

개변압 및 배압 변화가 디젤분무의 초기 미립화 특성에 미치는 영향

Effect of Opening Pressure and Ambient Pressure on the Characteristics of Atomization in Early Stage of Diesel Spray

김 중 현*, 이 봉 수**, 이 장 회***, 구 자 예****
Jong Hyun Kim, Bong Soo Lee, Jang Hee Lee, Ja Ye Koo

ABSTRACT

The disintegration of transient diesel spray in early stage was investigated at different opening pressure and chamber pressure by means of shadowgraph method using nanolite and still camera. Diesel spray was injected into the spray chamber which was charged with high pressure nitrogen gas. At the beginning of injection, a liquid column that was almost the same diameter as the nozzle hole was observed. Spray tip penetration and spray angle were always increased with an increase in opening pressure.

주요기술용어 : Transient Diesel Spray in Early Stage(초기 간헐 디젤분무), Spray Angle(분무각), Spray Tip Penetration(분무선단거리), Opening Pressure(개변압), Back Pressure(배압)

1. 서 론

지구 온난화의 주원인인 이산화탄소(CO₂) 및 주요 공해물질인 질소산화물(NO_x)과 탄소분(soot)에 대한 배가가스 규제가 강화되고 연료 소비율의 경제적 측면에서 직분식 디젤엔진에 대한 연료의 미립화가 중요한 연구대상이 되고 있

다. 고압의 실린더 내로 연료가 분사될 때, 분무의 분열길이, 분무각, 입경의 공간분포도 등과 같은 분무특성은 분무 주위의 상태, 인젝터 특성, 분사압력 등의 변화에 영향을 받는다고 알려져 있다.

高橋秀夫⁽¹⁾ 등은 디젤노즐로부터 분사되는 간헐 연료분무에 대한 미립화 거동을 고속카메라를 사용한 웨도우그래프법과 고분해 CCD 카메라를 사용하여 관찰하였다. 밸브의 개변압이 5MPa에서 70MPa까지의 넓은 영역에 대해 관찰되었고, 노즐 색(sac) 내부의 분사압에 대한 연속적인 분무의 측정이 이루어져서 분사 초기에 대한 미립화 메커니즘을 명백히 하려는 시도를 하여 분사

* 정회원, 한국항공대학교 인턴연구원

** 정회원, 한국항공대학교 대학원

*** 정회원, 한국기계연구원

**** 정회원, 한국항공대학교 항공기계공학과

초기에는 개변압력에 의해 결정되는 색(sac)실압력의 비정상성으로 인하여 분무생성에 영향을 미치고, 액주의 출현이 관찰되었다. 그 결과 액주는 노즐홀의 지름과 비슷하였으며, 그 후에 반경방향으로 퍼져나가면서 노즐 출구 부근에서 분무각을 형성함이 알았다.

지금까지의 연구로부터 인젝터에서 분사된 연료의 미립화 과정은 크게 두 단계로 나뉘어진다. 첫 번째 단계는 연료의 분사압력, 인젝터의 개변압, 인젝터 팁 형상과 같은 인젝터 설계요소에 의해 영향을 받는 인젝터 출구 부근의 초기 미립화 과정이고, 두 번째 단계는 분무가 주위기체를 관통하고 성장하는 과정에서 주위 기체의 유동과 분무액적들의 상호 작용에 의존하는 미립화 과정이다. 연료의 미립화에 관한 연구는 주로 두 번째 단계에 대하여 연구되어져 왔으나, 최근에는 배기가스 규제 강화로 질소산화물의 생성에 영향을 미치는 분무의 초기 미립화 과정이 중요시되고 있다.

이와 같은 초기미립화 실험은 주로 상압하에서 연구되었으나 실제 디젤 엔진과 유사한 배압 조건에서의 초기 분무에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 디젤연료 분사시 정적분무실을 질소를 사용하여 고압으로 충전하고 개변압을 변화시키면서 인젝터 출구 부분을 확대 촬영하여 분무각 및 분무선단거리 등의 초기 분무 특성을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에는 분사펌프, 고압파이프, 분사노즐

Table 1 Specification of F.I.E.

