

# 에멀전 연료를 이용한 저공해 디젤엔진 기술



오 승 목(KIMM 열유체환경연구부)

- '86 - '90 서울대학교 조선공학과(학사)
- '90 - '92 포항공과대학교 기계공학과(석사)
- '99 - 현재 한국과학기술원 기계공학과(박사과정)
- '92 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서론

디젤엔진은 열효율이 높고 대형화가 가능하여 미래의 동력장치로서 많은 가능성을 가지고 있으나, 입자상 물질(PM, particulate matter)과 질소산화물(NOx)이 가솔린엔진에 비하여 배출량이 상대적으로 크기 때문에 환경친화적이지 못하다는 인식이 있었다. 그러나 최근에 개발되고 있는 고압연료분사, 후처리기술의 등장은 이러한 문제점을 많은 부분 개선해 나가고 있다. 이러한 기술중의 하나로 연료의 개량을 통해 근원적으로 연료의 연소성능을 향상시킴에 의해 배기저감효과를 이루는 방법이 시도되고 있는데 연료중에 물을 첨가하여 PM과 NOx를 동시에 줄일 수 있는 에멀전 연료기술이 대표적 기술이다.<sup>[1-3]</sup>

디젤기관에 물을 첨가하여 에멀전 연료화하는 기술은 과거부터 많이 시도되어 왔으나 환경문제와 관련하여 배기가스 저감을 목적으로 하는 것은 비교적 최근의 일이며 또한 육상용 차량에 본격적으로 적용하기 위한 연구를 시작한 것은 불과 몇 년 전부터이다. 지금까지 에멀전연료는 선박용 엔진분야 및 보일러용 연료를 중심으로 많은 연구가 되어 왔다. 특히, 일본에서는 선박용엔진에 사용하기 위하여 디젤 혹은 벙커C유를 물과 혼합하여 열효율 및 매연을 감소시키는 연구를 오래 전부터 진행해 왔다. 그러나 선박엔진이나 보일러에 응용되는 에멀전연료에서는 물의 함량을 20%이상 증가시켜도 운전성능에 크게 영향을 주지 않지만 육상용 디젤엔진의 경우에는 엔진출력감소 및 불규칙한 연소에 의한 엔진변동이 직접적으로 운전자에게 느껴지므로 기존연료와

차이를 극복하기 위한 어려움이 따르게 된다. 즉 기존 연료를 사용하였을 때와 비교하여 운전성능이 크게 떨어지지 않으면서 배기가스도 줄이고 연료경제성도 확보하기 위해서 많은 어려움이 따르고 있다. 또한, 에멀전연료는 물과 연료가 계면활성제(surfactant)와 같은 첨가제에 의하여 물리적으로 결합되어 있어 시간이 지나면 자연스럽게 물과 연료가 분리되므로 장시간 보관을 위해서는 상분리를 막을 수 있는 첨가제 기술이 연료의 개발에는 가장 중요한 기술요건이 된다.

개발된 에멀전연료의 기술적 문제가 해결되어도 상용화시키기 위해서는 연료의 분배 및 공급과 관련한 문제가 발생하게 된다. 전용 저장고의 확보, 물 첨가로 인하여 연료탱크량이 감소함으로써 발생하는 운행정리문제 등 인프라와 연결되는 문제가 생기므로 이에 대한 해결책이 제시되어야 한다. 이것의 대책으로 미국 Lubrizol사의 경우는 중앙급유방식으로 운행되는 차량에 대하여 시범적으로 적용하고 있는데 연료제조장치, 연료첨가제, 베이스연료를 세트로 판매하여 차고지에 설치하고 연료를 공급하는 방식으로 유도하고 있다. 즉, 운송회사를 중심으로 판매하는 전략을 세움으로써 상분리에 의한 기술적 문제도 함께 해결하려는 것으로 사료된다.

다른 대체연료에 비하여 에멀전연료의 장점은 엔진의 개조나 교체없이 기존의 디젤엔진에 그대로 사용할 수 있다는 것이기 때문에 매력을 가지고 있다. 연료의 물성이 베이스연료와 거의 일치하므로 차량에 언제든지 급유하여 사용할 수 있으므로 저공해 연료적용시 흔히 발생하는 엔진 하드웨어적인 부담이 없어진다. 단, 아직까지 확실하게 입증된 것은 아니나 연료중에 수분함량이 많음에 의해 엔진에 부식, 마모를 심화시킬 수 있다는 우려가 있어서 이에 대한 심도있는 연구는 필요하리라 본다. 본 고에서는 KIMM과 타 기관에서 수행한 연구결과를 중심으로하여 에멀전 연료의 원리 및 효과를 살펴보고 외국연구동향을 간단히 소개하고자 한다.

