

돌발홍수 지수를 이용한 북한 홍수 위험도 평가 - 임진강 유역을 중심으로 -

An Assessment of Flooding Risk Using Flash Flood Index in North Korea - Focus on Imjin Basin -

곽 창 재* / 최 우 정** / 조 재 응***

Kwak, Chang Jae / Choi, Woo Jung / Cho, Jae Woong

Abstract

The most of natural disasters that occur in North Korea are flood, typhoon and damage from heavy rain. The damage caused by those disasters since the mid-1990s is aggravating North Korea's economic difficulties every year. By recognizing the seriousness of the damages from the floods, the North Korean government has carried out the river maintenance, farmland restoration, land readjustment and afforestation projects since the last-1990s, but it has failed preventing the damages. In order to estimate the degree of flood risk regarding damage from chronic floods that occur inveterately in North Korea, this research conducted an additional simulation for rainfall-runoff analysis to reflect the characteristics of the ungauged area that make foreign countries hard to obtain the hydrological data and do not open the topographical data to public. In addition, this research estimates the degree of flood risk by selecting the factors of the hazard, exposure and vulnerability by following the standards of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Keywords : ungauged area, hazard, exposure, vulnerability, flood risk

요 지

북한의 대규모 자연재난은 홍수와 태풍 그리고 집중호우로 인한 수해피해가 대부분이며 이러한 피해는 1990년대 중반부터 해마다 북한의 경제난을 악화시키고 있다. 북한 당국도 수해피해의 심각성을 인식하여, 1990년대 말부터 하천정리, 농경지 복구, 토지정리사업, 조림사업 등을 실시하였으나, 계속되는 수해피해를 막지 못하고 있다. 본 연구는 상습적으로 발생하는 북한의 홍수피해에 대한 위험도를 산정하기 위해 일반적인 위험도 평가과정은 동일하게 유지하되 대외적으로 수문자료 취득이 힘들고 지형자료가 공개되지 않은 미계측지역이라는 유역특성을 반영하여 강우-유출에 대한 모의를 추가적으로 실시하였다. 또한, 위험도 평가는 국제기구(IPCC)의 기준에 따라 홍수에 대한 위험성과 노출성, 취약성 인자들을 선정하여 홍수 위험도를 판단하였다.

핵심용어 : 미계측지역, 위험성, 노출성, 취약성, 홍수 위험도

* 교신저자, 국립재난안전연구원 책임연구원 (e-mail: water203@korea.kr, Tel: 82-2-2078-7728)

Corresponding Author, Researcher, Disaster Research Dept., National Disaster Management Institute, 136 Mapo-daero, Mapo-gu, Seoul 121-719, Korea

** 국립재난안전연구원 시설연구관 (e-mail: cwj3464@korea.kr)

Researcher, Disaster Research Dept., National Disaster Management Institute, 136 Mapo-daero, Mapo-gu, Seoul 121-719, Korea

*** 국립재난안전연구원 책임연구원 (e-mail: jwcho1005@gmail.com)

Researcher, Disaster Research Dept., National Disaster Management Institute, 136 Mapo-daero, Mapo-gu, Seoul 121-719, Korea

1. 서 론

1990년대 중반 이후 북한의 대표적인 홍수피해는 150억 달러의 재산피해와 520만 명의 이재민이 발생한 1995년 '100년만의 대홍수'와 1996년 홍수로 인해 8개도와 117개 시군은 22억 달러의 피해, 1997년에는 해일이 발생하면서 46만 5천여 정보의 농경지가 피해를 입었으며, 1998년 집중호우로 인해 7만 4천여 정보의 농경지가 침수되고, 4,250여 세대의 주택이 침수·파괴되었으며, 180여 곳의 탄광이 침수되는 피해로 4년간 연속해서 홍수피해가 계속되었다. 2000년 8월의 집중호우, 그리고 9월의 태풍 '프라피룬'과 '사오마이'로 함경남도 지역 13개 시·군에서 주택 1만여 채가 파손되고, 이재민 14만 7천여 명이 발생하였다. 2001년 10월 폭우와 해일로 강원도와 함경도를 비롯한 동해안 지역에서 114명이 사망, 84명이 중상, 33명이 실종되는 인명피해가 발생하였다. 2003년 장마로는 큰 피해를 입지 않았으나, 2004년과 2005년 집중호우로 인해 각각 24명, 193명이 사망하였다. 2006년 7월 집중호우로 278명의 사망자와 295명의 행방불명자, 3,042명의 부상자, 28,747가구의 주택 파손 등 대규모 피해를 입었다. 이처럼 북한에서는 연이은 자연재난으로 인한 주거지와 농경지, 산업시설이 침수·유실되는 등 심각한 피해를 입고 있다(CRED*, IFRC**).

1996년을 비롯하여 1998년, 1999년에 연이어 대규모 홍수가 발생했던 임진강 유역은 유역면적의 대부분이 군사지역으로 접근이 제한되어 있고 유역면적의 약 63% 가량이 북한 지역으로 상류에서 발생하는 홍수를 사전에 인지하지 못하는 것은 물론 강우량과 같은 기본적인 수문현황도 알 수 없는 관계로 홍수대책의 수립에 근본적인 한계를 지니고 있는 미계측지역이다. 최근 2009년에는 임진강 황강댐의 무단방류로 인해 경기도 연천군 일대에서 야영을 하던 6명이 실종되어 사망하는 사고가 발생하였고, 2012년에도 예고 없는 방류 정보에 대피소동이 일어난 적이 있다. 이와 같이 임진강 유역과 같은 공유하천에서는 돌발적으로 발생하는 홍수에 대한 댐의 저수능력이 떨어질 경우 방류를 통한 미봉책이 전부라고 볼 수 있어 무단방류로 인한 인명피해 및 손해가 발생에 노출되어 있다. 따라서, 북한의 무단방류 등 홍수피해에 대한 대응하기 위해서는 북한에서 발생하는 홍수피해에 대한 위험도를 평가하고 예방차원의 모니터링 시도와 통일대비 선제적인 대응책 마련계획 수립이 요구된다.

* 피해이력연구센터(CRED: Center for Research on the Epidemiology of Disaster)

** 국제적십자사(IFRC: International Federation Red Cross and Red Crescent Societies)

북한의 홍수에 대한 연구를 살펴보면 국지홍수연구에 있어 시공간적 특성을 지닌 강우를 이용한 기상학적 관점에서의 연구들이 선행되어져 왔으며 최근에는 레이더 강우를 활용한 돌발홍수를 수문학적 관점에서 과거 홍수사상의 유출량 자료 등을 이용하여 지역별 홍수특성을 이해하고자 하는 연구들이 수행되어 왔다. 과거의 홍수사상에 대한 유출수문곡선의 특성을 분석하여 돌발홍수의 심도를 평가하고자, Bhaskar et al. (2000)은 미국 켄터키 동부 지방에서 발생하였던 30개의 돌발홍수사상에 대하여 유출수문곡선의 상승부경사, 홍수량비, 홍수반응시간을 이용하여 돌발홍수지수를 산정하였다. Bhaskar가 제시한 방법을 적용하여 Jung (2000)은 보청천 유역의 홍수사상에 대해 돌발홍수지수를 산정한 바 있으며, Kim and Kim (2008)은 한강유역의 과거 101개의 홍수사상에 대한 돌발홍수지수를 산정하였다. Wi et al. (2008)은 한강 및 설마천 유역의 실측자료를 이용하여 기존의 돌발홍수지수를 보완한 종합홍수지수를 통해 홍수의 심도를 유역별로 상대평가하였다. Kim et al. (2009)은 유역의 실측강우에 대한 유출곡선 및 돌발홍수지수를 산정하여 강우와 유출특성과의 관계를 분석하였고, 과거 강우자료를 이용하여 각 빈도별 지속시간별 확률강우량에 대한 유출수문곡선을 바탕으로 돌발홍수지수를 산정하고 돌발홍수지수-지속시간-빈도 관계곡선을 제시하였으며(Kim et al., 2010), 모의된 유출수문곡선의 홍수반응시간을 제외한 상승부경사와 홍수량비를 이용하여 산정한 돌발홍수지수를 기존 3개의 상대심도로 산정한 돌발홍수지수와 비교하였다(Kim et al., 2012).

