

1.6MW급 가스엔진의 개발 및 엔진성능평가

노기철[†] · 설동일¹ · 허경미¹ · 김세훈¹

(원고접수일 : 2011년 11월 8일, 원고수정일 : 2011년 12월 12일, 심사완료일 : 2012년 1월 19일)

Development and Performance Evaluation for 1.6MW Gas Engine

Ki-Chol Noh[†] · Dong-il Seol¹ · Kyoung-Me Hu¹ · Se-Hun Kim¹

요약 : 최근 엔진 메이커들은 원유가 인상 및 대기환경 규제에 대응하기 위하여 디젤엔진의 대안으로서 가스엔진 개발에 대한 관심이 증가되고 있다. 이에 STX는 22HLX 디젤엔진을 기초로 한 1.6MW급 가스엔진을 개발하였다. 예연소실 방식의 개발된 가스엔진은 엔진속도가 1000rpm에서 제동평균유효압력이 21bar이고 질소산화물 배출량이 50ppm(공기 중 산소함유 15% 기준)의 우수한 성능을 가진다. 특히 열효율 45%의 우수한 연료 경제성을 가지며 이산화탄소 배출량은 디젤엔진의 약 75%수준으로 온실가스 저감에도 효과적이다.

주제어 : 가스엔진, 밀러 사이클, 희박연소, 예연소실, 공기과잉률

Abstract: Engine makers are lately interested in the gas engine development as the alternative for diesel engine in order to cope the rise of oil price and the environmental regulation. So, STX has developed the 1.6MW gas engine which was converted from 22HLX diesel engine. The gas engine developed with precombustion chamber, which has good performance of 21bar BMEP at engine speed 1000rpm and low NO_x emission of 50ppm at 15% oxygen composition, has been developed recently. Especially, it has a good thermal efficiency of 45% and a reduction efficiency of green house gas(CO₂) emission of 25% than a conventional diesel engine.

Key words: Gas engine, Miller cycle, Lean burn, Precombustion chamber, Excess air ratio.

1. 서론

최근 원유가 인상 및 전 지구적 대기환경 규제 강화에 따라 디젤엔진의 대안으로서 천연가스엔진에 대한 관심이 증폭되고 있다. 천연가스엔진은 연료의 넓은 가연한계로 희박연소를 통한 열효율 향상을 도모할 수 있고 동시에 연료의 낮은 탄소성분은 CO₂ 배출을 감소시켜 온실가스 저감에 효과적이다[1,2]. 또한 낮은 연료소비로 경제성이 우수하고 원유와 달리 천연가스는 전 세계에 넓게 분포하여 수급에도 유리한 측면이 있다. 이에 가스엔진에 대한 수요는 급격히 증가하는 추세이다. STX는 가스엔진 시장에 처음 진출하는 단계로서 22HLX 디젤

엔진을 기초로 한 1.6MW급 가스엔진을 개발하였다. 개발된 가스엔진은 예연소실이 있는 불꽃점화 방식의 전소 가스엔진이다[3]. 본 논문에서는 가스엔진을 개발하기 위한 연구내용 및 개발엔진의 성능평가 등에 대하여 기술하고자 한다.

2. 1.6MW 가스엔진의 개발

2.1 가스엔진의 개발목표 및 개발내용

2.1.1 가스엔진의 개발목표

STX는 가스엔진 시장에 처음 진출하는 단계로서 개발이 비교적 용이하고 개발비용이 상대적으로 저렴한 불꽃점화 방식의 전소 가스엔진을 개발하고자

[†] 교신저자(STX종합기술원 연소성능팀, E-mail: pivboy@onestx.com, Tel: 055-210-3385)

¹ STX종합기술원 연소성능팀

하였다. 엔진의 목표 출력은 기통 당 200kW인 1.6MW급이며[4], 엔진효율은 45% 수준으로 동급엔진에서 최고의 성능을 갖도록 목표를 두었다. 이 때 기준 NO_x 배출량은 국내 육상발전용 엔진의 규제인 50ppm(공기 중 산소함유 15% 기준)으로 하였다. 또한 제동평균유효압력의 목표치는 엔진속도 1000rpm에서 21bar로 일반적인 가스엔진보다 상당히 높은 수준이다. 이상과 같은 가스엔진의 개발목표 및 운전조건에 대하여 Table 1에 요약하여 기술하였다.

