



직분식 디젤엔진의 흡입·압축 행정시 엔진 실린더 내의 비정상 유동 해석

Transient Flow Analyses of the Intake and Compression Processes
In Direct Injection Engines

주 경 제*¹, 박 형 구*²

K. J. Joo and H. K. Park

The transient flow fields in direct injection engines were analyzed by using the STAR-CD CFD code during the intake/compression processes. The analyses were focused on the computation grid generation by using the IC3M code which is a pre-developed and especially well adapted for the analyses of internal combustion engines. The results showed that the used grid generation technique was well suited for the flow analyses on any internal combustion engines.

Key Words: 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), PISO 알고리즘, STAR-CD, ICEMCFD Diesel Engine.

1. 서 론

컴퓨터 성능과 그에 따른 소프트웨어의 발달로 최근 들어 컴퓨터를 이용한 해석 방법의 중요성이 점차적으로 확산되어 가고 있다. 특히, 차량개발과 같은 제작 초기 비용이 많이 소요되는 부분에서 전산유체역학의 해석 방법의 기대수준은 점점 더 높아지고 있다. 컴퓨터를 이용한 해석 방법의 큰 장점은 개발기간의 단축과 비용 절감이다. 또한 가상엔진(Virtual Engine)의 개념을 도입하므로 이는 다양한 해석을 통해 최적화, 시작엔진의 제작 방향 제시 등에 사용되고 있다.

CO₂의 국제 규제 강화로 모든 승용차 제조업체에서는 승용차용 디젤엔진에 관심을 갖게되었다. 일반적으로 승용차에 적용되는 디젤엔진은 HSDI(High Speed Direct Injection) 디젤엔진이다. HSDI 디젤엔진은 1,000~4,000 rpm 정도의 넓은 운전영역을 요구하는데, 직접분사식 디젤엔

진은 이러한 넓은 속도영역에서 양호한 혼합기를 형성하는 것은 매우 어려운 일이다.

디젤엔진에서 연료와 공기는 흡기포트의 스윙 유동과 연료 분사시스템의 분사압력에 의한 연료의 미립화에 주로 영향을 받아 혼합과 연소가 이루어진다.

왕복동 기관의 실린더내의 유동현상들은 공기의 유입, 연료의 분사 및 혼합기체의 확산, 압축 과정, 연소현상에 수반되는 화학적 반응, 열전달 현상 등 복잡한 양상을 띠고 있다. 이러한 현상 중에서 기관의 성능에 가장 큰 영향을 주는 인자 중의 하나가 실린더 내의 흡입과정과 압축과정의 유동특성이다. 실린더 내의 흡입·압축과정의 유동특성을 명확히 규명하는 것은 기관의 성능 향상을 위한 중요한 열쇠가 되어오고 있다.

실린더내의 유동특성은 흡입구의 형상, 연소실의 구조, 밸브의 크기, 위치 및 개폐조건, 연소정도 및 점화 시점, 디젤기관의 경우 분사 노즐의 위치, 각도 등 여러 인자에 의해 좌우된다. 연소실 내부유동은 기관의 출력 및 배기가스의 조성

1) * 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

2) * 성회원, 전남대학교 기계공학과

에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구는 우수한 운전 특성과 배기 특성을 지닌 기관의 개발을 위해 중요하다.

디젤기관에서는 연소실 내부유동의 난류강도를 증대시켜 흡입된 공기와 연료의 혼합을 빠르고 원활하게 하고 착화 후 화염의 확산속도를 증대시키기 위하여 스윙을 이용한다. 또한 흡입행정 중 생성된 텀블유동은 압축과정을 거치면서 감쇠되고 깨어져서 난류에너지로 변환되어 연소율을 증가시킨다.

엔진의 연소실 및 엔진시스템에서 일어나는 복잡한 현상을 연구하기 위해서는 LDV, PIV 등의 계측기구를 이용한 많은 실험과 연구가 진행되고 있으나, 실험 장치의 구성 및 측정에 많은 시간과 비용 및 측정자에 따른 오차 또한 포함하고 있어 어려움이 많다.

