ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI https://doi.org/10.11001/jksww.2022.36.4.219

피압 단순 관로 체제에서의 인버스 임피던스를 이용한 수압기반 유속추정기술

A pressure based flow velocity estimation technique using inverse impedance for simple pressurized pipeline systems

이정섭[1]·고동원[2]·최두용[3]·김상현[2*]
Jeongseop Lee[1]·Dongwon Ko[2]·Dooyong Choi[3]·Sanghyun Kim[2*]

[1]부산대학교 생산기술연구소, [2]부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과, [3]한국수자원공사
[1]*Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University*
[2]*Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University*
[3]*K-water Institute, K-water*

ABSTRACT

In this study, we propose a flow velocity evaluation scheme based on pressure measurement in pressurized pipeline systems. Conservation of mass and momentum equations can be decomposed into mean and perturbation of pressure head and flowrate, which provide the pressure head and flowrate relationship between upstream and donwstream point in pressurized pipeline system. The inverse impedance formulations were derived to address measured pressure at downstream to evaluation of flow velocity or pressure at any point of system. The convolution of response function to pressure head in downstream valve provides the flow velocity response in any point of the simple pipeline system. Simulation comparison between traditional method of characteristics and the proposed method provide good agreements between two distinct approaches.

Key words: Pipeline system, Velocity estimation technique, Frequency domain analysis, Unsteady flow analysis

주제어: 관수로 체제, 유속추정기술, 빈도영역해석, 부정류 해석

Received 2 June 2022, revised 2 August 2022, accepted 11 August 2022.
*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

• **이정섭 (전임연구원) / Jeongseop Lee (Associate Researcher)**
부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

• **고동원 (박사과정) / Dongwon Ko (Ph.D Student)**
부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

• **최두용 (수석연구원) / Dooyong Choi (Head Researcher)**
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125 Yuseong-daero 1689 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

• **김상현 (교수) / Sanghyun Kim (Professor)**
부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
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

상수관망은 물을 분배하는 주요 수자원 운송 시설이며, 이들의 적절한 관리는 관망관리에서 중요한 과제이다. 관망의 흐름 특성을 파악하는 방법으로는 기존의 특정 지점에 설치된 유량계로 특정 지점에서 유량을 실시간으로 측정하는 방법이 있지만, 실제 현장 대부분의 상수관망은 지하에 매설되어 있어 임의의 관망에 유량계를 설치하고 유량을 측정하는데는 상당한 비용이 발생하고, 관망의 특성을 파악하기에는 큰 어려움이 따른다.

수압계는 상수관망 임의의 지점에서 수압을 측정하는 장치로, 민감도, 비용, 샘플응답시간 등 여러 항목을 고려했을 때 가장 효율적인 측정 장치로 꼽히며 (Brunone 1999), 수압계로 수압을 측정하는 것이 관망의 특성을 파악하기 위한 부정류를 해석하는 방법론을 연구하는 데 있어서 중요한 전제조건이다 (Liu et al., 2018).

그리고 관망의 특성을 파악하기 위해 수압자료를 부정류 기반으로 해석하는 과정을 수행해야 하는데, 부정류를 해석하는 방법에서 대표적으로 특성선 방법 (Method of Characteristics iMOC)이 있다 (Streeter and Wylie, 1993; Chaudhry, 2014). 편미분방정식인 연속방정식과 운동방정식을 상미분방정식으로 변형하여 부정류를 해석하는 특성선 방법을 사용하여, 연구자들은 부정류 역산과정(Liggett and Chen, 1994; Vítkovský et al., 2000; Kapelan et al., 2003; Vítkovský et al., 2007; Covas and Ramos, 2010; Stephens et al., 2013), 부정류 감쇠 분석과정(Wang et al., 2002; Wang et al., 2005) 및 수압의 반사파 분석과정(Brunone, 1999; Gong et al., 2013) 등 여러 과정을 활용하여 부정류 기반 수압자료를 해석해왔다. 하지만, 특성선 방법은 모든 절점과 모든 시간에서 계산을 진행해 계산 진행시간이 너무 느리고 경계조건의 수정이 어려운 단점을 가지고 있다. 특성선 방법에 대한 대안적인 해석법으로는 임펄스 응답 방법이 있는데 이는 수압과 유량 사이의 관계식인 임피던스를 통해 관망의 특성을 분석하는 방법으로, 관망에서의 경계조건 수정없이 계산가능하고 결과를 얻고 싶은 지점만을 계산 가능하여 기존의 특성선 방법에서 걸리는 진행시간보다 더 빠른 장점이 있다 (Kim, 2007). 임펄스 응답 방법은 시간과 공간상의 함수관계인 연속방정식과 운동량방정식을 주파수와 공간상의 함수관계로 전환하는 과정을 진행하는 방식으로 수행되어지며, 이를 통해 연구자들은 관망의 부정류를 해석하거나(Suo et al., 1989; Covas et al., 2005) 누수의 위치를 분석하고(Lee et al., 2007) 또는 복잡 관망에서 수압와 유량 사이 관계를 임펄스 응답 방법을 통해 증명하는 방법론의 개발 등의 여러 방식으로 연구를 수행하였다 (Kim et al., 2008; Kim et al., 2020). 기존의 임펄스 응답 방법은 복소수 수압과 유량의 비를 수리 임피던스로 정의하여 유량을 통해 임의의 지점의 수압을 계산하는 방식으로 구체적 한계를 가지고 있다. 임펄스 응답 방법은 밸브 급폐에서 발생하는 최소 시간 간격이 유량이 급변하는 조건에 대한 수격압 현상에 한정되어있고 현장에서 실제로 일어나는 다양한 밸브 운영 조건이나 수압 변동 조건을 모사할 수 없는 한계점이 있다.

