

# 철망을 축열체로한 스텔링기관 재생기의 온도분포 특성

## Temperature Distribution of Regenerator with Wire-mesh Matrixes in Stirling Engine

이 시 민\*\*  
정회원  
S.M.Lee

이 정 택\*  
정회원  
J.T.Lee

김 태 한\*  
정회원  
T.H. Kim

### 1. 서론

스텔링기관은 재생사이클이므로 에너지 변환효율은 재생기의 특성에 좌우된다. 그리고 재생기가 기관 성능에 영향을 미치는 인자로는 재생기의 성능, 열전달 손실, 공극율, 유동마찰손실 등을 들 수 있으며 이는 재생기 축열체의 종류 및 형상에 의해 결정된다. 지금까지 재생기 축열체로서 사용되어온 철망은 비표면적이 큰 특성으로 인해 가스터빈의 재생기에 주로 사용되어 왔다. 그러나 가스터빈의 경우는 고온유체가 재생기를 통과하고, 그 후 저온유체가 재생기를 통과하기까지의 시간적인 간격이 비교적 길기 때문에 60메시 이하의 철망이 대부분 사용 되었다. 그러나 이 간격이 극히 짧은 스텔링기관의 경우에는 메시수가 더 큰 철망이나 메시수가 다른 2~4종류의 메시를 혼합하여 적층하는 것이 효과적일 것으로 생각되나 여기에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 재생기 축열체에 관한 연구로서 Kays, W.M. 외(1984), 浜口 외(1983, 1984)은 정상류 및 비정상류 조건하에서 철망을 적층한 축열체의 유동손실 및 전열특성에 관해 보고하였다. 그러나 이들의 연구는 메시 수가 동일한 단일 메시에 관한 것이기 때문에 메시수가 서로 다른 철망을 복합해서 사용하는 경우에는 적용에 문제가 있다. 또한 이들은 동작유체의 유동이 한 방향 유동 (unidirection flow) 상태하에서 실험한 것이므로 스텔링기관과 같이 동작유체 유동이 왕복동유동(Oscillating flow)인 상태와는 다르다. 이와 같은 왕복유동조건하에서 재생기 축열체의 동작유체 온도 특성에 관해 연구한 결과는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다.

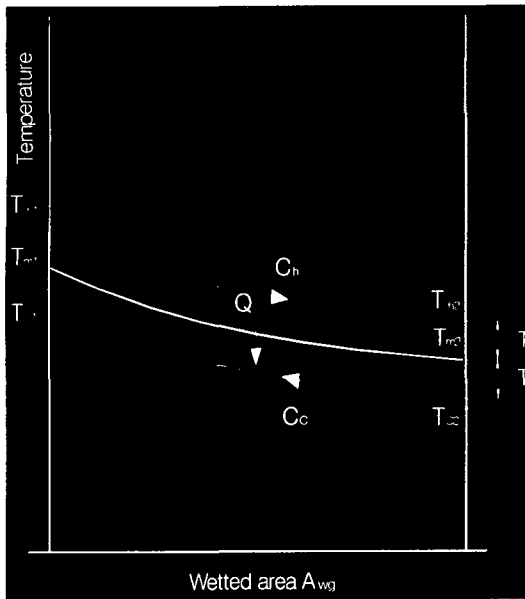
따라서 본 연구에서는 메시수가 큰 단일 철망과 메시수가 서로 다른 철망을 혼합 적층한 것을 축열체로하여 스텔링기관의 작동 상태와 동일한 조건하에서 실험을 통하여 재생기 내의 온도분포 특성 및 압력강하를 분석하여 스텔링기관 재생기의 축열체로 철망을 선정할 경우 참고자료를 제공하고자 하였다.

### 2. 재생기의 이론적인 온도분포 및 성능해석

재생기 축열체 및 재생기 내의 동작유체의 이론적인 온도분포는 그림1과 같다.

