

# 대규모 송수관로에서 유입밸브의 운전 Inlet Valve Operation in the Large-Scale Pipe Networks

강 형식 · ○박 문형 · 최 성욱 · 조 원철

## 1. 서론

밸브류의 급작스러운 조작, 펌프의 시동 및 재동, 그리고 정전 등의 이상상태 발생시 관로내에서는 과도류가 발생한다. 이러한 흐름의 변화에 의하여 관로내에서는 압력의 과도현상이 발생한다. 관로내에서 발생한 압력의 과도현상은 관로와 관로내의 각종 시설물을 파손시킬 수 있으므로 이에 대한 충분한 검토가 필요하다. 본 연구의 대상인 광역상수도 3단계의 취수원인 팔당취수장의 경우에는 수도권 (성남 정수장, 광명 정수장, 외부 정수장)으로 약 135 만톤/일의 유량을 송수하는 중요한 시설물이다. 따라서 대상관로를 압력의 과도현상으로부터 보호할 수 있는 펌프장 및 밸브 등의 운전 방법의 확립이 필요하다. 박문형 등 (1998)은 압력의 과도현상을 조절하기 위한 펌프상의 운전방안에 대하여 연구한 바 있다.

본 연구의 대상인 수도권 광역상수도 3단계 관로는 성남, 광명, 그리고 외부 정수장으로 용수를 공급하며 각 정수장은 유입밸브를 가지고 있다. 관로내의 이상상태 발생시 각 정수장의 유입변에 설치된 밸브를 조작하여야 한다. 본 연구의 목적은 이 때 발생하는 압력의 과도현상을 최소화하는 밸브의 운전방법을 결정하는데 있다. 밸브의 운전방법을 결정하기 위하여 각 정수장 유입밸브의 폐쇄시간은 Allievi (1925)가 제시한 식을 이용하여 결정하였다. 결정된 각 밸브의 폐쇄시간을 대상관로에 적용시키고, 밸브 폐쇄시 발생하는 압력의 과도현상을 미국 Stoner사가 개발한 LIQT를 이용하여 수치모의를 수행하였다.

## 2. 밸브의 조작에 의한 압력의 과도현상

### 2.1 관내 과도류의 지배방정식

관내 과도류의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로서 각각 다음 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \alpha + f \frac{|V|V}{2D} = 0 \quad (2)$$

여기서  $H$ 는 위압수두,  $P$ 는 압력,  $V$ 는 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $f$ 는 Darcy-Weisbach 마찰계수,  $a$ 는 압력파의 전달 속도,  $D$ 는 관경,  $\alpha$ 는 경사각, 그리고  $\rho$ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 식 (1)에서 압력파의 전달 속도  $a$ 는  $\sqrt{k/\rho}$ 이며  $k$ 는 유체의 체적탄성계수이다. 일반적으로 압력의 과도현상은 식 (1), (2)를 이용하여 해석한다.

### 2.2 밸브의 종류별 폐쇄 양상

밸브의 폐쇄시 발생하는 압력의 과도현상은 밸브의 개도변화에 따라 다르다. Wood와 Jones (1973)는 이러한 서로 다른 종류의 밸브에 대해서 밸브의 개도 변화율을 변화시켜 밸브 폐쇄에 대해 연구하였다. 본 연구에서는 Wood와 Jones (1973)가 제시한 밸브의 종류에 따른 밸브폐쇄의 특성을 고려하였다. 본 연구에 적용한 밸브는 circular 밸브, globe 밸브, needle 밸브, square gate 밸브, butterfly 밸브의 5가지로서, 밸브 내에 통수면적을  $A_0$ , 밸브의 총단면적을  $A$  라 하면,  $A$ 와  $A_0$ 의 비로서 밸브폐쇄의 특징을 식으로 표현하면 각각 다음 식 (3a)-(3e)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_0}{A} = \frac{Z}{D} \quad \text{globe 밸브} \quad (3b)$$

$$\frac{A_0}{A} = 1 - \left[ \frac{2}{\pi} \left( \arccos \left( \frac{Z}{D} \right) - \frac{Z}{D} \sqrt{1 - \left( \frac{Z}{D} \right)^2} \right) \right] \quad \text{circular 밸브} \quad (3a)$$

