



위기대응 취약성 분석을 통한 광역상수도 연계운영 평가

Evaluation for conjunctive operation of multi-regional water supply system through risk analysis

황진수^{1,2}·최태호²·홍공현³·이두진²·구자용^{1*}

Jinsoo Hwang^{1,2}·Taeho Choi²·Gonghyun Hong³·Doojin Lee²·Jayong Koo^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학과, 서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504

²한국수자원공사, 대전광역시 대덕구 신탄진로 200, 34350

³한국전기기술인협회, 서울시 관악구 남부순환로 2040, 08805

¹Department of Environmental Engineering, University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

²K-water, 200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34350, Republic of Korea

³Korea Electric Engineer Association, 2040, Nambusunhwan-ro, Gwanak-gu, Seoul 08805, Republic of Korea

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319

ABSTRACT

This study would present a risk analysis method to evaluate stable tap water supply in a multi-regional water supply system and propose a measure for the evaluation of the effect of the conjunctive operation of the multi-regional water supply system using this. Judging from the vulnerability for the crisis response of the entire N. multi-regional water supply system, as compared to the result of Scenario 1 in which no conjunctive pipes were operated, it was found that in Scenario 2, in which conjunctive pipes were partially operated, the vulnerability of crisis response decreased by about 30.6%, and as compared to Scenario 3, the vulnerability of crisis response decreased by 86.2%. In setting a plan for stable tap water supply in N multi-regional water supply system, using the estimated value and the method for the evaluation of the vulnerability of crisis response by pipe, by interval and by line, it is judged that this can be utilized as a basis for the judgment of the evaluation of the operation or the additional installation of conjunctive pipes.

Key words: Multi-regional water supply system, Conjunctive operation, Risk analysis, Pressure driven analysis

주제어: 광역상수도, 연계운영, 위기대응 취약성 분석, 수압기반 관망해석

1. 서론

국내 도·송수관로의 대다수를 차지하고 있는 광역상수도는 인근에 수자원 확보가 어려운 여러 개의 도시를 하나의 급수권으로 하여 대단위 수원과 연계하는 공급체계를 구축하기 위한 중심 시설물로서 우리나라 전체의 물 공급에 매우 중요한 역할을 담당하고

있다. 하지만, 1960년대 초반 울산, 창원 등 초기에 건설된 상수도 관로는 내구연수가 도래하고 있어 시설물 고장, 노후화로 인한 사고위험성이 점차 증가하고 있다. 만약, 상수도 관로에 파손 또는 기능고장이 발생할 경우 물 공급에 차질이 발생할 수 있으며, 그로 인한 경제적, 사회적 파급효과는 막대하기 때문에 항상 안정성 유지에 각별한 주의를 기울여야 한다. 또한, 기후변화를 비롯한 각종 재해 및 재난은 상수도 시설에 직·간접적인 영향을 줄 수 있으므로 재해 및

Received 18 February 2019, revised 18 July 2019, accepted 5 August 2019.

*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

재난에 대비한 안정성이 확보된 상수도 시설의 역할이 요구되고 있다.

한편, 최근 우리나라의 소득수준의 향상으로 수도물 공급서비스 전반에 대한 요구도 다양화·고급화되고 있으며, 수량적 측면에서의 만족뿐만 아니라 안전하고 안정적인 용수공급에 대한 요구가 증가하고 있다. 수도물 공급서비스에 대한 시민들의 요구수준이 점점 높아진다는 것은 단수에 의한 일상생활의 불편함과 업무 중단에 따른 손실 방지의 가치가 증대되고 있음을 의미하며, 공급자 입장에서는 단수를 최소화하도록 하는 안정적 용수공급 시스템의 구축이 요구되고 있다. 즉, 앞으로의 상수도사업은 신규 용수공급을 위한 신설 및 확장사업 보다는 개량, 교체 등 갱생사업으로 중심이 옮겨져 가고, 이에 따라서 단수 없는 안정적이면서 안전한 상수도 공급을 동시에 추구하는 방향으로 전환될 것으로 예측된다.

이와 같이 수요자에게 안전하고 안정된 수도물을 공급하기 위해서는 취수원 다양화, 도·송수관로 복선화, 상수도 관망 네트워크화, 정수장 예비용량 증대, 배수지 용량 증대, 원수 조절지 신설 등 다양한 제도적 및 기술적인 방법들이 있다. 특히, 상수도 관망 네트워크화 중 광역상수도 연계운영의 경우에는 도입 규모는 작지만 실행력이 매우 우수하며 수도물 공급 중단 없이 안전한 수도물을 제공할 수 있다는 점에서 가장 우선적으로 시행할 필요가 있는 방법이다. 더 나아가 광역상수도 연계운영에 의한 안전하고 안정적인 수도물 공급뿐만 아니라 에너지 관리측면에서 에너지 손실이 최소가 되도록 상수도 관망을 재구축할 수 있다는 점에서 그 효율성은 더 클 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 광역상수도에서의 안정적인 수도물 공급을 평가하기 위한 위기대응 취약성 분석 방법을 제시하고 이를 이용한 광역상수도 연계운영의 효과를 평가할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 위기대응 취약성 분석

