

## 함산소 물질이 혼합된 디젤연료의 분무특성

류근영\* · 하종석\*\* · 노수영\*\*\*

### Spray Characteristics of Diesel Fuel with Oxygenates

Keun-Young Ryu<sup>1)</sup>, Jong-Suk Ha<sup>2)</sup> and Soo-Young No<sup>3)</sup>

주요기술용어 : Oxygenated Fuel(함산소연료), Spray angle(분무각), Spray tip penetration(분무선 단관봉거리), Drop size distribution(입경분포), SMD(사우터 평균입경)

#### Abstract

The effect of four diesel fuels with oxygenated agents fuels on spray properties from plain-orifice atomizer was investigated. The oxygenates evaluated were diglyme, MTBE, DEE and DMM and were blended in weights of 5, 10, 15, 20 and 30% in a baseline diesel fuel. The physical properties such as surface tension, density and viscosity are also measured for each blended oxygenated fuels.

It was found that changes in physical properties of fuels considered are enough to influence spray properties, i.e. spray angle, spray tip penetration and mean drop size.

Spray properties were measured by PMAS(particle motion analysis system) which is employing a point measurement technology. Spray angle increased with increase in oxygenate content. The effect, however, was not great in the higher blend level. The oxygenated fuels produced more shorter spray tip penetration than diesel fuels. SMD was decreased with the increase in blending percent. SMD for DMM and DEE are represented 10.33 and 3.41% decreasing rates respectively. It was found that changes in spray characteristics of oxygenated fuel were easily large enough to impact pollutant emissions.

It was clear from this study that spray characteristics of oxygenated fuel is one of possible cause of reducing pollutant emissions from diesel engines when oxygenated fuels is applied.

#### 1. 서론

최근 세계적으로 심각한 대기오염과 지구 온난화에 따른 기후의 변화로 인하여 그 주요 원인으로 인식되고 있는 자동차의 배기가스 배출규제가 전 세계적으로 강화되고 있는 실정이다.

현재 주로 사용되고 있는 내연 기관 가운데 디젤엔진은

가솔린엔진과 비교하여 열효율이 좋고 연료 소비 측면의 성능이 우수하여 유럽 등에서는 이미 소형 디젤엔진을 기본 모델로 차세대 연료 절약형 고성능 엔진을 개발한 바가 있다. 그러나 디젤엔진은 우수성에 비하여 NOx와 입자상물질(Particulate matter, PM)의 배출이 많은 것이 문제점으로 지적되고 있으며 이 둘을 동시에 저감시킬 수 있는 방법의 연구가 필요하다.

이들에 대한 여러 가지의 방법들 중 연료 조성 변경의 경우는 개발비용이 적게 들며 현재 사용되는 엔진에 최소한의 수정을 통하여 효과를 얻을 수 있고, 연료 자체의

- 1) 충북대학교 대학원, zeco07@trut.chungbuk.ac.kr
- 2) 주성대학 자동차학과, jsha@namecomj.ac.kr
- 3) 충북대학교 농업기계공학과, sooyoung@chungbuk.ac.kr

배기가스 생성 메커니즘을 확인할 수 있는 장점도 가지고 있다. 이러한 연료 조성 변경의 방법을 세분화하면 연료 내의 황 함유량을 감소시키는 방법, 연료의 세탄가를 높이는 방법, 연료에 황산소 연료를 혼합하여 연료 내의 산소 함유량을 증가시키는 방법 등이 있다. 후처리 법의 경우는 크게 분류하면 입자상물질 트랩, 배기가스 재순환과 촉매를 이용하는 방법 등이 연구되고 있으나 이는 전처리법에 의해 처리되는 정도에 따라 영향을 받게 된다. 연료 조성 변경에 따라 배기가스가 저감된다는 사실은 이전의 연구에 의해 많이 알려져 있으나 그 결과의 대부분은 연소 실험을 통한 것으로 연료의 조성 변경에 의한 물리적 성질에 따른 미립화의 영향을 고려하지 않은 것이다. 따라서 경제적이고 연료 자체의 문제에 의한 배기가스의 배출을 제어할 수 있는 연료 조성 변경 방법에 대한 연구가 필요하며 근본적으로 효율적인 연소물 이루기 위한 미립화 측면의 연구가 이루어져야 한다.

