

일본 액체미립화 분야의 최근 연구동향

이 지근 (일본 히로시마대학 박사후 과정)

Jeekuen Lee (Post-Doc. Univ. of Hiroshima, Japan)

1. 서론

전 세계적인 관심사로 대두된 환경오염문제는 주요한 오염원으로 지목되는 자동차 배출가스의 저감을 요구하게 되었고, 이에 대응하기 위한 많은 노력이 이루어져 왔다. 특히 자동차로부터 배출되는 오염물질과 직접적인 관련이 있는 연료분사장치는 자동차의 발달 역사와 같이 해 왔다고 해도 지나치지 않을 것이다. 이러한 배경에서 분무 미립화와 관련된 연구, 특히 자동차 연료 분사계 및 분무와 관련된 연구는 최근 들어 두드러진 발전을 거듭하는 분야 중 하나가 되었다. 미립화 기술의 응용은 소요기술을 창출하는 사회의 산업적 구조와 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히 일본의 자동차 산업은 미국의 빅 3와 더불어 발달되어 있고, 이와 관련된 미립화 관련 연구 또한 매우 활성화되어 있어, 일본의 미립화 연구동향을 살펴보는 것이 관련분야 연구자들에게 흥미로운 것으로 생각되어 이 분야의 연구 동향을 간략히 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 연구분야

일본 미립화 분야의 연구동향을 개괄적으로 살펴보기 위해 최근에 개최된 학술대회의 세션 구성 및 개괄적인 내용을 검토해보는 것이 한 방법이 될 수 있을 것이다. 가장 최근에 개최된 미립화 관련 학술대회로는 제 11회 일본 미립화심포지움 (The 11th Symposium (ILASS-Japan) on Atomization, Dec. 19-21, 2002, Keio Univ.)이 있으며 세션 구성은 다음과 같다.

- Wall impingement: 단공 및 다공 디젤분무, wall-guided 직접분사식 가솔린 분무 및 fan spray의 벽면 충돌 전·후의 구조적 거동
- Internal flow: 단공 및 다공 디젤노즐의 10배 및 50배 확대 모델을 이용한 노즐 내부유동-미립화 상관관계 규명 및 cavitation이 미립화에 끼치는 영향에 관한 수치해석적 연구, 직접분사식 선화형 노즐을 내부유동 및 액막 형성·분열과정 규명
- Gasoline direct injection (GDI): High-pressure swirl type 노즐의 내부형상변화에 따른 분무의 거동 해석, 2-stage 분무의 구조적 거동 및 미립화 특성, Slit nozzle의 형상에 따른 유동 및 분무 미립화 특성
- Transient characteristics of diesel spray: 다성분 연료의 미립화 특성, 군분공 (group-hole) 노즐의 미립화 특성, 분사율의 주기적 변화를 이용한 액적 공간분포 특성 개선
- Measurement technique of spray: 액상 및 기상 동시 분리계측을 위한 광학적 기법의 응용, Planar Droplet Sizing 기법, 레이저 회절법의 확장
- Spray heat transfer: Mist cooling 및 분무 소화시스템, 분무 및 주위 공기의 열전달 계측
- Atomizer characteristics: 2유체 노즐, 제트엔진용 노즐, 고속분사용 노즐의 무화 특성 해석
- Ignition and combustion of fuel spray: 부분 예혼합 연소의 액적 크기의 영향, 예혼합 분무의 균연소 특성, Homogeneous

Charge Compression Ignition (HCCI) 엔진의 부분 불균일 혼합기가 연소 특성에 끼치는 영향

- Disintegration of liquid column and sheet: 공기흐름 중에 놓여진 액적 및 액주의 분열 거동
- Dispersion of fine drops: 초임계 유체를 이용한 미소입자의 생성과 분산 특성
- Mechanism of atomization: 초음파 및 전자기력을 이용한 미립화 촉진
- Application of spray: Flash boiling 분무 특성, 산화 연소 배출물 제거를 위한 분무 기술의 응용

세션 구성에서 알 수 있듯이 한국액체미립화학회 (ILASS-Korea)에서 다루고 있는 분야와 유사하게 매우 폭넓은 주제가 다루어지고 있다. 그러나, 중요 관심사항으로 대두되는 분야를 별도의 세션으로 비중 있게 다루고 있으며, 연구논문 또한 속도 형태의 최신 기술 및 연구 중에 획득한 새로운 내용을 형식에 구애받지 않고 발표할 수 있는 기회를 제공하는 것이 주목할 만하다. 학회의 학술활동 또한 활발하여 매년 개최되는 미립화 심포지움 (ILASS-JAPAN) 이 외에 일본 기계학회 및 자동차공학회 등의 학술대회에 미립화 관련 세션이 별도로 마련되고 있다. 또한 년1회 대학원생 및 신진기술자를 대상으로 분무특성 측정기법 및 실습에 관한 포럼이 관련 산업계와 공동으로 열리고 있어 미립화관련 기초기술의 전파 및 신진 연구인력 양성에 많은 노력을 기울이고 있다. 포럼의 내용은 미립화 관련 기초기술로서 다음의 주제가 실습과 동일한 비율로 다루어지고 있다.

