

부정류 효과를 고려한 조압수조가 있는 상수관망의 파괴확률

Probability of Pipe Breakage for Pipe Network with Surge Tank regarding Unsteady Effect

권혁재* / 이철응**

Kwon, Hyuk Jae / Lee, Cheol Eung

Abstract

Numerical model which can simulate the surge tank for unsteady flow was developed in the present study. Furthermore, reliability model which can calculate the probability of pipe breakage regarding unsteady effect was developed. For the risk estimation of pipe breakage and functional estimation of surge tank, probability of pipe breakage for pipe network with surge tank was calculated regarding unsteady effect. From the results, it was found that unsteady flow significantly increase the probability of pipe breakage and surge tank considerably decrease probability of pipe breakage as damping out the pressure oscillations.

Keywords : Pipe network, Pipe breakage, Reliability, Surge tank, Unsteady flow

요 지

본 연구에서는 부정류 상태의 조압수조를 해석 할 수 있는 수치모형이 개발되었다. 그리고 부정류 효과를 고려한 파이프의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 모형이 개발되었다. 파이프 파괴의 상대적 위험도 평가와 조압수조의 기능성 평가를 위해 부정류 효과를 고려한 조압수조가 있는 상수관망 시스템의 파괴확률을 산정하였다. 신뢰성 해석을 통하여 부정류가 파괴확률을 크게 증가 시키는 것을 알 수 있었으며 조압수조가 부정류의 압력을 크게 감소시킴으로써 파괴확률을 현저히 저하시키는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 상수관망, 파이프 파괴, 신뢰성, 조압수조, 부정류

서 론

상수관망에 대한 연구는 많은 어려운 연구과제들 중 하나일 것이다. 이는 지표면 밑에 매설된 관의 부식이나 침식의 정도를 측정하기 힘들며 또한 부정류에 의한 갑작스런 압력변화의 해석이 필요하기 때문이다. 실제 상수관의 설계에서 상수관의 정상시 수압을 2배 이

상 고려하여 설계함으로써 부정류의 영향을 최대한 반영하는 것이 사실이다. Maillhot *et al.* (2000)는 아주 짧은 파이프 파괴 기록이 있는 도시 상수관망을 위한 통계적 모델의 계수들을 평가하는 방법을 제시하였다. 그리고 파이프 파괴 측정기록을 갖고 있는 실제 도시의 상수관망에 대한 응용 방법을 보여주었다. Watson *et al.* (2004)는 Bayesian 방법으로 상수관망의 관리와 감

* 교신저자, 강원대학교 토목공학과, 연구교수

Corresponding author, Research Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

(e-mail: hyukjae68@hotmail.com)

** 강원대학교 토목공학과, 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

독, 그리고 여러 가지 의사 결정에 있어서 공학적 경험에 의존해야 하는 부분의 불확실성 인자들을 표현할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히, 상수관망의 장기적 관리에 관련한 부분에 중점을 두었으며 불연속적 사건의 일종인 상수도관 파괴에 대한 기초적 연구결과를 보여준다. 그러나 이러한 연구들은 부정류에 의한 급격한 압력변화의 영향이 고려되지 않았다. 상수관망에서 갑작스런 압력변화가 일어나거나 혹은 소방전(hydrant)의 사용과 같은 갑작스런 필요유량이 생긴다면 압력 급상승 혹은 급하강이 생기게 되며 이러한 갑작스런 변화는 원치 않는 악영향을 상수관망 시스템에 미치게 된다. 이런 변화가 빠르게 일어날수록 좋지 않은 영향들, 예를 들면 과도한 수압의 급상승이나 역류(backflow)등이 더 자주 그리고 더 빨리 일어날 수 있다. 특히, 고지대나 산지가 많고 시내에서도 표고차가 큰 것이 특징인 한국의 도시들은 이러한 현상의 발생 가능성이 크다고 볼 수 있다.

상수관망은 설계 시 특정한 규정을 따르게 되며 보수 관리 역시 특정한 가이드라인이 제공된다. 그렇지만 이러한 규정과 가이드라인이 지켜지지 않을 시에는 커다란 시설 피해를 볼 수 있으며 이로 인해서 경제적으로도 큰 손실을 볼 수 있다. 조사에 의하면 미국의 경우 일 년 평균 약 7,000 km의 파이프가 교체되며 새로 세워지는 파이프는 약 21,000 km라고 한다. 이중에 100 km당 일 년에 평균 16번의 파이프 파열이 발생한다 (Kirmeyer *et al.* 1994). 캐나다의 경우, 일 년에 평균 160,000,000달러를 파열된 파이프 교체 및 수리에 사용하고 있으며 파이프 파열로 인해서 버려지는 물의 값어치는 약 650,000,000달러이다(National Research Council Canada, 1995). 이러한 사고의 원인들 중에 상수관망에서의 부정류의 영향에 대한 이해 부족을 한가지로 꼽을 수 있으며 관망의 계획, 설계, 관리, 감독에 있어서 부정류의 영향을 반드시 고려해야 할 것이다.

본 연구에서 조압수조가 설치된 상수관망의 부정류를 해석할 수 있는 수치모형이 개발되었고 부정류 효과를 고려하여 파이프의 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있는 신뢰성 모형을 개발하였다. 부정류 해석 모형으로 조압수조가 설치된 상수관망의 부정류 해석을 수행하여 조압수조의 기능성 평가를 하였다. 또한 부정류 효과를 고려한 상수관망의 파괴확률을 산정하여 파이프의 위험도 평가를 하였다.

