



유동해석을 이용한 선박용 연료분사노즐의 Sac 형상에 따른 유량 특성 분석

Flow Rate Characteristics of Fuel Injection Nozzle for Ships according to Sac Geometry Using Flow Analysis

윤지원* · 정석호**†

Ji-Won Yoon* and Suk-Ho Jung**†

(Received 17 June 2019, Revision received 16 July 2019, Accepted 30 July 2019)

Abstract: There are no domestic companies designing a fuel injection nozzle even though it is a very important part affecting on combustion in diesel engine. It was accomplished to compute a flow rate using ANSYS FLUENT about the fuel injection nozzle designed by a domestic company and compare with test results at 10 MPa, in order to enhance design ability of domestic company on fuel injection nozzle. Experiment object models were standard and mini sac of fuel injection nozzles. Standard sac is 0.208 L/min larger than mini sac. The difference between the flow analysis and the test result is under 1% in case of the standard sac and 3.3% in case of the mini sac. It is needed to compute the flow analysis of fuel injection nozzle with fuel injection pressure in combustion chamber of diesel engine later on.

Key Words : Fuel injection nozzle, Diesel engine, Flow analysis, Flow rate characteristics, Sac geometry

1. 서 론

디젤엔진의 연소에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 연료분사노즐이다. 연료분사노즐은 디젤엔진의 연료분사시스템의 가장 끝부분인 연소실에 장착되어 연료의 미립화 및 가스화를 통해 연소의 특성을 결정짓는 역할을 한다. 그래서 디젤엔진의 역사가 100여 년이 넘었지만 여전히 연료분사노즐과 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁻³⁾

또한 경유뿐만 아니라 바이오 디젤유⁴⁾와 유화유⁵⁾와 같은 연료를 사용할 수도 있기 때문에 연료분사노즐 이후의 분무거동이나 연소특성에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.

한편 해운 및 수산선사에서는 하나의 선박에 매년 30~60개를 공급해야 할 정도로 연료분사노즐은 소모성 부품으로 대량의 수요가 있는 부품이다. 그러나 국내 제조사의 기술 현황은 자체 설계 기술의 부족으로 역설계에 의한 제조에만 그치고 있는 실정이다.

**† 정석호(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : 부교수, 부경대학교 기계시스템공학과
 E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198
 *윤지원(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3183-6591>) : 석사 과정, 부경대학교 대학원 기계시스템공학과

**† Suk-Ho Jung(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : Associate professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
 *Ji-Won Yoon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3183-6591>) : Graduate student, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

최근에는 중국의 자본력과 기술력에 밀리고 있다. 본 연구에서는 국내 제작 노즐에 대한 경쟁성을 향상시키고자 노즐의 설계 기술을 여러 업체에서도 이해하고 활용할 수 있는 기초 자료를 만들고자 한다.

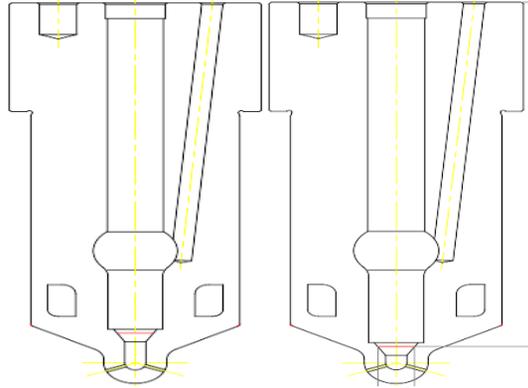
현재 연료분사노즐 제조업체의 기술력은 엔진 메이커로부터 받은 유량과 분사 홀 수 등의 데이터를 토대로 적합한 형상의 연료분사노즐 도면을 제작하고 제조하는 수준이다. 반면 소형의 연료분사노즐에 대한 국내의 수치해석 연구는 상당히 진행되어 있다. 수치해석 연구 결과에 따르면 노즐 입구로 들어가는 연료유의 종류6), 노즐의 형상7-8) 그리고 주변 환경과 같은 요소는 노즐의 추력성능에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀져 있다. 이처럼 국내외에서 연구진들은 상당히 고차원적인 연구를 진행함에 비해, 국내 선박용 연료분사노즐 제조업체의 설계 기술력은 다소 미비하다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 제조업체의 연료분사노즐에 대한 자체적인 설계 기술 확보를 위해 제조업체의 필요한 유동해석을 실시하고 피드백 하는 것을 목표로 한다. 첫 번째 시도로 연료분사노즐의 Sac 변화에 따른 유량특성을 유동해석을 통해 분석하고 시제품을 통해 실제 측정된 실험값과 비교하여 유효성을 입증하고자 한다.

