공동현상을 고려한 커먼레일용 고압 DME 인젝터 노즐의 최적 설계 연구

정 수 진* · 박 정 권 · 이 상 인

자동차부품연구원 동력시스템연구센터

Study on the Optimum Design of High Pressure Common-rail DME Injector Nozzle with Consideration of Cavitation

Soo-Jin Jeong* · Jung-Kwon Park · Sang-In Lee

Korea Automotive Technology Institute, 74 Youngjeong-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si
Chungnam 330-912, Korea

(Received 13 March 2012 / Revised 16 June 2012 / Accepted 24 June 2012)

Abstract : DME (Di-Methyl Ether) is synthetic product that is produced through dehydration of methanol or a direct synthesis from syngas. And it is able to save fossil fuel and reduce pollutants of emission such as PM and CO₂. In spite of its advantages it is difficult to design DME fuelled engine system because DME fuel may cause to severely generate cavitation and corrosion in fuel delivery system due to physical properties of DME. Therefore, in this study three-dimensional internal flow characteristics with consideration of cavitation were predicted in the DME injector using diesel and DME fuel. Moving grid technique was employed to describe needle motion and 1-D hydraulic simulation of injector was also simulated to obtain transient needle motion profiles. The results of simulation show that cavitations was generated at the inlet of nozzle near high velocity region both diesel and DME. And mass flow rate of DME is reduced by 4.73% compared to that of diesel at maximum valve lift because cavitation region of DME is much more larger. To increase flow rate of DME injector, internal flow simulation has been conducted to investigate the nozzle hole inner R-cut effect. The flow rates of diesel and DME increase as R-cut increases, and flow coefficient of DME fuel injector was increased by 6.3% on average compared with diesel fuelled injector. Finally, optimum shape of DME injector nozzle is suggested through the comparison of flow coefficient with variation of nozzle hole inner R-cut.

Key words : Common-rail injector(커먼레일 인젝터), Internal flow(내부유동), DME(디메틸 에테르), Cavitation(공동 현상), Effective flow area(유효 유동면적)

Nomenclature

t : time, sec

a : area, m²

v, V : velocity, m/s

D : diameter, m

CN : Cavitation Number, dimensionless

P : Pressure, Pa

ρ : density, kg/m³

V : volume, m³

R : radius of bubble, m

n_0 : number of bubble per unit volume, /m³

C_f : flow coefficient, dimensionless

$\dot{m}$: mass flow rate, kg/s

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

Subscripts

0	: ambient turbulence value
v, l	: vapor, liquid
inj	: near the inlet in injector nozzle
back	: near the exit in injector nozzle
V	: vapor pressure
bub	: bubble

1. 서 론

최근 석유자원의 고갈 및 배기규제 강화에 따라 친환경적이고, 경제적인 대체연료의 개발이 요구되고 있다. 디젤의 차세대 대체연료인 DME는 합산소 연료로 화학구조상 입자성 물질을 거의 배출하지 않아 친환경적이고, 상온에서 액화가 가능하여 취급이 용이하며, 다양한 원료에서 합성이 가능한 장점을 갖는다. 이러한 장점에도 불구하고 DME는 낮은 발열량과 점도 그리고 압축성 효과 때문에 디젤 엔진 적용에 많은 어려움이 있다.¹⁻⁵⁾ 상대적으로 디젤보다 낮은 발열량 및 연료밀도 특성을 갖는 DME는 동일엔진에서 동일 출력을 확보하기 위하여 체적기준으로 디젤보다 40%이상 더 많은 연료를 공급하여야 한다. 유량을 증가시키는 방법으로는 연료 공급 압력의 증가, 분사기간의 증가 그리고 노즐 홀 직경의 확대 등이 있다.^{1,2)} 그러나 연료 공급 압력을 증가시켜 연료량을 증가시키는 방법은 DME의 낮은 점성 등의 물리적 특성으로 인하여 기술적, 경제적 한계가 있기 때문에 분사기간과 노즐 홀 직경을 변경하여 부족한 연료량을 보상하는 방법이 일반적으로 선호된다. 본 논문에서는 디젤엔진에 청정대체 연료인 DME를 적용하기 위하여 디젤엔진과 동일출력을 확보할 수 있도록 유량증대 설계가 고려된 DME인젝터를 제작하였다. 제작된 인젝터의 실 작동시 내부 유동특성과 노즐 부위의 공동현상을 분석하기 위하여 우선 1차원 유압해석을 통하여 이들의 거동을 예측하였고 이 결과를 이용하여 노즐부의 분사 유량 및 공동현상 발생영역을 예측·분석하였으며,⁶⁾ 해석을 근거로 노즐 설계의 최적안을 제시하였다. 본 연구결과는 DME 연료를 사용하는 인젝터 개발시 정확한 유량계산을 위한 중요한 설계자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 인젝터 내부유동 해석

