

온돌난방제어 시 시스템저항 변화에 따른 유량 밸런싱에 관한 연구

최정민, 이규남, 류성룡, 여명석*, 김광우*

서울대학교 대학원 건축학과, *서울대학교 건축학과

A Study for Flow-rate Balancing when the System Resistance Changes in the Control of the Radiant Floor Heating System

Jeong-Min Choi, Kyu-Nam Lee, Seong-Ryong Ryu, Myoung-Souk Yeo*, Kwang-Woo Kim*

Department of Architecture, Graduate School, Seoul national University, Seoul 151-742, Korea

*Department of Architecture, College of engineering, Seoul national University, Seoul 151-742, Korea

(Received)

ABSTRACT: The behavior of whole system is affected by a minor change of system in the hydronic radiant floor heating system. Under partial load condition, the change of system resistance causes overflow of supply water. This unexpected effect is the cause of several problems in the heating system. In this study, we find some factors of overflow by analyzing a flow rate-headloss relationship. And the effects of these factors were validated with several computer simulations. After validation of this result, several conceptual solutions are evaluated to prevent overflow.

Key word: Hydronic radiant flow heating system (온수온돌난방 시스템), Flow rate balancing(유량밸런싱), Overflow(과유량), Factors of overflow(과유량의 영향인자), Head loss(수두손실), Bypass(바이패스), Readjustment of System resistance(시스템 저항 재조정)

기호설명

h_i : 수두손실 [m]
 v : 유속 [m/s]
 D : 배관내경 [m]
 C : Hazen-Williams 계수
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 Re : Reynolds 수
 R_i : 회로저항 [$m/(kg^2 \cdot s^2)$]
 m_s : 온수분배기 내를 흐르는 유량

ν : 동점성계수 [m^2/s]
 ξ_{bend} : 곡관손실계수
 $\xi_{fitting}$: 접합부 국부저항계수
 ρ : 물의 밀도 [kg/m^3]
 γ : 주관 저항 [$m/(kg^2 \cdot s^2)$]

하첨자

B : Bypass 회로
 i : i 번째 회로
 j : j 번째 회로

그리스 문자

ε : 배관절대조도 [m]

1.서론

† Corresponding author
Tel.: +82-2-880-7353; fax: +82-2-871-5518
E-mail address: msyeo@snu.ac.kr

주거건물의 온수온돌난방 시스템이 점차 복잡해지면서 시스템의 어느 한 부분에서 일어나는 작은 변화가 전체 시스템 변화에 미치는 영향이 증

가하고 있다. 때문에 시스템 구성요소 상호 간의 영향관계를 신중히 고려하지 않으면, 기대하지 않은 결과가 일어나기도 한다. 특히 온수분배기에서 각실 제어 시 부분부하가 발생할 경우, 밸브개폐에 따라 발생하는 회로저항의 증가는 개별 난방회로에 과유량을 유발하기 때문에 시스템은 설계의도와 다른 방식으로 운전된다. 따라서 실온상승 시 자칫 과도한 overshooting이 발생할 수도 있으며, 보일러의 short cycling이나 배관 열화 현상과 같은 시스템 자체의 손상을 유발할 수도 있다. 이에 본 연구에서는 밸브개폐가 과유량 현상에 어떻게 영향을 미치는가를 유량-수두손실 상관관계의 분석을 통해 살펴보고 영향인자 도출 후 시뮬레이션을 통해 검증해보았다. 그리고 도출된 영향인자들을 바탕으로 과유량 현상 해소를 위한 개념적인 대안들을 제시하고자 한다.

2. 예비적 고찰

2.1 온수온돌난방 시스템의 개관

Fig.1 에서 보는 것과 같이 온수온돌난방 시스템은 열원, 펌프, 팽창탱크, 온수분배기 및 온수공급용 배관과 각종 밸브들로 구성되며, 부하발생시 배관을 통해 온수를 공급함으로써 설계실온 유지에 필요한 열량을 각 실에 공급한다. 이 때, 이들 구성요소들은 배관 내 온수흐름을 방해하는 저항을 가지고 있어서 각 실로 공급되는 유량에 영향을 미치게 된다. 한편 한 단위세대 내 부분부하 발생 시, 각 실로 공급되는 유량은 온수분배기 각 구별 밸브를 개폐해서 조절한다.

