

분위기 조건이 직접 분사식 가솔린 분무의 발달 과정 및 미립화 특성에 미치는 영향

Effect of ambient conditions on the spray development and atomization characteristics of a gasoline spray injected through a direct injection system

하성용*

S. Y. Ha

ABSTRACT

This paper presents the effects of ambient pressure on atomization characteristics of high-pressure injector in a direct injection gasoline engine both experimentally and numerically. The atomization characteristics such as mean droplet size, mean velocity, and velocity distribution were measured by phase Doppler particle analyzer. The spray development, spray penetration, and global spray structure were visualized using a shadowgraph technique.

In order to investigate the atomization process numerically, the LISA-DDB hybrid model was utilized. This breakup model assumes that the primary breakup occurs when the amplitude of the unstable waves is equal to the radius of the ligament of liquid sheet near the nozzle and the droplet deformation induces the secondary breakup.

The results provide the effect of ambient pressure on the macroscopic and microscopic behaviors such as spray development, spray penetration, mean droplet size, and mean velocity distribution. It is also revealed that the accuracy of prediction of LISA-DDB hybrid model is pretty good in terms of spray developing process, spray tip penetration, and SMD distribution.

주요기술용어(Key Words): Gasoline Direct Injector (직분 가솔린 인젝터), Spray Development (분무 발달), Sauter Mean Diameter (Sauter 평균 입경)

t_{asoi} : time after start of injection

기호설명

L : axial distance from nozzle tip

P_{amb} : ambient pressure

P_{inj} : injection pressure

1. 서론

최근 자동차 배출 가스를 비롯한 각종 오염 물질에 의한 지구 환경 문제가 심각하게 대두되면서 지구 온난화의 원인 물질인 이산화탄소의 배출 억제와 배기 가스에 의한 환경 오염이

* 신홍대학 자동차과

심각한 문제로 되고 있다.

이러한 문제점을 해소하기 위하여 연료를 연소실 내로 직접 분사하는 직접 분사식 가솔린 엔진에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우에는 연소실 내에 연료를 직접 분사하므로 손실이 저하되고, 벽면 젖음 현상이 감소되어, 포트 분사식에 비하여 정확한 연료 공급 제어가 가능하며 약 30% 정도의 연료 소비율을 개선할 수 있으며, 실린더 내에서 연료가 기화할 때 생기는 연료의 기화 잠열에 의한 흡기의 냉각 효과가 커서 압축비를 높일 수 있으므로 열효율과 체적효율이 향상된다.

가솔린 직접 분사 엔진의 장점을 최대화 시키기 위해서는 상대적으로 짧은 연료-공기의 혼합 시간 동안 양호한 혼합기를 형성 시키는 기술이 핵심이다. 이러한 관점에서 가솔린 기관의 분무 특성과 미립화에 관하여 Zhao⁽¹⁾ ~⁽²⁾, Dodge⁽³⁾, Shelby⁽⁴⁾, Lawrence⁽⁵⁾ 등 여러 연구자들의 실험적 연구가 보고되고 있다.

이와 같은 실험적 연구와 더불어 해석적인 연구도 활발히 진행되고 있다. O'Rourke와 Amsden은 TAB (Taylor Analogy Breakup) 모델⁽⁶⁾을 제안하여 KIVA 코드에 적용하였으며, Ibrahim⁽⁷⁾은 기존의 TAB 모델에 비선형 효과를 추가하여 DDB (Drop Deformation and Breakup) 모델을 제시하였다. 이러한 액적 변형에 토대를 둔 모델 외에도 Reitz⁽⁸⁾, Bellman과 Pennington⁽⁹⁾은 파동 불안정성에 기반한 액적 분열 모델을 제시하였다.

