

# 저압라인 EGR을 적용한 대형 디젤엔진의 EURO-4 규제 대응 전략에 관한 수치적 연구

하 창 현<sup>1)</sup> · 이 승 재<sup>2)</sup> · 이 교 승<sup>3)</sup> · 전 광 민<sup>4)</sup>

현대자동차<sup>1)</sup> · 연세대학교 기계공학과 대학원<sup>2)</sup> · 경기공업대학 자동차과<sup>3)</sup> · 연세대학교 기계공학과<sup>4)</sup>

## Numerical Study on Strategy of Applying Low Pressure Loop EGR for a Heavy Duty Diesel Engine to Meet EURO-4 Regulation

Changhyun Ha<sup>1)</sup> · Seungjae Lee<sup>2)</sup> · Kyoseung Lee<sup>3)</sup> · Kwangmin Chun<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>3)</sup>Department of Automotive Engineering, Kyonggi Institute of Technology, Gyeonggi 429-792, Korea

<sup>4)</sup>Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received 14 June 2005 / Accepted 16 September 2005)

**Abstract** : EGR system has been widely used to reduce NOx emission in light duty diesel engines, but its application to heavy duty diesel engine is not common yet. In this study, simulation model for EURO-3 engine was developed using commercial code WAVE and then verified by comparison with experimental results in performance and emission. Possibility to meet EURO-4 regulation using modified EURO-3 engine with LPL EGR system was studied. Each components of the engine was modeled using CATIA and WaveMesher. The engine test mode was ESC 13 and injection timing and quantity were changed to compensate engine performances, because applying EGR causes power reduction. As a results of the simulation, it was found that EURO-4 NOx regulation could be achieved by applying LPL EGR system to current EURO-3 engine even with some BSFC deterioration.

**Key words** : Heavy duty diesel engine(대형 디젤엔진), EURO-4(EURO-4 배기규제), Low pressure loop EGR(저압 라인 배출가스재순환), NOx(질소산화물), BSFC(연료소비율)

### Nomenclature

PM : Particulate Matter  
NOx : Nitrogen Oxides  
BSFC : Brake Specific Fuel Consumption  
EGR : Exhaust Gas Recirculation

### 1. 서론

전 세계적으로 열섬현상등의 온난화 문제로 이산화탄소 배출에 대한 인식이 점차 커지고 있으며 이와 더불어 배출가스 규제도 점차 강화되고 있다. 디젤엔진은 효율이 좋기 때문에 이산화탄소 배출이 상대적으로 적다. 과거 디젤엔진은 PM 중 soot 문제와 고속 운전이 힘들다는 등의 단점으로 대형 엔진에 주로 사용되었으나 최근 연료분사 방식의 발전과 전자 제어가 가능해짐으로서 소형엔진에까지 그 사용영역이 넓어지고 있다. 대형 디젤엔진의 경우

\*To whom correspondence should be addressed.  
leeks@kinst.ac.kr

그동안 관대한 규제로 특별한 제어장치 없이도 규제를 만족시킬 수 있었으나 최근 규제가 강화되어 대형 디젤엔진의 경우에도 커먼레일 및 EGR 시스템 등의 장치가 필수적이 되었다.

디젤엔진은 높은 공연비와 고압축비로 인한 NOx 제어가 가장 큰 문제로 손꼽히고 있다. 가솔린 엔진은 EGR과 삼원촉매에 의한 유해가스 제어가 비교적 쉽게 가능하지만, 디젤엔진에는 삼원촉매를 사용하기 어려운 점들이 있다.

NOx 저감을 위한 후처리 기술이 최근 몇 가지 개발이 되고 있지만 실차에 적용하기 어려운 단점이 있다. 현재 개발된 기술로는 유레아(urea)를 사용한 SCR(Selective Catalytic Reduction), LNT(Lean Nox Trap) 등의 기술이 대표적이거나 실차에 적용하기 위해서 유레아 공급망이 우선적으로 필요한 등의 문제가 있어 당장은 적용하기 힘든 실정이다.