본 연구에서는 광역상수도 연계운영 평가를 위해 위기대응 취약성 분석을 수행하였으며, 상수도 관망에서의 위기대응 취약성 분석과 관련된 많은 연구들

을 검토하였다. 그 결과 위기대응 취약성 분석방법은 위상적 방법과 수리학적 방법으로 크게 2가지로 분류할 수 있었다. 위상적 방법은 정해진 상수도 관망에서 구성요소간의 물리적으로 연속되지 않을 확률을 측정하는 것과 관련되어 있으며, 수리학적 방법은 적합한 절점 수량과 압력으로 수요자에게 물을 공급하지 못할 확률로써 정의하는 것이다. 상수도 관망의 위기대응 취약성 분석에서 위상적 방법은 Goulter and Coals (1986), Kansal and Kumar (1995), Chen et al. (2002), Jun (2005), Wang and Au (2009), Lee (2011), Choi and Koo (2015) 등이 적용한 바 있고, 수리학적 방법은 Cullinane (1986), Fujiwara and Ganeshrajh (1993), Khomsi et al. (1996), Paik (2007), Kim (2009), Yoo (2012), Choi and Koo (2015) 등이 적용한 바 있다. 이와 같이, 본 연구에서는 기존 연구에서 제시한 위상적 방법과 수리학적 방법 중 수리학적 방법을 적용하여 위기대응 취약성을 분석하였으며, 이를 통해 광역상수도 연계운영을 평가하였다.

2.2 비정상상태 관망해석

위기대응 취약성 분석은 사고 시 발생하는 부족 수량 산정을 통해 계산할 수 있다. 이를 위해서는 상수도 관망에서의 사고 상황을 모의할 수 있는 비정상상태 관망해석이 필요하다. 관망해석 기법에는 DDA(Demand Driven Analysis)와 PDA(Pressure Driven Analysis)의 두 가지로 크게 구분된다. 일반적인 관망해석 기법인 DDA는 각 절점의 수요량은 모두 공급된다는 가정 하에 절점의 압력 수두를 계산하는 기법으로써 정상상태 해석에는 무리가 없다. 하지만 관과파 및 관내 저 압력 상태 등 관망의 수리학적 상태가 변하는 비정상상태 해석에서는 절점에서 부압 등 비현실적인 결과가 나타날 수 있으며, 이 경우에는 PDA 관망해석을 사용한다. PDA 관망해석은 현장의 실측 데이터를 바탕으로 산정한 HOR(Head-Outflow Relation) 관계식을 통해 비정상상태에서의 절점의 압력 수두에 따른 공급가능 유량을 산정할 수 있는 방법으로써, 가상의 저수지를 이용하는 방법(Bhave, 1991) 이후 최적화 기법에 화음탐색법을 이용한 연구(Baik, 2007), 모의 상수관망을 통한 압력과 유량 사이의 관계식에 관한 연구(Chang and Kang, 2014) 등 국내·외의 많은 연구자들에 의해 다방면으로 연구가 활



발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 K-water에서 자체 개발한 PDA 관망 해석 프로그램인 K-NRiskQ를 이용하였다. K-NRiskQ는 EPANET 3.0을 기반으로 다른 상용화된 관망해석 프로그램에 비해 이면누수 및 파손누수 모의 모듈, 누수량 산정 및 자동배분 모듈, 압력기반해석 누수모의 알고리즘, 해석결과 기반 누수 성능평가지표 표출, 비정상상황시 피해분석, 압력기반 수요민감도 분석 등의 차별화된 기능 등을 수행할 수 있는 프로그램이다. 따라서 본 프로그램 이용하여 관 파손시의 비정상 상태를 모의하고, 그 결과를 이용하여 각 관로 파손 시 예상되는 수요 부족량을 산정하여 위기대응 취약성을 산정하는데 활용하였다.

3. 연구방법

본 연구에서는 먼저, 광역상수도 연계운영 평가를 수행하기 위하여 비상연계관로가 설치되어 운영되고 있는 대상지역을 선정하였다. 연구대상지역의 상수도 GIS, 공급량 자료, 관 파손확률, 관 파손시 관경별 복구시간 등의 자료를 수집하였다. 상수도 GIS와 공급량 자료 등을 이용하여 관망해석을 위한 관망도를 작성하였고, 수리해석 모의 편의성을 위해 비상연계관로 기준으로 관망도 개략화를 수행하였다.

다음은 연구대상지역의 관 파손시 부족 수요량을 산정하기 위하여 3가지 분석 시나리오를 설계하였다.

시나리오 1은 비상연계관로가 모두 닫혀 있어 연계 이전의 상태를 평가하는 것이고, 시나리오 2은 현재 부분적으로 비상연계관로를 개방하고 있는 운영상태를 평가하고, 시나리오 3는 모든 비상연계관로를 개방하여 기존에 설치 되어 있는 모든 비상연계관로를 개방하는 것이다. 이러한 시나리오 분석을 통해 현재의 광역상수도 연계운영 상태를 평가하고, 향후 운영 방안을 도출하고자 하였으며, 이러한 분석은 K-water에서 개발한 PDA기반의 비정상상태 모의 프로그램인 K-NRiskQ를 활용하였다.

마지막으로, 연구대상지역의 관 파손시 부족 수요량을 산정하기 위한 시나리오 분석결과와 관 파손확률, 관 파손시 복구시간을 활용하여 시나리오별 위기대응 취약성을 정량적으로 산정하여 광역상수도 연계운영 평가를 수행하였다. 연구절차는 Fig. 1과 같다.