액적 분열 과정은 액적이 액주나 액막으로부터 분리되는 1차 분열과 분리된 액적이 다시 작은 액적으로 쪼개어지는 2차 분열 과정으로 구성된다. 따라서 이러한 액적 분열 이론에 근거하여 미립화 과정을 모사하기 위해서는 1, 2차 분열에 각각 다른 모델을 적용하는 복합 모델이 필요하다. Su 등⁽¹⁰⁾은 WAVE 모델과 RT 모델을 조합하여 KH-RT 복합 모델을 제안하였으며, 김 등은 여러 복합 모델들의 예측 정확성을 평가하였다. Park 등⁽¹¹⁾은 1차 분열에 LISA (Linearized Instability Sheet Atomization) 모델을 적용하고 2차 분열에

DDB 모델을 적용하는 LISA-DDB 모델을 적용하여 실험치에 근접한 결과를 얻었다.

본 연구에서는 고압 챔버내서 분위기 압력의 변화에 따른 연료 분무의 발달 과정을 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템과 새도그래프 법을 이용하여 실험적으로 분석하고, KIVA-3 코드와 LISA-DDB 복합 모델을 이용하여 해석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 PDPA 시스템

액적의 입경분포를 분석하기 위하여 PDPA 시스템과 연료 공급 장치를 구성하였다. 연료 공급 및 고압 분사 시스템은 연료 탱크, 고압 펌프, 압력 조정기와 인젝터로 구성되며, 연료 고압 펌프는 0.75 kW AC전동기로 구동하였다. 연료 분사량은 인젝터 드라이버의 제어에 의하여 이루어졌다. PDPA 장치의 광원은 Ar-ion 레이저(출력 : 1.5W)를 사용하였으며 레이저 빔은 40MHz의 주파수 시프트를 가지는 각각 2개 시프트 빔과 언시프트 빔으로 나누어지고, 4개의 빔이 광케이블을 통하여 전송부(transmitter)에 공급되면 빔이 교차하는 지점에 간격이 일정하고, 빛의 명암이 교차하는 프린지로 이루어진 측정 체적이 형성된다. 연료 입자가 측정 체적을 통과하면 측정 체적에 대향하고 있는 검출부(detector)에 주기적으로 명암이 교차하는 산란광이 검출되고, 검출되는 도플러 주파수는 입자의 방향에 관계없이 측정 체적을 통과하는 입자의 속도 성분중 프린지와 직각 방향의 속도 방향에 비례하므로, 입자의 속도에 대응하는 주파수 변화를 통해 입자 속도를 구할 수 있다. 이 때 속도의 방향은 Bragg cell을 통과하는 두 입사광의 주파수를 40MHz만큼 편이시킴으로써 프린지가 일정한 방향으로 일정한 속도로 움직이게 하여 입자의 이동 방향을 판별할 수 있다. 그리고 3개의 검출부에서 검출되는 도플러 신호의 주파수는 동일하지만 각각의 검출부에서 프린지 패턴에 대한 상대 위치가 다르므로 측정되는 위상이 달라지며, 위상차는 입자의 직경에 비례하고, 360°를 초과함으로써 발생하는 문제는 3개의 검출

부를 사용함으로써 해결한다. 검출되는 신호는 광변환 증폭기(photo-multiplier)로 전달되어 전기적 신호로 변환되어 신호 처리계를 통하여 실시간으로 연료 액적의 평균 지름과 속도를 구한다.

Fig. 1은 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 PDPA시스템의 구성을 도시한 것이다. 이 장치에서 광원은 Ar-ion 레이저(출력 : 1.5 W)를 사용하였으며 레이저 빔은 40MHz의 주파수를 가지고 있다.

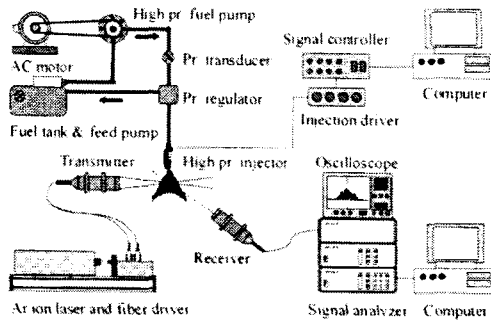


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 분무 가시화 장치

연료의 분무 거동 및 분열 과정을 가시화하고 분무의 관통도 및 분사가 같은 분무 구조를 파악하기 위하여 연료 분사 시스템 및 분무 측정 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다.

