

환상 2단연소실을 갖는 직접분사식 디젤기관의 성능 및 배출물 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Research on Performance and Emission Characteristics of Direct-Injection Diesel Engines with Annular Two-stage Combustion Chamber

김동호 · 배종욱

D. H. Kim and J. U. Bae

Key Words : Annular Two-stage Combustion Chamber(환상 2단연소실), NOx(질소산화물), Particulate Matter (PM, 미립자 물질), High Swirl(고 와류)

Abstract : Various measures have been tried to reduce the NOx emission from diesel engine, but with partial success because the mechanisms of NOx and PM formations appear to have trade-off relation between each other. Therefore it has been known to be difficult to reduce NOx emission and PM emission simultaneously. Two stage combustion method i.e. a combustion process which has rich combustion stage and lean combustion stage one by one, has been developed successfully to reduce NOx formation in the continuous combustion chambers such as in the boilers. But until yet it is not successful to apply the same method in intermittent combustion chamber like in the diesel engine cylinder, as it was, only several research works were carried out. In this study, devised was a uniquely shaped combustion chamber with reformed piston crown intended to keep fuel-rich condition during early stage of combustion and fuel-lean condition during next stage. It was found that the NOx emission decreased significantly at various conditions of operation with the two stage combustion type engines of PR20 type, but other values such as smoke, CO and specific fuel consumption deteriorated as usual.

기호 설명

λ : 공기 과잉율

τ : 연소 혼합 시간 [ms]

1. 서 론

해상에서 디젤 주기관 및 발전기관의 배기 가스중의 질소산화물(NOx)에 대하여 2000년 1월1일부터 IMO의 해상오염방지국제협약에 의하여 기관의 정격 회전수에 따른 제한치를 정하여 규제를 시작하였으

며, 향후 단계적으로 그 규제치는 낮아질 전망이다. 현 단계에서의 국내외의 디젤기관 제조자들은 기관의 분사계를 튜닝하는 방법 만에 의하여서도 규제치를 추종하고 있으나, 다음 단계에 가면 전처리 방식이라 할 수 있는 물첨가 유화유의 사용 또는 실린더 내에 물분사 방법을 대안으로 강구하고 있다. 물첨가 방식은 기존의 연료분사계를 사용할 수 있다는 장점을 가지기는 하지만, 물첨가 비율에 해당하는 출력의 저하를 피할 수 없으므로, 이를 만회하기 위하여서 연료 분사계를 교체하여야 하는 폐단이 있고, 물분사 방식은 실린더벽면 윤활유막의 파괴 및 효율의 감소가 초래되는 문제점이 있다. 또한 상기의 두 방법은 물에 의한 장애의 의구심이 완전히 해소되기 어렵다.

선택적 환원제와 촉매 환원 방식에 의한 후처리 방식은 배출 단계의 NOx를 90%이상 제거할 수 있으므로 종국적인 해결 방안으로 제시될 수 있으나 현 단계에서는 기관의 크기에 비교할 때 거대한 촉매 반응

접수일 : 2003년 8월 15일

김동호(책임저자) : 한국해양대학교 대학원,

국군수송사령부 함양운영단

E-mail : pos19@hanafos.com, Tel : (51-433)-2257

배종욱 : 한국해양대학교 기관시스템공학부

기를 설치하여야 하며 그 설치비도 막대하다는 문제점이 걸려 있다.

또한 NOx 배출량은 일반적으로 출력, 효율 및 Smoke 배출량 등과 상호 교환관계에 있기 때문에 NOx배출량을 저감시키는 대책을 시행하면 이와 반대로 상기 후자의 성능에 있어서 악화를 초래하는 것으로 알려져 있다. 따라서 NOx의 저감만을 이루었다 하여서 목표를 달성하였다고 볼 수는 없다.

그러므로 연소실의 형상을 개선함으로써 연소과정에서 NOx의 생성을 억제하는 방법을 효과적으로 활용할 수 있다면 전처리 방식과 후처리 방식의 문제점을 동시에 해결할 수 있는 유효한 한 방안으로 제시될 수 있을 것이다. 따라서 이 방향의 연구개발이 필요하다.

