

# 저온도차 모형 스티어링 엔진의 최대출력 설계조건

정 평석<sup>†</sup>, 원 민영\*, 김 수연\*\*

## DESIGN OF A LOW TEMPERATURE DIFFERENCE STIRLING ENGINE

P. S. Jung, M. Y. Won and S. Y. Kim

**Key Words:** Compression ratio(압축비), Maximum power condition(최대출력조건), Model Stirling Engine(모형 스티어링 기관), Phase angle(위상각)

### Abstract

A low temperature difference model Stirling engine is a small Stirling engine running with several degree of temperature difference without power output. In this study, the design parameters to give maximum power are discussed. As results, the phase angle is about 100 degree, and compression ratio is 15% of the ratio of heat source temperatures at maximum power condition.

### 기호설명

$r_T$  : 온도비  
 $r_v$  : 압축비  
 $T_H$  : 가열관 온도  
 $T_L$  : 냉각관 온도  
 $W$  : 출력

### 1. 서 론

스티어링 엔진은 열 재생기가 있는 외연기관으로 정의된다. 이것은 외연기관이므로 여러 가지의 열원을 이용할 수 있고 외형 또한 매우 다양한 형상으로 제작될 수 있다. 그러나 스티어링 엔

진은 열교환기의 비가역성 때문에 내연기관에 비하여 실용적이 못 되며 다만 특수한 목적으로 연구되고 있다. 장식용 또는 교육용으로 사용되는 모델 스티어링 엔진 또한 그 중의 하나이며, 학문적으로는 물론 취미로 온갖 형태가 제작되고 있으며 그 중의 상당수는 상업적으로 판매되고 있다. 그러나 저가로 대량생산 및 판매되는 성질의 상품이 아니므로 인터넷을 통하여 세계를 상대로 주문 판매되고 있는 실정이다.

대부분의 모형엔진은 저온도차에서 작동하기 위하여 감마 타입으로 제작된다. 감마 타입 중에서도 특히 낮은 온도차이에서 작동하는 것은 Senft engine라 불리는 접시형으로서 커피 잔이나 컴퓨터 모니터는 물론 손바닥 위에서 작동되기도 하는데 마찰을 줄이기 위하여 설계 및 제작

시 세심한 주의가 요구된다<sup>(1)-(4)</sup>. 또한 열역학적으로도 낮은 압축비와 상대적으로 넓은 전열면적이 필수적이다.

<sup>†</sup> 영남대학교 기계공학부

E-mail : psjung@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2447 FAX : (053)813-3703

\* 영남대학교 대학원

\*\* 영남대학교 기계공학부



Fig. 1 Photograph of a LTD Model Stirling Engine

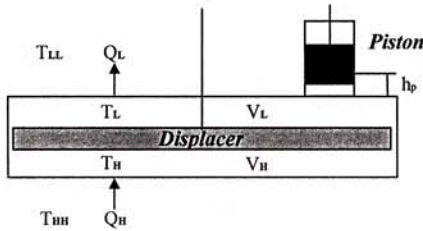


Fig. 2 Schematic diagram of analysis model.

모형 스텔링 엔진은 실용성이 없지만, 해석과 설계, 제작과정은 기계공학도를 위한 더없이 좋은 교육재료를 제공하며 다수의 대학들에서 교과과정으로 활용하고 있다. 본 연구에서는 10℃ 이내의 온도차에서 작동되는 모형엔진의 설계변수를 고찰하였다.