Injection Pump	Nozzle
Maker : DPICO	No. of Hole : 1
Type : PE-6P	Hole Dia.: 0.26mm
No. of Plunger : 6	Needle Lift : 0.28mm
Plunger Dia. : 12mm	Sac Vol. : 1.21mm ³
Plunger Stroke : 7 mm	

로 구성된 분사계를 사용하였으며 실험의 편의를 위하여 Fig. 1과 같은 단공노즐을 사용하였다. 실험에 사용된 분사계의 사양은 Table 1과 같다.

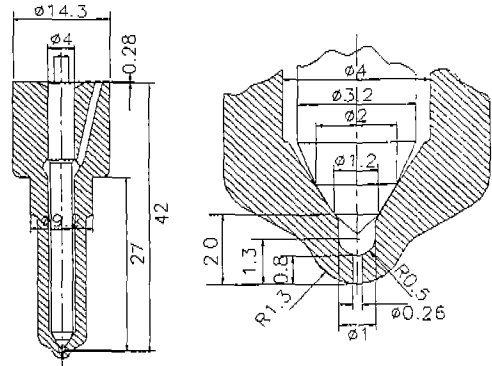


Fig. 1 Nozzle geometry

분사 압력과 니들변위를 측정하기 위하여 노즐 홀더를 Fig. 2와 같이 개조하고 니들변위센서 및 압력센서를 장착하였다.

