

와류형 고압인젝터의 초기분무의 분열 과도현상

최동석* · 김덕줄** · 고장권***

(1998년 2월 11일 접수)

Transient Breakup Phenomena of Initial Spray from High-Pressure Swirl Injector

Dong-Seok Choi, Duck-Jool Kim and Chang-Kwon Ko

Key Words : Gasoline direct injection(가솔린 직접분사), Breakup(분열), Initial spray(초기분무), High-pressure swirl injector(와류형 고압인젝터), Nozzle hole volume(분공체적)

Abstract

The disintegration process of initial spray from high-pressure swirl injector was investigated at different injection pressures. The transient breakup phenomena that were difficult to observe at high injection pressure were easily observed at the low injection pressure of 0.4MPa. The effect of fuel remained inside a nozzle hole volume on the penetration of initial spray was also investigated. The disintegration process of initial spray could be classified four regions: the formation of mushroom shape, the first collision, the second collision, and the development of spray. The liquid film of cup shape was particularly found in the second collision region, and the growth ratio of its length and width at low and high injection pressures were compared.

기 호 설 명

- b_f : 컵형 액막의 최대폭
- b_1 : 컵형 액막의 폭
- L_1 : 인젝터팁으로부터 버섯형 돌기와 액주가 충돌한 지점까지의 거리
- L_2 : 인젝터팁으로부터 액주끼리 충돌된 지점까지의 거리
- L_3 : 인젝터팁으로부터 침상형 액사가 발생한 지점까지의 거리
- L_4 : 인젝터팁으로부터 분무 선단까지의 거리
- l : 컵형 액막의 분무축방향 길이
- l_b : 분무 관통길이
- P_1 : 분사압력

- Q : 분사량
- t_1 : 분사 개시 후 경과시간
- t_f : 컵형 액막형성 종료시간
- t_s : 컵형 액막형성 시작시간
- Δt_1 : 분사기간

1. 서 론

가솔린엔진의 연료 분사방식은 1980년대의 카뷰레터에서 최근까지 MPI(Multi-Point Injection) 방식이 주류를 이뤄 왔으나, 2000년대 이후엔 GDI(Gasoline Direct-Injection) 방식으로 발전할 것으로 전망된다. GDI엔진은 포트 분사식 엔진이 가지고 있는 운전성을 유지하면서 성층연소를 통한 고압축비의 실현으로 열효율을 높일 수 있고, 또한 희박 연소가 가능해지므로 완전연소에 의한 배기가

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

** 회원, 부산대학교 기계공학부

*** 제주대학교 기계공학과

스 제어에 있어서도 유리하다는 장점을 갖는다. 이로 인해 세계 각국은 자동차로 인한 배기가스의 저감과 연비의 절감에 대한 대비책으로 GDI엔진을 대상으로 많은 연구들⁽¹⁻⁴⁾이 활발히 이루어지고 있다.

GDI엔진은 불꽃점화에 의한 연소방식을 취하고 있으나, 디젤엔진과 같이 실린더 내에 고압(3~12 MPa)으로 연료를 직접 분사시켜 혼합기를 형성하므로 연료의 미립화와 분무로의 공기유입에 의한 혼합과정이 특히 중요시된다. 분사장치는 공기 보조형 인젝터(air-assisted fuel injector)와 와류형 고압인젝터(high-pressure swirl injector)가 연구의 대상이었다. 최근에는 제어의 단순성과 직접분사에 유리한 분무특성 때문에 와류형 고압인젝터를 대상으로한 연구가 집중되고 있다. 와류형 고압인젝터로부터 분사된 분무의 발달과정은 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 인젝터 출구쪽 또는 근처에서 발생하는 초기 무화과정이다. 초기 무화과정의 단계에서는 연료 분사압력, 인젝터의 개방 특성, 인젝터 팁 형상 등의 인젝터 설계요소에 영향을 받는다. 두 번째 단계로서는 분무가 관통·성장되는 동안 발생하는 미립화과정이다. 여기서는 연소실 주위 공기유동장과 연료액적들의 상호작용에 의존한다.

Zhao등⁽²⁾은 와류형 고압인젝터를 대상으로 2차원 Mie산란기법을 사용하여 분무의 구조를 가시화하고 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 분무의 무화특성을 규명하였다. Naitoh등⁽³⁾은 SSP(Synthesized Spheroid Particle)방법으로 와류형 고압인젝터에서 분사된 분무의 분무액적과 액막의 거동, 연료와 공기의 혼합, 액적의 벽면 충돌을 계산하였다. 또한 Parrish등⁽⁴⁾은 가시화 기법에 의한 분무의 구조 및 시간적으로 분해능이 높은 평균 질량흐름의 분포를 통해 순간적인 분무특성을 규명하였다. 이와 같은 선행 연구들은 모두 분무의 발달과정 중 두 번째 단계인 분무가 관통되는 동안 연소실 주위 공기와 연료액적들의 상호작용에 의한 미립화과정에 해당하는 것이었다. 따라서 첫 번째 단계인 인젝터 출구 근처에서 발생하는 초기 무화과정에 대한 연구는 아직 부족한 상태다. 그러나 분무가 혼합기 형성, 연소, 배출물에 큰 영향을 미치는 디젤분무에서는 분사 초기의 분무에 대한 연구가 활발히 이루어 졌다. Umezu등⁽⁵⁾은 광섬유 지연에 의한 2중 광노출법에 의해 간헐분무

