

스털링 엔진 유회를 위한 가스 베어링 적용

김보흥*, 박영채**

(*울산대학교, **서울과학기술대학교)

1. 머리말

프리 피스톤 스텔링 엔진(FPSE: free-piston stirling engine)은 피스톤-실린더 왕복운동 구조이며, 좁은 간극을 갖고 위치하고 있다. 이런 좁은 간극을 두고 운동하는 피스톤-실린더 구조에서 피스톤, 실린더 간 마찰은 구조의 마멸을 발생시키며 심각할 경우 파손을 발생시킨다. 일반적인 피스톤-실린더 구조에서 선형 왕복운동 유회는 핵심적인 요소이며, FPSE의 경우에도 유회한 작동을 위해 다양한 유회 기술이 적용되어 왔다.

FPSE는 기본적으로 밀폐되어 있으며, 고온 부의 온도는 300° 이상인 고온 시스템이다. 위와 같은 제한 사항으로 유회 기술 적용에 제한이 따른다. 또한, FPSE는 일반적인 내연기관 엔진의 크랭크·샤프트(crank·shaft) 구조와 다르게, 기구적인 피스톤 측력은 없으나 선형발전기(linear alternator)의 편심이나 정렬 불량, 제작 오차로 인한 의한 측면 자기력이 발생한다. 따라서, FPSE 유회 기술의 핵심은 발전기 측면 자기력에 의한 피스톤-실린더 간 마찰이 억제하는 하중지지력을 형성하는 것이다.

일반적으로 피스톤-실린더 구조의 유회는 그림 1과 같이, 오일(oil)이나 그리스(grease)를 사용한 오일 유회를 통하여 얇은 유막 층을 형성하고 유막 층의 낮은 마찰계수를 이용하여 구동한다. 하

지만 FPSE에서는 오일의 증발이나 직접 유입을 통해 열 교환기 등 엔진 내부의 오염 및 성능 감소를 유발하고, 이러한 오일이 지속적으로 쌓일 경우 엔진 수명에 치명적인 요소로 작용한다. 피스톤-실린더 유회 기술 중 하나인 고체유회는 피스톤 표면에 테플론(Teflon)이나 몰리브덴(Molybdenum) 등 마찰 계수가 낮은 특수 고체물질 코팅하여 마찰을 줄이는 방법으로 사용되고 있다. 하지만, 재료 특성 상 고온에서 사용이 어렵고 지속적인 구동 시 코팅의 손실로 인한 유회 성능 저하가 발생하므로 FPSE 유회 기술로는 부적합하다고 평가 받는다.

최근에는 FPSE 유회 기술로 가스 베어링(HSGB: hydrostatic gas bearing)이 많이 사용되고 있다. FPSE의 HSGB는 피스톤 벽면에 있는 홀을 통해 높은 압력의 가스를 주입하여 피스톤-실린더 간 간극에 가스 층을 형성한다. 이러한 가스 층은 그림 2와 같이 FPSE의 선형발전기의 측면

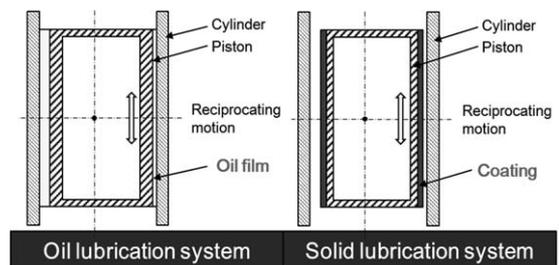


그림 1 일반적인 피스톤-실린더 유회 기술

** E-mail : newpark711@seoultech.ac.kr

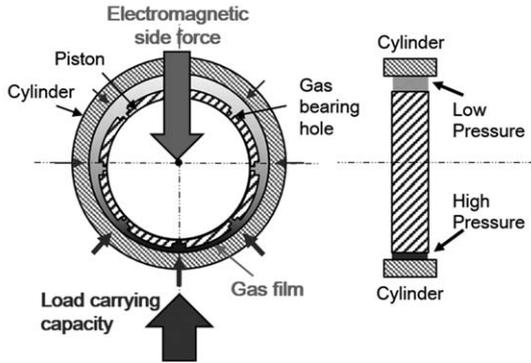


그림 2 프리 피스톤 스텔링 엔진을 위한 정압 가스베어링의 하중지지력

자기력에 의해 피스톤-실린더 간 편심이 발생할 경우 편심 반대 방향으로 하중 지지력을 발생하여 피스톤이 실린더의 중심에 정렬하게 된다. 가스 층이 깨지지 않는 이상 피스톤-실린더 간에 접촉으로 인한 마찰은 발생되지 않으며 별도의 급유 시스템을 요구하지 않으므로 반 영구적으로 사용할 수 있다.

