

공동주택 온수난방 시스템의 적정 열공급을 위한 배관망 시뮬레이션

Simulation of Pipe Network for Optimum Heat Supply in the Hot Water Heating System of Apartment House

김 주 용*·민 만 기**·최 영 돈**
J. Y. Kim, M. K. Mim, Y. D. Choi

Key words : Heating System(난방시스템), Pipe Network(배관망), Constant Flowrate Balancing Valve(정유량조절밸브), Single Zone(단일구역), Multi Zone(다구역)

Abstract

Pipe network of hot water heat supply system in an apartment house was analyzed. Flowrate and supply heat capacity of each household in which constant flowrate balancing valve is installed in a single zone system were calculated and the results were investigated.

In the existing piping system, the non-uniformity of heat supply with floors due to the static pressure and temperature difference between supply main and return main can not be avoided and this tendency get intense with the increase of the height of building. The non-uniformity of heat supply can be prevented by the installation of balancing valve at each household, however if the performance of supply pump is not sufficient to overcome the energy loss due to the installation of balancing valve for constant flow rate or if the selection of the valve capacity is not adequate, the valves will may lose their controllability.

기 호 설 명

<p>A : 관표면적 A_p : 관단면적 a : 면적비 C_p : 비열 D : 관경 d : 관경 D_u : 단수 f : 마찰계수 g : 중력상수 H : 높이, 양정 h : 손실계수 K : 국부손실계수 l : 회로의 수</p>	<p>L : 관길이 l_t : 관중심과 방표면 사이의 거리 \bar{l}_t : 관중심과 방표면 사이의 평균거리 n : 관의 수 p : 압력, 동력 Δp_{\min} : 최소 압력강하 Δp_{\max} : 최대 압력강하 Q : 유량 Q_{in} : 유입유량 Q_{out} : 유출유량 Q_t : 한 동으로의 공급총유량 q : 유량비 R_1 : 내경 R_2 : 외경 R_c : 레이놀즈수 T : 온도</p>
--	---

*고려대 대학원 기계공학과

**고려대학교 기계공학과

T_a	: 외기온도
T_{out}	: 세대 온수출구온도
T_s	: 방표면온도
T_w	: 관벽온도
U	: 등가 열전달계수
γ	: 비중량
ξ	: 표면조도
η	: 펌프효율

하첨자

i	: 관입구
m	: 최적점
o	: 관출구

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 여의도시범아파트 및 한강맨션아파트가 건설되면서 본격적인 공동주택의 생활문화권이 형성되기 시작하였다.

공동주택은 쾌적한 실내의 열환경을 제공해주고 주택설비의 관리 및 보수등을 중앙에서 관리하므로 관리비가 저렴하고 아파트 주변의 편의시설을 이용할 수 있는 장점을 지니고 있어 공동주택의 보급률은 날로 증가하고 있다. 초기의 공동주택은 5, 6층 정도에 불과 하였으나 단위면적 당의 건설비를 낮추기 위하여 15층의 아파트가 주종을 이루게 되었고 상계동 신시가지에 25층의 초고층아파트가 시범적으로 등장하였다. 앞으로 분당지구에는 30층 짜리의 초고층 아파트도 등장할 예정이다.

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 주민 간의 분쟁이 발생되기 시작하였다. 15층 아파트의 경우 실내온도의 최대차가 심한경우 10℃ 이상인 예도 볼 수 있었다. 이같은 분쟁이 심화되자 1980년

도 이후부터 정부에서는 이 열공급의 편중을 막는 조치로서 난방용 온수공급 배관관을 3개로 구분하는 수직구역화를 주택건설촉진법에서 의무화하도록 하였다.

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

독일 및 그밖의 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 다구역배관방식의 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 최적열공급 시스템의 설계기술의 개발이 시급하다. 이러한 설계기술이 개발되기 위해서 해야 할 일은 먼저 기존 다구역 배관망 열공급시스템과 단구역 배관망 열공급시스템에서 층간의 열공급 불균일성을 초래하는 원인이 무엇인가를 명확히 규명해야 되며 이와 같은 층간의 열공급의 불균일성을 정확히 해석해줄 수 있는 배관망해석 프로그램이 개발되어야 한다. 다음으로는 다구역 배관망 시스템을 쓰지 않고도 열공급을 균일하게 해줄 수 있는 열공급 시스템에 대한 성능해석이 뒤따라야 할 것이다.

본 연구에서는 고층건물 온수 배관망에서 층간의 열공급 불균일성의 원인을 규명하기 위한 배관망 시뮬레이션을 하였다. 다구역과 다구역 배관망 시스템에 대한 해석과 정유량밸브를 각 세대에 부착했을 때 열공급에 대한 해석을 하였다.

2. 이론 해석

2.1 고층아파트 층간열공급 불균일성의 원인

고층아파트의 열공급배관망에서 온수공급배관망을 단구역으로 하면 상층으로 올라갈수록 열공급이 잘되고 하층으로 내려올수록 열공급이 잘되지 않았으나 그 원인이 최근까지 막연히 부력의 효과 때문

이라고 생각되어져 왔다. 따라서 배관망을 다구역으로 하는 경우 이 부력효과를 감소시킬 수 있다고 생각해서 확실한 이론적 혹은 실험적 자료에 근거하지 않고 다구역배관망을 범제화하는 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. Fig. 1은 단구역 배관망 내에서 정수압력차에 의해서 발생하는 유동저항을 나타내준다. 공급관에서 비중량 γ_H 의 고온수가 공급되어 아파트 각 세대에서 열을 뺐진 후 비중량 γ_C 인 저온수가 되어 회수관으로 회수된다고 하자, Fig. 1에서와 같은 좌표축을 잡았을 때 고온수 공급관에 걸리는 정수압력은 기준점으로부터의 거리 h 에 따라 다음과 같이 표시된다.

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

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

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

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.

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

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 따라서만 변한다는 것은 유체역학의 기본원리이다. 따라서 다구역 배관망에서의 온수공급관의 정수압력의 h 에 따른 변화는 단구역 배관망과 하등의 차이가 없이 나타난다.