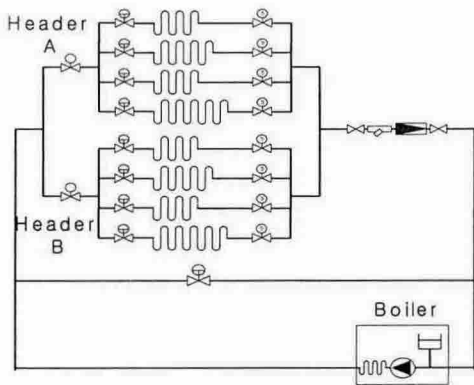


Fig.1 Hydronic radiant floor heating system

2.2 배관 내 수두손실산출과 관련된 식

2.2.1 직관손실(headloss in straight pipe)

직관에서 수두손실을 구하는 방법으로는 Hazen-Williams equation을 이용하는 방법과 Darcy-Weisbach equation을 이용하는 등의 방법이 있다.

Hazen-Williams equation은 경험식이며 그 형태는 식(1)과 같다.

$$h = \left[\frac{v}{0.849 \times \left(\frac{D}{4}\right)^{0.63} \times C} \right]^{1.852} \quad (1)$$

여기서, Hazen-Williams coefficient C값은 배관의 조도를 나타내는 값으로 배관재질의 종류 및 경년에 따라 결정되는 상수이며 온돌난방 배관의 경우 보통 150이 사용된다.

Darcy-Weisbach equation은 이론적인 식으로서 그 형태는 식(2)와 같다.

$$h = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2)$$

여기서 Friction factor f 는 식(3)과 같다.

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right] \right]^2} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 이용하여 정확한 유량을 계산하려면 배관의 상대조도 ϵ 값을 알아야하지만, 이는 현실적으로 불가능하므로, 이러한 이유 때문에 실무에서는 Darcy-Weisbach equation보다는 Hazen-Williams equation이 주로 이용되지만, Hazen-Williams equation의 적용범위는 관경 50mm이상의 배관 내를 속도 3m/s이하로 흐르는 상온의 물에 제한되므로, 난방배관에서 유량안정 시 이를 사용하는 것은 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 직관에서의 마찰손실을 구하는 방법으로 Darcy-Weisbach equation을 이용하였다.

2.2.2 곡관손실(bend loss)과 접합부 손실(fitting loss)

회로 내 설치된 밸브나 tee, elbow 및 90°, 180° bend에서 일어나는 수두손실은 식(4)를 이용하여 구한다.

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

2.2.3 단일회로 내 수두손실

단일회로 내 수두손실은 직관손실과 곡관손실, 그리고 접합부 손실의 합으로 나타낼 수 있으므로, 한 회로에 대한 수두손실은 식(5)의 형태로 표현된다.

$$h_i = \frac{v^2}{2g} \left\{ \left(\frac{fL}{D} \right) + (\sum \xi_{bends}) + (\sum \xi_{fittings}) \right\}$$

$$h_i = R_i m^2 \quad (5)$$

여기서 R_i 는 식(6)과 같다.

$$R_i = \left[\frac{8}{g \rho^2 \pi^2 D^5} \left\{ \left(\frac{fL}{D} \right) + (\sum \xi_{bends}) + (\sum \xi_{fittings}) \right\} \right] \quad (6)$$

3. 각 실 밸브개폐에 따른 시스템의 유량과 압력의 변화

3.1 단일회로에서의 유량-수두손실 상관관계

식(6)에 나타나는 각각의 저항요소들 중, $(\sum \xi_{bend} + \sum \xi_{fittings})$ 는 유량변화에 관계없이 일정하지만, f 는 식(3)에 의해 변화한다.

온수온도가 일정할 때, 단일회로 내를 흐르는 유량이 시스템 내 다른 회로의 밸브가 닫힘에 따라 증가한다면, 관경 D 와 조도 ϵ , 그리고 공급온수의 동점성 계수 ν 가 일정하다고 볼 수 있기 때문에 Reynolds수와 유량 m 은 정비례하므로, Reynolds 수가 증가하게 되고 f 값의 감소로 이어져 결국 회로저항은 감소하게 된다. 하지만 유량은 증가하기 때문에 구체적인 수치가 없다면 식(2)만 가지고 수두손실의 증감을 판단하기는 힘들다. 따라서 유량변화 시 한 회로 내의 수두손실의 변화를 알아보기 위해 식(2)를 Reynolds 수에 관해 미분해 보면 식 (7.a)와 같다.

