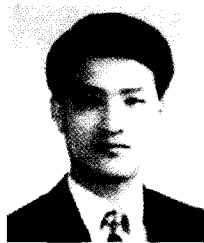


저온 모드 연소

Low Temperature Modes Combustion



최 대 / 미국샌디아 국립 연구소
Dae Choi / Sandia National Laborat, U.S.A.

저공해 차량의 개발 및 보급이 과거 그 어느 때보다 시급히 요구되고 있는 최근, 미국내에서도 자동차 배출 가스 규제 강화 및 연비 향상에 부응하기 위한 장·단기적 정책이 보다 구체적으로 논의되고 있다. 미국의 경우, 현재에 이르기까지 에너지 수급 환경이 원활하였던 관계로 전체 차량 대비 가솔린 엔진 탑재 차량 비율이 현저했으며, 이러한 점이 저공해 차량 개발 및 보급에 요구되는 대체 동력원, 이른바 천연가스, 메탄올, 하이브리드 차량 개발과 관련, 선택 폭이 좁았던 구조적 이유로 지적되어 왔다.

현재, 미국에서 논의되고 있는 자동차 연비 향상과 배출 가스 규제 달성을 위한 프로그램을 대략 살펴보기 위해 시행 우선 순위를 기준으로 하여 장·단기적 프로그램으로 나누어 보는 것이 편리하다.

자동차 산업계를 중심으로 개발 단계 혹은 부분 실행 단계에 와 있는 단기 프로그램에 있어서는 가솔린 차량과 디젤 차량이라는 기존의 틀을 유지하면서 당면 배기 규제치를 극복해 나가는 것이 현실적으로 타당하다는 것이 지배적이다. 즉, 향후 시장에 선보일 저공해 차량이 연비 향상 및 Power Density 측면에

서 기존의 시스템을 대신할 수 있는지의 여부가 단기 프로그램 성사를 결정짓는 주요 요소로 인식되고 있다. 한편, 장기 프로그램에서는 연료전지 탑재 차량이 짧게는 십 수년, 길게는 수십년을 내다 본 차세대 저공해차로서 인식되고 있는 것이 일반적인 시각이라 할 수 있다.

상기 기술한 배경을 토대로 하여 단기적으로 계획되고 있는 배출 가스 규제 달성을 위한 프로그램 중, 실용화 가능성에 가장 근접해 있는 압축착화기관용 저온 연소법에 대해 소개하기로 한다.

미국내에서의 저온 연소법

미국 국내에서 차세대 연소법 중의 하나로써 실린더 내부 혼합기의 공간분포를 균일하게 함과 아울러 연소온도를 억제함으로써 NOx 및 수트로 대표되는 입자상 물질의 동시 저감을 목적으로 하는 저온 연소법 (Low Temperature Combustion Technology)이 주목받고 있다.

지난달 미국 캘리포니아에 위치한 샌디아 국립 연

구소 Combustion Research Facility에서 열린 2003년 일차 CRADA Meeting^{주1)}에서는 DOE 산하 국립연구소의 관련 연구진들과 이른바 미국내 Big 3로 일컬어지는 GM, Ford, DymlerChrysler의 연구 책임자들은 예혼합 압축 자착화와 MK, UNIBUS 등으로 대표되는 저온 연소법의 조기 적용이 US2007 규제치 만족을 위한 가장 경쟁력있는 수단임에 의견을 같이 하였다.

미국내 자동차 산업계가 실용화를 위해 향후 수년 간에 걸쳐 전례없이 강한 드라이브를 걸 것으로 예상되는 저온 연소법은 지난 십여년 간에 걸쳐 이루어진 미국내 몇몇 연구기관과 일본을 중심으로 한 활발한 연구성과 보고에 기초한 것이다. 대표적인 예로서, 예혼합 압축 자착화 연소법, 도요타 자동차의 연구그룹에 의해 제안되어 시장에 선을 보인 UNIBUS 및 Low Temperature Smokeless 연소법, 그리고 닛산 자동차 연구진에 의해 개발되어 실용화에 성공한 바 있는 MK 연소법 등을 들 수 있는데, 이들 모두 Low Temperature Combustion 기술로 구분할 수 있다는 점에서 서로 공통점을 갖고 있다.