## 2. 저온도차 모형 스텔링 엔진의 설계

저온도차 스텔링 엔진은 모두 비슷한 형태를 취하고 있으며, 원활한 열전달을 위한 넓은 전열

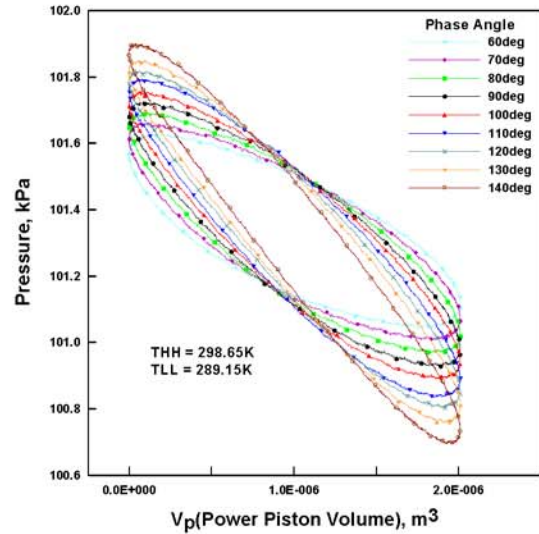


Fig. 3 P-V diagram of experiments. ( $\Delta T=9.5K$ , phase angle =  $60^\circ \sim 140^\circ$ )

면적 때문에 접시형의 변위기를 가진다. 또한 큰 변위기 공간과 상대적으로 작은 압축 피스톤 체적 때문에 압축비는 1에 가깝다. 플라이 휠일은 변위기와 직교하고 주축과 피스톤 및 변위기를 연결해주는 두 개의 크랭크가 있다.

엔진의 기능은 열로부터 기계적 일을 추출하는 것이다. 모형엔진은 비록 장난감 같은 크기와 형태이지만 이런 점에서 실제 엔진임에 분명하고 실제 엔진의 특성을 그대로 가진다. 한 사이클을 통하여 출력이 나오기 위하여서는 압력이 높을 때 작동유체를 팽창시키고 압력이 낮을 때 기체를 압축하여야 한다. 따라서 열역학적 작동순서는 가열-팽창-냉각-압축의 과정을 반복한다.

저온도차 모형엔진은 목적은 매우 낮은 온도차에서 자체적으로 회전하는 것이며, 외부로 출력을 배출하지는 않는다. 따라서 생성된 모든 동력은 내적 마찰을 이기는데 소모된다. 주된 마찰 지점으로는 주베어링, 크랭크 베어링, 피스톤-실린더, 엔진 내부의 유체운동, 변위기 연결막대 등이며, 이들 중 하나라도 큰 마찰이 생기면 엔진은 돌지 못하게 된다. 모형엔진은 상온 주위의 100도C이내의 온도차에서 수 cps의 속도로 작동하므로 비교적 정확한 압력변화의 측정이 가능하고 그 결과로부터 출력을 계산할 수 있다.

정상회전속도에서 생성된 동력은 내부 마찰과

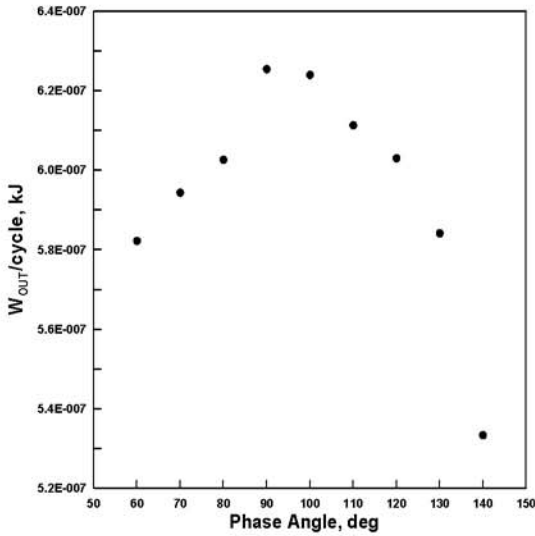


Fig. 4 W/cycle - Phase angle diagram of experiments. ( $\Delta T=9.5K$ )

