

## 유해배기가스 저감을 위한 Hole형 노즐의 미립화 특성실험

### Atomization Characteristics Experiment of Hole Type Nozzle for the Reduction of Harmful Exhausted Gas

정진도\*, 유병구\*\*  
Jin. Do. Chung, Byoung. Gu. YU

#### Abstract

A simplified experiment was performed to figure out the atomization characteristics of rice-bran oil which it is highly viscous liquid by applying ultrasonic energy. A spray system, an ultrasonic system, and three kinds of hole-type nozzles(hole diameter: 0.31, 0.34, 0.37mm) were manufactured. To investigate the effects of ultrasonic energy on the atomization of a highly viscous liquid, a phase doppler particle analyzer was used for measurement and calculation of spray droplets data. Nozzle opening pressures were chosen of 3 levels, i.e, 16, 20, and 24MPa. As a result, it could be concluded that the ultrasonic energy was effective to improve the spray atomization when it applied to the fuel by means of 3 different nozzles because of the effects of the liquid fuel cavitation and relaxation between molecules caused by ultrasonic energy. The improvement rate of the spray atomization by the ultrasonic method compared with the conventional spray increased about 15% in the case of hole type nozzles. By increasing of the nozzle opening pressure and decreasing of the hole diameter, the atomization of spray droplets was improved.

주요기술용어: Rice-bran oil(미강유), Hole-type nozzle(홀형 노즐), Phase doppler particle analyzer(비점촉식 광학계측장비), Sauter Mean Diameter(평균입경),

#### 1. 서론

1970년대 두차례의 석유위기로 인해 세계 각국은 에너지 절약과 탈 석유 방향으로 전환해 가고 있으며 또한 석유의 의존도를 경감할 수 있

는 대체에너지 개발에 적극적으로 노력하고 있다. 이러한 추세에 대응하기 위하여 선진국의 연구자들은 Table 1과 같은 디젤연료의 조건을 갖춘 식물유에 대한 연구를 수행해 오고 있다. 식물유의 경우 발열량이 경유의 약 85% 정도에 해당하며, 생산 및 이용이 용이하고, 디젤유에 비해 유황성분이 극소하여 청정 대체 에너지원으로도 주목을 받고 있으나, 고점도를 가지고 있어 분사시에 많은 문제점이 있다<sup>1,2,3)</sup>. Goering, Engleman, Hawkins등은 많은 식물유

