

가솔린 직분식 엔진에서 전산유체 해법 응용

허 강 열 교수 · 포항공과대학교 기계공학과

내연기관의 개발과 연구에 전산유체 해법이 응용된 것은 1980년대부터 미국 Los Alamos 연구소에서 개발한 KIVA 프로그램[1, 2]과 영국 Imperial College의 프로그램 [3]들로부터 시작되었으며 근래에는 상용 소프트웨어인 STAR-CD, FIRE 등이 산업 현장에서 유용한 설계 및 해석 도구로 자리잡아 가고 있다. 가솔린 직분식 엔진은 기존의 스파크점화기관과 디젤 기관의 장점을 취한 복합적 형태의 엔진으로서 이미 외국에서는 상용화가 이루어졌으며 국내 업체에서도 조속한 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

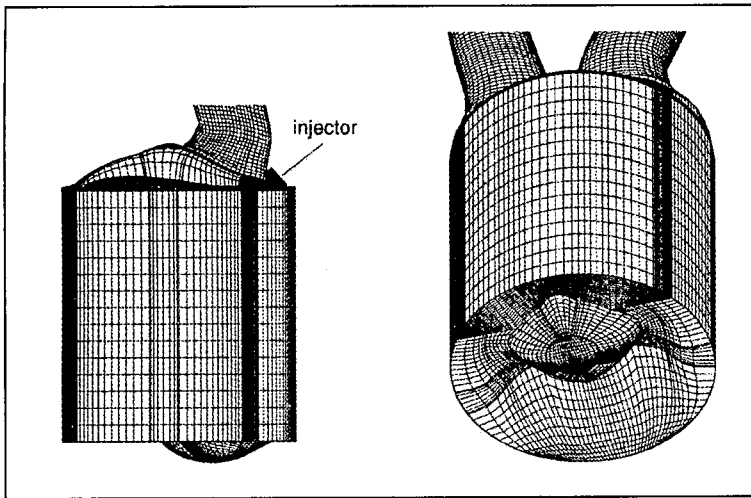
가솔린 직분식 엔진은 흡입 유동과 연료 분무의 3차원적 상호작용으로 인한 층상 혼합기 분포의 변화 과정을 활용하여 원하는 점화 시기와 위치에서 최적 혼합

기 분포를 형성해야만이 원활한 점화와 화염 전파를 달성할 수 있으며 연비 개선과 NOx 감소 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 유동과 연료 혼합기의 능동적 제어는 기존의 스파크 점화기관의 균일 혼합기나 디젤 분무의 착화보다 정확한 3차원적 예측 능력을 전제로 하며 개발 과정에서 직관에 의한 판단이 어렵고 실험 측정도 어려운 동시에 많은 제약이 따르기 때문에 전산유체 해법이 유용하게 활용될 수 있는 분야이다. 가솔린 직분식 엔진의 전산 모사는 크게 3차원의 연소실 형상과 피스톤, 밸브 운동 재현, 흡입 유동 해석, 분무 거동 해석, 스파크 점화 및 난류 연소 해석 부분으로 이루어진다.

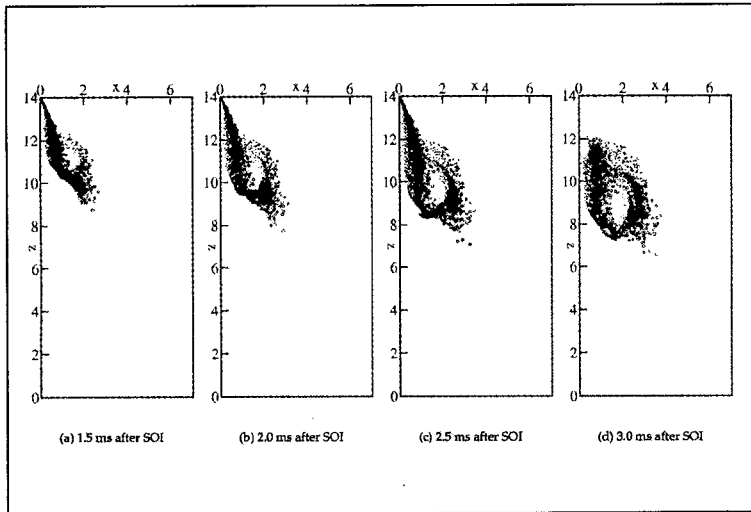
가솔린 직분식 엔진의 설계에서 가장 중요한 흡입 유동의 제어는 기존 스파크점화기관에서와 같이 흡입 포트와 연소실, 피

스톤 형상에 의해 이루어지므로 최적의 형상을 결정하기 위한 정확한 3차원 형상의 처리와 그에 따른 적절한 격자 생성이 요구된다. 정확하고 효율적인 격자 생성은 최종 전산유체 해석 결과의 질과 정확도를 결정하는 중요한 요인 중의 하나이므로 CAD에 의해 형상을 정의하고 이로부터 직접 격자를 생성할 수 있는 소프트웨어를 사용하는 것이 바람직하다. CAD와의 상호 호환성은 엔진 및 모든 자동차 부품의 표준화와 설계, 제조 과정의 자동화와 전산화를 위해서도 필수적이며 이미 산업 현장에서도 일반화되어 자리를 잡았다.

