

노즐형상비에 따른 디젤분무의 특성

양 윤 석* · 이 창 수* · 허 종 철**

The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Diesel Spray Characteristics

Yun-Seok Yang*, Chang-Soo Lee* and Jong-Chul Huh**

ABSTRACT

In this study, diesel spray characteristics has been conducted to investigate the effect on nozzle aspect ratio(L/D). A single hole nozzle which is 0.45mm in diameter and 2.78, 3.89, 5 in the nozzle aspect ratio is used. Injection pressure is 14MPa and ambient pressure are 0.1MPa and 3MPa. By nozzle aspect ratio, the disintegration process of a diesel spray was observed. The double flash method has been employed to visualize the developing process of the diesel spray.

Key words : Nozzle aspect ratio, nozzle diameter, injection pressure, ambient pressure

1. 서 론

현재 세계적으로 배기 규제가 강화되고 있는 추세에 비추어, 디젤엔진으로부터 배출되는 NO_x를 포함하는 배기가스의 배출은 운전조건에 따라 다르나 공회전 때나 감속 때에 가솔린 기관의 약 2배가 배출되므로 디젤엔진에서의 배기가스 저감기술을 개발하는 것은 매우 시급한 당면 과제로 되어있다¹⁾.

단공노즐을 채용하는 디젤기관에 있어서 고압의 연료는 미세한 오리피스를 통과하여 연소실에 분사되는 순간 압축에너지가 운동에너지로 변환되므로써 미세한 액적을 생성시키고, 이는 공기와의 접촉면적을 증가시킨다. 또 이렇게 분사된 연료는 공기와 혼합하여

자발화연소가 시작되기까지는 분사 후 약 1~1.5ms의 시간이 걸린다. 이 경우 연료는 적당한 관통도와 미립화된 입자를 가져야만 공기와의 양호한 혼합기를 형성하게 된다. 그러나 분사직후 분무는 미분열 액주 상태이며, 또한 시간경과에 따라 액주가 분열하여 미립화되는 복잡한 과정을 거치기 때문에 양호한 분무조건을 얻는다는 것은 이토마이저 설계에 있어서 어려운 점이 많다. 그러므로 디젤엔진 연소실내를 보다 효율적인 연소를 위해서는, 착화 지연기간동안 분무의 분열 및 발달과정을 명확히 규명·해석해야 하며, 그 분무의 발달과정, 생성된 액적의 크기 및 분산 등을 적절히 제어해야 한다.

지금까지의 이 분야의 연구진행을 보면 미립화 과정은 크게 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계는 연료의 분사압력, 노즐의 개방특성, 노즐의 팁 형상 등의 노즐 설계요소에 의해 영향을 받는 노즐 출구부근에서 발생하는 초기 미립화 과정이고, 두 번째 단계

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 기계공학과

Dept. of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ.

는 분무가 주위기체를 관통하고 성장하는 동안 주위 기체의 유동과 연료 액적들의 상호작용에 의존하는 미립화 과정이다.

본 연구에서는 관측창이 있는 압력용기에 노즐길이 가 1.25mm, 1.75mm, 2.25mm이고 노즐직경이 0.45mm. 그리고 노즐형상비가 각각 2.78, 3.89, 5인 단공노즐을 사용하였다. 디젤연료를 일정압력으로 분사시켜 대기압과 일정분위기압력 하에서 노즐형상비에 따른 디젤 분무특성을 Double flash에 의한 사진촬영에 의해 가시화 하여 분무선단도달거리, 분무속도, 분무각 등을 계산하였다. 분무의 초기발달과정, 천이점해석 및 분열기구를 보다 정량적으로 해석하기 위하여 확대사진 촬영을 행하여 디젤분무의 미립화형성과정에 관한 실험적 기초자료를 얻고자 한다.

