



# 소형 스텔링 엔진 발전시스템 기술개발 동향

고준석, 박성제, 김효봉, 홍용주 | 한국기계연구원

## [ 요약문 ]

소형 스텔링엔진 발전시스템은 전력을 생산하기 위해 스텔링엔진을 적용하는 시스템으로, 천연가스가 풍부한 북유럽 국가들을 중심으로 난방, 온수와 전기에너지를 동시에 공급할 수 있는 가정용 소형 열병합 발전시스템으로 각광받고 있다. 외연기관인 스텔링엔진은 연료의 종류에 제한을 받지 않기 때문에, 태양열, 폐열, 천연가스 등의 다양한 열원을 이용한 발전시스템에 적용이 가능하다. 수 kW급의 스텔링엔진을 적용한 소형 열병합 발전시스템의 기술개발 동향을 소개하고자 한다.

## 1. 서 론

현재의 전력 계통은 발전소에서 전력을 생산하여 거미줄처럼 얽힌 전력망을 통해 수용가에 송전하는 방식을 가지고 있어 송전 손실 및 대규모 정전 사고 위험의 문제를 가지고 있다. 소형 열병합발전시스템은 사용하는 곳에서 직접 전력을 생산하기 때문에 송전 손실을 배제할 수 있고, 발전소와 달리 시스템 가동 준비에 거의 시간이 필요하지 않기 때문에 전력 공급 부족에 즉각적으로 대응할 수 있는 장점을 갖는다. 대규모 전력을 생산하는 발전소의 건설에는 막대한 비용과 시간이 요구되기 때문에 전력 수요가 나날이 증가하는 현대 사회에서 분산 발전의 필요성은 모두가 공감하고 있다. 그 중에서 가정용 소형 열병합 발전시스템은 기존의 가정용 보일러에 열에너지로부터 전기에너지를 생산할 수 있는 엔진을 장착하여 난방수 및 온수 공급과 함께 kW급의 전력을 생산하는 시스템이다. 여러 형태의 엔진 중에서 엔진 외부로부터 열을 공급받는 외연기관의 일종인 스텔링 엔진이 효율과 안전 측면에서 가정용 소형 열병합발전시스템에 적합한 것으로 판단되고 있다.

스텔링엔진은 19세기 초반 영국의 Robert Stirling에 의해 열공기 엔진(Hot Air Engine)으로 개발된 외연기관으로, 피스톤과 실린더로 이루어진 밀폐 공간 내에 헬륨, 수소 등의 작동 기체를 밀봉하고 이를 외부에서 가열/냉각하여 열역학 사이클을 구성하여 피스톤의 운동을 통해 에너지를 얻는 장치이다.

1930년대 네덜란드의 필립스사에 의해 군용 발전기로 본격적인 개발이 시작되었으며, 1960년대 수백 kW급에 이르는 다양한 엔진이 개발되었다. 1970년대 필립스 및 포드사에 의해 저공해, 탈석유, 연비 향상의 목적으로 승용차 탑재용 엔진으로 개발된 바 있으나 현재의 자동차용 내연기관에 비해 경쟁력이 낮아 연구개발 단계에서 마무리되었다. 이후에는 태양열 발전, 폐열 발전 및 우주용 등의 목적으로 다양한 용량, 형태의 엔진이 개발, 적용된 바 있다.

외연기관인 스텔링엔진은 가스, 액체, 고체 연료를 모두 사용할 수 있어 연료에 제한을 받지 않고, 연소 조건의 최적화 및 제어를 통해 청정한 연소가 가능한 장점이 있다. 소형 열병합 발전시스템에 적용하는 경우에는 배기열을 열에너지로 회수하여 손실이 없고, 왕복동 방식의 내연기관에 비해 소음과 진동이 현저하게 작아 실내 설치 조건에도 적합하여 소형 가정용 열병합 발전시스템의 동력원으로 적합한 것으로 평가받고 있다.



