

고성능 GHP용 가스엔진 기술

GHP용 가스엔진의 고성능화 기술에 대하여 기술한다.

정 동 수

한국기계연구원 엔진그룹 / (dsjeong.kimm.re.kr)

개 요

GHP는 전기 모터 대신 가스 엔진을 사용하는 것으로 기존의 전기모터에 비교하여 사용상의 편의성, 경제성 등에서 유리해야 한다. 또한 GHP는 사용 장소가 주거지역인 점을 고려할 때, 배출가스로 인한 공해, 소음진동 등도 매우 중요한 인자라고 할 수 있다.

GHP용 엔진은 4행정 수냉식엔진이 주로 사용되며, 승용차용 엔진과는 특성이 달라 급가속이나 고회전수 전부하 운전을 하지 않고, 저속 저부하에서 회전력을 요구하고 있으며, 사용 연료가 주로 천연가스이므로 표 1에서와 같은 가솔린이나 경유, LPG의 연료 특성과의 차이점을 잘 파악해서 천연가스 연료의 장점을 최대한 활용해야 만 최상의 열효율과 최상의 내구성을 얻을 수 있게 된다. 최근 일본의 경우 40% 정도의 높은 열효율과 40,000시간 이상 긴 수명의 성능까지 달성하고 있다고 홍보하고 있다.

GHP용 엔진은 엔진의 배기가스의 열을 이용할 수 있기 때문에 전동기 구동 방식의 열펌프에 비해 약 20%, 보일러, 온풍기 등에 비해 약 30% 등의 에너지 절약 가능하므로 주요 온실 가스인 CO₂ 발생을 억제할 수 있는 장점이 있다. 따라서 효율적인 폐열이용 기술을 필요로 하고 있고, NO_x 등 배출공해가스의 저감기술, 그리고 진동 소음의 저감기술 등이 필수적으로 요구되고 있다.

가스 엔진의 특성

GHP용 가스엔진에는 주로 천연가스와 LPG가 사용되고 있지만 가격과 안전성 및 연료의 특성상 주로 천연가스를 사용하고 있다. 천연가스(natural gas)는 대부분 메탄(CH₄)을 주성분으로 지하에서

추출되고, LPG는 프로판, 프로필렌, 부탄, 부틸렌 등의 혼합가스로 주로 천연가스의 부산물로 생산되고 석유정제과정에서 부산물로 발생된다.

LPG는 상온, 상압에서는 기체이나 냉각 또는 가압에 의해 쉽게 액화되는 반면에 천연가스는 상온에서는 고압으로 가압하여도 기체상태로 존재하고 액화시키기 위해서는 -162℃로 냉각해야하므로 자동차와 같은 운송수단 용으로 사용하기에는 불리한 단점을 갖고 있다.

천연가스 연료특성으로는 다음과 같다.

- ① 주성분인 메탄은 탄화수소계 연료 중에서 가장 안정된 연료로서 가솔린에 비해 CO와 HC의 배출량이 매우 적은 저공해 연료이며 CO₂ 발생도 적다.
- ② 취급과 조절이 용이하며 시동성이 좋다.
- ③ 옥탄가가 높아 압축비를 높일 수 있으므로 열효율이 좋고 노킹에 유리하여 대형엔진에도 사용이 가능하다.
- ④ 엔진 연소실과 연료공급 계통에 퇴적물이 적어

<표 1> 연료별 특성 비교표

	NG	LPG	가솔린	경유
분자식	C ₁ -C ₁ (주료CH ₄)	C ₁ -C ₄ (주료 C ₃ H ₈)	C ₇ -C ₁₂	C ₁₀ -C ₂₁
몰 질량(g/mol)	16	44	약100	
밀도 : 액상(kg/l)	0.42	0.51	0.75	0.84
: 기상(kg/m ³)	0.8	2.0		
이론 공연비	17.3	15.6	14.7	14.6
옥탄가: RON	130	96~111	92	
: MON	125~130	89~96	83	
Cetane Number				45~55
저발열량(MJ/kg)	54.7	46.3	42~44	42
에너지밀도(MJ/l)	7.88*	23.5	31.83	35.08
비점(°C)	-162	-42	35~210	180~360
자발화온도(°C)	632	504	250	225

- (*) : 246kg/cm³에서의 값
 - RON : Research Octane Number (중저속과 엔진 디젤링의 노킹에 영향)
 - MON : Motor Octane Number (고속과 부분 트로틀링 노크에 영향)

엔진오일, 오일필터의 교환 주기가 연장되며 엔진수명도 길다.

