비상시 수계전환에 따른 공급성능 개선방안

Improvement Methods for Supply Performance in Emergency Interconnection Plans

김아린* · 김수리** · 최세중*** · 전환돈****

Gim, ARin* · Kim, Suri** · Choi, Seajoong*** · Jun, Hwandon****

Abstract

When operating a water supply network (WSN), pipe failures and water service interruptions are inevitable. A large-scale water service interruption decreases the reliability of a WSN; therefore, an emergency interconnection plan (EIP) is adopted to prevent it. To establish an EIP involving emergency interconnection pipes, in most cases, only the operation plan is considered. However, it is required to evaluate possible interconnected supply areas (PISAs) from the EIP to achieve the purpose of the EIP. It is obvious that PISA is dependent on the structure of the WSN, elevation difference between the adjacent interconnected blocks, size and location of the emergency interconnection pipes, and inline pumping station. In this study, we categorized the reasons resulting in insufficient PISA from the EIP and suggested improvement methods such as increasing the pipe diameter, new pumping stations, adding emergency interconnection pipes, and adding pressure relief valves. To quantify the effect of the improvement methods on the performance of the EIP, we applied them to a real WSN and estimated the emergency supply rate for each improvement method by using Pressure Driven Analysis (PDA) as the hydraulic simulation tool. Consequently, each improvement method increased the PISA and the emergency supply rate on the network. Thus, the suggested method will be used in the design and operation of EIPs to improve their performance.

Key words : Emergency Interconnection, PDA, Possible Interconnected Supply Area, Improvement Methods for the Supply Performance

요 지

상수관망은 다양한 사고에 따른 단수가 필연적으로 발생한다. 대규모 단수의 발생은 상수관망의 신뢰도를 저하시키므로 이를 방지하기 위하여 비상시 수계전환이 도입되어 운영되고 있다. 비상시 수계전환 계획을 수립할 때 대부분 비상관로를 통한 운영 계획만 수립된다. 그러나, 비상시 수계전환의 목적을 달성하기 위해서는 실질적인 비상시 연계공급가능범위에 대한 평가가 필요하다. 비상시 연계공급가능범위는 상수관망의 구조, 연계 배수블록간 고도차, 비상관로의 제원, 위치 및 가압펌프 유무등 다양한 원인에 의해서 결정된다. 본 논문에서는 비상시 수계전환 운영을 실시할 때 충분한 공급범위를 확보할 수 없는 원인을 정리하였고 이를 개선하기 위한 개선방안으로 비상관로 관경 증가, 가압펌프 추가, 비상관로 추가 및 감압밸브 추가 방안을 제안하였다. 제안된 개선방안의 효과를 정량화 하기 위하여 실제 상수관망을 대상으로 개선방안별 비상시 공급가능률을 산정하였다. 수리해석은 PDA 기법을 이용하였다. 적용결과 개선방안별 효과를 알 수 있었고 비상시 수계전환의 설계와 운영시 더 나은 효과를 도출하기 위한 기본 방안으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 비상시 수계전환, PDA, 연계공급가능범위, 공급성능 개선방안

*정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정(Tel: +82-2-970-6570, E-mail: 16100747@seoultech.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**정회원, 하준이앤씨(주) 기업부설연구소 연구원(Tel: +82-31-450-6396, E-mail: sl950714@naver.com)

Member, Researcher, Hajon Engineers & Consultants

***리치엔타임(주) 차장(E-mail: sjchoi@mtime.com)

Associate Director, RNTIME

****교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-2-970-6570, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

1. 서 론

상수관망의 목적은 질적으로 안전하고 양적으로 충분한 용수를 적정 수압으로 수용가에 공급하는데 있으며, 이를 기반으로 상수관망의 신뢰도가 결정된다. 그러나 노후화 등의 내적 요인과 관 파괴 등의 외적 요인에 의한 비정상상황이 지속적으로 발생하고 있으며, 이를 복구하는 과정에서 단수가 발생하게 된다. 단수의 발생은 수요자에게 상수관망의 신뢰도를 저하시키는 요인으로 사전에 방지하거나, 적절한 대응방안을 수립하여야 한다. 단수에 대한 대응방안으로 효율적인 방법 중 하나는 인접 수원으로부터 용수를 공급받는 비상시 수계전환을 실시하는 것이다.

