

## 스터링기관용 재생기에 관한 기초연구 (II)

- 복합메쉬 철망을 축열체로 한 재생기의 전열 및 유동손실특성-

## Basic Study on the Regenerator of Stirling Engine (II)

- Heat transfer and flow friction characteristic of the regenerator with combined wire-mesh matrix -

김 태 한*	이 시 민**	이 정 택*
정희원	정희원	정희원
T.H.Kim	S.M.Lee	J.T.Lee

### 1. 서론

스터링기관의 사이클은 원리적으로 재생 사이클이므로 에너지 변환효율은 재생기의 성능에 좌우된다. 그리고 재생기의 성능에 영향을 미치는 인자는 전열특성, 유동마찰손실 등을 들 수 있으며 이는 작동유체의 종류와 재생기 축열체의 재질 및 형상에 따라 결정된다. 따라서 본 연구는 지금까지 시도되지 않았던 재생기 축열체로서 메쉬번호가 서로 다른 철망을 혼합하여 적층하는 것등을 제안하고 이들을 축열체로한 재생기를 스텐링기관의 작동조건과 동일한 왕복운동조건하에서 전열성능 및 압력강하 특성 등을 실험을 통하여 구명하고자 하였다.

의 실린더와 피스톤으로 구성하였다. 보조장치로서는 2개의 피스톤의 상대위상을 변화시키는 장치로 구성하였다. 가열기는 전기가 열을 하였고, 공급열량을 2.2kW로 일정하게 연속 가열하는 방식을 채택하여 재생기로 공급되어지는 열량을 일정하게 유지되도록 하였다.

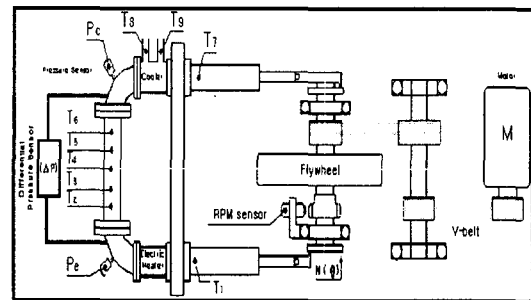


Fig. 1 Experimental apparatus of the regenerator in a stirling engine

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 실험장치

실험장치는 재생기 축열체의 성능 시험부 (regenerator), 구동장치(drive mechanism) 및 보조장치로서 구성하였다. 실험장치의 개략도는 그림 1과 같으며, 시험부에는 각종 공시 재생기를 장착하였다. 구동장치는 시험부에 동작체가 왕복운동상태가 되도록 2개

냉각기는 원통다관식으로 제작하여 수돗물을 연속적으로 공급하여 냉각하였다. 그리고 구동축의 회전수 변경은 전동기에 인버터를 장착하여 회전수를 조절할 수 있도록 하였다. 실험장치의 제원은 표 1과 같다.

\* 경북대학교 농업기계공학과

\*\* 한국농기계공업협동조합

Table 1. Specification of experimental equipment

Engine type	Piston displacer
bore × stroke(mm)	φ 35 × 120
phase angle	60 ~ 240deg.
working fluid	air
stroke volume ratio	1
regenerator size (mm)	φ 70 × 110

## 2.2. 실험재료 및 방법

### 2.2.1. 실험재료

표 2는 축열체로 사용된 철망메쉬의 기하학적 인자를 나타낸 것이며, 표 3은 공시 축열체의 종류, 적층매수, 전열표면적을 나타낸 것이다.

Table 2. Geometrical factors of wire screen meshes

classi. mesh No.	wire pitch	wire dia.	mesh distance	opening area ratio	porosity	specific surface
	p(mm)	d <sub>m</sub> (mm)	ℓ (mm)	β	φ	σ (mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> )
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, steel and copper wires

wire screen meshes	No. of layered sheet	specific surface (cm <sup>2</sup> )
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
60 - 200	197 - 550	28,235.1
200 - 60	550 - 197	28,235.1
200 - 100 - 150	367 - 183 - 282	31,553.7
150 - 100 - 200	282 - 183 - 367	31,553.7

표에서와 같이 단일메쉬는 메쉬번호 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250 등 7종류를 사용하였다. 예를 들면 공시 축열체로서 단일메쉬 40번의 경우는 275매를 적층하였고 그때의 전열표면적은 10,247.8cm<sup>2</sup>이었다.

