도로시설물에 대한 손실함수 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Loss Functions for Road Facilities

황신범* · 김상호** · 이창희***

Hwang, Shinbum*, Kim, Sangho**, and Lee, Changhee***

Abstract

In the event of damage due to heavy rains and typhoons, it is necessary to predict the extent of damage to road facilities that are actively used in disaster situations, for example, for evacuation and movement of recovery supplies. This study intended to develop loss functions for estimating the damage amount of road facilities by utilizing road facilities damage data of National Disaster Management Information System DB and flood trace map. The Korean Reach File (KRF) basin was selected as the scope of damage due to creation of flooded areas, and inundation area and road area of KRF basin were selected as independent variables to take into account the scale of the disaster, regional prevention ability with respect to disasters, and status of road facilities that could sustain damage. Based on the relationship between the dependent and independent variables, loss functions for road facilities were developed for metropolitan cities and counties through regional classification. These loss functions are expected to be utilized to support decision-making in the establishment of the disaster prevention policy by providing the basic information necessary for the preparation of disaster reduction measures.

Key words : Road Facilities, Loss Function, Damage of Road Facilities, NDMS

요 지

집중호우와 태풍에 의한 재해 발생 시 인명 대피와 복구물자의 이동 등 재해 상황에 적극적으로 활용되는 사회기반시설인 도로시설물에 대한 피해 규모를 예측하기 위하여 국가재난관리정보시스템(National Disaster Management System, NDMS) DB의 도로시설물 피해자료와 침수흔적도를 활용하여 도로시설물 피해액을 추정하기 위한 손실함수를 개발하였다. KRF (Korean Reach File) 유역을 침수구역 생성에 따른 도로시설물의 피해발생 범위로 선정하였으며, 재해 규모와 지역의 방재능력, 피해가 발생될 수 있는 도로시설물의 현황을 고려하기 위하여 KRF 유역 내 침수면적과 도로면적을 독립변수로 결정하였다. 종속변수와 독립변수간의 관계 그래프를 바탕으로 지역별 분류를 통하여 광역시와 시군에 대한 도로시설물 손실함수를 개발하였다. 개발된 도로시설물 손실함수는 재해저감 대책 마련에 필요한 기초정보를 제공함으로써 재해예방 정책 수립을 위한 의사결정 지원에 활용될 것으로 기대한다.

핵심용어 : 도로시설물, 손실함수, 도로시설물 피해, 국가재난관리정보시스템

1. 서 론

지구온난화에 따른 이상기후 현상이 지속됨에 따라 전

지구의 평균기온은 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 발생하는 집중호우나 태풍과 같은 자연재해의 발생빈도와 강도도 점차 증가하고 있는 추세이다. 2018년 기준으로 최근

*정회원, 상지대학교 일반대학원 토목공학과 박사과정(E-mail: drifttts@nate.com)

Member, Doctrate course, Department of Civil Engineering, Sangji University

**교신저자, 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-33-730-0476, Fax: +82-33-730-0606, E-mail: kimsh@sangji.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Sangji University

***정회원, 중원대학교 소방방재공학전공 교수(E-mail: lch75039@hanmail.net)

Member, Professor, Department of Fire and Disaster Prevention Engineering, Jungwon University

10년 동안 우리나라에서 발생한 자연재해로 인한 평균 피해액은 약 3,628억 원이며, 평균 복구액은 7,709억 원에 이른다. 자연재난의 원인별 재산피해액을 살펴보면, 2018년에는 호우와 태풍으로 인한 피해액이 전체 피해액의 약 88%를 차지하였으며, 자연재난 중목별 재산피해액의 경우 공공시설에 대한 재산피해액은 전체의 72%를 차지하는 것으로 나타났다(MOIS, 2018). 이러한 자연재난을 대비하고 예방하기 위해서는 발생 가능한 재해에 대한 정확한 피해규모의 예측이 필요하다. 본 연구에서는 공공시설물 가운데 재해연보와 국가재난관리정보시스템(NDMS) DB에서 도로로 구분되는 공공시설물을 대상으로 호우나 태풍으로 인해 발생 가능한 피해액을 추정할 수 있는 손실함수를 개발하고자 하였다.

