

피에조 액츄에이터 적용 고압 인젝터의 유압 동특성 해석

이진욱^{*1)} · 민경덕²⁾

한국기계연구원 친환경엔진연구센터¹⁾ · 서울대학교 기계항공공학부²⁾

Analysis of Hydraulic Characteristics of High Pressure Injector with Piezo Actuator

Jinwook Lee^{*1)} · Kyoungdoug Min²⁾

¹⁾Engine R&D Center, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 16 January 2006 / Accepted 23 February 2006)

Abstract : In the electro-hydraulic injector for the common rail Diesel fuel injection system, the injection nozzle is being opened and closed by movement of a injector's needle which is balanced by pressure at the nozzle seat and at the needle control chamber, at the opposite end of the needle. In this study, the piezo actuator was considered as a prime movers in high pressure Diesel injector. Namely a piezo-driven Diesel injector, as a new method driven by piezoelectric energy, has been applied with a purpose to develop the analysis model of the piezo actuator to predict the dynamics characteristics of the hydraulic component(injector) by using the AMESim code. Aimed at simulating the hydraulic behavior of the piezo-driven injector, the circuit model has been developed and verified by comparison with the experimental results. As this research results, we found that the input voltage exerted on piezo stack is the dominant factor which affects on the initial needle behavior of piezo-driven injector than the hydraulic force generated by the constant injection pressure. Also we know the piezo-driven injector has more degrees of freedom in controlling the injection rate with the high pressure than a solenoid-driven injector.

Key words : Piezo-driven injector(피에조 인젝터), Hydraulic modeling(유압 모델링), High pressure injector(고압 인젝터), Piezo actuator(피에조 구동기), AMESim code(AMESim 해석코드), CRDI system(커먼레일 직접분사시스템)

Nomenclature

Δ_L : displacement of piezo stack, μm

S : strain

E : electric field, V/m

d_{ij} : strain coefficient, m/V

U : voltage, V

K_1 : electro-mechanical coupling factor

ϵ_0 : vacuum permittivity

K_2 : relative permittivity

A : area, m^2

d : thickness of ceramic layer

P : pressure, Pa

F : output force, N

L_0 : initial length of piezo stack, mm

m : mass, kg

N : number of ceramic layer

Q : volumetric injection flow rate, L/min.

*Corresponding author, E-mail: immanuel@kimm.re.kr

1. 서 론

최근에는 연료 소비를 측면과 지구 온난화의 주 원인인 이산화탄소(CO₂) 배출량 규제에 있어서 상대적으로 유리한 직접 분사식 디젤 엔진의 경우, 동적 부하 응답성과 반복적이고 정확한 연료분사를 위해 전자적으로 제어되는 커먼레일 연료분사시스템용 솔레노이드 구동 인젝터(solenoid-driven injector)가 주로 사용되어지고 있다.¹⁾ 그러나 실제 분사지연시간의 단축과 다단계 분사(multiple injection)의 유용성을 실현하기 위해서는, 인젝터 노즐 형상과 구동 진동의 최소화 그리고 새로운 니들 구동 메카니즘 등 인젝터 주요 설계 인자들에 대한 개선이 필요하다.

특히 새로운 니들 구동방식으로서의 구동 메카니즘 전환 필요성은 다음과 같은 직접 분사식 디젤 엔진의 특징상 더욱 절실히 요구된다.

- 1) 직접 분사식 디젤 엔진은 광범위한 엔진 운전 범위를 가지기에 이의 만족이 필수적이다. 따라서 넓은 운전 범위에 자유롭게 적용 가능한 분사 시기 및 분사 압력 그리고 분사 시간의 제어를 위해서는 인젝터의 고응답성이 필요하다.
- 2) 직접 분사식 디젤 엔진이 고속 소형화됨에 따라 니들 구동용 전류 및 전력의 소비를 적게 하여, 실제 엔진에서의 다단 분사 세분화가 중요하다. 이는 유해 배기 배출물질과 소음 및 진동을 저감하기 위함일 뿐 만 아니라, 현재 활발히 연구 중인 디젤 후처리 기법 및 장치 등과의 효율적인 매칭을 통한 엔진 최적화에 있어서 필수적이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 직접분사식 디젤엔진의 커먼레일 연료분사시스템에 적용 가능한 차세대 고압 인젝터 구동방식으로써, 피에조 액츄에이터를 사용한 피에조 인젝터의 기본적인 기계적 작동 성능특성을 수치적으로 분석하고자 인젝터 내부의 유압 동특성 해석을 수행하였다. 이를 위해 피에조 액츄에이터의 해석 모델 정립 및 검증과 피에조 인젝터의 각 구성 요소들간의 최적 구동을 위한 수학적 모델 설정 그리고 인젝터의 제작성과 비용측면에서 어려운 피에조 스택 구동특성을 기존 솔레노이드 인젝터와 상호 비교하였다.