\* 경북대학교 농업기계공학과

\*\* 한국농기계공업협동조합



- $T_{h1}$  : 고온유체 유동시 재생기 입구의 동작유체 온도
- $T_{h2}$  : 고온유체 유동시 재생기 출구의 동작유체 온도
- $T_{c1}$  : 저온유체 유동시 재생기 출구의 동작유체 온도
- $T_{c2}$  : 저온유체 유동시 재생기 입구의 동작유체 온도
- $T_{m1}$  : 고온부의 재생기 축열체 온도
- $T_{m2}$  : 저온부의 재생기 축열체 온도

Fig. 1 Temperature distribution of matrix

그림에서 화살표는 동작유체의 유동방향을 나타낸다. 즉 동작유체가 가열기로부터서 냉각기쪽으로 유동할 경우(hot blow)는 그림1의 온도분포도의 위의 선으로 이 때에는 동작유체로부터 재생기 축열체로 열이 전달되고, 반대로 동작유체가 냉각기로부터 가열기 쪽으로 유동할 경우(cold blow)는 그림1의 온도분포도의 아래 선으로 이 때에는 재생기 축열체로부터 동작유체로 열이 전달 된다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 1) 실험장치

그림2에 실험장치의 개요를 나타내었다. 실험장치는 구동장치(Drive mechanism), 시험단면(Test section) 및 보조장치로서 구성하였다. 구동장치는 시험단면에 왕복동유동 상태가 되도록 2개의 실린더와 피스톤으로 구성하였다. 시험단면에는 각종 공시 재생기를 장착한다. 보조장치로서는 2개의 피스톤의 상대위상을 변화시키는 장치, 피스톤 행정을 변화시키는 장치로 구성하였다. 가열기는 전기가열을 하였고 가열온도를 조절할 수 있게 하였다. 냉각기는 원통다관식으로 제작하여 수돗물을 이용하여 냉각하였다. 실험장치 제원을 표1에 나타내었다.

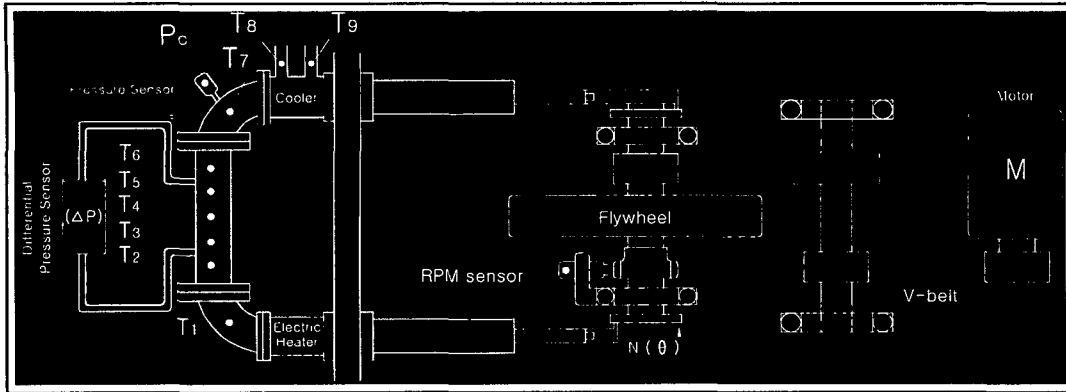


Fig. 2 Schematic diagram of stirling engine test equipments

Table 1 Specification of experimental equipments

bore × stroke(mm)	φ 35 × 30 ~ 50
phase angle	60 ~ 120deg.
working fluid	air
stroke volume ratio	1
regenerator size(φ × L)(mm)	φ 65 × 110

## 2) 실험방법

회전수는 원주상에 6도의 간격으로 60개의 요철을 설치한 회전원판을 크랭크축에 부착하고 픽업 센서로 회전 펄스를 검출하여 크랭크 회전각도( $\theta$ ) 및 회전속도( $n$ )를 측정하였고 압력은 그림 1에서와 같이 압축 및 팽창공간 압력 $P_c$ ,  $P_e$ 와 재생기축열체의 입, 출구 압력차  $\Delta P$ 를 스트레인게이지식 차압센서를 이용하여 측정하였다. 또한 온도는 K형 열전대를 이용하여 그림과 같이 재생기의 길이 방향으로 5개소( $T_2$ - $T_6$ )를 측정하고 팽창 및 압축공간온도 ( $T_1, T_7$ ) 및 냉각수 입 출구의 온도( $T_8$ - $T_9$ )를 측정하였다. 이상의 측정점으로부터 신호를 증폭해서 A/D변환하고 컴퓨터에 의해 온라인 계측하였다.