본 연구에서는 피스톤크라운 형상을 개량하는 방법으로 연소실을 변경하여 연소과정의 변화와 개선에 따른 NOx 생성의 억제효과를 목적으로 하고 있다.

2. 이론 해석

2.1 NOx 생성기구와 억제 연소 방식의 개념

NOx에는 Thermal NOx와 Fuel NOx가 있으며 디젤기관의 배기가스 중의 NOx의 대부분은 Thermal NOx로 구성된다. Thermal NOx의 생성은 1800K 이상의 고온에서 온도가 높을수록 잔존 O₂의 농도가 높을수록 활발하여지며, 또한 이러한 조건이 만족되는 시간이 길수록 생성량은 많아진다. 따라서 NOx의 생성을 억제하기 위하여서는 첫째로 가능하면 연소온도를 1800K 이하로 낮추어 주는 방법, 둘째로 공기과잉율을 0.6 정도 이하로 낮추어서 연소하는 방법, 그리고, NOx가 많이 생성되는 조건을 신속히 통과하는 방법등을 다각적으로 이용하여야 할 것이다.

이론공기량에 가까운 혼합기의 연소시에 연소온도는 최고점에 도달한다. 공기과잉율이 이론혼합비보다 현저히 낮으면, 불완전연소에 의하여 연소온도가 낮아지며, 이것이 현저히 높게 되면 과잉공기가 많아져서 연소온도가 낮아지므로 공기과잉율이 1에서 멀어질수록 NOx의 생성은 억제된다. 그런데 이 두 조건 중 공기과잉율이 낮은 조건은 불완전연소하여 미연소분이 많이 남게되므로 다음 단계에 가서 공기과잉율을 높여서 이것을 완전연소시켜야 한다. 이러한 방법을 2단연소라 한다. 그런데 2단연소는 그 이행과정에서 이론혼합비 조건을 통과하여야 하며, 이러한 조

건을 이행하는 시간이 NOx 생성량에 큰 영향을 미친다. Fig. 1은 초기 공기과잉율이 0.6 이하이거나 1.5 이상일 때와 연소혼합시간이 짧을 때에 NOx의 생성량이 적은 것을 나타내고 있다.

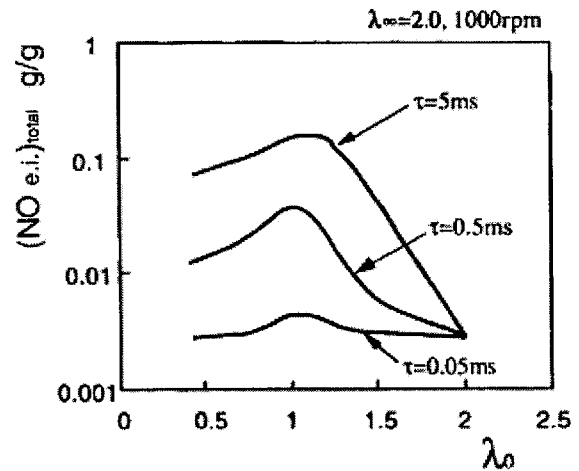


Fig. 1 Effect of mixing time-scale, τ , and initial excess air ratio, λ_0 , in two-stage combustion

디젤기관의 연소실 내 총 평균공기과잉율은 부하의 증가에 따라 5.0~15까지 변화하므로 분사된 연료가 실린더 내에 순간적으로 완전 혼합된다고 가정한다면, NOx의 생성량은 매우 적게 될 것이다.

만약 위의 가정이 실현될 수 없다면, 연소 초기에 공기과잉율 0.6~0.7정도로 연소한 후 공기과잉율 1.5 이상인 조건으로 신속히 이행하여 연소시키는 2단 연소 방법에 효과를 기대할 수 있을 것이다.

2.2 피스톤의 형상 및 명명법

본 연구에서는 Fig. 2의 단기통 직접분사식 소형 디젤기관의 고와류형 피스톤을 기본형(PO00 피스톤으로 명명)으로 하여 6개의, 각기 다른 2단연소실형 피스톤으로 환상 2단연소실형 피스톤(PR 피스톤으로 명명)을 고안하여 제작하였다.



