

GDI 고압펌프의 유동특성에 관한 연구[§]

이상진* · 노유정**† · 류하오* · 이재천* · 신용남*** · 박용덕*** · 강명권***
* 계명대학교 기계자동차공학과, ** 부산대학교 기계공학부, *** (주) 모토닉

A Study of the Fluidic Characteristics of High-Pressure Fuel Pumps for GDI Engines

Sangjin Lee*, Yoojeong Noh**†, Hao Liu*, Jae-cheon Lee*, Yongnam Shin***, Yongduk Park*** and Myungkweon Kang***

* Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.,
** School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,
*** Motonic Co. Ltd

(Received August 4, 2014 ; Revised January 2, 2015 ; Accepted February 16, 2015)

Key Words: Gasoline Direct Injection(가솔린 직접 분사 엔진), High Pressure Fuel Pump(고압연료펌프), Flow Rate(유량), Net Force(알짜힘), Look-up Table(룩업 테이블)

초록: 고압연료펌프는 GDI 엔진의 핵심 구성요소로써, 엔진출력 및 연료 효율을 향상시키기 위해서는 고압연료펌프의 유동특성을 연구하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 유압해석틀인 AMESim을 이용하여 고압연료펌프의 통합 모델을 생성하여 유동해석을 수행하였다. 하지만, AMESim은 시스템 해석을 위한 1차원 모델이므로 복잡한 유동현상이 발생하는 부근에서의 해석 결과는 정확하지 않은 단점이 있으므로 본 연구에서는 전산해석프로그램인 Fluent를 이용하여 난류유동이 발생하는 체크밸브의 흡입부와 토출부에서 유량과 알짜힘을 계산하였다. 다양한 압력조건과 밸브 간극변화에 따른 CFD 해석 결과는 AMESim모델에 대한 룩업테이블로 사용되어 AMESim의 결과를 보완함으로써 고압연료펌프에 대한 성능 분석결과의 정확성을 향상시키는 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract: A high-pressure fuel pump is a key component in a gasoline direct injection (GDI) engine; thus, understanding its flow characteristics is essential for improving the engine power and fuel efficiency. In this study, AMESim, which is a hydraulic analysis program, was used to analyze the performance of the high-pressure fuel pump. However, since AMESim uses a one-dimensional model for the system analysis, it does not accurately analyze the complicated flow characteristics. Thus, Fluent, computational fluid dynamics (CFD) software, was used to calculate the flow rates and net forces at the intake and discharge ports of the high-pressure fuel pump where turbulent flow occurs. The CFD analysis results for various pressure conditions and valve lifts were used as look-up tables for the AMESim model. The CFD analysis results complemented the AMESim results, and thus, improved the accuracy of the performance analysis results for the high-pressure fuel pump.

1. 서론

연비와 환경보호 관련 규제가 증가하면서 자동

차 업계에서는 고성능, 고연비, 친환경성을 만족하는 차세대 엔진을 개발하고 있다. 그 개발의 중심에 디젤엔진의 원리를 가솔린 엔진에 적용한 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진이 있다. GDI 엔진은 고압의 연료를 연소실 내부로 분사하여 연소반응에 참여하는 연료의 표면적을 넓혀 출력, 연비향상 및 배기가스를 저감하게 되는 기술

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 대구경북지회 춘계 학술대회(2014. 4. 25., 계명대) 발표논문임.

† Corresponding Author, yoonoh@pusan.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

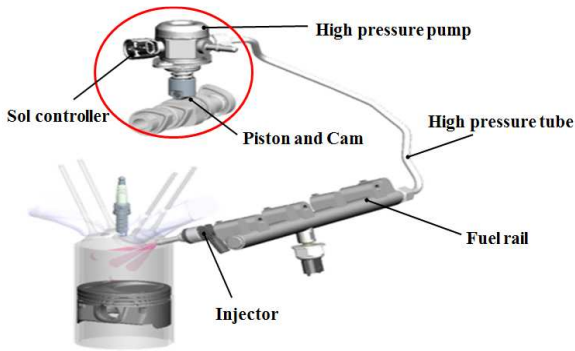


Fig. 1 GDI system configuration

로써 최근 국내뿐만 아니라 세계의 많은 차량에 적용이 되고 있는 기술이다. GDI 엔진은 고압의 연료를 생성하기 위하여 기존의 가솔린 엔진에서 사용하는 저압연료펌프 이외에 고압연료펌프 부품이 추가적으로 필요하다.⁽¹⁾

고압연료펌프는 연료흡입과 토출, 유량 변동, 그리고 과도한 압력 변화로 인해 GDI 시스템의 부품 피로를 증가시켜 수명 단축을 유발한다. 이로 인해 고압연료펌프에 대한 성능연구 및 작동 특성의 분석이 필요하다.

