

가정용 난방 시스템의 유량 불균형 완화를 위한 다단오리피스 밸런서 개발 및 성능평가

Development and Performance Evaluation of a Multi-stage Orifice Balancer for Mitigating Flow Imbalance in Residential Heating Systems

윤영원*

Young-Won Yun*

Abstract

This study aims to develop a Balancer, a compact flow-balancing device designed to be inserted between heating manifolds and coils, to achieve hydraulic equilibrium in residential heating systems without structural modifications. The Balancer was engineered using multi-stage orifice flow equations, featuring a simplified structure that alternates between single-hole and multi-hole orifices to provide precise flow control. To verify its effectiveness, experiments were conducted using a 4-port manifold connected to heating coils of significantly different lengths (70 m and 7 m), measuring flow distribution uniformity and pressure drop under various flow conditions. Experimental results showed that without the Balancer, the relative flow distribution error reached up to 26% due to the resistance imbalance caused by differing coil lengths. However, with the Balancer installed, this error was significantly reduced to within $\pm 3\%$ range. This confirms that creating a device-induced pressure drop greater than the coil's inherent resistance effectively minimizes the impact of coil length variations on the overall system.

Keywords: Flow Distribution Uniformity, Balancer, Multi-Stage Orifices, Water Distribution Manifolds, Hydraulic Equilibrium

1. 서론

유체를 다수의 경로로 분할하여 공급하는 유체 분배 장치는 에너지 전달과 자원 배분의 효율성을 결정짓는 핵심 설비이다. 이는 냉난방 공조(HVAC) 시스템을 비롯하여 산업용 플랜트, 수처리 시설 등 다양한 산업 분야에서 유체 흐름의 체계적인 제어 및 관리를 위해 광범위하게 적용되고 있다. 특히, 주거용 건축물에서는 보일러나 지역난방으로부터 공급

되는 온수를 각 실별 부하에 맞춰 적절히 배분함으로써 실내 쾌적성을 확보하고 열원 에너지의 효율적 이용을 도모하는 중추적인 역할을 수행한다(이경희·이준기, 2021; 김승훈 외, 2024).

난방 분배기를 통한 실별 균등 유량 배분은 거주자의 열쾌적성 향상은 물론, 시스템 전반의 에너지 효율 제고 및 설비 수명 연장과 직결되는 핵심 요소이다. 만약 유량 분배가 적절히 이루어지지 않을 경우, 특정 구역에 열공급이 편중되는 편난방 현상이 발생

* (주)한국지앤씨 대표·공학박사(kgnc@kgnc.co.kr)

하게 된다. 이는 불필요한 열에너지 소비를 조장할 뿐만 아니라, 순환 펌프 등 주요 구성 부품에 과도한 부하를 유발하여 장비의 내구성을 저하시키고 유지 관리 비용을 상승시키는 원인이 된다(Rhee et al., 2011).

그러나 실별 면적 차이에 따른 난방 코일의 길이 및 매니폴드 설치 위치에 따른 관로 저항의 불균형으로 인해 실제 현장에서는 불균일한 유량 공급 문제가 빈번히 발생하고 있다.

이러한 문제를 해소하기 위해 최근 실온 조절기와 연동된 자동 온·오프(On-Off) 밸브나 고가의 비례 제어 구동기가 적용된 시스템 분배기의 보급이 확대되고 있으나, 이는 각 실별 배관 경로의 차이로 발생하는 근본적인 수력학적 불균형(Hydraulic Imbalance)을 해결하기 위한 물리적 환경을 제공하지는 못한다. 즉, 시스템 분배기 역시 각 회로별 균일한 난방수 배분이라는 물리적 전제 조건이 충족될 때 비로소 제어 성능을 극대화할 수 있다(성순경, 2008).

유량 불균형 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 이는 크게 매니폴드(Manifold)의 형상 최적화를 통한 분배 성능 개선과 고기능성 제어 밸브 개발에 관한 연구로 구분할 수 있다.

우선 분배기 형상에 관한 연구를 살펴보면, Min et al.(2016)은 매니폴드 내부에 배플(Baffles)을 설치하여 물 분배 특성을 수치 해석 및 실험적으로 규명하였다. Hassan et al.(2014)은 원형 단면 헤더보다 유량 분포 특성이 우수한 테이퍼형 단면 헤더 설계를 제안하였으며, Chen and Sparrow(2009)은 출구 포트의 기하학적 형상이 질량 유량의 균일성에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, Said et al.(2015)은 단일 오리피스스를 적용하여 유량 불균일성을 완화하는 방안을 제시한 바 있다.

밸브 개발 분야에서는 윤준용·권우철(2007)이 스트레이너 일체형 자동 정유량 조절 밸브를 개발하여 성능을 검증하였고, 이태원·김용기(2004)는 형상

기억합금 소자를 활용해 온도에 따라 개폐되는 지능형 유량제어 밸브를 제안하였다. 아울러 권우철 외(2010)는 밸브 디스크와 시트를 일체화한 유량 밸런싱 밸브를 개발함으로써, 각 실별 코일 길이 차이에도 불구하고 정밀한 유량 배분이 가능함을 입증하였다.