한편 CFD를 이용한 연구는 물리적 타당성을 갖춘 다차원 수치해석 모델의 개발과 엔진의 운전 조건 및 복잡한 형상의 흡입 포트 밸브계를 포함한 계산영역에 대해서도 비구성 격자계를 이용한 계산이 가능하게 되었다. 그러나 실제 엔진의 경우 연소실 및 밸브 시스템의 형상이 복잡하며, 전산해석을 하기 위한 격자생성에 있어서 많은 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 엔진격자 생성시간의 단축과 흡입 과정 중 연소실내의 유동형태, 압력 분포 및 각각의 밸브와 포트에 발생하는 난류에너지의 변화를 관찰하며, 이러한 요소들이 연소실내 유동장에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

2. 본 론

2.1 엔진 제원

본 연구에서 사용된 디젤엔진은 실험 모델과 실제 모델로 나누어 해석을 하였고, 각각의 엔진 제원은 Table 1 과 같다.

2.2 지배 방정식

지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{U}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_j U_i - \tau_{ij}) \\ & = \frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 \sqrt{g} 는 metric tensor 의 determinant를 나타낸다. 내연기관 연소실내의 유동은 밸브선단 및 밸브 주위의 연소실 벽면에서 유동박리가 발생하며, 회전 및 재순환 유동이 존재하는 아주

(단위: mm)

| 엔진 | Single valve type | 4 valve type |
|---------------------------|-------------------|--------------|
| Bore | 100 | 83 |
| Stroke | 80 | 92 |
| Maxium Intake Valve Lift | 8.4 | 7.85 |
| Maxium Exhaust Valve Lift | 9.0 | 7.955 |
| Compression Ratio | 14.3 | 17.7 |

Table 1. Engine 제원

복잡한 유동의 형태를 가지고 있다. 이런 복잡한 유동장 해석에서 난류량들에 대한 정확한 모델링은 전산해석결과와 정확성에 크게 영향을 준다. 본 연구에서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였고, 난류 운동에너지 k 와 난류 운동에너지 소산율 ϵ 대한 지배방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j k - \frac{\mu_{ij}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) \\ & = \mu_t (P + P_b) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{여기에서 } P = 2S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

$$P_B = -\frac{g}{\sigma_H} \frac{l}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j})$$

$$= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} [\mu_t (P + C_{\epsilon 3} P_B) - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}] - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_{\epsilon 1} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

Turbulent Viscosity 와 $\kappa - \epsilon$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\mu_t = f_{\mu} C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

κ 및 ϵ , l 의 상호 관계는 와 $\kappa - \epsilon$ 모델에 사용된 상수들은 Table 2 와 같다.

$$\epsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (6)$$

| C_{μ} | σ_{κ} | σ_{ϵ} | $C_{\epsilon 1}$ | $C_{\epsilon 2}$ | $C_{\epsilon 3}$ | $C_{\epsilon 4}$ | k | E |
|-----------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|-----|
| 0.09 | 1.0 | 1.22 | 1.44 | 1.92 | 0.0 or 1.0 | -0.33 | 0.42 | 9.0 |

Table 2. Coefficients of $\kappa - \epsilon$ Model

2.3 해석 방법 및 격자 생성

본 연구에서는 엔진 연소실내의 흡입·압축 과정의 비정상상태 유동을 이동격자를 이용하여 계산하였다.

사용된 전산유체 코드는 STAR-CD로 3가지 형태의 이동격자 계산 모델을 포함하고 있다. 엔진의 움직임을 무리 없이 모델링 하기 위해서 Cell Addition and Deletion 기법을 이용하였다.

전산해석에 있어서 가장 많은 시간을 필요로 하고, 해석의 정확성을 결정하는 것이 격자생성이다. 기존에 엔진 설계와 개발을 위해서 연구된 전산해석의 시간은 대부분 엔진의 성능을 결정하는 복잡한 형상의 포트와 헬리컬 밸브, 및 밸브 시트, 커튼 등 Structured Grid를 사용하기 힘든 부분의 격자를 생성하는데 많은 시간을 소비하였다. 복잡한 엔진형상에 Unstructured Grid를 사

용할 경우 각각의 격자사이의 연속성이 문제가 되어 만족스러운 결과를 얻을 수 없었다.