최근 GDI 엔진의 우수성이 입증됨에 따라 고압연료펌프의 연구 사례가 증가하고 있다. Hwang⁽¹⁾은 GDI 고압연료펌프의 주요 밸브 성능 특성에 대해 CFD 방법을 이용하여 연구하였다. Seo⁽²⁾는 고압연료펌프의 작동특성을 고려한 스�필(spill) 밸브 제어기의 온도와 진동에 대한 실험을 제시하였으며, Na⁽³⁾는 펌프 내 플런저(plunger)와 바렐(barrel) 사이의 누설을 최소화시키는 형상설계를 수행하였다. 이와 같이 선행연구는 개별적인 부품에 대한 연구에 한정되어 있으며, 고압연료펌프를 포함하는 GDI 엔진 통합모델을 구성하여 분석한 연구 내용은 부족하다.

본 논문에서는 GDI 고압연료펌프의 통합 모델의 성능을 해석하기 위해 유압해석 툴인 AMESim을 이용하여 내부유동해석을 수행하였다. 하지만 AMESim은 시스템 측면에서 유량과 유압을 계산하여 펌프의 정밀한 유동특성을 해석하는데 한계가 있다. 연료의 흡입과 토출이 이루어지는 고압연료펌프는 흡입부와 토출부의 형상이 복잡하여 동특성 및 유공압 작동특성과 관련 있는 토출유량과 알짜힘 결과가 부정확하게 나타난다.

본 연구에서는 AMESim 프로그램의 부정확한 유동해석 결과를 보완하기 위한 방법으로 상용

CFD 해석프로그램인 FLUENT를 사용하였으며 3차원 고압펌프 시스템의 다양한 압력차이와 밸브 간극변화에 따른 유동해석을 진행하였다. CFD의 결과를 이용하여 GDI 통합모델 해석의 정확도를 향상하고 성능개선 및 설계 검증 개선을 목표로 하였다.

2. 해석모델

고압연료펌프는 GDI 시스템의 핵심 부품으로써 지속적인 연료의 흡입과 토출 또는 잦은 압력 변화로 인해 고압펌프의 정확한 성능특성을 실험하는데 어려움이 있다. 고압연료펌프를 분석하는 것은 GDI 시스템의 효율 및 성능과 직접적인 관련이 있으므로 고압연료펌프 통합시뮬레이션 모델을 이용한 설계 검증은 필수적이다.

Fig. 1은 본 연구의 해석대상인 GDI 시스템이다. GDI 시스템은 엔진 구동 시 고압연료펌프 하단의 캠(cam) 회전에 의해 피스톤(piston)의 상하 왕복운동으로 작동된다. 고압펌프는 챔버(chamber)의 압력 차이에 의해 연료탱크의 저압연료를 흡입한 후 고압으로 압축하여 토출부의 체크밸브를 열어 주며, 토출된 연료는 연료레일(fuel rail)에서 인젝터(injector)를 통해 분사된다.⁽⁴⁾ 고압연료펌프의 상세구조는 Fig. 2에 나타냈다. CFD 해석을 위한 모델은 고압연료펌프 부품 중 체크밸브 주변부이다. 체크밸브는 고압펌프 내부에서 연료가 일정한 방향으로 흐를 수 있도록 해주며 토출유량을 조절하는 역할을 하는 중요한 부품이므로 체크밸브 주변부의 정확한 유동분석은 고압연료펌프 성능 해석에 반드시 필요하다.