2. 솔레노이드 및 피에조 구동방식 비교

기존 커먼레일 분사시스템용 인젝터는 솔레노이드에 의해 인젝터 니들 밸브를 개폐하는 방식이며,^{2,3)} 일반 가솔린 인젝터와는 달리 구동 전류가 크고, 피크-홀드(peak and hold)방식으로 전류를 제어한다. 인젝터 내부의 솔레노이드는 전자기 유도 소자(inductive load)인 코일로 만들어지고, 코일에 전압을 인가하면 전류는 시간이 지남에 따라 서서히 증가하게 된다. 이를 해결하기 위해 코일에 더 높은 전압을 인가하여 전류 상승시간을 줄여야 한다. 따라서 초기 상승 전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치가 필요하다. 이렇게 솔레노이드 코일에 고전류가 인가되면서 인젝터는 신속하게 작동되며, 이와 동시에 인젝터 초기 작동에 인가되었던 높은 전류는 낮아지면서 지속적으로 솔레노이드에 전류가 인가된다. 즉, 인젝터 작동 전체기간 동안에는 구동 인가 전압이 ON/OFF상태로 펄스폭을 조절(Pulse Width Modulation, PWM)하면서 낮은 저항 값을 가지는 코일 특성으로 인해 피크 전류 및 홀드 전류를 제어하게 된다. 이처럼 솔레노이드 코일은 낮은 저항 값을 가지는 반면에, 전류 변화에 대한 전자기 유도에 의해 생기는 유도 기전력의 비를 나타내는 유도계수인 인덕턴스는 크다. 또한 최대 소요 전류는 솔레노이드 밸브와 코일 설계시 결정되며, 인젝터 작동 전체 기간에 전류를 필요(전류 소비)로 하기에, 전력 소모가 많을 뿐만 아니라, 열로 손실되는 전력 손실도 많다. 이러한 전류 제어방식에 비해 전압 제어방식은 비용 및 제어 복잡성 측면에서 상대적으로 어렵기 때문에 현재에는 적용되지 않는다.

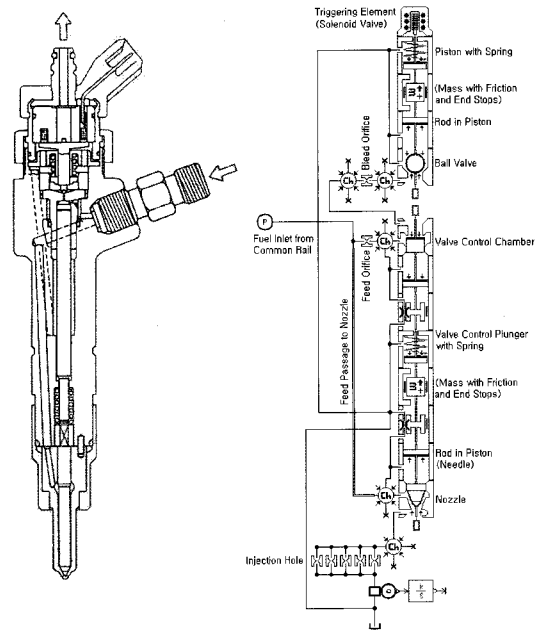
반면, 피에조 인젝터는 액츄에이터에 해당하는 피에조 스택(piezo stack)의 길이 변화로 인젝터 니들 밸브를 개폐하는 방식인데,⁴⁾ 피에조 스택은 전하를 축적하는 것을 목적으로 하여 만들어진 충전용량성 소자인 축전기(condenser)에 해당된다. 이 축전기는 코일과는 서로 상반되는 전기회로 소자이다. 축전기에 직류 전압을 인가하면 각 전극에는 걸린 전압의 극성에 따라 그리고 그 전압과 정전기 용량(capacitance)에 비례하여, 전하가 거의 순간적으로 축적되게 된다. 즉, 충전과 방전 과정시에만 전류를 소모하게 되며, 컨버터에서 방전과 동시에 재충전

된다. 그래서 전력 소모가 현저히 감소되며, 손실은 거의 없게 된다. 최대 소요 전류는 피에조 스택의 용량에 의해 결정되어진다.

3. CRDI시스템용 고압 인젝터 모델링

3.1 인젝터 본체 기계요소 모델

본 연구에서는 피에조 인젝터의 기본적인 작동 성능 해석을 수치적으로 검증하기 위하여, 신뢰성이 검증된 상용 AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems) 코드를 사용하여 수학적 모델을 정립한 후, 유압 해석을 수행하였다. 이 해석 방법은 피에조 인젝터 시스템의 설계 초기단계 및 설계과정에서 성능 검증과 향상을 도모할 수 있으며, 또한 설계 및 개발시간을 최소화할 수 있는 장점이 있다.⁵⁻⁷⁾ 먼저 Fig. 1과 같이 상용 슬래노이드 인젝터에 대한 유압 해석 모델을 정립하였는데, 피에조 인젝터의 경우, 이 모델에 있어서 인젝터의 구동부를 제외하고는 동일한 구성도를 가진다. 그리고 디젤 고압 인젝터의 작동원리를 반영한 Fig. 1(b)의 해석 모델을 구성하는 15개 주요 요소들은 참고문헌 [8]에 자세히 나타내었다. 본 연구에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단일 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다. 해석시간을 부여하는 신호는 선형적으로 최대 8단계로 구성되었으며, 이 입력신호는 출력으로 변환되게 된다. 이 힘은 바로 아래 부분에 위치한 스프링을 가진 피스톤에 전달되어, 일정 변위 및 일정 질량을 갖는 질량체(mass with friction and ideal end stops)를 경유하여 하단 피스톤에 적용하게 된다. 또한 커먼레일로부터 일정하게 공급되는 압력은 고압 연료 파이프($\varnothing = 2\text{mm}$, $l = 150\text{mm}$)를 통해 하단 feed orifice를 지나, 제어실에 채워지게 된다. 이러한 기계-유압적인 힘의 평형은 볼 밸브(ball poppet with conical seat)에 의해 유지되는데, 본 해석 모델에서는 Fig. 2와 같이 원추형 시트를 가지는 구형 포핏 밸브(spherical poppet valve)의 1차원 운동 모델로 고려하였다. 이 볼 밸브에 작용하는 순수 힘은 유체의 압력과 외부에서 작용하는 힘에 기인하게 된다. 그리고 인젝터 노즐에 대한 모델은 Fig. 3과 같이 원추형 시트를 가지는 원뿔형 포핏 밸브



