

CFD를 이용한 승용차용 HSDI 디젤엔진 해석

Analysis of HSDI Diesel Engine Using CFD

민 경 덕 · 서울대학교 교수

Min Kyoung Doug · Seoul National University



1. 서론

최근 들어 차량 개발에서 컴퓨터를 이용한 해석의 비중이 점차 중요하게 인식되고 있다. 선진국의 경우 차량 개발시 컴퓨터를 이용한 해석의 비중이 2006년에는 약 56%의 역할을 차지할 것이라고 예상하고 있으며 이로 인한 엔진의 개발 기간의 단축과 비용 절감에 큰 효과를 가져올 것이다. 예를 들면 엔진 개발 단계 초기부터 기본 개념과 설계 자료로부터 가상엔진(Virtual Engine)을 이용해 다양한 해석을 통해 최적화를 구현하고 시작엔진을 제작하는 방향으로 전환되고 있는 실정이다.

이 글에서는 승용차용 HSDI 디젤엔진에 적용되는 핵심기술과 각 분야에 적용할 수 있는 컴퓨터를 이용한 해석 방법과 상용 코드들에 대한 소개를 하고자 한다.

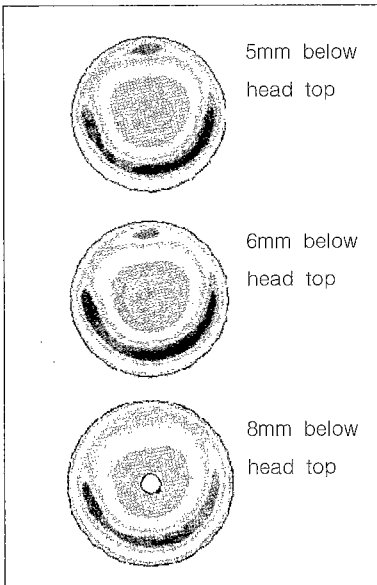
2. CFD를 이용한 승용차용 HSDI 디젤엔진 해석 내용

2.1 유동 해석

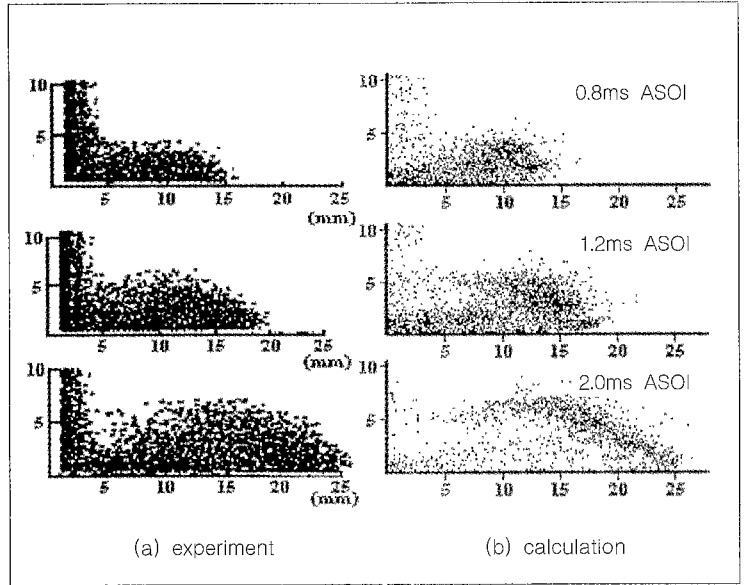
일반적으로 승용차에 HSDI 디젤엔진을 적용할 경우 1,000~4,000rpm 정도의 넓은 운전영역이 요구되는데 직접분사식 디젤엔진이 넓은 속도영역

에서 양호한 혼합기를 형성하는 것은 매우 어려운 일이다. HSDI 디젤엔진에서 연료와 공기는 흡기 포트의 스윙 유동과 연료분사시스템의 분사압력에 의한 연료의 미립화에 주로 영향을 받아 혼합과 연소가 이루어진다. 따라서 흡기포트는 충분한 공기의 흡입과 연소에 적절한 스윙값이 유지되도록 설계되어야 한다. 또한 연소실은 공기 유동과 더불어 인젝터에서 분사되는 분무와의 간섭을 고려하여 설계되어야 한다.

