



휴대용 압력과 발생장치를 사용한 단일관로에서의 누수탐지 연구

Study of leak detection in a pipeline system using a portable pressure wave generator

고동원¹·이정섭¹·김진원²·김상현^{1*}

Dongwon Ko¹·Jeongseop Lee¹·Jinwon Kim²·Sanghyun Kim^{1*}

¹부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과, ²수자원기술주식회사

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, ²Water Resources Engineering Corporation

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

ABSTRACT

This paper suggests a nonlinear pressure consideration scheme through an unsteady pipe network analyzer for leakage detection with a portable pressure wave generator. In order to evaluate the performance of a proposal scheme, linear input pattern has been simulated and experiments had been carried out under both no leakage and one leakage conditions in a reservoir-pipeline-valve system. This method using portable pressure wave generator showed that a leakage can be detected from a reflection where a leakage is originated through time domain analysis. Meaningful similarity in pressure response between nonlinear input pattern and experimental results were found both no leakage and a leakage conditions.

Key words: Nonlinear pressure scheme, Unsteady network analyzer, Leakage detection, Pressure wave generator

주제어: 비선형 압력고려, 부정류 해석프로그램, 누수탐지, 압력파 발생장치

Received 22 January 2020, revised 28 February 2020, accepted 10 March 2020.

*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

- 고동원 (석사과정) / Dongwon Ko (Master Student)
부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea
- 이정섭 (석사과정) / Jeongseop Lee (Master Student)
부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea
- 김진원 / Jinwon Kim
경기도 성남시 수정구 위례서일로 10, 605호
605, 10, Wiryeseoil-ro, Sujeong-gu, Seongnamsi, Gyeonggi-do 13647, Republic of Korea
- 김상현 (교수) / Sanghyun Kim (Professor)
부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

우리나라는 2017년 기준 정수장에서 생산된 상수도 보급률이 99.1%에 달하지만, 여전히 누수율은 전국 평균 10.5% 정도이며, 제주도의 경우에는 44.4%에 달한다 (Ministry of Environment, 2018). 관로 노후화, 이상기후 및 사고로 인한 관로 파열, 배수지 균열 등으로 인해 발생하는 누수는 수자원의 유지 및 관리를 어렵게 하고 경제적 손실을 일으키기 때문에 누수 위치를 정확히 탐지하고 해결하는 것이 중요하다.

정확한 누수탐지를 위해 국내·외적으로 지속적인 연구가 이루어져왔다. 국제적으로도 누수탐지는 중요한 연구과제로 인식되어 여러 분야에서 연구가 진행되었는데, 국외에서는 Brunone and Ferrante (2001), Kapelan et al. (2003), Liggett and Chen (1994) 등의 연구자들이 천이류 역산 분석(Inverse transient analysis)을 통한 누수탐지방법을 연구했으며, 국내에서도 Kim et al. (2003), Lee et al. (2006) 등의 연구자들이 밸브의 급폐로 인해 발생하는 천이류를 통한 누수탐지방법 연구를 지속적으로 수행했다.

하지만, 위 연구들은 관망의 모든 지점에서 누수를 해석해야 하는 역산방식의 복잡과정으로 인해 현장에 적용하기에는 한계가 있고 (Kim et al., 2005), 밸브의 급폐로 인해 발생하는 천이류는 관망 내부에 큰 수충격을 가해 부압이 발생함에 따라 관망과 이에 연결된 밸브를 쉽게 손상시킬 수 있다 (Meniconi et al., 2011). 이를 대신하여, 관망에 비교적 작은 크기의 천이류인 압력파를 발생시킴으로써 나타나는 파형을 통해 누수를 탐지하는 연구가 대두되었는데, 국외에서는 Brunone et al. (2008)이 압력파 발생장치를 통한 누수탐지연구와 동시에 현장에 쉽게 적용시키기 위해 휴대가 가능한 압력파 발생장치에 대한 연구를 수행했다. Meniconi et al. (2011)은 여기서 더 나아가 압력파 발생장치에서 발생된 압력파가 관망을 진단할 수 있음과 동시에 웨이블릿 분석(Wavelet analysis)을 통해 누수를 용이하게 탐지할 수 있음을 보여주었다. 하지만, 국내에서는 이와 관련된 연구가 아직은 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 현장의 상수관망에 안전하게 적용시키기 위해 압력파 발생장치를 사용하여 단일관망에서의 누수탐지에 대한 연구를 수행했다. 단일관망 시스템에 이송이 가능한 압력파 발생장치를 제작

하여 연결한 뒤, 압력파를 관망 내부로 발생시켜 압력파가 이상경계조건에서 반사함으로써 나타나는 수압의 감쇠를 통해 누수를 포함한 관망 내부에서 비정상 상태를 탐지할 수 있는지를 확인해보았다. 이를 부정류 해석프로그램(Unsteady network analyzer)을 활용한 수압의 선형주입거동과 비선형주입거동을 통해 얻은 결과들과 비교해봄으로써 단일관망에서의 누수탐지에 적합한 수압 모형을 구성하는 연구를 수행하였다.

