

소듐냉각고속로 연계 질소 브레이튼 사이클의 복열기 설계를 위한 지그재그 유로의 실험적 연구

정성균* · 오정현** · 이수빈* · 조항진*,**†

Experimental Study of a Zigzag Channel for Recuperator Design in a Nitrogen Brayton Cycle Coupled with a Sodium-cooled Fast Reactor

Sungkun Chung*, Jeong Hyeon Oh**, Subin Lee*, Hangjin Jo*,**†

Key Words : Sodium-cooled fast reactor(소듐냉각고속로), Nitrogen Brayton cycle(질소 브레이튼 사이클), Recuperator design(복열기 설계), Printed-circuit heat exchanger(인체기관형 열교환기), Zigzag channel(지그재그 유로)

ABSTRACT

This study investigates thermal-hydraulic performances of a zigzag channel for recuperator design in a nitrogen Brayton cycle coupled with a sodium-cooled fast reactor. Because the recuperator dominates system volume, improving channel performance while satisfying design requirements is important for compact and economical systems. With a gas-to-gas experimental loop, a printed-circuit heat exchanger (PCHE) with a zigzag channel with a 40° bending angle, 1.2 mm diameter, 8 mm pitch, and 640 mm core length was tested. Experiments were performed over Reynolds numbers from 1400 to 12000 under Prandtl-number conditions relevant to the target nitrogen cycle. Using measured heat transfer and pressure drop data, Nusselt numbers and Fanning friction factors were obtained after accounting for minor-loss and acceleration effects. The 40° zigzag channel showed heat-transfer performance 1.5–2.3 times higher than the straight channel at the same Reynolds number, whereas pressure-drop performance was 4–6 times higher. Compared with other zigzag channels, the 40° channel showed higher heat transfer and pressure drop than the 15° channel, but lower values than the 52° channel. New correlations were proposed for the 40° zigzag channel, and their mean absolute errors were 3.15% for heat transfer and 2.52% for pressure drop. A performance evaluation criterion indicated that, above Reynolds numbers of 3000, the 40° channel provided the best comprehensive performance among the zigzag configurations and remained within 7% of the straight channel. The proposed correlations were implemented in a validated one-dimensional PCHE design code and applied to recuperator design for a target nitrogen Brayton cycle. Under the same effectiveness and pressure-drop constraints, the 40° zigzag channel yielded a recuperator volume of 50.00 m³, slightly smaller than 51.65 m³ for the straight channel at the same hydraulic diameter. These results show that the 40° zigzag channel is feasible for compact and practical recuperator design in nitrogen Brayton cycles.

1. 서 론

최근 인공지능, 로봇, 데이터센터 등으로 에너지 밀도가 높으면서도 안정적인 전력 공급에 대한 수요가 증가하고 있다. 동시에 온실가스 배출 저감과 신재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 저탄소 에너지원의 필요성도 커지고 있다.

이러한 배경에서 안정적으로 전력 생산이 가능하고, 열에너지 저장 시스템과의 연계로 유연 운전이 가능한 원자력 시스템이 주요 후보군으로 주목받고 있다⁽¹⁾. 특히 제4세대 원자로인 소듐냉각고속로(Sodium-cooled fast reactor, SFR)는 신재생에너지의 간헐성을 보완하고 계통 유연성과 경제성을

* 포항공과대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

** 포항공과대학교 첨단원자력공학부(Division of Advanced Nuclear Engineering, POSTECH)

† 교신저자, E-mail : jhj04@postech.ac.kr

향상시킬 수 있는 급전가능(Dispatchable) 에너지원으로 간주되어 국내외적으로 활발히 연구되고 있다^(2,3).

소듐냉각고속로의 장점으로는 액체 소듐을 냉각재로 사용하기에 높은 열전도도와 높은 끓는점을 갖는 액체금속의 특성으로 인해 우수한 열전달 성능과 안전 여유도를 확보할 수 있으며, 사용후핵연료의 재활용 가능성 측면에서도 장점을 가진다. 이로 인해 높은 열효율, 향상된 안전성, 장주기 운전 가능성 등의 이점이 보고되었다⁽⁴⁾. 하지만 동력변환계통 작동유체로 물 또는 이산화탄소를 사용할 경우, 소듐과 화학반응할 수 있기에 추가적인 안전설계와 비용이 요구된다⁽⁵⁾. 이러한 문제를 최소화하기 위해 소듐과 반응하지 않는 비활성 기체를 적용한 브레이튼 사이클에 대한 열효율 평가가 수행되었으며, 그 결과 질소 브레이튼 사이클은 비교 대상 비활성 기체 사이클 가운데 높은 열효율과 단순한 계통 구성 측면에서 유리한 동력변환계통으로 평가되었다⁽⁶⁾.

질소 브레이튼 사이클에서 복열기(Recuperator)는 계통 열효율 향상에 핵심적인 역할을 하는 열교환기이다. 그러나 복열기는 주요 기기 중 가장 큰 전열면적과 부피를 요구하며, 전체 시스템의 소형화와 경제성에 큰 영향을 미친다. 특히 질소 브레이튼 사이클 주요 기기 전체 부피 중 복열기가 56-67%를 차지할 정도로 큰 비중을 가지므로, 목표 성능을 유지하면서 복열기 부피를 저감할 수 있는 설계기술의 확보는 경제성 향상과 열효율 확보에 중요하다⁽⁵⁾.