$$\frac{dh}{dRe} = \frac{d}{dRe} \left(\frac{1.325 L v^2 Re^2}{2g D^5 \left[\ln \left\{ \frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right\} \right]^2} \right)$$

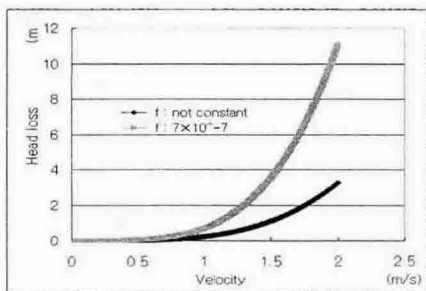


Fig.2 Unit head loss in straight pipe

$$= \left(\frac{2.65 L v^2 Re}{\left[\ln \left\{ \frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right\} \right]^2} \right) \times \Phi(Re) \quad (7.a)$$

여기서,
 $\Phi(Re)$

$$= \left[1 + \frac{5.166}{\left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) Re^{0.9} + 5.74 \right] \left[\ln \left\{ \frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right\} \right]} \right] \quad (7.b)$$

그런데, $\Phi(Re)$ 가 양수이기 때문에 다음 식(8),(9)가 성립한다.

$$\frac{dh}{dRe} > 0 \quad (8)$$

$$\frac{dRe}{dh} = \frac{1}{\left(\frac{dh}{dRe} \right)} > 0 \quad (9)$$

따라서, 단일회로 내의 밸브조작이 없을 때 유량이 증가하면 식(8)과 같이 수두손실이 증가하고 감소하면 수두손실도 감소한다. 수두손실이 증가했다면 식(9)와 같이 유량이 증가한 것이고 수두손실이 감소했다면 유량도 감소한 것이다

Fig.2는 f 를 상수로 했을 때 유속에 대한 수두손실과, f 가 식(3)과 같을 때 식(2)에 의한 유속에 대한 수두손실을 비교한 그림이다. 이 그림은 수두손실 산정 시, f 를 상수로 가정하는 것이 타당하지 않음을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 f 의 값을 고정된 상수가 아닌 유속에 따라 변화하는 값으로 하였다.

3.2 복합회로에서의 유량-수두손실 상관관계

Fig.3과 같이 각 회로별 수동 유량밸런싱 밸브가 설치된 온수분배기에서, 난방조기 모든 방이 설

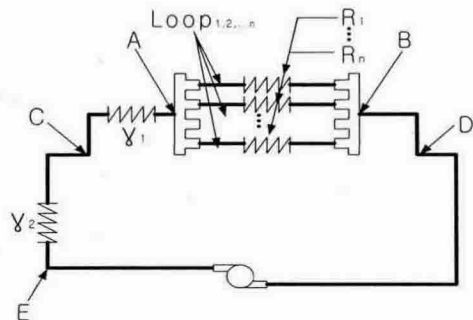


Fig.3 Schematic diagram of hydronic radiant floor heating system

정실은 이하인 상태라 할 때, 일정시간이 흐른 후 어떤 방의 실온이 설정실온에 도달하게 되면, 해당실의 온수공급이 중단된다. 그에 따라 시스템의 총 저항은 증가하게 되고, 시스템 곡선의 기울기도 증가하게 된다. 따라서 시스템 내의 유량은 감소하고 펌프의 양정은 증가한다. Fig.3에서 시스템 전체의 유량은 구간 CE를 흐르는 유량과 동일하므로 식(8)에 의해 γ_2 에 의한 수두손실은 감소한다. 펌프양정이 증가했지만, 구간CE에서의 수두손실은 오히려 감소했기 때문에, C지점과 D지점 사이의 수두차는 이전보다 더 커지게 된다. C와 D의 수두차가 커지면 식(9)에 의해서, 회로 C-R_B-D, 즉 bypass 회로로 흐르는 유량은 증가하게 된다. 한편 전체 유량의 감소 및 bypass회로의 유량증가로 구간 CA를 지나는 유량은 감소하게 되고 식(8)에 의해 γ_1 에 의한 수두손실은 감소하게 된다. 그런데 점 C와 D사이의 수두차는 오히려 커졌기 때문에 점A와 B사이의 수두차도 더 커지게 된다. A와 B는 각 실로 통하는 개별난방회로의 입구와 출구 부분이므로 식(9)에 의해 개별난방회로를 통해 흐른 유량은 증가하게 된다. 결과적으로 수동 유량 밸런싱 적용 시, 회로저항이 증가하면 개별난방회로 내를 흐르는 유량은 증가하게 된다.

