인젝터 노즐 형상이 노즐 내부 유동 및 출구 특성에 미치는 영향

김 창 현¹⁾ · 이 강 수²⁾ · 박 재 인²⁾ · 백 제 현^{*1)}

포항공과대학교 기계공학과¹⁾ · 현대자동차 파워트레인 열유동 해석팀²⁾

Influences of Injector Nozzle Shape on Nozzle Internal Flow and Outlet Characteristics

Changhyun Kim¹⁾ · Kangsoo Lee²⁾ · Jaein Park²⁾ · Jehyun Baek^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, POSTECH, Gyeongbuk 790-784, Korea

²⁾Powertrain Thermo-Fluid CAE Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 18 March 2013 / Revised 20 May 2013 / Accepted 21 May 2013)

Abstract : Diesel engine injector is used for spraying the fuel into the cylinder chamber. Complex phenomenon like cavitation occurs from small scale domain, highly pressurized condition and rapid injection. Flow inside the nozzle affects the whole engine performance including combustion and exhaust, therefore understanding the flow inside the injector nozzle is very important. In this paper, cylindrical and convergent-divergent nozzles are suggested for nozzle types and their influences on nozzle internal flow and nozzle outlet characteristics will be analyzed by changing their outlet diameters.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), Injector nozzle(인젝터 노즐), Cavitation(캐비테이션), Numerical analysis(수치 해석), Cylindrical nozzle(원통형 노즐), Convergent-divergent nozzle(수렴-발산형 노즐)

Nomenclature

CN	: cavitation number
F	: empirical coefficient
ID	: nozzle inlet diameter
L	: nozzle length
N	: number density
OD	: nozzle outlet diameter
P	: pressure
R	: radius / nozzle radius
r	: volume fraction / nozzle inlet rounding radius
ρ	: density
σ	: surface tension coefficient

Subscripts

B	: bubble
f	: liquid phase
g	: gas phase
n	: nucleation
r	: reference
v	: vapor phase

1. 서 론

디젤 엔진 인젝터는 고압으로 연소실 내에 연료를 분사하기 위한 장치로서, 작은 도메인 크기와 높은 분사 압력으로 인해 캐비테이션을 동반한 복잡한 유동 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

인젝터 노즐 내부 및 출구에서의 유동 특성은 연

*Corresponding author, E-mail: jhbaek@postech.ac.kr

료의 미립화 및 증발 특성 등과 큰 관련이 있으며, 이어지는 연소 및 배기 특성에 영향을 끼친다.

최근에는 보다 나은 연소 효율 및 배기 개선을 위하여 엔진 인젝터 성능을 향상시키려는 연구가 진행되고 있으나 그 크기가 매우 작고 짧은 시간 동안 분사가 이루어지기 때문에 실제 크기 노즐에서의 유동가시화 등의 실험적 연구는 매우 힘들다.

그러므로 노즐 내에서 발생하는 캐비테이션 유동을 수치해석을 이용하면 보다 효과적으로 분석할 수 있다. 현대에는 빠르게 발전하고 있는 컴퓨터 성능과 유동 해석 및 캐비테이션 인지에 적합한 모델들이 제공되어 수치해석을 통해서도 실제와 같은 타당한 분석결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 상용 유동 수치 해석 프로그램인 ANSYS CFX 13.0을 사용하여 인젝터 내부 유동 해석을 진행함과 동시에 노즐 형상이 노즐 내부 유동 및 출력 특성에 어떠한 영향을 끼치는지를 알아보기 위하여 다양한 노즐 형상에 대해서 노즐 형상과 유동 특성 간의 상관관계를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 캐비테이션 모델링

캐비테이션은 일반적으로 액체 유동 내에서 다양한 이유로부터 국소적으로 압력이 증기압 아래로 떨어질 때 일어나는 기체 발생 현상을 말한다. 유동에서 캐비테이션이 발생할 경향과 그 정도는 캐비테이션 수에 의해 예측되며 그 정의는 다음과 같다.

$$CN = \frac{P_{ref} - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

일반적으로는 캐비테이션 수가 작아질수록 캐비테이션의 발생이 심화되는 경향을 보인다. 캐비테이션은 온도 변화로부터 발생하는 상변화와는 차이가 있으며, 매우 짧은 시간 안에 일어난다.