Table 1: Objective specification of developed gas engine

Phase	Target
Power	1.6MW
BMEP	21bar
Thermal efficiency	45% acc. to ISO 3046-1
NO _x	≤ 50ppm @O ₂ =15%
Ambient temperature	25°C
Ambient pressure	1bar
Intake depression	50mbar
Charged air temperature	40°C
Exhaust back pressure	40mbar

상기와 같은 개발목표는 가스엔진으로서 상당한 수준의 출력성능으로 노킹 및 실화와 같은 이상연소로 인해 개발에 상당한 어려움이 있다[5]. 이에 STX는 이를 극복하기 위해 여러 개발기술을 적용하였다.

2.1.2 고출력 및 고효율의 실현

고효율 및 고출력의 가스엔진은 높은 열부하로 인해 노킹발생 및 NO_x 배출량 증가의 문제점을 야기한다. 이를 해결할 수 있는 방안으로 밀러 사이클 및 희박연소 기술을 적용하였다[6,7].

밀러 사이클은 Figure 1과 같이 흡입밸브를 일찍 닫음으로서 압축일을 감소시켜 열효율 향상을 기대할 수 있다. 또한 연소실 온도를 저하시켜 노킹발생 및 NO_x 배출량을 동시에 줄일 수 있는 장점이 있다. 이러한 밀러 사이클은 캠 형상의 설계보정으로 실현하였고 동시에 흡입 혼합기량 감소를 보상하기 위해

고성능의 과급기를 사용하였다. 희박연소는 완전연소를 가능하게 하여 열효율 향상을 기대할 수 있다. 그러나 희박수준이 확대될 경우 연소불안정의 원인이 되므로 적정 희박한계를 도출하여야 한다[8].

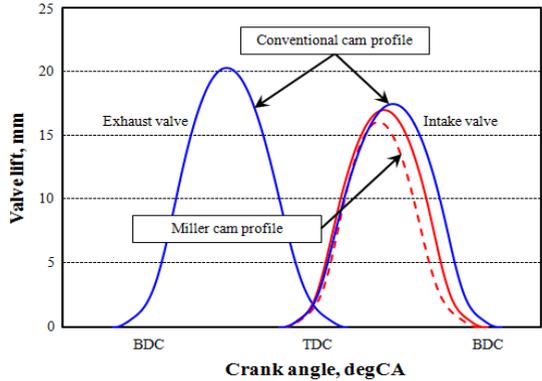


Figure 1: Miller cam profile

2.1.3 저 NO_x의 실현

NO_x의 배출 저감은 기본적으로 희박연소로 실현하였다[6,7]. 희박연소는 연소가스의 온도를 저감시켜 NO_x 배출량을 저감시킬 수 있다. 그러나 희박연소는 연소불안정, 불완전 연소 및 실화와 같은 문제점이 발생하므로 이를 해결하기 위해 예연소실 방식을 적용하였고 동시에 피스톤 형상의 최적화 및 난류유동을 고려하였다. 예연소실로는 다소 농후한 혼합기를 공급하여 연소시키고, 이를 통해 주연소실의 희박혼합기를 연소시킴으로서 희박연소에 따른 연소불안을 극복할 수 있었다. 또한 피스톤 형상의 최적화는 난류 및 화염전파 활성화로 희박연소가 원활하도록 하였다.

2.2 가스엔진의 주요 구성품

2.2.1 가스엔진의 주요 사양

본 연구로 개발된 가스엔진의 실물사진과 주요사양은 Figure 2 및 Table 2에 나타난 바와 같다.

