

GDI 엔진 개발에서의 CFD 이용

CFD Application in GDI Engine Development

최 회 명 / Hoimyoung Choi
서울대학교 박사후 과정
Seoul National University



민 경 덕 / Kyoungdoug Min
서울대학교 교수
Seoul National University

직접 분사식 가솔린엔진(Gasoline Direct Injection Engine, GDI Engine)은 엔진 실린더 내에 연료를 직접 분사함으로써 기존의 포트 분사식 가솔린엔진(Port Fuel Injection Engine, PFI Engine)과 구분되며, 엔진의 운전 조건에 따라 다양한 운전 모드로 최적의 연소 조건을 형성하여 열효율과 연료 소비율을 향상시키는 특성을 갖는다. GDI 엔진의 이런 특성들을 구현하기 위해서는 각 운전 조건에 맞는 정확한 제어를 해야 할 뿐만 아니라 기존의 가솔린엔진보다 더 정확한 3차원적 예측 능력이 필요하다. 그런데 이 조건들을 모두 충족시키고 원활한 점화와 안정된 연소를 위한 엔진 형상과 연료 분사의 최적 조건을 찾기에는 기존의 엔진 개발 방법인 단순한 모델 테스트나 유사한 조건에서의 측정 실험만으로는 사실상 불가능하다. 따라서 실험의 한계를 극복하고 엔진의 개발 방향을 제시하는데, 3차원 전산 유체 해법(Computational Fluid Dynamics, CFD)이 점차 중요해지고 있다. CFD는 엔진내 열유체 현상에 대한 각종 모델의 발전

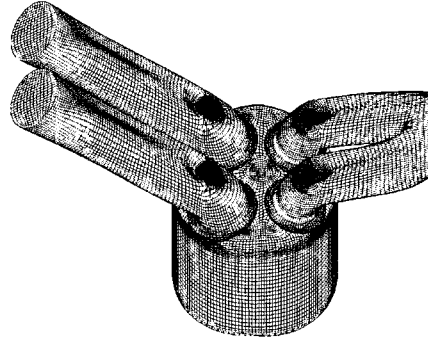
과 함께 더욱 그 적용 범위가 넓어지고 있으며, 이를 실험과 병행하면 실험만을 이용할 경우보다 짧은 설계 시간과 적은 비용으로 엔진을 개발할 수 있다. 또한 실험으로는 상상할 수 없었던 엔진의 형상들을 자유롭게 시험해 볼 수 있으며 이에 따라 보다 더 새로운 엔진의 개발에 효과적이라 할 수 있다. 더불어 과거와는 다르게, 최근의 강력하고 저렴한 컴퓨터 환경은 전산 유체 해석을 일상적인 업무로 사용할 수 있는 조건을 마련해 주고 있다. 본고에서는 GDI엔진에 대한 3차원 CFD 기법과 실제 적용한 예를 간단히 소개하겠다.

3차원 계산 격자

CFD를 통한 직접 분사식 가솔린엔진의 모사는 3차원 연소실과 피스톤 형상의 이동 격자 생성, 유동 및 분무로 인한 혼합기 형성 해석, 성층화 연소 해석 부분으로 나눌 수 있다. 일반적으로 계산 격자의 정확도와 품질은 CFD 결과의 정밀도에 절대적인 영향을 미치

