한국자동차공학회논문집 제8권 제5호, pp.86~95

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0091

디젤 연소실 벽면에 충돌하는 분무거동에 관한 실험적/수치적 연구

A Experimental/Numerical Study of Behaviors of Spray Impinging on the Diesel Combustion Chamber Wall

박 정 규*, 원 석 규**, 원 영 호***
Jung-Kyu Park, Suk-Kyu Won, Young-Ho Won

ABSTRACT

A modified spray impingement model has been developed, which is assessed against experiments for the impinging sprays on the small combustion chamber at various gas pressures. To investigate spray behaviors in the diesel combustion chamber, a transparent constant- volume chamber is made which is similar to the combustion chamber of a real diesel engine. The chamber is pressurized by N_2 gas from 0 bar to 20 bar to find the effects of ambient pressures. The behaviors of spray injected into this chamber and dispersed after impingement on the cylinder wall is measured two-dimensionally using laser sheet Mie scattering method.

The physical submodels have been properly modified to improve the prediction capability of original KIVA code to describe the spray behaviors after impingement on the curved cylinder wall. In terms of spray dynamics and evolution, numerical results give qualitatively good agreements with experimental data.

주요기술용어 : Diesel Spray(디젤분무), Laser Sheet(레이저 시트), Mie Scattering(Mie 산란), Wall Impingement(벽면충돌), KIVA-II Code(KIVA-II 코드)

1. 서 론

디젤분무의 연소실 벽면에 충돌은 엔진 연소효율 및 배기가스에 큰 영향을 미친다. 벽면충돌 후 액적은 벽면에 부착되어 액막을 형성하거나, 벽면에 반사되고 이때 충돌에너지를 흡수하여 미립화가 촉진된다. 이러한 복잡한 현상 때문에 주로 실험적으로 연구가 수행되었고, 이론적 연구는 최근에서야 시도되고 있다.[1),2)] 그러나, 이러한 연구들은 평면 벽에 충돌을 대상으로 한 것이 대부분이고, 실제 디젤연소실과 같은 곡면충돌에 대

* 회원, 건국대학교 기계항공우주공학부
** 회원, 건국대학교 대학원
*** 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

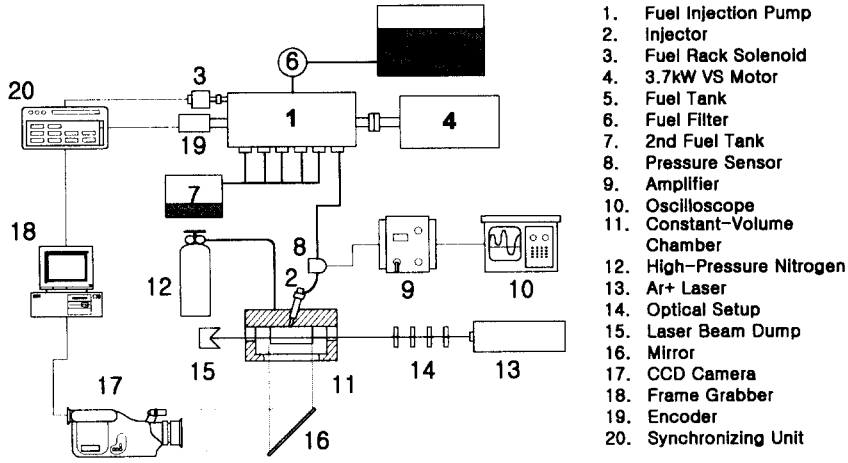

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

해서 실험결과를 이론계산과 비교한 예는 드물다.

벽면충돌 분무모델은 Naber[3] 모델이 대표적이다. 이 모델은 액적이 벽면에 저속으로 충돌하면 반사되고, 고속으로 충돌하면 벽면에 수직한 속도가 소멸하여 액체분류와 같이 벽면을 따라 이동한다는 실험결과로부터 도출되었다. 그러나, 벽면에 의한 액적의 미립화 촉진효과를 고려하지 않아서 노즐에서 충돌 면까지 거리가 가까운 경우 충돌 후 분무의 확산을 과도하게 예측한다.[4]

Senda[5]등은 Naber 모델이 벽면충돌 후 분무의 확산을 과도하게, 벽면부터의 높이를 작게 예측하는 것을 보완하기 위하여 충돌 후 액적의 미립화를 고려하고, 반사각을 어떤 각도 범위에서 무작위 하게 분포하는 것으로 가정하였다.