## 3) 공시 철망의 기하학적 형상

공시 철망의 검사체적을 고려하여 그림3과 같이 소선의 곡선부를 근사적으로 직선으로 간주하고 다음과 같이 형상치를 정의하였다. 또한 소선의 중첩부분에 의한 무효 전열면적을 고려하여 전 표면적으로부터 중첩부의 면적을 뺀 것을 전열표면적으로 하였다.

$$\text{피치} : p = \ell + d_m$$

$$\text{피치비} : pr = d_m/p$$

$$\text{개구비 } \beta = \text{최소 자유유로면적/전면적} \\ = (\ell/p)^2$$

공극율  $\phi =$  자유유로체적/전체적

$$= 1 - \frac{\pi d_m \sqrt{p^2 + d_m^2}}{4p^2}$$

비표면적  $\sigma = \frac{\text{전열표면적}}{\text{전체적}} = \frac{\text{전표면적} - \text{중첩부표면적}}{\text{전체적}}$

$$= \frac{\pi (2\sqrt{p^2 + d_m^2} - d_m)}{2p^2}$$

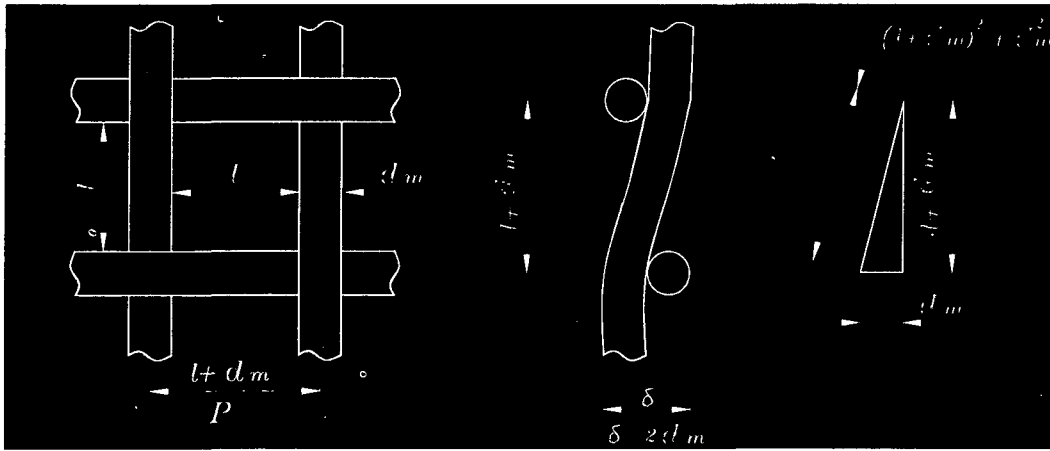


Fig. 3 Geometry of wire screens mesh unit

표2는 공시 철망의 기하학적인 인자를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 철망의 재질은 SUS-27이다. 표에서와 같이 메시수가 클수록 전열표면적은 증가하나 60메시를 제외하면 개구비 및 공극율은 거의 비슷함을 알 수 있다. 또한 시험에 사용한 복합 철망의 메시수를 구별하기 위하여 다음과 같이 나타내었다. 예를 들면 60-200은 재생기의 전 길이를 반으로 나누어 고온측에는 60메시의 철망을 적층하고 저온측에는 200메시의 철망을 적층한 것을 의미한다. 또한 200-100-150-80은 재생기의 전 길이를 4등분하여 재생기의 고온측으로부터 200메시의 철망과 100메시의 철망, 150메시의 철망, 80메시의 철망을 적층한 것을 의미한다.