재해에 대한 경제적 손실을 예측하기 위하여 선진국에서는 손상·손실함수 혹은 손실평가 모델이 개발되어 왔다. 미국의 Hazard US Multi-Hazard (HAZUS-MH; FEMA, 2011, 2012)는 1992년 지진에 대한 손실평가를 위하여 개발된 HAZUS에 지진 이외의 홍수, 허리케인 등과 같은 다양한 재해에 대한 손실평가 기능이 추가되었으며, 일반자산에 대해서는 시설물별 침수심에 따른 피해율을 제시하고, 6가지의 대분류 가운데 공공시설물과 연관성이 높은 교통시스템에서는 고속도로, 철도, 경전철, 버스, 항만 및 항구, 페리, 공항 등 7가지 세부요소로 구성되어 있으나, 사유시설물과 같이 침수심에 따른 피해율이 아닌 대부분 실제 조사에 의해 결정된 시설물의 피해율에 따른 피해단가만을 제시하고 있다. 일본의 치수경제조사매뉴얼(Ministry of Construction River Bureau, Japan[建設省 河川局], 2000)은 미국의 HAZUS-MH처럼 침수심별 피해율을 이용하여 일반자산에 대한 손실 규모를 예측하고, 과거 발생되었던 일반자산 대비 공공시설물별 피해 비율을 산정하여 일반자산 피해 규모에 공공시설물 피해비율을 곱하여 공공시설물에 대한 피해규모를 산정하였다. 또한, Youssef et al. (2011)은 이집트 남부 캐서린 도로에 대한 수치표고모델(DEM)과 유역면적, 배수율, 배수 밀도, 경사도 등의 매개변수를 이용하여 도로에서 발생할 수 있는 홍수 위험도를 나타내었으며, Dawod et al. (2012)은 사우디아라비아 Makkah 도시에 대한 홍수 특성과 DEM, 토양도 등의 자료를 활용하여 도로망에 대한 홍수 위험 등급을 분류하는 연구를 수행하였다.

국내에서는 홍수로 인한 피해액을 추정하기 위하여 간편법(MOCT, 2000)이 개발된 이후 개선법(MOCT, 2001)과 다차원법(MD-FDA)이 개발되었는데, 피해액 예측과 관련된 대부분의 연구는 치수경제성 분석에 많이 활용되고 있는 다차원법(Multi-Dimensional Flood Damage Analysis, MD-FDA; MOCT, 2004)을 활용한 연구이다(Choi et al., 2006a, 2006b; Lee et al., 2006; Lee and Park, 2011; C.K. Choi et al., 2017; Kang et al., 2018). 최근에는 공공시설물에 대한 연구도 비교적 활발히 이루어지고 있는데, Kim (2013)은 공공시설물을 침수심에 대한 예민시설과 비예민시설로 분류하여

피해액을 추정하는 방법론을 제시하였으나, 도로시설물과 같은 침수심 비예민시설에 대해서는 HAZUS-MH처럼 피해가 발생한 시설물에 대한 피해물량 혹은 피해길이가 제시될 경우 피해액을 추정할 수 있다. Kim et al. (2016)은 공공시설물 가운데 하천시설물을 대상으로 국내 일부 지역에서 발생한 하천 피해현황, 수문자료 및 개수율 등을 이용하여 하천의 피해길이와 피해액을 추정할 수 있는 식을 제안한 바 있으며, C.H. Choi et al. (2017)은 경기도 지역의 공공시설물에 대해 호우로 인한 피해를 예측하기 위해 기상요소 및 사회·경제적 요소를 고려하여 머신러닝 기법을 통해 호우피해액을 예측하였다.

공공시설물 중 도로시설물에 대한 손상 또는 손실함수 개발에 관한 연구는 국외에서 직접적으로 이루어진 것은 전무한 상황이며, 국내에서 일부 연구가 진행된 바 있으나 매우 미진한 상태라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 호우·태풍으로 인한 재해 발생 시 복구물자의 이동과 인명 대피에 활용되는 사회기반시설인 도로시설물에 대하여 국가재난관리정보시스템의 과거 실제 피해자료와 침수흔적도를 이용하여 직접적인 피해액을 추정하기 위한 손실함수를 개발하고자 하였다. 본 연구를 통하여 개발된 도로시설물 손실함수는 미래 호우·태풍에 따른 재해 발생 시 피해액 규모를 추정할 수 있는 정보를 제공하여 재해저감 대책 마련에 필요한 기초정보로 활용될 것으로 기대된다.

