

연료노즐의 내부유동 및 외부분무 특성

Characteristics of Internal Flow and Fuel Spray
in a Fuel Nozzle Orifice홍성태*, 박장혁**, 구자예***
S. T. Hong, J. H. Park, J. Y. Koo

ABSTRACT

The nozzle geometry and up-stream injection condition affect the characteristics of flow inside the nozzle, such as turbulence and cavitation bubbles. Flow details in fuel nozzle orifice with sudden contraction of cross sectional area have been investigated both experimentally and numerically. The measurements of velocities of internal flow in a scaled-up nozzle with different length to diameter ratio(L/d) were made by laser Doppler velocimetry in order to clarify the effect of internal flow on the characteristics of fuel spray. Mean and fluctuating velocities and discharge coefficients were obtained at various Reynolds numbers. The turbulent intensity and turbulence kinetic energy in a sharp inlet nozzle were higher than that in a round inlet nozzle. Calculations were also performed for the same nozzles as scaled-up experimental nozzles using the SIMPLE algorithm. External spray behavior under different nozzle geometry and up-stream flow conditions using Doppler technique and visualization technique were also observed.

주요기술용어 : Nozzle geometry(노즐형상), Scaled-up nozzle(확대상사노즐), Internal flow(내부유동), Fuel spray(연료분무), Turbulence kinetic energy(난류운동에너지), Droplet size(액적크기)

1. 서론

내연기관의 저연비화와 유해 배출가스 저감은 지구 환경보존적인 측면에서도 그 중요성을 더해 가고 있으며, 유해 배출가스 저감과 엔진 효율 향상을 목적으로 수행하는 미립화 효율 향상방안과 혼합기 형성과정에 관한 연구 동향이 종래에는 거시적인 노즐 외부분무 현상만을 관찰하였으나 최근에는 계측기기의 발달과 함께 연소실내의 연료 액적의 크기

및 속도분포를 측정하고 액적 간의 상호작용을 관찰하는 미시적인 연구도 함께 수행하고 있다. 또 최근에는 노즐형상과 분사조건에 따른 내부유동 현상 연구와 이들이 외부분무 발달과 어떻게 상호관계를 가지는가 하는 노즐내부유동과 외부분무발달과의 통합적인 연구가 요청되고 있다.

연료노즐 오리피스는 급격 축소 단면을 가지고 있으며 연료가 sac volume에서 오리피

* 한국항공대학교 대학원

** 고등기술연구원.

*** 한국항공대학교 항공기제공학과

스의 축소부로 들어갈 때는 오리피스 입구 형상에 따라 내부유동특성이 달라지며 이 내부유동특성에 따라 발달되는 분무 및 분무연소현상도 달라져서 궁극적으로는 엔진출력과 배기가스 수준에 영향을 미친다. 분사된 액체연료가 미립화 될 때 영향을 주는 노즐내부에서 발생할 수 있는 요소로서 노즐내부의 난류, 캐비테이션, 속도형상 등이 제시되고 있다[1-3]. 난류는 노즐 벽면의 전단력이나, 노즐 입구효과에 의해 발생하여 노즐내부의 유동특성에 영향을 주게 된다. 모서리 입구 또는 곡면 입구 등의 노즐 입구형상에 따라 분무특성이 다르게 나타나는 현상이 많은 연구자들에 의해 제시되었다[4-5]. 입구형상에 의해 노즐의 내부유동의 속도와 난류가 어떻게 변하며 분무에 어떤 영향을 미치는지에 대한 자세한 연구는 미흡한 실정이다. 실제 디젤노즐의 분무실험에서 공기와외 상호작용이 없도록 분무실을 거의 진공으로 만들어 주고 간헐 분사되는 현상을 관찰하였을 때 분사 초기에 상당한 분무각을 가진 분무가 형성되는 현상을 확인하였는데[6] 이는 노즐내부의 형상과 같은 분무의 상부조건이 외부 분무형성과 미립화에 영향을 주고 있음을 제시하고 있다. 그러나 실제 엔진에 사용되는 연료노즐의 직경은 0.2~0.4mm로 아주 작으며, 광학적으로도 측정 불가능하다. 따라서 실험 모델을 광학적으로 측정이 가능하도록

비례적으로 크게 만들고 단순화시키면 내부 유동의 가시화와 속도 및 난류강도 등의 측정이 가능하게 된다.

