복원탄력성을 고려한 우수관망 신뢰도 산정방법의 개선 연구

A Study on the Improvement of Reliability Estimation Method for Sewer Network considering Resilience

김동준* · 송양호** · 이정호***

Kim, Dong Jun*, Song, Yang Ho**, and Lee, Jung Ho***

Abstract

In city centers, the damage caused by inundation is aggravated by rising populations and urbanization, which extend impermeable areas. Research is needed to identify the inundation risks caused by climate change and quantitatively assess the consequences. In this study, we proposed an improved reliability study which considers resilience in the original evaluation method for the reliability of a storm sewer network. Rainfall-runoff analyses were performed on a part of Bangbae 2 drainage basin in Seoul by applying Storm Water Management Model 5 Ver. Based on the results of the application of excessive rainfall events, the original reliability evaluation method was compared with the improved reliability evaluation method. Consequently, the effect of the improvement of the cluster about 30% was confirmed when selection the central value rather than the existing representative value. The improved reliability evaluation method proposed in this study can be used as a design objective function and as an index for evaluating the inundation risk in adjacent drainage basins.

Key words : Reliability, Resilience, Sewer Network System, Storm Water Management Model

요 지

도시화로 인한 불투수면적의 증가와 인구의 과밀집 등의 문제로 인하여 도심지 내 침수발생에 따른 피해가 증가하고 있다. 기후변화로 인한 홍수 발생의 위험성을 파악하고 결과를 정량적으로 평가하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 기존에 제안된 우수관망 신뢰도 산정기법 연구에 복원탄력성을 고려한 개선된 신뢰도 연구를 제안하였다. Storm Water Management Model 5 Ver.을 바탕으로 서울시 방배2 배수분구 일부 유역에 대해 강우-유출분석을 수행하였다. 초과강우사상 적용에 따른 결과들을 바탕으로 기존의 신뢰도 산정기법과 개선된 신뢰도 산정기법을 이용하여 비교하였으며, 그 결과 기존 대표값 대비 중심 값 선정시 약 30%의 개선된 군집의 효과를 확인하였다. 본 연구에서 제안한 개선된 우수관망 신뢰도 평가기법은 향후 인접한 배수분구간의 위험도 평가 및 설계목적함수로 활용이 가능하다.

핵심용어 : 신뢰도, 복원탄력성, 우수관망 시스템, Storm Water Management Model

1. 서 론

기후변화로 인해 발생하는 자연재해의 위험은 비단 국내 뿐만 아니라 전 지구적으로 증가하고 있다. 도시화 이후 지속적인 인구 증가와 과밀집 그리고 지역 개발로 인한

재산 가치가 상승하면서 자연재해에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 국내거주 인구의 대부분은 도시지역에 생활권이 편중되어 있어 침수의 발생빈도와 그에 따른 피해액 역시 증가하는 추세로 침수위험에 대한 잠재력을 내포하고 있다. 침수에 관한 문제는 매년 반복적으로 발생하는 문제로

*정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: junhydro@gmail.com)

Member, Master Course Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

**정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 연구교수(E-mail: syho@daum.net)

Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

***교신저자, 정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-42-821-1106, Fax: +82-42-821-1589, E-mail: leejh@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

홍수와 같은 재난 유형을 대비하고자 내배수시설을 비롯한 방재시설물 활용방안, 투수면적 확대에 따른 우수유출 저감 그리고 지역적 특성을 고려한 홍수 위험성 평가와 관련된 다양한 연구가 수행되었다. 관련 연구들을 살펴보면 Al-Amin et al. (2019)은 동남아시아에 위치한 개발도상국들의 재해 위험성을 고찰하고 해수면 상승에 따른 홍수취약성에 대한 연구를 수행하였다. Sadiq et al. (2019)은 미국의 지역사회 기반 홍수 위험성 평가와 관련된 연구들을 조사하고 공통 지표를 활용한 방법론의 필요성을 주장하였다. Wu et al. (2020)은 기후 변화로 인해 강우의 발생빈도가 증가할 것을 고려하여 Bayesian Network을 이용하여 Zhengzhou 유역에 대한 홍수위험도 평가를 실시하였다.

