

< 논문 >

차세대 고응답 분사용 피에조 인젝터의 노즐유동 및 분무특성에 관한 연구

이진욱* · 민경덕*

(2006년 1월 24일 접수, 2006년 4월 17일 심사완료)

A Study on Nozzle Flow and Spray Characteristics of Piezo Injector for Next Generation High Response Injection

Jinwook Lee and Kyoungdoug Min

Key Words: Diesel Spray(디젤 분무), Needle Response(니들 응답성), Piezo Stack(피에조 스택), Piezo Injector(피에조 인젝터), Cavitating Nozzle Flow(캐비테이션 노즐유동)

Abstract

Most diesel injector, which is currently used in high-pressure common rail fuel injection system of diesel engine, is driven by the solenoid coil energy for its needle movement. The main disadvantage of this solenoid-driven injector is a high power consumption, high power loss through solenoid coil and relatively fixed needle response's problem. In this study, a prototype piezo-driven injector, as a new injector mechanism driven by piezoelectric energy based on the concept of inverse piezo-electric effect, has been designed and fabricated to know the effect of piezo-driven injection processes on the diesel spray structure and internal nozzle flow. Firstly we investigated the spray characteristics in a constant volume chamber pressurized by nitrogen gas using the back diffusion light illumination method for high-speed temporal photography and also analyzed the inside nozzle flow by a fully transient simulation with cavitation model using VOF(volume of fraction) method. The numerical calculation has been performed to simulate the cavitating flow of 3-dimensional real size single hole nozzle along the injection duration. Results were compared between a conventional solenoid-driven injector and piezo-driven injector, both equipped with the same micro-sac multi-hole injection nozzle. The experimental results show that the piezo-driven injector has short injection delay and a faster spray development and produces higher injection velocity than the solenoid-driven injector. And the predicted simulation results with the degree of cavitation's generation inside nozzle for faster needle response in a piezo-driven injector were reflected to spray development in agreement with the experimental spray images.

기호설명

P : 압력
Pr : 프란틀 수(Pr, Prandtl number)
 d_{ij} : 압전기(piezoelectric) 계수

α_L : 분산(dispersed)상 체적비
 μ : 동점성 계수
 ρ_L : 액체 밀도
 u_B : 기포 유속
D : 확산 계수
T : 응력 텐서
A : 부가 생성항
 κ : 난류 운동에너지
E : 확산 플럭스

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 친환경엔진연구센터

E-mail : immanuel@kimm.re.kr

TEL : (042) 868-7386 FAX : (042) 868-7305

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

1. 서론

직접분사식 디젤엔진용 커먼레일 연료분사시스템은 고압 연료에 대하여 분사기간과 분사시기를 제어하는데 있어서 보다 더 많은 자유도를 가진다. 즉 이 시스템은 엔진회전수나 엔진부하에 관계없이 자유롭게 분사제어를 수행할 수 있는 장점이 있다. 특히 이를 통해 향상된 디젤연소과정 실현과 질소산화물(NOx)저감이 가능한 다단 분사(multiple injection)의 적용이 가능해짐에 따라 이 시스템과 관련된 핵심기술의 고도화가 요구된다.

현재는 경유자동차 배출가스허용기준인 EURO IV기준을 만족할 수 있는 분사압력 160MPa까지 도달 가능한 제2세대 커먼레일 연료분사시스템이 개발된 상태인데, 이러한 분사압력의 고압화를 통해 연소 완성도가 높아지는 대신에 연소온도가 증가하여 질소산화물의 농도가 증가할 가능성이 있어, 분사 자유도가 높은 인젝터의 개발이 필수적이다. 이를테면 인젝터의 작동 반응도의 고속화를 통해 다단 분사 실현 및 연소실내 유동 조절을 통해 연료-공기 혼합을 최적 조절하여 질소산화물의 저감을 도모해야만 한다.⁽¹⁾

