Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.23, No.3, pp.295-303 June, 2009

상하수도학회지, 논문
23권 3호, pp.295-303, 6월, 2009

Surge Tank가 설치된 상수도관망에서 부정류를 고려한 불능확률 산정

Calculation of Probability of System Failure for Pipe Network with Surge Tank regarding Unsteady Flow

권혁재 · 이철응

Kwon, Hyuk Jae · Lee, Cheol-Eung

강원대학교 토목공학과

(2009년2월9일 접수 ; 2009년 6월4일 수정 ; 2009년 6월8일 채택)

Abstract

In the present study, a reliability analysis calculating the probability of system failure has been performed using cut set and results of numerical analysis for unsteady flow in pipe. Especially, the probability of system failure has been evaluated regarding the effect of valve closure which is a really important activity in operation of piping system. In spite of small amount of demand, it was found that fast valve closure can generate high probability of system failure. Furthermore, it was confirmed that surge tank can reduce the unsteady effects and probability of system failure in water distribution system. From the results, it was found that the unsteady flow has a significant effect on the probability of system failure Furthermore, it was able to find which pipe or cut set has high probability of system failure. So it could be used to determine which pipe or cut set has a priority of repair and replacement. Therefore, reliability analysis regarding unsteady flow has to be performed for the planning, designing, maintenance, and operation of piping system.

Key words : **Unsteady flow, Pipe network, Reliability analysis, Cut set, Surge Tank**

주제어 : **부정류, 상수도관망, 신뢰성해석, 컷 집합, Surge Tank**

1. 서 론

상수도관망은 도시 사회에 없어서는 안 될 필수적인 구조물이다. 이러한 관망을 통해서 계획된 유량이 시민에게 안전하게 전달된다. 그러나 여러 가지 원인들에 의해서 미리 계획 되었던 유량이 전혀 도달하지 못하거나 혹은 원하는 양보다 적게 계획지점에 도달하는 경우가 있다. 이러한 원인들 중에는 파이프의 노화로 인한 누수, 파손, 그리고 파이프 내벽의 부식 및 이물질의 퇴적 등이 있을 수 있다. 또한, 파이프 매설지역의 여러 가지 환경들 그리고 파이프 매설 당시의 많은 공사여건 및 환경 등이 이러한 상수도관망 시스템의 역할 불능상태(state of system failure)를 만들게 된다.

일부 연구자들은 상수도관망의 구조적 상태에 대한 평가로서 사용기간 동안 파이프가 파손될 확률을 예측하는 통계적 모델을 제시하여 왔다. 하지만 대부분의 이러한 모델들은 실제 도시 상수도관망 파손을 정확히 예측하지 못하고 있다. 그 이유로는 파이프 파손에 대한 연구 자료로써 파이프 매설 당시부터 측정한 파손횟수, 파손지점, 날짜 및 시각에 대한 기록이 필요하지만 이런 경우가 극히 드물고 파이프에 대한 일반자료나 기록 또한 제한적이다. 이러한 제약조건을 극복

* Corresponding author Tel:+82-33-250-6241, Fax:+82-33-244-6239, E-mail: hyukjae68@hotmaill.com(Kwon, H.J.)

하기 위하여 Mailhot et al. (2000)는 아주 짧은 파이프 파손기록이 있는 도시 상수도관망을 위한 통계적 모델의 계수들을 평가하는 방법을 제시하였다. 그리고 파이프 파손측정 기록을 갖고 있는 실제 도시의 상수도관망에 대한 응용 방법을 보여주었다. Watson et al. (2004)은 Bayesian 방법으로 상수도관망의 관리와 감독, 그리고 여러 가지 의사 결정에 있어서 공학적 경험에 의존해야 하는 부분의 불확실성 인자들을 표현할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히, 상수도관망의 장기적 관리에 관련한 부분에 중점을 두고 불연속적 사건의 일종인 상수도관 파손에 대한 기초적 연구결과를 보여준다. Kirmeyer et al. (1994)에 의하면 미국의 경우 상수도관망의 총 연장 길이는 1,400,000 km이며 이중 100 km당 일 년에 평균 16번의 파이프 파손이 일어난다고 한다. 또한, National Research Council Canada (1995)의 보고서는 캐나다 21개 도시들을 대상으로 1992년과 1993년 사이에 일어난 실제 상수도관의 파손에 대한 자세한 기록을 보여준다. 파이프의 노화로 인한 파손과 누수 현상은 많은 경제적 부담을 주게 되고 적정한 교체시기를 놓칠 경우 경제적 손실이 계속 누적 되게 되므로 파이프의 불능상태가 되기 이전에 교체를 해주는 것이 중요한 관건이다.