의 초기 미립화과정을 세단계로 나누어 고찰했다. Ishiyama등⁽⁶⁾은 ns광원에 의한 촬영기법으로 분사 후 0.5ms까지의 비증발 분무의 미시적 구조를 연구했다. Takahashi등⁽⁷⁾은 확대 음영사진기법을 통해 고압 비정상 분무의 초기 발달과정을 연구하여 파형태의 제트로부터 완전히 발달된 분무에 이르기까지의 미립화형태의 전이를 규명했다. Ishikawa등⁽⁸⁾은 고속 이미지컨버터 카메라를 사용하여 대기압력과 상온에서 디젤분무의 초기 형성과정에 대해 연구하였다. 또한 초기 분무의 형성은 낭체적(sac volume)내부의 조건에 큰 영향을 받는다고 보고하였다. 한편 저자등⁽⁹⁾은 고압의 분사압력은 아니지만 와류형 분사노즐에 대한 과도적 현상을 고찰한 바있고, 최근에는 와류형 고압인젝터를 대상으로 분사 초기의 사진을 촬영하여 분무거리의 충돌에 의한 돌기모양의 성장을 관찰한 바 있다.⁽¹⁰⁾

GDI엔진의 경우 고부하조건인 흡입행정시 연료가 분사되는 경우, 초기에 분사되는 연료량이나 분무형상은 그다지 중요하지 않고 분사가 종료된 뒤의 공기와 연료의 균일한 혼합이 주요 관심의 대상이다. 그러나 부분부하인 압축행정 말기에는 성층화를 위해 소량의 연료가 분사되므로 초기의 분무형상과 연료의 미립화가 매우 중요한 인자가 될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 GDI엔진의 혼합기 형성에 중요한 부분을 차지하는 와류형 고압인젝터를 대상으로 인젝터 출구부근에서 발생하는 분사 초기의 분무 형성과정에 대하여 고찰하였다. 또한 분공체적내의 연료의 유무가 초기분무 형성에 미치는 영향도 조사하였다. 이를 토대로 GDI엔진 분사계 설계를 위한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 분사계, 가시화장치, 신호처리계로 구성되어 있다.

분사계는 와류형 고압인젝터, 연료펌프, 레귤레이터로 구성되어 있다. 연료를 고압으로 펌핑하기 위해 질소가스를 이용해 0.2MPa의 압력으로 연료를 가압하였다. 연료 분사압력은 레귤레이터로 인젝터가 연결된 연료관의 압력을 조절하여 맞추었으며, 인젝터와 레귤레이터의 사이에 압력계를 설치

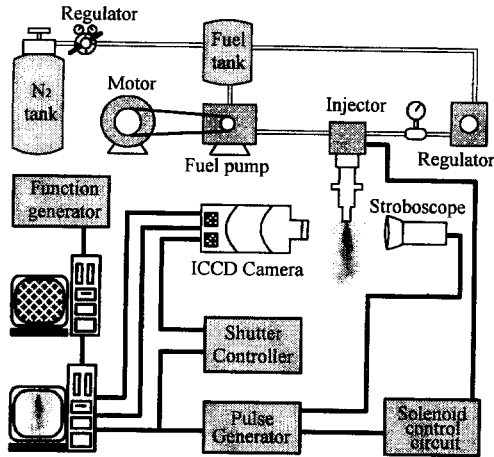


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

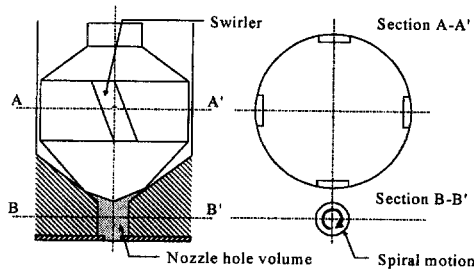


Fig. 2 Tip configuration of high-pressure swirl injector.

하여 연료 분사압력을 확인하였다. 연료는 이소옥탄(C_8H_{18})을 사용하였다.

가시화장치로서 광원은 발광시간이 $10\mu s$ 인 스트로보스코프를, 근접 확대 촬영이 용이한 초점거리 100 mm의 마이크로 렌즈가 부착된 ICCD카메라를 사용하였다. 카메라의 게이트 시간은 $4\mu s$ 로 하였고, 스트로보스코프의 광의 강도가 가장 높을 때와 동기시켜 화상을 획득했다.