개발된 가스엔진은 보어와 행정이 각각 220mm 및 300mm인 디젤엔진을 개조한 것이며 정격 엔진속도는 1000rpm이다. 엔진의 압축비는 12이며, 엔진의 속도제어는 스로틀 밸브의 열림 궤도로 조절하였다.



Figure 2: Feature of developed gas engine

Table 2: Specification of developed gas engine

Phase	Specification
Bore×Stroke	220mm×300mm
Arrangement of cylinder	8 in-line
Engine speed	1000rpm
Compression ratio	12.0
Fuel	Natural gas
Fuel admission	Central gas mixer
Engine speed control	Throttle valve
Ignition	Spark plug with PC

2.2.2 실린더 헤드 및 예연소실
개발된 가스엔진의 실린더 헤드 및 예연소실의 구성은 Figure 3에 보이는 바와 같다.

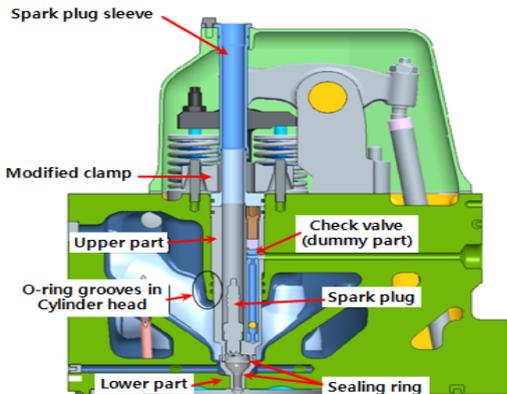


Figure 3: Feature of cylinder head and pre-chamber

실린더 헤드는 천이 운전영역에서의 응답성을 향상시키고 압축손실을 줄이기 위하여 불필요한 공간 (starting air hole, indication hole, injector cooling hole 등)을 가능한 많이 제거하였다. 또한, 열부하 증가에 따른 열응력 개선을 위해 냉각계통을 개선하였다. 각 실린더 헤드 측면에는 노킹발생을 감지하고 억제하기 위한 노킹감지센서를 부착하였고 이를 엔진제어시스템과 연결하였다.

예연소실은 기존 디젤엔진의 인젝터 자리에 설치하였다. 예연소실 내부에는 가스연료 공급을 위한 체크밸브 그리고 혼합기 점화를 위한 점화플러그가 설치되어 있다. 예연소실의 냉각수 누설은 오링으로 방지하였고, 점화플러그의 유지 및 보수가 쉽도록 실린더 헤드를 개선하였다.

2.2.3 가스연료 공급

가스연료 공급은 주연소실로 공급되는 저압가스 공급시스템과 예연소실로 공급되는 고압가스 공급시스템으로 구분되며, 그 구성은 Figure 4에 나타낸다.

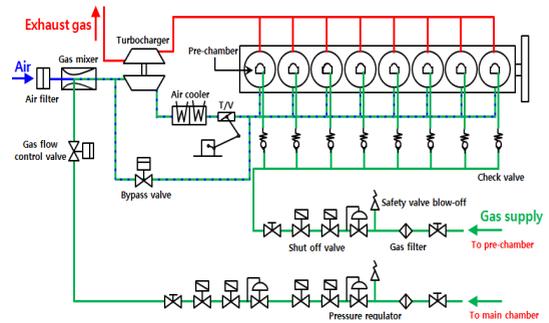


Figure 4: Schematic diagram of gas supply system

저압가스는 두 단계의 압력조절장치를 거쳐 연료 압력이 감압되고 가스믹서를 통해 공기와 혼합되어 흡기계통에 공급된다. 가스믹서를 과급기 전단에 설치하여 상대적으로 균질 혼합기 형성이 가능하다. 고압가스는 압력조절기를 거쳐 각 실린더의 체크밸브를 통해 예연소실로 공급된다. 특히 예연소실로는 가스연료만을 공급함으로 상대적으로 농후한 혼합기가 형성된다. 체크밸브는 연소실 내 압력과 연료

압력의 차이에 의해서 작동되며, 연료압력은 엔진부하에 따라 엔진제어시스템의 설정 값에 따라 자동적으로 조정된다.