비상시 수계전환을 실시하게 되면 비상관로를 통하여 연계 수원으로부터 용수를 공급받게 되므로, 두 배수블록 모두 수리학적 특성이 달라지게 된다. 용수를 공급받는 배수블록의 경우 기존 수원이 아닌 연계 수원으로부터 용수를 공급받아 압력 부족 등의 문제가 발생할 수 있으며, 용수를 공급하는 배수블록의 경우 수도손실 증가에 따른 압력 부족, 연계 수원의 고갈 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 비상시 수계전환을 실시하기 전 반드시 수리해석을 통하여 적정 시간동안 목표 지역까지 용수를 충분히 공급할 수 있는지에 대한 시·공간적 측면에서의 적절성을 검토하여야 한다.

시간적 측면의 적절성은 연계 수원의 제원, 유입량, 유입량 대비 공급량에 따라 얼마나 비상시 수계전환을 운영할 수 있는가에 의하여 결정된다. 공간적 측면의 적절성은 두 배수블록간 고도차, 비상관로의 위치, 관경, 가압장의 위치 등에 따라 비상시 수계전환 운영시 충분한 양의 용수를 목표 범위까지 공급할 수 있는가에 의하여 결정된다.

시간적 측면의 적절성이 확보되지 못할 경우, 비정상상황이 발생한 배수블록 뿐만 아니라 연계 배수블록에도 영향을 미칠 수 있으므로 복구시간대비 충분한 연계공급 가능시간을 확보한 이후 비상시 수계전환을 실시하여야 한다.

비상시 수계전환 운영시 시간적 측면의 적절성이 확보되지 않는 경우는 복구시간 대비 연계공급 가능시간이 확보되지 못한 비정상상황으로, 파괴된 관 또는 시설물에 의하여 단수되는 범위가 크고 파괴된 관 또는 시설물의 복구시간이 길어야한다는 특징이 있다.

공간적 측면에서의 적절성이 확보되지 못할 경우, 비상시 수계전환을 실시하더라도 피해 지역에 충분한 용수를 공급하지 못하게 된다. 뿐만 아니라, 연계 수원으로부터 공급되는 용수량이 증가하여 연계 배수블록에도 압력 저하에 따른 공급능력 감소 등의 문제가 발생할 수 있으므로 비상시 수계전환 운영 이전 수리해석을 통한 적정 범위까지 용수가 공급될 수 있는지, 연계 배수블록에 압력 저하에 따른 공급능력 감소 문제가 발생하지 않는지에 대한 검토가 필요하며, 만약 공간적 측면의 적절성을 확보하지 못할 경우 개선방안

을 수립하여 공급능력 개선방안을 확보하여야 한다.

ME (2010)에서는 수원시설의 안정성 향상을 위하여 다계통화, 복수화 등을 통해 비상시 연계·운용될 수 있도록 정비하는 것이 바람직하며, 수원에서 가뭄이나 홍수 등의 기후변화에 대비하여 주변 수원과의 연계, 비상수원 확보 등으로 수원의 다원화를 고려하여야 한다고 언급하고 있다. EPA (2011)에서는 비정상상황 발생시 단수를 최소화하기 위하여 비상관로, 제수밸브의 위치에 따른 비상시 연계공급의 필요성에 대하여 언급하고 있으며, Walski (1993)은 상수관망의 신뢰성 확보를 위해 비상연계 시스템 설계의 필요성을 언급하고 있다.

국토교통부 과제인 “수직형 정수처리시설이 도입된 분산형 용수공급시스템 구축”(2014)에서는 EPANET의 Emitter 기능을 실제 관망에 적용하여 5개 블록 간 연계공급에 대한 수리해석을 실시하였다. Baek et al. (2008)은 WaterGems의 Pressure-Dependant-Demand 모듈을 통하여 비상급수 계획을 평가하였다. Chang et al. (2012)은 부족량 기대치를 산정하여 비상관로 적정 관경 설계를 실시하였으며, Han et al. (2013)은 비상시 용수공급 방안을 제안하고 수리해석을 통해 공급가능량을 분석하였다.