정압 가스 베어링 연구는 일반적으로 회전체 시스템의 윤활 기술로 많이 사용되고 있다. 저널 베어링의 경우에는 정압 가스 층의 유체 구조에 대하여 전산 유체 해석(CFD)해석을 이용한 연구⁽¹⁾와 정압 가스 층의 해석적 예측과 실험적 검증을 통한 연구⁽²⁾가 진행되었다. 또한 스러스트 베어링의 경우에도 베어링 내 유체의 유동 구조에 대해 CFD해석을 이용한 연구⁽³⁾가 진행되었다.

프리 피스톤 스텔링 엔진의 윤활 연구가 가장 활발한 시기는 1980년대 후반부터 2000년대 초반으로 Sunpower사의 기술 개발과 함께 특허 기술로써 많이 진행되어왔다. 그 예를 보면, 엔진 내부 작동압력을 이용하여 피스톤 윤활면의 정압 가스 베어링 홀을 통해 윤활층을 형성하는 특허⁽⁴⁾와 피스톤 표면에 유체 유로(passage)를 형성시켜 윤활 층을 형성하는 특허⁽⁵⁾가 있다. 하지만 프리 피스톤 스텔링 엔진의 윤활에 대한 학술적인 연구는 그 중요성에 비하여 부족한 상황이다.

따라서, 프리 피스톤 스텔링 엔진의 안정적인 작동을 위하여 정압 가스 베어링에 대한 윤활 성능 예측 및 엔진 적용을 위한 학술적인 연구, 즉

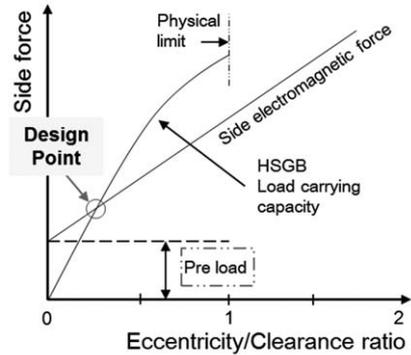


그림 3 프리 피스톤 스텔링 엔진을 위한 정압 가스베어링의 설계 조건

CFD 윤활 해석 및 윤활 성능 실험을 통하여 윤활 특성을 규명하는 연구가 필요하다.

2. 정압 가스 베어링의 설계 방법론

프리 피스톤 스텔링 엔진은 기본적으로 선형 발전기의 전자기력으로 인해 축력이 작용한다. 그림 3과 같이 편심량이 증가함에 따라 축력이 비례적으로 증가하는 경향이다. 이러한 축력은 피스톤과 실린더의 마찰을 발생시켜 윤활 성능에 치명적인 요소로 작용한다. 이러한 축력을 극복하기 위해서는 정압 가스 베어링의 하중 지지력을 이용한다. 하중 지지력은 발전기로 인한 축력과 마찬가지로 편심량에 따라 증가하며, 하중 지지력이 발전기 축력과 같거나 클 경우에는 힘의 평형상태가 되어 피스톤과 실린더 간의 접촉을 막을 수 있다. 이러한 하중 지지력은 CFD를 이용하여 예측할 수 있다. 하중 지지력에 영향을 끼치는 편심, 가압 압력 등 다양한 요소에 대해 비교하고 해당 하중 지지력을 발생시키는 유량을 예측하여 합리적인 설계를 할 수 있다. 추가적으로 발전기로 인한 축력에서 중요 고려 사항은 예압(preload)이다. 이는 피스톤-실린더의 제작 오차, 정렬 오차 등 구조적인 문제로 발생할 수도 있으며, 선형 발전기 자석-코일간의 전자기력 불평형으로 인해 발생할 수도 있다. 그 외에 실질적으로 제어 불가능한 다양한 오차로 인해 발생되며, 이러한 예압을 최소화하는 것과 윤활층 가

압 압력을 최소화하는 것이 프리 피스톤 스텔링 엔진을 위한 정압 가스 베어링 설계의 핵심 설계 요소 중 하나이다.