Gavaises[6]등은 액적이 벽면충돌 시 충돌에너지를 흡수하여 변형이 촉진되고, 변형이 한계값을 넘으면 액적이 미립화하는 모델을 제시하여, 충돌 후 액적 크기, 속도를 계산하였다.

본 연구에서는 실제 소형 디젤엔진 연소실과 유사한 반경의 곡면을 갖는 벽면에서의 분무 충돌모델 평가를 위하여 분무 가시화 실험을 수행하고, 얻어진 결과를 모델 계산 결과와 비교한다. 디젤 연소실을 모사한 투명 연소실에 분무가 충돌하여 확산하는 과정을 레이저 시트광 산란법으로 가시화하며, 측정결과는 KIVA 코드에 앞에서 언급한 여러 가지 충돌모델을 추가하여 계산한 결과와 비교하여 모델의 개선을 시도한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 분무 가시화실험장치의 개략도이다. 연료분사펌프는 Bosch형 6기통 in-line형 분사

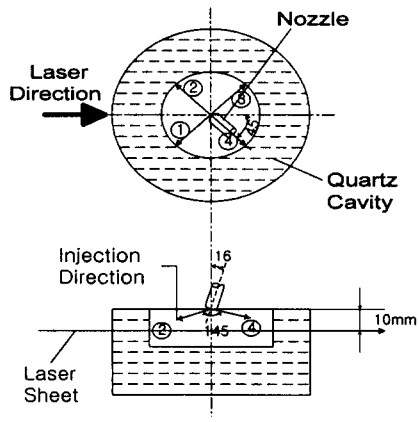

Fig. 2 Directions of injected sprays from each nozzle hole, and location of laser sheet

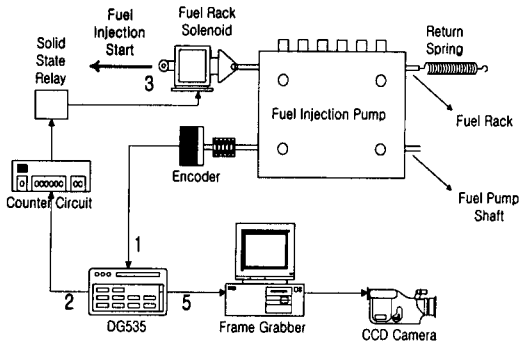

Fig. 3 Single injection system

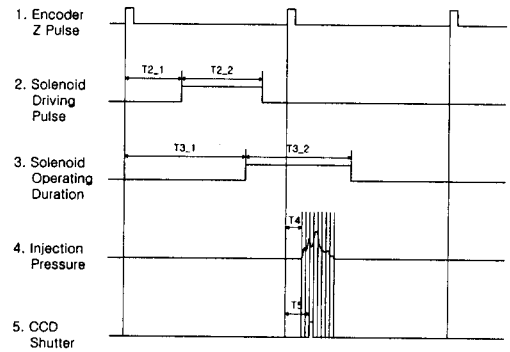

Fig. 4 Timing diagram for synchronization

펌프이며, 분사노즐은 4공 노즐을 사용하며, 분공경은 0.37mm이고, 개변압은 220 bar이다. 연료분사펌프는 3.7kW VS 모터를 이용하여 구동한다. 연료는 랙을 솔레노이드에 의해 작동시킴으로써 분사된다.

Fig.2는 석영으로 만든 정적 연소실의 형상으로 지름이 68mm이고 깊이가 20mm의 원통모양이다. 이 정적 연소실은 고압질소를 이용하여 원하는 분위기 압력을 만들어 준다. 가시화 실험에서는 그림의 ①번 분무만을 집중적으로 관찰한다.

광원은 최대출력이 6W Ar^+ 레이저를 사용하였다. 레이저빔은 한 개의 볼록렌즈로 광의 두께를 조절하고, 두 개의 원통렌즈로 시트 광을 만들었으며, 조리개로 레이저 시트 가장자리의 광 강도가 약한 부분을 잘라 준다. 레이저 시트는 노즐로부터 아래로 10~11mm의 횡단면을 지나며, 레이저 출력은 2W, 카메라의 노출시간은 10μs로 하였다. 촬영시점은 분사개시 후 0.11ms에서부터 0.1ms 간격으로 한다.

