

스털링 엔진용 재생 열교환기의 다공체 구조에 따른 성능 특성

신 명 철, 안 준*, 강 병 하*
국민대학교 대학원, *국민대학교 기계시스템공학부

Performance Characteristics of a Regenerative Heat Exchanger Depending on Its Porous Structure

Myung Chul Shin, Joon Ahn*, Byung Ha Kang*

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received October 20, 2011; revision received January 27, 2012)

ABSTRACT: Stirling engine is an external combustion engine, whose efficiency approaches that of Carnot engine with the help of a regenerator. The regenerator is a heat exchanger composed of porous medium, whose performance is dependent on the pore structure. Three types of pore structures are considered in the present study. They are wire screen, random wire and composite structure, i.e. a combination of wire screens with different hydraulic diameters. The porosity more highly affects the performance of a regenerator compared to the hydraulic diameter. The random wire can yield high effectiveness even at a high porosity. The composite mesh gives better performance when the hydraulic diameter decreases in the direction from hot side to cold side.

Key words: Stirling engine(스털링 엔진), Regenerator efficiency(재생기 효율), Porous media(다공성 매체), Porosity(공극률), Hydraulic diameter(수력 직경), Friction factor(마찰 계수)

기 호 설 명

A	: 면적 [m^2]
A_c	: 최소 자유유동 면적 [m^2]
\dot{E}_{total}	: 공급 에너지 [W]
f	: 마찰인자
G	: 질량 유속 [$kg/s m^2$]
g_c	: 비례상수
H	: 무차원 엔탈피
\dot{Q}_{ct}	: 재생기 튜브를 통한 전도 손실 [W]
\dot{Q}_{cm}	: 매트릭스를 통한 전도 손실 [W]

\dot{Q}_{rh}	: 재가열 손실 [W]
v_m	: 평균 비체적 [m^3/kg]
\dot{W}_l	: 압력강하 손실 [W]

그리스문자

ΔP	: 압력강하 [Pa]
ε	: 열교환 유용도
ψ	: 재생기 효율

하첨자

co	: 저온측, 재생기에서 냉각부로
eo	: 고온측, 가열부에서 재생기로
rc	: 저온측, 냉각부에서 재생기로

† Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4833; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: jahn@kookmin.ac.kr

1. 서 론

스털링 기관은 외연기관으로서 최근 태양열이나 바이오매스와 같은 신재생 열원을 이용한 발전 시스템 또는 소음 및 배가스 특성이 중요한 가정용 열병합 시스템의 원동기로서 주목을 받고 있다.^(1, 2) 또한 스텔링 기관은 재생열교환기에 의해 열역학적으로 Carnot 효율에 접근하는 높은 효율을 구현할 수 있다. 스텔링 기관의 효율에 큰 영향을 미치는 재생열교환기에는 주로 다공체가 사용되며 열교환기 설계를 위한 열전달 특성에 관하여는 국내외에서 활발한 연구가 진행되고 있다.⁽³⁻⁶⁾

다공체로 채워진 재생기에서는 Fig. 1에 보인 것과 같이 재생기 튜브를 통한 전도 손실, 매트릭스를 통한 전도 손실, 재가열 손실, 압력 강하 손실 등이 발생하여 성능에 영향을 주게 된다. 지금까지 많은 연구가 열교환기의 유용도를 기반으로 재가열 손실을 고려하고 있으나,⁽⁴⁻⁶⁾ 다공체의 구조나 운전 조건에 따라서 압력 강하 손실이 중요해 질 수 있으므로⁽⁷⁾ 이에 대한 종합적 검토가 필요하다.

본 연구에서는 운전 조건을 가정용 열병합 발전을 위한 스텔링 엔진의 재생기로 설정하고⁽⁸⁾ 다공체의 구조가 재생기의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하였다. 다공체 구조에 따른 재생기 성능에 대해서는 다공체의 수력직경이 증가할수록 유용도가 감소하는 선행연구가 발표된 바 있으나⁽⁴⁾ 수력직경, 공극률 및 와이어의 두께가 종합적으로 고려되지 못하였고 압력강하 손실 또한 고려되지 않았다.

