홍수위험도 평가를 활용한 인천광역시 복원탄력성 의사결정 지원

Support for Decision-Making on the Resilience of Incheon Metropolitan City Using Flood Risk Assessment

왕원준* · 김동현** · 유영훈*** · 이준형**** · 김경탁***** · 김형수*****

Wang, Won-joon*, Kim, Donghyun**, Yoo, Younghoon***, Lee, Junhyeong****, Kim, Kyung Tak*****,
and Kim, Hung Soo*****

Abstract

Since it was recognized as a UNDRR international safety city in 2020, Incheon Metropolitan City has been promoting policies aiming to strengthen resilience strategies for the next 10 years. For the resilience assessment, a Quick Risk Estimation (QRE), which is a risk assessment tool for various disasters, can also be used to support the decision-making of experts on strengthening resilience strategies. However, QRE is unable to provide a detailed risk assessment of a specific disaster such as flood. Therefore, in this study, a flood risk assessment was performed from 2016 to 2019 using the Indicator Based Approach for the 10 cities and counties in Incheon city. The aforementioned method can also support the decision-making of experts for disaster management alongside QRE results. The flood risk assessment in this study consists of four items (hazard, exposure, vulnerability, and capacity) and 11 detailed indicators. The details for each index, item, and flood risk indices were calculated for each evaluation stage. As of 2019, the flood risk index had been calculated for Ganghwa-gun (county), Michuhol-gu (district), Jung-gu, Seo-gu, and Ongjin-gun, among others. The flood risk assessment conducted in this study is believed to be beneficial for a rational decision-making that can support the strengthening of resilience strategies by identifying changes in city- and county-specific situations and risk-exposed indicators in response to flood risks.

Key words : QRE, Resilience, Flood Risk Assessment, IBA

요 지

인천광역시는 2020년 UNDRR 국제안전도시로 인정된 이후 향후 10년 동안 복원탄력성 강화를 목표로 관련 정책을 추진하고 있다. 복원탄력성 평가에서 사용되는 위험 평가 도구인 QRE (Quick Risk Estimation)는 복원탄력성 강화에 대한 전문가들의 의사결정을 지원한다. 하지만, QRE는 홍수와 같은 특정 재난에 대하여 상세한 분석이 어렵다는 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 인천광역시 10개 시군구를 대상으로 2016~2019년까지 연도별 IBA (Indicator Based Approach) 기반 홍수위험도 평가를 수행하여 QRE 도구와 함께 인천광역시 복원탄력성 강화에 대한 전문가들의 의사결정을 지원하고자 한다. 홍수위험도 평가는 Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity 4개의 항목과 11개의 세부지표로 구성되어 있으며, 평가 단계별로 세부지표별 지수, 항목별 지수, 홍수위험도 지수를 산정하였다. 2019년 기준 시군구별 홍수위험도 지수는 강화군, 미추홀구, 중구, 서구, 옹진군 등의 순서로 크게 산정되었다. 최종적으로 홍수위험도 평가는 홍수위험에 대응하는 시군구별 상황과 위험에 노출된 지표들의 변화를 파악하여 복원탄력성 강화를 위한 합리적인 의사결정 지원에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : QRE, 복원탄력성, 홍수위험도 평가, IBA

*정회원, 인하대학교 스마트시티공학과 박사과정(E-mail: makelest@naver.com)

Member, Doctor's Course, Department of Smart City Engineering, Inha University

**정회원, 인하대학교 스마트시티공학과 박사수료

Member, Ph.D. Candidate, Department of Smart City Engineering, Inha University

***정회원, 인하대학교 스마트시티공학과 박사과정

Member, Doctor's Course, Department of Smart City Engineering, Inha University

****정회원, 인하대학교 스마트시티공학과 박사과정

Member, Doctor's Course, Department of Smart City Engineering, Inha University

*****정회원, 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사

Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*****교신저자, 정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 교수(Tel: +82-32-860-7572, Fax: +82-32-876-9787, E-mail: sookim@inha.ac.kr)

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

1. 서 론

2020년 1월 인천광역시는 우리나라 최초로 UN Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) 롤모델 국제안전도시로 인정되었다(Lee, 2021). 인천광역시는 UNDRR 롤모델 도시인증을 신청하기 위하여 Quick Risk Estimation (QRE) 도구와 스코어 카드를 활용하여 인천광역시의 위험도와 복원탄력성을 평가하였다. QRE 도구는 총 8단계로 이루어진 위험 평가 도구로서 단계별로 대상 지역의 주요 위험요소와 재난 노출 평가, 취약성 평가, 조치 수준 평가 등이 이루어진다. 2018년 기준 인천광역시 시민안전본부에서 수행한 재난 QRE 분석에서는 자살, 풍수해, 지진 등의 순서로 위험 발생 가능성과 심각도가 높은 것으로 평가되었다. 최종적으로 QRE 도구를 활용한 위험도 평가 결과는 인천광역시 복원탄력성 강화에 대한 전문가들의 의사결정을 지원하기 때문에 매우 중요한 역할을 수행한다. 하지만 QRE 도구는 홍수와 같이 특정 재난 및 위험에 대하여 연도별, 시군구별로 세분화된 위험도 분석이 어렵다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 인천광역시 10개 시군구를 대상으로 Indicator Based Approach (IBA) 기반 홍수위험도 평가 기법을 적용하여 인천광역시 시군구의 복원탄력성 강화를 지원하고자 하였다. IBA 기반 홍수위험도 평가는 인천광역시 시군구별 정량적 통계자료를 기반으로 평가가 이루어지기 때문에 QRE 도구보다 연도별, 시군구별로 세분화된 위험도 평가가 가능하다는 장점이 있다.

국내에서 수행된 복원탄력성 평가 및 홍수위험도 평가 사례를 살펴보면, Kang and Cho (2013)에서는 복원탄력성의 개념을 재정립하여 사회적 비용관점에서 복원탄력성을 강화할 수 있는 정량적 평가방법을 제시하였다. Kim et al. (2015)은 국내 도시재생 분야에서 복원탄력성의 개념을 정의하고, 관련 프레임워크와 모델을 적용하기 위한 방향을 제시하였다. 또한 2018년에 시행된 울산시 Resilience 강화방안 연구(Yoon, 2018)에서는 재난방재분야에서 복원탄력성의 개념과 국내외 적용사례를 제시하고 울산광역시의 복원탄력성 강화를 위한 정책을 제안하였다. Choi et al. (2018)에서는 빅 데이터 분석 기법을 적용하여 세부지표 표준화 및 요인분석을 수행하고 안양천 유역의 시군구를 대상으로 풍수해 복원탄력성을 평가하였다. 홍수위험도 평가 사례의 경우 Kim et al. (2012)에서는 국내외 선행연구 사례 조사를 통해 풍수해에 대한 침수취약등급도 항목과 절차를 제시하였다. Kim et al. (2013)은 서울특별시 행정동 단위로 홍수를 유발하는 기후요인, 홍수에 노출된 정도를 나타내는 민감도, 홍수피해를 저감하는 능력인 적응도 요소를 종합하여 홍수취약도 지수를 산정하였다. Han et al. (2015)에서는 인천광역시를 대상으로 위험성, 노출성, 취약성, 대응·복구성 요소로 구성된 재해위험지수를 산정하여 도시지역의 재해위험도를 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 Wang et al. (2020)에

서는 경기도 31개 시군을 대상으로 도로명주소 전자지도(건물)와 건축물수 격자자료를 사용하여 침수피해 영향범위 내에 있는 통계값만을 추출하여 홍수위험도 평가를 수행하였다.

해외 연구사례의 경우 World Economic Forum (2013)은 설문조사 자료 기반으로 5가지 차원(Environmental, Governance, Infrastructure, Economic, Social)을 이용한 국가 단위 복원탄력성 평가 방법을 제시하였다. Cai et al. (2016)은 Exposure, Damage, Recovery로 구성된 복원탄력성 지표에 Z-score와 k-means clustering 기법 등을 적용하여 분석 결과를 산정하였다. Aslam et al. (2020)에서는 싱가포르에서 겪고 있는 전염병, 호우, 태풍 등의 위험(Hazard)에 노출된 자산(Exposure)과 물리적·사회경제적 취약성(Vulnerability)을 정리하고 재해위험을 감소시키기 위한 방안(Capacity)을 제시하였다. 또한, UNDRR에서 발간한 재해에 대한 복원탄력성 스코어 카드 평가에서는 세르비아, 루마니아 등의 지역을 대상으로 도시별 지속 가능한 개발과 복원탄력성 강화가 재해영향 감소에 미치는 결과를 제시하고 있다(UNDRR, 2020).

