

GDI 와류 분사노즐에 의한 비증발 분무의 가시화 및 수치해석

원 영 호^{*1)} · 강 수 구²⁾

울산대학교 기계자동차공학부^{*1)} · 울산대학교 대학원²⁾

Visualization and Numerical Analysis of Non-evaporating Spray with a Swirl-Type GDI Injector

Youngho Won^{*1)} · Soogoo Kang²⁾

^{*1)}School of Mechanical-Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

²⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

(Received 5 March 2003 / Accepted 14 May 2003)

Abstract : Predictions of the fuel spray dispersion and mixing processes are very important to improve the fuel consumption and exhaust emissions in GDI engines. Numerical and experimental analysis of the sprays with a swirl injector have been conducted. A numerical analysis is carried out using KIVA-II code with modified spray models. Experimental measurements are performed to show the global spray images and the local images near nozzle tip using laser sheet visualization technique.

Computed and measured spray characteristics such as spray width, tip penetration are compared, and good agreements can be achieved. The spray head vortex is stronger as the injection pressure increases, but numerical calculations cannot show the head vortex properly.

Key words : GDI swirl injector(GDI 와류분사 노즐), Spray modeling(분무 모델), Spray visualization(분무 가시화), Gasoline direct injection engine(직접분사식 가솔린엔진)

1. 서론

GDI 엔진에서 연료분무의 발달과정은 실린더 내 혼합기의 형성에 지대한 영향을 미치며 나아가서 연료 소비율과 배기가스 배출성능에도 영향을 준다. 연료 인젝터로는 와류노즐이 널리 사용되고 있다. 와류노즐은 노즐 내부에서 발생하는 강한 와류에 의해 연료가 분출공에서 분출과 동시에 중공 원추형 액막을 형성하고 이 액막이 분열하여 액적을 형성한다.¹⁾

여러 형상의 와류 분사노즐에 대하여 실험이 수

행되었고 수치해석법도 활발히 연구되고 있다.¹⁻²⁾ GDI 엔진의 와류 분사노즐에 의해 형성된 중공원추형 분무는 디젤엔진의 분무와 분무형성과정이 다르다. 수치모델은 노즐내부 유동과 액막의 거동까지 포함한 모델^{3,4)}과 액막에서 분열된 액적의 거동만을 다루는 DDM(Discrete Droplet Model)⁵⁾로 나누어진 다. 전자는 액적의 초기조건이 필요 없으나 계산격자와 시간간격이 아주 작아야 하고 결과도 아직 만족할 수준이 아니다. 반면에 후자의 방법은 분무각, 초기 액적의 크기와 속도 등의 초기조건으로 필요하다. 이 방법은 계산법이 비교적 간단하고 결과도 실험결과를 잘 예측하고 있다.

본 연구는 DDM에 의한 분무의 수치계산에 필요

^{*}To whom correspondence should be addressed.
yhwon@mail.ulsan.ac.kr

한 초기조건을 명확하게 하기 위하여 초기분무를 가시화하고, 이를 토대로 수치계산을 수행하였다. 수치계산 결과를 분무의 거시적 확산의 실험결과와 비교하여 수치계산의 예측성능의 향상을 시도하였다.

2. 수치모델

2.1 초기조건

와류노즐에서 분출되는 액막의 미립화 과정을 Fig. 1에 도식화하였다. 분무축 방향 속도, V_z 와 분출공에서 액막의 두께, h 는 Lefebvre⁶⁾가 제안한 준 실험식에 의하면 다음과 같다.

$$V_z = \sqrt{\frac{1-X}{1+X}} \sqrt{\frac{2(P_{inj} - P_a)}{\rho_l}} \quad (1)$$

$$h = \sqrt{\frac{1560 \mu_l \dot{m}_l}{d_o \rho_l (P_{inj} - P_a)} \frac{1+X}{(1-X)^2}} \quad (2)$$

여기서 $X = (1 - \frac{2h}{d_o})^2$,

P_{inj} 는 분사압력, P_a 는 분위기압력, μ_l 은 연료 점성계수, \dot{m}_l 은 질량유량, d_o 는 분출공 직경, ρ_l 은 연료밀도이다.

