



공업용수 배수관망시스템을 개선하기 위한 설계 대안의 수리해석

Hydraulic analysis of design alternatives to improve an industrial water distribution system

임성린*
Seong-Rin Lim*

강원대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

ABSTRACT

A CCTV inspection method has been widely used to assess sewer condition and performance, but Korea lacks a proper decision support system for prioritizing sewer repair and rehabilitation (R&R). The objective of this paper is to introduce the results that we have developed in the Sewer Condition Assessment and Rehabilitation Decision-making (SCARD) Program using MS-EXCEL. The SCARD-Program is based on a standardized defect score for sewer structural and hydraulic assessment. Priorities are ranked based on risk scores, which are calculated by multiplying the sewer severity scores by the environmental impacts. This program is composed of three parts, which are decision-making for sewer condition and performance assessment, decision-making for sewer R&R priority assessment, and decision-making for optimal budget allocation. The SCARD-Program is useful for decision-makers, as it enables them to assess the sewer condition and to prioritize sewer R&R within the limited annual budget. In the future, this program logic will applied to the GIS-based sewer asset management system in local governments.

Key words: Sewer, Rehabilitation Priorities, Decision support, Asset Management, Risk Assessment

주제어: 공업용수, 누수, 배수관망, 설계 대안

1. 서 론

산업단지에 입주해 있는 공장들의 지속적인 생산 활동을 지원하기 위해서는 공업용수의 안정적인 공급과 유지관리가 중요하다. 특히, 기후변화로 인한 강수량과 기온의 변화로 수자원이 부족할 가능성이 높아지고 있기 때문에 기후변화에 적응하기 위한 노력이 요구되고 있다(Lim et al., 2010). 공장에서는 필요로 하는 공업용수의 유량과 수압을 충분히 제공 받아야 하며, 제품의 원가를 낮추기 위해서는 공업용수의 원

가도 낮추어야 한다. 공업용수의 사용단가가 상승하면 모든 공장에서 생산하는 제품의 원가가 상승하여 기업의 경쟁력을 약화시킬 수 있다. 공업용수의 생산 단가를 낮추기 위해서는 공업용수를 이송하는 배수관망 시스템의 지속적인 개선이 필요하다. 이러한 배수관망 시스템의 개선은 공업용수뿐만 아니라 음용수를 공급하는 시스템에서도 반드시 필요하기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다(Skworcow et al., 2014).

산업단지에 설치되어 있는 배수관망 시스템은 공장의 운전 현황을 고려하여 최적화되어야 한다. 하지만 산업단지에서 운영되고 있는 공업용수의 배수관망 시스템의 용량은 공장들이 입주하기 이전에 계획되어

Received 16 December 2014; Revised 10 February 2015; Accepted 12 February 2015

*Corresponding author: Seong-Rin Lim (E-mail: srlim@kangwon.ac.kr)

pp. 1-9
pp. 11-21
pp. 23-31
pp. 33-38
pp. 39-46
pp. 47-55
pp. 57-63
pp. 65-75
pp. 77-88
pp. 89-96
pp. 97-106
pp. 107-122
pp. 123-131
pp. 133-138

설치되기 때문에 미래에 필요한 공업용수의 안정적인 공급을 위하여 그 용량이 과대 평가되어 설치되는 경향이 많다(De Corte and Sörensen, 2013). 설계 당시에는 입주업체에 대한 정확한 정보를 입수하기가 쉽지 않아 유사한 형태의 산업단지에 대한 데이터를 바탕으로 설계가 되기 때문에 실제로 입주가 실시된 이후에는 공업용수 실제 수요량과 설계치가 상당한 차이를 나타낼 수 있다. 공업용수의 사용량이 비교적 정확하게 예측되었다고 할 지라도 공장에서 폐수 재이용과 재활용을 통하여 공업용수의 사용량을 저감시킨다면 산업단지에 실제로 공급되는 공업용수의 양은 상수도 시스템의 설계 용량보다 훨씬 적게 될 수 있다(Lim and Park, 2008a). 이러한 차이가 크면 클수록 시스템의 가동에 필요한 기자재와 장비의 에너지 효율이 저하되기 때문에 불필요한 에너지의 낭비가 발생할 수 있다. 또한, 공업용수 사용량이 적기 때문에 배수관망에서의 압력손실이 설계 예상치보다 훨씬 낮아지게 되어 수압을 상승시키게 된다(McGhee, 1991). 이러한 상황에서 배관의 노후화와 손상으로 누수가 발생하게 된다면 공업용수의 손실량을 상당히 크게 된다. 배수관망의 누수율이 낮아지면 공업용수를 생산하는 전과정(Life Cycle), 즉, 취수, 도수, 정수, 송수, 배수에서의 물질과 에너지 사용에서 발생하는 다양한 종류의 환경영향을 감소시킬 수 있으므로 환경적으로도 유익하다(Lim and Park, 2008b). 이러한 경제적, 환경적인 문제를 사전에 예방하거나 저감시키기 위해서는 현재의 상황을 고려하여 기존의 배수관망 시스템을 개선할 필요가 있다.

본 논문의 목적은 높은 수압이 유지되고 있는 공업용수 배수관망의 누수 발생량을 저감할 수 있는 설계 대안을 제시하고 각 대안에 대하여 수리해석을 실시하여 최종 개선 방안을 도출하는 것이다. 이를 위하여 국내 A산업단지를 대상으로 운영자료를 수집하여 수리해석을 실시함으로써 배수관망의 유량과 수압을 평가하여 예상되는 문제점을 분석하였다. 이를 바탕으로 높은 수압이 유지되는 배수관망을 개선하기 위한 세 가지 설계 대안, 즉, (1) 감압밸브를 적용하는 대안, (2) 배수지를 사용하지 않고 송수펌프를 이용하여 배수관망에 직접 공급하는 대안, (3) 배수지를 표고가 낮은 위치로 이동시키는 대안에 대하여 수리해석을 각각 실시하여 상호 비교하였다. 본 연구 결과는 공업용수뿐만 아니라 음용수의 배수관망에 발생할 수 있는 누수량을 감소시키고 펌프 운전 시 필요한 에너지

를 저감시킬 수 있어 배수관망의 경제성과 환경성을 향상시키는데 활용될 수 있다.

