

# 가스엔진 열병합 발전의 국내외 시장 및 기술개발 동향

가스엔진의 열병합 발전은 가스엔진으로 구동하는 발전기에서 전기를 얻고, 가스엔진 작동 시에 발생하는 배기가스와 냉각수에서 열에너지를 회수하여, 전기와 열을 동시에 생산하는 고효율 에너지 절약 시스템으로서 지금까지 개발된 기술의 동향과 보급사례 등을 살펴보고자 한다.

이 장 희

한국기계연구원 엔진환경기체그룹 (jhlee@kimm.re.kr)

## 가스엔진 열병합발전의 개념

가스엔진의 열병합 발전은 가스엔진으로 구동하는 발전기에서 전기를 얻고, 가스엔진 작동 시에 발생하는 배기가스와 냉각수에서 열에너지를 회수하여, 전기와 열을 동시에 생산하는 고효율 에너지절약 시스템이다. 가스엔진의 연료는 주로 LNG를 기화한 도시가스를 주로 사용하며 산지에 따른 성분 차이가 있으나 주성분은 메탄(CH<sub>4</sub>)으로서, 청정연료일 뿐 아니라 연료 자체에 탄소성분이 작아 지구온난화 문제해결을 위한 CO<sub>2</sub> 총량규제에 적합한 연료이다.

## 가스 엔진의 종류

가스엔진은 기존에 개발되어 양산보급 중인 디젤엔진을 베이스엔진으로 하여 개조·제작하며, 크게 나누어 혼소(dual fuel) 엔진과 전소(dedicated) 엔진으로 나뉜다. 혼소 엔진은 기존의 디젤엔진에다 천연가스 연료공급장치를 추가하고, 기존의 디젤분사계를 사용하여 미량의 디젤연료를 분사(pilot injection)하여 점화(압축착화)하는 방식으로서 개조가 간단하지만 배기가스측면에서는 불리하다. 반면에 전소엔진의 경우에는 연료분사노즐 대신에 점화플러그를 장착하기 위해서 실린더 헤드를 변경하여야 할 뿐 아니라 압축비 감소를 위하여 피스톤의 형상을 변경하고 출력제어를 위하여 스로틀의 설치를 하여야 하는 등 배기저감효과 면에서는 혼소엔진에 비하여 우수하다.

## 혼소형 가스 엔진

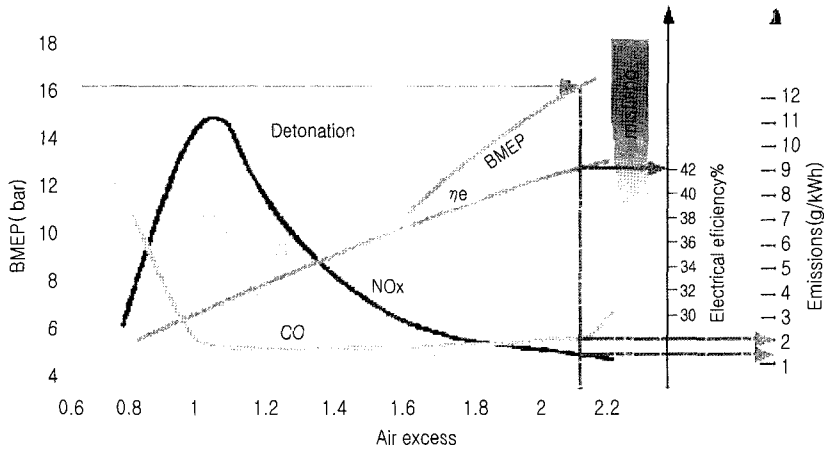
혼소엔진은 개조가 간단하여 가스엔진 개발 초기에는 많이 사용된 기술이다. 지금도 비상용 디젤발전기를 활용하여 쉽게 개조할 수 있다는 장점이 있고, 디젤발전기 보다는 공해측면에서 유리하므로 아직도 많은 관심을 갖고 연구되고 있다.

일본에서는 열병합 발전시스템의 일부분을 일정규모 이상의 건물에 의무적으로 설치되어야 하는 비상용 발전기로 대체할 수 있도록 허용하고 있다. 따라서 국내에서도 이와 같은 제도가 시행된다면 기존의 건물에 설치된 비상용 디젤발전기를 혼소형 가스엔진 열병합시스템으로 개조하여 여름철 피크전력시에 일시적으로 사용할 수 있어 국가 경제적으로 유리할 것으로 사료된다.