3. AMESim 해석

AMESim은 유압부품 및 기계부품인 포핏(poppet), 스펴(spool), 솔레노이드(solenoid), 오리피스(orifice) 등 기본 부품단위로 아이콘화 하여 도면형상에 따라 모델링이 용이한 유압해석 툴이다.⁽⁵⁾

Fig. 3은 AMESim에서 구성한 GDI 고압연료펌프 통합시뮬레이션 모델이다. GDI 통합시뮬레이션 모델의 작동은 솔레노이드 조절장치(solenoid controller)의 전기적인 신호에 의해 솔레노이드가 작동하게 되고 흡입부의 체크밸브의 여닫음을 조절하게 된다. 연료가 피스톤의 상승운동으로 가

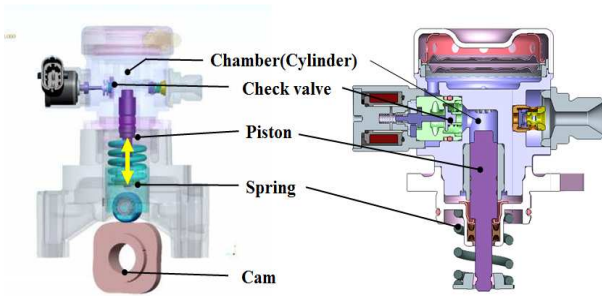


Fig. 2 Section view of the GDI high pressure fuel pump

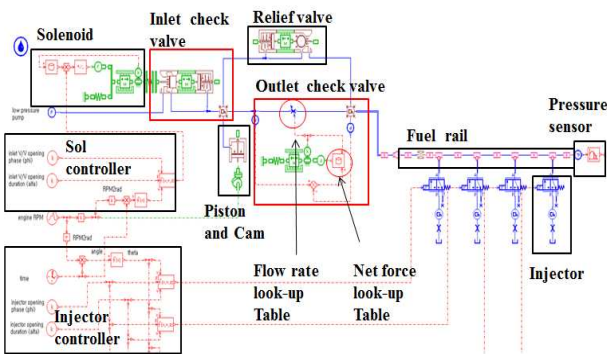


Fig. 3 Integrated model of the GDI high pressure pump

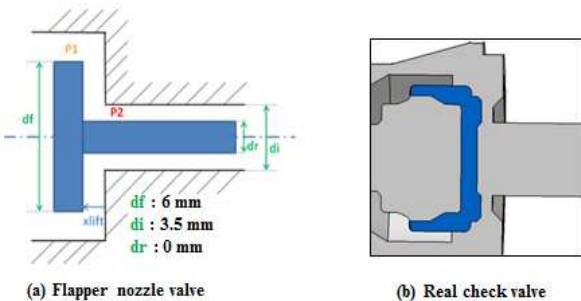


Fig. 4 AMESim model and CFD model

압되면 토출부의 체크밸브를 통해 연료 레일(fuel rail)로 이동하는 순서를 가진다.⁽⁶⁾ 또한 토출부에서 일정압력을 초과하게 되면 릴리프 밸브(relief valve)를 통해 일정한 압력을 유지하도록 한다.

AMESim은 1차원 해석모델 코드이므로 본 연구의 해석대상인 고압연료펌프 내부의 체크밸브 주변부를 3차원 형상으로 고려할 수 없다.⁽⁷⁾ 실제 복잡한 형상의 모델을 구현하지 못하는 AMESim에서는 가장 유사한 기능을 하는 대리모델(본 연구에서는 flapper nozzle valve)을 사용하게 되므로 해석의 정확성이 줄어들게 된다.

