

저온도차 모형 스테링 엔진의 작동 해석

김정국* · 심경용** · 정평석***

Analysis of The Operation of a Low Temperature Differential Model Stirling Engine

Jung-Kuk Kim, Kyung-Yong Shim and Pyung-Suk Jung

Key Words : Model Stirling Engine(모형스테링엔진), Low Temperature Difference(저온도차), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Maximum Power Condition(최대출력조건), Isothermal analysis(등온해석), Simple analysis(단순해석)

Abstract

A low temperature differential model stirling engine is manufactured, and its operation characteristics are measured and analyzed by SIMPLE analysis model, in which heat transfer processes are simply considered. The heat transfer coefficients between working fluid and heat sources in the analysis are estimated by comparing the P-V diagrams by experiment and by analysis. This result may be very useful for further design and manufacture of model Stirling engines as well as real engines because it provides a comparatively correct predictions of the operation conditions and power output. It will be also conveniently used as an educational material for mechanical engineering students because it can be a nice example of optimal design process to decide the phase angle and compression ratio of engine design with a simple but realistic simulation.

기호 설명

C_p : 정압 비열(kJ/kgK)
 C_v : 정적 비열(kJ/kgK)
 k : 비열비(C_p/C_v)
 R : 기체 상수(kJ/kgK)
 A : 전열 면적(m^2)
 r_v : 압축비
 m_{total} : 작동유체 총 질량(kg)
 m_H : 가열부 체적 질량(kg)
 m_L : 냉각부 체적 질량(kg)
 P : 내부 압력(kPa)
 T_{HH} : 가열 온도(K)
 T_{LL} : 냉각 온도(K)

T_H : 가열부 체적 온도(K)
 T_L : 냉각부 체적 온도(K)
 L_H : 가열판 두께(m)
 L_L : 냉각판 두께(m)
 δW : 단위시간당 Work
 U_H : 가열부 체적의 내부에너지(kJ/kgK)
 U_L : 냉각부 체적의 내부에너지(kJ/kgK)
 $h_{H,O}$: 가열부 작동 유체의 대류 열전달 계수(W/m^2K)
 $h_{L,i}$: 냉각부 작동 유체의 대류 열전달 계수(W/m^2K)
 $h_{L,O}$: 대기의 대류 열전달 계수(W/m^2K)
 k_H : 가열판의 열전도율($W/m K$)
 k_L : 냉각판의 열전도율($W/m K$)
 K_H : 가열부의 열전달 계수(W/K)
 K_L : 냉각부의 열전달 계수(W/K)

* 영남대학교 대학원 기계공학과
 ** 영남대학교 대학원 기계공학과
 *** 정회원, 영남대학교 기계공학부

1. 서론

스터링 엔진은 서로 다른 온도의 작동 유체 (air)가 연속적으로 압축, 팽창 과정을 거치는 열역학적 밀폐 재생 사이클(closed regenerative cycle)에 의해 열에너지를 기계적 일로 변환시켜 주는 기계적 장치로서, 1816년 영국의 Robert Stirling에 의해 처음 기관이 개발되었으며, Carnot cycle에 가장 가까운 높은 이론적 열효율을 가지는 외연기관으로 다양한 열원의 활용이 가능하다. 또한, 내연 기관 특유의 폭발 행정이 없으므로 소음·진동이 적으며, 연료 분사 밸브 등 각종 주변 장치가 생략됨으로서 기계적 구조가 간단하고, 고장 및 수리 요인이 적다는 장점으로 인해, 자원 절약 및 환경 문제가 대두되는 현대 산업 사회에서 그 실용화 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 스텔링 엔진(Stirling engine)의 실용화 연구와 함께 모형 스텔링 엔진의 제작도 활발히 이루어지고 있다. 저온도차 모형 스텔링 엔진은 열역학적 에너지 변환 측면에서 실용성은 없으므로 자체적인 연속 회전운동의 실현을 목표로 하고 있으며, 커피잔, 컴퓨터 모니터의 발생열, 증발냉각, 나아가서 손바닥의 체온 등을 열원으로 하여 작동이 가능하며, 고도의 정밀 기술이나 가공 설비 없이도 독창적인 아이디어를 적용하여 다양한 형태의 모형 엔진을 제작할 수 있으므로 세계적으로 모형 제작에 대한 관심이 커지고 있다.⁽²⁾ 또한 모형 스텔링 엔진은 다양한 열원을 이용하여 열 에너지를 기계적 일로 변환시키는 에너지 변환 장치의 작동 원리를 보여줌으로서 기계공학 교육재료로 그 활용 가치가 높다. 또한 최근 인터넷의 활성화로 모형 스텔링 엔진의 개발 및 제작에 대한 정보 교류가 동호인 차원에서 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 국내에서는 90년대 초 일부 연구소와 대학을 중심으로 스텔링 엔진에 대한 이론적 해석과 실제 엔진에 대한 작동 특성 연구·개발이 추진된 바 있으나, 기초적인 단계의 연구만 이루어졌을 뿐, 실용화 단계의 모델을 제시하지는 못했다.^(3, 5, 8) 현재 국내의 모형 스텔링 엔진의 개발 및 제작에 관한 연구는 거의 전무한 상태로서 해마다 중·고교생·일반인을 대상으로 모형 스텔링 엔진 제작

