

## Miller 사이클을 이용한 중형 디젤 기관 성능 개선

김동훈\* · 김기두\* · 하지수\* · 김호익\*\* · 김주태\*\*

### Improving the Performance of a Medium Speed Diesel Engine Using Miller Cycle

D-H Kim\* · K-D Kim\* · J-S Ha\* · H-I Kim\*\* · J-T Kim\*\*

**Key words** : Medium Speed Diesel, Miller Cycle, Performance Simulation, Fuel Consumption, Low NOx

#### Abstract

Miller cycle was studied and analyzed by engine performance simulation to achieve very low fuel consumption and to meet the IMO NOx regulation on a medium speed diesel engine. Based on the performance simulation results the intake valve closing time for HYUNDAI HiMSEN 6H21/32 engine was set at 0deg.ABDC(After Bottom Dead Center). Also, the simulation results indicated that significant NOx reduction could be achieved with low reduction of fuel consumption. The performance simulation investigated the effect of compression ratio and turbocharger on fuel consumption and NOx concentration in combination with Miller cycle. The results indicated a significant reduction of fuel consumption with keeping NOx concentration.

The results of performance simulation were compared with measured data to verify simulation results. The comparison showed the maximum error was 2.34% in exhaust temperature. Also, the experimental result showed that improvement in BSFC(Brake Specific Fuel Consumption) was 5.8g/kWh with keeping NOx level similar to simulation result.

#### 1. 서 론

현재의 중·대형 디젤 기관은 점차 강화되고 있는 유해 배출가스 규제를 극복해야 할 뿐만 아니라, 경제적인 면에 있어서 연료소비량의 저감도 동시에 달성해야 한다. 그러나 연료소비량 저감 방법과

유해 배출가스, 특히 현재 IMO (International Maritime Organization)의 규제 대상인 질소산화물(NOx)의 저감 방법은 서로 상반되는 경향이 있어 기관 개발 및 생산에 어려움이 많다. 연료소비량 및 유해 배출가스를 저감하는 방법 중, 기관 요소 및 운전조건을 변경하는 방법은 특별한 장치가

\* 현대중공업 산업기술연구소 에너지·환경연구실  
\*\* 현대중공업 엔진기계사업본부 엔진개발부

필요하지 않아서 경제적이거나, 그러한 최적 조건을 찾는 것은 어려우며, 많은 경험과 측정 데이터가 요구된다. 그러나 중·대형 디젤 기관과 같이 여러 가지 면에서 실험 여건이 충분하지 않은 경우에는 근래 급격한 발달로 그 신뢰성이 증대되고 있는 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 유용하다. 성능 해석 기술은 전용 S/W를 이용하여 기관의 주요 제원 및 운전 조건에 따라 기관의 성능을 예측하는 기술이다. 그러므로 중·대형 기관의 개발 시, 성능 해석 기술은 연료소비량 및 유해 배출가스 등의 주요 성능에 최적인 기관 사양 및 운전 조건을 결정하는데 유용한 기술이다.

저자의 회사에서는 세계 최고 수준의 기관 개발을 목표로 많은 노력을 하였으며, 주요 해결 과제 중의 하나가 저연비 및 저NOx를 동시에 달성하는 것이었다. 이를 위한 최근의 기관 개발 동향은 압축비를 16 이상으로 하고, 연소실 최고 압력을 200bar, 연료분사압력을 2000bar 정도로 하여 연료소비량을 개선하고, 이와 더불어 연료분사시기를 TDC(Top Dead Center)에 가깝게 함으로써 NOx 배출량을 줄이고 있다. 이와 더불어 높은 Bore/Stroke 비와 Miller Cycle을 적용하여 고효율, 저연비 및 저NOx의 HYUNDAI HiMSEN H21/32 기관을 개발하였다.