3.1 연구대상지역

위기대응 취약성을 통한 광역상수도 연계운영 평가를 위한 연구대상지역은 비상연계관로가 잘 운영되고 있고, 관망도 및 운영자료의 수집이 용이한 N 광역상수도로 선정하였다. N 광역상수도 연평균 용수수요량은 180,572.09 m³/day으로써 용수공급계통은 다음 Fig. 2와 같다. 연구대상지역의 분석범위는 송수관로로 한정하였으며, SP-HD 계통, SC-NH 계통, CM-GJ 계통 별로 총 15개의 비상연계관로가 설치 및 운영되고 있으며, 각 계통별 관로

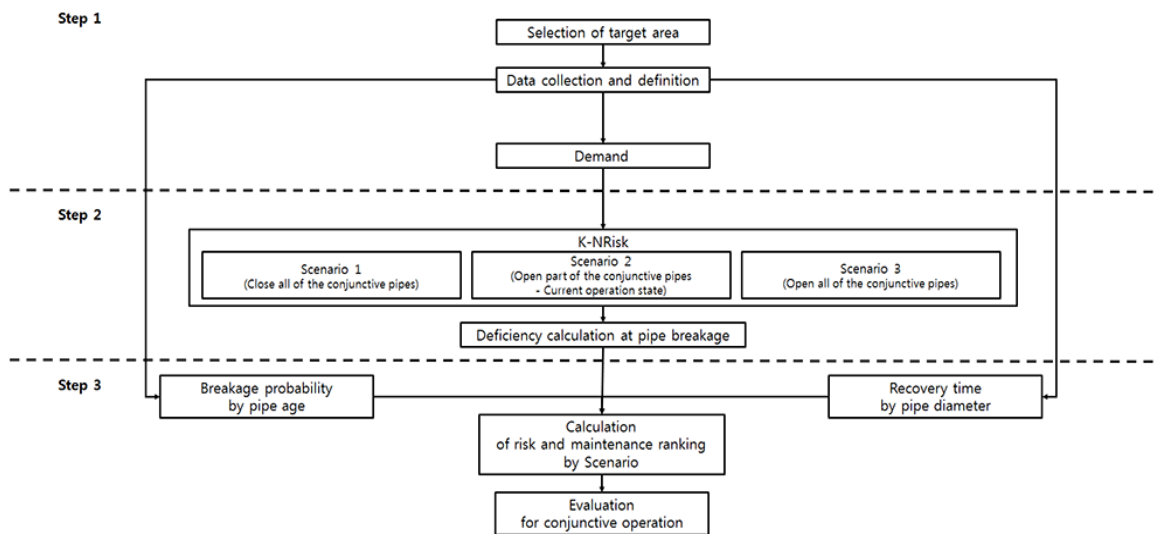


Fig. 1. Flow chart of this study.

pp. 243-250
pp. 251-258
pp. 259-268
pp. 269-279
pp. 281-289
pp. 291-297
pp. 299-309
pp. 311-319

Table 1. Pipeline overview of N multi-regional water supply system

Division	SP line	HD line	SC line	NH line	CM line	GJ line	Sum
Number of pipe	23	15	16	28	85	39	206
Number of interval	5	5	4	5	11	12	42
Length of pipe(km)	38.96	23.53	19.89	34.99	60.46	78.22	256.05

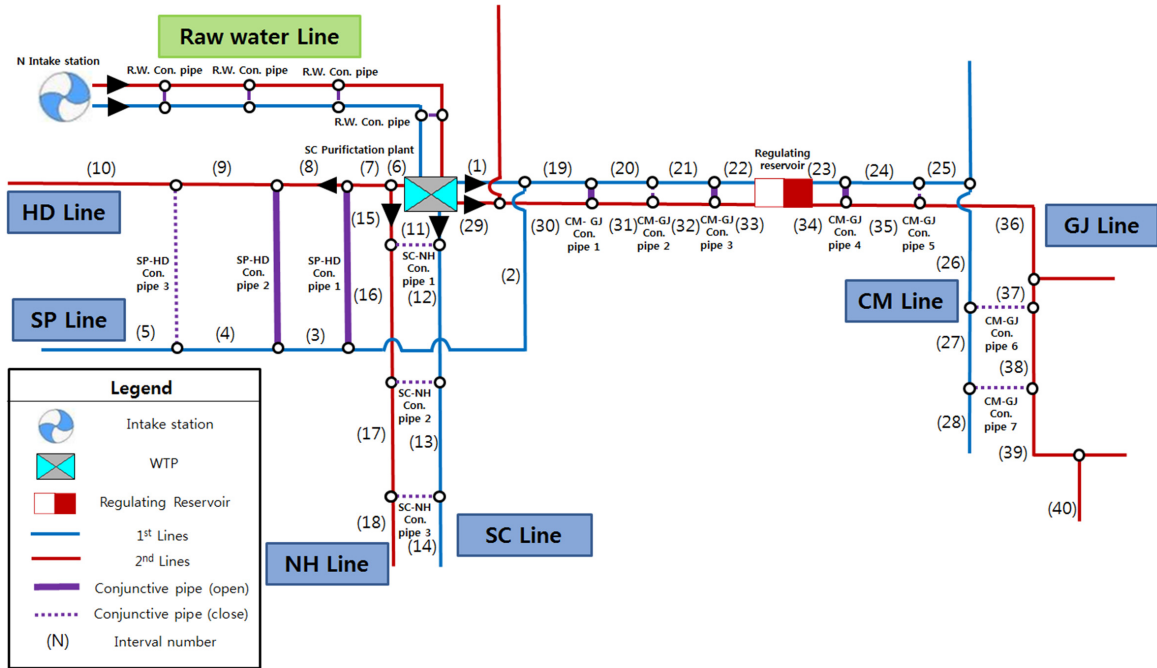


Fig. 2. Distribution diagram of N multi-regional water supply system.