이러한 부분을 해결하기 위해서 이 논문에서는 인버스 임피던스 방법을 제안한다. 이는 관측된 수압을 통해 임의의 지점의 수압과 유량 혹은 유속을 계산하는 방식으로 수압계로 측정한 데이터를 대입하여 결과를 도출해내는 구조로 설계되어 있다. 이와 같은 방법론의 구조의 유의성을 검증하기 위해서 수압계의 높은 빈도 성능을 구현할 수 있는 부정류 해석에서 널리 쓰이는 특성선 방법을 사용하여 측정 데이터를 대체하여 수압과 유속을 모의하고 특성선 방법을 통해 모의한 수압을 유도된 인버스 임피던스 수식에 대입하여 동일 빈도의 수압과 유속을 추정하는 연구를 수행한다. 제안된 방법론의 검증을 위해서 인버스 임피던스 방법으로 추정한 수압과 유속을 특성선 방법에서 모의한 수압과 유속을 비교하여 결정론적 방법인 특성선 방법과 제안된 방법의 정확성을 확인한다.

이와 같은 과정을 통해서 관망 내의 특정 지점에서 보다 간단한 방법으로 고빈도의 수압 데이터를 획득할 수 있는 센서형 수압계를 사용하면, 저비용·고효율의 성능으로 상수관망의 특성을 쉽게 파악할 수 있다. 특히 수압계를 사용하여 고빈도의 수압 변화를 측정하는 방식으로 획득된 자료는 고빈도의 유속이나 유량자료의 변환을 가능하게 하여준다.

2장에서는 결정론적 방법인 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법의 기본적인 유도과정을 정리하였고 인버스 임피던스의 기반이 되는 수식의 유도를 통해 수압을 이용하여 유량이나 유속을 계산하는 방법을 정리하였다. 3장에서는 수치해석을 통해 얻은 다양한 조

건의 수압 모의 결과와 이를 바탕으로 추정한 유속 결과를 비교하여본다. 결론으로는 결정론적 방법인 특성선 방법과 대체 방법인 인버스 임피던스 방법의 결과 비교에서 두 방법은 일치하는 결과를 보였으며 인버스 임피던스 방법이 수압을 사용하여 유속을 추정하는 상당한 잠재성을 보여줬다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 피압관로에서의 지배방정식

피압관로에서의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 이루어져 있으며, 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 표현된다 (Streeter and Wylie, 1993).

$$\frac{c^2}{g}v_x + h_t + vh_x = 0 \tag{1}$$

$$v_t + vv_x + gh_x + \frac{f}{2d}V|V| = 0 \tag{2}$$

여기서 c = 파속도, g = 중력가속도, d = 관내 직경, f = Darcy-Weisbach 마찰계수로, 수압과 유속의 편미분방정식의 형태로 나타난다.

2.2 결정론적 방법

특성선 방법(MOC)은 부정류 해석에서 가장 많이 쓰이는 방법으로 편미분방정식인 연속방정식과 운동량방정식을 상미분방정식으로 변형하는 방법으로 계산진행시간이 동일해야 하는 단점이 있지만, 편미분방정식을 보다 정확하고 편리하게 해석할 수 있는 큰 장점이 있다. 특성선 방법 적용을 위해, 연속방정식과 운동량방정식을 수압과 유속의 미분방정식으로 단순하게 변형하면 다음과 같다 (Streeter and Wylie, 1993).

$$L_1 = \frac{c^2}{g}v_x + h_t = 0 \tag{3}$$

$$L_2 = v_t + gh_x + \frac{f}{2d}V|V| = 0 \tag{4}$$

여기서, g = 중력가속도로, 여기에 미지의 연산자 λ를 사용하여 Eq.(3)과 Eq.(4)를 선형적으로 조합하고 정리하면 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\lambda L_1 + L_2 = (v_t + \lambda\frac{c^2}{g}v_x) + \lambda(h_t + \frac{g}{\lambda}h_x) + \frac{f}{2d}V|V| = 0 \tag{5}$$

λ는 임의의 승수로 $\pm g/c$로 표현되며, 종속변수 h와 v로 구성된 Eq.(3)과 Eq.(4)에서 λ를 결정하여 $v(x,t)$와 $h(x,t)$의 전미분 형태의 Eq.(5)로 표현할 수 있으며, 이는 $\pm c = dx/dt$의 특성선 상에서만 유효하게 된다. $+c$인 경우에는 하류방향을 의미하고, $-c$인 경우에는 상류방향을 의미하며, 이를 통해 다음과 같은 상미분방정식의 형태로 표현될 수 있다.

$$\frac{dv}{dt} + \frac{g}{c}(\frac{dh}{dt}) + \frac{f}{2d}V|V| = 0 \ (\frac{dx}{dt} = +c) \tag{6}$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{g}{c}(\frac{dh}{dt}) + \frac{f}{2d}V|V| = 0 \ (\frac{dx}{dt} = -c) \tag{7}$$

Eq.(6)과 Eq.(7)은 $+c$와 $-c$의 기울기를 가지는 특성선상에서만 유효하며, 초기 경계조건과 시간-공간축을 결정하여 특성선을 따라 적분함으로써 임의 지점의 수압과 유속을 계산할 수 있다.