2.2 선형해석법

배관망 지배방정식들은 비선형의 연립방정식을 이룬다. 이 비선형방정식들을 푸는 방법이 여러가지가 있으나 본 연구에서는 선형해석법을 택하였다. 본 연구에서는 선형해석법은 Hardy-Cross법, (1) Newton-Raphson법(2) 등보다 수렴속도가 대단히 빠르며 Wood와 Charls(3) 등에 의해서 배관망 해석에 적용되었다. 이러한 선형해석법을 이용한 정상상태의 지배방정식은 제안된 접합점방정식과 회로방정식이 있다.

(1) 접합점방정식(Junction Equation)

모든 배관망에 대하여 다음의 관계식이 성립된다.

$$n = j + l - 1 \quad (4)$$

여기서 n : 관의 수
 j : 접합점의 수
 l : 회로의 수

접합점방정식은 임의의 한 접합점에 대하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유입되는 총유량은 유출되는 총유량과 같다는 것을 나타낸다.

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \quad (5)$$

여기서 Q_{in} 은 접합점으로 유입되는 유량이고 Q_{out} 은 접합점으로부터 유출되는 유량이다.

(2) 회로방정식(Loop equation)

Fig. 3은 합류점만으로 관으로 이루어진 단위회로를 나타낸다. 주어진 배관망에서 회로방정식은 각 회로에 대하여

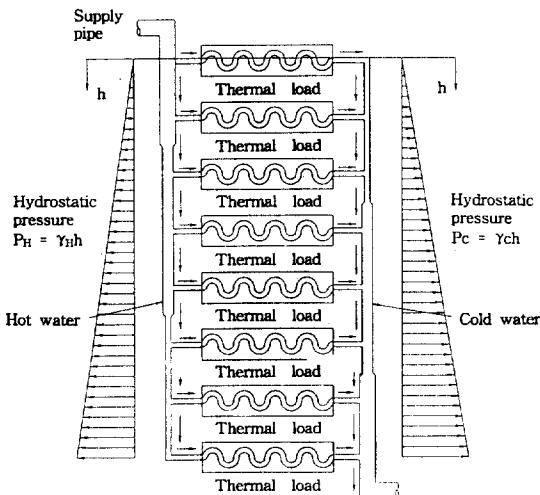


Fig. 1 Flow resistance in the pipe network due to the hydrostatic pressure difference.

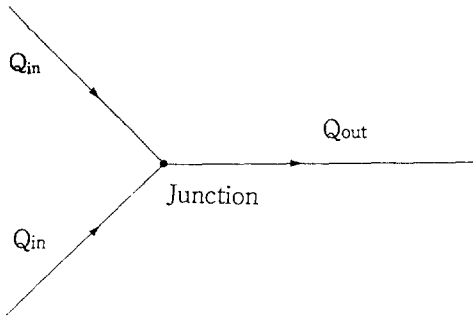


Fig. 2 Flow in a junction

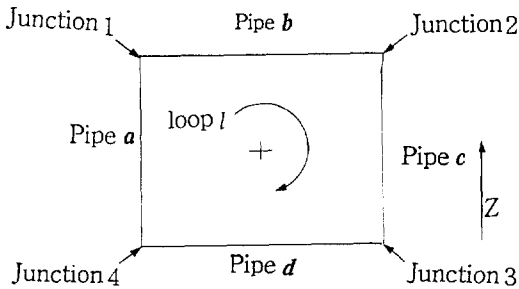


Fig. 3 A unit loop composed of 4 junctions and 4 pipes

$$\sum_{i=1}^n h_{ii} = 0 \tag{6}$$

의 관계를 만족시켜야 한다.

여기서

h_{ii} : 회로 l 에 속하는 관 i 의 수두손실

n : 회로 l 에 속한 관의 수

한편 회로 1상의 임의의 관 i 에 있어서의 손실수두는

$$h_{ii} = K_i Q_i Q_i = K_i Q_i^2 \tag{8}$$

여기서 K_i : 수정된 관상수

Q_i : 관 i 의 유량

Q_i^2 : 관 i 의 현재 유량

식(8)과 같이 손실수두를 선형화하여 각 회로방정식과 접합점방정식을 연립으로 해석하는 것이 선형 해석법이다.

2.3 열유동이 있는 회로의 배관망 해석

등온유동에 적용하던 회로방정식을 열유동의 배관망 해석에 그대로 적용할 수는 없다. 그것은 세

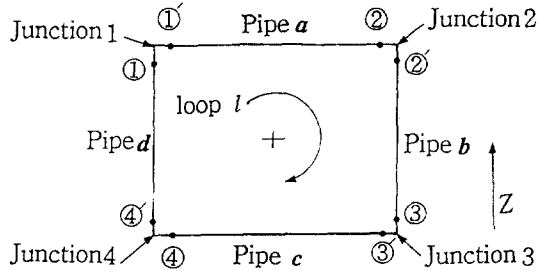


Fig. 4 A loop in the pipe network with 4 junctions and 8 nodal points

대내 상태변과 관에서의 열전달에 의해서 유체의 온도가 변하고 마찰손실에 따라 압력이 변함에 따라 유체의 밀도가 변하며 이 밀도의 변화는 회로방정식에 심각한 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 열유동이 있는 회로에 대하여 회로방정식을 유도하였으며 열유동에 따른 유체의 밀도 변화가 유체유동에 미치는 영향도 고찰하였으며 이 같이 해서 얻은 관계식들을 단구역 및 다구역 배관망 해석에 적용하였다.

