

액침법에 의한 바이오디젤유의 액적분포에 관한 연구 A Study on Droplet Distribution of Bio Diesel Fuels Using Immersion Sampling Method

김명수·도현철·고대권·안수길

M. S. Kim, H. C. Doh, D. K. Koh and S. K. Ahn

Key Words : Droplet Distribution(액적분포), SMD(Sauter 입경), Biodiesel Fuel(바이오디젤유), Ambient Pressure (분위기 압력)

Abstract : The purpose of this study is to measure the droplet distribution and Sauter mean diameter(SMD) of biodiesel fuel, using the immersion sampling method. This method involves using an optical microscope and a CCD camera, to take an image of the droplets. These images are then measured by using a 'Sigma Scan' processing program. The results of the above experiment are summarized as followed ; (1) There can be as much as a 10% error rate when measuring the diameter of these droplets, using the image processing method and the naked eye. (2) The result of droplet size distribution test, TVO(transesterified vegetable oil) big size droplet distribution were increased at ambient pressure 6kg/cm². (3) When ambient pressure increased 3kg/cm² above, SMD variation of TVO and UVO(used vegetable oil) 30 are small. (4) On Rosin-Rammler analysis, droplets size distribution of UVO(used vegetable oil) 30 uniform more than TVO 20 on ambient pressure 1kg/cm².

1. 서 론

최근 우리들은 화석에너지의 무분별한 채취와 과소비로 인하여 에너지 고갈의 위기와 환경 파괴에 직면하고 있다. 따라서 에너지 위기의 극복과 환경을 보전하기 위해 대체에너지의 개발이 절실히 요구된다. 대체에너지 중 바이오매스의 연료로는 유채유, 대두유, 팜유와 같은 각종 식물유, 우지와 같은 동물성 지방, 알콜 등 다양한 재생가능한 것들이 있지만 디젤기관의 경우 많은 나라에서 식물유를 사용하고 있다. 이는 기존 기관을 개조하지 않고 사용할 수 있을 뿐만 아니라 알콜 사용의 경우와 같은 부식성과 독성물질인 알데히드의 배출이 없기 때문이다¹⁾. 식물유는 원래 점도가 높고 휘발성이 낮기 때문에, 에스테르화하여 경유와 혼합한 혼합유의 사용이 현재 시도되고 있다.

A. K agarwal 등^{2),3)}은 아마유의 메틸 에스테르유 20%와 80%의 경유를 혼합한 바이오디젤유를 디젤

기관에 적용하여 성능 및 내구성을 실험한 결과 성능면에서는 2.5%의 효율 향상과 매연의 농도가 감소되었으며, 내구성면에서는 아마유의 윤활성 때문에 순수 경유 사용의 경우보다 마모량이 저감되었음을 나타내었다. 뿐만 아니라 국내에서도 정⁴⁾ 등은 폐식용유의 에스테르유 및 정제 폐식용유를 경유와 혼합한 바이오디젤 혼합연료유를 DI디젤기관에 적용하여 사용 가능여부와 연소특성을 조사한 바 있고 Ryu⁵⁾ 등의 미강유(rise bran oil)를 이용한 에스테르유와 경유 혼합유를 간접분사식 디젤기관에 적용하여 연소 특성을 조사한 바 있다. 연소에 크게 영향을 미치는 디젤분무의 특성에는 미립화, 도달거리, 분무각 등의 인자가 있지만 그 중에서도 미립화는 유해물질의 생성과 연소 등에 미치는 영향이 크다. 고온 고압의 분위기 중에 분사되는 디젤분무의 미립화는 액적들의 표면적이 증대되어, 열전달 및 물질 전달에 의한 유증기 및 주위 공기와의 혼합으로 연소한다. 이때 액적의 크기와 그 분포는 혼합기 형성과 연소 시간을 좌우한다.

