

2. 동력공학 특집

중·고속 4행정 디젤엔진의 기술 개발동향

(Recent Trends for Development of Medium and High Speed Marine Diesel Engines)



김 종 기
J-G Kim

• 팀장, 기술개발팀, (주)STX



김 현 규
H-K Kim

• 과장, 기술개발팀, (주)STX

1. 서 론

전세계적인 지구환경 보전운동은 화석연료를 주 연료로 하는 디젤엔진에 대해서도 많은 요구를 하고 있다. 배기배출가스에 포함된 질소산화물(NOx), 매연(Smoke) 등 대기오염물질의 배출량 감소, 지구온실효과의 주범인 이산화탄소(CO₂)의 배출 감소(열효율의 향상) 등을 요구하고 있다.

한편, 디젤엔진 이용자는 환경친화적일 뿐만 아니라 높은 출력을 기본으로 하고, 높은 운전 신뢰성, 낮은 운전비용, 긴 운전 수명, 편리한 유지보수성 등을 요구하고 있다. 또한, 디젤엔진 제작사는 환경친화적이고 고객의 요구 조건을 만족하는 동시에 치열한 엔진시장에서 경쟁력을 가지기 위해 낮은 생산비용과 짧은 개발 기간을 디젤엔진 설계자에게 요구하고 있다.

그림 1은 디젤엔진에 요구되는 여러 가지 조건을 보여주고 있는데, 이들을 만족시키기 위해서는 여러 가지 기술이 사용되고 있으며, 본 글에서 이들 기술 중 일부를 소개한다.

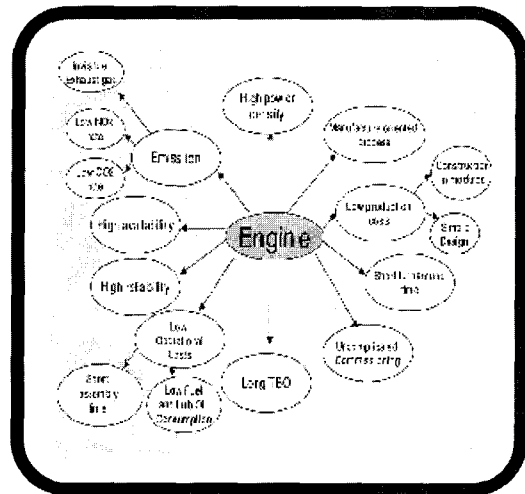


그림 1. 디젤엔진에 주어진 요구 조건들

2. 본 론

(1) 해석 프로그램의 사용

치열한 엔진 시장에서 환경친화적이며, 고객의 요구 조건을 만족하는 첨단 신기술을 채용한 엔진

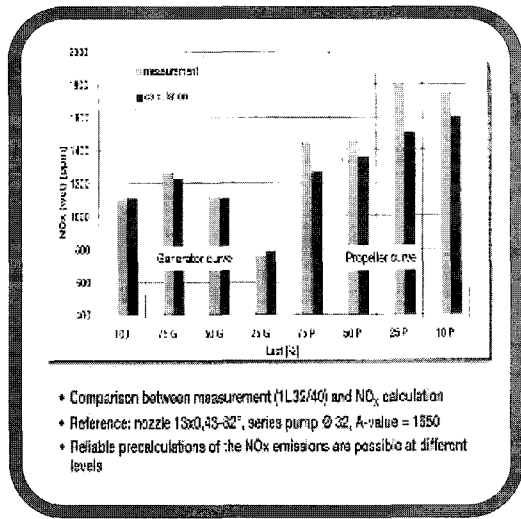


그림 2. 해석결과와 시험결과와의 비교예

의 신속한 개발은 엔진 제작사의 설계자들에게 주어진 일이다. 또, 기존 엔진에서 생산비용 절감을 위해 형상 또는 소재 변경이 요구되고, 고출력화 또는 낮은 오염물 배출을 위한 연소 시스템 (연료 분사펌프 및 밸브, 피스톤, 실린더헤드, 과급기 등) 변경 등의 요구가 있으므로 짧은 기간내 개발을 이루기 위해서는 컴퓨터 프로그램을 이용한 해석 작업은 반드시 필요하게 되었다.

