

Water Balancing의 理論的 解析

Theoretical Analysis of Water Balancing

崔 英 惇
Y. D. Choi

고려대학교 공과대학 기계공학과 교수



- 1950년 5월생
- 전산유체역학, 열전달을 전공하고 있으며 공조기, 내연기관의 해석과 실험에 관심이 있다.

1. 서 론

1970년대 초 우리나라는 경제부흥에 따른 생활수준의 향상으로 난방설비비 및 유지관리비가 저렴하고 대기오염 방지가 용이한 대단위의 공동주택이 들어서게 되었다. 고온수지역 난방의 효시라고 볼 수 있는 여의도 시범아파트 및 한강맨션아파트가 건설되면서 본격적인 공동주택의 생활문화권이 형성되기 시작하였다.

공동주택은 쾌적한 실내의 열환경을 제공해 주고 주택설비의 관리 및 보수 등을 중앙에서 관리하므로 관리비가 저렴하고 아파트 주변의 편의시설을 이용할 수 있는 장점을 지니고 있어 공동주택의 보급률은 날로 증가하고 있다. 초기의 공동주택은 5, 6층 정도에 불과하였으나 단위면적 당의 건설비를 낮추기 위하여 15층의 아파트가 주종을 이루게 되었고 상계동 신시가지에 25층의 초고층아파트가 그리고 분당지구에는 30층 짜리의 초고층아파트가 등장하였다.

그러나 1970년대 후반에 공동주택의 고층화에 따른 부작용이 사회적인 문제로 나타나기 시작하였다. 공동주택의 층수가 높아짐에 따라 고층부에는 온수의 열공급이 지나치게 많아 생활공간이 너무 더워서 유리창을 열어 놓게 되는 반면

하층부는 열공급이 원활하지 못하여 별도의 난방장치를 설치하는 등 열공급의 편중현상이 일어나 아파트 주민간의 분쟁이 발생되기 시작하였다. 15층 아파트의 경우 실내온도의 최대차가 심한 경우 10°C 이상인 예도 볼 수 있었다. 이같은 분쟁이 심화되자 1980년도 이후부터 정부에서는 이 열공급의 편중을 막는 조치로서 난방용 온수공급 주배관을 3개로 구분하는 수직구역화를 주택건설촉진법에서 의무화하도록 하였다.

이 조치로 층수에 따른 열공급의 편중으로 인한 분쟁은 잠잠해 졌으나 이 수직구역화로 인한 공급관 및 환수관의 물량증가로 배관공사비가 크게 증대되고 또한 수직배관 샤프트가 차지하는 건축면적이 커지는 부작용이 문제로 등장하게 되었다.

독일 및 그 밖의 외국에서는 중앙식 난방용 온수 및 공조용 냉수의 공급배관망에 정하여진 유량을 공급하도록 하고 과대유량을 방지해주는 각종 밸브를 사용하고 있으며 미국에서는 사무실 건물에 이 같은 밸브를 적용하고 모두 단구역 배관방식을 채용하고 있으나 국내에서는 다구역 배관방식의 적용이 의무화되고 있어 초기공사비의 부담을 감내할 수 밖에 없는 실정에 있다. 따라서 앞으로 다가올 초고층의 공동주택에서는

심각한 문제로 대두될 것으로 보인다.

이러한 저간의 문제점을 보전대 단일구역 배관방식에서 각 층마다 균일한 열공급을 할 수 있는 최적열공급시스템의 설계기술의 개발이 시급하다. 이러한 설계기술이 개발되기 위해서 해야 할 일은 먼저 기존 다구역 배관망 열공급 시스템과 단일구역 배관망 열공급시스템에서 층간의 열공급 불균일성을 초래하는 원인이 무엇인가를 명확히 규명해야 되며 그리고 유량조절 밸브에 의해 열공급을 균일하게 하는 방법과 원리를 이해해야 된다.