## 5. 결과 및 고찰

### 1) 재생기내의 동작유체의 온도분포

그림4는 재생기 축열체로 메시수 80인 철망을 451매 적층하여 회전수 변화에 따른 재생기내의 동작유체 온도분포를 측정된 결과를 나타낸 것이다.

Table 2. Geometric factor of wire mesh

classi. mesh size No.	wire pitch	wire dia.	mesh distance	opening area ratio	porosity	specific surface	total mass
	p(mm)	d <sub>m</sub> (mm)	ℓ (mm)	β	φ	σ (mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> )	m <sub>t</sub> (g)
60	0.420	0.140	0.280	0.444	0.724	6.64	739
80	0.310	0.120	0.190	0.376	0.674	8.91	872
100	0.254	0.101	0.154	0.363	0.668	10.86	1,064
150	0.169	0.065	0.104	0.379	0.676	16.34	872
200	0.127	0.050	0.077	0.368	0.668	21.72	968
250	0.102	0.040	0.062	0.369	0.669	27.04	894

그림 1에서 나타낸 이론적인 재생기내의 동작유체의 온도분포의 경우는 고온유체 유동 시와 저온 유체 유동 시에 큰 폭의 온도차가 발생하는 것으로 나타나 있으나 실제 실험에서는 그림 4에서와 같이 기관의 회전수가 저속의 경우에는 다소 이론적인 결과와 비슷한 경향을 나타내었으나, 회전 수의 증가에 따라서 고온유체유동과 저온유체유동사이의 온도차는 점점 감소하여 고속회전시에는 그 차이가 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다. 이는 스텔링기관의 경우 고온유체가 재생기를 통과하고, 그 후 저온유체가 재생기를 통과하기까지의 시간적인 간격이 가스터빈기관에 비해 극히 짧기 때문에 고온유체가 재생기를 거쳐 저온부로 유입되기 전에 저온유체가 재생기로 유입되어 고온유체와 혼합되는 현상 즉 고온유체유동과 저온유체유동이 확연히 구분되지 않고 재생기내에서 혼합되기 때문인 것으로 생각된다.

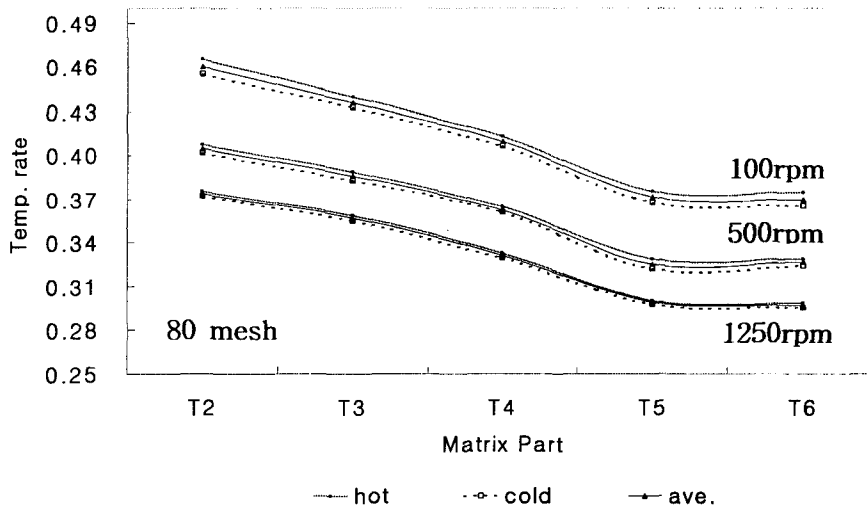


Fig 4. Temperature distribution of matrix

## 2) 재생기내 온도분포비

그림 5는 단일 메시와 2종류의 복합메시를 축열체로 사용한 경우의 재생기내의 온도분포특성을 비교한 것이다. 여기서 온도분포비  $X_r$ 은 고온부쪽( $T_2$ )과 중앙부의 온도( $T_4$ )차에 대한 중앙부( $T_4$ )와 저온부쪽의 온도( $T_6$ )차의 비로서 나타내었다.

$$X_r = \frac{T_2 - T_4}{T_4 - T_6}$$

이 비는 고온측 축열체의 전열성능이 저온측에 비해 높으면 재생기양단의 온도차가 크고 팽창 공간 동작유체의 평균온도가 높아지는 것을 의미한다.