CFX 13.0에서는 액체 상과 기체 상 간의 물질 전달 모델로서 Rayleigh-Plesset 모델이 이용되며, 캐비테이션 해석에는 동차(homogeneous) 다상 모델이 사용된다.

Rayleigh-Plesset 모델은 기체 생성과 소멸을 결정

하는 기준이 되며 액체 속에서 기포의 성장은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{P_v - P}{\rho_f}$$

2차 항과 표면장력 항을 무시하면 기포 반지름의 시간 변화율은 $\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}$ 이며 체적과 질량의 시간 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) = 4\pi R_B^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}$$

$$\frac{dM_B}{dt} = \rho_g \frac{dV_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_g \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}$$

기포 밀도를 N_B , 가스 볼륨비를 r_g 라 하면 증발과 응결 모두를 고려해 준, 총 상간 물질 전달률은 아래와 같다.

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3r_g \rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(P_v - P)$$

F는 증발과 응결 시의 상변화 속도의 차이를 고려하기 위해 도입된 경험 상수이며, 증발은 핵형성 구역(대부분 불응축 가스)에서 발생하므로 이것을 고려하여 핵형성구역의 볼륨비 r_{nuc} 를 도입하면 증발의 경우 상간 물질 전달률은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3r_{nuc}(1-r_g)\rho_g}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(P_v - P)$$

ANSYS CFX 13.0에서는 위 식에서 사용된 각 인자들의 기본값으로 $R_{nuc} = 1\mu m$, $r_{nuc} = 0.0005$, $F = 50$ (증발 시), $F = 0.01$ (응결 시)로 설정되어 있다.

2.2 선행 연구 결과

Y. Jang et al. (2001)¹⁾은 인젝터 노즐 형상을 10배 확대시킨 투명 아크릴 모델을 이용한 가시화 실험을 통해서, 인젝터 노즐 내부에서 일어나는 캐비테이션을 관찰하였으며, R. Payri et al. (2004)²⁾은 노즐 모양이 원통형인 경우와 원뿔형인 경우에 대해서 내부 압력 분포와 분사각, 관통력 등의 분무 특성을 분석하였다. R. Masuda et al. (2005)³⁾은 노즐 내 유동과 캐비

테이션을 반영해 분무를 시뮬레이션 하였다. W. Ning et al.(2008)⁴⁾은 노즐 길이, 입구 반지름, 노즐 수렴도가 노즐 내부 유동과 분무 및 미립화에 미치는 영향을 살펴보았다. F. Payri et al.(2009)⁵⁾은 노즐 형상이 원통형인 경우와 원뿔형인 경우, 니들 높이에 따른 내부 캐비테이션 및 출구 특성에 대해 분석하였다. A. Dorri et al.(2009)⁶⁾은 노즐 홀의 수렴도를 바꾸어가며 내부 압력 및 기체 분포에 대해서 연구하였다.

본 연구에서는 기존에 연구되었던 일반적인 원통형 노즐과 함께 입구에서의 수렴 형상을 통해 박리를 줄이고 출구에서의 발산 형상을 통해 분사각을 키울 것으로 기대되는 수렴-발산형 노즐에 대해서 연구하여 보다 좋은 분무 및 연소 성능을 제공할 수 있는 인젝터 노즐의 형상에 대해서 모색해보았다.

2.3 연구 방법

본 연구에 사용된 노즐은 Fig. 1(a)에서처럼 입구에서 출구까지 일직선으로 잇는 원통형과(b)와 같은 원호로 잇는 새롭게 제시된 수렴-발산형의 두가지 타입이 있다. 노즐의 기준 사양은 Table 1과 같다. 일반적인 원통형 노즐의 경우, 입구 직경(ID), 출구 직경(OD), 노즐 길이(L), 입구 라운딩(r)으로 하나의 노즐 형상을 결정할 수 있다. 그리고 수렴-발산형 노즐의 경우에는 Fig. 2와 같이 반경 변수(R)가 추가된다.