2. 고층 건물 층간의 열공급 불균일성의 원인

고층건물의 열공급배관망에서 온수공급배관망을 단구역으로 하면 상층으로 올라갈수록 열공급이 잘되고 하층으로 내려올수록 열공급이 잘되지 않았으나 그 원인이 최근까지 막연히 부력의 효과 때문이라고 생각되어져 왔다. 따라서 배관망을 다구역으로 하는 경우 이 부력효과를 감소시킬 수 있다고 생각해서 확실한 이론적 혹은 실험적 자료에 근거하지 않고 다구역 배관망을 범체화하는 데까지 이르렀다.

층간 열공급의 불균일성이 나타나는 것은 간단한 원리에 의한 것이다. 그것은 공급온수 유량의 불균일성 때문에 발생하고 그 공급온수의 불균일성은 온수 공급관과 회수관에서 온수의 온도차에 의한 물의 밀도차에 의해 발생하는 정수압력의 차에 의해서 발생한다. 그림 1은 단일구역 배관망 내에서 정수압력차에 의해서 발생하는 유동저항을 나타내 준다. 공급관에서 비중량 γ_H 의 고온수가 공급되어 아파트 각 세대에서 열을 뺐긴 후 비중량 γ_C 인 저온수가 되어 회수관으로 회수된다고 하자. 그림 1에서와 같은 좌표축을 잡았을 때 고온수 공급관에 걸리는 정수압력은 기준점으로부터의 거리 h 에 따라 다음과 같이 표시된다.

$$P_H = \gamma_H h \quad \dots\dots\dots(1)$$

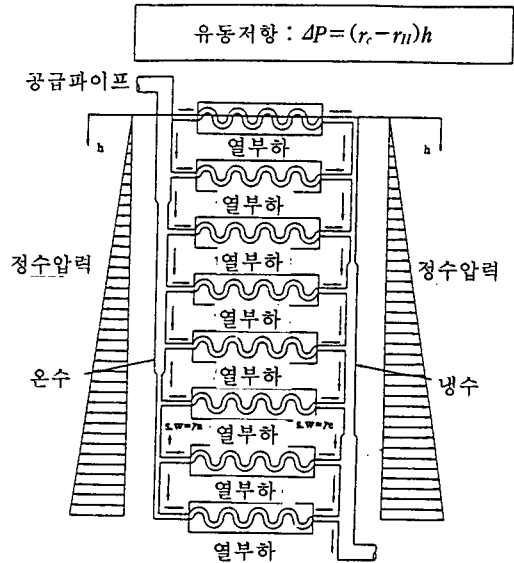


그림 1 정수압차에 의해 발생하는 배관망에서의 유동저항

한편 저온수 회수관에 걸리는 정수압력은 h 에 따라 다음과 같이 된다.

$$P_C = \gamma_C h \quad \dots\dots\dots(2)$$

γ_C 는 γ_H 보다 크므로 P_C 는 P_H 보다 크게 되어 결국 기준점으로부터의 거리 h 에 따라 식 (3)의 유동저항 ΔP 가 걸리게 된다.

$$\Delta P = (\gamma_C - \gamma_H)h \quad \dots\dots\dots(3)$$

이 유동저항은 결국 h 가 0일 때는 0이 되고 h 가 증가하면 h 에 비례해서 커지게 된다. 따라서 하층부로 갈수록 유동저항이 커져서 유동의 흐름이 방해되고 상층부로 갈수록 유동의 저항이 작아져 유동이 원활하게 된다.

그렇다면 이와 같은 정수압 차이에 의해 발생하는 유동저항이 다구역 배관망에서는 없어지는 것일까? 온수공급관이 하나로 연결되어 있을 경우 온수공급관에 걸리는 정수압력은 배관 형식에 관계없이 관의 높이에 따라서 변한다는 것은 유체역학의 기본원리이다. 따라서 다구역 배관망에서의 온수공급관의 정수압력의

h 에 따른 변화는 단구역 배관망과 하등의 차이가 없이 나타난다.

