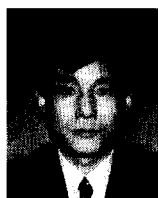


## 워터햄머현상의 이론적 고찰

### Theoretical study for water hammer

박 상 원  
S. W. Park

정우금속공업(주) 기술영업부



- 1957년생
- 건축기계설비 및 공기조화 부문의 열·유체 유동관련기에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 머리말

물을 공급하는 급수·급탕배관 시스템에서 현재까지도 여전히 문제가 되고 있는 것은 수격현상(hydraulic shock)이다. 더구나 오늘날 건물이 고층화 되면서 높은 급수압력에 따른 수격현상은 한층 더 심각한 문제가 되고 있다.

수격현상을 일반적으로 “워터햄머(water hammer)”라고 표현한다. 그러나 엄밀한 의미에서 두가지 표현이 같은 것은 아니다. 워터햄머는 수격현상에 따른 위험한 영향중 한가지 징후라고 보면 된다. 그러나 두가지 현상이 모두 같은 원인에 의해 발생하므로 수격현상이나 워터햄머나 동일한 원인분석과 같은 대책으로 해소할 수가 있다.

수격현상의 발생원인은 배관을 흐르던 유체의 속도가 갑작스러운 속도변화를 일으킬 때 발생된다. 이때 유체의 운동에너지는 즉각적으로 급격한 압력파로 변환되어 배관내로 전파된다. 압력파가 배관내를 왕복하면서 전파될 때 배관이 적절하게 고정·지지되지 않았거나 배관의 길이가 길거나 하면 압력파의 영향으로 배관이 진동하거나 관벽을 치게 되며, 이때 소음을 발생하게 되

는 것이다. 이러한 소음발생을 우리는 워터햄머라고 부르는 것이다. 만약 배관이 적절하게 고정·지지되었다면 수격현상은 워터햄머에 따른 소음 등의 징후가 없이 발생할 수 있다.

그러나 실제로 수격현상은 워터햄머의 소음 뿐만 아니라 상당히 심각하고 위험한 문제를 일으킨다. 수격현상은 배관의 파손, 접합부의 이완, 고정·지지물의 이완, 밸브나 수전류 및 위생도기류의 파손, 각종 계기류 및 온도·압력조절기나 계측기의 오동작 혹은 파손 등 배관시스템 전체를 위험한 상황에 놓이게 할 수 있다.

수격현상에 대한 무방비는 결과적으로 배관, 장비 등의 수리 및 교체에 따른 상당한 비용의 대가를 요구하게 될 것이다. 이러한 수격현상(워터햄머)이 발생하는 경우의 대부분은 펌프의 기동 및 중지, 밸브의 급격한 폐쇄등에 의해 일어난다.

이상에서와 같이 배관시스템의 위험한 현상 중의 하나인 수격현상에 대해 오래전부터 이론적인 고찰과 실험이 행하여져 왔다.

그 내용은 수격현상에 따라 발생하는 배관내 이상압력의 크기, 이에 대한 대책으로서 흡수할 수 있는 장치의 구상과 용량계산 등에 집중되어

있다.

본 강연에서는 이에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 워터햄머현상에 대한 이론적 고찰의 개요

서론에서 언급한 바와 같이 배관망(plumbing system)에 위험한 현상 중의 하나인 워터햄머의 파괴적인 힘을 조절하기 위해서 많은 연구가 있어 왔다. 문헌상 첫 번째 조사연구는 1878년 J. M. Michaud의 고전적인 작업으로 시작되었고, 1887년 Hugonit, 1898년 Joukovsky, 1900년 Rateau, 1903년 Lorenzo Allievi의 연구로 이어져 왔다. 미국기계학회(A.S.M.E.)에 의해 주최된 워터햄머에 관한 강연회(symposium)가 미국기계학회와 미국토목학회(A.S.C.E.) 공동후원으로 1933년 시카고에서 개최되었다.

이 강연회에서 워터햄머의 특성과 작동특성에 대해 실험을 거쳐 제출된 이론과 검증의 포괄적인 개요가 제시되었다. 이 강연회에서 워터햄머 현상의 조절에서 기술적으로 부딪히는 어려움과 일반적인 문제의 복합적인 특성이 지적되었고, 향후 조사·연구의 필요성이 지적되었다.

