

하천의 홍수방어목표 적정화를 위한 정량적 위험도 평가 적용: 하천 배후지역 이용현황에 따른 설계빈도 차등화를 중심으로*

Using the Quantitative Risk Assessment for Selecting the
Flood Defense Level According to Floodplain Development Conditions

이종소 Lee Jongso**, 이상은 Lee Sangeun***,
송창근 Song Chang Geun****, 신은택 Shin Eun Taek*****

Abstract

In Korea, the flood defense level has been typically determined by the classification of river grade. Each river interval should, in principle, have different level necessary to consider the flood risk behind the river, which however is not currently applied in planning the river due to the lack of scientific methods. Therefore, to develop a reasonable method for zoning the flood defense levels of river intervals, the methodology of the QRA (Quantitative Risk Assessment) originated from the reliability engineering was introduced to a river interval with highly urbanized area. First, the authors presented the FN curve showing the numbers of fatalities at various flood frequency conditions. Then, they evaluated the adequacy of flood risk comparing with the societal risk tolerance criteria for the river basin. Finally, they adjusted the flood defense level according to the distributions of population, land use, and buildings in riparian and checked whether it satisfied the risk criteria or not.

Keywords: Flood Risk Management, Flood Defense Level, Quantitative Risk Assessment, Societal Risk, FN-curve

* 본 논문은 2020년에서 2021년까지 진행 중인 국토연구원의 '정량적 위험도 평가를 통한 하천 홍수방어목표 적정화 방안 연구' 중간결과를 활용하여 작성하였음.

** 국토연구원 책임연구원(제1저자) | Assistant Research Fellow, National Territorial Environment&Resources Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements | Primary Author | jslee@krihs.re.kr

*** 국토연구원 안전국토연구센터장(교신저자) | Research Fellow, Land & Infrastructure Safety Research Center, Korea Research Institute for Human Settlements | Corresponding Author | selee@krihs.re.kr

**** 인천대학교 안전공학과 부교수 | Associate Prof., Dept. of Safety Engineering, Incheon National Univ. | baybreeze119@inu.ac.kr

***** 인천대학교 안전공학과 박사과정 | Ph.D. Candidate, Dept. of Safety Engineering, Incheon National Univ. | euntaek.shin@outlook.com

I. 서론

국가의 법령 및 건설기준에서 홍수량의 설계빈도를 홍수방어목표로 정하는 것은 미국 주택도시개발부가 1968년 국가홍수보험법을 입안하는 과정에서 1% 초과확률 또는 100년 설계빈도를 선택한 데에서 출발(ASFPM 2004)하였다. 미국에서 100년 설계빈도로 홍수방어목표를 채택한 이후 많은 국가의 법제도와 기술기준에 반영되었으나 확률의 이론적 근거 부족으로 인해 꾸준히 문제가 제기되어 왔다(Pilgrim and Cordery 1974). 100년 설계빈도가 지역 실정에 부합하지 않는다는 판단하에 많은 국가들이 차등화 방안을 모색하였는데, 일반적으로 홍수로 인해 국가적·광역적 피해가 예상되는 하천에는 100년 설계빈도보다 강화하는 방안을, 반대로 산지, 녹지 등을 관류하며 인구밀도가 낮은 하천에는 100년 설계빈도보다 완화하는 방안을 적용하였다. 우리나라는 하천설계기준(국토교통부 2018)에서 하천등급을 중시하여 국가하천의 주요 구간은 200년 이상의 설계빈도로, 국가하천 기타 구간과 지방하천 주요 구간은 100~200년 설계빈도 사이로, 지방하천의 기타 구간은 50~200년 설계빈도를 정하되, 토지이용 상황을 고려하여 구간별로 달리 선택할 수 있는 근거도 마련하였다. 하지만 하천설계기준에는 하천 중요도에 따른 참조표를 제공하고 하천등급별 전체 구간에 허용되는 홍수방어목표의 하한선만을 정의할 뿐 특정구간을 대상으로 설계빈도의 적정 수준을 판단하는 방법을 제공하지는 않고 있는 실정이다(이상은, 이종소 2020). 과거 한강홍수통제소(2011)에서 설계빈도 적정화를 위한 공간정보 분석방법을 제시한 바 있으나, 대리지표 활용 등의 한계로 정책 영역에서 투명한 의사결정을 지원하기는 힘든 것으로 판단되었다.

한편 일부 선진국들은 여러 가지 홍수대책의 의사결정에 있어서 정량적 위험도 평가(Quantitative Risk Assessment: QRA)의 활용성을 최근 검토해오고 있다. 예로서, 네덜란드 연구진(Vrijling 2001; Jonkman 2007; de Bruijn, Beckers, van der Most 2010; Jonkman, Jongejan, Maaskant 2010; Miller, Jonkman, van Ledden 2015)은 신뢰성 이론에서 출발한 QRA가 네덜란드 핵심 홍수방어 시설의 설계빈도를 결정하는 목적으로 적용한 바 있다. 또한 최근 US ACE(2010; 2020)는 홍수터 잔존 위험도를 관리하려는 목적에서 기성 제방의 붕괴로 인한 배후지역 위험도를 QRA를 통해 정량화하고, 이를 해당 제방의 안전등급을 판단하는 데 활용하고자 하였다.

