



Development of optimum pump operation technique for the damage rate reduction of water distribution system

Kwon, Hyuk Jae^{a*}

^aAssociate Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk, Korea

Paper number: 19-015

Received: 11 March 2019; Revised: 19 April 2019; Accepted: 19 April 2019

Abstract

In this study, the optimum pump operation technique is suggested to decrease the damage rate of water distribution system. Pump operation system was developed to achieve the effective pump operation. Pressure sensors which can communicate with pumps are installed at the end of water distribution system. Pump operation system can control the pressure of water pump according to data sent from the pressure sensors. Therefore, water distribution system can reduce the pressure and maintain enough pressure which can supply the demand of water users. For proving effectiveness of new system, reliability model was introduced to compare the results of damage rates between the maintaining high pressure and selective pressure in water pump. Unsteady analysis was conducted with several scenarios. And the results were used to calculate the probability of pipe breakage. From the results, it was found that new pump operation system can reduce the energy usage and probability of pipe breakage by applying to pumps.

Keywords: Pressure sensors, Probability of pipe breakage, Pump, Water distribution system

상수도관망의 피해를 저감을 위한 가압장 최적운영기법 개발

권혁재^{a*}

^a청주대학교 토목공학과 부교수

요 지

본 연구에서는 상수도관망의 피해를 저감을 위한 최적의 펌프운영기법을 제안하였다. 펌프운영시스템은 효과적인 펌프운영을 위하여 개발되었다. 이를 위해 펌프와 소통할 수 있는 압력센서가 상수도관망의 관말단부에 설치되었다. 펌프운영시스템은 관말단의 센서로부터 수신된 데이터를 통하여 펌프를 제어하게 된다. 따라서 펌프운영시스템은 관말단부에 충분한 유량을 전달할 수 있는 압력을 유지할 수 있고 불필요한 압력을 줄일 수 있다. 펌프운영시스템의 효과를 입증하기 위해 신뢰성해석모형이 사용되었고 기존의 펌프운영시스템과 새로운 펌프운영시스템의 운영결과를 통하여 상수도관의 파괴확률을 정량적으로 비교하였다. 이를 위해서 부정류해석을 수행하였고 그 결과는 파괴확률을 산정하는데 사용되었다. 그 결과, 새로 제시된 펌프운영시스템은 상수도관의 파괴확률을 현저히 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 압력센서, 관파괴확률, 펌프, 상수도관망

1. 서 론

상수도관망은 생활용수 및 공업용수를 안전하게 공급하기 위한 기반시설물이다. 상수도관망의 규모는 급격한 도시화

현상으로 인해 점차 확대되고 있으며 이에 따라 에너지 소비량도 꾸준히 증가하는 추세이다. 상수도관망 시스템은 도시의 경제성장, 인구의 과밀에 상응하는 라이프라인으로서 양질의 물을 수용가에게 안정적이고 저렴하게 공급할 수 있어야 한다. 이와 같이 상수도관은 안정적인 유량공급을 해야 하지만 많은 이유로 인해 누수가 발생하게 된다. 관의 누수현상은 수자원 낭비와 누수 발생지점의 구조물 및 지반을 파괴하기도

*Corresponding Author. Tel: +82-43-229-8473
E-mail: hjkwon@cju.ac.kr (H. J. Kwon)

한다. 누수현상이 관망에 발생하게 되면 관 내부의 유속과 압력이 변하게 된다. 그리고 압력의 변동으로 인하여 적절한 유량의 전달에 문제가 발생하게 되며, 결과적으로 사용자에게 불편함을 제공한다. 이러한 상황에서 유량을 원활하게 공급하기 위해서는 펌프시설의 용량증대를 통해 관의 수압을 높여야 하며, 이것은 결국 상수도관망의 높은 압력으로 연결되어 누수량은 더욱 증가하게 되는 악순환이 반복된다. 따라서 상수도관망의 시급한 개선이 요구된다. 이에 대한 개선책으로 감압밸브의 설치가 최우선시 되고 있으며 누수탐지를 위한 많은 노력이 이루어지고 있다.

