

## 다양한 부정류 마찰항을 고려한 관망 천이류 모의와 실험연구

### Transient Analysis of Pipeline System Considering Unsteady Friction Models

장일<sup>1</sup> · 김상현<sup>1\*</sup> · 김지현<sup>2</sup>

Il Jang<sup>1</sup> · Sang Hyun Kim<sup>1\*</sup> · Ji Hyun Kim<sup>2</sup>

1 부산대학교 환경공학과, 2 경북대학교 컴퓨터공학과

(2008년 10월 7일 접수; 2008년 11월 28일 수정; 2008년 12월 1일 채택)

#### Abstract

This research compared several unsteady friction models for transient analysis of pipeline system. Unsteady friction is an important factor for accurate simulation of hydraulic transient. Steady friction, quasi-steady friction, Zielke's model and two versions of Brunone model were compared with measurement data of identical pipeline conditions. This study showed that the existing simple steady friction model can be useful for the safer design of pipeline system due to its overestimation of waterhammer, but introduction of more elaborate models are required for advanced analysis such as inverse transient analysis of friction or leakage and the preliminary analysis of water quality prediction of water distribution system.

**Key words** : Transient analysis, Unsteady friction, Waterhammer

**주 제 어** : 천이류 해석, 부정류 마찰항, 수격압

#### 1. 서론

만족도 높은 먹는 물의 달성을 위해서는 양질의 정수관리와 더불어 생산된 수도물을 최종 소비자에게 안정적으로 완벽하게 공급하는 상수관로의 적절한 관리가 매우 중요하다. 그를 위해 상수도 내에서의 안정적인 상수도 공급, 상수관의 파열로 인한 오염물의 유입 방지, 누수로 인한 상수의 유출 방지 등 상수도의 적극적인 관리가 필수적이다. 이를 위해서는 상수관 내에서의 정확한 수질의 시공간적 분석과 관측이 필요하나, 이를 위한 필요조건인 상수관망의 모든 지점에서 일어나는 물의 움직임을 감지하는 유체의 수리학적 해석은 차분화 전산분석에서 발생하는 한계를 가지고 있다 (Chaudhry 1987, Wylie 와 Streeter 1993).

관망내의 급격한 밸브의 개폐와 단전으로 인한 펌프의 정지, 저수조 경계조건의 갑작스러운 변화, 방화수, 관 파손 등으로 인한 급격한 수요조건의 변화는 수충격 현상(water hammer)으로 알려진 관망 내의 압력파의 발생과 전이현상을 일으키며, 이는 관로에 상당한 손상을 야기할 수 있다. 따라서, 천이 상태에 노출된 관망은 일 단위의 정기적인 압력 변화를 고려할 뿐만 아니라, 관망 내의 급격한 변화에 대비하여 예기치 않은 사고도 고려하여 설계되어야 한다. 일반적인 정상상태 분석에 의한 관망설계는 천이상태에의 압력의 증감에 대해 적절한 대비를 하지 못하므로, 이를 보완하기 위해, 체크밸브, 펌프우회관로, 서어지 탱크, 감압밸브, 혹은 이들의 조합으로 구성된 관망 보조 장치가 장착되어 운영되고 있다(Boulos et al, 2005).

\*Corresponding author Tel: 051-510-2479, Fax: 051-514-9574, E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr(Kim, S.H.)

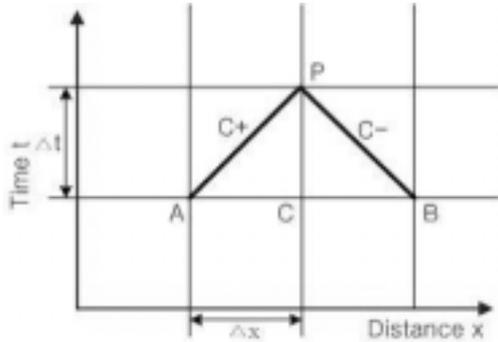


Fig. 1. Characteristic lines in Method of Characteristics.

한편, 관망에서의 천이류의 정확한 모의는 전통적이고도, 현재 활발히 진행 중인 중요 연구주제이다(Bergant and 2001; Adamkowski 와 Lewandowski 2006; Vitkovsky 의 2006). 특히, 천이류 역산 분석과 연관된 관망의 마찰계수나 누수의 보정과 예측에 대한 연구는 지난 10여 년간, 국제적으로 중요한 연구이슈가 되어왔고(Liggett and Chen 1994, Brunone and, Ferrante 2001, Kim 2008), 이와 관련된 대부분의 연구는 관망 천이류의 정확한 해석이 천이류 역산분석에 가장 중요한 선결과제를 보여주고 있다.

