

스털링기관용 재생기에 관한 기초연구 (Ⅱ)
- 철망을 축열재로 한 재생기의 전열 및 유동손실특성 -

Basic Study on the Regenerator of Stirling Engine (Ⅱ)
- Heat transfer and flow friction loss characteristics of the regenerator with
wire screen matrix -

김태한	이시민	이정택
정희원	정희원	정희원
T. H. Kim	S. M. Lee	J. T. Lee

ABSTRACT

The performance of Stirling engine, in particular, its energy conversion efficiencies are critically influenced by the regenerator characteristics. The regenerator characteristics are influenced by effectiveness, void fraction, heat transfer loss and fluid friction loss in the regenerator matrix. These factors were influenced by the surface geometry and material properties of the regenerator matrix. The regenerator design goals are good heat transfer and low pressure drop of working gas across the regenerator. Various data for designing a wire screen matrix have been given by Kays and London(1984). The mesh number of their experiment, however, was confined below the No. 60, which seems rather small for the Stirling engine applications. In this paper, in order to provide a basic data for the design of regenerator matrix, characteristics of heat transfer and flow friction loss were investigated by a packed method of matrix in oscillating flow as the same condition of operation in a Stirling engine.

Seven kinds of single wire screen meshes were used as the regenerator matrices. The results are summarized as follows;

1. While the working fluid flew slowly in the regenerator, the temperature difference was great at the both hot-blow(the working fluid flows from heater to cooler) and cold-blow(the working fluid flows from cooler to heater). On the other hand, while the working fluid flew fast, the temperature difference was not distinguished.
2. The No.150 wire screen used as the regenerator matrix showed excellent performance than the others.
3. Phase angle variation and filling rate affected heat transfer of regenerator matrices.
4. Temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator is very high in degree of 120 phase angle.

Keywords : Stirling engine, Regenerator matrix, Wire screen, Heat transfer, Flow friction loss.

The article was submitted for publication in August 2002, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in November 2002. The authors are T. H. Kim, Professor, J. T. Lee, Research Assistant, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea and S. M. Lee, Section Head, Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative, Seoul, Korea.

The corresponding author is Tae Han Kim, Professor, Agricultural Machinery Engineering, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu, 702-701, Korea. Fax: 053) 950-6780 E-mail: <thkim@knu.ac.kr>.

1. 서 론

스털링기관은 재생사이클이므로 이 기관의 열효율은 재생기의 성능에 좌우된다. 그리고 재생기의 성능에 영향을 미치는 인자는 열교환효도, 전열 성능, 유동마찰손실, 불용체적 등을 들 수 있으며 이는 특히 재생기 축열재(martix)의 재질 및 형상에 따라 결정된다. 이상적인 재생기는 전열성능이 우수하고 유동마찰 손실이 적은 것이나 이들은 서로 상반되는 조건을 갖고 있다. 지금까지 재생기 축열재로서 사용되어온 철망은 전열면적이 큰 특성으로 인해 가스터빈의 재생기에 주로 사용되어 왔다. 그러나 가스터빈의 경우는 고온유체가 재생기를 통과하고, 그 후 저온유체가 재생기를 통과하기까지의 시간 간격이 비교적 길기 때문에 메쉬 번호(mesh No.) 60번 이하의 철망이 대부분 사용되어 왔다(Kays, London, 1984).

그러나 고온유체와 저온유체가 재생기를 통과하는 시간 간격이 극히 짧은 스텔링기관의 경우에는 메쉬번호가 더 큰 철망을 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단되지만 이에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 또한 철망을 축열재로 한 재생기에 관한 연구로서 浜口와 高橋 등(1983, 1984)은 정상류 및 비정상류 조건에서 메쉬 번호가 같은 철망을 적용한 축열재의 유동손실 및 전열특성에 대해 보고하였다. 그러나 이들은 작동유체의 유동이 가스터빈 재생기에서의 유동과 같은, 한 방향으로만 유동(unidirectional flow)하는 조건에서 실험한 것이므로 스텔링기관과 같이 작동유체의 유동이 왕복 유동(oscillating flow)인 상태에 적용하는 데는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 메쉬 번호가 큰 철망을 축열재로 한 재생기를 스텔링기관의 작동조건과 동일한 왕복유동상태에서 실험하여, 전열성능 및 압력강하 특성을 구명하고, 또한 피스톤의 위상차 및 재생기 축열재의 충전율 변화가 전열성능 및 유동손실에 미치는 영향을 구명하여 향후 스텔링기관용 재생기를 설계하는데 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구사