그동안 지속적으로 개발, 발전되어온 해석용 프로그램 (연소해석, 유동해석, 응력해석, 동특성해석 등)의 해석 결과는 개발품의 시험 결과와 비교할 때 아주 높은 정확성을 보여 주고 있다. 그림 1은 디젤 엔진의 정속운전 모드와 변속운전 모드에서 질소 산화물의 배출량을 계산결과와 시험결과를 비교해서 나타내고 있는데 차이가 거의 없다. 아직 해석 결과와 시험 결과가 완전한 일치성을 보여주고 있지 않지만, 해석에 의해 요구조건 만족 여부 등의 사전 확인이 가능하며, 시제품 제작 및 시험 회수의 감소 등으로 해석 프로그램의 활용은 개발 기간의 단축 및 비용 절감은 현재의 프로그램 수준에서도 충분히 평가할 수 있다. 컴퓨터의 성능 향상, 해석 프로그램의 지속적 발전, 해석 및 시험 자료의 데이터베이스화를 통해 해석 프로그램을 활용한 엔진 개발은 더욱 중요하게 될 것이다.

(2) 고출력화 및 유닛트화

고출력화는 디젤엔진에 요구되는 기본 요구조건이다. 표 1에서 보는 것처럼 비슷한 피스톤 직경의 엔진이 B엔진처럼 피스톤 직경 대 피스톤 행정의 비, 연소최고압력 등을 높여 고출력화를 이루고 있다. 피스톤 속도의 증가로 피스톤, 커넥팅로드 등의 중량 및 연소최고압력의 증가에 따른 피스톤, 실린더 라이너, 실린더 헤드, 커넥팅로드의 열강도 및 기계강도 등을 고려하여 형상 및 소재에 대한 재설계가 따른다. 또한 출력 증가를 위해 연료분사계 및 과급기의 재설계는 필수적이다.

엔진 부품의 유닛트화 또한 최근 엔진 설계의 일반적 추세이다. 실린더헤드, 피스톤, 커넥팅로드 등으로 구성된 실린더 유닛트는 부품수의 감소로 엔진 생산 측면에서 생산비용을 낮추는 효과가 있으며, 엔진 보수 측면에서 보수시간을 줄이는 효과가 있다. 그림 3은 최근 유닛트화되는 엔진의 예를

표 1. 디젤엔진의 고출력화

| Engine Type | | A | B |
|----------------------|-----|----------|----------|
| Bore | mm | 225 | 210 |
| Stroke | mm | 300 | 310 |
| Stroke/Bore Ratio | - | 1.33 | 1.48 |
| Cylinder Rating/Cyl. | kW | 160 | 215 |
| Rated Speed | rpm | 1000 | 1000 |
| Mean piston Speed | m/s | 9.0 | 10.3 |
| M. E. P | bar | 17.9 | 24.1 |
| Pmax | bar | 130 | 200 |
| Compression Ratio | - | 13.0 : 1 | 15.5 : 1 |

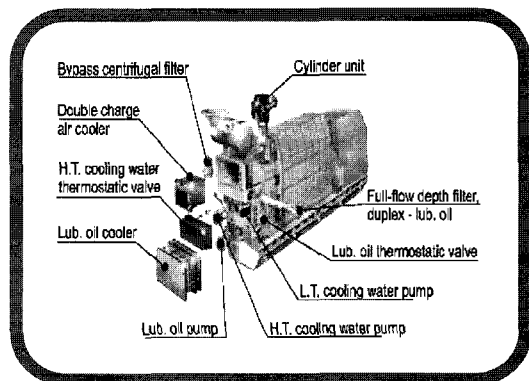


그림 3. 엔진 유닛트화의 예

보여주고 있다.

