



미래에너지를 위한 스텔링 컨버터의 필요성 및 활용방안

심규호

(서울과학기술대학교)

1. 미래 사회와 에너지

현대사회에서 에너지는 한 사회의 삶의 수준을 결정할 뿐 아니라 국가 경쟁력과 안보에 막대한 영향을 미치고 있다. 하지만 석유자원의 고갈로 인하여 국가 또는 가정의 에너지 수급 및 비용이 불안정해지는 상황에서 뚜렷한 대체에너지원마저 나오지 않아 불안감은 커져만 가고 있다. 시간이 지날수록 에너지 수요는 계속해서 증가되고 있는 상황에 미래사회는 어떻게 변해야 할 것이며, 미래에너지는 어떤 형태가 되어야 할까? 라는 질문에 대한 답이 될 수 있는 예가 있다.

그림 1은 스웨덴 남쪽도시인 말뫼의 에코마을이다. 말뫼의 에코마을은 1000여 가구가 모여 살며 100% 신재생 에너지로 자급자족하는 공간이다. 빗물을 정화해 식수원으로 이용하고, 태양열과 풍력을 통해 에너지를 만들고, 냉방과 난방은 깊은 땅속의 지열로 운용된다. 이 도시를 사진으



그림 1 에코 마을, 말뫼(Malmö), 스웨덴

로나마 보게 된다면 누구나 살고 싶은 도시이다.

고성장시대에 사람들은 모두 먹고 사는 것에 초점을 맞추었지만, 최근에 사람들은 친환경적이고 자유롭고 평등한 사회에서 사는 것을 희망한다. 미래사회와 에너지는 구성원들의 가치변화에 따라 변화해 나갈 것이다. 사람들의 가치변화는 새로운 시장을 창출하고 신산업을 발굴해 기존에는 잘 쓰지 않았거나 새로운 제품과 기술을 개발시킨다. 그러므로 사람들의 가치변화는 신산업을 보면 알 수 있다.

최근 휴대전화와 같은 모바일 플랫폼의 발달로 숨겨져 있던 자산의 활용이 가능해지고, 생산성도 극대화되는 공유경제를 이용한 사업이 매우 활발하다. 기존에 소유, 독점, 일방제공 형태의 서비스가 나누고 함께 쓰는 형태로 발전하였고, 숙박(에어비앤비), 교통(우버)에서 에너지 영역까지 확장되고 있다. 이를 에너지 관점으로 보면 필요한 에너지를 스스로 생산, 소비하고 남는 것은 판매/공유하여 수익을 창출한다는 것이다.

이러한 사람들의 가치변화에 맞춰 한국 정부는 에너지 신산업을 제시하였다. 에너지 신산업에 대한 요구는 '에너지이용효율증가', '전력프로슈머', '분산형 청정에너지', '온실가스 감축', '신재생 에너지 발굴' 등이 핵심이슈로 제시되고 있다. 이러한 핵심이슈들은 생산/소비 단위의 지역,

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

표 1 소규모 열에너지 변환 시스템 비교⁽¹⁾

	IC Engines	Micro-turbines	Stirling engine	Proton Exchange Membrane FC
Fuel	Fossil fuel	Fossil fuel	Various fuel	Various fuel
Power output (kW)	5 ~ 5,000	30 ~ 200	1 ~ 200	1 ~ 250
Efficiency (%)	25 ~ 45	20 ~ 30	7 ~ 38	30 ~ 40
Operating temperature (°C)	121	260	90 ~ 1100	90
Current cost (\$/kW)	440 ~ 830	700 ~ 1,110	2,000 ~ 36,000	5000 ~ 30,000
Noise	High	High	Low	X
Exhaust gas	High	High	Low	X

건물, 가정 단위로 분산화가 필요하여 사용자와 에너지시스템과 가까이 존재하게 되어 친환경적이고, 소형화를 요구한다. 또한 주변에서 버려지는 에너지를 재활용하여 사용할 필요가 있는데, 대부분이 열에너지 형태이다. 그러므로 에너지 신산업을 위해서는 소규모 친환경 저소음의 열에너지 변환 시스템이 필요하다.

