상수관망 배수지 용량별 비상연계 운영 효율성 분석

Emergency Interconnection Operation Efficiency Based on Reservoir Capacity

김태욱* · 이승엽** · 김중훈***

Kim, Taewook*, Lee, Seungyub**, and Kim, Joong Hoon***

Abstract

In the case of a reservoir failure, emergency interconnection operation can be initiated to supply water to the isolated block from an adjacent reservoir (s). Emergency interconnection operation is an effective solution to continue water service; however, no clear standards have been established. In this study, the relationship between the reservoir capacity and the supply performance of emergency interconnection operation was identified and explored. Four scenarios were constructed for a water distribution system located at S-City, and the efficiency was quantified using availability, which is calculated by the A-PDA model. The results show that a larger capacity of an adjacent reservoir results in higher availability. Another set of scenarios was used to evaluate the supply performance of emergency interconnection operation with similar-capacity reservoirs, either independently or simultaneously. In the case of a separate connection, the availability was approximately 50%; however, it increased to 70% when both reservoirs were connected simultaneously. It was confirmed that it is efficient to operate an emergency connection with a larger reservoir. However, recovery from the emergency interconnection operation is inversely proportional to the availability itself; therefore, careful planning is required when the duration of the emergency interconnection operation is expected to be long.

Key words : Water Distribution System, Emergency Interconnection Operation, A-PDA

요 지

비정상상황으로 인해 불가피하게 배수지가 격리된 경우 비상연계 운영을 통해 고립된 배수 블록에 물을 공급할 수 있다. 비상연계 운영은 무단수 공급을 위한 해결책이지만, 명확한 기준은 부재하다. 본 연구에서는 배수지의 용량과 비상연계 운영 시의 공급가능률 사이의 관계를 분석하였다. S시의 상수관망에 네 가지 시나리오를 구축하였으며, A-PDA 수리해석 모형을 통해 공급가능률을 정량화하였다. 그 결과, 공급가능률이 인접 배수지의 용량에 비례함을 보였다. 다음으로 비상연계 운영 시 유사한 용량을 가진 배수지를 독립적/동시에 비상연계 운영하는 경우를 비교하였다. 독립적으로 운영이 되는 경우 50% 정도의 공급가능률을 보였으나, 동시에 운영이 되는 경우 공급가능률은 70%로 보다 안정적인 공급이 가능했다. 하지만, 비상연계 운영을 실시한 이후 배수지의 저류량 회복은 공급가능률과 반비례하는 것으로 나타나 보다 신중한 전략 수립이 요구된다.

핵심용어 : 상수관망, 비상연계 운영, A-PDA

1. 서 론

상수관망이란 기초 생활용수부터 소화용수, 공업용수 등

을 공급하는 주요 사회기반시설물이다. 국내 상수도 보급률은 2005년에 90.7%, 2010년에 97.7%로 크게 상승한 이후 꾸준히 상승하여, 환경부 2019 상수도 통계 기준(ME, 2021)

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석·박통합과정(E-mail: jeff906@korea.ac.kr)

Member, Integrated Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 한남대학교 토목환경공학과 조교수(E-mail: syl5894@gmail.com)

Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Hannam University

***교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3316, Fax: +82-2-3290-5999, E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

으로 국내 상수도 보급률은 99%를 넘어 대부분 국민이 상수를 공급받고 있다. 상수도 보급률이 높아진 만큼 수량 위주의 물관리보다 안전한 수질의 물을 충분한 양을 안정적으로 사용자들에게 공급하는 수량-수질을 모두 고려한 물관리의 중요도가 높아지고 있다(Yoo et al., 2015). 하지만, 상수도 시설물의 내부적인 요인, 외부적인 요인들로 인해 발생하는 비정상상황(관 파손, 오염물의 유입 등)은 상수관망의 안정적인 물 공급에 다양한 장애 요인으로 작용한다. 이러한 비정상상황의 해결을 위해 해당 구역의 격리가 필요하며, 이때 격리 구역의 범위에 따라 단수 피해를 유발하게 된다. 시설의 노후로 인한 관의 파손과 관내 부착물 혹은 침전물의 탈리로 인한 수질 사고 등 비정상상황에 대한 위험도가 커지고 있기에(Baek et al., 2006), 단수를 최소화하는 안정적인 공급체계를 구축하고 지속적인 물 공급이 가능한 탄력적인 상수관망의 구축의 필요성이 강조되고 있다.