Fig. 2 Conventional high swirl piston(PO00)

Fig. 3에서 실선으로 표시된 D는 PO00 피스톤의 연소실이고, 점선으로 표시된 E는 PR형 피스톤의 연소실이다. PR형 피스톤은 와류의 강도 손실을 최소화 하기 위해 깊은 접시형의 캐비티(D) 주위에 환상의 2 단 연소실(E)을 가지는 형상을 하도록 제작된 것이다. 환상 연소실 체적(X)의 총 연소실 체적에 대한 백분율을 5%, 10% 및 20%로 차이를 갖도록 제작하여 각각 PR05, PR10 및 PR20 피스톤이라 명명하였고, 주연소실(Y)과 2단연소실(X)의 경계에 턱(C)의 유무에 따라 턱이 있는 것을 A형, 턱이 없는 것을 B형이라 명명하였다. 그리고 Fig. 4와 5는 상술한 6개의 피스톤이며 이들은 동일한 압축비가 되도록 캐비티의 체적이 계산되어 가공되었다.

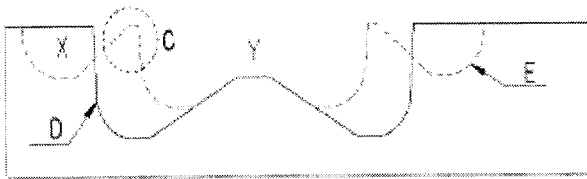


Fig. 3 Schematic of annular two-stage piston

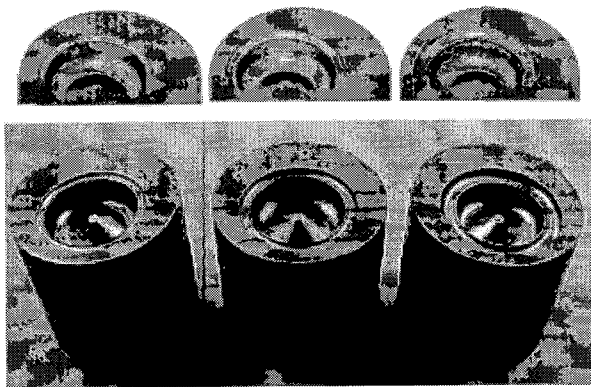


Fig. 4 Annular two-stage combustion piston, type A(PR05A, PR10A, PR20A)

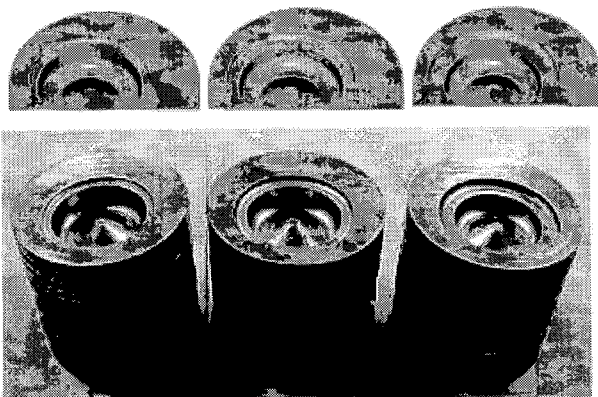


Fig. 5 Annular two-stage combustion piston, type B(PR05B, PR10B, PR20B)

3. 실험 방법 및 결과

3.1 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 6과 같이 회전수와 부하를 조절할 수 있으며, 연료소비량과 축 토크를 측정할 수 있는 동력계와 배기가스의 O₂, CO 및 NO_x의 농도를 측정할 수 있는 연소분석기, 배기가스의 Smoke를 측정할 수 있는 Smoke Meter로 구성되었다. 실험 기관의 주요 사항과 연소가스분석기의 제원은 Table 1과 2에 나타내었다.