본 연구에서 제시하는 IBA 기반 홍수위험도 평가에서는 싱가포르의 복원탄력성 연구사례처럼 위험도 평가항목을 4가지(Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity)로 분류하고 위험도 평가에 반영할 항목별 세부지표를 11개로 다양화하였다. 이중 Capacity 항목의 세부지표는 재해저감 및 복원탄력성 강화에 기여할 수 있는 지표로 구성하여 시군구별 복원탄력성의 변화가 위험도 평가에 반영될 수 있도록 하였다. 또한 세부지표별 지수 산정에서는 기존 연구에서 사용하던 min-max 표준화, Z-score가 아닌 분위수를 활용한 점수화 기법을 적용하여 시군구별 홍수위험도 지수가 왜곡 없이 산정될 수 있도록 개선하였다.

2. 홍수위험도 평가에 대한 이론적 배경

2.1 IBA 기반 홍수위험도 평가

본 연구에서는 인천광역시 10개 시군구를 대상으로 연도별 홍수위험도를 평가하기 위해 IBA 기반 위험도 평가 기법을 적용하였다. IBA 위험도 평가 기법은 리스크 매트릭스와 함께 정성적 위험도 평가에서 주로 사용되는 방법이며, 일반적으로 4가지 항목(Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity)을 종합적으로 고려하여 대상 지역의 위험도를 평가한다. 각각의 항목들은 항목별 특성과 연관된 세부지표로 구성되어 있는데, IBA 위험도 평가를 수행하기 위해선 정량적 데이터로 구성된 항목별 세부지표에 표준화를 적용해 지수화한다. 세부지표별 지수가 산정되면 가중치를 적용해 항목별 지수를 산정하고, 항목별 지수에 다시 가중치를 적용해 위험도 평가 기준이 되는 지수를 최종 산정한다.

본 연구에서는 인천광역시 시군구별 재해위험강도, 재해에 노출된 대상, 재해저감 및 복원력 강화 지표 등을 정량화된

통계값으로 나타내기 위해 IBA 기반 홍수위험도 평가 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 IBA 홍수위험도 평가는 4개 항목(Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity)과 11개의 세부지표로 구성되어 있다. 항목별 세부지표를 살펴보면 Hazard 항목은 확률강우량(100년 빈도, 지속시간 24시간)과 최대강우량(지속시간 24시간)이며, Exposure 항목은 건축물수, 주민등록인구수, 도로 면적으로 구성되어 있다. Vulnerability 항목은 노후건축물 비율, 의존인구 비율이며, Capacity 항목은 누적 방재예산액 비율, 방재시설 밀도, 소방·경찰관서 밀도, 병원 밀도로 구성되어 있다. 각 항목을 구성하는 세부지표의 선정은 Community Based Indicator System에서 제안하는 세부지표별 원데이터의 타당성, 신뢰성, 입수 가능성, 객관성을 고려하였다(Bollin et al., 2003). 타당성은 위험도 평가에서 고려하고자 하는 특성이 세부지표에 반영되었는지 여부이며, 신뢰성은 세부지표별 원데이터가 시간이 지나더라도 일관된 집계 결과를 제공하는지 여부를 나타낸다. 객관성은 연구 상황 및 환경이 변화되더라도 일관성 있는 세부지표별 원데이터를 다시 재현 및 구축할 수 있는지를 나타낸다. 연구에서 사용한 세부지표별 원데이터는 모두 기상청, 행정안전부, 국토교통부, 통계청 등 주요 국가기관에서 관리하고 있는 데이터를 선별해 사용했기 때문에 필요한 기준을 모두 통과하였다.

본 연구에서는 인천광역시 시군구별 홍수위험도 평가를 수행하기 위해 항목별 세부지표의 원데이터에는 분위수를 활용한 점수화 기법을 적용해 지수화한 후 엔트로피 가중치를 적용해 항목별 지수를 산정하였다. 산정된 항목별 지수는 min-max 표준화를 적용해 0~1의 범위로 통일시킨 후 동일 가중치 개념의 유클리드 거리를 적용해 인천광역시 시군구별 홍수위험도 지수를 최종 산정하였다. 시군구별로 산정된 세부지표별 지수, 항목별 지수, 홍수위험도 지수는 기존 QRE 도구와 함께 시군구별 위험도 및 상태, 향후 전망

등을 자세히 파악하는데 유용한 도구가 된다. Fig. 1은 앞에서 설명한 홍수위험도 지수 산정 절차에 대한 연구 흐름도를 나타낸 것이다.

2.2 분위수를 활용한 점수화

일반적으로 정량적 통계자료를 활용한 위험도 평가에서는 min-max 표준화, Z-score 방법 등을 사용하여 세부지표별 원데이터를 지수화한다. 하지만 일부 세부지표는 min-max 표준화나 Z-score 방법을 적용해도 지수의 분포가 정규분포를 따르지 않기 때문에 최종 산정되는 위험도 평가 지수도 왜곡되어 나타난다. 이러한 문제를 해결하기 위해 세부지표별 원데이터 가공 단계에서 root변환이나 log변환을 먼저 적용한 후 지수화하는 방법이 도입되었다. 하지만 세부지표의 원데이터에 매우 큰 극값이 존재하거나 원데이터의 개수가 적을 경우에는 root변환이나 log변환을 적용해도 지수의 분포가 정규분포를 따르지 않는 사례가 발생한다. Fig. 2는 인천광역시 10개 시군구를 대상으로 2016년부터 2019년까지 시군구별 건축물수 통계값에 대한 min-max 표준화 지수의 분포를 나타낸 것이다. 지수화된 데이터의 개수가 40개에 불과하므로 지수의 분포가 양극단에 몰려 있음을 확인할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 분위수를 활용한 점수화 기법을 적용하였다. 점수화 기법은 세부지표별 원데이터의 확률밀도함수를 9개의 분위수를 기준으로 10등분 한 후 각 구간별로 0.1부터 1까지 0.1 간격으로 점수를 부여하는 방법이다. 이 방법은 세부지표별 원데이터를 크기 순으로 정렬한 상태에서 분위수를 기준으로 점수가 배정되기 때문에 기존 min-max 표준화, Z-score 방법 등과 달리 치우침 없이 지수화가 가능하다는 장점이 있다. 실제로 2016~2019년 인천광역시 시군구별 건축물수 통계값에 점수화 기법을 적용한 Fig. 3에서는 건축물수 지수의 분포가 정규분포를 따르지는 않지만 각 구간별로 지수가 치우침 없이 고르게

Fig. 1. Flowchart for Flood Risk Assessment

Fig. 2. Distribution of Min-Max Standardized Index for the Number of Buildings in Each Cities and Counties

Fig. 3. Distribution of Scoring Index by Section for the Number of Buildings in Each Cities and Counties

분포하고 있음을 확인할 수 있다. 최종적으로 인천광역시 홍수위험도 평가에서는 세부지표별 지수 산정 단계에서 분위수를 활용한 점수화 기법을 적용하여 지수의 치우침 없이 모든 구간에서 지수가 고르게 분포할 수 있도록 하였다.

3. 인천광역시 시군구별 홍수위험도 평가

3.1 인천광역시의 수문·기상학적 특성

인천광역시는 10개의 시군구로 구성되어 있으며, 대륙성 기후와 해양성 기후의 특성을 함께 가지고 있다. 특히 인천광역시의 1931~1960년 연평균 강우량은 1,092.8 mm였으나, 1981~2010년 연평균 강우량은 1,234.4 mm로 과거 80년(1931~2010년)동안 연평균 강우량은 약 13% 증가하였다(Environment and Climate Policy Division, 2019). 2019년

기후변화보고서에 따르면 RCP 8.5 시나리오에서 21세기 후반기의 평균기온은 현재 기온보다 5.1 °C 상승하고, 인천광역시 시군구 중 연 강수량은 연수구가 41.2%, 용진군이 40.8%로 가장 크게 증가할 것으로 전망되었다. 인천광역시는 홍수에 대한 복원탄력성 강화 및 기후변화 적응대책의 일환으로 침수예방 및 안전사고에 대비한 하수관로 개보수(49,359 m) 및 준설(26,434톤)을 실시하였다. 또한 생태하천 복원 및 수해상습지(14개소)에 대한 하천 정비를 실시하여 시군구별 재해에 대한 예방 및 대응 방안을 마련하고 있는 상황이다.