기타 다른 연구는 수리학 및 위생공학회 회원이며 위스콘신대학교수인 Louis. H. Kessler의 지도에 의한 논문이 미국수도협회(A.W.W.A.) 잡지 Vol. 30, No. 1에 보고 되었다.

네덜란드 암스텔담 출신의 W. L. Borendans는 급수배관망에서 발생하는 충격압력을 결정하기 위한 매우 복잡한 식을 개발하였으며, 연구내용은 'Water' 잡지에 1939년 1~2월 3번에 걸쳐 주된 문제로 게재되었다. 또한 미국수도협회지 Vol. 31, Bo. 11(1939년 11월호)에도 번역되어 게재되었다.

동일한 주제로 Iowa대학교 공과대학의 A. A. Kalinske와 Dean F. M.-Dawson은 '워터햄머압력계산방법'에 대한 논문을 발표했다. 이 논문에서 그들은 좀더 단순화된 방법으로 워터햄머압력 계산에 유용하고 다양한 방법들을 만들려고 시도했다.

1942년 Dawson의 지도에 따라 에어챔버(air-chamber)의 적정규격계산에 관한 내용을 발표

했다. 이러한 시도들이 잇따르면서 많은 사람들이 워터햄머의 일반사항과 조절에 관한 지식 및 기술적인 진전에 대해 발표해 왔다.

이렇게 수많은 연구 및 시험·조사에 따라 축적된 기술적 진전을 가지고 1960년 미국위생배관협회(plumbing and drainage institute, PDI)는 기술상의 정보가 적용될 수 있는 규격을 포함한 워터햄머편람(manual)을 만들기 위해 연구자들을 규합했다. 이렇게해서 워터햄머에 관한 최초의 편람인 PDI-WH201 규격이 만들어졌다. 이후 PDI-WH201 규격을 기준으로 해서 ASSE 1010과 ANSI A 112.26.1-1969 규격이 제정 되었다.

## 3. 워터햄머의 계산

### 3.1 워터햄머의 발생 압력 계산

워터햄머는 유체흐름속도의 갑작스런 변화에 의해 유체가 가지고 있던 운동에너지가 압력파로 변해 배관내에 급작스런 압력상승을 일으키는 것이다. 이에 대해 Joukovsky가 처음으로 압력파의 전파율과 배관내에 상승되는 압력을 계산하는 공식을 수립했다.

$$t = \frac{2L}{a} \quad (1)$$

식에서  $t$ : 압력파가 발생시점부터 배관의 다른쪽 끝지점 까지 왕복하는데 걸리는 시간(sec),  $L$ : 배관의 길이(ft),  $a$ : 압력파의 전파속도(ft/sec)(4,200~4,500ft/sec)를 표시하며 유체의 흐름이 차단되는 시간(밸브의 폐쇄시간)을  $T$ 라 하면  $T \leq t$ 일 때 급폐쇄,  $T > t$ 일 때 완폐쇄라고 정의하며 최대상승압력은 급폐쇄시 발생되게 된다.

그러나 완폐쇄의 경우에도 밸브의 유량차단과정을 분석해 보면 급폐쇄시에 비해 워터햄머 크기는 줄어드나 시스템에 무리를 줄 수 있는 워터햄머가 발생한다. 대부분의 밸브는 완전히 열린 상태에서 닫는 간격의 대부분을 움직이면서 닫힘으로 유량에 큰 마찰저항이 일어나지 않는다. 따라서 유체흐름 속도의 감소도 약간만 일어난다.

밸브의 유량차단이 효과적으로 일어나는 간격은 최종 15% 간격에서 일어나므로 바로 이러한 상태에서 밸브가 완폐쇄가 되더라도 상당한 크기의 워터해머가 발생되는 것이다.

워터해머에 의한 상승압력크기를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$h_m = \frac{a \cdot v}{g} \quad (2)$$

식에서  $h_m$  : 급폐쇄시의 최대상승압력(ft),  $v$  : 유체흐름속도(ft/sec),  $g$  : 중력가속도( $ft/sec^2$ ) ( $32.2ft/sec^2$ )를 표시하며

식에서 상승압력을 계산하면

$$Pr = \gamma \cdot h \quad (3)$$

식에서  $Pr$  : 상승압력(PSI),  $\gamma$  : 유체의 비중량( $lb/ft^3$ ), (물의 경우  $62.4lb/ft^3$ )로서 식 (2)와 식 (3)을 결합하면

