

상수관의 관경변화가 상수관망의 신뢰도 향상에 미치는 영향 평가

Evaluation of the Reliability Improvement of a Water Distribution System by Changing Pipe

전 환 돈* / 김 석 현** / 유 도 근*** / 김 중 훈****

Jun, Hwan Don / Kim, Seok Hyun / Yoo, Do Guen / Kim, Joong Hoon

Abstract

When replacing deteriorated pipes, it is important to select pipe diameters of new pipes for improving the long-term reliability of a water distribution system. However, as the use of larger diameter pipes brings cost increase, it is required to evaluate the improvement of the reliability by the use of larger diameter pipes. In this study, we propose a methodology to evaluate the improvement of the reliability by the use of different pipe diameters. For this purpose, we rely on the segment-based minimum cutset method with the success mode approach to evaluate the reliability of a water distribution system and determine which pipes and their diameters will be replaced to improve the reliability using GA. After the suggested method is applied to a real water distribution system, the optimized pipe diameters produces higher reliability of the system than the current ones with the same construction cost. However, compared to the increase rate of the construction cost, the improvement of the reliability is not significant. Thus, in addition to the use the different pipe diameters, the structural modification or adding new valves to the system is necessary to improve the reliability efficiently.

keywords : Water Distribution System, Reliability Assessment, GA, Pipe Diameter

요 지

상수관망의 노후관 교체시 신설관의 관경 결정은 상수관망의 장기적인 신뢰도 향상에 기여할 수 있는 중요한 문제이다. 그러나 대구경 관의 사용은 공사비 증가를 가져오기 때문에 적절한 관경의 결정을 위해서 대구경 관 사용에 따른 신뢰도 향상정도를 평가해야 한다. 본 연구에서는 상수관망의 변화가 상수관망의 신뢰도 향상에 미치는 영향을 평가할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위하여 Segment 기반의 Minimum Cutset 및 Success Mode Approach를 활용하여 상수관망의 신뢰도를 산정하였으며 신뢰도 향상을 위하여 교체해야 할 상수관과 관경을 유전자 알고리즘을 이용하여 최적해를 찾도록 하였다. 제안된 방법을 실제 상수관망에 적용한 결과 상수관을 기존의 설계와 다른 관경을 이용할 경우 비슷한 공사비로 좀 더 나은 신뢰도 향상을 가져왔다. 그러나 공사비의 증가율에 비하여 신뢰도 향상의 효과는 크지 않았다. 따라서 관경 변화 뿐 아니라 상수관망의 구조적인 보강이나 추가적인 밸브의 설치도 함께 해야 상수관망의 전체적인 신뢰도 향상이 효율적으로 이루어질 것으로 판단된다.

핵심용어 : 상수관망, 신뢰도 산정, 유전자 알고리즘, 관경

* 서울산업대학교 건설공학부 조교수

Assistant Prof., School of Civil Engrg., Seoul National University of Technology

** 현대건설 기술개발원 연구원

Researcher, Institute of Construction Technology, HYUNDAI Engineering & Construction Co.,Ltd.

*** 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

Doctoral Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Seoul, Korea

**** 교신저자, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수

Corresponding Author, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Seoul, Korea
(e-mail: jaykim@korea.ac.kr)