2. 유동 해석 모델링

2.1 유동해석 조건 선정

2 종류의 연료분사노즐 형상을 설계하고 유동 해석 모델을 선정하였다. Fig. 1에 유동 해석에 사용한 연료분사노즐의 2D 도면을 CAD Viewer를 이용하여 나타내었다. (a)는 상대적으로 Sac 체적이 큰 Standard 노즐, (b)는 상대적으로 Sac 체적이 작은 Mini sac 노즐이다. Table 1에서 Standard 노즐과 Mini sac 노즐 형상에 대한 수치를 나타내었다.



(a) Standard nozzle (b) Mini sac nozzle

Fig. 1 Geometry of fuel injection nozzle tested

Table 1 Geometrical parameters of standard and mini sac nozzle

Geometrical parameters	Standard	Mini
Number of holes	9	9
Orifice length(mm)	3	3
Orifice diameter(mm)	0.56	0.56
Sac length(mm)	6.19	3.19

Table 2 Objectives of flow rate and experimental setting values

Parameters	Units	Value
Objective flow rate	L/min.	16.798 ~17.838
Flow time	sec	20
Fuel temperature	°C	40
Inlet pressure	MPa	10

Table 2는 유량 개발 목표 및 유량 측정 장치로 유량 값을 측정할 때 설정한 조건이다. 유량 측정은 연료가 충분히 분사되어 정상상태의 분무를 할 때(연료분사 시작 후 8초 이후)의 값을 취득하였다. 시제품의 실험과 동일하게 노즐 내부 니들밸브는 제거된 상태로 실시하였다.

2.2 유동해석 모델 선정

본 연구에서 연료 분사 노즐의 연료 공급 관으

로부터 연료유가 10 MPa의 압력으로 들어와 노즐의 토출부로 유량이 분사되기까지의 과정을 ANSYS Ver.15의 유동해석의 상용코드인 CFD FLUENT의 RANS model을 이용하여 분석하였다. 이 때 노즐 내부에서 연료의 수송은 난류 형상이므로 RANS model의 다양한 지배방정식 중 연료 분사노즐의 역 압력 구배 및 박리 현상, 벽 부근의 전단 유동에 대한 특성을 고려하여 Standard k-ε model을 선정하였다. Standard k-ε model의 지배방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta(\rho\epsilon)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho k \bar{u}_i)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\delta \epsilon}{\delta x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho\epsilon \quad (1)$$

식 (1)에서 σ_ϵ 는 상수로서 1의 값을 가진다. 여기서 와점성도(μ_t)는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

소실율(ϵ)은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\delta(\rho\epsilon)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho\epsilon u_i)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\delta \epsilon}{\delta x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

식 (3)에서 μ_t 는 i방향에 대한 속도성분을 나타내며, C는 상수로서 각 하첨자에 대한 C의 값은 아래와 같다.⁹⁾

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92 \quad (4)$$

본 연구에서는 다음 두 가지 사항은 고려하지 않았다. 첫째는 RANS model에 의한 오차이다. RANS model은 난류에 대한 직접적인 수치 계산을 하지 않는다. 난류에 의한 속도 변화를 각 격자에서 시간에 대한 평균값으로 나타내고, 정상상태에서의 유동을 중점적으로 보기 때문에 RANS model을 사용함에 따라 발생하는 오차의 영향은 크지 않다. 둘째는 노즐과 외부 간의 에너지 교환

에 의한 오차이다. 노즐과 외부 간의 열교환을 고려하면 계산시간의 비약적인 증가가 일어나기 때문에 본 유동해석에서는 열교환을 고려하지 않았다.

