

조압수조가 설치된 상수관망의 부정류를 고려한 불능확률

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

권혁재*, 이철응**, 최한규***

Hyuk Jae Kwon, Cheol-Eung Lee, Han Kuy Choi

요 지

본 연구에서는 컷 집합(cut set)개념과 파이프의 부정류를 위한 수치해석 결과를 이용하여 상수관망의 불능확률을 정량적으로 산정하는 신뢰성 해석이 수행되었다. 특히 상수관망에서 중요한 운용형태의 하나인 밸브의 개폐효과에 따른 효과를 통하여 불능확률이 산정되었다. 먼저 부정류 수치해석을 위해서 작은 상수관망을 만들고 여러 가지 시나리오를 재현하였다. 이때 부정류 해석을 위해서 특성선법(the method of characteristics)모형이 사용되었다. 밸브의 개폐에 따라서 여러 가지 형태의 부정류가 발생되고 발생된 부정류를 상수관망의 불능확률을 크게 증가시킨다. 상수관망에서 컷 집합을 추출하여 기준지점에 배출유량(demand)가 도달하지 못할 확률을 불능확률로 규정하여 정량적으로 산정한다. 이를 위해서 컷 집합의 총 유량을 시간에 따라 평균하여 COV를 불능확률 산정에 이용한다. 부정류로 인한 파이프 유량의 변동이 심할수록 COV는 증가하고 결국은 컷 집합의 불능확률은 증가하게 된다. 그리고 똑같은 상수관망에 에너지 감쇠장치인 조압수조가 설치되어 부정류 압력파(pressure wave)를 크게 감소시켰을 때 불능확률을 비교하였다. 조압수조와 같은 압력감쇠장치가 상수관망의 부정류 효과와 불능확률을 크게 저감시키는 것을 알 수 있었다. 또한 신뢰성 해석 결과로부터 부정류가 불능확률을 급격히 증가시킨다는 것을 확인하였다. 따라서 부정류 효과를 고려한 신뢰성 해석은 상수관망의 운용, 관리, 감독, 그리고 설계와 계획을 위해서 필수적이라 할 수 있다.

핵심용어 : 상수관망, 부정류, 불능확률, 컷 집합, 조압수조

1. 서론

여러 가지 원인들이 노후 된 상수도관의 파손을 야기하나 그 중에서도 주목해야 할 원인이 부정류의 영향이라는 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 조압수조(Surge tank)의 영향을 수치해석 하였으며 이 결과를 고려하여 신뢰성 해석을 하였다. 본 논문에서 사용된 해석방법은 시스템의 파손과 같은 사고기록이 없거나 혹은 기록에 신빙성이 결여 된 상수도관의 해석에 적합할 것이다.

2. 본론

2.1 부정류 해석

특성선법 (Kwon and Lee, 2008; Kwon, 2007; Chaudhry, 1979)을 사용하여 상수관망의 부정류 해석을 수행하였다. 부정류 해석을 위해 가상의 작은 상수관망을 Fig. 1과 같이 설정하였다. 본 연구에 사용된 상수관망은 2개의 저수지, 9개의 파이프, 그리고 6개의 분기점(Junction)으로 이루어졌다. Table 1은 본 논문에서 사

* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 강사 · E-mail : hyukjae68@hotmail.com

** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 교수 · E-mail : celee@kangwon.ac.kr

*** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 교수 · E-mail : hankuy@kangwon.ac.kr

용된 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 1초에 닫혔다 열린 경우이다. 즉, CASE 1의 경우 J-3에서의 배출유량 $0.1m^3/s$ 는 0.5초 만에, CASE 2는 1초 만에 배출유량이 $0.1m^3/s$ 에서 $0m^3/s$ 로 다시 $0.1m^3/s$ 로 선형적 변화를 한다고 가정하고 부정류 해석을 하였다.