3.2 홍수위험도 평가의 항목별 세부지표별 지수 산정

3.2.1 Hazard 항목 및 세부지표

Hazard 항목은 확률강우량(100년 빈도, 지속시간 24시간)과 최대강우량(지속시간 24시간)으로 세부지표가 구성되어 있다. 이 중에서 확률강우량은 극단적인 강우 시나리오에서 발생하는 산사태 위험도 평가(Lili et al., 2020)나 저지대에서 발생하는 홍수에 노출되는 정도를 평가할 때 Hazard 항목의 세부지표로 고려되어 진다(Mark and Mark., 2016). 분석에 사용한 강우 자료는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)에서 제공하는 인천광역시 주변의 종관기상관측소(ASOS) 두 곳과 방재기상관측소(AWS) 다섯 곳의 강우 자료를 사용하였다. ASOS 관측소는 강우 자료 보유량이 충분하여 연도별 30년치 강우 자료를 사용했지만, AWS 관측소는 1993년부터 강우 자료를 보유하고 있어, 연도별 24년치 강우 자료를 사용하였다. 총 7개의 관측소를 대상으로 산정한 확률강우량은 χ^2 검정과 K-S 검정을 모두 통과하였다. 관측소별 확률강우량과 최대강우량을 산정한 후에는 고정시간·임의 시간 환산계수와 티센면적비를 적용하여 면적 단위 확률강우량과 최대강우량을 최종 산정하였다. Table 1은 기상자료개방포털의 ASOS, AWS 관측소의 정보를 정리한 것이며, Fig. 4는 인천광역시 주변 기상관측소 위치와 티센망을 나타낸 것이다.

인천광역시 시군구별로 면적 단위 확률강우량과 최대강우량이 산정되면 구간별 점수화 기법을 적용하여 2016~2019년 동안의 연도별 세부지표 지수(0.1~1)를 산정한다. 그 후 세부지표별 엔트로피 가중치를 적용하여 Hazard 지수를 산정한다. 엔트로피 가중치의 경우 확률강우량은 0.292, 최대강우량은 0.708로 산정되었으며, 시군구별로 산정된 Hazard 지수는 min-max 표준화를 적용하여 0~1 사이의 지수로 변환해 준다. Table 2는 인천광역시 10개 시군구의 연도별 확률강우량과 최대강우량의 세부지표 지수 및 Hazard 지수를 나타낸 것이며, Figs. 5와 6은 2016년과 2019년의 시군구별 Hazard 지수를 비교한 것이다.

Hazard 지수는 세부지표 중 가중치가 0.708인 최대강우량의 영향을 크게 받는데, 2016~2019년 기간 동안 인천광역시 10개 시군구 중 대규모 강우가 빈번하게 발생한 강화군의 Hazard 지수가 가장 크게 산정되었다. 이러한 특징은 Figs.

5와 6에서 다른 시군구와 비교했을 때 명확히 드러나는데, 실제로 2016년 10월에는 강화군에서 24시간 동안 약 171.8 mm의 강우가 내려 호우경보가 발령되었고, 2019년 9월에는 태풍 링링의 영향으로 큰 피해가 발생하였다. 특히 2019년은 태풍 링링과 미탁의 영향범위에 들어왔었던 시군구를 제외하면

Table 1. Weather Station Information

Station	Sta. No.	Latitude	Longitude	Type
Incheon	112	37.4777	126.6249	ASOS
Ganghwa	201	37.7074	126.4463	ASOS
Gyodong	502	37.7894	126.2916	AWS
Deokjeokdo	513	37.2272	126.145	AWS
Daebudo	514	37.2377	126.5787	AWS
Yeongjongdo	543	37.499	126.5496	AWS
Siheung	565	37.3915	126.785	AWS

Fig. 4. Weather Station Location and Thiessen Polygon

Table 2. Detailed Indicators and Indices for Hazard Items in Cities and Counties (2016-2019)

County or District	2016					2017				
	Frequency based rainfall (mm)		Maximum rainfall (mm)		Hazard index	Frequency based rainfall (mm)		Maximum rainfall (mm)		Hazard index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index		Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	362.2	0.3	116.2	0.6	0.412	357.9	0.2	117.2	0.6	0.377
Namdong-gu	324.0	0.1	110.0	0.4	0.171	319.9	0.1	153.1	1	0.683
Bupyeong-gu	406.3	0.8	108.3	0.4	0.417	372.8	0.5	119.5	0.6	0.482
Jung-gu	369.0	0.4	133.9	0.9	0.703	360.0	0.3	122.0	0.7	0.497
Dong-gu	418.2	0.9	108.0	0.3	0.367	380.5	0.8	114.6	0.5	0.503
Gyeyang-gu	418.2	0.9	108.0	0.3	0.367	380.5	0.8	114.6	0.5	0.503
Ganghwa-gun	499.3	1	171.8	1	1	498.5	1	110.1	0.4	0.488
Seo-gu	412.0	0.9	111.3	0.4	0.452	377.9	0.6	115.6	0.5	0.432
Michuhol-gu	418.2	0.9	108.0	0.3	0.367	380.5	0.7	114.6	0.5	0.467
Yeonsu-gu	396.9	0.8	107.1	0.3	0.332	367.5	0.4	121.5	0.6	0.447
County or District	2018					2019				
	Frequency based rainfall (mm)		Maximum rainfall (mm)		Hazard index	Frequency based rainfall (mm)		Maximum rainfall (mm)		Hazard index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index		Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	356.0	0.2	131.1	0.8	0.548	350.7	0.2	103.6	0.2	0.035
Namdong-gu	319.5	0.1	154.4	1	0.683	321.2	0.1	92.4	0.2	0
Bupyeong-gu	371.5	0.4	131.2	0.8	0.618	372.3	0.5	90.8	0.1	0.055
Jung-gu	360.7	0.3	148.1	0.9	0.668	357.8	0.2	134.3	0.9	0.633
Dong-gu	379.1	0.6	127.8	0.7	0.603	379.7	0.7	90.6	0.1	0.126
Gyeyang-gu	379.1	0.6	127.8	0.7	0.603	379.7	0.7	90.6	0.1	0.126
Ganghwa-gun	496.9	1	146.1	0.9	0.915	493.6	1	182.8	1	1
Seo-gu	376.8	0.5	130.3	0.8	0.653	377.0	0.5	96.1	0.2	0.141
Michuhol-gu	379.1	0.6	127.8	0.7	0.603	379.7	0.7	90.6	0.1	0.126
Yeonsu-gu	366.5	0.3	130.1	0.8	0.583	367.2	0.4	91.5	0.2	0.106

Fig. 5. Hazard Index for Cities and Counties (2016)

Fig. 6. Hazard Index for Cities and Counties (2019)

전국적으로 강수량이 적었기 때문에 인천광역시에서도 강화군과 중구를 제외하면 Hazard 지수가 낮게 산정되었음을 확인할 수 있다.