현재 개발된 승용차용 HSDI 디젤엔진의 경우 연소실 내의 유동이 지속적으로 유지되는 Reentrant 형태의 연소실이 적용되고 있다. 이와 함께 흡기 포트의 형상을 Tangential 포트와 Helical 포트를 조합함으로써 최적의 유동 형태를 얻을 수 있도록 개선하고 있다. 이를 실험적 연구로 수행할 경우 비용과 시간의 소요가 상당히 증가하며 계산을 적용한 연구의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 국내외에서 다양한 유동 해석 프로그램과 피스톤과 밸브 운동을 고려한 격자의 생성을 위한 프로그램이 소개되어 있으며 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. STAR-CD, FIRE, CFD-ACE, VECTIS, KIVA-3V 등이 대표적으로 해석 프로그램을 적용할 경우 비교적 단기간에



〈그림 1〉 직접분사식 디젤엔진에서의 연소실 내부 유동해석



〈그림 2〉 고압 정적연소실에서의 분무 충돌 해석

유동의 해석이 가능할 뿐 아니라 연소실 내부 유동에 영향을 미치는 각종 설계 파라미터들을 바꾸어 해석함으로써 비용의 절감에 기여를 하게 된다.

〈그림 1〉은 직접분사식 디젤엔진을 이용하여 본 연구실에서 수행한 유동해석의 사례를 나타내었다.

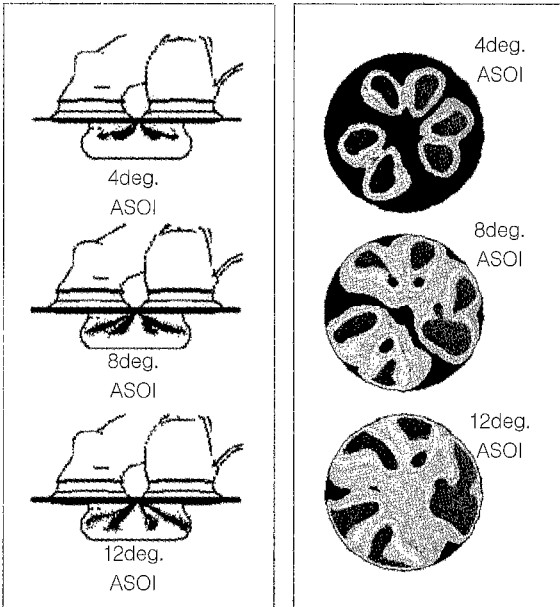
2.1 고압 정적 연료의 해석

HSDI 디젤엔진에서 연료의 분무 현상은 유동과 함께 연소 특성과 배출물 특성에 영향을 주기 때문에 지속적으로 연구의 대상이 되어왔다. 인젝터에서 분사된 연료 액적은 주위 공기와의 상호작용으로 인해 작게 나뉘어지거나 주위의 액적들과 충돌 또는 뭉쳐지는 등의 과정을 겪게된다. 또한 고온, 고압 상태의 디젤 연소실 조건에서는 분무된 연료 액적이 증발하거나 자발화가 발생하는 현상도 동시에 일어난다. HSDI 디젤엔진의 경우 인젝터로부터 피스톤벽면까지의 거리가 짧기 때문에 분사된 연료가 벽면에 충돌하는 현상도 발생하며 연료의 벽면에서의 충돌과 이로 인해 벽면에 연료액막이

형성되는 현상도 관찰할 수 있다.

