

분산발전용 가스엔진의 기술 동향

이 글에서는 분산발전용 전원의 하나인 가스엔진의 종류와 기술 동향, 향후 전망에 대하여 기술하고자 한다.

이장희 / 한국기계연구원 친환경엔진연구센터, 팀장

e-mail : jhlee@kimm.re.kr

분산발전용 가스엔진의 개념

분산발전용 가스엔진은 가스연료를 사용한 엔진으로서 에너지의 효율적 이용을 위하여 열병합 발전용으로 주로 사용되고 있다. 가스엔진 열병합발전이란 가스엔진으로 구동하는 발전기에서 전기를 얻고, 가스엔진 작동 시에 발생하는 배기가스와 냉각수에서 열에너지를 회수하여, 전기와 열을 동시에 생산하는 고효율 에너지절약 시스템이다.

분산발전용 가스엔진의 연료로는 주로 LNG를 기화한 도시가스를 사용하며, LNG는 산지에 따라 성분 차이가 있으나 대부분의 성분이 메탄(CH₄)으로 되어 있다. 도시가스는 청정연료일 뿐 아니라 연료 자체에 탄소성분이 작아 지구온난화 문제해결을 위한 CO₂ 총량규제에 적합한 연료이다.

최근에 와서는 음식물 쓰레기 혐기소화시설, 하수처리장 혐기소화시설, 축산분뇨 혐기처리시설, 매립지 등에서 생성되는 바이오가스(메탄 성분이 40~75%임)를 이용한 가스엔진의 보급이 활발히 진행되고 있으며, 이미 국내에도 약 30MW 용량의 바이오가스 발전시스템이 분산형 전원으로 사용되고 있다.

가스엔진의 종류

가스엔진은 기존에 개발되어 양

산보급 중인 디젤엔진을 개조하여 제작하며, 크게 나누어 혼소(dual fuel)엔진과 전소(dedicated)엔진으로 나뉜다.

혼소엔진은 기존의 디젤엔진에다 천연가스 연료공급장치를 추가하고, 기존의 디젤분사계를 사용하여 미량의 디젤연료를 분사(Pilot injection)하여 점화(압축착화)하는 방식으로 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 스로틀을 설치하여야 하는 등 배기저감 효과 면에서는 혼소엔진에 비하여 우수하다.

표 1에 혼소엔진과 전소엔진의 차이를 나타내었다.

표 1 가스엔진의 비교

	전소엔진	혼소엔진
점화 방식	스파크 플러그에 의한 불꽃 점화	미량의 경유분사에 의한 압축착화
압축비	상대적으로 낮음(8.5~13)	상대적으로 높음(14~17)
연료 성분	비교적 양질의 연료성분이 요구되며, 성분변화가 적어야 함	연료 성분의 변화가 어느 정도 허용됨
연료	도시가스 또는 바이오가스 100% 사용	도시가스 또는 바이오가스 (85~99%)와 경유(15% 미만) 사용
엔진 개조	어려움 (실린더 헤드 및 피스톤 등 개조가 어려움)	용이함 (기존의 디젤엔진 사용, 가스연료 공급장치 추가)
유지보수	점화플러그 등 잦은 교체	용이함

혼소형 가스엔진

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

혼소엔진의 효율을 결정하는 것으로 대체율이 사용된다. 즉, 엔진에서 사용된 전체 연료 중에서 가스가 차지하는 비율로서 이에 대한 정의는 다음과 같다. (1,3)

$$\text{대체율} = \frac{\text{가스}}{\text{가스} + \text{경유}} \quad (1)$$

그림 1은 혼소엔진의 대체율 변화를 나타낸 것으로 대체율이 높을수록 가스 사용량이 증가하여 바람직하나, 대체율을 너무 높이면 실화가 발생한다. 최근에 디젤엔진의 커먼 레일(common rail) 시스템을 활용하면 99% 대체율이 가능하다는 보고가 있으며, 과도한 대체율의 증가는 연료의 노즐냉각기

