

# DoE를 이용한 인젝터 유량 편차에 의한 배출가스 편차에 대한 강건 엔진 매핑 가능성의 검토

장진석<sup>1)</sup> · 정재훈<sup>2)</sup> · 조청훈<sup>1)</sup>

현대기아자동차 승용디젤엔진시험팀<sup>1)</sup> · 현대기아자동차 선행디젤엔진개발팀<sup>2)</sup>

## Feasibility Study on Robust Calibration by DoE to Minimize the Exhaust Emission Deviations from Injector Flow Rate Scatters

Jin-Seok Chang<sup>\*1)</sup> · Jae-Hoon Cheong<sup>2)</sup> · Chung-Hoon Jo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Passenger Car Diesel Engine Test Team, Hyundai-Kia Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-705, Korea

<sup>2)</sup>Advanced Diesel Engine Development Team, Hyundai-Kia Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-705, Korea

(Received 7 June 2007 / Accepted 27 July 2007)

**Abstract** : The hardware scatters as well as the engine parameters calibration have strong influences on exhaust emissions in recent diesel engines. In this research DoE(Design of Experiments) optimizations were done to study the possibility of minimizing the emission deviations caused by flow rate scatters of the injectors. It has been shown that the optimization of engine calibration, which minimizes the emission deviations, is feasible by establishing a target function representing the emission deviations for test results of maximum, mean and minimum flow rate injectors. It has also been shown that optimization of both emission deviations and emission level is possible by sequential DoE optimizations of the target functions representing the emission level and the emission deviations respectively with the appropriate boundary limits.

**Key words** : DoE(시험계획법), Deviation(편차), Robust calibration(강건 매핑), Emission(배출가스)

### Nomenclature

- OP : engine operating point(엔진운전영역)
- $n_i$  : OP  $i$ 의 시험횟수( $i = 1, 2, 3$ )
- $k$  : OP  $i$ 에서의 시험 인덱스( $k = 1 \sim n_i$ )

### Subscripts

- MAX : maximum flow rate injector(상품)
- MVI : mean value flow rate injector(중품)
- MIN : minimum flow rate injector(하품)

### 1. 서론

최근의 개발 동향에 의하면 디젤엔진의 개발에 있어 가장 어려운 점은 연비 및 엔진소음을 최소화하고 동력성능을 유지하면서 동시에 배출가스의 규제를 만족시키도록 엔진 파라미터를 매핑하는 일이다. 이러한 배출가스의 저감 요구조건을 충족시키기 위해 연료 다중 분사, 2-스테이지 터보차징, 가변 스윙 기능 등이 추가되면서 이는 곧 매핑변수의 증가와 최적화의 난이도 증가로 이어지고 있다.<sup>1)</sup> 게다가, 정해진 엔진 하드웨어에 대해 이러한 요구조건을 모두 만족시키는 매핑을 완수

\*Corresponding author, E-mail: jschang@hyundai-motor.com

했다고 하더라도 하드웨어 편차에 기인하는 배출가스 편차가 무시하지 못할 수준으로 여전히 존재한다. 설사 보증된 품질 편차 이내라고 하더라도 하드웨어 편차의 극단적인 조합이 이루어지면 이는 배출가스의 양이 규제치를 벗어나게끔 하는 원인이 될 수도 있다. 반면에 배출가스의 규제는 날이 갈수록 엄격해지고 있는 현실이므로, 이러한 하드웨어 편차에 따른 예측하기 힘든 배출가스 편차에 대한 고려는 더욱 중요해지고 있다. 결과적으로, 하드웨어 편차에 따른 배출가스 편차에 대한 제어가 강력히 요구된다.

지금까지는 일단 하드웨어 표준품만으로부터 수행된 시험결과에서 최적화된 엔진 파라미터 매핑이 결정된 후에 하드웨어 상품, 중품, 하품에 대한 평가 시험결과로부터 배출가스 편차가 받아들일만한 수준인지를 검증하는데 그치는 것이 일반적이었다.<sup>2)</sup> 그러나 하드웨어의 수와 이에 따른 파라미터 수의 증가 및 배출가스 규제 수준의 강화 때문에 이러한 프로세스는 개발일정을 증가시킬 수 있고, 더 이상 적합한 방법이라고 볼 수 없다. 따라서 엔진 파라미터 매핑의 초기 단계부터 엔진 배출가스의 수준을 최소화하고 동시에 하드웨어 편차에 의한 배출가스의 편차를 최적화시키는 매핑 방법론의 개발이 강력히 요구된다고 할 수 있다.

경험적으로 디젤엔진의 배출가스 편차에 영향을 끼치는 대표적 주요 인자는 인젝터 유량, 공기유량 센서 등 각종 센서류의 측정오차, 각종 가변 액츄에이터의 작동 오차, 엔진 연소실 및 기타 하드웨어의 편차 등 이라고 볼 수 있으며, 이러한 양산 과정상 발생하는 편차는 엔진 성능 및 배출가스 제어에 있어 발생하는 일종의 노이즈(noise)로 간주될 수 있다. 커먼레일 디젤엔진의 경우 연소실로 분사되는 유량은 크게 레일압력과 분사시간의 함수로 제어된다. 그러나 편차발생의 관점에서는 인젝터 양산에서 발생하는 가공 편차는 필연적으로 분무의 형상 및 분사유량에 영향을 끼치고 이는 디젤엔진의 배출가스 편차의 주요 원인이 된다.<sup>3)</sup> 또한 엔진제어 로직의 측면에서 고찰하면 이는 요구되는 토크를 발생하기 위해 필요한 실제 연료 유량과 엔진

ECU(Engine Control Unit)가 인식하는 목표 연료 유량의 차이를 유발하며, 이에 따라 참조되는 주요 엔진 파라미터의 값이 차이를 일으키게 되며 이것이 연소 상태에 영향을 끼쳐 배출가스의 편차를 유발하게 된다.

본 연구는 디젤엔진의 배출가스 편차에 영향을 끼치는 주요 인자인 인젝터 유량 편차에 대해 시험계획법(DoE, Design of Experiments)에 의한 파라미터 최적화를 수행하는 방법론을 다루었으며, 이를 통해 DoE를 이용하여 노이즈에 강건한 엔진 매핑이 존재할 수 있음을 보여주는 가능성 평가(Feasibility test)의 측면에서 연료유량 편차를 기준으로 최적화를 시도하였다.<sup>4)</sup> 3개의 임의의 엔진 운전영역에 대하여, 인젝터 업체가 제시한 인젝터 유량 상품, 중품, 하품 3가지 하드웨어에 대하여 5개의 주된 엔진 파라미터들에 대한 동일한 3세트의 DoE 시험들이 각각 수행되었다. 즉, 3세트의 DoE 시험에 대해 동일한 세트의 엔진파라미터들이 적용되어 시험되었고, 또한 인젝터에 따른 배출가스 편차 역시 같은 세트의 엔진파라미터들을 기준으로 계산 및 모델링이 수행되었다. 그럼으로써 편차를 정량화한 목적함수에 의한 최적화를 통해 비단 배출가스 편차 뿐 아니라 배출가스의 수준까지 동시에 최소화시킬 수 있음을 보이고자 한다.