또한 AMESim은 내부유동에 대해 유동 조건과 난류의 영향 등을 고려할 수 없어 본 연구에서는 CFD 결과를 이용하여 해석의 신뢰성을 가지도록

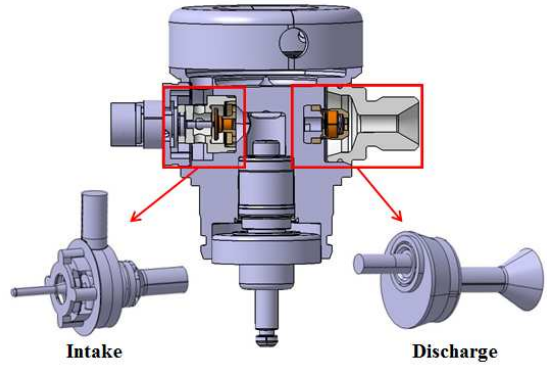


Fig. 5 Intake and discharge ports of the check valve

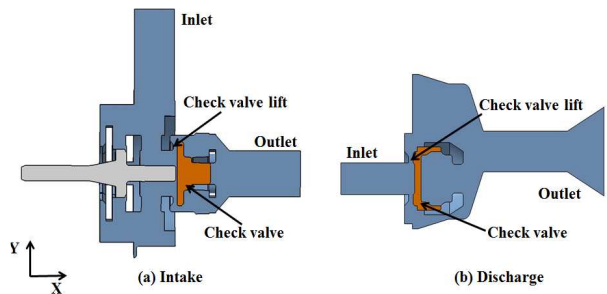


Fig. 6 Detailed section views at intake and discharge ports

하였다. Fig. 4는 Fig. 3에서 나타낸 토출부 체크밸브를 각 프로그램에서 표현하는 형상적인 차이를 나타냈다. AMESim을 이용한 전체 시스템 해석 결과는 CFD 해석 결과와의 비교를 위해 5장에 설명되어 있다.

4. CFD를 이용한 유동해석

고압연료펌프 내부에 존재하는 체크밸브를 기준으로 흡입부(intake)와 토출부(discharge) 두 부분으로 모델을 나누고 유동해석을 위해 내부유동영역을 추출 하였다. Fig. 5는 해석을 위해 추출된 모델이다.

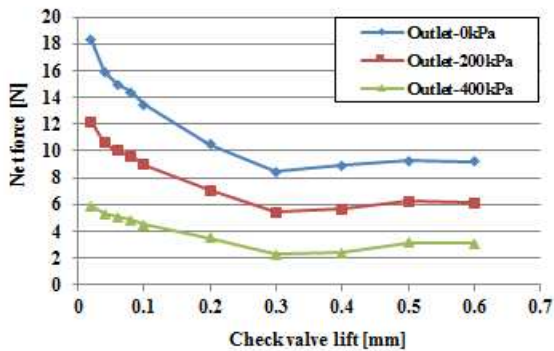
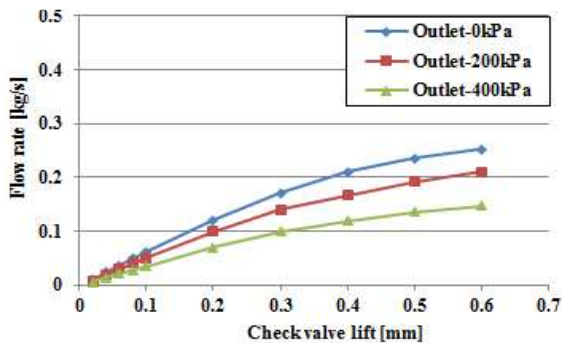
Fig. 6은 흡입부와 토출부에서 체크밸브 주변부의 단면 구조를 나타낸다. 유동의 흐름은 연료가 흡입부의 입구에서 들어와 체크밸브간극(check valve lift) 사이를 지나며 흡입부의 출구를 통과하여 챔버에서 가압된다. 가압된 연료는 토출부의 입구로 들어와 체크밸브를 열고 출구로 나가게 된다.

4.1 유동해석 이론

유동해석에 사용된 흡입부와 토출부에서의 알짜힘과 유량은 아래의 식 (1)과 (2)를 통해 구할 수 있다. 먼저 알짜힘에 관련된 이론은 식 (1)과

Table 1 Boundary conditions

Intake	Inlet pressure	600 kPa
	Outlet pressure	0, 200, 400 kPa
Discharge	Inlet pressure	20 MPa
	Outlet pressure	19.95, 19.90, 19.85, 19.80 MPa
Valve lift	0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.08, 0.06, 0.04, 0.02 mm	

**Fig. 7** Net forces at the intake port**Fig. 8** Flow rates at the intake port

같다.

$$F_a = \vec{a} \cdot \vec{F}_p + \vec{a} \cdot \vec{F}_v \quad (1)$$

알짜힘(F_a)은 체크밸브 모든 면에서 X 방향의 벡터(\vec{a})를 압력 힘 벡터(\vec{F}_p)와 점성력 벡터(\vec{F}_v)에 대해 내적인 후 이 두 식을 합산하여 계산된다.

