

## 승용 CR 연료분사시스템에 대한 유압 Modal 분석

성기수\* · 김상명\* · 김진수\* · 이진욱\*\*†

### Hydraulic Modal Analysis of High-Pressure Common-rail Fuel Injection System for Passenger Vehicle

Gisu Sung, Sangmyeong Kim, Jinsu Kim and Jinwook Lee

**Key Words:** AMESim simulation code(아메심 해석코드), CRDi(커먼레일 직접 분사), Modal analysis(모달 해석), Pressure pulsation(압력 맥동), Linear Analysis(선형화 해석), Clean diesel engine(클린디젤엔진)

#### Abstract

Recently, R&D demand for environmental friendly vehicle has rapidly increased due to its global environmental issues such as global warming, energy and economic crisis. Under this situation, the most realistic alternative way for environmental friendly vehicle is a clean diesel vehicle. The common-rail fuel injection system, as key technology of clean diesel vehicle, consists of a high pressure pump, common-rail, high pressure fuel line and electronic control injector. In common-rail high-pressure fuel injection system, high pressure wave of injection system and geometry of injector elements have a major effects on high-pressure fuel spray. Therefore, in this study, the numerical model was developed for analysis about the common-rail fuel pressure pulsation by using AMESim code. We could secure stability of common-rail high-pressure fuel injection system through optimal design of fuel line.

#### 1. 서 론

최근 세계적인 환경문제 및 에너지 안보에 따른 자동차 기술 패러다임 변화에 따라 환경친화형 저연비 자동차의 중요성이 점차 증대되고 있다. 특히, 유럽을 중심으로 세계 각국의 연비 및 배기규제가 강화되고 있으며 연료사용 절감과 이산화탄소의 배출을 줄이기 위한 새로운 기술들이 등장하고 있다. 이에 가장 현실적인 대안으로 부각되고 있는 것이 친환경 클린디젤 자동차이다. 그 중에서 커

먼레일 고압 연료 분사시스템은 클린디젤 자동차의 핵심 기술로 고압으로 연료를 분사함으로써 연소성능의 개선과 배출가스 저감에 효과적인 기술로 알려져 있다<sup>(1,2)</sup>.

이러한 커먼레일 고압 연료 분사시스템은 다단분사, 분사시기 및 분사율 제어 등을 통해 뚜렷한 연비와 배기성능 개선을 가능하게 하고 있다. 또한, 연료 분사 압력이 엔진 회전속도 및 부하 조건에 독립적이기 때문에 다양한 분사전략의 수립에 있어서 자유도가 높다는 이점이 있다<sup>(3)</sup>. Guntram A. Lechner 등은 디젤엔진에서 연료의 분사시기를 제어함으로써 기관성능 개선에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 하였고, Sylvain 등은 다단 분사전략에 따른 기관성능 및 배기성능 개선에 관한 연구를 수행 하였다. 또한, M. Chiodi 등은 인젝터의 구동방식과 연료 분사시기 제어에 따른 디젤엔진 성능 개선에 관한 연구를 하였다<sup>(4-6)</sup>.

커먼레일 연료 분사시스템은 크게 고압펌프, 커먼레

Received: 28 Jan 2015, Received in revised form: 19 Mar 2015, Accepted: 20 Mar 2015)