및 관망도 개략화를 통한 구간 현황은 다음 Table 1과 같다.

3.2 위기대응 취약성 산정

위기대응 취약성은 관파손확률, 관파손시 복구시간 및 관파손시 물부족량의 곱으로 산정되도록 정의하여 각 관로별, 구간별, 계통별 위기대응 취약성 지표값이 정량화되도록 하였으며, 이는 특정 관로, 구간, 계통 등에서의 1년 동안에 발생할 수 있는 물부족량을 의미한다. 관로별 위기대응 취약성 계산은 다음 식 (1)과 같다.

$$Risk_i = P_{age} \times L_{pipe} \times T_{diameter} \times impact_i \quad (1)$$

여기서,

$Risk_i$: i 관 파손에 대한 위기대응 취약성($m^3/year$)

P_{age} : 관연령별 평균 파손확률($건/km/year$) = 0.08

$T_{diameter}$: 파손시 관경별 복구시간(day)

L_{pipe} : 관연장(km)

$impact_i$: i 관로 파손시 물부족량($m^3/day/건$)

산정된 관로별 위기대응 취약성 지표를 광역상수도 연계운영 평가에 활용하기 위해서는 구간별 및 계통별 위기대응 취약성 지표로 환산해줄 필요가 있으며, 그 방법은 다음 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$Risk_{interval_j} = \sum Risk_i \quad (2)$$

여기서,

$Risk_{interval_j}$: j 구간의 위기대응 취약성($m^3/year$)

$$Risk_{line_k} = \sum Risk_{interval_j} \quad (3)$$



여기서,

$$Risk_{line_k} : k\text{계통의 위기대응 취약성}(m^3/year)$$

광역상수도 전체에 대한 위기대응 취약성은 각 계통별 위기대응 취약성을 합하여 산정하되, 1구간과 6구간과 같은 중복된 관로는 한번만 계산하도록 제외하였으며, 이는 각 관로의 위기대응 취약성을 모두 합한 것과 같도록 하였다. 그 방법은 다음 식 (4)와 같다.

$$Risk_{total} = \sum Risk_{line_k} - \sum Risk_{duplication} = \sum Risk_i \quad (4)$$

여기서,

$Risk_{total}$: 광역상수도 전체 위기대응 취약성

$Risk_{superposition}$: 중복 관로위 기대응 취약성($m^3/year$)

그리고, 관로의 파손 확률은 노후도에 따른 관 파손 확률(건/km/year)과 관 연장을 곱하여 확률적으로 계산 할 수 있도록 하였다. 다음 Fig. 3은 전국 광역상수도 및 공업용수도의 관 연령을 5개년씩 그룹화하여 관 연령에 따른 파손율을 도식화 한 것이다. 파손율 곡선을 보았을 때 전형적인 bathtub curve를 나타내고 있으며,

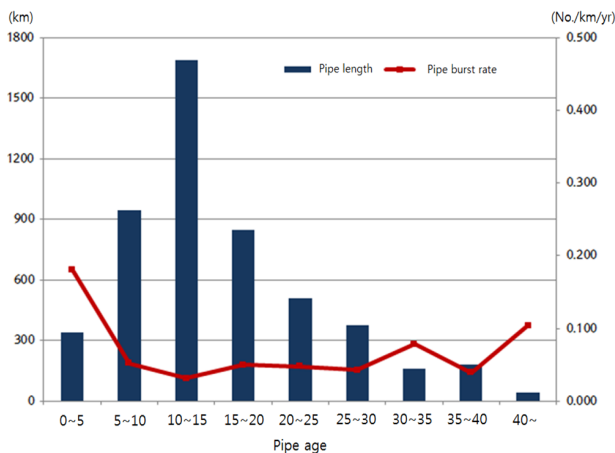


Fig. 3. Burst rate by pipe age of multi-regional water supply pipes (K-water, 2014).

Table 2. Recovery time by pipe diameter (K-water, 2012)

Diameter	~ 300 mm	400 mm	500 mm	600 mm	700 mm	800 mm	900 mm
Recovery time	10 hr	11 hr	12 hr	13 hr	14 hr	15 hr	16 hr
Diameter	1000 mm	1100 mm	1200 mm	1350~1650 mm	1650~2000 mm	2000 mm~	
Recovery time	18 hr	19 hr	20 hr	24 hr	30 hr	33 hr	

관 연령이 5년 이하와 40년 이상인 관로를 제외하고는 큰 변동이 나타나지는 않았으며, 전체 광역 및 공업용수도 관로의 파손율을 0.08(건/km/year) 정도 인 것으로 확인 할 수 있다 (K-water, 2014).

