커먼레일 디젤인젝터의 분사성능 개선을 위한 내부유로형상 최적화에 관한 수치적 연구

문 성 준¹⁾ · 정 수 진^{*1)} · 이 상 인²⁾ · 김 태 훈³⁾

자동차부품연구원 동력시스템연구센터¹⁾ · 공주대학교 기계공학부²⁾ · 마산대학교 기계자동차공학부³⁾

A Numerical Study on the Geometry Optimization of Internal Flow Passage in the Common-rail Diesel Injector for Improving Injection Performance

Seongjoon Moon¹⁾ · Soojin Jeong^{*1)} · Sangin Lee²⁾ · Taehun Kim³⁾

¹⁾Gas Engine System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

³⁾Division of Mechanical & Automotive Engineering, Masan University, Gyeongnam 630-729, Korea

(Received 19 July 2013 / Revised 18 October 2013 / Accepted 10 December 2013)

Abstract : The common-rail injectors are the most critical component of the CRDI diesel engines that dominantly affect engine performances through high pressure injection with exact control. Thus, from now on the advanced combustion technologies for common-rail diesel injection engine require high performance fuel injectors. Accordingly, the previous studies on the numerical and experimental analysis of the diesel injector have focused on a optimum geometry to induce proper injection rate. In this study, computational predictions of performance of the diesel injector have been performed to evaluate internal flow characteristics for various needle lift and the spray pattern at the nozzle exit. To our knowledge, three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model of the internal flow passage of an entire injector duct including injection and return routes has never been studied. In this study, major design parameters concerning internal routes in the injector are optimized by using a CFD analysis and Response Surface Method (RSM). The computational prediction of the internal flow characteristics of the common-rail diesel injector was carried out by using STAR-CCM+7.06 code. In this work, computations were carried out under the assumption that the internal flow passage is a steady-state condition at the maximum needle lift. The design parameters are optimized by using the L16 orthogonal array and polynomial regression, local-approximation characteristics of RSM. Meanwhile, the optimum values are confirmed to be valid in 95% confidence and 5% significance level through analysis of variance (ANOVA). In addition, optimal design and prototype design were confirmed by calculating the injection quantities, resulting in the improvement of the injection performance by more than 54%.

Key words : Common-rail diesel injector(커먼레일 디젤인젝터), Three-dimensional computational fluid dynamics analysis(3차원 전산유체역학해석), Internal flow analysis(내부유동해석), Design of experiment(실험계획법), Orthogonal array(직교배열), Polynomial regression(다항회귀분석), Response surface method(반응표면법)

1. 서 론

최근 디젤자동차의 시장 점유율이 증가하면서, 국

내에서도 디젤엔진에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그러나 핵심부품인 커먼레일 디젤인젝터는 기술 및 시장 진입장벽이 높기 때문에 전량수입에 의존하고 있다. 최근 고정밀 소재가공 및 수치해석기술 등

*Corresponding author, E-mail: sjjeong@katech.re.kr

관련 제반기술이 급격히 발전하면서, 커먼레일 디젤 인젝터의 국산화화를 위한 연구가 시작되고 있다.

고압 및 정밀제어 특성을 가진 커먼레일 디젤인젝터는 분사량과 리턴 유량을 제어하여, 디젤인젝터의 고압분사 성능을 크게 개선할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 10~100 μm 단위의 정밀한 유로형상 및 치수에 대한 설계가 필요하며, 다양한 경우의 수를 고려해야 한다. 따라서 설계단계에서 소요되는 시간과 비용을 최소화하기 위해 3차원 전산유체역학에 기반을 둔 전산모사가 필요하다.^{1,2)}

인젝터의 CFD 전산모사에 대한 연구는 Needle의 내부유동특성을 분석하거나, Nozzle의 분무형상 및 분사성능을 분석하는 것이 일반적이다.^{3,4)} 그러나 커먼레일 디젤인젝터는 Spool의 작동에 따른 압력 변화로 리턴유량이 발생하며, 이는 Needle의 상승 및 하강 시간에 큰 영향을 준다. 즉 커먼레일 디젤인젝터의 내부유동특성을 분석하기 위해서는 연료가 분사되는 부분과 리턴 되는 부분을 포함한 전체 유로에 대한 3차원 CFD 전산모사가 요구된다.

