

Eulerian-Lagrangian 다상 유동해석법에 의한 피에조 인젝터의 노즐 내부 비정상 캐비테이션 유동해석

Analysis of Unsteady Cavitating Flows in Fuel Injection Nozzle of
Piezo-driven Injector by Eulerian-Lagrangian Multi-phase Method

이진욱*, 민경덕*, 강건용**, M. Gavaises***, C. Arcoumanis***
Jinwook Lee, Kyungduk Min, Kemyong Kang

Abstract

This study describes the analysis results of unsteady cavitating flows behavior inside nozzle of the prototype piezo-driven injector. This piezo-driven injector has been recognised as one of the next generation diesel injector due to a higher driven efficiency than the conventional solenoid-driven injector. The three dimensional geometry model along the central cross-section regarding of one injection hole has been used to simulate the cavitating flows for injection time by at fully transient simulation with cavitation model. The cavitation model incorporates many of the fundamental physical processes assumed to take place in cavitating flows. The simulations performed were both fully transient and 'pseudo' steady state, even if under steady state boundary conditions. We could analyze the effect the pressure drop to the sudden acceleration of fuel, which is due to the fastest response of needle, on the degree of cavitation existed in piezo-driven injector nozzle

주요기술용어 : Cavitating Flow(캐비테이션 유동), Multi-hole Nozzle(다공노즐), Piezo-driven Injector(피에조 인젝터), GFS code(General Fluid Solver 코드)

1. 서론

연소실내로 연료를 직접 분사하는 직분식 디젤엔진은 연료 소비 저감 및 CO₂가스 배출량 규제에 적합한 승용자동차 동력원으로서, 최근 몇 년 전부터 주목을 받고 있는데, 이와 관련한 핵심 제어인자로는 인젝터의 특성, 분사조

건, 분무가 진행되는 연소실 내부의 유동특성, 벽면에서의 충돌 등을 들 수 있다. 이런 제어 인자들에 의한 실제 엔진내의 유동장과 분사시스템은 상호 매우 복잡하게 연관되어져 있기 때문에, 디젤분무의 경우, 실험과 이론 해석적 연구가 상호보완적으로 수행되고 있다. 특히, 본 연구와 같이 디젤분무에 지배적인 영향을 미치는 디젤 고압 인젝터의 구동방식을 새로운 시스템으로 바꾼 경우, 인젝터 노즐의 내부형상이 분무특성에 미치는 영향은 지배적이다. 특히 고속 직분식 디젤엔진에서 기존엔진과 구

* 서울대학교, 기계항공공학부

** 한국기계연구원, 청정동력기계그룹

*** City University, London

별되는 특징은 커먼레일(common-rail) 분사시스템방식을 사용하여 상대적으로 높은 고압분사를 통해 연료의 증발을 촉진하여 연료와 공기의 혼합율을 향상시켜 연소특성을 개선할 수 있다는 것이다¹⁾. 즉, 160MPa이상의 매우 높은 분사압력을 일정하게 유지한 채, 연료를 분사하는 것이 가능해지고, 엔진운전조건(엔진회전수 및 부하)에 따라 분사기간(분사량), 분사시기의 정밀제어가 가능해짐에 따라, 이의 장점을 충분히 활용할 수 있는 새로운 고압 인젝터의 개발이 유럽자동차 회사를 중심으로 하여 진행되고 있다²⁾. 따라서 본 연구의 목적은 유체의 고속유동과 와류 등에 의해 재순환 영역이 형성되는 노즐의 색체적과 분공의 윗부분을 대상으로 하여 니들의 급격한 거동을 모사한 내부 압력장의 변화에 따른 노즐 분공내 캐비테이션 발생정도를 살펴보고자 함이다. 특히, 본 연구에서는 향후, 기존 솔레노이드 구동방식의 인젝터를 대체할 가능성이 높은, 보다 빠른 응답성과 제어성을 지닌 피에조 구동방식의 인젝터³⁾의 개발에 있어서, 니들의 빠른 응답성에 따른 노즐내부의 복잡한 고압연료 유동장에 대하여 캐비테이션모델을 적용하여 해석하였다.