Fig.4는 상용관망해석 프로그램인 Flowmaster를 이용해 이와 같은 사실을 확인한 결과이다.

3.3 과유량의 영향인자

첫 번째에서 n번째 개별난방회로 중, 임의의 j (1 ≤ j ≤ n)번째 회로가 닫히더라도, 다른 i번째 회로(i ≠ j) 내를 흐르는 유량은 설계유량으로 유지되어야

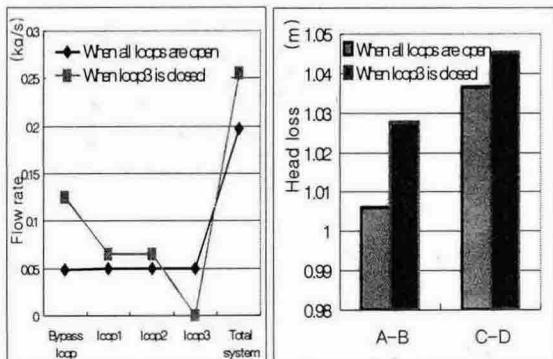


Fig.4 Change of system when loop3 is closed.

유지되어야 하므로 시스템은 식(10)을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\partial m_i}{\partial R_j} = 0 \quad (1 \leq i, j \leq n, i \neq j) \quad (10)$$

한편 개별난방회로 내의 유량은 식(5)에 의해 결정되므로 식(11)이 성립하는 조건에서 설계유량은 유지된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_i}{\partial R_j} &= \frac{\partial}{\partial R_j} \left(\sqrt{\frac{h_i}{R_i}} \right) \\ &= \frac{1}{2\sqrt{R_i h_i}} \left(\frac{\partial h_i}{\partial R_j} - m_i^2 \frac{\partial R_i}{\partial R_j} \right) = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

따라서 j번째 밸브가 닫힐 때, i번째 회로 내 과유량의 영향인자는, i번째 회로 양단의 수두차를 의미하는 $\frac{\partial h_i}{\partial R_j}$ 와 i번째 회로의 저항변화를 의미하는 $\frac{\partial R_i}{\partial R_j}$ 가 된다는 것을 알 수 있다.

즉, 수동 유량밸런싱의 경우, $\frac{\partial h_i}{\partial R_j} > 0$, $\frac{\partial R_i}{\partial R_j} < 0$

이므로, $\frac{\partial m_i}{\partial R_j} > 0$ 이 되어 밸브 시 개별난방회로의 유량은 증가하게 되고 과유량 발생의 위험이 있다.

4. 과유량 현상 해결을 위한 개념적인 대안

4.1 각 회로별 저항을 제조정하는 방법

만일 제어를 통해 $\frac{\partial h_i}{\partial R_j} > 0$, $\frac{\partial R_i}{\partial R_j} > 0$ 가 되도

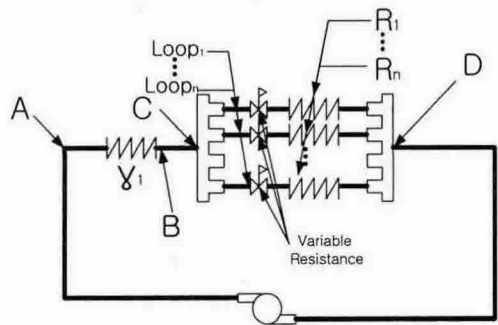


Fig.5 Schematic diagram of first alternative system

록 한다면 시스템은 식(11)을 만족하게 되므로 밸브가 닫힐 때, 발생하는 유량증가를 해소할 수 있다. 즉 이 방식은 Fig.5에서 보는 바와 같이 bypass 회로가 필요하지 않으며, j번째 밸브 차단 시, i번째(i≠j) 회로의 저항을 증가시켜, 회로 내 설계유량의 공급을 유지하는 방식이다. 시스템의 각 개별난방회로에 설계유량이 공급될 때, j번째 회로가 닫히더라도 나머지 회로 내에는 설계유량이 흘러야하므로, 총 시스템 유량 m_s 는 j번째 회로를 제외한 나머지 회로들의 설계유량의 합이 된다.