2. 부정류 해석 모형

부정류 수치해석에 쓰이는 지배방정식은 운동방정식과 연속방정식이며 두 개의 지배방정식 (1)과 (2)를

위한 여러 가지 해법들(Kwon, 2005)이 제시되고 있으나 거의 비슷한 해석결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 상수관의 부정류 해석을 위해 특성선법(the method of characteristics)을 이용한 수치모형(Karney and McInnis, 1992; Watters, 1984)이 사용되었다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (1)$$

$$\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

여기서 H 는 위압수두(piezometric head), Q 는 유량, c 는 압력파의 속도, A 는 파이프의 단면적, D 는 관경, g 는 중력가속도, 그리고 f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. L_1 이 운동방정식을 L_2 가 연속방정식을 의미한다면, 이들의 선형방정식, $L = L_1 + \lambda L_2$ (λ 는 Lagrangian multiplier)은 다음 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Chaudhry, 1979; Watters, 1984; Wiley and Streeter, 1993).

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3)$$

λ 를 결정하고 간단한 수학적 기법을 이용하면 Eq. (3)은 아래와 같은 Eqs. (4) and (5)와 같이 정리된다 (Kwon, 2005).

$$\left(Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n \right) + \frac{gA}{c} (H_i^{n+1} - H_{i-1}^n) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| = 0 \quad (4)$$

$$\left(Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^n \right) - \frac{gA}{c} (H_i^{n+1} - H_{i+1}^n) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| = 0 \quad (5)$$

여기서 윗 첨자는 시간변수를 아래 첨자는 공간변수를 의미한다. 특성선법의 경우 다음 Eq. (6)과 같은 수렴조건(Courant stability condition)을 반드시 만족해야만 한다.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{c} \quad (6)$$

본 연구에서는 수렴조건으로 관계식 $c \Delta t / \Delta x = 1$ 이

Table 1. Properties of Pipe Network

Pipe No.	Length (m)	Diameter (cm)	Junction No.	Demand (m^3/s)
1	550	100	J-1	0.0
2	400	50	J-2	0.05
3	150	50	J-3	0.06
4	700	50	J-4	0.07
5	700	50	J-5	0.12
6	150	30	J-6	0.0
7	400	30	J-7	0.08
8	600	40	J-8	0.0
9	600	40	J-9	0.1
10	400	100	J-10	0.0
11	250	50	J-11	0.09
12	250	50	J-12	0.0
13	150	30	J-13	0.0
14	150	50	J-14	0.0
15	200	50		

사용되었으며 마찰계수 f 는 모든 파이프에 대해서 0.03 이 적용되었다. Table 1은 본 논문에서 사용된 파이프의 길이, 직경, 유량 그리고 분기점에서의 배출유량을 보여준다. Fig. 1과 같은 상수관망에서 각 분기점의 유출밸브가 선형적으로 닫힌다고 가정하여 부정류 해석을 수행하였다.

3. 조압수조(Surge Tank) 해석 모형

여러 종류의 조압수조 중에서 가장 널리 사용되는 것은 단방향(One-Way) 조압수조와 양방향(Two-Way) 조압수조이다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 양방향 조압수조가 설치되었다고 가정하고 부정류 수치해석을 수행하였다. 양방향 조압수조는 위압수두가 적정선 보다

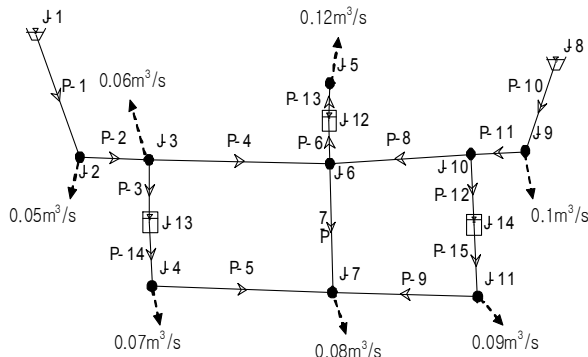


Fig. 1. Pipe Network with Surge Tank

낮아졌을 경우와 높을 경우, 두 경우 모두 작동하며 check valve가 탱크의 오리피스를 열고 닫음으로 인해서 적정압력을 유지시킨다. 부정류 수치해석을 위한 양방향 조압수조의 기본 방정식과 경계조건은 아래와 같다. 먼저 조압수조의 유출유량은 오리피스 유량공식인 Eq. (7)로 산정할 수 있다(Kwon, 2007).

$$Q_s = C_o A_n \sqrt{2g(h_s + Z_s - H_p)} \quad (7)$$

여기서 C_o 는 오리피스 계수(0.7), A_n 는 노즐면적 ($0.02m^2$), h_s 는 조압수조의 위압수두(10m)이고 Eq. (8)과 같다. Z_s 는 조압수조의 위치수두 그리고 H_p 는 노즐이 위치한 곳의 파이프 압력이다. 만약 $(h_s + Z_s - H_p)$ 가 0보다 크면 탱크의 물이 방출되고 0보다 작으면 파이프의 물이 탱크로 유입된다. 탱크의 물이 방출될 때 탱크의 새로운 수두는 아래와 같다.

