

파이프의 파괴확률 산정을 위한 신뢰성 해석

Reliability Analysis for Estimations of the Probability of Pipe Breaking

권혁재*, 이철응**, 최한규***

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

요 지

송수관이나 배수관은 계획된 필요유량을 특정 지점까지 안전하게 전달할 수 있도록 설계되지만 여러 가지 원인으로 인하여 갑작스런 파열이나 균열이 일어난다. 파이프 파괴의 원인으로는 수격현상, 관의노화, 파이프 외부로부터의 충격, 흙의 상태, 그리고 파이프 설치시의 공사여건 등이 있다. 본 연구에서 여러 가지 요인들을 불확실성 인자로 가정하여 파이프의 파괴확률을 산정할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 개발되었다. 상수관망의 설계 시 파이프의 두께를 산정하는 주 장력 공식을 이용하여 신뢰함수를 만들고 파이프의 파괴확률을 계산하였다. 신뢰함수를 구성하는 확률변수들 중 파이프의 내압에 대한 분포함수는 정규분포가 아닌 극치분포(Gumbel distribution)를 따른다는 것을 부정류 수치해석 결과로서 알 수 있었고 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 기법을 사용하여 파괴확률을 산정하였다. 신뢰성 모형을 이용하여 파이프의 두께, 직경, 허용응력, 그리고 파이프 내압에 따른 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 신뢰성 해석모형을 이용하여 보다 안전하고 경제적인 송배수관의 설계기법을 구축할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 상수관망, 부정류, 확률변수, 파이프파괴, 신뢰성해석

1. 서론

국가적 차원에서 상수관의 파열 혹은 누수 그리고 민고 사용할 수 있는 상수도관에 대한 많은 연구가 진행 중이다. 최근 이러한 상수관의 연구는 많은 공학적 문제에 직면하게 되어 합리적이고 효율적인 연구가 매우 어려운 실정이다. 왜냐하면 지표면 밑에 매설된 관의 부식이나 침식의 정도를 인지하기 힘들며 또한 부정류에 의한 갑작스런 압력변화의 해석이 필요하기 때문이다. 따라서 통계적 이론에 근거한 파이프 파괴 확률을 산정할 수 있는 신뢰성 해석이 절실히 필요하다. 이에 본 연구에서는 부정류 해석결과를 반영하여 상수도관의 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있는 신뢰성 해석 모형을 개발하였다.

2. 본론

2.1 부정류 해석

The method of characteristics model(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, 15개의 파이프, 그리고 12개의 분기점(Junction)으로 이루어졌으며 그 상세한 현황은 Table 1과 같다. 상수도관에서 부정류로 인해 생길 수 있는 최대 압력파고의 분포함수를 찾기 위하여 총 78번의 수격현상을 재현하고 부정류 해석을 하였다. Table 2와 같이 4가지 경우로 분류하여 총 78번의 부정류 해석을 하였다. 부정류 현상을 재현하기 위하여 밸브를 빠른 시간에 닫음으로써 임의로 수격현상을 발생시켰다. 첫 번째 수치해석의 경우, 각각의 8개 모든 분기점에서 밸브를 단독으로 0.3, 0.6, 그리고 1.2초에 닫았다. 두 번째, 세 번째, 그리고 네 번째 수치해석의 경우는 5번 분기점과 다른 분기점, 6번 분기점과 다른 분기점, 그리고 10번과 다른 분기점이 동시에 밸브가 닫혔다고 가정하고 해석하였다.

