



복합 관수로에서 인버스 임피던스 확장연구

Extended inverse impedance method for multiple branches or loops pipeline systems

고동원 · 김상현*

Dongwon Ko · Sanghyun Kim*

부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

We propose a transient evaluation scheme using a pressure measurement in a complicate pipeline systems. Conservation of mass and momentum equations in time domain can be transformed into a pressure head and flowrate relationship between upstream and downstream point in frequency domain. The impedance formulations were derived to address measured pressure at downstream to evaluate of flowrate or pressure head at any point of system. Both branched pipeline element and looped pipeline element can be generally addressed in the platform of the basic reservoir pipeline valve system. The convolution of time domain response function with measured pressure head from a downstream point provides flowrate or pressure head response in any point of the designated pipeline system. The proposed method was validated through comparison between traditional method of characteristics and the proposed method in several hypothetical systems.

Key words: Pipeline system, Transient estimation technique, Frequency domain analysis, Branched system, Looped system

주제어: 관수로 체제, 천이류 추정기술, 빈도영역 해석, 수지상 관망, 루프 관망

Received 1 December 2023, revised 13 December 2023, accepted 14 December 2023.

*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr; Fax. 82-51-514-9574, Tel. 82-51-510-2479)

고동원 (박사과정) / Dongwon Ko (Ph.D. Student)

부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2, 46241
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

김상현 (교수) / Sanghyun Kim (Professor)

부산광역시 금정구 부산대학교 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.

pp. 311-324

pp. 325-334

pp. 335-345

pp. 347-361

pp. 363-373

pp. 375-382

pp. 383-394

pp. 395-408

pp. 409-423

pp. 425-435

pp. 437-446

pp. 447-456

1. 서 론

막대한 예산을 소모하여 생산된 상수를 분배하는 상수관망은 주요한 사회 인프라 설비이며, 관로의 적절한 관리는 관망의 흐름 특성을 파악함으로써 적절히 관리될 수 있다. 흐름 거동을 파악하는 방법으로는 유량계로 특정 지점에서 유량을 측정하는 방법이 있지만, 대부분의 현장에서 유량계를 설치하고 안정적으로 운영하는 데는 상당한 비용이 발생하고, 상용 유량계의 정확도나 샘플링 빈도는 관망의 문제인 누수나 파열 노후화 혹은 막힘 등의 문제를 해결하는데 어려움이 있다.

전자식 수압계(Pressure Transducer)는 수압을 측정하는 장치로, 민감도, 비용, 응답시간 등 여러 항목을 고려했을 때 가장 효율적인 측정 장치로 꼽히며 (Brunone 1999), 특히, 관망의 적절한 관리는 관망내의 실제흐름을 파악함으로써 달성되는데 이를 위한 부정류 해석에서 관측값으로 측정 수압을 사용하는 것이 필요한 과정이다 (Liu et al., 2018).

관망의 흐름 특성을 파악하기 위해 수압자료를 부정류 기반으로 해석하는 과정의 대표적으로 방식은 특성선 방법(method of characteristics)이 있다 (Streeter and Wylie, 1993; Chaudhry, 2014). 이는 연속방정식과 운동방정식을 상미분방정식으로 전환하여 적분을 통해 해석하는 방식으로, 연구자들은 부정류 역산과정 (Vítkovský et al., 2007; Covas and Ramos, 2010; Stephens et al., 2013)을 통해서 누수나 폐색구간을 찾아왔으며, 천이류 발생의 변형과정인 압력파의 분석과 (Wang et al., 2005) 및 탄성과 반사분석(Gong et al., 2013) 등 여러 과정을 활용하여 부정류 기반 수압자료를 해석해왔다. 특성선 방법은 다양한 경계조건을 구현하는데 상당한 어려움이 있다. 대상 경계조건을 수학 수식화하고, 그 과정에서 발생하는 마찰손실을 실험을 통해서 매개변수로 근사화하는 과정이 필요하다. 이는 관망의 흐름 특성도 중요한 함수임으로 신뢰성을 가진 일반화가 난해한 과정임을 의미한다. 또한 이렇게 일반화된 과정이 주는 영향을 관망 전체 흐름에 반영하는데 차별화 방식이 수치해석이 가지는 과정을 반복해야 하는 한계점을 가지고 있다. 이는 공간상의 모든 지점의 계산을 수행하고자 순차적으로 시간적 진행을 진행한다는 점이다.

특성선 방법에 대한 대안적인 해석법으로는 임펄스 응답 방법 (Streeter and Wylie, 1993)이 있는데 이는 수

압과 유량 사이의 관계식인 임피던스를 통해 관망의 특성을 분석하는 방법으로, 관망에서의 경계조건 수정 없이 계산이 가능하고 결과를 얻고 싶은 지점만을 계산 가능하여 기존의 특성선 방법에서 걸리는 진행시간보다 더 빠른 장점이 있다 (Kim, 2007). 이와 같은 접근법은 시간과 공간상의 함수관계인 연속방정식과 운동량방정식을 주파수와 공간상의 함수관계로 전환하는 과정을 진행하는 방식으로 수행되었고, 이를 통해 연구자들은 점탄성 관망의 부정류를 해석하거나(Covas et al., 2005) 단순한 관망의 누수를 예측하고(Lee et al., 2007) 보다 복잡 관망에서 임피던스 방법개발 등의 방식으로 연구를 수행하였다 (Kim et al., 2020).

