상수관망에서 개선의 우선순위 결정을 위한 운영인자

Management Index for the Decision Making of Priority of the Improvement in Water Distribution System

권혁재*

Kwon, Hyuk Jae*

Abstract

In this study, management indexes have been developed for the decision of priority of improvement in water distribution system. And the safety was estimated by management indexes for the real water distribution system. First of all, unsteady analysis has been performed and results were used for the reliability analysis. Reliability model is difficult to be used for the management of water distribution system since it contains so many steps. Therefore, management indexes such as pipe index of thickness, junction index of water usage, junction index of hydrant, pipe index of service year, junction index of hydraulic pressure, pipe index of accident history have been developed to estimate the safety of water distribution system. Management indexes were used for the estimations of safety and it was able to find the weakest area of water distribution system.

Key words : Junction Index, Management Index, Pipe Index, Water Distribution System

요 지

본 연구에서는 상수관망의 개선을 위한 우선순위결정을 위해 운영지수를 개발하고 상대적인 안전도를 평가하였다. 이를 위해서 먼저 실제 상수관망에 대한 부정류해석을 수행하였고 이를 이용하여 신뢰성해석을 수행하였다. 신뢰성해석모형을 사용하려면 여러 가지 많은 복잡한 과정을 거쳐야 하며 이는 실제 상수관망의 관리에 사용되기 힘든 요소들이 있다. 따라서 본 연구에서는 쉽게 안전도를 평가할 수 있는 운영인자들을 개발하였다. 운영지수는 총 여섯 가지로 관두께 지수, 물 사용량 지수, 급수전 지수, 사용연수 지수, 수압 지수, 그리고 사고이력 지수 등 이다. 개발된 인자들을 이용하여 간단하게 위험도를 평가하고 최우선으로 교체나 개선을 필요로 하는 상수도 지역을 찾을 수 있었다.

핵심용어 : 절점지수, 운영지수, 관지수, 상수관망

1. 서 론

상수관은 도시사회에서 꼭 필요한 중요한 도시기반시설물중 하나이다. 이러한 상수관의 보급률은 상당히 높아져 대부분의 주민들이 이용할 수 있는 상황이지만 상수도시설 구축 후 많은 시간이 흘러 노후화가 급격히 진행되고 있는 도시가 많은 실정이다. 노후화로 인해 많은 양의 수도물이 낭비되거나 상수도 파열사고로 인해 많은 시민들이 어려움을 겪기도 한다. 이러한 상수관망의 노후도 분석 및 개량을 필요로 하는 최우선순위를 결정하는 일은 많은 노력을 필요

로 한다.

상수관망의 노후도 및 건전성분석과 개량우선순위를 논의한 연구로는 Kang et al.(2009)이 신뢰성모형을 통하여 도시상수관망의 불확실성을 분석하고 이를 통하여 안전도를 비교 평가하였고 Jung et al.(2013)은 Level II 신뢰성모형인 FORM을 이용하여 상수관망의 강건성(Robustness)을 비교 평가하였다.

Jun et al.(2013)은 상수관망에서 관 파괴가 발생할 경우 제수밸브의 차폐를 통해 격리시키고 피해를 최소화 할 수 있는 방법을 제시하였다. segment를 적용하여 관 파괴 시

*교신저자, 정회원, 청주대학교 이공대학 토목공학과, 부교수(Tel: +82-43-229-8473, Fax: +82-43-229-8466, E-mail: hjkwon@cju.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Associate professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University

피해영역을 최소화 할 수 있는 방법을 모의하고 제수밸브의 위치를 적절히 추가하는 방법을 제시하였다. 또한 대규모 segment 분할을 위한 모형을 네 가지로 구성하여 제시하였다.

Lee et al.(2013)은 상수관망의 최적 개량의사결정 방법을 제시하였는데 Fuzzy기법과 PSF-HS(Parameter Setting Free Harmony Search)라는 기법을 사용하였다. 개발된 알고리즘은 Harmony Search기법을 개선하기 위하여 Fuzzy기법을 적용하였으며 매개변수 결정의 어려움을 개선하기 위해 Harmony Search의 매개변수를 자동적으로 조절할 수 있는 PSF-HS기법을 사용하였다.

