



탄력성을 고려한 우수관망의 최적설계: 침수피해 심도에 따른 설계안 비교

Optimal Sewer Network Design Considering Resilience: Resulting Design Comparison for Different Level of Failure Depth

권순호* · 정동휘** · 김종훈***

Kwon, Soonho*, Jung, Donghui**, and Kim, Joong Hoon***

Abstract

We are recently observing that traditional probability-based on design of urban drainage network often fails because more frequent occurrence of catastrophic heavy rainfall event from global climate change. Therefore, it is very critical to consider system's ability to prepare, react, and recover from a failure (i.e., resilience) in urban drainage network design. This study proposes a resilience-constrained optimal design model of urban drainage network which minimizes total system cost while satisfying a predefined level of failure depth (i.e., resilience measures). In addition, failure (i.e., flooding) depth refers to the level of degradation in system performance. Optimal layout and pipe sizes are identified by the proposed model comprised of Harmony Search Algorithm (HSA) for optimization and Storm Water Management Model (SWMM) for dynamic hydrology-hydraulic simulation. The proposed model is demonstrated through the design of two hypothetical networks. In addition, The resilience-based design obtained is compared to the least-cost design obtained with no resilience consideration with respect to optimized layout and pipe sizes. It is possible to adopt the optimal sewer network design that satisfying the different level of failure depth by considering stability and economy in urban drainage systems.

Key words : Urban Drainage System (UDS), Resilience, Harmony Search Algorithm (HSA), Failure Depth

요 지

최근 세계적으로 기후변화로 인해 설계빈도를 초과하는 강우가 발생함에 따라 설계빈도를 기반으로 하는 우수관망의 침수피해가 종종 발생한다. 내배수시스템에서 실패를 준비하고, 대응 및 복구하는 시스템의 능력, 즉, 복원탄력성의 개념을 고려하여 우수관망에 적용하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 침수피해 심도를 만족하고, 시스템의 총 설계비용을 최소화하는 탄력성-제약조건을 기반으로 한 최적설계모형을 제안하였고, 여기서, 실패(침수) 심도는 시스템의 저항력을 의미한다. 최적화된 관의 제원 및 노선을 결정하기 위해 강우-유출모형인 SWMM 모형과 화음탐색법을 연계 사용하고, 이를 2개의 가상 네트워크에 적용하여 유의미한 결과를 도출하였다. 또한, 최적화방법을 사용하여 관의 제원 및 노선을 결정하고, 탄력성을 기반으로 한 설계에 대한 시스템의 설계비용은 복원력을 고려하지 않는 시스템의 설계비용과 비교하였다. 도출된 결과를 통하여 내배수시스템의 안정성과 경제성을 동시에 고려하여 적절한 수준을 만족하는 도시 내배수시스템의 설계방안을 채택할 수 있다.

핵심용어 : 도시 내배수시스템, 탄력성, 화음탐색법, 침수피해 심도

*정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: zsc1599@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Student, Department of Civil, Environment and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

**정회원, 계명대학교 토목공학과 조교수(E-mail: donghwiku@gmail.com)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University

***교신저자, 정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3316, Fax:+82-2-3290-3732, E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, Korea University

1. 서 론

도시 내배수시스템(Urban Drainage Systems, UDS)은 도시지역에 강우가 발생하면 우수를 하천이나 출구로 운반하여 강으로 배출하는 도시 홍수 방어 시스템이다. 따라서, 도시지역의 발생하는 강우에 따른 유출량을 조정하는 우수관거, 빗물저류지, 빗물펌프장 등 과 같은 다양한 구성요소로 구성되어 있다. 그 중 우수관거는 유역의 맨홀로부터 유입되는 빗물을 하류단의 우수관거, 저류조 및 빗물펌프장으로 운반하여 도시지역의 침수를 방어하고, 강우 발생 시 우수를 운반하기 위한 가장 중요한 역할을 한다. 빗물저류조는 한번에 많은 양의 빗물이 우수관거를 통해 유입되면 관거의 통수능 한계를 보완하기 위해 사용되며, 하천이나 제내지에서의 침투홍수량 저감에도 효과가 있다. 또한, 빗물펌프장은 저류조에 저장된 우수를 하천으로 배출하여 도시지역의 침수를 예방한다. 도시 내배수시스템의 기능을 효율적으로 활용하기 위해 내배수시설의 구성 요소에 따른 크기 및 용량을 적절하게 결정하는 것이 중요한 문제이다.

최근 전 세계의 여러 도시에서 극한 기상의 발생패턴 변화로 인해 극심한 침수피해가 빈번히 발생하고 있고, IPCC (2014)에 따르면 향후 기상이변이 더욱 증가하여 피해가 심각해질 것으로 예상된다. 또한, 도시화에 따른 불투수면적의 증가로 인해 유출량을 증가시키고 도달시간의 감소로 침투 유출량을 증가시켜 도시지역의 침수피해에 중요한 원인이 되고 있다.

현재 국내·외에서 우수관망의 설계에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 도시지역의 홍수방어를 위한 연구 주제로는 빗물펌프장 운영, 빗물저류조 용량 결정, 우수관거의 설계 등의 여러 연구가 수행 중에 있으나, 이 중 우수관거의 설계에 초점이 맞추어 연구가 수행되고 있다. 이에 따라, 도시지역의 침수피해를 최소화하기 위한 우수관거의 설계는 도시지역의 침수피해를 저감하기 위한 요소 중 가장 중요하다. 도시지역의 우수관망 설계에 대한 기존 연구에서는 최적화기법을 사용하여 최단거리의 우수관거 배치 설정에서 관거의 제원, 유입량, 관거의 경사 등의 제약조건으로 설정하여 이를 만족하도록 설계하고 있다. 이러한 설계에서 최소 설계비용을 산정하여 통수 능력을 만족하고 침수를 허용하지 않는 설계에 초점을 맞춘 연구들이 대부분이다. 먼저, 최적화 기법을 초점으로 한 우수관망 최적설계에 대한 기존 연구사례들은 (1) 우수관거의 제원에 대한 최적설계 및 최단거리 노선을 동시에 결정, (2) 우수관망의 제원 결정이나 최단거리 노선 결정에 대한 두 가지의 범주로 분류할 수 있다.

먼저, 우수관거의 제원과 노선 두 가지를 동시에 고려한 연구에 대해 살펴보면, Moeini and Afshar (2012)는 Ant Colony Optimization Algorithm (ACO)과 Tree Growing Algorithm (TGA)을 사용하여 내배수시스템의 관경 및 노선 결정하고 최소비용을 산정하였다. 대부분의 연구에서는 최

적화기법을 이용하여 우수관망의 관경 및 노선 결정을 수행하고, 해당유역의 최소비용을 산정하여 최적설계 기법을 제시하였다(Argaman et al., 1973; Li, 1986; Walters and Templeman, 1979; Walters and Smith, 1995; Diogo and Graveto, 2006; Haghghi, 2013; Steele et al., 2016). 두 번째로 제원이나 노선 중 한 가지만 고려한 연구에 대해 살펴보면, 먼저 관경 결정을 통한 최적설계에 대한 연구는 맨홀 사이의 연결 관거에 따른 최소비용의 관 경사 및 관경을 결정하기 위해 DDDP (Discrete Differential Dynamic Programming) 방법을 사용하여 최적설계 조건을 도출하였다(Mays and Yen, 1975; Mays and Yen, 1975). 관 경사 및 관경을 고려하여 해당 유역의 빗물펌프장의 규모 및 운영비용을 추가적으로 고려하여 관경을 결정하는 최적설계에 관한 연구를 수행하였다(Merritt and Bogan, 1973; Froise and Burges, 1978). 최적 노선을 결정하기 위한 연구로는 Tekeli and Belkaya (1986)는 맨홀 사이의 연결방향에 따라 standard shortest path algorithm을 이용하여 Layout Generation Algorithm을 개발하였다. Weng and Liaw (2005)은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 맨홀 사이의 노선방향을 결정하고 결정된 연결 노선에 해당하는 최소비용의 최적설계 모형을 개발하였다. 또한, Lee (2010)는 우수관망에서 침투유출량을 최소화하기 위해 유전자알고리즘을 이용하여 노선결정을 하였고, Kim et al. (2009)은 우수관망에서 관거의 노선 변경에 따른 침투유출량을 저감하였다.

