

수치해석을 이용한 디젤엔진 연료분사펌프의 캐비테이션 저감에 관한 연구

공경주¹ · 정석호² · 이상득³ · 고대권[†]

(Received April 7, 2017 ; Revised July 17, 2017 ; Accepted July 24, 2017)

Reduction of cavitation in fuel injection pumps of diesel engines using numerical analysis

Kyeong-Ju Kong¹ · Suk-Ho Jung² · Sang-Deuk Lee³ · Dae-Kwon Koh[†]

요약: 연료분사펌프는 고압을 발생시키기 때문에 캐비테이션에 의한 손상이 많이 발생되고 있다. 이러한 캐비테이션 현상의 저감 방안을 마련하기 위해 수치해석을 이용한 연구가 진행되었으나 구성 부품을 고정시킨 결과가 대부분이다. 앞선 연구에서 동적 격자 및 사용자 정의 함수를 적용하여 연료분사펌프 송출 압력과 해석 결과와 실험 결과에 신뢰성이 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 연료분사펌프의 캐비테이션 현상에 대해 동적 격자 및 사용자 정의 함수를 적용한 수치해석을 실시하였다. 특히, 바렐로 유입하는 연료의 압력에 따른 캐비테이션을 확인하였다. 그 결과 유입 압력이 상승함에 따라 캐비테이션 저감 효과가 크게 나타났다. 따라서 연료공급시스템에서 연료분사펌프로의 유입 압력을 상승시켜 운전하는 것이 캐비테이션을 저감하는데 효과가 있을 것으로 판단된다.

주제어: 연료분사펌프, 캐비테이션, 동적 격자, 사용자 정의 함수, 수치해석

Abstract: High pressure resulting from cavitation causes severe damage in fuel injection pumps. Many numerical studies are being carried out to reduce the cavitation phenomena; however, most studies focus on analyses of fixed components. In a previous study by the authors, good agreement was obtained between numerical analysis and experimental results of delivery pressure wave in a fuel injection pump. In this study, numerical analysis of cavitation phenomena of fuel injection pump was performed using dynamic mesh and user-defined functions. In particular, cavitation due to fuel inlet pressure flowing into barrel was analyzed. The results showed that increasing inlet pressure has considerable effect on reduction of the cavitation. It was suggested that inlet pressure to fuel injection pump be raised, if possible, for reducing cavitation in fuel supply systems.

Keywords: Fuel injection pump, Cavitation, Dynamic mesh, User-defined function, Numerical analysis

1. 서 론

최근 디젤엔진의 매연저감과 연소 효율 향상을 위해 연료분사기간을 단축시키고 연료 액적을 더욱 미립화시키고 있다[1]. 이러한 목적으로 연료분사압력이 고압화되고 있는데 이로 인해 연료분사펌프의 구성 부품 중에서 플런저(plunger)와 바렐(barrel) 등이 캐비테이션(cavitation)에 의해 손상을 많이 입고 있다[2]. 기존의 연료분사펌프의 캐비테이션에 관한 연구들은 유동가시화 등의 실험 연구들[3][4]이 대다수였으며 이러한 실험 연구는 실험 조건, 구성 부품의 형상 등의 여러 변수가 캐비테이션에 미치는 영향을 관찰하는데 경제적, 시간적 한계가 있었다. 또한, 기존의 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 수치

해석 연구는 구성 부품들의 움직임을 고정된 상태로 해석하여 실제 연료분사펌프의 작동 상태와는 차이가 있었다[5]. 이러한 이유로 본 연구에서는 여러 변수를 조절하며 캐비테이션을 관찰하기 위해 CFD를 이용하여 연료분사펌프의 실제 작동 상태와 동일하도록 동적 격자(dynamic mesh) 및 사용자 정의 함수(user-defined function, UDF)를 적용하여 연료분사펌프의 캐비테이션 저감에 관한 수치해석 연구를 진행하고자 하였다.

한편 앞선 연구에서 210 kW/cyl 급 중속디젤엔진의 연료분사펌프 송출 압력과 관련한 수치해석을 통해 실험 결과와 수치해석 결과간의 신뢰성을 확인하였다. 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하면 연료 송출 압력의 상승 시점,

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9214-2350>): Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, 365 Shinseon-ro, Nam-gu, Busan, 608-739, Korea, E-mail: dkkoh@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6195

1 Department of Control and Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University, E-mail: kjkong@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6195

2 Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, E-mail: sukhojung@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6198

3 Department of Ship Operation, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: sdlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4202