그러나 아직 열유동 해석 부분은 구조물 해석에 비해 어려운 점이 남아 있으며 상대적으로 발전의 속도가 느리지만 현재의 추세로 보아 가까운 장래에 급속히 확산될 것으로 전망된다.



〈그림 1〉 가솔린 직분식 엔진의 계산 격자



〈그림 2〉 직분식 압력-스월형 분사기에 의한 할로우-콘 분무 계산 결과

엔진 내부 구조에서 특히 흡배기 밸브는 복잡한 형상의 운동 경계면을 형성하므로 초기 전산 유체 해석에서 가장 어려운 부분으로 인식되었으나 최근에는 대부분의 소프트웨어에서 밸브의

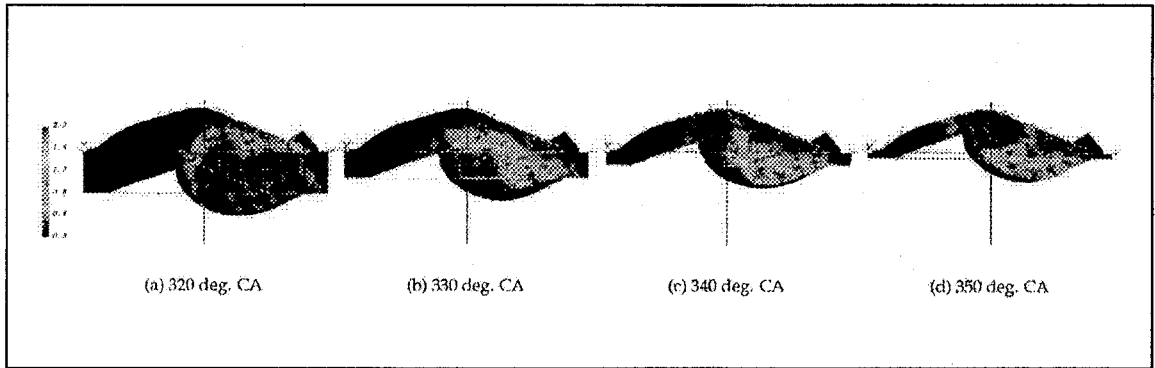
형상과 운동을 정확히 재현하는 것이 가능해졌다. 밸브 형상의 작은 차이도 흡입 유동에는 상당한 차이를 유발할 수 있으므로 격자 생성에 주의를 기울여야 한다. 흡입 유동 해석은 정상유동

리그에서 결과의 신뢰도가 상당 부분 입증되어 있으며 운전중의 과도 상태에서도 전체적인 유동 특성을 파악하는 데에 유용하게 활용될 수 있다.

가솔린 직분식 엔진의 연료 분무는 주변 공기와의 혼합을 용이하게 하기 위해 hollow-cone 형태로 분사되며 이와 같은 분무 거동에 대한 실험과 전산 해석 결과의 검증에 대한 연구가 최근 엔진 관련 학술회의 등에 발표되고 있다.

Hollow-cone 분무는 디젤에서의 solid-cone 분무와 달리 분사압이 상대적으로 작으며 일단 액막의 형태로 분사된 후 주변 공기와 자체 난류의 효과로 인해 작은 분무 입자들로 쪼개지게 된다. 분무와 피스톤 벽의 충돌을 활용하여 원하는 혼합기 분포를 얻고자 할 경우에는 분무-벽 충돌 현상에 대한 정확한 모델링이 요구된다.

