

직분식 디젤기관의 연료캠 회전속도에 의한 분무 거동 특성 Characteristic of the Spray Behavior in accordance with Revolution Speed of Fuel Injection Cam for DI Diesel Engines

김용순 · 라진홍 · 임봉호 · 안수길

Y. S. Kim, J. H. Ra, B. H. Lim and S. K. Ahn

Key Words : Visualization of Spray Behavior(분무 거동의 가시화), Image Process of Spray(분무화상처리), DI Diesel Engine(직분식 디젤기관), Fuel Distribution(연료분포), Spray Angle(분무각)

Abstract : In order to investigate a characteristic of the behavior of spray pattern in accordance with running conditions for a DI diesel engine, the PLN injection system with changeable revolution speed of fuel injection cam was set up, and through this, history curves of injection pressure for a similar real DI diesel engine were able to be displayed. Authors visualized and analyzed the sprays at various revolution speed of fuel injection cam, and found out that fuel distributions of the sprays in the low speed condition were bad, fuel with air was injected from the hole of nozzle at the beginning of injection, and wide spray angle at the early stage of injection became narrower with elapsed time, but wider again at the end of injection.

1. 서론

직분식 디젤기관은 다른 기관에 비해 열효율이 높은 반면, NOx, Soot 등과 같은 공해 물질이 많이 배출되는 것이 단점으로 지적되고 있다. 특히, 시동이나 저속에서 급가속할 때와 같은 비정상 운전 영역에서 일어나는 불완전 연소에 의한 Soot의 배출은 공해의 주범이며, 기관 운전의 출력 범위를 제한하는 결정적인 요인이기도 하다.

디젤 기관의 연소는 혼합기 형성을 지배하는 디젤분무의 분무상태에 크게 의존하며, 연료의 분무는 고압의 액체 연료가 노즐 내부를 통과하면서 발생한 난류 및 와류 등의 영향을 받아 분사직후 분열되고, 주위 기체와 분류간에 전단력 등의 유체 역학적 상호작용에 의해 미립화 되는 것으로 알려져 있다¹⁾. 디젤분무의 분무 특성에 대해서는 분사압력, 노즐형상, 분위기 조건 등의 인자들에 대해 가시화 기법 등을 이용하여 분무의 관통거리, 분무각, 액적직경과 분열길이 등을 계측하여 분석²⁻⁴⁾하

거나 분무의 내부 구조와 농도분포를 파악하는 등⁵⁾ 많은 연구가 진행되어 왔다.

그러나, 지금까지 보고되고 있는 많은 연구들 가운데, 대부분의 경우가 정형화된 분사율과 표준화된 분사압력 하에서의 분무에 한정되어 있으며, 실기관에서 문제가 되고 있는 시동시나 저속에서의 급가속과 같은 비정상운전 영역에서의 분사압력 이력과 이에 대한 분무의 거동특성에 대해 상세하게 해석하여 보고한 예는 접하지 못했다.

이에 따라, 본 연구에서는 기관의 운전속도에 따른 분무형상의 거동 특성을 파악하기 위해, 직분식 PLN(Pump-Line-Nozzle) 연료분사계에 연료캠의 회전속도를 가변(可變)할 수 있는 장치를 값싸게 구성한 후, 실기관의 운전에서 일어날 수 있는 연료분사압력의 이력 곡선을 재현하고, 이에 따른 분무형상을 스트로보스코프와 기존의 카메라로 확대 가시화 한 후 화상 해석함으로써, 분무의 거동 특성을 분석하였다. 이러한 분석을 통해 실기관의 비정상운전 영역에서 일어나는 불완전 연소의 원인을 파악하고, 나아가 실기관 운전시 일어날 수 있는 연소현상과 유해 배출물 생성 원인을 파악하는데 일조할 수 있으리라 판단된다.

접수일 : 2001년 4월 23일

김용순 : 부경대학교 대학원

라진홍 : 부경대학교 실습선

임봉호 : 포항1대학 자동차공학과

안수길 : 부경대학교 기계공학부

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

연료 분사장치는 분사펌프, 고압관, 연료분사노즐로 구성되어 있으며, 연료 캠축의 회전에 의해 분사펌프에서 연료가 가압되면 고압관으로 압력파가 전달되어 연료분사노즐에서 연료가 분사된다.

연료캠축의 회전력은 캠축의 우측 단에 장착된 구동스프링의 작용에 의해 생성되며, 구동스프링의 작용력을 조절함으로써 연료캠축의 회전 속도를 임의로 조절할 수 있다. 그리고 캠축의 좌측 단에는 연료캠축에 스프링력이 가해졌을 경우, 캠축이 임의로 회전하지 않도록 하기 위한 스톱퍼와 연료캠축 회전시 회전속도를 감지하기 위한 로터리 디스크가 설치되어 있다.