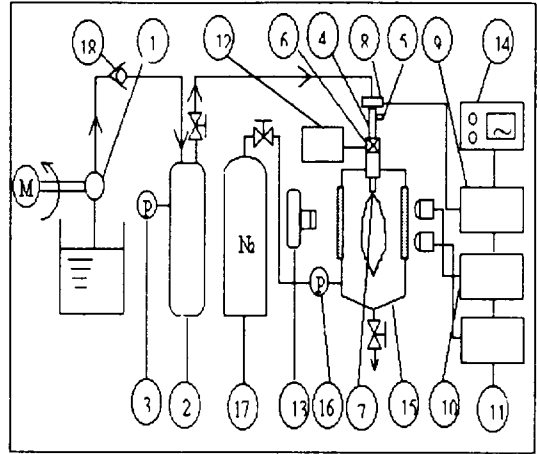
II. 실험장치 및 실험변수 결정

2.1. 연료분사 실험장치

본 연구에 사용된 연료분사 실험장치는 차량용 6기통 디젤엔진에 사용되는 분사펌프를 이용하여 연료분사 시스템, 연료분사 제어장치, 신호지연장치 및 스트로보스코프와 나노라이트를 광원으로 하는 사진촬영장치로 구성하였다. Fig. 1은 본 실험장치의 개요이다.

자동차용 분사펌프를 가변모터에 연결, 150rpm에서 1,800rpm까지 회전수를 변동시킬 수 있게 하여 플린저펌프 1개만을 연료의 가압장치로 사용하였고 나머지 5개는 다시 연료탱크로 복귀시켰다.

연료탱크내의 필터를 통과하여 분사펌프에 의해 가압된 연료는 분사펌프와 분사노즐 사이에 설치된 제 1 및 제 2축압실에 저장된다. 이들은 가압된 연료가 연료분사장치의 최종기구인 노즐⑦을 거쳐 분사되는 동안 분사압력을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 제 1축압실은 내압이 30MPa이고 내부용적 5.11 l 이며 주로 플린저펌프에서 고압 연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 한다. 제 2축압실은 최종적으로 디젤연료가 노즐에서 분사되는 동안 설정압력의 강하와 맥동을 없애주는 역할을 한다.



- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Plunger pump | 10. Nanolite |
| 2. 1st accumulator | 11. Stroboscope |
| 3. Pressure gauge | 12. Nozzle controller |
| 4. 2nd accumulator | 13. Camera |
| 5. Pressure transducer | 14. Oscilloscope |
| 6. Solenoid | 15. Pressure chamber |
| 7. Fuel injection nozzle | 16. Pressure gauge |
| 8. Photointerrupter | 17. N ₂ Gas bomb |
| 9. Double pulse generator delay circuit | 18. Check valve |

Fig. 1. Experimental apparatus.

노즐홀더의 상부에 솔레노이드⑥를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드를 작동시키지 않은 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 자화된 솔레노이드가 노즐의 니어들에 압착하고 있는 스펀들의 상부관을 끌어당기게 되며 노즐제어장치에 설정된 시간동안 연료가 분무관측용 용기⑮내로 분사된다. 그리고 용기내는 분위기압력을 3MPa까지 상승시키기 위하여 질소가스⑰를 충전하여 사용하였다. 또한 플린저펌프와 제 1축압실사이에 체크밸브⑱를 설치하여 분사압력을 28MPa까지 올리는 데 무리가 없도록 하였다.

2.2. 실험변수 결정

Fig. 2는 노즐내로 유입되는 연료의 압력분포를 나타낸 그림이다. 연료가 노즐내로 유입되면 관벽 근처에서는 급격한 압력강하가 발생하게 되고 오리피

스를 통과하여 분위기압력하에서 분사되며, 경우에 따라서는 증기압 이하로 하락되어 관내에서 공동현상(Cavitation)이 일어 날 수도 있다.

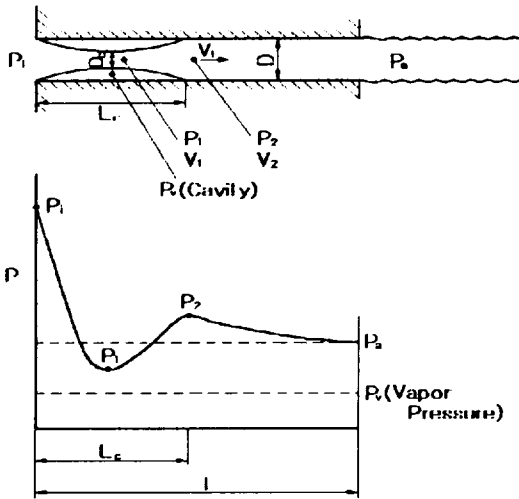


Fig. 2. Internal flow and pressure distribution in the nozzle.