단수 사고는 상수관망을 구성하고 있는 설비에 의해 발생하는 사고, 관로에서 발생하는 사고, 혹은 수질 사고나 자연재해와 같이 외부적인 요인으로 발생하는 사고로 분류할 수 있다. 단수 사고는 사용자들이 물을 사용하지 못하는 직접적인 피해뿐만 아니라 상수도 사업 관련한 신뢰도 하락 등 간접적인 피해가 발생하여, 빠르고 정확하게 대처하는 전략이 필요하다(Lee et al., 2012). 이에 대한 방안으로 지속적인 노후관 관리, 관로의 복선화를 통해 단수 피해를 최소화하는 것을 고려할 수 있다(ME, 2015). 다만, 해당 방안들은 사전 관리를 통해 작은 규모의 단수 사고는 예방할 수 있지만, 수원이 격리되는 경우와 같이 대규모 단수 사고 발생 시 그 효과가 미미하다(Kim et al., 2020). 대규모 단수의 경우 인접한 수원에서 임시로 물을 공급받는 것이 필요하며, 비상연계 운영을 통해 비상 급수를 수행하는 것이 효율적인 대비책으로 볼 수 있다(Oak et al., 2018).

비상연계 운영은 배수지 고갈로 인한 하나의 배수블록의 격리, 수질 문제 발생, 밸브 및 연결관의 고장과 같은 사고로 인해 수요자들에게 원활한 용수 공급이 불가능한 경우, 비상관 개방을 통해 인접한 배수블록에서 용수를 공급받는 것을 의미한다. 비상연계 운영을 위해 비상관은 배수 블록 사이에 설치되어야 하며, 평상시에는 닫혀있다가 비정상상황이 발생했을 경우 개방하여 인접 배수블록에 용수를 공급할 수 있어야 한다(Yoo et al., 2017). 상수도시설기준(ME, 2010)에서는 배수시설에 대하여 단순한 배관으로 설치하는 것이 아닌 상호 연결된 관망 형태를 권장하고 있으며, 불가능한 경우 복선화를 통해 비상시 대응능력을 확보할 것을 권장하고 있다. 미환경청(EPA)에서도 배수블록에 단수 사고와 같은 비상상황이 발생하였을 경우, 인접 배수블록과 수원을 공유한 비상연계 운영을 통해 피해를 최소화할 것을 권장하고 있다(Environmental Protection Agency, 2011). 이를 위해 국내 실정과 맞는 비상연계 운영을 위한 상수관망 구성요소의 설치기준, 비상연계 우선순위 결정, 구성요소간의 협력체

계 등과 관련한 구체적인 기준이 필요하지만, 정확히 제시된 내용을 찾아보기 어렵다.

상수관망에서 발생하는 비정상상황을 모의하고, 해당 상황에 대해 적절한 전략을 수립하기 위해서는 기존의 상수관망 수리해석 기법과는 다른 기법이 요구된다(Lee, Shin et al., 2018). 배수지에서 물을 정상적으로 공급할 수 없어진다면 상수관 내의 압력이 떨어지게 되고, 그로 인해 계획한 물을 정상적으로 공급할 수 없다. 상수관망 수리해석을 위해 범용적으로 사용되고 있는 EPANET 2.2 (Rossman, 2000)은 정상상황에 대한 상수관망 거동을 모의하기 위한 Demand Driven Analysis (DDA)와 절점의 압력이 부족한 비정상상황에 대한 상수관망의 거동을 모의하기 위한 Pressure Driven Analysis (PDA)를 제공하고 있다. DDA의 경우, 모든 수요 절점의 수요량을 모두 만족한다는 가정을 포함하고 있기에, 모든 수요 절점에서 압력 조건이 만족하는 정상상황에 대한 해석 신뢰도가 높다. 다만, 압력 조건이 만족하지 않는 비정상상황 시, 절점의 부압이 발생하는 등 비정상적인 결과를 도출하게 된다. 반면, PDA는 절점에 공급되는 유량이 수리해석을 통해 얻어진 압력 수두에 의해 결정되며, 최소요구수압보다 낮은 압력으로 계산된 경우 실제 수요량 대비 해당 수압에서 공급 가능한 수요량으로 조정해준다. 다만, 두 방법론 모두 무한수원을 가정하기에 수원의 수량 및 수두의 변동이 없어, 특정 수원의 저류량에 따른 최대 공급 가능량은 고려하지 못하기에 비상연계 운영과 같이 특정 수원에서 공급량이 증가하는 경우 시스템의 거동을 정확하게 모의할 수 없다는 공통된 문제점을 지닌다(Lee, Jun et al., 2018).

