

충돌분무에 의한 디젤기관의 배기 배출물 특성 Characteristics of Exhaust Emission by Impinging Spray of Diesel Engine

진용수 · 김재동 · 김용복
Y. S. Jin, J. D. Kim and Y. B. Kim

Key Words : Impinging Spray(충돌분무), Nitrogen Oxide(질소산화물), Smoke(매연), Injection Timing(분사시기), Injection Pressure(분사압력)

Abstract : Recently, study on the improvement of combustion performance for the diesel engine by using the impinging spray in the combustion chamber has been actively studied. The purpose of this study is to examine the variation of exhaust emission between the trial engine with impinging plate and the prototype engine in accordance with change of fuel injection timing and fuel injection pressure. The concentration of nitrogen oxide of trial engine decreased more than 50% compared to prototype engine. However, smoke of trial engine indicated very high concentration compared to prototype engine. The effect of fuel injection timing on the nitrogen oxide and smoke indicated different results, that is, the concentration of nitrogen oxide decreased as the degree of fuel injection start become slower, whereas the concentration of smoke decreased as the degree of fuel injection start become faster.

1. 서 론

고유가시대에 접어들면서 사용연료의 경제성과 고효율 및 대출력을 낼 수 있는 이점으로 디젤기관의 사용이 증대되었고, 이에 따라 디젤기관의 배출물에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 2005년 6월에 국제해사기구(IMO)에 의해 MARPOL 73/78 Annex VI(Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships)가 발효되면서 배기 배출물에 대한 규제는 육상용 기관뿐만 아니라, 선박 및 해양구조물용 기관에 까지 확대되었다.

디젤기관의 배기 배출물 중 질소산화물(NOx)은 광화학 스모그와 산성비를 유발시켜 지구환경을 파괴시키고, 매연(smoke)은 대기오염의 원인이 될 뿐만 아니라 인체에 해롭기 때문에, 특히 이들에 대한 배출 규제가 더욱 강화되고 있다.

디젤기관 배기 배출물의 절감방법은 연료 개선,

연소 개선, 배출가스 처리 등으로 대별할 수 있는데, 연소 개선을 통해 배출 유해성분을 줄이는 방법은 디젤기관의 열효율 향상 및 성능 개선과 더불어 꾸준히 연구되어 왔다¹⁻⁴⁾. 연소는 연료 분무시 유립의 분포와 유립의 공기 역학적 거동 등에 영향을 받기 때문에, 양호한 연소를 위해서는 우선 연료의 분사가 좋아야 한다. 디젤기관 연료분사의 요건은 유립의 무화(atomization), 관통(penetration) 및 분산(dispersion)을 들 수 있는데, 이들 요건은 서로 상반되는 관계가 있어 모든 요건을 만족하는 연료분사 상태 즉, 연소실 전역에 걸쳐 연료와 공기가 균일한 분포(distribution)를 유지하면서 완전연소를 이루기가 쉽지 않다.

최근 연소실 내에 충돌판을 설치하고 이곳에 연료를 분사시켜, 연료의 충돌분무에 의해 양호한 분사를 얻음으로써 연소 개선을 시도하는 연구가 활발히 추진되고 있다. 충돌판을 설치한 시험기관은 충돌판의 설치 위치가 피스톤의 cavity^{5,6)}, 실린더 헤드⁷⁾, 노즐의 선단부⁸⁾ 등으로 다양하지만, 충돌판 없이 연소실에 직접 분사하는 원형기관에 비해 대부분 양호한 연소를 나타내었고, 열효율의 상승^{5,6)}, 질소산화물 및 소음의 감소^{7,8)} 등의 결과를 나타내었다.