일반적으로 분무 입자가 벽에 충돌하게 되면 입사 조건에 따라 벽에 붙어 연료막을 형성하거나 여러 개의 입자로 깨어져 튕겨 나오게 되며 벽면의 온도가 높을 경우에는 붙어 있지 못하고 하나의 입자로서 튕겨 나오거나 혹은 여러 개의 입자로 깨어져 나오게 된다. 이와 같은 연료 입자의 거동을 결정하는 변수로서 입자의 수직 속도 성분, 입자의 크기, 연료의 밀도, 점도와 표면장력, 연료와 벽의 온도 등이 있다. 벽

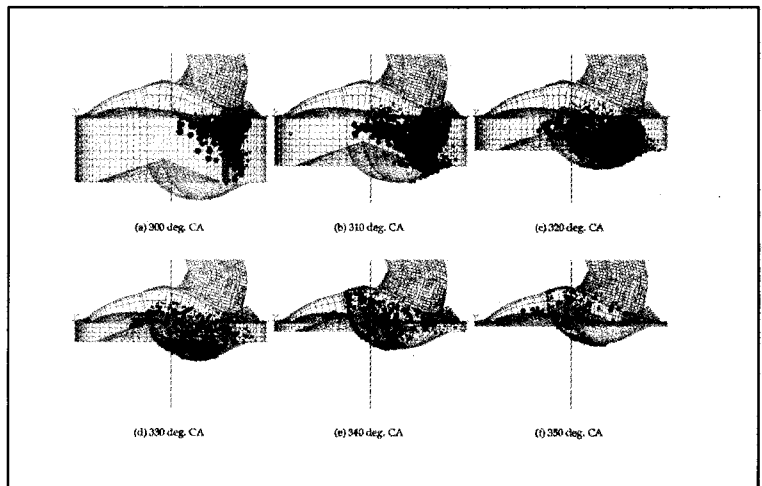


〈그림 3〉 시간에 따른 연소실 내부의 당량비 분포(연료 분사 시기 : 상사점 후 290도)

충돌이 일어날 경우에는 분사기 반대편의 피스톤 보울의 형상이 혼합기 분포를 결정하는 데에 중요한 역할을 하게 되며, 연료 분사 이후 점화가 일어나기 전까지의 텀블 혹은 역텀블의 초기 흡입 유동과 압축 말기의 피스톤과의 상호작용에 의해 변형된 유동이 중요한 영향을 미친다.

특히 분사 시기에 따라 연소실 내의 공기 밀도와 온도에 차이가 있기 때문에 분무의 도달 거리, 기화 속도에 큰 차이가 있으며 전 부하 시에는 균일 혼합기를 형성하기 위해 조기 분사가 이루어지는 반면 부분 부하 시에는 연비 개선과 NOx 감소를 위해 층상 혼합기를 통해 전체적으로 희박한 상태에서 안정된 연소를 추구하게 된다.

이들 조건을 모두 충족시키는 엔진 형상과 분사의 최적 조건을 찾는 일은 단순한 모델 테스트나 유사한 조건에서의 측정 실험만으로는 과도한 시행 착오와 시



〈그림 4〉 시간에 따른 연소실 내부의 분무 입자 분포(연료 분사 시기 : 상사점 후 290도)

간, 비용이 소요되므로 이들 방법과 함께 개발 과정에서의 설계 방향을 제시하는 데에 3차원 전산유체 해법이 유용하게 활용될 수 있다.

가솔린 직분식 엔진에서의 연소 과정은 스파크 주위에 적절한 혼합기 분포를 형성한 후에 스파크 점화에 의해 화염핵을 형성하

고 난류화염 전파에 의해 전체적으로 연소가 진행된다. 점화플러그 주위에서는 실화가 일어나지 않도록 혼합기의 분포가 충분히 농후해야 하는 반면 연소실 전체로는 화염이 중간에 끼치는 일이 없이 모든 연료를 이론공연비보다 희박한 상태에서 완전히 연소시킬 수 있을 만큼의 농도 분포

를 유지해야 한다.

대부분의 난류연소 조건에서는 연소 화학 반응의 속도가 난류 혼합 속도에 비해 훨씬 빠르기 때문에 연소 속도를 결정하는 요인이 난류 조건에 있으므로 엔진 설계 과정에서 흡기 유동과 연료 분무 특성 해석에 초점이 맞추어져 있다.

그러나 가솔린 직분식 엔진에서는 국부적으로 이론공연비보다 농후하거나 희박한 연소 조건에서 연소 화학 반응의 속도와 난류 혼합 속도가 서로 같거나 반대의 경우가 있을 수 있으므로 화학반응 혹은 층류화염 속도의 변화가 고려되어야 한다.

기존 엔진에서는 세부적인 메카니즘의 이해 없이도 직관적 판단이나 엔진 실험 결과에 의존하여 대부분의 문제를 해결할 수 있었으나 가솔린 직분식 엔진과 같은 새로운 연소 방식에서는 난류연소 과정에 대한 기초적인 이해와 정량적인 예측 모델이 더욱 절실히 필요하게 되었다.