대부분의 임펄스 응답법은 밸브의 개폐에 따른 유량조건을 경계조건으로 활용하였으면 이에 대한 경계조건을 완화하기 위해서 간단한 관망 시스템에 대해서 인버스 임피던스를 정의하고 관측 수압을 이용해서 대상 관망의 임의의 지점의 수압과 유량을 예측하는 연구가 수행되었다 (Lee et al., 2022). 이번 논문에서는 단순한 관망의 수압과 유량의 변동예측을 보다 복잡한 관망에서의 예측이 가능한가를 확장하는 연구를 수행하였다. 구체적으로는 수지상 관망, 복수 수지상 관망, 루프관 관망, 복수 루프관 관망 등으로 인버스 임피던스 적용 대상 시스템을 일반화하는 과정을 수행하였다. 개발된 방법론의 검증을 위해서 기존의 방법론인 특성선 방법을 사용하여 부정류 계산을 수행하였고 개발된 방법과 비교하였다. 이 논문의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 기본적인 연속방정식과 운동량방정식으로부터 상미분방정식으로 전환하여 적분하는 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법의 기본적인 전개 과정을 정리하였고 인버스 임피던스의 수식의 전개를 하고 수압을 이용하여 유량과 유속을 계산하는 방법을 정리하였다. 3장에서는 기본적인 방정식을 이 연구의 대상시스템인 복수 수지상 관망이나 복수 루프관 관망에 확장 적용하여 전개하는 과정을 기술하고 있으며 이 논문의 주요 내용이다. 4장에서는 기존의 방법론과 개발된 방법론의 비교를 통해서 확장된 인버스 임피던스 방법의 유효성을 입증한다. 결론으로는 인버스 임피던스 방법이 천이류 도입부의 관측 수압을 사용하여 임의의 지점의 유량이나 수압을 추정하는 방법이 복잡성이 추가된 복수 수지상 혹은 루프관 관망체제에서 적용이 가능하다는 방법론의 잠재성을 기술하였다.



2. 방법론

2.1 피압관로에서의 지배방정식과 차분화방법

부정류 관수로의 거동을 지배하는 원리는 편미분 운동량방정식과 연속방정식으로 나타낼 수 있으며 독립변수 시간 t 와 거리 x 와 종속변수 수압 h 그리고 유속 v 의 관계로 다음과 같이 표현된다 (Streeter and Wylie, 1993).

$$\frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (2)$$

여기서 c = 파속도, g = 중력가속도, d = 관내 직경, f = Darcy-Weisbach 마찰계수이다.

부정류 해석에서 가장 일반적으로 쓰이는 방법인 특성선 방법(Method of Characteristics, MOC)은 편미분 방정식인 연속방정식과 운동량방정식을 상미분방정식으로 변형하여 적분하는 방법으로 두 개의 편미분 방정식을 보다 용이하게 해석할 수 있는 큰 장점이 있다. 특성선 방법 적용을 위해 수압과 유속의 미분방정식으로 단순하게 변형하면 다음과 같다 (Streeter and Wylie, 1993).

$$\lambda L_1 + L_2 = \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \lambda \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \lambda \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{g}{\lambda} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (3)$$

여기서, $L_1 = \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0$, $L_2 = \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f}{2d} |V| V = 0$ 이다. λ 는 임의의 승수로 $\pm g/c$ 로 표현되며, 이는 $\pm c = dx/dt$ 의 특성선 상에서만 유효하게 된다. 이식에서 $c+$ 는 하류단 방향을 의미하고, $c-$ 경우에는 상류단 방향을 의미하며 각각 Eq. (4) Eq. (5)의 방정식으로 표현된다.

$$\frac{dv}{dt} + \frac{g}{c} \left(\frac{dh}{dt} \right) + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{g}{c} \left(\frac{dh}{dt} \right) + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (5)$$

Eq. (4) Eq. (5)를 적용시 초기 조건과 밸브 펌프 등의 경계조건을 설정하고 시간-공간 축의 특성선상에서 적분을 수행함으로 임의 지점의 수압과 유속을 계산할 수 있다.