접수일 : 2007년 11월 1일, 채택확정 : 2007년 11월 15일
김재동(책임저자) : 경상대학교 해양산업연구소
E-mail : jdkim@gsnu.ac.kr Tel. 055-640-3168
진용수 : 경상대학교 실습선
김용복 : 한국해양수산연수원 기관교육팀

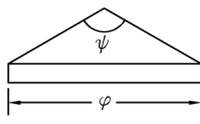
본 연구에서는 위에 열거한 선행 연구를 기초로 하여, 충돌판을 부착한 기관에 있어서 연료분사시기와 연료분사압력의 변화가 배기 배출물 수준과 기관 성능에 미치는 영향을 다음과 같이 실험적으로 고찰하였다. 우선, 기초실험을 통해 원형기관(prototype engine)과 유사한 분사각 및 유립 직경을 갖는 충돌판을 선정하였다. 그런 다음 선정된 충돌판을 연소실의 선단에 부착하고, 다공노즐을 장착한 원형기관과, 단공노즐을 장착한 시험기관(trial engine)에서 노즐 형상의 변경 및 연료분사시기와 연료분사압력의 변화가 배기배출물 수준에 미치는 영향을 실험결과에 근거하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 충돌판의 설계

원형기관과 유사한 분사각도를 나타내면서 연료의 분사가 가장 좋은 충돌판을 선정하기 위해, Table 1과 같은 6종류의 충돌판 모델을 제작하여 시험기관에 설치하고 운전해 봄으로써 적당한 충돌판 모델을 선정하였다. 원추각도(ψ)는 110° , 120° 및 130° 의 3가지로 하였으며³⁾, 직경(ϕ)은 흡, 배기밸브 사이의 간격을 고려하여 8mm와 9mm의 2가지로 구성하였다.

Table 1 Model of impinging plate

No.	Size	Degree (ψ)	Diameter (ϕ)	Schematic Diagram
1		110°	8mm	
2		110°	9mm	
3		120°	8mm	
4		120°	9mm	
5		130°	8mm	
6		130°	9mm	

2.1.1 분사각도의 측정

분무의 분사각도(θ)는 Fig. 1과 같이 cup spray tester에 분사기를 장착하고 노즐로부터 분사된 분무가 컵 벽면에 부딪힐 때 그 부딪히는 점의 수치를 읽어 식 (1)에 의해 구했다.

$$\theta = 180 - (\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

여기서 θ : 분사각도, θ_1, θ_2 : 컵면 충돌각

2.1.2 분무 평균입경의 측정

분무 입경의 측정은 액침법(immersion liquid method)에 의해 측정하였다. 분무 유립의 채취방법은 슬라이드 유리판에 실리콘 오일($1,000\text{cSt} @ 20^\circ\text{C}$)을 도포하여 노즐로부터 분무가 원형으로 확산될 때 전방 200mm의 점을 기준으로 통과하는 분무 기둥으로부터 채취하였다.

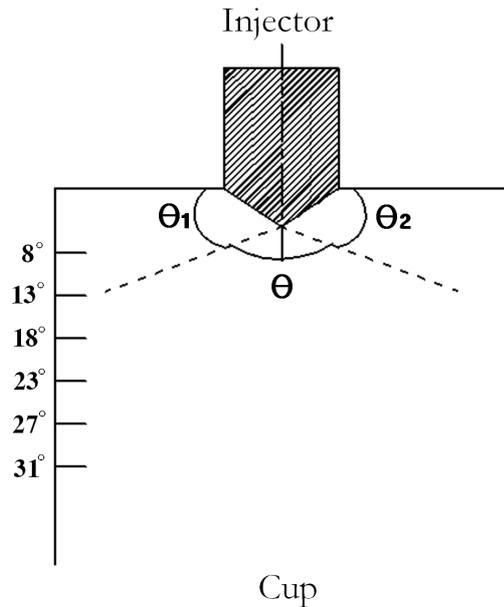


Fig. 1 Schematic diagram of cup spray tester

충돌판은 노즐선단에서 2mm되는 곳에 설치하였고, 사용유는 디젤유가 실리콘 오일에 쉽게 용해되어 액침법에 의한 입경측정이 불가능하므로, 약 40°C 로 가열한 미강유를 사용하였다. 평균입경은 식 (2)의 Sauter mean diameter(SMD)에 의하여 구하였다.