2000년 이후에는 유역의 홍수발생 원인과 현상을 종합하여 미래의 홍수위험발생 양상을 정량적인 수치로 나타낼 수 있는 다양한 지수가 개발되고 있다. 국내의 경우, 수자원장기종합계획(MLTM, 2001)에서는 치수안전도 설정을 위한 방향을 제시하여, 국내에 처음으로 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)라는 개념을 도입하였으며, 이후에 Kim and Kim (2003)는 기존 PFD의 구성요소 중 위험성 요소를 구성하는 부분요소인 가능성 요소와 방어능력 요소를 서로 독립적인 요소로 판단하여 사용하는 수정 PFD 방법을 제시하였다. UNISDR (2004) 보고서에서는 위험은 위험성과 취약성을 그 지역의 역량으로 나누어 평가해야 한다고 기술하였고, Kron (2003)은 자연재해 중 홍수와 관련된 홍수사상 또는 홍수사상의 발생확률을 나타내는 재해위험성(Hazard), 홍수위험지역에 있는 경제적 자산이나 인명의 노출성(Exposure), 그리고 홍수 방어능력의 부족을 의미하는 취약성(Vulnerability) 등 세

가지 요소들의 곱으로 홍수 위험도(Flood Risk)를 표현할 수 있다고 하였다. 미국의 대표적인 평가기법인 FEMA (2011)의 홍수보험프로그램(National Flood Insurance Program, NFIP)에서는, 100년 빈도 홍수를 기준으로 홍수터를 설정하여 홍수터 밖의 지역을 각각 등급화하고, 이에 따라 하천공간의 개발여부 결정 및 지역의 위험도에 따른 요율을 조절하며, 주정부차원에서의 하천공간 및 홍수터에 대한 통합적 관리가 이루어지고 있다. 유럽에서는 ESPON 1.3.1 Project (The European Spatial Planning Observation Network)를 통하여 지역별 위험 발생확률, 재난의 강도와 취약도를 조정한 위험도 지도를 제시하고, 취약성은 지역의 1인당 GDP, 인구밀도, 대응능력 등의 가중 합으로 계산하여, 유럽 전역을 지수화 하였다(GTK, 2006). Merabtene et al. (2004)은 치수계획을 위하여, 인구, 재산, 도시화율, 사회기반시설 등의 잠재성 요소와 홍수피해 발생가능성 및 이에 대한 방어능력 정도를 나타내는 홍수피해액, 그리고 확률강우량, 하천개수율, 홍수조절 용량 등의 위험성 요소로 구성되는 홍수위험도 지표를 제시하였고, Ologunorisa (2004)는 홍수취약성을 물리적 특성에 따라 구분하고 홍수위험지역을 심각한 지역, 복구된 지역, 낮은 홍수위험 지역으로 분류하여 나이지리아 삼각주지역에 맞는 홍수완화 전략을 제시하였다. 또한 UNDP (2004)에서는 국가간 자연재해에 노출된 정도, 취약성 및 위험도 사이의 비교평가를 위하여, 각종 자연재해로부터의 사망자수를 기초자료로 자연재해에 대응하는 국가 간의 상대적 취약성을 지수화한 재해위험지표(Disaster Risk Index, DRI)를 개발하였다.

본 연구는 남북한 공유하천으로 유역의 상당부분이 미계측지역인 임진강의 홍수 위험에 대한 평가를 실시하고자 국제기준에 제시하는 위험도를 평가 방법에 따라 홍수에 대한 위험성, 노출성, 취약성 지표를 추출한 것이다. 각 지표의 선정 및 추출 방법은 해당 유역의 기상학적 요소와 인문·사회학적 요소의 통계자료를 사용하였으며 가용 자료의 변동성과 유역의 여건에 따라 적합한 자료를 중심으로 활용하였다. 홍수에 대한 각 지표별 평가결과는 정성·정량적인 관점에서 상대적인 정도와 수치로 비교하였으며, 마지막으로 홍수 위험도를 각 지표의 결과를 토대로 평가하였다.

2. 미계측지역 강우-유출 해석

2.1 지형형태학적 순간단위도(GIUH)

Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)는 무한하게 많은

수로 구성된 강우 입자가 유역 전반에 걸쳐 동시에 떨어졌을 때 각각의 강우 입자가 유역의 출구에 도달하는 데 필요한 시간의 확률밀도함수를 유역출구에서의 수문곡선으로 가정하였다. 이를 바탕으로 유역 출구에서 순간단위도를 Eq. (1)과 같이 표현하였다.

$$IUH = \frac{d\theta\Omega(t)}{dt} = \sum_{i=0}^{\Omega} \theta_i(0) \cdot \frac{d\Phi_i\Omega(t)}{dt} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 $\theta_i(0)$ 는 초기확률로 i 차 하천 또는 i 차 하천 유역에 임의의 강우 입자가 떨어질 확률을 의미한다. 초기확률은 전체유역면적에 대한 i 차 하천의 직접유출면적 비율로 정의할 수 있으며 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_i(0) = \frac{A_i^*}{A_T} \quad (2)$$

여기서, A_i^* 는 i 차 하천유역의 직접유출면적이고, A_T 는 전체유역면적이다.

Eq. (1)의 $\Phi_{ij}(t)$ 항은 강우 입자가 i 차 하천에서 j 차 하천으로 이동하는 천이확률 p_{ij} 와 평균대기시간의 역수 λ_i 의 함수로 나타낼 수 있으며, Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)는 3차 하천에 대하여 각 변수들을 길이비, 면적비, 분기비, 1차 하천의 평균길이 및 유속으로 나타내었다. 또한 Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)는 RV-GIUH의 순위론 적용을 위하여 침투유량과 침투발생시간을 Eq. (3)과 같은 간략식으로 나타내었다. Ham et al. (2008)은 Eq. (1)을 4차 하천에 대하여 유도하였으며, 유도된 결과와 RV-GIUH의 간략식을 사용하여 단위도를 산정할 수 있다.

$$q_p = \frac{1.31}{L_\Omega} R_L^{0.43} v \quad (3)$$

$$t_p = \frac{0.44L_\Omega}{v} \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} \quad (4)$$

여기서, L_Ω 은 최고차 하천 길이이고, v 는 대상유역의 유속이다.

2.2 돌발홍수지수

돌발홍수는 짧은 시간동안에 많은 강우가 집중될 때 주로 경사가 급한 계곡에서 많이 발생하며 강우가 계곡의 하천으로 모여 수위가 급상승하게 되면 흐름의 앞부분에 큰 파가 형성되어 계곡을 따라 하류로 순식간에 흘러가는 것과 같은 것이라고 할 수 있다. 이때 수중에 흙이나 자갈, 바위가 포함된 토석류를 형성하여 피해를 가중시킬 수 있

다. 돌발홍수가 발생하는 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 대개는 제한된 지역에 집중된 호우로 발생하거나, 비구름이 정체되거나 그 부근에서만 움직이는 게릴라성 호우나 태풍 등에 의한 높은 강도의 호우 때문에 발생하며 댐 파괴나 제방붕괴 등의 최악의 홍수피해를 발생시키기도 한다(Jung, 2000).