일반적으로 공동현상은 유체의 압력이 낮고, 온도가 끓는점에 가깝거나 끓는점보다 높을 때 발생하게 되며, DME는 디젤 대비 끓는 점이 낮기 때문에 정압이 낮고, 유속이 빠른 인젝터 노즐의 입구부에서 공동현상의 급격한 발생이 예상된다. 이렇게 발생된 공동현상은 유효 유동 면적을 감소시켜 분사 유량을 감소시킨다. 공동현상의 발생이 유효 유동면적과 분사 유량에 미치는 영향을 확인하고, 노즐을 최적 설계하기 위하여 인젝터 노즐의 내부유동 해석을 수행하였다.

2.1 해석의 대상 인젝터

본 연구에 적용된 인젝터는 2,900cc급 디젤엔진에 장착되어지는 인젝터로서, DME에 적용하기 위한 설계변경을 수행하였다. 주요 내용으로서 디젤 엔진과 동일한 분사조건에서 연료분사에 따른 동등한 출력을 확보하고자 인젝터 노즐홀의 직경을 확장하였으며, 고무롤 부식시키는 DME의 특성을 감안하여 인젝터 내부의 실링재를 HNBR 소재로 변경하여 사용하였다. Fig. 1은 DME 인젝터 노즐의 본체와 노즐의 단면을 보여주고 있다.

Fig. 1 The nozzle body of DME injector

2.2 1D 해석을 통한 needle 거동의 예측

일반적으로 인젝터 내부에 위치하는 니들의 움직임 예측하는 것은 쉽지 않다. 인젝터에서 니들의 거동은 공동현상의 발생, 연료의 유동 특성 그리고 분사 유량에 직접적인 영향을 준다. 반대로 인젝터 니들의 거동 또한 연료의 물리적 성질에 따라 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 1D 해석 소프트웨어인 AMESim을 사용하여 DME 인젝터에서 디젤과 DME

Fig. 2 Modeling for 1D simulation

의 물성치에 따른 Needle의 거동을 예측하였다. AMESim에서의 인젝터 모델은 크게 입력신호 제어부를 포함하는 솔레노이드부와 연료의 물성치를 입력하고 유로의 설계 변수들을 입력하는 인젝터 본체부, 그리고 유량에 직접적인 영향을 주는 노즐부로 구성된다. 초기 인젝터 구동신호는 1ms로 설정하였고, 디젤과 DME 연료의 물성치를 입력하여 해석을 진행하였다. Fig. 2는 DME 인젝터의 1D 유압 회로도 및 입력 변수를 보여주고 있다.

AMESim 해석을 통하여 확보된 디젤과 DME 연료에 따른 니들의 거동 결과를 3차원 해석과 연계하였다. Fig. 3은 AMESim 해석의 결과로 연료에 따른 니들의 거동을 보여주고 있으며, Fig. 4는 1D 해석을

Fig. 3 Predicted needle lift using 1D simulation

Fig. 4 Coupling of 1D simulation and 3D simulation

통하여 예측된 니들의 거동을 움직임 격자법을 이용하여 3D 해석에 적용한 것으로 니들 거동 시작 후 0.1ms에서의 격자와 니들이 완전히 상승 하였을 때 인 0.8ms에서의 격자를 보여주고 있다.

2.3 3차원 해석 모델과 물리적 조건

난류 유동에 대하여 정확히 해석을 하려는 시도로 DNS(Direct Numerical Simulation)나 LES(Large Eddy Simulation)에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그러나 컴퓨터의 계산 성능과 수렴시간 등의 한계로 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다. 이에 비해 RANS(Reynolds Average Navier-Stokes)의 와점성 모델중 2차 난류 모델들은 적은 시간으로도 다양한 유동장에서 만족할 만한 성과를 나타내고 있다. 본 해석에 적용된 난류 모델은 Menter⁷⁾가 제안한 k- ω SST(Shear Stress Transport) 모델이며, 이 모델은 역압력 구배 또는 박리유동의 유동장을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 보고되어 왔다.^{7,8)}

두 개의 상이 존재하는 공동현상 해석을 위하여 VOF(Volume Of Fluid)를 적용하여 해석을 수행하였다. VOF는 화학반응을 제외한 혼합물 또는 다상 유체의 해석에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 연료들의 특성의 정확한 모사를 위하여 디젤과 DME의