분사기간 중 특정순간의 분무 화상은 연료캠축 상에 설치되어있는 신호감지센서의 출력신호가 신호제어기를 거쳐 스트로보스코프에 입력되면, 스트로보스코프(발광기간 $4\mu s$)의 발광에 의해 정사진카메라에서 촬영되도록 하였다. 그리고, 연료 분사노즐 입구측 고압관에 피에조 압력센서를 설치하여 연료 분사압력을 측정하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용한 분사펌프기구와 연료 분사노즐의 형상을 나타낸다. 직분식 고속 디젤기

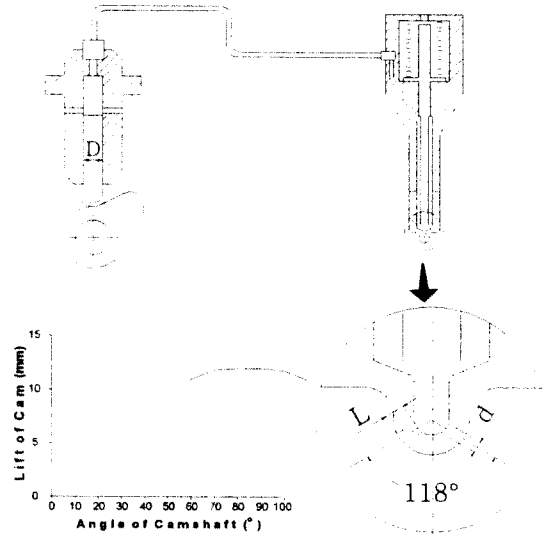


Fig. 2 Sectional view of fuel injection pump and fuel valve

관의 분사장치로서 연료분사 펌프는 플린저 직경 (D)이 10mm인 독립형 보쉬펌프이며, 캠형상은 등속도캠이다.

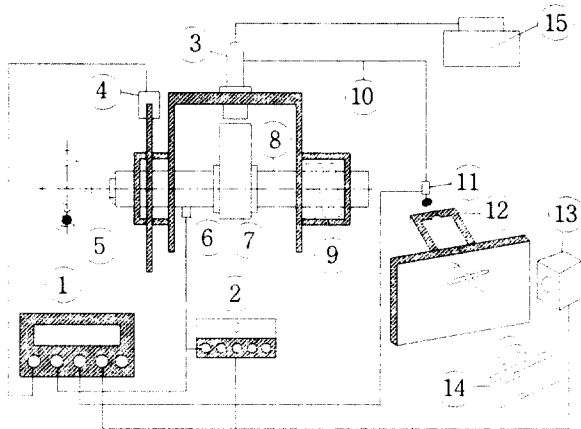
그리고 연료분사노즐은 니들밸브의 질량이 일반노즐보다 큰 케타필라 엔진 모델로 섹스일(sac volume)을 갖는 6구경, 직경 $d = 0.24mm$, $L/d = 3$ 이며, 분사각은 118° 이다.

2.2 실험 방법

본 실험 장치에서, 연료분사는 Fig. 1의 캠축 우측 단에 스프링력을 작용시킨 상태에서 좌측 단의 스톱퍼를 해제시켜, 캠축이 화살표 방향으로 회전하게 하여 연료분사 펌프의 플린저를 상승시키면, 연료가 가압되어 대기 중에 분사하게 된다. 그리고 분사되는 분무는 카메라 투시 방향의 측면에 설치된 스트로보스코프 광원의 측광 산란에 의한 정지화상이 촬영되도록 하였으며, 분사시작에서 분사종료시까지 일련의 분무화상은 연료캠 회전시 신호감지센서에서 출력된 신호에 의해 발광되는 스트로보 광을 매 촬영시마다 신호제어기에서 각기 0.1ms 간격으로 지연시켜 얻었다.

Table 1 Experimental conditions

fuel cam revolution(engine speed) rpm		injection quantity mg/stroke
low speed (idle speed)	450(900)	45
medium speed	850(1700)	
high speed	1200(2400)	



- ① Oscilloscope
- ② Signal controller
- ③ Injection pump
- ④ Rotary disc
- ⑤ Stopper
- ⑥ Signal pick up sensor
- ⑦ Fuel pump
- ⑧ Fuel cam shaft
- ⑨ Power spring
- ⑩ High pressure pipe
- ⑪ Pressure sensor
- ⑫ Injection nozzle
- ⑬ Strobe scope
- ⑭ Camera
- ⑮ Fuel tank

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1은 본 실험의 실험 조건을 나타내며, 실험조건의 연료캠 회전 속도는 분사 시작 후 분사 종료까지의 평균속도이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분무의 거동

Fig. 3은 기관속도가 저속영역인 연료캠 회전속도 450rpm에서의 분사압력 이력곡선과 이력곡선상의 표시점에서의 분무형상을 촬영하여 동시 배열한 것이다. 분사압력곡선에서 시간은 연료분사펌프에 의해 연료가 가압되는 순간을 "0"으로 하여 그 이후 경과를 나타낸 것이다.

연료분사압력곡선에서 동일 순간의 압력값은 각 이벤트마다 그 편차가 있으나, 전체적인 경향은 유사하며, 분사기간 중 수 차례에 걸쳐 급격한 압력 변동이 발생하였다. 분무가 출현하기 시작하는 점(분사지연)은 압력상승 개시 후 약 0.8ms이고, 이때 분사압력은 약 220bar이며 첫 번째 피크압력값에 도달한 점이다.