## 2. 스텔링엔진 열병합 발전시스템

### 2.1 스텔링 엔진의 작동원리 및 종류

스텔링엔진은 등온팽창, 등적냉각, 등온압축, 등적가열의 4개의 과정으로 구성되는 스텔링 사이클로 작동하며, 이상적인 열역학 사이클인 카르노 사이클(Carnot cycle)과 동등한 효율을 갖는다. 이상적인 스텔링 사이클은 그림 1과 같이 작동 기체가 충전되어 밀폐된 공간 내에서 재생열교환기(regenerator) 사이에 위치한 두 개의 피스톤의 운동에 의해 작동한다. 압축공간 내에서 압축 피스톤의 운동에 의한 등온 압축 과정(a → b), 압축 피스톤과 팽창 피스톤이 동시에 이동하며 압축된 기체가 팽창 공간으로 이동하며 재생 열교환기로부터 열을 공급받는 등적 가열 과정(b → c), 팽창 공간 내에서 팽창 피스톤의 운동에 의한 등온 팽창 과정(c → d), 팽창 피스톤과 압축 피스톤이 동시에 이동하며 팽창된 기체가 압축 공간으로 이동하며 재생 열교환기로 열을 방출하는 등적 냉각 과정(d → a)의 네 개의 과정을 통해 열역학 사이클을 구성한다. 실제 스텔링 엔진은 압축피스톤과 팽창피스톤이 90도의 위상을 갖고 왕복운동을 하면서 이와 같은 사이클을 구현한다.

스텔링 엔진은 외부 연소기로부터 열을 흡수하는 고온 열교환기, 고온부와 저온부 사이에 위치하여 통과하는 작동 기체와 열교환을 통해 열을 공급/저장하는 재생 열교환기, 외부로 열을 방출하는 저온 열교환기와 두 개의 피스톤 혹은 피스톤/변위기로 구성되며, 그림 2와 같이 피스톤과 변위기의 배치에 따라 형식이 구성된다. 실제 스텔링 엔진에는 그림 2에 나타난 알파, 베타, 감마형 형식이 주로 적용된다. 알파형 스텔링 엔진에서는 압축 피스톤과 팽창 피스톤이 각각 분리되어 독립된 공간에 배치되는 특징이 있다. 베타형 스텔링 엔진에서는 피스톤과 변위기가 동일한 실린더에 삽입되어 운동하며, 압축 공간의 체적이 피스톤과 변위기의 상대운동에 의해 결정되는 특징이 있다. 감마형 스텔링 엔진은 베타형과 유사하나 피스톤과 변위기의 실린더가 분리되어 배치되는 특징이 있다.

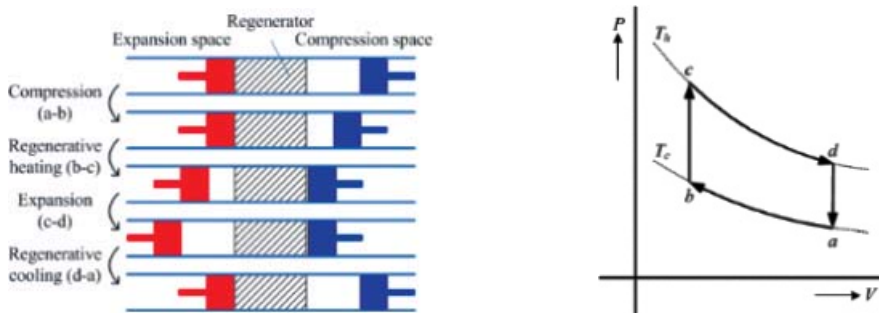


그림 1. 스텔링 사이클의 메커니즘 및 P-V선도

피스톤 및 열교환기 배치에 따른 구분 외에도 열에너지에 의해 발생한 동력 에너지를 전기 에너지로 변화하기 위해 사용되는 발전기 형태에 따라 회전발전기형과 선형발전기형으로 구분된다. 스텔링 엔진은 왕복운동을 하기 때문에 회전발전기를 이용하는 경우에는 직선 왕복운동을 회전운동을 변화하기 위한 기구장치가 필수적으로 요구된다. 크랭크등의 기구장치는 동력 전달 과정에서 마찰에 의한 손실이 발생하며 또한, 윤활유가 사용되는 경우에는 압축공간, 팽창공간 및 재생 열교환기로의 오일 미스트 유입이 발생한다. 오일 미스트가 유입되어 축적되면 스텔링엔진의 성능이 저하되기 때문에, 주기적으로 엔진을 분해하여 오일 미스트를 제거해주어야 하고, 이는 윤활유를 사용하지 않는 경우에 비해 매우 빠른 주기의 유지보수가 요구된다.

