

# 폐열 활용을 위한 히트파이프 열교환기 성능 시험 리그 개발 및 열 성능 시험

신동환\*<sup>†</sup> · 심재환\* · 김홍욱\*

## Development of a Heat Pipe heat Exchanger Performance Test Rig for Waste Heat Utilization and Thermal Performance Test

Dong Hwan Shin\*<sup>†</sup>, Jaehwan Shim\*, Hong Uk Kim\*

Key Words : Heat pipe(히트파이프), Heat exchanger(열교환기), Effectiveness(유효도), Thermal Resistance(열저항)

### ABSTRACT

This paper aims to establish core technologies for heat pipe heat exchanger systems that effectively recover waste heat from high-temperature industries. To this end, it was developed a heat exchanger thermal performance test rig capable of accurately simulating high-temperature hot gas environments above 200°C. During the initial commissioning of the test rig, severe temperature deviations at the inlet were identified and improved to within 1°C through the installation of flow control baffles and straighteners, thereby ensuring the reproducibility and reliability of the test results. Using the developed test rig, the thermal performance of three prototype heat pipe heat exchangers with and without fins was evaluated. The test results showed that the copper-copper fin type heat exchanger achieved a maximum performance improvement of 47.3% (maximum effectiveness of 81%) compared to the bare copper type heat exchanger, clearly demonstrating the difference in thermal performance due to the attachment of fins. Next, the difference in thermal performance due to changes in NTU was experimentally verified in heat exchangers of the same copper-copper fin type heat exchanger. Additionally, through thermal shock reliability testing, it was confirmed that the effectiveness of the heat exchanger prototype remained stably within 1.1%, verifying that long-term reliability can be ensured even under harsh operating conditions. This study provides an important technical foundation for the commercialization of high-temperature waste heat recovery technology and is expected to contribute to increased energy efficiency and reduced carbon emissions.

### 1. 서 론

현대 사회는 기후변화와 에너지 위기에 봉착해 있으며, 에너지 효율 증대와 지속 가능한 성장은 인류가 직면한 중요한 과제 중 하나이다. 산업화가 가속화되면서 전 세계 에너지 소비량은 꾸준히 증가하고 있지만, 이 과정에서 상당량의 에너지가 열에너지의 형태로 버려지고 있다. 한국에너지공단의 2024년 에너지 통계 연보에 따르면, 국내 최종 에너지 소비량의 약 28.7%가 미활용 열에너지로 손실되고 있다<sup>(1)</sup>. 특히 산업 부문에서 발생하는 폐열 손실은 전체 에너지 손실의

상당한 부분을 차지하며, 이는 국가적 에너지 낭비를 초래할 뿐만 아니라, 온실가스 배출의 주요 원인이 되어 기후변화 문제를 심화시키고 있다. 이러한 막대한 양의 폐열을 효과적으로 회수하여 재활용하는 기술 개발은 에너지 안보를 강화하고 탄소 중립 목표를 달성하기 위한 필수적인 전략이다.

글로벌 폐열 회수 시스템(Waste Heat Recovery System, WHRS) 시장은 이러한 시대적 요구에 힘입어 가파른 성장세를 보인다. 2024년 기준 847억 달러 규모로 평가하였으며, 2032년까지 연평균 성장률(CAGR) 9.3%로 성장하여 1,725억 달러에 도달할 것으로 전망한다<sup>(1)</sup>. 이와 같은 시장 성장은

\* 한국기계연구원 히트펌프연구센터(Korea Institute of Machinery & Materials, Heat Pump Research Center)

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail : dhshin@kimm.re.kr

세계 각국의 환경 규제 강화, 에너지 비용 상승, 그리고 효율적인 에너지 관리에 대한 기업들의 투자 증가에 기인한다. 특히 폐열 회수 시스템은 석유화학, 제철, 시멘트, 발전소 등 에너지 소비가 많은 다양한 산업 분야에서 운영비용 절감과 자가발전 목적으로 적극 도입되고 있다.