재난유형에 초점을 두는 우리나라와 달리 미국, 영국, 호주 등은 도시나 지역사회의 재해 취약성 평가 및 적응, 회복 능력을 포함하는 복원력(Resilience) 개념을 강조하고 있다(Kim et al., 2010). 이러한 이유를 살펴보면 자연재난으로 발생한 피해의 복구를 위해 소요되는 비용이 천문학적으로 증가하고 있기 때문이다. 따라서 홍수를 포함한 자연재해를 대비하기 위한 연구와 더불어 피해 발생 이후에 신속한 복구를 보장할 수 있는 복원력에 대한 개념을 통해 재해위험을 감소시킬 수 있는 기능을 함께 강화해야 한다(Cutter et al., 2008; Campbell et al., 2019). 국내에서도 자연재난 관리에 있어 기존의 대응·복구 중심의 사후관리에서 벗어나 예방·대비·대응·복구의 전 주기적인 관리를 통한 사회구현의 중요성이 강조되고 있다. Kwon et al. (2018)은 우수관망의 최적설계 과정에 침수피해 심도(Failure Depth)를 탄력성 제약조건으로 고려하여 침수량과 설계비용간의 관계를 검토하였다. Hong et al. (2019)은 레질리언스 역량과 조직효과성 간의 영향관계 분석을 통해 조직구성원들의 재난에 대한 역량강화 방안의 중요성을 강조하였다. Seo et al. (2019)은 재난 예방 분야의 안전서비스 구축을 위한 국내외 재난 안전 관련 연구개발 동향을 파악하고 중장기 개발전략에 대한 방향성을 제안하였다. 이들 연구들의 공통점은 기후변화를 고려한 재해예방 및 위험도 평가를 바탕으로 대응능력 향상을 위한 의사결정의 중요성을 언급하고 있다. 의사결정의 과정에 사후 수습·복구과정의 단축을 위한 미래 복원탄력성을 고려하였다.

선행 연구들에서 다루었던 재해위험도 평가와 미래 복원탄력성의 공통성은 발생하는 여러 문제들의 발생 유형 및 영향 분석을 바탕으로 유형 및 원인에 대하여 상대적으로 위험에 노출된 값을 산출하는 과정이라고 판단된다. 이에 따라 홍수 발생 가능성을 파악하고 정량적으로 평가하는 기능에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 개선된 신뢰도 기법을 통해 위험도 평가체계 내에서 파괴현상에 대한 정량적인 지표를 선정하고자 하였다. 선행 연구로써 Lee and Park (2012)의 단일 배수분구에서 관거의 구조적 설계 변화에 따른 치수 성능에 변화에 대한 평가 지표의 연구가 있다.

또한, Song (2013)의 다중 배수분구에서의 상대적인 치수 성능 비교를 연구가 있다. 본 연구에서는 앞서 제안한 연구들의 우수관망 신뢰도 평가기법의 성능을 기반으로 복원탄력성 개념을 추가로 적용하여 상대적으로 개선된 신뢰도 평가 접근법을 제안하였다. 본 연구의 절차는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Working Process According to Research Content

2. 연구방법

본 연구의 목표는 불확실한 기후변화로 인해 발생하는 침수 문제와 관련하여 우수관망 시스템의 개선된 치수기능의 수치화 과정이다. 본 연구에서는 기존의 연구에서의 치수 기능을 기반으로 산정된 신뢰도와 함께 개선된 신뢰도로써 기존의 신뢰도에 복원탄력성을 통합한 연구를 진행하였다. 이에 본 장에서는 우수관망 신뢰도 산정방법에 필요한 기본 이론과 복원 탄력성에 대한 정의를 살펴보고, 결과 도출과정에 대한 정보를 나열하고자 한다. 연구방법에는 기후변화 시나리오를 대변하는 초과강우사상을 고려하였으며 치수 성능과 관련 있는 지표인 월류발생량(Flood Volume at Nodes, V_o)과 월류발생 지점 수(Flooded Nodes, N_o) 그리고 지속가능성을 대변하는 복원탄력성 지수(Resilience Index, R_i)를 반영하여 도심지 치수대책에 대한 참고자료를 도출하는데 그 목적이 있다. 결과도출을 위해서는 도심지 우수관망을 이용한 강우-유출해석이 필요하며 EPA Storm Water Management Model (SWMM) 5 Ver.을 활용하였다.