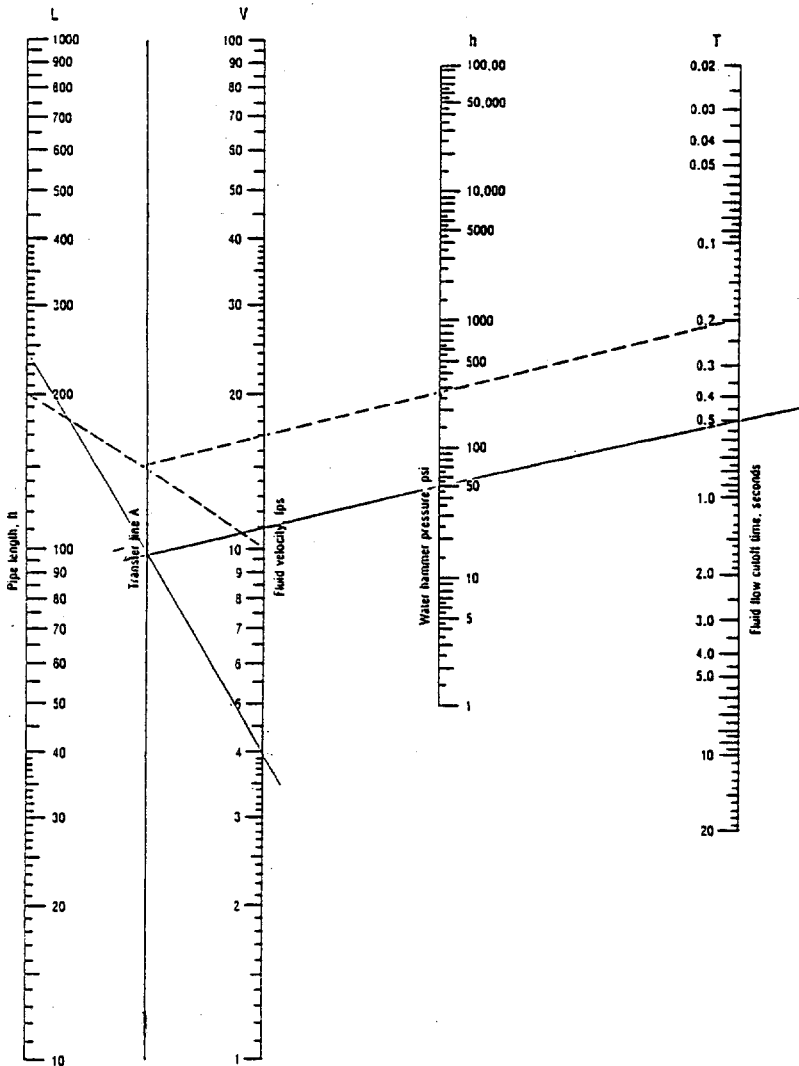


그림 1 충격압력의 계산도표

$$Pr = \frac{\gamma \cdot a \cdot V}{144g} \quad (\text{PSI}) \text{가 되고}$$

유체가 물일 경우  $Pr=60V(\text{ft} \cdot \text{lb} \text{ 단위계, MSK단위로 환산하면 } Pr=14V\text{kg/cm}^2)$ 가 된다. 즉, 배관내 물이 흐르다 급폐쇄되면 유속의 60배 가까운 상승압력이 순간적으로 압력파가 되어 배관내에 확산되는 것이다.

완폐쇄의 경우는 다음과 같다.

$$h = h_m \left( \frac{t}{T} \right) \quad (4)$$

식 (1)과 식 (2)를 식 (4)와 결합하면

$$h = \left( \frac{a \cdot V}{g} \right) \cdot \left( \frac{2L}{aT} \right) = \left( \frac{V}{g} \right) \cdot \left( \frac{2L}{T} \right)$$

$$Pr = \gamma \cdot h = \frac{\gamma \cdot V \cdot 2L}{144g \cdot T} = \frac{62.4 \times 2 \times V \cdot L}{144 \times 32.2 \times T} = \frac{V \cdot L}{37.2T}$$

(PSI)가 된다.

압력상승크기를 간단히 선정할 수 있도록 위의 식을 선정표(selection chart)로 만든 것이 다음의 계산도표이다.

