

〈논 문〉 SAE NO. 953707

디젤기관의 연료소비율 및 질소산화물 배출물에 미치는 EGR의 영향에 관한 연구

A Study on Effect of EGR upon Fuel
Consumption Rate and NOx Emission in Diesel Engines

배 명 환,* 임 재 근**
M. W. Bae, J. K. Lim

ABSTRACT

The effects of exhaust gas recirculation(EGR) on the characteristics of NOx emissions and specific fuel consumption rate have been investigated using an eight-cylinder, four cycle, direct injection diesel engine operating at several loads and speeds. The theoretical NO formation concentration is calculated with the equivalence ratio as a parameter of flame temperature to study the effect of EGR on NOx emissions in the diesel combustion. The experiments in this study are conducted on the fixed fuel injection timing of 38° BTDC regardless of experimental conditions. It is found that the specific fuel consumption rate is slightly increased with EGR rate, and NOx emissions are markedly reduced owing to the drop of the incoming oxygen concentration and the increase of equivalence ratio as the EGR rate increases.

주요기술용어 : Exhaust Gas Recirculation(배기재순환 : EGR), Diesel Engine(디젤기관), Intake Oxygen Concentration(흡기산소농도), Equivalence Ratio(당량비), NOx Emission(NOx배출물)

1. 서 론

디젤기관을 채용하고 있는 대형차량은 대기를 오염시키는 주된 원인의 하나로 알려져 그 규제가 점점 강화되고 있다. 최근에는 열병합 발전용, 건설기계용, 선박용 등의 디젤기관에 대해서도 배기규제가 시행 혹은 검토되고 있다.¹⁾ 그러나 디젤기관은 가솔린기관에 비하여 연비가 양호하여 CO₂배출량이 적고, 열효율이 높기 때문에 이를 대신할 동력원이 개발되지 않는 한 앞으로도 상

당히 선호도가 높으리라 예상된다.²⁾

디젤기관은 배출가스 규제강화에 대응하여 배기청정화를 진행시켜 왔는데, 그 주요기술은 연료분사 시기지연에 의해 NOx를 저감시키는 방법이었다. 그런데 이 방법은 매연미립자 등의 증가를 초래하기에 이를 개선하기 위하여 기관 개량을 도모해 왔다. 기타 물분사, 물-경유 유사연료, 배기재순환(EGR), 필터트랩(filter trap) 등의 전처리와 후처리 방법에 의해 많은 연구가 진행되고 있지만, 일반적으로 NOx와 매연미립

* 정회원, 한국기술교육대학 동력기계공학과

** 정회원, 군산대학교 기관공학과

자는 상호보상관계(trade-off)가 있기 때문에 기관 자체의 개량에 의해서 이들 배출물을 동시에 저감시키는 것은 한계점에 다다르고 있다.³⁻⁶⁾

현재 많은 연구들이 상기에 열거한 여러가지 방법을 조합하여 디젤기관의 유해 배기성분을 동시에 저감시킬 수 있는 유효한 방법을 조사하고 있는 중이다.⁷⁾ 저자들도 디젤기관의 유해배기 배출물을 저감시킬 목적하에 배기재순환 방법을 통해 흡입되는 순환배기에 물을 분사시켜 배기 중의 매연미립자를 제거하여 NO_x를 저감시키는 연구를 진행중에 있는데, 이 때 통과하는 재순환 배기중에는 약간의 수분을 함유하고 있기 때문에 물분사에 의한 영향을 받아 상기의 조합방법과 같은 이중의 효과를 거두리라 예상된다.⁸⁾

디젤기관의 각종 배기배출물, 특히 NO_x배출물에 미치는 EGR의 영향에 관한 연구들이 이 전부터 폭 넓게 진행되어 왔다. 그런데 EGR이 배기배출물에 미치는 영향에 관한 과정이 아직도 만족스럽게 파악되고 있지 않는 이유는 순간적이고 난류유동의 조건하에서 액체연료의 분무연소인 디젤연소과정이 매우 복잡하기 때문이다. 또한 EGR율의 증가에 따라 고부하 영역에서는 NO_x 이외의 배출물이 상당히 증가하고, 연료소비율도 약간 증가할 뿐만 아니라, 매연미립자 및 SO_x배출물의 순환에 의한 기관내부의 마모나 침식이 발생하고, 윤활유의 열화가 빠르기 때문에 디젤기관에 EGR만을 적용시켜 NO_x배출물을 효과적으로 저감시키기가 간단하지 않지만⁷⁾, 매연미립자 제거장치를 이용하여 흡기로 재순환되는 배기중 매연미립자배출물을 제거시킬 수만 있다면 어떤 처리방법보다도 효과적이고 용이하게 NO_x배출물을 줄일 수 있다고 생각된다.

본 연구에서는 디젤기관을 사용하여 부하 및 기관회전수를 파라미터로 해서 EGR율의 변화가 연료소비율 및 NO_x배출물에 미치는 영향을 구체적으로 파악하는 것이 첫째 목적이고, 효과적인 운전이 가능하도록 각 배기배출물을 종합 분석하여, 기관회전수 및 부하의 변화에 따라 가능하면 배기배출물을 규제값 미만으로 감소시킬 수 있는 최적 EGR율을 결정하는 것이 둘째 목적이다. 마지막으로 배기 재순환량을 흡기의 일부로

흡입시키기전 배기중 매연미립자배출물을 제거시킬 수 있는 매연미립자 제거장치와 기관운전에 적합한 정밀하고도 응답성이 좋은 EGR을 제어기구를 개발하기 위한 기초자료로 사용하는 것이 셋째 목적이다.

2. NO생성농도 계산

연소계로부터 배출되는 NO의 생성은 온도, 반응시간, N₂농도, O₂농도 및 다른 물질농도의 함수로 표시되고 있지만⁹⁾, 디젤기관의 NO발생에 관한 이론계산은 연료의 불균일 혼합, 연소실의 형상 등 때문에 연소과정이 복잡해서 아직 상세하게 해석된 예를 발견하지 못했다.¹⁰⁾ 그런데 연소반응온도가 높으면 반응속도가 빨라져서 평형상태에 빨리 도달되며, 평형상태의 NO농도도 산소농도가 충분한 경우에는 연소반응온도가 높을수록 NO발생량이 많아지고, 산소가 부족하면 연소반응온도보다 산소농도의 영향을 크게 받는다.¹¹⁾

내연기관에서의 NO발생은 연소행정에서 고온이기 때문에 반응속도가 빨라져 평형상태에 도달되며 이 때의 평형NO농도는 아주 높으나, 팽창행정에서는 반응온도가 급격히 저하하기 때문에 평형NO농도가 아주 낮아서 NO농도가 저하하는 방향으로 반응하지만 반응속도도 느리기 때문에 평형상태에 도달되지 못하고 동결되어 평형상태의 NO농도보다 상당히 높게 배출된다.

NO의 생성과정을 화학적인 측면에서 살펴보면 화학평형에 도달하기까지의 과정인 반응속도론에 입각한 비평형 연소모델¹²⁾과 반응하면 즉시 평형상태에 도달한다고 가정한 화학평형 연소모델¹³⁾이 있다. NO를 제외한 다른 가스성분은 반응시간이 아주 짧기 때문에 화학평형 연소모델로 계산할 수 있지만, NO의 반응속도는 연소속도에 비해 무시할 만큼 빠르지 못하기 때문에 비평형 연소모델로 계산하여야 한다.

디젤연소의 NO생성농도를 계산하기 위하여 사용된 연료는 트리데칸(tridecane), C₁₃H₂₈인데, 실제 실험에 사용된 연료의 화학성분을 계산해보면 화학식이 거의 C₁₃H₂₈와 같기 때문에, 계산의

단순화를 위해 $C_{13}H_{28}$ 을 적용했다.⁵⁾ 연료와 공기가 연소하여 CO_2 , CO , O_2 , O , NO , N_2 , N , H_2 , H , H_2O , OH 및 Ar 의 12종 연소생성물이 발생한다고 가정하여 화학평형계산에 의하여 12종 연소생성물의 몰수를 구한다. 연료-공기 혼합기연소의 질소분자로부터 NO 생성농도를 지배하는 주요반응이 Zeldovich식에 의한다고 가정하고, 평형속도정수 및 O_2 , N_2 , O 및 OH 의 농도를 대입하면 NO 생성농도의 시간적 변화인 NO 생성속도를 구할 수 있다.^{14,15)}

Fig.1은 화염온도를 파라미터로 한 당량비 변화에 따른 NO 생성농도를 나타낸 것인데, 이 비평형 계산에 의하면 화염온도가 증가할수록 NO 생성농도도 증가함을 알 수 있다. 또한 일정한 화염온도의 경우 당량비 0.8~1.2에서 NO 생성농도가 급격히 감소되고, 당량비 1.8에서 다시 NO 생성농도가 증가한다. 이러한 경향은 화염온도에