\* 정회원, 호서대학교

\*\* 정회원, 명지대학교대학원

중에서 유채유, 대두유, 해바라기유, 땅콩유, 피마자유, 들깨유, 옥수수유, 목화씨유 등을 엔진에 분사시켜 본 결과 연료로서의 이용 가능성이 있음을 확인했다<sup>1,2,3</sup>. 미강유는 대체 에너지원이 갖추어야 할 조건인 연료로서의 특성과 또한 생산량이 대체로 많아 경제성이 있을 것으로 예상되며 디젤엔진의 대체에너지원으로 개발될 여지가 많을 것으로 생각된다. 현재 일부 바이오유는 경제적인 양산 단계에까지 이르고 있다<sup>2,3</sup>. 식물유의 단점으로 고점성과 저휘발성으로 인한 기관 내부의 탄소 퇴적 등의 현상이 야기되는데 이는 미립화를 개선하는 방법에 의해 해결책을 모색하여야 할 것으로 예측된다. 이를 해결하기 위해서는 바이오유의 저점도화가 필요하며 일반적인 방법으로 가온법, 희석법, 열분해법, 에스테르화법, 미립화법 등<sup>4</sup>이 있다. 본 실험에서는 고점성 식물유에 초음파를 가하여 연료입자에 cavitation, 분자간의 분산 등에 의한 저점도화 및 미립화를 가하는 물리적 방법을 채택했다. 분무 미립화를 위한 초음파 에너지의 이용에 관한 연구들을 살펴보면, B. Niemczewski<sup>5</sup>는 액체에 초음파 에너지를 가하여 cavitation 강도를 조사하였고, Kazuyoshi 등<sup>6</sup>은 S.I엔진에 초음파 분무장치의 적용을 연구하였다. 天葉 近<sup>7</sup>은 초음파 분무장치의 적용을 연구하였다. 류 등<sup>8</sup>은 초음파를 이용하여 연료 무화를 개선, 디젤자동차의 적용등에 관해 실험결과를 제공하고 있다. 주 등<sup>9</sup>은 고점성 바이오디젤유의 액침법에 대한 미립화 연구로 기초 데이터를 제공한 바 있다. 분무노즐 연구의 주 목적은 분사조건, 즉 분사압력 및 작동 유체의 물리적 성질, 그리고 노즐 형태가 주어졌을 때 유량 및 액적 크기의 분포를 예측하는 것이 대부분이며<sup>10</sup> 식물유와 같은 고점성 유체의 미립화 특성실험의 결과는 향후 엔진 장착과 각종 산업용 보일러나 연소로 등에 대체 에너지원으로 사용이 가능할 것으로 예상되는데<sup>1,2</sup> 이에 관한 정밀 측정 데이터는 없는 실정이다. 상기의 실험들은 디젤유 이상의 연료를 사용했을 경우이고 디젤유보다 점도가 10 ~ 20배되는 고점성 식물유에 대한 분무미립화의 연구는 미미한 상태이며, 특히 고점성 바이

오유의 분무미립화에 초음파 진동을 적용한 것은 본 실험에서 채택한 방법이다. 본 실험에서는 우리나라 농산물의 대부분을 차지하는 벼의 도정시에 부산물로 얻어지는 쌀겨에서 추출되는 유지인 미강유(쌀겨유)의 분무미립화 개선 방안으로 초음파 진동을 연료유에 가한 후 출력 노즐에 의한 분무미립화 현상을 비광학 접촉 방식이며 재현성이 우수하고 데이터의 신뢰성이 높은 PDPA(Phase doppler particle analyzer)로 측정, 분석하여 식물유가 대체연료로서 적용가능성 및 타당성을 파악하여 고점성 식물유의 미립화에 대한 기초 자료를 얻고자 한다.

Table 1. Chemical and Physical properties of the fuels used

Contents	Light Oil	Rice-bran Oil
Carbon(%) <sup>o</sup>	85.7	77.2
Hydrogen(%)	13.6	11.6
Carbon residue(%)	0.20	0.307
Sulfur(%)	0.093	0.002
Ash(%)	0.001	<0.01
Specific Gravity(15/4 °C)	0.8484	0.920
Kinematic Viscosity(37.8 °C,cSt)	2.982	63.50
Higher Calorific Value(cal/g)	10920	9500
Lower Calorific Value(cal/g)	10244	8939
Flash Point( °C)	47	>150
Pour Point( °C)	-22	-5.0

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 미립화 실험장치

식물유의 미립화 실험장치의 개략도가 Fig. 1이다. 여기서 실엔진과 유사하게 1마력의 구동모터와 노즐을 장착할 수 있는 인젝터 및 소행분사펌프 등으로 구성되어 있는 분사장치, 액적의 분산을 막기 위한 포집장치, 공급되는 연료에 초음파 진동을 가해주는 초음파 장치, 그리고 미립화 정도를 측정하기 위한 비접촉식 광학계측장비인 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템 등으로 구성되어 실험하였다.

