

## 선박용 디젤기관의 에멀전 연료 이용기술 전망

### Applications of Emulsified Fuel on Marine Engines for the Reduction of the Pollutant Exhaust Gas and Improving Fuel Consumptions



박 태 인

T.I. PARK

- 1939년 2월 5일생
- 본학회 부회장
- 한국기계연구원 책임연구원
- 한국내연기관협회의회 부회장
- 한국액체미립화학회 부회장
- 충남대학교 공과대학 객원교수



김 기 형

K.H. KIM

- 1971년 9월 5일생
- 충남대학교 기계공학과 대학원

## 1. 서 언

디젤엔진은 다른 열기관에 비하면 열효율 및 내구성이 우수하고 대 마력화가 가능하여 2000년대에도 미래동력원으로 가장 가능성이 있는 원동기로서, 일반 산업용, 선박용 자동차용 등 그 용도도 다양하여 세계적으로 그 수요가 증가하는 추세이다.

그러나 이러한 특징에 비하여 디젤엔진은 고온고압의 연소실에 연료를 분사함으로써 연소가 진행되기 때문에 공연비가 매우 낮은 분무중심에서는 연소가 이루어지지 못하고 미연가스로 배출된다. 따라서 연비의 저하와 매연의 배출을 동반하게 된다. 이러한 현상에 의한 연비저하를 개선하기 위해서는 분사된 연료와 주위공기가 연소실 내부에 충분히 잘 섞여야 한다. 이러한 연구의 한 분야로서 물을 혼

합한 연료를 사용하는 연구가 최근 국외에서 많이 진행되고 있는데, 물의 작은 액적이 연료의 내부에 혼입되어, 엔진의 연소실에 분사되면 고온 연소장에서 기름내부에 있는 물이 열을 받아 미세폭발(微細爆發) 현상이 일어나서 2차 분무와 같은 효과로 분사된다. 이로서 연료액적이 미립화되고 연소실 내부에 골고루 퍼지면서 연소효율이 향상 될 뿐만 아니라 배기가스중의 유해성분인 NOx나 Soot도 저감하는 효과가 있어 최근 자동차나 선박의 배기가스 규제에 관심이 집중되는 분야이다.

본고는 에멀전 연료의 특성에 대한 이해를 돕고 또 이를 디젤기관에 활용함으로써 에너지 절약과 유해배기가스의 저감 효과 대하여 발표된 해외 연구자료를 정리하여 관심을 가져 보고자 한다.

## 2. 규제 동향과 대책기술

근년에 노웨이등 북구국가가 중심이 되어 선박에서 배출되는 유해 물질에 대한 조사 연구가 진행되면서 선박에서 배출되는 배기가스가 지구대기 환경을 파괴하고 있다는 사실이 차츰 밝혀지게 되었다. 노르웨이의 연구에 의하면 선박에서 배출되는 NOx의 양은 공장이나 자동차 등의 육상 시설에서 배출되는 양의 약 7%, SOx는 약 4% 정도인 것으로 밝혀졌다. 이러한 조사가 밝혀짐에 따라서 이들 국가의 제안으로 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 선박의 배기가스 규제에 대한 검토가 최근까지 진행되어왔고, 2000년 1월 1일부터 배기가스 규제가 실시될 것으로 예정되고 있다.

IMO의 배기 가스 규제의 대상은 NOx와 SOx이다. 이 중 SOx는 연료 중의 유황 분에 의해서 배출량이 거의 결정되므로 연료 중의 유황 분을 제어하는 것으로서 배출 양을 규제할 수 있으므로 SOx에 관해서는 이 방향으로 검토되고 있다. 배기가스 중의 SOx를 제어하는 방법도 있으나 이것을 선박에 채용하는 것은 문제가 많으므로, 현재로서는 연료 중의 유황 분을 규제하는 방법밖에 없다.

NOx의 발생 양은 기관 실린더 내에서 연소 즉, 고온, 고압 연소장에서 질소와 산소가 결합에 의하여 Thermal NOx와 연료중의 질소성분이 연소에 의해서 일어나는 Fuel NOx의 합으로 나타난다. 디젤기관에서는 Thermal NOx와 Fuel NOx의 비율은 기관의 운전 조건에 따라 크게 좌우되는 연료 중의 질소성분에 의하며, 일반적으로 Thermal NOx가 90% 이상이다. 따라서 박용 디젤 기관에서 NOx를 줄이기 위해서는 엔진의 연소과정에서 발생하는 양을 제어하는 일이 핵심이 된다.

IMO의 배기 가스 규제에 대해서 국내외에서 배기가스 저감을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 질소 산화물의 저감에 관한 연구로서 디젤 기관 연소실내에서 발생을 억제하는 방법, 배기가스를 후 처리에 의한 방법 등이 제안되고 있다. 배기가스 중의 NOx를 제거하는 방법으로, 예를 들면 선택적 접촉 환원법(SCR), 해수 스크러버법 등이 있으나, 이는 설비비가 고가이고 안전성 문제

도 검증이 안된 문제로 현 시점에서 이 방법을 기관 운전중 계속 사용하는 것은 곤란하다.

선박용 디젤 기관에서 배출되는 유해 배기가스를 억제하는 유효한 방법으로는, 흡기관 내에 물을 분사하는 방법, 에멀전 연료의 이용, 물과 연료를 충상으로 분사, 물을 연소실 내에 분사하는 방법 등이 있다.

그러나 지금까지 에멀전 연료를 이용한 엔진의 열효율 향상과 배기 가스에 관한 많은 연구가 이루어지고 있음에도 불구하고, 에멀전의 거동은 아직 명확하지 않다. 엔진의 종류, 운전 조건, 에멀전 연료의 제조 등에 따라 그 성능과 효과에 큰 차이가 있는 것이 밝혀지고 있다.

## 3. 에멀전 연료

### 3.1 연료 유화와 계면활성

서로 혼합이 안 되는 두 종류의 액체를 심하게 교반(攪拌)시키면 한 쪽이 미립자(일명 分散質)로 되어 다른 쪽의 액체 중에 분산(分散)된다. 이 과정을 유화(乳化, Emulsification)라 하고, 일어난 분산 계를 에멀전(Emulsion, 乳化界)이라 한다. 따라서 생성된 Emulsion을 안정화시키려면 일반적으로 유화제(乳化劑)의 사용이 필요하며, 생성된 乳化界를 장기간 안정화시키려면 안정화제가 병용된다. 그러나 유화제가 없이 두 종류의 액체를 교반해서 Emulsion된 후 방치하여 두면 분산해서 원래의 두 액체로 나누어지며 이를 합일(合一, coalescence)이라 한다.

물과 오일처럼 혼합되지 않는 두 액상의 한쪽을 다른 상에 분산시키면 두 액상의 계면 면적은 증대하나, 열역학적으로는 불안정한 계로 된다. 안정된 Emulsion을 얻으려면 액상 계면에 흡착해서 밀한 흡착 막을 형성하여 계면의 자유 에너지를 저하시켜 계를 안정화시키는 제 3 성분을 가할 필요가 있다. 유화를 유지하는 이 제 3 성분을 유화제라 부른다. 즉 유화제의 첫째 효과는 기름과 물과의 계면 장력을 낮추어 액적화를 이루는 것으로서, 일명 계면활성제(界面活性劑)라고도 한다.

Emulsion의 형은 유화제의 종류, 온도, 양 액상의 용적비, 첨가 방법, 용기 벽의 성질, 기계적 조

건 등에 의해서 결정되나 그 중에서도 유화제의 영향이 크다. 일반적으로 유화제가 많이 녹아있는 액상이 연속 상으로 이루어지기 쉽다. 유화제는 계면활성제의 일종으로서 그 분자 구조는 오일에 친한 부분(親油基)과 물에 친한 부분(親水基)으로 구성되어 있다. 유화제는 동일 분자 중에 점유하는 친유기와 친수기의 비율이 중요하다. 어느 것이나 한 쪽의 비율이 많게 되면 계면활성은 소실되어 유용성 또는 수용성 성질로 된다. 유화제의 친유기와 친수기의 비율을 나타내는 척도로서 HLB(Hydrophilic - Lipophile Balance)가 이용된다. 친유기의 비율이 많으면 HLB가는 작고, 친수기의 비율이 높으면 HLB가는 크게 된다.