레이저 시트 광에 의한 분무 산란광은 정적 연소실 밑면을 통해, 하부의 광학경에 반사되어 카메라로 촬영된다. 카메라는 PCO사의 고속도 SensiCam CCD 카메라를 사용하였고, 샷터는 100ns까지의 노출시간이 가능하다. 연소실의 공간이 협소하여 2~3회 연속 분사가 이루어지면 먼저 분사된 연료분무가 연소실 벽면을 오염시켜 나중에 분사된 연료분무의 거동을 간섭하므로, 다음과 같은 방법으로 단발분사를 구현한다. Fig.3 에 나타낸 연료분사 펌프를 회전시키면 펌프 축과 연결된 엔코더로부터 펌프 1회전 당 한 개의 주신호가 발생한다. 이 신호를 트리거 신호로 펄스발생기를 이용하여 원하는 시간과 폭의 펄스를 발생시켜 SSR(Solid State Relay)에 인가하면 연료랙의 솔레노이드가 구동되어 연료를 분사시킨다. 연료 랙이 스프링에 의해 복귀되면 카운터회로에 의해 더 이상의 분사가 일어나지 않게 하였다. 또한 펄스발생기에 의해 지연된 신호는 컴퓨터의 화상처리장치에 인가되어 원하는 시점에서 카메라 셔터를 개폐할 수 있다. Fig.4는 위에서 설명한 단발 분사장치의 각 구성요소 간의 동기화를 나타낸 시간선도이다.

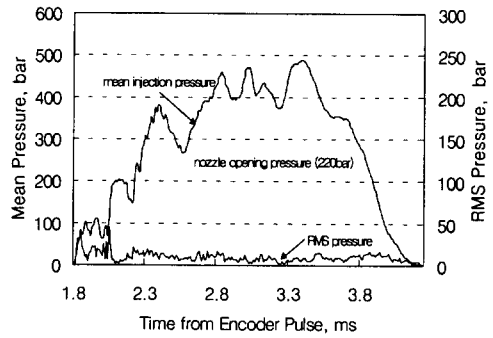

Fig. 5 Mean injection pressure data

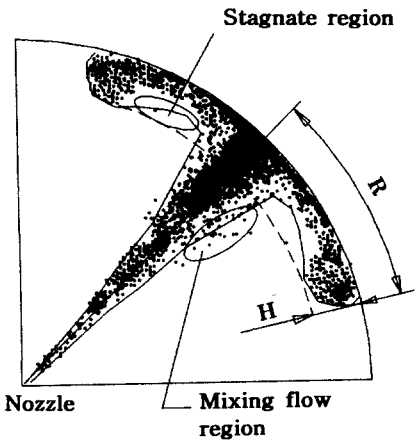

Fig. 6 Definition of spray radius, R , height, H , stagnate region and mixing flow region for wall impingement spray

실험은 분위기 압력이 분무에 미치는 영향을 파악하기 위하여 대기압인 공기와 20 bar인 질소에 대해서 실시하였다. 연료분사펌프의 회전수는 600rpm으로 고정하였으며, 사용연료는 일반 디젤유로 비중이 0.831이다. 연료 분사량은 동일한 조건에서 대기압에서 분사된 연료의 질량을 측정하고 분사회수로 나누어 평균 분사량을 측정하였으며, 1회 평균 연료 분사량은 116 mg 이다.

분사압력 센서는 인젝터 연료입구로부터 50 mm 지점에 설치되어 있으며, Fig.5는 분사 압력의 평균데이터이다. 본 실험에서는 1회 실험에 1개의 영상만을 얻을 수 있으므로, 각 실험에서의 재현성 여부를 판단하기 위해 동일한 조건에서 30회의 분사실험을 실시하였고, 여기서 얻어진 엔코더 신호와 압력데이터들로부터 Fig.5와 같은 평균압력선도와 RMS 선도를 얻었으며, 이 선도들로부터 공학적인 오차범위(개변압의 10%이내) 안에서 재현성을 가지고 있다고 판단한다.