디젤연소 개선과 유해배기가스 저감을 위해 지금까지 연구되어온 에테르류에는 DME(dimethyl ether), DEE(diethyl ether), Methylal로도 알려진 DM(Methoxy methan), monoglyme나 diglyme같은 glycol ether, MTBE(methyl tertiary butyl ether) 등을 들 수 있다.

지금까지의 연구결과들을 보면 메타놀, 천연가스, 석탄이나 바이오매스 등으로부터 쉽게 만들 수 있는 DME가 디젤엔진의 대체연료로서 가장 적극적으로 제안되어지고 연구되어져 왔다.<sup>11)</sup> DME는 주로 메타놀연료에 대한 점화 개선제로 사용되어져 왔으며 선행연구자들의 연구에 의하면 DME는 입자상물질이 아주 낮은 우수한 디젤 대체연료이지만 동일한 엔진 운전조건하에서는 디젤연료의 NOx 배출수준과 동등한 수준을 나타낸다고 보고하고 있다.<sup>11)</sup> 하지만 DME는 가스상태의 연료이므로 압축착화기관에 DME를 사용하기 위해서는 연료분사장치, 연료탱크 및 연소시스템 등도 같이 개발되어야 한다.

에타놀보다 더 큰 에너지 밀도를 가져서 우수한 압축착화기관의 연료로 알려진 DEE는 에타놀의 수화과정을 통하여 제조할 수가 있다. DEE는 오랫동안 냉사동 보조제로 알려져 왔으나 디젤연료의 완전한 대체물로서나 첨가제의 중요한 성분으로 알려져 있기도 하다.<sup>12, 13)</sup>

dimethoxymethane이나 methylal로도 알려져 있는 DMM은 디젤연료성분으로 사용되어 왔던 또 다른 황산소 첨가제이다. DMM은 혼합비율이 높아질수록 NOx와 입자상물질의 저감율이 커진다.<sup>14)</sup> 그러나 DMM-디젤혼합

연료에 대한 NOx효율 상반관계는 낮은 에너지 밀도에 기인하는 일반 디젤연료와 비슷하다고 할 수 있다.

monoglyme(ethylene-glycol-dimethylether)와 diglyme(dimethylene-glycol-dimethylether)와 같은 글리콜 에테르는 처음에는 세탄가 증진제로 알려져 있었으며 이들은 산소 함유량이 많고 높은 자발점화 특성과 세탄가를 가지기 때문에 디젤연료로 사용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

Kajitani 등<sup>15)</sup>은 기존의 디젤 연료에 MTBE를 5, 10, 15% 혼합하여 연소 실험하여 점화 지연이 길어지고 연소 시간이 짧아지며 체동열 효율이 향상되는 결과를 얻었으며 NREL연구소에서는 MTBE의 기초적 연소 메커니즘 중 유해 배기가스 생성에 주된 역할을 하는 OH라디칼과의 반응에 대한 연구를 수행하였다.

Sorenson과 Mikkelsen<sup>16)</sup>은 순수 DME를 소형 직분식 디젤엔진에 사용하여 엔진 성능과 배기가스 특성에 대하여 실험하여 기존의 디젤 연료와 동등한 열효율, CO, HC 배출에 대해서 75% NOx저감과 스모크가 거의 배출되지 않는 저소음 운전이 가능하다고 보고하였다.

Chen 등<sup>17)</sup>은 기존 디젤 연료에 DME를 혼합하여 직접 분사 디젤엔진에서 연소 성능과 배기가스 특성을 실험하여 엔진 성능과 배기가스 특성상 DME를 10% 혼합한 경우에 가장 바람직한 결과를 얻기도 하였다.