3.2.2 Exposure 항목 및 세부지표

기존 QRE 위험 평가에서 5단계에 해당하는 ‘노출 평가’에서는 위험에 노출되어 잠재적인 손실이 발생할 수 있는 대상으로 인구, 건축물수, 사회기반시설 등을 제시하였다. 본 연구의 IBA 기반 홍수위험도 평가에서는 Exposure 항목에서 건축물수, 주민등록인구수, 도로 면적을 세부지

표로 최종 선정하였다. 건축물수는 도로명주소 도움센터 (<https://www.juso.go.kr/>)에서 제공하고 있는 2016~2019년 12월 도로명주소 전자지도를 사용하여 시군구별 건축물수를 산정하였다. 도로명주소 전자지도는 건물군 단위로 구현된 토지피복도와 달리 건물이 객체 단위로 구현되어 있으므로 건물별 중심점을 기준으로 시군구별 소속 여부를 판정한 후 중심점 개수로 건축물수를 집계하였다. 도로명주소 전자지도에 구현된 건물들은 단독주택, 연립주택, 아파트 등의 주거건물 뿐만 아니라 제1종 근린생활시설, 공장, 발전시설 등과 같은 산업시설 및 공공시설물들도 포함되어 있어 다양한 유형의 건물들을 평가에 반영할 수 있다. 주민등록인구수는 행정안전부에서 제공하는 연도별 시군구 단위 주민등록 인구통계(<https://jumin.mois.go.kr/>) 자료를 사용하였으며, 시군구별 도로 면적은 도로명주소 전자지도에 포함된 실폭도로 자료를 사용하였다. 과거까지 도로와 관련해서 정부에서 제공하는 공간분석자료들은 토지피복도에 포함된 도로 폴리곤 자료와 폴리라인 형태의 자료가 전부였다. 토지피복도의 도로 폴리곤 자료는 자료의 갱신주기가 불연속적이고 해상도가 낮은 단점이 있었고, 폴리라인 형태의 자료는 도로 면적 산정이 불가능하였다. 하지만 새롭게 공개된 실폭도로는 폴리곤 형태로 자료가 제공되어 도로 면적 산정이 가능하고, 도로명주소 전자지도와 함께 월별로 갱신되고 있으며, 자료의 해상도도 매우 좋기 때문에 도로 면적을 Exposure 항목의 세부지표로 반영할 수 있었다.

Exposure 항목의 세부지표별 엔트로피 가중치를 산정한 결과 건축물수는 0.215, 주민등록인구수는 0.506, 도로 면적은 0.279로 가중치가 산정되었다. 기존에 Hazard 항목의 세부지표에 적용했던 방법과 동일하게 구간별 점수화와 엔트로피 가중치를 적용해 연도별 세부지표 지수와 Exposure 지수를 최종 산정하였다. Table 3은 Exposure 항목의 세부지표인 건축물수, 주민등록인구수, 도로 면적에 대한 원데이터와 세부지표 지수 및 Exposure 지수를 나타낸 것이다.

Exposure 지수는 세부지표의 특성상 Hazard 지수와 달리 연도별 지수의 변동 폭이 크지 않다. 다만 제시된 Table 3과 같이 연 단위로 시간 간격을 두고 비교해보면 일부 시군구에서 지수의 증감이 발생했음을 확인할 수 있다. 세부지표별로 살펴보면 건축물수의 경우 강화군은 부평구와 미추홀구의 건축물수를 추월하여 2019년 기준 인천광역시 10개 시군구 중 건축물수가 가장 많다. 반면 부평구는 2016년부터 시군구 내 건축물수가 지속적으로 감소하여 2016년 기준 0.9였던 세부지표 지수가 2019년에는 0.7로 감소하였다. 주민등록인구수에서는 2016년부터 서구의 인구수가 지속적으로 증가하면서 2018년 기준 인천광역시 시군구 중 가장 많은 인구수를 기록하고 있다. 반대로 부평구는 2016년에는 인천광역시 시군구 중 주민등록인구수가 가장 많았지만, 연도별 건축물수의 감소와 맞물려 2018년에는 남동구와 서구의 인구수에 추월되었다. 도로 면적은 Exposure의 세부지표 중 통계값의

Table 3. Detailed Indicators and Indices for Exposure Items in Cities and Counties (2016-2019)

County or District	2016						
	Number of buildings (pcs)		Number of registered resident (pcs)		Road area (km^2)		Exposure index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	13,090	0.3	21,351	0.1	3.951	0.2	0
Namdong-gu	31,463	0.6	530,982	0.9	8.188	0.7	0.774
Bupyeong-gu	38,215	0.9	549,716	1	4.950	0.4	0.814
Jung-gu	21,258	0.5	115,249	0.4	12.990	0.9	0.496
Dong-gu	11,490	0.2	71,014	0.3	1.300	0.1	0.066
Gyeyang-gu	16,953	0.4	330,284	0.6	4.557	0.3	0.385
Ganghwa-gun	37,629	0.8	68,010	0.2	11.636	0.8	0.414
Seo-gu	36,348	0.7	510,733	0.8	13.639	1	0.844
Michuhol-gu	40,146	1	417,103	0.7	5.193	0.5	0.684
Yeonsu-gu	9,253	0.1	328,627	0.5	6.654	0.6	0.345
County or District	2017						
	Number of buildings (pcs)		Number of registered resident (pcs)		Road area (km^2)		Exposure index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	13,370	0.3	21,573	0.1	3.955	0.2	0
Namdong-gu	31,640	0.6	536,578	0.9	8.189	0.7	0.774
Bupyeong-gu	37,914	0.8	539,941	1	4.948	0.4	0.787
Jung-gu	21,483	0.5	117,999	0.4	13.011	0.9	0.496
Dong-gu	11,463	0.2	69,487	0.3	1.371	0.1	0.066
Gyeyang-gu	17,015	0.4	323,784	0.5	4.557	0.3	0.320
Ganghwa-gun	38,756	0.9	68,754	0.2	11.683	0.8	0.441
Seo-gu	37,087	0.7	516,017	0.8	13.985	1	0.844
Michuhol-gu	39,717	1	419,267	0.7	5.193	0.5	0.684
Yeonsu-gu	9,346	0.1	335,142	0.6	6.660	0.6	0.409
County or District	2018						
	Number of buildings (pcs)		Number of registered resident (pcs)		Road area (km^2)		Exposure index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	13,533	0.3	21,036	0.1	3.960	0.2	0
Namdong-gu	31,687	0.6	537,161	0.9	8.189	0.7	0.774
Bupyeong-gu	36,186	0.7	524,640	0.8	4.948	0.4	0.631
Jung-gu	21,731	0.5	122,499	0.4	13.546	0.9	0.496
Dong-gu	11,166	0.2	66,233	0.2	1.371	0.1	0.002
Gyeyang-gu	16,585	0.4	312,680	0.5	4.607	0.3	0.320
Ganghwa-gun	39,511	0.9	68,896	0.3	11.737	0.8	0.506
Seo-gu	37,882	0.8	538,596	1	13.848	1	1
Michuhol-gu	39,568	1	416,542	0.7	5.161	0.5	0.684
Yeonsu-gu	9,423	0.1	346,359	0.6	6.779	0.6	0.409
County or District	2019						
	Number of buildings (pcs)		Number of registered resident (pcs)		Road area (km^2)		Exposure index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	13,699	0.3	20,566	0.1	3.981	0.2	0
Namdong-gu	31,659	0.6	532,704	0.9	8.206	0.7	0.774
Bupyeong-gu	34,834	0.7	511,577	0.8	4.974	0.4	0.631
Jung-gu	22,021	0.5	135,135	0.4	13.568	1	0.532
Dong-gu	10,519	0.2	64,427	0.2	1.374	0.1	0.002
Gyeyang-gu	16,518	0.4	303,471	0.5	4.756	0.3	0.320
Ganghwa-gun	40,791	1	69,178	0.3	11.861	0.8	0.533
Seo-gu	37,997	0.8	544,556	1	13.195	0.9	0.965
Michuhol-gu	39,300	0.9	408,862	0.7	5.182	0.5	0.657
Yeonsu-gu	9,145	0.1	366,550	0.6	7.888	0.7	0.445

변동폭이 가장 적지만 2016년 대비 2019년의 변화를 살펴보면 서구와 미추홀구를 제외한 모든 시군구에서 도로 면적이 증가하였다.

최종 산정된 Exposure 지수의 2016년 대비 2019년의 변화를 살펴보면 서구가 가장 큰 폭으로 증가하였고, 반대로 부평구는 가장 크게 감소하였다. Exposure 지수의 연도별 변화를 통해 인천광역시 시군구별로 홍수위험에 노출된 정도를 파악할 수 있는 것이다.