- ⑤ 비중이 공기보다 가벼워 누설시 축적되지 않고 대기로 쉽게 확산되어 화재나 폭발의 위험에 대한 안전성이 높다.

GHP용 엔진의 고성능화 기술

희박연소 엔진 (Lean-burn Engine)

일반 엔진의 연소기술은 공연비를 삼원촉매 효율이 최적인 이론공연비($\lambda = 1.0$)로 전자제어하여 조절하고 삼원촉매를 적용하여 CO, HC, NOx를 동시에 저감하는 시스템이다. 그러나 배기규제가 계속하여 강화되어 이 기술로는 향후 강화될 배기규제를 통과하기가 어렵고 또 유해배출가스 규제 내용에 CO₂가 포함될 것으로 예상하고 있으므로 CO₂의 생성량을 줄이기 위해서는 연비를 저감시키는 것이 가장 효율적인 대책으로 알려져 있다.

따라서 배기가스를 감소시키면서 연료소비를 줄이는 방법으로 희박연소가 가장 가능성 있는 기술로 제시되어 있다. 혼합기에 공기를 과잉 공급하여 연소시키는 희박연소는 상대적으로 펌핑손실이 적고, 정상연소보다 비열비가 증가함으로써 엔진열효율이 향상된다. 그리고 연소최고온도가 낮아짐으로써 질소산화(NOx)이 현저히 감소되며 완전연소로 인한 일산화탄소(CO)가 감소하여 유해배출가스가 줄어든다. 그러나 초희박연소는 공연비가 희박해짐에 따라 연소가 불안정하게 되어 토오크 변동을 초래하는 단점을 가진다. 따라서 초희박연소를 실현하기 위해서는 희박연소시 연소 안정성에 관한 기반기술의 확립이 선행되어야 한다.

희박연소를 실현하기 위한 방법에는 균질급기(homogeneous charge)와 성층급기(stratified charge) 두 가지로 크게 나누어 발전되어 왔는데, 성층급기방식에서는 전체적으로는 혼합기가 희박하나 점화플러그 근처에서는 공연비가 농후한 혼합기를 유도하는 혼합기의 성층화를 통해 점화가 용이하게 이루어지도록 하고 있다. 성층급기엔진에는 별도의 부연소실을 설치하여 여기에 공연비가 농후한 혼합기를 공급하고 설치된 점화플러그로서 점화하여 연소시킴으로서 희박혼합기가 공급된 주연소실에 연소화염이 분출되게 하여 화염전파를 촉진시키는 방법이 주로 사용되었다.

균질급기방식에서는 연소실 전체에 균일한 공연비

를 공급하는 방식으로 공연비가 희박함에 따라 연소를 위한 초기점화에너지가 증가하게 되므로 점화장치를 대폭적으로 개선하여야 한다. 고전류, 고에너지, 방전시간 단축 혹은 지속을 통한 방법이나 플라즈마제트, 다중점화방식 등으로 연료의 발화와 화염진행을 향상시키고 있다. 또한 연소실 설계변경을 통하여 열손실을 줄이고 연소율을 높이기 위한 연소실 내부 유동개선이 주요 설계인자로서 연구되고 있다.

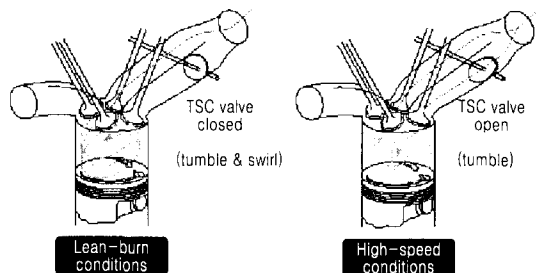
이를 위해 흡기포트의 형상설계, 스윙콘트롤밸브(SCV), 스퀴시먼적 확대 등의 기술이 적용되어 왔다.