(3) 연소계의 수정

엔진에 대한 여러 가지 요구 조건을 만족하는 새로운 엔진을 개발하는 것은 해석 프로그램을 이용하여도 많은 시간과 비용이 필요하며, 새롭게 적용할 기술 또한 엔진에 적용하여 확인할 필요가 있다. 따라서 엔진 제작사에서는 신형 엔진을 개발하기 전에 기존 생산엔진에 새로운 기술을 적용하는데, 특히 엔진의 응용 분야, 운전 지역, 생산 연도에 따른 환경 규제 기준등의 차이가 많아, 연소계의 수정이 활발히 이루어지고 있다.

디젤엔진에서 배출되는 대기오염물질 중에서 가장 크게 문제시되는 물질로 매연과 질소산화물인데, 그림 4는 디젤엔진에 요구되는 질소산화물의 배출 규제 기준이 지역적으로 또는 단체적으로

차이가 있는 것을 나타내고 있다.

그림 5는 피스톤 상면의 형상과 흡기포트의 유로형상을 변경시켜 공기 유동을 더욱 최적화시키고, 연료분사노즐의 구멍수를 증가시켜 분사연료의 미립화를 촉진시켜 대기오염 배출물의 저감 및 연료소비율의 저감을 동시에 이루었다는 일본 Yanmar사에서 개발한 연소계를 보인다.

연료 분사 최대 압력을 증가시키고, 노즐 끝단의 색(Sac) 체적을 줄이며, 노즐 끝단이 냉각이 되도록 하여 매연 등을 줄일 수 있게 설계된 독일 MAN B&W사의 연료 분사 노즐의 예를 그림 6에서 보여주고 있다.

기존의 연료분사펌프에 전자밸브를 설치하여 연료 분사시기를 제어할 수 있도록 하고, 물(Water) 첨가를 병행하여 질소산화물 및 입자상물질 등 동시에 저감시켰다는 독일 Deutz사의 연소

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|---------------|------------|---------------|---------|--|-------------|--|------------|------------------|--|---------------|--|
| Euro 3 (since 2000) | | Euro 4 (2005) | | Euro 5 (2008) | | Annex VI of MARPOL (Marine Diesel Engines) | | Ward Bank Rules (Commercial Marine Diesel) | | DNV Clean Design | | Lloyd's Notes | |
| 5 | 3,5 | 2 | 12 (12740) | 13 (14850) | 11 - 13 | 7,2 (12842) | 7,8 (14385) | 2 | NOx (ppmV) | | | | |
| Truck Industry high speed 4-stroke Diesel engine | | | | | | Marine / Stationary Application slow speed 4-stroke Diesel engine | | | | | | | |
| fuel: gasoil | | | | | | fuel: heavy fuel oil | | | | | | | |