며, 계산 격자의 수는 계산 시간을 결정하게 된다. 따라서 기존의 가솔린엔진보다 복잡한 형태를 지니는 연소실 및 피스톤 형상을 정확하게 구현하고 계산 격자의 품질을 유지하면서도 계산 격자의 수를 최소화하는 격자 생성 과정이 필수적이다. 과거의 엔진 이동 격자 생성은 많은 노력과 시간으로 요하는 작업이었으므로, 이로 인해 엔진의 비정상 CFD 해석은 제한적으로 사용될 수밖에 없었다. 그러나, 1990년대 말부터 여러 가지 엔진 전용의 계산 격자 생성 프로그램이 본격적으로 상용화되었는데, 대부분 기존의 상용 CFD 프로그램과 연계되어 사용되도록 Package 형태로 개발되어 있다. 일반적으로 이러한 프로그램들은 복잡한 엔진의 형상을 표현하기 위해 CAD 프로그램으로부터 형상 자료를 입력받아 이로부터 정의된 3차원 엔진 내부 공간을 육면체(Hexahedron), 또는 오면체(Tetrahedron) 격자로 채우거나 엔진 형상에 적합하게 미리 정의된 Template 격자의 외형을 CAD 형상 자료에 투영(Projection)하고 내부의 격자점(Vertex)를 재배열하는 방법을 사용한다. 또한 흔히 활용되는 정상 상태 흡입 유동 해석과는 달리 실제 엔진 사이클에 대한 비정상 해석에는 피스톤과 밸브의 운동을 표현하는 것이 필수적이다. 이를 처리하는 방법은 프로그램마다 다소 다른데, 어떠한 프로그램이든 사용자가 입력한 회전 속도, 스트로크 등의 엔진 사양과 밸브 리프트를 이용하여 피스톤과 밸브의 움직임을 자동적으로 처리해준다. 이와 같이 CAD로부터 생성된 엔진 형상을 그대로 이용하므로 예전에 비해 업무의 표준화 및 전산화가 용이해졌으며, 대부분의 작업이 자동 또는 반자동으로 이루어지므로 계산 격자 생성의 작업 효율이 크게 높아졌다. <그림 1>은 STAR-CD와 호환되는 ES-ICE 프로그램을 이용한 GDI 엔진 격자의 한 예이다.

엔진의 복잡한 3차원 형상을 정확하게 구현하기 위해서는 격자 수가 많을수록 유리하나 컴퓨터의 메모리 용량과 계산 시간을 고려할 때 실용적으로는 수십만 개 정도가 적당하며, 이때, 계산 격자의 한 변의 크기



<그림 1> ES-ICE로 만들어진 GDI 엔진 격자의 예

가 1 mm 정도이면 유동, 연료 분사 및 연소 과정에 있어서 공학적으로 충분히 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 다만, 엔진의 미세한 형상 변화에 의한 유동 변화를 예측하거나, 분무 거동 및 복잡한 화학 반응에 대한 보다 정밀한 예측이 필요한 경우에는 보다 작은 계산 격자가 요구될 수 있는데, 이러한 경우, 증가한 계산 격자를 처리하기 위하여 병렬 계산을 이용하는 것이 효과적이다. 현재 일부 CFD 프로그램에서 비정상 엔진 CFD에 대한 병렬 처리 기능을 제공하고 있다.

유동 해석 및 혼합기 형성

GDI 엔진에 대한 3차원 유동 해석은 기존의 가솔린 엔진 및 디젤 엔진과 같은 방법으로 수행되므로 국내에서도 이미 일부 활용되고 있다. 다만, 처음부터 균일한 혼합기를 계산하게 되는 기존 가솔린엔진의 유동 해석이나 압축 말기까지 유동만을 해석하게 되는 디젤 엔진과는 달리, 유동 해석과 동시에 연료 분사에 의한 혼합기 형성 해석이 이루어지는 것이 GDI 엔진에서의 특징이다. GDI 엔진에서의 혼합기 형성 방식은 크게 스월(Swirl) 유동을 이용한 방식, 텀블(Tumble) 유동을 이용한 방식, 스퀴시(Squish) 유동을 이용한 방식으로 나눌 수 있고, 각각의 방식이 연소실 형상, 인젝터와 점화 플러그 장착 위치, 연료 분사 방향, 분사 시기 및 분무 형상 등의 여러 설계 인자들의 조합에 따라 수많은 변형이 가능하다. 특히 전 부하 시에는 균일

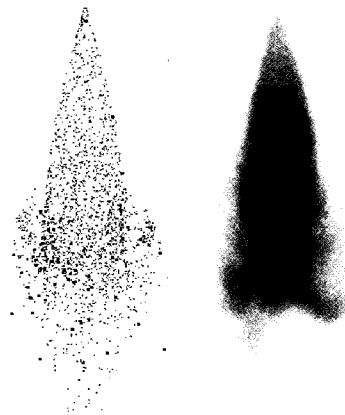
혼합기를 형성하기 위해 조기 분사가 이루어지는 반면 부분 부하 시에는 늦은 분사를 통한 성층화 혼합기를 형성하는데, 분사 시기에 따라 연소실 내의 공기 밀도와 온도의 차이에 의해 분무의 발달 길이와 분무의 증발 속도, 분사각 등의 분무 형태가 달라지게 된다. 이러한 모든 조건을 최적화하여 엔진의 형상과 분사 조건을 결정하는 일은 실험만을 통하여서는 불가능하다 할 수 있다. 따라서, 과도한 시행착오와 시간, 비용을 절약하고 개발 과정에서의 설계 방향을 제시하는 데에 3차원 CFD를 매우 유용한 도구로 사용할 수 있다.

