

# 베타형 스텔링 엔진의 열역학 해석 및 동역학 해석을 통한 통합 설계 방법론

## Integrated Design Methodology of Thermodynamic and Dynamic Analyses for Beta-Type Free-Piston Stirling Engine

심규호†·김동준\*·이윤표\*\*·장선준\*\*\*

Kyuhoo Sim, Dong-Jun Kim, Yun-Pyo Lee, Seon-Jun Jang

### 1. 서 론

최근 스텔링 엔진(Stirling Engine)은 지구 온난화와 화석 연료의 고갈 등으로 인해 소형 열병합발전, 태양열발전, 폐열에너지 재생 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 자유피스톤 스텔링 엔진(Free-piston stirling engine, FPSE)는 기존 스텔링 엔진에서 두 피스톤의 운동을 구속하는 기구부를 제거하고 진동시스템을 구성하여 시스템을 크게 단순화하고, 무게 및 크기를 크게 감소하였다.

스텔링 엔진의 연구 동향은 다음과 같다. Redlich 와 Berchowit<sup>(1)</sup>는 스텔링 엔진을 선형 진동 시스템으로 가정한 뒤 안정적인 작동 조건 및 작동주파수에 관해 연구하였다. Formosa<sup>(2)</sup>는 FPSE의 비선형 동역학에 대해 연구하였다. Karabulut<sup>(3)</sup>는 FPSE의 열역학 해석에 기반한 동역학 해석을 연구하였다. 특히, Farhan Choudhary<sup>(4)</sup>는 FPSE 동역학 거동 특성을 한 눈에 볼 수 있는 근궤적(root locus)을 활용하여 비선형 동역학 관점에서 동작점, 작동주파수 등을 예측하였다.

본 논문은 스텔링 엔진에 대한 기존의 열역학적 사이클 해석과 동역학 해석을 통합하여 30W 급 β-FPSE 설계를 목표로 한다. β-FPSE에 대한 동역학 해석을 통하여 작동주파수를 예측하고, 이를 바탕으로 열역학 해석을 수행하여 스텔링 엔진 성능을 예측한다.

### 2. 해석 모델

베타형(β) FPSE는 Figure 1에서 보는 바와 같

이 파워피스톤과 디스플레이서가 동일선 상에 위치하고, 비접촉식으로 연성된다. 디스플레이서는 가열부와 냉각부 사이에 위치하며 재생기를 거쳐 작동유체를 이동시킨다. 작동 유체가 차지하는 내부 공간은 팽창부, 압축부, 재생부로 나뉜다. Figure 1에 주어진 β-FPSE의 출력피스톤과 디스플레이서의 운동방정식은 식(1)과 같다.

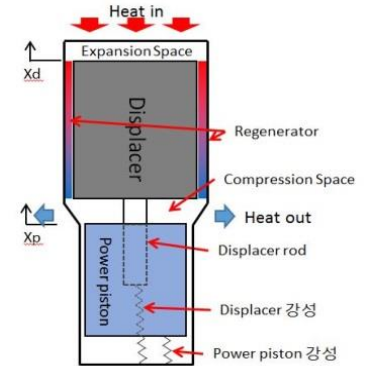


Fig. 1 Schematic of a β-type FPSE

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_p & 0 \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + \frac{P_m A_p^2}{ST_h} & -\frac{P_m A_p (A_d - A_r)}{ST_c} + \frac{P_m A_d A_p}{ST_h} \\ \frac{P_m A_r A_p}{ST_h} & k_d - \frac{P_m A_r (A_d - A_r)}{ST_c} + \frac{P_m A_r A_d}{ST_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $m_p$ ,  $c_p$ ,  $k_p$ 는 각각 출력피스톤의 질량, 댐핑, 스프링 강성이며  $m_d$ ,  $c_d$ ,  $k_d$ 는 각각 디스플레이서의 질량, 댐핑, 스프링 강성이다.  $T_h$ 는 팽창부 온도,  $T_c$ 는 압축부 온도이다.  $A_p$ 와  $A_d$ 는 각각 출력피스톤과 디스플레이서의 단면적이며  $A_r$ 은 디스플레이서 로드(rod)의 단면적이다.  $P_m$ 은 엔진내부 평균압력이다.

30W 급 β-FPSE의 초기 설계 파라미터는 기존에 다양한 β-FPSE의 사양을 참고하여 선정하였다. 작동 온도비는 2, 고온부 및 저온부 온도는 각각 700K, 350K, 평균 내부압력은 1MPa로 정하였다. 출력피스톤과 디스플레이서 질량은 각각 0.9kg, 0.25kg, 감쇠계수는 19.4Ns/m, 5.4Ns/m, 강성계수는 16400N/m, 4720N/m로 정하였다. 크기는

† 교신저자: 정희원,  
서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과  
E-mail : [khsim@seoultech.ac.kr](mailto:khsim@seoultech.ac.kr)  
Tel : 02-970-7195

\* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과  
\*\* 한국과학기술연구원 도시에너지시스템연구단  
\*\*\*이노베이션KR

200W FPSE<sup>(3)</sup>의 약 15% 수준으로 정했다.