2. 노즐내부 캐비테이션 유동 특성

복잡한 기하학적 형상의 노즐 내부와 아주 작은 크기의 지름을 갖는 분공(injection hole)을 통과하는 고압의 연료는 매우 빠른 속도와 분공근처에서의 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.

이를 대상으로 한 연구에 있어서, 실험적으로 해석하기에는 관찰영역의 크기가 상대적으

로 매우 작고, 고압연료의 속도가 약 300m/s부근이기 때문에 노즐 분공 내부유동과 캐비테이션 발생 메카니즘을 이해하는데에는 한계가 있다. 물론 실제 노즐크기를 몇 배 확대한 모형을 이용한 가시화연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다⁴⁾. 따라서 캐비테이션은 물리적 힘에 의해 유도된 현상(mechanically driven phenomenon)이라는 기본적인 가정에서 출발하여, 발생된 캐비테이션 기포가 성장하기 위해서는 기포 핵(nuclei)이 존재하는 상태를 대상으로 한 이론적 해석도 많이 시도가 되고 있다⁵⁾.

3. 본 연구에 적용된 수치해석법

본 연구에서는 디젤용 고압 피에조 인젝터의 노즐형상에 대하여 노즐 내부에서 발생하는 캐비테이션 유동을 해석하기 위해 VOF(volume of fluid)방법을 적용하였다. 수치계산은 3차원 점성유체 해석코드인 GFS(general flow solver) 프로그램을 가지고 수행되었으며, Fig. 1은 사용된 피에조 인젝터의 실제 노즐내 수치해석 영역 및 격자를 나타낸 것이다. 연료 분사압력에 해당하는 압력값을 가지는 격자경계면은 1개의 입구경계면, 1개의 출구경계면 그리고 2개의 대칭경계면으로 구성되어 있으며, 이들 경계면에서의 초기값은 Table 1과 같다. Giannadakis⁶⁾등에 의해 개발된 캐비테이션 모델은 노즐내부의 캐비테이션 정도를 예측하기 위해 사용되었는데, 이 모델의 주요 특징은 다음과 같다.

먼저, 이 캐비테이션 모델에서는 노즐분공내 내부압력이 임의값 이하로 떨어졌을때, 캐비테이션 유동이 발생된다고 가정하였다. 이 모델의 적용을 위해 작동유체는 단상으로 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 모델링할 수 있었다. α_L 의 계산을 위해

서는 정확하게 판단할 수 있는 계산 셀의 크기보다 상대적으로 큰 기포에 대해서만 계산대상으로 하였다. 이것은 기포근처의 모든 셀을 스케닝하고, 이 모든 셀에 대한 가중치된 셀 체적의 계산으로 가능하였다. 또한 난류의 영향을 해석하기 위해 기준κ-ε난류모델을 사용하였다.

(1) 질량보존방정식

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot \rho \hat{u} = 0 \quad (\text{for non-cavitating flow})$$

$$\partial (\alpha_L \rho_L) / \partial t + \nabla (\alpha_L \rho_L \hat{u}_L) = 0 \quad (\text{for cavitating flow})$$

(2) 운동량보존방정식

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

where, $T = -[P + (2/3)\mu \nabla \cdot \hat{u}]I + \mu[\nabla \otimes \hat{u} + (\nabla \otimes \hat{u})^T]$
(for non-cavitating flow)

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

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

여기서, T는 응력텐서, I는 단위텐서, P는 압력 그리고 μ는 유체의 동점성계수이다.

유체의 VOF(volume of fraction)을 해석하기 위해서 다음과 같은 수송방정식을 적용하였다. 이러한 3차원 계산의 경우, 수송방정식의 생성항은 캐비테이션 기포의 동특성을 나타내는 Rayleigh-Plesset 식을 이용하여⁷⁾ 기포의 생성과 소멸을 수치적으로 적분하여 구할 수 있었다. Rayleigh-Plesset 방정식은 변하는 압력장에서 구형 기포의 운동을 해석하는데 사용되며, 액체는 비압축성으로 가정한다.