이를 위해서는 고반응 인젝터에 대한 고압 연료 분사를 조절 기능이 향상된 커먼레일 연료분사시스템 확립은 매우 중요하다. 왜냐하면 현재 주로 사용중인 솔레노이드(solenoid) 인젝터는 고압화된 커먼레일에서 견고하면서도 빠른 응답성을 갖는데에는 한계가 있는 반면에, 솔레노이드 대신에 경량화되고 응답이 빠른 피에조 스택(piezo stack)를 이용하여 인젝터의 작동 반응도를 고속화할 경우, 분사특성 개선뿐만 아니라 향후, 본격적으로 보급될 디젤 후처리시스템(DPF)과의 통합적 제어적 측면(예, 후분사포함 고성능 다단 분사기능)에서 보다 유리하기 때문이다.⁽²⁾

따라서 본 연구에서는 고압 디젤 인젝터 니들의 구동을 제어하는 새로운 메카니즘으로써, 피에조 액츄에이터의 작동 개념을 적용한 차세대 디젤분사용 피에조 인젝터(piezo-driven injector)의 노즐 내부 캐비테이션 유동과 거시적 분무특성을 해석하고자, 각각 이론적 해석과 실험적 연구를 수행하였으며, 또한 기존 커먼레일 연료분사시스템에 적용되는 솔레노이드 인젝터와 상호 비교하였다.

2. 피에조 인젝터의 구동원리

Fig. 1에서 보듯이 피에조 인젝터의 기본적 작동개념은 피에조 스택(piezo stack)에 일정 전압을 가하면 극과 크기에 따라 피에조 스택의 길이가 변하는 역 압전효과(inverse piezoelectric effect)를 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. 피에조 스택의 변위는 인가되는 전압의 크기에 좌우되는데, 최대 인가 전압의 범위는 피에조 세라믹의 성질 및 단열 재질에 따라 결정되어진다.

본 연구에 사용된 시제품 피에조 인젝터와의 구동을 위해 인가되는 전류 및 전압 파형을 Fig. 2에 나타내었다. 충전과 방전방식으로 전류를 제어하고 있으며, 피에조 스택은 시험용 제어기로부터 구동 전류 신호를 받아 스택 길이가 팽창하거나 수축하게 되어 힘을 발생시키게 된다. 그림에서 보듯이 피에조 인젝터 구동 시작시, 피에조 소자에는 소량의 충전 전류만을 사용함으로써 구동 후, 구동 에너지를 재충전할 필요가 없어 다단 분사를 위한 시간적 제약이 없게 된다. 즉, 피에조 인젝터는 이러한 구동 회로의 에너지 소모를 방지할 수 있게 되어, 보다 빠른 제어 성능을 지니게 된다.

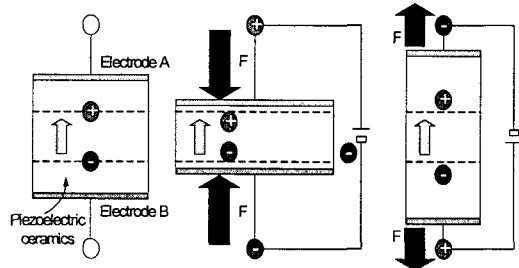
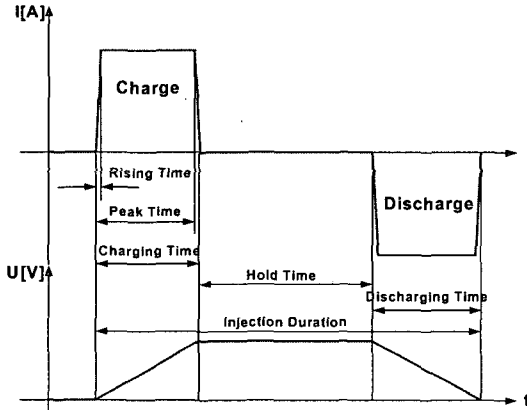


Fig. 1 Schematic of inverse piezoelectric effect concept for piezo-driven injector's driving



(a) Prototype piezo-driven injector



(b) Driving output current and voltage wave

Fig. 2 Operating method of piezo-driven injector with electric charge and discharge control