2.2 빈도영역에서의 수압유량 관계식

Eq. (1)과 Eq. (2)를 섭동분석(Perturbation Analysis)을 수행하거나, 이들 수식의 Laplace 변환을 적용하면, 관로연장에서 상하류단 간의 복소수 영역에서의 수압과 유량의 관계를 다음과 같이 표현하게 된다 (Streeter and Wylie, 1993).

$$H_D = H_U \cosh \gamma l - Q_U Z_c \sinh \gamma l \quad (6)$$

$$Q_D = -\frac{H_U}{Z_c} \sinh \gamma l + Q_U \cosh \gamma l \quad (7)$$

여기서, H_U , H_D , Q_U , Q_D 는 상하류단의 빈도 영역에서의 수압과 유량이다. 그리고 전달계수 γ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\gamma^2 = Cs(Ls + R) \quad (8)$$

여기서, s 는 일반적으로 복소수 빈도 혹은 라플라스 변수라고 알려져 있으며, 이 변수의 실수와 허수부분은 $s = \sigma + i\omega$ 과 같이 정의된다.

여기서, 인너턴스(inertia)를 L 로 정의되고 커패시턴스(capacitance)는 C 로 정의되는데 다음과 같이 표현된다.

$$L = \frac{1}{gA}; \quad C = \frac{gA}{a^2} \quad (9)$$

그리고 저항계수 R (resistance)은 선형화된 저항을 의미하고 층류조건에서는

$$R = \frac{32\nu}{gAD^2} \quad (10)$$

난류조건에서는

$$R = \frac{nfQ^{n-1}}{2gDA^n} \quad (11)$$

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

$$Z_c = \frac{\gamma}{C_s} \quad (12)$$

여기서, Z_c 와 γ 는 유체와 관수로의 물리적인 특성에 의해서 결정된다.

2.3 인버스 임피던스에 의한 수압과 유량 반응

관로상의 임의의 지점에 유량과 수압 반응을 유도하기 위해서 복소수 유량과 수압의 비를 인버스 임피던스로 다음과 같이 정의할 수 있다 (Lee et al., 2022). 저수조 관로 밸브로 구성된 단순관로 시스템의 개요는 Fig. 1 에 나타나 있다.

$$IZ(x) = \frac{Q(x)}{H(x)} \quad (13)$$

이를 Fig. 1과 같은 상하류단에 대해서 정의할 수 있는데,

$$IZ_D = \frac{1 - (IZ_U^{-1}/Z_c)\tanh\gamma l}{IZ_U^{-1} - Z_c\tanh\gamma l} \quad (14)$$

여기서, IZ_D 는 하류단의 인버스 임피던스이고 IZ_U 는 상류단의 인버스 임피던스이다.

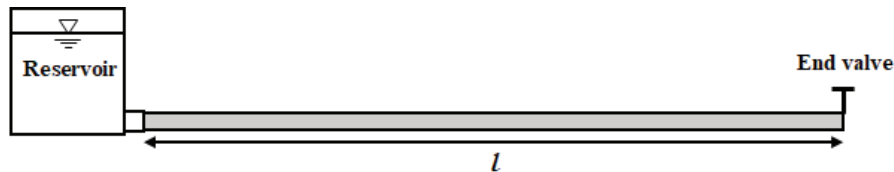


Fig. 1. Schematic diagram of a reservoir pipeline valve system.

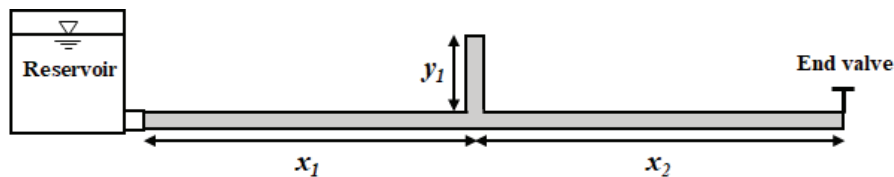


Fig. 2. Schematic diagram of a reservoir-pipeline-branch-pipeline-valve system.

하류단 저수조에서 길이 x 만큼 떨어진 곳에서 하류단 수압에 대한 x 지점의 시간상의 수압 반응함수는 다음과 같다.

$$r_{(xh)}(t) = \frac{1}{\pi} Re \left[\int_0^{\infty} (\cosh\gamma x + IZ_D^{-1} \cdot Z_c \sinh\gamma x) e^{i\omega t} d\omega \right] \quad (15)$$

여기서 Re 는 실수부를 의미하며, 하류단 저수조에서 길이 x 만큼 떨어진 곳의 하류단에서 x 만큼 떨어진 상류단 지점의 시간상의 유량 반응함수는 다음과 같다.

$$r_{(xq)}(t) = \frac{1}{\pi} Re \left[\int_0^{\infty} \left(\frac{1}{Z_c} \sinh\gamma x + IZ_D^{-1} \cdot \cosh\gamma x \right) e^{i\omega t} d\omega \right] \quad (16)$$

2.4 복수 수지상 관망에 대한 인버스 임피던스

Fig. 2는 저수조-관망-수지상관-관망-밸브로 구성되는 수지상 관망체계의 개요도를 보여주고 있다.