표 1은 에너지 변환시스템을 보여준다⁽¹⁾. 내연기관(IC engine)과 소형터빈(micro turbines)은 비용이 낮고 기술적 완성도가 높아 현재는 많이 사용하고 있지만, 배기가스가 많고, 소음이 커서 생활환경 주변에서 사용하는 것은 부적합하다. 그리고 연료전지는 배기가스가 없이 다양한 열원을 사용할 수 있고, 고효율/저소음의 장점을 가지지만, 1 kW 가정용 열병합 발전을 기준으로 약 6000만원의 설치비용이 들어가 현실적으로 적용하기 매우 어렵다⁽⁴⁾. 하지만 스텔링 컨버터는 동일한 장점을 가지면 현재 약 1000만원 이하로 공급할 수 있다. 또한 현재 전량 수입에 의존하고 있어 높은 가격대를 형성하지만 국내 상용화 기술 확보 시 가격을 현저히 떨어뜨릴 수 있기 때문에 소규모 친환경 저소음의 열에너지 변환시스템으로 가장 적합하다. 또한, 스텔링 엔진은 다른 일반적인 엔진의 연료가 정제된 액체 또는 기체 연료로 제한되는 것과 달리, 순수 열에너지를 이용하므로 자연에 산재하는 펠릿 등과 같은 바이오 고체연료, 지열/태양열과 같은 신재생 열에너지, 내연기관 배기열/산업공정 발생 열과 같은 폐열 회수에 특히 장점을 가지고 있다.

2. 스텔링 컨버터

2.1 소개

스텔링 컨버터(stirling convertor)는 순수 열에너지를 기계 동력으로 변환시켜 전기에너지를 생산하는 장치로서, 열·유동 시스템, 기계동역학 시스템, 전자기 시스템이 복합된 에너지 변환 장치이다. 비교적 출력 밀도는 낮지만, 고효율에 소음이 적고 배출가스가 없어 실내 설치가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 스텔링 엔진은 닫힌 공간 안의 작동기체를 서로 다른 온도에서 두 개의 피스톤의 왕복운동을 통하여 압축·팽창시켜 열에너지를 운동에너지로 변환하는 스텔링 사이클에 기반한 열기관(heat engine)이다.

스텔링 사이클은 등온 압축, 등적 가열, 등온 팽창, 등적 냉각으로 구성되며, 이론적으로 가장 높은 열효율을 가지는 것으로 알려져 있으며, 폭발행정이 없기 때문에 소음/진동이 작다. 특히, 외연기관이므로 기존 화석연료뿐 아니라 내연기관 배기열과 같은 다양한 미활용 폐열, 태양열/지열 등과 같은 신재생 열에너지, 석탄 등 고체 연료 등의 모든 열원을 이용할 수 있는 열기관이다.

기존 기구형 스텔링 엔진은 피스톤을 물리적으로 연결하는 기구부를 구비하는데, 각 피스톤의 운동 및 위상차를 정확하게 조절할 수 있지만, 상당한 측면 하중이 발생하여 피스톤 마멸 문제를 야기한다. 더구나, 이로 인하여 엔진의 크기와 무게가 커지고 기계적 손실과 밀봉 문제로 인하여 성능을 저하시킨다. 이러한 단점을 보완하기 위

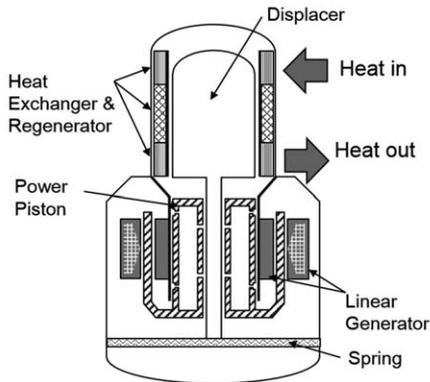


그림 2 베타형 프리 피스톤 스텔링 엔진

해서 프리 피스톤 스텔링 엔진(free-piston stirling engine, FPSE)는 기구부를 제거하고 각각의 피스톤에 스프링을 연결하여 스프링의 복원력을 이용한 피스톤의 운동을 발생시키는 진동시스템을 구성한 장치이며 차세대 스텔링 컨버터이다.

2.2 필요성

스텔링 컨버터는 가스터빈, 내연기관과는 달리 열원 제약 없이 전력 생산하여 바이오/고체 연료, 태양열, 폐자원의 에너지화에 유리하다. 또한 소음/진동이 작고 배기가스가 없어 친환경적인 요소는 모두 갖추고 있다. 해외 상용제품들은 주로 소형 열병합 발전, 신재생 태양열 발전에 적용된다. 즉, 전력이 필요한 곳에서 직접 생산하는 분산발전을 가능하게 하여 송전 손실도 줄이고 남은 전기를 팔 수 있는 전력 프로슈머가 가능하고, 무한한 태양에너지로 전력을 생산하여 신재생 에너지도 발굴할 수 있다. 그러므로 에너지 신산업 트렌드인 소규모 친환경 저소음의 열에너지 변환 시스템의 요건을 정확히 반영한다. 하지만 현재 국내 상용화 기술부족으로 전량 해외제품을 수입하여, 국내시장확산에 제한이 되고 있는 실정이다.