본 연구에서는 Miller 사이클에 대해 이론적으로 정리하였으며, 기관 성능 해석을 통해 Miller 사이클을 HYUNDAI HiMSEN 6H21/32 기관에 적용하였을 때의 성능 특성을 분석하고, 연료소비량 및 NOx 측면에서 최적이 되도록 기관 압축비와 과급기의 변경에 대한 성능 특성을 해석하였다. 또한 성능 해석 결과에 많은 영향을 주는 연료분사율의 데이터를 얻기 위해 연료분사계 해석도 수행하였다. 성능 해석 및 연료분사계 해석 결과는 실기관에서 측정된 데이터를 이용하여 검증하였다. 그리고 실험을 통해 Miller 사이클의 유용성을 검토하였다.

## 2. Miller 사이클

기관의 열역학적 사이클 중, 팽창행정이 압축행정보다 더 큰 사이클을 일반적으로 Atkinson 사이

클이라 총칭한다. 이 사이클은 충분한 팽창행정으로 일을 더 얻을 수 있다. 이상 공기 표준 복합 사이클 및 Atkinson 사이클의 효율을 각각 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

복합 사이클 효율=

$$1 - \frac{1}{\gamma_c^{\alpha-1}} \frac{\alpha \cdot \beta - 1}{(\alpha - 1) - \alpha \cdot x (\beta - 1)}$$

Atkinson 사이클 효율=

$$1 - \frac{1}{\gamma_c^{\alpha-1}} \frac{\alpha^{1/x} \beta - 1}{(\alpha - 1) + \alpha \cdot x (\beta - 1)}$$

여기서,  $\alpha$ 는 정적 가열동안의 압력비,

$$\beta(\text{차단비}) = \frac{\gamma_c}{\gamma_e}, \gamma_c : \text{압축비}, \gamma_e : \text{팽창비}, x : \text{비열비}$$

복합 사이클의 압축비와 팽창비가 동일하고, Atkinson 사이클의 압축비가 팽창비보다 적은 경우에 대해 식 (1), (2)에 타당한 값을 적용하여 계산하면, Atkinson 사이클 효율이 복합 사이클 효율보다 큼을 알 수 있다. 그러나 Atkinson 사이클을 현실화하는 것은 기계적인 어려움이 있다.

Miller는 압축일을 줄이기 위해 흡기밸브를 일찍 닫는 기관 사이클을 제안하였다. Atkinson 사이클을 현실화하는 하나의 방법으로서, 흡기밸브 닫힘각을 BDC(Bottom Dead Center)에서 멀리하면 유효 압축비가 줄어 사이클 효율을 좋게 할 수 있다. 최대 유효 압축비는 흡입공기의 관성으로 인해, BDC 이후 30~40deg.에서 생성되고, 그 보다 빠르거나, 늦을수록 유효 압축비가 작아지는 것으로 알려져 있다. 그러므로 Miller 사이클은 동일 팽창비에서 유효 압축비를 줄이는 것이 가능함으로써, 사이클 효율이 개선된다. 또한 압축압력을 낮출 수가 있어, 가스 및 가솔린 기관에서는 노킹(Knocking) 방지를 위해 많은 적용사례가 있으며, 디젤 기관에서는 NOx 저감을 위해 적용되고 있다.

Chute<sup>[1]</sup>는 Miller 사이클에 대한 컴퓨터 시뮬레이션으로 5~7%의 기관 성능 개선을 나타냈으며, Bolton 및 Assanis<sup>[2]</sup>는 과급기가 장착된 디젤 기관의 고부하 성능과 연료소비량을 극대화하기 위한

최적의 흡·배기 시스템 결정을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하였다. 이들은 EIVC(Early Intake Valve Closing)의 성공은 요구되는 흡기압력을 달성하는 것에 있으며, 결국 과급기의 효율에 영향을 많이 받을 것으로 보았다. Stebler<sup>[3]</sup> 등의 연구에서는 Miller 시스템을 이용하여 고부하 영역에서 NOx를 20% 저감하고, 연료소비율을 0.5~2% 저감하는 결과를 보여주었다. 그러나 저부하에서 공연비의 감소가 발생하여 'Variable Turbine Nozzle Geometry'의 필요성을 제안하였다.