따라서, N 광역상수도 관로 대부분이 30년 이내에 매설된 관로이며, 최근에 부분적인 개량공사 등을 시행하고 있는 점을 감안하여 N 광역상수도 관로 전체의 관파손확률을 0.08(건/km/year)으로 가정하였다. 그리고, 관로가 파손되면 복구시간 만큼의 단수 및 수요부족량이 발생하게 되며, 이는 일반적으로 관경이 커질수록 관 파손 복구시간과 수요부족량이 늘어나게 된다. 따라서, N 광역상수도 관로의 관경별 복구시간을 산정하기 위해서 다음 Table 2의 자료를 활용하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 관로별 위기대응 취약성 산정

N 광역상수도의 연계운영 평가를 위하여 먼저, 관로별 위기대응 취약성 분석을 시행하였다. 위기대응 취약성 분석을 위해서 관로별 파손확률, 관경별 복구시간, 관 파손시 물부족량 등을 통해 산정하였다. 다음 Table 3은 SP 계통내 관로별 기초정보이고, Table 4는 SP 계통내 관로별 관 파손시 물부족량 및 위기대응 취약성을 각 시나리오별로 산정한 결과이다.

SP 계통내 관로별 관파손시 물부족량과 위기대응 취약성을 시나리오별로 계산한 결과를 보면, 비상연계관로가 없는 시나리오1의 경우가 비상연계관로가 부분적(시나리오 2) 또는 전체적(시나리오 3)으로 운영 되고 있는 경우 보다 매우 크게 나타난 것을 볼 수 있어, 비상연계관로 운영에 대한 평가지표로서 활용가능함을 알 수 있다. 관로별 관파손시 물부족량은 정수장에서 멀어지는 관로일수록 관로의 유량이 감소하기 때문에 정수장에서 멀어질수록 감소하는 경향을

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319

Table 3. Specification by pipe of SP line

SP line					
Interval	Pipe name	Diameter (mm)	Recovery time (hr)	Pipe burst probability (No./km/yr)	Pipe length (km)
1	n1s-136	900	16	0.08	0.07
	1672	900	16	0.08	0.54
	n1s-521	900	16	0.08	0.25
	Sum				
2	n1s-690	300	10	0.08	0.04
	n1s-474	300	10	0.08	0.04
	Sum				
3	n1s-875	300	10	0.08	0.97
	n1s-411	300	10	0.08	0.01
	n1s-796	250	10	0.08	2.43
	n1s-723	250	10	0.08	1.37
	n1s-771	200	10	0.08	0.33
	n1s-831	200	10	0.08	3.03
Sum					8.14
4	n1s-529	200	10	0.08	0.37
	n1s-627	200	10	0.08	7.15
	n1s-833	200	10	0.08	0.12
	Sum				
5	n2s-933	200	10	0.08	0.93
	n1s-546	200	10	0.08	5.91
	Sum				
Total Sum					23.57

보이며, 관연령, 관경, 관연장등을 고려하고 있지 않기 때문에 각 시나리오별 특정된 관로간의 평가로만 활용 가능함을 알 수 있다.

하지만, 위기대응 취약성 지표의 경우에는 관연령과 관연장이 고려된 파손확률, 관경이 고려된 복구시간이 함께 고려되었기 때문에 특정관로 뿐만 아니라, 특정 구간, 특정 계통, 특정 광역상수도 전체에 대한 위기대응 취약성을 지표로서 비교 평가 가능함을 알 수 있으며, 이를 활용하여 비상연계관로 운영 여부에 대한 평가도 가능함을 알 수 있다.

이와 마찬가지로 HD계통, SC계통, NH계통, CM계통, GJ계통 등 N 광역상수도 내 206개 관로에 대하여 시나리오 1~3에 대한 위기대응 취약성 분석을 동일한 방법으로 산정하였고, 구간별, 계통별, 광역상수도 전체에 대한 위기대응 취약성을 산정하는데 활용하였다.

4.2 계통별 위기대응 취약성 산정 및 연계운영 평가

4.2.1 SP-HD 계통

SP-HD 계통의 구간별 및 계통별 위기대응 취약성 분석 결과는 Table 5와 같다.

SP계통과 HD계통의 위기대응 취약성은 시나리오 1에서 시나리오 3으로 갈수록 크게 감소하는 것으로 나타났다. 하지만, SP계통의 위기대응 취약성은 시나리오 1이 1,957.78 m³/year에서 현재 운영상태인 시나리오 2가 461.13 m³/year으로 급격히 감소한 반면에 HD계통의 위기대응 취약성은 14,615.80 m³/year에서 15,474.49 m³/year로 다소 증가한 것으로 나타났다. 이는 SP-HD 계통내의 1번과 2번 비상연계관로의 운영상태는 HD계통의 위기대응 취약성 해소에 영향이 거의 없다는 것을 의미하며, 오히려 2개의 비상연계관로



Table 4. Calculation results of water shortage and risk according to pipe burst in SP line

Interval	Pipe name	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
		Water shortage (m ³ /day/No.)	Risk (m ³ /yr)	Water shortage (m ³ /day/No.)	Risk (m ³ /yr)	Water shortage (m ³ /day/No.)	Risk (m ³ /yr)
1	n1s-136	4,128.14	15.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	1672	4,128.14	118.30	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-521	4,128.14	54.39	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sum	-	187.77	-	0.00	-	0.00
2	n1s-690	3,913.04	5.33	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-474	3,913.04	5.84	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sum	-	11.18	-	0.00	-	0.00
3	n1s-875	3,903.48	125.65	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-411	2,271.51	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-796	2,271.51	183.82	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-723	1,814.14	83.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-771	1,809.36	19.94	0.00	0.00	0.00	0.00
	n1s-831	1,345.76	136.08	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	-	549.49	-	0.00	-	0.00	
4	n1s-529	1,345.77	16.67	1,235.83	15.31	0.00	0.00
	n1s-627	1,094.46	260.94	944.37	225.16	0.00	0.00
	n1s-833	1,060.99	4.25	951.05	3.81	0.00	0.00
	Sum	-	967.43	-	244.28	-	0.00
5	n2s-933	1,060.99	32.79	951.05	29.39	1,060.99	32.79
	n1s-546	1,060.99	209.13	951.05	187.46	1,060.99	209.13
	Sum	-	241.92	-	216.85	-	241.92
Total Sum		-	1,957.78	-	461.13	-	241.92