GDI 엔진의 혼합기 형성에는 어느 방식이나 연료 분무의 모사가 필요하다. 일반적으로 Hollow-Cone 분무가 많이 연구되고 있으나²⁾ 최근에는 Slit-Type 분무³⁾ 등 다양한 형태의 분무 형상이 관심의 대상이 되고 있으며, 이러한 연료 분무의 정확한 모사에 관한 연구가 현재 발표되는 GDI 엔진 CFD 관련 논문 중 가장 많은 부분을 차지하고 있다.

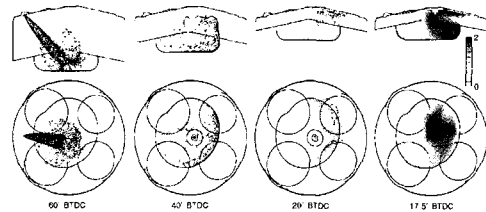
CFD에서 분무의 해석은 분산된 상(Phase)인 연료 액적과 주위의 연속적인 상의 유체가 서로 운동량, 질량 및 열전달 효과를 주고받는 과정을 모사하게 되는데, 1980년대부터 활발하게 연구되어 온 디젤 분무 모델과 근본적으로 동일하다. 분무 모델에서 난류 유동내의 분산된 상은 진동하는 난류 유동장의 영향으로 불규칙적인 운동을 하며 충돌(Collision) 혹은 결합(Coalescence) 등의 효과와 같은 상호 작용을 겪게 되는 동시에 연료 액적이 증발하는 등의 물질 전달 과정에 의해 액적의 크기가 변하게 된다. 우선 노즐로부터 분사된 연료는 주위 공기 속으로 이동하면서 액적과 주위 유동과의 상대 속도에 의해 액적 주위에 발생하는 불균일한 압력장 속에서 변형되게 된다. 이 과정에서 공기 항력에 의해 액적은 변형 과정을 거쳐 작은 액적으로 분열하게 되는데, 이러한 Break-Up 현상에 의해 형성된 액적이 주위 유동과 상호 영향을 주고받으며 전진하다가 연소실 벽 또는 피스톤에 충돌하게 되면, Weber수, 액적 및 벽면의 온도, 입사각 등의 입사 조건에 따라 벽에 붙어 연료막을 형성하거나 여러

개 또는 하나의 입자로 튕겨 나오게 된다. 이와 같은 충돌이 일어나는 경우에는 연료 분무가 충돌하는 벽면(주로 피스톤 보울)의 형상이 매우 중요하며 이와 연소실 내 유동, 연료 분무 형태의 상호작용으로 GDI 엔진의 혼합기 형성이 이루어진다. 이러한 연료 분무의 Break-Up, Collision/Coalescence, 벽면 충돌 및 연료막 형성에 대한 모델이 최근 20여년 동안 활발하게 연구되었고, 그 결과, 선진국 자동차 업체에서는 이러한 모델을 사용한 혼합기 형성 해석을 이미 활발하게 수행하고 있으며, 실제 개발한 GDI 엔진에 대한 실험과 CFD 결과의 검증이 다수 발표되었다.

〈그림 2〉는 GDI 분무의 측정 사진과 이를 모사한 CFD 결과를 비교한 그림이다. Break-up 모델은



〈그림 2〉 GDI 연료 분무의 CFD 계산 결과(좌)와 실험 측정 결과(우)의 비교(분사 후 4 ms, 분사압 10 MPa, 주위 : 대기압, 80℃)



〈그림 3〉 크랭크 각에 따른 연료 분무와 점화 시기의 달랑비 분포 (분사 시작 시기 : 80° BTDC, 평균달랑비 : 0.6)

Reitz와 Diwakar의 모델⁴⁾을, 액적 상호간의 충돌 모델로는 O'Rourke의 모델⁵⁾을 사용하였으며, 분사각은 30°이다. <그림 3>은 스윙조절밸브(Swirl Control Valve, SCV)를 가정한 흡입 유동에 압축 말기에 이소옥탄을 연료로 분사시킨 CFD 결과의 한 예이다.⁶⁾

연료 분무는 피스톤 보울 벽에 닿은 후 스윙 유동 및 피스톤 보울 벽을 따라 회전하면서 상승하여 점화 플러그 부근으로 이동하게 되며, 점화 시기에 이르러 연소실 가운데에 위치한 점화 플러그 주변에 연소 가능한 혼합기가 형성되어 있음을 알 수 있다.