2-3. 노즐

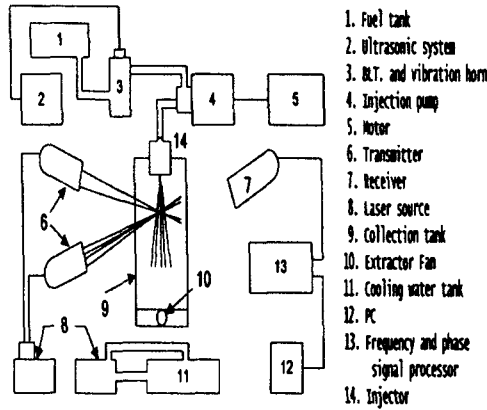


Fig.1 Schematic of the experimental apparatus

2-2. PDPA(Phase doppler particle analyzer) 구성

PDPA는 레이저 광을 이용하여 유체의 비접촉적 속도측정이 가능한 레이저유속계(Laser Doppler Velocimetry: LDV)에 리시버(receiver)와 시그널프로세서(signal processor)가 추가된 광계측장비이고, 3개의 리시버 검출기에서 받아들인 신호의 위상차 비교에 의해 단위 시간당 측정체적(probe volume)을 통과하는 입자의 3차원 속도, 크기 및 밀도를 동시에 측정할 수 있는 장치이며 개략도가 Fig. 2 이다.

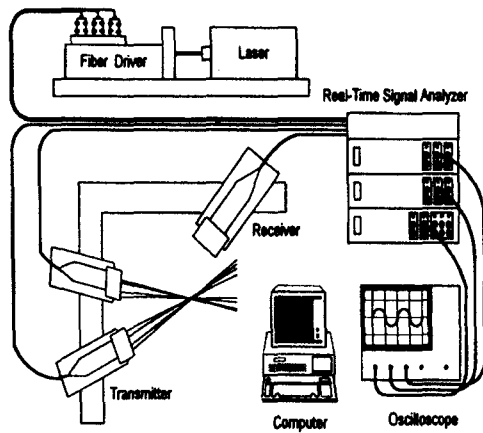


Fig. 2 Schematic of the PDPA system

일반적으로 노즐은 디젤기관의 각 실린더 헤드부에 부착되어 분사펌프에 의하여 고압으로 가압된 연료를 착화, 연소가 얻어질 수 있도록 무화시키고, 공기와 잘 혼합시키기 위하여 연소실의 크기, 형상에 맞추어서 연소실의 전 영역까지 도달되도록 하는 역할을 한다. 그리고 노즐은 연료의 무화, 관통 및 분포라고 하는 분무특성 외에 분사압력, 분사시기, 분사기간, 분사율 등 분사특성도 좌우하기 때문에 기관의 성능에 미치는 영향으로서 대단히 중요하다. 일반적으로 실험에 사용된 분사 노즐은 국내 D사에서 제작된 홀형(hole type)인 3종의 단공노즐을 사용하였으며, 상세한 노즐 사양은 Table 2.와 같다.

본 연구에 사용된 노즐의 상세도는 Fig. 3에서 나타내고 있다. 홀형노즐은 홀의 직경이 각각 0.31, 0.34, 0.37mm의 세종류를 사용하였으며 분사펌프는 D정공의 보슈(Bosch) A형으로 1개의 풀러저를가지고 있고, 캠 리프트에 의해 구동되어지는 일체형을 사용하였다.

Table 2. Specifications of the nozzle

Characteristics type	Nozzle		
	single hole type		
Opening pressure(MPa)	16	20	24
Initial spring load(N)	363.6	430.2	510.6
Seat diameter(mm)	3		
Open water pressure area(mm <sup>2</sup> )	21.21		
Closed water pressure area(mm <sup>2</sup> )	28.27		
Nozzle lift(mm)	0.35		
Material of nozzle body	SCM420, HRC60		
Material of needle valve	SDT11, HRC57		
Material of line contact	S58C, HRC55		
Hole length(mm)	5		