신호처리계는 자체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로, 분사시기를 광원과 카메라에 동기시키기 위한 시간지연회로, 화상취득용 이미지 그라버, ICCD카메라 셔터제어기와 펄스발생기로 구성되어 있다.

Fig. 2는 와류형 고압인젝터의 팁 형상을 나타낸 그림이다. 와류는 우회전을 하며 심플렉스(simplex)형 노즐이다. 분무각과 미립화는 축방향 속도와 반경방향 속도의 비에 의해 결정되며 분사압력의 영향을 크게 받는다. 인젝터 팁에 분공적경보다 작은 원판이 부착되어 분무각을 26도로 조절한 인

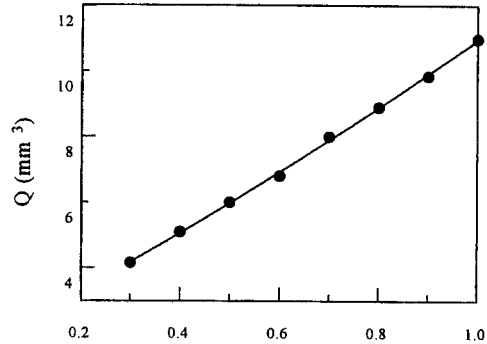


Fig. 3 Injection quantities at different injection duration ($P_1=5$ MPa).

젝터를 사용하였다. 니들과 시트사이의 체적 및 분공체적은 와류기(swirler)를 통해 접선방향과 축방향의 속도를 가진 분무가 형성되는 분공체적(nozzle hole volume)으로 정의하였다.

Fig. 3은 본 연구에 사용한 인젝터의 분사시간에 따른 분사량의 변화를 나타낸 것이다. 분사압력이 5 MPa일 때 분사시간에 따라 분사되는 연료량은 분사시간에 비례한다.

2.2 실험 조건

분사압력에 따른 분사 초기의 분무거동을 조사하기 위해 0.4, 0.6, 0.9, 3, 5 MPa로 분사압력을 변화시켜 가며 분무의 구조를 관찰하였다. 고압(3 MPa이상)에서 관찰하기 어려운 분무의 구조를 조사하기 위하여 분사압력을 저압(0.9MPa이하)으로 조정하여 실험을 하였다. 분위기 온도와 압력은 각각 상온과 대기압이며, 분사시간은 5 ms로 일정하게 두었다. 또한 분공체적내에 잔류한 연료의 영향을 조사하기 위해 분공체적내에 잔류된 연료가 존재하는 경우와 없는 경우를 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분열과정의 가시화

먼저 분사 초기의 과도적인 분무형상을 조사하기 위해 저압의 분사압력에서 분무사진을 촬영하였다. 실험을 행한 저압의 분사압력인 0.4, 0.6, 0.9 MPa 모두 유사한 경향이 관찰되었고, 분사 초기의 분무형상의 관찰이 용이한 분사압력 0.4 MPa의 경우를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4는 분사압력과 분사시간이 각각 0.4 MPa

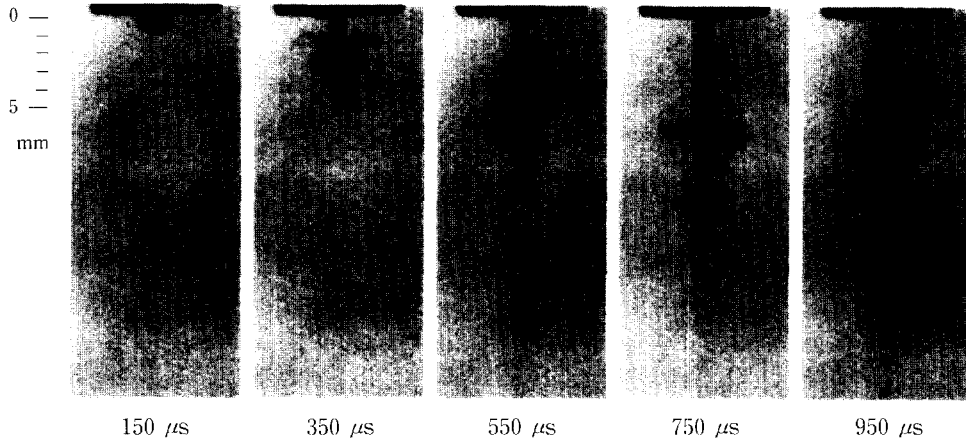


Fig. 4 Temporal change in the structure of initial spray ($P_1=0.4$ MPa, $\Delta t_1=5$ ms).