분사개시 후 분무의 거동은 급격한 압력변동과 함께 재차 분사(c, d)가 일어나는 등 불 균일한 분무 형상을 보이고 있으며, 분사 종료 후에도 (e)의 사진과 같이 미량의 간헐 분사가 이어졌다.

Fig. 4는 기관속도가 중속 영역인 연료캠 회전속도 850rpm에서의 분사압력 이력곡선과 곡선상 표시점에서의 분무화상을 촬영하여 동시 배열한 것이다.

연료분사압력은 밸브 개방압 이상으로 상승한 후 감소하고, 이어서 다시 상승하였다가하는 현상을 보였으며, 분무가 출현하기 시작하는 점은 압력상승 개시 후 0.6ms이고 이때 분사압력은 약 220bar였다.

분사 시작 순간의 경우, (a)의 사진과 그 압력선도에서 알 수 있는 바와 같이 분사 개시와 동시에 압력이 강하하지 않고, 분사 개시 후에도 일정기간 압력상승이 계속되었다. 이는 본 실험에 사용한 노즐의 니들밸브가 일반 노즐의 니들밸브와는 달리 그 질량이 크기 때문에 일어나는 현상으로, 캠의 회전 속도가 빨라짐에 따라 니들밸브는 관성력에 의해 느리게 열리는 반면, 연료 플런저의 가압에 의한 노즐 유입 연료유량은 상대적으로 빨리 증대하여, 노즐 오리피스로 빠져나가는 유출유량보다 플런저 가압에 의해 고압관 내로 들어오는 유입유량이 크기 때문으로 판단된다. 그리고 분무는 분사 종료 후에도 (e)의 사진과 같이 완전히 무화되지

않은 채 분무줄기 형태로 일부 유출되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 고속인 연료캠 회전속도 1200rpm에서의 분사압력과 분무형상을 나타낸 것이다. 최초 분사는 압력상승 개시 후 0.5ms에서 일어났으며, 분사 개시 이후에 압력상승이 상당 기간 계속된 후 강하하였고, 중·저속에 비해 압력 변동폭이 현저히 감소하였으며, 재현성이 양호함을 보여주고 있다. 그리고 분무는 방사선 방향으로 힘차게 뿜어나갔으며, 분사 종료 (e)는 후분사 없이 깨끗하게 이루어졌다.

이상과 같이 분무의 거동을 연료캠 회전속도에 따라 분석한 결과, 기관의 속도가 고속에서는 분무의 상황이 양호한 편이나, 기관의 속도가 느린 저속 영역에서는 분사 후 압력변동이 격심하여 재차 분사가 일어나는 등 분무 상황이 불량하다는 것을 알 수 있으며, 분사 종료시에도 미량의 간헐 분사가 행해진다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 분무의 구조

Fig. 6은 분사초기와 분사말기의 분무를 보다 상세하게 파악하기 위해, 분사 시작과 분사 종료 근방의 분무화상을 확대 촬영하여 얻은 화상이다. 분사 시작순간의 경우 노즐 오리피스를 통해 gas와 같은 유증기가 분출(a)하고 난 후, 이어서 분열된 연료 분무가 분출(b)하는 것을 확인할 수 있다. 이 현상은 캠의 회전속도에 관계없이 동일하게 나타났다. 이는 디젤분무의 분사초기 현상을 연구한 Lai⁶⁾와 허⁷⁾ 등이 보고한, 분사 시작 순간에는 노즐로부터 액주가 성장하고 이 액주 선단이 공기저항을 받아 리벳형태로 되면서 공기 중에 분열되었다는 것과는 상이한 관찰 결과이다. 이와 같이 선행 연구자의 관찰 결과와는 달리 분사초기 유증기가 먼저 분출하는 현상에 대해서는 분사 종료시 색크실에 존재하는 유증기 때문이라 판단된다. 본 실험에서 확인한 분사 종료시의 상황은 사진(c, d)에서 알 수 있는 바와 같이 니들 밸브가 닫힌 후에도 완전히 무화되지 못한 분무 줄기가 노즐구멍을 통해 유출되고 있다. 이는 분사구멍을 통해 분출하고 있던 연료의 일부가 니들밸브가 닫힌 뒤에도 연료의 관성력에 의해 색크실에 잔류하지 못하고 밖으로 빠져나가고, 색크실의 빈 공간에는 주위 공기로 채워져 있다는 것을 말해주는 것으로, 이 상태에서 후속의 분사가 개시되면, 색크실의 빈 공간에 머물고 있던 공기가 니들 밸브를 통해 들어오는 연료와 함께 노즐 오리피스를 빠져나오게 되어, 사진과