## 2. DoE : 배출가스 편차 최적화 시험계획

모든 시험은 V6 타입의 배기량 3.0L의 커먼레일 디젤엔진에서 수행되었다. 실시간 DoE 시험 및 최적화 작업을 위한 도구로 AVL의 CAMEO시스템이 사용되었다. 또한 엔진파라미터의 제어를 위한 EMS(Engine Management System) 도구로 ETAS의 INCA 시스템이, 배출가스 NOx 및 PM의 측정을 위해 HORIBA의 9100DEGR 배기가스분석기 및 AVL의 415S 매연측정기가 각각 사용되었다. 시험 전에 평가된 장비 측정 오차 및 재현성은 아래와 같다.

- 배기가스분석기의 재현성 및 측정오차(NOx)  
표준가스를 이용한 보정 후 측정스케일의  $\pm 1\%$

- 매연측정기의 정밀도(Smoke)  
± 0.001 FSN

**2.1 하드웨어 편차의 선정**

인젝터 유량 편차가 배출가스 편차에 끼치는 영향을 보기 위해 아래의 Table 1과 같이 허용된 유량 편차 내에서 유량 최상품, 중품, 최하품 3가지 종류의 인젝터가 선정되었다. 또한 3회의 DoE 시험들이 같은 종류의 파라미터 세트에 따라 수행되었다.

인젝터 편차에 따른 배출가스 편차는 주로 유량 편차에 의하므로, 배출가스 규제와 관련된 운전영역에서 유량 상품, 중품(표준품), 최하품이 DoE 시험을 위하여 선정되었다.<sup>5)</sup>

Table 1 Variation of injector flow rate for DoE

Injector variation	Subscript / abbreviation	Flow rate at emission-regulation region @ rail pressure 800 bar / energizing time 520µs
Maximum	MAX	20mm <sup>3</sup> /str + 1.0 mm <sup>3</sup> /str
Mean	MVI	20mm <sup>3</sup> /str (standard)
Minimum	MIN	20mm <sup>3</sup> /str - 1.0 mm <sup>3</sup> /str

임의의 양산 엔진에서 모든 실린더의 인젝터가 상품으로만 구성되거나 또는 모두 하품으로만 구성될 확률은 현실적으로 매우 낮다. 그러나 존재가능한 최악조건의 편차 발생을 고려하여 모든 인젝터가 각각 상품, 중품, 하품인 경우에 대하여 시험이 수행되었다.

**2.2 엔진 시험을 위한 운전영역의 선정**

Fig. 1과 같이 본 연구의 DoE 시험계획을 위하여 3개의 운전영역이 임의로 선택되었다.

- OP(Operating Point) 1 - 1472 rpm      85 Nm
- OP(Operating Point) 2 - 1459 rpm      147 Nm
- OP(Operating Point) 3 - 1669 rpm      147 Nm

**2.3 시험계획 및 배출가스 모델링을 위한 엔진 파라미터 변수의 선정**

디젤엔진의 주된 배출가스 성분인 NOx 및 PM이

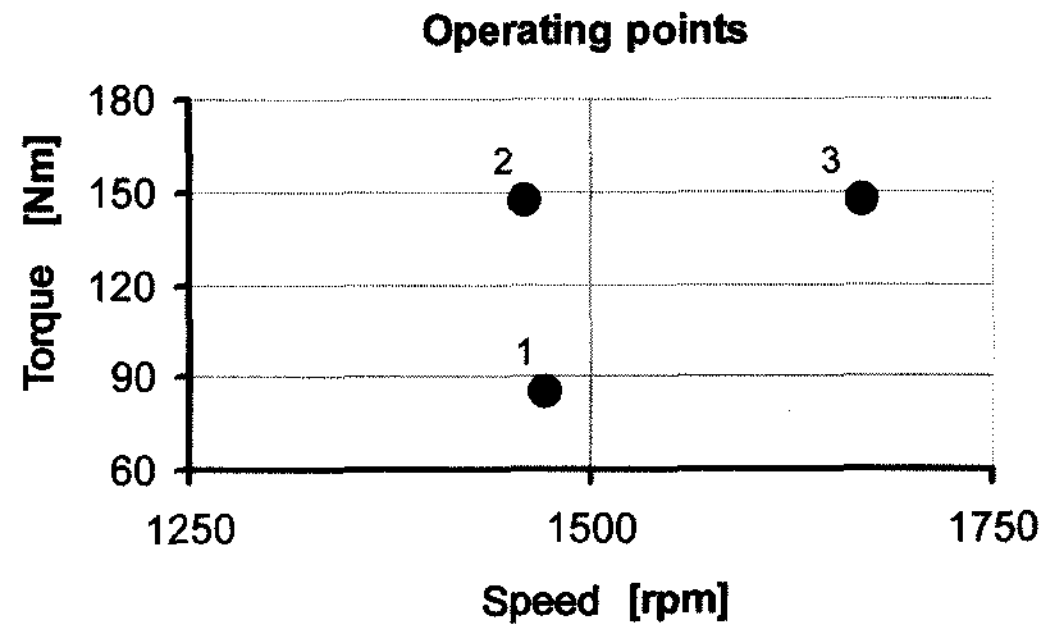


Fig. 1 Operating points for DoE engine test

최적화 목적함수의 정의를 위해 선택되었다. Table 2에 NOx와 PM, 그리고 다른 통계변수의 모델을 위한 5개의 엔진 파라미터 변수를 나타내었다. 5개의 엔진 파라미터 변수는 각각 공기량, 가변스웰 개도, 주분사 시기, 레일 압력, 과급압으로 선정되었으며, 각각의 변동 범위는 경험적으로 알고 있거나 또는 스크리닝(screening) 예비시험을 통해 지정되었다.

먼저 엔진 시험 벤치에서 중품 인젝터로 모델링을 위한 Online D-Optimal 시험이 실시되었다. 그 다음에 이 시험에 의해 정해진 파라미터 변수의 리스트 순서대로 상품 및 하품 인젝터에 대해서도 동등한 시험이 수행되었다. 따라서 인젝터 상품, 중품, 하품에 대하여 동등한 엔진파라미터에 대해 같은 순서로 시험이 수행되었다.