$$\frac{A_0}{A} = 2 \frac{Z}{D} - \left( \frac{Z}{D} \right)^2 \quad \text{needle 밸브} \quad (3c)$$

$$\frac{A_0}{A} = 1 - \frac{1}{\pi} \left[ \arccos \left( 2 \frac{Z}{D} - 1 \right) - \left( 2 \frac{Z}{D} - 1 \right) \sqrt{1 - \left( 2 \frac{Z}{D} - 1 \right)^2} \right] \quad \text{square gate 밸브} \quad (3d)$$

$$\frac{A_0}{A} = 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad \text{butterfly 밸브} \quad (3e)$$

여기서  $D$ 는 밸브의 직경,  $Z$ 는 개도된 밸브의 높이, 그리고  $\theta$ 는 butterfly 밸브의 경우 회전축의 회전각도를 나타낸다. 밸브의 완전 폐쇄시간을  $t_c$ 라 하고 임의의 시간에서의 밸브의 폐쇄시간을  $t$ 라 하면, 밸브의 직경 ( $D$ )과 밸브 개도의 높이( $Z$ )의 비는  $t/t_c$ 에 선형적으로 반비례하며 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Z}{D} = 1 - \frac{t}{t_c} \quad (4)$$

식 (3)에 식(4)를 대입하여 그림 1과 같은 밸브 종류별 폐쇄시간에 따른 개도율의 변화를 나타낼 수 있다. 그림 1에서 square gate 밸브는 선형으로 폐쇄되며, butterfly 밸브는 폐쇄초기에 개도의 변화가 크고, 나머지 밸브는 초기에 비하여 폐쇄가 완료되는 부분에서의 개도의 변화가 큰 것을 확인할 수 있다.

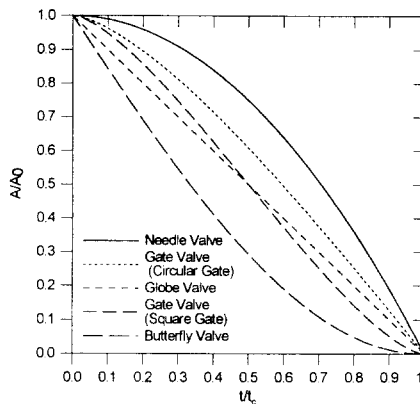


그림 1. 밸브의 종류별 폐쇄양상

### 3. 적용

#### 3.1 단순관로에서 밸브의 종류별 압력의 과도현상 진행 양상

앞에서 제시한 밸브의 종류별 폐쇄 특성에 따른 압력파의 전파양상을 파악하기 위하여 본 수치모의를 수행하였다. 관경 2.2 m, 길이 10 km, 경사 1°를 가진 임의의 단순 관로에 대해, 압력파의 전파 속도는 1000 m/s, Hazen-Williams의 유속계수는 120으로 가정하였다. 시점과 종점의 위압수두를 각각 184.5 m와 140 m로 설정하여 일정하다고 가정하고 모의를 수행하였다. 밸브의 완전 폐쇄시간은 5가지 밸브 모두 50 초로 설정하였다. 이에 대한 수치모의 결과는 아래 그림 2와 같다.

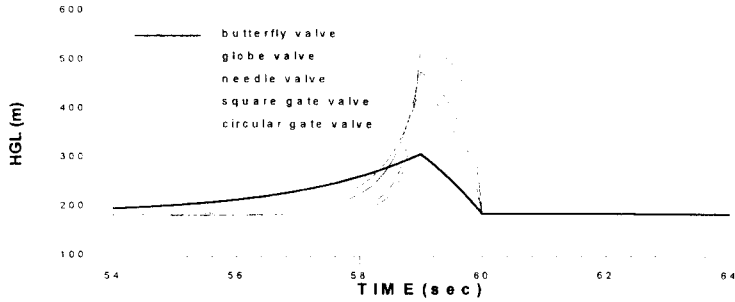


그림 2. 밸브 종류별 밸브 폐쇄시 시간에 따른 HGL의 변화

그림 2는 유입부에서 500 m 떨어진 지점에서 밸브 종류별 시간에 따른 위압수두의 변화를 나타내었다. 압력의 과도현상은 밸브 폐쇄후 약 60 초 부근에서 최대가 발생하였으나, 최대 상승 수위는 butterfly 밸브가 가장 작고, 그 다음 square gate, globe, needle, circular 밸브 순이다. 즉, 초기에 폐쇄의 정도가 큰 경우가 압력의 과도현상을 제어하는데 효과적인 것을 확인할 수 있으며, 일반적으로 대규모 관로에서는 butterfly 밸브를 사용하고 있다 (건교부, 1992).