Lee et al. (2018)은 비상시 수계전환의 수리해석을 위하여 유한수원을 고려한 수리해석 기법인 Advanced-Pressure Driven Analysis (A-PDA)를 개발하였으며, Oak, Baek et al. (2018)은 비상시 수계전환의 시·공간적 평가를 위하여 A-PDA 기반 수리해석 및 공급능력지표를 통한 수요자의 만족도를 산정하였다. 또한, Oak, You et al. (2018), Jun et al. (2020)은 비상시 수계전환시 Fuzzy함수 기반 공급가능량 기준 지표를 산정하고 수요자들의 인식에 따른 변수조합을 선정하고 만족도를 산정하였다.

위 사례에서 알 수 있듯이 비상시 수계전환의 효과를 극대화하고 이를 사전에 상수관망 설계 또는 운영에 반영할 수 있는 공급능력 방안의 제시와 제시된 공급능력 방안을 실제로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구는 부족했다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 비상시 수계전환 운영시 공급능력을 감소시키는 원인을 분석하고, 공간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위한 공급능력 개선방안을 제안하였다. 공급능력 개선방안을 실제 A시 상수관망에 적용하고 개선방안 전·후에 따른 공급가능량을 비교하여 성능을 분석하였다.

2. 비상시 수계전환 운영시 충분한 공급범위를 확보할 수 없는 원인분석

비상시 수계전환 운영시 연계 배수블록간 상수관망의 특징, 연계수원의 특성 등에 의하여 시·공간적 측면의 문제가 발생할 수 있다.

비상시 수계전환 운영시 문제가 발생하는 원인은 수량,

압력, 공급노선 부재가 있다. 수량적 측면의 문제는 공급량이 충분히 확보될 경우 비상시 수계전환 운영시 피해지역에 충분한 양의 용수를 공급할 수 있으므로, 시간적 측면에서의 문제로 구분할 수 있다. 시간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위한 방안은 Kim et al. (2020)에 의하여 제안되었다. Kim et al. (2020)은 비상시 수계전환 운영시 시간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위하여 연계공급 가능시간 확보 방안으로 공급률 조절 방안을 제안하였으며, Fuzzy 함수 기반 지수를 산정하여 공급률 조절 방안에 따른 수요자들의 인식별 만족도를 평가하였다.

본 논문에서는 시간적 측면에서의 원인이 아닌 공간적 측면에서의 원인을 분석하였다. 공간적 측면의 문제는 크게 압력 문제와 공급노선 부재로 분류할 수 있으며, 압력 문제는 압력 부족에 따른 공급능력 저하와 고압에 의한 문제로 구분할 수 있다.

2.1 압력 부족

상수관망에서 적정 압력이 확보되지 못할 경우 공급능력이 감소하게 되며, 이는 수요자의 용수 사용성 감소에 따른 상수관망의 신뢰도를 저하시키는 원인이 된다. 압력 문제는 연계 수원과 기존 배수블록간 고도차, 가압펌프, 감압밸브, 비상관로의 제원 등 영향에 의하여 발생하게 되며 이를 해결하기 위해서는 비상관로의 관경을 증가시키거나 가압펌프를 추가하여 압력을 확보하여야 한다.

2.2 공급노선 부재

관 파괴에 의한 대규모 단수피해가 예상될 경우, 피해가 발생한 구역과 인접 배수블록을 연결하는 비상관로를 통한 비상시 수계전환 운영으로 고립구역에 용수를 공급할 수 있다. 그러나 고립구역과 인접 배수블록을 연결하는 비상관로가 적절한 위치에 존재하지 않을 경우 공급노선이 길어짐

에 따라 압력 부족 문제가 발생할 수 있으며, 만약 고립구역과 연결된 공급노선이 존재하지 않을 경우 비상시 수계전환을 실시하더라도 용수를 공급하지 못하는 구역이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 비상시 수계전환시 개별 비상관로에 대한 공급능력 평가를 실시하여야 하며, 공급능력이 확보되지 못할 경우 적정 위치에 비상관로 추가하여 공급노선을 확보하여야 한다.