2.2.4 점화시스템

개발된 가스엔진은 불꽃점화방식으로 각 실린더에 점화코일 및 점화플러그가 설치되어 있다. 점화시기는 엔진제어장치에서 조절하며 크랭크축 및 캠축의 픽업 신호로부터 최대 20°C_{CA} BTDC에서 10°C_{CA} ATDC까지 조정가능하다. 엔진운전은 스로틀밸브의 거동 및 부하변동에 대한 엔진거동을 개선하기 위하여 동일한 점화시기를 고려하였다. 동시에 안정적인 연소 및 실린더 간 압력변동을 최소화하기 위하여 점화시기를 실린더 별로 독립적으로 제어하였다.

2.2.5 엔진제어시스템

가스엔진의 경우 노킹 및 실화와 같은 이상연소로부터 안정적인 운전을 위해서는 무엇보다도 엔진제어시스템이 중요하다. 이에 STX는 가스엔진개발의 초기단계로서 제어시스템의 엔진제어 및 모니터링 기능을 강화하였으며 그 개략을 Figure 5에 나타낸다.

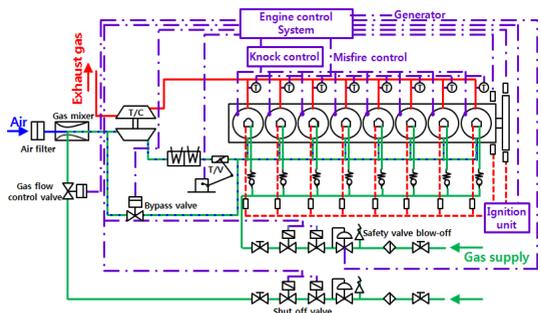


Figure 5: Schematic diagram of control system

엔진제어시스템은 노킹발생 시 점화시기를 0.4°C_{CA}씩 지각시켜 노킹발생을 회피하였으며 최대 8.0°C_{CA}까지 반복하였다. 점화시기 지각으로 노킹발생이 회피되면 점화시기는 원 위치로 복귀하고 8.0°C_{CA}까지 지각하여도 노킹발생이 지속되면 부하를 감소시킨다.

연소실 내 실화발생 여부는 배기가스의 온도변화로부터 판단하며, 실화발생 시 혼합기의 공기연료비를 조정하여 실화발생을 억제하였다. 그리고 이 모든 상황은 모니터를 통하여 실시간 감시가 가능하도록 엔진제어시스템을 구축하였다.

2.2.6 기타 주요 변경부품

디젤엔진과 가스엔진은 기본적으로 연소메커니즘이 다르다. 그에 따라 몇몇 부품의 변경이 요구된다. 우선 가스엔진의 경우 연소실로 혼합기가 공급되므로 밸브 오버랩 기간 동안 혼합기가 배기밸브 쪽으로 흐르는 것을 줄이기 위해 오버랩 기간을 줄였으며 밀러 사이클의 적용에 따라 캠축을 재설계하였다. 밀러 사이클의 적용으로 고성능의 과급기를 사용하였으며 압축 혼합기의 냉각효과를 높이기 위해 2단 공기냉각기를 사용하였다. 알루미늄 소재의 피스톤을 개발하여 피스톤 상부 열점에 의한 노킹발생을 회피하였고 동시에 피스톤 관성력을 줄일 수 있었다. 또한 기존 디젤엔진의 높은 압축비는 노킹발생을 초래하므로 압축비를 감소하였다. 그러나 이는 열효율 감소를 초래하므로 연소실 최고압력을 고려하여 적정 압축비를 선정하였다.