흡입부와 토출부의 체크밸브를 통과한 유체의 질량유량에 대한 이론은 식 (2)와 같다.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 는 체크밸브를 통과한 유체의 질량유

량을 나타낸다. 식 (2)에 사용된 유체밀도(ρ)와 유체속도(V)는 출구의 수직 방향의 평균값을 사용하여 계산한다.⁽⁸⁾

4.2 유동해석 조건

AMESim 모델의 해석 결과를 보완하기 위한 록업테이블을 만들기 위해서는 다양한 체크밸브간극과 입구와 출구의 압력 차이에 의한 유량변화와 체크밸브 면에서 유압에 의한 힘 변화 즉, 알짜힘을 계산해야 한다. Table 1은 해석을 위해 사용된 다양한 간극과 입출구의 압력값을 나타낸다.

유동에 사용된 물성치는 일반 차량용 가솔린의 물성치인 밀도(ρ) : 712 kg/m³, 점성(ν) : 0.0004 kg/m·s을 사용하였다. 고압연료펌프 내부의 3차원 비압축성 난류 유동을 해석하기 위해 standard k- ϵ model을 사용하였다.⁽⁹⁾ 토출부의 입구압력 20 MPa를 적용한 이유는 설계 예정인 GDI 고압연료펌프 챔버의 정상작동압력이 20 MPa으로 설계되었으며, 챔버의 출구부분이 토출부의 입구부분이므로 이와 같은 압력조건을 사용하였다.

4.3 CFD 해석 결과

다양한 압력과 체크밸브간극 변화에 따른 유동 해석을 수행한 결과 알짜힘의 경우 0.3 mm부터 0.6 mm까지 큰 변동이 없었으나 0.3 mm이하의 간극에서는 점점 증가하는 결과를 나타냈다.(Fig. 7) 이러한 이유는 특정 지점(0.3 mm)에서부터 간극 사이로 빠져나가는 유체가 줄어들면서 유압에 의해 체크밸브를 미는 힘이 점점 커지게 되어 알짜힘이 상승하게 된다.

유량의 변화 그래프에서는 예상한 바와 같이 간극이 늘어나면서 유체가 나가는 면적이 넓어짐에 따라 유량 또한 증가함을 알 수 있다.

해석을 수행한 다양한 케이스 중에서 흡입부의 토출압력이 400 kPa, 밸브간극 0.6 mm의 속도양상을 살펴보면 다음과 같다. 해석 결과 체크밸브 간극에서 가장 클 때 작동유체의 속도 역시 최대임을 확인할 수 있었다. 토출부의 유량변화, 알짜힘의 계산결과는 AMESim 모델과의 비교를 통해 5장에 설명하였다.

4.4 록업테이블 생성

CFD 해석 결과를 유압해석 툴인 AMESim에 적

Table 2 Look up table

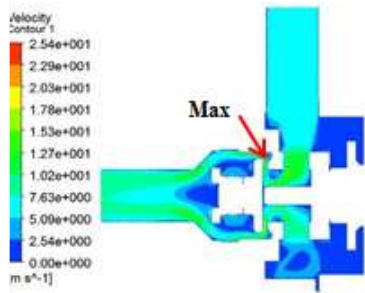
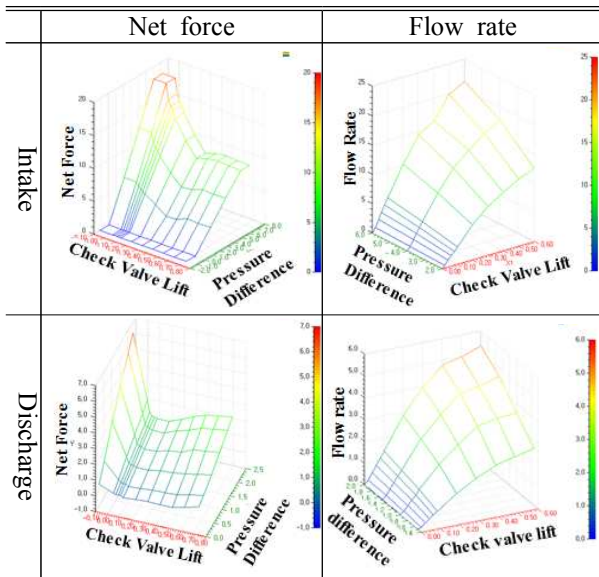