## 2. 에멀전연료

### 2.1 에멀전연료란 무엇인가?

연료와 물을 적정비율로 혼합하여 물의 입자가 5~10 $\mu$ m 정도로 분산시켜 얻어내는 우유빛의 연료를 말하는데, 유중수핵(W/O, water in oil) 혹은 수중유핵(O/W, oil in water)의 구조가 대부분이다. 이 연료를 연소시키면 분무직후의 급속한 온도상승시에 물이 연료보다 비등점이 낮으므로 물 입자가 미세폭발현상(micro-explosion)을 일으켜 주위의 연료를 미세 분산시키므로써 완전 연소에 이르게 되며 매연을 일으키는 미립자의 생성을 억제한다. 또한 디젤엔진에서는 물의 증발로 인한 열흡수가 연료의 최고 화염온도를 알맞게 저하시켜 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성을 억제한다.

에멀전 연료는 서로 잘 혼합되지 않는 물과 기름이다. 이러한 혼합되지 않는 물과 기름이 서로 섞이게 하는 수단으로 유화(emulsification)라는 기법을 사용하는데, 서로 혼합되지 않는 두 종류의 액체를 심하게 흔들거나 교반하여 혼합시키면 한 쪽이 미립자로 되어 다른 쪽의 액체중에 분산이 되는 유화라는 과정을 거쳐 만들어지는 것을 에멀전이라 한다.

유화제 없이 두 종류의 액체를 교반해서 그대로 놓아두면 분리되어 다시 원래의 두 액체로 나누어진다. 생성된 에멀전을 안정화시키려면 일반적으로 유화제라는 것을 첨가하는데, 만들어진 유화제를 오랜 시간동안 안정화시키려면 안정화제가 같이 사용되어야 한다. 유화제의 제1효과는 오일과 물과의 계면장력을 낮추어 액적화를 이루는 것으로써 이 같은 효과를 갖는 화학물질을 계면활성제라고 한다.

### 2.2 에멀전연료의 유형

- 유중수적형(Water in Oil type)

그림 1과 같이 유중수적형은 기름속에 물이

있는 것이다. 이 형식의 에멀전연료의 경우 유중수핵의 구조로써 연소실 내에서 연소 시에 연료 중 물이 먼저 증발하기 때문에 연소실 내의 온도를 낮출 수 있게 되고 이에 따라서 NOx의 생성을 상대적으로 감소시킬 수 있게 된다. 또한, 물이 직접적으로 엔진과 접촉하지 않으므로 부식의 우려도 거의 없어진다.

- 수중유적형(Oil in Water type)

그림 1과 같이 물 속에 기름이 있는 구조로 W/O와 반대의 구조이다. 이 경우의 연료 연소 시에 연료입자의 바깥쪽이 물이기 때문에 연소가 잘 이루어지지 않게 되는 것으로 생각된다. W/O에 비해 반대로 부식의 우려도 있어서 이 구조의 에멀전연료는 잘 사용하지 않는다. 에멀전연료의 2차 미립화 현상을 포함하여 그 연소 과정은 순수 연료의 단일 액적의 연소와 비교해서, 매우 복잡하고, 그 기본적인 성질을 정확히 파악하는 것은 매우 곤란하다.

또, 현재 응용의 주류인 유중수적형 에멀전연료에 대해서도, 연소성의 견지에서 수중유적형에 멀전연료와 비교해서, 그 상위 또는 득실이 아직 명확하게 밝혀지지는 않고 있다.

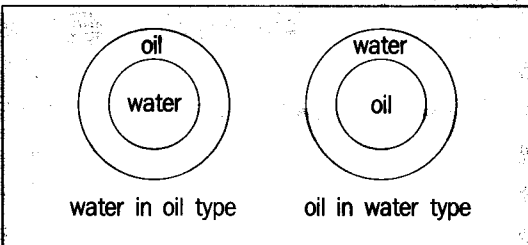


그림 1. 에멀전연료의 입자구조

2.3 디젤엔진에서 에멀전연료 효과

에멀전연료의 경우에는 디젤연료에 비해서 연료 소비율, NOx 및 매연 농도가 동시에 저감되나 소음 및 HC는 역으로 증가하고 CO는 분사시기 및 운전조건에 따라 영향을 받아 증감한다.