NOx 저감을 위해 엔진 자체에서 원천 저감하는 방법으로 EGR을 들 수 있다. EGR은 배출가스를 실린더 내부로 신기와 함께 섞어서 넣어주는 기술이다. EGR로 인해 실린더로 유입되는 공기 중 산소 농도가 감소하여 NOx 발생률이 줄어들게 되고, 이 효과 외에도 높은 열용량을 가지고 있는 EGR에 의해 실린더 내부의 급격한 온도 상승을 막아 NOx 발생률이 줄어들기도 한다.<sup>1)</sup> 최근 EGR 기술은 대부분의 소형 디젤엔진에 이미 적용되고 있으며 강화된 규제에 대응하기 위해서는 EGR율의 증가와 더불어 실린더간 EGR 분배 편차가 5% 미만을 만족시켜야 한다고 알려져 있다.<sup>2)</sup>

EGR을 적용하는 방법에는 고압라인 배출가스 재순환(High Pressure Loop EGR)과 저압라인 배출가스 재순환(Low Pressure Loop EGR)이 있으며 HPL EGR의 경우 배기측과 흡기측의 압력차가 크지 않아 EGR율을 쉽게 높이지 못하므로 일반적으로 다른 부대장치가 필요하다는 단점이 있다.<sup>3,4)</sup>

본 논문에서는 EGR이 적용되지 않은 기존의 EURO-3 규제 대응 대형 디젤엔진을 대상으로 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교하여 수치해석의 타당성을 검증한 후, LPL EGR을 적용하고 LPL EGR 적용 EURO-3엔진이 EURO-4 규제에 대응할 수 있는지를 여러 가지 엔진변수를 변화시키며 검토하려 한다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석 대상 엔진

본 연구의 대상 엔진은 Table 1에 나타난 바와 같이 커먼레일이 적용된 8L급 대형 디젤엔진으로 직렬 6기통이며 EGR과 VGT가 적용되지 않았고, 터보차저(WGT)가 장착된 엔진이며 제작사는 두산 인프라 코어이다.

Table 1 Engine specification

Bore	108mm
Stroke	139mm
Displacement volume	7640cc
Max. power	320PS@2200rpm
Max. torque	135kgf · m@1200rpm
Compression ratio	16.6
Number of cylinders	6
Firing order	1-5-3-6-2-4
Firing intervals	120°CA

### 2.2 해석 방법

범용 프로그램인 WAVE를 사용하여 엔진 해석을 수행하였으며, 흡기 매니폴드의 각각의 치수, 곡률, 길이 등의 정확한 정보를 위해 Fig. 1과 같이 CATIA로 흡기의 형상을 모사하였으며 이들 기하학적 데이터를 WAVE 데이터로 변환하기 위해 Wave Mesher가 사용되었다. 컴프레서와 터빈맵은 실제 엔진의 맵을 그대로 적용하였고, 커먼레일 압력, 인터쿨러 전후단의 온도 및 압력, 연료 분사량, 연료 분사 시기, 흡배기 밸브의 리프트(lift), 각 덕트의 직경 및 길이 굴곡 등 최대한 실제의 엔진을 모사하였다. 또한 현시점에서 개발단계에 있는 LPL EGR 적

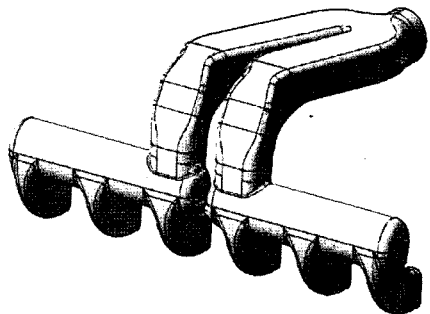


Fig. 1 3-D model of intake manifold

용 엔진의 시뮬레이션 결과를 실험으로 검증하는 것이 불가능하기 때문에, 먼저 기존 EURO-3 엔진을 해석하여 EURO-3 엔진의 실험데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교한 후, LPL EGR을 적용하기 위해 EGR 파이프의 직경 및 길이를 결정하고 EGR 적용으로 인해 감소한 토크를 보상하기 위해 엔진 입력 변수를 조정하였다.

2.3 해석 조건

엔진 사이클 해석을 위한 운전 조건으로 ESC-13 모드를 사용하였으며, Table 2 및 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 근거하여 ESC-13모드가 결정되며 Table 2와 Fig. 2에 나타난 point No.는 동일지점이다.

운전영역의 결정은 엔진 최대토크 점으로부터 50%지점의 엔진속도가 작동영역의 0%로하고 최대 토크 지점의 30%되는 곳이 100%로 정한다.