3. 유량조절밸브와 펌프의 매칭

3.1 펌프의 성능곡선식

배관망내 열유동의 원리를 이해하기 위해서는 먼저 펌프의 성능인 양정-유량곡선을 이해하고 이를 수식으로 나타낼 수 있어야 한다. 펌프의 설계점에서의 양정과 유량을 H_m 및 Q_m 이라 하면 이 점은 펌프의 효율이 가장 큰 점(BEP)이다.

그림 2는 펌프의 양정-유량곡선을 나타낸다.⁽¹⁾ 유량이 0일 때의 수두는 일반적으로 $1.2H_m$ 이고 수두-유량곡선을 2차 포물선으로 나타내면

$$H = H_m(1.2 - 0.2q^2) \dots\dots\dots(4)$$

이 된다. 여기서 q 는 Q/Q_m 을 나타낸다. 일반적으로 펌프의 효율 η 는

$$\eta = \eta_m(-1.167q^2 + 2.167q) \dots\dots\dots(5)$$

로 나타낼 수 있으므로 펌프의 구동에 필요한 동력은

$$P = \frac{\rho g h Q}{\eta} = \frac{\rho g h_m Q_m}{\eta_m} \left(\frac{1.2 - 0.2q^2}{2.176 - 1.167q} \right) \quad (6)$$

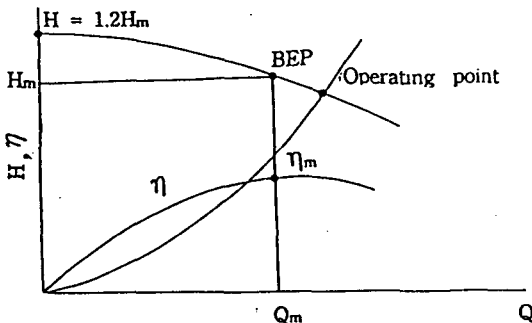


그림 2 펌프특성곡선

이다. 실제 펌프가 운전되는 점은 펌프의 양정-유량곡선과 온수배관망 시스템의 부하곡선이 만나는 점이다. 운전점이 BEP에 가까울수록 펌프용량의 선정이 잘된 것이다.

3.2 유량조절밸브의 원리

배관망에서 회로내의 유량을 원하는 대로 조절하기 위해서는 유량조절밸브의 원리를 이해해야 한다. 유량조절밸브에는

- (1) 자동정유량조절밸브
- (2) 수동가변유량조절밸브

가 있다. 이 두 밸브의 특성은 어떠하며 이 두 밸브가 펌프의 특성과 어떻게 매칭되어 회로내의 유량이 원하는 대로 조절되는지에 대한 이론(유량조절 이론)을 살펴보고 유량조절밸브 설계법을 알아보기로 한다.

3.2.1 자동정유량조절밸브의 특성곡선

열전달이 있는 배관망 시스템의 유량을 조절하기 위해서 자동정유량조절밸브를 부착할 경우의 특성(유량과 압력차와의 관계)을 이해하고 수식으로 나타내는 것이 중요하다. 그림 3은 자동정유량조절밸브에서 밸브 양단의 압력차 ΔP 와 유량과의 관계를 나타내는 일반적인 특성곡선이다.

일반적으로 밸브의 사양에는 Q_0 , ΔP_{min} 및 ΔP_{max} 가 주어져 있다.

본 연구에서는 이 값들을 이용하여 그림 2의 Q 와 P 와의 관계식을 다음과 같이 유도했다.

- 1) $\Delta P < \Delta P_{min}$ 일 때

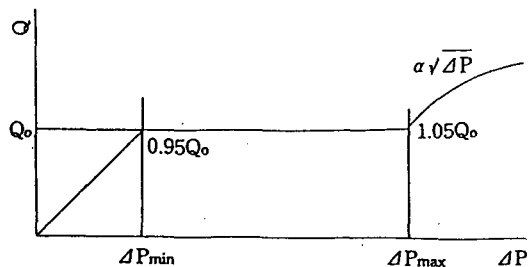


그림 3 자동정유량조절밸브의 유량-압력차곡선

$$h_f = \frac{4P}{\gamma} = \frac{0.95 \Delta P_{min}}{\gamma} \frac{Q}{Q_0} \dots\dots\dots(7)$$