인쇄회로형 열교환기(Printed-circuit heat exchanger, PCHE)는 높은 구조 건전성과 체적당 전열면적을 바탕으로 고온·고압 조건에서 안정적으로 운전할 수 있어 브레이튼 사이클용 복열기의 적합한 후보로 평가된다⁽⁷⁾. 다만 PCHE는 채널 형상에 따라 열전달 및 압력강하 특성이 크게 달라지며, 열에너지 저장 시스템과 연계된 조건에서는 출력 변동에 따라 운전조건이 변화할 수 있으므로, 넓은 운전조건에서 열수력 성능을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 따라서 복열기 설계 및 시스템 과도해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 설계 유로 형상에 대한 실험적 열수력 성능 검증이 필요하다.

이에 본 연구에서는 지그재그(Zigzag, Zz) 채널에 대한 실험을 통해 열전달 및 압력강하 특성을 정량적으로 평가하고, 이를 바탕으로 해당 채널의 성능을 예측할 수 있는 상관식을 제안하고자 한다. 또한 제안된 결과를 활용하여 소듐냉각고속로 연계 질소 브레이튼 사이클용 복열기 설계 가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험 구성 및 데이터 후처리

2.1 실험 장치

본 연구에서는 지그재그 채널 PCHE를 비롯한 여러 기체-기체 열교환기 성능을 평가할 수 있는 실험 장치를 Fig. 1과

같이 구축하였다.

해당 장치는 최대 30 bar 수준에서 운전 가능하며, Fig. 2에 나타난 바와 같이 관류형(Once-through type)으로 구성되었기에 저온부와 고온부의 질량유량이 동일하다. 또한 해당 장치는 공기를 활용하는 개루프(Open loop) 방식과 질소를 가압하여 순환할 수 있는 폐루프(Closed loop) 방식으로 운전 가능하다. 해당 장치를 통해 선행연구에서 열수력 성능이 잘 알려진 직관 유로에 대한 실험을 수행한 바 있으며, 층류 조건부터 천이, 난류 조건까지 기존 상관식을 대비 30% 이내의 성능을 확인하여 장치 신뢰성을 확인하였다⁽⁸⁾.

2.2 지그재그 PCHE 실험시편

지그재그 유로에 대한 열수력 성능을 평가하고 검증하기 위하여 Fig. 3에 나타난 제작 시편을 활용하였다. Table 1에 명시된 바와 같이 시편은 저온부와 고온부가 동일한 형상으로 제작되었다. 시편의 직경, 채널 수 및 채널 간격은 질소 복열기 설계 시 6000-10000 수준의 레이놀즈(Reynolds, Re) 수로 설계되는 부분^(5,7)을 참고하여 실험 범위 내에서 Re 수가 1700-12000으로 운전될 수 있도록 결정하였다. 각도는 상사 조건에서 40° 유로의 기초데이터를 확보하고, 직관 유로 및 다른 유로들과 비교할 수 있도록 선정하였다.

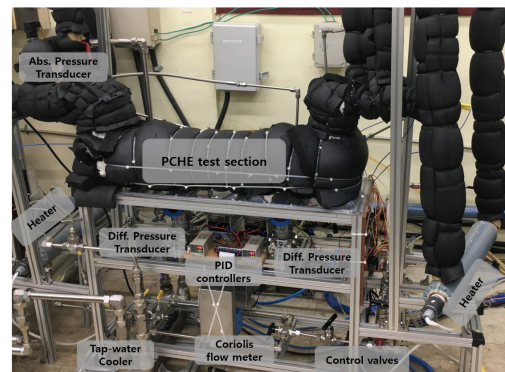


Fig. 1 Gas-to-Gas PCHE experimental loop⁽⁸⁾

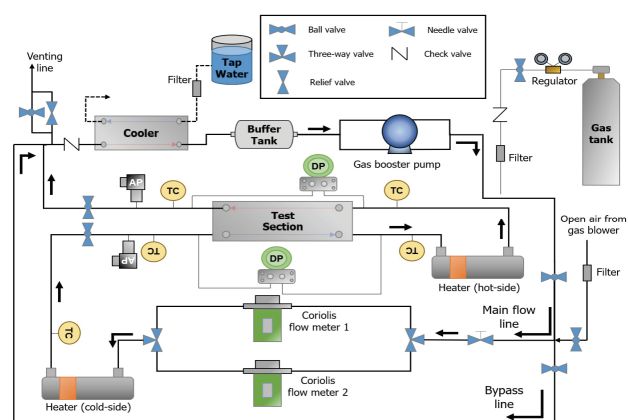


Fig. 2 Schematic diagram of experimental loop⁽⁸⁾

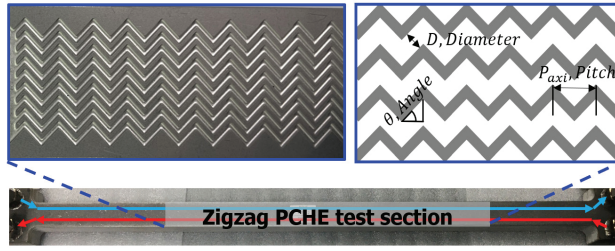


Fig. 3 Zigzag PCHE test section

Table 1 Specification of test section

Parameters		Hot side	Cold side
Geometry	Diameter(D)	1.2 mm diameter of semicircle	
	Angle(θ)	40°	
	Pitch(P _{axi})	8 mm	
Plate thickness		1.2 mm	
Axial core length		640 mm	
Material		SUS316L	
Number of channels per plate		9	
Number of plates		6	
Total number of channels		54	