반면에, 선형발전기형 스텔링엔진은 별도의 기구장치 없이 동력 피스톤과 선형발전기가 결합되고 윤활유가 필요 없기 때문에 발전 효율과 엔진의 신뢰성이 좋은 장점이 있다. 선형발전기는 영구자석이 운동하는 가동자석형(moving magnet)과 코일이 운동하는 가동코일형(moving coil)으로 구현될 수 있는데, 상대적으로 경량화가 가능하

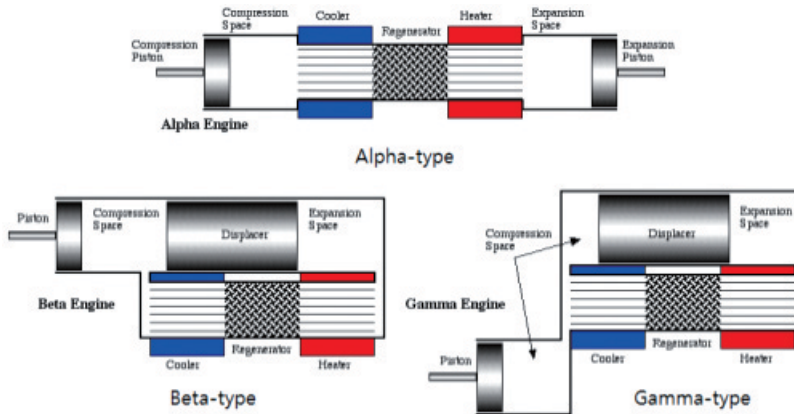


그림 2. 스텔링 엔진의 형식<sup>[1]</sup>

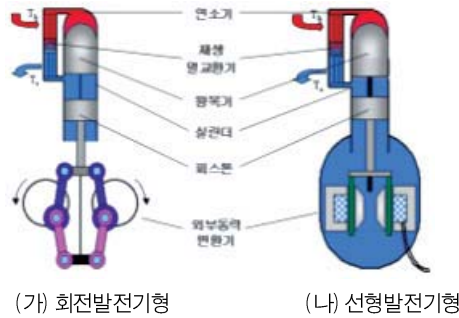


그림 3. 발전기에 따른 스텔링엔진 분류<sup>[10]</sup>

고 움직이는 부분에 권선 연결이 없는 가동자석형이 스텔링 엔진에 적합하다. 선형발전기는 질량-스프링-감쇠 시스템의 진동 에너지를 교류 전기 에너지로 변화하는 역할을 하는데, 에너지 전달 효율을 최대로 하기 위해서는 공진 운전 조건을 맞추어 주어야 한다.

스텔링 엔진의 효율은 고온부와 저온부의 작동 온도, 작동 압력, 공진 운동에 크게 영향을 받는데 기본적으로 공진 운동 조건은 만족되어야 한다. 공진 운동 조건을 만족한 경우에는 일반적으로 고온부와 저온부 온도차가 클수록, 작동 압력이 높을수록 엔진의 효율은 향상된다. 하지만, 저온부의 온도가 너무 낮은 경우에는 열을 방출할 수 있는 낮은 온도 조건을 조성하기 위한 추가적인 에너지가 필요하고, 고온부의 온도가 높을수록 부품에 사용할 수 있는 재질에 제한을 받으며, 작동 압력이 높을수록 압력 용기 제작에 부담이 증가하기 때문에, 이러한 제약 조건을 고려한 설계가 요구된다. 스텔링 엔진의 작동 기체로는 고효율을 위해 높은 열전도도와 낮은 점도를 갖는 수소 및 헬륨 등이 주로 사용되는데, 분자량이 작아 누설 위험이 높기 때문에 고성능의 밀봉 구조가 요구된다.