앞서 언급되었던 연구들의 대부분은 관경결정 및 노선결정에 초점을 맞추어 침수를 전혀 허용하지 않기 위한 내배수시스템의 설계를 기반으로 수행되어 왔다. 즉, 침수를 전혀 허용하지 않는 설계는 일반적으로 빈도를 초과한 강우사상이 발생하였을 때 심각한 침수피해를 야기할 수 있다(ME, 2010). 만약 설계빈도를 초과하는 강우사상이 발생하는 경우에 이를 보완하기 위한 대안으로 탄력성을 고려한 설계방법을 사용할 수 있다. 이는 침수가 발생한 시스템에 탄력성을 고려하여 손상(침수)된 시스템을 복구하는데 걸리는 노력을 최소화하는 것에 초점을 맞추는 것이다. 최근 소수의 연구자들은 빈도를 초과한 강우로 인해 극심한 침수피해를 최소화하기 위한 방안으로 기존의 도시 내배수시스템에 탄력성을 구축하는 방안을 제시하였다(Lee et al., 2016; Lee and Kim, 2017; Lee et al., 2017; Djordjević et al., 2011; Park et al., 2013). 그러나 앞서 도시 내배수시스템에 탄력성을 도입했던 연구들은 강우의 설계빈도를 기준으로 내배수시스템을 설계하는 데에 초점을 맞추어 왔다. 설계빈도를 기준으로 내배수시스템을 설계하게 되면 설계빈도 초과강우 발생 시 기존 시스템보다 큰 침수피해를 야기할 수 있다. 이에 따라 설계빈도를 초과하는 강우와 탄력성의 개념을 동시에 고려하여 우수관망의 침수피해의 영향을 최소화하고, 손상된 내배수시스템을 초기 상태로 복구하는데 걸리는 시간을 최소화하는 내배수시스템의 설계기법이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 도시 내배수시스템에 탄력성의 개념을 고려하고 최적화기법인 화음탐색법(Harmony Search Algorithm, HSA)를 사용하여 관거의 노선 및 제원을 동시에 결정할 수 있는 탄력성-제약조건을 기반으로 한 최적설계 모형을 개발하였다. 이는 최적 설계 모형에서 설정된 제약조건을 모두 만족하고, 해당 네트워크의 각 절점에서 관경 및 노선을 동시에 결정하고, 다양한 수준의 침수피해 심도(Failure depth)를 제약조건으로 고려하여 최적화를 수행하여 최적의 설계방안을 결정하였다. 도출된 결과를 바탕으로 도시 내배수시스템의 최적 설계비용과 총 침수량을 비교하여 최적의 설계방안을 제시하여 안전성과 경제성을 동시에 고려하여 적절한 수준을 만족하는 도시 내배수시스템의 설계 방안을 채택할 수 있다.

2. 탄력성을 고려한 내배수시스템 설계 모형

본 연구의 목적은 최적화 기법을 기반으로 한 관거의 노선 및 제원을 동시에 결정하고, 이에 따른 최소비용을 산정하는 것이다. 앞서 도출된 최적설계에 해당하는 시스템의 침수량의 침투 값(MAXMAXF)을 기준으로 여러 구간의 제약조건을 설정하고, 설정한 제약조건에 따른 각각의 내배수시스템에서 우수관망의 시스템에 대한 견고성(Robustness)을 비교 및 분석하였다. 다음 절에서는 도시 내배수시스템에서 탄력성의 정의 및 각각에 대한 구성요소, 본 연구에서 제안한 모델에 대한 설명, 연구의 흐름도 및 최적화 방법에 대해 자세히 설명하였다.

2.1 내배수시스템 탄력성과 구성요소

탄력성(Resilience)이란 “To jump back”의 뜻을 나타내는 라틴어 ‘Rresiliere’를 어원으로 하며 “Bouncing back”과 동일어로 사용되는데, 이는 이전 상태로 되돌아가는 능력을 정의 한다(NDMI, 2010). 생태학자인 Holling (1973)에 의해 탄력성의 학문적인 개념이 체계적으로 제안된 바 있었고, 이는 “시스템의 지속성을 유지하고, 변화와 교란을 흡수하고 인구나 상태 변수 사이에 동일한 관계를 유지하는 능력”으로 정의하고 제시하였다. 이후, 공학, 생태학, 사회학 등의 여러 분야에서 탄력성의 개념을 사용하고 각각의 분야에 맞게 재정의 되고 있다.

공학 분야 중 재난방재 분야에서는 자연재난의 발생을 원천적으로 예방하는 것은 불가능하지만, 도시의 물리환경과 개인, 지역사회의 탄력성이 확보된다면 재난으로 인한 피해를 줄일 수 있다고 정의된 바 있으며(Kim et al., 2011), 다른 분야와 마찬가지로 여러 가지 정의가 존재하나 “재난에 적응하고 회복하는 능력”으로 짧게 정의할 수 있다. 과거의 재난방재 분야에서는 ‘재난’이나 ‘위기’를 환경적 요인에 의한 불가피한 외부적 충격, 스트레스, 피해 등의 결과로 정의내리는 경향이 있다. 재난방재 분야에서 탄력성 개념이

발전하면서 기존의 “자연재해와 이에 대한 피해“에 초점이 맞추어진 접근 방식에서 벗어나 “지역사회의 범주 안에서 자연재해를 이해“ 하는 접근방식으로 변화하고 있으며, 이에 따른 중요성 및 필요성이 언급되고 있다(Mayunga, 2009; Kang et al., 2013). 그리고 이와 같은 변화로 인해 외부적 충격, 스트레스 이후에 복구되는 관점 또한 원 상태로의 복구보다 더 나은 시스템으로의 복구로 개념적 범위를 확장 시킨 바 있다. 또한, Lee (2017)에서는 다양한 비상상황에서 성공적으로 재난 및 사고를 준비하고 그 충격을 흡수할 수 있으며 비상상황에서 회복하고 대처 할 수 있는 능력을 탄력성으로 정의하였다. 특히 토목공학에서 탄력성이 우수한 시스템이란 외부의 재난 및 사고에 빠르게 대처하고 신속하게 본래의 기능을 회복하는 시스템을 말한다(Jung, 2013).

