

# 디젤 분무에 관한 기초 연구와 활용 분야 Introduction on Basic Study and Applied Field for Diesel Spray

염 정 국  
J. K. Yeom

## 1. 서 론

디젤엔진은 다른 내연기관에 비해서 연료경제성이 뛰어난 장점으로 물류수송분야 뿐만 아니라 연료분사 제어방법의 획기적인 발전으로 현재는 승용차에도 적극적으로 도입되고 있지만, 엔진에서 배출되는 유해가스성분은 대기오염의 주요인으로써 심각한 사회문제로 대두 되고 있다. 그 대안으로 하이브리드(Hybrid)엔진 등과 같은 신개념의 엔진들이 개발되어 상용화되고 있으나, 국내의 실정을 감안하면 경제성문제, 기초기술 및 사회적 인프라 구축의 미비로 국내 보급에는 장기간의 시간이 소요될 것이라 판단되며, 이에 따라 기존 엔진에 대한 성능향상 개발연구가 요구되고 있다. 따라서 미래에 있어 하이브리드엔진 등과 같은 신개념의 엔진과의 비교우위를 통한 디젤엔진의 존속을 보장하기 위해서는 유해배기가스의 저감이 절실히 필요하고, 그 저감의 대표적인 방법으로서 Table 1에 보이는 것과 같이 엔진의 연소개시 이전 실린더 내의 시(時)-공간적(空間的) 혼합기형성제어(분무제어)와 연소이후의 연소제어가 있다. 혼합기형성제어에 의한 디젤기관의 배기가스정화연구으로써, 연료분사압력의 고압화에 의한 Soot<sup>1,2)</sup>의 억제나 연료·물층상분사에 의한 NOx와 PM(Particulate Matter) 및 연비(燃費)의 동시저감<sup>3)</sup> 등의 기술은 벌써 실용화되어 있다. 또, 복수의 분사노즐을 이용한 2단 연소(Multiple Stage Diesel Combustion : MULDIC)<sup>4)</sup>의 경우, 연연소실내에 분사되는 연료의 시·공간적 분포를 자유스럽게 제어하는 것에 의해, 低NOx를 유지해가면서 연비와 PM의 개선을 도모하고 있다. 또한, 연료의 조기분사(早期噴射)에 의한 균일·희박한 혼합기를 형

기를 형성해 예혼합압축착화(Premixed Lean Diesel Combustion System : PREDIC)<sup>5)</sup>를 피하는 등 여러 가지 분무제어의 연구가 행해지고 있다. 보다 적극적인 혼합기형성제어방법으로는 연료설계(Fuel Design)가 있으며 혼합연료(Fuel+CO<sub>2</sub>첨가)의 분사<sup>6)</sup>에 의한 NOx와 PM의 트레이드-오프(Trade-off)의 연구가 행해지고 있고, 순수 단일 연료를 사용하여 디젤엔진의 Soot를 저감하는 방법으로는 합산소(含酸素)연료로서 디메틸에테르(Dimethyl Ether : DME)를 이용한 연소실험이 있다. 그 결과로써 합산소연료 중에 존재하는 산소분자에 의한 Soot 생성억제 및 저비점인 DME의 미립화효과에 의해 NOx의 농도 증가 없이 배출 Soot의 농도가 대폭 저감하였다. 또 물-에멀전(Water-emulsion)연료는 미소폭발(Micro-explosion)에 의해 Soot 및 미연탄화수소(HC)배출을 억제하고, 연소과정에 있어 수증기의 발생에 의해 연소온도를 저하시킴으로 NOx 배출의 억제에 유효하다고 발표하고 있다. 본 논문에서는 디젤분무, 특히 분사연료의 상변화가 일어나는 증발장에 있어서 실험과 계산을 각각 실시해 구한 주위조건변화에 대한 증발디젤분무의 거동특성 해석 결과를 보이고, 미래의 디젤분무연구의 적용분야에 대해서 기술한다.