Table 5. Calculation results of Risk in SP-HD line

SP line				HD line			
Interval	Risk(m ³ /year)			Interval	Risk(m ³ /year)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
1	187.77	0.00	0.00	6	709.51	842.08	25.15
2	11.18	0.00	0.00	7	41.49	57.21	1.84
SP-HD conjunctive pipe 1	Close	Open	Open	SP-HD conjunctive pipe 1	Close	Open	Open
3	549.49	0.00	0.00	8	4,544.29	5,419.31	133.17
SP-HD conjunctive pipe 2	Close	Open	Open	SP-HD conjunctive pipe 2	Close	Open	Open
4	967.43	244.28	0.00	9	3,194.40	3,112.48	80.86
SP-HD conjunctive pipe 3	Close	Close	Open	SP-HD conjunctive pipe 3	Close	Close	Open
5	241.92	216.85	241.92	10	6,126.11	6,043.41	6,167.29
Sum	1,957.78	461.13	241.92	Sum	14,615.80	15,474.49	6,408.30

운영에 따른 수요변동 등의 원인에 의해 HD계통의 위기대응 취약성이 증가한 것으로 판단된다. 결과적으로 SP-HD계통 전체에 대한 위기대응 취약성은 비상연계관로가 없는 상태에서 비상연계관로를 2개 운

영하고 있는 시나리오 2로 운영함으로써 16,573.58 m³/year에서 15,935.62 m³/year로 감소하여 총 637.96 m³/year 만큼의 위기대응 취약성이 해소되었다고 볼 수 있다. 그리고 3개의 SP-HD 비상연계관로를 모두 운영



Table 6. Calculation results of Risk in SC-NH line

SC line				NH line			
Interval	Risk(m ³ /year)			Interval	Risk(m ³ /year)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
11	899.94	893.34	148.82	6	709.51	842.08	25.15
				15	19.46	19.31	0.00
SC-NH conjunctive pipe 1	Close	Close	Open	SC-NH conjunctive pipe 1	Close	Close	Open
12	6,907.23	5,475.82	455.47	16	3,832.31	3,891.92	0.00
SC-NH conjunctive pipe 2	Close	Close	Open	SC-NH conjunctive pipe 2	Close	Close	Open
13	5,163.92	5,078.11	0.00	17	863.64	840.66	0.00
SC-NH conjunctive pipe 3	Close	Close	Open	SC-NH conjunctive pipe 3	Close	Close	Open
14	798.37	788.72	795.39	18	3,979.33	4,284.39	3,561.56
Sum	13,769.46	12,235.99	1,399.68	Sum	9,404.24	9,878.35	3,586.71

할 경우에는 SP-HD계통 전체 위기대응 취약성은 6,650.22 m³/year으로 감소함으로써 3개의 SP-HD 비상연계관로를 모두 운영하지 않은 경우보다 9,923.36 m³/year 만큼 위기대응 취약성이 감소된 것을 알 수 있다.

4.2.2 SC-NH 계통

SC-NH 계통의 구간별 및 계통별 위기대응 취약성 분석 결과는 Table 6과 같다.

SC-HN 계통의 경우에는 비상연계관로가 설치되어 있지 않은 상태인 시나리오 1과 현재 운영상태인 시나리오 2의 상태는 동일하게 운영되고 있다.

SC계통과 NH계통의 위기대응 취약성은 시나리오 1과 시나리오 2에서 시나리오 3으로 갈수록 크게 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 시나리오 1과 시나리오 2의 비상연계관 운영상태가 동일함에도 불구하고 SC계통과 NH계통의 시나리오 1과 시나리오 2의 위기대응 취약성은 다소 증감한 것으로 나타났다. 이는 시나리오 분석시 SC-NH 계통내의 비상연계관로 뿐만 아니라, SP-HD계통과 CM-GJ계통내의 비상연계관로도 함께 조작하도록 하였기 때문에 다른 계통의 비상연계관로 운영상태에 따른 물수요변동이 발생하였기 때문이다. 따라서, SC계통과 NH계통의 시나리오 1과 시나리오 2의 위기대응 취약성 차이는 큰 의미는 없다고 볼 수 있다. 결과적으로 SC-NH 계통 전체에 대한 위기대응 취약성을 시나리오 별로 계산해보면 시

나리오 1에서 23,173.70 m³/year, 시나리오 2에서 22,114.34 m³/year, 시나리오 3에서 4,986.39 m³/year로 크게 감소된 것을 알 수 있으며, 이는 비상연계관로의 운영에 따라 SC-NH 계통에 대한 위기대응 취약성은 충분히 감소시킬 수 있다는 것을 보여준다.

4.2.3 CM-GJ 계통 연계운영 평가

CM-GJ 계통의 구간별 및 계통별 위기대응 취약성 분석 결과는 Table 7과 같다.