분사개시 시점은 평균압력선도에서 분사압력이 개변압인 220bar의 이상이 되는 시점으로 판단하였으나, 압력센서의 위치에 의해 실제로 분사가 시작되는 시점과 차이가 있다고 판단되기 때문에, 분사노즐의 바로 밑에 레이저빔을 투사하여 연료분무가 실제로 보이기 시작하는 시점을 측정한 결과, 평균압력선도에서의 분사시점과 실제로 분사되는 시점 사이에 0.15ms의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

3. 수치모델

3.1. 액적의 미립화모델

수치계산은 KIVA-II 코드를 다음과 같이 수정하여 사용한다. KIVA-II에 사용된 액적분열모델인 TAB모델은 액적을 지나치게 미립화시켜, 분무선단 도달거리를 실측치보다 작게 한다. 따라서 분무의 액적 분열 모델은 WAVE 모델을 사용한다. 이 모델은 Reitz[7]가 제안한 모델로서 노즐 출구에서 축대칭 원통 분무의 표면에 형성되는 Kelvin-Helmholtz파의 불안정한 성장을 고려하여 개발된 모델이다. 이 모델에서 실험상수인 미립화 계수 B_0는 0.61을, 액적 분열시간계수 B_1은 충돌 전에는 30을 충돌 후에는 충돌에 의한 미립화 촉진 효과를 고려하여 이 보다 작은 값을 사용한다.[8]

WAVE 모델에서 노즐에서 액적은 분무 중심축을 따라 분출되고, 반경방향의 액적 확산은 미립화 된 액적의 반경방향 속도에 의존한다. 그러나 이렇게 예측된 분공에서의 분무각은 실험치보다 작다. Kosaka[9]의 실험결과에 의하면 진공 분위기에서도 분공에 아주 근접한 곳에서도 액적은 반경방향으로 확산되어 있고, 확산 각은 분위기 밀도에 영향을 받지 않는다. 이 결과로부터 본 연구에서는 액적의 분출 분무각을 13° 로 고정하고 액적을 이 각도 범위에서 무작위 하게 분출하는 것으로 한다.

액적의 항력계수, C_D는 TAB모델에 의한 액적

의 변형을 고려한 동적 항력계수를 사용한다.[8]

3.2. 충돌 후 액적 거동 모델

Gavaises[6]모델과 Naber[3]모델을 적용하였으나, Gavaises모델은 벽면 충돌 후 분무의 확산이 실험결과에 비해 아주 작았다. 이는 충돌로 인한 액적의 재미립화를 과도하게 예측하기 때문으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 Naber 모델을 사용한다. 이 모델에서는 벽면에 충돌하는 액적의 웨버 수($We_l = \rho_l U^2 r/\sigma$ 여기에서 ρ_l 은 액체밀도, U는 벽면에 대해 수직한 액적 속도성분, r 은 액적 반경, σ는 표면장력)에 따라 충돌 후의 액적 거동을 점착, 반사, 벽면제트로 분류하였다. 충돌 전 액적의 웨버 수가 80 이상이면 벽면제트로 가정하고, 충돌 후 반사되는 액적의 벽면과의 고도각, θ를 0으로 가정하나, 이렇게 하면 충돌 후 분무높이, H가 실험결과와 비교하여 지나치게 작게 된다. 이는 액적의 벽면충돌로 인한 비산(splash)효과를 무시하기 때문이다. 이에 대한 고려로 θ는 실측결과로부터 최대값, θ_{max}를 정하고, 다음과 같이 가정한다.

$$\theta = \theta_{max}(\frac{\alpha}{90})P \qquad (1)$$

여기서 α 는 충돌 전 액적의 고도각이고, P는 0 과 1 사이의 난수이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

Fig.6 은 분무가 벽면에 충돌한 후 확산되는 과정을 정량화하기 위해 반경 방향으로의 확산거리, R 과 분무의 높이, H 에 대해 정의한 그림이다. 또한 Katura[1]등이 정의한 혼합영역(mixing flow region)과 정체영역(stagnate region)도 나타낸다.

Fig.7은 분위기가 대기압인 공기에서 충돌분무의 확산과정 사진이다. 분사개시 후, 연료분무의 벽면충돌은 0.11ms와 0.21ms 사이에서 일어난다. 분무의 벽면충돌 후, 충돌분무의 선단에서 와류가 관찰된다. 이 와류는 충돌 초기에는 작고 명확하나 후반으로 갈수록 희미하게 되는데, 이는 시간이 경과함에 따라 와류가 발달하면서 주위가스와 혼합되어 분무의 밀도가 낮아지기 때문이다. 평판에서의 충돌분무와 마찬가지로 정체영역이 충돌 점 부근에서 보이며, 벽면에서 가까운 곳의 분무밀도가 높게 관찰된다.[1] 분무의 반경방향 확산과 벽면으로부터의 높이는 시간이 지남에 따라 그 성장이 느려지는 것을 알 수 있다.