본 연구에서는 캐비테이션이 없는 단상유동의 조건에서 노즐 길이 대 직경비(L/d)로 기하학적으로 확대상사(100배)시키고 레이놀즈수를 상사시킨 단순 급격축소 노즐 오리피스의 입구형상과 길이 대 직경비의 변화에 따라 출구로 나가는 유동의 난류강도와 속도의 변화를 측정하여 비교하였다. 이를 위해 원형단면의 노즐 시험부를 갖는 내부유동 실험장치를 제작하였고, 레이저유속계를 이용하여 각 단면에서의 속도와 난류를 측정하였다. 실험에서 사용한 노즐형상과 동일한 조건에서 수치적으로 내부유동장을 예측하여 실험결과와 비교하였으며 수치계산에서는 노즐의 기하학적 상사비를 변화시켜서 실제 크기정도에서의 연료노즐 내부유동도 예측하였다. 또한 동일 형상의 노즐을 선정하여 액적의 크기 및 속도를 위상도플러 입자측정기(PDPA)로 측정하여 내부유동과 외부분무 발달현상을 연계시켰으며 노즐내부 유동현상이 분무의 미립화에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모형확대노즐실험

연료분사 노즐의 내부유동 모사를 위해 실제 노즐 크기(통상 $d=0.2\sim0.4\text{mm}$ 에서, $d=0.3\text{mm}$ 를 기준)의 100배 확대된(scale up) 노즐분사장치는 Fig. 1과 같다. 실험유체는 물을 사용하였으며, 펌프의 동력은 1.5KW이며 최대양정은 50m, 최대유량은 100 l/min 이다. 실험중 기포가 계속해서 발생하였고 이로 인해 유동상태가 불안정해지는 것을 방지하고, 시험부(test section)쪽으로 유량을 조절하기 위해 압력탱크를 장착하였다. 압력탱크에 공기제거관을 연결하여 장치내부에서 발생한 기포가 물과 같이 수조(reservoir)쪽으로 빠

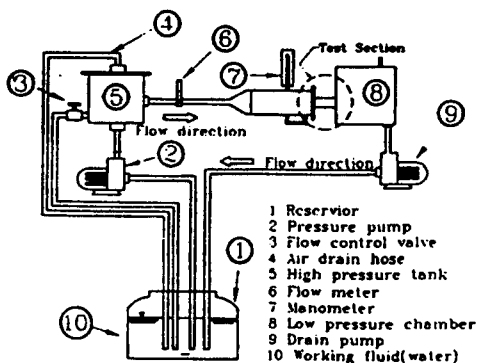


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus(1)

저나가도록 하였다. 유량조절밸브로 압력탱크의 압력을 조절하여 시험부 쪽으로 원하는 유량을 보낼 수 있었다. 유량은 오리피스식 유량계를 사용하여 측정하였으며, 측정 범위는 8.3~58 l/min이다. 노즐 입구에서의 압력은 마노메타를 제작하여 측정하였고, 노즐 출구에서의 압력은 대기압력으로 유지하였다.

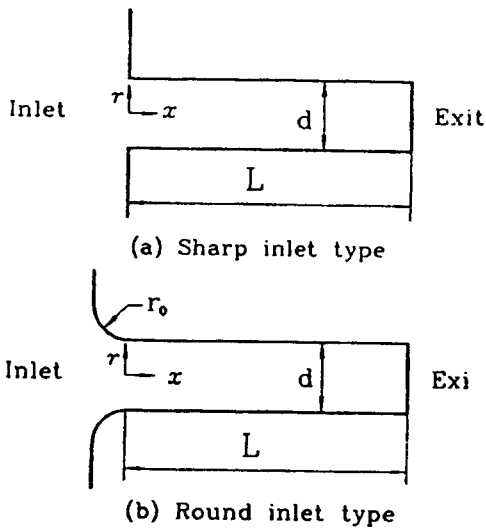


Fig. 2 Sudden contraction for turbulent flow
본 실험에서는 노즐길이 대 직경비(L/d), 레이놀즈수와 입구형상을 변수로 하여 유량계수를 구하였고 L/d=4에 대해 입구형상이 다른 노즐의 입구에서 출구에 이르기까지 축방향 속도 및 난류강도의 형상변화와 출구에서 반경방향 난류강도를 측정하였다. 또한 모서리입구 노즐에서 길이 대 직경비에 따른 노즐출구에서의 각 방향 난류강도를 측정하였다. Fig. 2는 단순 급격축소 노즐 오리피스 형상을 나타낸다. 노즐 길이 대 직경비는 모서리입구 노즐은 L/d=1, 3, 4, 5, 8, 곡면입구 노즐은 L/d=1, 4, 8을 선택하였다. 트랜스미터로부터의 입사광의 교차평면은 노즐 오리피스의 중심평면과 일치하기 때문에 축방향 속도의 측정위치는 노즐의 수평 중심평면상에서 취하였다. 본 실험에서는 별다른 산란입자의 공급 없이 작동유체로 사용된 물