Edgar 등<sup>18)</sup>은 DME와 DMM의 자발 점화 특성에 관한 연구를 통하여 에테르 계열의 황산소 물질들이 자발 점화 성능이 우수하여 압축 착화 연소에 적합하며 이 황산소 물질들이 연료에 혼합되면서 냉간 시동성이 향상되며 연소 소음이 저감되고, NOx 저감 등의 성능 향상이 이루어질 수 있다고 보고하였다.

Bailey 등<sup>19)</sup>은 DEE의 디젤 연료 적합성 실험을 수행하여 세탄가가 높은 특성상 디젤 연료로 적합하며 배기가스 배출 특성은 NOx는 1~9%, PM은 13~24% 저감되는 것이 가능하다고 보고하였다.

Liotta 등<sup>20)</sup>은 diglyme를 유닛 인젝터에 적용하여 연료 적합성 실험을 통하여 연료 내의 산소 함유량에 비례하여 입자상 물질의 저감이 가능하다는 결과를 보고하였다.

이와 같이 황산소 연료를 사용한 경우 배기가스의 저감이 이루어지고 있으나 이에 대한 원인은 여러 가지가 있을 수 있다. 황산소 연료의 물성치는 산소와 탄소의 비율이 높으며 탄소와 탄소의 결합수가 적고 산소분자는 연소 기간동안에 고형탄소입자를 형성하기가 어려운 특성을 가지며 그윰의 발생을 억제하게 된다<sup>11)</sup>. 황산소 첨가제의

연료 물성치들은 배기가스특성으로 쉽게 전환되는 분무특성에 영향을 미칠 수 있을 정도로 쉽게 커진다<sup>17)</sup>.

본 연구에서는 4가지의 합산소연료에 대한 분무특성 변화 효과를 파악하였다. 즉, diglyme, MTBE, DEE와 DMM를 디젤유에 여러 가지 비율로 혼합하여 디젤엔진에서 실제적으로 가장 널리 사용되는 평면 오리피스 분무기를 통해 각각의 경우에 대하여 분무특성을 파악하였다.

2. 실험방법

합산소 첨가제는 디젤연료의 비등 범위 내에 속한 것으로 diglyme, MTBE, DEE와 DMM을 각각 선정하였으며 상대비교를 위하여 디젤연료를 포함시켰다. 선정된 합산소 첨가제들은 디젤연료에 중량비율로 5, 10, 15, 20, 30%로 혼합되었다. DMM, MTBE, diglyme는 Adrich사에서 각각 순도 99%, 98%와 99%의 것을 확보하였으며 DEE는 Junsei Chemical로부터 순도 99.5%의 것을 구하였다.

주 실험을 진행하기 전에 밀도, 점성, 표면장력 등과 같은 연료의 물성치를 대기온도 조건에서 각 합산소 첨가제의 혼합비율별로 측정하였다. 각 혼합연료의 밀도, 점도 및 표면장력의 측정에는 표면장력계(Kyowa Interface Sci. CBVD-A3)와 점도계(Tokyo keiki B8FD)를 각각 사용하였다.

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 이 실험에는 분공경 0.56mm이고 개변압이 22MPa인 노즐과 직렬형 고압분사펌프(Bosch PES6AD)가 사용되었다. 분사펌프는 AC 모터(220V, 3상, 1.5kW)에 의해 구동되고 회전수는 600rpm으로 인버터에 의해 조절하였다. 또한 연료 유량은 1ml/s로 하였으며 단발분사는 컨트롤 랙에 장착되어 단발 펄스 생성회로로부터의 신호를 받아 작동되는 솔레노이드를 통하여 행하였다.

합산소 연료가 분무각과 분무 평균입경에 미치는 영향은 PMAS(particle motion analysis system, V-TEK Co., Korea)를 사용하여 조사하였다. 이것은 질점 측정기술의 하나로서 약 50ns의 매우 짧은 시간에 발광하는 스파크 광원과 망원렌즈, CCD카메라와 이미지 보드를 가진 컴퓨터로 구성되어 있다.