한국의 홍수방어목표 설정에 대한 한계를 보완하고, 동시에 최근의 선도연구 결과의 적용성을 검토하려는 배경에서 본 연구는 QRA를 응용하여 하천 구간별로 설계빈도를 합리적으로 설정하는 방법을 제안하고자 한다. 방법론의 유용성을 실증하기 위해 온천천 유역의 사례연구를 실시하고자 한다. 온천천 유역은 약 71만 명이 거주하고 있는 대표적인 도시하천에 해당하며, 최근에도 주민들은 2009년, 2014년, 2016년, 2019년, 2020년 등 지속적인 침수피해를 겪고 있다. 특히 2009년에는 하류 일부 구간 하천 범람으로 저지대 주택과 상가 등에 상당한 피해가 발생한 것으로 나타나 연구 대상지역으로 적절하다고 판단되었다. 본 연구에서 제시한 방법은 향후 하천기본계획 수립 시 하천의 구간별 홍수방어목표를 적정화하는 데 유용할 것으로 판단되며, 유역특성에 맞는 QRA를 통해 학술적인 발전 가능성과 정책적 활용 가능성을 제공할 것이라 생각된다.

II. 방법론

1. 정량적 위험도 평가

QRA에서 위험도는 위험도(hazard)와 부적절한 결과(consequence)의 조합으로 간주된다. 여기서 위험도는 정상상태를 교란하는 심각한 사상이 발생할 초과확률을 의미하는데 홍수재해의 경우 홍수량이 홍수방어능력을 초과하여 배후지역이 범람할 확률이 해당되어 이는 홍수 발생빈도로 정의할 수 있다. 부적절한 결과는 심각한 사상의 발생으로 인한 피해 규모를 의미하는데, 홍수 범람으로 인한 인명피해, 재산피해, 경제적 손실 등 여러 가지 지표를 선정할 수 있다. 이 중에서 QRA는 경제적 최적화를 도모하기보다는 사회 안전에 대한 허용규범의 충족을 중시하므로 전통적으로 인명피해, 즉, 사망자 수를 중요한 지표로 고려한다. 최종적으로 위험도, 즉, 위험도와 부적절한 결과의 조합을 표현하는 방법으로 FN곡선을 활용한다. FN곡선이란 사망자 수를 가로축에, 해당 사망자 수를 초과하는 재해가 발생할 확률 또는 빈도를 세로축에 표현한 log-log 축척의 그래프를 지칭한다. FN곡선은 인명손실의 임계값, 변화양상, 최댓값 등 다양한 정보를 직관적으로 확인할 수 있으므로 위험도를 종합적으로

해석하면서 위험도의 적정성 여부나 추가 위험도 감소의 필요를 판단하는 데 유용하다. <Figure 1>은 본 연구에서 온천천 배후지역의 홍수 위험도를 평가하는 절차와 방법을 요약하고 있다.

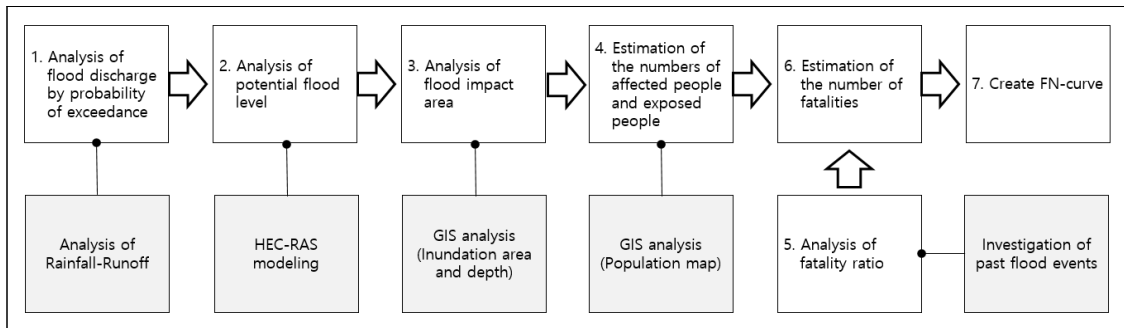
① **홍수량 산정:** 홍수 위험도를 평가하는데 100년에서 1,000년까지의 발생빈도 조건을 고려하기로 하였는데, 100년에서 500년까지 빈도의 지점별 홍수량은 기존 하천기본계획(부산광역시 2017)의 결과를 활용하였으며 그 이상의 빈도에 대한 홍수량은 지점별 외삽을 통해 분석의 간소화를 도모하였다.

② **잠재적 홍수위 산정:** 빈도별 홍수량에 따른 잠재적 홍수위를 해석하기 위해 미국 공병단(US ACE)의 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)를 구축하여 분석하였다.

③ **침수범위 및 침수심 산정:** GIS분석을 통해 HEC-RAS로 분석한 잠재적 홍수위와 지형고도의 차이를 비교하여 빈도별 침수범위와 침수심을 산정하였다.

④ **영향인구 및 노출인구 산정:** 국토지리정보원¹⁾에서 제공하는 100m×100m 격자별 인구지도를 이용해

Figure 1_ Flow Chart of Quantitative Risk Assessment



1) 국토교통부 국토지리정보원. <http://www.ngii.go.kr> (2020년 12월 18일 검색).

빈도별 영향인구를 산정하고 이어서 노출인구를 산정하였다. 영향인구와 노출인구의 관계에 대해서는 국내 선행연구를 찾을 수 없어 미국의 허리케인 카트리나나 구스타프 사례(Jonkman, Kok, van Ledden and Vrijling 2009; Wolshon 2006; Cutter and Smith 2009)를 참고로 노출인구가 영향인구의 10%라고 가정하였다.