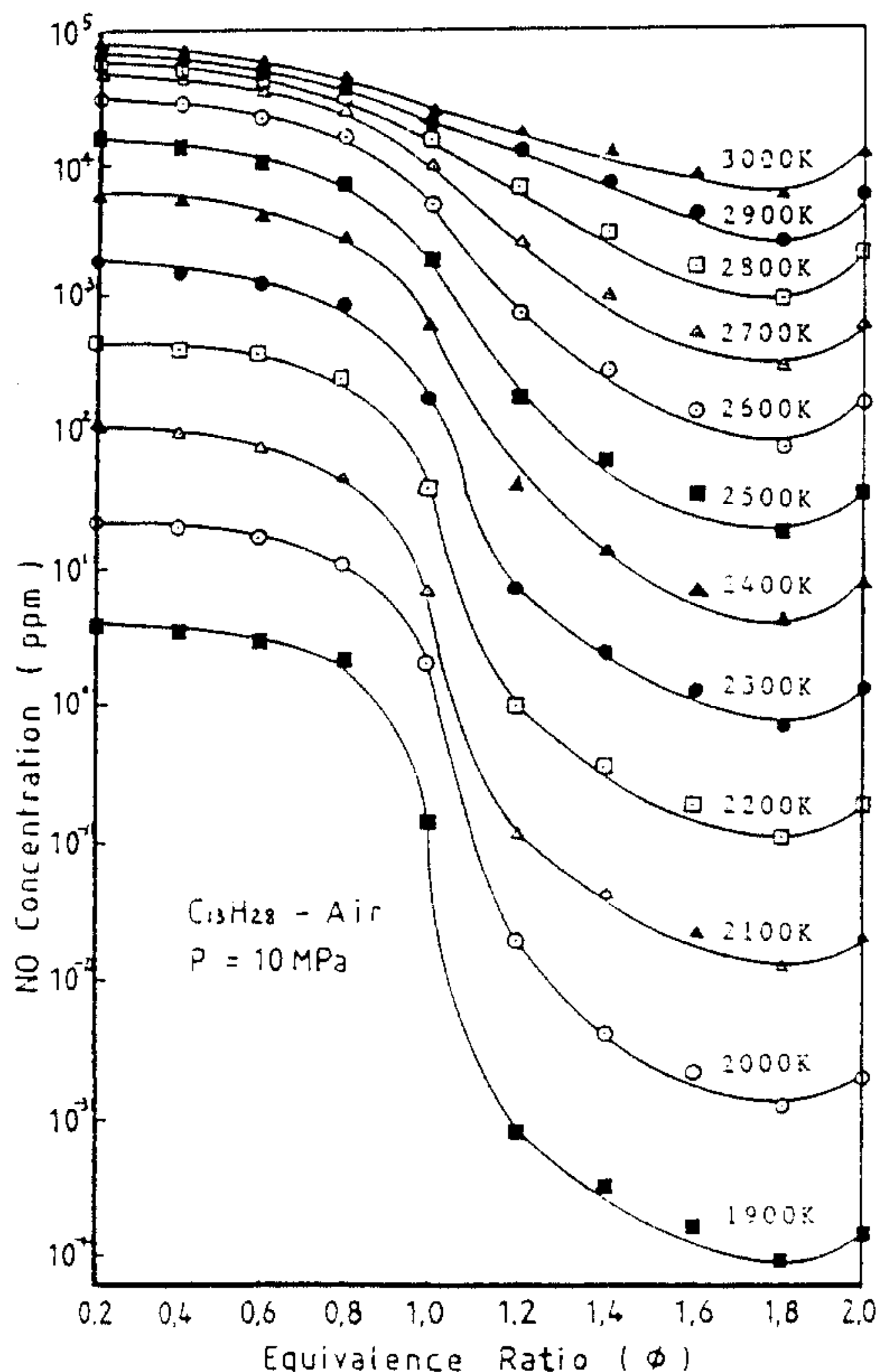


Fig.1 Effect of equivalence ratio on NO concentration as a parameter of flame temperature

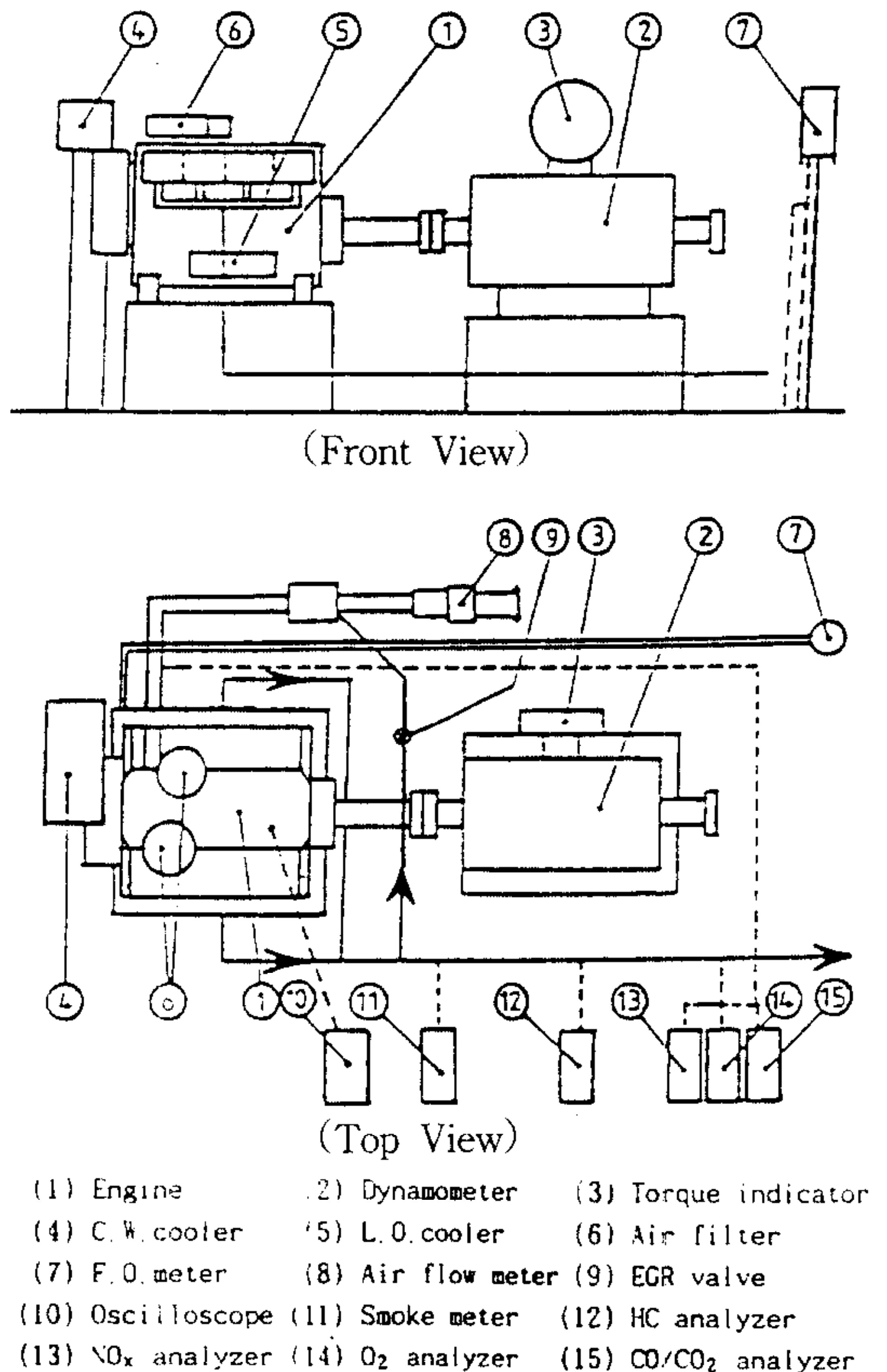
관계없으나 온도가 증가할수록 당량비의 영향이 감소됨을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig.2는 본 실험에 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것인데, 실험에 사용된 기관은 독일의 MAN B & W의 박용기관으로 수냉·8기통 직접분사식의 4행정 디젤기관이며, 주요 제원은 Table 1과 같다.

진자(Pendulum)식 직류 동력계를 사용하여 기관부하를 측정하였고, 연소실 압력을 측정하기 위하여 제 2번 실린더에 피에조(piezo-electric)형의 압력변환기를 장착하였다. 배기 배출물을 측정하기 위하여 독일 Hartmann & Braun AG의 배



- (1) Engine (2) Dynamometer (3) Torque indicator
- (4) C.W. cooler (5) L.O. cooler (6) Air filter
- (7) E.O. meter (8) Air flow meter (9) EGR valve
- (10) Oscilloscope (11) Smoke meter (12) HC analyzer
- (13) NO_x analyzer (14) O_2 analyzer (15) CO/CO_2 analyzer

Fig.2 Schematic diagram of test apparatus

Table 1 Specifications of Test Engine

Item	Specification
Engine/Model	MAN-M-(V8)/D-1548iM
Type	8 Cylinder, V Type, Water-Cooled, 4 Cycle, Direct Injection, Natural Aspiration
Piston Displacement	11.63(ℓ)
Bore×Stroke	115(mm)×140(mm)
Compression Ratio	17 : 1
Fuel Injection Timing	BTDC 38°
Max. Power	113kW/2000rpm
Valve Timing	Intake Open:4° 30' BTDC, Intake Close:27° 30' ABDC Exhaust Open:40° BBDC, Exhaust Close:8° ATDC

기 분석기와 보쉬(bosch)식 스모크 계측기를 사용하였고, 기관운전에 필요한 연료소비량은 Seppler의 용적식 유량계를 설치해서 광트리거(optical trigger)에 의해 작동되는 시계를 사용하여 일정량의 소비시간을 계측한 후에 계산하였다. 또한 Aerzerner-Maschinen의 로터리 피스톤 가스계측기를 사용하여 흡입공기량을 측정하였다.

실험기관의 전부하에 대한 출력, 토크 및 연료소비율의 특성곡선, 그리고 실험에서 사용된 디젤유의 화학적 성분 및 물리적 성질에 대해서는 저자들의 이전 논문에 게재되어 있다.⁶⁾

3.2 실험방법

본 연구에서는 기관회전속도, 부하 및 EGR율을 파라미터로 하여 기관회전속도와 부하를 고정한 상태에서 EGR율만 바꾸는 실험을 시도했는데, 기관회전속도는 1200rpm에서 2000rpm까지 200rpm 간격으로, 부하는 25%에서 100%까지 25% 간격으로, EGR율은 0에서 40%까지 10% 간격으로 실험을 하였다. 본 실험에서는 동일 조

건의 기관회전속도와 부하를 갖는 경우일지라도 EGR율의 변동율은 ±6%이고, 부하를 바꾸었을 경우의 부하 변동율은 ±5% 정도이다. 실험에 있어서 부하 25%, 기관 회전속도 2000rpm 상태에서는 정상적 운전이 어려울 뿐더러, 데이터의 신뢰성 때문에, 또한 EGR율 40%, 기관회전속도 2000rpm 상태에서는 배기량 과다(특히 매연미립자)로 인해 실험 및 데이터 정리의 대상에서 제외시켰다. 이렇게 하면 본 논문의 실험 조건은 전체 92종이 된다. 이 때 분사시기는 BTDC 38°로 했는데, 본 연구에서는 분사시기를 실험조건에 관계없이 고정해서 실험하였다.