본 실험에서 분무각과 분무도달거리는 PMAS의 거시적 분무측정기능에 기초한 새도우그래프법을 이용하여 측정하였다. 새도우그래프 상은 카메라 렌즈의 막을 통하여 CCD에 기록된다. 정량적인 관찰과 단기간의 순간상은 새도우 그래프 기법에 의해 얻어졌다. 디젤분무의 각도는

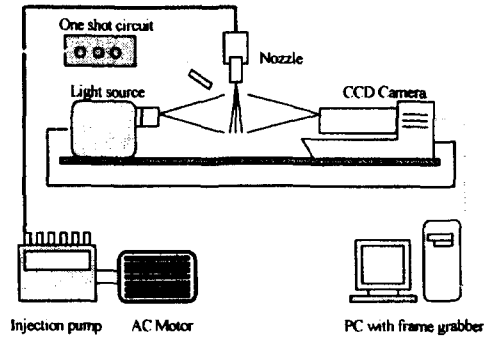


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

일반적으로 송출 오리피스로부터 분출되는 분무의 외곽을 노즐로부터 하류방향으로 60d가 되는 지점에까지 그은 두 선이 이루는 각도로 정의한다.

본 실험에서는 분무각을 노즐 하류방향으로 33.6mm(60d)의 거리에서 측정하였다. 측정 시점은 노즐로부터 분사 후 1.5ms에서 측정하였고 분무각과 분무 선단 관통 거리는 각각의 실험 조건에 대하여 30회의 데이터를 취득하여 그 평균값을 대표값으로 하였다. SMD는 PMAS의 미시적 분무측정방법으로 측정하였으며 이때 측정의 위치는 노즐 하류방향으로 112mm(200d)을 측정 기준점으로 하여 반경 방향으로 중심, +10, -10mm의 세 지점에서의 SMD를 측정하였다. Fig. 2에 분무각과 SMD의 측정위치에 대한 본 연구에서의 측정점을 나타내었다.

