

3방 비례제어 조절밸브 개발 및 성능 연구

Development of Three-Way Proportional Control Valve and Performance Study

이중화(Jonghwa Lee)¹, 정택수(Taeksu Jung)¹, 조종두(Chongdu Cho)^{1*}, 김주용(Jooyong Kim)²

¹인하대학교 기계공학과, ²한국지역난방공사 기술연구소

¹Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Republic of Korea

²R&D Institute, Korea District heating Corp, Seoul 135-220, Republic of Korea

(Received December 9, 2013; revision received March 7, 2014; Accepted: March 25, 2014)

Abstract Korea District heating corp. recently give an attention to combine the district heating and supply pipes as a two pipe system that are in the present system separated with room heating and warm water supply pipe, and the two pipe system is commonly applied for heating service in European countries. In the new two pipe system, only one heat source is supplied to a house and partitioned into room heating and warm water supply by household substation. So the effective distribution of supplied heat source in accordance to user intention is very important. This paper presents the development and performance test of three-way proportional control valve for a combined heat source system in district heating. The proposed valve is controlled to partition heat source into two different directions : hot water distributor for space heating and household substation for warm water supply in response to the pressure drops of tap water caused by the user. The performance investigation is shown within 3% of error compared to the theoretical model of the three-way proportional valve and its controllability is verified.

Key words District heating system(지역난방 시스템), 3-way proportional control valve(3방 비례제어밸브), Combined pipe system(통합 배관 시스템)

* Corresponding author, E-mail: cdcho@inha.ac.kr

기호설명

\dot{m} : 유체의 질량유량 [kg/s]
 V : 유체의 유속 [m/s]
 F : 물리적 힘 [N]
 P : 압력 [bar]
 A : 면적 [m²]
 a : 밸브 입력부 반경 [mm]
 θ : 피스톤 경사부 각도 [degree]
 x : 피스톤 축 방향 이동거리 [m]
 ρ : 유체의 밀도 [kg/m³]

상첨자

' : 밸브 입력부 분할

하첨자

I : 밸브 입력부
 1 : Output 1 출력부
 2 : Output 2 출력부
 k : 주 스프링

P : 피스톤 축 방향
 R_x : x축 방향 반력
 R_y : y축 방향 반력
 min : 최소값
 max : 최대값
 c : 압력판

1. 서론

현재 국내의 지역난방은 1980년대 중반에 도입되기 시작하여 주로 아파트단지를 중심으로 확대 보급되어 2010년 말 현재 약 200만 세대, 보급률 13.5%를 달성하였다.⁽¹⁾ 그러나 대규모 수용가를 대상으로 한 광역 배관망을 통해 열 에너지를 공급하는 과정에서 발생하는 열 손실을 최소화 하여 시스템 경쟁력을 유지시키는 방안에 대한 해결책은 아직 확실하지 않으며, 특히 상대적으로 열 손실에 대한 대비책 및 체계적인 관리 부재로 전체 시스템의 효율을 저하시키는 2차 축 열 배관에 대한 개선 기술 마련은 미흡한 실정이다.^(2,4)

현재 지역난방 공급을 받고 있는 아파트단지 내 열수송 방식은 난방과 급탕의 공급 및 환수 배관으로 구성되는 4-pipe 시스템이며, 이는 유럽 등지에서 적용되고 있는 2-pipe(통합 배관) 시스템에 대비 배관망의 열손실 측면에서 불리한 것으로 알려져 있다.

각 세대로 난방, 급탕용의 온수를 공급하는 입상관을 단일 배관으로 통합하는 2-pipe(통합 배관) 시스템의 특성 상, 시스템의 정상 동작을 위해서는 세대로 인입되는 단일 온수를 난방용과 급탕용으로 분기시키는 기능을 수행하는 밸브의 설치가 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 난방, 급탕용의 온수를 공급하는 입상관이 단일 배관으로 통합된 ‘통합 배관 시스템’에 적용 가능한 3방향 난방, 급탕 비례제어 밸브의 국내 고유모델 개발을 목적으로 하고 있으며, 이를 위해 기계식으로 작동하는 밸브의 형상 모델이 제안되었고, 해당 형상에 대한 이론적 검증 및 실험을 통해 그 성능이 평가되었다.