이에 본 연구에서는 적층형 매트릭스(Wire screen), 랜덤 와이어(Random wire) 구조 및 유동방향으로 수력직경이 변화하는 조합형(Composite) 적층 매트릭스에 대하여 수력직경 및 공극률이 재생기 성능에 미치는 영향에 대하여 체계적인 실험을 수행하

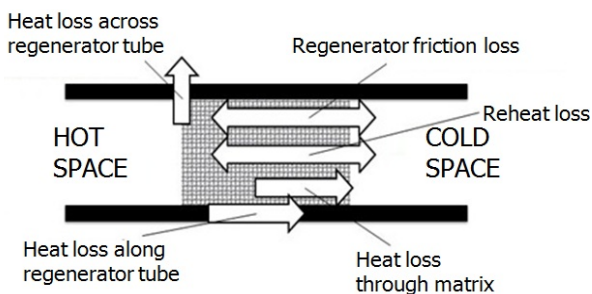


Fig. 1 Possible losses in a regenerator of a Stirling engine.

였고 유용도 뿐 아니라 압력강하도 측정하여 종합적인 결론을 도출하였다.

2. 재생기 성능 실험

2.1 재생기 다공체 구조

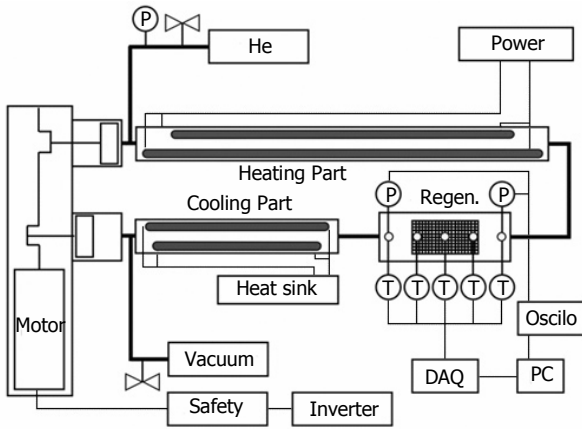
본 연구에서는 균일한 적층형 매트릭스(Wire screen), 랜덤 와이어(Random wire) 다공체, 유동방향으로 메쉬를 변화시킨 조합형 매트릭스로 재생기를 구성하여 성능을 측정하였다. 적층형 매트릭스 재생기의 경우, 수력직경에 따른 재생기의 성능을 평가하기 위하여 Mesh number 100, 150, 200, 250, 350의 스크린 와이어 메쉬에 대하여 실험을 수행하였다. 실제 기관에서 사용하는 와이어와 직경이 30 μm 로 같은 WN350에 대해서는 적층 밀도를 통해 공극률을 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95로 조정하면서 공극률 변화에 따른 결과를 도출하였다.

상용화된 외산 1 kW급 스텔링 엔진의 재생기⁽⁸⁾에는 랜덤 와이어 다공체가 삽입되어 있으며 직경은 30 mm, 공극률은 0.92이다. 본 연구에서는 직경 30 mm인 와이어로 공극률 0.90~0.95의 랜덤 와이어 다공체를 제작하여 실험을 수행하였다. 조합형 다공체의 경우, 가열부로부터 냉각부 방향으로 수력직경이 증가하도록 WN350~200~100으로 구성된 매트릭스(type A)와 수력직경이 감소하도록 WN100~200~350으로 구성된 매트릭스(type C)에 대하여 실험을 수행하여 수력직경이 WN200으로 일정한 경우(type B)와 비교하였다.

2.2 실험 장치 및 조건

실험 장치는 Fig. 2에 제시한 것과 같이 구동부, 작동 유체를 가열, 냉각하기 위한 가열 및 냉각부, 메쉬를 삽입하여 재생기 3를 모사하는 부분으로 구성하였다. 재생기에 해당하는 부분에서는 온도 및 차압을 측정하여 재생기의 성능이라고 할 수 있는 열적 유용도와 압력강하 손실을 구할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 소형 열병합 발전을 위한 스텔링 엔진을 연구 대상으로 하여 발전 주파수에 해당하는 주파수와 같은 왕복 유동 조건 하에서 실험을 수행할 수 있도록 응답속도 및 자료 변환 속도를 확보하였다.

작동 유체는 실제 엔진과 동일한 헬륨을 사용하였다. 연구 대상인 스텔링 엔진의 고온부 온도는 약



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 2 Experimental apparatus.