본 연구에서는 커먼레일 디젤인젝터의 내부유동특성을 분석하기 위하여 전체 유로를 모델링하고, 3차원 전산유체역학 코드인 STAR-CCM+7.06을 사용한 전산모사를 수행한다. 이를 통해 내부유동에 따라 형성된 압력 및 속도, 분사량, 유량편차를 분석한다. 그리고 인젝터 내부에서 압력강하가 발생하는 지점을 주요 설계인자로 정하여, L16 직교배열(4인자-4수준)에 따른 실험계획법(DOE)과 다항식회귀분석(PR), 반응표면법(RSM)을 통해 최적의 유로형상을 결정한다. 마지막으로 최적 모델에 대한 수치해석을 통해 기존대비 분사량 개선효과를 검증한다.

2. 내부 유동 해석

커먼레일 디젤인젝터의 내부유동특성을 파악하고자, 3차원 CFD 코드를 사용한 전산모사를 수행하였다.

2.1 커먼레일 디젤인젝터

개발 중인 2L급 커먼레일 디젤인젝터의 내부유로를 유압식 회로로 도식화하면 Fig. 1과 같다(Fig. 2 참조). 개발 인젝터에는 최대 2,000 bar의 연료가 유

Fig. 1 Schematic of the common-rail diesel injector (Hydraulic circuit)

Fig. 2 Computational mesh of the entire injector duct for the 3-D CFD analysis

입되며, 연료가 분리관에 도달하면 분사 방향과 리턴 방향으로 나뉘어 유동된다(I-L₁ 구간). 여기서 리턴방향의 유동을 살펴보면, Orifice 부와 Spool 부로 연료가 유입되면서 고압 분위기가 형성되는데, 이때 Solenoid 신호에 의해 Spool 밸브가 열리는 순간, 저압 분위기로 급격히 전환되면서 리턴유로를 따라 빠져나간다(R-L 구간). 한편, Orifice 부와 Spool 부의 저압 분위기는 Needle을 상승시키고, 이로 인해 8개의 Nozzle-hole이 동시에 개방된다. 이때 분사방향의 유동은 Needle을 통과한 후 Sac volume에서 잠시 정체되었다가(I-L₂, I-L₃ 구간), Nozzle 관을 지나

서 연소실에 고압분사 된다(I-L₄ 구간).

2.2 실험 결과

본 연구의 해당 인젝터는 2,000 bar 이상의 3세대 디젤인젝터로서, 8개의 Nozzle-hole을 가진 서보 솔레노이드 방식의 고속 분사장치이다. 이러한 초고압 디젤인젝터의 설계를 위해서는 기초설계단계에서 시제품 제작 및 기본적인 성능평가가 선행되어야 한다.⁵⁾ Fig. 3은 연료 분사율 측정 장치를 사용하여 압력변화에 따른 시제품의 분사량을 측정한 결과이다. 엔진부하조건 및 펄스폭이 각각 1,500 rpm, 800 us일 때, 인젝터 분사량은 압력 상승과 비례하였으며, 압력이 2,000 bar일 때 분사량은 57.9 mg/inj.로 나타났다. Fig. 4는 고속카메라와 위상 도플러 입자 분석기를 사용하여, 시제품의 SMD(Sauter Mean Diameter)와 SMD 분포도를 측정한 결과이다. SMD 크기는 인젝터 압력 상승과 반비례하였으며, 압력이 2,000 bar일 때 Overall SMD는 12.32 μ m로 측정되었다.

한편, 해당 시제품은 국내에서 기술개발 사례가 전무했던 만큼 제작을 위해 많은 시행착오가 수반되었고, 실험에서도 유량 편차, 분무 방향, 후적 등의 문제점이 발생하였다. 특히, 해당 시제품을 차량에 적용하기 위해서는 Nozzle-hole의 직경 확대를 통한 출력 향상이 필수적이다. 또한 8개의 Nozzle-hole을 오차 없이 제작하기 위한 세계적인 수준의 가공기술이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 개발 인젝터의 기초설계를 위해 수치해석을 사용하여 내부유동특성을 정밀하게 분석한다.