$$D = \frac{\sum d_i^3 \cdot \Delta n_i}{\sum d_i^2 \cdot \Delta n_i} \quad (2)$$

여기서, D : Sauter 평균입경, d_i : 입자의 직경, n_i : 입자의 개수

2.2 충돌판의 부착

실험에 사용된 원형기관(prototype engine)의 제원은 Table 2와 같다. Fig. 2는 원형기관의 분사기(다공노즐 : $0.2\text{mm} \times 4$)를 외부 치수는 동일하지만 노즐 구멍이 하나인 단공노즐($0.6\text{mm} \times 1$)로 바꾸고, 실린더 헤드와 노즐 선단 부분을 절삭하고 나사를 낸 다음 충돌판 지지부를 삽입함으로써, 노즐 선단

에 충돌판을 부착한 시험기관(trial engine)을 나타내고 있다. 시험기관에서 단공노즐의 분무는 노즐 구조상 그 중심선에서 25° 기울어진 방향으로 분사되기 때문에, 분무는 충돌판 중앙으로 충돌되며 충돌 후 원형의 방향으로 확산한다. 노즐선단과 충돌판의 거리는 2mm가 되도록 하였다.

Table 2 Specification of prototype engine

Type	4 Cycle Diesel engine, Water-cooled, Horizontal Single Cylinder
Bore x Stroke (mm)	92 x 95
Stroke Volume (cc)	631
Compression Ratio	19 : 1
Injection Pressure (MPa)	21.6
Injection Timing	BTDC 22°
Maximum Torque (Nm/rpm)	38.2 / 1,900
Normal Output (Kw/rpm)	5.9 / 2,200
Maximum Output (Kw/rpm)	8 / 2,200
Injection Nozzle	0.2mm x 4 holes

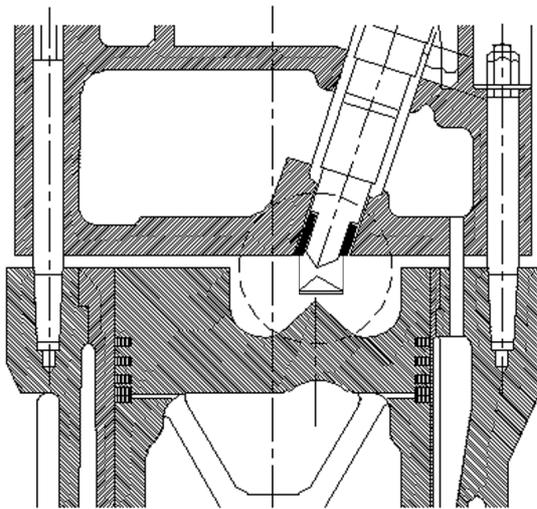


Fig. 2 Schematic view of trial engine with impinging plate

2.3 측정방법

본 실험에 사용된 측정장치의 제원은 Table 3과 같다. 기관의 부하는 동력계의 부하저항기를 조정하면서 변화하였으며, 질소산화물의 농도 측정은 배기가스분석기를 사용하여 배기관 플랜지부로부터 약 200mm 떨어진 출구 쪽 배기관에 흡입구를 삽입하고 3분간 가스를 흡입하여, 기기속에 내장된 측정센서

에 의해 검출된 측정치의 평균값을 구하였다. 매연의 측정은 배기매연측정기를 사용하여 배기관 플랜지로부터 약 200mm 출구 쪽 배기관에 흡입구를 삽입하고 배기가스를 흡입하여 흡착된 여과지를, 측정기에서 퍼센트 값으로 읽어 들었다.