2. 도로시설물 손실함수 개발 방안 정립

2.1 도로시설물 관련 피해자료 수집 및 분석

집중호우로 인해 제내지에서 발생하는 내수침수로 인한 도로시설물의 피해액을 추정하기 위한 손실함수를 개발하기 위하여 국가재난관리정보시스템(NDMS) DB에서 2009년부터 2016년까지 발생한 피해자료 중 도로시설물과 직접 관련된 ‘도로/교량’, ‘농어촌도로’로 분류된 자료를 수집하였다. 수집된 NDMS DB 자료를 조사한 결과 도로의 포장, 보도, 신호 등과 같은 교통시설물을 포함한 도로의 구성요소들뿐만 아니라 법면, 사면, 관로 등 도로에 인접되어 있거나 도로에 매설되어 있는 여러 가지 시설물들이 도로 피해로 분류되어 있었다. 또한, 도로시설물에서 재해가 발생할 때에는 단일 시설물에서만 피해가 발생하는 것이 아니라 여러 가지 도로시설물에서 동시에 피해가 발생하는 복합재해의 양상으로 주로 나타나기 때문에 NDMS DB에서 제시된 피해 대상물들은 단일 피해 대상물이 아닌 여러 대상물에서 발생한 피해 내역이 함께 제시되어 있었다. Fig. 1은 NDMS DB에서 수집된 도로시설물 피해 자료들을 도로, 사면/법면, 옹벽 등으로 분류하여 시설물의 종류별 피해물량과 피해액 비율을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 도로와 사면에서 발생한 피해물량과 피해액이 약 80%의 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 1. Damage Status for Road Facilities

본 연구에서는 호우·태풍으로 인한 다양한 피해가 도로시설물에서 복합적으로 발생하고 있기 때문에, 시설물의 종류별로 피해물량을 구하고 단가 적용을 통해 피해액을 도출해야 하는 손상합수가 아닌 도로시설물에서 발생하는 전체 피해액을 대상으로 하는 손실합수를 개발하고자 하였다.

2.2 도로시설물 피해발생 현황 분석

과거 제내지에서 발생한 도로시설물의 피해자료와 침수 흔적도와의 관련성을 분석하기 위해 2009년부터 2016년까지 발생한 침수흔적도(한국국토정보공사)를 수집하였으며, NDMS DB에서 수집한 도로시설물에 대한 피해자료를 수치지도 상에 도시하고자 하였다. 그러나, 수집된 NDMS DB의 경우 GIS 기반 DB가 아닌 텍스트 형태의 데이터 시트로만 작성되어 있어 침수구역 내 피해자료를 직접 도시할 수 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 NDMS DB 속성 중 상세주소가 존재하는 피해자료에 대하여 국내 주요포털사이트의 지도를 통하여 주소를 재확인하였으며, 최종 위치확인이 완료된 상세주소는 Parcel Number (PNU)로 변환하였다. 변환된 피해자료의 PNU와 연속지적도의 PNU 속성을 연계하여 도로시설물 피해발생 위치를 GIS DB로 구축하였으며, 수집된 침수흔적도와 GIS 상에서 중첩하였다. Fig. 2는 동두천시와 부산광역시 북구에서 발생한 침수구역과 도로시설물의 피해발생 위치를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 붉은색으로 표시한 도로시설물의 피해발생 위치는 대부분 파란색으로 표시한 침수구역 내에서 발생한 것이 아닌 외부 지역에서 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이를 전국범위로 검토한 결과 상세주소 확인이 가능한 1,800

Fig. 2. Example of Comparison between the Location of Road Damage and Inundation Trace Map

여건의 자료 중 약 1.1%에 해당되는 20여건의 피해자료만이 침수구역 내에서 발생한 것으로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 도로시설물의 피해는 침수구역 내에서 침수에 의해 주로 발생하는 것이 아니라 집중호우로 인해 발생하는 지표류가 지면을 따라 유하하거나 도로 인근의 사면이나 법면을 흐르면서 피해를 유발하는 것으로 규정하였으며, 이와 같은 피해발생 메커니즘을 고려하여 손실합수를 개발하고자 하였다.

2.3 도로시설물 피해자료 범위 설정

도로시설물에 대한 손실합수 개발을 위해서는 집중호우시 발생하는 침수흔적도를 중심으로 주변에서 발생한 도로시설물 피해자료에 대한 적용범위를 설정하여야 하며, 그 적용범위는 전국에서 과거 발생한 침수흔적도에 대해 획일적인 기준으로 적용되어야 한다.

이를 위해 구역경계의 기본 단위로 활용되고 있는 시군단위 행정구역과 수문해석의 기본 범위로 사용되는 표준유역을 침수구역에 대한 도로시설물 피해발생 가능 범위로 검토하였지만, 시군단위 행정구역이나 표준유역은 과거 발생한 침수흔적도의 분포와 침수구역 개념의 면적 크기를 고려할 경우 과도한 것으로 판단되었다. 이에 지표류 유하에 의해 생성되는 침수흔적도의 침수면적 개념을 접목할 수 있는 물환경정보시스템의 Korean Reach File (KRF) 유역을 검토하였다. KRF 유역은 전국적으로 획일적인 구역 제시가 가능하며, 구축 과정에서 하천간 단위의 분할과 하천흐름해석, 침수구역, 유역도, 침수구역 경계 보정과정을 거치기 때문에 비교적 적정 크기의 침수구역 개념을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 임의 지역에서 발생한 침수흔적도와 연관된 도로시설물의 피해발생 위치에 대한 공간적 범위를 KRF 유역으로 국한하였다. Fig. 3은 서울과 경기도 지역에 대한 KRF 유역을 나타내고 있다.