여러 가지 원인이 위와 같이 노후 된 상수도관의 파손을 야기하나 그중에서도 주목해야 할 원인이 부정류의 영향일 것이라는 연구결과가 있다 (Kwon and Lee, 2008a,b). 본 논문에서는 부정류에 대한 수치해석 결과를 신뢰성 해석 모형과 결합하여 불능확률(probability of system failure)에 미치는 부정류의 영향을 정량적으로 확인하였다. 컷 집합(cut set) 개념 (Ang and Tang, 1984)을 함께 도입하여 상수도관망의 신뢰성 해석을 수행하였다. 특히 상수도관망에서 부정류에 대한 Surge Tank의 영향을 수치해석 하였으며 이 결과를 고려하여 신뢰성 해석을 하였다. 본 논문에서 사용되어진 해석방법은 시스템의 파손이나 불능의 기록이 없거나 혹은 기록에 신빙성이 결여 된 상수도관의 해석에 적합할 것이다.

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 상수도관의 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 H는 위압수두 (piezometric head), Q는 유량, c는 압력파의 속도, A는 파이프의 단면적, D는 관경, g는 중력가속도, 그리고 f는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. L_1이 운동방정식을 L_2가 연속방정식을 의미한다면, 이들의 선형방정식, $L=L_1+\lambda L_2$(λ는 Lagrangian multiplier)은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Chaudhry, 1979; Watters, 1984; Wiley and Streeter, 1993).

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

λ를 결정하고 간단한 수학적 기법을 이용하면 식 (3)은 아래와 같은 식 (4)와 (5)와 같이 정리된다. (Kwon, 2005).

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

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

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

$$\frac{\triangle t}{\triangle x}\le\frac{1}{c} \quad (6)$$

본 연구에서는 수렴조건으로 관계식 $c\triangle t/\triangle x=1$이 사용되었으며 마찰계수$f$(Darcy-Weisbach)는 모든 파이프에 대해서 0.01이 적용되었다.

Table 1은 본 논문에서 사용된 파이프의 유량과 분류지점(junction)에서의 위압수두를 나타낸다. Fig. 1과 같은 상수도관망에서 J-3의 유출밸브가 선형적으로 닫혔다 열린다고 가정하여 부정류 해석을 수행하였다. 첫 번째 경우는 밸브가 0.5초에 닫혔다 열린 경우, 두 번째 경우는 밸브가 정확히

상하수도학회지, 논문
23권 3호, pp.295-303, 6월, 2009

Table 1. Discharge and Piezometric head at steady state condition

Pipe No.	Discharge (m^3/s)	Junction No.	Piezometric head(m)
1	0.170	J-1	430.0
2	0.063	J-2	429.8
3	0.105	J-3	428.4
4	0.007	J-4	429.8
5	0.107	J-5	428.4
6	0.092	J-6	429.9
7	0.199	J-7	430.0
8	0.107	J-8	428.4
9	0.038		