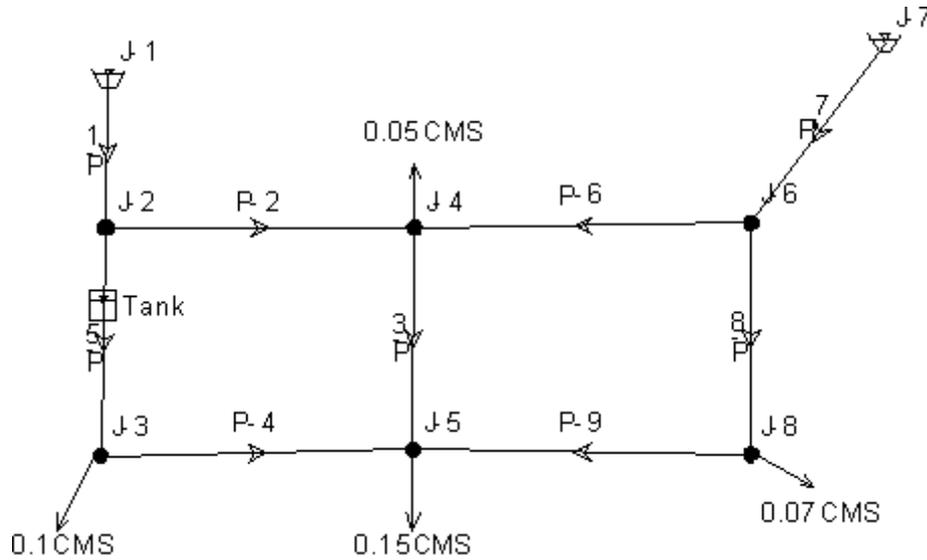


Fig. 1. Plan view of pipe network with Surge Tank

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		

2.2 조압수조

먼저 조압수조의 유출유량은 식 (1)로 산정할 수 있다.

$$Q_s = C_o A_n \sqrt{2g(h_s + Z_s - H_p)} \quad (1)$$

여기서 C_o 는 오리피스 계수, A_n 는 노즐면적, h_s 는 조압수조의 위압수두이고 식 (2)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.

$$h_s = h_{s_0} - \frac{\Delta t}{A_s} Q_s \quad (2)$$

h_{s_0} 는 조압수조의 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 (1)은 식 (3)과 같이 정리된다.

$$(H_p)^2 + (2K + 2L^2g)H_p + K^2 - 2L^2g(h_s + Z_s) = 0 \quad (3)$$

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

2.3 신뢰성 해석

본 연구에서는 컷 집합 개념을 도입하여 시스템의 불능확률을 산정하였다. 이를 위해 먼저 임의의 대상이 되는 상수도관망 시스템에서 각각의 컷 집합을 설정해야 한다. 본 연구에서 컷 집합이란 임의의 지점에 일정유량이 전달될 수 있는 모든 경로의 파이프의 집합을 의미한다. 본 연구에서는 다음 식 (4)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.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (4)$$

여기서, n 은 컷 집합에 포함된 파이프의 수, q_{ij} 는 파이프의 유량이다. i 는 컷 집합의 번호이고 j 는 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 (5) 및 식 (6)에 의하여 쉽게 산정할 수 있다.

$$\mu_{Q_i} = \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (5)$$

$$\sigma_{Q_i}^2 = \sum_{j=1}^n \sigma_{q_{ij}}^2 \quad (6)$$

마지막으로 앞에서 언급된 컷 집합 개념과 불능확률의 정의를 이용하면 신뢰성 해석을 위한 다음 식 (7)의 신뢰함수(reliability function)를 수립할 수 있다.

$$Z_i = Q_T - Q_i \quad (7)$$

$Z_i < 0$ 은 물리적으로 임의의 지점에 요구되는 필요유량 Q_T 가 도달되지 않는다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 신뢰함수를 구성하는 모든 확률변수들이 정규분포를 따른다는 가정 하에 $Z_i < 0$ 이 될, 즉 불능확률을 다음 식 (8)을 이용하여 산정하였다.

$$P_{f_i} = 1 - \Phi(\beta_i) \quad (8)$$

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 (9)로부터 계산하였다.

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt \quad (9)$$

2.4 신뢰성 해석 결과

Fig. 2는 CASE 1의 결과로써 J-3의 밸브 개폐가 0.5초 만에 이루어 졌을 경우 불능확률을 나타내고 있다. 그리고 조압수조가 있을 경우와 없을 경우를 비교하였다. 컷 집합 #5의 경우 J-5의 필요유량이 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 조압수조가 없으면 불능확률이 약 15%이고 조압수조가 있는 경우 불능확률은 약 2%로 나타났다. 컷 집합 #10의 경우 조압수조가 없는 경우 불능확률은 약 5%이고 조압수조가 있는 경우 불능확률은 0%인 것으로 나타났다. Fig. 3은 CASE 2의 결과이며 J-5의 필요유량이 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 이면 조압수조가 없는 경우 컷 집합 #5는 불능확률이 약 8%로 나타났고 조압수조가 있는 경우는 불능확률이 0%이었다. 그리고

컷 집합 #10는 조압수조가 없는 경우 불능확률이 약 2%나타났고 조압수조가 있으면 0%로 나타났다. J-5의 평소 필요유량인 $0.15m^3/s$ 에서의 불능확률을 비교할 때 밸브의 개폐가 느릴수록 그리고 조압수조가 있을 경우 불능확률이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있다