Fig. 9 Velocity contours (outlet pressure = 400kPa, lift = 0.6mm)

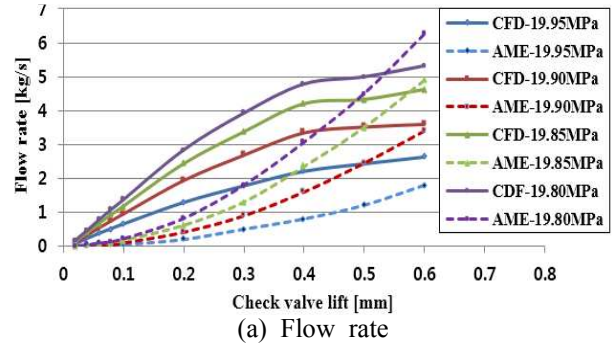
용하기 위해 룩업테이블 형태로 변환하였다. 룩업테이블은 체크밸브 간극과 압력 차이에 의해 알짜힘과 유량을 3차원 그래프로 나타낸 결과이다. 이처럼 변환을 하는 이유는 정해석에 의한 CFD 결과들을 캠 구동 각도 변화에 의한 계산을 진행하는 AMESim에서 입력변수로 사용하기 위해서이다. 즉, 동해석을 진행하는 프로그램에서 정해석 자료를 사용하기 위해 룩업테이블을 이용하게 된다.⁽¹⁰⁾

CFD 결과를 이용한 룩업테이블을 Table 2에 나타냈다. 여기서 평면상에 있는 X-Y축은 체크밸브의 간극과 입구와 출구의 압력차이며, Z 축은 알짜힘 혹은 유량을 나타낸다.

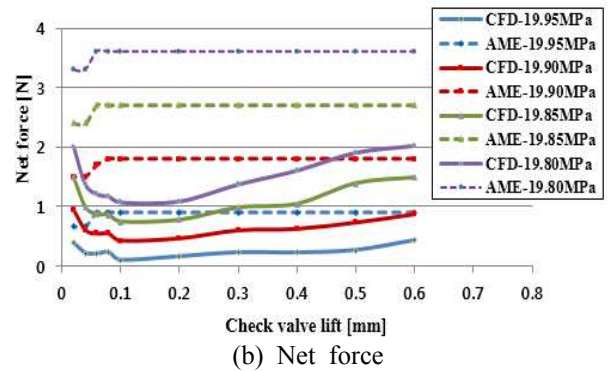
5. 해석 결과

5.1 CFD와 AMESim의 해석 비교

토출부 체크밸브 주변부의 CFD 해석으로 유량



(a) Flow rate



(b) Net force

Fig. 10 Flow rates and net forces at the discharge port

과 알짜힘의 룩업테이블을 AMESim 통합모델에 적용하였다. 통합모델에서는 흡입부 해석 결과를 제외한 토출부 해석 결과를 사용하였다. 그 이유는 흡입부에서의 CFD 해석 결과와 AMESim 모델의 해석 결과가 크게 다르지 않았기 때문에 AMESim의 자료를 이용하여 해석을 진행하였다.

5.1.1 유동해석 결과

토출부에서의 CFD 해석 결과와 AMESim 모델의 해석 결과를 살펴보면 Fig. 10과 같다. AMESim 해석 결과는 체크밸브의 간극이 증가함에 따라 유량의 증가율이 점점 증가하는 반면, CFD 해석 결과는 체크밸브 간극이 증가함에 따라 유량의 증가율이 점점 감소함을 알 수 있었다.