그러나 분배기 형상 최적화는 현장마다 다른 배관 경로에 맞춰 개별 제작해야 하므로 실용성이 떨어지며, 고기능성 밸브 방식은 구조적 복잡성으로 인해 유지관리가 어렵고 초기 설치 비용이 높다는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 기존 시스템의 구조를 변경하지 않고도 수력학적 평형을 구현할 수 있도록 분배기 출구와 난방 코일 연결부에 삽입하는 간소화된 배관 연결 장치인 밸런서를 개발하였다. 본 장치는 오리피스 유량 방정식을 기반으로 관로 저항에 맞춰 오리피스 수량을 가변적으로 적용함으로써 정밀한 유량 제어가 가능하도록 설계되었다. 특히 경험적 수식에 기반한 최적 오리피스 설계와 플러그 삽입형 구조를 채택하여, 기존 밸브 방식보다 경제적이며 시공 현장에서의 실무 적용성 또한 향상시켰다.

현재 국내 주거용 건축물의 주된 열원인 도시가스는 주거 부문 탄소 배출의 주요 원인으로 지목되고 있다. 글로벌 기후 위기 대응과 국가 탄소중립 목표 달성을 위해 건축물 에너지 소비에 대한 규제가 강화되는 시점에서, 효율적인 난방수 분배를 통한 에너지 효율화 기술의 중요성은 점차 증대되고 있다.

본 기술은 공동주택의 고질적인 문제인 편난방을 근본적으로 해소하고 에너지 낭비를 최소화함으로써, 실질적인 에너지 절감과 국가적 탄소중립 정책 기여라는 환경적 가치를 동시에 창출할 것으로 기대된다.

2. 다단오리피스 밸런서

이 장에서는 다단오리피스 형태의 부품을 설계한 내용을 다룬다. 일반적인 다단오리피스는 압력회복

을 위해 오리피스 단에 충분한 간격을 두고 오리피스 플레이트에 여러 개의 다공을 형성한 형태이다. 오리피스 단을 통과할 때 압력강하가 발생하고 단계별로 압력을 감압시켜 발전산업, 석유 및 가스, 화학 및 수처리, 그리고 일반 산업플랜트 산업에 많이 활용되고 있다(신정철, 2015; Vekar et al., 2013; Ahmed et al., 2023).

이와 달리 본 연구에서 설계한 다단오리피스 형태는 오리피스 단의 간격이 짧고 홀수 번째 오리피스는 단일 홀을 형성하고 짝수 번째 오리피스는 홀수 번째 오리피스 단일 홀 면적의 1/4인 네 개의 오리피스 홀을 형성하여 교차 나열한 형태이다.

설계에 앞서 아래와 같이 네 가지 가정을 하였다.

- (1) 홀수 번째 오리피스는 단일 홀이고 짝수 번째 오리피스는 다공 홀이지만 유량계수(discharge coefficient)가 각 단에 모두 동일하다.

$$C_{d, single} = C_{d, multi}$$

여기서, $C_{d, single}$ 는 단일 홀 오리피스의 유량계수, 그리고 $C_{d, multi}$ 는 짝수 번째인 다공 홀에서의 유량계수이다.

일반적으로 유량계수는 배관 및 오리피스의 직경비와 레이놀즈 수(Re)에 의해 결정되며, 레이놀즈 수가 충분히 큰 영역에서는 특정 값에 수렴하는 특성을 갖는다. 본 연구의 운전 조건인 $Re \geq 5,000$ 범위는 유량계수의 수렴 특성이 나타나는 구간에 해당한다. 선행 문헌에 따르면, 배관 내경에 대한 오리피스 직경비(β)가 0.2 및 0.4 일 때 유량계수는 약 0.6에서 0.7 사이의 일정한 값을 유지하는 것으로 알려져 있다(Hollingshead et al., 2011; Hutagalung, 2019; Martins et al., 2021; Wu et al., 2002).

- (2) 비압축성 유동으로 밀도($\rho = constant$)가 일정하고 다단오리피스를 통과하는 유체는 정상 상태 유동 특성($\partial/\partial t = 0$)이다. 시간에 따른 유동 특성 변화, 즉 온도, 압력 그리고 유량이 변화가 무시할 수 있을 만큼 작고 사용 유체는 물인 뉴턴 유체이며 실험범위의 온도변화($18^{\circ}C \sim 25^{\circ}C$)에 따른 밀도 변화가 1% 미만이기 때문에 비압축성으로 간주하였다.

- (3) 전체 필요한 압력 강하가 각 오리피스 단계에 걸쳐 일정하거나 또는 의도적으로 분산된다. 압력 강하가 특정 단계 편중되지 않고 동일한 면적으로 균등한 압력 강하 배분을 실현하기 위해 교차로 배치하였다.

- (4) 코일 저항보다 큰 압력강하를 설계함으로 코일 길이 차이로 인한 저항 변동성은 전체 시스템 저항에 미치는 영향이 최소화된다.

$$\Delta p_{total} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i + \Delta p_{coil}, \sum_{i=1}^n \Delta p_i \geq \Delta p_{coil}$$

여기서, Δp_{total} 는 분배기 입구 압력과 코일 저항에 의한 출구 압력의 차압, Δp_i 오리피스 단 전체의 압력강하, Δp_{coil} 코일 길이에 의한 마찰손실, 그리고 n 은 분배기 회로 수이다.