한편, 가스연료로의 변경에 따라 디젤연료공급시스템을 모두 제거하였다. 엔진시동시스템도 연소실로 혼합기가 공급되므로 압축공기에 의한 공기모터 방식을 채택하였다. 그리고 크랭크케이스에 미연가스에 의한 폭발을 방지하기 위하여 안전장치를 추가하였다.

2.3 가스연료 특성

가스엔진의 성능평가에 사용된 연료는 CH₄조성이 90%이상이고, 저위발열량이 39.33MJ/Nm³인 천연가스로 그 특성은 Table 3에 나타낸 것과 같다.

공급된 천연가스의 메탄가는 73으로 일반적으로 성능평가 시 고려되는 80보다는 낮은 특성을 보인다. 메탄가는 가스연료의 반 노킹 성을 나타내는 수치로 엔진의 열효율 및 출력성능에 영향을 미친다. 가스연료 공급압력은 예연소실로 공급되는 연료압력을 고려하여 최소 5.5bar 이상으로 유지하였다.

Table 3: Gas quality used for engine test

Phase	Unit	Quality
CH ₄ composition	%	over 90
Lower heating value	MJ/Nm ³	39.33
Density	kg/m ³	0.7976
Stoichiometric ratio	-	16.87
Molecular weight	kg/kmol	17.77
Methane number	-	73
Gas supply pressure, (g)	bar	over 5.5

3. 가스엔진의 성능평가

3.1 연소성능평가

3.1.1 연소실내 압력특성

Figure 6은 크랭크 각에 따른 연소실 내 압력곡선을 나타낸 것이다.

그림에서 보듯이 주연소실과 예연소실 모두 안정적인 연소가 일어남을 알 수 있다. 특히 예연소실의 압력이 다소 높은 경향이나 최고압력 도달 후 두 연소실의 압력이 거의 동일한 특성을 보인다. 두 압력 편차는 예연소실의 내구성에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

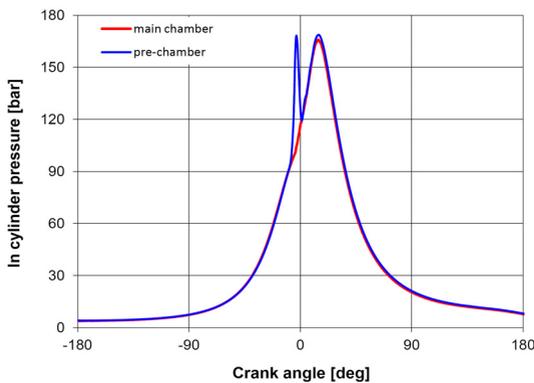


Figure 6: In-cylinder pressure versus crank angle

실린더 별 압력을 분석하기 위하여 **Figure 7**에 연소실 평균압력 및 실린더 간 압력편차를 나타낸다.

연소실 압력은 엔진부하의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향이며 100% 부하에서 연소실 최고

압력은 약 169bar 정도를 보인다. 이 값은 피스톤의 허용압력 190bar을 충분히 만족하는 값이다. 특히 연소실간 압력편차가 2~4bar 수준으로 디젤엔진보다 안정적임을 확인할 수 있다. 이는 실린더 간 점화시기를 독립적으로 제어하는데 기인한 것이다.

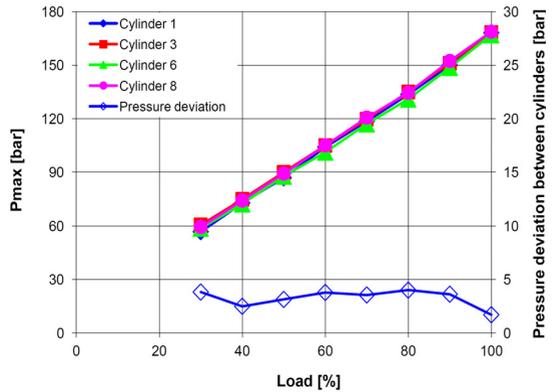


Figure 7: Ensemble-averaged pressure and pressure deviation between cylinders versus engine load

3.2 성능평가

3.2.1 NO_x 배출특성

Figure 8은 엔진부하 변동에 따른 NO_x 배출특성을 나타낸 것이다. NO_x 배출량은 대기환경규제로서 반드시 준수하여야 한다. 실험은 동일 조건으로 3회 (1회/일) 수행하였으며, 이들 실험을 각각 Pre A_Test1, Pre A_Test2, A_Test라고 하였다.