2.3 고압

비상시 수계전환 운영시 고도가 낮은 배수블록으로부터 고도가 높은 배수블록으로 용수가 공급될 경우 배수블록간 고도차에 의하여 압력 부족에 따른 공급능력 저하가 발생한다. 그러나 고도가 높은 배수블록으로부터 고도가 낮은 배수블록으로 용수가 공급될 경우 공급능력 부족 문제는 발생하지 않으나, 관 말단부 또는 저지대 구역에서 고압에 따른 관 파괴 등의 문제가 발생할 수 있다.

따라서 비상시 수계전환 운영시 고도가 높은 배수블록으로부터 고도가 낮은 배수블록으로 용수가 공급될 경우 고압 문제를 검토하여야 한다. 고압 문제를 해결하기 위해서는 감압밸브를 추가하여 용수를 공급받는 지역의 압력을 적정 압력으로 감소시켜야 한다.

3. 공급능력 개선방안

비상시 수계전환의 운영은 비정상상황에 의하여 대규모 단수가 예상될 경우 운영하게 되며, 연계 배수블록간 상수관망의 특징에 의하여 공간적 측면의 적절성이 결정된다.

본 논문에서 공간적 측면에서의 문제를 해결하기 위하여 비상관로 관경 증가, 가압펌프 추가 방안, 비상관로 추가 방안 및 감압밸브 추가 방안을 제안한다. 각각의 문제에 따른 공급능력 개선방안은 Fig. 1과 같이 선정할 수 있으며,

Fig. 1. The Improvements of Supply Performance

구체적인 개선방안에 대한 설명은 다음과 같다.

3.1 비상관로 관경 증가

비상시 수계전환 운영시 비상관로를 통하여 고립지역에 용수를 공급하게 되는데, 이 때 비상관로를 통해 많은 양의 용수가 고립지역으로 공급되면서 수두손실이 발생하게 된다. 수두손실은 관의 관경에 반비례하므로, 비상관로의 직경을 증가시키므로써 수두손실을 감소시켜 공급성능을 확보할 수 있다. 비상관로의 관경은 미소손실을 고려하여 인접한 배수관로의 직경보다 과다하게 크지 않도록 설정하여야 한다.

그러나 연계 배수블록간 고도차에 의하여 발생하는 압력 부족 문제는 비상관로를 통하여 용수가 공급될 때 발생하는 수두손실에 의한 영향보다 연계 블록간 고도차에 의한 영향이 더 크므로, 관경을 증가시키더라도 공급성능 개선 효과가 거의 없다. 이 경우에는 비상관로 관경 증가가 아닌 가압펌프 추가 방안 또는 비상관로 추가 방안을 고려하여야 한다.

3.2 가압펌프 추가

일반적으로 연계지역간 고도차가 클 경우에는 비상관로 관경 증가, 비상관로 추가에 따른 공급성능 개선 효과가 미미할 수 있다. 이 경우, 가압펌프를 적정 위치에 추가하여 공급성능을 개선하여야 한다.

가압펌프의 위치는 정상운영상황에서 영향을 미치지 않도록 비상관로의 유입부 또는 유출부 중 시공가능한 위치에 설치하고, 토출압은 연계 공급을 실시하는 배수블록의 공급성능이 감소하지 않으며, 용수를 공급받는 배수블록의 압력이 70 m를 초과하지 않는 최대 압력으로 설정한다. 만약 피해가 발생한 블록의 공급성능을 높이기 위하여 토출압을 과다하게 설정할 경우, 수두손실 증가에 따라 용수를 공급을 실시하는 배수블록에서 압력 부족에 의한 공급성능 저하가 발생할 수 있으므로 용수를 공급해주는 배수블록에는 피해가 가지 않는 최대 압력을 토출압으로 설정한다. 단, 최대 압력을 토출압으로 설정하였을 때 용수를 공급받는 배수블록에서의 압력이 70 m를 초과할 경우 후술되는 고압문제가 발생할 수 있으므로, 용수를 공급받는 배수블록의 압력이 70 m를 초과하지 않도록 토출압을 선정한다.

3.3 비상관로 추가

비상관로 추가 방안은 고립구역과 연계 배수블록간 공급노선이 존재하지 않는 공급노선 부재 문제를 해결하는 유일한 방안이며, 또한 압력 부족 문제를 개선할 수 있다.

