

디젤기관 매연 배출물에 미치는 재순환 배기의 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Recirculated Exhaust Gas
on Soot Emissions in Diesel Engines

배명환*, 임재근**
M. W. Bae, J. K. Lim

ABSTRACT

The effects of recirculated exhaust gas on the characteristic of soot emissions have been investigated by using an eight-cylinder, four-stroke, direct injection and water-cooled diesel engine operating at several loads and speeds. The experiments in this study are carried out at the fixed fuel injection timing of 38° BTDC regardless of experimental conditions. The intake oxygen concentration and the mean equivalence ratio calculated by the intake air flow and fuel consumption rate are used to analyze and discuss the influences of EGR rate on soot emissions. Results of this study indicate that soot emissions increase owing to the drop of intake oxygen concentration and the rise of equivalence ratio as the EGR rate increases at a given engine load and speed, especially the high load.

주요기술용어 : Exhaust Gas Recirculation(배기 재순환 : EGR), Diesel Engine(디젤기관), Intake Oxygen Concentration(흡입산소농도), Equivalence Ratio(당량비), Soot Emissions (매연 배출물)

1. 서 론

디젤기관은 소형 플랜트로서 뛰어난 열효율을 갖고 있고, 출력에 비하여 CO₂ 배출량이 적기 때문에, 에너지 절약과 시구온난화 억제의 입장에서 다른 열기관에 비하여 우수함이 밝혀져 이를 대신할

동력원이 개발되지 않는 한, 앞으로도 상당히 선호도가 높으리라 예상된다. 그러나 디젤기관의 분무연소계는 동급의 가솔린기관에 비하여 수십배의 매연을 배출하는데, 이러한 매연이 대기를 오염시키고, 생물에 나쁜 영향을 미치기 때문에, 저감대책은 긴급한 사회적 과제가 되고 있다. 따라서 현 단계에서는 디젤기관의 배기 배출물에 대한 저감대책에 총력을 기울여 디젤기관의 장점을 살려 나아가야 할 필요가 있다.

* 정회원, 경상대학교 기계설계학과, 생산기술연구소

** 정회원, 군산대학교 기관공학과

이러한 저감대책의 일환으로 저자들이 EGR시스템을 사용하여 디젤기관의 배기 배출물을 저감 시킬 목적으로 재순환 배기가 연료소비율 및 NO_x 배출물에 미치는 영향을 연구하였는데, 특히 EGR율의 증가에 따른 흡입산소농도, 배기산소농도 및 당량비의 변화에 의한 영향을 검토하여 EGR시스템을 채용하는 경우에 NO_x 배출물이 저감되는 원인을 고찰해 보았다.¹⁾

디젤기관은 연소실내에 산소량이 많기 때문에, EGR을 채용하는 경우에 가솔린기관 만큼의 NO_x 배출물 저감효과는 없지만, 저부하인 경우에는 매연 등의 악화가 그다지 심하지 않고, 오히려 착화지연이 개선되어 HC가 저감된다. 그러나 EGR율의 증가에 따라 고부하 영역에서는 NO_x 이외의 배출물이 상당히 증가하고, 연료소비율도 약간 증가할 뿐만 아니라, 특히 매연 배출물의 재순환에 의한 기관내부의 마모나 침식이 발생하고, 윤활유의 열화가 빨라 내구성 및 신뢰성의 저하를 가져오므로, 디젤기관에 EGR시스템을 채용하는 경우에 가장 큰 문제로 대두되는 것이 매연 배출물이다. 이러한 이유 때문에, 디젤기관에 EGR시스템만을 적용시키는 것은 어렵지만, 매연 제거장치 등을 이용하여 흡기로 재순환되는 배기중 매연을 제거시킬 수만 있다면, 어떤 처리방법보다도 효과적이고 용이하게 NO_x 배출물을 줄일 수 있어, 디젤기관의 NO_x 배출물 저감기술로서 가장 기대가 되고 있는 방법중의 하나이다.^{2,3)}

배 등⁴⁾은 스크리버형 EGR시스템 디젤기관에 있어서 재순환 배기가 라이너, 피스톤 및 피스톤링의 마모에 어느 정도 영향을 미치는지를 물분석 매연제거장치를 사용하여 각각의 두 실린더에 하나는 신기만을, 다른 하나는 신기와 재순환 배기 20%를 흡입시켜 실험하여 조사한 결과, EGR을 채용하는 경우에 마모율이 상당히 증가함을 밝혔다. 또한 동 저자⁵⁾는 스크리버형 EGR 시스템 디젤기관에 있어서 연소압력 및 열발생률을 이용한 연소해석에 의해 재순환 배기가 연료소비율 및 배기 배출물에 미치는 영향을 조사한 결과, EGR에 의해 NO_x 배출물이 현저하게 저감되고, 물분석 매연제거장치에 의해서는 매연 배출물이 저감되고 있음을 확인하였다. 이러한 연구결과들은 EGR,

물분사 및 매연제거 후처리의 조합적인 효과가 나타나고 있으리라 예상된다.

NO_x와 매연의 생성은 서로 동시에 만족시킬 수 없는 조건 때문에, 현상태에서는 기관자체의 개량만에 의해 동시에 저감시키기에는 한계점에 다다르고 있다. 따라서 한 가지 방법이 아닌 전처리, 후처리, 연소 자체개선 등의 주요 저감기술을 동시에 조합시켜 효과를 얻는 방법을 강구하여야 하는데, EGR시스템을 디젤기관에 채용하는 경우에는 부하, 기관회전속도 등의 운전범위가 광범위하기 때문에, 효과적인 운전이 가능하도록, 각 배기 배출물, 특히 NO_x와 매연 배출물의 관계를 종합적으로 분석하고, 기관회전속도 및 부하의 변동에 따라 배기 배출물을 규제값 미만으로 감소시킬 수 있는 최적EGR율을 결정하는 것이 필요하다. 따라서 저자들이 이전에 연구검토한 조합식의 스크리버형 EGR시스템의 제어기술을 개발하기 위해서는 기관운전의 적합성, 정밀성 및 응답성이 좋은 실험데이터를 기초자료로서 활용하여야 한다.

본 연구에서는 배기 배출물 저감대책에 있어서 EGR시스템 채용의 장점을 살리고, EGR 및 매연제거장치의 조합시스템을 동시에 채용하는 경우의 문제점을 검토하기 위하여 1단계로서 기관본체의 설계를 변경하지 않는 단순 EGR시스템에 의해 디젤기관의 부하 및 기관회전속도를 파라미터로 하여 재순환 배기율을 증가시켰을 경우, 매연 배출물에 미치는 영향을 조사하고 흡기산소농도 및 당량비를 사용하여 정성적으로 고찰해 본다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 기관은 독일 MAN B & W 박용기관의 수냉·8기통 직접분사식 4행정 디젤기관으로, Fig.1에 본 실험에 사용된 장치의 개략도를 나타내고, Table 1에는 시험기관의 주요 제원을 보여주고 있다.

기관의 부하는 진자식(pendulum)의 직류 동력계를 사용하여 측정하였고, 연소실의 압력은 제2번 실린더에 압전식(piezoelectric)의 압력변환기를 장착하여 측정하였다. 배기 배출물은 보쉬(Bosch)식