2. 부정류 해석

2.1 관망 내에서의 압력파 거동

Fig. 1은 초기 정상상태에서 양의 x 방향으로 속도 V 로 일정 단면적을 가진 관망의 제어체적을 나타낸다. 초기 압력이 P 인 단면 B-B는 유량의 변화에 따라 압력과 속도는 $P + \Delta P$, $V + \Delta V$ 가 된다. 여기서 압력파는 음의 x 방향으로 파속도(Wave speed) c 만큼 이동한다. 시간 t 동안 압력파가 움직인 거리는 $t(c - V)$ 이다.

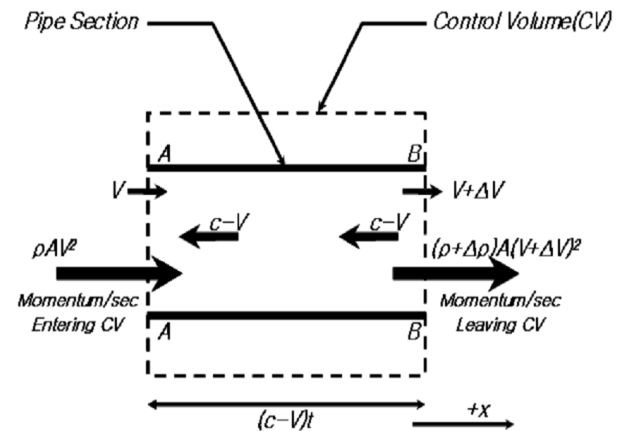


Fig. 1. Control volume in pipeline system.

Fig. 1의 제어체적 운동량보전방정식은 다음과 같다.

$$-A\Delta P = A(c - V)[(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V) - \rho V] + [A(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V)^2 - \rho AV^2] \quad (1)$$

여기서 A = 관망의 단면적, ρ = 물의 밀도, $\Delta\rho$ = 압력변화에 따른 밀도의 변화이다. Fig. 1의 제어체적의 연속방정식은 다음과 같다.



$$\rho A V - (\rho + \Delta\rho)A(V + \Delta V) = \frac{At(c - V)\Delta\rho}{t} \quad (2)$$

Eq.(1)과 Eq.(2)을 통해 다음과 같은 수식을 표현할 수 있다.

$$\Delta P = -\rho c \Delta V \quad (3)$$

$$P = \rho g H \quad (4)$$

여기서 H = 압력수두이다. Eq.(4)을 이용하면 Eq.(3)은 다음과 같다.

$$\Delta H = -\frac{c \Delta V}{g} \quad (5)$$

Eq.(5)은 일정한 단면적을 가진 관망의 임의 지점에서 압력변화와 속도변화의 관계를 나타낸다.

파속도는 관망의 두께, Young 탄성계수와 같은 관망 고유의 특성들, 관망이 서로 연결되어 있는 형태, 유체의 밀도, 유체의 탄성계수와 같은 고유의 특성들에 많은 영향을 받는다. 앞의 여러 가지 사항을 고려하여 파속도의 일반적인 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Halliwell, 1963).

$$c = \sqrt{\frac{\frac{k}{\rho}}{1 + \frac{Dk}{Ee}}} \quad (6)$$

여기서 k = 유체의 탄성계수, ρ = 유체의 밀도, E = 관망의 Young 탄성계수, D = 관망의 내부직경, e = 관망의 두께이다.

2.2 특성선 방법

부정류를 해석하는 방법은 여러 가지가 존재하는데 그 중 특성선 방법(Method of characteristics)이 계산의 정확성과 편리성으로 가장 유용하게 사용된다. 특성선 방법은 연속방정식과 운동량방정식의 편미분 방정식을 상미분 방정식으로 변형하는 방법으로 계산진행 시간이 같아야 하는 단점이 있지만, 편미분 방정식을 보다 정확하고 편리하게 해석할 수 있다는 특성을 가지고 있다. 일반적인 관망 내부에서 흐르는 부정류의 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다 (Wylie et al., 1993).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad (8)$$

여기서, R 은 관로저항계수($=f/2DA$), f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수이다. Eq.(7)과 Eq.(8) 두 식을 조합하여 다음과 같은 형태로도 표현할 수 있다.

$$\lambda \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{gA}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + RQ|Q| = 0 \quad (9)$$

여기서, λ 는 임의의 승수이다. 이 λ 가 결정되면 다음과 같고,

$$\lambda = \pm \frac{gA}{c} \quad (10)$$

Eq.(9)의 괄호안의 항은 $H(x,t)$ 와 $Q(x,t)$ 의 전미분 형태가 되며, 아래의 특성선 상에서만 유효하게 된다.

$$\frac{dx}{dt} = \pm c \quad (11)$$

Eq.(11)은 $dx/dt = +c$ 인 경우 하류방향을 의미하고, $dx/dt = -c$ 인 경우 상류방향을 의미한다. 따라서 Eq.(9)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad \left(\frac{dx}{dt} = +c \right) \quad (12)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad \left(\frac{dx}{dt} = -c \right) \quad (13)$$

위의 식은 $dx/dt = \pm c$ 로 정의되어지는 C^+ 와 C^- 특성선상에서만 유효하게 적용된다. 만약 초기조건과 시간-공간 축을 알고 있다면, Eq.(12)과 Eq.(13)는 Fig. 2의 AP선과 BP선을 따라 적분할 수 있다.