본 연구에서 이용된 해석모델의 격자생성은 Rapid Mesh Generation 의 개념을 도입하므로 엔진 설계 및 개발 시 얻고자 하는 엔진의 유동 형태 분석을 빠른 시간에 해석하고, 엔진 개발 기간을 단축할 수 있음을 보여 주고자 한다.

사용된 해석모델은 각기 다른 형상의 포트와 밸브를 가지고 있으며, 배기행정 마지막에 보여지는 밸브 오버랩 형상을 모사하여 실제 왕복엔진의 유동장 형태를 해석하였다. 각 엔진 부의 격자생성 형태는 엔진의 움직임을 모사하는 부분은 Hexa 형태의 격자를 생성하고, 형상이 복잡하고 관심이 높은 형상에는 Tetra 형태의 격자를 적용하였다. 엔진 연소실 내 유동장의 정확한 형상을 계산하기 위하여 연소실 벽면은 Prism 형태의 격자를 사용하므로 난류강도의 변화에 따른 연소실 내 유동장을 분석하였다.

사용된 엔진 모델은 격자 전문 생성 프로그램인 ICEMCFD를 이용하였고, 특히 Rapid Mesh Generator 인 IC3M로 엔진의 이동격자를 생성하였다.

비정상유동해석을 위해서는 PISO 알고리즘을 사용하였다. 격자를 생성하기 전 해석 대상의 엔진의 밸브는 닫힌 상태를 유지하며, 피스톤은 상사점에 위치하게 한다. 생성된 격자수는 Single valve DI 엔진은 피스톤이 하사점에 이르렀을 때 약 500,000개이고, 4-valve DI 엔진은 약 700,000 개 이다. 특히, 연소실 내의 스윙과 텀블을 잘 표현하기 위하여 Bowl 형상과 연소실 내부에 많은 격자를 생성하였다. 입구 경계조건은 일정한 대기압 압력조건으로 설정하여 계산을 수행하였다.

격자가 생성된 해석모델을 전산해석 프로그램인 STAR-CD로 읽어들인 후, aspect ratio 및 wrapage, skewness 등을 조사하여 격자의 생성이 계산에 적합한 지 검사과정을 거쳐서 만약 계산에 적합하지 못한 부분이 발생했을 시 격자생성의 재조정과정을 수행했다. 여기서 aspect ratio란 생성된 cell의 가장 작은 변의 길이에 대한 가장 긴 변의 길이의 비로 정의되는 값으로

써 기하학적 계산 오류의 확산을 격감시키기 위하여 일정한 값 이하로 제한된다. 또한, wrapage angle은 cell 의 뒤틀림 정도를 나타내는 값으로 일정한 값의 제한성이 수반된다.

해석 대상인 디젤엔진은 배기 행정 말기부터 압축 상사점 전까지 계산을 수행하였다. 해석된 엔진모델의 피스톤 회전수는 2000 rpm으로 같게 하였다. 계산시간 간격은 Single valve DI 엔진은 CA (Crank Angle) 0.25 즉 2.1×10^{-5} sec 이고, 4-valve DI 엔진은 CA 0.175로 1.05×10^{-5} sec으로 설정하였으며, 계산은 workstation 인 RS6000를 사용하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

해석모델의 격자 생성 모양은 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. 실험 해석모델인 Single valve DI 엔진과 실제 해석모델인 4-valve DI엔진의 Bowl형상이 다르며, 각 모델의 격자 생성시 Bowl과 실린더와 접하는 Partial Boundary Part의 격자 간의 연속성을 검사하는 부분이 중요하다. (Fig.6)

계산은 Single valve DI 엔진은 CA 340 °와 4-valve DI 엔진은 CA 335 °에서 시작하였다. Fig. 3 (CA 345 °)과 Fig. 4(CA 363 °)는 엔진의 행정 중 배기 말기에 해당하는 부분으로 배기 밸브와 흡기 밸브의 오버랩 되는 현상을 모사하였고, 배기 밸브에서 흡기 밸브 쪽으로 Back flow 되는 현상을 볼 수가 있다. 특히, Fig. 4 에서 배기밸브와 배기 포트 방향으로 난류 에너지가 증가함과 Fig. 3 에서는 배기 밸브 상단에 높은 압력이 분포함을 알 수가 있다.

