

## 분사노즐 출구 각도 변화가 분사특성에 미치는 영향에 관한 계산적 고찰

김주연<sup>1</sup> · 박권하<sup>†</sup> · 이승호<sup>2</sup>

(원고접수일 : 2012년 7월 27일, 원고수정일 : 2012년 9월 13일, 심사완료일 : 2012년 10월 29일)

### Computational Study on The Effect of Injection Nozzle Hole Exit Angle Variation on Injection Characteristics

Ju Youn Kim<sup>1</sup> · Kweon Ha Park<sup>†</sup> · Seung Ho Lee<sup>2</sup>

**요약** : 박용기관에서의 배기규제는 단계별로 강화되고 있으며 연소실 내외의 종합대책이 요구되고 있다. 기관 내부의 연소 특성은 배기배출 특성과 밀접한 관계가 있으며 분사밸브의 노즐과 노즐 홀 특성은 연소에 중요한 영향을 미친다. 분무 특성을 향상시키기 위한 노즐에 관한 연구는 입구형상, 직경 등에 집중되고 있으며, 노즐 출구의 형상에 대해서는 연구가 부족하다. 본 연구에서는 노즐 출구의 형상을 0도에서 90도까지 변화시키면서 계산을 수행하였다. 분사 압력, 질량유량, 유속, 유동특성 등을 종합하였을 때 노즐 출구 각도를 30도와 60도 사이로 하였을 때가 가장 효과적일 것이라 사료된다.

**주제어** : 분무특성, 노즐 형상, 디젤기관

**Abstract**: Emission regulations have been strengthened step by step for marine engines. A noble measure is required both inside and outside of the combustion chamber. The combustion characteristics in cylinder have a very close relationship with the exhaust emission characteristics. Injection valve and nozzle hole geometry is an important factor for combustion. The study to improve the spray characteristics has concentrated on nozzle inlet geometry and nozzle hole diameter, but the exit geometry has not considered. In this study the nozzle exit angle variation was tested. The results show that the angle between 30° and 60° is more effective than the other cases.

**Key words**: Injection characteristics, Nozzle geometry, Diesel engine

## 1. 서 론

디젤 엔진은 현재 사용되는 어떠한 내연 기관보다 높은 열효율을 가지고 있으며 사회 전반적으로 가솔린 기관과 함께 가장 많이 사용되는 기관이다. 특히 큰 출력을 요구하는 대형 트럭이나, 건설 장비, 선박, 발전용 및 산업용으로 널리 쓰이며 현재는 디젤 기술이 많이 발달되었기 때문에 중소형 차량용으로 공급 되고 있다. 하지만 디젤 기관은 가솔린 기관과는 달리 대기 환경 보전법에 의하여 엄격한 규제를 받고 있으며, 특히 질소 산화

물과 매연 미립자의 배출에 대한 규제는 매우 강화되고 있다. 강화되는 배기규제를 만족하기 위하여 연소에 매우 중요한 역할을 하는 연료 분사에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

윤[1]은 연료분사 노즐 형상이 선박용 디젤 엔진의 질소산화물(NOx)에 미치는 영향에 대하여 연구하였는데, 노즐 홀 지름 및 개수가 증가할수록 연료 소비율은 증가하고 NOx 발생량은 감소하여 연료 분사 노즐 홀 지름을 바꾸는 것이 노즐 홀 개수를 바꾸는 것보다 NOx 개선에 효과적임을 강조하

† 교신저자(한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4367)

1 한국해양대학교 대학원 기계공학과, E-mail: fdotori@yahoo.co.kr, Tel: 010-3833-7736

2 ㈜신원 미크론, E-mail: nozzle@korea.com, Tel: 010-8521-4066

였다. 김[2]은 이중제트에서 노즐과 노즐 사이의 각도 변화에 따른 유동 특성에서 난류강도가 증가하는 원인은 유입과 상호 간섭 때문이며 노즐 사이의 각도가 작아질수록 난류 에너지가 크다는 연구를 하였다. 차[3]는 분사 노즐 분공경에 따른 디젤 엔진 연소실내 분무 거동에 관한 연구에서 노즐 분공경 축소는 연료 미립화 및 공연비(A/F) 증대 등을 유발하여 매연과 연비를 향상 시킬 수 있음을 수치 해석 결과와 성능 실험 결과를 통해 발견 하였다. 연료분무 자체의 거시적인 특성은 분무 도달거리, 분무각 등과 미시적인 특성인 연료 액적 입자의 크기 및 속도는 상부조건 즉 노즐 형상과 노즐 내부의 유동현상에 큰 영향을 받기 때문에 노즐 내부의 유동 현상이 연료분무의 미립화에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[4-7].