\*충실대학교 대학원 기계공학과

\*\*충실대학교 기계공학과

†책임저자, 중신회원, 한국역체미립화학회

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02)820-0929

일, 고압 연료라인, 전자 제어 인젝터로 구성 되어있다. 이러한 커먼레일 고압 연료 직접 분사시스템에서 액체 연료를 분사할 경우 분사시스템 자체의 연료 압력 맥동 및 인젝터 요소들의 기하학적 형상들이 분사에 큰 영향을 미친다<sup>(7)</sup>. 특히, 각 인젝터의 연료 분사시 발생하는 연료의 노즐 유동은 높은 압력 파동을 발생시키고, 이로 인해 커먼레일 시스템의 내구성에 악영향을 미치게 된다. 이러한 이유로, 고압의 커먼레일 라인은 공급되는 연료와 분사압력 등에 따른 압력파동을 흡수하여 안정된 분위기 상태에서 인젝터가 연료를 분사할 수 있도록 설계되어야 한다<sup>(8)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 유압 해석 프로그램인 AMESim (Advanced Modeling Environment for Performing Simulation of Engineering System)을 사용하여 승용차량의 커먼레일 연료 라인 압력맥동 해석을 위한 모델을 개발하였다. 개발된 모델에 선형화 해석 방법인 모달해석 기법을 적용하여 압력 맥동의 공진 주파수에 영향을 미치는 연료 시스템의 특성인자에 대해 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 고압의 연료 분사시 승용 커먼레일 시스템용 연료 라인의 최적설계를 통한 고압 연료 분사시스템의 강건성을 확보하는데 기여하고자 한다.

## 2. CRD용 고압 연료 분사시스템 모델링 및 해석조건

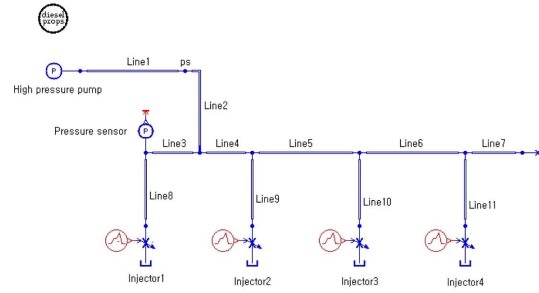
### 2.1 AMESim을 이용한 해석 모델링

본 연구에서는 고압의 연료를 분사하는 연료 라인의 최적설계를 통한 커먼레일 고압 연료 분사시스템의 안정성을 확보하기 위하여, 신뢰성이 검증된 유압 해석 프로그램인 AMESim을 사용하여 Fig. 1과 같은 커먼레일 모델을 개발하였다. 모델의 개발은 실제 커먼레일 (Bosch) 시스템을 분석하여 진행하였다.

커먼레일 연료 분사시스템에서는 연료의 압력 파동이 전체 시스템에 많은 영향을 미치기 때문에 고압펌프에서 인젝터까지 연결되는 파이프를 포함한 압력 맥동의 해석이 중요하다. 따라서, Fig. 1에 나타난 모델에서 고압의 연료 라인은 압력 파동을 고려할 수 있는 파이프 라인 모델을 적용하였다. 이 모델은 AMESim내 HL04 계열 파이프라인 sub-model로 유체의 마찰과 압력을 고려하는 일반적 유압시스템 해석에 적합하다. 각각의 라인 요소들의 설계 사양 및 민감도 해석의 편의성을 위해 Global parameter를 사용하여, 고압펌프-커먼레일, 커



(a) Common-rail(Bosch)



(b) Hydraulic common-rail model

Fig. 1 Schematic of common-rail fuel system

먼레일-인젝터간의 변수조건을 수립하였다. 인젝터 노즐은 단순 오리피스를 이용하여 임의의 입력 신호에 대해 열고 닫게 하여 인젝터 동작 상태에 따른 모델의 논리적 타당성을 분석하였다. 또한, 고압 커먼레일 시스템 내부의 유체의 유동은 압축성 유체로 설정하여 압력의 변화에 따른 밀도와 동점도의 변화를 고려하였다.