3. 기술 요소

3.1 요구기술

스텔링 컨버터는 그림 3과 같이 열·유체, 진

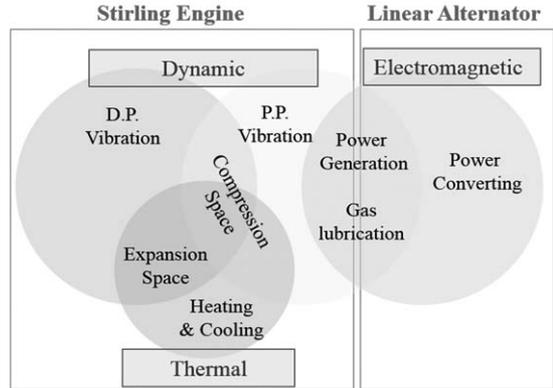


그림 3 스텔링 컨버터의 핵심 고려요소

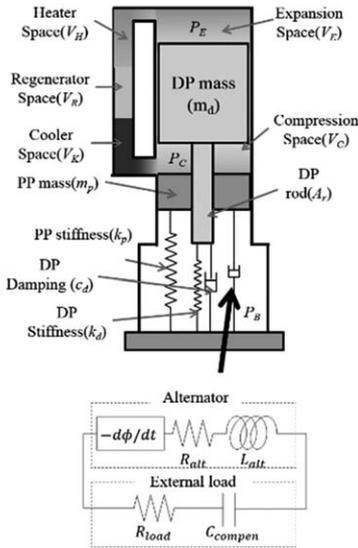
동, 전자기, 운할 요소가 구조적, 이론적으로 높은 밀도로 복합적으로 연계되어 있어 핵심요소 기술을 필요로 하는 동시에 높은 수준의 요소 연계 기술이 필요하다.

3.2 엔진/발전기 단독 및 연계해석

스텔링 컨버터는 외부의 열에너지를 기계 동력으로 바꾸어주는 엔진 파트, 기계 동력을 전자기 유도에 의해 전기 출력으로 바꾸어주는 발전기 파트로 구성된다.

엔진 파트는 두 개의 피스톤이 각각 스프링에 연결되고 작동공간의 압력으로 연성되어 작동하는 2자유도 진동시스템을 구성한다. 기구적으로는 단순하지만 열에너지 순환과 압력 발생에 의한 비선형 진동에 기반한 작동원리와 내부 열교환기/재생기의 효율과 압력강하 등의 손실이 고려되어야 하는 열-진동 복합시스템으로서, 엔진의 거동 및 성능을 예측하기 위해 높은 수준의 열·유동해석과 연계된 동역학 해석이 요구된다.

선형발전기 파트는 단독 설계도 중요하지만, 엔진 파트와 연계한 최적 부하설계가 핵심이다. 기계동력이 전기출력으로 변환될 때 발전기와 엔진 피스톤 간에 부하가 걸리게 된다. 이 부하는 엔진의 기계 동력 중 일부를 빼앗는 동시에 발전기에 전기 에너지를 생산함으로써 엔진과 발전기 상호작용하는 연결고리가 된다. 이 때 부하의 크기는 발전기에 외부회로로 연결된 저항



Governing Equation			
Equation of motion for stirling engine			
$M_d \ddot{x}_d$	$= (P - P_0) [1 - \frac{(A_p - A_r)x_p}{V_{B0}}]^\gamma A_r$	$- k_d x_d + C_d \dot{x}_d + C_p \dot{x}_p$	
Inertia force	Pressure force	Stiffness force	Pressure drop force
Equation of motion for P.P.			
$M_p \ddot{x}_p$	$= (P - P_0) [1 - \frac{(A_p - A_r)x_p}{V_{B0}}]^\gamma (A_p - A_r)$	$- k_p x_p - K_e I$	
Inertia force	Pressure force	Stiffness force	Alternator force
Circuit equation for linear alternator			
$K_e \cdot \dot{x}_p$	$= L_{alt} \dot{Q} + \frac{1}{C_{compen}} Q + (R_{alt} + R_{load}) Q$		
Induced voltage	Inductance voltage	Capacitance voltage	Load resistance voltage