## 2.2 스텔링 엔진의 개발동향

스텔링 엔진은 열병합발전, 태양열/폐열/바이오 발전, 군사 및 우주용 전원 등의 다양한 용도로 개발된 바 있으며, 표 1은 주요 제작사별 스텔링 엔진의 출력 및 응용분야를 나타낸다. 대다수의 제작사는 25 kW 이하 출력의 엔진 개발에 주력하여 내구성 및 신뢰성 확보를 위해 노력하고 있다.



표 1. 스텔링엔진 주요 제작사별 용량 및 응용분야 (R: 회전발전기형, L: 선형발전기형)

엔진제작사	응용 분야							
	가정용 CHP	상용 CHP	태양열 발전	폐열 발전	바이오 발전	보조 전원	군용/ 우주	기계 구동
ADI Thermal power corp.(R)		25				25		
BSR Solar Technologies(L)			5-10	5-10				
Infinia(L)	1	3	30				~0.1	
Kockums (R)		25	25				75	
Quiet Revolution Motor Co. (L)		75						75
SigmaE. (R)	3							
SOLO (R)	2-10		2-10		2-10			
STM Power (R)		25	25	25	25			
Sunpower(L)	1				10		-5	
Tamin (R)	~10					~10	~10	
Uwe Moch (R)	1				1			
Whisper Tech (R)	1					1	1	

표 2. 25 kW급 스텔링 엔진 사양

	Kockums 4-95	SOLO	STM
실린더 수	4	1	4
작동유체	수소	헬륨	수소
운전 조건	700-750°C	650°C / 1500 RPM	1800 RPM
출력전원	440 V, 3Φ	400 V, 3Φ	480 V, 3Φ
연료	태양열	천연가스	천연가스
효율(전기/총합)	42 %	24/90 %	30.9/80 %
수명	18,000 hr(보수)	1 year(보수)	40,000 hr

표 3. 1 kW급 스텔링 엔진 사양

	Infinia	Sunpower	Whisper Tech.
실린더 수	1	1	4
작동유체	헬륨	헬륨	질소
운전 조건	50/60 Hz	525°C / 50 Hz	
출력전원	120/240V, 1Φ	240 V, 1Φ	230 V, 1Φ
연료	천연가스/프로판	천연가스/프로판	천연가스/프로판
효율(전기/총합)	23 %	28 %	12/90 %
수명	50,000 hr		30,000 hr

표 2와 3은 각각 25 kW급과 1 kW급 스텔링 엔진의 사양을 나타낸 것으로, 25 kW급 엔진은 주로 4기통의 회전 발전기형으로 개발되었으며, 1 kW급은 선형 발전기형을 채택하여 가정용 소형 열병합발전시스템에 주로 적용되고 있다.

뉴질랜드의 Whisper Tech 사는 그림 4와 같이 Dual-acting 방식으로 4 개의 실린더 및 회전형발전기를 사용하

먼서도 피스톤 측력을 감소하여 마모를 최소화할 수 있는 Wobble yolk 방식의 동력전달기구를 채용한 스텔링 엔진을 개발하였으며, 질소를 작동 기체로 사용하여 엔진 효율보다는 누설로 인한 성능 저하를 방지하여 신뢰성 향상을 도모하였다.