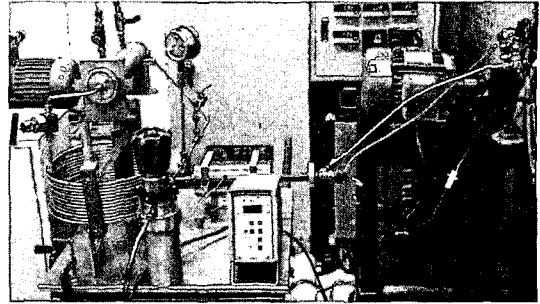


Fig. 3 Experimental apparatus for measuring injection rate between piezo and solenoid injector

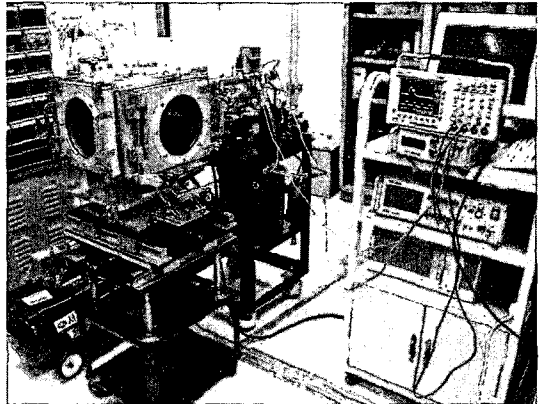


Fig. 4 Experimental apparatus for high pressure spray visualization

3. 디젤 분사율 및 분무 계측 실험

비정상 디젤 분무 연구에 있어서 필수적인 분사율(injection rate) 측정을 위해서, 본 연구에서는 일정 파이프내에 고압연료를 분사하여 이의 내부 압력변화로부터 분사율을 산출하는 Bosch 튜브법을 적용하였다. 비정상류내에서 단일 압력파에 의한 압력 $P(t)$ 과 유속의 일반적인 관계 및 연료 질량 분사율(Q_D)는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$P(t) = \rho_f \cdot a \cdot u_P \quad (2)$$

$$Q_D = A_P \cdot u_P = A_P \cdot \frac{P(t)}{\rho_f \cdot a}$$

여기서, a 는 유체의 음속, A_P 는 파이프의 단면적, u_P 는 파이프내의 유속을 나타낸다. 즉, 분사율은 파이프 내부의 압력 변화를 계측하여 구할 수 있게 된다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 분사율을 측정하기 위한 실험 장치인데, 크게 인젝터 연결부, 압력센서 적용 측정부(8m 측정파이프) 그리고 배압 조절부로 나눌 수 있다.

또한 거시적 분무 계측을 위해서 Fig. 4와 같은 고압 분무 실험 장치를 구성하였다. 커먼레일내 고압연료를 저장하기 위해서, 먼저 최대 200MPa 까지 가압할 수 있는 고압 분사펌프를 DC 모터(최대 3.7kW)와 귀환 제어기능을 가지고 있는 인버터에 의해 구동되게끔 서로 직렬로 연결하였다. 그리고 질소를 이용하여 최대 7MPa의 분위기 압력까지 설정할 수 있게끔 제작된 고압 정적 분무 실내 생성되는 고속 분무영상을 계측하기 위한 가시화 방법으로, 본 연구에서는 분무에 의한 Mie 산란광을 촬영할 수 있는 후방 조영에 의한 직접 사진법을 적용하였다. 또한 고압 분사와 고속 카메라(Phantom v7.0, 최대 50,000fr/s)의 동기화를 위해 디지털 펄스 발생기(DG 535)를 이용하여 인젝터의 분사지연시간만큼 신호를 지연시키면서 고속 분무 영상을 정확히 획득할 수 있었다. 그리고 고속 분무촬영에 필요한 광원이 측정영역에 쉽게 접근하도록 하기 위해, 3개 원형 측정창(직경 108mm, 두께 50mm, 석영)을 설치하였다.