추가 비상관로는 두 배수블록간 고도가 유사하고 실제 거리가 길지 않은 곳에 설치하며, 실제 시공 가능한 위치에 설치하여야 한다. 추가 비상관로의 관경은 유입부·유출부와 인접한 관로의 관경으로 설정하며, 관 길이는 두 지점간 실측 길이로 설정한다. 그러나 부적절한 위치에 비상관로를 추가할 경우 용수를 공급하는 배수블록에 공급성능이 저하

될 수 있으므로, 반드시 수리해석을 통하여 적정 위치를 결정하여야 한다.

비상관로 추가를 통하여 공급노선을 확보하더라도 두 배수블록간 고도차, 비상관로의 제원 등에 의하여 압력 문제가 발생할 수 있으므로 성능평가를 실시하여 압력 문제 발생 여부를 검토하여야 한다.

3.4 감압밸브 추가

비상시 수계전환 운영시 고도가 높은 배수블록으로부터 고도가 낮은 배수블록으로 용수가 공급하게 될 경우 관 파괴 등의 문제가 발생할 수 있으므로 고압 발생 여부를 검토하며, 고압 문제 발생시 감압밸브를 추가하여 피해지역에 적정 압력을 확보하여야 한다.

감압밸브의 위치는 정상운영상황에서 영향을 미치지 않도록 비상관로의 유입부 또는 유출부 중 시공가능한 위치에 설치하며, 감압후 압력은 정상운영상황시 개별 절점에서의 압력과 유사하도록 설정한다.

4. 상수관망에의 적용

4.1 수리해석 기법

상수관망의 수리해석에서 주로 이용되는 기법으로는 Demand Driven Analysis (DDA)와 Pressure Driven Analysis (PDA)가 있다. DDA는 개별 절점에서의 수요량을 고정인자로 설정하고 수원에서 모든 절점의 수요량을 100% 만족시키는 것을 가정하여 절점별 압력과 관별 유량을 산정한다. PDA는 압력과 유량의 관계식을 도입하였으며, 압력을 기반으로 절점에서의 공급량을 산정한다.

그러나 두 해석기법 모두 무한수원의 법칙을 가정하고 있어 비상시 수계전환 운영시 연계 수원의 수위 변화 등을 분석할 수 없다. Lee et al. (2018)은 연계 수원의 수위 변화를 분석하기 위하여 유한수원의 법칙을 가정한 A-PDA를 제안하였다.

A-PDA는 기존 PDA에 유한수원 객체인 Limited Reservoir를 추가하고 PDA 기반 수리해석을 실시하여 개별 절점에서의 압력에 따른 공급량을 산정하고, 수원의 유입량과 공급량의 차에 따른 수위 변화 및 고갈 여부를 분석한다. Table 1은 수리해석 기법에 따른 특징을 정리한 결과를 나타낸다.

공간적 측면의 문제는 상수관망 특징에 의한 수리학적 문제에 의해 발생하므로, 연계 공급량이 충분하여 연계 수원의 수위 변화는 수리해석에 영향을 미치지 않는다. 이에 본 논문에서는 공간적 측면에서의 적절성을 검토하기 위해 PDA를 적용하여 개선방안 적용 전·후 공급성능 평가를 실시하였다.

4.2 대상지역

공급성능 개선방안 적용을 위한 대상지역은 A시 일부

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

Characteristic	DDA	PDA	A-PDA
Available discharge	Demand	Pressure dependent	Pressure and storage dependant
Considering nodal pressure	X	O	O
Considering source storage	X	X	O
Applicability for normal condition	O	O	O
Applicability for pressure deficient condition	X	O	O
Applicability for storage deficient condition	X	X	O
Additional input Characteristics	-	HOR	HOR, level-storage relation, average inflow and inflow pattern

Fig. 2. Layout of Target Network (A City)

Fig. 3. Water Service Interruption Area by the Isolation of Pipe A, B

Table 2. The Properties of the Reservoirs

Reservoirs	Elevation (m)	Supply (m ³ /day)	Volume (m ³)	Maximum Level (m)
RES1	134.7	74,472	35,218	5
RES2	79.7	55,003	23,042	5
RES3	85.7	50,921	29,267	4.5

구역(이하 A시)으로, 3개의 배수지가 각 배수블록을 담당하고 있으며, 면적은 약 5,629 ha, 전체 수요량은 180,396 CMD이다. 구체적인 A시의 현황은 Fig. 2와 같다.