히트파이프 열교환기 기술은 고온 폐열 회수 분야에서 그 중요성이 증대됨에 따라 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 연구들은 주로 히트파이프의 성능을 향상하고, 실제 산업 현장에 효과적으로 적용하기 위한 기술적 과제들을 해결하는 데 초점을 맞추고 있다. 히트파이프의 열전달 성능을 극대화하기 위한 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행된다. 첫 번째는 작동 유체 및 내부 구조의 최적화이다. Ghanbarpour 등<sup>(2)</sup>의 연구에서는 작동 유체에 알루미늄 나노 입자를 첨가하여 열전달 성능을 향상하는 방안을 제시했으나, 10%의 고농도에서는 오히려 성능 저하가 발생할 수 있음을 밝혀, 나노 입자의 최적 농도 및 분산 안정성에 대한 추가적인 연구의 필요성을 시사했다. Esmailzadeh 등<sup>(3)</sup>은 그래핀 나노유체를 이용한 히트파이프 실험에서 나노유체의 농도와 히트파이프의 기울기가 열전달 성능에 미치는 영향에 관하여 연구하였고, 그래핀 옥사이드(Graphene Oxide) 나노유체를 이용해 산업용 열교환기에서 열전달 향상 효과에 관한 연구를 진행하였다<sup>(4)</sup>. 두 번째는 핀 형상 및 배열의 최적화이다. 연구자들은 튜브 외부에 부착되는 핀의 형상, 간격, 재료 등을 변경하여 공기 유체와의 열교환 효율을 높이는 방안을 모색하고 있다. 특히, 히트파이프 열교환기에서 열전달 성능을 극대화하기 위해 유체 유동을 제어하는 배플(Baffle) 설계가 중요한 요소로 인지되고 있다. Geum 등<sup>(5)</sup>은 배플 설계를 최적화하여 열전달 효율과 유효도를 최대 36%까지 향상할 수 있음을 수치해석적으로 분석하였다.

고온 폐열 회수 기술의 동향은 단순한 열교환 효율 증대에서 나아가 시스템의 장기 신뢰성, 내구성, 그리고 경제성을 확보하는 방향으로 진화하고 있다<sup>(6, 7)</sup>. 특히 산업 현장의 가혹한 환경(고온, 부식, 먼지 등)에 대응하기 위해, 히트파이프의 재료 및 코팅 기술, 그리고 운전 중에 발생하는 열충격에 대한 내구성을 평가하는 연구가 중요하게 주목받고 있다. 또한, 폐열 회수 시스템을 에너지 저장 및 발전과 연계하여 더욱 높은 부가가치를 창출하는 융합 기술에 관한 연구도 활발히 진행 중이다. 예를 들어, 폐열을 회수하여 스팀이나 전기를 생산하는 시스템과의 연계는 전체 에너지 생산 효율을 획기적으로 높이는 방안으로 주목받고 있다.

본 연구의 궁극적인 목표는 고온 폐열 회수용 히트파이프 열교환기 기술의 상용화를 위한 핵심 기반 기술을 확보하는 것이다. 이를 달성하기 위한 세부적인 연구 목표는 다음과 같다. 첫 번째는 히트파이프 열교환기 성능 시험 리그를 개발하는 것으로, 200℃ 이상의 고온 유체 환경을 모사하고, 유량과 온도를 정밀하게 제어할 수 있는 고온 유체 시험 리

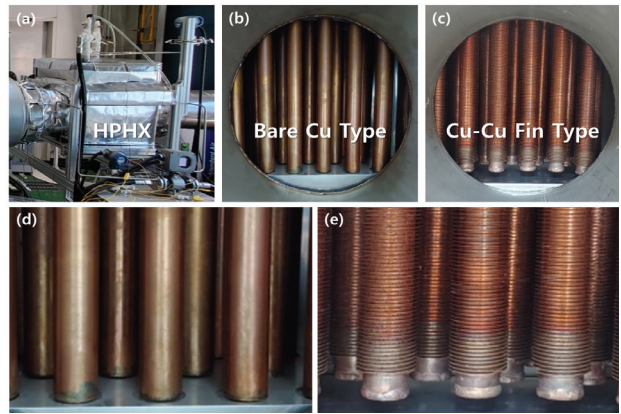


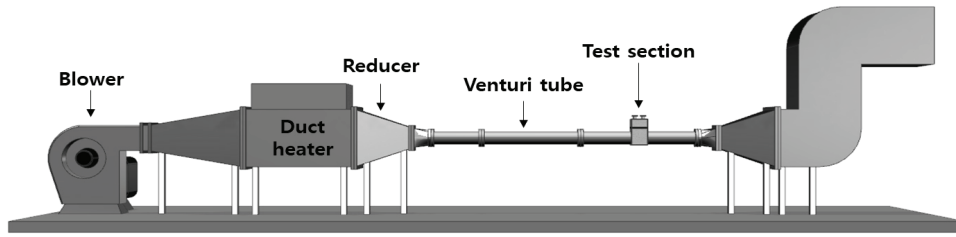
Fig. 1 Heat pipe heat exchanger used in the experiment (a) HPHX installed in test rig, (b) Copper type HPHX without fins, (c) Copper-Copper fin type HPHX, (d) Magnified picture of (b), and (e) Magnified picture of (c)