2.1 Utopian Approach 기반의 우수관망 신뢰도 분석

우수관망 시스템이 발휘해야 할 성능은 결국 시스템이 설계 과정에 반영된 빈도별로 요구되는 치수 능력을 발휘하는 것이다. 잦은 집중호우로 인한 치수 성능의 중요성이 더욱 강조됨에 따라 관련 기술 개발에는 시간적·경제적인 측면을 반영함으로써 이를 대응하는 요소기술로의 역할이 필요하다. 이와 관련하여 Lee and Park (2012)과 Song (2013)은 우수관망의 치수안전성 평가를 위한 신뢰도 분석기법을 제안하였으며 이들 연구에서는 월류발생량과 월류발생지점수를 바탕으로 Fig. 2와 같이 관망 구성에 따른 파괴 현상을 고려한 침수위험 평가를 실시하였다.

Fig. 2. A Difference of Destruction Phenomenon (flood) by Design Composition of Sewer Networks

본 연구에서의 거리척도방법은 현재 운영 중인 우수관망 시스템에 치수능력을 판단하기 위한 방법으로 현재 능력 대비 초과호우 사상 발생에 대한 성능의 파괴 확률을 고려하는 것이다. 이 과정에서 고려한 지수들의 단위의 차원 및 범위의 척도를 동일시하고 상대적인 비교를 하기 위해 Utopian Approach의 거리척도방법을 이용하였다. 즉 이상점(Utopian Point)과 파괴가 일어나는 현재 상태에 대하여 그 거리 차이를 이용하는 방법을 사용하였다. 이를 그림과 수식으로 표현하면 Fig. 3 및 Eq. (1)과 같다.

$$\text{Euclidean distance: } c = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (1)$$

2.2 복원탄력성의 정의

탄력성의 개념은 근래 들어 방재분야에서 재난복원력으로써 활용되는 주요 연구주제이다. 탄력성은 환경적이며 생태적인 체계의 능력을 의미하며, 이 능력은 교란으로 인한

영향을 흡수하고, 기능적으로 온전한 형태로 되돌아가는 재조직화가 이루어지는 과정을 포함한다(Holling, 1973). 공학기술적 관점에서의 복원탄력성은 파괴가 일어나기 전의 기본 성능으로의 재기능 회복(Bounce-Back)에 중점을 두었다(Davoudi, 2012). Timmerman (1981)은 방재분야에서 복원탄력성은 재해 발생을 흡수하고 복구할 수 있는 능력이라고 정의하였다. Butler et al. (2014)은 도시 기반 시스템이 예외적인 조건에 따라 설계 수명 동안 서비스 장애의 정도와 기간을 최소화하는 정도를 복원력으로 정의 했다. 이를 바탕으로 Mugume et al. (2015)은 도시배수시스템(Urban Drainage Systems, UDSs)의 재해발생과 복원탄력성간의 상관관계를 정량화하기 위한 연구를 Fig. 4와 같이 제안하였다.

Fig. 4. Theoretical System Performance Curve for an Urban Drainage System (Mugume et al., 2015)

Fig. 4는 우수관망 시스템의 이론적 치수성과 초과강우와 같은 재해와의 관계를 표현한 곡선 $P_i(t)$ 이다. P_0 는 본래 우수관망의 치수성능 수준을 나타내며, P_a 는 가용 치수성능 한계치를 나타낸다. P_f 는 최소 치수성능 상태를 나타낸다.

Fig. 3. Utopian Approach Method Using Euclidean Distance of Two Vector Concept

곡선 $P_i(t)$ 는 재해 발생으로 인한 성능 저하에 영향을 주는 심각도(Severity)와 복구 기간 t_n 으로 결정된다(Hwang et al., 2015). 심각도는 총 홍수량과 총 유입량으로 결정된다. t_0 는 강우의 초기 발생단계로 원활한 치수성능을 나타내고 있다. t_{fs} 는 침수발생으로인한 시스템의 치수성능 감소 시작 시점, t_{mf} 는 시스템의 치수성능이 가장 낮은 상태를 가리킨다. t_{rs} 는 최소한의 기능만을 유지하던 시스템이 복구되기 시작할 때의 시점이며, t_r 은 시스템의 치수성능이 원기능으로 복구 되었을 때의 시점이다. t_n 은 우수관망 치수성능이 원 상태로 되돌아 왔을 때까지의 시간을 고려한다.