Fig. 4는 4개의 접합점(Junction)으로 이루어진 회로이다. 이 회로에서 관a 및 관c는 수평으로 놓여 있고 관b 및 관d는 수직으로 놓여 있다고 가정하자. 그리고 상방향을 z방향이라 한다. 에너지 손실을 고려한 확장된 오일러방정식은

$$\begin{aligned} dP &= -\gamma dz - dH_L - \gamma d\left(\frac{w^2}{2g}\right) \\ &= -\gamma dz - dH_L - d\left(\frac{\gamma w^2}{2g}\right) + \frac{w^2}{2g} d\gamma \end{aligned} \tag{9}$$

이다. 여기서 γ 는 유체의 비중량이고 H_L 은 관에서의 에너지 손실이며 w 는 관에서의 평균 속도이다. 이 식에서 γ 는 유체온도만의 함수로 가정할 수 있기 때문에 다음과 같이 적분될 수 있다.

$$-\int \gamma dz = \gamma_b H - \gamma_a H \tag{10}$$

여기서 γ_b 및 γ_a 는 관b 및 관d에서의 평균 비중량이다. Fig. 4의 회로에 대하여 위의 적분식들을 고려하여 오일러방정식을 적분하여 방정식을 얻으면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{f_a}{D_a} \frac{\gamma_a}{2g} W_a^2 L_a - \gamma_a \sum_i K_i \frac{W_a^2}{2g} \\ &\quad \text{②-②' 사이에서의 국부손실} \\ &\quad + \left[\left(\frac{3}{4} - \frac{1}{4} \frac{W_b}{W_a}\right) \gamma_2 + \frac{1}{4} \left(1 + \frac{W_b}{W_a}\right) \gamma_2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_d}{W_a}\right)\gamma_1-\left(\frac{3}{4}-\frac{1}{4}\frac{W_d}{W_a}\right)\gamma_1\frac{W_a^2}{2g} \\
 & -\frac{f_b}{D_b}\frac{\gamma_b}{2g}W_b^2L_b-\gamma_b\sum_i K_i\frac{W_b^2}{2g} \\
 & \quad \text{③-③'에서의 국부손실} \\
 & +\left[\left(\frac{3}{4}-\frac{1}{4}\frac{W_c}{W_b}\right)\gamma_3+\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_c}{W_b}\right)\gamma_3\right. \\
 & \left.-\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_c}{W_b}\right)\gamma_2-\left(\frac{3}{4}-\frac{W_a}{W_b}\right)\gamma_2\right]\frac{W_b^2}{2g} \\
 & +\frac{f_c}{D_c}\frac{\gamma_c}{2g}W_c^2L_c+\gamma_c\sum_i K_i\frac{W_c^2}{2g} \\
 & \quad \text{④-④'에서의 국부손실} \\
 & -\left[\left(\frac{3}{4}-\frac{1}{4}\frac{W_d}{W_c}\right)\gamma_4+\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_d}{W_c}\right)\gamma_4\right. \\
 & \left.-\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_b}{W_c}\right)\gamma_3-\left(\frac{3}{4}-\frac{W_b}{W_c}\right)\gamma_3\right]\frac{W_c^2}{2g} \\
 & +\frac{f_d}{D_d}\frac{\gamma_d}{2g}W_d^2L_d+\gamma_d\sum_i K_i\frac{W_d^2}{2g} \\
 & -\left[\left(\frac{3}{4}-\frac{1}{4}\frac{W_i}{W_d}\right)\gamma_1+\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_i}{W_d}\right)\gamma_1\right. \\
 & \left.-\frac{1}{4}\left(1+\frac{W_c}{W_d}\right)\gamma_4-\left(\frac{3}{4}-\frac{W_c}{W_d}\right)\gamma_4\right]\frac{W_d^2}{2g} \\
 & +\gamma_b H-\gamma_d H \quad (11)
 \end{aligned}$$

식(11)은 유체의 밀도가 고려된 오일러방정식으로 각 회로에 대해서 이 방정식을 풀면 온수의 밀도차에 의해 발생하는 유동저항으로 야기되는 층간의 유량공급 불균일성이 예측될 수 있으므로, 본 연구에서는 이 식을 배관망 해석에서 지배방정식으로 사용하였다.

2.4 유동해석에 필요한 관계식

배관망 내 열유동을 해석하는 시뮬레이션의 해가 정확하기 위해서는 각 배관망 요소들에서 수두손실과 펌프에서의 압력상승을 정확히 계산하여야 하며 그러기 위해서는 관의 마찰계수, 각 요소에서의 국부손실계수를 정확히 계산해 주고 유량에 따른 펌프의 수두 변화도 정확히 나타내 주어야 한다.

본 연구에서 사용한 관마찰계수, 여러 국부손실계수 및 펌프의 성능곡선 등의 식들은 다음과 같다.

(1) 관의 마찰계수식

관의 마찰계수에 대한 식은 층류유동과 난류유동을 구분하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

1) $Re \leq 2300$

$$f = 64/Re$$

여기서 f : 마찰계수

Re : 레이놀즈수

2) $Re > 2300$

$$f = \left[\frac{1}{-1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\xi/d}{3.7} \right)^{1.11} \right]} \right]^2 \quad (12)$$

여기서 ξ : 관의 조도 (사용관에서는 0.046 mm)

(2) 국부손실계수

1) 밴드

Dean number를 다음과 같이 정의하고

$$Du = Re \left(\frac{R}{R_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

R : 관의 반경

R_c : 곡률반경

$$K = \frac{2R(Re)^2}{R_c} \quad (14)$$

라 하면 층류유동의 경우 아래와 같이 마찰계수를 결정할 수 있다.

$Du < 17$ 인 경우 :

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{1 - 0.03058 \left(\frac{K}{576} \right)^2 - 0.01195 \left(\frac{K}{576} \right)^2} \quad (15)$$

$17 < Du < 1000$ 인 경우 :

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{11.6}{Du} \right]^{0.45}} \quad (16)$$

$Du > 1000$

$$f = \frac{64}{Re} \left[0.1028 Du^{\frac{1}{2}} (1 + 3.7 Du^{\frac{1}{2}}) \right] \quad (17)$$

난류유동의 경우 마찰계수는 다음과 같다.

$$0.034 < Re \left(\frac{R}{R_c} \right)^2 < 300$$

$$f = \frac{4 \left[0.0725 + 0.076 \left(Re \left(\frac{R}{R_c} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{4}} \right]}{\left(\frac{R}{R_c} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

2) 지관과 접점

(a) 합류인 경우 ($A2 = A3$)