성층화 연소 모델

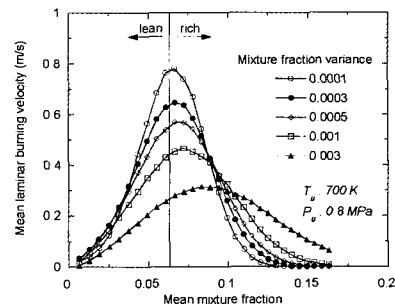
CFD를 통한 가솔린엔진의 균일한 혼합기에 대해서는 이미 많은 연구가 있어 왔고 실험과의 비교를 통하여 정량적으로 검증되어 왔다. 최근의 가솔린엔진의 예혼합 연소 과정 모사는 주로 반응 영역에서의 난류 화염소(Laminar Flamelet) 개념을 기반으로 발전되어 왔는데, G-Equation, Coherent Flame Model, Flame Area Model 등이 대표적이다. 이러한 연소 모델이 얼마나 화염 전파와 난류 유동의 상호 작용, 그리고 벽면에서의 화염 전파를 실제 모습에 가깝게 구현하는가가 중요한데, 지금까지의 연소 모델들을 이용한 가솔린엔진의 화염 전파에 대한 모사의 유용성은 실험 결과와의 비교를 통하여 어느 정도 입증되었다.

그러나 GDI 엔진의 조기 분사 방식의 경우는 균일한 혼합기로 볼 수 있으나, 늦은 분사 방식의 경우 성층화 혼합기의 형태를 갖추면서 연료가 농후한 지역에서 희박한 지역까지 다양하게 분포하므로 기존의 균일 혼합기 하에서 적용되는 연소 모델로는 한계가 있다.

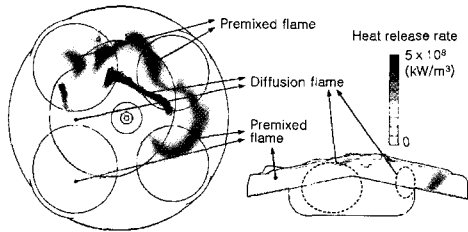
연소 과정에 대한 보다 정확한 모델 개발을 위해서 가장 중요한 것 중 하나가 연소율에 대한 계산 방법이다. 엔진 실린더 내부의 연소율은 난류 화염 속도로나 타낼 수 있으며, 이는 화학적 변수들과 층류 화염 속도의 함수이다. 따라서 층류 화염 속도를 정확히 알아내는 것은 연소에 대한 연구에 있어서 매우 중요하다. 특

히 내연 기관의 경우 고온, 고압 조건에서 연소가 일어나기 때문에 기존의 연구들처럼 대기압, 상온 조건에서의 결과들을 적용하는 것은 불가능하다. 고온, 고압 조건에서 층류 화염 속도에 대한 연구는 기존의 이론 당량비 부근의 균일한 혼합기 조건의 계산에는 비교적 유용하나, 희박하거나 농후한 혼합기하에서는 부정확한 값을 갖기 때문에 성층화 혼합기의 연소 모델에서 사용하는 데는 적합하지 않다. 따라서 넓은 당량비 범위에서 사용할 수 있는 층류 화염 전파 속도 관계식이 제안되고 있는 실정이다⁷⁾. 또한 층류 화염 속도는 국부적인 당량비의 함수가 되는데, 성층화된 혼합기내에서 공간적으로 대류, 확산에 의해 계산하려는 곳에서의 당량비는 시간에 따라 변동(Fluctuation)될 수밖에 없다. 따라서, 공간적인 당량비 분포와 동시에 그 변동 정도를 파악하는 것이 필요하며, 이에 의한 층류 화염 속도의 변화를 예측하여야 한다. <그림 4>는 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 이용하여 당량비 변동에 의한 층류 화염 속도의 변화를 나타낸 그림이다⁸⁾. 당량비의 변동(혼합기 분율의 분산)이 클수록 계산 격자내에 이론당량비의 혼합기가 존재할 확률이 낮아지므로 층류 화염 속도의 크기가 작아진다.