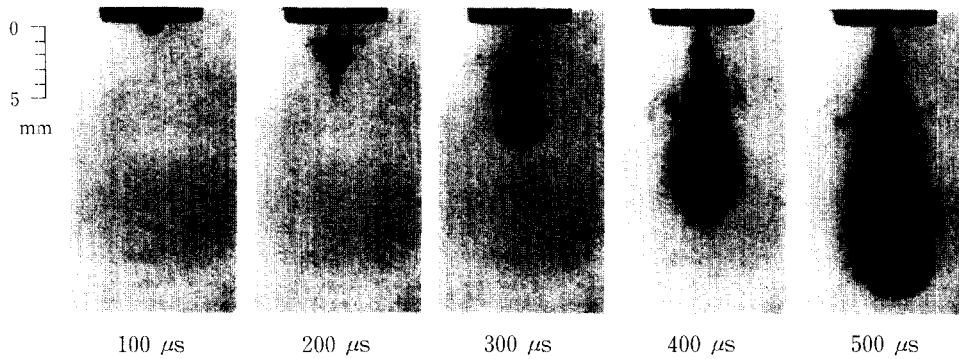


Fig. 5 Temporal change in the structure of initial spray ($P_1=5$ MPa, $\Delta t_1=5$ ms).

과 5 ms일 때, 분사후 150 μ s~950 μ s사이의 시간에 따른 분사 초기의 분무발달과정에 대하여 촬영한 사진이다. 분사개시 후 150 μ s에서는 분구(噴口)로부터 액주와 그 선단에 버섯모양의 돌기형상을 관찰할 수 있다. 이 버섯모양은 분공체적내에 차 있던 연료가 니들이 작동하기 시작한 직후의 약한 분사압력과 전달에 의해 밀려나오면서 표면장력과 주위 기체의 저항을 받아 형성된 것이다. 350 μ s에서는 작살모양의 액주 선단부와 주머니모양의 액막을 관찰할 수 있다. 작살모양의 액주는 니들이 차츰 들려 올라가면서 다소 강해진 분사압력에 의해 분출된 와류를 동반한 액주가 먼저 분출된 속도가 느린 액주와 충돌되어 형성된 것으로 생각된다. 또한 주머니모양의 액막은 버섯형 돌기가 성장한 것으로 작살모양의 액주에 의해 중심부가 뚫려 분열되고, 측면부에서는 와류를 동반한 작살모양의 액주와의 충돌로 튀겨올라 액적들로 분열되고 있음

관찰할 수 있다. 550 μ s와 750 μ s에서 주머니모양의 액막의 중심 끝부분이 작살모양의 액주에 의해 밀려늘어져 컵모양의 액막으로 성장해 나가면서 액적으로 분열된다. 또한 선단부는 액주와 액막이 충돌되어 중심부에서 밀려 나간 연료가 액사로 성장해 나간 후 주 분무류에 의해 따라잡히는 것이 관찰된다. 750 μ s에서는 분구 근처에서 니들 양정의 증가로 인한 굽은 주 분무류와 그 표면에서의 교란을 관찰할 수 있다. 950 μ s에서는 컵모양의 액막은 거의 사라지고 액주와 액막의 충돌로 인해 생긴 액사도 주 분무류에 의해 완전히 따라 잡힌 것이 관찰된다. 또한 주 분무류에 동반된 와류의 구조도 잘 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 실제 GDI엔진의 분사압력인 5 MPa, 분사기간은 5 ms일 때, 분사개시 후 100 μ s에서 500 μ s까지 시간에 따른 분사 초기의 분무발달과정을 나열한 사진이다. 분무의 발달과정은 저압의 분

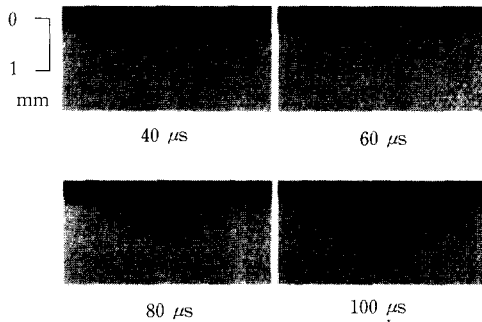


Fig. 6 Temporal change in the structure of initial spray until 100 μ s after injection start ($P_i=5$ MPa, $\Delta t_i=5$ ms).

사압력인 0.4 MPa일 때와 유사하며, 단지 분사압력의 차이로 인해 각각의 과정들이 상대적으로 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 분사개시 후 100 μ s에서는 사진의 해상도가 낮아 앞서 관찰된 버섯모양의 돌기형상은 뚜렷이 관찰되지 않았다. 따라서 이 시간대에서 분구 근처의 확대 촬영이 필요하다고 생각된다. 200 μ s에서는 상대적으로 빠른 속도로 분사된 액주가 1차충돌로 인해 생긴 액막과 충돌되어 액막의 일부가 튀겨오르고 충돌부분은 분무축 하방향으로 이동하고 있다. 액막의 중심부는 운동량이 큰 액주에 의해 밀려나가 침상형 액사로 성장한다. 300 μ s에서는 강도가 높아진 와류를 동반한 분무류가 앞서 충돌되어 선단 중심부에서 생긴 액사를 추월하고, 충돌된 부분을 컵형상으로 늘어뜨리고 있다. 400 μ s와 500 μ s에서는 충돌부분과 컵형상의 액막은 액적으로 분열되고, 이들의 상승으로 인한 강한 와류를 가진 주 분무류의 출현으로 분무각이 커지고 있다.

