호우 복합재난 시나리오 기반 국가 위험성 평가 기법 개발

Development of a Method for National Risk Assessment Based on Heavy Rain-induced Multi-Hazard Scenarios

윤우석* · 함희정** · 최승훈*** · 이승수****

Yun, Wooseok*, Ham, Hee Jung**, Choi, Seung Hun***, and Lee, Sungsu****

Abstract

In order to estimate the multi-hazards affecting the Korean peninsula, a National Risk Assessment (NRA) method is developed and applied to the regions of Incheon and Gangwon provinces using multi-hazard scenarios. National risk can be assessed on the basis of likelihood (the probability of occurrence) of a hazard and its impact (the degree of damage caused). Likelihood is assessed by statistically analyzing historical patterns of heavy rainfalls in ranges of 50- and 500-year return periods that may occur within the next five years. Impact is assessed by applying the developed fragility model based on historical damage data and expert surveys. The final national risk is assessed in the form of a 5×5 matrix by applying the assessment results of both likelihood and impact. The NRA method developed in this study can be utilized as a scientific basis for analyzing multi-hazards and establishing countermeasures for risk factors in the near future.

Key words : National Risk Assessment, Likelihood, Multi-Hazard Scenario, Impact

요 지

본 연구에서는 복합재난이 국가에 미치는 위험성을 사전에 예측하고 대응책을 마련하기 위하여 복합재난 국가 위험성 평가 기법을 개발하고 호우 복합재난 시나리오를 인천과 강원 지역에 적용하여 시범평가를 수행하였다. 국가 위험성은 재난이 발생할 수 있는 확률을 의미하는 발생개연성과 재난 발생 시 피해의 정도를 의미하는 영향으로써 평가될 수 있다. 발생개연성은 국내 과거 호우 양상을 통계적으로 분석하여 향후 5년 이내에 발생 가능한 50년과 500년 재현주기의 호우를 대상으로 평가되었다. 영향은 과거 피해자료와 전문가 조사를 기초로 개발된 취약도 모형을 통하여 평가되었다. 최종 국가 위험성은 평가된 발생개연성과 영향의 결과를 설정된 5단계의 등급에 적용하여 5×5 매트릭스 형태로 평가되었다. 본 연구에서 개발한 국가 위험성 평가 기법은 국가에서 가까운 미래의 위험요인을 분석하고 그에 대한 대책 수립 시 과학적인 근거로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 국가 위험성 평가, 발생개연성, 복합재난 시나리오, 영향

1. 서 론

최근의 재난은 규모가 커지고 연쇄적인 복합재난 형태로 발생하는 경향이 증가하고 있다(MOIS, 2017; MOIS, 2018).

복합재난이 발생하면 단일재난과 비교하여 더 큰 인적·경제적 피해가 발생할 가능성이 높으나, 현재 재난관리 체계는 단일재난 중심으로 운영되고 있어 복합재난에 대한 적응력은 떨어지고 있는 실정이다. 이와 같이 복합재난의 발생을 사전에

*정회원, 강원대학교 산학협력단 연구원(E-mail: topsky27@naver.com)

Member, Researcher, University-Industry Cooperation Foundation, Kangwon National University

**교신저자, 정회원, 강원대학교 건축·토목·환경공학부 교수(Tel: +82-33-250-7280, Fax: +82-33-250-6211, E-mail: heejham@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Kangwon National University

***정회원, 강원대학교 건축공학과 박사과정

Member, Ph.D Candidate, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

****정회원, 충북대학교 토목공학부 교수

Member, Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

예측하고 대비하지 못한다면 국가의 큰 위기로까지 발전할 수 있다. 대표적인 복합재난의 한 예로 지진 및 쓰나미로 발생한 일본의 후쿠시마 원전 폭발사고로 인한 천문학적인 경제적 손실과 국가 기능의 마비 사례를 들 수 있다(Lee, 2016).

이러한 복합재난을 사전에 예측하고 예방대책을 수립하기 위하여 최근 OECD 선진국에서는 국가 위험성 평가(National Risk Assessment, NRA) 제도에 대한 활용이 증가되고 있다. 그러나 국내의 경우 우리나라 재난환경에 적합한 복합재난 국가 위험성 평가 기법이 부재한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내에 부재한 국가 위험성 평가 기법 개발을 수행하였다.

