



평가방법에 따른 낙동강 유역의 홍수취약성 결과 사례 연구

A Case Study on Flood Vulnerability Results of Different Assessment Methods in the Nakdong Watershed

이종석* · 최현일**

Lee, Jong Seok*, and Choi, Hyun Il**

Abstract

A variety of flood vulnerability assessments have been carried out in many previous studies to prioritize flood damage mitigation plans. However, domestic and foreign studies have not analyzed the influence of vulnerability assessment components in different methods for determining flood vulnerability outcomes. Therefore, this study investigated the differences in flood vulnerability results for the 54 administrative districts in the Nakdong Watershed that implemented widely used methods, such as the OECD PSR, IPCC concept, and MOLIT PFD. It was found that the three analysis methods could result in very different flood vulnerability index outcomes in a considerable number of districts. This case study on flood vulnerability outcomes of different assessment methods can help to select a proper method for assessment purposes.

Key words : Flood Vulnerability Assessment, OECD PSR, IPCC Concept, MOLIT PFD

요 지

홍수피해 저감대책의 우선순위 선정을 위해 많은 선행 연구들에서 다양한 홍수취약성 평가가 수행되고 있다. 그러나 국내외 연구에서는 서로 다른 방법별 취약성 평가요소에 따라 홍수취약성 결과에 미치는 영향은 평가되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 널리 사용되고 OECD PSR 구조, IPCC 개념, 그리고 국토부의 PFD에 따른 낙동강 유역 54개 시군구에 대한 홍수취약성 결과의 차이를 고찰하였다. 3개의 분석방법에 의해 상당수의 지역에서 상반되는 홍수취약성 지수(FVI) 산정결과가 초래된다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 취약성 평가방법에 따른 홍수취약성 평가결과에 대한 사례 연구는 평가목적에 적합한 평가기법 선정에 도움이 될 것으로 기대한다.

핵심용어 : 홍수취약성 평가, OECD PSR, IPCC 개념, 국토부 PFD

1. 서 론

전국 모든 지역에 대한 홍수피해를 저감하기 위한 투자와 대비에는 많은 예산과 인력이 소요되므로, 홍수피해 저감대책을 위한 지원은 지역별 우선순위에 따라 선별적으로 집행되어야 할 것이다. 또한 지역별 홍수위험에 합리적으로 대처하기 위해서는 지역의 다양한 홍수특성과 피해양상 및 대응기능을 면밀히 파악하고 정량화하여 홍수취약성을 산정할 수 있는 평가방안의 구축이 매우 중요하다. 따라서 통합적인

홍수위험을 관리하는 측면에서 지역의 특성과 우선순위에 따른 홍수피해 대책의 방향을 선정하고 효율적인 홍수피해 저감을 위한 대안선정에 도움을 줄 수 있도록 다양한 홍수취약성 분석이 수행되고 있다. 그러나 서로 다른 취약성 평가체계에 따른 홍수취약성 산정결과에 대한 비교고찰은 체계적으로 이루어지지 않고 있다.

홍수취약성 분석에 많이 사용되고 있는 평가기법으로, OECD (1991)에서 개발하여 활용되고 있는 Pressure-State-Response (PSR) 모형은 압력(Pressure), 현상(State), 대응

*정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 박사수료(E-mail: ljs5219@gmail.com)

Member, Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

**교신저자, 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-53-810-2413, Fax: +82-53-810-4622, E-mail: hichoi@ynu.ac.kr)

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

(Response)의 3개 평가지표들의 인과 관계적 접근방식을 통해 치수특성 평가문제를 파악할 수 있어, 홍수취약성 분석에 널리 이용되고 있다. 국내의 주요 홍수취약성 평가 사례에서 사용된 압력, 현상, 대응의 3개 평가지표 구성에 의한 대리변수들의 선정 예를 살펴보면 다음과 같다.

압력 지표의 대리변수를 위해 Chung and Lee (2009)에서는 자산가치, 인구밀도, 기반시설, 자연문화자원을 선정하였고, Lim et al. (2010)은 연평균강우량, 확률강우량, 초과강우 발생회수, 저지대율, 임상, 고도, 도시화율, 인구밀도, 녹지면적율, 불투수지비율, 자산현황, 사회기반시설밀도, 경사를 포함하였고, Lee et al. (2013)은 초과강우량발생회수, 도시화율, 전담비율, 인구밀도로 구성하였고, Lee et al. (2016)은 일최대강우량, 유역평균경사도, 도시화율, 인구밀도를 사용하였으며, Kim et al. (2017)에서는 재해기간 총강우량, 30 mm 이상 시강우 발생회수, 연평균 일최대강우량, 도시화율, 공공시설면적율, 평균경사, 인구밀도, 1인당 지역내 총생산 등의 대리변수들을 선정하였다. 선행 연구들에서는 압력 지표의 대리변수로 주로 강우량 관련 기상 및 지형특성 관련 자연요소와 인적 및 물적 사회요소 인자들을 선정하고 있는 것을 확인할 수 있다.

상태 지표의 대리변수들로는 Chung and Lee (2009)에서는 유역경사, 강우강도, 연평균 홍수피해액, 도시화율을 선정하였고, Lim et al. (2010)은 홍수피해밀도, 침수면적밀도, 사망자수, 피해자수, 우심피해회수를 포함하였고, Lee et al. (2013)은 홍수피해액, 침수면적, 이재민수로 구성하였고, Lee et al. (2016)은 홍수피해액밀도, 침수면적밀도, 인명피해자수, 홍수발생빈도를 사용하였으며, Kim et al. (2017)에서는 연평균 호우피해액, 호우피해 발생회수, 내수재해위험지구개수, 하천재해위험지구개수 등의 대리변수들을 선정하였다. 선행 연구들에서는 홍수피해 이력 관련 재해요소를 상태 지표의 대리변수로 선정하는 경우가 많은 것으로 보인다.

