한국자동차공학회논문집 제2권 제1호, pp. 1~8, 1994.

〈논 문〉 SAE NO. 943700

超音波 燃料供給裝置用 디젤自動車의 性能 向上에 관한 연구(I)

-초음파 연료공급장치를 통과한 연료의 분무특성에 대하여-

A Study on the Performance of Diesel Automobile of Ultrasonic Fuel Supply System(I)

-About the Droplet Size Distribution of Ultrasonic Fuel Supply System-

최 두 석,* 설 진 호,* 류 정 인,**
D. S. Choi, J. H. Seol, J. I. Ryu

ABSTRACT

This study carried out to investigate the spray characteristics of diesel oil through out ultrasonic fuel supply system in comparison with conventional.

Size of the droplets comprising diesel spray was measured by immersed liquid method at different positions along the spray axis. Droplets distribution diagram was ploted and Sauter Mean Diameter(SMD) was also calculated.

The effects of the ultrasonic vibration and injection pressure on the droplet size distribution and SMD were investigated. As the ultrasonic vibration supply SMD decreases on the same injection pressure conditions with conventional injector's. But the effect of ultrasonic vibration decreases with injection pressure increasing.

주요기술용어 : Ultrasonic Fuel Supply System(초음파 연료공급장치), Branchness Index(브랜치 인덱스), SMD(사우트 평균입경) , NMR(핵자기 공명), Ultrasonic Generator System(초음파 발진장치)

1. 서 론

이미 중요한 대기 오염원으로 자리잡아가고 있는 디젤기관의 배출물의 특성은 여러가지 요인에 의하여 지배받으나, 특히 연소실내에서의 분무연료의 연소특성에 크게 좌우된다. 노즐을 통하여 분사된 연료는 여러가지 크기의 액적상태의 분무를 형성하게 된다. 이 분무는 실린더내로 흡입된 공기와 혼합된 후, 고온·고압의 조건하에서 증발과정을 거쳐 착화한다. 이와 같이 연료가 분사되어 연소할때 까지의 과정이 디젤기관의 배기특성 및 출력특성 결정에 중요한 요인으로 작용한다. 즉 최적의 연소과정은 최고의 기관성능을 발휘하게 한다. 최적의 연소란 양호한 혼합기 형성에 의한 완전연소를 말하는데, 양호한 혼합기의 형성은 노즐 등의 분무기구와 연료특성에 의해 결정된다.

액적상태의 연료는 고온의 산화성 분위기에서

* 정회원, 충남대학교 대학원
** 정회원, 충남대학교 기계공학과

증발되어 직경이 감소하고, 적당한 조건의 분위기가 형성되면 어느 정도의 지연시간 후에 자발화하여 연소된다. 그러나 입경이 어느 임계치보다도 크거나 공기와의 혼합상태가 불량하면 이 연료액적은 착화되지 않고 배출되어 기관의 성능특성을 악화시키는 요인이 된다.[1,2]

증발에서 착화까지의 지연기간은 액적의 주위에 가연혼합기가 형성되어 착화가능 상태로 되기까지의 물리적 지연과 화학반응이 진행되어 착화될 때까지 화학적 지연으로 구분되는데 실험결과에 의하면 물리적 지연기간이 화학적 지연기간에 비해 2배 정도 길다고 밝혀져, 분무의 물리적 특성을 개선시키는 것이 중요함을 알 수 있다.[3,4]

角田[5]등은 고온 · 고압하에서 액적의 착화지연 측정실험을 통하여 착화지연기간, 특히 물리적 착화지연기간은 액적의 초기 직경에 좌우된다는 것을 밝혔다. 그리고 Azzopard[6]등은 균일입경 액적군의 화염전파기구 측정실험을 통하여, 액적직경 10μm 이하인 경우에는 연소에 앞서 액적이 모두 증발하여 기체 연료의 연소와 같은 메카니즘이 된다.