와류에 의한 액막의 원주방향속도를 고려하면 액막의 분출속도, $V_o = \frac{V_z}{\cos \theta}$ 이고 액막이 액적으로 분열하는 길이, L 은 Ren^3 의 실험에 의하면 다음과 같다.

$$L = 1.7 \left(\frac{\rho_l \sigma_l h \cos \theta}{\rho_g^2 V_o^2} \right)^{0.5} \quad (3)$$

여기서 σ_l 은 연료의 표면장력, ρ_g 는 분위기 밀도이다.

액막에서 분열된 액적의 평균직경, D_i 는 액막에 발생하는 교란파의 파장에 비례한다고 가정하고 Ren^3 의 실험상수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_i = 0.63 \left(\frac{24 \pi \sigma_l^2 h^*}{\rho_g^2 V_z^2 V_o^2 \sin^2 \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

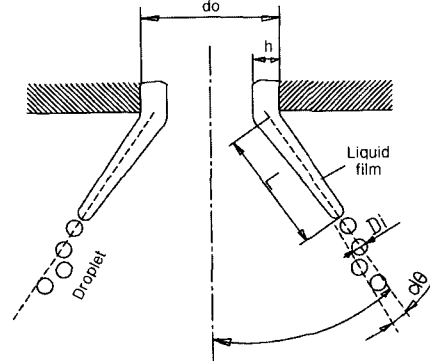


Fig. 1 Schematic diagram of a hollow cone spray

여기서 h^* 는 분열시의 액막의 두께로 액막속도가 일정하게 유지되고, 액막이 원추형으로 넓어지는 것을 고려하면 연속의 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h^* = \frac{(d_o - h) h}{d_o - h + 2 L \sin \theta} \quad (5)$$

위 식에서 θ 는 분무 원추각의 반각으로 실험에서 측정된 값을 사용한다. 또한 액적의 분출각도는 분무 두께각, $d\theta$ 의 범위에 무작위로 분포하는 것으로 가정한다.

2.2 수치계산

수치계산은 KIVA-II⁵⁾ 코드를 사용하였다. 액적 분열모델은 TAB 모델, 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 액적의 공기역학적 항력은 액적의 변형을 고려한 값을 사용하였다.

계산영역은 축대칭으로 가정하고 분무의 축 방향으로 140 mm, 반경방향으로 80 mm로 하였다. 계산 격자수는 계산결과에 영향을 미치지므로 실험과 비교하여 적절한 값을 도출하였다. 사용된 격자수는 축 방향 x 반경방향으로 50 x 50 개 이다. 분출공에서 분출하는 액막의 축 방향 속도는 전 분사기간에 걸쳐 일정하게 하였으며 분무각과 액적의 직경은 Fig. 2와 같이 가정하였다. 그림에서 초기분사기간 t_i 는 분사개시 후 분무각이 증가하여 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간으로 가시화 실험을 통하여 결정하였다.

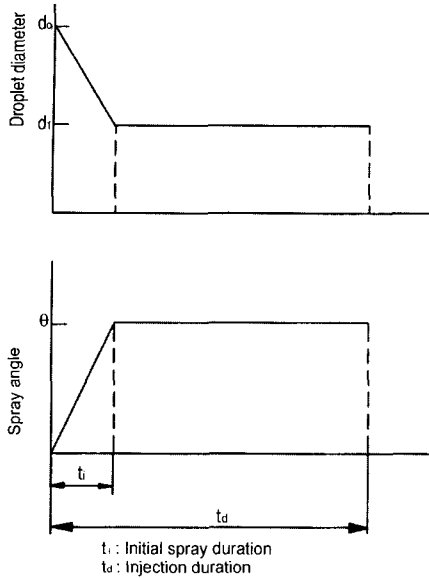


Fig. 2 Profiles of droplet diameter and spray angle

초기분사기간에 형성된 분무를 초기분무(core spray)로 이후의 증공원추형분무를 주분무(cone spray)로 정의한다. 초기분사기간에 분무각과 원주 방향 속도는 시간에 비례하여 증가하는 것으로 액적의 직경은 감소하는 것으로 가정하였다.

계산에 사용한 액적의 parcel 수는 3000개로 하였다. 분사압력이 30, 50, 70 기압의 3가지 조건에서 수치 계산하였으며 이 때의 사용한 초기 값을 Table 1에 나타내었다.

