

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0107

## 스웰형 가솔린 직분식 인젝터의 분무특성에 대한 수치적 연구

### A Numerical Study on the Spray Characteristics of the Swirl-Type Gasoline Direct Injector

이 충 훈\*, 정 수 진\*, 김 우 승\*\*, 이 기 형\*\*, 배 재 일\*\*\*  
Choong-Hoon Lee, Soo-Jin Jeong, Woo-Seung Kim, Ki-Hyung Lee, Jae-Il Bae

#### ABSTRACT

In this study, the characteristics of high-pressure swirl injector have been studied using a commercial CFD code, STAR-CD and experiment to investigate the effect of the length of orifice and swirl port on the spray characteristics. Influences of swirl port angle and initial conditions have also been examined in terms of penetration depth and Sauter's mean diameter. Computed results of the spray characteristics are compared with experimental results. The results show that the tangential velocity at the nozzle exit decreases, but the axial velocity increases as swirl port angle is increased. Hence, the static flow rate increases, but the initial spray angle decreases with increasing the swirl port angle. It is also shown that the values of the initial SMD used as input data for spray simulation influences the penetration depth and SMD. The spray pattern from the present numerical simulation agrees well with experimental result.

주요기술용어 : High pressure swirl injector(고압 스웰 인젝터), Gasoline direct injection(GDI, 가솔린 직분사), Static flow rate(정적유량), Sauter mean diameter(SMD, Sauter 평균입경)

#### Nomenclature

$D_o$  : orifice diameter  
 $F$  : intensity of the measured light signal  
 $L$  : axial length of orifice  
 $m$  : mass, kg

$P_a$  : air pressure, Pa  
 $P_f$  : fuel pressure, Pa  
 $q_m$  : mass flow rate, kg/s  
 $S$  : general source term  
 $\theta_T$  : theoretical spray cone angle, degree  
 $\phi$  : general dependent variable

\* 회원, 한양대학교 대학원  
\*\* 회원, 한양대학교 기계공학과  
\*\*\* KEFICO(주)

#### Subscripts

c : continuous phase  
d : dispersed phase

## 1. 서론

최근 CO<sub>2</sub>에 의한 지구온난화 문제의 대책 기술로써 기술된 직분식(GDI) 엔진에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이미 일부 차량에는 탑재되어 상용화되고 있다.<sup>1)</sup> GDI 엔진은 냉시동시나 고부하 운전시에는 연료를 흡입과정중에 분사하여 이른 공연비 수준의 균일혼합기를 이용하고, 저부하 운전시에는 압축과정 중에 분사하여 점화플러그 주위에 층상화된 혼합기를 조성하여 초회박운전을 실현하고 있다. 이런 요구를 만족시키기 위하여 연료분무는 매우 작은 액적이어야 하며, 액적이 증발할 시간이 매우 짧은 후기분사에서 특히 연료의 미립화가 중요하다.

GDI 엔진의 개발을 위한 우선적인 과제는 미립화 증진 및 벽충돌을 최소화하기 위해 분사특성 파악을 통한 인젝터 사양 및 분사압력의 결정이며, 충돌분무와 설치성 등을 반영한 인젝터의 최적위치 선정, 피스톤 형상의 결정과 넓은 운전속도영역에서 충돌된 분무를 안정하게 점화플러그 주위로 전달하여 화염 성장의 변화가 적도록 유동장을 최적화시키는 것이 중요하다.<sup>2,3)</sup> 고압스웰 인젝터의 개발로 인해 연료를 효과적으로 미립화하는 것이 가능해졌으나 GDI 엔진에 맞도록 최적화시키기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하다. 그러나, 실험을 통하여 인젝터 형상을 최적화하기 위하여는 많은 시간과 비용이 요구되는 실정이다.

이에 대한 대응책으로 90년대 이후부터 컴퓨터의 급속한 발달로 간단한 형상의 저압 MPI용 인젝터 노즐의 내부유동을 수치적으로 해석하려는 시도가 활발히 이루어졌다.<sup>4,5)</sup> 또한, 고압스웰 인젝터에 대한 수치해석적인 연구가 여러 연구자들에 의해 이루어지고 있다.<sup>6-9)</sup> 이러한 수치적 계산에 의한 인젝터 내부유동의 해석결과는 분무해석의 초기조건으로 사용되며 인젝터 출구에서의 유동해석의 결과는 분무특성을 결정하는 자료로 활용될 수 있다.

그러나, 고압스웰 인젝터의 내부유동과 분무

특성의 관계에 대해서는 아직 명확하게 알려져 있지 않으며 분무해석에 필요한 수치적, 실험적 연구결과 또한 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유한체적법(FVM)을 사용하는 상용프로그램인 STAR-CD<sup>10)</sup>를 이용하여 GDI용 고압스웰 인젝터의 여러 가지 설계인자 변경에 따른 내부유동 해석을 통해 인젝터의 성능을 예측하고, 해석결과를 초기조건으로 사용하여 분무해석을 실시하여 분무특성에 영향을 미치는 설계인자에 대한 분석을 시도하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 수치해석 영역

연구에 사용된 인젝터는 국내 K사의 GDI용 고압 인젝터로서 pintle형 노즐이며 미립화를 촉진시키기 위하여 수평으로 4개의 스웰포트를 장착시켰다.

계산에 사용된 노즐의 격자구조를 Fig.1에 나타내었다.