또한 실험에 사용한 복합 메쉬로서 2중복합메쉬 2종류, 3중복합메쉬 2종류를 선정하였다. 표 3에서와 같이 단일메쉬는 메쉬번호가 클수록 전열표면적은 증가하지만 2중, 3중 복합메쉬는 큰 차이가 없게 나타났다.

### 2.2.2. 실험방법

실험장치의 크랭크 회전각도( $\theta$ ) 및 회전속도(n)는 원주상에 18도의 간격으로 20개의 요철을 설치한 회전원판을 크랭크축에 부착하고 픽업 센서로 회전 펄스를 검출하여 측정하였다. 또한 압력은 그림 1에서와 같이 압축 및 팽창공간 압력Pc, Pe와 재생기 축열체 양단의 압력차  $\Delta P$ 를 스트레인게이지식 압력센서를 이용하여 측정하였다. 온도는 K형 열전대를 이용하여 재생기의 길이 방향으로 5개소(T<sub>2</sub> ~ T<sub>6</sub>)를 측정하고 팽창 및 압축공간온도(T<sub>1</sub>, T<sub>7</sub>) 및 냉각수 입, 출구의 온도(T<sub>8</sub>, T<sub>9</sub>)를 측정하였다. 이상의 측정점으로부터 신호를 증폭해서 A/D변환하고 컴퓨터에 의해 온라인 계측하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 재생기내 작동유체의 온도분포

그림 2는 재생기 축열체로 단일 메쉬 80번 철망을 451매 적층하여 회전수를 100, 300, 600rpm으로 변화시켰을 경우에 재생기내 작동유체 온도분포를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 기관의 회전수가 저속영역의 경우에는 다소 이론적인 결과와 비슷한 경향을 나타내었고, 고속영역의 경우에는 고온유체유동과 저온유체유동사이의 온

도차는 점점 감소하여 그 차가 거의 없는 것으로 나타났다.

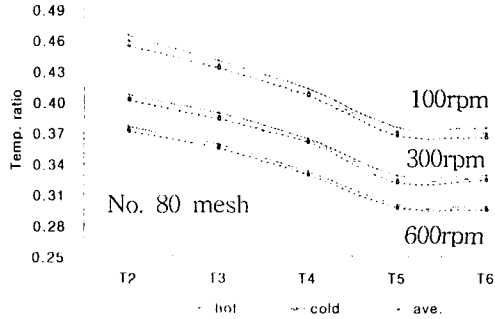


Fig 2. Temperature distribution in the matrix (No. 80)

이는 스테어링기관의 경우 가열기쪽에서의 고온 작동유체가 재생기를 통과한 후 냉각기쪽에서의 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 작동유체 유동과 저온의 작동유체 유동이 확연히 구분되지 않고 고온의 작동유체와 저온의 작동유체가 재생기내에서 혼합되어 고온의 작동유체와 저온의 작동유체의 특성이 없어졌기 때문에 고속의 회전수에서 온도차가 없는 것으로 생각된다.

### 3.2. 단일 메쉬의 철망을 축열체로 한 경우의 전열 및 유동손실 특성

그림 3은 철망의 메쉬번호 60, 80, 100, 150, 200, 250번의 단일 메쉬를 각각 재생기 축열체로 사용한 경우의 기관의 팽창공간과 압축공간의 작동유체 온도차를 나타낸 것이다.

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

철망메쉬의 경우에는 양자간의 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

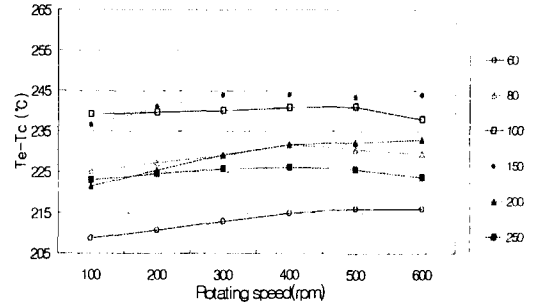


Fig 3. Effect of rotating speed on temperature difference between the expansion and compression spaces for the single layered meshes.