2.3 격자구성 및 격자의존성 검토

본 논문에서는 유동해석을 위한 격자 조성을 ANSYS의 격자구성 상용코드 Mesh를 이용하였다. 전반적인 격자는 3D Geometry, 노즐의 복잡한 형상 등에 의한 격자수의 증가로 인한 계산 시간의 증가를 감안하여 Tetra 격자계를 이용하여 구성하였다. 노즐의 Inlet과 Outlet에서 벽면 부근의 격자를 구성함에 있어서는 연료유의 점성에 의해 생기는 전단유동 현상을 고려하기 위해 Mesh Inflation 기법을 사용하였다. 이를 통해 조밀한 격자를 구성하여 벽과의 거리에 따른 점성도를 세밀하게 고려 해주었다. 격자의존성에 대한 검토는 Standard 노즐과 Mini Sac 노즐의 격자 구성 개수에 큰 차이가 없기 때문에 Standard 노즐을 통해 검토를 진행하였다. 이때 노드 수를 각 3만개, 5만개, 10만개, 20만개로 구성하여 검토하였다.

Fig. 2에서는 노드 수에 따른 연료분사노즐 토출부의 정상상태 속도를 나타낸 것이다. 노드 수가 3만개, 5만개일 때의 Outlet 평균속도를 토대로 계산한 유량 값은 실측 유량 및 개발목표 유량과도 다소 큰 오차를 나타냈다. 약 10만개 이상인 격자에서의 Outlet 평균속도는 3만, 5만개 격자에

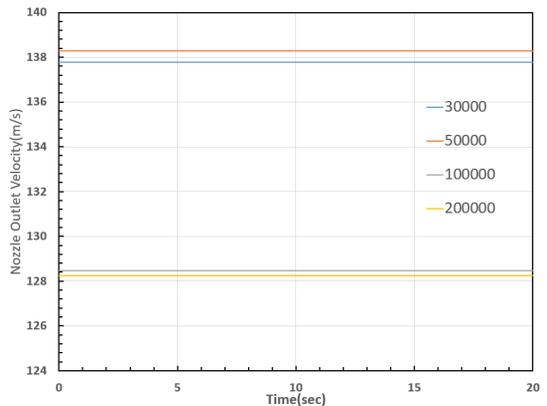
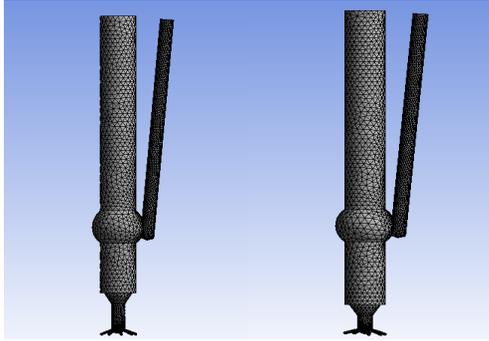
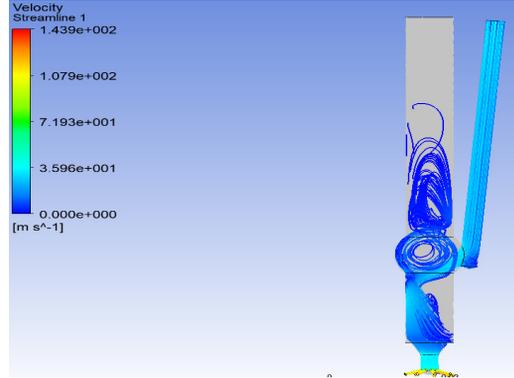