그를 설계하고 제작하는 것이다. 이때, 열교환기 입구부의 온도 및 유속 분포를 균일하게 하여 시험 결과의 재현성과 신뢰성을 확보하며, 온도, 압력, 유량 등 다양한 데이터를 실시간으로 측정 및 수집할 수 있는 정밀한 데이터 수집 시스템을 구축한다. 두 번째는 히트파이프 열교환기 시작품의 열 성능을 평가하는 것으로, 다양한 형태의 열교환기 열 성능 차이를 시험 리그를 통해 확인하고, 다양한 고온 가스 및 냉각수 유량 조건에서 열교환기의 유효도, NTU(Number of transfer units) 효과를 정량적으로 측정하고 비교 분석하는 것이다. 다음은 히트파이프 열교환기 시작품의 신뢰성 및 내구성을 검증하는 것으로, 실제 산업 환경에서 발생할 수 있는 급격한 온도 변화에 대한 열교환기의 내구성을 평가하기 위해 열충격 신뢰성 시험을 시행한다. 이를 통해 열충격 시험 전후의 열 성능 변화를 측정하여 장기 운전 안정성을 예측하고, 히트파이프 자체의 열적 안정성을 검증하고자 한다.

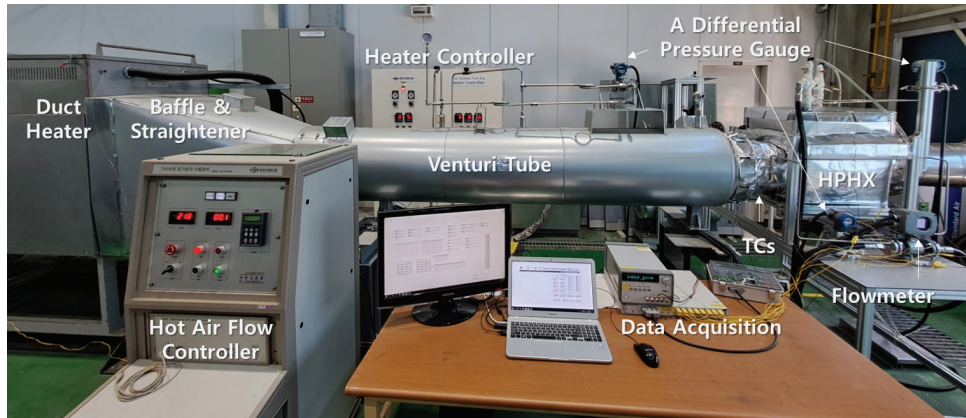
## 2. 히트파이프 열교환기 시험 리그 구축

### 2.1 히트파이프 및 열교환기 제작

본 연구에 사용한 히트파이프는 열전도가 우수한 구리를 소재로 하여 제작하였고<sup>(8)</sup>, 총 96개의 히트파이프를 배치하여 열교환기를 구성하였다. 열교환기의 크기는 540 (W) × 540 (L) × 465 (H) mm<sup>3</sup>이며, 고온부(증발부, 고온 공기)와 저온부(응축부, 저온 액체)는 격벽으로 서로 분리되어 있으며 열전달 효과를 높이기 위하여 각각 배플을 설치하였다<sup>(5)</sup>. 본 실험에서는 그림 1에 나타낸 것과 같이 두 가지 형태의 열교환기를 사용하였다. 그림 1(a)는 시험 리그에 장착된 열교환기 사진이며, (b)는 구리 튜브 히트파이프 열교환기로 추후 개발품에 대한 실험 결과를 비교할 비교군이다. 구리로 제작한 히트파이프의 외경은 28.6 mm, 내경은 26.0 mm이



(a) A schematic diagram



(b) Actual photo of main parts

Fig. 2 Heat pipe heat exchanger thermal performance test rig

다. 그림 1(c)는 구리-구리 핀 튜브 히트파이프 열교환기로 외경과 내경은 (b)와 동일하며, 사용한 핀 두께는 0.45 mm, 핀 높이는 4.5 mm, FPI(Fin per inch)는 9이다. 해당 열교환기는 유동이 흐르는 유로의 거리를 조정하여  $NTU=2.5$ 와  $NTU=3.0$ 의 두 가지 형태로 구성하였다.

## 2.2 열교환기 성능 리그 설계 및 제작

본 연구의 핵심은 고온 환경을 모사하고, 다양한 운전 조건을 정밀하게 제어하고 계측할 수 있는 시험 리그를 구축하는 데에 있다. 시험 리그는 크게 고온 유체 공급부, 시험부, 데이터 측정 및 제어부로 구성된다.