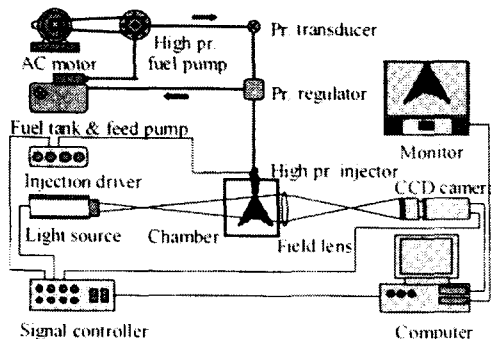


Fig. 2 Schematic diagram of gasoline injection and spray visualization system

가솔린 분무의 발달과정은 새도그래프법을 이용하여 분무 형태, 분무 선단의 도달 거리,

분무 폭 등을 가시화하였다.

가시화된 가솔린 분무 거동을 분석하기 위한 화상의 취득은 CCD 카메라로부터 얻어진 분무 화상을 이미지 그래버를 통하여 컴퓨터에 저장하고, 이들 이미지 데이터로부터 분무 발달 과정과 분무 도달 거리, 분무 폭 등의 거시적 특성을 취득하였다.

2.3 실험 방법

분무실 내의 압력 및 온도의 변화에 따른 분무 특성 및 미립화 특성을 알아보기 위하여 연료의 분사 기간을 5msec로 하고 분사 압력을 5MPa로 하여 실험을 수행하였다. 분무실 내의 기체의 압력은 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0 MPa의 6단계로 변화시키면서 분무의 발달 과정을 가시화 하였다. 또한 분무의 입경 분포는 대기압 하에서 연료 분사 압력 5MPa에서 수행하였으며 축 방향거리 20mm와 40mm에서 반경 반향으로 2mm간격으로 측정하였다. 인젝터의 신호와 PDPA 시스템의 신호 처리계를 동기하여 분사신호가 나올 때 마다 신호처리계의 측정시간이 0으로 되면서 분사시간에 따른 속도와 입경을 측정하였다.

실험에 사용된 노즐은 단공 압력 분무 스텔형 인젝터를 사용하였고, 노즐 출구 지름은 1.0mm이고, 연료의 밀도는 680.3kg/m³이고, 점성 계수는 0.00029Ns/m²이다.

3. 분열 모델 및 해석 방법

Fig. 3은 직분식 가솔린 엔진의 분무 미립화 및 증발 과정 해석에 적용된 LISA-DDB 복합 모델의 개념을 도시한 것이다. 분무가 인젝터에서 분사된 후 액막 분열 거리에 도달하게 되면 LISA 모델에 의해 1차 분열이 일어난다. 그 후 DDB 모델에 의해 2차 분열이 일어나는 것으로 가정하였다.

1차 분열을 계산하기 위하여 사용된 LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 모델은 액막 불안정성 이론에 기초하여 Schmidt등⁽¹²⁾이 제안한 모델이다. 이 LISA 모델은 세부적으로는 3단계의 과정으로

나뉘어 지며 아래의 Fig. 4에서 보여지는 것처럼 박막형성, 액막분열, 미립화 과정으로 이루어진다.