스털링기관 재생기의 축열재에 관한 연구로서

西本, 北元(1986)은 재생기 축열재의 종류를 선정하는 자료를 구명하기 위하여 강관내에 각각 직경 3mm, 5mm의 강구(stainless steel ball)와 메쉬번호 60번 철망, 그리고 직경 15mm의 동제(銅製) 링(ring) 등 각종의 축열재 시료를 충전하여 정상상태조건에서 전열성능과 유동저항을 측정하였다. 그 결과, 전열성능은 강구, 철망, 동제 링의 순으로 우수성이 나타났으나 유동저항의 크기는 직경 3mm의 강구, 철망, 직경 5mm의 강구, 동제 링의 순으로 나타났다고 보고하였다.

Chen과 Griffin(1984)은 재생기에서의 압력손실이 기관성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 GPU3 기관을 대상으로 2차 단열해석에 의한 성능분석에서 마찰계수를 50~200%까지 각각 50%씩 4단계 증가시킨 결과 회전속도 3,500 rpm에서 도시열효율과 도시출력이 각각 50%씩 감소하였다고 보고하였다.

Isshiki와 Watanabe 등(1984, 1987)은 스텔링기관의 세손실인자 즉 재생기에서의 유동마찰 손실, 피스톤링 마찰손실, 피스톤링에서의 누설손실, 베어링 등 회전 운동부분의 마찰손실 등을 측정할 결과, 재생기내의 유동마찰 손실이 가장 크게 나타났다고 하였으며, 재생기 축열재의 종류로서 철망, 구, 파이프, 꼬인 철선 등을 이용한 재생기를 시작기관에 사용하여 출력성능을 평가하였다. 그 결과 알루미늄재 파이프(내경 1.8 mm, 외경 2.5 mm)는 철망(40번 메쉬)에 비해 축출력이 최대 2배로 증가하였고, 이는 철망의 전열면적이 파이프에 비해 3배정도 큰 반면에 유동저항계수가 20배정도 크기 때문이라고 하였다.

Bartolini와 Naso(1984)는 재생기의 축열재로서 스테인레스재의 철망에 대한 열역학적, 기술적 및 경제적인 면에 대해 평가하였다. 축열재의 기하학적 형상으로서 철망의 직경, 피치, 철망과 철망 사이의 최소거리, 전열면적 등을 인자로 전열성능에 대해 평가한 결과 전열면적이 1m²인 경우에는 피치를 0.1mm에서 1.3mm까지 증가시키에 따라 전열성능이 우수하였으나 전열면적이 2m², 3m²의 경우 철선의 직경이 0.6mm 이상으로 증가됨에 따라 피치 0.7mm인 경우가 가장 양호하였다고 하였다.

Barnes와 Render(1986)는 재생기 축열재의 종류가 기관 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 재생기 축열재로서는 스테인레스재의 철망과 섬유망,

그리고 니켈-크롬합금의 금속재(retimet) 등 3종류를 평가하였다. 그 결과 철망메쉬와 섬유망을 밀착 적층한 경우가 가장 우수한 것으로 나타났다고 보고하였다.

3. 재료 및 방법

가. 실험장치

실험장치는 재생기, 가열기 냉각기, 피스톤 및 실린더, 크랭크기구 및 보조장치로서 구성하였다. 실험장치의 개략도는 그림 1과 같으며, 재생기에는 각종 공시 축열재를 적층하였다. 그림 2는 실험장치의 사진을 나타낸 것이다. 재생기는 직경

70mm, 길이 110mm 인 관의 양단에 플랜지를 부착하여 가열기와 냉각기 사이에 접합시키는 구조로 제작하였다(그림 3).

보조장치로서는 2개의 피스톤의 상대위상을 변화시키는 장치로 구성하였으며 피스톤의 내경은 35mm, 행정은 120mm이다. 가열기는 전기가열(2.2kW)방식을 채택하여 재생기로 공급되는 열량을 일정하게 유지되도록 하였다.