4. 노즐 캐비테이션 유동해석

복잡한 기하학적 형상의 노즐 내부와 아주 작은 크기의 지름을 갖는 분공(injection hole)을 통과하는 고압의 연료는 매우 빠른 속도와 분공 근처에서의 큰 압력강하로 인해, 국소적으로 연료의 증기압 아래로 떨어지는 지점에서 기포(bubble)가 발생하여 분공내 압력조건에 따라 성장과 소멸과정을 통하여 분공내 액상과 기상이 함께 존재하는 2상유동의 형태를 지니게 된다. 이러한 노즐내부 색 체적(sac volume)과 분공내에서 발생하는 캐비테이션 유동현상은 분사시스템의 고압화 및 빠른 니들거동 그리고 분공입구 형상 등에 지배적인 영향을 받는다.⁽³⁾ 본 연구에서는 이러한 노즐 분공내부에서 발생하는 캐비테이션 현상을 Eulerian-Lagrangian 다상 유동해석법으로 해석하여, 동일한 노즐 형상을 가지는 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 서로 다른 니들 거동에 따른 노즐 분공내 캐비테이션 발생정도를 비교하고자 수행하였다.

수치계산은 3차원 점성유체 해석코드인 GFS (general flow solver) 프로그램으로 수행하였으며, Fig. 5는 실제 인젝터 노즐의 색 체적과 1개 분공 부분만을 대상으로 한 수치해석 영역과 격자를 나타낸 것이다.

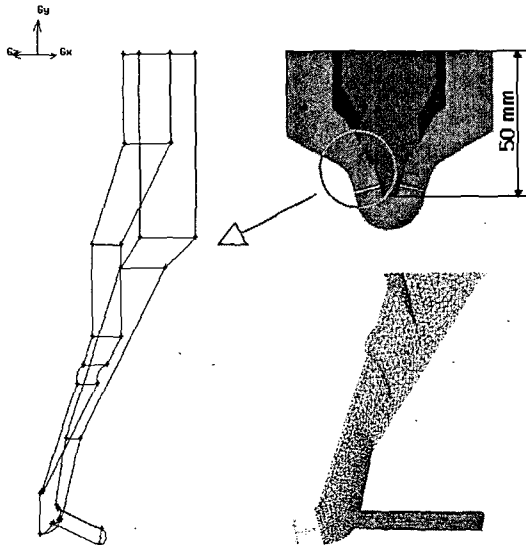


Fig. 5 Computational mesh and model region inside injector nozzle along the central cross-section for one injection hole

먼저, 작동유체는 단상(single phase)으로 고려하여, Euler 좌표계에서 질량 및 운동량방정식을 정상상태 조건으로 해석한 후, 구해진 압력장에 대한 유체의 밀도는 dispersed phase volume fraction (α_L)을 도입하여 액상과 기상에서 발생하는 중요한 물리현상들을 비정상, 다차원 연립방정식으로 질량 및 운동량 보존방정식을 모델링하였다. 그리고 α_L 의 계산을 위해서는 정확하게 판단할 수 있는 계산 셀의 크기보다 상대적으로 큰 기포에 대해서만 계산 대상으로 하였다. 이는 기포 근처의 모든 셀을 우선 스캐닝한 후, 이 모든 셀에 대한 가중치된 셀 체적의 계산으로 가능하였다. 유체의 VOF(volume of fraction)을 해석하기 위해, 수송방정식의 생성항은 캐비테이션 기포의 동특성을 나타내는 Rayleigh-Plesset식을 이용하여 기포의 생성과 소멸을 수치적으로 적분하여 구할 수 있었다.⁽⁴⁾ 또한 난류의 영향을 해석하기 위해 기존 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다.