Fig. 3 Experiment result of mass delivery according to injection pressure at the same pulse width (maximum needle lift)

Fig. 4 Experiment result of SMD according to injection pressure(Lift), and drop size histogram at the maximum pressure (Right)

2.3 내부유로 모델링

본 연구에서는 디젤인젝터의 내부유동특성에 대한 전반적인 분석을 위해 Needle과 Nozzle 뿐만 아니라, Orifice와 Spool을 포함한 전체 내부유로를 수치해석 대상으로 정한다. 이에 따라 전체 내부유로에 대한 CAD 및 Mesh 모델링은 각각 CATIA-V5와 STAR-CCM+를 사용하였다. 한편, Mesh 모델링에는 Polyhedral과 Prism layer를 사용하고, 수렴성을 고려하여 Volume mesh의 수를 170만 개로 최적화하였다. Fig. 2는 완성된 Mesh 모델링이고, 8개의 Nozzle-hole은 그림과 같이 번호를 붙여 구분한다.

2.4 해석 조건

인젝터 내부유동을 3차원 압축성 난류유동으로 고려한 전산모사를 수행하기 위해 유한체적법(FVM)에 기반한 CFD 코드인 STAR-CCM+ 7.06을 사용하였다. Table 1은 유동해석에 적용된 경계조건

Table 1 Simulation model and numerical conditions

Working condition	
Working fluid	C12H26 (at room temp.)
Injection pressure [bar]	2,000 (200 MPa)
Density [kg/m ³]	Initial: 746.756 After: compressible ⁶⁾
Dynamic viscosity [Pa·s]	0.00137563
Needle lift condition	
Boundary condition	Steady state
Needle lift [mm]	0.3 (Max. lift)
Spool lift [mm]	0.03 (Max. lift)
Analysis model	
Tool	STAR-CCM+ 7.06
Turbulence model	SST(Menter) K-Omega
Max. step	5,000 (Iteration base)

과 수치모델을 나타내고 있으며, 난류유동은 역압력구배 예측능력이 뛰어난 Menter의 K-Omega SST (Shear Stress Transport) 난류모델을 적용하였다. 한편 Needle과 Spool은 닫힌 상태에서 각각 0.3 mm, 0.03 mm 위쪽으로 완전히 개방된 정상상태로 가정하였다.

2.5 해석 결과

CFD 코드를 통한 압력 및 속도 분포는 Fig. 5, 6, 7

과 같다. 분사방향의 유동은 초기 유입된 연료의 압력과 속도를 유지하지만, Needle을 지나서 Sac volume에서 순간 정체된 후, 최소목인 Nozzle 입구에 도달하면 1,980 bar의 압력강하가 발생하고, Nozzle exit에서 2,000 bar로 고압 분사된다(I-L₄ 구간). 리턴 방향의 유동은 Orifice-1, 2에 의해 각각 1,250 bar의 압력강하가 발생하며, 이후 0 ~ 10 bar의 압력으로 리턴 된다(R-L 구간). 한편 속도분포는 압력과 반비례 관계를 보여주는데, Nozzle exit에서 600 m/s,

Fig. 5 Representative images of the pressure and velocity profiles between needle entrance and nozzle exit

Fig. 6 Calculation result of pressure profile on the location of internal flow passage at the maximum lift (inlet pressure of 2,000 bar)

Fig. 7 Calculation result of velocity profile on the location of internal flow passage at the maximum lift (inlet pressure of 2,000 bar)

Fig. 8 The injection rate and relative deviation, the pressure and velocity gradients according to the location of internal flow passage at the cylindrical nozzle exit

Orifice-1에서 450 m/s, Orifice-2에서 640 m/s에 도달한다.^{7,8)}

개발 인젝터에서 압력이 2,000 bar일 때, 인젝터의 연료 유입량은 45.72 g/s, 연료 분사량은 31.33 g/s, 리턴 유량은 14.39 g/s로 산출된다(Fig. 8 참조). 이때 Nozzle의 각 홀에서 분사되는 유량은 최대 0.8%의

Fig. 9 Uniformity index of the pressure and velocity gradients according to the location of internal flow passage (between needle entrance and nozzle exit) at the maximum needle lift (inlet pressure of 2,000 bar)