$$h_s = h_{s_0} - \frac{\Delta t}{A_s} Q_s \quad (8)$$

h_{s_0} 는 조압수조의 초기 수두높이이다. 그리고 경계조건, $Q_{1,J}^{n+1} + Q_s = Q_{2,1}^{n+1}$ 과 를 적용하면 Eq. (7)은 Eq. (9)와 같이 정리된다. $H_{1,J}^{n+1} = H_{2,1}^{n+1} = H_p$

$$(H_p)^2 + (2K + 2L^2g)H_p + K^2 - 2L^2g(h_s + Z_s) = 0 \quad (9)$$

여기서 $K = (C_n - C_p)/(C_{a1} + C_{a2})$ 그리고 $L = (C_o A_n)/(C_{a1} + C_{a2})$ 이다.

여기서 C_a , C_p , 그리고 C_n 은 앞서 설명한 특성선법에 의해서 아래 Eqs. (10), (11), and (12)와 같이 정리된다.

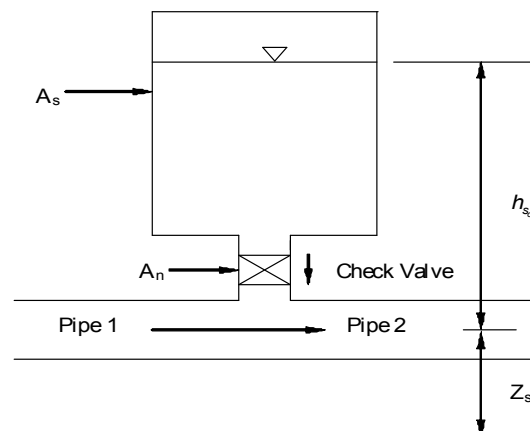


Fig. 2. Schematic of Surge Tank

$$C_{a1} = \frac{gA_1}{c}, C_{a2} = \frac{gA_2}{c} \quad (10)$$

$$C_p = Q_{1,J}^n + \frac{gA_1}{c} H_{1,J}^n - \frac{f \Delta t}{2D_1 A_1} Q_{1,J}^n |Q_{1,J}^n| \quad (11)$$

$$C_n = Q_{2,1}^n + \frac{gA_2}{c} H_{2,1}^n - \frac{f \Delta t}{2D_2 A_2} Q_{2,1}^n |Q_{2,1}^n| \quad (12)$$

여기서 $H_p = (-b + \sqrt{b^2 - 4c})/2$ 이고, $b = 2K + 2L^2g$, $c = K^2 - 2L^2g(h_s + Z_s)$ 이다. 그리고 $(h_s + Z_s - H_p)$ 가 0보다 작을 때, 경계조건은 $Q_{1,J}^{n+1} - Q_s = Q_{2,1}^{n+1}$ 이며 아래와 같은 조압수조의 유량공식이 성립된다.

$$Q_s = C_o A_n \sqrt{2g(h_s - Z_s - H_p)} \quad (13)$$

파이프의 압력으로 인해서 물이 수조로 유입될 때 수조의 수두는 아래 Eq. (14)와 같다. Eq. (13)은 아래 Eq. (15)와 같이 정리된다.

$$h_s = h_{s_o} + \frac{\Delta t}{A_s} Q_s \quad (14)$$

$$(H_p)^2 + (2K - 2L^2g)H_p + M^2 + 2L^2g(h_s + Z_s) = 0 \quad (15)$$

위 식에서 $K = (C_n - C_p)/(C_{a1} + C_{a2})$, $L = (C_o A_n)/(C_{a1} + C_{a2})$, 그리고 $M = (C_p - C_n)/(C_{a1} + C_{a2})$ 이다. 따라서 최종 $H_p = (-b - \sqrt{b^2 - 4c})/2g$ 가 되고 여기서 $b = 2K - 2L^2g$, $c = M^2 + 2L^2g(h_s + Z_s)$ 이다.

CASE 1은 J-2,3,4,5,7,9,11의 유출밸브가 0.2초, 0.5초, 1.0초에 걸쳐서 닫힌다고 가정하였다. 그리고 조압수조가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우를 구분하여 수치 해석 하였다. Table 2와 같이 CASE 2, 3, 4는 두 개의 분기점에 있는 유출밸브가 0.2초, 0.5초, 1.0초에 닫힐 경우를 수치해석 하였으며 조압수조가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우를 수치해석 하였다.

부정류 해석에서 시간증분 Δt 는 0.01초 그리고 공간 증분 Δx 는 15.0 m을 사용하였다. 그리고 각 경우마다 조압수조가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 부정류 해석결과를 비교 분석하였다. Fig. 3은 J-4, J-5, J-7, J-11에서 만들어진 수격현상으로 인한 압력유동을 J-6 지점에서 측정한 수치해석 결과이다.