2. 밸브 구조 및 작동원리

2.1 밸브 구조

밸브의 구조는 Fig. 1과 같이 크게 상단부(a), 중단부(b), 하단부(c)로 구분할 수 있다.

상단부(a)는 T-배관형 전면부 몸체와 피스톤으로 구성되어 있다. 전면부 몸체는 Fluid A의 입력부 한 개와 출력부 두 개로 구성되어 있으며 피스톤은 입력된 Fluid A의 물리적 유로 분배가 가능토록 사선의 경사면으로 설계하였다.

하단부(c)는 후면부 몸체, 압력판과 시동스프링으로 구성되어 있다. 압력판은 후면부 몸체에 의하여 유지되는 Fluid B의 압력에 따라 동작하며 시동스프링은 밸브 초기 동작시 구동력을 발생시킨다.

중단부(b)는 주 스프링과 샤프트로 구성되어 있다. 주 스프링은 Fluid A와 Fluid B의 압력 차이를 보정하여 Fluid B의 압력에 따라서 결과적으로 Fluid A의 Output 1과 Output 2로 출력되는 유량의 비례제어가 가능하도록 피스톤의 위치를 유지하고 키는 피스톤의 동작범위 이탈 방지를 위하여 주 스프링과 피스톤의 최대 변위를 제한한다.

2.2 밸브 작동 원리

Fig. 2는 밸브의 기본 동작 원리를 나타낸다. 초기 밸브는 Fluid B의 압력이 최대이며 피스톤이 최상단에 위치한 상태이다. Fluid B의 압력 변화에 따라 피스톤이 상하로 움직이며 Fluid A의 유로를 비례적으로 제어한다.

Fluid A Output 1은 초기 Fluid B의 압력에 의하여

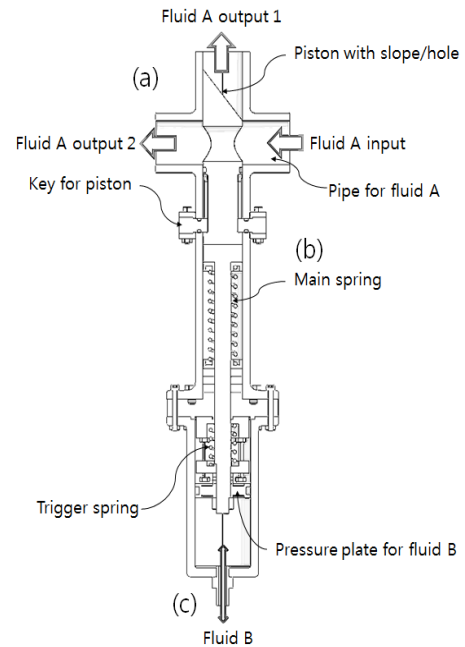


Fig. 1 3-way proportional control valve.

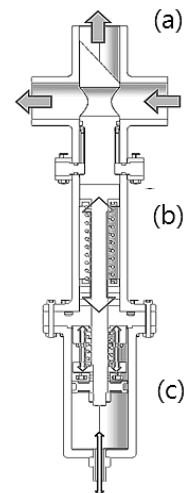


Fig. 2 Schematic model of 3-way valve.

피스톤은 최상단에 위치한 상태에서 피스톤에 의하여 막혀있어 Fluid A는 Fig. 1의 (a)에 표시된 내용과 같이 Fluid A output 2로 전량 출력된다. 밸브 경사면에 흐르는 유체가 없으므로 밸브 경사면에 작용하는 힘이 없으며 Fluid A의 유동은 밸브의 구동에 영향을 미치지 않는다.

Fig. 1의 (c)에 표기된 Fluid B의 압력이 감소되면 초기에 압축되어있던 시동 스프링의 동작에 의하여 밸브 초기 구동을 위한 구동력이 발생하여 피스톤이 밸브 하단 방향으로 이동하게 된다. 피스톤의 경사면에 의