## 2. 증발디젤분의 실험적 연구결과의 일례

분사된 연료의 상변화가 일어나는 증발장에서 실험으로 구한 디젤자유분무와 충돌분무의 결과를 Figs. 1과 2에 각각 나타낸다. 측정방법으로는 (액상 및 기상)의 동시 분라·가시화방법인 엑사이플렉스 형광법(Exciplex fluorescence method)을 적용하였다. 그 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 분사압력이 높을수록 증발분무의 기상 분포는 균일하다. 이것은 분사압력의 증가는 분사연료의 미립화를 촉진시키고, 그 결과 보다 신속하고 균일한 혼합기의 형성이 가능하다.

Table 1 Schematic of emission control process of diesel engine

Emission control of diesel engine	Step 1	Spray control
	Step 2	Combustion control

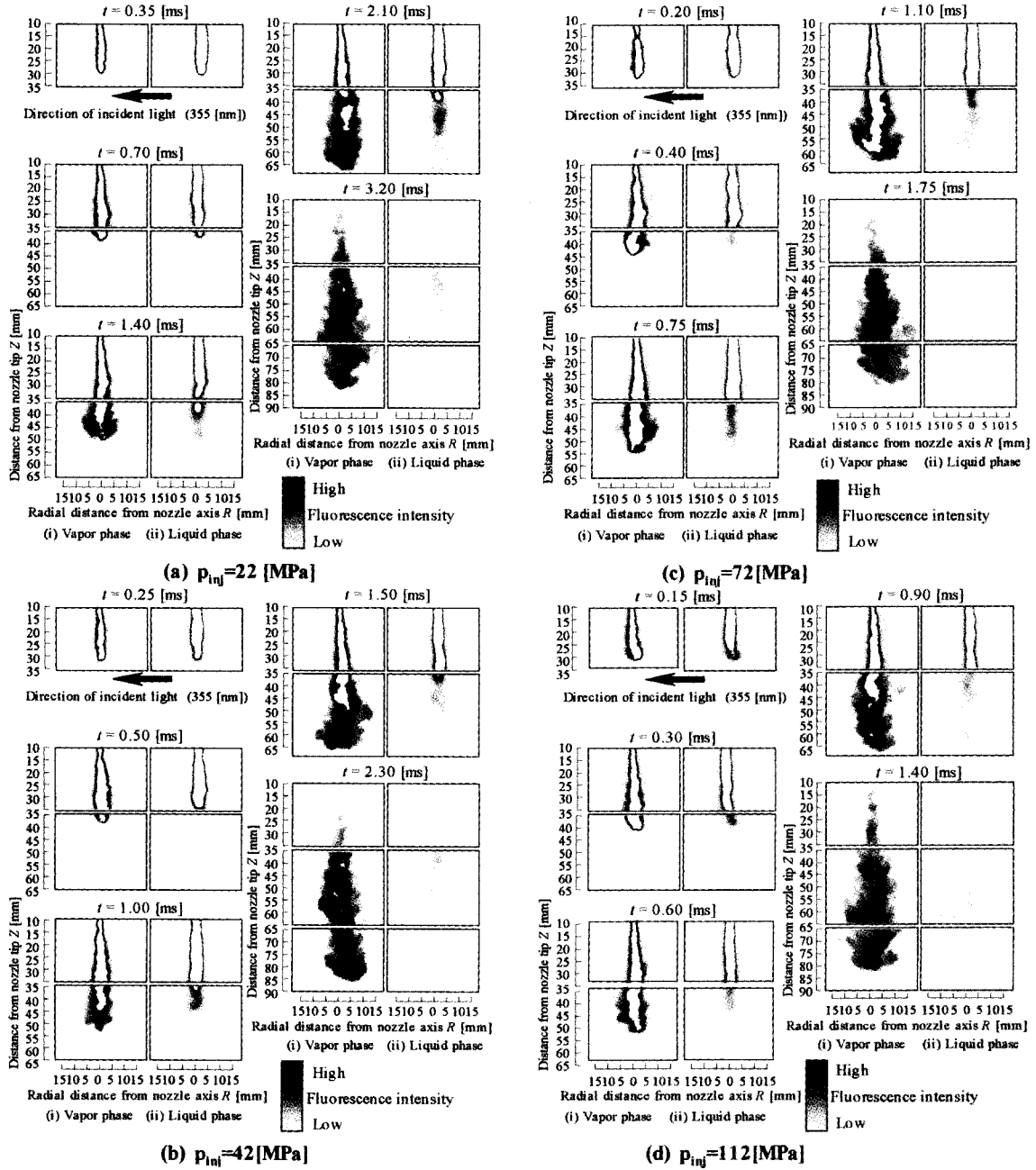


Fig. 1 Temporal change in the free spray images taken by exciplex fluorescence method<sup>7,8)</sup>  
 ( $P_{inj}=72$  [MPa],  $Q_{inj}=12.0$ [mg],  $T_a=700$ [K])