일반적인 혼소 엔진의 경우에는 경유 10% 미만으로 사용하고, 도시가스 90%(발열량 기준)이상으로 작동 가능하며, 가스공급이 안되는 경우에는 100% 디젤 발전을 할 수 있으므로 비상발전기의 역할을 수행할 수 있다.

## 전소형 가스 엔진

그림 1은 전소형 가스엔진의 공연비에 따른 배출가스 특성과 열효율의 변화를 나타낸 것이다. 효율은 희박 연소 쪽으로 갈수록 증가하며, 이론 공연비 부근에서는 NO<sub>x</sub>가 많이 배출되고, 노킹(knocking)이



[그림 1] 가스엔진의 공연비 변화에 따른 효율 및 배기가스 배출 특성

발생하기 쉽다. 희박연소 영역에서는 상대적으로 NOx가 낮게 배출될 뿐 아니라 노킹 또한 쉽게 발생하지 않는다. 따라서 가스엔진에서는 배기가스 저감 기술 방법상 이론공연비 연소와 희박연소 방식으로 나뉜다.

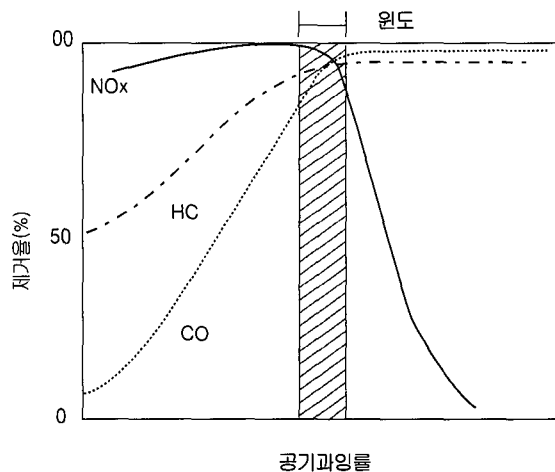
**이론 공연비 연소**

이론 공연비 연소는 희박연소에 비해 상대적으로 많이 배출되는 NOx를 삼원촉매를 사용하여 감소하는 방식이다. 그림 2는 삼원촉매의 공연비에 따른 전환 효율을 나타낸 것으로서, 삼원 촉매는 CO와 HC를 산화시키고, NOx를 환원시키는 작용을 한다. 그러나 산화작용과 환원작용은 서로 상반되는 조건에서 이루어지므로 희박영역에서는 NOx의 환원작용이 원활하지 못하고, 과농영역에서는 산화작용이 원활하지 못하게 된다. 따라서 산화와 환원이 동시에 원활하게 진행되는 구간이 이론공연비 부근이며, 산화와 환원을 촉진하기 위해서 이론 공연비 전후의 좁은 영역내(window라고 함)에서 희박과 과농을 반복하여 산화와 환원반응이 촉진되도록 한다. 일반적으로 이론 공연비 부근에서는 삼원 촉매의 전환효율은 95~98%로 알려져 있다. 또한 이론 공연비 연소방식은 노킹이 발생하기 쉬워 비교적 소형가스엔진에 적합하다.

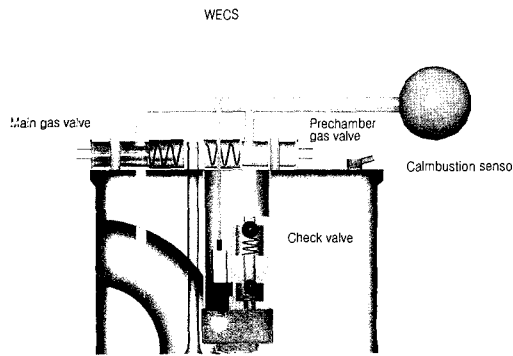
**희박 연소**

희박연소 영역에서는 열효율이 증가하고, 연소과정

에서 연소온도가 이론공연비 연소에 비해 낮아 NOx 발생량이 작다. 뿐만 아니라 잉여 산소가 많은 상태에서 연소되므로 CO 또한 작게 발생한다. 그러나 공연비가 희박해 질수록 안정적인 점화를 위해서 고에너지의 점화원을 요구하게 되며, 연소속도 또한 느려져서 팽창과정에 화염이 제대로 전파되지 못하는 불완전 연소나 화염생성이 곤란한 희박한계가 존재하게 된다. 이러한 희박한계를 극복하기 위하여 그림 3과 같이 실린더 헤드에 예연소실을 설치하고 희박상태의 공기-연료 혼합기가 흡기과정에서 공급되면 압축과