Table 3 Specification of measuring apparatus

Item	Specification
Dynamometer	Type : 1WB15 Power : 35Kw Torque : 140Nm Maximum speed : excited 10,000min ⁻¹ Excitation current/voltage : 4/4.5A/V Weight : 185Kg Switzerland
Smoke meter	Diesel exhaust smoke tester ST - 100 Kwang myong, Japan
Exhaust gas analyzer	Sensonic - 5000 NOx measuring range : 0-1,100 ppm Austria, SAUTER
Fuel metering gauge	Metering burette, Stop watch

3. 결과 및 고찰

3.1 충돌판의 선정

3.1.1 원형기관의 분사각

4공노즐인 원형기관의 분사각도(θ)는 분무가 상부로 향하는 쪽을 전방향이라고 하면, 전후방향과 좌우방향의 분사각도는 Table 4와 같이 각각 달랐다. 즉, 전후방향은 θ_1, θ_2 가 각각 13°, 31°로써 θ 가 136°이었으며, 좌우방향은 각각 23°로써 θ 가 134° 나타나, 전후, 좌우방향의 각도를 평균하면 135°가 됐다.

Table 4 Spray degree of 4-hole nozzle

Direction \ Degree	θ_1	θ_2	θ
Front-Rear	13	31	136
Left-Right	23	23	134

3.1.2 충돌판 모델의 분사각

충돌판을 부착한 시험기관의 분사각을 측정한 결과는 Table 5와 같다. 충돌판의 각도가 클수록 분사각이 커지는 결과를 나타냈고, 120° - 8mm와 120° - 9mm 모델의 분사각이 각각 130° 및 140°로 원형기관의 분사각과 근사한 각도를 나타냈다.

Table 5 Spray degree of impinging plate model

No.	Model	θ_1	θ_2	θ
1	110° - 8mm	31	31	118
2	110° - 9mm	29	29	122
3	120° - 8mm	25	25	130
4	120° - 9mm	20	20	140
5	130° - 8mm	20	20	140
6	130° - 9mm	18	18	144

3.1.3 유립의 평균입경

Fig. 3은 분사압력 21.6MPa로 여러 가지 충돌판 모델에 분사된 분무 유립의 평균입경을 나타낸 것이다. 110° - 8mm, 110° - 9mm, 120° - 9mm와 130° - 9mm 충돌판 모델이 유립의 미립화가 좋아 입경이 각각 25.7 μ m, 29.9 μ m, 30.2 μ m 및 28.5 μ m로 나타났다.

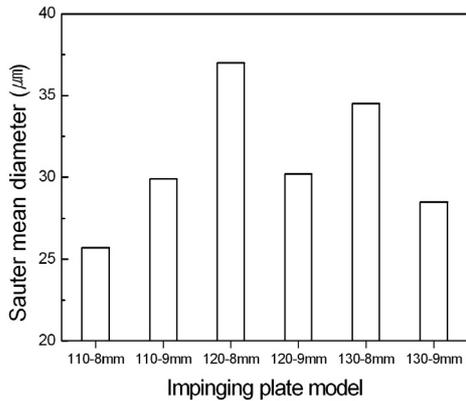


Fig. 3 Average oil droplet size of trial engine with various impinging plates(injection pressure at 21.6MPa)

이상의 유립의 분사각과 입경 측정 결과에서, 분사각에 있어서는 120° - 8mm와 120° - 9mm 충돌판이 4공노즐을 갖는 원형기관의 분사각에 근접하고 있으며, 입경은 110° - 8mm, 110° - 9mm, 120° - 9mm와 130° - 9mm 충돌판에 분사된 분무의 유립이 비교적 작아 미립화가 양호함을 알 수 있다. 그러므로 분무의 미립화가 양호하면서 분사각이 원형기관에 근접하는 120° - 9mm 충돌판을 가장 적합한 모델로 선정하였다.