(a) Sketch of injector (b) Injector equivalent hydraulic circuit
Fig. 1 Schematic of the electro-hydraulic injector

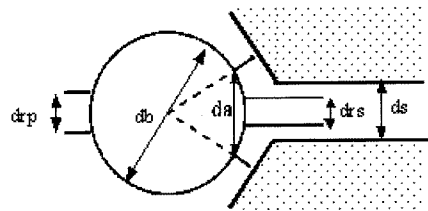


Fig. 2 Ball poppet with conical seat for hydraulic balance

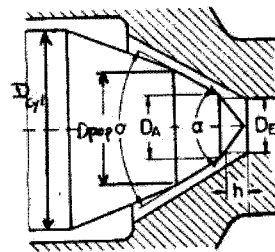


Fig. 3 Poppet with conical seat in nozzle

브(spherical poppet valve)의 1차원 운동 모델로 고려하였다. 본 연구에 적용된 고압 인젝터는 5개의 노즐 분공을 가지는데, 1개 분공의 직경은 0.168 mm이며, 오리피스로 모델링할 수 있었다.

3.2 인젝터 구동부 모델

피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터에 비해 상대적으로 큰 구동력과 빠른 응답성능을 나타낼 수 있으므로, 인젝터의 동적 모델링시, 적절한 구동부 모델을 정립할 필요가 있다. 인젝터 구동부의 핵심 부품인 기존 솔레노이드를 피에조로 대체할 경우, 정확한 솔레노이드 및 피에조 스택의 재질 특성이 해석에 반영되어야 상호간의 비교와 실험 결과와의 정확한 비교가 가능하다. 하지만 범용 해석 코드내에 이들을 반영하기에는 아직 많은 불확실성이 존재하기에,⁹⁾ 본 연구에서는 솔레노이드와 피에조 스택의 재질을 표준 IEEE규정(standard IEEE description)을 만족하는 사양으로 적용하였다.^{10,11)}

이를 바탕으로 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터 사이의 인젝터 구동부 변화에 따른 유압적 동특성을 비교 해석하고자, 피에조 인젝터의 핵심인 피에조 스택 구동부에 대한 해석 모델을 수립하였다. 이를 통해 궁극적으로 다양한 시험조건에 대한 피에조 인젝터의 기계적 구동 특성을 유압적으로 해석할 수 있었다. 아울러 본 연구에서 수립한 피에조 구동 해석 모델이 압전 효과 및 역 압전 효과를 잘 묘사하는지에 대한 기초 구동 해석을 수행하여 본 해석 모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

3.2.1 피에조 액츄에이터의 선형 거동 특성

피에조 인젝터의 기본적 구동 개념은 피에조 스택(piezo stack)에 전압을 가하면 극과 크기에 따라 스택의 길이가 변하는 역 압전 효과를 이용한 것이다. 무하중의 단층 피에조 액츄에이터(unloaded single-layer piezo actuator)의 경우, 피에조 스택의 변위는 다음 식 (1)과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\Delta L = S \cdot L_0 \approx \pm E \cdot d_{ij} \cdot L_0 \quad (1)$$

여기서, ΔL 은 피에조 스택의 변위, S 는 변형률, L_0 는 피에조 스택의 원래 길이, E 는 전기장의 세기 (V/m) 그리고 d_{ij} 는 피에조 변형률 계수(m/V)이다. 특히, d_{33} 은 피에조 세라믹의 분극 벡터방향과 평행 (두께 방향)한 변형률을 나타내며, d_{31} 은 이 분극 방향과 직교하는 방향(폭 방향)의 변형률을 의미한다. 따라서 d_{33} 과 d_{31} 은 모두 피에조 게인(piezo gain)으로 간주되나, PZT 스택 액츄에이터에서는 d_{33} 이 변형률 계수로 적용된다. 이러한 변위는 인가되는 전압

의 크기에 좌우되는데, 최대 인가 전압의 범위는 피에조 세라믹의 성질 및 단열 재질에 따라 결정되어진다. 따라서 피에조 스택을 구성하는 수 백개의 얇은 PZT 세라믹 소자의 두께 및 단면적은 중요한 설계 인자이며, 피에조 스택에 인가 가능한 전압의 크기를 고려하여 결정되어야 한다. 즉, 피에조 소자의 기계적 특성에 있어서 피에조 소자의 빠른 응답성을 위한 최대 작동 전압은 세라믹 소자의 두께에 비례한다.

이를 바탕으로 실제적으로 피에조 인젝터에 사용되는 적층형 PZT 스택 액츄에이터(Fig. 4 참조)의 변위는 다음 식 (2)와 같이 계산되어질 수 있다.

$$\Delta L \approx d_{33} \cdot N_p \cdot U \quad (2)$$

여기서, N_p 는 세라믹 소자의 층수이고, U 는 인가 전압(V)을 의미한다.