최저 속도와 최고 속도 사이를 operational range라 하고 operational range의 25%, 50%, 75%되는 지점을 각각 속도 A, B, C라 정의 한다. 각 엔진 속도에서 부하조건 25%, 50%, 75%, 100%의 4개 속도의 지점을 정의하여 총 12개의 운전 조건을 선택하고 이 외에 공회전 조건과 임의의 2 조건을 선택하여 총 15개의 운전조건에서 시험한다. 본 연구에서는 임의 조건을 제외한 13개의 조건에 대해서 해석하였다. 그림

Table 2 ESC-13 mode

Point NO.	Speed (rpm)	ESC Point	Torque (N · m)	Load (%)	Weighting factor
1	1000	Additional point	1264.2	100	0
2	2200	Additional point	1019.2	100	0
3	599	Idle	37.24	0	0.15
4	1285	A100	1326.92	100	0.08
5	1610	B050	648.76	50	0.1
6	1610	B075	970.2	75	0.1
7	1285	A050	660.52	50	0.05
8	1285	A075	994.7	75	0.05
9	1285	A025	330.36	25	0.05
10	1610	B100	1289.68	100	0.09
11	1610	B025	324.38	25	0.1
12	1935	C100	1155.42	100	0.08
13	1935	C025	287.14	25	0.05
14	1935	C075	860.4	75	0.05
15	1935	C050	573.3	50	0.05

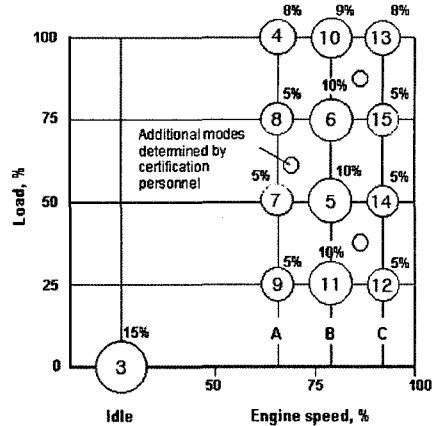


Fig. 2 Definition of operating speed range

Fig. 2는 1285 rpm, 1610rpm, 1935rpm의 운전영역에 해당한다.

3. 해석 결과

3.1 EURO-3 엔진 해석

EURO-3 엔진을 WAVE code로 해석하였으며 기본엔진(baseline engine)인 두산 인프라 코어의 실험데이터와 비교하였다. Fig. 3은 토크비교 그래프로 최대 오차 범위 10%에서 수치해석 결과의 타당성을 확인하였다. Fig. 4에는 모드별 각 운전 조건에서의 NOx 배출 결과 그래프인데, 역시 최대 10% 이내의 오차범위로 수치해석 결과를 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

3.2 EGR pipe 직경 산출

EGR을 적용하기에 앞서 EGR파이프의 직경 및 길이를 해석적인 방법으로 선정하였다. EGR 파이

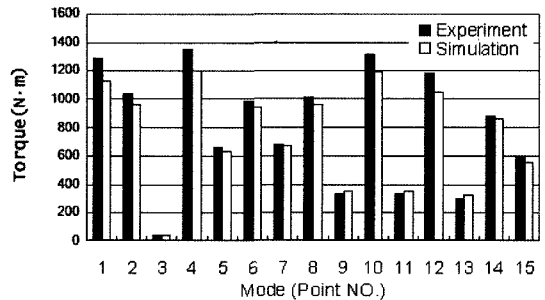


Fig. 3 Torque comparison between experimental and simulation results

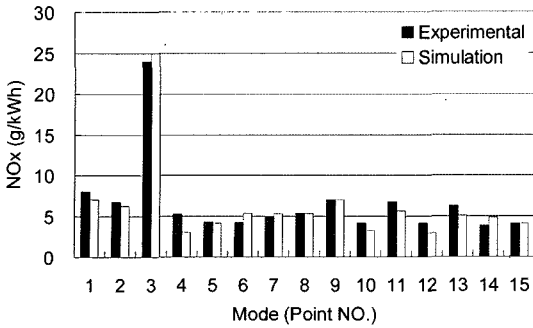


Fig. 4 NOx emission comparison between experimental and simulation results

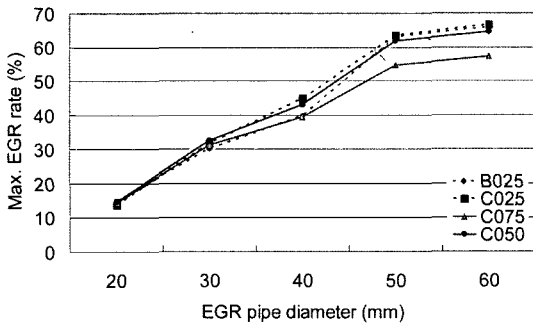


Fig. 5 Max. EGR rate vs. EGR pipe diameter

프의 길이는 엔진 자체의 기하학적 형상에 의해 약 300mm로 결정되었다. EGR 파이프의 직경의 경우에 직경에 따라 EGR율이 크게 변하므로 EGR 파이프 직경의 산출이 필수적이다. 설계시 최대 EGR을 목표 30%를 달성하기 위해, 기존 흡기 파이프의 직경을 고려하여 EGR 파이프의 직경을 20~60mm 까지 10mm 단위로 변경하여 해석하였다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 최대 EGR을 30%를 만족시킬 수 있는 EGR 파이프의 직경은 약 30mm임을 확인할 수 있었으며 이때 최대 EGR율은 32.3%였다. 이후 해석에서 EGR 파이프 직경은 30mm로 고정하였다.