본 연구는 단수 사고 중 가장 큰 피해를 발생시키는 상수관망 특정 배수지의 격리에 따른 비상연계 운영 시 비상연계 대상 배수지의 저수용량에 따른 공급성을 검토하고, 비상연계 운영에 대한 전략을 도출하고자 한다. 이를 위해 기존의 수리해석 기법의 한계를 극복하고, 유한 수원을 고려하여 다양한 비정상적인 조건에서 비교적 현실적인 수리해석이 가능한 Advanced-Pressure Driven Analysis (A-PDA)를 적용하였다. A-PDA는 Lee, Jun et al. (2018)에 의해 개발되어, 제한된 저류량 및 유입량을 고려할 수 있어, 연계 공급을 위한 배수지의 여유 저류량에 대한 모의 및 평가가 가능하다(Oak et al., 2018). 이를 활용하여 국내 S시 상수관망에 비상 사고 시나리오를 구성, 비상연계 운영을 모의하여 공급성을 정량적으로 평가하였다. 또한, 해당 결과를 기반으로 비상연계 운영에 대한 전략을 제시하고자 한다.

2. 상수관망 수리해석 기법

상수관망 수리해석을 위해 일반적으로 사용되고 있는 해석기법은 DDA와 PDA가 있다. 앞서 언급한 것과 같이, 두 수리해석 기법은 수원의 총 수두가 항상 일정하다는 가정(무한 수원)을 포함하고 있어, 상수관망의 수원(배수지)

의 저류량에 영향을 줄 만큼 큰 상황에 정확한 수리해석 결과를 도출한다고 볼 수 없다. 본 연구에서 적용한 A-PDA 방법은 이러한 한계점에 대해 좀 더 현실적인 모의를 가능케 하는 수리해석 기법으로 본 장에서는 각 해석기법에 대해 요약하고 차이점을 정리한다.

2.1 Demand Driven Analysis

DDA는 모의하고자 하는 모든 절점의 요구 수요량을 알고 있을 때, 해당 수요량은 100% 공급이 가능하다고 가정한다. 따라서 상수관망이 정상적으로 운영이 되는 상황에서 절점의 수두와 관내 유량 계산이 가능하다. DDA는 유량의 연속방정식과 수두의 에너지방정식을 세우고, 모든 절점의 수두와 모든 관의 유량을 계산하는 것이 DDA다. EPANET에서는 DDA를 Gradient Algorithm을 기반으로 수리해석을 수행한다. 각 절점의 수요량과 관의 특성, 수원의 수두 값 등 기지의 값과 초기에 가정된 절점의 수두와 관내 유량을 통해 보정유량과 수두를 계산하고, 반복 계산을 통해 수렴조건에 만족하게 되면 결과값을 출력한다.

2.2 Pressure Driven Analysis (PDA)

상수관망 내 비정상상황이 발생하여 압력이 떨어지게 되면 절점에 충분한 양의 물을 공급할 수 없다. PDA의 경우, Head-Outflow Relation (HOR) 관계식을 모든 수요 절점에 부여하여, 공급가능 유량을 개별적으로 계산한다. Germanopoulos (1985), Wagner et al. (1988), Cullinane et al. (1992), Fujiwara and Ganesharajah (1993), Gupta and Bhawe (1996), Udo (2001), Tanyimboh and Templeman (2004)은 각각 HOR 관계식을 제안하여 절점의 수압과 공급량 계산을 수행하였다. EPANET 2.2은 Wagner et al. (1988)이 제안한 오리피스 형태의 HOR 관계식을 사용하고 있다.

2.3 Advanced-Pressure Driven Analysis (A-PDA)

A-PDA의 경우, 기존의 수리해석 기법들에서 유한수원의 개념을 추가한 수리해석 모형이다. 배수지와 관련한 비정상

상황이 발생하여 비상연계 운영을 수행하는 경우, 비상연계 운영을 하게 되는 배수지의 저류량에 영향이 미친다. 해당 수원의 용량과 저류량을 고려하는 수위-저류량 관계식을 도입하여, 시간대별로 유한수원으로 유입되는 유량, 각 시간대에 유한수원의 저류량을 반복적으로 계산하게 된다. 만약 비상연계 운영을 하는 배수지의 저류량이 '0'이 되는 경우, 정상적으로 수요 절점에 물을 공급하지 못하는 상황을 모의할 수 있다. 언급된 세 종류의 수리해석 기법의 특성은 Lee, Jun et al. (2018)에서 Table 1과 같이 제시하였다.