1. 서 론

상수관망(Water Distribution System)은 상수도 공급 사업을 위한 사회기반시설물 중의 하나로서 정수를 수송, 분배, 공급하는 기능을 가지며 상수관, 펌프 및 밸브 등이 조합된 매우 복잡한 네트워크 시스템이다. 통계청의 자료에 따르면 2005년 기준 전국의 총 수도관의 연장은 약 129,844 km이며 이 중 배수관은 63,929 km로서 전체 관로의 49.2%에 이를 정도로 전체 상수시스템의 많은 부분을 차지하는 시설물이다. 우리나라는 1908년 서울에 최초로 수도를 공급한 이래로 급수보급율이 2005년 12월 말 기준 91%에 이른다(KOSIS 국가통계포털). 그러나 시설의 노후화로 인하여 상수관 파괴가 빈번하게 나타나고 있으며 이로 인하여 단수가 자주 발생한다. 이를 극복하기 위하여 많은 지자체에서 상수관망의 노후관 개량사업이 시행되고 있으며, 서울시의 경우 1984년부터 장기적인 노후관 개량사업을 실시하여 2007년에 총 15,797 km를 새로운 관으로 교체하였고 이를 위한 총사업비는 2007년 기준으로 약 1조 5천억원이 소요되는 대규모 사업이었다. 이처럼 대규모 사업비와 장기간의 사업기간이 필요한 상수관 교체사업을 실행할 때 장기적인 상수관망의 신뢰도 향상을 위하여 신설관의 관경결정이 중요한 문제이다. 일반적으로 관경이 큰 관의 경우 관두께, 재질, 성형방법 등의 차이로 작은 관경의 관에 비하여 내구성이 우수하다고 볼 수 있다. 즉, 같은 위치에 작은 관경의 관과 큰 관경의 관을 설치할 경우 동일한 조건(동일한 성형방법, 동일한 내압 및 토압, 토양의 부식도등의 외부조건)일 경우 관두께가 두꺼울수록 토압에 의한 하중, 토압에 의한 외부부식에 따른 관두께 감소, 내압에 대한 저항성이 일반적으로 크다고 할 수 있다. 이는 St. Louis에서 장기간 관측된 상수관 파열기록에 의한 관경에 따른 파괴 확률회귀식에서 이러한 경향을 보이고 있다(Su *et al.*, 1987). St. Louis 자료를 바탕으로 한 파괴확률회귀식은 Eq. (5)에 나타나 있다. 그러나 관경의 변화에 따른 관의 신뢰도 변화가 다르게 나타날 수 있다. 이러한 경우 각 상수관망을 운영하는 지자체나 다른 연구에서 도출된 결론을 관경별 신뢰도 산정에 이용한 후 본 논문에서 제안한 방법에 적용하면 관경의 변화에 따른 상수관망 전체의 신뢰도 변화를 산정할 수 있다. 즉 본 연구에서 관별 신뢰도 산정 모델 (Eq. 5) 대신 다양한 연구에 의해서 도출된 식으로 이를 대체하면 우수한 내구성을 가진 관을 설치할 경우 변화되는 상수관망 전체의 신뢰도를 산정할 수 있다. 우수한 내구성은 장기적인 관의 신뢰도를 높이기 때문에 관파괴나 누수와 같은 문제를

덜 야기하고 이에 따라 전체적인 상수관망의 신뢰도 향상에 기여한다. 그러나 대구경 관의 설치에 공사비 증가를 가져오기 때문에 총사업비를 고려한 적절한 관경의 결정이 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 관경 변경에 따른 상수관망의 신뢰도 향상 정도를 평가할 수 있는 방법을 제안하였으며, 실제 상수관망에 적용하여 관경의 변화에 따른 상수관망의 신뢰도 변화를 추정하였다. 또한 총사업비의 증가가 신뢰도 향상에 기여하는 정도를 평가하여 효율적인 상수관망 신뢰도 증대 방안을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 상수관망에 대한 신뢰도의 정의 및 산정기법

Mays(1996)는 시스템의 신뢰도를 크게 기계적인 신뢰도와 수리학적인 신뢰도로 구분하였다. 여기서 기계적인 신뢰도는 시스템내의 구성요소의 빈번한 수리나 구성요소의 교체 없이 지속적으로 장기간 용수공급을 지원할 수 있는 시스템의 능력을 나타내며, 수리학적인 신뢰도는 용수 소비자들에게 적절한 수압으로 충분한 물을 공급할 수 있는 시스템의 능력을 의미한다. 또한 Goulter(1986)는 상수관망의 비정상 상태를 야기하는 파괴를 크게 Mechanical failure와 Performance failure로 구분하였다. Mechanical failure는 구성요소의 직접적인 파괴를 의미하며, Performance failure는 구성요소 기능 저하로 인한 압력수두 저하 같은 상태를 야기하는 것을 의미한다. 즉 신뢰도라는 것은 시스템이 이러한 파괴를 유발하지 않을 확률 또는 정상상태를 유지할 확률로 정의할 수 있다. 이와 같이 정의될 수 있는 상수관망의 신뢰도를 산정하는 방법은 많은 선행연구가 있으나 대표적인 것은 다음과 같다.

