

## 水擊現象의 發生原因과 諸影響

### The Occurrences and the Effects of Water Hammer

洪 性 銀  
S. E. Hong

柳韓專門大學 建築設備科 副教授



- 1950년생
- 건축 기계설비분야에서 위생배관계통 및 냉동기에서의 열전달에 관심이 있다.

#### 1. 머리말

1970년대 초반부터 일기 시작한 우리나라 건설붐은 1980년대 중반부터는 한정된 토지의 효율적 이용, 열악한 주거환경 개선 및 산업사회의 급성장에 따른 업무용 공간의 필요에 따라, 신도시나 재개발지역에 대단위 아파트가 건설되고 업무용 빌딩등은 고층화, 대형화 되어가고 있다.

또한 건축물 내부는 보다 더 쾌적하고 안락한 주거조건이 요구되고 있으며, 이러한 요구를 충족시키기 위하여 내부설비는 더욱 복잡하고 다양화, 고급화 되었다. 예전에는 대형 업무용 빌딩에만 냉난방설비를 하던 것이 이제는 완벽한 공조설비까지 하고 있으며 머지않아 아파트와 같은 주거용 건물에도 이와같은 설비를 하는 것이 일반화 될 추세이다. 그러나 외형적인 건축분야의 비약적인 발전에도 불구하고 건축설비분야는 아직까지도 선진국에 비해 낙후된 분야가 많이 있는 것이 사실이다.

위생설비분야도 연구 개발하여야 할 과제가 많이 있으나 여기서는 우리가 흔히 겪고 있는 水擊現象(water hammer)에 대해서만 언급하고자 한다.

미국을 위시한 선진 각국에서는 이미 100여년

전부터 수격현상에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 우리나라에서는 아직까지 이에 대한 전문적인 연구가 미흡한 실정이다.

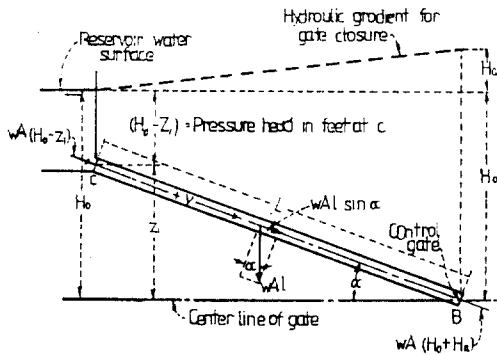
따라서 본고에서는 수격현상의 발생원인을 분석하고, 이로 인한 배관계에서의 여러 영향들을 고찰하고자 한다.

#### 2. 수격현상의 발생원인

##### 2.1 Rigid Water Column 이론

유체가 흐르는 배관계의 밸브류나 수전류를 급히 개폐하거나, 정전 등으로 펌프가 갑자기 정지되면 유동의 변화로 관 내부의 압력변화가 급속히 발생하며 때로는 특이한 소리를 동반한다. 이것이 수격현상이며 우리가 흔히 겪는 현상중에 하나이다.

여기서 수격현상의 발생원인을 역학적으로 분석하기 위하여 그림 1과 같이 길이가  $L$ 이고, 단면적( $A$ )이 균일한 배관계에서 유동이 급격히 변화할 때의 영향을 생각해 본다. 배관의 윗쪽은 저수조에 연결되어 있고 아래쪽은 대기중에 노출되어 있으며, 끝에는 방유량을 조절할 수 있는 조절밸브가 장치되어 있다. 그리고 분석을 간단하게 하기 위하여 다음과 같이 가정한다.



- A : Cross-sectional area of pipe (ft<sup>2</sup>)
- L : Total length of pipe
- α : Angle of slope of pipe
- w : Specific weight of water
- H<sub>0</sub> : Pressure head for steady conditions (when gate is submerged, H<sub>0</sub> is taken as the net head on gate) (ft)
- H<sub>a</sub> : Pressure rise above normal
- A<sub>1</sub> : Height of point on pipe measured above center line of control gate

그림 1 배관계의 一例

- ① 관속의 물은 비압축성이다.
- ② 관벽은 관내의 어떤 압력에도 늘어나지 않는다.
- ③ 관 내에는 항상 물이 차 있고 관 내부압력은 물의 증기압보다 높다.
- ④ 수압손실과 속도수두는 압력변화에 비해 무시할 수 있다.
- ⑤ 관 길이방향의 물의 속도는 관의 어느 단면에서나 균일하다.
- ⑥ 횡단면에서의 압력은 어느 단면에서도 균일하고 관 중심선상의 압력과 같다.
- ⑦ 저수조의 수면은 밸브가 작동하는 동안 일정한 수위를 유지한다.

그림에서 밸브가 폐쇄되기 시작하면 유동이 변하여 게이트에서 관 속의 물에 작용하던 외력이 평형을 잃게 되며, 외력은 게이트의 개도가 커질수록 증가한다.

단위시간당 유출되는 물의 속도 감소량(“-”의 가속도)은  $-dV/dt$ 이며, 물의 속도  $V$ 는 유동 방향을 “+”로 한다. 또한 유출에 의해 감소되는 물의 질량은  $wAL/g$ 로 되며 물에 작용하는 외력

에 의한 출구에서의 수두의 변화량을  $H_a$ 로 표시하면 외력은

$$wA\{(H_0 + H_a) - (H_0 - Z_1) - L \cdot \sin\alpha\}$$

이다. 그런데  $Z_1 = L \cdot \sin\alpha$ 이므로 결국 외력의 크기는  $wAH_a$ 로 된다.