본 연구에 이와 같이 인가된 전압에 대한 피에조 스택의 작동 특성은 피에조 스택에서 발생하는 힘의 크기가 중요한 요소이기에, 피에조 스택의 거동 특성을 선형 모델로 고려하였다. 즉, 수 백 개의 얇은 세라믹 소자(두께 d , 단면적 A)들이 N 개 적층되어 전기적으로 병렬회로를 이루는 하나의 피에조 스택에 같은 전압(V)을 인가한 경우, 피에조 스택이 축 방향으로 ΔZ 만큼 수축되는데, 이때 적용되는 선형 특성식을 본 해석 연구에서는 다음 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\Delta Z = \frac{N \cdot d}{C_1 \cdot A} F + \frac{C_2 \cdot N}{C_1} V \quad (3)$$

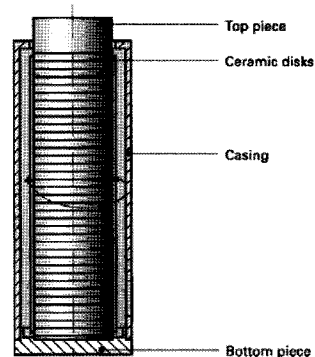


Fig. 4 Standard laminated uniform layers with internal electrode in a piezo stack

여기서, C_1 은 피에조 소자의 탄성계수이고, C_2 는 피에조 상수이다. 피에조 상수가 포함된 항인 (C_2/C_1)은 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{C_2}{C_1} = K_1 \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot K_2 \cdot C_1} \quad (4)$$

여기서, K_1 은 기전력 상관 계수, ϵ_0 는 진공 유전율, K_2 는 상대 유전율이다. 해석에서 고려한 힘(F)는 초기에 부여된 힘(blocked force)인데, 피에조 스택의 수축으로 인해 이 값은 점차 증가하게 된다. 본 해석의 경우, 적용된 피에조 소자의 탄성계수(C_1)은 $2.18 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, K_1 은 0.772, 그리고 K_2 는 2,900으로 설정하였다. Fig. 5는 본 연구에 사용된 시제품 피에조 인젝터를 나타낸 것인데, 피에조 액추에이터를 제외한 나머지 부분은 기존 상용 솔레노이드 인젝터 사양과 동일하도록 제작된 특징이 있다.



Fig. 5 Prototype piezo-driven injector used in this study

3.2.2 피에조 액추에이터의 해석 모델

Fig. 6은 본 연구에서 수립한 피에조 스택의 해석 모델이다. 피에조 스택의 모델은 가변 전압 구동기(저항 포함)와 히스테리시스를 무시한 선형 피에조 스택으로 구성되어 있다. 주어진 피에조 스택의 재질과 공급되는 전압의 크기에 따라 피에조 스택은 다양한 변위 차이를 발생시키게 된다. 전류가 공급되는 방향이 순방향(충전)과 역방향(방전)으로 주어지기에, 본 해석 모델에서는 폐회로 형태로 구성한 특징이 있다. 입력 구동 전압은 피에조 스택의 수축을 의미하는 -100 V(DC)로 설정하였으며, 이때, 피에조 스택의 최대 변위량은 14 μm 이다. 또한 해석 결과의 비교를 위해, 기존 인젝터에 적용되는 솔레노이드 구동방식에 대한 모델은 Fig. 7에 별도로 나타내었다. 이 해석 모델에서는 솔레노이드의 입력 신호를 전류신호(current force signal)로 부가하였는데, 여기서는 흡입력이기 때문에 1차 지연요소를 사용하여 게인 값을 -100으로 설정하였다. 이는 통전된 솔레노이드 코일에 의해 전기에너지가 자기 에

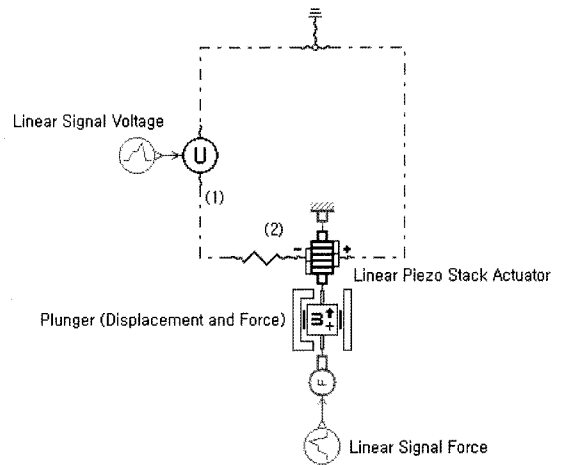


Fig. 6 Analytic model of piezoelectric actuator

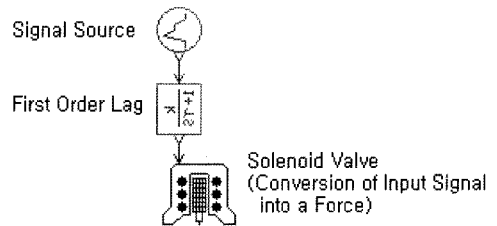


Fig. 7 Analytic model for driving the solenoid valve

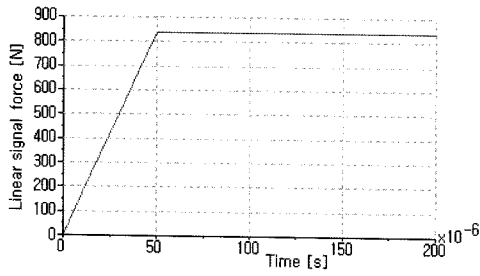
너지로 변환되며, 코일에는 변환된 자기 에너지가 축적되어져, 결국에는 힘(구동력)을 발생시키게 되는 과정을 모사하게 된다.