그러나 부연소실이 없이 주연소실(open chamber)에서 성층연소를 생성하면서 희박연소를 구현할 수 있으며 성층화는 크게 스윙(swirl)과 텀블(tumble)을 사용하는 방법을 이용한다. 그림 1에서와 같이 스윙을 이용하는 시스템은 두 개의 흡기포트 중 하나는 닫고 다른 하나의 포트에 연료공기 혼합기를 공급함으로써 스윙을 발생하게 하면서 희박연소를 시킨다.

텀블을 사용하는 방식으로 일반적으로 흡기포트의 단면은 원형이나 이 경우는 흡기포트 형상을 역삼각형으로 만들어 그림과 같이 강한 텀블이 생성되게 한다. 또한 흡기포트가 두 개인 경우 한쪽만 연료를 공급함으로써 다른 포트에 공기만 공급하여 생성시킨 공기 텀블과 연료공기 혼합기 텀블이 성층화를 이룬다.

희박엔진에서는 CO와 NOx는 상당히 줄어드나 HC는 도리어 증가한다. 즉 질소산화물은 공연비가 커짐에 따라 증가하다가 급격히 감소하는 경향을 보이며 30% 이상의 저감효과가 있는 반면, 미연소탄화수소는 이론공연비보다 희박해질수록 감소하다가 어느 한계이상에서는 다시 증가한다. 이와 같은 HC 증가는 과희박 혼합기가 점화되지 못하거나 또는 연소기간이 과도하게 길어지는 데에 기인한다고 볼 수 있다.

현재의 흡기포트 연료공급방식 희박연소엔진으로는 $\lambda = 1.5 (A/F=23)$ 까지가 기술의 한계로 인식되



[그림 1] 희박연소엔진 방식

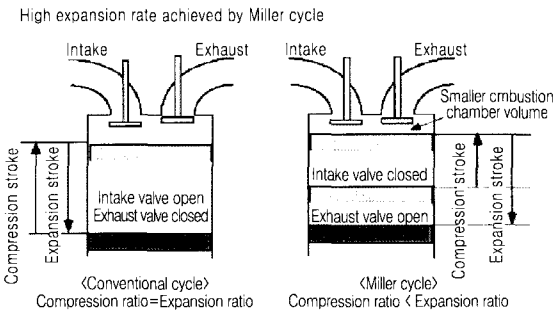


고 있으나 자동차용으로는 정밀 전자제어 및 연소실 내 연료 직접분사 기술 등을 적용할 경우 $\lambda = 3.0$ ($A/F=40\sim50$)의 공연비까지 연소가 가능한 초희박 엔진도 연구되고 있다.

저압축 고폽창 엔진 (밀러사이클 엔진)

저압축 고폽창 엔진은 19세기 후반에 고안되었으나 1947년 R.H. Miller씨가 실용화 개념의 새로운 Miller cycle을 발표하였다. 이 기술은 그림 2에서와 같이 일반 엔진에 흡기밸브의 닫는 시기를 지연시켜 압축행정 에 비하여 팽창행정이 상대적으로 길어 압축행정의 기계손실(pumping loss)를 저감시키고 고폽창비화 함으로써 엔진의 성능을 향상시키는 것이다. 그러나 이 엔진기술을 상용화시키기 위해서는 응답성이 좋은 과급기 개발이 무엇보다 중요함을 인식하고 일본의 마쯔다자동차에서 기존의 Lysholm 압축기를 개량하여 채용함으로써 1990년대 초반에 Miller 사이클 엔진을 실제 자동차에 적용하였다. 일본의 산요회사는 마쯔다사의 밀러사이클(Miller Cycle)기술을 GHP용으로 채용해서 엔진열효율을 향상시켜 종래의 제품에 비해 약 20% 정도 에너지 절약을 실현하였다.