대회를 개최할 정도로 이 분야에 대한 활성화가 이루어진 가까운 일본과는 현저한 차이를 보이고 있다.

본 연구에서는 대체 기관으로서 그 효율성이 커지고 있는 스텔링 엔진의 모형을 직접 제작하고, 실험을 통해 낮은 온도차에서 구동하는 제작 모델의 작동 특성을 관찰하였다. 이론적으로 Isothermal analysis, 열전달(Heat transfer)을 고려한 Simple analysis 결과를 실험 결과와 비교·일치시킴으로서, 실험 모델에 대한 타당한 해석 모델을 제시하고, 온도차에 대한 열전달 계수(Heat transfer coefficient)의 상관식을 탐색하고자 한다.

2. 모형 스텔링 엔진의 제작

모형 스텔링 엔진의 제작은 외부로의 출력 획득보다는 엔진의 자체적인 구동을 궁극적인 목표로 하며, 열역학적 출력의 전부 혹은 대부분은 엔진의 작동 시 발생하는 기구학·동역학적 마찰로 소모되게 된다. 따라서, 커피잔, 체온 등 매우 낮은 온도차의 열원에서 발생한 미소 출력으로 자가 구동을 이루기 위해서는 엔진 자체의 여러 마찰 요인을 최소화하는 것에 제작의 주요 초점을 맞추어야 하며, 이를 위해서는 기계공학적 안목을 기본으로 한 구체적인 설계·계산 과정이 요구된다. 예를 들면, 가장 큰 마찰 손실이 발생될 것으로 예상되는 Powerpiston & Cylinder, Displacershaft & guider 사이의 마찰을 줄이기 위해서 간극을 증가시키게 되면, 내부 작동 기체의 누수가 생기고, 압력차가 발생하지 않게 된다. 따라서, 적절한 재질의 선정으로 어느 정도 이러한

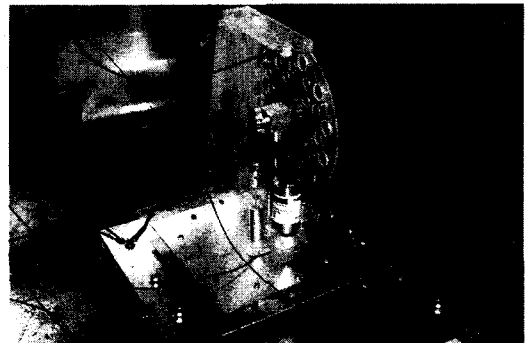


Fig. 1 Photograph of model stirling engine

한계를 보상한다 하더라도 마찰 감소에 대한 근본적인 한계가 있다. 실험 대상인 모형 엔진이 본 실험실에서 직접 설계 및 제작되었지만, 일부 부품의 제작은 정밀가공이 이루어져야 하고, 계산에 의한 설계대로 가공되었다하더라도, 여러 번의 시행착오를 거치면서 수정하였다.

또한, Powerpiston, Displacer의 자체 무게로 인해 모형 엔진의 구동시 flywheel에 편심이 발생하게 되고, 이는 회전운동을 방해하여 마찰을 증가시키는 요인이 될 수 있다.