3. 대상 상수관망 정보

본 연구의 대상 지역은 국내 S시 상수관망으로 총 16개의 수원(배수구역 별 1개)으로 이루어져 있으며, 각각의 수원은 하나의 구역을 담당하여 물을 공급하는 기능을 수행한다.

Fig. 1. Layout of S City

Table 1. Characteristic Comparisons Among Hydraulic Analysis Models (Lee, Jun et al., 2018)

Characteristic	DDA	PDA	A-PDA
Available discharge	Demand	Pressure dependent	Pressure and storage dependent
Applicability for normal condition	○	○	○
Applicability for pressure deficient condition	X	○	○
Applicability for storage deficient condition	X	X	○
Additional input characteristics	-	HOR	HOR, level-storage relation, average inflow&inflow pattern

해당 관망의 입력자료는 총 19,261개의 절점과 19,977개의 관로로 구성되어 있다(Fig. 1). S시는 약 17만 명의 인구가 거주하고 있으며, 총 수요량은 149,985 m³/d이다. 본 연구에서 대상이 되는 배수 구역은 총 네 곳으로 Fig. 1의 음영처리가 된 부분으로 정리할 수 있다. 각각의 수원을 R2, R6, R9, R12라고 명명했으며, 각 수원은 전체 수요량의 13.25%, 4.30%, 6.92%, 5.78%를 담당한다. 해당 수원들은 저수용량이 비슷하여 대상 배수 구역으로 설정하였으며, 후에 시나리오 구성에 자세한 내용을 설명한다.

4. 비정상 시나리오

상수관망에서 단수 사고는 취수장, 정수장, 배수지, 가압장과 같이 상수관망을 구성하고 있는 설비에서 발생하는 사고, 송수관, 배수간선, 배수지선과 같이 관로에서 발생하는 사고, 수질 사고나 자연재해와 같이 외부적인 요인으로 인해 발생하는 사고로 분류될 수 있다. 기사화된 국내에서 발생한 다양한 단수 사고 중에서도 배수지에 의한 단수 사고는 평균 약 8시간의 단수 시간과 평균 10,000세대의 피해범위를 보였다. 배수지에 의한 단수 사고들은 다른 단수 사고에 비해 피해 시간과 규모가 작으나, 비교적 짧은 단수 시간에 비해 큰 피해범위를 가지고 있어 그 중요도가 크다.

현재 배수지 설계기준상 비상상황을 대처하기 위해 용량을 1일 최대 급수량의 12시간 이상을 표준으로 하고 있으나, 하나의 배수블록이 고립되었을 경우 어느 배수블록과 연결된 비상관을 개방하는 기준은 존재하지 않는다. 이에 따라 본 연구에서는 임의의 비상 연계 시나리오를 Table 2와 같이 구축하였다. 구축한 시나리오에서는 R12와 연결된 관로의 파손으로 인해 R12가 고립되어 인접 수원에서 물을 공급받는 비상연계 운영 시나리오를 고려하였다. R12의 위치는 Fig. 1에서 적색 사각형의 위치와 같으며 적색 음영이 된 구역에 물을 공급한다. R12가 고립될 경우, 비상연계 운영이 가능한 인접 수원은 R1, R2, R6, R9 총 네 개가 있다. 다만, 비상연계 운영이 가능한 배수지 중 R1의 경우, S시 총 수요량의 49%를 담당하고 있으며, 중요 민감시설(병원)과 학교, 공업, 상업 지구가 밀집해 있기에 비상연계 운영에서는 제외하는 것으로 가정하였다. R2, R6, R9를 통한 비상연계 운영 시나리오를 구성하였다.