2.1 밸런서 설계

난류유동에서 사용되는 유량방정식은 베르누이 방정식과 연속방정식으로 식 (1)과 같이 유도된다(Merritt, 1967).

$$Q = C_d A_0 \sqrt{(2\rho/\gamma)\Delta p} \quad (1)$$

이 식 (1)을 식 (2)와 (3)과 같이 다시 단순하게 표현할 수 있다.

$$Q = K\sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

$$K = C_d A_0 \sqrt{2\rho/\gamma} \quad (3)$$

여기서, Q 는 오리피스 통과 유량, C_d 는 유량계수, $\Delta p = p_1 - p_2$ 는 입구압력 p_1 과 출구압력 p_2 의 차인 압력강하, ρ 는 유체의 밀도, γ 는 유체의 비중량, A_0 는 오리피스 면적, 그리고 K 는 경험적 유량 상수이다.

식 (2)의 양변을 제곱하여 다시 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\Delta p / Q^2 = (1/K)^2 \quad (4)$$

경험적 유량 상수는 가정 (1)과 경험치를 반영하여 상수로 다룬다. 원하는 압력강하와 통과유량이 결정되면 식 (4)의 좌변을 구할 수 있고 식 (4)의 우변은 그 값을 얻기 위한 경험적 유량 상수를 결정하면 된다. 다단오리피스 설계를 위해 식 (4)를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha / \beta = N_{eq} \quad (5)$$

여기서 $\alpha = \Delta p / Q^2$ 는 오리피스를 통과한 실제 유동 저항을 나타내는 계수, $\beta = (1/K)^2$ 는 오리피스 설계 면적과 유체 물리량을 통해 요구되는 설계 목표저항을 나타내는 계수, 그리고 N_{eq} 은 등가 저항계수이다.

이 등가 저항 계수는 실제 유동 저항 계수를 얻기 위해 설계 목표 저항 계수의 몇 배의 유동 저항을 요구하는지를 나타내는 계수로 정의한다고 할 수 있다.

예로 N_{eq} 가 4인 경우 4배가 되는 물리적 단수가 결정되므로 4단의 오리피스를 결정하게 되고 정수가 아닌 소숫점 형태로 표현될 경우 소숫점 이하의 영향을 보상해 주기 위해 보정단이 필요하다.

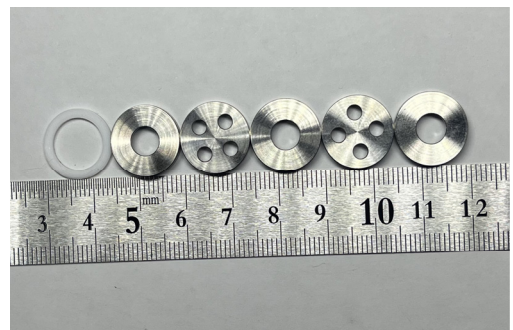
정리하면 식 (5)의 등가 저항 계수로 다단오리피스 단수를 설계할 수 있다.

2.2 밸런서 실험

본 연구를 위해 제작한 밸런서를 Fig. 1(a)에 나타내었고, Fig. 1(b)는 분해한 그림이다. 제작에 있어 ISO 5167을 참고하여 사용 파이프 내경, $D_{pipe} = 15\text{mm}$ 와 직경비, β 를 $0.2 < \beta < 0.4$ 범위로 하여 오리피스 직경을 $d_o = 6\text{mm}$ 로 하였다. 단일 홀과 다공 홀을 교차로 배치하여 반복적인 유량 통과 과정을 통해 에너지 손실의 변동성을 평균화함으로써 실제 저항값에 대한 높은 재현성을 확보할 수 있도록 설계하였다. 실제 유동저항 계수는 압력강하와 필요 유량을 각각 $40,000\text{Pa}$, $7.5e^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ 로 하여 계산하였고 이 값을 얻기 위한 설계 목표저항 계수는 밀도, 비중량을 각각 $1,000\text{kg}/\text{m}^3$, $9,800\text{N}/\text{m}^3$ 과 그리고 가



(a)



(b)

Fig. 1. Balancer for Flow Uniformity

Table 1. Specification of the Experimental Apparatus

Nomenclature	Model	Specifications
Water Header	4 Zone	Man Pipe: 25 A / Branch Pipe: 15 A
Pump	HG-915-6500	Max. 108 L/min / Max. Head: 4.5~5.0 m
Pressure Transmitter	P116	± 1.0% F.S. / Max. 1.0 MPa / 4~20 mA
Pressure Gauge	7ADFI044	± 1.5% F.S. / Ø 50 mm / < Max. 60°C
Flow Sensor	WFK2-020	± 2.5% F.S. / Max. 1.0 MPa / 4~20 mA
DAQ Board	cDAQ-9171	24-bit resolution / 8 Channel
Reservoir	W1.8×L2×1.5 m	Self-Made

Table 2. Pump Performance Test Results

Power [W]	Flow rate [$10^{-4} \times m^3/s$]	Head [m]
13	1.33864	1.439
19	1.452	1.737
25	1.66338	2.036
31	1.77626	2.266
37	1.87511	2.524
43	2.00279	2.711
49	2.1313	2.889
55	2.20874	3.069