국부마찰계수와 마찰손실계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$a = \frac{A_1}{A_3} \quad (0.4 < a < 1)$$

$$q = \frac{Q_1}{Q_3}$$

라 하면

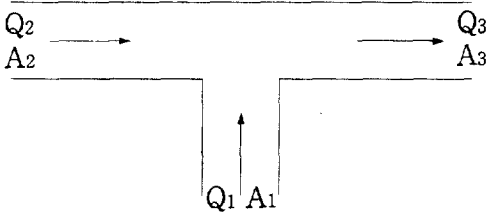


Fig. 5 Junction

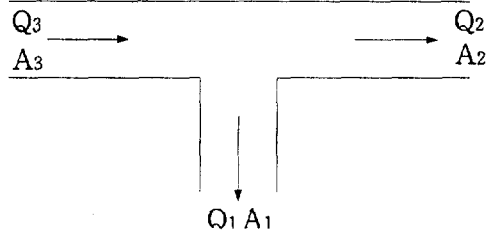


Fig. 6 Branch

$$K_{13} = \frac{\Delta P_{13}}{\frac{1}{2} \rho V_3^2}$$

$$K_{23} = \frac{\Delta P_{23}}{\frac{1}{2} \rho V_3^2}$$

$$K_{13} = -0.92(1-q)^2 - q^2[-(1.2-r)^{\frac{1}{2}} + 0.8(1-\frac{1}{a^2})] + (2-a)(1-q)q \quad (19)$$

$$K_{23} = 0.03(1-q)^2 - q^2[1 + (1.62-r)(-1) + 0.38(1-a)] + (2-a)(1-q)q \quad (20)$$

여기서 r 은 관의 분기각도에 관련된 함수로 직각일 때는 0이다.

$$h_{13} = K_{13} \frac{V_3^2}{2g} \quad (21)$$

$$h_{23} = K_{23} \frac{V_3^2}{2g} \quad (22)$$

(b) 분기인 경우 ($A_2 = A_3$)

국부마찰계수와 마찰손실계수는 다음과 같이 계산한다.

$$K_{32} = \frac{\Delta P_{32}}{\frac{1}{2} \rho V_3^2}$$

$$K_{31} = \frac{\Delta P_{31}}{\frac{1}{2} \rho V_3^2}$$

$$K_{32} = 0.03(1-q)^2 + 0.35q^2 - 0.2q(1-q) \quad (23)$$

$$K_{31} = 0.95(1-q)^2 + q^2[(-0.3 + \frac{0.4-0.1a}{a^2}) + (1-0.9(\frac{r}{a}))^{\frac{1}{2}}]$$

$$h_{31} = K_{31} \frac{V_3^2}{2g}$$

$$h_{32} = K_{32} \frac{V_3^2}{2g} \quad (24)$$

3) 급격확대관 및 급격축소관

급격확대관과 급격축소관의 국부마찰계수와 마찰

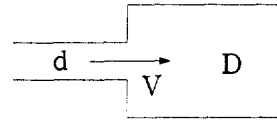


Fig. 7 Suddenly expanded pipe

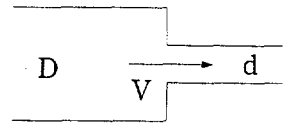


Fig. 8 Suddenly contracted pipe

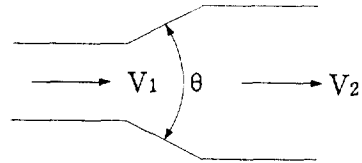


Fig. 9 Diffuser

손실수두는 다음식으로 계산한다.

$$K_{se} = [1 - \frac{d^2}{D^2}]^2, \quad K_{sc} = 0.42[1 - \frac{d^2}{D^2}] \quad (26)$$

$$h_{se} = K_{se} \frac{V^2}{2g}, \quad h_{sc} = K_{sc} \frac{V^2}{2g} \quad (27)$$

4) 디퓨저

디퓨전의 국부마찰계수는 다음의 식으로 계산한다.

$$K = \frac{h_m}{V_1^2/2g}$$

(a) $20 < 2\theta < 67.5$

$$K = 0.196 + 0.0243\theta - 0.000155\theta^2 \quad (28)$$

(a) $2\theta > 67.5$ 인 경우

$$K = 1.21 - 0.00116\theta \quad (29)$$

여기서 θ 는 degree

5) 축소부

축소부의 국부마찰계수는 다음식으로 계산한다.

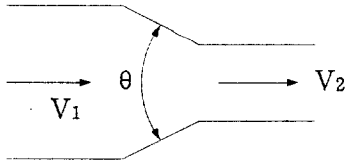


Fig. 10 Contractor

$$K = 0.00998 - 0.000332\theta + 0.0000222\theta^2 \quad (30)$$

6) 나사이음

나사이음의 국부마찰계수는 다음 식으로 계산한다.

(a) 90° 엘보우

$$K = 0.3067 + \frac{42.5}{D} - \frac{316.7}{D^2} \quad (31)$$

(b) 게이트 밸브

$$K = 0.06 + \frac{6.5}{D} - \frac{50}{D^2} \quad (32)$$

(c) 글로우브 밸브

$$K = 10.3 - 0.046D \quad (33)$$

7) 플랜지 용접 관이음

플랜지 용접 관이음의 국부마찰계수는 다음식으로 계산한다.

(a) 90° 엘보우

$$K = 0.30 + \frac{0.478}{D} - \frac{61.38}{D^2} \quad (34)$$

(b) 게이트 밸브

$$K = -0.06486 + \frac{24.76}{D} - \frac{226.6}{D^2} \quad (35)$$

(c) 글로우브 밸브

$$K = 4.014 + \frac{258.3}{D} - \frac{841.1}{D^2} \quad (36)$$

(3) 펌프의 성능곡선식

배관망내 열유동 해석용 시뮬레이션을 위해서는 펌프의 성능을 양정-유량곡선식으로 나타내어야 한다. 펌프의 설계점에서의 양정과 유량을 H_m 및 Q_m 이라 하면 이 점은 펌프의 효율이 가장 큰 점(BEP)이다.