냉각기는 원통다관식(shell and tube)으로 제작하여 수돗물을 연속적으로 공급하여 냉각하였다. 그리고 구동축의 회전속도 변경은 전동기에 인버터를 장착하여 회전속도를 조절할 수 있도록 하였다. 실험장치의 제원은 표 1과 같다.

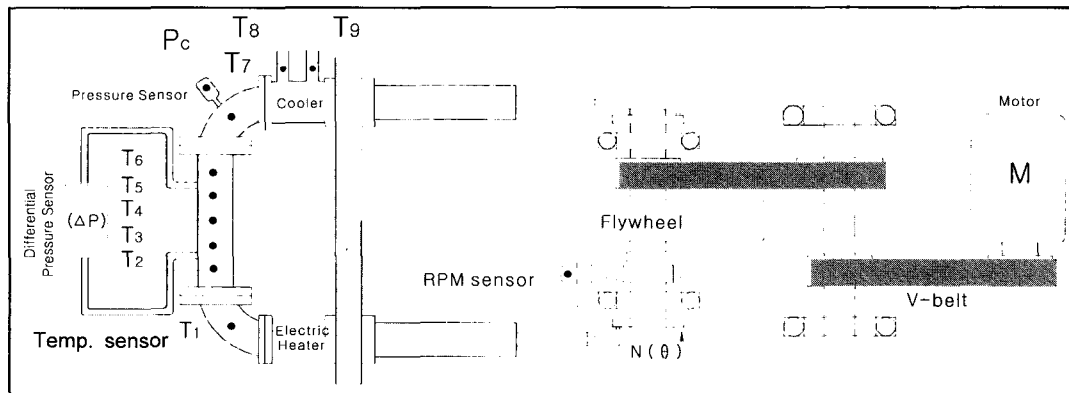


Fig. 1 Experimental apparatus of the regenerator in a stirling engine.

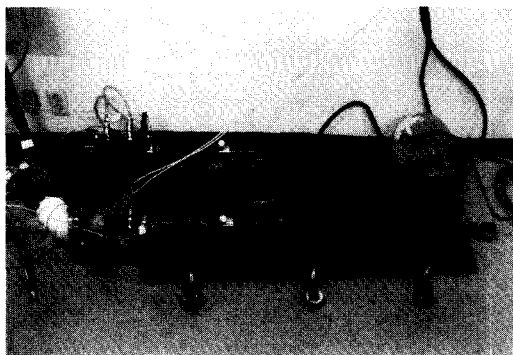


Fig. 2 Photo of the regenerator in a stirling engine.

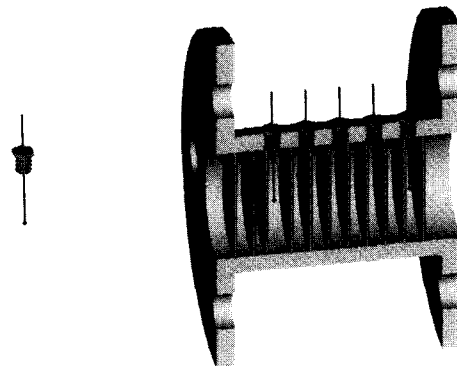


Fig. 3 Cross sectional view of the packed wire screen in the regenerator.

Table 1 Specifications of experimental equipment

Engine type	Two piston
Bore × stroke(mm)	φ 35 × 120
Phase angle	60 ~ 240deg.
Working fluid	air
Stroke volume ratio	1
Regenerator size (mm)	φ 70 × 110

나. 실험재료 및 방법

(1) 실험재료

표 2는 축열재로 사용된 철망의 기하학적 인자를 나타낸 것이다. 예를 들면 메쉬번호 40의 철망은 피치(p)가 0.63mm, 선경(d_m)이 0.2mm, 개구비(β)가 0.466, 공극(φ)이 0.738, 전열표면적(σ)이 4.34mm²/mm³이다.

표 3은 공시 철망의 적층매수, 전열표면적을 나타낸 것이다.

표에서와 같이 메쉬번호 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250 등 7종류를 사용하였다. 예를 들면 공시 축열재로서 메쉬 40번의 경우는 275매를 적층하였고 그때의 전열표면적은 10,247.8cm²이었다.

