



## Calculations of probability of pipe breakage according to service year

Kwon, Hyuk Jae<sup>a\*</sup> · Kim, Hyeong Gi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, Korea

<sup>b</sup>PhD Student, Department of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, Korea

Paper number: 19-061

Received: 2 August 2019; Revised: 19 August 2019; Accepted: 19 August 2019

### Abstract

Reduced thickness of the water pipes due to corrosion makes it difficult to perform the original functions since corrosion in metallic water pipes can occur over time. In this study, reliability model that can estimate the probability of pipe breakage is developed regarding corrosion depth increment according to service year. Probability of pipe breakage was calculated by FORM(First Order Reliability Method) and unsteady analysis was performed to analyze the statistical properties of water pressure. And KCIP(Korea Cast Iron Pipe) equation was adopted for the reliability function. Furthermore, change of pipe thickness was estimated by Nahal and Khelif equation and Romanoff equation. Therefore, pipe thickness was calculated due to change of corrosion depth and probability of pipe breakage was calculated and compared with 10, 20, 30 service years. From the results, probability of pipe breakage for network A is gradually increased from 6.8% to 8.6% according to service year of 10, 20, 30 when Nahal and Khelif equation is applied. And probability of pipe breakage for network A is also gradually increased from 6.4% to 8.9% according to service year of 10, 20, 30 when Romanoff equation is applied.

**Keywords:** Corrosion, Pipe thickness, Probability of pipe breakage, Unsteady analysis, Water pipe

## 상수도관의 사용연수에 따른 관파괴확률 산정

권혁재<sup>a\*</sup> · 김형기<sup>b</sup>

<sup>a</sup>청주대학교 토목공학과 부교수, <sup>b</sup>청주대학교 토목공학과 박사과정

### 요 지

상수도관은 시간이 흐름에 따라 부식이 발생할 수 있으며 이로 인해 관두께가 작아져 기존의 성능을 발휘하기 힘들어진다. 이에 본 연구에서는 관두께 변화에 따른 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있는 수치모형을 개발하였으며 이를 실제 상수도관망에 적용하여 사용연수가 증가함에 따라 파괴확률이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 파괴확률은 FORM(First Order Reliability Method)를 사용하여 산정되었고 압력의 통계적 특성을 분석하기 위해 여러 가지 다른 시나리오를 이용하여 부정류해석을 수행하였으며 신뢰함수로는 주장력공식을 개선한 KCIP(Korea Cast Iron Pipe)식을 사용하였다. 또한 부식으로 인한 두께변화를 산정하기 위하여 Nahal and Khelif식과 Romanoff의 식을 사용하였으며 이를 통하여 10년, 20년, 30년 후의 부식으로 인한 관두께를 추정하였고 이에 따른 파괴확률을 산정하여 비교분석하였다. 본 연구에서 적용된 상수도관망A의 경우 Nahal and Khelif의 식을 사용하였을 때 100 mm 직경의 강관이 사용연수가 10년, 20년, 30년으로 증가할 경우 파괴확률은 상수도압 12 kg/cm<sup>2</sup> 일 때 각각 6.8%, 7.8%, 8.5%로 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있었고, Romanoff의 식을 사용하였을 경우 6.4%, 7.5%, 8.9%로 증가하는 것을 확인하였다.

**핵심용어:** 관두께, 관파괴확률, 부식, 상수도관, 부정류해석

\*Corresponding Author. Tel: +82-43-229-8473

E-mail: hjkwon@cju.ac.kr (H. J. Kwon)

### 1. 서론

최근 상수도에서 발생한 적수로 인해 많은 시민들이 피해를 보고 있으며 이를 위한 상수도개선사업이 시급한 실정이다. 하지만 물을 전달하는 상수도관의 경우 부식이라는 상황을 100% 막을 방법이 없기 때문에 이에 대한 피해를 최소화하는 방법이 많이 제시되고 있다.

Caleyo *et al.* (2002)은 부식이 진행중인 파이프라인의 잔존수명을 예측할 수 있는 추계학적 방법을 제시하였다. 이 연구에서는 시간에 따른 일정한 부식 형태를 갖고 정상상태 부식모형을 적용하였다. 시간경과에 따른 부식으로 인한 파괴 확률 산정을 위해 SORM (Second Order Reliability Method) 방법을 사용하여 해석하고 Monte Carlo integration 방법을 한계상태 함수로 적용되었다. 하지만 확률변수들은 모두 정규 또는 log normal 분포함수로 가정하여 사용하였다.

Ahamed (1998)는 부식상태의 파이프의 잔존수명 예측 모형을 제시하였고, 이상적인 장기간 부식증가 모형이 적용되었다. 잔존수명 예측을 위한 신뢰성 모형으로 Level II 방법이 적용되었고 확률변수의 분포는 정규분포 또는 비정규분포 함수를 적용하였으나 아주 단순화된 부식모형을 사용하였다.

Teixeira *et al.* (2008)는 FORM (First Order Reliability Method)를 사용하여 부식으로 인한 파이프의 신뢰성 해석을 수행하였다. 한계상태는 소규모 실험결과를 사용하였고, Monte Carlo Simulation이 부식된 파이프라인의 파괴 압력에 대한 불확실성을 예측하기 위해 사용되었다. 하지만 부식 모형은 가정된 값을 적용하였다.