- 증발분무의 거동특성은 액적의 수밀도(Number density)가 아주 높은 분무노즐부근영역과 액적의 수밀도가 낮은 분무액상과 기상이 혼재하는 2개의 영역으로 나눌 수 있다. 전자는 비증발분무에 있어 분사연료와 주위기체와 운동량 교환에 필요한 길이에 해당하며, 본 연구에서는 증발분무의 액상길이(Liquid phase length,  $L_{liq}$ )라 정의했고, 그 값은 약 38mm이다.

- 분무내부에 동일한 연료량이 존재하면, 분무의 선단도달거리는 분사압력에 의존하지 않는다.

그리고 화상상관법(Particle Image Velocimetry : PIV)<sup>9)</sup>을 이용한 엔진 실린더 내부의 유동의 계측결과를 Figs. 3과 4에 나타낸다. 그러나 PIV 기법을 내연기관 분야에 적용한 선행연구는 많이 있으나 그 대부분이 실린더내의 유체 유동<sup>10-14)</sup>이나 실제엔진 내부의 상태와는 다른 분사연료의 상변화가 일어나지 않는 비증발분무<sup>15)</sup>가 대상인 연구들이다. 비증발인 경우는 관측대상인 분무가 액체 단일의 상이기 때문에 가시화 계측이 용이하지만, 증발장에 있어서 분무계측의 경우는 분사연료의 액체, 기체

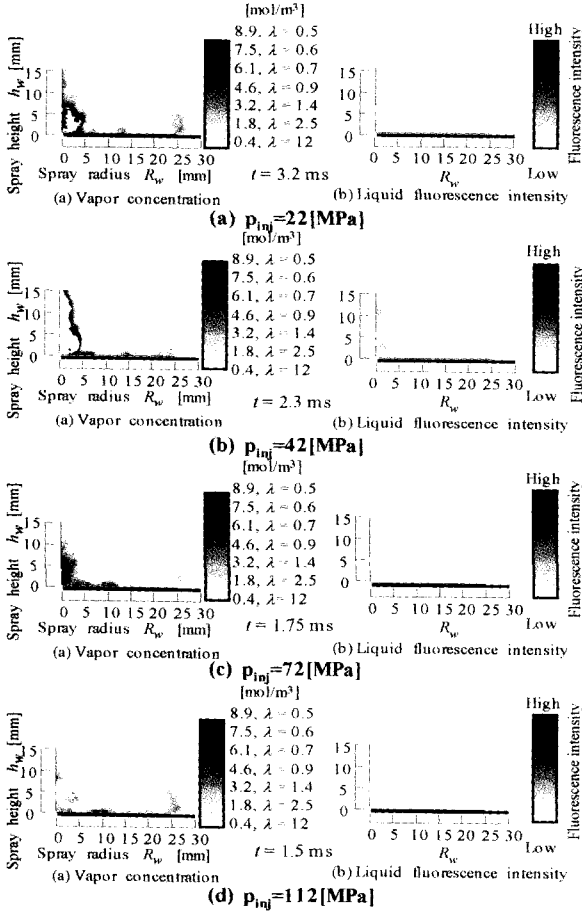


Fig. 2 Temporal change in the impinging spray images taken by exciplex fluorescence method