3.2.3 Vulnerability 항목 및 세부지표

QRE 위험 평가에서 6단계인 ‘취약성 평가’는 대상 지역의 생산 부문, 인프라, 도시 기반 서비스 등을 대상으로 평가가 이루어진다. IBA 기반 홍수위험도 평가에서 Vulnerability 항목의 세부지표는 Exposure 항목의 세부지표가 가지고 있는 취약성으로 정의된다. 따라서 Vulnerability 항목의 세부지표로 선정된 노후건축물 비율과 의존인구 비율은 각각 건축물

수와 주민등록인구수에 대한 취약성을 의미한다. 노후건축물 비율은 건축물 생애이력 관리시스템(<https://blcm.go.kr/>)에서 제공하는 건축물 통계를 사용하였으며, 인천광역시 시군구별 건축물수 대비 사용승인일이 20년 이상 경과한 건축물수의 비율로 설정하였다. 의존인구 비율은 시군구별 주민등록인구수 대비 재해위험에 취약한 유아(7세 이하)와 고령(65세 이상) 인구수 합계의 비율로 정의하였다. 또한 연령대별 인구수는 주민등록인구수와 동일하게 주민등록 인구 통계에서 제공하는 연령별 인구현황 통계자료를 사용하였다. Vulnerability 항목의 세부지표별 엔트로피 가중치는 노후건축물 비율 0.49, 의존인구 비율 0.51로 산정되었다. Table 4는 Vulnerability 항목의 세부지표인 노후건축물 비율, 의존인구 비율에 대한 원데이터와 세부지표 지수 및 Vulnerability 지수를 나타낸 것이다.

Vulnerability 항목의 세부지표는 Exposure 항목의 세부지표 통계값 대비 비율로 구성되어 있으므로 연도별 변화가

Table 4. Detailed Indicators and Indices for Vulnerability Items in Cities and Counties (2016-2019)

County or District	2016					2017				
	Ratio of old building		Ratio of dependent population		Vulnerability index	Ratio of old building		Ratio of dependent population		Vulnerability index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index		Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	0.344	0.2	0.271	0.8	0.427	0.343	0.2	0.279	0.9	0.512
Namdong-gu	0.517	0.6	0.180	0.4	0.414	0.517	0.6	0.183	0.4	0.414
Bupyeong-gu	0.526	0.7	0.180	0.4	0.495	0.530	0.8	0.184	0.4	0.576
Jung-gu	0.308	0.1	0.216	0.7	0.261	0.307	0.1	0.214	0.7	0.261
Dong-gu	0.511	0.6	0.249	0.8	0.752	0.521	0.7	0.256	0.8	0.834
Gyeyang-gu	0.462	0.5	0.156	0.1	0.078	0.471	0.5	0.159	0.1	0.078
Ganghwa-gun	0.441	0.4	0.342	1	0.759	0.441	0.4	0.348	1	0.759
Seo-gu	0.375	0.3	0.167	0.2	0	0.367	0.3	0.168	0.2	0
Michuhol-gu	0.647	1	0.207	0.6	0.909	0.656	1	0.211	0.6	0.909
Yeonsu-gu	0.549	0.9	0.158	0.1	0.404	0.556	0.9	0.160	0.1	0.404
County or District	2018					2019				
	Ratio of old building		Ratio of dependent population		Vulnerability index	Ratio of old building		Ratio of dependent population		Vulnerability index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index		Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	0.345	0.2	0.291	0.9	0.512	0.348	0.2	0.304	0.9	0.512
Namdong-gu	0.516	0.6	0.187	0.5	0.498	0.524	0.7	0.193	0.5	0.580
Bupyeong-gu	0.528	0.8	0.190	0.5	0.661	0.536	0.8	0.197	0.5	0.661
Jung-gu	0.308	0.1	0.214	0.6	0.176	0.311	0.1	0.214	0.6	0.176
Dong-gu	0.522	0.7	0.263	0.8	0.834	0.533	0.8	0.273	0.9	1
Gyeyang-gu	0.486	0.5	0.164	0.2	0.163	0.500	0.5	0.172	0.3	0.248
Ganghwa-gun	0.440	0.4	0.357	1	0.759	0.434	0.4	0.369	1	0.759
Seo-gu	0.364	0.3	0.170	0.3	0.085	0.373	0.3	0.174	0.3	0.085
Michuhol-gu	0.655	1	0.215	0.7	0.993	0.646	1	0.223	0.7	0.993
Yeonsu-gu	0.556	0.9	0.164	0.2	0.488	0.586	0.9	0.168	0.3	0.573

크지 않다. 하지만 시군구마다 세부지표별 특징이 두드러지게 나타나는데, 연도별 특징을 살펴보면 노후건축물 비율의 경우 미추홀구가 2019년 기준 0.6462로 가장 크고, 중구가 0.3107로 가장 작다. 이를 통해 미추홀구는 20년 이상 노후건축물수가 다른 시군구보다 매우 많이 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 연도별 비율 변화에서도 강화군, 서구, 미추홀구를 제외한 모든 시군구에서 2016년 대비 노후건축물 비율이 증가하였다. 이 중에서 강화군은 2019년 신규 건축물수의 증가 폭이 2016년 대비 가장 컸기 때문에 타 시군구와 달리 노후건축물 비율이 감소했음을 알 수 있다. 그리고 의존인구수 비율에서는 2019년 기준 강화군이 0.369로 가장 큰데, 실제로 25,502명의 의존인구수 중에서 7세 이하 인구수는 2,095명, 65세 이상 인구수는 23,407명으로 10배 이상 차이가 난다. 이를 통해 앞으로도 인구의 노령화와 출산을 저하로 인해 의존인구수 중 고령인구의 비율이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 반대로 연수구는 2019년 기준 의존인구수 비율이 0.168로 10개 시군구 중 가장 낮고, 의존인구수의 구성에서도 7세 이하 인구수와 65세 이상 인구수가 각각 23,698명, 38,024명으로 1.6배밖에 차이가 나지 않기 때문에 인구의 고령화 문제는 10개 시군구 중 가장 양호하다.

두 세부지표를 통해 최종 산정된 연도별 Vulnerability 지수에서는 2016년 대비 2019년의 증가폭이 가장 큰 시군구는 동구이며, Vulnerability 지수도 가장 크다. 실제로 동구는 2016년과 비교해서 노후건축물 비율 지수는 0.6에서 0.8, 의존인구 비율 지수는 0.8에서 0.9로 증가하였다. 반대로 서구와 중구는 10개 시군구 중 Vulnerability 지수가 가장 작으며, 이중 중구는 2019년 기준 노후건축물 비율 지수는 0.1, 의존인구 비율 지수는 0.7에서 0.6으로 감소하여 10개 시군구 중 유일하게 2016년 대비 Vulnerability 지수가 감소하였다.

3.2.4 Capacity 항목 및 세부지표

홍수위험도 평가의 Capacity 항목은 QRE 위험 평가에서 7단계인 '현재 조치 또는 조치의 수준 평가'와 유사하며, 본 연구에서는 홍수위험을 저감하기 위해 시군구별로 수행한 노력이 반영될 수 있는 지표들로 Capacity 항목의 세부지표를 선정하였다. 세부지표는 각각 누적 방재예산액 비율, 방재시설 밀도, 소방·경찰관서 밀도, 병원 밀도로 구성되어 있다. 일반적으로 재난에 대한 정성적 평가를 수행할 때는 재난관리 4단계인 예방, 대비, 대응, 복구 중 특정 단계에 초점을 맞추어 세부지표를 구성한다. 하지만, 본 연구에서 제시한 홍수위험도 평가는 복원탄력성 강화를 위한 의사결정 지원이 목적이기 때문에 Capacity 항목의 세부지표를 재난관리 4단계 중 특정 단계에 초점을 맞추어 구성하지 않고, 복원탄력성 강화에 기여하는 세부지표들로 선정하였다.