### 3.2 분기관로에서 밸브의 폐쇄시간 결정

분기관로내 각 유입면에서의 밸브 폐쇄로 인해 발생하는 압력의 과도현상을 최소로 하는 밸브의 운전방안을 수립하기 위해 본 수치모의를 실시하였다. 본 연구에서 사용된 대상관로는 광역상수도 3단계 관로이며, 관로의 재원은 표 1과 같다. 각 정수장의 유입면에 설치된 butterfly 밸브에 대하여 압력의 과도현상을 모의하였다. 그림 3은 본 연구의 대상관로에 대한 개략도이다. 각 관로의 유입면 밸브를 편의상 밸브-1, 밸브-2, 밸브-3라고 정하였다. 그림 3에서 절점 PG10은 광역상수도 3단계 관로에서 조압수조가 설치된 지점이나 본 연구에서는 다른 압력 조절장치의 효과를 배제하고 밸브의 운전시간에 따른 압력의 과도현상만을 모의하기 위하여 조압수조는 모의에서 제외하였다.

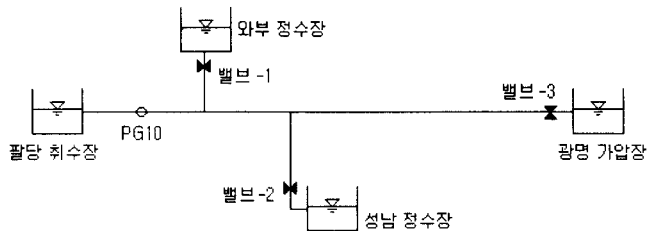


그림 3. 광역상수도 3단계 개략도

표 1. 광역상수도 3단계의 개요

	팔당 - 광명	팔당 - 성남	팔당 - 와부
총 길이 (L)	45.12 km	30.29 km	15.40 km
관 경 (D)	2.2 m	2.2 m, 1.8 m	1.2 m
마찰계수 (f)	0.02		
유속계수 (C <sub>H</sub> )	120		

밸브를 연계운전을 모의하기 전에 각 정수장에 설치되어 있는 밸브들의 폐쇄시간을 결정 하기 위해 압력파의 최대 상승수위에 대한 식을 이용하였다. 일반적으로 밸브의 폐쇄시간  $t_c$ 가 압력파의 전파속도  $a$ 의 왕복시간 보다 짧은 경우 ( $t_c < 2l/a$ ) 밸브 위치에서의 최대 압력파의 상승수위  $H_m$ 은 Joukowski (1904)가 제

시한 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_m = \frac{a}{g} V_0 \quad (5)$$

여기서  $V_0$ 는 정상류의 유속이다.  $t_c$ 가 압력파의 전파 속도  $a$ 의 왕복시간 보다 큰 경우 ( $t_c > 2l/a$ ) Allievi (1925)가 제시한 아래의 식 (6)을 적용할 수 있다.

$$\frac{H_m}{H_0} = \frac{N}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{N^2 + 4N} \quad (6)$$