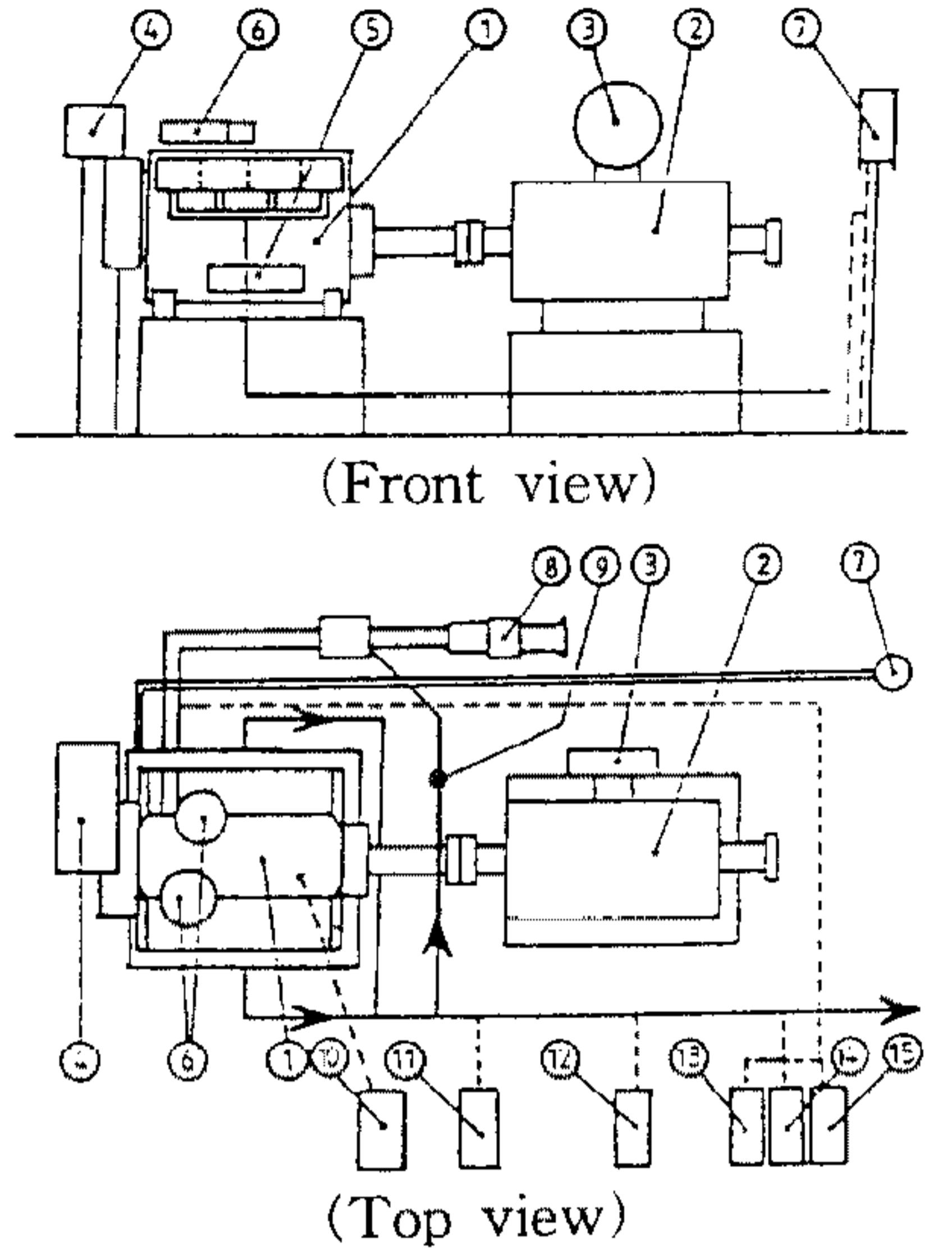


Fig.1 Schematic diagram of test apparatus

Table 1 Specifications of Test Engine

Items	Specifications
Engine/Model	MAN-M-(V8)/D-1548M
Type	8 Cylinder, Water-Cooled, 4 Cycle, Direct Injection, V Type, Natural Aspiration
Piston Displacement	11.63 ℥
Bore × Stroke	115 mm × 140 mm
Compression Ratio	17 : 1
Fuel Injection Timing	BTDC 38°
Maximum Power	113 kW/2,000 rpm
Valve Timing	Intake Open : 4° 30' BTDC Intake Close : 27° 30' ABDC Exhaust Open : 40° BBDC Exhaust Close : 8° ATDC

스모크 계측기와 독일 Hartmann & Braun AG 사의 배기 분석기를 사용하여 측정하였고, 연료소비량은 Seppler사의 체적식 유량계에 의하여 광트리거(optical trigger)에 의해 작동되는 시계로 일정량의 소비시간을 계측하여 계산했다. 또한 흡입공기량은 Aerzerner-Maschinen사의 로타리 피스톤 가스계측기를 사용하여 측정하였다.

실험에 사용된 디젤유의 화학적 성분 및 물리적 성질에 대한 값과 시험기관의 전부하시 출력, 토크 및 연료소비율에 대한 특성곡선은 저자들의 이전 논문을 참고하기 바란다.⁶⁾

2.2 실험방법

본 연구에서는 기관회전속도를 1,200 rpm에서 2,000 rpm까지 200 rpm 간격으로, 부하를 25%에서 100%까지 25% 간격으로, EGR율을 0%에서 40%까지 10% 간격으로 변화시키면서 실험을 했는데, 기관회전속도, 부하 및 EGR율의 3개 파라미터중, 2개를 고정한 상태에서 하나의 파라미터만을 변화시켰다. 본 실험에서는 동일 조건에서 이루어졌을지라도 EGR율 변동률은 ±6%이고, 부하 변동률은 ±5%이다. 기관회전속도 2,000 rpm 및 부하 25%의 상태에서는 정상운전이 상당히 어려웠을 뿐만 아니라, 얻어진 데이터의 신뢰성 때문에, 데이터 정리의 대상에서 제외시켰고, 기관회전속도 2,000 rpm 및 EGR율 40%의 상태에서는 배기량, 특히 매연이 과다하게 배출되어 실험을 할 수 없었다. 이렇게 해서 실험은 91조건에서 수행되었는데, 이 때 분사시기는 BTDC 38°로 실험 조건에 관계없이 고정했다.

실험을 하는 동안 기관의 냉각수와 윤활유 온도를 조절하기 위하여 수냉식 열교환기를 사용하였고, 기관의 작동상태를 수시로 점검하기 위하여 기관 각부에 장착된 T형 열전대(CC)와 압력계를 이용하여 온도와 압력을 측정하였다. 배기온도로 연소상태를 판단하기 위하여 각 연소실의 배기관에도 T형 열전대를 부착하였다.

배기 재순환 실험의 EGR율은 흡기관과 배기관에서 CO₂ 농도를 측정하여 구하기도 하지만^{7~9)}, 본 연구에서는 전체 연소실의 흡기량에 대한 EGR된 배기량의 관계식인 EGR Rate(%) = (V_o - V_a) / V_o, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율을 사용했다.^{10~13)}

여기서 V_o 는 EGR을 하지 않았을 경우의 흡입공기량(m^3/h)이고, V_a 는 EGR을 했을 경우의 새로운 흡입공기량(m^3/h)이다.

EGR율이 매연 배출물에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 흡입산소농도와 당량비가 이용되었는데, 이들은 직접 계측한 흡입공기량, 연료소비량 및 EGR율에 의해 계산한 평균값이다.¹⁾

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 매연생성 기구^{14, 15)}

디젤기관, 가스터빈 등 분무연소계의 매연은 생성과 산화라고 하는 두 가지 과정을 동시에 겪은 후 화염으로부터 배출되므로, 매연배출량을 저감시키기 위해서는 매연의 생성 및 산화 과정을 명확히 파악할 필요가 있다. 이중, 산화과정에 대해서는 몇 명의 연구자들이 매연의 산화 및 표면반응속도에 대한 실험식을 나타내고 있고, 이들 실험식은 충격파관을 이용한 실험 등에 의한 실측값과 잘 일치되고 있음이 확인되고 있다. 그러나 매연생성과정은 기상에서 고상으로의 상변화를 수반하는 등 복잡다기한 과정이 포함되어 해석이 간단하지 않기 때문에, 아직 불명확한 부분이 많다. 최근 버너, 충격파관 등을 사용하여 비교적 단순한 연소장에서 기초적 연구를 하여 해석을 시도하고 있는데, 이들 기초적 연구에서 매연 생성과정은 열분해, 핵생성, 표면생장, 응집 및 합체로 이루어지고 있음을 밝히고 있다.

매연 생성과정은 복잡하지만, 현단계에서 매연생성의 주요경로는 연소기에 분사된 연료가 고온의 연소가스로부터 대류와 복사에 의한 열전달 및 혼합에 의해 고온이 되어 C_2H_2 , C_2H_4 등의 불포화 저분자량 탄화수소로 열분해되고, 이들이 서로 중합 및 축합을 반복해서 다환방향족 탄화수소가 됨과 동시에 탈수소화가 진행되어 분자량 10^6 정도로 고분자화한 단위직경 수 10 nm 의 입자가 매연이 된다고 하는 중성핵 생성이론중의 유기화합물 중축합설이 유력하다.