그림 4 스티어링 엔진-발전기 연계 개략도 및 지배방정식

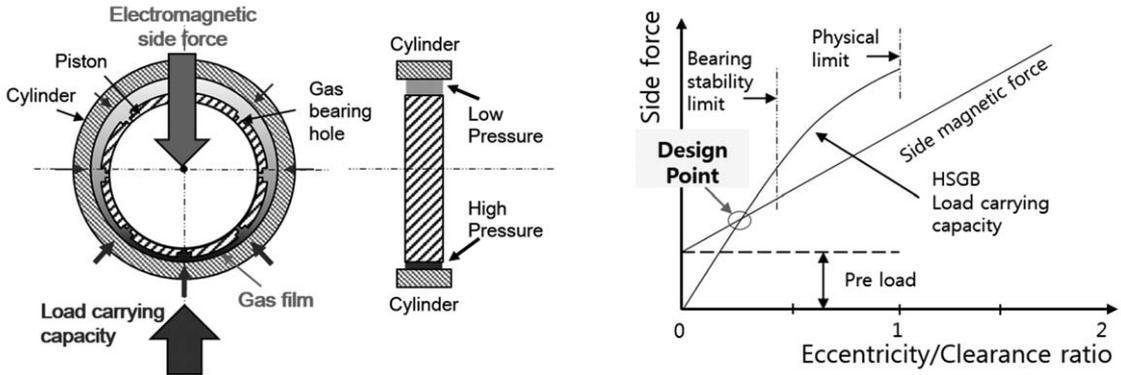


그림 5 정압 가스베어링의 편심에 따른 하중 지지력(왼쪽), 편심에 따른 하중 지지력, 발전기 출력의 관계(오른쪽)

(resistance)과 축전기(capacitor)에 의해 결정된다. 저항과 축전기 값이 변화하면 부하가 달라지고 부하로부터 출력되는 전기 에너지 크기 및 역률이 달라진다. 다시 말하면 저항 및 축전기 값에 따라서 엔진에 작용하는 부하와 전기출력이 결정되는 것이다. 그러므로 엔진과 발전기 파트를 연계한 다물리 통합 해석이 필요하다. 엔진-발전기 연계 다물리 통합 해석은 그림 4와 같이 엔진 파트와 발전기 파트를 모듈화하여 각각의 기계 진동, 전자기 지배방정식을 유도하여 최종적으로 두 식을 연계한다. 즉, 스티어링 컨버터의 동적 거동 예측은 진동-전자기 지배방정식을 활용할 수 있다.

3.3 윤활요소

스티어링 컨버터는 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극으로 인해 제작오차, 발전기의 측면자기력 등으로 윤활을 요구한다. 파워피스톤 옆에 선형 발전기가 장착되어 피스톤에 측면 자기력이 작용한다. 특히 측면 자기력은 피스톤-실린더 간 강한 마찰을 유발하여 엔진 성능을 저하시키기 때문에, 측면 자기력을 극복하는 것이 스티어링 컨버터 윤활 기술의 핵심이다.

스티어링 컨버터 윤활 기술로는 정압 가스 베어링이 많이 사용되고 있다. 정압 가스 베어링은 피스톤 벽면에 있는 홀을 통해 일정 압력의 가스를 주입하거나 엔진 내부압력변화를 이용해 피스



그림 6 태양열 이용 3 kW 스텔링 컨버터, infinia(왼쪽), 발전 단지, Boeing, Kockums(오른쪽)

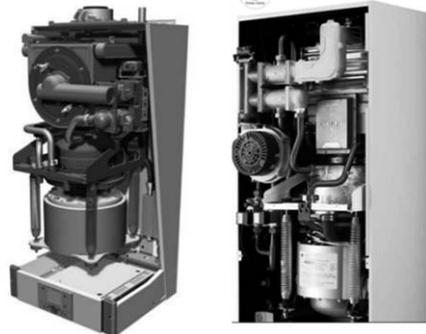


그림 7 가정용 열병합발전 개념도(왼쪽), 전기발전 보일러 상용제품, Baxi, KD Navien(오른쪽)

톤-실린더 간 간극에 기체 유막을 형성한다. 이러한 기체 유막은 그림 5 (왼쪽)과 같이 FPSE의 선형발전기의 측면자기력에 의해 피스톤-실린더 간 편심이 발생할 경우 편심 반대 방향으로 강한 하중 지지력이 작용하여 피스톤이 실린더의 중심에 정렬하게 된다.