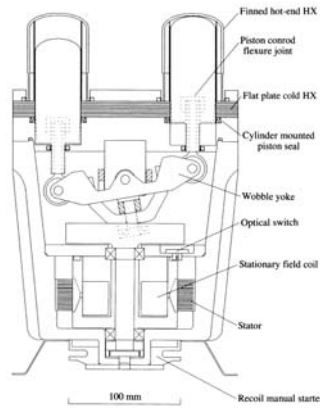


그림 4. Whisper Tech. 사의 스텔링엔진 구조<sup>[11]</sup>

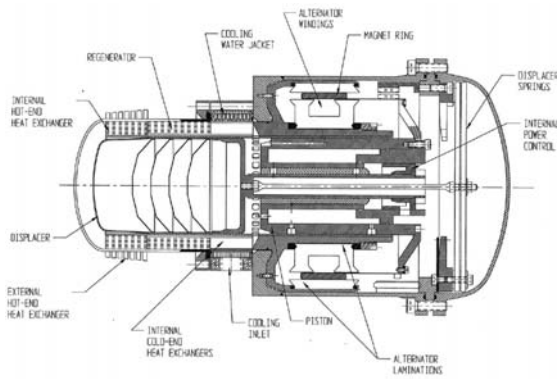


그림 5. Sunpower 사의 스텔링엔진 구조<sup>[12]</sup>

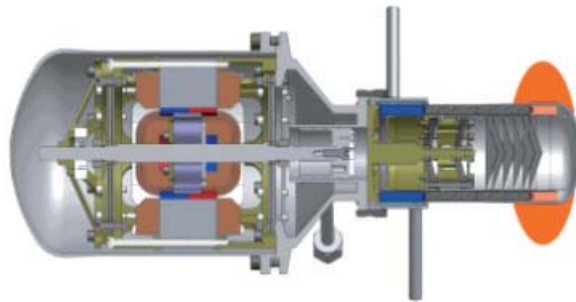


그림 6. Infrinia 사의 스텔링엔진 구조<sup>[13]</sup>



그림 5와 6은 각각 Sunpower 사와 Infinia 사에서 개발한 스텔링 엔진의 모습을 보여준다. 미국의 Sunpower 사는 1974년 FPSE(Free-Piston Stirling Engine)의 상용화를 위해 설립되었으며, 고신뢰성의 비접촉방식 가스베어링(Gas bearing) 및 관형 스프링(Flexure bearing)을 적용한 자유 피스톤 방식의 지지구조와 기동자석형 선형 발전기를 적용하여 수십 W ~ 수 kW 급의 스텔링엔진을 개발하였다. Sunpower 사는 특히 스텔링 엔진과 냉동기에서 다수의 원천 기술을 보유하고 있으며 기술 성숙도가 매우 높은 엔진 제작사이다. 미국의 Infinia 사는 천연가스, 프로판 경우, 태양에너지, 방사성 동위원소 등의 다양한 연료원 사용하며 선형발전기를 채택한 FPSE를 개발한 바 있으며, 운동 축 선상에서 두 개의 관형 스프링을 적용하여 기동자의 운동 강성을 향상시켜 수명 향상을 도모하여 50,000 시간 이상의 엔진 수명을 제시하고 있다.

### 2.3 소형 스텔링엔진 열병합 발전시스템 및 개발동향

스텔링엔진 소형 열병합 발전 시스템은 1 kW급의 스텔링 엔진과 콘덴싱 보일러를 통합한 발전시스템으로 최근 유럽의 보일러 회사를 중심으로 가정용 열병합발전 시스템의 개발 및 실증시험이 활발히 진행되고 있다. 그림 7은 가정용 스텔링엔진 열병합 발전시스템의 개략도와 전력만 사용하는 경우의 에너지 흐름량의 예시를 보여준다. 그림 8은 Microgen 사의 1 kW급 스텔링엔진을 적용하여 BAXI 사에서 개발한 micro-CHP 시스템의 내부 모습을 나타낸다. 전력 수요만 있는 경우에는 엔진에 장착된 연소기만 가동하여 6 kW 열량이 공급되어 4.2 kW의 열이 엔진으로 공급되고 고온의 배기가스가 가지고 있는 1.8 kW의 열량은 보조 보일러에서 순환수를 가열하여 온수 형태로 축열조에 저장된다. 엔진에 공급된 4.2 kW의 열량은 1.2 kW의 동력에너지로 변환되고, 3 kW의 열량은 냉각수를 가열함으로써 회수되어 축열조에 열에너지 형태로 저장된다. 엔진 운전에 의해 발생한 1.2 kW의 동력에너지에서 엔진 내부에서의 마찰 손실과 발전기 손실에 의해 0.2 kW의 손실을 제외한 1 kW의 에너지가 전기에너지로 출력된다. 서술한 열량 및 에너지량의 수치는 일반적인 운전 조건에서의 값을 의미하며, 연소기, 스텔링엔진, 시스템, 운전 조건 등에 의해 변할 수 있는 값이다. 예로 제시한 수치를 이용하여 효율을 계산해보면 스텔링엔진 발전 효율은 23.8%, 시스템 발전효율은 16.7%의 값을 보인다. 전력 수요만 있는 경우에 열에너지로 회수할 수 있는 열량은 4.8 kW로, 겨울철 난방 수요와 전력 수요가 동시에 있을 때의 난방 및 온수 수요를 전부 감당하기에 부족하므로 보조 보일러에 설치된 연소기를 가동하여 난방에 필요한 열량을 추가로 공급한다. 보조 보일러의 용량은 사용할 가정의 난방 및 온수 수요를 만족할 수 있는 적정 용량으로 선정되어야 한다.