그림에서 L_c 는 속도가 재구성되는 길이이며 분사압력에 따라 달라진다. 일반적으로 미립화 영역에서 분사속도가 증가하면 L_c 의 길이는 길어지고 그로 인해 붕괴길이(Break-up length)는 반대로 작아지나 분무각은 증가하는 경향이 있다²⁾.

Fig. 3은 노즐길이 L 이 초기 미립화에 미치는 영향을 도식화한 그림이다. 그림에서 간극(Gap)안으로 유입된 유체의 순간 속도는 감소하고 압력은 상대적으로 증가하게 된다. 간극 내부에서 그런 현상에 의해 Cavitation bubbles의 소멸에 의한 디스터번스(Disturbance)가 발생하게 되는데 Fig. 3(a)경우처럼 길이(L_1)가 작으면 디스터번스가 분류(Jet)의 발생이나 액체의 미립화에 직접적인 요인으로 작용하게 된다. 반면 길이(L_2)가 긴 Fig. 3(b)의 경우 디스터번스가 간극 근처에서 생성되어 분류의 발생이나 액체 미립화에 커다란 영향을 미치지 못하게 된다³⁾. 따라서 분사압력과 노즐직경이 일정하다면 오리피스길이 L 이 분류의 분포과정에 큰 영향을 미치므로 미립화기구의 주요 변수가 된다.

본 연구에서는 노즐직경 0.45mm일때 오리피스 길

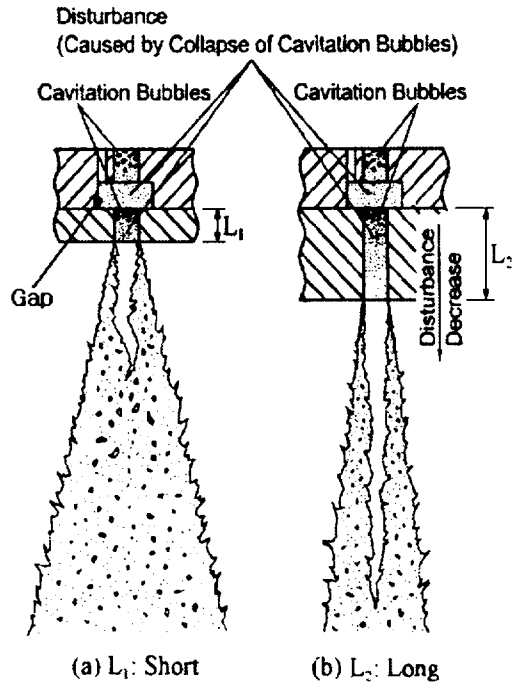


Fig. 3. Schematics of internal flow in the hole nozzle and liquid jet.

이를 변화시켜 노즐형상비가 각각 2.78, 3.89, 5이고 분위기 조건이 대기압, 3MPa인 경우를 실험변수로 택하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 대기압하에서 노즐형상비에 따른 디젤분무의 초기분열과정

Fig. 4와 5는 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 각각 2.78 및 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력 14MPa로 고정하고 분위기압력 0.1MPa일 때 디젤분무의 초기 분열과정을 촬영한 확대사진으로 사진의 전체 실체길이는 8mm이다. 그림에서 사진은 선발분무가 후발분무에 추월 당하기전의 미분열액주의 끝지점을 시간경과에 따라 나타낸 것이고 사진아래의 θ 는 분무원추각을 나타낸다.