Smith¹⁶⁾는 디젤기관에 있어서 매연생성과정을 Fig.2와 같이 나타내고 있는데, 전구물질(precursor)분자가 과포화되어 국소적으로 생성되고 매연의 핵이 응축, 응집, 표면생장되어 직경 20 nm 정

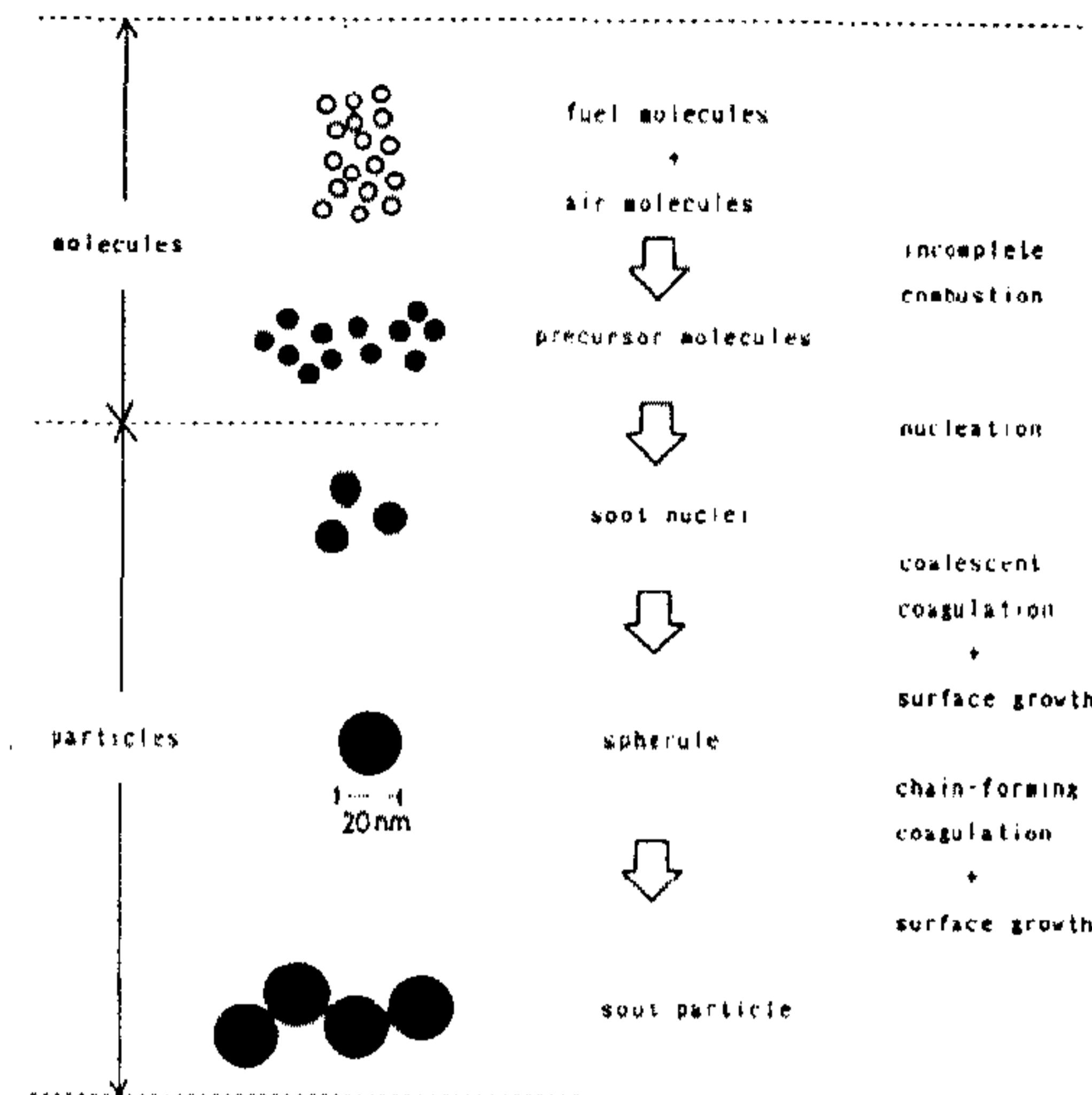


Fig.2 Schematic diagram of sequence of events during diesel soot formation

도의 작은 구로 되는데 수 ms 정도 걸린다고 하였다. 이 때 또한 이 과정과 동시에 탈수소화와 산화반응이 일어나는데, 응집되는 과정은 탈수소화가 진행할수록 증가하지만, 탈수소화는 너무 느려서 그러한 역할을 진행할 수 없다고 했다.

매연미립자의 핵생성 및 생장의 동역학적 연구가 현재 많이 이루어지고 있지만, 매연생성에 대한 동역학적 이해와 더불어 화염내의 유체역학적 및 열역학적 거동을 해석하고, 연소계에서 생성 및 배출되는 매연미립자에 관한 제현상을 계통적으로 해석할 수 있는 상태의 단계에 아직 도달되어 있지 않기 때문에, 이론적인 접근과는 다른 매연생성 조건, 생성량 등이 현상론적으로 조사되고 있다. 매연생성의 조건 및 생성량은 연료의 종류, 당량비, 압력, 온도, 시간 등의 함수인데, 이러한 관계함수를 대표적인 화염이나 고온연소장치에서 구하는 것은 실제 연소계의 매연생성 저감을 위한 대책을 수립하는데 유용할 뿐만 아니라, 상기의 동역학적 연구를 위한 일반적인 자료를 제공한다는 의미에서도 중요하다.

본 연구에서는 매연입자경을 조사하기 위하여 분해능이 좋은 투과식 전자현미경을 사용하여 프로판 공기의 정직 예혼합화염에서 매연시료를 포집했다. 세라믹 강화막인 콜로디온으로 표면을 칠한 동메쉬에 매연입자를 포함한 연소배기를 불어넣어 메쉬상에 매연

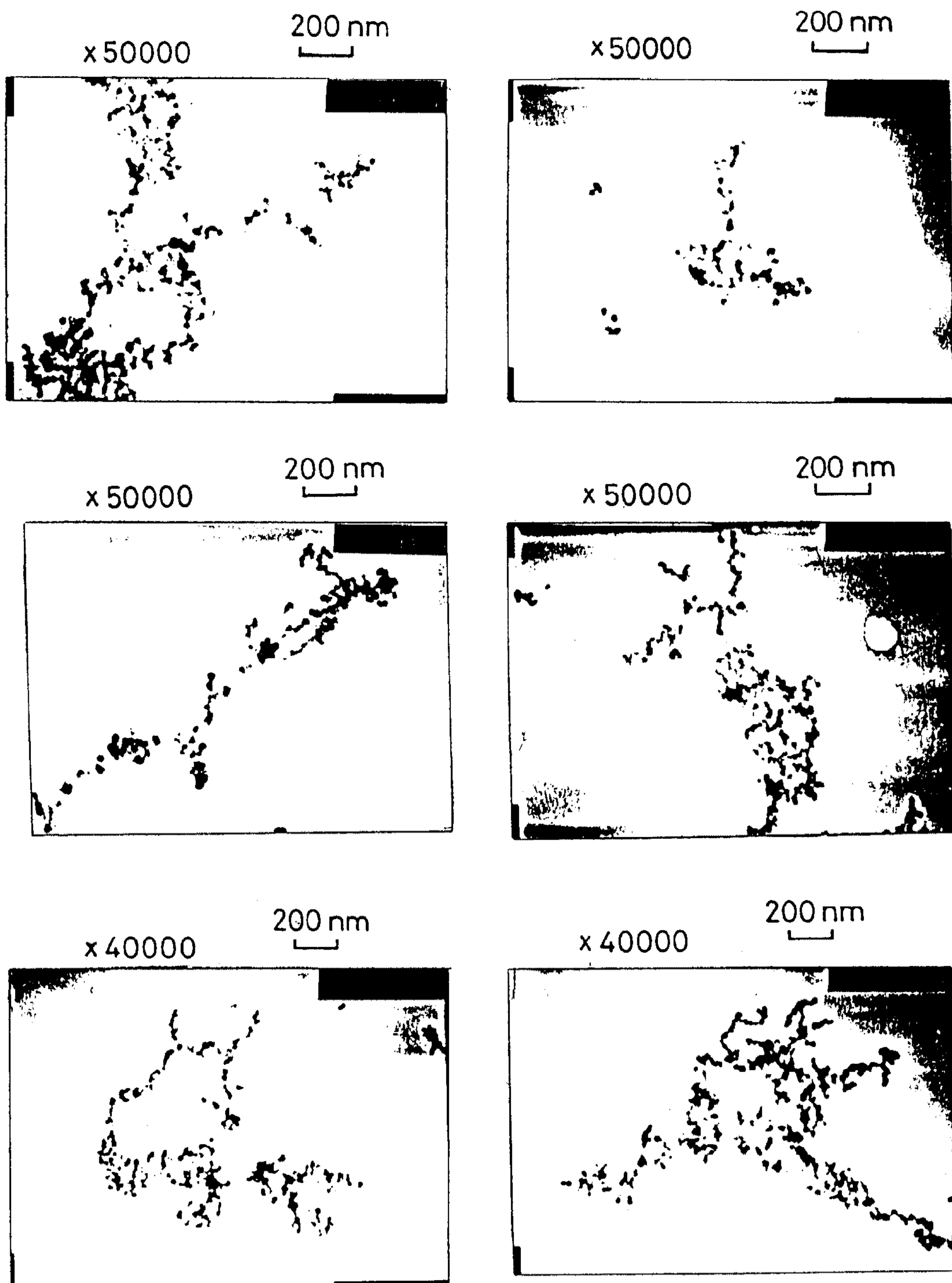


Fig.3 Transmission electron micrograph of soot particles formed during a constant -volume combustion

을 부착시키도록 했다. 이러한 매연입자의 시료를 전자현미경사진으로 나타낸 것이 Fig.3인데, 입자경은 20~30 nm되어 디젤매연의 입자경과 유사하다. 또한, 그림에서 입자개체의 차이는 거의 없고, 쇄상으로 연결되어 응집되고 있음을 알 수 있다.