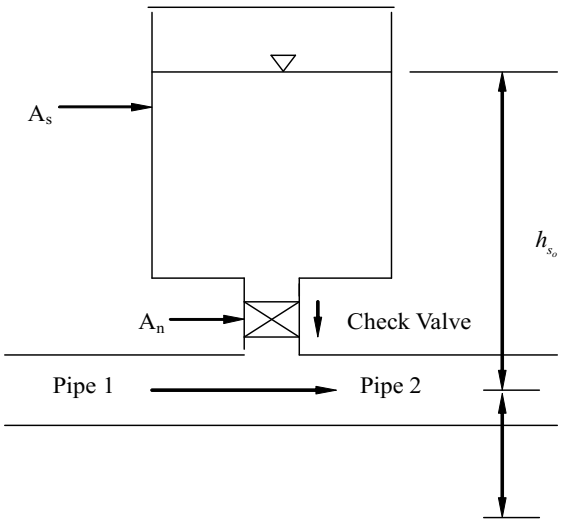

Fig. 2. Schematic of Two-Way Surge Tank

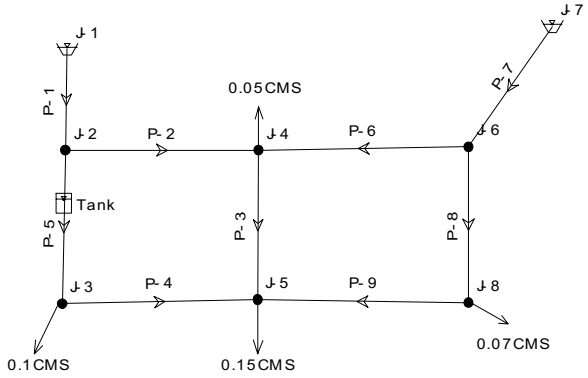

Fig. 1. Pipe network with Surge Tank

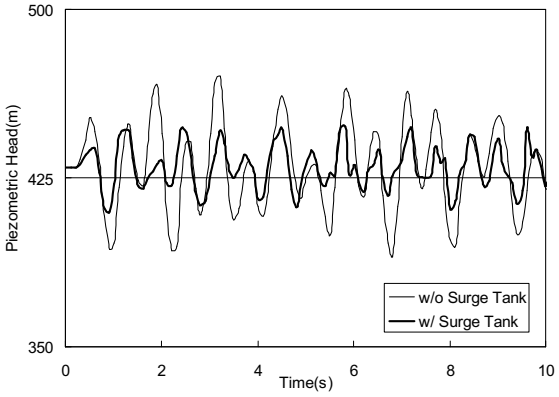

Fig. 3. Piezometric head at J-4 with and without Surge Tank

1초에 닫혔다 열린 경우이다. 그리고 세 번째 경우는 밸브가 정확히 2초에 닫혔다 열린 경우이다. 즉, CASE 1의 경우 J-3에서의 배출유량 $0.1m^3/s$는 0.5초 만에, CASE 2는 1초 만에, 그리고 CASE 3은 2초 만에 배출유량이 $0.1m^3/s$에서 $0m^3/s$로 다시 $0.1m^3/s$로 선형적 변화를 한다고 가정하고 부정류 해석을 하였다. 그리고 각 case마다 Surge Tank가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우를 해석하였다. 부정류 해석에서 시간증분 $\triangle t$는 0.01초 그리고 공간증분 $\triangle x$는 15.0m을 사용하였다. 그리고 각 경우마다 **Fig. 2**와 같은 가상의 Surge Tank가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 부정류 해석결과를 비교 분석하였다. **Fig. 3**과 **4**는 J-4와 J-5에서의 부정류 효과로 인한 압력유동을 보여주고 있다. Surge Tank가 있는 경우는 현저히 압력감쇠가 일어나는 것을 볼 수 있다. **Fig. 5**와 **6**은 밸브 개폐 속도에 따른 P-4와 P-9에서의 시간에 따른 유량변동을 보여준다. 개폐 속도가 빠를수록 시간에 따른 유량변동은 상당히 커지는 것을 알 수 있다. **Fig. 7**과 **8**은 밸브가 0.5초에 개폐될 경우 P-4와 P-9의 유량변동을 보여주고 있다. Surge Tank가 있는 경우 변동 고저차가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이상의 세 가지 경우에 대한 부정류 수치해석 결과를 통해서 밸브의 개폐 속도가 상수도관망의 압력과 유량변위에 얼마나 큰 영향을 미치는지 알 수 있다.

3. Surge Tank

Surge Tank의 종류에는 여러 가지가 있으나 그 중 가장 널리 사용되는 것이 One-Way Surge Tank와 Two-Way

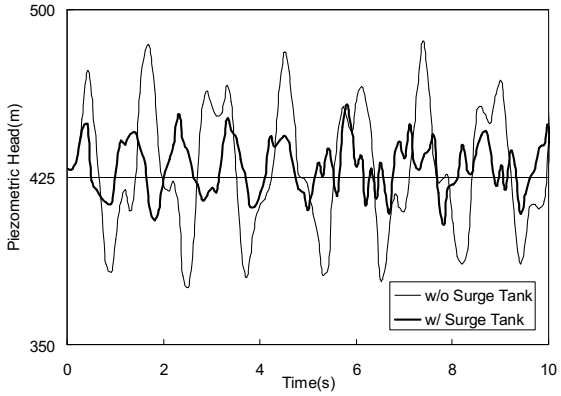

Fig. 4. Piezometric head at J-5 with and without Surge Tank

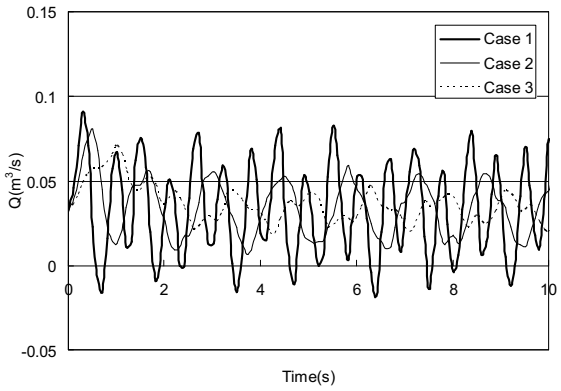

Fig. 5. Discharge at P-4 with three different cases

Surge Tank이다. 본 연구에서는 **Fig. 2**와 같은 Two-Way Surge Tank가 설치되었다고 가정하고 부정류 수치해석을 수행하였다. Two-Way Surge Tank는 위압수두가 적정선 보다 낮아졌을 경우와 높을 경우, 두 경우 모두 작동하며 check valve가 탱크의 오리피스를 열고 닫음으로 인해서 적정압력을 유지시켜준다. 부정류 수치해석을 위한 Two-Way Surge Tank의 기본 방정식과 경계조건은 아래와 같다. 먼저 Surge Tank의 유출유량은 식 (7)로 산정할 수 있다.