(3) 임의 스칼라변수(φ)의 수송방정식

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

where, $\hat{E} = \Gamma_\phi \nabla \phi$

$$\Gamma_\phi = \mu / \sigma_\phi$$

여기서, A는 부가된 생성항, E는 확산플럭스 벡터, Γ_φ는 확산계수 그리고 σ_φ는 Prandl number이다. 그 외, 이와 관련된 κ-ε계수들은 다음과 같다.

$$\hat{E} = (\mu_{eff} / \sigma_\phi) \nabla \phi$$

$$\mu_{eff} = C_\mu \rho \kappa^{3/2} / \epsilon + C_\mu \rho \kappa^2 / \epsilon$$

$$A_\kappa = G - \rho \epsilon = G - (\rho^2 C_w / \mu) \kappa^2$$

$$A_\epsilon = C_1 (\epsilon / \kappa) G - C_2 \rho (\epsilon^2 / \kappa) + C_3 \rho \epsilon \cdot \nabla \hat{u}$$

$$= [C_1 C_\mu \rho \kappa] / \mu [G - (C_2 C_\mu \rho^2 \kappa) / \mu] \epsilon + (C_3 \rho \epsilon \cdot \nabla \hat{u})$$

$$G = \mu_t \nabla \hat{u} \cdot [\nabla \hat{u} + (\nabla \hat{u})^T] - (2/3) \nabla \hat{u} (\rho \kappa + \mu_t \nabla \hat{u})$$

여기서, G는 난류운동에너지의 생성항이다. 사용된 상수값은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Initial pressure value at inlet and outlet boundary conditions

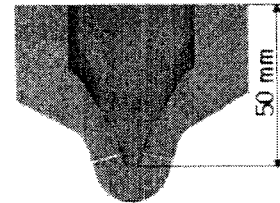
Inlet boundary	40MPa, 130MPa
Outlet boundary	0.1MPa

Table 2 Constants of κ-ε turbulence model

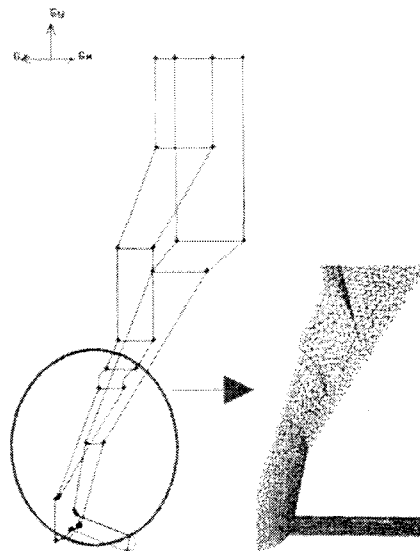
C _μ	C ₁	C ₂	C ₃	σ _κ	σ _ε
0.09	1.44	1.92	-0.373	1.0	1.3



(a) Piezo-driven injector



(b) Computational region inside nozzle



(c) Nozzle model and mesh

Fig. 1 3-D computational nozzle geometry

이를 위해서 본 연구에서는 구형태를 가지는 팽창과 수축을 하는 내부가 빈 기포의 생성에 필요한 핵이 액상내에서 존재하며, Lagrangian approximation을 따라 이 핵이 주위 압력에 따라 성장과 소멸한다고 가정하였다. 초기 핵의 역할을 하는 캐비테이션 기포의 초기 수밀도는 디젤의 경우, 약 10^{12} 으로 간주하였다. 초기 핵의 크기는 PDF(probability distribution function)로부터 선택되는데, 이를 위해서는 2개의 가중치된 수밀도와 2개의 직경을 초기 입력값으로 필요로 한다. 그리고 초기 핵의 위치는 현재 기포의 체적비, 각 Eulerian 격자셀의 무차원 압력(tension) 그리고 체적을 고려한 분포함수로부터 선별되어 무작위로 계산된다.

