

## 스털링 기관용 재생기에 관한 기초 연구 (IV) - 철선을 축열재로 한 재생기의 전열 및 유동손실 특성 -

오대건 김태한

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

- Heat Transfer and Flow Friction Characteristic of the Regenerator with Steel Wire Matrix -

D. G. Oh T. H. Kim

#### Abstract

The output of Stirling engine is influenced by the regenerator effectiveness. The regenerator effectiveness is influenced by heat transfer and flow friction loss of the regenerator matrix. 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 the oscillating flow as the same condition of operation in a Stirling engine. As matrices, 6 kinds of steel wires, 4 kinds of combined steel wires, 8 kinds of combined steel wires with screen meshes were used. The results are summarized as follows;

Among 6 kinds of steel wires ( $\phi 0.7$  mm,  $\phi 0.9$  mm,  $\phi 1.2$  mm,  $\phi 1.6$  mm,  $\phi 2.0$  mm,  $\phi 2.7$  mm), the two steel wires ( $\phi 0.7$  mm,  $\phi 0.9$  mm) showed the highest in effectiveness. Among 4 kinds of combined steel wires ( $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$  mm,  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$  mm,  $\phi 0.9$ - $\phi 1.2$  mm,  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$  mm), the  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$  mm showed the highest in effectiveness. Among 8 kinds of combined steel wires with screen meshes (150- $\phi 0.9$  mm, 150- $\phi 1.2$  mm,  $\phi 0.9$  mm-150,  $\phi 1.2$  mm-150, 150- $\phi 0.9$  mm-150, 150- $\phi 1.2$  mm-150, 150- $\phi 1.6$  mm-150, 150- $\phi 2.0$  mm-150), the  $\phi 1.2$  mm-150 showed the highest in effectiveness.

**Keywords :** Stirling engine, Regenerator, Steel wire matrix, Combined matrix, Heat transfer, Flow friction loss

## 1. 서론

스털링 기관의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 열교환기이다. 이 열교환기 중 재생기는 가열기와 냉각기 사이에 설치되어 동작 유체가 팽창공간에서 압축공간으로 유동할 때 (hot blow)는 동작 유체로부터 열을 흡수하고, 압축공간에서 팽창공간으로 유동할 때(cool blow)는 동작 유체에 열을 공급하는 역할을 한다. 스텔링 기관에 높은 열효율을 기대할 수 있는 것도 이 재생 열교환기가 있기 때문이다. 재생기의 성능에 영향을 미치는 인자로는 재생기 축열재의 전열 성능, 유동 마찰 손실 등을 들 수 있으며 이들은 재생기 축열재의 기하학

적 형상과 재질의 종류에 의해 결정된다.

스털링기관 재생기의 축열재에 관한 연구로서 Isshiki 등 (1984)은 스텔레스재의 철망과 강구를 축열재로 사용한 결과 기관 회전수 1,400 rpm에서 손실동력이 각각 700W, 500W로 나타났다고 하였다. 또한 철망을 재생기 용기에 밀착 적층한 경우와 느슨하게 적층한 경우의 손실동력은 각각 1,500W, 700W로 나타났다고 하였고, 스텔링기관의 제손실인자 중 회전수 변화에 따른 유동손실, 피스톤링 마찰손실, 피스톤링에서의 누설손실, 운동부분의 마찰손실 등을 측정하여, 회전수의 증가와 더불어 유동저항손실이 가장 크게 나타났다고 하였다.

Barnes 등(1986)은 재생기 축열재의 종류와 압력이 기관

성능에 미치는 영향을 조사하였다. 재생기 축열체로서는 스테인레스재의 철망과 섬유망, 그리고 니켈-크롬합금의 금속제 (retimet) 등 3종류를 가열온도, 기관회전수, 압력변화(change pressure) 등을 인자로 하여 기관성능을 평가하였다. 그 결과 철망메쉬와 섬유망을 밀착 적층한 경우가 가장 우수한 것으로 나타났다고 보고하였다.

Isshiki 등(1987)은 재생기 축열체의 종류로서 철망, 구, 파이프, 꼬인 철선 등을 이용한 재생기를 시작기관에 장착하여 출력 성능을 평가하였다. 그 결과 알루미늄재 파이프(내경 1.8 mm, 외경 2.5 mm)는 철망(40번 메쉬)에 비해 축출력이 최대 2배로 되었다. 이는 철망의 경우 전열면적이 파이프에 비해 3배 정도 큰 반면에 유동저항계수가 20배 정도 크기 때문이었다고 하였다.

본 연구의 제2보(김 등, 2002), 제3보(김 등, 2005)에서는 재생기 축열체로 단일 및 복합 철망에 관한 재생기 양단의 온도차 및 압력강하 특성을 구명하였다. 그러나 이들 공시 축열체는 전열표면적이 넓은데 비해 전열성능이 우수하지 못하였고 또한 유동마찰손실이 큰 문제점이 있었다. 따라서 본보에서는 전열성능도 어느 정도 우수하면서 유동마찰 저항이 작은 축열체로서 철선을 선정하여 단일 철선을 재생기 용기 내에 선형으로 충전한 것과 직경이 서로 다른 철선 2종류를 혼합하여 충전한 것, 메쉬 수 150번 철망 중간에 철선을 충전한 것을 제안하고 이들을 축열체로 한 재생기를 스텔링 기관의 작동 조건과 동일한 왕복 유동 조건 하에서 전열성능 및 압력강하 특성 등을 실험을 통하여 구명하여 스텔링기관용 재생기 축열체를 설계하는데 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 가. 실험 장치

그림 1은 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 축열체의 성능 시험부인 재생기(regenerator), 냉각기(cooler), 가열기(heater), 피스톤 및 실린더, 크랭크 기구, 구동장치(drive mechanism) 및 보조 장치로 구성하였다. 재생기 내부에는 각종 공시 축열체를 충전하였다. 구동장치는 모터로부터 크랭크축을 구동하여 동작체가 왕복 유동 상태가 되도록 2개의 실린더와 피스톤으로 구성하였으며 보조 장치로서는 2개의 피스톤의 상대 위상을 변화시킬 수 있는 장치로 구성하였다.