- Connectivity / topological reliability : Tung (1985), Goulter(1986), Wagner et al.(1988)
- Hydraulic reliability : Su *et al.*(1987), Bao and Mays(1990), Xu and Goulter(1998), 전환돈 등 (2007)

이중 전환돈 등(2007)이 제안한 방법은 Walski(1993)가 제안한 segment와 Jun(2005)이 제안한 unintended isolation을 상수관의 파괴에 의한 피해범위로 정의하였고 이를 이용하여 상수관망내에 존재하는 minimum cutset을 정의하였다. 여기서 상수관망에서의 minimum cutset이란 상수관망의 절점(node)에 용수공급을 중단시킬 수 있는 최소한의 단위(subsystem)이다. segment, unintended isolation, minimum cutset의 예를 Fig. 1의 상수관망과 Table 1을 이용하여 설명하였다.

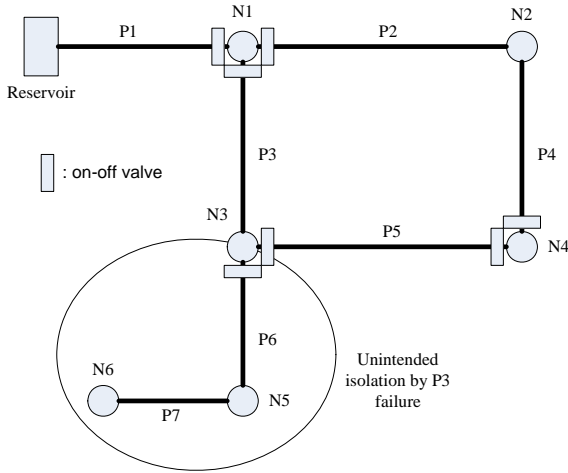


Fig. 1. Sample Network

Table 1에서 segment S1은 P1의 파괴시 발생하며 P1이 수리를 위해 격리될 경우 전체 상수관망에 용수공급이 이루어지지 않기 때문에 minimum cutset으로 정의된다. segment S5의 경우 P6와 P7으로 이루어지며 P6 또는 P7중 어느 한 관에서 누수가 발생하여 격리될 경우 두 관이 동시에 격리되며 이때 절점 N5와 N6에 용수공급이 중단되기 때문에 minimum cutset으로 정의된다. 이에 반해서 segment S4는 P5로 이루어지며 P5가 격리되어도 단수를 야기하지 않기 때문에 minimum cutset이 아니다. 이와 같이 전체 상수관망에 존재하는 segment를 정의하고 각 segment 별로 minimum cutset 인지를 판별하는 과정이 전체 상수관망의 신뢰도 산정에 필수적이다.

본 연구에서는 상수관망의 신뢰도 산정을 위해서 상수관의 다중파괴가능성을 고려할 수 있는 정상상태접근방법(success mode approach)을 이용하였다(전환돈 등, 2007). Eq. (1)의 정상상태접근방법은 각 minimum cutset이 안정적으로 운영될 경우를 고려한다. 즉 개개의 minimum cutset이 모두 정상적으로 운영이 될 경우 상수관망 전체는 정상상태(즉 전체 상수관망에서 단수 발생 지점이 없이 정상적인 용수공급이 이루어지고 있는 상태)를 유지할 것이다.

Table 1. Segment, Unintended Isolation, Minimum Cutset in the Sample Network

Segment	Pipes in the segment	Unintended isolation	Minimum Cutset
S1	P1	P2, P3, P4, P5, P6, P7	Yes (no water service at all nodes)
S2	P2, P4	-	Yes (no water service at N2)
S3	P3	P6, P7	Yes (no water service at N3, N5, and N6)
S4	P5	-	No
S5	P6, P7	-	Yes (no water service at N5 and N6)

$$R_{sys} = P\{FE(MC_1)^c \cap FE(MC_2)^c \cap \dots \cap FE(MC_n)^c\} \quad (1)$$

여기서, $FE(MC_i)^c$ 는 i 번째 minimum cutset의 파괴사건의 여집합으로 정상운영사건(success event)이다. 사건들 간 교집합의 발생확률은 Boolean 대수법칙에서 각 사건이 독립사건일 경우, 즉 사건 A에 따라 사건 B가 일어날 확률이 변하지 않을 때 다음 Eq. (2)를 이용해 산정할 수 있다.