이 함유하고 있는 작은 공기 기포나 입자에 의한 산란 신호를 측정할 수 있었다. 유량계수는 다음과 같이 정의한다.

$$C_v = U_m / \sqrt{2\Delta p / \rho}$$

여기서, U_m 은 유량계에서 측정된 유량에서 환산된 평균속도이며, 압력차 Δp 는 노즐입구와 출구에서의 압력차를 의미하며 노즐입구에 설치된 마노메타의 수두를 읽었다. ρ 는 물의 밀도이다. 유량은 압력탱크의 유량조절밸브를 수동으로 조작하여 원하는 유량을 시험부 쪽으로 흐르게 하였으며 그때 유량을 기준으로 노즐입구에서의 압력을 수두로 읽었다. 실제 디젤 노즐의 직경은 0.2~0.4mm이고 평균속도 150~200m/sec일 때의 레이놀즈수는 13000~26000 정도이다. 본 확대 모형노즐 실험에서는 노즐 출구 직경을 기준으로 한 레이놀즈수가 15,000~30,000사이인 5개 조건을 정하여 측정하였다.

2.2 외부분무실험

분무실험을 위한 장치는 Fig. 3과 같다. 압축질소를 이용하여 디젤 저장통을 가압하면 디젤 연료가 분무실에 장착된 노즐을 통하여 분사된다. 분무실을 가압하였을 때의 분무의 변화를 보기 위하여 2.1MPa까지 가압이 가능하도록 분무실을 제작하였다. 또한, 분무실 측면에 두께 30mm의 석영유리(quartz window)를 부착하여 레이저빔의 광로를 형성

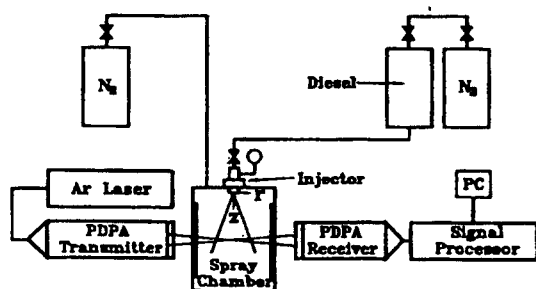
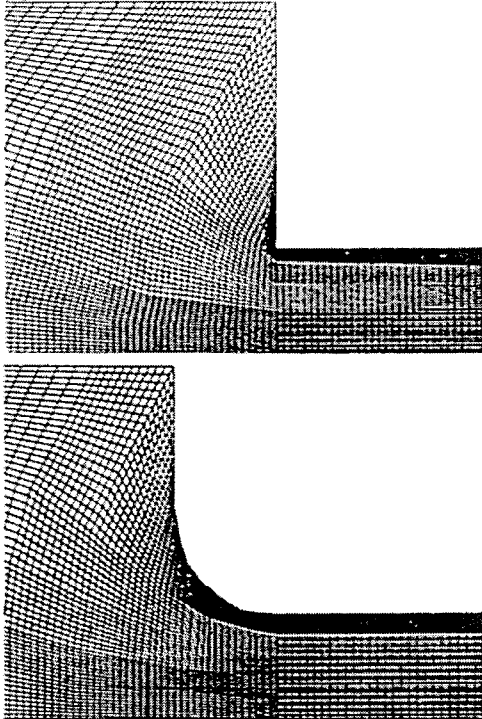


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus(II)



round inlet nozzle

하고 사진 촬영을 할 수 있게 하였다. 분무실의 압력을 대기압, 0.6, 2.1MPa로 하고, 이에 따른 분사압력을 각각 10.1, 10.6, 12.1MPa로 변화시킴으로써, 같은 압력차 10MPa에서 분무실의 압력 변화에 따른 분무 발달의 차이를 볼 수 있도록 하였고, 또한 분무실 압력이 대기압, 2.1MPa일 때 분사압력차를 각각 2, 4, 6, 8, 10MPa로 변화시켜 분사압력과 분무실 압력이 분무에 미치는 영향을 동시에 볼 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 노즐은 직경이 실제 엔진에 사용되는 연료노즐과 비슷한 0.3mm인 plain-orifice 노즐이며, 노즐 직경 d가 일정하고 노즐길이 대 직경비(L/d)가 1, 3, 4, 5, 8이며, 각각 모서리 입구(sharp inlet)와 곡면 입구(round inlet)를 갖는 총 10개의 노즐을 제작하였다. 모든 노즐은 드릴 작업으로 제작되었으며, 노즐 입구의 가공상태를 보기 위하여 100배의 확대사진을 촬영하였다. 분무

사진 촬영을 위한 광원은 35W copper laser 이고, collimating lens와 cylindrical lens 의 배열로 laser light sheet를 형성하였다.

