

고속 NO 분석기를 이용한 SI 엔진에서의 사이클 변동에 따른 NO 배출에 관한 분석

Analysis on Cycle-by-Cycle NO Emissions from an SI Engine with Fast NO Analyzer

성 정 민*, 김 현 우**, 이 경 환**
Jung-Min Sung, Hyun-woo Kim, Kyung-Hwan Lee

ABSTRACT

The NO emissions at the exhaust manifold were investigated with a fast NO analyzer to investigate the cycle-by-cycle variations on NO emissions level and the dependence of NO emissions on combustion. The measurement was performed with a part load condition with respect to the mixture ratios and the changes in loads at 1800rpm. The averaged values were obtained during 200 cycles. We found that there is characteristic pattern in NO emissions from exhaust port and it was possible to set a representative value with the data sampled during specific period. As the load increased, the characteristics of NO emissions were more dependent on combustion pressures. It was also analyzed that the correlation between combustion pressures and NO emissions for different equivalence ratios tends to increase as the mixture goes leaner. Furthermore, this correlation for the lean mixture near the lean limit seemed to be kept.

주요기술용어 : SI engine(전기점화기관), BMEP(제동평균유효압력), Nitrogen oxide(질소산화물), Linear correlation coefficient(선형상관계수)

1. 서 론

점점 악화되고 있는 대기오염으로 인해 자동차의 배출가스에 대한 규제는 더욱 강화되고 있고 향후에도 지속적으로 강화될 것으로 전망된다. 이에 대한 대응으로 배기저감에 대한 다양한 연구 개발이 활발하게 전개되고 있으며, 특히, 질소산화물에 대해서는 그 발생 메카니즘이나,^{1,2)} 저감 방법³⁾ 등에 대해 많은 연구가 이루어져 오고 있는데, 엔진의 특성에 따라 배출 특성이 달라

지는 문제가 있어 효율적인 저감 대책이 이루어지기 위해서는 엔진특성에 따라 저감 방법을 달리해야 한다.

NO의 배출 특성은 산소의 농도와 화염의 온도에 따라 영향을 받게 된다.⁵⁾ 즉, 공연비가 이론공연비보다 약간 농후한 상태에서 화염의 온도는 최대가 되지만 산소의 농도가 부족하게 되어 이 영역에서는 NO의 최대 배출 특성을 보이지 못하고, 이 조건보다는 오히려 공연비가 약간 희박한 조건에서 연소시켰을 때 충분한 산소의 농도로 인해 NO의 최대의 배출 특성을 갖게 되며, 이보다 농후하거나 희박하게 되면 배출량은 감소하게 된

* 회원, 순천대학교 대학원

** 회원, 순천대학교 기계·자동차공학부

다. 특히, 린번엔진이나 직접분사식엔진의 경우는 공연비 분포가 균일하지 않고 점화플러그 주위가 전체 공연비보다 농후하게 되어,⁶⁾ 전영역에 걸쳐 동일하게 희박한 공연비 조건의 포트분사식 엔진보다 NO 배출이 많아지는 경향이 있다.

본 연구에서는 4행정 SI엔진의 배기매니폴드에서 고속 NO 분석기를 이용하여 NO 배출특성이 부하조건과 공연비를 달리했을 때, 각 사이클마다의 NO 배출과 연소압이 어떤 관련성이 있는지를 규명하기 위해 시간에 따른 NO의 배출형태를 파악하고 각 cycle마다 배출되는 NO의 농도를 측정하여 연소실의 연소상태에 따른 배출 특성을 파악하고자 한다.