Fig. 2에서 P에 대한 방정식은 다음과 같이 Q 와 H 의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$H_P = C_P - B_P Q_P \quad (14)$$

$$H_P = C_M + B_M Q_P \quad (15)$$

여기서 C_P , B_P , C_M , B_M 는 적분상수로써 다음과 같다.

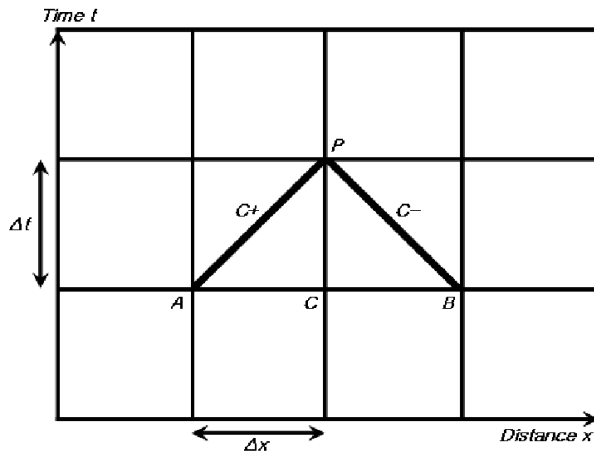


Fig. 2. Characteristic lines.

$$C_P = H_A + Q_A [B - R |Q_A| (1 - l)] \quad (16)$$

$$B_P = B + lR |Q_A| \quad (17)$$

$$C_M = H_B + Q_B [B - R |Q_B| (1 - l)] \quad (18)$$

$$B_M = B + lR |Q_B| \quad (19)$$

여기서 Q 와 H 의 아래첨자는 그 점에서의 Q 와 H 을 의미하고(P는 $Time = t + \Delta t$, A와 B는 $Time = t$), $B(=c/gA)$ 는 관로의 물리적 특성, l 는 0.85의 중간값을 가지는 선형화 상수다. 특성선 값을 구하기 위해서는 초기조건 A와 B가 먼저 주어져야 한다. 임의의 관망에서 위의 식을 적용하는 과정은 정류상태의 마지막 값들을 계산하고 난 뒤, 그것을 부정류상태의 초기 값으로 취함으로써 부정류상태의 계산을 진행할 수 있다.

2.3 관망 누수의 특성선 방법상의 표현

물이 흐르고 있는 관망에서 임의의 지점을 살펴보면, 그 지점을 기준으로 들어오는 유량 Q_i 와 나가는 유량 Q_f 가 존재한다. 만약 여기서 누수가 발생할 경우, Q_i 와 Q_f 의 유량 이외에 추가로 관망에서 유량 Q_{exit} 가 발생하게 되고 이와 동시에 관망의 기준 수두가 감소하게 된다. 이때 발생하는 누수의 유량과 수두를 특성화할 수 있는데, 이는 특성선 방법과 오리피스 방정식을 이용하면 질량보존 방정식으로부터 유량과 수두를 알아낼 수 있다 (Chaudry, 1987).

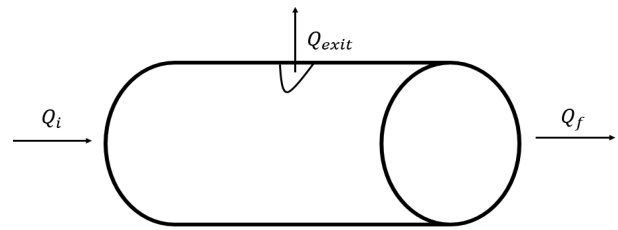


Fig. 3. Leakage of a pipeline system.

Fig. 3은 누수가 발생한 상수관망을 도식적으로 나타냈으며, 이를 통해 유량의 관계를 보여준다.

$$Q_f = Q_i - Q_{exit} \quad (20)$$

$$Q_i = \frac{H - C_M}{B_M} \quad (21)$$

$$Q_f = \frac{C_P - H}{B_P} \quad (22)$$

Eq.(20)은 유량에 관한 질량보존 방정식, Eq.(21)과 Eq.(22)은 특성선 방정식을 이용하여 유량을 구하는 식이다. Eq.(21)와 Eq.(22)을 Eq.(20)에 대입하면 다음과 같다.