여기서 운동에 관한 Newton의 제2법칙을 적용하면 「힘 = 질량 × 가속도」이므로

$$wAH_a = (wAL/g) \times (-dV/dt)$$

$$H_a = -\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

그리고 밸브가 작동하기 전 대기중으로 방출되는 물의 양  $Q_0$ 는

$$Q_0 = AV_0 = (C_d A_g)_0 \sqrt{2gH_0}$$

로 되며, 여기서  $B_0 = \frac{(C_d A_g)_0 \sqrt{2g}}{A}$ 로 놓으면

밸브를 닫기전 물의 속도  $V_0$ 는

$$V_0 = B_0 \sqrt{H_0}$$

한편, 밸브의 게이트가 작동되는 어느 순간의 속도  $V$ 와  $V/V_0$ 는

- $V$  : Velocity in pipe for surge conditions (ft/sec)
- $V_0$  : Velocity in pipe for initial steady conditions (ft/sec)
- $V'$  : Difference initial and final steady velocity ( $V - V_0$ ) (ft/sec)
- $t$  : Time (sec)
- $T$  : Time of gate travel (sec)
- $g$  : Acceleration of gravity (= 32.2 ft/sec<sup>2</sup>)
- $Q_0$  : Initial steady flow in pipe (ft<sup>3</sup>/sec)
- $C_d$  : Coefficient of discharge through gate
- $A_g$  : Cross-sectional area through gate opening (ft<sup>2</sup>)
- $B_0$  : Gate opening factor for initial steady conditions
- $B$  : Gate opening factor for surge conditions
- Subscript 0 refers to initial steady values at  $t=0$  prior to surge conditions

$$V = B\sqrt{H_0 + H_a}$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{B}{B_0} \sqrt{1 + \frac{H_a}{H_0}}$$

만일  $B/B_0$ 를  $\tau$ 로 표시한다면

$$V = \tau V_0 \sqrt{1 + \frac{H_a}{H_0}} \dots\dots\dots (2)$$

이 된다.  $\tau$ 는 시간의 함수로서 시간이  $t=0$ 일 때 즉 게이트를 작동하기 전과 작동한 후 게이트의 유효개도의 계수비로 정의되며, 위의 식 (1)과 (2)는 밸브의 폐쇄에 의해 발생하는 수격현상의 기초가 되는 식이다.

이번에는 게이트의 작동상태에 의한 수두의 변화를 살펴보도록 한다. 게이트를 부분적으로 또는 전체적으로 일정한 속도로 작동할 때, 게이트를 작동하는 시간을  $T$ 라 하고 작동 전후 게이트에서의 속도변화량을  $V'$ 라 하면

$$\tau = 1 - \frac{V't}{V_0T} \quad (\text{단, } 0 \leq t \leq T)$$

로 표시할 수 있다. 따라서 이것을 식 (2)에 대입하면

$$V = \left( V_0 - \frac{V't}{T} \right) \sqrt{1 + \frac{H_a}{H_0}} \dots\dots\dots (3)$$

으로 되고, 식 (3)을 (1)에 대입하여 gate를 폐쇄시킬 때 발생하는 최대수두상승  $(H_a)_{max}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{(H_a)_{max}}{H_0} = \frac{K_1}{2} + \sqrt{K_1 + \left(\frac{K_1}{2}\right)^2}$$

단,  $K_1 = \left( \frac{LV'}{gH_0T} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$

마찬가지로 게이트를 개방시킬 때 발생하는 최대수두강하  $(H_a')_{max}$ 는

$$\frac{(H_a')_{max}}{H_0} = \frac{K_1}{2} - \sqrt{K_1 + \left(\frac{K_1}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (5)$$

식 (4)와 (5)의 해는 그림 3을 이용하면 쉽게 그 해를 얻을 수 있다.

예를 들면 그림2와 같이 설치된 관의 길이가  $L=3,000\text{ft}$ 이고 내경이  $D=10\text{ft}$ 일 때 밸브를 작

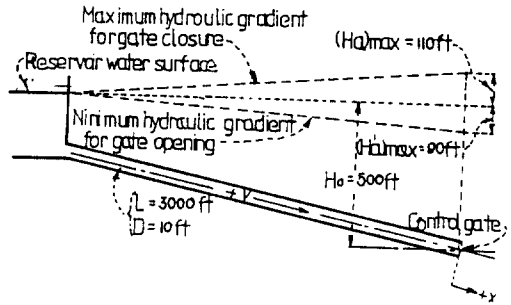


그림 2 배관계의 一例

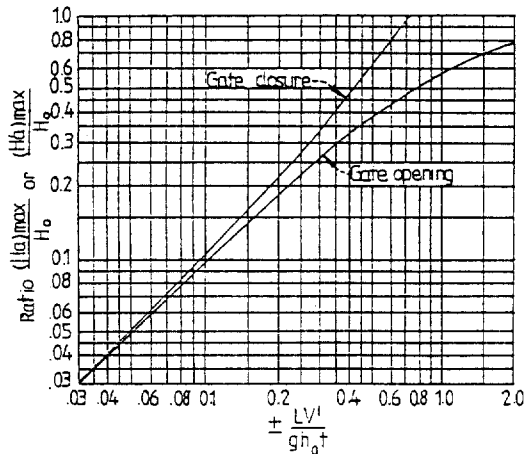


그림 3 게이트를 일정한 속도로 작동시킬 때의 수격현상

- $g$  : Acceleration of gravity (ft/sec<sup>2</sup>)
- $(H_a)_{max}$  : Maximum rise in head at the gate due to gate closure (ft)
- $(H_a')_{max}$  : Maximum drop in head at the gate due to gate opening (ft)
- $H_0$  : Initial steady head at the gate (ft)
- $L$  : Length of pipe (ft)
- $T$  : Time closure or opening (sec)
- $V'$  : Difference between initial and final steady velocities (ft/sec)

동하기 전 유량이 1,500ft<sup>3</sup>/sec이고, 12초 동안 밸브를 균일하게 작동시켜 500ft<sup>3</sup>/sec로 되었다면 식 (4)에서

$$K_1 = \left( \frac{LV'}{gH_0T} \right)^2$$

$$= \left( \frac{3,000 \times 4(1,500 - 500) / (\pi \times 10^2)}{32.2 \times 500 \times 12} \right)^2$$

$$= 0.04$$

이므로 최대 수두상승은  $(H_a)_{max} \approx 110(\text{ft})$ 이다.

만일, 이 상태에서 다시 12초 동안 게이트를 균일하게 열어 처음과 같은 유량으로 되었다면 (1,000ft<sup>3</sup>/sec) 최대 수두강하는  $(h_a')_{max} = 90(\text{ft})$ 이므로 게이트에서의 수두는 410(ft)로 된다.