현재 상수도 피해를 줄이기 위한 연구가 많이 진행되고 있으며 관 파괴를 발생시키는 원인을 분석하고 있다. 본 연구에서는 관의 파괴 및 누수의 원인으로써 고압의 상태에서 발생 가능한 수충격현상이 주요원인중 하나라고 판단하였다. 수충격현상에 대한 연구는 다음과 같이 진행되고 있다. 파이프라인에서 부정류상태의 다른 해석을 내놓았으며 부정류 정보를 단순화하였다(Karney, 1990). 간단한 관망에서 특성선법 모형을 이용하여 부정류에 대한 수치해석 결과를 보였으며, 여기서 간단한 몇 가지의 수리구조물에 대한 경계조건이 소개되었다(Karney and McInnis, 1992). 실제 관수로에서 부정류를 측정하였으며 이를 수치해석 결과와 비교 하였으며 비교 결과는 많은 차이점을 나타냈다(McInnis and Karney, 1995). 이를 극복하기 위하여 저자는 인공적인 에너지 감쇠효과를 수치해석 모형에 더하였다. 하지만 이런 노력은 수치모형 이용자에게 많은 논란을 만들었다. 이러한 오류는 마찰계수의 잘못된 사용으로 인해 나타난 것으로 판단되며, 이를 통하여 부정류 해석에 있어 마찰계수 산정이 몹시 중요하다는 것을 나타냈다.

또한 상수도 운영방법의 효율증대를 위한 연구가 다음과 같이 진행되고 있다. 펌프 스위치의 ON/OFF 횟수를 제한함으로써 펌프의 유지관리비용을 제한할 수 있다고 제시하였다(Lansley, 1994). 상수도관망 설계에 있어 펌프운동을 고려한 최소비용설계를 수행하였으며, 펌프운영비용과 상수도관망 설계비용을 최소화하는 결과를 얻기 위해서 Ant Colony Optimization을 적용하였다(Ostfeld and Tubaltzev, 2008).

용수공급 시스템 운영문제의 핵심은 용수공급의 안전성을 확보하면서 송수를 위해 소요되는 비용을 최소화하는 것이라고 제안하였으며, 적정 수질을 확보하면서 송수계통에서 누수를 최소화하였다(Cembrano, 2000). 상수도관망의 물 공급에 있어 수리학적 조건을 충분히 유지하면서 최소비용의 펌프운동을 결정하는 최적화 알고리즘을 제시하였다(Pasha and Lansley, 2010). 알고리즘은 Support Vector Machine를 사용

하여 구성되었고, 최단시간에 최적해에 근접한 결과를 획득할 수 있었다.

본 연구에서는 효율적인 펌프운동을 위하여 펌프 자동운영 시스템이 개발되었다. 또한, 수충격해석 프로그램을 이용하여 상수도관의 관 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있고 안정성을 분석할 수 있는 신뢰성모형이 구축되었다. 펌프운영 시스템을 실제 현장에 적용하여 시스템을 운영할 경우 상수도관의 파괴확률과 에너지 사용량을 시스템을 구축하기 전과 비교하여 시스템의 우수성을 검증하였다.

2. 부정류해석

관수로 흐름에서 수충격해석은 압력과 유속이 어디에서나 시간의 함수로 결정되어야 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 상수관의 수충격해석에서 가장 사용이 간편하고 안정적인 특성선법(The method of characteristics)을 이용한 수치모형(Karney and McInnis, 1992; Watters, 1984)이 사용되었다. 특성선법(MOC)이란 운동량 방정식과 연속방정식의 편미분 형태를 상미분 형태로 변형한 유한차분식을 임의의 지점에서의 유량과 수두에 관련된 해를 구하는 방식으로 사용이 간단하고 안정적인 방법으로 수충격해석 분야에서 널리 알려져 있다. 파이프의 수충격해석을 위한 지배방정식인 운동방정식과 연속방정식은 아래 식 Eqs. (1) and (2)와 같다.

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

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

여기서, Q 는 유량, H 는 위압수두(piezometric head), c 는 압력파의 속도, g 는 중력가속도, A 는 파이프의 단면적, D 는 관경, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. L_1 이 운동방정식을 L_2 가 연속방정식을 의미한다고 한다면, 이들의 선형방정식 ($L = L_1 + \lambda L_2$ (λ 는 라그랑지안 멀티플라이어))은 아래 식 Eq. (3)과 같이 표현될 수 있다.

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

특성선법에 의하면 유한차분식은 각각 아래 식 Eqs. (4) and (5)와 같이 수립되었다(Kwon, 2005).

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

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

여기서, $n+1$ 은 시간변수를 의미하게 된다. 특성선법의 경우아래 식 Eq. (6)의 수렴조건(Courant stability condition)을 만족해야 한다.