미계측지역에서 빈도와 지속기간별 확률강우량에 의해 모의된 유출수문곡선의 상승부경사(K), 홍수량비(M), 초과홍수지속시간(D) 등을 고려하여 각각의 확률홍수사상에 대해 돌발홍수지수 결과를 도출할 수 있다. 돌발홍수지수 산정을 위한 3가지 형태의 심도계수들의 무차원 지수화 방법은 기존의 연구에서 제시한 방법들을 참고하여 분석대상 최댓값에 대한 비로 산정할 수 있다.

2.2.1 유출수문곡선의 상승부경사(K)

기본적으로 그 지역의 지형학적 특성을 내포하고 있는 유출수문곡선의 상승부 기울기는 상승부의 경사도 값으로 나타낼 수 있으므로, 유출수문곡선의 상승곡선은 Bhaskar et al. (2000)에서 제시한 Eq. (5)와 같은 형태의 일반적인 지수식으로 나타내며, 상승부 경사 K 값은 Eq. (6)을 이용하여 산정할 수 있다. Eq. (5)에서 K 값이 증가하면 t 시간 후에 엄청난 크기의 홍수량이 발생하게 되며 하도에 큰 영향을 미치게 되어 돌발홍수의 발생가능성이 커질 수 있다.

$$Q = Q_0 e^{Kt} \quad (5)$$

$$K = 24 \ln(Q_t / Q_0) / t \quad (6)$$

여기서, Q_0 는 초기유량, Q_t 는 홍수반응시간 T_p 에 가까운 시간 t 에서의 유량, K 는 상승곡선 기울기(/day), t 는 시간(hr)이다.

2.2.2 홍수량비(M)

홍수량비(M)는 유출수문곡선에 대한 첨두홍수량과 평균유량의 비이며, 해당 지역의 평균유량과 비교하여 얼마나 큰 홍수량이 발생하였는지를 파악 할 수 있는 인자로서, Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = Q_{\max} / Q_a \quad (7)$$

여기서, Q_{\max} 는 첨두홍수량, Q_a 는 장기간의 평균유량이다.

기존의 돌발홍수지수 산정법에 사용했던 홍수량비는 장기간의 평균유출량에 대한 각 홍수사상의 첨두홍수량에 대한 비를 의미한다. 그러나 미계측지역에서는 장기유

출량의 실측값이 없으며, 또한 국내 여건상 소유역이 아니라 하더라도 실제 장기유출량을 실측하고 있는 유역은 많지 않다. 따라서, 장기유출모형을 사용하여 모의되는 결과는 적용하는 매개변수에 따라 다르게 산정되므로 결과의 불확실성이 높을 수 있다.

장기유출량에 의한 홍수량비 산정의 불확실성에 대한 대안으로 Eq. (8)과 같이 Jo et al. (2013)이 제시한 홍수량비를 한계유량 Q_b 에 대한 첨두유량 Q_p 의 비를 이용하여 홍수량 비에 대한 심도계수 M 을 산정할 수 있다.

$$M = Q_p / Q_b \quad (8)$$

여기서, 집중호우 발생시 제내지의 피해발생 가능성을 나타내는 한계유량(Threshold Discharge)을 Henderson (1961)이 제시한 초기 홍수를 유발하는 조건인 강턱유량(Bankfull Discharge)의 개념을 활용한다면 강턱유량은 자연하천에서 실제 홍수터 표고까지의 강턱을 월류하지 않고 흐르는 유량을 말하며(Williams, 1978), 강턱유량보다 큰 홍수량은 제내지보다 높은 홍수위를 형성하여 제내지에 침수피해를 유발하는 요소가 될 것이다. 이러한 강턱유량은 현장자료를 이용하여 결정할 수 있으나, 현장에서 강턱유량이나 수심의 구별이 어려운 관계로 특정 재현기간별 유량으로 산정하는 연구들이 많이 수행되었다(Dury, 1961; Williams, 1978; Leopold, 1994). 이에 따라 Hey (1994)와 Riley (1998)는 2년 빈도의 유량을 강턱유량으로 제시하였으며, 국내에서도 Lee and Lee (2003)는 섬강의 문막 수위관측소 자료를 분석하여 1.8년 빈도 유량을 강턱유량으로 제시하였고, Im et al. (2006)도 2년 빈도의 유량을 강턱유량으로 제시한 바 있다. 따라서, 임진강 유역과 같은 미계측지역에서 한계유량에 해당하는 강턱유량은 2년 빈도 홍수유량으로 가정할 수 있을 것이다.

한계유량을 이용한 홍수량비에 대한 심도계수 M 값은 유역의 침수위험 가능성이 있는 한계유량에 대해 발생한 홍수의 상대비를 의미하게 되고 M 이 증가하면 제내지의 침수를 유발할 가능성이 있는 큰 홍수량이 발생하여 홍수 피해가 가중될 가능성이 높다고 할 수 있다.

2.2.3 초과홍수지속시간(D)

홍수반응시간 T_p 는 유출수문곡선으로부터 직접 산정할 수 있으며, 홍수사상의 시작과 첨두홍수량이 발생한 시간으로 정의된다. 짧은 홍수반응시간은 높은 유출 속도를 갖는 일반적인 돌발홍수와 관련이 있으며 이러한 관점에서 작은 값의 홍수반응 시간은 높은 상대심도를 갖게 된다. T_p 의 단위는 시간(hr)이며 값이 작으면 작을수록

홍수 유출속도가 높다는 것을 의미한다. 그러나 홍수유출 수문곡선의 짧은 홍수반응시간이 유출속도가 빠른 홍수와 관련이 있으므로, 상승부 경사 K 와 홍수반응시간 T_p 는 유사한 특성을 중복적으로 나타낼 수 있다(Kim et al, 2012). Jo et al. (2013)은 홍수반응시간 T_p 를 대신하여 한계유량을 초과하는 홍수지속시간인 초과홍수 지속시간에 대한 새로운 심도계수인 D 를 제시한 바 있다. Eq. (9)는 한계유량 이상의 홍수발생 시작시간 T_s 로부터 종료시간 T_e 까지 시간으로써 산정된 초과홍수지속시간 심도계수 D 가 길어지면 체내지의 침수를 유발할 수 있는 한계유량을 초과하는 홍수가 오랜 시간 지속됨을 의미하여 홍수피해가 증가될 가능성이 커지게 되는 것이다.

$$D = T_e - T_s \quad (9)$$

2.2.4 상대심도지수

Eq. (6)의 유출수문곡선의 상승부 경사에 대한 심도계수 K 와 Eq. (8)에 의한 홍수량의 비에 대한 심도계수 M , 그리고 Eq. (9)의 초과홍수에 대한 지속시간의 심도계수인 D 를 활용하여 각 모의 조건에 대한 심도계수(K , M , D)의 상대심도를 정량화하기 위해서 각 심도계수에 대해 최대 상승부 경사(K_{max}), 홍수량 비(M_{max}), 초과홍수지속시간(D_{max})에 대한 비를 다음과 같이 지수화 할 수 있다.

$$RK = K_i / K_{max} \quad RM = M_i / M_{max} \quad RD = D_i / D_{max} \quad (10)$$

여기서, 첨자 i 는 각 모의조건별 심도계수의 수치를 의미하며, RK , RM , RD 는 각각의 심도계수에 대한 상대심도 지수를 의미한다.

2.2.5 돌발홍수지수(FFI)

각 심도지수에 대한 상대심도지수를 산술평균하여 백분율을 취하면 다음 Eq. (11)과 같이 돌발홍수지수를 산정할 수 있고 돌발홍수지수를 홍수 위험성 지표로 활용할 수 있다.

$$FFI = (RK + RM + RD) / 3 \times 100 (\%) \quad (11)$$

3. 미계측 지역 홍수 위험도 평가

3.1 위험도 평가의 정의

위험도는 위험성, 노출성, 취약성 지표에 의해 산출되므로 각 지표에 대한 의미 및 정의가 분명해야 한다.