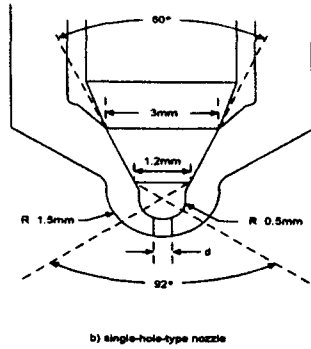


Fig. 3. Detailed drawing of nozzle

2-4. 분무평균입경 측정 방법

디젤기관에 있어서 고압의 연료를 작은 노즐로써 분사하면 고속류를 일으키고 동시에 이들이 공기의 입자와 충돌, 붕괴(break-up)되어 연소실내에 비산된다. 연료의 입자가 연소할 때 연소성을 향상시키기 위해서는 각 입자가 기화하여 기화된 연료가 공기와 골고루 접촉하여야 하며 이러한 목적을 달성하려면 연료는 가능한 한 미세한 입자로 분산되는 것이 좋다. 본 측정은 일반 디젤 인젝터에 의한 연료의 미립화 정도를 초음파 연료공급장치를 사용한 경우와 사용하지 아니한 경우에 있어서 미립화 정도를 측정하기 위한 것이다. 분사실험 결과로 얻어진 미립화 액적들의 크기를 초음파 에너지에 의한 분무액적의 미립화 개선율을 구하여 비교 검토하였다. 홀형 노즐에서는 홀 직경을 0.31, 0.34, 0.37mm 로 하고 노즐의 분사압력에 따른 분무평균입경을 측정하기 위하여 노즐 테스터로 대기압 상태에서 홀형 노즐의 스프링의 크기를 조정하여 분사압력을 16, 20, 24 MPa 로 실험하였다. 이때 포집거리는 300mm로 하였다. 초음파진동을 효율적으로 전달하기 위한 연료 특성 실험을 하였고, 측정기기로 PDPA를 사용하였다. PDPA는 레이저 광을 6개로 분리하여 측정하고자 하는 위치에 측정체적을 형성시킨다. 그러면 이 검사 체적을 통과하는 액적들은 빛을 산란시키게 되며 이 산란광들은 수광부의 두 광센서에서 감지된다. 이 때 광센서에 감지되는 신호는 도플러 성분과 pedestal 성

분이 합쳐진 상태이며 대역필터를 통과시켜 도플러성분만 얻게 된다. 여기서 광센서는 공간적으로 서로 떨어져 있는 관계로 감지되는 신호는 위상차를 보이게 되는데 이때의 위상차는 입경에 비례하고 도플러 신호의 주파수는 입자의 속도에 비례하게 된다. 즉 주파수와 위상차이만으로 속도와 입경을 측정할수 있는 것이다. 입경의 측정은 매 측정시 마다 여러 번을 분사한 많은 데이터가 취해지므로 위상 평균(Phase average)과 앙상블 평균(Ensemble average)을 취해 계산된다. 입자의 크기와 측정 영역의 관계는 입자의 크기가 작을수록 측정 영역의 크기는 작아지며, 반면에 레이저 빔의 강도는 커진다. Fig. 4는 입자크기에 대한 측정체적직경의 변화를 나타내고 있다. 실험조건은 대기압 상태에서 미강유 온도를 33°C로 유지했으며, 10 ~ 20초동안 노즐선단에서 300mm에 위치한 측정체적을 지나는 입자를 측정하여 계산하였다.

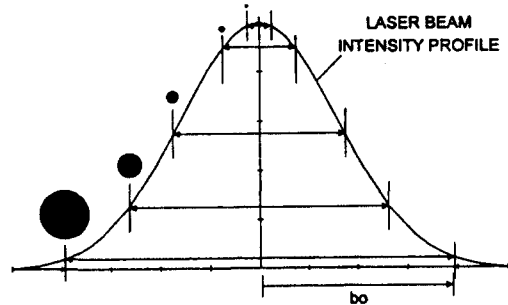


Fig. 4. Variation of the probe volume diameter depending on the particle size

3 결과 및 고찰

3-1. 식물유의 특성실험

Table 1은 미강유와 경유의 두 종류에 대해 21°C에서 측정된 연료의 성질들을 나타낸 것이다. 디젤기관의 주 연료인 경유에 비해 식물유의 점성이 매우 높다는 것을 알수 있다. 식물유가 고점성 유체이므로 분무미립화 불량에 의한 불완전 연소로 열효율 저하와 탄소 누적에 의한 연료계통의 막힘등의 문제점은 상기한 바