$$m_s = \sum_{i \neq j} m_i \quad (12)$$

한편 펌프곡선의 방정식을 $h = \Psi(m_s)$ 라 할 때, 펌프의 양정은 점A, B의 수두차와 점C, D의 수두차의 합과 같아야 한다.

$$h = \Psi(m_s) = \gamma_1 m_s^2 + R_i m_i^2 \quad (13)$$

따라서 j번째 회로가 닫혔을 때, i번째 회로 내에 설계유량이 흐르도록 하려면, 회로저항이 식(14)와 같이 되도록 밸런싱 밸브의 개도를 조절하면 된다.

$$R_i = \left\{ \frac{\Phi(m_s) - \gamma_1 m_s^2}{m_i^2} \right\} \quad (14)$$

Fig.6은 Flowmaster를 이용하여 한 회로가 닫혔을 때, 식(14)에서 구한 회로저항으로 유량밸런싱을 한 결과를 나타내고 있다.

이 방식으로 유량밸런싱을 하면 bypass 회로를 별도로 구성하지 않아도 된다. 또한 식(14)를 이용하여 유량밸런싱을 하면, 반복계산을 수행할 필요가 없다. 반면, 유량밸런싱 시, 펌프곡선을 고려해야 하고, 시스템 저항의 상태에 따라 각각의 회로에 연

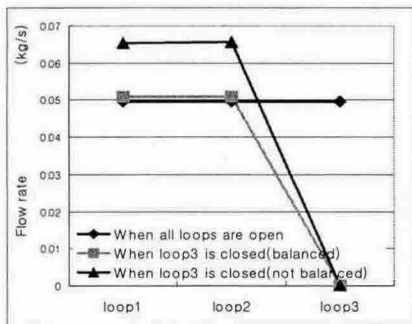


Fig.6 Change of flow rate when system resistance is increased

결된 밸런싱 밸브의 개도를 조절해주는 제어기가 필요하고, 또 각각의 밸런싱 밸브들이 연동해야 하기 때문에 시스템의 복잡성이 증가하고, 따라서 유지 관리적 측면에서는 불리할 수 있다.

4.2 유량 bypass를 하는 방법

만일 제어를 통해 $\frac{\partial h_i}{\partial R_j} = 0, \frac{\partial R_i}{\partial R_j} = 0$ 가 되도록

록 한다면 시스템은 식(11)을 만족하게 되므로 밸브가 닫힐 때, 발생하는 유량증가를 해소할 수 있다. 이 방식은 회로저항이 변하더라도 Fig.7의 C와D지점 사이의 수두차를 일정하게 유지해서 시스템의 저항변화가 나머지 회로에 영향을 미치지 못하도록 하는 것이다. 앞서 3.2절에서 수동 유량밸런싱을 하면 시스템 저항 증가 시 C, D지점의 수두차가 증가한다는 사실을 확인했다. 그런데 만약 밸런싱 밸브의 개도는 처음 상태 그대로 유지하면서, bypass 밸브의 저항을 적절히 줄인다면, C와D지점 사이의 수두차는 처음상태 대로 유지되고, 따라서 시스템의 변화에도 불구하고 개별난방회로에 설계유량을 안정적으로 공급할 수 있게 된다. Fig.7에서 B, E 간의 수두차는 식(15)와 같다.

$$\gamma_1 m_s^2 + h_1 = R_B m_B^2 \quad (15)$$

$$\text{단, } m_s = \sum_{i \neq j} m_i$$

여기서 h_1 은 점 C와 D사이의 수두차로써 처음에 유량밸런싱을 할 때, 수두손실기준인 인덱스 회로의 수두손실 값이다. 한편 펌프곡선의 방정식을 $h = \Psi(m_{system})$ 라고 하면, 두 점 B, E 간의 수두

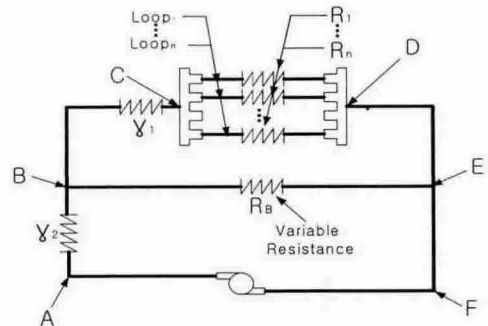


Fig.7 Schematic diagram of second alternative system

차는 식(16)으로 표현된다.