노즐 형상이 노즐 내부 유동 및 출구 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 1의 기준 사양을 바탕으로 노즐 타입과 노즐 출구 직경을 달리하여, 선정된 총 6가지 해석 케이스는 Table 2와 같다.

실제 인젝터 노즐 내에서는 연료를 분사하기 위하여 니들의 높이가 시간에 따라 주기적으로 변한다. 본 연구에서는 니들의 위치를 세 개의 구간으로

Table 1 Specification of nozzle

Nozzle parameter	Dimensionless value
Outlet Diameter (OD/ID)	1
Length (L/ID)	5.30
Inlet Rounding (r/ID)	0.13
Nozzle Radius (R/ID)	0.022 (Con-Di)

Fig. 2 Nozzle parameters

Table 2 Different nozzle types and nozzle outlet diameters

Nozzle type	OD/ID*100 (%)
Cylindrical nozzle	75
	100
	125
Convergent-divergent nozzle	75
	100
	125

나누어 저점, 중점, 고점 중에서 캐비테이션이 많이 발생하는 중점에⁵⁾ 니들 높이를 고정시키고 정상(steady) 해석을 수행하여 노즐 형상에 따른 내부 유동을 비교해보았다. 그 결과 노즐 형상에 따른 유동 경향성에서 차이점들이 나타났다.

3. 해석 조건

해석에 사용될 인젝터는 Fig. 3의 8홀-인젝터로서 각 노즐은 대칭이다. 따라서 보다 효율적인 계산을 위하여 노즐 하나의 절반 부분(전체 인젝터의 1/16)에 대해서 ICEM CFD 13.0을 사용하여 Fig. 4와 같이 격자를 제작하였다. 격자는 약 45 만개의 노드로 구성되어있으며, 유동이 복잡할 것으로 예상되는 노즐 입구 상단 부분에 격자가 조밀하게 분포한다.

Fig. 1 (a) Cylindrical nozzle, (b) Convergent-divergent nozzle

Fig. 3 (a), (b) 8 Hole injector nozzle

Fig. 4 (a), (b) Grid distribution on 1/16 part of the injector

경계조건으로는 입구에 600bar, 출구에 30bar를 부여하였으며, 원주방향 면에는 대칭성을 고려 대칭 조건을, 나머지 벽면은 점착 조건으로 설정하였다. 난류모델은 유동 박리 등에서 정확도가 높은 $k-\omega$ SST모델이 사용되었으며 캐비테이션 고려를 위해 Rayleigh-Plesset 모델을 적용, 40°C 등온 해석을 수행하였다. 작동유체로는 n-도데칸이 사용되었다.

4. 해석 결과 및 분석

본 연구에 앞서 ANSYS CFX 13.0을 이용한 노즐 계산의 유효성을 검증하기 위하여 기준 사양 노즐에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 5에서와 같이 계산과 실험에서의 분사율 곡선이 일치하였고, 총 분사량은 약 1% 정도의 미미한 차이로 실제 인젝터의 내부 유동을 잘 예측하였다. 캐비테이션 또한 Fig. 6에서 나타난 것처럼 니들 높이가 중점 부근에 있을 때 많이 발생하였다.

노즐 형상에 따른 내부 유동의 차이점을 분석하고자 노즐 중간 단면에서의 증기 볼륨비 분포와 압력 분포를, 유선과 함께 노즐 단면에서의 증기 볼륨비를 나타내었다.