3. 분무 가시화 실험

3.1 실험장치

Fig. 3은 실험장치의 개략을 나타낸다. 광원으로 는 파장 532 nm, 출력 900 mJ/pulse의 Nd:YAG 레이저를 사용한다. 레이저 빔은 원통렌즈를 사용하여 두께 0.3 mm의 시트광으로 변환되어 분무의 수직 중심단면을 통과한다.

인젝터는 Mitsubishi B4 와류형으로 분출공 직경은 0.95 mm이다. 연료는 시판 가솔린으로 고압 질소가스로 가압하는 블래더형 어큐뮬레이터에서 가압된다. 분사시작 시점을 정확히 알기 위하여 직경 1.0 mm의 레이저빔을 노즐 분출공에 근접하여 통과시키고 분무에 의해 레이저광이 감쇄하는 것을

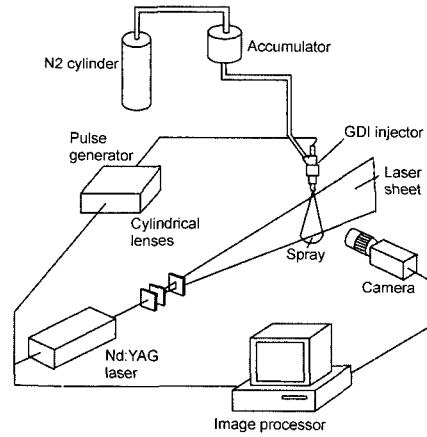


Fig. 3 Experimental setup

Table 1 Calculation conditions

	Case 1	Case 2	Case 3
Injection pressure, atm	30	50	70
Injection quantity, mg	27.1	29.3	29.9
Injection duration, sec	2.8	2.5	2.2
Spray cone angle, deg.	60	60	60
Injection velocity, m/s	62	74.4	83.4
Liquid film thickness, mm	0.137	0.12	0.11
Liquid film length, mm	0.8	0.63	0.53
Droplet SMD, μm	50.7	39.6	33.9

포토센서로 감지하여 센서의 출력이 하강하는 시점을 분사 시작점으로 판단한다.

분무사진은 시트광과 수직방향에서 Kodak ES-1 CCD카메라에 의해 촬영한다. 촬영은 액적의 산란 광법과 형광물질인 로다민 590을 100 ppm 용해한 연료로부터 나오는 형광을 촬영하는 방법을 사용한다.⁷⁾

3.2 실험조건 및 방법

연료는 상온 대기 중에 분사하였으며, 분사압력은 30, 50, 70 기압으로 하였다. 인젝터에 폭 2 ms의 구동신호를 주어 구동시켰으나 실제 분사기간은 분사압력에 따라 차이가 있어 30, 50, 70 기압에서 분사기간은 각각 2.8 ms, 2.5 ms, 2.2 ms 이며 이 때 분사량은 각각 27.1 mg, 29.3 mg, 29.9 mg 이다. 거시적 분무거동을 알기 위하여 액적의 산란법을 사용하였으며, 분출공 근처에서 초기 분무의 거동을 보다 자세히 파악하기 위하여 카메라의 배율을 높여 분출공