우리나라는 최근까지 정수시설 개선이나 상수도 현대화 사업을 통하여 최고시설의 상수도공급시스템을 구축하기 위해 노력하고 있지만 최근 발생한 적수문제와 여러 가지 형태의 많은 상수도민원을 볼 때 실제 상수도시스템의 선진화가 이루어지고 있는지 의심하지 않을 수가 없다. 현재 관의 노후화로 인한 누수로 물 생산량의 10%가 버려지고 있는 실정이다. 이는

약 6천억원에 해당하는 금액이며 서울에 비해 지방의 누수율이 월등히 높은 것으로 알려져 있다. 그리고 누수율을 낮추고 깨끗한 물을 공급하기 위한 노력에는 많은 경제적 부담이 따를 수밖에 없을 것이다. 상수도 보급율이 98%를 넘어선 상황에서 지하에 매설된 상수도관의 상태를 정확하게 파악하고 관리할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 시급하다. 따라서 상수도관의 노후화 특성 및 그에 따른 파괴특성에 대한 연구가 필요하며 이를 바탕으로 잔존수명을 예측하고 상수도관망 개선에 적용 가능한 연구가 필요할 것이다. 본 연구에서는 부식으로 인해 상수도관의 두께가 작아져서 관의 파괴확률이 상승할 것이라고 판단하고 파괴확률의 상승폭을 정량적으로 파악할 수 있는 해석모형을 수립하였다. 먼저 사용연수경과에 따른 관두께의 변화를 예측하고 상수도관망 내 수층격발생 모의를 하여 그 결과를 신뢰성해석모형에 적용하였다.

### 2. 관의부식

부식에 따른 관두께 변화를 파악하기 위해 Nahal and Khelif (2014)의 식과 Romanoff (1957)의 식을 사용하였다. 아래 Fig. 1에서 보는 그림은 Romanoff가 실측한 데이터에 근거한 것으로 매설된 상수도관은 사용연수에 따라 항상 아래와 같은 양상을 보이는 것으로 기술하고 있다. 실제 Romanoff는 실측치를 정리하여 15년까지의 강관의 부식두께를 아래와 같이 표현하였다.

Nahal and Khelif (2014)은 부식으로 인한 관두께 변화 Eq. (1)을 사용하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 사용연수에 따른 부식으로 인한 부식깊이를 산정할 수 있었다. 또한, Romanoff (1957)의 실측치를 이용하여 Fig. 3과 같이 사용연수에 따른 부식으로 인한 부식깊이를 산정할 수 있었다. Romanoff (1957)은 당시 사용연수 15년까지의 데이터를 보여주었고 본 연구에서는 이를 40년까지 regression하여 사용하였다.

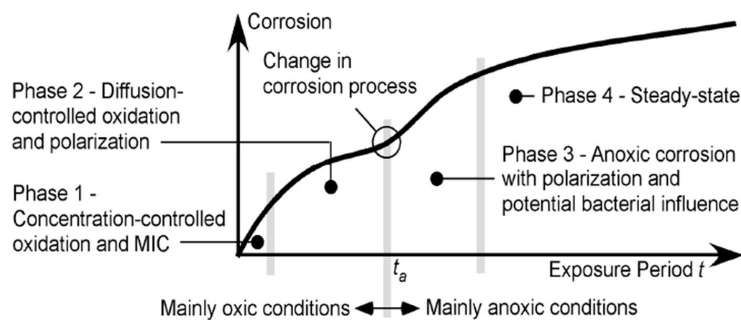


Fig. 1. Schematic representation of the bi-modal behaviour of corrosion loss showing principal phases (Romanoff, 1957)

$$d_c = k_c t^n \tag{1}$$

여기서,  $d_c$ 는 관의 부식으로 인한 부식깊이,  $k_c$ 는 부식상수,  $t$ 는 경과년수,  $n$ 은 상수이다. 본 연구에서  $k_c$ 와  $n$ 은 각각 Nahal and Khelif (2014)이 사용한 0.066과 0.53을 사용하였다. Nahal and Khelif (2014)의 식을 사용하여 관두께 변화를 분석한 결과 사용연수가 10년, 20년, 30년, 40년으로 증가할 경우 각각의 부식깊이는 0.2236 mm, 0.3229 mm, 0.4003 mm, 0.4663 mm로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Romanoff (1957)의 식을 사용하여 관두께 변화를 분석한 결과 사용연수가 10년, 20년, 30년, 40년으로 증가할 경우 각각의 부식깊이는 0.1640 mm, 0.3010 mm, 0.4380 mm, 0.5750 mm로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

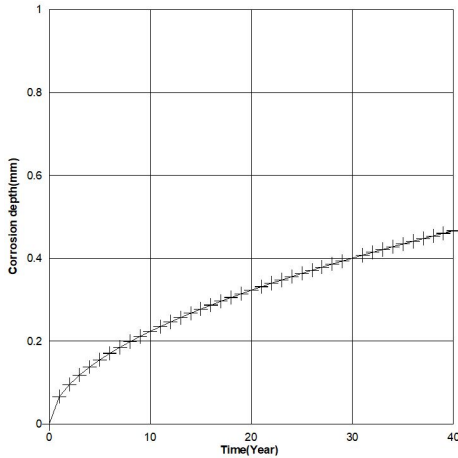


Fig. 2. Corrosion depth according to service year (Nahal and Khelif, 2014)