많은 연구결과들이 보여 주는 바와 같이 디젤기관의 성능을 개선시키기 위해서는 노즐로 부터 분사된 연료의 분무특성을 개선할 필요가 있음을 알 수 있다. 즉, 분사된 연료는 가능한 작은 입경의 액적으로 미세화시켜 연소상태를 개선하는 것이다. 이와같은 배경에서 본 연구에서는 디젤기관의 노즐로부터 분사되는 연료액적의 크기를 미세화시켜 성능특성 향상을 도모하고자, 초음파 에너지를 이용한 연료분사장치를 구성하여 이 장치의 분무특성을 조사하고, 기존의 연료분사장치의 분무특성과 비교하였다. 그리고 초음파장치를 통과한 연료가 어떠한 화학적 변화를 겪었는지 알아보기 위하여 핵자기공명법(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)으로 초음파 처리 전 · 후 시료의 분자구조분석을 실시하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험장치의 개략도이다

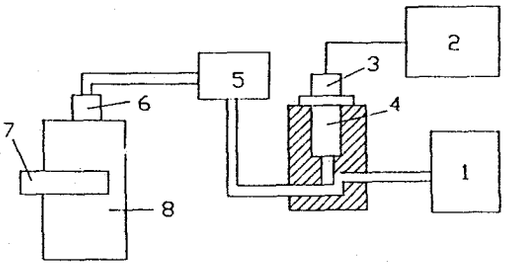


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

실험장치는 크게 초음파 발진장치, 초음파 장치, 펌프 및 분사노즐 그리고 액적포집 장치 등으로 구성되어 있다.

2번 초음파 발진장치(Ultrasonic Generator System)는 실내전원(AC 110V, 60Hz)으로 구동되며 발진주파수는 28KHz이다. 3번은 전왜진동자(Electrostrictive Transducer)로서 종류는 강성이 크고 열에 잘 견디는 볼트체결형 랑게빈 진동자(Bolted Langevin Transducer : BLT)를 사용하였다. 4는 진동자의 진폭을 확대시키는 역활을 하는 혼(Horn)으로 재질은 Al 7017-T651을 사용하였고, 형식은 스텝형(Step Type)을 이용했다. 혼은 대단부의 길이와 소단부의 길이가 λ/4(λ : 파장)로 서로 같을때 진폭도가 가장 크며, 단면비가 증가할수록 진폭도는 증가하나 경계면에서의 응력집중이 커져 깨질 우려가 있으므로 제작 구조상 단면비를 4 : 1로 정했다.

Fig.2와 Fig.3에는 분무액적 포집용기와 액적채취장치의 상세도를 나타냈다. 포집용기는 150×150×300(가로×세로×높이, 단위 : mm)의 직육면체의 구조로 상부중앙에 노즐을 꽂는 구멍이 있고, 상부로 부터 50mm와 100mm 되는 지점에 액적채취장치를 삽입시킬 수 있는 60×30mm(가로×세로)의 직사각형의 구멍이 뚫려져 있다. 액적채취장치는 슬라이드, 본체, 유리의 3가지로 구성되어 있는데, 슬라이드와 본체 중간에 지름 5.5mm의 구멍이 뚫려져 있다.

액적채취는 액침법(Immersed Liquid Method)