CM계통과 GJ계통의 위기대응 취약성은 시나리오 1, 시나리오 2, 시나리오 3으로 갈수록 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 시나리오 2에서 시나리오 3으로 갈수록 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고, CM-GJ 계통 전체에 대한 위기대응 취약성을 시나리오 별로 계산해보면 시나리오 1에서 310,426.06 m³/year, 시나리오 2에서 205,320.60 m³/year, 시나리오 3에서 26,730.60 m³/year으로 크게 감소된 것을 알 수 있으며, 이는 비상연계관로의 운영에 따라 관파손시 물부족량을 급격히 감소시킬 수 있었기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 계통별 및 N 광역상수도 총 위기대응 취약성 산정 및 연계운영 평가

위와 같이 N 광역상수도 내 206개 관로에 대한 관로별 위기대응 취약성과 구간별 위기대응 취약성 산



Table 7. Calculation results of Risk in CM-GJ line

CM line				GJ line			
Interval	Risk(m ³ /year)			Interval	Risk(m ³ /year)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
1	187.77	0.00	0.00	29	1,891.26	0.00	0.00
19	5.48	0.00	0.00	30	690.70	0.00	0.00
CM-GJ conjunctive pipe 1	Close	Open	Open	CM-GJ conjunctive pipe 1	Close	Open	Open
20	1,428.29	0.00	0.00	31	34,299.42	0.00	0.00
CM-GJ conjunctive pipe 2	Close	Close	Open	CM-GJ conjunctive pipe 2	Close	Close	Open
21	1,446.63	0.00	0.00	32	31,959.15	0.00	0.00
CM-GJ conjunctive pipe 3	Close	Open	Open	CM-GJ conjunctive pipe 3	Close	Open	Open
22	1,828.79	0.00	0.00	33	38,173.13	0.00	0.00
23	921.56	0.00	0.00	34	2,187.53	0.00	0.00
CM-GJ conjunctive pipe 4	Close	Open	Open	CM-GJ conjunctive pipe 4	Close	Open	Open
24	20,104.96	20,166.71	0.00	35	30,734.66	31,257.48	3,417.56
CM-GJ conjunctive pipe 5	Close	Close	Open	CM-GJ conjunctive pipe 5	Close	Close	Open
25	3,790.37	3,802.20	0.00	36	15,831.95	16,565.14	3,053.08
26	15,474.93	15,447.26	0.00	37	23,744.89	26,522.65	3,900.43
CM-GJ conjunctive pipe 6	Close	Close	Open	CM-GJ conjunctive pipe 6	Close	Close	Open
27	18,289.88	18,137.94	0.00	38	35,804.94	39,993.53	5,124.02
CM-GJ conjunctive pipe 7	Close	Close	Open	CM-GJ conjunctive pipe 7	Close	Close	Open
28	7,843.14	6,986.96	7,862.63	39	23,192.74	25,905.92	2,769.51
				40	593.89	534.82	603.37
Sum	71,321.81	64,541.07	7,862.63	Sum	239,104.28	140,779.53	18,867.97

정을 통해 SP계통, HD계통, SC계통, NH계통, CM계통, GJ계통, SP-HD계통, SC-NH계통, CM-GJ계통에 대한 위기대응 취약성을 각각 산정할 수 있었다. 이와 마찬가지로 방법으로 N 광역상수도 전체에 대한 위기대응 취약성을 산정할 수 있으며, 그 시나리오별 결과는 다음 Table 8과 같다.

N 광역상수도 전체의 위기대응 취약성을 기준으로 평가하였을 경우 비상연계관로가 운영되고 있지 않은 시나리오 1의 결과보다 비상연계관로를 일부 운영하고 있는 시나리오 2의 경우에 약 30.6%의 위기대응 취약성이 감소하였고, 시나리오 3과 비교시에는 약 86.2%의 위기대응 취약성이 감소된 것을 알 수 있다.

Table 8. Risk by line of N multi-regional water supply system

Division	Risk(m ³ /year)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
SP line	1,957.78	461.13	241.92
HD line	14,615.80	15,474.49	6,408.30
SC line	13,769.46	12,235.99	1,399.68
NH line	9,384.79	9,859.04	3,561.56
CM line	71,321.81	64,541.07	7,862.63
GJ line	239,104.28	140,779.53	18,867.97
N multi-regional water supply system	349,256.64	242,509.1	48,308.1

이는 N 광역상수도의 현재 비상연계관로 운영상태에서 추가적인 비상연계관로 운영을 통해 위기대응 취약성을 보다 더 감소시킬 수 있음을 의미한다. 또한, N 광역상수도의 안정적인 수돗물 공급을 위한 계획수립시 관로별, 구간별, 계통별 위기대응 취약성 산정값과 산정방법을 이용하여 비상연계관로의 운영평가 또는 각 관로별, 구간별, 계통별 위기대응 취약성 우선순위를 산정하여 비상연계관로의 추가설치의 판단근거로서도 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 광역상수도에서의 안정적인 수돗물 공급을 평가하기 위한 위기대응 취약성 분석 방법을 제시하고 이를 이용한 광역상수도 연계운영의 효과를 평가할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. N 광역상수도를 대상으로 위기대응 취약성 분석을 수행하였으며, 관로별, 구간별, 계통별 및 전체 광역상수도에 대한 위기대응 취약성을 산정하기 위하여 관 파손확률, 관 파손시 관경별 복구시간 및 K-NRiskQ를 활용한 시나리오별 수요부족량을 산정하였다. 특히, 관 파손시 부족 수요량을 산정하기 위하여 3가지 분석 시나리오로 설계하였으며, 시나리오 1은 비상연계관로가 모두 닫혀 있어 연계 이전의 상태를 평가하는 것이고, 시나리오 2은 현재 부분적으로 비상연계관로를 개방하고 있는 운영상태를 평가하고, 시나리오 3은 모든 비상연계관로를 개방하여 기존에 설치되어 있는 모든 비상연계관로 개방하는 것으로 하였다.