와 같으며 이의 해결을 위해 저점도화 및 분무 개선의 필요성이 나타나고 있다. 두 연료의 점도를 낮추어 미립화 특성을 개선하기 위해서 초음파에너지를 가해 주는데 두연료가 초음파 에너지를 받는 시간에 따라 변화상태를 조사할 필요가 있다. 이것은 초음파에너지를 연료에 전달하기 위한 진동자 혼 설계에 기초자료가 된다. Fig. 5 는 초음파에너지를 가하여 준 시간과 그에 대한 동점성 계수의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 동점성 계수의 측정은 스피들 회전식점도계를 사용하여 비교적 정확하게 계산하였다. 초음파에너지전달 시간을 10초에서 60초까지 10초간격으로 설정했고 매 시간당 5 회 측정하여 평균값을 결과값으로 사용했다.

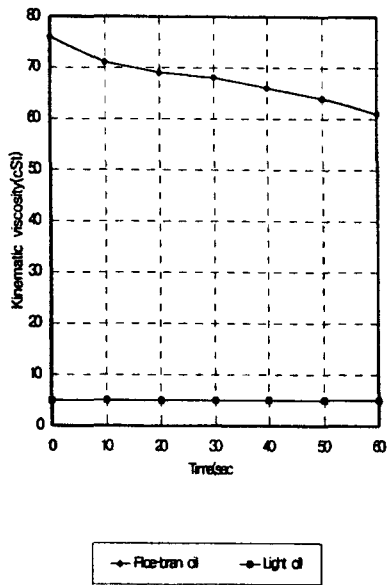


Fig. 5. Change kinematic viscosity with time for different fuels

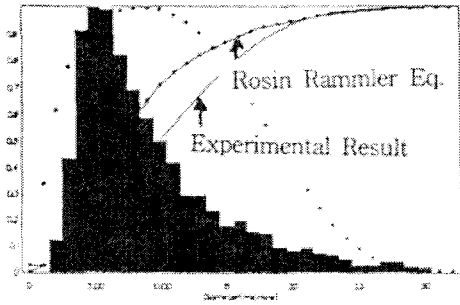
미강유 변화 곡선에서 보는 바와 같이 시간변화에 따른 미강유의 동점성계수가 급격하게 떨어지는 시점은 적어도 초음파에너지를 10초 이상 가했을 때라는 것을 알 수 있다. 이는 미강유가 정제하여 최소한 10초 이상의 초음파에너지가 가해졌을 때 동점성계수가 급격하게 떨어지면서 노즐에서의 분무미립화가 촉진될 수

있음을 보여준다. 연료의 점도가 크면 노즐에서 분사되는 입경이 크게 되어 착화시 착화지역이 길어지게 되고 실린더 내에서 불완전 연소가 되어 기관의 성능과 수명에 치명적인 영향을 준다. 또한 연료의 입자가 크면 노즐의 분공이 마모되어 노즐의 수명도 영향을 받게 된다. 이러한 제약 때문에 연료의 미립화는 식물유에 있어서 필수적이라 할 수 있다. 초음파에너지를 받은 연료의 동점성계수가 낮아지는 것으로 보아 초음파 발전장치를 향후 소형 농형 디젤기관에 장착 하면 실린더 내에서 연소특성이 상당히 개선되리라 사료된다.