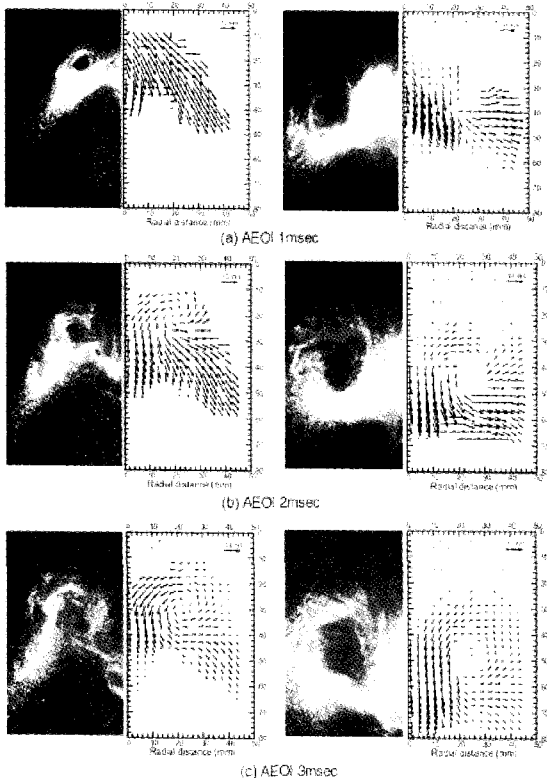


Fig. 3 Flow example in engine cylinder<sup>10)</sup>

및 주위기체까지 모두 3 부분의 계측영역이 존재한다. 따라서 입자(Tracer)를 이미지획득의 매개체로 활용하는 PIV 계측법이 비증발장과 비교해서 어렵게 된다. 따라서 보다 정도 높은 디젤분무의 제어를 위해서는 실제엔진 내부의 상태를 모사할 수 있는 고온·고압의 정용용기를 이용하여 상변화가 일어나는 디젤분무를 대상으로 분사연료의 액체와 기체를 제외한 주위기체 만의 입자 유동추적 해석을 통하여 디젤연료분무의 혼합기형성과정을 명확히 할 필요가 있다.

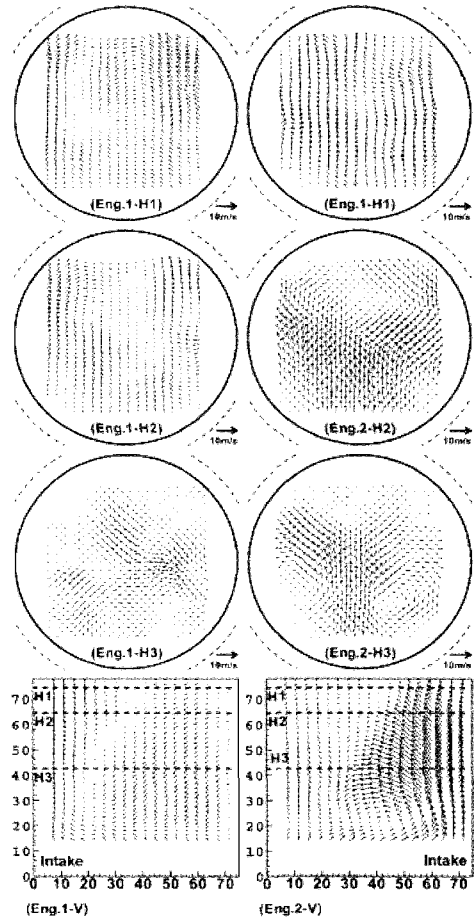


Fig. 4 Flow example at compression stroke<sup>11)</sup>

### 3. 증발디젤분의 수치적 연구결과의 일례

범용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 11.0<sup>16)</sup>를 이용해서 구한 수치해석 결과의 일례를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸다. Fig. 5는 분위기 압력  $p_a=1.04\text{MPa}$ 과 분사압력  $p_{inj}=72\text{MPa}$  일 때, 분사개시 후 1.10ms에서 디젤분무의 부피를 2-D와 3-D를 사용하여 부피분율(Volume fraction)과 속도벡터로 나타낸 것으로서 기·액상 연료의 부피를 모두 포

합하고 있고, 정의된 분무각(Spray angle,  $\theta$ )과 축 방향 도달거리(Axial penetration,  $S_A$ )를 표시했다.