그림에서와 같이 단일 및 복합메시 모두 회전수의 증가에 따라 온도분포비가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 회전수의 증가에 따라서 재생기 양단의 온도차가 점차적으로 감소한 결과라 할 수 있다. 또한, 단일 메시에 비해 2중 복합메시의 경우가 다소 높은 온도분포비를 나타냈으며, 복합메시 중에는 고온측에 200메시 550매, 저온측에 60메시 198매를 적층한 경우가 반대로 적층한 경우보다 온도분포비가 높음을 알 수 있다. 이는 고온측 축열체의 전열성능이 저온측에 비해 높아서 재생기양단의 온도차가 크기 때문이다. 단일 메시간의 비교에서는 전열면적이 적은 60메시에 비해 전열면적이 큰 200, 250메시가 높게 나타났다. 또한 복합메시가 단일메시 200, 250보다도 전열면적이 적음에도 불구하고 온도분포비가 높은 이유는 표2에서 고찰한 바와 같이 60메시가 타 단일메시에 비해 개구비 및 공극율이 커서 동작유체의 유동이 원활하기 때문인 것으로 생각된다.

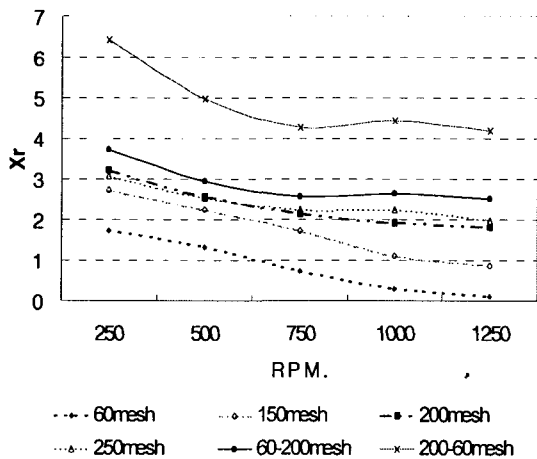


Fig 5. Temperature distribution rate of matrix.

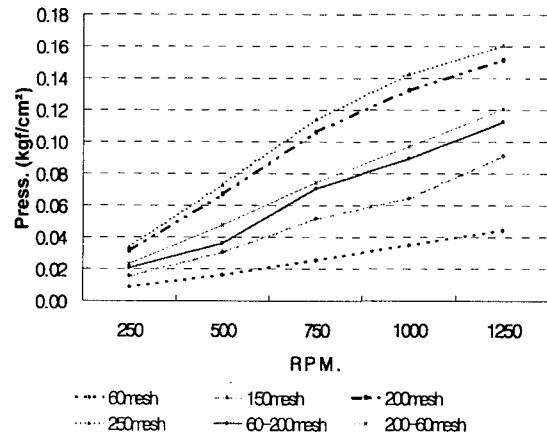


Fig 6. Pressure difference of matrix.

그림 6은 그림5의 각종 메시종류에 따른 재생기 양단간의 압력차를 측정된 결과이다. 그림에서와 같이 압력강하는 회전수의 증가에 따라 증가됨을 알 수 있다. 이는 압력강하가 유체의 유동속도자승에 비례하기 때문이다. 또한 메시 종류별 압력 강하는 60, 150, 60-200, 200-60, 200, 250메시의 순으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 메시수의 증가에 따라 전열면적이 증가하기 때문이다.

그림 7은 2중 복합메시와 4중 복합메시를 축열체로 사용한 경우의 재생기내의 온도분포특성을 비교한 것이다. 그림에서 2중 복합메시의 축열체 적층방법은 그림5와 동일하고 4중 복합메시의 축열체 적층방법으로 250-200-150-100은 재생기 고온측부터 250메시 344매, 200메시 275매, 150메시 212매, 100메시 139매를 적층하였고 200-100-150-80은 같은 방법으로 각각 275, 139, 212, 115매를 적층하였으며, 100-200-80-150은 각각 139, 275, 115, 212매를 적층한 것이다.