가열기는 전기를 이용하여 가열(1.8kW)하여, 재생기로 공급되어지는 열량을 일정하게 유지되도록 하였다. 냉각기는 원통 다관식(shell and tube)으로 제작하여 수도수를 연속적으로 공급하여 냉각하였다. 그리고 구동축의 회전수 변화는 전동기에 인버터를 장착하여 회전수를 조절할 수 있도록 하였다.

본 연구에 사용된 실험장치의 제원은 표 1과 같다. 피스톤 1개의 행정체적이 115 cm<sup>3</sup>이고 공기를 동작 유체로 하였다.

Table 1 Specification of experimental equipment

Engine type	Two Piston type
bore×stroke (mm)	ø35×120
phase angle	180 deg.
working fluid	air
stroke volume ratio	1
regenerator size (ø×L) (mm)	ø70×130

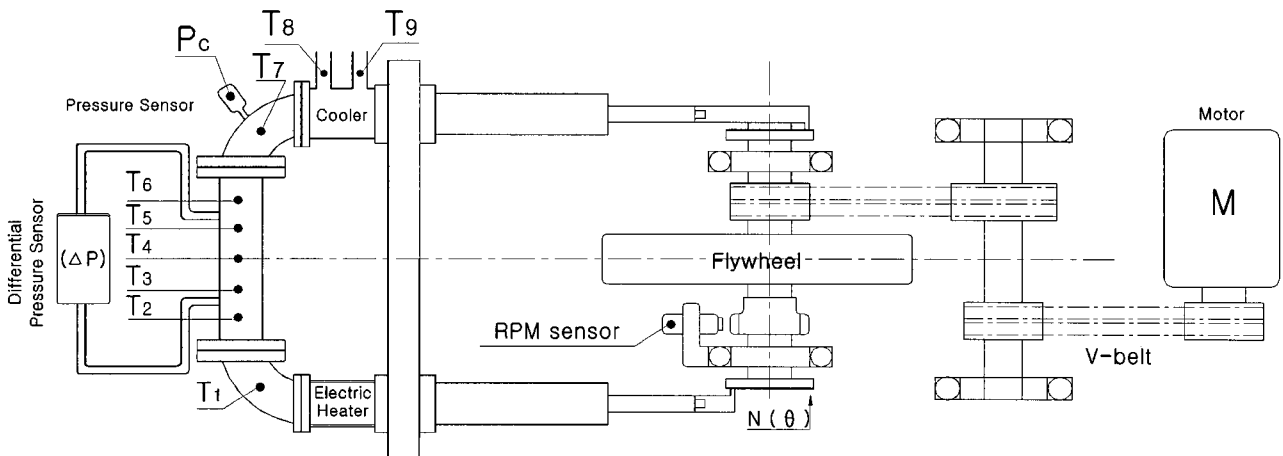


Fig. 1 Experimental apparatus of the regenerator in a Stirling engine.

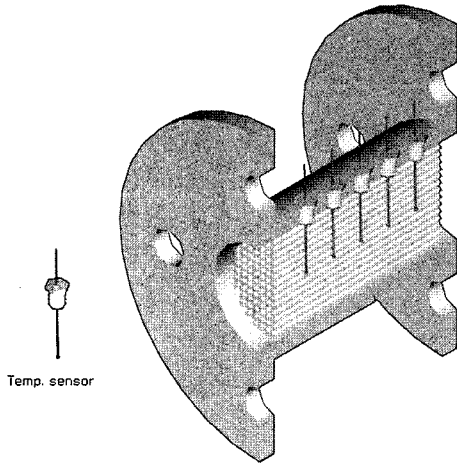


Fig. 2 Cross sectional view of the packed steel wire in the regenerator.

재생기의 직경은 70 mm이며 길이는 130 mm이다.

그림 2는 재생기내에 축열재로서 철선을 선형으로 적층한 단면을 나타낸 것이다. 작동유체 온도는 재생기의 길이 방향으로 일정간격마다 온도 센서를 설치하여 측정하였다.

#### 나. 실험재료 및 방법

##### 1) 실험재료

표 2의 첫째열은 공시 축열재의 종류, 둘째열은 사용한 축열재 개수 혹은 적층 매수, 셋째열은 그에 따른 전열 표면적

Table 2 Surface area of wire mesh and steel wires

Steel wire (dia)	Counts per bunch	Surface area (cm <sup>2</sup> )
ø2.7	527	5,871.57
ø2.0	961	7,909.96
ø1.6	1,502	9,875.24
ø1.2	2,669	13,140.82
ø0.9	4,746	17,505.10
ø0.7	7,921	22,705.91
ø0.9 - ø1.2	4,746 - 2,669	15,322.96
ø1.2 - ø0.9	2,669 - 4,746	15,322.96
ø1.2 - ø1.6	2,669 - 1,502	11,508.03
ø1.6 - ø1.2	1,502 - 2,669	11,508.03
150 - ø0.9	500 - 4,746	27,699.78
150 - ø1.2	500 - 2,669	25,517.64
ø0.9 - 150	4,746 - 500	27,699.78
ø1.2 - 150	2,669 - 500	25,517.64
150 - ø0.9 - 150	250 - 4,746 - 250	27,699.78
150 - ø1.2 - 150	250 - 2,669 - 250	25,517.64
150 - ø1.6 - 150	250 - 1,502 - 250	23,884.85
150 - ø2.0 - 150	250 - 961 - 250	22,902.21

을 계산하여 나타낸 것이다. 즉 공시 축열재로서 단일 철선 ø2.7의 경우는 직경 2.7 mm의 철선 527개를 재생기에 충전하였고 그 때의 전열 표면적은 5,871.57 cm<sup>2</sup>라는 것을 나타낸 것이다. 철망은 메시 번호 150을 사용하였다.