2.3 데이터 후처리 방안

본 연구에서는 측정된 실험데이터에 대한 후처리를 통하여 지그재그 PCHE에 대한 중심부(Core part) 열전달 및 압력강하 성능을 도출하였다. 평균 열전달(Q_{avg})의 경우 수식 (1)처럼 측정된 고온부 열량(Q_h)과 저온부 열량(Q_c)을 평균화한 값으로 활용하였으며, 총괄열전달계수($OHTC$)는 수식 (2)와 같이 열저항 회로기법을 활용하여 분석하였다.

$$Q_{avg} = (Q_h + Q_c)/2 = OHTC \cdot A_s \Delta T_{LMTD} \quad (1)$$

$$OHTC = \frac{1}{R_{h,conv} + R_{cond} + R_{c,conv}} \quad (2)$$

대류열전달계수(HTC)는 수식 (3)과 같이 도출하였다. 수행된 실험에서 비오프(Biot, Bi) 수가 0.1보다 작은 범위 (0.012-0.075)에 존재하였기에 전도 열저항(R_{cond})은 무시하였고, 고온부와 저온부의 Re 수와 프란틀(Prandtl, Pr) 수의 차이가 2% 이내였기에 저온·고온부의 대류 열저항이 동일한 것으로 간주하였다. 이를 바탕으로 수식 (4)처럼 실험데이터 기반의 누셀트(Nusselt, Nu) 수를 도출하였다.

$$HTC \approx \frac{OHTC}{2}, \text{ where } HTC_h \approx HTC_c \quad (3)$$

$$Nu = (HTC \cdot D_h)/k \quad (4)$$

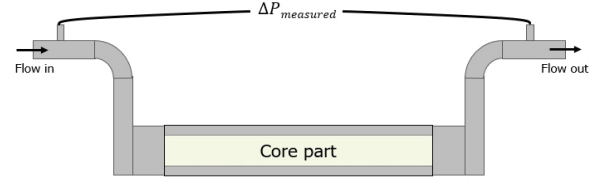


Fig. 4 Differential pressure measuring points

Table 2 Minor loss coefficient

Form factor	Loss coefficient
Tee	0.20
Elbow	0.30
Expansion	0.33
Contraction	0.48

압력강하의 경우 수식 (5)와 Fig. 4에 나타난 바와 같이 측정되는 차압 데이터는 부차적 손실(Minor loss)을 포함하고 있다. 부차적 손실을 위하여 수식 (6)과 Table 2에 나온 부차적 손실계수들을 활용하였고 측정된 압력강하 내 기체 밀도 변화로 유체가 가속되는 영향을 고려하기 위해 수식 (7)을 활용하였다. 최종적으로 지그재그 PCHE 시편 중심부 Fanning 마찰계수를 수식 (8)을 활용하여 도출하였다.

$$\Delta P_{measured} = \Delta P_{minor} + \Delta P_{core} + \Delta P_{acc} \quad (5)$$

$$\Delta P_{minor} = \Sigma K_{loss} \frac{\rho u^2}{2} \quad (6)$$

$$\Delta P_{acc} = (\rho u^2)_o - (\rho u^2)_i \quad (7)$$

$$\Delta P_{core} = 4f_{core} \frac{L_{core}}{D_h} \left(\frac{\rho u^2}{2} \right) \quad (8)$$

실험 불확실도의 경우 PCHE 선행연구 방법론⁽⁵⁾과 동일한 방식하게 수식 (9)를 바탕으로 계산하였다.

$$\sigma_y = \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \times \sigma_{\xi_i}^2 \right)^{0.5} \quad (9)$$

도출한 Nu 수의 경우 8-12%의 불확실도를 가지며, 도출한 Fanning 마찰계수의 불확실도는 1-2%로 계산되었다.

3. 실험데이터 기반 성능 평가

3.1 실험 조건 및 데이터 신뢰성 평가

본 연구의 기체-기체 지그재그 PCHE 실험은 Table 3에 제시된 온도 및 압력 조건에서 개루프 공기 조건과 폐루프 가압 질소 조건으로 수행되었다. 또한 질량유량을 변화시키

Table 3 Experimental conditions of zigzag PCHE

Type	Open-loop test	Closed-loop test
Working fluid	Air	Nitrogen
Operating temperature	16-150°C	
Operating pressure	2-7 bar	9-30 bar
Mass flow rate	1-3 g/s	3-10 g/s
Prandtl number	0.70-0.73	
Reynolds number	1700-3500	3700-12000

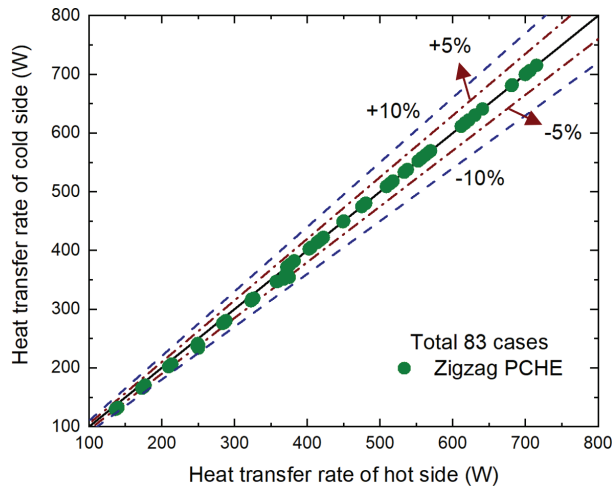


Fig. 5 Heat balance results

면서 복열기 설계 영역을 포함할 수 있도록 넓은 Re 범위 (1400-12000) 내에서 실험을 수행하였다. 이때 낮은 Re 조건(1400-3500)에서는 공기를 사용하였고, 높은 Re 조건(3700-12000)에서는 가압 질소를 작동유체로 사용하였다. 개루프 및 폐루프 실험 모두에서 목표 질소 사이클 복열기 운전조건⁽⁹⁾ 대비 Pr 수 차이는 5% 이내로 유지되었다.