대응 지표를 위한 대리변수들의 경우, Chung and Lee (2009)에서는 외수범람안전도, 펌프장용량, 댐저수지용량이 선정되었고, Lim et al. (2010)은 재정자립도, 하수도보급율, 댐및저수지, 중계펌프장, 우수관로설치길이, 홍수예보시스템, 기상관측소밀도, 복구비, 치수사업투자비율을 포함하였고, Lee et al. (2013)은 홍수조절용량, 하천개수율, 치수사업투자비율, 복구비로 구성하였고, Lee et al. (2016)은 하천개수율, 우수관로연장, 주요공공시설물수, 치수사업투자비를 사용하였으며, Kim et al. (2017)에서는 소규모 치수 시설개수, 제방연장, 재정자립도, 방재예산 등의 대리변수들을 선정하였다. 선행 연구들에서는 대응 지표를 위해 주로 방재 및 복구 관련 대책요소 인자들을 대리변수로 선정하고 있다.

PSR 구조와 함께 홍수취약성 평가기법으로 널리 사용되고 있는 평가체계로 기후변화취약성 개념모형(IPCC, 2001)이 있다. IPCC (2001)는 기후변화취약성이란 한 시스템이

기후변화에 의해 부정적인 영향을 받거나 적절히 대응하지 못하는 정도를 의미하는 것으로서, 어떤 시스템이 기후변화에 대한 노출도(Exposure)와 민감도(Sensitivity), 그리고 적응능력(Adaptive Capacity)의 요소에 의해 결정되는 것으로 정의하였다. 국내의 홍수취약성 평가를 위하여 사용되는 기후변화취약성 개념모형의 노출도, 민감도, 적응능력 3개 평가지표에 선정된 대리변수들의 현황을 분석하면 다음과 같다.

노출도 지표의 대리변수를 위해 Kim et al. (2011)에서는 일최대강우량, 극치강우량, 일강우량 80mm 초과일수, 단위면적당 유출량을 선정하였고, Kim et al. (2012)은 일강우량 80 mm 초과일수와 100년 빈도 일확률강우량을 사용하였고, Oh et al. (2012)은 일최대강우량, 우기강우량, 일강우량 80mm 초과일수, 최대 연평균유출량으로 구성하였고, Jun et al. (2013)은 일최대강우량, 일강우량 80 mm 초과일수, 5일 최대강우량, 지표유출량, 우기강우량을 포함하였으며, Lee and Choi (2018)에서는 일최대강우량, 강우강도, 일강우량 80 mm 초과일수 등의 대리변수들을 선정하였다. 선행 연구들에서는 노출도 지표의 대리변수로 주로 강우량 및 유출량 관련 기상 및 수문특성 관련 자연요소 인자들을 선정하고 있다.

민감도 지표의 대리변수를 위해 Kim et al. (2011)에서는 65세 이상인구수, 인구밀도, 15세 미만 인구수, 자산밀도, 도로비율, 불투수비율, 유역평균고도를 선정하였고, Kim et al. (2012)은 100년빈도 일직접유출량, 소하천비개수율, 100년빈도 홍수위이하 면적비율을 사용하였고, Oh et al. (2012)은 도로면적, 고도, 상수도보급 지역면적, 하수도보급 지역면적으로 구성하였고, Jun et al. (2013)은 10 m 이하 저지대면적, 10 m 이하 저지대가구수, 유제부지역면적비, 인구밀도, 총인구수, 지역평균경사, 도로면적비, 최근 3년간 홍수피해액, 최근 3년간 인명피해자수를 포함하였으며, Lee and Choi (2018)에서는 인구밀도, 도시화율, 유역경사 등의 대리변수들을 선정하였다. 선행 연구들에서는 민감도 지표의 대리변수로 주로 인적 및 물적 사회요소 인자들을 선정하고 있으며, 지형특성 관련 자연요소 및 홍수피해 이력 관련 재해요소 인자들을 일부 포함하는 경우도 있다.

적응능력 지표의 대리변수를 위해 Kim et al. (2011)에서는 임상도, 토양배수분포도, 홍수조절용량, 하천개수율, 배수 펌프용량을 선정하였고, Kim et al. (2012)은 하수도보급률, 방재 및 유지보수 성과, 재정자립도, 방재적응능력, 응급의 로기관개수율 사용하였고, Oh et al. (2012)은 재정자립도, 공무원수, 하천개수율, 홍수적응능력으로 구성하였고, Jun et al. (2013)은 수자원관련 공무원수, 재정자립도, 공무원비율, 지역내 총생산, 하천개수율, 배수시설용량, 댐저수지용량을 포함하였으며, Lee and Choi (2018)에서는 하천개수율, 빗물펌프용량, 공무원비율 등의 대리변수들을 선정하였다. 선행 연구들에서는 적응능력 지표를 위해 지자체의 재정능

력 등을 포함하여 주로 구조적 및 비구조적 대책요소 인자들을 대리변수로 선정하고 있다.