2. 연구방법

2.1 대상 산업단지와 공업용수 배수관망의 현황

A산업단지의 입주업체는 철강 원재료를 이용한 금속가공 산업과 철강생산 공장 등에서 부산물로 배출되는 것을 원료로 하여 다양한 제품을 생산하고 있는 석유화학 산업으로 이루어져 있다.

A산업단지의 현장조사를 통하여 배수관망과 관련된 자료를 조사한 결과, 설계도면과 운전현황 데이터를 입수할 수 있었던 B단지 지역을 공업용수 배수관망을 개선하기 위한 대상으로 선정하였다. B단지는 1단계가 1993. 12. 31에, 2단계가 1994. 12. 31에 준공이 되어 약 20년 정도 노후화가 진행된 배수관망이다. 공단 정수장에서 공업용수와 생활용수를 정수처리한 후 송수펌프를 이용하여 배수지까지 공급하고, 배수지부터는 각 입주업체에 자연유하로 공급된다. 공업용수의 일평균 공급 유량은 9,000-10,000 m³/일이다. 설계 유량인 20,000 m³/일과 대비하여 현재 사용되고 있는 공업용수의 유량은 50% 이하로서 정수처리시설과 배수관망의 용량이 설계치를 훨씬 밑도는 수준으로 운영되고 있다. 이는 용수 사용량을 저감하기 위해 입주업체들이 폐수 재이용과 공정 개선을 지속적으로 실시한 결과이다. Fig. 1은 A산업단지에서 운영중인 공업용수의

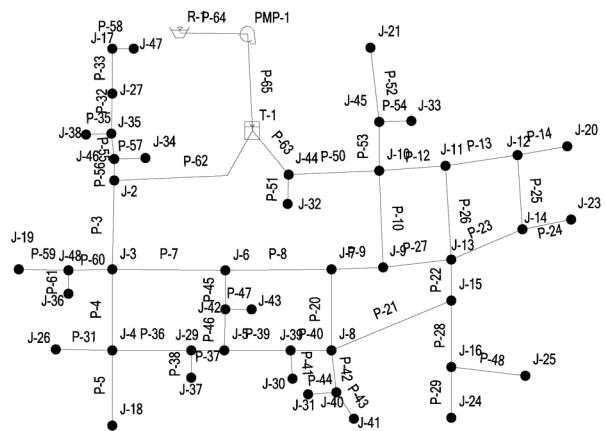


Fig. 1. Existing water distribution system to supply industrial water to an industrial park (R-1: treated water basin; PMP-1: treated water pump; T-1: distribution basin; J: Junction; and P: pipe).



Table 1. Data for an existing industrial water distribution system in an industrial park: (a) daily average and hourly maximum flowrates of industrial water supplied to industrial plants; (b) length, diameter, and Hazen-Williams coefficient of the pipes (material: ductile iron); (c) elevation of the junctions in the system; and (d) specifications of the water treatment plant and elevated water storage basin

(a)

Label of Industrial Plant	J-17	J-18	J-19	J-20	J-21	J-23	J-24	J-25	J-26	J-30
Daily Average Flowrate (L/sec)	0.21	0.25	0.34	0.31	0.25	0.32	0.25	0.28	0.21	11.94
Hourly Maximum Flowrate (L/sec)	0.31	0.32	0.43	0.40	0.35	0.41	0.35	0.34	0.30	15.79
Label of Industrial Plant	J-31	J-32	J-33	J-34	J-36	J-37	J-38	J-41	J-43	J-47
Daily Average Flowrate (L/sec)	5.20	14.92	12.15	5.24	7.11	5.47	40.31	0.29	6.88	1.31
Hourly Maximum Flowrate (L/sec)	6.01	21.00	16.21	6.63	9.11	7.19	55.00	0.43	9.03	1.88

(b)

Label	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Coefficient	Label	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Coefficient
P-3	437	450	110	P-39	300	150	110
P-4	250	200	110	P-40	115	150	110
P-5	237	100	105	P-41	10	100	105
P-7	410	450	110	P-42	100	100	105
P-8	410	450	110	P-43	194	100	105
P-9	115	450	110	P-44	10	100	105
P-10	363	450	110	P-45	121	200	110
P-12	329	200	110	P-46	130	200	110
P-13	200	200	110	P-47	10	100	105
P-14	120	100	105	P-48	280	200	110
P-20	276	200	110	P-50	315	450	110
P-21	433	150	110	P-51	10	100	105
P-22	140	150	110	P-52	369	100	105
P-23	378	150	110	P-53	200	100	105
P-24	145	100	105	P-54	10	100	105
P-25	236	150	110	P-55	160	200	110
P-26	391	200	110	P-56	60	200	110
P-27	311	200	110	P-57	20	152.4	130
P-28	261	150	110	P-58	10	100	105
P-29	182	150	110	P-59	226	200	110
P-31	191	100	105	P-60	170	200	110
P-33	320	100	105	P-61	20	152.4	130
P-32	160	200	110	P-62	524	450	110
P-35	10	100	105	P-63	100	450	110
P-36	300	150	110	P-64	20	600	110
P-37	110	150	130	P-65	48,000	600	110
P-38	10	100	105				

pp. 1-9

pp. 11-21

pp. 23-31

pp. 33-38

pp. 39-46

pp. 47-55

pp. 57-63

pp. 65-75

pp. 77-88

pp. 89-96

pp. 97-106

pp. 107-122

pp. 123-131

pp. 133-138

(c)