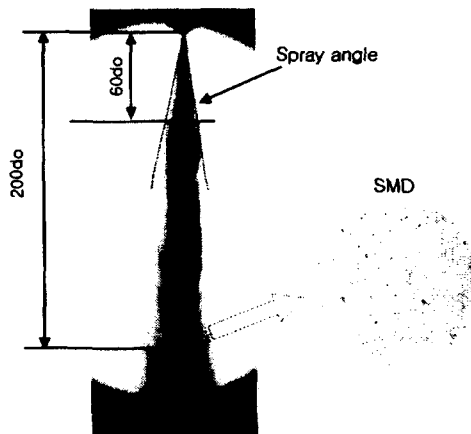


Fig. 2 Measurement of spray angle and SMD from raw image

3. 실험결과

Fig. 3는 합산소 물질의 혼합 비율에 따른 표면장력과

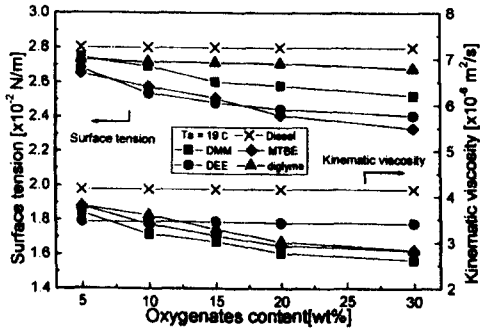


Fig. 3 Surface tension and Kinematic viscosity of oxygenated fuels

동점도의 변화를 보여주고 있다. 표면장력의 경우 합산소 물질이 혼합된 연료는 디젤 연료보다 낮은 표면장력을 나타내고 있으며 전체적인 경향은 합산소 물질의 혼합 비율이 증가함에 따라 표면장력이 대체로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 혼합 비율이 낮은 5%에서는 모든 합산소 연료들이  $2.6 \sim 2.8 \times 10^{-2} \text{N/m}$ 의 좁은 범위에 모여 있지만 합산소 물질의 혼합 비율이 증가함에 따라 그 분포 범위가 점점 벌어지는 것을 볼 수 있다. 합산소 물질 각각의 경향을 살펴보면 DEE와 DMM이 5~10%에서 급격한 감소를 보이고 있다가 15%이후에서는 감소의 폭이 줄어들고 있는 반면 MTBE는 전체적으로 갈수록 감소 경향을 보이고 있다. 그러나 diglyme의 경우는 5%에서 30%로 혼합 비율이 증가함에 따라 거의 변화 없는 표면장력을 보이고 있다. 표면장력의 감소를 수치적으로 살펴보면 혼합 비율 5%에서 30%로 변화하였을 때 DMM이 8.02%, MTBE가 11.99%, DEE가 10.25%, diglyme가 1.90%의 표면장력 감소를 나타내었다. diglyme가 다른 합산소 물질에 비해서 표면장력에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났는데 이는 순수 diglyme의 표면장력이 디젤 연료의 표면장력과 그다지 차이가 나지 않기 때문에 표면장력에 미치는 영향이 작기 때문이라고 생각된다. 동점도의 경우에서도 마찬가지로 합산소 물질이 혼합된 연료는 디젤 연료보다 작은 동점도를 나타내고 있으며 대체로 합산소 물질의 혼합 비율이 증가함에 따라 동점도가 감소하는 경향이 보여지고 있다. DMM이 28.37%, MTBE가 25.59%, diglyme가 25.32%로 비교적 큰 동점도의 감소폭과 비슷한 감소 경향을 보이고 있는 반면 DEE는 그 변화의 폭이 0.98%로 거의 영향을 받지 않고 일정한 수준으로 유지되는 것으로 나타났다. 이것은 순수 DEE의 동점도가 디젤 연료의 그것에 비해 거의 1/4수준이기 때문에 혼합에 따른 영향이 적은 때문이라고 생각된다.

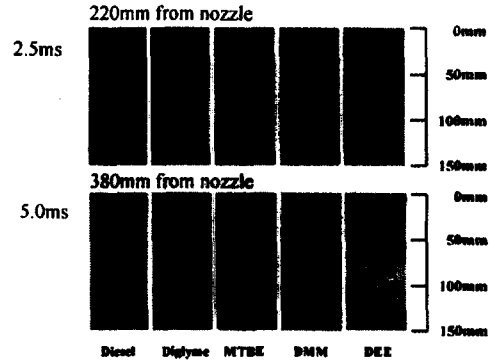


Fig. 4 Typical photographs of spray tip penetration

Fig. 4은 합산소 물질의 혼합비율이 15%일때의 분무 선단 관통 거리 측정의 대표적인 모습을 보여준다.

그림에서 위 쪽의 부분은 분사 후 2.5ms에서 측정된 사진으로 그림의 상단 끝은 노즐로부터 220mm의 지점이며 분무 선단 관통 거리는 대략 320mm에서 형성되고 있으며, 아랫쪽의 부분은 분사 후 5.0ms에 측정된 것으로 그림이 상단 끝은 노즐로부터 380mm의 지점으로 분무 선단 관통 거리는 대략 480~520mm의 지점에서 형성된다. 그림에서 보면 혼합 비율별로 중간 영역인 15%인 경우에서도 분무 후 2.5ms에서는 합산소 물질의 혼합에 따라 디젤 연료와 분무 선단 관통 거리의 차이가 그다지 크지 않음을 볼 수 있으며 5ms이후에서는 최대 40mm의 차이가 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이는 분무 선단 관통 거리가 연료의 물리적 성질에 의한 영향을 받고 있음을 확인할 수 있으며 실험이 대기압 하에서 진행되었기 때문에 합산소연료간의 분무 선단 관통 거리는 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 5은 각기 다른 합산소 연료 분무에서 합산소 첨가제의 함량이 분무각에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

Fig. 4 Typical photographs of spray tip penetration

분무각은 노즐 끝단에서 하류방향으로 60deg의 지점에서 측정하였다. 비교를 위하여 일반적인 디젤분무에 대한 분무각도 측정하였다. 이 측정결과로부터 합산소 첨가제의 혼합비율이 높아질수록 분무각도 증가한다는 것과 너무 큰 혼합비율에서는 영향도가 낮다는 것을 알 수 있었다. 분무각은 액체와 주위기체의 밀도차, 점도와 표면장력 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 점도가 감소할수록 분무각이 커지는 것으로 알려져 있으