Miller 사이클의 단점은 흡기밸브 열림 시간이 적어져, 흡입공기량이 적어진다는 것이며, 이를 개선하기 위해 2단 과급 시스템을 채용하는 사례도 있다. 그리고 흡입공기량의 증가를 위해 흡기압력을 상승시키면 이에 따른 배기압력의 상승이 사이클 효율을 저하시키므로 이 또한 시스템 설계에 주요 고려 사항이다. 이러한 단점을 극복하는 가장 좋은 방법은 기관에 적절한 고효율의 과급기를 선정하는 것이다.

### 3. 연료분사계 해석

기관 성능 해석의 주요 결과인 연료소비량과 NOx는 연소과정에 직접적인 영향을 받는다. 기관의 연소과정에 영향을 주는 인자는 많으며 대부분은 성능 해석 자체와 관련되어 있으나, 연료분사율은 입력되어야 하는 데이터이다. 그러므로 올바른 성능해석 결과를 얻기 위해서는 정확한 연료분사율의 데이터를 얻는 것이 필요하다.

연료분사율의 데이터를 얻기 위해서는 전용 실험 장치나, 연료분사계에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 후자의 시뮬레이션 방법을 이용하여 연료분사율 데이터를 확보하였다. 본 해석의 검증을 위해서는 연료분사율의 측정 데이터가 필요하나, 이는 전용 실험 장치에 의해서만 측정이 가능하므로, 본 연구에서는 H21/32 기관의 연료분사 펌프 측의 압력 측정 데이터를 이용하여 해석 검증을 수행하였다.

연료분사 시스템의 해석은 1 차원 정상/비정상 유동 해석 S/W인 FLOWMASTER를 이용하였다.

#### 3. 1 연료분사계의 모델링 및 해석

Fig. 1에 H21/32 기관 연료분사계의 전체적인 구조를 나타내었다. 연료펌프는 고압분사가 가능하도록 설계하였으며, 인젝터의 경우 니들의 열림 압력이 최적이 되도록 니들(Needle)밸브의 스프링 상수 및 'Pre-load distance'를 설정하였다. 송출 밸브의 경우 다소 크게 설계되었는데 이는 송출 밸브 내부에 등압 밸브가 존재하는 특이한 구조로 송출 밸브를 설계하였기 때문이다.

분사 펌프는 플런저실의 체적, 유입 및 유출 포트의 열림 면적이 캠의 리프트에 따라 변화하도록 모델링 하였으며, 일체형으로 설계된 송출밸브와 등압 밸브는 모델링의 편의를 위하여 각각을 분리하여 모델링 하였다. 니들 밸브는 노즐실의 연료압력이 450bar에 이르면 밸브가 열리게 되고 니들의 리프트에 따라 밸브의 열림 면적이 변화하도록 하였으며, 노즐의 분무공은 분무공 각각을 개별적으로 나타내지 않고 하나의 요소에 분무공의 전체 면적과 유출 계수를 설정하는 방식으로 간략히 모델링 하였다.

연료분사계의 해석을 검증하기 위해 연료분사 펌프의 압력과 연료소비량의 계측 데이터가 필요하며, 0.32×10(분무공의 직경이 0.32mm이고 개수가 10개) 노즐에 대하여 연료분사계 해석을 수행하였다. 해석 조건은 기관의 회전속도가 900 rpm일 때 각 부하 조건 25, 50, 75, 90 및 100%로 하였다.