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최대 송출 압력이 나타난 시점 및 연료 송출 압력과의 전 파속도는 실험 결과와 동일하였으며, 최대 송출 압력은 수치해석 결과가 실험 결과보다 1.40% 높았으나 거의 근사한 결과를 나타냈다. 따라서 수치해석을 이용한 디젤엔진 연료분사펌프의 연구가 실험 결과와 신뢰성이 있다고 판단된다[6]. 연료분사펌프의 연료 송출이 끝나는 시점인 스푼 포트(spill port)가 닫힌 직후에 스푼 포트에 빠져나가는 연료의 유속은 빠르게 나타났으며 압력은 감소하였다. 따라서 바렐 내부의 연료가 스푼 포트에 빠져나가는 부분이 캐비테이션을 관찰하는데 있어 주 관찰 부분이 될 것이라 판단된다[6]. 또한, 캐비테이션에 영향을 미치는 여러 요인 중 유입 압력이 캐비테이션에 미치는 영향을 알아보기 위해 변수를 유입 압력으로 두고 이에 따른 캐비테이션의 관찰 및 저감 방안을 수치해석을 이용해 모색하고자한다.

2. 수치 해석

2.1 CFD 모델링

수치해석 대상은 국내 P사의 L28/32H 중속 디젤엔진용 연료분사펌프[7]이며, CFD 모델링은 연료분사펌프, 고압관 및 연료분사밸브를 대상으로 ANSYS FLUENT R15.0을 사용하여 수치해석 하였다[8]. 연료분사펌프의 구성 부품 중 연료 송출에 직접적으로 영향을 미치는 하우징(housing), 플런저, 바렐 그리고 커넥팅 피스(connecting piece) 등에 대하여 실제 연료분사펌프와 동일하게 모델링하였다. 이 중 플런저는 바렐 내부에서 왕복 운동하며 연료를 송출시키는 역할을 하며, 이를 동적 격자 및 사용자 정의 함수를 적용하여 구현하였다. 또한, 연료분사밸브와 딜리버리 밸브의 모델링은 형상을 단순화하여 동적 격자 및 사용자 정의 함수를 적용하여 개폐 움직임을 적용하였다. 그 이유는 실제 형상으로 동적 격자를 적용하여 모델링 한다면 계산 속도 및 재원에 큰 부하를 주는 격자 재생성(remeshing) 기법을 사용해야하기 때문이다. 형상은 단순화 하였지만 개폐 움직임은 동일하게 적용하였기 때문에 플런저와 바렐의 캐비테이션을 관찰하는데 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 격자는 여러 부분으로 나뉘 각 부분의 활용에 맞춰 육면체와 사면체 격자로 나뉘 생성하였으며, 노드 수는 696만 개이다. 동적 격자가 적용된 부분은 시간 단계를 고려하여 격자의존성을 초과하여 생성하였다[6].

2.2 CFD 해석 조건

CFD 해석 조건은 실험 조건과 동일하며 Table 1에 나타내었다[6]. 컨트롤 랙(control rack) 위치 21 mm는 50% 부하 상태이며[7], 캐비테이션에 영향을 주는 여러 요인 중 유입 압력에 따른 캐비테이션을 살펴보기 위해 변수를 유입 압력 3.5 bar, 5.5 bar 및 7.5 bar 세 가지 조건으로 해석하였다.

Table 1: Conditions of parameter on Experiment and CFD analysis

Items	Method	Experiment	CFD
Revolution speed (rpm)		370	370
Control rack position (mm)		21	21
Inlet pressure (bar)		3.5	3.5/5.5/7.5
High pressure pipe (mm)		Φ5 x 770	Φ5 x 770
Fuel injection valve opening pressure (bar)		320	320

주 관찰 부분은 캐비테이션에 의해 가장 많이 손상 되는 부분으로 바렐의 내부와 플런저의 리드 부분이다[1].

캐비테이션을 수치해석하기 위한 CFD 해석의 설정을 Table 2에 나타냈다[6]. 난류 모델은 사면체 격자에서 높은 정확성을 얻기 위해 표준 k-ε 을 사용하였고, 비정상상태로 해석하였다[9][10].

Table 2: Setup conditions on CFD analysis

Items	CFD Modeling
Viscous model	Standard k-ε
Time	Transient
Multiphase	Mixture
Cavitation model	Schnerr-Sauer
Materials	Diesel oil, 55°C
Vapor pressure (bar)	0.0133

수치해석에 적용된 지배방정식인 일반형 수송방정식은 식 (1)과 같다[11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S \quad (1)$$

여기서, ρ는 유체 밀도, φ는 종속변수, Γ는 확산계수 그리고 S는 생성항이며, 일반형 수송방정식은 비정상항, 대류항, 확산항, 그리고 생성항으로 구성되어있다.