실험을 하는 동안 기관의 냉각수와 윤활유는 수냉식 열교환기를 사용하여 온도를 조절하였으며, 기관 각부에 장착된 T형 열전대(CC)와 압력계를 이용하여 온도와 압력을 측정하고 후기관의 작동상태를 수시로 점검하면서 실험을 하였고, 각 연소실의 배기관에도 T형 열전대를 부착하여 배기온도로 연소상태를 판단했다.

실제 실험에 있어서 EGR율을 구하기 위해서는 흡기관과 배기관에서 CO₂농도를 측정하여 사용하기도 하지만^{16,17)}, 본 연구에서는 EGR율을 계산할 때 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 배기량, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 다음 식을 이용했다.¹⁸⁻²⁰⁾

$$EGR율(\%) = \frac{V_0 - V_a}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서 V₀는 EGR을 하지 않았을 경우의 흡입공기량(m³/h), V_a는 EGR을 했을 경우의 새로운 흡입공기량(m³/h)이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 흡기 및 배기 산소농도

EGR채용시 NO_x배출물이 감소하는 이유로서 열용량 증가로 인한 연소온도 저하²¹⁾와 급기중의 산소농도 감소를 들고 있다. 그런데 Tsunemoto 등²²⁾은 EGR채용으로 인한 열용량증가가 가솔린 기관 보다는 디젤기관이 적기 때문에, 디젤기관에

있어서 NO_x저감에 대한 EGR의 효과를 급기중의 열용량 증가로 인한 연소온도 감소 때문이라고 설명하기는 어렵다고 지적했다.

EGR은 주로 초기예혼합연소에 영향을 주어 착화지연의 증가를 가져오고, 확산연소기간은 과급 입력의 변화에 영향을 받아 공기유동 등 확산혼합속도가 증가되어 EGR율과의 상관관계는 적다고 内田 등²³⁾은 보고했다. 그들 연구에 의하면 착화지연은 급기중의 산소농도와 사이에 부의 상관관계가 있어 급기중의 산소농도가 증가할수록 착화지연이 감소함을 알았다. 한편 鹽崎 등²⁴⁾은 디젤기관에 EGR을 적용한 실험에서 EGR율의 증가에 따라 예혼합연소의 피크값이 감소하지만, 확산연소의 변화는 적다고 했다. 또한 동실험에서 EGR가스에 의해 실린더내 급기온도의 상승에 따라 착화지연이 감소하고, 연소기간이 길어짐에 따라 연비악화 및 매연증가를 초래한다고 했다. 그러나 EGR율의 증가는 산소농도의 감소에 의해 NO_x생성속도가 저감하지만, 화염온도의 저하에 의해서도 NO_x생성속도가 저감된다고 했다. Dürmholz 등²⁵⁾은 급기온도를 일정하게 유지한 실험에서 EGR율의 증가는 착화지연의 증가를 가져온다고 했다. 그들은 착화지연 증가의 원인으로 급기중의 산소농도 감소를 들고 있다.

Fig.3은 EGR율의 증가에 따른 실린더에 흡입되는 산소농도를 보여주고 있는데, 흡기산소농도는 기관회전속도 및 부하율에 관계없이 EGR율의 증가에 따라 직선적으로 감소하고, EGR율이 증가할수록 급기중의 산소농도 감소폭이 큼을 알 수 있다. 이러한 정성적 경향은 内田 등²³⁾의 연구결과와 아주 잘 일치한다. 따라서 본 연구결과에 의해서도 EGR율이 증가할수록 착화지연이 증가하여 NO_x배출물의 특성에 커다란 영향을 미칠 것으로 생각한다.

Fig.4는 배기산소농도가 NO_x배출물과 어떤 관계가 있는가를 알아보기 위해서, 우선 파라미터중 Fig.3과 마찬가지로 EGR율의 증가에 따른 배기중의 산소농도를 나타낸 것이다. Fig.4는 기관회전속도 및 부하에 관계없이 정리한 결과인데, 배기산소농도는 EGR율의 증가에 따라 완만하게