[그림 2] 삼원촉매의 배기가스 정화 특성



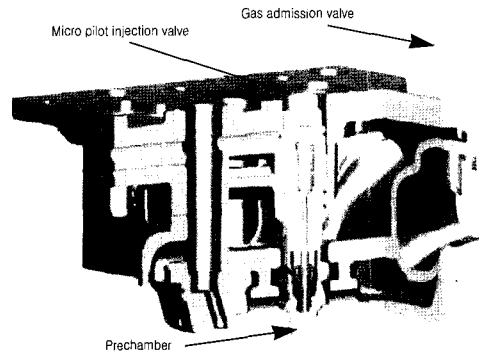
[그림 3] 전소형 예연소식(Wartsila)

정에서 예연소실내로 추가의 연료(약 1%)의 공급하여 예연소실내의 공기-연료 혼합비가 이론공연비 부근이 되도록 하여 안정적인 점화가 일어나도록 한다. 연소가 시작된 예연소실내의 혼합기는 팽창하면서 주 연소실로 빠져나올 때 강력한 난류제트(turbulent jet)를 형성하면서 급속연소가 일어나도록 하여 노킹 발생가능성을 감소시키므로 압축비 상승이 가능하며 일반적인 희박운전 공연비영역인  $\lambda = 1.3 \sim 1.7$ 을  $\lambda = 1.9 \sim 2.2$  까지 확장하여 연비향상 및 배기저감을 극대화하고 있다.

따라서 기통당 출력이 큰 엔진의 경우(실린더 직경 140mm 이상)에는 노킹 등의 문제로 인하여 예연소실을 채택한 희박연소방식을 예외 없이 채택하고 있다.

**전소형 혼소가스엔진**

전소형 가스엔진의 초희박 연소에는 강력한 점화원을 필요로 한다. 예연소실을 사용하여 강력한 점화원을 형성하는 방법으로서 그림 3과 같이 예연소실부분에 가스연료를 농축하여 점화플러그로 점화하는 방법도 있으나, 그림 4와 같이 디젤의 연료분사노즐을 사용하는 경우도 있다. 이는 디젤의 압축점화방법을 사용하여 예연소실내에서 점화를 시켜, 예연소실에서 분출되는 와류에 의해 엔진 연소가 이루어지도록 하는 방법이다. 가스 엔진의 점화원으로 디젤 분사계를 사용한다는 점에서는, 앞에서 설명한 혼소시스템과 같으나 혼소시스템은 가스공급이 없는 상태에서 100% 디젤운전이 가능하나, 전소형 혼소가스엔진시



[그림 4] Micro pilot injection system (Wartsila)

스템에서는 최대 10% 전후의 디젤연료만을 분사하도록 설계되어 있어 디젤운전상태의 구현은 불가능하고 오로지 가스엔진의 안정적 운전을 위한 점화장치로만 사용된다.

독일의 FEV에서는 신형식 연료분사장치인 커먼레일(common rail)시스템을 사용하여 예연소실 없는 전소형 혼소가스엔진 실험을 수행한 바 있다. 디젤 연료 분사량은 발열량 기준 1~10% 전후의 극미량이므로 연료가 분사되면서 수행하는 연료의 노즐 냉각기능 또한 저하되므로 고부하에서 고온에 노출된 노즐이 소착하는 문제점이 있다. 이를 방지하기 위해서 노즐 부분을 냉각시킬 수 있도록 실린더 헤드부분의 수정이 이루어 져야 한다. 그러나 희박 연소한계를 넓힐 수 있다는 가능성이 있어 이에 대해 많은 관심이 집중되고 있다.