Fig. 5 Surface model and grid generation

온도와 압력에 따른 물성치를 다항식 형태의 함수로 입력하여 해석하였고,^{9,10)} 해석시간의 단축과 격자의 밀도를 높이기 위하여 인젝터 노즐의 1/6만 Periodic 기법으로 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 인젝터 노즐에서 해석영역을 보여주고 있다. 체적 격자는 니들 구동초기에 약 38만개의 육면체 형태의 격자로 구성하였고, 니들의 상승과 하강에 따라 최대 90만개이상 증가한다. 해석 모델과

Table 1 Simulation models and numerical conditions

Simulation models
<ul style="list-style-type: none"> • k-ω SST turbulence model • Cavitation <ul style="list-style-type: none"> - Seed Density : 1.0E12 /m³ - Seed Diameter : 1.0E-6m • Lagrangian Multiphase <ul style="list-style-type: none"> - VOF
Numerical conditions
<ul style="list-style-type: none"> • Boundary condition <ul style="list-style-type: none"> - Inlet condition : Stagnation inlet, 40[MPa] - Outlet condition : Pressure outlet, 2[MPa] - Adiabatic • Initial condition <ul style="list-style-type: none"> - Turbulence Intensity : 0.01 - Turbulence Viscosity Ratio : 10 • Implicit Unsteady <ul style="list-style-type: none"> - Time step : 1.0E-5 ms - Maximum Physics time : 2.0 ms • Solve time → 168 hours (2CPU) <ul style="list-style-type: none"> - HP xw8400 Intel Xeon E5320 CPU / Memory 32.0GB RAM

경계조건은 Table 1과 같다.

인젝터에서 Reynolds 수는 유체의 유속과 노즐 홀의 길이 및 유체의 동점도로서 정의되며, 캐비테이션 수(CN : Cavitation Number)는 노즐 홀의 출구부 압력 P_{back} , 노즐 홀의 입구부 압력 P_{inj} 그리고 유체의 증기압 P_V 의 함수로 정의된다.^{10,12)}

$$Re = \frac{v_{inj} D}{\nu} \quad (1)$$

$$CN = \frac{P_{inj} - P_{back}}{P_{back} - P_V} \quad (2)$$

일반적으로 PV의 크기는 상대적으로 작기 때문에 무시할 수 있다. 식 (2)를 다시 정리하면 식 (3)와 같이 정리할 수 있다.

$$CN = \frac{P_{inj} - P_{back}}{\frac{1}{2} \rho_l U^2} \quad (3)$$

노즐의 내부 압력이 연료 증기압 이하로 떨어졌을 때 기포는 발생되고, 이때 발생된 기포의 성장으로 공동현상은 심화되며, 발생된 기포의 크기와 분포가 균일하다고 가정한다. 식 (4)는 전체 체적에서 기포가 차지하는 비율과 기포의 반경 및 수량의 관계를 나타내고 있다.

$$\alpha_v = \frac{V_v}{V} = \frac{N_{bub} \times \frac{4}{3} \pi R^3}{V_l + V_v} = \frac{n_0 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{1 + n_0 \times \frac{4}{3} \pi R^3} \quad (4)$$

α_v 는 전체 체적에 대한 기포 체적의 비이고, N_{bub} 는 전체 기포의 수, N_0 는 단위 체적당 기포의 수, R 은 기포의 반경 그리고 $V_{l,v}$ 는 액상 연료와 기상 연료의 체적이다.

2.4 노즐 설계 최적화 해석

유량에 지배적인 영향을 미치는 변수로는 노즐 홀의 직경, 노즐의 분사각, 노즐 홀 입구부의 R-cut 등이 있다. 노즐 홀의 직경, 노즐의 분사각 등의 설계 변경은 가공성 및 연소실로 분사된 연료와 흡기의 혼합기 형성 등 고려하여야 할 부분이 많기 때문에 비교적 가공의 자유도가 높은 노즐 홀 입구부의 R-cut을 변경하여 유량을 증대하고자 하였다. R-cut

Fig. 6 The structures of injector nozzle

에 따른 유량의 변화는 니들이 완전하게 상승한 상태에서 정상 상태 해석을 통해서 비교·분석하였다. Fig. 6은 노즐의 구조와 노즐 홀의 R-cut을 보여주고 있다.