UNISDR (2009)의 위험도 평가를 포함한 각 지표에 대해 위험도 평가(Risk Assessment)에 대한 보고서에서는

“어떠한 위험이 발생할지를 분석하고 위험에 따른 수준 및 범위를 평가하여 이해당사자가 수용할만한 위험관리 계획을 수립하는 과정을 말하고, 위험성(Hazard)은 재해의 유발에 직접적인 영향을 주는 요소이다. 노출성(Exposure)은 재해 발생시 위험지역에 위치하여 피해를 입을 수 있는 요소(위험지역 내 재산, 인구 등)이며, 취약성(Vulnerability)은 재난의 발생에 밀접한 관계를 가지며 피해를 쉽게 받을 수 있는 요소(지형적, 사회적, 경제적, 환경적 요소)이다”라고 정의하고 있다.

3.2 지표의 표준화

지표를 표준화하는 방법에는 다양한 방법이 있으며, 가장 쉽게 산정할 수 있는 순위 방법은 순위 정렬(Ranking) 방법으로 단순 나열하는 방법이다. 정렬 방법은 이상치나 자료의 분포 특성 등을 전혀 고려하지 않기 때문에 일반적인 통계분석에서는 잘 이용되지 않는다. Jain et al. (2005)은 지표의 표준화 방법들을 분류하여 각 표준화 방법에 대한 비교를 통해 특징을 설명하였다. 가장 대표적으로 사용되는 표준화 방법에는 Z-Score 방법과 Rescaling 방법이 있다. Z-Score 방법은 원점수의 상대적 위치를 알려주는 표준점수의 일종으로 원점수의 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만드는 방법으로서 통계학적으로 표준정규 분포의 의미를 가지는 Z 값은 정규분포의 평균 μ 와 임의의 값 x 사이의 실제 차이를 표준편차 σ 의 배수로 표현한 상대적인 가치 척도이며 Eq. (12)로 표현된다.

$$Z = (x - \mu) / \sigma \quad (12)$$

Z-Score 방법의 결과는 0을 중심으로 값의 분포가 이루어지므로 음의 값이 발생하여 해당값의 수준을 직관적으로 파악하기 어려움이 있기 때문에 McCall (1923)은 Z-Score에 10을 곱하여 50을 더해주어 평균 50, 표준편차가 10인 분포로 전환하는 T-Score를 제시하였다. Z-Score가 정상분포에 가까우면 $-3 \leq Z \leq 3$ 의 값을 가지므로 여기에서 얻어진 T-Score는 통상적으로 20~80 사이의 값을 갖게 되어 전통적인 100점 단위와 유사하게 된다. T-Score의 산정방식은 Eq. (13)과 같다.

$$T = 10 \times (x - \mu) / \sigma + 50 \quad (13)$$

3.3 엔트로피(Entropy) 가중치 산정

엔트로피 가중치 추정방법은 대안과 속성을 많이 포함하는 현실적인 다기준 의사결정 문제에 대해 의사결정권자가 비교적 이해하기 쉬운 정보이론 방법을 적용하는 것

으로, 사용자 주관에 배제되고, 이용된 지표의 속성 정보만을 이용하여 가중치를 산정하는 방법이다. 북한 홍수 위험도의 각 지표에 대해 평가자의 주관적 개입으로 인한 항목 간 평가의 왜곡을 방지하기 위하여 엔트로피 이론을 이용한 가중치를 부여하였다.

4. 임진강 유역의 홍수 위험도 평가

4.1 위험도 평가를 위한 자료

Table 1은 북한의 홍수 위험도 평가를 위해 국제기관 및 국내 정부기관을 통해 수집한 기상학적인 요소와 인문·사회학적인 요소의 통계자료이다. 북한지역의 국제적인 상황과 폐쇄적인 국가정책으로 인해 관련된 통계자료가 많지 않으며, 신뢰성도 떨어지므로 시간의 변화에 대한 변동성이 작은 노출성과 취약성 지표의 경우는 통계자료를 그대로 사용하였지만 시간에 따른 변동성이 큰 위험성 지표인 강우량의 경우 강우량을 토대로 유역별 강우-유출을 모의하는 방식을 채택하였다.

4.2 임진강 유역의 홍수 위험성

4.2.1 홍수 위험성 지표

남북한의 홍수유형을 불특정홍수(특별히 구분 짓지 않

는 홍수), 돌발홍수(단시간의 폭우로 인해 내륙에 물이 급격히 차오르는 홍수), 일반홍수(강우로 인해 하천에 범람한 물이 내륙으로 서서히 차오르는 홍수)로 분류하여 비교해 보면 남한은 3가지 유형의 홍수가 유사한 빈도로 발생된 반면, 북한의 경우는 일반홍수의 빈도가 다른 유형의 홍수발생 빈도에 비해 높았다. 유형별 인명피해에서는 남한은 전체 유형에서 돌발홍수가 52%로 가장 많은 부분을 차지하였고, 북한의 경우 일반홍수가 42%로 가장 많은 비중을 차지하였다(Park et al., 2010).

남한은 돌발홍수에 의한 인명피해가 일반홍수에 비해 2.3배 높았고, 북한의 경우 불특정홍수와 돌발홍수의 발생 빈도는 비슷하나 돌발홍수로 인한 인명피해가 불특정홍수 보다 1.5배 정도 높았다. 홍수피해의 경우 돌발홍수에 대한 인명피해가 다른 홍수 유형보다 높게 나타나므로 북한의 홍수모니터링을 위해서는 돌발홍수에 대한 검토가 우선 시행되어야 할 필요가 있다. 따라서, 홍수 위험도의 위험성 지표로 강우량 자체를 지표로 설정하기 보다는 강우량에 대한 강우-유출 모의 결과인 돌발홍수지수로 산정하여 위험성 지표로 선정하였다.

4.2.2 돌발홍수 지수를 이용한 홍수 위험성 지표 산정

임진강 유역의 확률강우량의 빈도와 지속기간에 대한

Table 1. Selection of Flood Risk Index in the North Korea

Category	Item	Frist time of Record	Index	Source
Natural Environment	Average Temperature	1965	Hazard	KMA*
	Yearly Rainfall	1965	Hazard	KMA
	Regional Area	2006	Exposure	MOLIT**
	Administrative District	2006	Exposure	MOGAHA***
Population	Population of North Korea	1993	Exposure	Statistics Korea
	Population Density	1993	Exposure	Statistics Korea
	Gender Ratio	1993	Exposure	Statistics Korea
	Population of Major City	1970	Exposure	Statistics Korea
	Survey of Census	2008	Exposure	North Korea Central Bureau of Statistics
SOC	Total Length of Railroad	1965	Exposure	KORAIL
	Total Length of Road and Expressway	1965	Exposure	MOLIT
	Urbanization Rate	1950	Vulnerability	UN
etc.	Number of Disaster Victims	2006	Vulnerability	IFRC

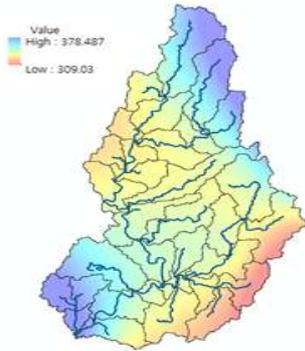
* KMA: Korea Meteorological Administration

** MOLIT: Ministry of Land, Infrastructure and Transport

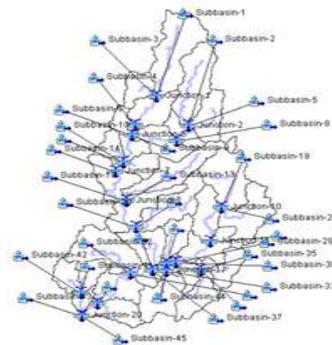
*** MOGAHA: Ministry of Government Administration and Home Affairs