Emulsion에는 기름이 분산질인 O/W형(水中油滴형 : oil in water type)과 물이 분산질인 W/O형(油中水滴형 : water in oil type)이 있고, 유화연료도 이 두 가지의 형태로 나뉘어진다. O/W형 유화연료는 중질유의 유동성 개선에 효과가 높고, W/O형 유화연료는 미세폭발이나 질소산화물의 생성 억제 등의 효과가 높아 내연기관에 사용되며 보통 연료유에 배합하는 물의 양은 유량에 대해서 수%~50%를 함유한다. 때문에 분산하고 있는 유입자는 다면체를 나타내는 것이 많아 디젤기관에 유화연료를 적용하는 경우에는 유화안정성, 유동성, 부식성, 연소성(착화성) 등의 점에서 유종수적형을 선택하는 경우가 많다.

### 3.2 계면활성제의 효과

유화제로서 이용되는 계면활성제는 주로 anion성·cation성·비이온성의 3종류로서 어느 것이나 물과 기름 사이의 계면장력을 유효하게 낮추는 효과가 높다. 이외에 이온성 계면활성제에서는 기름물 계면에 配位하므로 분산액적의 전위를 높여 그 상호전기적 반발력이 강하여 액적의 합일을 저지하는 경향이 있다. 예를 들면 W/O형 에멀전에 있어서 anion성 계면활성제는 소수성 액적에 강한 부(-)의 전하를 또, cation성 계면활성제에서는 동액적에 강한 정(+)의 전하를 각각 가지므로, 큰 potential을 갖는 전기 이중층을 형성한다.

한편, 비이온성 계면활성제는 비계면활성제로 있지만, 그 자체 액적에 큰 전하를 갖는 능력은 별

어나 일반적으로 친수기의 용접분율이 크므로 액적의 주변에 풍부한 친수성의 층을 형성해서 다른 액적의 접근을 저지하는 효과가 크다.

에멀전 연료에 이용되고 있는 계면활성제는 거의가 비이온성 계면활성제이다. 일반적으로 계면활성제는 소수성과 친수성과의 balance가 그 성질을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 특히 비이온성 계면활성제에서 이 소수성과 친수성과의 balance는 HLB價로서 수치화시켜 용도에 따라 사용된다. 그 값이 높은 만큼 친수성이 크고 낮은 만큼 소수성이 크다.

물/기름의 에멀전 연료는 유화를 촉진하기 위한 첨가제(유화제)를 가해 homogenizer 등의 유화기에서 미세한 에멀전을 얻는다. 사용되는 유화제 및 그 첨가율에 따라 에멀전 연료의 성질이 바뀔 것으로 예상된다.

### 3.3 분산과 유화분해(乳化分解)

#### 1) 에멀전 형을 지배하는 요인

에멀전 형을 지배하는 요인에는 HLB가 만이 아니고 에멀전 생성시의 조건도 몇 가지가 포함된다.

##### ① 유화제의 종류

친수성이 강한 유화제(HLB가) O/W형, 친유성이 강한 유화제(저 HLB가)는 O/W형 에멀전을 생성한다.

##### ② 액상의 용량비

유화제가 존재하지 않으면 일반적으로 2상중 대량으로 존재하는 쪽이 연속 상으로 된다.

##### ③ 기계적 조건

교반에 의하여 에멀전 형이 변하는 것이 있다.

##### ④ 용기의 벽의 성질

물에 달라붙기 쉬운 표면을 갖는 용기(glass 등)에서는 물이, 한편, 소수성 표면을 갖는 용기에서는 오일이 연속 상으로 되기 쉽다.

#### 2) 에멀전 연료의 안정성과 유화분해

안정한 에멀전을 조제하려면 에멀전 생성의 용이도와, 에멀전의 안정성을 고려하여야 한다.

에멀전의 속에는 반영구적으로 안정하게 보이는 것도 있으나, 유화는 열역학적으로는 불안정한 한계이므로 장기간 후에는 물과 오일로 분리된다. 이 분리 과정을 해소(demulsification)라고 부르며, 대

략 다음의 세 가지 과정으로 이루어진다.

a) **Cleaming**

W/O형 에멀전에서는 오일상보다 수상의 밀도가 높기 때문에 분산질(수상)이 중력에 의해 침강한다. 이 현상은 에멀전의 농축 과정이고 **cleaming**이라 부른다.

분산질의 상승 또는 침하의 속도는 일반적으로 "stokes의 법칙"에 의하여 근사적으로 설명된다. 에멀전 연료에서 **cleaming**을 방지하려면 입경이 작고, 입경 분포가 좁은 에멀전을 제조하는 것이다. Stokes 법칙은 분산매(오일상)는 고밀도, 고점도로 있는 만큼 에멀전의 안정성에는 유리하나 연료유의 성상을 고려하여 그 성상을 유지하는 것은 어려움이 많다.

[Stokes의 식]

$$v = \frac{2a^2(\rho - \rho_0)g}{g\eta}$$

여기서, v : 침강 속도

a : 액적의 입경

$\eta$  : 분산매의 점도

g : 중력 가속도

$\rho, \rho_0$  : 분산질 및 분산매의 밀도

b) **응집(flocculation)**

응집은 액적이 서로 연결되어 이차적인 집합체를 만드는 현상이고, 액적의 브라운 운동이나 외력에 의한 상호 충돌로 이루어진다.

응집을 방지하기 위해서는 전기 이중층에 의한 반발력을 크게 하면 효과적이며, 즉, 제타 전위가 큰 쪽이 응집 방지가 뛰어나다. 비 이온성 계면 활성제는 산성 또는 알칼리성 어느 것이나 각각 H<sup>+</sup> 이온 또는 OH<sup>-</sup> 을 흡착하기 때문에 + 또는 -의 전하를 증가시켜 안정도는 높게 된다.

c) **합일(Coalescence)**

액적이 응집된 후 액적 간의 흡착 막이 이탈하며 소실되어 액적이 부착하는 과정을 합일이라 부른다. 2 액적 사이의 합일이 진행하면 머지않아 오일상과 수상으로 분리된다. 이와 같이 합일은 시간 경과에 따른 과정이 있기 때문에 에멀전 연료의 경우에 있어서도 에멀전의 조제에서 사용까지 시간이 짧으면 합일은 일어나지 않는다.

3.4 에멀전 연료의 성상

에멀전 연료는 연료유와 물을 혼합해서 유화시킨 것으로 에멀전 연료 중에 미세한 물 입자를 분산시킨 유중 물액적형(W/O형)과 수중에 미세한 유입자를 분산시킨 수중 유액적형(O/W형)의 두 가지로 분류되며 대표적인 구조 모형을 나타내

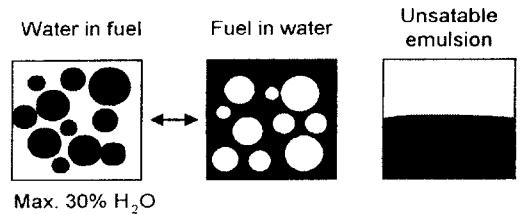


그림 3.1 에멀전 연료의 구조

면 그림 3.1과 같다.

유중 물액적형의 경우, 물 비율이 5~30 용량% 정도에서는 분산 물 입자는 구형에 가까운 형으로 된다. 한편, 수중 유액적형의 경우, 분산 상으로 되는 오일 비율이 보통은 50% 이상으로 많기 때문에 분산하고 있는 유입자는 다면체를 나타내는 것이 많아 디젤 기관에 유화 연료를 적용하는 경우에는 유화 안정성, 유동성, 부식성, 연소성(착화성) 등의 점에서 유중 물액적형을 선택하는 경우가 많다.