하여 Fluid A의 입력부 면적이 분할됨에 따라 초기 Fluid A 유량 전량이 Output 2로 출력되는 상태에서 피스톤의 경사면에 의하여 일부 Fluid A의 유량이 Fluid B의 압력 감소량에 비례적으로 Output 1로 출력되며, 이에 따라 Fluid A의 압력에 의한 힘과 피스톤의 경사면을 따라 흐르는 질량유량에 의한 힘이 피스톤의 경사면에 작용하게 된다. Fluid B의 압력 감소량이 커짐에 따라 피스톤의 하단방향 변위는 비례적으로 증가하며, 피스톤의 변위가 증가할수록 피스톤의 경사면에 의하여 Fluid A의 입력부의 면적이 비례적으로 Fluid A Output 2에서 Output 1로 증가하므로 Fluid A Output 1로 출력되는 질량유량이 증가한다. 이때 Fig. 2의 (b)에 설치된 주 스프링의 힘과 (c)에 설치된 압력판에 작용하는 Fluid B의 힘과 (a)의 Fluid A의 압력에 의하여 피스톤의 빗면에 작용하는 힘이 평형을 이루는 위치에서 피스톤이 정지하게 된다.

Fluid B의 압력이 최소로 감소하면 피스톤의 하단방향 변위는 최대가 되며 Fig. 1의 (b)에 설치된 키에 의하여 피스톤의 위치는 최대 변위로 고정된다. 피스톤이 최대 변위에 위치할 때, 피스톤의 경사면에 의하여 Fluid A Output 2는 닫히게 되며 입력되는 Fluid A 유량은 전량 Fluid A Output 1로 출력된다.

결과적으로 Fluid B의 압력 감소 정도에 따라서 비례적으로 피스톤의 위치가 결정되며 피스톤의 위치에 따라서 Output 1과 Output 2로 출력되는 Fluid A의 유량이 비례적으로 제어된다.

3. 밸브의 수학적 모델

작동원리에서 설명한 내용과 같이 밸브 상단부에서 빗면에 작용하는 Fluid A의 질량유량에 대한 반력과 Fluid A의 공급 압력은 피스톤을 후단부로 미는 방향으로 작용하며 이는 Fig. 2와 같이 Fluid B의 압력과 주 스프링에 의한 힘의 합력과 같다.

Fluid A 입력부는 밸브 내부의 피스톤에 의하여 입구 A_i 의 면적이 출구 A_1, A_2 로 나뉘는 원형 파이프로 단순화할 수 있다. Fluid A 입력부에서 입력되는 유량을 \dot{m}_i 라 하고 피스톤의 경사면에 의하여 Fluid A Output 1과 Output 2로 분배되는 유량을 각각 \dot{m}_1, \dot{m}_2 라 하면 질량보존법칙에 의하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_i = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (1)$$

질량유량 \dot{m} 은 밀도 ρ 와 단면적 A 와 속도 V 의 곱으로 표현할 수 있으며 밸브 입력부 면적 A_i 에서는 A_1 와 A_2 와 관계없이 속도 V_i 는 일정하다. 질량보존법칙에 의하여 밸브 입력부 분할 면적 A_1' 을 통하여 흐르는

Fluid A의 질량유량 \dot{m}_1' 은 Output 1의 질량유량 \dot{m}_1 과 동일하므로 아래와 같이 Fluid A Output 1과 Output 2의 유속 V_1, V_2 의 관계식을 구할 수 있다.

$$V_1 = \frac{A_1' V_1'}{A_1}, \quad V_2 = \frac{A_2' V_2'}{A_2} \quad (2)$$

Fig. 3과 같이 원형 입구 A_i 의 면적이 피스톤의 변위가 x 일 때, 피스톤의 경사면에 의하여 나뉘는 면적 A_p 에 대한 A_1' 과 A_2' 의 면적은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$A_p = (x-a) \sqrt{2ax-x^2+a^2} \cos^{-1} \left(\frac{a-x}{a} \right) \quad (3)$$

$$A_1' = A_p, \quad A_2' = A_i - A_p \quad (4)$$

식(4)와 같이 밸브 입구 A_i 는 A_1' 과 A_2' 의 면적의 합이므로 밸브 입력부 압력 P_i 은 P_1' 과 P_2' 에 대하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_i = P_1' = P_2' \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 'Bernoulli 방정식'에 적용하여 Fluid A output 1의 압력 P_1 과 output 2의 압력 P_2 에 대하여 정리하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = P_i + \frac{\rho V_1'^2}{2} - \frac{\rho V_1^2}{2} \quad (6)$$

$$P_2 = P_i + \frac{\rho V_2'^2}{2} - \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (7)$$