2.3 인버스 임피던스 방법(Inverse Impedance Method)

편미분 형태의 운동량방정식과 연속방정식에 수압과 유량항을 평균치와 산란항으로 구분하여 대립하고 이를 전개하면 다음과 같은 산란항으로 이루어진 다음과 같은 선형화된 편미분방정식을 도출할 수 있다.

$$h_x' + Lq_t' + Rq' = 0 \tag{7}$$

$$q_x' + Ch_t' = 0 \tag{8}$$

여기서 R은 선형화된 저항을 의미하고 층류조건에서는

$$R = \frac{32\nu}{gAD^2} \tag{9}$$

난류조건에서는

$$R = \frac{nf\overline{Q^{n-1}}}{2gDA^n} \tag{10}$$

여기서 인너턴스 L (inertance)과 카파시틴스 (capacitance) C를 정의하면 다음과 같다.

$$L=\frac{1}{gA};\ C=\frac{gA}{a^2} \tag{11}$$

변수분리 기법을 사용하여 선형화 방정식을 풀이하고 공간과 시간 항을 분리해서 표시하고, 공간상에서는 흐름의 특성이 상류단과 하류단으로 전파하고 시간상에서는 일방향으로만 진행한다는 가정으로 수식을 전개하면 다음과 같이 압력수두의 특별해가 나타난다.

$$h'=e^{st}(C_1e^{\gamma x}+C_2e^{-\gamma x}) \tag{12}$$

또한, 유량 산란분의 특별해도 다음과 같이 표현된다.

$$q'=-\frac{Cs}{\gamma}e^{st}(C_1e^{\gamma x}-C_2e^{-\gamma x}) \tag{13}$$

여기서 s는 일반적으로 복소수 빈도 혹은 라플라스 변수라고 알려져 있으며, 이 변수의 실수와 허수부분은 $s=\sigma+i\omega$과 같이 정의된다. 그리고 전달계수 γ는 다음과 같이 나타난다.

$$\gamma^2=Cs(Ls+R) \tag{14}$$

또 하나의 중요한 함수는 특성 임피던스인데 이는 다음과 같은 복소수 함수로 나타나고 시간과 공간에 독립적으로 다음과 같이 정의된다.

$$Z_c=\frac{\gamma}{Cs} \tag{15}$$

여기서, Z_c와 γ는 유체와 관수로의 물리적인 특성에 의해서 결정된다.

이와 같은 수식의 전개는 피압관로의 관로연장, l, 상의 상하류단 간의 복소수 영역에서의 수압과 유량의 관계를 다음과 같이 표현하게 된다.

$$H_D=H_U\cosh\gamma l-Q_UZ_c\sinh\gamma l \tag{16}$$

$$Q_D=-\frac{H_U}{Z_c}\sinh\gamma l+Q_U\cosh\gamma l \tag{17}$$

2.4 인버스 임피던스에 의한 수압과 유량 반응

Fig. 1은 저수조 관로 밸브로 구성된 단순관로 시스템의 개요도이다. 이와 같은 관로에서 유량과 수압 반응을 유도하기 위해서 복소수 유량과 수압의 비를 인버스 임피던스로 정의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z(x)^{-1}=\frac{Q(x)}{H(x)} \tag{18}$$

이를 관수로 상하류단에 대해서 정의할 수 있는데,

$$Z_D^{-1}=\left(\frac{1-(Z_U^{-1}Z_C)\tanh\gamma l}{Z_U^{-1}-(1/Z_C)\tanh\gamma l}\right)^{-1} \tag{19}$$

여기서, Z_D^{-1}는 하류단의 인버스 임피던스 Z_U^{-1}는 상류단의 인버스 임피던스이다.

상류간 저수조에서 하류단 임의의 지점까지의 수압 유량 관계가 Eq. (16)와 Eq. (17)로 구성되어 있고 이를 상류단 저수조간에 적용하면 하류단 밸브에서 다음과 같은 시간상의 유량반응이 나타난다.

$$r_{(D,l)}(t)=\frac{1}{\pi}Re\left[\int_0^\infty(-Z_C\tanh\gamma l)^{-1}e^{i\omega t}d\omega\right] \tag{20}$$

여기서 Re는 실수부를 의미한며, 하류단 저수조에서 길이 x만큼 떨어진 곳에서 하류단 수압에 대한 x 지점의 시간상의 수압 반응은 다음과 같이 나타난다.

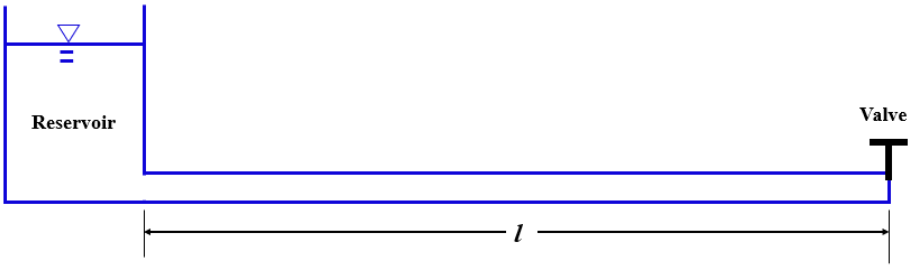

Fig. 1. Schematic diagram of a reservoir pipeline valve system.

$$r_{(xh)}(t)=\frac{1}{\pi}Re[\int_0^{\infty}(\cosh\gamma x+Z_D^{-1}Z_C\sinh\gamma x)e^{i\omega t}d\omega] \quad (21)$$

하류단 저수조에서 길이 x만큼 떨어진 곳의 하류단 수압에 대한 x지점의 시간상의 유량 반응은 다음과 같이 나타난다.

$$r_{(xq)}(t)=\frac{1}{\pi}Re[\int_0^{\infty}(\frac{1}{Z_c}\sinh\gamma x+Z_D^{-1}\cosh\gamma x)e^{i\omega t}d\omega] \quad (22)$$

2.5 시간상 수압 및 유량 반응

식(20)-(22)롤 도출된 반응함수는 다음과 같은 과정의 합성적분을 통해서 시간상의 수압이나 유량 반응으로 나타난다.