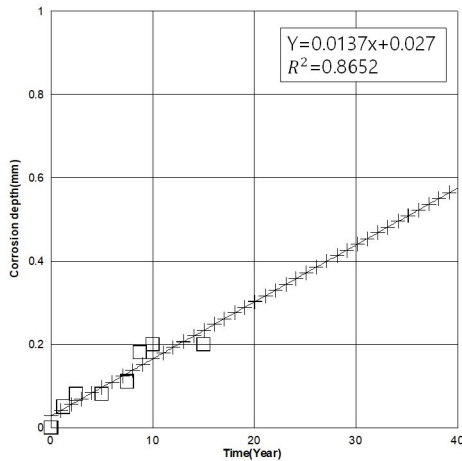


Fig. 3. Corrosion depth according to service year (Romanoff, 1957)

### 3. 실제 상수도관망의 부정류해석

#### 3.1 부정류해석 모형

관수로 흐름에서 부정류해석은 유속과 압력이 어느 지점에서나 시간의 함수로 계산되어야 한다. 해석에 쓰이는 두 개의 지배방정식은 잘 알려진 연속방정식과 운동방정식이며 두 개의 지배방정식을 위한 여러 가지 해법들(Kwon, 2005)이 제시되고 있으나 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 상수도관의 수충격 해석에서 가장 사용이 간편하고 안정적인 특성선법(The method of characteristics)을 이용한 수치모형(Karney and McInnis, 1992; Watters, 1984)이 사용되었다. 특성선법(MOC)은 연속방정식과 운동량 방정식의 편미분 형태를 차분식(finite difference equation)식으로 변환하여 각 지점에서 압력과 유속(유량)에 관한 해를 구하는 방식으로 부정류해석에서 사용이 매우 간편하고 계산속도가 빠르며 수치해석적으로 안정적인 방법으로 널리 알려져 있다.

상수도관의 부정류해석을 위해 사용되는 운동방정식과 연속방정식은 다음 Eqs. (2) and (3)와 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \tag{2}$$

$$\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

여기서,  $H$ 는 위압수두(piezometric head),  $c$ 는 압력파의 속도,  $Q$ 는 유량,  $A$ 는 파이프의 단면적,  $g$ 는 중력가속도,  $D$ 는 관경, 그리고  $f$ 는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다.  $L_1$ 이 운동방정식을  $L_2$ 가 연속방정식이라고 가정한다면, 이들의 선형방정식,  $L=L_1+\lambda L_2$ ( $\lambda$ 는 라그랑지안 멀티플라이어)은 다음 Eq. (4)과 같이 표현될 수 있다. Fig. 4는 특성선법에서 미지수 P의 계산을 위한 특성선을 나타내고 있다.

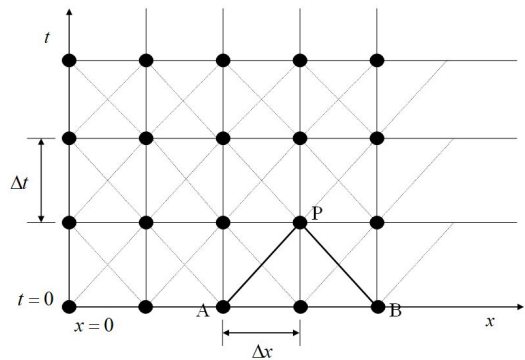


Fig. 4. Characteristic lines of the method of characteristics

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda c^2 \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda g A \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (4)$$

여기서,  $H=f_1(x,t)$ 이고,  $Q=f_2(x,t)$ 이며, 다음 Eqs. (5) and (6)의 체인법칙의 적용이 가능하다.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

따라서 Eqs. (4)~(6)를 이용하여  $\lambda$ 는 다음과 같이 결정된다. 만약,  $dx/dt=\lambda c^2$ 이라면 Eq. (4)의 좌변의 첫 항은 Eq. (5)와 일치하게 되고,  $dx/dt=1/\lambda$ 라면 Eq. (4)의 좌변 두 번째 항의 괄호는 Eq. (6)와 일치하게 된다. 그러므로  $1/\lambda=dx/dt=\lambda c^2$ 이며,  $\lambda$ 는 Eq. (7)과 같이 나타나게 된다.

$$\lambda = \pm \frac{1}{c} \quad (7)$$

따라서, Eq. (7)을 사용하면 Eq. (4)은 아래의 두 Eqs. (8) and (9)과 같이 정리가 가능하다.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (9)$$

여기서, 특성선법의 특성상  $dx/dt=c$ 를 통해서 Eq. (8)이 사용되고,  $dx/dt=-c$ 를 통해서는 Eq. (9)이 해석된다. 마지막으로 Eqs. (8) and (9)을 유한차분식으로 변환하면 각각 아래 Eqs. (10) and (11)과 같이 사용이 가능하다(Kwon, 2005).

$$\begin{aligned} & (Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n) + \frac{gA}{c} (H_i^{n+1} - H_{i-1}^n) \\ & + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & (Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^n) - \frac{gA}{c} (H_i^{n+1} - H_{i+1}^n) \\ & + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $n+1$ 은 시간변수를 의미하게 된다. 특성선법의 경우 아래 Eq. (12)과 같이 Courant stability condition을 수렴조건으로 적용한다.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{c} \quad (12)$$