위의 내용에 대해 예를 들어 설명하면 배관길이가 200ft이고 유속이 10ft/sec에서 배관내 유체유동 초기압력이 75PSI(5kg/m<sup>2</sup>)라고 하면,

$$\text{급폐쇄의 경우 } t = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 200}{4,500} = 0.09(\text{sec})$$

이때 이상압력 발생은  $Pr = 60 \times 10 = 600(\text{PSI})$ 가 발생되며 초기압력을 고려하면 배관내에 순식간에 675PSI(45kg/m<sup>2</sup>)의 엄청난 압력이 발생된다.

만약 밸브의 폐쇄속도가 0.2초라고 하면

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{10 \times 200}{37.2 \times 0.2} = 269(\text{PSI}) + 75 \\ &= 344\text{PSI}(23\text{kg/m}^2) \end{aligned}$$

의 압력이 발생되어, 역시 완폐쇄의 경우도 워터햄머에 의한 위험이 발생하는 것이다.

이 결과는 그림 1의 계산도표(nomograph)에서 선정해보아도 동일한 값이 나올 것이다.

### 3.2 워터햄머의 배관내 작동 특성

그림 2는 워터햄머가 발생하여 배관내에 압력파가 전달되는 첫 번째 싸이클의 과정을 나타낸 것이다.

(1)은 밸브가 닫히기전의 정상적인 유체의 흐름상태를 나타낸다.

유체는 저수조로부터 밸브쪽으로 일정한 초기속도  $V_0$ 로 흐르며 이때 관마찰손실에 의해 압력은 감소한다. 이때의 압력값을  $H_0$ 라고 하고, 밸브가 완전히 폐쇄된다면 즉시 밸브쪽의 유량은 속도가  $V$ 로 변하고 초기속도  $V_0$ 로부터 0까지 감소하면서 유체의 운동에너지(kinetic energy)

$$E = \frac{W \cdot A \cdot L \cdot V_0^2}{2g} \quad (\text{ft} \cdot \text{lb}) \text{는 배관의 탄성에너}$$

지와 유체의 압축에너지로 변환·저장된다.

배관내 유체가 압축지역으로부터 연속적으로 초기 유동방향과 초기속도  $V_0$ 지역을 거슬러 흐르는 동안 압축지역의 앞쪽은 압력파의 속도  $a$ 로 저수조를 향해 매우 빠르게 전진한다.

압력파가 밸브닫힘시간  $T_c = L/2a$ 인 동안 저수조와 밸브의 중간지점까지 이동한 상태를 나타낸 것이 (2)의 상태이다.

초기 유체흐름 방향에 있는 유체는 여전히  $V_0$ 의 속도가  $H_0$ 의 압력을 유지한다. 압축지역의 유체는 정지하며  $H_0+h$ 의 압력이 된다.

(3)은  $T_c = L/a$ 에서 압축지역이 저수조에 도달할 때의 상태이다.

그림에서와 같이 배관내 모든 유체는 정지되며  $H_0+h$ 의 압력상태에 있다. 여기서 상승된 압력  $h$ 는 에너지라는 측면에서 일정하다. 그러나  $H_0+h$ 는 ③에서와 같이 일정한 기울기의 압력경사를 나타낸다.

배관내 상승압력  $h$ 때문에 유체는 저수조로 들어가며, 배관과 유체에 저장된 에너지는 유체가  $V_0$ 의 속도를 갖도록 다시 운동에너지로 재변환된다. 그러나 유체흐름방향은 처음과는 반대가 된다.

에너지변환이 이루어지는 지역은 저수조로부터 시작하고, 일정한 압력파 전파속도  $a$ 를 가지고 밸브쪽으로 이동한다.