4. 이론적 해석 결과

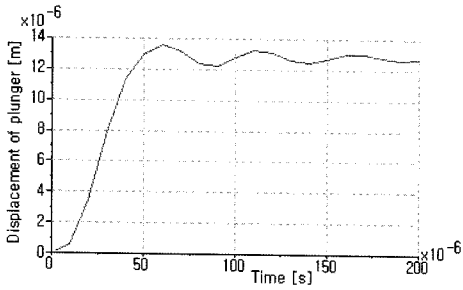
4.1 피에조 액추에이터 해석 모델 검증

본 연구에서는 피에조 스택의 해석 모델을 검증하기 위해, 피에조 스택에 일정하게 가해지는 외부 힘만 고려한 경우와 피에조 스택에 일정 전압만을 인가한 경우에서 피에조 스택의 특성을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 발생된 변위, 전압 그리고 변위 속도에 따라 비교하여 나타내었다. 전자의 경우는 압전 효과(piezo-electric effect), 그리고 후자의 경우는 역압전 효과(inverse piezo- electric effect)에 해당된다.

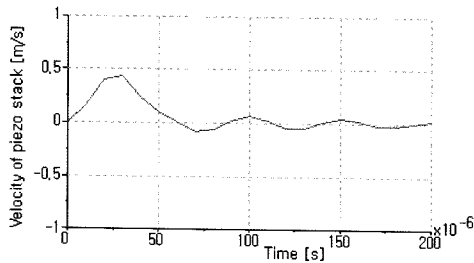
일정 외부 힘만이 피에조 스택에 작용하는 경우의 해석 결과를 나타낸 Fig. 8에서 보듯이, 플런저를 통해 전달된 힘은 거의 선형적으로 플런저의 최대 변위지점까지 증가한 후, 일정 값으로 수렴함을 알



(a) Input signal



(b) Transition of plunger

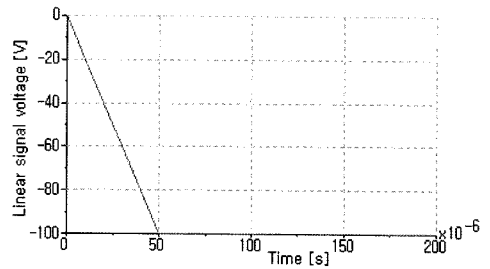


(c) Variation of piezo stack

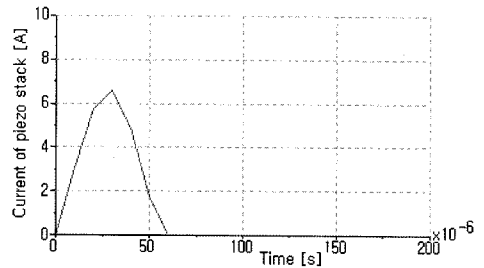
Fig. 8 Effects of linear input signal force to a piezo stack

수 있었다. 이들 통해 피에조 스택으로부터 일정 전압이 발생되며(압전 효과에 해당), 피에조 스택의 변화(수축)가 있음을 속도분포로부터 알 수 있었다.

반면, Fig. 9와 같이 일정 전압만을 피에조 스택에 인가한 경우, 전류 발생을 통한 플런저의 변위 이동이 허용 최대지점까지 작동 기간내 증가한 후, 일정하게 계속 유지됨을 알 수 있다. 이는 계속 공급되는 전압의 영향으로 피에조 스택이 축전기로서의 역할을 수행함을 의미한다. 이를 통해 구해진 피에조 스택 해석 모델내 주요 각 지점에서의 전압 및 전류 변화 특성을 실제 인젝터 구동 모델에 적용할 경우, 인젝터 분사 조건에서의 분사량 예측이 가능해질 수 있다.



(a) Input signal



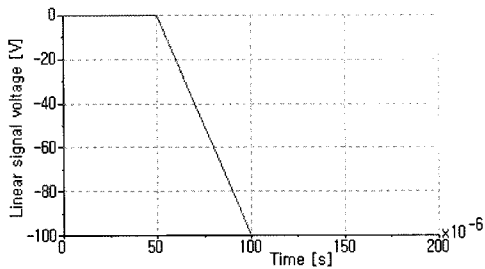
(b) Current generated in piezo stack

Fig. 9 Effects of linear input signal voltage to a piezo stack

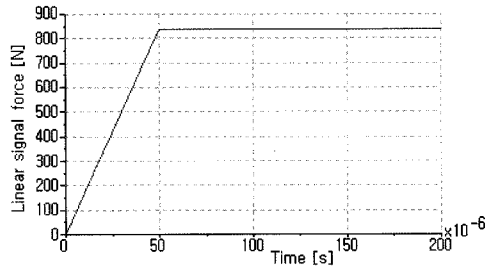
Fig. 10은 실제 인젝터 분사조건을 모사한 경우로써, 피에조 스택에 외부 힘을 일정 기간내 작동시켜 일정 값으로 유지할 동안에, 피에조 스택에 구동 전압을 인가한 경우이다. Fig. 10(c)와 같이 피에조 스택내 작용하는 힘은 두 가지 영역으로 구분됨을 알 수 있다. 외부 힘이 일정하게 유지되는 50 μ s 이상의 영역에서는 인가된 전압과 동일한 기울기로 피에조 스택내 힘이 선형적으로 감소된다. 그리고 플런저 변위는 외부 힘에 의해 초기에 민감히 변하기 때문에, 50 μ s 이내 영역에서는 이의 영향만을 모사한 Fig. 8(b)의 결과와 동일한 특성을 보인다. 이러한 피에조 스택의 선형적 거동 특성은 본 연구에서 개발한 피에조 스택의 해석 모델이 인젝터 구동부 해석에 적용할 수 있는 신뢰성 및 정확성을 가짐을 의미한다.