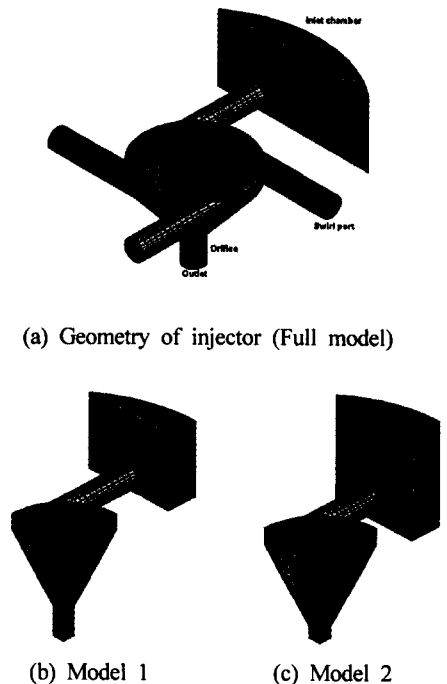


Fig. 1 Computational grid systems of the injectors

스월포트가 90° 간격으로 있기 때문에 대칭성과 계산의 효율성을 고려하여 전체모델의 1/4을 해석영역으로 선정하였다. 오리피스 길이가 분무패턴에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Fig.1에 나타낸 2가지 모델(Model 1과 Model 2)을 수치적으로 해석하였고 2가지 모델에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다. 두 모델의 사양은 동일하며 Model 1이 Model 2에 비해 오리피스의 축방향 길이가 긴 차이점이 있다. 또한 Model 1의 경우는 분무 가시화 실험이 동시에 수행되었다.

Table 1 Specification of the injectors

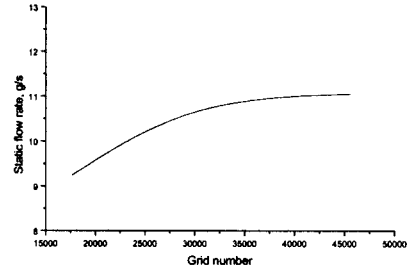
|                  | Model 1    | Model 2 |
|------------------|------------|---------|
| Seat angle       | 80°        |         |
| Needle lift      | 60 $\mu m$ |         |
| L/D <sub>o</sub> | 1.34       | 0.504   |

내부유동과 분무 해석에 사용된 모델의 격자수를 선정하기 위해 Fig.2에 나타낸 바와 같이 격자 의존성 테스트(grid dependency check)를 실시하였다. 내부유동 해석의 경우는 격자수에 따른 정적유량의 변화를 알아보았고 분무해석의 경우는 격자수에 따른 침투거리의 변화를 살펴보았다. 그 결과 두 경우 모두 격자수 35000개 이상에서는 정적유량 및 침투거리의 변화가 매우 작으므로 본 연구에서는 35000개의 계산격자를 해석에 사용하였다.

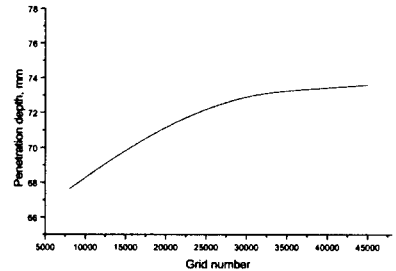
## 2.2 수치 모델링 및 해석조건

기존의 인젝터에 대한 수치적 연구들<sup>5-9)</sup>이 노즐 내부의 비정상상태 거동을 해석하여 동적유량을 예측하거나 노즐개선에 대한 연구에만 집중되어 있는 반면 분무특성에 대해서는 주로 실험에 의존하는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 스월형 인젝터에서 관심부분인 분무형상을 해석하기 위해 내부유동과 분

무 해석을 연계하여 계산하였다.



(a) Variation of static flow rate as a function of grid number



(a) Variation of penetration depth as a function of grid number

Fig. 2 Grid dependency check for optimal grid generation

수치해석은 2가지로 나누어 수행하였다. 우선 최대 밸브 양정시의 인젝터내 유동을 정상상태로 계산하였으며 이 해석결과들 중에서 출구속도, 초기 분무각, 정적유량 등을 입력조건으로 사용하여 분무특성을 비정상상태로 해석하였다.

분무 유동해석은 공기의 연속상(continuous phase)은 Euler 관점에서, 액적의 분산상(dispersed phase)은 Lagrange 관점에서 해석하는 Euler-Lagrange 방법<sup>10,11)</sup>을 사용하였다. 연속상의 Euler 형 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_c \Phi_c) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_c u_{c,j} \Phi_c) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi_c}{\partial x_j} \right) = S_{\Phi,c} + S_{\Phi,d} \quad (1)$$

여기서  $S_{\theta,c}$ 는 단상 유동 자체에서의 일반화된 생성항이며  $S_{\theta,d}$ 는 연속상과 분산상 간의 상호작용에 의한 생성항을 나타낸다.

분산상의 운동량방정식은 다음과 같다.

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_{am} + \vec{F}_b \quad (2)$$

여기서  $\vec{F}_{dr}$ 은 항력(drag force),  $\vec{F}_p$ 는 압력과 관련된 힘,  $\vec{F}_{am}$ 은 가상질량에 의한 힘(added-mass force),  $\vec{F}_b$ 는 체력(body force)을 나타낸다.

연속상에서의 액적의 분열은 Bag 분열과 Stripping 분열의 두가지 메커니즘에 의해서 해석된다.<sup>10-12)</sup>

Euler형 지배방정식에 대한 해를 얻기 위하여 대류항 차분법은 상류도식을 사용하였으며 속도장 및 압력장의 연계를 위해서 정상상태 해석에는 SIMPLE 알고리즘을, 비정상상태 해석에는 PISO 알고리즘을 사용하였다.

난류모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 내부유동 및 분무 해석에 사용된 물성치, 초기 및 경계조건은 Table 2에 나타내었다. 또한 내부유동 및 분무해석의 초기 및 경계조건에 대한 개략도를 Fig.3과 같이 나타내었다.