따라서, 이를 보정하기 위해 양쪽 connecting rod 연결부의 반대쪽에 비슷한 무게의 균형추를 설치하여 편심에 의한 불균형이 최소화하도록 설계·제작하였다. 본 실험에서 제작된 모형 스테어링 엔진은 상온(27°C)에서 손바닥 체온보다 낮은 약 30°C의 낮은 열원에서 50 RPM 정도로 구동하는 작동 성능을 보이고 있다.

3. 이론적 해석

이론적 해석의 궁극적인 목표는 실험 모델에 대한 타당한 해석 모델을 제시함으로써, 실험 모델의 작동 특성(내부 압력, 온도, 회전수)을 예측하고, 모형뿐만 아니라 실제 엔진의 설계·제작 시 유용한 기초 자료를 확보하고자 하는데 있다. 실험 모델에 대한 이론 해석에 앞서 다음과 같은 몇가지 가정이 전제되어야 한다.⁽¹⁾

- 첫째, 내부 작동 유체(air)는 이상 기체이다.
- 둘째, 작동 유체의 C_p , C_v , k , R 은 상수값이다
- 셋째, 실린더 내부의 압력은 균일(uniform)하다.
- 넷째, 구동시 발생하게 되는 작동 유체의 kinetic energy 와 potential energy 는 무시한다.
- 다섯째, 내부 작동 유체의 질량은 일정하다.
($m_{total} = Constant$)

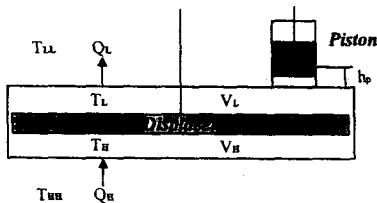


Fig. 2 Schematic of Isothermal and Simple analysis model

여섯째, 열전달 계수(Heat transfer coefficient)는 일정하다. ($K_H, K_L = Constant$)

Isothermal analysis는 가열·냉각 온도(T_{HH}, T_{LL})와 모형 엔진 내부의 가열부·냉각부 체적의 온도(T_H, T_L)가 동일한 경우 즉, 가열판과 냉각판 양 표면 사이에 열전달이 전혀 없고 작동 유체와 재생기사이에 열교환이 100%라고 가정한 것으로 가장 기초 단계의 해석이다. 열역학적 관점의 기본 방정식(Basic equation)은 다음과 같다.

Conservation of mass

$$m_H + m_L = m_{total} = Const \quad (1)$$

Equation of state

$$m_H = \frac{PV_H}{RT_H}, \quad m_L = \frac{PV_L}{RT_L}$$

$$P_H = \frac{m_{tot}}{\left[\frac{V_H}{RT_H} + \frac{V_L}{RT_L} \right]} \quad (2)$$

Work

$$\delta W = PdV = P(V - V_0) \quad (3)$$

Conservation of energy

$$\delta Q_H - \delta W_H + \delta m_{H_i} h_{H_i} - \delta m_{H_e} h_{H_e} = dU_H$$

$$\delta Q_L - \delta W_L + \delta m_{L_i} h_{L_i} - \delta m_{L_e} h_{L_e} = dU_L \quad (4)$$

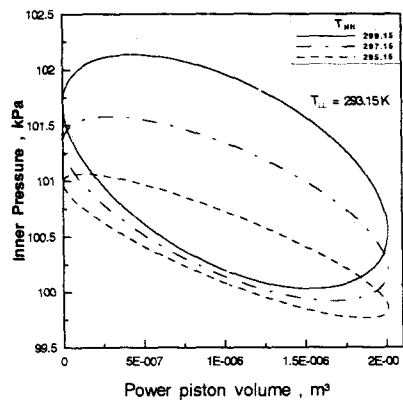


Fig. 3 P-Vdiagram of Isothermal analysis ($T_L = Const$)

m_{total} 은 작동유체의 총 질량으로 항상 일정하며, 작동유체의 일은 식(3)과 같이 체적 변화로 계산하였다. 식(1)~(4)을 연립하여 임의의 온도차에서 각도 변화에 대한 내부 압력을 계산하면, Fig. 3과 같이 대기압(100kPa)을 기준으로 약 ± 3 kPa (0.45psi)정도의 압력 변화를 보였다.

