

커먼레일용 연료분사 인젝터의 설계변수에 대한 민감도 분석

장 주 섭¹⁾ · 윤 영 환²⁾

경원대학교 기계자동차공학과¹⁾ · (주)신호시스템²⁾

Sensitivity Analysis on Design Parameters of the Fuel Injector for CRDI Engines

Joosup Jang^{*1)} · Younghwan Yoon²⁾

¹⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University, Gyeonggi 461-701, Korea

²⁾Shinho-systems Co., Ltd, B-702 Ssangyong IT Twin Tower, 442-5 Sangdaewon-dong, Jungwon-gu,

Seongnam-si, Gyeonggi 462-120, Korea

(Received 27 February 2009 / Accepted 19 May 2009)

Abstract : A Common-Rail Direct Injection (CRDI) system for high speed diesel engines was developed to meet reductions of noise and vibration, emission regulations. High pressure in the common rail with electric control allows the fuel quantity and injection timing to be optimized and controlled throughout a wide range of engine velocity and load conditions. In this study, CRDI system analysis model which includes fuel and mechanical systems was developed using commercial software, AMESim in order to predict characteristics for various fuel injection components. The parameter sensitivity analysis such as throttle size, injection rate, plunger displacement, supply pressure of fuel injection for system design are carried out.

Key words : Diesel engine system(디젤엔진장치), Sensitivity analysis(민감도 분석), CRDI(커먼레일 직접분사), Fuel injector(연료 분사 인젝터), Solenoid valve(솔레노이드 밸브), Design parameter(설계 변수)

1. 서론

가솔린 엔진에 비해 디젤엔진은 내구성과 신뢰성이 좋을 뿐만 아니라 근래에 지속적으로 개선되고 있는 연비 또한 우수한 것으로 잘 알려져 있다.¹⁾ 많은 장점 중에서 연비의 우수성은 전 세계적으로 CO₂ 감축 협약이 체결되고 있기 때문에 특히 중요하고 CO와 HC의 배출이 낮다는 장점을 가지고 있다. 최근 자동차 보급의 확대와 운전 시간이 길어지게 되면서, 소비자들은 차량 정숙성과 쾌적성에 대한 관심과 요구 조건이 더욱 증대되고 있다. 이에 따라 자동차 업체들은 차량의 진동, 소음에 대하여 더

욱 많은 관심과 연구 노력을 기울이고 있다. 특히 디젤 엔진을 자동차에 탑재하기 위해서는 진동, 소음을 저감할 수 있는 시스템 설계기술이 필요하다.^{2,3)} 자동차에 탑재되는 직접 분사식 디젤엔진은 간접분사식 디젤엔진에 비해 열효율은 높으나 회전수가 낮아 주로 대형 경유차에 이용되어 왔다. 최근 고압 연료분사장치 개발 및 연료혼합기술의 발전으로 직접분사식 디젤엔진의 회전수를 높이는 것이 가능하게 되어 이를 자동차용 엔진으로 적용하기 위한 고속직접분사 디젤엔진의 개발이 이루어져 유럽에서 상용화를 주도하고 있으며 최근 국내에서도 적용차종이 점차 확대되고 있다.^{4,6)}

본 연구에서는 커먼레일의 연료분사 시스템에서

*Corresponding author, E-mail: jsjang@kyungwon.ac.kr

사용되고 있는 인젝터의 설계변수에 대한 민감도를 분석하기 위하여 상용 소프트웨어인 AMESim을 이용하였으며, 이것은 인젝터 챔버의 압력, 니들 밸브의 변위량 등과 관련이 있는 부품의 설계 변수 변화에 따른 디젤연료의 분사량과 응답성 등을 면밀히 검토하고자 한다.

2. 인젝터 모델의 타당성 검토²⁾

인젝터는 고압으로 압축되어 있는 커먼레일로부터 고압의 연료를 공급 받아 인젝터 내의 솔레노이드 듀티(Solenoid duty)신호에 의한 분사 시작과 분사 종료를 제어한다. 이 때 분사량은 커먼레일 압력, 노즐의 유입유량과 튜티에 의해 결정된다.

작동원리를 Fig. 1에 나타낸 상세도에서 설명하면, 고압연료가 Z 스로틀을 지나 제어 챔버에 채워지면 챔버 내의 고압연료가 유압 피스톤의 역할을 하여 니들(Needle) 밸브를 누르므로 연료의 분사를 막는다. 솔레노이드가 작동하여 앵커볼트가 들리면, 제어 챔버를 막고 있는 밸브 볼이 들려서 A 스로틀을 통해 연료가 빠져나간다. 챔버 내의 연료가 빠져나가면, 힘의 평형이 깨지면서 니들 밸브가 열리게 된다. 솔레노이드의 제어만으로 분사압력의 자유로운 조절이 가능하며, 제어 압력은 1350 bar에서 1600 bar까지 가능하다. 고압연료 공급부에 가장자리 형 필터를 적용하여 오염에 대비하며, 인젝터와 노즐사이에 고정 핀을 적용하였다.