3. 수치 계산

수치계산에서는 속도벡터, 압력, 난류매개변수들의 앙상블 평균을 계산할 수 있는 지배방정식을 유한체적법을 사용하여 해를 얻었다. 난류는 k-ε 방법을 사용하였으며 지배방정식, 경계조건 등 수치계산의 자세한 내용은 참고문헌[7]에 기술되어 있다. Fig. 4는 단순 급격축소 노즐의 격자 모양을 나타내며 Fig. 6-9는 수치계산으로 예측한 결과와 실험결과를 비교한 그림이다.

4. 결과 및 분석

4.1 모형확대노즐의 내부유동특성

Fig. 5는 $Re_d=15,000$ 에서 모서리입구 노즐은 $L/d=1, 3, 4, 5, 8$ 에 대하여, 곡면입구 노즐은 $L/d=1, 4, 8$ 에 대하여 유량계수를 측정된 결과이다. 유량계수는 모서리입구 노즐의 경우 $L/d=3$ 일 때 가장 크며 $L/d=3$ 이상에서는 L/d 가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. $L/d=1$ 인 경우에는 입구에서 박리된 유동이

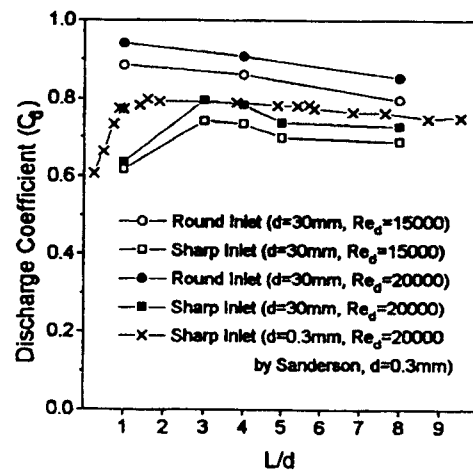


Fig. 5 Discharge coefficient with L/d and inlet shape

인 모서리 입구와 곡면입구를 갖는 노즐의 속도와 난류강도를 축방향으로 4~5개 지점, 반경방향으로는 노즐 중심축을 포함 11개 지점에서 측정하였다. 각 측정 위치에서 얻어