### 3.3 EGR 밸브 개도량에 따른 신기 유량 및 EGR 가스 유량 변화

Fig. 6은 대표적인 5개의 운전 조건에 대해 EGR 밸브 개도량에 따른 신기 유량을 나타내었고, 그에 따른 EGR율을 Fig. 7에 나타내었다.

EGR 밸브 개도량에 따라 EGR 가스의 높은 온도가

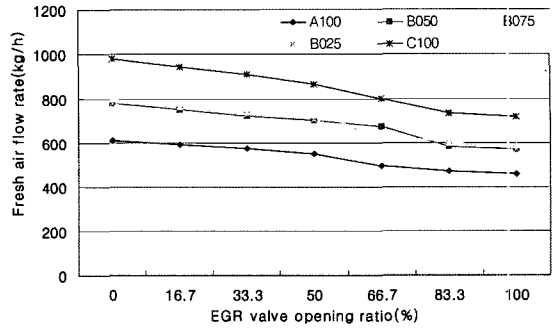


Fig. 6 Fresh air flow rate vs. EGR valve opening ratio

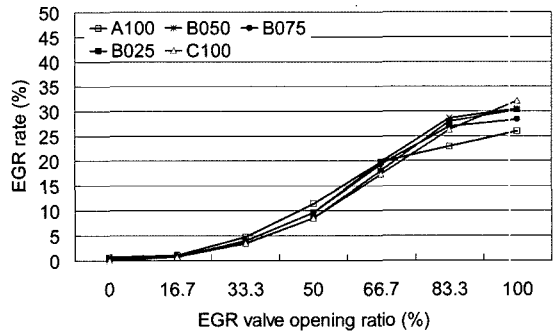


Fig. 7 EGR rate vs. EGR valve opening ratio

때문에 신기와와 혼합기 온도가 상승하며 이로 인해 상대적으로 실린더로 유입되는 혼합기의 질량은 감소한다.

### 3.4 EGR 적용에 따른 torque 변화

EGR이 적용되지 않은 엔진에 EGR을 적용할 경우, EGR 가스의 온도가 높아 체적효율이 떨어지고 산소 분율이 감소하기 때문에 토크가 감소하게 된다. 반면에 EGR에 의해 흡기 가스의 온도가 높아져 착화지연(ignition delay)이 짧아진다는 장점은 있으나 그 효과가 크지는 않다.<sup>5)</sup>

Fig. 8은 기본엔진에 EGR을 적용하고 기타 엔진 변수를 변경하지 않았을 경우 토크의 변화를 나타낸 그래프이다. 중저부하 영역에서는 EGR 개도량에 따라 토크가 크게 변하지 않는데 (5%이내) 이는 신기가 충분히 유입되고, EGR에 의한 영향으로 착화지연(ignition delay)이 감소하게 되어 토크에는 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

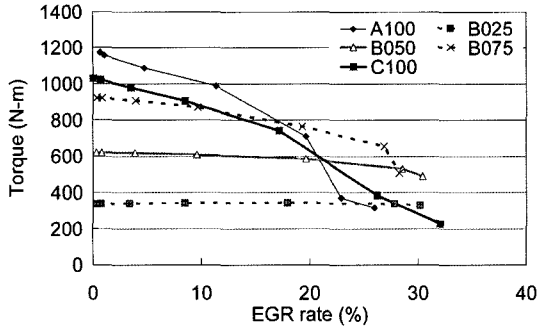


Fig. 8 Torque variation due to EGR rate

### 3.5 EGR율에 따른 NOx 배출량 변화

EGR 밸브 개도량이 증가함에 따라 실린더 내부의 최고 온도상승이 억제되어 NOx 생성 역시 억제되는데 Fig. 9에 경향성을 나타내었다. 세로축의 DeNOx efficiency는 EGR 밸브를 열지 않은 조건 즉, EGR을 적용하지 않았을 때의 NOx값을 기준으로 계산된 값이다.