4. 수치해석 조건

피에조 인젝터의 경우, 기존 솔레노이드 인젝터에 비해 니들이 열리고 닫히는 시간이 매우 짧기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 니들의 상승시간(rising time)을 무시한 경우에 대하여, 분공내 비정상(transient) 캐비테이션 기포의 생성과 소멸을 고려한 모델 등을 결합하여 캐비테이션 유동을 해석하였다. 이는 본 논문과 관련한 연구의 최종목적이 시제품 피에조 인젝터의 개발을 위해, 이상적(ideal) 니들의 거동에 대한 분공내 캐비테이션 유동의 발생 정도를 예측하여 초기 분무에 미치는 영향을 파악하기 위함이기 때문이다. 그래서 본 논문에서는 이러한 니들거동에 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 근접가능한 시제품 피에조 인젝터에 사용된 노즐형상을 대상으로 하였다. 해석계산시간의 단축을 위해, 분공의 직경이 0.168mm인 5공 피에조 인젝터에 대하여, 1개의 분공에 대한 나머지 분공들과의 대칭 경계면형상을 먼저 설정하였고, 다시 이 1개의 분공형상에 대하여 분공의 중앙단면을 기준으로 대칭 경계면 형상을 설정하였다. 앞서 밝힌대로 이는 실제 커먼레일 분사시스템에 사용되는 인젝터의 3차원 노즐형상이며, 약 11,000개의 node와 약 48,000개의 element로 구성하였다. 그리

고 본 연구에 사용된 작동유체인 디젤(n-dodecane)의 밀도는 835kg/m^3 , 동점성계수는 $2.5 \times 10^{-3}\text{kg/(ms)}$ 이며, 인젝터내 니들의 최대양정은 $200\mu\text{m}$ 이다.

이를 위해, 먼저 단상(single-phase) 정상상태 계산을 Table 1에 나타낸 일정 압력 초기조건값에 대해 수행한 후, 이를 통해 구해진 유동장에 비정상 캐비테이션 모델을 적용하였다. 이 경우, 니들의 위치는 캐비테이션 해석을 시작하는 순간부터 최대양정에 놓이게 되도록, 이의 기하학적 형상을 초기 입력값에 설정하였다. 출구 경계면의 값은 전체 해석시간 동안에 일정하게 유지되나, 입력 압력값은 해석시간 동안에 과도 압력 측정(transient pressure measurement)이 가능하기에, 시간에 따라 변하게 된다. 이렇게 구한 비정상 해석의 압력장은 Table 1에 나타낸 입구경계면 압력값인 40MPa과 130MPa(nominal inlet pressure)에 대하여 비교되어질 수 있었다. 이 압력조건은 직분식 디젤엔진에서 각각 아이들 영역과 전부하 영역에 주로 사용되는 분사압력에 해당된다. 초기 기포 핵의 크기와 수밀도는 앞서 밝힌 PDF를 통해 구해지는데, 이와 관련한 변수의 초기값은 α_{v0} (initial volume fraction of the nuclei)가 0.05%이며, 10^{20}nuclei/m^4 을 갖는 기포의 최소 반경크기는 $0.25\mu\text{m}$ 그리고 10^{19}nuclei/m^4 를 갖는 기포의 최대 반경크기는 $1.5\mu\text{m}$ 이다. 최종적인 초기 기포수는 500-2000개 정도이다.