또한, 플런저, 연료분사밸브 및 딜리버리 밸브의 움직임에 적용된 동적 격자의 보존 방정식은 식 (2)와 같다[12].

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\vec{u} - \vec{u}_g) \cdot d\vec{A} \\ & = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, V는 임의의 검사체적, ∂V는 검사체적의 경계, \vec{u} 는 유속 벡터, \vec{u}_g 는 동적 격자의 격자 속도, \vec{A} 는 공간벡터, Γ는 확산계수 그리고 S_ϕ 는 φ의 생성항이다.

다상혼합유체로 캐비테이션 모델은 Schnerr-Sauer 모델을 사용하였다. Schnerr-Sauer 모델은 증기의 물성 및 증기 기포의 크기와 관련된 계수가 같아 기화 압력에 대한 상대 압력에 따라 기화 및 응축하는 상변화를 모델링 할 수 있기 때문이다. 캐비테이션 해석을 위한 증기 수송방정식은 식 (3)과 같다[13]-[15].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_v) + \nabla \cdot (\alpha\rho_v \vec{V}_v) = R_e - R_c \quad (3)$$

여기서, α 는 증기부피율, ρ_v 는 증기밀도 그리고 \vec{V}_v 는 증기상속도이며, 우변의 $R_e - R_c$ 은 기화 압력에 대한 상대 압력에 따라 기화 및 응축하는 상변화를 모델링한 소스항이다. 증기 기포 크기는 증기의 체적분율로 계산되므로 식 (3)의 증기 수송방정식으로부터 구하며 기포 반지름 R_B 는 식 (4)와 같다.

$$R_B = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

증기 압력(vapor pressure)은 해석 조건에 적용된 디젤 55°C의 증기 압력인 0.0133 bar로 설정하였다[16][17].

3. 결과 및 고찰

3.1 유입 압력의 증가에 따른 송출 압력

유입 압력의 증가가 연료 송출 압력에 미치는 영향을 고찰하기 위해 유입 압력을 3.5 bar, 5.5 bar, 7.5 bar 세 가지로 수치해석 한 CFD 결과와 실험 결과의 연료 송출 압력을 Figure 1에 비교해보았다. 가로축은 연료 캠 각도(fuel cam angle, °CA)를 나타내며 시간으로 볼 수 있다. 세로축은 연료분사펌프 출구의 연료 송출 압력이다[7].

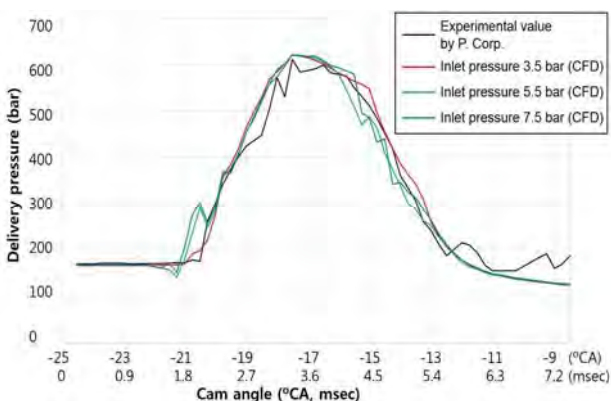


Figure 1: Delivery pressure of experimental value and CFD results (inlet pressure 3.5, 5.5, 7.5 bar)

CFD 해석 결과에서 유입 압력이 변화여도 연료 송출 압력의 상승 시작 시점 및 최대 송출 압력이 나타난 시점은 동일하였으며, 실험 결과와 CFD 해석 결과의 최대 송출 압력을 Table 3에 나타내었다.

Table 3: Maximum delivery pressure of experimental value and CFD results

Inlet Pressure (bar)	Experiment	CFD		
	3.5	3.5	5.5	7.5
Maximum delivery pressure (bar)	610.55	619.22	620.09	620.69

CFD 해석 결과에서 최대 송출 압력은 유입 압력이 3.5 bar 경우에 비해 5.5 bar, 7.5 bar일 때 각각 0.14%, 0.24% 상승하였다. 연료분사펌프의 유입 압력이 상승하여도 최대 송출 압력에는 큰 영향을 미치지 못했다. 연료 송출 압력의 상승은 플런저의 상승이 주 역할을 하여 송출하기 때문에 바렐 내부로 들어오는 연료의 압력은 큰 영향을 주지 못하였기 때문이다. 하지만 연료분사펌프 유입 관에 누설 발생 사고 가능성, 내구성 등의 여러 문제를 고려해야하므로 실제 유입 압력을 상승시켜 운전한다면 추후 보완점이 필요하다고 생각한다.