관로 말단에서의 수압의 변동은 다음과 같이 계산된다.

$$h(t)_{(x\fallingdotseq 0)}=\overline{h}+\int_o^t r_{xq_{(x\fallingdotseq 0)}}(t-\tau)\triangle h_D d\tau \quad (23)$$

여기서 $\overline{h}$는 기준수압, $\triangle h_D$는 하류단 밸브에서 수압의 변동이다. 만약 하류단에서 밸브를 급폐하면, 기준유량에서 0으로 변동되는 간단한 시계열이 들어간다.

유사한 방식으로 관로 상의 임의의 지점 x에서 수압의 변동은 다음과 같이 계산된다.

$$h(t)=\overline{h}+\int_o^t r_{xh}(t-\tau)\triangle h_D d\tau \quad (24)$$

관로 내의 임의의 지점에서의 유량도 다음과 같이 합성적분으로 계산될 수 있다.

$$q(t)=\overline{q}+\int_o^t r_{xq}(t-\tau)\triangle h_D d\tau \quad (25)$$

여기서, $\overline{q}$는 기준유량 즉 밸브의 개도가 변화하기 전의 정상상태 유량이다.

3. 실험결과

3.1 대상 단순관로 시스템

Fig. 2는 연구수행을 위한 저수조-관로-밸브-저수조(Reservoir Pipeline Valve Reservoir: RPVR) 형태의 단순피압관로 시스템으로, 양쪽의 저수조가 90 m 만큼의 거리를 스테인리스 재질 관망을 통해 유지하고 있고, 오른쪽 저수조 앞단에 개폐조정이 가능한 밸브로 구성되어 있다. 본 시스템은 23.38 m 수두의 왼쪽 저수조와 23.13 m 수두의 오른쪽 저수조 수두 차이를 통해 0.099 m/s 유속의 레이놀즈수는 1976으로 층류인 안정된 흐름을 발생시킬 수 있으며, 직경 0.020 m, 두께 0.0021 m, 그리고 Darcy-Weisbach 마찰손실계수가 0.036인 관망이 단일직선형태로 양쪽 저수조를 연결하는 시스템이다.

Fig. 3은 RPVR 형태의 단순피압관로에서 수지관을 추가하여 관망 특성을 변형한 시스템이다. 주 관로에서 수지관까지의 길이가 39.73 m, 수지관 자체의 길이는 8.7 m이다.

3.2 수압 모의

결정론적 방법인 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법을 비교하기 위하여 두 가지 방법으로 모의하였다. 특성선 방법의 결과는 MOC로 나타나었고 인버스 임피던스 방법의 결과는 IIM으로 나타내었다. 직선관망에서 23.3 m를 기준 수압으로 하여 밸브 폐쇄에 걸

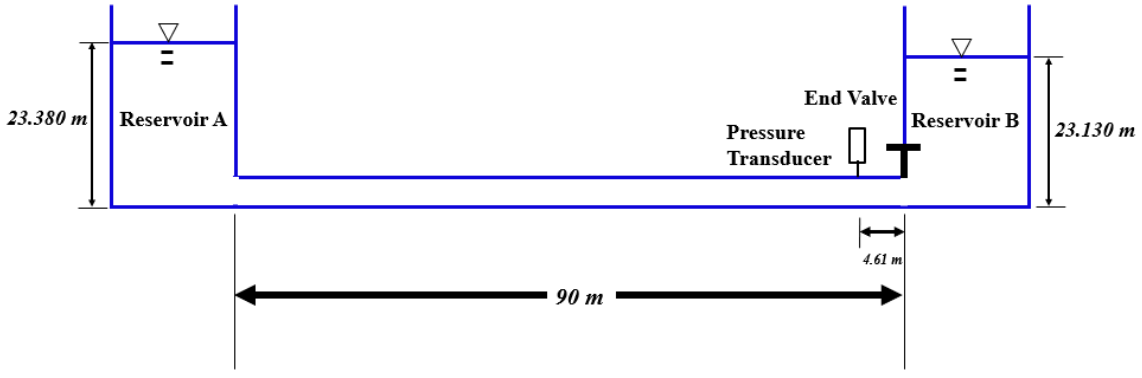

Fig. 2. Research setup of a simple pressurized pipeline system.