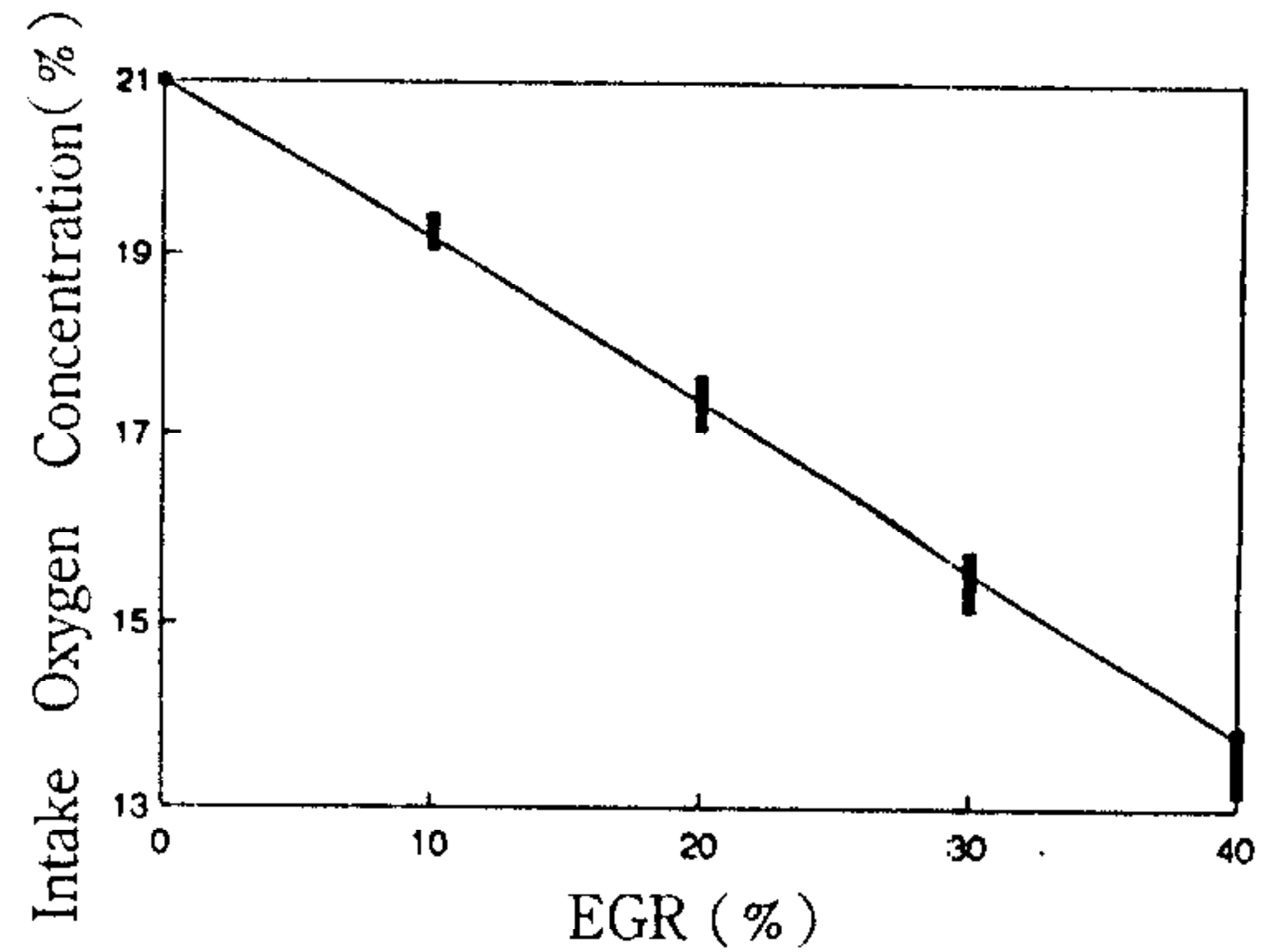


Fig.3 Intake oxygen concentration versus EGR rate

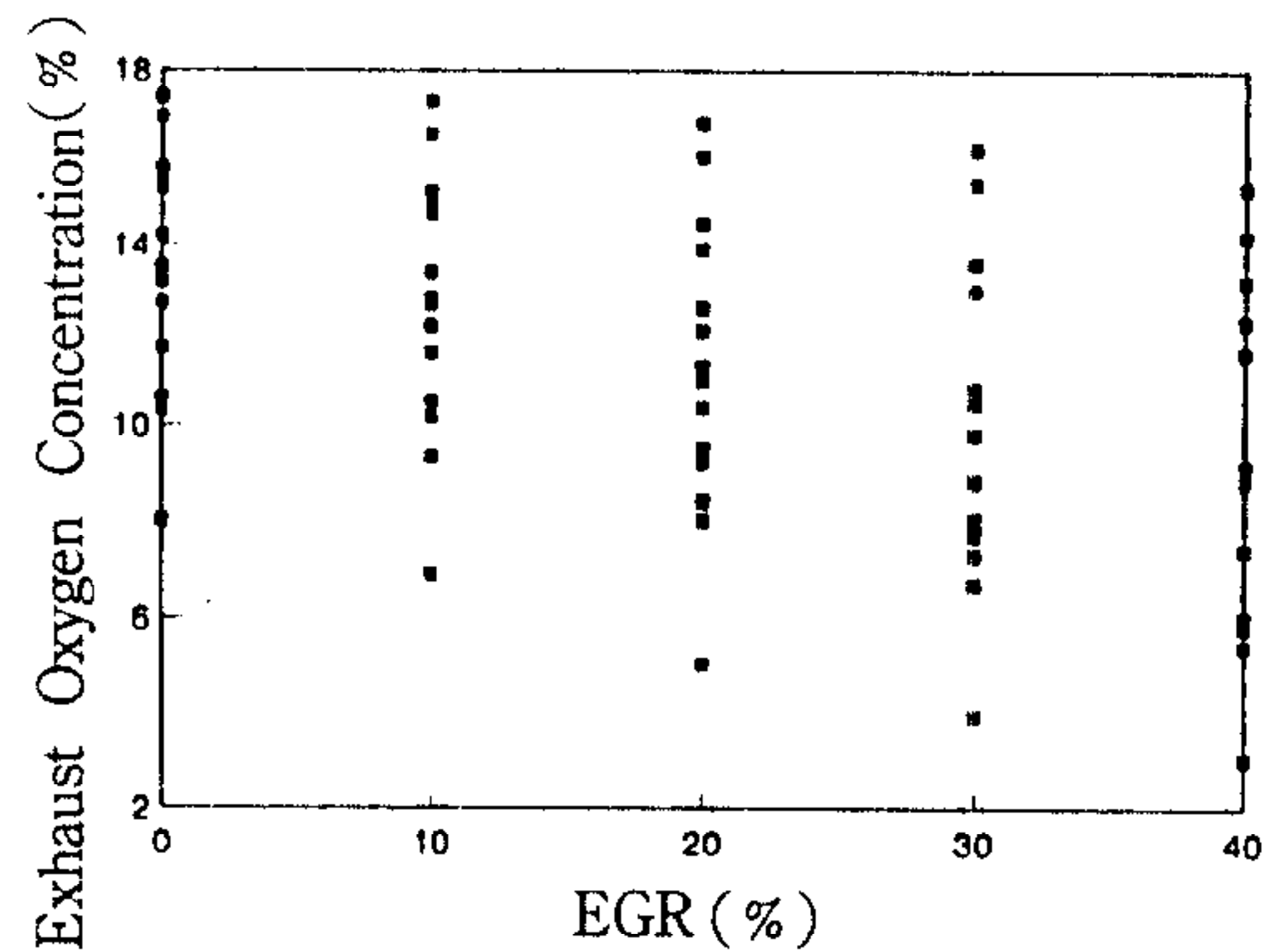


Fig.4 Exhaust oxygen concentration versus EGR rate

감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 그러나 급기산소농도에서와 같이 뚜렷하지 않고, EGR율의 증가에 따른 배기산소농도가 걸쳐있는 폭이 아주 넓어 기울기가 작음을 알 수 있다. 이것은 배기산소농도가 EGR율만이 아니고, 부하, 기관회전속도 등의 기관성능과도 관계가 있음을 보여주고 있다.

Fig.5에는 기관부하율 25%, 50%, 75% 및 100%일 경우의 EGR율과 배기산소농도와의 관계를 기관회전속도를 파라미터로 해서 나타낸 것이다. 그림에 의하면 배기산소농도는 EGR율이 증가할수록 감소하고, EGR을 적용할 경우 기관회전속도가 증가하면 배기산소농도는 대체적으로 감소함을 알 수 있다.

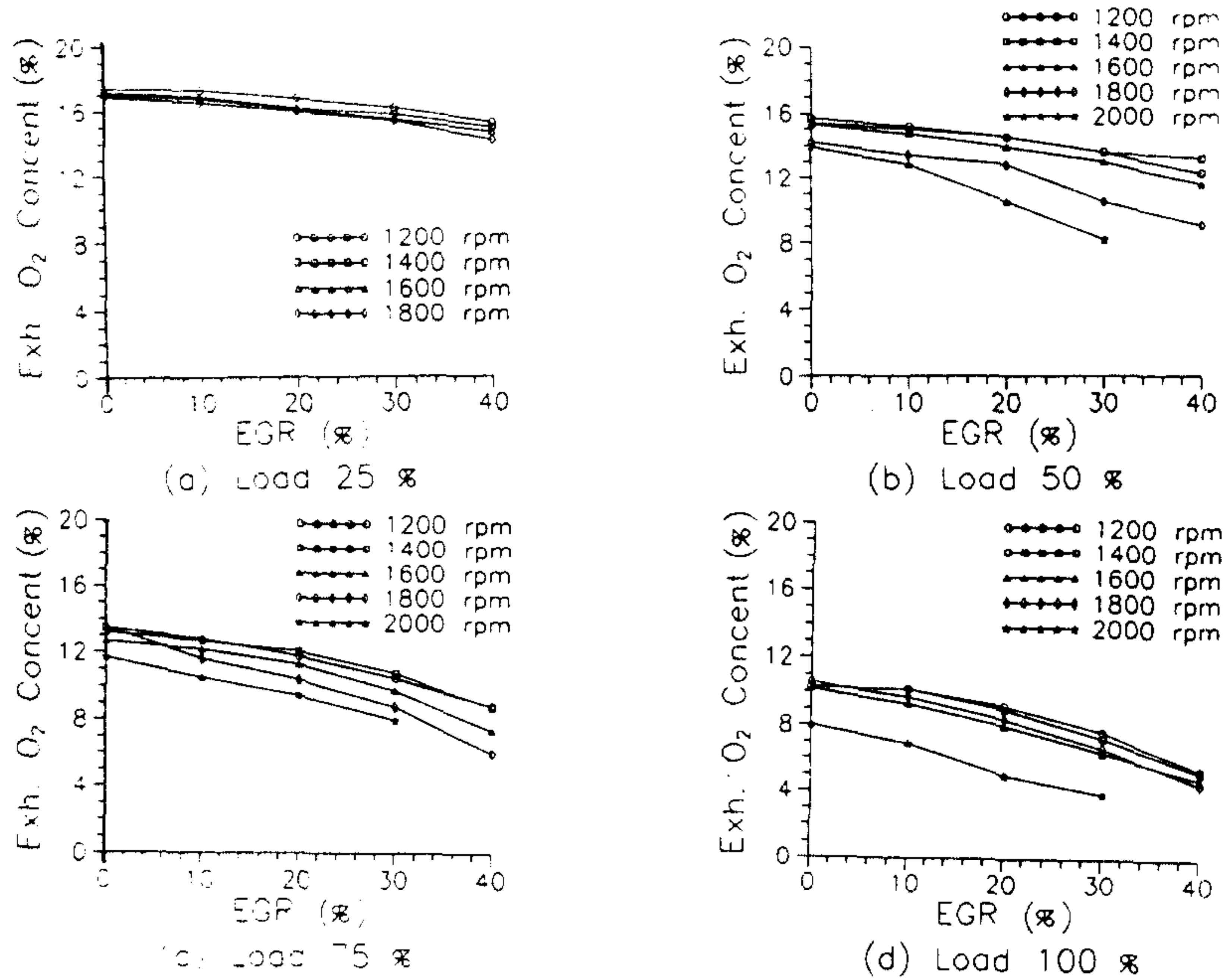


Fig.5 Correlation between exhaust oxygen concentration and EGR rate with engine speed(rpm) as a parameter at a given engine load

4.2 당량비

디젤기관은 언제나 이론혼합비보다 희박한 상태에서 운전되고 있는데, EGR을 적용할 경우에 연소실내의 혼합기가 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여 본 실험조건내에서 당량비를 계산해 보았다. 이 때 당량비는 실린더내에 흡입되는 산소량과 연료량에 의해 계산된 연소실내의 평균당량비인데, 이것은 화염온도를 파라미터로 해서 당량비 변화에 따라 이론 NO생성농도를 계산하여 표시하였기 때문에, 본 실험의 NOx농도에 미치는 당량비의 영향을 고찰하기 위해 필요한 데이터다. Fig.6은 기관부하율 25%, 50%, 75% 및 100%일 경우의 당량비 변화를 기관회전속도를 파라미터로 해서 EGR을 변화에 따라 나타낸 값이다. 이 그림에서 EGR율이 증가함에 따라 당량비가 희박혼합기에서 이론혼합기 부근으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 부하율이 높을수록, 기관회전속도가 증가할수록 현저하고, 또한 기관회전속도를 파라미터로 한

EGR증가에 따른 당량비 변화폭은 부하율이 증가할수록 크게 나타났다.

4.3 연료소비율

EGR적용시 연료소비율을 조사하기 위하여 92종의 실험조건에 대한 실험을 하였다. Fig.7은 본 실험조건에 대한 기관부하율에 따른 연료소비율을 나타낸 것인데, 그림에 의하면 동일 부하·기관회전속도에서 EGR율의 증가에 따른 연료소비율의 증가·감소 경향은 불규칙적이며, 그 변동폭도 아주 작아 연료소비율이 증가한 경우에도 그 증가는 대부분 3% 미만으로 나타났다.

小高¹⁹⁾ Narusawa 등²⁰⁾은 직접분사식 대형 디젤기관을 사용한 연구에서 흡입산소량이 18% 이상인 영역에서는 연료소비율이 흡입산소량의 감소, 즉 EGR의 증가에 의해 약간 떨어진다 할지라도 대폭적인 감소는 관찰되지 않는다고 했다. 또한 Stumpp 등²⁶⁾의 논문에서는 디젤기관에 있어서 BMEP 1MPa, 기관회전속도 1600rpm일 경우, EGR을 35% 정도까지는 연료소비율이 변화하지