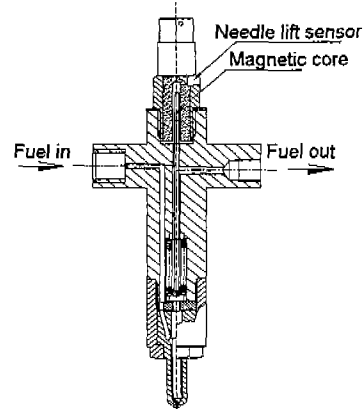


Fig. 2 Modified nozzle holder for needle lift measurement

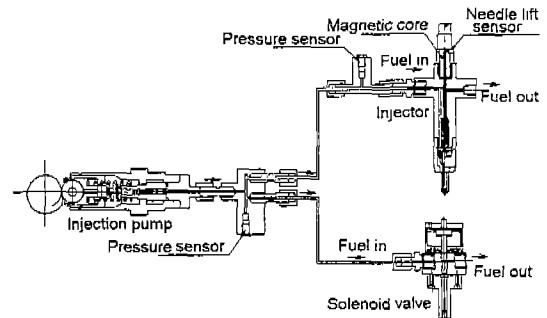


Fig. 3 Single injection system

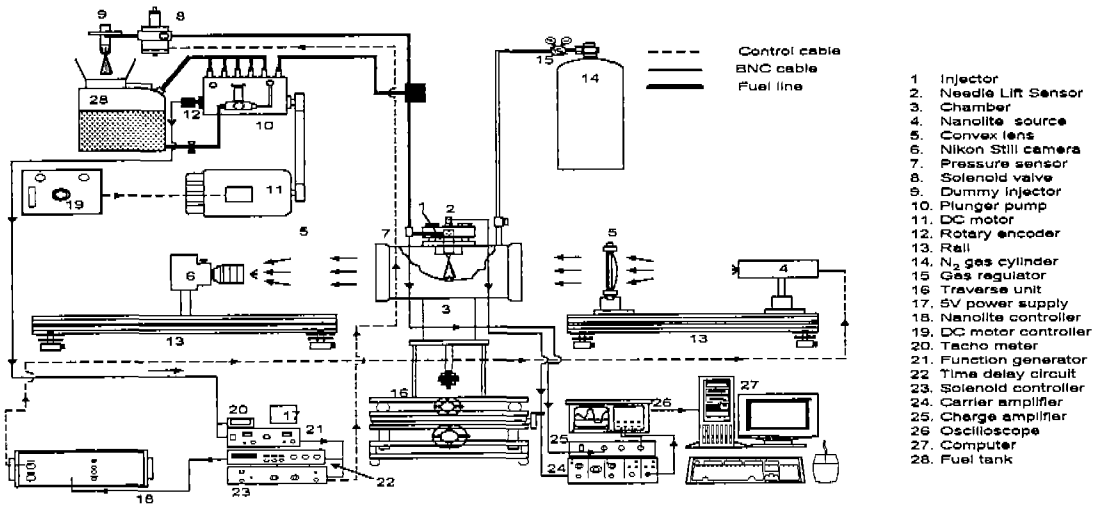


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

분무가 미립화 되는 과정을 관찰하기 위하여 단발 분사 장치와 배압(P_b)을 증가시킬 수 있는 정적분무실을 제작하였다. 단발 분사 장치는 Fig. 3과 같이 기존의 연료분사계에 솔레노이드 차단 밸브를 사용하여 제작하였다. 보조인젝터는 개변 압(P_o)을 1.1MPa로 낮게 설정하고 주인젝터의 개변압을 20.1MPa, 40.1MPa로 하여 항상 보조 인젝터로 연료가 분사되게 하였다. 단발분사장치는 솔레노이드 차단밸브를 이용하여 보조인젝터를 순간적으로 차단하여 주인젝터로 연료를 압송하여 단발로 분사가 되게 하였다.

Fig. 4는 본 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 분사펌프는 직류모터로 구동되고 펌프와 같은 축에 연결된 로터리 인코더(rotary encoder)에서 펌프가 1회전 할 때마다 5 볼트의 Z-펄스를 발생시킨다. 이 Z-펄스가 모든 시스템의 기준 펄스가 된다. 분사펌프의 6개의 라인 중 5개는 보조탱크로 되돌려지고 1개의 라인에 주인젝터와 보조인젝터를 장치하였다. 주인젝터는 정적 분무실에 장착되고 보조 인젝터에는 솔레노이드 차단 밸브(solenoid spool valve)를 설치하였다.

Fig. 5는 Z-펄스, 솔레노이드 구동펄스, 광원 펄스, B 셔터, 압력, 니들변위의 동기를 나타내는 선도이다. Z-펄스는 펌프가 1회전 할 때마다 발

생하므로 초기화 장치를 만들어 스위치 작동 시 한번만 Z-펄스를 취하게 한다. 이 Z-펄스를 솔레노이드 컨트롤러에 입력시키면 솔레노이드 차단밸브가 작동하여 주인젝터에서 분무실로 단발 분사가 이루어진다. 또 동시에 이 Z-펄스는 시간 지연회로를 지나 광원 컨트롤러에 보내어서 광원(nanolite)을 작동시킨다. 광원의 노출시간은 18ns이고 광에너지는 25mJ이다. 이때 주위를 어둡게 하고 카메라는 셔터가 열려있는 B-셔터상태로 한다. 광원은 Z-펄스를 기준으로 시간지연 회로를 거쳐서 작동한다. 분사펌프의 회전수는 700RPM이고 분사기간은 2ms로 고정하여 실험하였다.

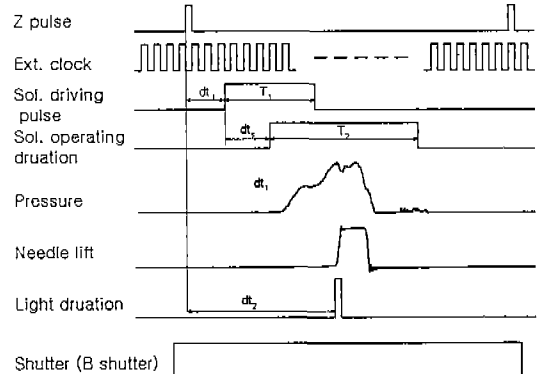


Fig. 5 Timing diagram for synchronization

Fig. 6은 개변압(P_0)이 20.1MPa, 30.1MPa, 40.1MPa에서 실제 니들변위 및 압력선도를 나타낸다. 개변압이 변화하더라도 인젝터가 열리는 초기 압력파형은 동일하지만 개변압이 증가할수록 압력파가 중첩되어 압력이 상승함을 알 수 있다. 또 개변압 변화에 따라 니들이 열리고 닫히는 시각이 지연되고 있다.