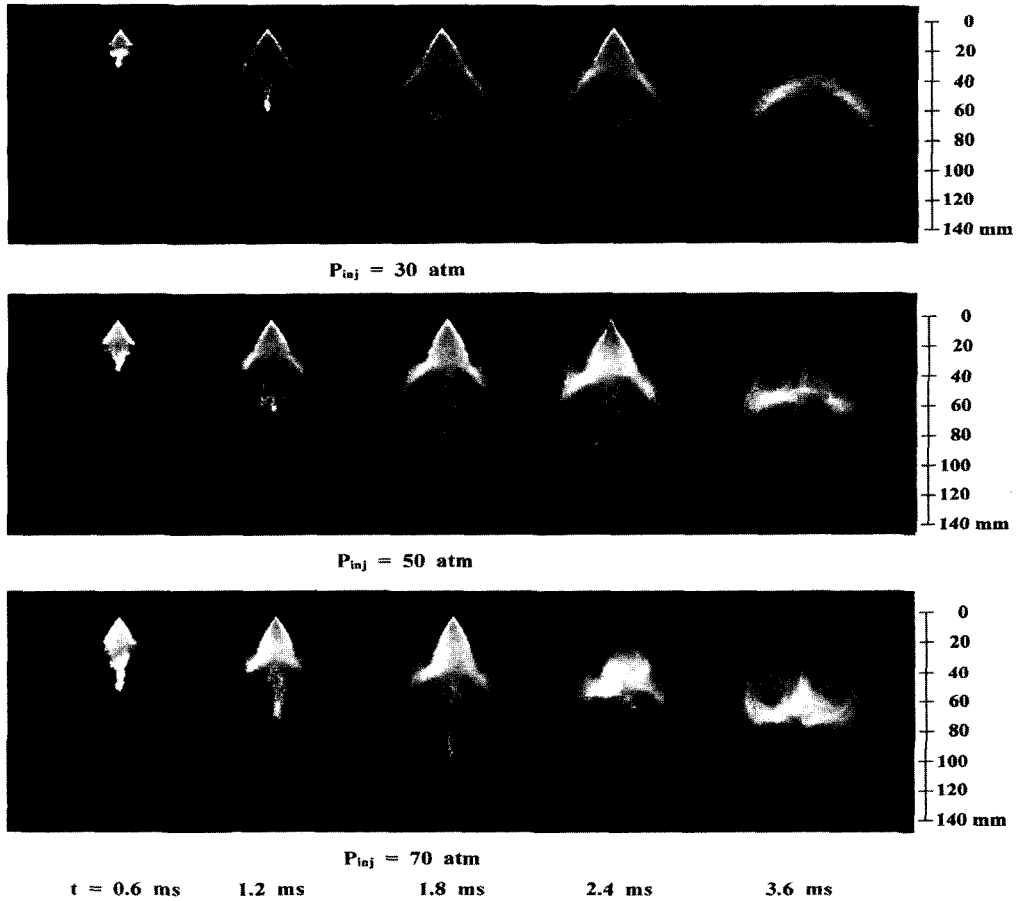


Fig. 4 Global spray images at various injection pressures and times after injection start

근처의 분무를 형광법을 사용하여 확대 촬영하였다. 형광법은 확대 촬영할 때 산란법에 비하여 다중 산란의 영향을 줄이는 효과가 있어 보다 명료한 화상을 얻을 수 있었다.⁷⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

Fig. 4는 전체분무를 압력을 변화시키면서 산란법을 이용하여 촬영한 사진이다. 분사초기에는 분사된 초기분무(core spray)가 완전히 확산되지 않아 뒤이은 주분무(cone spray)와 함께 마름모꼴을 이루고 있다. 또한 초기분무의 선단도달거리는 주분무보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 분사후반 또는 분사종료 후에는 분무에 의해 선단에 발생된 선단와류가 관찰된다. 와류의 영향으로 원추분무의 중간부

분이 중심축으로 휘고, 이 부근에 많은 액적이 분포한다. 이러한 경향은 분사압력이 높을수록 현저하다.

Fig. 5는 Fig. 4의 분무사진에서 실측한 분무각의 변화를 나타낸다. 분사초기에 일정기간동안 분무각이 증가하다가 이 후 거의 일정한 값을 유지한다. 분사종료 후에 분무각이 다시 다소 감소한다. 초기 분무각이 작은 이유는 노즐내부에서 연료의 와류가 발달하지 않았기 때문이고, 분사종료 후 분무각 감소는 노즐 근방에 발생한 공기의 와류유동의 영향 때문으로 생각된다. Fig. 6은 초기분무의 선단도달거리를 나타낸 것으로 분사압력이 증가함에 따라 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나 주분무의 선단도달거리는 Fig. 7에서와 같이 분사압력 영향을 거의 받지 않는다. 이러한 경향은 $Ren^3)$ 의 실험결과와도

잘 일치한다.

Fig. 8은 초기분무의 거동을 보다 자세히 관찰하기 위하여 분출 공에서 하류로 20 mm의 영역을 확대하여 촬영한 분무사진이다. 분사초기에는 연료가 거의 수직방향으로 분사되고 반경방향으로도 거의 균일하게 분사되어 원통형 분무를 하고 있다. 그러나 분사시작 후 0.3 ms 이후에 분무는 거의 중공원추형으로 분출되고 있고 분무각은 거의 일정하다.