수트생성에 관한 온도의 종성 · 저온 연소법

자동차 내연기관 관련 분야에서 저온 연소 반응이라는 용어가 본격적으로 거론되기 시작한 시점은 NOx 및 입자상 물질의 동시 저감을 위한 차세대 연소법의 연구개발이 한창 진행 중이던 1990년대 중반으로 거슬러 올라간다. 이러한 논의의 시점은 탄화수소계 연료의 산화반응기구에 대한 기존의 연구 결과를 통하여 수트 입자의 생성 기구를 재해석하고 이를

통하여 Low Sooting Combustion Technology의 확립을 도모하고자 했던 시기와도 대략 일치한다. 탄화수소계 연료를 이용하는 통상의 압축착화 연소 반응 과정에 있어 나타나는 대표적 특징은 주어진 분위기 조건에 따라 다소 상이하기는 하나 대략 저온 산화반응기구의 착화과정에 미치는 영향이 무시 가능한 정도이고, 고온 산화반응이 지배적임과 아울러 연소과정에 있어 수트 생성 온도역으로의 전이가 매우 신속하게 이루어진다고 하는 점이다. 이와 관련 주목할 만한 이론적 발견으로서 수트 생성에 관한 온도 의존성을 들 수 있다.

즉, 특정 고온역에서 수트 입자의 원인이 되는 방향족 탄화수소가 생성되고 근본적으로 이를 피함으로써 저수트 연소법이 가능하고 이는 연소온도를 극히 억제함으로써 실현 가능하다.

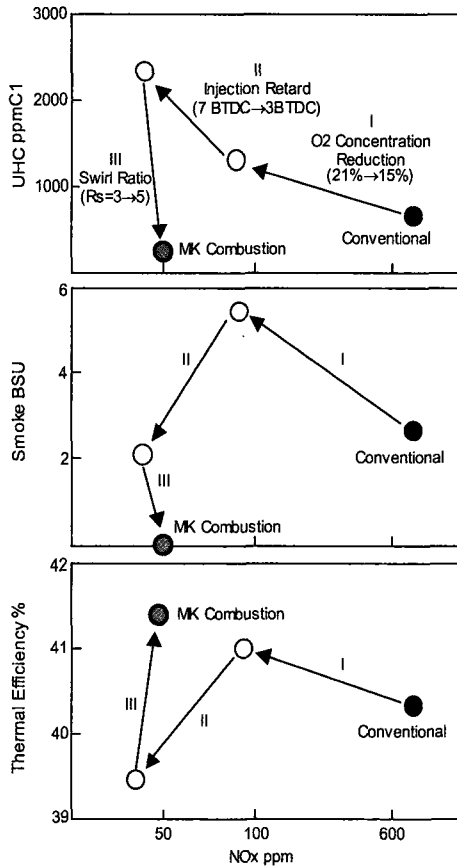
Low Sooting 연소법에 대한 제안은 내연기관 연소에 대한 화학 반응론적 접근으로부터 시작되었다고 할 수 있다. 한편, 실용화에 성공한 상술한 저온 연소법은 실린더내 과농한 혼합기의 공간적 불균일 분포와 불완전 연소의 원인을 해소함으로써 질소산화물과 입자상 물질을 동시에 저감시키고자 한 연구개발 단계의 시행착오적 산물이라고도 할 수 있으나, 최근에 이르러서 이 두 형태의 접근 방법의 적절한 조화가 이루어지고 있고, 초기 문제시되었던 연소제어 및 고부하 운전조건 등에 해결의 실마리가 제시되고 있다.

대표적 저온 연소법

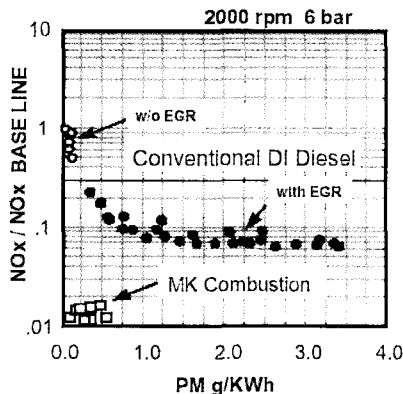
〈그림 1〉에 최근 미국내에서 집중적으로 연구 조사되고 있는 저온 연소법 중의 하나인 닛산의 MK

주1) CRADA Meeting

Cooperative Research and Development Agreement의 약어로서 DOE 산하기구인 Office of Advance Automotive Technology와 Office of Heavy Vehicle Technology의 주도하에 있는 DOE CIDI Engine Program 관련 연례 회의.