3.2 유입 압력의 증가가 캐비테이션에 미치는 영향

증기 부피율은 캐비테이션에 의한 손상의 원인이 되는 기화의 부피율을 나타낸 것으로 이는 캐비테이션의 지표가 될 수 있다[13][18]. 증기 부피율이 존재하면 캐비테이션이 발생 또는 발생 가능성이 있다고 판단할 수 있다[15][17].

연료분사펌프의 구성 부품 중 캐비테이션에 의해 주로 손상되는 플런저의 리드와 바렐의 스피드 포트 부분을 관찰하여보았다[1]-[4]. CFD 해석 결과 중 이 부분의 연료 캠 각도에 따른 평균 증기 부피율을 Figure 2에 나타냈다. 가로축은 연료 캠의 각도이며, 세로축은 이 위치에서의 증기 부피율의 평균값이다.

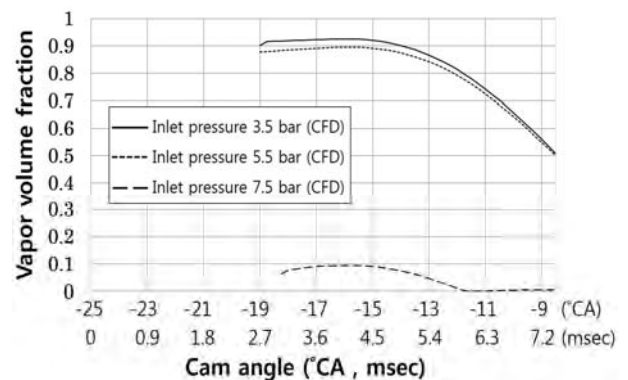


Figure 2: Vapor volume fraction of CFD results

캐비테이션이 나타나기 시작한 시점은 유입 압력 3.5 bar와 5.5 bar의 경우 -19.00 °CA에서 나타났으며, 플런저가 바렐의 스피드 포트를 막아 연료 송출이 되고 있는 시점이다. 유입 압력 7.5 bar의 경우 0.50 °CA 이후 시점인 -18.50 °CA에서 캐비테이션이 나타났다. 유입 압력 3.5 bar, 5.5 bar, 7.5 bar 경우 모두 캐비테이션이 가장 많이 발생한 시점은 -16.50 °CA이며, 플런저의 리드가 바렐의 스피드 포트와 만난 후 시점이다.

Figure 3은 캐비테이션에 의해 손상된 플런저와 CFD 해석 결과에서 캐비테이션이 가장 많이 발생한 연료 챔 각도 -16.50°CA 일 때를 비교하여 나타낸 것이다. 손상된 플런저는 디젤 엔진에 장착되어 1,000시간 이상 운전 후 분해한 것이다[7]. CFD 해석 결과에서 캐비테이션은 유입 압력 3.5 bar, 5.5 bar의 경우 플런저의 리드 부분에 전체적으로 나타났고 유입 압력 7.5 bar의 경우 플런저의 상부에 집중적으로 나타났다. 특히, 유입 압력 3.5 bar, 5.5 bar의 경우 바렐의 스피어 포트에서 캐비테이션이 많이 발생하였다. 이 위치는 플런저와 만나는 위치이며 플런저가 손상된 위치와 유사하다. 그러므로 스피어 포트에서 발생하는 캐비테이션이 플런저에 손상을 입힐 것이라 판단된다.