편차가 발생한다. 이러한 편차의 원인을 규명하기 위해 각 구간에서의 압력 및 속도 구배의 상대편차를 통해 유동편차 균일도(Uniformity Index)를 산출하면 Fig. 9와 같이 나타난다. 유동편차 균일도가 1.00이면 유량편차는 발생하지 않으며, 1.00보다 작을수록 유량편차는 크게 발생한다. 결과적으로, 연료가 Needle의 외벽을 지난 이후 Sac volume에서 합류할 때, 관성에 의해 Sac의 저면 부까지 하강하고, 이후 출구인 Nozzle을 통과하기 위해 다시 상승한다. 즉, Sac의 벽면 또는 Nozzle의 입구부에서 정체(Stagnation) 또는 박리(Separation)로 인해 유동편차 균일도가 내려간 것으로 보인다. 한편, 유동편차 균일도에 대한 수식은 식 (1)과 같다.

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(w_i - w_{mean})^2}}{w_{mean}} \quad (1)$$

where w_i : local value, w_{mean} : mean value, n : total number of measuring point

3. 최적 설계

개발 인젝터의 내부유로형상에 대한 주요 설계인자와 수준을 정하여 실험계획법을 처리하고, 반응표면법을 통해 최적해를 산출하였다.

3.1 문제 정식화

개발 인젝터에 요구되는 유량을 만족하기 위해서는 Nozzle이 완전히 개방된 상태에서 가능한 많은 연료가 분사되어야 한다. 따라서 기존 내부유동 해석을 통해 발견한 압력강하지점인 Nozzle 부와 Orifice 부를 설계변수로 선정하였다. 특히, Nozzle 부의 설계변수로서 Nozzle-hole의 직경과 경사각은 분사된 유체의 압력과 속도에 영향을 주는 매우 중요한 설계인자이다. 일반적으로 Nozzle-hole의 직경이 클수록 목표 유량확보에 유리할 수 있으나, 이 경우 Needle 끝단의 Sac volume도 함께 커지기 때문에 후적(Dribbling), HC 계열의 오염물질 발생, SMD 감소 등으로 인한 성능저하가 우려된다. 따라서 적절한 크기의 Sac volume에서 Nozzle-hole의 개수를 고려하여, 4 수준의 직경과 경사각을 설계변수로 선정하였다. 그리고 Orifice 부는 유체의 분사를 위해 Spool 부의 상승을 돕는 리턴 유량과 밀접한 관련이

있으며, 2개의 Orifice 직경과 직경 비는 내부 압력강하 및 인젝터의 분사시간에 큰 영향을 주기 때문에 설계변수로 선정하였다(Table 2 참조).

3.2 실험계획법

개발 인젝터에 일정한 압력으로 유입된 연료는 내부유로를 따라 유동되는데, 이때 Nozzle의 직경과 경사각, Orifice의 직경과 직경비 등 주요 설계변수들의 중첩원리에 따라 인젝터의 분사량과 유량편차 등이 결정된다. 본 연구에서는 전술한 4가지 설계변수의 가공한계 및 오차를 감안하여 4인자-4수준의 L16 직교배열법(Orthogonal array)을 실험계획법으로 선정하였다(Table 3 참조). 여기서 직교배열법은 다양한 근사모델과의 호환성이 우수하여 실험계획법으로 널리 사용되고 있으며, 기존 Conventional design 뿐만 아니라 최근 많이 연구되는 Advanced design에도 적용이 가능하다.

Table 3 Orthogonal array (L16) the design variables and their levels

No.	A	B	C	D	No.	A	B	C	D
1	1	1	1	1	9	3	1	3	4
2	1	2	2	2	10	3	2	4	3
3	1	3	3	3	11	3	3	1	2
4	1	4	4	4	12	3	4	2	1
5	2	1	2	3	13	4	1	4	2
6	2	2	1	4	14	4	2	3	1
7	2	3	4	1	15	4	3	2	4
8	2	4	3	2	16	4	4	1	3

Table 2 The critical design variables and their levels

Design variables	< Nozzle >		< Orifice >	
Lv.	A: Nozzle diameter [mm]	B: Nozzle slope [°]	C: Orifice-1 diameter [mm]	D: Orifice-2 diameter [mm]
1	0.110	0.00	0.24	0.24
2	0.120	3.00	0.26	0.26
3	0.130	5.00	0.28	0.28
4	0.140	7.00	0.30	0.30