한편, 우리나라의 대표적인 홍수취약성 평가기법으로, MOLIT (2001)는 수자원 장기종합계획 수립에서 치수단위 구역별 치수특성을 파악하여 홍수방어대책의 우선순위를 선정하거나 대규모의 치수종합계획을 세우기 위한 목적으로 홍수피해잠재능(PFD, Potential Flood Damage)을 제시하였다. 치수단위구역의 잠재홍수피해 취약성을 나타내는 PFD 산정을 위해서, 인구밀도, 자산밀도, 도시화율, 사회기반시설밀도의 대리변수로 구성된 잠재성(Potential) 지표와 홍수피해가 발생할 가능성을 나타내기 위한 대리변수로 확률강우량과 홍수피해액밀도를 사용하고, 이에 대한 방어능력 정도를 고려하기 위한 대리변수로 저수지 및 댐, 외수방어능력, 내수방어능력 등을 사용한 위험성(Risk) 지표를 종합하여 평가한다.

이와 같이, 국내 홍수취약성 분석사례들에서 전체적으로는 크게 다르지 않은 대리변수들을 선정하지만, 사용하는 취약성 분석방법에 따라 선정된 대리변수들이 상이하게 분류되어, 전체 홍수취약성 분석결과에 영향을 크게 미칠 수 있다. Kim and Kim (2018)은 3가지 서로 다른 취약성 분석방법에 의해 우리나라 113개 중권역 단위의 홍수위험지수들을 2000년부터 2015년까지 산정하고, 각 산정결과와 여러 홍수피해유형에 대한 상관분석을 실시하였지만, 각 취약성 분석방법별로 선정된 대리변수들이 상이하여 평가 지표 분류체계 자체가 홍수취약성 산정결과에 미치는 영향을 고찰하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 홍수취약성 평가를 위해 사용되는 대표적인 대리변수들을 먼저 선정하고, OECD PSR 모형, IPCC 기후변화취약성 개념이론, MOLIT PFD 산정기법 등 3개의 서로 다른 취약성 평가기법에서 동일하게 선정된 대리변수들에 대한 평가지표 분류체계의 차이가 홍수취약성 분석결과에 미치는 영향을 낙동강 유역에 대한 사례분석을 통하여 고찰하고자 한다.

2. 홍수취약성 평가지표 대리변수 선정

2.1 대리변수 선정 및 구축

홍수취약성 분석을 위한 지역적 특성요소를 기상요소, 사회요소, 재해요소, 대책요소의 4개 분야로 분류하고, 분야별 3개씩 총 12개의 대리변수들을 다음과 같이 선정하였다.

기상요소를 나타내는 대리변수로는 일최대강우량[mm/day] 및 강우강도[mm/hr], 그리고 일강우량 80 mm 이상 일수[days]를 선정하고, 전국 75개 기상청 강우관측지점에서 관측된 2007년부터 2016년까지의 최근 10개년 자료를 이용하여 구축하였다.

사회요소를 나타내는 대리변수는 행정안전부에서 제공하는 2014년 행정구역별 인구수 자료로부터 인구밀도[인/km²], 국토교통부에서 제공하는 2015년 공시지가 자료로부

터 산정한 자산밀도[원/km²], 그리고 2011년을 기준으로 환경부에서 제공하는 토지피복지도를 이용하여 도시화율[km²/km²]을 구축하였다.

재해요소를 나타내는 대리변수는 인적, 물적, 지형적 피해를 고려하기 위하여 인명피해자밀도[인/km²], 재산피해액밀도[km²/km²] (통계청의 2016년 소비자물가지수를 기준으로 화폐가치를 환산), 그리고 침수면적비율[km²/km²]로 선정하고, 2007년부터 2016년까지 최근 10개년 간 집계된 시군구별 홍수피해자료를 국가재난정보센터(National Disaster Information Center, www.safekorea.go.kr)에서 제공받아 구축하였다.

대책요소를 나타내는 대리변수로는 비구조적 대책으로 2014년 기준 국가통계포털에서 제공하는 자료로부터 공무원비율을 산정하고[인/인], 외수피해저감 구조적 대책으로 2014년 기준 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 자료로 하천개수율[km/km]과 내수피해저감 구조적 대책으로 2014년 기준 환경부에서 제공하는 자료로 빗물펌프용량[m³/min]을 각각 구축하였다.

2.2 평가방법별 대리변수 분류

OECD PSR 모형, IPCC 기후변화취약성 개념이론, MOLIT PFD 산정방법 등 3가지의 취약성 평가체계에 의해 홍수취약성을 분석한 기존 평가사례들에서 사용된 대리변수들을 참고하여, 본 논문에서 선정된 기상요소, 사회요소, 재해요소, 대책요소의 4개 분야에 대한 총 12개 대리변수들을 Table 1과 같이 분류하였다. OECD PSR 평가지표 분류체계에서는, 압력 지표에는 기상요소 및 사회요소의 6개 대리변수, 상태 지표에는 3개의 재해요소 대리변수, 그리고 대응 지표에는 3개의 대책요소 대리변수가 각각 분류되었다. IPCC 기후변화 취약성 평가지표 분류체계에서는, 노출도 지표를 위해 3개의 기상요소 대리변수, 민감도 지표를 위해 사회요소 및 재해요소의 6개 대리변수, 적응능력 지표를 위해서 3개의 대책요소 대리변수가 각각 분류되었다. MOLIT PFD 평가지표 분류체계에서는, 3개의 사회요소 대리변수가 잠재성 평가지표를 위해 분류되고, 기상요소, 재해요소, 그리고 대책요소의 9개 대리변수가 위험성 지표를 위해 분류되었다. 이와 같이, 취약성 평가방법별 평가지표 분류체계 차이에 의한 홍수취약성 분석결과에 영향을 비교분석하기 위하여, 각 방법에서 사용된 전체 대리변수들은 동일하게 12개의 선정된 인자들을 사용하였다.