* 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

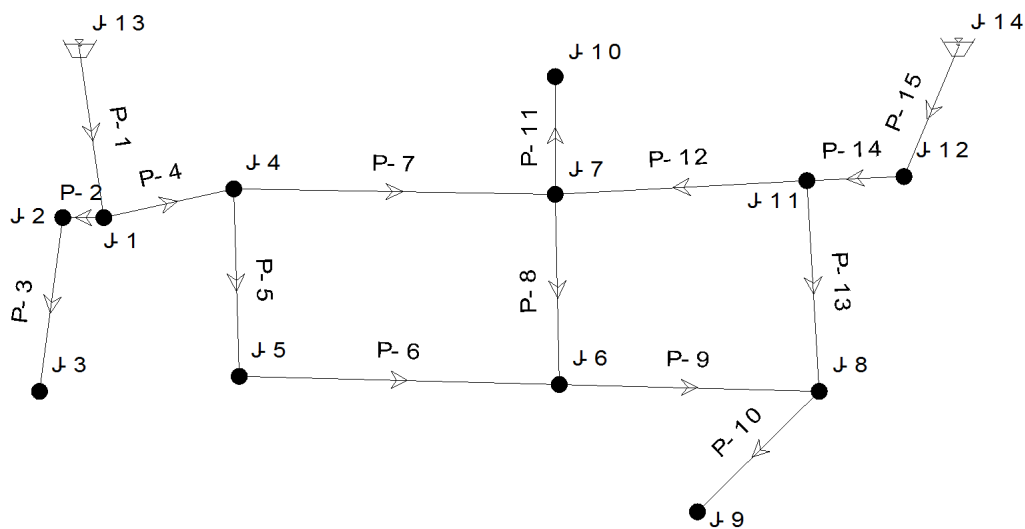


Fig. 1. Plan view of pipe network

Table 1. Description of pipe network

| Pipe No. | Length(m) | Diameter(cm) | Junction No. | Demand(m^3/s) | Elevation(m) |
|----------|-----------|--------------|--------------|-------------------|--------------|
| 1 | 300 | 35 | 1 | 0 | 150 |
| 2 | 50 | 35 | 2 | 0.08 | 140 |
| 3 | 300 | 35 | 3 | 0.08 | 130 |
| 4 | 200 | 40 | 4 | 0.06 | 140 |
| 5 | 300 | 30 | 5 | 0.06 | 140 |
| 6 | 400 | 35 | 6 | 0.1 | 130 |
| 7 | 400 | 35 | 7 | 0 | 130 |
| 8 | 300 | 40 | 8 | 0.1 | 130 |
| 9 | 300 | 40 | 9 | 0.12 | 140 |
| 10 | 250 | 30 | 10 | 0.12 | 140 |
| 11 | 200 | 30 | 11 | 0 | 135 |
| 12 | 300 | 30 | 12 | 0 | 130 |
| 13 | 300 | 25 | 13 | 0 | 300 |
| 14 | 150 | 25 | 14 | 0 | 300 |
| 15 | 250 | 30 | | | |

Table 2. Total simulation cases

| Valve closure | | | |
|---------------|-----------|----------|-----------|
| CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 | CASE 4 |
| J-2 | J-5, J-2 | J-6, J-2 | J-10, J-2 |
| J-3 | J-5, J-3 | J-6, J-3 | J-10, J-3 |
| J-4 | J-5, J-4 | J-6, J-4 | J-10, J-4 |
| J-5 | J-5, J-8 | J-6, J-5 | J-10, J-6 |
| J-6 | J-5, J-9 | J-6, J-8 | J-10, J-8 |
| J-8 | J-5, J-10 | J-6, J-9 | J-10, J-9 |
| J-9 | | | |
| J-10 | | | |

2.2 신뢰성 해석 모형

주 장력 공식을 이용하여 신뢰함수(Ang and Tang, 1984)를 아래 식 (1)과 같이 만들었다. 그리고 식 (2)는 파괴확률을 의미한다.

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

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

σ 는 허용응력, t 는 파이프 두께, D 는 파이프 직경, 그리고 p 는 파이프 내의 수압이다. 허용응력과, 파이프 두께, 그리고 파이프 직경은 제품이 출고될 때 여러 불확실성을 내포하고 있지만 식 (3)과 같이 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그리고 파이프 내압의 경우 많은 불확실성이 내포되어 있으며 그 분포함수를 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 상수관망에 임의의 수격현상을 재현하고 이때 만들어지는 최대 압력파고의 확률분포를 Fig. 2와 나타낼 수 있었다. Fig. 2(a)는 24번의 부정류 수치해석 결과를 통한 확률분포를 나타내고 2(b)는 78번의 부정류 수치해석결과를 통한 확률분포를 나타낸 것이다. 이 결과를 통하여 상수관망에서 수격 현상으로 발생한 최대 압력파고는 식 (4)의 극치분포(Gumbel distribution)와 일치 하는 것으로 나타났다.