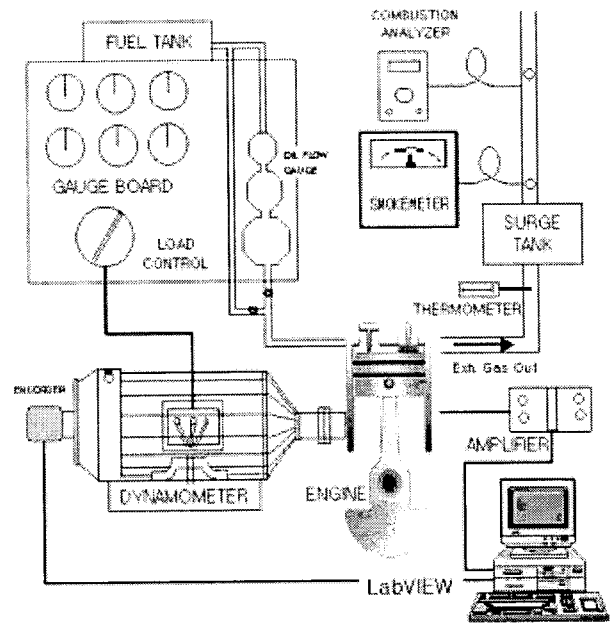


Fig. 6 Schematic of system for experiment

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Model	ND80DI
Engine Type	Single, water-cooled 4 stroke diesel engine
Piston Displacement	63l cc
Cylinder (bore × stroke)	92 mm × 95 mm
Max. power	5.88 kW, 2200 rpm
Compression ratio	19
Fuel injection pressure	18 MPa
Nozzle injection angle	144°

Table 2 Specifications of combustion analyzer

Meas. object	Range (accuracy)	
	KANE-MAY QUINTOX 9006	P8340
O ₂	0~25% (±0.2)	
CO	0~4000 ppm (±20)	
NO	0~5000 ppm (±5%)	
NO ₂	0~800 ppm (±5%)	
Smoke		0~100%

실험 기관의 운전은 회전수를 2200 rpm으로 일정 하 하고, 여러 가지 부하의 조건에서 기존의 고와류형 피스톤과 환상 2단 피스톤에 대해 비교하였다. 부하의 조건은 가스분석의 결과로부터 계산된 공기과잉율로 표시하였다. 경부하에서는 공기과잉율이 4.0 이상과 같이 큰 값을 나타내며, 부하가 증가할수록 공기과잉율은 감소하여서 본 성능시험 공시기관에서는 1.6 정도의 값에서 최대 부하의 상태로 되었다.

그리고, 해당 부하에서 공기과잉율의 변화에 따른 축토크[Nm], 연료소비량[cc/min], NOx 배출농도 [ppm], smoke[%] 및 CO 배출농도[ppm]의 측정값으로부터 출력[kW], 연료소비율[g/kWh], NOx 배출율 [g/kWh], smoke 배출농도[%] 및 CO 배출율[g/kWh]를 계산하여 비교 검토하였다.

3.2 실험 결과

3.2.1 PR-A형 피스톤

Fig. 7은 PR-A형의 축토크 곡선을 보여주고 있는데, 낮은 부하조건에서의 축토크는 PR10A가 가장 양호하지만 부하의 증가에 따라 PO00에 비교하여 약간

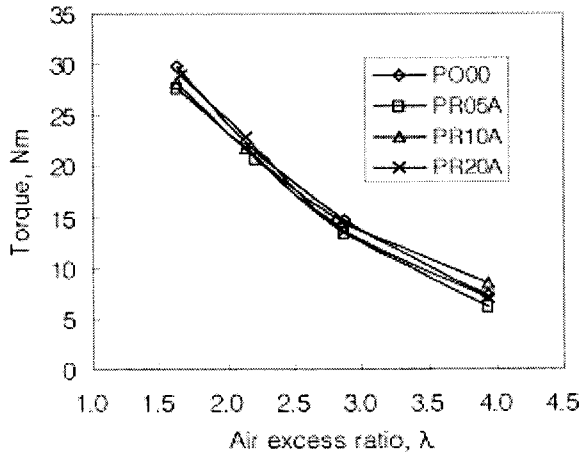


Fig. 7 Torque curve at PR-A type

반전되고 있다. PR20A는 PO00과 비슷한 경향을 나타내지만 이 역시 높은 부하조건에서 근소한 반전을 나타내며, PO00과 가장 비슷한 축토크 경향을 나타내고 있다. 그리고 PR05A가 공기과잉율을 증가에 따라 축토크 감소가 가장 크지만 전체적으로 연소실 형상에 따른 큰 변화는 나타내고 있지 않다. Fig. 8에서도 같은 경향의 연료소비율을 보여주고 있는데 PR05A의 저부하에서 연료소비율 증가는 출력 감소에 기인한 것으로 생각된다.