3.2 매연 배출물에 미치는 재순환 배기율의 영향

각 기관회전속도에 있어서 부하와 EGR율을 변화시켰을 경우와 매연 배출물의 관계를 나타낸 것이 Fig.4인데, EGR율 및 부하의 증가에 따라 매

연 배출물이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그런데 기관회전속도 1,200rpm에서 부하가 높아질수록 다른 기관회전속도의 경우보다 매연의 증가폭이 커지고 있는데, 이것은 아이들링 상태에서 급가속되는 것에 대응하는 것으로, 저속의 고부하시는 연료펌프의 회전수가 낮아서 높은 분사압력을 얻을 수 없기 때문에, 연료의 미립화와 연료·공기의 혼합이 나빠져서 매연 배출물이 증가한다.¹⁷⁾

본 연구의 실험조건인 1,200rpm보다 더 저속인 경우에도 이러한 현상이 발생하는지를 알아보기 위하여 기관회전속도가 1,000rpm에서 동일한 조건

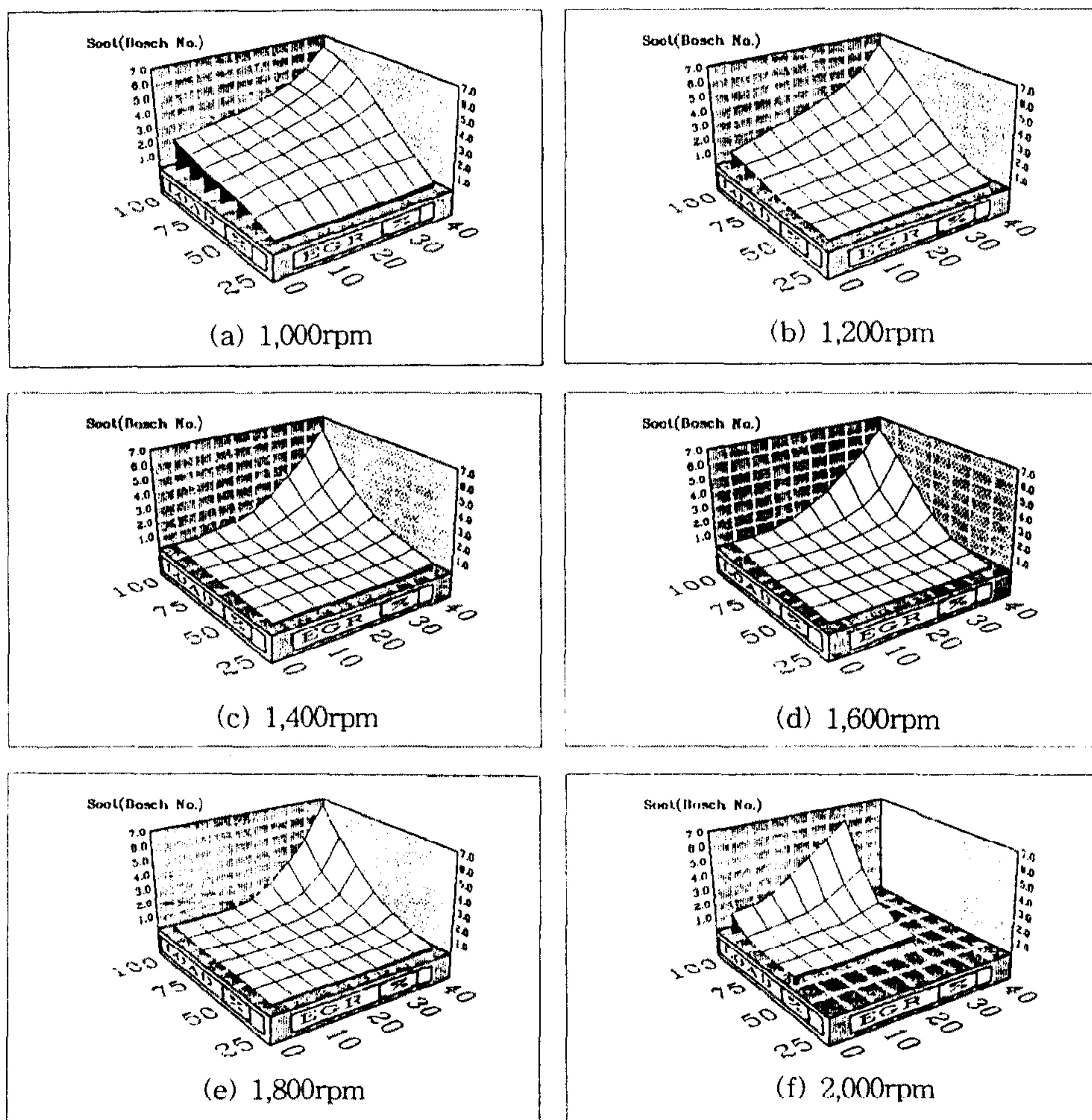


Fig.4 Effect of EGR rate on soot emissions characteristic with engine load at a given engine speed

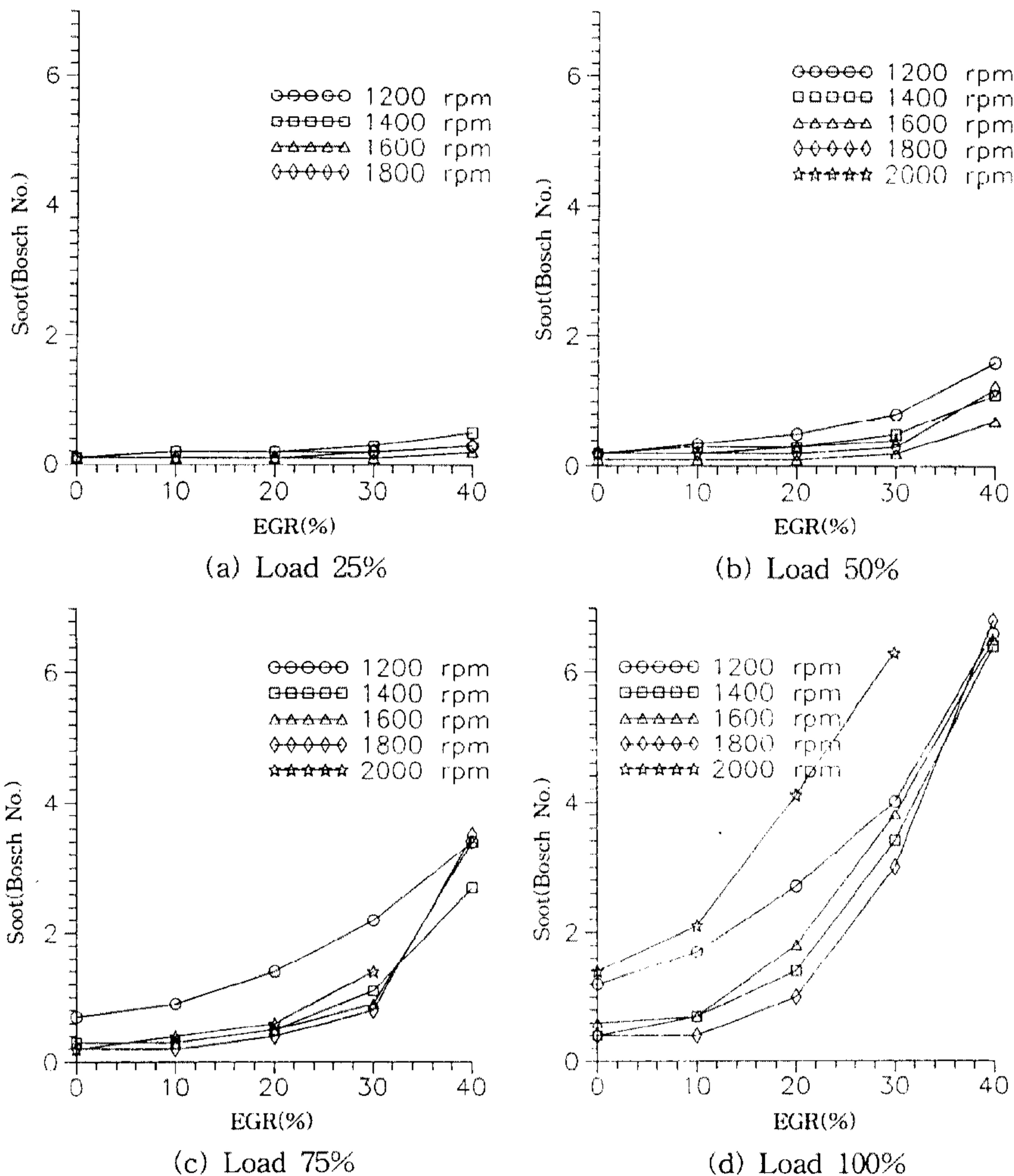


Fig.5 Effect of EGR rate on soot emissions characteristic as a parameter of engine speed at a given engine load