본 연구에서는 바이오디젤 연료의 연소특성을 체계적으로 연구하기 위하여 에스테르화과정을 거친 폐식용유 및 경유 혼합유, 정제 폐식용유와 경유 혼

접수일 : 2006년 9월 20일, 채택확정 : 2006년 10월 25일
김명수(책임저자) : 부경대학교 대학원 제어기계공학과
E-mail : kms55kr@hanmail.net Tel. 018-211-2083
도현철, 고대권, 안수길 : 부경대학교 기계공학과

합유의 물성치를 조사하고 이들 연료유의 간헐 분사시 입경 분포와 평균 입경(SMD)을 조사하는 것이 목적이다.

디젤분무의 경우 입경 분포 측정에는 액침법에 의한 측정⁷⁾과 프란호프 회절이론에 의한 광학적 측정⁸⁾에 의한 해석이 있으나 본 연구의 경우는 액침법에 Image processing을 적용하여 시간을 절약하고자 하였다.

2. 시료 및 물성치

실험에 사용한 시료로는 경유, UVO(used vegetable oil) 30, TVO(Transesterified vegetable oil), TVO 20 을 사용하였다. 경유는 일반 시중 주유소에서 판매하는 자동차용 경유를 사용하였고, UVO 30은 정제된 폐식용유와 경유를 3:7의 중량비로 단순 혼합하여 제조하였다. TVO(Transesterified vegetable oil)는 정제된 폐식용유를 에스테르화 과정을 거쳐 실험에 사용하였다. TVO 20은 경유와 TVO를 체적비로 8:2로 혼합한 것이다.

시료에 따른 분무 액적 분포를 알아보기 위해 먼저 시료에 대한 표면장력, 점도, 비중 등의 물성치를 측정하였다.

표면 장력의 측정은 직접 구성한 장치를 이용하였다. 측정원리는 양팔 저울을 이용하여 저울의 한쪽에 뷰렛(burette)에서 물이 공급되면 지레의 원리에 따라 저울의 반대편의 링이 올라간다. 이때 링에 달려 올라간 액주가 파괴되기 직전까지의 높이를 측정하고 다음 식 (1)로 표면장력을 구할 수 있다. 저울 한쪽 뷰렛에서 공급된 물의 무게와 저울 반대편에서 들어 올려지는 액주의 무게가 링의 표면장력과 같다고 볼 수 있다.

$$2\pi(r_1 + r_2)\sigma + \pi(r_1^2 - r_2^2)h\rho g = W$$

$$\sigma = \frac{W}{2\pi(r_1 + r_2)} - \frac{r_1^2 - r_2^2}{2} \times h\rho g \quad [N/m] \quad (1)$$

r1 : 링의 외경(m) h : 액주의 높이(m)
 r2 : 링의 내경(m) ρ : 물의 밀도(kg/m³)
 g : 중력 가속도(m/s²) W : 뷰렛에서 공급된 물의 무게(N)

본 장치로 물의 표면장력을 12회 측정한 평균값이 알려진 물의 표면장력과 근접함을 확인하여 장치에 대한 신뢰도를 확보하였다. 시료의 표면장력을

20회 이상 측정한 평균값으로 Table.1 에 나타내었다. "Brookfield DV-1+" 디지털 점도계를 사용하여 298°K에서 점도를 측정하고 밀도를 이용하여 동점도로 환산하였다. 점도를 측정하기 위해서 항온 실험 장치를 이용하여 일정한 온도에서 점도를 측정하여 Table 1에 나타내었다. 시료에 대한 비중은 비중계를 이용하여 298°K에서 측정하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of fuels at 298°K

| Fuels | diesel fuel | UVO 30 | TVO 100 | TVO 20 |
|--|-------------|--------|---------|--------|
| Surface tension (mN/m) | 32 | 39 | 40 | 33 |
| Kinematic viscosity (cm ² /s) | 0.066 | 0.118 | 0.264 | 0.087 |
| Gravity | 0.82 | 0.862 | 0.905 | 0.937 |

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 1에 디젤 분무의 입경과 입경분포를 측정하기 위하여 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 이 장치는 연료 공급호스와 연료 분사 펌프 그리고 단발 분사를 위하여 스프링의 장력에 의한 캠 구동장치와 분위기 압력에 따른 분무 입경을 측정하기 위한 압력 용기 및 공기 압축기로 구성되어 있고 용기의 측면 하단부에 관찰 공(Inspection hole)을 뚫어 놓았다.