**가스엔진 열병합 발전시스템의 국내외 시장 동향**

전세계적인 열병합발전시장에 대한 통계는 많이 나와 있으나 가스엔진에 국한된 시장 동향을 정확히 파악하기에는 많은 무리가 따른다. 다만 여기서는 전반적인 열병합 발전시장에서 거의 대부분을 가스엔진과 가스터빈이 차지하고 있으며, 가스엔진과 가스터빈의 특징을 고려하면 시장 동향을 어느 정도 추정할 수 있을 것으로 사료된다. 즉 주로 가스엔진은 2MW이하의 발전시설에 주로 사용되며, 가스터빈은 2MW이상의 발전시설에 주로 사용된다는 점에서 상호보완관계에서 경쟁이 이루어지고 있다.



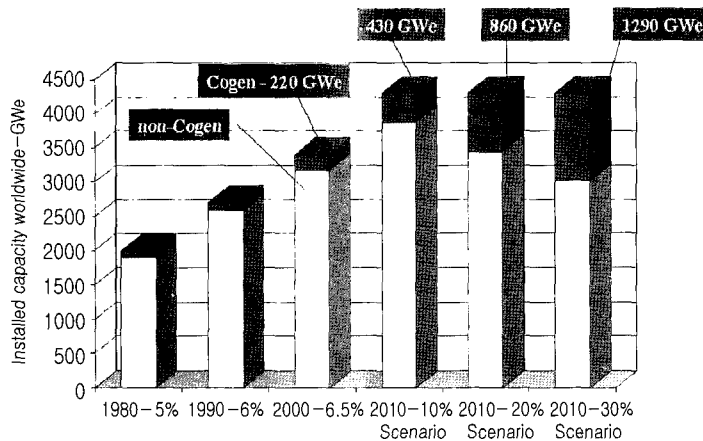
그림 5는 세계의 열병합시장의 규모와 전망을 나타낸 것으로서 열병합 시장은 에너지 절약과 지구온난화 방지책의 일환으로 꾸준히 보급이 확산 촉진될 것으로 예측하고 있다.

미국의 열병합 시장의 신규 수요는 그림 6에 나타난 바와 같이 2000년 3.7 GW에서 2005년에 4.1 GW로 증가할 것으로 추정되고 있다. 그림 7은 가스엔진과 가스터빈의 미국내 판매되는 추세를 나타낸 것으로서, 1998년에 가스엔진 시스템은 약 700 대가 판매되었으며, 가스터빈 시스템은 120여대가 판매된 것으로 보고되고 있으며, 가스엔진 부분은 급격한 증가세를 나타내고 있음을 알 수 있다.

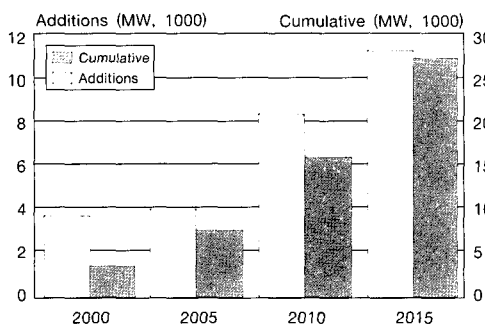
유럽의 대표적 열병합 시장인 독일 열병합 시장의 변화는 그림 8과 그림 9에 나타나 있다. 그림 8에서

알 수 있듯이 1994년을 정점으로 신규수요는 감소하는 추세이나, 1 MW이하의 열병합 수요는 감소하지 않고 꾸준히 유지되고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 최근의 독일의 신규 열병합 발전수요를 나타낸 것으로서 신규수요가 급격히 감소하고 있으나, 50kW이하의 신규 수요는 오히려 증가하고 있음을 알 수 있으며, 2MW이상의 신규 열병합 발전 시스템은 급격히 감소하고 있음에도 불구하고, 2MW 이하의 신규 시스템은 그 감소폭이 작게 나타나고 있다. 이는 1998년 에너지시장의 자유화와 더불어 신규 수요는 급격히 둔화되고 있으나, 대체에너지 발전지원법에 의한 지원으로 바이오가스 발전 등의 소규모 발전시스템은 활발한 보급이 이루어지고 있는 것으로 추정된다.