### 3.2 실제 상수도관망 적용

본 연구에서는 특성선법(MOC)을 사용하여 두 개의 실제 상수도관망에 대해 수충격해석을 수행하였다. 상수도관망 A와 B의 파이프 개수는 각각 260개와 151개, 절점수는 238개와 147개, 그리고 총 유량은 0.024 m<sup>3</sup>/sec와 0.0063 m<sup>3</sup>/sec이다. 수충격 발생 시나리오는 유량이 가장 큰 15개의 상수도관에서 밸브의 빠른 폐쇄에 의해 수충격 현상이 발생했다고 가정하였다. 밸브 폐쇄시간 1.0초에 대해 모든 절점에서의 수충격을 계산하였다. 해석조건으로는  $\Delta x$ 는 10 m, 파속(C)는 1200 m/sec 마찰계수(f)는 0.02를 적용하였고 총 60초간 시뮬레이션하였다. 신뢰성해석을 위해 상수도관망A(Fig. 5)와 B(Fig. 6)에서의 수충격압의 통계적 특성을 분석한 결과 Gumbel 분포를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Kwon and Lee (2008)에 의해 상수도의 수충격압의 통계적인 특성이 Gumbel분포와 일치한다는 것이 증명된 바 있다. 본 연구에서 사용된 수충격압의 통계적인 특성값은 상수도관망A의 경우 평균 수격압=19.67 m, COV=0.410,  $\kappa=0.159$ ,  $\lambda=16.04$ 로

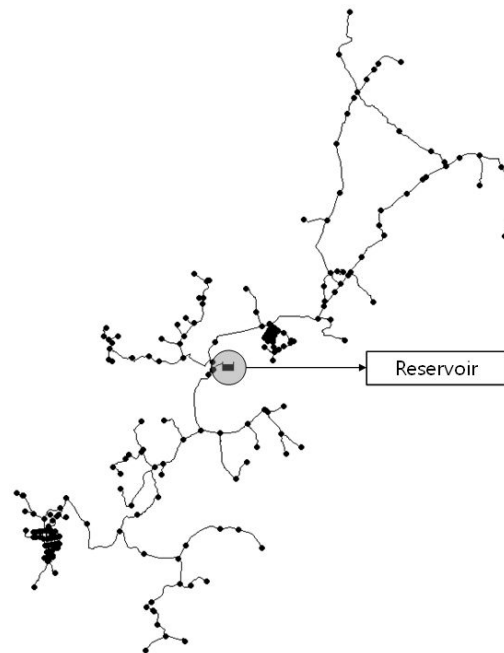


Fig. 5. Water distribution A

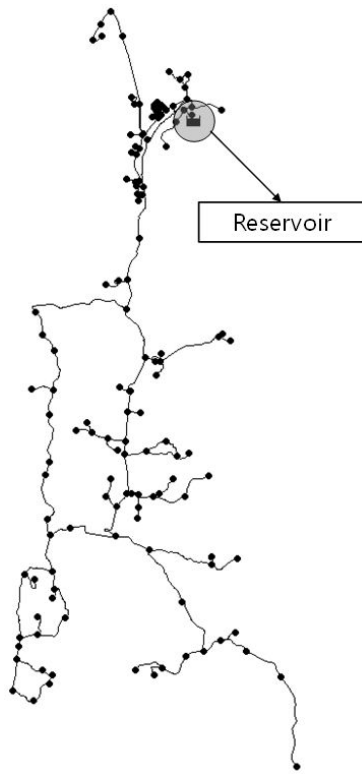


Fig. 6. Water distribution B

나타났다. 상수도관망B의 경우 평균 수직압 8.82 m, COV=0.463,  $k=0.314$ ,  $\lambda=6.98$ 로 나타났다. Figs. 7 and 8은 상수도관망A와 B에서의 수충격압의 확률밀도함수이고, Table 1은 상수도관망A와 B의 수충격압의 통계적 특성이다.

### 4. 신뢰성 해석

#### 4.1 신뢰성 해석모형

신뢰성 해석은 각각의 다른 해석방식을 사용하며 이를 통해서 Level I, Level II, Level III로 분류가 된다. Monte-Carlo Simulation이 대표적인 Level III이며 난수를 만들고 구조물의 안정성에 영향을 주는 확률변수들을 이용하여 신뢰성해석을 수행하게 된다. 본 연구에서 사용된 Level II는 하중 및 저항함수를 적용하여 신뢰함수(reliability function)를 수립하고 신뢰성해석을 수행하게 된다. 이 방법에서 확률변수는 극치 분포나 정규분포와 같은 특정한 분포함수를 적용하여 해석하게 된다(Ang and Tang, 1984; Frankel, 1988; Modarre, 1999). Level II는 저항함수와 하중함수의 통계적 특성과 분산, 평균값 계산에서의 비선형성의 존재에 따라 FORM (First-Order Reliability Method)과 SORM (Second-Order Reliability

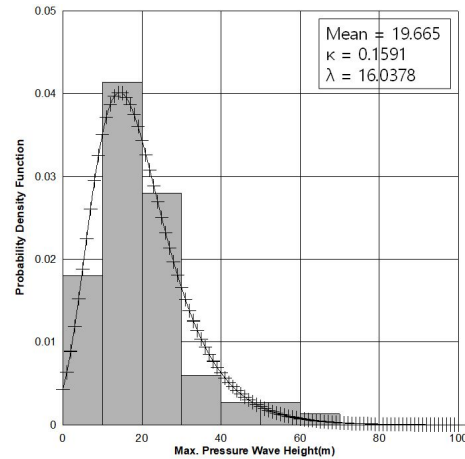


Fig. 7. Probability density function of water hammer pressure (water distribution A)

