

미국 자동차 기술 동향

Automotive Technology Trend in USA

최 대 / 미국 국립 샌디아 연구소
Dae Choi / Sandia National Laboratories, U.S.A.

1990년대 이후, 자동차용 내연기관의 배기에 포함되는 유해배출물의 저감대책에 관한 연구개발이 초미의 관심사가 되어 있는 가운데, 한동안 유럽 및 일본에 주도권을 내어준 듯 했던 미국이 2000년대에 들어 그 어느 때보다 관련 연구개발 분야에 대해 미정부 주관 연구 프로그램을 중심으로 과감히 투자하고 있음을 곳곳에서 감지할 수 있다. 최근 미국내에서 이루어지고 있는 자동차 기술관련 연구개발 동향을 살펴보면, 기초연구로부터 산업현장으로의 응용에 이르기까지 산·학·연 상호간의 유기적이고도 원활한 협조가 두드러지고 있다. 이러한 노력들은 종래와는 달리, 획기적인 배기개선이 확실시되거나 적어도 그 가능성이 충분히 예견되는 엔진 시스템 개발과 그 적용확대에 집중되고 있다는 점에서 주목할 필요가 있다. 특히, 이들 연구개발 과정으로부터 얻어질 결과들은 향후 엔진 시스템 관련분야의 R&D, 생산기술 분야에 있어 필수 불가결한 원천기술로서의 활용이 예상되고 있으며, 이를 바탕으로 한 관련산업분야의 경쟁력으로 이어지리라 분석되고 있다.

디젤기관 연구개발에 대한 관심고조

배기 유해배출물에 관한 규제가 날로 강화되고 있는 가운데, 이를 달성하기 위한 일련의 과정에서 가솔린기관과 디젤기관으로 대별되는 종래의 피스톤식 내연기관의 구분방식이 변화가 일어나고 있다. 실례로서, 직접분사식 가솔린기관의 경우, 예혼합 균일 혼합

기를 이용하는 종래의 가솔린기관과는 달리 운전조건에 따라서는 연료와 공기의 균일한 혼합을 오히려 피하고 공간적으로 불균일한 혼합기 농도를 이용하는 방법을 택하고 있다. 반면, 직접 분사식 디젤기관에 있어서는, 연료분사 후 착화에 이르기까지의 시간을 충분히 확보하여 실린더 내부에 혼합기를 공간적으로 균일하게 분포시켜 자착화시키는 방식이 종래의 방식과 다른 점이라고 할 수 있다.

이 두가지의 연소방식의 경우, 연비개선과 유해배출물 저감이 주요 관심사이고, 이중 직접 분사식 가솔린기관은 1990년대 후반 일본을 시작으로 양산형 엔진으로까지 실용화에 성공한 바 있다. 최초, 시장에 선을 보인 직접 분사식 가솔린기관의 경우, 약 10% 정도의 연비 개선효과가 기대된 반면, 실제의 경우 최대 5% 이내로 제한될 뿐만 아니라 기존의 가솔린기관에서 볼 수 없었던 입자상 물질의 배출규모가 급증하는 등, 고효율 고배기 성능을 전제로 하는 차세대 자동차용 엔진 시스템으로서의 성립여부에 대한 진지한 검토 및 개선이 필요하다는 분석도 나오고 있다.

이러한 배경과 함께 최근, 미국내에서 한동안 터부시해왔다고도 할 수 있는 디젤기관에 대한 자동차 산업계의 관심이 점차 고조되고 있다. 이는 전체 차량보유대수 대비 디젤기관탑재 차량비율이 아주 미미한 미국내의 실정을 고려하면, 연비개선을 목적으로 하는 최신의 직접분사식 압축착화기관의 보급은 현재 시점에서 당분간 외면할 수 없는 대안 중의 하나라는 점이 이해된다. 이러한 배경으로 압축착화기관과 관