유체는 비압축성으로 가정하였으며 인젝터의 입구와 출구에는 각각 일정한 분사압과 대기압으로 설정하여 3차원 해석을 수행하였다. 분무특성 해석시 초기 SMD 분포는 수치적인 방법이나 실험적으로 구하기 어렵기 때문에 GDI용 인젝터의 분무해석에 사용된 기존 논문들<sup>3,8)</sup>의 조건을 참고하여  $50 \mu m$ 의 일정한 분포로 가정하였고 초기 SMD 변화에 따른 영향에 대해서도 해석을 수행하였다. 계산된 총 분사시간은 2 ms이며 계산시 분사시간 중 최대 액적의 수는 4000개로 해석하였다.<sup>13)</sup> 계산은 SGI Indy 워크스테이션을 사용하였으며 내부유동 해석과 그 결과로부터 분무계산까지 경우당 약 12시간이 소요되었다.

Table 2 Computation conditions

|  |   |
|--|---|
| Fuel   | n-heptane ( $C_7H_{16}$ )<br>( $\rho = 685 kg/m^3$ ,<br>$\mu = 0.0006 Ns/m^2$ )                     |
| Injection pressure                               | 10 MPa  |
| Ambient pressure                                 | 0.1 MPa   |
| Boundary conditions for internal flow simulation | Inlet & outlet constant pressure BC, Cyclic BC, Symmetric BC  |
| Initial condition for spray simulation           | Constant SMD<br>Spray angle<br>Static flow rate<br>Droplet velocity (from internal flow simulation) |

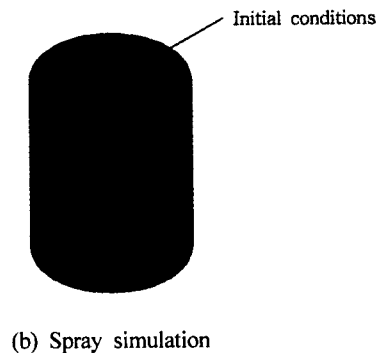
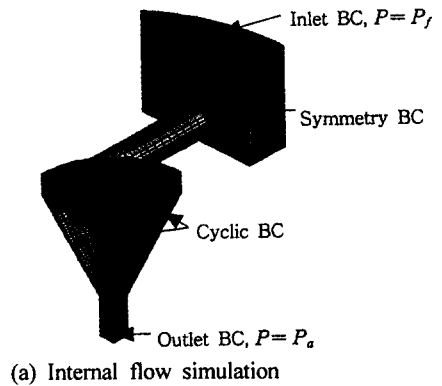


Fig. 3 Schematic systems of the computation conditions

### 3. 실험장치 및 방법

분무형상을 측정하기 위한 실험방법으로는 Fig.4와 같은 레이저 시트(laser sheet) 산란법을 이용한 분무 가시화 시스템을 구성하였다.

광원은 second harmonic generator을 장착한 Nd:YAG 레이저(Surelite I-10, Continuum)로서 최대 출력과 파장이 각각 200mJ, 532nm이고, 레이저에서 유도된 레이저 시트의 빔 두께는 2~3mm이다. 그리고 화상을 취득하는 CCD 카메라(XC-77RR, Sony)는 해상 분해능이 768(H)×493(V), 셀 크기는 11(H)×13(V)μm이며 이미지 보드(MeteorRGB, Matrox)는 8bit의 640(H)×480(V) 유효화상을 취득할 수 있다. 또한 레이저와 인젝션 신호와의 동기를 위하여 4채널 펄스 발생기(DG535, SRS)를 사용하였으며, 인젝터 구동 드라이버는 자체 제작한 드라이버를 사용하였다. 대기압에서의 분무 실험은 이송장치를 이용하여 인젝터의 위치를 축 방향 및 반경 방향으로 움직여서 여러 분무단면 이미지를 취득하였다.

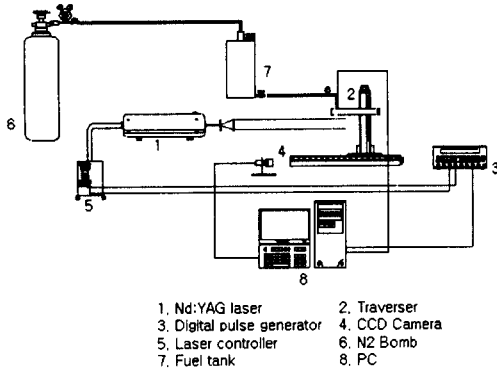


Fig. 4 System of spray visualization

### 4. 결과 및 고찰

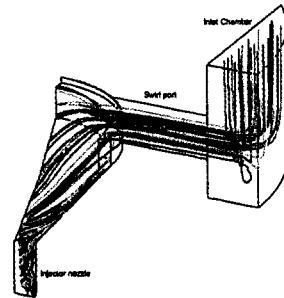
#### 4.1 설계인자 변경에 따른 해석결과

스윙 인젝터는 스윙포트에 의해 생성되는 원심

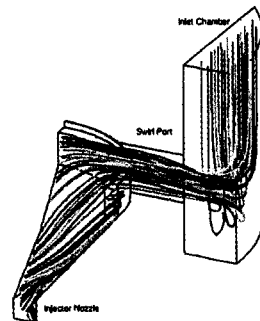
력이 인젝터 내부에서 연료의 회전운동을 생성시켜서 스윙챔버로 연료를 전송한다. 이때, 오리피스 벽쪽으로 연료막(fuel film)이 형성되고 중심 부분에는 원주형태의 공기 코어(air core)가 존재하게 된다.<sup>6,11)</sup>

Fig.5는 두가지 모델에 대해서 니들 리프트 60 μm일 때 인젝터 내부에서의 유적선(particle tracking)을 나타내었고 노즐 수직단면에서의 압력분포를 분사압력( $P_f$ )으로 나누어 무차원하여 Fig.6에 나타내었다.

Fig.5로 부터 스윙포트를 통해 노즐내부로 유입된 연료가 최대 양정으로 인하여 충분한 유로가 확보되므로 노즐 벽면을 따라 경사지게 스윙을 형성하고 오리피스 벽면으로 강한 스윙을 형성하면서 분출됨을 보여준다.