### 2.2 해석조건 및 방법

본 연구에 사용된 파이프라인 모델의 해석조건을 Table 1에 나타내었다. 고압펌프의 연료 분사 압력은 1,000 bar로 설정하였다. 커먼레일 라인 모델에서 공진 주파수에 영향을 미치는 부품의 기여도를 찾아내기 위해 시스템의 동적거동 해석에 유리한 선형화 해석 방법 (Linear analysis method)을 사용하였다. 고압펌프의 연료 분사압력에 가장 큰 영향을 받는 지점을 Fig. 1(b)에서와 같이 압력노드로 설정하여, 압력 해석 지점으로 사용하였다. 커먼레일 연료 라인의 해석 모델내 압력노드

Table 1 Modal analysis conditions

	Global parameter	Modified parameter
Wall thickness (mm)	10	6, 8, 12, 14
Line length (mm)	160	140, 150, 170, 180
Line Diameter (mm)	2.4	1.6, 2.0, 2.8, 3.2

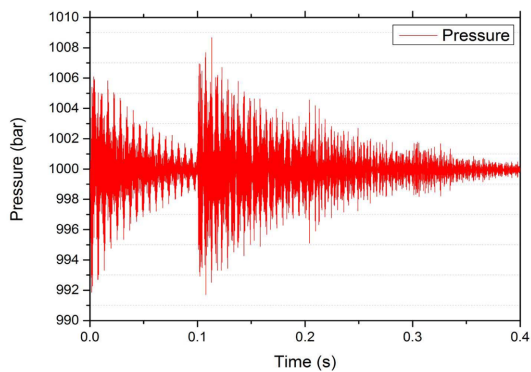
지점의 압력을 시간역에 따라 해석한 후, 결과를 주파수 도메인 표현으로 바꾸기 위해 본 연구에서는 고속푸리에변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 사용하였다. 이를 통해 공진이 발생하는 영역의 주파수를 파악할 수 있었다. 또한, 공진 주파수에 영향을 미치는 커먼레일라인 해석 모델 부품 요소의 기여도를 알아보기 위해 Modal shape을 분석하였다.

### 3. 해석결과

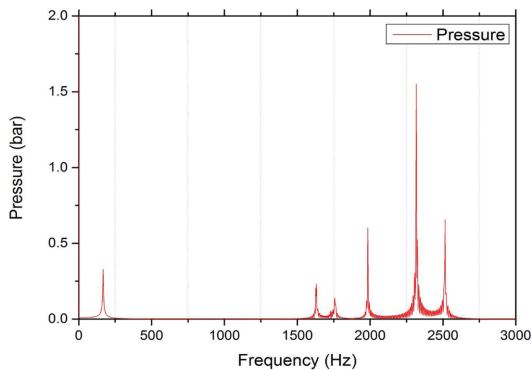
#### 3.1 모달 해석 결과

Fig. 2는 압력 노드에서 시간역에 따른 압력맥동을 나타낸 것이다. 해석결과, 대략 0.1초 부근에서 공진이 발생함을 알 수 있었다. 이를 주파수 도메인 표현으로 바꾸기 위해 고속푸리에변환한 결과인 Fig. 2(b)에서 보듯이 약 2.31 kHz 부근에서 가장 큰 공진이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

이를 바탕으로, 공진주파수에 가장 큰 영향을 미치



(a) Time data



(b) frequency data

Fig. 2 Pressure variation

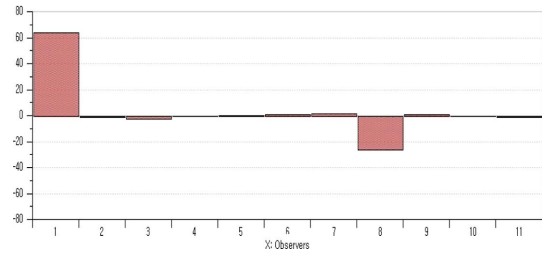
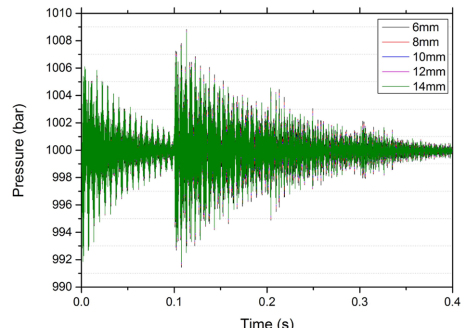