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

여기서 C_o는 오리피스 계수, A_n는 노즐면적, h_s는 Surge Tank의 위압수두이고 식 (8)과 같다. Z_s는 Surge Tank의 위치수두 그리고 H_p는 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

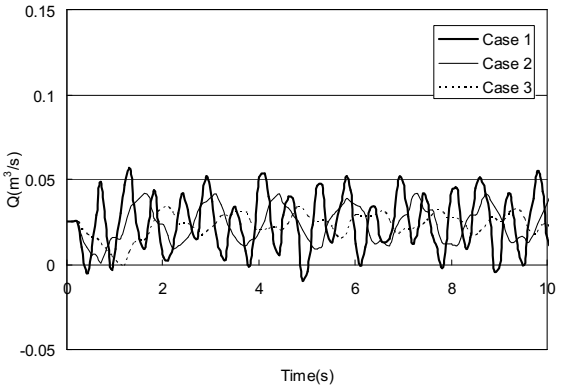

Fig. 6. Discharge at P-9 with three different cases

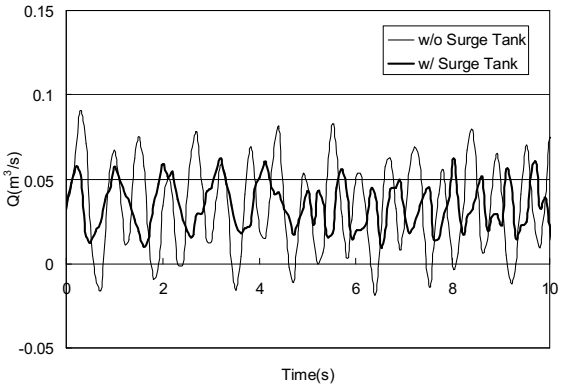

Fig. 7. Discharge at P-4 with and without Surge Tank (CASE 1)

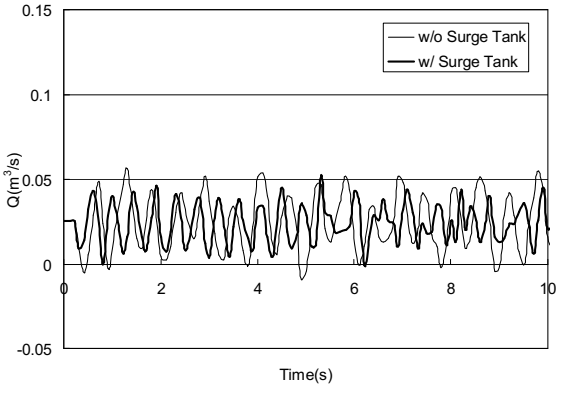

Fig. 8. Discharge at P-9 with and without Surge Tank (CASE 1)

물이 방출될 때 탱크의 새로운 수두는 아래와 같다.

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

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

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

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_n은 앞서 설명한 특성선법에 의해서 아래 식 (10), (11), 그리고 (12)와 같이 규정된다.

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

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

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

여기서 $H_p = (-b + \sqrt{b^2 - 4c})/2$ 이고, $b = 2K + 2L^2 g$, $c = K^2 - 2L^2 g(h_s + Z_s)$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 Surge Tank유량공식이 성립된다.

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

파이프의 압력으로 인해서 물이 탱크로 유입될 때 탱크의 수두는 아래 식 (14)과 같다. 식 (13)은 아래 식 (15)과 같이 정리된다.

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

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

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 $H_p = (-b - \sqrt{b^2 - 4c})/2$가 되고 $b = 2K - 2L^2 g$, $c = M^2 + 2L^2 g(h_s + Z_s)$ 이다.

4. 신뢰성 해석 모형

본 연구에서는 컷 집합 개념을 도입하여 시스템의 불능확률을 산정하였다. 이를 위해 먼저 임의의 대상이 되는 상수도관망 시스템에서 각각의 컷 집합을 설정해야 한다. 상수도관망에서 개별 상수도관은 각각의 유량에 의해 구분될 수 있고 상수도관망을 통한 총 유량은 관망의 특정 컷 집합에 의존하게 된다. 만약 개별 상수도관의 유량이 확정적이라면 상수도관망의 총 유량은 최소 컷 집합의 유량에 의해서 결정되게 된다. 그러나 개별상수도관의 유량에 불확실성이 존재한다면 상수도 관망의 총 유량은 확률론적으로 산정되어야 하며 이 경우 모든 가능한 컷 집합들이 고려되어야 한다. 본 연구에서 컷 집합이란 임의의 지점에 일정유량이 전달될 수 있는 모든 경로의 파이프의 집합을 의미한다. 본 논문에서는 Table 1에 제시된 재원을 갖는 Fig. 1과 같은 상수도관망 시스템을 대상으로 해석하였다. 특히 본 논문에서의 시스템 불능확률은 추출된 컷 집합에 의하여 J-5에 필요유량이 전달되지 않아 상수도관망 시스템의 기능이 올바로 발휘되지 못할 가능성을 의미한다. 본 상수도관망 시스템에서는 Table 2에 제시된 바와 같이 모두 11개의 컷 집합을 추출할 수 있다. 예를 들면, 컷 집합 #2에 속하는 파이프는 파이프 #1, #6, 그리고 #8이다. 이것은 1번, 6번, 8번 파이프 모두가 불능이 된다면 J-5까지 목표유량이 도달하지 못하게 된다는 것을 의미한다. 이와 같은 개념을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 각 컷 집합의 통계적 특성과 분포함수를 알아야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 다음 식 (16)와 같이 각 컷 집합의 유량은 그 컷 집합에 포함된 각각의 파이프 유량의 합으로 정의하였다. 예를 들면, 컷 집합 #2의 유량은 파이프 #1의 유량, 파이프 #6의 유량, 그리고 파이프 #8의 유량을 합한 값이다.