최종적으로 복원탄력성 R 은 Hwang et al. (2015)의 민감도와 Mugume et al. (2015)의 식에 의해 Eq. (2)로 정의된다. 치수 성능의 척도인 복원탄력성 지수 R 은 원 치수성능 1에서 심각도를 감한 값이다. F 는 지점들에서의 홍수량의 총합을 의미하며, D 는 홍수발생 지점들의 홍수지속기간의 평균값을 의미한다. V_{ti} 는 우수관망 내부로 유입된 총 유입량을 의미한다. 본 연구에서는 t_n 을 유역 출구에서의 유출이 종료된 시간을 반영하였다. 복원탄력성 R 의 범위는 Eq. (3)과 같다.

$$R = 1 - Sev = 1 - \frac{F}{V_{ti}} \times \frac{D}{t_n} \quad (2)$$

$$0 < R < 1 \quad (3)$$

2.3 개선된 우수관망 신뢰도 산정기법 절차

본 연구의 목표는 불확실한 기후변화로 인해 발생하는 침수 문제와 관련하여 우수관망 시스템의 개선된 치수기능의 수치화 과정이다. 본 연구에서는 기존의 연구에서의 치수기능을 기반으로 산정된 신뢰도와 함께 개선된 신뢰도로써 기존의 신뢰도에 복원탄력성을 통합한 연구를 진행하였다. EPA-SWMM 5.1을 이용하여 결정된 강우 빈도별 총 강우량(R_i) 및 적용된 최대 강우량 값(R_{max})을 도출하였다. 강우 빈도별 월류발생량(V_o)과 관망 내 총 유입량(V_i)을 통하여 Eq. (4)와 같은 빈도별 월류발생량 비율(V_i)을 도출하였다. 강우 빈도별 월류발생 지점 개수(N_o)와 총 지점 개수(N_i)를 통하여 Eq. (5)와 같은 빈도별 월류발생 지점 비율(N_i)을 도출하였다. 최종적으로 도출된 월류발생량 비율(V_i)과 월류발생 지점 비율(N_i)을 함께 고려한 신뢰도 결과값은 Eq. (6)과 같다.

$$V_i = 1 - \left[\frac{(V_o)_i}{(V_i)_i} \right] \left(\frac{R_{max}}{R_i} \right) \quad (4)$$

$$N_i = 1 - \left[\frac{(N_o)_i}{(N_i)_i} \right] \left(\frac{R_{max}}{R_i} \right) \quad (5)$$

$$\text{Reliability Value} = 1 - \frac{\sqrt{(1 - N_i)^2 + (1 - V_i)^2}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

먼저 신뢰도 결과값과 복원탄력성 값을 산정하였다. 신뢰도와 복원탄력성을 접목시킨 개선된 신뢰도 값을 산정하였다. 그 후, 앞서 산정한 기존의 신뢰도 결과와 본 연구에서의 개선방안인 복원탄력성 값을 반영한 개선된 신뢰도 결과를 거리척도방법을 사용하여 비교하였다. 기존의 우수관망 신뢰도의 연구의 경우 Fig. 5의 (a)와 같이 거리척도방법을 사용하기 위하여 좌표평면에서 각 축에 매개변수인 초과강우에 대한 월류발생 지점 수와 월류량을 적용하였다. 본 연구에서는 Fig. 5의 (b)와 같이 도출된 신뢰도 결과값과 복원탄력성 결과값을 매개변수로 변경하여 각각의 두 지수를 하나의 지수로 통합하였다. 결과 도출의 절차는 다음의 Fig. 5와 같다.