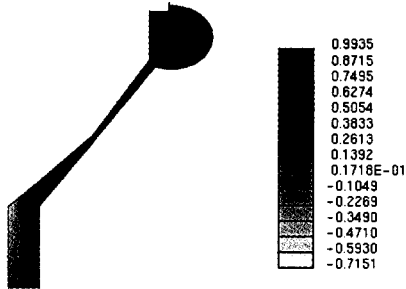
(a) Model 1



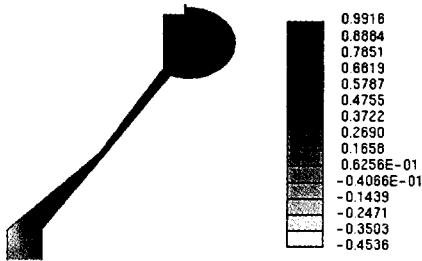
(b) Model 2

Fig. 5 Comparison of the particle tracking of Model 1 and Model 2

Fig.6을 살펴보면 오리피스에서 큰 압력강하가 일어나며 중심부분에는 박리로 인한 재순환 영역이 형성되어 음의 압력분포가 나타남을 확인할 수 있다. Model 1의 경우는 긴 오리피스로 인한 벽면에서의 전단력으로 인하여 Model 2에 비해 중심부분에서 음의 압력분포가 넓게 분포한다. 오리피스 출구에서의 큰 압력구배로 인하여 유체가 빠르게 가속되며 이로 인하여 스웰 인젝터가 출구에서 연료막의 두께를 기존 MPI방식의 인젝터에 비해 얇게 할 수 있어 연료의 미립화를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.



(a) Model 1

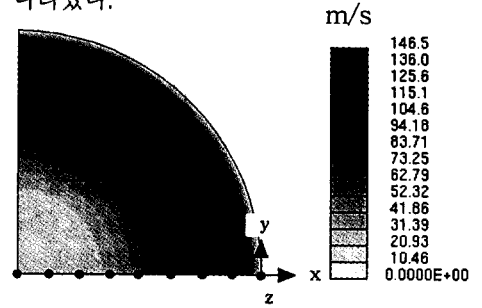


(b) Model 2

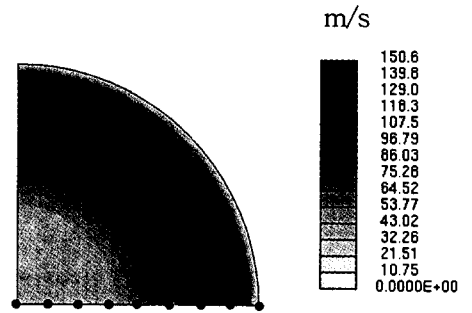
Fig. 6 Comparison of the non-dimensionalized pressure( $P/P_i$ ) contour of Model 1 and Model 2 at cross-sectional view

Fig.7은 Model 1과 Model 2의 오리피스 출구 단면에서의 속도장을 나타낸 것이다. 원심력으로 인하여 외곽부에 높은 속도분포를 지닌 스웰유동장이 형성되어 있음을 확인할 수 있으며 Model 2의 경우가 Model 1에 비해 속도분포가 약간 높

게 나타났다.



(a) Model 1



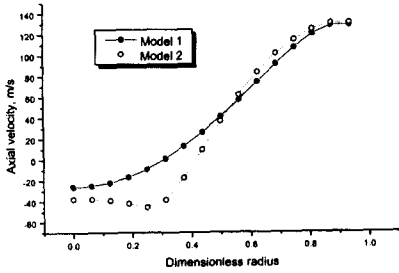
(b) Model 2

Fig. 7 Comparison of the velocity magnitude at the nozzle exit

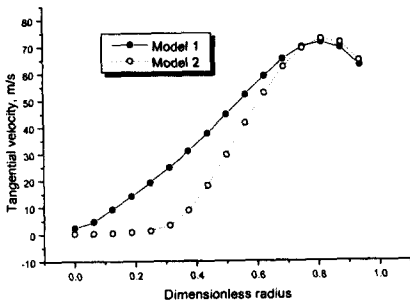
Fig.8은 보다 정확한 속도변화를 확인하기 위하여 Fig.7에 나타낸 바와 같이 오리피스 출구 중심으로부터 반경방향(x축)으로의 각 격자점까지의 거리를 출구반지름으로 나누어 무차원화시킨 후 축방향 속도(z축)와 접선방향 속도(y축)를 비교한 것이다. Model 2의 경우가 Model 1에 비해 노즐 출구 바깥쪽에서 축방향 속도와 접선방향 속도가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 오리피스 길이가 긴 Model 1의 경우가 Model 2에 비해 유체의 점성작용으로 인해 오리피스 벽과의 전단응력이 증가하여 속도가 감소하기 때문이다.

Fig.9는 니들 리프트 증가에 따른 정적유량을 계산한 결과이다. 니들 리프트가 증가함에 따라 정적유량은 증가하며 Fig.8에서 볼 수 있듯이

Model 2의 경우가 Model 1에 비해 대부분의 연료가 분출되는 오리피스 출구 바깥쪽에서 속도분포가 크게 나타나므로 유량이 더 증가함을 확인할 수 있다.



(a) Axial velocity



(b) Tangential velocity

Fig. 8 Comparison of the axial and tangential velocity at the nozzle exit

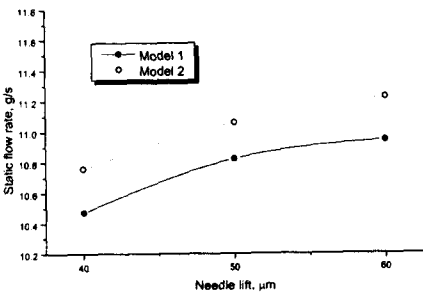


Fig. 9 Variations of the static flow rate as a function of needle lift

Ren 등<sup>6,7)</sup>은 계산 결과로부터 평균속도를 구하여 초기 분무각을 이론적으로 예측하였다. 본 연구에서 초기 분무각 계산에 사용된 이론식은 다음과 같다.

$$\theta_T = 2 \tan^{-1} \left( \frac{V}{W} \right) \quad (3)$$

$$W = \frac{q_m}{\pi \rho (r_o^2 - r_{ac}^2)} \quad (4)$$

$$V = \frac{\int_{r_{ac}}^{r_o} v_r dr}{r_o - r_{ac}} \quad (5)$$

여기서  $q_m$ 은 정적유량이며,  $r_{ac}$ 는 공기 코어를 나타낸다.