Table 2 Variations of engine parameters for 3 OPs

Variation	OP 1	OP 2	OP 3
Air mass [mg/hub]	300~400	380~480	400~500
Variable swirl [%]	0~75	20~80	20~80
Main inj. timing [CA, BTDC]	-6.0~1.5	-6.0~2.0	-4.5~3.5
Rail pressure [hPa, abs.]	420000~620000	600000~900000	800000~1000000
Boost pressure [hPa, abs.]	1080~1200	1200~1350	1200~1400
Number of tests planned by DoE(n <sub>i</sub> )	63	62	63

**2.4 무차원화 변수의 모델링**

앞서 거론된 바와 같이, 다음의 주요 배출가스가 측정되었고, 3차 다항 함수로 모델링되었다.

BNOx : 측정된 Brake specific NOx [g/kWh]  
 BPM : 측정된 Brake specific PM [g/kWh]  
 매연측정치 (Smoke number) [FSN]

또한 다음과 같이 정의된 통계 변수들이 측정된 배출가스 값들에 의해 계산되었다.

먼저, 중품(표준) 인젝터로부터의 배출가스 값의 최적화를 위해 BNOx 및 BPM을 통합하는 다음의 식을 통해 무차원 변수 “EM”이 정의되었다. 이는 BNOx 및 BPM 값을 무차원화시킨 후 RMS (Root - Mean-Square) 방식으로 통합한 것이다. 표준치인  $\overline{BNOx}_i$ ,  $\overline{BPM}_i$ 는 각각의 운전영역 OP(operating point) i에서 표준인젝터로부터 측정된 평균값을 의미한다(i = 1, 2, 3). 결과적으로 이 EM값이 커지면 전체 배출가스 값이 커져서 NOx-PM의 상충관계 (Trade-off) 경향이 악화된다.

$$EM_{i,k} = \sqrt{\left(\frac{BNOx_k}{\overline{BNOx}_i}\right)^2 + \left(\frac{BPM_k}{\overline{BPM}_i}\right)^2} \quad [\text{무차원}]$$

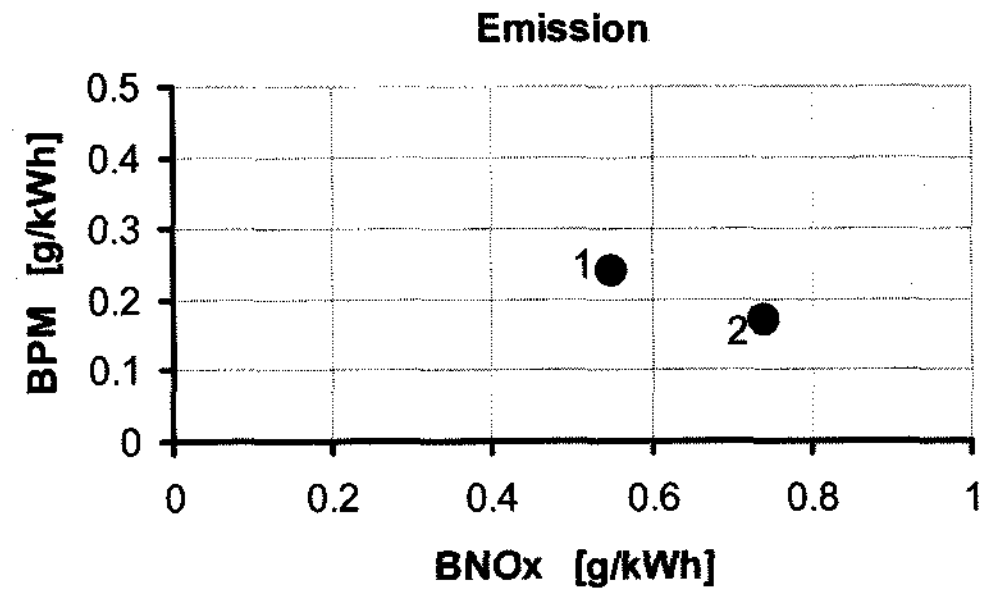
$$\overline{BNOx}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} BNOx_k}{n_i} \quad [\text{g/kWh}]$$

$$\overline{BPM}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} BPM_k}{n_i} \quad [\text{g/kWh}]$$

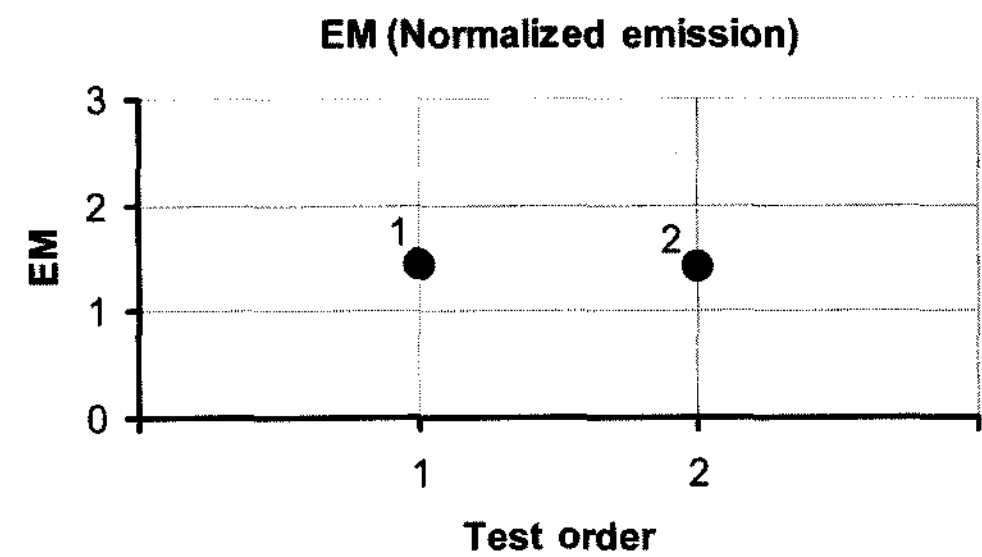
2세트의 샘플결과로부터 BNOx와 BPM이 EM값으로 통합되는 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 그래프의 과정은 아래 Table 3에 나타내었다. 여기서 시험 1, 2에서의 BNOx, BPM 값은 각각 다르지만, 계산된 EM 값은 거의 동등하며, 이는 두 시험결과가 동등 선상의 NOx-PM Trade-off 관계임을 의미한다.