Fig. 11은 펌프의 양정-유량곡선을 나타낸다.⁽⁴⁾ 유량이 0일 때의 수두는 일반적으로 $1.2H_m$ 이고 수두-유량곡선을 2차 포물선으로 나타내면

$$H = H_m(1.2 - 0.2q^2) \quad (37)$$

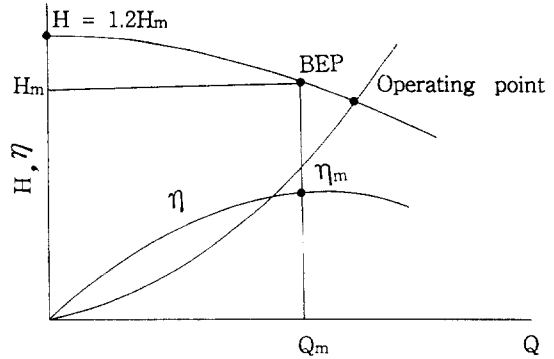


Fig. 11 Performance curve of a pump

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

$$\eta = \eta_m(-1.167q^2 + 2.167q) \quad (38)$$

로 나타낼 수 있으므로 펌프의 구동에 필요한 동력은

$$P = \frac{\rho g h Q}{\eta} = \frac{\rho g H_m Q_m}{\eta_m} \left[\frac{1.2 - 0.2q^2}{2.176 - 1.167q} \right] \quad (39)$$

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

(4) 정유량조절밸브의 특성해석

열전달이 있는 배관망 시스템의 유량을 조절하기 위해서 정유량조절밸브를 부착할 경우에는 시스템의 전산해석을 위해서 정유량밸브의 특성(유량과 압력차와의 관계)을 수식으로 나타내는 것이 중요하다. Fig. 12는 정유량조절밸브에서 밸브 양단의 압력차 ΔP 와 유량과의 관계를 나타내는 일반적인

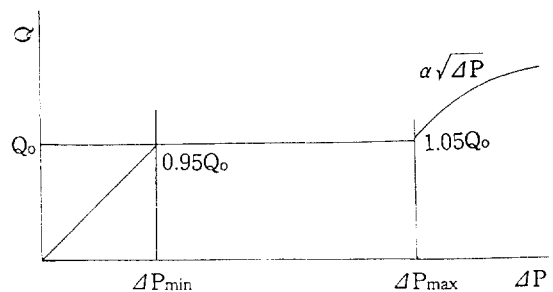


Fig. 12 Flowrate-pressure difference curve of constant flowrate balancing valve

특성곡선이다.

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

본 연구에서는 이 값들을 이용하여 Fig. 12에서 Q 와 P 와의 관계식을 다음과 같이 유도했다.

1) $\Delta P < \Delta P_{min}$ 일 때

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{0.95 \Delta P_{min}}{\gamma} \frac{Q}{Q_0} \quad (40)$$

2) $P_{min} \leq P \leq P_{max}$ 일 때

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}}{0.1 Q_0 \gamma} [Q - Q_0 (0.95 - \frac{0.1 \Delta P_{min}}{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}})] \quad (41)$$

3) $P > P_{max}$ 일 때

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P_{max}}{\gamma} (\frac{Q}{1.05 Q_0})^2 \quad (42)$$

(5) 열전달 해석에 필요한 관계식

열전달이 있는 배관망을 해석하기 위해서는 다음과 같은 관계식들이 필요하다.

1) 보온된 관에서의 온수온도의 변화

Fig. 13은 길이 L 이고 내경이 R_1 , 외경이 R_2 인 보온관을 나타낸다. 열평형식에 의하면 온수관의 입구온도를 T_i 라 하면 출구온도 T_o 는

$$T_o = T_i + (T_a - T_i) (1 - e^{-UA/\rho_i W_i C_p A_p}) \quad (43)$$

온수관 속 온수의 평균온도는

$$\bar{T}_L = T_i + (T_a - T_i) (1 + \frac{e^{-D} - 1}{D}) \quad (44)$$

로 계산한다. (5) 여기서 T_a 는 외기온도이고 $A = 2\pi R_1 L$, $A_p = \pi R_2^2$, $D = \pi U R_1 L / \rho_a W_a C_p A_p$ 이다.

2) 등가열전달계수의 계산

D 의 정의 중에서 U 는 유동과 외기 사이의 등가열전달계수로 관의 형태에 따라 그 값을 다음과 같이 계산한다.

(a) 외기에 노출된 관

외기에 노출된 관에서의 U 는

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{R_1 \ln R_2}{K_{st} R_1} + \frac{R_1 \ln R_3}{K_{is} R_2} + \frac{R_1}{R_3 h_o}} \quad (45)$$

이며 여기서 h_i 는 다음식으로 계산한다.

$$h_i = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} k_w / D_i (Re_d > 2300)$$

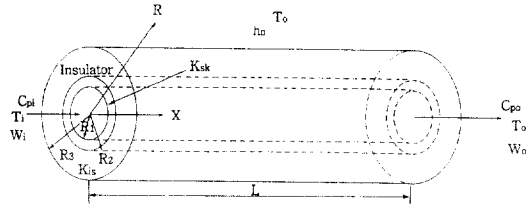


Fig. 13 Insulated pipe

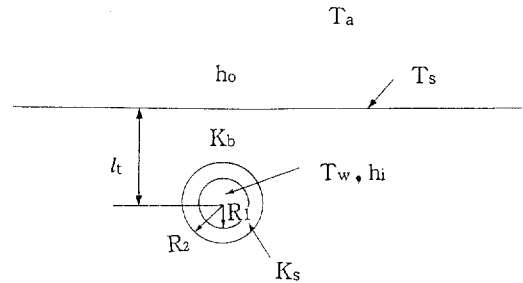


Fig. 14 Pipe buried in the semi-infinite body

$$h_i = \frac{4.36 k_w}{D_i} (Re_d \leq 2300)$$

로 계산한다. 뒷식들에서 k_w 는 관속의 물의 열전도계수이고 D_i 는 관의 내경이다.