2) $P_{min} \leq P \leq P_{max}$ 일 때

$$h_f = \frac{4P}{\gamma} = \frac{4P_{max} - \Delta P_{min}}{0.1 Q_0 \gamma}$$

$$[Q - Q_0(0.95 - 0.1 \frac{\Delta P_{min}}{4P_{max} - \Delta P_{min}})] \dots\dots(8)$$

3) $P > P_{max}$ 일 때

$$h_f = \frac{4P}{\gamma} = \frac{4P_{max}}{\gamma} (\frac{Q}{1.05 Q_0})^2 \dots\dots\dots(9)$$

3.2.2 자동정유량조절밸브의 특성과 펌프 특성의 매칭

그림 4는 자동정유량밸브가 유량을 조절하는 원리를 나타낸다. 자동정유량밸브를 부착하지 않은 경우, 시스템 부하곡선과 펌프성능곡선이 만나는 점은 P^* 이며 유량은 Q_m^* 로 흐르게 된다. 그러나 자동정유량밸브를 부착하면 시스템의 부하곡선은 실선과 같이 되어 펌프특성곡선과 P 점에서 만나서 요구되는 유량 Q_m 이 흐르게 된다.

자동정유량밸브가 시스템의 압력수두 변동에 무관하게 유량을 일정량으로 조절하기 위해서는

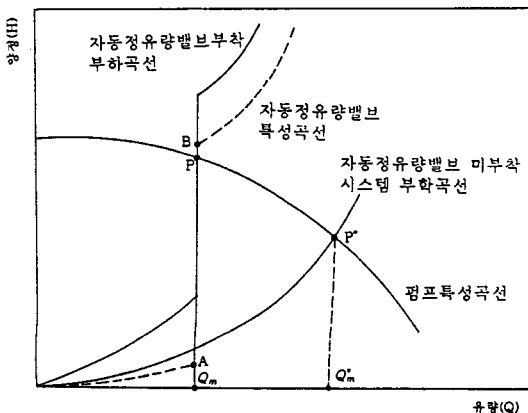


그림 4 자동정유량밸브와 펌프특성의 매칭

특성곡선상에서 AQ_m 의 크기는 작을수록 좋고 AB의 길이(작동압력차)는 클수록 좋다.

3.2.3 수동가변유량조절밸브 특성과 펌프 특성의 매칭

임의 회로상의 유량조절은 일반 밸브를 부착하고 TAB에 의해서 가능하다. 그러나 일반 밸브는 밸브 리프트에 따라서 유량이 비례하지 않고 밸브 리프트를 일정값으로 잠그는(lock) 장치가 없어서 유량조절용으로 사용하기 어렵다.

밸브 리프트와 유량이 비례 관계에 있게 하고 리프트를 고정하는 잠그는 장치가 있으며 리프트를 미세이동시킬 수 있도록 고안된 밸브가 가변유량조절밸브이다. 수동가변유량 조절밸브의 특성은 그림 5와 같다.