Fig.8은 압력이 20bar인 질소 분위기에서 분무 사진으로, 분무의 벽면충돌은 분사개시 후 0.31ms와 0.41ms 사이에서 시작된다. 분위기 압력이 대기압 일 때와 마찬가지로 충돌분무의 선단에서 와류가 관찰되며 시간이 경과함에 따라 발달한다. 분무의 반경방향 확산과 벽면으로부터의 높이의 성장이 대기압에서 보다 느리게 되는데, 이는 밀도가 높은 분위기의 저항이 크기 때문이다. 시간이 경과함에 따라 Fig.6의 정체영역의 상류에서 분무밀도가 높은 것으로 관찰되었으며, 분위기 압력이 낮은 Fig.7에 비해 그 경향이 강하게 나타난다.

위의 결과들은 평판에서의 분무충돌 현상과 아주 흡사하지만, 정체영역의 상류에서의 분무의 밀도가 높고, 시간경과에 따라 이 영역의 벽면으로부터의 높이가 높아지는 현상은 평판 충돌분무와 다르다. 이러한 경향은 주위가스밀도가 높을수록 강해진다. 이것은 충돌면의 형상이 곡면이기 때문에, 곡면을 따라 성장하는 충돌분무의 선단에서 분위기의 저항이 커서 충돌 후 운동량을 잃은 액적들의 정체가 심화되기 때문으로 생각된다. 이러한 현상을 보다 명확히 하려면, 분무내 액적의 크기, 속도 및 수밀도 분포에 대한 측정이 더 필요하다.

4.2 수치모델 계산결과

Fig.9는 분위기가 대기압인 공기일 때, Fig.10은 분위기 압력이 20bar인 질소일 때 수치계산

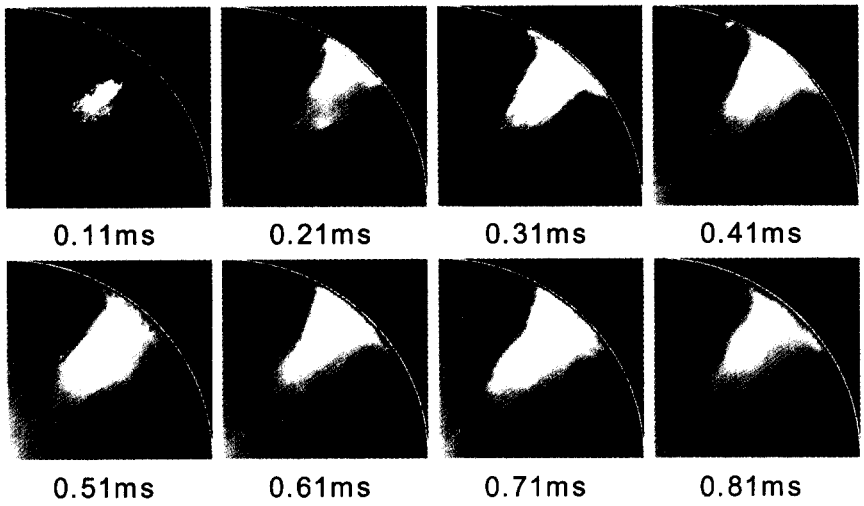

Fig. 7 Variation of spray images after injection start at atmospheric air (Experiment)

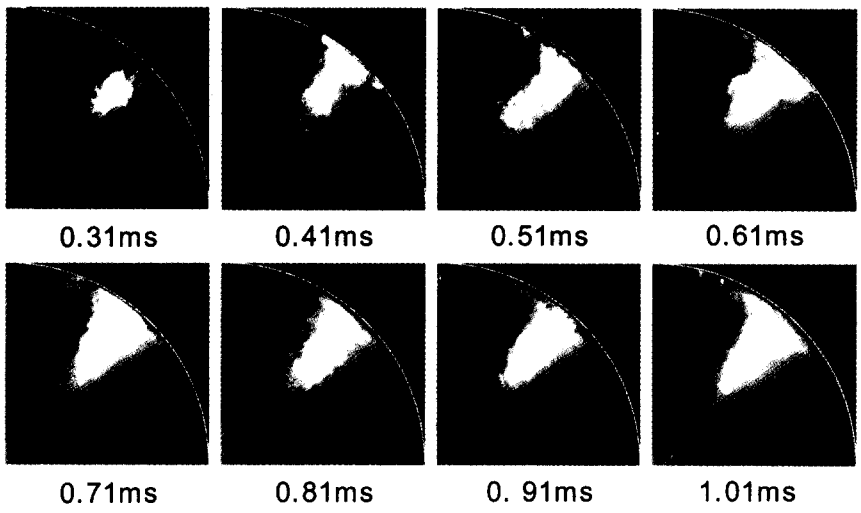

Fig. 8 Variation of spray images after injection start at 20 bar N_2 gas (Experiment)