의 실험을 한 후, 매연 배출물을 조사하고 같은 방법으로 데이터를 정리하여 나타낸 것이 Fig.4의 (a)이다. 그림에서 1,200rpm의 경우와 유사한 경향을 보이고 있는데, 정량적으로 더욱 현저한 증가현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 운전 가능한 저속에서 부하가 높아질수록 매연 배출물이 증가함을 암시하고 있다. 그러나 기관회전속도를 더욱 저속화시키면, 어느 한계점에서 불완전연소가 증가되어 매연 배출물보다는 HC 혹은 CO 배출물이 증가되고 결국에는 가연 한계점에 도달

되어 연소가 일어나지 않으리라 예상된다.¹⁰⁾

Fig.4에서 EGR을 증가에 의한 매연 배출물의 현상을 보다 쉽게 알아보기 위하여 각 부하에 있어서 EGR율과 매연 배출물의 관계를 기관회전속도를 파라미터로 해서 표시한 것이 Fig.5이다. 동일 기관회전속도에 있어서는 부하가 증가할수록, 또한 EGR율이 증가할수록 매연 배출물이 증가하고 있는데, 저부하에서는 EGR율의 영향이 별로 크지 않지만, 부하가 증가할수록 EGR율의 영향이 현저하게 커짐을 알 수 있다.

기관회전속도 2,000rpm에서 EGR율이 40%인 경우에는 매연의 과다 배출로 기관의 정상운전이 곤란했고, 신뢰성의 문제 때문에 얻어진 데이터를 사용하지 않았지만, 2,000rpm에서 EGR율이 증가하고 부하가 높아지는 경우에 매연 배출물이 급속하게 증가하고 있다. 이것은 충격파관의 비화염 열분해 및 산화의 실험결과에 대한 종형상 매연발생(soot bell)의 현상^{11,18)}과 유사한데, 고속운전 상태인 기관회전속도 2,000rpm에서는 EGR율에 의해 연소가스온도가 다소 저하될지라도, 매연미립자 생성의 최적온도상태로 되어 산화보다는 열분해가 가속되기 때문에 매연 배출물이 증가한다고 생각된다.

디젤기관에 있어서 EGR율과 매연 배출물의 관계에 관한 연구가 상당히 많이 이루어지고 있는데, 이들 연구결과들은 대체적으로 3부류, 즉 첫째는 EGR율을 증가시키면 연소기간이 길어지기 때문에, 매연 배출물이 증가한다고 하는 경우^{2,10,19~24)}, 둘째는 조합방식을 일부 채용하거나 실험방법을 바꾸는 등에 의해, 일정 EGR율의 증가까지는 매연 배출물의 변화가 없거나, 부하 및 기관회전속도의 영역에 따라 감소하기도 하고, 증가하기도 하는 경우^{11,12,24~26)}, 셋째는 일정 EGR율까지는 흡기온도 상승에 의한 연소개선효과, 배기량 저감에 의한 효과, 당량비 변화 등에 의한 연소에 미치는 영향 때문에, 매연 배출물이 감소한다고 하는 경우²⁷⁾로 나누어지고 있다.

디젤기관의 매연은 일반적으로 전부하 부근에서 급격하게 증가하지만, 부분부하에서 증가하는 경우도 있다. 매연생성을 억제시키려면 연료와 공기의 혼합이 잘 되게 하고, 착화후에 분사되는 량을 적게 하여, 연소기간 및 착화지연을 짧게 하고, 열발생률의 최고값을 낮게 할 뿐만 아니라, 팽창행정 후반부의 연소가스온도를 높이는 것이 유리하다. 또한, 매연은 온도함수로 고온역에서는 연소가스온도가 증가할수록 감소하는데^{11,28)}, 특히 고온역에서 연소가스온도가 상승하면 O₂, OH 등에 의해 매연 및 CO의 산화가 촉진된다.^{29~32)}

이상의 연구결과에서는 실험방법, 장치 등에 따라 매연 배출물에 미치는 재순환 배기의 영향이 다르게 나타나고 있는데, 본 연구에서는 EGR율이 증가하면, 특히 부하가 증가할수록 매연 배출물이 증

가하고 있다. 이것은 연소에 필요한 흡입산소농도의 상대적인 감소로 공기과잉률의 변화가 매연 배출물 방향으로 움직여 흡기온도 상승효과와 배기량 저감효과에 의한 저감분보다는 공기과잉률의 변화에 의한 증가분이 더 크게 되어 전체적으로는 매연이 증가한다고 추정된다.

3.3 매연 배출물에 미치는 흡입산소농도의 영향

EGR율의 증가에 따라 흡입산소농도가 어떻게 변화하고 이들 변화가 매연 배출물에 어떠한 영향을 미치는지 고찰해 보기 위하여 Fig.6에는 EGR율과 흡입산소농도의 관계를 보여주고 있는데, 기관회전속도 및 부하에 관계없이 EGR율의 증가에 따라 흡입산소농도가 직선적으로 감소하고, EGR율이 증가할수록 감소폭이 커짐을 알 수 있다. 이러한 정성적 경향은 이전의 연구결과^{33,36,37)}와 아주 잘 일치하고 있기 때문에, 본 연구결과에서도 EGR율이 증가할수록 착화지연이 증가하여 매연 배출물 특성에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

배기 재순환이 배기 배출물에 미치는 영향의 이유로서 EGR율이 증가하면 배기산소농도가 낮아져 연소가스 열용량이 증가하여 연소가스온도가 저하하는 경우^{10,12)}와, 흡입산소농도가 감소하는 경우를 들고 있는데, Tsunemoto 등³³⁾은 배기 재순환으로 인한 열용량 증가가 가솔린기관보다는 디젤기관이 적기 때문에, 디젤기관에 있어서 배기 배출물에 미치는 EGR의 영향을 급기중의 열용량 증가로 인한 연소실온도 감소 때문이라고 설명하기는 어렵다고 지적했다.

鹽崎 등²⁾은 디젤기관에 EGR을 적용한 실험에서 EGR에 의한 연소특성에 대해 예혼합연소의 최고값은 감소하지만, 확산연소의 변화는 적고, 실린더내 급기온도의 상승에 따라 착화지연이 감소하고 연소기간이 길어짐에 따라 연비악화 및 매연증가를 초래한다고 했다. Dürmholz 등³⁴⁾ 및 内田 등³⁵⁾은 급기온도를 일정하게 유지한 실험에서 EGR율이 증가하면 급기중의 산소농도가 감소하기 때문에 착화지연이 증가하고 있다고 했다. 최근, 광계축용의 4기통 1.9ℓ 직접분사식 디젤기관을 사용한 Ar-coumanis 등¹³⁾의 연구에서는 EGR율의 증가에 따라 일반적으로 화염 중심온도가 낮아지고, 매연

산화율이 감소하지만, 착화지연은 발생하지 않는다고 했다.

흡입산소농도가 매연 배출물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 기관회전속도와 부하에 관계없이 전 데이터를 정리해서 분석한 것이 Fig.7인데, 가로축은 흡입산소농도(EGR시 흡입산소농도/비EGR시 흡입산소농도)를 표시하고 있다. 그림에서 흡입산소농도가 감소할수록 매연 배출물의 증가가 현저함을 알 수 있는데, 여기서 흡입산소농도가 감소함은 EGR율의 증가를 의미한다. 이러한 정성적인 경향은 이전의 많은 연구결과와 아주 잘 일치하고 있다.³³⁾

Wade 등³⁶⁾은 EGR율의 증가에 따른 매연 배출물 증가의 이유로서 EGR율의 증가는 흡입산소농도의 감소를 가져와 연소전에 분사된 연료와 예 혼합시키기 위하여 필요한 산소량의 감소를 들고 있는데, 감소된 산소는 매연의 증가에 기여한다고 했다. 또한, 흡입산소농도의 감소는 팽창행정중 매연의 산화에 필요한 산소량을 감소시키기 때문에, 매연이 급격하게 증가되어 디젤연소시스템의 고부하에서 운용될 수 있는 EGR량에 제한을 받게 되는 경향이 있다고 했다.

Plee 등¹⁰⁾도 EGR량이 많을수록 흡입산소농도가 감소하여 매연의 산화보다는 생성이 우선적인 지배를 받기 때문에, 매연 배출물이 증가한다고 했다. 그들은 연소가스온도는 EGR율에 크게 영향을 받지 않지만, 일반적으로 매연 배출물은 연소온도와 함수관계가 있기 때문에, 연소온도가 증가할수록

매연 생성 및 산화 속도가 증가되는데, EGR시는 산화과정에 더 강하게 영향을 미친다고 했다.