Table 2. Damage of Flood Type

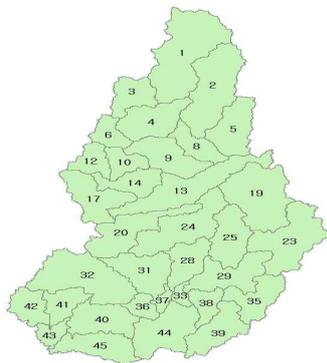
Type of Flood	Normal Flood	Unspecific Flood	Flash Flood	Storm/Costal Flood
North Korea	762 (42%)	431 (24%)	627 (34%)	0 (0%)
South Korea	266 (23%)	283 (24%)	608 (52%)	10 (1%)



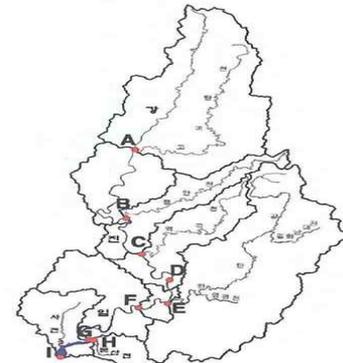
(a) Distribution of Probability Rainfall (100yr, 1,440min)



(b) Hydrologic Modeling



(c) Composition of Watersheds



(d) Major Point

Fig. 1. Rainfall-Runoff Simulation in Imjin Basin

강우-유출 모의를 위해 유역의 지형학적 특성과 강우량의 파악이 선행되어야 할 것이다. 임진강 유역의 지형학적 특성치는 ArcGIS의 ArcHydro Tool을 이용하여 고도의 분석과 하천의 생성 및 소유역의 구성, 소유역의 특성치를 파악하였으며, 임진강 유역의 강우량 자료의 경우 1일 강우량의 시간간격은 전일 21시부터 당일 21시까지의 값이므로 정시 시간간격과는 다소 차이를 보일 수 있는 점을 감안하고 북한 지점의 강우관측소 자료를 이용하였으며, 임진강 유역에 영향을 미치는 강우관측소 8개 지점의 자료를 이용하여 지점우량을 확정하고, 빈도와 지속기간별 확률강우량에 대한 유역의 전반적인 강우의 분포를 파악하기 위해 Spline 기법을 적용하여 빈도와 지속기간에 대한 유역 평균강우량을 산정하였다.

Fig. 2는 임진강 유역의 확률강우량에 빈도와 지속기간에 대한 강우-유출 모의를 위한 초기자료의 구성과 입력

과정을 나타낸 것이다. Fig. 3은 강우-유출 모의를 통해 산출한 유출수문곡선에 대한 심도계수를 산정하여 표출한 임진강 유역 돌발홍수지수의 8개 빈도(2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100년), 3개 지속기간(720, 1,440, 2,880분)에 해당하는 결과 중 지속기간 720분과 1,440분의 각 빈도별 결과를 T-Score 방법으로 표준화하여 도시한 것이다.

Fig. 3의 임진강 유역 홍수 위험성 지표의 표출도로 정성적으로 평가할 때 동일빈도에 지속기간이 다른 경우 2년 빈도에서는 임진강 상류에 해당하는 A지점을 기준으로 북서쪽 지역에 해당하는 3, 6 소유역과 남쪽의 12, 14번 소유역 동쪽의 8번 소유역, D지점 동편의 28번 소유역, 수입천과 사직천이 위치하는 35번이 1,440분 지속기간에 비해 낮은 수치인 푸른색을 나타내고, 3년 빈도는 사미천 합류후 임진강 본류에 해당하는 40번 소유역이 연두색으로 1,440분 보다 높은 수치의 색상을 보이고, 평안천이 있는

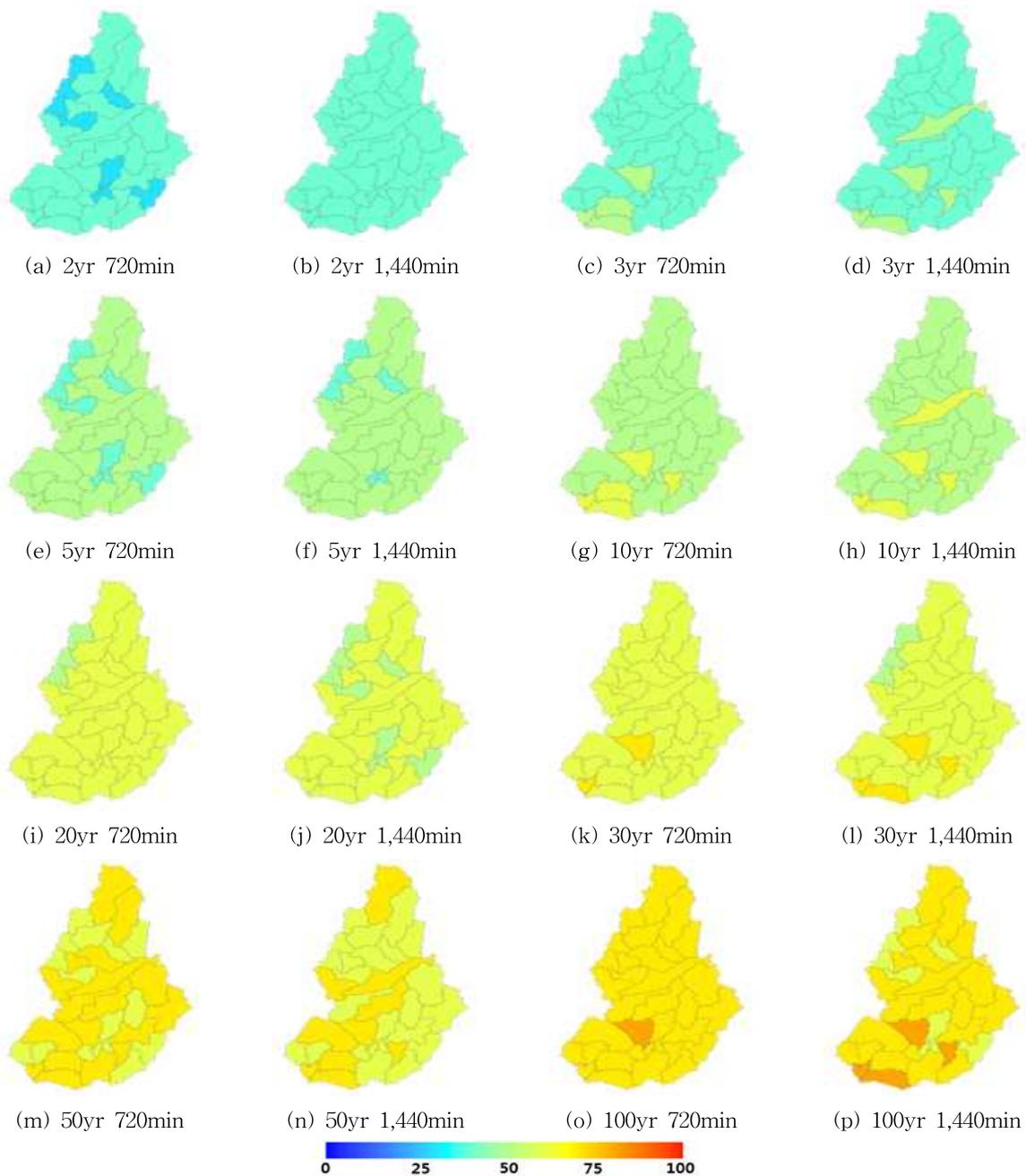


Fig. 2. Flood Hazard in Imjin Basin

13번 소유역과 영평천이 포천천과 합류하는 38번 소유역에서 1,440분 지속기간보다 낮은 색상을 보인다. 5년 빈도의 경우 14, 35번 소유역이 1,440분 지속기간보다 낮았고, 10년 빈도 40번 소유역이 1,440분 지속기간의 색상수치상 높았고, 13번 소유역은 1,440분 지속기간보다 낮은 색상을 보였다. 20년 빈도 14번, 8번, 28번, 35번 소유역이 1,440분 지속기간보다 높았고, 30년 빈도는 3, 6, 12번 소유역이 높고, 문산천이 위치하는 45번 소유역과 영평천이