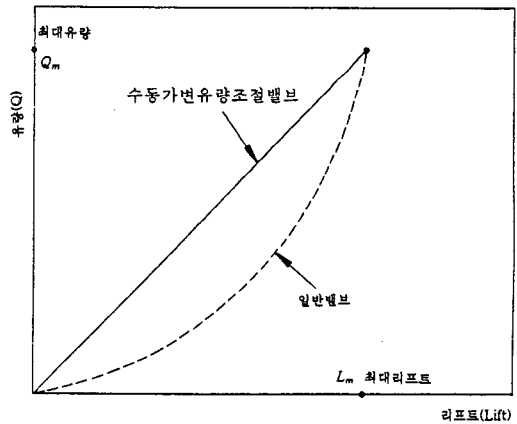


그림 5 밸브의 리프트와 유량과의 관계

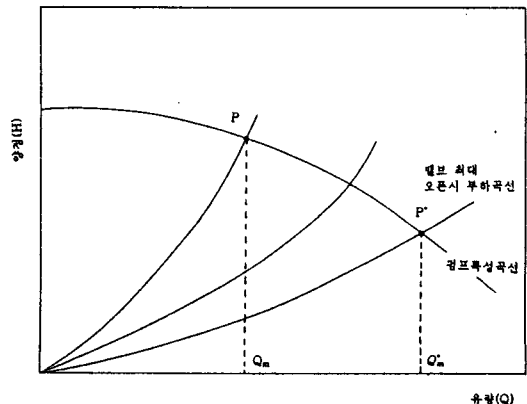


그림 6 수동가변유량조절밸브 특성과 펌프 특성의 매칭

그림 6은 수동가변유량조절밸브에 의해 시스템의 유량을 조절하는 방법을 도시한 그림이다. 밸브가 최대로 오픈되어 유량이 Q_m^* 이다가 TAB에 의해서 밸브개도를 조절하여 원하는 Q_m 이 나오도록 하면 시스템곡선과 펌프곡선은 P에서 만난다.

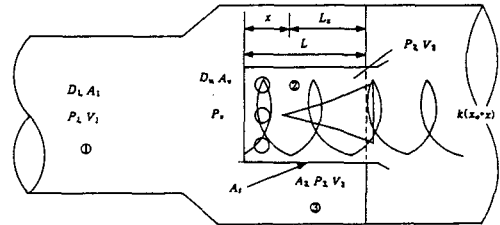


그림 7 정유량밸브의 개략도

4. 유량조절밸브의 설계

4.1 자동정유량조절밸브의 설계

그림 7은 자동정유량밸브의 개략도이다. 스프링 상수를 k , 스프링의 초기변위를 x_0 , 변위를 x , 밸브 목의 면적을 A_1 , 밸브 전면적과 직경을 D_u , A_u , 정면압력을 P , 입구 유동의 직경, 압력, 면적, 속도를 D_1 , P_1 , A_1 , V_1 , 밸브 목전의 압력, 면적, 속도를 P_3 , A_3 , V_3 , 밸브 후의 압력 속도를 P_2 , V_2 라 하자.

오리피스의 유량공식은

$$Q = C_d A_1 \sqrt{\frac{4P}{\rho(1 - (\frac{A_1}{A_3})^2)}} \dots\dots\dots(10)$$

이다. 여기서 C_d 는 유량계수이다.

①과 ③사이에 베르누이 방정식을 세우면

$$\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_3}{\rho} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2} \dots\dots\dots(11)$$

운동에너지 수정상수 α_1 은 α_3 와 같다고 가정한다.

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha \dots\dots\dots(12)$$

연속방정식에서

$$V_1 A_1 = V_3 A_3 \dots\dots\dots(13)$$

이므로

$$V_1 \frac{\pi D_1^2}{4} = V_3 \pi D_v L_x \dots\dots\dots(14)$$

가 된다. 여기서 L_x 는 $L-x$ 이다. 따라서

$$V_3 = \frac{D_1^2}{4D_v L_x} V_1 \frac{A_1}{A_3} \dots\dots\dots(15)$$

이다. 여기서 D_u 는 밸브 요동부의 직경이다.

식(12), (15)를 식(11)에 대입하면

$$\frac{P_3 - P_1}{\rho} = \alpha \frac{V_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(16)$$

이 된다. 밸브 정면압력을 정체압력(stagnation pressure)과 P_3 의 평균이라고 가정하면

$$\frac{P_s}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha \frac{V_1^2}{2} + \frac{P_3}{\rho} \right) \dots\dots\dots(17)$$

식(17)에 식(16)을 대입하여 P_1 을 소거하면

$$P_s - P_3 = \alpha \rho \frac{V_1^2}{4} \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 \dots\dots\dots(18)$$

한편 밸브의 힘평형방정식에서

$$P_s - P_2 = \frac{k(x+x_0)}{A_u} \dots\dots\dots(19)$$

이다. 여기서 k 는 스프링상수이고 x 는 스프링 변위이며 x_0 는 스프링의 초기변위이고 A_v 는 밸브 정면 단면적이다.