770 K이나 재료 및 계측 장치의 내열 한계로 인해 전기 가열 방식으로 장시간 실험을 수행하는 데 어려움이 있어 온도 의존성에 대한 예비 실험을 거쳐 고온부 온도 420 K 조건에서 실험을 수행하였다. 왕복 유동의 주파수는 실제 발전기와 같은 50 Hz가 되도록 모터를 구동하였다. 실린더 및 다공체 치수는 실제 엔진과 유사한 약 $8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 질량유속이 형성 되도록 설계하였다.

2.3 계측 및 분석방법

재생열교환기의 열전달 특성은 30 mm 간격으로 설치한 다섯 개의 열전대를 통해 측정된 결과를 통하여 파악하였다. 재생기의 유용도는 이상적으로 전달될 수 있는 에너지에 대한 실제 전달되는 에너지의 비로서 실험적으로 얻을 경우 식(1)을 통해 산출한다.

$$\varepsilon = \frac{H_{eo} - H_{rc}}{H_{eo} - H_{co}} \quad (1)$$

압력 강하 특성은 재생기 전후에 120 mm의 폭으로 설치한 차압 센서를 통하여 구하였다. 측정된 차압을 이용하여 마찰인자(Friction factor)를 산출하였고 정의는 Kays and London⁽⁶⁾에 제안된 정의를 따랐다(식(2)).

$$f = \frac{2g_c}{G^2 v_m} \frac{A_c}{A} \Delta P \quad (2)$$

열전달 및 압력강하를 총괄하는 재생열교환기의 성능은 식(3)과 같이 정의된 재생기의 효율을 통해 검토하였다.

$$\psi = 1 - \frac{\dot{Q}_{ct} + \dot{Q}_{cm} + \dot{Q}_{rh} + \dot{W}_l}{E_{total}} \quad (3)$$

식(3)은 재생기에서 발생 가능한 손실의 합을 재생기 전체에 전달된 전체 에너지로 나눈 값을 1에서 뺀 것으로서 위의 모든 손실이 없을 때 효율은 1이 된다.

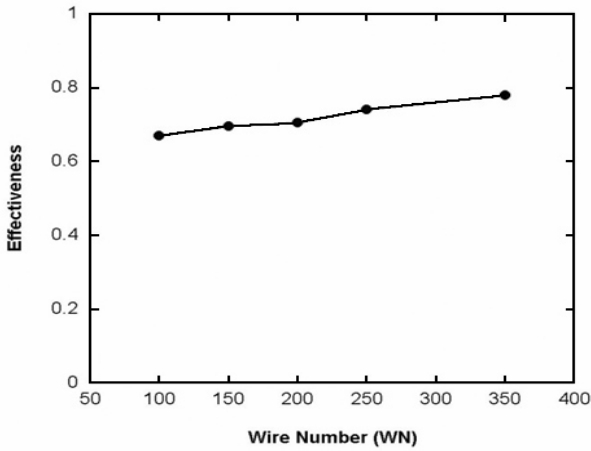
3. 재생기 성능 분석 및 결과

3.1 재생기 종류에 따른 유용도

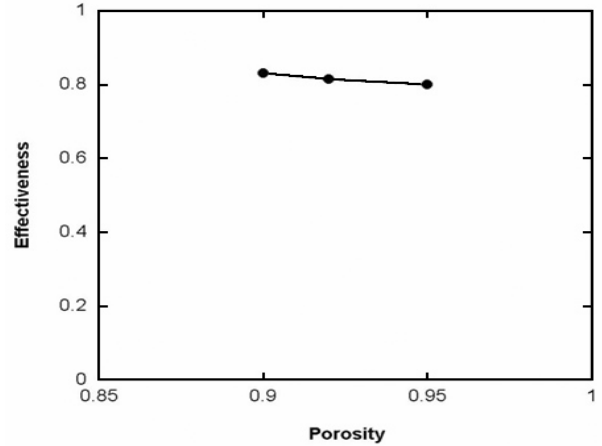
적층형 매트릭스의 경우 유용도(Fig. 3)는 실험을 수행한 범위에서 수력 직경에 대한 변화보다 공극률에 의한 변화가 확연히 크게 나타났다. 수력직경의 영향을 보면(Fig. 3(a)), 수력직경이 감소할수록, Wire Number가 증가할수록 유용도가 증가하는 경향을 보인다. 공극률의 경우(Fig. 3(b)), 공극률이 작을수록 유용도가 높은 경향을 보인다.