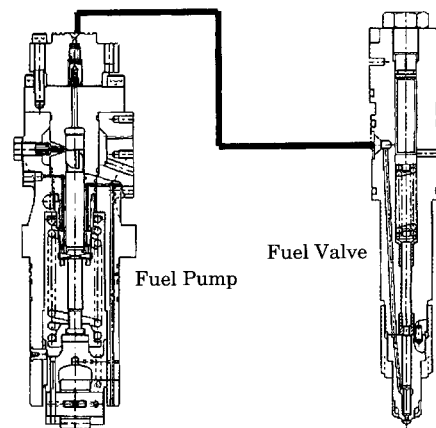


Fig. 1 Fuel injection system

### 3.2 연료분사계 해석 결과

Fig. 2에는 0.32×10 노즐에 대하여 25, 50, 75 및 100% 부하에서 해석 결과와 측정된 연료분사 펌프 압력을 비교하였다.

전 부하에 걸쳐 계측 결과와 해석 결과가 거의 동일한 경향을 나타내므로, 연료분사계의 모델링 및 해석 결과가 상당히 신뢰성이 있음을 알 수 있다. 특히, 압력의 상승과정이나 유출 포트의 열림 이후에 압력이 감소하는 경향을 비교해 볼 때, 체적탄성계수와 음속 등의 연료 특성, 유입 및 유출 포트 그리고 송출 밸브와 니들 밸브의 모델링이 적절함을 간접적으로 확인할 수 있다. 그러나, 유출 포트의 열림 직후에 압력의 하강 시점이 부하에 따라 조금씩 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이는 해석의 입력 값인 'Fuel Rack Index'의 보다 정확한 계측으로 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 송출 밸브의 닫힘 이후 압력이 잔압으로 감쇠하는

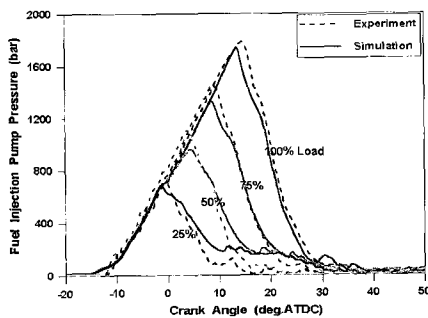


Fig. 2 The verification of analysis results on the fuel injection pump pressure

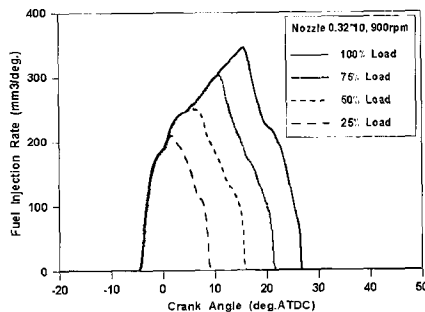


Fig. 3 The calculated injection rate

과정에서 해석 결과가 계측 결과보다 상당히 느리게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 송출 밸브의 밸브 바디와 시트가 선 접촉이 아닌 면 접촉 상태로 설계되어 있으므로, 연료의 누설로 인해 계측 결과의 압력이 급격히 감소하였을 가능성이 큰 것으로 생각된다.

Fig. 3에 0.32×10 노즐의 연료분사율에 대한 해석 결과를 부하 별로 비교하여 나타내었다. 그리고 이 데이터는 성능해석의 입력 데이터로 사용되었다.

## 4. 성능해석

### 4.1 성능해석 모델링

해석 대상 기관은 과급기가 장착되어 있는 직접 분사식 디젤기관이며 주요 제원은 Table 1과 같다.

성능해석은 운전조건 변경에 따라 NOx, 연소실 최고 압력 및 배기가스 온도 등이 정확히 계산되어야 하므로, 이의 결과에 영향을 많이 주는 연소 과정에 대한 해석이 병행되어야 한다. 이의 방법으로는 연소실내 공기유동, 연료의 분사 및 분무 해석을 포함하는 3차원 연소해석을 수행하여 연소 상태를 파악하는 방법이 있다. 그러나 이는 해석에 많은 시간이 필요하며 해석의 정확성을 확보하는 것에 어려움이 있다. 다른 방법으로는 디젤 연소의 특성을 반영하여 수립된 연소 모델을 이용하여 연소 과정을 해석하고 이를 성능 해석에 반영하는 것이다. 이 방법은 비교적 간단한 연소모델을 통해 해석 시간을 크게 줄일 수 있으나 정확한 연소 해석 결과를 위해서는 많은 실험 데이터에 근거한 경험적인 계수값들을 필요로 한다. 근래의 성능해석 S/W는 후자의 방법을 사용하고 있다.