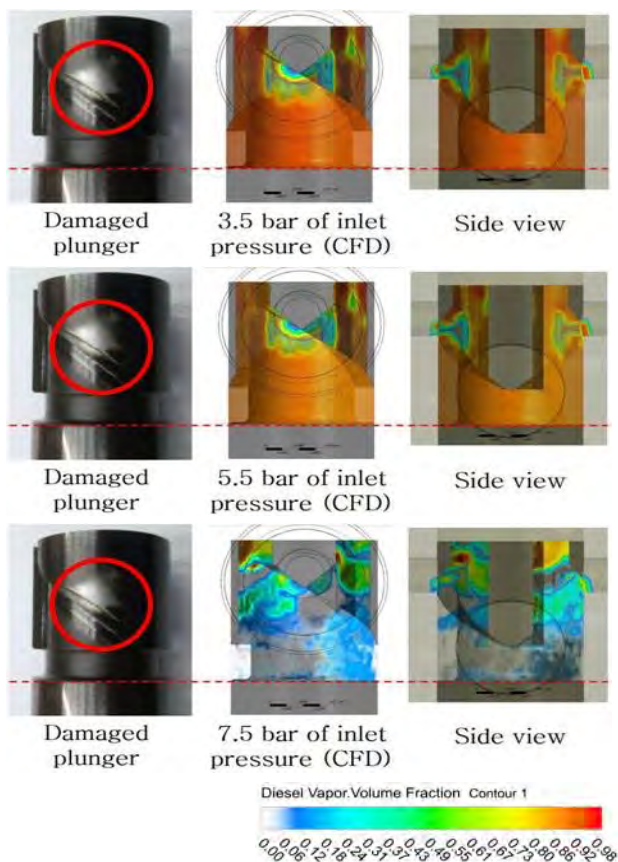


Figure 3: Damaged plunger and vapor volume fraction contour

최대 송출 압력이 나타난 시점인 연료 챔 각도 -17.50°CA 와 캐비테이션이 가장 많이 발생한 시점인 연료 챔 각도 -16.50°CA 에서 유입 압력에 따른 증기 부피율의 분포를 고찰해보았다.

Figure 4는 유입 압력 3.5 bar이며 최대 송출 압력 시점인 연료 챔 각도 -17.50°CA 일 때 증기 부피율의 분포를 나타낸 것이다. 리드와 스피어 포트가 만난 시점이며 리드에서 증기 부피율 평균값은 0.9211이다. 리드와 스피어 포트가 만나는 부분의 증기 부피율은 0.80 이하로 평균값보다 낮게 나타났지만 스피어 포트에서는 증기 부피율이 0.90 이상 높은 부분이 나타났다.

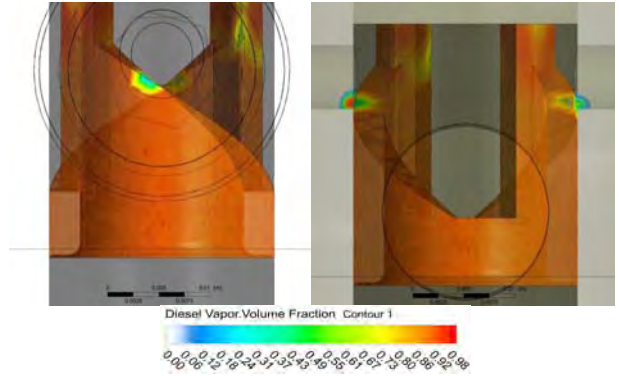


Figure 4: Vapor volume fraction contour for front and side of inlet pressure 3.5 bar at -17.50°CA

Figure 5는 유입 압력 3.5 bar이며 캐비테이션이 가장 많이 발생한 연료 챔 각도 -16.50°CA 일 때 증기 부피율의 분포를 나타낸 것이다. 증기 부피율의 평균값은 리드에서 0.9257이며, 최대값은 스피어 포트에서 0.9882로 나타났다. 스피어 포트에서 증기 부피율이 0.10 이상 나타난 부피는 16.05 mm^3 으로 최대 송출 압력이 나타난 시점보다 확대되었다. 이는 리드와 스피어 포트가 만나는 부분이 확대되었기 때문이라 생각한다. 스피어 포트에서 증기 부피율이 0.90 이상 높은 부분이 나타났고 이 부분에서 나타난 캐비테이션이 플런저와 만나 손상을 일으킬 것이라 생각한다.

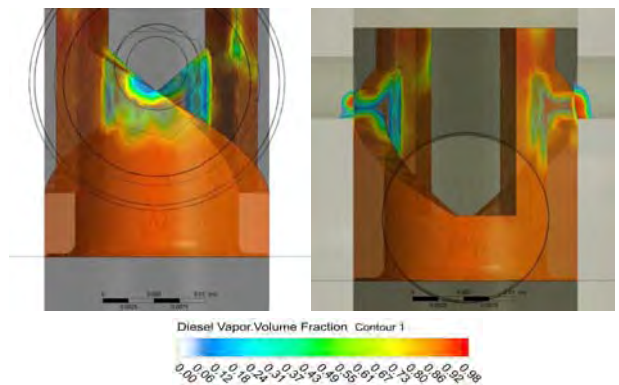


Figure 5: Vapor volume fraction contour for front and side of inlet pressure 3.5 bar at -16.50°CA

Figure 6은 유입 압력 5.5 bar이며 최대 송출 압력 시점인 연료 챔 각도 -17.50°CA 일 때 증기 부피율의 분포를 나타낸 것이다. 리드에서 증기 부피율 평균값은 0.8880으로 유입 압력 3.5 bar 경우에 비해 3.59% 감소하였다. 스피어 포트에서 증기 부피율이 0.90 이상 높은 부분이 발생하였고 이 부분에서 증기 부피율의 평균값은 유입 압력 3.5 bar 경우에 비해 4.04% 감소하였다. 유입 압력 3.5 bar의 경우에 비해 증기 부피율은 감소하였으나 증기 부피율 0.90 이상의 많은 캐비테이션이 발생하고 있으므로 유입 압력 3.5 bar 경우와 마찬가지로 플런저와 스피어 포트가 만나는 부분에 큰 손상을 줄 것이라 생각한다.