Table 2 Geometrical factors of wire screen meshes

Mesh No.	Classi.	Wire pitch	Wire dia.	Mesh distance	Opening area ratio	Porosity	Specific surface
		p (mm)	d _m (mm)	ℓ (mm)	β	φ	σ (mm ² /mm ³)
40		0.630	0.200	0.430	0.466	0.738	4.36
60		0.420	0.140	0.280	0.444	0.724	6.64
80		0.310	0.120	0.190	0.376	0.674	8.91
100		0.254	0.101	0.154	0.363	0.668	10.86
150		0.169	0.065	0.104	0.379	0.676	16.34
200		0.127	0.050	0.077	0.368	0.668	21.72
250		0.102	0.040	0.062	0.369	0.669	27.04

Table 3 Specific surface areas of wire screen meshes

Mesh No. of wire screen	No. of layered sheet	Specific surface (cm ²)
40	275	10,247.8
60	393	14,628.5
80	458	17,439.3
100	550	20,722.7
150	847	32,096.6
200	1,100	41,841.7
250	1,375	52,189.0

(2) 실험방법

실험장치의 크랭크축 회전속도(n)는 원주상에 18도의 간격으로 20개의 요철을 설치한 회전원판을 크랭크축에 부착하고 픽업 센서로 회전 펄스를 검출하여 측정하였다. 또한 압력은 그림 1에서와 같이 재생기 축열재 양단의 압력차 ΔP를 스트레인게이지식 압력센서(Kyowa, DPA-0.5k)를 이용하여 측정하였다. 온도는 K형 열전대를 이용하여 재생기의 길이 방향으로 5개소(T₂ ~ T₆)를 측정하고 팽창 및 압축공간온도(T₁, T₇) 및 냉각수 입, 출구의 온도(T₈, T₉)를 측정하였다. 이상의 측정점으로부터 컴퓨터에 의해 온라인 계측하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 재생기내 작동유체의 온도분포

그림 4은 재생기 축열재로 단일 메쉬 80번 철망을 451매 적층하여 회전속도 100, 300, 600rpm으로 변화시켰을 경우에 재생기내 작동유체 온도분포를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 기관의 회전속도가 저속영역의 경우에는 본 연구의 제1보(김태한 외, 2002)에서 설명한 바와 같이 작동 유체가 고온부에서 저온부로 유동할 때(고온유동)와 저온부에서 고온부로 유동할 때(저온유동)의 온도차가 뚜렷하게 나타나 이론적인 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있으나, 고속영역의 경우에는 고온유체유동과 저온유체유동사이의 온

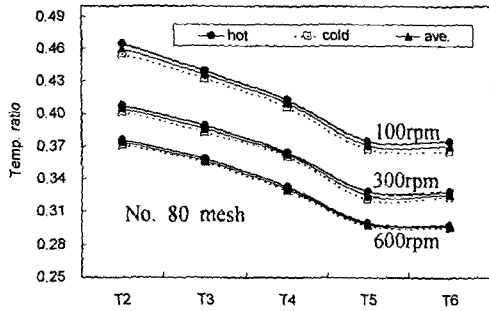


Fig. 4 Temperature distribution in the matrix.

도차는 점점 감소하여 그 차가 거의 없는 것으로 나타났다.

이는 스텔링기관의 경우 고온 작동유체가 재생기를 통과한 후, 저온 작동유체가 재생기를 통과하기까지의 시간적인 간격이 가스터빈 기관에 비해 극히 짧기 때문에 고온의 작동유체가 재생기를 거쳐 냉각부로 유입되기 전에 저온의 작동유체가 재생기로 유입되어 고온의 작동유체와 혼합되는 현상, 즉 고온의 작동유체와 저온의 작동유체가 재생기내에서 혼합되기 때문인 것으로 생각된다.

나. 단일 메쉬의 철망을 축열재로 한 경우의 전열 및 유동손실 특성

그림 5는 철망의 메쉬번호 60, 80, 100, 150, 200, 250번의 단일 메쉬를 각각 재생기 축열재로 사용한 경우의 재생기 양단의 작동유체 온도차를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 재생기 축열재로 150번 철망메쉬를 사용하였을 경우가 다른 5종류의 단일메쉬보다 온도차가 가장 크게 나타났고, 그 다음이 100, 80, 200, 250, 60번 철망메쉬의 순으로 나타났다.