여기서  $N$ 은  $(lV_0/gt_cH_0)^2$ ,  $H_0$ 는 압력의 과도현상이 발생하기 전의 위압수두이며, 그리고  $l$ 은 관로의 연장이다. 급속폐쇄의 경우 식 (5)에 의하면 압력파의 상승폭( $H_m$ )은 중력가속도와 압력파의 전파속도를 상수로 볼 때, 유속만으로 결정되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 완속폐쇄의 경우에는 초기 위압수두, 유속, 관로연장, 그리고 밸브의 폐쇄시간 등의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 일반적으로 밸브의 폐쇄는 완속폐쇄를 사용하므로 본 연구에서는 식 (6)을 이용하여 폐쇄시간을 결정하였다. 식 (6)을 이용하여 각 정수장 별로 밸브의 폐쇄시간에 따른 압력파의 변화율은 그림 4와 같다. 건교부 (1992)는 관로내의 압력의 과도현상에 의한  $H_m/H_0$ 의 비가 1.5 - 4.0일 때를 안전축이라고 제시하고 있으나, 본 연구에서는 이들 보다 안전축인 1.0의 경우를 한계 상승수위로 설정하여 밸브의 폐쇄시간을 결정하였다. 따라서 그림 4에서 밸브-1은 180 초, 밸브-2는 420 초, 밸브-3은 330 초를 각 유입변내 밸브들의 총 폐쇄시간으로 결정하였다.

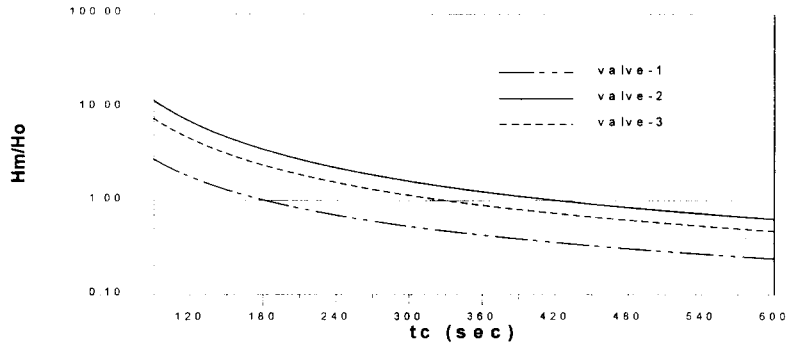


그림 4.  $H_m/H_0$  와  $t_c$ 의 관계곡선

각 밸브의 폐쇄시간을 대상관로에 적용시켜 각각의 밸브가 독립적으로 폐쇄될 경우 PG10에서 계산된 위압수두는 그림 5와 같다. 그림에서 밸브-3 만을 폐쇄시킨 경우 압력의 과도현상이 가장 크게 발생하였으며, 밸브-1의 영향은 다른 밸브들에 비해 비교적 작음을 알 수 있다.

각 밸브의 폐쇄 시작 시간을 결정하기 위하여, 밸브의 폐쇄 시작 시간을 변화시켜 수치모의를 수행하였다. 먼저 관로내에 압력의 과도현상이 미치는 영향이 큰 밸브-2와 밸브-3에 대하여 밸브-2의 폐쇄 시작 시간을 변화시켜 모의결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 밸브-3를 폐쇄시킨후 60 초 후에 밸브-2를 폐쇄시킨 경우가 압력파의 최대와 최소값의 차이가 10.5 m 로서 가장 작은 것으로 나타났으며, 또한 약 80-140 초 부근에서는 압력의 과도현상이 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 밸브-3의 폐쇄시간이 260초 이후에 위압수두의 최대값이 가장 작게 나타났다.

그림 7은 밸브-2를 밸브-3에 이어 60, 120, 260 초가 경과한 후 폐쇄시킬 때, PG 10 지점에서 압력의 과도현상을 모의한 결과이다. 그림 7에서, 밸브-2의 폐쇄 시간이 60 초 일때 압력의 과도현상의 진폭이 가장 작게 나타났으며, 120 초 일때 진폭이 큰 것을 알 수 있다. 그리고 260초에서 폐쇄시킨 경우 역시 60 초에 폐쇄시킨 경우 보다 압력파의 진폭은 더 크게 발생하였다. 따라서 단순히 밸브의 폐쇄시간만 지연시키는 것은 과도현상에 의한 영향을 줄이는 것과 무관함을 알 수 있으며, 밸브-2의 폐쇄 시작시간은 약 60초 정도 간격을 두고 운전하는 것이 안전할 것으로 판단된다.