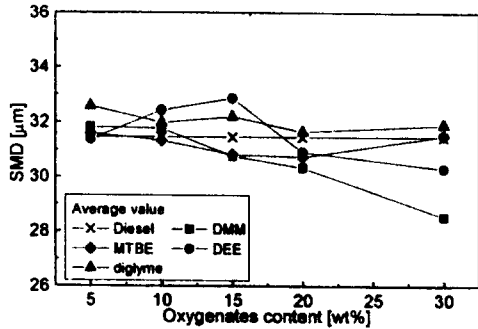


Fig. 5 Effect of oxygenates content on spray angle

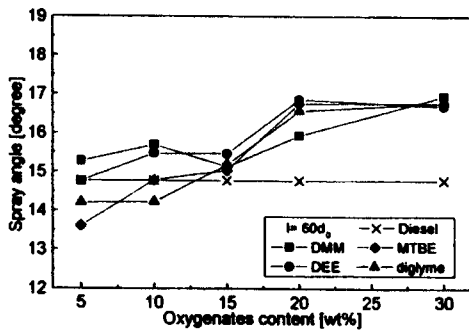


Fig. 6 Radial distribution of SMD (Oxygenates content : 15%)

며 이 실험의 결과도 Fig. 3에서 보여 주듯이 일반적인 경향과 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 15%의 혼합비율에서 각기 다른 합산소 연료에 대한 200do 위치에서의 반경방향 SMD분포를 나타낸다. 일반적으로 분무기의 하류에서의 입경분포가 유해배기가스 생성에 주된 역할을 하는 것으로 알려져 있지만 본 실험에서는 노즐의 출구부분에서 고밀도 분무가 형성되므로 정확한 입경분포를 측정할 수가 없었다. 디젤연료와 SMD를 비교해 보면 본 실험에서의 측정위치에서 볼 때 DEE와 diglyme는 디젤보다 크게 형성되지만 DMM과 MTBE는 더 작게 형성됨을 알 수 있다. 또한 모든 경우에 있어서 중심부가 외곽보다 SMD가 크게 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 반경방향 -10mm지점에서 각기 다른 합산소 연료에 대하여 혼합비율이 SMD에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 DEE를 제외하고는 혼합비율이 10% 이상이 되면 합산소 연료의 SMD는 감소하는 것을 알 수 있다.

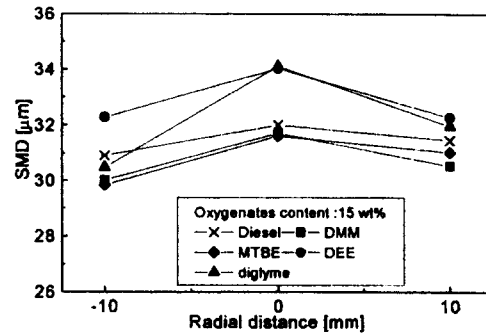


Fig. 7. Effect of oxygenates content on SMD (Average value)

디젤 분무특성들 중 특히 입경 크기분포와 SMD는 연료의 표면장력과 점도에도 영향을 받는다. SMD는 표면장력과 점도가 증가할수록 증가되는 경향을 보이고 있으며<sup>[3]</sup> 특히 주어진 분사압력에서 SMD의 증가율은 고점성유체에서 크게 기여하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 본 연구에서 취급한 디젤연료와 합산소 연료들은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이  $3 \sim 4 \times 10^{-4}$  m/s 정도로 아주 낮은 동점성계수를 가지고 있기 때문에 이것이 본 연구의 결과에서 각 합산소 연료에 대한 SMD의 편차가 적은 이유가 된 것으로 보여진다.