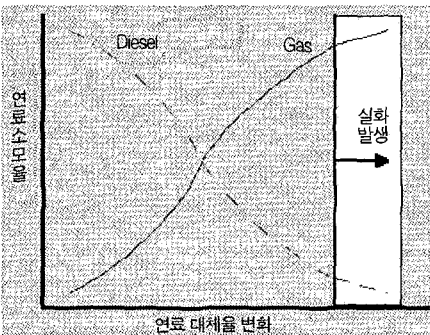


그림 1 혼소엔진의 대체율 변화

능을 저하하여 노즐 소작 등의 문제를 새로이 야기하므로 엔진 실린더 헤드의 냉각시스템과 함께 고려해야 한다. (4)

일반적인 혼소엔진의 경우에는 경유 15% 미만으로 사용하고, 도시가스 85%(발열량 기준) 이상으로 작동 가능하며, 가스공급이 안 되는 경우에는 100% 디젤 발전을 할 수 있으므로 비상발전기의 역할을 수행할 수 있다.

일본에서는 열병합 발전시스템을 일정 규모 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 열병합 시스템으로 개조하여 여름철 피크 전력 시에 일시적으로 사용할 수 있어 국가 경제적으로 유리할 것으로 사료된다.

또한 혼소엔진은 음식물 쓰레기 혐기소화시설, 하수처리장 혐기소화시설, 축산분뇨 혐기처리시설, 매립지 등에서 생성되는 바이오가스같이 연료 성분이 변화하는 곳에서 매우 안정적으로 작동하는 장점이 있다.

전소형 가스엔진

그림 2는 전소형 가스엔진의 공연비에 따른 배출가스 특성과 열효율의 변화를 나타낸 것이다.

효율은 실화가 발생하지 않는 범위 내에서 희박연소 쪽으로 갈수록 증가하며, 이론 공연비 부근에서는 NOx가 많이 배출되고, 노킹(knocking)이 발생하기 쉽다. 희박연소 영역에서는 상대적으로 NOx가 낮게 배출될 뿐 아니라 knocking 또한 쉽게 발생하지 않는다. 따라서 전소형 가스엔진은 배기가스 저감기술 방법상 이론공연비연소(rich burn)와 희박연소(lean burn) 방식으로 나뉜다.

이론공연비연소

이론공연비연소는 희박연소에 비해 상대적으로 많이 배출되는 NOx를 삼원촉매를 사용하여 감소하는 방식이다. 그림 3은 삼원촉매의 공연비에 따른 전환

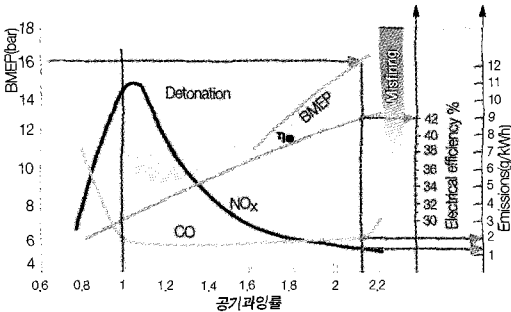


그림 2 전소형 가스엔진의 공연비 변화에 따른 효율 및 배기가스 배출 특성

효율을 나타낸 것으로서, 삼원 촉매는 CO와 HC를 산화시키고, NOx를 환원시키는 작용을 한다. 그러나 산화작용과 환원작용은 서로 상반되는 조건에서 이루어지므로 희박영역에서는 CO와 HC의 산화작용이 활발하게 진행되고, 과농영역에서는 NOx의 환원작용이 활발하게 진행된다. 따라서 산화와 환원이 동시에 원활하게 진행되는 구간이 이론공연비 부근이며, 산화와 환원을 촉진하기 위해서 이론공연비 전후의 좁은 영역 내(window라고 함)에서 희박과 과농을 반복하여 산화와 환원반응이 촉진되도록 한다. 일반적으로 이론 공연비 부근에서는 삼원 촉매의 전환효율은 95~98%로 알려져 있다. 또한 이론공연비연소 방식은 노킹이 발생하기 쉬워 비교적 소형 가스엔진에 적합하다.