본 연구에서 NRA는 호우로 유발되는 재난 시나리오를 기반으로 하여 발생개연성(Likelihood)과 영향(Impact)을 활용하여 평가되었다. 최종적으로 국가 위험성은 5단계로 등급화된 발생개연성과 영향에 대한 결과를 바탕으로 5×5 매트릭스 형태로 평가되었다. 개발된 NRA 기법을 바탕으로 인천과 강원 지역에 적용하여 국가 위험성을 시범 평가하였다.

2. 복합재난 국가 위험성 평가 이론적 배경

2.1 복합재난의 정의

복합재난(Multi-Hazard)이라는 용어에 대한 학술적인 정의는 명확하지는 않으나 일반적으로 ‘재난의 대응자가 여럿인 경우’, ‘여러 재난이 연속적으로 발생하여 재난이 복합화되는 경우’, ‘재난이 대형화되면서 피해가 다양한 범위로 확산되는 경우’에 복합재난으로 분류된다(KIPA, 2015). 또한, 정부의 입장에서 ‘국민의 재산 등 피해가 극심하여 국가적 위협이 되어 다수부처의 중앙사고수습본부가 운영되고, 통합적 대응이 필요한 재난’을 복합재난으로 통상 정의하고 있다(MOIS, 2016b).

2.2 국가 위험성 평가 방법

OECD 선진국에서는 향후 5년 이내 가까운 미래에 발생할 가능성이 높고, 발생할 경우 미치는 영향이 높은 재난을 사전에 대비하기 위하여 NRA를 수행하고 있다. NRA를 통하여 고위험으로 분석된 재난에 대해서는 예산 투입, 제도 개선 등의 대책을 통하여 피해를 저감할 수 있는 사전 위험 예방·관리 제도를 운영하고 있다.

영국의 NRA는 보안상의 이유로 비공개로 진행되며, 최종적으로 도출된 NRA 결과의 일부는 국가위험목록(National Risk Register)의 형태로 정리되어 국민들에게 공개된다. 영국에서는 매년 NRA를 수행하여 향후 5년 이내에 다부처간에 공동대응이 요구되는 주요 비상상황을 예측하고 있다. NRA를 통하여 예측된 결과는 중앙정부 및 지방정부에게 전달되어 위험관리 계획 수립 및 국가회복력계획(National Resilience Planning)에 반영된다(Cabinet Office, 2017).

현재 NRA 절차는 국가별로 다소 차이는 있으나 일반적인

로 Fig. 1과 같이 Horizontal Scanning을 통한 위험 파악, 시나리오 기반의 위험 인식, 위험 분석, 위험 평가 등으로 진행된다.

Fig. 1. Conceptual Process of NRA (MOIS, 2018)

국가 위험성은 기본적으로 재난의 발생가능성인 발생개연성과 재난발생 시 평가 대상이 받게 될 피해를 의미하는 영향을 분석하여 평가되며, 여기서 피해 평가 대상을 지표라고 정의한다. 이때 발생할 수 있는 확률이 높은 재난을 분석하는 부분을 발생개연성, 해당 재난이 발생하였을 경우 예상되는 피해 정도를 분석하는 것을 영향이라고 정의한다. 일반적으로 발생개연성과 영향은 5단계의 등급으로 구분하여 평가하기 때문에 평가된 재난의 발생개연성 등급과 재난의 피해 등급을 5×5 매트릭스에 도식화하여 발생개연성에 따른 영향을 종합적으로 분석하게 된다. 따라서 최종적으로 국가 위험성은 발생개연성과 영향을 각각 5단계로 등급화하여 지표별 5×5 매트릭스 형태로 도출된다(FSEPS, 2006).

Table 1. Likelihood Ranking (Cabinet Office, 2017)

Ranking	Likelihood of Hazard within 5 Years
1 (Very Low)	$\leq 1/20,000$
2 (Low)	$\leq 1/2,000$
3 (Medium)	$\leq 1/200$
4 (High)	$\leq 1/20$
5 (Very High)	$\geq 1/2$

발생개연성과 영향의 등급은 해당 국가의 상황에 맞게 설정되기 때문에 국가에 따라 지표 등급에 차이가 발생한다. Table 1은 현재 적용되고 있는 영국의 발생개연성 등급을 나타내고 있으며(Cabinet Office, 2017), Table 2는 아일랜드에서 적용하고 있는 NRA 지표 중 인명과 사회간접시설 분야에 대한 영향 등급을 보인다(DOD Ireland, 2012).