저압축 고폽창 엔진의 경우 팽창비는 충분히 크게 하여 연소가스의 팽창에너지를 충분하게 활용함으로써 에너지효율을 높여 종래 엔진에 비해 1.5배의 높은 토크와 10-15% 연비절감을 얻고 있으며 CO₂ 저감도 상당하다. 또한 실용회전범위가 넓은 편이고 전 회전영역에서 평탄한 토크 특성을 나타내며, 엔진응답성도 우수하나 생산가격이 높아지는 단점이 있다. 그러나 Miller 사이클은 Otto 사이클에 비해 흡입행정이 짧기 때문에 과급효율이 높은 과급기가 필요하며, 인터쿨러를 사용하여 흡입공기를 냉각하여 과급효과를 높여 줌으로써 충분한 효과를 얻을 수



[그림 2] 밀러사이클(Miller Cycle) 엔진의 작동 원리 비교

있다.

Miller 사이클은 흡기밸브의 닫힘시기(closing timing)를 조절함으로써 구현할 수 있으며, 방식으로는 흡기밸브가 하사점에 도달하기 이전의 흡입행정 후반에 닫는 "가변 Miller 방식"과, 하사점 통과 후 압축행정 초기에 닫는 "고정 Miller 방식"이 있는데, 가변 Miller 방식은 저속영역에서는 연비가 우수한 장점이 있으나 고속에서는 흡입공기량이 감소하고 제어가 복잡한 단점이 있는 반면, 고정 Miller 방식은 고속에서 흡입공기량 감소가 적으며 중저속에서도 노킹방지효과가 크나, 스로틀 손실이 상대적으로 크며 부분부하 시 효과가 감소되는 단점이 있다.

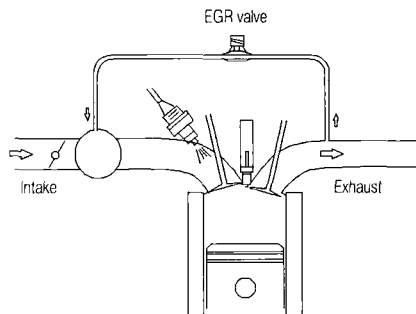
배기가스 재순환 (EGR)

EGR(exhaust gas recirculation)은 NOx저감을 위한 가장 효과적인 방법의 하나로서 자동차용 엔진에서는 이미 실용화되어 사용되고 있다. 이는 배기가스의 CO₂나 H₂O 등과 같은 불활성가스가 그림 3에서와 같이 흡기의 일부와 치환되어 혼합됨으로서 혼합기의 열용량이 증대되어 실린더 내 연소가스 온도 상승을 억제하며 또한 공기과잉율을 낮추어 thermal NOx생성을 억제함으로써 전체 NOx 발생량을 줄이는 원리이다. 또한 흡기의 일부가 산소농도가 낮은 배기가스로 치환되므로 연소실 내 산소가 감소하기 때문에 NOx 생성이 억제된다.

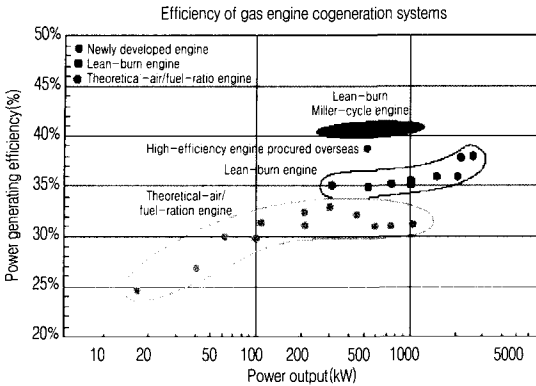
배기가스 중 질소산화물(NOx)의 배출량은 공연비 피드백(feed back)제어에 의한 희박연소 방식과 배기가스재순환(EGR) 기술을 활용함으로써 종래 제품에 비하여 최대 40% 까지 삭감이 가능하다.

결론

세계 각국에서 지구온난화를 고려한 CO₂ 배출저감



[그림 3] 배기가스재순환(EGR) 기술



[그림 4] 미쯔비시사의 열병합발전용 가스엔진의 기술적용 사례

과 대기오염 방지를 위하여 자동차의 경우 저연비 요구와 배출가스에 관한 규제가 강화되고 있다. 이러한 저연비와 배출가스규제의 강화에 대한 현실적인 대응 방안으로는 종래의 엔진에 희박연소기술과 배기 재순환(EGR)기술은 이미 일반화 되었으며 엔진의 연소실에 연료를 직접 분사하는 연료 직분식 기술, 천연가스나 LPG를 연료로 사용하는 대체가스연료 엔진 기술, 그리고 배기파이프에서 유해배기ガ스를 정화해주는 후처리장치 등의 기술이 개발되어 복합적으로 적용시키고 있다.