본 연구에서는 해당 관망에 대해 유한수원의 적용을 위해 이를 1시간 단위로 총 1일 기간의 확장 기간 모의(Extended Period Simulation)로 변환하였다. 각 절점의 최소 및 총족수두는 0 m와 15 m이며, 오리피스 형태의 HOR의 지수는 0.5를 적용하였다. A-PDA에서는 기존 관망의 무한수원을 유한수원으로 변환하는 과정이 필요하며, 이에 따라 각 유한수원의 고도를 기존 무한수원의 수두보다 3 m 낮은 위치에 있는 것으로 하고 기존 무한수원의 초기 수두를 유지할 수 있도록 하였다. 각 유한수원의 최소 및 최대 수위는 각각 0 m, 5 m로 설정하였으며 상수 설계기준(2010)에 따라 통해 유한수원의 면적과 저류량을 계획 1일 최대급수량의 12시간분 이상을 기본용량으로 가지고 있도록 결정하였다. 유한수원으로의 시간에 따른 유입량을 가정하기 위해 대상 가상관망의 정상상황에 대해 DDA 수리해석을 수행하였다. 수행 결과 R2의 평균 유입량은 6,438.29 m³/d, R6는 2,090.5 m³/d, R9는 3,362.41 m³/d, R12는 2,807.83 m³/d로 산정되었다. 각 수원이 유량을 공급하는 것으로 나타나는 유량 값을 각 수원으로 유입되는 평균 유입량으로 가정하였으며, 시간에 따른 유입량은 변하지 않고 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 수요 절점에서 실제 시간에 따른 물 소비량의 패턴을 고려하기 위해 Fig. 2와 같은 하루 단위의 수요량 패턴을 모든 절점에 적용하였다.

본 연구에서 적용한 비상연계 운영 시나리오는 S시 상수관망의 R12과 연결된 유출관로의 파손으로 인해 배수지 고립이 발생한 시나리오이다. 해당 시나리오를 위해 R12는 06:00에 작동이 중단된 경우의 총 네 가지의 시나리오를 확인하였다. 첫 번째는 비상연계 운영이 가능한 수원 중 비교적 용량이 큰 R2와의 비상연계 운영, 두 번째로 가장

Fig. 2. Daily Demand Pattern Depend on Time

Table 2. Summary of Emergency Interconnection Operation Scenarios

Scenario	Isolated Reservoir	Emergency Interconnection Operation Reservoir	Overall Reserved Emergency Supply (m ³ /d)
Scenario 1	R12	R2	3,219.14
Scenario 2		R9	1,681.21
Scenario 3		R6	1,045.25
Scenario 4		R9+R6	2,727.46

유사한 저류량을 가진 R9와의 비상연계 운영, 세 번째는 R6과의 비상연계 운영, 마지막으로 R6과 R9를 동시에 비상연계 운영하는 것으로 구성하였다.

각 시나리오의 비상연계 운영 시 성능 비교를 위해 공급가능률(Availability) 지표를 사용하였으며, 공급가능률 산정은 Eq. (1)과 같다.

$$Availability (\%) = \frac{\sum Available Discharge}{\sum Actual Demand} \times 100 \quad (1)$$

여기서, Actual Demand (m³/d)는 모든 수요 절점의 요구수요량(Base Demand)와 수요 패턴(Demand Pattern)의 곱이며, Available Discharge (m³/d)는 HOR 식에 의해 계산된

Fig. 3. Availability at Every Scenarios

Table 3. Minimum Availability and Corresponding Time for Each Scenario

	Availability	
	Min	Time
Scenario 1	88.50%	09:00
Scenario 2	57.07%	09:00
Scenario 3	51.33%	10:00
Scenario 4	73.69%	10:00

Table 4. Properties of Emergency Pipe and Average Head Loss During 06:00-14:00

	Emergency Pipe ID	Length (m)	Diameter (mm)	Roughness	Avg. Head Loss (m/km)
Scenario 1	5306	5.3	250	100	3.46
Scenario 2	10412	14.7	110	100	5.73
Scenario 3	1479	4.6	100	100	8.05
	2552	1.0	50	100	6.50
	11992	5.0	300	100	0.11
Scenario 4	10412	14.7	110	100	4.84
	1479	4.6	100	100	7.71
	2552	1.0	50	100	6.14
	11992	5.0	300	100	0.09

각 수요 절점별 공급 가능 유량을 의미한다.

5. 적용 결과

Fig 3은 비상연계 운영에 따른 공급가능률 변화를 보여준다. Scenario 1은 R12보다 저류량이 많은 R2와 비상연계 운영이 시행된 시나리오로, 이론적으로는 R2가 확보하고 있는 여유분으로 R12가 담당하는 배수지 대부분의 수요 절점에 유량을 공급할 수 있는 것으로 나타났다(Table 3). 다만, R2가 담당하는 배수지에 비해 R12가 담당하는 배수지의 고도가 높아 R12 배수지 수요 절점 중 수압 조건에 위배되는 구역이 발생했다. 이에 따라 공급가능률은 가장 높은 수요량이 요구되는 10:00시에 88.50%까지 떨어지고, R12 고립 후 정상 복귀까지 8시간 동안 평균적으로 92.38% 인 것으로 나타났다.

