디젤 및 대체연료 예혼합 압축착화엔진기술

Diesel-Fueled HCCI Engines and Alternative Fuel

배 충 식 / Choongsik Bae
한국과학기술원 교수 / Korea Advanced Institute of Science and Technology

디젤 예혼합 압축착화 연소기술 개요

예혼합 압축착화(HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition) 연소기술은 연료와 공기의 균일 혼합기를 형성하고 이를 압축착화하는 연소방식으로 기존 디젤 엔진에 비해 PM과 NOx를 크게 저감할 수 있는 가능성을 가진 기술이다. 최근 커먼레일 시스템 도입으로 제어의 자유도가 높고 고압 분사가 가능해진 직접 분사식 디젤 엔진은 기계식 펌프를 사용하는 기존의 디젤 엔진에 비해 고속운전, 연비 그리고 배기가스 저감에 있어 큰 기술 발전을 이루었다. 그러나 그 연소 과정에 있어 압축 행정 말기에 연료를 고온, 고압 분위기의 연소실로 직접 분사시켜 액적의 증발 및 혼합기 형성과 연료의 산화 과정을 거친 후 착화되므로 공간적으로 불균일한 혼합기 영역이 존재하게 되고, 불균일 영역 중 농후한 영역에서는 입자상 물질(Particulate Mattter: PM)이 이론 공연비 영역에서는 NOx가 발생하게 되는 문제점을 갖고 있다. 또한 PM과 NOx는 서로 상반된 생성 관계를 가짐으로 동시 저감이 어려운 문제점을 갖고 있다.

예혼합 압축착화 연소기술은 연료의 흡기포트 분사 혹은 이른 시기에 행해지는 실린더 내 직접 분사 방법 등으로 균질(Homogeneous) 혼합기가 형성되도록 함으로써 PM 발생이 없고, 연소실 전체에서 다점 점화되므로 인해 연소온도가 낮아 NOx 발생이 크게 저감되는 장점을 가진다. 즉 예혼합 압축착화 엔진 기술을 디젤엔진에 적용할 경우 압축착화를 위한 고압축비 운전으로 열효율이 높을 뿐 아니라 부분부하에서의 희박연소를 통한 연비성능의 우월성을 보이는 기존 디젤 엔진의 장점을 유지하면서도 PM과 NOx의 동시 저감이 가능하며 점화 방법의 구분이 없어지므로 가솔린, 디젤, DME, 천연가스, LPG 등 가용 연료의 범위가 넓다는 장점도 가지게 된다.

디젤 예혼합 압축착화 연소기술 구분

예혼합 압축착화 연소기술은 가용 연료의 범위가 넓어 가솔린, 디젤, LPG, CNG 등은 물론 Iso-Octane, n-Heptane 등 단일 화학종 연료, DME 등의 대체 연료를 통해서도 시도되고 있으며 Base Engine 역시 기존 가솔린 엔진, 소형 및 대형 디젤 엔진, 가스 엔진 등으로 다양하다. 따라서 기존 엔진에 대한 방법으로는 기술 구분이 모호하며 기술명에 있어 HCCI(Homo-Geneous Charge Compression Ignition)와 같은 범주 안에서도 CICH(Compression Ignited Homogeneous Charge) Combustion, PCCI(Premixed Charge Compression Ignition), CAI(Controlled Auto-ignition), PREDIC(Premixed Diesel Combustion), UNIBUS(Uniform Higher-Dispersed Mixture Mormation), MK(Modulated Kinetics)와 같이 다양한 이름으로 제시되고 있다.

예혼합 압축착화 연소기술의 핵심은 예혼합기를 형성하는 데 있는 바 예혼합기 형성 방법에 따라 그 기술을 구분함이 타당하며 이에 따라 다음과 같이 세가지 기술로 나누어 볼 수 있다.

1. Premixed HCCI
2. Early Direct-Injection HCCI
3. Late Direct-Injection HCCI

Premixed HCCI 기술은 연료를 흡기포트에서 분사하여 공기와 연료의 혼합기가 흡기 행정 동안 실린더 내로 공급되도록 하는 방식으로 예혼합기 형성에 가장 적절하며 흡기포트에서 다양한 연료를 자유롭게 공급할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 실린더 내 온도와 압력이 낮은 흡기 행정중에 혼합기가 공급됨으로써 연료의 Wall Wetting 문제가 발생하며 Combustion Phase를 제어할 방법이 없는 것이 문제다.