정(1)에서 언급한 값을 사용하여 경험적 유량계수 K 를 구한 다음 식 (4)~(5)에 대입하여 설계하였다. 이 과정을 통해 등가 저항계수 $N_{eq} = 4.37$ 를 얻을 수 있었고 4개의 오리피스와 소숫점 이하를 보정하기 위한 보정 오리피스를 추가하여 총 5개의 오리피스를 설계하여 사용하였다. 코일 저항은 레이놀즈 수가 약 6,300인 난류 상태이고 사용된 가교 폴리에틸렌 코일을 매끄러운 관으로 취급하면 Blasius 공식에 의해 마찰계수, f 를 약 0.0366으로 추정할 수 있고 이 값을 통해 실험에 사용된 긴 코일 70m의 마찰 손실은 식 (6)로 추정할 수 있다(Munson et al., 2016).

$$\frac{\Delta p_{pipe}}{L_{pipe}} = f \frac{\rho V^2}{2D_{pipe}} \quad (6)$$

여기서, $\Delta p_{pipe}/L_{pipe}$ 는 단위 길이 당 코일에서 발생하는 압력손실, f 는 원형 관내 유동의 난류 마찰 계수, V 는 평균 유속이다. 이 식으로 단위 길이당 압력 손실은 약 207Pa/m임을 산출할 수 있다.

Table 1에 실험에 사용된 주요 구성요소를 나타내었다. 먼저 실험에 앞서 사용한 펌프의 성능을 평가하였다. 펌프를 최하 13Watt에서 최대 55Watt까지 8단계 별로 조정을 통해 토출 유량에 대한 양정을 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. 설계된 밸런서가 실제 유동 저항계수를 만족하는지를 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하여 평가하였다. 두 개의 압력 트랜서듀서 ③, ④ 사이에 밸런서 ⑥를 연결하고 출구에 유량센서 ⑤를 장착하였고 펌프 ①에서 공급되는 유량을 Table 2의 표시된 Watt로 변화해 가며 통과유량에 대한 압력강하를 측정하였다. 등가 유량계수는 4.37로 소숫점을 반영하기 위해 보



Fig. 2. Experimental Apparatus

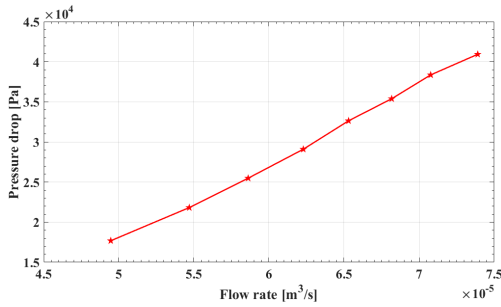


Fig. 3. Pressure Drop vs Flow Rate of Calibrating Orifice Diameter \varnothing 7 mm

정단 오리피스 직경을 \varnothing 7mm로 하였고 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실제 유동 저항 계수 선정에 사용된 압력강하 40,000Pa에서 통과 유량 $7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 을 보임을 확인할 수 있었다. 또한 $\Delta p \propto Q^2$ 관계에 따라 데이터를 선형회귀한 결과, 결정계수 R^2 는 식 (7)에 의해 0.998로 선형 모델과 근사적으로 일치하는 것으로 확인되었다. 이 결과를 통해 본 연구에서 제시한 오리피스 홀 가공과 이를 나열한 형태가 가정(1)의 낮은 레이놀즈수에서의 유량 계수 적용, 그리고 가정(3)의 압력강하가 효과적으로 분산되어 설계 의도에 따른 유량특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (7)$$

보정단 오리피스가 미치는 영향을 확인하기 위해 보정단 오리피스 직경 변화를 통해 추가적인 실험을

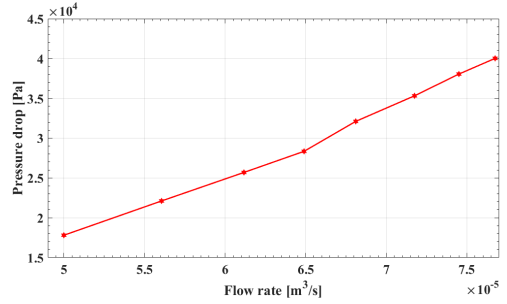


Fig. 4. Pressure Drop vs Flow Rate of Calibrating Orifice Diameter 6 mm

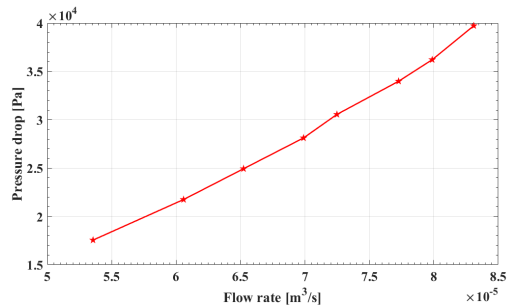


Fig. 5. Pressure Drop vs Flow Rate of Calibrating Orifice Diameter \varnothing 8 mm