실험에서와 같은 합산소 물질이 혼합된 합산소 연료를 디젤엔진에서 운전하였을 때 SMD가 작아지는 결과에 따른 배출 배기가스의 저감 정도를 예측하기 위하여 Su와 Farrell이 1988년에 연구한 고압 분사 조건에서의 분사 압력과 노즐 분공경의 형상에 따른 디젤 분무 특성과 유해배기가스 배출의 상관관계에 대한 연구를 비교하였다.<sup>[10]</sup> 이 연구에 의하면 본 실험에서 사용한 노즐과 동일한 형상인 sharp-edged형 노즐의 경우 SMD가 조금만 변하여도 NOx와 PM의 배출에 많은 영향을 미친다는 결과를 보고하고 있다.

이 연구에서는 고압분사물 통한 SMD의 변화와 합산소 물질을 사용한 각 경우에 대한 SMD의 변화를 살펴 볼 수 있다. 분사 압력이 90에서 160MPa로 78% 증가시킨 때, SMD는 29에서 26μm로 약 10% 감소하고 있으며 그 결과는 본 실험에서 DMM을 사용한 결과와 거의 같은 수준인 것을 확인 할 수 있다. 또한 MTBE, DEE, diglyme도 작지만 SMD가 작아진 것을 알 수 있다.

또한 고압 분사와 합산소 물질의 영향을 배기가스 배출에 대하여 나타내었을 때, PM의 경우 약 75%가 감소되

어 작은 SMD의 변화도 배기가스 생성에 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있으며 본 실험의 결과와 비교해 보면 합산소 물질의 혼합 비율이 5에서 30%로 증가할 때, 반경 방향의 SMD의 평균값을 측정된 데이터들 기준으로 보면, SMD는 DMM이 10.33%, MTBE가 0.25%, DEE가 3.41%, diglyme가 2.05% 감소하는 결과를 나타낸다. 이 결과를 Su와 Farrel에서의 SMD감소와 PM의 감소의 관계로 생각해 볼 때 SMD의 절대적 크기에 관계가 있겠으나 합산소 물질의 혼합에 따른 SMD의 감소는 18~75%의 범위에 걸친 PM감소로 나타날 수 있다고 판단된다. 따라서 합산소 물질의 혼합 비율에 따른 연료의 물리적 성질의 변화는 분무 특성의 하나인 SMD의 크기에 영향을 주어 배출가스의 저감에 기여한다고 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

합산소연료가 평면 오리피스 분무기의 분무성질에 미치는 영향을 조사하였다. 선정된 합산소 첨가제는 diglyme, MTBE, DEE와 DMM으로 이들은 디젤연료에 5, 10, 15, 20, 30%의 증량비율로 혼합되었으며 디젤연료는 비교를 위하여 포함하였다.

4종류의 합산소 연료에 대한 표면장력과 동점성계수를 측정하였으며 이들 혼합비율에 따른 합산소연료의 물성치 변화는 배기가스의 생성에 영향을 미치는 분무각, 분무선단 관통거리, 평균입경 등의 분무 성질들에 충분히 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

분무 선단 도달 거리는 합산소 물질의 혼합에 따라 디젤 연료보다 약간 감소하는 형태를 보였으나 그다지 큰 폭의 변화를 보이지는 않았으며, 분무각은 합산소 물질의 혼합 비율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내지만 저 혼합 비율에서는 급격한 증가를 보이다가 20~30%의 고 혼합 비율에서는 그다지 큰 변화를 일으키지 않아 30%이상에서는 분무각에 많은 영향을 미치지 못하는 것으로 보여진다.

SMD는 합산소 물질의 혼합 비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 특히 DMM과 DEE가 비교적 큰 10.33%와 3.41%의 감소폭을 나타내었다.