(a) Lee and Park (2012)'s (b) Improved Reliability at this Study

Fig. 5. Comparison of Flowchart Original Reliability and Improved Reliability

3. 연구결과

3.1 적용대상 유역 검토 및 강우-유출해석 모형 구축

연구 대상 유역은 강남구 방배본동 및 방배4동 일대의 약 85.3 ha의 유역이며, 유역에서 발생한 유출량은 동작대교 인근의 반포천으로 유출된다(Fig. 6). 총 215개의 맨홀과 228개의 관거로 이루어져 있으며 유역면적의 대부분이 아파트, 빌라와 같은 주거시설로 구성되어있다. 자세한 유역의 정보를 Table 1에 나열하였다. 특히 해당 유역의 경우 2001년 7월, 2010년 9월 및 2011년 7월 서울에서 발생한 대규모 침수피해의 집중적인 발생지역으로 최근까지 침수예방 대형 우수관로 증설사업이 실시된 유역에 해당한다. 현재 국가 수자원관리 종합정보 시스템(WAMIS)에서 재해위험지구 침수위험 1등급으로 분류되어있다. 분석을 위해 적용된 강우사상은 서울의 확률강우량을 바탕으로 Yoo and Na (2019)의 연구에 따라 서울의 적정 호우사상인 중호우에서 최빈분위인 2분위법(Huff's Quartile Method)을 적용하였다(Table 2).

(a) Google Map Image of Bangbae 2 Basin

(b) EPA-SWMM

Fig. 6. Bangbae 2 Drainage Basin at EPA-SWMM

Table 1. Watershed Properties of Study Area

Category	Specification
Address	Bangbae-dong, Seocho-gu, Seoul, Republic of Korea
Area (ha)	85.3
Number of Nodes/Links (EA)	215 / 228
Number of Outlets (EA)	1
Watershed Direction	The Banpo Stream of Korea

Table 2. Probable Rainfall of 1 Hour Duration for Frequency in Seoul

Frequency	5-yr	10-yr	30-yr	50-yr	80-yr	100-yr
Probable Rainfall (mm)	61.99	73.62	91.19	99.24	106.56	110.02

3.2 연구결과

본 장에서는 복원탄력성을 고려한 개선된 우수관망 신뢰도 산정결과를 나열하였다. 개선된 신뢰도 산정결과와의 비교를 위해 기존의 신뢰도 평가방법으로 도출된 결과를 그림과 함께 제시하였다. 기존의 우수관망 신뢰도 정량화식에 따른 실유역 적용 결과값은 Table 3과 같다.

Table 3은 방배 2 배수분구에서의 1시간 확률강우의 빈도별 신뢰도 결과값이다. 강우 빈도 증가로 인한 강우량 증가로 총 홍수량과 관망으로의 총 유입량의 증가를 확인하였다. 강우 발생 빈도가 증가함에 따라 월류발생량은 증가하는 양상을 보였지만, 월류발생 지점 수는 선형적인 증가 양상을 보이지 않았다. 그 결과, 5년 빈도 강우에서의 신뢰도 결과값은 0.935이지만, 100년 빈도 강우에서의 신뢰도 결과값은 0.693로 약 26% 감소하였다. 강우량 증가에 따라 우수관망의 치수능은 강우 빈도와 반비례하여 감소하는 양상을 보였다.

Figs. 7의 (a), (b)는 기존에 제안된 우수관망 신뢰도 평가법으로 산정된 신뢰도 결과값을 Utopian Approach방법으로 나타낸 그래프이다. 강우발생 빈도의 증가에 따라 신뢰도 결과값들과 이상점(1,1)과의 거리가 최소 0.092에서 최대 0.434까지의 값을 갖는 것으로 나타났다. 개선된 신뢰도 결과값 도출을 위한 복원탄력성 결과는 Table 4와 같다.

Table 4는 1시간 확률강우의 강우 빈도별 복원탄력성 결과값이다. 빈도에 반비례하는 양상을 띤 앞선 신뢰도 결과값과 달리 복원탄력성은 5년 강우빈도에서의 다른 빈도들의 결과값에 비해 평균 홍수 기간이 상대적으로 높게 나타났다. 강우 발생빈도의 증가로 인해 전체적인 유입량이 증가하여 홍수량이 증가하더라도, 한 개의 지점에 홍수량이 집중된다면, 복원탄력성은 감소한다는 것을 의미한다.