수행하였고 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 실험결과 보정된 오리피스의 직경변화로 통과유량과 그에 따른 압력강하값도 변화됨을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 보정단 오리피스 조정을 통해 부하압력을 조정할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 분배기에 장착되어 있어 볼밸브의 개도 조정에 따른 영향을 실험으로 평가하였다. 보정단 오리피스가 \varnothing 6, \varnothing 7 그리고 \varnothing 8mm에 대해 Fig. 3의 볼 밸브 ⑦의 개도 조정으로 부하 압력을 제공한 실험을 수행하였고 결과를 Figs. 6~8에 각각 나타내었다. 볼 밸브 개도 각도 값은 측정하여 표시하지 않았으나 개도 각도 증가에 따라 통과유량이 선형적인 특성을 보임을 알 수 있었고 이 결과 개도 각도에 대한 정보를 나타내는 볼 밸브 사용으로 볼 밸브 개도 조절을 통해서도 통과 유량에 대한 압력강하를 예측할 수 있을 것이다.

2.3 분배기 장착 실험

분배기에 적용한 실험을 수행하였고 실험장치를 Fig. 9에 나타내었다. 저수조 내 펌프는 공급 관으로 물을 공급하여 분배기의 각 구에 연결된코일로 분배 되는 형태이고 환수관은 사용하지 않고 저수조 내

물을 순환하여 사용하는 형태로 실험하였다. 사용된 구성품은 Table 1과 같고 4구 분배기를 사용하였다. 공급관 입구에 가까운 구를 #1로 하고 가장 먼 구를 #4로 하여 각각 70m와 7m 코일을 연결하였다. 4구 분배기의 구 모두 볼밸브가 장착되어 있고 동일하게 제작한 밸런서를 분배기와 코일 사이에 연결하였다. 먼저 볼 밸브 온오프 조작으로 #1번만 열고 나머지는 모두 닫은 상태로 펌프를 8단계 별로 변화시켜 가며 70m 코일로 공급되는 압력강하와 통과 유량을 조사하였고 Fig. 10에 나타내었다. 이는 70m 호스에서 작용하는 압력손실과 통과 유량을 알기 위해서이다. 최대 유량 공급 시 #1번 호스에서 배출하는 유량은 약 $1.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 입구압력은 약 31,542Pa로 측정되었다. 식 (6)에 의해 70m의 경우 약 14,490Pa 이었으나 수조의 협소한 공간에서 코일의 굴곡부에