Table 3 Example : Calculation of variable EM

Test order	BNOx	BPM	$\frac{BNOx}{\overline{BNOx}}$	$\frac{BPM}{\overline{BPM}}$	EM (RMS)
1	0.55	0.24	0.85	1.17	1.45
2	0.74	0.17	1.15	0.83	1.42
$\overline{BNOx}$ $\overline{BPM}$	0.65	0.21			



(a) Measured raw emission values



(b) Normalized and unified emission value EM

Fig. 2 Normalized variable EM

동일한 파라미터 조건하에서 시험된 인젝터 유량 상품, 중품, 하품에서의 BNOx, BPM에 대하여 다음의 편차변수 “σ<sub>EM</sub>”이 다음과 같이 정의되었다. 따라서 인젝터 유량 상품, 중품, 하품에 대하여 수행된 한 세트의 시험에 1개의 σ<sub>EM</sub>이 존재하게 된다. 또한 정해진 엔진 파라미터에 대하여 이 값이 커질수록 인젝터 유량편차에 의한 배출가스의 편차도 커지게 된다. 평균값은 무차원화의 기준으로서 중품 인젝터에서의 측정치를 기준으로 정의되었다.

$$\sigma_{EM,i,k} = \sqrt{\left(\frac{BNOx_{MVI,i,k} - BNOx_{MAX,i,k}}{\overline{BNOx}_i}\right)^2 + \left(\frac{BPM_{MVI,i,k} - BPM_{MAX,i,k}}{\overline{BPM}_i}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{BNOx_{MVI,i,k} - BNOx_{MIN,i,k}}{\overline{BNOx}_i}\right)^2 + \left(\frac{BPM_{MVI,i,k} - BPM_{MIN,i,k}}{\overline{BPM}_i}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{BNOx_{MAX,i,k} - BNOx_{MIN,i,k}}{\overline{BNOx}_i}\right)^2 + \left(\frac{BPM_{MAX,i,k} - BPM_{MIN,i,k}}{\overline{BPM}_i}\right)^2}$$

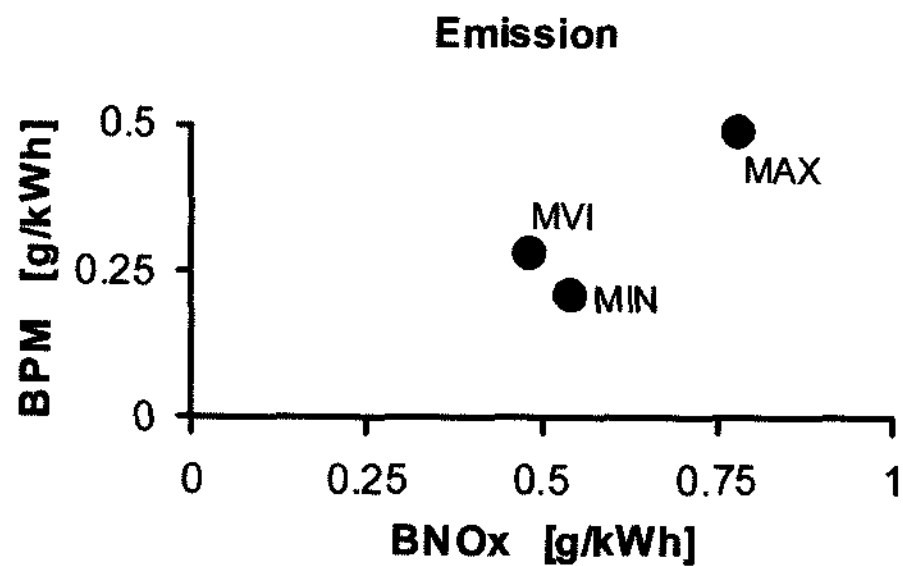
$$\text{단, } \frac{BNOx_{i,k}}{\overline{BNOx}_i} = \frac{BNOx_{i,k}}{\overline{BNOx}_i}, \frac{BPM_{i,k}}{\overline{BPM}_i} = \frac{BPM_{i,k}}{\overline{BPM}_i}$$

$$\overline{BNOx}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} BNOx_{MVI,k}}{n_i}, \overline{BPM}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} BPM_{MVI,k}}{n_i} \quad [\text{g/kWh}]$$

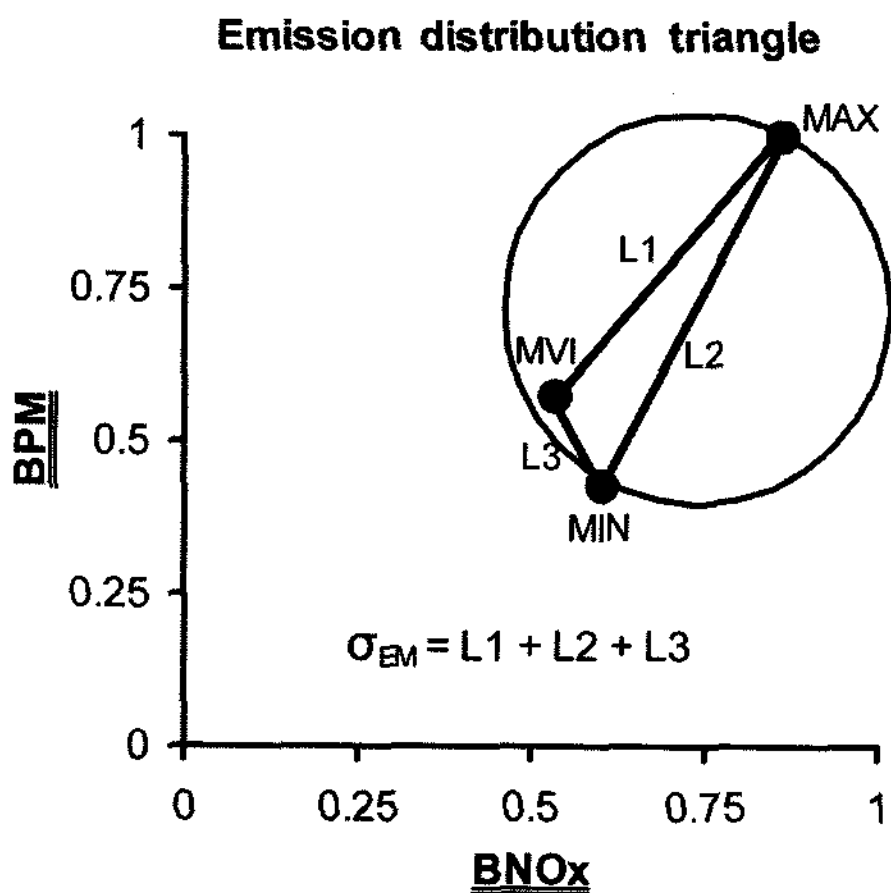
BNOx<sub>MVI</sub>, BPM<sub>MVI</sub> : 중품인젝터에서의 BNOx, BPM 값