Table 1 Engine specifications

Engine Type	Direct Injection, Turbocharged, 6 Cylinder Diesel
Bore × Stroke	210 × 320 mm
Rated Power	200 kW/cyl.
Rated Engine RPM	900 rpm
Turbocharging System	Pulse Type

연소해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 연료분사율, 과급기 선도, 흡·배기계 유량계수 등이 정확히 입력되어야 한다. 즉, 압축압력 및 흡입공기량이 정확해야 착화 지연 및 열발생율의 계산이 정확하며, 그럼으로써 배기되는 연소가스의 온도 및 유량과 이에 따른 과급기 터빈일 및 압축일도 정확히 해석된다. 또한 이의 결과로 도출되는 흡기압력, 흡입공기량 등도 바르게 계산된다. 결국, 모든 관련 요소가 정확히 입력 및 모델링되어야 올바른 결과를 얻을 수 있다.

연료분사율은 연소 과정에 크게 영향을 미치는 주요 인자로서 본 연구에서는 연료분사계 해석을 통하여 입수하였다. 과급기 모델링은 흡기 및 배기압력과 흡입공기량을 좌우하는 요소로서 과급기 선도가 필요하다. 흡·배기계의 모델링은 흡입공기량 및 흡기압력 등에 영향을 주는 인자로서 이를 위한 흡·배기계의 형상, 즉 각 관로의 지름 및 길이는 실제 기관 데이터를 이용하여 모델링하였으며, 벽면의 온도는 측정 데이터를 이용하여 입력하였다. 흡·배기 밸브의 유량계수도 성능에 미치는 영향이 큰 것으로서, 본 연구에서는 기관 헤드 전용 유량계수 측정장치에서 계측된 데이터를 입력하였다.

연소 해석에서 결정해야 할 주요 요소는 연소모델 계수이다. 성능해석 S/W에 포함되어 있는 연소해석 모듈은 일반적으로 실험식 등에 의존하므로 해석 대상 기관에 적절하게 연소모델 계수를 수정해야 해석 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 'Diesel Jet Combustion Model'을 사용하였으며, 이에는 연소실내 공기 및 연소가스 움직임, 분사된 연료의 공기내의 침투 거리, 연소실내 열전달 등과 관련된 계수가 포함되어 있다. 그 동안 저자의 회사에서는 연구용 단기통 기관 등을 이용하여, 중형기관에 최적인 이들 계수 값을 찾기 위해 많은 노력을 하였다.

연소실내 열전달도 기관 성능에 많은 영향을 준다. 성능해석에 필요한 연소실 벽면의 온도는 측정 데이터를 이용하였다.

기관의 마찰평균유효압력(FMEP)은 연료소비량의 계산 등에 많은 영향을 주므로 해석 대상 기관에 적절히 모델링되어야 하며, 본 연구에서는 측정 데이터의 도시평균유효압력(IMEP)와 제동평

균유효압력(BMEP)을 이용하여 모델링하였다.

성능해석 S/W는 RICARDO사의 WAVE를 사용하였다.

#### 4.2 성능해석 검증

성능해석 결과를 검증하기 위하여 실 기관에서의 측정 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. 측정 결과와 해석 결과가 배기가스 온도에서 최대 1.97%의 오차를 보이고 있으며, 연료소비율, NOx 배출을 및 연소실 최고 압력 등, 성능관련 주요 데이터는 모두 2% 이내의 오차 범위를 가지고 있으며, 이로써 해석결과의 타당성을 검증할 수 있었다.