그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 W/O형의 경우에는 분산 물액적 입자가 완전한 구상을 나타내고 있는 반면에, 내상(內相)이 많은 O/W형의 경우에는 분산 유액적이 다면체를 나타내고 있다.

이 내상(內相)의 분산입자가 모두 균일한 球의 형상이라고 간주하여 기하학적으로 계산하면, 내상이 차지하는 비율이 74%일 경우에는 최밀충전(最密充填)이 되고 내상의 비율이 보다 더 증가하게 되면 분산입자는 구상으로부터 점차적으로 다면체를 형성하게 되어 궁극적으로는 약간 경사진 16 면체를 형성하게 된다고 말할 수 있다.

일반적으로 사용하고 있는 에멀전 연료는 O/W형이며, 내상이 되는 물의 비율은 10-40vol%로 많기 때문에 유액적은 다면체를 나타내고 있는 것이 많다.

### 3.5 에멀전 연료의 물리적 특성

에멀전 연료는 보통 기름연료와는 다르며 다음과 같은 물리적 특성을 갖는다.

#### 1) 점도

그림 3.2는 유화 A 중유의 수분 비율에 의해 점도 변화를 나타낸다. 또 그림 3.3 및 그림 3.4에 수분 비율을 parameter로 하는 온도와 점도 변화의 특성을 나타낸다.

연료유 중에 球形狀의 물 입자가 分散된 경우에는 물 입자 界面의 영향에 의해서 수분 비율이 높게 됨으로 점도가 상승한다.

유화 A 중유의 경우 그림 3.2 및 그림 3.3의 경향에서 수분 비율 및 온도에 의해서 점도 변화는 작아 R.W. 30~50초[20.8~95.7 cSt] 범위이다. 한편, 유화 C 중유의 경우 그림 3.4에서 수분 비율 및 온도에 의한 점도 변화는 크게 되므로, 점도 조정이 중요하게 된다.

#### 2) 밀도

에멀전 연료는 연료유와 물의 혼합물이므로 연료유와 물의 밀도 차에 의해 분산 층으로 있는 물이 침강, 합체하여 분리하는 성질이 있다. 연속층(連續層)에서는 연료유와 물의 밀도 차가 작음에 따라 에멀전 연료의 안정성은 양호하다.

그림 3.5와 3.6은 유화 A 중유와 C중유의 수분 비율에 따른 밀도의 변화를 나타낸다. 수분 비율이 증가 함에 따라 유화 밀도가 크게 된다.

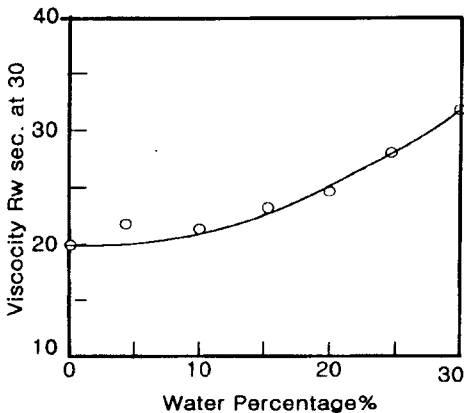


그림 3.2 유화 A중유중의 수분비율과 점도와의 관계

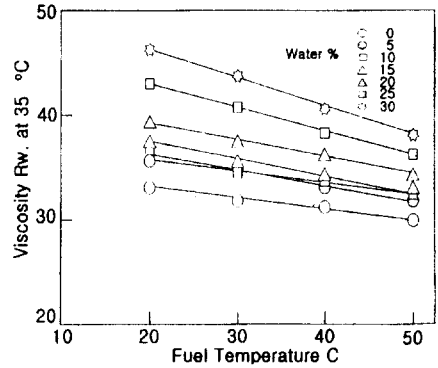


그림 3.3 유화 A중유중의 온도 - 점도특성

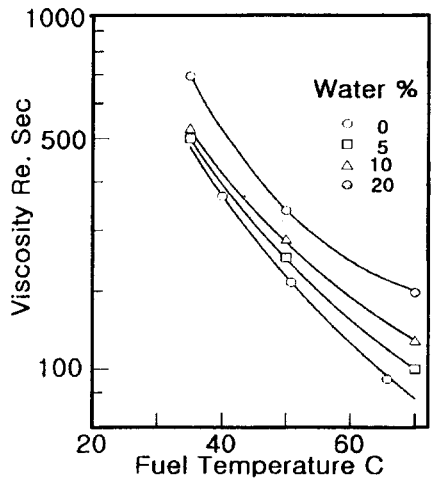


그림 3.4 유화 C중유중의 온도 - 점도 특성

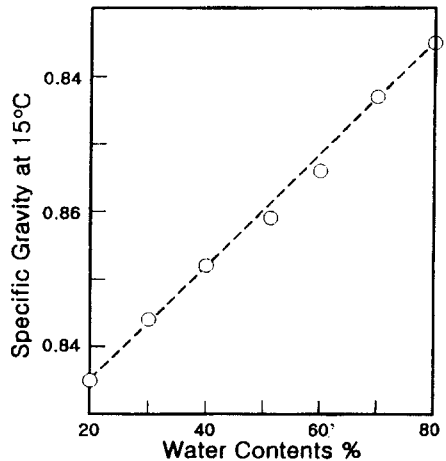


그림 3.5 유화 A중유중의 수분 비율과 밀도와의 관계

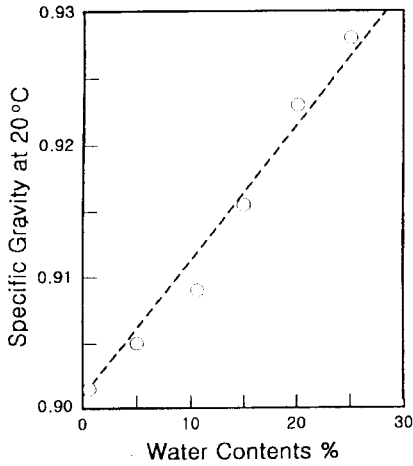


그림 3.6 유화 C종유중의 수분 비율과 밀도와와의 관계

3) 색상(色相)

표 3.1은 에멀전 연료의 分散粒子 직경과 색상과의 관계를 나타낸다.

에멀전 연료는 보통 분산입자가 1 $\mu$ m 이상이며, 유화 등·경유의 경우는 유백색(乳白色)이나, 유화 중질유의 경우는 초콜릿색을 나타낸다.

또, 색상은 分散相 粒子의 미립화도, 均一度 등에 따라서도 다르게 나타나므로 색상이라는 광학적 성상이 물 입자의 비율, 미립화 정도, 균일도의 상태에 따르게 된다.

표 3.1. 에멀전 연료의 직경과 색상과의 관계미립자

경미립자 경(mm)	色相
비교적 큰 물液滴	2個의 相識別 가능
>1m	乳白色
1~약 0.5m	靑白色
0.1~1.05m	灰色이나 透明
≤0.05m	透明

3.6 온도에 의한 영향

에멀전 연료는 온도가 상승함에 따라 분자운동이 활발해지기 때문에 분산입자간에 합일(合一)이 진행되기 쉬울 뿐만 아니라, 또 연속상의 점도도 저하하기 때문에 일반적으로 안정성이 저하하게 된다. 에멀전 연료에 널리 사용되고 있는 산화에 에틸렌계의 비이온 계면 활성제는 온도가 높아지면 친수성(親水性)이 저하하게 되고 O/W형에서 W/O

형으로 전환하게 되므로 주의할 필요가 있다.

3.7 유동특성

내상(內相)의 비율 30vol% 정도 이하로 적은 에멀전 연료의 점도는 연속상 점도의 1.5-3배 정도인 Newton유체라고 간주해도 별로 큰 문제가 되지 않는다. 더욱이 내상의 비율이 증가하게 되면 분산입자에 의한 마찰이 증가하여 점도가 높아지게 되고 가소성(假塑性)유동(Pseudoplastic Flow)이 나타나게 된다. 그리고 내상의 비율이 증가하여 90vol% 이상이 되면 고점도의 Gel상이 되어 Bingham 유동(Plastic flow)이 나타나게 된다.