Jun et al.(2013)은 상수관망의 노후화에 따른 관파괴 시 유지보수를 위하여 제수밸브를 이용하여 차폐하게 된다. 이때 제수밸브의 중요도를 평가하고 등급화하여 우선적으로 보수해야 할 제수밸브를 결정하고 상수관망 운영에 적용하는 기법을 개발하였다. 제수밸브의 중요도 등급을 결정하고 다수의 실제 밸브에 적용하여 상대적 중요도를 산정하여 비교하였다. 배수지 근처에 위치한 제수밸브이외에 관망의 중심부에 위치한 제수밸브의 중요도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

Kwon and Lee(2009)는 부정류 효과를 고려한 상수관의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성해석 모형을 제안하였다. 이 연구에서는 조압수조가 설치된 소규모상수관망에서 부정류 해석을 모의하였고 이 결과를 이용하여 상수관의 파괴확률

을 정량적으로 산정할 수 있음을 확인하였다. 실제 부정류의 압력을 크게 감쇄시킬 수 있을 때 파괴확률이 현저히 낮아지고 이는 상수도의 안전도 평가에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 실제 도시 상수관망인 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망을 대상으로 부정류해석을 수행하였다. 부정류해석결과를 이용하여 신뢰성해석을 수행하고 상수관망의 파괴확률을 정량적으로 산정하고 운영인자를 개발하여 상수관망의 상대적인 안전도를 평가하였다.

2. 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 부정류 해석

광탄 GT1-1 소블럭 상수관망은 신산리, 방축리, 창만리, 발랑리, 오산리를 포함하는 급수전수 1,282전 정도의 소블럭으로 해발고도 84 m의 배수지를 갖고 있으며 약 28 km^2 의 면적에 평상시 약 $0.021 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유량을 공급하고 있다. 발랑리계통의 경우 해발고도 50 m 이상의 고지대에 위치되어 가압펌프를 통한 용수공급을 하고 있다. Fig. 1은 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망을 보여주고 있다. 본 상수관망은 1개의 배수지, 1개의 펌프, 564개의 절점, 그리고 582개의 파이프를 이루어졌다. 또한 구역별 안전도 분석을 위해 같은 면적의 7개 구역으로 나누었다.

Fig. 1. Kwangtan GT1-1 Small Block Water Distribution System

본 연구에서는 특성선법(The Method of characteristics)을 이용하여 부정류 해석을 수행하였다. 먼저 배수지에서 밸브가 0.5초씩 선형적으로 닫혔다가 열려 1초 후 부터는 완전 개방된 부정류 흐름으로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한 Fig. 1에 표현된 70개 절점의 소요유량을 밸브폐쇄시간(0초, 1초)별로 부정류 해석을 수행하였다. 부정류해석을 위한 수치해석 조건으로 $\Delta t=0.0008$ sec, $\Delta x=1$ m, $c=1,250$ m/sec를 사용하였다. 그리고 Darcy-Weisbach 마찰계수는 모든 관에 대하여 0.052를 적용하였다. Fig. 2는 부정류해석결과 의 예로써 배수지 유량변화로 발생한 J-4와 J-73의 압력변화를 보여주고 있다. Fig. 3은 각 절점별 소요유량의 밸브폐쇄시간에 따른 부정류해석을 통해 나타난 최대압력변위를 절점별로 나타내고 있다.

3. 신뢰성 해석

3.1 신뢰성 해석 모형

본 연구에서는 신뢰성해석 모형으로 Level II 인 FORM (First-Order Reliability Method)모형을 적용하였으며 신뢰

함수로 주장력공식 Eq. (1)을 사용하였다.

$$Z = 2\sigma_a t - pD \quad (1)$$

여기서, σ_a =파이프의 허용응력, t =관두께, p =파이프의 내압, 그리고 D =관 직경이다. 따라서 신뢰함수는 Eq. (2)를 사용하여 $Z < 0$ 에 해당하는 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (2)$$

파이프의 허용응력과 두께, 그리고 직경은 제품이 출고될 때 여러 불확실성을 내포하고 있지만 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그리고 파이프의 내압의 경우 많은 불확실성이 내포되어 있으며 그 분포함수를 규명할 필요가 있다(Kwon and Lee, 2009). 또한 본 연구에서는 국내에서 실제 사용되는 관두께 산정식(Korea Ductile Iron Industry, 2012)을 적용하여 신뢰성해석을 수행하였다. 관두께 산정식은 정수압과 수격압, 그리고 토피에 의한 토압 및 트럭하중에 의한 토압을

Fig. 2. Pressure Oscillation at (a) J-4 (b) J-73 According to Change of Reservoir Flow

Fig. 3. Pressure Change at Junctions According to Valve Closure Time (a) 0sec (b) 1.0sec

전부 동시에 고려하고 있으며 정수압에 대한 안전율 2.0, 수직압에 대한 안전율 2.0, 토피에 의한 안전율 2.0, 차량하중에 의한 토압안전율 2.0을 대입하여 Eq. (3)과 같이 산정한다.