삼원촉매 이외에도 NOx 발생량을 저감하는 방법으로 배기가스를 재순환(EGR : Exhaust Gas Recirculation)하는 것이 있으며, 이는 불활성 가스인 연소가스를 흡입공기로 재순환함으로써 연소실 내의 최고 연소온도를 낮추어서 고온에서 형성되는 NOx 발생을 억제하는 방법이다.

희박 연소

희박연소 영역에서는 열 효율이 증가하고, 연소 과정에서 연소온도가 이론 공연비연소에 비해 낮아 NOx 발생량이 작다. 뿐만 아니라 잉여 산소가 많은 상태에서 연소되므로 CO 또한 작게 발생한다. 그러나 공연비가 희박해질수록 안정적인 점화를 위해서 강력한 점화원을 요구하게 되며, 연소 속도 또한 느려져서 화염이 제대로 전파되지 못하는 불완전연소나 화염생성이 곤란한 희박한계가 존재하게 된다. 이러한 희박한

계를 극복하기 위하여 그림 4와 같이 실린더 헤드에 예연소실을 설치하고 희박상태의 공기-연료 혼합기가 흡기과정에서 공급되면 압축과정에서 예연소실 내로 추가의 연료(약 1%)를 공급하여 예연소실 내의 공기-연료 혼합비가 이론공연비 부근이 되도록 하여 안정적인 점화가 일어나도록 한다.

연소가 시작된 예연소실 내의 혼합기는 팽창하면

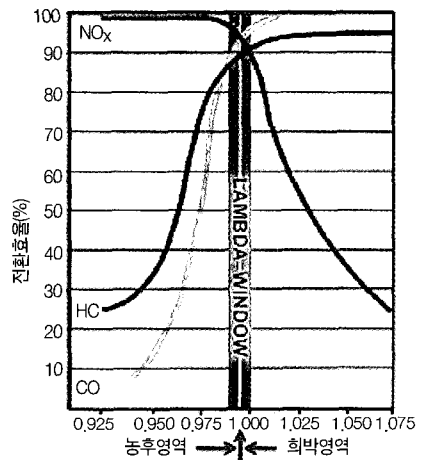


그림 3 삼원촉매의 배기가스 정화 특성

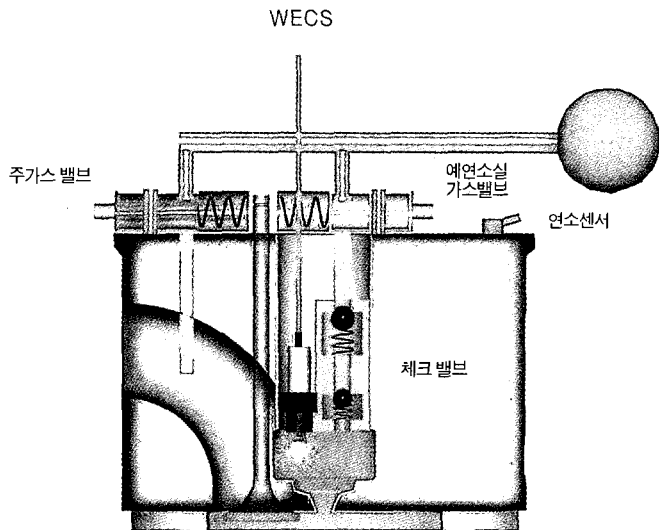


그림 4 희박연소용 예연소실(Wartsila)