Table 2. Cases of Unsteady Analysis

Valve Closure Time=0.2s, 0.5s, 1.0s			
CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
J-2	J-2, J-3	J-4, J-5	J-9, J-5
J-3	J-2, J-4	J-4, J-7	J-9, J-7
J-4	J-2, J-5	J-4, J-9	J-9, J-11
J-5			
J-7			
J-9			
J-11			
42cases	18cases	18cases	18cases

조압수조가 있는 경우는 현저히 압력감쇠가 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 부정류 수치해석 결과를 통해서 조압수조가 압력을 크게 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

4. 신뢰성 해석 모형

신뢰성 해석은 여러 가지 가정과 해석방법의 차이에 의해서 Level II와 Level III로 분류된다. Level III은 난수를 발생시켜 구조물의 안정성에 영향을 주는 확률변수들을 이용하여 파괴확률을 산정한다. Monte-Carlo Simulation이 Level III의 일종이다. Level II는 저항함수와 하중함수를 이용한 신뢰함수(reliability function)를 수립하고 파괴확률을 산정하는 방법이다. 이 방법에서 확률변수들은 정규분포와 같은 특정한 분포함수를 따른다고 가정한다(Ang and Tang, 1984; Modarre, 1999; Frankel, 1988). Level II는 하중함수와 저항함수의 통계적 특성과 분산, 평균의 계산에서 비선형성의 존재에 따라 FORM (First-Order Reliability Method)과 SORM (Second-Order Reliability Method)로 분류된다. FORM은 파괴면(failure surface)의 설계점(design point)에 대한 반복계산의 존재여부에 따라서 FMA (First-order Mean value Approach)와 FDA (First-order Design point Approach)로 분류된다. 하지만 FMA와 FDA는 저항함수와 하중함수가 독립적이고 확률변수들이 모두 정규분포를 따른다는 조건에서만 사용이 가능하다. 따라서 정규분포를 따르지 않는 확률변수들을 해석하기 위해서 AFDA (Approximate Full Distribution Approach)가 사용되었다. 본 연구에서는 신뢰함수가 아래 Eq. (16)과 같이 Barlow 식에 의해서 수립되었다.

$$Z = 2\sigma_a t - pD \quad (16)$$

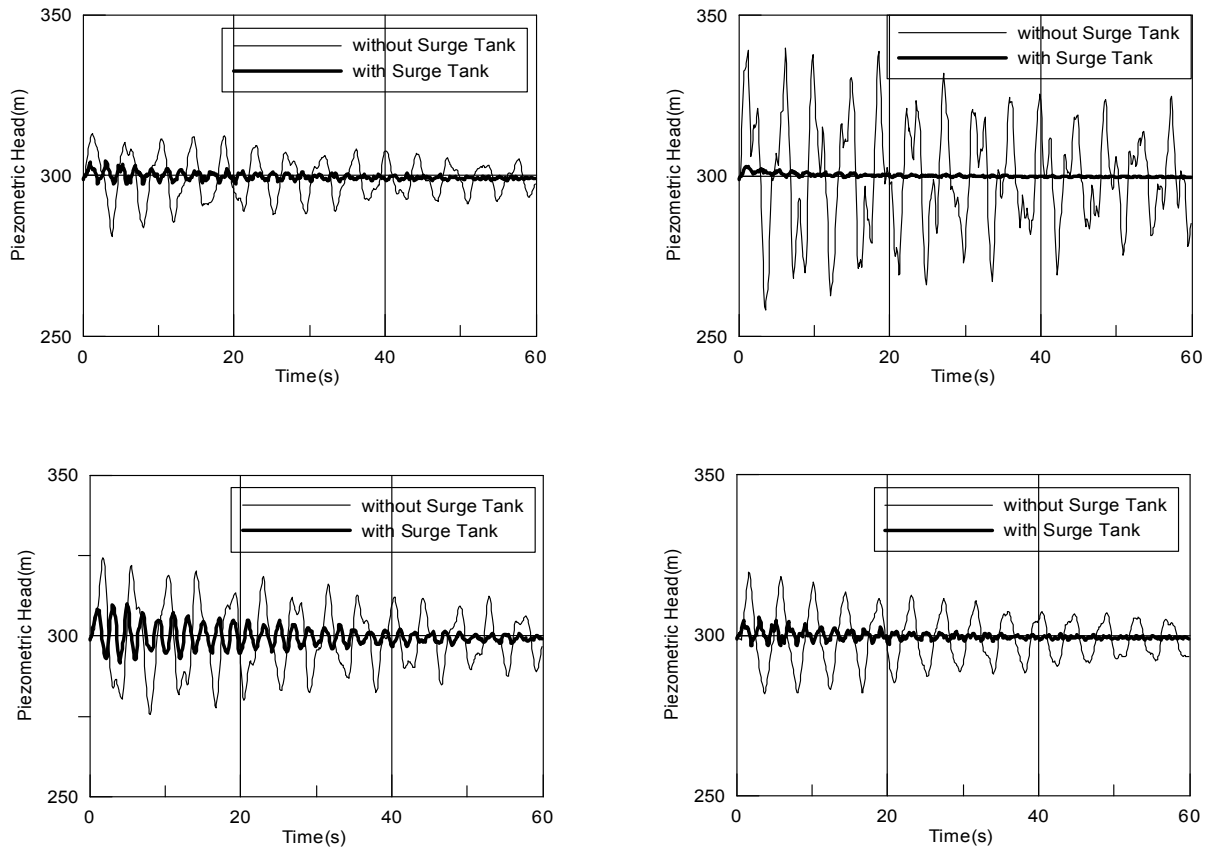


Fig. 3. Pressure-Time History at (a)J-4 (b)J-5 (c)J-7 (d)J-11 with and without Surge Tank (Valve Closure Time=1.0s)

Table 3. Statistical Properties of Random Variables for Reliability Function(P-7)

	σ_a (kg/cm ²)	t(cm)	D(cm)	p (kg/cm ²)	
				w/o surge tank	w/ surge tank
Mean	1200	0.35	30	16.8	11.7
COV	0.1	0.1	0.1	0.611	0.513
Distribution	Normal	Normal	Normal	Gumbel	Gumbel

σ_a 는 파이프(P-7)의 허용응력, t 는 파이프 두께, p 는 파이프내의 압력, 그리고 D 는 파이프의 직경을 의미한다. Table 3은 신뢰함수의 확률변수들에 대한 통계적 특성을 보여준다.