특히 니들과 니들 시트(Needle seat)면은 매우 특수한 형태로 AMESim Code에서는 개도를 모델링할 수 있게 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 보조 모델을 제공하여 이것을 해석에 이용하였다.

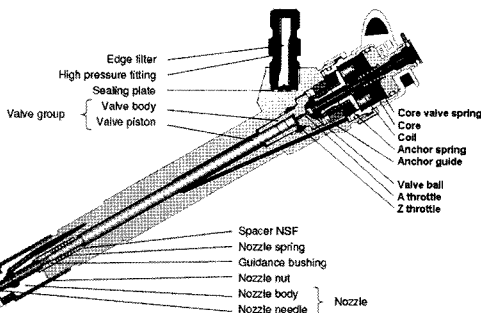


Fig. 1 Detail drawing of the injector

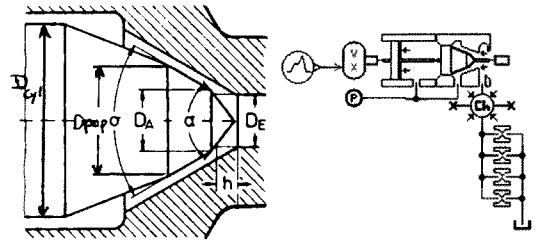


Fig. 2 Detail drawing of the Nozzle

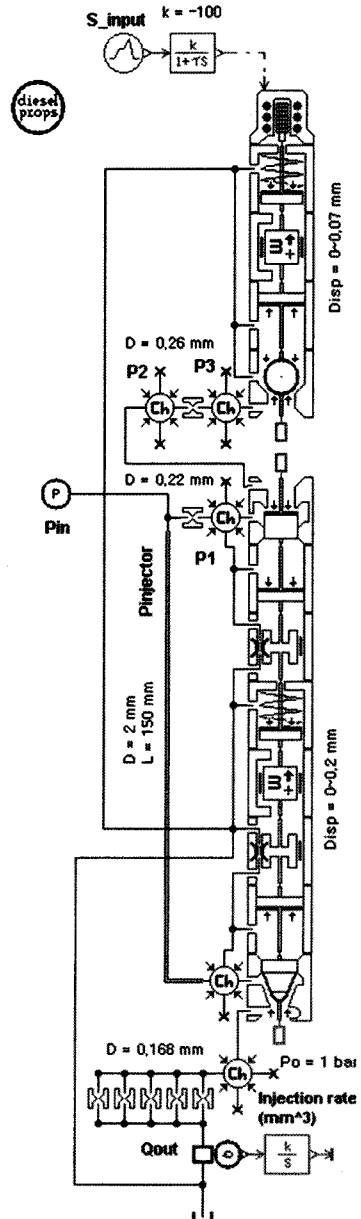


Fig. 3 Simulation model of the injector

Fig. 3은 연료 분사 인젝터 모델의 타당성을 검토하기 위해 해석 모델이다. 단품 조건에서 동작 상태에 따른 논리적 타당성을 검토하였다.

Fig. 4는 인젝터 기능의 타당성을 확인하기 위한 해석 결과를 나타낸 것으로 (a)는 입력으로 정한 솔레노이드의 입력 신호 선도로 상승 및 하강시 시간 지연은 90 μ s이며, 유지시간은 20 μ s로 설정하였다. (b)는 기준 입력에 의한 솔레노이드 밸브 플런저와 니들의 변위 선도이며, (c)는 각 제어 챔버의 압력, (d)는 분사율 및 분사량에 대한 선도이다.

해석 결과, 솔레노이드 기준 입력 신호에 의해 플런저의 변위가 발생하면 각 제어 챔버의 압력이 하강한다. 솔레노이드 밸브에 가장 근접한 P3 챔버의 압력이 가장 먼저 하강하고 뒤이어 P1, P2 챔버의 압력이 하강한다. P1과 P2 챔버의 압력이 니들을 누르고 있는 스프링 힘보다 작아지면 니들의 변위가 발생하여 분사를 하게 된다. 결과적으로 개발된 모델이 논리적으로 작동하였고 타당성이 있다는 것을

기존의 참고자료^{1,2,4)}와의 비교를 통하여 결과가 유사하다는 것을 확인하였다. 또한 분사되는 연료의 양은 노즐의 열린 시간, 유량과 분사압력에 따라 결정된다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 인젝터의 설계 인자 및 민감도 분석