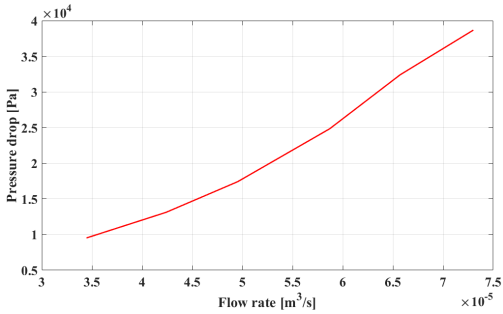


Fig. 6. Throttling Result for Calibrating Orifice Diameter \varnothing 6 mm

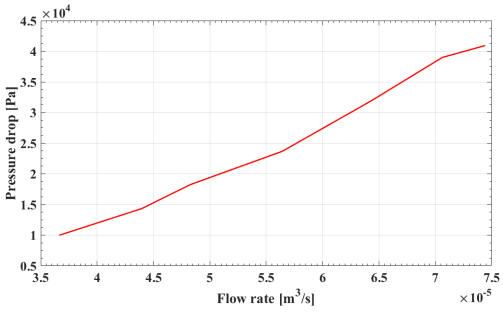


Fig. 7. Throttling Result for Calibrating Orifice Diameter \varnothing 7 mm

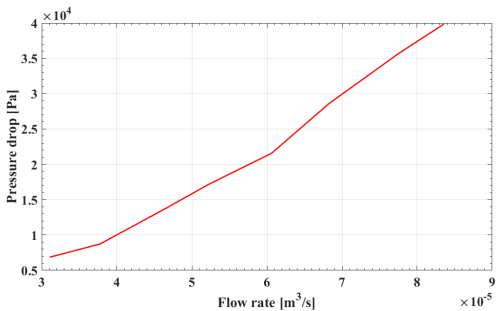


Fig. 8. Throttling Result for Calibrating Orifice Diameter \varnothing 8 mm

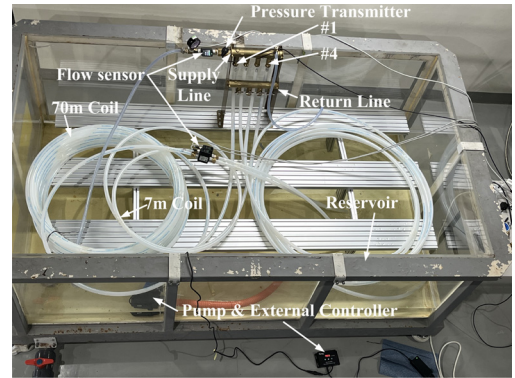


Fig. 9. Experimental Apparatus

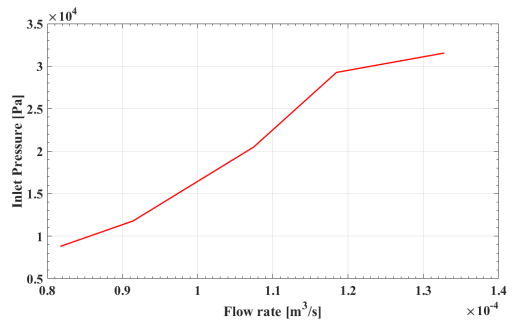


Fig. 10. Flow Rat of Coil #1

의한 손실로 압력손실이 증가한 것으로 보인다. 큰 압력손실이 발생하였지만 밸런서 설계에서 설계 압력강하를 40,000Pa로 설계하는 것이 가정 (3)에 부합설계라고 할 수 있다. 밸런서가 없는 상태에서의 실험결과를 Fig. 11에 나타내었고 Table 3에 유량 평균값에 의한 상대오차를 나타내었다. 입구 유량, Q_{in} 에 대한 토출 유량의 합이 일치하지 않는 것은 유량 센서 오차로 추정된다. Fig. 11(a)에서 입구 유량 분배에 대해 오차는 약 26%로 #1과 #4에 대한 분배 오차가 거의 동일함을 알 수 있었다. 그러나 유량을 증가했을 경우 실험 Fig. 11(b)와 같이 상대오차가 크게 증가하였고 사용펌프의 토출 유량을 최대로 하였을 경우 Fig. 11(c)와 같이 상대오차는 다소 줄어들었다. 이 결과 분배기 회로에서 코일로 공급되는 유량은 펌프에 무리를 가하지 않는 범위 내에서 충분해야 함을 알 수 있었다. Fig. 12은 밸런서를 장착하였을 경우에 대한 실험결과를 나타내고 Table 4에 유량 평균값, Q_{avg} 에 대한 상대오차를 나타내었다. Fig. 11 실험결과와 비교하면 적은 유량에서도 밸런서에 의해 부하압력이 형성되는 것과 펌프 최대 유량에서 밸런서로 인해 통과 유량이 크게 증가하지 않고 부하압력이 증가한 것을 알 수 있었다. 그리고 점진적 유량 증가에 대해서 비례하는 부하압력이 형성되는 것과 단계별 유량 변화에도 입구 유량 평균에 대한 상대오차가 일정함을 알 수 있었다. 이 일정한 상대오차는 밸런서가 분배기 내 압력과 실별로 각각 공급하는 코일 내 압력과의 차압을 일정하게 하여 그에 따른 유량을 통과시키지만 밸런서를 통과

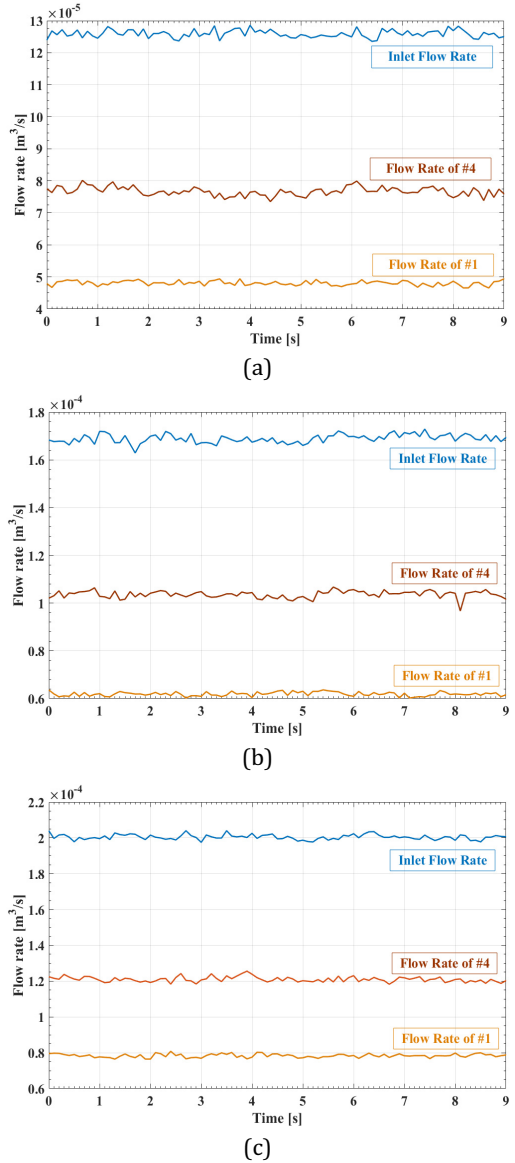


Fig. 11. Experimental Results without the Balancer

Table 3. Experimental Results without the Balancer

	Flow Rate [$10^{-4} \times m^3/s$]			Pressure Drop [Pa]	Relative Error [$\approx \%$]	
	Q_{in}	Q_{avg} of #1	Q_{avg} of #4		#1	#4
Fig. 11(a)	1.24	0.48	0.77	-	23	23
Fig. 11(b)	1.68	0.62	1.00	18,574	82	194
Fig. 11(c)	2.00	0.78	1.20	22,313	21	20