신뢰함수에서 $Z < 0$ 은 파괴상태, $Z > 0$ 는 안전상태, 그리고 $Z = 0$ 는 한계상태를 의미한다. 따라서 신뢰함수는 Eq. (17)을 사용하여 $Z < 0$ 에 해당하는 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (17)$$

본 연구에서는 파이프 파괴확률 산정을 위해서 FORM의 일종인 Level II AFDA방법이 사용되었다.

Fig. 4에서 신뢰지수(reliability index) β 은 원점에서 파괴면의 설계점(design point)에 이르는 최단거리이며 반복계산에 의해서 구해진다. β 를 구할 때 신뢰지수의 불변성이 요구되어지기 때문에 정규화과정(normalization process)이 필수적이다.

먼저 방향여현(directional cosine)은 Eq. (18)과 같이 구하고 Eq. (19)의 새로운 설계점을 산정하기 위해 사용된다. 첫 번째 반복계산에서는 확률변수의 평균값이 설계점으로 사용된다.

$$\alpha_{x_i}^* = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)_*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)_*^2}} \quad (18)$$

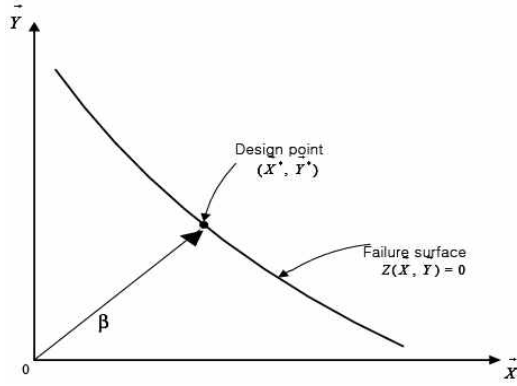


Fig. 4. Design Point on Failure Surface

여기서 $x'_i = (x_i - \mu_{x_i}) / \sigma_{x_i}$, $x_i = \sigma_a, t, p, D$, 그리고 μ_{x_i} 와 σ_{x_i} 는 각 확률변수들의 평균과 표준편차이다. 따라서 설계점은 다음 Eq. (19)와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_a^* = \mu_{\sigma_a} - \alpha_{\sigma_a}^* \beta \sigma_{\sigma_a} \quad (19a)$$

$$t^* = \mu_t - \alpha_t^* \beta \sigma_t \quad (19b)$$

$$p^* = \mu_p^N - \alpha_p^* \beta \sigma_p^N \quad (19c)$$

$$D^* = \mu_D - \alpha_D^* \beta \sigma_D \quad (19d)$$

여기서 μ_p^N 과 σ_p^N 는 파이프 내압의 등가정규분포 (equivalent normal distribution)의 평균과 표준편차이며 Eq. (20)과 같이 Rosenblatt 변환으로 산정할 수 있다.

$$\mu_p^N = p^* - \sigma_p^N \Phi^{-1} [F_p(x^*)] \quad (20a)$$

$$\sigma_p^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_p(x^*)]\}}{f_p(x^*)} \quad (20b)$$

여기서 $F_p(x)$ 와 $f_p(x)$ 는 Eq. (21)과 같이 파이프 내압의 Gumbel 분포함수를 의미한다.

$$F_p(x) = \exp[-e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (21a)$$

$$f_p(x) = \kappa \exp[-\kappa(x-\lambda) - e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (21b)$$

여기서 $\kappa = \pi / (\sqrt{6} \sigma_p)$, $\lambda = \mu_p - (0.577 / \kappa)$ 이다. 만약 Eq. (19)를 신뢰함수 Eq. (16)에 삽입하면 한계상태방정식은 아래 Eq. (22)와 같이 된다.

$$2(\mu_{\sigma_a} - \alpha_{\sigma_a}^* \beta \sigma_{\sigma_a})(\mu_t - \alpha_t^* \beta \sigma_t) - (\mu_p^N - \alpha_p^* \beta \sigma_p^N)(\mu_D - \alpha_D^* \beta \sigma_D) = 0 \quad (22)$$

적절한 β 을 구한 후 새로운 설계지점은 β 을 Eqs. (18), (19)에 삽입함으로써 얻을 수 있다. β 가 적정한 값에 수렴할 때 까지 반복계산이 이루어져야 한다. 파이프의 허용응력과, 두께, 그리고 직경은 제품이 출고될 때 여러 불확실성을 내포하고 있지만 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그리고 파이프 내압의 경우 많은 불확실성이 내포되어 있으며 그 분포함수를 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 상수관망에 임의의 수격현상을 재현하고 이때 만들어지는 최대압력파고(maximum pressure wave height)의 확률분포를 규명하였다. Fig. 5는 상수관망에서 수격현상으로 발생한 최대압력파고는 Gumbel 분포와 일치하는 것을 보여준다.