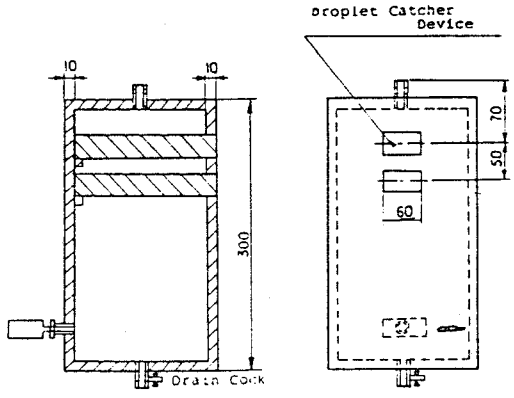


Fig.2 Spray Vessel

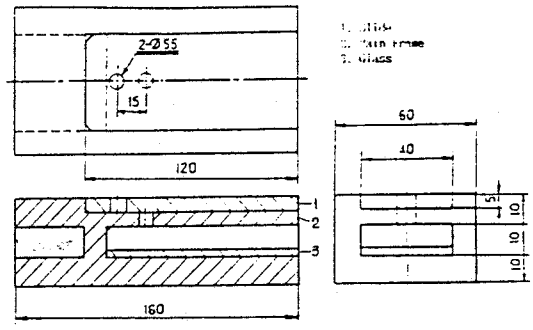


Fig.3 Device for Droplet Catcher

을 사용하였는데, 이 방법은 비교적 간단하고 경제적이므로 현재에도 널리 사용되고 있는 방법이다. 포집액으로는 실리콘오일(1000cst/at 20°C)을 사용하였다. 실험방법은 노즐의 스프링 장력을 조절해 분사압력을 120, 135, 150kgf/cm²으로 변화시켜 가면서 초음파 장치를 구동시킨 경우와 구동시키지 않는 경우로 나누어 분무액적을 채취했다. 액적채취 위치는 노즐선단에서 53mm 떨어진 지점과 103mm 지점의 두곳이다. 초음파 장치를 통과한 연료는 펌프를 거쳐 노즐에서 설정된 압력으로 공기내에 분사된다. 이때 액적채취장치의 슬라이드를 잡아 당기면 슬라이드와 본체에 뚫린 구멍이 서로 만날때 그 구멍이 통하여 실리콘오일을 도포한 유리위에 분사된 연료액적이 받아진다. 이것을 전자현미경으로 110배 확대한 후 사진촬영 하였다. 이때 분위기의 압력은 상압으로 했다.

액침법에 의한 액적의 채취는 그 방법이 간단한 반면에 연속적인 측정이 곤란하고, 분사된 액적이 유리위에 포집될 때, 서로 충돌 합체되어 실제의 액적크기보다도 커지는 경우가 있어 주의를 기울였다. 본 실험에서는 한 조건에서 수회 반복 측정하여 그 평균값을 결과 분석하여 사용했다.

연료의 분자구조분석에 사용한 실험장치는 양자 핵자기 공명 스팩트로미터(Proton NMR Spectrometer)이다.

3. 결과 및 고찰

Fig.4는 분사압력 120kgf/cm²일 때의 초음파 장치를 가동한 경우와 가동하지 않은 경우의 액적의 입도분포를 나타낸 것으로 입수분포곡선으로 표시했다. 이 분포곡선은 곡선의 폭이 좁고 최대위치가 기준점에 가까울수록 입경이 미세하고 고르게 분포된 것을 의미하는데, 여기서 dx는 입경 구간, n_T는 총액적수, dn은 구간 x와 x+dx 사이에 있는 액적의 수이다.

이 경우는 53mm에서 채취한 것으로 초음파를 사용하지 않은 경우는 수μm에서 150μm까지 폭넓게 분포하고 있으나 초음파를 사용한 경우는 최대직경이 120μm로 더 미세하고 고르게 분포된 것을 알 수 있다. 두 곡선의 SMD는 초음파를 가하지 않았을 때 100μm, 초음파를 가한 경우는 약 78μm였다.

이 이유는 초음파 에너지가 공동현상(Cavitation)을 통해 연료에 작용하여 연료입경을 미세하게 분열시키기 때문이다.[7-9]

Fig.5는 103mm에서 채취한 경우로 두곡선 모두 100μm이내에 액적이 집중분포하고 있어 액적이 50mm를 비행하는 동안 증발에 의해 직경이 감소되었음을 알 수 있다. 이때의 SMD는 52μm와 42μm로 초음파 사용에 따른 입경 감소 효과는 Fig.4에 비해 적어 분무액적 포집길이(이하 분무거리라 함)가 커질수록 초음파 효과보다는 증발에 의한 영향이 큰 것으로 생각된다.

Fig.6은 분사압력이 135kgf/cm²일 때 53mm에서 채취한 것으로 120kgf/cm² 경우에 비해 분포곡선이 좁고 높게 나타나 압력증가에 따라 입경이