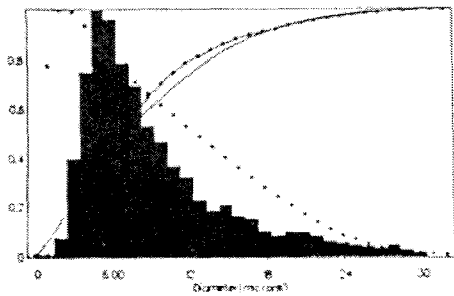
3-2. 평균입경 및 입경분포

Hole형 3개의 노즐 및 3단계의 분사압력에 대해 상용분사와 초음파 적용분사의 두 경우에 대해 실험 하여 비교 검토하였다. PDPA의 측정계적용을 통과하는 액적들로 부터의 data 획득 시간은 10 ~ 20초 정도이며 4,000 ~ 5,000개의 입자들을 유효 data로 처리하여 계산되었다. 이 때의 주변온도는 23°C, 대기압 상태이고 노즐 선단으로부터 포집거리는 300mm로 하였다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 홀 직경이 0.31, 0.34, 0.37mm 인 노즐을 사용하여 열림압 20 MPa에서 얻어진 자료를 신호분석기로 처리하여 얻어진 입자크기에 대한 입자수의 분포 그래프이다.

(a)는 상용 분사인 경우이고 (b)는 초음파 분사인 경우이다. 초음파 분사인 (b)그래프가 상용 분사인 (a)그래프보다 액적의 크기가 작은 왼쪽으로 그래프가 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 초음파 에너지에 의해 분사 액적의 미립화 개선이 이루어졌음을 나타낸다. 신호분석기 처리로 정리된 이들 자료들을 표로 만들어 정밀 검토하면 Table 3 과 같다. Table 3.에서 보면 산술 평균입경  $D_{10}$ 의 개선율은 33.15%, 면적평균입경  $D_{20}$ 의 개선율은 29.67%, 체적평균입경  $D_{30}$ 의 개선율은 25.06%로 나타나고 있으며, 일반적으로 많이 쓰이는 SMD인  $D_{32}$ 는 14.89%만큼 초음파분사에 의한 분무미립화의 개선율을 보이고 있다.

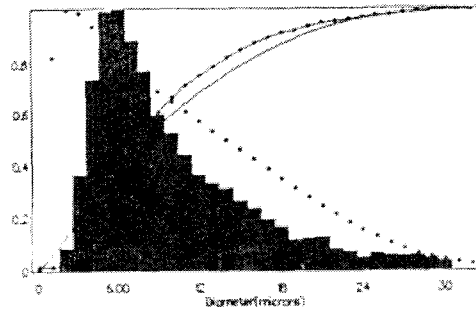


(a) Conventional Spray

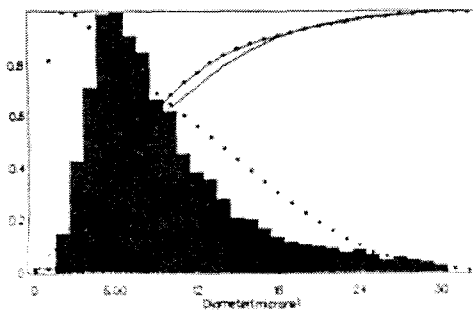


(b) Ultrasonic Spray

Fig. 6. Comparison of drop size distribution between conventional and ultrasonic sprays(0.31mm, 20MPa, 300mm, hole-type nozzle)

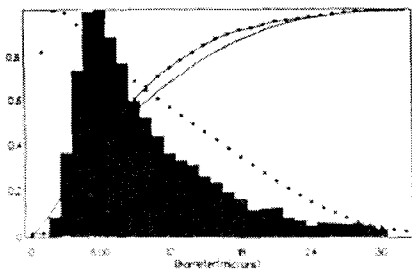


(a) Conventional Spray

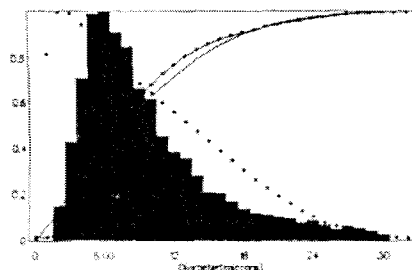


(b) Ultrasonic Spray

Fig. 8. Comparison of drop size distribution between conventional and ultrasonic sprays(0.37mm, 20MPa, 300mm, hole-type nozzle)