3.3 다항식회귀분석

다항식회귀분석은 실험점 사이를 근사화시키기 위해 사용하며, 데이터의 배열이 자유곡선일 때 식 (1)과 같이 사용할 수 있다. 여기서 e 는 다항식 결과와 y 값 사이의 오차이며, 식 (2)와 같이 제품의 합을 구하여 각각 $a_0, a_1, \dots, a_i$ 로 미분하면 식 (3)과 같은 선형대수방정식이 된다. 즉 오차의 제품을 최소화함으로써 실험점 사이의 값을 근사시킨다.⁹⁾

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_ix^i + e \quad (1)$$

where y : a dependent variable, x : an independent variable, e : an unobserved random error

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_1 - \dots - a_i x_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.4 반응표면법

각 설계변수의 변화에 따른 분사량 및 리턴 유량을 통계적으로 분석하여 최적해를 산출하기 위해 반응표면법(RSM)을 사용한다. 반응표면법은 두 가지 이상의 산출값에 대한 상호작용(Interaction)을 가중치합법(Weight sum method)을 통해 고려할 수 있다. 즉, 독립변수가 k인 2차 회귀모형은 식 (4)와 같으며, β 는 각 차항수의 회귀계수, x는 각각 해당되는 변수, ϵ 은 응답의 오차항을 의미한다.^{10,11)}

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (4)$$

where β : vector of unknown constant coefficient, ϵ : random experimental error

4. 결과 및 검증

전술한 방법으로 최적 수준을 산출하고, 분산분석과 수치해석을 통해 개선효과를 검증하였다.

4.1 최적 수준 예측

개발 인젝터의 유로형상 최적화 과정은 Fig. 10과 같다. 결정한 최적 수준을 3차원 CFD 해석에 적용하여 분사량과 리턴유량을 산출하며, 목표에 도달하지 못하면 분산분석 결과를 고려하여 설계수준을 다시 정해야 한다. 3차원 CFD 해석으로 실험계 획법을 처리한 결과는 Table 4와 같다. 여기서 인젝터 분사량은 리턴방향의 오리피스 지름에 따른 분사시기 변화를 고려하여 최대 1% 보정하였다.

반응표면법을 통해 산출된 각 설계변수의 최적수준은 Fig. 11과 같다. 여기서, Nozzle 직경은 0.135 mm, Nozzle 경사각은 7°, Orifice-1 직경은 0.249 mm, Orifice-2 직경은 0.255 mm 이다. 한편, 수치해석 결과를 분산분석 하면, 각 설계변수의 p-value가 0.05

Fig. 10 Flow chart of design procedure

Table 4 Analysis result associated with the experiments

No.	Injection [g/s]	Return [g/s]	No.	Injection [g/s]	Return [g/s]
1	28.9	16.2	9	42.8	23.7
2	30.2	19.2	10	44.5	23.0
3	31.2	21.8	11	42.6	17.9
4	32.3	25.6	12	44.1	17.6
5	37.5	20.5	13	48.3	21.2
6	37.7	19.4	14	48.8	18.4
7	39.7	19.2	15	48.4	22.2
8	39.9	20.2	16	48.6	18.8

Fig. 11 Predicted flow rate on the RSM and optima of design variables (arrow)

보다 작을 때 유효함을 확인할 수 있다. 인젝터 분사량에 대해서는 설계변수 A가 가장 유효하였고, 설계

변수 D를 제외한 모든 설계변수가 유효함을 확인하였다(p-value, $D > 0.05 > B > C > A$). 리턴유량에 대해서는 설계변수 D가 가장 유효하였으며, 설계변수 B를 제외한 모든 설계변수가 유효하였다(p-value, $B > 0.05 > A > C > D$).

4.2 검증

Fig. 11에서 결정된 최적수준은 실제 제품의 가공 공차를 고려하여 적용해야 하며, 본 검증에서는 3차원 CFD 해석에 이를 적용하여 기존 결과와 비교하였다. Fig. 12는 내부유동 해석을 통해 산출한 각 Nozzle-hole에서의 분사량과 리턴 유량이다. 최적수준 유로의 리턴 유량은 20% 증가하였으나, 분사량은 기존 대비 54% 향상되어 인젝터 성능이 개선되었음을 확인할 수 있다. 일반적으로 Nozzle 및 Orifice의 직경 확대는 액적의 미립화를 억제시키, 인젝터의 성능을 저하시킨다. 그러나 개발 인젝터는 초고압 분사를 통해 우려되었던 성능 저하를 상쇄시킨 것으로 판단된다.