고온 유체 공급부에는 그림 2에 나타난 것과 같이 최대 유속 30 m/s를 재현할 수 있는 블로어가 있고, 최대 온도 400°C를 만들 수 있는 300 kW급 덕트히터를 구축하였고 PID (Proportional-Integral-Differential) 제어를 통해 온도를 정밀하게 조정하였다. 열교환기에 인가되는 유량을 정밀하게 측정하기 위해 벤투리 튜브를 덕트히터 후단에 설치하였다. 유량 측정의 정확성은 열교환기의 성능 계산에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유량 측정에 따른 압력손실이 가장 적은 기구를 선정하였다. 유량은 차압을 측정하여 고온 공기의 밀도와 온도로 계산하였으며, 본 시험 리그를 구성하는 구조물의 전반적인 크기에 비해 측정하는 차압은 수십 Pa 수준으로 아주 작은 값이기 때문에 매우 정밀한 측정이 필요하였다.

이는 차압계의 설치 방법에 따라 오차가 날 수 있는 정도의 값으로 개별 계측기의 교정뿐만 아니라 시스템 레벨의 교정이 필요하였다. 따라서 두 개의 서로 다른 차압계(ROSEMOUNT, ST810, YOKOGAWA, YEW-MT210)를 설치하고 두 차압의 차이가 0.3 Pa 이내에 들어오는 조건을 정상상태로 판단하여 측정을 시작하였다.

시험부에 위치한 히트파이프 열교환기는 열 손실을 최소화하기 위하여 유리섬유 단열재로 감싸고 거치하였으며, 다양한 종류의 열교환기 시험 시 교체가 용이하도록 열교환기의 양 끝단은 플랜지 형태로 제작하였다. 열교환기의 입구와 출구는 직경 300 mm의 튜브 형태를 가지며 외벽에서 중심부로 각각 75 mm 지점에 상하좌우 4개의 K-type 열전대(OMEGA, TJ36-CAXL-116G-6-CC-SMPW-M)를 각각 설치하고 열교환기 입구부의 상하좌우 온도 차이가 1°C 이내로 수렴할 때를 시험 시작점으로 설정하였다. 냉각수는 탈이온수를 사용하였고 냉동기(Daehocooler, DH30A) 및 700 L급 물탱크를 활용하여 열교환기를 통과한 고온의 냉각수를 일정한 온도로 공급할 수 있게 조정하였다. 유량계(TOSHIBA, LF620)와 차압계(ROSEMOUNT, ST810)를 설치하고 시험 조건의 최대값을 기준으로 계측기의 스패(span)를 조정하여 측정 정밀도를 확보하였다. 냉각수의 입구와 출구 온도는 K-type 열전대를 사용하여 측정하였고 입구 온도는 20°C, 출구 온도는 유동의 불안정을 배제하기 위해 80°C 이내로 조정하여 실험 조건을 설정하였다.

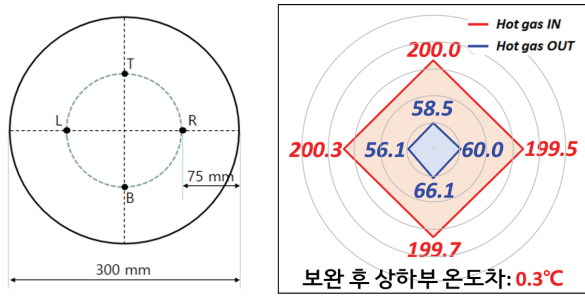


Fig. 3 Hot gas temperature difference at the heat exchanger inlet region

벤투리 튜브 및 시험부에서 측정하는 차압 및 유량의 정밀도를 높이기 위해 계측기와 데이터수집장치(DAQ, VTI, EX1032A)는 신호선을 이용하여 연결하였고 각각의 계측장치와 실험 장비를 접지하였다. 데이터 측정 불확실성은 1.5%, 실험 환경에 의한 불확실성은 6.5%이다.

시험 리그 제작 후 시험 장치의 건전성을 확인하기 위하여 시운전을 시행하였다. 본 연구에서 가장 중요한 점은 열교환기 입구의 온도 및 유속 분포를 균일하게 만드는 것이다.

초기 시운전 결과, 열교환기 입구에서 상하부 온도 편차가 크게 형성되어 입구부의 온도 균일도가 확보되지 않는 문제가 발생하였다. 이러한 불균일한 열원 공급은 열교환기의 실제 성능을 정확하게 평가하기 어렵게 한다. 이를 해결하기 위하여 덕트히터와 벤투리 튜브 사이에 있는 리듀서(reducer) 내부에 균일한 유량 제어를 위한 배플을 설치하고 벤투리 튜브 입구에 허니콤(honey comb) 형태의 다공성 판재인 스트레이트너(straightener)를 추가로 설치하는 보완 작업을 진행하였다. 해당 배플과 스트레이트너는 다양한 형상 조건에 대한 수치해석을 통해 설계하였고, 실물 제작이 가능한 범위에서 최종 설계 도면을 확정하였다. 또한, 장치 간의 연결부를 정밀하게 정렬함으로써 해당 영역에서 발생할 수 있는 유동의 교란을 최소화하였다. 장치 보완 후 시운전을 통해 열교환기 입구부의 온도 분포를 재측정하였고, 그 결과 열교환기 입구에서의 상하부 온도 차가 1°C 이내로 수렴하는 것을 확인하였다. 이는 초기 온도 편차에서 대폭 개선된 결과이며 본 연구에서 구축한 시험 리그가 정량적이고 재현성 있는 열 성능 시험을 수행할 수 있는 충분한 환경을 갖추었음을 의미한다.