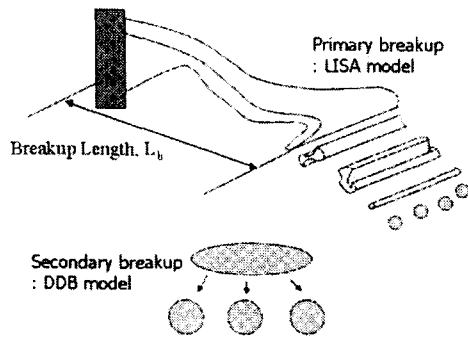


Fig. 3 The concept of LISA-DDB hybrid model

1차 분열에 의해 형성된 액적이 더 작은 액적으로 분열되는 2차 분열은 DDB(Droplet Deformation and Breakup)을 적용하여 계산하였다. KIVA 코드의 분열 모델인 TAB 모델⁽⁶⁾은 선형 모델로 알려져 있다. 그러나 액적의 변형이 큰 경우에는 비선형이 된다. 이런 점을 보완하기 위하여 Ibrahim은 TAB 모델에서 고려하지 않았던 비선형 효과를 고려하여 DDB 모델⁽⁷⁾을 제안하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분위기 압력이 연료 분무의 발달 과정에 미치는 영향

Fig. 4는 색도 그래프법 분무 가시화 장치와 LISA-DDB 복합 모델을 사용하여 구한 결과이다. 분사 압력의 변화와 주위 기체 압력의 변화에 따른 분무 형태를 관찰하기 위하여 분사 기간이 5msec인 경우에 연료를 5MPa의 분사 압력으로, 주위 기체의 압력은 0.1MPa, 0.4MPa, 0.8MPa, 및 1.0MPa 로 변화시키면서 분사 후 0.8msec의 시간 간격으로 실험을 수행하였다. 실험 결과 사진에서 볼 수 있듯이 증공와류형 분무가 주위 기체의 압력 변화에 따라 와류의 폭이 줄어들고 주위 기체의 항력 증가에 의해 분무 폭 및 분무 도달 거리가 줄어드는 경향을

나타내었다. 반면 해석 결과에서는 대기압 하에서는 와류가 나타나지 않았으나 분위기 압력이 증가함에 따라 와류의 강도가 커졌다. 그리고 그림에서 관찰 되듯이 실험 결과와 해석 결과 모두 분위기 압력이 증가할수록 주분류가 인젝터 축 방향으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 이런 경향이 나타나는 이유는 분위기 압력의 증가에 의해 축방향에 운동량에 비해 상대적으로 적은 운동량을 가지는 반경 방향 운동량이 빨리 소멸되기 때문인 것으로 판단된다.

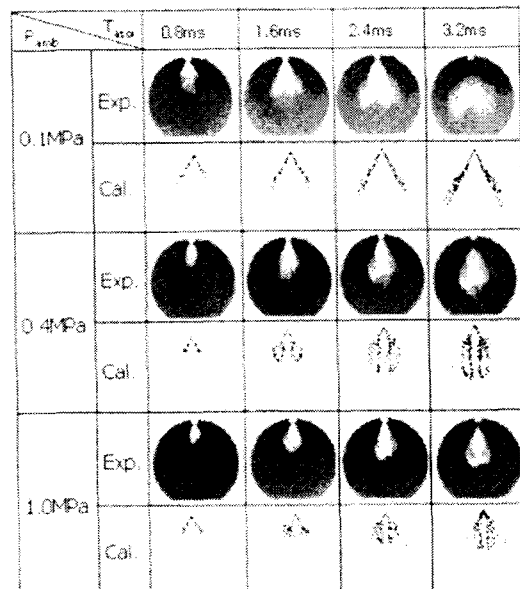


Fig. 4 Effect of ambient pressure on spray behavior (P_{inj}=5MPa, T_{inj}=5ms)

Fig. 5는 주변 기체의 압력 변화에 의한 분무 선단의 도달 거리 변화를 나타낸 것이다. 분위기 압력이 대기압인 경우에는 실험 결과와 계산 결과가 비교적 잘 일치 하였으나 분위기 압력이 상대적으로 큰 경우에는 계산 결과가 실험 결과보다 다소 낮게 나타났다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 분위기 압력의 증가에 의한 항력의 증가가 실제보다 크게 예측되기 때문으로 판단된다. 그리고 실험 결과와 해석 결과 모두 시간에 대해 거의 선형적으로 분무 선단 도달 거리가 증가하였다. 이는 일반적으로 분무 선단의 도달 거리가 분사 기간 내에서는 선형적으로 증가하다가 분사가 끝난 후 일

정한 범위에서 수렴하는 경향과 잘 일치한다.