관망의 천이류 분석과 관련된 국내 연구로는 김상현 외 (2003) 혹은 이미현 외(2006)의 누수효과를 고려한 분석실험 등이 보고된바 있다. 그러나 이들 연구에서는 실험 자료의 부재와 불확실한 실험조건 등으로 모형의 검증이 실측치와 비교를 통해 이루어지지 못했다. 또한, 이들 연구에서 사용된 부정류 마찰항 모형은 제한된 것으로 보다 확장된 모형들과 비교가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 국내의 보고된 문헌 연구조사를 기반으로 관망 천이류를 기술하는 모형들을 전체적으로 재현하고, 동일한 조건의 실험을 실시하여, 상이한 모형들의 압력과 감쇠과정을 비교 분석하는 연구를 실시하고자 한다. 이 연구에서는 선행 연구에서 수행된 부정류 마찰항 모형을 개선함과 더불어 추가적인 모형을 구현하여 보다 광범위한 해석을 수행하였다. 또한, 기존 연구의 실험조건을 개선하여 고품질의 천이류 실험 자료를 획득하였다. 이를 통해서 수가지 부정류 마찰항 접근법이 가지는 장단점과 한계를 파악하고, Brounone 모형의 매개변수에 대한 보정과 교찰을 도출하였다.

## 2. 천이류 해석

### 2.1. 특성선 방법(Method of Characteristics)

관수로에서의 물의 천이류 거동은 관로내의 제어체적에 질량보전원리와 운동량 보전법칙을 적용하고, 1차원 거동으로 근사화하여 시간과 공간의 독립변수에 대해서 다음과 같

은 편미분 방정식(1)과 (2)의 형태로 나타낼 수 있다 (Chaudhry 1987).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은  $f/(2DA)$ ,  $H$ 는 압력수두,  $Q$ 는 유량,  $D$ 는 내부관경이다. 또한  $f$ 는 Darcy-Weisbach 마찰계수,  $a$ 는 충격파속도,  $g$ 는 중력가속도,  $A$ 는 관로단면적이다. 식 (1)과 식 (2)를 조합하여 상미분방정식 형태의 유량  $Q$  와 수두  $H$  로 이루어진 특성선 방정식을 식 (3)과 같이 유도할 수 있다 (Wylie와 Streeter, 1993).

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (3)$$

위의 식은  $dx/dt = \pm a$  로 정의되어지는  $C^+$  와  $C^-$  특성선(characteristic line)상에서만 유효하게 적용되어진다. 이러한 특성관계를 만족하기 위해서는 Courant 조건 즉  $\Delta x = \pm a \Delta t$  의 관계가 성립되어야 한다(Chaudry, 1987; Wylie 와 Streeter, 1993).

일단 초기조건과 시간-공간 축이 결정되어지면 식(3)은 Fig. 1에서 보여지는 AP 와 BP 선을 따라 적분되어진다. Fig. 1에서 미지점 P에 대한 2개의 방정식은 다음과 같다.

$$Q_P = C_P - C_a H_P \quad (4)$$

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad (5)$$

여기서 적분상수는 다음과 같다.

$$C_P = Q_A + C_a H_A - RQ_A |Q_A| \Delta t \quad (6)$$

$$C_n = Q_B - C_a H_B - RQ_B |Q_B| \Delta t \quad (7)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (8)$$

여기서, 수두와 유량의 아래첨자는 그 지점의 수두와 유량을 의미 한다(즉 P는  $t + \Delta t$  의 지점, A와 B는  $t$  의 지점). 초기조건에서 기지점 A점과 B점의 수두와 유량을 알려져 있다면 계산이 진행됨에 따라 미지의 시간 P( $t + \Delta t$  지점값)의 유량과 수두 값을 계산할 수 있다. 일반적으로 정류상태의 값들을 부정류상태의 초기 값으로 취함으로써 부정류상태의 계산이 진행되어 나간다.

## 2.2. 부정류 마찰항의 고려

다수의 천이류 해석은 식(2)의  $R$ 항을 계산하는데 정상상태의 가정에서 도출된 수두 감쇄 효과( $h_f$ )를 고려하여, Darcy-Weisbach 마찰계수( $f$ )만을 적용하여 유도함으로써  $h_f = \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2gD}$ 로 표현하였다. 이와 같은 접근법은 수격압의 최대 혹은 최소 수압을 안정적으로 모의하는 목적에는 적합하나, 정확한 천이류의 모의에는 한계를 가지고 있다(Bergant의 2001; Bolus의 2005). 따라서, 본 연구에서는 천이류 모의를 위한 부정류 마찰항과 관련하여 문헌에 제시된 수가치 모형을 집대성하여 다음과 같이 나타냈다.