여기서, 내배수시스템의 탄력성의 개념을 도입하면 다음과 같이 정의할 수 있다. 도시지역의 내배수시설에서 침수 및 오작동, 그리고 기능 실패(Failure)로부터의 준비, 회복 및 복구를 준비하는 능력으로 정의된다. 예를 들어, 강우가 발생하여 내배수시스템의 우수관거에서 우수를 처리하지 못하고 침수가 발생하는 것을 기능 실패라 할 수 있다. 즉, 침수량이 발생하는 순간 ‘침수 없이 우수를 배제하는 기능’이 손실되었다고 가정할 수 있다. 탄력성은 크게 강건성과 신속성의 두 가지 특성으로 분류 할 수 있다. 강건성(Robustness)은 시스템이 재난 또는 외란에 대해 그 기능을 유지하는 능력을 말하며 주로 기능 실패 발생 초기의 손상된 기능의 정도(피해심도, Failure depth)로 정량화 한다(Jung et al., 2013). 신속성(Rapidity)은 시스템이 얼마나 신속하게 기능 손실을 회복하느냐와 관련이 있으며 주로 복구시간(Time to Repair)로 정량화 한다(Jung et al., 2015; Butler et al., 2014; Scholz et al., 2012). 침수 발생 후 침수량이 전량 배제될 때까지 걸린 시간으로 신속성을 나타낼 수 있으며 초기 또는 최대침수량을 강건성 지표로 활용할 수 있다.

다음 Fig. 1은 시간에 따른, 기능 실패에 의한 시스템 기능 손실 정도 및 복구 과정을 보여주고 있다. 시스템의 탄력성은 피해심도(강건성)과 복구시간(신속성)의 함수로 동일한 외란이 주어진 상황에서 피해심도가 작고 복구시간이 짧은 시스템이 탄력적인 시스템이라 할 수 있다. 또한, 탄력성의 두 특성의 정도가 다른 경우가 존재할 수 있는데 지속시간이

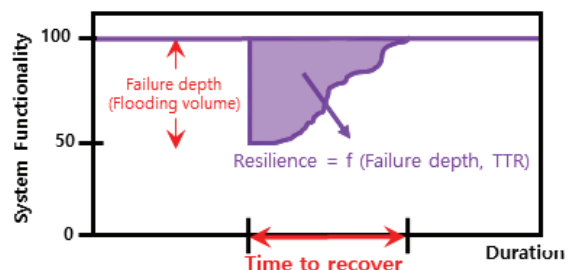


Fig. 1. System Functionality Degradation Under a Failure Event and Its Recovery After the Event

깊지만 미미한 침수(피해심도 작고 복구시간 김), 지속시간은 짧지만 극심한 피해를 주는 침수 이벤트(피해심도 크고 복구 시간 짧음)가 존재할 수 있다.

2.2 탄력성 제약조건 기반 최적설계모형

본 연구에서 제안하는 모형은 탄력성-제약조건을 기반으로 하는 최적설계모형이고, 총 2단계의 최적화 모듈로 구성되어 있다. 그리고 제안하는 모형의 흐름도는 Fig. 2에 나타내었다. 본 모형에서 시스템 침수량의 침투 값(MAXMAXF)을 제약조건으로 설정하고, 침수피해 심도 (Failure depth)의 변화에 따라 각각의 시스템에 발생하는 침수량을 비교한다. 그리고 탄력성의 구성요소인 견고성(Robustness)를 기반으로 결과를 도출하고 비교하지만, 최적화 방법으로 설정한 제약조건을 모두 만족하는 관경 및 배치를 결정하고, 강우-유출모형인 SWMM 프로그램을 활용하여 침수량 분석 등 반복적인 최적화 모듈을 수행하여 최적해에 해당하는 결과를 도출하게 된다.

먼저, 침수피해 심도(Failure depth)의 결과를 도출하기 위해 1단계 최적화 모듈에서 최적설계 비용을 산정하게 된다. 1단계 최적화 모듈에서 산정된 최적해에 해당하는 시스템 침수량의 침투 값(MAXMAXF)을 계산하고, 2단계 최적화 모듈에서 서로 다른 가중치를 부여한 값을 제약조건으로 추가 설정하고 다시 최적화 모듈을 수행하게 된다. 이를 통해 침수피해 심도(Failure depth)에 해당하는 시스템의 최적 설계비용과 침수량의 결과를 도출하게 된다. 그리고 도출된 최적해에 해당하는 시스템의 설계비용 결과를 비교하기 위해, 서로 다른 가중치를 부여한 시스템에 해당하는 탄력성의 구성요소인 견고성을 비교 분석하였다.

도시지역의 내배수시스템은 우수관, 맨홀, 빗물펌프장, 빗물저류조, 등의 기타 시설물로 구성되어 있다. 우수관망을 설계하기 위해 가장 기초적인 목적함수는 설계비용을 최소화하는데 있다. 본 연구에서 우수관망의 최적배치 설계에 적용한 목적함수는 Eq. (1)로 나타낼 수 있다. 이는 우수관망의 설계비용은 상업용 관경별 비용과 각 관로에 해당하는 길이의 곱으로 나타낼 수 있으며, 네트워크의 모든 관의 비용을 합한 것으로 나타낼 수 있다. 또한, 시스템에서 발생하는 침수량을 고려하기 위해 Eq. (2)와 같은 벌점함수를 산정하여 목적함수에 이를 부여하고, 해당 설계안에 추가설계비용을 산정하도록 식을 나타내었다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^N C_i(D_i) \times L_i + \sum_{j=1}^M P_j \quad (1)$$

$$P_j = \alpha F_j \quad (2)$$

여기에서 $C_i(D_i)$ 는 관로 i 의 길이 당 설계비용의 함수를 의미하고, L_i 는 관로의 길이, D_i 는 관로 i 의 관경을 의미한다. N 과 M 은 내배수시스템의 우수관망에 존재하는 관로의 절점의 수를 의미한다. 또한, F_j 의 경우, 시스템에서 발생하는 각 절점의 침수량을 의미하고, P_j 의 경우 각 절점의 침수량에 따라 부가되는 벌점함수를 의미하게 된다. 그리고 α 의 경우 벌점함수에 적용되는 상수를 의미하며, 주어진 문제 및 대상 유역의 특성에 따라 최적의 설계비용을 산정할 수 있도록 충분한 값을 적용하며, 본 연구에서 적용한 값의 경우, 가상 네트워크에는 10^6 , 가상 네트워크에 대한 결과를 검증하기 위한 실제 네트워크에는 10^9 을 각각 적용하였다.

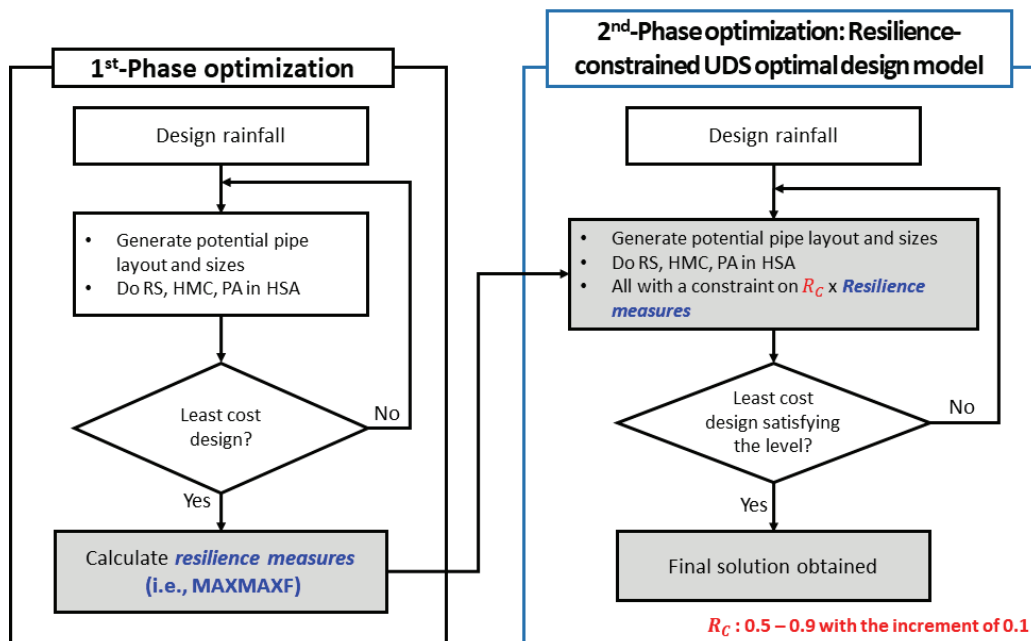


Fig. 2. The Schematic of Proposed Model in this Study

또한, 본 연구에서 목적함수를 계산하기 위해 고려한 제약 조건으로는 Eqs. (3)~(4)로 나타내었다.