Label of Junction	Elevation (m)	Label of Junction	Elevation (m)	Label of Junction	Elevation (m)	Label of Junction	Elevation (m)	Label of Junction	Elevation (m)
J-2	34.5	J-11	40.2	J-20	34.25	J-32	56.88	J-40	32.19
J-3	31.4	J-12	38.4	J-21	37.5	J-33	37.2	J-41	32.18
J-4	25.8	J-13	37.2	J-23	33.25	J-34	34.5	J-42	39.25
J-5	40.18	J-14	35.78	J-24	34.28	J-35	35.55	J-43	39.25
J-6	38.49	J-15	28.45	J-25	35.68	J-36	25	J-44	56.88
J-7	40.21	J-16	22.28	J-26	20.21	J-38	35.55	J-45	37.2
J-8	38.75	J-17	29.46	J-29	36.65	J-27	35.55	J-46	34.5
J-9	42.3	J-18	22.04	J-30	35.12	J-37	36.65	J-47	29.46
J-10	39.4	J-19	21.84	J-31	32.18	J-39	35.12	J-48	25

(d)

		Specifications
Industrial Water Treatment Plant	Main Process	- Coagulation→Flocculation→Sedimentation - Design Capacity: 20,000 m ³ /day
	Treated Water Basin	- Size: 17.5 m L X 16.0 m W X 3.0 m H (840 m ³) - Elevation: High Water Level (HWL) 44.00 m Low Water Level (LWL) 41.00 m
	Treated Water Pump	- Pump Capacity: 4.63 m ³ /min X 48 mH ₂ O - Number of Pumps: 3 for operation (1 for standby)
Distribution Basin		- Size: 32.0 m L X 28.0 m W X 4.0 m H (3584 m ³) - Elevation: HWL 84.00 m, LWL 80.00 m

배수관망을 WaterCad 소프트웨어(Bentley, 2007)로 나타낸 것이다. 배수관망은 도로망을 따라서 격자 형태의 블록시스템으로 구성되어 있다. 이것은 공단의 특성상 용수의 안정적인 공급을 위한 것으로 판단된다. 각 절점(Node)은 배관의 연결점이나 수요처를 나타낸 것이다. Table 1은 이 배수관망내에 위치한 공업용수 수요처의 일평균유량과 시간최대유량, 배관의 길이와 직경, Hazen-Williams 계수, 절점의 표고(elevation), 정수 처리시설과 배수지의 사양을 나타낸 것이다.

2.2 배수관망의 수리해석 방법

공업용수 배수관망의 평가분석을 위해서 WaterCad 소프트웨어(Bentley 2007)를 사용하였다. WaterCad에서 사용하고 있는 수리학적 모델은 초기 유량을 가정한 후 반복 계산하여 유량을 구하는 방식으로 Hardy Cross 방법과 유사하다(Mostafa et al., 2013). 절점 i와 j 사이에 존재하는 배관에서의 수두손실은 다음의 식(1)과 같이 계산된다.

$$H_i - H_j = h_{ij} = aQ_{ij}^f + mQ_{ij}^2 \quad (1)$$

여기에서 H는 절점의 수두, h는 수두손실, a는 저항 계수(배관의 길이, 직경, 거칠기에 따른 에너지 손실을 나타내기 위한 계수), Q는 유량, f는 유량차수(수두 손실을 계산하기 위한 경험식의 지수 값), m은 미소손실계수(배관에 설치되는 피팅(Fitting)으로 인한 에너지 손실을 나타내기 위한 계수)이다. 펌프에 대해서는 음의 수두손실이 다음의 식(2)와 같이 표현된다.

$$h_{ij} = -\omega^2(h_o - r(Q_{ij}/\omega)^\varphi) \quad (2)$$

여기에서 h_o는 펌프에 대한 체절수두(토출량이 없는 상태에서의 펌프압력에 대한 수두), ω는 상대속도 인자(펌프의 최대속도 대비 운전속도의 비), r와 φ는 펌프의 성능곡선계수(펌프의 성능곡선을 수식으로 나타내기 위한 계수)이다. 모든 절점에 대해서는 다음의 식(3)과 같이 유량에 대한 연속방정식이 만족되어야 한다.



$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \dots \dots \text{for } i = 1, \dots, N \quad (3)$$

여기에서 D_i 는 절점 i 에서 필요로 하는 유량이다. 각 배관에서의 초기 유량을 가정한 다음 수치해석 알고리즘인 Gradient Method를 이용하여 최종 유량을 구할 수 있다.

3. 기존 배수관망의 평가분석 결과

A산업단지의 입주업체에 공업용수가 공급되고 있는 현황을 바탕으로 배수관망에 대하여 수리해석을 실시한 결과에서는 수압이 과다한 지역이 배수관망내에 일부 존재하여 누수율이 높아질 가능성이 존재하는 것으로 나타났다. Fig. 2는 일평균유량과 시간최대유량으로 공업용수가 기존 배수관망을 통해 공급되었을 때의 수리해석 결과로서 각 배관에서의 흐름 방향과 압력을 나타낸 것이다. 일평균유량의 경우, J-32와 J-44 지점을 제외한 모든 배수관망의 수압이 400-500kPa의 수압분포를 가지고 있음을 알 수 있다(Fig. 3). 수요처의 관말에서 요구하는 수압이 일반적으로 150-250kPa(한국수도협회, 1997)임을 감안할 때 매우 높은 수압을 유지하고 있음을 알 수 있다. 압력이 높은 부분에서 누수가 발생하면 낮은 압력에서보다도 더 많은 유량의 용수가 손실될 수 있다. 용수배관망의 누수를 방지하기 위해서는 관말 요구압력을 만족시키면서도 용수배관망 내의 수압 분포를 가능하면 낮게 유지하는 것이 필요하다. 배관내 압력 변화를 시간최대유량의 경우로 수리해석하였을 경우에는 일평균유량으로 급수하였을 경우보다 압력의 변화가 더 급격하게 나타났다. 이것은 유량의 상승에 따라 유속이 배관내에서 증가하여 수두손실이 급격히 상승하기 때문이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 대부분의 지역에서는 유량에 따른 압력의 변화가 거의 없었으나, J-21, J-33, J-38, J-45 절점에서는 시간최대유량시의 수압이 일평균유량시의 수압보다 15-20% 감소하였다. 이렇게 수압의 변화가 유량에 따라 심한 부분에 대해서는 배관이 압력의 변화에 따라 이격될 수 있기 때문에 배관공사시 확실하게 고정할 수 있도록 유의하여야 한다. 대부분의 절점에서 적정 압력인 300 kPa(McGhee, 1991)보다 훨씬 높은 압력을 유지하였다. 일평균유량과 시간최대유량에 대한 수리해석의 결과는 수요처에서 요구하는 수압을 만족시키는 데는 문제가 없었다. 그러나, 배수관망의 설계유량보다 훨씬 적은 유량이 공급되어 배