Early Direct-Injection HCCI 기술은 기존의 직접분사식 디젤 엔진에 비해 극히 이른 시기에 연료를 실린더 내 직접 분사하여 예혼합기를 형성하는 방법으로 현재 연비 및 출력 그리고 배기가스 면에서 가장 발달된 디젤 엔진 기술인 커먼레일 분사시스템의 직접 적용이 가능하고 연료 분사 시기를 포함한 제어의 자유도가 큰 장점이 있다. 그러나 기존의 분사기를 사용할 경우 실린더 내 공기 밀도가 낮아 고압 분사하는 연료의 도달 거리가 길어지게 되고 벽면에 연료가 직접 충돌하는 Over-penetration 문제가 심각하며 역시 Combustion Phase를 직접 제어할 수 없는 문제점을 갖고 있다.

Late Direct-Injection HCCI 기술은 기존 직접분사식 디젤 엔진에 비해 늦은 분사시기에 연료를 실린더내로 직접 분사하되 높은 EGR율로 점화지연 기간을 늘여 예혼합기 형성 시간을 확보하고 High Swirl Ratio를 구현해 예혼합기 형성을 촉진토록 한 기술로서 기존 디젤의 PM 배출 수준을 유지하면서 NOx는 크게 저감시킬 수 있는 기술로 알려져 있다.

디젤 예혼합 압축착화 연소기술 미해결 과제

이처럼 디젤 엔진을 예혼합 압축착화 연소기술로 운전하고자 할 경우 발생하는 문제점은, 첫째로 디젤 연료의 점도가 높고 기화에 필요한 온도가 높아 예혼합기 형성이 어렵다는 점이다. 이 때문에 흡기관을 가열하여 높은 온도의 공기를 공급하는 것이 필요하다.

둘째 문제는 연료를 실린더 내 직접분사하는 방법을 적용할 경우에 발생하는 스프레이 충돌 문제이다. 기존의 디젤 엔진 분사기가 실린더 압축을 통해 만들어진 고밀도의 공기로 연료를 분사하는 상황에 최적화된 데 반해 예혼합 압축착화의 구현을 위해서는 흡기 행정과 같은 이른 시기에 연료를 분사해야 하므로 실린더 내 공기의 밀도가 낮아 분사된 연료의 분무 도달

거리가 길어지고 이 때문에 연료가 실린더 벽면 혹은 피스톤 상단부에 충돌하게 된다. 충돌한 일부 연료는 액체 상태로 실린더 내벽에 남아있게 되며 미연소 가스로 배출되어 예혼합 압축착화 엔진의 주요 장점으로 지적된 PM의 저감을 이룰 수 없게 하고 연료 소비율을 나쁘게 만든다. Premixed HCCI 방법에서도 지적된 바와 같이 Wall Wetting으로 설명되는 연료의 벽면 흡착 현상 역시 분사된 연료의 직접 충돌은 아니라고 할 지라도 유사한 문제점으로 지적된다. 이를 해결하기 위해서는 예혼합 압축착화에 최적화된 분사기의 제작이 필요하며 분무도달거리는 짧고 미립화는 촉진하는 다공노즐 분사기, 실린더 벽면에 연료가 충돌하지 않도록 분사각을 좁게 한 분사기 등이 그 예이다.

셋째 문제는 이른 점화 시기 문제로 600~700K 정도의 낮은 연소 온도에서 발생하는 디젤 연료의 Cool Flame이 최적의 운동성능을 발휘하기 이전의 피스톤 압축행정 중에 주 열방출이 일어나도록 하는 문제점이다. 이 현상은 점화 촉진을 위한 고압축비 운전이나 디젤의 나쁜 기화 특성 해결을 위해 흡기온을 상승 시켰을 때 더욱 심화되며, 문제의 해결을 위해 저압축비 운전, 배기재순환(EGR: Exhaust Gas Recirculation)을 통한 Dilute Mixture의 형성으로 점화 시기를 지연시키는 방법이 있다.

넷째 문제는 실제 엔진에 적용하여 넓은 범위에서 운전하고자 하였을 경우 고부하의 운전 조건으로 연료량이 늘어나거나 고속운전 하고자 할 경우 예혼합기 형성을 위한 시간이 짧아짐으로 인해 연소 효율이 저하되고 엔진 출력이 떨어져 운전 범위의 제한을 갖는 문제점이다. 따라서 선행 연구자들은 부분부하 운전에서의 예혼합 압축착화의 장점을 강조하고 있으며 고부하 운전시에는 기존의 디젤 엔진과 같은 운전법을 적용하여 출력을 유지하는 두가지 연소 방법의 병용을 시도하고 있는 실정이다.