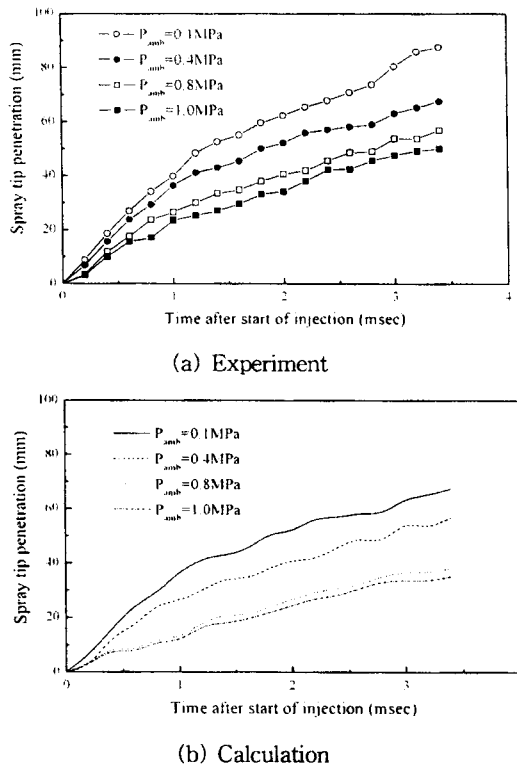


Fig. 5 Effect of ambient pressure on spray tip penetration at 5MPa of injection pressure

4.2 분위기 압력이 연료 분무의 미립화 특성에 미치는 영향

분무의 미세적인 미립화 특성인 분무의 입경을 인젝터 노즐 팁으로부터 20, 40mm 지점에서 반경 반향으로 2mm 간격으로 측정하였다. 실험은 PDPA 실험 장치를 이용하여 20000개의 샘플을 채취하여 평균 입경, 속도 등을 구하여 측정치로 하였다. 또한 인젝터로 들어가는 분사 신호를 신호처리계와 동기시켜 분사 시간에 대한 데이터 처리를 수행하였다.

KIVA 코드의 계산 결과를 PDPA 실험 결과와 비교하기 위해서는 데이터의 후 처리가 필요하다. 본 연구에서는 PDPA의 원리와 같이 일정한 영역을 지나는 액적들의 입경, 속도 등을 그 지점의 계산 결과에 포함하였다. 정확한 비교를 위해서는 계산에 포함할 면적을 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 계산 기간

동안 액적의 패적이 L=20mm 또는 40mm를 중심으로 하고 반경 0.1mm인 원을 지난다면 그 액적의 입경, 속도 같은 물성치는 그 점의 계산 결과에 포함된다. 따라서 영역의 크기를 설정에 따라 계산 결과가 달라지게 된다. 반경이 0.1mm인 경우 축 방향에서 전체 액적의 5~7%정도가 각 점의 계산 결과에 포함되었다.