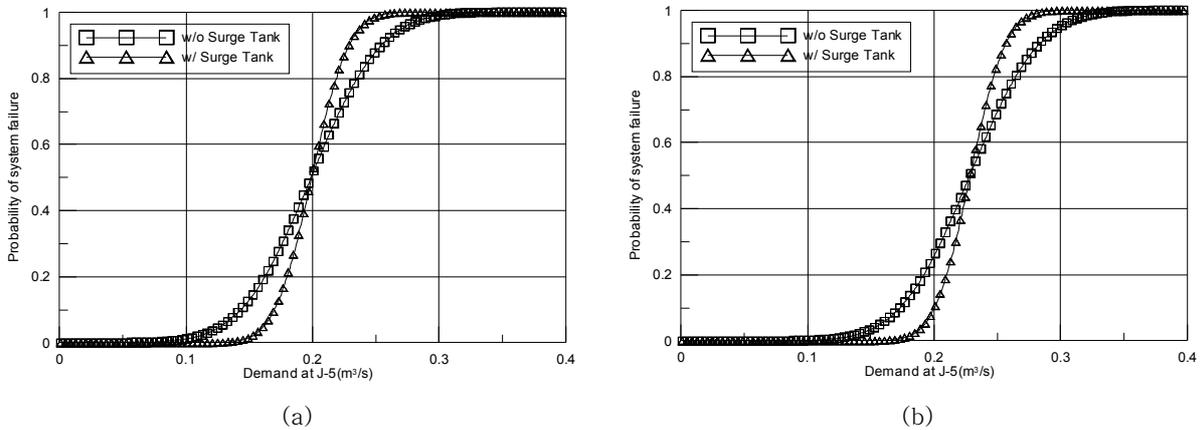


Fig. 2. Probability of system failure of Cut set (a) #5 (b) #10 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 1)

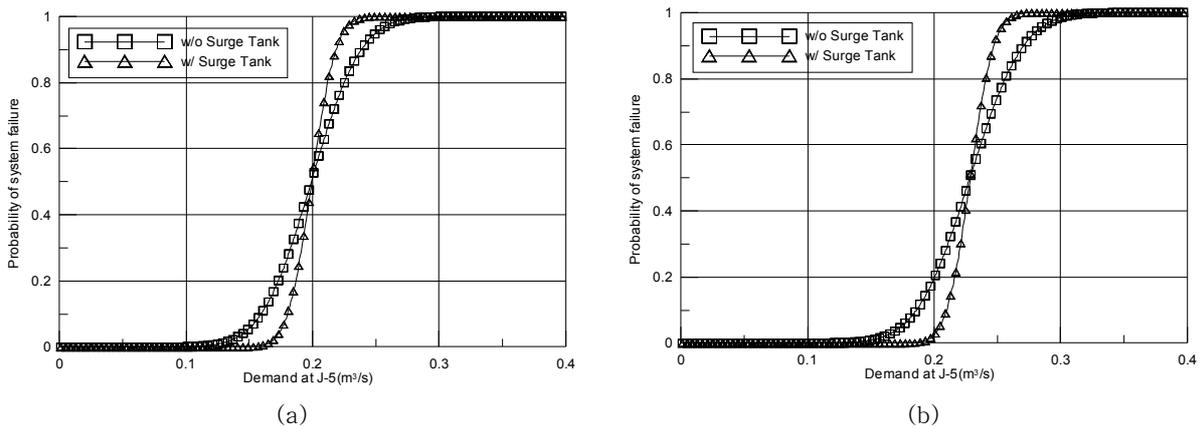


Fig. 3. Probability of system failure of Cut set (a) #5 (b) #10 according to demand at J-5 with and without Surge Tank (CASE 2)

3. 결론

(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 나타나지 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 밸브

개폐가 상수도관망의 불능확률에 가장 큰 영향을 미치는지 찾을 수 있었다.

(3) 상수도관망에서 부정류의 영향을 감쇠시키기 위해서 조압수조가 있는 상수도관망의 부정류 수치해석을 수행하였다. 그 결과로부터 조압수조가 부정류 과압과 유량변위를 감쇠시키므로 상수도관망의 불능확률이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 신뢰성 해석 모형이 상수도관망 설계에 사용된다면 불능확률이 커질 우려가 있는 컷 집합들과 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. 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 조압수조와 같은 압력 감쇠장치의 설치가 필수적이다.

4. 참고문헌

- 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.
- Kwon, H. J. (2007). "Computer Simulations of Transient Flow in a Real City Water Distribution System." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 11, pp. 43-49.
- Kwon, H. J. and Lee, C. E. (2008a). "Reliability analysis of pipe network regarding transient flow." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 409-416.
- Kwon, H. J. and Lee, C. E. (2008b). "Reliability analysis for the probability of pipe breakage." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 22, No. 6, pp. 609-617.
- Kwon, H. J. and Lee, J. J. (2008). "Computer and experimental models of transient flow in a piping system involving backflow preventers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134 ,No.4, pp. 426-434.