이러한 유동성을 그림으로 도시하면 그림 3.7과 같으며, 각각의 외관상 점도는 각 점과 원점을 연결한 직선의 구배에 상당한다.

상술한 바와 같이, 일반적으로 사용되고 있는 유중 물액적형 에멀전 연료는 그림중의 유동특성 (a)에 상당하고, 또한 수중 유액적형 에멀전 연료는 그림중의 (b)또는 (c)에 상당한다.

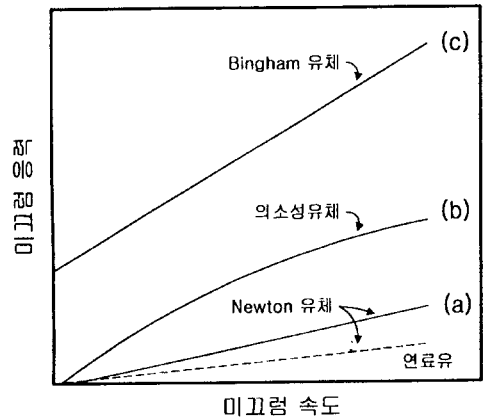


그림3.7 에멀전 연료의 유동특성

3.8 분무특성

에멀전 연료는 분무 시에 일반적으로 노즐 선단부에서 미끄럼 속도를 받기 때문에 분산입자가 더욱 작은 입자로 분할된다. 그러나, 연속상(連續相)인 대단히 작은 Gel상의 수중 유액적형 에멀전 연료의 경우에는 미끄럼 속도에 의하여 일부가 배액현상(倍額現想)이 일어나 분해되거나 또는 유중

물액적형으로 변하여 분무되는 경우도 있다.

### 3.9 기타성상

유중 물액적형의 에멀전 연료는 연료에 쉽게 분산되며, 수중 유액적형의 에멀전 연료는 물에 잘 섞이고 쉽게 균일해 진다. 또한 수중 유액적형의 에멀전 연료는 통전성이 있으며, 이러한 성상은 에멀전 연료의 에멀전 형식을 판별하는 데에 널리 이용되고 있다.

## 4. 에멀전 연료의 연소이론과 응용

### 4.1 에멀전 연료의 연소이론

#### 1) 에멀전 연료의 연소성

에멀전 연료를 연소시키는 경우의 효과로써는 NOx의 저감과 분진 저감 및 과잉공기의 감소에 의한 에너지절약의 3가지가 있다.

에멀전 연료를 연소장(燃燒場)에 분무시키면 대부분의 경우가 물의 기화점에서 Micro 폭발을 일으키게 되며, 이때 유액적(油液滴)중에 함유되어 있는 물액적이 급격하게 증발하여 가스화 되므로서 체적이 1,700 - 1,800배로 팽창하고 액적은 비산하게 된다. 이 때문에 유액적은 2차 미립화가 일어나게 되고 면적이 증가하여 산소와 접촉하기 쉬운 상태로 된다. 따라서 연소시간이 짧아짐과 동시에 탄소가 완전 연소하게 되며, 더욱이 물과 탄소가 수성가스반응을 일으켜 CO와 H2로 되고 재연소하는 등의 과정을 거쳐 완전연소가 이루어지게 된다.

그림 4.1은 O2 농도와 NOx 농도 및 분진농도의 관계를 도시한 것으로써, 이와 같이 에멀전 연료의 기술은 NOx의 저감과 동시에 분진저감에도 유효할 뿐만 아니라 저 O2연소에도 이용될 수 있다.

#### 2) 에멀전 연료 액적(液滴)의 연소기구

에멀전 연료는, 분무액적(噴霧液滴)이 연소중에서 이차 미립화 현상을 일관하여 불리어지고 있는 Puffing현상 즉 수증기가 비교적 온화하게 분출되는 현상으로 유액적(油液滴)을 비산시키는 정도가 적다. 미세폭발 현상 즉 수증기와 열수가 충돌 분사되어 무수히 크고 작은 자적(子滴)을 발산하는

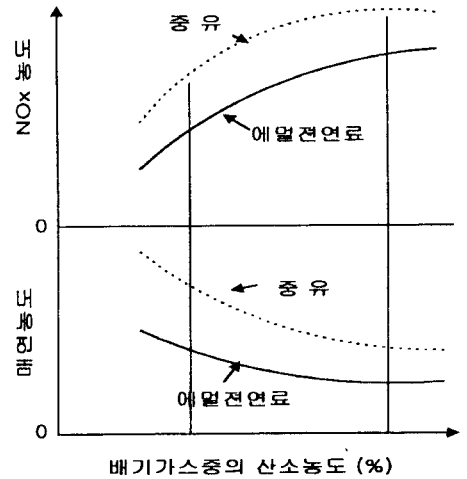


그림 4.1. 에멀전 연료의 NOx 및 분진의 억제효과

현상을 말하고 또 Disruption 현상은 미세폭발 현상이 한층 심해져 에멀전 연료의 액적 전체가 순식간에 크고 작은 무수한 자적으로 나누어지고 모적(母滴)도 동시에 소실하는 현상을 말하나, 이러한 현상을 미세폭발 현상이라고 말하는 경우도 있다. 이러한 현상이 일어나는 것을 이용할 경우에는 연료와 공기의 혼합상태를 좋게 함과 동시에, 매연 발생을 억제시켜 공기과잉을 감소와 연소효율 향상에 크게 기여할 수 있다.

또한, 고속으로 비산하는 미립자는 화염 고온부 영역을 급속적으로 통과하기 때문에 확산연소가 가까워지고 Thermal NOx의 배출량도 감소하게 된다.

따라서, 에멀전 연료는 보일러, 가열로, 용광로, Turbine, Diesel Engine 등과 같은 직접분사형의 연소기에 널리 사용될 뿐만 아니라, 그 특징을 살릴 수 있다. 이와 같은 연소 기기에서의 에멀전 연료는 분무군(噴霧群)의 형태로서 고온의 산화성 분위기에 비산하여 연소하게 된다.

#### 3) 에멀전 연료의 분무 및 연소특성

O/W형 및 W/O형 에멀전 연료가 저 공해 및 에너지 절약화를 위한 목적에 적합하고 있는지는 연소조건이나 에멀전 연료화의 조건에 따라 다소 많은 영향을 받고 있으나, 일반적으로 중질유의 경우에 있어서는 W/O형이 우수하고 등유의 경우에 있어서는 O/W형이 양호한 성적을 나타내고 있다.

에멀전 연료를 Diesel분사 Pump로 분무하는 경우에 있어서는 에멀전 연료중의 물액적(水液滴,  $1-5\mu\text{m}$ )은 고압분사에 의하여 대단히 미세한 물액적이 되며, 또 압축점화식의 분무연소 장치를 이용하여 경유 에멀전 연료의 분무화염을 관찰하면 착화지연은 원래의 모연료(母燃料)보다 길어지나 착화후의 연소는 양호할 뿐만 아니라 화염이 밝고 갈색부분이 적기므로, 매연 발생량도 적고 화염의 소화시간도 비교적 빠르다.

4.2 에멀전 연료의 활용

디젤엔진에서 이차 미립화에 의한 연소성 개선, Thermal NOx와 매연 배출량의 억제 및 운전조건에 따른 연료소비의 절약도 기할 수 있다. 그러나 연소가 고압 하에서 진행되는 디젤엔진 중에서는 압력증가에 따라 이차 미립화의 활동이 쇠퇴하는 결점이 있을 뿐만 아니라 고부하 연소에서는 어떠한 방법으로도 매연농도의 감소효과가 적다는 결점이 있으며 O/W형과 W/O형의 에멀전 연료 사이에는 고압에서도 이차 미립화의 특성에 많은 차이가 있다는 것을 알 수 있다.