Fig. 3 Modal shape of common-rail line at 2.31 kHz

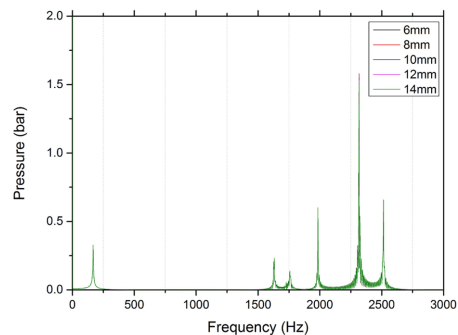
는 커먼레일라인 해석 모델 부품의 요소를 파악하기 위해 2.31 kHz 부근에서 Modal shape을 분석하였고, 각 요소들의 압력변동을 관찰하기 위해 Line1~Line11의 모든 파이프라인 모델을 Observer variable로 지정하였다. Fig. 3은 Modal shape 분석 결과로써, Line1이 공진 주파수에 가장 큰 기여도(64%)를 나타냈고, 공진 주파수 대역을 줄이기 위해서는 Line1의 설계사양을 변경해야 함을 알 수 있었다.

#### 3.2 수정변수 적용 해석 결과

모달 해석 결과, 공진주파수에 대한 Line1의 기여도



(a) Pressure data



(b) Frequency data

Fig. 4 Pressure variation at different pipeline wall thickness

가 가장 큼을 알 수 있었기에 Global parameter에 의해 설계된 파이프라인 Line1의 사양을 Table 1에 나타낸 것과 같이 수정된 변수를 이용하여 본격적으로 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 수정 변수는 파이프라인의 두께, 길이, 내경으로 설정 하였으며, 각 요소들이 공진에 미치는 영향을 독립적으로 알아보기 위한 해석을 진행하였다.

Fig. 4는 Line1 파이프라인의 벽 두께를 Global parameter 값인 10 mm에서  $\pm 2$ ,  $\pm 4$  mm만큼 변화시켰을 경우의 선형화해석 결과를 나타낸 것이다. 해석결과, 시간역에 따른 압력맥동과 공진주파수 영역이 크게 변하지 않는 결과를 나타내었고, 본 연구의 해석조건 내에서 파이프라인의 벽 두께는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Line1 파이프라인의 길이를 Global parameter 값인 160 mm에서  $\pm 10$ ,  $\pm 20$  mm만큼 변화시켰을 경우의 선형화해석 결과를 나타낸 것이다. 해석결과, 파이프

라인의 길이가 길어질수록 시간역에 따른 압력맥동이 다소 감소하였으며, 파이프라인 길이가 140 mm에서 180 mm까지 변할 때, 최대 6 bar의 압력 변동폭을 갖는 결과를 보였다. 또한, 공진이 일어나는 주파수 영역의 값은 2.48 kHz에서 2.14 kHz까지 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 Line1 파이프라인의 내경을 Global parameter 값인 2.4 mm에서  $\pm 0.4$ ,  $\pm 0.8$  mm만큼 변화시켰을 경우의 선형화해석 결과를 나타낸 것이다. 해석결과, 파이프라인의 내경이 넓어질수록 시간역에 따른 압력맥동이 다소 감소하는 경향을 보였으며, 파이프라인의 내경이 2.0 mm에서 2.8 mm까지 변할 때, 최대 11 bar의 압력 변동폭을 갖는 결과를 보였다. 공진주파수 영역의 값 또한 감소하는 경향을 나타내었으며, 공진이 일어나는 주파수 영역의 값은 2.17 kHz에서 2.58 kHz로 증가함을 알 수 있었다.