디젤엔진의 분무 특성은 혼합기 형성, 연소 및 배출물 형성에 중요한 영향을 미친다. 노즐 내부의 유동은 3차원 특성을 가지고 있으므로 실험만으로는 가시화가 용이하지않다. 이에 수치해석적 시뮬레이션을 이용하여 노즐 내부 뿐만 아니라 가시화하기 힘든 부분, 즉 실험으로 측정이 곤란한 영역을 파악할 수 있으므로 국내외로 많은 연구가 진행되고 있다[8-11]. 이러한 이유로 최근에 캐비테이션이 발생하는 디젤 인젝터 내부의 형상 및 운전 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 3차원 해석의 중요성은 증대되고 있다.

이러한 많은 연구에도 불구하고 노즐 출구의 형상에 대한 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 MAN L27/38용 분사 노즐의 출구에 개도 각을 준 경우의 분사 특성을 수치 해석적으로 분석하였다.

## 2. 수학적 모델 및 계산조건

### 2.1 수학적 모델

노즐 출구 개도 각이 분사 특성에 미치는 영향을 계산적으로 고찰하였다.

유동 계산에 적용된 질량, 모멘텀, 에너지 보존에 대한 전달 방정식은 다음과 같다. 연속방정식과 모멘텀 방정식은 식 (1)과 (2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

여기서 응력텐서  $\tau$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot U) \quad (3)$$

에너지 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $h_{tot}$ 는 전 엔탈피를 나타내며  $h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2$ 이다.  $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ 는 점성 일의 항이며  $U \cdot S_M$ 은 외부 모멘텀 생성항이다.

난류계산은 계산영역이 작고 형상이 복잡한 계산에 정확도가 높은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다(식 (5)).

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (5)$$

$$\arg_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 w}\right), \frac{4\rho k}{CD_{kw} \sigma_w^2 y^2}\right) \quad (6)$$

여기서  $y$ 는 벽과의 거리를 나타내며  $v$ 는 동점성 계수를 나타낸다.

$$CD_{kw} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_w^2 w} \nabla k \nabla w, 1.0 \times 10^{-10}\right) \quad (7)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (8)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 w}\right) \quad (9)$$

### 2.2 계산 격자 및 조건

Figure 1은 출구의 개도 각이 0°, 30°, 60°, 90°인 경우의 MAN L27/38 용 분사 노즐의 형상을 나타낸다.

계산격자의 생성은 UG와 ANSYS ICEM CFD를 이용하였으며 평균 격자의 수는 250만개 정도이며 Figure 2와 같다.

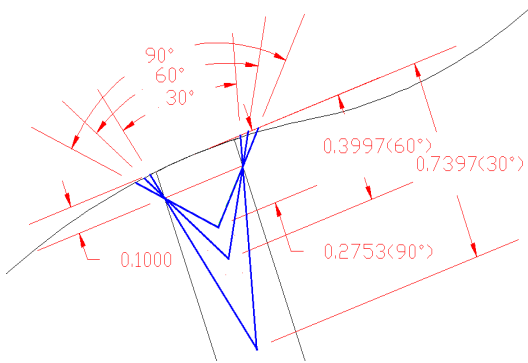


Figure 1: Nozzle shapes with exit angle variation.

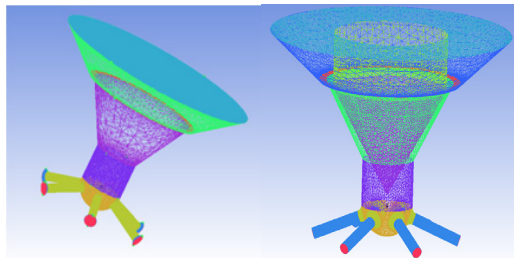


Figure 2: Shape and grids for calculation

계산 조건은 Table 1과 같다. 노즐 개도 각과 노즐 입구의 곡률반경 모두 같은 조건으로 계산을 수행하였다. 사용한 유체는 액체 상태의 세탄을 사용하였으며 세탄의 온도는 60°C이며 연소실 내부에 노출된 노즐 출구의 압력은 350bar로 하였다.