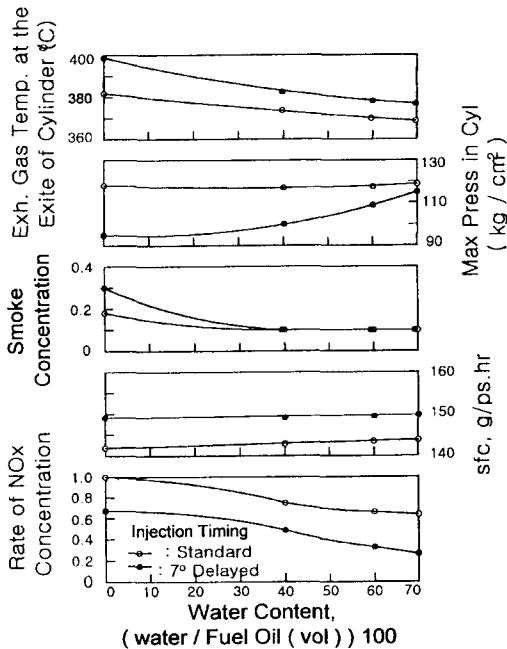


그림 4.2 디젤엔진의 에멀전 연료 적용시험결과

그림 4.2는 대형 디젤엔진에서 W/O형의 중유 에멀전 연료를 연소시켰을 경우에 NOx 및 매연농도의 배출량을 측정하여 도시한 것으로서 일정수준 이상의 물을 함유시킨 경우에는 W/O형 또는 O/W형과 같이 에멀전 연료의 구조를 달리 하여도 배기가스 특성은 그다지 변하지 않는다는 것을 알 수 있다.

표 4.1은 O/W형의 경유 에멀전 연료를 Bus, Truck 용 엔진에 사용하여 운전한 결과의 일 예를 나타낸다.

이 엔진에 사용한 에멀전 연료의 조성은 경유 86.4 vol%, 물과 계면활성제의 합이 13.6%, 점도 4.0 Poise 250℃ 및 발열량 85,550kcal/kg이다. Bosch의 매연농도는 에멀전 연료를 사용하여도 정격부하 연소의 경우에는 감소하지 않으나, 부분부하의 경우에는 대체적으로 작아진다. 소형 디젤엔진에서는 미연소 탄화수소의 배출량이 약간 증가하여 NOx+HC는 10-20%감소하게 된다. 또한 CO 배출량은 경유 에멀전 연료를 사용한 이전과는 거의 변하지 않는다.

이러한 결과들은 에멀전 연료의 착화지연이 길

표 4.1 Bus · Truck용 Engine에 있어서의 O/W형 경유 에멀전 연료의 비교시험결과

Items		Swirl	Pre - Cham - ber	DI	
Pollutant Gas	NOx	-28	31	-10	
	HC	+25	+86	+43	
	CO	-4	-29	+30	
Eng. Performances	100 %	Max. Power (%)	+0.4	+0.5	+1.5
		Bosch No.	-0.6	0.3	-0.1
		Exh Gas Temp (°C)	±0	+15	-5
	75 %	sfc(%)	+0.0	-3.0	-1.5
		2200 (rpm)	+0.1	-1.5	-4.0
		3700	2300	2500	
Bosch No. (rpm)		-0.8	-0.5	+0.4	
	2200		1400	1500	
	3700	-0.6	-0.1	-0.5	



어지기 때문에 일차 미립화와 이차 미립화가 착화 전 또는 착화직후에 증발하지 않는 채, 그대로 연소실 벽에 부착하고 소염효과에 의하여 미연소 탄화수소의 배출이 증가하기 때문에 생긴 것이라고 추정되어진다.

많은 실험으로부터 에멀전 연료를 디젤에 적용하기 위한 활용방안으로써는 소형 엔진보다도 대형 엔진 쪽이 에멀전 연료의 특징을 잘 살릴 수 있으므로 저 공해화와 연료소비율 향상을 용이하게 실현시킬 수 있다.

## 5. 에멀전 연료 제조방법 및 제조 장치

### 5.1 에멀전 연료의 제조방법

에멀전 연료의 혼합장치는 여러 가지 방법의 유화장치가 유럽 및 일본 등 선진국에서는 개발되고 있으며, 이들의 대표적인 혼합 원리는 액체 중에서 교반자(攪拌子)를 회전을 시키거나 또는 진동시켜 미끄럼 속도를 주는 방법과, 액체자체를 분사시키는 등으로 난류가 일어나도록 하여 미끄럼 속도를 주는 방법의 2가지가 있다.

에멀전 연료를 생성하는 장치를 원리적으로 분류하면 유동의 난류, 전단, 충격, 진동 및 공동현상 등에 의한 것으로 나눈다. 이 작용을 이용한 기계적 유화 분산 장치로서 탱크형 교반기, 유동형 교반기, roller mill, colloid mill, 고압 분출 장치 등이 있다.

### 5.2 에멀전 연료의 제조장치

#### 1) 기계식 유화 장치

에멀전 연료를 제조하는 유화 장치 중 현재 실용화되고 있는 형식은,

- a) Screw형 교반익에 의한 유화장치
- b) 관내 혼합을 이용하는 유화장치
- c) 전단 작용을 이용하는 유화장치
- d) 분류를 이용하는 유화장치
- e) 복합형 유화장치와 같이 분류되며 각 장치별로 개요에 대하여 설명하면 다음과 같다.

#### a) Screw형 유화장치

고속으로 회전하는 스크류형 교반익에 의해 기

름과 물을 혼합 미립화하는 방식으로 구조는 매우 간단하나 균일하고 미세한 에멀전 연료를 만드는 데에는 다소 부적합하다. 소량의 유화유를 batch 방식 생산에는 적당하나 연속으로 대량의 유화유를 만드는 공정에는 부적합하다.

#### b) 관내 혼합을 이용하는 유화 장치

유로 내의 흐름을 분할한다거나 난류를 발생시키는 판이 설치되어 있으므로 이 판을 통과할 때마다 분할과 혼합이 이루어진다. 그림 4.1과 같이 판을 몇 단 조합시키면 매우 미세한 유화를 얻는다. Mixer element를 두 개 병렬로 조립된 원통 통로 판의 내부에 그림에 나타난 것과 같은 나선형 날개를 조립한 구조로 되어 있다. Element의 전후에는 중간 방이 설치되어 있다. 2 층의 유체가 mixer element를 통과하면, 그림의 아래에 나타나는 것과 같이 8 층으로 분할 되므로 분할수(N)는 element수를 n으로 하면,  $N=4^n$ 의 order로 나타낸다. 반면에 1회만으로는 유화가 충분히 만들어지지 않으므로 여러 번 반복하여 통과시켜야 한다.

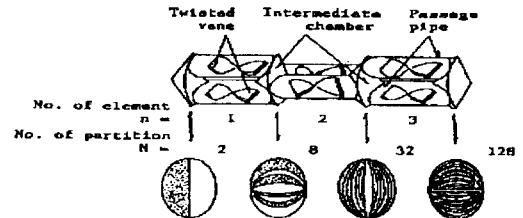


그림 5.1 파이프내 혼합기의 개념도(Hi - Mixer)

#### c) 전단작용을 이용하는 유화장치

그림 5.2에서와 같이 외측(stator)이 고정되어 있고 내측(rotor)이 고속으로 회전하는 회전자 사

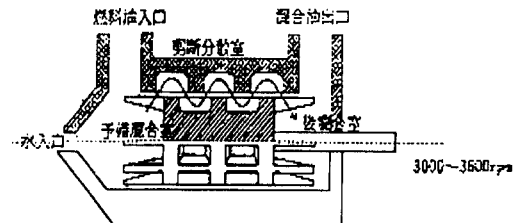


그림 5.2 기계식 혼합기 단면도(일본 關口産業, Sekima - MSB)

이에 좁은 간격으로 연료와 물의 혼합액이 화살표 방향으로 흐르는 과정에 전단과 혼합을 반복하여 유화가 이루어지는 것이다. 이 장치에는 기계적으로 접촉하는 부분이 없고, 유화가 균일하고 안정성이 높은 에멀전 연료가 얻어진다.