Scenario 2는 비슷한 용량을 가진 R9와 연계 운영된 경우로 모의 결과 평균 공급가능률이 58.87%인 것으로 나타났으며, R12보다 적은 용량을 가진 R6의 경우 평균 공급가능률이 54.63%로 가장 적은 값을 나타냈다. 전반적으로 공급가능률이 Scenario 1에 비해 큰 폭으로 감소한 것을 알 수 있고, 이는 절대적으로 각 배수지의 여유 용량 자체가 적기 때문이다. 마지막 Scenario 4의 경우 Scenario 2와 3을 동시에 운영하는 것으로, 전반적으로 비상연계 운영의 효과는 강화되는 것으로 나타났다. 구체적으로, 공급가능률이 87.10%로 시작되어, 가장 많은 수요량이 요구되는 시간대에는 73%까지 떨어지고 평균적으로는 77.72%인 것으로 확인되었다(Table 3).

이와 같은 결과는 비상연계 운영을 위해 개방된 비상관과도 연계하여 해석할 수 있다. Table 4는 시나리오별 개방되는 비상관의 특성 나타내고 있으며, 비정상상황이 발생하는 06:00 - 14:00에서의 관 내 평균 수두손실을 나타내고 있다. Scenario 1에서 가장 높은 공급가능률을 보이는 것은 배수지의 큰 용량과 더불어 적은 수두손실로 인한 결과로 볼 수 있다. Scenario 2, 3과 Scenario 4를 비교하면, 같은 비상관이

개방되었음에도 Scenario 4의 경우에 수두손실이 더 적은 것을 확인할 수 있다. 이는 해당 시나리오에서 더 원활한 공급이 가능한 것으로 해석할 수 있다.

추가로, A-PDA 모형의 사용에 따른 결과의 신뢰도를 검증하기 위해 동일 시나리오에 PDA 기반 수리해석을 적용하였으며 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 비상연계 운영을 실시한 직후의 공급가능률은 A-PDA를 통한 결과가 높았다. 이는 비정상상황이 발생하기 이전 배수지 총 유입량이 모든 수요 절점의 요구 유량보다 많았으며, 그에 따라 저류량이 증가하여 배수지의 수두가 증가하였기 때문이다. 08:00 AM 부터 수요 절점에서 요구 유량이 급격히 증가함에 따라 배수지의 저류량이 감소하게 되어 A-PDA를 통해 계산된 공급가능률이 PDA를 통한 결과보다 낮아지게 되었다. 이는

PDA에서 모의하는 경우, 배수지의 총 수두는 항상 일정하기 때문이다. 또한 같은 이유로 비정상상황이 지속되는 시간대의 평균 공급가능률이 PDA를 통해 얻은 결과가 더 높았다.

결과적으로 가장 큰 용량을 갖는 R2에서 비상연계할 경우 공급가능률은 최대가 되는 것으로 확인되었다. 또한 비상관의 영향으로 인한 공급가능률에 영향을 확인할 수 있었으며, 비상관의 관경이 큰 것이 일차적으로 원활한 공급에 도움을 줄 뿐만 아니라 비상연계 운영이 실시된 배수지에 따라 손실수두의 저하 효과를 확인할 수 있었다. 다만, 수요량을 충분히 만족할 만한 여유 용량을 확보하고도 두 배수지간 고도 차에 의해 충분한 압력이 확보되지 못해, 공급가능률은 기존에 비해 낮아지는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 비상연계 운영(6시부터 14시까지) 및 정상 운영

Table 5. Availability (%) During 06:00-14:00 - Calculation Using PDA and A-PDA

Time	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4	
	PDA	A-PDA	PDA	A-PDA	PDA	A-PDA	PDA	A-PDA
07:00	96.10	94.74	60.33	60.15	57.44	61.85	87.10	80.63
08:00	89.10	91.52	57.13	60.03	52.39	56.92	76.26	78.59
09:00	88.50	90.88	57.07	59.80	51.55	56.10	74.20	77.95
10:00	88.88	90.66	57.14	59.25	51.33	55.79	73.69	76.94
11:00	90.16	91.44	57.85	58.53	52.28	56.84	74.49	77.02
12:00	94.27	94.06	60.18	58.98	55.92	60.87	77.63	78.83
13:00	95.12	94.48	60.29	58.67	57.06	62.24	78.44	79.37
14:00	96.95	95.30	60.94	59.38	59.08	64.58	79.93	80.62
Avg.	92.39	92.89	58.87	59.35	54.63	59.40	77.72	78.74