### 2.2 Elastic Water Column 이론

앞에서 기술한 수격현상에 관한 기초식들을 유동이 변화하는 좀 더 일반적인 경우에 대해 적용하여 보자. 기초식을 유도할 때의 가정은 관벽이 탄성체이고 관내 압력의 변화에 대해 물이 미세하나마 압축될 수 있다는 점을 고려하지 않았으므로 이를 고려하기 위해 그림 4와 같은 배관계에서 길이가  $dx_1$ 인 관속의 물의 한 요소를 생각해 본다.

요소에 대한 역학적 평형조건은 요소에 작용하는 힘은 요소의 질량과 가속도의 곱과 같다는 것이며, 요소의 모든 부분은 항상 물로 차 있어야 한다는 연속성의 원리가 적용되어야 한다. 이와 같은 역학적 평형조건과 연속성의 원

리가 수격현상에 대한 기초식을 만족시켜야 한다.

그림 4에서 B면의 횡단면적이 A이고 C면까지 단면적이  $\partial A / \partial x_1$ 의 비율로 증가한다면 B면과 C면의 횡단면적, 작용하는 압력 및 힘은 다음과 같이 표시된다.

그림 4에서 요소의 중심에 작용하는 수직력을 구하면 다음과 같으므로

$$w(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1) dx_1$$

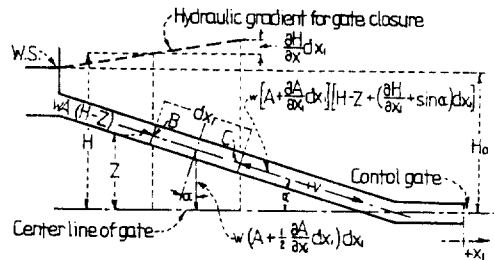


그림 4 배관계의 一例

관의 중심축을 따라 작용하는 힘은

$$w(A + \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1) [H - Z + (\frac{\partial H}{\partial x_1} + \sin \alpha) dx_1]$$

$$- wA(H - Z) - W(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1) dx_1 \cdot \sin \alpha$$

으로 표시되며 힘의 “+”방향은 유동방향의 반대방향이다. 이 식을 전개하여 고차항을 무시하여 정리하면 다음과 같다.

$$w(A \frac{\partial H}{\partial x_1} + (H - Z) \frac{\partial A}{\partial x_1}) dx_1$$

그런데 항상 1차항  $wA \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1$ 에 비해 2차항  $w(H - Z) \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1$ 가 아주 작으므로 관의 중심축을 따라 작용하는 힘은 근사적으로  $wA \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1$ 과 같다.

	B면	C면
면적	A	$A + \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1$
압력	$w(H - Z)$	$w[H - Z + (\frac{\partial H}{\partial x_1} + \sin \alpha) dx_1]$
힘	$wA(H - Z)$	$w(A + \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1) [H - Z + (\frac{\partial H}{\partial x_1} + \sin \alpha) dx_1]$

H : Pressure head for surge conditions

Z : Height of point on pipe measured above center line of control gate

그리고 요소의 질량이  $wAdx_1/g$ 이고 가속도는  $-dV/dt$ 이므로 Newton의 제2법칙에 대입하여 정리하면 다음과 같은 물의 요소에 대한 역학적인 평형식을 얻는다.

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x_1} \right) \dots\dots\dots (6)$$

이 식은 역학적 평형조건을 만족시키는 식이며, 식 중의  $V$ 는  $t$ 와  $x_1$ 의 함수이다.

이번에는 유체의 연속성의 원리로부터  $H$ 와  $V$ 의 관계식을 유도해 본다.

그림 5(a)에서 시간이  $t$ 일 때 길이가  $dx_1$ ( $B \sim C$ 사이)인 한 요소를 생각해 보자. 어느 순간  $B$ 와  $C$ 면 사이의 속도변화율이  $\partial V/\partial x_1$ 이며,  $B$ 와  $C$ 면에서의 속도가 각각  $V$ 와  $V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1$ 이다.

그리고 그림 5(b)에서 미소시간  $dt$ 가 경과하였을 때 요소  $BC$ 가  $DF$ 로 이동하였다면  $V$ 는  $t$ 와  $x_1$ 의 함수이므로  $D$ 와  $F$ 면에서의 속도는 그림에 표시한 것과 같이된다. 요소가  $BC$ 에서  $DF$ 로 이동할 때 길이의 변화는  $(BD - CF)$ 이며 미소시간  $dt$  동안  $B$ 에서  $D$ 까지의 평균속도는

$$V + \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial x_1} BD + \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial t} dt$$

그리고  $dt$  시간동안 움직인 거리는  $BD$ 이므로

$$BD = \left( V + \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial x_1} BD + \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial t} dt \right) dt$$

같은 방법으로

$$CF = \left[ V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_1} \left( V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 \right) CF + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left( V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 \right) dt \right] dt$$

고차항을 무시하고 정리하면 길이의 변화량은

$$BD - CF = -\frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 dt \dots\dots\dots (7)$$

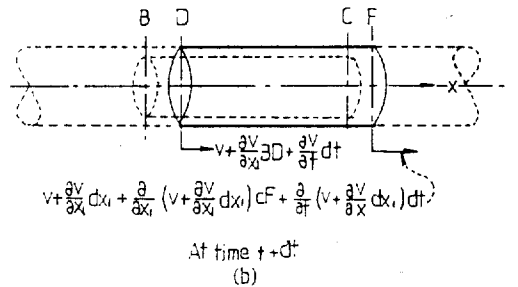
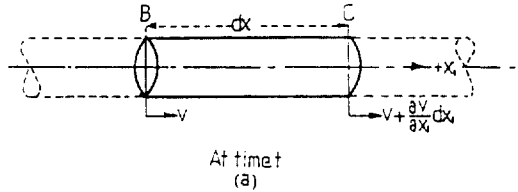


그림 5 시간에 따른 관과 물의 변화

길이가  $dx_1$ 인 요소는 다음과 같은 두가지 영향에 의해 그 길이가 변한다.