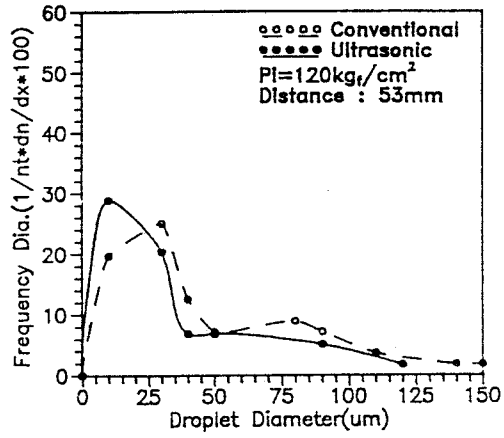


Fig.4 Droplet size distribution at 53mm down stream of spray with Pi=120kgf/cm²

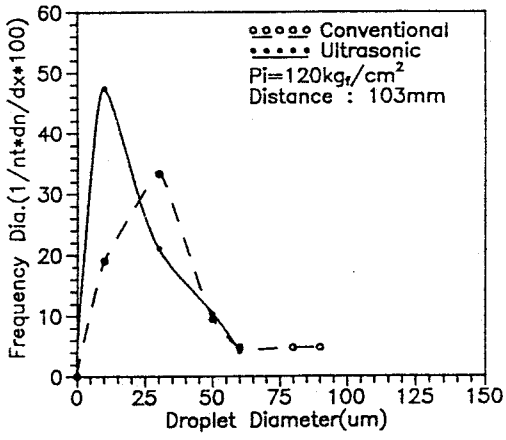


Fig.5 Droplet size distribution at 103mm down stream of spray with Pi=120kgf/cm²

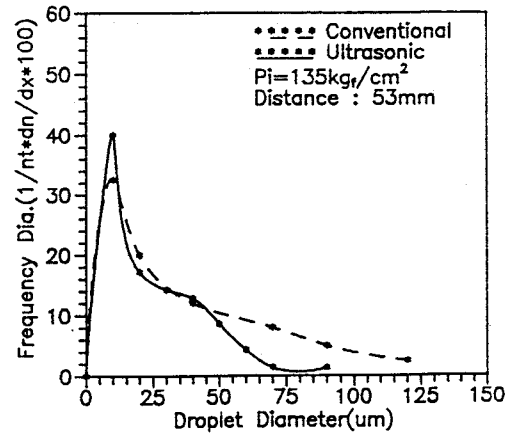


Fig.6 Droplet size distribution at 53mm down stream of spray with Pi=135kgf/cm²

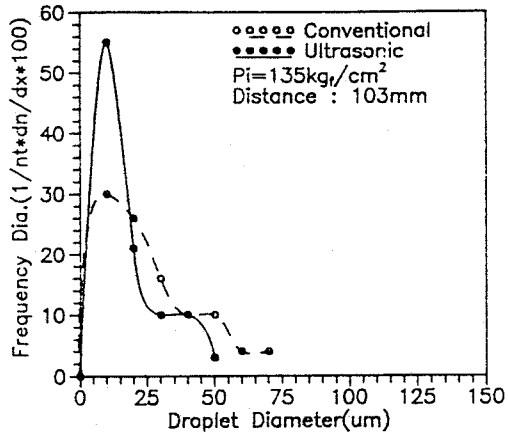


Fig.7 Droplet size distribution at 103mm down stream of spray with Pi=135kgf/cm²

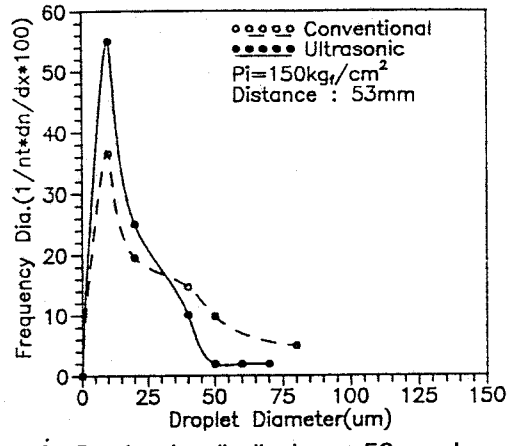


Fig.8 Droplet size distribution at 53mm down stream of spray with Pi=150kgf/cm²

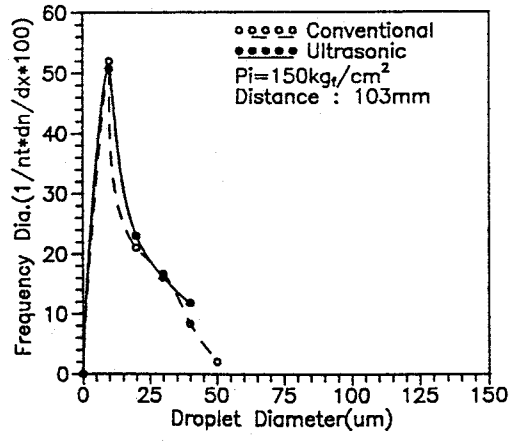


Fig.9 Droplet size distribution at 103mm down stream of spray with Pi=150kgf/cm²