$$H = C_K - B_K Q_{exit} \quad (23)$$

$$B_K = \left(\frac{1}{B_P} + \frac{1}{B_M} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$C_K = B_K \left(\frac{C_P}{B_P} + \frac{C_M}{B_M} \right) \quad (25)$$

특성선 방정식 이외에도 오리피스 방정식을 이용하여 누수 유량과 수두를 이용할 수 있는데, 이는 다음과 같다.

$$Q_{exit} = C_d A_{exit} \sqrt{2g(H - H_{elevation})} \quad (26)$$

여기서, C_d 는 유량계수로 1로 가정을 한다. Eq.(23)과 Eq.(26)을 결합하면 다음과 같이 수두에 관한 2차 방정식을 얻을 수 있다.

$$H^2 - 2(C_K + g(B_K C_d A_{exit})^2)H + (C_K^2 + 2gH_{elevation}(B_K C_d A_{exit})^2) = 0 \quad (27)$$

Eq.(27)을 근의 공식을 통해서 수두를 구할 수 있고 동시에 누수 유량도 알아낼 수 있다.



3. 실험 이론 및 장치

3.1 실험 장치

Fig. 4는 연구를 위한 관망 시스템의 개략도이다. 크기는 저수조-관망-밸브로 구성되어 있고, 왼쪽 끝단에 저수조가 위치해있으며, 오른쪽 끝단에는 닫힌 상태로 존재하는 밸브가 저수조와 단일 관망으로 연결되어 있다. 이 관망은 직경 0.272 m, 두께 0.0021 m, Darcy-Weisbach 마찰계수가 0.0244인 스테인리스 관망이며 수평 길이는 최대 90 m로 구성되어 있다.

이러한 기본 관망에 더해 압력파가 발생함에 따른 누수 탐지를 위해 밸브에서 0.3 m 떨어진 지점에 압력파 발생장치를 직경 0.0217 m, 길이 2.1 m로 기존 관망과 연결시켰다. 여기서 0.3 m 떨어진 지점에 고정밀 수압계(AEP; TPUSB, 0.05%)를 설치하였고, 오른쪽 끝단 밸브로부터 72 m 떨어진 지점에서 누수를 발생시킬 수 있게 누수를 설치하였다.

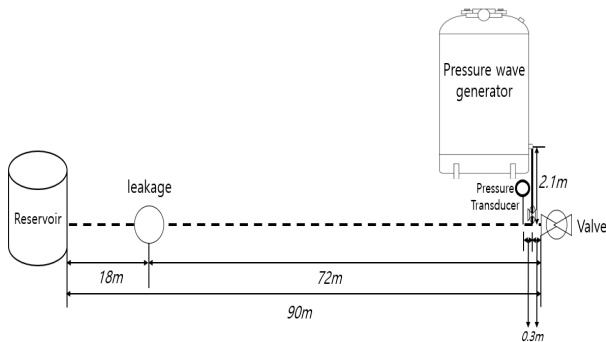


Fig. 4. Experimental setup of a reservoir-pipeline-valve system.

3.2 압력파 발생장치를 통한 비선형 압력고려

3.2.1 압력파 발생장치 구성

압력파 발생장치를 통한 누수탐지는 밸브의 급폐로 인해 발생하는 수충격과 비교하여 작은 크기의 압력 주입에 따른 상대적으로 작은 관망 내 압력의 증가로 연구를 수행할 수 있는 큰 장점이 있다 (Meniconi et al., 2011). 이에 근거하여 연구에 필요한 압력파 발생 장치를 Fig. 5와 같이 휴대가 가능하도록 자체 제작하였다. 발생장치 내부에 하단의 스텐밸브 입구를 통해 물을 채울 수 있고, 하단의 밸브들을 모두 잠근 후에 오른쪽의 질소탱크를 발생장치 상단 우측의 주입구와 플렉시블 호스로 연결하여 최대 10 bar까지 압력을

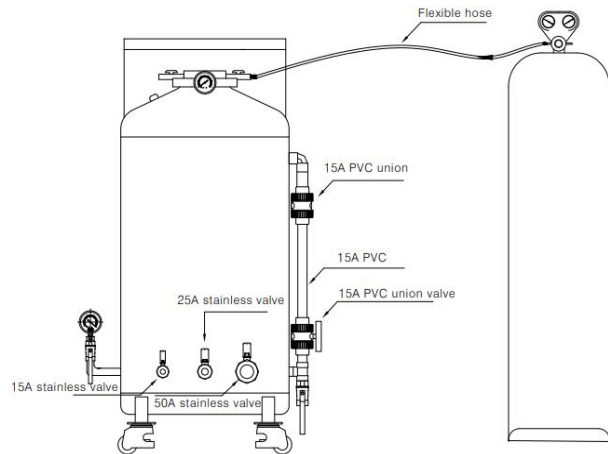


Fig. 5. Portable pressure wave generator.

주입할 수 있으며, 상단 좌측의 주입구를 통해 압력을 방출시키는 것도 가능하며 원하는 만큼의 압력 수치를 설정할 수 있다.