위의 그림과 같은 관망체제에서 상류단 관요소 x_1 의 하류단의 수리 임피던스인 수압 유량비는 다음식과 같이 유도된다.

$$Z_1 = -Z_c \tanh\gamma x_1 \quad (17)$$

수지상 관망의 연장 y_2 의 수리 임피던스는 연장 y_2 의 상류단이 사수부임을 고려하면 다음과 같이 유도된다.



$$Z_2 = \frac{Z_c}{\tanh \gamma y_1} \quad (18)$$

수지상관망의 절점부의 수리임피던스의 관계는 절점에서 수압이 동일하다는 조건과 유량의 연속방정식을 고려하면 절점 하단부의 수리 임피던스가 다음과 같이 나타난다.

$$Z_3 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (19)$$

수지상관망 연장 x_2 의 상하류단 수압 유량관계를 도입하면 관망의 관말에서의 수리 임피던스는 다음과 같이 나타난다.

$$Z_4 = \frac{Z_3 - Z_c \tanh \gamma x_2}{1 - Z_3 / Z_c \tanh \gamma x_2} \quad (20)$$

하류단에서 상류단의 x 거리에 위치한 위치함 임의의 지점에서의 인버스 임피던스는 다음과 같이 나타난다.

$$IZ_D = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma x + \frac{1}{Z_4} \cosh \gamma x \quad (21)$$

Fig. 3은 저수조-관망-수지상관-관망-수지상관-관망-밸브로 구성되는 이중 수지상 관망체계의 개요도를 보여주고 있다. 관망체제에서 상류단 관요소 x_1 의 하

류단의 수리 임피던스인 수압 유량비는 첫 번째 수지상관의 하단부는 전술한 바와 동일하게 유도된다. 관망요소 x_2 하단에서의 수리 임피던스는 Eq. (20) 과 같이 나타난다.

두 번째 수지상 관망의 연장 y_2 의 수리 임피던스는 연장 y_2 의 상류단이 사수부임을 고려하면 다음과 같이 유도된다.

$$Z_5 = \frac{Z_c}{\tanh \gamma y_2} \quad (22)$$

절점의 임피던스 관계를 고려하면 두 번째 절점 하단부의 수리 임피던스가 다음과 같이 나타난다.

$$Z_6 = \frac{Z_4 Z_5}{Z_5 - Z_4} \quad (23)$$

수지상 관망 연장 x_3 의 상하류단 수압 유량관계를 도입하면 관망요소 x_3 하단에서의 인버스 임피던스는 다음과 같이 나타난다.

$$IZ_D = \frac{1 - Z_6 / Z_c \tanh \gamma x_3}{Z_6 - Z_c \tanh \gamma x_3} \quad (24)$$

2.5 복수 루프관 관망에 대한 인버스 임피던스

Fig. 4는 저수조-관망-루프관-관망-밸브로 구성되는 수지상 관망체계의 개요도를 보여주고 있다.

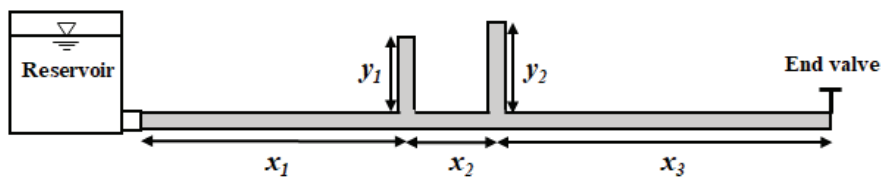


Fig. 3. Schematic diagram of a reservoir-pipeline-branch-pipeline-branch-pipeline-valve system.

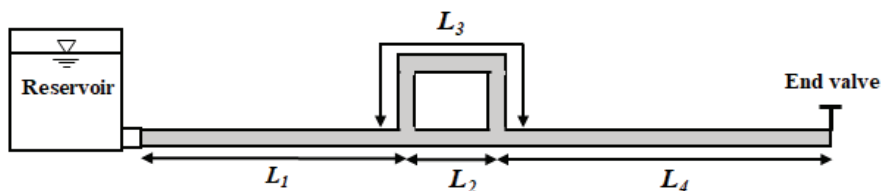


Fig. 4. Schematic diagram of a reservoir-pipeline-loop-pipeline-valve system.

pp. 311-324
pp. 325-334
pp. 335-345
pp. 347-361
pp. 363-373
pp. 375-382
pp. 383-394
pp. 395-408
pp. 409-423
pp. 425-435
pp. 437-446
pp. 447-456

관망체제에서는 상류단부터 다른 요소의 절점에서의 수압 동등 관계와 유량의 연속방정식 관계를 순차적으로 적용하면서 수압-유량 관계를 상류단부터 하류단으로 진행하면서 구현한다.