랜덤 와이어의 경우에도 공극률이 증가할수록 유용도가 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 4(a)). 단, 유용도 값이 공극률이 0.9일 때 0.84, 0.95일 때 0.80으로서 동일한 공극률에서 스크린 와이어 매쉬의 경우보다(각각 0.63 및 0.56, Fig. 3(b) 참조) 훨씬 높은 수치를 보인다.

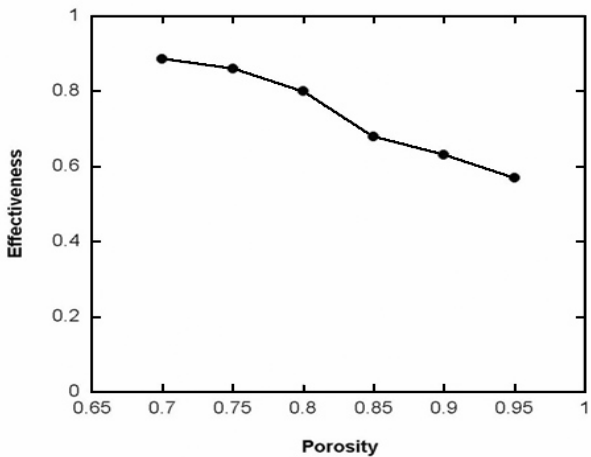
유동방향으로 수력직경에 변화를 준 조합형 재생열교환기의 경우(Fig. 4(b)), 각각의 경우 평균 수력



(a) Effect of mesh size



(a) Random wire type



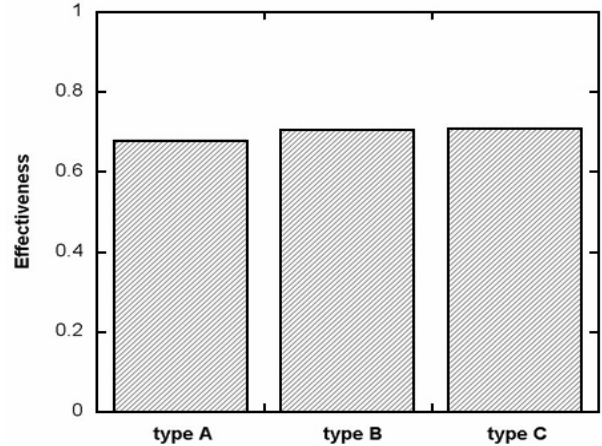
(b) Effect of porosity

Fig. 3 Thermal effectiveness of wire mesh type regenerators.

직경 및 공극률이 동일하여 형태별로 유용도가 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나 고온부에서 저온부 방향으로 수력직경이 감소하는 type C의 경우가 0.72로서 반대의 경우인 type A에서 얻은 0.68에 비해 5% 정도 향상된 성능을 보인다.

3.2 재생기 종류에 따른 압력강하

압력 손실을 입력 에너지로 나눈 상대 압력 손실을 Fig. 5, Fig. 6에 제시하였다. 대체로 15~20% 정도의 입력에너지가 압력 손실에 의해 소모되는 것을 볼 수 있다. 와이어 스크린 메쉬의 경우(Fig. 5), 수력직경과 공극률이 증가할수록 압력 강하가 감소하는 경향을 보인다. 실험을 수행한 범위에서는 수력직경보다 공극률이 더 큰 영향을 주고 있다. 앞에



(b) Composite mesh

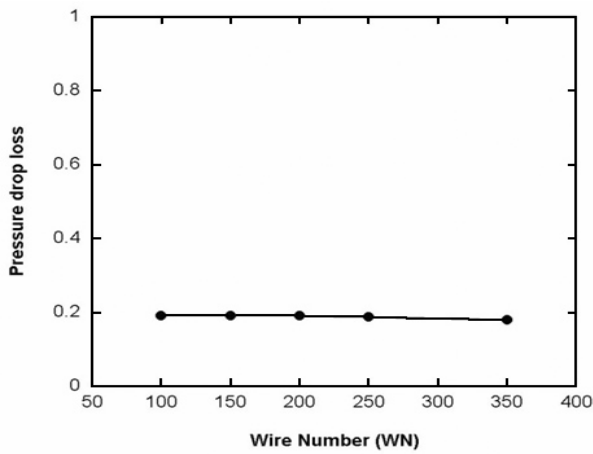
Fig. 4 Thermal effectiveness of regenerators.