(그림 1) MK 연소법의 개념도



(그림 2) MK 연소의 NOx · PM 저감 특성

(Modulated Kinetic) 연소법의 개략을 소개한다. 잘 알려져 있는 바와 같이 질소산화물 저감을 위해서 실린더 내부의 연소온도를 저감시킬 필요가 있다. 이를 위해서 MK 연소에서는 종래의 엔진과 비교하여 다량의 배기가스 재순환(EGR)을 행하여 연소가스의 Heat Capacity를 증대시켜 연소열의 과대한 증가를 회피하고, 산소농도를 대폭 감소시키는 방법(〈그림 1〉의 I)으로 연소온도를 낮추고 있다. 한편, 입자상 물질 생성의 주 요인중의 하나인 확산연소의 비율을 줄이고 예혼합 연소 비율을 증대시키는 방법을 취함으로써 수트 생성을 억제하고 있다(〈그림 1〉의 II). 이는 실린더 내 연료분사 시기를 피스톤 상사점 후로 가져가는 분사시기 지연에 의해 실현되고 있으며, 이로 인해 발생하는 열효율 악화는 연소과정에 강한 스월류(〈그림 1〉의 III)를 도입하는 등, 가스유동의 최적화를 통하여 회복하고 있다. 〈그림 2〉는 MK 연소를 통하여 얻어지는 대표적인 질소산화물과 수트 동시저감 예이다.

저온 연소법의 실용화 및 과제

상기 MK로 예를 든 저온 연소법의 대표적 특징으로서 연소과정에 도입되는 배기가스 재순환 및 혼합기의 예혼합화를 들 수 있다. 이는 상기 언급한 다른 형태의 Low Temperature Modes 연소법, 예혼합 압축 자착화 연소 및 Low Smokeless 연소법 모두에서도 찾아 볼 수 있는 공통된 특징이다.

이들 연소과정에서는 필연적으로 저온 모드로 연소가 일어나는 관계로 종래의 압축착화기관에 비하여 연소온도가 낮고, 아울러 낮은 열발생을 등의 문제점을 내포하고 있으며 기술 실용화에 가장 큰 장애라고도 할 수 있는 고부하 운전이 극히 제한되는 결과를 낳는다.

따라서, 고부하 운전영역을 충분히 확보하기 위하여 각종 운전 파라미터의 최적화가 필요하고, 저온 연소법의 특성을 해치지 않는 범위 내에서 종래의 디젤 엔진의 운전 조건을 제어 파라미터로 설정하는 등 다양한 기술확보를 위한 노력이 경주되고 있다. 저온 연소법 실현을 위한 엔진 운전 조건으로 가장 크게 두 가지의 제어 패턴을 생각해 볼 수 있다. 하나는 <그림 1> 에서와 같이 패턴 I, II, III의 조합에 따른 운전이 바로 그것이고, 또 하나는 고부하 혹은 전부하 영역에서 통상의 압축착화 연소의 운전 패턴을 취하는 방법이다. 다만, 이 경우 통상의 직분식 디젤연소 방식의 운전 방식을 취하고, EGR을 행하지 않을 뿐만 아니라 저속의 스윙류 적용, 연료의 분사 시기도 통상의 피스톤 상사점 이전으로 되돌리는 등 통상의 운전방식을 이용하는 것이 일반적이다. 이러한 이유로 운전조건 변화에 응답이 가능한 가변 흡기 포트의 효용성이 점차 높아지고 있다.

한편, EGR 비율이 최대 40%를 초과하는 경우도 저온 연소법에서는 흔한 경우여서 EGR 거동이 배기 배출 및 연소 현상에 미치는 영향을 파악하는 것이 부분부하 혹은 전부하를 상정한 각종 엔진 운전조건 설정 및 최적화가 필수 불가결한 요소라고 지적되고 있다.

현재에 저온 연소법에 관한 기초연구 및 개발을 위한 준비가 상당부분 진행되었다고 평가되고 있기는 하나, 근본적으로 해를 얻어야 한다고 미국내에서 강조되고 있는 분야를 다음에 요약한다.

- 가. 연소조건 변화에 따른 착화시기 및 연소속도 변화의 안정화
- 나. EGR 영향 평가 및 최적화
- 다. 다량의 미연탄화수소의 발생 해소
- 라. 연료 소비율의 증가 완화
- 마. 전부하 영역 부근에서의 기관성능 확보
- 바. 파일로트 연료분사 등 기존 연료분사법과의 하이브리드화
- 사. 안정된 연소 사이클의 구현

이상의 과제에 대한 정확한 이해를 위해선 방대한 양의 케이스 스터디가 요구될 뿐만 아니라, 이들 서로 간의 상호 관련성을 규명해야 하는 일도 시급하다. 이러한 측면에서 본격적인 개발이 이제 비로서 시작되었다고 할 수 있다. 이에 따라, 미국내 관련 연구기관 및 대학 그리고 자동차 산업계에서는 상기분야의 개선에 관한 투자 계획을 바탕으로 저온 연소법의 실용화를 기하고 있는 바, 향후 4-5년간에 걸쳐 다수의 구체적인 연구성과가 기대되고 있다.

(최 대 편집위원: dchoi@ca.sandia.gov)