⑤ **사망률 산정:** 우리나라 과거 홍수피해 자료(행정안전부 1994-2018) 중에서 호우에 의해 사망자가 발생한 총 52건을 바탕으로 누적 이재민 수와 누적 사망자 수의 비율을 분석해 얻은 0.325%를 사망률로 간주하였다. 이재민 수와 사망자 수 간의 관계는 사상별로 발생특성과 피해요인이 달라 변동성이 큰 것이 사실이나, 위 52건에서 상관관계의 검증통계량(t -value = 2.401)이 적절한 유의수준 조건($\alpha = 0.05$)에서 충분히 높아 상관관계를 인정할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 연구에서 이재민과 노출인구가 동일하다고 간주하였는데, 재난통계에서 이재민의 수는 일상생활로 복귀하기 힘들 만큼 신체나 주거·재산의 피해가 발생한 사람을 집계하고 있으므로 향후 사망자 과다추정 원인이 될 수 있다고 판단된다.

⑥ **사망자 수 추정:** ④의 빈도별 노출인구에 ⑤의 사망률을 적용하여 홍수 발생빈도별 사망자 수를 추정하였다.

⑦ **FN곡선 작성:** 빈도별 사망자 수를 이용해 log-log 축척의 FN곡선을 작성하였다.

2. 사회적 위험도 허용기준 설정

위험도의 허용기준(tolerance criteria)이란 사회가 용인할 수 있는 한계치로서 특별한 경우를 제외하고 이를

넘어서는 위험도는 정책 결정자나 일반 대중이 받아들일 수 없다고 간주된다. 신뢰성 이론에 따르면 위험도 관리의 최적 수준은 이러한 허용기준 이내에서 ALARP(as low as reasonably practicable)의 원칙에 따라 경제성, 현실성, 합리성을 중시하여 결정되어야 한다(Le Guen 2010). 위험도 허용기준은 크게 개인적인 기준과 사회적인 기준으로 구분할 수 있는데, 전자는 특정 개인의 사망률 증가의 허용범위를 설정하는 것으로 주로 토지이용의 적정성을 평가할 때 활용된다. 후자는 사회 전체에서 용인할 수 있는 확률과 피해를 조합하여 위험도의 허용범위를 설정하는 것으로 주로 홍수와 같은 저빈도·고피해 특성을 지닌 재해에 대하여 사회 안전 목표를 결정하는 데 활용된다. 본 연구에서는 사회적 위험도 허용기준을 통해 QRA를 통해 산정한 위험도가 사회적으로 용인할 수 있는지 여부를 평가하고자 하였다.

사회적 위험도 허용기준을 설정하는 다양한 방법이 있는데, 그 가운데 국가 단위의 오랜 기간의 홍수 피해기록을 바탕으로 허용기준을 결정된 뒤 해당 유역단위의 허용기준으로 환산하는 것이 자료수집에 유리하며 지역 간 기준의 일관성이 높아 실용적인 방법으로 간주된다(Jonkman, van Gelder and Vrijling 2003). 특별히, 본 연구에서는 사회적 위험도 허용수준이 국가차원에서는 이미 실현되어 있다는 가정하에 과거 피해기록을 바탕으로 허용기준을 설정하는 현시선호기법(Abedinisohi 2014)을 다음의 세 단계에 따라 적용하고자 하였다.

① **국가단위의 홍수 사망자에 따른 발생빈도 산정:** 각 연도 재해연보를 토대로 홍수 사상에 대한 빈도와 사망자 수의 통계적 관계를 다음 <식 1>과 같이 분석하였다. 여기서 $F(N < n)$ 는 사망자가 n 인 누적분포함수, $\bar{F}(N \geq n)$ 은 사망자수 n 이상인 발생빈도,

R_n 은 사망자가 n 인 사상의 순위, 그리고 k 는 사망자가 n 인 사상의 발생횟수를 의미한다.

$$F(N \leq n) = \frac{R_n}{k+1},$$

$$\text{따라서 } \bar{F}(N > n) = 1 - \frac{R_n}{k+1} \quad \text{<식 1>}$$

② 국가단위의 사회적 위험도 허용기준 추세선 도출:

앞에서 산정한 사망자 수 N 와 발생빈도 $\bar{F}(N \geq n)$ 의 관계를 FN곡선 위에서 표시하고 국가단위의 사회적 위험도 허용기준 SR_{Nat} 을 추세선으로 도출한다. 본 연구에서 사망자 수와 발생빈도는 <식 2>와 같이 역승관계를 가정하였는데, Farmer(1967)가 초기 원전 안전기준을 연구한 이후 표준모형으로 통용되고 있다. 여기서 α 는 log-log 축척을 지닌 FN곡선 위에서 허용기준의 기울기를 결정하는 계수로서 대규모 재해에 대해 사회의 위험회피 성향을, C 는 허용기준의 높이를 결정하는 상수를 의미한다.

$$\bar{F}(N > n) < SR_{Nat} = \frac{C}{n^\alpha} \quad \text{<식 2>}$$

③ 유역단위 위험도 허용기준 환산: 적용 대상지의 크기를 고려하여 허용기준에 포함된 상수 C 값을 환산하였다. 원전, 화학공장 등 위험도 발생원의 크기가 중요한 경우나, 자연재해와 같이 잠재적인 노출 가능한 인구가 중요한 경우는 다른 방식으로 환산해야 하는데, 본 연구는 Abedinsohi(2014)에서와 제시한 바와 같이 전국과 해당 유역의 인구비율로 환산하기로 하였다.

3. 하천 구간별 홍수방어목표 조정

현재 수준(base-line)의 설계빈도 조건에서 하천 배후 지역의 전체 위험도가 허용기준을 초과하는지를 FN곡선을 토대로 우선 확인하였다. 만일 산정된 위험도가 허용기준을 넘어선다면 위험도 저감을 위한 효과적인 대책이 필요하므로 특정 구간을 대상으로 설계빈도를 조정하여 하천 배후지역 사망자 수가 허용기준에 도달할 때까지 감소시키고자 하였다.