Fig. 6은 분사압력이 5 MPa일 때 분사개시로부터 100 μ s까지의 분구 부근의 확대 사진이다. 40 μ s에서 60 μ s까지는 분공체적내의 연료가 압력파에 의해 밀려나오면서 주위 기체와 표면장력의 영향을 받아 버섯형 돌기형태를 취하고 있다. 80 μ s와 100 μ s에서는 분공체적내의 연료와 과도 분사압력에 의해 분사된 연료가 충돌되어 우측에는 연료액적의 일부가 튀겨오른 것을 관찰할 수 있다.

3.2 관통길이의 변화

Fig. 7은 분사압력에 따른 관통길이의 변화를 나타낸 것이다. 분사후 시간의 경과에 따라 관통길이가 길어지고 있다. 분사압력이 증가될수록 액주의

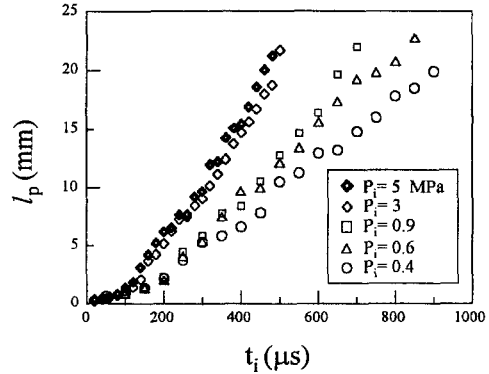


Fig. 7 Penetration of initial spray at different injection pressures.

속도가 빨라진다. 또한 0.9MPa이하의 분사압력인 경우에는 관통길이가 분사압력의 영향을 받고 있으나, 3MPa이상에서는 분사압력이 관통길이에 크게 영향을 미치고 있지 않다. 즉 본 연구에 사용된 인젝터는 분사압력이 3MPa이상이 되면 분사압력이 관통길이에 미치는 영향이 적어지는 특성이 있었다. 분사압력이 0.9MPa이하인 경우, 초기(300 μ s)는 분사압력의 영향이 거의 없으나 300 μ s이후에는 분사압력에 따라 차이가 생겼다. 이것은 분공체적내의 연료가 과도 분사압력에 의해 밀려나오는 시간이 비슷하므로 초기에는 관통길이의 차이가 거의 없으며, 그 이후의 시간에서는 버섯형 돌기와의 충돌로 인하여 연료의 일부가 밀려 나가기 때문에 관통길이가 길어진다고 생각된다. 분사압력이 3MPa 이상인 경우, 분사압력이 0.9MPa이하인 경우와는 달리 관통길이의 변화가 없는 시점이 다소 앞당겨져 60 μ s 근방이다. 이것은 분사압력의 증가에 따른 운동량의 증가로 분공체적내의 액체와 니들양정의 증가에 따라 분사된 연료와의 충돌이 분사 직후(약 60 μ s이후)에 일어나기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 분사속도 차이로 인해 분무꺼리 충돌되어 형성된 컵형 액막의 분무축 방향 성장거동을 분사압력에 따라 나타낸 것이다. 횡축은 컵형 액막을 관찰할 수 있는 최초 시간(t_s)과 최종 시간(t_f)의 비이며, 종축은 분무축 하방향으로의 컵형액막의 길이(l)와 인젝터 팁으로부터 분무 선단까지의 거리(l_p)의 비이다. 분사압력이 저압(0.9MPa이하)인 경우, 분사압력의 증가에 따라 컵형액막이 빨리 형성되고 전체분무중에 컵형액막이 차지하는 비도 증가된다. 이것은 분사압력의 증가로 인해 분무꺼

리의 충돌이 빨라지므로 0.9MPa인 경우가 먼저 컵형 액막을 형성하고 분사압력이 낮아질수록 컵형 액막이 늦게 형성되기 때문이다. 또한 컵형 액막길이의 증가도 분사압력의 증가에 따른 운동량의 증가로 액막을 늘어뜨리는 정도가 커지기 때문이다. 분사압력이 고압(3MPa이상)인 경우, 분사압력이 5MPa인 경우가 3MPa보다 컵형액막 형성시간이 다소 빠르다. 분사압력이 고압이므로 저압의 경우보다 분사 초기에 매우 짧은 시간(약 120 μ s)동안 컵형 액막이 존재하므로 시간비로서 컵형액막형성 시간을 저압의 경우와 직접 비교할 수 없다. l/l_p 는 거의 비슷한 값을 나타낸다. 이것은 분사압력이 3MPa이상 이 되면 관통길이의 차이가 거의 없기 때문이다. 또한 고압의 경우가 저압의 경우보다 l/l_p 가 성장하는 속도가 빠름을 알 수 있다.