Fig. 5와 Fig. 6은 Z와 A 스로틀의 설계 사양을 검토하기 위한 민감도 해석 결과를 나타낸 것이다. 국외 회사인 B사의 설계기준 사양으로 Z 스로틀은 0.22 mm이며 A 스로틀은 0.26 mm이다. 해석에 사용된 설계 사양의 범위로 Z 스로틀은 0.22 ~ 0.26 mm이며 A 스로틀은 0.26 ~ 0.3 mm이다. 해석 방법으로 하나의 스로틀을 고정 기준사양으로 설정한 후, 다른 스로틀의 사양을 변화시키면서 수행하였다.

Fig. 5는 Z 스로틀이 0.22 mm인 경우, A 스로틀을 0.26 mm (run 1), 0.28 mm (run 2), 0.3 mm (run 3)에 대한 해석 결과로 A 스로틀의 크기가 작을수록 솔레노

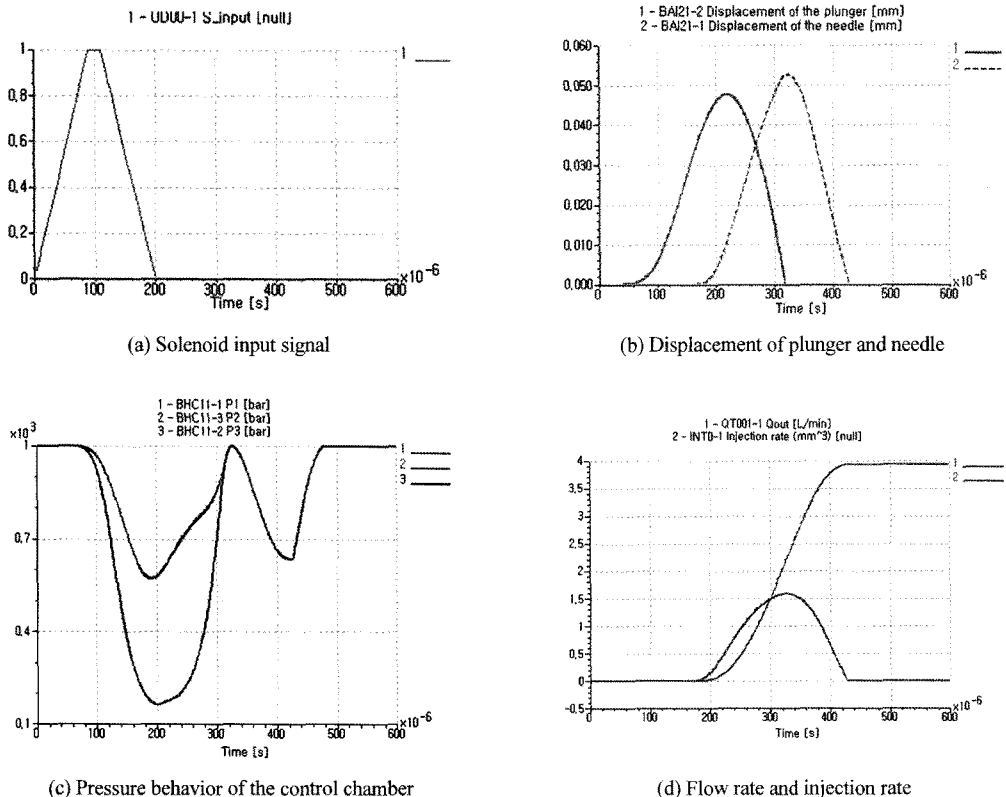


Fig. 4 Simulation results of the injector

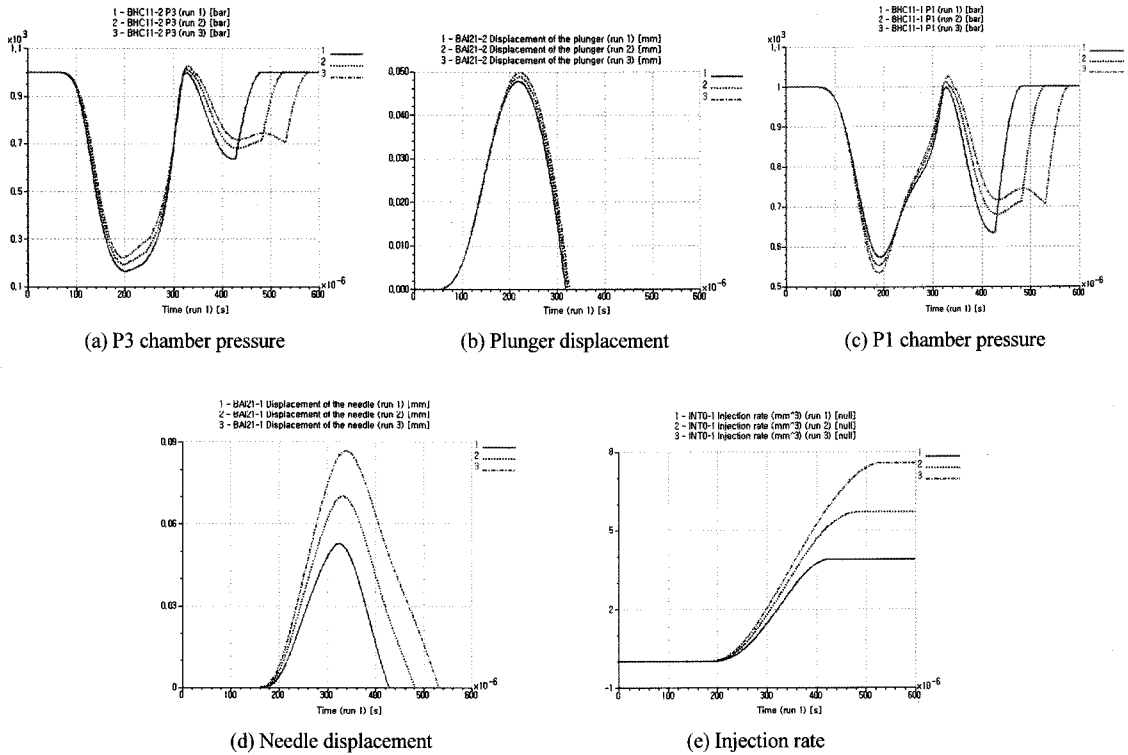


Fig. 5 Sensitivity analysis of the A throttle

이드 입력에 의한 유량 손실의 보상이 상대적으로 작아지기 때문에 (a)에서와 같이 P3 챔버의 압력은 가장 빨리 하강하며 그 크기도 가장 크다. 동시에 흡입 타입의 솔레노이드 밸브에 작용하는 힘이 줄어들어 (b)에서와 같이 솔레노이드 밸브는 가장 적게 열리고, 빨리 닫히게 된다. 동시에 솔레노이드 밸브를 통해 빠져나가는 유량이 상대적으로 작아지기 때문에 (c)에서와 같이 P1 챔버의 압력은 상대적으로 적게 하강하여 (d)에서와 같이 니들 변위가 작게 발생하고 빨리 닫히게 된다. 결국 (e)에서와 같이 니들의 변위에 직접적으로 영향을 받는 분사량이 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 인젝터의 작동 상태를 가장 이해하기 쉽고, 설계시 중요한 판단 기준이 되는 물리량 선도라 생각이 된다.