$$\gamma_1 m_s^2 + h_1 = \Psi(m_s + m_B) - \gamma_2(m_s + m_B)^2 \quad (16)$$

따라서 반복계산을 통해 식(16)을 만족하는 m_B 값을 구한 후, 그 값을 식(17)에 대입하면, bypass 회로의 저항인 R_B 값을 구할 수 있다.

$$R_B = \frac{\gamma_1 m_s^2 + h_1}{m_B^2} \quad (17)$$

Fig.8은 Flowmaster를 이용하여 한 회로가 닫혔을 때, 식(17)에서 구한 회로저항을 갖는 bypass 밸브를 설치한 경우의 결과를 나타내고 있다.

이 방식으로 유량밸런싱을 하면 bypass 밸브의 개도만을 제어하면 되므로 시스템이 앞서 4.1절에서 제시한 대안보다 간단해지고 유지관리 측면에서도 유리해지며, 또 밸런싱 밸브의 개도를 처음 상태 그대로 놓아두어도 된다는 장점이 있다. 한편 처음에 유량밸런싱을 할 때도, 펌프곡선을 고려하지 않고 인덱스 회로의 수두손실만을 기준으로 각 회로 별 밸런싱 밸브의 개도를 결정할 수 있다. 하지만 시스템에 별도의 bypass 회로가 필요하고, 식(16)에서 반복계산을 통해 m_B 값을 구해야 한다는 단점이 있다.

5. 결론

한 세대 내 부분부하발생 시, 밸브가 닫힘으로서 일어나는 시스템 저항의 증가는 각 개별난방회로 내 과유량을 유발한다. 그리고 이러한 과유량 현상은 실온상승 시 자칫 과도한 overshooting이 발생할 수도 있으며, 보일러의 short cycling이나 배관 열화 현상과 같은 시스템 자체의 손상을 유

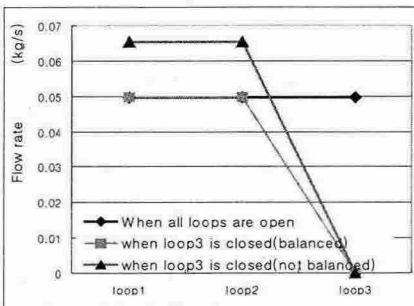


Fig.8 Comparison of flow rate distribution when loop3 is closed.

발할 수도 있다.

(1)밸브개폐가 과유량 현상에 어떻게 영향을 미치는지를 알아보기 위해, 유량-수두손실 상관관계를 분석해 보았다.

(2)영향인자로써 j번째 밸브차단 시, i번째 회로 양단의 수두차 변화인 $\frac{\partial h_i}{\partial R_j}$ 와 회로저항변화인 $\frac{\partial R_i}{\partial R_j}$ 를 도출하였다.

(3)이러한 유량-수두손실 상관관계를 이용하여, 수동 유량밸런싱을 할 경우, bypass를 시킨다고 하더라도 과유량의 증가가 발생함을 살펴보았다.

이에 본 연구에서는 과유량 현상 억제를 위한 개념적인 대안으로써 밸브차단 시, 다른 회로의 저항을 증가시키는 방식과 다른 회로의 양단에 작용하는 수두차를 일정하게 유지하는 방식을 살펴보고 각각의 대안별 회로 저항값을 식(14)와 식(17)을 통해 제시하였다.

후 기

건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C04-01)에 의한 것임

참고문헌

1. Chyr Pyng Liou (1998) "Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation", Journal of Hydraulic Engineering, 1998.9, pp 951-953
2. Eva Romeo, Carlos Royo, Antonio Monzon (2002), "Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes" Chemical Engineering Journal 86, pp 369-374
3. John Siegenthaler (2003), "Modern Hydronic Heating : Regsidential and light commercial buildings" 2nd ed. THOMSOM-DELMAR LEARNING, pp 93-210
4. Jan F.Kreider, Peter S.Curtiss, Ari Rabl (2002), "Heating and Cooling of Buildings : Design for efficiency" 2nd ed. McGraw-Hill, New York, pp.186-221.
5. Golestan, F., (1996), "Automatic balancing valves in distribution networks today", ASHRAE Transactions, 102(2), pp 439-444