3. 홍수취약성 분석 및 비교

3.1 분석 대상지역

본 논문에서 취약성 평가방법별 홍수취약성 분석결과를 비교하기 위하여, 낙동강 유역을 대상으로 2.1절에서 선정된 지역적 특성인자들 중 기상요소를 제외한 대부분의 대리변

Table 1. Classification of Proxy Variables for the Three Vulnerability Assessment Methods

OECD PSR		IPCC Concept		MOLIT PFD	
Components	Proxy Variables	Components	Proxy Variables	Components	Proxy Variables
Pressure	1. Maximum daily rainfall 2. Rainfall intensity 3. Heavy rainy days 4. Population density 5. Property density 6. Urban area ratio	Exposure	1. Maximum daily rainfall 2. Rainfall intensity 3. Heavy rainy days	Potential	1. Population density 2. Property density 3. Urban area ratio
State	7. Casualty loss density 8. Property damage density 9. Inundation area ratio	Sensitivity	4. Population density 5. Property density 6. Urban area ratio 7. Casualty loss density 8. Property damage density 9. Inundation area ratio	Risk	4. Maximum daily rainfall 5. Rainfall intensity 6. Heavy rainy days 7. Casualty loss density 8. Property Damage Density 9. Inundation area ratio 10. Civil servant ratio 11. River improvement ratio 12. pumping station capacity
Response	10. Civil servant ratio 11. River improvement ratio 12. Pumping station capacity	Adaptative Capacity	10. Civil servant ratio 11. River improvement ratio 12. Pumping station capacity		

수들의 집계단위와 동일하도록 행정구역경계인 54개 시군구를 평가대상 공간단위로 선정하였다(Fig. 1).

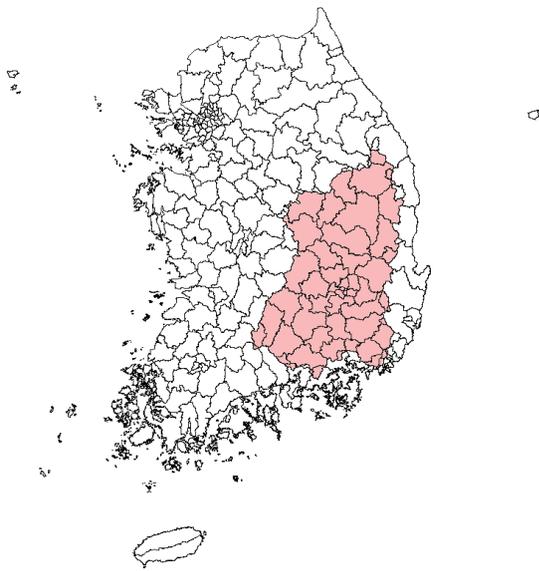


Fig. 1. Administrative Districts in the Nakdong Watershed under Study

3.2 홍수취약성 산정과정

3.2.1 대리변수 표준화

취약성 평가에 필요한 대리변수들은 일반적으로 각기 값의 단위와 범위가 다르므로, 대리변수들의 비교분석을 위해서는 동일한 단위와 범위의 값으로 변환해주는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 각 대리변수의 상대적 크기와 자료의 분포특성을 변형없이 비교할 수 있는 표준화 방법을 사용하였다. 즉, 대리변수의 값이 클수록 취약성이 높아지는 경우에는, Eq. (1)과 같이 대리변수 원자료값(x_i)을 자료의

최대값(x_{max})에 대한 비율로 무차원화하여 최대값이 1인 지표값(s_i)으로 표준화하였다. Eq. (1)을 사용하여 표준화한 대리변수들은 기상요소, 사회요소, 재해요소 등 3개 분야의 총 9개 인자들이다.

$$s_i = \frac{x_i}{x_{max}} \quad (1)$$

한편, 대리변수의 특성에 따라 대리변수의 값이 클수록 취약성을 저감하는 방향인 경우, 선행 연구들에서 사용한 표준화 방법(Weis et al., 2016; Kablan et al., 2017; Liu and Hao, 2017; Lee and Choi, 2018)을 적용하여, Eq. (2)에 의해 변환하였다. Eq. (2)를 사용하여 변환한 대리변수들은 대책요소 인자들인 공무원비율, 하천개수율, 빗물펌프용량으로서, 표준화를 통하여 각각 공무원비율부족, 하천개수율부족, 빗물펌프용량부족의 개념으로 변환된다고 가정한다.

$$s_i = \frac{x_{max} - x_i + x_{min}}{x_{max}} \quad (2)$$

3.2.2 평가지표

표준화된 대리변수들을 홍수취약성 평가에 사용하기 위해서는 취약성 평가방법별 평가지표 분류체계에 따라 대리변수(Proxy Variable, PV)들을 각 평가지표(Assessment Indicator, AI)로 합성하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 각 대리변수가 평가지표 산정에 미치는 영향이 동일하다고 가정하여, 동일가중치를 적용한 Eq. (3)을 사용하여 각 평가지표를 산정하였다.

$$AI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PV_i \quad (3)$$

여기서 n 은 각 평가지표별로 상이한 대리변수들의 개수이다.