### 2.2.1. 반 정상상태 마찰모형(Quasi-steady Friction Model)

Darcy-Weisbach 마찰계수는 Moody선도에 따르면, Reynold수와 관로의 조도의 함수로 나타난다. 그러나, Moody 선도의 비선형적인 관계는 도해법과 시산적인 방법으로 만 구현이 가능함으로, 이에 대한 함수화 표현 연구는 상당한 필요성과 이에 따른 여러 관련연구가 존재한다. 대표적인 방법으로는, 층류영역( $Re \leq 2000$ )에서는  $f = \frac{64}{Re}$ 가 일반적으로 적용된다.  $Re > 2000$ 인 경우 Colebrook 와 White의 식(9)가 가장 적절한 것으로 알려져 있다(Haaland, 1983).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{K}{3.7D} \right) \quad (9)$$

그러나 상기 수식은 음함수로서 반복계산을 필요로 하므로 양해법으로 변형할 필요가 있다. 이와 관련된 여러 수식이 제안되었지만 식 (10)이 가장 적절한 것으로 알려져 있다(Haaland, 1983).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{K}{3.7D} \right)^{10/9} \right] \quad (10)$$

여기서  $K$ 는 관의 조도,  $D$ 는 관의 내경으로  $K/D$ 는 관의 상대조도가 된다.

### 2.2.2. Zielke의 2차원 반경 점성 모형

층류영역에서 유체의 점성을 고려한 부정류 마찰항 모델이 Zielke에 의해 제안되었다(Zielke, 1968). 부정류 층류에서, 비압축성, 축대칭 평형 흐름을 기술하는 운동량 방정식은 다음과 같은 편미분 방정식으로 표시된다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{\nu} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\nu D} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (11)$$

여기서,  $u$ 는 유속,  $r$ 은 반경,  $\nu$ 는 점성계수를 의미한다.

식 (11)은 관로선-반경선(axial-radial)축으로 구성된 2차원 부정류 모형을 빈도영역에서 해석학적으로 유도한 결

과에 근거하여 평균 유속이 다음과 같이 표현한다.

$$u(r, s) = C_1 J_0(i \sqrt{s/\nu} r) + C_2 N_0(i \sqrt{s/\nu} r) - F/s \quad (12)$$

여기서,  $J_0$  와  $N_0$  는 각각 1st 와 2nd 형태의 Bessel 함수를 의미하며,  $C_1, C_2$ 는 특정한 경계조건으로부터 지정되는 상수이다.

또한,  $F$  는 다음과 같은 압력의 관로 방향 구배를 푸리에 전환한 결과이다.

$$F(t) = 1/\rho \cdot \partial p / \partial x \quad (13)$$

관로 벽면의 전단력을 빈도영역에서 표현하면 식 (14)로 나타난다.

$$F(s) = \frac{\rho R s}{j_1(i \sqrt{s/\nu} R) - 2} V(s) \quad (14)$$

여기서,  $j_1(z) = z \cdot J_0(z) / J_1(z)$ 로 표현되는 변형 1차 Bessel 함수이고,  $V(s)$ 는 식(12)의 추가전개로 도출되는 평균유속의 빈도상 함수이다.

식(14)를 역푸리에변환을 수행하면 전단력의 시간상 반응 함수가 다음과 같이 나타난다.

$$\tau_0(t) = \frac{4\rho\nu}{R} V(t) + \frac{2\rho\nu}{R} \int_0^t \frac{\partial V}{\partial t}(u) W(t-u) du \quad (15)$$

여기서,  $W$ 는 다음과 같은 무차원 시간( $\tau$ )의 가중 함수이다.

$$\tau = \frac{V}{R^2} t \quad (16)$$

벽면 전단력과 손실수두의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$h_f = \frac{4\tau_0}{\gamma D} \quad (17)$$

식(11)에서 식(17)로 부터의 일련의 전개는 손실수두의 시간상 함수를 다음과 같은 표현에서

$$h_f(t) = h_{fs}(t) + h_{ru}(t) \quad (18)$$

식 (18)에서  $h_{fs}$ 는 Darcy-Weisbach 마찰항에 기인한 정상류 마찰항으로서, Quasi-steady friction 모델을 적용할 수 있다. 부정류 마찰항은 식 (17)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$h_{ru}(t) = \frac{16\nu}{gD^2} \int_0^t \frac{\partial V}{\partial t}(u) W(t-u) du \quad (19)$$

여기서,  $\nu$ 는 유체의 동 점성계수,  $W$ 는 가중함수로서 다음과 같이 적용된다.

$$W(\tau) = \begin{cases} e^{-26.3744\tau} + e^{-70.8493\tau} + e^{-135.0198\tau} + e^{-218.9216\tau} + e^{-322.5544\tau} & \text{for } \tau > 0.02 \\ 0.282\tau^{-\frac{1}{2}} - 1.250 + 1.058\tau^{\frac{1}{2}} + 0.938\tau + 0.397\tau^{\frac{3}{2}} - 0.352\tau^2 & \text{for } \tau \leq 0.02 \end{cases} \quad (20)$$

식 (19)의 적분항은  $\frac{\partial V}{\partial t}$ 와 가중함수( $W$ )의 합성곱(convolution)을 나타내는데, 이로 인해 계산시간이 시간의 흐름에 따라 천문학적으로 커지고 많은 저장 용량을 필요로 하는 단점이 있다.