$BNO_{x_{MAX}}, BPM_{MAX}$  : 상품인젝터에서의  $BNO_x, BPM$  값  
 $BNO_{x_{MIN}}, BPM_{MIN}$  : 하품인젝터에서의  $BNO_x, BPM$  값

Fig. 3은 배출가스 편차 최적화를 위한 목적함수로서  $\sigma_{EM}$  모델링의 의미를 보여준다.  $\sigma_{EM}$ 은 인젝터 상품, 중품, 하품에서 측정되어 무차원화된  $BNO_x, BPM$  값에 의해 무차원 평면 상에서 그려지는 삼각형의 세 변의 길이의 합(=  $L1 + L2 + L3$ )을 의미한다. 삼각형의 세 변의 각각의 길이는 인젝터 상품, 중품, 하품 중에서 측정된 두 가지의 배출가스 값 사이의 편차에 대한 무차원화된 RMS(Root - Mean - Square) 값이 된다. 따라서 인젝터 유량에 의한 배출가스 편차가 커질수록 이 세 점에 의한 삼각형의 크기도 커지게 된다. 이는 배출가스 편차가 커질수록  $\sigma_{EM}$  전체 값도 커짐을 의미한다. 이는 인젝터 유량 편차에 의한  $BNO_x, BPM$  편차를 하나의 대표값으로 통합시킨 것을 말한다.



(a) Measured raw  $BNO_x, BPM$  from injectors



(b) Normalized emission distribution

Fig. 3 Normalized emission distribution

새롭게 정의된 통계 변수인  $EM$ 과  $\sigma_{EM}$  역시 5개의 엔진 파라미터 변수에 따라 3차 다항함수로 모델링되었다.

### 2.5 배출가스 측정치와 통계변수의 모델링

시험결과에 따른 배출가스 측정치 및 통계변수에 대한 3차 다항함수 모델링이 수행되었다. Fig. 4에서 목적함수  $EM$  및  $\sigma_{EM}$ 에 대하여 엔진파라미터에 따른 관계추이(intersection graph)를 OP 3에서의 예로 나타내었다. 이 그래프는 5개 변수의 다차원 공간 내에서 파라미터의 변화에 따라 다양하게 변화될 수 있다. Fig. 4 상태에서의 관계추이를 살펴보면,  $\sigma_{EM}$ 의 경우 주로 공기량에 의해,  $EM$ 의 경우 주로 공기량, 가변 스웰, 주분사 시기 등에 의해 최적화될 수 있음을 알 수 있다. 흥미롭게도 이 순간의 관계추이 그래프에서는 변수들의 미세한 조절을 통해  $\sigma_{EM}$ 과  $EM$ 을 동시에 최적화할 수 있는 영역을 찾을 수 있다. 이 경우, 공기량이 주된 최적화 대상이 되며, 점 A 주변에서 그러한 가능성을 찾을 수 있다. 점 B의 경우  $\sigma_{EM}$ 에 대해서는 최적화가 가능해 편차가 최소화될 수 있지만,  $EM$ 의 경우는 높게 증가하여 전체적인 배출가스 수준이 높아질 것이다. 이 경우엔 무의미한 최적화라 할 수 있다. 이는 또한 배출가스 편차의 최적화를 위해선 배출가스 값의 상한치를 설정할 필요가 있음을 의미한다.

### 3. 1차 최적화 : 배출가스의 최소화 (중품 인젝터)

#### 3.1 최적화를 위한 목적 함수 및 경계 조건

각각의 영역 OP 1, 2, 3에서 중품 인젝터로부터 얻어진 모델에서  $EM$ 값을 최소화하는 파라미터 매핑을 찾기 위한 1차 최적화가 수행되었다.

최적화를 위한 목적 함수 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{최적화 목적함수: } EM = \sqrt{\left(\frac{BNO_x}{BNO_x}\right)^2 + \left(\frac{BPM}{BPM}\right)^2}$$

(최소화 조건)

경계 조건:

Smoke Number < 2.5 FSN

$BNO_x < 0.7 \text{ g/kWh}$

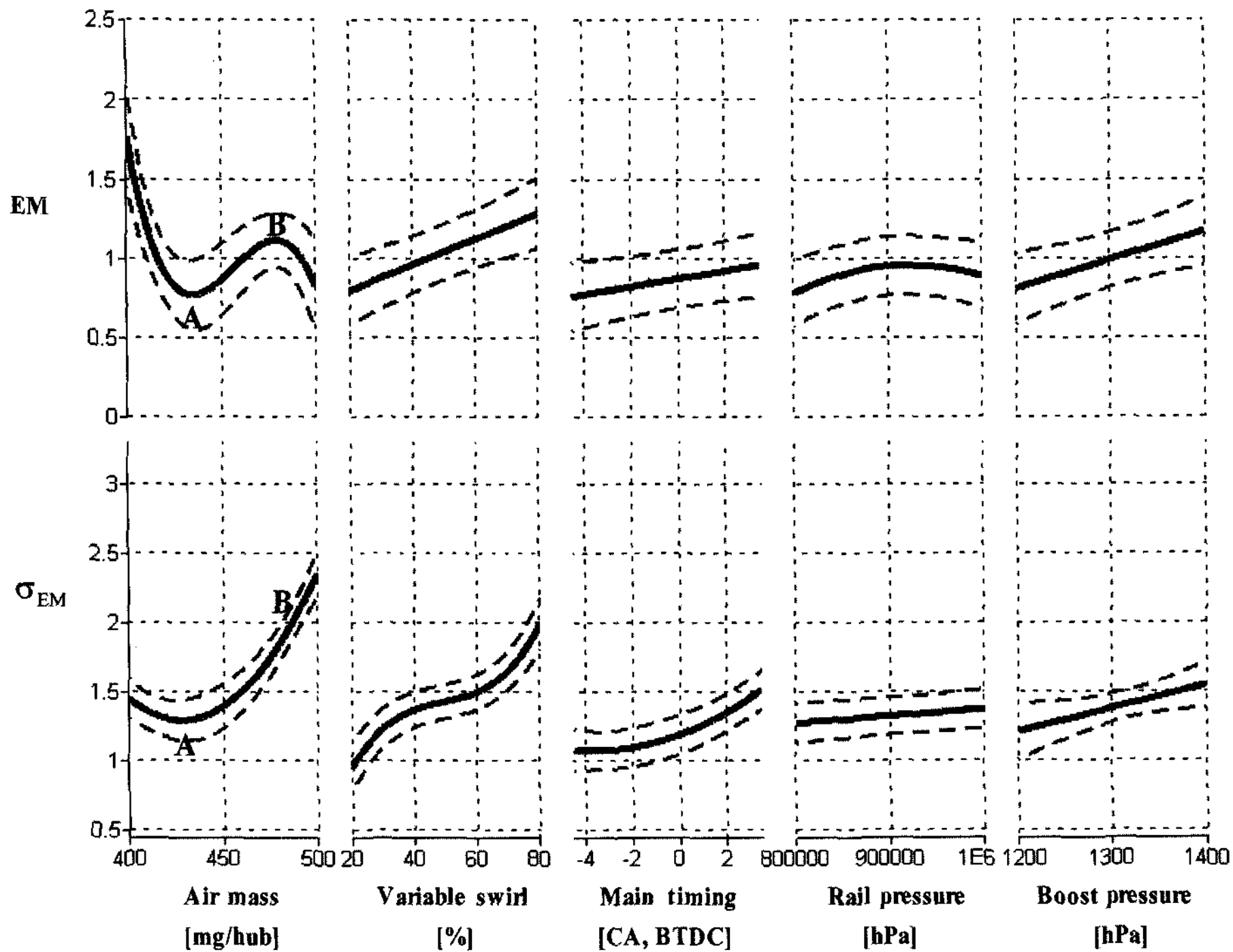


Fig. 4 Intersection : Parameter variations vs Target functions (example of OP 3)

최적화 알고리즘 : Genetic Algorithm<sup>6)</sup>

BNOx의 상한치를 경계조건으로 설정하는 것은 무의미한 최적화 결과의 발생을 막기 위한 것으로서, BNOx만을 경계치 상한조건으로 둔 이유는 NOx와 PM이 서로 Trade-off의 상충관계를 갖기 때문이다. 이를 통해 BNOx 또는 BPM이 지나치게 크거나 또는 모델링 등의 오류로 인한 무의미한 최적화 결과를 막을 수 있다. 0.7 g/kWh라는 값은 해당 운전 영역에 대해 시험적으로 알려진 임의의 기준이며, 물론 최적 조건이나 운전 영역에 따라 달라질 수 있다. 또한 Smoke Number의 상한치는 차량운전조건에서 가시매연의 발생을 막기 위한 것이다.

3.2 배출가스의 최소화를 위한 1차 최적화 결과

Table 4는 OP 1, 2, 3에 대해 중품 인젝터 만에 대한 모델로부터 EM값을 최소화한 1차 최적화결과이다.

이러한 최적화 결과는 하드웨어 편차에 대한 고려없이 중품 인젝터에 대해서만 배출가스 값을 최소화한 결과이며, 이는 지금까지의 일반적인 방법론에 의한 것이라 볼 수 있다.

Table 4의 1차 최적화결과는 다음의 2차 최적화결과와 다시 비교될 것이다.

4. 2차 최적화 : 인젝터에 의한 편차의 최소화

Table 4 Optimization results of minimizing emissions with the mean valued injectors

OP	Speed	Torque	Air mass	Variable swirl	Main timing	Rail press.	Boost press.	BNOX	BPM
	rpm	Nm	mg/hub	%	CA BTDC	hPa	hPa	g/kWh	g/kWh
1	1472	85	339.8	38.3	-5.0	554550	1168	0.551	0.270
2	1459	147	393.5	24.6	-2.4	900000	1220	0.673	0.271
3	1669	147	400.0	20.0	-4.5	899980	1234	0.468	0.253



#### 4.1 최적화를 위한 목적함수 및 경계조건

비록 본 연구의 가장 중요한 목적은 하드웨어 편차로부터 발생하는 배출가스의 편차를 최소화하는 것이지만, 만일 편차가 최적화된 배출가스 및 매연의 수준 자체가 지나치게 높다면 이는 결과적으로 무의미하다고 볼 수 있다. 따라서, 목적함수 및 경계조건이 다음과 같이 설정되었다.

최적화 목적함수 :  $\sigma_{EM}$  (최소화 조건)

경계 조건 :

Smoke Number < 2.5 FSN

BNOx < 0.7 g/kWh

최적화알고리즘 : Genetic Algorithm

배출가스의 편차를 최소화하되, 배출가스의 수준을 1차 최적화결과와 동등수준으로 유지하여 결

과를 비교하기 위해 경계조건  $BNO_{x_{MVI}} < 0.7 \text{ g/kWh}$  가 재차 설정되었다.

#### 4.2 배출가스 편차를 최소화하기 위한 2차 최적화 결과

Table 5는 위에서 결정된 경계조건을 기준으로 모델로부터 배출가스 편차에 대한 2차 최적화 결과를 나타낸다. “ $\sigma_{EM}$  by Model”은 모델에서 바로 추출된 값이며, “ $\sigma_{EM}$  by Calc.”은 BNOx, BPM값을 이용하여  $\sigma_{EM}$ 의 공식으로부터 계산된 값이다. OP 1의 경우는 두 값이 다소 차이를 보이고 있으나, 나머지의 경우는 계산된 값과 모델에서 추출된 값이 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

Table 4(1차 최적화)에서 결정된 파라미터 변수를 상품, 중품, 하품 인젝터의 모델에 모두 동일하게 적용한 결과를 Table 6에 나타내었다. 2차 최적화결과

Table 5 Model-based emissions of “deviation-minimized” optimization results for the MAX, MVI, MIN injectors

OP	Air mass	Variable swirl	Main timing	Rail press.	Boost press.	BNOX MVI	BNOX MAX	BNOX MIN	$\sigma_{EM}$ by Model
						BPM MVI	BPM MAX	BPM MIN	$\sigma_{EM}$ by Calc.
	mg/hub	%	CA BTDC	hPa	hPa	g/kWh	g/kWh	g/kWh	-
1	343.4	46.1	-1.8	620000	1196	0.680	0.634	0.715	0.607
						0.246	0.498	0.423	0.976
2	411.5	21.7	-6.0	863200	1240	0.700	0.714	0.593	0.345
						0.287	0.214	0.205	0.357
3	429.9	34.3	-4.5	867010	1205	0.700	0.714	0.926	0.465
						0.292	0.309	0.392	0.474

Table 6 Model-based emissions of “emission-minimized” optimization results for the MAX, MVI, MIN injectors

OP	Air mass	Variable swirl	Main timing	Rail press.	Boost press.	BNOX MVI	BNOX MAX	BNOX MIN	$\sigma_{EM}$ by Model
						BPM MVI	BPM MAX	BPM MIN	$\sigma_{EM}$ by Calc.
	mg/hub	%	CA BTDC	hPa	hPa	g/kWh	g/kWh	g/kWh	-
1	339.8	38.3	-5.0	554550	1168	0.551	0.560	0.578	1.080
						0.270	0.608	0.456	1.277
2	393.5	24.6	-2.4	900000	1220	0.673	0.744	0.639	0.712
						0.271	0.481	0.262	0.645
3	400.0	20.0	-4.5	899980	1234	0.468	0.486	0.731	1.340
						0.253	0.520	0.131	1.253