Table 2 Comparison of experiment and simulation results

	Experiment	Simulation	Error (%)
SFOC(g/kWh)	192.8	193.2	0.21
NOx(g/kWh)	10.52	10.559	0.37
Maximum cylinder pressure(bar)	189.37	188.2	-0.62
Intake pressure(bar)	3.8	3.79	-0.26
Exhaust temperature(°C)	473.6	483.1	1.97
Air flow rate(kg/h)	9097	8990	-1.19
Turbocharger RPM	49590	49658	0.14

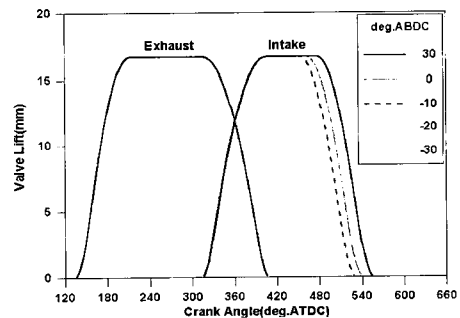


Fig. 4 The valve lift of intake & exhaust

#### 4.3 Miller 사이클 해석

흡기밸브 닫힘각이 6H21/32 디젤기관의 성능에

미치는 영향을 파악하고, 최적의 운전 조건을 결정하기 위해 성능해석을 수행하였다. 흡기밸브 닫힘각을 흡기 행정의 BDC에 대해 크랭크 각도로 -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30 및 46도로 바꾸어 가면서 해석을 수행하였다. Fig. 4에 해석 조건의 흡·배기 밸브 리프트(Lift)를 나타내었다. 이때 다른 기관 운전조건은 모두 동일하게 하여 흡기밸브 닫힘각만이 기관 성능에 영향을 끼치도록 하였다. 기관 기본 제원, 과급기 사양, 및 운전 조건 등은 6H21/32 기관과 동일하다.

Fig. 5에 흡기밸브 닫힘각의 변화가 연소실의 압력-체적선도(P-V 선도)에 미치는 영향을 나타내었다. 또한 기관의 유효 압축비를 파악하기 위해 흡기압력도 같이 나타내었다. 유효 압축비의 정의는 실린더 압력이 흡기밸브가 열려 있는 동안의 흡기 평균 압력과 같아지는 크랭크 각도에서의 실린더 체적을 틸새 체적으로 나눈 것이다. Fig. 5에서 -20deg.ABDC 조건의 흡기밸브 닫힘각은 흡기 구

간에서 실린더 압력이 서서히 상승하다가 실린더 체적/연소실 체적이 14이후부터 흡기밸브가 닫힘에 따라, 급격히 팽창하기 시작하여 실린더 체적/연소실 체적이 16이 되면 실린더 압력이 최저가 되고, 압축하기 시작한다. 그리고 Fig. 5의 A점에서 실린더 압력과 흡기 압력이 동일하게 되며, 이후, 크랭크 샤프트가 회전함에 따라 압축이 이루어진다. 그러므로 형상에 따른 압축비 16과 달리 실제 유효 압축비는 A점에 해당하는 13.75이다. 마

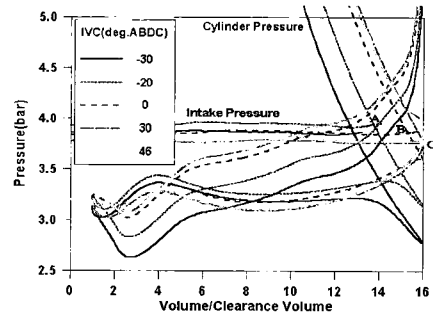


Fig. 5 Variation of P-V diagram by inlet valve closing time(IVC)

Table 3 Simulation result of the each case

Case	SFOC (g/kWh)		NOx (g/kWh)	
	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
1 Base	193.2	192.8	10.559	10.52
2 IVC	192.2	-	9.689	-
3 IVC, TC	191.3	-	9.489	-
4 IVC, TC, CR	189.9	187	10.509	10.5