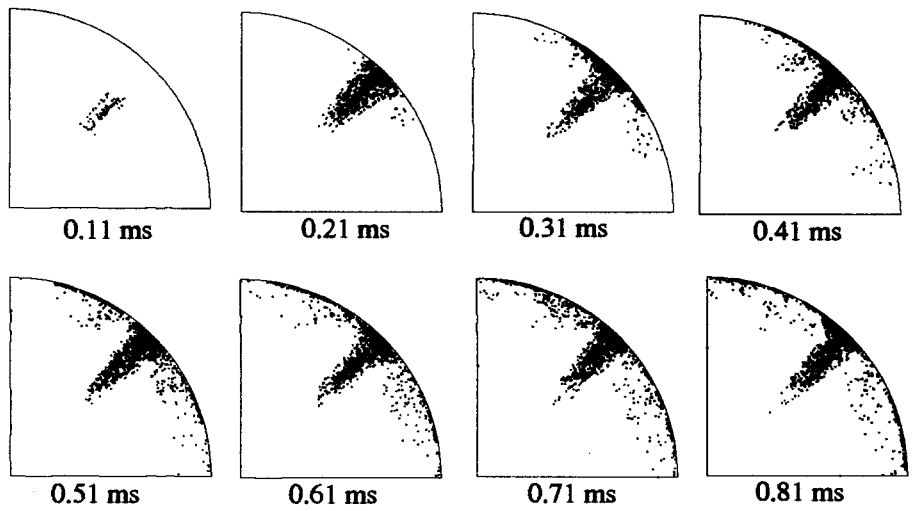

Fig. 9 Horizontal view of sprays at atmospheric air (Calculation)

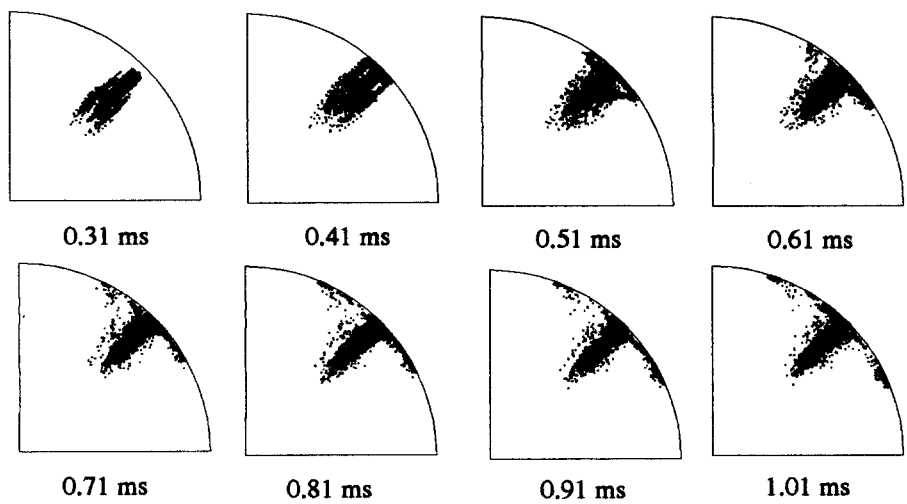

Fig. 10 Horizontal view of sprays at 20 bar N_2 (Calculation)

결과이다. 각각의 결과에 나타나는 점들은 액적군(液滴群)으로 실제 현상에서 동일한 물리량(크기, 속도, 온도, 질량 등)을 갖는 액적들을 대표한다. 충돌 후 분무확산은 액적 분열계수 B_1에 크게 의존한다. 분위기압력이 20 bar 일 때 권장값인 B_1 =1.73으로 하였으나, 대기압인 경우 이 값으로 계산하면, 반경방향 확산을 과도하게 예측한다. 이는 충돌 전 액적이 크고, 충돌속도가 커서 미립화 촉진효과가 더 크기 때문으로는 생각된다. 따라서 대기압인 경우 밀도비로 나눈 B_1 = 0.0825 로 하였다. 이러한 B_1의 불확실성을 없애기 위해 향 후 Liu 등[10]의 모델 적용을 시도하고 있다. 식 (1)에서 충돌 후 액적의 반사 고도각 범위 θ_{max}는 60° 로 하였다.