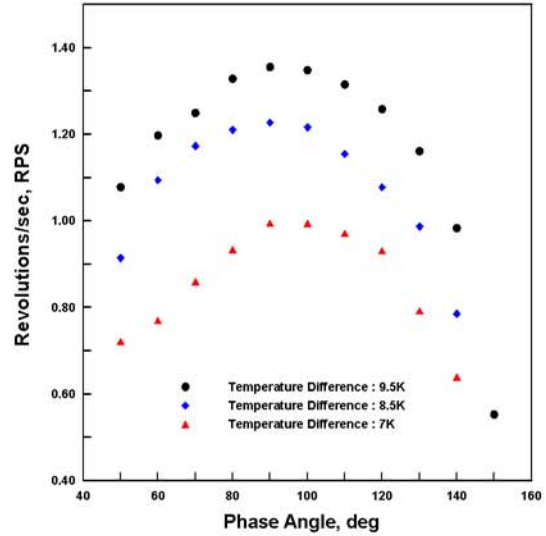


Fig. 5 R.P.S - Phase angle diagram of experiments.

균형을 이룬다. 출력도 감소하지만 마찰손실이 증가하므로 적절한 속도에서 정상상태를 보이게 된다. 모형엔진도 실제엔진과 마찬가지로 다수의 설계변수가 출력에 영향을 미치며, 그 예로, 변위기와 압축피스톤의 위상각, 압축비, 플라이휠의 크기, 변위기와 내벽의 간극 등이 있다. 여기서는 위상각과 압축비의 영향을 알아보았다.

### 3. 위상각

저온도차 모형엔진은 거의 1에 가까운 압축비를 가지며, 체적변화를 무시한다면 변위기의 위치가 작동유체의 평균온도를 결정하고 압력은 곧 평균온도에 비례하게 된다. 등온해석모델에 의하면 변위기가 상사점에 있을 때 최고온도가 되고 하사점에서 최저온도가 되는데 피스톤 압력은 평균온도에 비례하므로 상사점에 있을 때 팽창시키고 하사점에 있을 때 압축하면 최대의 출력을 얻을 수 있다.

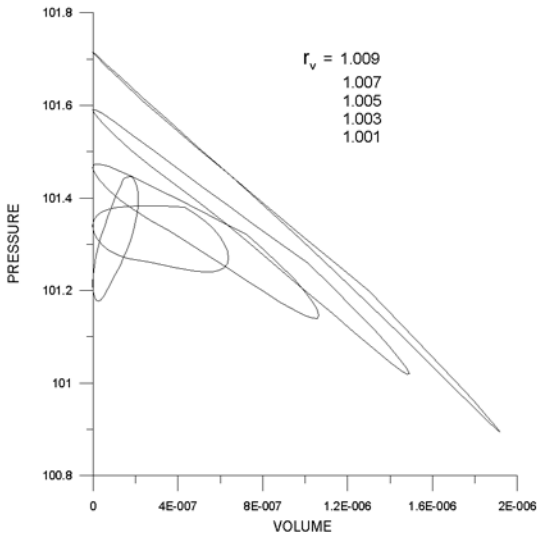
따라서 연속적인 운동이 되려면 압축피스톤의 위치가 변위기를 90도의 위상차로 따라가는 형태가 되어야 한다. 그러나 열전달의 지연 등으로 등온해석모델은 자체가 근사적인 해석에 불과하며, 체적 또한 일정하지 않으므로 실제로는 90도에서 약간 이동하게 된다.

최대출력조건을 이해하기 위하여서는 열전달의 고려가 필수적인데 가장 간단한 해석모델로서 단순해석 모델이 있다.<sup>(5)</sup> 단순모델에서는 열전달량이 단순히 온도차에 비례하는 것으로 가정한다. 여기서는 실험결과 계산값만 고려해 보자. Fig.3는 여러 가지 위상각에 대한 P-V선도이다. 각 사이클의 내부면적이 곧 출력이 되며 실험결과로부터 쉽게 계산할 수 있고 Fig.4에 나타나 있고 Fig.5는 회전수이다. Fig.4 과 Fig.5 모두 위상각이 100도 부근에서 최대출력이 나타나는데 실제 열 전달이 지연된 결과로 생각된다.