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

3. 신뢰성해석

본 연구에서는 신뢰함수가 아래 식 Eq. (7)과 같이 규정되었다.

$$Z = 2\sigma_a t - pD \quad (7)$$

여기서, σ_a =파이프 허용응력, t =관의 두께, p =파이프 내압, D =관의 직경이다. 수립된 신뢰함수에서 $Z < 0$ 은 파괴상태를 의미하며, $Z > 0$ 은 안전상태를 의미하며, $Z = 0$ 은 한계상태를 의미한다. 따라서 신뢰함수는 식 Eq. (8)을 이용하여 $Z < 0$ 에 해당되는 파괴확률을 정량적으로 산정이 가능하다.

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (8)$$

Fig. 1에서 β 는 신뢰지수(reliability index)이며, 반복계산을

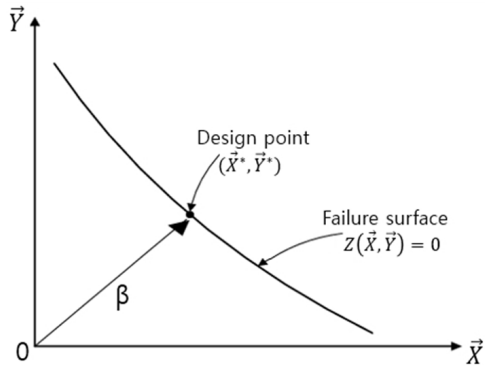


Fig. 1. Design point on the failure surface (Kwon, 2014)

통하여 구해지게 된다. 또한 원점에서 파괴면의 설계점에 이르는 최단거리이며, β 를 구할 때는 신뢰지수의 불변성이 요구된다. 따라서 정규화과정(normalization process)이 필수적이게 된다.

우선 방향여현(directional cosine)은 식 Eq. (9)와 같이 구하게 되며 식 Eq. (10)의 새로운 설계점을 산정하기 위하여 사용된다. 처음 반복계산을 통하여 확률변수의 평균값은 설계점으로 이용된다(Ang and Tang, 1984; Frankel, 1988; Modarres, 1999).

$$\alpha_{x_i}^* = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_i}\right)_*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i}\right)_*^2}} \quad (9)$$

여기서, $x_i' = (x_i - \mu_{x_i})/\sigma_{x_i}$, $x_i = \sigma_a, t, D, p$ 그리고 μ_{x_i} 와 σ_{x_i} 는 각 확률변수들의 평균과 표준편차를 의미한다. 따라서 설계점은 식 Eq. (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_a^* = \mu_{\sigma_a} - \alpha_{\sigma_a}^* \beta \sigma_{\sigma_a} \quad (10a)$$

$$t^* = \mu_t - \alpha_t^* \beta \sigma_t \quad (10b)$$

$$p^* = \mu_p^N - \alpha_p^* \beta \sigma_p^N \quad (10c)$$

$$D^* = \mu_D - \alpha_D^* \beta \sigma_D \quad (10d)$$

여기서, 파이프 내압의 등가정규분포의 표준편차와 평균은 σ_p^N 과 μ_p^N 이며, 식 Eq. (11)과 같이 Rosenblatt 변환으로 산정이 가능하다.

$$\mu_p^N = p^* - \sigma_p^N \Phi^{-1}[F_p(x^*)] \quad (11a)$$

$$\sigma_p^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_p(x^*)]\}}{f_p(x^*)} \quad (11b)$$

여기서, $F_p(x)$ 와 $f_p(x)$ 는 식 Eq. (12)와 같이 파이프 내압의 Gumbel 분포함수를 의미하게 된다.

$$F_p(x) = \exp[-e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (12a)$$

$$f_p(x) = \kappa \exp[-\kappa(x-\lambda) - e^{-\kappa(x-\lambda)}] \quad (12b)$$

여기서, $\kappa = \pi / (\sqrt{6} \sigma_p)$, $\lambda = \mu_p - (0.577 / \kappa)$ 이다. 또한 식 Eq. (10)을 신뢰함수 식 Eq. (7)에 삽입하게 된다면, 한계상태방정식은 식 Eq. (13)과 같이 된다.

$$2(\mu_{\sigma_a} - \alpha_{\sigma_a}^* \beta \sigma_{\sigma_a})(\mu_t - \alpha_t^* \beta \sigma_t) - (\mu_p^N - \alpha_p^* \beta \sigma_p^N)(\mu_D - \alpha_D^* \beta \sigma_D) = 0 \quad (13)$$