Fig. 2 Grid independence with respect to number of nodes

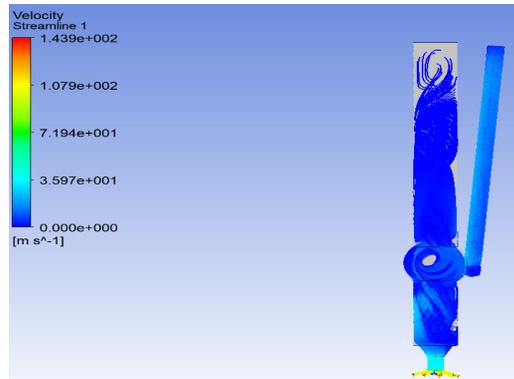


(a) Standard nozzle (b) Mini sac nozzle

Fig. 3 Mesh of the flow domain



(a) Streamline of transient state flow(0~1s)



(b) Streamline of steady state flow(1~20 s)

Fig. 5 Flow streamline of fuel injection nozzle

비해 실측 유량과 상대적으로 근접하였다. 또한 노드 수가 약 5만개 이하가 되면 Mesh Inflation 기법을 사용하기에 있어서는 노드수가충분하지 때문에 벽면부근의 유동에서 정확성이 떨어지므로 약 10만개의 노드를 사용하여 유동해석을 진행하였다.

Fig. 3은 격자의존성 검증을 토대로 약 10만개의 노드로 짠 격자계이다.

3. 성능분석 결과 및 고찰

3.1 정상상태 유동 특성

유동해석에서 과도상태의 값을 배제하기 위해 Flow time에 대한 연료분사노즐 내부의 유동 변화를 관측하여 더 이상 변화가 나타나지 않는 시점부터 유량 값을 측정하였다. Fig. 4는 노즐의 토출

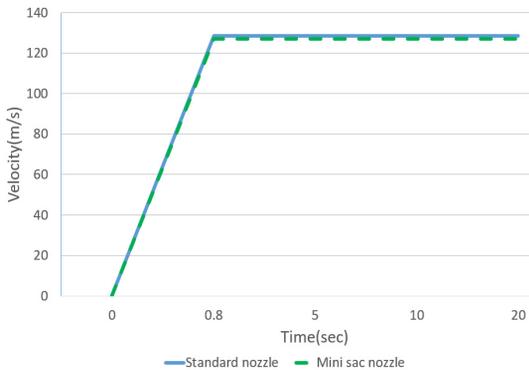


Fig. 4 Velocity gradient of nozzle outlet

부에서 시간에 따른 연료의 속도 변화를 나타낸 것이고, Fig. 5는 각각 과도상태, 정상상태에서의 유동을 나타낸 것이다. 정상상태 유동에 도달하기까지는 약 0.8 sec 정도의 시간이 소요되었으므로 본 연구의 유동해석에서는 1 sec 이후의 값으로 유량을 계산하였다.

3.2 압력 변화 특성

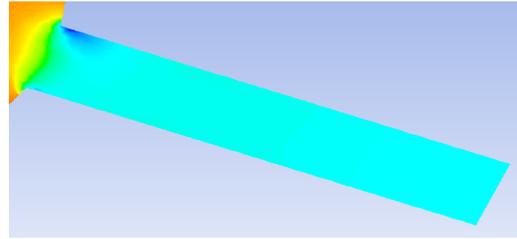
Fig. 6은 연료분사노즐 내부 압력 분포이며 Fig. 7은 Outlet의 압력 분포를 대해 확대하여 나타내었다. Mini Sac 노즐의 토출압력은 2.26 bar로, 2.18 bar인 Standard 노즐에 비해 미약하지만 상대적으로 높은 토출압력을 나타냈다. 그 이유는 노즐 Sac의 크기에서 찾아볼 수 있다.¹⁰⁾ 노즐 Sac의 크기가 작을수록 노즐 바디 하단부에서 유체의

압력 변동이 급격하기 때문에 Outlet 부근에서 상대적으로 높은 토출압력이 나타난다.