### 3.3 초기압력 변화에 따른 해석결과

Fig. 7은 커먼레일 연료 라인 유압 해석 모델에 Glo-

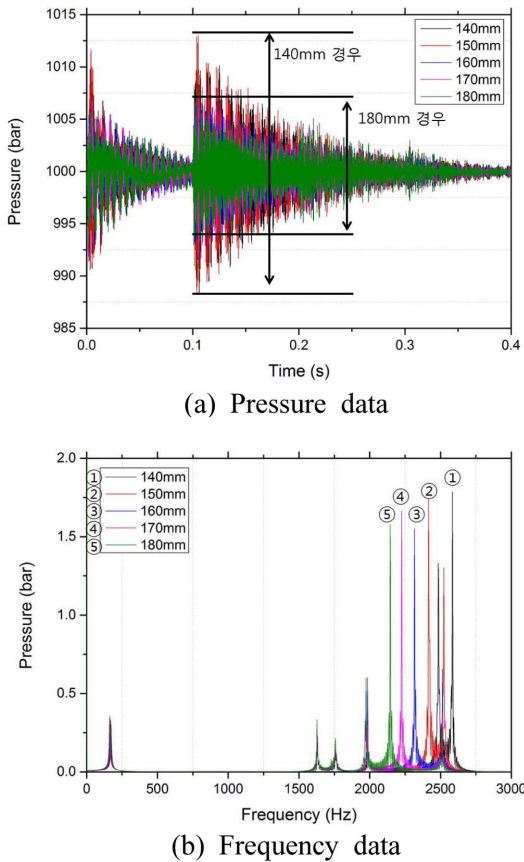


Fig. 5 Pressure variation at different pipeline length

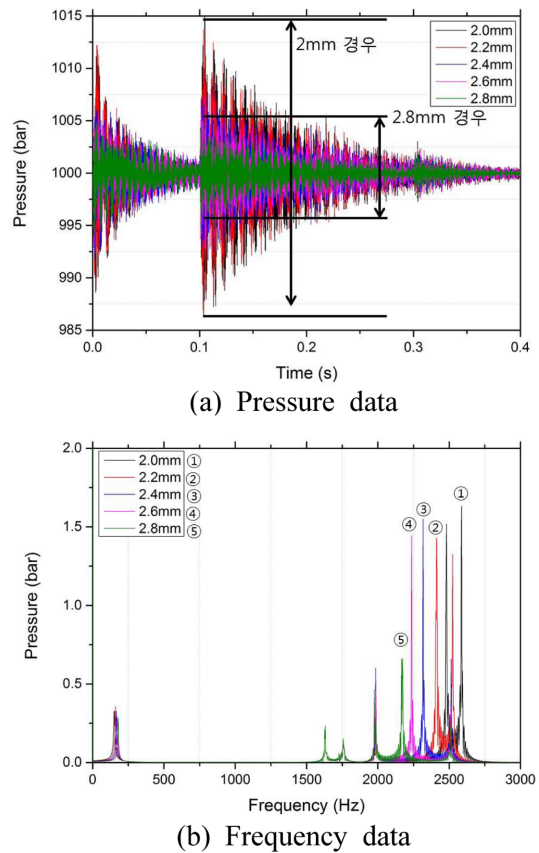


Fig. 6 Pressure variation at different pipeline diameter

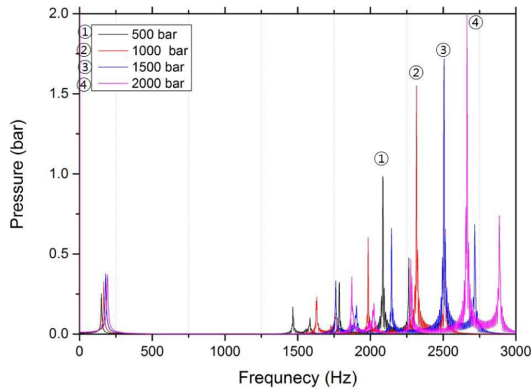


Fig. 7 Pressure variation at different initial pressure

bal parameter를 적용시, 압력에 따른 공진주파수 영역을 파악하기 위해 초기압력을 변화시켰을 경우의 선형화 해석 결과를 나타낸 것이다.