또한 실험에는 복합 철선(4종류), 철망-철선-철망(4종류), 철선-철망(4종류)을 선정하여 실험하였다. 표에서 ø0.9-ø1.2는 재생기를 길이방향으로 반으로 나누어 가열부 쪽에 철선 ø0.9, 냉각부 쪽에 철선 ø1.2를 다발로 묶어 충전하였으며 이 때의 전열 표면적은 15,322.96 cm<sup>2</sup>이었다. ø1.2-150의 경우는 재생기를 길이방향으로 반으로 나누어 가열부 쪽에 철선 ø1.2를 2669개, 냉각부 쪽에 철망 150 메시를 500매 적층하였으며 이 때 전열 표면적은 25,517.64 cm<sup>2</sup>이었다. 150-ø0.9-150의 경우 재생기를 길이방향으로 3등분하여 가열부쪽에 메시번호 150의 철망 중간에 철선 ø0.9을 4746개, 냉각부 쪽에 다시 메시번호 150의 철망을 충전하였다. 이 때의 전열 표면적은 27,699.78 cm<sup>2</sup>이었다.

##### 2) 실험방법

실험장치의 크랭크 회전각도(θ) 및 회전속도(n)는 원주 상에 18도의 간격으로 20개의 요철을 설치한 회전원판을 크랭크축에 부착하고 픽업 센서로 회전 펄스를 검출하여 측정하였다. 구동부의 회전수는 100 rpm에서 600 rpm까지 100 rpm씩 증가시켜 실험을 하였다. 또한 압력은 그림 1에서와 같이 압축 및 팽창공간 압력Pc, Pe와 재생기 축열재 양단의 압력차 ΔP를 스트레인 게이지식 압력센서(kyowa, DPA0.5k)를 이용하여 측정하였다. 온도는 K형 열전대를 이용하여 재생기의 길이 방향으로 5개소(T<sub>2</sub>~T<sub>6</sub>)를 측정하고 팽창 및 압축공간 온도(T<sub>1</sub>, T<sub>7</sub>) 및 냉각수 입, 출구의 온도(T<sub>8</sub>, T<sub>9</sub>)를 측정하였다. 이상의 측정 점으로부터 신호를 증폭해서 A/D변환하고 컴퓨터에 의해 온라인 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 단일 직경의 철선을 축열재로 한 재생기의 온도 및 압력강하 특성

그림 3은 재생기 축열재로서 단일 철선 ø0.7, ø0.9, ø1.2, ø1.6, ø2.0, ø2.7을 사용하고, 기관의 회전 속도를 100 rpm에서 600 rpm까지 변화시켰을 때 재생기 양단의 온도차를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 재생기 양단의 온도차는 재생기의 축열재로 사용한 철선의 직경이 작을수록, 즉 전열 표면적이 클수록 커지는 경향을 보였으나 ø0.7의 철선은 기관 회전수 100~600 rpm사이의 온도차 평균이 87°C이고 ø0.9의 철

선은 85℃로 2℃의 차가 있었다.

그림 4는 그림 2의 공시 축열재에 대해 동일한 조건에서 재생기 양단의 압력 차를 실험한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 철선의 직경이 커질수록 양단의 압력 차가 작아졌다. 이것은 재생기 축열재의 전열 표면적이 감소하여 유동 저항이 줄어들기 때문이라고 생각 한다. 재생기 양단의 압력 차가 큰 순서로 나열하면 철선  $\phi 0.7$ ,  $\phi 0.9$ ,  $\phi 1.2$ ,  $\phi 1.6$ ,  $\phi 2.0$ ,  $\phi 2.7$  이었다.  $\phi 0.7$ 의 철선은 압력차가 최고 0.0043 kgf/cm<sup>2</sup>(4.214 kpa) 최저 0.0023 kgf/cm<sup>2</sup>(2.254 kpa)으로 평균 0.0032 kgf/cm<sup>2</sup>(3.136 kpa)였고,  $\phi 0.9$ 의 철선은 최고 0.0015 kgf/cm<sup>2</sup>(0.147 kpa), 최저 0.0003 kgf/cm<sup>2</sup>(0.0294 kpa)으로 평균 0.0009 kgf/cm<sup>2</sup>(0.0882 kpa)로 나타나  $\phi 0.7$ 의 철선이  $\phi 0.9$ 의 철선에 비해 압력차가 평균 3.5배정도 높게 나타났다.

이상 그림 3과 그림 4의 결과를 보면 전열 표면적이 가장 큰 철선  $\phi 0.7$ 이 단일 철선 6종류 중에 재생기 양단의 온도차

가 가장 컸으며 다음이  $\phi 0.9$ 였다. 반면 철선  $\phi 0.7$ 이 재생기의 양단 압력 차가 가장 크게 나타났으며  $\phi 0.9$ 가 그 다음으로 나타났다.

따라서 이들 2종류의 공시 축열재의 성능을 평가하기 위하여 각각의 축열재에 대한 재생기 양단의 온도차 증가에 따른 기관의 압력증가 값과 전열표면적 차에 의한 압력강하 값의 차를 비교한 결과, 단일 철선  $\phi 0.7$ 이 단일 철선  $\phi 0.9$ 에 비해 재생기 양단의 온도차 크기에 의한 압력 상승 값이 100 rpm에서 0.013265 kgf/cm<sup>2</sup>(1.29997 kpa), 300 rpm에서 -0.028636 kgf/cm<sup>2</sup>(-2.806328 kpa), 600 rpm에서 0.052535 kgf/cm<sup>2</sup>(5.14843 kpa)으로 평균 0.015336 kgf/cm<sup>2</sup>(1.502928 kpa)인데 비해 재생기 양단의 압력강하 값 차는 단일 철선  $\phi 0.7$ 이 철선  $\phi 0.9$ 에 비해 각각의 회전수에서 0.0023 kgf/cm<sup>2</sup>(0.2254 kpa), 0.0024 kgf/cm<sup>2</sup>(0.2352 kpa), 0.0038 kgf/cm<sup>2</sup>(0.3724 kpa)이며 평균 0.002934 kgf/cm<sup>2</sup>(0.287532 kpa)으로 나타났다. 따라서 단일 철선  $\phi 0.7$ 이  $\phi 0.9$ 의 보다 성능이 우수함을 알 수 있었다. 본 결과에 의하면 재생기 축열재로서 철선을 사용할 경우에는 직경이 0.7 mm보다 가는 것이 바람직할 것으로 생각되나 이보다 더 가는 철선은 시판되지 않으므로 공시재료로 사용할 수가 없었다.