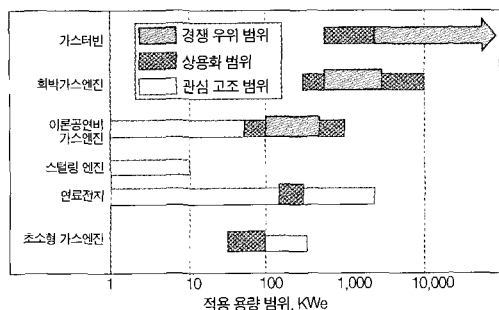


그림 5 분산형 전원별 경쟁력 비교⁽²⁾

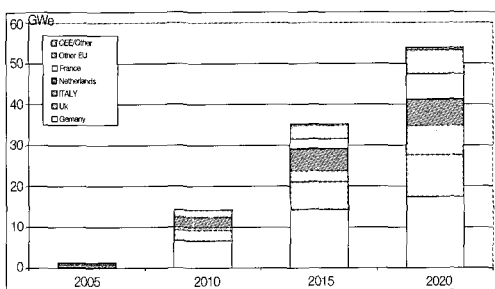


그림 6 유럽의 초소형 분산형 전원 시장 전망(15kWe 미만)⁽⁹⁾

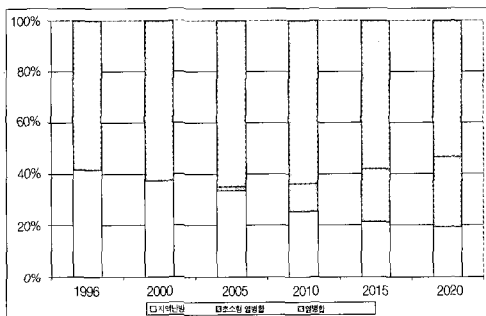


그림 7 유럽의 난방 방식 점유율 추이⁽⁹⁾

서 주연소실로 빠져나올 때 turbulent jet를 형성하면서 급속연소가 일어나도록 하여 노킹 발생가능성을 줄여 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.

기통당 출력이 큰 엔진의 경우(실린더 직경 140mm 이상)에는 노킹 등의 문제로 인하여 예연소실을 채택한 희박연소 방식을 주로 사용하고 있다.

희박연소에서는 그림 1에서 알 수 있듯이 이론공연비 연소에 비하여 상대적으로 NOx가 작게 배출

되고 있으나, 희박영역에서 NOx를 저감하는 방법이 마땅치 않다. Lean NOx Catalyst(De-NOx 촉매) 등의 방법이 이론적으로 가능하나 전환효율이 낮아서 실용화가 이루어지지 못하고 있고, SCR (Selective Catalyst Reduction)이 실용화는 되어 있으나, 설치비가 많이 소요될 뿐 아니라 암모니아 성분(Urea)을 지속적으로 공급해주어야 하므로 유지비가 소요되어 경제성이 떨어진다.

따라서 희박연소의 NOx성분을 감소시키려면 초희박 영역에서 연소를 시키는 것이 이상적이거나 이것도 실화(misfire)로 인하여 한계가 있다.

가스엔진 발전시스템의 국내외 시장 동향

그림 5에는 분산형 전원별 경쟁력이 나타나 있으며, 가스엔진은 2MW 이하의 발전 시설에 주로 사용되고, 가스터빈은 2MW 이상의 발전 시설에 주로 사용된다는 점에서 상호보완 관계에서 경쟁이 이루어지고 있다.

그림 6은 15kWe 미만의 유럽의 분산형 전원 시장을 나타낸 것으로서 초소형 분산형 전원의 보급이 급격히 늘어날 것으로 예측하고 있다. 이에 대응하는 분산형 전원으로는 초소형 가스엔진과 스텔링 엔진이 결합할 것으로 보이며, 지금 한창 연구 중인 연료전지 기술이 어느 정도 완성되면 경쟁에 합류할 것으로 보인다.

그림 7은 유럽의 난방방식의 시장점유율의 변화를 나타낸 것으로 15kWe 미만의 초소형 분산형전원이 활발히 보급될 것으로 예상하고 있다.

그림 8은 초소형 분산형 전원(Home Cogeneration)의 개념도를 나타낸 것으로서 발전효율은 10~25%, 난방효율은 70%로 예상하고 있다.