서 언급한 유용도를 고려한 재가열 손실은 반대의 경향을 보일 것이므로 최적의 재생기 성능을 얻을 수 있는 공극률 또는 수력직경이 존재할 가능성을 확인할 수 있다.

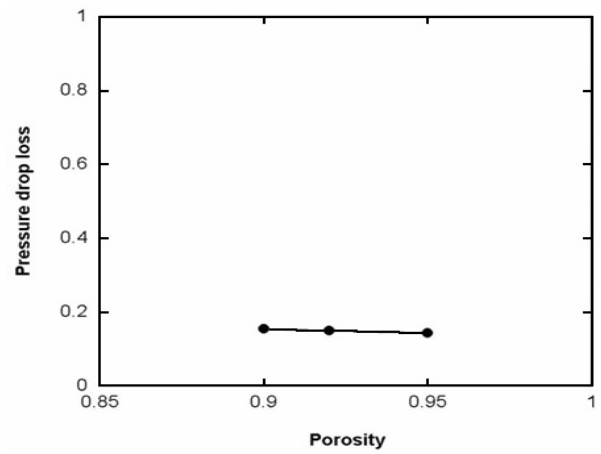
랜덤 와이어 메쉬의 경우에도 공극률이 증가할수록 압력손실이 감소하는 경향을 보인다(Fig. 6(a)). 정량적으로는 상대압력손실이 0.14에서 0.16의 범위로서 공극률이 동일한 스크린 와이어 메쉬에 비해 10~20% 정도 작은 값을 보인다. 조합형 메쉬의 경우 type C가 0.18로서 0.23인 type A보다 낮은 값을 나타내어 고온부에서 저온부 방향으로 수력직경을 줄이는 설계가 열전달 및 압력강하 면에서 모두 유리한 것으로 나타났다.

3.3 재생기에서 발생 가능한 손실과 효율

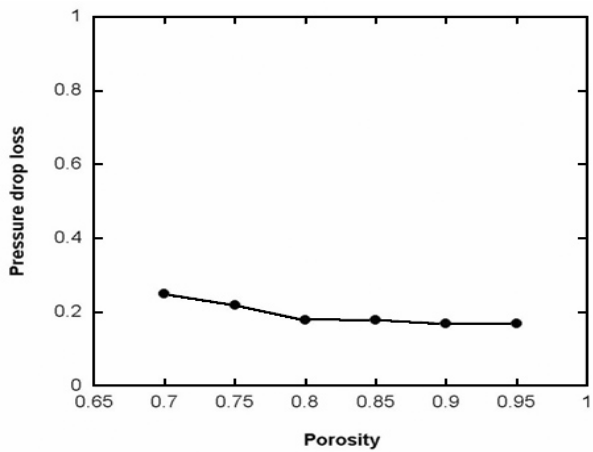
열전달 특성과 압력 강하 특성을 분리하여 재생



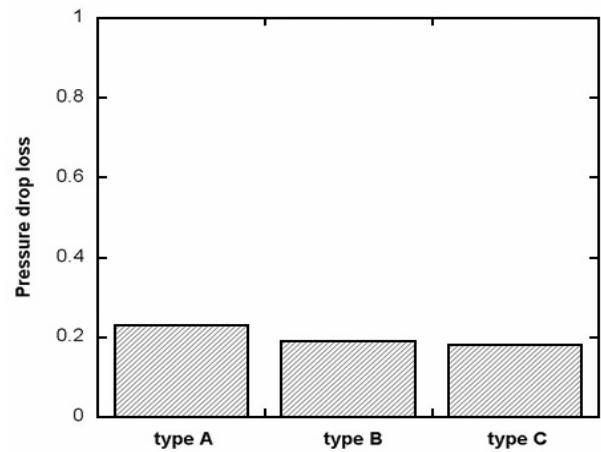
(a) Effect of mesh size



(a) Random wire type



(b) Effect of porosity



(b) Composite mesh

Fig. 5 Pressure drop loss of wire mesh type regenerators.

Fig. 6 Pressure drop loss of regenerators.