그림 4. 엔진에 요구되는 친환경적 조건에

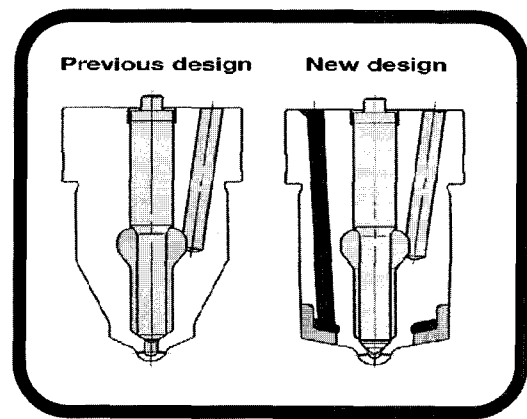


그림 6. MAN B&W사의 연소계 수정 예

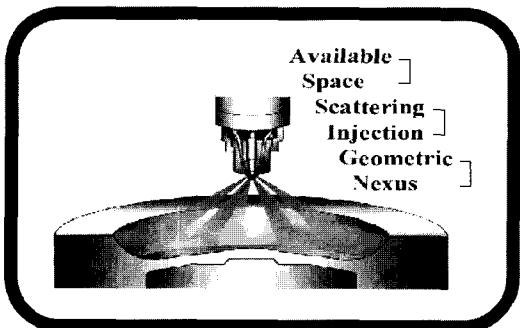


그림 5. YANMAR사의 연소계 수정 예

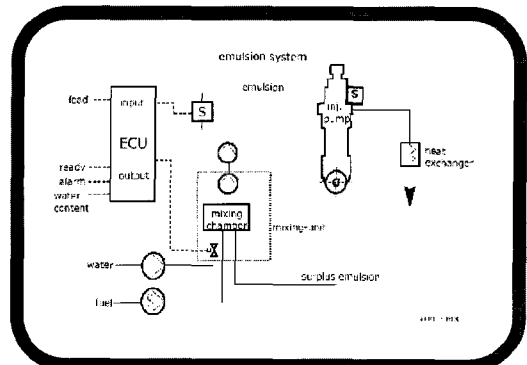


그림 7. DEUTZ사의 연소계 수정 예

계 수정 예를 그림 7에서 보여주고 있다.

(4) 커먼레일 분사계 사용

앞에서 언급한 것처럼, 디젤엔진에 대해 친환경적 요구 조건은 최근 더욱 증가하고 있다. 그중 대표적인 것이 질소산화물 및 매연(연료소비율)의 동시 저감이다. 그림 8에서 보는 것처럼, 디젤엔진에서 질소산화물과 매연(연료소비율)의 배출 특성은 상반관계(Trade-Off)를 보이는데, 질소산화물의 저감을 위해 연소 화염 온도를 감소시키는 기술을 적용하면 매연(연료소비율)이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 대부분의 디젤엔진이 Bosch형 연료분사계를 적용하여 연료분사시기, 연료분사압력 및 연료분사율 등이 엔진 운전 중에는 변경이 불가능하여 연소실내의 연소조건(엔진 부하, 엔진 회전속도 등)의 변화에 대응할 수 없는 것이 주원인이다. 그림 9에서는 디젤 연료분사계

에서 여러 변수가 엔진 성능에 어떤 영향을 미치는지를 나타내고 있다.

최근 육상용 디젤엔진을 시작으로 해서, 선박용 디젤엔진에까지 커먼레일 분사 시스템의 적용이 이루어지고 있다. 커먼레일 분사시스템은 커먼레일이라 불리는 일정한 체적을 가진 공간에 높은 압력으로 디젤 연료를 공급시키고, 연료분사밸브에서 연소실의 조건(엔진 부하, 엔진 회전속도 등)에 맞추어 연료분사시기, 연료분사기간(연료분사량) 등이 엔진 운전 중에도 최적으로 제어되어, 연료가 연소실로 공급되는 시스템이다. 그림 10은 독일 MTU사에서 적용한 커먼레일 연료분사 시스템의 예를 보인다.