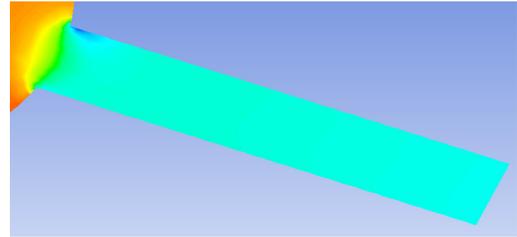
3.3 속도 변화 특성

유속의 경우 Standard 노즐이 128.48 m/s로 126.92 m/s인 Mini Sac 노즐에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이를 통해 연료분사노즐의 토출압력과 토출 속도의 상관관계를 파악할 수 있었다.

Fig. 8은 연료분사노즐 단면에 대한 속도 분포이며 Contour를 통해 대략적인 유동 형상까지 파악할 수 있다. Fig. 9에서는 Outlet의 속도 분포를 확대시킨 것으로 2.2절에서 언급한 벽면부근의 유동에 대한 세밀한 격자계 구성을 통해 벽면과의 거리에 따른 유속 변화를 자세히 관측할 수 있었다.

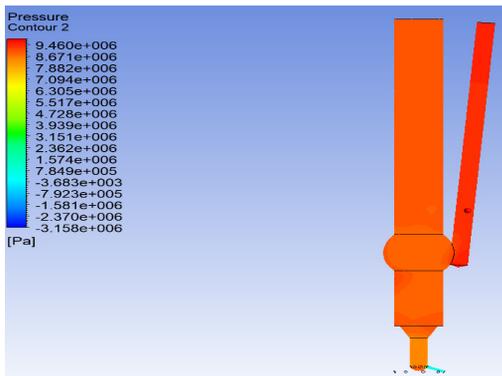


(a) Pressure contour of standard nozzle outlet

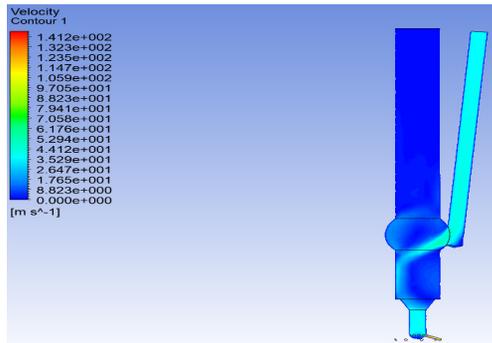


(b) Pressure contour of mini sac nozzle outlet

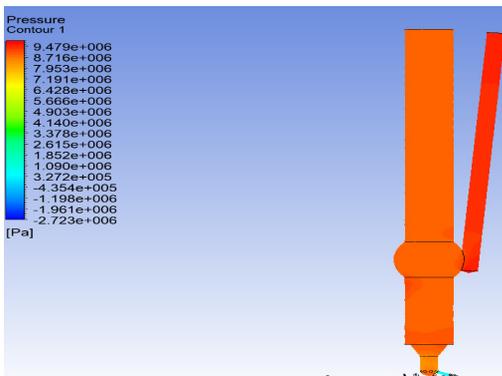
Fig. 7 Pressure contour of fuel injecting nozzle