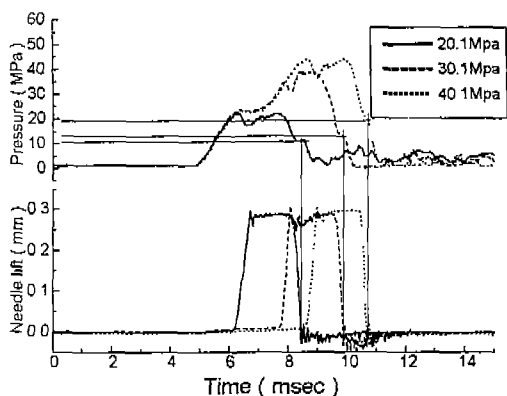


Fig. 6 Needle lift and pressure at various opening pressure

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분열과정의 가시화

분사 초기의 분무특성을 조사하기 위하여 인젝터의 개변압(P_0)을 20.1MPa, 40.1MPa로 변화시키고, 분무실의 배압(P_b)은 질소를 이용하여 0.1MPa, 2.1MPa로 변화시키면서 분무사진을 촬영하였다.

Fig. 7의 (a)는 인젝터의 개변압이 20.1MPa, 분무실 배압이 0.1MPa인 경우의 분무사진으로서 분사초기에 분무선단에서 돌출 부분이 관찰되는데 분무선단이 9mm가 진행되어도 돌출부분이 계속 존재한다. 이는 색(sac) 체적 내에 남아있던 연료가 주위기체의 저항이 작은 상태에서 밀려나와 주분무 보다 앞서서 진행하기 때문이다. Fig. 7의 (b)는 인젝터의 개변압(P_0)이 40.1MPa이고 분무실의 배압이 0.1MPa인 경우로서 돌출부분이 나타나지 않고 있다. 또한 분무선단이 버섯모

양으로 옆으로 퍼지고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 개변압의 증가에 따라 분사압력이 증가하여 색(sac) 체적에서 밀려나온 연료는 후반에 분사되는 빠른 속도의 주분무에 의하여 추월 당하고 충돌되기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 인젝터의 개변압이 각각 20.1MPa, 40.1MPa일 때 분무실 배압을 2.1MPa로 증가시킨 경우이다. 분무실 배압이 2.1MPa일 때는 개변압이 상대적으로 낮은 20.1MPa인 경우에도 분무실 배압이 0.1MPa인 Fig. 7의 (a)에 나타난 돌출부분이 관찰되지 않고 분무선단이 버섯 모양을 나타내고 있다. 이러한 현상은 주위 기체의 밀도 증가로 인하여 기체저항이 증가하여 색(sac) 체적의 연료는 응집되어 주분무와 함께 분사되기 때문이라고 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 분사 초기에 노즐 분공의 지름과 크기가 같은 분무를 관찰할 수 있다. 배압이 0.1MPa이고 개변압이 20.1MPa인 Fig. 7의 (a)에서는 노즐 출구 부근에서 분사 후 $32\mu\text{s}$ 까지 시간이 경과하여도 분무의 미립화가 이루어지지 않고 있으며, 분무 직경이 노즐 분공과 거의 동일하므로 액주라고 판단된다.

Fig. 7의 (a)에서 분사 후 $95\mu\text{s}$ 경과한 분무사진을 보면 분무가 생선뼈 구조(fish-bone structure)로 나타나는데 다른 조건에서 촬영한 분무사진들에서는 이러한 현상이 관찰되지 않고 있다. 이 현상은 Koo⁽²⁾ 등도 관찰하였으며, 클리프톤 효과(Klystron effect)⁽³⁾, 노즐 내부의 캐비테이션 버블(cavitation bubble)에 의한 영향, 노즐 내의 와류(vorticity)등의 가능성이 제기되지만 아직 명확히 규명되지 않고 있다.