(b) 상패널 내의 매설관

관이 상패널 내에 매설되어 있을 때 U 는 위의 식(45)로 계산할 수 없다. Fig. 14는 반무한 지중에 묻힌 내경 R_1 , 외경 R_2 인 관을 나타낸다. 대기온도는 T_a 라 하고 지중 흙 열전도계수를 K_b , 관의 열전도계수를 K_s 라 하고 지면의 열전달계수를 h_o 라 하면 등가열전달계수는

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{R_1 \ln R_2}{K_s R_1} + \frac{\cosh(D_i/R_1)}{K_b} R_1 + \frac{R_1}{h_o \bar{l}_t}} \quad (46)$$

로 계산한다. 여기서 \bar{l}_t 는 관중심과 방표면의 평균거리로서

$$\bar{l}_t = \frac{\pi}{2} l_t \quad (47)$$

로 계산한다. (6)

2.5 모형 아파트의 건축 사양

이 모형 아파트의 온수배관망 구역 방법은 한 열을 1

Table 1 Specification of model apartment house

Floors	Columns	Regions of pipe network
15	8	1st region 1st floor(upward type return pipe) 2nd region 2~4 floor(downward type return pipe) 3rd region 5~9 floor(downward type return pipe) 4th region 10~15 floor(downward type return pipe)

층, 2층~4층, 5층~9층 및 10~15층의 4구역으로 나누었고 1~4층은 상향공급식, 5~15층은 하향공급식 배관망 구조를 가지고 있다. 1층, 2층~4층은 상향식으로 하여 별도의 회수관을 설치하고 5층~9층 및 10층~15층은 하향식으로 하여 하나의 회수관으로 온수를 회수하고 있다.

본 연구에서는 단구역일 때의 유량특성과 열공급 특성을 알아보기 위해서 이 아파트 제2열의 온수배관망을 단구역으로 할 때의 유량특성과 열공급 특성을 알아보기 위해서 배관망해석을 하였다. 단구역 배관망에서는 온수공급관이 하나이고 회수관도 하나이다. 이 단구역 배관망 해석에서는 정유량조절밸브를 두는 경우와 두지 않는 경우에 대하여 해석하였다.

다구역과 단구역 배관망의 경우 각각 한 아파트동으로의 펌프공급유량을 5.78l/s, 2.89l/s 및 1.45l/s인 3가지로 변화시키며 계산하였고 온수의 입구온도는 70℃로 균일하게 하였다. 또 부력효과를 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 대하여도 계산하였으며 각각의 경우 각층의 유량, 온수출구온도 및 열공급율을 계산하여 비교하였다.

3. 배관망의 시뮬레이션 결과

3.1 다구역 배관망 시스템

본 연구에서 주로 고찰해 보고자 하는 것은 배관에서 열전달 현상에 의해서 발생하는 물의 밀도차에 의한 부력이 유체유동의 불균일성에 미치는 영향을 해석하고 또 이 불균일성이 각 층의 유입유량에 어떤 영향을 미치는가를 고찰해 보는 것이다. 실제 아파트에서는 일정용량의 펌프가 설치되어 펌프의 용량과 아파트 배관망의 유동저항에 의해서 아파트 한 동으로 유입되는 유량이 결정되므로 펌프의 유량이 변하면 각 층의 유입유량도 변한다. 따라서 본 연구에서는 펌프의 유량의 변화에 따라서 각 층의 유체유동의 불균일성이 부력에 어떠한 영향을 받는가를 알아보려고 하는 것이다.

이를 위해서 전산 시뮬레이션에 의해서 펌프에 의한 아파트 한 동의 유입유량을 어느 하나의 값으로 고정시키지 않고 인위적으로 변화시켜 그 유입유량의 크기에

따라 각 층의 유량분포의 불균일성을 조사하였다.

Fig. 15는 펌프의 한 아파트 동으로의 공급유량을 5.78 l/s, 2.89 l/s 및 1.45 l/s라고 가정했을 때 앞에서 설명한 대상아파트의 다구역 배관망 시스템을 계산해서 얻은 각 층의 유량을 도시한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 5층에서 15층까지는 2구역으로 되어 있음에도 불구하고 구역을 나눈 효과가 전혀 나타나지 않고 각 층의 유량이 모두 15층에서 가장 크고 5층까지 거의 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

이것은 앞에서 설명한 바와 같이 다구역 배관망 시스템이라 하여도 온수공급관과 온수회수관 사이의 밀도차에 의해 발생하는 수압력의 차에 의한 유동저항 곧 부력효과를 근본적으로 막을 수 없기 때문에 나타난 것이다. 5.78l/s의 펌프공급유량에서 1층~4층 사이의 층별 유량이 큰 것은 주 공급관으로부터 각 세대까지의 거리가 하향공급식보다 가까와 마찰저항이 적기 때문이며 부력효과가 줄어들었기 때문은 아니다. 부력효과에 의한 각 층에서의 유동의 불균일성이 유속이 작을수록 커짐을 알 수 있다. 2.89 l/s인 펌프유량에서는 층의 변화에 따른 유량변화의 구배가 5.78 l/s인 펌프유량에서

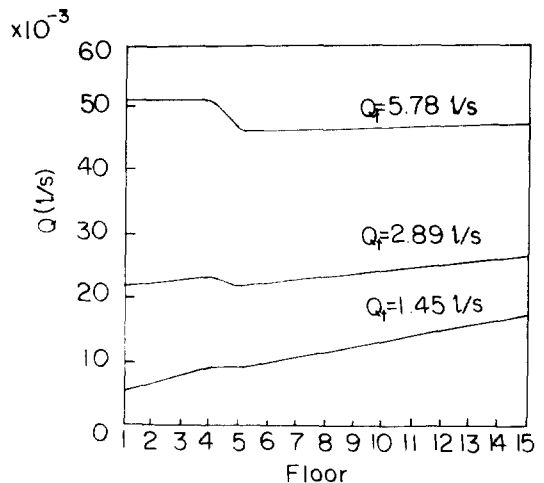


Fig. 15 Distribution of flowrate in multi-zone pipe network

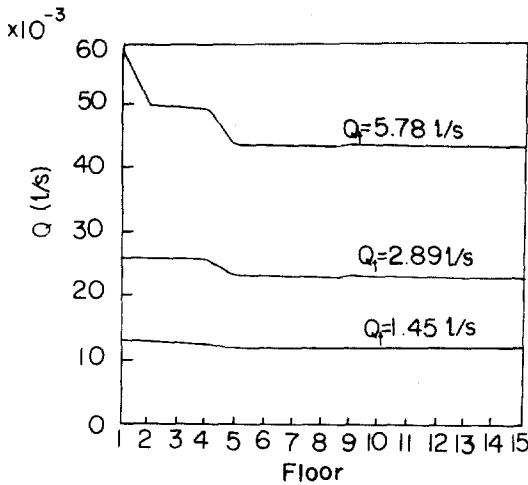


Fig. 16 Distribution of flowrate in multi-zone pipe network when the buoyancy effects are ignored