나. 복합 철선을 축열재로 한 재생기의 온도 분포 및 압력 강하 특성

그림 5는 재생기 축열재로 복합 철선  $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$ ,  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$ ,  $\phi 0.9$ - $\phi 1.2$ ,  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 을 사용하여 기관의 회전 속도를 100 rpm에서 600 rpm까지 변화시켰을 때 재생기 양단 온도차를 단일 철선 중 성능이 가장 우수한  $\phi 0.7$ 와 비교하여 나타낸 것이다. 복합 철선 축열재  $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$ 의 경우 재생기 전체 길이를 반으

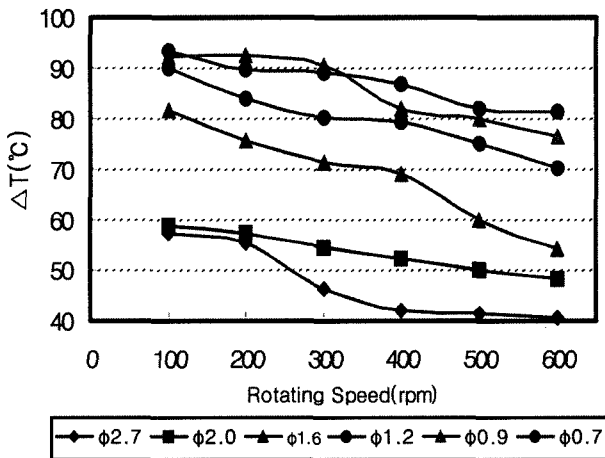


Fig. 3 Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for different bunched wires.

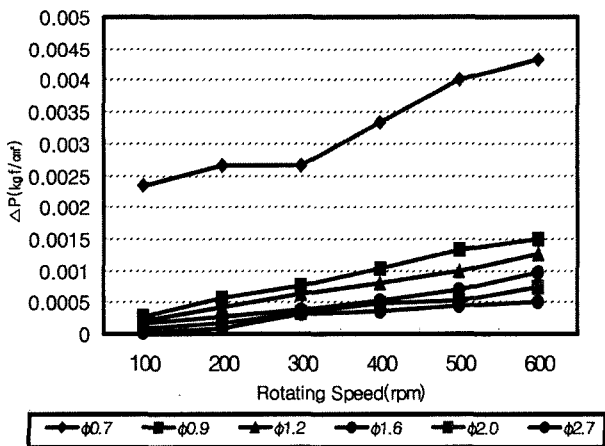


Fig. 4 Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for different bunched wires.

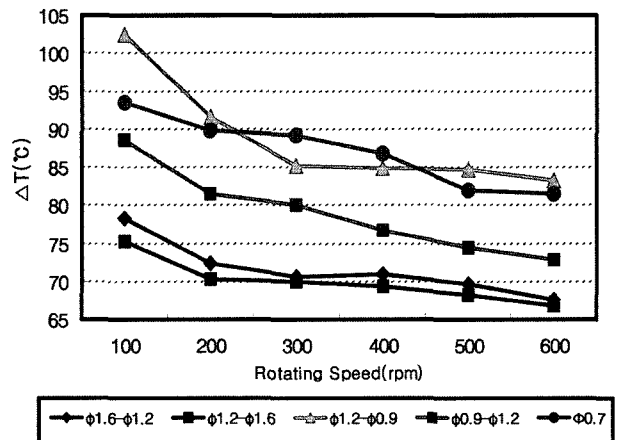


Fig. 5 Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the combination of various wires.

로 나누어 가열부 쪽에 철선  $\phi 1.6$ 을 충전하였고, 냉각부 쪽에 철선  $\phi 1.2$ 를 충전하였다. 또한  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$ 의 경우 재생기 전체 길이를 반으로 나누어 가열부 쪽에 철선  $\phi 1.2$ 을 충전하였고, 냉각부 쪽에 철선  $\phi 1.6$ 를 충전하였다. 다른 공시 재료도 전술한 바와 같은 방법으로 충전하였다.

그림에서와 같이 복합 철선  $\phi 0.9$ - $\phi 1.2$ 의 재생기 양단 온도차는 최고  $88^{\circ}\text{C}$ , 최저  $72^{\circ}\text{C}$ 였으며 온도차 평균은  $79^{\circ}\text{C}$ 였다. 복합철선  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 의 재생기 양단 온도차는 최고  $102^{\circ}\text{C}$ , 최저  $83^{\circ}\text{C}$ 였으며 온도차 평균은  $88^{\circ}\text{C}$ 였다. 또한 복합철선  $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$ 는 온도차 평균이  $71^{\circ}\text{C}$ 이고,  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$ 는  $69^{\circ}\text{C}$ 로서 미소하나마  $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$ 가  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$ 보다 온도차가 크게 나타났다. 따라서 복합철선을 사용할 경우에는 가열부 쪽보다 냉각부 쪽에 철선 직경이 작은 것을 충전하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 또한 철선의 직경이 큰 것의 조합보다는 직경이 작은 철선의 조합이 재생기 양단의 온도차가 큼을 알 수 있다. 이는 철선 직경이 작은 것을 조합한 경우가 큰 것을 조합한 경우보다 전열 표면적이 크기 때문이다. 그리고 복합철선  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 의 재생기 양단 온도차는 평균  $88^{\circ}\text{C}$ 이고, 단일 철선  $\phi 0.7$ 의 온도차는 평균  $87^{\circ}\text{C}$ 로서 거의 비슷하게 나타났다.