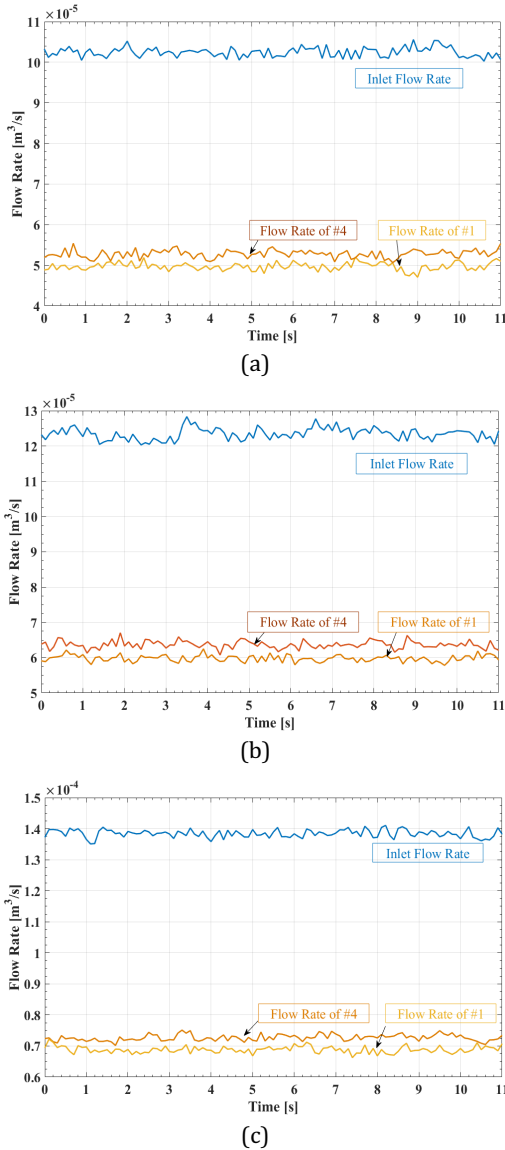


Fig. 12. Experimental Results with the Balancer

후단의 63m의 코일 길이 차이에서 발생하는 물리적 저항에 따른 오차로 분석된다. 그러나 가정 (4)에 따라 분배기 각각의 회로에 코일 길이저항보다 큰 압력강하를 설계함으로써 코일 길이 차이로 인한 저항 변동성은 전체 시스템 저항에 미치는 영향이 최소화 되고 수력학적 평형을 제공할 수 있다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이 오차를 줄이기 위해서는 코일 길이 저항 차이에 따른 상대 오차값을 검토하여 보정단 오리피스를 그에 맞게 각각 재설계하여 적용된 상대 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

3. 결론

본 연구에서는 분배기 회로에서 각 실별로 균일한 유량을 공급하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 균일한 유량을 공급하기 위해 수력학적 평형을 제공하는 밸런서를 설계하여 분배기와 코일 사이에 연결하여 실험을 수행하였다. 밸런서는 다단오리피스 형태이고 설계 압력강하와 통과 유량으로 설계되며 단일 홀과 단일 홀 직경의 1/4인 다공 홀로 구성되며 추가로 보정단 오리피스가 추가되는 형태이다. 가정을 통해 설계된 밸런서를 4구 분배기의 #1과 #4에 장착하였고 70m와 7m 코일을 각각 연결하여 공급 유량 균일 분배 실험과 이를 통해 제시한 가정을 검증하였다. 출구 유량 배분에 대한 상대오차 목표치를 약 ±3% 범위로 하였고 코일길이 차이가 63m에서도 이 목표치를 만족하는 것을 확인하였다. 이 오차는 압력형성과 이에 따른 통과유량이 각각의 코일

Table 4. Experimental Results with the Balancer

	Flow Rate [$10^{-4} \times \text{m}^3/\text{s}$]			Pressure Drop [Pa]	Relative Error [$\approx \%$]	
	Q_{in}	Q_{avg} of #1	Q_{avg} of #4	Δp_{avg}	#1	#4
Fig. 12(a)	1.02	0.496	0.528	16,451	2.75	3.53
Fig. 12(b)	1.23	0.598	0.636	26,511	2.76	3.42
Fig. 12(c)	2.38	0.671	0.713	35,114	2.75	3.33

로 균일한 유량을 통과시킨 이후 후단 코일 #1과 #4의 길이 차이 및 코일 형상에 의한 추가적인 관로 손실 저항 때문으로 추측된다.

본 연구 결과를 통해 가정에서의 난방 효율 향상과 에너지 절감에 따른 비용 절감, 그리고 정부 탄소 배출 저감 효과에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 코일 길이 차이로 발생하는 오차를 보정한 오리피스를 추가적으로 재설계하여 오차를 줄일 계획이고 더 나아가 셸엔튜브 열교환기의 효율을 향상시키기 위해 튜브로 균일하게 냉각수를 공급하는 연구와 최근 데이터 센터 냉각장치의 수냉식 매니폴더에서 균일한 냉각수를 공급하는 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