디젤기관에 에멀전연료를 사용할 때에는 다음의 효과에 의해 연소가 개선되고 연료 소비율이 저감된다.

- 1) 에멀전연료 중의 물 입자의 급속한 체적팽창 즉, micro-explosion에 의한 분무 효과의 미세화

유중수적형의 에멀전은 미세한 물 입자 주위를 경유 피막으로 싸인 구조로 되어있다. 이 액적이 실린더 내의 고온 가스로 인해서 가열되고 고온가스와 경유 피막, 경유피막과 내부 물 입자의 사이에 급속한 열 이동이 일어나 그 속도가 충분히 큰 경우에는 물 입자는 연료 액적의 내부에서 합체하여 비점 이상으로 되어 과열 상태로 된다. 이와 같이 하여 형성된 과열 물은 매우 불안정하게 될과 동시에 연료와의 비등점 차이가 있으므로 이 과열수가 우선 기화하여 일저에 팽창한다. 이때에 연료 액적은 폭발적으로 파괴되어 보다 미세한 액적으로 되어 연소실 내의 공기와 잘 혼합되기 때문에 연소가 촉진되는 것이다.

- 2) 분무의 운동량 증가에 의한 분무속 내의 공기의 swirl 증가
- 3) 물의 함유에 의한 분무의 국소 공기 과잉을 증대
- 4) 착화 지연에 의한 예혼합 연소량 증가
- 5) 연소온도 저하 및 화염 감소에 의한 냉각 손실 저감
- 6) 연소온도 저하에 의한 열해리 경향 억제
- 7) 연소가스의 물 수 증가

3. 에멀전연료의 특성

3.1 에멀전연료의 분사특성

일반적으로 디젤연료의 분사특성은 표 1과 같다. 에멀전연료는 그림 2, 3과 같이 디젤연료에

표 1. 디젤연료의 분무특성

분무특성	유체유동/열전달/물질전달 거동	지배 변수
• 입경 분포	미립화 기구	• 노즐의 종류
• 분열 길이 (액막 또는 액주 길이)	• 주위 기체의 유입	• 주위 기체의 물성치 (온도, 압력, 밀도, 점도등)
• 분무각(분무면적)	• 분무 액체의 증발 및 주위 기체의 응축	• 분사액체의 물성치 (온도, 밀도, 점도, 표면장력)
• 침투의 정도	• 분무간의 간섭	• 분사압력(또는 분사유량) • 노즐의 배열 상태

비하여 밀도 및 점도가 높아서 분사시 분무각도가 작고 분무도달거리가 길어서 연료분사의 관점에서는 불리할 수도 있다. 그림 4와 같이 연료액적의 크기가 상대적으로 크기 때문에 연료가 공기와 접촉하는 면이 작아서 미세폭발현상이 일어나기 전까지의 연소조건은 디젤연료에 비해 나쁘다.<sup>[4]</sup> 특히, 연소실의 크기가 작은 엔진의 경우에는 에멀전연료의 분무도달거리가 증가하므로 연료가 연소실 벽면에 부딪히는 양이 많게 되고 벽면에 축적되어 미연탄화수소의 증가를 일으킬 수도 있다. 따라서 연소실의 크기가 충분히 큰 디젤엔진이 에멀전연료를 적용하기에 유리하므로 현재 대부분의 연구가 이 분야에 집중되어 있다.

에멀전연료를 사용할 경우 실제엔진에서와 같이 동일한 출력을 갖기 위해서는 물혼합량 만큼 더 많은 연료를 분사해야 하므로 물첨가량 만큼의 추가적인 연료공급이 필요하지만 물을 혼합한 경우에도 가능한 최대공급량이 물을 혼합하