### 2.2.3. Brunone의 난류 가속항 모형

Brunone(1991)에 의해서 제안된 1차원 부정류 관수로 모형의 운동량 보존 편미분 방정식을 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fNV}{2gD} + \frac{\kappa}{g} \left( \frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \quad (21)$$

여기서, 순간 국부가속항(instantaneous local acceleration)  $\frac{\partial V}{\partial t}$ 과 순간 전달가속항(instantaneous convective acceleration)  $\frac{\partial V}{\partial x}$ 을 고려한 추가 마찰 손실항은 매개변수  $\kappa$ 의 적절한 보정에 의해 부정류 마찰의 효과를 고려할 수 있다.

그러나 식 (10)에 제시된 모델은 압력파의 가속 및 감속 방향에 대해 유체의 거동을 잘못 예측하는 경우가 있다. 따라서 Vitkovsky는 Brunone 모델의 전달가속항(convective term)의 올바른 부호 결정을 위해 식 (21)을 다음과 같이 수정하였다(Bergant, 2001).

$$h_{fi}(t) = \frac{\kappa}{2g} \left( \frac{\partial V}{\partial t} + \alpha S(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right) \quad (22)$$

여기서  $S(V) = (+1 \text{ for } V \geq 0 \text{ or } -1 \text{ for } V < 0)$ 으로 결정된다.

식 (21)과 식 (22)는 국부가속도항과 전달가속도항에 동일한 보정계수를 고려한 모형으로, 상이한 기작에서 발생하는 에너지손실을 동일한 규모로 모형의 거동을 기술한다는 논리상의 문제를 가지고 있다. 이와 같은 문제에 대처하기 위해서 제안된 모형은 다음과 같다.

$$h_{fi}(t) = \frac{\kappa_B}{2g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\alpha \Psi_A \kappa_A}{g} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (23)$$

여기서  $\Psi_A$ 는 속도와 전달가속도의 기울기가 같은 경우는 1, 다른 경우는 -1이 쓰이는 부호보정계수이고,  $\kappa_A$ 는 압력파의 형상을 조절하는 변수이고  $\kappa_B$ 는 상의 이동을 제어하는 역할을 한다(Ramos and Covas, 2003). 또한 이들 부정류 마

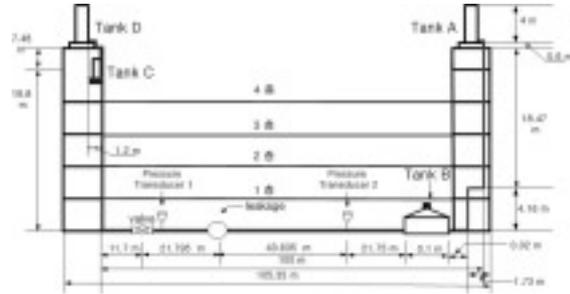


Fig. 2. Experimental setup for simulating hydraulic transient.

찰변수는 관성력과 마찰력의 효과를 제어하는 역할을 한다.  $\kappa_A$ 와  $\kappa_B$ 의 범위와 산정에 대한 연구들은 저 빈도 효과를 고려하는 방향과 Darcy-Weisbach의 마찰계수에서 직접 산정하는 방식들이 만들어져 왔다(Vitkovsky의 2006).

## 3. 천이류 실험장치 및 실험과정

### 3.1. 천이류 실험장치

Fig. 2는 설치된 천이류 실험장치의 정면도이다. 수조에는 수두차이를 만들기 위한 40 mm구경의 수두조절밸브 16개가 매 0.25 m마다 설치되어 있다. 실험에 사용되어지는 유체인 물은 옥상에 설치되어 있는 상수도 저장탱크에서 실험 수조 A로 연결되어 있는 관로를 통해 직접 공급받고 있다. 수조 A와 D는 관경 20 mm의 스테인리스 관으로 연결되어 있고, 수두차이를 더욱 많이 만들기 위해 추가로 설치되어 있는 보조수조 C와도 연결되어 있다.

수조 A에서 나온 관은 수직으로 아래로 내려가 관 중간에 설치된 수조 B를 지나서 지면과 평행하게 건물의 반대편 모서리 부근까지 이어진 후 수조 C(보조수조)와 수조 D(북쪽 6층의 수조)를 향해 수직으로 올라간 다음 연결된다. 실험에 사용된 관은 20 mm 스테인리스 관으로서 총 연장길이 155.86 m, 최대 수평직선길이 87.22 m로 구성되어 있다. 관 중간에 설치된 수조 B는 방해요소의 발생을 억제하고 단일 관망과 같은 효과를 내도록 하기 위해서 설치되었다. Data Logger System은 실험으로부터 얻어진 아날로그 자료는 Data Logger System에서 디지털 자료로 변환된다. Data Logger System은 National Instruments의 DAQ Card-6024E를 사용하였고 주요 사양은 이미현 외(2006)와 같다. 수조 B와 밸브사이의 실험 관로는 87.22m이고 밸브 바로 앞과 상류로부터 21.8m 떨어진 곳에 각각 수압계를 설치하였다. 상류의 수두(upstream reservoir head)는 23.22m가 되고 밸브에서 측정된 초기 수두는 23.125m이다. 관은 내경 20mm의 스테인리스 관이며 두께는 3mm이다.