Ren 등<sup>6)</sup>은 공기 코어가 오리피스 출구에서 축방향 속도가 제로인 반경방향으로 위치한다고 추정하였다. 또한 계산된 공기 코어가 실제보다 과소 예측되어 이론 분무각이 실제 분무각에 비해 과대 예측되므로 보정계수를 실험적으로 구해야 한다고 하였다. 본 연구에서 계산한 이론 분무각을 실험을 통해 얻은 분무각과 비교하여 구한 보정계수는 0.77이다. 이는 Ren 등이 사용한 고압 스웰 인젝터의 보정계수 0.79와 유사함을 보였다.

Fig.10은 이론식을 이용하여 초기분무각을 계산한 결과이다. 니들리프트가 증가함에 따라 분무각은 증가하며 오리피스 길이가 짧은 Model 2의 경우가 Model 1에 비해 상대적으로 스웰강도가 증가하기 때문에 분무각이 더 크게 나타났다.

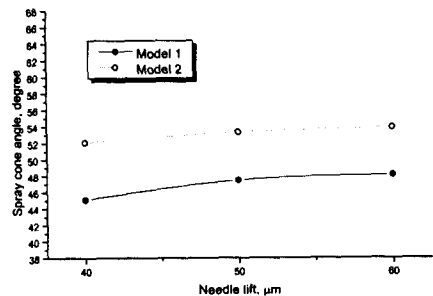


Fig. 10 Variations of the spray cone angle as a function of needle lift

Fig.11은 두 모델에 대한 침투거리를 비교한 것이다. Fig.10에서와 같이 Model 2의 경우가 Model 1에 비해 분무각이 크게 나타나므로 침투 거리가 상대적으로 작아짐을 확인할 수 있다.

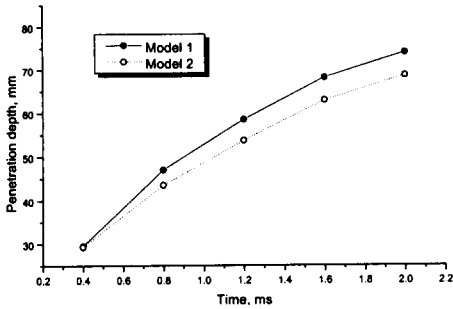


Fig. 11 Comparison of the penetration depth of Model 1 and Model 2

오리피스 길이의 변화가 입경분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Sauter 평균입경(SMD)<sup>11)</sup>을 사용하였으며 분사시작 후 2ms 시점에서 노즐출구에서 30mm 떨어진 지점의 SMD를 계산하였다.<sup>3)</sup> 두 모델의 SMD를 비교한 결과, Model 2가 20.67  $\mu\text{m}$ 로 Model 2의 22.85  $\mu\text{m}$ 에 비해 작게 나타났다. 이는 오리피스 길이가 짧은 Model 2의 경우가 Model 1에 비해 분무각이 증가하고 속도분포가 크게 나타나므로 좀 더 활발한 공기유입으로 인한 상호작용으로 입경이 감소하기 때문이다.

스윙포트가 노즐에 접하는 각도를 Fig.12와 같이 정의하였다. 스윙포트 각도는 Model 1에 대해서 기본 값으로 설정된 39°를 49°, 59°로 변화시키면서 각각의 영향을 살펴보았다.

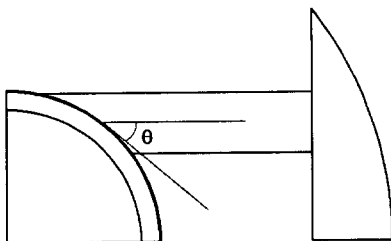
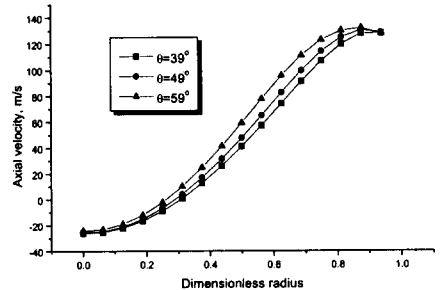
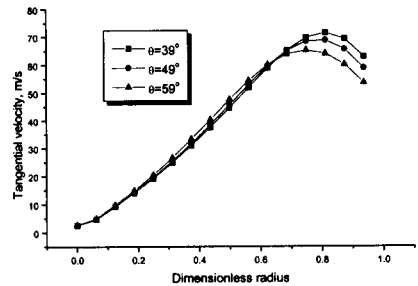


Fig. 12 Definition of the swirl port angle,  $\theta$

Fig.13은 스윙포트 각도변경에 따른 노즐출구에서의 축방향 속도와 접선방향 속도를 비교하였다. 각도가 커짐에 따라 홀중심과의 오프셋(offset)이 상대적으로 작아지게 되어 원심력에 의한 스윙강도가 감소하게 되므로 접선방향 속도는 감소하며 축방향 속도는 상대적으로 증가하게 된다.