3.2.2 압력파의 투입거동

압력파 발생장치를 통해 발생한 압력파가 관망으로 주입되는 과정은 밸브의 급격한 개방을 통해서 이루어지는데 이는 통상적으로 선형적인 압력의 증가가 짧은 시간간격에 주어지는 방식으로 모의가 이루어졌다 (Meniconi et al., 2011). 그러나 실험과 모의과정의 시행착오를 통해서 주입되는 압력의 거동을 정교화할 필요성이 발생했고, 압력파 발생을 정확하게 모의하기 위해 2장의 부정류 해석이론을 Fortran언어로 변환하여 microsoft visual studio 2017에 적용한 부정류 해석 프로그램을 기반으로 하여 선형주입거동(Linear input pattern)과

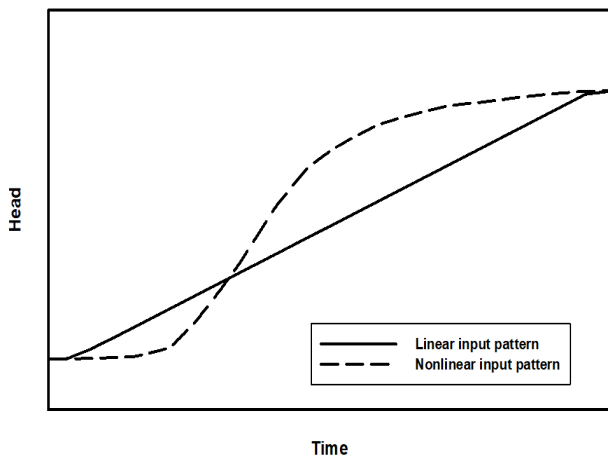


Fig. 6. Comparison between linear and nonlinear input pattern.

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

비선형주입거동(Nonlinear input pattern) 2가지 거동으로 모의하였다. 선형주입거동은 일정 시간동안 압력이 선형적으로 증가하고 비선형주입거동은 일정 시간동안 압력이 비선형적으로 증가함을 보여주는 거동으로써 Fig. 6과 같은 양상을 보인다. 선형주입거동은 압력이 일정하게 증가하는 이상적인 직선의 형태로 발생하고, 비선형주입거동은 현장에 설치된 대부분의 밸브는 들어오는 유량에 관계없이 안전상의 이유로 상당히 느리게 개폐하도록 설계가 되어 있는 점을 적용해 어느 정도 시간이 흐르고 압력이 급격하게 증가하는 형태로 발생한다는 차이가 있다. 두 거동을 통해 모의한 값들과 압력과 발생장치를 통해 획득한 실험값들을 비교하여 어느 거동이 누수가 존재하는 관망에서 수압의 변동을 더 잘 묘사하는지 비교를 수행하였다.

3.3 연구 과정

연구 수행을 위해 저수조의 수두를 23.500 m, 압력과 발생장치의 수두를 29.970 m로 하여 수두차이를 6.470 m정도로 설정한 뒤, 관망의 정상상태 흐름을 위해 오른쪽 끝단의 밸브를 개방하여 일정 시간동안 아무런 조작 없이 물을 흐르게 하고난 뒤 밸브를 닫고 연구를 시작하였다.

압력과 발생장치와 관망을 연결시키는 밸브를 0.06초 만에 개방하고 5초 동안 상태를 유지한 뒤 3초 동안 밸브를 천천히 닫는 과정을 정립하여 연구에 적용시켰다. 밸브를 급격하게 개방했을 때 장치에서 6.470 m의 더 높은 압력파가 관망 내부에 주입되는데, 이렇게 발생한 압력파는 관망을 따라서 진행하다가 경계조건에 반사되어 원위치로 돌아오는 과정을 수없이 반복하고 있으며, 이는 수압계로 측정된 수압의 감쇠를 통해 확인할 수 있다. 이 때 압력파가 처음으로 반사되고 돌아오는 시간을 τ 라 하면, τ 는 식 $\tau = 2L/c$ (L =관망의 직선길이, c =파속도)을 따르기 때문에, 이를 통해 대상 관망의 파속도를 알아낼 수 있음과 동시에 관망의 임의 지점에서 일어나는 현상들을 효율적으로 진단할 수 있다.

이러한 과정을 확실하게 정립하여 관망 상태를 육안으로 진단한 후, 누수가 없는 조건과 72 m 지점에서 누수가 발생하는 조건에서 같은 과정으로 연구를 수행하였다. 이때 발생하는 누수는 대기로 방출되며, 유량은 $1.31 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 무누수 조건에서의 결과 비교

위 과정을 적용하여 누수가 없는 조건에서 압력파가 발생함으로써 시간에 따른 수압의 변화를 Fig. 7로 나타냈다. 검은색 직선은 선형주입거동을 통해 압력과 발생을 해석한 결과, 검은색 점선은 비선형주입거동을 통해 해석한 결과이며 회색 점선은 수압계를 통해 측정된 실측값이다.