Fig. 4와 같이 Fluid A 입력부의 유량이 Fluid A Output 1과 Output 2로 비례제어 되는 과정에서 피스톤 경사면에 흐르는 Fluid A의 질량유량에 의하여 θ 만큼 기울어진 피스톤의 경사면에 반력이 발생하며 이는 운동량 보존법칙을 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Rx} = \dot{m}_1 V_1 \sin \theta \quad (8)$$

$$F_{Ry} = \dot{m}_1 V_1 \cos \theta + \dot{m}_1' V_1' \quad (9)$$

위 식(8)과 식(9)를 이용하여 피스톤의 경사면에 작용하는 압력 중 피스톤의 축 방향으로 작용하는 힘은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F_p = P_1 A_i \tan \theta \quad (10)$$

이와 같이 피스톤에 Fluid A 질량유량 \dot{m} 에 의하여

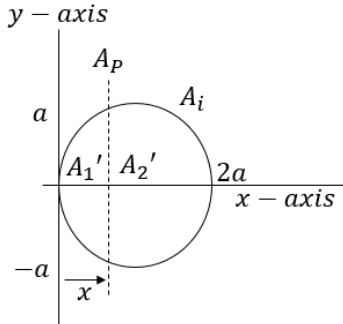


Fig. 3 New area divided by piston.

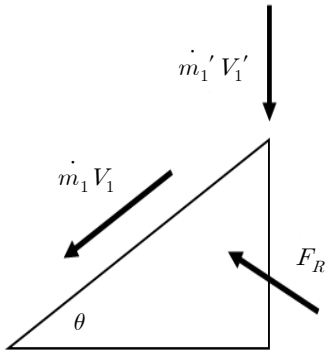


Fig. 4 Conservation of momentum and Reaction force.

피스톤에 x축 방향으로 작용하는 반력 F_{Rx} , Fluid A의 압력에 의하여 피스톤 축 방향으로 작용하는 힘 F_P , 주 스프링에 의한 힘 F_k 과 Fluid B의 최대, 최소 압력 P_{max} , P_{min} 과 압력관의 면적 A_c 에 의하여 형성되는 실린더 내부에 작용하는 힘에 의하여 피스톤의 위치가 결정된다. 밸브 구동 중 기계적인 접촉으로 인하여 마찰력이 발생하나 실험결과 밸브 초기 구동 외 전반적인 동작에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되어 마찰 요소는 수식에서 제외하였다. 결과적으로 피스톤의 위치결정은 입력되는 Fluid A의 유로를 비례제어하며 힘 평형식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$F_{Rx} + F_P + F_k = -\frac{P_{max}A_c - P_{min}A_c}{2a}x + P_{max}A_c \quad (11)$$

앞서 작동원리에서 설명한 내용과 같이, 본 연구에서 제안한 3방 비례제어 밸브는 Fluid A와 Fluid B의 압력 차를 이용하여 내부 피스톤의 위치제어로 Fluid A 유량의 비례제어를 유도하였다. Fig. 5는 식(6)에 Table 1의 값을 대입한 결과로부터 피스톤의 위치에 따라 필요한 이론적인 스프링 힘을 도식화한 것으로, 초기 동작을 위한 힘과 밸브의 비례 유량 제어를 위한 힘의 방향이

Table 1 Specification of the valve

a	A_c	A_i	θ	P_{max}	P_{min}	P_i	V_i
12.5	687	491	40.0	3.0	0.0	6.0	0.45
mm	mm ²	mm ²	°	bar	bar	bar	m/s

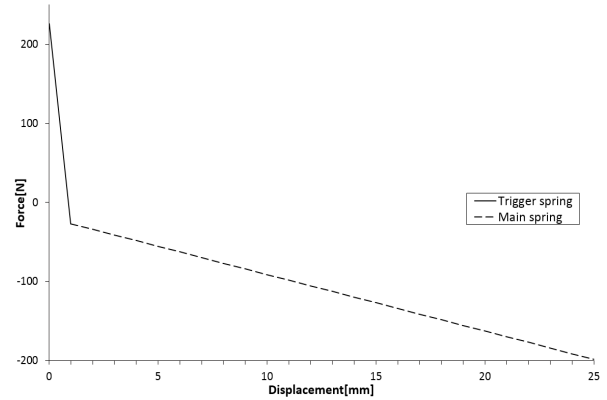


Fig. 5 Necessary trigger/main spring pressure for proportional operation by Fluid B.