질량보존방정식

$$\partial(\alpha_L \rho_L) / \partial t + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \hat{u}_L) = 0$$

운동량보존방정식

$$\partial(\alpha_L \rho_L \hat{u}_L) / \partial t + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \hat{u}_L \otimes \hat{u}_L - \alpha_L T) = \hat{A}u$$

$$\text{where, } T = -[P + (2/3)\mu_L \nabla \cdot \hat{u}_L]I + \mu_L [\nabla \otimes \hat{u}_L + (\nabla \otimes \hat{u}_L)^T]$$

수송방정식

$$\partial(\rho\phi) / \partial t + \nabla \cdot (\rho\hat{u}\phi - \hat{E}) = A\phi$$

$$\text{where, } \hat{E} = D\nabla\phi \text{ and } D = \mu/Pr$$

여기서, A는 부가된 생성항, E는 확산플럭스 벡터, D는 확산계수 그리고 Pr은 Prandtl number 이다.

본 연구의 핵심인 캐비테이션 유동해석에 있어서 노즐내부의 캐비테이션은 물리적 힘에 의해 유도된 현상(mechanically driven phenomenon)이라는 기본적인 가정에서 출발하였으며, 발생된 캐비테이션 기포가 성장하기 위해서는 기포 핵(nuclei)이 존재하는 상태를 가정하였다. 즉, 구형태를 가지는 팽창과 수축을 하는 내부가 빈 기포의 생성에 필요한 핵이 액상내에서 존재하며, Lagrangian approximation을 따라 이 핵이 주위 압력에 따라 성장과 소멸한다고 가정하였다. 그리고 본 해석에서 초기 핵의 역할을 하는 캐비테이션 기포의 초기 수밀도는 디젤의 경우, 약 10^{12} 으로 간주하였다. 초기 핵의 크기는 PDF(probability

distribution function)로부터 선택될 수 있는데, 이를 위해서는 2개의 가중치된 수밀도와 2개의 직경을 초기 입력값으로 설정하였다. 그리고 초기 핵의 위치는 현재 기포의 체적비, 각 Eulerian 격자셀의 무차원 압력 그리고 체적을 고려한 분포 함수로부터 선별·적용하였다.

5. 실험 및 해석결과

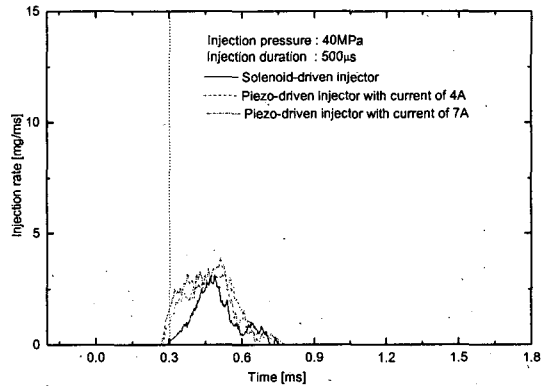
5.1 분사율 특성

Fig. 6은 분위기 압력 0.1MPa의 경우, 2가지 분사 압력(40, 130MPa)에 대하여 피에조 인젝터의 구동 전류가 분사율에 미치는 영향을 나타낸 것인데, 동일한 시험 조건으로 수행한 솔레노이드 인젝터의 실험결과와 비교하였다. 피에조 인젝터의 경우, 분사 초기와 분사 말기에서의 분사율 기울기는 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 급격히 증가 및 감소됨을 알 수 있으며, 또한 이 분사율의 변화율은 인가되는 전류에 의해 변화될 뿐만 아니라 초기 분사 압력에 의해서도 민감하게 변화됨을 알 수 있었다. 궁극적으로 이러한 피에조 인젝터의 분사율 특성은 빠른 니들 응답성에 기인하는 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 니들 상승시간 동안에, 인젝터 분공내 비정상(transient) 캐비테이션 기포의 생성과 소멸을 고려하여 캐비테이션 유동을 해석할 수 있었다.