pp. 209-218
pp. 219-228
pp. 229-237
pp. 239-248

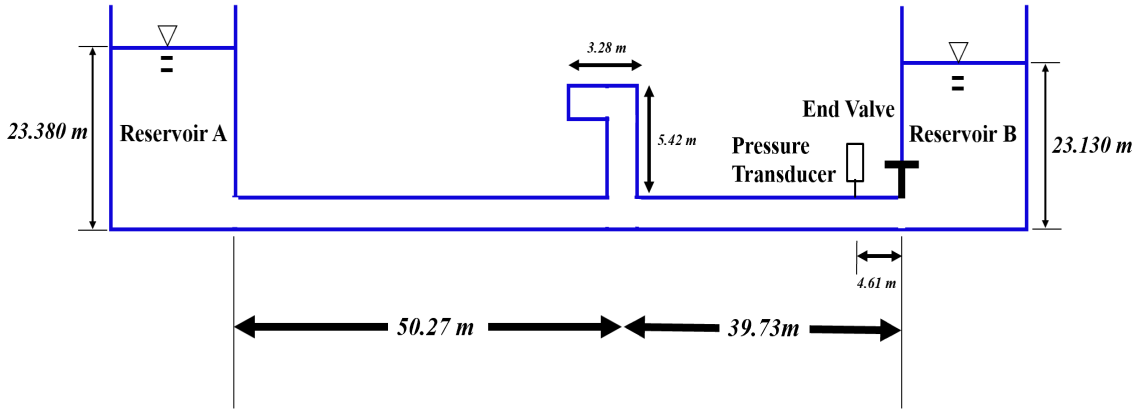

Fig. 3. Research setup of a branch pressurized pipeline system.

리는 시간을 0.01초로 하는 급폐 조건을 기본 조건으로 설정하였다.

Fig. 4의 직선관망 모의에서는 밸프 폐쇄가 끝나는 0.01초까지 수압이 상승하고 0.125초까지 유지되었다가 그 후로 하강하는 0.2547초의 사이클을 가지는 수격압 반응이 나타났다. 특성선 방법에서 모의한 그래프는 직선의 형태로 수압반응이 유지되나 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 수압이 최고 지점에 이르고 난 이후 진동이 생성되고 사이클이 진행되어도 생성된 진동이 유지되는 형태가 나타난다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 일치하는 결과를 보인다.

수지관망에서도 똑같은 방법으로 23.3 m를 기준 수압으로 하여 밸브 폐쇄에 걸리는 시간을 0.01초로 하는 급폐 조건을 기본 조건으로 설정하였다. Fig. 5에서 직선관망과 다르게 수지관망이 존재하기 때문에 수압이 수지관망에 반향되어 돌아오는 0.056초에서 급격하게 감소하고 다시 상승하는 형태가 나타난다. 0.125초부터 감소하는 형태는 직선관망과 비슷하나 그 후 사이클부터는 안정적인 수격압의 형태가 사라지고 불규칙한 형태로 수압이 진동하는 형태가 나타난다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 일치하는 결과를 보인다.

밸브를 급폐하는 조건뿐만 아니라 완폐하는 조건에서도 모의를 진행하였다. 23.3 m를 기준 수압으로 하여 밸브 폐쇄에 걸리는 시간을 2 L/a의 시간보다 길게 한 0.2초로 설정하였다.

Fig. 6은 수압이 2 L/a인 0.13초까지 상승하고 그 이후 하강하다 0.2초에서 밸브가 완전히 닫히고 그 이후 0.2547초의 사이클이 반복되는 수격압의 형태가 나타난다.

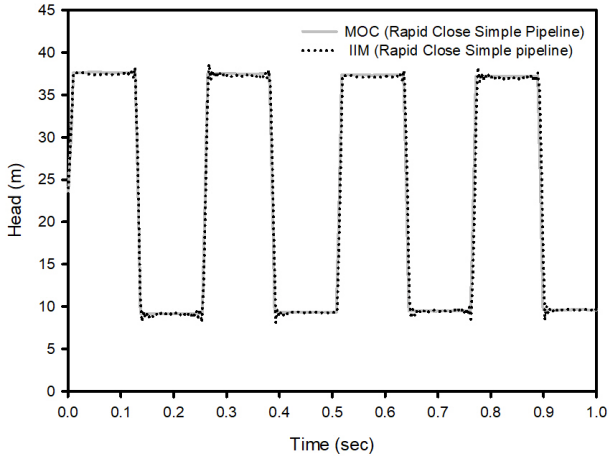

Fig. 4. Hydraulic head simulation result of rapid closed simple pressurized pipeline system.

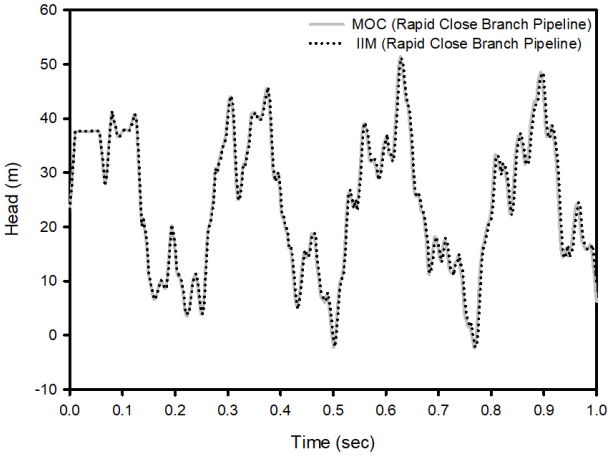

Fig. 5. Hydraulic head simulation result of rapid closed branch pressurized pipeline system.