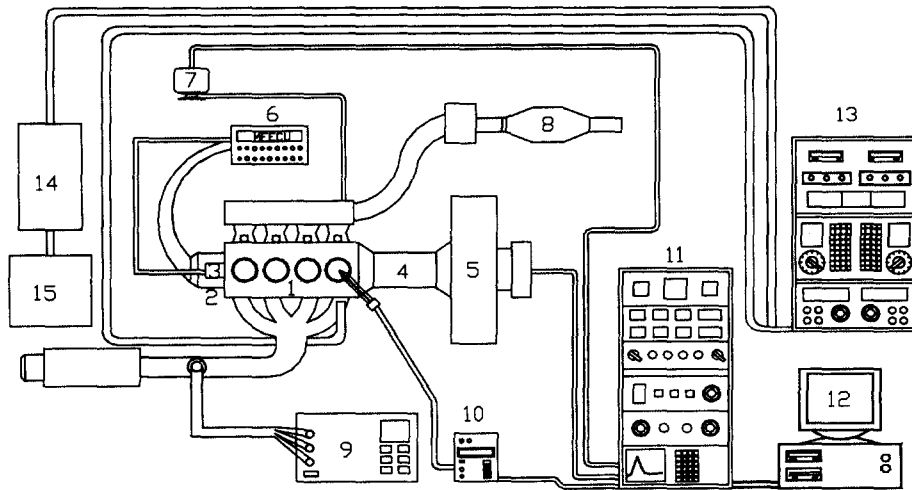
2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

연구의 실험장치의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다. 연료 및 점화 시기 조절 장치를 통하여 점화 시기와 연료분사 시기 및 분사 양을 조정하여 부하 및 공연비를 조정할 수 있다. 연소실내의 연소압력을 측정하기 위하여 Kistler 6053C60 압

전형(Piezo electric type) 압력센서를 4번 실린더 헤드에 장착하였고 Data acquisition system을 통하여 압력데이터를 취득하였다. 배축가스 분석기(Horiba, MEXA-554JK)를 사용하여 공연비를 확인하였으며 고속 NO(LHC500, Combustion) 분석기의 샘플링 프로브를 통하여 연소실의 NO를 샘플링하였다. NO 샘플링에 있어서 다른 기통의 영향을 지양하기 위하여 4번 실린더 배기포트를 다른 포트와 분리시켰고, 또한, NO 분석기의 응답시간을 고려하여 4번 실린더의 배기 밸브에서 약 15mm 떨어진 곳에 샘플링 프로브를 장착하였다. 실시간으로 NO의 변화를 측정하기 위한 고속 NO 분석기의 개략적인 구성을 Fig. 2에 나타냈다. 이 장치에서 CP(Constant Pressure) chamber는 연소의 주기적 변동에 의한 영향을 줄여주는 기능을 하며, CP chamber내의 Reaction chamber에서 샘플링 된 NO가스와 오존발생기로부터 발생하는 오존이 반응하여 발생하는 빛을 Optical fiber band를 통하여 Photo detector로 감지하여 NO 발생량을 알 수 있다. 고속 NO 분석기의 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서 대상으로 사용한 엔진은 4밸브



1. Test engine 2. ECU 3. Encoder 4. Pressure-sensor 5. Dynamometer 6. Fuelling & spark-timing controller 7. Throttle actuator 8. Laminar flow meter 9. Exhaust gas analyzer 10. Charge amplifier 11. Dynamometer controller & data acquisition system 12. Computer 13. Fast NO analyser 14. Ozone-generator 15. Vacuum pump