알짜힘의 경우 AMESim 모델은 일정한 값을 갖는 반면, CFD 해석은 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 같이 해석 결과가 상이한 이유는 CFD 해석 결과의 경우 밸브 주변부에서 발생하는 유동의 속도 및 압력의 변화, 내부 형상을 고려한 반면 AMESim의 경우 체크밸브 대리 모델 사용과 난류 해석 조건을 고려하지 못하여 단순한 압력 차이와 입 출구의 크기에 의해 해석되기 때문이다. 그러므로 AMESim 해석 결과는 모델의 간략화로 인해 해석에 오류가 있으므로

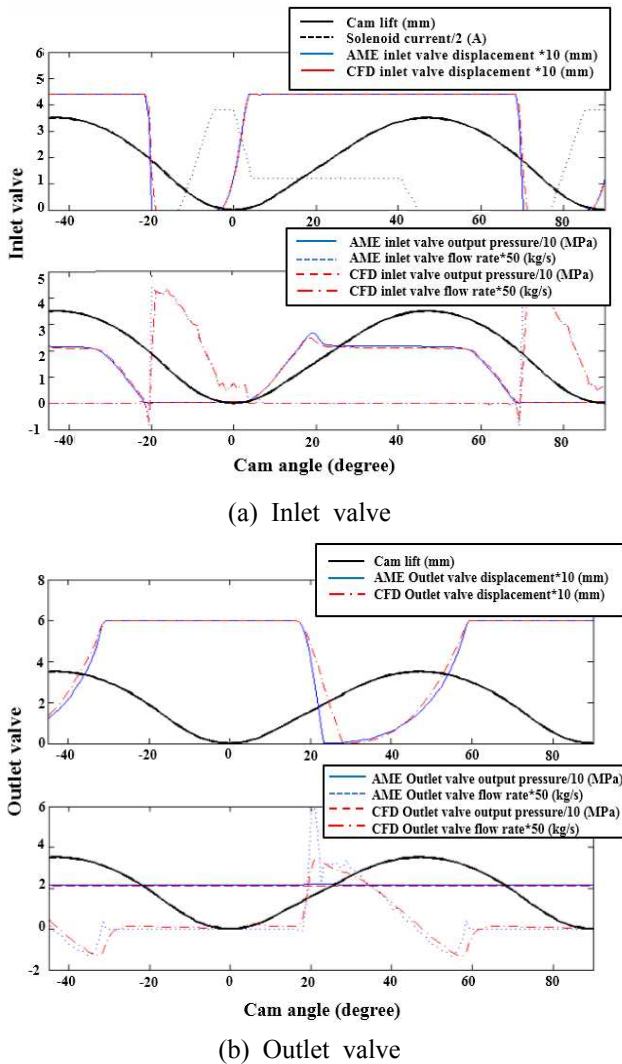


Fig. 11 Comparison of AMESim results with and without using CFD results

CFD 해석 결과를 이용한 통합모델분석이 반드시 필요하다.

5.1.2 통합모델 해석 결과

마지막으로 AMESim 고압연료펌프 통합모델에 CFD 해석 결과를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대한 흡입부와 토출부의 성능을 계산하였다. Fig. 11은 캠의 각도변화(Cam lift)에 의한 체크밸브 위치변화(inlet valve displacement), 토출유량과 토출압력의 변화를 나타낸다. 그래프의 “AME”로 나타낸 선은 CFD 결과를 사용하지 않은 AMESim 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과값을 하나의 그래프로 나타내기 위해 토출압력의 경우 10MPa를 나누었으며, 토출유량은 50kg/s를 곱하여 나타내었다.

Fig. 11(a)는 토출부의 결과변화가 흡입부의 구동 특성에 미치는 영향을 보기 위해 흡입부의 압력변화와 유량변화를 비교하였다. 흡입부의 경우 캠 각도에 의한 이동 위치 그래프의 기울기는 체크밸브의 이동속도를 의미한다. 캠 각도가 -20 도 (피스톤이 최대상승위치에서 하강을 반쯤 한 구간)에서 CFD 해석 결과를 포함하지 않는 AMESim 결과에 비해 CFD 해석 결과를 포함한 AMESim 결과에서 이동속도는 약간 상승하였으며, -20 도와 20 도 부근에서 토출유량 및 토출압력의 차이가 각각 발생하였다.