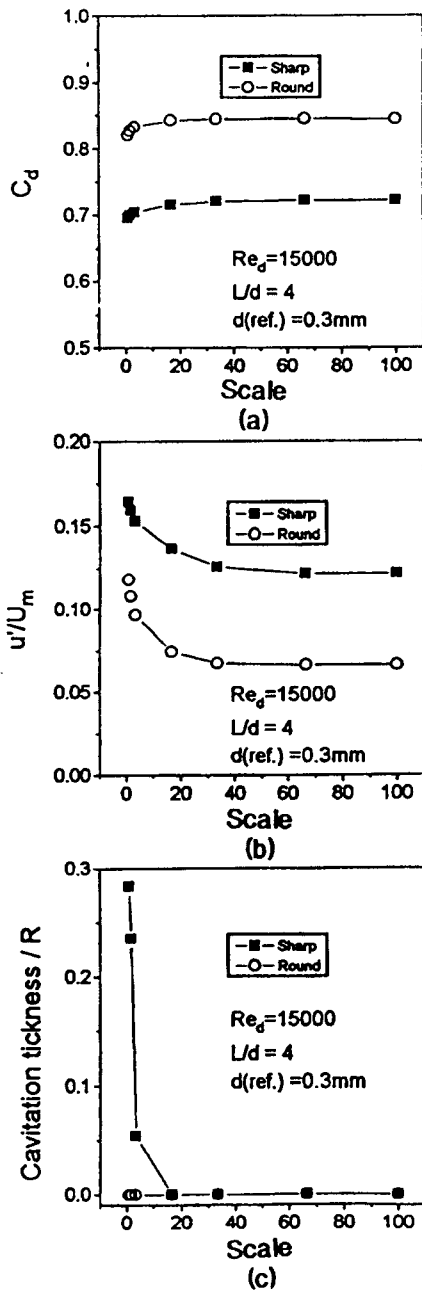


Fig. 10 Flow characteristics with scale factor in the scaled up nozzle

진 시간평균된 속도를 단면을 지나는 질량평균속도로 무차원화하였고, 난류강도는 요동 속도성분에 대한 평균제곱근(root mean square)값을 단면을 지나는 질량평균속도로 무차원화하여 표시하였다. Fig. 6은 곡면 입구에서부터의 출구 직경($d=30\text{mm}$)에 0.31, 0.5, 2, 3.71배 되는 단면에서의 속도를 평균 속도로 나눈 무차원화된 속도 형상이고 Fig. 7은 각 단면에서의 무차원화된 난류강도이다. 레이놀즈수($Re_d = \rho U d / \mu$)가 15,000 이므로 난류 유동임을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보여진 것처럼 계산치와 실험치가 노즐 내부 거의 모든 영역에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 단, 벽면에서의 난류강도가 계산치 보다 실험치가 더 크게 나오는 것은 벽면에서의 3차원 변동속도는 축방향 변동속도 u' 이외에 radial 변동속도도 있으며 또 다른 이유로는 벽면 근처에서의 $k-\epsilon$ 모델의 정확성과 실험의 정확성 등에 기인하는 영향도 있을 수 있다. Fig. 8은 모서리 입구에서부터의 출구 직경($d=30\text{mm}$)에 0.31, 0.5, 2, 3.71배 되는 단면에서의 속도를 평균 속도로 나눈 무차원화된 속도 형상이고 Fig. 9는 각 단면에서의 무차원화된 난류강도이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 보여진 것처럼 계산치와 실험치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있고 $x/d=2$ 와 $x/d=3.71$ 에서는 계산치와 실험치 모두 거의 일정함을 볼 수 있다.

Fig. 10은 레이놀즈수를 일정하게 유지하면서 노즐의 직경을 실제 크기부터 100배까지 확대하여 수치계산한 결과치이다. (a)는 100배 확대한 노즐보다 실제 크기 노즐의 유량계수가 작은 것을 보여주며, (b)에서 실제 크기의 노즐의 난류강도가 큰 것을 알 수 있다. (c)는 실제 크기 노즐처럼 작은 직경의 노즐에서만 그것도 모서리 입구 노즐에서만 캐비테이션 현상이 발생할 가능성이 있음을 나타낸다. 실제 크기의 모서리 입구 노즐에

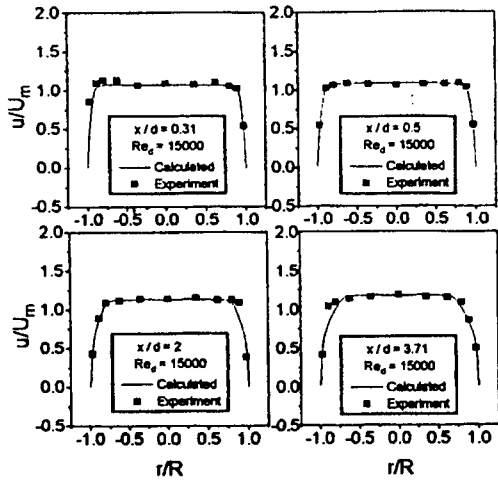


Fig. 6 Comparison of axial velocity between predictions and measurements for round inlet nozzle

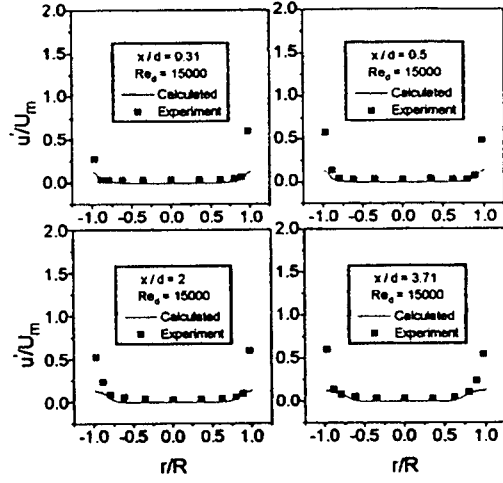


Fig. 7 Comparison of turbulent intensity between prediction and measurement for round inlet nozzle

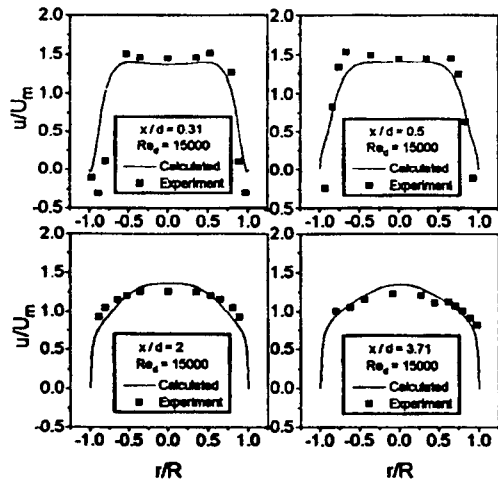


Fig. 8 Comparison of axial velocity between predictions and measurements for sharp inlet nozzle