정상운영상황시 각 배수지는 담당 배수블록에만 용수를 공급하나, 비정상상황 발생시 배수블록간 위치한 11개의 비상관로를 통한 비상시 수계전환을 실시하여 용수를 공급받을 수 있다. Table 2는 배수지들의 제원을 나타낸다. 1지 배수지가 담당하는 배수블록은 고배수지(1지 배수지)로부터 용수를 공급받으며, 일부 지역은 감압밸브를 통하여 적정

압력을 확보하고 있다. 2지, 3지 배수지가 담당하는 배수블록은 1지 배수블록에 비하여 상대적으로 고도가 낮고 평평한 지형으로 구성되어 있다.

4.3 시나리오1 : 관 A, B 파괴

관 A, B (D700 mm) 파괴시 제수밸브의 차폐 및 공급노선 차단에 의하여 Fig. 3과 같이 1지 배수블록에 A시 수요량의 16.1% (29,114 CMD)에 해당하는 단수가 발생한다.

이와 같은 피해를 저감시키기 위해 비상시 수계전환을 실시하게 되면 2지 배수지로부터 단수구역에 11,505 CMD (39.5%)의 용수를 공급할 수 있다. 그러나 비상시 수계전환을 실시하더라도 대규모 단수피해가 예상되므로, 적절한 공급성능 개선방안을 수립하여야 한다.

배수블록간에는 고도차가 크며, 고도가 낮은 2지, 3지 배수블록으로부터 1지 배수블록으로 용수가 공급됨에 따라 압력 부족 문제가 발생한다. 이에 공급성능 개선방안으로 비상관로 관경 증가, 가압펌프 추가 방안, 비상관로 추가 방안을 적용하여 공급성능을 분석하고자 한다. 고립구역과

2지 배수블록을 연결하는 비상관로는 총 4개로, 이중 비상시 수계전환 운영시 공급량 11,505 CMD의 30.2%를 담당하는 비상관로 A에 공급성능 개선방안을 적용하였다.

4.3.1 Case 1) 비상관로 관경 증가

비상관로 A의 관경을 기존 200 mm에서 400 mm로 증가시킨 후 수리해석을 실시한 결과, 비상시 수계전환에 의하여 11,865 CMD의 용수를 공급함으로써 단수구역의 피해를 40.8% 감소시킨다. 비상관로 관경 증가에 따른 공급성능 개선 효과는 비상시 수계전환 운영 대비 1.3%인 것으로 나타났다.

4.3.2 Case 2) 가압펌프 추가

비상관로 A의 유출부에 가압펌프를 설치하고 토출압을 34 m로 설정한 후 수리해석을 실시한 결과, 비상시 수계전환

에 의하여 15,764 CMD의 용수를 공급함으로써 단수구역의 피해를 54.1% 감소시킨다. 가압펌프 추가에 따른 공급성능 개선 효과는 비상시 수계전환 운영 대비 14.6%인 것으로 나타났다.

4.3.3 Case 3) 비상관로 추가

비상관로 A 이외에 비상관로 B (D200 mm, L=240 m)를 추가하였다. 추가 비상관로의 위치는 거리가 짧으며 두 절점 간 고도차가 거의 없는 지역으로 선정하였으며, 구체적인 위치는 Fig. 4와 같다.

비상관로 추가에 따른 수리해석을 실시한 결과, 비상시 수계전환에 의하여 12,489 CMD의 용수를 공급함으로써 단수구역의 피해를 42.9% 감소시킨다.

비상관로 추가에 따른 공급성능 개선 효과는 비상시 수계전환 운영 대비 3.4%인 것으로 나타났다.

수리해석 결과는 Table 3과 같다. 공급성능 개선방안 중 가압펌프를 통한 압력 확보방안이 공급성능 효과가 54.1%로 가장 높은 것으로 나타났다. 관 A, B 파괴시 2지, 3지 배수블록으로부터 1지 배수블록으로 용수를 공급함에 있어 배수블록 간 고도차에 의한 압력 부족이 주요 원인이므로 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다. 가압펌프 추가 전·후에 따른 피해지역의 절점별 공급가능률은 Fig. 5와 같다.