4.2 인젝터 유압 동특성

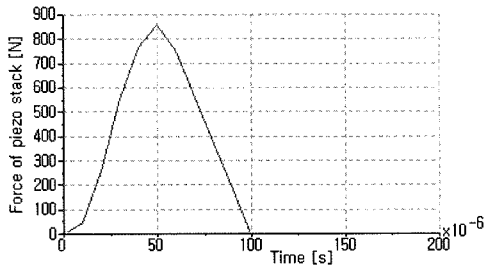
Fig. 11은 솔레노이드 인젝터에 대하여 일정하게 공급되는 분사 압력에 따른 솔레노이드 구동 플런저의 변위, 인젝터 니들 변위, 오리피스부 압력변화 그리고 연료 분사율의 변화 특성을 나타낸 것이다. 솔레노이드 밸브의 변위에 해당하는 상단 플런저의



(a) Input signal - voltage



(b) Input signal - force



(c) Output force from piezo stack

Fig. 10 Analytic results of a piezo actuator's model

변위에서 보듯이 분사 압력 200MPa 이상에서는 매우 불안정해지는데, 이는 구성된 각 인젝터 요소들의 물리적 특성을 고려할 때, 이 이상의 압력으로 구동되는 것은 불가능함을 의미한다. 이로 말미암아 니들의 변위와 오리피스부의 압력 거동은 이의 영향을 매우 밀접하게 받게 됨을 알 수 있다. 분사율에 있어서는 분사 압력 200MPa 이상에서부터 분사율 종료시점이 영향을 받게 되는데, 이는 니들 변위 거동과 일치하는 것으로, 현재의 해석모델로 구성된 솔레노이드 인젝터에 있어서는 분사 압력 200MPa 이상으로 작동하는 것은 적합하지 않음을 알 수 있었다.

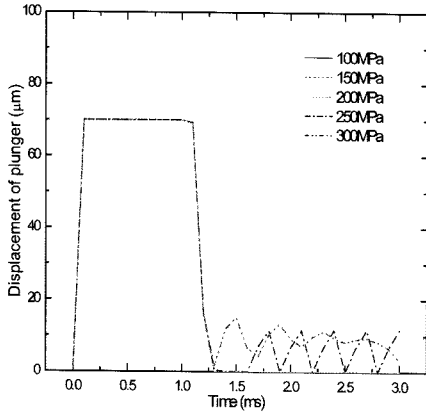
Fig. 12는 본 해석을 통해 구한 피에조 인젝터의 주요 구성요소인 피에조 스택의 특성(전류변화), 발

생출력과 플런저 및 니들 변위 특성 그리고 분사 특성을 나타낸 것이다. 해석 조건은 분사 압력 100MPa 과 구동기간 1.0ms로 설정하였다. 해석 결과, 입력 전압이 120V인 경우, 발생 전류는 10A 부근임을 알 수 있으며, 플런저 변위는 최대 허용 이동거리(0.07 mm)의 약 35% 정도 만큼 움직임을 알 수 있다. 니들의 변위 또한 솔레노이드 인젝터에 비해 상당히 완만히 증가하게 되어 전체적인 분사량은 감소함을 알 수 있다. 또한 피에조 스택에서의 초기 발생력에 의한 오리피스 압력은 인가된 전압에 따라 민감히 변동된다. 그러나 실제적으로 사용 가능한 입력 전압인 200V인 경우, 초기 니들의 상승 기울기는 상대적으로 급격히 증가하여 분사율의 증가를 도모할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 니들의 빠른 응답성이 피에조 스택에 공급되는 입력 전압의 크기에 따라 제어될 수 있음을 의미한다. 또한 상대적으로 낮은 입력 전압인 80V에 경우에 있어서는 실제적인 인젝터 니들의 이동은 없음을 알 수 있었다.

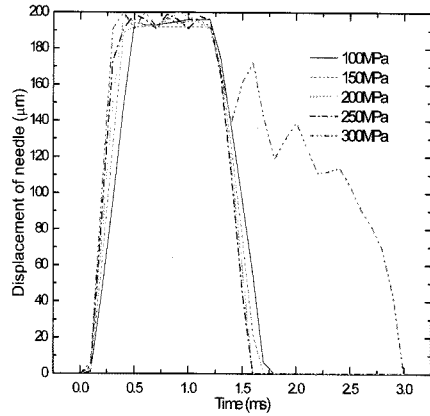
Fig. 13은 입력 전압을 200V로 일정하게 유지한 채, 3가지 분사 압력별(100MPa, 150MPa, 200MPa) 피에조 인젝터의 구동 특성 즉, 플런저와 니들 변위 그리고 분사율 특성을 비교한 것이다. 일정한 플런저 변위가 유지됨을 알 수 있었으며, 앞서 Fig. 12에서 밝힌대로 충분한 입력 전압인 200V의 공급으로 인해 니들의 정상적으로 구동되어짐을 알 수 있었다. 비록 분사 압력이 증가함에 따라 니들의 상승 기울기는 다소 변화되지만, Fig. 12에서처럼 입력 전압의 영향 만큼의 변화는 없음을 알 수 있었다. 또한 분사 압력의 증가로 인해 니들의 닫히는 시점이 변화되는 특성을 보이는데, 이는 피에조 인젝터에 있어서 고압의 분사 압력일수록 적절한 입력 전압의 선택이 필요함을 의미한다. 이상의 해석 결과로 볼 때, 피에조 인젝터에 있어서 실제적인 분사율 특성에 영향을 미치는 인젝터 니들의 초기 거동을 비교해 보면, 초기 커먼레일을 통해 공급되는 분사 압력에 의한 유압적 힘보다는 세라믹 스택에 가해지는 전압에 따라 차이가 더 지배적임을 알 수 있었다.