(a) Axial velocity



(b) Tangential velocity

Fig. 13 Comparison of the axial and tangential velocity at the nozzle exit

Fig.14는 스윙포트 각도변경에 따른 정적유량을 나타낸 것이다. 각도가 커짐에 따라 Fig.13에서 나타난 것과 같이 접선방향 속도가 축방향 속도로 전환되므로 상대적으로 정적유량이 증가하게 된다. 반면에 초기 분무각은 Fig.15에서 나타난 것과 같이 스윙포트의 각도가 커짐에 따라 원심력에 의한 스윙강도가 작아지므로 감소하는 결





Fig. 14 Variations of the static flow rate as a function of the swirl port angle

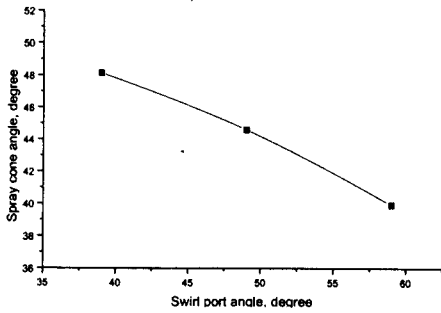


Fig. 15 Variations of the spray cone angle as a function of the swirl port angle

과를 보인다.

Fig.16은 스윙포트 각도가 변화할 때 시간에 따른 침투거리를 나타낸다. 각도가 커짐에 따라 침투거리가 상대적으로 증가하는 결과를 보인다. 이는 Fig.13에서 알 수 있듯이 각도가 커짐에 따라 스윙강도가 감소하고 축방향 속도가 증가하여 초기 분무각이 작아지기 때문이다.

Fig.17은 스윙포트 각도 변경에 따른 SMD 변화를 계산한 결과이다. 그림에서 보듯이 스윙포트 각도가 커짐에 따라 SMD가 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig.15에서 볼 수 있듯이 스윙포트 각도가 커짐에 따라 초기 분무각이 작아지므로 외부로부터의 공기유입이 상대적으로 감소하여 입자와 공기간의 상호작용이 약해지기 때문이다.

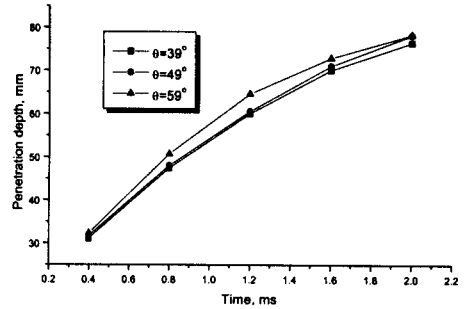


Fig. 16 Variations of the penetration depth for three different values of the swirl port angle



Fig. 17 Variations of SMD as a function of the swirl port angle

## 4.2 분무특성 해석결과

분무패턴을 수치해석하기 위해서는 초기 SMD를 결정해야 하며 기존의 연구결과에서는 초기 SMD 값이 분무특성 해석결과에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>3,8,9)</sup> 그러나 고압 스윙 인젝터의 분무해석에 필요한 입력조건인 초기 SMD는 인젝터 출구 근처에서 액적의 밀도가 크고 노즐 형상에 따라서도 다르게 나타나기 때문에 실험적으로 측정하는데 많은 어려움이 있다.

기존 논문<sup>8,9)</sup>에서 사용된 초기 SMD의 범위는 50 μm ~ 100 μm이다. 본 연구의 대상 인젝터는 스윙포트가 장착되어 초기 SMD는 스윙포트가 장착되지 않은 경우보다 감소할 것이다. 따라서 본 연구에서는 초기 SMD가 스윙형 GDI 인젝터

의 해석결과에 미치는 민감도를 연구하기 위하여 초기 SMD를 35  $\mu\text{m}$ 에서 50  $\mu\text{m}$ 까지 변화시켰으며 이에 따른 침투거리와 SMD를 계산하여 Fig.18과 Fig.19에 나타내었다. 계산결과 초기 SMD가 30% 증가함에 따라 분사말기의 SMD는 16.6% 증가하였고 이로 인하여 침투거리 또한 길어지는 경향을 보였다. 따라서 분무해석에 있어서 초기 SMD의 보정은 정확도 높은 해석결과를 위해서 필수적이라 할 수 있다.

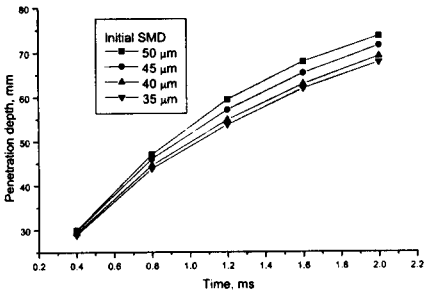


Fig. 18 Temporal variations of the penetration depth for different values of the initial SMD

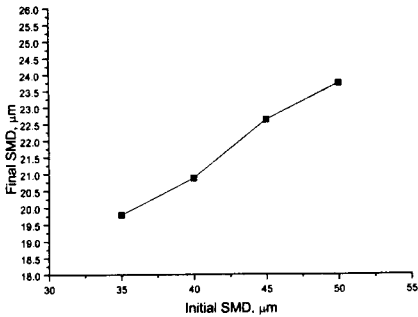


Fig. 19 Variations of the final SMD as a function of the initial SMD

실험과 계산이 수행된 Model 1에 대한 분사조건을 Table 3에 나타내었다. 분무각, 초기 SMD 등의 분무조건은 일정하다고 가정하여 수치해석을 수행하였다.

Table 3 Injection conditions

| Fuel               | n-heptane ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$ ) |
|--------------------|---|
| Injection pressure | 10 MPa                                  |
| Injection duration | 2 ms                                    |
| Spray angle        | 48°                                     |
| Initial SMD        | 50 $\mu\text{m}$                        |

인젝터 내부의 유량분포는 시간의 함수로 주어지는 니들 밸브의 상승높이에 따라 변하는데 이는 분무특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 비정상적인 분무패턴을 보다 현실적으로 해석하기 위하여 니들 밸브가 최대 상승했을 때의 높이를 10  $\mu\text{m}$  단위로 나누어 준정적(quasi-steady)인 유동해석을 통하여 밸브양정에 따른 유량을 계산하였다. 또한 Fig.20에 나타난 시간에 따른 유량분포를 분무해석의 초기조건으로 사용하여 계산을 수행하였다.