(Table 5)와 1차 최적화결과(Table 6)을 비교하면, 2차 최적화의 결과에서 인젝터 간의 배출가스 편차가 줄어들었음을 명확히 알 수 있다. 또한 2차 최적화의 결과를 보면 전체적인 배출가스의 수준이 1차와 비슷한데, 이는 2차 최적화에도 1차와 동등한 경제조건 상한치( $BNO_{x_{MVI}} < 0.7 \text{ g/kWh}$ )가 적용되었기 때문이다.  $\sigma_{EM}$ 에 의한 최적화를 통해 추가적인 배출가스 수준의 커다란 상승없이 인젝터 유량 편차에

의한 배출가스 편차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 최적화 결과의 검증

Fig. 5는 Table 5, 6에서 보인 모델기반의 예측 결과를 무차원화된 배출가스 분포 삼각형으로 도시화한 것이다. 또한 Fig. 6은 Fig. 5에 보인 모델기반의 결과를 검증하고자 Table 5, 6과 동일한 파라미터를 적용하여 엔진 대상 벤치에서 측정한 배출가스값을

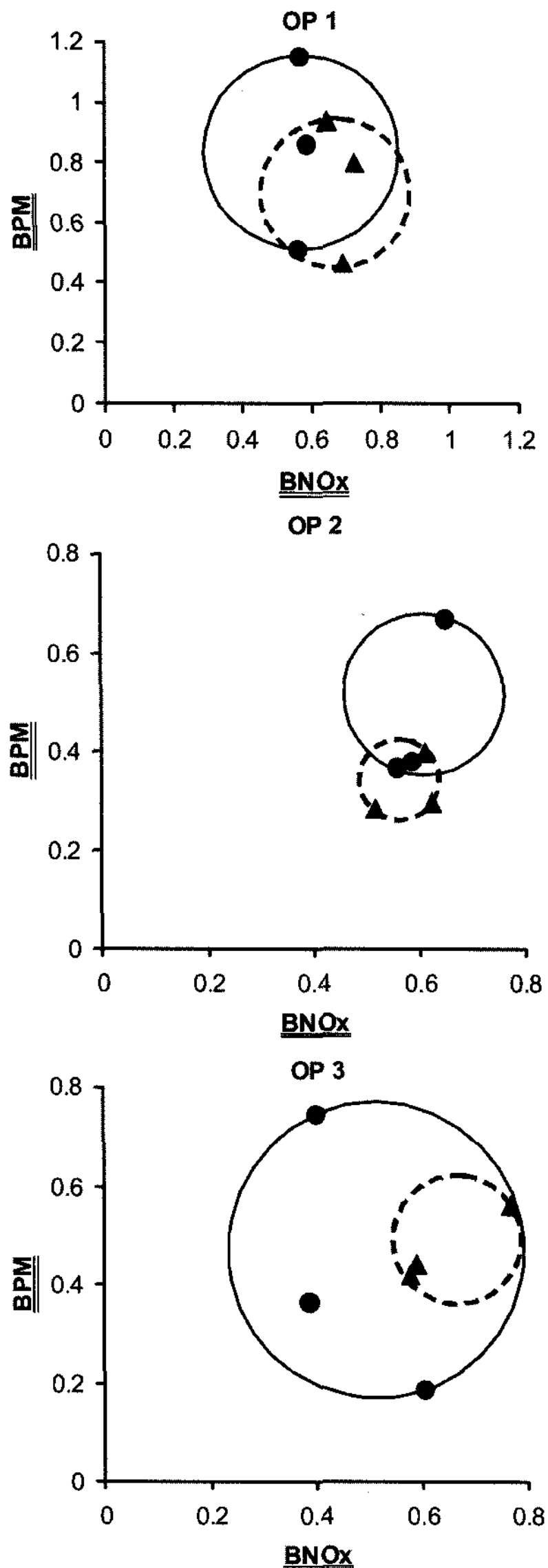


Fig. 5 Comparison between 1st and 2nd optimization results (model-based results)

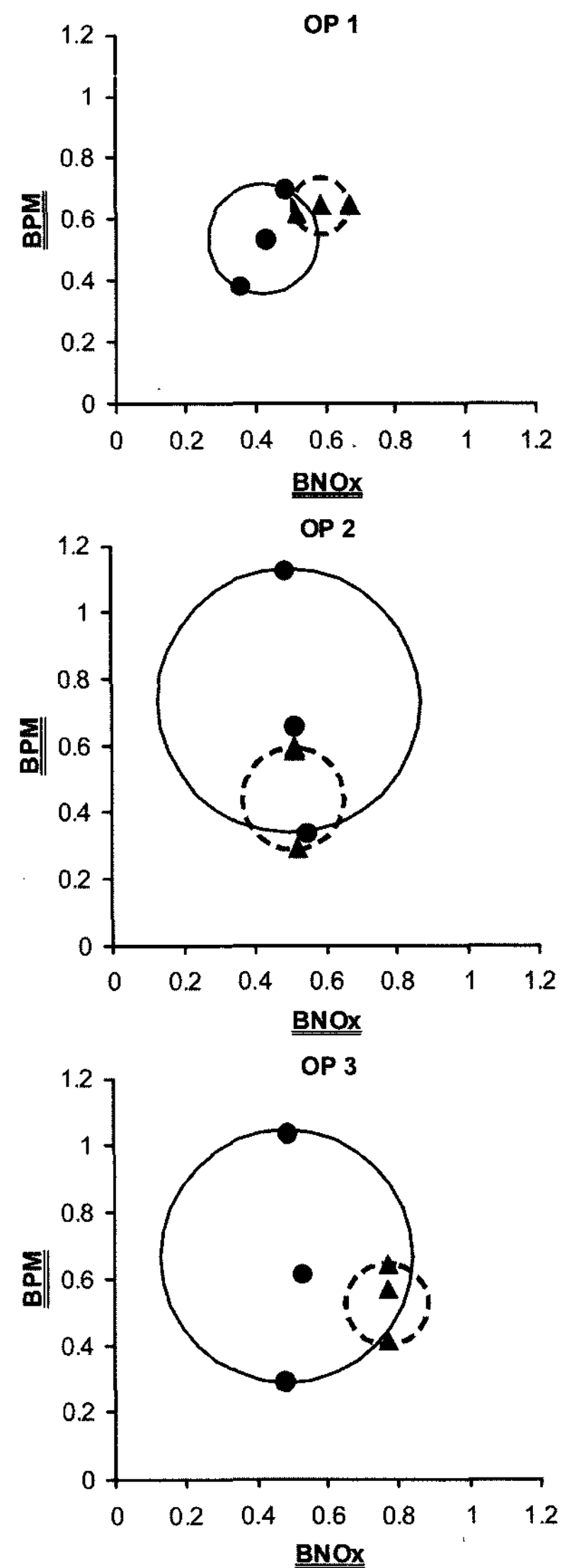


Fig. 6 Comparison between 1st and 2nd optimization results (test results)



도시화한 결과이다.