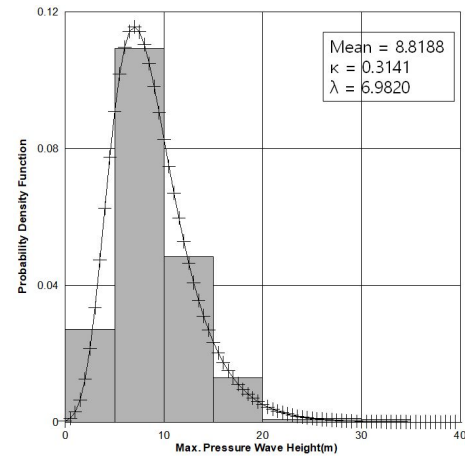


Fig. 8. Probability density function of water hammer pressure (water distribution B)

Table 1. Statistical properties of water hammer pressure

Water distribution A		Water distribution B	
mean (m)	19.67	mean (m)	8.82
standard deviation (m)	8.06	standard deviation (m)	4.08
COV	0.410	COV	0.463
Scale parameter ( $k$ )	0.16	Scale parameter ( $k$ )	0.314
Shape parameter ( $\lambda$ )	16.04	Shape parameter ( $\lambda$ )	6.98

Method)로 분류할 수 있다. 특히 본 연구에서 사용된 FORM은 파괴면의 설계점에 대한 반복계산의 존재여부에 따라서 FDA (First-order Design point Approach)와 FMA (First-order Mean value Approach)로 분류된다. 그러나 FDA와 FMA는 하중함수와 저항함수가 독립적이고 확률변수들이 전부 정규분포를 따른다는 가정이 앞서야 한다. 따라서 본 연구에서는

정규분포를 따르지 않는 확률변수들을 적용하기 위해 FORM 모형을 적용하였다. 본 연구에서는 한국주철관협회(Korean Cast Iron Pipe Cooperation, 2012)에서 제시한 Eq. (13)을 아래와 같이 사용하여 신뢰함수를 구축하였다.

$$t = \frac{(P_s + P_u) + \sqrt{(P_s + P_u)^2 + 8.4(K_f W_f + K_t W_t)\sigma_a}}{2\sigma_a} d \quad (13)$$

여기서,  $t$ =관두께,  $P_u$ 와  $P_s$ 는 각각 수층격압과 정수압,  $K_t$ 는 관저 지지각에 의해 결정되는 계수,  $K_f$ 는 관정=0.079, 관저=0.011,  $W_f$ 와  $W_t$ 는 각각 토압과 트럭하중에 의한 외압이다.

Fig. 9에서 신뢰지수(reliability index)  $\beta$ 는 반복계산에 의해서 산정하고, 이는 원점에서 파괴면의 설계점에 이르는 최단거리를 의미한다.  $\beta$ 를 구할 때 신뢰지수의 불변성이 요구되기 때문에 정규화과정(normalization process)이 필수적이다.

먼저 방향여현(directional cosine)은 Eq. (14)과 같이 구하게 되며 Eq. (15)와 같이 새로운 설계점을 산정하기 위하여 사용된다. 첫 번째 반복계산에서 확률변수의 평균값을 첫 번째 설계점으로 사용하게 된다.

$$\alpha_{x_i}^* = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_i}\right)_*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i}\right)_*^2}} \quad (14)$$

여기서,  $x_i' = (x_i - \mu_{x_i})/\sigma_{x_i}$ ,  $x_i = \sigma_a, t, p, D$ , 그리고  $\mu_{x_i}$ 와  $\sigma_{x_i}$ 는 확률변수들의 평균과 표준편차를 나타낸다. 그리고 설계점은 Eq. (15)과 같이 계산하게 된다.

$$\sigma_a^* = \mu_{\sigma_a} - \alpha_{\sigma_a}^* \beta \sigma_{\sigma_a} \quad (15a)$$

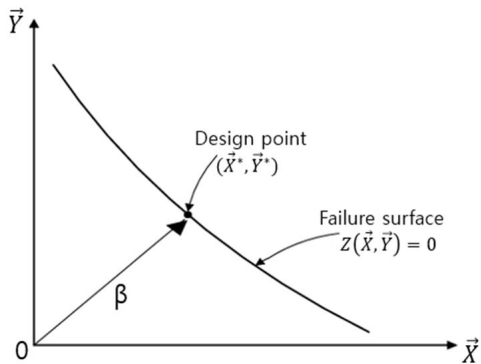


Fig. 9. Design point of failure surface

$$t^* = \mu_t - \alpha_t^* \beta \sigma_t \quad (15b)$$

$$p^* = \mu_p^N - \alpha_p^* \beta \sigma_p^N \quad (15c)$$

$$D^* = \mu_D - \alpha_D^* \beta \sigma_D \quad (15d)$$

여기서,  $\sigma_p^N$ 과  $\mu_p^N$ 는 파이프 내 수압의 등가정규분포의 표준편차와 평균이며 Eq. (16)와 같이 Rosenblatt 변환으로 계산된다.