밸브-3에 이어 60초 후에 밸브-2를 폐쇄한 상태에서, 밸브-1의 폐쇄 시작 시간을 변화시키며 수치모의를

수행하였다. 그림8은 PG10에서 밸브-2와 밸브-1의 폐쇄간격에 따른 위압수두의 변화를 나타내었다. 그림에서 최소 위압수두는 거의 일정함을 알 수 있다.

그림 9에서는 밸브-2의 폐쇄에 따른 밸브-1의 폐쇄 시간간격이 각각 0, 10, 180 초 일 때 PG10 지점에서 위압수두의 변화를 나타 내었다. 그림 8에서 살펴본 바와 같이 밸브-2와 밸브-1의 폐쇄간격은 위압수두에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있으며, 밸브-1을 100 초 후에 폐쇄 시켰을 때가 가장 작은 수충압이 발생하였다. 따라서 밸브-3를 폐쇄 시킨후 밸브-2를 60 초 후에, 그리고 밸브-1을 100 초 후에 폐쇄 시켰을 경우가 가장 작은 수충압을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

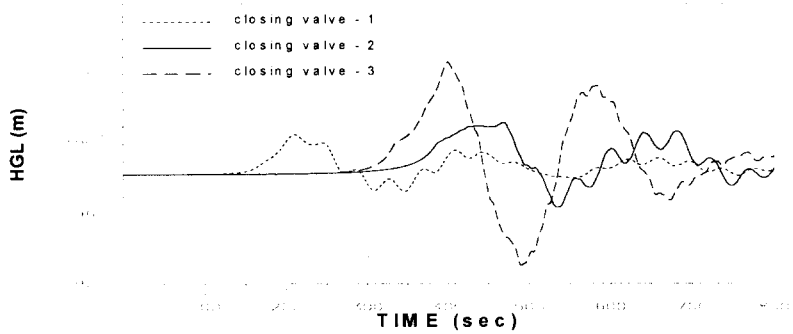


그림 5. 각각의 밸브를 닫았을 경우 PG10 지점에서의 시간에 따른 HGL의 변화

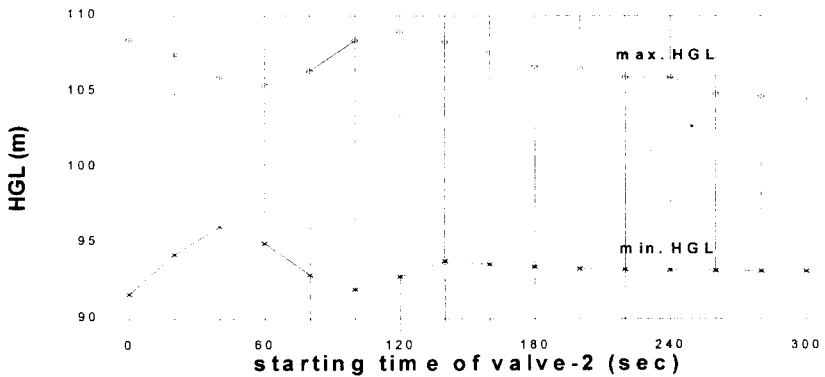


그림 6. valve-2의 폐쇄시작 시간에 따른 최대, 최소 HGL의 변화

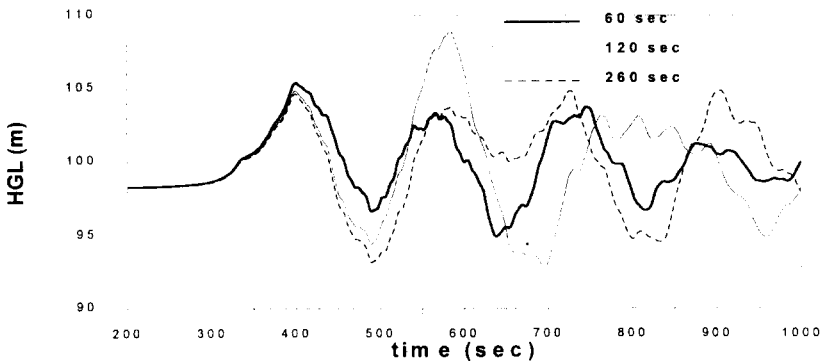


그림 7. PG 10지점에서 valve-2의 폐쇄 시간별 시간에 따른 HGL의 변화

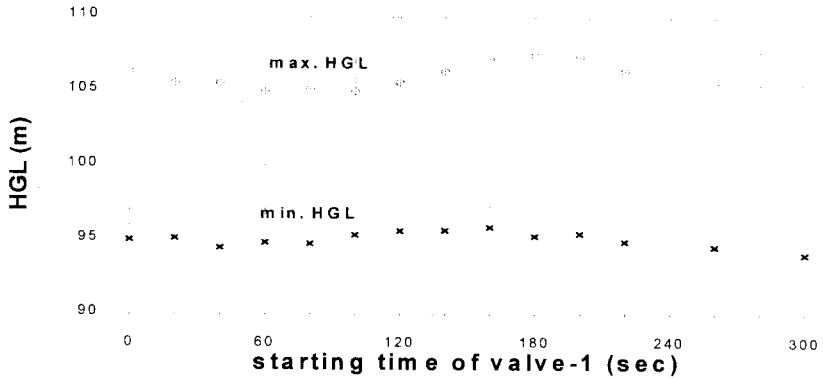


그림 8. valve-1의 폐쇄시작 시간에 따른 최대, 최소 HGL의 변화

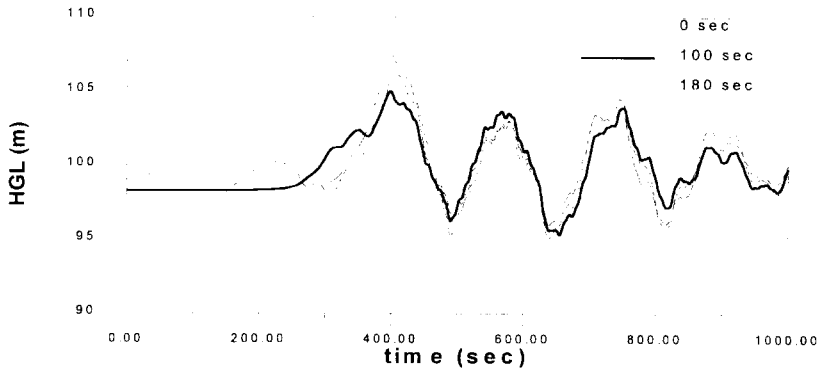


그림 9. PG 10지점에서 valve-1의 폐쇄 시간별 시간에 따른 HGL의 변화