EGR을 적용하는 경우의 매연 특성은 착화지연, 연소가스온도, 열발생율(예혼합 및 확산 연소의 최고값), 연소기간 등에 의해 지배받고 있는데, 본 연구에서는 Fig.6과 같이 EGR율이 증가할수록 흡입산소농도가 낮아지고, 결과적으로 착화, 혼합 등의 연소에 악영향을 초래하게 된다. 따라서 착화지연이 발생하여 연소가스온도가 감소하고, 연소기간이 길어지게 되어 결국은 매연 배출물이 증가하게 됨을 알 수 있다.

3.4 매연 배출물에 미치는 당량비의 영향

EGR율의 증가에 따라 당량비가 어떻게 변화하고 이들 변화가 매연 배출물에 어떠한 영향을 미치는지 고찰해 보기로 한다. 디젤연소시스템의 운전은 언제나 이론혼합비보다 희박한 상태에서 이루어지고 있는데, 배기를 재순환시키는 경우에 연소실내 연료와 공기의 혼합 정도를 알아보기 위하여, 본 실험조건에 대한 당량비를 계산해 보았다. 여기에서 당량비는 실린더내의 흡입산소량과 연료량에 의해 계산된 연소실내의 평균당량비인데, Fig.8은 기관회전속도를 파라미터로 해서 부하 25%, 50%, 75% 및 100%일 경우의 당량비 변화를 EGR율 변화에 따라 표시한 것이다. EGR율이 증가함에 따라 당량비가 희박혼합기에서 이론혼합기 부근으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 부하가 높을수록, 기관회전속도가 증가할수록 현저하고, 또

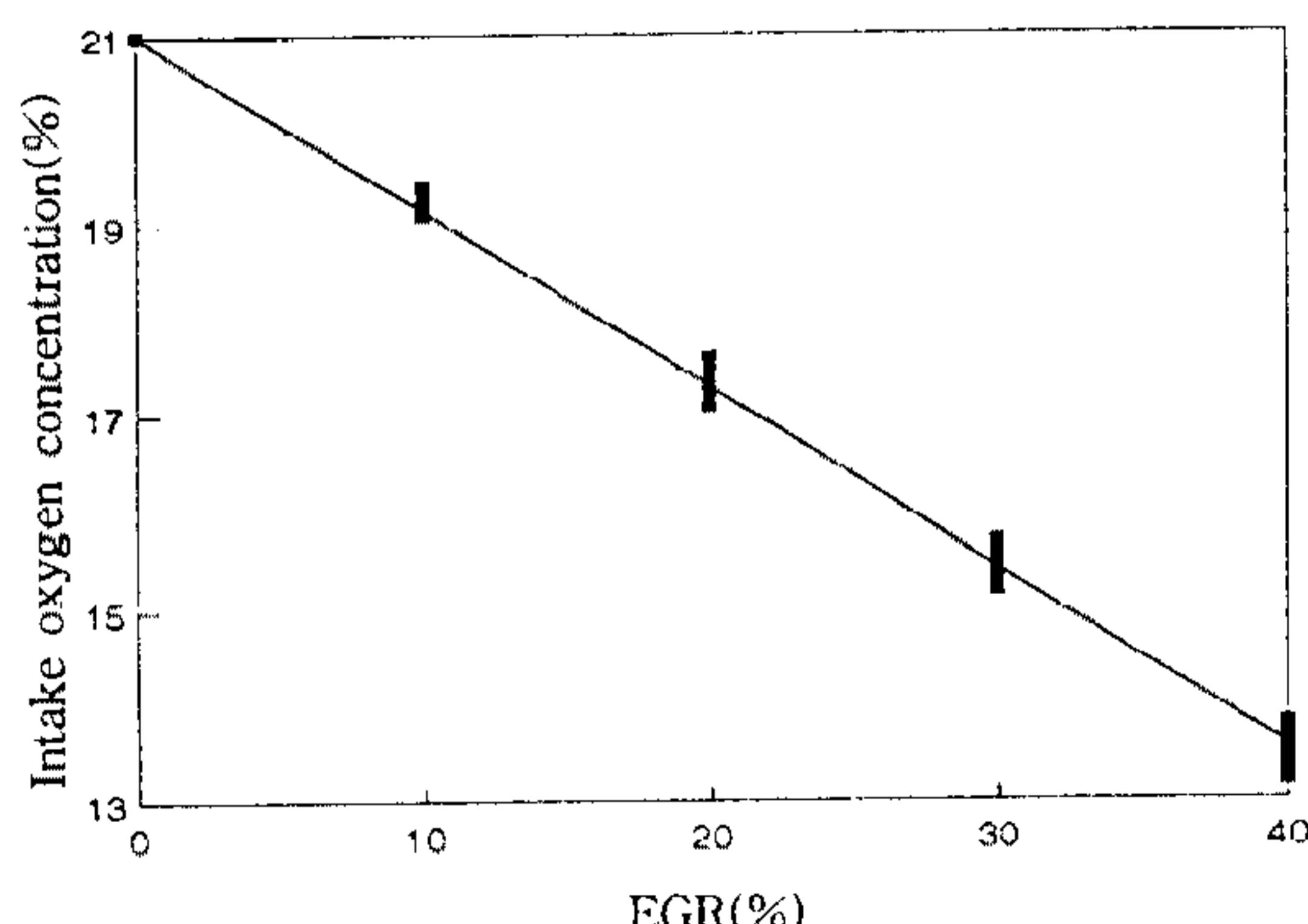


Fig.6 Intake oxygen concentration versus EGR rate

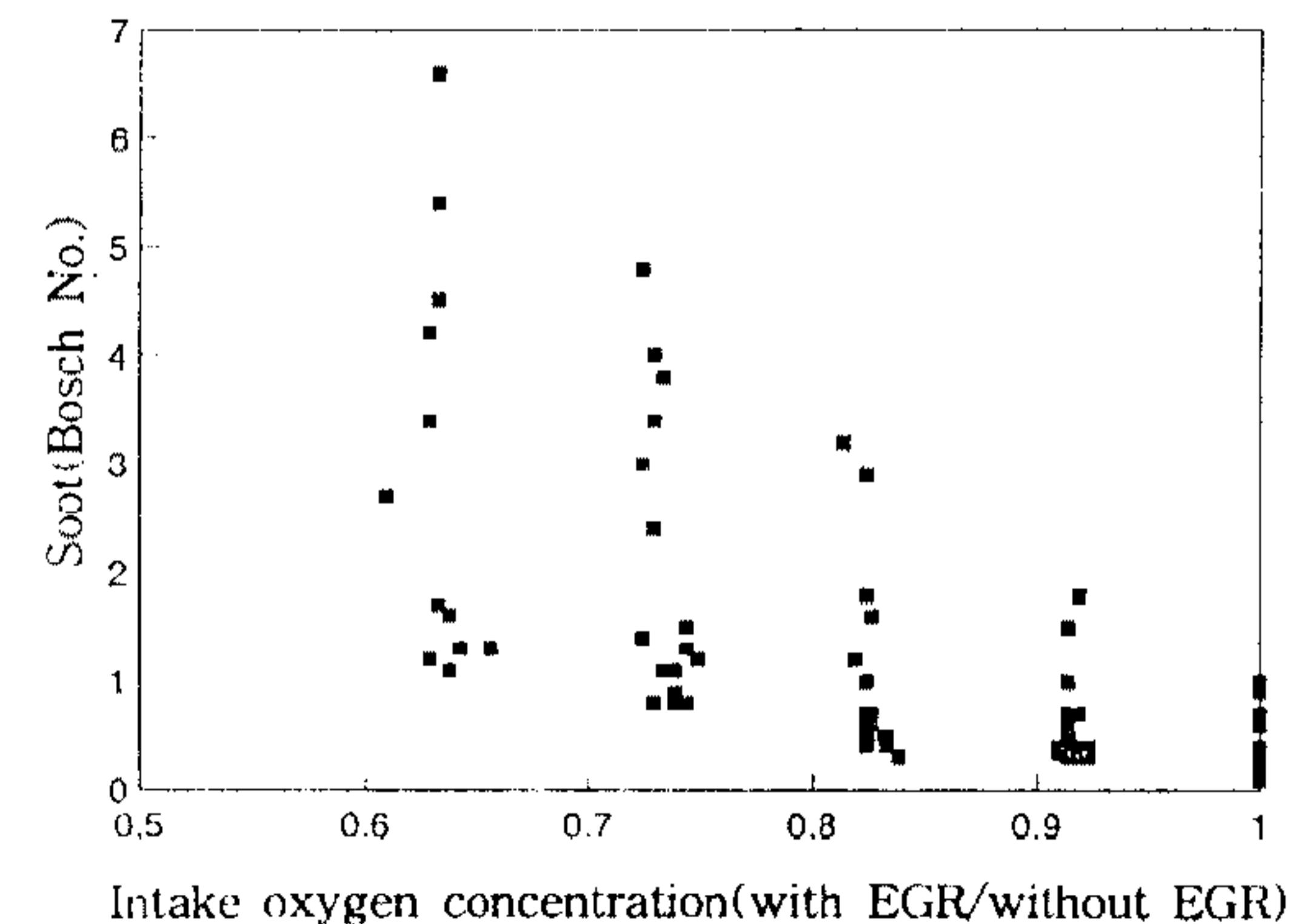


Fig.7 Effect of intake oxygen concentration(with EGR/without EGR) on soot emissions