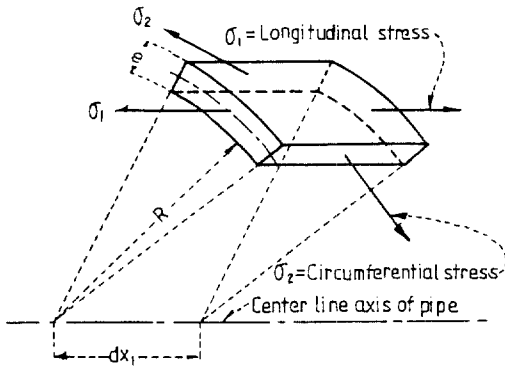
- ① 압력변화로 관이 수축 또는 팽창하게 되어 단면적이 변하므로 요소의 길이를 변화시킨다.(물은 동일한 체적을 유지하려 한다)
- ② 물의 압축성으로 인하여 요소 내 물의 체적변화를 초래하여 결과적으로 요소의 길이를 더 변화시킨다.

따라서 요소 길이의 전체변화량은 물의 탄성과 관벽의 변화를 고려하여 계산하여야 하므로, 이와 같은 상태의 관벽을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 관벽의 변화로 축방향과 원주방향의 응력을 변화시키며, 관 내경의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta R = \frac{R + e/2}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1) = \frac{R}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1)$$

그리고 요소의 축방향의 변화량은

$$\delta x_1 = \frac{dx_1}{E} (\Delta \sigma_1 - \mu \Delta \sigma_2)$$



$\sigma_1$  : Axial or longitudinal stress in pipe shell  
 $\sigma_2$  : Hoop or circumferential stress in pipe shell  
 $R$  : Inside radius of pipe  
 $e$  : Thickness of pipe wall

그림 6 관벽의 응력분포

한편, 요소의 변화된 체적은  $\pi(R+\Delta R)^2 \cdot (\delta x_1 + dx_1)$ 이며, 체적변화에 의해 변화되는 요소 BC의 변화 후 길이는

$$\frac{\pi(R+\Delta R)^2 \cdot (\delta x_1 + dx_1) - \pi R^2 \cdot dx_1}{\pi R^2}$$

값이 너무 작은 항을 무시하고 요소 BC길이의 전체 변화량을 구하면

$$\delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1$$

그런데 축방향의 응력변화량  $\Delta\sigma_1$ 은 관 길이 방향의 구속조건에 따라 다르므로 이에 대한 검토가 필요하다.

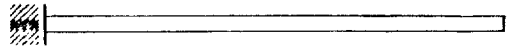
[1] 아래 그림과 같이 관의 한쪽이 anchor나 구조물등에 의해 고정되어 있고 다른쪽은 자유로운 경우 관이음을 사용하지 않았다면 압력이  $wDH$ 만큼 변화할 때 발생하는 축방향과 원주방향의 응력변화는 관내경을  $D$ 라 하면

$\mu$  : Poisson's ratio for the pipe wall material  
 $\Delta R$  : Change of the inside radius of pipe  
 $\Delta\sigma_1$  : Change in the longitudinal stress in pipe shell  
 $\Delta\sigma_2$  : Change in the circumferential stress in pipe shell  
 $\delta x_1$  : Change in the axial length of the element

$$\Delta\sigma_1 = \frac{wD}{4e} \frac{dH}{dx_1}, \quad \Delta\sigma_2 = \frac{wD}{2e} \frac{dH}{dx_1}$$

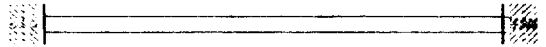
따라서 요소 길이방향의 전변화량은

$$\begin{aligned} \delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1 &= \frac{dx_1}{E} \left( \frac{wD}{4e} \frac{dH}{dx_1} - \mu \frac{wD}{2e} \frac{dH}{dx_1} \right) \\ &+ \frac{2dx_1}{E} \left( \frac{wD}{2e} \frac{dH}{dx_1} - \mu \frac{wD}{4e} \frac{dH}{dx_1} \right) \\ &= \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{dx_1} \left( \frac{5}{4} - \mu \right) dx_1 \end{aligned}$$



[2] 관의 양단이 모두 고정되어 있는 경우

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \frac{\mu wD}{2e} \frac{dH}{dx_1}, \quad \Delta\sigma_2 = \frac{wD}{2e} \frac{dH}{dx_1} \\ \delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1 &= \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{dx_1} (1 - \mu^2) dx_1 \end{aligned}$$



[3] 관 양단이 고정되고 그 사이에 관이음을 사용한 경우

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= 0, \quad \Delta\sigma_2 = \frac{wD}{2e} \frac{dH}{dx_1} \\ \delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1 &= \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{dx_1} \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right) dx_1 \end{aligned}$$



이와 같은 세 경우를 종합하여 압력변화  $wDH$ 에 의한 요소의 전체 변화량을 표시하면 다음과 같다.

$$\delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1 = \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{dx_1} c_1 \dots \dots \dots \textcircled{a}$$

- 단, (1)의 경우 :  $c_1 = \frac{5}{4} - \mu$
- (2)의 경우 :  $c_1 = 1 - \mu$
- (3)의 경우 :  $c_1 = 1 - \frac{\mu}{2}$

그리고 물의 탄성으로 인한 압력변화  $w dH$ 로 발생하는 길이가  $dx_1$ 인 요소의 체적변화는

$$\frac{w\pi R^2}{K} dH dx_1$$

단,  $K$ : 물의 체적탄성계수(lb/ft<sup>2</sup>)

로 표시되며, 요소의 길이에 상당하는 변화는

$$\frac{w\pi R^2}{K\pi R^2} dH dx_1 = \frac{w}{K} dH dx_1 \dots\dots\dots \textcircled{a}$$

따라서 물의 압축성과 관의 변형을 고려할 때, 압력변화  $w dH$ 에 의한 물의 한 요소  $BC$ 의 전체 길이변화는 식  $\textcircled{a}$ ,  $\textcircled{b}$ 로부터

$$w \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right) dH dx_1$$

이 식에서  $H$ 는  $x_1$ 과  $t$ 의 함수이며  $V = dx_1/dt$ 이므로

$$dH = \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1 = \left( \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} \right) dt$$

그러므로 식 (7)은

$$BD - CF = - \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 dt = w \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right) \left( \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} \right) dx_1 dt$$

따라서

$$\frac{\partial V}{\partial x_1} - w \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right) \left( \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} \right)$$