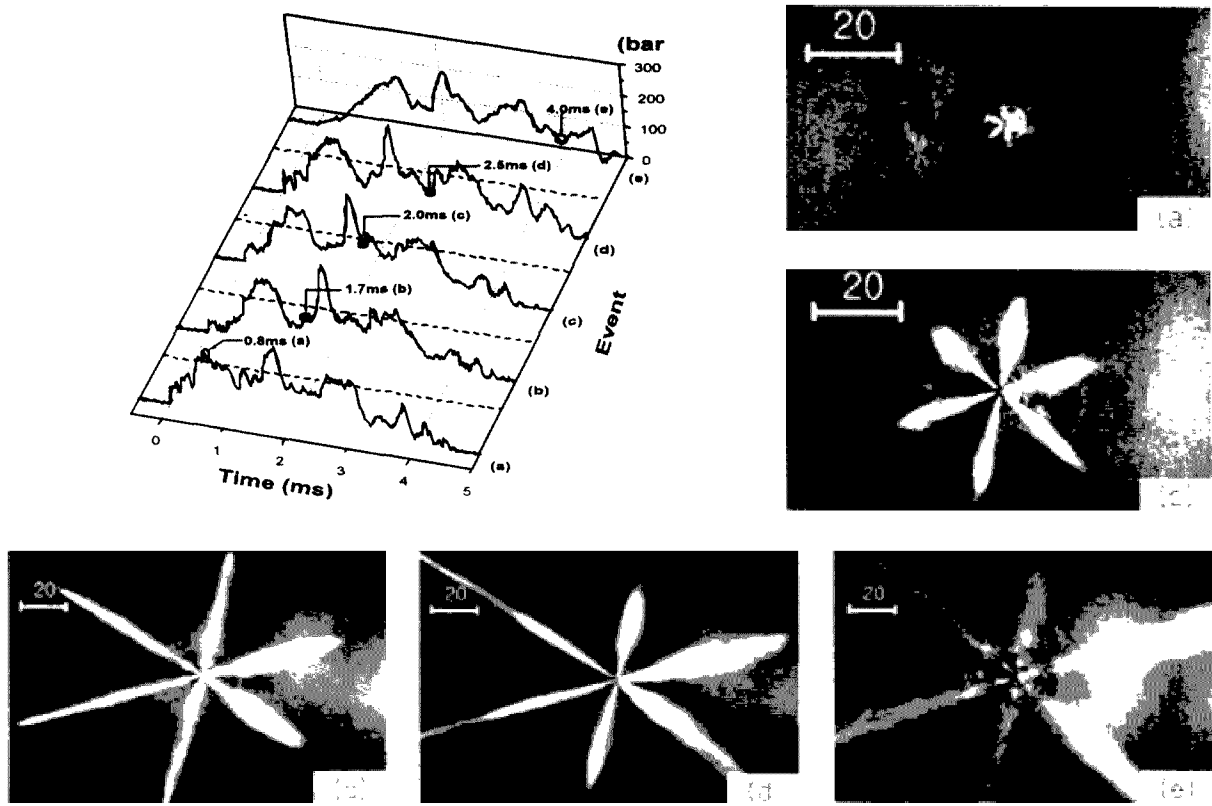


Fig. 3 Injection pressures and spray behaviors at 450 rpm

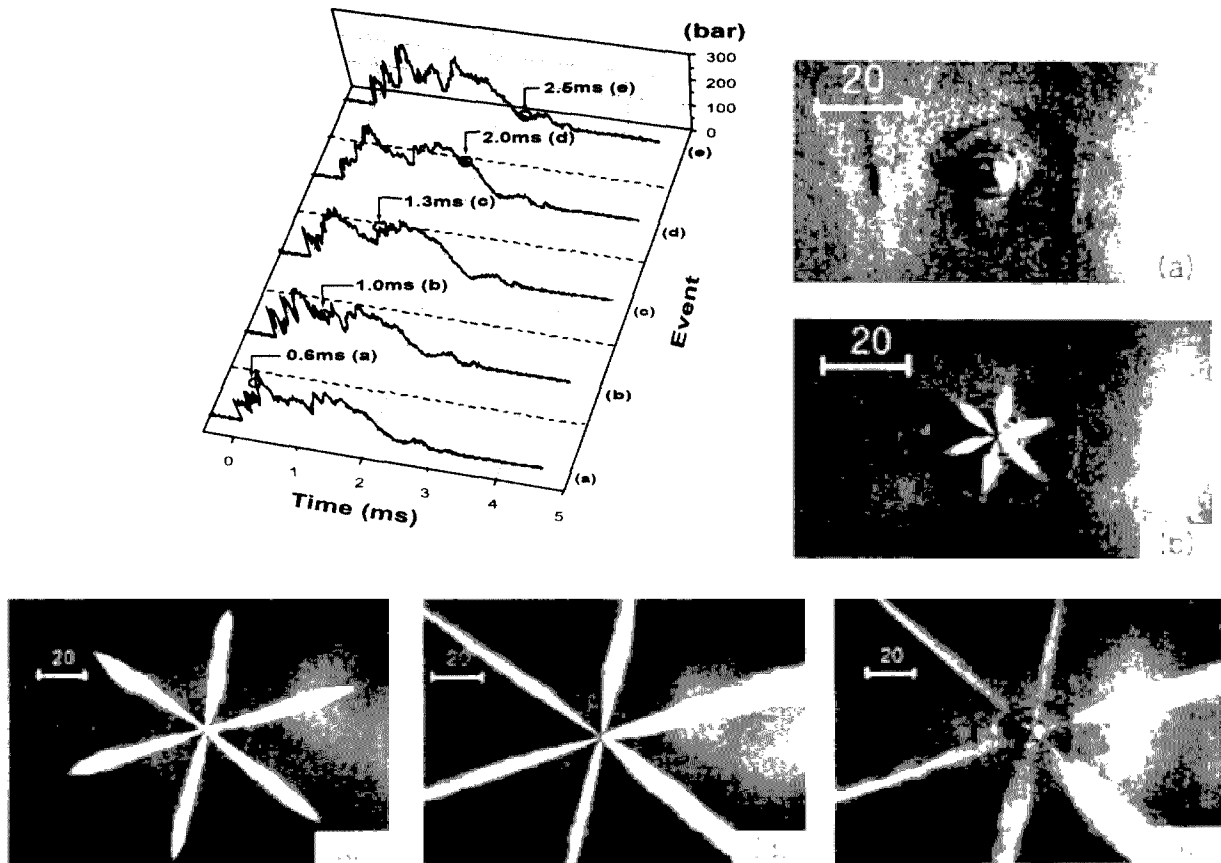