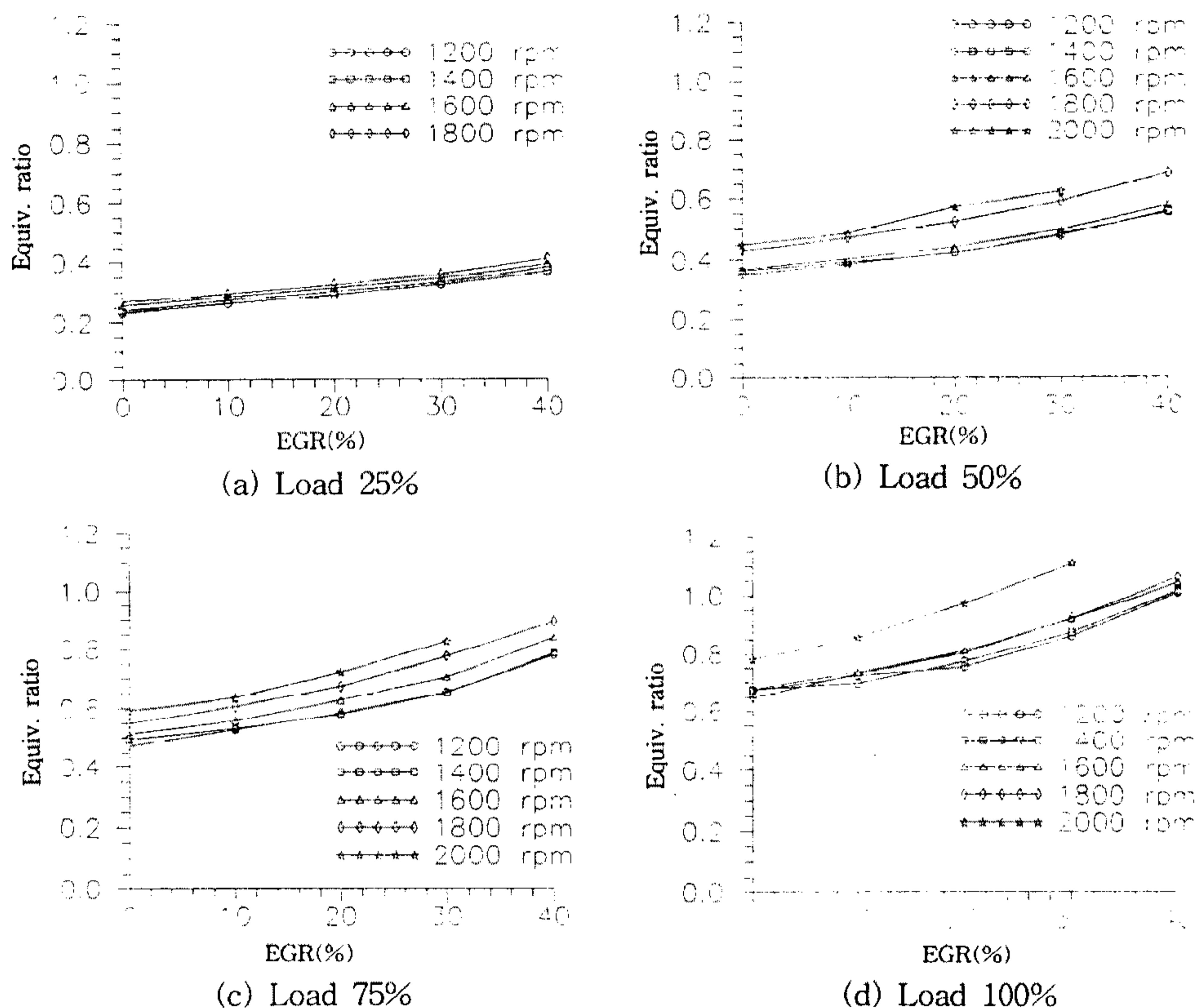


Fig.8 Variation in equivalence ratio with EGR rate for different engine speeds at a given engine load

한 동일한 기관회전속도에서는 부하가 증가할수록 EGR을 증가에 따른 당량비 변화폭이 크게 나타나고 있다.

Fig.9은 당량비와 매연 배출물과의 관계를 나타내고 있는데, 당량비 0.6 이하인 회박영역에서는 매연 배출물이 적지만, 그 이상에서는 거의 선형적으로 증가되어 이론혼합비를 넘어서면 매연 배출물의 농도가 현지함을 알 수 있다. 배¹⁴⁾의 예혼합기 연소 연구에 의하면 매연생성에 미치는 당량비의 영향이 아주 큰데, 그 이유로서 당량비가 증가하면 저분자량 탄화수소이온보다는 고분자량 탄화수소이온이 증가한다고 했다. 여기서 고분자량 탄화수소이온의 농도와 크기는 매연입자를 의미한다. 디젤연소는 확산연소이지만, 극소적으로 보면 예혼합연소의 집합으로 간주할 수 있기 때문에 같은 현상을 나타내리라 예상된다.

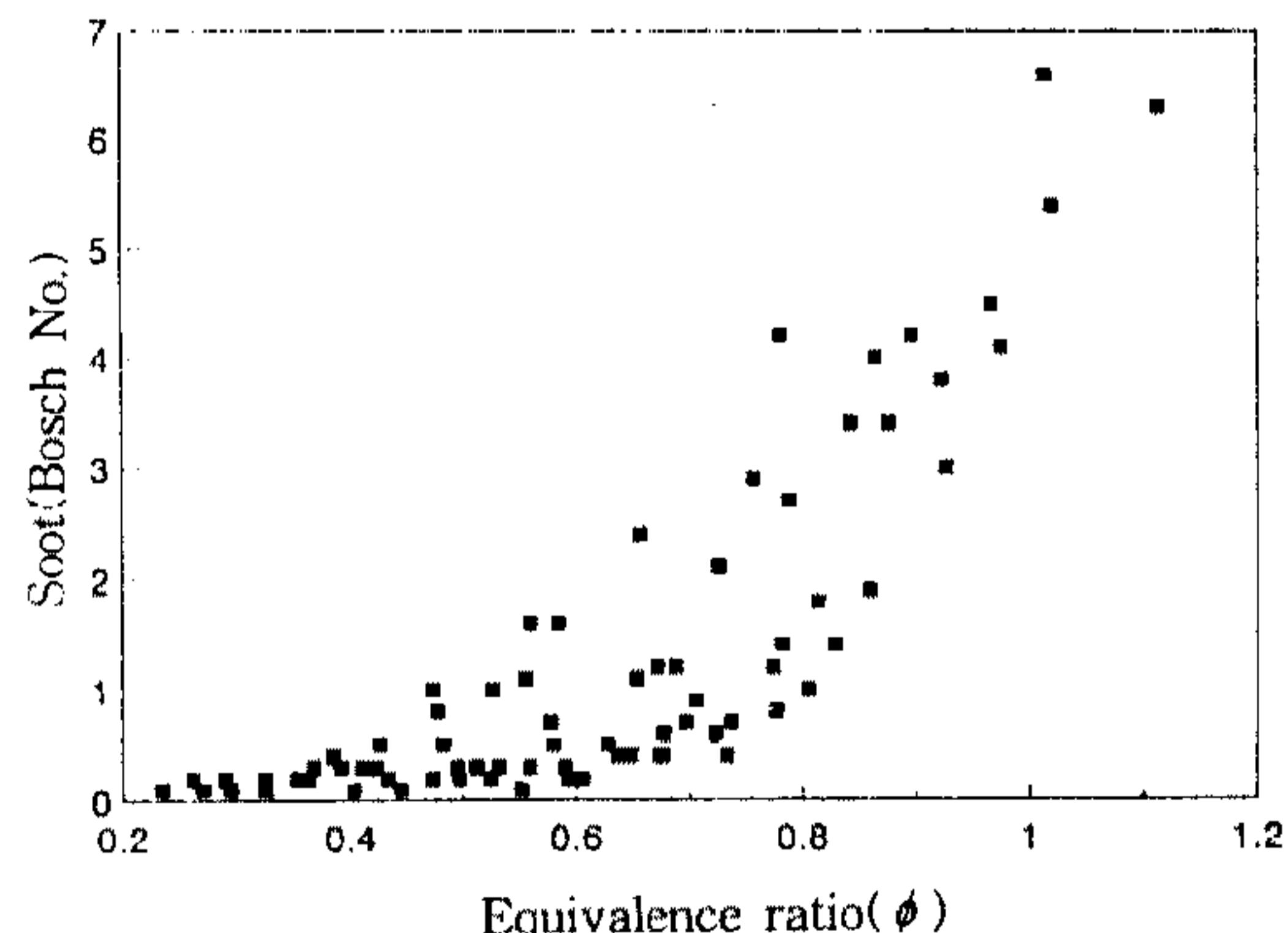


Fig.9 Effect of equivalence ratio on soot emissions

위 그림에서 매연 배출물과 당량비의 관계에 대한 정성적 경향은 다른 연구결과^{27,33,36)}에서도 볼 수 있는데, Tsunemoto 등³³⁾의 직접분사식, 간접