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} q_{ij} \quad (16)$$

여기서, n은 컷 집합에 포함된 파이프의 수, q_{ij}는 파이프의 유량이다. i는 컷 집합의 번호이고 j는 그 컷 집합에 포함된 파이프의 번호이다. 따라서 각 파이프에서의 유량변동이 정규분포를 따른다고 가정하면 각 컷 집합의 평균과 분산은 중심극한정리(central limit theory)에 의하여 다음 식 (17) 및 식 (18)에 의하여 쉽게 산정할 수 있다.

상하수도학회지, 논문
23권 3호, pp.295-303, 6월, 2009

Table 2. Mean discharge and pipe number of the cut set

Cut set No.	Pipe No.	$\mu_Q(m^3/s)$
1	1,7	0.369
2	1,6,8	0.369
3	1,6,9	0.300
4	3,4,9	0.150
5	2,4,6,9	0.200
6	2,5,7	0.369
7	2,4,7	0.269
8	2,5,6,8	0.369
9	2,3,5,9	0.313
10	3,4,6,9	0.242
11	3,4,6,8	0.311

$$\mu_{Q_i} = \sum_{j=1}^{n} q_{ij} \tag{17}$$

$$\sigma_{Q_i}^2 = \sum_{j=1}^{n} \sigma_{q_{ij}}^2 \tag{18}$$

마지막으로 앞에서 언급된 컷 집합 개념과 불능확률의 정의를 이용하면 신뢰성 해석을 위한 다음 식 (19)의 신뢰함수(reliability function)를 수립할 수 있다.

$$Z_i = Q_T - Q_i \tag{19}$$

$Z_i < 0$은 물리적으로 임의의 지점에 요구되는 필요유량 Q_T가 도달되지 않는다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 신뢰함수를 구성하는 모든 확률변수들이 정규분포를 따른다는 가정 하에 $Z_i < 0$이 될, 즉 불능확률을 다음 식 (20)을 이용하여 산정하였다.

$$P_{f_i} = 1 - \Phi(\beta_i) \tag{20}$$

여기서, $\beta_i = \mu_{Z_i}/\sigma_{Z_i}$로 정의되는 신뢰지수(reliability index)이다. 각 파이프의 유량은 부정류 수치해석에서 나온 유량 $Q(t)$를 이용하여 다음 식 (21)로부터 계산하였다.

$$\overline{Q} = \frac{1}{T}\int_0^T Q(t)dt \tag{21}$$

Table 5. COV of the pipes regarding transient effect (CASE 3)

Table 3. COV of the pipes regarding transient effect (CASE 1)

Pipe No.	COV of the pipes (valve at J-3 closed in 2.0s)	
	w/o Surge Tank	w/ Surge Tank
1	0.161	0.067
2	0.117	0.064
3	0.112	0.045
4	0.331	0.223
5	0.179	0.084
6	0.134	0.059
7	0.150	0.062
8	0.123	0.046
9	0.298	0.190

5. 신뢰성 해석 결과 분석

본 연구에서는 실제 상수도관망 시스템의 운용에서 중요한 밸브의 개폐 특성에 따른 영향을 중심으로 해석하였으며 Surge Tank와 함께 상수도관망의 부정류 영향을 분석하였다. 부정류 수치해석 결과로부터 각 파이프의 변동계수(COV: coefficient of variance)를 산정하고 컷 집합의 불능확률을 산정하였다. 본 연구에서는 압력의 유동이 가장 심한 처음 10초간의 구간에서 각각의 파이프에 대한 변동계수를 **Table 3, 4, 5**와 같이 산정하였다.

Fig. 9는 컷 집합 #5에서 J-5의 필요유량에 따른 불능확률을 밸브의 닫는 속도에 따라 비교한 것이다. 세 경우가 상당히 많은 차이를 보이고 있으며 컷 집합 #5의 평균유량인 $0.2m^3/s$까지는 밸브가 빨리 닫혔을 경우에 불능확률이 상당히 크게 나타났다. **Fig. 10**은 컷 집합 #10에서 J-5의 필요유량에 따른 불능확률을 밸브의 닫는 속도에 따라 비교하고 있다. 이 경우 평상시 컷 집합 #10의 평균유량인 0.242 m^3/s까지는 밸브가 0.5초에 닫혔을 경우가 필요유량의 증가에 따라 불능확률이 2초에 걸쳐서 닫혔을 경우와 큰 차이를 나타냈다. 그리고 두 가지 경우 모두 급격히 불능확률 1에 도달하였다. J-5의 평상시 필요유량 $0.15m^3/s$를 고려할 때, 컷 집합 #10의 경우 밸브가 아주 빨리 닫혔을 경우를 제외하면 기능성 면에서 컷 집합 #5보다 비교적 안정적임을 알 수 있었다.