기의 성능을 고려할 경우 최적의 조건을 도출하기에 어려움이 있다. 이러한 이유로 재가열 손실로 나타나는 열전달 특성과 압력 강하 손실로 환산한 차압을 뿐만 아니라 재생기 튜브나 매트릭스를 통한 손실을 모두 고려하여 효율의 개념으로 접근하였다. 각 손실의 비율을 나타낸 자료가 Fig. 7, Fig. 8에 제시하였다. Fig. 9, Fig. 10에는 이를 효율로 환산하여 0에서 1사이의 값으로 나타내었다.

스크린 와이어 메시에서 수력 직경의 영향을 보면 (Fig. 7(a)), 수력직경이 감소할 때 압력강하 손실은 크게 증가하지 않지만 재가열 손실이 크게 감소하여 유효하게 이용할 수 있는 에너지의 비율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 재생기의 효율도 유용도를 그대로 따라가는 경향을 보인다(Fig. 9(a)).

공극률의 경우(Fig. 7(b)), 공극률이 증가할수록 압

력손실은 감소하지만 재가열 손실이 증가하여 0.85 이상에서는 유효하게 이용할 수 있는 에너지의 비율이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 효율과 유용도를 비교하면(Fig. 9(b)), 유용도의 경우 공극률이 증가할수록 감소하지만 압력강하를 고려하면 공극률 0.75에서 0.8부근에서 재생기 효율이 최대값을 갖는다.

랜덤 와이어의 경우(Fig. 8(a)), 공극률이 높은 경우에도 재가열 손실이 크지 않아 공극률이 같은 와이어 스크린에 구조에 비해 유효하게 사용되는 에너지의 비율이 높은 것을 볼 수 있다. 재생기 효율은(Fig. 10(a)), 공극률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 감소폭은 와이어 스크린에 비해 크지 않은 것을 관찰할 수 있다.

조합형 구조에서는 고온부에서 저온부 방향으로 수력직경이 감소하는 구조(type C)가 증가하는 구조(type A)에 비해 압력강하와 열전달 측면에서 모

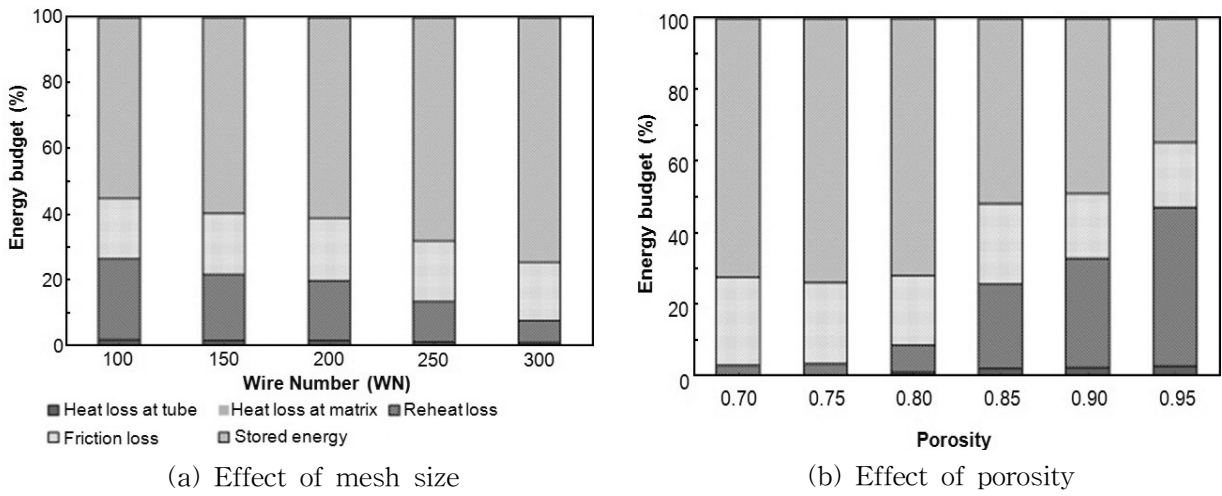


Fig. 7 Energy budget in wire mesh type regenerators.