#### 4. 결론

본 연구는 단순관로에서 관로 중점부에 서로 다른 종류의 밸브를 폐쇄시켰을 때 발생하는 압력의 과도현상과 광역상수도 3단계에서 각 관로 중점부에 위치한 밸브를 폐쇄시켰을 경우 발생하는 압력의 과도현상을 수치모의 하였다. 수치모의 결과 단순관로에서 butterfly 밸브가 가장 작은 압력과의 상승수위를 나타내었다. 또한 분기관로에서 Allievi (1925)가 제시한 식을 이용하여 관로 중점부에 위치한 밸브의 완전 폐쇄시간을 결정 하였으며, 각각의 밸브를 폐쇄 시킬 때 밸브 폐쇄 시작 시간을 다르게 함으로서 밸브 폐쇄시 발생하는 압력의 과도현상을 조절할 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

- 건교부 (1992), 상수도시설기준, 한국수도협회.
- 박문형, 최성욱, 조원철 (1998). "수치모의를 이용한 펌프의 운용방안 검토." 대한토목학회 학술발표회 논문집 (III), 89-92.
- Allievi, L. (1925). *Theory of Water Hammer*, Riccardo Garoni, Italy.
- Joukowsky, N. (1904). "Waterhammer." *Proc. Am. Waterworks Associate*, Vol. 24, 341-424.
- Stoner Associate, Inc. (1990). *LIQT Training Book*, Carlisle, PA.
- Stoner Associate, Inc. (1990). *User's Guide for LIQT-386 version 6.0*, Carlisle, PA.
- Wood, D.J., and Jones, S.E. (1973). "Water-hammer chapters for various types of valves." *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 99 (HY1), 167-177.
- Wylie, E.B., and Streeter, V.C. (1993). *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, NJ.