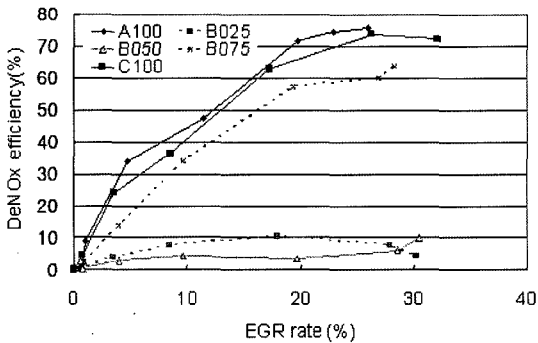


Fig. 9 DeNOx efficiency due to EGR rate

EGR율이 증가함에 따라 대부분의 운전조건에서 NOx가 저감되는 것이 확인되었으며 EGR율이 일정 값을 넘어설 경우, EGR로 인한 NOx 저감에는 큰 변화가 없음 역시 확인하였다. 뿐만 아니라 EGR율이 증가폭에 비해 NOx의 저감률이 크지 않은 경우도 있는데, 이는 중속 조건의 중저부하 조건으로 NOx 발생량 자체가 적은 운전 조건이다. 따라서 상기 결과로 각 운전 조건별로 임계 EGR율이 존재함을 확인할 수 있었다.

### 3.6 EGR 적용에 따른 토크 보상

EGR이 적용되지 않은 엔진에 EGR을 적용하였을 경우 토크의 감소를 가져오는데 실제 설계에 반영하기 위해서는 토크보상이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 토크보상 방법으로 두산 이프라 코어에서 제안한 연료 분사시기의 진각 및 연료분사량 증가의 방법을 사용하였다.

#### 3.6.1 25% 부하 조건

Fig. 9~ 11에 일부 나타낸 바와 같이 일반적인 경우, ESC 모드 전 운전영역의 저부하(25% 부하) 운전 조건에서는 중부하(50% 부하) 조건에 비해 EGR에 의한 토크 변화률(2.7% 감소)이 크지 않았다. 더욱이 고속 저부하 운전 조건(1935rpm, 25% 부하)의 경우 EGR에 의해 토크가 증가하는 지점도 보이고 있는데, 이는 고속 저부하 운전 조건의 경우에는 착화 지연(ignition delay)이 4.2°(CA)에서 2.6°(CA)로 감소하여 이에 의한 영향으로 토크가 오히려 증가한 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이 저부하 영역에서는 EGR율에 따른 토크의 감소가 크지 않기 때문에, 최대 EGR을

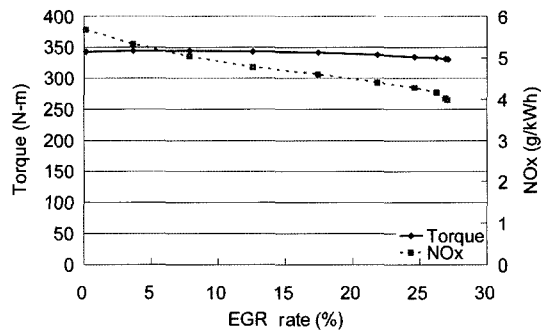


Fig. 10 Torque and NOx emission due to EGR rate at B025 point (1610rpm, 25% load)

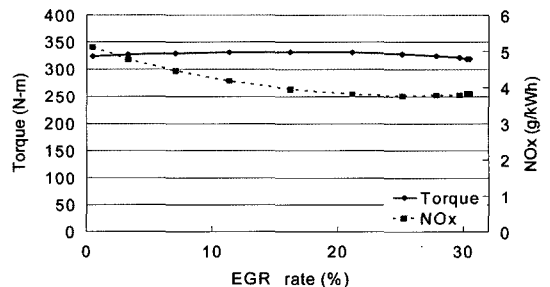


Fig. 11 Torque and NOx emission due to EGR rate at C025 point (1935rpm, 25% load)

을 적용함에 있어 EGR 밸브를 전개도 하였다. 이 경우 EGR율은 저속(1285rpm)에서 29.3%, 중속(1610 rpm)에서 27.1%, 고속(1935rpm)에서 30.5%였다. 다만 고속의 경우 30.5% EGR 적용시 NOx 생성량이 오히려 증가한 운전 조건이 발생함으로 EGR율을 25.1%로 하향 조정하였다.

토크보상을 위해 연료 분사시기에 따른 영향을 고찰하였다. 연료 분사시기를 진각하여도 EGR의 영향에 의해 저속과 중속 모두 토크가 2% 감소하여 연료분사시기에 의한 영향이 크지 않은 이유로 연료 분사량에 의해서만 토크를 보상하였다. 연료 분사량을 저속의 경우 2% 증가, 중속에서 4% 증가, 고속에서는 1% 감소시켜 토크를 보상하였고, Fig. 12 와 같은 NOx 저감 결과를 얻을 수 있었다. EGR이 적용되지 않은 EURO-3 엔진에 EGR을 적용하고 출력 보상을 수행하여, 저속에서 39%, 중속에서 37%, 고속에서 27%의 NOx 저감이 가능하였다.