Simple analysis는 열원·대기(T_{HH} , T_{LL})와 가열부·냉각부의 내부 작동 유체(T_H , T_L) 사이 즉, 가열판·냉각판의 양 표면사이의 온도차로 인해 열전달(Heat transfer)이 발생하는 경우로, 대기압을 기준으로 약 ± 1 kPa(0.15psi)정도의 압력 변화를 보이고 있는데, Isothermal analysis에 비해 압력 변화 정도가 작다. 가열·냉각판 사이의 열전달 계수(Heat transfer coefficient)의 계산은 총괄 열전달 계수(Overall heat transfer coefficient)와 전열면적의 곱으로 나타낼 수 있으며, 방정식은 다음과 같다.⁽⁶⁻⁷⁾

<총괄 열전달 계수>

가열판

$$U_H = 1 / \left(\frac{L_H}{k_H} + \frac{1}{h_{H,o}} \right) \quad (5)$$

냉각판

$$U_L = 1 / \left(\frac{1}{h_{L,i}} + \frac{L_L}{k_L} + \frac{1}{h_{L,o}} \right) \quad (6)$$

<열전달 계수>

$$K_H = U_H \times A \quad (7)$$

$$K_L = U_L \times A$$

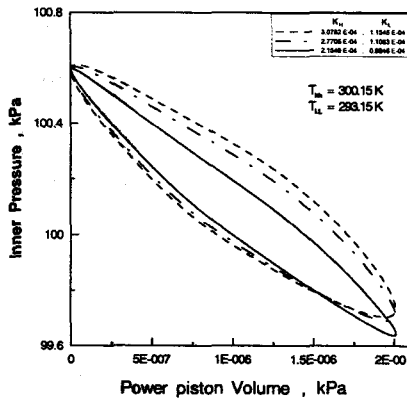


Fig. 4 P-V diagram of Simple analysis ($T_H, T_L = \text{Const}$)

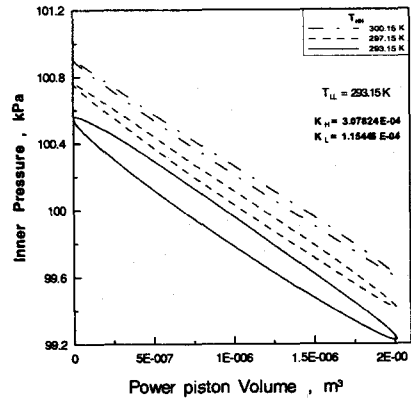


Fig. 5 P-V diagram of Simple analysis ($K_H, K_L = \text{Const}$)

Fig. 4, 와 Fig. 5 는 Simple analysis 에서 냉각부 온도가 일정하고 임의의 온도차에 대해 열전달 계수가 변하는 경우와 열전달 계수값은 일정하고, 온도차가 변하는 경우의 P-V선도를 보여주고 있다.

4. 실험 모델의 작동 특성

본 실험에 설치된 모형 스테어링 엔진은 직접 설계·제작된 모델로써, 상기된 내용과 같이 상온(27℃)의 대기상태에서 손바닥 체온(30℃)정도의 낮은 열원으로 구동하며, 회전 속도는 약 50 RPM 이상이다. 특별히 실험 모델에 대해서 외부로 출력의 추출은 없으며, 발생 출력은 작동시 자체 마찰로 모두 소산된다고 가정한다.

Table 1은 제작 모델의 실험 조건으로 위상각

Table 1 Experiment condition.