기체 유막이 깨지지 않는 이상 피스톤-실린더 간에 접촉으로 인한 마찰은 발생되지 않으며 별도의 급유 시스템을 요구하지 않으므로 반 영구적으로 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 스텔링 컨버터 상용화 유행기술을 위해서는 그림 5 (오른쪽)과 같이 편심에 따른 가스베어링의 하중 지지력과 발전기의 측면자기력을 예측하는 연구가 필요하다.

4. 활용방안

스텔링 컨버터는 수십 W에서 수 kW급을 중심

으로 세계적으로 약 20여 개 회사가 개발 중에 있으며, 적용 분야는 태양열 발전, 가정용 열병합 발전, 군사, 우주 분야 등이 있다.

첫 번째로 스텔링 컨버터를 이용한 이용한 태양열 발전시스템은 접시 형태의 집광기를 통해 태양의 복사에너지를 스텔링 엔진에서 흡수하여 전기를 발생시킨다. 약 25%에서 30%의 태양열 스텔링엔진 발전효율을 가진다. 냉각은 공냉 방식을 사용하여 냉각수를 구하기 어려운 사막 지역이나, 일조량이 많은 지역에서의 사용이 용이하다. 고 일사지역의 경우 접시형 태양열발전 효율이 태양광 발전에 비해 2배 이상으로 대량생산으로 경제성을 확보할 경우 경쟁력 확보가 가능하다⁽²⁾. 국외에서는 SESI(미국)사의 25 kW급 태양열 이용 스텔링 컨버터 발전시스템(그림 6)을 개발하였으며, 최대 발전효율은 약 32%에서 33% 수준이다⁽¹⁾.

두 번째로 스텔링 컨버터를 이용한 열병합 발



그림 8 우주선 내 발전 스텔링 컨버터(왼쪽), 스텔링 냉동기(오른쪽)

전 시스템은 최근 유럽의 보일러 회사를 중심으로 가정용 열병합발전 시스템의 개발 및 실증시험이 활발히 진행되고 있다. 가정용 열병합발전 시스템은 국내를 비롯한 일본, 유럽 등에서 상용화하였지만, 스텔링 컨버터는 대표적으로 현재 Microgen(영국)사에서 생산한 제품을 채용하고 있다⁽¹⁾.

그 외 적용분야는 군사 보조전원용 및 미래병사체계용 전원으로 수십 W, 수 kW급 스텔링 컨버터가 개발되었다. 또한 미국을 포함한 우주 강국들은 우주탐사 및 인공위성용 전원(그림 8, 왼쪽)에도 널리 활용하고 있다(Sunpower, 미국)⁽²⁾. 또한 스텔링 엔진의 역사이클인 스텔링 극저온 냉동기는 극저온 냉동기 및 초전도체 냉각용으로 널리 이용되고 있다(그림 8, 오른쪽)

이처럼 미국, 유럽 등에서는 스텔링 컨버터를 상용화하여 신재생 열에너지, 미활용 폐열 등을 사용하여 전력을 공급하고 있다. 그러므로 국내에도 이처럼 스텔링 컨버터의 상용화를 위한 연구가 활성화되어 미래에너지 확보에 앞장설 필요가 있다.

5. 맺음말

스텔링 컨버터는 고효율, 정숙성 등의 장점을 기반으로 바이오/고체 연료, 태양열, 폐자원 등



다양한 형태의 열에너지원을 이용한 전력생산으로 미래에너지 개발에 높은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 이렇듯 스텔링 컨버터는 미래 에너지 상을 정확히 반영하여 활용도가 매우 높지만, 국내 상용화 기술 부족으로 인해 제품화, 시장확산이 미흡한 실정이다. 그러므로 여러 기술요소가 복잡하게 연계된 기술적 한계를 극복할 수 있는 여건마련이 필요하다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Thimsen, D., 2002, Stirling Engine Assessment, Technical report No. 1007317, EFRI, Palo Alto, CA.
- (2) Park, S. J., Ko, J. S., Hong, Y. J. and Kim, H. B., 2015, Technical Trend of Stirling Engine/Alternator, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 5~10.
- (3) Wood, G. J. and Lane, N., 2003, Advanced 35 W Free-piston Stirling Engine for Space Power Applications, Proc. STAIF, Albuquerque, NM, pp. 662~667.
- (4) <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=57702>.