관망 전체에 대하여 고압이 유지되어 배관의 노후화와 충격으로 누수율이 커질 우려가 존재할 수 있다는 것을 보여 주었다.

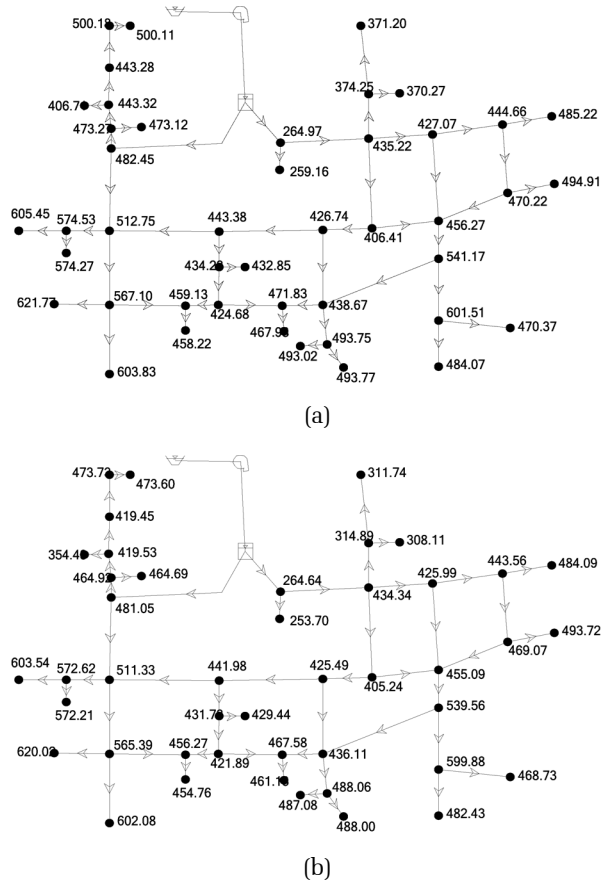


Fig. 2. Simulated water pressures (in kPa) in the nodes and water flow directions in the pipes for the existing water distribution system: (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.

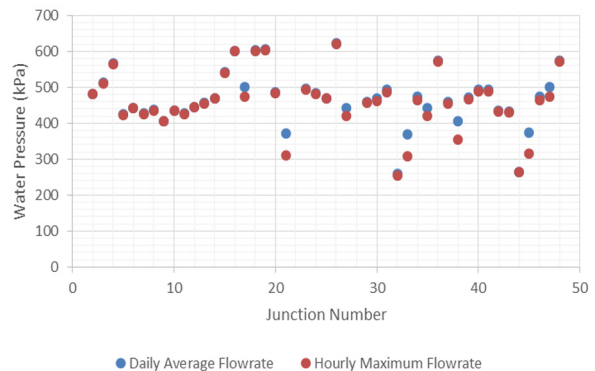


Fig. 3. Water pressures for daily average and hourly maximum flowrates in the nodes in the existing water distribution system.

- pp. 1-9
- pp. 11-21
- pp. 23-31
- pp. 33-38
- pp. 39-46
- pp. 47-55
- pp. 57-63
- pp. 65-75
- pp. 77-88
- pp. 89-96
- pp. 97-106
- pp. 107-122
- pp. 123-131
- pp. 133-138

4. 배수관망의 개선을 위한 대안별 평가 분석 결과

4.1 감압밸브를 적용하는 대안

높은 수압으로 인해 발생할 수 있는 기존 배수관망의 누수를 저감하기 위해서는 배관내의 압력을 낮게 유지할 수 있게 하는 감압밸브(Pressure-regulating Valve: PRV)를 수압이 높은 지역에 설치할 수 있다. 감압밸브를 설치하면 배관의 압력을 적절한 수준으로 감소시켜 누수율을 감소시킬 수 있다. Fig. 4는 기존 배수관망에 2개의 감압밸브를 설치한 대안을 나타낸 것이다. PRV-1과 PRV-2의 초기 설정압력은 각각 330과 220 kPa이다.