Table 2. Impact Ranking (DOD Ireland, 2012)

Ranking	Life	Infrastructure
1	• 0 to 4 Fatalities	≤ 4M (Euros)
2	• 4 to 8 Fatalities • Serious Injuries • a Few Sufferers	4 to 24M (Euros)
3	• 8 to 20 Fatalities • Serious injuries • 4,000 sufferers	24 to 80M (Euros)
4	• 20 to 50 Fatalities • Serious Injuries • 1,600 Sufferers	80 to 200M (Euros)
5	• ≥ 50 Fatalities • Serious Injuries • over 1,600 Sufferers	≥ 200M (Euros)

3. 복합재난 국가 위험성 평가

3.1 복합재난 국가 위험성 시범평가 지역

본 연구는 국내에 부재한 NRA 기법을 개발하고, 개발된 기법을 기초로 광역시/도에 대한 호우 복합재난의 영향성을 시범적으로 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 대도시의 특성과 해안의 특성을 지닌 인천 지역과 산간·도농지역의 특성을 대표한 강원 지역이 시범지역으로 고려되었다.

3.2 복합재난 시나리오

복합재난의 발생경로는 복잡하고 경우의 수가 많기 때문에 모든 경우를 평가할 수 없으며, 위험성이 높은 재난에 대해 우선적으로 NRA가 이루어져야하기 때문에 발생가능성이 높은 복합재난 시나리오를 구성할 필요가 있다. 이를 위하여 재해연보를 통하여 과거 시도별·원인별 재난을 분석한 결과, 호우의 영향이 강풍, 대설 등과 같이 타 자연재난에 비하여 상대적으로 높은 것을 알 수 있다(MOIS, 2018).

호우는 침수 및 붕괴 등과 같은 피해뿐만 아니라 산사태, 홍수와 같은 다른 형태의 재난을 동반할 가능성이 높다. 이러한 재난간 연계 시나리오를 설정하기 위하여 Fig. 2와 같이 호우 유발 복합재난 시나리오를 구성하였다. Fig. 2의 복합재난 시나리오는 재해연보의 전국 과거 피해자료 분석을 통하여 호우로 유발된 산사태의 발생확률과 호우로 유발된 홍수의 발생확률을 기반으로 하여 분석되었다. 재해연보에서는 직접적으로 산사태와 홍수의 피해를 제시하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 재해연보의 사망피해와 침수피해를 산사태와 홍수의 피해로 고려하였다(MOIS, 2016a). Fig. 2의 ‘()’ 값은 호우로 인하여 각 재난이 발생할 확률을 의미한다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 호우재난이 발생하는 경우 평균 86%의 홍수 재난이 발생할 수 있는 반면, 산사태는 이보다 낮은 34%의 발생가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, 홍수와 산사태가 동시에 나타날 가능성은 약 30% ($34\% \times 86\%$)임을

알 수 있다. Fig. 2에서 홍수와 산사태의 발생확률은 2007년~2016년 동안 호우가 발생했을 때 기록된 독립적인 산사태와 홍수의 피해자료를 조건부확률로써 고려한 결과이다. 본 연구에서는 이를 기초로 호우 재난만 발생한 경우를 단일재난 시나리오로, 호우로 의하여 홍수와 산사태가 동시에 유발되는 경우를 복합재난 시나리오로 설정하였다.

Fig. 2. Multi-Hazard Scenarios

3.3 국가 위험성 평가를 위한 등급 설정

국가 위험성은 등급화된 발생개연성과 영향을 기초로 평가된다. 이를 위하여 발생개연성의 경우 과거 재해연보의 재해발생 데이터 및 선행연구들의 결과(DOD Ireland, 2012; Cabinet Office, 2017)를 기초로 Table 3과 같이 재현주기 및 발생확률에 따른 발생개연성 등급을 설정하였다. Table 3에서 재현기간은 향후 5년 내 발생개연성으로부터 역으로 산정한 결과를 의미한다.