그림 4에서와 같이 압력강하는 단일메쉬중 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 회전수의 증가에 따라 압력강하가 증가됨을 알았다. 이는 압력강하가 유체의 유동속도의 제곱에 비례하기 때문이다.

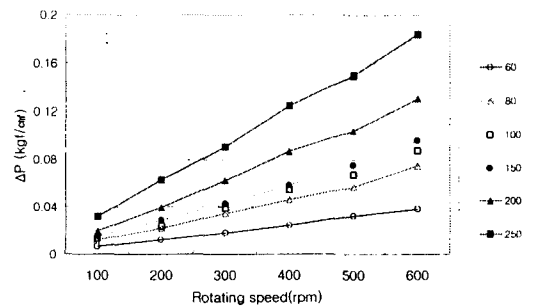


Fig 4. Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the single layered meshes.

이상의 그림 3과 4의 실험 결과로만 보면 재생기 축열체의 전열면적이 가장 큰 250번 철망메쉬가 단일메쉬 6종류중 온도차가 가장

크고, 그 다음이 200번 철망메쉬이어야 하나 그림에서와 같이 전열면적보다는 압력손실이 전열성능에 큰 영향을 미치고 있음을 알았다. 또한 메쉬번호 100, 80, 60번의 철망메쉬는 압력강하량이 150번 철망메쉬보다 작게 나타났다.

축열체의 성능을 평가하기 위해 각 메쉬번호별 팽창 및 압축공간의 온도차 크기에 의한 압력상승과 재생기 양단의 압력강하량의 대소를 비교할 경우 150번 철망메쉬는 100번 철망메쉬에 비해 양 공간의 온도차 크기에 의한 압력상승량이 100rpm에서 0.0136kgf/cm<sup>2</sup>, 300rpm에서 0.0124kgf/cm<sup>2</sup>, 600rpm에서 0.0097kgf/cm<sup>2</sup>이고, 재생기 양단의 압력강하량의 차는 각각의 회전수에서 0.002, 0.003, 0.009kgf/cm<sup>2</sup>로 나타나 단일메쉬중 100번의 철망메쉬가 가장 작게 나타났다.

따라서 단일 메쉬번호의 철망을 재생기 축열체로 사용할 경우에는 150, 100번 철망메쉬가 다른 철망메쉬번호에 비해 전열성능이 우수하고 압력손실도 다소 적어 성능이 우수함을 알았다.

### 3.3. 2중 복합메쉬의 철망을 축열체로 한 경우의 전열 및 유동손실 특성

그림 5는 재생기 축열체로서 2중 복합메쉬 2종류와 단일메쉬중 재생기내 축열체로서 가장 성능이 우수한 150번 철망메쉬를 비교하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 2중 복합메쉬는 표 3과 같이 적층한 공시축열체를 사용하여 재생기 양단의 온도차를 비교한 것이다.

그림에서와 같이 가열부쪽에 200번 철망메쉬, 냉각부쪽에 60번 철망메쉬(200-60)의 경우가 가열부쪽에 60번 철망메쉬, 냉각부쪽에 200번 철망메쉬(60-200)보다 재생기 양단의 온도차가 크게 나타났다.

그러나 단일메쉬중 가장 성능이 우수한

150번 철망메쉬 보다는 2중 복합메쉬가 재생기 양단의 온도차가 작게 나타남을 알았다. 이는 전체적인 재생기 내의 전열면적이 단일메쉬인 150번 철망메쉬의 경우가 2중 복합메쉬의 경우보다 크기 때문에 150번 철망메쉬의 경우가 재생기 양단의 온도차가 큰 것으로 나타났다.

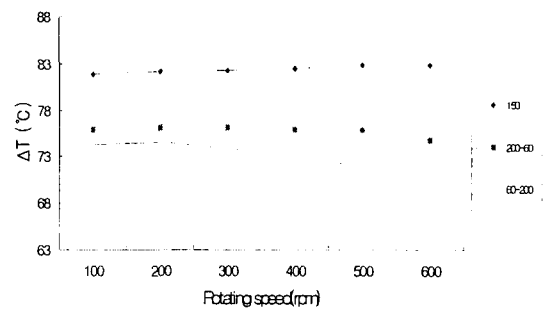


Fig 5. Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the various meshes.