$$H_{joint,L_1} = H_{joint,L_2} = H_{joint,L_3} \quad (25)$$

$$Q_{joint,L_1} = Q_{joint,L_2} + Q_{joint,L_3} \quad (26)$$

빈도상 수압 유량 관계를 각각의 관망 요소에 적용하고 관망 요소의 관계를 정의하면서 하류단으로 진행하는 과정을 통해 관망 요소별 유량표현을 다음과 같다.

$$Q_{joint,L_3} = \frac{H_{joint,L_1}(\cosh\gamma L_3 - \cosh\gamma L_2) + Q_{joint,L_1} Z_C \sinh\gamma L_2}{Z_C \sinh\gamma L_2 + Z_C \sinh\gamma L_3} \quad (27)$$

$$Q_{joint,L_2} = \frac{H_{joint,L_1}(\cosh\gamma L_2 - \cosh\gamma L_3) + Q_{joint,L_1} Z_C \sinh\gamma L_3}{Z_C \sinh\gamma L_3 + Z_C \sinh\gamma L_2} \quad (28)$$

일련의 전개과정을 통해서 밸브지점에서의 인버스 임피던스는 다음과 같다.

$$IZ_D = \frac{1 - H_{joint}/Q_{joint} \tanh\gamma L_4}{H_{joint}/Q_{joint} - Z_C \tanh\gamma L_4} \quad (29)$$

Fig. 5는 저수조-관망-루프관-관망-루프관-관망-밸브로 구성되는 복수 수지상 관망체제의 개요도를 보여주고 있다.

두 번째 루프관 말단에서 합쳐지는 복소수 유량과 상류단 루프시작 지점의 복소수 유량비는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{Q_{4L5}}{Q_3} &= -\frac{Z_3}{Z_2} \sinh\gamma L_6 + \frac{(Z_3(\cosh\gamma L_6 - \cosh\gamma L_5) + Z_c \sinh\gamma L_5) \cosh\gamma L_6}{Z_c \sinh\gamma L_5 + Z_c \sinh\gamma L_6} \\ &- \frac{Z_3}{Z_2} \sinh\gamma L_5 + \frac{(Z_3(\cosh\gamma L_5 - \cosh\gamma L_6) + Z_c \sinh\gamma L_6) \cosh\gamma L_5}{Z_c \sinh\gamma L_6 + Z_c \sinh\gamma L_5} \end{aligned} \quad (30)$$

동일한 지점에서 나타나는 복소수 수압과 상류단 루프 시작 지점의 복소수 유량비는 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{H_{4L6}}{Q_3} = -Z_3 \cosh\gamma L_6 + \frac{(Z_3(\cosh\gamma L_6 - \cosh\gamma L_5) + Z_c \sinh\gamma L_5) Z_c \sinh\gamma L_6}{Z_c \sinh\gamma L_5 + Z_c \sinh\gamma L_6} \quad (31)$$

두번째 루프관 말단에서의 인버스 임피던스는 다음과 같이 나타난다.

$$IZ_D = \frac{1 - H_{4L6}/(Q_{4L5} + Q_{4L6}) \tanh\gamma L_7}{H_{4L6}/(Q_{4L5} + Q_{4L6}) - Z_C \tanh\gamma L_7} \quad (32)$$

2.6 시간상 수압 및 유량 반응

Eq. (32) 혹은 Eq. (24)과 같은 표현은 Eq. (15) 혹은 Eq. (16) 방식으로 시간상으로 전환될 수 있고 시간상 함수는 합성곱 적분을 통해서 임의의 지점에서 시간상의 수압이나 유량 반응으로 나타난다.

관로 말단에서의 측정 수압의 입력을 바탕으로, 관로 상류단 x지점에서 기준수압에 대한 변동은 다음과 같이 표현된다.

$$h(t) = \int_0^t r_{xh}(t-\tau) \Delta h_{D} d\tau \quad (33)$$

상류단의 x지점에서의 기준 유량에 대한 변동량도 합성곱적분으로 다음과 같이 계산된다.

$$q(t) = \int_0^t r_{xq}(t-\tau) \Delta h_{D} d\tau \quad (34)$$

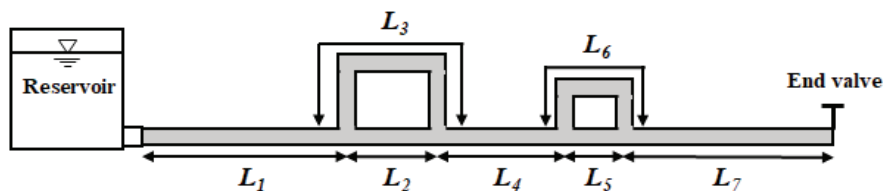


Fig. 5. Schematic diagram of a reservoir-pipeline-loop-pipeline-loop-pipeline-valve system.