오리피스, 노즐 그리고 벤투리등을 가진 관로에서 유량을 계측하고 비교하는 경우, 이론상으로 얻어지는 유량과 실제 유량 사이의 관계를 나타내는 계수를 일반적으로 유량계수(C_f : Flow coefficient)라고 하며, 해석을 통하여 예측된 유량은 유량계수 비교를 통하여 객관적인 평가 및 분석이 가능하다. 식 (5)는 계산된 유량과 해석을 통하여 예측된 유량의 상관관계를 통하여 유량계수를 나타내고 있다.

$$C_f = \frac{\dot{m}_{(Actual)}}{\dot{m}_{(Ideal)}} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 공동현상의 발생과 유효면적의 변화

해석 결과 DME의 높은 압축성 효과와 물성차이의 영향으로 DME의 분무시간은 디젤 대비 8.9% 증가하였고, DME의 공동현상이 디젤의 공동현상보다 더 활발하게 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 노즐에서 DME의 공동현상은 유속이 최소가 되는 최대 니들 개방상태에서 가장 적게 발생하는 것을 확인하였다. DME의 공동현상은 DME의 낮은 임계온도와 노즐내 압력강하 때문에 최대 니들 개방상태에서 디젤 대비 약 12% 더 발생하였고, 이것의 영향으로 DME의 유량이 더 적을 것으로 예상되었다. Fig. 7은 인젝터 노즐에서의 공동현상의 발생을 보여주고 있다.

 Fig. 7 Generation of cavitation (P_{in} : 40MPa, P_{out} : 2MPa)

Fig. 8은 공동현상의 발생에 따른 유효 유동 면적의 영향성을 확인하기 위하여 Stream line을 확인한 결과이다. 인젝터의 니들이 완전히 상승하였을 때, 유효 유동 면적이 가장 작을 것으로 예측되는 노즐의 입구부에서 디젤과 DME 모두 최고 유속을 나타냈다. 해당 위치에서 DME의 평균 유속은 디젤의 평균 유속 대비 11.5% 더 빠르게 나타났다. 이것은 DME의 유효 유동 면적이 더 작기 때문으로 판단되며, Stream line 확인 결과 공동현상의 발생이 예측되는 부분에서 Stream line의 속도가 빠른 것으로 나타났다.

(a) A variation of velocity in injector nozzle with diesel

(b) A variation of velocity in injector nozzle with DME

Fig. 8 Velocity contour and stream line in injector nozzle ($P_{in} : 40\text{MPa}$, $P_{out} : 2\text{MPa}$)

3.2 공동현상과 분사 유량의 영향

Fig. 9은 디젤과 DME의 시간에 따른 분사율 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 동일한 유압시스템에서 작동유체가 다르면 밀도차에 의해 상이한 유량을 나타낸다. DME의 밀도는 디젤대비 약 20%정도 작기 때문에 유량도 20%정도 차이가 발생되어야 하지만 DME의 압축성 효과와 공동현상이 복합적으로 작용하여 본 해석에서는 Needle의 lift가 최대가 되는 0.8ms부근에서 DME의 유량이 4.73% 더 적은 것으로 나타났다. 그러나 1회 총 분사량의 경우 DME의 물성으로 인한 니들의 홀드기간의 증가로 DME가 디젤 대비 4.58% 더 많은 것으로 나타났다.

Fig. 9 A comparison of mass flow rate with diesel and DME fuel ($P_{in} : 40\text{MPa}$, $P_{out} : 2\text{MPa}$)

3.3 인젝터 노즐 형상에 따른 유량의 변화

앞서 언급한 바와 같이 유량에 지배적인 영향을 미치는 설계 변수중 비교적 가공의 자유도가 높은 R-cut을 변화시켜 니들이 완전히 개방된 상태에서 해석을 수행하였다. Fig. 10은 R-cut을 0 ~ 0.3까지 변화시켜가며 이에 따른 유량의 변화에 따른 Cf값 변화를 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이, R-cut이 증가함에 따라 디젤과 DME의 유량계수는 모두 증가하였고, R-cut에 따른 유량계수는 디젤보다 DME가 평균 6.3% 증가하여 더 효과적인 것으로 나타났으며, 이것은 R-cut의 영향으로 DME의 공동현상 발생이 감소하여 유효 유동면적이 증가하였기 때문으로 판단된다. R-cut의 가공은 유량 증대에 충분히 효과적이거나 과대한 R-cut의 가공은 근접한 홀의 R-cut과 간섭이 발

Fig. 10 A comparison of flow coefficient (P_{in} : 40MPa, P_{out} : 2MPa)

생할 수 있으며, 이에 따른 노즐 홀 안쪽입구 체적이 증가하여 후적 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 인젝터의 노즐 설계시 R-cut설계의 반영은 효과적인 유량증대의 방안이 될 수 있으며, 본 연구의 경우 R-cut은 가공성과 후적의 발생 등을 고려하여 0.08mm이하가 적당할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 적용 연료에 따른 인젝터 내부의 유동 특성을 파악하였으며, 3차원 비정상 내부 유동 해석을 통하여 DME 인젝터의 내부 유동 및 공동현상을 예측하였다. 이를 근거로 연소기법 및 분사 시스템의 변경 없이 적용 가능한 노즐의 최적 설계안을 제시하였다.