개루프 조건에서 42회, 폐루프 조건에서 41회의 실험을 수행하여 총 83회의 실험데이터를 확보하였다. 수행된 열전달 실험 결과를 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 고온부에서 전달한 열량과 저온부에서 흡수한 열량을 비교하였을 때 차이가 10% 이내였기에 실험의 신뢰성이 확보된 상황에서 성능 평가가 이루어졌다.

3.2 열전달 성능 평가

열전달 성능 평가를 위하여 실험데이터 기반으로 도출한 Nu 수를 직관 유로 및 다른 각도의 지그재그 유로 성능과 비교하였다. 직관(Straight, St) 유로에 대한 열전달 성능은 Table 4에 나타난 것처럼 유동 영역에 따라 실험적으로 검증된 Chen 상관식과 Gnielinski 상관식을 활용하였다^(8,10).

동일 Re 수 조건에서 직관과 지그재그 40°의 열전달 성능을 비교하였을 때, Fig. 6과 같이 지그재그 40°의 열전달 성능은 직관 대비 1.5-2.3배 수준으로 비교적 높은 열전달 성

Table 4 Heat transfer correlations for straight channels

Regime	Heat transfer correlations
Laminar flow ⁽¹⁰⁾ (Chen correlation)	$Nu_{chen} = 0.01352Re^{0.80058}$ [1200 ≤ Re < 1850]
Transition flow ⁽¹⁰⁾ (Chen correlation)	$Nu_{chen} = 3.6361 \times 10^{-4} Re^{1.2804}$ [1850 < Re ≤ 2900]
Turbulent flow ⁽⁸⁾ (Gnielinski correlation)	$Nu_{Gnielinski} = \frac{(f_d/8)(Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7(Pr^{2/3} - 1) \cdot (f_d/8)^{0.5}}$ [$f_d = (1.82 \log_{10}(Re) - 1.64)^{-2}$, 3000 < Re]

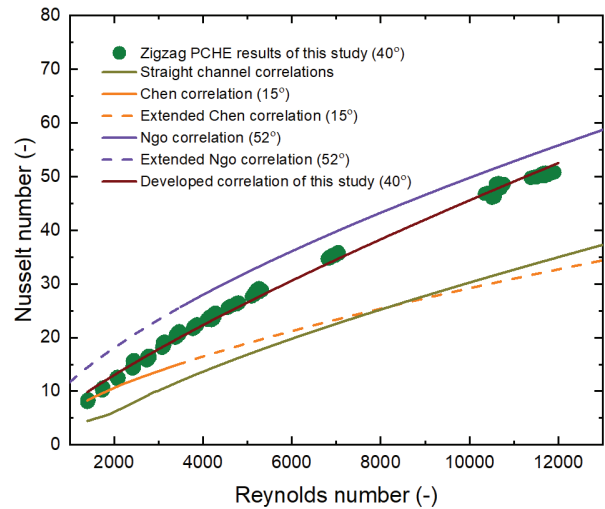


Fig. 6 Heat transfer performance evaluation

Table 5 Heat transfer correlations for zigzag channels

Type	Heat transfer correlations
Chen correlation ⁽¹¹⁾ (15° angle)	$Nu_{15^\circ} = 0.05516Re^{0.69195}$ [1400 ≤ Re < 2200]
	$Nu_{15^\circ} = 0.09221Re^{0.62507}$ [2200 < Re ≤ 3558]
Ngo correlation ⁽¹²⁾ (52° angle)	$Nu_{52^\circ} = 0.1696Re^{0.629} Pr^{0.317}$ [3500 < Re < 22000]

능을 보였다.

지그재그 유로의 경우 Table 5와 같이 각도에 따라 열전달 성능을 나타냈으며, 실험적으로 도출된 상관식들을 이용하였다^(11,12). Fig. 6에서 선행연구 실험 범위 내에서 검증된 Re 수 영역은 실선으로 명시하였고 이외 영역에서는 점선으로 성능을 나타내어 경향성을 확인할 수 있도록 하였다. 각도 15° 유로의 열전달 성능은 Chen 상관식⁽¹¹⁾을 사용했으며, 52° 유로에 대한 열전달 성능은 Ngo 상관식⁽¹²⁾을 사용하였다.

지그재그 유로의 각도에 따른 열전달 성능을 비교한 결과를 Fig. 6에 명시하였을 때 본 연구에서 도출한 40° 유로의 열전달 성능은 15° 유로보다는 높고 52° 유로보다는 낮았다.

Fig. 6에서 지그재그 40° 유로의 열전달 성능은 15° 유로

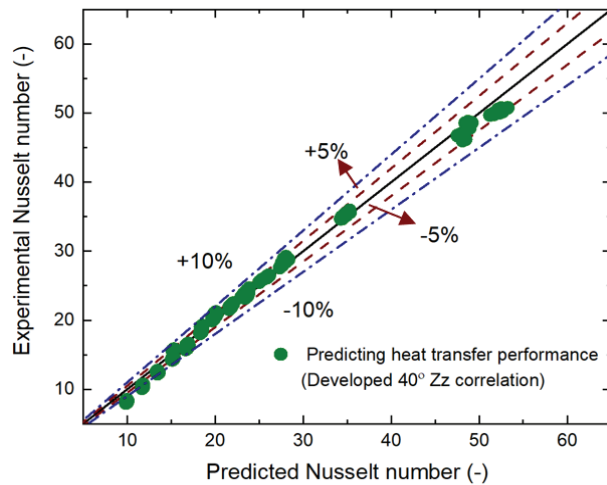


Fig. 7 Heat transfer correlation evaluation

성능 대비 1.2~1.5배 수준이었으며, 52° 유로 성능 대비 40° 유로의 열전달 성능은 70~95% 수준을 보였다. 지그재그 40° 유로의 열전달 성능을 예측하기 위하여 Nu 수 상관식을 Re 수와 Pr 수를 기반으로 수식 (10)과 같이 도출하였다.