분무초기이지만 Fig. 4와 5를 비교해볼 때 분무각

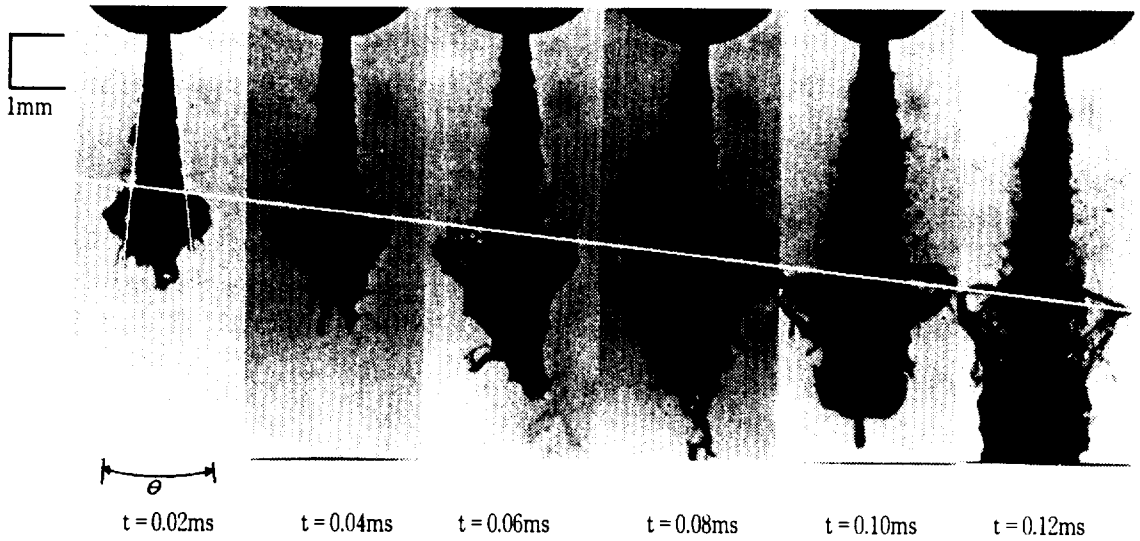


Fig. 4. Enlarged photographs of initial diesel spray.
($P_i = 14\text{MPa}$, $P_a = 0.1\text{MPa}$, $D = 0.45\text{mm}$, $L/D = 2.78$)

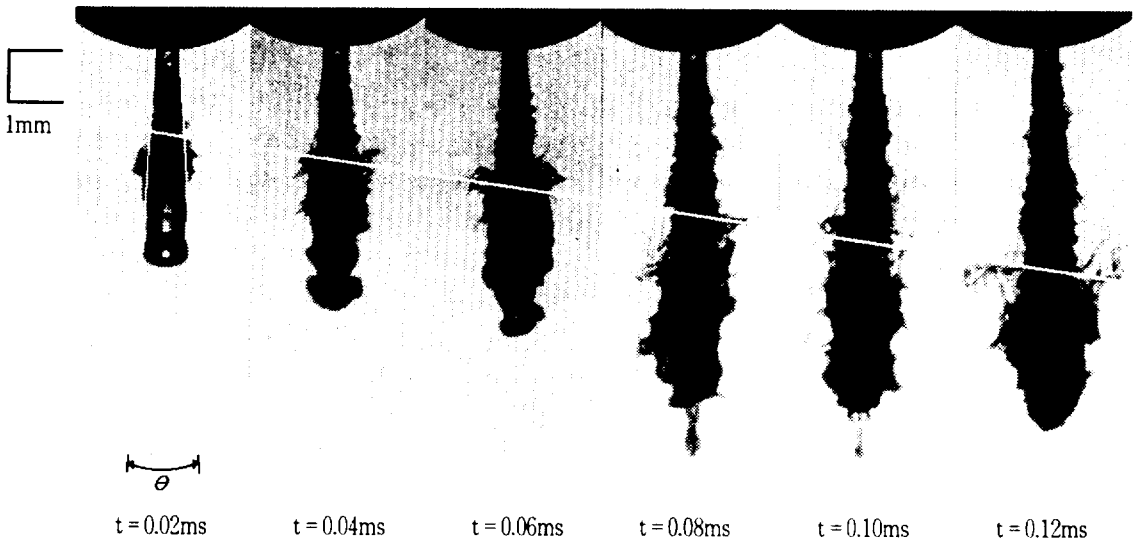


Fig. 5. Enlarged photographs of initial diesel spray.
($P_i = 14\text{MPa}$, $P_a = 0.1\text{MPa}$, $D = 0.45\text{mm}$, $L/D = 5$)

의 차이가 현저하다는 것을 볼 수 있다. 이는 노즐 길이의 차이 즉 노즐형상비의 차이에서 발생하는 공동현상과 밀접한 관련이 있다. 그리고 사진에서의 사선으로 비교해볼 때 노즐형상비가 커짐에 따라 미분 열액주의 길이가 길어짐으로서 표면파의 형성 및 액