5. 파이프의 파괴확률 해석결과

조압수조가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우 각 48경우를 수치해석 하여 총 96번의 부정류 수치해석이 수행되었다. Fig. 5(a)는 조압수조가 설치되지 않은 48경우의 부정류 수치해석결과 나타난 최대압력파고의 확률분포함수를 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 조압수조가 설치된 48경우의 부정류 수치해석결과를 분포함수로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 조압수조가 설치된 경우 최대압력파고의 평균이 20 m보다 작게 나타났고 40 m보다 큰 수치는 나타나지 않았다. 상수관망에 설치된 조압수조가 부정류로 인한 압력파고를 크게 감소시켰다.

Fig. 6은 Monte-Carlo simulation(MCS)에 의해서 산출된 압력데이터를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 조압수조가 설치되지 않았을 경우에 산출된 압력데이터의 분포와 이론적 분포를 비교한 것이고 Fig. 6(b)는 조압수조가 설치되었을 경우에 산출된 압력데이터 분포와 그에 따른 이론적 분포를 비교한 것이다. Fig. 7은 Monte-Carlo simulation에 의해서 산정된 파괴확률을 보여주고 있다. 첫 번째 그림은 Fig. 7(a)는 조압수조가 설치되지 않았을 경우이며 신뢰함수 Z 가 $-\infty$ 에서 0인 곳까지 적분을 하면 파괴확률은 14.2 %가 된다. 또한 Fig. 7(b)는 조압수조가 설치되었을 경우이며 신뢰함수가 $-\infty$ 에서 0인 곳까지 적분을 하면 파괴확률은 2.4 %가 된다. Table 4는 AFDA로 산정한 파괴확률과 MCS로 산정한 파괴확률을 보여주고 있다. 표에서 볼 수 있듯이 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다.

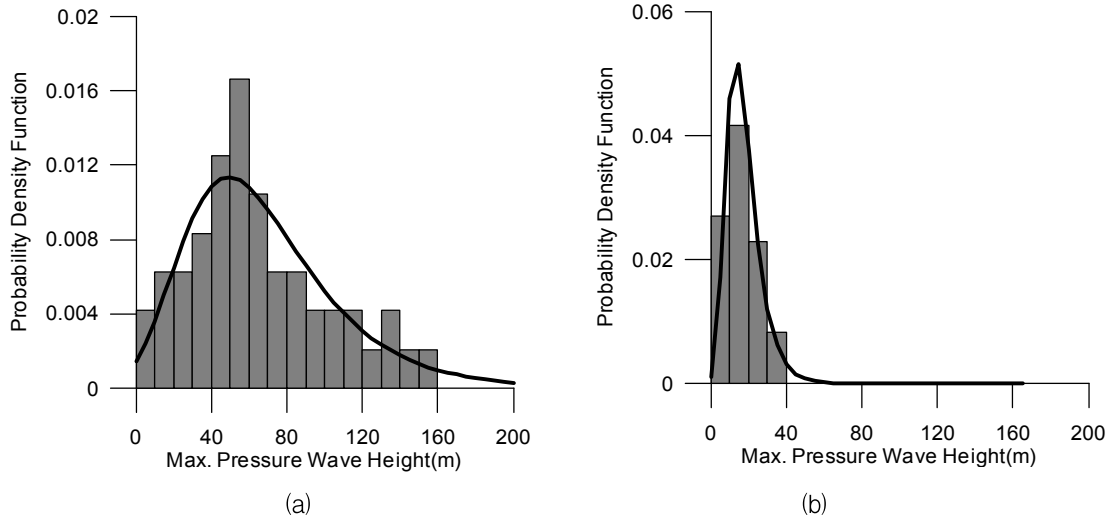


Fig. 5. Statistical Distribution of the Maximum Pressure Wave Heights after Generating Water Hammer in Pipe Network (a) without Surge Tank (b) with Surge Tank

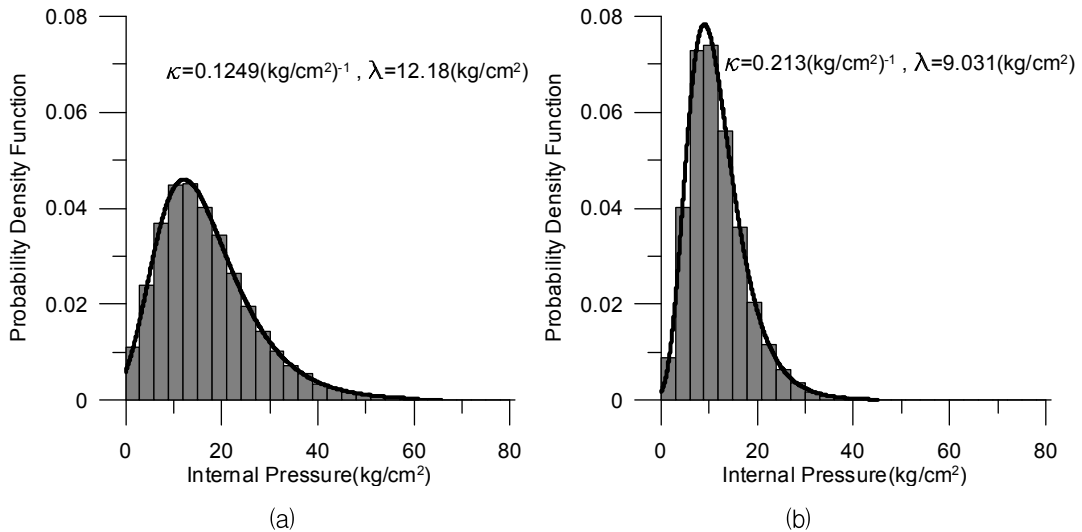


Fig. 6. Comparison of Theoretical Distribution for Internal Pressure with Simulated Pressure Data (a) without Surge Tank (b) with Surge Tank