$$t = \frac{(P_s + P_u) + \sqrt{(P_s + P_u)^2 + 8.4(K_f W_f + K_t W_t)\sigma_a}}{2\sigma_a} d \quad (3)$$

여기서, t =관두께(mm), P_s =정수압(kg/cm^2), P_u =수직압(kg/cm^2), K_f =관저의 지지각에 따라 결정되는 계수, K_t =관정 0.076, 관저0.011, W_f =토피에 의한 토압(kg/cm^2), W_t =트럭하중에 의한 토압(kg/cm^2), d =관의 내경(mm), σ_a =허용응력(kg/cm^2)이다. 본 연구에서는 관두께 산정을 위하여 허용응력(σ_a)=2,500 kg/cm^2 , 차량하중=9,600 kg을 적용하여 토피 1.5 m, 2 m, 2.5 m에서의 관두께를 산정하였다.

3.2 신뢰성 해석 결과

약 28 km^2 의 면적을 가진 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망을 같은 면적의 7개 구역으로 나누고 각 구역별로 10개씩 총 70개의 측정지점을 선정하였고 다양한 시나리오로 부정류 해석을 수행하였다. Fig. 4는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 부정류 수치해석결과로 나타난 최대압력파고의 확률밀도함수를 보여주고 있다.

Fig. 4. Probability Density Function of Maximum Pressure Wave Height in Kwangan GT1-1 Water Distribution System

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 확률분포가 Gumbel분포를 나타내고 있다. 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 구역별 파괴확률

산정을 위하여 각 구역별 파이프의 직경, 두께, 허용응력은 정규분포를 따른다고 가정하고 파이프의 수직압은 Gumbel 분포를 사용하였다. 7개 구역 중 가장 큰 직경이 분포한 2구역의 경우 평균 직경 25.5 cm와 평균 관두께 0.773 cm를 적용하였으며 가장 작은 직경이 분포한 7구역의 경우 평균 직경 10.7 cm와 평균 관두께 0.682 cm를 적용하였다. 또한 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 관 재질이 덕타일주철관이므로 평균 허용응력은 2,500 kg/cm^2 을 사용하여 구역별 파괴확률을 산정하였다. Fig. 5는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 구역별 파괴확률을 보여주고 있다.

Fig. 5. Probability of Pipe Breakage of Each Areas in Kwangan GT1-1 Small Block

Fig. 5의 사각형 실선은 1구역의 파괴확률을 보여주고 있으며 원형 실선은 2구역의 파괴확률, 삼각형 실선은 3구역의 파괴확률, 넓은 십자형 실선은 4구역의 파괴확률, 엑스형 실선은 5구역의 파괴확률, 별형 실선은 6구역의 파괴확률, 얇은 십자형 실선은 7구역의 파괴확률을 보여주고 있다. 압력 10 kg/cm^2 에서 1구역의 파괴확률은 0.25%를 보여주고 있으며 2구역은 0.31%, 3구역은 0.21%, 4구역은 0.23%, 5구역은 0.22%, 6구역은 0.21%, 7구역은 0.18%의 파괴확률을 나타내고 있다. 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망은 비교적 큰 관망에 비하여 수충격 최대 압력파고의 평균이 11.7 m밖에 나타나지 않았고 이에 따라 파괴확률도 현저히 작게 나타났다. 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 경우 모든 압력에서 2구역이 가장 큰 파괴확률을 나타내었고 1구역, 4구역, 5구역 등이 그 뒤를 잇는 순서로 나타났다. Table 1은 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 구역별 파괴확률을 보여주고 있다.

Table 1. Comparison of Probability of Pipe Breakage for 7 Areas of Kwangan GT1-1 Water Distribution System

Pressure (kg/cm^2)	Probability of Pipe Breakage (%)						
	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Area 7
10	0.25	0.31	0.21	0.23	0.22	0.21	0.18
15	0.55	0.76	0.43	0.49	0.47	0.43	0.36
20	1.19	1.74	0.87	1.02	0.96	0.84	0.7

4. 운영지수

상수관망은 운영관리시 인구 증가와 물사용량, 노후화 등 여러 가지 원인에 따라 매설관의 파열 및 단수 등 많은 위험성을 내포하고 있다. 이에 따라 상수관망에서 개선의 우선순위 결정을 위한 운영인자를 통해 상수관망의 위험도를 판단한다. 본 장에서는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 운영인자로서 구역별 관두께 지수와 물 사용량 지수, 급수전 지수, 사용연수 지수, 수압 지수, 사고이력 지수를 결정하였다. 관두께 지수는 상수관의 설계시 산정된 관두께와 실제 관두께의 비로써 외력으로 작용하는 내압의 크기가 관두께 산정에 큰 영향을 미치게 된다. 관두께 지수를 I_t 로 정의하고 계산에 의해 산정된 관두께를 t , 사용 관두께를 t_k 로 했을 때의 관두께 지수 식은 Eq. (4)와 같다.