FPSE를 위한 HSGB 설계 시, 가장 핵심적으로 주안 점은 윤활 성능이다. 즉, FPSE 선형 발전기의 측면 자기력을 HSGB의 하중 지지력을 이용하여 극복하는 것을 가장 우선적인 해결 과제로 두어야 한다. 그러므로 측면 자기력을 극복 할 수 있는 HSGB의 설계를 먼저 진행해야 한다. 그 이후, 해당 HSGB이 요구하는 동압을 제공 할 수 있는 FPSE 내부 설계를 진행하는 것이 합리적이다.

FPSE 내부 설계가 동반되는 HSGB의 설계는 많은 불확실성이 존재한다. 그러므로 위와 같이 두 단계로 분리하여 설계를 진행하는 것이 필요하다. 우선적으로 HSGB 자체의 윤활 성능을 확인하기 위하여 외부 가압을 압력 원으로 이용한 장치의 전산 유체 해석과 실험적인 확인이 필요하다. 여기서 외부 가압은 엔진 동압을 이용하는 압력 원의 대체로 사용되는 실험적인 인자이다. 시스템을 간단하게 하여 비교적 높은 정확도의 해석적 예측이 가능하고, 가압 압력의 변화에 따라 실험적으로 윤활 성능의 변화 추이에 대한 확인이 가능하다. 첫 번째 단계를 통하여 윤활 성능이 확보 된 엔진 동압의 수준을 예측하고, HSGB의 형상에 대한 1차 설계가 가능하다. 이 후, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 윤활 성능이 확보 된 엔진 동압을 기준으로 FPSE내부 설계를 진행하고, 그에 따라 전체 시스템에 대한 전산 유체 해석이 가능하다. 1차 설계를 통해 완성 된 HSGB을 전체 시스템 해석을 통해 HSGB의 형상에 대한 2차 설계가 가능하다. 위의 두 단계를 거쳐 불확실성을 최대한 제거하여 FPSE를 위한 HSGB설계가 가능하다.

3. CFD를 이용한 윤활 유동 해석

전산 유체 해석을 이용하기 위해서는 기본적으로 해석 경계 조건 및 결과에 대한 물리적 근거에

기반한 판단이 필요하다. 경계 조건에 대해서는 실험 값이나 참고 문헌의 값이나 물리적 지식에 기반한 값을 입력하여 해석을 진행해야 한다. 마찬가지로 해석 결과 값에 대해서는 값이 정확한 지에 대한 물리적 판단이 필요하다.

FPSE를 위한 HSGB 설계의 해석은 위와 같이 크게 두 단계로 진행된다. 엔진 동압을 대체하여 외부 가압을 압력 원으로 이용한 HSGB의 해석과, 전체 시스템 해석으로 진행된다. 첫 번째 단계의 해석의 목표는 윤활 성능 확보이다. 가압 압력을 이용한 1차적인 해석이므로 해석의 불확실성 제거를 위해 온도 경계조건을 제외하고, 정적 해석을 진행한다. 위 해석을 통하여 가압 압력, 윤활 간극, 윤활 면적, 편심에 따른 윤활 성능을 확인 할 수 있으며 해석 결과에 따라 HSGB의 1차 설계가 가능하다. 두 번째 단계의 해석의 목표는 확보된 윤활 성능을 기반으로 엔진 동압을 이용한 HSGB의 설계가 목표이다. 두 번째 단계에서는 실제 시스템에 대한 HSGB의 설계이므로 각 경계조건에 대한 온도 값과 동적 해석을 진행한다. 또한 1단계 실험 값을 기반으로 2단계 해석의 경계조건으로 입력하여 좀 더 높은 정확도의 해석 예측이 가능하다. 이를 통해 FPSE를 위한 HSGB의 설계가 가능하다.

CFD(전산유체해석)에서는 격자 구조 및 배치가 해석 결과에 큰 영향을 끼치므로 합리적이고 신뢰성 높은 격자를 구성해야 한다. 또한 격자의 개수가 과도하게 많을 경우 해석 시간이 기하 급수적으로 증가 할 수 있으며, 해석이 불가한 상황이 발생 할 수 있다.