토출부에서는 CFD 결과를 포함한 것과 포함하지 않은 AMESim의 유동해석 결과가 다르기 때문에 큰 차이를 나타냈다. 캠이 20 도(피스톤이 최하저점에서 상승을 반쯤 한 구간)일 때 CFD 해석으로 얻은 결과를 적용 시 체크밸브의 이동속도는 느려지게 된다. 이 영향으로 인해 CFD 해석 결과를 포함하지 않은 AMESim 결과의 급격한 유량의 상승과 불규칙한 변화가 완만하게 줄어들 수 있었다. 그러므로 고압연료펌프의 정확한 해석을 위해서는 AMESim 모델에서 체크밸브와 같은 복잡한 유동현상이 발생하는 부분에 대해서는 CFD 해석을 이용한 록업테이블을 통해 전체 시스템 해석 결과의 보완이 필요하다는 사실을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 GDI 고압연료펌프의 성능을 알아보기 AMESim 모델을 이용하여 시스템 해석을 수행하였다. 하지만, AMESim은 복잡한 현상을 가진 밸브 주변이나 유동손실로 인한 유동현상은 정확히 해석하지 못하므로 이에 대한 보완이 필요하다.

본 연구에서는 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여 체크밸브 주변부의 알짜힘과 유량을 계산하였으며, 이 결과를 이용하여 AMESim 프로그램에서 구성된 GDI 고압연료펌프 통합모델의 시스템 해석에 정확도를 높이고자 하였다. CFD의 정해석 방법을 AMESim의 동해석 방법에 적용하기 위해 록업테이블을 사용하였으며, CFD 해석 결과를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 의한 변화를 비교하였다.

비교 결과 토출부의 성능변화는 연료흐름의 반대쪽인 흡입부에도 영향을 주는 것을 알 수 있었

으며, 토출부에서 CFD 해석 결과를 사용하면 벨브의 이동 속도가 조금 느려졌으며 이 결과로 인해 토출유량의 급격한 상승 현상이 사라짐을 확인할 수 있었다. 연구결과는 실제 형상과 내부유동에 대해 더욱 정확한 CFD 해석을 통해 얻었으므로 고압연료펌프의 성능 해석 및 설계를 위한 중요한 기초 자료로 사용될 수 있을 것이라 기대한다.

후 기

본 연구는 (주)모토닉의 지원으로 “LPDI/GDI 고압연료펌프 유로해석 및 부품 최적화 해석” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 아울러 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원 지정 계명대학교 전자화 자동차부품지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다. 지원기관에 감사드립니다.

참고문헌

(References)

- (1) Hwang, J. S., Heo, H. S., Lee, D. H., Shin, W. Y. and Hwang, J. K., 2011, "Analysis of Valves for Design of a High Pressure Fuel Pump for GDI Engine," *KSAE Conference Proceedings*, pp. 347~352.
- (2) Seo, D. H., Shin, W. G., Moon, H. S. and Lee, J. H., 2012, "The HALT Test on the Spill Valve Controller Considering the Operating Characteristics of GDI Fuel Pump," *proceeding of KSME*, pp. 976~980.
- (3) Na, B. C. and Kim, B. S., 1998, "A Study on Performance Improvements of High Pressure Fuel Pump for GDI Engine," *proceeding of KSME*, pp. 464-469.
- (4) Jang, J. S. and Yoon, Y. H., 2008, "Analysis Model Development of Fuel Injection System for CRDI Engines," *KSAE 30th Anniversary Conference 2008*, pp. 468~474.
- (5) Yoon, Y. H., 2005, "Introduction to AMESim Software," *Korean Soc Fluid Power Constr Equip Vol.2 No1*, pp. 3~9.
- (6) Lim, B. S. and Ahn, S. J., 2010, "NVH Development of the High Pressure Fuel System for GDI Engines," 2010.11, *KSAE Conference Proceedings*, pp. 468-474.
- (7) Jang, J. S., Koh, H. S., Han, S. Y. and Lee, K. W., 2011, "Analysis of Dynamic Characteristics and Performances of Vent-Relief Valve," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 70~77.
- (8) Lee, C. T., 2013, "A Study on the Performance Characteristic of Common Rail High Pressure Pump," 2013-17-6. *Journal of the Korea society for power system engineering*, pp. 5~10.
- (9) Park, H. J., Bae, S. J. and Heo, H. S., 2012, "An Analytical Study of Dynamic Flow Characteristics of a High Pressure Fuel Pump for Gasoline Direct Injection Engine," *KSAE*
- (10) Spegar, T. D., Chang, S. and Das, S., 2009, "An Analytical and Experimental Study of High Pressure Single Piston Pump for Gasoline Direct Injection (GDI) Engine Applications," *SAE International*, 2009-01-1504.