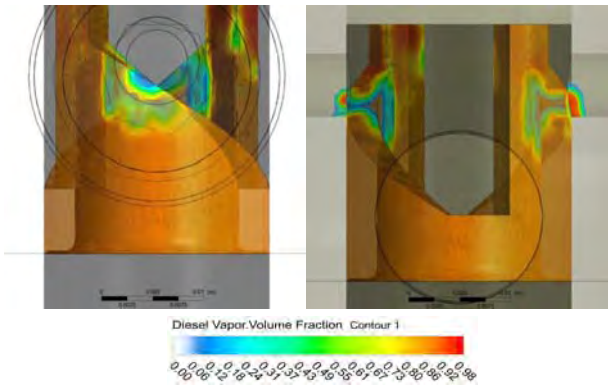


Figure 6: Vapor volume fraction contour for front and side of inlet pressure 5.5 bar at $-17.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$

Figure 7은 유입 압력 5.5 bar이며 캐비테이션이 가장 많이 발생한 연료 캠 각도 $-16.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 일 때 증기 부피율의 분포를 나타낸 것이다. 증기 부피율의 리드에서 평균값은 0.8958으로 유입 압력 3.5 bar 경우보다 3.23% 감소하였으며, 최대값은 스피드 포트에서 0.9838으로 나타났다. 스피드 포트에서 증기 부피율의 평균값은 유입 압력 3.5 bar 경우에 비해 0.28% 감소하였고 유입 압력 3.5 bar 경우와 마찬가지로 증기 부피율이 0.90 이상 높은 부분이 발생하여 캐비테이션에 의한 손상이 발생한다고 생각된다.

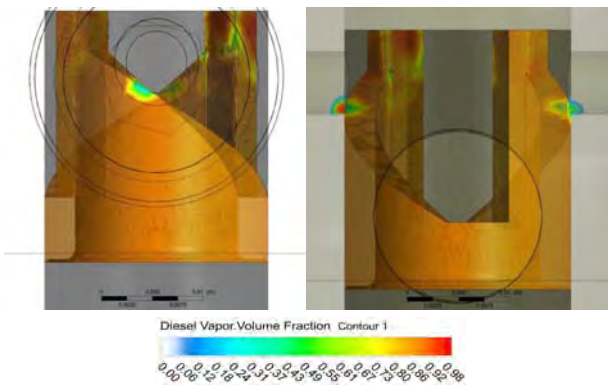


Figure 7: Vapor volume fraction contour for front and side of inlet pressure 5.5 bar at $-16.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$

Figure 8는 유입 압력 7.5 bar이며 최대 송출 압력 시점인 연료 캠 각도 $-17.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 일 때 증기 부피율의 분포를 나타낸 것이다. 플런저의 리드 부분의 증기 부피율 평균값은 0.0845으로 유입 압력 3.5 bar, 5.5 bar의 경우 보다 90.82%, 90.48% 감소하였다. 스피드 포트에서 증기 부피율이 0.80 이상인 부분이 발생하였지만 유입 압력 3.5 bar 경우와 비교하였을 때 증기 부피율 평균값이 46.07% 감소하였다.

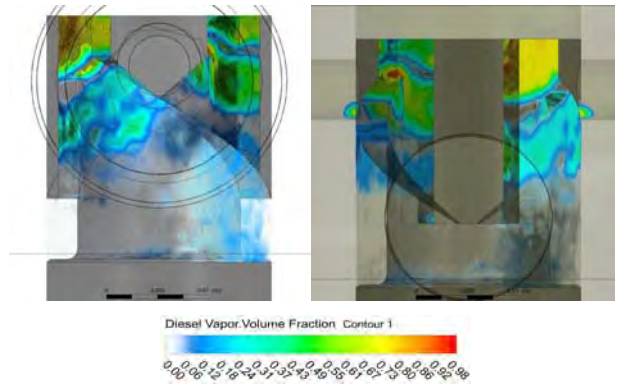


Figure 8: Vapor volume fraction contour for front and side of inlet pressure 7.5 bar at $-17.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$