이는 메쉬번호가 큰 철망이 전열면적이 크므로 전열성능이 가장 우수하여야 하나 최적 전열면적을 초과하면 전열면적 증가에 따른 유동마찰 손실이 증가하여 작동유체의 유동저항이 커짐으로 인해 오히려 전열성능을 저하시키는 결과를 초래함을 알 수 있다.

그림 6은 그림 5의 재생기 축열재에 대한 재생기 양단의 압력차를 나타낸 것으로 실험 조건은

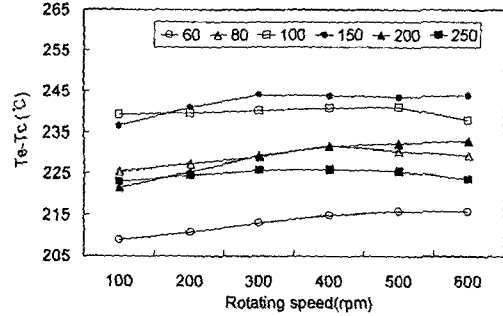


Fig. 5 Effects of various kinds of wire screen on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator.

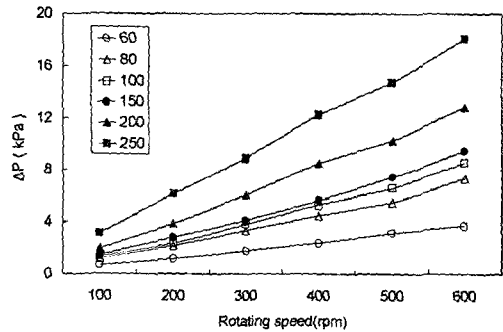


Fig. 6 Effects of the various kinds of wire screen on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator.

그림 5에서와 동일하다.

그림에서와 같이 압력강하는 250번 철망메쉬가 가장 크게 나타났고, 그 다음이 200, 150, 100, 80, 60번 철망메쉬의 순으로 나타났다. 이는 메쉬번호의 증가에 따른 전열면적 증가로 인해 작동유체의 유동마찰이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 실험에 사용한 6종류의 철망메쉬 모두가 회전속도의 증가에 따라 압력강하가 증가됨을 알았다. 이는 압력강하가 유체의 유동속도에 비례하기 때문이다.

이상의 그림 5와 6의 결과에서 6종류의 철망 메쉬중 가장 성능이 우수하게 나타난 메쉬 150번과 100번 철망의 성능을 평가하기 위해 각각 평항 및

압축공간의 온도차 크기에 의한 압력상승폭과 재생기 양단의 압력강하폭의 대소를 비교하였다. 그 결과 150번 철망메쉬는 100번 철망메쉬에 비해 양공간의 온도차 크기에 의한 압력상승폭이 100rpm에서 1.333kPa, 300rpm에서 1.215kPa, 600rpm에서 0.951kPa로 크게 나타났으나, 반면 재생기 양단의 압력강하량의 차는 100번의 철망 메쉬가 150번의 철망에 비해 각각의 회전속도에서 0.196, 0.294, 0.883kPa로 작게 나타났다. 따라서 이들의 차를 비교한 결과 150번 메쉬의 철망이 다른 철망에 비해 축열재로서의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

다. 피스톤의 위상차 변화가 재생기 축열재의 전열 및 유동손실에 미치는 영향

그림 7은 팽창공간과 압축공간의 두 피스톤의 위상차를 60°, 120°, 180°, 240°로 4단계로 변화시켰을 때 재생기 양단의 온도차를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 실험에 사용한 재생기 축열재는 메쉬번호 150번의 철망을 847매 적층한 것이다.

그림에서와 같이 위상차 120°의 경우가 온도차가 가장 크고 그 다음이 60°, 240°, 180°의 순으로 나타나 위상차가 전열성능에 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 동일 위상차에서는 기관 회전속도변화에 따른 양단의 온도차 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 8은 그림 7의 실험 조건과 동일한 상태에

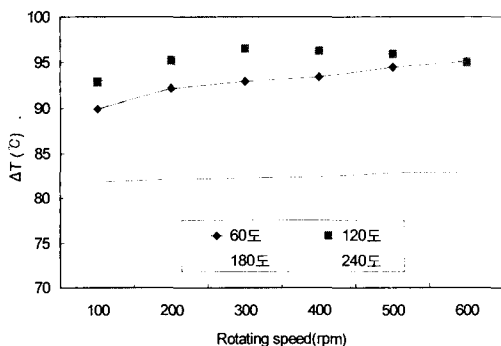


Fig. 7 Effects of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the different phase angle.