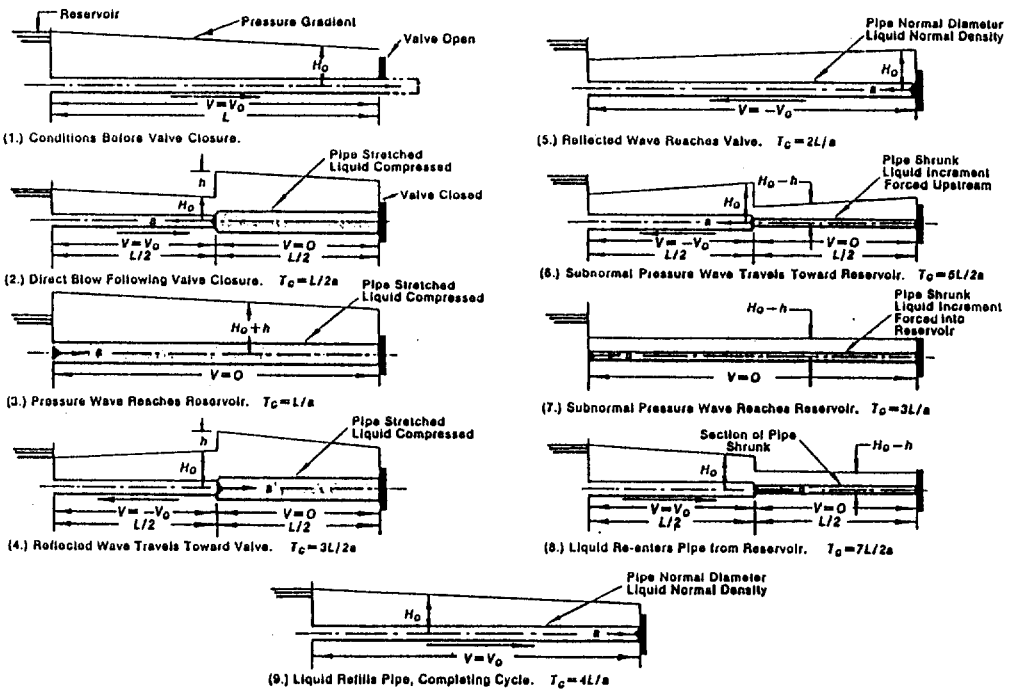


그림 2 워터해머의 압력파전과 상태도

(4)는 밸브방향의 중간지점까지 반사된 압력파가 진행된 상태이다. 거꾸로 거슬러는 지역의 유체는 저수조 안으로  $-V_0$ 의 속도와 초기압력  $H_0$ 상태로 흘러들어간다. 반대쪽 유체는 정지하며  $H_0+h$ 의 압력을 받는다.

(5)는  $T_c=2L/a$ 의 시간에서 저장된 에너지가 모두 운동에너지로 바뀌고 반사된 압력파가 밸브에 도착했을 때의 상태이다. 모든 유체는 초기상태에 있으며 일정한 속도  $-V_0$ 로 저수조로 이동하며, 배관내 압력은  $H_0$ 의 상태이다.

(6)은 유체가 연속적으로 저수조로 흐름으로서 배관의 저수조를 떠나는 유체의 양은  $-h$ 만큼의 압력강하를 일으키기에 충분하다. 반대쪽 유체까지 운동에너지를 전달하고 있는 나머지 유체는 정지된다.

(7)은  $T_c=3L/a$ 에서 모든 유체속도가 0이 되는 상태이다. 이 순간의 배관내 압력은 이론적으로  $H_0-h$ 가 되며, 실제로 이 값은 유체의 증기압보다 결코 작아질수 없다.

(8)은 저수조의 불균형된 압력이 초기흐름방향과 초기압력  $H_0$ 에서  $V_0$ 의 속도로 다시 시작되는 상태이다.

(9)의 상태는  $T_c=4L/a$ 에서 밸브까지 다시 도달된 상태로 조건은 밸브닫힘시간이  $T_c=0$ 인 순간과 동일하다.

모든 유체는 속도  $V_0$ , 압력  $H_0$ 의 초기상태에서 다시 밸브를 향해 흐른다. 여기서  $4L/a$ 의 시간에 완성된 사이클은 다시 동일한 방법으로 반복되나 관마찰에 의해 소멸될 때까지 효력이 감소된다. 그리고 압력  $H_0-h$ 는 유체의 증기압 이하가 될 수 없는 한계가 있다.

지금까지 워터해머에 대해 발생압력의 크기에 대한 계산과 배관내에서 작용하는 동작특성에 대해 알아보았다.

### 3.3 워터해머의 흡수 대책 및 용량 계산

워터해머를 흡수할 수 있는 가장 간단하고 확실한 방법으로는 유체의 흐름이 폐쇄되는 지점과

가장 가까운 곳에 워터햄머로 인한 이상 상승압력을 흡수할 수 있는 흡수공간을 두는 것이다. 즉, 흡수공간내에 압축성기체를 담은 에어챔버를 형성하면 된다.