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

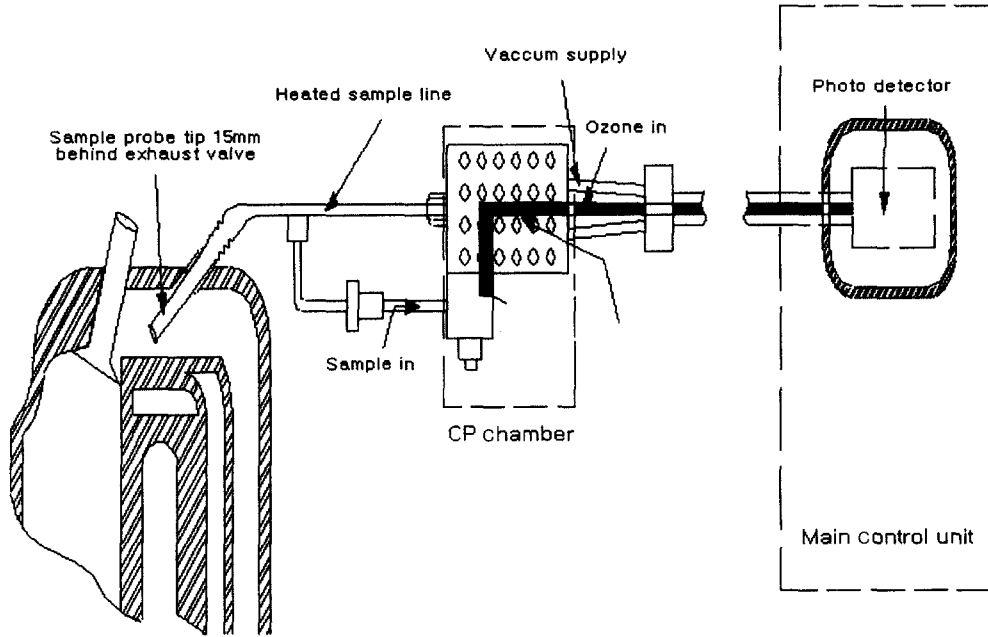


Fig. 2 Measurement system of NO emission

Table 1 Specification of fast NO analyser

Sensitivity	0.1mv/ppm to 50mV/ppm in 9 ranges as NO at an STP sample flow of 50cc/min
Linearity	±1% of full scale to 5000ppm NO ±2% of full scale to 10000ppm NO
Noise	rms. < 1% of mean for 1000ppm NO, gain 20
Response time	90-10% ~ 4ms with a standard sampling configuration

Table 2 Engine specification

	Engine
Bore (mm)	75.5
Stroke (mm)	83.5
Connecting rod length (mm)	131.0
Cylinder displacement (cc)	1495
Compression ratio	9.5:1
Valve timing (°CA)	5/35 43/5

전기점화 엔진으로 연소실 형태는 semiwedge형이다. Table 2에 본 연구에서 사용된 엔진의 제원을 보인다.

2.2 실험조건 및 방법

엔진을 냉각수 온도 85°C, 오일 온도 90°C까지 완전하게 난기 시킨 후, 엔진 회전속도 1800rpm, 이론공연비에서 채동 평균 유효압력(BMEP)을 2, 3, 4, 5bar로 변화하여 부하변화에 따른 연소압과 NO배출의 상관성을 알아보았다. 또한, 엔진의 회전속도를 1800rpm에, 그리고 채동 평균 유효

효압력(BMEP)을 2bar로 고정시킨 다음, 공연비를 이론 공연비에서 18.5:1까지 변화시켜서 공연비에 따른 연소압과 NO배출의 상관성을 알아보았다. 연소압과 NO의 데이터는 연소의 주기적 변화와 NO 배출농도의 변동을 고려하여 1°CA(Crank Angle)간격으로 200사이클을 취득하여 사용하였다. 모든 경우의 점화시기는 최적점화시기(Minimum - advance for the best torque)를 결정한 후에 실험하였다.

본 연구에서는 NO와 연소압과의 관계를 알아보기 위하여 선형상관계수를 이용하였다. 선형

상관계수란 산포도에서 두 개의 변수 x, y가 어떻게 관련되었는지를 나타내는 것으로 Dunn과 Clark의 논문에서 이에 대해 자세히 기술되어 있으므로⁷⁾ 여기서는 대략적인 개념만을 서술하겠다.

X, Y 두 개의 변수를 아래와 같이 정의한다.

x_i : x on the i-th individual for $i=1,2,\dots,n$

y_i : y on the i-th individual for $i=1,2,\dots,n$

실험을 통한 데이터로부터 분산을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$covariance(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{n-1}$$

where : \bar{X} mean value of x

\bar{Y} mean value of y

x의 표준편차를 V(x)라고 하면

$$V(x) = \left[\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

형상관계수(R)는

$$R = \frac{covariance(x, y)}{V(x)V(y)} = \frac{\sum(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{[\sum(x_i - \bar{X})^2 \sum(y_i - \bar{Y})^2]^{\frac{1}{2}}}$$

으로 표현 할 수 있다.