Table 1: Calculation Conditions

Items		conditions
Nozzle shape	Exit angle	0, 30, 60, 90 [degree]
Inlet condition	Fluid	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
	State	Liquid
	Pressure	350 [bar]
	Temp.	60 [°C]

### 3. 계산 결과 및 고찰

#### 3.1 노즐 내부 압력의 변화

Figure 3은 노즐 개도 각에 따른 전체 압력의 변

화를 나타낸 것이다. 전반적으로 0도를 제외한 3종류의 경우 모두 압력이 비슷한 경향을 보이며, 노즐 출구 각도가 커지면 노즐 내부 압력분포가 낮아지는 경향을 나타낸다. Figure 4는 압력 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 출구 각도가 0도인 경우가 가장 높고 각도가 커지면서 압력이 감소한다. 이는 출구 개도 각이 증가 하면서 노즐 내부의 유동 마찰이 저감된 원인으로 판단된다.

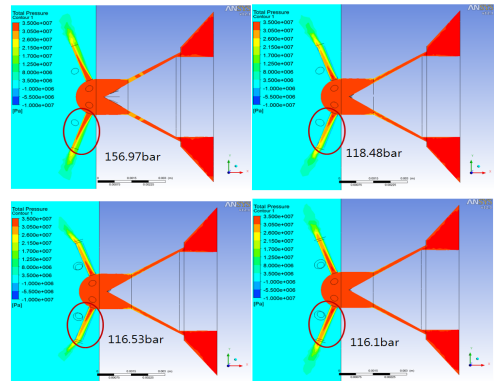


Figure 3: Passage pressure at nozzle hole exit angles of 0°, 30°, 60°, 90°

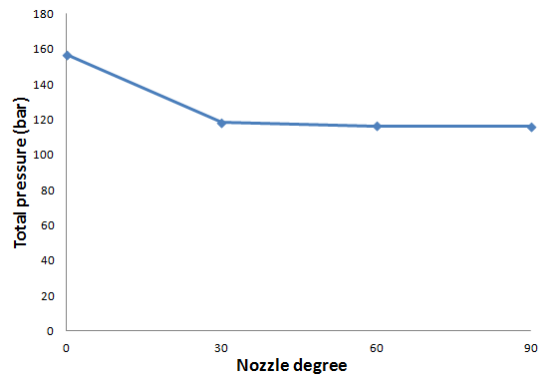


Figure 4: Passage pressures at nozzle hole exit angles of 0°, 30°, 60°, 90°

#### 3.2 노즐 출구면 압력의 변화

Figure 5는 노즐 개도 각에 따른 출구 압력 변화를 나타낸다. 개도 각이 0인 경우 출구 면에 부압 발생이 없으며 좁은 영역에서만 압력변화를 나타낸다. 30도인 경우 우측에 부압이 발생하며 각도가 증가하면서 부압발생 영역이 증가함을 나타낸다.

이는 압력변동에 의한 분무유동의 활발한 혼합 작용이 개도각의 증가와 함께 발생한다는 것을 의미한다.

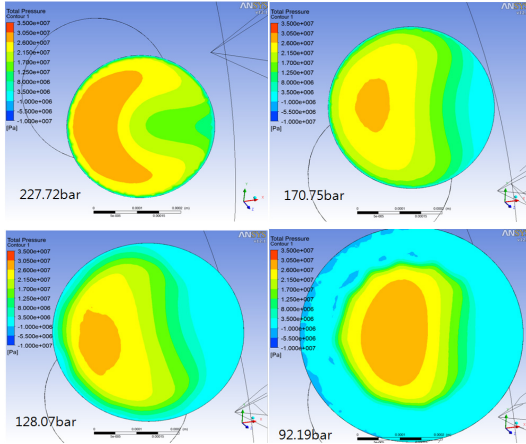


Figure 5: Outlet pressure at nozzle hole exit angles of 0°,30°,60°,90°

### 3.3 노즐 전체 유속

Figure 6은 노즐 개도 각에 따라 노즐의 전체 유속을 나타낸 것이며 Figure 7은 평균 유속의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 노즐의 출구 개도 각이 0도인 경우가 가장 유속이 낮으며 30도에서 증가하다 60도 일 때 유속이 가장 높게 나타나며 90도가 되면서 유속이 다시 감소한다.