분석결과, N 광역상수도 전체의 위기대응 취약성을 기준으로 평가하였을 경우 비상연계관로가 운영되고 있지 않은 시나리오 1의 결과보다 비상연계관로를 일부 운영하고 있는 시나리오 2의 경우에 약 30.6%의 위기대응 취약성이 감소하였고, 시나리오 3과 비교시에는 약 86.2%의 위기대응 취약성이 감소된 것을 알 수 있었다. N 광역상수도의 안정적인 수돗물 공급을 위한 계획수립시 관로별, 구간별, 계통별 위기대응 취약성 산정값과 산정방법을 이용하여 비상연계관로의 운영평가 또는 각 관로별, 구간별, 계통별 위기대응 취약성 우선순위를 산정하여 비상연계관로의 추가설치 및 운영에 대한 판단근거로 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 그리고, 광역상수도의 안정적인 수돗물 공급을 위한 연계관로 운영뿐만 아니라 관망 복선화

및 네트워크화 등의 설계시에도 중요한 설계인자로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 위기대응 취약성은 관로별, 구간별, 계통별로 수치적으로 산정하여 그 우선순위는 도출 할 수 있지만, 어느 정도의 값이 적절한 값인지는 판단 할 수 없다. 또한, 비상연계관로를 더 많이 운영할수록 위기대응 취약성 값을 더 많이 감소시킬 수 있지만, 이 경우 특정지역에 대한 수압저하 및 출수불량의 원인을 제공할 수 있으며, 더 나아가 비상연계관로의 과도한 운영에 따른 관로내 유속저하로 인한 수질 문제 등을 발생할 수도 있게 된다. 향후 이러한 사항들을 고려하여 지역규모별 위기대응 취약성의 한계치를 결정하기 위한 추가적인 지표 및 방법론이 도입된다면 특정 지역에 대한 위기대응 취약성 분석을 통한 비상연계관로 운영평가 및 안정적인 수돗물 공급을 위한 관망시설 설계시 보다 정확한 의사결정근거로 활용 될 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌담 환경기술개발사업(2016002120005)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

- Bhave, P.R. (1991). Analysis of flow in water distribution networks, Technomic Pub. Co., Inc., USA, 25-68.
- Chang, D.I., and Kang, K.H. (2014). Experimental analysis of nodal head-outflow relationship using a model water supply network for pressure driven analysis of water distribution system, J. Korean Soc. Environ. Eng., 36(6), 421-428.
- Chen, W.W., Shih, B.J., Chen, Y.C., Hung, J.H., and Hwang, H.H. (2002). Seismic response of natural gas and water pipelines in the ji-ji earthquake, Soil Dyn. Earthq. Eng., 22, 1209-1214.
- Choi, T.H., and Koo, J.Y. (2015). A water supply risk assessment model for water distribution network, Desalination, Water Treat., 54, 1410-1420.
- Cullinane, M.J. (1986). “Hydraulic reliability of urban water distribution systems”, *Proceedings of ASCE Conference, Water Forum 86: World Water Issues in Evolution*, AXE, New York, NY, 1264-1271.
- Fujiwara, O., and Ganesharajah, T. (1993). Reliability assessment



- of water supply systems with storage and distribution networks, *Water Resour. Res.*, 29(8), 2917-2924.
- Goulter, I.D., and Coals, A.V. (1986). Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks, *J. Transp. Eng.*, 112(3), 287-301.
- Jun, H.D. (2005). Strategic valve location in a water distribution system, PhD dissertation of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Kansal, M.L., and Kumar, A. (1995). Reliability analysis of water distribution systems under uncertainty, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 50(1), 51-59.
- Khomsy, D., Walters, G.A., and Thorley, A.R.D. (1996). Reliability tester for water-distribution networks, *J. Comput. Civ. Eng.*, 10(1), 10-19.
- Kim, K.P. (2009). Development of optimal management model for real losses in water distribution system and applicability assessment, Doctoral Thesis, University of Seoul, Seoul, Republic of Korea.
- K-water. (2012). Stabilization project reports of multi-regional water supply pipeline.
- K-water. (2014). Validation review of optimal renewal period of multi-regional water supply pipeline.
- Lee, S.W. (2011). Reliability assessment of water distribution systems management reliability index, Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Republic of Korea.
- Paik, C.W. (2007). Development of HSPDA model for analysis of water distribution systems under abnormal operating conditions, Doctoral Thesis, Korea University, Seoul, Republic of Korea.
- Wang, Y., and Au, S.K. (2009). Spatial distribution of water supply reliability and critical links of water supply to crucial water consumers under an earthquake, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 94, 534-541.
- Yoo, D.K. (2012). Seismic reliability assessment for water supply networks, Doctoral Thesis, Korea University, Seoul, Republic of Korea.

pp. 243-250

pp. 251-258

pp. 259-268

pp. 269-279

pp. 281-289

pp. 291-297

pp. 299-309

pp. 311-319