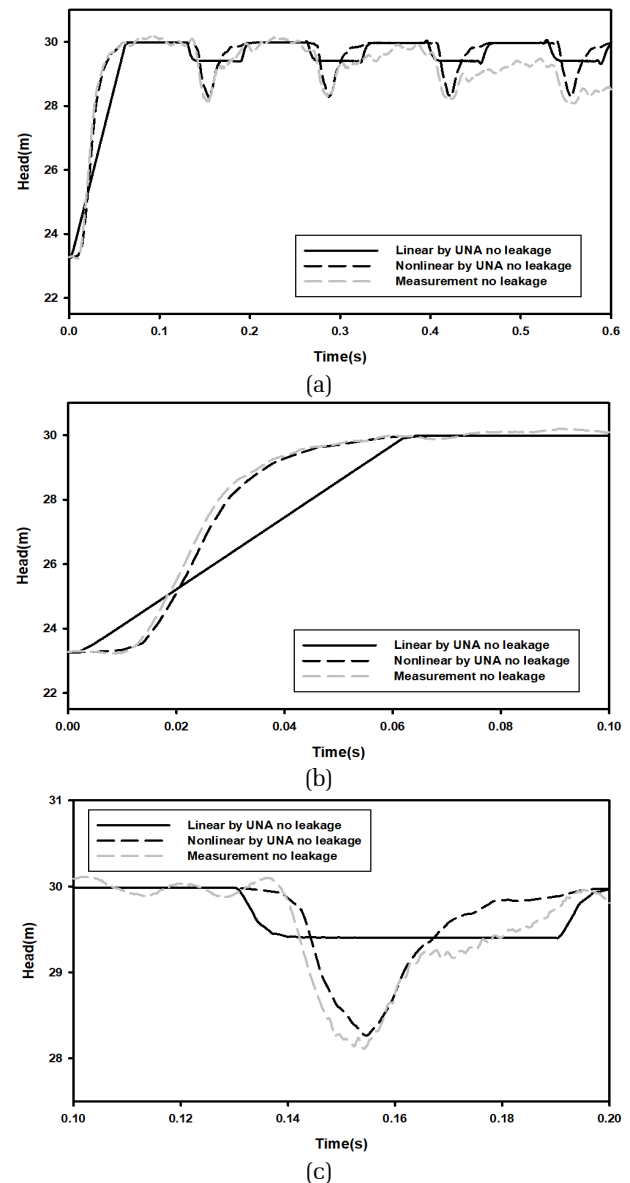


Fig. 7. Time series of pressure head on no leakage for (a) 0~0.6 sec, (b) 0~0.1 sec and (c) 0.1~0.2 sec.



Fig. 7에서 고찰해보면, 선형압력거동보다 비선형압력거동이 실측값과 유사한 반응 양상을 보였다. 압력파가 반사되어 돌아오는 시간은 모두 약 0.13초로 동일하여 대상 관망의 파속도가 1.385 m/s임을 알 수 있지만, 이외에는 선형주입거동과 실측값과 큰 차이를 나타냈다. (b)에서 보이듯이 압력파가 선형으로 주입되지 않아 관망에서 압력파가 발생하는 시발점이 다르게 나타나고 동시에 수압이 감소하는 시점도 달라져 차이를 나타낸다. 또한 수압이 감소하는 형태도 다르게 나타나게 되는데 0.50 m 정도 길고 낮게 감소하는 양상의 선형주입거동과는 달리 비선형주입거동은 1.60 m 정도 짧고 깊게 감소하는 형태를 나타냈으며 실측값도 이와 아주 유사한 형태를 나타냈다. 이는 실측값과 유사한 형태의 비선형압력거동이 선형압력거동보다 누수를 포함하는 관망 내부에서 일어나는 임의의 현상들을 더 정확하게 묘사할 수 있음을 보여주었다. 다만, (a)을 통해 실측값은 시간이 경과함에 따라 비선형압력거동과의 오차가 점점 증가했는데, 이는 실제 실험에서 압력파가 주입되는 과정에서 관망 내부로 공기가 일부 유입되어 압력파의 전달과정에서 공기기포의 영향이 수압의 불확실성을 가져오는 것으로 판단된다.

4.2 누수 발생으로 인한 결과 고찰

누수가 없는 조건에서의 탐지능력을 확인한 후, 72 m 지점에서 누수를 발생시키고 똑같은 연구과정을 수행하여 얻은 수압의 변화를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타냈다. 정상 관망에서 누수가 발생할 경우, 첫 번째 압력파가 누수지점과 저수조 둘 다에 반사되어 돌아와 수압이 감소하는 형태가 한 주기에 2개가 나타나고, 72 m 지점에서 발생한 누수라는 점과 관망의 파속도가 1.385 m/s라는 점을 이용하여 압력파 발생 시점으로부터 수압이 감소하는 시점이 0.10 초 만에 나타나야 한다 (Brunone et al., 2008).