〈표 1〉 DOE CIDI 주요 프로그램 및 주요 연구 내용

주요 프로그램	연구내용
In-cylinder Combustion Studies and Modeling	In-cylinder Condition, Fuel Parameters on Soot Formation Measurement & Modeling on In-cylinder Turbulence Physics Spray Research Multi-dimensional KIVA Modeling Extending EGR Limits and EGR-Air Optimization PM Measurement, PM Reduction Strategy HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition)
Fuels for CIDI Engines	Oxygenated Diesel Fuel Diesel Fuel Chemistry Modeling Urea SCR Catalyst Sys. Evaluation for Unregulated Emission, SCR(Selective Catalytic Reduction) Isotopic Tracing of Fuel Components in Combustion Product
Emission Control Devices for NOx and PM Control	NOx Reduction for Lean-Burn Engine Integrated PM and NOx Reduction Device NOx Absorber Catalyst System Plasma Assisted Catalysts for NOx reduction Sulfur Management in NOx Absorber Catalyst System
Propulsion Materials	Fabrication of Small Orifice Microwave-Generated Diesel Exhaust Particulate Filter High Density Infrared Plasma Arc Lamp Processing Electrochemical NOx Sensor

런, 최근 미국내에서 수행되고 있는 대표적인 연구동향을, DOE (Department of Energy)에 의해 주도되고 있는 「In-cylinder Combustion Studies and Modeling」프로그램 중심으로 개관하기로 한다.

DOE CIDI 연구 프로그램

미국내에서 수행되고 있는 직접분사식 압축착화기에 관한 대표적인 연구 프로젝트로서 DOE 산하기

구인 OAAT (Office of Advance Automotive Technologies)와 OHVT (Office of Heavy Vehicle Technologies)에 의해 주도되고 있는 「DOE CIDI (Compression Ignition Direct Injection) Engine Combustion, Emission Control, and Fuels R&D」를 들 수 있다. 이 프로그램은 DOE 산하 혹은 DOE 지원 하에 있는 미국내 국립연구소들의 주도로 수행되고 있으며, 이중 일부는 미국내 주요 대학들이 공동 연구그룹으로 참여하고 있는 프로젝트들이기도 하다. 특히, 이들 성과에 대한 평가가 연구수행과 직접적 관련이 없는 미국내 자동차 업체의 R&D 부문 전문기술인력에 의해 매년 시행되고, 그 피드백 결과에 따라 해당 연구프로젝트의 존속여부가 결정된다는 점은 본 프로그램이 갖는 경쟁력의 근원이라 사료된다. 이러한 점들로 미루어 볼 때, 현재 시행되고 있는 프로그램들은 미 정부를 포함한 당해 기관들에 있어 충분한 인프라 구축을 바탕으로 한 산학연 공동 프로젝트라고 할 수 있다.

2002년 현재, DOE CIDI 프로그램은 〈표 1〉에서 보인 바와 같이, 총 4개 부문에 걸쳐 수행되는 프로그램으로 구성되어 있으며, 세부 27개 과제로 구분되어 있고 연구범위로서 실린더내 분무연소현상으로부터 NOx 센서 개발에 이르는 등, 기초분야로부터 응용기술 개발 분야에까지 비교적 폭 넓게 다루어지고 있음을 알 수 있다.

In-cylinder Combustion

DOE CIDI 프로그램 중 기초연구에 해당하는 프로젝트 군이라 할 수 있으며, 이들로부터 얻어지는 성과의 관련산업분야에 미치게 될 영향이 프로젝트 평가에 있어 중요한 판단기준이 되기 때문에, 결과적으로 기초연구의 성격을 띠고 있으면서도 연구배경 및 목적에 실제적용을 위해 지향해야할 점이 피드백 의견서에 구체적으로 명시되어 있다는 점이 매우 흥미롭

다. 이는 기초연구의 특성상 발생할 수 있는 비효율성을 차단하기 위한 노력의 일환으로 보여진다. In-cylinder Combustion Studies and Modeling 분야에서는 주로 CIDI 기관 실린더내 분무연소과정의 현상규명을 위한 물리·화학적 기구들이 주된 연구대상이며, 예혼합 압축착화연소의 연소기구 규명과 아울러 연소기구에 영향을 미치는 파라미터들이 심도 있게 조사되어지고 있고, 입자상 물질의 측정법 개발도 병행 추진되고 있다.