외국에서는 이미 층상혼합기 연소에 대한 기초 실험과 전산 모사 결과의 검증에 대한 논문이 증가하고 있는 추세이며 이에 따라 부분예혼합 난류연소에 대한 기초 연구와 실용적 엔진 연소 연구와의 상호 결합이 이루어지고 있다. 난류예혼합 연소에서 실제 연소 반응은 무시할 수 있을 정도로 작은 두께의 laminar flamelet, 즉 층류 화염편에서

일어나며 화염편에서의 연소속도는 미연가스의 조성과 local flame stretch rate에 의해 결정된다.

난류예혼합 연소에서의 연소 영역은 난류강도와 층류화염속도의 비, 화염편 두께와 Kolmogorov scale의 비에 따라 wrinkled flamelet, corrugated flamelet, thin reaction zone, distributed reaction zone 등의 영역으로 구분되며 각각 영역에서의 난류연소속도를 결정하는 요인과 정량적인 관계는 서로 다를 수 있음이 밝혀지고 있다(4).

난류예혼합 연소에 대한 기초 연구의 유용한 결과 중의 하나로서 난류연소 속도에 대한 관계식들이 있으나 아직 만족스러운 결론에는 도달하지 못하고 있다.

가솔린 직분식 엔진의 3차원 전산유체 해석에 응용될 수 있는 연소 모델로서 화학반응이 난류의 시간 스케일에 비해 충분히 빠르다는 가정 하에 laminar flamelet 모델로서 Coherent Flamelet Model(5)과 N. Peters의 RIF (Representative Flamelet Model)(6)에 대한 연구가 관심의 대상이 되고 있다.

이와 같은 난류연소에 대한 기초 이론을 실용적인 엔진 연소 해석에 적용하기 위해 전산유체 해석 프로그램이 유용한 중간 다리 역할을 할 수 있으며 이에 대

한 연구가 활성화되는 추세에 있다.

최근 PC의 성능이 비약적으로 개선되면서 슈퍼컴퓨터에서만 가능하던 대형 계산들이 앞으로 저가의 PC들을 병렬 연결하여 처리할 수 있게 될 것이며 전산유체 해법에 소요되는 시간과 비용은 더욱 감소하게 될 것이다. 연소실 내에서의 분무, 난류연소 등 아직 불확실성이 큰 요소 모델들에 대해서도 관련 물리현상들에 대한 기초 연구가 활발하게 진행되고 있으므로 이들을 기반으로 하는 전산유체 해법에 대한 신뢰도는 계속 개선되어 나갈 것이다.

일부 엔진 개발 과정에서의 모델 테스트 및 실험 측정에 비해 전산유체 해법이 더 효율적이고 경제적인 접근 방법으로 받아들여지게 될 것이며, 사용자가 소프트웨어의 내용에 대한 전문적 이해와 지식이 없이도 전산 모사에 의한 가상 실험이 실제 실험보다 더욱 정확하고 많은 정보를 제공할 수 있게 될 것이다.

그러나 아직 관련 소프트웨어들이 충분히 성숙한 단계에 도달해 있지 못하므로 사용자가 소프트웨어에 사용된 수치 해법, 물리적 모델, 컴퓨터의 한계 등에 대해 정확히 이해하고 있어야 주어진 제약 조건 하에서 유용한 결론을 도출해 낼 수 있을 것으로 생각된다.

현재는 엔진 개발 과정에서 소

프트웨어가 차지하는 비중이 별로 크지 않지만 앞으로는 기술의 핵심이 하드웨어보다는 소프트웨어의 형태로 집약되어 나가게 될 것이다.

따라서 지금과 같이 계속 외국 소프트웨어에만 전적으로 의존하게 되면 기초 기술 축적의 기반과 미래 핵심 기술 개발에 대한 주도권을 상실하게 될 것이 우려되며 이제 국내에서도 자체 소프트웨어의 개발을 위해 관심을 기울여야 할 때이다.

참고 문헌

1. Amsden, A. A., O'Rourke, P. J. and Butler, T. D., "KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays," LA-11560-MS, May 1989.
2. Amsden, A. A., "KIVA-3: A KIVA program with block-structured mesh for complex geometries," LA-12503-MS, March, 1993.
3. EPISO-SPRAY, SPEED-SPRAY Manuals.
4. N. Peters, "Four lectures on turbulent combustion", ER-COFTAC Summer School, September 1997.
5. Baritaud, T., Duclos J.-M., Fusco, A., "Modeling turbulent combustion and pollutant formation in stratified charge SI engine", Revue de l'Institut Francais du Petrole, Vol. 52, No. 5, 1997.
6. H. Pitsch, Y. P. Yan, and N. Peters, "Numerical investigation of soot formation and oxidation under diesel engine conditions", SAE 952357, 962057, 971590.