이 장치의 작동원리는 캠축의 우측단에 스프링장력을 작용시킨 상태에서 좌측 단의 스톱퍼(stopper)를 해제시키게 된다. 그러면 캠축의 회전으로 연료 분사펌프의 플런저가 상승하게 되고, 연료가 가압되어 연료분사노즐을 통해 분사하게 된다. 그리고 노즐은 압력 용기 상단 중앙에 부착하여 직각으로 분사되도록 하였다.

사용 노즐은 0.7mm의 선박용 핀틀 노즐을 사용하였으며, 분위기 압을 1, 3, 6kg/cm²으로 변화시켰고 이에 해당하는 분위기 밀도는 각각 2.33kg/m³, 4.63kg/m³, 8.07kg/m³이었으며 분사 압력은 140kg/cm²으로 하였다.

그리고 압력 용기는 분사된 자유 분무가 하부와 벽면에 충돌하지 않도록 φ=250, H=1000mm로 충분한 크기로 제작하였다. 압력용기의 Inspection hole을 통해 포집 셀(cell)을 넣고 분무 액적을 수집하였다.

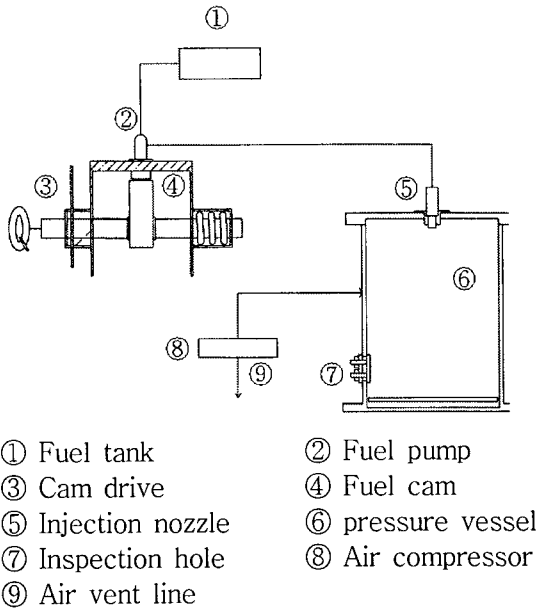


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3.2 실험 방법

실험방법은 먼저 포집액이 도포된 셀을 용기에 넣고 실험 조건에 따라 용기의 압력을 공기 압축기로 충전한 후 시료를 단발 분사한다. 분사된 액적들이 충분히 낙하할 수 있도록 2~3분이 경과한 후 포집셀의 액적들을 CCD카메라가 장착된 광학 현미경에서 40배의 배율로 확대하여 컴퓨터에 저장하였다. 이때 포집셀 위에 0.2mm의 강철침을 넣어 동시에 저장하였다. 본 실험에 사용된 포집액은 비중이 낮을수록 유동성이 증가하여 포집셀을 광학 현미경으로 옮길 때 액적의 유동에 의한 입경의 변화가 많아 포집액의 비중을 S=0.9로 고정하여 실험하였다. 포집셀의 현미경 관찰에서 비중에 따른 액적의 변형이 거의 보이지 않았다.