새로운 설계지점은 β 를 식 Eqs. (10) and (11)에 대입하여 얻을 수 있으며, β 가 적정한 값으로 수렴할 때까지 계산이 반복되어야 한다. 신뢰함수를 이루고 있는 다른 확률변수들은 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그러나 상수도관 내부의 압력은 불확실성이 많이 내포되어 있기 때문에 분포함수를 찾고, 통계학적 특성을 분석할 필요성이 있다. 국내에서 실제 사용되는 관두께 산정식(Korean Cast Iron Pipe Cooperation, 2012)은 정수압과 수격압, 그리고 토피에 의한 토압 및 트럭하중에 의한 토압을 전부 동시에 고려하고 있으며 정수압에 대한 안전율 2.0, 수격압에 대한 안전율 2.0, 토피에 의한 안전율 2.0, 차량하중에 의한 토압안전율 2.0을 대입하여 식 Eq. (14)와 같이 산정한다.

$$t = \frac{(P_s + P_u) + \sqrt{(P_s + P_u)^2 + 8.4(K_f W_f + K_t W_t)\sigma_a}}{2\sigma_a} d \quad (14)$$

여기서, t =관두께(mm), P_u =수격압(kg/cm^2), P_s =정수압(kg/cm^2), K_f =관저 지지각에 의해 결정되는 계수, K_t =관정 0.076, 관저 0.011, d =관의 내경(mm), W_f =토피에 의한 토압(kg/cm^2), W_t =트럭의 하중에 의한 토압(kg/cm^2), σ_a =허용응력(kg/cm^2)이다. 본 연구에서는 허용응력(σ_a)은 $600 kg/cm^2$ 를 적용하였고, 차량하중은 9,600kg을 적용하여 관의 두께를 산정하였다. 또한 국내 주철관 두께 산정식은 변수가 많기 때문에 주장력 공식과 같이 간략화하여 식 Eq. (15)와 같이 수립하였다.

$$t = \frac{\alpha(P + \beta)D}{2\sigma_a} \quad (15)$$

여기서, t =파이프 두께(mm), α =하중계수, p =파이프의 내압(kg/cm^2), σ_a =허용응력(kg/cm^2), β =파이프 내압계수, D =파이프의 직경(mm)이다. 산정결과 하중계수 α 는 1.4, 내압계수 β 는 11.5인 것으로 나타났다. 신뢰성 해석을 위한 설계 변수 중 하나인 P 는 검별분포로 가정하였으며, D , t , σ_a 는 정규분포로 가정하였다. Fig. 2는 파이프 내압증가에 따른 관두께의 비교 그래프이며, 최소 RMS는 0.0306 mm로 나타났다.

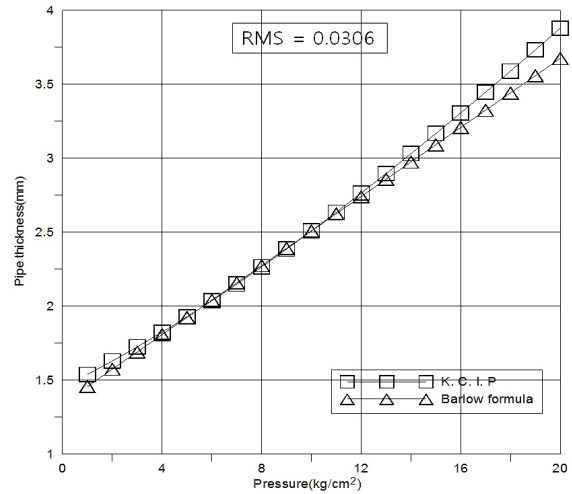


Fig. 2. Pipe thickness according to pipe pressure (D=100 mm, H=2 m)

4. 실제 상수도관망에 적용

갈산동 가압장은 충남 서산시에 위치하고 $1.57 km^2$ 의 면적에 $0.002 m^3/sec$ 의 유량을 공급하고 있다. 1~2층의 주택지역과 체육시설 및 종합운동장을 보유하고 있는 거주형태의 소블럭이다. 갈산동 상수도 관망은 1개의 펌프장, 46개의 파이프, 45개의 절점으로 구성되어 있다. 또한 대부분 10 cm의 직경을 나타내고 있으며 2018년 기준으로 C값은 100을 적용했다. 수용가의 해발고도는 30~60 m를 이다. Fig. 3은 테스트

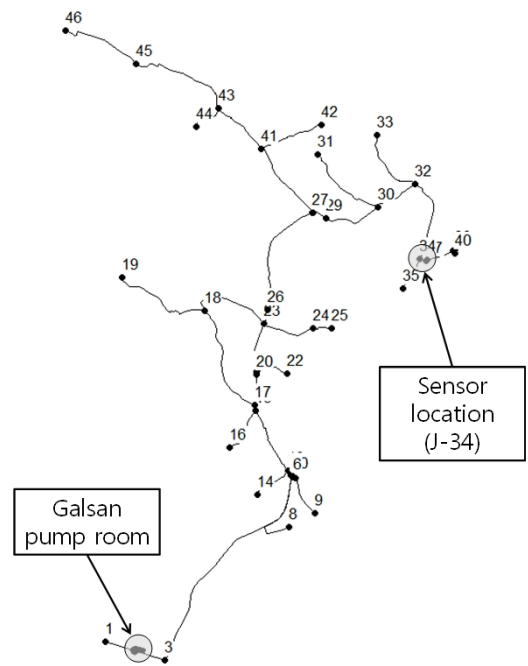


Fig. 3. Galsan pipe network and sensor location

베드의 관망도를 보여주고 있다.