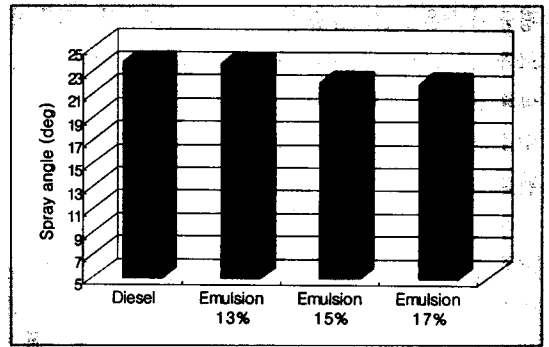


그림 3. 분무각비교

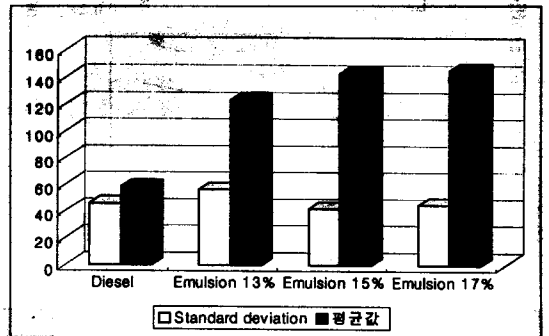


그림 4. 연료액적크기비교

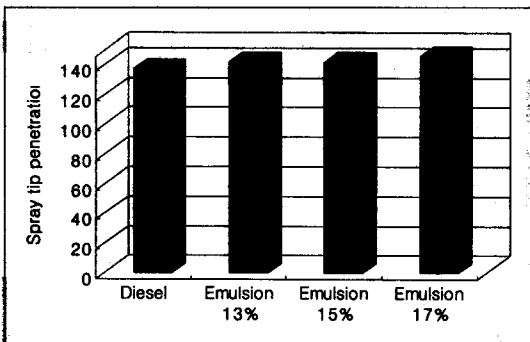


그림 2. 분무관통거리비교

지 않은 경우와 유사하기 때문에 그만큼의 출력저하를 피할 수 없게 된다. 즉, 동일한 엔진출력을 갖기 위해서는 분사시스템을 개조하여 분사용량을 확대하여야만 한다.

### 3.2 에멀전연료의 연소 및 배기특성

에멀전연료는 그림 5와 같이 특정영역의 부하에서 물 혼합율의 증가와 함께 NOx와 매연이

동시에 저감되며 열효율의 향상으로 연료소모율도 감소하게 된다. 발화시기 지연, 연소실 압력 상승에도 불구하고 NOx가 저감되는 것은, 물 첨가에 의해 연소실 내 열흡수와 불활성 가스로서의 수증기 역할에 의하여 연소실내의 온도 저감, 동시에 미세폭발 및 공기 유동의 활성화에 의한 국부적 온도상승의 억제에 의한 것으로 판단할 수 있다. 그림 6은 연소실가스온도에 따른 NOx 배출특성을 나타낸 것으로 에멀전연료가 평균가스온도가 상승함에 따라 NOx의 배출이 크게 감소함을 보여준다.<sup>[1]</sup> 그러나 분사특성에서 살펴봤듯이 연료의 벽면 퇴적현상으로 미연탄화수소의 증가 및 연소실내의 퇴적물 증가가 우려된다.

그림 7은 엔진부하율에 따라 PM배출 특성을 보여주고 있으며 중부하영역에서 단위출력당 PM 배출이 작게 나타나고 있다. 저부하에서는 연소온도가 낮아서 수분의 미세폭발 효과가 활발하지 못하기 때문이며 고부하에서보다 PM 배출량은 더 크게 나타나고 있다. 일반적으로 물첨가율은 엔진의 특성마다 다르지만 육상수송기관에서는 30%이하로 조정되며 그 이상에서는 오히려 역효과가 나타날 수 있다.

에멀전연료는 디젤유에 비하여 점화지연시간이 길므로 기존 디젤엔진에 적용할 경우 분사시기의 조정이 필요하다. 그림 8은 연료분사시기를 변화함에 따라 매연 및 NOx의 변화를 보여주는 그림이다. 실험대상엔진은 단기통 직분식 디젤엔