포천천과 합류하는 38번 소유역이 1,440분 지속기간보다 낮게 보인다. 50년 빈도에서는 고미탄천이 위치하는 2번 소유역과 10, 9, 20, 19, 23, 29, 44번 소유역과 같이 다수의 소유역에서 1,440분 지속기간보다 높은 색상을 보이고, 100년 빈도 임진강 최하류부에 해당하는 43, 45 소유역과 38번 소유역이 낮은 색상을 3, 6, 12, 14, 8, 28, 35번 소유역에서는 1,440분 지속기간보다 높은 색상을 나타내고 있다. 동일지속기간에 빈도가 다른 경우는 특별한 특징이 나

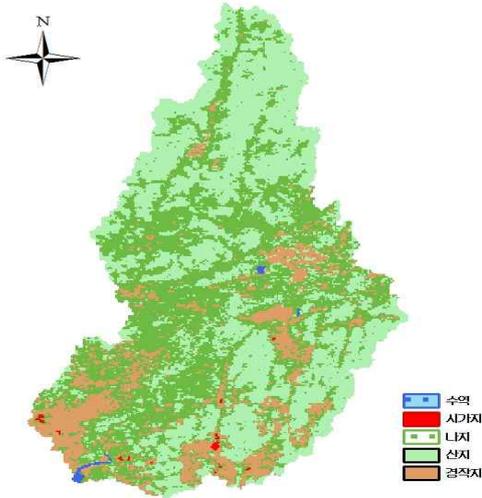


Fig. 3. Land Use in Imjin Baisn

타나지 않고 빈도가 증가할수록 홍수 위험성 지표에 해당하는 돌발홍수지수가 높게 나타났다. 전반적인 빈도와 지속기간에 대해 평안천 유역과 한탄강과 임진강이 합류하는 지점, 남북한의 경계에 해당하는 임진강 분류 지점, 임진강 최하류부 유역에서 대체적으로 높은 수치에 해당하는 색상을 보였다.

정성적인 분석에서 특징적인 결과를 보인 3, 6, 8, 12, 14, 28, 35, 38번 소유역을 중심으로 정량적으로 분석해 보면 동일빈도에 지속기간이 다른 경우 38번 소유역을 제외하고 10년 빈도 이상에서는 지속기간이 작은 720분의 돌발홍수지수가 0.1~6.8 포인트 높게 나타났고, 10년 미만의 저빈도에서는 720분 돌발홍수지수가 1,440분 지속기간

의 수치보다 1.1~4.5 포인트 낮은 결과를 보였다. 38번 소유역의 경우 빈도에 관계없이 720분 지속기간의 돌발홍수지수가 1,440분 지속기간의 돌발홍수지수 보다 1.5~1.7 포인트의 범위에서 낮은 수치를 보였다. 동일지속기간에 빈도가 다른 경우 정성적인 결과와 마찬가지로 빈도가 증가할수록 소유역별 돌발홍수지수가 증가하였고 그 범위는 최소 27.5~75.1 포인트였다.

특정하게 100년 빈도 지속기간 24시간을 대푯값으로 두고 정량적인 평가를 해보면 전체유역 평균 돌발홍수지수 63.2 포인트에 비해 13, 38, 31, 43, 45 소유역은 각각 67.1, 70.5, 72.4, 73.2, 72.3 포인트로 평균 돌발홍수지수 대비 편차가 3.9, 7.4, 9.3, 10.1, 9.1 포인트 높았고, 평균을 기준으로 6.2, 11.7, 14.7, 16.0, 14.5 % 포인트 높은 결과이다.

정성·정량적인 결과를 종합해보면 임진강 유역의 위험성 지표에 해당하는 돌발홍수지수는 최소 26.1~최대 97.4 포인트 범위로 나타났고, 동일한 빈도에서 지속기간이 길수록 홍수의 위험성이 높아지며, 전반적으로 임진강 최하류부인 남서쪽의 홍수위험성 높고, 대체적으로 10년 빈도 이상에서는 50 포인트 이상의 돌발홍수지수를 보이는 특징이 나타났다. 홍수 위험성 지표의 대표적인 형태인 강우량을 통해 산정한 돌발홍수지수를 홍수 위험성 지표로 본다면 임진강 유역에서는 10년 빈도 이상에서 돌발홍수로 인한 피해가 높다고 판단할 수 있다.

4.3 임진강 유역의 홍수 노출성 및 취약성

홍수 노출성과 취약성 지표는 Table 3과 같이 수집된 인문·사회학적 통계자료의 활용가능성을 평가해 보았다.

Table 3. Possible Application Review for Flood Exposure and Vulnerability

Category	item	Frist time of Record	Index	Applicability
Natural Environment	Regional Area	2006	Exposure	×
	Administrative District	2006	Exposure	×
Population	Population of North Korea	1993	Exposure	×
	Population Density	1993	Exposure	×
	Gender Ratio	1993	Exposure	×
	Population of Major City	1970	Exposure	×
	Survey of Census	2008	Exposure	◎
SOC	Total Length of Railroad	1965	Exposure	×
	Total Length of Road and Expressway	1965	Exposure	×
	Urbanization Rate	1950	Vulnerability	◎
etc.	Number of Disaster Victims	2006	Vulnerability	×

지역별 면적, 행정구역은 홍수 위험도를 산정하기 위해 부가적인 자료로는 활용이 될 수 있으나 홍수의 노출성의 직접적인 지표로 활용하는 무리가 있으며, 북한인구와 인구밀도, 성별인구 및 성비, 주요도시인구의 경우 북한 전체에 대한 통계치이므로 유역단위의 위험도를 평가하기는 힘든 요소가 된다. 또한, 사회간접자본에 해당하는 철도 총 연장, 도로 총 연장 및 고속도로 길이도 시군구와 같은 행정구역이나 하천유역단위의 통계자료가 아니므로 직접적인 활용이 불가능하다고 판단된다. 재해사망자 및 이재민 수는 피해 규모를 판단하기에는 용이하나 위험도의 평가지표로는 부적합하였다.

인구센서스 조사의 경우 북한의 시군구 행정구역 단위로 성별, 나이별로 조사된 통계자료로 구성되어 있어 노출성 지표로 활용가능하다. 마지막으로 도시화율은 시군 단위로 통계자료가 구성되어 있으나 자료의 신뢰도가 떨어지는 이유로 인공위성을 활용한 토지이용상태의 밴드를 추출하여 시가화 지역으로 표시된 지역을 홍수 취약성 지표로 활용하고자 하였으나, Fig. 3과 같이 임진강유역은 군사분계선과 산악지역으로 구성되어 있는 지역적 특성상 시가화 지역이 전체유역의 0.2%에 불과하여 취약성 지표로 선정하기는 어려웠다. 따라서, 홍수 취약성 지표는 인구센서스 조사의 통계자료를 토대로 임진강 유역의 여성인구 중 노약자인 재해취약자로 선정하여 적용하였다. Fig. 4는 임진강 유역의 홍수에 대한 노출성과 취약성 지표에 대해 T-Score로 표준화 한 결과를 도시한 것이다.