또는

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} = - \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x_1} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{단, } a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right)}} \dots\dots\dots (9)$$

식 (6)과 (8)은 동시에 구해지며 식 (6)에서  $V \frac{\partial V}{\partial x_1}$ 가  $\frac{\partial V}{\partial t}$ 보다 작고 식 (8)에서  $V \frac{\partial H}{\partial x_1}$ 가  $\frac{\partial H}{\partial t}$ 보다 작으므로, 이것을 고려하여 식 (6)과 (8)을 다시 쓰면

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x_1} \dots\dots\dots (11)$$

윗 식들의 일반해는 다음과 같이 표시된다.

$$H - H_0 = f\left(t - \frac{x_1}{a}\right) + F\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \dots\dots\dots (12)$$

$$V - V_0 = \frac{g}{a} \left[ f\left(t - \frac{x_1}{a}\right) - F\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \right] \dots\dots\dots (13)$$

수격현상의 기초가 되는 식이 이렇게 간단한 이유는  $x_1$ 과  $V$ 가 저수조에서 게이트로 같은 방향의 + 값으로 표시되기 때문이다.

그러나 관말에서 수격현상이 처음 발생하여 관을 따라 진행되므로 게이트의 작동을 포함한 복잡한 수격현상의 해는 관말로부터 관의 임의의 단면까지의 거리를 “+”로 나타내는 것이 더 편리하다.

따라서,  $-x = x_1$ 으로 표시하면 식 (14)와 (15)는 다음과 같이 되며, 이 식들을 수격현상의 기초식이라 한다.

$$H - H_0 = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + F\left(t + \frac{x}{a}\right) \dots\dots\dots (14)$$

$$V - V_0 = -\frac{g}{a} \left[ F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t - \frac{x}{a}\right) \right] \dots\dots\dots (15)$$

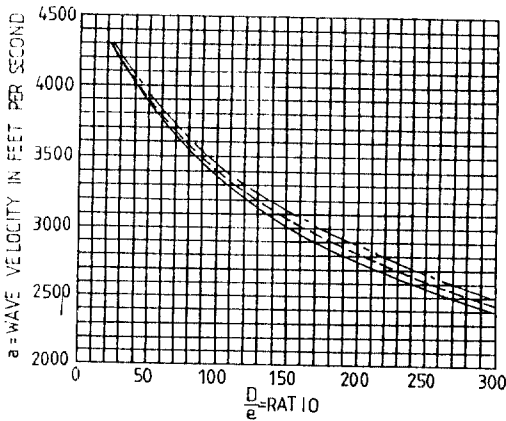
$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right)}}$$

### 3. 수격현상의 제영향

#### 3.1 압력파의 진행속도

##### 1. 강관, 주철관 및 세멘트-석면관

액체가 차 있는 관에서 수격현상에 의한 압력파의 진행속도는 식 (9)에서



$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right)}}$$

where,

$a$  : wave velocity (ft/sec)

$g$  : acceleration of gravity = 32.2 (ft/sec<sup>2</sup>)

$\frac{D}{e}$  : diameter of pipe / thickness of pipe

$E$  : Young's modulus for steel pipes = 4.32 × 10<sup>9</sup> (lb/ft<sup>2</sup>) = 30 × 10<sup>6</sup> (lb/in<sup>2</sup>)

$K$  : volume modulus of water = 43.2 × 10<sup>6</sup> (lb/ft<sup>2</sup>) = 0.3 × 10<sup>6</sup> (lb/in<sup>2</sup>)

$w$  : specific weight of water = 62.4 (lb/ft<sup>3</sup>) = 0.036 (lb/in<sup>2</sup>)

$\mu$  : Poisson's ratio = 0.3

$c_1$  : values for pipes anchored as follows

1) a pipe anchored at the upper end and without expansion joints

$$c_1 = \frac{5}{4} - \mu$$

2) a pipe anchored against longitudinal movement throughout its length

$$c_1 = 1 - \mu^2$$

3) a pipe with expansion joints

$$c_1 = 1 - \frac{\mu}{2}$$

그림 7 물이 있는 강관에서 압력파의 진행속도

로 표시되며, 식에서 계수  $c_1$ 은 앞에서도 이미 밝힌 바와 같이 관의 지지와 관이음의 유무에 따라 결정된다(그림 7 참조).

이 식을 살펴보면 압력파의 진행속도는 관재료가 같을 경우  $D/e$ 의 비율이 커질수록 그 값이 작아짐을 알 수 있다.

그림 7은 물로 채워진 강관의 지지법과  $D/e$ 비에 따른 압력파의 진행속도를 나타낸 것이며 그림 8은 주철관과 시멘트-석면관에 대한 것이다. 주철관이나 시멘트-석면관의 경우는 대개 흙이나 지하에 매설하거나 길이방향으로 이동할 수 없도록 양단을 고정하므로  $c_1 = 1 - \mu^2$ 으로 보아도 무방하다. 예를 들면 내경이 40 인치이고 두께가 1/4인치의 양단이 고정된 강관의 경우 압력파의 진행속도는 약 3020ft/s에 달한다.

##### 2. 둥근 터널

압력관과 같이 사용되는 둥근 터널에서 압력파의 진행속도는 위에 나타낸 것과 같은 형태로 표시할 수 있다. 터널의 압력이  $w d H$  만큼 증가할 때, 터널 내면의 반경방향의 변화량은 다음과 같은 식으로 주어진다.