감압밸브를 설치하면 배수관망 전체의 수압을 낮추어서 누수율이 상당히 감소할 것으로 나타났다. 일평

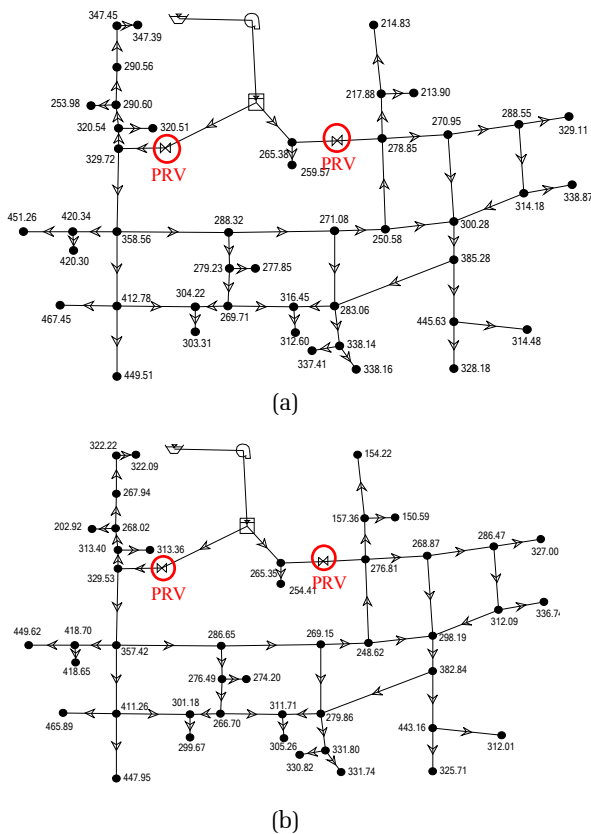


Fig. 4. Simulated water pressures (in kPa) in the nodes and water flow directions in the pipes for the alternative design to install the pressure regulating valves (PRVs): (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.

균유량이 공급될 경우에는 평균적으로 32%의 압력이 감압밸브의 설치로 감소되었으며, 최대 56%의 수압이 감소되는 지점도 있었다(Fig. 5(a)). 기존 배수관망에서는 최대 622 kPa의 압력이 존재하였으나, 감압밸브의 설치로 가장 높은 수압이 467 kPa로 낮아졌다. 최소 수압은 259 kPa에서 214 kPa으로 변하여 수요처에서 요구하는 수압인 150 kPa을 유지할 수 있다. 시간최대 유량이 공급되는 경우에는 평균적으로 32%의 압력이 감소되었으며, 최대 68%의 수압이 감소되기도 하였다(Fig 5(b)). 감압밸브의 설치로 배수관망의 최대 압력이 620 kPa에서 466 kPa으로 낮아졌다. 최소 수압은 254 kPa에서 151 kPa으로 변하였지만, 수요처에서 요구하는 수압인 150 kPa을 만족시킬 수 있다. 기존 배수관망의 경우에는 전체 수압의 분포가 254-622 kPa 사이로 차이가 많았으나, 감압밸브를 설치하는 경우의 수압 분포는 151-467 kPa 사이로 그 차이가 감소하였다. 하지만, 수압이 적정수준인 300 kPa를 초과하는 절점들이 배수관망의 가장자리를 중심으로 여전히 존재하였다. 대부분의 지역에서는 유량의 변화에 따른

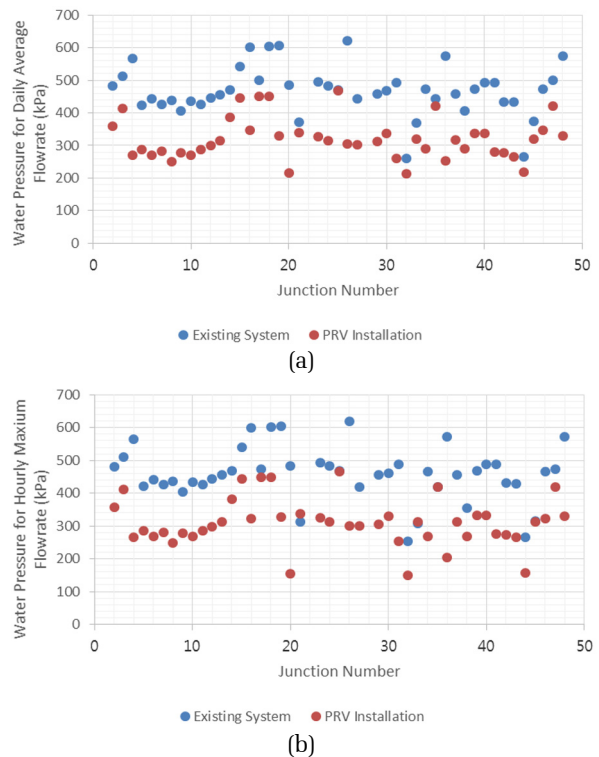


Fig. 5. Comparison of simulated water pressures in the junctions of the existing and the pressure regulating valves (PRVs)-installed systems: (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.



압력의 변화가 거의 없었으나, J-20, J-32, J-36, J-44 절점에서는 시간최대유량시의 수압이 일평균유량시의 수압보다 25-42% 감소하였기 때문에 배관의 이격을 유의할 필요가 있다. 또한, J-16→J-25와 J-16→J-24와 같은 구간에서는 수압의 변화가 매우 급격하게 일어났는데, 이는 절점이 위치한 표고의 변화로 압력이 변하였기 때문이다.

4.2 송수펌프를 이용하여 배수관망에 직접 공급하는 대안

기존 배수지를 사용하지 않고 정수처리시설에 위치한 송수펌프의 토출 압력을 낮추어서 배수관망에 직접 공급함으로써 기존 배수관망의 압력을 낮출 수 있다. 공업용수를 저장하기 위하여 배수지 대신 정수지를 사용하기 때문에 저장 능력은 부족해지지만, 수요처의 공업용수 사용량이 설계기준과 대비하여 50% 수준이고 수요처의 대부분이 공장이기 때문에 시간에 따른 사용유량의 변화가 적어 이 대안에 대한 타당성을 검토할 필요가 있다. 이렇게 하면 펌프의 양정이 배수지까지 공업용수를 보내기 위해 필요한 것보다 감소하기 때문에 전기 에너지를 저감하는데도 도움이 될 수 있다. Fig. 6는 양정이 낮은 송수펌프를 설치하여 기존 배수관망에 직접 공업용수를 공급하는 대안을 나타낸 것이다. Table 2는 이 대안을 위해 추가적으로 필요한 배관, 절점, 펌프에 대한 자세한 데이터를 나타낸 것이다.