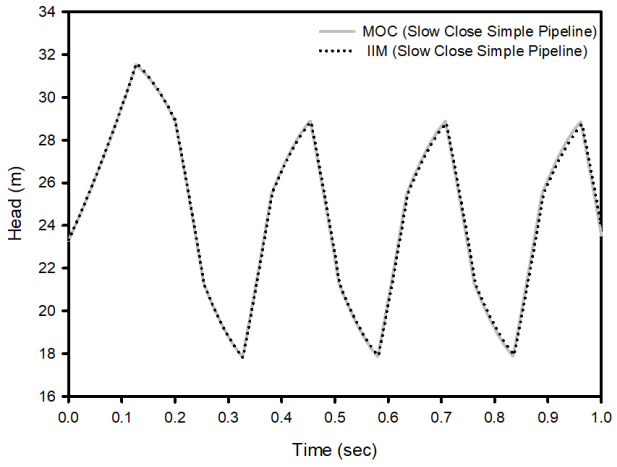

Fig. 6. Hydraulic head simulation result of slow closed simple pressurized pipeline system.

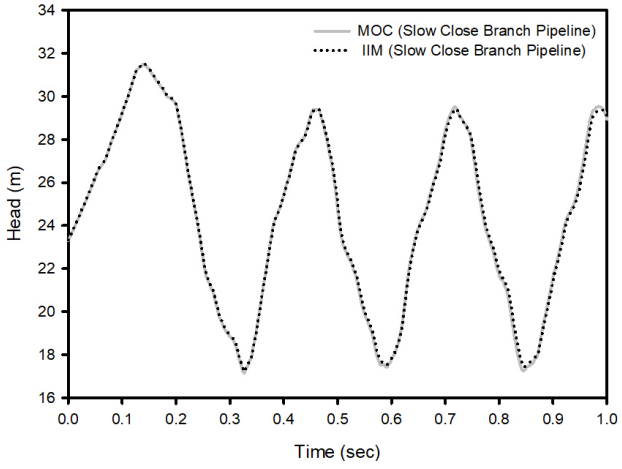

Fig. 7. Hydraulic head simulation result of slow closed branch pressurized pipeline system.

급폐 수격압 그래프와 달리 밸브 폐쇄 이후 수압이 수직으로 변하지 않고 피크를 가지는 형태가 나타난다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 일치하는 결과를 보인다.

Fig. 7은 수압이 2 L/a인 0.13초까지 상승하고 그 이후 하강하다 0.2초에서 밸브가 완전히 닫히고 그 이후 0.2547초의 사이클이 반복되는 수격압의 형태가 나타난다. 직선관망과 다르게 수지관망이 존재하기 때문에 수압이 수지관망에 맞고 돌아오는 0.056초에서 수압이 변형되는 형태가 나타나고 그 이후에도 수지관에 의한 영향으로 수압이 변형되는 형태가 나타난다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 일치하는 결과를 보인다.

3.3 유속추정방법

수압 모의에서는 관말 지점을 기준으로 하여 수격압에 의한 수두를 비교하였으나 관말 지점에서는 유속의 변화가 잘 나타나지 않아 유속 모의에서는 측정지점에서 45 m 떨어진 지점을 기준으로 하여 수격압에 의한 유속을 비교하였다. 직선관망에서 0.099204 m/sec를 기준 유속으로 하여 밸브 폐쇄에 걸리는 시간을 0.01초로 하는 급폐 조건을 기본 조건으로 설정하였다. 관 내 유체가 정방향대로 흐르는 상태를 양수로 하고 역방향으로 흐르는 상태를 음수로 표현하였다.

Fig. 8은 측정 지점에서 45m를 기준 지점으로 모의하였기 때문에 유속의 최고와 최하, 유속이 0인 상태에서 저수조에서 반향되는 90 m의 2 L/a인 0.06초 간 수압이 유지된다. 유체가 관 내를 왕복하며 수격압이 생성되는 형태가 나타난다. 수압 모의와 비슷하게 특성선 방법으로 모의한 유속은 직선의 형태로 나타나지만 인버스 임피던스 방법으로 모의한 유속은 유속이 유지되는 지점에서 미소 진동하는 형태가 나타난다.

Fig. 9에서 수지관망의 유속모의에서 유속의 최고와 최저 지점은 Fig. 8과 같은 지점에서 나타나나 0.03초 이후 직선관망과 다르게 추가된 수지관의 존재로 인해 유속이 급격하게 변화하는 형태가 나타난다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 일치하는 결과를 보인다.

밸브를 급폐하는 조건뿐만 아니라 완폐하는 조건에서도 모의를 진행하였다. 직선관망에서 0.099204 m/sec를

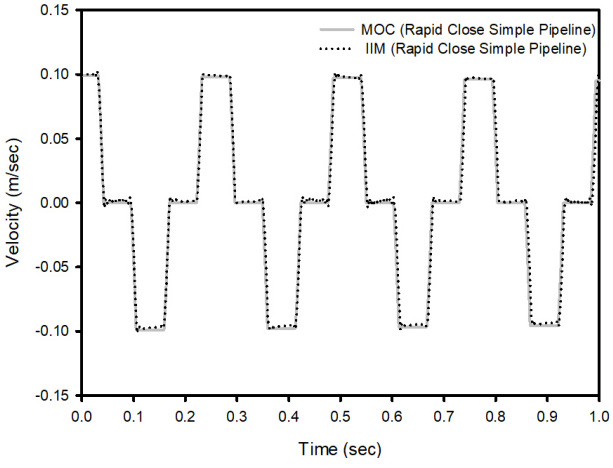

Fig. 8. Hydraulic velocity simulation result of rapid closed simple pressurized pipeline system.