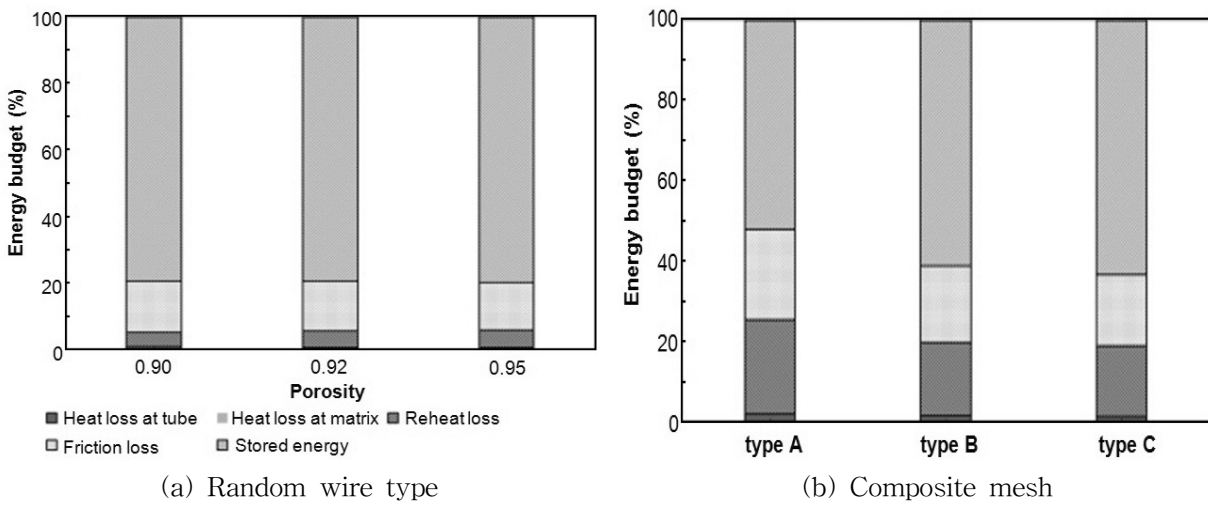


Fig. 8 Energy budget in regenerators.

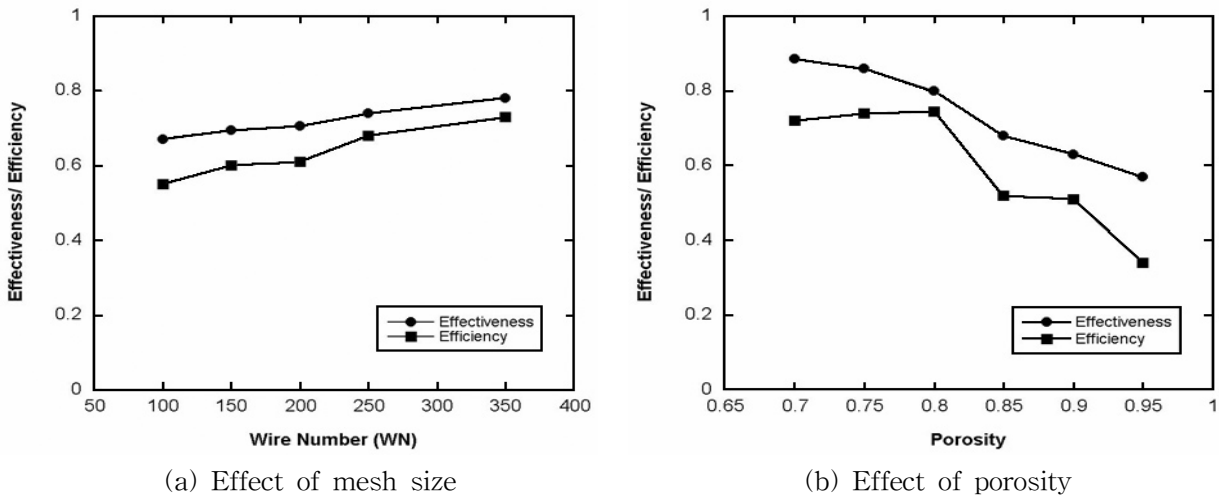


Fig. 9 Regenerator efficiency in comparison with thermal effectiveness for wire mesh type regenerators.