임진강 유역 중 인구수가 밀집되어 있는 문산천 유역과 임진강 하류부 유역에서 비교적 높은 수치를 기록하였고, 북한지역에서는 임진강의 최상류부와 고미탄천 유역, 평

안천 유역, 남한지역에서는 사미천 유역과 한탄강 상류유역, 포천천, 수입천 유역에서 타 유역보다 상대적으로 높은 노출성과 취약성 지표가 도출되었다.

4.4 임진강 유역의 홍수 위험도 평가

북한 전체에 대한 홍수 위험도를 산정하기에 앞서 모니터링 우선순위에서 시범지역으로 선정한 임진강 유역에 대한 홍수 위험도를 산정해 보았다. 홍수 위험도는 표준화된 홍수 위험성, 노출성, 취약성 지표를 바탕으로 엔트로피 가중치가 부여된 값에 산술평균을 취하여 산정하였으며, 확률강우량의 빈도와 지속기간별로 Fig. 5와 같이 도시하였다.

Fig. 5의 결과와 같이 소유역별 홍수 위험도는 빈도가 증가할수록 위험도는 증가하는 일정한 경향을 보였지만, 지속기간에 대해서는 큰 차이가 나타나지 않았고 파주와 양주, 포천, 동두천시가 위치하는 40, 44, 45번 소유역에서 타 소유역에 비해 큰 홍수 위험도를 보이는 특징이 나타났다. 또한 접경지대에 해당하는 28, 31 소유역을 기준으로 동·서방향이 비교적 낮은 것을 알 수 있다.

가시적인 결과에서는 특별한 경향이나 특징이 나타나지 않으므로 정량적인 분석을 추가적으로 수행해 보았다. 홍수 위험도의 범위는 37.6~84.4 포인트이었고, 홍수 위험도의 분포에서는 첨예도가 5.14로 높게 나타났고, 평균이 50인 T-Score의 특성으로 볼 때 왜곡도(Skewness)가 2.35로 평균을 기준으로 우측(높은 수치)로 왜곡되는 형태를 나타내었다. 부분적으로 보면 가시적인 결과에서 높은 홍수 위험도를 보인 40, 44, 45번 소유역에서 홍수 위험도의 평균이 각각 61.6, 78.7, 66.6 포인트로 높은 경향이