Table 3. Suggestion of Likelihood Ranking

Ranking	Likelihood within 5 Years	Return Period
1	≤ 1/20,000	≥ 100,000 Years
2	≤ 1/2,000	≥ 10,000 Years
3	≤ 1/200	≥ 1,000 Years
4	≤ 1/20	≥ 100 Years
5	≥ 1/20	≤ 100 Years

본 연구에서는 영향의 등급을 설정하기 위해서 인명과 사회간접시설의 피해를 지표 항목으로 고려하였다. 지표 항목은 피해자료의 확보 가능 여부, 자료 접근 가능 여부, 통계적으로 유의미한 수준의 자료 확보 가능 여부 등을 최종적으로 검토하여 선정하였다. 영향 등급 평가를 위하여 최종 고려된 피해 대상은 Table 4와 같이 인명 피해와 경제적 손실의 대표 변수인 사회간접시설분야로 총 6개 항목이 선정되었다.

Table 4. Classification of Impact Index and Details

Index	Details			
Life	Fatalities			
Infrastructure	Road		River	
	Water Supply and Sewerage	School	Rail	

영향 등급의 경우 Fig. 3과 같이 2007년~2016년 기간 동안 재해연보(MOIS, 2016a)에 나타난 지표별 피해 데이터를 통계 분석하여 재현주기별 호우에 따른 피해 영향 추정치를 도출하였다(MOIS, 2018). 도출된 발생가능성에 대한 피해 범주를 고려하여 Table 5와 같이 영향의 5단계 등급을 설정하였다. 인명의 영향은 사망자 수, 사회간접시설의 영향은 지방세입예산 대비 피해액의 비를 기준으로 등급화되었다.

Fig. 3. Estimation of Damage Scale Considering Poisson Distribution for Hazard Occurrence

Table 5. Suggestion of Impact Ranking

Ranking	Life	Infrastructure
1	0 to 1 Fatalities Minor Injuries	within 0.025% of the revenue budget in target city
2	1 to 2 Fatalities Moderate Injuries	0.025% to 0.1% of the revenue budget in target city
3	2 to 5 Fatalities Seriously wounded person less than 5 and Moderate Injuries	0.1% to 0.5% of the revenue budget in target city
4	5 to 10 Fatalities Seriously wounded person less than 20 and Severe Injuries	0.5% to 1.25% of the revenue budget in target city
5	over 10 Fatalities Seriously wounded person over 20 and Severe Injuries	over 1.25% of the revenue budget in target city

3.4 국가 위험성 평가를 위한 발생개연성 산정

NRA를 위하여 단일재난과 복합재난이 발생할 수 있는 확률인 발생개연성을 산정해야 된다. 본 연구에서는 NRA 기법을 시범적으로 적용할 인천과 강원 지역의 호우특성을 Eqs. (1)~(7)과 같이 통계적으로 분석하였다. 일반적으로 강우의 누적량으로 인하여 피해가 발생하기 때문에 50년 및 500년 재현기간 일최대강우 기반의 발생개연성을 추정하였다.

인천과 강원 지역에 대한 일최대강우의 연최대값 시계열 데이터를 극치 분석한 결과, Gumbel 분포가 가장 적합한

것으로 분석되었다. 이 결과를 기초로 재현기간별 극한 일최대강우를 추정하였다. 본 연구에서는 모멘트법(Method of Moment)으로 산정한 Gumbel 분포의 평균 및 표준편차와 Gumbel 분포의 특성값 a, b 의 관계식을 이용하여 Gumbel 분포의 특성값을 추정하였다. Gumbel의 누적분포함수인, $F(x)$ 는 Eq. (1)과 같이 계산된다(Ang and Tang, 2006; MOIS, 2018).

$$F(x) = \exp(-\exp(-a(x-b))) \quad (1)$$

여기서, a, b 는 Eq. (2)의 관계식으로 계산된다.

$$a \approx 1/0.78\sigma, \quad b = \mu - 0.45\sigma \quad (2)$$

여기서 μ 는 모집단의 평균, σ 는 모집단의 표준편차를 의미한다. 모집단의 평균과 표준편차는 Eq. (3)과 같이 표본의 평균과 표준편차로 추정된다.

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2} \quad (3)$$

여기서, m 은 표본의 평균, s 는 표준편차, n 은 데이터 수를 의미한다.