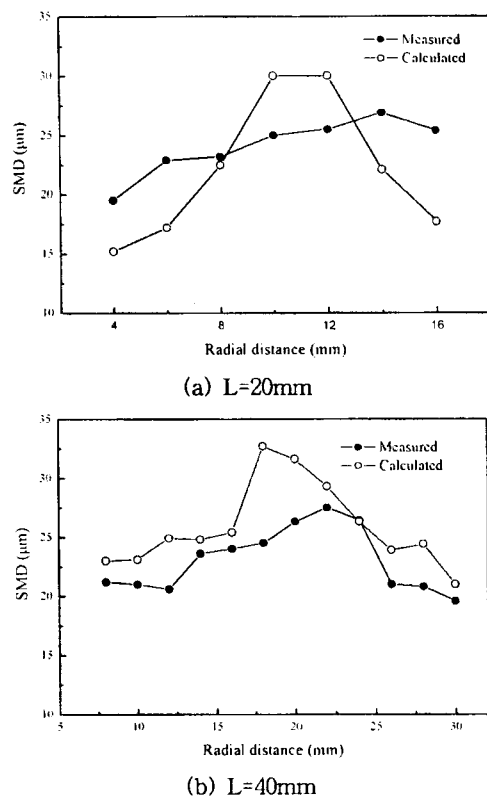


Fig. 6 SMD distribution according to axial distance ($P_{inj}=5MPa$, $P_{amb}=0.1MPa$)

Fig. 6는 분사 압력 5MPa, 축방향 거리 20mm와 40mm 지점에서 반경 방향에 따른 SMD 분포를 나타낸 그림이다. SMD의 평균 분포는 실험 결과와 해석 결과가 비슷하였다. 그림의 축방향 거리 20mm 실험 결과에서 나타난 바와 같이 SMD 반경 방향이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나 계산 결과에서는 주분류가 지나는 지점까지는 SMD가 증가하였으나 그 이후에는 감소하였다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 분무 주분류에서 분리되어 나온 액적들이 주분류의 내측과 외

측에 많이 분포하기 때문인 것으로 판단된다. 축 방향 거리 40mm 지점에서는 SMD의 크기가 20mm인 경우보다 다소 증가하는 경향이 해석 결과에서 나타났다. 이는 축방향 거리 20mm와 40mm 지점 사이에서 합착이 다소 과대하게 예측되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 축 방향 거리 20mm 지점 상류에서 액적 분열이 빈번하게 일어나고, 20mm 와 40mm 사이에서는 합착이 다소 우세하게 예측된다고 할 수 있다.

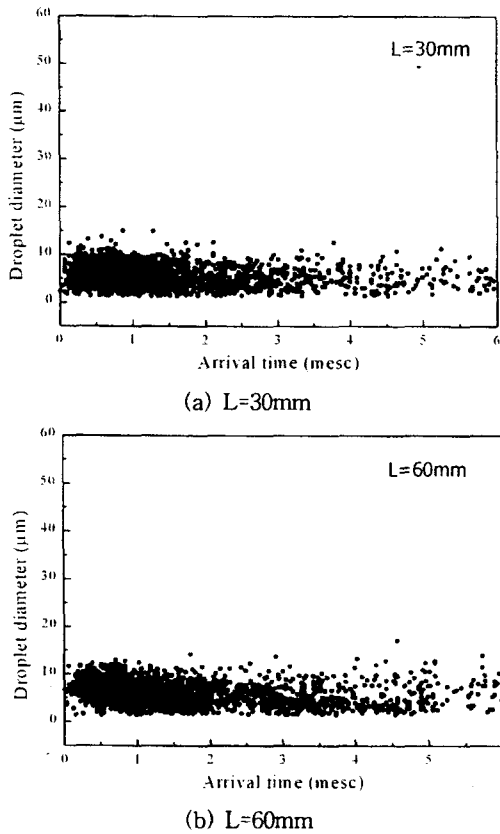


Fig. 7 The droplet diameter as a function of arrival time ($P_{inj} = 5MPa$)

Fig. 7은 분사압력 5MPa에서의 분사후 도달 시간과 SMD와의 상관 관계를 나타낸 실험 결과이다. 거의 모든 지점에서는 $10\mu m$ 이하의 액적들이 주로 분포 하였으며, 경향 또한 거의 변화가 없었다. 도달 시간이 짧을수록 액적의 빈도가 컸으며, 시간이 흐름에 따라 그 빈도가 줄어들었다.