3.3 분무폭의 변화

Fig. 9는 컵형액막이 형성될 때 충돌부분의 분무폭의 성장 거동을 나타낸 그림이다. 횡축은 Fig. 8에서 정의된 것과 동일하며, 종축은 각각의 시간에서 관찰된 충돌부분의 분무폭(b_i)과 이러한 분무폭들의 최디값(b_f)의 비이다. 시간비의 증가에 따라 충돌부분의 분무폭이 증가하고 있다. 분사압력이 저압(0.9MPa이하)인 경우, 분사압력의 증가에 따라 충돌부분의 폭이 빨리 형성되고 있다. 이것은 분사압력의 증가로 인해 분무거리의 충돌이 빨라지기 때문이다. 그러나 b_i/b_f 는 거의 비슷한 성장 경향과 약 30%의 변화 범위를 나타내고 있다. 분사압력이 고압(3MPa이상)인 경우, 분사압력이 5MPa인 경우가 3MPa보다 충돌부분의 분무폭 형성

시간이 다소 빠르며, Fig. 8과 동일한 이유로 시간비로서 충돌부분의 폭 형성 시작 시간을 저압의 경우와 직접 비교할 수 없다. b_i/b_f 는 약 40%의 변화 범위를 나타내고 있다. 또한 고압의 경우가 저압의 경우보다 b_i/b_f 가 성장하는 속도가 빠르다.

3.4 잔류 연료의 영향

Fig. 10은 분공체적내에 잔류된 연료의 유무에 따라 촬영한 초기분무의 사진이다. (a)는 분사압력 0.4 MPa, 분사개시 후 350 μ s에서 (b)는 분사압력 5 MPa, 분사개시 후 140 μ s에서 각각 분공체적내의 연료와 과도 분사압력에 의해 분사된 연료액주가 충돌할 때를 촬영한 사진이다. (a)와 (b)

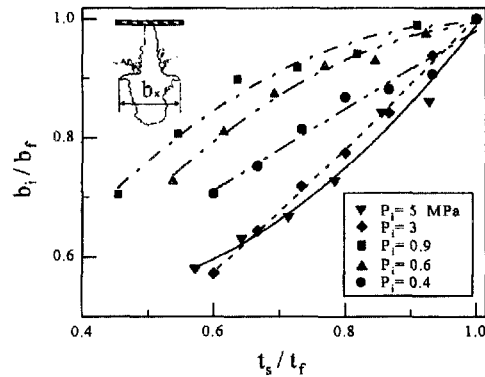


Fig. 9 Radial growth of the liquid film of cup shape at different injection pressures.

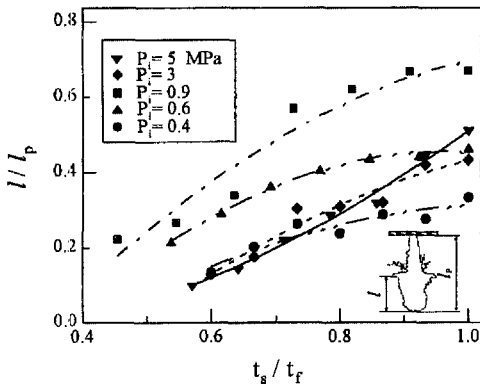


Fig. 8 Axial growth of the liquid film of cup shape at different injection pressures.

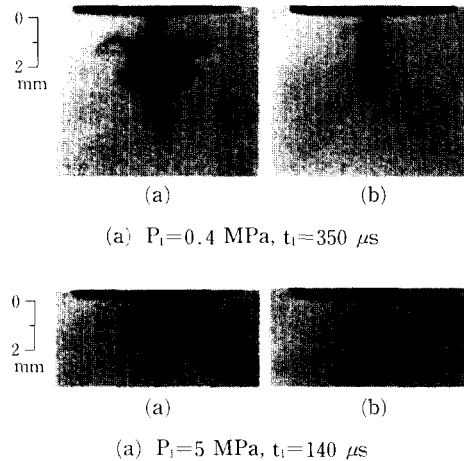


Fig. 10 Comparison on the structure of initial spray with and without fuel inside a nozzle hole volum at low and high injection pressures.

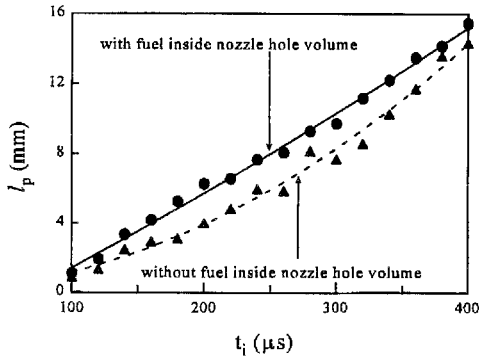


Fig. 11 Comparison on the penetration of initial spray with and without fuel inside a nozzle hole volum ($P_1=5$ MPa).