Figure 9는 유입 압력 7.5 bar이며 캐비테이션이 가장 많이 발생한 연료 캠 각도 $-16.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 일 때 증기 부피율의 분포를 나타낸 것이다. 리드의 증기 부피율 평균값은 0.0946으로 유입 압력 3.5 bar 경우보다 89.78% 감소하였다. 증기 부피율의 평균값이 89.78% 감소한 것에 비해 최대값은 0.96% 감소하였는데, 이는 플런저의 수직 홈의 극소 부분에서만 나타났으며 전체적인 캐비테이션은 감소하였다. 플런저의 수직 홈 지점에서 증기 부피율의 최대값이 나타난 것은 이 지점이 연료 송출 과정에 의해 가압된 바렐 내부와 맞닿아 차압이 크게 발생하는 지점이기 때문이라 생각한다. 스피드 포트에서 증기 부피율의 평균값은 유입 압력 3.5 bar 경우에 비해 40.78% 감소하였으며 캐비테이션이 발생한 부피 또한 17.88% 감소하여 플런저에 주 손상을 입히는 위치의 캐비테이션이 감소하였다고 생각한다.

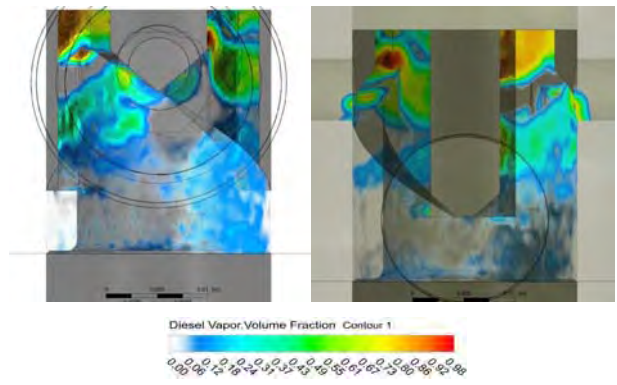


Figure 9: Vapor volume fraction contour for front and side of inlet pressure 7.5 bar at $-16.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$

캐비테이션이 가장 많이 발생한 연료 캠 각도 $-16.50\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 일 때 플런저의 리드와 바렐의 스피드 포트에서 발생한 증기 부피율을 종합하여 **Table 4**에 나타내었다.

Table 4: Vapor volume fraction at -16.50 °CA lead of plunger and spill port of barrel

Vapor volume fraction Inlet pressure (bar)	Lead of plunger			Spill port of barrel	
	Min.	Mean	Max.	Mean	Volume (>0.10) (mm ³)
3.5	5.50e-14	0.9257	0.9882	0.8617	16.05
5.5	4.05e-14	0.8958	0.9839	0.8593	15.45
7.5	2.07e-28	0.0946	0.9787	0.5103	13.18

플런저의 리드에서 증기 부피율은 3.5 bar, 5.5 bar, 7.5 bar 세 가지 유입 압력 조건 모두 최소값이 평균값 및 최대값에 비해 미소량으로 나타났다. 증기 부피율의 평균값은 유입 압력 7.5 bar 의 경우, 3.5 bar 에 비해 89.78% 감소하여 확연하게 캐비테이션이 저감되었다고 판단된다. 저감된 이유는 유입 압력의 상승으로 연료 송출 과정에서 바렐 내부의 차압이 줄어들었기 때문이라 생각되며, 추후 캐비테이션이 저감되는 유입 압력의 기준 및 7.5 bar 이상으로 유입 압력을 상승시켰을 경우에 관한 연구가 진행되어야 한다고 생각한다. 증기 부피율의 최대값은 유입 압력이 높을수록 평균값이 줄어든 것에 비해 크게 줄어들지 않았다. 하지만 유입 압력 7.5 bar의 경우 증기 부피율의 최대값은 플런저의 수직 홈의 극소 지점에서만 나타났다. 이 부분은 연료 송출 과정에 의해 가압된 바렐 내부와 맞닿아 차압이 크게 발생하는 부분이며, 플런저가 캐비테이션에 의해 손상되는 스피어 포트와 만나는 부분과는 다른 부분이다. 그러므로 증기 부피율의 최대값은 캐비테이션에 의한 손상을 판단하는데 기준이 되지 않는다고 생각한다.

바렐의 스피어 포트에서 증기 부피율의 평균값은 유입 압력 3.5 bar 경우보다 5.5 bar, 7.5 bar 상승시켰을 때 0.28%, 40.78% 감소하였다. 증기 부피율이 0.10 이상 나타난 부피는 유입 압력 3.5 bar 경우보다 5.5 bar, 7.5 bar 상승시켰을 때 3.74%, 17.88% 감소하였다.

유입 압력을 5.5 bar 까지 상승 시켰을 경우 캐비테이션이 많이 저감되지 않았고, 7.5 bar까지 상승시켰을 때 캐비테이션 저감 효과가 크다고 판단된다.