Fig. 5 Outlet mass flow rate in experiment and cfd

Fig. 6 Needle profile and outlet vapor volume fraction

4.1 노즐 중간 단면에서의 증기 볼륨비

노즐 모양에 따른 중간 단면에서의 증기 볼륨비는 Fig. 7, 8과 같다. 가장 일반적인 노즐 타입인 원통형 노즐을 살펴보면, 다른 연구에서 알려진 바와 같이 노즐 입구 상단에서 캐비테이션이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 유선에서도 나타나지만 노즐 입구에서 유동 방향이 급격하게 바뀌에 따라 유동 박리 현상이 발생하고 국소적으로 압력이 증기압보다 낮아져 캐비테이션이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 캐비테이션의 발생 정도는 노즐 형상에 따라 달라진다. Fig. 7에서 입구 직경이 같고 출구 직경이 다른 원통형 노즐의 경우 출구 직경이 커질수록 캐비테이션이 넓은 영역에서 발생함을 보여주고 있다. 이는 출구 직경이 커지면 유동이 꺾이는 각이 상대적으로 커져 유동 박리가 더 심하게 일

Fig. 7 Vapor volume fraction on mid-plane, cylindrical nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 8 Vapor volume fraction on mid-plane, convergent-divergent nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

어나기 때문이다.

반면에 수렴-발산형 노즐에서 증기 볼륨비는 원통형 노즐에서와는 차이를 보이는데, 캐비테이션 영역이 출구 쪽으로 집중되어 있다. 그리고 그 영역의 크기는 원통형 노즐에서와 같이 출구 직경이 커질수록 넓어지는 경향을 보인다. 입구 쪽의 증기 볼륨비가 낮은 이유는 형상의 특성상 수렴형 노즐과 발산형 노즐을 합쳐놓은 형태로서 수렴형 노즐에서는 유동 박리가 적게 일어나 압력 강하가 크지 않기 때문이다.

종합하면 노즐 출구 직경이 커질수록 캐비테이션의 발생 영역이 넓어지는 경향성을 보이며, 발생 영역의 위치는 노즐 타입에 따라서 차이를 보인다. 더 자세한 분석을 위하여 중간 단면에서의 압력 분포를 살펴보았다.

4.2 노즐 중간 단면에서의 압력 분포

Fig. 9, 10에 나타난 압력 분포와 증기 볼륨비 분포를 비교해보면 압력이 낮은 부분에서 캐비테이션이 발생함을 알 수 있다. 원통형 노즐의 압력 분포에서

는 노즐 입구 상단의 압력이 증기압 보다 낮아 캐비테이션이 발생하였다. 수렴-발산형 노즐의 경우에도 노즐 입구에서 압력 저하가 일어나지만 그 크기가 크지 않고, 노즐의 목 부근에서 압력이 강하하여 캐비테이션이 발생하기 시작함을 알 수 있다. 또한 노즐-뺨에서의 압력 분포는 노즐 출구 직경에 따라 달라지며 압력의 크기는 출구 직경이 작아질수록 높아진다. 위의 증기 볼륨비와 압력 분포에서 볼 수 있듯 노즐 타입과 입/출구 직경에 따라서 캐비테이션의 발생 정도와 위치가 달라진다.

4.3 노즐 내부에서의 유동

증기 볼륨비와 압력 분포에서 볼 수 있듯, 노즐 타입과 입/출구 크기에 따라서 캐비테이션의 발생 정도와 위치가 다양하다. 이는 노즐 내부 유동 흐름의 차이에서 기인하며, Fig. 11과 12에 도시된 유선과 노즐 단면에서의 증기 볼륨비를 통해서 보다 차이점을 명확하게 알 수 있다.

원통형 노즐의 경우에는 출구가 커질수록 노즐 입구 상단에서 유속이 빨라지고, 유동 박리가 크게

인젝터 노즐 형상이 노즐 내부 유동 및 출구 특성에 미치는 영향

Fig. 9 Pressure distribution on mid-plane, cylindrical nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 10 Pressure distribution on mid-plane, convergent-divergent nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 11 Streamline & vapor volume fraction, cylindrical nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 12 Streamline & vapor volume fraction, convergent-divergent nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

일어나는 것을 유선과 속도 크기에서 볼 수 있으며, 전체 노즐에서 발생하는 캐비테이션의 영역 또한 넓어진다. 노즐 입구 상단에서 발생한 캐비테이션은 노즐 상단을 따라 출구에 영향을 미친다.