에어챔버가 이상압력을 흡수하는 것은 보일의 법칙(Boyle's Law)으로 간단히 설명할 수 있다.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \Leftrightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2$$

초기압력  $P_1$ , 초기체적  $V_1$ 의 상태에 있던 공기실에 이상압력이 발생되어 압력이  $P_2$ 로 상승되면 공기실은  $V_2$ 로 압축되어 평형을 유지하게 되는 것이다. 그러면 워터햄머를 흡수하기 위해 필요한 공기실 체적은 어떻게 계산되는지를 살펴보기로 한다.

다음에 설명되는 계산식은 대형시스템의 압력 흡수탱크에서부터 위생배관의 지관에 설치하는 워터햄머흡수기까지 그 용량을 구할 때 공통적으로 적용될 수 있다.

첫 번째로 고려할 사항은 유체의 운동에너지를 구하는 것이다.

$$K = \frac{W \cdot A \cdot L \cdot V^2}{2g} \quad (5)$$

유체가 물일 경우

$$K = \frac{62.4A \cdot L \cdot V^2}{2g} = 0.97ALV^2 \quad (6)$$

식 (5), (6)에서  $g$ : 중력가속도(32.2ft/sec<sup>2</sup>),  $A$ : 배관단면적(ft<sup>2</sup>),  $L$ : 배관의 길이(ft),  $V$ : 유체 초기속도(ft/sec),  $W$ : 유체의 비중량(lb/ft<sup>3</sup>),  $K$ : 운동에너지(ft·lb)를 표시한다.

만약, 관경이 틀린 배관시스템일 경우에 각각의 관경별로 계산해서 합한 것이 총운동에너지가 된다. 이때 속도는 밸브가 설치된 배관내 유속을 알수 있다면 다른 관경의 배관내 유속은 다음과 같이 계산할수 있다.

$$V_1 = \left( \frac{A_0}{A_1} \right) V_0 \quad (7)$$

식에서  $A_0$ : 속도  $V_0$ 인 배관의 단면적,  $A_1$ :

관경이 다른 배관의 단면적,  $V_1$ :  $A_1$  단면적을 가진 배관내 유속을 표시한다.

다음으로 압력비  $Y$ 값을 그림 3의 도표에서 구한다

$$Y = (f) \frac{P_m}{P_0} \quad (8)$$

식에서  $p_0$ : 초기유체유동압력(PSIG),  $P_0$ : 절대압력(= $p_0+15$  PSIA),  $p_m$ : 밸브폐쇄시 최대 발생압력(언급이 없는한 통상상용압력의 1.5배 적용)(PSIG),  $P_m$ : 절대압력(= $P_m+15$ PSIA)를 표시한다.

운동에너지와 압력비  $Y$ 값을 찾아내므로서 필요한 공기실 용량이 구해진다.

$$C = 1,728 \frac{K}{P_0 Y} \text{ (in}^3\text{)} \quad (9)$$

여기서 구해진 용량  $C$ 는 실제 이상압력 발생시 공기실 내로 들어오는 물이 차지하는 공간  $C_0$ 보다 크다.

$$C_s = C \left( 1 - \frac{P_0}{P_m} \right) \text{ (in}^3\text{)} \quad (10)$$

이상과 같이 워터햄머를 흡수할 공기실체적을 구하게 되면, 계산된 용량에 맞는 워터햄머흡수기(surge tank, surge master, water hammer arrester)를 제작하여 차단밸브와 가장 가까운 곳(pumping line 같은 경우는 토출측의 체크밸브 직후)에 설치하면 되는 것이다.

워터햄머흡수장치가 갖추어야할 요건중 가장 중요한 것은 공기실의 영구적인 유지에 있으므로 물과 공기실의 공기가 접촉되지 않고 기밀을 유지할 수 있는 구조로 만들어져야 한다. 즉, 기존의 배관을 잘라 캡을 씌운 에어챔버는 워터햄머 흡수기 역할을 할 수 없다.