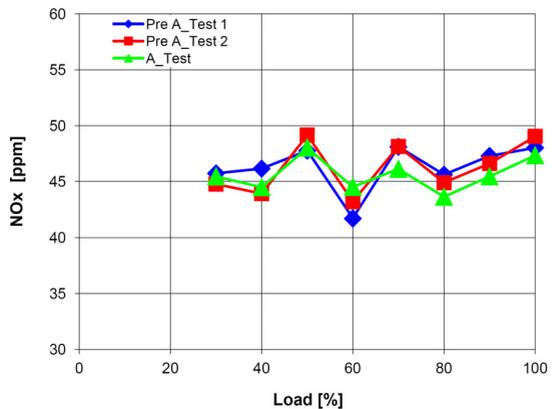


Figure 8: NO_x emission rate versus engine load

그림에서 보듯이 NO_x 배출량이 전 부하에 걸쳐 배출규제치인 50ppm이하로 개발목표가 만족됨을 확인할 수 있다. NO_x 배출량은 대략 44~48ppm 수준으로 이 값은 0.85g/kWh에 해당된다. 이 값은 국제해사기구 IMO TierII의 약 9.4% 수준으로 TierIII 규제도 만족시킨다. 즉, 가스엔진의 경우 특별한 후처리장치 없이 NO_x 배출규제를 만족시킬 수 있음을 의미한다. 한편, NO_x 배출이 증가하면 열효율이 향상된다. 따라서 일부 부하영역에서 과도한 NO_x 배출 여유를 줄인다면 열효율 향상을 일부 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2 열효율 특성

Figure 9는 엔진부하에 따른 엔진 열효율을 나타낸 것이다. 열효율은 연료비 절감에 직접적인 영향을 미치며, 동시에 CO₂ 배출량 감축에 중요한 요소이다. 엔진 열효율은 엔진부하가 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타내며, 부하 100%에서 열효율이 약 45.04%로 개발목표를 만족하였다. 또한 이 때 열효율의 역수인 연료소모량은 170g/kWh 수준으로 일반적인 디젤엔진 연료소모량인 195g/kWh의 약 87% 수준으로 가스엔진이 연료비 절감에도 효과적임을 알 수 있다.

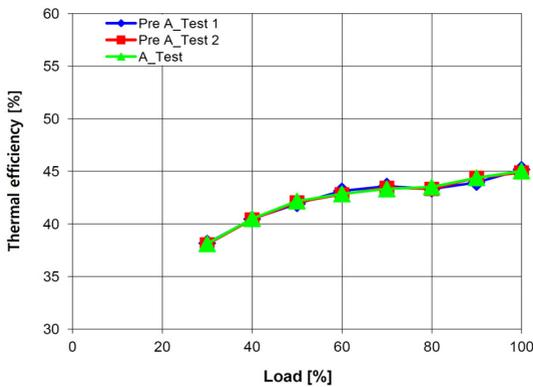


Figure 9: Thermal efficiency versus engine load

온실가스 저감효과를 파악하기 위한 엔진부하 변동에 따른 CO₂ 배출량은 Figure 10에 나타낸 바와 같다.