Fig. 5에서 2차 최적화 결과가 1차 최적화 결과에 비해 배출가스의 편차를 확실히 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 2차 최적화 결과의 전반적인 배출가스 수준은 1차결과와 거의 동등하다. 이러한 결과는 서로 다른 목적함수와 동일한 경계조건에서 비롯된 것이라 할 수 있다. 1차 최적화는 목적함수로 EM이 적용된 반면, 2차 최적화는 목적함수로  $\sigma_{EM}$ 이 적용되었다. 또한 경계조건은 1차, 2차 모두 동일하게  $BNOx < 0.7 \text{ g/kWh}$ 이 적용되었다. 중품 인젝터의 결과만을 비교하면 1차 최적화에서 중품 인젝터의 배출가스값을 최적화한 결과가 2차 최적화에서의 결과보다 다소 더 우수하지만, 최적화시 적용된 경계조건이 1차 및 2차에 대해 동일하기 때문에 그 차이는 고려할만큼 크지 않다. 반면, 편차의 관점에서 보면, 목적함수  $\sigma_{EM}$  때문에 2차의 결과는 1차의 결과보다 더 우수한 인젝터간 배출가스 편차를 나타내게 된다. 이는 한편으로 중품 인젝터의 배출가스값과 인젝터 상품, 중품, 하품 간의 편차 사이의 상충관계(trade-off)를 의미한다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 실제 엔진 시험에 의해 1차 및 2차 최적화의 결과를 확인한 결과를 나타낸다. 본 시험에서 고려되지 않은 다른 노이즈인자(공기량센서, 액츄에이터 작동오차, 측정장비 오차, daily-variation 등)로부터 기인하는 모델기반 결과와 측정결과와의 차이가 엄연히 존재하지만, 전반적인 측정결과 역시 각각의 운전영역에 대하여 1차 및 2차 최적화의 모델기반 결과와 동일한 경향성을 보임을 알 수 있다.

이는 DoE를 이용한 인젝터 유량 편차에 대한 강건 매핑이 가능함을 의미한다. 엔진 성능 및 배출가스 최적화 개발에 있어 엔진 파라미터 매핑의 초기 단계부터 이를 적용한다면 개발시간의 단축 및 보다 더 효율적인 매핑을 수행할 수 있다.

## 6. 결론

- 1) 엔진 하드웨어 편차에 기인한 배출가스 편차에 대한 강건 매핑의 가능성을 검토하는 연구가 수행되었다. V6타일의 배기량 3.0L 디젤엔진에 대하여, 허용된 스펙 오차 내에서 상품, 중품, 하품의 특성을 가지는 3가지 인젝터에 대하여 DoE

시험 및 최적화가 진행되었다.

- 2) 본 연구를 위하여 인젝터 간 배출가스 편차를 의미하는 목적함수가 정의되었으며, 엔진 파라미터의 강건 매핑이 가능하도록 최적화되었다. 본 연구에 의해 추출된 최적화 매핑 결과는 실제로 인젝터간 편차에 대해 덜 민감하였으며, 이는 하드웨어 편차에 대하여 강건한 매핑을 얻기 위하여 DoE 및 최적화가 사용될 수 있음을 뜻한다.
- 3) 적절한 목적함수 및 경계조건 설정과 함께 수행된 순차적인 1, 2차 최적화 결과의 비교를 통하여, 단지 배출가스의 수준 뿐 아니라 인젝터 유량 편차에 따른 배출가스의 편차까지 동시에 최소화할 수 있음을 보였다.

## 7. 향후의 연구과제

- 1) 본 연구의 결과를 배출가스에 영향을 끼치는 공기량센서, EGR 밸브, 터보차저, 램다 센서 등의 하드웨어에 대해서도 추가 적용하여 관련된 강건 매핑의 존재 가능성에 대하여 검토 가능하다.<sup>7)</sup>
- 2) 본 연구에서 수행된 국지적인 최적화(Local optimization) 결과의 적절한 결합을 통하여 전체적인 엔진 운영영역에 대하여 하드웨어 편차에 대해 보다 강건한 엔진 파라미터 매핑을 수행하는 전역 최적화(Global optimization)에 대한 연구가 시도될 수 있다.
- 3) 하드웨어 편차는 비단 배출가스 외에도 NVH (Noise-Vibration-Harshness) 등의 디젤엔진 차량 성능에도 큰 영향을 끼침을 고려할 때, 본 연구의 개념을 확장하여 다차원의 성능인자에 대해서도 좋은 모델링 수준을 유지하는 목적 함수의 선정 및 개발과 이를 이용한 최적화 방법론에 대한 연구가 가능하다.

## References

- 1) K. Röpke and 84 Co-authors, Design of Experiments(DoE) in Engine Development II, Ed. K. Röpke, Expert Verlag, 2005.
- 2) Y. Raynaud, D. Lopes, T. Fortuna, A. Zrim and A. M. Gallacher, "Application of Adaptive

- Online DoE Techniques of Engine ECU Calibration,” SAE 2002-04-0078, 2002.
- 3) T. Nishimura, K. Satoh, S. Takahashi and K. Yokota, “Effects of Fuel Injection Rate on Combustion and Emission in a DI Diesel Engine,” SAE 981929, 1998.
  - 4) K. Röpke, A. Rosenek and M. Fisher, “Practical Application of DoE Methods in the Development of Production Internal Combustion Engines,” SAE 2002-04-0083, 2002.
  - 5) Y. Sushma, M. Sridhar and A. D. Dharmadhikari, “Experiments Planning for Robust Design Through CAE,” SAE 2006-01-3518, 2006.
  - 6) D. Kim, N. Cho, S. Cha and S. Cho, “An Optimization Technique for Diesel Engine Combustion Using a Micro Genetic Algorithm,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.3, pp.51-58, 2004.
  - 7) X. Liu and S. Jiang, “A DoE-based Approach to Multi-response Optimization,” SAE 2003-01-0880, 2003.