노즐내부에 재부착하지 않고 그대로 외부로 빠져 나가는 현상(flip flop)이 관찰되었다. 이때는 노즐내 전 영역에서의 유동이 수축되는 vena contraction으로 유효단면적이 줄어드는 효과가 발생하여 압력손실이 현저하게 증가한 것으로 판단된다. $L/d=3$ 에서 8 가

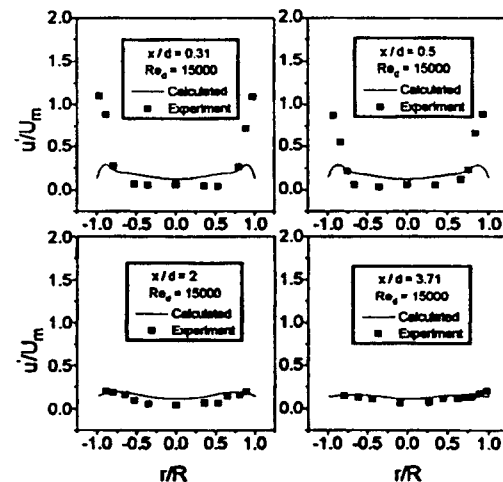


Fig. 9 Comparison of turbulent intensity between prediction and measurement for sharp inlet nozzle

지는 비교적 완만하게 감소하는데 노즐 벽면에서의 마찰에 의해 운동에너지의 손실이 발생한 것으로 설명할 수 있다. 또한 곡면입구 노즐의 유량계수는 L/d 가 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데 이것도 노즐 벽면에서의 마찰손실로 생각된다. 본 실험에서는 $L/d=4$

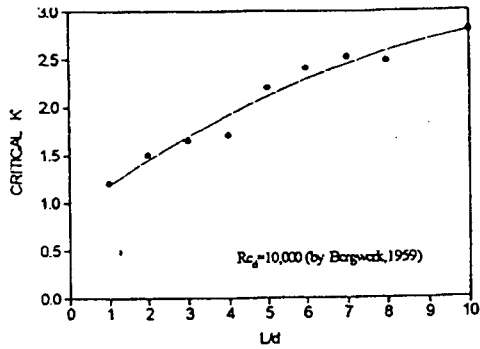


Fig. 11 Critical cavitation number with L/d

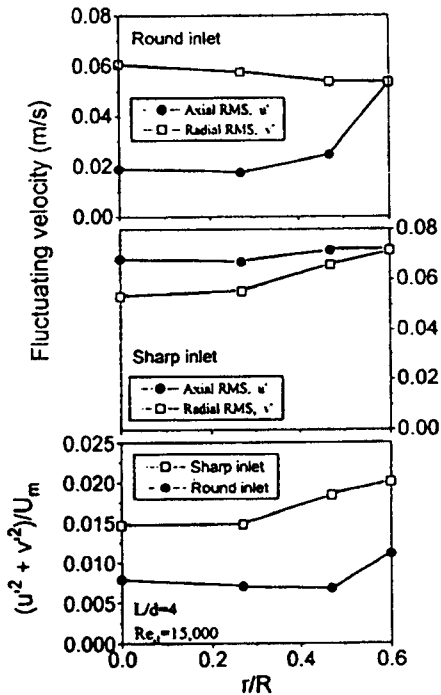


Fig. 12 Fluctuating velocity and turbulence kinetic energy with radial position at nozzle exit(L/d=4)

서는 캐비테이션 현상이 발생할 가능성이 있으므로 100배 확대한 노즐에서의 유동 현상을 그대로 실제 노즐에 적용하기에 어려움이 발생할 것이다. 실제 노즐과 레이놀즈수가 상사되고 기하학적 상사가 되어도 압력과 속도 조건이 다르면, 내부유동 특성이 상당히 다르게 나타날 수 있다는 사실을 알 수 있다.