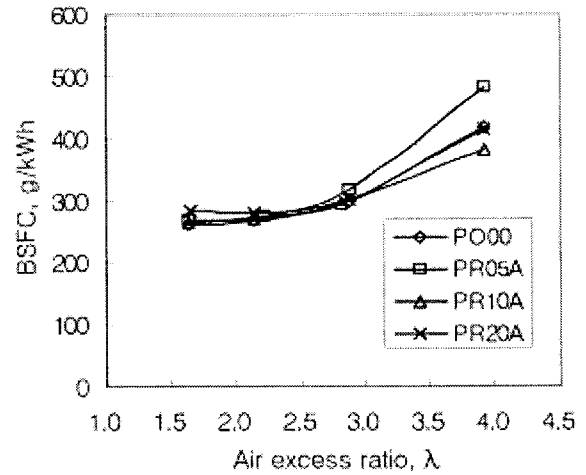


Fig. 8 BSFC curve at PR-A type

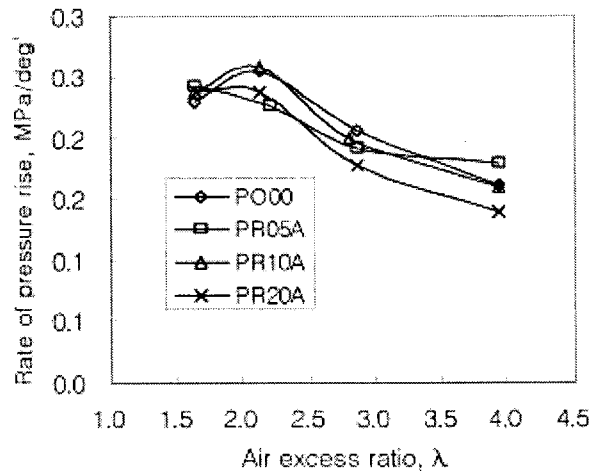


Fig. 9 Rate of pressure rise curve at PR-A type

Fig. 9는 디젤기관의 연소과정중 제2기에 해당하는 폭발적 연소기에서의 압력상승률을 나타내고 있는데, 여기에서도 PR20A가 PO00과 가장 비슷한 경향을 나타내고, PR10A가 PO00과 가장 유사한 상승률을 보여주고 있으며 가장 양호한 축토크를 나타내는 것으

로 보인다. 특히 PR05A는 저부하에서 높은 압력 상승률을 보이고 있다.

의 체적비율이 커질수록 증가되고 있지만 그 외의 조건에서는 PO00보다 약간 향상되었다.

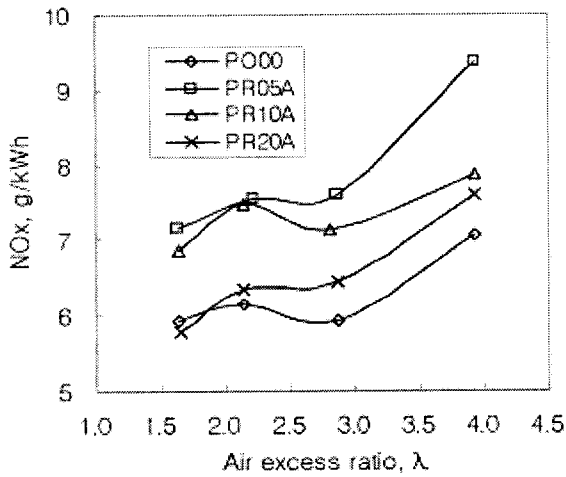


Fig. 10 NOx emission curve at PR-A type

Fig. 10은 NOx 배출율을 나타낸 그림으로서 환상 2단연소실의 체적비율이 커질수록 NOx의 배출율은 감소하고 있지만, PR20A의 고부하 조건에서 기존보다 감소되고, 그 외의 피스톤에서는 악화됨을 나타내고 있다.