(a) Scenario 1

(b) Scenario 2

(c) Scenario 3

(d) Scenario 4

Fig. 4. Water Level Changes of Each Scenarios, (a) Scenario 1, (b) Scenario 2, (c) Scenario 3, (d) Scenario 4

회복(14시경) 후 각 시나리오의 배수지 수위를 나타낸다. 비상연계 시 정상 운영 시에 비해 높은 공급량을 요구하므로, 모든 배수지의 수위가 정상 운영 시와 비교해서 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 다만, 감소 폭과 정상운영 후 회복하는 속도는 시나리오별로 차이를 나타냈다.

Scenario 1의 경우 다른 배수지보다 용량이 큰 R2의 수위가 다른 배수지에 비해 느리게 회복하는 양상을 보였으며, 모의 마지막 시간인 24시에도 수위는 회복되지 못하는 것으로 나타났다. 배수지의 용량이 가장 작은 R6 (Scenario 3)의 경우 정상 운영으로 전환된 후 비교적 빠른 시간(정상 운영 전환 후 5시간 후)에 수위가 회복됨을 알 수 있다. Scenario 2인 R9의 경우 R6보다는 용량이 크지만, R2에 비해서는 용량이 적어 정상운영 전환 후 10시간 후인 24시 경 어느 정도 정상 수준으로 회복되었다. 다만, 동일한 수원으로 비상연계 운영한 Scenario 4의 경우 R9도 모의 마지막 시간까지 정상 수위로 회복은 하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 Scenario 2에서 R9가 비정상상황 동안의 총 유출량이 37,799 m³/d이며, Scenario 4에서는 42,065 m³/d이기 때문이다. Scenario 4에서 총 유출량이 큰 이유는 세 배수구역이 모두 연계운영이 되었기 때문이다. 이러한 결과는 결국 공급가능률과 배수지의 수위 회복에는 역의 상관관계가 있음을 시사하며, 연속적인 혹은 좀 더 장기간의 배수지의 고립인 경우 1차적으로 효과적인 비상연계의 효과가 감소할 수 있음을 의미한다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내 S시의 여러 배수지 중 R12의 배수구역이 고립되었을 경우, 인근 배수지에서 비상연계 운영을 수행하는 경우 공급가능률을 확인하였다. 총 네 배수지가 연계에 고려되었으며, 이 중 가장 큰 저수용량을 보유하고 있는 R1의 배수구역은 S시의 중심지로 중요도가 높아 비상연계 운영 대상에서 제외하였다. 비상연계 운영이 가능한 배수지에 대해서 서로 다른 4개의 시나리오를 검토하였으며, 이 과정에서 배수지에 저류량에 영향을 미칠 수 있으므로 유한 수원을 고려한 수리해석 기법인 A-PDA를 활용하였다.

다른 세 배수지 중 하나인 R2는 R12보다 두 배 정도의 저류량을 보유하고 있으며, 다른 두 배수지 R6, R9는 유사한 저류량을 보유하고 있다. 총 네 종류의 비상연계 운영 시나리오를 통해 피해가 가장 적은 비상연계 운영 전략을 수립하고자 하였다. 그 결과, 비상연계 운영 대상 배수지 중 가장 큰 배수지인 R2와 연계된 Scenario 1에서 가장 적은 피해가 발생하는 것으로 확인되었다. 이 외에 비슷한 규모의 배수지 (R6, R9)와 비상연계 운영하는 Scenario 2~4의 경우, 하나의 배수지를 독립적으로 비상연계 운영하는 것보다 R6과 R9를 동시에 연계하여 운영하는 것이 피해를 줄일 수 있는 운영방안으로 확인되었다. 이는 두 배수지에서 동시에 비상연계 운영을 실시하는 경우 비상관에서 발생하는 수두손실이

독립적으로 비상연계 운영을 실시하는 경우에 비상관에서 발생하는 수두손실보다 낮아져 효율적으로 유량을 공급이 가능했기 때문이다. 다만, 공급가능률이 높은 만큼 배수지의 수위가 낮아져, 전반적으로 긴 시간 동안의 비상연계 운영 혹은 연속적인 비상연계 운영이 필요한 경우 대비에는 미흡할 것으로 나타났다.