3.2 분무선단거리의 변화

Fig. 9는 배압(P_b)이 0.1MPa일 때 개변압(P_0)이 20.1MPa, 40.1MPa인 경우와 배압이 2.1MPa일 때 개변압이 20.1MPa, 40.1MPa인 경우의 분무선단도달거리를 나타내고 있다. 동일 배압에서 개변압이 증가할수록 분무선단도달거리가 증가함

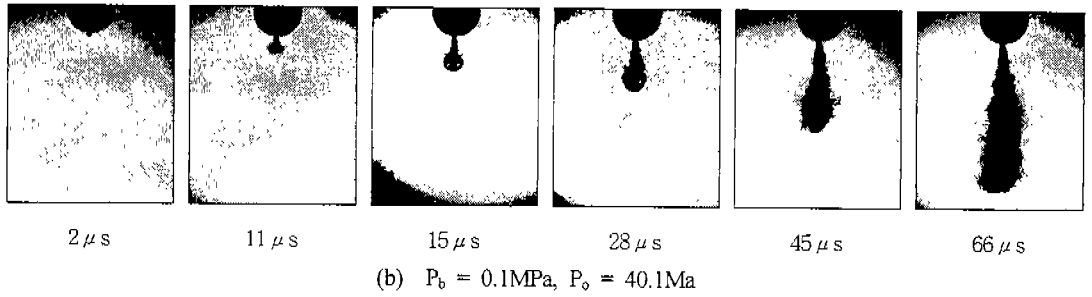
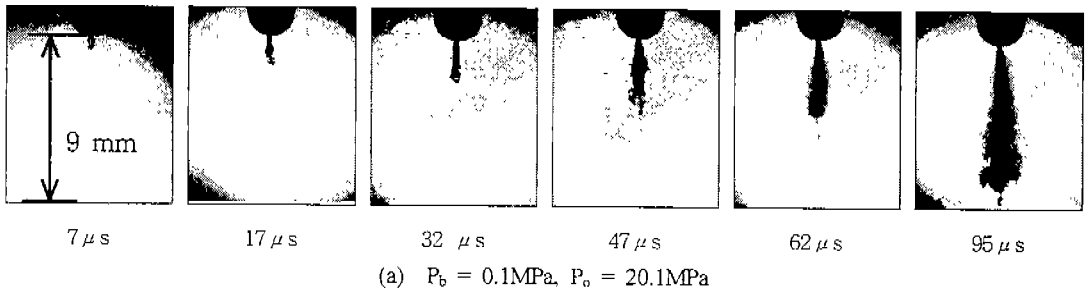


Fig. 7 Early stage of diesel spray at the back pressure(P_b) of 0.1MPa

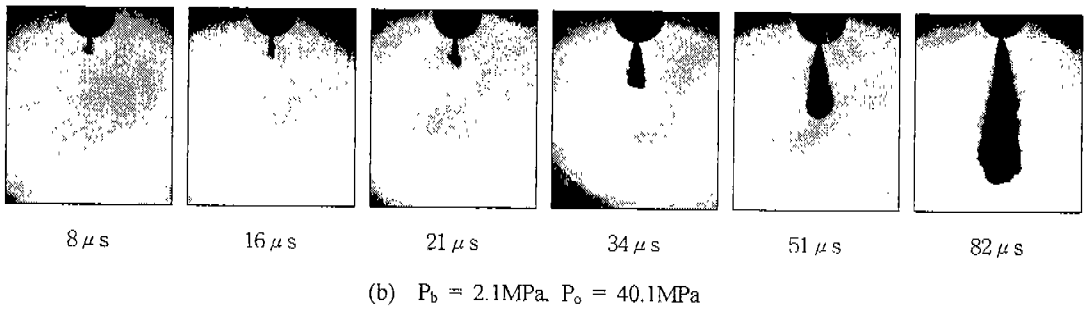
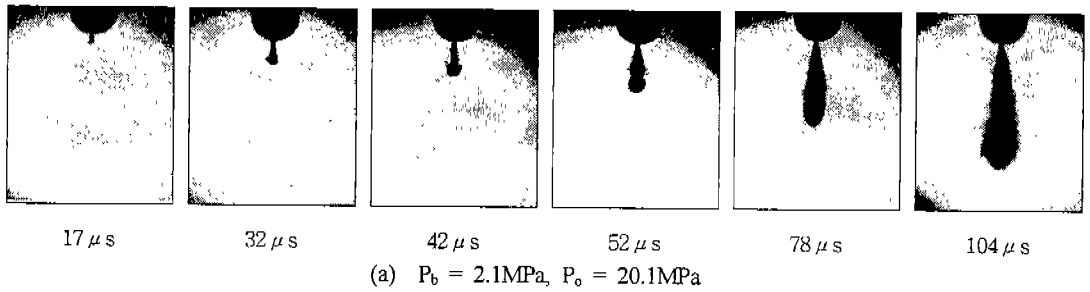