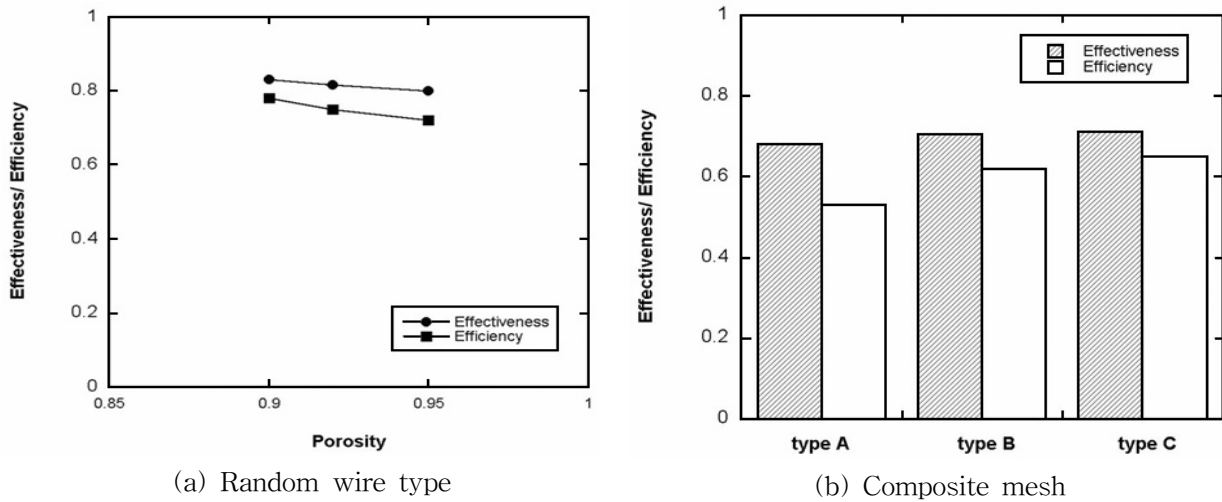


Fig. 10 Regenerator efficiency in comparison with thermal effectiveness for regenerators.

두 유리하여 재생기에 저장되는 에너지의 비율이 상대적으로 높게 나타난다(Fig. 8(b)). 효율과 유용도를 비교해보면(Fig. 10(b)), 재가열 손실이 감소하여 유용도는 type C가 type A보다 높은 값을 보인다. Type C의 경우 압력강하 손실도 감소하여 유용도와 효율의 차이가 type A에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 스텔링 엔진 재생기의 왕복 유동 조건에서 적층형 매트릭스, 자유형 와이어, 조합형 매트릭스의 세 가지 구조에 대하여 성능 실험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 적층형 매트릭스의 경우 수력직경보다 공극률이 성능에 큰 영향을 주며 공극률이 증가할수록 압력손실은 감소하지만 재가열 손실이 증가하므로 가정용 열병합 발전을 위한 1 kW급 엔진의 경우 최적의 성능을 갖는 공극률이 존재한다.

(2) 랜덤 와이어 구조의 경우, 와이어 스크린 구조에 비해 공극률이 높은 경우에도 재가열 손실이 작아 재생기 효율이 높게 유지된다.

(3) 와이어 스크린의 수력직경을 유동방향으로 변화시킨 조합형 구조의 경우 고온측에서 저온측 방향으로 수력직경이 감소하는 구조가 열전달 및 압력강하 측면에서 모두 유리한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발사

업 및 에너지인력양성사업에 의해 지원받았으며 이에 감사드립니다(No. 20114010100070).

참고문헌

- Ahn, J., Lee, Y. S., and Kim, H. J., CFD Study on the Combustion Chamber of a 1 kW Class Stirling Engine, Trans. KSCFE, Vol. 16, No. 3, pp. 88-94.
- Ahn, J., Lee, Y. S., and Kim, H. J., Combustion Characteristics of a Premixed Burner in a Stirling Engine for a Domestic Cogeneration System, Trans. KSME(B), Vol. 36, No. 2, pp. 211-216.
- Kaviany, M., 1995, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer.
- Cho, K. S., Lee, D. Y., and Ro, S. T., 1996, Analysis of Effectiveness for a Stirling Machine Regenerator, Trans. KSME(B), Vol. 20, No. 4, pp. 1426-1436.
- Kim, J. H., Lee, J. H., and Kang, B. H., 1995, Heat Transfer of Oscillating Flow in a Cylinder with Regenerator, Trans. KSME, Vol. 19, No. 7, pp. 1758-1769.
- Lee, G. T., Kang, B. H., and Lee, J. H., 1998, Effectiveness Enhancement of a Thermal Regenerator in an Oscillating Flow, Applied Thermal Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 653-660.
- Kays, W. M. and London, A. L., 1984, Compact Heat Exchangers(Third edition), McGraw-Hill Book Company.
- BAXI Ltd., 2007, BAXI Micro CHP, pp. 1-3.