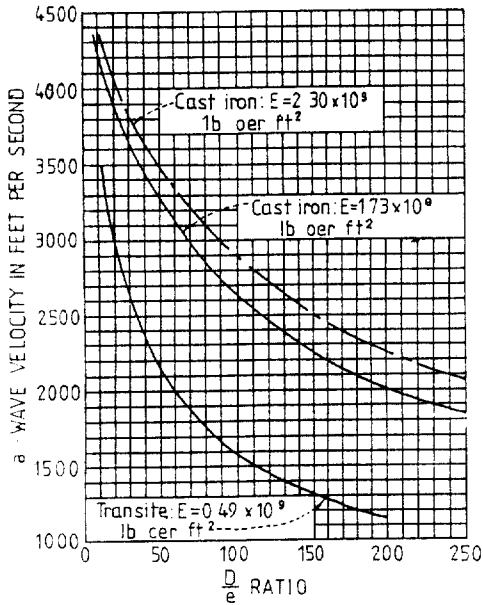
$$\Delta R = \frac{wR}{2G} dH$$

위의 식에서  $G$ 는 터널재료(외부)의 강성계수이며, 앞에서와 같은 방법으로 계산하면 충격파의 진행속도는

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{G} \right)}} \dots\dots\dots (9)$$

그림 9는 터널재료의 강성계수에 따른 압력파의 진행속도를 나타낸 것으로 강성계수가  $G = 200 \times 10^6$  lb/ft<sup>2</sup>인 콘크리트댐을 통과하는 압력수로에서 발생하는 압력파의 진행속도는 약 4280 ft/s임을 알 수 있다.





$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right)}}$$

- $a$  : wave velocity (ft/sec)
- $g$  : acceleration of gravity = 32.2 (ft/sec<sup>2</sup>)
- $\frac{D}{e}$  : diameter of pipe / thickness of pipe
- $E$  : Young's modulus for steel pipes (lb/ft<sup>2</sup>)
- $K$  : volume modulus of water = 43.2 × 10<sup>6</sup> (lb/ft<sup>2</sup>) = 0.3 × 10<sup>6</sup> (lb/in<sup>2</sup>)
- $w$  : specific weight of water = 62.4 (lb/ft<sup>3</sup>) = 0.036 (lb/in<sup>3</sup>)
- $\mu$  : Poisson's ratio = 0.3
- $c_1$  : values for pipes anchored against longitudinal movement throughout its length as follows

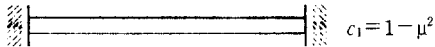
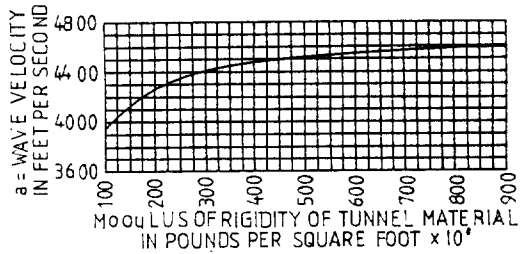


그림 8 주철관 및 시멘트-석면관(transite pipe)에서 압력파의 진행속도

3. 강관이 들어있는 둥근 터널

바위나 콘크리트로 된 터널에 강관을 끼워 사용하는 경우 압력파의 진행속도는 강관을 사용하지 않는 터널보다 미약하나마 약간 높다. 강관이 들어있는 둥근 터널에서 압력파의 진행속도는



$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{G} \right)}}$$

- $a$  : wave velocity (ft/sec)
- $g$  : acceleration of gravity = 32.2 (ft/sec<sup>2</sup>)
- $K$  : volume modulus of water = 43.2 × 10<sup>6</sup> (lb/ft<sup>2</sup>)
- $w$  : specific weight of water = 62.4 (lb/ft<sup>3</sup>)
- $G$  : modulus of rigidity of tunnel material (lb/ft<sup>2</sup>)

그림 9 둥근 터널에서 압력파의 진행속도

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{Dc_2}{Ee} \right)}}$$

여기서  $c_2 = \frac{Ee}{GD + Ee}$

4. 철근콘크리트관

철근콘크리트관에서 압력파의 진행속도를 구하려면 먼저 콘크리트의 두께와 철근의 양을 고려하여 동가의 강관으로 환산하여야 한다. 즉 콘크리트 대 강의 탄성계수비를 구하여 콘크리트의 두께를 강관의 두께로 환산한 후 그림 7이나 식 (9)를 이용하여 속도를 구한다.

3.2 반사파

아래의 그림 10과 같은 배관계에서 게이트를 작동시키면 순간적으로 관내 유속의 변화로 게이트 가까이에 있는 관 내부에서 압력파  $F$ 가 발생된다. 이 압력파의 속도는 앞에서 설명한  $a$ 이며 관로를 따라 저수조 쪽으로 (+ $x$  방향) 진행된다. 압력파가 저수조에 도달하면 반사파  $f$ 가 생긴다. 저수조에 인접한 곳에서의 압력수두는 이러한 관에서의 일시적인 압력에도 불구하고 변하지 않는다. 따라서 식 (14)에서  $x=L$ 로 놓으면

$$H - H_0 = F(t - \frac{L}{a}) + F(t + \frac{L}{a}) = 0$$

$$f(t + \frac{x}{a}) = 0$$

이므로

$$F(t - \frac{1}{a}) = -F(t + \frac{L}{a}) \dots\dots\dots (16)$$

이 식의 좌변은 압력파, 우변은 반사파를 의미한다. 이 관계를 식 (15)에 대입하면

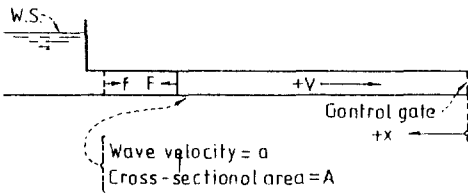


그림 10 배관계에서 압력파와 반사파의 발생

$$V - V_0 = -\frac{2g}{a} F(t - \frac{L}{a}) \dots\dots\dots (17)$$

식 (17)은 압력파가 저수조에 도달할 때 속도변화를 나타내는 식이며, 이 속도변화로 인해 반사파  $f$ 가 생기게 되는 것이다. 반사파  $f$ 의 크기는 압력파  $F$ 와 같으나 방향이 반대이다.

따라서 게이트에서 압력파  $F$ 와 반사파  $f$ 의 관계는

$$f(t) = -F(t - \frac{2L}{a}) \dots\dots\dots (18)$$

이 됨을 알 수 있으며, 게이트로 되돌아 온 반사파  $f$ 의 크기는  $2L/a$ (sec) 먼저 게이트를 떠난 압력파와 크기는 같으나 방향이 반대임을 뜻한다.