Fig. 9는 Fig. 8의 분무사진에서 실측한 분무각을 나타낸 것이다. 초기분무 기간동안 분무각은 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 초기분사시간은 압력에 상관없이 대략 0.3 ms 정도이다. 이러한 결과로부터 수치계산에서 분사압력에 상관없이 Fig. 2의 초기분사시간, t_i 는 0.3 ms로 분무각, 2θ 는 60° 로 하였다.

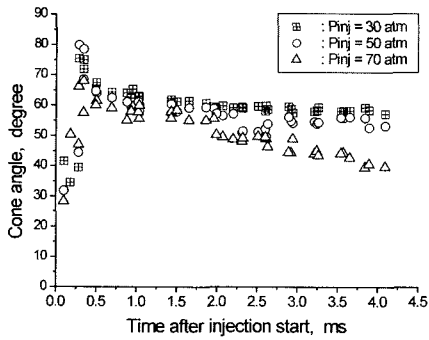


Fig. 5 Spray cone angle at various injection pressures (Experiment)

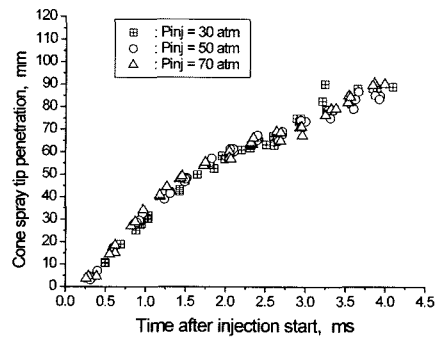


Fig. 7 Cone spray penetration at various injection pressures (Experiment)

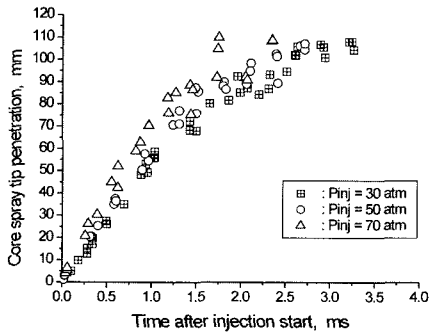


Fig. 6 Core spray tip penetration at various injection pressures (Experiment)

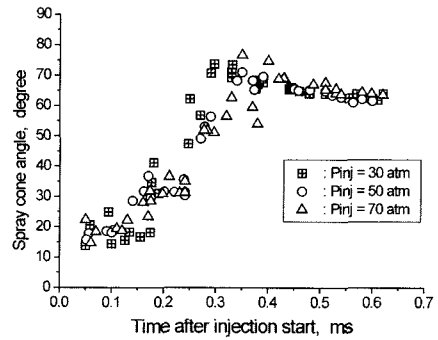


Fig. 9 Variation of spray cone angle at various injection pressures

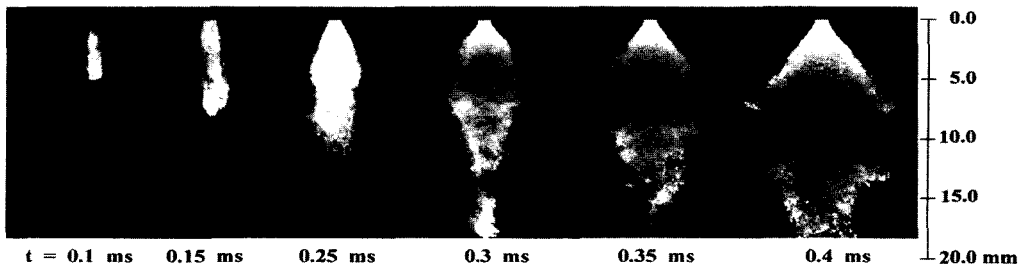


Fig. 8 Local initial spray images at various times after injection start. Injection pressure is 50 atm

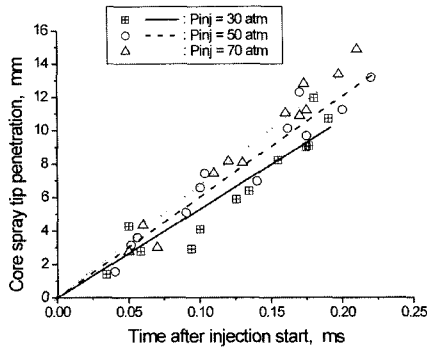


Fig. 10 Variation of initial spray tip penetration at various injection pressures