Fig. 5 (CA 412 °) (a)는 흡입 행정 시 흡기 밸브에서 실린더 내로 강한 스윙이 발생함을 볼 수가 있으며, 밸브 시트 영역에서는 속도 분포가 Jet와 같은 유동 형태를 보이며 유입 유동장이 실린더 벽면에 부딪침으로 실린더 벽면의 압력이 증가함을 볼 수가 있다. 더 나아가 Bowl 영역에도 흡입유량의 영향을 받아 스윙이 생성되고, 흡기 밸브 상단에서 흡기 포트쪽으로 압력이 상승함을 알 수가 있다.

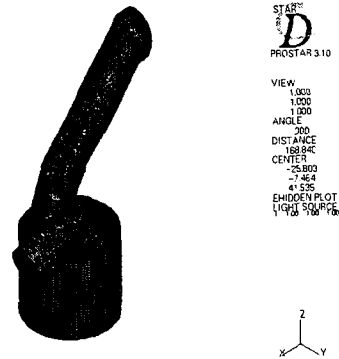


Fig. 1 Singel-valve DI engine

또한, 흡입 행정시 유동장이 밸브와 충돌함으로 밸브 위면에서 압력이 크게 증가한다. 이것은 밸브가 유동장을 방해하는 요소이므로 적절하다.

Fig. 5 (b) 의 4-valve DI 엔진에서 각 밸브로부터 실린더 안으로 유입되는 유동 형태는흡기 밸브 부분은 시계방향, 배기부분은 반시계 방향으로 유동형태가 형성됨을 알 수 있다.

Fig 5 (d) 와 같이 흡기밸브에서 연소실내 로 유동이 유입될 때 난류에너지가 밸브 시트링에서부터 실린더 안쪽으로 증가됨을 볼 수가 있다.

전산해석과정 중 형상이 복잡한 4-valve 엔진의 시간 증가량을 작게한 이유는 실린더와 Bowl을 이루는 격자의 성질이 다르고, 각각의 적절한 aspect ratio에 따른 격자 생성과 연속성을 유지하기 위해서이다. (Fig. 6) 만약 이러한 현상을 고려하지 않으면, 비정상 해석이며 이동 격자 개념을 이용한 해석에서 오류가 발생한다. 전산해석에 사용된 Cell Addition and Deletion 기법은 엔진의 각각의 Crank angle에 맞게 시간 증가분을 설정하고 정해진 Routine에 따라 기존의 격자를 생성과 소멸하기 때문에 특히, 복잡한 엔진 형상에서 격자생성시 한 종류의 격자형태만을 적용한다는 것은 많은 오류를 포함하게 된다. 그러므로, 엔진 형상이 요구하는 각각의 격자형태를 적절히 조합하여 생성하여야한다. 이렇게 최적화된 격자형상에서 전산해석의 정확성을 높이는 방법으로 기본 알고리즘인 PISO 알고리즘의 Corrector step을 증가시킴으로 전산해석 중

에 발생할 수 있는 오류의 범위를 최소화하였다. 해석 모델에 사용한 Rapid Mesh Generation의 개념은 각기 다른 엔진형상의 문제에서 연구 개발을 위한 시작 방향을 빠른 시간 내에 제시함으로써, 그 동안 새로운 엔진개발 시 많이 소요되었던 격자생성 시간을 줄이므로, 전산해석의 효율성과 경제성을 증대할 수 있다고 생각된다.