$$d_i = D_i + 0.5 \quad (3)$$

$$\text{Failure depth} < R_c \times \text{MAXMAXF} \quad (4)$$

여기에서 d_i 는 각 절점에 해당하는 매설 깊이를 의미하고 이는 동결심도를 고려하여 0.5 m로 결정하였다. 그리고 침수량의 침투 깊이(MAXMAXF)은 1단계 최적화 모듈에서 도출된 최적 설계비용에 해당하는 값을 의미한다. R_c 의 경우, MAXMAXF에 해당하는 값의 가중치를 의미함으로써 각 해당 시스템의 침수피해 심도(Failure depth)를 얻을 수 있다. 이는 탄력성 구성요소인 시스템의 견고성(Robustness)과 같은 의미를 부여함으로써 도출된 각각의 해당하는 결과를 얻을 수 있다. 그리고 R_c 의 값은 0.5부터 0.9까지 해당하는 값을 의미하고 0.1단위로 총 5가지의 가중치를 고려하여 도출된 결과를 비교하고 분석하였다.

2.3 화음탐색법 (Harmony Search Algorithm, HSA)

Geem et al. (2001)으로부터 개발된 화음탐색법(Harmony Search Algorithm, HSA)은 기본적으로 음악에서 즉흥연주를 모방하고 최초로 무작위로 발생된 해집합으로부터 출발하여 지역탐색과 전역탐색을 통해 최적해를 도출하는 메타휴리스틱 최적화 알고리즘 중 하나이다. 즉흥연주는 연주자들이 모여 미리 그려진 악보의 음을 연주하는 것이 아니라, 각각의 연주자들이 즉흥적인 소리를 내며 화음을 만드는 것을 의미한다. 최적화 연산에서 결정변수(Decision Variable) 또는 설계변수(Design Variable)는 즉흥연주에서의 연주자에 해당한다. 그리고 각 연주자들이 낼 수 있는 음역 대는

각 변수가 가질 수 있는 변수의 범위라 할 수 있다. 또한 각 연주자들이 개별적인 음을 연주할 경우 각 음들이 모여 종합적으로 만들어내는 화음은 최적화 연산에서 각 결정변수들이 특정 값을 가질 때의 해당 솔루션의 목적함수에 해당한다. 즉흥연주 과정에서 초반에 발생하는 불협화음은 연습과정이 진행됨에 따라 점차 적합한 화음(Local Optimum)으로 변화하며, 또한 미적으로 가장 뛰어난 화음(Global Optimum)에 이를 수 있다.

또한, 화음탐색법은 반복연산을 통해 무작위로 생성된 초기 발생 해가 점차 변화하여 우수한 적합도를 갖는 최적해를 도출하는 과정을 거친다. 이는 반복적인 연산 시 HSA는 무작위선택(Random Selection), 기억회상(Harmony Memory Considering), 피치조정(Pitch Adjusting)의 세 가지 연산과정을 수행하며, 각 연산이 선택될 확률은 두 가지 매개변수 HMCR (Harmony Memory Considering Rate)과 PAR (Pitch Adjustment Rate)에 따라 결정된다. 그리고 솔루션의 저장공간 (Harmony Memory, HM)의 크기를 의미하는 HMS (Harmony Memory Size), 결정변수가 연속형 변수일 경우 피치조정의 폭을 결정하기 위해 사용되는 BW (Band Width)를 매개변수로 활용한다.

3. 연구 대상 네트워크

본 연구에서 제안된 탄력성-제약조건 기반 최적설계모형을 검증하기 위해 2개의 가상 네트워크에 적용하여 도출된 결과를 비교 분석을 수행하였다. 먼저, 도시 내배수시스템에서 우수관망 최적배치 설계 모형에 대한 침수피해 심도(Failure depth)의 변화 비교를 위해 Fig. 3과 같이 2개의 가상 네트워크에 적용하여 비교 분석을 수행하였다. 여기서, 관거의 연결 가능한 방향은 지표고를 기준으로 맨홀 사이의 오른쪽이나

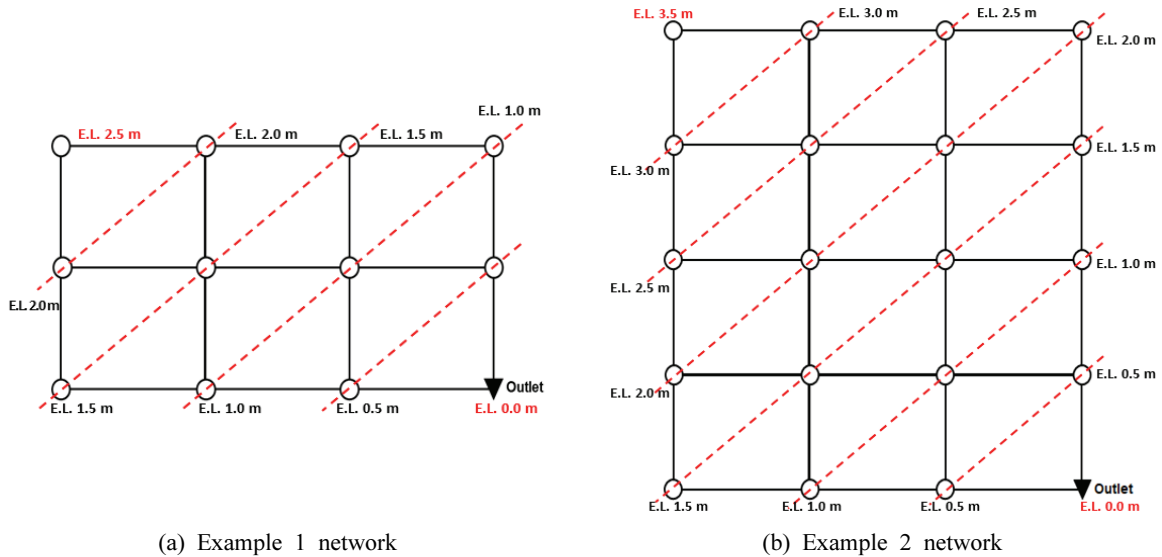


Fig. 3. Two Hypothetical Networks Used in this Study

아래쪽으로 가능하고, 각 맨홀을 기준으로 1개의 관거를 연결이 가능하도록 설정하였다. 그리고 첫 번째 가상네트워크의 절점의 개수는 15개, 연결 가능한 관거 11개로 소유역으로 결정하였고, 두 번째 가상네트워크의 절점의 개수는 20개, 연결 가능한 관거 19개로 약간 큰 유역으로 결정하였다. 본 연구에서 사용한 가상네트워크는 실제유역과 유사하게 유역면적 및 지표경사 등을 고려하여 설정하였다. 이를 통해 본 연구에서 제시된 방법론을 실제 유역에 적용하기에 앞서 가상네트워크를 통해 결과 검증을 수행하였다. 또한, 2개의 가상네트워크에서 유역정보는 맨홀 지점에 대한 유역면적 및 지표경사, 각 관거의 관경사 및 관의 길이는 동일하게 설정하였고, 해당 유역정보는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Network Input Variables in Two Hypothetical Networks

Divisions	Value
Conduit length	50m
Sub-catchment area	0.2ha
Surface slope	0.007
Conduit	0.005

4. 침수피해 심도에 따른 최적설계안 비교

본 연구에서는 서로 다른 침수피해 심도(Failure depth)를 야기하는 최적설계안을 비교하기 위해 앞서 제안한 2단계 최적설계 모형을 이용하여 연구 대상 네트워크의 관 배치와 관경을 결정하였다. 최적설계 모형 내에서 강우-유출모형을 사용하여 시스템의 침수량을 산정한다. 설계강우를 정의하기 위해 Huff (1967)가 제시한 강우분포 중 3분위를 이용하였다(Yoon, 1998). 본 연구에서는 설계빈도가 초과한 강우를 적용하기 위해 서울 지역의 150년빈도 강우를 사용하여 제안된 모형에 적용하여 분석 결과를 도출하였다.