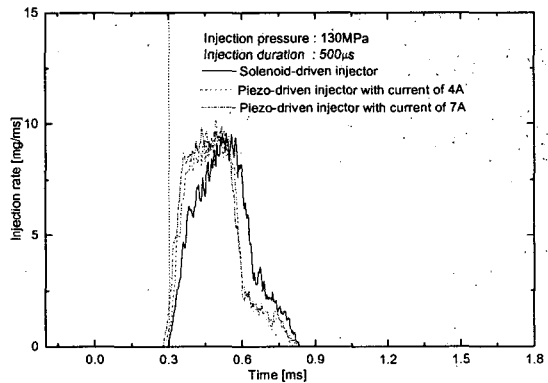
5.2 초기 거시적 분무 생성 및 발달 특성

Fig. 7은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터에 대하여 분위기 압력 3MPa인 경우, 2가지 분사 압력(40, 130MPa)별로 인젝터의 구동 전류 및 초기 분무 발달과정을 나타낸 것이다. 여기서, 피에조 인젝터의 구동조건은 구동 전압 120V와 구동 전류 7A로 설정하였다.

두 인젝터의 구동 전류 파형내 표시한 100 μ s 동안 생성된 초기 분무를 비교해 볼 때, 두 인젝터 모두 분사 압력의 영향을 받으며, 인젝터 구동 전류신호에 따라 별다른 분사 지연없이 대칭을 이루면서 정상적인 분무가 형성됨을 알 수 있었다. 또한 두 인젝터 모두, 분사 압력이 증가함에 따라 분무 선단 관통거리는 길어지는데, 이 분무 선단 관통거리는 각 인젝터의 분공별 그리고 두 인젝터별로 약 3%내의 편차내로 그다지 차이가 없음을 알 수 있었다.



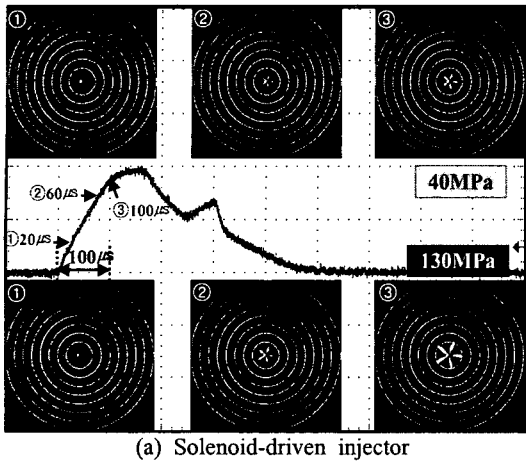
(a) Injection pressure : 40MPa



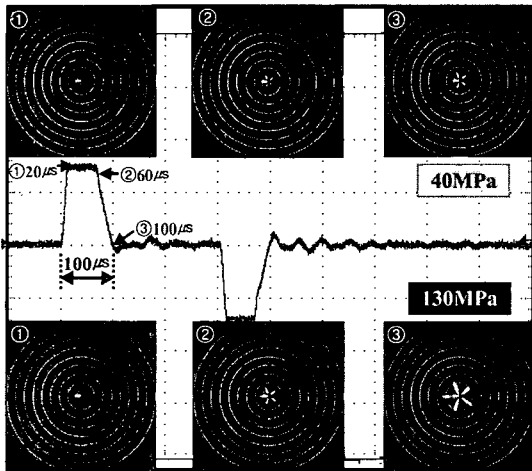
(b) Injection pressure : 130MPa

Fig. 6 Comparison of injection rate between solenoid and piezo-driven injector with two different currents

Fig. 8은 분사 압력 130MPa, 분위기 압력 3MPa, 그리고 분사 기간 500 μ s인 경우, 구동 입력 전류 4A와 7A의 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터에 대한 분무 선단 관통거리 및 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 두 인젝터는 분사가 진행되는 시점 이후부터 분명한 분무 특성의 차이가 있음을 알 수 있다. 솔레노이드 인젝터의 경우, 피에조 인젝터에 비해 상대적으로 작은 분무 선단 관통거리와 상대적으로 넓은 분무각을 형성함을 알 수 있었다. 또한 구동 입력 전류 7A인 피에조 인젝터의 경우, 초기 분무 생성구간(200 μ s 이내)에서의 분무 선단 관통거리는 솔레노이드 인젝터에 비해 Fig. 8에 표시된 편차값(솔레노이드 인젝터의 분무 선단 관통거리의 $\pm 10\%$ 값)의 2배인 $\pm 20\%$ 보다 더 증가함을 알 수 있었다.