그림 9는 일본에서 양산 보급중인 9.8kW급 가스엔진이며, 일본 법규상 10kW 이상의 발전시설에는 전담관리자를 고용하도록 되어 있어, 전담관리자 없이 사용가능하도록 시스템을 개발한 것이다. 이외에도 가정용 열병합용으로 1kW와 3kW급 가스엔진이 일본과 유럽에서 개발되어 시험보급 중에

테마기획 ■ 분산발전

있으며, 궁극적으로는 가정용 보일러를 대체하는 것을 목표로 하고 있다. 이는 열수요가 많은 북반구의 추운 지역에 적합한 시스템으로 평가되고 있다.

국내 가스엔진 보급 및 기술 개발 현황

표 2는 국내에 설치된 열병합 발전시스템의 설치 증가를 연도별로 정리하여 나타낸 것으로 일부 가스 터빈의 자료(대수로 10대 미만, 출력으로는 20MW 미만)가 포함되었으나, 대부분이 가스엔진으로 보아도 큰 무리가 없다. 국내의 가스엔진 보급은 1988년에 롯데호텔에 혼소형 가스엔진(5.9MW * 6기)이 보급된 것을 시작으로 2005년 6월 기준으로 약 116MW의 발전용량이 보급되었다. 특히 최근에 와서는 2002년 대전의 신동아아파트에 열병합 발전시설이 도입된 이후 아파트에 300~1,000kW 가스엔진 열병합 시스템이 급격히 보급되고 있다. 이는 에너지절약을 위한 정부의 강력한 열병합 발전 시스템보급에 대한 지원과 각 아파트의 보일러 교체시기가 맞물려 보급이 촉진되고 있는 것이다. 다만 아쉬운 것은 국내 기술에 대한 신뢰 부족으로 외국엔진이 전량 도입되어 설치되고 있다는 것이다.

이미 국내에서도 이론공연비 방식의 100~400kW급 가스엔진이 개발 완료되었으나, 실증 사례가 없어 지난 몇 년 동안 국내 보급이 진행되지 못하였다. 금년 하반기에는 에너지관리공단에서 수행하는 지역에너지 사업으로 광주광역시 서민임대아파트에 국산 200kW급 가스엔진이 장착된 열병합 시스템이 보급될 예정이다.

표 3은 2000년 이후의 국내의 가스엔진 기술개

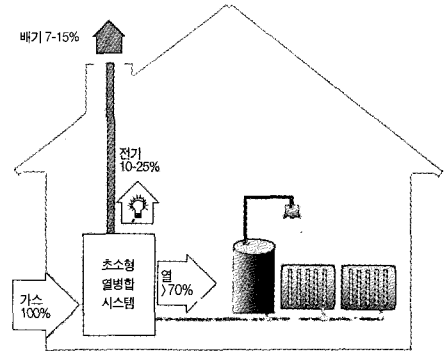


그림 8 초소형 분산형 전원(Home Cogeneration)시스템

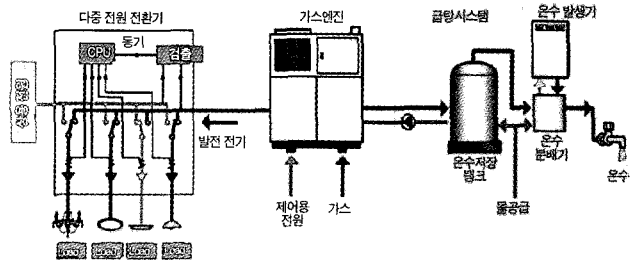


그림 9 9.8kW 가스엔진 열병합 시스템 구성도(일본)

표 2 국내 열병합발전 설치 현황(가스터빈 포함 - 출처:에너지관리공단 홈페이지)

구분	2001까지	2002	2003	2004	2005.6월	비고
용량(kW)	67,183	92,983	97,606	111,180	116,554	누계
대수(대)	29	44	60	97	113	누계
개소	13	23	32	62	75	

표 3 국내의 분산 발전용 가스엔진 개발 현황(2000년 이후)