해석결과, 초기 압력을 500 bar에서 2000 bar까지 증가시킴에 따라 공진이 발생하는 주파수영역이 2.08 kHz에서 2.66 kHz까지 증가하는 경향을 보였으며, 주파수에 따른 압력의 크기도 점차 증가함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 유압 해석 프로그램인 AMESim을 사용하여 승용차량의 커먼레일 연료 라인의 압력맥동 해석을 위한 모델을 개발하고, 개발된 모델에 선형화 해석 방법인 모달해석 기법을 적용하여, 고압 연료 라인의 특성 인자들이 압력 맥동의 공진 주파수에 미치는 영향을 분석한 것이다. 이를 통해 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 공진주파수에 영향을 미치는 커먼레일라인 해석 모델 부품 요소의 기여도를 알아보기 위해 Modal shape을 분석하였으며, 모델의 Line1 요소가 공진주파수에 가장 큰 영향(64%)을 미침을 알 수 있었다.

2) Line1 파이프라인의 벽 두께를 10 mm에서  $\pm 2$ ,  $\pm 4$  mm만큼 변화시켰을 경우, 시간역에 따른 압력맥동과 공진주파수 영역이 크게 변하지 않음을 알 수 있었다.

3) Line1 파이프라인의 길이를 160 mm에서  $\pm 10$ ,  $\pm 20$  mm만큼 변화시켰을 경우, 파이프 라인의 길이가 길어질수록 시간역에 따른 압력맥동이 다소 감소하는 경향을 보였으며, 공진주파수 영역의 값 또한 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다.

4) Line1 파이프라인의 내경을 2.4 mm에서  $\pm 0.4$ ,  $\pm 0.8$  mm만큼 변화시켰을 경우, 파이프라인의 내경이 넓어질수록 시간역에 따른 압력맥동이 다소 감소하는 경향을 보였으며, 공진주파수 영역의 값 또한 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다.

5) 커먼레일 유압 해석 모델의 초기압력을 500 bar에서 2000 bar까지 증가시킴에 따라 공진이 발생하는 주파수영역이 증가하는 경향을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차 기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 한국자동차공학회 미래기획위원회, “2030년 자동차 기술전망”, 한국자동차공학회, 2010, pp. 11~13.
- (2) Philipp Beierer, Kalevi Huhtala and Matti Vilenius, “Experimental Study of the Hydraulic Circuit of a Commercial Common Rail Diesel Fuel Injection System”, SAE Technical paper 2007-01-0487, 2007.
- (3) 최영, “국내 클린디젤 동력발생 기술개발 동향”, 한국자동차공학회지널, 제35권, 5호, pp. 54~60.
- (4) Guntram A. Lechner, Timothy J. Jacobs, Christos A. Chryssakis, Dennis N. Assanis and Robert M. Siewert, “Evaluation of a Narrow Spray Cone Angel, Advanced Injection Timing Strategy to Achieve Partially Pre-mixed Compression Ignition Combustion in a Diesel Engine”, SAE Technical paper 2005-01-0167, 2007.
- (5) Sylvain Mendez and Benoist Thirouard, “Using Multiple Injection Strategies in Diesel Combustion : Potential to Improve Emission, Noise and Fuel Economy Trade-Off in Low CR Engines”, SAE Technical paper 2008-01-1329, 2008.
- (6) M. Chiodi, O. mack, M. Bargende, K. Paule, J. Brandt, V. Fackh and D. Wichelhaus, “Improvement of a High-Performance Diesel-Engine by means of Investigation on different Injection Strategies”, SAE Technical paper 2009-01-0008, 2009.
- (7) Jacek Czarnigowski, Mirosław Wendeker, Piotr Jaklinski, Lukasz Grabowski and Konrad Pietrykowski,

“CFD model of fuel rail for LPG systems”, SAE Technical paper 2007-01-2053, 2007.

(8) Wei Liu and Jun Wang, “Simulation on Pressure Con-

trol of Common Rail Line in High Pressure Fuel Injection System”, IPCSIT, Vol. 51, pp. 508~514, 2012.