$$P\{A \cap B \cap C \cap \dots\} = P\{A\} \times P\{B\} \times P\{C\} \times \dots \quad (2)$$

따라서 상수관망의 신뢰도는 다음 Eq. (3)과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} R_{sys} &= P\{FE(MC_1)^c \cap FE(MC_2)^c \cap \dots \cap FE(MC_n)^c\} \quad (3) \\ &= P\{FE(MC_1)^c\} \times P\{FE(MC_2)^c\} \times \dots \times P\{FE(MC_n)^c\} \\ &= [1 - P\{FE(MC_1)\}] \times [1 - P\{FE(MC_2)\}] \\ &\quad \times \dots \times [1 - P\{FE(MC_n)\}] \end{aligned}$$

2.2 유전자 알고리즘을 이용한 관별 최적관경 결정

유전자 알고리즘을 이용한 관별 최적관경의 결정을 위하여 목적함수는 상수관망의 신뢰도를 최대화 하는 것으로 설정하였으며 제한조건인 공사비의 범위는 현재 상수관망의 건설비용으로 하였다. 즉, 최적화 과정에서 신뢰도를 증대시키기 위해서 모든 관을 최대관경으로 선택하는 것을 막기 위하여 이러한 제한조건을 도입하였다. 최적화 대상관경은 상업용 관경으로 한정하였고, 매세대의 개체수는 30, crossover rate은 0.75, mutation rate은 0.01로 설정하였다. 상수관 설치를 위한 공사금액은 Su et al (1987)을 이용하여 산정하였고(Eq. (4)), 관별 신뢰도는 Su et al.(1987)에 의해 제시된 St. Louis 시에서 장기간의 상수관 파괴기록으로부터 추정된 회귀식을 바탕으로 추정하였다(Eq. (5)).

$$Cost(D, L) = \sum_{i, j} 1.1 \times D_{ij}^{1.24} \times L_{ij} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{0.6858}{D_i^{3.26}} + \frac{2.7158}{D_i^{1.3131}} + \frac{2.7685}{D_i^{3.5792}} + 0.042 \quad (5)$$

$$\beta_i = \alpha_i \times L_i \quad f_i = \alpha_i \times L_i \quad r_i = 1 - f_i$$

여기서, i =Pipe index, D =Pipe diameter(in), L =Pipe length(mile),

α =Breaks/mile/year, β =Breaks/year, f =Failure probability, r =Reliability.

최적화 과정의 흐름도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 「Segment based Minimum cutset method」는 전환돈 등(2007)에서 제안된 모델이다.

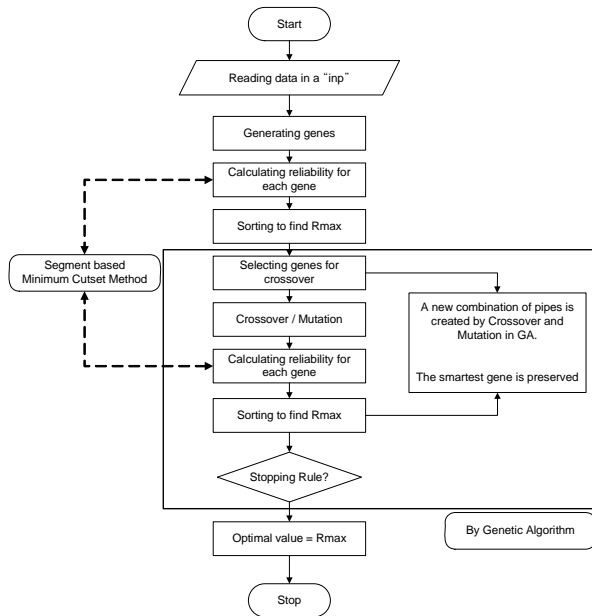


Fig. 2. Flow Chart for the Optimization Procedure

2.3 개발된 모형의 구성

개발된 모형은 크게 세개의 모듈로 구성된다. 첫 번째 모듈은 상수관망의 전체적인 신뢰도를 계산하기 위하여 전환돈 등(2007)이 제안한 segment 기반의 minimum cutset 과 success mode approach를 바탕으로 한 모델을 이용하였다. 두 번째 모듈은 유전자 알고리즘을 활용하여 주어진 사업비내에서 상수관망의 신뢰도를 최대로 할 수 있는 상수관의 관경 조합을 결정한다. 세 번째 모듈은 결정된 관경으로 상수관망의 수리학적 타당성을 검토하는 EPANET2.0 DLL이다. EPANET 2.0 DLL을 이용하여 주어진 관경의 조합에