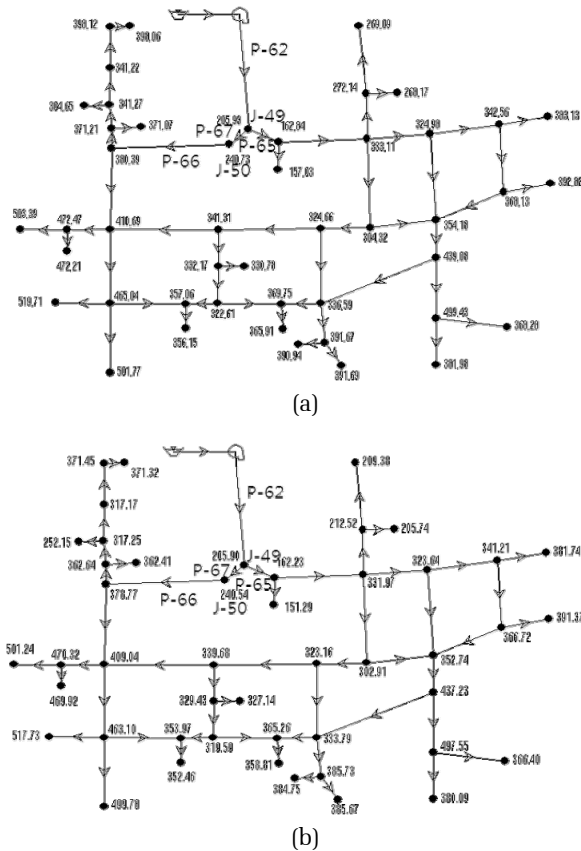


Fig. 6. Simulated water pressures (in kPa) in the nodes and water flow directions in the pipes for the alternative to directly pump to the water distribution system without transferring through the elevated water storage basin: (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.

Table 2. Data for the additional junctions and pipes needed to directly supply industrial water to the existing water distribution system without transferring through the elevated water storage basin: (a) length, diameter, and Hazen-Williams coefficient of the pipes (material: ductile iron); (b) elevation of the junctions; and (c) specifications of a pump needed for the direct supply

Label	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Coefficient	Label	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Coefficient
P-62	3100	600	100	P-66	524	450	110
P-65	154	450	110	P-67	50	450	100

Label of Junction	J-49	J-50
Elevation (m)	52.56	48.98

Discharge Flowrate (L/sec)	Pump Head (m)	Elevation (m)	Relative Speed
151.49	32.00	41.00	1.00

pp. 1-9
pp. 11-21
pp. 23-31
pp. 33-38
pp. 39-46
pp. 47-55
pp. 57-63
pp. 65-75
pp. 77-88
pp. 89-96
pp. 97-106
pp. 107-122
pp. 123-131
pp. 133-138

펌프를 이용하여 배수관망에 공업용수를 직접 공급하면 배수관망 전체의 압력이 낮아져서 누수가 감소될 것으로 나타났다. 일평균유량이 공급될 경우에는 평균적으로 22%의 압력이 감소되었으며, 최대 39%의 수압이 감소되는 지점도 나타났다(Fig 7(a)). 기존 배수관망에서는 최대 622 kPa의 압력이 존재하였으나, 펌프를 이용한 직접 공급 대안에서는 가장 높은 수압이 520 kPa로 낮아졌다. 최소 수압은 259 kPa에서 157 kPa으로 변하여 수요처에서 요구하는 수압을 유지하는 데는 별 문제가 없었다. 시간최대유량이 공급될 경우에도 평균 22%의 압력이 감소되었으며, 수압이 최대 40% 감소되었다(Fig 7(b)). 배수관망의 최대 압력은 620 kPa에서 356 kPa로 낮아졌다. 최소 수압은 254 kPa에서 151 kPa으로 변하였지만, 최소 요구 수압인 150 kPa을 만족시킬 수 있었다. 기존 배수관망의 경우에는 전체 수압의 분포가 254-622 kPa로 차이가 많았으나 펌프 직접 방식의 대안 시스템에서는 수압 분포가 151-520 kPa 사이여서 그 차이가 감소하였다. 그러나, 대부분의 절점에서는 적정수압인 300 kPa을 초과

하고 있어 수압이 높게 유지되었다. 대부분의 지역에서는 유량 변화에 따른 압력 변화가 거의 없었으나, 기존 배수관망의 수리해석 결과와 같이 J-21, J-33, J-38, J-45 절점에서는 시간최대유량시의 수압이 일평균유량시의 수압보다 급격히 감소하였다.

4.3 배수지를 표고가 낮은 위치로 이동시키는 대안

배수지의 표고를 낮추기 위해 배수지의 위치를 다른 곳으로 옮길 수 있다면 배수관망 내의 수압을 낮출 수 있다. 배수지를 사용하지 않고 송수펌프를 이용하여 배수관망에 공업용수를 직접 공급하는 방안은 정수지의 용량이 적어 저장능력이 떨어지는 문제점이 있어 새로운 배수지를 설치할 수 있는 부지가 가용하다면 세 번째 대안을 고려할 수도 있다. 이 대안은 배수지의 표고를 낮춤으로써 송수펌프의 양정을 감소시킬 수 있기 때문에 에너지 절감에도 기여할 수 있다. Fig 8는 배수지를 기존

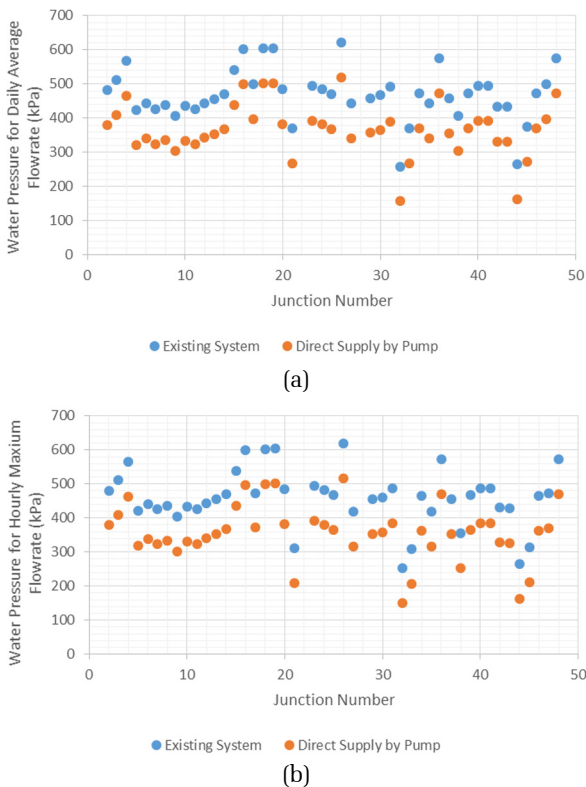


Fig 7. Comparison of simulated water pressures in the junctions of the existing and the direct supply systems: (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.