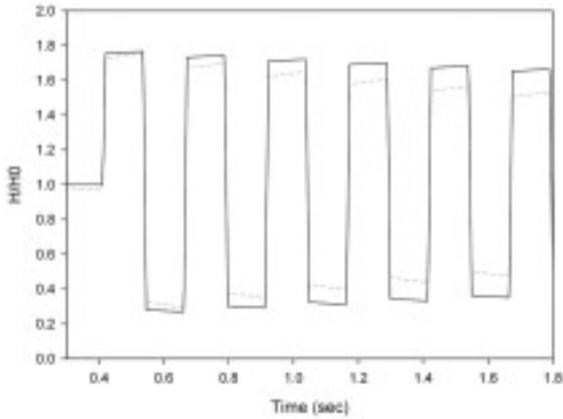
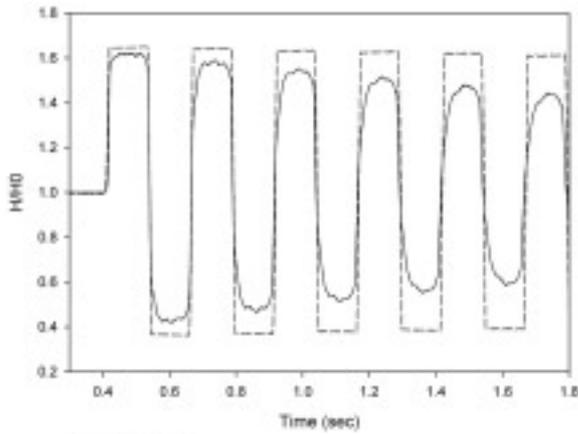


Fig. 3. Normalized pressure variations for a hydraulic transient by experiment, steady friction model, and quasi-steady friction model with Reynolds number = 1774 (a); steady friction model and quasi-steady friction model for Reynold number = 17740 (b).

### 3.2. 천이류 실험과정

천이류 실험을 위해 건물 옥상에 설치된 총 높이 4 m인 두개의 스테인리스 수두조절탱크 수두차이를 두었다. 정상상태의 유체흐름을 만들기 위해 실험수행 전 일정시간동안 밸브의 작동 없이 수조 A에서 수조 D로 물을 흘려보냈다. 관속에 기포의 존재는 파속도를 변화시켜 관내의 압력파의 모양에 상당한 영향을 미친다. 따라서 관내에 기포를 없도록 조작한 다음 정상상태임이 확인이 된 후 실험이 수행되어졌다. 실험 유량은  $3.3047 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  이다. 관의 총 길이는 87.22 m이며 스테인리스관으로 구성된 단일관망으로써 수압계는 두 개가 설치되었다. 수압계가 설치된 위치로 하나는 관말밸브의 바로 앞에 설치되었으며 나머지 하나는 관말밸브

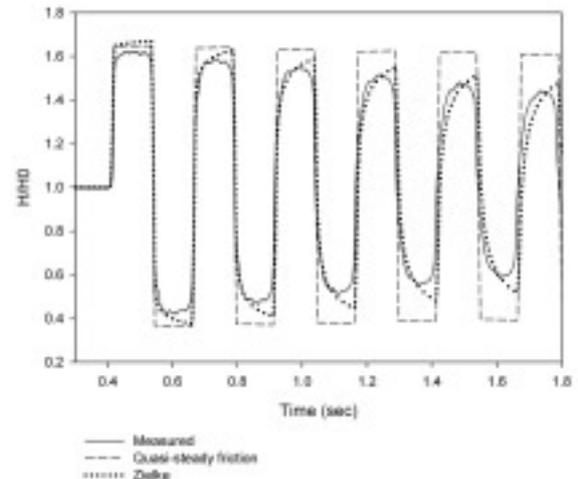


Fig. 4. Normalized pressure variations of hydraulic transient by experiment, quasi-steady friction model, and Zielke's model with Reynolds number = 1774.

로부터 65.42 m에 설치되었다. 실험의 재현성을 알아보기 위해서 같은 조건의 실험을 수차례 반복 수행하고 동일결과를 확인하였다. 천이류의 발생은 관말 밸브의 급폐를 실시하고, 이후 약 10여초간의 수압변동자료를 초당 1000회의 빈도로 기록하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. 정상류 마찰 모형과 반정상상태 마찰 모형

Fig. 3(a)는 Fig. 2의 실험 장치에서 밸브 급폐조건에 의한 천이류 발생실험을 관로 말단에서 관측한 결과와 정상류 마찰모형을 사용하여 수압을 모의한 결과와 반 정상상태 마찰모형의 모의 결과를 비교한 도식이다. 비교결과의 일반성을 부여하기위해 Joukowsky(1904) 수압으로 정규화한 양식으로 도식하였다. 실험결과가 시간이 경과함에 따라서, 상당한, 수두감쇄 효과를 보이는 반면, 정상류 마찰 모형이나 반 정상상태 마찰 모형의 수두감쇄는 미소하다. 정상류 마찰 모형과 반 정상상태 마찰 모형은 구분이 불가능한 유사 거동을 보이는 데, 이는 Reynold 수가 작은 층류 상태의 수치 실험이기 때문이다. Fig. 3(b)는 Reynold 수가 17740 인 경우의 마찰모형의 모의 결과를 비교한 도식인데, 상당한 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 층류 영역의 낮은 Reynold 수에서는 반 정상상태 마찰모형의 마찰 감쇠기여 정도가 무시할 수 있을 정도로 미소함을 의미한다.