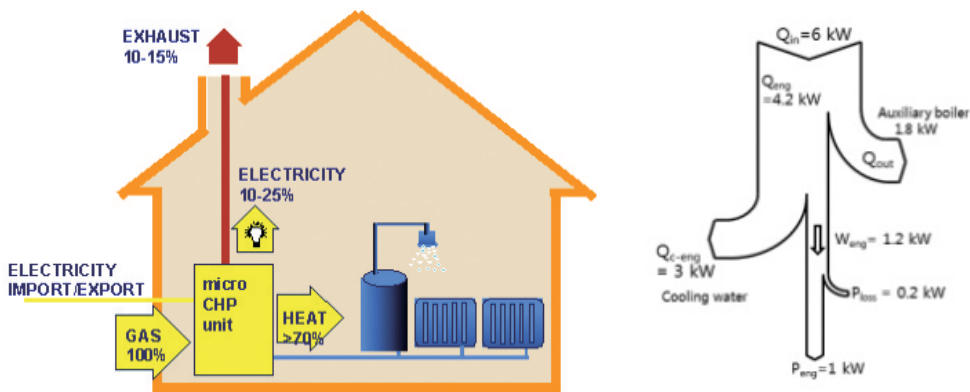


그림 7. 스텔링 엔진 적용 micro-CHP 시스템의 에너지 흐름<sup>[4]</sup>

소형 스텔링엔진 열병합 발전시스템은 1 kW급을 중심으로 세계적으로 약 10 여개 회사가 개발 및 보급을 위한 노력 중에 있다. 가정용 소형 열병합 발전시스템에 사용되는 스텔링 엔진은 Microgen 사와 Infinia 사의 엔진이 주로 사

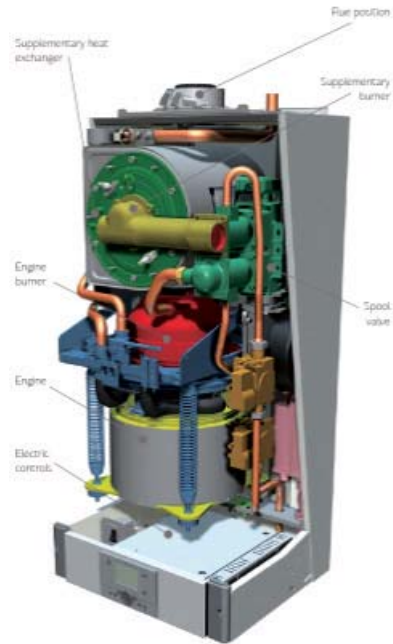


그림 8. 가정용 벽부착형 micro-CHP 시스템 도식 (BAXI 사)<sup>[5]</sup>

용되고 있다. 상용 스텔링 엔진에 대한 기술은 20 여년 이상을 기술개발에 투자해 온 소수의 제작사만 보유하고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

분산발전 회사인 ENECO, 보일러 회사인 ATA, 스텔링엔진 회사인 ECN이 합작한 네덜란드의 ENATEC 사는 미국 Infinia 사의 스텔링엔진을 기반으로 가정용 micro-CHP 시스템을 개발하여 유럽 시장에서 경쟁하고 있으며 일본의 Rinnai 사와 제휴를 통하여 일본 시장으로의 진출도 목표로 하고 있다. 유럽의 메이저 보일러 업체인 영국의 BAXI 사는 Microgen 사의 스텔링엔진을 기반으로 벽걸이형 가정용 열병합 발전시스템인 ECOGEN을 개발하였다.