각각의 경우에 대하여 왼쪽 사진은 분공체적내에 연료가 잔류해 있는 경우(A), 오른쪽 사진은 없는 경우(B)이다. (A)경우가 (B)경우보다 관통길이가 더 길며 공간분포도 다소 양호한 형상이다. 이것은 분공체적내에 연료가 잔류하고 있을 경우, 분구로부터 전달된 압력파에 의해 연료가 먼저 밀려나와 버섯형 돌기를 형성하고 뒤이어 분사된 액주와 충돌되어 충돌의 중심부를 밀어내므로 관통길이가 길어지며, 분무폭도 액주끼리의 속도차이에 따른 충돌로 인해 (A)경우가 더 커지기 때문이다.

Fig. 11은 분사압력이 5 MPa일 때 분공체적내의 잔류 연료의 유무에 따른 관통길이를 나타낸 그림이다. 분사개시 후 100 μs 에서 400 μs 까지 측정하였다. (B)의 경우가 (A)의 경우보다 관통길이가 짧다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 측정시간내에서 분공체적내에 잔류한 연료가 압력파에 의해 먼저 분출되고 충돌로 인해 분무의 일부를 멀리 밀어보내는데 따른 영향이 크기 때문으로 생각된다. 그러나 그 이후의 시간에서는 그림에서와 같이 (B)의 경우가 보다 큰 운동량을 가지므로 점선이 실선을 추월해 관통길이가 길어질 것으로 예측된다.

3.5 고압 분사압력에서의 분열기구

Fig. 12는 초기분무의 발달과정을 분사 후 시간별로 구분하기 위하여 분무의 특징적인 형상에 대하여 특성거리를 기호로 정의한 것이다. 인젝터 턴으로부터, 관성력이 약한 버섯형 돌기와 뒤이은 액주가 충돌할 지점까지의 거리를 L_4 , 액주끼리 충돌되어 형성된 두꺼운 액막의 충돌면까지의 거리를 L_2 , 주분무류가 L_2 의 충돌면을 늘어뜨려 침상형 액

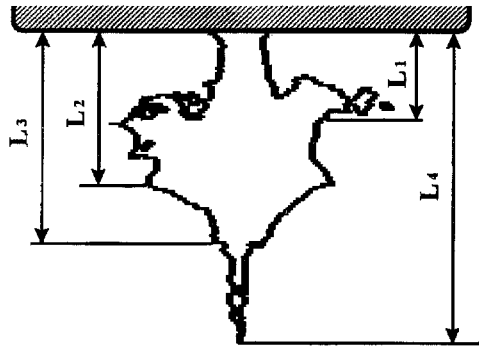


Fig. 12 Characteristic distances on the disintegration process of initial spray.

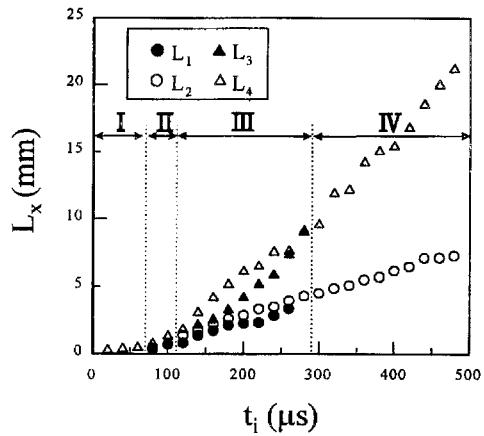


Fig. 13 Breakup process of initial spray ($P_1=5$ MPa).

사가 발생될 지점까지의 거리를 L_3 , 전체분무의 선단까지의 거리를 L_4 로 정의하였다.

Fig. 13은 분사압력이 5 MPa일 때, Fig. 12에서 정의된 특성거리를 사용하여 초기분무의 분열과정을 4단계로 나누어 나타낸 그림이다.

제 I 단계 : 버섯형 돌기 형성 단계이다. 분사개시로부터 약 60 μs 까지이며 L_4 로만 표시된다. 분공체적내에 고여 있던 연료가 분사압력파에 의해 밀려 내려오는 단계이다. 이 때 분공체적내의 연료는 니들이 들리기 시작한 직후의 매우 약한 분사압력파의 전달에 의해 밀려나오면서 주위 기체의 저항에 의해 버섯모양의 돌기형태로 성장해 나간다.

제 II 단계 : 1차 충돌단계이다. 버섯형 돌기와 액주가 충돌되는 단계이다. 분사개시 후 약 60 μs 이후에서 120 μs 이전까지의 영역이며, 충돌로 인하여 L_1 이 처음으로 표시되고 차츰 커지다가 없어진다.

제 I 단계에서 형성된 버섯형 돌기와 과도 분사압력에 의해 분출된 액주가 충돌되어 측면으로 튀는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 제 I 단계보다는 분사압력이 관내 압력에 가까워지므로 와류의 강도가 점차 커지기 때문이다.