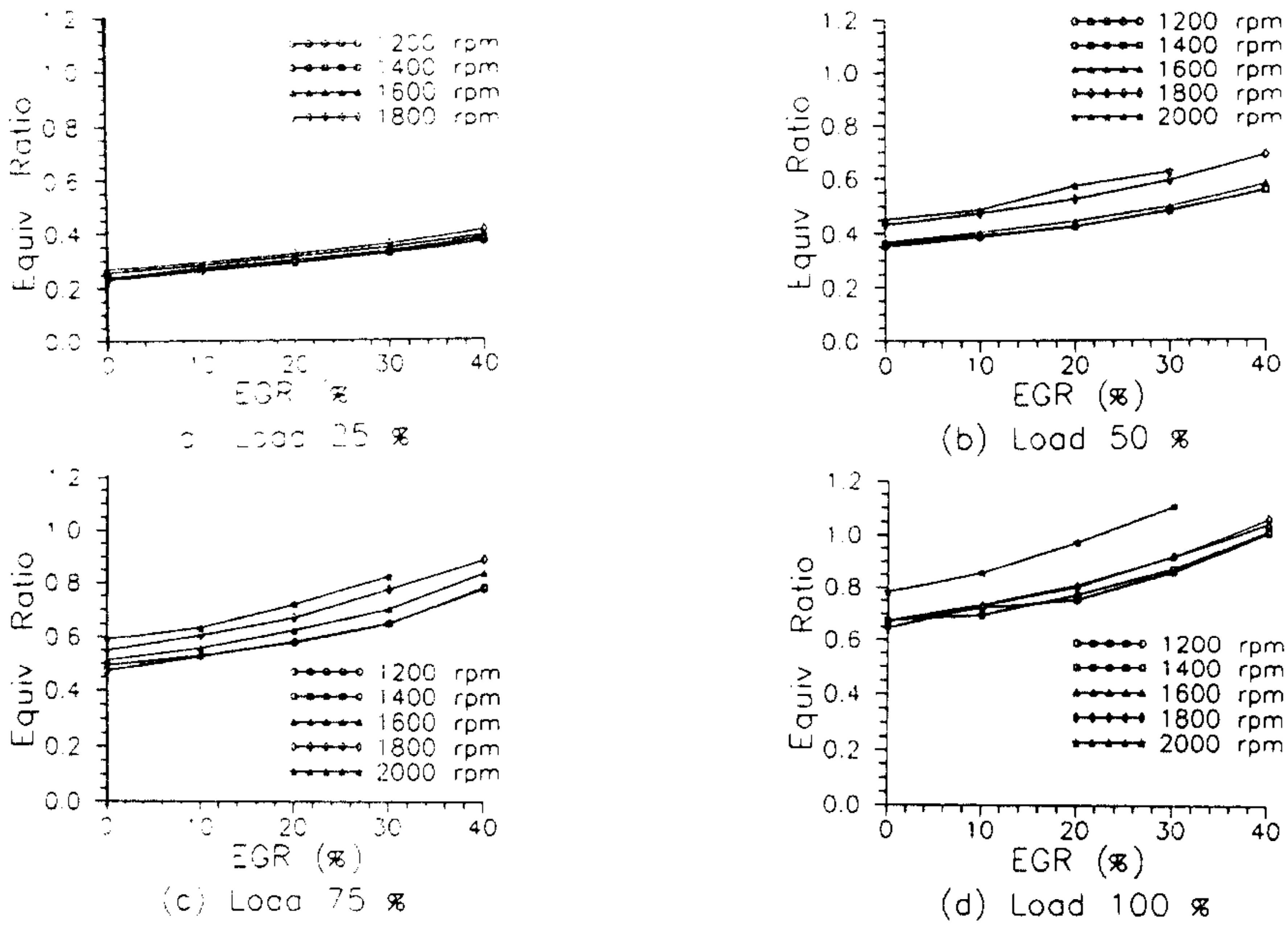


Fig.6 Correlation between equivalence ratio and EGR rate with engine speed(rpm) as a parameter at a given engine load

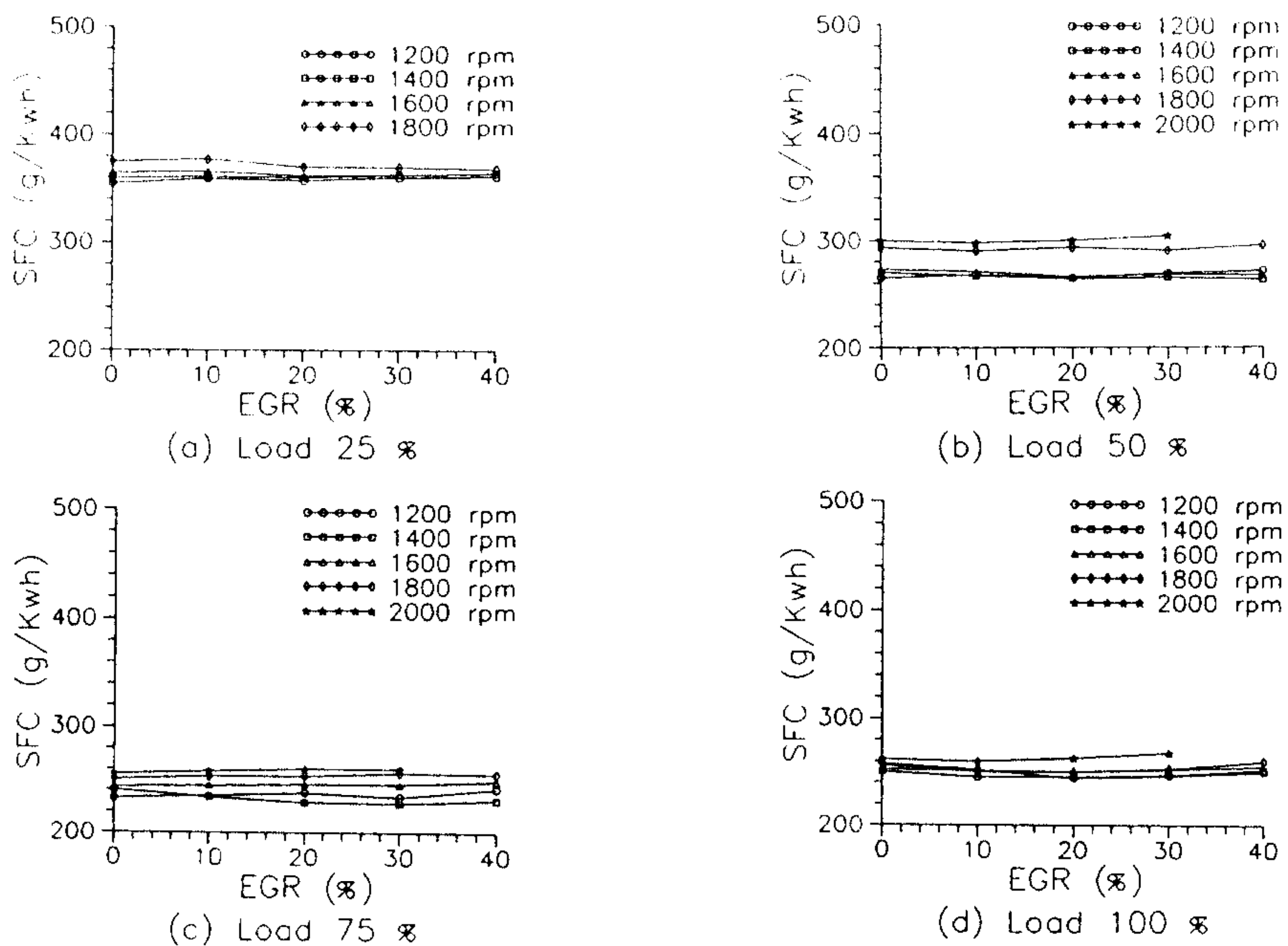


Fig.7 Effect of EGR rate on specific fuel consumption(SFC) as a parameter of engine speed at a given engine load

않으나, 그 이상에서는 실린더내 흡입산소량의 감소로 인해 연료소비율이 증가한다고 했다. 기타 연구결과^{27, 28)}에서도 EGR율이 연료소비율에 미치는 영향은 별로 크지 않는 것으로 나타났으나, Nagai 등²⁹⁾은 중속 디젤기관을 사용한 실험 및 시뮬레이션 계산결과에서 EGR율이 증가함에 따라 연료소비율도 증가한다고 했다.

본 논문 및 이전 연구들의 결과를 종합해 보면, EGR율 30~40% 정도까지는 연소에 필요한 산소량이 부족하지 않기 때문에 연료소비율에는 별로 영향을 미치고 있지 않지만, EGR율이 40

%를 초과하면 흡입산소량 부족으로 인해 연료 소비율이 증가하는 경향을 나타낼 것으로 예측된다.

4.3 NOx배출물

Fig.8은 각 기관회전속도에 대해 부하와 EGR율을 변화시킨 경우, NOx배출물 특성을 나타낸 것이다. NOx배출물은 EGR율 증가에 따라 현저하게 감소하는데, 특히 고속·고부하의 경우에 감소율이 커서, 기관회전속도 1800rpm의 전부하시에는 10%의 EGR율에서 NOx배출물 30%, 20%

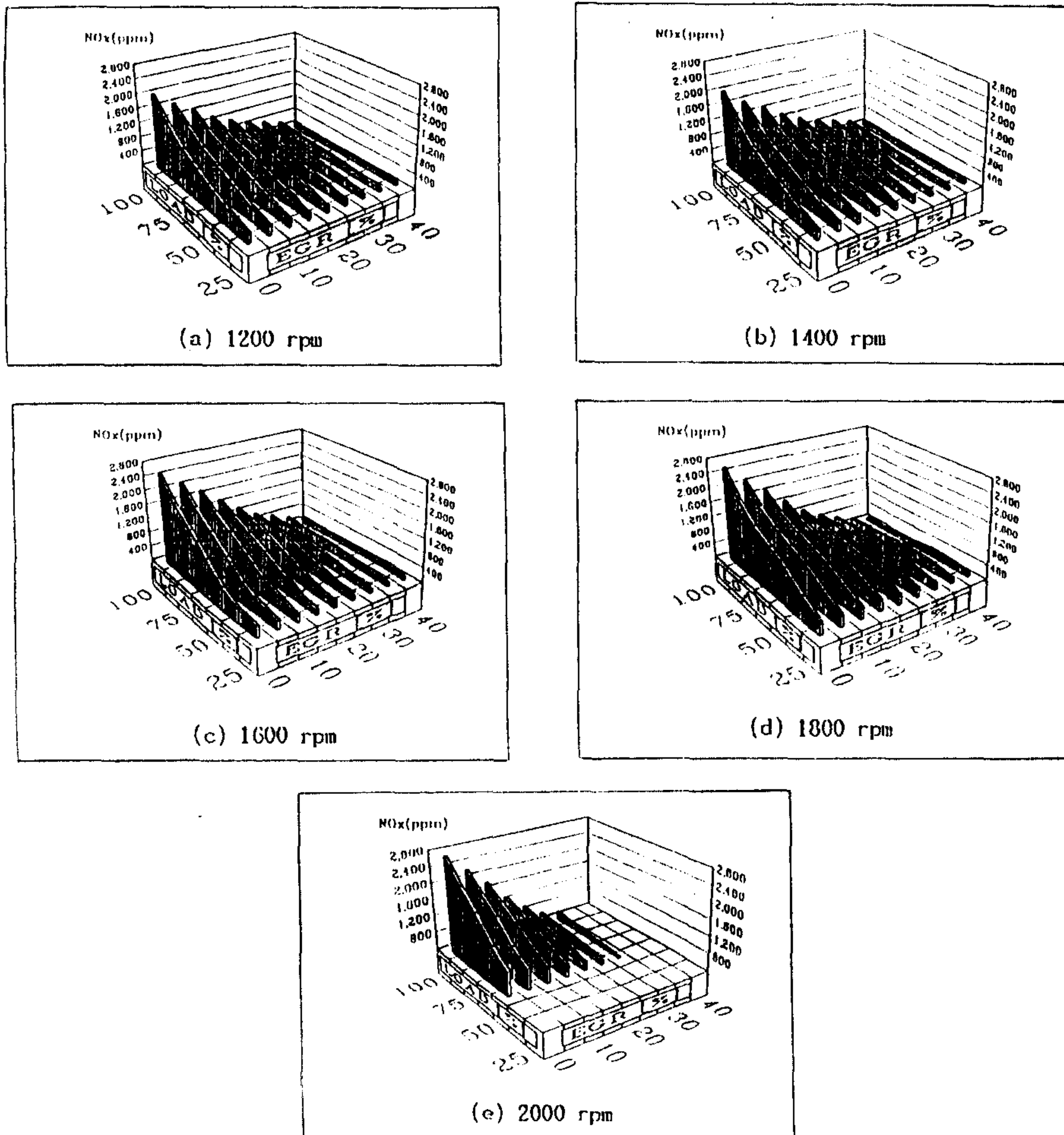


Fig.8 Effect of EGR on NOx emission characteristic with engine load at a given engine speed