최종적으로 특성값 a, b 는 Eq. (4)와 같이 추정된다.

$$a \approx 1/0.78s, \quad b = m - 0.45s \quad (4)$$

비초과확률 F 와 평균재현기간 T 사이에는 Eq. (5)의 관계가 성립된다.

$$F = 1 - \frac{1}{T} \quad (5)$$

Gumbel 모멘트법으로 추정한 분포와 관측값의 적합관계를 판단하기 위하여 Eq. (6)과 같이 관측값별 비초과확률을 결정 시 Hazen 도시위치식(Plotting Position Formula)을 적용하였다.

$$F(x_i) = 1 - \frac{i - 0.5}{n} \quad (6)$$

여기서, n 은 표본 수, x_i 는 표본을 내림차순으로 정렬하였을 경우 i 에 해당하는 값을 의미한다.

Hazen 도시위치식에 의해 관측치를 도시한 값과 Gumbel 모멘트법으로 추정한 분포의 적합성은 Eq. (7)을 적용하여 오차(E)가 5% 전후일 때 적합한 것으로 결정된다(MOIS, 2018).

$$E = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \right)^{1/2} / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (7)$$

Eqs. (1)~(7)을 통하여 평가 지역의 50년, 500년 재현주기 일최대강우량은 Table 6과 같다.

Table 6. Maximum Daily Rainfall in Incheon and Gangwon

City	Return Period	
	50 years	500 years
Incheon	330 mm	514 mm
Gangwon	274 mm	403 mm

Table 6의 결과와 초과확률간의 관계를 기초로 각각의 재현기간에 대한 발생확률을 Table 7과 같이 계산하였다. Table 7에서 복합재난의 발생확률은 본 연구에서 재해연보를 이용하여 분석한 2007년~2016년 기간에 각 지역에서 발생한 ‘호우’ 재해에 의한 피해 중 ‘침수’ 등으로 나타나는 홍수 피해와 ‘사방시설피해’로 나타나는 ‘산사태’가 동시에 발생한 경우에 대한 빈도를 조사하여 단일재해의 발생확률을 기반으로 한 조건부확률로 산정하였다. 예를 들어 해당 기간에 강원도에는 총 29회의 호우재해가 발생하였으며, 그 가운데 8회는 홍수와 산사태가 동시에 발생하였다. Table 7에서 알 수 있듯이 복합재난의 경우 지역별 특성으로 인하여 지역에 따라 서로 상이한 발생확률을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Table 7. Probability of Occurrence of According to Return Period in Incheon and Gangwon

Classification		Return Period	
		50 years	500 years
Single Hazard		0.02	0.002
Multi-Hazard	Incheon	0.0018	0.00018
	Gangwon	0.0056	0.00056

일반적으로 국가 위험성은 향후 5년 내 발생 가능한 재난을 대상으로 평가를 수행한다. Table 7의 재현주기별 발생확률 결과를 이용하여 5년 내 발생개연성(P_5)은 Eq. (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_5 = 1 - (1 - P)^5 \quad (8)$$

여기서, $P = 1/T$ 을 의미한다.

위 결과를 기초로 시범평가 지역의 발생개연성 등급을 Table 8과 같이 평가하였다. Table 8의 상수는 5년 내 발생확률, ‘()’ 값은 Table 3의 해당하는 발생개연성 등급을 각각

의미한다. Table 8에서 알 수 있듯이 50년 재현주기 재난의 발생 개연성이 500년 재현주기 재난의 발생개연성보다 1단계씩 높은 것을 알 수 있다. 또한, 단일재난의 등급이 복합재난의 등급보다 1단계씩 높은 것을 알 수 있다.

Table 8. Likelihood Ranking based on Probability of Occurrence within 5 Years

Classification		Return Period	
		50 years	500 years
Single Hazard		0.096 (5)	0.009 (4)
Multi-Hazard	Incheon	0.009 (4)	0.001 (3)
	Gangwon	0.027 (4)	0.002 (3)

3.5 국가 위험성 영향 산정을 위한 취약도 평가

NRA를 위해서는 발생개연성 뿐만 아니라 영향 평가도 요구된다. 본 연구에서는 단일재난 및 복합재난으로 인한 지표의 피해를 평가하기 위하여 취약도 모형(Fragility Model)을 적용하였다. 취약도 모형은 임의의 재난 강도에 의하여 평가 대상의 피해율을 계산할 수 있는 방법론이다(Yun et al., 2015). 본 연구에서는 취약도 모형을 개발하기 위하여 과거 피해자료를 기반으로 구축하는 경험적 방법론(Schultz et al., 2010)과 해당 전문가의 의견을 통하여 구축하는 전문가적 방법론(Schultz et al., 2010)을 혼합하여 적용하였다.