적, 액사로의 분열도 느려짐을 쉽게 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4와 5의 사진을 근거로 노즐형상비에 따른 분무원추각을 그래프로 나타낸 그림이다. 노즐형상비가 5일 때는 시간경과에 따른 분무원추각의 차이가 작지만 노즐형상비가 2.78일 때는 0.02ms일

때와 0.12ms일 때 분무원추각이 약 6° 정도로 큰 차이를 보이고 있고 노즐형상비가 2.78 및 5일 때 동일 조건하에서의 분무각의 차이도 현저함을 알 수 있다. 이는 노즐형상비의 차이에서 발생하는 공동현상과 밀접한 관련이 있다고 사료된다.

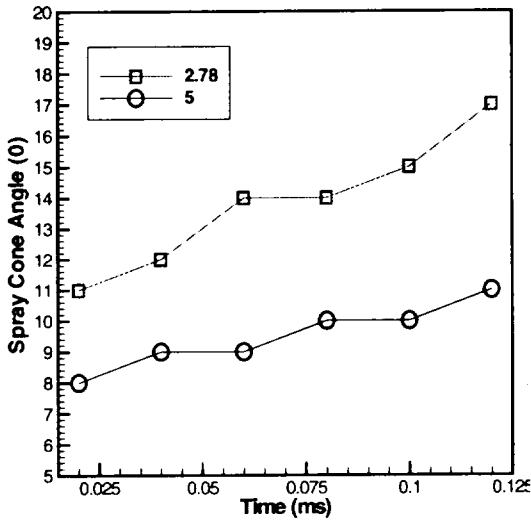


Fig. 6. Influence of nozzle aspect ratio on spray cone angle.

3.2. 노즐형상비에 따른 디젤분무의 특성

Fig. 7, 8 및 9는 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 2.78, 3.89 및 5인 노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고 분위기 압력이 3MPa인 조건으로 용기내로 분사하였을 때의 노즐형상비에 따른 분무선단도달거리와 분무각 및 속도를 그래프로 나타낸 그림이다.

Fig. 7은 분무선단도달거리를 나타낸 그래프로서 분사초기에는 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 순서로 분무선단도달거리가 길게 나타나고 있다. 그리고 천이점의 발생은 노즐형상비가 2.78일 때는 0.95ms, 3.89일 때는 1.0ms, 5일 때는 1.1ms 부근에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 분무가 천이점을 지나 완전히 발달되었을 때 분무선단도달거리는 노즐형상비와 무관하여 분사시간의 경과에 따라 거의 같게 발달하고 있다고 보아도 좋을 것이다.

Fig. 8은 분무각을 나타낸 그래프로서 분사초기에

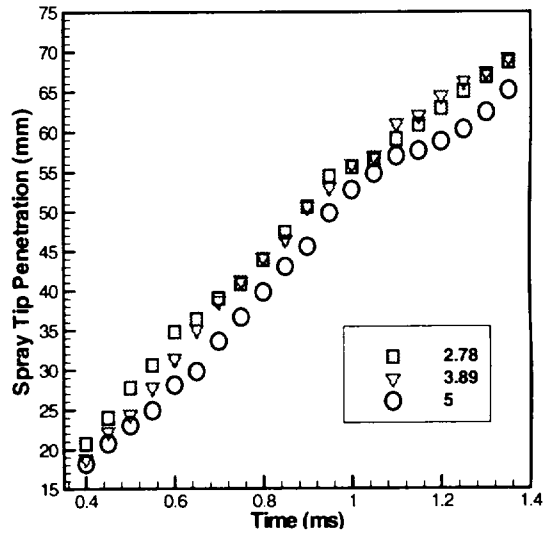


Fig. 7. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration.

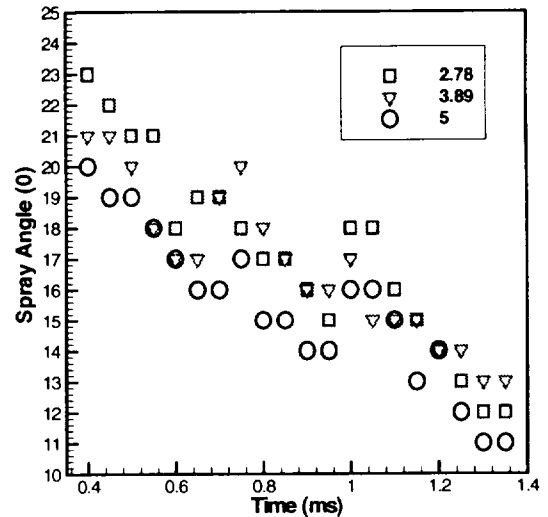


Fig. 8. Influence of nozzle aspect ratio on spray angle.