연료의 분무 현상을 모델링하고 컴퓨터를 이용하여 계산하는 방법을 많은 연구자들이 이용하고 있으며 컴퓨터의 고속화와 3차원 모델을 적용한 각종 코드의 개발이 이루어져 분무 현상을 계산에 이용하여 파악하는 연구가 급속도로 진행되고 있다. 3차원 해석에서 연료 분무의 거동을 예측하는 방법으로 Stochastic Lagrangian Model을 주로 사용하며 전체의 분무 입자를 수천개 정도의 그룹(Parcel)으로 나누어 각각에 대해 위치, 속도, 입경 등을 계산으로 구하게 된다.

연료 분무를 정확히 해석하기 위해서는 분무의 분열, 충돌 및 합착, 항력계수, 증발 및 벽면충돌 등의 현상에 대한 적절한 모델 또는 실험식이 필요하다. 인젝터에서 분사되는 액적들의 분열현상은 연료의 물리적 특성, 연료펌프의 특성과 인젝터의 특성 등에 의해 영향을 받으며 특히, 분무 액적과 주변 기체의 공기역학적 상호 작용에 의해 많은 영향을 받는다. 분무의 분열 모델로서 O'Rourke의 TAB(Taylor Analogy Breakup)모델⁽¹⁾ 등이 있



〈그림 3〉

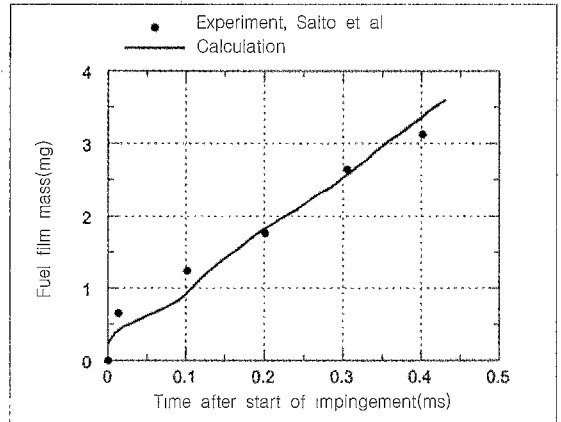
직접분사식 디젤엔진에서의 분무 해석

〈그림 4〉

직접분사식 디젤엔진에서의 혼합기 분포 해석

으며 계산의 특성에 맞는 분열 모델을 많은 연구자들이 개발하여 사용하고 있다. STAR-CD에 Reitz와 Diwakar 모델⁽²⁾이 사용되고 있고 KIVA-II에는 TAB모델이 사용되고 있다. 분무 상호 작용에 의한 충돌 및 합착 모델로는 계산 격자 내에서의 입자간의 충돌 및 결합 확률을 모델링한 O'Rourke의 모델⁽³⁾이 주로 사용되고 있다. 분무 모델과 관련하여서는 STAR-CD, FIRE, CFD-ACE, KIVA 등이 많이 사용되는데 사용자가 분무에 관한 모델링을 수행하여 서브루틴화하는 과정이 이루어져야 한다. 최근 들어 연료의 분사가 고압화되고 HSDI 디젤엔진의 개발이 이루어짐에 따라 기존의 분무와 관련된 모델 이외에 연료의 분무 충돌 모델^{(4)~(5)} 및 액막형성 모델^{(6)~(7)}의 개발이 이루어지고 있다.

〈그림 2〉는 HSDI 디젤엔진에 적용되는 분무의 형성과 충돌에 관한 모델들을 이용하여 본 연구실에서 코드화하고 STAR-CD에 적용하여 계산한 사례이다. 계산은 고압의 공기속으로 분사된 디젤