본 연구에서 개발된 펌프자동운영 프로그램의 적용 지역인 갈산동 상수도관망은 약 30~60 m의 수용가 해발고도를 나타내고 있다. 이 때문에 수용가에게 충분한 수량을 제공하기 위해 24시간 펌프장을 운영하고 있는 상황이다. 펌프장은 항상 75 m의 펌프 토출압력수두로 운영되고 있으며, 물 사용량이 상대적으로 낮은 시간대에는 과잉수압이 발생하게 된다. 이는 누수량 증가 등의 문제로 이어지게 된다. 또한 유수율의 감소로 이어지게 될 가능성이 있다. 이러한 현상은 관의 노후도를 가속화시켜 결과적으로 관의 파괴라는 결과가 발생하게 된다. 펌프자동운영 프로그램을 위하여 센서가 설치된 지점(J-34)에서 압력값을 실시간 송신한다고 가정하였고, 압력 데이터의 송신은 10분단위로 결정하였으며, 총 24시간의 데이터(144개)를 수집한 것으로 가정하여 본 연구에서 개발된 펌프 자동운영 프로그램으로 시뮬레이션하였다. 우선 펌프장의 펌프가 ON/OFF일 경우 측정지점의 압력수두를 알아보기 위하여 시간에 따른 압력수두를 산정하였다. 허용 압력수두의 최솟값은 30 m (3.0 kg/cm^2)로 결정하였다. Fig. 4는 펌프장의 가동상태에 따른 J-34의 시간에 따른 압력수두 값이다.

펌프를 미가동 하였을 경우 J-34에서의 압력수두는 최소 기준치인 3.0 kg/cm^2 이하로 내려간다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 갈산동 상수도 관망은 수용가의 소요수압을 충족 시켜주기 위해서 단순히 ON/OFF상태로 펌프가 운영되는 것이 아닌 특정 임계치값을 지정해 주어야 한다. 따라서 본 연구에서 개발된 펌프자동운영 프로그램을 갈산 상수도관망에 적용하였다. 센서지점의 압력수두가 30 m이하로 떨어지게 되면 펌프 토출압력수두는 75 m로 가동하게 되고 30 m 이상을 유지할 때는 펌프 토출압력수두는 60 m를 유지하게 된다. 시간대별 수요량의 차이가 발생하게 되고 새벽이나 수요량이 적은 시간대에서는 펌프 토출압력수두가 60 m로 운영되고 나머지 시간대에서는 75 m로 운영한 것으로 시뮬레이션하였다. 이러한 펌프운영은 관말단에서 보내진 압력데이터를 근

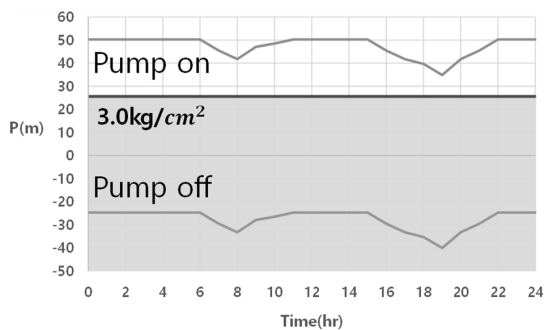


Fig. 4. Pressure head according to switch On/Off at J-34

거로 실시간 프로그램이 자동인식하여 명령을 내리게 되어 펌프를 자동운영하게 된다. 펌프장이 최적 펌프 토출압에 의해 운영될 경우 절점 34에서의 시간별 압력수두는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서 개발된 실시간 펌프자동운영 프로그램을 갈산동 상수도 관망에 적용해보았다. 그 결과 최적의 펌프장 운영은 시간에 따라 75 m 토출압과 60 m 토출압으로 운영해야 하는 선택적 운영으로 나타났다. 적용된 시나리오를 바탕으로 수충격압을 산정하였다.