EGR율인 경우는 60%, 30% EGR율인 경우는 80%, 40% EGR율인 경우는 NOx배출물 95% 이상의 감소효과가 있다. 기관회전속도 2000rpm에서는 이보다 더 큰 감소효과를 나타내고 있다.

EGR율의 영향에 따른 NOx배출물의 감소현상을 알아보기 쉽게 Fig.9에는 각각의 기관부하에 있어서 기관회전속도를 파라미터로 가로축에 EGR율, 세로축에 NOx농도를 표시해 보았다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 동EGR율에서는 대체적으로 부하가 클수록 기관회전속도가 증가할수록 NOx배출물의 절대량이 많아지지만, EGR율이 30%를 넘어서면 그러한 경향이 다소 완화된다. 또한 동일부하 · 동일 기관회전속도에서는 EGR율의 증가에 따라 NOx농도가 거의 직선적으로 감소하고, 감소폭은 부하가 클수록, 기관회전속도가 증가할수록 큼을 알 수 있다.

田代¹⁰⁾ 등의 연구에 의하면 EGR양이 증가하면 급격히 NOx농도가 감소하는데, 고부하로 될수록 NOx농도의 저감율은 크지만, 산소농도 감소현상 때문에 출력감소 및 매연미립자 농도의 증가가 현저하며, 예연소실식 및 직접분사식 디젤기관에서도 모두 같은 정도의 EGR효과가 있지만, 예연소실식 기관의 매연미립자 배출농도가 더욱 현저하게 높은 것으로 지적되었다. 또한 鈴木³⁰⁾는 4사이클 와류연소실식 디젤기관에 EGR가스양의 저장실을 설치한 내부 EGR법에 의한 EGR율이 2~9%일 경우 NOx농도 감소율은 20~30% 정도인데, 이것은 최고 연소가스온도의 저하 때문임을 밝히고 있다.

NOx농도를 감소시키려면 연료의 분사시기를 늦춰서 연소가스온도를 낮춤과 동시에 고온 유지시간을 줄이는 것이 유효하지만, 이 경우 반

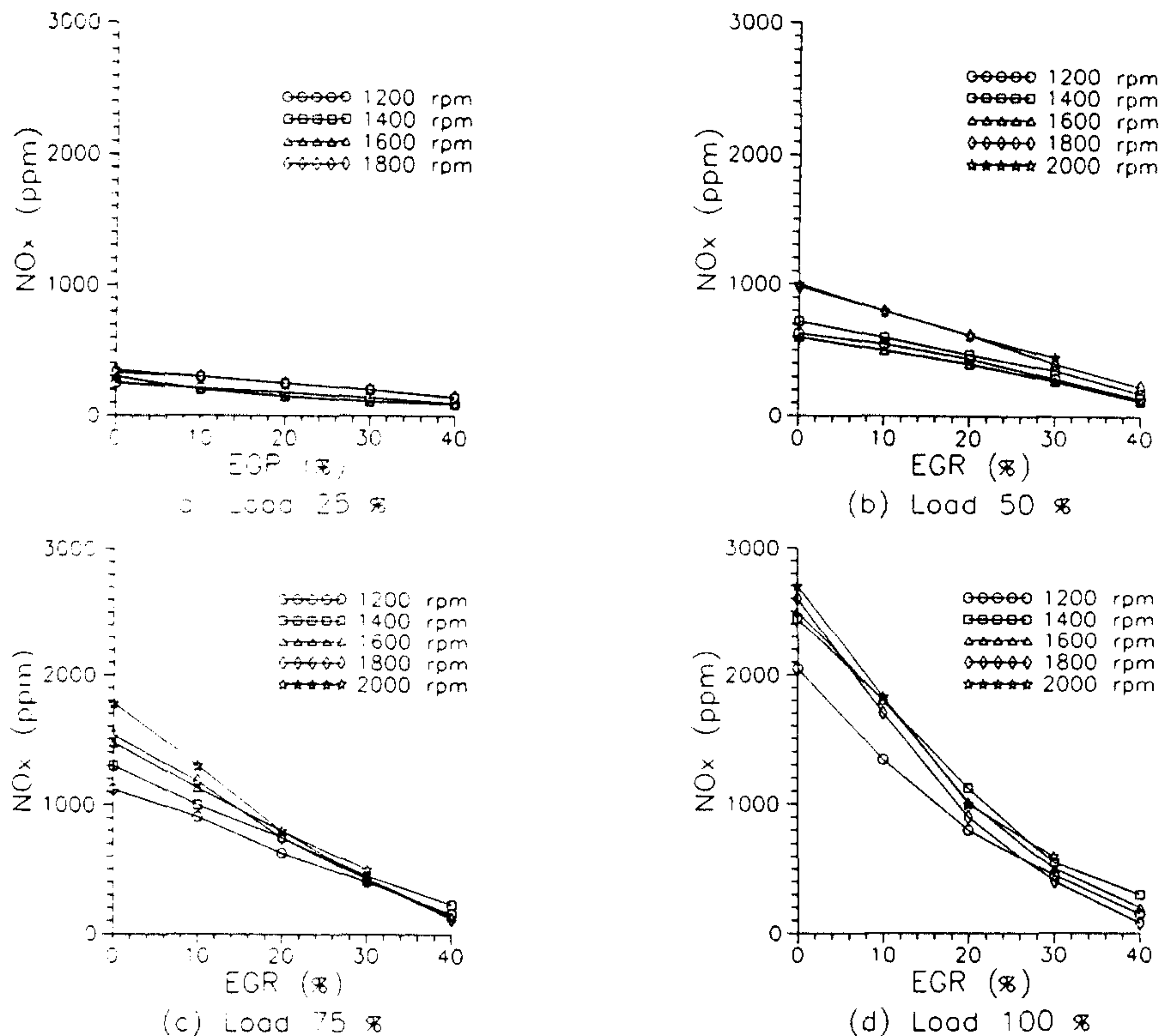


Fig.9 Effect of EGR on NOx emission characteristic as a parameter of engine speed at a given engine load

대로 매연미립자농도 등의 다른 배출물은 증가한다. 저속·전부하시에 NO_x농도가 증가하는 것은 저속이기에 팽창행정에 시간이 걸려 고온 유지시간이 길어지기 때문이다. EGR을 변화에 따른 디젤기관의 NO_x배출량에 미치는 영향을 조사한 많은 연구보고^{16,18-20,26-29,31-34)}에 의하면 EGR을 채용하면 연소실에 들어가는 흡입공기 일부가 낮은 산소농도의 배가스로 치환되어 연소가스온도가 낮아지고, 연소속도가 늦어져 NO_x농도가 현저하게 감소되지만, 고부하에 있어서는 출력이 제한되므로 부하에 따라서 순환량을 거감하는 제어기가 필요하다고 했다.

Fig.10은 급기산소농도(EGR시 급기산소농도/비EGR시 급기산소농도)에 따른 NO_x농도 감소율을 나타낸 것이다. 그림에서 급기산소농도가 감소할수록 기관회전속도나 부하율에 관계없이 NO_x농도의 감소율은 거의 직선적으로 증가함을 보여주고 있다. 여기서 급기산소농도가 감소함은 EGR율이 증가함을 의미한다. Khan 등³⁵⁾에 의하면 원추형 연료분무상의 중심부에 있어서 연료과농영역이 EGR율의 증가, 즉 급기산소농도의 감소에 따라 넓어지고, 연료과농영역의 증대는 산소부족으로 인해 반응온도의 저하를 초래해서, NO_x 생성영역과 연료과농영역의 온도차이가 증가할 뿐만 아니라, NO_x생성영역에서 연료과농영역까지의 열전달의 증가로 인해 NO_x생성영역의 온도가 저하하는데, 이러한 현상이 EGR적용시 NO_x농도가 감소하는 주요한 요인이 된다고 했다.