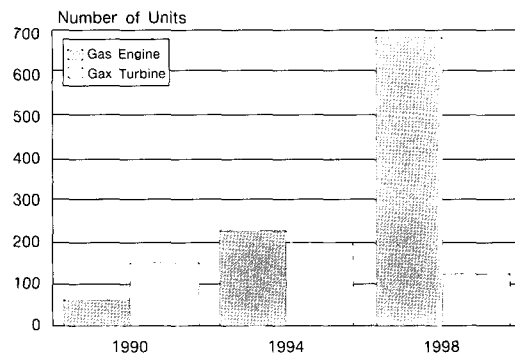
일본은 1970년대 2차례에 걸친 에너지위기를 겪은



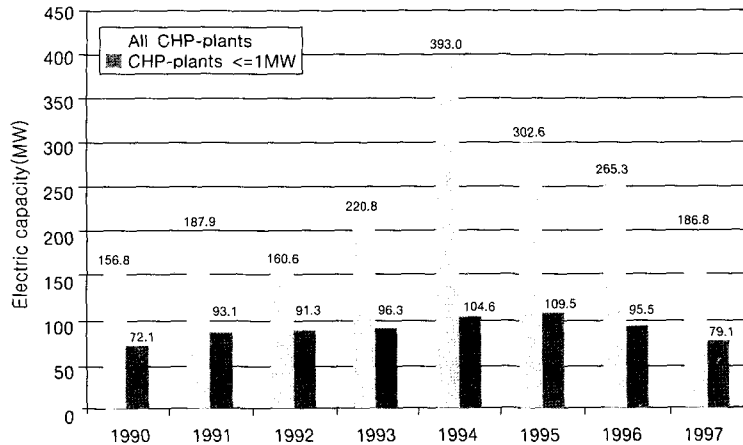
[그림 5] 세계의 열병합발전시장의 규모



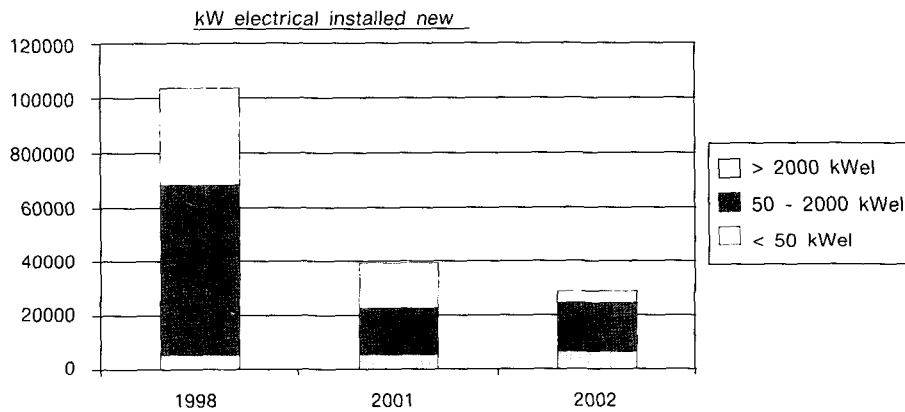
[그림 6] 분산형전원의 시장전망(미국)



[그림 7] 가스엔진과 가스터빈 판매 추이(미국)



[그림 8] 신규 열병합 발전시스템 건설 동향 (독일)



[그림 9] 열병합 발전시스템의 신규 수요 및 출력별 분포 (독일)

면서의 기존의 디젤 비상발전기를 가스 열병합시스템으로 대체하는 등 열병합 시스템의 보급이 활발하게 진행되어 왔으며, 가스열병합 시스템 시설 용량이 1999년 1.52GW에서 2001년 2.15GW로 꾸준히 증가하고 있으며, 소형 호텔에 적합한 9.8kW 열병합 시스템<sup>주1)</sup>과 1kW급 가정용 열병합시스템의 개발이 완료되어 보급 중에 있다.

국내에 공급된 열병합 시스템은 표 1에 나타난 바와 같이 총 26곳이며, 이중 23곳에 가스엔진 시스템이 설치되어 있다. 특히 2003년중 8월까지 설치된 가스

엔진 열병합시스템이 설치된 곳이 9군데에 이르고 있으며, 이러한 추세는 정부의 강력한 지원정책에 따라 가속화될 전망이다.