- 권우철·윤준용·유선학(2010), “온수분배기용 유량제어밸브의 개발”, 「한국유체기계학회 논문집」, 13(4): 11~17.
- 김승훈·김재협·김명환·조미정(2024), “가구 에너지소비량 결정요인 분석: 에너지절약특성을 중심으로”, 「토지주택연구」, 15(3): 97~111.
- 성순경(2008), “실별제어 온수분배기의 유량분배 특성”, 「설비공학논문집」, 20(3): 175~180.
- 신정철(2015), “원자로 압력 및 체적제어계통의 다단 오리피스 설계”, 「에너지공학」, 24(2): 17~21.
- 윤준용·권우철(2007), “Y 스트레이너형 자동 정유량 조절 밸브의 개발”, 「한국유체기계학회 논문집」, 10(1): 49~55.
- 이경희·이준기(2021), “부산시 임대아파트 및 분양 아파트의 냉난방에너지 소비량 분석”, 「LHI Journal」, 12(3): 79~85.
- 이태원·김용기(2004), “공동주택에서의 효과적인 난방열량제어 관리방안”, 「설비저널」, 33(2): 11~21.
- Ahmed, S., A. Hassan, R. Zubair, S. Rashid and A. Ullah (2023), “Design Modification in an Industrial Multistage Orifice to Avoid Cavitation using CFD Simulation”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 148: 104833.
- Chen, A. W. and E. M. Sparrow (2009), “Effect of Exit-Port Geometry on the Performance of a Flow Distribution Manifold”, *Applied Thermal Engineering*, 29(13): 2689~2692.
- Hassan, J. M., T. A. Mohamed, W. S. Mohammed and W. H. Alawee (2014), “Modeling the Uniformity of Manifold with Various Configurations”, *Journal of Fluids*, 2014(1): 325259.
- Hollingshead, C. L., M. C. Johnson, S. L. Barfuss and R. E. Spall (2011), “Discharge Coefficient Performance of Venturi, Standard Concentric Orifice Plate, V-cone and Wedge Flow Meters at Low Reynolds Numbers”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(3~4): 559~566.
- Hutagalung, S. S. (2019), “Effect of Release Coefficient of Orifice Plate on Water Fluid Flow Systems”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1230(1): 012086.
- Martins, N. M., D. I. Covas, S. Meniconi, C. Capponi, and B. Brunone (2021), “Characterisation of Low-Reynolds Number Flow through an Orifice: CFD Results vs. Laboratory Data”, *Journal of Hydroinformatics*, 23(4): 709~723.
- Merritt, H. E. (1967), *Hydraulic Control Systems*, New York: John Wiley & Sons.
- Min, G. S., P. J. Lee and J. H. Kang (2016), “Numerical and Experimental Study on the Flow Distribution in a Water Manifold”, *EPJ WEB of Conferences*, 114: 02076.
- Munson, B. R., D. F. Young, T. H. Okiishi and W. W. Huebsch (2016), *Fundamentals of Fluid Mechanics (8th ed.)*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Rhee, K. N., S. R. Ryu, M. S. Yeo and K. W. Kim (2011), “Simulation Study on Hydronic Balancing to Improve Individual Room Control for Radiant Floor Heating System”, *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(1): 57~73.
- Said, S. A. M., R. Ben-Mansour, M. A. Habib and M. U. Siddiqui (2015), “Reducing the Flow Maldistribution in a Heat Exchanger”, *Computers & Fluids*, 107: 1~10.
- Vehar, F., A. Lipej, R. Pavlin, A. Šerlavaj, B. Jančar and M. Černeck (2013), “Numerical and Experi-

mental Design of Multi-Stage Orifice FWRO-004", *Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Energy for New Europe*, 229.1~229.8.

Empirical Discharge Coefficient Model for Orifice Flow", *International Journal of Fluid Power*, 3(3): 13~18.

20. Wu, D., R. Burton and G. Schoenau (2002), "An

요약

본 연구는 가정용 난방 시스템에서 발생하는 유량 불균형 및 편난방 문제를 해결하기 위해, 기존 분배기 구조의 변경 없이 삽입 가능한 다단 오리피스 구조의 '밸런서(Balancer)'를 개발하고 그 성능을 실험적으로 검증하였다. 기존의 형상 최적화 방식이나 고기능성 밸브 방식은 현장 적용성과 경제성 면에서 한계가 있었으나, 본 연구에서 제안한 밸런서는 오리피스 유량 방정식을 기반으로 관로 저항에 맞춰 단수를 가변적으로 적용할 수 있는 간소화된 구조를 채택하여 실무 적용성을 높였다. 실험 결과, 밸런서가 없는 상태에서는 코일 길이 차이(약 63m)에 따라 약 26%의 유량 분배 오차가 발생하였으나, 밸런서를 장착한 후에는 상대오차가 $\pm 3\%$ 이내로 현저히 감소하여 우수한 수력학적 평형 성능을 입증하였다. 이는 밸런서를 통해 코일 자체의 저항보다 큰 압력강하를 설계함으로써 배관 길이에 따른 저항 변동성을 최소화할 수 있다는 설계를 검증한 것이다. 본 연구는 공동주택의 고질적인 편난방 현상을 해소하고 열원 에너지 낭비를 방지함으로써, 거주자의 열쾌적성 향상과 국가적 탄소중립 목표 달성에 실질적으로 기여할 수 있는 경제적이고 실무적인 대안이 될 것으로 기대된다.

주제어: 균일 유량분배, 밸런서, 다단오리피스, 분배기 매니폴더, 수력학적 평형