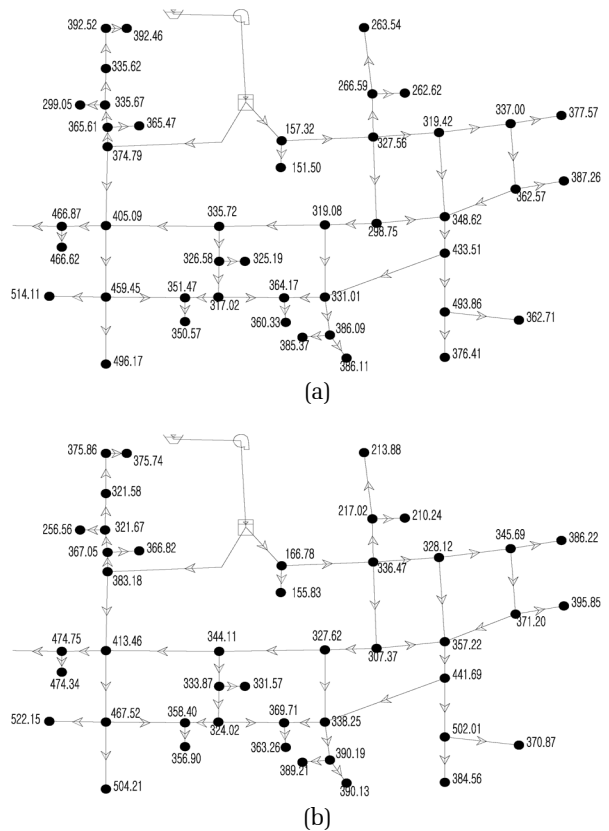


Fig 8. Simulated water pressures (in kPa) in the nodes and water flow directions in the pipes for the alternative to relocate the elevated water storage basin: (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.

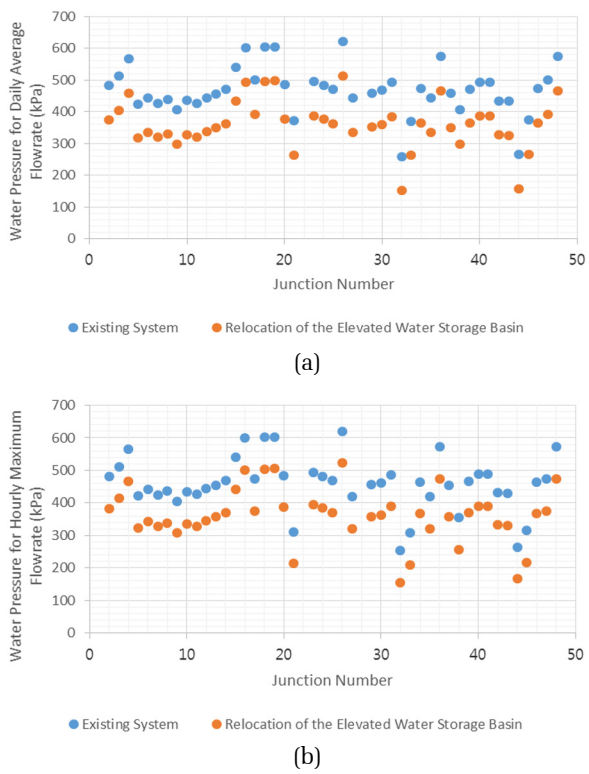


Fig. 9. Comparison of simulated water pressures in the junctions of the existing and the elevated water storage basin-relocated systems: (a) daily average flowrate; and (b) hourly maximum flowrate.

표고(HWL 84.00 m, LWL: 80.00 m)보다 10m 낮은 장소(HWL 74.00 m, LWL: 70.00 m)에 설치하여 기존 배수관망에 공업용수를 공급하는 대안을 나타낸 것이다.

배수지를 표고가 낮은 장소로 이동시켰을 때, 배수관망 전체의 압력이 낮아져 누수를 저감시킬 수 있다. 일평균유량이 공급될 경우에는 평균적으로 23%의 압력이 감소되었으며, 최대 42%의 수압이 감소되는 지점도 있었다(Fig 9(a)). 기존 배수관망에서는 최대 622 kPa의 압력이 존재하였으나, 배수지를 이동시키면 가장 높은 수압이 514 kPa로 낮아졌다. 최소 수압은 259 kPa에서 152 kPa으로 바뀌지만 수요처에서 요구하는 최소한의 수압을 유지할 수 있었다. 시간최대유량이 공급될 경우에도 평균 21%의 압력이 감소되었으며, 최대 39%가 감소되기도 하였다(Fig 9(b)). 배수관망의 최대 압력은 620 kPa에서 522 kPa로 낮아졌다. 최소 수압은 254 kPa에서 156 kPa으로 변하였지만, 최소 요구 수압을 만족할 수 있었다. 기존 배수관망의 경우에는 전체 수압의 분포가 254-622 kPa로 차이가 많았으나 배수지를 이동시킨 대

안에서는 수압의 분포가 152-522 kPa 사이로 되어 그 차이가 감소하였다. 그러나, 배수관망의 가장자리에 있는 절점뿐만 아니라 대부분의 절점에서 수압이 300 kPa을 초과하고 있다. 대부분의 지역에서는 유량의 변화에 따른 압력의 변화가 거의 없었으나, J-21, J-33, J-38, J-45 절점에서는 시간최대유량시의 수압이 일평균유량시의 수압보다 17-25% 정도 감소하였다.