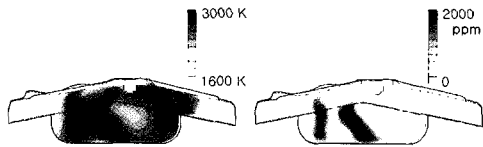
성층화 연소 현상에서는 예혼합 연소와 함께 농후한 영역에서 연소되지 않는 연료가 존재하여 확산 연소가 일어나는데, 이를 예측하기 위하여 기존의 예혼합 연소 모델에 PDF 개념을 이용하거나 연소 반응을 관계



<그림 4> 혼합기 분율과 그 분산에 대한 이소옥탄의 층류 화염 속도



〈그림 5〉 성층화 연소 모델로 예측된 GDI 엔진의 예혼합 화염과 확산 화염(15° ATDC, 점화시기 : 17.5° BTDC)



〈그림 6〉 그림 5의 성층화 화염 구조에 의한 온도 분포(좌)와 질소산화물(NO) 발생량(우)

식을 Arrhenius 형식의 층류 연소항과 화염 전파항의 합으로 구성하는 등 몇가지 방법이 제시되었으나,⁹⁻¹³⁾ 대부분 확산 연소와 관계된 화학종의 분포와 이로 인한 복잡한 화염 구조를 예측하지 못하고 있다. 현재까지는 여러가지 GDI 엔진의 연소 모델이 활발하게 개발중이며, 실제 엔진 실험과 비교하여 이러한 GDI 연소 모델의 타당성을 검증하려는 시도가 다소 이루어지고 있는 상황이다.

한편, 예혼합 연소 모델과 확산 연소 모델을 결합하는 성층화 연소 모델이 제안되었는데, 예혼합 연소 모델에는 앞서 설명한 층류 화염 속도에 대한 당량비 변동 효과를 적용하고, 농후한 예혼합 연소의 기연 영역의 CO, H₂가 주위의 산소와 반응하는 확산 연소 반응¹⁴⁾을 고려하는 모델이다. 이 모델은 예혼합 연소 화염 후면에 남은 여분의 연료가 고온 고압에서 CO 및 H₂의 형태로 존재하는 사실¹⁵⁾에 바탕을 두고 있으며, 혼합기 분포에 따라 불균일하게 발생하는 CO와 H₂가 역시 불균일하게 분포되어 있는 산소와 만나 확산 화염을 이루게 되므로 혼합기 형태에 따른 확산 화염의 형상을 예측할 수 있다.

〈그림 5〉는 〈그림 3〉의 혼합기에서 계산된 성층화

연소에 의한 화염 구조를 나타낸 것이다.¹⁶⁾ 공간적인 당량비 분포에 따라 불균일하게 발달한 예혼합 화염의 전과 후면에 확산 화염이 존재하게 되며, 이러한 화염 구조는 〈그림 6〉과 같은 연소실 내 온도 분포와 질소산화물 발생 분포의 원인이 되는데, 성층화 연소에서는 화염 구조와 이에 따른 온도 분포의 정확한 계산이 질소산화물 등의 연소 배출물 예측에 필수적이다.

맺음말

이상과 같이 GDI 엔진의 CFD 해석 동향을 간단히 살펴보았다. CFD 분야는 컴퓨터의 발달과 함께 과거 10여 년 동안 급속한 발전이 이루어졌으며, 특히 최근 몇 년 동안에는 엔진에 쉽게 적용할 수 있는 전문 패키지 프로그램이 경쟁적으로 출현하여 보다 쉽게 이용할 수 있게 되었다. 과거에는 모델이나 프로그램의 제약으로 CFD의 개념과 각종 모델을 정확히 이해하고 있는 사용자만이 CFD를 활용할 수 있었으나, 이미 사용자 친화적인 소프트웨어 환경으로 전환되는 단계이므로, 곧 CFD에 대한 전문 지식이 부족한 연구자라도 유용한 해석 결과를 얻을 수 있는 환경으로 발전할 것으로 생각된다. 다만, 외국산 CFD 프로그램들이 엔진에 특화된 계산 격자 생성과 이동 격자 기능을 구비하고, 전/후처리 기능을 강화함으로써 더욱 시장 지배력을 공고히 하는 현실에서 자체 기술의 축적이 더욱 어려워지지 않을까 하는 우려를 떨칠 수 없다. 이러한 어려움 속에서도 일부 연구기관들이 분무, 연소 등의 모델 연구를 통해 자체적인 역량을 키워나가고 국제적인 협력 관계를 개척해 나가는 것은 고무적인 현상이다.