Fig. 4 Injection pressures and spray behaviors at 850 rpm

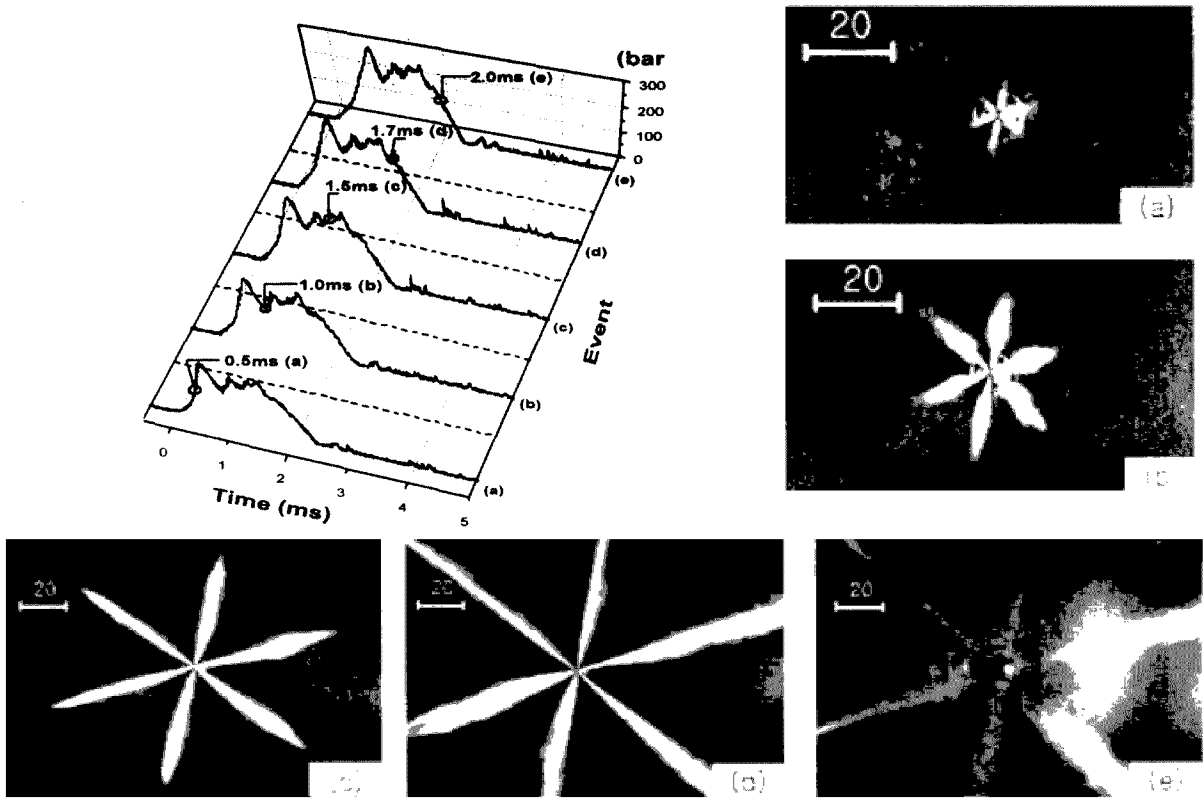


Fig. 5 Injection pressures and spray behaviors at 1200 rpm