사망자 수를 지표로 위험도 허용기준을 설정하였으므로 허용기준을 효과적으로 충족하기 위해 하천 배후지역 중 영향인구를 고려하는 게 중요하다고 볼 수 있다. 그러나 실제 위험도는 사망자 수 외에도 재산손실, 경제적 피해 등 매우 다양한 측면을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 인구, 건축물, 토지이용 등을 종합적으로 고려하여 조정구간을 선정하도록 <식 3>과 같이 다음 세 가지 홍수 영향지표를 적용하였다.

① 영향인구 지표 a_i (명/km²): i 번째 구간에서 홍수로부터 영향을 받는 인구 크기 p_i 를 의미한다.

② 영향건축물 지표 b_i (개소/km²): i 번째 구간에서 홍수로부터 영향을 받게 되는 건축물의 수 l_i 를 의미한다.

③ 영향토지이용 지표 c_i (km²/km²): i 번째 구간에서 홍수로부터 영향을 받게 되는 도시지역 면적 u_i 을 의미한다.

$$a_i = \frac{p_i}{A_i}; b_i = \frac{l_i}{A_i}; c_i = \frac{u_i}{A_i} \quad \text{<식 3>}$$

세 가지 지표를 산정할 때 각 구간별 연안지역 면적 A_i 을 나눈 것은 동일 면적 대비 영향을 서로 비교하기 위함이며, 홍수 영향은 현재 설계빈도의 크기를 상회하도록 200년의 빈도를 기준으로 분석하기로 하였다.

III. 적용 및 결과

1. 온천천 유역의 홍수영향 분석 결과

온천천 유역에 대해 기존 설계빈도인 100년 이내의 홍수량에 대해서는 제방 월류나 파제가 없다는 가정하에 빈도별 침수지역과 영향인구는 <Table 1> 및 <Figure 2>과 같이 분석되었다. 실제 과거 침수피해 사례와 유사하게 모의되었는데 침수지역은 크게 금정구 북개구간 주변지역과 연제구 일대 두 지점으로 구분할 수 있다. 중상류에 해당하는 금정구 북개구간 주변 지역은 전체 침수면적 대비 약 5%, 전체 영향인구 대비 약 15%로 영향이 크지 않은 것으로 나타났고 하류의 연제구 일대 지역은 전체 침수면적 대비 약 90%, 전체 영향인구 대비 약 85%로 영향이 큰 것으로 나타났다.

2. 온천천 유역의 사회적 위험도 허용기준

1994년부터 2018년까지 총 25년의 기간에 대해 재해 연보상 호우에 의해 사망자가 발생한 총 52건의 피해 기록을 수집하였고 사망자 수와 초과확률 간의 관계 (n, \bar{F}) 를 분석한 뒤 FN 곡선상 추세선을 도출하였다.

Figure 2_ Result of Flood Impact Population (Return Period = 200yr)

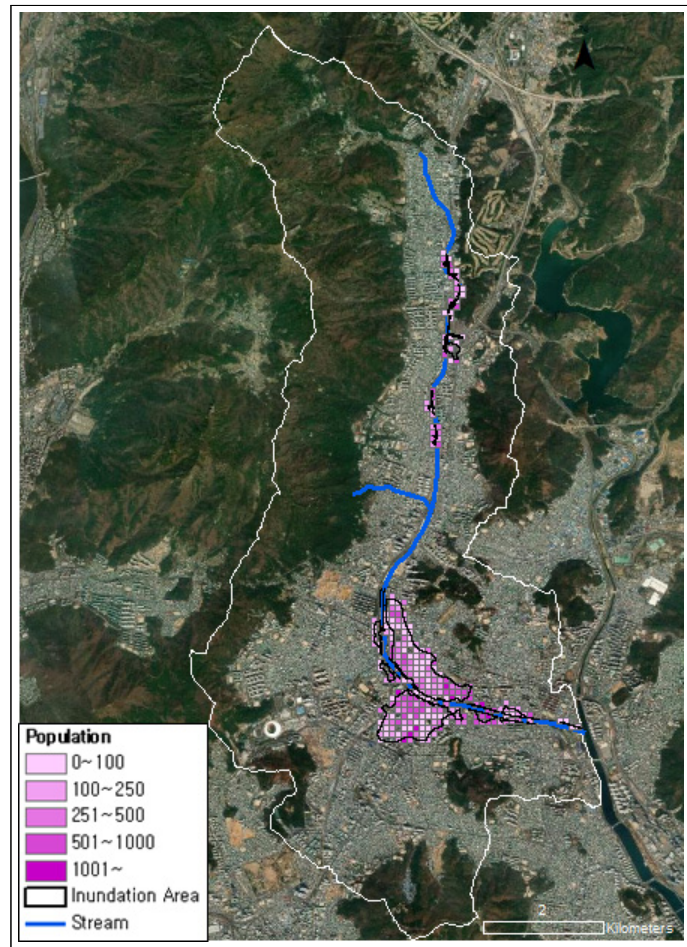


Table 1_ Result of Flood Impact Population by Return Period

Return Period	200yr	300yr	500yr	800yr	1,000yr
# of Affected People	76,391	78,411	86,349	93,251	94,437
Area(km ²)	1.687	1.803	2.095	2.323	2.503