누적 방재예산액 비율은 2012년부터 시군구별 [025재난방재민방위] 예산과 [141수자원] 예산의 누적합을 시군구별

면적으로 나누어 비율로 산정한 값이다. 누적 방재예산액은 방재예산액을 '기준연도 - 1'까지 누적하여 산정하며, 비율 개념으로 세부지표 지수를 산정함으로써 시군구별 면적에 대한 특성이 방재예산액 크기 비교에 반영될 수 있도록 하였다. 방재시설 밀도는 국가통계포털(<https://kosis.kr/>)에서 제공하는 도시계획현황 통계자료를 사용하였으며 지자체별 하천, 우수지, 저수지, 방수설비, 사방설비, 방조설비로 분류된 방재시설물을 집계하여 얻은 통계값으로 밀도를 산정하였다. 이때 일부 통계값은 시도 단위로 자료가 제공되어 대상 시군구를 특정할 수 없으므로, 이러한 통계값은 통계목록에서 언급되지 않는 시군구 수로 n 등분하여 분배하였다. 그밖에 소방·경찰관서 밀도와 병원 밀도도 시군구별 기본통계와 국가통계포털에서 제공하는 DB를 수집하여 다른 세부지표와 같이 시군구별 면적으로 나누어 밀도를 산정하였다. 세부지표별로 산정된 엔트로피 가중치는 누적 방재예산액 비율 0.413, 방재시설 밀도 0.196, 소방·경찰관서 밀도 0.117, 병원 밀도는 0.274로 각각 산정되었다. Table 5는 Capacity 항목의 세부지표별 원데이터와 세부지표 지수 및 Capacity 지수를 나타낸 것이며, Figs. 7과 8은 2016년과 2019년의 시군구별 Capacity 지수를 비교한 것이다.

Hazard, Exposure, Vulnerability 지수와 각각의 세부지표 지수는 모두 지수가 클수록 부정적이고, 작을수록 긍정적인 의미를 뜻한다. 하지만 Capacity 항목은 홍수위험도를 저감하고 복원탄력성을 강화하는 세부지표로 구성되어 있기 때문에 지수가 클수록 긍정적, 작을수록 부정적인 의미를 가진다. Capacity 항목을 구성하는 세부지표의 연도별 변화를 살펴보면 누적 방재예산액 밀도는 동구가 다른 9개 시군구와 비교하여 연도별로 가장 큰 증가세를 보이고 있다. 또한 누적 방재예산액의 특성상 2019년 기준 시군구별 세부지표 지수는 2016년 대비 모두 증가하였는데, 그중 남동구의 경우 2016년에는 서구보다 낮았지만 2017년부터 큰 폭으로 증가하여 2019년에는 10개 시군구 중 4번째로 세부지표 지수가 크다. 방재시설 밀도에서는 다른 시군구와 비교했을 때 동구가 4년 연속으로 가장 크며, 2018년에는 2017년 대비 중구, 강화군, 서구를 제외한 모든 시군구에서 방재시설 밀도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그 외 소방·경찰관서 밀도와 병원 밀도는 다른 지표와 달리 연도별 변화가 크진 않지만 그중에서 연수구에서는 2019년 기준 소방·경찰관서 밀도가 크게 증가하여 계양구를 추월하였고, 세부지표 지수도 0.5에서 0.6으로 증가하였다. 최종적으로 엔트로피 가중치와 min-max 표준화를 적용하여 산정한 Capacity 지수에서는 동구가 4년 연속 Capacity 지수가 가장 크며, 강화군은 2018년까지는 10개 시군구 중 Capacity 지수가 가장 작았지만, 2017년부터 꾸준히 증가하여 2019년에 옹진군을 추월하였다. Capacity 지수는 남동구가 가장 큰 폭으로 개선되었는데, 2019년 기준으로 2016년 대비 0.304 증가하였다.

Table 5. Detailed Indicators and Indices for Capacity Items in Cities and Counties (2016-2019)

County or District	2016								
	Cumulative disaster prevention budget ratio (1,000 won/ km^2)		Disaster prevention facility density (pcs/ km^2)		Density of firefighting and police officers (pcs/ km^2)		Hospital density (pcs/ km^2)		Capacity index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	496,817	0.4	0.056	0.2	0.116	0.3	0.180	0.1	0.080
Namdong-gu	606,275	0.5	0.175	0.6	0.353	0.7	15.230	0.7	0.529
Bupyeong-gu	821,681	0.6	0.247	0.9	0.624	0.8	26.358	1	0.792
Jung-gu	393,322	0.3	0.045	0.1	0.124	0.3	1.141	0.3	0.072
Dong-gu	4,180,113	1	1.391	1	0.862	1	17.105	0.8	1
Gyeyang-gu	148,418	0.1	0.229	0.8	0.242	0.6	10.264	0.6	0.305
Ganghwa-gun	245,334	0.2	0.104	0.3	0.046	0.1	0.258	0.2	0
Seo-gu	608,950	0.5	0.143	0.4	0.181	0.4	5.539	0.4	0.317
Michuhol-gu	908,237	0.7	0.400	0.9	0.724	0.9	24.790	0.9	0.827
Yeonsu-gu	157,886	0.1	0.219	0.7	0.200	0.5	8.138	0.5	0.225
County or District	2017								
	Cumulative disaster prevention budget ratio (1,000 won/ km^2)		Disaster prevention facility density (pcs/ km^2)		Density of firefighting and police officers (pcs/ km^2)		Hospital density (pcs/ km^2)		Capacity index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	542,151	0.4	0.056	0.2	0.116	0.3	0.191	0.1	0.080
Namdong-gu	855,781	0.7	0.175	0.6	0.370	0.7	15.706	0.7	0.641
Bupyeong-gu	1,075,437	0.7	0.247	0.9	0.624	0.8	26.514	1	0.848
Jung-gu	554,664	0.4	0.053	0.1	0.102	0.2	1.141	0.3	0.112
Dong-gu	5,433,393	1	1.391	1	0.862	1	17.249	0.8	1
Gyeyang-gu	186,391	0.1	0.229	0.8	0.242	0.6	10.439	0.6	0.305
Ganghwa-gun	320,501	0.2	0.104	0.3	0.046	0.1	0.263	0.2	0
Seo-gu	836,969	0.6	0.143	0.4	0.199	0.4	5.675	0.4	0.373
Michuhol-gu	1,183,706	0.8	0.400	0.9	0.724	0.9	25.434	0.9	0.883
Yeonsu-gu	220,003	0.1	0.219	0.7	0.220	0.5	8.618	0.5	0.225
County or District	2018								
	Cumulative disaster prevention budget ratio (1,000 won/ km^2)		Disaster prevention facility density (pcs/ km^2)		Density of firefighting and police officers (pcs/ km^2)		Hospital density (pcs/ km^2)		Capacity index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	596,866	0.5	0.047	0.1	0.116	0.3	0.186	0.1	0.109
Namdong-gu	1,175,137	0.8	0.142	0.4	0.370	0.7	16.287	0.7	0.644
Bupyeong-gu	1,581,709	0.8	0.189	0.7	0.624	0.8	26.576	1	0.851
Jung-gu	689,746	0.6	0.055	0.2	0.109	0.2	1.134	0.3	0.251
Dong-gu	7,234,234	1	1.160	1	0.862	1	17.393	0.8	1
Gyeyang-gu	315,694	0.2	0.188	0.6	0.242	0.6	10.417	0.6	0.308
Ganghwa-gun	386,946	0.3	0.104	0.3	0.049	0.1	0.261	0.2	0.056
Seo-gu	1,098,453	0.7	0.145	0.5	0.190	0.4	5.883	0.4	0.455
Michuhol-gu	1,742,231	0.9	0.244	0.8	0.724	0.9	25.555	0.9	0.912
Yeonsu-gu	290,279	0.2	0.181	0.6	0.220	0.5	9.058	0.5	0.255

Table 5. Continued

County or District	2019								
	Cumulative disaster prevention budget ratio (1,000 won/ km^2)		Disaster prevention facility density (pcs/ km^2)		Density of firefighting and police officers (pcs/ km^2)		Hospital density (pcs/ km^2)		Capacity index
	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	Raw DB	Index	
Ongjin-gun	641,742	0.5	0.044	0.1	0.116	0.3	0.186	0.1	0.109
Namdong-gu	1,730,776	0.9	0.273	0.9	0.370	0.7	16.834	0.7	0.833
Bupyeong-gu	2,121,341	0.9	0.172	0.5	0.624	0.8	26.420	1	0.854
Jung-gu	768,850	0.6	0.055	0.2	0.109	0.2	1.287	0.3	0.251
Dong-gu	9,197,936	1	1.078	1	0.862	1	17.536	0.8	1
Gyeyang-gu	460,488	0.3	0.176	0.6	0.242	0.6	10.483	0.6	0.364
Ganghwa-gun	461,160	0.4	0.104	0.3	0.049	0.1	0.261	0.2	0.112
Seo-gu	1,394,422	0.8	0.145	0.5	0.190	0.4	6.064	0.4	0.511
Michuhol-gu	2,320,380	0.9	0.221	0.7	0.724	0.9	25.877	0.9	0.886
Yeonsu-gu	386,742	0.3	0.170	0.5	0.280	0.6	9.338	0.5	0.300