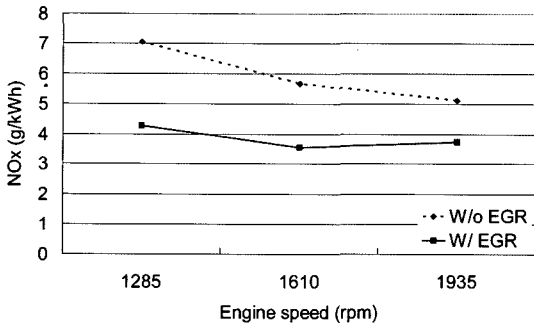


Fig. 12 NOx reduction by EGR at 25% load

3.6.2 50% 부하 조건

중부하(50% 부하) 운전조건은 Fig. 13에서 보는 바와 같이 EGR에 의해 토크의 변화가 큰 영역으로 EGR 적용 시, 토크가 저속 중부하 영역에서 18% 감소하였다. EGR 적용으로 인한 토크보상시 BSFC가 크게 증가할 것으로 예상되므로 중부하 이상의 운전 조건에서는 제작사와의 협의에 의하여 토크가 10% 감소될 때의 EGR율을 최대 EGR율로 정하였으며 이때의 EGR율은 저속에서 18.5%, 중속에서 22.2%, 고속에서 21.6%였다.

중부하 조건에서 10% 부족한 토크를 보상하기 위해 연료 분사량을 증가시키고, 이후 부족한 토크

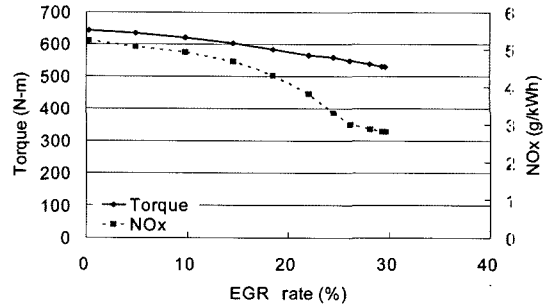


Fig. 13 Torque and NOx emission due to EGR rate at A050 point (1285rpm, 50% load)

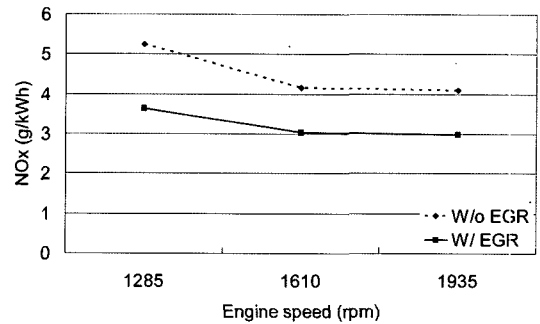


Fig. 14 NOx reduction by EGR at 50% load

는 연료 분사시기로 보상하였다. 전술한 EGR 조건 하에서 연료 분사량을 초기에 10% 증가시켰으나, 최대 토크가 EURO-3 엔진 대비 저속에서 4%, 중속에서 5%, 고속에서 2% 부족하였으나 이와 동시에 NOx는 모드의 세 가지 운전속도에서 모두 25% 저감되었다. 따라서 토크를 보상하기위해 저속의 경우 연료 분사량을 15% 증가시키고, 이에 따라 연료 분사시기를 0.6° 진각시켜 토크를 보상하였고, 중속에서도 연료 분사량을 15% 증가하고, 연료 분사시기를 1.4° 진각하였으며, 고속에서는 연료분사량을 14% 증가하고 연료분사시기는 고정하여 토크를 보상하였다. Fig. 14에 그 결과를 도시하였으며 EGR이 적용되지 않은 EURO-3 엔진에 EGR을 적용하고 출력보상을 수행하여, 저속에서 31%, 중속과 고속에서 각 27%의 NOx를 저감되었다.

3.6.3 75% 부하 조건

Fig. 15의 고속 고부하(1935rpm, 75% 부하) 조건에서 토크 감소가 가장 컸으며 약 43% 감소되었다. 따라서 중부하 조건에서와 마찬가지로 제작사와의

협의를 의하여, 적용 EGR율은 토크가 10% 감소되는 지점을 최대 EGR율로 고정하였으며 이 때 EGR율은 저속에서 9.6%, 중속에서 8.4%, 고속에서 11.8%였다. 고속에서는 중속에 비해 체적효율이 크기 때문에 토크 보상을 위한 연료 분사량 증가를 중속에서 보다 작게 하여도 토크보상이 충분히 가능하였다. 토크는 고부하 조건에서 EURO-3 엔진보다, 저속의 경우 6%, 중속과 고속의 경우 9% 부족하였고, NOx의 경우 저속에서 46%, 중속과 고속에서 53% 저감되었다. NOx가 충분히 저감되었기 때문에 연료 분사량을 11%까지 증가하고, 잔여 토크보상은 연료 분사시기를 조절하였다.