Fig. 6은 A 스로틀을 0.26 mm로 설정한 후, Z 스로틀을 0.22 mm (run 1), 0.24 mm (run 2), 0.26 mm (run 3)에 대한 해석 결과로 P1 챔버의 압력을 중심으로 분석하면 Z 스로틀의 크기가 작아질수록 솔레노이드 입력에 의한 유량 손실의 보상이 상대적으로 작

고 지연되어 발생하기 때문에 (a)에서와 같이 P1 챔버의 압력이 가장 빨리 하강함과 함께 가장 지연되어 동작하는 것을 알 수 있다. 동시에 P3 챔버의 압력은 감소하나 A 스로틀에서 감쇠되기 때문에 솔레노이드 밸브의 입력에 의한 P3 챔버의 압력 하강은 Z 스로틀의 크기 변화에 큰 영향을 받지 않고 있다는 것을 (b)에서 알 수 있다. 결과적으로 (c)에서와 같이 솔레노이드 밸브의 변위 변화는 크게 발생하지 않는다. 니들 변위는 P1, P2 챔버의 압력에 가장 많은 영향을 받기 때문에 P1 챔버의 압력에 의해 가장 적게 열리고 가장 늦게 닫히는 것을 알 수 있다. 결국 (e)에서 보면 니들의 변위에 영향을 받는 분사량도 가장 많은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 공급 압력 변화에 대한 민감도 해석 결과로서 공급 압력을 500 bar (run 1), 800 bar (run 2), 1000 bar (run 3), 1400 bar (run 4), 1500 bar (run 5)을 변화시켰을 때의 결과를 나타낸 것이다.