한편 **Fig. 11**과 **12**는 CASE 1의 결과로써 J-3의 밸브 개폐가 0.5초 만에 이루어 졌을 경우 불능확률을 나타내고 있다. 그리고 Surge Tank가 있을 경우와 없을 경우를 비교

Table 4. COV of the pipes regarding transient effect (CASE 2)

Pipe No.	COV of the pipes (valve at J-3 closed in 1.0s)	
	w/o Surge Tank	w/ Surge Tank
1	0.300	0.087
2	0.250	0.110
3	0.212	0.066
4	0.411	0.320
5	0.287	0.089
6	0.258	0.086
7	0.283	0.095
8	0.245	0.079
9	0.425	0.174

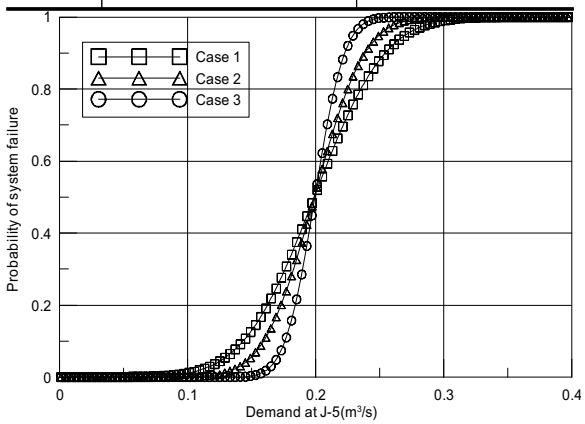

Fig. 9. Probability of system failure of Cut set #5 according to demand at J-5 with three different cases

하였다. 컷 집합 #5의 경우 J-5의 필요유량이 $0.15m^3/s$

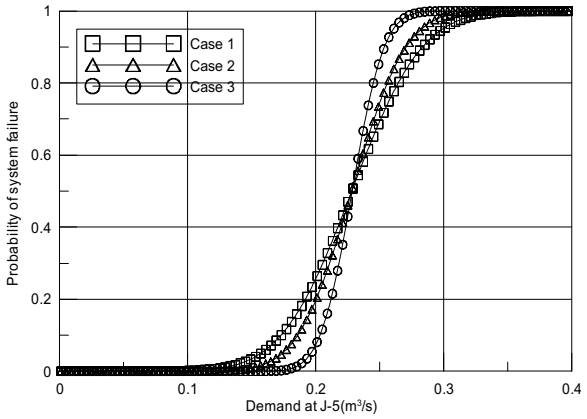

Fig. 10. Probability of system failure of Cut set #10 according to demand at J-5 with three different cases

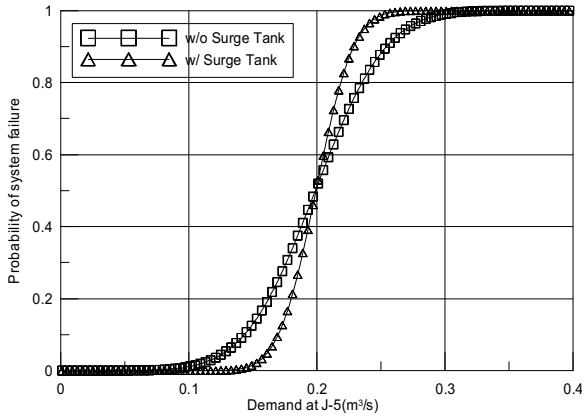

Fig. 11. Probability of system failure of Cut set #5 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 1)

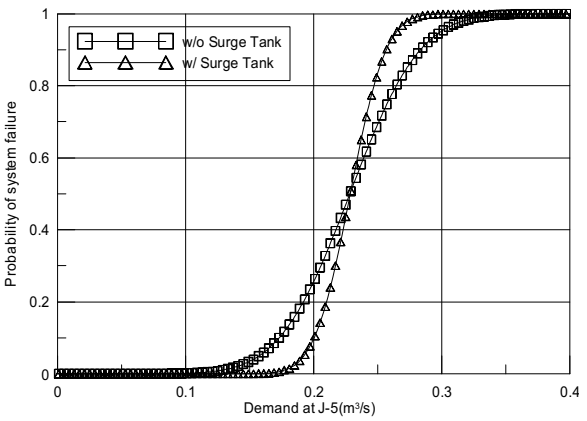

Fig. 12. Probability of system failure of Cut set #10 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 1)