Fig. 12 Analysis results in optimum design [unit: g/s]

5. 결론

본 연구에서는 커먼레일 디젤인젝터의 내부유동에서 압력강하가 발생하는 지점을 주요 설계인자로 정하여, L16 직교배열(4인자-4수준)에 의한 실험계획법(DOE)과 다항식회귀분석(PR), 반응표면법(RSM)으로 최적수준을 결정하였다. 이를 위해 인젝터 전체유로를 대상으로 3차원 CFD 해석을 통해 연료의 분사량과 리턴유량을 산출하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 커먼레일 디젤인젝터의 내부유동을 분석한 결과, 분사방향의 Nozzle 부와 리턴방향의 Orifice-1, 2에서 압력강하로 인한 속도 및 유량변화가 예측된다. 따라서 Nozzle의 직경과 경사각, Orifice-1, 2의 직경과 직경 비를 설계변수로 선정하였다.
- 2) 실험계획법을 처리하여 산출된 결과를 바탕으로 설계수준 내에서 최대의 분사량과 최소의 리턴유량을 만족하는 최적해를 반응표면법으로 산출하면, Nozzle 직경은 0.135 mm, Nozzle 경사각은 7°, Orifice-1 직경은 0.249 mm, Orifice-2 직경은 0.255 mm로 나타난다.
- 3) 반응표면법으로 산출된 최적 유로형상을 수치해석에 적용하여 기존 결과와 비교한 결과, 연료 분사량이 54% 향상됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 주관 “산업원천기술개발사업(10040169)”의 일환으로 수행되었으며, 후원해 주신 관계자분들께 깊은 감사를 전합니다.

References

- 1) C. Arcoumanis, H. Flora, M. Gavaises, J. M. Nouri, E. Abdul-Wahab and R. W. Horrocks, “Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi-hole Diesel Engine Injector,” SAE 980811, 1998.
- 2) C. Soteriou, R. Andrews and M. Smith, “Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization,” SAE 950080, 1995.
- 3) M. C. Lai, P. H. Lu and J. H. Yoo, “Implications of 3-D Internal Flow Simulation on the Design of Inward-opening Pressure-swirl Injectors,” SAE 2002-01-2698, 2002.
- 4) J. W. Lee and K. D. Min, “A Study on Relation of Needle-nozzle Flow of Piezo-driven Injector by Eulerian-lagrangian Multi-phase Method,” Transactions of KSAE, Vol.18, No.5, pp.108-114, 2010.
- 5) M. S. Chon, “Effect of Nozzle Hole Number on Fuel Spray and Emission Characteristics of High Pressure Diesel Injector,” Journal of Illass-

- Korea, Vol.17, No.4, pp.210-215, 2012.
- 6) L. M. Rodriguez-Anton, J. Casanova-Kindelan and G. Tardajos, "High Pressure Physical Properties of Fluids used in Diesel Injection Systems," SAE 2000-01-2046, 2000.
 - 7) V. C. Sarre, S. C. Kong and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Spray," SAE 1999-01-0912, 1999.
 - 8) S. Sibendu, I. R. Anita, E. L. Douglas and K. A. Suresh, "Effect of Nozzle Orifice Geometry on Spray, Combustion, and Emission Characteristics under Diesel Engine Conditions," Fuel, Vol.90, Issue 3, pp.1267-1276, 2011.
 - 9) T. Varady, R. R. Martin and J. Cox, "Reverse Engineering of Geometric Models: An Introduction," Computer-Aided Design, Vol.29, No.4, pp.255-268, 1997.
 - 10) R. Myers, A. Khuri and W. Carter, "Response Surface Methodology: 1966-1988," Technometrics, Vol.31, No.2, pp.137-157, 1989.
 - 11) H. M. Raymond and C. M. Douglas, Response Surface Methodology Process and Product and Optimization Using Design Experiments, John Wiley & Sons, New Jersey, 1995.