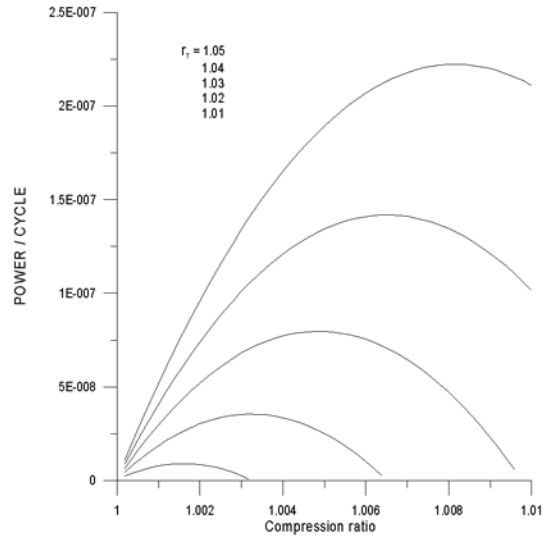
### 4. 압축비

압축비는 열역학적 사이클의 출력과 효율에 큰 영향을 미치는 변수이다. 예를 들어 브레이튼 사이클의 최대출력조건으로서의 압축비는 잘 알려져 있다.

압축비 1은 압축과 팽창이 없는 경우이므로 당연히 출력이 없으며 압축비가 증가하면 출력이 증가하나, 압축비가 너무 증가하면 열투입이 감소하므로 결국 어느 적절한 압축비에서 최대출력을 보인 다음 다시 감소하게 된다. 열전달을 고려한 사이클의 최대출력문제는 내적가역사이클 또는 유한시간 열역학이라는 이름으로 알려져 있



**Fig. 6** P-V diagram with various compression ratio.( $r_T=1.03$ , cps=1)



**Fig. 7** Power as function of compression ratio with various temperature ratio.

다. 특히, 선형 열전달을 가정한 카노사이클은 Curzon-Ahrbon cycle이라 불리우며 최대출력조건에서의 효율이  $1 - \sqrt{(T_L/T_H)}$ 이 됨이 유명하다. 만약 스티링 엔진이 완전한 열 재생을 한다면 곧 카노사이클과 같아지며 이 경우 압축비는  $(T_L / T_H)^{1.25}$  가 된다. 그러나 모형엔진은 이상적인 가역사이클이 아니며, 고온유체와 저온유체의 혼합은 쉽게 예측할 수 없다. 가열 및 냉각관의 열용량 또한 해석 시 고려하기 어려운 부분이다.

Fig.6는 단순해석에 의한 P-V선도이다. 압축비가 커지면 처음에는 면적이 증가하다가 다시 사이클이 얇아지면서 출력이 감소다가 소멸하게 된다.

Fig.7은 여러 가지 온도비에 따른 W-r<sub>v</sub> 선도이다. 최대출력조건에서의 압축비는 온도비의 약 15% 정도이다.

### 5. 결론

저온도차 모형엔진의 설계조건으로서의 위상각과 압축비에 대하여 알아보았다. 그 결과 위상각은 약 100도, 압축비는 온도비의 15% 부근에서 최대출력이 나타남을 보였다.

### 참고문헌

- (1) J. K. Kim, K. C. Cho and P. S. Jung, 1998, "Manufacture of Model Stirling Engine", Proceeding of the KSME 1998 Fall Annual Meeting B, pp.196-200.
- (2) J. K. Kim, K. Y. Shim and P. S. Jung, 2000, "Operation Test of a LMTD Model Stirling Engine", Proceeding of the KSME 2000 Spring Annual Meeting B, pp.199-204.
- (3) P.S.Jung and K.S Kim, 2002, "Analysis of Low Temperature Difference Model Stirling Engine", JUSSUM 2002, pp.107-110.
- (4) Senft, J. R., 1993, An Introduction to Stirling Engines, Moriya Press.
- (5) Urieli, I., and Berchowitz, D. M., 1984, Stirling Cycle Engine Analysis, Adam Hilger Ltd., Bristol.