따른 각 절점의 최소설계수압과 관별 유속을 만족하는지를 검토한다. 최소설계수압은 상수도시설기준의 15 m를 적용하였으며 관별유속의 경우 0.3 m/sec에서 3.0 m/sec 범위인지를 검증한다. 만약 주어진 관경의 조합이 이 기준을 만족하지 못할 경우 새로운 관경조합을 다시 산정한다. 개발된 모형의 구성은 Fig. 3과 같다.

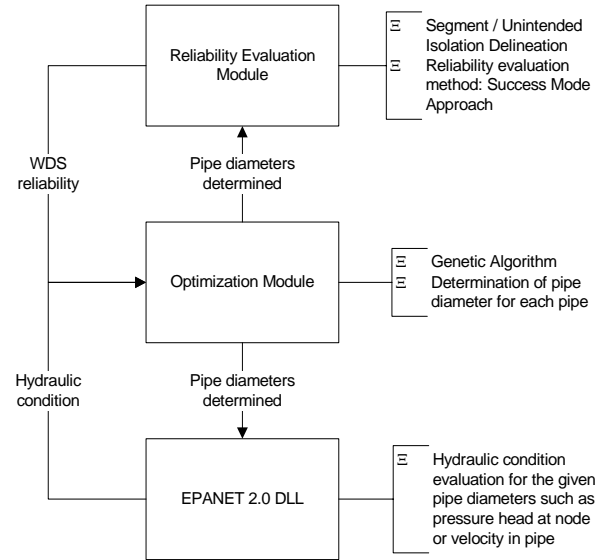


Fig. 3. Schematic Diagram of the Developed Model

3. 실제 상수관망에의 적용

3.1 적용대상

적용대상 지역은 미국 Connecticut 주에 위치한 Cherry Hill 상수관망을 선정하였다. Cherry Hill 상수관망은 90개의 절점, 104개의 관(6, 8, 12 인치 3종 관경으로 구성), 94개의 제수밸브 등으로 구성되어 있다. Cherry Hill 상수관망의 형태는 Fig. 4와 같다. 상업용 관경은 기존 상수관망에서 6, 8, 12 inch 3종 관경으로 구성되어 있으나 변화에 유연성을 주기위해 6, 8, 10, 12, 14, 16 inch의 6종의 상수관을 사용하게 했다.

3.2 적용결과

현 상수관망의 총 공사비용은 USD 1,224,942이며 최적화 수행 결과 공사비가 감소했음에도 불구하고 상수관망의 신뢰도는 약 1% 증가시킬 수 있었다(Table 2 참조). 산정된 상수관망의 신뢰도의 정확한 의미는 1년 동안 전체 상수관에서 모든 minimum cutset이 비정상 상태(예를 들면 관파괴)가 되지 않을 확률이다. 즉, 1년 동안 모든 minimum cutset이 파괴되지 않아서 단수가 발생하지 않을 확률을 의미한다. 여기서 “1년”의 의미는 상수관 매설 후 몇 년이 지난 후와 같이 실제적인