그림 9. ENATEC 사의 스텔링 엔진 가정용 열병합 발전시스템<sup>[6]</sup>



그림 10. BAXI 사의 스텔링 엔진 가정용 열병합 발전시스템(ECOGEN)<sup>[5]</sup>

### 3. 결 론

스털링엔진은 다양한 연료의 사용이 가능하고 고효율, 저소음 및 저진동 특성으로 소형 열병합발전, 태양열 발전, 폐열 발전 등의 다양한 분야에서 활용되거나 검토되어지고 있다. 특히, 천연가스가 풍부한 북유럽 국가들을 중심으로 분산 발전에 대한 관심 증가와 맞물려 가정용 소형 열병합발전 시스템으로의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 소형 열병합 발전시스템에 대한 개발은 보일러 회사 주도로 진행되어 많은 업체들이 활발하게 노력하고 있지만, 핵심 기술인 스텔링 엔진은 소수의 제작사에 의해서만 상용화 기술이 확보된 상황이다. 스텔링 엔진 소형 열병합 발전시스템은 소용량 규모의 분산 발전 시스템이며 가정용 보일러를 대체할 수 있기 때문에 경제적, 사회적으로 큰 파급력을 갖는다. 하지만, 이의 보급을 가속화하기 위해서는 스텔링 엔진의 성능 및 내구성 향상과 함께 대량생산 제조공정 개발을 통한 가격 경쟁력의 제고가 절실히 요구되고 있다.

### ❁ 참고 문헌

- [1] I.D. G. Thombare, S. K. Verma, 2008, "Technological development in the Stirling cycle machine", Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 12, pp. 1-38.
- [2] W. D. Emst and R. K. Shaltens, "Automotive Stirling Engine Development Project", NASA CR-190780, 1997
- [3] 산업자원부, "산업기술로드맵-소형 에너지소스", 2004
- [4] Ian Knight and Ismet Ugursal, "Residential Cogeneration Systems : A Review of The Current Technologies", A report of Subtask A of FC+COGEN-SIM The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems, IEA/ECBCS, ISBN 9780662462217.
- [5] R. R. van der Woude, B. Vriesema, J. G. M. Zutt and G. J. J. Becker, "Stability Consideration of Grid-connected Free Piston Stirling Engine", The 13th Int. Stirling Engine Conf., Tokyo, Japan, September 23-26, 2007.
- [6] S. Qiu, D. Redinger and J. Augenblick, "The New Generation Infinia Free-Piston Stirling Engine for Micro-CHP and Remote Power Applications", 3rd Int. Energy Conversion Eng. Conf., AIAA-2005-



5517.

[7] I. Urieli and D. M. Berchowitz, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984.

[8] H. W. Brandhorst and P. A. Champman, "New 5kW Free Piston Stirling Space Converter Developments", Acta Astronautica, Vol. 63, pp. 342-347, 2008.

[9] <http://www.ohio.edu/people/urieli/stirling/me422.html>

[10] D. Thimsen, "Stirling Engine Assessment", Final Report 1007317, October 2002, EPRI

[11] <http://www.whispergen-europe.com/index.php>

[12] <http://www.sunpowerinc.com/>

[13] <http://www.clanstirling.org/>

[14] [http://www.microchp.be/energy\\_saving\\_trust.htm](http://www.microchp.be/energy_saving_trust.htm)

[15] <http://www.baxi.co.uk/index.htm>

[16] <http://www.enatec.com.br/>



고 준 석

- 한국기계연구원 극한기계연구본부 극한에너지기  
계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : jsko@kimm.re.kr



박 성 제

- 한국기계연구원 극한기계연구본부 극한에너지기  
계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : sjpark@kimm.re.kr



고 준 석

- 한국기계연구원 극한기계연구본부 극한에너지기  
계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : hyobong@kimm.re.kr



고 준 석

- 한국기계연구원 극한기계연구본부 극한에너지기  
계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : yjhgong@kimm.re.kr