3.2 배기가스 배출물

3.2.1 질소산화물

Fig. 4는 분사시기가 BTDC 22°, 분사압력이 22.5MPa로 일정하게 조정된 원형기관과 시험기관에 있어서 회전속도와 부하에 따른 질소산화물 배

출농도의 변화를 나타낸다. 원형기관에 비해 시험기관이 현저히 낮은 질소산화물 농도를 나타냈다. 양기관이 동일하게 2,200rpm을 운전될 때, 1/2부하에서 원형기관의 질소산화물 배출농도가 375ppm인데 반해 시험기관은 161ppm으로 약 57%의 감소를 보이고 있고, 4/4부하에서는 원형기관이 721ppm 인데 반해 시험기관의 질소산화물 배출농도는 334ppm으로 약 54%의 질소산화물 농도 감소를 나타내, 부하와 회전속도에 관계없이 시험기관이 원형기관에 비해 약 50% 이상의 질소산화물 배출농도 감소를 보이고 있다. 이것은 시험기관의 경우 충돌판으로 분사된 유립이 충돌판에서의 적극적인 충돌 반사에 의해 분무의 확산과 분포가 좋아지고, 이로 인해 공기이용율이 높아져 조기연소에 의한 발화지연기간이 짧아졌기 때문이라고 생각된다.

한편, 양 기관 모두 저부하(1/2 부하)로 운전시키고 부하(4/4 부하)보다 질소산화물의 배출 농도가 낮아지고, 또한 기관의 회전수가 증가함에 따라 질소산화물의 배출 농도는 낮아졌다.

Fig. 5는 시험기관이 1/2 부하로 운전될 때 분사 시작시기에 따른 질소산화물 배출 농도의 변화를 나타내고 있는데, 분사시작시기가 늦을수록 질소산화물 배출농도는 저하하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 시험기관의 분사압력에 따른 질소산화물 배출농도의 변화를 나타내고 있는데, 분사압력이 낮을수록 질소산화물의 배출농도는 저하하는 것을 알 수 있다.

3.2.2 매연

Fig. 7은 회전속도와 부하에 따른 원형기관과 시험기관의 매연 농도의 변화를 나타내고 있다. 질소산화물의 경우와는 반대로 시험기관이 원형기관에 비해 높은 매연 농도를 보이고 있다. 그러나 부하에 따른 매연농도의 변화는 질소산화물의 경우와 같이 고부하로 갈수록 매연의 농도는 높아지고 있다.

Fig. 8은 4/4부하로 운전되는 시험기관의 분사시작시기에 따른 매연 농도의 변화를 나타내고 있는데, 분사시작시기가 빠를수록 매연 농도는 저하함을 알 수 있다.

이상의 결과에서, 질소산화물과 매연 농도에 미치는 분사시작시기의 영향은 서로 상반된 결과를 나타내고 있다. 이것은 질소산화물과 매연의 발생조건이 서로 상반되기 때문이다. 즉, 매연은 산소가 희박한 고온 분위기 속에서 연료증기의 열해리에 의해 일어나지만, 질소산화물은 가스의 온도가 높고

산소가 충분하며 반응시간이 길 때 증가한다. 따라서 분사시작시기를 빨리하면, 분무 유입의 발화지연 시간이 길어져 예혼합 연소부가 커지기 때문에 질소산화물은 증가하지만, 화염 중에 분사되면서 연소하는 확산연소가 적어지므로 매연은 감소한다. 반면에 분사시작시기를 늦어지면, 질소산화물은 감소하지만 매연은 증가하고, 이에 따라 연료소비율이 높

아지고 출력은 떨어진다.

Fig. 9는 분사압력에 따른 매연 농도의 변화를 나타내는데, 분사압력이 높을수록 매연 농도는 저하하는 것으로 나타났다.