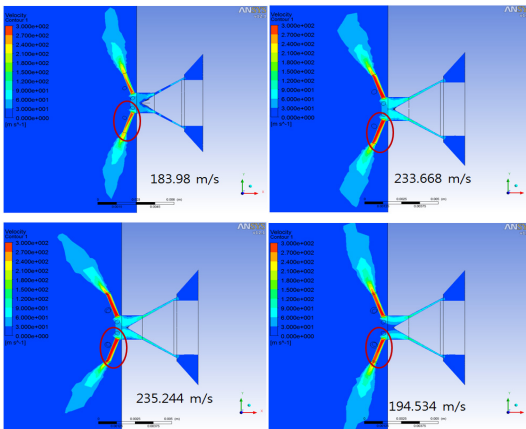


Figure 6: Passage flow velocity at nozzle hole exit angles of 0°,30°,60°,90°

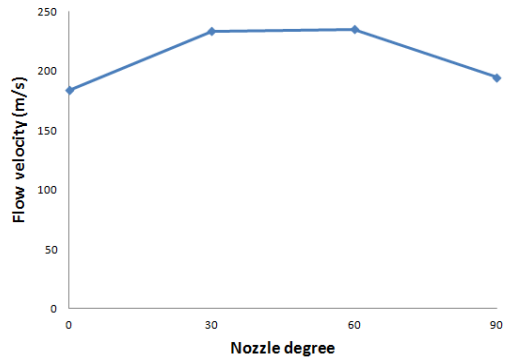


Figure 7: Passage flow velocity graph at nozzle hole exit angles of 0°,30°,60°,90°

### 3.4 노즐 출구면 유속 및 유량의 변화

Figure 8는 노즐 개도 각에 따라 노즐 출구면의 유속과 유량을 나타낸 것이며 Figure 9은 출구에서의 연료의 질량 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 개도 각이 0인 경우 전반적으로 낮은 유속 분포를 나타내며 높은 유속 영역이 증가하며 60도 일 때 가장 넓은 영역에서 높은 유속을 나타낸다. 유량 역시 60도 일 때 가장 많으며 90도에서는 다시 감소한다.

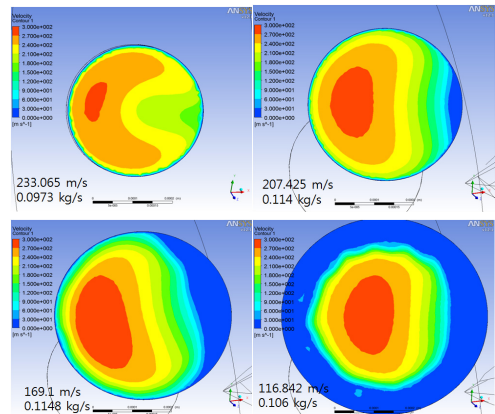


Figure 8: Outlet flow velocity and mass flux at nozzle hole exit angles of 0°,30°,60°,90°

### 3.5 노즐 출구 유동 특성

Figure 10은 노즐의 출구 부분의 유동을 벡터로 나타낸 것이다. 개도 각이 0도인 경우는 최대 296m/s 속도로 분사가 되며 개도 각이 없어서 유

동이 직진성만을 보여준다. 30도의 경우는 최대 343m/s로 16% 증가 되었으며 각도가 약간 상부로 치우쳐 지면서 0도 보다는 유동이 활성화 된다. 60도의 경우는 최대 386m/s로 30% 증가 되었으며 주변의 공기가 노즐의 벽면으로 유입이 되면서 스웰 유동이 매우 활발하게 발생한다. 90도의 경우는 노즐 출구에 유입되는 공기의 유동이 균형을 이루며 개도 각이 0도인 경우와 유사하게 직진성을 보이고 최대 속도도 319m/s로 감소된다.

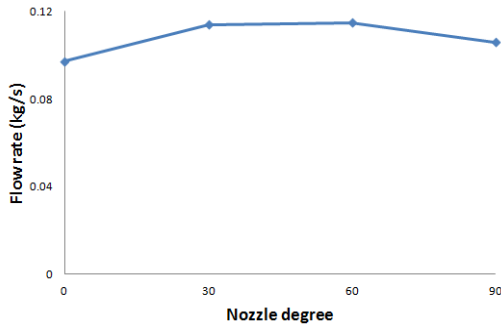


Figure 9: Outlet mass flux graph at nozzle hole exit angles of 0°, 30°, 60°, 90°

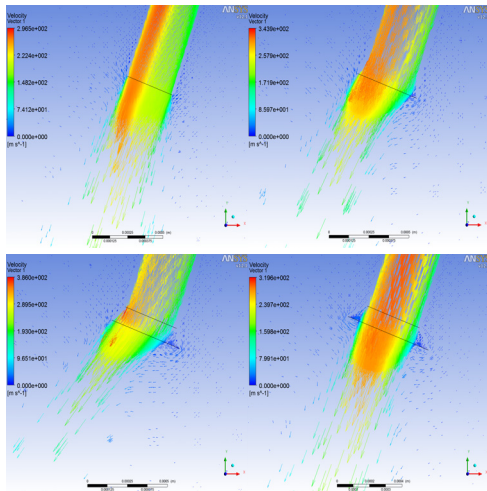


Figure 10: Outlet flow velocity vector at nozzle hole exit angles of 0°, 30°, 60°, 90°

이상의 결과를 종합하면 노즐 홀 출구에 개도 각을 주어 출구를 미세하게 확장하면 노즐 내부의 유체마찰 저감에 의한 압력의 감소와 출구로 유입

되는 공기의 영향으로 유동이 활성화 되며 최대 분사속도가 증가된다. 이러한 효과는 30도와 60도에서 가장 크게 나타난다.