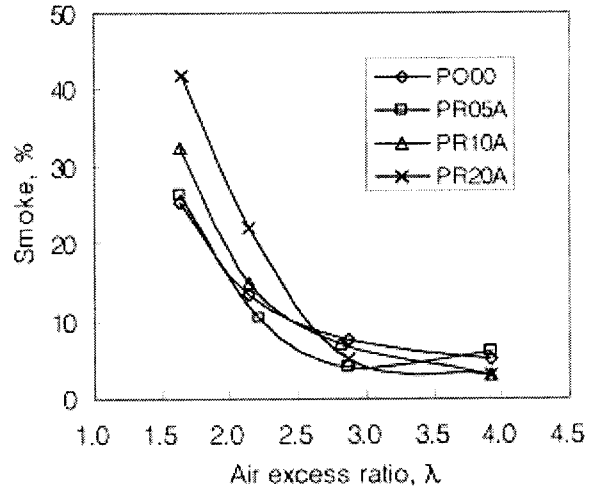


Fig. 12 Smoke emission curve at PR-A type

3.2.2 PR-B형 피스톤

PR-B형 피스톤은 PR-A형 피스톤과 같은 방식이지만 주연소실과 환상연소실의 경계에 턱이 없는 것이 차별된다.

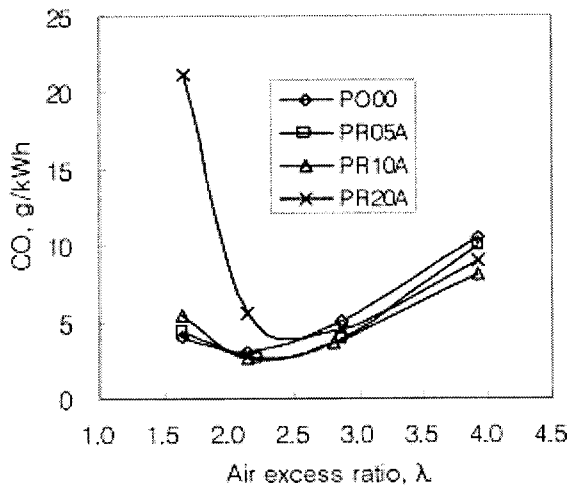


Fig. 11 CO emission curve at PR-A type

Fig. 11과 12는 각각 CO와 Smoke 배출율을 보여 주고 있는데, CO 배출율은 PR20A 피스톤의 경우, 높은 부하조건에서 매우 악화되고 있지만 대부분의 부하 조건에서 PO00보다 양호한 값을 보이고 있고, Smoke의 배출농도는 고부하측에서 환상 2단연소실

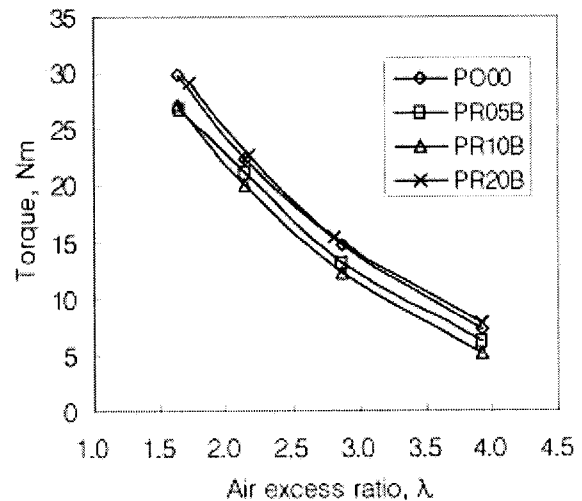


Fig. 13 Torque curve at PR-B type

Fig. 13과 14는 PR-B형 피스톤의 축토크와 연료 소비율을 나타내는데 여기서 PR20B형의 축토크는 모든 부하조건에서 PO00보다 근소한 향상을 나타내고 있으며, 연료소비율에 있어서는 거의 같은 값을 나타내고 있다.