해석결과에서 보면, 분사량은 공급 압력의 크기에 비례하여 증가하나 (a)에서 1400 bar에서는 정상

Sensitivity Analysis on Design Parameters of the Fuel Injector for CRDI Engines

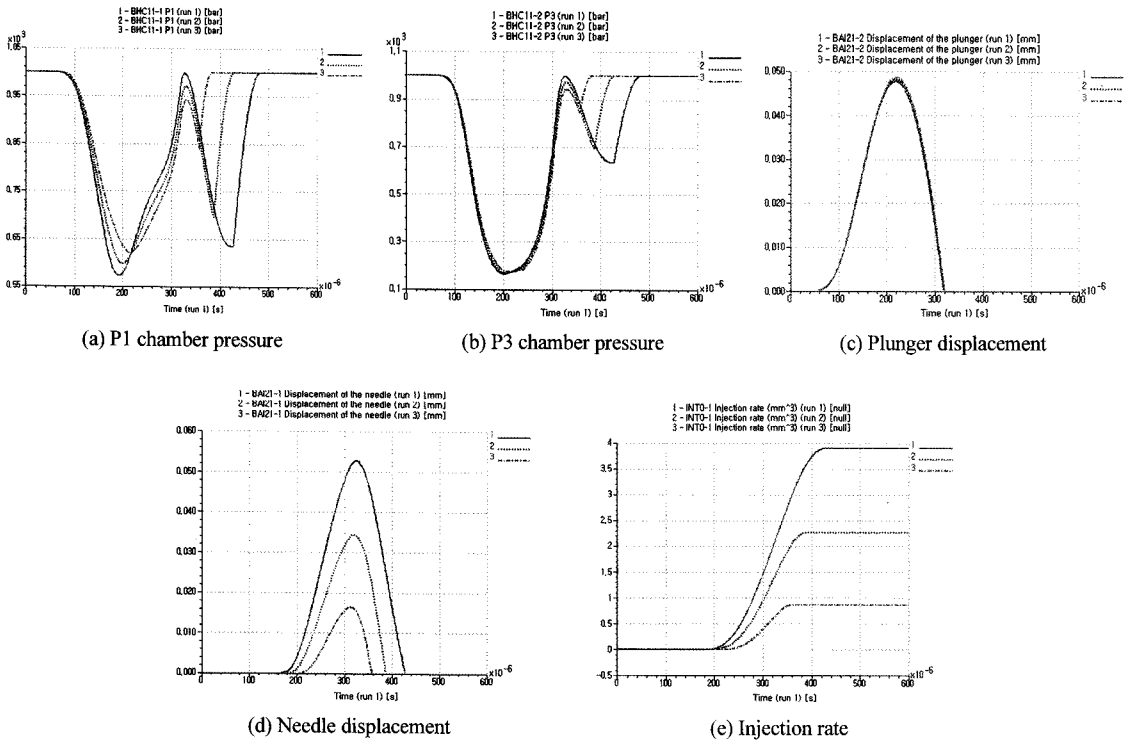


Fig. 6 Sensitivity analysis of the Z throttle

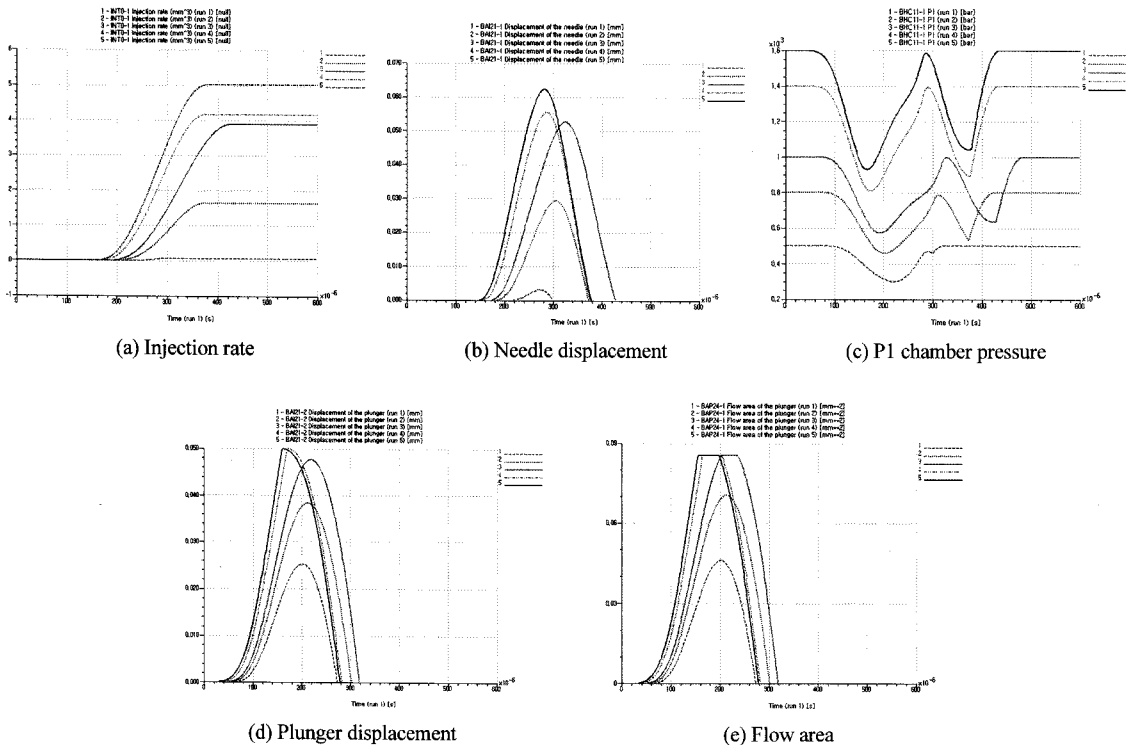


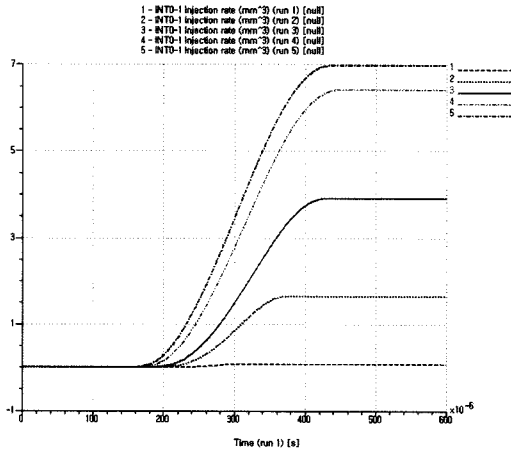
Fig. 7 Sensitivity analysis of supply pressure (plunger displacement : max. 0.05 mm)

적으로 분사량이 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이 원인을 확인하기 위해 (b)에 나타난 니들 변위 선도를 보면 1400 bar 이상에서 변위의 왜곡이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 (c)에 나타난 P1 챔버의 압력 왜곡에 의한 원인이며 더 나아가 (d), (e)에서와 같이 솔레노이드밸브 변위의 포화 즉, 유량 면적 (Flow area)의 포화에 의해 P1 챔버의 압력 거동이 이상하게 나타나는 것이라 추정할 수 있겠다.