그 결과 국가단위의 사회적 위험도 허용기준을 나타내는 표준모형의 계수와 상수는 아래 <Figure 3>과 같이 각각 $\alpha = 0.703$, $C = 2.234$ 로 분석되었다. 이어서 국가 전체 인구와 온천천 유역의 인구규모 비율을 상수값 C 로 환산하여 계산한 사회적 위험도 허용기준은 최종적으로 아래의 <식 4>와 같이 도출하였다.

$$SR = \frac{C}{n^\alpha} = \frac{3.08 \times 10^{-2}}{n^{0.703}} \quad \text{<식 4>}$$

Figure 3_ National Level of Social Risk Acceptance Criteria

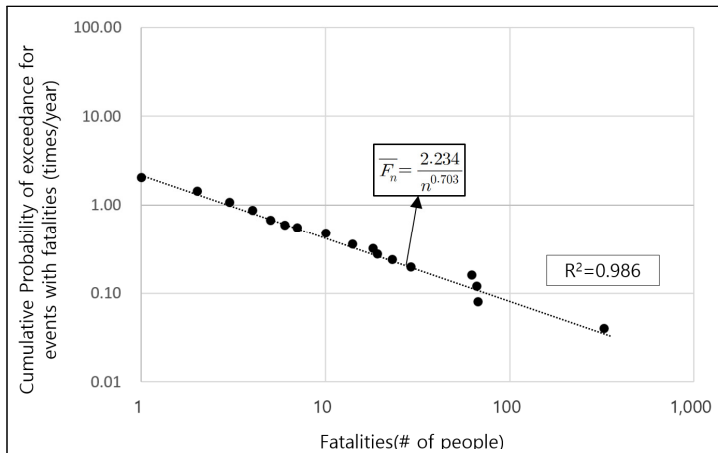
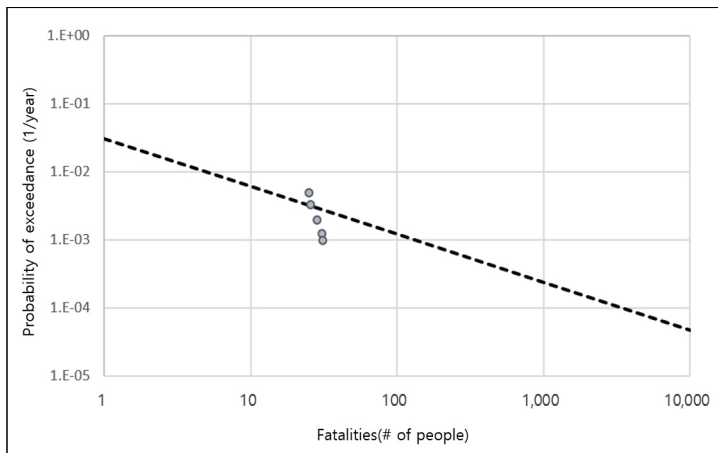


Figure 4_ Results of Social Risk Assessment (Onchen Stream)



허용기준에 포함된 계수 α 는 허용기준의 기울기, 즉, 사망자 수의 증가에 비해 발생빈도를 얼마나 제한할지를 결정하는 것으로 산업재해의 계수 α 가 약 2에 달해 위험회피 성향이 매우 두드러짐에 반해 홍수와 같이 자연재해의 경우 계수 $0 < \alpha < 1.5$ 수준으로 위험회피 성향이 상대적으로 덜 드러나는 것이 일반적이다(Ferreira and Slesin 1976; Griesmeyer, Simpson and Okrent 1979; Abedinsohi 2014; De Silva, Gunasekera and De Alwis 2017). 특히, 홍수 피해를 고려한 최근 연구들은 계수 $0 < \alpha < 1$ 을 제시하는 경향이 있는데 본 연구 결과에서도 $\alpha = 0.703$ 으로 도출되어 적절한 수준이라 판단되었다.

3. 하천 구간별 홍수방어목표 조정 결과

앞에서 산정한 온천천 유역의 홍수 위험도와 사회적 위험도 허용기준을 FN곡선 위에서 서로 비교한 결과 <Figure 4>와 같이 해당 유역의 위험도가 약 300년 빈도까지는 허용범위를 벗어나고 있음을 확인할 수 있었다. 온천천 유역은 현재 100년의 설계빈도로 정비되어 있어 다른 지방하천에 비해 홍수방어목표가 높다고 할 수 있으나 배후지역의 넓은 침수면적과 높은 인구밀도로 인해 위험도 허용기준을 상회하게 되며, 따라서 특정 구간을 대상으로 설계빈도를 조정하여 위험도를 저감할 필요가 있다고 해석할 수 있다.

조정대상구간은 하천기본계획상 구분된 홍수위 산정의 주요 구간 ON-1에서 ON-9까지 기준점을 대상으로 선정키로 하였다. 각 구간에 대해 홍수 영향지역 내 인구(a_i), 건축물(b_i), 토지이용방식(c_i)을 200년 설계빈도의 기준으로 살펴보았는데, 특히, <Figure 5>와 같이 하류의 $i=7$ 에서 9까지의 세 구간에서 눈에 띄는 점을 확인할 수 있었다. 영향인구의 경우 유역 전체의 76,391명 가운데 64,437명이, 영향 건축물의 경우 유역 전체의 2,561개에 가운데 2,402개가 해당

구간에 집중되어 있었다. 침수영향 면적 가운데 도시로 이용되는 1.66km^2 의 영향받은 토지도 1.58km^2 이 해당 구간에 집중되고 대부분 홍수피해에 민감한 주거용도로 활용되고 있었다.