그림 6은 그림 5의 공시 축열재에 대해 동일한 조건에서 재생기 양단의 압력 차를 실험한 결과를 나타낸 것이다.

압력 차가 큰 순서대로 나열하면 복합 철선  $\phi 0.9$ - $\phi 1.2$ ,  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ ,  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$ ,  $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$ , 이었다. 복합 철선  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 는  $\phi 0.9$ - $\phi 1.2$ 에 비해 미소하나마 압력차가 작게 나타났다. 또한  $\phi 1.2$ - $\phi 1.6$ 의 압력차 평균은  $0.00054 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.5292 \text{ kpa}$ ) 으로서,  $\phi 1.6$ - $\phi 1.2$ 의 압력차 평균  $0.00044 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.04312 \text{ kpa}$ )보다 조금 크게 나타났다. 그러나 이들 복합철선의 압력차는 온도차에 비해 무시할 수 있을 정도로 미미 하였다. 그러

나 철선  $\phi 0.7$ 의 압력차 평균은 평균  $0.0032 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.3136 \text{ kpa}$ ) 으로서 복합철선 중 압력차가 가장 큰  $\phi 0.9$ - $\phi 1.29$ 의 압력차 평균  $0.00075 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.0735 \text{ kpa}$ )에 비해 4.3배 높게 나타났다. 철선은 직경이 작은 것의 조합이 직경이 큰 것의 조합보다 압력 차가 미소하나마 크게 나타났다. 이것 역시 전열 표면적 증가에 의한 유동 마찰 저항이 증가하였기 때문이라고 생각된다.

이상에서 그림 5와 그림 6의 결과를 보면, 복합 철선  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 가  $\phi 0.9$ - $\phi 1.2$ 보다 재생기 양단의 온도차가 큰 반면, 압력차는 적으므로 재생기 축열재로서 더 적합한 것으로 나타났다. 또한 복합 철선 중에 재생기 양단의 온도차가 가장 크게 나타난  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 와 단일 철선 중에서 성능이 가장 우수한  $\phi 0.7$ 을 비교하면  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 가  $\phi 0.7$ 에 비해 재생기 양단의 온도차가 비슷하게 나타난 반면 재생기 양단의 압력차가 약 4.3배 작게 나타나 복합 철선  $\phi 1.2$ - $\phi 0.9$ 가 단일 철선  $\phi 0.7$ 보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 7은 재생기 축열재로서 철망과 철선을 혼합·사용하여 기관의 회전 속도를  $100 \text{ rpm}$ 에서  $600 \text{ rpm}$ 까지 변화시켰을 때 재생기 양단의 온도차를 나타낸 것이다. 철망-철선 혼합 축열재  $150$ - $\phi 1.2$ 는 재생기를 반으로 나누어 가열부 쪽에 메쉬 수 150번 철망을 적층하였고, 냉각부 쪽에 철선  $\phi 1.2$ 를 충전하였다.

그림에서 보듯이  $\phi 0.9$ -150이  $150$ - $\phi 0.9$ 보다 재생기 양단의 온도차가 높게 나타났으며,  $\phi 1.2$ -150이  $150$ - $\phi 1.2$ 보다 재생기 양단의 온도차가 높게 나타났다. 즉, 재생기를 반으로 나누어 가열부 쪽에 철선을 충전하고 냉각부 쪽에 철망을 충전한 것이 가열부 쪽에 철망을, 냉각부 쪽에 철선을 충전한 것보다 재생기 양단의 온도차가 높게 나타났다. 철망-철선 축열재 4종류

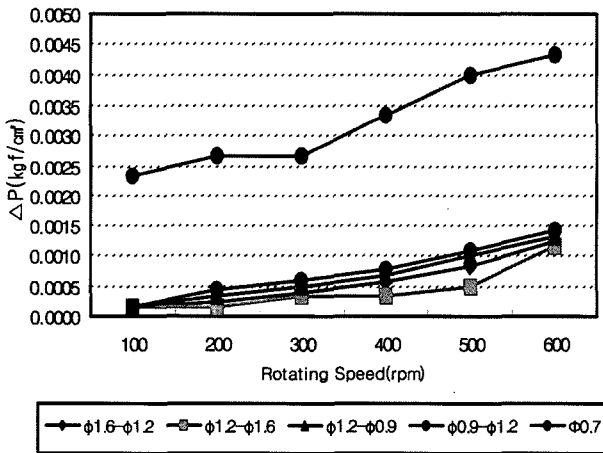


Fig. 6 Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of regenerator for the combination of various wires.

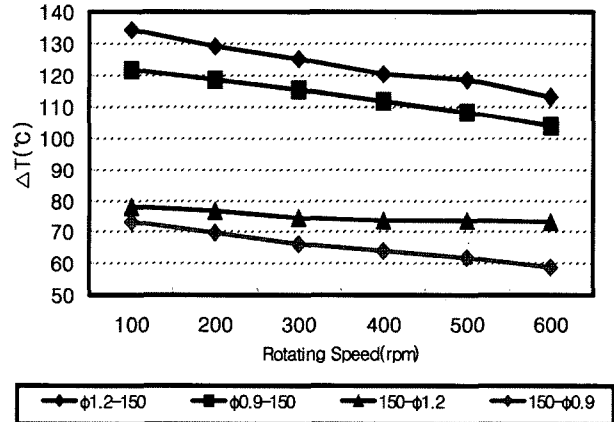


Fig. 7 Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the combination wire with wire-mesh.