3. 실험결과 및 분석

Fig. 3은 1800rpm, 2bar BMEP에서의 연소압과 NO 배출 특성을 나타낸 그림이다. 각 크랭크앵글에 대한 NO값은 200사이클 동안의 NO값을 평균한 것이다. 여기서 보면 EVO시점과 NO값이 급격히 변화하기 시작하는 점과의 사이에는 시간차가 존재한다. 이는 배출가스가 프로브를 통해 Reaction Chamber에 도달하는 시간과 고속NO 분석기의 응답지연시간으로, 이 실험의 경우, 응답지연 시간은 배기밸브가 열리고 난 후, 약 60°CA (Crank Angle)로 약 5ms이다. Fig. 3을 보면 초기에 블로다운(blowdown) 현상이 있는 부근에서 NO의 배출이 큰 값을 보이고, 이후 NO값이 떨어지는 현상이 나타난다. 이는 연소의 대부분이 상사점 근방에서 이루어지고 연소 후 발생하는 기연

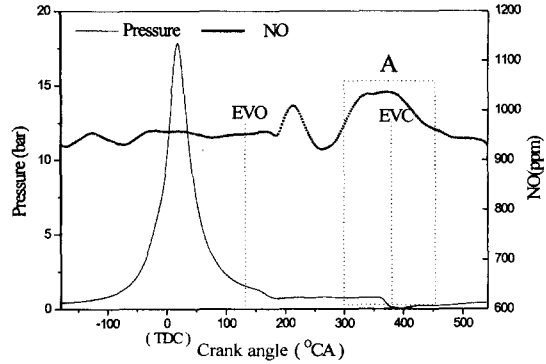


Fig. 3 Averaged NO and pressure trace with respect to crank angle at 1800rpm and 2.0bar BMEP

가스 또한 상사점 근방에 머물러서, 배기밸브가 열렸을 때 NO값이 점차 증가하다가, 이후로 피스톤이 하강하면 연소실 체적의 급격한 변화로 인해 기연가스의 운동량을 증가시키게 되고 이로 인하여 기연가스의 분포는 상사점 부근보다는 하사점 부근으로 갈수록 밀집된 형태를 나타내기 때문에 NO의 배출이 점차 감소하는 구간을 가지는 패턴을 보이는 것으로 추정된다.⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 배기행정 중 · 후반부인 300°CA ~ 450°CA에서 취득되어진 NO값을 대푯값으로 하였는데, 이는 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 A구간에서의 NO값과 연소압과의 상관성이 가장 높게 나타나는 것에서 그 타당성이 입증된다. 또한, Fig. 4에서 보면 최고 연소압과 NO와

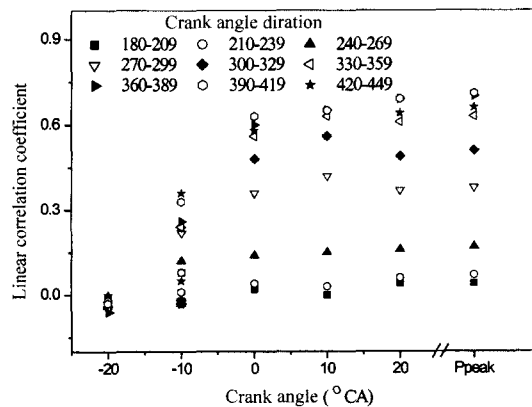


Fig. 4 Linear correlation between NO and pressures for different referenced crank angle durations

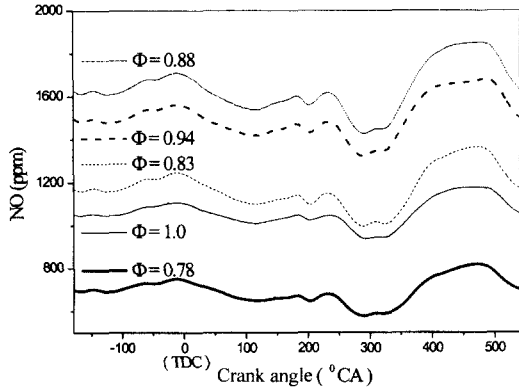


Fig. 5 Averaged NO trace at 1800rpm and 2.0bar BMEP with respect to equivalence ratios with unisolated exhaust manifolds

의 상관성이 가장 높다는 것을 알 수가 있다.⁸⁾ 한편, 초기 연소압과 NO와의 상관성은 낮은데, 이 경우 연소실내에서 NO를 직접 샘플링하지 않았기 때문에 그 상관관계 역시 명확하다고 할 수는 없다. Fig. 5는 기존 엔진의 배기 매니폴드에서 4번 실린더의 배기 포트에 설치된 프로브를 통해 NO를 샘플링한 경우이다. NO변동의 경향은 대체로 일치한다는 것을 알 수가 있으나, 배기행정 이 아닌 행정에서도 다른 기통의 영향으로 EVO 이전의 NO농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 배기매니폴드의 4번기통을 분리하여 NO를 샘플링하였다.