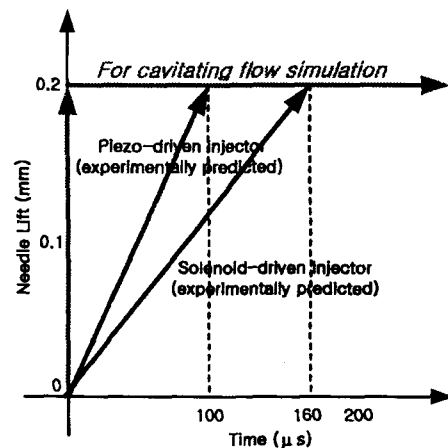


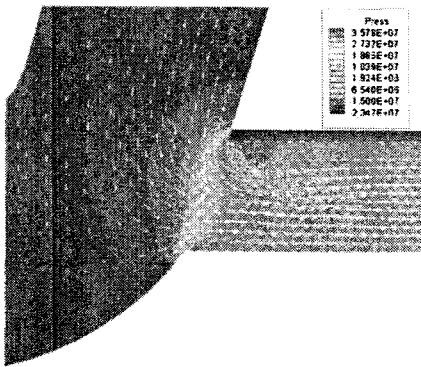
Fig. 2 Characteristics of needle behavior

5. 수치해석 결과 및 검토

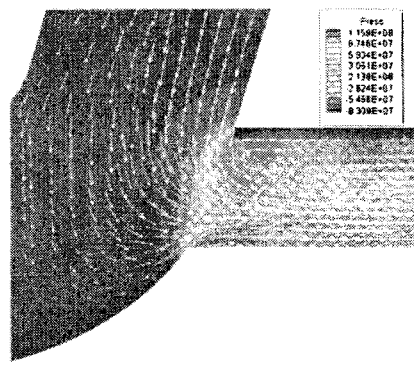
Fig. 3은 서로 다른 분사압력 조건에서 노즐 색 채적 및 분공내부의 압력장 및 고압연료유 속 변화에 대한 정상상태 해석결과를 나타낸 것이다. 색 채적의 중앙부분과 분공 입구 윗 부분 그리고 아래 벽면 부근에서는 작동 유체의

와류(vortex) 등에 의하여 재순환(recirculation) 지역이 형성되는데, 이 영역에서 최소 압력지점이 생기게 되고, 이와 더불어 특히 색 채적의 바닥면이나 노즐 분공 내부의 벽면의 영향으로 인한 캐비테이션 발생을 예측할 수 있다.

이렇게 해서 발생된 작은 기포에 대한 생성 모델링은 매우 어렵기에, Fig. 3에서 구한 결과

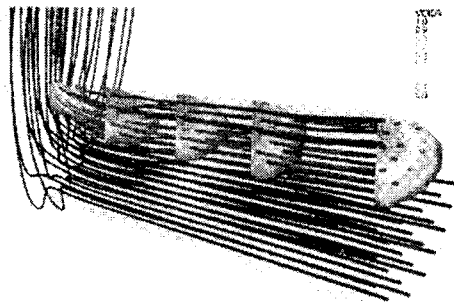


(a) Injection pressure : 40MPa

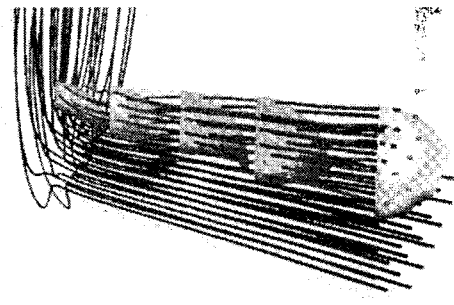


(a) Injection pressure : 130MPa

Fig. 3 Calculated velocity and pressure field in the sac volume



(a) Injection pressure : 40MPa



(b) Injection pressure : 130MPa

Fig. 4 Calculated velocity and pressure field in the nozzle with cavitation model (injection duration of 300μs)