#### 4. 맺음말

수격현상에 의한 물공급 배관시스템의 위험은 상당히 크다. 그러므로 오랜기간 동안 많은 사람들에 의해 연구·실험이 이루어 졌으며 그 결과

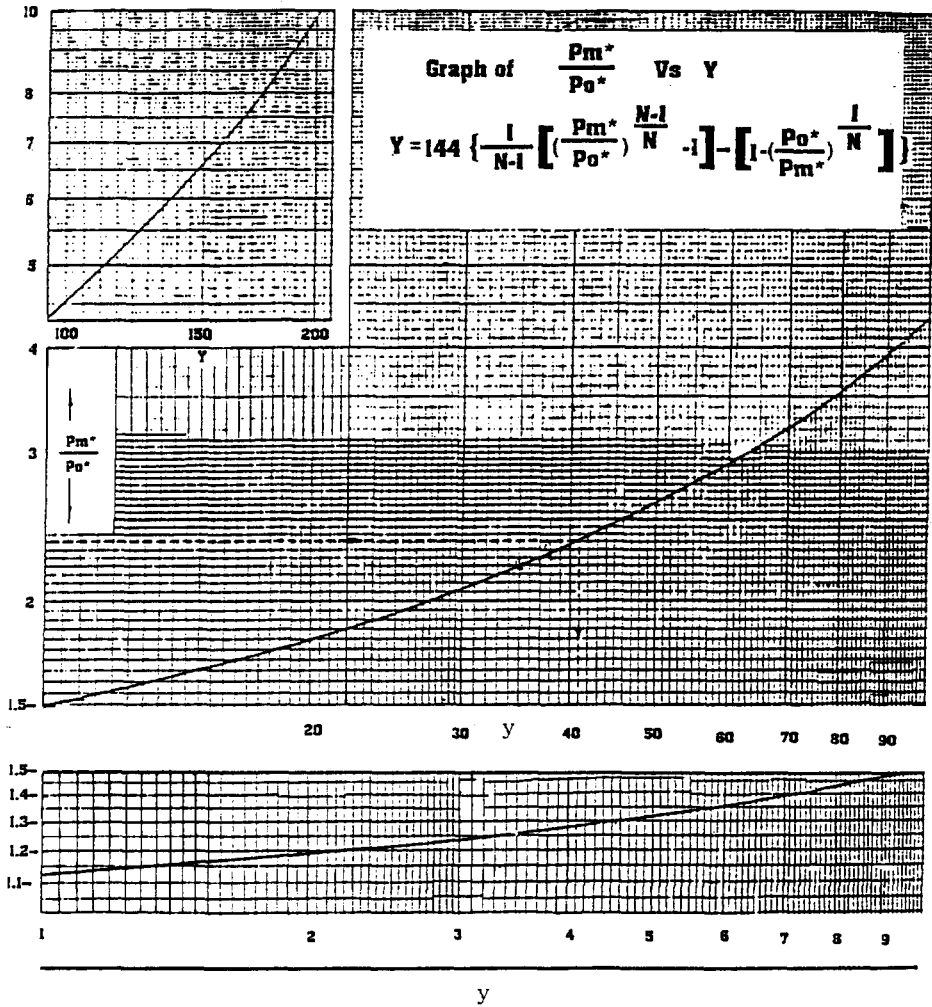


그림 3 Y값 선정도표

오늘날 그 원인과 대책 또한 정립이 되어 있는 상태다. 국내 건설분야에서도 워터햄머에 대한 문제들을 많이 겪고 있지만 실제로는 설계에 대책이 반영되어 있지 않거나, 있다하여도 형식적인 설치에 그치는 경우가 대부분이다.

외국에서 100여년에 걸쳐 끊임없이 연구되어 온 것만 보아도 워터햄머가 상당히 중요한 문제임에는 틀림없을 것이다.

배관시스템의 크고 작음에 관계없이 물이 공급 되는 곳이면 반드시 워터햄머가 발생되므로, 이에 대한 대책도 소규모 주택의 위생배관으로부터

대규모의 기계실 펌프배관에 이르기까지 정상적인 워터햄머방지 대책이 적용되어야 한다.

지금까지의 내용이 워터햄머에 대한 이해를 높이고, 문제를 해결하는데 작은 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. JAMES K.O' HARA, 1979, "Heating/Piping/Air Conditioning", HPAC Info-dex.
2. Tyler Pipe & Foundry Company, 1966,

“Theory of Water Hammer”, Wede division.

3. ANSI A112.26.1, “Water Hammer Arresters”, 1969(R1975)
4. A.S.S.E. Standard No. 1010, “Water Ham-

mer Arresters”, 1967(R1982).

5. PDI WH201, “Water Hammer Arresters”
6. Alfred Steele, 1975, “High Rise Plumbing Design”, MIRAMAR PUBLISHING Company, LA California.