복잡한 변수의 영향을 고려하여 연소실 내 혼합기 형성을 최적화해야 하는 GDI 엔진의 개발에는 CFD를 이용하는 것이 효과적임은 의심할 여지가 없다. 앞으로 보다 정밀한 연료 분무 및 성층화 연소 모델의 개발과 더불어 엔진 개발 과정에서의 CFD의 역할을 기대해 본다.

(민경덕 교수 : kadmin@snu.ac.kr)

참고문헌

1. Zhao, F., Harrington D.L., and Lai M., Automotive Gasoline Direct-Injection Engines, SAE International, Warrendale, pp. 5, 12, 15, 56-58, and 97-100, 2002.
2. Joh, M. and Huh, K.Y., "Numerical Prediction and Validation of Fuel Spray Behavior in a Gasoline Direct-Injection Engine", SAE Technical Paper No. 2001-02-3668, 2001.
3. Nomura, Y., Miyagawa, H., Fujikawa, T., Tomoda, T., Kubota, M., and Abe, S., "Numerical Study of Mixture Formation and Combustion Processes in a Direct Injection Gasoline Engine with Fan-Shaped Spray", SAE Technical Paper No. 2001-01-0738, 2001
4. Reitz, R.D., and Diwakar, R., "Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays", SAE Paper No. 860469, 1986.
5. O'Rourke, P.J., "Collective Drop Effects in Vaporizing Liquid Sprays", Ph. D. Thesis, Princeton Univ., 1981.
6. 최희명, 직접분사식 가솔린 엔진의 성층화 연소 및 미연 연료 산화 모델링, 공학박사학위논문, 서울대학교, 2003.
7. 배상수, 민경덕, "상세화학반응기구를 이용한 탄화 수소 및 메탄올 연료의 층류 화염 속도 모델링", 대한기계학회 논문집 제 25권 제10호, pp. 1303-1310, 2001.
8. Choi, H., Kim, M., Min, K., and Lee, J.H., "The Stratified Combustion Model of Direct-Injection Spark-Ignition Engines", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 695-701, 2002.
9. Reising, J., Peters, H., Kech, J.M., and Spicher, U., "Experimental and Numerical Analyses of the Combustion Process in a Direct Injection Gasoline Engine", Int. J. of Engine Research, Vol. 1, No. 2, pp. 147-161, 2000.
10. Kech, J.M., Reising, J., Gindele, J., and Spicher, U., "Analyses of the Combustion Process in a Direct Injection Gasoline Engine", COMODIA 98, pp. 287-292, 1998.
11. Tatschl, R. and Riediger, H., "PDF Modelling of Stratified Charge SI Engine Combustion", SAE Technical Paper No. 981464, 1998.
12. Ranasinghe, J. and Cant, S., "A Turbulent Combustion Model for a Stratified Charged Spark Ignited Internal Combustion Engine", SAE Technical Paper No. 2000-01-0275, 2000.
13. Wallesten, J., Lipatnikov, A., and Chomiak, J., "Simulation of Fuel/Air Mixing, Combustion, and Pollutant Formation in a Direct Injection Engine", SAE Technical Paper No. 2002-01-0835, 2002.
14. Chung, S.H. and Williams, F.A., "Asymptotic Structure and Extinction of CO-H₂ Diffusion Flames with Reduced kinetic Mechanisms", Combustion and Flame Vol. 82, pp. 389-410, 1990.
15. Haworth, D.C., Blint, R.J., Cuenot, B., and Poinot, T.J., "Numerical Simulation of Turbulent Propane-Air Combustion with Nonhomogeneous Reactants", Combustion and Flame Vol. 121, pp 395-417, 2000.
16. 최희명, 김용태, 민경덕, "직접분사식 가솔린엔진의 성층화 연소 모델 개발", 한국자동차공학회 추계학술대회, 2003.