### 4.2. Zielke의 2차원 반경 점성 모형의 모의

층류 영역의 반경 점성을 고려한 Zielke의 모형을 반 정상상태 마찰 모형에 추가하여 수치 모의한 결과를 Zielke 모형이라 정의하고, 이 계산 결과를 Fig. 4에 도식하였다. Zielke

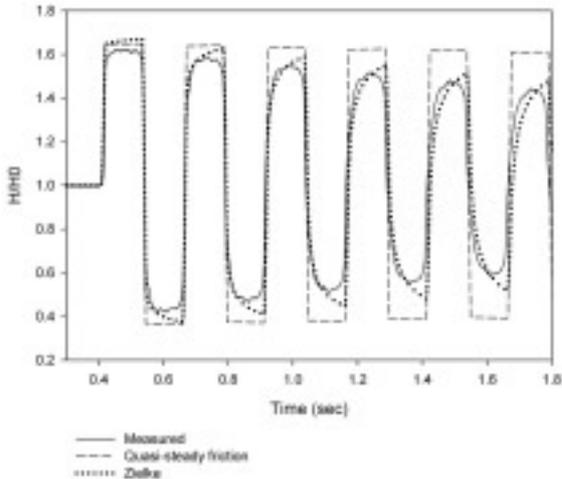


Fig. 5. Normalized pressure variations of hydraulic transient by experiment, and Brunone model of k version.

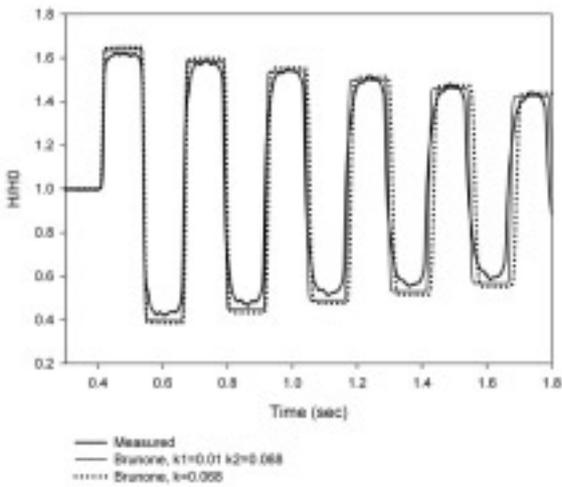


Fig. 6. Normalized pressure variations of hydraulic transient by experiment, and Brunone model of k1 and k2 version.

의 모형은 반 정상상태 마찰모형에 비해 실험결과를 잘 모사하고 있으며, 특히, 수두감쇠 효과를 적절히 재현하는 특성을 보이고 있다. 그러나, 파의 선단부의 형상을 비교하면, 관측치에 비해서 수압의 가중치가 후반부에 집중되는 특성을 보이고 있다. 이는 Zielke의 모형(1968)의 유도과정에서 도출된 Bessel 함수의 특성으로 기인된 것으로 판단되며, 실제 관측치는 반경방향의 점성효과와 더불어 추가적인 기좌에 의해 지배받고 있음을 나타내고 있다. 특히, 수차례 반향파의 주기거동 후 파의 상이 미소한 불일치를 보이고 있는 점은 비록 층류 상태이지만, 국부 가속항이나 전달 가속항이 여전히 상당부분 역할을 할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 이는 Bergant 외(2001)의 결과와도 일치하는 부분이다.

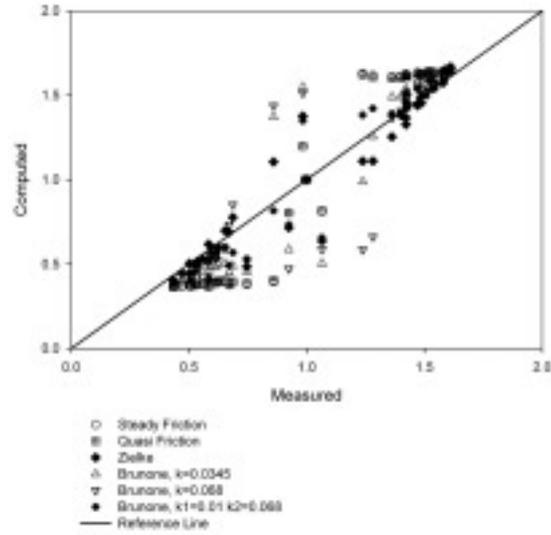


Fig. 7. Comparisons of normalized pressure variations of hydraulic transient by experiment, and various models.