Argonne Nat'l Lab.은 X-ray 흡수법을 디젤분무 주변 공간에 분포하는 연료농도의 정량적 측정에 이용하는 등, Low-emission CIDI 엔진 디자인과 관련하여 디젤분무의 수치 모델 개발을 위한 데이터 베이스 구축을 시도했다는 점이 높이 평가되고 있다. 그러나 디젤연료분무에 대한 미시적 거동 관찰을 위한 측정법 자체의 분해능 개선이 여전히 과제로 남아 있는 가운데, 기존의 디젤분무 진단 분야에서 좀처럼 얻기 힘들었던 혼합기 형성과정에 있어 연료농도의 시·공간적 정량화가 시급히 해결해야 할 과제로 지적되고 있다

Oak Ridge Nat'l Lab.의 경우, EGR Level의 최적화를 위한 연구를 수행하고 있다. EGR 한계의 최적화는 통상적인 압축착화연소 뿐만 아니라 새로운 개념의 연소법 구현에도 요구되는 사항이며, 특히, 저온 연소 혹은 Smokeless 연소라고도 일컬어지는 저온산화반응을 이용한 연소법의 실제적용에 필수 불가결한 요소로서 향후의 방향전개가 큰 관심의 대상이라 하겠다.

Los Alamos Nat'l Lab.은 내연기관 분무연소 현상의 수치적 모델링을 위해 자체 개발한 KIVA 코드의 개선을 지속하고 있다. 최근, KIVA 코드의 재현성이 LES (Large Eddy Simulation) 방식과 DNS (Direct Numerical Simulation) 방식의 수치해석법과 비교되는 등 거센 도전을 받고 있는 가운데, 지금까지의 방대한 실험 데이터와의 비교검토를 통한 개

선을 통하여 엔진개발에 직접 이용되는 단계에까지 이르렀다고 보고되고 있다. KIVA 코드가 갖는 현재의 문제점으로, 난류유동장내의 제 물리량이 극히 짧은 시간 동안에 변동과 변화를 거듭하는 함으로 인해 수치적 예측이 여전히 난해하다는 점과 비정상 상태의 연소 및 미립자 생성·산화과정을 정확하게 재현하는 모델이 완성되어 있지 않다는 점을 들 수 있다. 한편, 최근 뛰어난 연산능력의 슈퍼컴퓨터를 이용한 난류모델의 적합성 검토와 Chemical Kinetics와 KIVA 모델내의 지배방정식과의 Coupling에 의한 수치해석 수법이 개발되는 등, 과거 어느 때보다 실제의 압축착화연소 현상에 근접한 결과가 얻어지리라는 평가도 아울러 보고되고 있다.

한편, Sandia Natl. Lab 내의 엔진연소 연구그룹에 의해 수행되고 있는 연구는 크게 3가지로 요약 가능하다.

1. 디젤분무화염에서의 수트생성 및 PM계측
2. 디젤분무화염의 난류거동 및 모델링
3. 예혼합압축착화 기관

수트 생성과정의 규명을 위해서 In-cylinder Condition, Injection System, Flame Lift-Off, 연료성상 등을, 수트생성과 관련된 주요 영향인자로 선정하여 각종 조건에 따른 물리적·화학적 특성이 다각적으로 조사되고 있다. 현재, 수행되고 있는 연료성상과 연료분사계의 조합을 통한 파라미터 스테디의 결과는 종래 얻어진 현상학적 수트생성 모델에 비해 수트생성과 영향인자들 사이의 상관관계가 보다 명확하고 구체적으로 기술된 실험적 모델로 이어지리라 기대된다. 이러한 일련의 과정에서 얻어진 결과들은 일차적으로 디젤분무 및 연소 모델링 평가를 위한 기초자료로 이용되어질 것이 예상되며, 나아가 질소산화물과 수트로 대표되는 유해배출가스성분 억제를 위한 엔진 운전조건의 설정 및 분사계 디자인시의 기초자

료로 이용되어질 수 있을 것이라는 점이 본 연구로부터 기대되는 점이라 할 수 있다.