는 2.78, 3.89 및 5인 순서로 큰 값을 보이고 있다. 이것은 분사초기에 노즐형상비가 작을수록 디스터번스의 영향을 많이 받아 분무각이 커지고 천이점도 일찍 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 1.25ms 이후, 즉 분무가 천이점을 지나 완전히 발달된 이후부터는 3.89, 2.78 및 5인 순서로 크게 나타나고 있다.

Fig. 9는 분무의 속도를 나타낸 그래프로서 분사초

기에는 노즐형상비가 2.78, 3.89 및 5인 순서로 큰 값을 나타나고 있으나 천이점 이후에는 3.89, 2.78 및 5인 순서로 나타나고 있다.

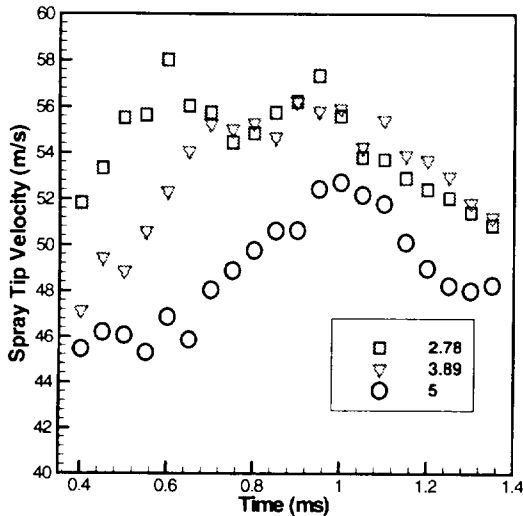


Fig. 9. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip velocity.

위 결과로부터 분사초기에는 분무선단도달거리, 분무각 및 분무속도가 노즐형상비가 작은 순서로 큰 값을 보이다가 분무가 완전히 발달된 이후에는 노즐형상비가 3.89, 2.78 및 5인 순서로 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 노즐형상비가 분무의 발달과정에 미치는 영향은 분사초기뿐만 아니라 천이점 이후에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.3. 디젤분무의 미립화기구 관찰

Fig. 10은 분사압력이 14MPa, 분위기압력이 0.1MPa, 노즐형상비가 3.89, 노즐직경이 0.45mm일 때 분무의 분산과정을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 확대사진을 스케너로 읽은 다음 분무초기 분무의 분산과정을 해석하였다.

Fig. 10(a)는 분사된 후 0.30ms에서의 분무사진이다. 사진에서 구간①은 교란되지 않은 미분열장이며 노즐형상비에 의해 결정되며 노즐형상비가 클수록 그 길이는 길어진다. 구간②는 노즐선단 부근에서 발생

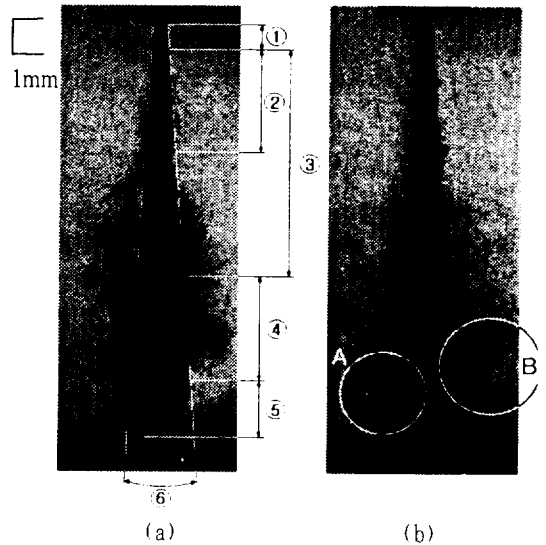


Fig. 10. Disintegrating mode of developing spray. (t = 0.30ms(a), t = 0.35ms(b))

된 과거 상류로 갈수록 점점 성장 교란되어 결국 이 파로부터 액사 및 액적발생 구간③의 끝까지 계속되고 있다. 구간④는 정지된 주위공기의 저항으로 인해 분무가 정체되고 그로 인해 후발분무와 선발분무가 서로 충돌하여 원추각 6보다 큰 분무각을 형성하면서 반경방향으로 발달되고 있다. 구간⑤는 후발분무가 선발분무를 추월하여 발달되고 있으며 액사 및 액적이 발생되고 있지 않다.