반대인 것을 확인할 수 있다.

Table 1의 설계 기준 선정 배경은 다음과 같다. 밸브는 25 A 배관에 설치 가능하도록 설계되었으며 피스톤의 경사각은 가공 및 밸브 조립의 용이성과 Output 1과 Output 2로 1 : 1의 유량 분배 가능성을 고려하여 45°보다 작은 40°로 설계하였다. 건축 시공 규정에 따라서 압력 P_{max} 와 P_{min} 을 선정하였다.

본 연구에서 실험한 밸브에서는 앞서 설명한 이론식에 따라 시동스프링과 주 스프링을 설계하여 초기 시동에 필요한 힘과 밸브의 비례 제어에 필요한 힘을 형성하였다.

4. 실험 장치 및 방법

설치된 실험 장치의 개형은 Fig. 6과 같으며 Fig. 7과 같이 CAD를 통하여 실험 장비를 구체화 하였다.

Fig. 7과 같이 실험 장비는 압력 및 유량 조건에 맞는 Fluid A의 공급을 위한 ①저유량 고양정 회전마찰 펌프, Fluid A의 ②저장 탱크, 밸브의 입력 및 출력유량 측정을 위한 ③유량 센서, Fluid B의 ④가압장치와 ⑤3방 비례제어 조절밸브로 구성되어 실험을 진행하였다.

①펌프와 ④가압장치에 의하여 통합배관 시스템 환경에 맞게 Table 2의 조건으로 Fluid A와 Fluid B를 공급하며 이후 Fluid B의 압력을 조절하였을 때, Fluid A의 유량이 Output 1과 Output 2로 비례 제어되어 출력되는 양을 측정하여 밸브 성능 및 신뢰성 실험을 진행하였다.

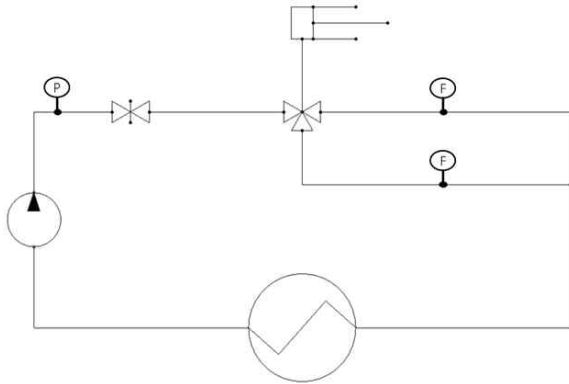


Fig. 6 Schematic diagram of valve testing device.

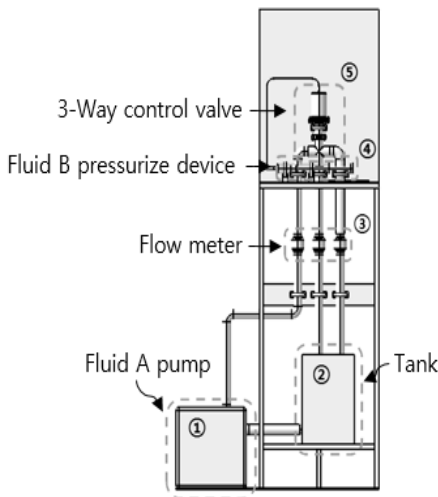


Fig. 7 CAD modeling of testing device.

Table 2 Valve testing circumstance

	P_i [bar]	\dot{m} [LPM]	$2a$ [mm]
Fluid A	6	6.08	20
Fluid B	3	3.3	15

5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8과 같이 밸브의 비례 유량 제어 실험 결과 이론식과 같이 Fluid B의 압력 감소 정도에 비례하여 Fluid A의 유량이 output 1과 output 2로 출력되는 결과를 확인할 수 있었다.

유량 센서의 측정 오차는 $\pm 2\%$ 이며 Fluid B의 압력은 0.2 bar 간격으로 총 14개로 구분하여 압력별 100회씩 반복 실험을 진행하였다.