### 3.3 배관에서의 변화

밸브가 작동되지 않은 상태는 정상유동이나 게이트가 순간적으로 닫히면 게이트의 인접부에서 압력파가 발생되며, 작동 순간에는 반사파가 없다고 보아야 하므로 식 (16)의 일반적 형태로부터

따라서 수격현상의 기초식 (14)와 (15)로부터

$$H - H_0 = F(t - \frac{x}{a}),$$

$$V - V_0 = -\frac{g}{a} F(t - \frac{x}{a})$$

윗 식에서 압력변화  $\Delta H = H - H_0$ 를 구하면

$$\Delta H = -\frac{a}{g} \Delta V$$

여기서  $\Delta V = V - V_0$ 는 순간적인 gate의 폐쇄에 의한 gate 인접부에서 유속의 변화이며, 압력변화는 유속의 변화와 압력파의 진행속도에 비례함을 알 수 있다.

만일 gate가 완전히 폐쇄된다면  $V=0$ 이므로 최대압력상승  $(\Delta H)_{max}$ 은

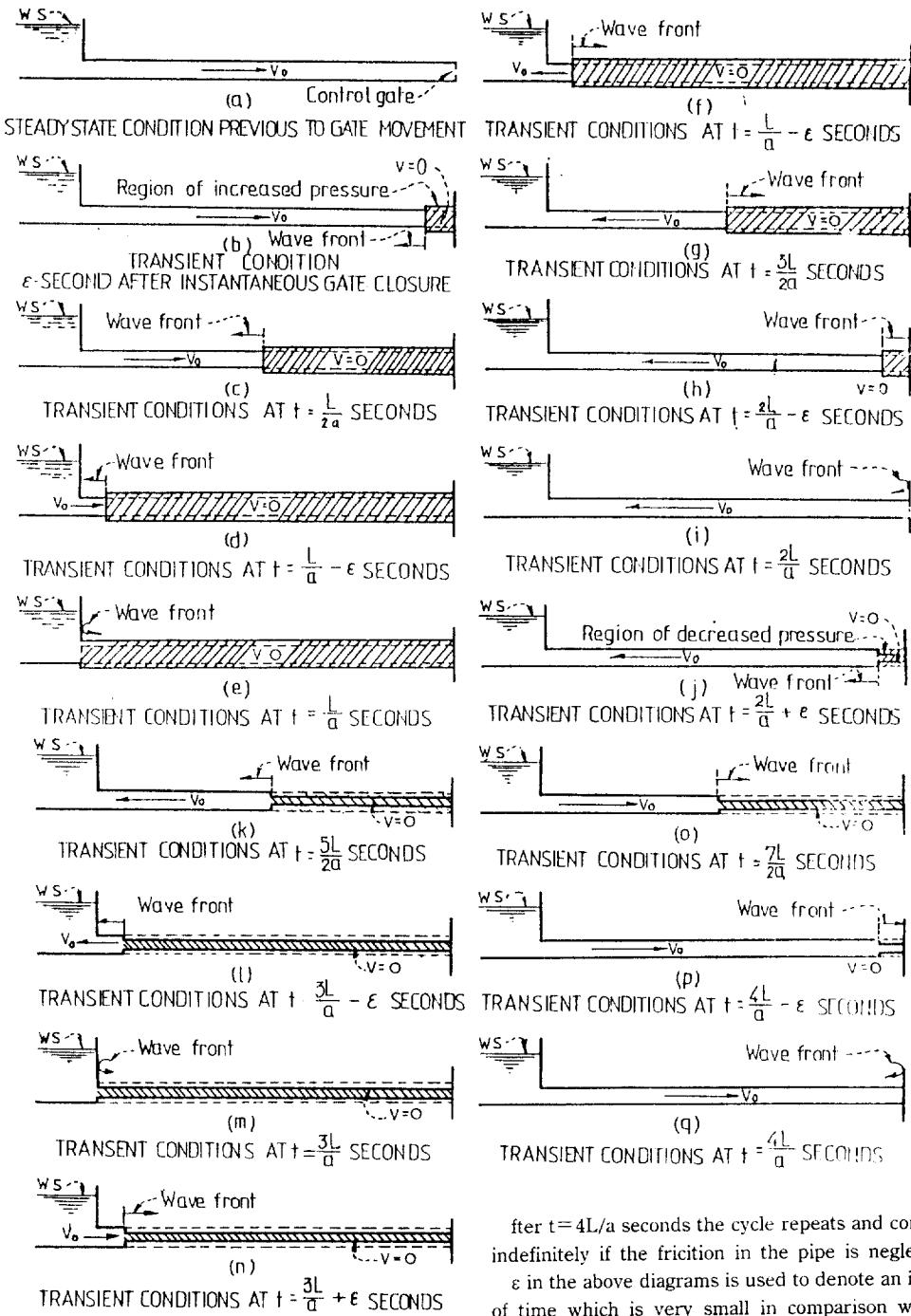
$$(\Delta H)_{max} = \frac{a}{g} V_0 \dots\dots\dots (19)$$

로 되어 Joukowsky의 식과 같아진다.

일반적으로 밸브의 순간적인 개폐는 있을 수 없고 급개폐를 의미하며 밸브의 급개폐관 식 (18)에서 밸브의 작동시간  $T$ 가  $T \leq 2L/a$  (반사파가 압력파가 발생한 게이트 인접부까지 되돌아 오는데 소요되는 시간)일 때로 정의한다. 한편, 밸브개폐에 의한 압력변화와 유속변화의 크기는 밸브를 개방할 때보다 폐쇄할 때가 크므로 본고에서는 밸브를 급폐쇄할 때 발생하는 배관에서의 변화만을 검토한다.

그림 11은 밸브를 급폐쇄하는 경우 압력파와 반사파의 진행현상을 나타낸 것으로 다음은 이에 대한 간단한 설명이다.

(a) - (b) : 밸브가 작동되지 않는 정상상태(a)에서 밸브가 급폐쇄된 후, 아주 짧은 시간(압력파가 gate로 부터 저수조까지 왕복하는 시간에



After  $t = 4L/a$  seconds the cycle repeats and continues indefinitely if the friction in the pipe is neglected.  $\epsilon$  in the above diagrams is used to denote an interval of time which is very small in comparison with the round trip wave travel time.

The symbol U or U is used to denote the reflection of the wave front.