Fig. 4. Location of the Emergency Pipe

Table 3. Results of Hydraulic Analysis

Improvements	Supply (m ³ /day)	Damage reducing rate (%)
Case 1	11,865	40.8
Case 2	15,764	54.1
Case 3	12,489	42.9

Fig. 5. Available Supply Rate by Hydraulic Analysis

4.4 시나리오2 : 관 C, D 파괴

관 C, D (D600 mm) 파괴시 제수밸브의 차폐 및 공급노선 차단에 의하여 Fig. 6과 같이 2지 배수블록에 A시 수요량의 12.4% (22,448 CMD)에 해당하는 단수가 발생한다.

대규모 단수피해를 저감시키기 위하여 비상시 수계전환 운영시 비상관로 C (D400 mm, L=314.4 m)를 통하여 1지 배수블록으로부터 22,163 CMD의 용수를 공급함으로써 단수구역의 피해를 98.7% 감소시킬 수 있다.

그러나 비상시 수계전환 운영시 고지대인 1지 배수블록으로부터 상대적으로 고도가 낮은 2지 배수블록으로 용수를 공급함에 따라 압력이 과다하게 높아져 말단부 관 파괴 등의 피해가 발생할 수 있다.

Fig. 6. Water Service Interruption Area by the Isolation of Pipe C and D

이를 방지위해서는 비상관로 C의 유출부에 감압밸브를 설치함으로써 공급되는 용수의 적정 압력을 확보하여야 한다. 감압밸브의 Setting 값은 정상운영상황시 비상관로 유출부에서의 압력과 유사하도록 30 m로 설정하였으며, 감압밸브의 위치는 Fig. 7과 같다.

감압밸브 추가 전·후에 따른 압력 분포 결과는 Fig. 8과 같고, 비상관로 유입부, 유출부 및 고립구역 말단부 절점에서의 압력 변화는 Table 4와 같다. 감압밸브 추가에 따라 말단부 절점에서의 압력이 71.2 m에서 49.6 m로 적정 압력이 확보되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 7. Location of the Pressure Relief Valve (PRV)

(a) Before

(b) After

Fig. 8. Pressure by Installing PRV

Table 4. Results by Installing PRV

Node ID	Elevation (m)	Pressure (m)	
		Before	After
5107 (Inflow node)	64.9	41.9	41.9
5108 (Outflow node)	52.1	51.6	30.0
1559 (End of Block2)	30.5	71.2	49.6

5. 결 론

본 연구에서는 비상시 수계전환 운영시 공간적 측면의 적절성을 확보하기 위하여 공급성능을 저하시키는 원인을 제안하고, 원인에 따른 개선방안을 제안하였다. 공급성능은 압력과 공급노선에 의해 결정되며, 공급성능에 영향을 미치는 요인에는 배수블록간 고도차, 비상관로의 제원 및 위치, 가압장 등이 있다. 공급성능 개선방안은 압력 문제 해결을 위한 비상관로 관경 증가, 가압펌프 추가, 공급노선 문제 해결을 위한 비상관로 추가 방안 및 고압 문제 해결을 위한 감압밸브 설치 방안을 제안하였다.

비상관로의 관경 증가는 연계 배수블록간 고도차에 의해 발생하는 압력 부족 문제는 해결할 수 없으므로, 배수블록간 고도차가 클 경우 가압펌프를 통한 압력 확보가 필요하며, 고도차가 크지 않더라도 비상관로 관경 증가 이후 충분한 공급성능 확보가 불가능할 경우 가압펌프를 추가를 검토하여야 한다. 비상관로 추가 방안 또한 비상관로 설치 이후 수리해석을 통하여 공급성능을 분석하여 적정 위치에 비상관로가 설치되었는지, 압력 문제가 발생하지 않는지 등의 문제점을 검토하여야 한다. 고압문제의 경우 공급성능은 만족하나, 압력 과다로 인한 관파괴 등의 문제를 야기할 수 있으므로 고지대로부터 저지대로 용수를 공급할 경우, 가압펌프를 추가 설치할 경우 고압이 발생하지 않는지에 대한 수리해석이 실시되어야 한다.