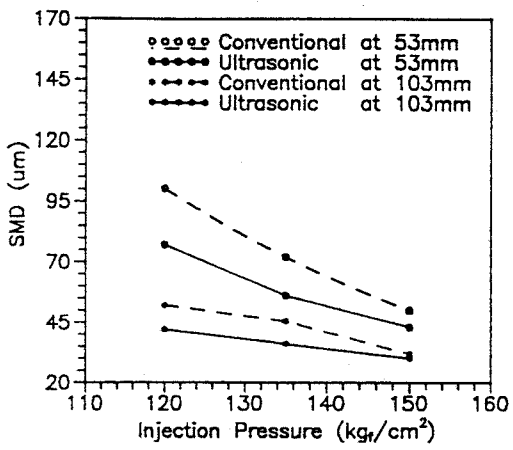


Fig.10 SMD variation against injection pressure at 53mm, 103mm down stream

급격히 감소함을 알 수 있다. 이 경우의 SMD는 72μm와 55μm였다.

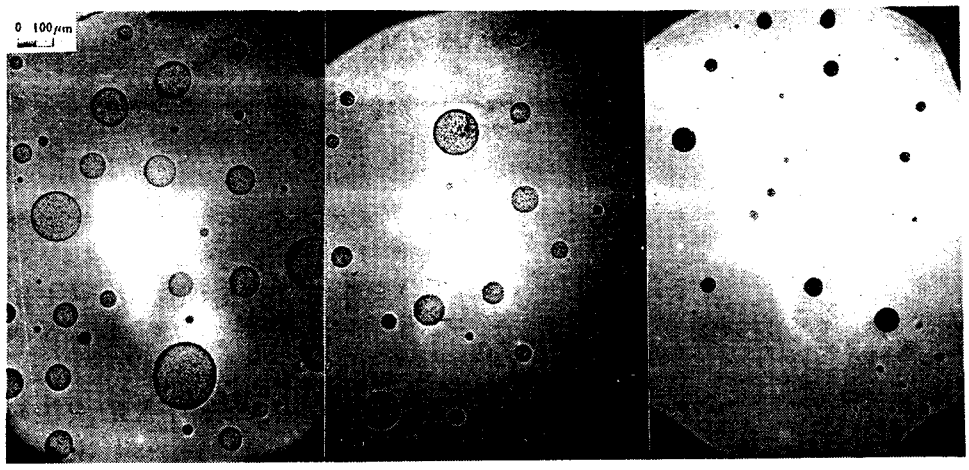
Fig.7은 분사압력이 135kgf/cm²이고 채취위치가 103mm인 경우로, 두 곡선 모두 70μm 이내에 액적이 분포하고 있다. SMD는 45μm와 36μm로 나타났다.

Fig.8은 분사압력이 150kgf/cm², 53mm인 경우로 초음파 유·무에 관계없이 거의 비슷한 분포를 보여 어느 압력 이상이 되면 초음파에 의한 분무의 불리적 특성변화는 한계에 달하고, 분무특성은 압력에만 의존한다고 생각된다. SMD는 48μm와 41μm였다. 그리고 Fig.9의 103mm의의 경우도 Fig.8의 경우와 거의 같아 초기 액적크기가 감소함에 따라 액적의 증발도 감소하는 것을 알 수 있다. 이 경우의 SMD는 30μm와 29μm로 큰 차이가 없어 압력이 증가할수록 초음파의 영향보다는 압력 자체에 의한 액적크기 감소가 지배적이었다.

Fig.10은 분사압력과 채취위치에 따른 SMD의 변화를 나타낸 것으로 초음파에 의한 SMD의 감소 경향은 압력이 증가할수록, 채취위치가 멀어질수록 둔화되고 있다. 분사압력이 150kgf/cm²이고 포집위치가 103mm인 경우의 SMD는 큰 차이가 없었다.