A-PDA 모형을 통해 수리해석 한 결과는 배수지를 추가로 고려할 수 있어 기존의 수리해석 모형인 DDA, PDA를 통해 도출할 수 없었던 비상시 연계 운영을 통한 상수관망에 유량 공급 가능 기간을 도출할 수 있었다. 비상연계 운영 시나리오를 반영하여 PDA를 통해 수리해석을 수행한 결과, 배수지의 총 수두의 변화가 없어 공급가능률은 수요 패턴에 의해 지배적으로 나타나며 비현실적인 결과를 도출하였다. 이는 실무적인 관점에서 A-PDA를 통해 수리해석을 수행한 결과가 해당 상황에 대해 적절한 대응을 할 수 있도록 의사결정을 지원하는 데에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이번 연구에서는 공급가능률을 통해서 피해가 최소화되는 시나리오를 선택하였다. 향후 연구에서는 시간적인 공급가능률을 포함하여, 절점의 압력 상태를 공간적으로 파악하고, 비상연계 운영을 실시함에 따라서 발생 가능한 수질 문제 혹은 비용적인 측면을 모두 고려하고, 배수지의 수두에 따른 공급성과 연구 대상 지역의 특성을 고려한 비상연계 운영 전략 수립을 해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문(특허)은(는) 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2B5B03069810).

References

- Baek, C.W., Kim, S.W., Kim, E.S., Kim, J.H., and Park, M. (2006). Development of optimal decision-making system for rehabilitation of water distribution systems divided by small division. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 6, pp. 545-552.
- Cullinane, M.J., Lansey, K.E., and Mays, L.W. (1992). Optimization-availability-based design of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 3, pp. 420-441.
- Environmental Protection Agency. (2011). *Planning for an Emergency Drinking Water Supply*.
- Fujiwara, O., and Ganesharajah, T. (1993). Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2917-2924.

- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 171-179.
- Gupta, R., and Bhawe, P.R. (1996). Comparison of methods for predicting deficient-network performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 3, pp. 214-217.
- Kim, S., Gim, A., Ha, J., and Jun, H. (2020). Determination of proper water supply rate for emergency interconnection plan. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 6, pp. 159-166.
- Lee, H.M., Jun, H., Back, S.C., and Kim, J.H. (2018). Development and application of advanced-pressure driven analysis model considering limited reservoir. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 271-280.
- Lee, H.M., Shin, E., and Kim, J.H. (2018). Development applications of K-NRisk for pressure dependent demand analysis in water distribution networks. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 231-238.
- Lee, T.K., Chae, S.H., Kim, S.S., Seo, I.S., Kim, J.H., and Park, N.S. (2012). Establishment of methodology for estimating an emergency water. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 3, pp. 361-372.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Design standard for water distribution systems*.
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Guidelines for the establishment of a basic plan for water maintenance*.
- Ministry of Environment (ME). (2021). *Statistics of waterworks*.
- Oak, S., Kim, S., and Jun, H. (2018). An application of the A-PDA model and the water supply performance index for the temporal and spatial evaluation of the performance of emergency water supply plans via interconnections. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 11, pp. 977-987.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2: Users manual*. Cincinnati, OH: EPA (US Environmental Protection Agency).
- Tanyimboh, T.T., and Templeman, A.B. (2004). A new nodal outflow function for water distribution networks. *Proceedings of the 4th International Conf. on Eng. Computational Technology*, Civil-Comp Press, Stirling, UK, Paper, Vol. 64, p. 12.
- Udo, A. (2001). Steady-state flow analysis of pipe networks considering reduction of outflow in the case of low water pressures. *Water Software Systems*, Vol. 1, pp. 173-182.
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1988). Water distribution reliability: Simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, No. 3, pp. 276-294.
- Yoo, D.G., Kim, K.P., Park, M.J., and Joo, J.G. (2017). Multi-objective optimal design for improving water supply serviceability considering segments in water distribution networks. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 29-37.
- Yoo, D.G., Lee, S.Y., Lee, H.M., Jun, H., and Kim, J.H. (2015). Life cycle energy analysis of pipe rehabilitation and replacement strategies in water pipeline systems. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 6, pp. 301-310.

Received	December 1, 2021
Revised	December 2, 2021
Accepted	December 13, 2021