다섯째는 HC, CO의 증가이다. 기존 디젤 엔진의 경우 높은 연소 온도와 확산 연소의 지속을 통해 배기가스 온도가 높아 HC, CO가 산화되므로 가솔린 엔진과 달리 큰 문제점으로 지적되지 않았으나 예혼합 압축착화 엔진의 경우에는 낮은 연소 온도로 인해 HC, CO가 산화되지 않아 기존 가솔린 엔진 수준의 HC, CO 발생의 문제점을 갖는다. 이의 해결을 위해 연소실에 연료를 가두는 공간을 최소화하는 것이 필요하며 압축링과 피스톤 상단부의 간극을 줄이는 것이 그 예이다. 실제 구현에 있어서는 HC, CO 저감을 위한 배기 후 처리장치가 널리 사용되고 있어 기존 디젤 엔진 대비 HC, CO 증가의 문제점보다는 NOx, PM의 저감에 따른 장점이 더욱 부각되고 있는 실정이다.

대체 연료 예혼합 압축착화 연소기술

예혼합 압축착화 엔진에서 가솔린, 디젤 연료에 대한 대체 연료가 필요한 것은 부분부하로 제한된 운전 범위를 확장하고자 하는 데 있다. 이는 가솔린, 디젤 연료에 비해 기화 특성이 좋아 배기가스 저감에 효과적인 대체 연료를 사용하거나 점화를 촉진하거나 점화 시기를 지연 혹은 제어할 수 있는 첨가제를 사용하여 달성 가능하다.

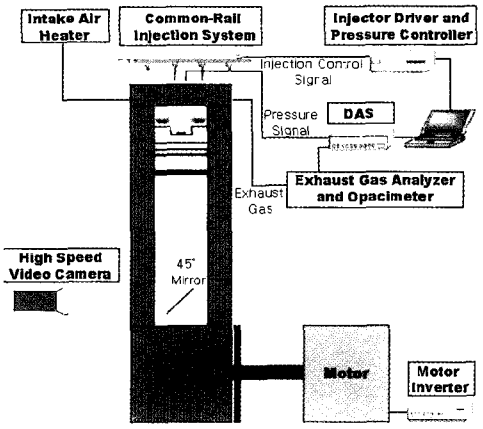
천연가스는 n-heptane, iso-octane과 같은 단일화학종 연료를 제외하고 대체 연료의 개념으로 가장 널리 연구되고 있는 연료이다. 천연가스는 가솔린 엔진을 예혼합 압축착화 엔진으로 변형하여 적용할 경우 효과적인 것으로 연구되고 있으며 디젤 엔진에서는 천연가스를 통한 예혼합기 형성과 디젤 직접분사를 통한 점화 촉진의 효과가 활발히 연구되고 있다. LPG의 경우 옥탄가가 높고 자착화가 힘들어 예혼합 압축착화 엔진에서의 연구가 활발하진 않으나 디젤 엔진에서 DTBP와 DME를 첨가하여 자착화를 유도하고자 하는 결과가 보고되고 있다. 메탄올은 알코올계 연료로서 mis-fire가 없이 EGR율을 80%까지 적용할 수 있

어 가솔린 엔진에 사용될 경우 운전범위 확장이 가능한 것으로 보고되고 있으며 디젤 연료에 사용될 경우 기화 특성이 좋아 디젤 연료를 기화시키는데 필요한 높은 흡기 온도를 크게 저감시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. PM을 크게 저감할 수 있어 디젤을 대체할 수 있는 연료로 널리 알려진 DME(Dimethyl Ether)는 그 자체만으로 예혼합 압축착화 엔진에 적용될 경우 이른 점화 시기로 인한 운전 범위 제한의 문제점을 갖고 있다. 따라서 디젤, 천연가스, LPG 등과 같이 예혼합 자착화가 힘든 연료와 혼합하여 연소를 제어하고자 하는 연구가 널리 수행되고 있다.

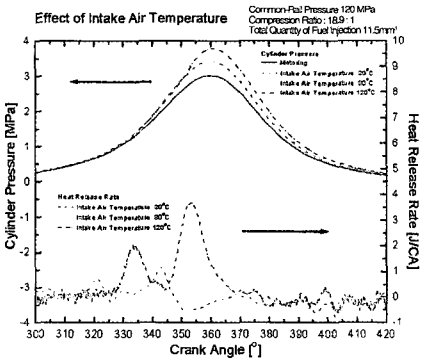
기타 디젤 연료에 대한 첨가제로써 DMM(Dimethoxy Methane)과 DEE(Diethyl Ether)와 같은 함산소 연료가 PM을 30~80% 가량 저감할 수 있으며 디젤과의 상호작용으로 Radical의 생성을 지연시켜 점화 시기를 지연시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 DEE는 냉시동시 디젤 연료가 기화되기 전에 기화되어 점화를 촉진시키는 효과도 갖고 있다. 점화 촉진제로서 가능한 첨가제는 DTBP와 2-EHN으로 세탄가 향상의 효과도 있으며 피셔-트롭시 디젤(F-T Diesel)연료는 CNG와 혼합하여 사용할 때 함량의 조절로 저부하 및 고부하 운전이 가능하다는 연구결과가 보고 되었다.