과 제 명	개발 주체	비 고
10kW급 가스엔진 개발	KIER / 효성	LPG엔진 개조
100kW급 가스엔진 개발	대우중합기계 / KIMM	디젤엔진 개조 2002. 6. 완료
350kW급 매립지 가스엔진 개발	KIMM / 두산 인프라이코어 (구 대우중합기계)	디젤엔진 개조 2005. 5. 완료
300kW급 가스엔진 개발	KIMM / (주)보국전기 / (주)템스 / 두산인프라코어 (구 대우중합기계)	에너지절약 과제로 진행 중
150kW급 혼소형 바이오가스엔진 개발	KIMM / (주)템스	환경부 과제로 진행 중
12ℓ, 15ℓ, 18ℓ 급 가스엔진 개발	두산인프라코어 (구 대우중합기계)	자체 개발 완료

발 현황을 정리한 것이다.

표 4 대기환경보전법의 배출허용기준

	배출시설 (발전용 내연기관)		적용기간 및 배출허용기준	
			~2004. 12. 31.	2005. 1. 1.~
NOx (기체연료)	액체연료	1) 가스터빈 가) 기존시설 나) 신규시설	950(13) ^{ppm} ppm 이하	250(13)ppm 이하 70(13)ppm 이하
		2) 디젤기관 가) 기존시설 나) 신규시설		
	기체연료	1) 기존시설 2) 신규시설	500(13)ppm 이하	150(13)ppm 이하 50(13)ppm 이하

배기 규제 동향

우리나라의 가스엔진의 배기규제는 NOx에 국한되어 있으며, 표 4에 나타난 바와 같이 2005년 신규시설에 대한 NOx 규제치는 50ppm @13% O₂^{*)}으로서 선진국보다 엄격한 수준으로 강화되어 있다.

이러한 규제지에 대하여 이론공연비 연소의 경우에는 삼원촉매장치를 사용하면 규제치를 만족하는 데는 기술적으로 문제가 없으나, 희박연소의 경우에는 희박 상태에서 NOx를 환원시키는 Lean NOx Catalyst^{*)} 등의 개발이 미흡한 상태이며, 기술적으로 완성된 SCR(Selective Catalyst Reduction)은 시설자체가 고가일 뿐 아니라 암모니아를 지속적으로 공급해 주어야 하는 등 경제적으로 많은 부분을 희생해야 한다.

이러한 문제점을 인식한 독일에서는 TA-Luft (German Regulation on Emission)에서 가스엔진의 배기규제를 NOx 250mg/Nm³ @ 5% O₂(= 61ppm @13% O₂)으로 일원화하여 적용하였다가, 2002년 1월에 시행된 New TA-Luft에서 희박연소 엔진과 이론공연비의 배기규제를 이원화하여 적용하고 있다. 희박연소엔진의 경우에 NOx 500mg/Nm³ @ 5% O₂(= 122ppm @ 13% O₂)으로 NOx 규제를 완화하여 희박연소 엔진이 원활히 보급될 수 있는 기반을 마련하였다[7].

그림 1에서 언급한 바와 같이 희박 영역에서 엔진 효율(또는 발전효율)이 좋을 뿐 아니라, 이론공연비

가스엔진의 경우에는 노킹 문제 등으로 인하여 엔진의 크기가 제한(주 4)되므로, 고출력을 요구하는 데는 희박연소 방식을 사용한다. 따라서 2005년 배기규제치를 NOx 50ppm@ 13% O₂으로 적용하면 고효율 고출력의 가스엔진 보급은 경제성 측면에서 사실상 불가능해진다.

이러한 문제점을 인식한 환경부에서 희박연소 방식의 가스엔진 배기규제를 NOx 125ppm@ 13% O₂으로 3년간 유예하여 희박연소 가스엔진이 국내에 보급될 수 있도록 하였으며, 향후 기술개발의 추이를 보아서 이를 연장 또는 강화할 예정이다.