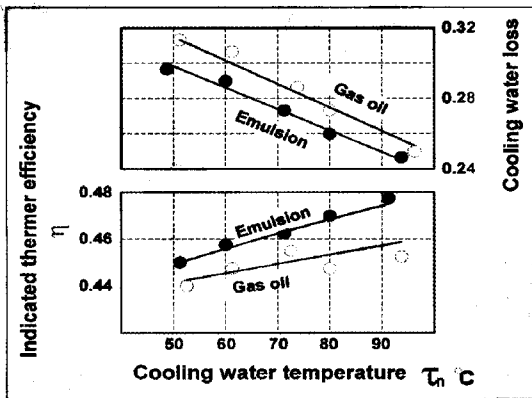


그림 5. 에멀전 연료의 연소특성

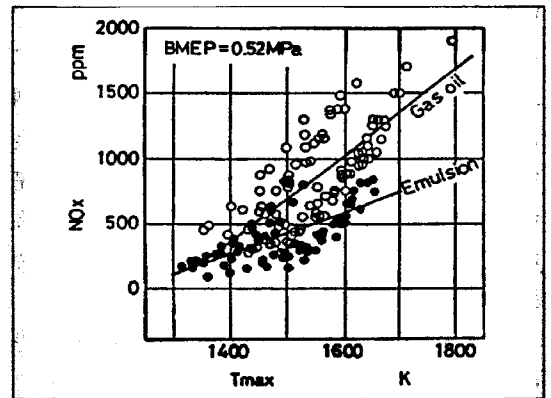


그림 6. 연소실온도에 따른 NOx 배출특성

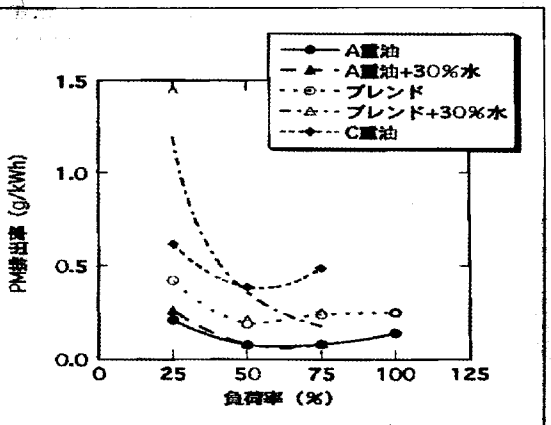
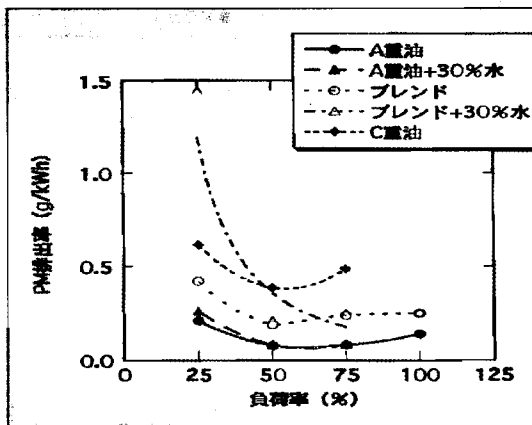


그림 7. 물첨가율 및 부하에 따른 PM 배출특성

진으로 1500cc의 배기량을 가지고 있는 기관이다. 기존의 디젤연료를 사용했을 때보다 분사시기를 앞당겨도 NOx의 감소효과를 볼 수 있으므로 PM을 감소시키기 위한 분사시기 조정이 가능하게 된다. 즉, PM과 NOx가 가지고 있는 trade-off 관계를 극복할 수 있게 되는 것을 의미하는 것이다. 따라서, 엔진마다 혹은 물 첨가율에 따라 달라지기는 하지만 분사시기 조정을 2-4도 앞당김에 의하여 PM과 NOx를 동시에 저감시키는 결과를 얻을 수 있는 것이다. 물론 그림에서와 같이 점화시기의 조정없이도 배기가스 저감효과는 얻을 수 있지만 보다 적은 배출가스 목표를 얻기 위해서는 분사시기 조정과 같은 간단한 방법으로 최적화된 엔진조건을 얻을 수가 있다.