3. 결 과

3.1 관로 시스템 제원

개발된 방법론의 수치분석수행을 위한 기본적인 저수조-관로-밸브-저수조(Reservoir-Pipeline-Valve-Reservoir: RPVR) 형태의 단순관로 시스템의 제원은 다음과 같다. 상류단과 하류단 저수조의 관로길이는 90 m 이고 직경은 0.020 m, 두께 0.0021 m, 그리고 Darcy-Weisbach 마찰손실계수가 0.036, 재질은 스테인리스이고, 하류단 저수조 상단에 조절밸브가 설치되어 있다. 상류단에서는 23.38 m 수두와 하류단에서는 23.13 m 수두를 유지함으로, 0.099 m/s 유속을 안정적으로 유지한다. 이는 레이놀즈수가 1,976인 층류의 안정된 흐름을 기반으로 하류단 밸브를 급폐쇄 조작하여 천이류를 유입시킨다.

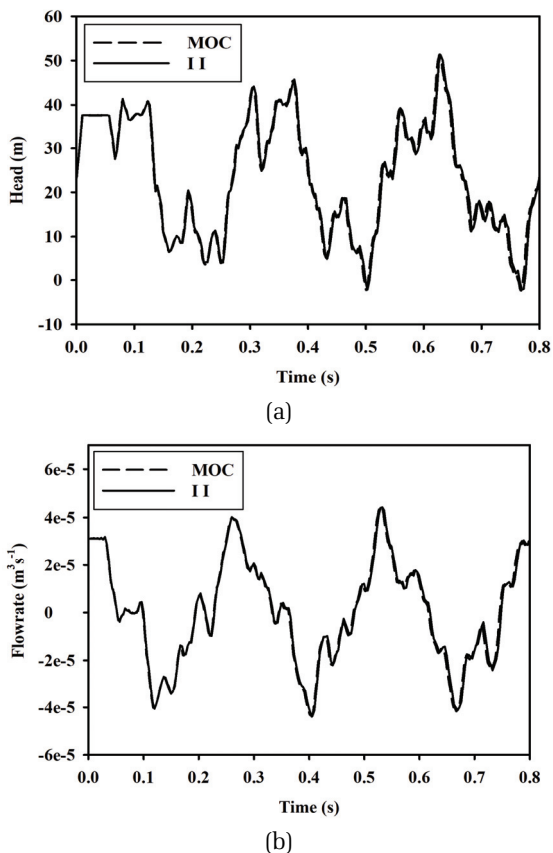


Fig. 6. Pressure(end) and flowrate(45 m from downstream) responses for a hydraulic transient reservoir pipeline branch pipeline system. MOC: Method of Characteristic, II: Inverse impedance.

3.2 모의를 통한 검증

첫 번째 수치 실험은 단순피압관로에서 수지관을 추가하여 관망 특성을 변형한 시스템이다. 주 관로에서 수지관까지의 거리가 39.73 m, 수지관 자체는 8.7 m 이고 관경은 본관과 동일하다.

개발된 수식의 유효성을 입증하기 위해서 동일한 관망제원에 대해서, 결정론적 방법인 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법을 모의하여 비교하였다. Fig. 6은 한 개의 수지상관이 있는 관로 시스템에서 관말에서 수압 모의와 관로상단의 특정 지점에서 유량 모의를 수행한 결과를 비교한 그림이다. 수압과 유량 추정치 모두 기존의 특성선방법(MOC)와 개발된 인버스 임피던스(II)의 모의 결과가 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

두번째 수치 실험은 단순피압관로에서 루프관을 추가하여 관망 특성을 변형한 시스템이다. 주 관로에서

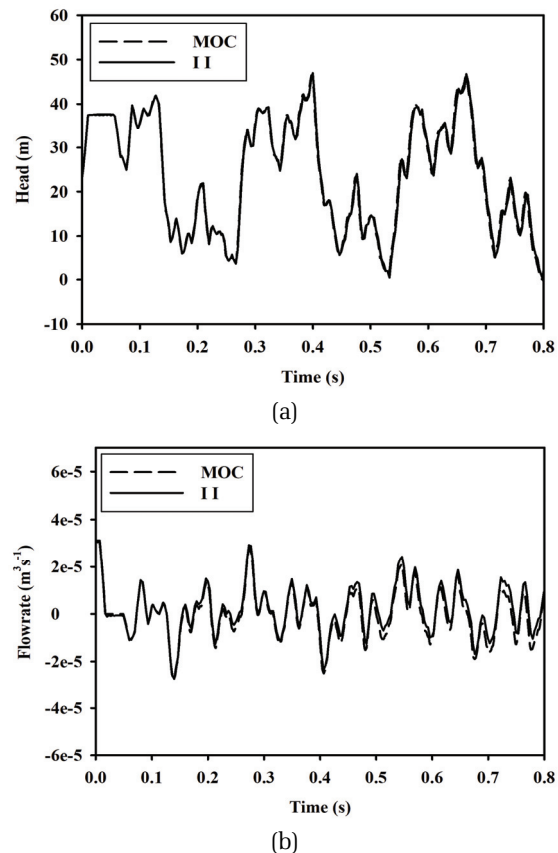


Fig. 7. Pressure(end) and flowrate(10 m from downstream) responses for a hydraulic transient reservoir pipeline loop pipeline system. MOC: Method of Characteristic, II: Inverse impedance.