분사식 및 터보 직접분사식에 대한 어느 경우의 연구결과와도 아주 잘 일치하고 있다. 이것은 대부분의 매연이 압축행정중의 고온에 의한 착화지연의 감소로 확산연소기간이 늘어나기 때문에 생성되는 대, 잔류가스중의 산소농도는 매연의 재연소에 아주 중요한 역할을 한다. 따라서 본 연구와 같이 EGR율의 증가에 따른 당량비의 증가는 매연의 생성과정에 기여하여 매연 배출물이 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

수냉·8기통 직접분사식 4행정 디젤기관에 있어서 부하 및 기관회전속도를 파라미터로 하여 EGR율을 증가시켰을 경우, 재순환 배기가 매연 배출물에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사하고, 흡입산소농도 및 당량비와의 관계를 고찰하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

- 1) 매연 배출물은 동일 기관회전속도에서는 부하가 증가할수록, 또한, EGR율이 높을수록 증가하는데, 저부하 영역보다는 고부하 영역에서 EGR율의 영향이 현저하다.
- 2) 저속에서 부하가 증가할수록 연료미립화 및 연료·공기의 혼합이 악화되기 때문에, 매연 배출물에 미치는 EGR율의 영향이 크다.
- 3) EGR율의 증가에 따라 흡입산소농도는 감소하고, 흡입산소농도의 감소는 착화지연의 증가를 초래하여 부하 및 기관회전속도에 관계 없이 매연 배출물이 증가한다.
- 4) EGR율이 증가함에 따라 당량비가 희박혼합기에서 이론혼합기 부근으로 증가하는데, 이러한 경향은 부하가 높을수록, 기관회전속도가 증가할수록 현저하고, 동일한 기관회전속도에서는 부하가 증가할수록 EGR율 증가에 따른 당량비 변화폭이 크다.
- 5) 당량비 0.6 이하인 희박혼합기 영역에서는 매연 배출물이 적지만, 그 이상의 당량비에서는 거의 선형적으로 증가하여 이론혼합비를 넘어서면 매연 배출물이 현저하다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구과제 연구비에 의하여 수행되었으므로 도움을 주신 재단 관계자 여러분께 감사드리며, 많은 자료제공과 연구결과의 고찰에 도움을 주신 TIT의 Kamimoto 교수께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 裴明煥, 林載根, “디젤機關의 燃料消費率 및 窒素酸化物 排出物에 미치는 EGR의 影響에 關한 研究”, 韓國自動車工學會 論文集 第3券, 第1號, pp. 76~88, 1995.
2. 鹽崎忠一, 鈴木孝幸, “直接ディーゼルエンジンのEGRが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.
3. 鹽崎忠一, 鈴木孝幸, 大谷哲也, “ディーゼルエンジンにおけるEGRとその問題點について”, 日野技報, No. 38, pp. 3~15, 1989.
4. 朴泰仁, 裴明煥, 河正鎬, “스크러버형 EGR시스템 디젤機關의 실린더·피스톤 磨耗에 미치는 再循環 排氣의 影響”, 韓國舶用機關學會秋季學術講演會 抄錄集, pp. 149~155, 1996.
5. 裴明煥, 河正鎬, “스크러버형 EGR시스템 디젤機關의 燃燒 및 排氣 排出物 特性에 미치는 再循環 排氣의 影響”, 韓國舶用機關學會 1997年 度 秋季學術大會 論文集, pp. 120~126, 1997.
6. 林載根, 裴明煥, 金鐘一, “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”, 韓國舶用機關學會誌 第16券 第4號 pp. 60~77, 1992.
7. 野平英隆, 小端喜代志, “EGRの研究(第1報) - 筒内燃焼ガス割合(BGR)と筒内ガス-燃料比(G/F)による評價-”, トヨタ技術 第26券 第2號, pp. 156~166, 1977.
8. Nakajima, Y., Sugihara, K., and Muranaka, S., “Effects of Exhaust Gas Recirculation on the Combustion Process of a Diesel Engine”, SAE Paper 870143, 1987.

- culation on Fuel Consumption", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 195, pp. 369~376, 1981.
9. Fujimoto, H., Senda, J., Shibata, I., and Matsui, K., "New Concept on Lower Exhaust Emission of Diesel Engine", SAE 952062, pp. 65~78, 1995.
 10. Plee, S. L., Ahmad, T., and Myers, J. P., "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NO_x Emissions", SAE 811195, pp. 75~91, 1981.
 11. 小高松男, "大型ディーゼル車のEGRによる実用運転時NO_x抑制方策とその効果", 内燃機関 28, pp. 17~23, 1989.
 12. 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.
 13. Arcoumanis, C., Bae, C., Nagwaney, A., and Whitelaw, J. H., "Effect of EGR on Combustion Development in a 1.9L DI Diesel Optical Engine", SAE 950850, pp. 169~193, 1995.
 14. 裴明煥, "高圧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. 11~14, 1989.
 15. 日本科學技術情報センタ-(特殊法人), "炭素状微粒子の生成過程", 昭和57年度環境廳委託業務結果報告書, pp. 9~19, 1983.
 16. Smith, G. W., "Kinetic Aspects of Diesel Soot Coagulation", SAE 820466, pp. 299~309, 1980.
 17. 池上詢, "燃焼改善の展望", 日本機械學會誌, Vol. 95, No. 882, pp. 47~50, 1992.
 18. Frenklach, M., and Clary, D. W., "Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene", 20th Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute, pp. 887~901, 1984.
 19. 田代實, 辻村欽司, "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. 119~127, 1972.
 20. Walder, C. J., "Reduction of Emissions from Diesel Engines", SAE 730214, pp. 1~17, 1973.
 21. 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.
 22. Nagai, T., and Kawakami, M., "Reduction of NO_x Emission in Medium-Speed Diesel Engines", SAE 891917, pp. 1~15, 1989.
 23. 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.
 24. Uchida, N., Daisho, Y., Saito, T., and Sugano, H., "Combined Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emissions", SAE 930601, pp. 103~109, 1993.
 25. 鈴木邦男, "ディーゼル機関の低排出化を圖る燃焼制御", 内燃機関 Vol. 19, No. 235, pp. 32~40, 1980.
 26. Kohketsu, S., Mori, K., Kato, T., and Sakai, K., "Technology for Low Emission, Combustion Noise and Fuel Consumption on Diesel Engine", SAE 940672, pp. 103~112, 1994.
 27. 松岡 孟, 櫻井 茂, 中谷 茂樹, "渦室式ディーゼル機関のパティキュレート低減手法(断熱渦流室におけるEGR及び噴射時期の最適化)", 第6回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, pp. 137~142, 1987.
 28. Kamimoto, T., and Bae, M. H., "High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines", SAE 880423, pp. 1~10, 1988.
 29. Glassman, I., "Combustion", Academic Press, New York, 1977.
 30. Fenimore, C. P., and Jones, G. W., "Oxidation of Soot by Hydroxyl Radicals", J.

- Phys. Chem., Vol. 71, pp. 593~597, 1967.
31. Neoh, K. G., Howard, J. B., and Sarofim, A. F., "Soot Oxidation in Flames", Particulate Carbon, Formation During Combustion, pp. 261, 1981.
32. Fristrom, R. M., and Westenberg, A. A., "Flame Structure", McGraw - Hill, New York, 1965.
33. 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, 1980.
34. Dürnholz, M., Eifler, G., and Endres, H., "Exhaust-Gas Recirculation - A Mea-
- sure to Reduce Exhaust Emission of DI Diesel Engines", SAE 920725, pp. 151~158, 1992.
35. 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", 自動車技術會論文集 Vol. 24 No. 4, pp. 41~46, 1993
36. Wade, W. R., "Light-Duty Diesel NO_x-HC-Particulate Trade-Off Studies", SAE 800335, pp. 1379~1398, 1980.
37. 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集, pp. 229~234, 1992.