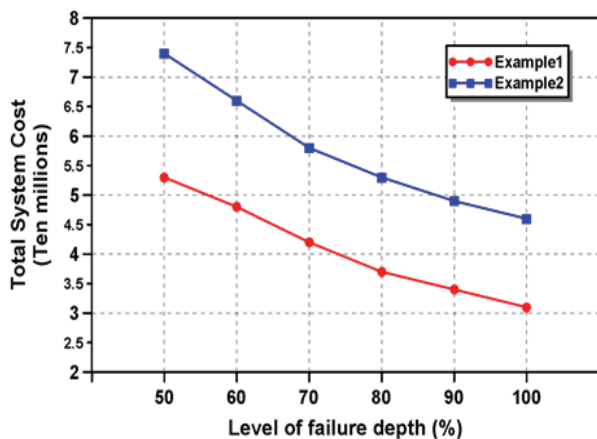


Fig. 4. Trade-off Relationship Between Total System Cost and Failure Depth in Two Hypothetical Networks

Fig. 4에서는 서로 다른 침수피해 심도에 따른 각 시스템(2개의 가상 네트워크)의 설계비용을 도시하였다. 먼저, 1단계 최적화모듈에서 산정된 최적해에 해당하는 가상 네트워크 1과 2의 시스템 설계비용은 각각 3.14 천만원, 4.62 천만원으로 산정되었고, 침수피해 심도를 최고수준(50%)으로 설정하고 산정된 시스템의 설계비용은 5.56 천만원, 7.29 천만원으로 산정되었다. 예상했던 바와 같이, 허용 침수피해 심도를 감소시킬수록 총 시스템의 설계비용이 증가하여 둘 사이에 상쇄관계(Trade-off relationship)가 존재함을 확인하였다. 이는 가상 네트워크의 1과 2에서 모두 시스템의 침수량을 줄이기 위해 시스템을 설계할 때 관경이 기존 시스템보다 크게 설정되기 때문이다.

2개의 가상 네트워크에서 모두 최소비용설계안 대비 90%, 80%, ..., 50%의 침수피해를 허용하는 설계안에서 더 많은 설계비용이 산정된 것을 확인할 수 있었다. 먼저 가상네트워크 1의 경우, 즉, 침수피해 제약조건을 고려하지 않은 최소비용설계안에서 침수피해 심도의 수준을 90%로 부여하였을 때, 약 0.3 천만원 증가, 90%에서 80%는 0.4 천만원이 증가, 70%에서 60%의 구간에서는 0.6 천만원이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 허용 침수피해 심도가 낮아질수록 단위침수피해 저감(즉, 10%)를 위해 더 많은 비용이 투자가 필요하며, 곧 한계비용(Marginal Cost)의 증가를 의미한다. 신뢰성(Reliability) 또는 탄력성(Resilience)이 이미 어느 수준에 도달한 네트워크의 해당 성능은 현저히 증가시키기는 어렵다.

가상 네트워크 2의 경우에도, 최소비용설계안에서 침수피해 심도의 수준을 90%로 부여하였을 때, 약 0.3 천만원이 증가하는 것을 확인할 수 있고, 60%에서 최고수준인 50%의 구간은 0.8 천만원까지 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 가상 네트워크 1보다 2에서 비선형성이 더 큼을 의미한다. 여기서, 2개의 가상 네트워크 모두 침수피해 심도의 수준에 대한 설계비용은 비선형적으로 증가하는 형태를 나타냈으나, 가상 네트워크 2의 경우에는 침수피해 심도의 수준이 60% 구간과 50% 구간에서 가상 네트워크 1 대비 설계비용의 증가형태가 비선형의 정도가 더 큰 것으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 2개의 가상 네트워크의 탄력성을 고려한 최적설계모형에서 침수피해를 허용하는 설계안에 따른 최적 관 배치 및 관경은 Figs. 5 and 6과 같다.

가상 네트워크 1의 경우, 최소비용설계안에서 1 m³ 이상의 침수량 발생 절점이 2개로 나타났고, 제약조건을 90%로 설정한 설계안에서는 1개로, 나머지 수준에서는 없는 것으로 나타났다. 가상 네트워크 2의 경우, 최소비용설계안에서 1m³ 이상의 침수량 발생 절점이 2개로 나타났고, 제약조건을 증가시킬수록 발생빈도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 2개의 가상 네트워크에서 모두 최소비용설계안과 90%, 80%, ..., 50%의 침수피해를 허용하는 설계안에서 각 절점의 1 m³ 이상의 침수량 발생 빈도가

수준이 높아질수록 극심한 침수량의 발생빈도는 감소하고 있는 형태를 확인할 수 있다(Figs. 5 and 6).

2개의 가상 네트워크에서 도출된 최적해에 따른 시스템의 설계비용을 포함한 침수량, 침수량의 침투 값 등의 결과를 Table 2에 정리하였다. 여기서, 1단계의 최적화 모듈에서 도출된 침수피해 제약조건을 고려하지 않은 최소비용설계안 및 침수피해 심도를 제약조건으로 허용하는 설계안에서 각각 발생한 총 침수량의 저감 비율을 확인하였다. 가상 네트워크 1에서는 침수피해 심도를 최고 수준인 50%로 부여하였을 때, 기존 시스템의 침수량에서 72.9%까지 저감되었고, 가상 네트워크 2에서는 약 70.9%까지 저감 비율을

나타난 것으로 확인되었다. 가상 네트워크 1과 2에서 침수피해 심도의 제약조건 수준이 높아질수록 각 절점의 최대 침수량은 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 침수피해를 허용하는 설계안은 침수피해 심도의 수준이 높아질수록 침수 저감량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 설계비용을 투자하였을 때, 이전과 같은 시스템의 침수량을 저감할 수 있는 것이 아니라 더 많은 설계비용을 투자해야 시스템의 침수량을 저감할 수 있음을 의미한다. 그리고 최소설계비용 및 설정된 제약조건을 만족하는 시스템이 저감할 수 있는 최대의 침수량에 근접했다는 것을 의미한다.