의 양단 온도차를 큰 순서대로 나열하면  $\phi 1.2-150$ ,  $\phi 0.9-150$ ,  $150-\phi 1.2$ ,  $150-\phi 0.9$ 이었다.

그림 8은 그림 7의 공시 축열재에 대해 동일한 조건에서 재생기 양단의 압력 차를 실험한 결과를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 각 공시 축열재의 재생기 양단의 압력 차는 큰 변화가 없었으나, 철선과 철망을 복합하여 사용할 경우에는 재생기를 반으로 나누었을 때 철선을 가열부 쪽에, 철망을 냉각부 쪽에 충전한 것이 반대로 충전한 것 보다 재생기 양단의 압력 차가 더 낮게 나타났다. 또한 철선의 직경이 작은 것을 사용한 경우가 재생기 양단의 압력 차가 높게 나타났다. 양단의 압력 차가 큰 순서대로 나열하면  $150-\phi 0.9$ ,  $150-\phi 1.2$ ,  $\phi 0.9-150$ ,  $\phi 1.2-150$ 이었다.

이상 그림 7과 그림 8의 결과를 보면 재생기 축열재로서 철망-철선을 혼합하여 사용할 경우 복합 축열재  $\phi 1.2-150$ 이 재생기 양단의 온도차가 가장 큰 반면 재생기 양단의 압력 차는 가장 낮게 나타나 공시 복합 축열재 중 가장 우수함을 알 수 있다. 또한 선경이 서로 다른 철선을 복합하여 사용할 경우에는 가열부 쪽에 철선의 직경이 굵은 것을 사용한 경우가 작은 것을 사용한 것보다 재생기 양단의 온도차는 높게 나타났고 재생기 양단의 압력 차는 낮게 나타났다.

그림 9는 철선-철망 복합 축열재 중에 성능이 가장 우수한 것으로 나타난  $\phi 1.2-150$ 과 단일 철선  $\phi 0.7$ , 복합 철선  $\phi 1.2-\phi 0.9$ 를 비교한 것이다. 재생기 양단의 온도차가 가장 크게 나타난 것은 철선-철망 복합축열재  $\phi 1.2-150$ 이었으며 다른 공시 축열재들 사이에는 큰 차가 없었으나 미소하나  $\phi 1.2-\phi 0.9$ ,  $\phi 0.7$ 의 순으로 나타났다.

그림 10은 그림 9의 공시 축열재에 대해 동일한 조건에서 재생기 양단의 압력 차를 실험한 결과를 나타낸 것이다. 재생

기 양단의 압력 차가 가장 높게 나타난 것은  $\phi 1.2-150$ 이었으며 그 다음이  $\phi 0.7$ ,  $\phi 1.2-\phi 0.9$ 의 순으로 나타났다.

그림 9와 그림 10을 살펴본 결과, 재생기 양단의 온도차가 가장 크게 나타난 것은  $\phi 1.2-150$ 이었으며 다음이  $\phi 1.2-\phi 0.9$ 였다. 반면  $\phi 1.2-\phi 0.9$ 가  $\phi 1.2-150$ 보다 재생기 양단의 압력차가 작게 나타났다.

따라서 이들 공시 축열재들의 성능을 비교하기 위하여 재생기 양단의 온도차 증가에 따른 기관의 압력 증가 값과 압력 강하 값의 차를 비교한 결과,  $\phi 1.2-150$ 이  $\phi 1.2-\phi 0.9$ 에 비해 재생기 양단의 온도차 크기에 의한 압력 상승 값이 100 rpm에서  $0.385532 \text{ kgf/cm}^2$ (37.78214 kpa), 300 rpm에서  $0.482504 \text{ kgf/cm}^2$ (47.28539 kpa), 600 rpm에서  $0.360621 \text{ kgf/cm}^2$ (35.34086 kpa)인데 비해  $\phi 1.2-150$ 와  $\phi 1.2-\phi 0.9$ 의 재생기 양단의 압력강하 값 차는 각각의 회전수에서  $0.0016 \text{ kgf/cm}^2$ (0.1568 kpa),  $0.0052 \text{ kgf/cm}^2$ (0.5096 kpa),  $0.0117 \text{ kgf/cm}^2$ (1.1466 kpa)로 나타났다. 따라서 성능은 재생기 양단의 온도차 크기에 의한 압력 상승 값이 재생기 양단의 압력 강하 값보다 크면 우수한 것이므로 철선-철망  $\phi 1.2-150$ 이 철선-철선

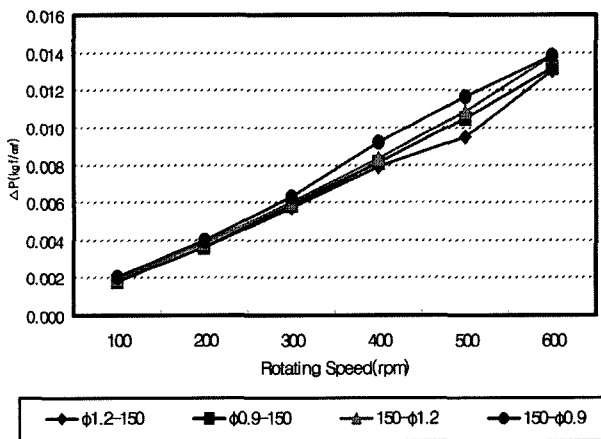


Fig. 8 Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the combination wire with wire-mesh.

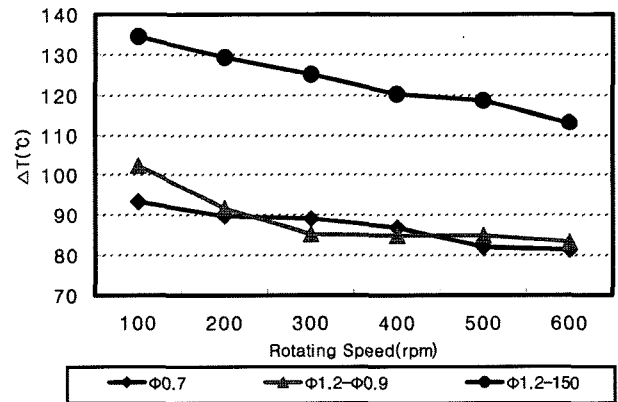


Fig. 9 Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the various matrices.