Phase angle (Deg)	100
Displacer storke (mm)	10
Powerpiston storke (mm)	8
Compression ratio (r_v)	1 : 95.703
Atmosphere Temp. (K)	290.15
Cooling Temp. (K)	293.15
Heating Temp. (K)	300.15 ~ 311.15

(Phase angle), 압축비(Compression ratio), 냉각 온도(Cooling temperature) 등은 일정하게 두고, 가열 장치에 공급되는 전압을 조절하여 가열 온도만 변화시켰다. 내부 압력 측정은 측정범위 0~1psig의 압력계(Sensotec Co., P-100MV)를 사용하였으며, Powerpiston의 체적 변화는 광센서(Takex Co., FT505)를 사용하여 측정하였고, 가열판·냉각판의 온도는 T-type thermocouple을 표면에 부착하여 측정하였다. Fig. 6은 300K의 열원에서 시간에 따른 내부 압력 변화와 Powerpiston의 위치 변화에 대한 측정 결과이다. 한 사이클에서 90°마다 Powerpiston의 위치가 일정하게 변하지 않는데, 이는 압축·팽창 행정 시 동력의 입·출력 변화 및 회전 시 불균형에 의한 결과로 추측된다.

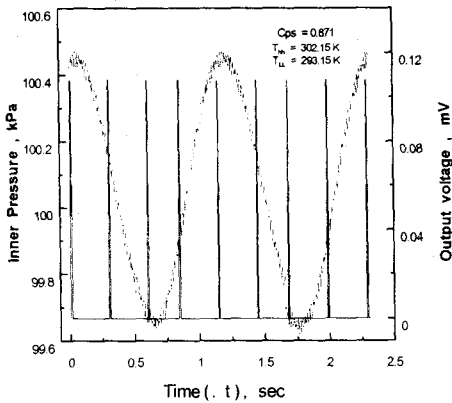


Fig. 6 Inner Pressure and Powerpiston position history ($T_L = \text{Const}$)

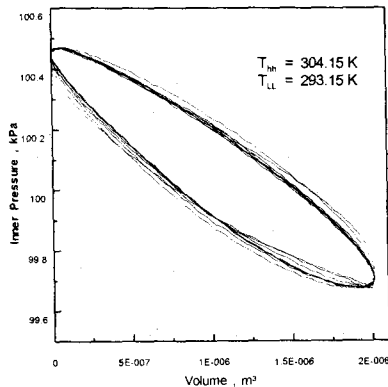


Fig. 7 P-V diagram of experiment model ($\Delta T = 11 \text{ K}$)

Fig. 7은 임의의 온도차에서 측정된 내부 압력과 Power piston 체적 변화에 대한 P-V선도로 대기압을 기준으로 약 $\pm 0.5\text{kPa}$ ($\pm 0.06\text{psig}$) 정도의 압력 변화를 보이고 있다. 이처럼 매우 작은 압력 변화는 내부 작동 유체(air)의 누수보다는 낮은 가열 온도와 Powerpiston stroke이 작아서 전체 체적에 대한 압축비가 작는데 그 원인이 있는 것으로 보인다.

5. 결과 및 고찰

임의의 온도차에서 실험 결과로부터 구한 P-V 선도와 Isothermal analysis와 열전달을 고려한 Simple analysis의 P-V선도를 서로 비교하면 다음과 같다. Isothermal analysis의 경우 Fig. 8에서와 같이 실험 결과와 해석 결과가 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 실제 모델에서 열전달이 전혀 없다는 가정 자체가 부적절함을 보여주고 있다. Simple analysis 결과인 Fig. 9은 양편의 열전달 계수값을 조절함으로써, 실험과 해석 결과가 거의 일치하는 것을 보여주고 있다. 이는 실제 모델에서 열전달이 분명 존재하고, 열전달 계수의 변화에 따라 실험 모델에 대한 비교적 정확한 예측이 가능함을 보여주고 있다. Fig. 10은 각 실험 case에 대해 비교한 결과를 조합하여, 임의의

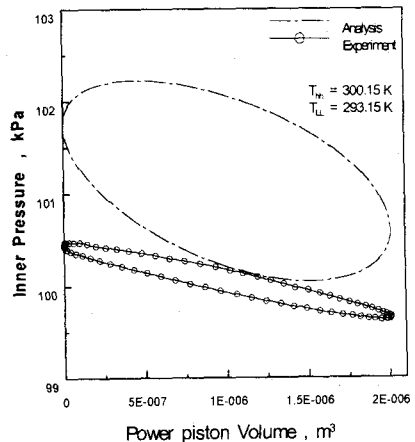


Fig. 8 A comparison for P-V diagram between experimental result and Isothermal analysis result