3.1 부하변화에 따른 NO 배출특성

엔진회전수가 1800rpm일 때 부하변화에 따른 NO의 배출상태를 Fig. 6에 나타내었다. 부하가 높아질수록 NO 발생량이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 부하변화에 따른 NOpeak값과 최고연소압을 Fig. 7에서 나타내었다. 이 경우, 부하가 증가할수록 최고 연소압과 NOpeak가 증가함을 알 수가 있는데 이는 동일한 공연비에서 부하증가로 인하여 연소온도의 상승에 기인하는 것이다.

Fig. 8에 부하변화에 따른 연소압과 NO의 상관성을 나타내었다. 압축행정 TDC이후의 상관성이 높는데 이는 초기연소보다는 후연소와 NO

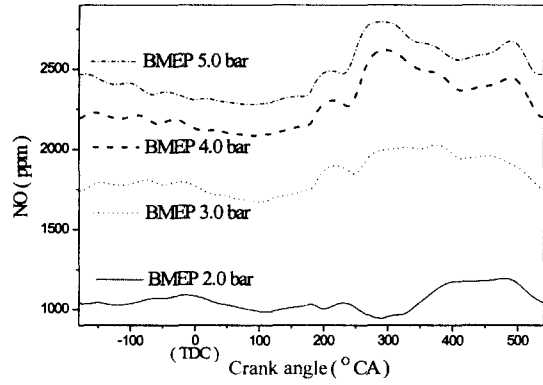


Fig. 6 Averaged NO trace at 1800rpm with respect to load conditions

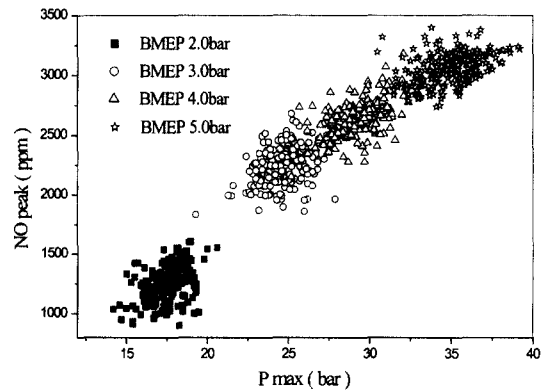


Fig. 7 Cycle-by-cycle Peak NO emission with respect to load conditions at 1800rpm

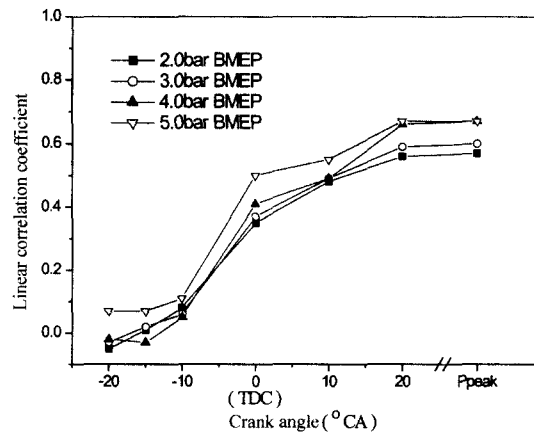


Fig. 8 Linear correlation coefficient between pressures at referenced crank angles and NO with respect to load conditions

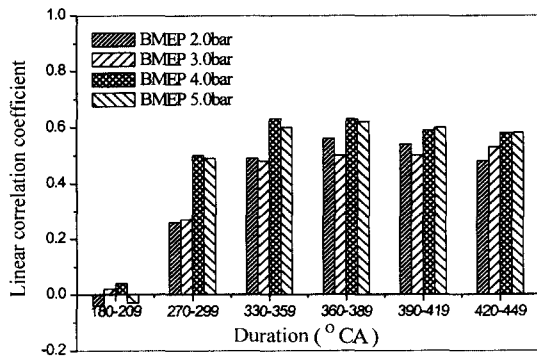


Fig. 9 Linear correlation coefficient between peak pressures and NO at separated CA intervals