한편, 입상상 물질의 생성·산화거동에 미치는 실린더내 유동특성의 영향이 결정적임에도 불구하고 실린더내 유동해석이 상세하게 이루어진 전례가 없었던 점에 착안하여 현재, 실린더내 유동특성, 특히 난류 계측 및 모델링이 시도되고 있다. 그 결과, 지금까지 알려지지 않았던 새로운 사실들이 속속 발견되고 있다. 그 가운데, Late Cycle시 생성되는 난류강도는 연소에 의한 가스팽창보다 오히려 연소실 그 자체의 형상에 의해 유기되는 독특한 유동패턴에 지배됨을 밝히는 등, 수트의 재산화과정의 인위적 조절 가능성까지 제시한 것으로 평가되어 향후의 연구결과가 주목되고 있다.

1990년 중반 이후부터 본격적으로 연구되기 시작한 예혼합 압축자착화 (HCCI) 연소법은 종래의 디젤기관이 갖는 근본적인 문제점, 즉 질소산화물과 입상 물질의 트레이드 오프 관계를 개선할 수 있는 유력한 대안으로서 알려져 있다. 이는 공기와 연료를 미리 예혼합시켜 균일한 혼합기를 형성한 후, 압축착화시키는 방식으로 연소를 진행시키는 방법이다. 따라서, 종래의 디젤기관의 연소패턴에서 기대할 수 없었던 클린한 연소가 얻어진다. 이 연소법은 질소산화물과 수트 생성량을 대폭 감소시키는 등의 장점이 있는 반면, 착화시기 및 연소속도의 제어곤란, 미연탄화수소 발생 등과 같은 제 문제점을 동시에 포함한다. 따라서, 종래의 디젤기관을 완전히 대체할 수 있는 연소법이라고는 인식되어지지 않고 있으나, 최근 거듭된 연구개발의 결과, 향후 디젤기관과 관련된 자동차 산업 분야에서 최신 직접 분사식 디젤기관과 경합하며 서로 시장을 양분할 가능성까지 조심스럽게 짐작되고 있는 실정이다. 현실적으로는 이에 대한 설득력 있는 평가가 많지 않은 실정이나, 미국내에서도 예혼합 압축자착화에 대한 가능성으로 두고 많은 논의가 이루어지고 있다. 이와 관련하여 처음단계의 연구개발 동

향을 살펴보면 예혼합 자착화 연소기구 그 자체에 대한 연구가 우세하였다기 보다, 엔진시스템을 이용한 시행착오적 배기성능 개선의 확인과정이 다소 우세하였다. 그러나 이 연소법을 통해 얻어지는 배기성능의 개선원인으로서 물리적 요인보다 화학적 요인이 지배적이다 하여 최근에 이르러서는 화학반응론을 토대로 한 열역학적 접근 방법이 택해진 연구보고가 다수 행해지고 있다. 이러한 가운데, SNL에서 수행하고 있는 HCCI 연구를 그 대상에 따라 구분하면, 크게 기술된 HCCI 와 Diesel Fuel HCCI 로 나눌 수 있다. 이들 프로젝트에서는 상기 언급한 HCCI 엔진개발시 장애가 되는 문제점을 극복하기 위한 방법이 새롭게 조명되고 있고 이를 통하여 HCCI 엔진 운전조건에 있어서의 자유도를 확대하고자 하는 점에 연구의 초점이 맞추어져 있다. 이를 위해서 실기관, Optically Accessible Test Engine, 화학반응론적 모델링 등을 이용한 연구가 수행되고 있으며, HCCI 엔진 사용연료의 최적화, 혼합 제어 기술의 확보가 이루어지리라 기대된다. 아울러, 또 하나의 문제점으로 지적되어온 고부하시의 Feasibility에 대한 검토도 아울러 병행 추진되고 있다.