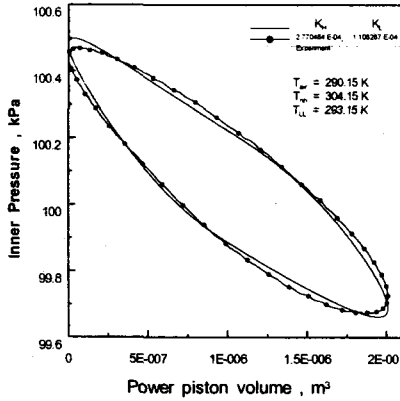


Fig. 9 A comparison for P-V diagram between experimental result and Simple analysis result

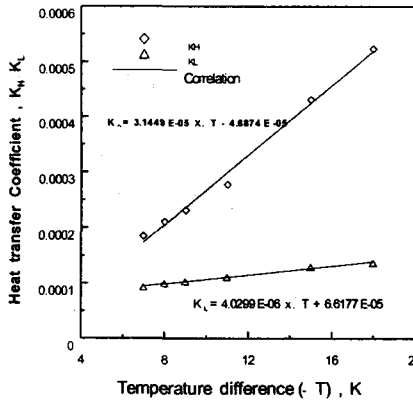


Fig. 10 The correlation equation of Heat transfer coefficient at a low temperature differences

온도차에 대한 가열판·냉각판의 열전달계수 상관식을 나타내고 있다.

6. 결론

인간의 체온 정도의 열원으로 구동이 가능한 저온도차 모형 스텔링 엔진을 제작하여 열원 온도에 따른 작동특성을 측정하고, 간단한 열전달을 고려하는 단순해석 모델에 의한 해석을 시도하였다. 즉, 측정 결과에 의한 열역학적 사이클의 압력-체적 선도와 단순 해석 모델에 의한 선도를 비교하므로써 해석모델에 필요한 가열부와 냉각부의 열전달 계수를 결정하였다.

이러한 결과는 저온도차 모형 스텔링 엔진의 작동 특성에 대한 비교적 정확한 예측을 가능하며, 모형 엔진의 설계, 제작시 유용한 참고 자료로 이용할 수 있다. 특히, 그 결과를 이용하면, 엔진의 위상각 및 압축비 변화에 따른 출력변화를 계산할 수 있으므로 이러한 변수들에 대한 최적설계가 가능하고, 엔진 작동의 열역학적 특성에 대한 상세한 이해가 가능하므로 기계공학 교육재료로도 이용 가치가 높을 것이다. 나아가, 모형뿐만 아니라, 실제 실용화 연구에서도 기관의 설계 및 제작에 대한 기초 자료로 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Urieli, I., and Berchowitz, D. M., 1984, Stirling Cycle Engine Analysis, Adam Hilger Ltd., Bristol.
- (2) Senft, J. R., 1993, An Introduction to Stirling Engines, Moriya Press.
- (3) 유호선, 노승탁, 1990, "재생기효율을 고려한 스텔링기관의 예비설계," 대한기계학회 논문집 제14권, 제5호, 대한기계학회, pp. 1356~1364.
- (4) 최갑석, 박태인, 최준변, 이장희, 황의선, 1990, "스텔링 엔진 개발," 선박용 스텔링 엔진 개발 연차 보고서, 과학기술처.
- (5) 이춘식, 정종수, 강병하, 정형호, 김응태, 유호선, 이대길, 정석호, 정광섭, 1990, "스텔링엔진 개발 연구-범용 스텔링 엔진," 범용 스텔링 엔진 연구 연차 보고서, 과학기술처.
- (6) Mills, A. F., 1995, Basic Heat and Mass Transfer, Richard D. Irwin, Inc.
- (7) Costea, M., and Feidt, M., 1998, "The effect of The Overall Heat Transfer Coefficient Variation On The Optimal Distribution Of The Heat Transfer Surface Conductance Or Area In A Stirling Engine," *Energy Conversion & Management*, Vol. 39, No. 16-18, pp1753-1761.
- (8) 김정국, 조경철, 정평석, 1998, "모형 스텔링 엔진의 제작," 대한기계학회 '98년도 추계학술대회 논문집(B), 영남대, pp. 196~200