Fig. 8은 분사후 시간의 흐름에 따라 전체 액적의 SMD 변화를 계산하여 나타낸 그래프이다. 분사후 전체 SMD는 급격히 줄어들었으며, 시간의 흐름에 따라 $19\mu m$ 정도에서 수렴하였다. 분사 후 1msec 지점까지 SMD가 급격히 감소하였으며, 1msec 이후에는 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

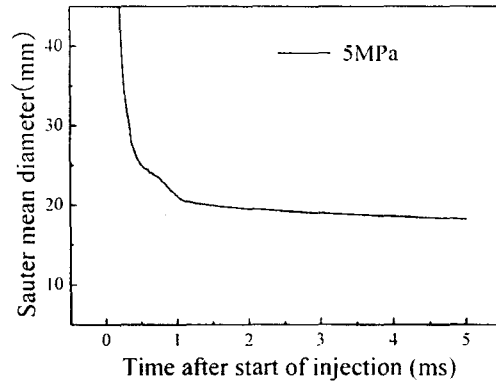


Fig. 8 Overall calculated SMD according to time after start of injection

5. 결론

직접 분사식 가솔린 기관에 적용되는 고압 연료 인젝터로부터 분사되는 분무 거동 및 분무 미립화 특성에 미치는 분무실의 압력 조건 및 분사 조건의 영향을 분무 가시화와 분무 측정 시스템을 이용하여 실험적으로 분석하였다. 그리고 KIVA-3코드와 LISA-DDB 복합 모델을 적용하여 얻은 결과를 실험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) LISA-DDB 모델에 의해 예측된 분무 발달 과정, 분무 선단 도달 거리, SMD 분포 등의 결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.
- (2) 분위기 압력이 증가 할수록 중공와류형 분무가 주위 기체의 압력 변화에 따라 와류의 폭이 줄어들고 주위 기체의 항력 증가에 의해 분무 폭 및 분무 도달 거리가 줄어드는 경향을 나타내었다
- (3) 분위기 온도의 증가는 분무실 내의 온도 조건의 변화는 분무 거동, 즉 분무 도달 거리 및 분무 발달 과정의 변화에는 그다지 큰 영향을

을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(4) 축방향 거리 20mm 실험 결과에서 나타난 바와 같이 SMD 반경 방향이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나 계산 결과에서는 구분류가 지나는 지점까지는 SMD가 증가하였으나 그 이후에는 감소하였다.

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 Engines, SAE Paper 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 Paper 961925.

(3) Dodge, L. G., 1996, Fuel Preparation requirements for direct-injection spark ignition Engine, SAE paper 962015.

(4) Shelby, M. H., VanDerWege, B. A, and Hochgreb, S., 1998, Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engine", SAE Paper 980160

(5) Laurence W. Evers., 1994, Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector, SAE Paper 940188

(6) O'Rouker, P. J. and Amsden, A. A., 1987, The TAB method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE Paper 872098

(7) Ibrahim, E. A., Yang, H. Q. and Przekwas, A. J., 1993, Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup, AIAA J. Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, pp. 652-654

(8) Reitz, R. D., 1987, Modeling Atomization Processes in High-Pressure Fuel Sprays, Atomization and Spray Technology, Vol. 3,

pp. 309-337

(9) Bellman, R. and Pennington, R. H., 1954, "Effects of Surface Tension and Viscosity on Taylor Instability," Quarterly of Applied Mechanics Vol.12, pp151~162

(10) T.F. Su, M.A. Patterson, R.D. Reitz, and P.V. Farrel, 1996, Experimental and Numerical studies of high pressure multiple injection sprays, SAE Paper 960861

(11) Sung Wook Park, Hyung Jun Kim, and Chang Sik Lee, An Experimental and Numerical Study on Atomization Characteristics of Gasoline Injector for Direct Injection Engine, 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, pp. 47-51

(12) Schmidt, D.P., Nouar, I., Senecal, P.K., Rutland, J.K., and Reitz, R.D., Pressure-Swirl Atomization in the Near Field, SAE paper, 1999-01-0496