본 연구의 결과와 분무 특성과 배기가스 배출의 관계를 규명한 연구를 비교한 결과, 합산소 물질의 혼합에 의한 SMD감소는 배기가스의 생성에 쉽게 영향을 미쳐 입자상 물질의 경우 정성적 분석으로 최고 75%까지 감소가 가능하다고 판단할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] H.Ofner, D.W.Gill, and C.Krotscheck, Dimethyl Ether as Fuel for CI Engines-A New Technology and Its Environmental Potential, SAE paper 98115R
- [2] B. Bailey, J. Eberhardt, S. Goguen and J. Erwin, Diethyl Ether(DEE) as a Renewable Diesel Fuel, SAE 972978
- [3] S. Cheng and R. W. Dibble, Emission Performance of Oxygenate-in-Diesel Blends and Fischer-Tropsch Diesel in a Compression Ignition Engine, SAE paper 1999-01-3606
- [4] K. D. Vertin, J. M. Ohi, D. W. Naegeli, K. H. Childress, G. P. Hagers, C. I. McCarthy, A. S. Cheng and R. W. Dibble, Methylal and Methylal-Diesel Blended Fuels For Use in Compression-Ignition Engines, SAE 1999-01-1508
- [5] N. Bettrli, D.Giacomo and C. Beatrice, Diesel Combustion Improvements by the Use of Oxygenated Synthetic Fuels, SAE paper 972972
- [6] N. Miyamoto, H. Ogawa, T. Arima and K. Miyakawa, Improvement of Diesel Combustion and Emissions with Addition of Various Oxygenated Agents to Diesel Fuels, SAE 962115
- [7] N. Miyamoto, H. Ogawa, N. M. Nurun, K. Obata and T. Arima, Smokeless Low NO<sub>x</sub> High Thermal Efficiency and Low Noise Diesel Combustion with Oxygenated Agents as Main Fuel, SAE 980506
- [8] N. Miyamoto, H. Ogawa, N. M. Nurun, K. Obata and T. Arima, Improvement of Emissions and Thermal Efficiency in Diesel Combustion with Oxygenated Agents as Main Fuel, JSME Journal B Vol 64, No. 620, 1998, pp306-312
- [9] N. Miyamoto, H. Ogawa, T. Arima, K. Obata and G. H. Cao, Improvements of Diesel Combustion and Emissions with Oxygenated Fuels, JSAE Journal Vol. 29, No. 1, 1998, pp 18-22
- [10] M. Nurun, M. Miami, H. Ogawa and N. Miyamoto, Attempt and Mechanism of Ultra Low Emission and High Performance Diesel Combustion with Highly Oxygenated Fuel, JSME Journal B, Vol.

- 66, No. 642, 2000, pp. 298-304
- [11] N. M. Nurun, M. Minami, H. Ogawa and N. Miyamoto, Ultra Low NO<sub>x</sub> and Smokeless Diesel Combustion with Highly Oxygenated Fuel, Proc. of 15th ICE Symp. (Int'l), Seoul, Korea, July 13-16, 1999, pp 81-86.
- [12] S. Kajitani, H. Usisaki, E. Clasen, S.Campbell, and K.T. Rhee, MTBE for Improved Diesel Combustion and Emissions?, SAE paper 941688
- [13] M.S.Graboski and R.L.McCormick, Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines, Prog. Engery Combust. Sci., Vol. 24, 1998, pp.125-164.
- [14] T. Murayama, M.Zheng, T. Chikahisa, Y.T.Oh, Y. Fujiwara, S. Tosaka, M. Yamashita and H. Yoshitake, SAE paper 952518
- [15] T.Yoshisaki, K.Wakai, K.Nishida, and H. Hiroyasu, The Seventh Symp.(ILASS-Japan) on Atomization, Dec. 21-23, Gunma, Japan, pp. 183-188.
- [16] Z. Chen, S. Kajitani, K. Minegisi, and M. Oguma, Engine Performance and Exhaust Gas Characteristics of a Compression Ignition Engine Operated with DME Blended Gas Oil Fuel, SAE paper 982538
- [17] R.L.McCormick, J.D. Ross, and M. Graboski, Environ. Sci. Technol. Vol.31,1997, pp.1144-1150.
- [18] A.H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Pub. Co., 1989
- [19] T.F.Su and P.V.Farrell, Characterization of High-Injection Pressure Diesel Sprays with Relation to Particulate and NO<sub>x</sub> Emissions, Atomization and Sprays, Vol.8, 1998, pp.83-107.
- [20] H. Hiroyasu, Experimental and Theoretical Studies on the Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines, ICLASS-91, Gaithersburg, MD, USA, July 1991, pp.17-31.