Fig. 7. Capacity Index for Cities and Counties (2016)

Fig. 8. Capacity Index for Cities and Counties (2019)

3.3 항목별 지수를 활용한 시군구 평가

2016~2019년 동안 인천광역시 10개 시군구를 대상으로 연도별로 산정한 Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity 지수를 활용하면 홍수위험에 대응하는 시군구별 상황과 위험에 노출된 지표들의 변화를 살펴볼 수 있다. Fig. 9는 인천광역시 10개 시군구의 연도별 Hazard 지수(x축)와 Capacity 지수(y축)의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

Hazard 지수와 Capacity 지수를 0.5를 기준으로 구간을 나누어 연도별 지수의 변화를 살펴보면 어느 시군구에서 큰 피해가 발생했고, 이를 대비하기 위해 방재역량을 어느 정도 강화했는지 한눈에 알 수 있다. 예를 들어 Hazard 지수에서는 2018년도에 모든 시군구에서 큰 강우가 발생하였고, 그중에서 강화군과 중구는 3년(2016년, 2018년, 2019년)에 걸쳐서 큰 규모의 강우가 연달아 발생하였다.

홍수위험에 대처하기 위해 시군구별로 시행한 대응 및 조치는 Capacity 지수에서 나타나는데, 하위 50% 구간에서는 강화군과 중구, 서구에서 2016년 대비 2019년의 Capacity 지수가 눈에 띄게 증가하였다. 이 중에서 강화군은 시군구의 면적이 넓어 실제로 투자한 방재예산액 대비 누적 방재예산액 비율은 낮게 산정되었지만 꾸준한 투자로 Capacity 지수가 0.1 이상 증가하였다. 중구와 서구도 2016년부터 꾸준히 투자가 이루어져 서구의 경우 2019년 기준 상위 50% 구간에 진입하였다. 반면 옹진군은 하위구간에서 연도별 Capacity 지수의 변화가 가장 적다. 상위 50% 구간에서는 남동구의 변화가 가장 눈에 띄는데, 2016년에도 큰 규모의 방재예산액 투자가 있었지만, 2017년과 2018년에 큰 강우가 연달아 발생하면서 2019년 기준으로 Capacity 항목을 구성하는 4가지 세부지표 지수가 모두 크게 증가하였다. 반면 미추홀구는

Fig. 9. Annual Changes in Hazard & Capacity Index of Cities and counties in Incheon Metropolitan City

2018년부터 방재시설 밀도가 감소하면서, 2019년 기준 10개 시군구 중 유일하게 Capacity 지수가 감소하였다.

다음으로 Fig. 10은 인천광역시 10개 시군구의 연도별 Exposure 지수(x축)와 Vulnerability 지수(y축)의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. Exposure 지수와 Vulnerability 지수도 0.5를 기준으로 구간을 나누어 살펴보면 지역별로 홍수위험에 노출된 정도와 취약성을 파악할 수 있다. Exposure 지수부터 살펴보면 상위 50% 구간에 있는 시군구인 서구, 남동구, 부평구, 미추홀구 등은 실제로 건축물수와 인구수가 밀집되어 있으며, 서구를 제외하면 Vulnerability 항목에 해당하는 노후건축물 비율과 의존인구 비율도 높다. 또한 Exposure 지수가 연도별로 감소하고 있는 동구, 미추홀구, 부평구, 계양구 등은 출산을 저하로 인한 인구감소 영향을 직접적으로 받고 있다고 판단할 수 있다. Vulnerability 지수의 경우 2019년 기준 대다수의 시군구가 상위 50% 구간에 있으며, 연도별로 증가 추세를 보이고 있다. 하지만 강화군의 경우 적극적인 도시 개발을 수행하여 Vulnerability 지수가 4년 동안 0.759로 유지되고 있다. 또한 중구는 인천광역시 10개 시군구 중 유일하게 Vulnerability 지수가 감소하고 있는데, 이는 적극적인 도시 개발과 인구수 증가를 목표로 정책 방안을 수립하여 얻은 성과로 판단된다.

3.4 인천광역시 시군구별 홍수위험도 지수

인천광역시 시군구별 홍수위험도 지수는 시군구별 Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity 지수에 유클리드 거리를 적용하여 산정한다. 항목의 개수가 4개이기 때문에 유클리드 거리는 4차원 공간에서 산정되며, 유클리드 거리로 산정

Fig. 10. Annual Changes in Exposure & Vulnerability Index of Cities and Counties in Incheon Metropolitan City

Fig. 11. Results of Flood Risk Assessment of Cities and Counties in Incheon Metropolitan City

한 홍수위험도 지수는 0~2의 범위를 가진다. 유클리드 공간에서 홍수위험도 지수는 0에 가까울수록 안전하며, 2에 가까울수록 위험도가 큼을 의미한다. 이때 Capacity 지수는 다른 항목별 지수와 다르게 지수가 클수록 긍정적, 작을수록 부정적인 의미이므로 유클리드 거리에서 반전화하여 적용한다. Eq. (1)은 홍수위험도 평가에서 유클리드 거리를 적용한 산정 식을 나타낸 것이며, Fig. 11은 인천광역시 10개 시군구의 연도별 홍수위험도 지수를 나타낸 것이다.

Table 6. Relief Fund and Flood Risk Index of Cities and Counties in Incheon Metropolitan City

County or District	2016		2017		2018		2019	
	Relief fund (1,000 won)	Index	Relief fund (1,000 won)	Index	Relief fund (1,000 won)	Index	Relief fund (1,000 won)	Index
Ganghwa-gun	11,500	1.6576	-	1.4174	114,000	1.5999	6,737,971	1.6276
Michuhol-gu	9,000	1.2077	1,081,000	1.2353	42,000	1.3513	40,312	1.2029
Namdong-gu	7,000	1.0110	1,041,000	1.1689	-	1.2007	769,390	0.9818
Jung-gu	-	1.2925	21,000	1.1621	15,000	1.1337	207,492	1.1296
Seo-gu	11,500	1.1764	898,500	1.1370	88,500	1.3155	352,223	1.0937
Ongjin-gun	-	1.0947	1,000	1.1181	-	1.1639	861,147	1.0277
Bupyeong-gu	20,000	1.0610	977,000	1.0989	48,000	1.1132	135,534	0.9272
Yeonsu-gu	3,000	0.9961	14,500	1.0632	5,000	1.1406	53,875	1.0135
Dong-gu	-	0.8399	36,000	0.9759	1,000	1.0291	181,259	1.0079
Gyeyang-gu	-	0.8786	5,000	0.9190	101,250	0.9859	106,500	0.7645

$$D = \sqrt{(Hazard)^2 + (Exposure)^2 + (Vulnerability)^2 + (1 - Capacity)^2} \quad (1)$$

연도별 홍수위험도 지수를 살펴보면 지수 변동의 영향으로 어느 시군구가 홍수위험에 취약한지와 개선되었는지 여부를 파악할 수 있다. 2019년에는 강화군, 미추홀구, 중구, 서구 순으로 홍수위험도 지수가 크며, 하위권에서는 계양구, 부평구, 남동구, 동구 순으로 작다. 홍수위험도 지수는 4가지 항목의 평가 결과를 조합하여 산정된 결과이기 때문에 시군구별 의사 결정자들은 복원탄력성 강화에 대한 정책 방향 설정에 활용할 수 있다. 예를 들어 홍수위험도 지수가 상위권에 위치한 미추홀구의 경우 Vulnerability 항목에 해당하는 노후건축물 비율과 의존인구 비율이 지속적으로 증가하고 있으며, Capacity 지수도 감소하고 있으므로 향후 관련 지표를 개선하는 방향으로 정책을 수립해야 한다. 또한, 계양구의 경우에도 홍수위험도 지수는 가장 작지만, Capacity 지수는 하위권에 위치하므로 대규모 홍수피해가 발생할 위험에 대비하여 Capacity 지수의 개선이 필요하다.