고부하 조건에서 저속의 경우 연료 분사량을 11% 증가시키고, 연료 분사시기를 5.2° 진각시켜 토크를 보상할 수 있었다. 중속의 조건에서도 연료 분사량은 11% 증가한 상태에서 연료 분사시기를 1.1° 진각하였고, 고속의 경우 역시 연료 분사량은 11% 증가하였고, 연료 분사시기는 7.2° 진각하여 토크를 보상하였다. 결과로 얻은 NOx 생성량 그래프는 Fig. 16과 같고 NOx의 경우 EGR을 적용하지 않았을 경

우보다 저속에서 38%, 중속에서 47%, 고속에서 44% 저감되었다.

### 3.6.4 100% 부하 및 공회전(idle) 조건

100% 부하 운전조건인 경우 EGR 밸브를 완전히 개도하였을 때, 1285rpm과 1610rpm 조건에서 토크가 60% 감소하고, 1935rpm에서 67% 감소하여 EGR을 적용하지 않았다. 또한 idle 조건에서도 EGR을 적용하지 않았다.

### 3.7 NOx 및 BSFC 계산

각 운전조건별 NOx량과 SFC에 weighting factor를 주어 NOx와 fuel penalty를 계산하였다. 계산에 필요한 데이터는 3.6절에서 얻은 연료 분사량과 분사시기를 Table 3에 나타내었으며 Table 3로부터 계산된 NOx값과 SFC값을 정리하여 Table 4에 나타내었다. NOx의 경우 3.17g/kWh로 EURO-4 규제치 3.5 g/kWh를 만족시켰다. 그러나 EGR을 적용함에 있어 EGR 가스를 냉각하지 않아 체적효율이 감소하였으며, 따라서 BSFC가 244g/kWh에서 259g/kWh로 6.1% 증가하는 결과를 초래하였다.

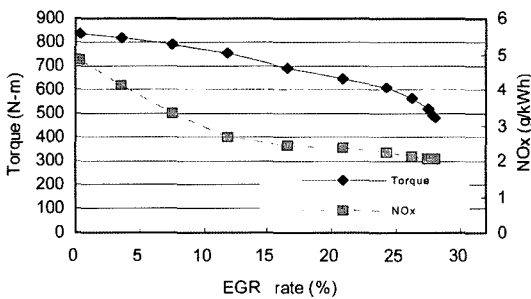


Fig. 15 Torque and NOx emission due to EGR rate at C075 point (1935rpm, 75% load)

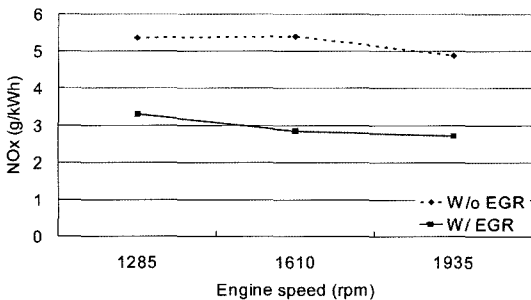


Fig. 16 NOx reduction by EGR at 75% load

Table 3 EGR rate, injection timing advanced, and amount of injected fuel increase rate for compensating torque

Mode	EGR rate (%)	Injection timing advanced (°CA)	Amount of injected fuel increase ratio (%)
A025	29.3	0.0	2
A050	18.5	0.6	15
A075	9.6	5.2	11
A100	0.0	0.0	0
B025	27.1	0.0	4
B050	22.2	1.4	15
B075	8.4	1.1	11
B100	0.0	0.0	0
C025	30.5	0.0	1
C050	21.6	0.0	14
C075	11.8	7.2	11
C100	0.0	0.0	0
Idle	0.0	0.0	0