Figs. 6(a) and 6(b)는 수충격 해석결과 의 예로써 펌프 투출 압력수두가 75 m로 운영될 경우와 60 m로 운영될 경우 밸브의 개폐에 따른 절점 17에서의 압력수두변화이다.

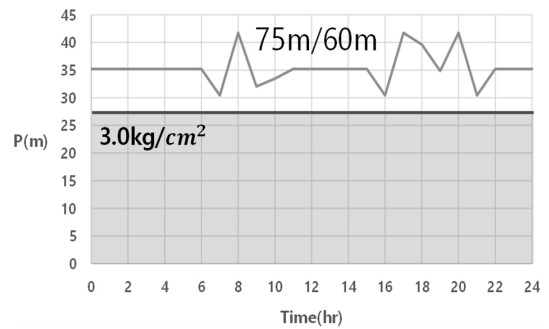
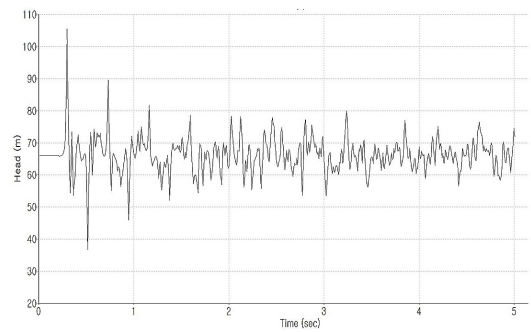
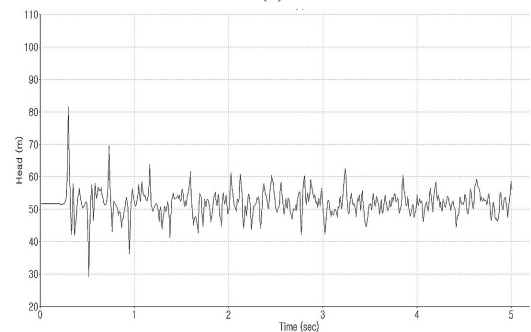


Fig. 5. Pressure head at J-34 according to selective operation of water pump pressure head of 75 m and 60 m



(a)



(b)

Fig. 6. Change of pressure head at J-17 (a) 75 m pressure head of water pump (b) 60 m pressure head of water pump

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 펌프장의 토출압 변화에 따라 압력의 변동폭이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 신뢰성해석을 통해 75 m로 운영될 경우와 60 m로 운영될 경우 수충격압의 통계적 특성을 분석한 결과 모두 검뎀분포를 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있었고, 수충격압의 통계적인 특성값은 펌프 토출압력수두 75 m로 운영시의 평균 수적압력수두는 16.55 m, 변동계수는 0.434, 축척계수는 0.178, 형상계수는 13.32이었으며, 펌프 토출압력수두 60 m로 운영 시 평균 수적압력수두의 크기는 12.58 m, 변동계수는 0.429, 축척계수는 0.237, 형상계수는 10.15로 나타났다. Figs. 7 and 8은 운영조건에 따른 수충격압의 확률밀도 함수이다.

통계적 특성 및 분석결과를 통해 수충격압에 대한 파괴확률을 산정하였다. 이때 사용한 설계변수인 허용응력, 직경, 두

께는 정규분포로 가정하였다. 직경은 100 mm를 사용하였으며, 관두께는 관두께 산정식을 사용하여 75 m운영과 60 m운영 시 각각 2.2 mm, 2.0 mm를 사용하였고, 허용응력은 관의 특성(PVC관)을 고려하여 600 kg/cm^2 을 사용하였다. 또한 압력은 수충격압의 평균에 정상류 상태의 압력을 더하여 파괴확률을 산정하였다. 펌프 토출압력수두 75 m로 운영할 경우 압력수두는 75.38 m, 펌프 토출압력수두 60 m로 운영할 경우 압력수두는 57.28 m로 나타났으며 본 연구에서 개발된 실시간 펌프운영 시스템을 사용하였을 경우 압력수두는 62.56 m로 나타났다. 이는 펌프 자동운영결과, 토출압력수두 75 m는 7시간 그리고 60 m는 17시간 운영되는 것으로 나타났으며 이를 비례식으로 환산한 값이다. 상수도 관망 내 가장 많은 관의 직경은 100 mm이며, 이에 대한 신뢰성해석을 수행하였다. Figs. 9~11과 같이 펌프의 운영조건을 변경하여 파괴확률을 정량적으로 산정하였다. 펌프 토출압력수두 75 m 운영 시 100