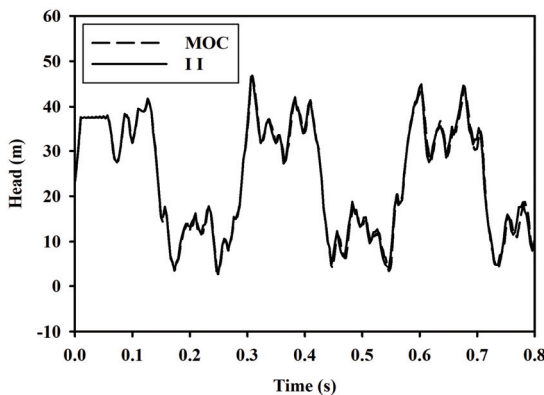
루프관까지의 거리가 39.6 m이고 루프관은 연장이 19.8 m 그리고 하류단에서 48.8 m 지점에서 루프관이 본관과 다시 연결되는 구성이며, 관경은 본관과 동일하다.

Fig. 7은 한 개의 루프관이 있는 관로 시스템에서 관말에서 수압모의와 관로상단의 특정 지점에서 유량 모의를 수행한 결과를 비교한 그림이다. 수압과 유량 추정치 모두 기존의 특성선방법(MOC)과 개발된 인버스 임피던스(II)의 모의 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

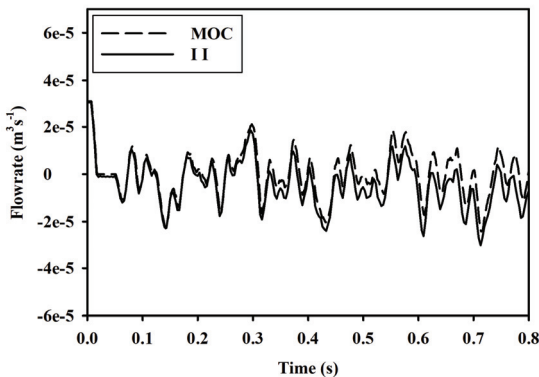
세 번째 경우는 보다 복잡한 관망인 복수 수지상관은 관망의 하류단에서 길이 41.2 m 지점과 이 지점에서 9.2 m 상단에 각각 11.1 m와 8.7 m의 수지상관이 추가되어 있는 경우이다. Fig. 8은 복수의 수지관이 있는 관로 시스템에서 관말에서 수압모의와 관로상단의

특정 지점에서 유량 모의를 수행한 결과를 비교한 그림이다. Fig. 8 또한 수압과 유량 추정치 모두 기존의 특성선방법(MOC)과 개발된 인버스 임피던스(II)의 모의 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

네 번째 경우는 보다 복잡한 관망인 복수 루프상이 있는 경우로 관망의 하류단에서 14.2 m 지점에 연장 6.2 m와 연장 13.8 m의 루프관이 있고 여기서 20.8 m 상류단에 연장 9.2 m과 연장 19.8 m의 두 번째 루프관이 있는 경우이다. Fig. 9는 복수의 루프관이 있는 관로 시스템에서 관말에서 수압모의와 관로상단의 특정 지점에서 유량 모의를 수행한 결과를 비교한 그림이다. Fig. 9도 수압과 유량 추정치 모두 기존의 특성선방법(MOC)과 개발된 인버스 임피던스(II)의 모의 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

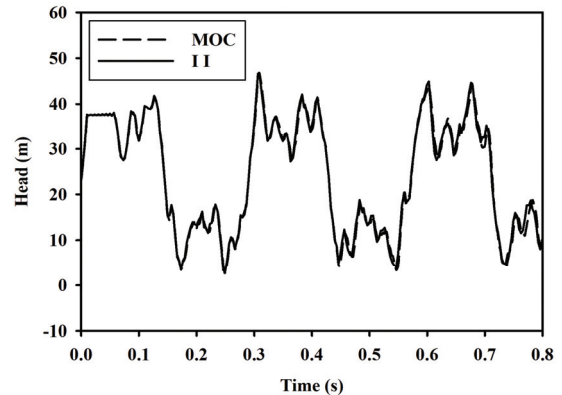


(a)

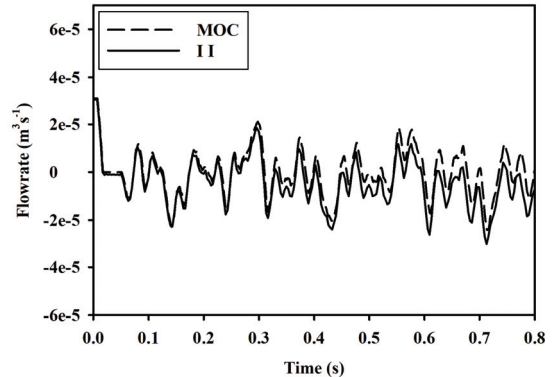


(b)

Fig. 8. Pressure(end) and flowrate(10 m from downstream) responses for a hydraulic transient reservoir pipeline branch pipeline branch pipeline system. MOC: Method of Characteristic, II: Inverse impedance.