(a) Conventional Spray



(b) Ultrasonic Spray

Fig. 7. Comparison of drop size distribution between conventional and ultrasonic sprays (0.34mm, 20MPa, 300mm, hole-type nozzle)

Table 4는 상기조건에서 3단계 열림압에 따른 SMD 및 그의 개선율을 보이고 있으며 초음파 분사에 의한 상용분무액적의 미립화 개선율은 약 15%로 나타나고 있다.

Table 3. Improvement rate of atomization expressed in terms of mean diameters between conventional and ultrasonic sprays(0.34mm, 20MPa, 300mm, single-hole-type nozzle)

Mean diameter (μm) / Item	Conventional	Ultrasonic	Improvement rate(%)
D <sub>10</sub>	9.08	6.07	33.15
D <sub>20</sub>	10.65	7.49	29.67
D <sub>30</sub>	12.09	9.06	25.06
D <sub>32</sub>	15.58	13.26	14.89

Table 4. Improvement rate of atomization in terms of SMD between conventional and ultrasonic sprays depending on nozzle opening pressures (0.34mm, 300mm, single-hole-type nozzle)

Item Opening pressure (MPa)	Conventional	Ultrasonic	Improvement rate(%)	Remark
16	15.29	13.15	14.0	• SMD( $\mu\text{m}$ ) ** mean improvement rate: 14.85%
20	15.58	13.26	14.89	
24	15.64	13.19	15.66	

Fig. 9는 hole형 노즐에서 노즐 열림압력에 따른 분사액적의 면적 평균입경( $D_{20}$ )의 변화를 보이고 있다. 여기서도 상기와 같은 현상을 보이며 hole의 직경이 작을수록 분포선이 아래에 위치함을 볼 수 있는데, 이는 hole직경이 작을수록 분포미립화에 유효함을 보여준다.

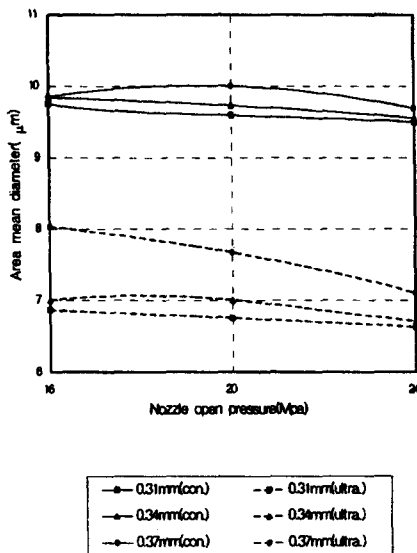


Fig.9. Variation of area mean diameter depending on the nozzle opening pressure in single-hole-type nozzles

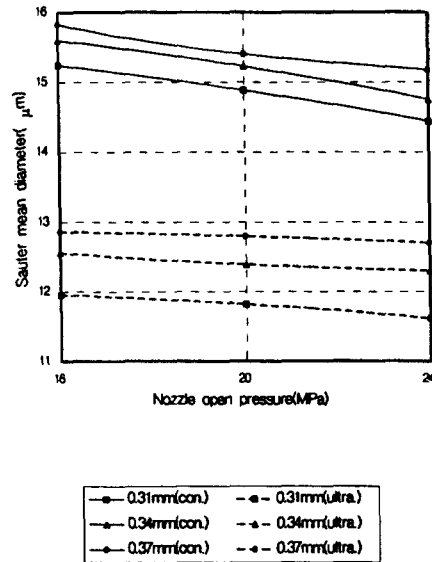


Fig. 10. Variation of Sauter diameter depending on the nozzle opening pressure in single-hole-type nozzles