기준 유속으로 하여 밸브 폐쇄에 걸리는 시간을 2 L/a의 시간보다 길게 한 0.2초로 설정하였다.

Fig. 10에서 유속이 0.2초까지 감소하였다가 밸브가 닫힌 후 수격압이 발생하는 형태의 그래프가 나타난다. 급폐 유속 그래프와 달리 밸브 폐쇄 이후 유속이 수직으로 변하지 않고 변화하는 형태가 나타난다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 시간이 지나감에 따라 오차가 발생한다. 이는 인버스 임피던스 방법에서 유량의 크기가 수압에 비해서 너무 작아서 생기는 반올림 오차이다 (모의에 대입하는 H는 m단위, Q는 m^3/sec의 단위를 사용한다). 실제로 인버스 임피던스는 그 크기가 10^{-7}에서 10^{-8}으로 계산시간이 진행됨에 따라서 누적 오차가 발생하는

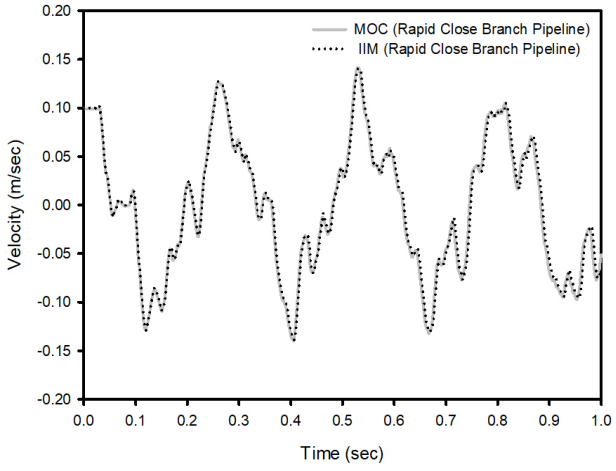

Fig. 9. Hydraulic velocity simulation result of rapid closed branch pressurized pipeline system.

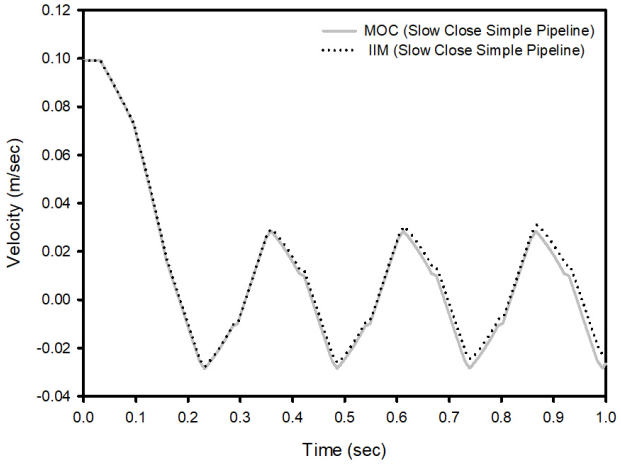

Fig. 10. Hydraulic velocity simulation result of slow closed simple pressurized pipeline system.

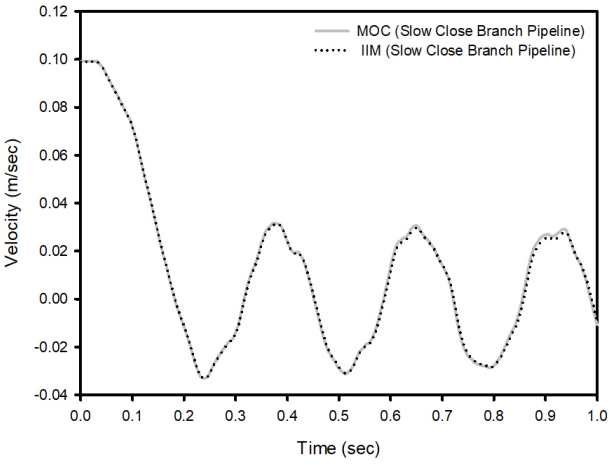

Fig. 11. Hydraulic velocity simulation result of slow closed branch pressurized pipeline system.

양상을 보이고 있다. 그러나 Fig. 10에서 나타나는 두 방법의 차이는 작은 정도로 높은 빈도로 측정값을 구하는 것이 불가능한 유속계의 현실을 고려하면 무시할 수 있는 정도이다.

Fig. 11은 완폐조건의 수지관망에서 특성선 방법으로 모의한 그래프에서 유속이 유지되지 않고 수지관의 영향에 의해 유속이 변형되는 형태가 나타나는데 인버스 임피던스 방법에서도 같은 형태로 유속이 변형되는 형태를 보인다. 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법으로 모의한 결과는 일치하는 결과를 보인다.

3.4 실험결과 고찰

특성선 방법과 인버스 임피던스 방법을 통해 모의한 결과에서 직선 관망과 수지 관망은 기본 형태에서 차이를 보인다. 이는 직선관망은 상류단 저수조와 하류단 저수조를 관 내 유체가 왕복하나 수지관망은 수지관의 존재 때문에 관 내 유체가 저수조에서 반향되는 유체와 수지관의 관말 지점에서 반향되는 유체로 나뉘어 두 흐름이 상호작용하여 수압과 유속 모두에서 급격한 변화가 일어난다.