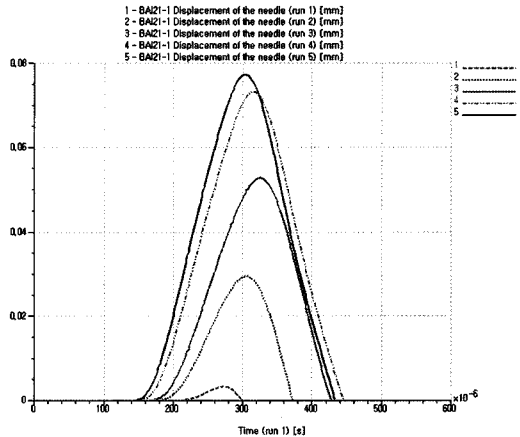
원인분석에 대한 검증을 위해 솔레노이드 변위의 기준 설계 사양인 0.05 mm를 0.06 mm로 변경하여 해석한 결과는 Fig. 8과 같다. 해석 결과 1400 bar 까지 문제가 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 솔레노이드 변위를 0.07 mm로 변경하여 해석한 결과로 솔레노이드 변위를 크게 증가시켜도 밸브 개도가 포화되기 때문에 1600 bar 까지 사용하기 위해서는 밸브 변위 및 개도에 대한 설계 변경이 필요함을 확인할 수 있는 계기가 되었다.

본 과제에서 사용한 B사 인젝터의 최대 공급 압력 설계사양은 1350 bar이므로 1600 bar까지 사용하기 위해서는 솔레노이드 밸브의 변위 또는 개도 면적을 크게 해야 한다는 것을 알 수 있다. 솔레노이드 변위를 증가시키기 위해서는 솔레노이드의 사양도 변경되어야 하기 때문에, 기존 사양에서 솔레노이드 밸브 개도량을 최대한 증가시키는 것이 바람직