계산결과를 보면, 충돌 전 분무의 선단도달거리와 충돌 후 분무의 성장을 거의 유사하게 예측한다. 충돌분무는 반경방향으로 성장하면서 전반적으로 액적군의 수밀도가 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 벽면 가까운 곳에서의 액적군의 수밀도가 높게 관찰되는 것 등, 실험에서 나타나는 현상들을 잘 모사하고 있다. 또한, 분위기의 밀도에 따른 차이점도 역시 실험결과를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

Fig.11 은 Fig.10 의 조건에서 분무 중심의 수직단면의 계산결과이다. 위의 수평단면과 달리 선단와류가 잘 발달되고, 정체영역의 높이도 아주 낮다. 이러한 현상은 앞에서 언급한 평판 충돌분무의 특징을 잘 나타내고 있는 것으로 곡면 충돌에서 분무 확산과 다소 다르다.

Fig.12 는 분위기 압력에 대해 시간 경과에 따른 분무반경과 높이의 변화를 각각 나타낸 그림이다. 실험결과에서 분위기압력이 20bar일 때, 분무의 반경방향 확산거리와 분무 높이가 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 주위가스의 밀도가 높아지면서 액적이 항력을 많이 받기 때문이다. 그리고, 시간이 경과함에 따라 분무 반경과 높이의 성장이 서서히 둔화되는 것을 알 수 있다.

충돌초기 즉 대기압의 공기에 대해서는 0.21 ms~0.31 ms, 20bar의 질소에 대해서는 0.41 ms~0.51 ms의 기간에는 분무의 성장이 분위기 압력에 대해 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 충돌의 초기에는 적은 운동량을 가지는 혼합영역이 발달하지 못하고, 운동량이 집중된 분무 중심영역은 분위기 밀도에 크게 영향을 받지 않기 때문으로 생각된다. 이 후에는 분무의 운동량은 급격히 감소하기 때문에 충돌 후기에는 주위가스 밀도의 영향이 크게 된다. 수치계산 결과는 20 bar 질소 분위기에서 반경방향 확산을 다소 작게 예측하나, 그 외의 조건에서는 실험결과와 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

디젤분무의 실린더 곡면 충돌 후 거동을 파악하고, 이를 모델화하기 위하여 실제 디젤 연소실을 모사한 투명 정적 연소실을 제작하였고, 연소실 측면에 충돌하는 비증발 연료분무의 거동을 압력이 대기압인 공기와 20 bar인 질소분위기에서 레이저 시트법으로 가시화 하였다. 또한, KIVA-II 코드에 충돌모델을 추가한 계산결과를 가시화결과와 비교하였다. 이를 통해서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

1) 충돌 초기에 분무의 성장은 분위기 압력 즉 분위기 밀도의 영향을 크게 받지 않는다.

2) 충돌분무의 선단에서 와류가 관찰되며, 시간이 경과하면서 벽면을 따라 성장한다. 와류가 성장함에 따라서 정체영역으로 주위가스의 유입이 증가하여 분무의 액적 밀도는 감소하게 된다. 그러나 이러한 현상은 곡면에서는 평면에서와 같이 명확히 발생하지 않는다.

3) 충돌 후 시간이 경과함에 따라, 분무의 정체영역의 상류에서 분무의 액적 밀도가 증가하였고, 이러한 현상은 분위기 압력이 높아지고 충돌면이 곡면이면 강해진다.