이러한 해석들을 Fig. 8에서 확인할 수 있으며 저수조 지점뿐만 아니라 누수 지점에서도 0.50 m 정도 감소하는 형태가 나타나는 점을 포함하여 비선형주입거동이 실측값과 유사한 형태를 나타냈다. Meniconi et al. (2011)도 이와 유사한 실험을 수행함으로써 시간에 따른 수압의 그래프를 얻었다. 관망의 길이에 따른 수압이 감소하는 시점이 $\tau = 2L/c$ 을 따르고 수압의 감소

정도도 약 1.50 m로 공통점을 확인할 수 있었다. 다만 누수 지점에서 감쇠 후 회복하고 저수조 지점에서 다시 감쇠하는 수압의 형태가 아닌 선형주입거동에서의 감쇠 형태처럼 누수 지점에서 계속 감쇠된 수압으로 진행되다가 저수조 지점에서 그대로 감쇠했다는 점에서는 분명한 차이점을 보였다.

Fig. 8을 통해 약 0.10초 만에 수압이 감소하는 형태가 나타남으로써 72 m 지점에서 발생한 누수를

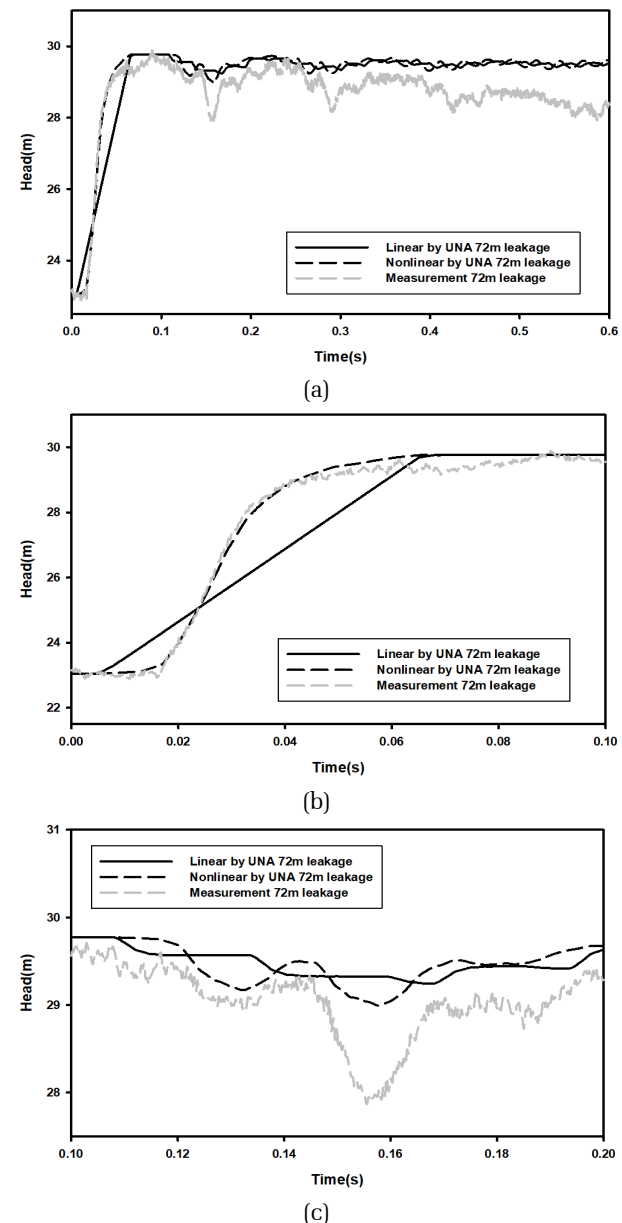


Fig. 8. Time series of pressure head on 72 m leakage for (a) 0~0.6 sec, (b) 0~0.1 sec and (c) 0.1~0.2 sec.

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

탐지할 수 있음을 증명했지만, 실측값과 비선형주입 거동이 누수가 없는 조건에서보다 더 많은 차이점을 나타냈다. 우선 누수가 발생함에 따라 실측값에서 누수 자체가 발생시키는 수압의 변동요소가 나타났다는 점과 저수조 지점에서 수압이 감쇠하는 정도가 실측값과 비선형주입거동이 서로 달랐고 비선형주입거동에서의 감쇠가 1.00 m 정도 훨씬 낮게 나타났다. 누수가 없는 조건에서는 문제가 없었지만 누수가 발생했을 때 이러한 차이가 보이는 이유는 2.3에서의 관망 누수의 특성선 방법상의 표현에 근거하여 거동화한 비선형주입거동이 실제 누수 현상을 설명하는 데 있어서는 일정 부분 한계가 있음을 보여준다. 이를 통해 특성선 방정식과 오리피스 방정식을 통해 누수유량과 수두를 산출했던 방정식보다 더 현장에 적합한 누수 방정식을 적용하여 더욱 개선된 비선형주입거동을 개발하는 연구가 지속적으로 행해져야 함의 필요성을 보여준다.