커먼레일 연료분사 시스템에서 연료분사압력(커먼레일 압력)은 엔진 운전 중에도 바꿀 수 있어,

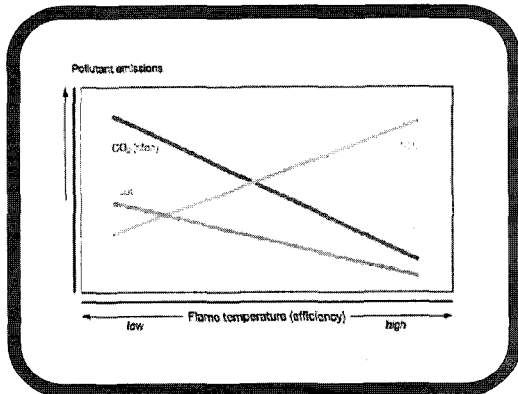


그림 8. 질소산화물과 매연의 상반관계

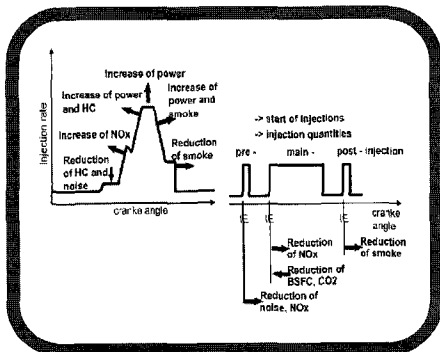


그림 9. 분사계의 엔진성능에 미치는 영향

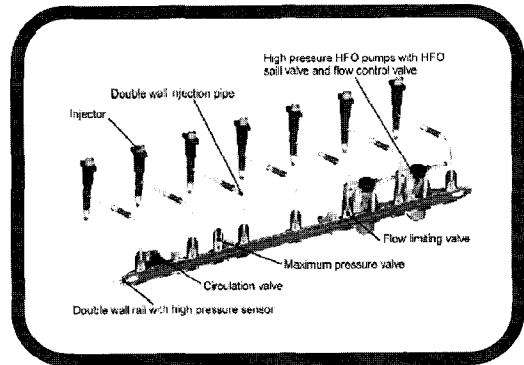


그림 10. MTU사의 커먼레일 분사시스템 예

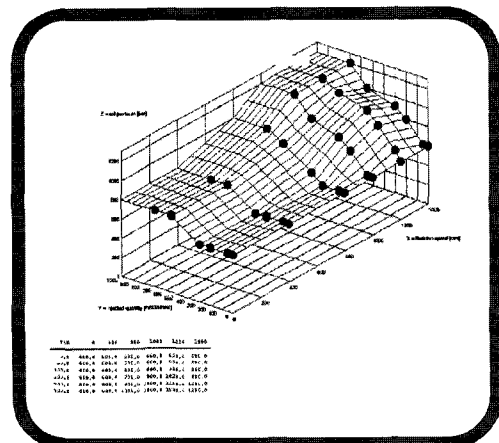


그림 11. 연료분사압력 제어 지도 (MAP) 예

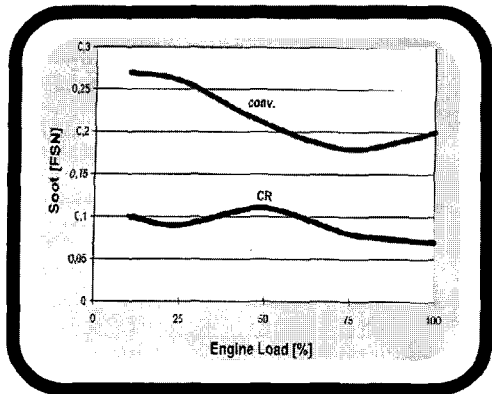


그림 11 커먼레일 연료분사시스템 적용 예

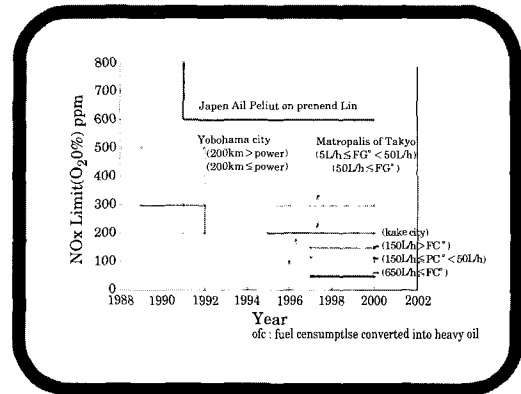


그림 13 일본 도시의 환경규제 기준 예

연소실 상태에 따라 최적의 분사압력을 유지할 수 있다. 또, 연료분사시기와 연료분사기간(연료분사량)은 연료분사밸브에 설치된 전자밸브에 의해 주로 제어되는데, 크랭크축으로부터 크랭크 각도 신호에 따라 정확히 제어 가능하므로 연소실 상태에 따라 최적의 연료분사시기와 연료분사기간을 유지할 수 있다. 따라서 그림 8에 나타난 질소산화물과 매연(연료소비율)의 상반관계에서 양쪽 모두 낮은 배출 수준을 유지하며 엔진 운전이 가능하다.