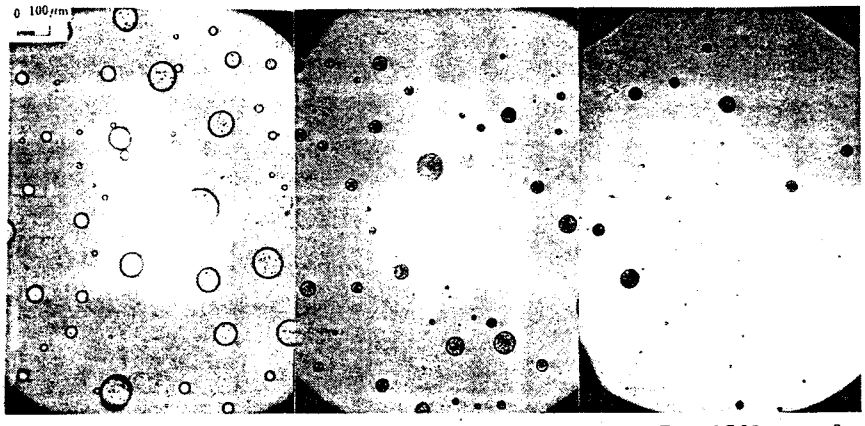
Photo.1은 초음파장치를 가동시키지 않았을 때, 포집위치 53mm 지점에서 채취한 액적의 분포사진으로 분사압력이 120kgf/cm²에서 150kgf/cm²로 증가함에 따라 액적직경이 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 120kgf/cm²의 경우에서는 약 수μm에서 150μm사이에 폭넓게 입경이 분포하고 있다.

Photo.2는 포집위치 130mm에서의 분포사진으로 53mm 지점에 대해서 경향은 비슷하나 입경크기가 줄어들어 분무입경은 분무거리가 커질수록 감소되는 것을 알 수 있다. 이것은 액적이 거리를 비행하면서 증발하기 때문이다.



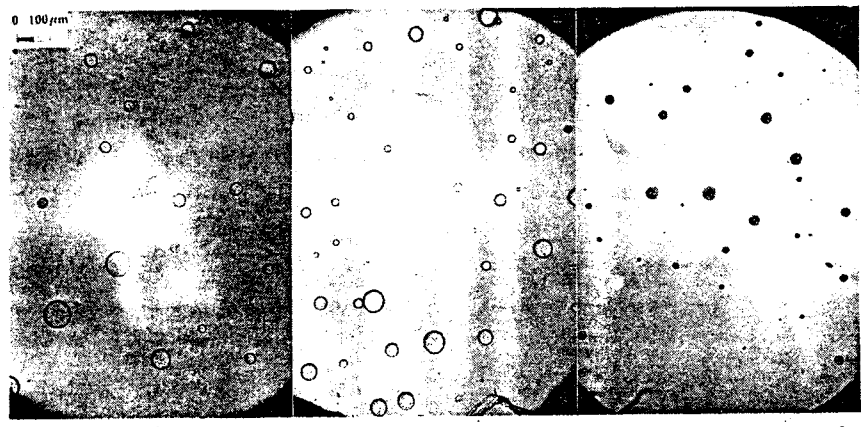
$P_s = 120\,kg_f/cm^2$ $P_s = 135\,kg_f/cm^2$ $P_s = 150\,kg_f/cm^2$

Photo.1 Photograph of Droplets Catched by Immersed Liquid Method at 53mm Downstream of Nozzle with Conventional Injector



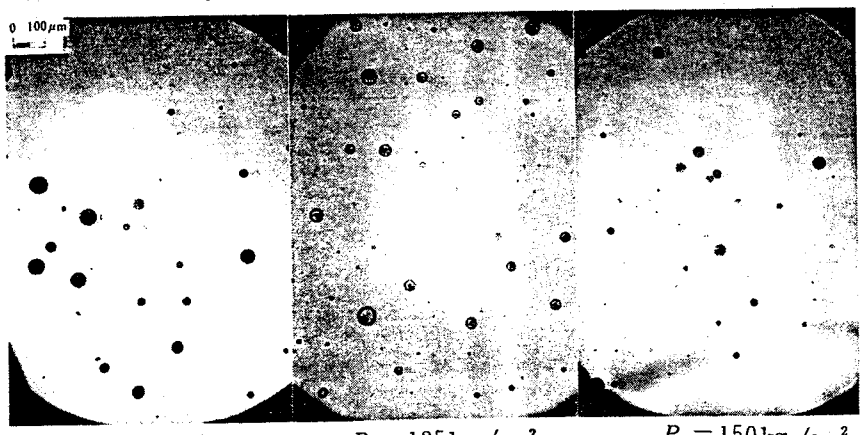
$P_s = 120\,kg_f/cm^2$ $P_s = 135\,kg_f/cm^2$ $P_s = 150\,kg_f/cm^2$