경험적 방법론을 적용하기 위하여 2007년~2016년까지의 재해연보를 활용하여 호우로 인한 사망자 수를 파악하였으며, 도로, 하천, 상하수도, 학교, 철도는 피해 발생 개소 수와 발생 피해액을 조사하였다.

Fig. 4. Relationship between Rainfall and Damage Ratio for School

재해연보에 기록된 재난을 유발한 호우 강도를 조사하기 위하여 과거 호우 재난 발생시기와 동일한 시점에서의 기상청 데이터를 조사한 후, Fig. 4와 같이 조사된 호우강도와

피해율의 형태로 분석하였다. Fig. 4의 피해율(Damage Ratio, DR)은 Eq. (9)와 같이 전체 대상에서 피해가 발생한 대상의 비를 의미한다.

$$DR = \frac{D_l}{D_t} \quad (9)$$

여기서, D_l 은 과거 피해 데이터로부터 파악된 지표별 발생 피해량, D_t 는 지표별 전체 인벤토리를 의미한다. 전체 피해대상 인벤토리는 통계청의 자료를 통하여 인구수, 상하수도, 학교의 개소 수 및 도로, 하천, 철도의 연장으로 구성된다.

Fig. 4에서 선형의 호우강도와 피해율간의 상관관계는 조사된 자료를 선형회귀분석하여 도출하였다. Fig. 4의 결과는 단일재난에 대한 피해율이기 때문에 복합재난의 영향성을 반영하지 못하고, 재해연보의 호우 피해 기록은 다른 재난의 영향까지 반영되어 있어 순수 호우유발 단일재난의 영향성을 분별하기 어렵다. 경험적 방법론을 적용하여 복합재난 취약도 모형을 개발하기 위해서는 과거 복합재난에 대한 피해자료가 요구된다. 하지만 국내·외 문헌을 파악한 결과, 복합재난 피해자료가 부재한 관계로 단일재난의 취약도 결과를 바탕으로 복합재난 취약도로 확장할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 4의 단일재난 취약도로부터 복합재난의 취약도를 확장하기 위하여 베이지안 네트워크(Bayesian Network)를 이용한 선행연구 결과(Nam, 2014)를 적용하였다.

Table 9. Scale-up Factor due to the Multi-Hazard Effect

Second Hazard		Life	Infrastructure
Landslide	Flood		
×	×	0.03	0.36
○	○	3.06	2.52

Nam (2014)의 연구에서는 1차 재난으로 호우가 발생하였을 경우 복합재난으로 산사태와 홍수가 발생할 수 있는 조건부확률을 계산하였다. 이 결과를 기초로 단일재난 및 복합재난으로 확장되었을 경우 Fig. 4의 호우재난 피해율 대비 증감되는 피해율을 Table 9와 같이 계산할 수 있다.

본 연구에서는 호우재난 이외 재난의 영향성이 혼재되어 있는 Fig. 5의 선형취약도 기울기(Slop) 값에 Table 9와 같이 복합재난으로 발전하였을 경우 상승하는 비만큼 증감하는 것으로 고려하여 복합재난 및 단일재난의 선형취약도를 Fig. 5와 같이 계산하였다.

전술한 방법론을 적용하여 계산된 인명과 사회간접시설 피해의 선형취약도 기울기 값은 Table 10과 같다.

Fig. 5. Linear Fragility for School

Table 10. Slop Values for Linear Fragility

Classification	Slop	
	Single Hazard	Multi Hazard
Fatalities	0.40×10^{-6}	44.30×10^{-6}
School	0.44×10^{-6}	3.23×10^{-6}
River	1.48×10^{-6}	10.66×10^{-6}
Road	0.03×10^{-6}	0.20×10^{-6}
Water Supply and Sewerage	3.39×10^{-6}	24.34×10^{-6}
Rail	0.45×10^{-6}	3.25×10^{-6}

Fig. 5와 Table 10의 취약도 결과는 과거 실제 발생한 호우로 집계된 피해를 기반으로 구축되었기 때문에 고강도(250 mm 이상)의 호우에 대한 비선형적 영향성을 적절히 표현하지 못한다.