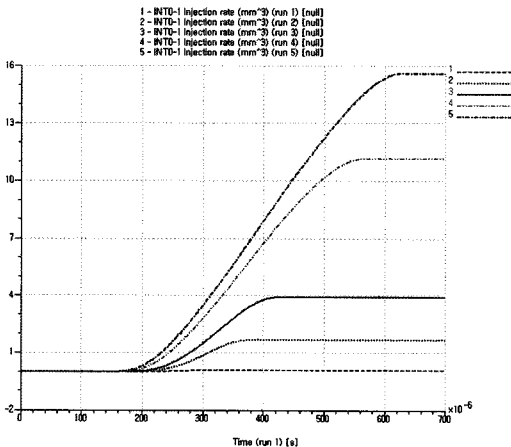


(a) Injection rate

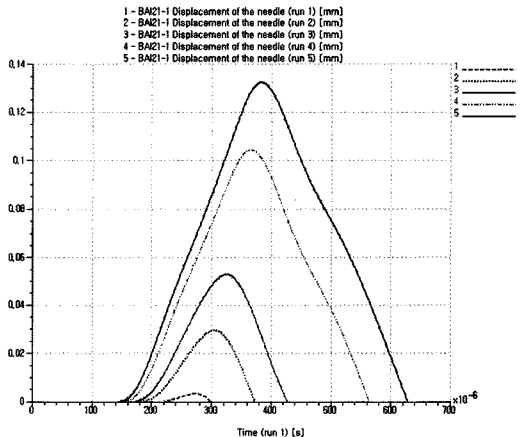


(b) Needle displacement

Fig. 8 Sensitivity analysis of supply pressure (plunger displacement : max. 0.06 mm)



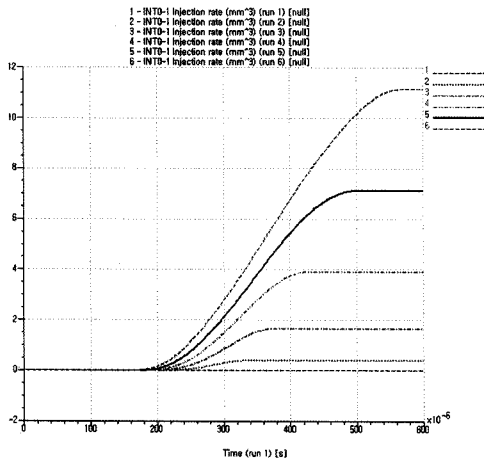
(a) Injection rate



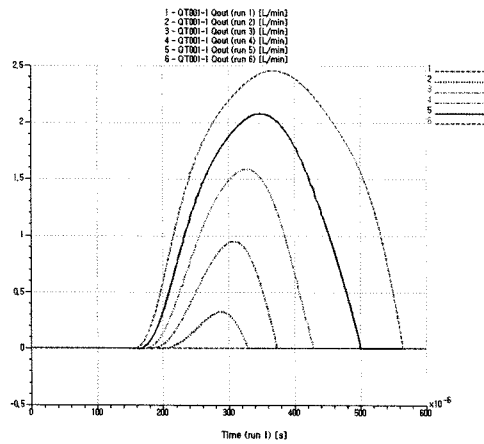
(b) Needle displacement

Fig. 9 Sensitivity analysis of supply pressure (plunger displacement : max. 0.07 mm)

커먼레일용 연료분사 인젝터의 설계변수에 대한 민감도 분석



(a) Injection rate



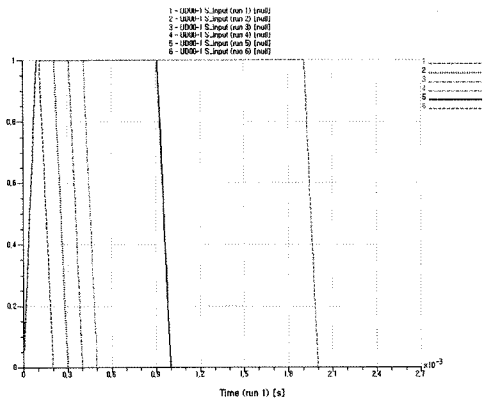
(b) Flow rate

Fig. 10 Sensitivity analysis of supply pressure (plunger displacement : max. 0.08 mm)

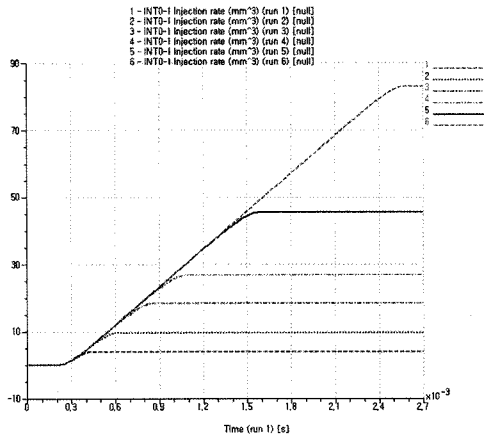
하나 개도와 변위는 상호 연관이 있기 때문에 설계시, 충분히 고려해야 할 것으로 생각된다.