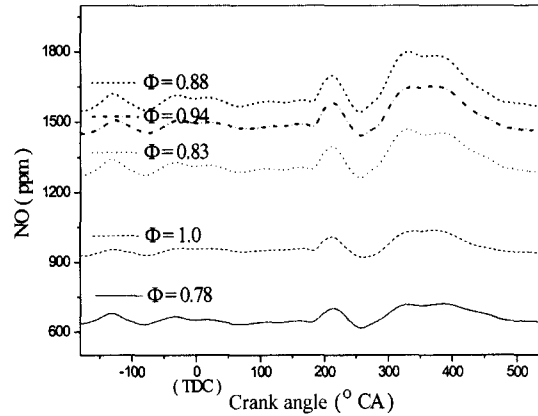


Fig. 10 Averaged NO trace at 1800rpm and 2.0bar BMEP with respect to equivalence ratios

와의 관계가 더 밀접하다는 것을 의미한다. 또한, 부하가 증가할수록 상관성이 높게 나타나는데 이는 연소실내의 기연가스 온도가 부하가 증가할수록 높아지고 이로 인하여 NO의 발생량 또한 증가하는데 그 원인이 있다고 할 수 있겠다.

EVO 이후로 30°CA를 갖는 6개의 소구간을 설정하여 각 구간별로 최고 연소압과 NO와의 상관성을 Fig. 9에서 알아보았다. NO 배출량이 높은 구간에서 최고 연소압과의 상관성 또한 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 공연비 변화에 따른 NO배출 특성

공연비의 변화에 따른 NO배출특성을 Fig. 10에서 나타내었고 연소압과 NO의 공연비에 따른 분포를 Fig. 11에서 나타내었다. 공연비가 희박해질수록 NO발생량이 증가하다가 $\Phi=0.88$ 에서 최고를 보이고 lean해질수록 더 큰 NO의 감소를 보인다. Fig.11에서 $\Phi=1.0$ 의 경우, 압력과 NO의 분포가 상당히 안정적임을 알 수 있는데 반해, $\Phi=0.78$ 의 경우, 연소압과 NO가 상대적으로 넓게 분포되어서 연소자체가 불안정하다는 것을 유추할 수 있다.

공연비에 따른 NO의 최고치와 평균치 및 연소압과 NO의 C.O.V를 Fig. 12에 나타내었다. 최고치와 평균치 모두 $\Phi=0.9$ 부근에서 가장 높은 수치를 나타내고 이를 정점으로 낮아지는 경향을 보이며, 희박해질수록 C.O.V가 증가한다는 것을

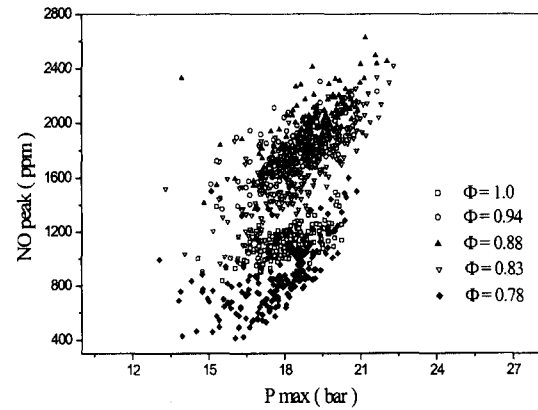


Fig. 11 Cycle-by-cycle Peak NO emission with respect to equivalence ratios at 1800rpm

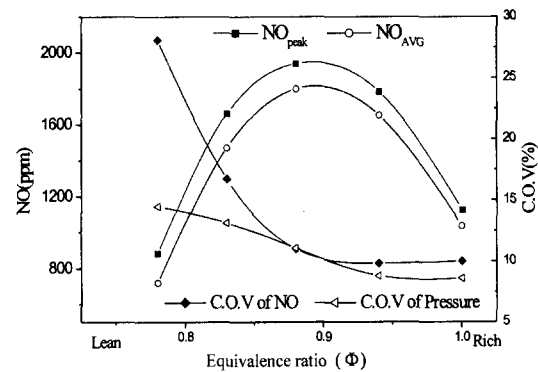


Fig. 12 Peak NO level, averaged NO level and coefficient of variation on peak NO and pressure with respect to equivalence ratios