$$I_t = \frac{t}{t_k} \quad (4)$$

여기서, I_t =관두께 지수, t =계산된 관두께(mm), t_k =사용 관두께(mm)이다. 관두께 지수는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 각 구역별로 대표되는 10개의 파이프를 선정하였으며 발생가능한 모든 수충격압을 고려하여 구역별 관두께 지수를 산정하였다. 물 사용량 지수는 구역별로 실제 사용된 소요유량의 합과 배수유량의 비이다. 물 사용량 지수를 I_d 로 정의하고 실제 사용된 소요유량을 d , 배수유량을 d_r 로 했을 때의 물 사용량 지수 식은 Eq. (5)와 같다.

$$I_d = \frac{d}{d_r} \quad (5)$$

여기서, I_d =물사용량 지수, d =사용된 소요유량(m^3/sec), d_r =배수유량(m^3/sec)이다. 물 사용량 지수는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 각 구역별로 모든 절점의 소요유량의 합으로 물 사용량 지수를 산정하였다. 급수전 지수는 구역별로 존재하는 급수전수와 총 급수전수의 비이다. 급수전 지수를 I_h 로 정의하고 구역별 급수전수를 h , 총 급수전수를 h_t 로 했을 때의 급수전 지수 식은 Eq. (6)과 같다.

$$I_h = \frac{h}{h_t} \quad (6)$$

여기서, I_h =급수전 지수, h =구역별 급수전수, h_t =총 급수전수이다. 급수전 지수는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 1개의 절점을 급수전수 2.7개로 고려하여 급수전 지수를 산정하였다. 사용연수 지수는 실제 파이프 매설연도와 최초 매설연도의 비이다. 사용연수 지수를 I_y 로 정의하고 실제 파이프 매설연도를 y , 최초 매설연도를 y_f 로 했을 때의 사용

연수 지수 식은 Eq. (7)과 같다.

$$I_y = \frac{y}{y_f} \quad (7)$$

여기서, I_y =사용연수 지수, y =실제 파이프 매설연도, y_f =최초 매설연도이다. 사용연수 지수는 본 연구에 사용된 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 최초 매설연도가 1990년으로 사용연수 25년을 적용하였다. 수압 지수는 구역별 압력수두와 배수지 압력수두의 비이다. 수압 지수를 I_p 로 정의하고 구역별 압력수두를 p , 배수지 압력수두를 p_r 로 했을 때의 수압 지수는 Eq. (8)과 같다.

$$I_p = \frac{p}{p_r} \quad (8)$$

여기서, I_p =수압 지수, p =구역별 압력수두(m), p_r =배수지 압력수두(m)이다. 수압 지수는 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 각 구역별 모든 절점의 압력수두를 평균하여 수압 지수를 산정하였다. 사고이력 지수는 실제 발생한 관로사고횟수와 총 관로사고횟수의 비이다. 사고이력 지수를 I_a 로 정의하고 실제 발생한 관로사고 횟수를 a , 총 관로사고횟수를 a_t 로 했을 때의 사고이력 지수 식은 Eq. (9)와 같다.

$$I_a = \frac{a}{a_t} \quad (9)$$

여기서, I_a =사고이력 지수, a =실제 발생한 관로사고횟수, a_t =총 관로사고횟수이다. 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 경우 아직 사고이력이 없었지만 각 구역별로 1회씩 관로사고가 발생했다고 가정하여 구역별 사고이력지수로 0.14를 적용하였다. Table 2는 광탄 GT1-1 상수관망의 구역별 운영 지수이다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 운영인자로서 구역별 물 사용량지수와 급수전지수, 사용연수지수, 수압지수, 사고이력 지수를 나타내어 본 결과 7개 구역 중 물 사용량 지수는 2구역이 0.32로 가장 높은 값으로 나타났으며 급수전 지수는 1구역이 0.28로 가장 높은 값을 나타내었다. 또한 7개 구역 중 3구역이 매설연도지수 0.77과 수압지수 0.69로 가장 높은 값을 나타내었다. 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 각 구역별 운영인자들을 방사형차트로 나타내어 면적을 비교해 본 결과 1구역은 1.035, 2구역은 1.061, 3구역은 0.961, 4구역은 0.987, 5구역은 0.896, 6구역은 0.818, 7구역은 0.619로 나타났다. 따라서 본 연구에 사용된 운영인자에 따른 광탄 GT1-1 소블럭 상수관망의 개선의 우선순위는 2구역으로 나타났으며 1구역, 4구역, 3구역 등이 그 뒤를 잇는 순서로 나타났다. Fig 6은 광탄 GT1-1 상수관망 개선의 우선순위 결정을 위한 운영인자를 보여주고 있다.