4. 결 론

디젤엔진 연료분사펌프의 캐비테이션 저감 방안을 찾기 위해 동적 격자 및 사용자 정의 함수를 적용하여 수치해석하였다. 연료분사펌프의 캐비테이션에 영향을 미치는 여러 요인 중 유입 압력이 캐비테이션에 미치는 영향에 대한 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 캐비테이션이 많이 발생한 시점은 스피어 포트가 닫히기 직전 및 열린 직후이며, 연료 송출 종료 시점 이후인 연료 캠 각도 -16.50 °CA일 때 가장 많이 발생하였다.
- (2) 캐비테이션이 많이 발생한 부분은 스피어 포트와 플런저의 리드 부분이며, 특히 스피어 포트와 플런저가 만나는

부분에서 발생하는 캐비테이션이 플런저 손상에 가장 많은 영향을 미친다고 판단된다.

- (3) 캐비테이션은 연료 유입 압력이 증가할수록 감소하였으나 유입 압력 5.5 bar 경우 저감 효과를 많이 얻지 못하였고, 유입 압력을 7.5 bar까지 상승시켰을 때 많은 저감 효과를 얻었다. 따라서 연료분사펌프의 유입 압력을 7.5 bar 까지 상승시켜 운전하는 것이 캐비테이션을 저감하는데 효과가 있다고 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] H. Rulfs and M. Wöhnke, "Cavitation phenomena in fuel injection pumps." Proceedings of the 22nd International Congress on Combustion Engines, Diesel Engine Papers, vol. 4, pp. 1093-1102, 1998.
- [2] G. P. Michael and W. H. Richard, "Investigation of Fuel Injection System Cavitation Problems on the MV James R. Barker. MV Mesavi Miner and MV William J. De Lancey," Society of Naval Architects and Marine Engineers, vol. 22, no. 3, pp. 214-237, 1985.
- [3] S. H. Ryu, D. H. Kim, B. S. Kim, and T. H. Park, "Optical observation of cavitation phenomena in diesel fuel injection pumps," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 4, pp. 460-467, 2011 (in Korean).
- [4] T. H. Park, J. Y. Heo, and D. H. Kim, "Flow visualization to evaluate jet-plunger for preventing cavitation damage of fuel injection pumps on diesel engines," Proceedings of the 36th Korean Society of Marine Engineering Fall Conference, p. 149, 2012 (in Korean).
- [5] Y. J. Yang, "Study on simulation of fuel injection pump for marine medium diesel engine," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 11, no. 6, pp. 123-129, 2012 (in Korean).
- [6] K. J. Kong, S. H. Jung, S. D. Lee, and D. K. Koh,

- “A numerical analysis of the delivery pressure wave on fuel injection pump of 210 kW/cyl for medium speed diesel engines,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 295-300, 2016 (in Korean).
- [7] J. H. Kim, A Study on the Possibility of Localization for the Fuel Injection Pump in L28/32H Middle Speed Diesel Engines, M. S. Thesis, Department of Control & Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, 2015 (in Korean).
- [8] D. T. Hountalas and A. D. Kouremenos, “Development of a fast and simple simulation model for fuel injection system of diesel engine,” *Advances in Engineering Software*, vol. 29, no. 1, pp. 13-28, 1998.
- [9] Ansys. Inc. *Fluent Theory Guide*, pp. 46-48, 2013.
- [10] R. Marcer, A CFD Code for Diesel Direct Injection Simulation, ICLASS, 2003.
- [11] H. K. Myeong, *CFD Introduction*, Munundang, pp. 5-7, 2002 (in Korean).
- [12] Ansys. Inc. *Fluent Theory Guide*, pp. 35-36, 2013.
- [13] Ansys. Inc. *Fluent Theory Guide*, pp. 581-590, 2013.
- [14] S. Patouna, A CFD Study of Cavitation in Real Size Diesel Injectors, Ph.D. Dissertation, Department of Thermal Engines and Machines, University of Valencia, Spain, 2012
- [15] N. Dumont, O. Simonin, and C. Habchi, “Numerical simulation of cavitating flows in diesel injectors by a homogeneous equilibrium modeling approach,” 4th International Symposium on Cavitation, session B6, no. 5, 2001.
- [16] M. Kubota, H. Kato, and S. Kimura, “Internal flow analysis of nozzels for DI diesel engines using cavitation model,” *JASE Review*, vol. 24, no. 3, pp. 255-261, 2003.
- [17] Y. Delannoy and J. L. Kueny, “Two phase flow approach in unsteady cavitation modeling,” *The American society of mechanical engineers, Proceedings of the Spring Meeting of the Fluids Engineering Division*, pp. 153-158, 1990.
- [18] Ansys. Inc. *Fluent Theory Guide*, pp. 568-569, 2013.