## 4. 결론

본 연구에서는 EGR이 적용되지 않은 EURO-3 규제 대응 커먼레일 장착 대형 디젤엔진을 대상으로

Table 4-NOx, SFC, power results of base model and compensated model

Mode	Weighting factor	NOx and BSFC						Increment of BSFC (%)	Reduction of NOx (%)
		Base Model			Torque Compensated Model				
		Power kW	BSFC kg/kWh	NOx g/kWh	Power kW	BSFC kg/kWh	NOx g/kWh		
A025	0.05	45.2	0.227	7.04	45.2	0.232	4.28	2.2	39.3
A050	0.05	85.3	0.220	5.25	85.3	0.253	3.64	15.0	30.6
A075	0.05	120.2	0.228	5.36	120.2	0.253	3.30	11.0	38.4
A100	0.08	143.3	0.256	3.06	143.3	0.256	3.06	0	0.0
B025	0.10	57.0	0.241	5.67	57.0	0.251	3.58	3.9	36.9
B050	0.10	102.9	0.229	4.15	102.9	0.272	3.04	18.7	26.8
B075	0.10	150.8	0.229	5.40	150.8	0.254	2.84	11.0	47.4
B100	0.09	186.3	0.251	3.21	186.3	0.251	3.21	0.0	0.0
C025	0.05	64.8	0.261	5.12	64.8	0.259	3.76	-1.0	26.5
C050	0.05	113.5	0.240	4.09	113.5	0.273	2.99	13.8	26.9
C075	0.05	166.6	0.240	4.87	166.6	0.276	2.71	11.0	44.4
C100	0.08	200.6	0.265	2.90	200.6	0.265	2.90	0.0	0.0
Idle	0.15	2.2	0.511	24.16	2.2	0.511	24.16	0.0	0.0
Weighted Average			0.244	4.28		0.259	3.17	6.1	25.8

ESC-13 모드 실험데이터와 해석데이터를 비교함으로써 해석모델의 타당성을 검증하였다. 또한 대상 엔진에 LPL EGR을 적용하여 EURO-4 규제를 만족시킬 수 있는 전략을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) EURO-3 대상 엔진에 EGR을 적용하여 최대 EGR 율 30%를 목표로 하였을 경우, 신기 파이프 직경이 100mm인 본 연구의 주어진 조건에서 EGR 파이프의 직경은 약 30mm임을 확인하였다.
- 2) 25% 부하 운전 조건에서는 EGR 율을 최대한 적용하였으며 부족한 토크는 연료 분사량 증가만으로 보상이 가능하였다. 속도에 따른 EGR 율, NOx 저감률 및 연료 소비율의 증감은 각각 1285rpm에서 29.3%, 39%, 2.2%, 1610rpm에서 27.1%, 37%, 3.9%, 1935rpm에서 30.5%, 27%, -1.0%였다.
- 3) 50% 부하 운전 조건에서는 EGR에 의해 토크가 10% 감소하는 지점까지 EGR 밸브를 개도하고, 감소한 토크 보상을 위해 연료 분사량을 15% 증

가시켰으며 잔여보상은 연료 분사시기로 조절하였다. 엔진 속도에 따른 EGR 율, NOx 저감률 및 연료 소비율이 증감은 각각 1285rpm에서 18.5%, 31%, 15.0%, 1610rpm에서 22.2%, 27%, 18.7%, 1935rpm에서 21.6%, 27%, 13.8%였다.

- 4) 75% 부하 운전 조건에서도 EGR에 의해 토크가 10% 감소하는 지점까지 EGR 밸브를 개도하고, 감소한 토크 보상을 위해 연료 분사량을 11%까지 증가시켰으며 잔여보상은 연료 분사시기로 조절하였다. 엔진 속도에 따른 EGR 율, NOx 저감률 및 연료 소비율의 증감은 각각 1285rpm에서 9.6%, 38%, 11.0%, 1610rpm에서 8.4%, 47%, 11.0%, 1935rpm에서 11.8%, 44%, 11.0%였다.
- 5) ESC-13 모드 시험조건에서 계산한 결과 기존 EURO-3 대응 엔진과 비교 시, NOx 생성량은 3.17 g/kWh로 26% 저감 가능하였으며, 따라서 EURO-4 규제를 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 반면, BSFC의 경우 EGR 적용으로 인해 감소한 토크를 보상하기 위하여 6.1% 증가하였다.

References

- 1) N. Ladommatos and R. Balian, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Combustion and NOx Emissions in a High-speed Direct-injection Diesel Engine," SAE 960840, 1996.
- 2) N. S. Park, J. H. Lee and G. K. Yeo, "Coupled 1-D/3-D Analysis of Cylinder-to-cylinder EGR Distribution of Intake Manifolds in a HSDI Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.441-446, 2004.
- 3) R. S. G. Baert, D. E. Beckman and A. Veen, "Efficient EGR Technology for Future HD Diesel Engine Emission Targets," SAE 1999-01-0837.
- 4) M. Lejene, D. Lortet and S. Michon, "Combustion Development for EURO 4," THIESEL, pp.277-292, 2002.
- 5) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988.