- 액체 미립화 및 분무특성의 이론적 고찰
- 미립화 측정법의 특성 및 측정 데이터의 처리
- 레이저 회절법에 의한 액적 크기 측정
- 위상도플러법, 간섭화상법, PIV 기법의 응

용

- 분무-연소장에 있어서 분무 계측 기법
- 분무 측정관련 신기술 동향 및 응용 사례
- 에어로졸 및 미립자 측정 기법

최근에는 학회 주관으로 미립화 관련 내용과 용어를 체계적으로 정리한 "Atomization technology-微粒化 基礎 및 基本用語辭典, 日本液體微粒化學會編, 2001년 11월 30일" 이 출판되었다. 특히 용어와 관련된 내용을 상세히 정리하여 국내 연구자가 용어의 한글화에 긴요하게 참고할 수 있을 것이다.

2.2 연구내용

현재 다양한 분야의 여러 사항이 중요 관심분야로서 다루어지고 있지만, 몇 가지 예를 들면 직접분사식 가솔린 분무시스템의 개발과 디젤엔진의 common rail 분사 시스템에서 다단분사의 injection rate shaping 및 군분공 (group-hole) 분무의 연구 등을 들 수 있다. 이와 관련된 개괄적인 내용을 기술하면 다음과 같다.

2.2.1 직접분사식 가솔린 분무

4행정 GDI (Gasoline Direct Injection) 엔진은 기존의 포트분사식 엔진에 비해 뛰어난 연비와 배기가스 저감의 가능성이 평가된 이후 전 세계적으로 활발히 연구가 진행되어져 오고 있다. GDI 엔진은 사용된 용어자체에서 알 수 있듯이 연료분사시스템이 핵심이다. 연료분사시스템의 기본개념은 초회박 연소를 실현하기 위한 성층연소 (stratified charge combustion)와 이를 위한 희박한 연료균을 스파크 플러그 주변에 모아두는 것이다. 이러한 기본개념에 부합한 연소시스템은 초기의 Wall-guided 형태로부터 최근 들어 Air-guided 그리고 Spray-guided 형태로 발전이 진행되고 있다. 연료 분사기로는 High-Pressure Swirl-type Injector (HPSI)가 폭넓게 응용되고 있다. HPSI는 익히 알려진 바와 같이 노즐 선단에 위치한 스웰 챔

버에서 분사되는 연료에 선회성분을 주어 미립화를 촉진하도록 되어 있다. 최근의 개발 동향은 노즐 내부의 Sac volume 및 스월 그루브(swirl groove)의 기하학적 형상변경을 통한 분무의 거동을 제어하고, 앞서 언급한 3가지 형태의 연소시스템에 적합한 최적의 분무 형태를 찾는 방향으로 진행되고 있다. 특히 완전히 발달된 원추형(hollow-cone) 분무 이전에 형성되는 Pre-swirl spray의 유무는 엔진 성능 및 배기가스 특성과 밀접한 관계가 있어, Sac volume이 변경된 노즐을 이용하여 분무 미립화-연소특성 파악 및 노즐 형상 인자와 각종 특성치 사이의 상관관계를 체계적으로 정리해 가고 있다. 또한 분무각과 분무형상은 Air-guided 및 Spray-guided 시스템에서 매우 중요한 인자로 취급되고 있어 시스템 요구사항에 적합한 분무를 형성하기 위한 연구가 진행되고 있다.

직접분사식 노즐 분무의 특성 평가는 분무 도달거리, 분무각 및 분무폭 등과 같은 분무의 구조적 거동과 더불어 액적 크기 및 분무 유동장의 속도분포 측정 등이 엔진 연소실 조건과 유사한 고온·고압 환경에서 이루어지고 있다. 최근에는 분사된 연료 분무의 증기상 및 액상의 동시계측을 통해 연소실내의 분무 거동을 보다 자세히 예측하고 있으며, 결과를 노즐 개발에 적극적으로 반영하고 있다. 이와 더불어 PIV의 확장이라 할 수 있는 LIF-PIV (Laser Induced Fluorescence-Particle Image Velocimetry) 기법을 이용한 분무 액적 및 분무 내·외부의 공기 속도의 동시 계측을 통한 분무-공기 상대속도 평가가 이루어지고 있다. LIF-PIV 기법에 있어서 가장 중요한 형광 염료로는 Rhodamine B ($C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$) 등이 이용되고 있다.