3.2.3 홍수취약성 지수

OECD의 인과관계 개념이론에 의한 PSR 구조에서는, 압력 지표(AI_{pre})는 일최대강우량, 강우강도, 호우일수, 인구밀도, 자산밀도, 도시화율을 사용하여, 현상 지표(AI_{sta})는 인명피해자밀도, 재산피해밀도, 침수피해비율로 구성되어, 대응부족 지표(AI_{lor})는 공무원비율부족, 하천개수율부족, 빗물펌프용량부족으로부터 각각 Eq. (3)에 의해 구축되었다. 이상 3개의 평가지표는 Eq. (4)의 승법형 효용함수(Multiplicative utility function)에 의해서 홍수취약성 지수(FVI_{OECD})로 종합되었다.

$$FVI_{OECD} = AI_{pre} \times AI_{sta} \times AI_{lor} \quad (4)$$

IPCC 기후변화취약성 개념이론에 의한 홍수취약성 평가를 위해, 일최대강우량, 강우강도, 호우일수가 노출도 지표(AI_{exp})로, 인구밀도, 자산밀도, 도시화율, 인명피해밀도, 재산피해밀도, 침수피해밀도가 민감도 지표(AI_{sen})로, 그리고 공무원비율부족, 하천개수율부족, 빗물펌프용량부족이 적응능력부족 지표(AI_{lac})로 각각 Eq. (3)에 의해 산정되었고, 3개의 평가지표는 다음 Eq. (5)와 같은 승법형 효용함수에 의한 홍수취약성 지수(FVI_{IPCC})로 합성되었다.

$$FVI_{IPCC} = AI_{exp} \times AI_{sen} \times AI_{lac} \quad (5)$$

MOLIT에서 제시한 PFD 산정방법의 적용에서는, 인구밀도, 자산밀도, 도시화율을 이용하여 잠재성 지표(AI_{pot})를, 일최대강우량, 강우강도, 일강우량 80mm이상의 날 수, 인명피해, 재산피해, 침수면적비율, 공무원비율부족, 하천개수율부족, 빗물펌프용량부족을 이용하여 위험성 지표(AI_{ris})를 각각 Eq. (3)에 의해 산정하고, 2개 평가지표를 Eq. (6)에 의해 홍수취약성 지수(FVI_{MOLIT})로 종합하였다.

$$FVI_{MOLIT} = AI_{pot} \times AI_{ris} \quad (6)$$

3.3 홍수취약성 결과 비교

Fig. 2의 낙동강 유역 54개 시군구를 대상으로 산정된 3개의 취약성 평가방법별 평가지표 및 홍수취약성 지수(FVI) 결과를 살펴보면, OECD PSR 구조의 평가지표 분류체계에서는 상태 지표(최소 0.00)가 압력 지표(최소 0.36)와 대응부족 지표(최소 0.34)보다 상대적으로 지역별로 큰 변화를 보이고 있고, IPCC 기후변화취약성 이론의 평가체계에서는 민감도 지표(최소 0.05)가 노출도 지표(최소 0.60)와 적응능력부족 지표(최소 0.39)보다 상대적으로 지역별 차이가 크게 나타나고 있으며, MOLIT PFD 평가지표 분류체계의

잠재성 지표(최소 0.01)는 위험성 지표(최소 0.55)보다 상대적으로 큰 범위의 지역별 차이를 나타내고 있다. 이에 따라 각 취약성 평가방법에서의 최종 종합적인 홍수취약성 지수(FVI) 산정결과는 지역별 변별력이 상대적으로 크게 나타나는 민감도 지표, 현상 지표, 잠재성 지표에 의해 각각 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 서로 다른 평가지표의 분류체계가 홍수취약성 결과에 주는 영향을 비교분석하기 위하여, 각 홍수취약성 지수(FVI) 산정결과의 크기에 따른 순위를 취약성이 높은 순서에 따라 전체 순위의 20%구간별로 1-5등급으로 분류하였다. Fig. 3에 도시한 등급별 홍수취약성 결과를 살펴보면, OECD PSR 구조에서는 홍수취약성이 가장 높은 1등급은 최근 홍수피해가 상대적으로 많은 경상북도 포항시, 상주시와 부산광역시 강서구, 그리고 경상남도 하동군, 창원군, 진주시, 밀양시, 창원시, 김천시, 김해시가 선정되었다. 이들 지역의 높은 OECD FVI 분석결과는 홍수취약성에 미치는 영향력이 큰 상태 지표(지배 지표)가 홍수피해 이력과 관련된 대리변수들로 구성된 것에 기인한다. 반면에 광역시의 대부분 행정구역들은 사회요소 인자들의 영향으로 높게 평가된 압력 지표 결과에도 불구하고 최근 홍수피해 이력 상대적으로 많지 않아 상태 지표(지배 지표)가 낮은 관계로, 대부분의 지역에서 최종 홍수취약성은 상대적으로 낮은 등급결과를 보이고 있다. IPCC 기후변화취약성 개념을 사용한 결과는 대구광역시 중구, 서구, 달서구와 경상북도 상주시, 김천시와 부산광역시 강서구, 사상구, 사하구, 그리고 경상남도 창원시, 김해시가 홍수취약성이 가장 높은 1등급으로 평가되었다. IPCC FVI 산정결과에서 일부 광역시 행정구역의 홍수취약성이 높게 산정된 이유는 지배 지표인 민감도 지표 산정에 재해요소와 함께 사회요소가 반영되어 이들 지역의 민감도 지표가 높게 산정되었고 기상요소에 의해 산정된 노출도 지표도 어느 정도 높게 산정된 것에 기인한다. MOLIT PFD 산정방법에 따른 결과는 대구광역시 중구, 서구, 달서구, 남구, 북구, 수성구와 부산광역시 북구, 사상구, 사하구, 그리고 경상남도 창원시로서, 대부분 광역시의 행정구역들에서 높은 취약성을 보이고 있다. 이는 사회요소 인자들만이 대리변수로 구성된 잠재성 지표가 지배 지표로 MOLIT FVI 산정에 주된 영향을 미치기 때문이다. 반면에 재해요소는 기상요소 및 대책요소와 함께 지역별 변별력이 상대적으로 낮은 위험성 지표에 포함되므로, 홍수피해 이력이 많은 지역들이 MOLIT FVI 산정결과에서는 높은 등급을 보이지 못하고 있다.