(a) Solenoid-driven injector



(b) Piezo-driven injector

Fig. 7 Initial macroscopic spray behavior

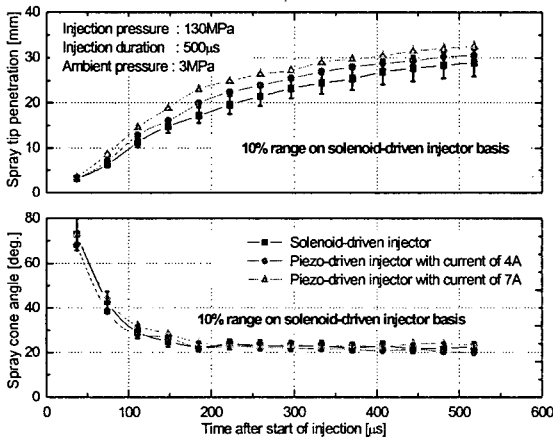
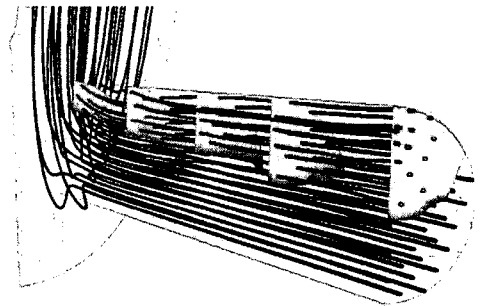


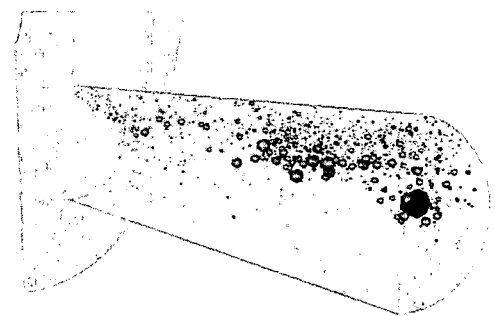
Fig. 8 Comparison of spray tip penetration and spray cone angle for two different injectors

5.3 노즐 내부 캐비테이션 유동특성 해석결과

Fig. 9는 분사 압력 130MPa, 분위기 압력 3MPa 조건에서 피에조 인젝터의 경우, 최대 니들 양정일 때의 캐비테이션 기포 특성을 나타낸 것이다. 노즐 색 체적의 중앙부분과 분공 입구 상단 벽면 부근에서는 작동 유체의 와류(vortex)에 의해 재순환(recirculation)영역이 형성됨을 알 수 있으며, 이 영역에서 최소 압력지점이 생기게 되고, 이와 더불어 특히 색 체적의 바닥면이나 노즐 분공 내부 벽면의 영향으로 캐비테이션이 발생됨을 알 수 있었다. 인젝터의 노즐 분공 영역에서 생성된 캐비테이션 기포는 노즐 분공의 출구까지 필름 형태를 유지하면서 이동되며, 발생한 기상 영역의 밀도는 액상 영역의 밀도보다 작아서 대개 분공의 윗 영역에 위치함을 알 수 있다. 또한 분공 내부에 형성된 압력 강하의 영향으로 인해 핵으로부터 성장한 캐비테이션 기포는 하류로 이동하면서 소멸과정을 겪는데, 미처 소멸되지 않은 기포는 노즐 분공 출구까지 이동된다.