Table 2. Management Indexes for 7 Areas in Kwangtan GT1-1 Water Distribution System

Area no.	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Area 7
Pipe index of Thickness	0.49	0.54	0.47	0.48	0.47	0.46	0.43
Junction index of Water usage	0.29	0.32	0.04	0.09	0.06	0.04	0.01
Junction index of Hydrant	0.28	0.21	0.11	0.09	0.14	0.12	0.05
Pipe index of Service year	0.66	0.6	0.77	0.8	0.68	0.55	0.24
Junction index of Hydraulic pressure	0.53	0.64	0.69	0.68	0.58	0.58	0.56
Pipe index of Accident history	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Extent	1.035	1.061	0.961	0.987	0.896	0.818	0.619
Risk ranking	2	1	4	3	5	6	7

Fig. 6. Radar Charts of 7 Areas in Kwangtan GT1-1 Water Distribution System

5. 결 론

본 연구에서는 실제 도시 상수관망인 광탄 GT1-1 소블릭 상수관망을 대상으로 부정류해석을 수행하였고 신뢰성해석을 통하여 구역별 파괴확률을 산정하였다. 또한 상수관망의 운영인자로써 물 사용량지수와 급수전지수, 사용연수지수, 수압지수, 사고이력지수를 개발하여 광탄 GT1-1 소블릭 상수관망의 운영지수에 의한 구역별 위험도를 분석하여 상대적으로 안전에 취약한 구역을 선정할 수 있었다. 광탄 GT1-1 소블릭 상수관망을 7개 구역으로 나누어서 신뢰성해석과 운영지수에 따른 위험도 분석을 수행하였고 상대적으로 수격압으로 인한 관로파괴에 취약한 구역을 선정할 수 있었다. 또한 광탄 GT1-1 소블릭 상수관망에서는 구역별 파괴확률과 운영지수에 따른 위험도 순위가 같게 나타났다. 본 연구에서 개발된 상수관망의 신뢰성해석모형과 운영지수를 운영관리에 적용한다면 향후 개량이나 교체가 필요한 상수관로의 우선순위 선정에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업 (2016002120004)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

- Ang, A., and Tang, W.H. (1984) *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Frankel, E.G. (1988) *Systems Reliability and Risk Analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- Jun, H.D., Lee, J.H., Yu, D.G., and Lee, H.M. (2013) A Methodology for the Minimization of the Pipe Failure Impact on a Water Supply Network by Dividing Large Segments. *Proceedings of 2013 Annual Conference of Korean Society of Hazard Mitigation*, p. 246.
- Jun, H.D., Lee, J.H., Yu, D.G., and Lee, H.M. (2013) Case Studies of the Determination of the On-off Valve Relative Importance to Real Water Supply Networks. *Proceedings of 2013 Annual Conference of Korean Society of Hazard Mitigation*, p. 245.
- Jung, D., Kang, D., Kim, J.H., and Lansey, K. (2013) Robustness- based Design of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 11, Article ID 04014033.
- Kang, D.S., Pasha, M.F.K., and Lansey, K. (2009) Approximate Methods for Uncertainty Analysis of Water Distribution Systems. *Urban Water Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 233-249.
- Korea Ductile Iron Pipe Industry (2012) *Hand of Ductile Iron Pipe*.
- Kwon, H.J., and Lee, C.E. (2009) Probability of Pipe Breakage of Water Distribution System with Surge Tank. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 785-793.
- Kwon, H.J., Lee, C.E., and Choi, H.G. (2008) Reliability Analysis for Probability of Pipe Breakage. *Proceedings of 2008 Annual Conference of Korean Water Resources Association*, pp. 850-853.
- Lee, H.M., Yu, D.G., and Kim, J.H. (2013) Optimal Rehavilitation Decision Making of Water Distribution System using Fuzzy and PSF-HS. *Proceedings of 2013 Annual Conference of Korean Society of Hazard Mitigation*, p. 247.
- Modarres, M., Kaminsliy, M., and Krivtsov, V. (1999) *Reliability Engineering and Risk Analysis*. Marcel Dekker Inc.

Received	January 4, 2018
Revised	January 5, 2018
Accepted	January 12, 2018