$$Nu_{40^\circ} = 0.04249 Re^{0.7789} Pr^{0.55} \quad (10)$$

[1400 ≤ Re ≤ 12000, 0.6 < Pr < 0.8]

도출된 열전달 상관식의 예측 정확도를 Fig. 7과 같이 평가하였을 때, 평균절대오차(Mean absolute error, MAE)는 3.15%이었다. 해당 지그재그 40° 열전달 상관식을 활용하여 목표하는 질소 사이클에 대한 복열기 설계를 수행하였다.

3.3 압력강하 성능 평가

열전달 결과와 마찬가지로 압력강하 성능을 평가하기 위하여 실험데이터 기반으로 도출한 Fanning 마찰계수를 직관 유로 및 다른 각도의 지그재그 유로와 비교하였다. 직관 성능의 경우 열전달의 경우와 유사하게 유동 조건에 따라 Table 6에 명시된 상관식들⁽¹³⁾을 활용하였다.

동일 Re 수 조건에서 직관 유로와 지그재그 40° 유로의 압력강하 성능을 Fig. 8과 같이 비교하였을 때 지그재그 40° 각도의 압력강하 성능은 직관 대비 4~6배 높은 수준이었다.

Table 6 Pressure drop correlations for straight channels

Regime	Fanning friction factor correlations
Laminar flow ⁽¹³⁾ (Fully developed)	$f_{Fully} = 16/Re$ [Re < 2100]
Transition flow ⁽¹³⁾ (Liu correlation)	$f_{Liu} = 6.34 \times 10^{-5} Re^{0.6373}$ [2100 ≤ Re < 2700]
Turbulent flow ⁽¹³⁾ (Blasius correlation)	$f_{Blasius} = 0.0791 Re^{-0.25}$ [4000 ≤ Re < 10 ⁵]

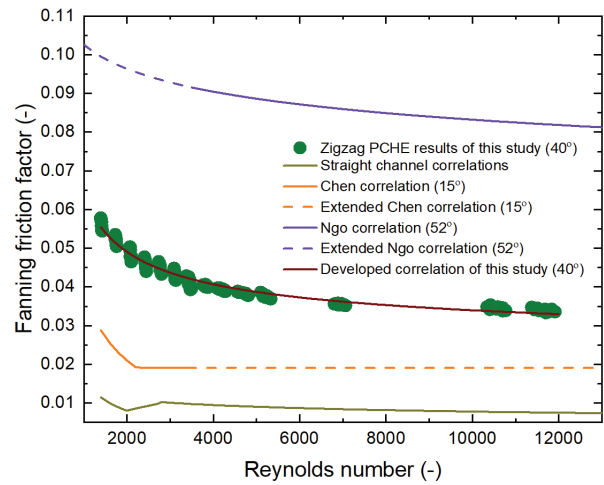


Fig. 8 Pressure drop performance evaluation

Table 7 Pressure drop correlations for zigzag channels

Type	Fanning friction factor correlations
Chen correlation ⁽¹¹⁾ (15° angle)	$f_{15^\circ} = 17.639/Re^{0.8861}$ [1400 ≤ Re ≤ 2200]
	$f_{15^\circ} = 0.019044$ [2200 < Re ≤ 3558]
Ngo correlation ⁽¹²⁾ (52° angle)	$f_{52^\circ} = 0.1924 Re^{-0.091}$ [3500 < Re < 22000]

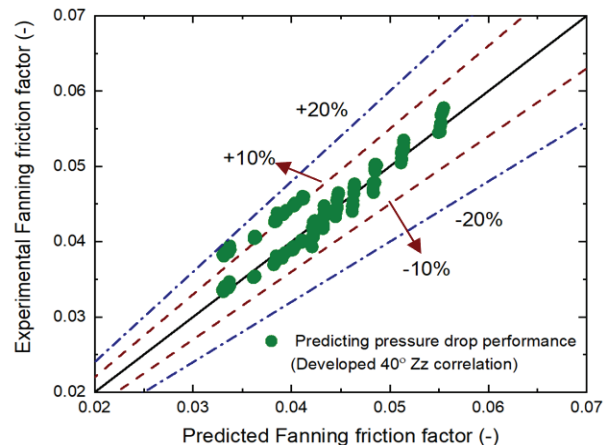


Fig. 9 Friction factor correlation evaluation

Table 7에 명시된 다른 각도의 지그재그 유로들^(11,12)과 본 실험시편의 압력강하 성능을 비교하였을 때, 본 연구에서 도출한 40° 유로의 압력강하 성능은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 15° 유로보다는 높고 52° 유로보다는 낮게 위치하였다.

40° 유로의 압력강하 성능은 15° 각도 성능 대비 1.7~2.5배 수준이었으며, 52° 각도 성능 대비 40° 유로의 압력강하 성능은 40~55% 수준을 보였다. 이를 통해 지그재그 유로에서 꺾임 각도의 증가가 난류 유동을 강하게 만들고 열전달과 압력강하를 모두 증가시키는 경향이 있음을 확인하였다.