따라서

$$P_s - P_3 + P_3 - P_2 = P_s - P_3 + \Delta P = \frac{k(x+x_0)}{A_v} \dots\dots(20)$$

이면 식(20)과 식(18)에서

$$\Delta P = \frac{k(x+x_0)}{A_v} + \alpha \rho \frac{V_1^2}{4} \left(\frac{A_1}{A_3} \right) \dots\dots(21)$$

식(21)을 식(10)에 대입하고 제곱하면

$$Q^2 = \frac{C_d^2 A_1^2}{1 - \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2} \left(\frac{k(x+x_0)}{\rho A_v} - \alpha \frac{V_1^2}{4} \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2 \right) \dots\dots(22)$$

따라서

$$A_1 = \frac{Q}{\sqrt{\frac{Q^2}{A_3^2} + C_d^2 \left(\frac{k(x+x_0)}{\rho A_v} - \frac{\alpha Q^2}{4A_3^2} \right)}} \dots\dots(24)$$

$$= \frac{Q}{\sqrt{\left(1 - C_d^2 \frac{\alpha}{4}\right) \frac{Q^2}{A_3^2} + C_d^2 \frac{k(x+x_0)}{\rho A_v}}} \dots\dots(25)$$

이 식에서 $A_3 = \pi D_v(L-x)$ 이고 C_d 도 x 의 함수이므로 Q 가 일정하게 주어질 경우 A_1 가 x 의 함수로 주어진다.

초기 밸브 목면적 A_{10} 는

$$A_{10} = \frac{Q}{\sqrt{\left(1 - C_d^2\right) \frac{\alpha}{4} \frac{Q^2}{(\pi D_v L)^2} + C_d^2 \frac{k x_0}{\rho A_v}}} \dots\dots(26)$$

한편,

$$y = -\frac{dA_1}{dx} \dots\dots(27)$$

이므로

$$y = \frac{Q}{2} \left(C_d^2 \frac{k}{\rho A_v} + \frac{2(1 - C_d^2 \frac{\alpha}{4}) Q^2}{(\pi D_v)^2 (L-x)^3} \right) \left(1 - C_d^2 \frac{\alpha}{4}\right) \frac{Q^2}{A_3^2} + C_d^2 \frac{k(x+x_0)}{\rho A_v} \right)^{-\frac{3}{2}} \dots\dots(28)$$

$$y_0 = \frac{Q}{2} \left(C_d^2 \frac{k}{\rho A_v} + \frac{2(1 - C_d^2 \frac{\alpha}{4}) Q^2}{\pi^2 D_v^2 L^3} \right) \left(1 - C_d^2 \frac{\alpha}{4}\right) \frac{Q^2}{A_3^2} + C_d^2 \frac{k(x+x_0)}{\rho A_v} \right)^{-\frac{3}{2}} \dots\dots(29)$$

y 를 근사해법으로 구하기 위해서 식(24)를 간략화하면

$$A_1 = \frac{Q}{\sqrt{C_d^2 \frac{k(x+x_0)}{\rho A_v}}} \dots\dots(30)$$

이 되고

$$A_{10} = \frac{Q}{\sqrt{C_d^2 \frac{k x_0}{\rho A_v}}} \dots\dots(31)$$

이 된다. 따라서

$$y_0 = \frac{Q}{2} (C_d^2 \frac{k}{\rho A_v}) (C_d^2 \frac{k x_0}{\rho A_v})^{-\frac{3}{2}}$$

$$k = \frac{24\rho Q^2}{\pi C_d^2 L^3} \dots\dots\dots(38)$$

$$y_0 = \frac{Q}{2} x_0^{-\frac{3}{2}} (C_d^2 \frac{k}{\rho A_v})^{-\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(32)$$