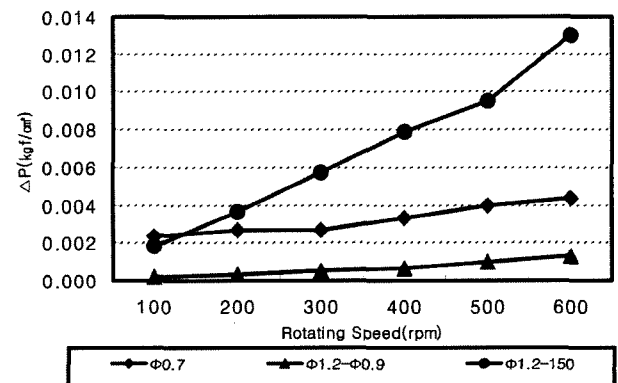


Fig. 10 Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the various matrices.

Ø1.2-Ø0.9에 비해 우수함을 알 수 있었다.

그림 11은 재생기 축열재로서 철망 150메시 사이에 철선을 충전한 후 기관의 회전 속도를 100 rpm에서 600 rpm까지 변화시켰을 때 재생기 양단 온도차를 나타낸 것이다. 철망과 철선을 혼합하여 사용하는 경우에는 재생기의 전 길이를 3등분하여 양단부에 철망을 적층하고 중앙부에 철선을 충전하였다. 그림과 같이 재생기의 양단 온도차를 큰 순서대로 나열하면 150-Ø2.0-150, 150-Ø1.6-150, 150-Ø1.2-150, 150-Ø0.9-150 순이었다. 150-Ø0.9-150이 전열 표면적이 가장 크지만 재생기 양단의 온도차가 가장 작은 것은 유동 마찰 저항이 크기 때문이다.

그림 12는 그림 11의 공시 축열재에 대해 동일한 조건에서 재생기 양단의 압력 차를 실험한 결과를 나타낸 것이다. 예상했던 바와 같이 재생기 양단의 압력차는 150-Ø0.9-150가 가장

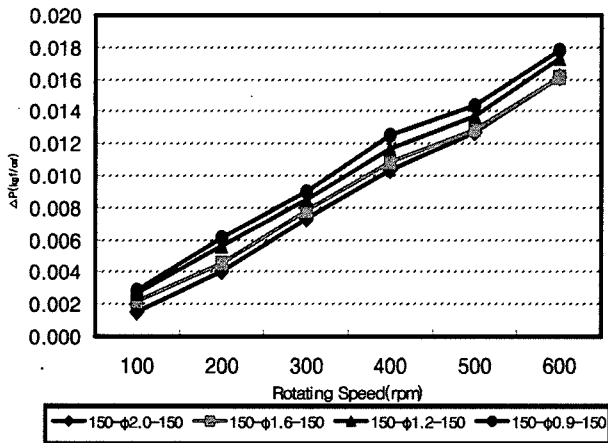


Fig. 11 Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the combination wire-mesh with wire.

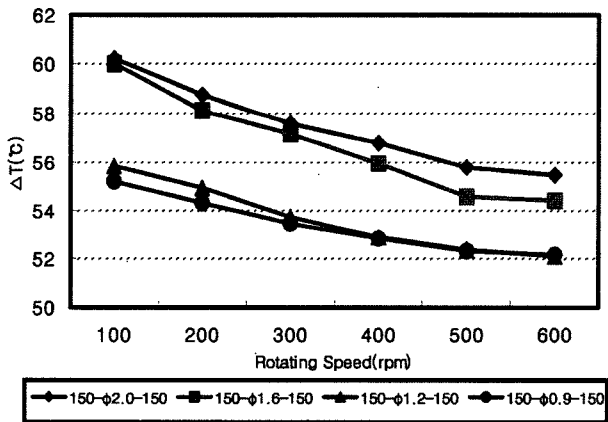


Fig. 12 Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the combination wire-mesh with wire.

했으며 그 다음이 150-Ø1.2-150, 150-Ø1.6-150, 150-Ø2.0-150 순이었다. 즉, 전열 면적이 클수록 양단의 압력 차가 크게 나타났다.

이상 그림 11과 그림 12를 살펴본 결과, 철망 사이에 철선을 충전한 4종류의 복합 축열재 중 철선의 직경이 큰 150-Ø2.0-150이 재생기 양단의 온도차가 가장 크게 나타났으며 그 다음이 150-Ø1.6-150으로 나타났고 가장 낮게 나타난 것이 150-Ø0.9-150이었다. 또한 재생기 양단의 압력 차는 150-Ø2.0-150이 가장 낮게 나타났고 그 다음이 150-Ø1.6-150이었으며 재생기 양단의 압력 차가 가장 높게 나타난 것은 150-Ø0.9-150이었다.

따라서 철망사이에 철선을 충전한 복합 축열재를 사용할 경우에는 철망사이에 직경이 큰 철 선을 충전하는 것이 직경이 작은 것을 충전하는 것 보다 재생기의 양단의 온도차가 높고 재생기 양단의 압력 차가 작음을 알 수 있다. 그러므로 본 실험에서 철망사이에 철선을 충전한 공시 축열재 중 가장 우수한 것은 150-Ø2.0-150으로 나타났다.

그림 13은 본 실험에서 공시 축열재로 사용한 각각의 축열재 중 성능이 우수한 것을 대상으로 양단의 온도차를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 이들 공시 축열재 중 재생기 양단의 온도차가 큰 순서로 나열하면 Ø1.2-150, Ø1.2-Ø0.9, Ø0.7, 150-Ø2.0-150이었다.