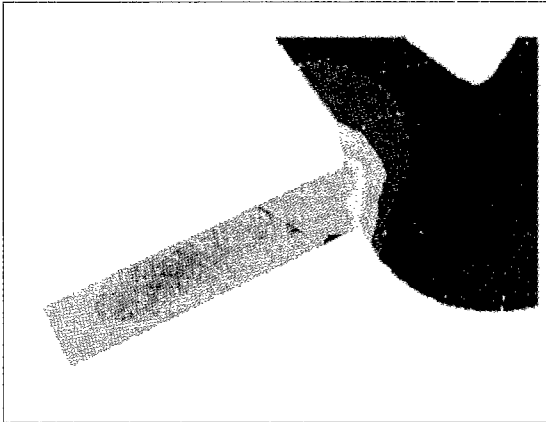


〈그림 5〉 고압 정적연소실에서의 액막형성 해석

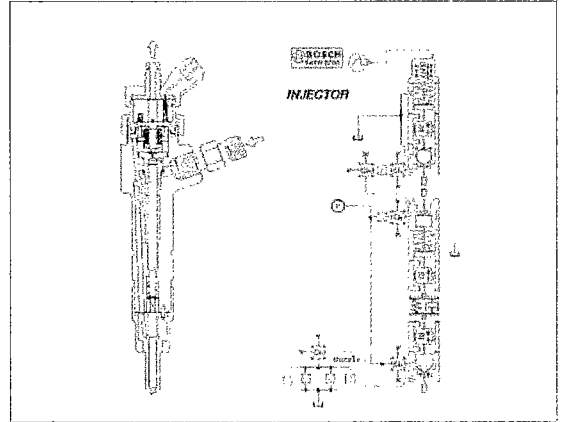
분무를 계산한 것으로서 Katsura의 실험결과⁽⁸⁾와 비교한 것이다. 액적의 공간적인 분포와 분무선단에 생성되는 와류를 예측하는 것을 알 수 있으며 실험의 결과만으로는 알 수 없는 연료 증기의 3차원적 분포를 알 수 있는 장점이 있다.

〈그림 3〉은 직접분사식 디젤엔진 조건에서 분무 모델과 충돌모델을 동시에 적용하여 계산한 경우의 한 예를 나타낸다. 계산에서는 실험적으로 많은 비용과 장치가 필요한 스월의 변화에 따른 분무의 형태를 보여줄 수 있는 장점이 있다. 〈그림 4〉는 직접분사식 디젤엔진 조건에서 연료 혼합기의 분포를 계산한 예이다. 연소실 및 포트 격자의 변화가 가능하므로 엔진 연소실 최적화에 사용이 가능한 장점이 있다. 〈그림 5〉는 HSDI 디젤엔진과 유사한 조건에서 벽면에 생성되는 연료액막의 양을 계산한 것으로서 배출물 특성을 계산결과와 연관지어 설명할 수 있고 연소실 형태를 변화시켜가면서 유해 배출물이 감소되는 최적의 엔진 연소실 형상이나 분사파라미터 등을 찾는 데 유리하게 이용할 수 있다.

또한 연료 분사가 고압화되면서 인젝터 내부에서 필연적으로 발생하는 캐비테이션 현상의 해석과 이로 인해 분무에 미치는 영향에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 가시화용 확대 노즐을 이용하



〈그림 6〉 Sac Volume 노즐에서의 압력 분포 해석



〈그림 7〉 상용 해석 프로그램을 이용한 커먼레일 인젝터 모델링

여 실제 조건에 상사한 조건을 적용한 실험적 연구와 함께 캐비테이션의 발생과 이로 인한 분무의 특성 변화 등에 대한 계산을 이용한 연구와 모델 개발이 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다.^{(9)~(10)} 캐비테이션 현상의 해석에 대표적인 상용 프로그램으로 AVL사의 SWIFT가 이용되고 있으며 2상 유동의 대표적인 해석 방법인 VOF(Volume of Fraction) 기법을 적용하여 해석을 하고 있다.

〈그림 6〉에 본 연구실에서 Sac Volume을 가진 디젤노즐에서 압력분포를 계산한 예를 나타내었다. 해석을 통해 노즐 홀 내부에서 캐비테이션이 발생하는 위치와 이로 인해 분무에 미치는 영향을 파악할 수 있고 위에서 설명한 분사 모델을 보완하는데 적용할 수 있다. 엔진에서 분무의 특성을 파악하는데 계산을 적용하는 것이 매우 유리하지만 실험결과를 잘 설명할 수 있고 엔진 개발의 도구로서 사용하기 위해서는 물리적 현상에 바탕을 둔 적절한 모델링이 반드시 필요하다.