그림 11 압력파와 반사파에 의한 관의 변화

비하여) 동안은 게이트부의 압력이 급상승하여 압력파가 발생하고 유체의 흐름을 막아 정지상태로 만든다. 그러나 압력과 전면의 물은 정상유속( $V_0$ )을 그대로 유지한다.(b)

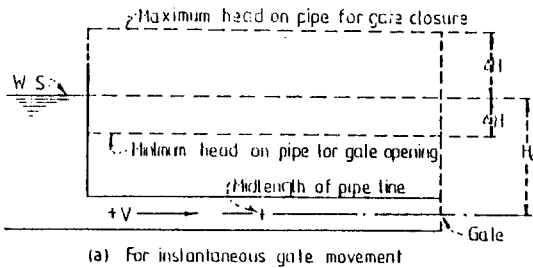
(c)-(e) : 게이트부에서 발생한 압력파가 속도  $a$ 로 저수조를 향하여 진행됨에 따라 관은 팽창되며 물의 밀도가 증가한다. 압력파가 지나간 부분은 정지상태를 유지한다. 그러나 압력과 전면의 물은 정상유속을 유지하며 압력파가 저수조에 도달하면 반사파가 발생되고 저수조 부분의 압력은 정상보다 커진다.

(f)-(i) : 반사파가 다시 게이트를 향하여 진행됨에 따라 반사파가 지나간 관은 다시 수축되고 물의 밀도는 감소하며 그 속의 물은 저수조 쪽으로 흐른다. 반사파가 게이트에 도달하면 다시 되반사되어 반사파가 생긴다.

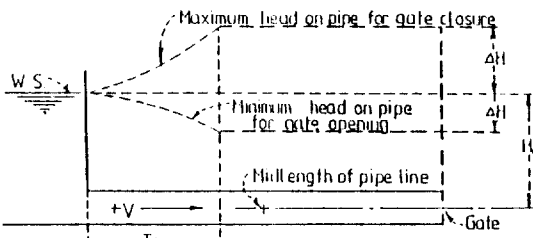
(j)-(m) : 되반사된 반사파가 저수조를 향하여 진행되면 물의 밀도는 더욱 작아지고 관도 더 수축한다. 따라서 반사파 전면의 물은 계속 저수조를 향하여 흐르며 반사파가 저수조에 도달하면 세번째 반사파가 생긴다.

(n)-(q) : 다시 생긴 반사파는 게이트로 향하여 진행되며 관을 다시 팽창시키고 물의 밀도 또한 증가시킨다. 세번째 반사파가 게이트에 도달하면 다시 처음과 똑같은 사이클이 반복된다.

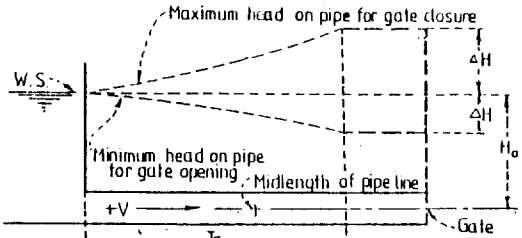
그림 12는 밸브를 급개폐하는 경우 밸브를 작동하는 시간  $T$ 에 따른 관내 압력의 변화를 나타낸 것으로 그림12 (a)와 같이 순간적인 개폐는 관로의 전구간에 걸쳐 최대 압력상승이 일어나지 않는 시간  $T$ 가 길어짐에 따라 최대 압력상승이 일어나는 구간은 점점 감소하여 시간이 압력파가 반사되어 게이트에 도달하는 시간과 같은 경우(그림 e)에는 게이트에서만 순간적인 최대압력상승이 나타난다.



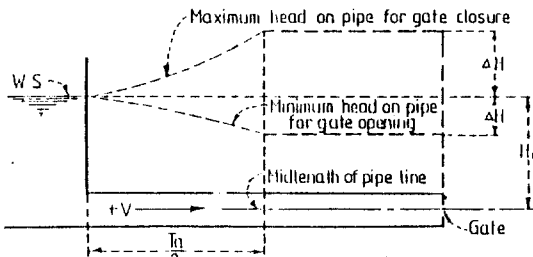
(a) for instantaneous gate movement



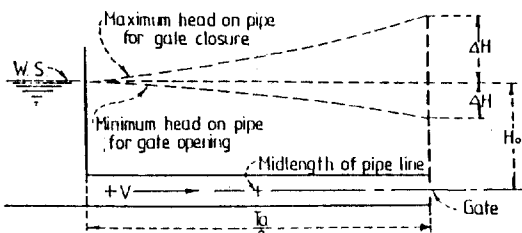
(b) When gate movement time is less than  $\frac{L}{a}$  seconds



(d) When gate movement time is greater than  $\frac{L}{a}$  seconds but less than  $\frac{2L}{a}$  seconds



(c) When gate movement time equals  $\frac{L}{a}$  seconds



(e) When gate movement time is equal to  $\frac{2L}{a}$  second

그림 12 밸브의 급개폐에 의한 압력변화

#### 4. 맺음말

지금까지 검토한 바와 같이 수격현상에 의한 압력파와 반사파가 계속해서 관로를 왕복하여 압력상승을 가져오며 이로 인해 진동과 소음이 발생하고 또 밸브나 관이음등 관로의 여러부분을 손상시킨다. 여기서 언급되지는 않았으나 펌프의 기동, 정지 및 회전수 제어시 발생하는 수격현상도 심각한 것 또한 사실이다.

수격현상은 정도의 차이가 있을뿐 어떠한 경우에서도 발생하므로 발생의 강도를 줄일 수 있도록 밸브 등을 조작하는 시간을 충분히 길게 하여야 하지마는, 조작시간을 줄일 수 없는 경

우에는 발생된 수격현상의 강도를 빨리 감쇠시키는 방법을 강구하여야만 한다.

#### 참 고 문 헌

1. John Parmakian, "Waterhammer Analysis", Dove Publications Inc, pp.1-36, 1963
2. 효성펌프편람, 효성중공업주식회사, pp.187-224, 1989
3. 공기조화 · 냉동 · 위생공학 편람, 공기조화 · 냉동공학회, 제1권, pp.124-125, pp.244-246, 1988
4. 김 영호, "하계특별강연회", 공기조화 · 냉동 공학회, pp45-90, 1991