Fig. 15는 압력상승률을 보여주는데 PR05B가 PO00과 가장 비슷한 경향을 나타내지만 전체적으로 PO00보다 상승률이 저하되어 있다.

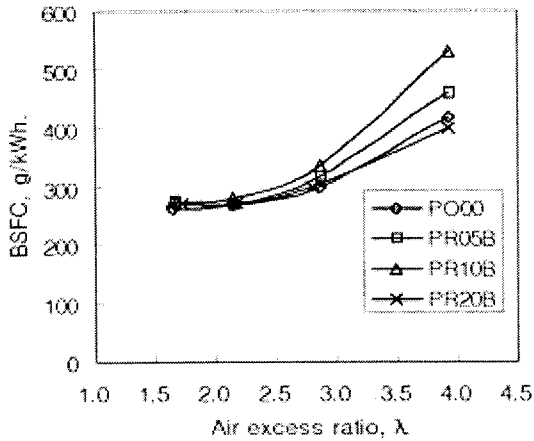


Fig. 14 BSFC curve at PR-B type

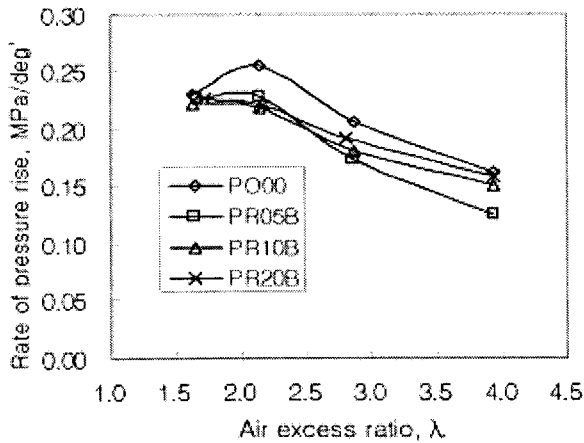


Fig. 15 Rate of pressure rise curve at PR-B type

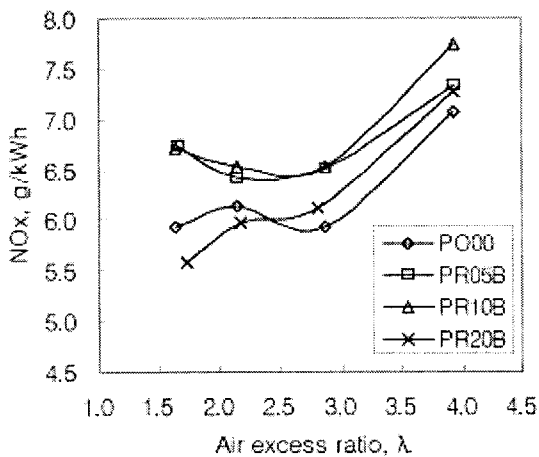


Fig. 16 NOx emission curve at PR-B type

Fig. 16은 NOx 배출율을 나타낸다. 이 경우에도 환상 2단연소실의 체적비율이 커질수록 NOx의 배출율은 감소하고 있으며, PR05B와 PR10B에 있어서는 PO00에 비하여 악화를 나타내고 있지만 PR20B에서는 낮은 부하조건에서 비슷한 수준을 유지하다가 부하가 증가할수록 저감율이 증가하여 최대 부하조건에서 6.7% 정도 저감되고 있다. 이 경향으로 볼 때 환상연소실의 체적을 더욱 증가하여 30% 이상으로 한다면 더욱 향상된 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