2.3 커먼레일 분사시스템 해석

고압분사에 있어서 가장 최근에 개발된 기술은 커먼레일 분사시스템이며 Fiat와 Benz에 의해 개발되고 Bosch에 의해 제작된 시스템이 1998년 유럽시장에 선보인 것이 그 효시라 할 수 있다.

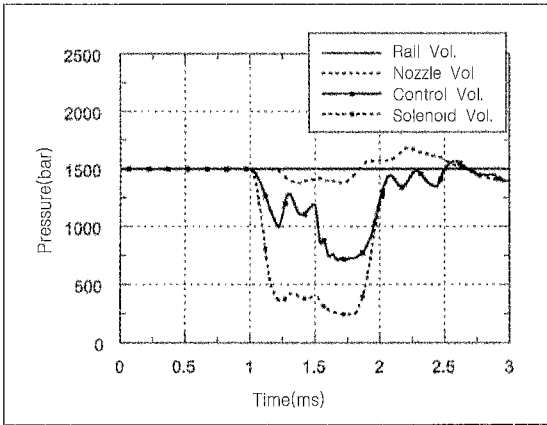
Lucas사와 Denso사도 이와 유사한 방식의 시스템 개발을 발표하였으며 국내의 (주)두원정공에서 커먼레일 분사시스템을 개발 중에 있다.

연소 특성에 큰 영향을 미치는 커먼레일 분사시스템의 해석과 독자적인 기술 확보에는 아직 해결되어야 할 문제가 많은 실정이다.

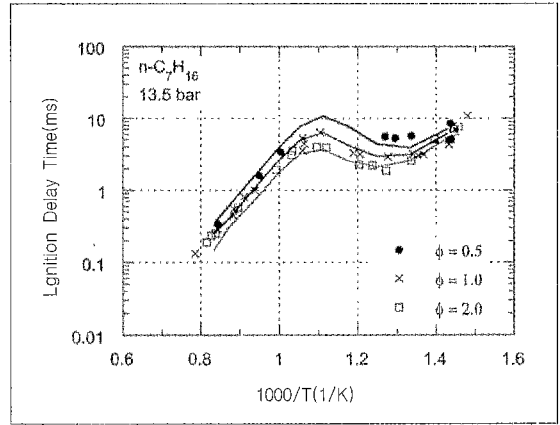
국내에 소개된 많은 유압 시스템 해석 프로그램 중에 커먼레일 분사시스템 해석에 적절한 것으로 Imagine 사의 AMESim, AVL 사의 Hydsim 등이 대표적이다. 커먼레일 시스템을 1차원으로 해석하는 방법을 사용하며 시스템 각 부분의 압력 및 분사율 등을 예측할 수 있는 장점이 있고 레일압력 제어, 분사량 제어, 분사시기 제어 등의 로직 개발과 고압 인젝터에 적용되는 각각의 부품의 해석과 설계 파라미터 선정에 유용하게 사용될 수 있는 특성이 있다.

국외의 경우 이러한 해석 프로그램을 사용하여 커먼레일 분사시스템 해석에 적용한 예가 많이 있으며 Bosch 의 경우 Hydsim과의 연계를 통하여 자사 시스템 해석을 적용하고 있다. 또한 AVL에서는 자사의 프로그램과 연계하여 1차원 해석된 결과를 3차원 격자와 매칭하여 좀 더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 기능을 제공하고 있다.