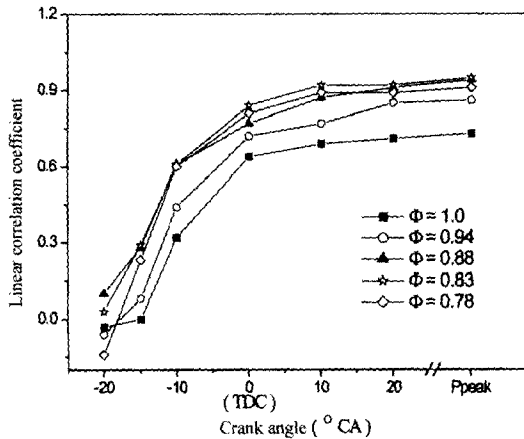


Fig. 13 Linear correlation coefficient between pressures at referenced crank angles and NO with respect to equivalence ratios

알 수가 있다. 공연비에 따른 최고 NO값의 변동 폭은 $\phi=0.9 \sim \phi=1.0$ 의 경우 약 10% 정도이지만, 희박한 공연비에서는 그 값이 28%까지 급격하게 증가한다.

공연비에 따른 연소압과 NO와의 상관관계를 Fig. 13에서 알아보았다. 전반적으로 공연비와는 무관하게 압축행정 TDC 이후의 상관성이 높아진다는 것을 알 수가 있다. 그러나,

공연비가 희박해질수록 초기 연소압에서의 상관성이 높아진다는 것을 알 수가 있다. 이는 점화 시기의 영향으로 보인다. 즉, 이론 공연비에서의 최적점화시기인 25°BTDC의 경우와는 달리 공연비가 희박해질수록 점화시기가 진각되고 이로 인하여 초기 연소압과 NO와의 상관성이 높게 나타난다. 또한, $\phi=0.78$ 의 경우, 연소압과 NO와의 상관성이 다시 떨어지는 경향을 보이는데, 그 차이는 그다지 크지 않다.

4. 결론

부하와 공연비에 따른 NO 배출특성을 파악하기 위하여 연소압과 NO농도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축행정 TDC 이후의 연소압과 NO와의 상

관성이 높다는 것을 알 수 있었다.

- 2) 부하가 증가할수록 연소압과 NO와의 상관성은 증가한다. 또한, 최고 연소압과의 상관성이 가장 높게 나타난다.

- 3) $\phi=0.9$ 에서 NO는 가장 높은 농도를 보여주며, 공연비가 낮아질수록 상관성은 높아진다. 가연한계에 이르면 초기압력과의 상관성이 떨어지나 전체적인 상관성에 있어서는 그다지 큰 차이는 없다

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) S. R. Turns, An Introduction to Combustion, McGRAW-HILL, pp.172-175, 1999.
- 2) J. B. Heywood, "Predicting NOx Emissions and Effects of Exhaust Gas Recirculation in Spark Ignition Engines," SAE 730475, 1973.
- 3) T. Aoyama, et al., "NOx Reduction by Injection Control," SAE 900637, 1990.
- 4) J. K. Ball, C. R. Stone, N. Collings, "Cycle-by-Cycle Modelling of NO Formation and Comparison with Experimental Data," Proc. Instn. Mech. Engrs. Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol. 213, 1999.
- 5) Y. Takagi, T. Teruyuki, et al., "Simultaneous Attainment of Low Fuel Consumption, High Output Power and Low Exhaust Emissions in Direct Injection SI Engine," SAE 980149, 1998.
- 6) K. St. J. Reavel, N. Collings, M. Peckham, T. Hands, "Simultaneous Fast Response NO and HC Measurements from a Spark Ignition Engine," SAE 971610, 1997.
- 7) O. J. Dunn, V. A. Clark, Applied Statistics: Analysis of Variance and Regression, John Wiley & Sons, 1997.
- 8) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGRAW-HILL, pp.231-232.