지그재그 40° 유로의 압력강하 성능을 예측하기 위하여 Fanning 마찰계수 상관식을 Re 수 기반으로 수식 (11)과 같이 도출하였다.

$$f_{40^\circ} = \frac{22.4}{Re} + 0.08728Re^{-0.1099} \quad (11)$$

[1400 ≤ Re ≤ 12000]

Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 것 같이 도출된 마찰계수 상관식의 실험데이터 예측 정확도를 평가하였을 때, 평균절대오차(MAE)는 2.52%이었다. 지그재그 40° 유로의 압력강하 성능을 예측할 수 있는 Fanning 마찰계수 상관식을 활용하여 목표 복열기 설계를 수행하였다.

3.4 종합성능평가

복열기 설계에서 앞서 열전달과 압력강하 성능을 종합적으로 평가하기 위하여 수식 (12)에 명시된 성능평가지표 (Performance evaluation criteria, PEC)를 활용하였다⁽⁵⁾.

$$PEC \equiv (Nu/Nu_{ref}) / (f/f_{ref})^{1/3} \quad (12)$$

해당 지표는 기준 형상 대비 동일 펌핑파워 조건에서 열전달 성능 차이를 나타낸다. 본 연구에서는 기준 형상을 직관으로 선정하였으며, 선행연구⁽⁵⁾에서 질소 사이클의 복열기가 난류 조건에서 설계되었기에 본 연구의 종합성능평가는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 Re 수 3000 이상에서 진행하였다.

PEC 기반으로 종합성능을 확인하였을 때, Re 수가 3000 수준에서 지그재그 유로들은 유사한 성능을 보이며, 직관보다 종합성능이 높았다.

하지만 증가된 Re 수 영역(5000–12000)에서는 지그재그 유로 성능들이 직관 대비 종합성능이 낮아졌으며, 지그재그 각도에 따른 성능 차이가 생겼다. 주목할 만한 점은 40° 유

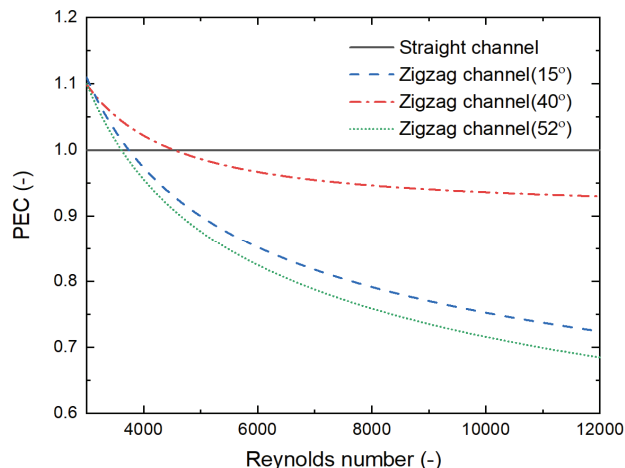


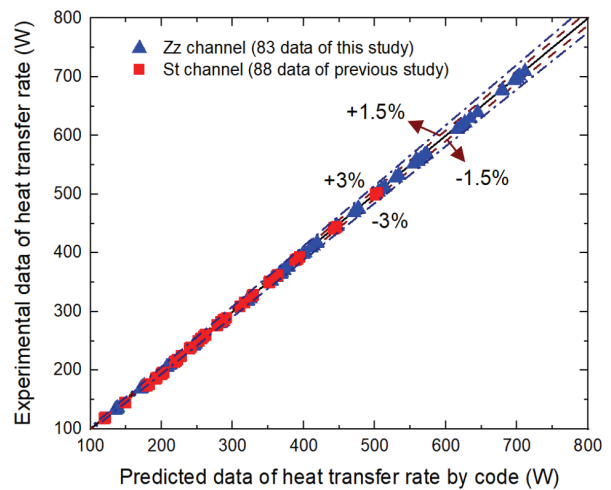
Fig. 10 Comprehensive performance evaluation

로의 종합성능은 직관 대비 7% 이내였고 지그재그 채널 중에서는 가장 우수한 성능을 보였다. 따라서 본 연구에서는 우수 설계 후보군으로 예상되는 직관과 지그재그 40° 유로를 활용하여 질소 사이클 복열기를 설계하였다.

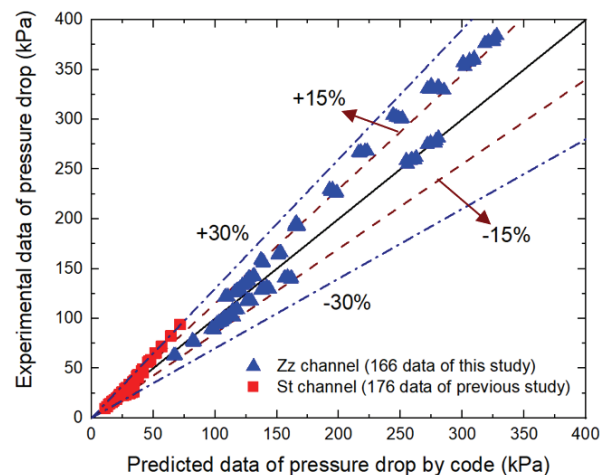
4. 질소 브레이튼 사이클 복열기 설계

4.1 복열기 설계기술 검증

본 연구에서 도출된 열전달 및 압력강하 상관식을 기존 구축된 1차원 PCHE 설계코드⁽⁵⁾에 적용하였다. 설계코드 계산 정확도를 확인하기 위해 본 연구에서 도출한 83개의 지그재그 실험데이터를 비롯하여 선행연구⁽⁸⁾에서 도출한 88개의 직관 실험데이터를 활용하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 지그재그와 직관 유로 모두 열전달을 3% 이내, 압력강하를 30% 이내로 실험데이터를 예측하여 설계기술을 검증하였다.