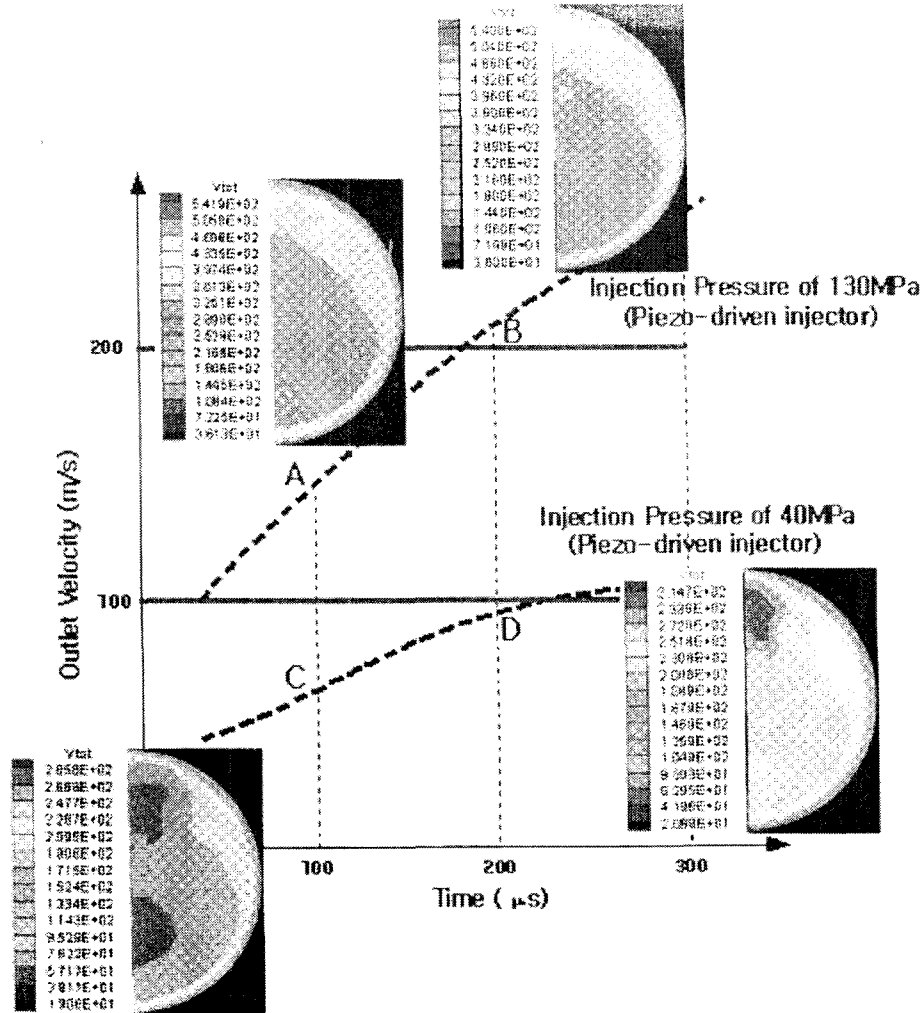


Fig. 5 Comparison between the computational and experimental results on the nozzle outlet velocity

를 바탕으로 해서, 실제 해석에 적용 가능한 작은 기포의 수밀도를 고려한 후, 기포의 성장과 소멸과정에 대한 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 인젝터의 노즐 분공 영역에서 생성된 캐비테이션 기포는 노즐 분공의 출구까지 필름 형태를 유지하면서 이동되는 것을 확인 할 수 있다. 발생하는 기상 영역의 밀도는 액상 영역의 밀도보다 작아서 대개 분공의 윗 영역에 위치하는데, 분공 내부에 형성된 압력 강하의 영향으로 인해 핵으로부터 성장한 캐비테이션 기포는 하류로 이동하면서 소멸과정을 겪게 되며, 특히 분사압이 상대적으로 큰 경우에 빨리 소

멸과정이 진행되며, 미처 소멸되지 않은 기포는 노즐 분공 출구까지 이동됨을 알 수 있었다. 또한 분사압이 낮을 경우에는 초기 기포의 크기가 커서 소멸과정이 느리게 진행됨도 확인할 수 있었다. 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. 5는 이미 실험을 통해 구한⁸⁾ 분공 출구에서의 임의 분사시간후에 측정된 분사속도와

본 연구를 통해 구한 분공 출구영역에서의 해석결과를 비교해서 나타낸 것이다. 분사압에 따른 분공출구에서의 속도차이는 뚜렷이 나타나며, 커먼레일 압력이 130MPa인 경우에는 노즐 분공내부에 고압 연료의 속도가 약 350m/s에 도달함을 알 수 있다. 이런 조건으로 분사된 후, 고압 분무속도는 마찰저항으로 인해 급격히 감소되어 약 200m/s정도로 진행됨을 알 수 있다. 커먼레일 압력이 40MPa인 경우에도 이와 유사한 경향을 가지는데, 노즐 출구에서의 속도장은 상대적으로 매우 불규칙한 특성을 보이는데, 이는 저압인 커먼레일 압력조건과 서로 상관되어져, 실제 분사시에 저속분사영역이 존재하게 됨을 알 수 있었다.