그림 11은 엔진 회전속도와 연료분사기간에서 연료분사압력의 제어 지도(MAP) 예를 나타내고, 그림 12는 Bosch형 연료분사 시스템을 사용하는 디젤엔진(conv.)을 커먼레일 연료분사 시스템을 적용했을 때(CR) 매연의 저감 정도를 나타내고 있다.

(5) 디젤엔진의 가스엔진화 (Power Plant)

육상 Power Plant에 사용되는 왕복동 엔진은 지금까지 대부분이 디젤엔진이었다. 발전소 건설시 지리적 또는 지역적 문제, 발전용량(소용량)에 있어 문제가 있을 때에는 디젤엔진 또는 터빈을 운전하여 전기를 생산하는 내연발전소를 건설하였다. 그러나, 최근에는 하절기의 전기 부족 및 가스연료의 보관 등 국가 에너지 관리 측면, 백화점, 병원 등의 대형화에 따른 에너지 소비 집중화, 대도시의 대기오염 심화, 지역 이기주의에 의한 신규 발전소 건설의 어려움 등으로 도시에서는 건물내에 분산형 발전 시스템을 많이 설치하고 있는 추세이며, 이 시스템에 사용되는 원동기의 사용연료를 가스

연료로 하고 있다.

가스연료는 도시가스를 사용하는데, 분산형 발전 시스템의 원동기로 사용되는 왕복동 엔진은 디젤엔진을 기본으로 하여 가스엔진으로 개발한 것이 대부분이다. 외국의 경우에도 가스연료의 수송, 저장문제로 보편화가 되지 못하다가 약 10년전부터 도시가스망의 확충과 대도시 환경규제 강화에 의해 그 수요가 폭발적으로 증가하고 있는 추세이다. 그림 13은 일본 대도시의 NOx 규제 기준의 예를 나타내는 것으로 디젤엔진으로는 규제 기준을 만족할 수 없는 수준이다.

그림 14에는 가스엔진의 연소방식을 크게 3가지로 구분하여 나타내고 있다. (1)번 방식은 예연소실식 희박연소 방식으로 주연소실에 희박혼합기를 흡기포트를 통해 흡입행정 에 주연소실로 공급하고, 압축행정 후반에 예연소실로 가스연료를 공급, 점화플러그를 이용하여 점화시킨 후, 주연소실을 연소시키는 방식이다. 압축된 예연소실로 가스연료를 공급하기 위해 가스 압축기가 추가적으로 필요하며, 점화플러그의 내구성 향상 문제가 남아 있다. (2)번 방식은 이중연료(Dual-Fuel) 연소방식으로 희박혼합기를 흡기포트를 통해 흡입행정 에 연소실로 공급하고, 압축행정 말기에 디젤연료(전체 혼합기 열량의 5~10%)를 분사, 자기착화 후, 연소실의 가스혼합기를 연소시키는 방식이다. 엔진에서 질소산화물의 배출이 주로 초기에 분사된 디젤 연료량에 의해 지배를 받고 있으므로, 이 연소방식은 질소산화물의 배출이 많아, 현재는 분산 발