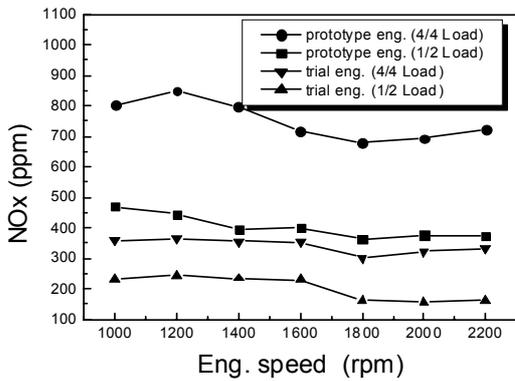


Fig. 4 Comparison of NOx emission between prototype engine and trial engine

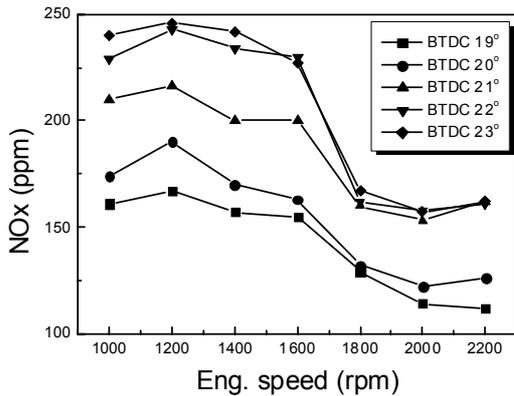


Fig. 5 Comparison of NOx emission of trial engine with various injection timing

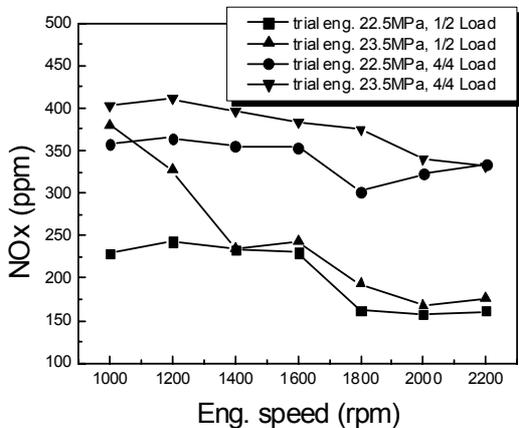


Fig. 6 Comparison of NOx emission of trial engine with various injection pressure

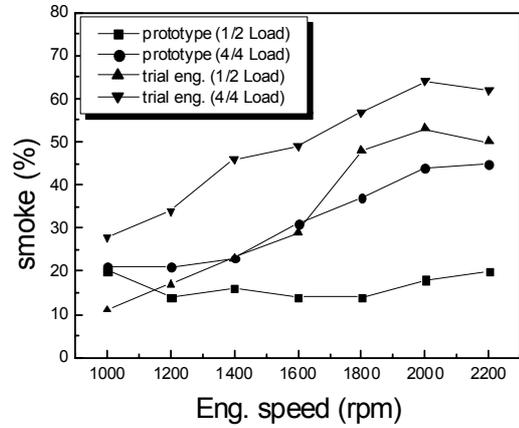


Fig. 7 Comparison of smoke emission between prototype engine and trial engine

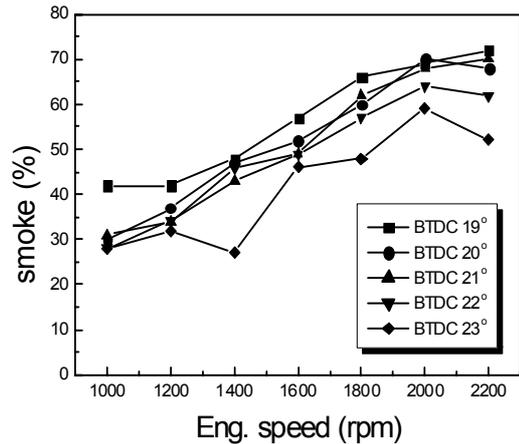


Fig. 8 Comparison of smoke emission of trial engine with various injection timing

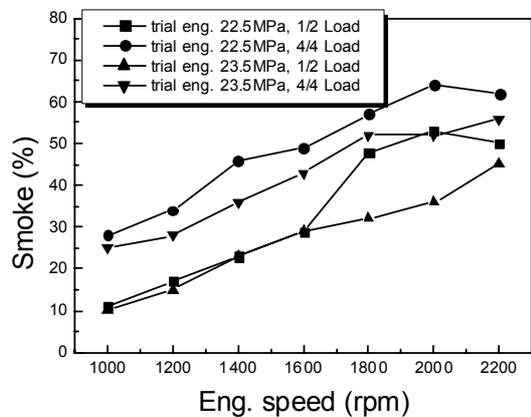


Fig. 9 Comparison of smoke emission of trial engine with various injection pressure