### 3. 열 성능 및 신뢰성 평가 방법

#### 3.1 열용량 평가 방법

열교환기의 열 성능 평가를 위하여 실험 장치에 전원을 인가하고 냉각수 펌프와 유동 조절 장치를 제어하여 표준 시험 조건에 수렴시킨다. 본 연구에서 설정한 표준 시험 조건은

고온부 질량유량 0.165 kg/s, 저온부 질량유량 0.145 kg/s, 열교환기 입구 온도 200°C, 냉각수 입구 온도 20°C로 설정하며 각 조건의 오차범위는 3%로 제한한다. 열용량은 고온부와 저온부의 열용량을 모두 계산하여 상호 비교하였다. 여기에서는 고온부의 열용량을 기준으로 설명하고자 하며 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_h = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) [W] \quad (1)$$

여기서  $C_p$ 는 정압비열 200°C 기준 1,026 J/kg · K이고,  $T_{h,in}$ 은 고온부 입구에서 측정한 4개 온도의 평균값(초당 1회 측정, 600개 데이터),  $T_{h,out}$ 은 고온부 출구에서 측정한 온도의 평균값이다. 시험 리그에서 측정한 유량에 밀도를 곱하여 식(2)와 같이 질량유량을 구할 수 있다.

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = \frac{C_d \cdot A_d \cdot \sqrt{2\rho \cdot \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (2)$$

여기서  $C_d$ 는 시험 리그에 설치한 벤투리 튜브의 유량계수(discharging coefficient)로 0.985,  $A_d$ 는 벤투리 튜브의 작은 직경(179.9 mm)에 대한 면적으로 0.025419 m<sup>2</sup>,  $\rho$ 는 200°C 공기 기준 0.745 kg/m<sup>3</sup>,  $\Delta P$ 는 차압계 측정값,  $\beta$ 는 벤투리의 큰 직경(299.5 mm)과 작은 직경(179.9 mm)의 비율로 0.60066778이다. 따라서 열용량은 식(3)을 통해 계산할 수 있다. 해당 계산은 데이터 측정 프로그램(Labview)에서 계산하여 결과를 실시간으로 모니터링 할 수 있게 장치를 구성하였다.

$$Q_h = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$= \frac{C_d \cdot A_d \cdot \sqrt{2\rho}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) [W]$$

#### 3.2 유효도 평가 방법

열교환기 유효도( $\epsilon$ )는 고온부와 저온부 모두에서 측정하여 상호 비교하도록 설정하였고, 두 값에 대한 에너지 균형(energy balance)을 확인하였다. 결과물로서의 유효도는 고온부와 저온부의 유효도 평균값을 취하였다. 단, 여기에서는 유효도 계산 과정은 고온부를 기준으로 한다. 유효도는 열교환기의 실제 열전달량이 이론적으로 가능한 최대 열전달량에 얼마나 근접하는지를 나타내는 무차원수로 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

폐열 활용을 위한 히트파이프 열교환기 성능 시험 리그 개발 및 열 성능 시험

Table 1 Test results of bare copper type HPHX case(NTU=2.5)

	시험 조건 변수		온도 측정값				열량		유효도		Energy balance
	$\dot{m}_h$ (kg/s)	$\dot{m}_c$ (kg/s)	$T_{h,in}$ (°C)	$T_{h,out}$ (°C)	$T_{c,in}$ (°C)	$T_{c,out}$ (°C)	$Q_h$ (kW)	$Q_c$ (kW)	$\epsilon_h$	$\epsilon_c$	
Ref. Cbnd.	0.166	0.143	199.1	101.2	19.8	47.5	16.52	16.54	0.546	0.547	1.00
$\dot{m}_h - 30\%$	0.118	0.143	198.2	89.4	19.6	40.9	12.98	12.80	0.609	0.601	0.99
$\dot{m}_h - 15\%$	0.142	0.143	198.9	86.0	19.8	44.5	14.87	14.79	0.575	0.571	0.99
$\dot{m}_h + 15\%$	0.193	0.143	199.5	106.3	20.4	50.7	18.25	18.19	0.520	0.519	1.00
$\dot{m}_h + 30\%$	0.218	0.144	199.5	110.3	20.7	53.5	19.76	19.69	0.499	0.497	1.00
$\dot{m}_c - 30\%$	0.165	0.099	199.1	105.2	19.7	57.2	15.76	15.56	0.523	0.517	0.99
$\dot{m}_c - 15\%$	0.166	0.123	199.0	102.7	19.8	51.2	16.25	16.13	0.537	0.533	0.99
$\dot{m}_c + 15\%$	0.165	0.165	199.0	100.2	19.9	43.9	16.62	16.46	0.552	0.546	0.99
$\dot{m}_c + 30\%$	0.166	0.185	199.0	99.5	20.1	41.5	16.77	16.59	0.556	0.550	0.99