Figs. 8의 (a), (b)는 복원탄력성 결과를 Utopian Approach방법으로 나타낸 그래프이다. 복원탄력성 결과값들과 이상점(1,1)과의 거리가 최소 0.109에서 최대 0.434의 값을 갖는

Table 3. Comparison of Reliability Results for Frequency (Duration 1-hr)

Results	Frequency					
	1-hr					
	5-yr	10-yr	30-yr	50-yr	80-yr	100-yr
Rainfall Depth (mm)	62.00	73.62	91.20	99.24	106.56	110.02
Number of Flooding Node (EA)	1	13	10	8	18	19
Total Flood Volume (m ³)	0.57	1.34	7.05	10.39	13.58	15.08
Total Inflow Volume (m ³)	11.06	16.14	24.94	29.31	33.46	35.47
N_i	0.9917	0.9096	0.9439	0.9587	0.9136	0.9116
V_i	0.9085	0.8763	0.6588	0.6070	0.5811	0.5748
Reliability Value	0.9350	0.8917	0.7555	0.7206	0.6975	0.6929

(a) Original Reliability Results

(b) Enlarged Reliability Results

Fig. 7. Reliability Results with Utopian Approach**Table 4.** Comparison of Resilience Results for Frequency (Duration 1-hr)

Results	Frequency					
	1-hr					
	5-yr	10-yr	30-yr	50-yr	80-yr	100-yr
Number of Flooding Node (EA)	1	13	10	8	18	19
Total Flood Volume (m ³)	0.57	1.34	7.05	10.39	13.58	15.08
Total Inflow Volume (m ³)	11.06	16.14	24.94	29.31	33.46	35.47
Mean Flood Duration (hr)	2.42	0.21	0.38	0.51	0.24	0.23
Total Elapsed Time (hr)	1.06	1.31	2.08	2.35	2.56	2.65
Resilience Value	0.8830	0.9865	0.9484	0.9227	0.9612	0.9617

(a) Original Resilience Results

(b) Enlarged Resilience Results

Fig. 8. Resilience Results with Utopian Approach

것으로 나타났다. 강우빈도가 증가함에 따라 빈도별 결과값과 이상점과의 거리가 증가하는 선형적인 양상을 보이는 신뢰도 결과와 달리, 복원탄력성의 결과는 빈도와 관계없는 비선형적인 양상이 나타났다.

Figs. 9의 (a), (b)는 기존의 정량화 된 신뢰도 값과 복원탄력성을 반영한 개선된 신뢰도 값의 Utopian Approach 비교 그래프이다. Fig. 9(a)와 같이 기존의 우수관망 신뢰도 산정 기법에 따르면 x 축과 y 축에 각각 월류발생 지점 수(N_i)와 월류발생량(V_i)을 적용하였다. 그러나 (b)의 본 연구에서는 x 축에는 복원탄력성(Resilience)을 적용하고, y 축에 기존의 신뢰도(Reliability)를 적용하였다. 기존의 정량화된 신뢰도 결과값에서의 이상 값과 빈도별 결과값들의 사이 거리 값들의 총 합은 1.848이었으며, 개선된 신뢰도 결과값에서의 이상 값과 빈도별 결과값들의 사이 거리 값들의 총 합은 1.75였다. 기존의 신뢰도에 복원탄력성 개념을 도입함으로써, 이상 값과 빈도별 결과값들의 거리의 합이 각각 1.848에서 1.75로 5%가 감소하여 이상점(1,1)에 더욱 가까워 졌다. 이는 이상점과의 거리를 비교하여 가장 거리가 짧은 대안을 합의안으로 채택하는 방법인 Utopian Approach에 따라, 개선된 신뢰도가 기존의 신뢰도보다 더욱 이상적인 지수이다.