- 1) 1D 해석을 수행하여 연료에 따른 인젝터 니들거동을 예측하였고, 3차원 해석과 연계를 통하여 공동현상의 발생 영역을 예측하였으며, 유량 및 유속의 변화를 확인하였다.
 - 1차원 해석을 통하여 본 연구의 경우 DME의 분사시간은 DME의 압축성 효과로 디젤 대비 0.17ms 증가함을 확인하였다.
 - DME의 유량은 공동현상의 발생으로 인한 유효 유동 면적의 감소로 최대 리프트에서 4.73% 감소하였다.
- 2) 이를 근거로 공동현상 저감을 위한 노즐 최적설계 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 확인하였다.
 - R-cut이 증가함에 따라 디젤과 DME의 유량계

수는 모두 증가하였고, DME의 유량계수가 디젤대비 평균 6.3% 증가하여 더 효과적인 것으로 나타났다.

- R-cut의 가공은 유량 증대에 충분히 효과적이지만 과도한 R-cut의 가공은 근접한 홀의 R-cut과의 간섭, 후적 발생 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 본 연구의 경우 R-cut은 가공성과 후적의 발생 등을 고려하여 0.08mm이하가 적당할 것으로 판단된다.

- 3) 본 연구의 결과는 디젤과 동일한 에너지를 발생시키도록 유량 증대 설계가 고려된 DME 인젝터의 노즐 설계에 유용한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 인젝터의 분사율 측정 실험을 수행하여 해석 모델 검증 및 신뢰성 검토를 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 지식경제부에서 지원하는 산업원천기술 개발사업(과제 번호 : 100033303)의 일환으로 수행된 연구결과와 일부이며, 이에 관계기관에 감사를 전합니다.

References

- 1) S.-J. Jeong and S.-I. Lee, "Three Dimensional Numerical Analysis of Transient Internal Flow in High Pressure Common-rail DME Injector with Consideration of Cavitation," KSAE Annual Conference Proceedings, KSAE11-A0125, pp.677-683, 2011.
- 2) H. Teng and J. C. McCandless, "Comparative Study of Characteristics of Diesel-fuel and Dimethyl-ether Sprays in the Engine," SAE 2005-01-1723, 2005.
- 3) M. Konno, K. Chiba and T. Okamoto, "Experimental and Numerical Analysis of High Pressure DME Spray," SAE 2010-01-0880, 2010.
- 4) J. Cha, S. H. Park, C. S. Lee and S. W. Park, "Study on Spray and Exhaust Emission Characteristics of DME-biodiesel Blended Fuel in Compression Ignition Engine," Transactions of KSME(B), Vol.35, No.1, pp.67-73, 2011.

- 5) KATECH, Development of Fuel System and Combustion Technique for Next Generation Clean Alternative Fuel, DME, Industry Original Technology Development Report, MKE(Ministry of Knowledge Economy), 2010.
- 6) O. Chiavola and F. Palmieri, "Modeling Needle Motion Influence on Nozzle Flow in High Pressure Injection System," SAE 2007-01-0250, 2007.
- 7) F. R. Menter, "Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Modeling for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol.32, No.8, pp.1598-1605, 1994.
- 8) SATR-CCM+ Ver. 6.02 User Guide, CD-adapco, 2011.
- 9) DME Handbook, Japan DME Forum, 2006.
- 10) M. Battistoni and C. N. Grimaldi, "Analysis of Transient Cavitating Flows in Diesel Injectors Using Diesel and Biodiesel Fuels," SAE 2010-01-2245, 2010.
- 11) P. G. Aleiferis, Y. Hardalupas, D. Kolokotronis, A. M. K. P. Taylor and T. Kimura, "Investigation of the Internal Flow Field of a Diesel Model Injector Using Particle Image Velocimetry and CFD," SAE 2007-01-1897, 2007.
- 12) J.-W. Lee and K. Min, "A Study on Relation of Needle-nozzle Flow of Piezo-driven Injector by using Eulerian-Lagrangian Multi-phase Method," Transactions of KSAE, Vol.18, No.5, pp.108-114, 2010.