Table 2 Test results of Cu-Cu fin type HPHX case (NTU=2.5)

	시험 조건 변수		온도 측정값				열량		유효도		Energy balance
	$\dot{m}_h$ (kg/s)	$\dot{m}_c$ (kg/s)	$T_{h,in}$ (°C)	$T_{h,out}$ (°C)	$T_{c,in}$ (°C)	$T_{c,out}$ (°C)	$Q_h$ (kW)	$Q_c$ (kW)	$\epsilon_h$	$\epsilon_c$	
Ref. Cbnd.	0.165	0.143	199.5	53.2	20.9	61.0	24.5	24.0	0.82	0.80	0.98
$\dot{m}_h - 30\%$	0.115	0.143	198.6	44.8	20.1	49.5	17.9	17.6	0.86	0.85	0.98
$\dot{m}_h - 15\%$	0.139	0.144	199.3	49.0	20.8	55.7	21.2	20.9	0.84	0.83	0.98
$\dot{m}_h + 15\%$	0.189	0.145	199.8	56.2	21.5	65.8	27.6	26.9	0.81	0.79	0.98
$\dot{m}_h + 30\%$	0.215	0.145	199.9	60.2	21.7	70.9	30.4	29.9	0.78	0.77	0.98
$\dot{m}_c - 30\%$	0.164	0.106	199.6	59.2	21.0	72.4	23.3	22.7	0.79	0.76	0.97
$\dot{m}_c - 15\%$	0.166	0.124	199.8	55.2	21.1	66.5	24.3	23.5	0.81	0.78	0.97
$\dot{m}_c + 15\%$	0.167	0.167	199.7	51.1	21.2	56.4	25.1	24.6	0.83	0.82	0.98
$\dot{m}_c + 30\%$	0.168	0.190	199.6	49.5	21.1	52.7	25.5	25.1	0.84	0.83	0.99

$$\epsilon_h = \frac{C_h \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})} \times 100 [\%] \quad (4)$$

여기서  $C_h$ 는 고온부의  $\dot{m} \cdot C_{p,h}$  이고,  $T_{h,in}$ 은 고온부 공기의 열교환기 입구 온도,  $T_{h,out}$ 은 고온부 공기의 열교환기 출구 온도,  $T_{c,in}$ 은 냉각수 입구 온도이며,  $C_{min}$ 은  $C_h$ 와  $C_c$  중 작은 값을 사용한다. 본 실험의 경우  $C_h$ 는 169 [J/s · K],  $C_c$ 는 609 [J/s · K]로  $C_{min}$ 은  $C_h$ 가 된다. 따라서 고온부의 열용량은 식(5)로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_h = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \times 100 [\%] \quad (5)$$

### 3.3 열 신뢰성 평가 방법

히트파이프 열교환기의 장기 운전 안정성을 평가하기 위하여 열충격 신뢰성 시험을 수행하였다. 이 시험은 열교환기가 실제 산업 현장에서 겪을 수 있는 급격한 온도 변화에 얼마나 잘 견디는지를 검증하는 중요한 과정이다. 시험은 두 가지 경우로 나누어 진행하였다. 첫 번째는 열교환기를 구성하는 히트파이프 단품에 대한 시험으로, IEC 60068-2-14 코드 및 MIL-STD-810G-Method 503.5 코드를 기준으로 실험을 수행하고 열저항 값의 변화를 확인하였다. 두 번째는 열교환기 일체를 환경 챔버에 넣고 -15°C ~ 50°C의 대기 환경에 대한 열충격 사이클을 100회 수행한 뒤 열교환기의 유효도를 비교하였다. 본 실험의 목적은 열교환기 및 구성 요소인 히트파이프의 건전성을 평가함과 동시에 구축한 열교환기 열 성능 시험 리그의 측정 정밀도를 확인하는 과정이다.