Fig. 3. KRF Basin for Seoul and Gyeonggi-do

2.4 도로시설물 손실함수의 구축

도로시설물에 대한 손실함수를 개발하기 위하여 본 연구에서는 과거 집중호우로 인해 피해지역에 형성된 침수흔적도를 기초자료로 활용하였는데, 침수흔적도는 강우에 의하여 유출된 유수가 저지대로 모여 침수구역을 생성하는 과정에서 지형의 특성, 강우의 강도, 지역 방재시설물의 성능에 따라 침수구역의 범위가 다양하게 나타날 수 있다. 침수흔적 즉, 침수구역이 형성됨에 따라 발생하는 도로시설물의 피해범위는 KRF 유역 내에서 발생한 피해로 제한하였으며, 이 범위에서 발생한 피해액의 합계를 분석자료로 구축하였다.

도로시설물에 대한 피해액 추정에 사용되는 침수면적과 함께 적용 가능한 독립변수를 선정하기 위해 KRF 유역 내 도로면적과 도로길이, KRF 유역면적 등의 인자들을 선정하였으며, 도로시설물에 대해 피해자료가 있는 2013년, 2014년, 2016년 NDMS DB 및 침수흔적도 자료를 구축하였다. 여기서, 종속변수로 사용되는 피해액의 경우 재해발생 연도별로 화폐 가치가 다르기 때문에 한국은행에서 제시되는 건설업 Gross Domestic Product (GDP) Deflator를 적용하여 2017년 기준 환산액으로 피해액에 대한 화폐가치를 통일시켰다. 독립변수로 사용되는 인자들에 대한 피해액과의 Pearson 상관성 분석을 Table 1과 같이 실시하였다. 표에서 보는 바와 같이 KRF 유역면적을 제외한 모든 독립변수에서 함수 개발에 활용될 수 있는 유의미한 수준의 상관성이 있는 것으로 나타났는데, KRF 유역 내 존재하는 도로 종류, 즉 국도와 지방도 등 도로 등급에 따른 도로의 폭을 반영할 수 있는 도로면적을 침수면적과 함께 도로시설물의 손실함수를 위한 독립변수로 선정하였다. Eq. (1)은 도로시설물에 대한 피해액 산정을 위해 침수면적과 KRF 유역 내 도로면적으로 구성된 도로시설물 손실함수의 형태를 나타내고 있으며, Fig. 4는 도로시설물의 손실함수를 구성하고 있는 인자들에 대한 이해를 돕기 위해 침수흔적도, 전체 도로망에서 KRF 유역 내에 위치한 도로와 도로시설물 피해가 발생한 위치를 도시한 그림이다.

$$\text{Damage of Local Road Facilities} = f(\text{Inundation Area, Road Area within KRF Basin}) \quad (1)$$

Fig. 4. Key Map for Variables of Loss Functions

Fig. 5에서는 Table 1에서 검토된 손실함수의 독립변수와 종속변수 간의 관계를 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 자료의 분포형태가 x축의 조건에 따라 피해액이 큰 그룹과 작은 그룹으로 나뉘는 두 가지 형태의 추세를 나타내고 있다. 본 연구에서는 두 가지로 구분되는 자료의 추세에 대한 여러 가지 원인분석을 실시하였으며, 그 결과 Fig. 6과 같이 침수구역과 도로시설물의 피해가 발생된 지역을 광역시와 시군에 따른 행정구역별로 구분하였을 때 자료의 그룹핑이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 광역시의 경우 침수면적이 작더라도 많은 시설물들이 밀집되어 있는 도시지역의 특성과 시군 단위의 지역에서는 상대적으로 피해액이 낮게 발생할 수 있는 지역적 특성을 잘 나타내고 있었으며, 본 연구에서는 도로시설물에 대한 손실함수를 광역시와 시군 지역으로 구분하여 개발하고자 하였다.

3. 도로시설물 손실함수 개발

3.1 분석자료에 대한 이상자료 제거

도로시설물에 대한 손실함수의 개발을 위해 Eq. (1)에서 제시된 과거 도로시설물에서 발생한 피해액(2017년 기준 환산 피해액), 침수면적 그리고 KRF 유역 내 도로면적 자료를 광역시와 시군으로 구분하여 자료에 대한 상관성을 검토하였다. 광역시의 경우 Fig. 7에서 보는 바와 같이 도로시설물

Table 1. Correlation Analysis of Dependent and Independent Variables for Road facilities

Classification		Inundation Area (m ²)	Road Area within KRF Basin (m)	Road Length within KRF Basin (m)	KRF Basin Area (m ²)
Damage Cost (1,000won, 2017)	Pearson Correlation Coefficient	0.315	0.455	0.411	0.010
	Significance Level	0.015	0.000	0.001	0.942