또한, 노즐 하단에서도 캐비테이션이 발생하여 출구에 영향을 준다. 캐비테이션의 발생 위치(상단, 하단)에 따른 차이점을 살펴보면, 노즐 상단에 위치한 캐비테이션은 출구 쪽으로 갈수록 노즐 단면에서 차지하는 비중이 작아지지만, 노즐 하단에 위치한 캐비테이션은 출구 쪽으로 갈수록 노즐 단면에서 차지하는 비중이 커진다.

수렴-발산형 노즐의 경우에는 노즐 중간 단면에서의 증기 볼륨비 분포와 압력 분포 결과에서 보았듯, 노즐 입구 쪽에서는 수렴 형상으로 인해 입구 상단에서 유동 박리가 심하지 않고 캐비테이션 발생이 미미하나, 노즐 목 부근에서 발생하는 캐비테이션이 출구까지 도달하며 확장하는 것을 관찰할 수가 있다. 캐비테이션이 발생하기 시작하는 지점은 출구 크기가 커질수록 상류 쪽으로 이동한다. 또한 형상의 영향으로 하류 쪽으로 갈수록, 출구 직경이

작아질수록 유속이 빨라지는 경향을 보인다.

노즐-썩 부분에서는 노즐 타입이나 형상에 상관없이 비슷한 양상으로, 크게 와류가 형성되며 그 크기나 경향은 거의 유사한 것으로 나타났다.

4.4 출구 속도 분포 및 분사율

노즐 형상은 내부 유동 및 캐비테이션의 발생에 영향을 끼치고 또한 출구 속도 분포 및 분사율 등에도 변화를 가져온다. 출구 속도 분포는 분사각이나 관통력, 혼합기 형성 등과 관련 있다. 따라서 각 경우에 출구에서의 속도 분포와 함께 출구면에 속도 벡터를 투영시켜 분무 특성을 예측하여 보았다.

Fig. 13, 14에서 출구 속도 분포를 살펴보면 모든 케이스에서 노즐 가운데 부근에서 가장 빠른 속도를 보여주지만, 동심원 모양이 아니라는 점은 2차 유동으로 인하여 유동 분포에 변화가 있었음을 의미한다. 출구 속도는 앞서 유선을 나타낸 그림에서와 같이 노즐 출구 크기가 작아질수록 커진다.

노즐 출구 면에 투영시킨 단면의 속도 벡터는 모두 시계방향으로 회전하는 경향을 보인다. 이는 캐

Fig. 13 Velocity distribution at outlet, cylindrical nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 14 Velocity distribution at outlet, convergent-divergent nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 15 Velocity vector at outlet, cylindrical nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

Fig. 16 Velocity vector at outlet, convergent-divergent nozzle (OD/ID = 75, 100, 125%)

비테이션 및 노즐 형상으로 인하여 발생한 2차 유동 및 와류가 출구면 속도 성분에 영향을 끼쳤음을 의미한다.

그리고 출구면에서의 속도 벡터를 Fig. 15와 16에 나타내어 분사각을 측정된 결과, 원통형 노즐의 경우에는 세 케이스가 9.2~10.9° 정도로 10° 전후로 비슷하였으나, 수렴-발산형 노즐의 경우 큰 직경의 경우 15.2°로 작은 직경의 9.8°에 비해서 확연하게 큰 분사각을 보여주었다. 이처럼 형상에 따라서 분사각이 달라지며 형상 설계에 따라 조정할 수 있다.

출구 분사율은 연소와 관련되어있어, 엔진 선정 및 작동에 있어서 중요한 변수이다. 각 경우의 출구에서의 분사율은 Table 3과 같다.

결과를 살펴보면 출구 직경과 분사율은 비례한다. 입/출구 압력이 모든 케이스에서 같으므로 유로가 넓은 출구 직경이 큰 경우에 분사율이 높다. 입/출구 직경이 동일한 경우에는 노즐 반경이 존재하는 수렴-발산형 노즐의 경우에 분사율이 감소한다.