그림에서와 같이 4중 복합메시가 2중 복합메시 보다 다소 높은 온도분포비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 4중 복합메시는 고온측으로부터 메시수가 큰 순서로 적층한 250-200-150-100의 복합메시의 온도분포비가 가장 높으며 그 다음이 200-100-150-80, 100-200-80-150순으로 온도분포비가 낮음을 알 수 있다. 이는 그림 5에서 고찰한 바와 같이 고온측 축열체의 전열성능이 저온측에 비해 높아서 재생기양단의 온도차가 크기 때문이다.

그림 8은 그림7의 각종 메시종류에 따른 재생기 양단간의 압력차를 측정할 결과이다. 그림에서와 같이 복합메시의 종류별 압력 강하는 200-100-150-80의 복합 메시가 가장 작고 60-200, 100-200-80-150, 200-60, 250-200-150-100 복합메시의 순으로 조금 증가하나 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 복합메시의 적층 방법에 따라 전열면적이 변하기 때문인 것으로 생각된다.

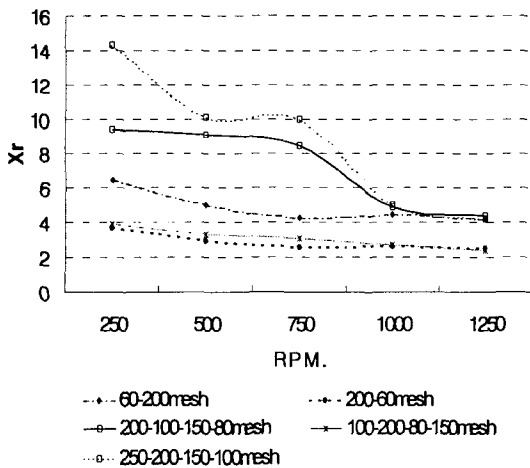


Fig 7. Temperature distribution rate of matrix.

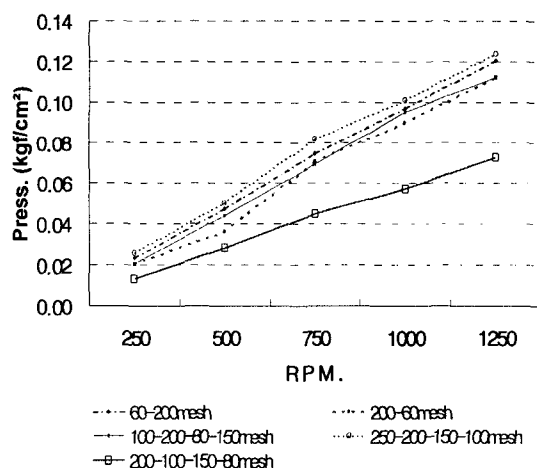


Fig 8. Pressure difference of matrix.

### 3) 재생기 양단 온도차 비

그림9는 재생기내의 고온부온도( $T_2$ )와 저온부온도( $T_6$ )의 차를 비교한 결과이다. 복합메시의 적층방법은 그림 7의 방법과 동일하다. 3중 복합메시의 경우 200-100-150은 각각 363, 183, 280매를 적층하였고, 150-100-200은 각각 280, 183, 363매를 적층한 것이다.

그림에서와 같이 재생기 양단 온도차는 각 메시종류별 모두 회전수의 증가와 더불어 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있다. 또한 3중 복합메시 보다 4중 복합메시의 경우가 재생기 양단의 온도차가 크고 4중 복합메시중에는 100-200-80-150, 200-100-150-80, 250-200-150-100의 순서로 온도차가 큼을 알 수 있다.