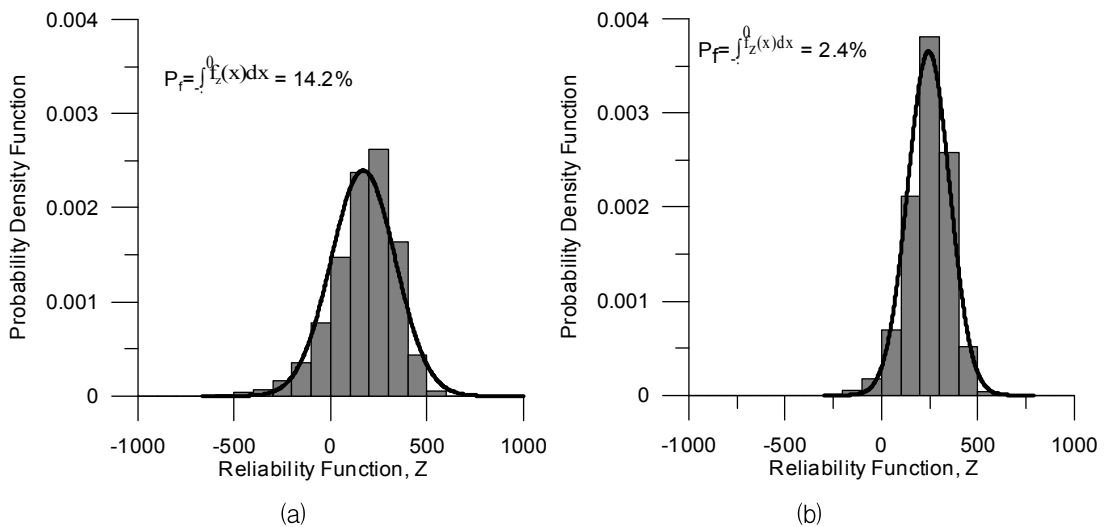


Fig. 7. Probability Distribution of Reliability Function Calculated by MCS Model (a) without Surge Tank (b) with Surge Tank

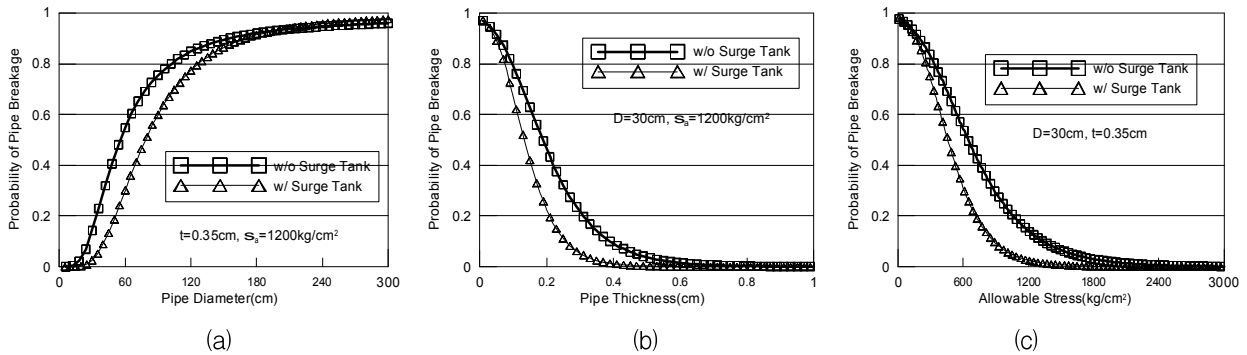


Fig. 8. Probability of Pipe Breakage for P-7 according to (a)Pipe Diameter (b)Pipe Thickness (c)Allowable Stress with and without Surge Tank

Table 4. Comparison of Probability of Pipe Breakage

	AFDA		MCS	
	w/o surge tank	w/ surge tank	w/o surge tank	w/ surge tank
Pf (%)	14.2	2.5	14.2	2.4