### 배기 규제 동향

우리나라의 가스엔진의 배기규제는 NOx에 국한되어 있으며, 표 2에 나타난 바와같이 2005년 신규시설에 대한 NOx 규제치는 50 ppm @13% O<sub>2</sub><sup>주2)</sup>로서 선진국보다 엄격한 수준으로 강화되어 있다.

주1) 일본법령에 의하면 10kW이상의 발전시설은 전담관리자를 의무적으로 고용하여야 하나, 10kW 미만의 시설에 대해서는 이를 면제하고 있음.

주2) 표준산소농도(O<sub>2</sub>의 백분율)

<표 1> 가스 열병합 발전 시스템 설치현황 (2003년 8월 현재)

NO	설 치 장 소	용량 및 설치대수	설치년도	원동기종류	비고
1	잠실롯데월드	5,900kW×6	1998	가스엔진	
2	롯데부산점	2,500kW×3	1995	가스엔진	
3	삼성에버랜드(중앙개발)	2,300kW×1	1995	가스터빈	
4	한국가스공사	1,000kW×1	1996	가스터빈	
5	테마폴리스(분당타미날)	1,400kW×3	1998	가스엔진	
6	센트럴시티	3,000kW×3	1998	가스엔진	
7	LG 강남타워	1,400kW×3	1998	가스엔진	
8	성가병원	570kW×2	1999	가스엔진	
9	성빈센트병원	985kW×1	2000	가스엔진	
10	안양병원	333kW×1	2001	가스엔진	
11	안산신병원	235kW×1	2001	가스엔진	
12	신동아아파트	279kW×1	2002	가스엔진	ESCO투자
13	계룡대아파트	220kW×1 325kW×1	2002	가스엔진	ESCO투자
14	에너지경제연구원	10kW×1	2002	가스엔진	
15	인천 만수주공4단지아파트	340kW×1 228kW×1	2002	가스엔진	ESCO투자
16	마산 종리 현대아파트	325kW×1	2002	가스엔진	ESCO투자
17	가스공사인천LNG인수기지	9,000kW×	2002	가스터빈(산업체)	
18	수원역사	1,500kW×3	2003	가스엔진	
19	평택삼성아파트	340kW×1	2003	가스엔진	ESCO투자
20	덕정주공아파트	356kW×1	2003	가스엔진	ESCO투자
21	서울보훈병원	773kW×1	2003	가스엔진	ESCO투자
22	군포병원	844kW×1	2003	가스엔진	ESCO투자
23	대구파크호텔	375kW×2	2003	가스엔진	ESCO투자
24	대구파티마병원	800kW×2	2003	가스엔진	ESCO투자
25	대구스파밸리	356kW×2	2003	가스엔진	ESCO투자
26	상도동 건영아파트	248kW×2	2003	가스엔진	ESCO투자
소계		96,035		산업체 : 18,000kW 민생 : 78,035kW	

(근거 : 열병합발전 및 CES 사업시장조성을 위한 국제심포지움, 2003, 에너지관리공단주최)

<표 2> 우리나라 대기환경보전법의 배출허용기준

	배 출 시 설 (발전용 내연기관)		적용기간 및 배출허용기준	
			~2004. 12. 31	2005. 1. 1~
NOx	액체연료	1) 가스터빈 가) 기존시설 나) 신규시설 2) 디젤기관 가) 기존시설 나) 신규시설	950(13) <sup>주3)</sup> ppm 이하	250(13)ppm 이하 70(13)ppm 이하
			기체연료	500(13)ppm 이하

주3) 표준산소농도(O<sub>2</sub>의 백분율)

이러한 규제치에 대하여 이론공연비 연소의 경우에는 삼원촉매장치를 사용하면 규제치를 만족하는 데는 기술적으로 문제가 없으나, 희박연소의 경우에는 희박 상태에서 NOx를 환원시키는 Lean NOx Catalyst<sup>주4)</sup> 등의 개발이 미흡한 상태이며, 기술적으로 완성된 SCR (Selective Catalyst Reduction)은 시설자체가 고가일 뿐 아니라 암모니아를 새로이 공급해 주어야 하는 등 경제적으로 많은 부분을 희생해야 한다.