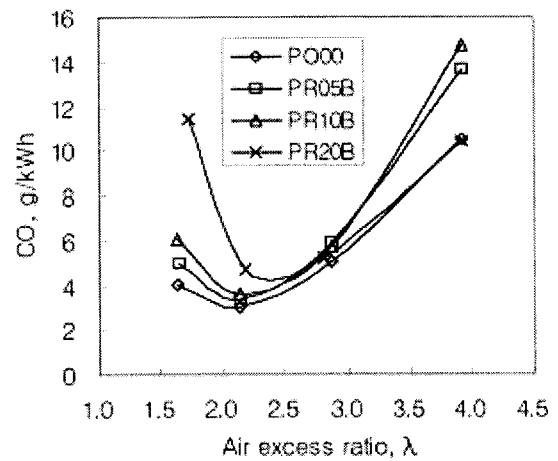


Fig. 17 CO emission curve at PR-B type

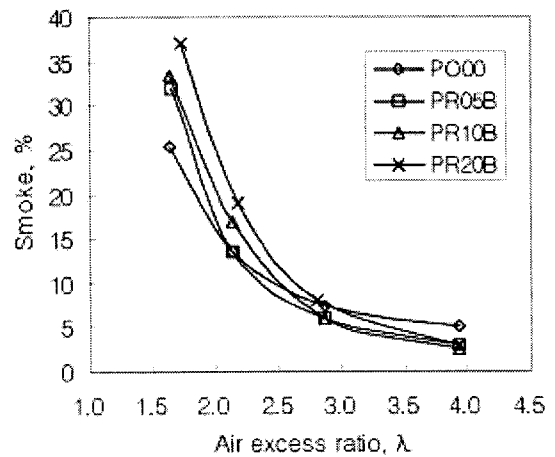


Fig. 18 Smoke emission curve at PR-B type

Fig. 17과 18은 각각 CO 배출율과 Smoke 배출농도의 그래프로서 CO 배출율은 PR20B 피스톤의 경우, 저부하에서는 PO00 피스톤과 비슷한 결과를 나타내지만 고부하 영역에서는 악화된 값을 보이고 있다. Smoke의 배출농도는 고부하측으로 갈수록 환상

2차연소실이 클수록 증가되고 있지만 저부하측으로 갈수록 PO₂보다 근소한 저감을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서 각 형식의 피스톤에 관하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. PR-A형 피스톤들은 축토크, 연료소비율, 그리고 NO_x의 배출율은 기본형 피스톤 보다 악화되는 반면 저부하 영역에서의 Smoke와 CO 배출율은 약간 향상이 되었다.
2. PR20A 피스톤은 고부하 조건에서는 NO_x 배출율이 기본형 피스톤보다 약간 향상되었지만 CO와 Smoke의 악화를 초래되었다.
3. PR-B형 피스톤들은 특히 PR20-B 피스톤에 있어서 CO 배출율에 있어서 상당한 악화를 제외하면, 축토크, 연료소비율 및 Smoke배출농도의 악화가 근소하였으며, 최대부하 조건에서 NO_x 저감을 67%의 효과를 얻을 수 있었다.
4. 결국 전반적으로 PR-B형 피스톤에서의 NO_x 배출을 저감효과가 PR-A형 피스톤보다 우수하며, 이는 주연소실과 환상 2단연소실사이의 턱이 없는 것이 2단연소의 효과를 증대시키는 것으로 생각된다.

PR-B 피스톤에서는 CO배출율의 악화가 우려되기는 하지만 이것을 촉매에 의한 후처리로서 제거할 수 있다고 한다면 PR20-B 또는 환상연소실의 체적이 20% 이상이 되는 피스톤에서는 고부하 조건으로 갈수록 NO_x 저감효과가 더욱 증대할 것으로 기대된다. 따라서 PR30B 또는 PR40B 피스톤을 제작하여 동일한 방법의 연구를 지속하는 것도 의미 있는 방안이 될 것이다.

참고 문헌

1. T. Chikahisa and T. Araki, 1996, "In-cylinder Control of Smoke and NO_x by High Turbulant Two-Stage Combustion in Diesel Engine", SAE Paper 962113.
2. J. B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp. 509~514.

3. S. R. Turns, 1999, "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill Book Company, pp. 523~558.
4. 진선호, 2002, "2단연소 개념의 연소실을 갖는 디젤 기관의 NO 저감에 관한 연구", 한국해양대학교 학위 청구 논문, pp. 04~16.
5. 전효중, 2000, "내연기관강의", 효성출판사, pp. 72~74.
6. 배종욱 외 2인, 2003, "디젤기관의 피스톤 크라운 캐비티 형상에 따른 배기 배출 특성에 관한 실험적 연구", 박용기관학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 27~34.