Fig. 8(a)는 AFDA에 의해서 산정된 파이프 직경에 따른 7번 파이프의 파괴확률을 보여주고 있다. 굵은 실선은 상수관망에 조압수조가 설치되지 않았을 경우의 파괴확률이며 얇은 실선은 조압수조가 설치되었을 경우의 파괴확률이다. 이때 파이프 두께의 평균은 0.35 cm이며 허용응력의 평균은 1,200 kg/cm²이다. 그림에서 볼 수 있듯이 파이프의 평균 직경이 30 cm일 때 조압수조가 설치되지 않은 경우 파괴확률은 14.2 %이며 조압수조가 설치되었을 경우 파괴확률은 2.5 %였다. 만약 7번 파이프의 직경이 40 cm로 커진다면 파괴확률은 조압수조가 없을 경우 약 40 % 조압수조가 있을 경우 약 13 %로써 더 큰 차이를 보이게 된다. Fig. 8(b)는 파이프 두께에 따른 7번 파이프의 파괴확률을 보여주고 있다. 7번 파이프 두께의 평균값인 0.35 cm에서 파이프의 파괴확률은 조압수조가 없을 경우 14.2 %이고 조압수조가 설치되었을 경우 약 2.5 %이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 만약 7번 파이프의 두께가 0.6 cm까지 두꺼워진다고 하더라도 조압수조가 설치되지 않은 경우 약 2 %의 파괴확률을 내포하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 파이프의 허용-응력에 따른 7번 파이프의 파괴확률을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 허용응력이 2,000 kg/cm²라고 가정해도 조압수조가 설치되지 않은 경우 파괴확률은 존재하는 것으로 나타났다. 반면에 조압수조가 설치된 경우 파이프 파괴확률은 급격히 저하되고 1,200 kg/cm²부터는 거의 파괴확률이 존

재하지 않는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 파이프의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 해석을 수행하였다. 먼저 부정류 해석결과를 고려하여 기존의 개발된 특성선법에 오리피스 공식을 응용한 부정류 수치모형을 개발하였다. 그리고 AFDA 방법을 이용한 파이프의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 모형이 개발되었다. 먼저 개발된 부정류 수치모형을 사용하여 조압수조가 있는 경우와 없는 경우 작은 상수관망의 부정류 해석을 수행하였다. 부정류 수치해석 결과를 신뢰성 해석모형에 사용하여 상수관의 파괴확률을 조압수조의 유무에 따라 계산하였다. 자세한 결과는 다음과 같다.

- 1) 96번의 부정류 수치해석결과를 통해서 부정류로 인한 최대압력파고는 Gumbel 분포와 잘 일치하는 것으로 나타났으며 확률변수인 파이프내의 압력에 대한 분포함수로써 사용되었다.
- 2) 본 논문에서 가정한 작은 상수관망을 주어진 조건 하에서 신뢰성 해석을 수행한 결과, 직경이 30 cm인 7번 파이프의 파괴확률은 조압수조가 설치되었을 경우(2.5 %)가 조압수조가 설치되지 않았을 경우(14.2 %)보다 훨씬 작은 것으로 나타났다.
- 3) 부정류 수치해석결과 조압수조가 설치된 경우 부정류로 인한 압력유동을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 신뢰성해석 결과로부터 조압수조가 있는 경우 파이프의 파괴확률이 현저하게 낮아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 상수관망의 파괴확률을 낮추기 위해서는 압력감쇠장치가 꼭 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 개발된 부정류 수치모형과 신뢰성 모형은 파괴확률이 상대적으로 높은 파이프를 미리 예측

할 수 있고 취약한 부분을 파악하여 설계 및 관리 감독에 사용될 수 있다. 또한 우선적으로 교체 및 보수되어야 할 파이프를 예측 할 수 있을 것이다. 부정류로 인한 파이프의 파괴나 누수에 대한 피해를 최소화하기 위해 압력감쇠장치가 설치된다면 상수관망의 장기적 관리대책으로써 보다 안전하고 효율적인 운용 및 관리가 될 것이다. 앞으로 본 연구에서 개발된 신뢰성 해석 모형을 실제 상수관망의 자료를 통하여 비교, 검토하는 검증작업이 수행된다면 보다 더 발전된 신뢰성 모형이 될 것이다.

참 고 문 헌

Ang, A. and Tang, W.H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Chaudhry, H.M. (1979). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Frankel, E.G. (1988). *Systems Reliability and Risk Analysis*. Klume Academic Publishers.

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.

Kirmeyer, G., Richards, W. and Smith, C.D. (1994). *An Assessment of Water Distribution Systems and Associated Research Needs*. Denver, CO: AWWARF.

Kwon, H.J. (2005). *Transient flow in water distribution system*. Ph.D. dissertation, University of Southern California, Los Angeles, CA.

Kwon, H.J. (2007). "Computer simulations of

transient flow in a real city water distribution system." *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 11, No. 11, pp. 43-49.

Kwon, H.J. and Lee, C.E. (2008). "Reliability analysis for the probability of pipe breakage." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 22, No. 6, pp. 609-617.

Mailhot, A., Pelletier, G., Noel, J-F., and Villeneuve, J-P. (2000). "Modeling the evolution of the structural state of water pipe networks with brief recorded pipe break histories: Methodology and application." *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 10, pp. 3053-3062.

Modarres, M. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis*. Marcel Dekker.

National Research Council Canada (1995). *Water Main Breaks Data on Different Pipe Materials for 1992-1993*. Canada.

Watson, T.G., Christian, C.D., Mason, A.J., Smith, M.H., and Meyer, R. (2004). "Bayesian-based pipe failure model." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 6, No. 4, pp. 259-264.

Watters, G.W. (1984). *Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipe lines*. Butterworths, Boston.

Wylie, B.E. and Streeter, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. FEB Press, Ann Arbor, Mich.

논문번호: 09-024	접수: 2009.03.02
수정일자: 2009.03.30/08.21	심사완료: 2009.08.21