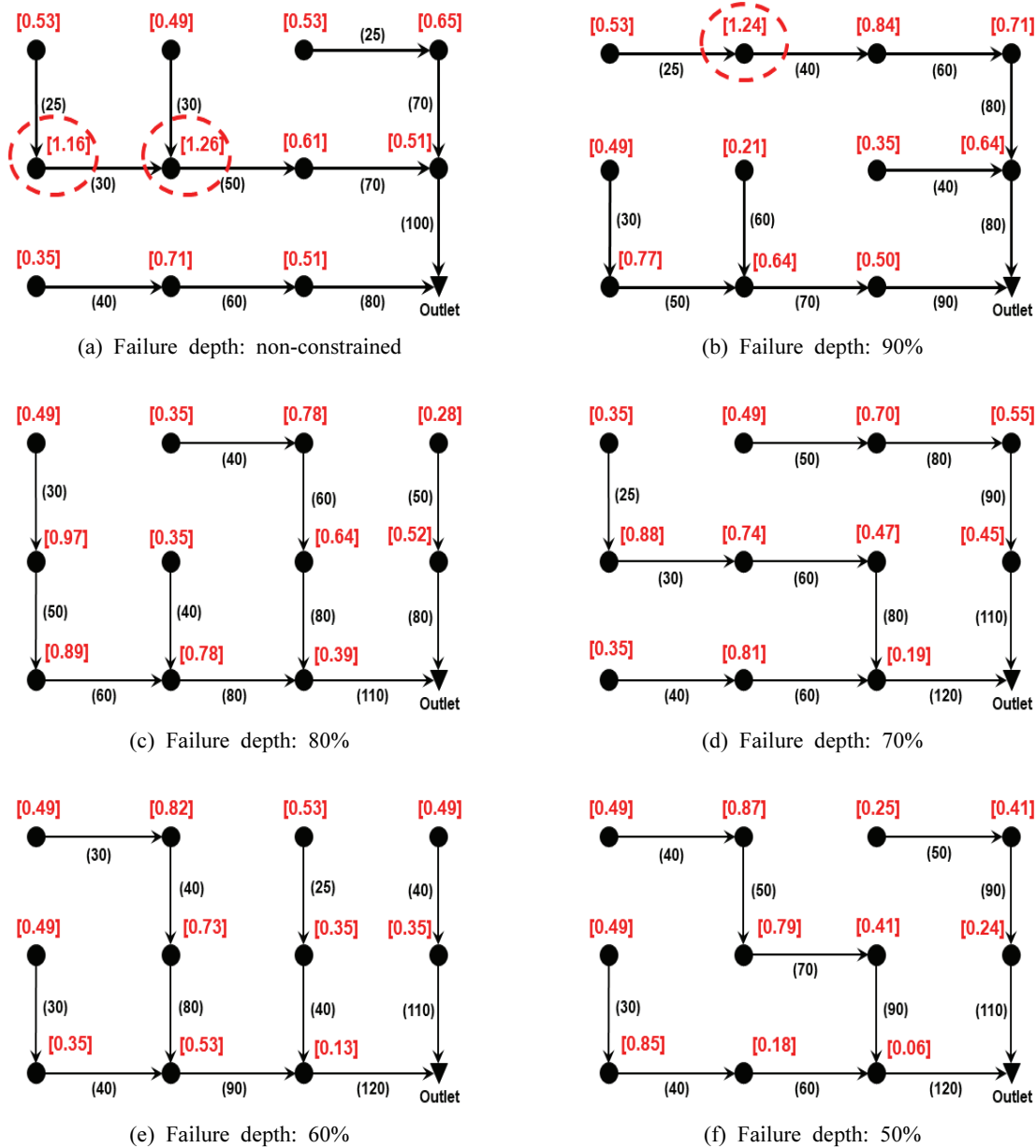


Fig. 5. Pipe Layout and Size Comparison of the Solutions Obtained Under Different Failure Depth Constraints (Example1 network) [(): Pipe diameters (mm), []: Node Flooding volume (m³)

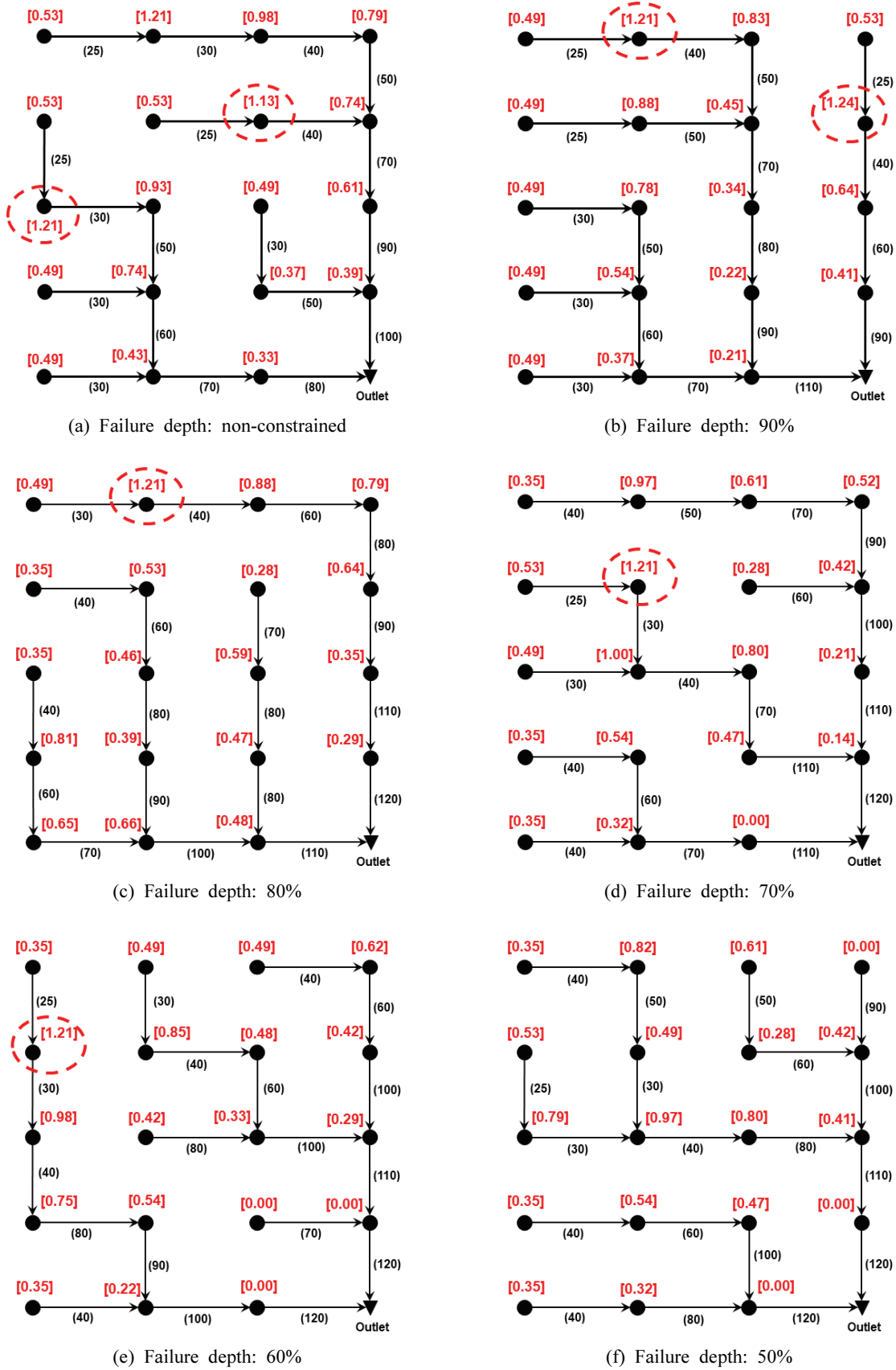
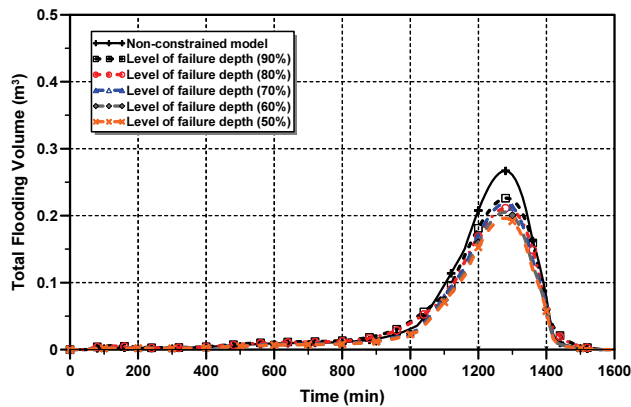