$$\mu_p^N = p^* - \sigma_p^N \Phi^{-1}[F_p(x^*)] \quad (16a)$$

$$\sigma_p^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_p(x^*)]\}}{f_p(x^*)} \quad (16b)$$

여기서,  $F_p(x)$ 와  $f_p(x)$ 는 아래 Eq. (17)과 같이 파이프 내압의 Gumbel 분포함수를 의미하게 된다.

$$F_p(x) = \exp[-e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (17a)$$

$$f_p(x) = \kappa \exp[-\kappa(x-\lambda) - e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (17b)$$

여기서,  $\kappa = \pi/(\sqrt{6}\sigma_p)$ ,  $\lambda = \mu_p - (0.577/\kappa)$ 이다. 또한 Eq. (15)를 신뢰함수 Eq. (13)에 삽입하게 된다면, 한계상태방정식은 Eq. (18)과 같이 된다.

$$2(\mu_{\sigma_a} - \alpha_{\sigma_a}^* \beta \sigma_{\sigma_a})(\mu_t - \alpha_t^* \beta \sigma_t) - (\mu_p^N - \alpha_p^* \beta \sigma_p^N)(\mu_D - \alpha_D^* \beta \sigma_D) = 0 \quad (18)$$

새로운 설계지점산정을 위해  $\beta$ 를 Eq. (15)에 삽입하여 계산하고  $\beta$ 가 적절한 값에 수렴할 때 까지 반복계산이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 신뢰함수를 이루는 다른 확률변수는 정규분포를 따른다고 가정하였다. 하지만 상수도관내 수압은 많은 불확실성(Uncertainty)을 갖고 있기 때문에 확률분포함수를 정확히 파악하고 통계학적 특성을 분석할 필요성이 있다.

#### 4.2 신뢰성 해석 결과

통계적 특성 및 분석결과를 이용하여 상수도관의 사용연수경과에 따른 파괴확률을 산정하였다. 여기서 사용된 설계변수인 직경과 두께 그리고 허용응력은 모두 정규분포로 가정하였다. 상수도관의 직경은 모두 100 mm를 사용하였고 관두께  $t$ 는 4.5 mm이고, 허용응력은  $1000 \text{ kg/cm}^2$ 를 사용하였다.

Table 2는 설계변수의 통계적 특성이다. 관두께는 Nahal and Khelif (2014)의 식과 Romanoff (1957)의 식을 사용하여 사용연수에 따른 부식깊이를 산정하여 관두께에 적용하였다. Table 3은 Nahal and Khelif (2014)와 Romanoff (1957)의 식에 따른 사용연수별 관두께의 변화이다. 또한 압력 P값은 정상류상태의 정수압에 수충격압의 평균을 합하여 파괴확률 산정에 적용하였다. 본 연구에서는 실제 상수도관망에서 발생 가능한 여러 가지 시나리오를 토대로 수충격압의 통계적 분포함수를 찾아내고 이를 신뢰성해석에 적용하였는데 신뢰성해석 결과를 보다 쉽고 간단히 설계에 반영하기 위해서 상수도관두께 계산 시 적용하는 수충격압의 값을 신뢰성해석에 그대로 적용하여 계산하는 방법도 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 측정치의 부족으로 인해 사용연수 경과에 따른 관두께의 불확실성을 고려할 수는 없었으나 향후 관두께 변화의 불확실성 또한 고려하여 신뢰성해석을 수행함이 적절할 것으로 판단된다.

Table 2. Statistical properties of design parameters

Mean			COV		
D	t	$\sigma_a$	D	t	$\sigma_a$
100 mm	4.5 mm	1000 $kg/cm^2$	0.1	0.1	0.2

Table 3. Change of pipe thickness according to service year

Nahal and Khelif (2014)			Romanoff (1957)		
Service year (Year)	corrosion depth (mm)	thickness (mm)	Service year (Year)	corrosion depth (mm)	thickness (mm)
10	0.2236	4.276	10	0.1640	4.336
20	0.3229	4.177	20	0.3010	4.199
30	0.4003	4.100	30	0.4380	4.062
40	0.4663	4.034	40	0.5750	3.925

Figs. 10~13과 같이 사용연수에 따라 파괴확률을 정량적으로 산정하였다. 또한 상수도관망 내 100 mm직경의 관에 대하여 해석을 수행하였으며 Figs. 14 and 15와 같은 결과를 얻을 수 있었다. Table 4는 실제 적용한 상수도관망에서 12  $kg/cm^2$ 의 압력을 갖는 100 mm관의 사용연수에 따른 파괴확률이다.