Reitz[8]가 미립화 영역 분무에 사용한 노즐의 캐비테이션수의 범위는 4.3-140인데, 본 실험에서 사용된 확대노즐에서의 캐비테이션수의 최대값은 0.001을 넘지 못하였다. 캐비테이션수는 $\Delta p / (p_{gas} - p_v)$ 로 정의되며, 여기서 Δp 는 노즐 입구와 출구의 압력차, p_{gas} 는 분무실 압력, p_v 는 연료의 증기압이며, p_v 는 거의 영에 가깝다. Reitz의 모서리입구 노즐의 유량계수 측정 시 캐비테이션수는 Fig. 11에 보인 바와 같이 Bergwerk[9]가 제시하는 임계 캐비테이션수를 초과하여 캐비테이션이 발생하였다고 생각되며, 낮은 캐비테이션수 범위의 확대모형노즐 실험에서는 캐비테이션이 일어나지 않았으므로 유량계수 값이 증가한 것으로 생각된다. 곡면입구노즐인 경우, Ohn[3]의 분사실험에서의 캐비테이션수는 3.44인데, 캐비테이션이 발생하지 않은 본 연구의 확대노즐실험에서의 유량계수와 거의 비슷하게 나타난 것으로 보아 두 경우 모두 캐비테이션이 일어나지 않았다고 생각된다. 따라서 임계 캐비테이션수 조건만을 만족한다고 해서 캐비테이션이 발생하지 않으며, 노즐 입구형상에 의해 내부유동특성이 다르다는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 곡면입구와 모서리입구 노즐의 출구에서 축방향 난류강도와 반경방향 난류강도를 측정하고, 난류운동에너지를 비교하였다. 난류에너지는 모서리입구 노즐이 곡면입구 노즐에 비해 크며, 노즐의 중심축에서 보다 벽면으로 갈수록 더욱 커지고 있다.

4.2 외부분무실험

Fig. 13과 14는 축방향 및 반경방향 위치에 따른 SMD의 변화를 나타낸다. Fig. 13에 나타난 SMD의 축방향 변화에서 모서리입구 노즐에서 생성된 액적의 SMD가 곡면입구 노즐에서 생성된 SMD보다 작은 경향을 보인다. 이 결과는 모형확대노즐의 내부유동 실험에

서 모서리입구 노즐의 출구지점에서의 난류 에너지가 곡면입구 노즐의 출구지점보다 크다는 설명으로 볼 때 노즐 출구에서의 난류 강도가 큰 경우가 미립화가 잘되어 SMD가 작아진다고 생각할 수 있다. Fig. 14에서 모서리입구 노즐과 곡면입구 노즐 모두 분무 중심축에서의 SMD가 가장 크고, 반경방향으로 갈수록 SMD가 대체로 감소한다. 노즐 출구로부터 30mm인 지점($z=30\text{mm}$)에서 반경방향으로의 SMD 변화는 모서리입구 노즐의 SMD가 곡면입구 노즐의 SMD 보다 작게 나타난다. 그러

나 노즐 출구로부터 60mm 지점($z=60\text{mm}$)에서의 분무중심축에서는 모서리입구 노즐의 SMD가 작지만, 분무중심축에서 벗어나 반경방향으로 갈수록 곡면입구 노즐에서 생성된 액적의 SMD가 모서리입구 노즐의 SMD보다 작게 되는데 그 이유는 곡면입구 노즐의 분무에서 노즐 출구로부터의 거리가 1mm 이상인 지점에서는 분무의 가장자리에 해당되기 때문이다. 곡면입구 노즐에서 $r=6\text{mm}$ 지점에서는 거의 분무가 없으나 가끔씩 모멘텀이 큰 액적이 측정채적에 도달하기 때문에 $r=3\text{mm}$ 지점