Fig.11은 배기산소농도(EGR시 배기산소농도/비EGR시 배기산소농도)와 NO_x농도 감소율의 관계에 대하여 세로축을 로그함수로 나타낸 그림인데, 배기산소농도 0.8를 중심으로 0.8~1사이에는 거의 직선적으로 0.8이하에서는 조금 완만하게 감소율이 증가함을 보여주고 있다. 앞에서 배기산소농도는 EGR율만이 아니고 부하, 기관회전속도 등의 기관성능하고도 관계가 있을 것으로 추측했는데, Fig.11은 배기산소농도가 NO_x배출물에 영향을 미치고 있음을 시사하고 있다. 小高¹⁹⁾는 급기산소농도가 18% 이상인 경우에는 배기산소농도의 감소에 따른 NO_x배출물 증가가 현저하지만, 급기산소농도가 18% 이하로 떨어

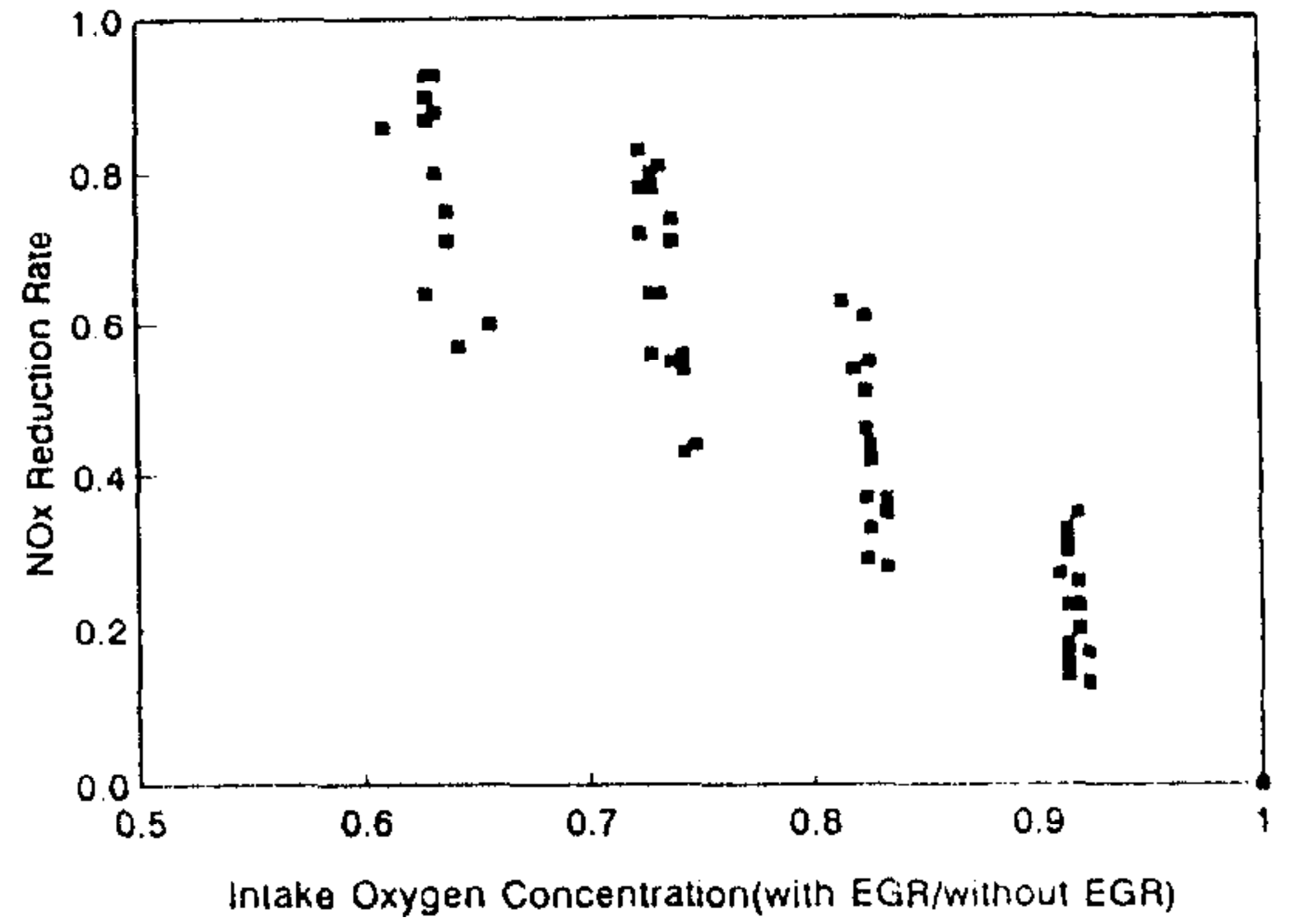


Fig.10 NO_x reduction rate versus intake oxygen concentration

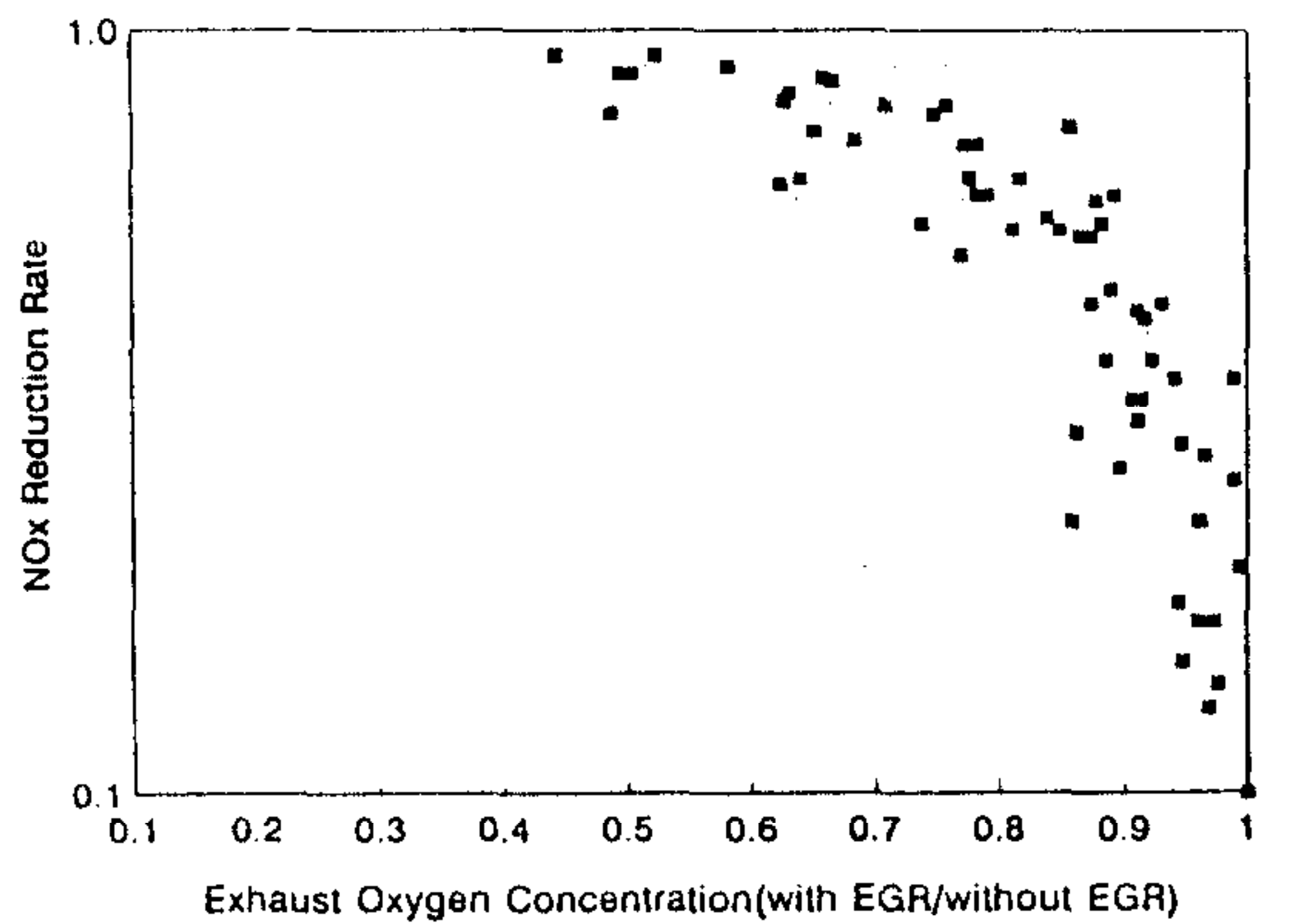


Fig.11 NO_x reduction rate versus exhaust oxygen concentration

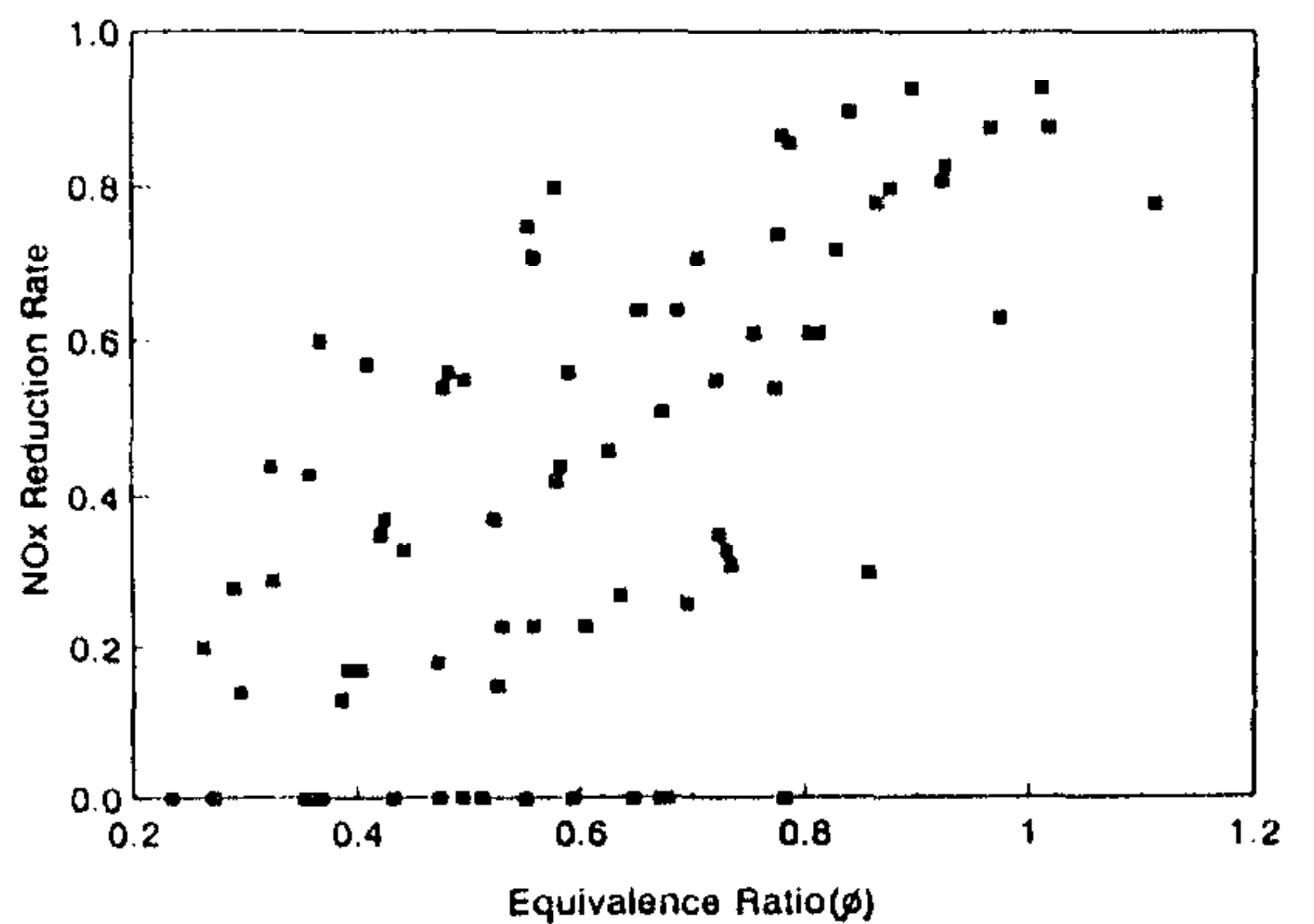


Fig.12 NO_x reduction rate versus equivalence ratio

지면 NO_x배출물에 대한 배기산소농도의 의존성이 아주 약해진다고 설명하고 있다. 이것은 본 실험결과와도 정성적으로 유사하다.

Fig.12는 당량비와 NO_x농도 감소율과의 관계인데, 데이터가 흩어져 있어 고찰하기가 쉽지는 않지만, 대략 당량비 0.8부분이 변화되는 점으로 간주된다. 즉 당량비 0.8이하에서는 NO_x감소율의 편차가 흩어져 있지만, 0.8을 초과하면 대체로 감소율이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 Fig.1의 이론계산에서와 정성적으로 거의 일치하는데, 당량비가 높아지면(EGR율이 증가하는 것과 같다) 상대적으로 연료과농이 되기 때문에 산소부족으로 반응온도가 저하되어 NO_x농도가 감소된다고 생각된다.

5. 결 론

수냉·8기통 직접분사식의 4행정 디젤기관에 있어서 EGR율, 부하 및 기관회전속도의 3개 요소중 하나의 파라미터를 바꿔가면서 EGR율이 연료소비율 및 NO_x배출물에 미치는 영향에 대해 실험적으로 조사하고, 연소온도와 당량비에 따른 NO_x생성농도 관계를 이론적으로 계산하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 디젤연소범위에서는 이론적 NO_x생성농도가 당량비 0.8~1.2에서 급격히 감소된다.
- 2) 급기산소농도는 기관회전속도 및 부하율에 관계없이 EGR율에 의존하고, EGR율이 증가할수록 급기산소농도의 변화폭이 커진다.
- 3) EGR율의 증가에 따른 연료소비율 변화는 아주 작는데, 이것은 본 실험의 EGR율 범위내에서는 연소에 필요한 산소량이 부족하지 않기 때문인 것으로 추정된다.
- 4) EGR율이 증가함에 따라 급기산소농도가 저하하여 NO_x배출물이 거의 직선적으로 감소한다.
- 5) NO_x배출물은 배기산소농도와도 관계가 있어, 특히 배기산소농도가 0.8이상인 경우에는 NO_x감소율이 거의 직선적으로 증가한다.
- 6) EGR율이 증가함에 따라 급기산소농도의

감소로 인해 당량비가 희박혼합기에서 이론혼합기 부근으로 증가하고, 당량비가 0.8을 초과하면 NO_x배출물 감소율이 증가하는 경향을 보인다.

본 연구는 학술진흥재단의 93공모과제(지방대 육성 중점과제)에 의해 수행된 것임을 밝혀두며, 도움을 주신 재단관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bastenhof, D., and Lausch, W., "Environmental Aspects in Medium-Speed Four-Stroke Diesel Engines", The Motor Ship, 13th International Marine Propulsion Conference, pp.1~23, 1991.
2. 河村英男, "ディーゼルエンジンの効率向上", 日本機械學會誌, Vol.96, No.893, pp.50~54, 1993.
3. Wade, W.R., "Light-Duty Diesel NO_x-Hc-Particulate Trade-Off Studies", SAE 800335, 1980
4. Wade, W.R., Hunter, C.E., Trinker, F.H., and Cikanek, H.A., "Reduction of NO_x and Particulate Emissions in the Diesel Combustion Process", Transactions of the ASME Vol.109, 426~434, 1987.
5. 林載根, 裴明煥, 金鍾一, "小型高速 디젤機關의 排氣排出物에 미치는 排氣再循環率의 影響에 關한 實驗的 研究", 韓國船用機關學會誌 第16卷 4號, pp.60~77, 1992.
6. 盧相舜, 裴明煥, "물-가스홀 混合物을 燃料로 使用한 가솔린機關의 性能 및 排氣成分에 關한 實驗的 研究", 韓國船用機關學會誌 8, pp. 25~38, 1984.
7. 内田登, 菅野水昭, 大聖泰弘, 齊藤孟, "ディーゼル機關におけるEGRと過給の組み合わせによりの排氣特性の改善", 自動車技術會論文集 Vol.24 No.4, pp.41~46, 1993.
8. 朴泰仁, 金泰權, 裴明煥, 崔在星, "船用 디젤機關의 排氣排出物에 미치는 스크러버形 排氣再循環器의 影響", 韓國船用機關學會 春季學術講演會 抄錄集, pp.42~47, 1994.

9. Eyzat, P., and Guibet, J. C., "A New Look at Nitrogen Oxides Formation in Internal Combustion Engines", SAE 680124, pp.1~18, 1968.