또한 기존 엔진의 응용기술로 저압축 고폽창 엔진인 Miller cycle 엔진 기술도 실용화되었고, 17:1 정도의 고압축비에 의한 압축열을 이용한 가솔린 예혼합 압축점화(HCCI) 엔진, 연소실내 고온의 잔류배기가스 열에 의한 가솔린 압축점화 엔진 등의 첨단 신기술도 실용화될 예정이다.

GHP엔진은 사용상의 편의성, 경제성, 배출가스로 인한 공해, 소음진동 등이 매우 중요한 고려인자라는 점에서는 자동차의 엔진과 유사한 특성이 많다고 할 수 있으나, 급가속이나 고회전수 전부하 운전을 하지 않고, 저속 저부하에서 회전력을 요구하고 있으며 사용 연료가 주로 천연가스인 점 등에서 기존 자동차용 엔진과는 특성이 다르다. 따라서 GHP용으로 개조할 베이스 엔진으로 자동차용 혹은 산업용 엔진, 자동차용일 경우 LPG엔진 혹은 디젤엔진, LPG엔진일 경우 DOHC엔진 혹은 SOHC엔진, 디젤엔진일 경우 직분식 혹은 간접분사식 등 여러 가지 경우에 대해 장단점이나 개조 용이성, 개조비용, 신기술의 적용 가능성 등을 잘 고려하여 여러 엔진기술의 장점을 최대한 활용해야 만 최상의 열효율과 최상의 내구성을 얻을 수 있게 된다.

을 수 있게 된다.

그림 4는 일본 미쯔비시사의 열병합발전용 가스엔진의 경우 용량별 적용엔진 기술의 효율을 표시한 것으로 밀러사이클과 희박연소 엔진은 효율은 높으나 약 300kw급 이상의 엔진에 주로 적용하고 있으므로 GHP에서도 사용 목적과 용량에 따라 엔진 생산단가의 비율 등을 고려해서 기술의 적용을 결정해야 한다는 것을 짐작할 수 있다.

또한 GHP는 사용 장소가 주거지역인 점을 고려할 때, 배출가스로 인한 공해, 소음진동 등도 자동차의 경우와 마찬가지로 매우 중요한 인자라고 할 수 있다. GHP의 소음은 엔진뿐만 아니라 콤프레샤나 송풍기, 냉각수 펌프 등으로부터 복합적으로 발생하지만 엔진에 의한 소음이 가장 크다고 할 수 있다. 또한 여름철 냉방 시 외기 온도가 섭씨 32℃ 이하에서는 엔진의 회전수를 억제하여 약 10% 정도 성능을 낮추어 운전하면 최대 3dB(A)까지도 저감이 가능한 정속운전 모드기술, 2단 소음기라든지 닥트 구조의 배기파이프, 흡기닥트 부착 이중구조 doppler, 대형 흡기챔버 내지 특수소음기 지지구조등 엔진의 극저소음화를 위해서 다양한 기술의 적용을 고려해야 한다.

유해배기가스의 저감은 희박연소, EGR 등 엔진 자체 내의 전처리 기술이 우선적으로 적용되어야 하고 향후 규제의 강화에 따라 촉매에 의한 후처리 기술도 추가 적용 되어야 하므로 배기열교환기로 인한 배기가스온도 저하와 희박연소용 촉매선정 등이 고려되어야 한다. 또한 실외기 본체에서 발생하는 배기가스의 냄새도 일종의 촉매를 사용하여 저감이 가능하므로 고려되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. The Japan Gas Association, official website (<http://www.gas.or.jp>).
2. SANYO Electric Co. Ltd., official website (<http://www.sanyo.co.jp>).
3. YANMAR Diesel Engine Co. Ltd., official website (<http://www.yanmar.co.jp>)
4. Osaka Gas Co. Ltd., official website (<http://www.osakagas.co.jp>).
5. 정용일, "자동차와 환경", website (<http://www.autoenv.org>).