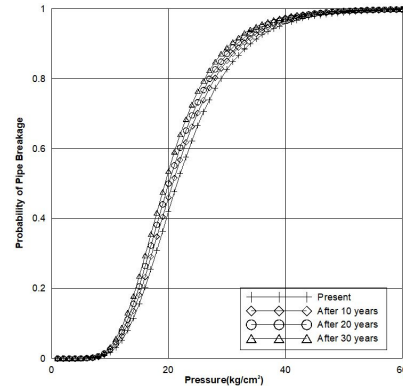


Fig. 11. Probability of pipe breakage according to pressure using Romanoff eq. (Water distribution A)

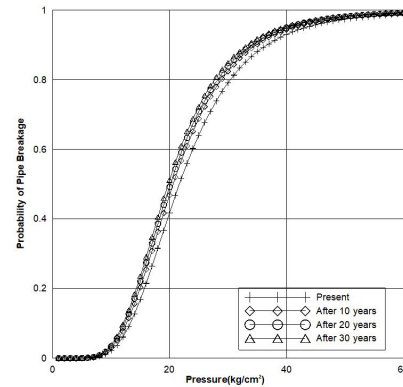


Fig. 12. Probability of pipe breakage according to pressure using Nahal and Khelif eq. (Water distribution B)

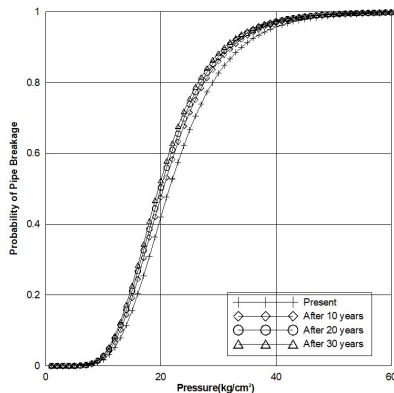


Fig. 10. Probability of pipe breakage according to pressure using Nahal and Khelif eq. (Water distribution A)

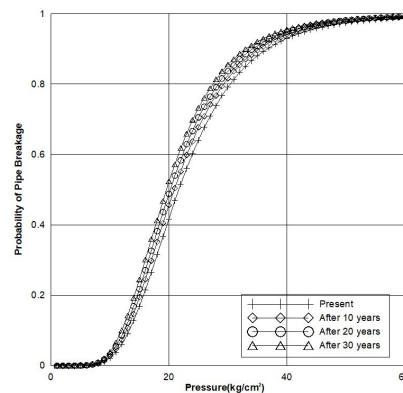


Fig. 13. Probability of pipe breakage according to pressure using Romanoff eq. (Water distribution B)

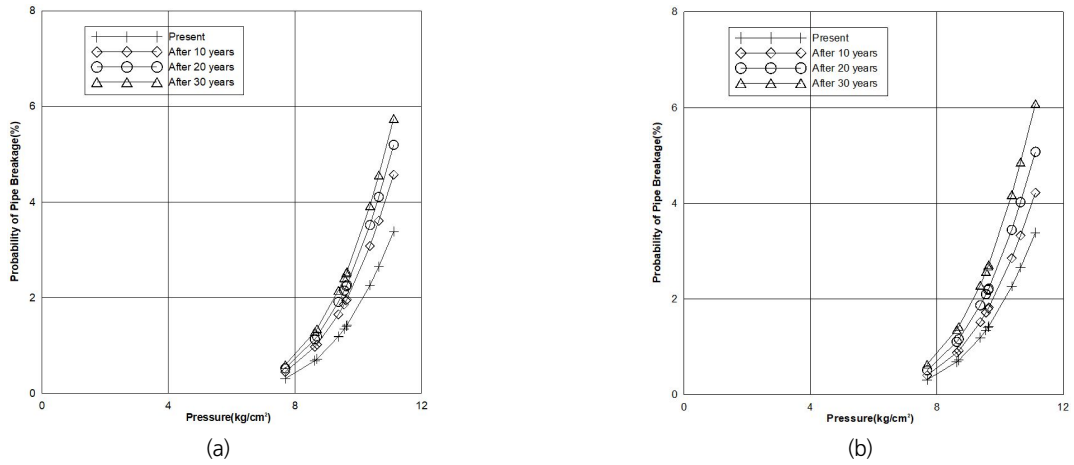


Fig. 14. Probability of pipe breakage of 100 mm pipes according to pressure using (a)Nahal and Khelif eq. (b)Romanoff eq. (Water distribution A)

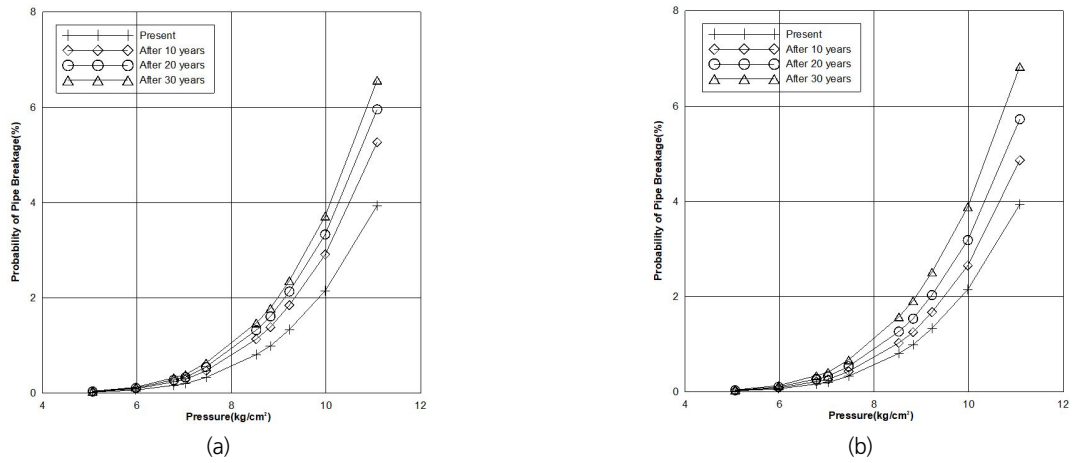


Fig. 15. Probability of pipe breakage of 100 mm pipes according to pressure using (a)Nahal and Khelif eq. (b)Romanoff eq. (Water distribution B)