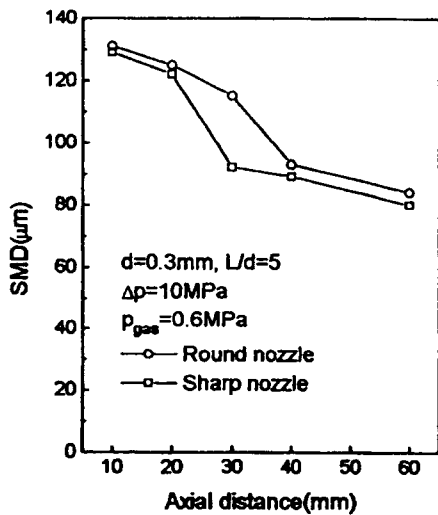


Fig. 13 Droplet sizes along spray axis

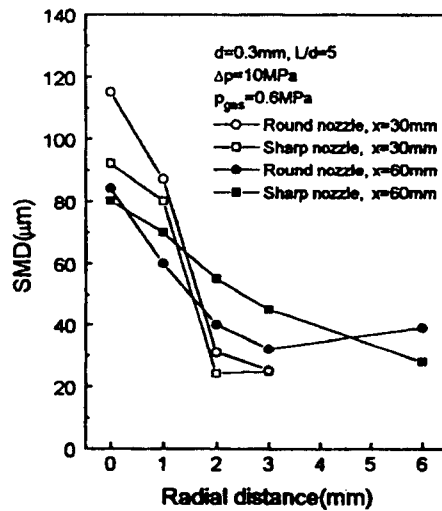


Fig. 14 Droplet sizes in radial position

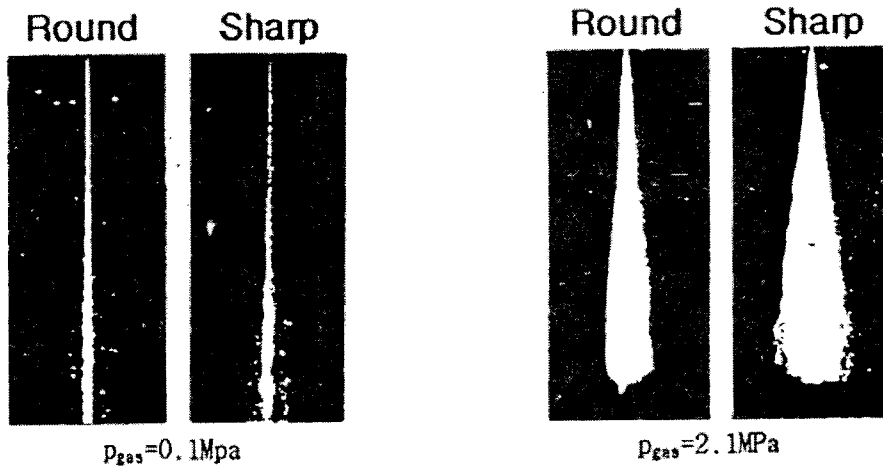


Fig. 15 Spray development of sharp and round inlet nozzle at different chamber pressure ($\Delta p=10\text{MPa}$, $L/d=5$)

보다 SMD가 크게 나타난다.

Fig. 15는 분사압력과 노즐 입구형상에 따른 분무발달 변화를 나타낸다. 곡면입구 노즐보다 모서리입구 노즐의 분무각이 더 넓게 나타났고, 두 가지 노즐 모두 마찬가지로 분무실의 압력이 높을 때의 분무각이 더 넓었다. 또한 분무실의 압력이 낮을 때에는 노즐 입구형상의 영향이 별로 없지만, 분무실의 압력이 올라갈수록 입구의 형상이 분무에 미치는 영향이 커지는 것을 볼 수 있다. 실제 엔진에서 연료 분사 시의 연소실 내부의 압력은 본 실험의 압력 범위보다 크게 높은 것을 감안하면 입구 형상의 변화가 분무에 미치는 영향은 더 클 것으로 예상된다.

5. 결론

노즐 입구형상에 따른 확대모형노즐의 내부 유동실험과 분무실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 노즐 출구에서의 난류에너지와 난류강도는 모서리입구 노즐이 곡면입구 노즐보다 높았다.
- (2) 모서리입구 노즐에서 생성된 액적의 크기가 곡면입구 노즐에서 생성된 액적보다 작고, 모서리입구 노즐의 분무각이 곡면입구 노즐의 분무각보다 넓었다.

후 기 : 본 연구는 1994년 한국과학재단의 핵심전문연구(과제번호941-1000-025-2)지원 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bergwerk, W., "Flow Pattern in Diesel Nozzle Spray Holes," Proceedings Institution of Mechanical Engineerings, Vol. 173, No. 25, pp. 655-660, 1959.
2. Licharowicz, A., Duggins, R.K. and Markaland,

E., "Discharge Coefficient for Incompressible Non-Cavitating Flow Through Long Orifice," Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 7, No.2, pp. 210-219, 1965.

3. Ohrn, T.R., "The Effect of Internal Geometry and Injection Pressure on the Flow and Spray Characteristics of a Plain Orifice Atomizer," MS Thesis, Purdue Univ., 1989.

4. Andrea, J.K., "Turbulent Flow in a Scale Model of A Diesel Fuel Injector Nozzle Hole", Ph.D. Thesis., University of Wisconsin-Madison., 1992.

5. Shimizu, M., Arai, M., and Hiroyasu, H., "Disintegrating Progress of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle," JSME Vol. 56, No. 528, pp. 2519-2525, 1990.

6. Koo, J.Y. and Martin, J.K., "Near Nozzle Characteristics of a Transient Fuel Spray," Atomization and Spray, Vol. 5, No. 1, pp. 107-121, 1995.

7. 구자예, 박장혁, 오두석, 정홍철, "연료 노즐 내부유동 현상의 수치해석" 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제6호, 1996.

8. Reitz, R.D. and Bracco, F.V., 1979, "Ultra High Speed Filming of Atomizing Jets," Phys. Fluid 22(6), June 1979.

9. Bergwerk, W., "Flow Pattern in Diesel Nozzle Spray Holes," Proceedings Institution of Mechanical Engineerings, Vol. 173, No. 25, pp. 655-660, 1959.