위 결과를 바탕으로 각 구간의 홍수 영향지표를 산정한 결과는 <Table 2>와 같다. 홍수로부터 영향을 받는 인구는 $i=3$ 구간에서 약간 높고 하류구간인 $i=7\sim 9$ 구간이 심각하게 높아지는 것을 확인할 수 있었으며, 건축물과 토지이용방식의 경우에도 $i=7\sim 9$ 구간

Figure 5 _ Result of Flood Impact (1/200yr; Land Use, Population, Building)

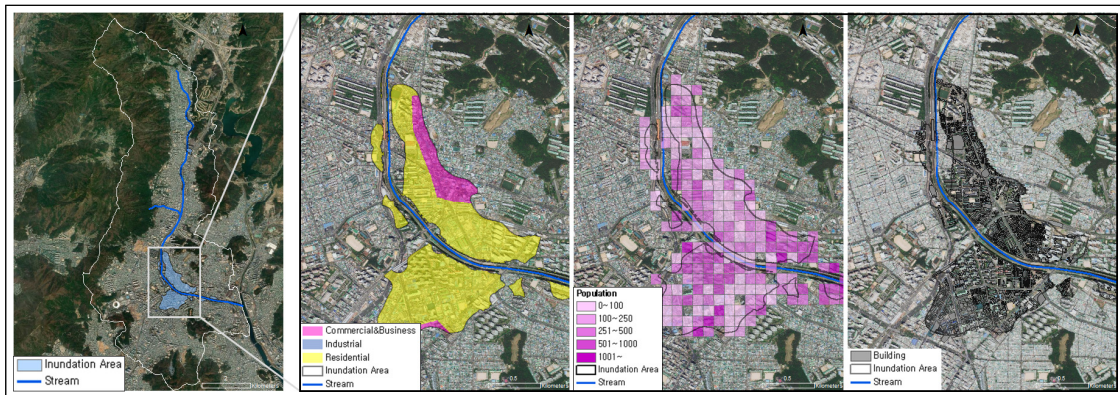
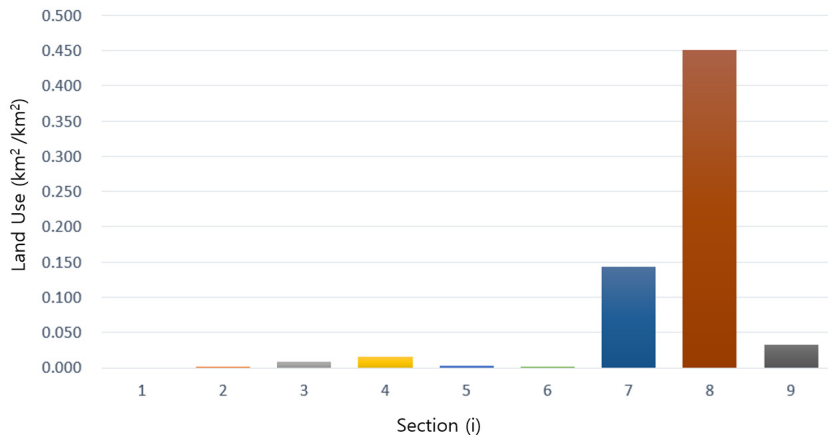
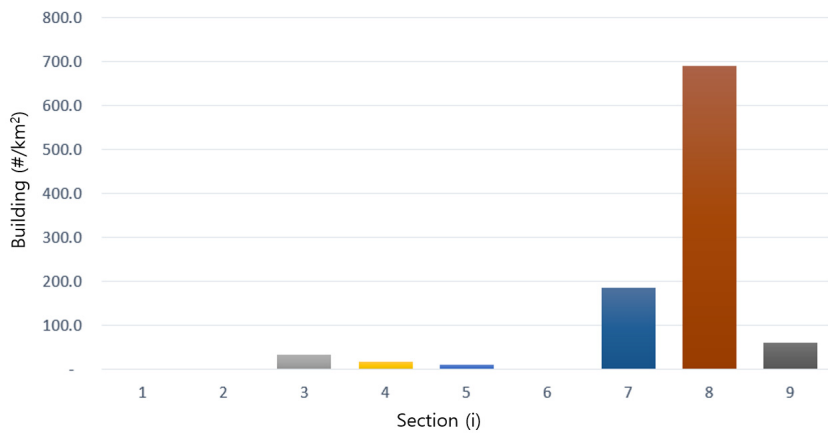
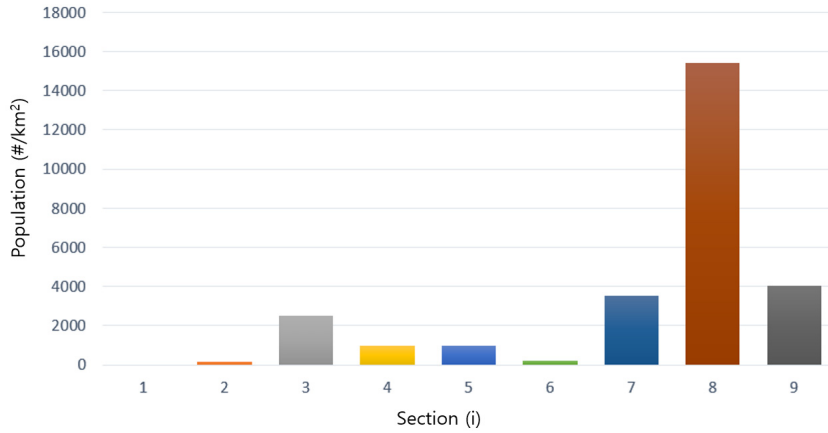