Table 4 Simulation results of case 4

	Experiment	Simulation	Error (%)
SFOC(g/kWh)	187	189.9	1.53
NOx(g/kWh)	10.5	10.509	0.09
Maximum cylinder pressure(bar)	198.9	195.5	-1.74
Intake pressure(bar)	3.86	3.874	0.36
Exhaust temperature(°C)	459.4	448.9	-2.34
Air flow rate(kg/h)	8920.8	9020	1.10
Turbocharger RPM	46614	47439	1.74

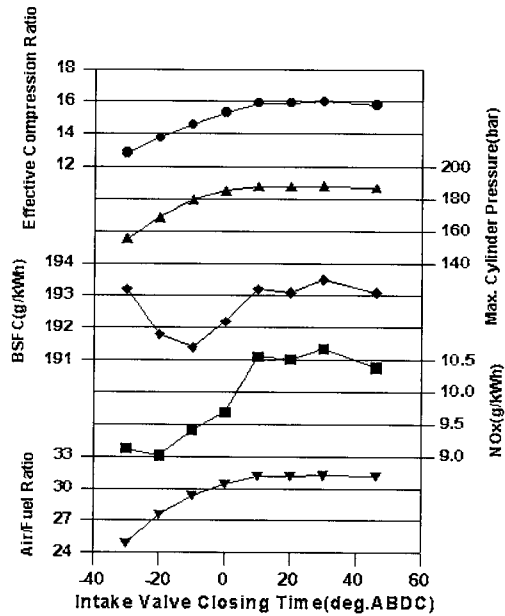


Fig. 6 Variation of engine performance by inlet valve closing time at 100% load

찬가지로 0deg.ABDC인 흡기밸브 닫힘각은 B에서 실제 압축이 이루어져 15.3의 유효 압축비를 갖으며, 30deg.ABDC인 경우 유효 압축비가 형상에 의한 압축비와 동일한 16이다.

Fig. 6에 흡기밸브 닫힘각에 따른 기관의 성능 특성을 나타내었다. 유효 압축비는 10 deg. ABDC 이전에 닫히는 경우에는 닫힘이 빠를수록 급격하게 작아지며, 30deg.ABDC에서 최대인 16이 되고, 그 이후로 약간 감소하고 있다. 최대 값이 나타나는 위치가 BDC 이후 30deg.에서 발생하는 것은 흡입 공기의 관성때문이며, 그 이후 감소하는 경향은 상당히 적어, 기존에 알려진 BDC 이후의 낮은 유효 압축비를 이용하는 방법은 본 기관에 적용 가능성이 적은 것으로 판단된다.

유효 압축비와 밀접한 관계가 있는 실린더 최고 압력은 그 경향이 유효 압축비와 유사하며, 이는 유효 압축비가 적어지면, 실린더 압축압력이 적어지며, 이에 따라 실린더 최고 압력도 적어지는 것에 기인한다.

연료소비율은 -10deg.ABDC에서 최소를 보이며, 흡기밸브 닫힘각을 더 느리게 하면 점차 상승하여, 30deg.ABDC에서 최대를 보인다.

NOx의 배출율은 30 deg.ABDC에서 최대를 보이며, 밸브 닫힘각을 빠르게 하면 급격히 감소하여, -20deg.ABDC에서 최소를 보인다. NOx의 배출을 저감은 유효 압축비가 낮아짐에 따라 압축 압력 및 연소실 압력의 저하에 기인한 것으로 판단된다.

실린더로 유입된 공기/연료비는 흡기밸브 닫힘각이 빨라짐에 따라 적어지며, 이는 흡기밸브 열림 시간이 줄어들어 따른 결과이다.

기관 성능의 주요 관심 사항인 연료소비율과 NOx 배출율로 판단할 때, 결과적으로 -10deg.ABDC에서 최적의 성능을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 이때의 공연비가 30이하로 되고, 이로 인한 저부하에서의 스모크(Smoke) 발생이 우려되므로 최적 값은 0deg.ABDC로 결정하였다.