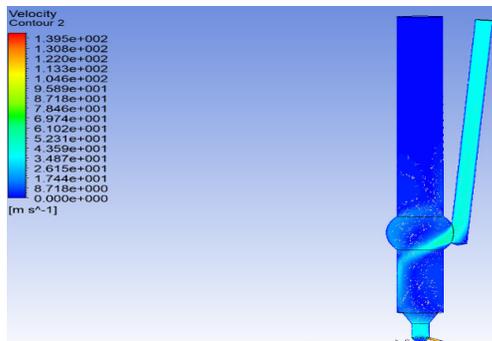
(a) Pressure contour of standard nozzle



(a) Velocity contour of standard nozzle



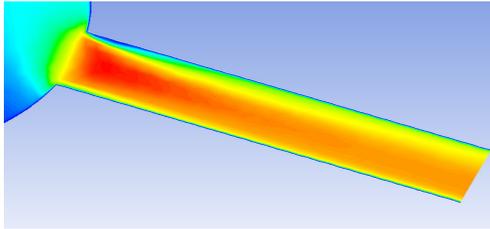
(b) Pressure contour of mini sac nozzle



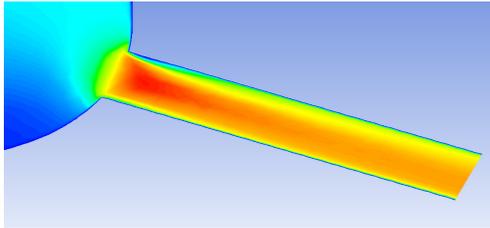
(b) Velocity contour of mini sac nozzle

Fig. 6 Pressure contour of fuel injecting nozzle

Fig. 8 Velocity contour of fuel injecting nozzle



(a) Velocity contour of standard nozzle outlet



(b) Velocity contour of mini sac nozzle

Fig. 9 Velocity contour of fuel injecting nozzle

3.4 유량 특성

연료분사노즐의 형상 변화에 따른 유량 변화의 실측값과 유동해석 값을 Table 3에 나타내었다. Standard 노즐은 17.088 L/min, Mini Sac 노즐은 16.880 L/min의 값이 나왔으며, 그 차이는 0.208 L/min으로 Mini Sac 노즐의 유량이 약 1.2% 적었다. 그리고 각각의 노즐에 대한 실측결과와 해석 결과에 있어서는 Standard 노즐이 1%, Mini Sac 노즐이 3.3%의 오차를 나타냈다.

오차의 원인은 다음과 같이 크게 3가지 정도로 분석된다. 첫째, RANS model의 특성상 유동에 생성되는 난류의 유동에 대한 계산을 시간 평균에 대한 수치를 취득하여 계산하기 때문에 실제 유량과의 오차 발생이 불가피하다. 둘째, 연료분사노즐의 제조공정에서 발생하는 공차 때문이다. 셋째, 유량 측정 장치에서 압력 등의 제어에서 발생

Table 3 Flow rate results

	Experimental result [L/min]	Flow analysis result [L/min]
Standard Nozzle	17.199	17.088
Mini Sac Nozzle	17.451	16.880

하는 오차를 들 수 있다.

또한 노즐 Sac 하단부에서 토출 오리피스로 유동이 흐르는 과정에서 발생하는 급격한 압력변화에 의해 발생할 수 있는 캐비테이션(Cavitation) 현상을 본 연구에서는 반영하지 못하였다. 윗부분은 노즐을 설계함에 있어서 고려해야 할 중요한 요소 중 한가지이므로 향후 연구에서는 캐비테이션을 포함한 노즐에 영향을 미치는 다양한 요소들을 노즐 형상 변화와 접목하여 진행할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 연료분사노즐 제조업체의 자체 설계 기술 증진을 위해 요구한 Sac의 형태에 따른 유동해석을 실시하였다. 실제 분사유량 테스트와 같은 방식으로 진행하기 위해 연료분사노즐에는 노즐을 제외하고 유량의 변화를 예측하였고 시제품의 실제 유량 측정값과 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 토출압력의 유동해석 결과는 Standard 노즐의 경우가 Mini Sac 노즐에 비해 0.08 bar 낮았지만 토출유속은 Standard 노즐이 1.56 m/s 더 컸다.
- 2) 유동해석에 의한 Standard 노즐의 유량은 17.088 L/min, Mini Sac은 16.880 L/min이었고 차이는 0.208 L/min이었다.
- 3) 유동해석으로 도출한 유량 값과 실제 측정값은 약 1~3% 정도의 오차를 나타내었다. 이러한 결과를 토대로 추후에는 연소실에서 니들밸브가 있는 상황에서의 유동해석이 필요하다.
- 4) 엔진메이커에서 요구하는 사양의 노즐을 위해 연료 분사 유량을 향상시켜야 할 경우, Sac 크기를 넓히는 방향을 채택하고, 분사 압력을 향상해야 할 경우, Sac 크기를 상대적으로 줄임을 통해서 보다 적합한 연료분사 노즐 제작을 할 수 있을 것이다.