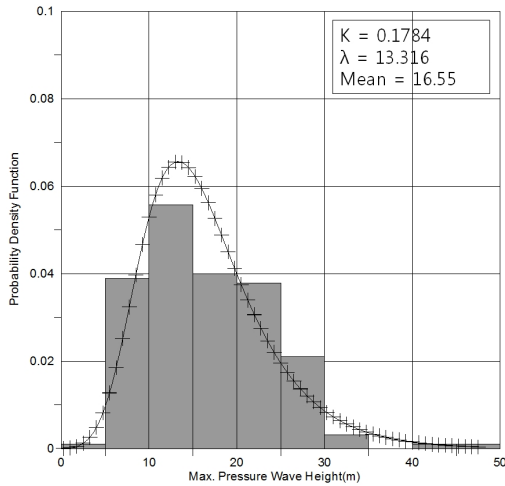


Fig. 7. Probability density function of surge pressure head with 75 m pressure head of water pump

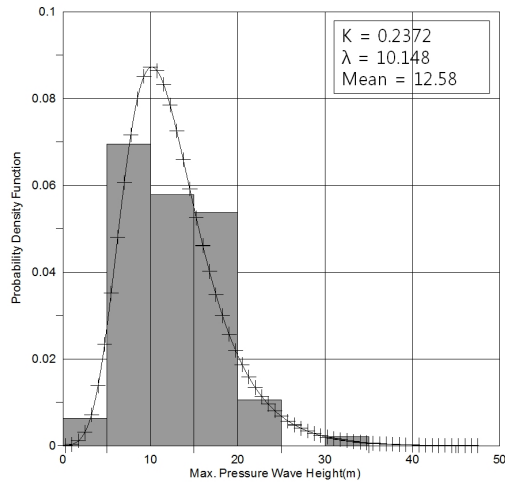


Fig. 8. Probability density function of surge pressure head with 60 m pressure head of water pump

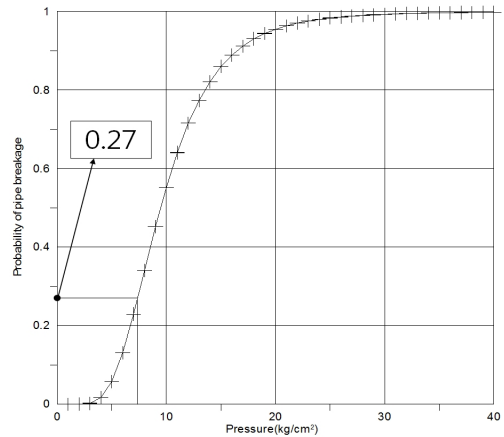


Fig. 9. Probability of pipe breakage according to operation condition (75 m pressure head of water pump)

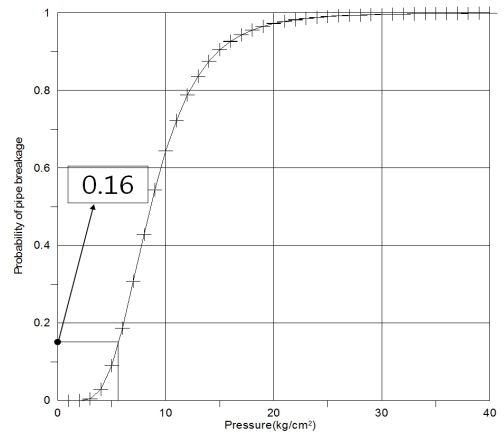


Fig. 10. Probability of pipe breakage according to operation condition (60 m pressure head of water pump)

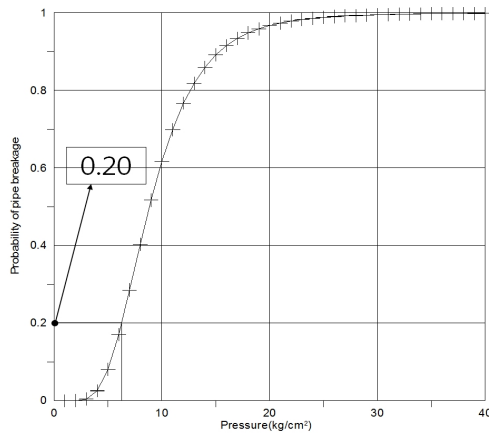


Fig. 11. Probability of pipe breakage according to operation condition (selective pressure head of water pump)