4) WAVE 분열모델과 충돌액적의 충돌 후 반사각을 수정한 Naber 벽면 충돌모델이 실험에서 실측한 분무의 거동을 잘 예측하는 것을 확인

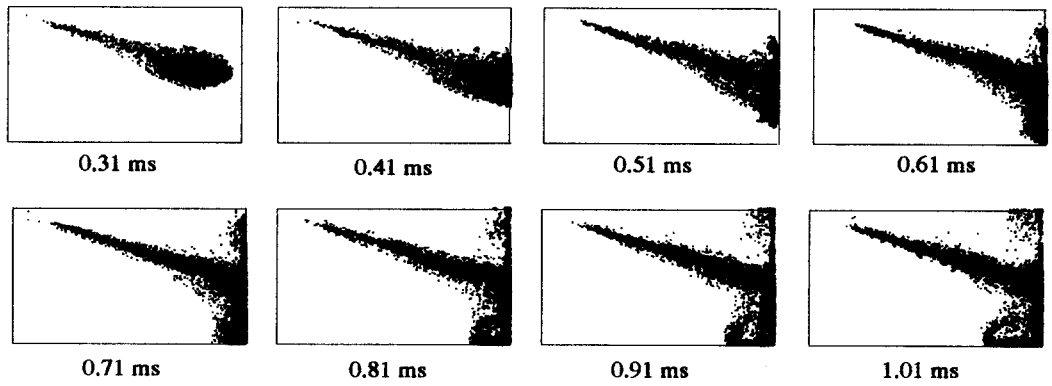

Fig. 11 Vertical view of sprays at 20 bar N_2 (Calculation)

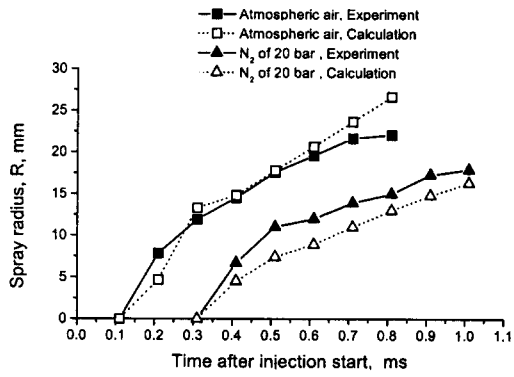

Fig. 12 Impinging spray radius, R versus time after injection start.

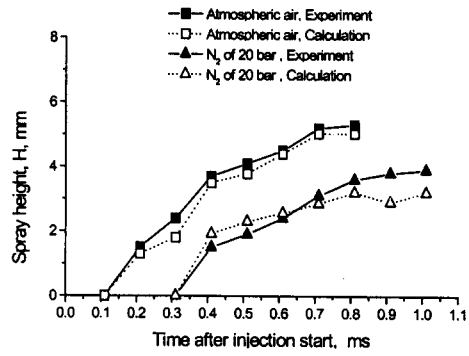

Fig. 13 Impinging spray height, H versus time after injection start

하였다. 그러나 분위기의 압력 변화에 따라 WAVE모델은 충돌 후 분열시간계수를 조정할 필요가 있다. Naber 모델은 액적의 웨버수가 80 이상일 때, 벽면 충돌 후 반사되는 액적의 벽면과의 고도각을 0으로 하였으나, 본 연구에서는 입사각에 비례한 각도범위에서 무작위로 분포시킴으로서 실험과 잘 일치하는 결과를 얻었다.

본 연구의 모델에서 연소실 벽면에 형성되는 액막에 대한 모델은 포함하고 있지 않다. 그러나 액막 형성과정은 분무 확산에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구가 보완되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 특정연구과제(과제

번호 97-02-00-03-01-3)의 연구비지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Katura N., et al., "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall", SAE Trans. 890264, 1989.

2) 長江 他 5名, "壁面衝突ディーゼル噴霧の 性狀", 第8回内燃機關シンポジウム講演論文集, pp33-38, 1990.

3) Naber, D., et al., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE Trans. 880107, 1988.

4) Naber, D., et al., "Fuel Impingement in a Direct Injection Diesel Engine", SAE Trans. 881316, 1988.

5) Senda, J., et al., "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall", SAE Trans. 941894, 1994.

6) Gavaises, M., et al., "Modeling Wall Impingement of Diesel Sprays", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.17, No.2, pp130-138, 1996.

7) Liu, A.B., et al., "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays", SAE paper 930072, 1993.

8) Rutland, C.J., et al., "Toward Predictive Modeling of Diesel Engine Intake Flow, Combustion and Emissions", SAE paper 941897, 1994.

9) Kosaka, H., et al.,"A Study of the Structure of Diesel Sprays Using 2-D Imaging Technique," SAE Trans. 920107, 1992.

10) Liu, Z., et al., "Modeling Drop Drag Effects on Fuel Spray Impingement in Direct Injection Diesel Engines," SAE Trans. 970879, 1997.