〈그림 7〉은 AMESim을 이용하여 커먼레일 분



〈그림 8〉 Hydsim을 이용한 커먼레일 분사시스템 해석



〈그림 9〉 축소화학반응 메커니즘을 이용한 자발화 특성 해석

사시스템을 해석할 수 있도록 모델링한 적용례를 나타낸다. 〈그림 8〉에 Hydsim을 이용하여 2-웨이 방식 커먼레일 분사시스템에서 인젝터 내부 각종 체적의 시간에 따른 압력변화 예를 나타내었다.

2.4 승용차용 HSDI 디젤엔진에 적용하기 위한 자발화 특성 해석

자발화 특성을 해석하기 위한 방법으로는 RCM, Shock Tube 등에서 수행된 실험을 이용하여 자발화 메커니즘을 수정, 보완하는 연구 방식을 채택하고 있는데 삼차원 모델의 계산상의 복잡성 때문에 반응에 참여하는 수백 개의 화학종과 수천 개의 반응식을 이용한 상세화학반응 메커니즘 보다는 축소화학반응 메커니즘을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 축소화학 반응 메커니즘으로는 대표적으로 Shell 모델⁽¹¹⁾이 널리 사용되고 있다. 이외에도 HSDI 디젤엔진 조건과 같은 불균일한 혼합기에서의 자발화 특성을 예측할 수 있는 모델의 수립이 필요하며 모델의 타당성 확보를 위한 자발화 실험도 병행되어야 한다.

본 연구실에서는 승용차용 HSDI 디젤엔진과 유사한 조건에서의 RCM 실험을 수행하고 축소화학반응 메커니즘의 개발을 통해 승용차용 HSDI 디젤엔진에 적용하는 연구를 수행중이며 〈그림 9〉에

개발된 축소화학반응 메커니즘을 이용하여 계산된 자발화 특성의 예를 나타내었다.

2.5 승용차용 HSDI 디젤엔진 연소 해석

엔진에서 일어나는 연소 현상을 해석하는 방법으로 널리 사용되는 것으로 크게 3차원 모델과 1차원 모델이 있다. 3차원 연소해석 방법의 대표적인 상용 프로그램으로는 STAR-CD, FIRE, KIVA-3V 등이 있는데, 난류에 의해 지배되는 Eddy Breakup 모델, Time Scale 모델, PPDF(Presumed Probability Density Function) 모델 등을 내부적으로 포함하고 있다.

이외에도 국내외에서 RIF(Representative Interactive Flamelet) 모델을 이용한 해석이 다양하게 이루어지고 있다. 3차원 해석의 경우는 연소실 및 유동의 3차원적인 특성을 반영할 수 있기 때문에 디젤엔진 연소의 예혼합 및 확산 연소 특성을 비교적 정확히 표현할 수 있는 장점이 있다.

1차원 모델의 경우 엔진 연소실 내부를 열역학적인 개방 시스템으로 보고 해석하는 방법으로 엔진의 기하학적 형태에 따른 연소 특성, 유동 및 분사 특성을 완벽히 고려할 수 없다는 단점이 있지만 단기간에 엔진의 운전 특성 변화, 설계 파라미터의 변경에 따른 효과를 살펴볼 수 있다는 장점이 있

다. 특히 최근에 개발된 상용 프로그램의 경우 연소율을 결정하는 함수를 이용해서 연소의 특성을 계산하는 대신 각종 실험식과 모델로부터 얻어진 자료를 바탕으로 어느 정도 multi-zone의 특성에 근접할 수 있는 해석 결과를 얻을 수 있도록 개발되고 있다.

AVL의 Boost와 Ricardo의 WAVE 등이 대표적인 상용 프로그램이다. 연료의 분사, 증발, 점화 및 연소를 실험식과 모델을 바탕으로 계산하기 때문에 온도 및 압력 형태, 열발생률의 해석이 가능하며 배출물 특성도 정성적인 해석이 가능한 장점이 있다.