Figs. 10의 (a), (b)는 기존에 제안된 우수관망 신뢰도 평가 기법으로 도출된 신뢰도 결과값 Fig. 10(a)와 복원탄력성 지수를 반영한 개선된 신뢰도 결과값 Fig. 10(b)를 비교하는 Median Approach 비교 그래프이다. 기존의 기법으로 도출된 신뢰도 결과값 Fig. 10(a)에서의 중심 값과 결과값들의 사이 거리 값들의 합은 0.782이었으며, 개선된 신뢰도 기법으로 도출된 결과값 Fig. 10(b)에서의 중심 값과 결과값들의 사이 거리 값들의 합은 0.551이었다. 상단의 두 그래프와 같이 기존의 신뢰도에 복원탄력성을 반영함으로써, 기존의 형태에서 약 30%만큼 중심 값과 결과값들 사이 거리가 감소하였으므로, 상대적으로 더욱 군집된 결과를 확인할 수 있었다. 기존의 형태보다 더욱 군집을 이루었기 때문에 중심 값의 대표성이 더욱 명확해지는 장점을 갖는다. 더불어 두 결과값을 비교하였을 때, 중심점에 더욱 가까운 개선된 신뢰도가 더욱 이상적인 지수라 판단할 수 있다.

결국 복원력 정량화를 통한 본 연구의 목적은 결국 실패 가능성을 최소화하고자 하는 신뢰도 기반의 이론적 정의와 일치한다. 이러한 정량화 과정이 의미하는 바는 기후변화에 따른 도시 내배수 시스템의 치수능력 및 개선을 위한 현재 상태를 나타내는 역할을 한다. 본 연구에서 제안한 방법을 통해 월류발생에 따른 도심지 내수침수 위험도를 평가하고

Fig. 9. Original Reliability and Improved Reliability Results with Utopian Approach

Fig. 10. Reliability and Improvement Reliability Results with Median Approach

수치로 정량화하는데도구로 활용하는 데에 참고자료로 활용이 가능하다.

4. 결 론

다수의 복원력과 관련된 연구들은 사례의 개념화를 바탕으로 양적 측정도구로 활용하고 있다는 특징을 갖는다. 그러나 기존의 근래 우수관망 시스템의 치수능력과 관련되어 발생하는 문제점들을 살펴보면 비단 기후변화로 인한 문제가 아닌 설계 과정에서 반영하지 못하는 지역적 수준에서 발생하는 중요한 사회적 및 거버넌스 요소를 포착하지 못하고 있다.

본 연구에서는 도시 우수관망 침수 위험도 평가의 한 지표로써 기존의 신뢰도 지수에 복원탄력성을 접목하여 개선된 신뢰도 지수를 제안하였다. 기존의 우수관망 신뢰도 연구의 경우 거리척도방법을 사용하기 위하여 좌표평면에서 각 축에 매개변수인 초과강우에 대한 월류발생 지점수와 월류량을 적용하였다. 본 연구에서는 도출된 신뢰도 결과값과 복원탄력성 결과값을 매개변수로 변경하여 각각의 두 지수를 하나의 지수로 통합하였다. 이에 따라 본 연구에서는 다음과 같은 결론들이 도출되었다.

첫째, 기존의 우수관망 신뢰도 결과값 들이 강우빈도가 증가함에 따라 선형적인 경향의 결과를 보였지만, 복원탄력성은 강우빈도와 관계없이 비선형적인 경향의 결과를 보였다. 두 지수를 통합하여 Median Approach 방법을 통해 비교하였을 때, 개선된 신뢰도 결과값들과 중심값에 대한 사이거리가 기존의 신뢰도 결과값 들과 중심값에 대한 사이의 거리 합보다 30% 감소하여 보다 균집된 특성을 확인하였다.

둘째, 복원탄력성 결과값은 강우빈도에 반비례하여 감소할 것이라는 원념과는 달리, 가장 작은 강우 빈도인 5년 강우 빈도에서 가장 작은 성능 값이 도출되었다. 즉, 관망 내 전체적인 유입량보다는 한 개의 지점에 부하량에 대한 영향성을 나타내는 결과로 판단되었다.