이러한 문제점을 인식한 독일에서는 TA-Luft (German Regulation on Emission)에서 가스엔진의 배기규제를 NOx 250 mg/Nm<sup>3</sup> @ 5% O<sub>2</sub> (= 61 ppm @ 13% O<sub>2</sub>)으로 일원화하여 적용하였다가, 2002년 1월에 시행된 New TA-Luft에서 희박연소 엔진과 이론공연비의 배기규제를 이원화하여 적용하고 있다. 희박연소엔진의 경우에 NOx 500 mg/Nm<sup>3</sup> @ 5% O<sub>2</sub>(=122 ppm @ 13% O<sub>2</sub>)으로 NOx 규제를 완화하여 현실적으로 희박연소 엔진이 보급될 수 있도록 하였다.


앞절에서 언급한 바와 같이 희박 영역에서 엔진효율 (또는 발전효율)이 좋을 뿐 아니라, 이론공연비 가스엔진의 경우에 노킹 문제 등으로 인하여 엔진의 크기가 제한<sup>주5)</sup>되므로, 고출력을 요구하는 경우 희박연소 가스엔진 이외에는 대안이 없다. 따라서 2005년 배기규제가 희박연소 가스엔진에 그대로 적용된다면 고출력이 필요한 곳에 고효율 고출력의 가스엔진이 공급되지 못하고, 배기규제치가 상대적으로 느슨한 디젤 기관 등이 이러한 공백을 메워나가는 모순이 발생하게 된다. 따라서 국내에서도 2005년 이후에도 희박연소 방식의 가스엔진이 보급될 수 있도록 희박연소 가스엔진에 대한 배기규제의 보완 작업이 선행되어야 한다.

**맺음말**

부존자원의 부족으로 에너지 자급률이 낮은 우리나라

의 경우에는 LNG를 전량 수입하고 있으며, 통상적으로 월별 일정량을 의무적으로 도입하도록 계약이 이루어진다. 따라서 계절별로 가스 수요가 변동하는 국내의 현실에서는 여름철에는 가스가 남아돌고, 겨울철에는 가스가 모자라는 현상이 발생하며, 이를 해결하기 위해서 평택 LNG 기지 등에 대용량 저장탱크를 설치하여 수급 불균형을 해소하고 있다. 한편 전력 수요는 여름에 냉방 수요의 증가로 인하여 여름철 피크 전력이 최고치를 이루고 있다. 따라서 가스 엔진 열병합 발전은 여름철 피크전력의 강하와 가스 수요의 증가에 의해 국가적으로 에너지 수급상의 불균형을 어느 정도 해소할 수 있는 매우 유용한 방법이라 하겠다.

국내에서도 가스엔진 열병합 시스템의 보급이 활성화되고 있는 시점에 국산 가스엔진이 활용되고 있지 못하다는 점은 다소 아쉬운 감이 없지 않으나, 대우중합기계에서 거의 완성단계에 있는 8l, 11l, 15l, 18l, 22l 급 가스엔진의 개발이 완료되면 100~400kW급의 가스엔진이 국내시장에 보급될 수 있을 것으로 판단되므로 향후 적극적인 활용방안을 모색해야 할 것으로 사료되며, 현대중공업의 국산 디젤엔진인 “힘센 엔진”의 가스엔진화 개발이 이루어진다면 0.6~2.0MW급 가스엔진의 국산화가 가능할 것으로 믿는다. 또한 부분적으로 연구개발이 시도되고 있기는 하나, 향후의 마이크로 분산전원의 보급확대에 대비하여 15kW급 이하의 초소형 열병합발전용 가스엔진에 대한 실용화 개발 역시 활성화되어야 할 것으로 생각된다.

원활한 열병합 시스템의 보급을 위하여, 가스엔진의 희박연소 방식에 대한 배기규제 완화를 위한 기술적 검토 작업이 수행될 수 있기를 바라며, 열병합 발전시스템의 일부를 비상발전기로 겸용할 수 있는 제도가 도입되어 1년에 1~2회 시험가동하는 디젤 비상발전기의 자원이 활용될 수 있기를 기대해 본다. 

주4) 잉여 산소가 존재하는 상태에서 산화반응이 아닌 환원반응을 한다는 것은 매우 어려운 기술임  
 주5) 가솔린 엔진이 고출력을 요구하는 버스에 사용되지 못하는 원인과 같음.