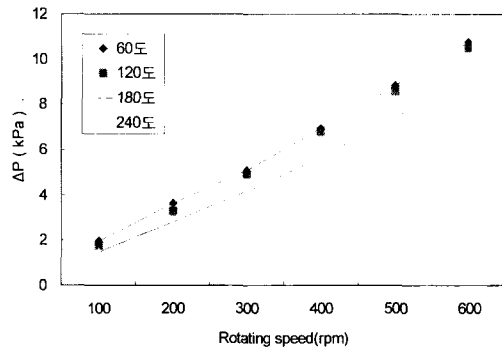


Fig. 8 Effects of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the different phase angle.

서 실험했을 때, 재생기 양단의 압력차를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 위상차 60°, 120°, 240°의 경우에는 압력차가 거의 나타나지 않으나 180°의 경우에는 조금 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상 그림 7, 8의 결과로 볼 때 재생기 축열재로 단일 메쉬를 사용 할 경우 최적 위상차는 60°~120° 범위로 하는 것이 재생기 성능이 최대가 됨을 알 수 있다.

라. 재생기 축열재의 충전율 변화가 전열 성능 및 유동손실에 미치는 영향

그림 9는 재생기 축열재의 충전율 변화가 전열 성능에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 충전율은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\text{충전율} = \frac{(\text{적층매수} \times \text{메쉬1매의 체적})}{\text{재생기전체적}}$$

재생기의 전체적은 423.3 cm³이며, 40번 메쉬의 철망을 재생기내에 275매 적층하였을 때를 기준으로 하여, 적층매수의 비율을 10%씩 감소시킨 결과 충전율은 각각 60.2%, 54.1%, 47.9%, 41.8%, 35.7%였다.

그림에서와 같이 충전율이 35.7%, 41.8%, 47.9%로 증가함에 따라 전열성능이 향상되나 충전율이 54.1%, 60.2%로 증가함에 따라 전열성능은 오히려

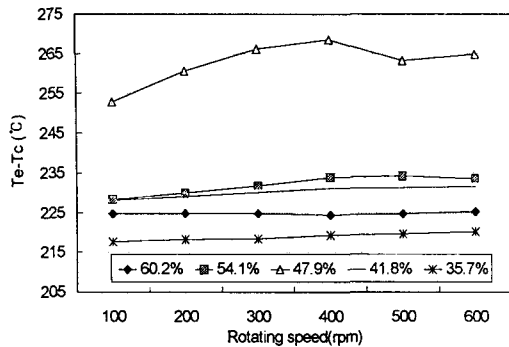


Fig. 9 Effects of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the various filling rates.

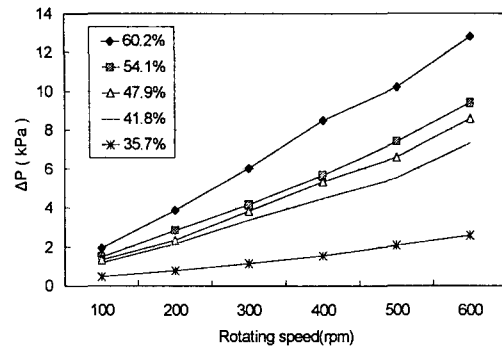


Fig. 10 Effects of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the various filling rates.

저하하는 경향을 나타내고 있다. 이는 전열면적 증가에 따른 전열성능 향상과 작동유체의 유동마찰손실 증가에 따른 전열성능 저하와의 사이에 최적치가 있음을 의미한다.

그림 10은 그림 9의 실험조건과 동일한 상태에서 재생기 축열재의 충전율 변화에 따른 재생기 양단의 압력차를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 재생기 양단의 압력차는 그림에서와 같이 재생기 내 축열재의 충전율이 60.2%인 경우가 가장 높게 나타났고, 그 다음이 54.1%, 47.9%, 41.8%, 35.7%의 순으로 나타났다.