일 때 Surge Tank가 없으면 불능확률이 약 15%이고 Surge Tank가 있는 경우 불능확률은 약 2%로 나타났다. 컷 집합 #10의 경우 Surge Tank가 없는 경우 불능확률은 약 5%이고 Surge Tank가 있는 경우 불능확률은 0%인 것으로 나타났다. **Fig. 13**과 **14**는 CASE 2의 결과이며 J-5의 필요유량이 $0.15m^3/s$이면 Surge Tank가 없는 경우 컷 집합 #5는 불능확률이 약 8%로 나타났고 Surge Tank가 있는 경우는 불능확률이 0%이었다. 그리고 컷 집합 #10는 Surge Tank가 없는 경우 불능확률이 약 2%나타났고 Surge Tank가 있으면 0%로 나타났다. **Fig. 15**와 **16**은 CASE 3의 결과이며 J-5의 필요유량이 $0.15m^3/s$이면 Surge Tank가 없을 경우 컷 집합 #5의 불능확률은 약 1%였고 Surge Tank가 있으면 불능확률은 0%로 나타났다. 그리고 컷 집합 #10은 두 경우 모두 불능확률이 0%로 나타났다. J-5의 평소 필요유량인 $0.15m^3/s$에서의 불능확률을 비교할 때 밸브의 개폐가 느릴수록 그리고 Surge Tank가 있을 경우 불능확률이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

컷 집합 개념을 이용하여 부정류 효과를 고려한 상수도관망 시스템의 불능 상태를 확률론적 개념으로 해석할 수 있는 신뢰성 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 사용된 상수도관망의 경우 컷 집합 5번과 10번의 불능확률이 다른 컷 집합의 불능확률에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 개발된 신뢰성 해석 모형을 이용하여 상수도관망에서 상대적으로 큰 불능확률을 일으키는 컷 집합들을 찾을 수 있었으며, 컷 집합의 불능확률에 대한 변동계수의 영향을 면밀히 분석할 수 있었다.

(2) 정류상태를 고려한 상수도관망의 신뢰성 해석에서 나타

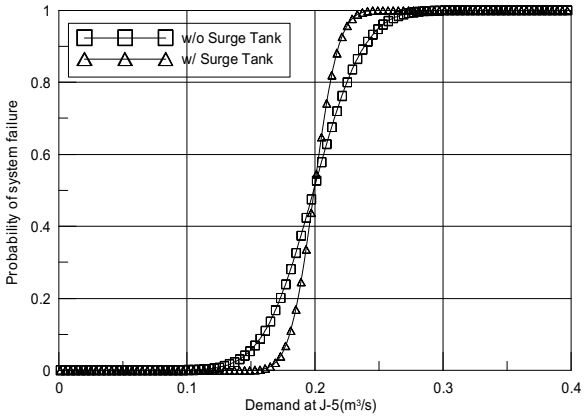

Fig. 13. Probability of system failure of Cut set #5 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 2)

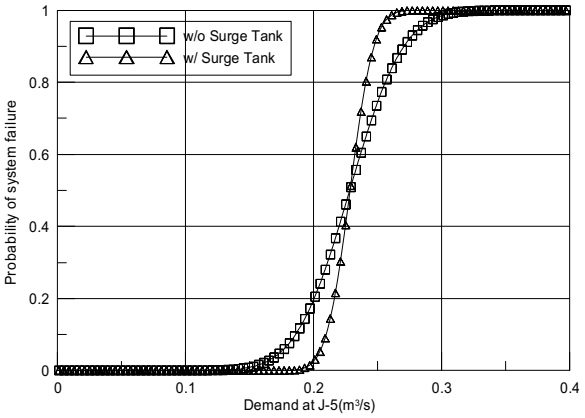

Fig. 14. Probability of system failure of Cut set #10 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 2)

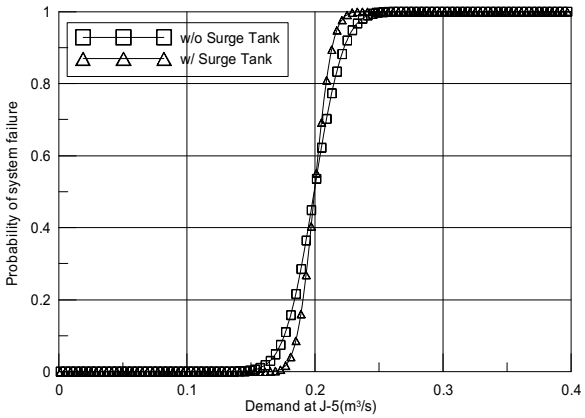

Fig. 15. Probability of system failure of Cut set #5 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 3)