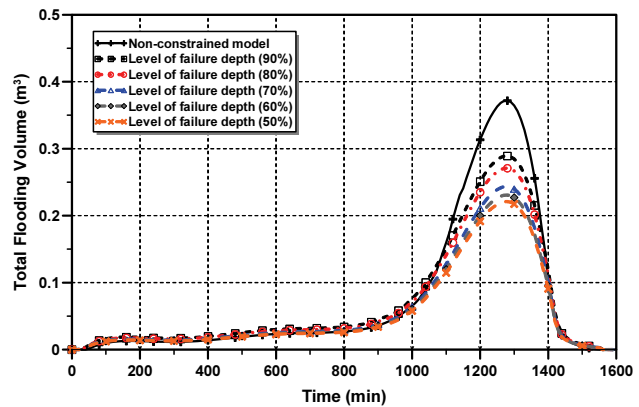
Fig. 6. Pipe Layout and Size Comparison of the Solutions Obtained Under Different Failure Depth Constraints (Example2 network) [(): Pipe diameters (mm), [] : Node Flooding volume (m³)

Table 2. Resilience-constrained Optimal Design Solutions in UDS

Robustness design solutions	Example1 network			Example2 network		
	Total system cost (thousand won)	Total flooding volume (m ³) (reduction rate, %)	Nodal peak flooding volume (m ³) (reduction rate, %)	Total system cost (thousand won)	Total flooding volume (m ³) (reduction rate, %)	Nodal peak flooding volume (m ³) (reduction rate, %)
Failure depth: non-constrained (1st-phase optimal design)	31,482	7.324 (-)	0.267 (-)	46,348	11.863 (-)	0.371 (-)
Failure depth: 90% (2nd-phase optimal design)	34,204	6.847 (-6.5)	0.226 (-11.0)	49,139	11.121 (-6.30)	0.289 (-22.1)
Failure depth: 80% (2nd-phase optimal design)	37,266	6.383 (-12.8)	0.211 (-15.6)	53,101	10.432 (-12.1)	0.271 (-27.0)
Failure depth: 70% (2nd-phase optimal design)	42,850	5.865 (-19.9)	0.218 (-18.4)	58,433	9.726 (-18.0)	0.244 (-34.2)
Failure depth: 60% (2nd-phase optimal design)	48,195	5.613 (-23.4)	0.205 (-23.2)	64,507	8.943 (-24.6)	0.231 (-37.7)
Failure depth: 50% (2nd-phase optimal design)	55,698	5.341 (-27.1)	0.196 (-26.6)	72,988	8.408 (-29.1)	0.221 (-41.4)



(a) Example1 network



(b) Example2 network

Fig. 7. System Total Flooding Volume Over Time Obtained in the Least-cost Designs with Different Failure Depth Constraints

Fig. 7에서 2개의 가상 네트워크에 대한 시간별 침수량의 그래프를 나타내었다. 이는 본 연구에서 설정한 침수피해 심도의 수준이 높아질수록 가상 네트워크 1과 2의 모두 침수량의 첨두 값이 감소하는 것을 나타내었다. 그리고 유역의 크기가 클수록 침수량의 첨두 값도 높게 도출된 것으로 나타내었다(가상 네트워크 1과 2의 비교, Figs. 7 (a) and 7 (b)). 또한, 허용 침수피해 심도의 단위 감소에 따른 총 침수량의 저감량을 비교해 보면, 네트워크의 규모와 유입되는 우수량이 큰 가상네트워크 2가 1에 비해 저감량이 보다 더 현저하였다.

그러나 내배수시스템에서 침수량의 변화는 구성된 네트

워크의 연결 특성에도 영향을 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 전체적인 시스템의 형태를 보았을 때, 합류점이 많고, 네트워크의 형태가 가지형태이면 침수량이 낮아진다(Oh, 2009). 이는 Yang et al. (2017)에서 제안한 도시지역의 네트워크 연결 특성(Topology characteristics analysis; Fractal index)을 통해 확인이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 침수피해 심도의 수준이 최고 수준인 50%의 네트워크에서는 가지형태를 띄지 않는다. 이는 최적화를 수행할 때, 노선 및 관의 제원을 동시에 고려하기 때문에 관경의 크기를 키워 통수능을 확보한다는 의미를 갖는다.

5. 결 론

도시 내배수시스템은 강우가 발생할 때 우수를 하천이나 출구로 운반하여 강으로 배출하는 사회기반시설이고, 도시 지역에서 아주 중요한 홍수방어 시스템이다. 이에 따라 도시 내배수시설은 자연적으로 도시구역의 대부분 인간 생활공간과 인접한 곳에 위치하여 있다. 그러므로 도시 내배수시설의 구성 요소에 따른 크기 및 용량을 적절하게 결정하는 것이 중요한 문제이다. 최근 도시지역에 설계빈도를 초과하는 강우발생 빈도가 증가함에 따라 이를 보완하기 위한 대안으로 탄력성을 고려한 설계방법을 사용되고 있다. 본 연구에서는 도시 내배수시스템에 탄력성의 개념을 도입하고, 화음탐색법을 사용하여 관거의 노선 및 제원을 동시에 결정할 수 있는 탄력성-제약조건을 기반으로 한 최적설계모형을 제안하였다. 이는 최적설계모형에서 화음탐색법을 사용하여 설정된 제약조건을 모두 만족하고, 대상 네트워크의 각 절점에서 노선 및 제원을 동시에 결정하고, 다양한 수준의 침수피해 심도를 제약조건으로 고려하여 최적의 설계방안을 제시하였다. 이를 통해 도시 내배수시스템의 최적설계모형에 대한 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구의 결과에서는 침수피해 심도의 수준(Failure depth)에 서로 다른 제약조건을 적용하였을 때, 침수피해 심도의 수준을 증가시킬수록 설계비용이 많이 발생하고, 총 침수량과 침수량의 침투 값은 감소하는 것으로 확인할 수 있었다.
- (2) 침수피해 심도(Failure depth)의 수준을 증가시킬수록 총 시스템의 설계비용이 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 가상 네트워크 1의 경우, 침수피해 심도에 따라 설계비용이 약간의 비선형적인 형태를 나타냈으나, 가상 네트워크 2의 경우, 일정 수준까지 선형적 증가하다가 최고수준에 이르게 되면 비선형의 정도가 가상 네트워크 1보다 크게 증가하는 경향을 나타내기도 했다.
- (3) 침수피해 심도의 수준이 높아질수록 기존 시스템보다 침수량의 저감 비율이 급격하게 낮아지지만, 설계비용은 이에 비해 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이전과 같은 설계비용을 투자하였을 때, 이전과 같은 시스템의 침수량을 저감할 수 있는 것이 아니라 더 많은 설계비용을 투자해야 비슷한 침수량을 저감할 수 있음을 확인할 수 있다.
- (4) 침수피해 심도의 수준이 90%, 80%, ..., 50%를 허용하는 설계안의 침수피해 수준이 높아질수록 각 절점에서 발생하는 극심한 총 침수량의 발생빈도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 침수피해 심도의 수준에 따라 결정된 각 네트워크에서 노선이나 제원이 각기 다르기 때문에 설계안에 따라 침수량의 차이가 상이한 차이로