#### 4. 4 최적 운전 조건 성능해석

6H21/32 기관의 흡기밸브 닫힘각(IVC) 10deg.ABDC에서 0deg.ABDC로 바꾸어 성능해석을 수행하였다. 또한 연료소비율 및 NOx 배출율을

개선하기 위해 과급기 및 기관 압축비를 바꾸었다.

Table 3에 100% 부하조건에 대해, 각 Case에 대한 연료소비율 및 NOx 배출율을 나타내었다. Case 2는 Case 1을 기본으로 하여 흡기밸브 닫힘각을 10도 줄였을 때의 성능 해석 결과이다. 연료소비율은 1g/kWh, NOx는 0.87g/kWh의 개선이 예측되었다. 즉 NOx는 8.2% 정도 줄었다. Case 3은 Case 2에서 과급기의 터빈 노즐링 면적이 작은 것으로 바꾸었으며, 이를 통해 연료소비율은 0.9g/kWh, NOx 배출율은 0.2g/kWh 개선이 예측되었다. Case 4는 Case 3에서 기관 압축비를 1 높이는 것에 대한 성능해석 결과이며, 1.4g/kWh의

연료소비율 개선 및 1.02g/kWh의 NOx 증가가 있었다.

전체적으로 흡기밸브 닫힘각, 과급기 및 기관 압축비를 변경하여 연료소비율을 3%인 5.8g/kWh의 개선 효과가 실험적으로 판명되었으며, 이는 Miller 사이클을 통한 NOx 저감으로 가능한 것으로 판단된다.

Case 4에 대하여 실험한 결과와 비교를 하였으며 이를 Table 4에 나타내었다. 해석 결과의 최대 오차는 배기가스의 온도에서 2.34%로 모두 만족할 만한 결과를 보여 해석 결과의 신뢰성을 판단할 수 있었다.

## 5. 결 론

성능 해석 기술을 이용하여 중형 디젤기관 HYUNDAI HiMSEN 6H21/32 기관에 Miller 사이클 적용, 기관 압축비 및 과급기 변경을 통한 성능개선 방안을 도출하였으며, 성능 해석의 신뢰성 있는 결과를 위해 연료분사계 해석도 수행하였다.

6H21/32 기관에서 측정된 연료분사계 및 기관 성능을 해석된 데이터와 비교하였으며, 그 결과 주요 성능 관련 요소에서 최대 2.34%의 에러를 보여 해석 결과의 신뢰성을 확보하였다.

성능 해석을 통하여 6H21/32 기관은 흡기밸브 닫힘각이 0deg.ABDC인 Miller 사이클에서 기존 운전조건 보다 연료소비율이 1g/kWh 저감되고, NOx 배출율이 8.2%인, 0.87g/kWh 저감됨을 확인하였으며, 이에 따라 Miller 사이클은 NOx 저감에

효과적인 방법임을 알 수 있었다.

흡기밸브 닫힘각, 과급기 및 기관 압축비를 변경한 기관 실험을 통하여 NOx 배출율의 변화없이 연료소비율을 3%인, 5.8g/kWh의 개선 효과가 입증되었으며, 이에 따라 HYUNDAI HiMSEN 6H21/32 기관의 성능 개선을 이룩하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Chute, "Pressure Compounding a Four-Cycle Diesel Engine" SAE paper 851510, 1985
- [2] B. K. Bolton and D. N. Assanis, "Optimum Breathing Strategies for Turbocharged Diesel Engines Based on the Miller Cycle Concept" ASME ESDA Conference, Vol. 64-8.2, pp. 253-262, 1994
- [3] H. Stebler, K. Boulouchos, M. K. Eberle, M. Geist and I. Vlaskos, "Reduction of NOx-Emissions of a Medium Speed D.I. Diesel Engine Using Miller System, Exhaust Gas Recirculation, Variable Nozzle Turbocharger and Common Rail Injection" CIMAC Congress, pp. 857-866, 1998