Fig. 8 Early stage of diesel spray at the back pressure(P_b) of 2.1MPa

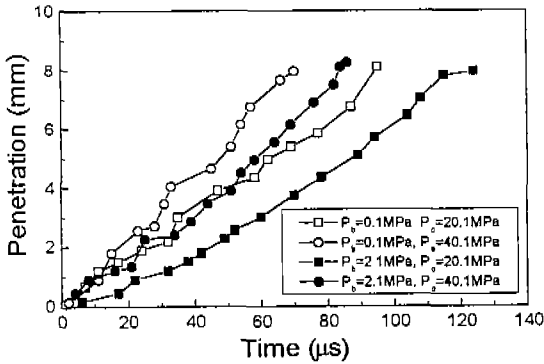


Fig. 9 Spray tip penetrations at various back pressure and opening pressure

을 알 수 있는데, 그 이유는 Fig. 6에서 개변압이 증가할수록 니들이 열리는 시각도 달라지며 그때의 압력이 증가하여 분무 분출속도가 증가하기 때문이다. 개변압이 20.1MPa와 40.1MPa로 일정한 상태에서 분무실의 배압이 증가할수록 분무선단도달거리는 짧으며, 또한 개변압이 20.1MPa인 경우가 40.1MPa인 경우보다 각 시각에서의 분무선단거리의 차이가 더 크게 나타나고 있다. 이는 분사압력과 배압의 압력차가 크므로 분무속도가 증가하기 때문이다.

3.3 분무각의 변화

Fig. 10(a)는 배압(P_b)이 0.1MPa이고 개변압(P_o)이 20.1MPa과 40.1MPa일 때 분무각을 측정 한 그래프이다. 높은 개변압에서 분무각의 발생이 조기에 나타나고 있으며 분무각이 증가하는 것을 보여준다. 이러한 현상은 분사압력의 증가로 인하여 섹(sac) 내부에서 밀려나온 연료가 바로 주분무와 충돌하기 때문이다. Fig. 10(b)는 배압을 2.1MPa로 증가시킨 경우로서 개변압이 증가하면 분무각은 조기에 나타나지만 분무각의 변화는 25° 부근에서 큰 변화를 나타내지 않고 있다. Fig. 10(c)는 인젝터의 개변압이 20.1MPa에서 연료가 분사될 때 배압이 증가함에 따라 주위 기체의 밀도가 증가하여 분무에서 주위기체로 운동량 전달이 증가하고, 그 결과 분무각이 증가하는 것을 나타낸다. 그러나 Fig. 10(d)의 개변압이