Table 11. Ratio for High Intensity Rainfall Effect

Rainfalls	Life	Infrastructure
210 mm/200 mm	2.714	1.923
220 mm/210 mm	3.315	3.0

이에 본 연구에서는 고강도 재난의 영향을 반영하기 위하여 Table 11과 같이 과거 피해자료로부터 예측된 고강도 호우의 확률분포를 적용하여 200mm 이상의 강우량으로 인하여 피해율 증가 비율을 계산하였다(MOIS, 2018). Table 11의 증가 비율은 과거 피해자료로 계산된 200mm의 호우로 인한 피해율 대비 210mm, 220mm로 높아졌을 때 증가되는 피해율의 비를 의미한다.

최종 취약도 곡선은 저강도의 경우 선형취약도의 피해를 적용하였으며, 고강도의 경우 피해를 증가 비율로 추정한 값을 적용하여 Fig. 6의 ‘○’ 심별과 같이 곡선맞춤하기 위한 기본 자료로 가공하였다. 취약도 곡선은 Fig. 6의 실선과 같이 로그정규누적분포의 함수로 곡선 맞춤하였다.

Fig. 6. Log-normal Type Fragility Curve for School due to Multi-Hazard

본 연구에서는 단일/복합재난평가를 위한 취약도의 적합성을 검증 및 보완하기 위하여 전문가 자문회의를 수행하였다. 전문가 자문회의를 통하여 저강도에서는 선형의 취약도, 고강도에서는 로그정규누적분포함수의 취약도를 혼합하는 것이 타당하다는 결론을 도출하였다. 이에 Fig. 7과 같이 NRA를 위한 영향 산정 시 적용한 최종 취약도 곡선을 도출하였다.

Fig. 7. Hybrid Fragility Curve of School due to Multi-Hazard

최종 취약도 곡선에서 재현주기 호우량에 해당하는 피해를 산출하여 평가 지역의 인벤토리(인구수, 학교 수 등)를

곱하게 되면 각 지표별 피해량(사망자 수, 피해액 등)을 산출할 수 있으며, 이를 Table 5에 반영하여 등급을 평가할 수 있다.

3.6 복합재난 국가 위험성 시범평가

본 연구에서는 전술한 방법론을 통하여 NRA 기법을 개발하였다. 개발된 NRA 기법을 기초로 50년과 500년 재현주기에 따른 인천과 강원 지역의 국가 위험성을 시범평가 하였다. 본 장에서는 가장 보수적인 500년 재현주기에 대하여 평가하였다. Table 12의 값은 취약도 모형을 이용하여 예측된 재난으로 인한 2017년 인구수 기준의 사망자 수를 의미하며, ‘()’ 값은 예측된 재난으로 인한 사망자 수에 따른 Table 5의 영향 등급을 의미한다. Table 12에서 알 수 있듯이 단일재난의 경우 500년 재현주기의 호우발생 시 인천과 강원 지역 모두 Table 5의 1등급 피해, 복합재난의 경우 인천 지역은 4등급, 강원 지역은 2등급의 피해가 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 12. Impacts on Human Fatalities (Rainfall of Return period of 500 Years)

Classification	Incheon	Gangwon
Population (Thousand)	2,949	1,550
Fatalities for Single Hazard	0.1 (1)	0.0 (1)
Fatalities for Multi-Hazard	6.5 (4)	2.1 (2)

Table 13은 500년 재현주기의 재난에 따른 사회간접시설 분야의 경제적 피해를 의미한다. Table 13에서 ‘%’ 값은 평가지역 세입예산 대비 사회간접시설 분야 취약도 모형으로 예측된 학교, 하천, 도로, 철도, 상하수도에 대한 피해액 총합의 비율을, ‘()’ 값은 예측된 인한 피해액에 따른 Table 5의 영향 등급을 의미한다.

Table 13. Impacts on Infrastructure Loss (Rainfall of Return period of 500 Years)

Classification	Incheon	Gangwon
revenue budget (Thousand million KRW)	8,945	5,871
Single Hazard	0.318% (3)	0.618% (4)
Multi-Hazard	3.241% (5)	4.149% (5)

Table 13과 같이 단일재난의 경우 인천 지역은 3등급의 피해, 강원 지역은 4등급의 피해가 발생하여 상대적으로 강원도가 호우단일재난에 취약함을 알 수 있다. 복합재난의 경우 인천과 강원 지역 모두 5등급으로 각각 상승하는 것을 알 수 있으며, 지역적으로 비교하였을 경우 단일재난과 마찬가지로

가지로 강원 지역이 더 위험한 것을 알 수 있다.