이상 그림 9, 10의 결과에 의하면 충전율 47.9%의 경우가 팽창공간과 압축공간의 온도차가 가장 크게 나타났으나, 재생기 양단의 압력차는 충전율이 41.8%, 35.7%인 경우가 충전율 47.9%의 경우보다 작게 나타났다.

축열재의 성능 비교 기준으로 공시 축열재에 대해 각각 재생기 양단의 온도차에 의한 작동유체의 압력증가폭 차와 유동마찰손실에 의한 압력강하의 차를 서로 비교하여 평가할 수 있다.

이상의 평가 기준에 의해 계산한 결과 충전율 47.9%의 경우가 충전율 35.7%인 경우에 비해 재생기 양단의 온도차 증가에 의한 작동유체의 압력증가량이 100rpm에서 9.99kPa, 300rpm에서 8.59kPa, 600rpm에서 9.29kPa이고, 이들 2종류의 축열재에 대한 재생기 양단의 압력강하 차는 충전율 35.7%인 경우가 회전속도 600rpm에서 최대 0.49kPa로

충전율 47.9%에 비해 작게 나타났다. 따라서 충전율 47.9%의 경우가 충전율 35.7%인 경우에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

스털링기관의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 재생기의 설계에 기초 자료를 제공할 목적으로 단일 메쉬 철망 7종을 공시 축열재로 하여 스텔링기관의 운전조건과 동일한 왕복유동상태에서 전열 및 유동손실 특성에 관한 실험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재생기내에서 작동유체의 유동속도가 느린 경우에는 고온유동과 저온유동 사이의 온도차가 큰 반면에 유동속도가 증가함에 따라 이들 사이의 온도차는 거의 나타나지 않았다.
- 2) 단일 메쉬의 철망을 재생기 축열재로 사용할 경우에는 메쉬번호 150번 철망이 다른 철망에 비해 성능이 우수하였다.
- 3) 위상차가 재생기의 전열성능에 영향을 미칠 수 있었으며 위상차 120°의 경우가 온도차가 가장 큰 것으로 나타났다.
- 4) 충전율이 재생기의 전열성능에 영향을 미칠 수 있었으며 충전율 47.9%의 경우가 재생기 양단의 온도차가 가장 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Barnes, C. and G. T. Render. 1986. An investigation into the effect of various regenerators on the performance of a stirling engine. Proc. of the 21th IECEC:512-518.
2. Bartolini, C. M. and V. Naso. 1984. Parametric thermal analysis of the stirling engines metallic regenerators. Proc. of the 19th IECEC:2067-2072.
3. Chen, N. C. J. and F. P. Griffin. 1984. "Effects of pressure-drop correlations on stirling engine predicted performance". Proc. of the 18th IECEC: 708-713.
4. Isshiki, N., S. Tsukahara and F. Teruda. 1984. Analysis of various internal losses in stirling engine. Proc. of the 19th IECEC:2049-2054.
5. Isshiki, N., H. Watanabe, S. Tsukahara, K. Hasimoto and K. Yoshikawa. 1987. Study on linear element for stirling engine regenerators. Proc. of the 22th IECEC:1847-1852.
6. Kays, W. M. and A. L. London. 1984. Compact Heat Exchangers. MacGraw-Hill book comp. New York. USA. pp. 7-46.
7. Kim, T. H., S. M. Lee and J. T. Lee. 2002. Basic study on the Regenerator of the stirling engine(I). KSAM 27(1):33-38 (In Korean).
8. Krazinski J. L., R. E. Holtz, K. L. Uherka and P. A. Lottes. 1986. An analysis of pressure drops under reversing flow conditions. Proc. of the 21th IECEC:519-532.
9. 兵口和洋, 高橋太郎, 官部英也. 1983. 再生器マトリックスの流動損失(金網積層の場合). 日本機械學會論文集48(435):2207-2216.
10. 兵口和洋, 高橋太郎, 官部英也. 1984. 再生器マトリックスの傳熱性能(金網積層の場合). 日本機械學會論文集49(445):2001-2008.
11. 西本奎一, 北元宏明. 1986. スターリング 機關の試作および性能試験. 日本機械學會論文集 51 (462):612-623.