4. 결론

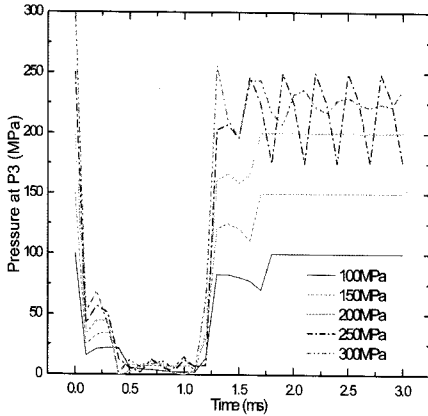
본 연구는 커먼레일 연료분사시스템용 디젤 고압



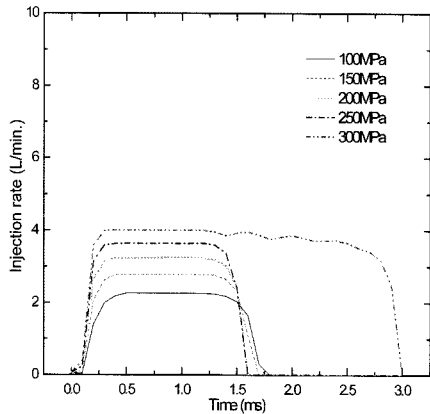
(a) Plunger movement driven by solenoid



(b) Displacement of needle



(c) Pressure variation near at orifice



(d) Injection rate

Fig. 11 Effects on the injection pressure in solenoid injector

인젝터의 다단 분사 및 고응답 분사특성을 향상시키기 위한 새로운 인젝터 구동방식으로써, 피에조 액츄에이터의 개념을 적용한 피에조 인젝터의 기본적인 작동 성능을 수치적으로 분석하고자, 피에조 인젝터의 내부 유압적 동특성을 해석한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

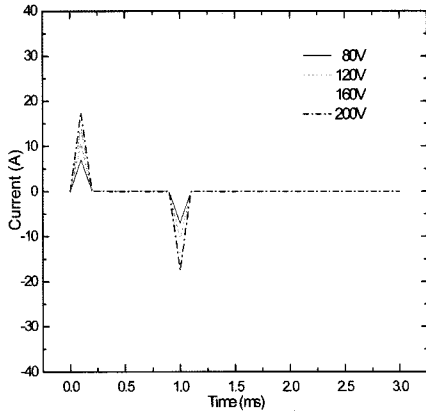
1) 피에조 인젝터의 핵심부인 피에조 액츄에이터의 수학적 해석 모델을 상용 AMESim코드를 사용하여 수립하였으며, 수립된 피에조 구동 해석 모델에 대하여 피에조 인젝터의 구동개념인 역압전 효과를 잘 모사하는지에 대한 검증시험을 통해 이 해석 모델에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다. 즉, 유압 모델링 해석을 위해 피에조 스택 구동부에 대한 해석 모델을 폐회로 형태로 구성하여 피

에조 액츄에이터로서의 기능을 검증하였다.

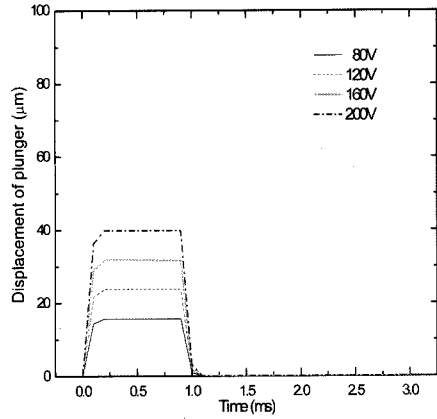
2) 해석에 적용된 피에조 스택은 세라믹 소자들이 적층되어 전기적으로는 병렬회로를 구성되기에, 본문에서 제시한 선형특성식으로 정의할 수 있었으며, 이 식의 주요 상수들을 실제 실험 제작 가능한 값으로 설정하여 본 해석을 수행한 특징이 있다.

3) 이를 바탕으로 피에조 인젝터의 전체적인 동적해석 모델을 수립하였다.

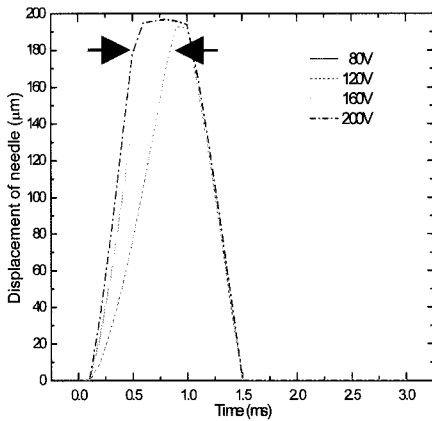
4) 유압 동특성 해석 결과, 피에조 인젝터에 인가되는 1개의 입력 값을 통해 얻게 되는 분사를 변화 특성은 솔레노이드 인젝터에서 2개 입력값(피크-홀드 전류)의 변화를 통해 얻게 되는 분사를 변화 특성보다는 훨씬 더 광범위하게 제어될 수 있음