3.8 배기가스 저감 기술 해석

승용차용 HSDI 디젤엔진에서 NO_x, PM 등의 배기 배출물은 그 발생 메커니즘이 복잡하여 해석을 통한 정확한 예측이 어렵지만 엔진 내의 직접적인 배출물 측정과 배출물 특성과 관련된 엔진 설계 인자들의 독립적인 영향을 실험에 의해서만 평가하는 것은 상당히 어렵기 때문에 컴퓨터를 이용한 해석은 그 이용가치가 크다고 할 수 있다.

앞서 설명한 3차원 해석 프로그램인 STAR-CD, FIRE 등에서 제공하는 NO_x, PM 등의 모델을 이용하거나 사용자가 배출물에 대한 모델을 부프로그램화하여 유동, 분무, 연소와 함께 결합하여 계산을 수행할 경우 EGR에 의한 엔진의 배출물 특성, NO_x 배출 등의 특성을 분석할 수 있다.

이외에도 Boost나 WAVE 와 같이 열역학적 개방 시스템의 해석을 통한 프로그램을 이용해도 어느 정도 정성적으로 배출물 특성을 파악할 수 있으며 시스템의 변경에 따른 영향을 단기간에 파악하기에 유리하다.

또한 다공성 물질에서의 유동과 표면에서 일어나는 화학반응에 대한 계산이 가능하므로 최근에 EURO-IV 등의 배기 규제를 만족하기 위해 부각되고 있는 촉매의 해석에도 다양한 상용 프로그램을 적용할 수 있다.

3. 결론

이 글에서는 승용차용 HSDI 엔진 개발에 적용할 수 있는 컴퓨터 해석 기법에 대한 소개를 간략하게 정리하였다. 컴퓨터 성능의 향상과 함께 엔진 내의 여러 현상들에 대한 모델들이 빠르게 개발되고 있으므로 이러한 CFD 기법을 통한 HSDI 디젤엔진 설계는 제품 개발비용의 절감과 질적 향상에 크게 기여할 것으로 사료된다. 승용차용 HSDI 디젤엔진은 국제경쟁력 향상을 위해 시급히 개발되어야 하며 강화되는 배기가스 규제에 대응하기 위해서도 관련 기술에 대한 중장기적 연구개발이 절실히 요구된다.

<참고문헌>

- (1) P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, "The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup", SAE Paper No. 872089, 198700
- (2) R. D. Reitz and R. Diwakar, "Effects of Drop Breakup on Fuel Sprays", SAE Paper No. 860469, 1986
- (3) P. J. O'Rourke, "Collective Drop Effects in Vaporizing Liquid Sprays", Ph. D. Thesis, Princeton Univ., 1981
- (4) A. P. Watkins, D. M. Wang, "A New Model for Diesel Spray Impaction on Walls and Comparison with Experiment", Int. Symp. on Diagnostics and Modeling of Combustion in IC Engines, pp. 243-248, 1990
- (5) C. Bai, A. D. Gosman, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation", SAE paper No. 950283, 1995
- (6) C. Bai and A. D. Gosman, "Mathematical Modelling of Wall Films Formed by Impinging Sprays", SAE Paper No. 960626, 1996
- (7) D. W. Stanton and C. J. Rutland, "Multi-

- Dimensional Modeling of Thin Liquid Films and Spray-Wall Interactions Resulting from Impinging Sprays", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 3037-3054, 1998
- (8) N. Katsura et al., "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall", SAE Paper, No. 890264, 1989
- (9) C. Arcoumanis et al., "Investigation of Cavitation in a Vertical Multi-Hole Injector", SAE Paper No. 1999-01-0524, 1999
- (10) C. Arcoumanis et al., "Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi Hole Diesel Engine Injector", SAE Paper No. 980811, 1998
- (11) M. P. Halstead, L. J. Kirsch, and C. P. Quinn, "The Autoignition of Hydrocarbon Fuels at High Temperatures and Pressures-Fitting of a Mathematical Model," *Combustion and Flame* Vol. 30, pp. 45 - 60, 1977

〈민경덕 편집위원 : kadmin@snu.ac.kr〉