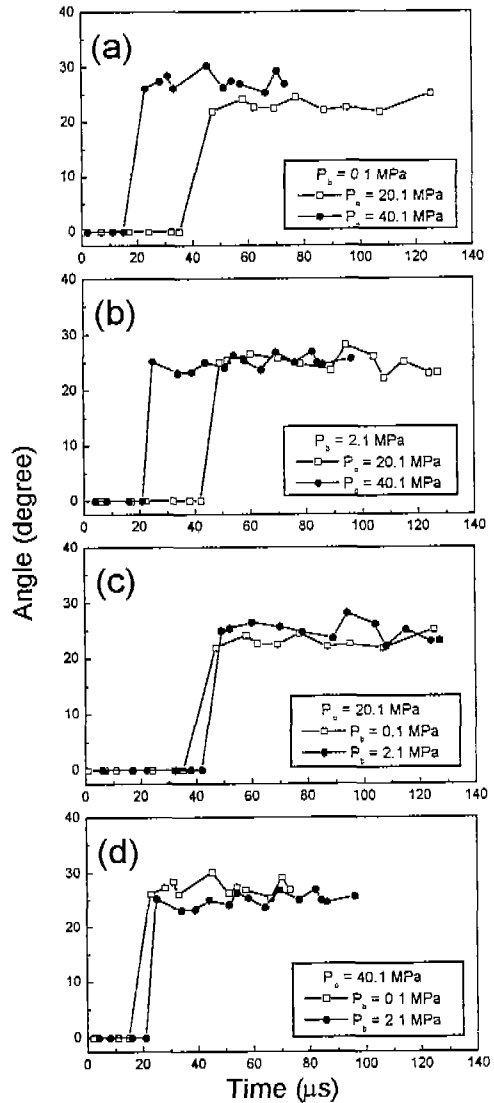


Fig. 10 Spray angle at various opening pressure

40.1MPa일 경우에는 주분무의 충돌에 의한 영향이 밀도의 증가에 의한 기체저항 증가의 효과보다 더 크기 때문에 오히려 배압이 낮을 때 분무각이 증가한다고 생각된다.

4. 결론

디젤 분무 초기의 가시화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개변압이 비교적 낮은 20.1MPa이고 배압이 0.1MPa인 경우에는 색(sac) 체적 내에 남아 있던 연료가 분사시에 밀려나와 주분무 선단에서 돌출부분이 관찰된다. 그러나 개변압이 증가하면 색(sac) 체적 내에서 밀려나온 연료가 주분무와 즉시 충돌하기 때문에 돌출부분이 관찰되지 않고 있으며, 배압이 증가하면 기체 저항의 증가로 색(sac) 체적에서부터 연료가 응집되면서 주분무와 같이 분사되어 돌출부분이 나타나지 않고 있다.

(2) 배압이 0.1MPa에서 개변압을 증가시키면 분무선단도달거리와 분무각이 증가하고 분무각이 생성되는 시각이 빨리 나타난다. 배압이 2.1MPa에서 개변압을 증가시키면 분무선단도달거리는 배압이 0.1MPa인 각각의 경우 보다 감소하고, 개변압의 증가로 분무각은 빨리 나타나지만 일정 시간 후에 분무각은 일정해지는 경향이 있다.

(3) 개변압이 20.1MPa인 경우에는 배압이 증가하면 분무각이 커지지만 개변압이 40.1MPa인 경우에는 주분무의 추월에 의한 연료충돌 효과가 발생하여 배압이 낮을 때 분무각이 더 커지는 현상이 발생한다.

참 고 문 헌

1. 高橋秀夫, “ディーゼルノズルより噴出する間歇噴霧の初期微粒化過程の觀察”, 日本機械學會論文集(B編), 61卷, 581号, 論文 No.94-0898, 1995.
2. J. Y. Koo and J. K. Martin, "Droplet Size and Velocity in a Transient Diesel Fuel Spray", SAE paper, No.900397, 1990.
3. W. C. Strahle, "Dynamics of Combustion and Flow Processes in Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", Ed. by Harrje, D. T., NASA SP-194, pp. 117-128, 1972.
4. R. D. Reitz and F. B. Bracco, "On the Dependence of Spray Angle and Other Spray Parameters on Nozzle Design and Operating Conditions", SAE paper No.790494, 1979.
5. L. Bayvel and Z. Orzechowski, "Liquid Atomization", Ed. by Taylor & Francis, pp.37-40.
6. Arai M., Tabata M., and Hiroyasu H., "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle", SAE Trans., vol. 93, 1984.