10. 田代實, つじむら欽司, "ディーゼル機関の排氣対策", 内燃機関 Vol.11(自動車用機関の燃焼と排氣), pp.120~127, 1972.
11. 池上詢, "ディーゼル機関の燃焼と窒素酸化物", 内燃機関 Vol.11(自動車用機関の燃焼と排氣), pp.101~108, 1972.
12. Lavoie, G.A., Heywood, J.B., and Keck, J.C., "Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines", Combustion Science & Technology Vol.1, pp.313~326, 1970.
13. Agrawal, D.D., and Gupta, C.P., "Computer Program for Constant Pressure or Constant Volume Combustion Calculations in Hydrocarbon-Air System", Trans. of the ASME, 1977.
14. Kamimoto, T., and Bae, M.H., "High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines", SAE 880423, pp.1~10, 1988.
15. 斐明煥, "高壓下の豫混合氣燃焼におけるすす生成に関する研究", 東京工業大學博士學位論文, pp.2~6, 1989.
16. 野平英隆, 小端喜代志, "EGRの研究(第1報)ー筒内燃焼ガス割合(BGR)と筒内ガスー燃料比(G/F)による評價ー", トヨタ技術 第2號, pp.156~166, 1977.
17. Nakajima, Y., Sugihara, K., and Muranaka, S., "Effects of Exhaust Gas Recirculation on Fuel Consumption", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 195, pp.369~376, 1981.
18. Plee, S.L., Ahmad, T., and Myers, J.P., "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NOx Emissions", SAE 811195, pp.75~91, 1981.
19. 小高松男, "大型ディーゼル車のEGRによる實用運轉時NOx抑制方策とその効果", 内燃機関 28, pp.17~23, 1989.
20. Narusawa, K., Odaka, M., Koike, N., Tsukamoto, Y., and Yoshida, K., "An EGR Control Method for Heavy Duty Diesel Engines under Transient Operations", SAE 900444, pp.1~14, 1990.
21. Ohigashi, S., Kuroda, H., et al., "Heat Capacity Change Predict Nitrogen Oxides Reduction by Exhaust Gas Recirculation", SAE 710010, 1971.
22. Tsunemoto, H., and Ishitani, H., "The Role of Oxygen in Intake and Exhaust on NO Emission, Smoke and BMEP of a Diesel Engine with EGR System", SAE 800030, pp.132~140, 1981.
23. 内田登, 菅野秀昭, 大聖泰弘, 齊藤孟, "ディーゼル機関におけるEGRと過給の組み合わせによる排氣特性の改善", 第10回内燃機関合同シンポジウム講演會, pp.229~234, 1992.
24. 鹽崎忠一, 鈴木孝幸, "直接ディーゼルエンジンのEGRガ性能および排ガスに與える影響", 自動車技術會學術講演會前刷集 892, pp.29~32, 1989.
25. Dürnholz, M., et al., SAE 920725, 1992.
26. Stumpp, G., and Banzhaf, W., "An Exhaust Gas Recirculation System for Diesel Engines", SAE 780222, pp.1~2, 1978.
27. Walder, C.J., "Reduction of Emissions from Diesel Engines", SAE 730214, pp.1~17, 1973.
28. Mayer, A., and Pauli, E., "Emissions Concept for Vehicle Diesel Engine Supercharged with COMPREEX", SAE 880008, pp.77~89, 1988.
29. Nagai, T., and Kawakami, M., "Reduction of NOx Emission in Medium-Speed Diesel Engines", SAE 891917, pp.1~15, 1989.
30. 鈴木邦男, "ディーゼル機関の低排出化を圖ふ燃焼制御", 内燃機関 19, pp.32~40, 1980.
31. 池上詢, "燃焼改善の展望", 日本機械學會誌, Vol.95, pp.47~50, 1992.
32. Chan, T.T., and Borman, G.L., "An Experimental Study of Swirl and EGR Effects on Diesel Combustion by Use of the Dumping Method", SAE 820359, pp.193~202, 1982.

33. 小西正己, “小型乗用車の課題解決に向けて”, 日本機械學會誌, Vol.95, pp.64~67, 1992.
34. 水澤雅武, “建設機械の排出ガス対策”, 日本機械學會誌 Vol.95, pp.72~75, 1992.
35. Khan, I.M., Greeves, G, and Wang, C.H.T., “Factors Affecting Smoke and Gaseous Emissions from Direct Injection Engines and a Method of Calculation”, SAE 730169, pp.687~709, 1973.