본 결과를 바탕으로 최종 사회간접시설 분야의 경제적 피해 지표 NRA 매트릭스를 구성하면 Fig. 8과 같다. 구성된 NRA 매트릭스는 평가된 발생개연성 및 영향 등급의 결과를 직관적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 8에서 I는 인천 지역, K는 강원 지역, ‘※’ 심벌은 복합재난이 발생한 경우, ‘※’ 심벌이 없는 경우는 단일재난이 발생한 경우를 의미한다.

5			K※ I※		
4				K	
3				I	
2					
1					
	1	2	3	4	5

Likelihood

Fig. 8. NRA Matrix (Infrastructure Loss)

4. 결 론

본 연구에서는 국가 위험성 평가 기법을 개발하고, 개발된 모형을 기초로 국가 위험성을 시범 평가하였다. 이를 위하여 호우재난 시나리오를 설정하고 5단계의 발생개연성과 영향의 등급을 제시하였다. 국가 위험성을 평가하는 대상을 의미하는 지표는 인명과 사회간접시설 분야로 선정되었다. 발생개연성은 국내 과거 호우 양상을 통계적으로 분석하여 향후 5년 이내에 발생가능한 50년, 500년 재현주기의 호우를 대상으로 평가되었다. 영향은 재해연보의 과거 피해자료와 전문가 조사를 기초로 개발된 취약도 모형을 적용하여 평가되었다. 발생개연성과 영향의 결과를 적용하여 시범지역인 인천과 강원 지역의 국가위험성 평가 매트릭스를 도출하였다. 평가한 결과, 복합재난의 경우 단일재난에 비하여 1~2 등급 더 취약한 것을 알 수 있다. 지역적 특성의 경우 평가 지역의 환경에 따라 위험한 요인에 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

향후에는 산사태 등에 영향을 미치는 추가 요인으로 일취대강우 이외에 선행강우 등의 영향을 고려한 분석이 필요할 것으로 사료되며, 이외의 개선 사항에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 국가 위험성 평가 기법은 국가에서 가까운 미래의 위험요인을 분석하고, 그에 대한 대책 수립

시 과학적인 근거로 활용할 수 있다고 사료된다. 추후 연구에서는 평가지역의 확대와 재난의 대상을 확장하여 국가 위험성을 예측 및 평가할 필요가 있으며, 검증은 통하여 본 연구 결과의 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ang, A., and Tang, W.H. (2006). *Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Cabinet Office. (2017). *National risk register of civil emergencies*. London, UK.
- DOD Ireland. (2012). *A national risk assessment for Ireland*. Department of Defence, Dublin, Ireland.
- FSEPS (Fire Services and Emergency Planning Section). (2006). *A Framework for Major Emergency Management, Department of the Environment*. Department of the Environment, Heritage & Local Government, Dublin, Ireland.
- KIPA (Korea Institute of Public Administration). (2015). *A study on legislative requirements of large-scale multi hazard*.
- Lee, S. (2016). Characteristics of Large-scale Multi Hazard and Literature Review of Risk Assessment. *Korean Fire Protection Association Webzine*, Vol. 64. Retrieved from https://www.kfpa.or.kr/webzine/201607/disaster_prevention_01.html
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). (2016a). *Chronological List of Disasters 2007-2016*. Department of Disaster insurance, Ministry of the Interior and Safety.
- MOIS. (2016b). *Comprehensive plan of management for multi hazard*.
- MOIS. (2017). *Development of risk assessment methodology for large-scale multi hazard*.
- MOIS. (2018). *Development of risk assessment methodology for large-scale multi hazard*.
- Nam, K.H. (2014). *A study on the compound-disaster risk assessment by utilizing the Bayesian network*. Ph.D. dissertation, Inje University.
- Schultz, M., Gouldby, B., Simm, J., and Wibowo, J. (2010).

Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability. ERDC SR-10-1, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.

Yun, W.S., Ham, H.J., Kim, H.J., and Lee, S.S. (2015). Evaluation of extreme wind fragility of balcony window systems in apartments. *Journal of the*

Architectural Institute of Korea, Structure & Construction, Vol. 31, No. 4, pp. 3-11.

Received	■	August 21, 2018
-----------------	---	-----------------

Revised	■	August 21, 2018
----------------	---	-----------------

Accepted	■	August 28, 2018
-----------------	---	-----------------