Lawrence Livermore Natl. Lab.의 연구그룹은 Detailed Chemical Kinetics Modeling을 이용한 엔진 모델 구축을 목적으로 현재 천연가스 HCCI 연구를 수행하고 있고 해당분야 발전에 큰 기여를 하고 있다. 최근에는 HCCI 엔진의 실제적용을 위한 노력의 일환으로 Reduced Model을 개발하여 호평을 받은 바있고, 수치적 모델의 검증을 위해 실엔진으로부터 얻어진 실험결과와 비교 개선을 행하고 있다. 그러나, 실기관을 이용한Chemical Kinetics Modeling의 검증이 극히 제한될 수 밖에 없다는 점을 고려하면, 운전조건의 최적화에 필요한 제어인자의 추출이 가능한가 라고 하는 논의의 쟁점이 될 수 있다. 따라서, 수치적 모델에 대한, 실엔진의 연소실 조건을 상정한 실험적 검증이 시급히 요구되는 실정이며, 이를 보완하기

위한 일환으로 SNL과의 HCCI 프로그램과의 연계가 이루어지고 있다.

Fuels & Emission Control Device

DOE CIDI 프로그램 가운데, 연료관련 프로그램은 크게 산소함유연료(SNL)와 Diesel Fuel Chemistry Modeling(LLNL)을 다루는 두 프로젝트로 구성되어 있다. 산소함유연료에 관한 연구테마의 경우, 현재 단계로서는 엔진시스템으로의 적용보다 Low Sooting Fuel의 엔진내부에서의 In-situ 연소 특성 파악에 초점이 두어지고 있으며, Diesel Fuel Chemistry Modeling의 경우는 엔진운전 파라미터, Combustion Chemistry 그리고 유체역학적 특성간의 상호관계를 규명하고자 하는 목적으로 추진되고 있다. 이중, Diesel Fuel Chemistry Modeling의 경우, 사용연료에 따른 입자상물질(Particulate Matter, PM), PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), CO, CO₂, NO_x 생성에 관한 상세 기구를 다루고 있으므로 이는 Detailed Chemical Kinetics Modeling에 유익한 데이터를 제공함과 아울러 연료제조단계에서 유해배출성분 저감을 위한 연료성분조정에 대한 힌트를 제공한다는 측면에서 높이 평가받고 있다.

한편, 압축자착화 기관으로 배출되는 유해배기가스 성분은 엔진후처리장치를 거치게 함으로써 한층 더 제거할 필요가 있다. 이를 위해서 DOE CIDI 프로그램에 연구개발되고 있는 질소산화물 및 입자상물질 저감을 위한 장치들을 요약하면 다음과 같다.

- NO_x Absorber Catalyst System
- NO_x 저감을 위한 Plasma Assisted Catalyst
- PM 및 NO_x 저감을 위한 Non-thermal Plasma System
- Microwave-Regenerated DPF (Diesel Particulate Filter)

맺음말

이상, 미국내에서 이루어지고 있는 자동차 기술과 관련된 연구개발동향 가운데, 압축착화기관과 관련된 최근 연구동향을, DOE CIDI 프로그램을 통해 간략히 개관해 보았다. 이들을 다시 요약하면 다음과 같다.

- 직접분사식 디젤기관의 연소개선을 통한 유해배출물의 저감
- 예혼합압축자착화 기관을 통한 배기저감
- 연료개선
- 배기후처리를 통한 배기 유해성분제거

획기적인 배기유해성분을 감소시키고자하는 이러한 전략적 접근은 미국만이 아니고 한국, 일본, 유럽에서도 공통적으로 택해지고 있다. 다만, 이들을 통해 다루어지는 연구개발 분야가 매우 방대한 분야에 걸쳐 있기 때문에 상호간의 유기적인 연계가 확보되어 있지 않을 경우, 자칫 지향해야 할 목표자체가 산만해질 가능성에 대해 경계해야 한다고 사료된다. 이러한 측면에서 미국 정부가 지원하고 있는 DOE CIDI 프로그램은 시너지 효과를 배가시킬 수 있는 효율을 가지고 있다고 할 수 있다. 특히, 기초연구에서 응용기술개발 단계까지의 모든 과정에 있어 연구소, 대학, 산업현장이 의견이 반영된다고 하는 점이 매우 인상적이고 주목할 만한 가치가 있다고 사료된다.

(최대 편집위원 : choi-dae@hotmail.com)