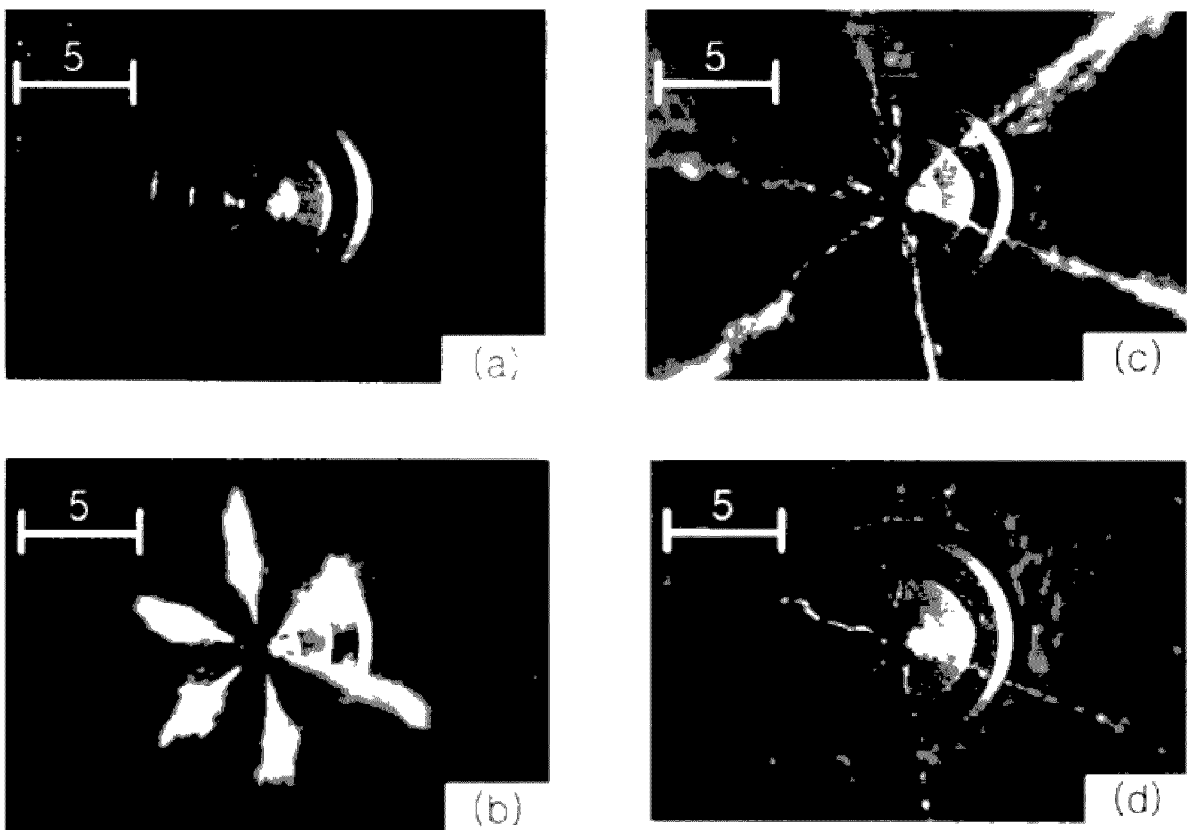
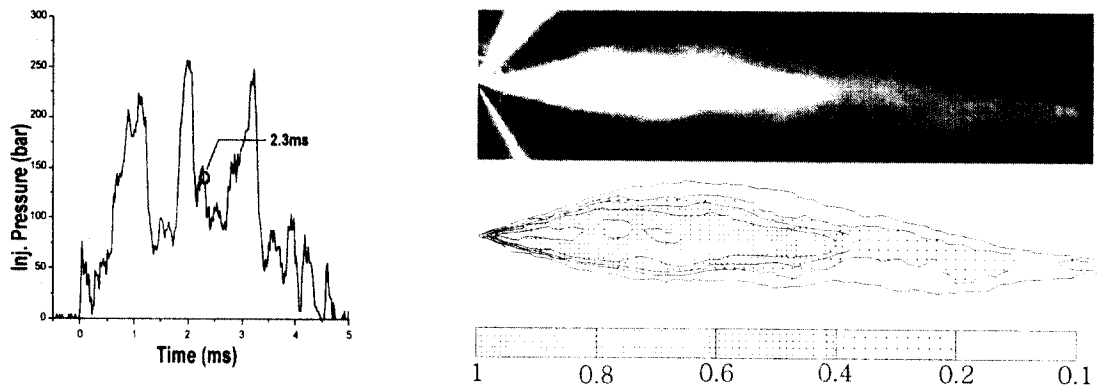
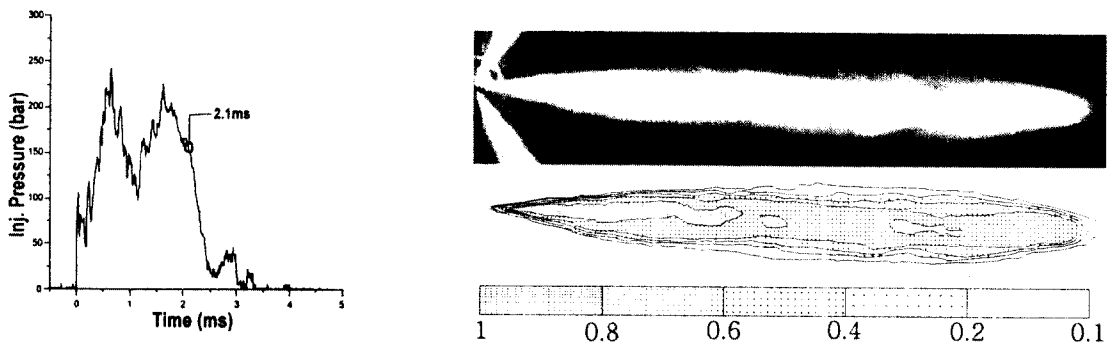