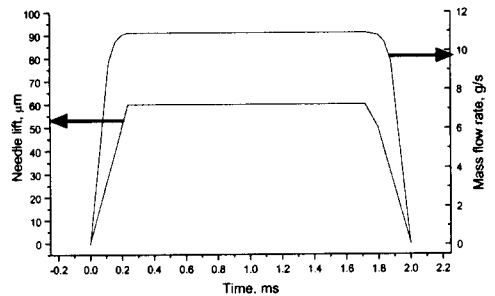


Fig. 20 Temporal variations of the mass flow rate as a function of the needle lift

Fig.21에 비정상적 분무패턴의 발달양상의 해석결과를 가시화 실험결과와 비교하여 나타내었다. 수치해석 결과, 분무형상은 원추형이었으며 시간이 경과함에 따라 스웰에 의한 공기와 액적

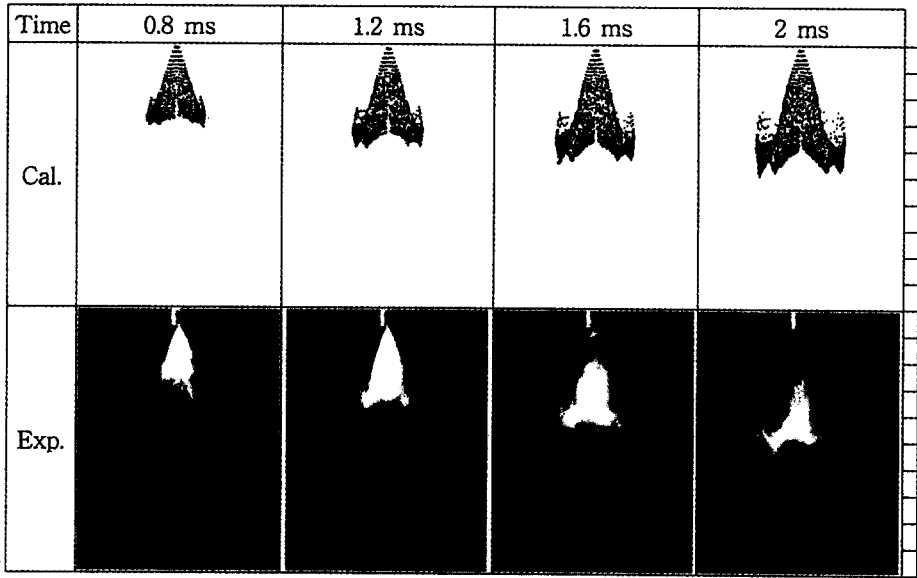
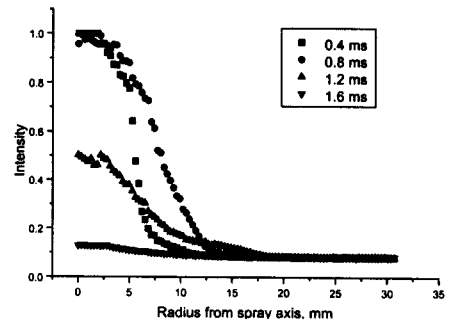


Fig. 21 Comparison of the calculated and experimental results of spray patterns

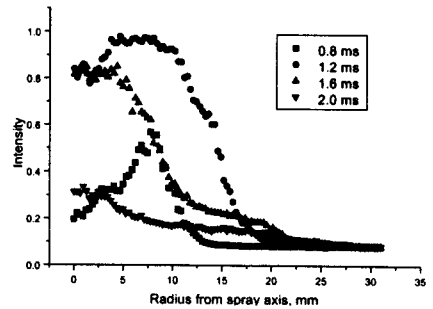
간의 상호작용에 의해 활발한 분열이 진행되며 침투거리는 점차 감소함을 볼 수 있다. 또한 강한 스윙로 인하여 분무 양쪽 선단에 와류(vortex)가 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 와류의 영역은 점차 확대됨을 볼 수 있는데 이러한 와류는 분무영역내로 활발한 공기의 유입(entrainment)을 발생시킨다.

Fig.21에 나타난 동일한 조건에서의 가시화 실험결과에서도 역시 고압 스윙형 인젝터의 주요 분무특성인 분사말기의 분무선단에서의 와류형성을 확인할 수 있었으며 와류의 위치와 시간에 따른 발달양상이 해석결과와 정성적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

분무 액적군의 공간분포를 파악하기 위하여 영상처리를 이용한 분무질량분포를 Fig.22에 나타내었다. 레이저에 의하여 산란된 액적의 화상은 8bit의 디지털 이미지로서 각각의 화소들은 0~255의 명암을 가지고 있다. 식(6)과 같이 각 방향으로의 산란강도를 평균하고 이를 다시 256으로 나누면 0에서부터 1까지의 범위를 가지는 연료의 공간적 분포 상태를 산출하여 가시화를 통하여 분석하는 것보다 정량적인 접근을 도모할 수가 있다.



(a) At 20mm from injector tip



(b) At 40mm from injector tip

Fig. 22 Temporal development of radial distribution

$$R(r) = \frac{1}{360} \sum_{\varphi=1}^{360} F(\varphi, r) = \text{aver. } F(r) \quad (6)$$

Fig.22에서 볼 수 있듯이 인젝터 끝단으로부터 축방향으로 20mm 떨어진 단면에서는 시간이 경과함에 따라 연료 액적군의 존재가 소멸되고 있으며 초기 0.4ms와 0.8ms에서의 산란강도는 분무축을 중심으로 높게 나타났다. 40mm 떨어진 단면에서는 주분무가 도달하는 1.2ms에 높은 산란강도 분포를 나타내었고 분무가 발달함에 따라 연료 액적의 분포 영역이 넓어지면서 산란강도가 감소하였다. 이는 연료의 미립화가 고르게 진행되고 있음을 의미한다.