취약성 평가지표 분류체계가 홍수취약성 산정결과에 주는 영향에 대해 정량적인 비교분석을 위하여, Table 2에는 3개의 평가결과에서 홍수취약성 1등급에 속하는 각 10개씩의 시군구 중, 중복되는 경우를 제외한 총 19개 시군구에 대하여 홍수취약성 산정방법별 등급결과를 비교하였다. OECD FVI 산정결과 1등급으로 평가된 지역들은 IPCC FVI 산정결과에

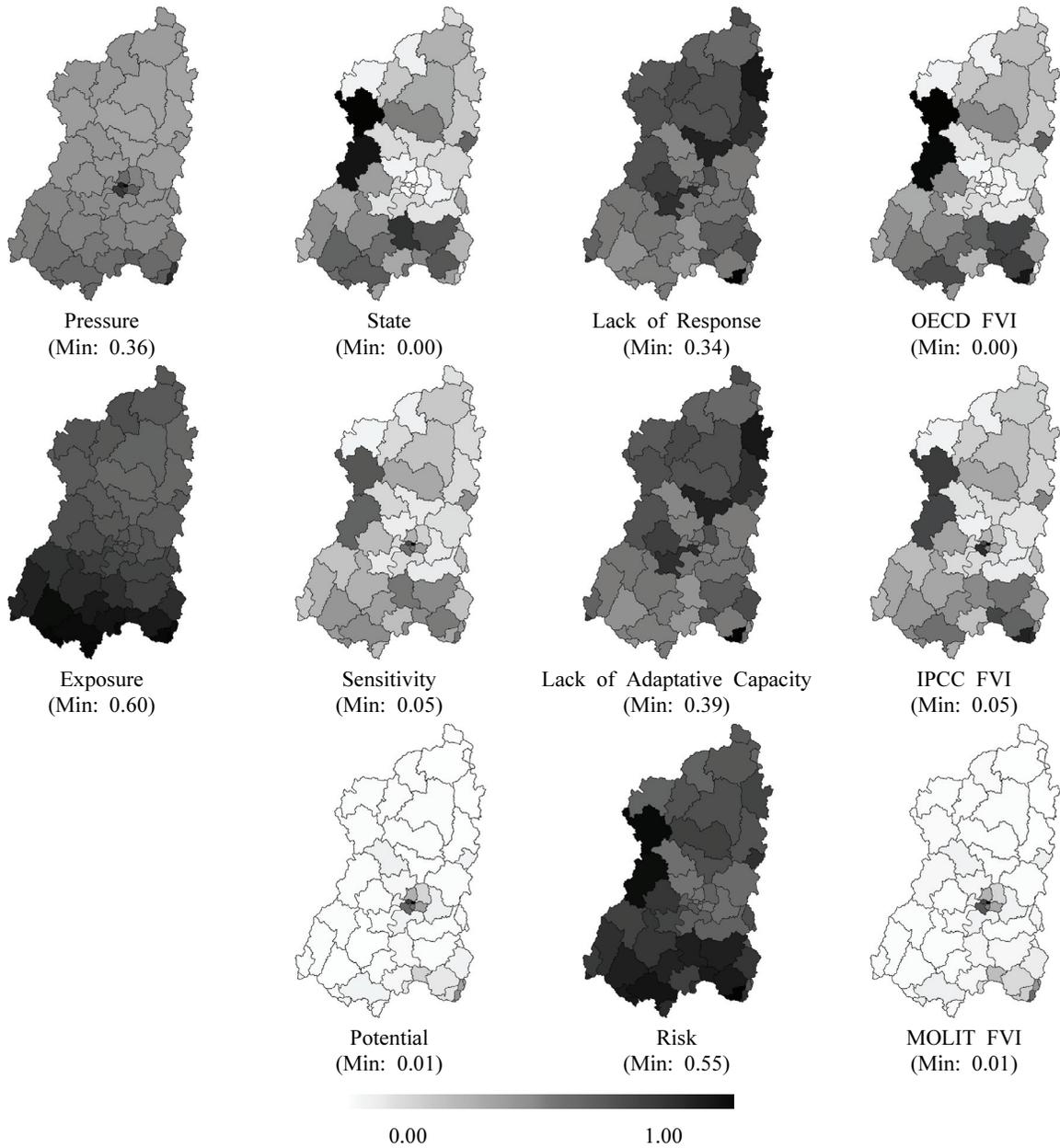


Fig. 2. Comparison of Flood Vulnerability Results by Assessment Methods

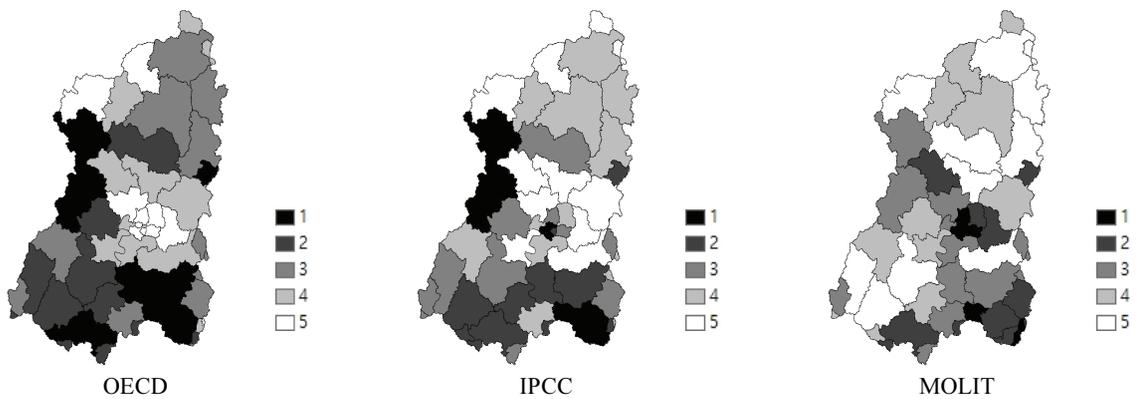


Fig. 3. Comparison of Flood Vulnerability Classification Results by Assessment Methods