Fig. 6 Photographs of sprays at the injection starting point(a,b) and the end point(c,d)

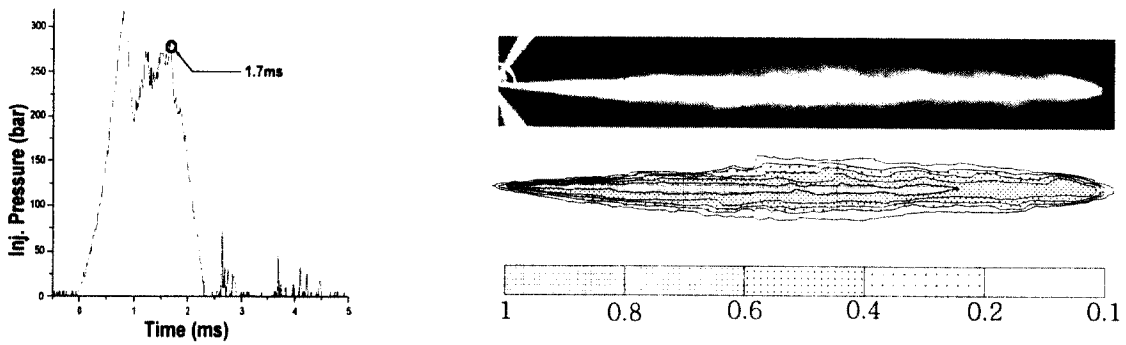
직분식 디젤기관의 연료캠 회전속도에 의한 분무 거동 특성



(a) 450 rpm



(b) 850 rpm



(c) 1200 rpm

Fig. 7 Photographs of growing sprays and their fuel distributions in accordance with fuel cam speed at the middle stage of injection

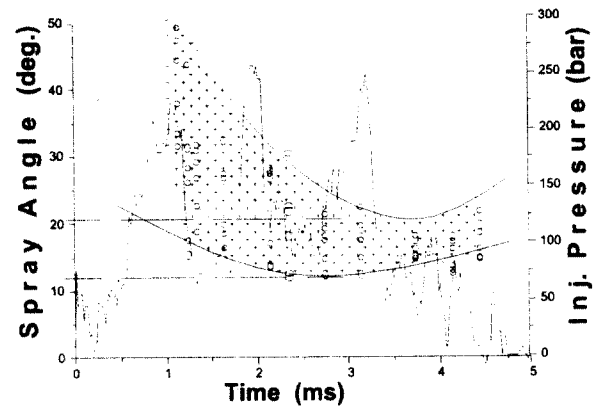
같이 분사 시작 시에는 액주상태가 아닌 유증기가 분출하게 되는 것이라 판단할 수 있다. 따라서, 본 실험에서 관찰한 것을 미루어 볼 때, 실기관에서의 분사 초기의 분무 상황도 액주의 분출이 아닌 유증기상의 연료분무가 분출되리라 추정된다.

Fig. 7은 성장중에 있는 분무의 연료 농도분포상황을 연료캠 회전 속도에 따라 비교 분석해 보기 위해, 분무 1가닥을 예로 그 산란광 강도분포를 구하고, 분무의 연료농도분포를 화상해석에 의해 추정하였으며, 분무화상의 농도분포는 저농도인 0.1과 고농도인 1.0을 5단계로 구분하여 등농도 구역으로 구분하였다. (a)의 경우 저속인 연료캠 회전 속도 450rpm, 가압 후 2.3ms에서의 분무를 나타낸 것이다. 그림과 같이 초기에 분사된 분무가 공기 중에 분산되고 이후 재차 분사에 의한 후속의 고농도 분무가 침투해 들어가고 있다. 이와 같이 재차 분사가 일어나는 것은 연료가 밸브 개방압까지 상승하여 니들 밸브가 열림과 동시에 노즐 오리피스를 통해 분출하지만, 기관회전속도가 느리기 때문에 연료를 가압하고 있는 플런저의 상승속도 둔화로, 후속의 유량이 고압관내로 충분히 유입되지 못하기 때문에, 압력이 강하하면서 니들 밸브가 닫히고, 니들밸브가 닫히는 순간 유입되는 유량에 의해 다시 압력이 상승하게 되어 니들밸브가 열리면서 다시 분사가 일어나는 것이라 판단된다. 이러한 분무 현상이 실기관에서 일어날 경우, 불균일 연료 혼합에 의한 불완전 연소의 직접적인 원인이 된다는 것을 알 수 있다. (b)인 중속의 경우, 분사 개시 후 분무의 거동은 저속의 경우와 같은 재차 분사가 일어나는 등의 현상은 보이지 않았으나 고농도 지역의 농도분포가 불량한 분무 구조를 하고 있다는 것을 알 수 있고, 분무 전체의 폭이 저속일 때보다 좁은 형상을 하고 있다. 그리고 (c)인 고속의 경우, 분무 전체의 농도가 비교적 균일하게 분포하고 있고 폭이 좁고 길이가 길며, 분무 진행 방향으로 힘차게 뿜어 나가는 양호한 형상을 하고 있다.