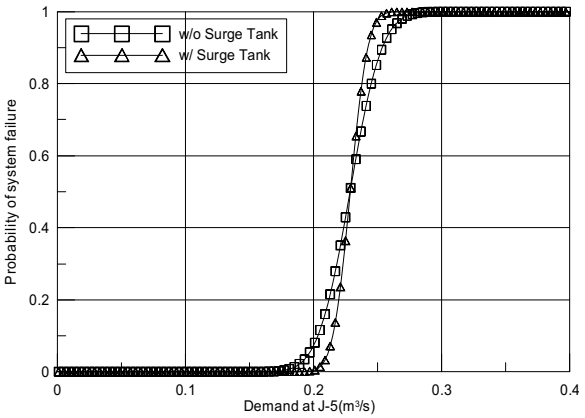

Fig. 16. Probability of system failure of Cut set #10 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 3)

상하수도학회지, 논문
23권 3호, pp.295-303, 6월, 2009

나지 않았던 밸브개폐의 영향을 분석하기 위하여 부정류 효과를 고려한 신뢰성 해석이 수행되었다. 특히 J-5주변의 밸브개폐에 따른 불능확률을 비교한 결과, J-3의 밸브개폐가 불능확률에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 밸브개폐 속도에 따른 불능확률의 비교에서는, 밸브가 빠르게 닫히면 아주 작은 필요유량에서도 큰 불능확률이 나타났다. 분석결과로부터 부정류가 상수도관망 시스템의 불능확률에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었으며 어느 구역의 밸브개폐가 상수도관망의 불능확률에 가장 큰 영향을 미치는지 찾을 수 있었다.

(3) 상수도관망에서 부정류의 영향을 감쇠시키기 위해서 Surge Tank가 있는 상수도관망의 부정류 수치해석을 수행하였다. 그 결과로부터 Surge Tank가 부정류 파압과 유량변위를 감쇠시키므로 상수도관망의 불능확률이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 신뢰성 해석 모형이 상수도관망 설계에 사용된다면 불능확률이 커질 우려가 있는 컷집합들과 파이프들을 발견할 수 있어서 보다 안전한 설계가 가능할 것이다. 또한 상수도관망의 보수 및 확장 계획에서도 우선 교체 및 보수되어야 할 파이프를 찾을 수 있을 것이다. 즉, 본 연구에서 개발된 신뢰성 해석 모형을 이용하여 불능확률에 큰 영향을 미치는 구역을 찾을 수 있으며 그 구역 밸브에는 견고한 안전장치를 설치하거나 보다 더 주의를 기울여 관리 할 수 있을 것이다. 상수도관망에 일어나는 불능현상의 원인은 여러 요소에서 찾을 수 있으나 그 중 부정류의 영향이 명백한 원인임을 확인하였다. 따라서 상수도관망의 부정류의 효과를 최소화할 수 있도록 본 논문에서 사용된 Surge Tank와 같은 압력 감쇠장치의 설치가 필수적이다. 본 연구에서는 필요유량의 전달유무에 대한 확률을 정량적으로 산정하여 상수도관망에 대한 신뢰도 분석을 하고 파이프의 기능성 평가를 하였다. 이러한 방법은 상수도관망의 설계 또는 계획에 있어서 유용하게 사용 될 수 있을 것이다. 또한 해석기법을 상수도관망의 운용에 이용한다면 안전하고 효율적인 관리 감독이 이루어 질 것으로 판단된다. 앞으로 Surge Tank의 용량에 따른 불능확률을 산정하여 설치비용에 따른 효용성 분석이 필요하다. 그리고 사례연구를 통하여 많은 실측 데이터와 함께 검증 작업을 거쳐 보완한다면 본 연구에서 제시된 해석방법이 더 정확하게 정립될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Ang, A. and Tang, W. H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design.* John Wiley and Sons, Inc. New York.
2. Chaudhry, H. M. (1979). *Applied Hydraulic Transients.* Van Nostrand Reinhold, New York.
3. Karney, B. W. & Mcinnis, D. (1992). "Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118 (7), 1014-1031.
4. Kirmeyer, G., W. Richards, and C.D. Smith. (1994). *An Assessment of Water Distribution Systems and Associated Research Needs.* Denver, CO: AWWARF
5. Kwon, H. J. (2005). "Transient flow in water distribution system." *Ph..D. Thesis*, University of Southern California, Los Angeles, CA.
6. Kwon, H. J. (2007a). "Computer Simulations of Transient Flow in a Real City Water Distribution System." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 11, No. 11, pp. 43-49.
7. Kwon, H. J. (2007b). "Analysis of Transient Flow in a Piping System." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 209-214.
8. Kwon, H. J. and Lee, C. E. (2008a). "Reliability analysis of pipe network regarding transient flow." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 409-416.
9. Kwon, H. J. and Lee, C. E. (2008b). "Reliability analysis for the probability of pipe breakage." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 22, No. 6, pp. 609-617.
10. 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.
11. National Research Council Canada (1995). Water Main Breaks Data on Different Pipe Materials for 1992-1993.
12. 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.
13. Watters, G. W. (1984). *Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipe lines.* Butterworths, Boston.
14. Wylie, B. E. and Streeter, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems.* FEB Press, Ann Arbor, Mich.