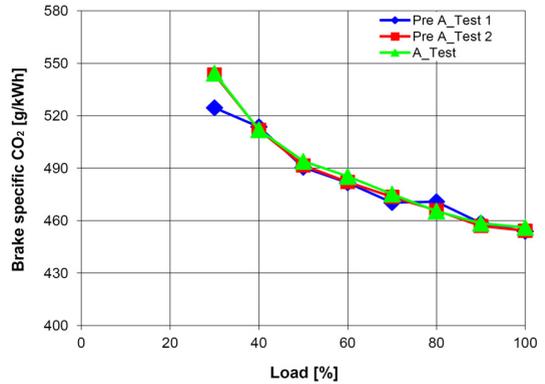


Figure 10: Brake specific CO₂ versus engine load

CO₂ 규제는 NO_x 등 기타 규제 대상 물질과 달리 총량을 대상으로 함으로 절대적으로 열효율에 영향을 받는다. Figure 10에서 알 수 있는 바와 같이 CO₂ 배출량은 부하증가에 따라 열효율이 증가하므로 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 부하 100%에서 CO₂ 배출량은 약 460g/kWh 수준으로 동급 디젤엔진의 약 75%수준이며 이는 온실가스규제에 대한 대응에도 가스엔진이 유리함을 의미하는 것이다.

한편, CO₂ 배출량 감소율은 열효율 향상률을 초과하는 값인데 이는 가스연료에 함유된 탄소성분이 디젤연료보다 적은데 기인한 것이다.

고효율 및 저 NO_x 성능을 달성하기 위해서 희박연소는 필수적인 요소이며 이를 평가하기 위한 부하 변동에 따른 공기과잉률은 Figure 11에 나타낸 바와 같다.

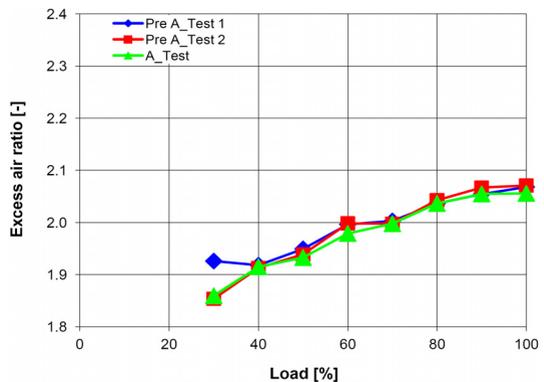


Figure 11: Excess air ratio versus engine load

공기과잉률은 이론 공기연료비에 대한 실제 공기 연료비의 비로서 표현되며 그 값이 1 보다 크면 희박연소, 1 보다 작으면 농후연소로 정의한다. Figure 11에서 알 수 있는 바와 같이 공기과잉률은 1.8 이상으로 희박연소가 이루어지며, 80% 이상의 고 부하영역에서는 2.0 이상의 초 희박연소가 구현됨을 확인하였다.

3.1.3 평균유효압력

엔진부하 변동에 따른 도시평균유효압력 및 제동평균유효압력은 Figure 12에 나타낸 바와 같다.

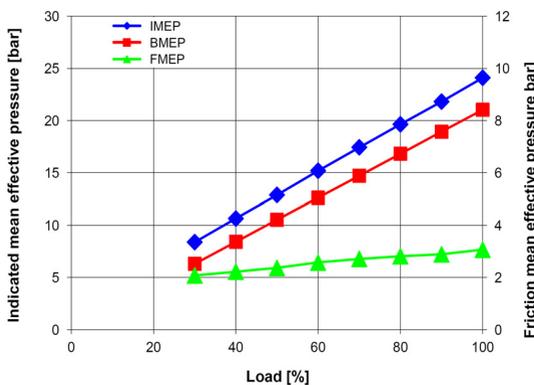


Figure 12: IMEP and FMEP versus engine load

Figure 12에서 알 수 있는 바와 같이 제동평균유효압력이 100% 부하에서 21bar이고 엔진출력은 1.6 MW이므로 개발목표에 도달함을 확인할 수 있었다. 도시평균유효압력과 제동평균유효압력의 차인 마찰평균유효압력은 약 3bar 수준으로 다소 크지만 이를 개선할 경우 보다 높은 열효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 가스엔진으로서 제동평균유효압력 21bar는 상당히 높은 값으로 그 만큼 노킹발생의 위험도가 높다고 할 수 있다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 개발된 1.6MW급 독자모델의 가스엔진 성능실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연소실 내 최고압력은 약 169bar 수준으로 피스

톤의 설계압력을 충분히 만족하였고 기통 간 최고압력 편차도 약 2~4bar 수준으로 디젤엔진보다 안정된 수준임을 확인할 수 있었다.