실제로 Table 6은 인천광역시 10개 시군구의 2016~2019년 재해연보에 기재된 호우, 태풍에 대한 복구비와 홍수위험도 지수를 나타낸 것이다. 홍수위험도 지수가 가장 큰 강화군의 경우 2017년을 제외하고 연도별 홍수피해에 대한 복구비가 10개 시군구 중 최상위권에 위치한다. 반면, 동구의 경우 연도별로 집계된 복구비가 10개 시군구 중 하위권에 위치하는데, 이는 동구의 Capacity 지수가 4년 연속으로 가장 커서 피해저감 및 복원탄력성 강화에 기여했기 때문이다. 그리고 2017~2019년 동안 홍수위험도 지수가 가장 작았던 계양구에서 2018년 복구비가 타 시군구보다 크게 발생한 이유는 앞에서 언급했듯이 Capacity 지수가 0.308로 낮은 상태에서 큰 규모의 호우 발생했기 때문이다. 결론적으로 세부지표별, 항목별 지수와 홍수위험도 평가 결과를 활용하면 시군구별 특성과 상황에 맞는 방재 대책을 수립할 수 있으며, 복원탄력성 강화를 위한 의사결정을 지원할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인천광역시 시군구별 복원탄력성 강화에 대한 의사결정을 지원하기 위해 IBA 기반 홍수위험도 평가 방법을 제시하였다. 홍수위험도 평가는 Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity 4가지 항목과 11개의 세부지표로 구성되어 있다. 2016년부터 2019년까지 인천광역시 10개 시군구를 대상으로 홍수위험도 평가를 진행하여 다음과 같은 시사점을 얻을 수 있었다.

첫째는 구간별 점수화 기법을 이용한 세부지표 지수 산정의 유용함이다. 기존에 국내에서 수행된 정성적 위험도 평가에서는 min-max 표준화나 Z-score 기법을 사용하여 세부지표의 원데이터를 지수화하는 것이 정석처럼 사용되었다. 하지만 일부 세부지표의 경우 지수화를 통해 산정된 결과가 정규분포를 따르지 않아 데이터 분포에서 치우침이 발생하였고 그 결과 최종적으로 산정되는 정성적 위험도 평가 결과도 왜곡되는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 root변환이나 log변환을 적용 후 지수화하는 방법도 시도되었으나, 특정 세부지표의 경우 변환을 적용해도 정규화가 되지 않는 사례가 있었다. 본 연구에서 적용한 구간별 점수화 기법은 세부지표별 지수가 정규분포를 따르지는 않지만, 데이터의 치우침이 없이 지수가 고르게 분포할 수 있도록 조정해준다. 세부지표 단계에서 구간별 점수화 기법을 사용하여 얻은 효과는 본 연구의 홍수위험도 평가에서 제대로 나타난다.

둘째는 IBA 기반 홍수위험도 평가 기법을 사용하면 홍수 위험에 대응하는 시군구별 상황과 위험에 노출된 지표들의 변화를 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 9에서는 Hazard 지수와 Capacity 지수의 변화를 통해 위험에 대처하는 시군구들의 연도별 상황을 파악할 수 있었고 Fig. 10에서는 시군구별로 위험에 노출된 지표들의 상황을 Exposure 지수와 Vulnerability 지수로 확인할 수 있었다. 시군구별 방재 대책을 수립하는

의사결정자들은 홍수위험도 지수뿐만 아니라 항목별 세부 지표별 지수의 변화를 참고하여 합리적인 의사결정을 내릴 수 있다.

세 번째는 QRE 도구와 함께 홍수위험도 평가를 시군구별 복원탄력성 강화를 위한 의사결정 지원 도구로 사용할 수 있다. 인천광역시 2020년에 UNDRR로부터 국제안전도시로 인증을 받았지만 복원탄력성 강화에 대한 의사결정을 지원할 수 있는 도구는 QRE 위험 평가 정도였다. 본 연구에서 제시한 홍수위험도 평가는 인천광역시에서 연도별, 시군구별로 세분화된 위험도 평가 결과를 제공할 수 있기 때문에 복원탄력성 강화를 위한 유용한 평가도구로 활용할 수 있다.

이번 연구에서 제시한 IBA 기반 홍수위험도 평가에서는 시군구 단위 통계자료 및 공간분석자료를 기반으로 평가가 이루어졌다. 따라서 시군구 내에서 홍수위험에 취약한 지역의 속성값만을 선별하지는 못해 일부 시군구의 홍수위험도 지수는 재해연보의 복원비와 차이가 있었다. 추후 연구에서는 격자 단위 자료와 홍수위험지도 등을 활용하여 개선된 홍수위험도 평가를 수행해볼 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 지원으로 수행되었음(과제번호 21AWMP-B121100-06).

References

- Aslam, P., Janne, P., Pannawadee S., and Ariela, M. (2020). *Disaster risk reduction in singapore*. ADPC & UNDRR.
- Bollin, C., Cárdenas, C., Hahn, H., and Vatsa, K.S. (2003). *Disaster risk management by communities and local governments*. Washington D.C.: Inter-American Development Bank. Retrieved from <https://publications.iadb.org/handle/11319/4642>
- Cai, H., Lam, N.S.N., Zou, L., Qiang, Y., and Li, K. (2016). Assessing community resilience to coastal hazards in the lower mississippi river basin. *Water*, Vol. 8, No. 2, Article No. 46, pp. 1-18.
- Choi, C.H., Kim, Y.S., Kim, J.S., Kim, D.H., Kim, J.W., and Kim, H.S. (2018). Indicator development and evaluation of storm and flood resilience using big data analysis: (2) Evaluation of resilience, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 109-123.
- Environment and Climate Policy Division. (2019). *Incheon Metropolitan City Climate Change Report 2019*.
- Han, S.R., Kang, N.R., and Lee, C.S. (2015). Disaster risk evaluation for urban areas under composite hazard factors. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 33-43.
- Kang, S.J., and Cho, S.H. (2013). *A policy implication for community resilience from natural disasters*. Gyeonggi Research Institute.
- Kim, J.G., Lim, J.H., and Lee, S.H. (2015). *A research on urban resilience for urban regeneration*. Lang & Housing Institute.
- Kim, J.S., Sung, H.H., and Choi, G.Y. (2013). Spatial patterns of urban flood vulnerability in Seoul. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 19, No. 4, pp. 615-626.
- Kim, S.S., Jeong, G.S., Lee, J.W., Park, Y.J., and Kim, E.M. (2012). Inundation vulnerability map generation for storm-flood disaster vulnerability assessment. *Proceedings of 2012 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 415-418.
- Lee, T.S. (2021). *Incheon metropolitan city UNDRR international safety city certification and disaster safety policy development plan*. Incheon Metropolitan City & THE Incheon INSTITUTE.
- Lili, X., Jiajia, W., Yanbo, Z., and Jun, Z. (2020). Quantitative Risk Analysis of a Rainfall-Induced Complex Landslide in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir, China. *Int J Disaster Risk Sci*, Vol. 11, No. 3, pp. 347-363.
- Mark, T., and Mark, B. (2016). *National scale exposure analysis for river flooding in low lying areas*. Caribbean Handbook on Risk Information Management.
- UN Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2020). *Disaster resilience scorecard assessment: Case studies and lessons learned from north macedonia*. Romania, and Serbia.
- Wang, W.J., Kim, S.J., Kim, K.T., Lee, C.G., and Kim, H.S. (2020). Analysis of applicability of grid-based spatial analysis data for flood risk assessment. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 6, pp. 399-406.
- World Economic Forum. (2013). *Global Risks 2013* (8th ed.).
- Yoon, Y.B. (2018). *A study on ways to strengthen Ulsan city's resilience*. Ulsan DEVELOPMENT INSTITUTE.

Received	June 14, 2021
Revised	June 17, 2021
Accepted	June 28, 2021