#### 4.3. Brunone의 난류 가속항 모형의 모의

Brunone의 국부가속도항과 전달가속도항의 구형 모형을 반 정상상태 마찰 모형에 추가하여 수치 모의한 결과를 Brunone 모형이라 정의하고, 모사 결과를 실험결과에 비교한 결과를 Fig. 5에 도식하였다. 2.2.3절에 기술된바, Brunone 모형은 보정계수  $k$ 를 사용한 경우와  $k_1(k_B)$ 과  $k_2(k_A)$ 를 사용한 경우가 있다. Fig. 5는  $k$ 를 사용한 경우를 실험결과와 비교하고 이를 Joukowsky 수압으로 정규화하여 도식하였다. Fig. 5의 보정계수  $k=0.0345$ 의 경우는 Bergant 등(2001)에 의해 제안된 값을 쓴 경우이고,  $k=0.068$ 은 본 연구에서 보정한 값이다. 실험치와의 비교는 Bergant 등(2001)의  $k=0.0345$ 가 수두감쇠 양상을 적절히 모사하지 못하고 있음을 보여주고 있고, 이 계수가 시스템의 특성에 따라, 변경될 수 있음을 의미한다. 실제로 Bergant 등(2001)의 실험관망은 길이가 37.23m로 본 연구에서 사용된 관망의 42%이며 가압방식도 가압탱크를 사용한 인공가압으로 본 연구의 자연가압방식과 차이가 있다. 그러나, 본

Table 1. Sum of residual squares and Pearson's correlation coefficient between measured and modeled pressure time series

	Sum of Residual <sup>2</sup>	Pearson's Cor. Coeffi.
Measured	0.0000	1.0000
Steady	0.0530	0.9751
Quasi	0.0336	0.9704
Zielke	0.0117	0.9669
Brunone 1	0.0273	0.9515
Brunone 2	0.0375	0.9014
Brunone 3	0.0095	0.9788

\* Brunone 1 :  $k=0.0345$ , Brunone 2 :  $k=0.068$ , Brunone 3 :  $k_1=0.01$   
 $k_2=0.068$

연구에서 보정된  $\kappa=0.068$ 는 수압파의 상(Phase) 불일치가 Bergant등(2001)의  $\kappa=0.0345$ 에 비해 시간이 지남에 따라 증폭됨을 Fig. 5는 보여주고 있다. 이는 초기 Brounone 모형의 한계를 보여주는 것으로  $\kappa_1(\kappa_B)$ 과  $\kappa_2(\kappa_A)$ 를 사용하는 Ramos와 Covas(2003) 그리고 Vitkovsky(2006)의 모형 개선 노력의 동기가 되고 있다. Fig. 6은  $\kappa=0.068$ 의 경우에  $\kappa_1(\kappa_B)=0.01$ 을 도입하고,  $\kappa_2(\kappa_A)=0.068$ 을 사용한 결과를 비교 도식하였다. 두 계수( $\kappa_1, \kappa_2$ )로 보정한 경우가 단일 계수( $\kappa$ )로 보정한 경우보다 상의 일치를 보다 적절히 묘사함을 확인할 수 있다. 특히, 이와 같은 현상은 압력파의 반향이 수차례 진행된 Fig. 6의 후반부에 두드러지게 나타나는데, 이는 보정계수  $\kappa_1(\kappa_B)$ 이 국부가속항에 관련되어 있고, 국부가속항의 기여도는 파의 진행방향이 전환되는 관망의 경계부분에서 발생된다는 관련 연구자들의 지적과도 일치한다(Vitkovsky 외 2006).

#### 4.4. 관측치와 계산치의 상관도

Fig. 7은 실험을 통한 관측치와 본 연구에서 구현된 여러 종류의 모형 간의 상관관계를 정규화한 수압의 기준으로 도식화한 그림이다. 관측자료 및 모의자료의 과다문제로, 전체 자료의 1% 만을 등간격으로 추출하여 비교를 위해 도식하였다. Fig. 7은 모형구동과 실측치의 차이가 수격압의 상한치나 하한치보다는 기준수압(1)의 주변에서 상대적으로 크게 나타난다는 것을 보여주고 있는데, 이는 압력파의 수차례 진행 후 나타나는 상의 불일치에 기인한 것으로 판단된다. 또한, Fig. 7은 Zielke의 모형이나 Brunone 모형의 두 계수( $\kappa_1, \kappa_2$ ) 보정 version이 상대적으로 가장 우수한 실험의 재현 능력을 보여주고 있음을 나타낸다.