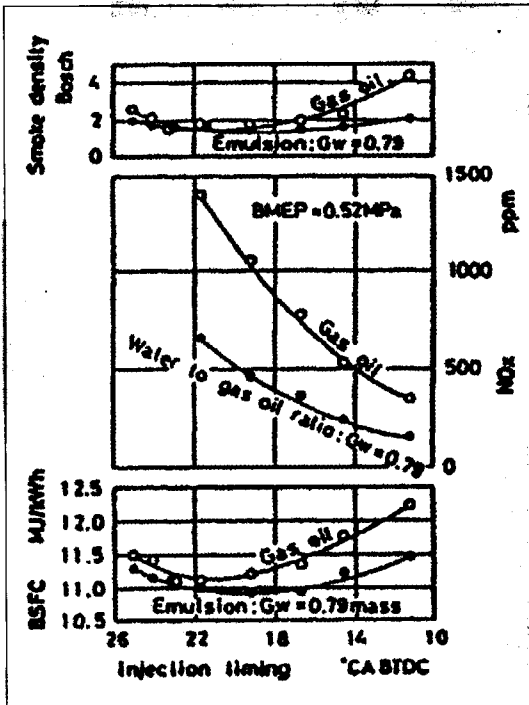


그림 8. 연료분사시기에 따른 연료소비율 및 배기 특성

다음은 대형 버스용 디젤엔진에 에멀전 연료를 적용한 실험결과를 소개하고자 한다.<sup>[5]</sup> 그림

9는 분사시기변화에 따른 D13모드 배기가스실험 결과를 보여주고 있다. 분사시기를 3도 앞당김으로써 NOx와 PM이 동시에 줄어드는 효과를 보여주고 있다. 분사시기가 BTDC 16도에서 NOx를 동일 수준으로 유지하면서 PM을 30% 정도 감소시키는 결과가 나타났으며 분사시기 조정 없이도 NOx와 PM을 동시에 20% 이상 감소시킬 수가 있다.

본 연구는 아직 연료의 개발이 진행 중에 있으므로 계면활성제를 포함한 연료첨가제의 최적화 작업이 완료되면 지금 이상의 결과도 예상되고 있다. CO나 HC량의 증가 현상이 나타나고 있지만 CO와 HC는 디젤엔진의 연소특성상 그 발생량이 작아 현재 및 미래의 규제치를 충분히 만족할 수 있는 수준이어서 우려할 필요는 없다. 그러므로 배기가스 규제치가 강화되어도 기존 디젤연료를 에멀전 연료로 대체하여 사용하는데는 별 문제가 없을 것으로 사료된다.

#### 4. 외국의 연료개발동향

연료에 물을 첨가하여 효과를 볼 수 있다는 것은 1913년에 이미 밝혀져 있었고 지금까지 이와 관련된 특허만 해도 500개 이상이 된다. 그러나 물과 기름을 혼합하고 오래 동안 상분리를 막을 수 있는 첨가제의 개발이 무엇보다 어려운 기술이기 때문에 에멀전 연료를 개발하고 있는 회사는 저마다의 고유기술을 가지고 있으며 이것은 일급비밀로 유지되고 있다. 표 2는 지금 전 세계적으로 에멀전 연료가 개발되어 상품화된 것을 정리한 것이다. 공개된 데이터로는 아직까지 어느 회사의 제품이 우수하다고 말할 수는 없는 상태이며 보급이 활성화되지 못한 관계로 확실한 검증도 되어있지 못한 실정이다. 하지만 소도시를 중심으로 한 운행시험이나 판매망 구축은 계속되고 있다. 에멀전 연료는 엔진의 개조 없이 바로 주유만 하면 사용할 수 있게 제품을 생산하고 있기 때문에 앞으로의 보급은 활성화