실험 결과 Fluid B의 압력이 감소함에 따라서 출력되는 Fluid A의 유량이 이론식과 같이 Fluid B의 압력

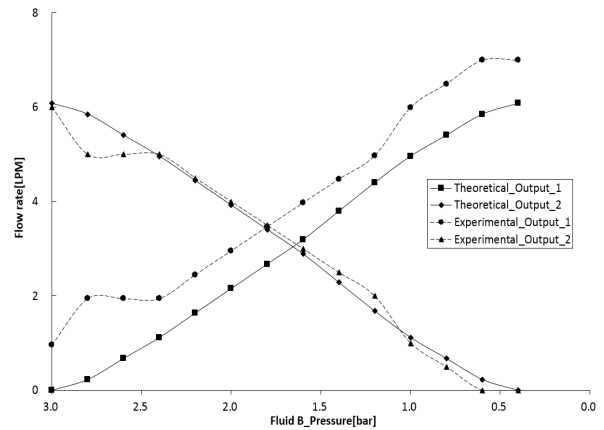


Fig. 8 Comparison of experimental result and theoretical analysis.

변화 전 구간에서 완벽한 선형 비례 제어가 아닌 밸브 동작 시작 부분과 끝 부분, 일부 구간에서 마찰에 의한 영향으로 비선형 거동을 하는 것이 확인되었다. 실험은 Fluid B의 압력을 최대 3.0 bar에서 최소 0.0 bar까지 변화시키며 진행하였으며 이론식 상 Fluid B의 압력이 약 1.7 bar에서 Fluid A output 1과 output 2의 출력 유량이 1 : 1로 동일하며 이후 증가와 감소 추세를 나타내지만, 실험 결과 Fluid B의 압력이 약 1.8 bar일 때 Fluid A output 1과 output 2의 출력 유량 값이 교차된 후 증가와 감소하는 경향을 나타내었다.

실험결과와 이론식과 비교하여 약 3%의 오차가 발생하였으며 오차 원인으로 유량 센서의 측정 오차와 더불어 이론적인 Fluid A의 공급 압력 및 공급 유량 경계조건을 실험장비에서 구현하는 과정에서 실험장비 중 회전마찰 펌프의 특성상 동일한 압력 및 유량으로 출력되는 것이 아니라 실험 결과 압력 부분은 약 $\pm 0.2 \sim 0.3$ bar의 편차가, 유량 부분은 약 ± 0.5 LPM의 편차가 있어 완벽히 일치하는 조건을 만족시킬 수 없어 오차가 발생한 것으로 분석된다.

6. 결 론

본 연구에서는 지역난방 통합 배관 시스템의 2차 측의 유량 분배에 사용 가능한 기계식 3방 유량 제어 밸브를 국산화 개발한 제품에 대한 제품 제작 및 실험을 통하여 밸브의 유동 특성을 파악하였다. 개발된 밸브의 실험 결과에 따르면 통합 배관 시스템이 적용된 환경 하에서 밸브는 시스템에서 요구하는 대로 Fluid B의 압력 변화에 따라서 피스톤의 위치는 Fluid B의 압력에 대하여 비례적으로 이동하여 결과적으로 Fluid B의 압력에 약 3% 오차 내에서 Fluid A의 유량을 Output 1과 Output 2로 분배하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 대한설비공학회 2013년 동계학술발표대회에서 발표된 동명의 논문을 기반으로 하였으며, 한국지역난방공사의 연구 지원 하에 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

Reference

1. Park, R. Y., 2011, The best environment-friendly energy company, Proceedings of the SAPA, Winter Conference, pp. 541-553.
2. Kim, Y. E., Park, B. S., Kim, H. J., and Im, Y. H., 2011, Hot-water circulation flow rate in thermal energy efficiency at the apartment, Proceedings of the Korea Society for Energy engineering Autumn Conference, p. 193.
3. Schmitt, F., Hoffmann, H. W., and Göhler, T., 2005, Strategies to manage heat losses-technique and economy, Sittard Novem.
4. Olsen, P. K., Lambertsen, H., Hummaelshøj, R., Bøhm, B., Christianse, C. H., Svendsen, S., Larsen, C. T., and Worm, J., 2008, A new low-temperature district heating system for low-energy buildings, Proceedings, The 11th International Symposium on District Heating and Cooling, Iceland.