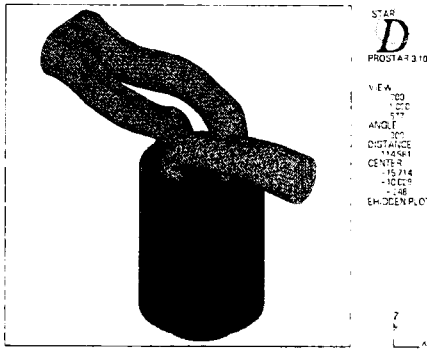
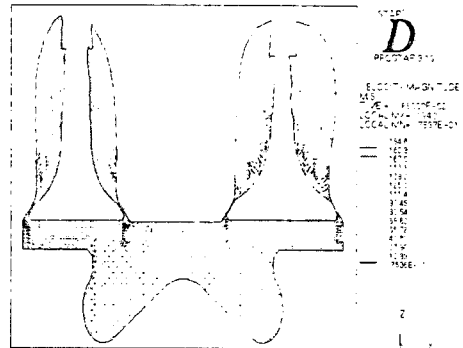
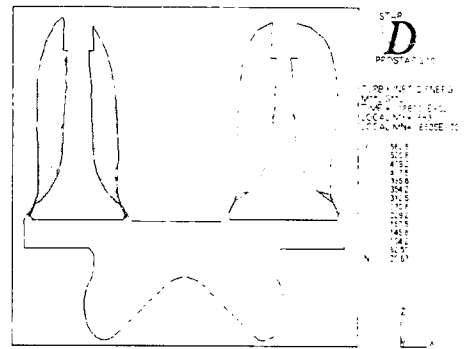


Fig. 2 4-valve DI engine

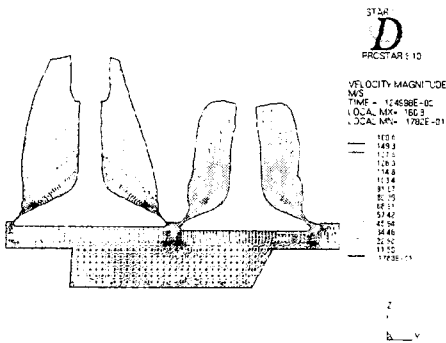


(a) velocity field

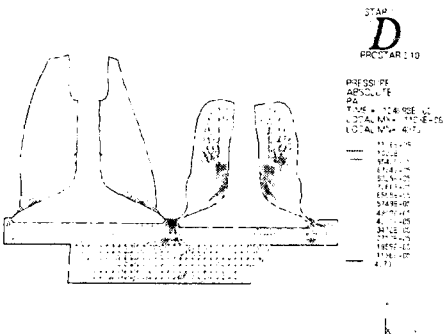


(b) Turbulence energy field

Fig. 4 4-valve DI engine (363 CA)

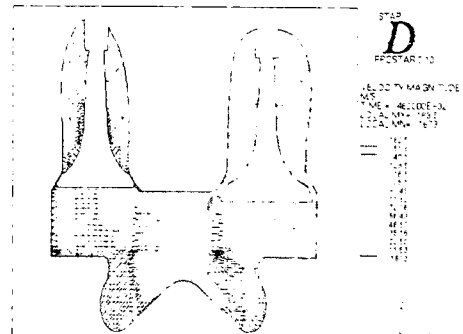


(a) Velocity field

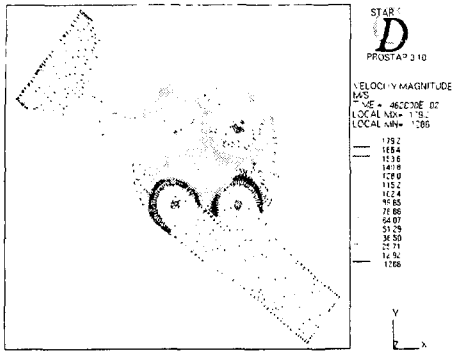


(b) Pressure field

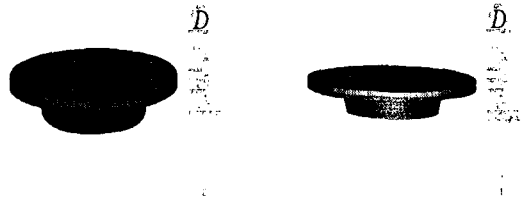
Fig. 3 Single valve DI engine (345 CA)