Table 2 _ Analysis of Impact Index by Section

i	Section	Impact Index			Map
		Population (#/km ²)	Building (#/km ²)	Land Use (km ² /km ²)	
1	Upper Stream~ON-1	0.0	-	0.0000	
2	ON-1~ON-2	181.0	0.8	0.0003	
3	ON-2~ON-3	2488.3	34.2	0.0089	
4	ON-3~ON-4	974.2	18.0	0.0150	
5	ON-4~ON-5	954.6	11.1	0.0026	
6	ON-5~ON-6	223.3	1.2	0.0016	
7	ON-6~ON-7	3510.8	186.7	0.1428	
8	ON-7~ON-8	15396.2	689.8	0.4506	
9	ON-8~ON-9	4039.6	61.6	0.0331	

(continued)

Table 2_Analysis of Impact Index by Section (continued)



에서 심각하게 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 종합해 볼 때 온천천 유역의 홍수방어목표는 $i=7$ 에서

$i=9$ 까지의 하류 구간을 대상으로 위험도 허용기준을 충족시키도록 상향 조정이 필요하다고 생각된다.

IV. 결론

본 연구는 홍수방어 관련 의사결정에서 QRA와 위험도 허용기준 설정이 국제적으로 중요한 방법론으로 부상함에 따라 하천구간의 설계빈도 적정화를 위해 그 유용성을 온천천 유역을 대상으로 실증하고자 하였다. 하천의 설계빈도, 배후지역의 개발여건을 고려하여 정량적인 위험도와 적절한 허용기준을 분석하고 필요한 절차 및 평가방법을 제안하였으며 결과는 크게 세 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 홍수와 관련된 사회적 위험도 허용기준을 산정하였다. 재해연보를 통해 해당 기간 내 호우로 인한 사망자 발생 사상을 수집 및 분석한 결과 국가기준의 사회적 위험도를 산정할 수 있었으며, 이를 온천천 유역의 인구로 환산한 결과 $SR = 3.08 \times 10^{-2}/n^{0.703}$ 의 관계가 있는 것으로 분석되었다.

둘째, 온천천 유역의 홍수 위험도가 사회적으로 용인할 수 있는지를 체계적으로 평가하였다. 설계기준을 초과한 홍수가 발생할 때 수많은 인구가 영향을 받게 됨을 알 수 있었다. 또한 이를 FN곡선을 작성하여 살펴보았는데 온천천 유역은 약 300년 빈도의 홍수까지는 사회적 위험도 허용기준을 충족시키기 힘들다는 것을 알 수 있었다. 즉, 온천천 유역은 사회적 위험도의 허용기준을 상회하므로 현재 홍수방어가 불충분하다고 할 수 있다.

마지막으로, 홍수 위험도의 효율적인 저감을 위해 조정구간을 선정하였다. 하천기본계획 시 구분된 각각의 구간에 인구, 토지이용, 건축물에 대한 지표를 통해 $i=7$ 에서 $i=9$ 까지의 하류 구간을 중심으로 홍수방어목표의 조정이 필요할 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과를 종합해 보면 해당 하천 전 구간에 걸쳐 현재 홍수방어목표 및 설계기준에 제시된 홍수방어목표 하한치를 적용한 뒤 FN곡선을 통해 정량

적인 위험도를 평가하게 된다. 그다음 위험도 허용기준을 초과하게 되면 하천의 특정구간에 대한 홍수방어목표를 상향 조정함으로써 물리적 영향 및 사망자 수 발생확률을 낮추는 방법을 검토할 수 있을 것이다. 본 연구는 인명손실을 기준으로 사회적 위험도 허용기준을 시범적으로 적용하였으나 이외에도 건물 및 시설의 경제적인 피해, 광역적인 사회기능 피해 등을 기준으로 할 수 있을 것으로 생각된다.

우리나라는 2018년 하천설계기준의 개정을 통해 하천 배후지역의 이용현황에 따라 설계빈도를 차등화하는 제도를 도입하고 있지만 주변 지역의 사회·경제적 상황을 정량적으로 평가하는 방법이나 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서 제시한 위험도 평가 방법, 허용기준 설정 등을 활용한다면 유역 홍수방어 목표의 일률적 상향이 아닌 조정 대상 구간을 합리적으로 선정할 수 있게 되며 국민안전을 보다 효율적으로 달성하는데 기여할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 국토교통부 국토지리정보원. <http://www.ngii.go.kr> (2020년 12월 18일 검색)
MOLIT National Geographic Information Institute. <http://www.ngii.go.kr> (accessed December, 18).
2. 이상은, 이종소. 2020. 하천의 홍수방어목표 적정성 제고방안. 국토정책Brief 774호. 세종: 국토연구원.
Lee Sangeun and Lee Jongso. 2020. Improve the Adequacy of River Flood Defense Level. *KRIHS Policy Brief* no.774. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
3. 국토교통부. 2018. 하천설계기준. 국토교통부 고시 제 2018-969호(12월 31일 전면개정).
Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2018. River Design Criteria. 2018. MOLIT No.2018-969(December 31, 2018).
4. 부산광역시. 2017. 온천천 하천기본계획 보고서. 부산광역시