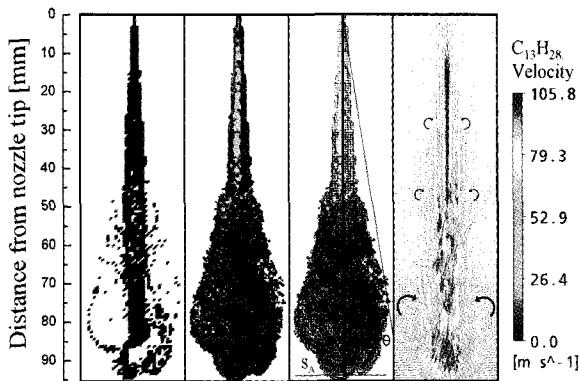


Fig. 5 2-D and 3-D images of diesel spray volume at the injection pressure of 72MPa

Fig. 6은 각각의 주위기체압력  $p_a=1.04\text{MPa}$ ,  $1.70\text{MPa}$  및  $2.55\text{MPa}$ 로 변화시킨 경우에 분사개시 이후 0.50ms에서 분사된 디젤연료( $n$ -Tridecane,  $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ )와 주위기체(Nitrogen,  $\text{N}_2$ )의 속도벡터를 나타낸다. 분무선단을 제외하고는 표시된 속도벡터의 크기가 아주 작기 때문에 가시화를 용이하게 하기 위하여 벡터의 크기를 일정하게 설정하였다. 상류부에서 생성된 와가 분무하류방향으로 진행함에 따라 성장하여 분무반경방향의 확산유동을 지배한다. 연료분류에 의해 발생한 주위기체와 연료와의 혼합기형성과정에서 있어서 분무 내부에 생성된 대규모의 와 속에 크고 작은 와괴의 증가 때문에 주위기체압력이 증가하면 주위기체의 유동은 촉진되고, 분무 내로의 주위기체 도입(Entrainment)이 활발해진다.

#### 4. 디젤분무 연구의 적용분야

신속하고도 고도의 정확한 혼합기형성은 엔진 내

연소 시 배출미립자의 배출을 저감시키며, 결과적으로 연료를 보다 효율적으로 필요한 일로 변환시켜 연비절감에 도움을 줄 수 있다. 입자상물질 (Particulate matters: PM)의 구성을 Fig.7에 나타낸다. 현재 자동차엔진 내 연료 분사기술의 정도는 급속한 분사제어기술의 발달로 보다 적은 연료로써 동일한 출력성능을 유지하면서도 높은 연비향상을 도모할 수 있게 되었다. 그러나 지금처럼 대체연료 (Alternative fuels) 연구<sup>(17)</sup>가 활발히 진행 중이고, 그 중, 특히 바이오 연료(Bio-fuels)연구에서는 그 연료의 사용에 있어 엔진최적 구동제어 및 연비향상을 위해서는 각 연료 물성치에 기인하는 분무거동특성 변화에 대해서 보다 기초적이고 정확한 연구결과가 필요한 실정이다. 여기에 바이오연료 중 PVO(Pure Vegetable Oil, 순식물성 오일)이며 비곡물성 연료인 자트로파 오일(Jatropha curcas/Physic nut)에 대해서 간략히 소개한다. 이 자트로파는 'curcine'으로 불리는 toxalbumine과 독성을 지닌 phorbol ester가 함유되어 있어 식용으로 쓸 수 없는 비식용 식물성 바이오디젤의 원료이고, 가뭄에 대한 내성, 척박한 토양에서의 빠른 성장속도 및 생명력, 관리의 용이성 및 열대지방에서 연간 다모작 생산 가능 등으로 가격이 저렴하다. 주요 재배지는 미얀마, 인도, 태국, 중남미 등이 있다. 그리고 비곡물성으로 곡물가격의 변동에 다른 공급차질이 거의 없고, 높은 경제성을 지니고 있다. 한편, 국내외 관련 동향으로 PVO를 생산하는 회사는 바이오 디젤회사와 비교해 거의 없는 편이며 대표적으로는 네덜란드의 Refuel이란 회사가 있고, 많은 바이오디젤회사들이 지금 현재도 전 세계적으로 설립되고 있으며, 프랑스, 독일, 스웨덴, 벨기에, 이탈리아, 브라질, 미국, 콜롬비아, 중국 등의 나라에서 바이오디젤 사용을 공식화 하고 있다. 프랑스에서 운행되