셋째, 기존의 우수관망 신뢰도에 복원탄력성을 접목시켜 개선된 신뢰도를 도출했으며, 거리척도기법인 Utopian Approach를 이용하여 기존의 우수관망 신뢰도와 개선된 신뢰도를 비교하였다. 기존의 우수관망 신뢰도에 비해 개선된 신뢰도가 결과값들과 이상점과의 사이거리의 합이 5% 감소하여 이상점에 가까웠기에, 개선된 신뢰도가 더욱 이상적인 지수라 판단하였다.

본 연구에서는 개선된 우수관망 신뢰도를 제안함으로써 기존 신뢰도 산정기법에서 중심값에 대한 대표성이 개선되었으며, 더욱 이상적인 지수라 판단하였다. 이에 따라, 우수관망 시스템들의 상대적인 비교 및 평가에 있어서, 다기준의사결정 기법에서의 시스템의 질적 측정도구로써 주요 치수능력 판단 인자로 사용되어 도심지 내수침수 위험도 평가와 관련된 연구에 기초 자료의 역할을 수행할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었음(과제번호 19NSPS-B154314-02).

References

- Al-Amin, A.Q., Nagy, G.J., Masud, M.M., Leal Filho, W., and Doberstein, B. (2019). Evaluating the impacts of climate disasters and the integration of adaptive flood risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 39, 101241. doi:10.1016/j.ijdr.2019.101241
- Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K., and Astarai-Imani, M. (2014). A new approach to urban water management: Safe and sure. *16th Water Distribution System Analysis Conference, WDSA2014, Procedia Engineering*, Vol. 89, pp. 347-354.
- Campbell, K.A., Laurien, F., Czajkowski, J., Keating, A., Hochrainer-Stigler, S., and Montgomery, M. (2019). First insights from the flood resilience measurement tool: A large-scale community flood resilience analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 40, 101257. doi:10.1016/j.ijdr.2019.101257
- Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., et al. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, Vol. 18, No. 4, pp. 598-606.
- Davoudi, S. (2012). Resilience: A bridging concept or a dead end?. *Planning Theory and Practice*, Vol. 13, No. 2, pp. 299-307.
- Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-23.
- Hong, S.H., Seo, S.H., and Yi, W.H. (2019). Influence of resilience capability on organizational effectiveness of disaster management organizations. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 4, pp. 73-79.
- Hwang, H., Lansey, K., and Quintanar, D.R. (2015). Resilience-based failure mode effects and criticality analysis for regional water supply system. *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 17, No. 2, pp. 193-210.
- Kim, H.J., Kim, T.H., and Lee, G.J. (2010). *Classifying the urban elements and setting up the directions for*

- developing urban disaster prevention standard. NIDP-2010-08-02, National Institute of Disaster Prevention.
- Kwon, S., Jung, D., and Kim, J.H. (2018). Optimal sewer network design considering resilience: Resulting design comparison for different level of failure depth. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 95-106.
- Lee, J.H., and Park, M.J. (2012). A reliability evaluation method of storm sewer networks for excessive rainfall events. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 4, pp. 195-201.
- Mugume, S.N., Gomez, D.E., Fu, G., Farmani, R., and Butler, D. (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water Research*, Vol. 81, pp. 15-26.
- Sadiq, A.A., Tyler, J., and Noonan, D.S. (2019). A review of community flood risk management studies in the United States. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 41, 101327. doi:10.1016/j.ijdr.2019.101327
- Seo, Y.S., Kim, T., Lee, J., Park, S.H., Kim, Y.J., and Jung, J.W. (2019). Development of disaster safety technologies through analysis of safety service trends in disaster prevention. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 6, pp. 171-179.
- Song, Y.H. (2013). *The evaluation method of urban inundation risk using multi criteria decision making method*. Master's thesis, Hanbat National University.
- Timmerman, P. (1981). *Vulnerability resilience and collapse of society: A review of models and possible climatic applications*. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- Wu, Z., Shen, Y., Wang, H., and Wu, M. (2020). Urban flood disaster risk evaluation based on ontology and Bayesian Network. *Journal of Hydrology*, Vol. 583, 124596. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124596
- Yoo, C.S., and Na, W.Y. (2019). Analysis of a conventional Huff model at Seoul station and proposal of an improvisation method. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 2, pp. 43-55.

Received	July 9, 2020
Revised	July 9, 2020
Accepted	July 23, 2020