- 시 고시 제2017-91호(3월 29일).
- Busan City. 2017. Oncheoncheon River Master Plan. Busan No.2017-91(March 29, 2017).
5. 한강홍수통제소. 2011. 지역별 피해 특성을 고려한 홍수안전도 평가연구: 선택적 홍수방어 방법론 개발 및 시범적용. 서울: 국토해양부.
Han River Flood Control Office. 2011. *A Study on Flood Safety Evaluation Considering the Characteristics of Damage: Development of Selective Flood Protection Methodology and Pilot Application*. Seoul: MLTMA.
 6. 행정안전부. 1994-2018. 재해연보. 세종: 행정안전부.
MOIS. 1994-2018. *Disaster Annual Report*. Sejong: MOIS.
 7. Abedinisohi, F. 2014. *Societal Risk Criteria: History, Current Risks, Risk Aversion and Scale Effect*. Ph.D. diss., University of Marland.
 8. ASFPM(Association of State Floodplain Managers). 2004. Reducing flood losses: Is the 1% chance(100-year) flood standard sufficient? *Background Reading for the Gilbert F. White National Flood Policy Forum*, September 21-22. Washington DC: National Academies Keck Center.
 9. Cutter, S. L. and Smith, M. M. 2009. Fleeing from the hurricane's wrath: Evacuation and the two Americas. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 51, no.2: 26-36. <https://doi.org/10.3200/ENVT.51.2.26-36>
 10. De Bruijn, K., Beckers J. and van der Most, H. 2010. Casualty risks in the discussion on new flood protection standards in the Netherlands. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 133, 73-83. <https://doi.org/10.2495/FRIAR100071>
 11. De Silva, K.G.V.K., Gunasekera, M. Y. and De Alwis, A.A.P. 2017. Derivation of a societal risk acceptance criterion for major accident hazard installations in Sri Lanka. *Process Safety and Environmental Protection* 111: 388-398. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.025>
 12. Farmer, R. 1967. Siting criteria: a new approach. *Containment and Siting of Nuclear Power Plants Proceedings of a Symposium*. Vienna.
 13. Ferreira, J. and Slesin, L. E. 1976. *Observations on the Social Impact of Large Accidents*. Cambridge: MIT Operations Research Center.
 14. Griesmeyer, J. M., Simpson, M. and Okrent, D. 1979. *Use of Risk Aversion in Risk Acceptance Criteria*. Los Angeles: UCLA.
 15. Jonkman, S. N. 2007. *Loss of Life Estimation in Flood Risk Assessment, Theory and Applications*. Delft: Dissertation, Delft University of Technology.
 16. Jonkman, S. N., Jongejan, R. B., Maaskant, B. 2010. The use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy – nationwide estimates of societal risk and policy applications. *Risk Analysis* 31, no.2: 282-300. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01502.x>
 17. Jonkman, S. N., Kok, M., van Ledden, M. and Vrijling, J. K. 2009. Risk-based design of flood defence systems: a preliminary analysis of the optimal protection level for the New Orleans metropolitan area. *Journal of Flood Risk Management* 2, no.3: 170-181. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01036.x>
 18. Jonkman, S. N., van Gelder, P.H.A.J.M. and Vrijling, J. K. 2003. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials* 99, no.1: 1-30.
 19. Le Guen, J. 2010. The tolerability of risk framework. *Proceedings of Exploration of Tolerable Risk Guidelines for the USACE Levee Safety Program*. March 17-18, Washington, DC.
 20. Miller, A., Jonkman, S. N. and van Ledden, M. 2015. Risk to life due to flooding in post-Katrina New Orleans. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15, no.1: 59-73. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-59-2015>
 21. Pilgrim, D. H. and Cordery, I. 1974. Design Flood Estimation: An appraisal of philosophies and needs. *Water Research Laboratory, Report No.140*. Sydney: The University of New South Wales.
 22. US ACE(U.S. Army Corps of Engineers). 2010. Levee safety program and tolerable risk guidelines. *Proceedings of Exploration of Tolerable Risk Guidelines for the USACE Levee Safety Program*. March 17-18, Washington, DC.
 23. US ACE(U.S. Army Corps of Engineers). 2020. *Water Resource Policies and Authorities – US Army Corps of Engineers Levee Safety Program*. EC 1165-2-218. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
 24. Vrijling, J. K. 2001. Probabilistic design of water defense systems in the Netherlands. *Reliability Engineering & System Safety* 74, no.3: 337-344. <https://doi.org/10.1016/S0951->

25. Wolshon, B. 2006. Evacuation planning and engineering for Hurricane Katrina. *Roads Bridges* 36, no.1: 27-34.

- 논문 접수일: 2021. 1. 20.
- 심사 시작일: 2021. 2. 3.
- 심사 완료일: 2021. 3. 8.

요약

주제어: 홍수위험관리, 홍수방어목표, 정량적 위험도 평가, 사회적 위험도, FN곡선

우리나라는 하천을 설계하는 데 하천 배후지역의 위험도를 고려하기보다는 하천등급에 따라 홍수방어목표, 즉, 설계빈도를 구분하는 방식을 채택하고 있다. 원칙적으로는 하천 구간의 특성을 고려하도록 하나, 과학적인 판단기준 및 분석방법이 불분명한 실정이다. 이에 본 논문에서는 신뢰성 공학에서 제안한 정량적인 위험도 평가를 응용하여 하천 구간별로 설계빈도를 합리적으로 설정하는 방법을 제안하고 온천천 유역의 사례연구를 통해 방법론의 유용성을 실증하고자 하였다. 먼저, 다양한 설계빈도 조건에서 인

명피해를 분석하고 FN곡선을 통해 위험도를 나타내었다. 다음으로는 해당 유역의 실정에 맞는 사회적 위험도 허용기준을 도출한 뒤 앞에서 산정한 위험도의 적정성을 판단하였다. 마지막으로, 하천 배후지역의 인구, 토지이용, 건축물 등의 분포를 고려한 결과 인구밀도가 매우 높아지는 일부 구간에서 설계빈도 상향 조정 등 위험 저감대책이 필요함을 실증하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 향후 하천기본계획 수립 시 하천의 구간별 홍수방어목표를 적정화하는 데 유용할 것으로 판단된다.