5. 결 론

1) 현장 상수관망에서의 누수탐지를 위해 관망 손상을 쉽게 야기하는 기존의 수충격으로 천이류를 발생시킴으로써 누수를 탐지하는 방법을 대신하여, 이송이 가능한 압력과 발생장치에서 생성된 압력파가 반사함으로써 시간 영역에서 나타나는 수압의 변화 및 수압 감쇠 형태를 통해 누수를 탐지할 수 있음을 확인했다. 또한, 압력과 발생장치에 의해 주입되는 압력과 발생 형태를 기반으로 선형주입거동 및 비선형주입거동을 부정류 해석프로그램을 통해 모의한 결과와 실험을 통해 얻은 실측값을 비교한 결과, 비선형주입거동이 선형주입거동보다 안정성을 이유로 설계된 현장 밸브에서 확보된 실측값에 더 가까운 형태를 나타냈고 수압의 감쇠정도를 통해 누수를 훨씬 정확하게 탐지할 수 있음을 보여줬다.

2) 누수가 없는 조건에서는 비선형주입거동 결과와 실측값이 수압의 감쇠 형태 및 감쇠 정도가 동일한 형태를 보였지만, 시간이 지남에 따라 관망 내부로 공기가 주입되어 실측값의 수압은 비선형주입거동과 다르게 전체적으로 감소하는 형태를 나타냈다. 누수가 있는 조건에서는 비선형주입거동의 누수 지점에서의 감쇠 형태가 실측값과 동일하게 나타났지만 저수조 지점에서 수압의 감쇠 정도가 실측값에 비해 1.00 m

정도로 훨씬 낮게 나타났다. 2.3에서의 관망 누수의 특성선 방법상의 표현에 근거하여 거동화한 비선형주입거동이 실제 누수 현상을 설명하는 데 있어서는 일정 부분 한계가 있음을 보여준다.

3) 실제 현장의 상수관망에서의 누수탐지를 효율적으로 수행하기 위해서는 특성선 방정식과 오리피스 방정식을 통해 누수유량과 수두를 산출했던 기존의 비선형주입거동보다 더 현장에 적합한 누수 방정식을 적용하여 더욱 개선된 비선형주입거동을 개발하는 연구가 지속적으로 행해져야 함을 의미한다.

기호 설명

V	= Velocity.
P	= Pressure.
c	= Wave speed.
ρ	= Density.
A	= Cross-sectional area.
H	= Pressure head.
g	= Gravitational acceleration.
k	= Bulk modulus of elasticity.
E	= Young's modulus of elasticity.
e	= Thickness.
D	= Diameter.
Q	= Flow rate.
R	= Pipeline resistance coefficient.
f	= Darcy-Weisbach Friction Factor.
B	= Physical properties of the pipeline.
l	= Linearization constant.
C_d	= Discharge coefficient.
Q_{exit}	= Leak outflow.
$H_{elevation}$	= Elevation.
A_{exit}	= Cross-sectional area of leakage.
τ	= First characteristic time of the pipeline.
L	= Straight length.

사 사

이 연구는 환경부 "글로벌탐 환경기술개발사업 (20160886004)"의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.



References

- Brunone, B. and Ferrante, M. (2001). Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients, *J. Hydraul. Res.*, 39(5), 539-548.
- Brunone, B., Ferrante, M. and Meniconi, S. (2008). Portable pressure wave-maker for leak detection and pipe system characterization, *J. Am. Water Works Assoc.*, 100(4), 108-116.
- Chaudhry, M.H. (1987). *Applied hydraulic transients*. 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
- Halliwell, A.R. (1963). Velocity of waterhammer wave in an elastic pipe, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 89(HY4), 1-21.
- Kapelan, Z.S., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2003). A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks, *J. Hydraul. Res.*, 41(5), 481-492.
- Kim, H.G., Kim, H.S., Lee, M.H. and Kim, S.H. (2005). Application of transient and frequency analysis for detecting leakage of a simple pipeline, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 27(10), 1065-1071.
- Kim, S.H., Kim, B.K., Jo, I.Y. and Lee, H.D. (2003). A comprehensive study of the transient analysis considering the unsteady friction terms in a pipeline system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 25(5), 602-608.
- Lee, M.H., Song, Y.S. and Kim, S.H. (2006). Transient analysis and experiment considering unsteady friction and leakage in a pipeline system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 20(2), 207-214.
- Liggett, J. A. and Chen L. C. (1994). Inverse Transient Analysis in Pipe Networks, *J. Hydraul. Eng.* 120(8), 934-955.
- Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M. and Massari, C. (2011). Small amplitude sharp pressure waves to diagnose pipe systems, *Water Res.*, 25(1), 79-96.
- Ministry of Environment. (2018). 2017 Statistics of waterworks.
- Wylie, E.B., Streeter, V.L. and Suo, L. (1993). *Fluid transients in systems*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632.

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159