(a) Inundation Area

(b) Road Area within KRF Basin

(c) Road Length within KRF Basin

(d) KRF Basin Area

Fig. 5. Relationship of Dependant-Independent Variables for Loss Functions of Road Facilities

(a) Inundation Area

(b) Road Area within KRF Basin

Fig. 6. Classification of Data according to the Administrative Areas

(a) Inundation Area in Metropolitan Cities

(b) Road Area within KRF Basin in Metropolitan Cities

(c) Inundation Area in Counties

(d) Road Area within KRF Basin in Counties

Fig. 7. Regression Graph for Dependant-Independent Variables

피해액에 대해 침수면적과의 결정계수(R^2)는 0.494, KRF 유역 내 도로면적은 0.544로 나타났으며, 시군의 경우 침수면적은 0.251, KRF 유역 내 도로면적 0.254로 나타났다. 이러한 결과는 그림에서 보는 바와 같이 침수면적이나 도로면적의 크기에 따른 피해액의 규모가 비정상적으로 발생한 자료들이 크게 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 이러한 자료들은 함수 개발 시 함수의 설명력(결정계수)을 약화시키고 잘못된 경향으로 유도할 수 있기 때문에 비정상적인 자료에 대한 제거 과정이 필요하다.

이상자료에 대한 제거는 통계학에서 회귀식 개발에 활용되는 자료가 현실적으로 발생 가능한 자료인지에 대한 타당성 및 활용성을 검토하여 좋은 회귀식을 도출하기 위한 일반적인 과정이며, 본 연구에서는 지역별 분류 자료에 대하여 종속변수인 피해액과 독립변수간 비율을 정규분포 상사도표에 적용하여 1차 이상자료를 제거하였다. 상사도표는 자료에 대한 사분위간 범위(Interquartile range, IQR)를 활용

하여 중앙값과 Q1, Q3, 최대값, 최소값을 이용하여 작도되는 그래프로서 Outlier 바깥 부분을 이상자료로 표현하기 때문에 이상자료의 확인과 제거가 용이하며, 자료 전체의 분포 및 타당성(validity) 확인이 비교적 용이하다.

1차적으로 이상자료를 제거한 자료를 대상으로 종속변수와 독립변수간의 선형 관계에서 이상자료를 판별하는 통계학적 분석방법인 표준화 잔차(Standardized Residuals), 쿡의 거리(Cook's Distance), 표준화 DFFIT (Standardized Difference of Fits, DFFIT)를 사용하여 2차 이상자료를 검토하였다. 표준화 잔차는 잔차의 표준화 값으로 추정 회귀식으로부터 관측치가 얼마나 떨어져 있는지를 나타내는 것으로 절대값이 3보다 크면 이상값일 가능성이 높다. 쿡의 거리는 회귀직선의 모양(기울기나 절편 등)에 크게 영향을 미치는 자료들을 찾는 방법으로 절대값이 1보다 클 경우 이상값으로 판별한다. 표준화 DFFIT는 영향력 통계량을 검토하는 방법으로 특정 케이스를 제외하고 나타난 예측값의 변화량을 나타내

며, 절대값이 2보다 큰 경우를 이상값으로 판별한다. 본 연구에서는 표준화 잔차, 쿡의 거리, 표준화 DFFIT를 상용 통계프로그램인 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS; IBM, 2013)를 이용하여 이상자료를 제거하였다. Fig. 8은 두 차례의 이상자료 제거과정을 통해 분석대상 자료들에 대한 최종 상관성 분석 결과이며, 광역시와 시군 모두에서 이상자료 제거로 인하여 결정계수가 증가한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 손실함수 개발을 위한 회귀식 검토

이상자료를 제거한 분석자료를 대상으로 광역시와 시군 지역을 구분하여 도로시설물 손실함수를 개발하였다. 손실함수는 상용 통계프로그램인 SPSS의 다중선형회귀식 기능을 이용하여 광역시와 시군 지역별 선형 및 비선형 형태의 회귀식을 Tables 2와 3과 같이 개발하였다. 개발되어진 다양한 형태의 회귀방정식(Regression Equation, R.Eq.)을 2016

년과 2017년에 실제 피해가 발생된 시군에 적용하여 최종적인 도로시설물에 대한 직접피해 손실함수를 선정하고자 하였다.