Author contributions

J. W. Yoon; Project Administration, S. H. Jung; Supervision.

References

1. J. W. Yoon, D. K. Koh and S. H. Jung, 2019, "Flow Rate Characteristics of Fuel Injection Nozzle for Ships Using Flow Analysis", Proceedings of The Korean Society for Power System Engineering Spring Conference, pp. 23-24.
2. R. Torelli, S. Som, Y. Pei, Y. Zhang, M. Traver, 2017, "Influence of Fuel Properties on Internal Nozzle Flow Development in a Multi-hole Diesel Injector", Journal of The Science and Technology of Fuel and Energy, Vol. 204, pp. 171-184.
(DOI:10.1016/j.fuel.2017.04.123)
3. D. Sankesh, P. Petersen, P. Lappas, 2018, "Flow Characteristics of Natural-gas from an Outward-opening Nozzle for Direct Injection Engines", Journal of The Science and Technology of Fuel and Energy, Vol. 218, pp. 188-202 (DOI:10.1016/j.fuel.2018.01.009)
4. S. C. Hwang, H. J. Kimm and S. H. Jung, 2017, "Optimization of blending oil with non-esterified bio-diesel fuel using design of experiment at partial engine loads", International Journal of Automotive Technology, Vol. 18, Issue 1, pp. 79-84.
(DOI:10.1007/s12239-017-0008-6)
5. J. K. Yeom, S. H. Jung and J. H. Yoon, 2019, "An experimental study on the application of oxygenated fuel to diesel engines", Fuel, Vol. 248, pp. 262-277.
(DOI:10.1016/j.fuel.2018.12.131)
6. S. Wu, M. Xu, David. L.S Hung, H. Pan, 2017, "Effects of Nozzle Configuration on Internal Flow and Primary Jet Breakup of Flash Boiling Fuel Sprays", Journal of The Science and Technology of Fuel and Energy, Vol. 130, pp. 730-738.
(DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.073)
7. L. Wang, J. Lowrie, G. Ngaile, T. Fang, 2019, "High Injection Pressure Diesel Sprays From a Piezoelectric Fuel Injector", Journal of The Science and Technology of Fuel and Energy, Vol. 152, pp. 807-824.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.095)
8. D. Han, J. Zhai, Y. Duan, C. Wang, Z. Huang, 2018, "Nozzle effects on The Injection Characteristics of Diesel and Gasoline Blends on a Common Rail System", Journal of The Science and Technology of Fuel and Energy, Vol. 153, pp. 223-230.
(DOI:10.1016/j.energy.2018.04.039)
9. H.K. Versteeg, W. Malalasekera, 2007, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", Chapter 3, pp. 40-14.
10. Z. He, W. Zhong, Q. Wang, Z. Jiang, Z. Shao, Effect of nozzle, 2013, "Effect of Nozzle Geometrical and Dynamic Factors on Cavitating and Turbulent Flow in a Diesel Multi-hole Injector Nozzle", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 70, pp. 132-143.
(DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2013.03.008)