(a) Heat transfer validation



(b) Pressure drop validation

Fig. 11 PCHE design code validation results

4.2 복열기 설계 결과

도출된 열수력 상관식 및 검증된 PCHE 설계코드를 바탕으로 본 연구에서는 선행연구^(5,9)에서 명시된 질소 사이클의 목표 운전조건과 이를 만족하는 복열기 설계 결과들을 Table 8에 정리하였다. 동일 열전달 및 압력강하 조건을 만족하는 설계 결과들을 확인하였을 때, 실험시편과 동일한 수력직경 (0.7 mm) 조건에서 지그재그 40° 유로를 활용한 설계는 직관 유로를 적용한 경우보다 소폭 감소한 부피를 보였다. 이는 앞서 평가한 열수력 종합성능에서 지그재그 40° 유로가 직관 유로와 유사한 수준을 유지하였고, 지그재그 유로의 형상적 특성으로 인해 동일 전열면적을 보다 짧은 축방향 길이에 배치할 수 있는 특징 때문으로 예상된다.

이외에도 본 연구의 설계 결과는 수력직경 변화가 복열기 설계부피에 미치는 영향도 보여준다. 동일한 운전조건과 다

른 수력직경 조건($D_h = 1.1 \text{ mm}$)에서 복열기 설계를 수행한 선행연구⁽⁵⁾ 결과와 비교하였을 때, 본 연구에서 적용한 수력 직경 조건($D_h = 0.7 \text{ mm}$)을 활용하여 복열기 설계부피를 더욱 줄일 수 있었다. 또한 해당 선행연구에서 지그재그 52° 유로는 직관 유로에 비해 더 큰 부피를 가졌지만, 본 연구에서 사용된 지그재그 40° 유로는 균형 잡힌 열수력 특성에 의해 동일 수력 직경 조건에서 직관 대비 경쟁력 있는 결과를 나타내었다.

Fig. 12처럼 지그재그 40° 유로를 수력직경 조건($D_h = 1.1 \text{ mm}$)에서도 추가 설계함으로써 선행연구⁽⁵⁾의 직관 및 지그재그 52° 유로와 동일 수력직경 조건에서 비교하였다. 이를 위하여 본 연구의 지그재그 40° 유로의 직경(D)과 채널 간격(P_{axi})을 증가시켜 수력직경은 변화하면서도 유로의 무차원형상변수(P_{axi}/D_h)는 유지하였다^(14,15). Fig 12에서 설계 결과를 비교하였을 때, 지그재그 40° 유로는 64.15 m^3 로 설계되었기에 동일 수력직경 조건에서도 직관 및 지그재그 52° 유로에 비해 목표 운전조건을 만족하면서도 더 적은 부피를 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 수력직경이 적을 때와 동일한 경우($D_h = 0.7 \text{ mm}$, $D_h = 1.1 \text{ mm}$) 모두 지그재그 40° 유로는 우수한 설계 경향을 보였다.

본 연구에 대한 후속연구에서는 수력직경 감소에 따른 부피 저감 효과와 유속 증가에 따른 채널 수 증가에 대한 균형으로 최적 설계가 존재할 것으로 예상되기에 이에 대한 분석을 수행하고자 한다. 또한 이러한 최적 설계 결과들은 유로 형상별 열수력 성능 차이에 따라 다르게 나타날 것으로 예상되기에 지그재그 유로의 꺾임 각도 변화 등에 따른 열전달 및 압력강하 성능변화와 설계부피 변화 분석을 후속연구에서 수행하고자 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 소듐냉각고속로 연계 질소 브레이튼 사이클용 복열기 설계를 목적으로 지그재그 40° 유로를 적용한 PCHE 시편에 대해 실험적 열수력 성능 평가를 수행하였다. 실험은 질소 사이클 복열기 운전조건과 유사한 Pr 수 범위에서 Re 수 1400–12000 조건으로 수행되었으며, 측정 데이터를 바탕으로 열전달 및 압력강하 특성을 분석하였다.

지그재그 40° 유로의 열전달 성능은 동일 Re 수 조건에서 직관 유로 대비 1.5–2.3배 향상되었으며, 압력강하는 4–6배 증가하는 것으로 나타났다. 또한 지그재그 40° 유로의 열전달 및 압력강하 성능은 각각 15° 유로와 52° 유로 사이에 위치하여, 비교적 균형 잡힌 열수력 특성을 나타내었다.

실험데이터를 바탕으로 지그재그 40° 유로에 대한 Nu 수 및 Fanning 마찰계수 상관식을 도출하였으며, 평균절대오차는 각각 3.15%와 2.52%로 평가되었다. 또한 도출된 상관식을 적용한 1차원 PCHE 설계코드는 열전달량을 3% 이내, 압력강하를 30% 이내에서 실험값을 예측하여 복열기 설계가

Table 8 Recuperator target conditions and design results

Channel type	Straight type		Zigzag type	
Target conditions	Effectiveness, $\epsilon = 0.952$			
	Hot-side pressure drop, $\Delta P_h = 60\text{ kPa}$			
	Cold-side pressure drop, $\Delta P_c \leq 30\text{ kPa}$			
Channel geometry	1.2 mm semicircle ($D_h = 0.7\text{ mm}$)		1.2 mm semicircle ($D_h = 0.7\text{ mm}$, $\theta = 40^\circ$)	
Designed effectiveness [-]	0.9521		0.9521	
Designed pressure drops [kPa]	59.98 [Hot side]	28.54 [Cold side]	59.95 [Hot side]	28.48 [Cold side]
Designed Re numbers [-]	10139 [Hot side]	9817 [Cold side]	6118 [Hot side]	5924 [Cold side]
Designed volume [m ³]	51.65		50.00	