분석되었다. 향후 수문학적 이론을 바탕으로 네트워크의 연결구조 특성 분석(Topology characteristics analysis; Fractal index)을 수행하여 네트워크의 연결구조에 따른 각 절점에 발생하는 침수량의 차이에 따른 밀접한 관련성을 도출할 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서는 설계빈도를 초과한 강우를 고려하고 탄력성의 개념인 침수피해 심도의 수준을 조정하여 각 해당 네트워크에 해당하는 최적설계안을 결정하였다. 향후 침수피해 기간의 수준을 조정하여 최적설계안을 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 도출된 결과를 통해 내배수시스템의 안정성과 경제성을 동시에 고려하여 적절한 수준을 만족하는 도시 내배수시스템의 설계방안을 채택할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(17AW MP-B066744-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Afshar, M.H. (2010) A Parameter Free Continuous ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Design of Storm Sewer Networks: Constrained and Unconstrained Approach. *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No. 2, pp. 188-195.
- Argaman, Y., Shamir, U., and Spivak, E. (1973) Design of Optimal Sewerage Systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, Vol. 99, No. 5, pp. 703-716.
- 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. *Procedia Engineering*, Vol. 89, pp. 347-354.
- Diogo, A.F., and Graveto, V.M. (2006) Optimal Layout of Sewer Systems: A Deterministic Versus a Stochastic Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 9, pp. 927-943.
- Djordjević, S., Butler, D., Gourbesville, P., Mark, O., and Pasche, E. (2011) New Policies to Deal With Climate Change and Other Drivers Impacting on Resilience to Flooding in Urban Areas: The CORFU Approach. *Environmental Science & Policy*, Vol. 14, No. 7, pp. 864-873.
- Froise, S., and Burges, S.J. (1978) Least-cost Design of Urban-drainage Networks. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, Vol.

- 104, No. 1, pp. 75-92.
- Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. (2001) A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
- Haghighi, A. (2013) Loop-by-loop Cutting Algorithm to Generate Layouts for Urban Drainage Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 139, No. 6, pp. 693-703.
- Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-23.
- Huff, F.A. (1967) Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) *Climate Change 2014—Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press.
- Jung, D. (2013) Robust and Resilient Water Distribution Systems. Ph.D. dissertation, The University of Arizona.
- Jung, D., Kang, D., Kim, J.H., and Lansey, K. (2013) Robustness-based Design of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 11, Article No. 04014033.
- Jung, D., Kang, D., Liu, J., and Lansey, K. (2015) Improving the Rapidity of Responses to Pipe Burst in Water Distribution Systems: A Comparison of Statistical Process Control Methods. *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 17, No. 2, pp. 307-328.
- Kang, S.J., Cho, S.H., and Hong, S.Y. (2013) *A Policy Implication for Community Resilience from Natural Disasters*. Research Report 2013-05, Gyeonggi Research Institute.
- Kim, J.H., Joo, J.G., Jun, H.D., and Lee, J.H. (2009) A Study of Sewer Layout to Control a Outflow in Sewer Pipes. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7.
- Kim, T.H., Kim, H.J., and Lee, K.J. (2011) The Concept and Functional Objectives of the Urban Resilience for Disaster Management. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 1, pp. 65-70.
- Lee, E.H. (2017) *Development of Conjunctive Operation Techniques and Resilience Index for Urban Drainage Systems*. Ph.D. dissertation, Korea University.
- Lee, E.H., and Kim, J.H. (2017) Development of Resilience Index Based on Flooding Damage in Urban Areas. *Water*, Vol. 9, No. 6, Article No. 428:1-15.
- Lee, E.H., Lee, Y.S., Joo, J.G., Jung, D., and Kim, J.H. (2017) Investigating the Impact of Proactive Pump Operation and Capacity Expansion on Urban Drainage System Resilience. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 143, No. 7, Article No. 04017024.
- Lee, E.H., Lee Y.S., Jung, D., Joo, J.G., and Kim, J.H. (2016) Determination of Operating Offline Detention Reservoir Considering System Resilience. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 10, pp. 403-411.
- Lee, J.H. (2010) A Change of Peak Outflows Due to Decision of Flow Path in Storm Sewer Network. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 5151-5156.
- Li, G.Y. (1986) The optimal Design of Sewer Networks by DDDP. *China Water Supply Sewerage*, Vol. 2, No. 2, pp. 18-23.
- Mays, L.W., and Yen, B.C. (1975) Optimal Cost Design of Branched Sewer Systems. *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 37-47.
- Mayunga, J.S. (2009) *Measuring the Measure: A Multi-dimensional Scale Model to Measure Community Disaster Resilience in the US Gulf Coast Region*. Ph.D. dissertation, Texas A&M University.
- Merritt, L.B., and Bogan, R.H. (1973) Computer-based Optimal Design of Sewer Systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, Vol. 99, No. 1, pp. 35-53.
- ME (Ministry of Environment) (2010) A Study of Guideline for Flooding Establishment in Sewage Simulation.
- Moeini, R., and Afshar, M.H. (2012) Layout and Size Optimization of Sanitary Sewer Network Using Intelligent Ants. *Advances in Engineering Software*, Vol. 51, pp. 49-62.
- NDMI (Natural Disaster Management Research Institute) (2010) Classifying the Urban Elements and Setting up the Directions for Developing Urban Disaster Prevention Standard.
- Oh, J.A. (2009) *Topological Characteristics of Urban Storm Sewer Networks*. Master's thesis, Korea University.
- Park, J., Seager, T.P., Rao, P.S.C., Convertino, M., and Linkov, I. (2013) Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems. *Risk Analysis*, Vol. 33, No. 3, pp. 356-367.

- Scholz, R.W., Blumer, Y.B., and Brand, F.S. (2012) Risk, Vulnerability, Robustness, and Resilience from a Decision-theoretic Perspective. *Journal of Risk Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-330.
- Steele, J.C., Mahoney, K., Karovic, O., and Mays, L.W. (2016) Heuristic Optimization Model for the Optimal Layout and Pipe Design of Sewer Systems. *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 5, pp. 1605-1620.
- Tekeli, S., and Belkaya, H. (1986) Computerized Layout Generation for Sanitary Sewers. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 112, No. 4, pp. 500-515.
- Walters, G.A., and Smith, D.K. (1995) Evolutionary Design Algorithm for Optimal Layout of Tree Networks. *Engineering Optimization*, Vol. 24, No. 4, pp. 261-281.
- Walters, G.A., and Templeman, A.B. (1979) Non-optimal Dynamic Programming Algorithms in the Design of Minimum Cost Drainage Systems. *Engineering Optimization*, Vol. 4, No. 3, pp. 139-148.
- Weng, H.T., and Liaw, S.L. (2005) Establishing an Optimization Model for Sewer System Layout with Applied Genetic Algorithm. *Journal of Environmental Informatics*, Vol. 5, No. 1, pp. 26-35.
- Yang, S., Paik, K., McGrath, G.S., Urich, C., Krueger, E., Kumar, P., and Rao, P.S.C. (2017) Functional Topology of Evolving Urban Drainage Networks. *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 11, pp. 8966-8979.
- Yoon, Y.N. (1998) *Hydrology: Basic and Applied*. Cheongmoongak.

Received ■ January 29, 2018

Revised ■ February 1, 2018

Accepted ■ February 19, 2018