$\beta$ -FPSE의 동역학 모델은 식(1)을 무차원화시켜  $x_p=Z_1, x_d=Z_2, x'_p=Z_3, x'_d=Z_4$ 를 이용해 상태방정식으로 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>. 파워피스톤과 디스플레이서의 댐핑값을 증가하면서 개루프 근궤적(open loop root locus)을 그려 작동점을 파악해 동작 여부와 작동 주파수를 확인한다. 근궤적상에서 허수축을 지나는 점이 작동주파수이다. 이 작동주파수를 이용하여 열역학적 사이클 해석을 실시한다.

본 논문의 스티어링 엔진에 대한 열역학 사이클 해석은 Schmidt 이론<sup>(5)</sup>을 기반으로 스티어링 엔진의 내부 압력은 같고, 작동 유체를 이상기체로 가정한다. 또한, 부피, 작동 유체의 질량, 온도를 이용하여 압력을 계산함으로써 p-v 선도 및 온도, 압력, 위상차에 따른 출력변화를 이론적으로 계산한다. 재생기의 효율은 1로 가정하고, 온도는 고온부와 냉각부의 평균 온도이다.

### 3. 해석 결과

Figure 2는 200W FPSE<sup>(3)</sup>와 본 논문의 30w 급 FPSE의 개루프 근궤적선도를 보여준다. 출력피스톤과 디스플레이서의 감쇠계수를 동시에 증가하였다. 두 개의 엔진 모두 허수축을 지나고 있으므로, 비선형 동역학 상태방정식의 고유치(Eigenvalue)가 순허수가 되어 Hopf Bifurcation 현상<sup>(6)</sup>으로 인한 한계 진동(Limit cycle)이 발생함을 확인할 수 있다. 작동주파수는 무차원수 1.16 이고, 차원화하면 각각 14Hz, 25Hz에 해당한다.

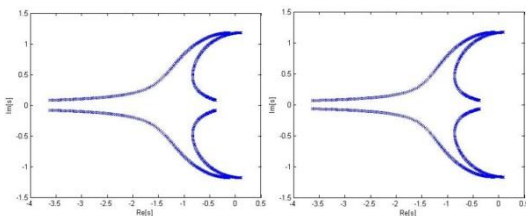


Fig. 2 Root locus of 200 W FPSE (left) and 30 W FPSE (right) for increasing damping coefficients of power piston and displacer with given parameters in Table 2.

Figure4는 스티어링 엔진 작동 주파수 10 Hz - 30 Hz에 대하여 피스톤 간의 위상차와 고온부 온도의 변화에 대한 출력을 보여준다. 모든 작동주파수에 대하여 위상차가 140도일 때 최대화하고, 작동주파수의 증가는 출력 증가를 유발한다. 고온부 온도를 증가시킬 때, 전체적으로 출력 및 효율은 증가하지만 고온에서 증가율은 감소함을 알 수 있다.

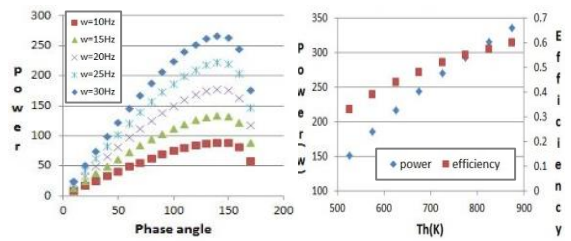


Fig. 4 Power output of 30 W class FPSE for increasing phase angles between power piston and displacer (left) and increasing high end temp. (right).

### 4. 결론

본 논문은설계를 위하여 스티어링 엔진에 대한 기존의 열역학적 사이클 및 동역학 통합 해석을 수행하여 30W 급  $\beta$ -FPSE 해석 모델을 제시하였다. 향후 이 해석 모델을 이용해 설계값을 결정하고, 실험장치를 제작하여 해석모델을 검증하고 설계인자의 민감도를 실험으로 측정할 것이다.

### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비(일부)지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) R.W. Redlich, D.M. Berchowitz, Linear Dynamics of free-piston Stirling Engines, Proc. of IMechE, Journal of Mechanical Engineering Science Part C, 199 (1985).
- 2) F. Formosa, Nonlinear dynamic analysis of a membrane Stirling engine: Starting and stable operation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 326, 794-808 (2009).
- 3) Halit Karabulut, Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles, Renewable Energy 36 (2011) 1704-1709.
- 4) Farhan Choudhary, Dynamics Of Free Piston Stirling Engines, Master's Thesis, University of Maryland, 2009
- 5) Koichi Hirata, Schmidt Theory for Stirling Engines, National Maritime Research Institute
- 6) Nabajyoti Das and Tarini Kumar Dutta, Determination of Supercritical and Subcritical Hopf Bifurcation on a Two-Dimensional Chaotic Model, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, 2(1), pp. 207-220.