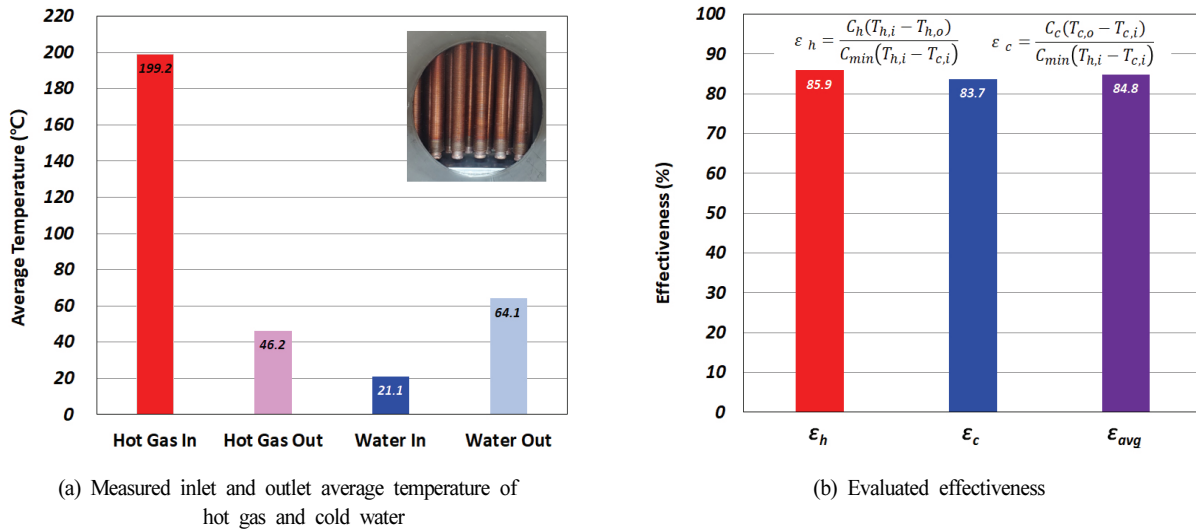


Fig. 4 The thermal performance test results of Cu-Cu fin type HPHX (NTU=3.0) case

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 열교환기 열 성능 비교

본 연구에서 수행한 열교환기의 열 성능 측정의 주목적은 제작한 시작품의 열 성능을 신뢰도 있는 측정 여부에 있다. 따라서 분명한 성능의 차이가 예상되는 구리 튜브 타입 열교환기와 구리-구리 핀 타입 열교환기에 대한 열 성능을 각각 측정하였다. 표 1은 두 가지 형태의 열교환기의 실험 결과를 나타낸 것이다. 해당 열교환기의 열 성능을 평가하기 위해 표준 시험 조건을 설정하였다. 이는 모든 형태의 열교환기에 일반적으로 적용할 수 있는 시험 조건이 아니라 해당 시험 리그의 건전성을 확인하기 위하여 임의로 설정한 값을 밝힌다. 또한, 현장에서 발생할 수 있는 다양한 상황에서 열 성능을 검토하기 위하여 탈 설계 조건(off-design condition)에 대한 실험을 수행하였다.

결과적으로 표준 시험 조건에서 구리 튜브 타입 열교환기의 유효도는 55%를 기록하였고, 핀을 부착한 열교환기의 유효도는 81%로 측정되었다. 이는 핀 부착을 통해 열전달 성능이 약 47% 향상되었음을 의미한다. 이러한 성능 향상은 주로 공기와 같은 기체는 열전달계수가 매우 낮으므로 핀이 열교환기 외부의 열전달 면적을 크게 확장하는 역할을 하였고, 고온 유체로부터 히트파이프로의 열 흡수 효율을 향상했기 때문이다.

##### 4.2 NTU 변화에 따른 열교환기 유효도

본 연구진이 제작한 열교환기 열 성능 시험 리그를 사용하여 열교환기 유효도의 NTU 변화에 따른 영향을 추가로 실험하였다. NTU가 증가함에 따라 열교환기의 유효도는 증가할

것이다. 해당 실험은 구리-구리 핀 타입 열교환기를 대상으로 실험을 수행하였으며, NTU를 3.0으로 증가시킨 경우, 열교환기의 유효도는 85%임을 확인하였다. 그림 4는 NTU=3.0인 열교환기 실험에서 얻은 결과를 나타낸 것이다. 이는 핀이 없는 구리 튜브 타입 열교환기의 유효도에 비해 54.5% 성능이 개선된 결과이다. 핀 부착이 단순한 성능 향상을 도모하는 데에 비해, 시스템의 운전 조건에 따라 성능 변화가 이루어지며, 고 유량 조건에서도 높은 유효도를 유지하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 고온 폐열 회수 시스템의 효율을 극대화하는 방법의 하나임을 시사한다.