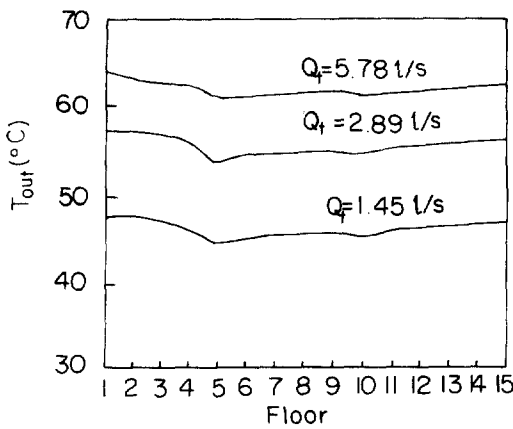


Fig. 17 Distribution of outflow temperature in multi-zone pipe network when the buoyancy effects are ignored

보다 커져서 관속의 유속이 작아질수록 부력효과에 의한 유량의 불균일성이 크게 나타나는 것을 알 수 있고 이 효과는 1~4층에서도 뚜렷하게 나타나고 있다. 공급 유량을 1.45 l/s로 감소시켰을 때 각 층에서의 유량변화를 나타내는 곡선을 보면 층간의 유량변화가 대단히 크게 나타나고 15층에서의 유량은 1층에서의 유량의 약 3배가 됨을 알 수 있다.

Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18은 열전달이 있는 유동에서 부력효과를 고려하지 않고 해석한 각 층의 유량분포와 각세대 온수출구온도와 각 세대로의 열전달율을 나타낸다. 이 그림은 부력효과를 고려하지 않는 경우이므로

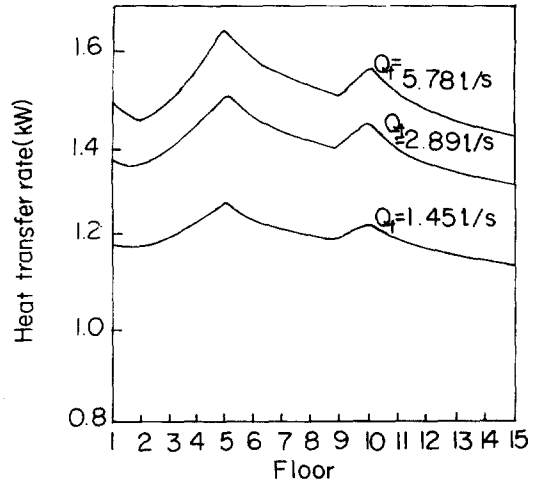


Fig. 18 Distribution of heat flowrate at each household in multi-zone pipe network when the buoyancy effects are ignored

각 세대간의 유량분포와 온수출구온도가 거의 균일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과들은 앞에서 설명한 각 층간의 유량분포가 균일하지 못한 주 원인이 부력효과임을 나타낸 것이다.

3.2 단구역 배관망 시스템

Fig. 19은 부력효과를 고려한 단구역 배관망 시스템에서의 펌프의 공급유량을 5.78 l/s, 2.89 l/s 및 1.45 l/s로 변화시킬 때 각 층간의 유량분포를 나타낸 것이다.

어느 경우이건 유량은 최고층에서 가장 크고 저층으로 내려갈수록 선형적으로 감소하는데 펌프공급유량이 감소할수록 그 변화구배가 커짐을 알 수 있다. 흥미로운 것은 Fig. 15의 다구역 배관망 시스템일 때와 비교하면 펌프공급유량이 클 때는 그 변화곡선에 차이가 있으나 펌프공급유량이 작아져 부력효과가 커지면 그 변화경향이 비슷해지고 펌프공급유량이 1.45 l/s인 경우를 보면 최상층과 최하층의 유량차이는 거의 같아짐을 알 수 있다.

Fig. 20은 단구역 배관망 시스템에서 펌프공급유량의 변화에 따른 각 층에서의 열공급율의 변화를 나타낸 것인데 온수출구온도는 공급유량에 관계 없이 부력효과를 받아서 상층에서 저층으로 내려갈수록 감소하는 경향이 나타나 열공급율은 펌프 공급유량이 클때에는 유량특성과는 반대로 고층에서 저층으로 내려갈수록 열공급율이 상승하다가 펌프공급유량이 감소하면 이 경향이 적어져서 유량이 1.45 l/s이 되면 열공급율도 고층에서

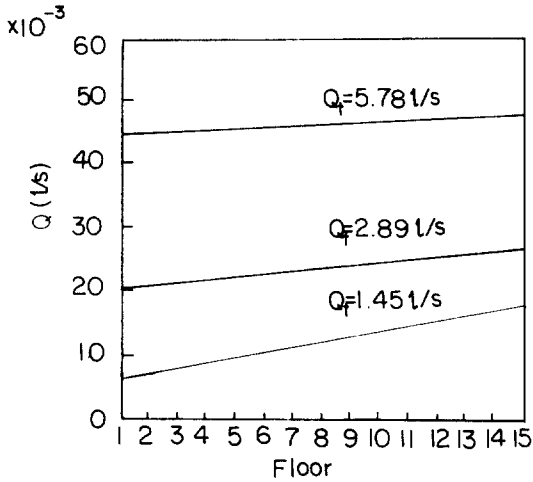


Fig. 19 Distribution of flowrate in single-zone pipe network

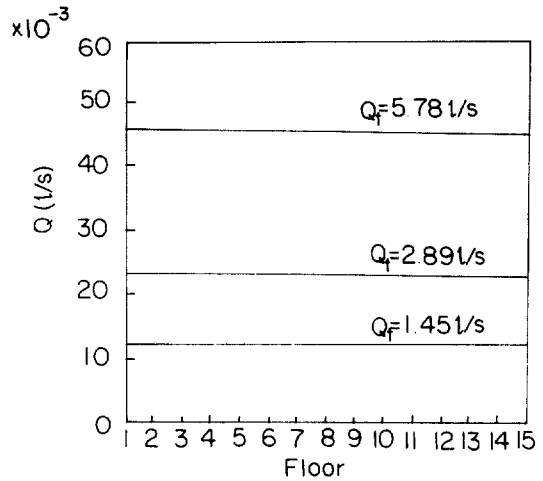


Fig. 21 Distribution of flowrate in single-zone pipe network when the buoyancy effects are ignored