2. 공기과잉률이 약 2.0 이상으로 초 희박연소를 실현하였으며 그로부터 열효율 향상을 꾀할 수 있었다.

3. 가스엔진 개발목표인 NO_x 배출량, 열효율 및 제동평균유효압력을 각각 효과적으로 달성하였고 그 값은 각각 다음과 같다.

NO_x 배출량: 50ppm (공기 중 산소함유 15% 기준)

열효율: 45.04% @NO_x ≤ 50ppm

제동평균유효압력: 21bar

4. 특히, NO_x 및 CO₂배출은 디젤엔진에 비해 현저히 감소함을 확인할 수 있었다.

NO_x 배출량: 0.85g/kWh(Tier II의 약 9.4% 수준)

CO₂ 배출량: 460g/kWh(디젤엔진의 약 75% 수준)

후 기

본 가스엔진 개발은 AVL사와 공동으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K. Okamoto, T. Takemoto and Daichi M. "Development of A 350kW high-efficiency (over43%) lean burn gas engine for co-generation system", CIMAC 2004, Paper no. 98, 2004.
- [2] Kengo Tanaka, Hiromi Shimoda and Goda Yasunori, "Development of the lean burn miller cycle gas engine", CIMAC 2004, Paper no. 199, 2004.
- [3] S. G. Dexter and C. Ennemoser, "Fire not misfire in pre-chamber gas engines", CIMAC 1995, D45, 1995.
- [4] Günther R. H. and Friedrich Gruber, "The new high efficiency 1.5MW engine of Jenbacher AG. high efficiency concept-HEC", CIMAC 2001, pp. 966-975, 2001.
- [5] Toru Takemoto, Kazuo Nishida and Satoshi S. Morimoto "Development of high efficiency gas engine improvement of knocking limit by optimized engine system", CIMAC 2004, Paper

No. 36, 2004.

- [6] Guenther R. H. and Friedrich Gruber, “Miller cycle-efficiency potentials for gas engines”, CIMAC 2004, Paper no. 197, 2004.
- [7] M. Kondo and A. Sakane, “Development of the 1,000kW-class gas engine(MD20G)”, CIMAC 2007, Paper no. 135, 2007.
- [8] K. Dean Edwards, Robert M. Wagner and C. Stuart Daw, “Adaptive control for extending the effective lean limit in a spark-ignition engine model”, CIMAC 2004, Paper no. 253, 2004.

저 자 소 개



노기철(盧基哲)

1995년 성균관대학교 기계공학과(공학사), 1998년 성균관대학교 기계공학과(공학석사), 2005년 성균관대학교 기계공학과(공학박사), 2007년-2010년 (주)STX엔진, 2011년-현재 STX종합기술원.
관심분야: 가스엔진, 디젤엔진, 신재생

에너지



설동일(薛東日)

2005년 동의대학교 기계공학과(공학사), 2008년 부산대학교 대학원 기계공학과(공학석사), 2007년-2010년 (주)STX엔진, 2011년-현재 STX종합기술원. 관심분야: 디젤엔진, 가스엔진, SCR, CFD



허경미(許京美)

2007년 인하대학교 항공우주공학과(공학사), 2009-2010 (주)STX엔진, 2011년-현재 STX 종합기술원. 관심분야: 가스엔진, CFD



김세훈(金世勳)

2008년 영남대학교 기계공학과(공학사), 2010 한양대학교 기계공학과(공학석사), 2010-2010 (주)STX엔진, 2011년-현재 STX 종합기술원. 관심분야: 가스엔진, SCR