제 III 단계 : 2차 충돌 및 컵형 액막형성단계이다. $120\mu\text{s}$ 이후부터 $300\mu\text{s}$ 이전까지의 영역이다. 니들이 차츰 들러 가면서 다소 강해진 분사압력파에 의해 먼저 분출된 속도가 느린 액주와 후에 분출된 속도가 빠른 액주가 충돌되어 L_2 가 표시된다. 그리고 II 단계에서 충돌되어 형성된 액막을 중심부에서 깨어 밀고 나간 침상형 액사인 L_3 를 관찰할 수 있다. 또한 강도가 높아진 와류를 동반한 분무류가 침상형 액사의 선단부를 추월하고, 충돌부를 늘어뜨려 컵형 액막을 형성한다.

제 IV 단계 : 분무 성장 단계이다. $300\mu\text{s}$ 이후의 영역이다. L_4 는 분사압력이 관내압력에 근접되므로 강한 와류를 동반하여 급격히 증가하고 있는 반면, L_2 는 분무축 하방향으로의 증가가 둔화되고 있다. 또한 점차 강한 와류가 형성되어 분무각이 커진다.

4. 결 론

본 논문에서는 GDI엔진의 혼합기 형성에 중요한 부분을 차지하는 와류형 고압인젝터를 대상으로 분사압력의 변화에 따라 인젝터 출구 부근에서 발생하는 분사 초기의 분무 발달과정에 대하여 연구하였다. 또한 분공체적내의 연료의 존재 여부가 초기 분무 형성에 미치는 영향도 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분사압력이 0.4MPa 일 때 고압의 분사압력에서 관찰하기 어려운 초기분무의 과도 현상이 잘 관찰되었다.

(2) 초기분무의 관통길이는 분사압력이 3MPa 이상이면 큰 영향을 받지 않고 동일한 분사압력에서는 분공체적내에 연료가 잔류된 경우가 길어진다.

(3) 초기분무의 과도적인 구조인 컵형액막은 분사압력이 저압인 경우, 분사압력의 증가에 따라 빨리 형성되고 전체분무중에 컵형액막이 차지하는 비도 증가된다. 분사압력이 고압인 경우, 분무관통길이에 대한 액막길이의 비는 비슷하며 저압의 경우보다 성장속도가 빠르다.

(4) 컵형 액막이 형성된 충돌부분의 분무폭의 변

화 범위는 분사압력이 저압인 경우는 약 30%이며, 고압인 경우는 약 40%이다.

(5) 초기분무의 분열과정은 버섯형 돌기형성, 1차 충돌, 2차 충돌, 분무성장의 4단계로 나눌 수 있다.

참고문헌

- (1) Zhao, F. Q., Lai, M. C. and Harrington, D. L., 1997, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engine," *SAE Technical paper*, No. 970627.
- (2) Zhao, F. Q., Yoo, J. H., Liu, Y., and Lai, M. C., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," *SAE Technical paper*, No. 961925.
- (3) Naitoh, K., and Takagi, Y., 1996, "Synthesized Spheroid Particle (SSP) Method for Calculating Spray Phenomena in Direct-Injection SI Engines," *SAE Technical paper*, No. 962017.
- (4) Parrish, S. E., and Farrell, P. V., 1997, "Transient Spray Characteristics of a Direct-Injection Spark-Ignited Fuel Injector," *SAE Technical paper*, No. 970629.
- (5) Umezumi, S., and Murakami, T., 1991, "The Structure of Intermittent Spray Injected through Diesel Injection Nozzle (Study of the Atomization in the Early Stage by Adopting the Double-Exposure Method Using a Delay System Equipped with and Optical Fiber)," *JSME Journal (B)*, Vol. 57, No. 544, pp. 310~315, (in Japanese).
- (6) Ishiyama, T., Miwa, K., Kamogawa, M., Lit, Y., and Miyashiro, S., 1994, "Observations of Microscopic Structures of Diesel Sprays with a Nano-spark Light Source," *JSME Journal (B)*, Vol. 60, No. 570, pp. 365~371, (in Japanese).
- (7) Takahashi, H., Yanagisawa, H., Shiga, S., Karasawa, T., and Nakamura, H., 1994, "Development of Initial-Stage Diesel Spray with Unsteady and Higher Injection Pressure," *JSME Journal (B)*, Vol. 60, No. 571, pp. 371~376, (in Japanese).

- (8) Ishikawa, N., Komori, M., and Tsujimurak., 1996, "Study on Initial Stage of Diesel Spray Formation(Effects of the Condition Inside the Nozzle Sac)," *JSME Journal (B)*, Vol. 62, No. 598, pp. 436~441, (in Japanese).
- (9) 김신구, 김덕줄, 이충원, 1988, "SI 기관용 전자제어 연료분사노즐의 과도적 현상," 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 308~318.
- (10) 박봉우, 최동석, 차건중, 김덕줄, 1997, "직분식 가솔린 분무의 기상분포의 예측," 한국액체미립화학회 학술강연회 및 제2회 아시아 미립화 및 분무시스템 학술대회, pp. 104~110.