그림 6은 단일메쉬와 2중 복합메쉬의 3종류에 대하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 각 공시 축열체의 종류에 따른 재생기 양단의 압력차 크기는 확실하게 구분할 수 없을 정도로 비슷하게 나타났다.

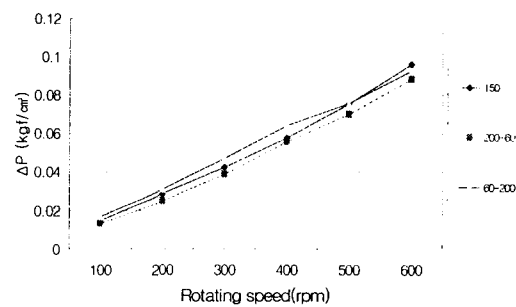


Fig 6. Effect of rotating speed on pressure difference between the inlet and outlet of the regenerator for the various meshes.

이상의 그림 5와 6의 결과에 의하면 재생기 축열체로서 2중 복합메쉬를 사용할 경우에는 재생기의 가열부 쪽에 메쉬번호가 큰

철망을 저온부 쪽에 메쉬번호가 작은 철망을 적층하는 것이 반대로 철망을 적층하는 것보다 성능이 우수함을 알았다

### 3.4. 3중 복합메쉬의 철망을 축열체로 한 경우의 전열 및 유동손실 특성

그림 7은 재생기 축열체로서 3중 복합메쉬 2종류, 단일메쉬 150번 철망메쉬와 2중 복합메쉬 중 성능이 우수한 200-60번 메쉬(200-60)를 사용하여 재생기 양단의 온도차를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 3중 복합메쉬는 표 3과 같이 적층하여 사용하였다.

그림에서와 같이 450rpm이하에서는 재생기의 가열부쪽에서부터 냉각기 쪽으로 철망메쉬를 200-100-150번의 순서로 적층한 3중 복합메쉬가 재생기 양단의 온도차가 가장 크고 그 다음이 단일메쉬철망200, 가열부쪽에서부터 냉각기 쪽으로 철망메쉬를 150-100-200번의 순서로 적층한 3중 복합메쉬, 2중 복합메쉬(200-60)의 순으로 나타났다. 또한 3중복합메쉬 중에는 재생기의 가열부쪽에서부터 냉각기 쪽으로 철망메쉬를200-100-150번의 순서로 적층한 경우가 150-100-200번의 순서로 적층한 경우보다 재생기 양단의 온도차 크게 나타남을 알았다.

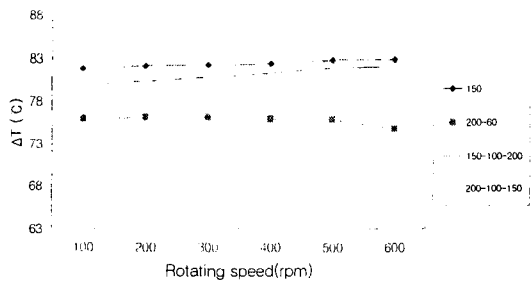


Fig 7. Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the various meshes.

그림 8에서와 같이 3중 복합메쉬가 2중 복합메쉬와 단일메쉬보다는 재생기 양단의 압력차가 크게 나타났고, 3중 복합메쉬 중에는

재생기의 가열부쪽에서부터 냉각부 쪽으로 철망메쉬를200-100-150번의 순서로 적층한 경우가 150-100-200번의 순서로 적층한 경우보다 재생기 양단의 압력차가 미소하나마 작음을 알았다.

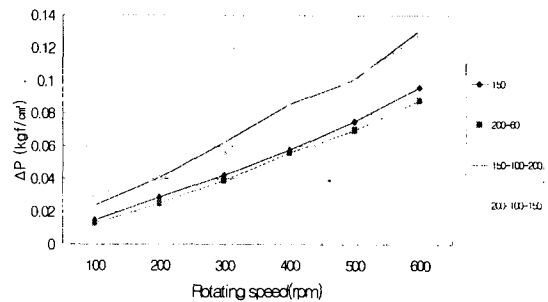


Fig 8. Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the various meshes.