d) 분류를 이용하는 유화장치

액체를 특수한 형상의 용기 내에 고속으로 분사해서 액체의 충돌과 전단 작용으로 유화시키는 방식이다. 그림 5.3에 그 장치의 단면을 나타낸다. 연료와 물이 고속으로 원추형의 mixing chamber의 접선방향으로 분사시키고 회전시키면 중심으로 향한다. 회전 운동을 시키면 접선 방향 속도는 여러 가지 작용을 받아서 변화한다. 그래서 액체 층(동심원의 형을 한다)의 접선 방향 속도에는 차이가 있고, 각층 사이에 전단력이 작용하여 혼합된다. 중심의 배출구에 가까운 액체는 축 방향의 속

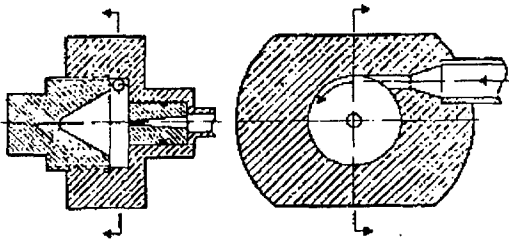


그림 5.3 분류식 유화기(ORF Hydroshear)

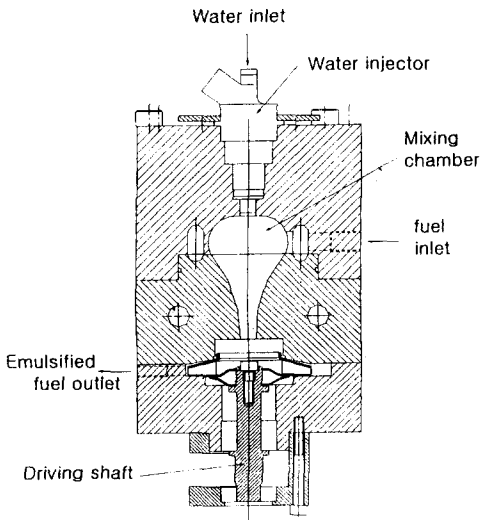


그림 5.4 복합형 유화기

도를 받아 배출된다. 이 때에 유화가 촉진된다. 이 장치는 매우 구조가 간단하나 一回의 처리만으로는 충분한 유화를 얻지 못하므로 여러 번 순환시켜야 한다.

e) 복합형 유화 장치

기계식과 분류방식을 조합한 방식으로서 스위스의 HDC사가 생산하는 형식으로, 그림 5.4와 같이 기구모양의 Chamber를 중심으로 붙은 위에서 노즐에 의하여 분사되고, 기름은 Chamber의 상부 주위에 연료의 전단작용이 이루어질 수 있는 구조의 부위에 수평 원주방향으로 유입되어 물과 혼합되면서 Chamber 하부의 흡인력에 의한 작용에 의하여 유동이 공동현상으로 발전하여 물과 기름의 미립화가 촉진된다.

2) 초음파식 유화기

초음파 homogenizer는 고주파 전원으로 구동되는 초음파 진동자에 의해서 연료유가 접촉하는 진동면 상에 발생하는 진공 층의 생성과 소멸이 반복되면서 cavitation에 의해 충격 작용으로 유화 분산이 진행된다. 그림 5.5에 초음파 homogenizer를 나타낸다. 에멀전 연료를 적용할 때에는 우선 문제되는 것이 안정성이다. 초음파 homogenizer는 기존의 기계적 교반 등의 방식에 비해서 미립화 등이 뛰어나 연속 처리의 경우 1~2 $\mu$ m의 물 입자로 균일하게 유화 분산시키는 특징이 있다. 에멀전

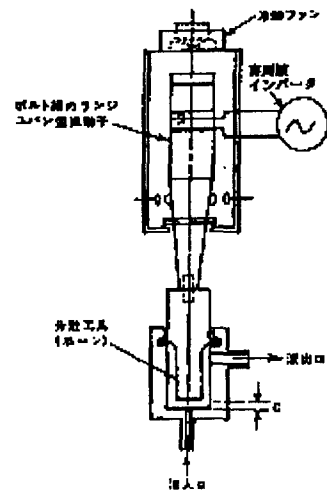


그림 5.5 초음파 Homogenizer

연료의 안정성은 이와 관련하여 연료유의 종류, 물 첨가율, 유화제의 종류와 첨가율 등이 크게 영향을 미친다. 일반적으로 A 중유나 경유와 비교해서 물의 비중 차가 작은 C 중유의 경우, 기계적 교반에 의해서도 비교적 쉽게 에멀전 연료가 생성된다. 그러나 점도가 낮은 A 중유나 경유, 더욱이 가솔린, 등유 등의 경우는 유화 분산 장치의 특성이나 유화제의 첨가율에 의해 안정성이 크게 차이가 난다.

초음파 homogenizer의 경우 어떤 것이나 점도가 낮은 연료유의 유화 분산에 알맞고, 기계적 교반기 등에 비해 적은 유화제, 또는 조건에 따라 유화제 없이 에멀전 연료를 제조할 수 있다.

초음파 homogenizer는 고주파 전원 에 의해서 구동되는 초음파 진동자와 초음파 진동자의 진동을 효율적으로 전달하는 선단부, Cone 및 Horn과 유화실 등으로 구성된다.

진동자의 공진 주파수는 15~30kHz, 진동자 단체의 출력은 150~2000W정도이다.

초음파에 의한 연료유와 물의 유화 분산 작용은 horn 선단에 연료유가 접촉하는 진동면 부근의 공동현상에 의해 발생한다. 따라서 단지 초음파를 방사하는 것만으로는 유화 분산을 일으키기 어렵다. Cavitation을 유효하게 발생하도록 horn 선단과 유화실 밑바닥과의 간격은 수 mm로서 유체의 정도에 따라 조절한다.

### 5.3 에멀전 연료 제조 시스템

에멀전 연료 제조를 위한 시스템은 그림 5.6과 같으며 제어반, 물 펌프, 물 필터, 혼합기, ECU, 열

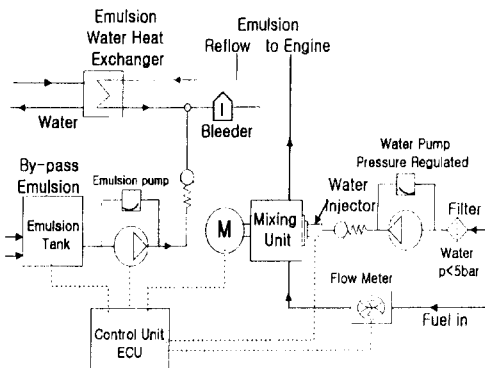


그림 5.6 에멀전연료 유화장치 시스템

교환기 및 탱크류 등으로 구성된다.

## 6. 디젤기관에의 에멀전 연료의 적용

### 6.1 에멀전 연료의 연소효과

유화 연료의 경우에는 경유에 비해서 연료 소비율, NOx 및 Soot 농도가 동시에 저감되나 소음 및 HC는 역으로 증가하고 CO는 분사시기에 따라 영향을 받아 증감한다.

디젤 기관에 유화 연료를 사용할 때에는 다음에 나타나는 효과에 의해 연소가 개선되고 연료 소비율이 저감된다.

- (1) 유화 연료 중의 물 입자의 급속한 체적팽창 즉 미세폭발 효과에 의한 분무의 미세화
- (2) 분무의 운동량 증가에 의한 분무속 내의 공기의 swirl 효과
- (3) 물의 함유에 의한 분무의 국소 공기 과잉을 증대
- (4) 착화 지연 증대에 의한 에혼합 연소량 증가
- (5) 연소 온도 저하 및 휘염 감소에 의한 냉각 손실 지감
- (6) 연소 온도 저하에 의한 열해리 경향 억제
- (7) 연소 가스 물 수 증가

여기서, 특히 (1)~(4) 효과에 의해서 연소실내에서 분무 연료와 공기와 혼합이 촉진되고 연소기간이 단축되며 그 결과 연소효율이 개선된다. 더욱이 (5)~(7)의 이유도 가해져 특히 냉각 손실의 저감에 의해 연료 소비율이 저감되는 것이라고 생각된다.