Table 4. Probability of pipe breakage of water distribution A and B according to service year

service year	Nahal and Khelif (2014)		Romanoff (1957)	
	Water distribution A	Water distribution B	Water distribution A	Water distribution B
present	5.1549%	6.0569%	5.1549%	6.0569%
10years	6.8110%	7.7801%	6.4253%	7.3527%
20years	7.7801%	8.8505%	7.4931%	8.5340%
30years	8.5340%	9.6797%	8.8505%	10.0269%
40years	9.1756%	10.3831%	10.5646%	11.7020%

### 5. 결론

상수도의 노후화는 급격하게 일어나는 것으로 알려져 있으며 특히 부식이 발생하는 경우 사용연수에 따라 관의 파손 규모는 계속 증가하게 된다. 따라서 사용연수에 따른 부식깊이를 정확히 산정하고 이에 따른 개선책을 마련하는 것이 시

급할 것이다. 본 연구에서는 부식으로 인해 상수도관의 두께가 작아져서 관의 파괴확률이 상승할 것으로 예측하고 부식깊이 변화에 따른 파괴확률을 정량적으로 산정하였다. 먼저 사용연수경과에 따른 관두께의 변화를 예측하고 상수도관망 내 수충격발생 모의를 통하여 그 결과를 신뢰성해석모형에 적용하였다. 본 연구로부터 도출된 결과는 다음과 같다.



- 1) 부식의 정도는 Nahal and Khelif와 Romanoff의 식을 적용하였으며, Nahal and Khelif의 식을 사용하였을 경우 사용연수가 10년, 20년, 30년으로 증가할 경우 파이프 두께는 0.2236 mm, 0.3229 mm, 0.4003 mm 감소하는 것을 확인하였고, Romanoff의 식을 사용하였을 경우 사용연수 증가에 따라 0.1640 mm, 0.3010 mm, 0.4380 mm의 두께 감소를 확인하였다.
- 2) 본 연구에서 적용된 상수도관망A의 경우 Nahal and Khelif의 식을 사용하였을 때 100 mm 직경의 강관이 사용연수가 10년, 20년, 30년으로 증가할 경우 파괴확률은 상수도압 12 kg/cm<sup>2</sup> 일 때 각각 6.8%, 7.8%, 8.5%로 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있었고, Romanoff의 식을 사용하였을 경우 6.4%, 7.5%, 8.9%로 증가하는 것을 확인하였다.
- 3) 상수도관망B의 경우 Nahal and Khelif의 식을 사용하였을 때 사용연수가 10년, 20년, 30년으로 증가할 경우 파괴확률은 각각 7.8%, 8.9%, 9.7%로 증가하는 것을 알 수 있었으며, Romanoff의 식을 사용하였을 경우 100 mm 직경의 강관의 파괴확률은 상수도압 12 kg/cm<sup>2</sup>에서 약 7.4%, 8.5%, 10.0%로 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 사용연수경과에 따른 부식으로 인한 상수도관망의 파괴확률의 변화추이를 예측해 보았다. 상수도관망의 피해정도를 정량적으로 산정하기 위해서 신뢰성 해석모형을 구축하여 실제 상수도관망인 A, B 지역에 적용하였으며, 사용연수가 증가할수록 파괴확률이 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이는 부식의 깊이 예측모형이 정확하다는 가정하에 수행되었으며 향후 부식깊이를 정확히 예측할 수 있는 부식모형이 설정되어야 할 것이다. 또한 부식의 깊이 뿐 아니라 부식의 면적 혹은 길이 또한 상수도관의 파괴에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있기 때문에 이에 대한 연구가 꼭 필요하다고 판단된다. 본 연구 결과는 향후, 상수도관의 사용연수에 따른 유지관리의 방법으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

- Ahmed, M. (1998). "Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 4, pp. 321-329.
- Ang, A., and Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Caleyo, F., Gonzalez, J. L., and Hallen, J. M. (2002). "A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defect." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, No. 1, pp. 77-86.
- Frankel, E. G. (1988). *Systems reliability and risk analysis*. Klume Academic Publishers. USA.
- Karney, B. W., and McInnis, D. (1992). "Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1014-1031.
- Korean Cast Iron Pipe Cooperation (2012). *Handbook of ductile cast iron pipe*. KCIP.
- Kwon, H. J. (2005). *Transient flow in water distribution system*. Ph. D. Thesis, University of Southern California.
- Kwon, H. J., and Lee, C.-E. (2008). "Reliability analysis of pipe network regarding transient flow." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 409-416.
- Modarres, M. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis*. Marcel Dekker. USA.
- Nahal, M., and Khelif, R. (2014). "Failure probability assessment for pipelines under the corrosion effect." *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 15-20.
- Romanoff, M. (1957). *Underground corrosion*. National Bureau of Standards Circular 579, US Government Printing Office (Publishers), Washington DC.
- Teixeira, A. P., Guedes, S. C., Netto, T. A., and Estefen, S. F. (2008). "Reliability of pipelines with corrosion defects." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, No. 4, pp. 228-237.
- Watters, G. W. (1984). *Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipeline*. Butterworths. USA.