실제 연구의 예 – Early Direct-Injection PCCI

한국과학기술원(KAIST)에서는 디젤 연료를 이용한 예혼합 압축착화 연소기술을 구현하기 위해 〈그림 1〉과 같이 소형 직접분사식 디젤 엔진을 예혼합 압축착화 엔진으로 변형하였다. 이와같은 실험 장치를 이용해 연료분사시기, 분사압력, 분사량과 같은 연료분사인자 및 흡기 온도 변화에 따른 운전 실험과 운전 조건별 화염 및 분무 가시화를 수행하고 있으며 PM, NOx, HC, CO 등의 배기가스를 계측하고 있다.



〈그림 1〉 디젤 예혼합 압축착화 엔진

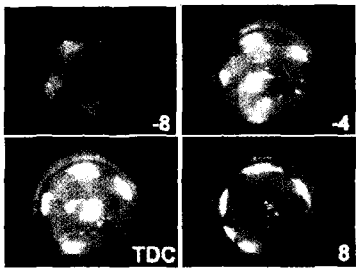


〈그림 2〉 흡기 온도에 따른 실린더 압력과 열방출율 변화

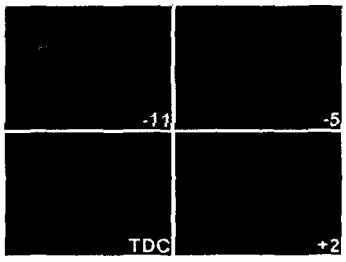
〈그림 2〉는 흡기온 변화에 따른 연소 실험 결과로 열방출율에 있어 Cool Flame에 의한 낮은 수준의 열방출이 발생하고, 뒤이어 주 열방출이 일어나는 전형적인 형태를 보여주고 있다. 실험시 연료 분사시기는 BTDC 200 ° Crank Angle로 기존 직접사식 디젤엔진에 비해 극히 이른 시기에 수행하여 예혼합기를 형성하기 위한 충분한 시간을 확보하였다. 흡기 온도 변화에 따라서는 고온 흡기 조건일수록 열방출양은 크게

증가하고 그 시기는 앞당겨지는 것을 확인할 수 있다. 이는 높은 흡기온에서 디젤 연료의 기화 및 예혼합기 형성이 촉진되어 연소효율이 개선되면서도 Cool Flame의 발생 역시 촉진되어 이른 점화 시기 문제가 심화된 결과를 보여준다. 이에 따라 선행 연구자들은 배기재순환(EGR: Exhaust Gas Recirculation) 기술을 적용하여 Dilute Mixture를 통해 점화 시기를 지연시키고 있다.

〈그림 3〉은 화염 가시화의 결과로 (가)는 BTDC 15° Crank Angle에 연료 분사가 시작되어 점화 지연기간을 거친 후 불균일하게 밝은 휘염이 발생하며 진행되는 직접분사 디젤 연소의 화염을 Direct-Imaging방법으로 취득한 것이며, (나)는 BTDC 200° Crank Angle에 연료 분사가 시작되어 예혼합기를 형성한 후 연소실 전체에서 균일하게 강도가 낮은 화염이 발생하는 예혼합 압축착화 연소의 화염을 Intensifier를 적용하여 취득한 결과이다.



(가) 직접분사 디젤연소



(나) 예혼합 압축착화 연소

〈그림 3〉 직접분사디젤 및 예혼합 압축착화 엔진의 연소

미래 예혼합 압축착화 연소기술

예혼합 압축착화 연소기술은 연료 분사 시스템 및 제어 기술의 발전에 힘입어 연구가 활발히 진행되고 있으며 앞서 기술한 바와 같이 기존 가솔린, 디젤 연료는 물론 대체 연료에 대해서도 폭넓은 연구가 진행되고 있다. 배기재순환시스템의 최적화, 과급 시스템의 적용, 가변 밸브 타이밍 기술, 가변 압축비 엔진의 적용, 극고압분사 구현을 통한 분무 특성 개선 등은 실제 엔진 구현을 앞당길 것이며 저부하로 제한되는 운전범위의 단점 역시 저부하 영역에서의 예혼합 압축착화 운전과 고부하 영역에서의 직접 분사 디젤 엔진 운전의 병용 기술의 방향으로 극복 가능하다. 다가오는 친환경 엔진에 대한 강도 높은 요구에 부응하기 위한 기술 중 예혼합 압축착화 연소 기술은 적절한 대안의 하나로 받아들여지고 있으며 이에 따라 국내 연구자들의 높은 관심과 실제적인 연구의 수행이 필요한 시기라 하겠다.

(배충식 교수 : csbae@kaist.ac.kr)