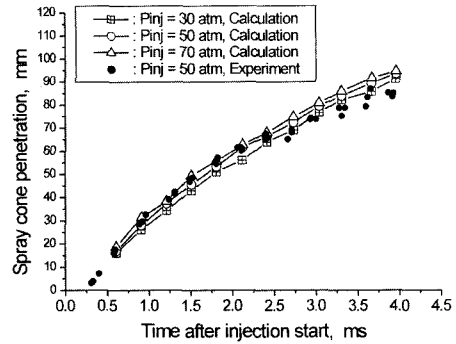


Fig. 12 Comparison of spray cone penetration at various injection pressures

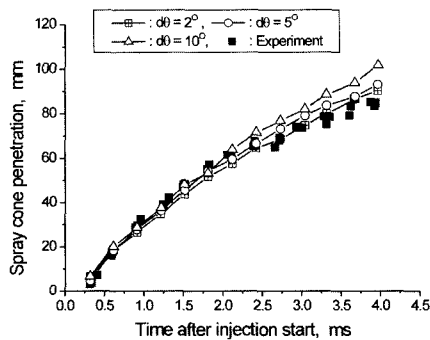


Fig. 11 Variation of spray cone penetration by spray thickness angle, $d\theta$. Injection pressure is 50 atm

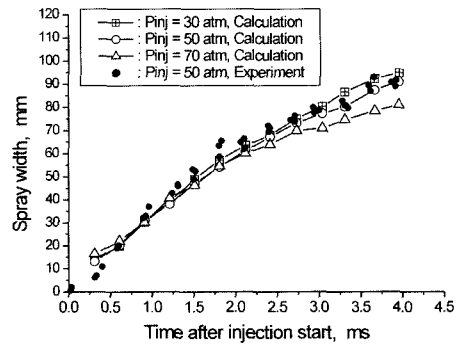


Fig. 13 Comparison of spray width at various injection pressures

Fig. 10은 초기분무의 선단도달거리를 실측한 것으로 분사 후 시간에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 직선의 기울기로 구한 분사압력 30, 50, 70기압에서 연료 평균 분출속도는 각각 53, 60.3, 67.3 m/s로 식 (1)을 사용하여 계산된 분출속도, V_z 의 값인 53.4, 64.4, 72.2 m/s와 비교적 잘 일치하고 있다.

4.2 수치모델 계산결과

수치계산으로 실험에서 확인이 곤란한 증공원추형 분무의 두께각, $d\theta$ 를 변화시켜 계산을 수행하여 $d\theta$ 의 영향을 조사하였다. Fig. 11은 $d\theta$ 를 10°, 5°, 2°로 변화시켜 분사압력 50 기압에서 수치 계산한 주분무의 선단도달거리의 결과와 실험결과를 비교한 그림이다. $d\theta$ 가 10°일 경우 분사 후반부에 주분무 선단도달거리를 과도하게 예측하나 5°와 2°일 때 실험 값에 근접함을 알 수 있다. 따라서 $d\theta$ 는 5°로 하였다.

Fig. 12는 수치 계산한 주분무의 선단도달거리를 실험과 비교한 그림이다. 계산된 선단도달거리는 분사압력의 영향을 거의 받지 않는 경향을 보이는데 이는 Fig. 7의 실험결과와 잘 일치한다. 또한 분사압력 50 기압에서 계산된 선단도달거리의 값은 실험값과 잘 일치한다.

Fig. 13은 계산한 분무 폭을 실험과 비교한 그림이다. 분사종료 근처에서 계산결과는 실험에 비해 다소 작으나, 나머지 구간에서는 실험과 잘 일치하고 있다. 이상의 결과로 수치모델이 분무의 거시적 확산을 잘 예측함을 알 수 있다.