출구 직경 크기와 노즐 타입 모두 분사율에 영향을 주지만, 출구 직경 크기를 줄였을 때의 분사율 감소보다 새로 도입한 수렴-발산형 노즐 타입으로 인한 분사율의 감소 폭이 더 컸다.

이 결과들은 노즐 형상이 캐비테이션 뿐만 아니라 출구 분무 형태와 분사율에도 큰 영향을 주어, 엔진 사양에 따른 적절한 노즐 형상의 선정과 제작이 필요하다는 것을 의미한다.

Table 3 Rates of injection

Nozzle Type	OD/ID*100 (%)	분사율 (g/s)
cylindrical nozzle	75	0.941
	100	1.19
	125	1.20
con-di nozzle	75	0.592
	100	0.870
	125	1.08

5. 결 론

본 연구에서는 인젝터의 노즐 형상이 내부 유동 및 출구 특성에 미치는 영향을 알아보고자 원통형 노즐과 수렴-발산형 노즐에서 입구 직경을 고정시키고 출구 직경을 달리하여 설계한 총 6가지 형상의 노즐에 대해서 유동 해석을 수행하여 그 결과를 비

교하였고 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 노즐 입구 크기를 고정하고, 출구 크기가 변하는 경우, 발산도(출구 직경/입구 직경)가 커질수록 노즐 입구 상단에서 유동 박리 및 압력 강하가 심하게 발생하고 캐비테이션 영역이 증가한다.
- 2) 원통형 노즐의 경우, 노즐 입구 상단에서 발생한 캐비테이션은 노즐 상단을 통해 출구까지 전파되고, 노즐 하단에서도 캐비테이션이 발생하여 출구 특성에 영향을 미친다.
- 3) 새롭게 제안된 수렴-발산형 노즐에서는 노즐 입구 상단에서의 유동 박리의 영향보다는 후류에서 압력 강하로 인한 캐비테이션 발생이 우세하며, 캐비테이션 영역은 출구 직경이 커질수록 증가한다.
- 4) 출구 면이 작아질수록 유속이 증가하며, 노즐 출구 단면에서는 와류가 관찰되었다. 출구 직경 크기와 노즐 타입에 따라서 분사각이 달라질 수 있으며, 분사율의 경우에는 출구 직경이 작은 경우와 수렴-발산형 노즐 타입에서 감소했다.

추후 연구에서는 노즐 움직임을 반영한 비정상 해석을 통한 시간에 따른 노즐 내부 유동의 관찰과 함께, 분무 해석과의 연계를 통해 노즐 내부 유동이 분무에 미치는 영향에 대하여 살펴볼 예정이다.

후 기

본 연구는 현대자동차에서 지원한 산학협동과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) Y. Jang, M. Kim and K. Min, "A Study on Cavitation Flow in Diesel Injector Nozzle by Using Transparent Acrylic Model," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.406-411, 2001.
- 2) R. Payri, S. Molina, F. J. Salvador and J. Gimeno, "A Study of the Relation between Nozzle Geometry, Internal Flow and Sprays Characteristics in Diesel Fuel Injection Systems," KSME International Journal, Vol.18 No.7, pp.1222-1235, 2004.
- 3) R. Masuda, T. Fuyuto, M. Nagaoka, E. von Berg and R. Tatschl, "Validation of Diesel Fuel Spray and Mixutre Formation from Nozzle Internal Flow Calculation," SAE 2005-01-2098, 2005.
- 4) W. Ning, R. Reitz, R. Diwakar and A. Lippert, "A Numerical Investigation of Nozzle Geometry and Injection Condition Effects on Diesel Fuel Injector Flow Physics," SAE 2008-01-0936, 2008.
- 5) F. Payri, X. Margot, S. Patouna, F. Ravet and M. Funk, "A CFD Study of the Effect of the Needle Movement on the Cavitation Pattern of Diesel Injectors," SAE 2009-24-0025, 2009.
- 6) A. Dorri, A. Lamani (Londo) and A. Hoxha, "Influence of Hole Geometry in the Cavitation Phenomena of Diesel Injectors, a Numerical Investigation," GOMABN, Vol.47, No.3, pp.351-371, 2009.