GDI용 인젝터 설계시 주된 관심사는 운전 조건에 따른 침투거리이다. 특히 액적이 실린더 표면에 충돌하지 않도록 세심한 주의를 기울여야 한다. 따라서 이러한 최적설계를 위한 수치적 분무해석의 정확도를 검증하기 위하여 Fig.23에 수치해석과 실험 결과로부터의 시간에 따른 침투거리를 구하여 상호 비교하였다.

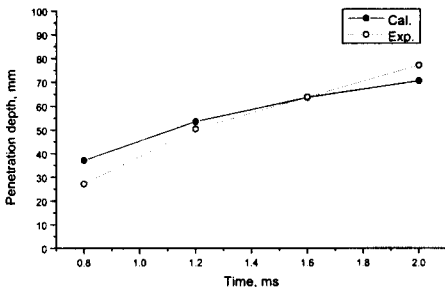


Fig. 23 Comparison of the calculated and experimental results of penetration depth

시간이 지남에 따라 침투거리는 점차 감소하며 분무가 완전히 발달된 1.2~1.6ms 영역에서는 상호간의 침투거리의 오차가 5% 이내로 근접한 결과를 나타내었다. 그러나 분사 초기와 말기에 다소간의 차이를 보이는데 이는 수치해석의 분무모델에서는 초기조건으로

액적들이 분사되어 분열되는 것으로 가정하였으나 실제 분무는 초기에 연료막이 액적들로 분열되는 등 보다 복잡한 분열과정을 거치기 때문으로 생각된다. 따라서 이러한 실제 분무특성을 보다 정확히 묘사할 수 있는 분무모델의 개발이 필요하며 SMD분포, 분무각 등의 초기조건에 대한 추가적인 연구를 수행하여 인젝터 내부유동과 분무특성에 대한 관계를 정립해 나가는 것이 중요하다고 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 스월형 직분식 인젝터의 분무특성을 해석하기 위하여 내부유동 해석과 분무특성 해석을 연계하여 수행하였고 해석결과를 가시화 실험을 통하여 검증하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 아래와 같다.

- 1) 오리피스 길이가 다른 2가지 스월형 직분식 인젝터에 대해서 분무해석을 수행한 결과, 오리피스의 축방향 길이가 62.4% 감소함에 따라 초기 분무각이 12% 증가하였으며 그 결과로 SMD가 10% 감소함을 알 수 있었다.
- 2) 스월포트 각도가 커짐에 따라 침투거리는 증가하며 스월강도의 감소로 인하여 초기 분무각은 감소하였다. 스월포트 각도가 커짐에 따라 외부로 부터의 공기유입이 상대적으로 감소하므로 SMD는 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 스월형 직분식 인젝터의 수치적 분무해석 결과를 검증하기 위하여 가시화 실험결과와 비교 분석한 결과, 비정상적인 분무패턴의 경우 고압 스월 인젝터의 주요 분무특성인 분무선단에서의 와류의 위치 및 크기를 비교적 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 침투거리를 비교한 결과, 분사 초기 및 말기 영역을 제외한 구간에서의 오차는 5% 이내로 높은 정확도를 나타내었다. 분사 초기 및 말기 영역에서는 분무모델의 한계와 SMD, 분무각 등의 초기조건부의 부정확성으

로 인하여 비교적 큰 오차를 보이고 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 G7 차세대 자동차 기술과제의 지원에 의하여 수행되었으며 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 조진호, "내연기관공학", 학연사, pp.299-309, 1999.
- 2) T. Kume, Y. Iwamoto, K. Iida and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE Paper 960600, 1996.
- 3) C. Preussner, C. Doring, S. Fehler, and S. Kampmann, "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance", SAE Paper 980498, 1998.
- 4) M. Kashiwaya, T. Kosuge, K. Nakagawa, and Y. Okamoto, "The Effect of Atomization of Fuel Injectors on Engine Performance", SAE Paper 900261, 1990.
- 5) J. L. Chen, G. Chen, and M. Wells, "Dynamic and Static Flow Analysis of a Gasoline Fuel Injector", ASME Trans. J. Eng. for Gas Turbine and Power, Vol.115, pp750-755, 1993.
- 6) W. M. Ren, J. Shen, and J. F. Nally, "Geometrical Effects on Flow of Gasoline High Pressure Direct Injector", SAE Paper 971641.
- 7) J. Cousin, W. M. Ren, and S. Nally, "Transient Flows in High Pressure Swirl Injectors", SAE Paper 980499.
- 8) David P. Schmidt, Idriss Nouar, P. K. Senecal, C. J. Rutland, J. K. Martin, R. D. Reitz, and Jeffrey A. Hoffman, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field", SAE Paper 1999-01-0496, 1999.
- 9) C. Arcoumanis, M. Gavaises, "Modeling of Pressure-Swirl Atomizers for GDI Engines", SAE 1999-01-0500, 1999.
- 10) STAR-CD User's Manual, Version 3.0, 1996.
- 11) 이상용, "액체의 미립화", 민음사, pp. 130-131, 240-249, 1996.
- 12) R. D. Reitz and R. Diwakar, "Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays", SAE Paper 860469, 1986.
- 13) Min Xu and Lee E. Markle, "CFD-Aided Development of Spray for an Outwardly Opening Direct Injection Gasoline Injector", SAE Paper 980493, 1998.
- 14) 정수진, 이충훈, 김우승, 이기형, "저공해 자동차 설계를 위한 전후처리 장치의 수치적 해석 및 실험적 검증(촉매변환기 및 GDI 인젝터를 중심으로)", STAR-CD Users' Conference, Seoul, Korea, 2000.
- 15) 井上 憲太, 近村 銅司, "自動車原動機的環境對應技術," 朝倉書店, pp.15~48, 1997.