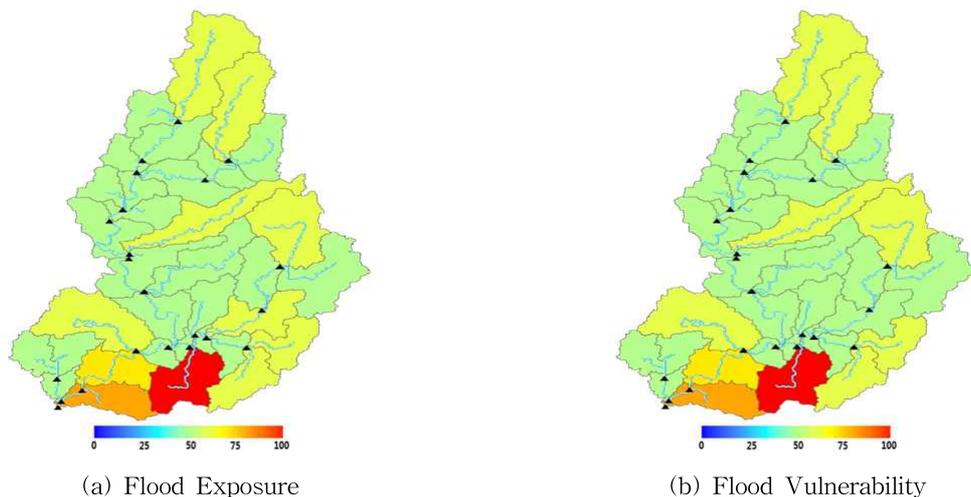


Fig. 4. Flood Exposure and Vulnerability in Imjin Basin

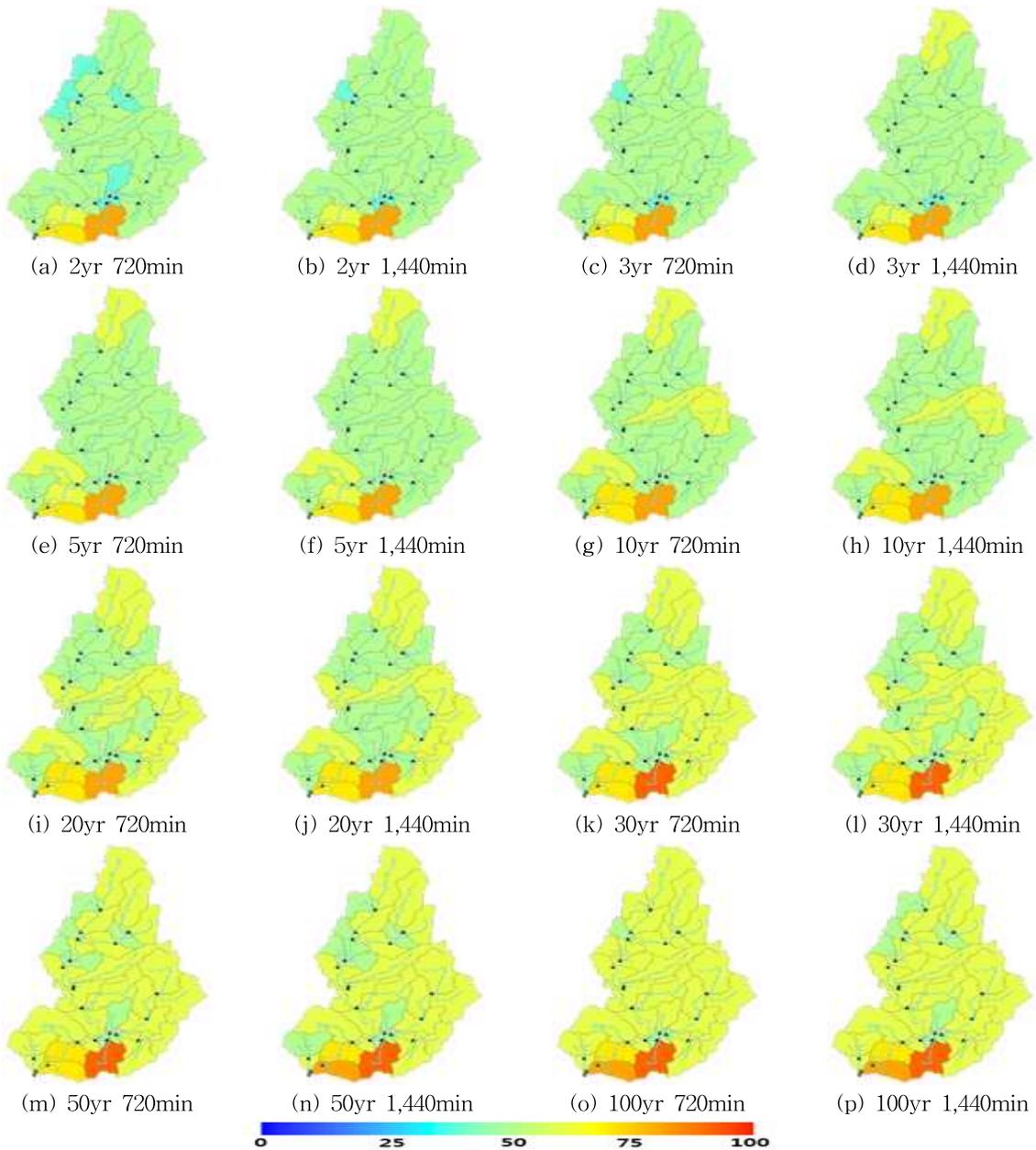


Fig. 5. Flood Risk in Imjin Basin

나타남을 확인하였고, 해당 소유역에 대한 변동성(Coefficient of Variability)은 6.1, 4.6, 5.8%로 전체유역의 변동성의 평균치인 7.3 % 보다 낮게 나타났다. 평균과 변동성의 분석결과와 같이 소유역 40, 44, 45번은 빈도와 지속기간에 큰 종속성 없는 것으로 보아 위험성 지표 즉, 빈도와 지속기간에 직접적인 연관성이 높은 돌발홍수지수 즉 홍수 위험성 지표 보다 상대적으로 파주, 양주, 포천, 동두천과 같이 인구가 타 소유역에 비해 높은 밀도를 보이는 노출성과 취약성 지표에 영향이 크다고 볼 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 유역의 63% 가량이 북한지역으로 구성되어 있고 수문자료의 취득이 힘들고 지형공간에 대해 완전 공개되지 않은 미계측지역인 임진강 유역에 대해 홍수 위험도를 검토한 것이다. 홍수 위험도의 산정은 국제기준 방식을 이용하였고 미계측지역의 특성을 반영하기 위해 홍수 위험성은 유역에서 발생할 수 있는 돌발홍수에 대한 지수를 산정하고, 노출성과 취약성은 인문·사회학적 통계 자료로 활용하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음

과 같다.

- 1) 임진강 유역을 대상으로 홍수에 대한 위험성, 노출성, 취약성 인자들의 특성을 각각 파악하고, 표준화된 지표를 이용하여 홍수 위험도를 평가하였다.
- 2) 홍수 위험성 지표의 대표적인 형태인 강우량을 통해 산정한 돌발홍수지수를 홍수 위험성 지표로 본다면 임진강 유역에서는 10년 빈도 이상에서 돌발홍수로 인한 피해가 높다고 판단할 수 있다.
- 3) 임진강 유역 중 인구수가 밀집되어 있는 문산천 유역과 임진강 하류부 유역에서 비교적 높은 수치를 기록하였고, 북한지역에서는 임진강의 최상류부와 고미탄천 유역, 평안천 유역, 남한지역에서는 사미천 유역과 한탄강 상류유역, 포천천, 수입천 유역에서 타 유역보다 상대적으로 높은 노출성과 취약성 지표가 도출되었다.
- 4) 홍수 위험도는 빈도와 지속기간에 직접적인 연관성이 높은 돌발홍수지수 즉 홍수 위험성 지표 보다 상대적으로 파주, 양주, 포천, 동두천과 같이 인구가 타 소유역에 비해 높은 밀도를 보이는 노출성과 취약성 지표에 영향이 크다고 볼 수 있을 것이다.

향후, 추가적으로 하천과 댐 등 수리학적 구조물과 특성인자를 반영하여 정밀한 수리수문학적 해석을 통해 집중호우 피해를 홍수추적 방식으로 산정한다면 유역에서 발생하는 침수상황까지 파악 가능할 것이라 사료된다.

References

- Bhaskar, N.R., French, B.M., and Kyiamah, G.K. (2000). "Characterization of flash floods in Eastern Kentucky." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 327-331.
- CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters), <http://www.cred.be/>
- Dury, G.H. (1961). "Bankfull discharge: an example of its statistical relationships." *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, Vol. 6, No. 3, pp. 48-55.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2011). National flood insurance program: Flood insurance manual. Washington, DC., USA.
- GTK (Geological Survey of Finland). (2006). Project 1.3.1: The spatial effects and management of natural and technological hazard in general and in relation to climate change. Final Report, European Spatial Planning Observation Network.
- Ham, D.H., Joo, J.G., Jun, H.D., Kim, J.H. (2008). "Study on Derivation of Fourth-Order GIUH and Revision of Initial State Probability." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 229-239.
- Henderson, F.M. (1961). "Stability of alluvial channels." *Journal of Hydraulics Division-ASCE*, Vol. 87, pp. 109-138.
- Hey, R.D. (1994). "Restoration of gravel-bed rivers: Principles and practice." *Natural Channel Design: Perspectives and Practice*, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ont., pp. 157-173.
- IFRC (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies), <http://www.ifrc.org/>
- Im, C.S., Lee, J.H., Kim, T.H., Lee, J.C., and Yoon, S.E. (2006). "A dominant discharge estimate for channel characteristics quantity survey." *Proceedings 2006 Annual Conference, KWRA*, pp. 66-71.
- Jain, A., Nandakumar, K., and Ross, A. (2005). "Score normalization in multimodal biometric systems." *Pattern Recognition*, Vol. 38, pp. 2270-2285.
- Jo, D.J., Son, I.O., Choi, H.I., (2013). "Development of a New Flood Index for Local Flood Severity Predictions." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 47-58.
- Jung, J.C. (2000). "The study on estimation of the flash flood index for the Bo-chunRiverbasin." MS. Thesis, Suwon University, Korea.
- Kim, B.S., and Kim, H.S. (2008). "Estimation of the Flash Flood Severity using Runoff Hydrograph and Flash Flood Index." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 185-196.
- Kim, E.S., Choi, H.I., and Jee, H.K. (2010). "Estimation of the flash flood index by the probable rainfall data for ungauged catchments." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 81-88.
- Kim, E.S., Choi, H.I., Lee, D.E., and Kang, D.J. (2009). "Estimation of the flash flood severity using flash flood index." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 6, pp. 125-131.
- Kim, E.S., Jang, H.Y., Kim, S.D., Park, M.S., and Choi, H.I. (2012). "Analysis of rainfall-flood severity rela-

- tions in small ungauged catchments.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 199–208.
- Kim, J.H., and Kim, Y.H. (2003). “Improving potential flood damage.” *Proceedings 2003 Annual Conference, KSCE*, pp. 2373–2378.
- Kron, W. (2003). Flood risk=hazard×exposure× vulnerability. Flood Defence, Edited by Wu et al., Science Press, New York, N.Y., pp. 82–97.
- Lee, H.C., and Lee, E.T. (2003). “A study on the channel forming discharge estimation and the hydraulic geometry characteristics of the alluvial stream.” *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 36, No.5, pp. 823–838.
- Leopold, L.B. (1994). A view of the river. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- McCall, W.A. (1923). “Science of Education.” *The Journal of Educational Research*, Vol. 7, No. 5, pp. 384–396.
- Merabtene, T., Yoshitani, J., and Kuribayashi, D. (2004). Managing Flood and Water-related Risks: A challenge for the future. AOGS 2004 Joint 1st Annual Meeting & 2nd APHWConference, Singapore, pp. 1–8.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2001). “Water vision 2020.”
- Ologunorisa, E.T. (2004). “An assessment of flood vulnerability zones in the Niger Delta.” *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 61, No. 1, pp. 31–38.
- Park, S.Y., Lee, Y.G., and Kim, S.W. (2010). “Flood Damage of North Korea and Prevention Measure.” *Proceedings 2010 Annual Conference, KWRA*, pp. 1867–1872.
- Riley, A.L. (1998). Restoring streams in cities : a guide for planners, policy makers and citizens. Island press, Washington, D.C., USA.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J. (1979) “The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response.” *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409–1420.
- UNDP (United Nations Development Programme). (2004). “Reducing disaster risk : A challenge for development.” New York, NY., USA.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). (2004). Living with risk : A global review of disaster reduction initiatives. Geneva. Swiss.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). (2009). 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction.
- Wi, S.W., Chung, G.H., and Kim, T.W. (2008). “Development of a Comprehensive Flood Index through Standardizing Distributions of Runoff Characteristics.” *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 41, No. 6, pp. 605–617.
- Williams, G.P. (1978). “Bankfull discharge of rivers.” *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 1141–1154.

paper number : 15-079

Received : 24 September 2015

Revised : 16 October 2015 / 23 October 2015

Accepted : 23 October 2015