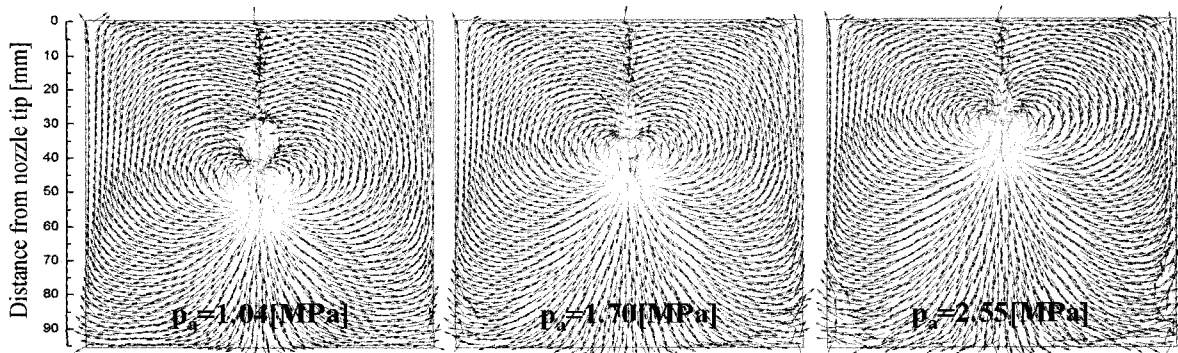


Fig. 6 Comparison of the velocity of the diesel spray with vectors normalized

## 입자상물질(PM)

• 정의(CARB) : 51.7°C 이하의 공기중으로 응축되어 필터에 포집된 배출성분 중 응축수분(condensed water)을 제외한 모든 배출성분

- The main component of PM is the unburned carbon solid particle of 15-30nm diameter, gas phase- from fuel and partly from lubricant, and all named as fines, dust, soot, mist, fog, and smog are a part of PM.

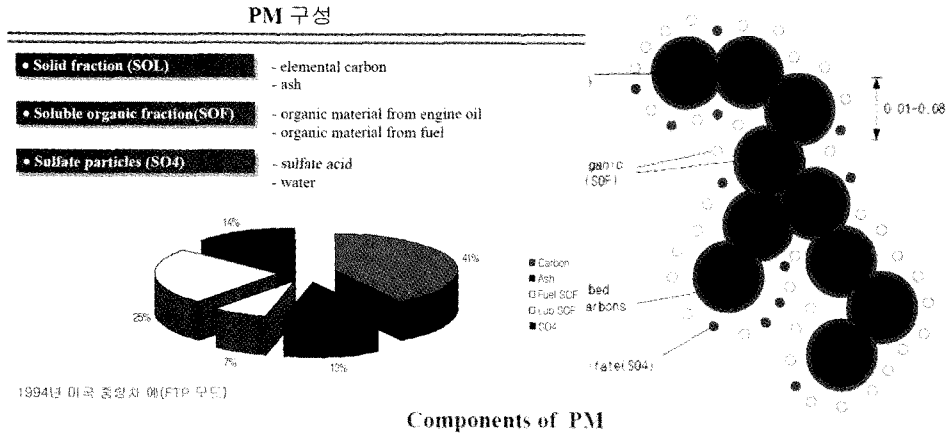


Fig. 7 Composition of the particulate matters<sup>7)</sup>

는 버스 및 트럭 약 4,000대 가량에 사용하고 있는 것으로 조사됐다. 프랑스는 바이오연료 사용량 기준 목표치인 2010년 5%를 대폭 앞당겨 2007년에 목표 조기 달성하고 2010년 7%를 달성하고, 2015년까지 220만 톤의 바이오디젤을 보급할 예정이다. 그러나 국내의 자트로파 PVO 바이오디젤 시장은 미개척 분야로서 이와 관련된 구체적인 연구개발 기술은 거의 전무한 실정이다. 따라서 국내에서도 PVO 바이오디젤에 대해서 보다 활발한 연구가 필요하고, 특히 자트로파 PVO 바이오연료를 디젤엔진에 적용 시 엔진의 설계 및 최적구동을 위하여 그 사용 바이오연료의 분무거동특성 해석은 반드시 필요한 부분이다. 또한 바이오 디젤연료의 거동특성해석을 통한 디젤 전용의 연료활성화 장치 및 연료공급부의 최적화에 대한 기반연구가 절실히 요구되고 있다.