4. 결 론

본 연구에서는 연소실의 노즐 선단에 충돌판을 설치하고 이곳에 분사된 연료를 충돌시켜, 양호한 유립의 분산에 의한 배기 배출물의 개선 가능성을 시도하였다. 원형기관의 분사각에 근접하고 유립의 미립화가 좋은 충돌판을 선정하기 위해 분사각 및 유립의 측정을 통해 가장 적합한 충돌판을 선정하였으며, 선정된 충돌판을 부착한 시험기관과 충돌판을 부착하지 않은 원형기관에 대하여 분사시작시기, 분사압력 등을 변화시켜 운전하여, 질소산화물과 매연의 농도에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충돌판의 선정을 위하여 6개의 충돌판 모델을 제작, 설치하여 실험한 결과, 분무의 미립화가 양호하면서 원형기관의 분사각에 근접하는 충돌판은 $120^\circ - 9\text{mm}$ 이었다.

2) 시험기관은 충돌판에서의 분무 유립의 적극적인 충돌 반사에 의해 분무의 분포가 좋아지고, 이로 인해 공기이용율이 높아져, 원형기관에 비하여 약 50% 이상의 질소산화물 배출농도 감소를 나타내었다.

3) 매연 농도에 있어서는 시험기관이 원형기관에 비해 높은 매연 농도를 나타냈다. 이것은 시험기관에 있어서 충돌판을 지지하고 있는 3개의 지지대가 충돌한 연료분무의 확산을 저지하고 유립을 모아 흘러내리게 함으로, 국부적으로 분산이 나빠져 불완전연소를 야기했기 때문이라고 생각된다.

4) 질소산화물과 매연 농도에 미치는 분사시작시기의 영향은 서로 상반된 결과를 나타내고 있다. 즉, 질소산화물의 농도는 분사시작시기가 늦을수록 저하하는데 비해, 매연의 농도는 분사시작시기가 빠를수록 저하하는 것으로 나타났다. 이것은 질소산화물과 매연의 발생조건이 서로 상반되기 때문이다.

5) 분사압력이 배기 배출물에 미치는 영향은, 질소산화물 농도의 경우 분사압력이 낮을수록 저하하나, 매연 농도의 경우는 분사압력이 높을수록 저하하는 것으로 나타났다.

pp. 222~229.

2. 廣安博之, 新井雅隆, 中西和雄, 1986, “デイゼル噴霧火炎内の燃料生成物の舉動(第2報, 燃燒室渦初期溫度流度の影響), 日本機械學會論文集(B編), 52(473), pp. 230~237.
3. 近藤博美, 乾豊, 1994, “中小形デイゼル機關NOx規制に對する取組み”, 內燃機關 33(1), pp. 41~48.
4. 檜戶清, 1993, “液體燃料の豫蒸發,豫混合燃燒におけるNOx排出特性, 日本機械學會論文集(B編), 59(563), pp. 2317~2324.
5. 加藤 聰, 大西 繁, 1991, “直噴式衝突擴散層狀給氣機關の開発”, 日本機械學會論文集(B編) 57(536), pp. 1497~1503.
6. S. Kato and S. Onishi, 1988, "New mixture formation technology of direct fuel injection stratified charge SI engine (OSKA) -Test result with gasoline fuel", SAE Paper 881241.
7. 加藤 聰, 大西 繁, 1993, “燃料噴流の衝突擴散を利用した低NOxデイゼル機關の開発”, 內燃機關 32(6), pp. 57~66.
8. 小倉 勝, 林 百福, 大道寺達, 1992, “衝突ノズルヘッド付き直噴デイゼル機關に關する研究”, 內燃機關 31(4), pp. 25~30.

참고문헌

1. 廣安博之, 新井雅隆, 中西和雄, 1986, “デイゼル噴霧火炎内の燃料生成物の舉動(第1報, 渦流れ速度の影響), 日本機械學會論文集(B編), 52(473),