Fig. 10은 hole형 노즐에서 노즐 열림압력에 따른 분사액적의 SMD의 변화를 보이고 있다. 여기서도 상기와 비슷하게 3가지 hole직경 전반에 걸쳐 초음파 분사가 상용분사에 비해 분무액적의 미립화 개선에 유효했음과 hole직경이 작을수록 분무액적이 작아짐도 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 실험은 청정에너지원으로 주목받고 있는 식물유중 미강유에 대하여 초음파 연료 공급장치물이용하여 28.5kHz의 초음파 진동을 가하여 초음파에 의한 연료의 미립화 특성을 구명하기 위한 실험적 연구로서, 대기압 상태에서 분사압력 변화에 따른 분무 평균입경과 입경 분포를 PDPA로 측정,분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진동자원에 의해 초음파 진동에너지가 연료에 전달되는데 요하는 시간은 동점성계수의

측정 실험에서 미강유의 경우 10초 이상이 적절한 것으로 나타났다.

2. 분무평균입경(SMD)은 상용연료 공급장치의 경우보다 초음파 연료 공급장치의 경우 hole형 노즐에서는 SMD를 기준으로 하여 약 15% 미립화 개선을 얻을 수 있었다.

3. 노즐 열림 압력에 따른 분포선이 홀 직경이 작을수록 상용 및 초음파 분사 전반에 걸쳐서 아래에 위치함을 얻을 수 있었다.

4. 초음파 연료공급장치에 의한 입경분포는 상용연료공급장치의 경우에 비해 균일한 입자군을 나타내었다.

따라서 본 실험에서는 초음파진동에너지를 연료에 공급함으로써 고점성연료의 미립화 개선이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

이 논문은 1997년도 하반기 호서대학교 학술연구 조성비에 의하여 부분 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. Goering, C.E., et al, "Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils", Transactions of the ASAE Vol.25(6), 1982, pp.1472~1483
2. Engleman, H.W., D.A. Guenther and T.W. Sivia, "Vegetable oil as a diesel fuel", ASME paper No. 78-DG, 1978
3. Hawkins, C.B., et al, "Sunflower oil esters: An alternate fuel for direct injection diesel engine", SAE paper No 831356, 1983
4. 櫻井芳人, 齊藤道雄, 東秀雄, "總合食料工學", 恒星社 厚生閣, 1976, pp.239~262
5. Niemczewski, B., "A Comparison of Ultrasonic Cavitation Intensity in Liquids", Ultrasonic, May, 1980, pp.107~110
6. Kazuyoshi Namiyama, Hiromi Nakamura, Kakuro Kokubo, Daijiro Hosogari, "Development of Ultrasonic Atomizer and Its Application to S.I Engines", SAE 890430, 1987, pp.1~11
7. 千葉 近, "超音波による液體の微粒化の研究", 内燃機關, 11卷 2号, 1972, pp.11~22
8. 최두석, 설진호, 류정인: "초음파 연료공급장치 용디젤자동차의 성능 향상에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, Vol.2, No.1, 1994, pp.1~8
9. 주은선, 정석용, 강대운, 김종찬: "고점성 바이오디젤유의 분무미립화에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문, Vol.5 No. 1, 1997, pp.146~153
10. 유병구, 차경욱, 정진도, 주은선, "PDPA에 의한 Pintle형 노즐의 미립화 특성실험 -식물유를 중심으로", 한국자동차공학회 춘계 학술대회, 1997
11. 강대운, "고점성 대체연료의 미립화에 관한 연구", 경상대학교 석사학위 논문, 1996
12. 인왕기, 이상용, 송시홍: "Y-JET 2-유체 분무노즐 내부유동의 모델링, 대한기계학회논문집, 제17권 제7호, 1993, PP.1841~1850