그림 14는 그림 12의 공시 축열재에 대한 재생기 양단의 압력 차를 나타낸 것이다. 재생기 양단의 압력 차를 큰 순서로 나열하면 150-Ø2.0-150, Ø1.2-150, Ø0.7, Ø1.2-Ø0.9이었다.

이 공시 축열재들의 성능을 비교하기 위하여 재생기 양단의 온도차 증가에 따른 기관의 압력 증가 값과 압력 강하 값의 차를 비교한 결과, 복합 철선 Ø1.2-150이 공시 축열재 중 가장 성능이 우수한 것으로 나타났으며 그 다음이 Ø1.2-Ø0.9

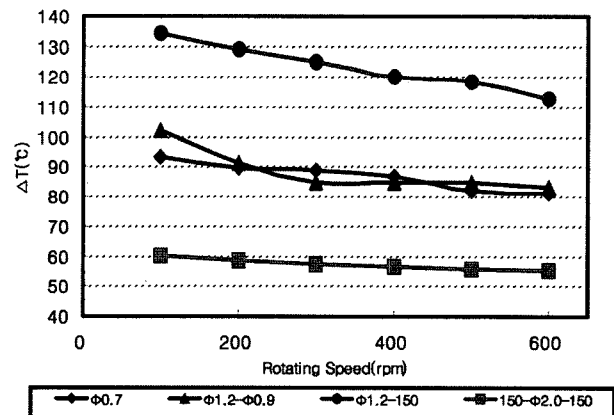


Fig. 13 Effect of rotating speed on temperature difference between the inlet and outlet of the regenerator for the various matrices.

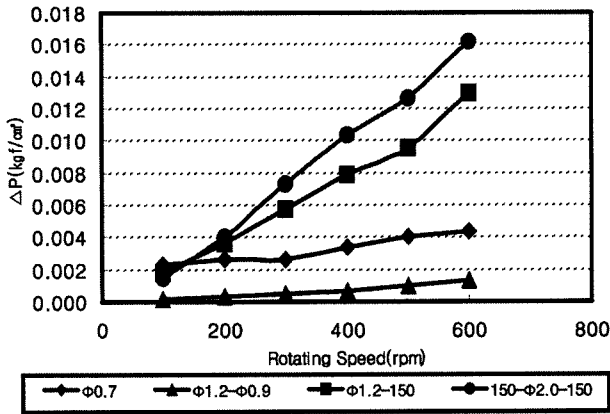


Fig. 14 Effect of rotating speed on pressure drop between the inlet and outlet of the regenerator for the various matrices.

이었다.

이상 철선을 축열재로한 경우의 재생기 성능을 제2, 3보의 철망을 공시 축열재로 사용한 경우의 성능과 비교해 볼 때 150-φ2.0-150을 제외하면 철선은 철망에 비해 재생기 양단의 온도차가 평균 30~40% 높고, 압력강하가 10~20% 낮게 나타 철망보다 우수하였다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 스티어링 기관의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 재생기 축열재의 설계에 필요한 기초자료를 제공 할 목적으로 단일 철선 6종류(φ0.7, φ0.9, φ1.2, φ1.6, φ2.0, φ2.7), 복합 철선 4종류(φ1.6-φ1.2, φ1.2-φ1.6, φ0.9-φ1.2, φ1.2-φ0.9), 철망-철선을 서로 다르게 혼합한 축열재 8종류(150-φ0.9, 150-φ01.2, φ0.9-150, φ1.2-150, 150-φ0.9-150, 150-φ1.2-150, 150-φ1.6-150, 150-φ2.0-150)를 공시 축열재로 하여 스티어링 기관의 운전조건과 동일한 왕복 운동 상태에서 축열재의 충전 방법에 따른 재생기 양단의 온도차 및 압력강하 특성에 관한 실험을 수행 하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단일 철선 6종류를 축열재로 사용한 경우 재생기의 성능은 φ0.7과 φ0.9이 거의 비슷하였으며 가장 우수하였다.
- (2) 복합철선을 사용하는 경우 재생기의 성능은 가열부쪽 보다 냉각부쪽에 철선 직경이 가는 것을 충전하는 것이 반대로 충전하는 것 보다 우수하였다. 또한 공시 복합 철선 4종류 중 재생기의 성능이 가장 우수한 것은 φ1.2-φ0.9으로 나타났다.
- (3) 철망-철선을 혼합하여 축열재로 사용할 경우 재생기의 성능은 재생용기를 길이방향으로 반으로 나누어서 가열부쪽에 철선을, 냉각부쪽에 철망을 충전하는 것이 반대로 충전하는 것 보다 우수하였다. 또한 공시 철망-철선 혼합 축열재 중 φ1.2-150이 가장 성능이 우수하였다.
- (4) 메시 수 150번 철망 중간에 철선을 충전한 공시 축열재의 경우 재생기의 성능은 철선의 직경이 큰 것이 작은 것보다 우수하였다. 또한 철망중간에 철선을 충전한 공시 혼합 축열재 중 재생기의 성능이 가장 우수한 것은 150-φ2.0-150이었다.
- (5) 철선을 축열재로한 경우의 재생기 성능은 제2, 3보의 철망을 축열재로한 경우에 비해 재생기 양단의 온도차가 평균 30~40% 높고, 압력강하가 10~20% 낮게 나타나 철망보다 우수하였다.

#### 참고 문헌

1. 김태한, 이시민, 이정택. 2002, 스티어링기관용 재생기에 관한 기초연구(II) KSAM 27(6):529-536.
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., S. Tsukahara and F. Teruda : 1984, Analysis of various internal losses in Stirling Engine, Proc. of the 19th IECEC : 2049-2054.
4. Isshiki, N., Watanabe, H., etl : 1987, Study on Linear Element for Stirling Engine Regenerators, Proc. of the 22th IECEC : 1847-1852.