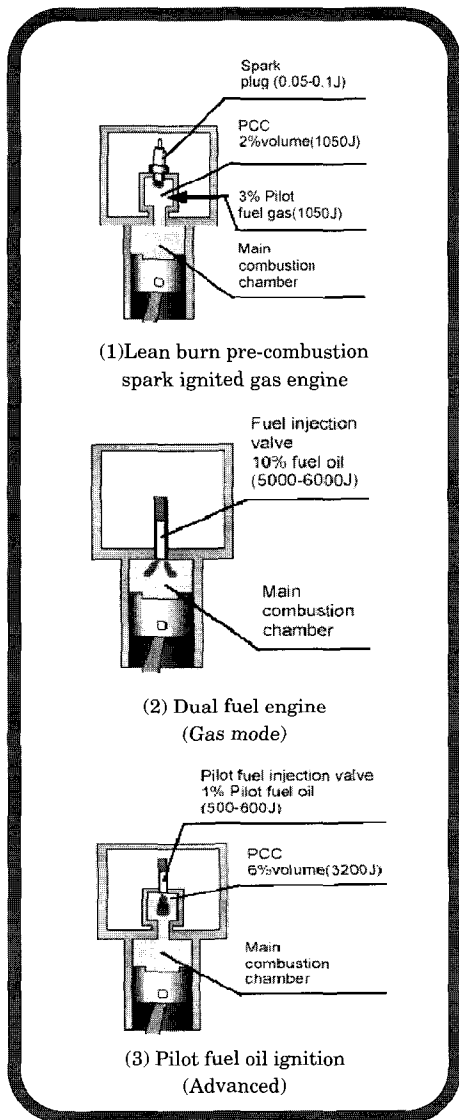


그림 14. 가스엔진의 연소 개념 예

전 시스템에서는 사용하지 않는 방식이다. (3)번 방식은 (1)번 방식과 유사하지만 점화플러그 대신, 디젤연료(전체 혼합기 열량의 1%)를 분사(Micro Pilot Injection), 자기 착화된 화염이 주연소실을 연소시킨다. 이 방식은 최근 개발된 방식으로 (1)번 방식의 문제점을 보완하고, (2)번 방식의 문제점도 나타내지 않는 특징을 가지고 있으며, 디젤연료의 분사는, 앞에서 언급한 커먼레일 분사 시스템을 활용하고 있다.

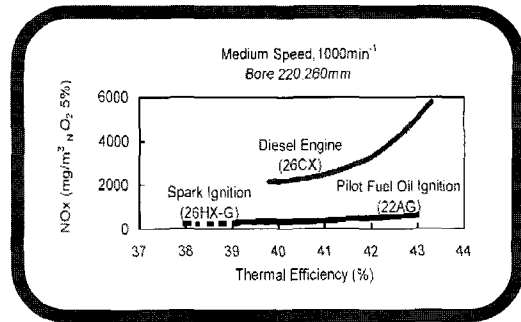


그림 15. Micro Pilot 가스엔진의 성능 예

그림 15에서는 Micro Pilot 연료분사 시스템 적용 가스엔진의 성능 예를 나타낸 것이다.

3. 결 론

중속 4행정 디젤엔진에 주어진 내·외적 요구조건은 계속 증가하고 있으며, 선진 외국의 엔진 제작사들은 그 동안의 축적된 신기술을 활용하여 기존 엔진의 고성능화를 이루고, 첨단 기술을 적용한 새로운 엔진을 개발·발표하고 있다.

우리나라의 경우, 자동차산업에서는 자동차용 엔진의 연구·개발에 대한 상당한 실적이 있으나, 조선산업에서는 세계 1위의 생산국을 자랑하지만 선박용 엔진의 연구·개발 실적은 최근의 한 예를 제외하고 거의 없다. 또, 국내에서 생산되는 선박에 설치되는 대부분의 엔진은 기술제휴에 의해 조립·생산되어 매년 많은 기술료가 지불되고 있는 실정이다. 또한 기술제휴에 의한 엔진 생산은 엔진에서 가격점유율이 높은 과급기, 연료분사 시스템 등의 해외 의존도를 지속화시키고 있는 실정이다.

조선산업에서의 세계 1위를 유지하고, 관련 산업의 성장을 위해서도 디젤엔진뿐만 아니라 핵심 부품에 대한 신기술 개발은 산·학·연이 연계되어 반드시 이루어야 할 과제로 생각한다.