#### 4. 결 론

연료 분사 노즐의 출구 개도각 변화에 따른 분사의 특성을 계산에 의하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다

- 1) 노즐 내부압력은 개도 각이 없는 경우와 비교할 때 개도 각이 30도일 때 25% 저감 되었으며 60도, 90도 까지 유사한 저감량을 나타낸다.
- 2) 출구 면에서의 압력분포는 0도인 경우 부압의 발생이 없었으며 개도 각이 증가 하면서 출구 가장 자리로 부압이 발생 되었다.
- 3) 노즐 출구의 최대유속은 0도와 비교할 때 30도에서는 16%, 60도에서는 30% 증가하였으며 60도 일 때 가장 큰 공기 유입과 함께 유동이 크게 활성화 되었다.
- 4) 분사 유량은 0도에 비하여 30도와 60도에서 가장 많이 증가 되었으며 90도에서는 증가량이 다시 감소되었다.

이상을 종합하면 개도 각이 30도와 60도 사이에서 출구유동의 영향으로 내부 유체마찰이 저감되고 분사유량이 증가하며 분무유동이 활성화 될 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] W.-H. Yoon, B.-S. Kim, and S.-H. Ryu, et al, "Effect of fuel nozzle configuration on the reduction of NOx emission in medium-speed marine diesel engine", Conference of the Korean Society of Marine Engineering, Nov. 01, pp. 13-14, 2005 (in Korean).
- [2] D.-G. Kim, M.-K. Kim, and S.-H. Yoon, "The flow characteristics with variation of nozzle-to-nozzle angles on unventilated dual jets", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 1231-1239, 2008 (in Korean).
- [3] K.-S. Cha, W.-I. Chung, and C.-G. Park, "A

- study on spray behaviors with variation of nozzle diameter in the diesel combustion chamber”, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, vol. 8, no. 3, pp. 18-27, 2000 (in Korean).
- [4] F.J. Salvador, J.V. Romero, M.D. Rosello, and J. Martinez-Lopez, "Validation of a code for modeling cavitation phenomena in diesel injector nozzle", Elsevier Mathematical and computer Modeling, vol. 52, no. 52, pp. 1123-1132, 2010.
- [5] F.J. Salvador, J.V. Romero, and M.D. Rosello, "Influence of biofuels on the internal flow in diesel injector nozzles", Elsevier Mathematical and computer Modeling vol. 54, no. 54, pp. 1699-1705, 2011.
- [6] Sibendu Som, Anita I. Ramirez, Douglas E. Longman, and Suresh K. Aggarwal, "Effect of nozzle orifice geometry on spray combustion, and emission characteristics under diesel engine conditions", Elsevier Fuel vol. 90, no. 90, pp. 1267-1276, 2011.
- [7] C. Acroumanis, M. Gavaises, J. M. Nouri, E. Wahab and R. Horrocks, "Analysis of the flow in the nozzle of a vertical Multi-Hole diesel engine injector", SAE paper 980811, 1998.
- [8] W.-J. Chung, S.-H. Oh, and C.-H. Son, "Numerical analysis of the flow field of circular nozzle exit region", Journal of Fluid Machinery, vol. 13, no. 6, pp. 13-18, 2010 (in Korean).
- [9] B.-H. Kim, K.-H. Ryu, and E.-I. Jung, et al, "Flow and performance analysis of atomizing nozzle", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 9, no. 3, pp. 42-48, 2010 (in Korean).
- [10] J.-K. Kim, J.-H. Lee, and H.-B. Chang, "Computational investigation of pintle nozzle flow", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, vol. 13, no. 2, pp. 35-41, 2009 (in Korean).
- [11] Tommaso Lucchini, Gianluca D'Errico, Daniele Ettorre, "Numerical investigation of the spray-mesh-turbulence interactions for high-pressure, evaporating sprays at engine conditions". Elsevier International Journal of Heat and Fluid Flow, no. 32, pp. 285-297, 2011.