Fig. 14는 분사압력이 50 기압에서 분무의 형상을 수치 계산한 결과이다. Fig. 4의 실험결과와 비교하면 분사초기의 마름모형의 분무를 잘 나타내고 있다. 또한 분사중반에 선단와류에 의해 분무선단이 바깥쪽으로 벌어지는 현상도 잘 나타내고 있다. Fig. 4의 분무사진에서 분사가 거의 종료되는 시점

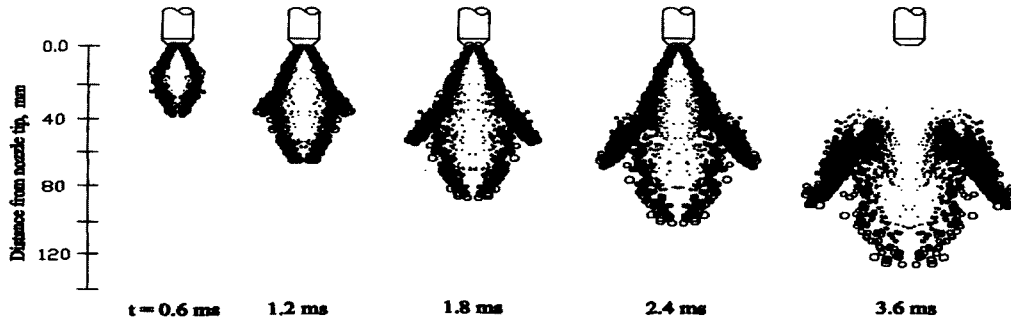


Fig. 14 Calculated sprays at various times after injection start. Injection pressure is 50 atm

인 t 가 2.4 ms에서 주분무 선단 중심축에 액적이 상당히 분포하지만 계산결과에는 나타나지 않는다. 주분무 선단의 중심축상의 액적은 이보다 상부에는 거의 없으므로 노즐에서 직접 이 방향으로 분사된 액적이 아님을 알 수 있다. 이러한 추론은 가시화 실험에서도 분사종료 시까지 분무각은 거의 변하지 않는 것으로도 확인할 수 있다. 따라서 이는 액적의 분열이나 충돌 시 중심축 방향으로 속도를 갖게된 액적이 이동하여 생긴 현상으로 생각된다. 수치계산에 사용한 액적분열과 충돌모델이 이러한 분무 내부의 현상을 잘 묘사하지 못하는 것으로 생각되며 이에 대해 향후에 보다 세밀한 검토가 필요하다.

4. 결론

GDI용 와류노즐의 분무의 거동을 레이저 시트광 가시화법을 이용하여 측정하였다. 측정결과를 토대로 DDM 수치계산에 필요한 초기조건을 예측하는 모델을 제시하였다. 이를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 와류노즐에서 생기는 중공원추형 분무의 거동은 측정이 용이한 분무각을 이용하면, 에너지와 운동량 보존식에 근거한 준 실험식을 사용하여 예측할 수 있다.
- 2) 분사 시작 후 분무각이 선형적으로 증가하는 기간이 있고, 이 기간에 분사된 초기분무는 이후에 형성된 중공원추형 주분무와 다른 거동을 보인다.
- 3) 분사압력이 증가하면 초기분무의 선단도달거리는 증가하지만, 주 분무의 선단도달거리와 분무각, 분무 폭에는 거의 영향을 미치지 않는다.
- 4) 분사 후기에 분무선단에서 와류의 영향으로

분무가 중심축으로 이동하는 등 확산이 촉진된다. 수치계산 결과에서도 이러한 선단와류를 확인할 수 있었으나, 와류의 영향으로 분무가 분무 중심축으로 이동하는 결과는 나타나지 않았다.

후 기

이 논문은 2002년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) M. Takagi, Y. Moriyoshi, "Numerical Analysis of a Hollow-Cone Spray Using a Swirl-Type Injector", Transactions of JSME, Vol.67, No.657, pp.1289-1294, 2001.
- 2) Y. Moriyoshi, M. Takahashi, H. Xiao, "Development of a Spray Model for Swirl-Type Gasoline DI Injectors", Proceedings of Busan Engine Int. Symposium 2001, pp.235-241, 2001.
- 3) W. M. Ren, J. F. Nally Jr., "Computations of Hollow-Cone Sprays from a Pressure-Swirl Injector", SAE 982610, 1998.
- 4) Y. Moriyoshi, M. Takahashi, H. Xiao, "Analysis of Mixture Formation Process with a Swirl-Type Injector", SAE 2000-01-2057, 2000.
- 5) A. A. Amsden, "KIVA-II : A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", LA-11560-MS, UC-96, 1989.
- 6) A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Co., 1989.
- 7) Y. H. Won, C. R. Lim, "Impinging Atomization of Intermittent Gasoline Sprays", Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.174-181, 1998.