#### 1) 분무액적의 미세화

유중 수적형의 Emulsion은 미세한 물 입자주위를 경유 피막으로 싸 구조로 되어있다. 이 액적이 실린더 내의 고온 가스로 인해서 가열되고 고온 가스와 경유 피막, 경유 피막과 내부 물 입자의 사이에 급속한 열 이동이 일어나 그 속도가 충분히 큰 경우에 물 입자는 연료 액적의 내부에서 비점 이상으로 되어 과열 상태로 된다. 이와 같이 형성된 과열 물은 매우 불안정하게 될과 동시에 연료와 사이에 비점 차이가 있으므로 이 과열수가 우선 기화하여 일거에 팽창한다. 이 때에 연료 액적은 폭발적

으로 파괴되어 보다 미세한 액적으로 되어 연소실 내의 공기와 잘 혼합되기 때문에 연소가 촉진되어 연소효율이 높게 되는 것이다.

2) 분무속 내의 공기 swirl 효과

그림 6.1은 분무의 도달 거리, 분무각, sauter 평균 입경에 대하여 경유와 유화 연료를 비교한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 유화 연료의 경우에는 경유에 비해서 도달 거리는 크나 분무각은 작고, 평균 입경이 크므로, 연소상 요망되는 분무 상태가 아니다. 그러므로 그림 6.2에서 나타내는 것

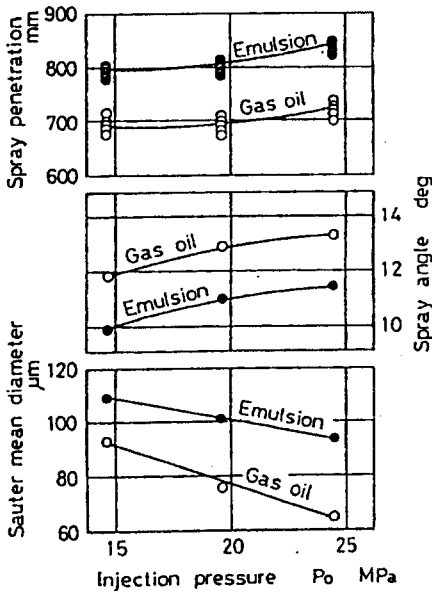


그림 6.1 노즐개폐압에 따른 에멀전과 디젤연료의 분무특성

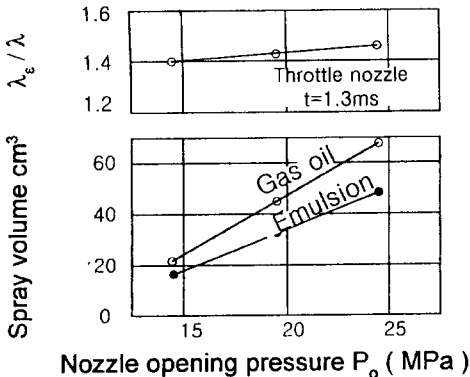


그림 6.2 분사량과 공기과잉율

과 같이 분무 내에 평균 공기 과잉율은 경유( $\lambda$ )에 비해 유화 연료( $\lambda E$ )가 크다.

3) 분무의 국부 공기 과잉율의 증대

그림 6.2는 연료의 총 분사량이 동일하다고 계산한 것이며, 유화 연료의 경우에는 물의 양만큼 분사량이 증대된다. 이 경우 즉, 공급 열량을 일정하게 한 경우의 분무 내에 평균 공기 과잉율의 비  $\lambda E = \lambda$ 는 그림 6.3에 나타난 것과 같이 급격히 증가한다. 그림 6.3에서  $X_e/X$ 는 도달 거리의 비이고 ①은 동일 분사계, ②는 동일 분사 기관의 경우를 나타낸다.

4) 예혼합 연소량의 증가

그림 6.4는 예혼합 연소량의 증가에 대한 micro

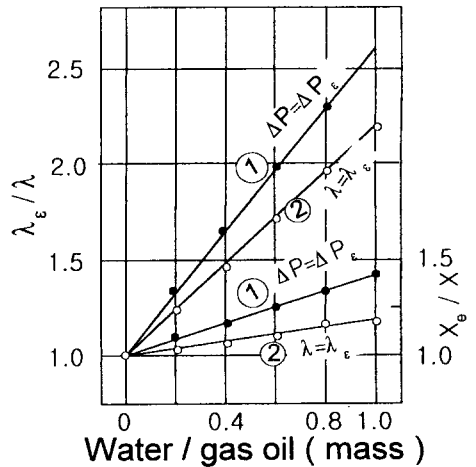


그림 6.3 분무 관통거리 및 공기과잉율 관계

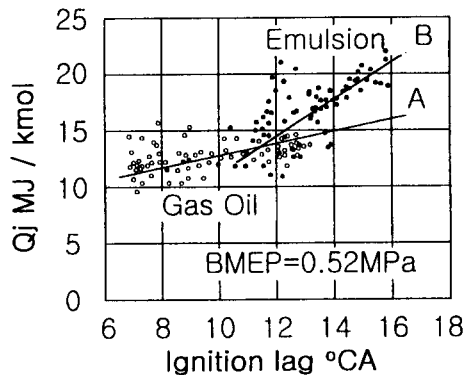


그림 6.4 착화지연과 열발생율과의 관계

폭발 및 분무속 내의 공기 과잉을 증대의 효과와 착화 지연의 증가에 대한 효과를 구별하기 위하여 착화 지연과 초기 연소량  $Q_i$ 의 관계를 경유와 유화 연료로 비교한 것이다. 여기서 초기 연소량  $Q_i$ 는 착화에서부터 crank각  $10^\circ$  CA를 경과한 사이에 발생한 열량으로 정한다. 그림에 나타난 것 같이 유화 연료의 경우에 경유에 비해서 착화지연이 크므로  $Q_i$ 도 커진다.  $Q_i$  증가 경향은 경유 연료와 유화 연료가 다르다. 즉, 경유의 경우에는 착화 지연의 증대에 따라  $Q_i$ 의 증가를 그림 6.4 중의 A선으로 나타내는 데에 비하여 유화 연료의 경우에는 B선으로 나타내며, 그 경향은 A선에 비해 크다. 따라서 이 양 직선의 경사차가 유화 연료의 micro 폭발 및 분무속 내의 공기 도입에 의한 혼합 촉진 효과라고 추정된다.

5) 냉각 손실 저감

그림 6.5는 기관의 냉각수 출구 온도를 바꿀 때의 냉각수 손실  $\psi_c$ 와 실린더 내 압력에서 구한 냉각 손실  $\psi_w$ 를 경유와 유화 연료에 대하여 비교한

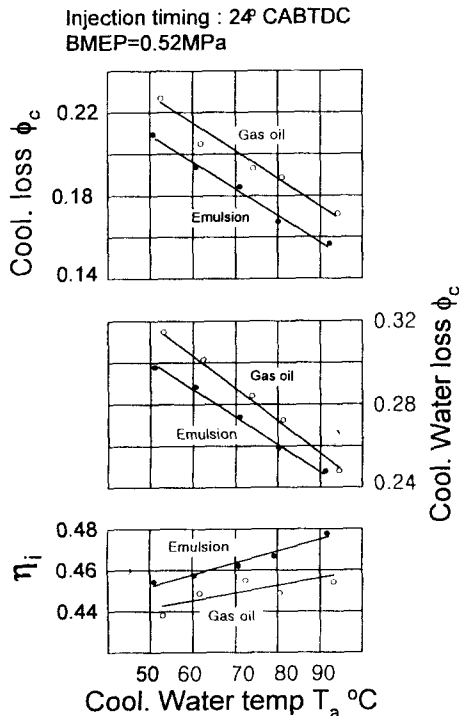


그림 6.5 냉각수온도 변화에 대한 열효율, 냉각손실 관계

것이다. 냉각수 출구 온도가 높게 됨에 따라 냉각 손실  $\psi_w$  및 냉각수 손실  $\psi_c$ 는 저감됨과 동시에 도시 열효율은 증대한다.