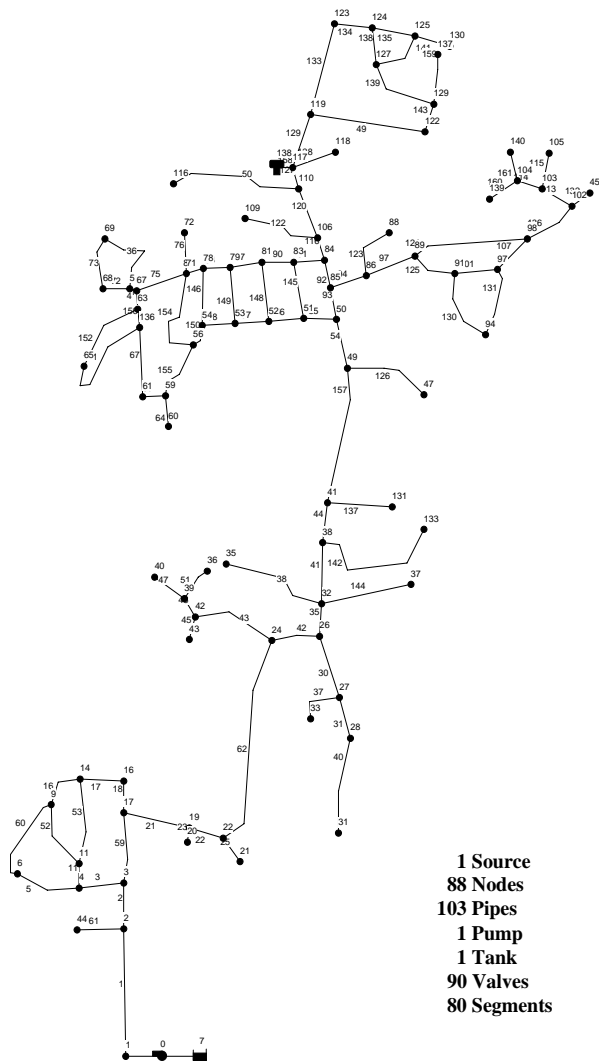


Fig. 4. Cherry Hill Network

시간의 흐름이 아니고 같은 위치에 작은 관경의 관을 설치했을 때와 큰 관경의 관을 설치했을 경우 각각의 경우에 대해 “1년” 동안 파괴가 발생할 확률이다. 따라서 Table 2의 산정된 수치가 의미하는 바는 동일한 조건일 경우 관경의 변화에 따른 전체 상수관망의 신뢰도의 상대적인 수치변화이다. 관 매설 후 파괴확률의 변화를 장기간에 걸쳐서 시간에 따른 함수로 나타내고 이를 매년의 전체 상수관망의 신뢰도 산정에 이용한다면 시간의 흐름을 고려한 관경변화가 전체 상수관망의 신뢰도 향상에 미치는 영향을 좀 더 정확히 나타낼 수 있을 것으로 사료되며 추후 연구과제가 될 것이다.

Table 2. Comparison of Reliability Between the Current and Optimized System

	Cost (USD 1000)	Cost Difference (%)	System Reliability
Original	1,225	0.00	0.1373 (13.7%)
Optimized	1,218	-0.56	0.1461 (14.6%)

최적화 과정에서 총 103개의 상수관 중 33개는 관경이 감소했고 36개는 변하지 않았으며 34개는 증가했다. 103개의 관중에서 관경이 변화된 관의 예는 Table 3과 같다.

여기서 33개의 관의 관경이 감소한 이유는 수리학적 인 조건을 만족하면서 작은 관경을 사용한 후 절약된 공사비를 좀 더 중요한 관(전체 상수관망의 신뢰도 향상에 기여가 큰)의 내구성 증가에 사용되었기 때문이다. 증가된 34개의 관중 32개는 minimum cutset으로 결정된 segment에 포함된 관이며 2개는 minimum cutset이 아닌 segment에 포함된 관이었다. 즉, 직접적인 상수관망의 신뢰도 향상을 위해서는 상수관망내에 존재하는 minimum cutset을 정의하고 이들에 포함된 관을 대상으로 대구경관 또는 내구성이 큰 관으로 교체해야 효과적임을 알 수 있다. 그러나 공사비 제한 때문에 신뢰도의 향상이 미미하여 공사비 제한조건을 현 공사비 대비 135%까지 증가시켰다. Fig. 5는 공사비의 변화에 따른 신뢰도 변화를 보여준다. 공사비 증가에 따른 신뢰도 변화는 거의 선형적으로 증가하였으나 공사비의 증가율에 비하여 신뢰도의 증가율이 낮았다. 이것은 상수관망의 구조적인 개선없이 관경의 증가 또는 개개의 관을 좀 더 내구성이 큰 관으로 교체해서 달성할 수 있는 상수관망의 신뢰도 향상에는 한계가 있음을 보여준다.