컴퓨터에 저장된 액적 사진(640×480의 화소)들은 "Sigma scan"이라는 화상처리 프로그램을 이용하여 액적의 지름을 구하였다. 프로그램을 통해 얻어진 액적의 원넓이로부터 지름을 구하고 이를 픽셀수로 환산하여 여기에 0.2mm 강철침을 같은 배율의 광학 현미경에서 얻어진 이미지의 픽셀수로 나눈 값에 픽셀의 실제 길이를 곱하여 액적의 지름을 측정하였으며, 데이터의 신뢰성을 구축하기 위하여 800~1500개의 액적들을 카운팅하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 화상처리기법과 목측과의 비교

액적 이미지의 윤곽을 선정함에 있어 목측의 경

우 주관적 기준에 따르지만 이미지프로세싱은 객관적 기준에 따르므로 신뢰성을 확보할 수 있다. 즉, 콘트라스트를 조절하여 이미지의 윤곽을 동일하게 조정하고 동일 기준의 인텐시티 스톱(Thresholding)으로 액적 이미지의 윤곽을 확실히 할 수 있다. 따라서 목측의 경우가 오차가 발생할 가능성이 더 크다고 보여진다.

Fig. 2는 분위기 압력 6kg/cm² 일때의 에스테르유의 액적 사진이다.

목측과 이미지 프로세싱을 이용하여 계산되어진 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 나타난 것과 같이 목측의 경우가 약 10%정도 커진 것으로 나타났다.

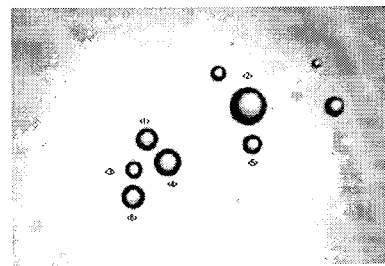


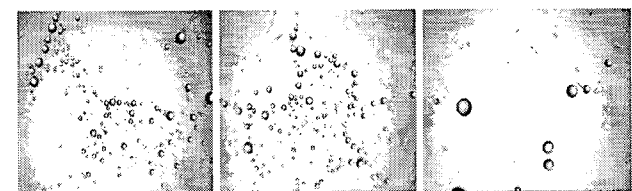
Fig. 2 Image of transesterified vegetable oil on ambient pressure 6kg/cm²

Table 2 Comparison of eye measurement and image processing

(단위 : μm)

| Number | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|----|-----|----|-----|----|----|
| Eye | 82 | 145 | 55 | 100 | 73 | 91 |
| Image | 73 | 130 | 47 | 90 | 66 | 79 |

4.2 미립화 사진



(a) 1kg/cm² (b) 3kg/cm² (c) 6kg/cm²

Fig. 3 Droplets image of light oil ambient pressure

Fig. 3은 분위기 압력에 따른 경유의 액적 사진을 보여주고 있다. 사진에서 나타나는 바와 같이 분위기 압력이 커지면 액적이 커지는 경향을 알 수 있다.

4.3 개수비, 체적비, 누적체적

Fig. 4는 분위기 압력이 3kg/cm²일때의 개수비, 체적비, 누적체적을 나타낸 그래프이다. 개수비는 전체 액적에 대한 해당 구간의 액적들의 개수에 대한 비를 구간 간격으로 나눈값으로 나타낸 것이며, 체적비는 전체 체적에 대한 해당 구간의 액적들의 체적에 대한 비를 구간 간격으로 나눈 것을 나타내었고, 누적체적은 체적비를 누적한 것이다. 여기서 무적체적(v)는 Rosin-Rammler분석에 사용된다.