Table 1은 모의치와 관측치 사이의 잔차의 제곱과 Pearson 상관계수를 보여주고 있다. 최소 잔차의 제곱합은 Zielke의 모형이, 최고 Pearson 상관계수는 Brunone 모형의 두 계수( $\kappa_1, \kappa_2$ ) 보정 version이 구현하고 있는 것으로 나타나, 천이류 해석 모형을 마찰계수나, 누수조건 같은 보정을 위한 목적으로 사용할 때는 이 두 모형이 다른 모형보다 우수한 결과를 도출할 수 있는 조건임을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 보다 정교한 비선형 매개변수 최적화 알고리즘을 채택한 매개변수 보정과정을 통해서 개선될 여지가 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 관수로의 수격압 현상시 나타나는 압력파의 이동을 정확히 모의하기 위해 여러 연구자들이 제안한 다양한 부정류 마찰항에 대한 모형을 종합적으로 비교하는 연구를 수행하였다. 모사를 위한 수치실험 연구와 함께 관수로 실험장치의 동일조건 실험을 실시하여 이를 비교하였으며,

실험치와 일치정도를 향상시키기 위한 모형의 매개변수도 보정하였다.

정상류 혹은 반 정상상태 마찰 모형은 Joukowsky 수격압을 재현하고, 최대 수격압의 개략적인 변화를 모의하는 용도로는 사용될 수 있지만, 천이류의 압력 변화를 정확히 모의하기 위한 수두의 감쇠폭이나, 압력파의 상일치 측면 모두 적절치 못한 것으로 나타났다. 관로 반경방향으로의 점성 효과를 고려한 Zielke의 모형은 반정상상태의 모형에 비해 상당한 개선 효과가 있는 것으로 확인되었지만, 가중함수의 합성곱을 수행하는 과정에서 상당한 계산 용량을 필요로 하는 단점이 있다. Brounone의 모형은 두 계수를 사용하는 경우가 단일계수의 경우보다 천이류의 변동양상을 보다 적절히 묘사하는 것으로 판단된다.

관로에서의 천이류를 묘사하려는 여러 모형들의 성공적인 거동에도 불구하고, Navier-Stokes 방정식에서 출발하는 유체모형의 간략화 과정에서 파생되는 가정과 제한점, 완전 해석해의 부재에서 기인되는 모형구조의 불확실성, 다른 모형들의 개발역사와 관련된 일관성의 부재, 그리고 열역학적인 관계식의 부재와 또는 이와 관련된 공기기포의 존재와 완전구현의 한계는 관망에서 천이류 완전 해석을 위해 반드시 해결해야 할 난제로 남아있다.



## 사사

이 논문은 환경부의 '차세대 핵심환경기술개발사업'으로 지원 받은 연구입니다. 교육과학부의 인력양성인 BK21 Program의 지원에도 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김상현, 김봉기, 조임영, 이현동, (2003) "관로시스템의 천이류 해석에 의한 부정류 마찰항 고려방법에 대한 비교 연구", *대한환경공학회*, Vol. 25(5), pp. 602-608.
2. 이미현, 송용석, 김상현 (2006) "단일관망에서 누수효과를 고려한 천이류 분석 및 실험", *상하수도학회지*, Vol. 20(2), pp. 139-140.
3. Adamkowski A., Lewandowski, M. L. (2006) "Experimental examination of unsteady friction models for transient pipe flow simulation", *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 128, pp. 1351-1361.
4. Bergant A., Simpson A. R., and Vitkovsky J. (2001)

- "Developments in unsteady pipe flow friction modelling." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39(3), pp. 249-258.
5. Boulos P., Karney B. W., Wood D. J., Lingireddy S. (2005) "Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 97(5), pp. 111-124.
6. Brunone B., Ferrante M., (2001) "Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients" *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 5 pp. 539-548.
7. Brunone B., Golia, U. M., and Greco, M., (1991) "*Some remarks on the momentum equations for fast transients.*" International meeting on hydraulic transients with column separation, 9th round table, IAHR, Valencia, Spain.
8. Chaudhry M. H., (1987) "*Applied hydraulic transients.*" 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
9. Haaland, S. E., (1983) "Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow." *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 89-90.
10. Joukowsky, N., (1904) "Waterhammer" Mem. Imp. Acad. Soc. St. Petersburg, 1898(translated by O. Simin); *Proc. Am. Waterworks Assoc.* Vol. 24, pp. 341-424.
11. Kim, S. (2008) "Address-oriented impedance matrix method for generic calibration of heterogeneous pipe network systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134(1), pp. 66-75.
12. Liggett J. A., Chen L. C., (1994) "Inverse transient analysis in pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 8, pp. 934-955.
13. Ramos H., Covas D., (2003) "Surge damping analysis in pipe systems :modelling and experiments." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42(4) pp. 413-425.
14. Vitkovsky J., Stephens, M., Bergant, A., Simpson, A., Lambert, M., (2006) "Numerical error in weighting function-based unsteady friction models for pipe transients." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132(7), pp. 709-721.
15. Wylie, E. B., Streeter V. L., (1993) "*Fluid transients in systems.*" Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J.
16. Zielke, W., (1968) "Frequency-dependent friction in transient pipe flow." *Journal of Basic Engineering*, Vol. 67, 109-115.