최근까지의 직접분사식 가솔린엔진의 분무 및 연소특성과 관련되어 지금까지 각종 문헌에 나타난 내용을 체계적으로 정리한 "Automotive Gasoline Direct-Injection

Engines, 2002, SAE (Society of Automotive Engineers), Fuquan Zhao et al."이 최근에 출간되었다. 현재 개발단계에 있고, 향후 발전가능성이 무궁한 직접분사식 연료분사시스템 관련 연구자에게 유익한 참고서가 될 것으로 생각한다.

2.2.2 디젤 분무

디젤분무의 초고압화는 오염물질 저감에 효과가 있다는 사실은 널리 알려져 있으며, 2단 3단 분사를 통한 injection rate shaping은 오염물질 저감에 효과가 있어 많은 연구가 수행되어져 왔으며, 이에 대한 결과는 일본자동차기술회지 "Current and Future Tasks for Combustion Technologies of Heavy Duty-Diesel Engines, Vol.53, No.4, 1999" 및 SAE Technical paper 등에 많이 소개되어 있다. 그러나 연소 및 배출가스 특성에 미치는 다단분사 분무의 직접적인 영향이 아직 뚜렷이 규명되지 않아 이 분야에 대한 연구가 최근 들어 진행되고 있다.

노즐 형상과 관련된 연구로 군분공(group-hole) 노즐에 대한 연구가 이루어지고 있다. 군분공 노즐이란 1개의 노즐 분공을 출구면적을 동일하게 유지한 상태에서 2개 이상의 분공으로 분리하여 설치하는 것으로서, 5공 노즐의 경우 1개의 노즐 분공 위치에 분공을 2개 이상 설치하는 것을 의미한다. 이와 같은 군분공 노즐은 인접한 분공의 상호작용으로 분무선단 도달거리의 최소한 감소를 갖고 분무각 증가, 액적크기 감소 및 공기 유입을 증가의 효과가 있어, 기존의 단공 및 다공 노즐보다 우수한 연료-공기 혼합특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 주요한 설계변수로 군분공간의 거리가 0.1-0.7 mm의 범위에서, 그리고 군분공의 기울기 -10° ~ $+10^{\circ}$ (0° 의 경우 두 분공이 평행) 범위에서 검토되고 있다.

2.2.3 광학을 응용한 측정방법

이미지 프로세싱, 레이저 회절법, 위상도 플러법 (LDV 및 PDA 등), Particle Image Velocimetry (PIV) 등 고전적인 방법 이외에 광학을 응용한 측정방법이 개발·응용되고 있다. 특히 기존에 널리 알려진 Laser Induced Fluorescence (LIF), Exciplex Fluorescence, Laser Absorption Scattering (LAS) 기법 등의 단점을 보완하여 작동엔진의 연소실과 유사한 고온·고압조건에서 분무의 액상 및 기상을 분리 계측하고 분무 내로의 공기 유입율을 측정하여 분무의 엔진시스템의 적합성을 평가하고 있으며, 다양한 온도 모델을 적용하여 분무 내부의 온도 등을 예측하는데 활용하고 있다.

이와 관련하여, 지난 11회 미립화 심포지움에 Invited lecture로 강연을 한 서울대학교 윤용빈 교수의 "Qualitative Measurement of Spray Characteristics Using Planar Imaging Technique"는 광학적 측정기법의 응용에서 반듯이 수행되어야 할 측정기법의 정확성을 체계적이고도 정량적으로 검증하여 큰 주목을 받은 바가 있다.

3. 결론

분무 미립화 기술의 발달은 분무의 물리적 현상 규명과 관련된 학문적인 측면과 이를 응용하기 위한 기술적인 측면의 발달이 병행되어질 것이다. 이를 위해서는 다양한 형태로 표출되는 미립화 현상의 체계적 규명을 위한 장기적인 연구의 지원이 필수적이며 특히 기술의 소요창출을 위한 산·학 연계의 공동노력이 절실한 시점이라고 할 수 있다.

끝으로, 이 글은 연구동향에 관한 소개이기 때문에 다소 포괄적으로, 세부적이고 상세한 내용을 원하는 분들에게는 다소 부족한 점이 있을 것으로 생각되지만, 국내 미립화 관련 연구·기술자 여러분들이 일본 미립화의 전반적인 연구 동향을 파악하는데 조금이나마 참고가 되었으면 한다.

(jkleee@mec.horoshima-u.ac.jp)