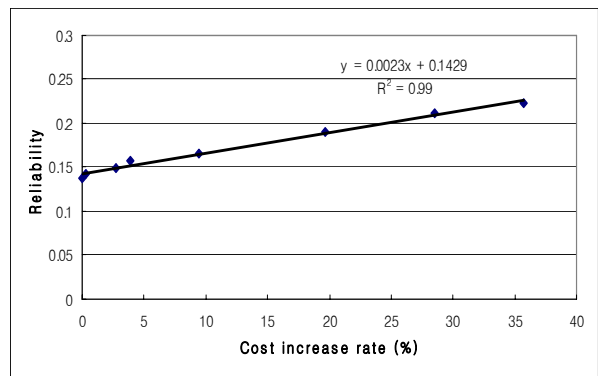


Fig. 5. System Reliability Improvement Along with Cost Increase

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Table 3. Examples of Diameter Change by the Optimization Procedure

Pipe ID	Length (ft)	Diameter (inches) - Original	Diameter (inches) - Optimized
51	400	8	12
52	910	6	8
53	1072	8	12
59	838	12	12
60	1000	8	8
61	400	8	12
62	2500	12	6
4	83	12	6
5	870	8	12

- 1) 상수관의 교체나 새로운 상수관망을 설계할 경우 환경의 변화에 의해서 장기적인 상수관망의 신뢰도 향상을 이룰 수 있음으로 수리학적인 조건을 만족시킨 후 추가적인 분석을 통해서 시스템의 신뢰도를 향상시킬 방안을 강구할 필요가 있다. 이는 총공사비를 제한조건으로 한 최적화 결과 비슷한 공사비를 투입하여 좀 더 높은 신뢰도를 구현할 수 있었으며 추가 공사비 투입이 가능한 경우 더 높은 신뢰도 향상을 가져왔다.
- 2) 최적화 결과 34개의 관을 좀 더 큰 관경으로 교체하였으며 이중 32개의 관이 minimum cutset에 포함된 사실로 볼 때 시스템의 신뢰도를 효율적으로 향상시키기 위해서는 minimum cut set에 포함되는 관을 위주로 관경변화 또는 내구성이 큰 관으로 교체함을 고려하여야 한다.
- 3) 상수관망의 구조적인 개선 없이 각 구성요소의 내구성을 증대시키는 것만으로는 시스템 신뢰도를 향상시키는데 한계가 있었다. 즉, 최대 현공사비 대비로 35%의 공사비를 추가 투입하여도 신뢰도는 10%정도 증가하는데 그쳤다. 따라서 상수관망의 노선변경, Loop 화, 추가적인 제수밸브의 설치와 같은 구조적인 보강이 상수관망의 신뢰도 향상에 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 사업인 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구 (ECORIVER21)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고 문헌

전환돈, 박재일, 백천우, 김중훈 (2007). “상수관망의 신

뢰도 산정을 위한 Segment 기반의 Minimum Cutset 방법” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 745-742.

Bao, Y. and Mays, L.W., (1990). "Model for Water Distribution System Reliability" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 9, pp. 1119-1137.

Goulter, I.C and Coals, A.V.(1986). "Quantitative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 112, No. 3, pp. 287-301.

Jun, H.D. (2005). *Strategic Valve Locations in a Water Distribution System*. Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic and State University, VA, USA.

Mays, L.W. (1996). "Review of reliability analysis of water distribution systems." *Stochastic hydraulics '96*, K. K. Tickle et al., eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 53-62.

Mays, L.W. (2006). "Water Resources Sustainability", McGraw-Hill Professional, New York, NY.

Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N. and Lansey, K.E. (1987). "Reliability based optimization model for water distribution systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 12, pp. 1539-1556.

Tung, Y.K. (1985). "Evaluation of Water Distribution Network Reliability", *Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age 1985*, ASCE, pp. 359-364.

Wagner, J.M., Shamir, U., Marks, D.H. (1988). "Water Distribution Reliability: Simulation

Methods" *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, No. 3, pp. 276-294.

Walski, T.M. (1993). "Water distribution valve topology for reliability analysis." *Reliability engineering & system safety*, Vol. 42, No. 1, pp. 21-27.

Xu, C. and Goulter, I.C. (1998). "Probability Model for Water Distribution Reliability" *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, No. 4, pp. 218-228.

(논문번호:09-028/접수:2009.03.10/심사완료:2009.05.26)