6.2 유화 연료의 NOx 생성

내연 기관에서 NOx 생성을 지배하는 주요 인자는 연소장에서의 산소 농도, 연소 온도 및 고온 가스의 체류시간 등 3 가지요소이다, 디젤 기관에서는 불균일 혼합기, 확산 연소 및 착화 지연 등의 요인에 의해 NOx 생성은 복잡하게 영향을 받는다.

유화 연료를 사용한 경우에는 흡기관 물 분사의 경우와 똑같이 물의 증발에 의해 연소 온도의 저하와 수증기에 의한 산소 농도 저하에 의해 NOx가 저감된다.

그러나 디젤 기관에서 NOx는 주로 연소영역 근방의 고온영역에서 생성되는 것이므로 유화 연료가 함유된 수분이 연소영역에서 온도 저하에 관여하여 흡기관 물 분사보다 그림 5.6과 같이 매우 효과적으로 NOx가 현저하게 저감되었다.

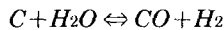
분사 시기를 바꿀 때의 crank 각도에 대한 온도 및 NO 농도 경과는 그림 5.7과 같이 연소 온도는 분사 시기 지연에 따라 피크 값이 낮아지고 팽창 측으로 이동한다. 또, 유화 연료의 경우에는 경유에 비해서 피크 값이 낮아지고, 보다 팽창 측으로 이동한다. NOx는 지연 분사시기에 저감되고 유화 연료는 경유에 비해서 낮다. 어떠한 분사 시기에서도 연소 온도가 거의 2700K이하에서는 NO 농도가 동결된다. 또 연소 농도가 2700K이상으로 유지되는 Crank 각도의 간격을 비교하면, 유화 연료의 경우에는 1.5~5° CA 정도가 짧아진다.

이와 같이 유화 연료를 사용하는 경우에는 물의 증발과 더불어 착화 지연의 증가에 의해 열 발생물의 피크 값의 지연에 따라 연소 온도가 저하함과 더불어 물 수 증가에 의한 산소 농도의 저감 및 연소 시간의 단축에 의한 고온 가스 체류 시간의 저감에 의해 NO가 저감된다.

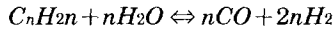
6.3. Soot의 생성

유화연료를 사용하면 화염과 액적 표면 사이의 연료 과농한 영역에서 수증기 농도가 증가하고 연소 온도가 저하하는 현상은 micro폭발에 의해 액

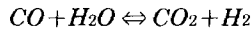
적이 미세화 되고 혼합 촉진되어 기체 상으로 되어 배기 Soot의 생성이 감소된다. 이와 같이 수증기에 의한 Soot 감소는 화학적인 것은 물론 물리적인 효과에 의한 것이다. 그러나 화염대를 지배하고 있는 고온도 (2500K이상)에서는 연료 또는 생성 카본 입자의 직접적인 반응으로 Soot 가 저감되고 있다. 즉, 고온 시에 탄소와 수증기의 반응은 다음과 같이 나타난다.



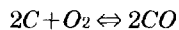
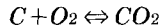
또, 연료와 수증기가 직접적인 반응을 하면



이들의 가스반응에 의하여 생성된 가스 상호 관계는 다음과 같은 소위 수성 가스 반응이 일어난다.



이들의 반응 결과 Soot의 저감을 얻었다고 생각된다. 어느 것이나 흡열 반응이지만 공기가 충분히 존재하는 경우는 다음과 같은 발열 반응이 일어나므로, 위 반응의 경우는 흡열을 도와주는 효과라고 생각된다.



연료 소비율과 Soot 농도의 관계를 나타낸다. 유화연료는 경유에 비해 양자가 동시에 저감된다.

## 7. 결 언

앞에서 언급한 바와 같이 지구의 대기환경보존과 관련하여 선박용 디젤기관에 대하여 배기가스 규제가 2000년 초에 IMO 규약에 의거 실시될 것으로 예정하고 있으며 선진 조선해양국에선 이미 대비가 되어 있는 것으로 발표되고 있다.

이미 일본은 대형선박에 에멀전 연료에 의한 실선 운항 실험을 통하여 에멀전 연료 연소시스템으로 IMO 규제 대비를 어느 정도 준비가 되어 있고, 또 덴마크의 B&W사, 필랜드의 바실리야社 등도 에멀전 연료 적용기술을 개발 완료하여 시행 시점에 준비가 되어 있다.

그러나 우리 나라의 조선관련산업이 수출 지향

적인 것을 감안하면 선박의 대기공해규제에 대한 대비도 준비되고 있어야 할 것이다. 현재 국내에서는 에너지 절약 측면에서 Batch 방식에 의한 에멀전 연료를 보일러용을 대비한 공급계획으로 기술 개발 중에 있다, 한편 한국기계연구원은 에너지자원기술센터의 지원으로 선박 및 산업용 디젤기관에 적용될 수 있는 에멀전 제조 시스템을 개발하기 위하여 연구를 수행하여 왔으며, 이는 초기 에멀전 연료의 분무특성과 기초연소실험으로 그 특성을 규명하고 있는 단계이다.

에멀전 연료 유화 장치는 앞에서 언급 한바와 같이 기계식과 초음파 식으로 대부분되며 혼합물의 제어가 용이한 기계식을 선호하는 경향이다. 핵심부품이 물/연료 혼합기와 이의 혼합율을 제어하는 시스템으로 구성되어 있으며, IMO의 규제시점에는 선박에 필요한 필수장비로서 국내 개발이 긴요한 시점에 우리의 준비가 절실하다.

본 고를 준비하면서 에멀전 연료의 활용은 IMO 규제를 대비한 기술로서 그 경제성이나 배기가스 저감 측면에서 가장 효율성이 우수하고 적용이 용이한 기술로 파악되었고, 시스템의 신뢰성 및 부식문제에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있어 장차 유망한 기술로 발전할 것으로 확신하게 되었다.

끝으로 선박 관련분야에 종사하는 회원들의 에멀전 연료에 대한 기술적 이해를 돕기 위해 관련 해외 연구자료를 조사하여 정리하였으며 현업에 종사하는 관계자에게 참고가 되었으면 한다.

## 참고문헌

1. 선에멀존 대기공해방지기의 연료자동조절장치 개발연구, 한국에너지기술연구소, 1992. 12
2. 燃料乳化による排氣淨化に關する調査研究, 日本船舶機關學會, 平成9年7月
3. 中野眞三 外, 乳化燃料液滴の燃焼におけるすす生成にする研究, 日本船舶機關學會誌 第15卷 第5, 1980. 5
4. 塚原實外, 乳化燃料驅動디젤機關の性能に及ぼす單口ホルノスルの噴口徑の影響, 日本機械學會論文集, 第57卷542 (1991 - 10)
5. 西川和美 外, エマルジョン燃料による NOx, スモクの低減, Journal of the M.E.S.J., Vol.26 N0.9,

- 1991.19
6. A. Lawsomand, et al, Modified Fuel for Diesel engines by Application of Unstabilized Emulsions, SAE,790925
  7. Report on Performance Combustion Characteristics and Exhaust Emission of a Direct Injection Engine Using Water/Oil Emulsions as Fuel, North Carolina State University, 1985. 6
  8. Puffing and Micro Explosion Phenomena of Water Emulsion Fuels, K.C.Tsao and C.L.Wang
  9. Experimental Reduction of NO<sub>x</sub>, Smoke, and BSFC in a Diesel Engine Using Uniquely Produced Water (0 - 80%) to Fuel Emulsion, Tadashi Murayama, Yasushi Morishima, Minoru Tsukahara, Noboru Miyamoto
  10. Influence of Emulsified Fuel Properties on the Reduction of BSFC in a Diesel Engine, Minoru Tsukahara and Yasufumi Yoshimoto, Tadashi Murayma
  11. 박권하, 박태인, 김기형. 배기 재순환 기술과 혼합 연료사용에 의한 디젤기관의 질소산화물·매연미립자 동시저감기술 (1997.7)