(a) Velocity field

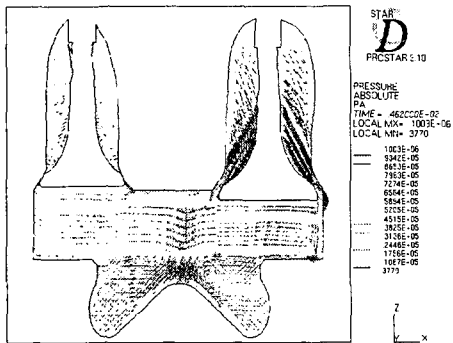


(b) Top view

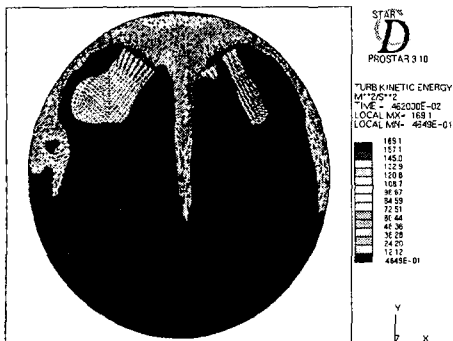


(a) 4-valve DI engine (b) Single valve DI engine

Fig. 6 The mesh plot of cylinder bottom and bowl



(c) Pressure field



(d) Turbulence energy field

Fig. 5 4-valve DI engine (412 cA)

4. 결론

본 연구에서는 엔진 성능에 매우 밀접한 관련이 있는 흡입·압축과정을 비정상상태로 해석함으로써, 실제 엔진과 같은 유동장을 모사하였고, 빠른 격자생성 개념을 도입함으로써 전산해석의 효율성을 증대하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전산 유체 코드를 이용하여 엔진 내 비정상상태 유동장을 해석함으로써, 전산유체 코드의 효율성을 검증하였다.
- 2) 빠른 격자생성 개념을 소개함으로써, 기존의 초기 엔진개발 시 소요되었던, 격자 생성 시간을 감소시키며, 전산해석의 효율성을 증대할 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 흡기 밸브와 배기 밸브의 오버랩 되는 과정이 디젤엔진 내 강한 난류를 형성해 줌을 알 수 있었다.

본 연구모델에서는 연소를 배제한 엔진 내 유동장을 해석하였다. 실제엔진의 유동에서는 연소를 포함하고 있으며, 연소 전후의 연소실 내 유동장을 해석하는데는 아직까지 많은 전산해석의 제약성이 있다. 이러한 결론을 바탕으로 향후 연구 방향으로 연소를 포함한 엔진 유동장 해석에 관한 연구가 필요하며, 특히 폭발 전 후의 엔진 연소실 내 유동장 형태의 해석과 연료의 미립하



가 연소실내 유동현상에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

참고 문헌

- [1] 민경덕, “ CFD를 이용한 승용차용 HSDI 디젤엔진 해석”, 자동차공학지(2001/2), pp.27-33
- [2] 양희천, 이준식, 유정열, 최해천, “회박 엔진 연소실내의 유동해석(I)”, SAE NO. 953792 (1995), pp.188-198
- [3] 김영남, 이경환 “ SI 엔진의 밸브 리프트에 따른 흡입 포트 및 실린더 내 정상 3차원 유동장 해석”, SAE NO.953769(1995), pp.82-89
- [4] 김미로, 조남효 “ CFD를 이용한 직접분사식 엔진의 비정상해석” , STAR-CD USERS' CONFERENCE (2000), pp.55-60
- [5] CD-Adapco, “ STAR-CD Version 3.15 User Guide”, Computational Dynamics(2001)