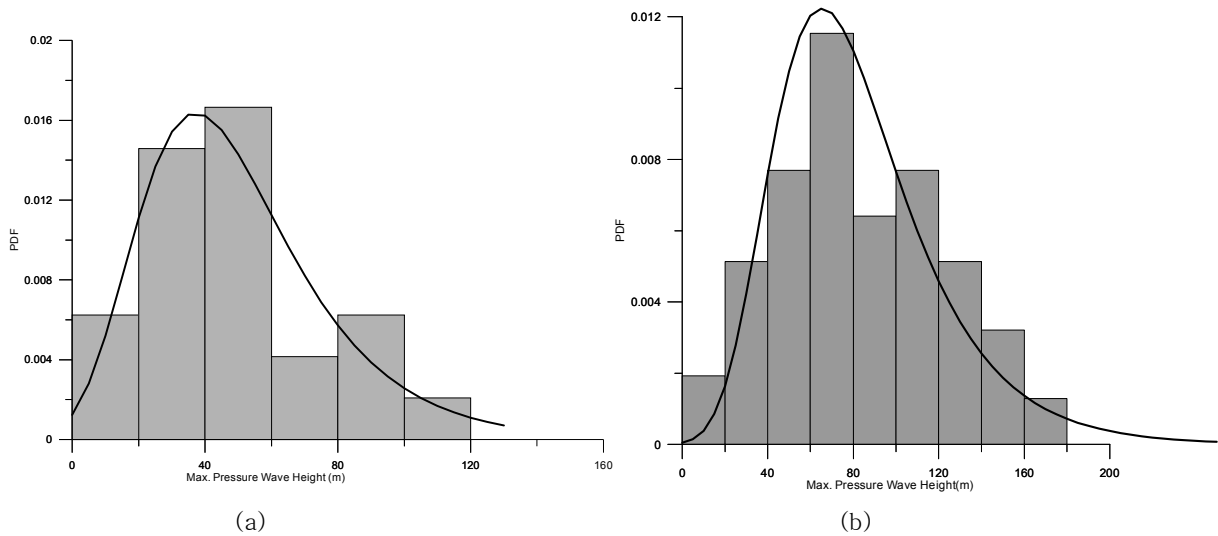


Fig. 2. Maximum pressure distribution at J-7 with 24 simulations(a) and 78 simulations(b)

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$f_p(x) = \alpha \exp[-\alpha(x-u) - e^{-\alpha(x-u)}] \quad (4)$$

본 연구에서 재현한 78번의 수치해석결과, 극치분포를 위한 α 는 $0.033(\text{m}^{-1})$, COV는 0.466, σ 는 38.550(m), u 는 65.324(m), 그리고 평균값은 82.725(m)로 나타났다. 신뢰함수 식 (1)에서 파이프의 두께, 직경, 인장응력은 정규분포를 따른다고 가정하고 파이프의 내압은 극치분포를 사용하여 AFDA기법으로 신뢰성 분석을 하였다. 정류상태의 확률변수들은 Table 3과 같이 그 통계적 특성을 나타낸다. 여기서 파이프 내 수압의 확률분포는 부정류를 고려하였을 때와 마찬가지로 Gumbel 분포를 따른다고 가정하였다. Fig. 3은 8번 파이프의 두께와 직경의 변화에 따른 파괴확률을 보여주고 있으며 부정류 효과로 인한 최대 압력파고의 평균값인 $8.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 더해 주어 파이프 내 수압이 $18.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때와 비교하였다. Fig. 4는 8번 파이프의 내압과 허용인장응력의 변화에 따른 파괴확률을 보여주고 있으며 COV가 0.1일 경우와 부정류 효과를 고려하여 COV가 0.566일 경우를 비교하였다.