4.4 3가지 대안의 비교

감압밸브를 적용하는 대안이 배수관망의 높은 압력을 저감시키는 데 있어 가장 효과적이었다. 이 대안은 펌프를 이용하여 배수관망에 직접 공급하거나 배수지를 이동시키는 대안보다 기존 배수관망의 평균과 최대 압력을 10%와 15-30% 정도 각각 더 감소시킬 수 있었다. 또한, 300 kPa 이상의 절점도 감압밸브를 사용하는 대안이 가장 적었다. 하지만 감압밸브를 적용시키는 대안은 배수관망의 최소 압력을 낮추는데 있어서는 다른 대안보다 효과적이지 못하였다.

각 대안의 건설비에 대한 경제적 타당성을 정성적으로 고려하였을 때, 감압밸브를 설치하는 대안의 공사비가 가장 적을 것으로 판단된다. 이 대안은 감압밸브와 밸브실만 설치하면 되기 때문에 다른 대안과 비교하여 상대적으로 간단한 공사가 요구되기 때문이다. 펌프를 이용하여 직접 공급하는 대안에서는 배관을 새로 설치해야 하는 구간의 거리가 길어서 배관의 설치비가 증가할 것으로 생각되며, 배수지를 표고가 낮은 곳으로 이동시키는 대안에서는 부지 확보와 배수지 건설을 위한 비용이 클 것으로 예상된다. 하지만, 운영비에 대한 경제적 타당성을 고려하였을 때는, 펌프를 이용하여 직접 공급하거나 배수지를 이동시키는 대안들이 펌프 운전에 필요한 전력 사용량을 줄일 수 있기 때문에 유리하리라 생각된다. 실제 적용을 위해서는 초기 건설비, 내용연수 기간 동안의 유지관리비, 폐기 비용 등을 모두 고려하는 전과정비용평가(Life Cycle Costing)을 적용하여 경제성을 평가할 필요가 있을 것이다(Lim et al., 2009). 보다 종합적인 경제성 평가를 위해서는 배수관망내의 압력 차이에 따른 누수율을 고려함으로써 보다 타당한 대안의 선정이 가능할 것이다. 이러한 경제적인 타당성 평가와 더불어, 배수관망에서 누수되는 공업용수와 펌프에서 사용되는 전기를 생산하는 과정에서 발생하는 환경영

- pp. 1-9
- pp. 11-21
- pp. 23-31
- pp. 33-38
- pp. 39-46
- pp. 47-55
- pp. 57-63
- pp. 65-75
- pp. 77-88
- pp. 89-96
- pp. 97-106
- pp. 107-122
- pp. 123-131
- pp. 133-138

향을 동시에 고려한다면 지속가능성이 높은 개선 대안을 도출할 수 있을 것이다(Lim et al., 2013).

5. 결 론

본 연구에서는 운전현황과 설계조건이 현저히 다른 기존 배수관망의 효율을 개선하기 위하여 다양한 대안을 도출하여 수리해석을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 누수율을 저감시키기 위해서는 감압밸브를 이용하는 대안이 가장 효과적이었으며 건설비도 가장 낮을 것으로 예상된다. 반면, 배수지를 사용하지 않고 송수펌프를 이용하여 배수관망에 직접 공급하는 대안은 펌프의 양정이 감소하여 배수관망의 운영비를 저감시키는데 도움이 될 수 있을 것이다. 배수지의 표고를 낮추는 대안은 부지의 확보와 배수지의 건설에 드는 비용의 증가로 송수펌프를 이용하는 대안보다는 경제적 타당성이 낮을 것으로 예상된다. 본 연구에서 실시한 사례연구는 공업용수뿐만 아니라 음용수를 공급하는 배수관망의 개선에도 응용될 수 있어 기존 배수관망의 경제성과 환경성을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다 (NRF-2014R1A1A2059556).

References

- Korea Water and Wastewater-Works Association Standards for water works facilities.
- Lim, S.-R., Suh, S., Kim, J.-H. and Park, H.S. (2010) Urban water infrastructure optimization to reduce environmental impacts and costs. *Journal of Environmental Management* 91(3), 630-637.
- Skworcow, P., Paluszczyszyn, D. and Ulanicki, B. (2014) Pump schedules optimisation with pressure aspects in complex large-scale water distribution systems. *Drinking Water Engineering and Science* 7(1), 53-62.
- De Corte, A. and Sörensen, K. (2013) Optimisation of gravity-fed water distribution network design: A critical review. *European Journal of Operational Research* 228(1), 1-10.
- Lim, S.R. and Park, J.M. (2008a) Synthesis of an environmentally friendly water network system. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47(6), 1988-1994.
- McGhee, T.J. (1991) *Water Supply and Sewerage*, McGraw-Hill, New York.
- Lim, S.R. and Park, J.M. (2008b) Cooperative water network system to reduce carbon footprint. *Environmental Science and Technology* 42(16), 6230-6236.
- Bentley (2007) *WaterCAD*.
- Mostafa, N.G., Matta, M.E. and Halim, H.A. (2013) Simulation of chlorine decay in water distribution networks using watercad - Case study. *Journal of Engineering and Applied Science* 60(1), 25-42.
- Lim, S.R., Lee, H. and Park, J.M. (2009) Life cycle cost minimization of a total wastewater treatment network system. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 48(6), 2965-2971.
- Lim, S.-R., Kim, Y.R., Woo, S.H., Park, D. and Park, J.M. (2013) System optimization for eco-design by using monetization of environmental impacts: a strategy to convert bi-objective to single-objective problems. *Journal Of Cleaner Production* 39, 303-311.