##### 4.3 열 신뢰성 평가 결과

열교환기를 구성하는 핵심 요소인 단일 히트파이프에 대하여 앞서 언급한 코드를 활용하여 열충격 시험을 수행하였다. 시험 전후의 열저항 변화율은 3% 이내로 측정되었고, 해당 결과는 히트파이프 내부의 작동 유체나 히트파이프 모재가 열충격으로 인하여 성능 저하를 발생시키지 않는다는 것을 보인다.

열교환기 시작품에 대한 열충격 사이클 시험은 더욱 가혹한 100 사이클 조건에서 수행하였으며 시험 전후의 유효도 변화율은 최대 1.1%에 불과한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 개발한 열교환기 시작품이 반복되는 열팽창 및 수축 과정에서 구조적 피로와 열적 스트레스에도 본래의 열전달 성능을 안정적으로 유지하는 것을 의미한다. 상기와 같은 신뢰성 평가는 개발한 히트파이프 열교환기가 단순한 실험적 검증을 넘어, 실제 산업 현장의 고온 및 가혹한 환경에서도 장기간 안정적으로 작동할 수 있는 충분한 내구성과 신뢰성을 확보하였음을 보여주는 중요한 근거이며 해당 시험을 수행할 수 있는 시험 리그의 건전성을 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구는 고온 산업 폐열 회수를 위한 히트파이프 열교환기의 성능을 체계적으로 평가하기 위한 시험 리그를 개발하고, 이를 통해 개발한 열교환기 시작품의 열 성능과 신뢰성을 검증하는 것이며, 본 연구의 성과는 하기와 같다.

덕트히터와 열교환기 사이의 유량 제어를 위한 배플 및 스트레이트너를 설치하여 열교환기의 입구 온도 편차를 1°C 이하로 유지함으로써, 고온 유체 환경을 정밀하게 모사하는 신뢰성 높은 시험 환경을 구축하였다. 열 성능 측정 정확도를 시험하기 위하여 개발한 3가지 종류의 히트파이프 열교환기를 실험하고, 핀이 없는 구리 타입 열교환기에 비해 최대 54.5% 성능이 향상된 열교환기 개발품에 대한 성능을 검증하였다. 또한, 개발한 열교환기 시작품에 대한 열충격 신뢰성 시험 결과, 열교환기 시작품의 유효도 변화율이 1.1%, 단일 히트파이프의 열저항 변화율이 3.1% 이내로, 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지수요 관리핵심 기술개발사업의 일환으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다. (과제번호: 20212020800270)

## References

(1) Energy Statistics Yearbook, Ministry of Trade, Industry and Energy

- (2) M. Ghanbarpour, N. Nikkam, R. Khodabandeh, M.S. Toprak, and M. Muhammed 2015, "Thermal performance of screen mesh heat pipe with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 66, pp. 213–220.
- (3) A. Esmailzadeh, N. Nik-Ghazali, H.S.C. Metselaar, M.S. Naghavi, M. Azuddin, and S. Iranmanesh, 2021, "Thermal performance evaluation of the heat pipe by using 1-pyrene carboxylic-acid functionalized graphene nanofluid," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 129, 105669
- (4) Omid Khouri, Hamid Reza Goshayeshi, Seyed Borhan Mousavi, Shamin Hosseini Nami, and Saeed Zeinali Heris, 2024, "Heat Transfer Enhancement in Industrial Heat Exchangers Using Graphene Oxide Nanofluids," *ACS Omega*, Vol. 9, Issue 22, pp. 24025–24038.
- (5) Gyohoon Geum, Sukkyung Kang, Sehyeon Cho, Daeyoung Kong, Seungjae Lee, JinHyeuk Seo, Dong Hwan Shin, Seong Hyuk Lee, Jungho Lee, and Hyoungsoon Lee, 2024, "Thermal performance analysis of heat pipe heat exchanger for effective waste heat recovery," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 151, 107223
- (6) Paul Christodoulides, Rafaela Agathokleous, Lazaros Aresti, Soteris A. Kalogirou, Savvas A. Tassou, and Georgios A. Florides, 2022, "Waste Heat Recovery Technologies Revisited with Emphasis on New Solutions, Including Heat Pipes, and Case Studies," *Energies*, Vol. 15, No. 1, 384
- (7) Global Market Insights, "Heat Pipe Heat Exchanger Market", 2024.
- (8) Jin Hyeuk Seo, Dong Hwan Shin, and Jungho Lee, 2022, "Study on Working Fluid Filling into Heat Pipe by Induction Heating," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 25, No. 4, pp. 39–49.