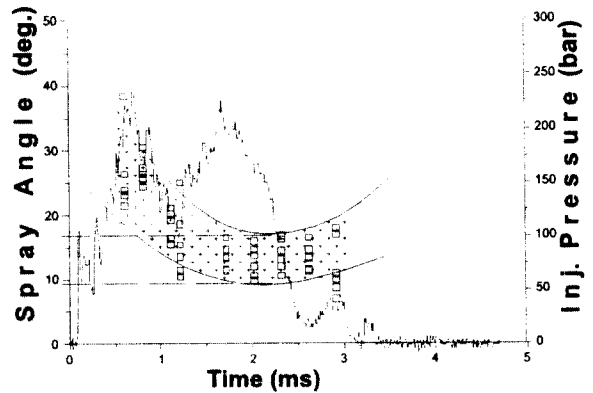
3.3 분무각

Fig. 8은 실험 조건에 따른 연료 분사 초기부터 종료시까지 연료의 분무각을 압력이력곡선과 함께 도시한 것이다.

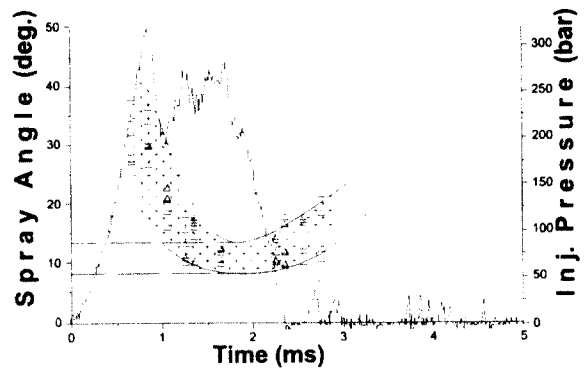
기관의 운전 조건에 관계없이 분사 초기에는 분무각이 크며, 분사된 후 분무가 성장하는 동안은 작아지고, 분사 종료시에는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 분사 초기와 분사 종료시



(a) 450 rpm



(b) 850 rpm



(c) 1200 rpm

Fig. 8 Spray angles in accordance with fuel cam speed during injection

에 분무각이 큰 것은 이 기간 중에는 니들밸브의 개도(開度)가 작아 니들 밸브 시트로 흐르는 유속 증가로 섹크실 내의 와류가 증대⁸⁾되기 때문으로 판단된다.

저속인 (a)의 경우, 분사 초기를 포함한 전 영역

에서 분무각 편차의 범위가 넓으며, 분사 진행중인 분사기간 중반에는 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 범위의 분무각을 형성하였다. 그리고 캠의 회전속도가 증가해 갈수록 분무각이 작고 편차의 범위가 좁게 나타났으며, 고속인 (c)의 경우 분사 중기의 분무각이 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 범위에 분포하고 있으나 분무의 길이가 길고 힘차게 뿜어나가는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

기관의 운전속도에 따른 분무형상의 거동 특성을 파악하기 위해, 직분식 PLN 연료분사계에 연료캠의 회전속도를 가변(可變)할 수 있는 장치를 구성한 후, 실기관의 운전에서 일어날 수 있는 연료분사압력의 이력 곡선을 재현하고, 이에 따른 분무형상을 가시화 하여, 분무의 거동 특성과 그 분무의 모양을 비교 분석한 결과 다음과 같이 요약되었다.

- 1) 연료캠의 회전속도가 느리면 분사기간 중에 급격한 분사압력변동을 유발하고, 이에 따른 분무의 농도분포가 불균일하여 불완전 연소의 직접적인 원인이 됨을 확인하였다.
- 2) 분사개시 순간의 분무는 액주상태가 아닌 유증기 상태로 분출하였다.
- 3) 분무각은 기관 회전속도에 관계없이 분사초기에 크며, 분사개시 후 분무가 성장하는 동안 작아진 후, 분사종료시에는 다시 증가하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 2000년도 두뇌한국21사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. N. Chigier, "Atomization and Sprays 2000", Workshop, Gaithersburg MD, July 19, 1991
2. H. Takahashi, K. Tomaru, T. Karasawa, S. Shiga, and T. Kurabayash, "Characteristics of Diesel Spray with Unsteady and Higher Injection Pressure Using a Rapid Compression Machine", SAE 910226
3. H. Hiroyasu, M. Arai, M. Tabata, and M. Shimizu, "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle", SAE 840275

4. T. Kamimoto, H. Yokota, and H. Kobayashi, "A New Technique for Measurement of Sautermean Diameter of Droplets in Unsteady Dense Spray", SAE 890316
5. M. Nishida, T. Nakahira, and et al., "Observation of High Pressure Fuel Spray with Laser Light Sheet Method", SAE 920459
6. M. Lai, T. Wang, and et al., "Microscopic Characterization of Diesel Sprays at VCO Nozzle Exit", SAE 982542
7. 허중철, 구자왕, 등, "디젤유 분무의 초기분산 과정에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회지, Vol. 13 No. 2, 1991
8. 김장현, 송유근, "디젤 연료분사노즐 섹크실내의 압력과 유동패턴이 분류위 분열거동에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집, 제8권 제1호, 2000