3.3 도로시설물 주소 누락 자료의 검토

앞서 손실함수 개발에 활용한 NDMS DB는 도로시설물에 대한 피해자료 속성에서 상세주소로부터 피해 발생 위치가 확인된 피해자료만을 대상으로 고려하였으며, 상세주소가 누락되어 함수 개발 과정에서 고려되지 않은 피해자료들에 대한 피해액을 고려하기 위해 도로시설물 전체 피해액과 상세주소가 존재하는 피해액의 비율을 산정하였다. 이를 위해 시군구 행정구역 및 피해일자를 기준으로 도로시설물의 총 피해액과 상세주소가 존재하는 도로시설물 피해액에 대한 선형 관계에 따른 기울기를 가중계수로 구하였다. 또한, 함수 개발 시 활용한 이상자료 제거 방법을 도로시설물 총 피해액과 상세주소가 존재하는 피해액에 대해서도 동일

(a) Inundation area in Metropolitan cities

(b) Road area within KRF Basin in Metropolitan cities

(c) Inundation area in Counties

(d) Road area within KRF Basin in Counties

Fig. 8. Regression Graph for Dependent-Independent Variables after 2nd Removing of Outliers

Table 2. Development of Linear and Nonlinear Regression Equation in Metropolitan Cities

No.	Regression Equation (R.Eq.)	Determination Coeff. (R ²)	Selection
1	$DC_{Rd} = 0.021 \times IA + 0.222 \times RA_{BA}$	0.851	●
2	$DC_{Rd} = -1.490E-6 \times IA^2 + 2.293E-7 \times RA_{BA}^2 + 0.694 \times IA - 0.057 \times RA_{BA}$	0.874	
3	$DC_{Rd} = 0.087 \times IA^{0.102} \times RA_{BA}^{0.970}$	0.859	
4	$DC_{Rd} = 4136.166 \times IA^{0.149} + 0.008 \times RA_{BA}^{1.220}$	0.858	
5	$DC_{Rd} = IA^{-1.092} + RA_{BA}^{0.902}$	0.833	

Table 3. Development of Linear and Nonlinear Regression Equation in Counties

No.	Regression Equation (R.Eq.)	Determination Coeff. (R ²)	Selection
1	$DC_{Rd} = 0.118 \times IA + 0.012 \times RA_{BA}$	0.760	
2	$DC_{Rd} = 1.424E-7 \times IA^2 - 8.391E-9 \times RA_{BA}^2 - 0.038 \times IA + 0.046 \times RA_{BA}$	0.802	
3	$DC_{Rd} = 9.594E-11 \times IA^{1.374} \times RA_{BA}^{1.200}$	0.788	
4	$DC_{Rd} = 4.230E-8 \times IA^{2.067} + 27.104 \times RA_{BA}^{0.503}$	0.796	
5	$DC_{Rd} = IA^{0.841} + RA_{BA}^{0.680}$	0.738	●

하게 적용하였으며, 그 결과 1.145의 가중계수를 구할 수 있었다. 따라서 대규모 호우·태풍으로 인해 침수구역 발생 시 추정되는 피해액은 최종적으로 선정되는 손실함수에 가중계수를 적용하여 주소 누락자료에 대한 피해액까지 고려된 도로시설물의 손실함수를 적용함으로써 구할 수 있다.

4. 도로시설물 손실함수 적용 및 선정

4.1 도로시설물 손실함수 선정

광역시와 시군 단위 지역을 대상으로 개발된 회귀식에 대한 손실함수 선정을 위해 2016년과 2017년 실제 피해가 발생한 시군을 대상으로 회귀식들을 적용하였다. 이때 회귀식의 매개변수가 음의 값으로 추정된 Tables 2와 3의 R.Eq. (2)는 회귀식 적용과정에서 배제하였으며, 주소 누락자료에 대한 피해액을 포함시키기 위하여 가중계수인 1.145를 회귀방정식에 적용하였다. 회귀식 적용 결과 Table 4에서 보는바와 같이 광역시의 경우 R.Eq. (1)인 선형 형태에서 상대오차가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 시군의 경우 R.Eq. (5)의 비선형 형태의 함수에서 상대오차가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 과정을 통해 선정된 회귀방정식에 주소 누락자료에 대한 가중인자를 고려한 손실함수는 광역시의 경우 Eq. (2) 그리고 시군의 경우 Eq. (3)과 같다.