모의한 수압과 수압을 통해 추정한 유속에서 밸브 폐쇄 시간이 2 L/a보다 빠른 급폐의 경우와 밸브 폐쇄 시간이 2 L/a보다 긴 완폐의 경우 모두에서 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법을 통한 결과가 일치한다.

4. 결 론

본 연구는 기존의 하류단 밸브 급폐 유량 변화를 기반으로 하는 임펄스 응답법의 기본 구조를 변경한 인버스 임피던스 방법을 제안하여 수압을 모의하고 동일 빈도상의 유속을 추정하는 연구를 수행하였다. 대상 관망을 직선관망과 수지관망의 두 종류로 설정하고 밸브 폐쇄 조건을 급폐와 완폐로 설정하여 관망의 특성별 모의를 진행하였다.

대상관망의 하류단 밸브의 급폐와 완폐 모의에서 부정류의 모의의 대표적인 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법이 임의 지점 수압에서 일치하는 결과를 보였다. 수압 모의를 통한 유속 추정 결과에서도 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법이 일치하는 결과를 보였다.

수압계의 높은 빈도 특성을 구현할 수 있는 특성선 방법을 통해 얻은 수압과 이를 통해 추정한 유속이 인버스 임피던스 방법을 통해 얻은 수압과 유속과 일치하는 결과가 나타났고, 이는 유속을 추정하는 방법으로 인버스 임피던스 방법의 유효성을 보여준다. 이후에 이루어질 연구는, 실제 관망에서 실험을 통해 얻은 높은 빈도의 데이터를 기반으로 하여 인버스 임피던스 방법의 정확도를 높이는 것이 유속 추정 기술 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 수자원공사의 개방형 R&D(21-BT-002)의 지원에 의해서 수행되었습니다.

기호 설명

ρ = Density.
A = Inside area of a pipeline.
V = Mean flow velocity.
P = Inside pressure of a pipeline.
a = Wave speed.
D = Inside diameter of a pipeline.
f = Darcy-Weisbach Friction Factor.
H = Pressure head.
Q = Flow rate.
g = Gravitational acceleration.
F_r = Head loss due to friction.
$\psi(\eta)$ = Morlet mother wavelet.
ω = Angular frequency.
$W_n^x(s)$ = Continuous wavelet transform.
τ = Shift from a time.
s = Scale.
$*$ = Complex conjugate.
n = Time of input signal.
N = Total length of material.
δt = Time increment.
x, y = Random pressure wave data in time series.
$W_n^{xy}(s)$ = Cross wavelet spectrum between x and y.
S = Smoothing function.
θ = First characteristic time of the pipeline.
L = Length of pipeline.

References

Brunone, B. (1999). Transient test-based technique for leak detection in out-fall pipes, J. Water Resour. Plan. Manag., 125(5), 302-306.

Chaudhry, M.H. (2014). Applied Hydraulic Transients. 3rd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.

Covas, D., Ramos, H., and Almeida, A.B. (2005). “Impulse response method for solving hydraulic transients in viscoelastic pipes”, *XXXI IAHR Congress*. IAHR, Seoul, Korea.

Covas, D.I.C. and Ramos, H.M. (2010). Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis, J. Water Resour. Plan. Manag., 136(2), 248-257.

Gong, J., Simpson, A.R., Lambert, M.F., Zecchin, A.C., Kim, Y.I., and Tijsseling, A.S. (2013). Detection of distributed deterioration in single pipes using transient reflections, J. Pipeline Syst. Eng. Pract., 4(1), 32-40.

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, S.H. (2007). Impedance matrix method for transient analysis of complicated pipe networks, J. Hydraul. Res., 45(6), 818-828.

Kim, S.H. (2008). Address-oriented impedance matrix method

for generic calibration of heterogeneous pipe network systems, J. Hydraul. Eng., 134(1), 66-75.

Kim, S.H. (2020). Control-oriented impedance matrix and alternative transient control for pipe network systems, Water Resour. Manag., 34(11), 3499-3513.

Lee, P.J., Vítkovský, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R. and Liggett, J.A. (2007). Leak location in pipelines using the impulse response function, J. Hydraul. Res., 45(5), 643-652.

Liggett, J.A. and Chen, L.C. (1994). Inverse transient analysis in pipe networks, J. Hydraul. Eng., 120(8), 934-955.

Liu, Z. and Simpson, A.R. (2018). Influence of connection stub parameters and valve closure time on transient measurement accuracy of a pressure transducer, Water Sci. Techol. Water Supply, 18(6), 1984-1995.

Stephen, M.L., Lambert, M.F. and Simpson, A.R. (2013). Determining the internal wall condition of a water pipeline in the field using an inverse transient, J. Hydraul. Eng., 139(3), 310-324.

Streeter, V.L. and Wylie, E.B. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632.

Suo, L. and Wylie, E.B. (1989). Impulse response method for frequency-dependent pipeline transients, J. Fluids Eng., 111(4), 478-483.

Vítkovský, J.P., Simpson, A.R. and Lambert, M.F. (2000). Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms, J. Water Resour. Plan. Manag., 126(4), 262-265.

Vítkovský, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R. and Liggett, J.A. (2007). Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection, J. Water Resour. Plan. Manag., 133(6), 519-530.

Wang, X.-J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Liggett, J.A. and Vítkovský, J.P. (2002). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients, J. Hydraul. Eng., 128(7), 697-711.

Wang, X.J., Lambert, M.F. and Simpson, A.R. (2005). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients, J. Water Resour. Plan. Manag., 128(7), 697-711.