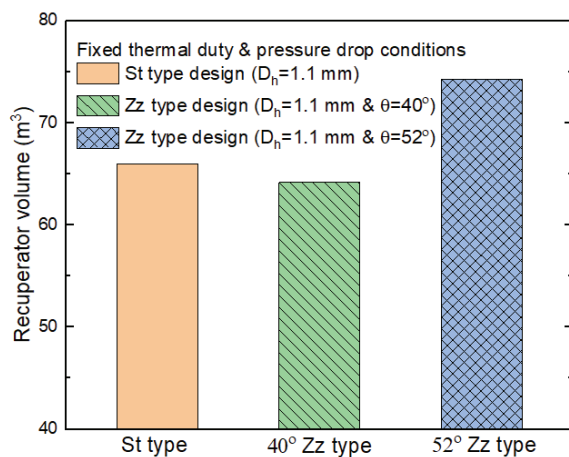


Fig. 12 Recuperator design evaluation

능성을 확인하였다.

설계에 앞서 PEC 지표 기반으로 종합 열수력 성능평가를 수행하였을 때, Re 수 3000 이상 영역에서 지그재그 40° 유로는 직관 유로 대비 7% 이내의 성능 차이를 보였고 지그재그 유로 중 가장 우수한 종합성능을 나타내었다. 이를 복열기 설계에 적용하였을 때, 동일한 목표 열량 및 압력강하 제한조건에서 지그재그 40° 유로는 직관 유로보다 소폭 감소한 설계부피를 나타내어, 질소 브레이튼 사이클용 복열기의 유망한 설계 후보가 될 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 한국수력원자력(주)의 지원으로 수행된 연구(2025)이며, 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20222020800130, 중·저온 산업폐열 이용 하이브리드 발전시스템 개발·실증).

References

- (1) Hjelmeland, M., Nøland, J. K., Backe, S., and Korpås, M., 2025, "The role of nuclear energy and baseload demand in capacity expansion planning for low-carbon power systems," *Applied Energy*, Vol. 377, p. 124366.
- (2) Kinsey, J., 2024, "TerraPower/Natrium proposal to 'de-couple' the Nuclear Island from the Energy Island," Report No. INL/MIS-24-76343-Rev000, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID, USA.
- (3) Han, J. W., Choi, S. R., Jun, I. S., Baik, S., Ye, H. Y., and Lee, J., 2026, "Investigation on diversity of trip parameters in reactor protection system for SALUS under various anticipated operational occurrences," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 449, p. 114727.
- (4) Seo, S. B., Seo, H., and Bang, I. C., 2016, "Adoption of nitrogen power conversion system for small scale ultra-long cycle fast reactor eliminating intermediate sodium loop," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 87, pp. 621~629.
- (5) Chung, S., Lee, S. W., Kim, N., Shin, S. M., Kim, M. H., and Jo, H., 2023, "Experimental study of printed-circuit heat exchangers with airfoil and straight channels for optimized recuperators in nitrogen Brayton cycle," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 218, p. 119348.
- (6) Yoon, J., Eoh, J., Kim, H., Kim, D. E., and Kim, M., 2018, "Design characteristics of N₂ Brayton cycle power conversion system coupled with an SFR in terms of thermal balance and cycle efficiency," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, May 2018.
- (7) Lee, S. W., Shin, S. M., Chung, S., and Jo, H., 2022, "Evaluation of thermal-hydraulic performance and economics of Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE) for recuperators of Sodium-cooled Fast Reactors (SFRs) using CO₂ and N₂ as working fluids," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 54, No. 5, pp. 1874~1889.
- (8) Chung, S., Lee, G., Cha, J. E., and Jo, H., 2025, "Experimental study and optimized design of printed-circuit heat exchanger with straight channel from laminar to turbulent conditions for recuperators in gas Brayton cycles," *Proceedings of NURETH-21*, August 2025.
- (9) Ahn, Y., and Lee, J. I., 2014, "Study of various Brayton cycle designs for small modular sodium-cooled fast reactor," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 276, pp. 128~141.
- (10) Chen, M., Sun, X., Christensen, R. N., Shi, S., Skavdahl, I., Utgikar, V., and Sabharwall, P., 2016, "Experimental and numerical study of a printed circuit heat exchanger," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 97, pp. 221~231.
- (11) Chen, M., Sun, X., Christensen, R. N., Skavdahl, I., Utgikar, V., and Sabharwall, P., 2016, "Pressure drop and heat transfer characteristics of a high-temperature printed circuit heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp. 1409~1417.
- (12) Ngo, T. L., Kato, Y., Nikitin, K., and Ishizuka, T., 2007, "Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 560~570.
- (13) Li, J., Li, Y., Xiayu, T., Li, X., and Zheng, R., 2025, "Experimental investigation on transitional flow of supercritical hydrocarbon fuel within straight channels of Printed Circuit Heat Exchangers for hypersonic thermal management systems," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 259, p. 124905.
- (14) Yoon, S. J., O'Brien, J., Chen, M., Sabharwall, P., and Sun, X., 2017, "Development and validation of Nusselt number and friction factor correlations for laminar flow in semi-circular zigzag channel of printed circuit heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 1327~1344.
- (15) de la Torre, R., Francois, J. L., and Lin, C. X., 2021, "Optimization and heat transfer correlations development of zigzag channel printed circuit heat exchangers with helium fluids at high temperature," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 160, p. 106688.