mm관의 파괴확률은 27%로 나타났으며, 펌프 토출압력수두 60 m 운영 시 파괴확률은 16%로 나타났다. 가압장의 운영조건을 자동 펌프운영 시스템을 적용하여 변경하였을 경우 파괴확률은 20%로 나타났다. 본 연구에서 개발된 펌프자동운영 시스템을 적용하였을 경우 파괴확률은 7%의 차이를 보였다. 그리고 Percentage Error를 사용하여 계산한 결과 약 25.93%의 피해 저감율을 확인할 수 있었다. 또한, 에너지 효율을 확인하기 위하여 갈산동 가압장을 대상으로 전력소비량을 산정하였다. 본 연구에서 적용한 실제 관망을 펌프 자동운영 시스템 구축하기 전과 구축한 이후를 비교하였으며, 펌프 토출압력수두 75 m로 운영하였을 경우의 전력소비량과 선택적 운영을 하였을 경우의 전력소비량을 산정해 비교해 보았다. 기존 75 m의 펌프 토출압력수두로 24시간 운영되는 경우와 센서기반 자동 펌프 운영시스템을 적용하여 75 m의 펌프 토출압력수두로 7시간, 60 m의 펌프 토출압력수두로 17시간 운영되는 선택적인 운영을 할 경우 실제로 발생하는 전력소비량을 산정하여 비교해 보았다. 기존의 75 m의 펌프 토출압력수두로 운영할 경우 전력소비량은 연간 18368.0 Kw이고 선택적 운영 시 전력소비량은 연간 13396.0 Kw로 나타났으며 두 운영간의 전력량을 비교하였을 경우 약 27.07%의 에너지 효율이 증대되는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 펌프장 자동운영 시스템을 개발하였다. 또한, 개발된 펌프 자동운영 시스템을 서산시 갈산동에 적용하여 피해율이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 관망 말단 수용가의 물 사용량에 따라 설치된 압력계가 실시간으로 가압장과

통신하여 펌프를 제어하여 토출압을 조절하게 된다. 본 연구에서는 실시간 펌프 자동운영 시스템을 적용하였을 경우 관망의 피해율 저감을 정량적으로 산정하기 위해서 신뢰성 해석모형을 구축하여 갈산 가압장에 적용하였다. 또한, 수충격 해석모형을 이용하여 부정류 해석을 하였으며, 그 결과는 신뢰성 해석모형에 이용되었다. 충남 서산시 갈산동의 상수도관망은 약 30~60 m의 높은 해발고도에 위치하고 있고, 펌프장을 24시간 운영하고 있다. 따라서 자동펌프운영 시스템을 적용하였으며, 그 결과 펌프의 최적 운영조건은 75 m의 펌프 토출압력수두로 7시간, 60 m의 펌프 토출압력수두로 17시간 운영되는 선택적 운영으로 나타났다. 개발된 펌프운영시스템 적용한 결과 상수도파괴확률은 25.93% 저감하는 것을 확인하였고 에너지 사용은 27.07% 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 대상 가압장의 전력사용량을 바탕으로 펌프 자동운영 시스템을 적용하였으며, 에너지 효율이 증대되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 프로그램 및 시스템은 현지에 설치하여 운영할 계획에 있으며 피해율과 에너지 절감율을 직접 확인할 예정이다. 이러한 센서기반 펌프 자동운영 시스템은 향후 상수도관망 운영에 적극 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 (2019)학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

References

- Ang, A., and Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Cembrano, G., Wells, G., Quevedo, J., Pérez, R., and Argelaguet, R. (2000). "Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system." *Control Engineering Practice*, Pergamon Press Inc., Vol. 8, No. 10, pp. 1177-1188.
- Frankel, E. G. (1988). *Systems reliability and risk analysis*. Klume Academic Publishers, USA.
- Karney, B. W. (1990). "Energy relations in transient closed-conduit flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 10, pp. 1180-1196.
- 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, USA.
- Kwon, H. J. (2014). "Reliability model for storm sewer." *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 181-190.
- Lansey, K. E. (1994). "Optimal control of water supply pumping systems." *Journal of water resources planning and management*, ASCE, Vol. 120, No. 2, pp.17-35.
- McInnis, D., and Karney, B. W. (1995). "Transients in distribution networks: Field tests and demand models." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 3, pp. 218-231.
- Modarres, M. (1999). *Reliability engineering and risk analysis*. Marcel Dekker, USA.
- Ostfeld, A., and Tubaltzev, A. (2008). "Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems." *Journal of water resources planning and management*, ASCE, Vol. 134, No. 2, pp. 107-118.
- Pasha, M. F. K., and Lansey, K. (2010). "Strategies for real time pump operation for water distribution systems." *Proceeding of Water Distribution Systems Analysis 2010*, Tucson, USA, pp. 1456-1469.
- Watters, G. W. (1984). *Analysis and control of unsteady flow in pipeline*. Butterworths, Boston.