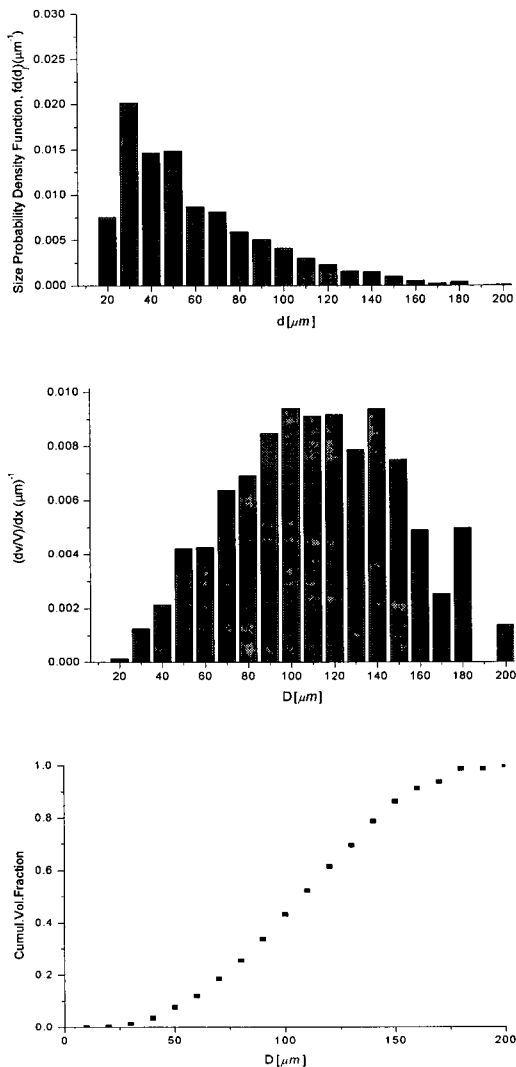


Fig. 4 Droplet size distribution, volume fraction and cumulative volume fraction of light oil under pressure, 3kg/cm²

4.4 분위기 압력에 따른 시료별 입경분포

Fig. 5는 분위기 압력이 1kg/cm²일때 연료별 개수비를 나타내었고, Fig. 6은 분위기 압력이 3kg/cm²,

Fig. 7은 압력이 6kg/cm²일 때의 개수비를 나타내었다.

Fig. 5에서 Fig. 7을 보면, 분위기 압력이 1kg/cm²의 경우는 연료에 관계없이 비슷한 분포를 보인다. 그러나 분위기 압력이 3kg/cm² 이상이 되면, 경유, TVO 20, UVO 30 등은 분포 패턴에 큰 변화가 없으나 TVO 100의 경우에는 분위기 압력이 증가함에 따라 큰 입경이 많이 분포하게 된다. 이는 TVO 100이 다른 연료보다 동점도가 매우 크기 때문으로 여겨진다. 따라서 순수 에스테르유만으로는 소형 고속 기관에 사용할 수 없을 것으로 사료된다.

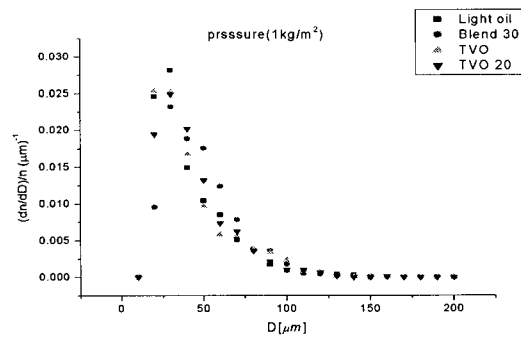


Fig. 5 Droplet size distribution of fuel for pressure 1kg/cm²

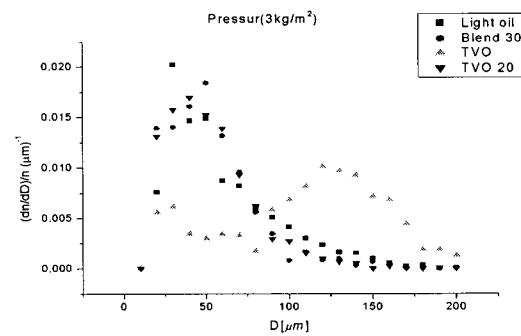


Fig. 6 Droplet size distribution of fuel for pressure 3kg/cm²

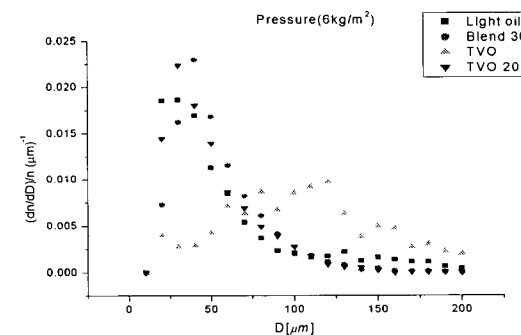


Fig. 7 Droplet size distribution of fuel for pressure 6kg/cm²

4.5 Rosin-Rammler분석

Rosin - Rammler 분포함수는 누적 체적 분포함수로서 다음 식(2)로 나타낸다.