정압 가스 베어링의 해석 영역은 크게 압력을 가해주는 홀 영역과 갭 영역으로 나뉜다. 갭 영역에서는 지배적인 유동 방향이 존재 한다. 그러므로 육면체(hex)격자를 이용하면 좀 더 효과적으로 유동을 나타낼 수 있다. 또한 가스 베어링 홀 영역에서는 홀->갭의 급격한 구조 변화로 인해 불규칙적인 난류 유동이 발생된다. 그러므로 사면체(tetra)구조로 격자를 구성하면 난류 유동을 적합하게 반영할 수 있다. 또한 벽면의 경계 조건

으로는 no slip 조건을 부여한다.

유동 흐름의 경우 편심량이 커질수록 피스톤 갭의 크기가 달라진다. 즉 편심 측에서 반대 측으로 유동이 흐르는 현상을 보인다. 이는 유동 저항으로 설명할 수 있는데, 편심이 발생하면 편심 측 갭이 좁아져 유동 저항이 상대적으로 높아진다. 유동 저항이 높아질 경우 유동은 유동 저항이 높은 곳에서 작은 곳으로 흐르게 된다. 또한 유동 저항이 높을 경우에는 유속이 낮아져 내부 유체가 상대적으로 오랜 기간 지체하므로 더 고압의 압력이 발생한다.

가스 베어링 홀 영역에서는 홀에서 갭으로 급격한 구조 변화가 발생하여 유동 흐름에 큰 장애가 발생한다. 그러므로 와류(Vortex) 같은 복잡한 난류 유동이 발생하게 된다. 그리고 갭 영역에서는 좁은 관을 통한 유동이 발생하므로 벽면 마찰 효과에 의해 압력유동(Poiseuille flow)가 형성되게 된다.

위 내용에 기반하여 피스톤 표면에 작용하는 압력을 예측하면 편심이 발생하지 않을 경우에는 피스톤 표면의 압력층이 고르게 분포하여 하중 지지력이 발생하지 않을 것으로 예측된다. 편심이 발생될 경우 편심 방향에 상대적으로 고압의 압력이 발생되어 피스톤 양 측간의 압력차이로 인해 하중 지지력을 발생시킨다. 이 때의 하중 지지력은 일반적으로 편심 량과 가압 압력에 비례하여 상승한다. 하지만 편심 량과 가압 압력 증가에 따라 많은 하중 지지력을 발생시키기 위해서는 많은 유량을 소모해야 한다. 프리 피스톤 스틸링 엔진에서 정압 가스 베어링의 과도한 유량 소모는 엔진의 성능 손실을 유발한다. 즉, 엔진 작동에 필요한 유량을 유효를 위해 사용하는 것이다. 그러므로 유효 성능과 유효 유량 소모 간 최적화를 위한 설계가 반드시 필요하다.

4. 맺음말

현재까지의 연구 결과에 따르면, 향후 내부 압력 유효 시스템을 위해서는 예압에 대해 개선할 필요가 있다. 예압에 따라 설계 점이 바뀌고 지나치게 큰 예압은 그 만큼의 가압 압력을 요구한다. 우선적으로 설계 측면에 있어서 예압이 불명확하고 불균일할 경우 적합한 설계를 진행할 수 없다. 예압이 클 경우에는 가압 압력이 많이 필요하고, 엔진 내부의 유량을 많이 사용해야 하므로 예압의 균일화와 최소화가 함께 고려되어야 한다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Lihua, L. et al., 2012, Research on Static Stiffness of Hydrostatic Bearing using Fluid-structure Interaction Analysis, *Procedia Engineering*, Vol. 29, pp. 1304~1308.
- (2) Kim, D. J. et al., 2009, Hydrostatic Air Foil Bearing: Analytical and Experimental Investigation, *Tribology International*, Vol. 42, No. 3, pp. 413~425.
- (3) Kozdera, M., 2011, Investigation of Fluid Flow in Axial Hydrostatic Bearing, *Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 2/2011, pp. 1~6.
- (4) Beale, W. T., 1989, Sliding Surface Lubrication Particularly Antageous for a Free Piston Stirling Engine, US 4802332 A.
- (5) Ungger, Z.-M., 2001, Gas Bearing and Method of Making a Gas Bearing for a Free Piston Machine, US 6293184 B1.