6. 결 론

커먼레일 고압 분사용 피에조 인젝터의 니들의 급격한 거동을 모사한 내부 압력장의 변화에 따른 노즐 분공내 캐비테이션 발생정도를 Rayleigh-Plesset 방정식을 위주로 하여 이론적으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 해석에 적용된 3-D 대칭적 분공을 가지는 노즐형상 및 계산 격자는 본 연구에서 적용된 비정상 캐비테이션 모델을 적용한 해석에 있어서, 수렴시간과 정확성에 별 다른 문제가 없음을 확인할 수 있었다.
- (2) 작은 캐비테이션 기포에 대한 생성 모델링은 매우 어렵기 때문에, 이에 대한 모델링보다, 이미 구한 노즐 내부 압력장(정상상태해석)을 바탕으로 하여 기포의 수밀도의 변화를 통한 캐비테이션 기포의 성장과 소멸과정을 해석하는 방식(비정상상태해석)이 타당함을 알 수 있었다.
- (3) 노즐 분공 내부에 형성된 압력 강하의 영향으로 인해, 기포 핵으로부터 성장한 캐비테이션 기포는 하류로 이동하면서 소멸과정을 겪게 되는데, 특히 분사압이 상대적으로 큰 경우에 빨리 소멸과정이 진행되는데, 노즐 분공 출구에서 미처 빠져 나가지 않은 큰 기포가 존재함을 알

수 있었다.

(4) 노즐 섹 체적 내에서 생성된 연료유동의 유선 형태를 볼 때, 매우 불규칙한 상하 방향의 심한 변형을 가지는 유동 특성으로 인하여 분공지름을 통과할 때 순간적인 유량변화에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

(5) 본 연구를 통해 얻어진 해석결과를 이미 구한 실험결과와 비교한 결과, 분공 출구에서의 속도장 분포특성 결과는 실제 분사속도에 미치는 영향을 파악하기에 타당함을 알 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) S. P. Edwards, A. D. Pilley, S. Michon and G. Fournier, "The Optimization of Common Rail FIE Equipped Engines Through the Use of Statistical Experimental Design, Mathematical Modelling and Genetic Algorithms", SAE 970346, 1997.
- 2) J. Abthoff, F. duvinage, T. Hardt, M. Kramer and M. Paule, "The 2-Stroke DI-Diesel Engine with Common Rail Injection for Passenger Car Application", SAE 981032, 1998.
- 3) C. Fetters, and A. Leipertz, "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, 2001.
- 4) C. Arcoumanis, M. Badami, H. Flora and M. Gavaises, "Cavitation in Real-Size Multi-Hole Diesel Injector Nozzles", SAE 2000-01-1249, 2000.
- 5) C. E. Brennen, Cavitation and Bubble dynamics, Oxford University Press.
- 6) E. Giannadakis, M. Gavaises, H. Roth and

- C. Arcoumanis, "Cavitation Modelling in Single-Hole Injector Based on Eulerian-Lagrangian Approach", To be published in conference on thermo & fluid dynamic processes in diesel engines, October, 2004.
- 7) C. W. Hirt and B. D. Nicholls, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Comput. Phys., Vol. 39, pp.202~225, 1981.
- 8) J. W. Lee, J. W. Bae, H. N. Kim, K. Y. Kang and K. D. Min, "Effect of Injection Hole and Needle-driven Characteristics on Pilot Spray in High Pressure Injector with Common-rail Injection System", Transaction of ILASS-Korea, Vol. 9, No. 1, pp. 8~14, 2004.