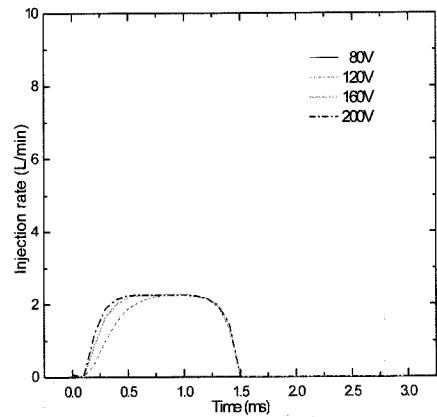
(a) Output current from piezo stack



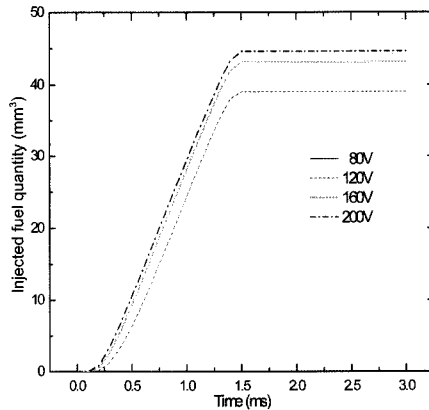
(b) Displacement of plunger



(c) Displacement of needle



(d) Variation of injection rate



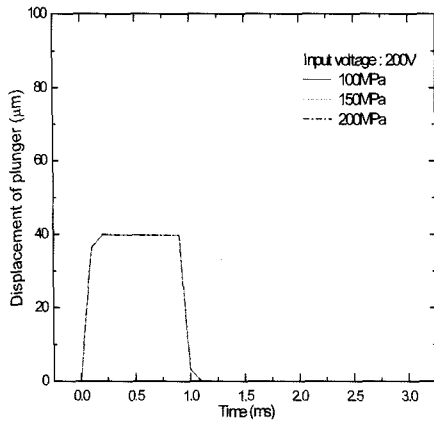
(e) Variation of injected fuel quantity

Fig. 12 Effects of input voltage on injection characteristics in piezo-driven injector

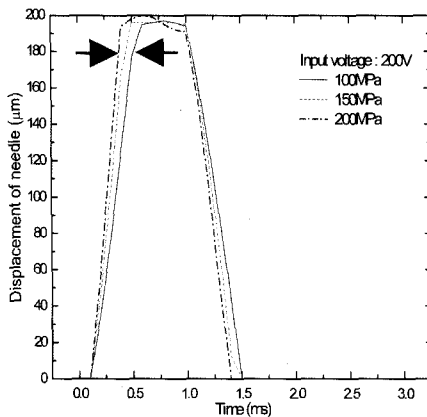
을 알았다.

- 5) 또한 피에조 인젝터의 초기 니들 거동에 영향을 미치는 주요 인자는 커먼레일을 통해 공급되는

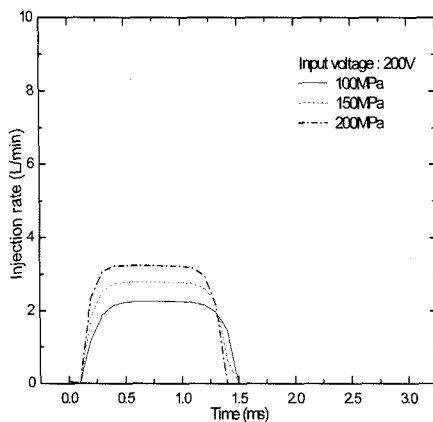
일정 분사 압력에 의한 유압적 힘보다는 피에조 스택에 가해지는 전압임을 본 연구를 통해 알 수 있었다.



(a) Plunger movement driven by piezo stack



(b) Displacement of needle



(c) Variation of injection rate

Fig. 13 Effects of injection pressure on piezo injector's driving

후 기

이 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업의

연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) W. Boehner and K. Hummel, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles," SAE 970345, 1997.
- 2) G. M. Bianchi, P. Pelloni, F. Filicori and G. Vannini, "Optimization of the Solenoid Valve Behavior in Common-Rail Injection Systems," SAE 2000-01-2042, 2000.
- 3) J. W. Hwang, H. J. Kal, J. K. Park and J. O. Chae, "A Numerical Study for the Design of Fast Solenoid," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.94-102, 1999.
- 4) C. Pettes and A. Leipertz, "Potentials of a Piezo-Driven Passenger car Common Rail System to meet Future Emission Legislation - An Evaluation by Meas of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion," SAE 2001-01-3499, 2001.
- 5) D. T. Hountalas and A. D. Kouremenos, "Development of a Fast and Simple Simulation Model for the Fuel Injection System of Diesel Engines," Advanced in Engineering Software, Vol.29, No.1, 1998.
- 6) G. M. Bianchi, S. Falfari, M. Parotto and G. Osbat, "Advanced Modelling of Common Rail Injector Dynamics and Comparison with Experiments," SAE 2003-01-0006, 2003.
- 7) O. Chiavola and P. Giulianelli, "Modelling and Simulation of Common Rail System," SAE 2001-01-3183, 2001.
- 8) J. W. Lee, "A Study on Driving Performance, Spray Characteristics and Cavitation Flow of a Piezo-driven Diesel Injector," Ph. D. Dissertation, Seoul National University, 2005.
- 9) J. Mooney, "Drive Circuit Modeling and Analysis of Electronically Controlled Fuel Injectors for Diesel Engines," SAE 2003-01-3361, 2003.
- 10) American National Standard : IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Standard, 1987.
- 11) H. Adriaens, W. L. de Koning and R. Banning, "Modeling Piezoelectric Actuator," IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, Vol.5, No.4, pp.331-341, 2000.