(a)



(b)

Fig. 9. Pressure(end) and flowrate(10 m from downstream) responses for a hydraulic transient reservoir pipeline loop pipeline loop pipeline system. MOC: Method of Characteristic, II: Inverse impedance.



3.3 분석결과 고찰

특성선 방법과 인버스 임피던스 방법을 통해 모의한 결과에서 수지 관망 및 루프관망은 기본 형태에서 차이를 보인다. 수지상 관망은 상류단 저수조와 하류단 사이에 수지관의 존재 때문에 관 내 유체가 저수조에서 반향되는 유체와 수지관의 관말 지점에서 반향되는 유체로 나뉘어 두 흐름이 상호작용하여 수압과 유속 모두에서 급격한 변화가 일어난다. 그러나 루프관 체제는 하부단에 발생한 압력파가 루프관의 장단과 하단을 통해서 시간차를 가지로 상단에 전달되며 일부는 상류단으로 일부는 하류단으로 다시 전파되고 각각의 전파된 파가 저수조와 닫힌 밸브에 반사되어 루프관으로 다시 유입되고 분리되는 과정을 반복한다. 복수의 수지상관과 복수의 루프관은 각각의 단수의 경우에 반응패턴을 추가한 것으로 나타나고 이는 두 다른 부속 관로 특성을 대표하고 있다.

이 논문에서 제시한 인버스 임피던스 방법은 단수 수지상 관망, 복수 수지상 관망, 단수 루프관 관망, 복수 루프관 관망에서 천이류 모의가 동일한 시스템에서 계산된 특성선 방법의 수압과 상류단 유량에서 일치하는 결과가 얻어졌다. 이는 이 논문에서 개발된 수식들의 유효성을 나타내며, 기존의 특성선 방법의 대안적인 방법론이 될 수 있다. 인버스 임피던스 방법은 하류단 천이류 도입 부분에서 수압만 측정하면 이를 사용해서 복잡한 관로의 어느 지점에서건 수압과 유량을 계산할 수 있다. 인버스 임피던스 방법은 차별화 과정이 없이 해석학적인 유도만으로 시스템을 특성화할 수 있기 때문에, 관로상의 제원과 관계없이 해석학적으로 동일한 계산 비용으로 결과를 확보할 수 있다.

4. 결 론

기본적인 인버스 임피던스 방법의 구조를 확장하여 단순한 관망에 단수나 복수의 수지상관이나 루프관을 추가하고 복합관망구조에서 각각의 경우에 해당되는 인버스 임피던스 방법의 지배방정식을 유도하였다. 하류단 밸브의 폐쇄 조건을 천이류 도입의 경계조건으로 설정하여 관망의 수압 및 유량 반응 모의를 진행하였다. 모든 관망의 경우에 대하여 특성선 방법과 인버스 임피던스 방법이 수압과 유량 모두 상당히 일

치하는 결과를 보였다. 이는 인버스 임피던스 방법의 확장에 대한 유효성을 보여준다. 이와 같은 결과는, 실제 관망에서 높은 정확도와 높은 빈도의 수압자료를 상대적으로 저렴한 수압계의 운영을 통해서 대상 관망의 임의의 지점에 대한 유량과 수압정보를 추출하는 것이 용이하다는 것을 의미하며, 기존의 방법론이 가지고 있는 차별화 과정, 계산시간, 매개변수 혹은 경계조건의 구현에서 어려움을 상당 부분 극복할 수 있다는 것을 의미한다. 앞으로의 연구는 인버스 임피던스 방법의 정확도를 높이는 것과 이를 기존의 사용화된 유속 측정 기술과 연계하여 검증과정을 진행하는 것이다.

기호 설명

- v = flow velocity.
- h = pressure head of a pipeline.
- a = Wave speed.
- C = Capacitance
- d = Inside diameter of a pipeline.
- f = Darcy-Weisbach Friction Factor.
- H = Pressure head in frequency domain.
- IZ = inverse impedance.
- Q = Flowrate in frequency domain.
- R = Resistance.
- L = inertance.
- l = Length of pipeline.
- t = time.
- x = distance.
- Z_c = Characteristic impedance.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

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. (2020). Control-oriented impedance matrix and alternative transient control for pipe network systems, *Water Resour. Manag.*, 34(11), 3499-3513.
- Lee, J.S., Ko, D.W., Choi, D.Y., Kim, S. (2022) A pressure based flow velocity estimation technique using inverse impedance for simple pressurized pipeline system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 36(4), 219-228.
- 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. Technol. 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.
- 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. and Simpson, A.R. (2005). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 128(7), 697-711.