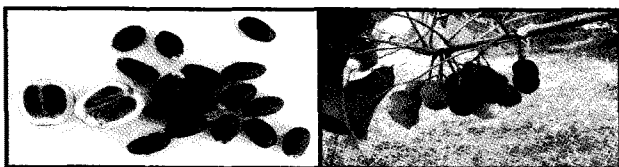


Fig. 8 Jatropa curcas/Physic nut

### 참고 문헌

1. T. Kato, 1989, "Spray Characteristics and
2. 武田好央, 石川田直也, 新村惠一, 小森正憲, 1995, "高壓燃料噴射によるディーゼル機関の燃焼改善及び排出物の低減", 新エィシーイー技術論文集, pp. 19~24.
3. K. Takasaki et al., 1997, "Improvement of Diesel Combustion Using a Fuel-Water-Fuel Injection System", JSME, Transaction of JSME(B), Vol. 63, No. 613(in Japanese), pp. 263~270.
4. Y. Takeda and K. Niimura, 1995, "Characteristics of Diesel Combustion and Emissions with a Multi-Injector System", SAE Paper 952511.
5. 武田好央, 1995, "希薄予混合ディーゼル燃焼によるNOxの低減", 新エィシーイー技術論文集, pp. 89~92.
6. J. Senda et al., 1998, "Spray Combustion of Liquefied CO<sub>2</sub> Mixed Fuel for NO and Soot Simultaneous Reduction", International Symp-osium COMODIA 98(in Kyoto), pp. 117~122.
7. J. K. Yeom, 2008, "Approach to Fuel

[저자 소개]

Economy by Diesel Spray Control”, KSAE Auto Journal , Vol. 30, No. 6, pp. 34~38.

8. J. K. Yeom et al., 2008, "Advanced Analysis and Measurement of the Unsteady Evaporative Diesel Spray", KSME(B), Vol. 32, No. 7, pp. 529~535.
9. 鹽路昌宏 外 4人, 1988, "晝像處理におけるディーゼル火炎の解析", 日本機械學會論文集 (B), 54券 504號, pp. 759~780.
10. K. H. Lee and C. H. Lee, 2007, "Experimental Study on the Flow and Mixture Distribution in a Visualization Engine Using Digital Particle Image Velocimetry and Entropy Analysis", IJAT, Vol. 8, No. 2, pp. 127~135.
11. 엄인용, 박찬준, 2006, "흡입 밸브 각도에 따른 압축 행정 중 실린더 내 유동 특성", 한국자동차공학회논문집, 14권, 4호, pp. 77~83.
12. 최규훈, 박종호, 이내현, 1998, "가솔린 직분식 엔진의 연소실 개발을 위한 분무 및 유동장 해석", 한국자동차공학회논문집, 6권, 6호, pp. 202~209.
13. 안용흠 외 4인, 2004, "엔트로피 해석과 PIV를 이용한 HCCI 엔진용 스윙 인젝터의 분무 특성 해석에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 12권, 1호, pp. 39~47.
14. 이창희, 이기형, 이창식, 2005, "DPIV와 엔트로피 해석방법을 이용한 가시화 엔진내의 유동특성 및 성능효과에 관한 실험적 연구", 한국 자동차공학회논문집, 13권, 1호, pp. 9~18.
15. 최육, 홍창호, 최병철, 2001, "비정상 고압 디젤 분무의 공기 유입성향 추정", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, 1호, pp. 311~317.
16. ANSYS CFX release 11.0, ANSYS Europe, Ltd., 1996~2006.
17. S. Y. No, 2009, "Jatropha Oil as Substitute Fuel in Compression Ignition Engines", ILASS-Korea(in Kyungju), Proceedings, pp. 54~59.

염정국

E-mail : laser355@dau.ac.kr

Tel : 051-200-7640

동아대학교 기계공학과