Table. 2 Selected Administrative Districts with Large Differences of Flood Vulnerability Classification Results by Assessment Methods

Districts	FVI Classifications			FVI Classification Differences		
	OECD	IPCC	MOLIT	OECD & IPCC	IPCC & MOLIT	OECD & MOLIT
Changwon-city, Gyeongsangnam-do	1	1	1	0	0	0
Gangseo-gu, Busan Metropolitan City	1	1	2	0	1	1
Gimhea-city, Gyeongsangnam-do	1	1	2	0	1	1
Gimcheon-city, Gyeongsangbuk-do	1	1	3	0	2	2
Sangju-city, Gyeongsangbuk-do	1	1	3	0	2	2
Pohang-city, Gyeongsangbuk-do	1	2	2	1	0	1
Jinju-city, Gyeongsangnam-do	1	2	2	1	0	1
Miryang-city, Gyeongsangnam-do	1	2	3	1	1	2
Changnyeong-gun, Gyeongsangnam-do	1	2	3	1	1	2
Hadong-gun, Gyeongsangnam-do	1	2	4	1	2	3
Sasang-gu, Busan Metropolitan City	2	1	1	1	0	1
Saha-gu, Busan Metropolitan City	3	1	1	2	0	2
Jung-gu, Daegu Metropolitan City	4	1	1	3	0	3
Seo-gu, Daegu Metropolitan City	5	1	1	4	0	4
Dalseo-gu, Daegu Metropolitan City	5	1	1	4	0	4
Buk-gu, Busan Metropolitan City	4	2	1	2	1	3
Nam-gu, Daegu Metropolitan City	5	2	1	3	1	4
Buk-gu, Daegu Metropolitan City	5	3	1	2	2	4
Suseong-gu, Daegu Metropolitan City	5	3	1	2	2	4

서도 모두 1~2 등급으로 평가되는 반면, MOLIT FVI 산정결과에서는 3~4등급으로 낮게 평가되는 지역들을 볼 수 있다. IPCC FVI 산정결과와 1등급 지역들 중, 광역시의 행정구역들은 MOLIT FVI 산정결과에서도 대부분 동일한 1등급으로 평가되는 반면, OECD FVI 산정결과에서는 대부분 2~5등급으로 낮게 평가되었다. 아울러 일반 시들의 경우 OECD FVI 산정결과에서는 동일하게 1등급이지만, MOLIT FVI 산정결과에서는 경상남도 창원시를 제외하고는 2~3등급으로 낮게 평가되었다. MOLIT FVI 산정결과 1등급 지역들은 대부분 광역시의 행정구역으로, IPCC FVI 산정결과에서는 1~3등급으로 다양하게 평가되었으며, OECD FVI 산정결과에서는 대부분이 4~5등급으로 낮게 평가되고 있다. 낙동강 유역의 시군구들에 대한 3개 방법별 평가결과에서 유일하게 동일한 1등급으로 평가된 곳은 경상남도 창원시가 유일하며, 평가방법별로 홍수취약성이 높은 지역은 다르게 분석될 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이, 3개 취약성 평가방법의 평가지표 분류체계별 대리변수의 구성차이가 홍수취약성 분석 결과에 큰 영향을 미치므로, 취약성 평가방법을 신중하게 선정할 필요가 있음을 확인할 수 있다. 따라서 취약성 평가방법별 평가지표 분류체계의 특성을 파악하고 취약성 평가목적에 적합한 평가방법을 선정하여 홍수취약성을 평가하는 것이 더욱

중요한 것임을 확인할 수 있다.

4. 결론

지역별 홍수로 인한 피해를 저감하고 예비하기 위한 홍수 대책 수립 및 적용의 우선순위 선정을 위해 선행되어야 하는 것은 합리적인 홍수취약성 평가이다. 국내 많은 홍수취약성 평가 연구들에서 사용하고 있는 취약성 평가체계 중 대표적인 방법으로, 압력, 현상, 대응 지표로 구성된 OECD (1991) PSR 구조, 노출도, 민감도, 적응능력 지표로 구성된 IPCC (2001) 기후변화취약성 개념이론, 그리고 잠재성과 위험성 지표로 구성된 MOLIT (2001) PFD 산정방법이 있다. 이와 같이 기존 연구들에서 다양한 평가지표 분류체계를 사용하여 각각 지역별 홍수취약성을 평가하고 있으므로, 본 논문에서는 국내 홍수취약성 평가에 널리 사용되고 있는 3개의 취약성 평가기법에서의 평가지표 분류체계가 홍수취약성 지수 산정 결과에 미치는 영향을 고찰하였다.