맺는 말

대형발전소의 건립은 시간과 비용이 많이 소요될 뿐 아니라 환경오염의 집중 및 열에너지의 활용부족, 송전손실 등으로 인하여 분산형 전원의 공급으로 그 추세가 바뀌고 있다.

에너지 자급률이 낮은 우리나라의 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 피크 전력이 증가하고 있다. 따라서 가스 엔진 열병합 발전은 여름철 피크 전력의 강화와 가스 수요의 증가에 의해 국가적으로 에너지 수급상의 불균형을 어느 정도 해소할 수 있는 매우 유용한 방법이라 하겠다.

정부에서도 2013년까지 270만 kW의 소형열병합 발전시스템을 보급하겠다는 계획을 적극 추진 중이며, 이에 따라 아파트에 가스엔진 열병합시스템의 보급이 급격히 증가하고 있다.

가스엔진 열병합 시스템의 보급이 활성화되고 있는 시점에 국산 가스엔진이 활용되고 있지 못하다는 점은 다소 아쉬운 감이 없지 않으나, 금년 하반기에 광주광역시의 임대아파트에 지역에너지 사업으로 국산 200kW급 가스엔진이 보급될 예정이며, 이를 시점으로 국산가스엔진의 보급도 활발해 질 것이다.

두산인프라코어(구 대우중합기계)에서 개발이 완료된 8ℓ, 11ℓ, 15ℓ, 18ℓ, 22ℓ급 가스엔진(100~400kW급의 가스엔진)의 국내 보급을 위한 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 연구 개발이 시도되고 있기는 하나, 향후의 마이크로 분산전원의 보급 확대에 대비하여 15kW급 이하의 초소형 열병합발전용 가스엔진에 대한 실용화 개발에 대한 준비도 진행되어야 할 것으로 생각된다.

원활한 열병합 시스템의 보급을 위하여, 가스엔진의 희박연소 방식에 대한 배기규제에 대한 기술적 검토 작업이 수행될 수 있기를 바라며, 열병합 발전시스템의 일부를 비상발전기로 겸용할 수 있는 제도도 도입되어 1년에 1~2회 시험 가동하는 디젤 비상발전기의 자원이 활용될 수 있기를 기대해 본다.

[참고 문헌]

- (1) 이장희, 2005, “국내의 바이오가스엔진 기술개발 현황”, 신재생 에너지 춘계학술대회.
- (2) 오시덕, 2005, KIMM 세미나 자료.
- (3) 이장희, 김영민, 노윤현, 최병철, 팽성일, 김성진, 2004, “바이오가스를 이용한 혼소형 가스엔진발전시스템 개발”, 제6회 환경기술 세미나.
- (4) M. Umiersky and P. Stommel, 2000, “Fuel Efficient Natural Gas Engine With Common-Rail Micro-Pilot Injection”, SAE 2000-01-3080.
- (5) M. Whiteley, et al, 2001, “The Future of CHP in the Uropean Market-The Uropean Cogeneration Study”.
- (6) D.O.E Report, 1999, “Review of Combined Heat and Power Technologies”.
- (7) Workshop 자료, 2003, “KEMCO International Cogeneration Symposium”, 서울 라마다르네상스.

주1), 주2)표준산소농도(O₂의 백분율)

주3) 잉여 산소가 존재하는 상태에서 산화반응이 아닌 환원반응을 한다는 것은 매우 어려운

기계용어해설

수분유출방지관(Antipriming Pipe)

물방울과 증기의 밀도차를 이용해 증기만 밸브로 송출함으로써, 수분유출을 막는 보일러에 장치된 관.

아크 방전(Arc Discharge)

탄소나 텅스텐의 두 전극을 기체 속에서 수평으로 마주보게 하여 저항을 거쳐 전원을 접속시킨 다음, 일단 전극을 접속시켰다가 떨어뜨릴 때 일어나는 방전.

전진각(Angle of Advance)

일반적으로 내연기관에서 전기점화, 연료분사 등은 압축행적의 상사점보다 약간 앞에서 일어나는데, 이 시기를 크랭크의 회전각으로 나타낸 것.