$y_{max} = 0.8L$ 이라 가정하면

$$\therefore y_0^2 x_0^3 = \frac{Q^2}{4} (C_d^2 \frac{k}{\rho A_v})^{-1}$$

$$A_{iv} = \frac{Q}{\sqrt{C_d^2 \frac{k(0.8L+x_0)}{\rho A_v}}}$$

$$\therefore Q^2 = 4y_0^2 x_0^3 C_d^2 \frac{k}{\rho A_v} \dots\dots\dots(34)$$

$$= \frac{Q}{\sqrt{C_d^2 \frac{k(0.97L)}{\rho \frac{\pi}{4} L^2}}} \dots\dots\dots(39)$$

식(30)에서

$$A_{io}^2 = \frac{Q^2}{C_d^2 \frac{k x_0}{\rho A_v}} \dots\dots\dots(34)$$

이 되며 나머지 면적을 N개의 구멍으로 대체하면

이 되어 식(33), (34)에서

$$N \frac{\pi}{4} D_k^2 = \frac{Q}{\sqrt{C_d^2 \frac{0.97k}{\rho \frac{\pi}{4} L}}}$$

$$\therefore A_{io} = 2x_0 y_0 \dots\dots\dots(35)$$

이 되고 $N=10$ 이면

가 되고 $y_0 = \frac{3}{4} \pi D_v$, $L = D_v$ 라고 가정하고 $A_{io} = A_1 = \frac{1}{4} \pi D_1^2$ 으로 가정하며

$$10^2 \frac{\pi^2}{4^2} D_k^4 = \frac{\rho \pi L Q^2}{C_d^2 \times 4 \times 0.97k}$$

$D_o = D_1$ 으로 가정하면

$$D_k^4 = \frac{\rho L Q^2}{25 \times 0.97 \times \pi C_d^2 k} \dots\dots\dots(40)$$

$$x_0 = \frac{L}{6} \dots\dots\dots(36)$$

이 된다. 따라서

$$\therefore D_k = \sqrt[4]{\frac{\rho L Q^2}{25 \times 0.97 \times \pi C_d^2 k}} = 0.2036L \quad (41)$$

$$Q \approx 2x_0 y_0 \sqrt{C_d^2 \frac{k x_0}{\rho A_v}}$$

4.2 수동가변유량조절밸브의 설계

$$Q^2 = 4x_0^3 y_0^2 C_d^2 \frac{k}{\rho A_v}$$

수동가변유량조절밸브 설계의 요점은 밸브 리프트(x)와 유량 Q와 비례하도록 밸브목면적 A_v를 정해야 한다. 따라서 식(10)에서

$$x_0^3 = \frac{Q^2}{4 y_0^2 C_d^2 k} \dots\dots\dots(37)$$

$$Q^2 = C_d^2 A_1^2 \frac{4P}{\rho(1 - (\frac{A_1}{A_3})^2)} \dots\dots\dots(42)$$

식(37)에 식(36)을 대입하면

이 되고

$$\frac{C_d^2 A_1^2}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2\right)} = \alpha^2 x^2 \dots\dots\dots(43)$$

이 되어야 한다. 따라서

$$A_1 = \frac{\alpha x}{\sqrt{\frac{C_d^2}{\rho} + \frac{\alpha^2 x^2}{A_3^2}}} \dots\dots\dots(44)$$

이 되도록 A_1 의 크기를 설계해야 한다.

5. 결 언

고층아파트에서 부력에 의해 발생하는 각 층간의 열공급 불균일성은 각 세대에 유량조절밸브를 부착함으로써 해결할 수 있어서 유량조절밸브를 부착할 경우 열공급 배관망을 단구역으로 할 수 있다. 유량조절밸브에는 자동정유량조절밸브나 수동가변정유량조절밸브가 있으며 어느 것으로도 고층아파트 층간의 열적 불균일성을 해결할 수 있다. 이 강좌에서는 고층아파트에서 열공급 불균일성이 발생하는 원인을 규명했고 자동 정유량조절밸브와 수동가변유량조절밸브의 특성을 분석하고 그 설계법을 설명하였다. 이와 같은 이론에 따르면 유량조절밸브를 독자적으로 개발할 수 있을 것이다.