Fig. 10(b)는 동일 조건하에서 분사개시 후 0.35ms에서의 분무사진이다. (A)와 (B)의 분열과정은 추월현상으로 발생한 불안정한 액체덩어리간의 친화력과 분열되려는 힘과의 상호작용, 액사와 액적간의 충돌 및 공기와의 마찰 등에 의해 액적이 생성되고 있다.

IV. 결 론

본 연구는 노즐형상비에 따른 디젤분무의 발달과정을 나노라이트와 스트로보광원에 의한 고속순간 확대사진을 상세히 관찰하여 디젤분무의 분산특성을 정량적으로 해석하고 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 분사압력과 분위기압력이 일정할 경우 노즐 형상

- 1) 비가 작을수록 디스터번스의 발생이 분무의 초기 미립화에 직접적인 요인으로 작용한다. 따라서 붕괴길이가 작아지고 초기분무각은 커지는 요인으로 작용하게 되어 천이점이 일찍 발생하게 된다.
- 2) 분사개시후 분무된 연료는 약 1~2mm까지 교란되지 않은 액주상태의 분무로 분출된다. 노즐형상비가 클수록 미분열액주의 길이는 길어진다.
- 3) 노즐형상비가 2.78, 3.89 및 5인 경우 분위기압력에 분사된 분무는 분무선단도달거리에 큰 영향이 없으나 분사시간경과에 따라 2.78, 3.89 및 5인 순서로 천이점이 일찍 발생하였다.
- 4) 분무각은 노즐형상비가 작을수록 큰 값을 가지나, 천이점을 지나 분무가 완전히 발달되었을 때는 노즐형상비가 3.89일 때가 가장 크게 나타났다.
- 5) 노즐형상비에 따른 분무의 분열과정을 살펴본결과 분무의 발달과정에서 노즐형상비가 분무초기의 미립화를 지배하는 주요 변수임을 알 수 있었다. 완전히 발달된 분무의 경우에 적정 분무각에 대한 노즐형상비가 존재함을 알 수 있다.

참고 문헌

- 1) 명현국, 1995. 디젤엔진의 분무형태에 따른 연소 및 배기특성에 관한 연구, 국민대학교 자동차공학과.
- 2) M. H. Hiroyasu, 1991. Similarity between the Break-up lengths of a high speed liquid jet in atmospheric and pressurized condition. Institute for Liquid Atomization and Spray System, pp.563-570.
- 3) N. Tamaki, M. Shimizu and H. Hiroyasu, 2000. Enhanced atomization of a liquid jet by cavitation in nozzle hole. Institute for Liquid Atomization and Spray System, pp.292-299.
- 4) 허종철, 구자왕, 이규영, 양옥룡, 1991. 디젤분무의 초기분산과정에 관한 실험적 연구, 한국자동차공학회지, 13권 2호, pp.42-49.
- 5) 許鐘哲, 1992. 單孔 디젤 노즐의 微粒化 形成機構에 關한 實驗的 研究, 仁荷大學校 博士學位論文.
- 6) 현기수, 1992. 노즐形狀比가 디젤 噴霧의 分散過程에 미치는 影響, 仁荷大學校 碩士學位論文.
- 7) 허종철, 고경남, 1996. 분위기 압력이 디젤분무특성에 미치는 영향, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제7권 1호, pp.35-44.
- 8) 이상용, 1996. 액체미립화, 대우학술총서 자연과학.
- 9) 이봉수, 구자예, 이장희, 1998. 디젤 분무의 초기 미립화 특성, 한국액체미립화학회 학술강연회 논문집, pp.63-69.

1) 명현국, 1995. 디젤엔진의 분무형태에 따른 연소 및