$$1 - v = e^{-\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^\delta} \quad (2)$$

여기서 $1 - v$ 는 x 보다 큰 직경의 입경이 있을 수 있는 체적 분율이고 \bar{x} 는 입경 파라미터이며 δ 가 분포 파라미터이다.

여기서 \bar{x} 는 v 가 63%에 해당하는 입경이다.

Table 3은 분위기 압력에 따른 δ 와 \bar{x} 의 값을 나타내었다.

Table 3 Value of δ and \bar{x}

| fuels | pressure (kg/cm ²) | δ | \bar{x} (μ m) |
|-------------|--------------------------------|----------|----------------------|
| diesel fuel | 1 | 3.719 | 87 |
| | 3 | 2.91 | 121 |
| | 6 | 2.42 | 161 |
| UVO 30 | 1 | 3.13 | 80 |
| | 3 | 2.50 | 102 |
| | 6 | 2.56 | 104 |
| TVO 100 | 1 | 2.53 | 93 |
| | 3 | 5.80 | 155 |
| | 6 | 4.18 | 160 |
| TVO 20 | 1 | 2.67 | 81 |
| | 3 | 2.55 | 92 |
| | 6 | 2.76 | 102 |

TVO 20 그리고 UVO 30은 분위기 압력이 증가하여도 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. TVO 100의 경우에는 δ 값의 차이가 다른 연료에 비해 크게 나타나고 있다. 분위기 압력 1kg/cm²에서 입경 파라미터 값이 비슷한 TVO 20 과 UVO 30을 비교해보면 UVO 30의 δ 값이 더 큼을 알 수 있다. 이는 UVO 30의 액적 분포가 더욱 균일하다는 것을 나타낸다.

4.6 분위기 압력에 따른 시료별 SMD

SMD란 액적군의 직경의 세계곱의 총합에 제곱의 총합을 나눈 값이며 d_{32} 라고도 한다. Fig. 8은 분위기 압력에 따른 시료들의 SMD를 나타내었다. 분위기 압력이 증가함에 따라 모든 시료에서 SMD

가 증가하는 경향이 있으며 경유의 경우가 뚜렷하였다. 분위기 압력의 증가에 따른 SMD의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 분출속도($U_r = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$)는 분위기 압력이 증가하면 ΔP 의 값이 작아져 분무의 분출 속도가 감소하여 주위 공기와의 상대 속도가 작아지므로 입경이 커지며,

둘째, We수($We = \frac{\rho_a U_{dr}^2}{\sigma}$)는 주위 분위기 밀도 즉, 공기밀도(ρ_a)에 비례하여 증가한다. 이는 액적의 불안정을 가중시켜 쉽게 분열되게 함으로 입경이 작아지게 되고,

셋째, 분무 도달거리의 감소로 액적들의 수 밀도가 증가하므로 충돌과 합체의 확률이 증가하여 입경은 커진다. 여기서 ρ 와 σ 은 시료의 밀도와 표면장력 그리고 d 는 입경의 직경이다.