- Loss Functions of Road Facilities in Metropolitan Cities

$$DC_{Rd} = 0.024 \times IA + 0.254 \times RA_{BA} \quad (2)$$

- Loss Functions of Road Facilities in Counties

$$DC_{Rd} = 1.145 \times IA^{0.841} + 1.145 \times RA_{BA}^{0.680} \quad (3)$$

최종 선정된 손실함수에 대한 적용성 검토를 위해 손실함수 개발 시 활용된 자료와 함수 개발에 활용되지 않은 기왕년 자료를 각각 적용하였다. 객관적인 검토를 위하여 모형의 정확성에 대한 평가항목으로 많이 사용되는 지표인 오차(Error), 상대오차(Percentage Error, PE), 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE), 평균절대오차비(Mean Absolute Percentage Error, MAPE), 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error, RMSE) 등을 이용하였다. Tables 5와 6은 손실함수 개발에 활용된 자료에 대하여 지역별 손실함수를 적용한 결과를 나타내고 있다. 연도별로 발생한 개별자료에 대한 검증 결과인 MAE는 광역시의 경우 전체에서 72,020천원으로 나타났으며, MAPE는 전체 312%, RMSE는 전체 99,963천원으로 나타났다. 시군의 경우 MAE는 전체 23,751천원, MAPE는 전체 250%, RMSE는 전체 30,979천원으로 나타나 광역시보다는 시군에서 오차가 더 작은 것을 확인할 수 있었다. 또한 Tables 7과 8에 함수 개발에 활용되지 않은 2009년~2012년까지 과거 발생된 피해자료에 대한 함수의

Table 4. Result of Loss Function Application to Administrative District

Administrative District		Actual Damage Cost (1,000won, 2017)	Relative Error of Linear Function (%)	Relative Error of Nonlinear Function (%)		
			R.Eq. (1)	R.Eq. (3)	R.Eq. (4)	R.Eq. (5)
Metro. City	Ulsan	4,769,520	21	43	72	
County	Cheongju	1,598,799	70	59,856	2,537	- 5
	Cheonan	2,264,729	- 89	86	- 90	- 92
	Geosan	1,991,599	- 84	63	- 71	- 87

Table 5. Result of Loss Function Application to Function Development Utilization Data in Metropolitan Cities

Year	Actual Damage Cost (1,000won, 2017)	Estimated Damage Cost (1,000won, 2017)	Error (1,000won)	PE (%)	MAE (1,000won)	MAPE (%)	RMSE (1,000won)
Total	2,769,764	2,931,472	161,708	6	72,020	312	99,963
2014	2,289,177	2,280,588	- 8,589	0	113,794	341	143,397
2016	480,587	650,884	170,297	35	43,099	293	51,719

Table 6. Result of Loss Function Application to Function Development Utilization Data in Counties

Year	Actual Damage Cost (1,000won, 2017)	Estimated Damage Cost (1,000won, 2017)	Error (1,000won)	PE (%)	MAE (1,000won)	MAPE (%)	RMSE (1,000won)
Total	953,809	1,008,195	54,386	6	23,751	250	30,979
2013	802,958	886,571	83,613	10	29,329	312	35,641
2014	106,868	81,486	- 25,382	- 24	8,766	87	9,626
2016	43,983	40,138	- 3,845	- 9	3,845	9	3,845

Table 7. Application Result of Loss Function to Past Data in Metropolitan Cities

Year	Actual Damage Cost (1,000won, 2017)	Estimated Damage Cost (1,000won, 2017)	Error (1,000won)	PE (%)	MAE (1,000won)	MAPE (%)	RMSE (1,000won)
Total	2,251,206	2,025,297	- 225,909	- 10	192,963	153	280,118
2009	580,170	992,896	412,726	71	137,575	252	191,959
2010	76,250	129,457	53,207	70	53,207	70	53,207
2011	1,594,786	902,944	- 691,842	- 43	345,921	46	422,741

Table 8. Application Result of Loss Function to Past Data in Counties

Year	Actual Damage Cost (1,000won, 2017)	Estimated Damage Cost (1,000won, 2017)	Error (1,000won)	PE (%)	MAE (1,000won)	MAPE (%)	RMSE (1,000won)
Total	2,950,975	1,193,310	- 1,757,665	- 60	84,504	221	146,875
2009	404,280	114,370	- 289,910	- 72	89,626	108	159,922
2010	13,356	29,372	16,016	120	16,016	120	16,016
2011	1,487,175	436,176	- 1,050,999	- 71	89,562	181	164,305
2012	1,046,164	613,392	- 432,772	- 41	82,514	302	127,045

적용 결과를 나타내었다. 기왕년 자료에 대한 손실함수의 적용 결과 광역시 전체 자료의 MAE는 192,963천원, MAPE는 153%, RMSE는 280,118천원으로 나타났다. 시군의 경우 MAE는 84,504천원, MAPE는 221%, RMSE는 146,875원으로 나타나 함수 개발 활용 자료와 마찬가지로 광역시보다는 시군에서 오차가 더 적은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 집중호우 또는 태풍에 의한 홍수 재해가 발생하였을 때 제내지의 도로시설물에서 일어나는 피해액 규모를 직접 추정할 수 있는 손실함수를 개발하였으며, 주요 연구내용은 다음과 같다.