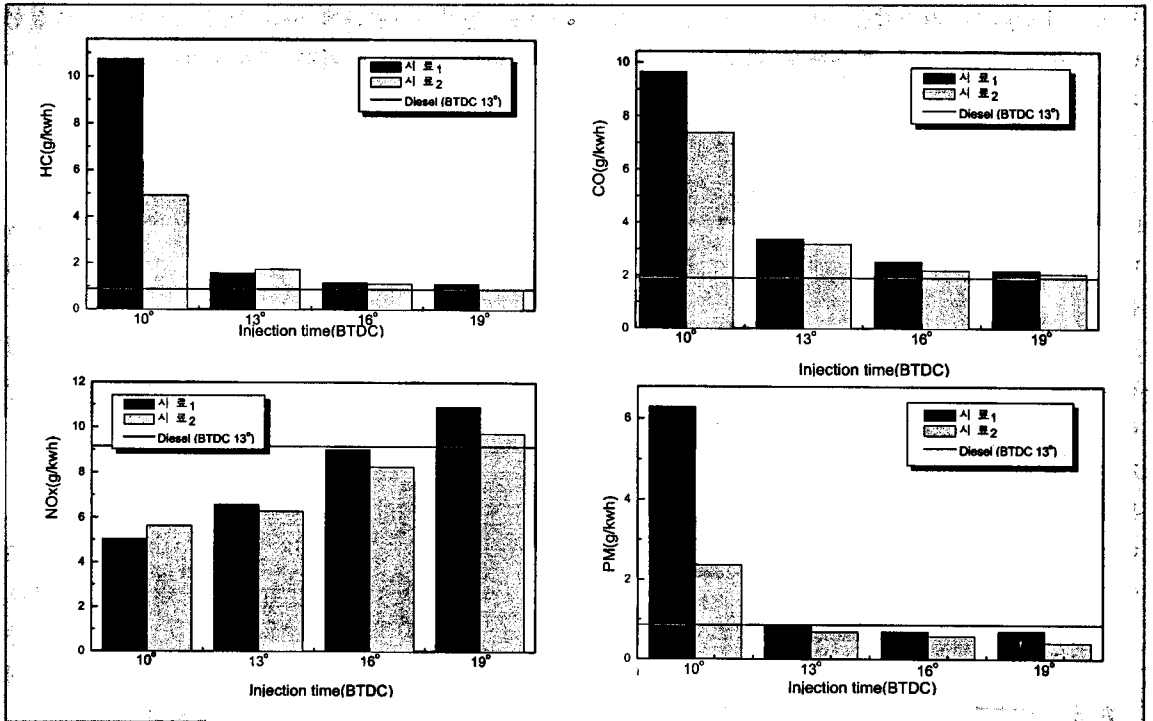


그림 9. 점화시기 변화에 따른 배기가스 변화

표 2. 해외 에멀전연료 개발 현황

상 품 명	개발회사	물침가율	배기 및 열효율(공개자료)	기타사항
PuriNOx	Lubrizol	10-20%	NOx 5-30% 감소 PM 20-50% 감소 연비 5% 향상	Caterpillar사와 공동 연구 중
A-55	Clean Fuels Technology Inc.	20-30%	NOx 25-50% 감소	Lubrizol과 특허분쟁 중
Aquazole	Elf	10-15%	매연 30-80% 감소 NOx 15-30% 감소 PM 10-50% 감소 연비 1-4% 향상	

되리라 생각된다. 연료를 오래 보관해도 상분리를 막을 수 있어야 하기 때문에 2개월 이상 유지가 가능하도록 상품을 개발하고 있고 특히, 자동차회사와 연계하여 내구, 마모, 부식실험을 엔진에서 수행하고 있다. 따라서 보급이 활성화됨에 따라 차량 운행결과에 대해 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.

### 5. 결론

디젤엔진에서 저공해 실현을 위한 방법으로 에멀전 연료에 대하여 소개하고 실험결과를 소개하여 보았다. 에멀전 연료의 연소메카니즘에 의한 그 효과는 이미 입증된 결과를 보여주고 있다. PM과 NOx를 동시에 줄일 수 있으면서

열효율을 향상시켜 에너지 절감도 가능하게 하는 장점이 있으며 특히, 엔진개조 없이도 바로 디젤엔진에 적용할 수 있으므로 사용의 편의성도 함께 제공한다. 기술적으로는 아직까지 개선해야 할 여지가 있지만 연구가 진행되면서 품질향상이 기대되며 특별한 인프라 구축이 필요하지 않기 때문에 앞으로의 보급도 활성화되리라 기대한다.

### 참 고 문 헌

[1] “연료유화에 의한 배기정화에 관한 조사 연구,” 일본박용기관학회, 1997.  
 [2] 本 康文, 塚原 實., “유화연료 구동 디젤기

관의 성능에 미치는 분사특성의 영향(제 1 보, 유화연료의 분무특성),” 일본기계학회 논문집(B편), 54권 503호, 1988, pp.1866~1871.

[3] 梶谷修一, 澤 則弘., “경유·물(W/O형) 유화연료에 관한 연구 (분무 특성의 시간적 추이에 대하여),” 일본기계학회논문집(B편), 56권 531호, 1990, pp.3548 ~ 3553.  
 [4] 서희준, “엑시머레이저를 이용한 에멀전 연료의 분무특성 연구,” 충남대학교 석사논문, 2000.  
 [5] “에멀전을 이용한 청정제품 개발,” G7 환경기술개발 연구보고서, 1999.