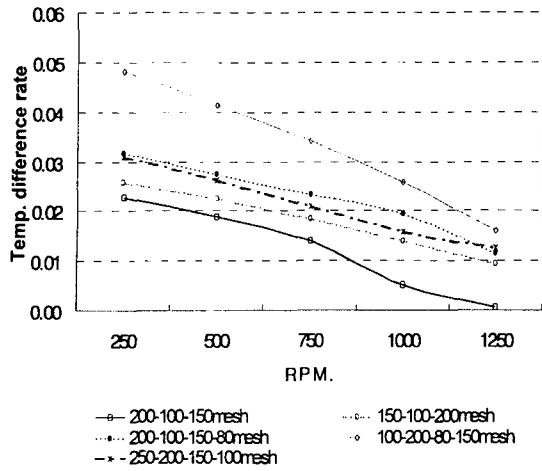


Fig 9. Temperature difference rate of matrix.

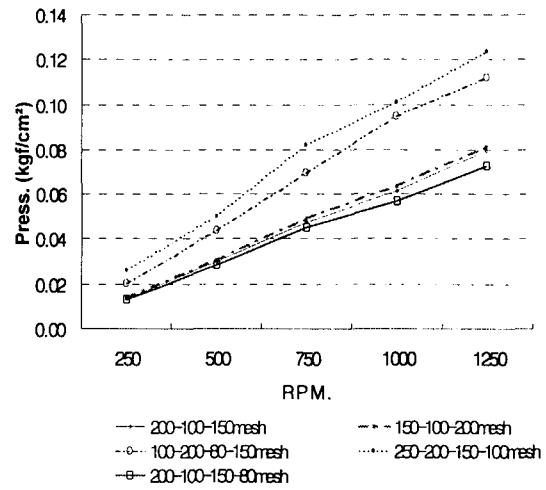


Fig 10. Pressure difference of matrix.

그림 10은 그림9의 각종 메시종류에 따른 재생기 양단간의 압력차를 측정된 결과이다. 그림에서와 같이 복합메시의 종류별 압력 강하는 200-100-150-80의 복합 메시가 가장 작고 200-150-100, 150-100-200, 100-200-80-150, 250-200-150-100 복합메시의 순으로 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다.

재생기의 성능은 재생기 양단의 온도차가 크고, 압력강하가 작으며 온도분포비가 큰 것이 우수하다. 이상 그림 8, 9, 10의 결과를 종합할 때 4종 복합메시 중 온도분포비는 250-200-150-100이 가장 높고 그 다음이 200-100-150-80이며, 재생기 양단 온도차는 100-200-80-150이 가장 높고 그 다음이 200-100-150-80으로 나타났다. 또한 압력강하는 200-100-150-80이 가장 낮고 그 다음이 100-200-80-150으로 나타나 복합메시 중에는 200-100-150-80이 온도차 및 온도분포비가 어느 정도 크고 압력강하 가장 낮아 재생기 축열체로서 가장 우수할 것으로 판단된다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구는 재생기 축열체로서 메시수가 큰 단일 철망과 메시수가 서로 다른 철망을 혼합 적층하여 스틸링기관의 작동 상태와 동일한 조건하에서 실험을 통하여 재생기 내의 온도분포특성 및 압력강하를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 재생기내의 고온유체유동(hot blow)시와 저온유체유동(cold blow)시의 동작유체 온도차는 저회전수 영역에서는 큰 반면에 회전수가 증가함에 따라 감소하여, 고속에서는 차가 거의 나타나지 않았다.



2. 재생기내의 온도분포 비는 모든 축열체에서 회전수의 증가함에 따라 점차적으로 낮아지는 경향을 보였으며, 단일 메시, 2중 복합메시, 3중 복합메시, 4중 복합메시의 순으로 높아지는 것을 알 수 있었다. 또한 재생기 양단의 압력차는 축열체의 전열면적이 클수록 크게 나타났다.

3. 재생기 양단의 온도차 비는 3중 복합메시에 비해 4중 복합메시의 경우가 높게 나타났다.

## 7.참고문헌

1. 兵口和洋, 高橋太郎, 官部英也. 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, 1983.
2. 兵口和洋, 高橋太郎, 官部英也. 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, 1984.
3. Kays, W.M, & A.L. London "Compret Heat Exchangers". MacGraw-Hill book comp. 1984.
4. Israel Urieli, David M Berchowitz. Stirling Cycle Engine Analysis. pp114-119 Adam Hilger Ltd, Bristol. 1984.