에 재난에 신속히 대응할 수 있도록 재해통계 자료와 강우자료를 활용해 피해액을 추정할 수 있는 함수를 제시하고자 하였다. 비선형 회귀식을 이용하여 강우-피해액에 대한 함수를 개발하였고, 이를 이용하여 강우에 따른 피해액을 미리 추정할 수 있도록 하였다. 피해액 추정을 위한 대상지역으로는 이천시, 수원시, 양평군을 선정하였고, 대상지역의 1994년부터 2012년까지의 홍수피해 자료와 강우자료를 이용하였다. 강우-홍수피해액 추정함수식을 개발하기 위하여 매개변수 추정방법으로는 비선형 회귀 함수 최적화 기법을 이용하였으며, 강우량과 피해액간의 상관관계를 이용한 복합강우개념을 사용하였다. 즉, 지속시간별 최대강우량과 피해액에 대한 상관성분석을 실시하여 12시간 및 24시간 최대강우량이 피해액과 상관관계가 높다는 것을 파악하였다. 따라서 2개의 최대시강우량을 독립변수로, 피해액을 종속변수로 하는 복합강우 개념을 도입하여 강우-피해액의 비선형 회귀식을 추정하였다. 추정된 비선형 회귀식을 이용하여 예상피해액을 산정한 결과, 이천시의 경우 실제 피해액 대비 37% 과대 추정, 수원시의 경우 14% 과소 추정, 양평군의 경우 16% 과소 추정되었다.

피해액이 과대·과소 추정되는 원인으로는 지역의 재해대응력증가, 피해발생의 불확실도, 재해연보 상의 불확실성, 피해액에 대한 자료의 부족, 근원적으로 해결하기 어려운 자연현상의 불확실성, 고려하지 못한 지역별 대응능력 등이 있을 것으로 판단된다. 자연현상으로 인해 발생한 자연재난의 피해액을 사전에 추정한다는 것은 불확실성이 높을 수 밖에 없다. 따라서, 자연현상의 불확실성을 줄이기 위해 각 지점별로 다양하게 존재하고 있는 AWS강우자료 또는 레이다 강우 등의 품질개선을 통한 접근을 고려하거나, 지역별 특성과 지역별 재해대응력이 증가된 부분을 반영하는 등의 지속적인 연구가 필요하다. 즉,

자연속에 내재되어 있는 불확실성을 줄이기 위한 노력과 실제 지역에서 수행하는 재난 대응을 위한 다양한 요소들을 고려한다면 보다 더 정확한 피해액 산정을 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MPSS-자연-2015-79]

References

- D.H Park., et al (2011), "Correlation between Storm Characteristics and Flood Damage", Journal of Wetlands Research ,Vol.13, No.2 pp.219~229
- D.H Park, J.H Ahn (2011), "An Analysis of Relations between Rainfall Characteristic and Flood Damage", Korea water resource association, pp.423
- G.H Kim (2013), "A Study on Estimation of Flood Damage and Development of Flood Damage Index on Public Facilities", Ph.D. Dissertation, Inha University
- GH.Lee., et al. (2006), "Application of Multi-Dimensional Flood Damage Analysis for Urban Flood Damage", KSCE, Volume 26, No.4B, pp.363~369
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151
- Jörn Birkmann, Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies , United Nations University Press (2006)
- Joy Sanyal* and X. X. Lu(2005)"Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India " Volume 19, Issue 18, pages 3699 - 3716, 30 November"
- Korea Research Institute for Human Settlements (2005), "Analysis of Flood Damage Characteristics and Development of Flood Damage Index"
- Ministry of Construction & Transportation (2001), "Flood Management in River Basin"
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2014), "A study on Economic Analysis System for Flood Control"
- Ministry of Public Safety and Security (2014), "Natural disaster research and recovery planning guidelines
- Ministry of Public Safety and Security (1994 ~ 2014), "Disasters yearbooks"
- National Emergency Management Agency (2006), "Study on the Algorithm for Typhoon Risk Assessment"
- National institute for disaster prevention (2009), "Study of the Countermeasures on Extreme Flood"
- O.J Jang(2006), "Flood Risk Assessment Using Regional Regression Analysis", Master Thesis, Seoul National University
- Prahl, B. F., et al. "Applying stochastic small scale damage functions to German winter storms." Geophysical Research Letters 39.6 (2012)
- Prahl, B. F., et al. "Comparison of storm damage functions and their performance." Natural Hazards and Earth System Science 15.4 (2015)
- S.K Park (2006), "Estimation of Potential Risk for Flood Damage Occurrence", Master Thesis, Inha University
- The Office for Government Policy Coordination (2003), "Improvements of water statistics"
- T.S Park., et al (2012), "Flood Damage Index regarding Regional Flood damage Characteristics", KSCE ,Volume 30, No.4B pp.361~366
- Zhai, Alice R., and Jonathan H. Jiang. "Dependence of US hurricane economic loss on maximum wind speed and storm size." Environmental Research Letters 9.6 (2014)