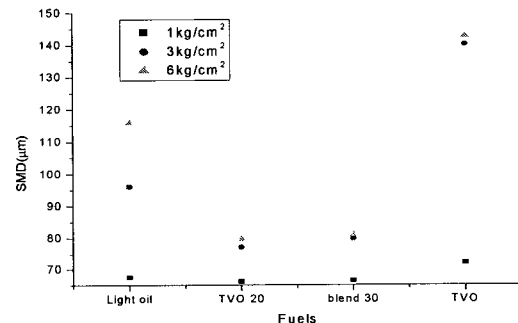


Fig. 8 SMD of fuel for pressure variation

따라서 본 연구의 경우는 We수의 증가로 인한 입경의 감소보다 분출속도와 분무 도달거리의 감소에 의해 SMD가 증가하였다고 생각되어진다. Fig. 8에 분위기 압력에 따른 SMD의 변화를 나타내었다. UVO 30과 TVO는 일정 분위기 압력(3kg/cm²)이상에서는 SMD의 변화가 적게 나타나고 있다. 이는 이 두 시료의 높은 동점도에 기인하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 바이오 디젤연료의 연소에 중요한 요소인 입경 분포와 SMD를 액침법과 이미지프로세싱을 이용하여 분위기 압력 변화에 따라 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 이미지프로세싱을 이용하여 측정된 액적 지름과

- 목측에 의한 액적의 지름은 약 10%의 오차를 갖고 있다.
- 2) 개수비 분포를 볼 때 분위기 압력이 6kg/cm^2 으로 증가함에 따라 TVO 100은 큰 액적들의 분포가 증가하였다.
 - 3) 분위기 압력이 3kg/cm^2 이상으로 증가하면 TVO 100과 UVO 30의 SMD변화가 작게 나타났다.
 - 4) Rosin-Rammler분석을 통하여 분위기 압력 1kg/cm^2 경우 UVO 30이 TVO 20보다 분포가 더욱 균일함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. R.W.McCabe, E.T.King, W.L.H Watkins and H.S. Gandhi, 1990, "Laboratory and Vehicle Studies of Aldehyde Emissions from Alcohol Fuels," SAE 900708,
2. A.K Agarwal, and L.M. DAS, April 2001, "Biodiesel Development and characterization for use as a fuel in compression ignition engine", Transaction of the ASME , vol 123 , pp 440.
3. A.K Agarwal, J. Bijwe, and L.M. DAS , July 2003, "Wear assessme in a biodiesel Fueled compression ignition engine", Transaction of the ASME, vol 125, pp820.
4. 정석호 외 4명, 2004 "PXI와 Labview를 이용한 직접분사식 디젤기관의 바이오 디젤유 연소 특성 분석", 한국동력 기계공학회지 제8권 제2호 pp18.
5. Kyunghyun Ryu, and Youngtaig Oh, 2004, "Combustion characteristics of an agricultural diesel engine using biodiesel fuel", KSME international journal vol.18, No 4, pp 709.
6. Otto A. Uyehara, 1987, "Factors that Affect BSFC and Emissions for Diesel engine", SAE 870343.
7. H. Hiroyasu, and T. Kadota, 1974, "Fuel Droplet Size Distribution in Disel combustion chambers", SAE 740715.
8. Yohan Chi, Eungseo Kim, 1993, "Measurement of Droplet Size Distribution of transient Diesel Spray", SAE 931949
9. Hoang Xuan Quoc and Maurice Brun, 1994, "Study on Atomisation and Fuel Drop Size Distrubution in Direct Injection Diesel Spray", SAE 940191.
10. R. A. Mugele ,H. D. Evans, June 1951, "Droplet Size Distribution in Sprays", Industrial and Engineering Chemistry vol. 43 No. 6
11. Sung Wool Park, Hyung Jun Kim and Chang Sik Lee, 2003, "Investigation of Atomization Characteristics and Prediction Accuracy of Hybrid Models for High-Speed Diesel Fuel Sprays", SAE paper 2003-01-1045.
12. R. W. TATE, 1961, "Immersion Sampling of Spray Droplets", A. I. Ch. E. Journal , vol. 7 ,no. 4, page 574~577.
13. In Goo Kim and Sang Yong Lee, 1990, "A Simple Technique for sizing and Counting Spray Drops Using Digital Image processing", Experimental Thermal and Fluid Science vol. 3, pp.214~221.
14. 김경현, 1996 "노즐 형상이 초고압 디젤분무의 미립화에 미치는 영향", 부경대 석사 학위논문.