이상의 해석 결과를 바탕으로 솔레노이드 변위를 0.08 mm로 변경하여 공급 압력에 대한 인젝터 분사량의 특성을 파악하기 위한 민감도 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었고, 공급압력을 400 bar(run 1), 600 bar(run 2), 800 bar(run 3), 1000 bar(run 4), 1200 bar(run 5), 1400 bar(run 6)로 변화시켰을 때 분사량과 변위의 변화정도를 확인하였다.

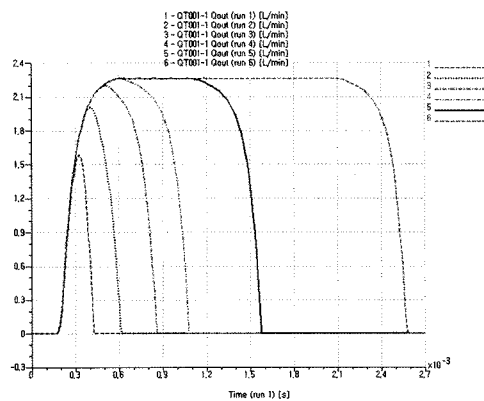
해석 조건의 분사 입력 즉, 솔레노이드의 입력사양인 400 bar에서는 니들이 상승되지 않아 분사가 되지 않으며, 1000 bar에서 분사량은 약 4 mm³이다.



(a) Solenoid input



(b) Injection rate



(c) Flow rate

Fig. 11 Sensitivity analysis of solenoid input signal

Fig. 11은 솔레노이드 입력 신호 변화에 따른 분사량 특성을 파악하기 위한 해석 결과로 공급 압력을 1000 bar로 설정한 상태에서 솔레노이드의 입력

신호의 상승 및 하강 시, 시간 지연은 90 μ s로 일정하게 하고 유지시간을 20 μ s (run 1), 120 μ s (run 2), 220 μ s (run 3), 320 μ s (run 4), 820 μ s (run 5), 2.32 ms (run 6)로 변화시켰을 때의 결과를 나타내었다. 해석 결과에서 보면 유지시간이 증가하면 증가할수록 인젝터에서의 연료 분사량이 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

커먼레일용 연료분사 인젝터에 대한 해석 모델을 구축하기 위해 각 부품의 기능 및 특성분석과 부품 모델링 실시하여 민감도 해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디젤 연료 분사 인젝터에서 사용하고 있는 각 부분품에 대하여 기능분석과 분석모델 개발을 통해 기능 및 사양을 분석하였으며, 다양한 해석을 통해서 시스템 사양 및 조정 변수에 대한 해석을 수행하였다.
- 2) 개발된 해석모델은 스톱의 크기, 공급 압력, 니들의 변위, 솔레노이드의 제어 방법 등에 따른 변수의 거동을 확인하는 것이 가능하며, 이를 통해 개선방안 도출 및 각 부품의 치수 등에 대해 정량적으로 성능을 분석할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 민감도 해석 모델링은 향후, 신제품을 개발할 때 기존모델의 재사용 및 사용상 문제점과 분석이 사전에 가능하여 개발 기간 단축 및 문제점 분석이 용이하기 때문에 최적설계 및 현장에서 발생하는 문제 해결에 활용이 가능할 것으로 생각된다.
- 4) 기존에 사용되고 있는 인젝터에 공급하는 최대 압력이 1350 bar인 경우, 이것을 더 높은 압력인

1600 bar까지 사용하기 위해서는 솔레노이드 밸브의 변위와 개도 면적을 크게 변경해야 한다는 것을 해석 통해 알 수 있었다.

References

- 1) H. Y. Kim, J. Y. Koo, H. K. Na and C. S. Kim, "Simulation of High Pressure Common-rail Fuel Injection System," Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.162-173, 1998.
- 2) J. S. ang and Y. H. Yoon, "Analysis Model Development for Component Design of the Fuel Injection System for CRDI Engines," Transactions of KSAE, Vol.17, No.3, pp.117-126, 2009.
- 3) Y. S. Park, N. Y. Kim, D.-S. Choi, M. H. Kark, B. J. Yong, "Emission Characteristics of Common Rail Direct Injection Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.331-336, 2006.
- 4) K. Nam, S. Park and M. Sunwoo, "Dynamic Model of an HSDI Common-rail Injector and Injection Rate Estimation," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.43-49, 2003.
- 5) J. Lee and K. Min, "Analysis of Hydraulic Characteristics of High Pressure Injector with Piezo Actuator," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.164-173, 2006.
- 6) J. S. Jang and Y. H. Yoon, "Sensitivity Analysis on Design Parameters of the Fuel Injector for CRDI Engines," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.335-340, 2008.