Table 3. Descriptions of variables for the reliability function with steady state

| | 허용응력(σ) | 파이프두께(t) | 파이프직경(D) | 파이프내 수압(p) |
|---------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|
| Mean(μ) | $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ | 0.38cm | 30cm | $10\text{kg}/\text{cm}^2$ |
| COV | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Distribution | Normal | Normal | Normal | Gumbel |

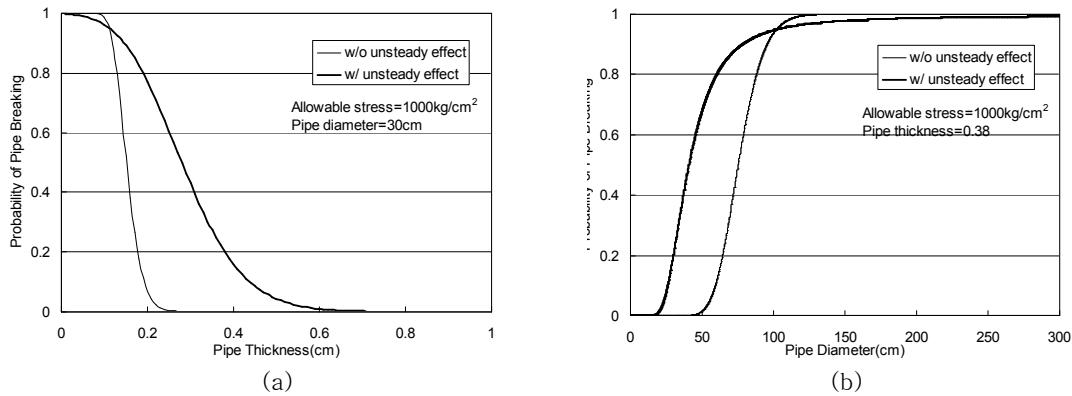


Fig. 3. Probability of pipe breaking at P-8 according to (a) pipe thickness (b) pipe diameter

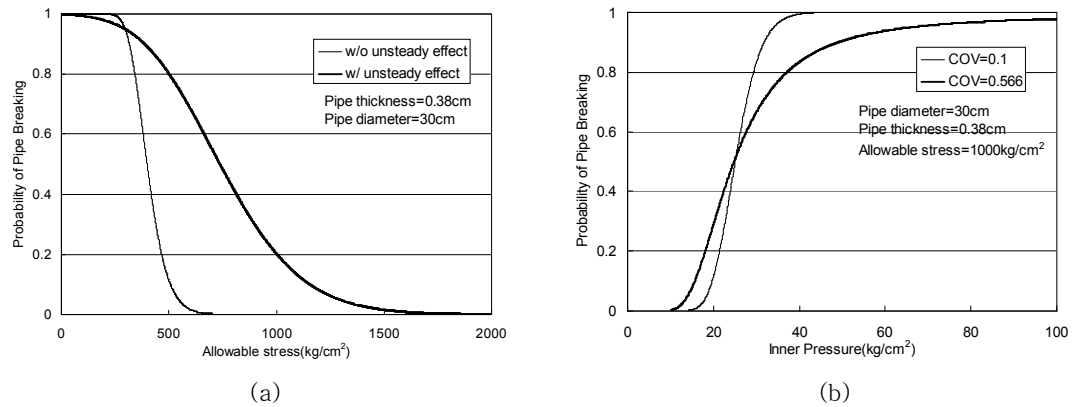


Fig. 4. Probability of pipe breaking at J-8 according to (a) inner pressure (b) allowable stress

3. 결론

부정류 효과를 고려한 상수관망의 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 개발 되었다. 부정류 효과를 고려하여 파괴확률을 산정한 결과, 부정류 효과를 고려하지 않았을 때 보다 훨씬 더 큰 파괴확률이 더 빨리 나타났다. 파이프 두께가 0.38cm일 경우 파괴확률이 0에 가깝지만 부정류 효과를 고려하였을 경우 파괴확률은 20%에 이르렀다. 또한 허용응력이 1000kg/cm²일 경우 파괴확률이 0이지만 부정류 효과를 고려하였을 경우 파괴확률은 약 19%로 나타났다. 파이프 내 수압의 변화에 따른 파괴확률은 부정류 효과를 고려하여 COV를 0.566일 경우 상당히 큰 파괴확률을 나타냈다. 따라서 상수관망의 신뢰성 분석 시 부정류의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안된 기법은 앞으로 상수관망의 설계 및 계획 그리고 운용에 이르기까지 다양하게 사용될 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, M. H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold, New York.
3. Kwon, H. J. & 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.
4. Kwon, H. J. (2007). "Computer Simulations of Transient Flow in a Real City Water Distribution System." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 43-49.