공급성능 개선방안의 효과 분석을 위하여 실제 A시의 대규모 단수 시나리오에 공급성능 개선방안을 적용하여 수리해석을 실시하였다. 관 A, B 파괴에 따른 비상시 수계전환 운영시 수리해석을 통하여 압력 부족 문제를 확인하고, 공급성능 개선방안을 검토한 결과, 연계블록간 고도차에 의한 공급성능 저하로 가압펌프 추가에 따른 비상시 수계전환 운영시 단수에 의한 피해를 가장 많이 저감시킬 수 있는 것을 확인하였다. 관 C, D 파괴에 따른 비상시 수계전환 운영시 공급성능은 98.7%로 매우 높으나, 용수를 연계공급 받는 배수블록 말단부 저지대에서 고압이 발생함을 확인하고 적정 압력 확보를 위하여 감압밸브 설치 방안을 분석하였다.

공급성능 개선방안 적용에 따른 비상시 수계전환 운영시

피해지역에 공간적으로 더 많은 양의 용수를 더 넓은 범위까지 공급할 수 있다. 그러나 연계 수원으로부터 추가적으로 공급되는 용수의 양이 증가하여 연계공급 가능시간이 감소하므로, 공급성능 개선방안 검토 이후 시간적 측면에서의 적절성을 추가적으로 검토하여야 한다. 제안하는 공급성능 개선방안은 비상시 수계전환 운영을 고려한 설계시 가압장, 감압장 등 수리시설의 적정 위치를 선정하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

제안하는 공급성능 개선방안은 방안별 개선 효과가 차이가 있으므로, 수리해석을 실시하여 비용대비 효과를 검토하여 적정 대안을 선정하여야 한다. 공급성능 개선방안은 필요에 따라 두 가지 이상을 병행하여 적용할 경우 큰 효과를 볼 수 있으므로, 실질적인 설계 적용시 공급성능 개선방안의 조합을 검토가 필요하다. 추후에는 공급성능 개선방안 조합에 따른 공급성능 개선 효과를 분석하고, 비상시 수계전환 운영시 공급성과 사용성이 만족되는 적절한 공급방안에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 제시된 비상시 수계전환 보완방안 간의 성능향상 비교를 정확히 하기 위해서는 상수관망의 수리학적 자료가 실제 운영자료를 기반으로 하여 검토정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950002).

References

- Baek, C.W., Jun, H.D., Kim, J.H., Yoo, D.K., and Lee, K.C. (2008). Evaluation of Emergency Water Supply Plan for Block System of Water Network using WaterGEMS. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 8, No. 6, pp. 15-20.
- Chang, Y., Kim, J., and Jung, K. (2012). A Study on the Design and Evaluation of Connection Pipes for Stable Water Supply. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 2, pp. 249-256.
- Han, W., Jung, K., and Kim, J. (2013). Hydraulic Adequacy of Connection Pipes in Water Supply Systems for Contingencies. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 27, No. 6, pp. 679-687.
- Jun, H.D., Gim, A., Oak, S., and Jung, D. (2020). Development of a fuzzy-function-based performance indicator for water distribution system's emergency condition. *Water*, Vol. 12, No. 8, pp. 2296.
- Kim, S.R., Gim, A.R., Ha, J.T., and Jun, H.D. (2020).

- Determination of Proper Water Supply Rate for Emergency Interconnection Plan. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 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.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Designstandard for water distribution systems*.
- Oak, S., Baek, S., Lee, H.M., and Jun, H. (2018). An Application of the A-PDA Model For the Interconnected Operation Among Adjacent Blocks of Water Distribution Systems In Case of Emergency. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, pp. 231-237.
- Oak, S., You, K., Noh, H., and Jun, H. (2018). A Development of Supply Performance Indicator in a Water Distribution System Using Fuzzy Sets and a PDA Model. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 2, pp. 289-297.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Planning for an Emergency Drinking Water Supply*. EPA 600/R-11/054.
- Walski, T.M. (1993). Practical Aspects of Providing Reliability in Water Distribution Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 42, No. 1, pp. 13-19.

Received	May 12, 2021
Revised	May 13, 2021
Accepted	May 25, 2021