- (1) 국가재난관리정보시스템(NDMS) DB의 도로시설물 피해자료 내 상세주소 정보를 이용하여 피해자료에 대한 GIS 기반 DB를 구축하였으며, 침수구역과의 중첩을 통하여 대부분의 도로시설물 피해가 침수구역 이외의 구간에서 나타난 것을 확인하였다.
- (2) 침수흔적도를 중심으로 피해가 발생한 도로시설물의 검토 기준 범위를 물환경정보시스템의 KRF 유역으로 선정하여 침수구역별 도로시설물 피해자료를 추출하였다.
- (3) 도로시설물에 대한 피해 유발인자들을 대상으로 상관분석을 실시하여 도로시설물 피해액을 종속변수로, KRF 유역 내 침수면적과 도로면적을 독립변수로 선정하였으며, 독립변수-종속변수 관계 그래프의 추세 경향을 고려하여 광역시와 시군으로 피해자료를 분류하였다.
- (4) 지역별로 분류된 자료들에 대하여 정규분포 상자도표 및 통계학적 방법을 적용하여 이상자료를 제거한 후 광역시와 시군을 대상으로 도로시설물 손실함수를 개발하였으며, 함수의 적용성을 검토하였다.
- (5) 도로시설물 손실함수 개발에 활용되지 못한 상세주소가 누락된 피해자료에 대한 피해액 보존을 위하여 시군별 도로시설물 전체 피해액과 상세주소가 있는 도로시설물 피해액간의 상관관계 분석을 통하여 도로시설물 손실함수에 대한 보완을 실시하였다.

도로시설물에 대한 손실함수는 과거 발생한 피해자료를 바탕으로 재해규모에 따른 피해액을 추정하기 위한 함수식으로 높은 정확도의 손실함수 개발을 위해서는 보다 많은 피해자료와 현황자료가 축적되어야 할 것이다. 본 연구를 통해 개발되어진 손실함수는 향후 도로시설물의 재해저감 대책에 대한 비용 대비 효과분석 등의 정보를 제공함으로써 재해예방 정책 수립을 위한 의사결정 지원에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 재난예측및저감연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(MOIS-재난-2015-05). 이 논문은 2018년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임.

References

- Choi, C.H., Park, K.H., Park, H.K., Lee, M.J., Kim, J.S., and Kim, H.S. (2017). Development of heavy rain damage prediction function for public facility using machine learning. *J Korean Soc Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 443-450.
- Choi, C.K., Kim, K.T., Kim, G.H., and Kim, H.S. (2017). Development of damage function for flood damage assessment on single family housing. *J. Korea Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 421-431.
- Choi, S.A., Yi, C.S., Shim, M.P., and Kim, H.S. (2006a). Multi-dimensional flood damage analysis (I): Principle and procedure. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-9.
- Choi, S.A., Yi, C.S., Shim, M.P., and Kim, H.S. (2006b). Multi-dimensional flood damage analysis (II): Application. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No.1, pp. 11-22.
- Dawod, G.M., Mirza, M.N., and Al-Ghamdi, K.A. (2012). GIS-based estimation of flood hazard impacts on road network in Makkah City, Saudi Arabia. *Environ. Earth Sci.*, Vol. 67, No. 8, pp. 2205-2215.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2011). *HAZUS-MH technical manual*.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2012). *Getting Started with HAZUS-MH 2.1*.
- IBM. (2013). *SPSS statistics 22 algorithms*.
- Kang, D.H., Lee, S.H., Kim, G.H., and Kim, B.S. (2018). Estimation of flood damage using building group inventory and multi-dimensional flood damage analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 119-127.
- Kim, G.H. (2013). *A study on estimation of flood damage and development of flood damage index on public facilities*. Ph.D. dissertation, Inha University.
- Kim, S.H., Lee, C.H., Kim, Y.S., and Hwang, S.B. (2016). A study on development of flood damage estimation function for river infra structure with NDMS and WAMIS. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 81-87.

- Lee, G.S., and Park, J.H. (2011). Flood damage assessment according to the scenarios coupled with GIS data. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 19, No.4, pp. 71-80.
- Lee, K.H., Choi, S.A., Kim, H.S., and Shim, M.P. (2006). Application of multi-dimensional flood damage analysis for urban flood damage. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4B, pp. 363-369.
- Ministry of Construction River Bureau (建設省 河川局). (2000). *Flood control economic research manual (Draft)* (治水経済調査マニュアル(案)). Japan.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2000). *River design criteria*.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2001). *A study on economic analysis of flood protection*.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2004). *A study on economic analysis in flood control projects – Multi-dimensional flood damage analysis*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2018). *Statistical yearbook of MOIS*.
- Park, S.H. (1999). *Regression analysis*. Seoul: Minyoungsa.
- Youssef, A.M., Pradhan, B., and Hassan, A.M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environ. Earth Sci.*, Vol. 62, No. 3, pp. 611-623.

Received	October 16, 2019
Revised	October 16, 2019
Accepted	November 8, 2019