본 논문에서는 우선 기존 연구들에서 사용한 대리변수들을 확인하고, 기상, 사회, 재해, 대책의 4가지 요소로 구분하여 대표적인 총 12개의 대리변수를 선정하였다. 기상요소의 대리변수는 일최대강우량, 강우강도, 일강우량 80 mm 이상 일수로, 사회요소의 대리변수는 인구밀도, 자산밀도, 도시화

율로, 재해요소의 대리변수는 인명피해자밀도, 재산피해액 밀도, 침수면적비율로, 그리고 대책요소는 공무원비율, 하천 개수율, 빗물펌프용량으로 각각 구성하고, 최신 자료를 수집하여 낙동강 유역의 54개 시군구에 대한 자료를 구축하였다. 각 평가지표 분류체계별로 분류된 대리변수는 표준화하여 평가지표로 변환하고, 분류체계별 평가지표들은 승법형 효용함수를 통해 각 방법별 3개의 홍수취약성 지수인 OECD FVI, IPCC FVI, MOLIT FVI로 종합되었다.

낙동강 유역에 대한 3개 홍수취약성 지수 산정결과를 살펴보면, 각 평가기법에서 총 12개의 동일한 대리변수를 사용하였지만, 방법별 평가지표의 분류체계에 따른 대리변수들의 상이한 조합의 영향으로 홍수취약성 분석결과에 큰 차이를 보이고 있다. OECD FVI에서는 현상 지표, IPCC FVI에서는 민감도 지표, 그리고 MOLIT FVI에서는 잠재성 지표가 낙동강 유역에서 상대적으로 지역별 변별력이 뚜렷한 특징을 보여, 각 홍수취약성 지수 산정결과에 큰 영향을 미치는 지배 지표로 확인되었으며, 이들 지배 지표를 구성하는 대리변수들의 특성에 따라 동일지역에서의 홍수취약성 분석결과가 크게 다를 수 있는 사실을 알 수 있다. 이에 따라, OECD FVI에서는 재해요소가, IPCC FVI에서는 재해요소 및 사회요소가, 그리고 MOLIT FVI에서는 사회요소가 각각 높은 취약성을 보이는 지역의 홍수취약성이 일반적으로 높게 평가되는 것을 확인하였다.

본 논문의 연구결과를 바탕으로 향후 연구에서 적절한 대리변수 선정, 독립성 평가, 표준화 방법 선정, 그리고 평가 지표 및 홍수취약성 지수 산정 시 적정 가중치 및 합리적 효용함수의 적용 등 최종 홍수취약성 분석결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인들에 대한 종합적인 분석을 통하여, 각 취약성 평가방법별 특성에 따라 홍수취약성 평가의 목표와 목적에 적합한 평가기법을 선정하는 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MOIS-재난-2015-03].

References

Chung, E.S., and Lee, K.S. (2009). Identification of spatial ranking of hydrological vulnerability using multi-criteria decision making techniques: Case study of Korea. *Water Resour. Manag.*, Vol. 23, No. 12, pp. 2395-2416.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001). *Human health and climate change: Impacts, adaptation and vulnerability*.

Jun, K.S., Chung, E.S., Kim, Y.G., and Kim, Y.A. (2013). A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. *Expert Syst. Appl.*, Vol. 40, No. 4, pp. 1003-1013.

Kablan, M.K.A., Dongo, K., and Coulibaly, M. (2017). Assessment of social vulnerability to flood in urban Côte d'Ivoire using the MOVE framework. *Water*, Vol. 9, No. 4, Article No. 292.

Kim, H.S., Park, G.J., Kim, S.D., Choi, M.H., Park, M.J., and Yoon, J.Y. (2012). Assessment of flood vulnerability considering climate change and large-scale river restoration project. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 107-113.

Kim, J.S., Choi, C.H., Lee, J.S., and Kim, H.S. (2017). Damage prediction using heavy rain risk assessment: (1) Estimation of heavy rain damage risk index. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 361-370.

Kim, M.J., and Kim, G.S. (2018). Analysis of the applicability of flood risk indices according to flood damage types. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 29-39.

Kim, T.H., Han, K.Y., and Cho, W.H. (2011). Vulnerability analysis in the Nakdong river basin for the utilization of flood risk mapping. *Journal of the KAGIS*, Vol. 14, No. 3, pp. 203-222.

Lee, D.R., Choi, S.J., and Moon, J.W. (2013). Development of integrated water resources evaluation index. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 1017-1028.

Lee, J.S., and Choi, H.I. (2018). Comparison of flood vulnerability assessments to climate change by construction frameworks for a composite indicator. *Sustainability*, Vol. 10, No. 3, Article No. 768.

Lee, J.S., Nam, Y.G., Choi, H.I., and Cho, G.T. (2016). Flood risk assessment by integrating results from average index method and PROMETHEE. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 1, pp. 275-280.

Lim, K.S., Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2010). Development of flood risk index using causal relationships of flood indicators. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70.

Liu, D., and Hao, S. (2017). Ecosystem health assessment at county-scale using the pressure-state-response framework on the loess plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 14, No. 1, Article No. 2. doi:10.3390/

ijerph14010002

MOLIT (Ministry Of Land, Infrastructure and Transport). (2001). *Water vision 2020*.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). (1991). *Environmental indicators. A preliminary set*. Paris, France.

Oh, S.H., Lee, W.K., Yoo, S.J., Byun, J.Y., Park, S.M., Kwak, H.B., et al. (2012). A study on vulnerability assessment and prioritizing sectors to support adaptation strategy to climate change: Case study of Gangwon province. *Climate Change Research*,

Vol. 3, No. 4, pp. 245-257.

Weis, S.W.M., Agostini, V.N., Roth, L.M., Gilmer, B., Schill, S.R., Knowles, J.E., et al. (2016). Assessing vulnerability: An integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure. *Climatic Change*, Vol. 136, No. 3-4, pp. 615-629.

Received	September 20, 2018
Revised	September 27, 2018
Accepted	October 8, 2018