이상 그림 7과 8의 결과에 의하면 재생기 축열체로서 3중 복합메쉬를 사용할 경우에는 재생기의 가열부 쪽에 메쉬번호가 큰 철망을 저온부쪽에 메쉬번호가 작은 철망을 적층하는 것이 반대로 적층하는 경우보다 성능이 우수함을 알았다.

또한 그림 7에서 재생기 양단 온도차는 3중 복합메쉬 중 200-100-150번 메쉬의 경우가 150번의 단일메쉬 철망보다 조금 높게 나타났다으나, 그림 8의 재생기 양단의 압력차는 200-100-150번의 3중 복합메쉬의 경우가 150번의 단일메쉬 철망의 경우 보다 크게 나타났다.

이들 2종류의 공시축열체의 성능을 비교하기 위하여 재생기 양단의 온도차 증가에 따른 기관의 압력증가량과 그림 8의 압력강하 곡선의 차를 비교한 결과 메쉬번호 200-100-150번 조합의 3중 복합메쉬는 150번 단일메쉬 철망에 비해 재생기 양단의 온도차 크기에 의한 압력상승량이 100rpm에서 0.0377 kgf/cm², 300rpm에서 0.0264kgf/cm², 600rpm에

서 0.0047kgf/cm<sup>2</sup>인 데 비해 재생기 양단의 압력강하량 차는 각각의 회전수에서 0.016, 0.013, 0.032kgf/cm<sup>2</sup>로 150번 단일 메쉬 철망이 작게 나타났다.

따라서 축열체의 성능비교는 재생기 양단의 온도차 크기에 의한 압력상승량이 재생기 양단의 압력강하량 보다 크면 우수한 것이므로 단일 메쉬번호의 철망 3종을 복합해서 재생기 축열체로 사용할 경우, 450rpm이하의 저속에서는 200-100-150번 조합의 3중 복합 메쉬가 단일메쉬로서 가장 우수한 150번 철망메쉬에 비해 성능이 우수함을 알았다.

#### 4. 요약 및 결론

스터링기관의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 재생기의 축열체 설계에 기초 자료를 제공할 목적으로 단일 메쉬 철망 7종, 2중 복합메쉬 철망 2종, 3중 복합메쉬 철망 2종을 공시축열체로하여 스텔링기관의 운전조건과 동일한 왕복유동상태에서 축열체의 적층방법, 작동유체의 유속변화 등에 따른 전열 및 유동손실 특성에 관한 실험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 재생기내에서 작동유체의 유동속도가 느린 경우에는 작동유체가 가열기로부터 냉각기쪽으로 유동할 경우와 냉각기로부터 가열기쪽으로 유동할 경우의 온도차가 큰 반면에 유동속도가 증가함에 따라 차이가 거의 나타나지 않았다.

2. 단일 메쉬번호의 철망 6종(60, 80, 100, 150, 200, 250)을 재생기 축열체로 사용할 경우에는 150, 100번 철망메쉬가 다른 번호의 철망메쉬에 비해 성능이 우수하였다.

3. 재생기 축열체로서 2중 복합메쉬 2종(200-60, 60-200)을 사용할 경우에는 재생기의 가열부 쪽에 메쉬번호가 큰 철망을 저온부 쪽에 메쉬번호가 작은 철망을 적층하는 것이

그 반대로 적층하는 경우보다 성능이 우수하였다.

4. 3중 복합메쉬 중 성능이 우수한 200-100-150번 메쉬를 축열체로 사용할 경우 450rpm이하의 저속에서는 단일메쉬중 가장 우수한 150번 철망메쉬에 비해 우수하였다.

#### 5. 참고문헌

1. 유호선 : 1988, 단일 실린더내에서 톱날과 형 피스톤운동을 하는 스텔링 기관에 대한 해석적인 해, 대한기계학회 논문집 12(5) : 1197-1205.
2. Barnes.C., 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.
3. Isshiki,N., Watanabe,H.,etl : 1987, Study on Linear Element for Stirling Engine Regenerators, Proc. of the 22th IECEC : 1847-1852.
4. 岡本男, 金泰漢, 木谷收 : 1990, 바이오 가스를燃料とする農業用スターリング機關に關する 基礎的研究(第1報), 日本農業機械學會誌52(4) : 3-10.