(a) Stream lines with vapor fraction



(b) Bubble parcels

Fig. 9 Calculated nozzle cavitating flow

그리고 색 체적 내에서 생성된 유선 형태를 볼 때, 매우 불규칙하고 심한 변형이 상하 방향으로 크게 발생하는 것으로 여겨져, 상대적으로 크기가 작은 분공지름을 통과할 때 순간적인 유량변화에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Fig. 10은 노즐 출구에서의 평균 분사 속도 및 유효 면적을 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터에 대해 비교한 것이다. 유효 면적값 1은 캐비테이션 현상이 발생되지 않음을 의미한다. 이 결과로 볼 때, 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 더 빠른 캐비테이션 개시 및 분사 속도를 가짐을 예측할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 고압커먼레일 디젤분사시스템용 피에조 인젝터의 고압 분무 특성을 Mie산란 분무

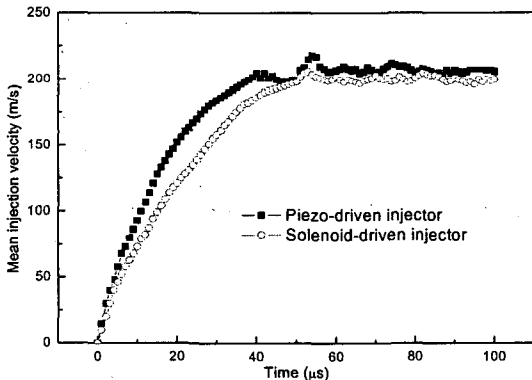
영상 가시화 및 분사율 실험을 통해 정량화하였다. 실험 결과, 피에조 인젝터의 분무 선단 관통거리는 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 증가함을 알 수 있었다. 그리고 피에조 인젝터의 분사율 기울기는 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 급격히 증가하며, 이 분사율 기울기의 증가율 변화는 분사 압력이 상대적으로 고압인 130MPa보다 낮은 40MPa인 경우, 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 이는 피에조 스택에 인가되는 전기적 값에 따라 변화해짐을 알 수 있었다. 그리고 Eulerian-Lagrangian 다상 유동해석법을 기초해서, 캐비테이션 기포 핵의 수 밀도를 바탕으로 생성된 캐비테이션 기포의 성장 및 소멸을 고려한 모델을 Rayleigh-Plesset 방정식에 적용하여 노즐 분공내부 3차원 캐비테이션 유동을 이론적으로 해석하였다. 해석결과, 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 더 빠른 캐비테이션 발생 및 노즐 출구에서의 고속 분사속도 결과는 분무실험결과와도 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며, 이는 향후, 고압 분무에 대한 수치해석시, 초기 조건으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

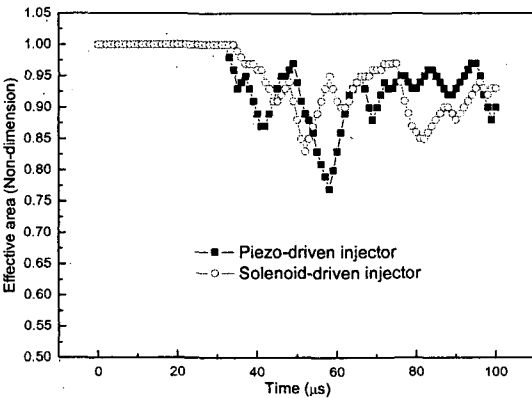
본 연구는 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Edwards, S. P., Pilley, A. D., Michon, S. and Fournier, G., 1997, "The Optimization of Common Rail FIE Equipped Engines Through the Use of Statistical Experimental Design, Mathematical Modelling and Genetic Algorithms," SAE 970346.
- (2) Fetters, C. and Leipertz, A., 2001, "Potential of a Piezo-Driven Passenger Car Common-Rail System to Meet Future Emission Legislation-An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion," SAE 2000-01-3499.
- (3) Arcoumanis, C., Badami, M., Flora, H. and Gavaises, M., 2000, "Cavitation in Real-Size Multi-Hole Diesel Injector Nozzles," SAE 2000-01-1249.
- (4) Hirt, C. W. and Nicholls, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computation Physics*, Vol. 39, pp. 202~225.



(a) Mean injection velocity



(b) Effective area

Fig. 10 Predicted mean injection velocity and effective area at the exit of nozzle hole between solenoid and piezo-driven injector for nominal common-rail pressure of 40MPa