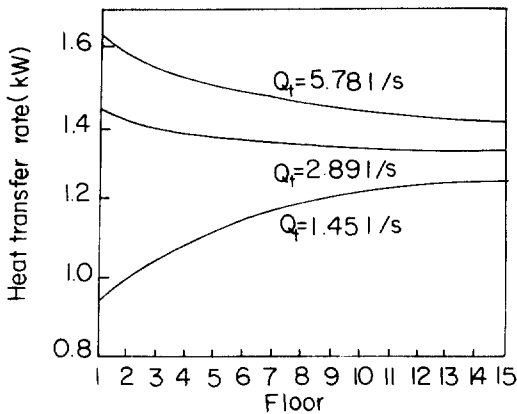


Fig. 20 Distribution of heat flowrate in single-zone pipe network

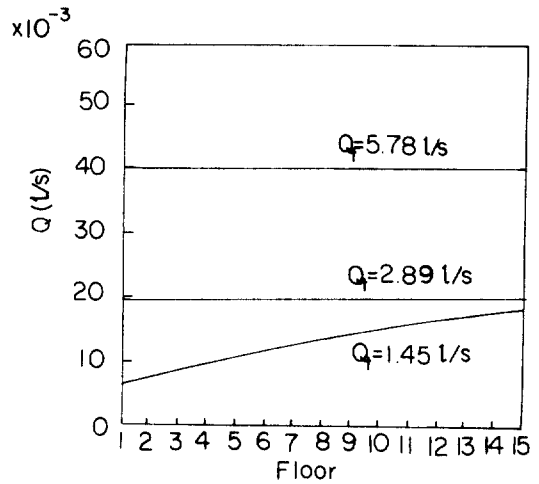


Fig. 22 Distribution of flowrate in single-zone pipe network employed automatic flow control valve

저층으로 내려갈수록 감소함을 알 수 있다.

Fig. 21는 부력효과를 무시하고 단구역 배관망 시스템을 해석하여 얻은 유량분포곡선인데 부력효과를 무시하면 유량분포가 거의 균일하게 나타남을 알 수 있어서 단구역 배관망 시스템에서도 유량분포의 불균일성의 주원인이 부력효과임을 알 수 있다.

위의 결과들에 의하면 펌프용량의 선택이 잘못되어 유량공급이 어느값 이하가 되면 부력효과에 의한 열공급율의 불균일성이 커지게 된다. 따라서 펌프의 선택은 이 현상을 고려해서 하여야 한다.

3.3 정유량조절밸브를 부착한 단구역배관망 시스템

Fig. 22은 펌프공급유량을 5.78 l/s, 2.89 l/s 및 1.45 l/s로 하고 각 세대의 기준유량이 41.7×10^{-3} l/s, 20.3×10^{-3} l/s, 10.2×10^{-3} l/s인 정유량조절밸브를 부착한 단구역 배관망 시스템에서 각 층의 유량분포를 나타내는데 유량이 5.78 l/s, 2.89 l/s인 경우는 기준유량의 $\pm 5\%$ 내에서 유량공급량이 조절되어 층간 유량의 불균일성이 거의 없어진 것을 알 수 있다. 그러나 유량이 1.45 l/s인 경우는 각 세대의 기준유량에서는 층별 유량을 조절하지 못하고 층간 유량의 균일성을 잃고 있

다. 이것은 펌프공급유량이나 양정이 정유량조절밸브에서 요구되는 양 이하로 떨어지면 정유량조절밸브의 조절기능이 없어진다는 것을 의미한다. 따라서 정유량조절밸브를 각 세대에 부착할 때는 일정온수공급을 위해서 적정 펌프용량 선정이 정유량조절 밸브를 사용할 때는 밸브 자체에 의한 마찰손실이 추가되어 펌프동력이 증가되나 이는 정유량조절밸브를 달지 않고 부력효과를 감소시키기 위해 펌프용량을 크게 하여 증가하는 동력 소비의 증가에 비하면 작은 값이 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 공동주택의 난방용 온수를 공급하는 배관망 내 열유동에서 유량, 온도, 전열율 등의 층별 분배 특성을 시뮬레이션하는 전산 프로그램을 개발하고 그 프로그램을 이용하여 다구역 및 단구역의 두가지 배관망에 대한 수치해석으로부터 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

- (1) 단구역 배관망에서는 순환펌프의 송출유량을 감소시키면 각 층의 유량은 최고층에서 가장 크고 저층으로 내려올수록 선형적으로 감소하며 순환펌프의 송출유량이 감소할수록 층별 유량증가의 기울기가 부력으로 인하여 커진다.
- (2) 다구역 배관망에서도 각 구역별로 단구역 배관망에서와 똑같은 유량특성을 갖는다. 즉, 부력효과를 근본적으로 막을 수는 없다.

- (3) 단구역 배관망에서 층별 공급열량의 편중을 해소하기 위해 각 층마다 정유량조절밸브를 사용하는 경우 기준유량의 $\pm 5\%$ 이내에서 공급유량이 조절되어 층별 유량, 온수출구온도, 열공급율의 불균일성이 없어진다. 다만 이때 순환펌프는 어느 정하여진 유량범위 내에 있어야 한다.

참고문헌

- (1) Cross, H., 1936, "Analysis of Flow in Networks of Conduits and Conductor," Univ. Illinois Engr., Expt. sta., Bull. p. 286,
- (2) Shamir, U. and Howard, C. D.D, 1988, "Water Distribution Systems Analysis," J. of Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Jan., pp. 219~234.
- (3) Wood, D.J. and Charles, C. O. A., 1972, "Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory," J. of the Hydraulic Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, July, pp. 1157~1170.
- (4) Lobanoff, V.S. and Ross, R. R., 1985, "Centrifugal Pumps Design and Application," Gulf Publishing Company.
- (5) 이춘식, 1986, "고온용 흡수식 열펌프 개발," 과학기술처 연구보고서, N110-2480-2, pp. 149~164.