Photo.2 Photograph of Droplets Catched by Immersed Liquid Method at 103mm Downstream of Nozzle with Ultrasonic Injector



$P_s = 120\,kg_f/cm^2$ $P_s = 135\,kg_f/cm^2$ $P_s = 150\,kg_f/cm^2$

Photo.3 Photograph of Droplets Catched by Immersed Liquid Method at 103mm Downstream of Nozzle with Conventional Injector



$P_s = 120\,kg_f/cm^2$ $P_s = 135\,kg_f/cm^2$ $P_s = 150\,kg_f/cm^2$

Photo.4 Photograph of Droplets Catched by Immersed Liquid Method at 103mm Downstream of Nozzle with Ultrasonic Injector

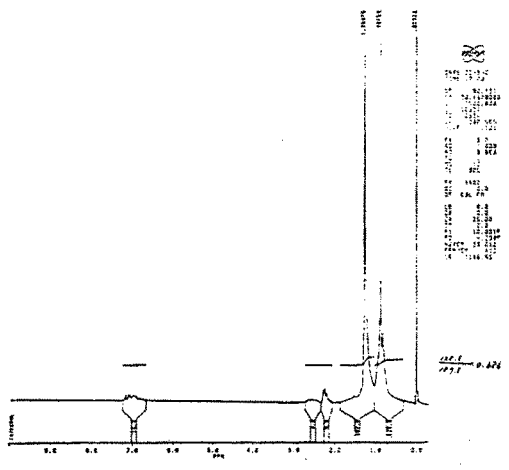


Fig.11 NMR Spectrum of Diesel Oil

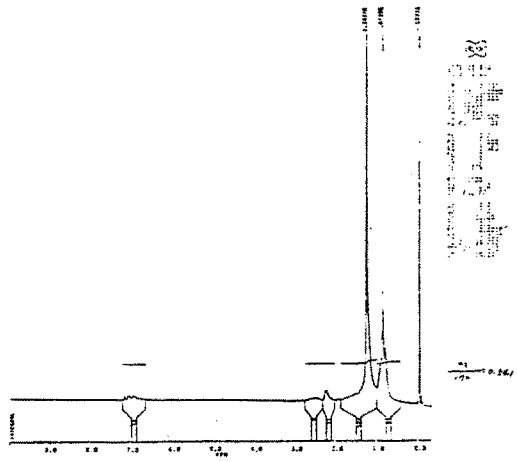


Fig.12 NMR Spectrum of Diesel Oil Treated by Ultrasonic

Photo.3, 4는 초음파 장치를 가동시켰을 때, 각각 53mm 지점과 103mm 지점에서 채취한 연료액적의 분포사진이다. 역시 압력이 증가할수록 액적 크기가 줄어들고 있다. 이 경우는 저압 분사시에도 100μm 이상의 액적들이 보이지 않고 있다. 그리고 분사노즐에서 거리가 멀어질수록 액적의 증발에 의해 직경이 감소하고 있다.

Fig.11과 Fig.12는 NMR법에 의한 디젤연료와 초음파 처리한 디젤연료의 스텍트럼을 분석한 결과이다. 일반적으로 디젤유 중의 방향성 양자(Aromatic Proton)는 스펙트럼 분석에서 화학변화 범위(Chemical Shift Range)가 6.2~9.2ppm이고, 지방성 양자(Aliphatic Proton)는 0.5~4.0ppm 사이에 존재한다고 알려졌다. 시험에 사용한 디젤유와 초음파 처리한 연료 두 경우 모두 약 7.0ppm 근처에서 미약한 피크가 나타나 방향성 양자의 존재를 확인했으나, 그 비율이 약 3.3% 이하로 지방성 양자의 수에 비해 매우 적은 것을 알 수 있다.

지방성 양자는 방향성 양자의 고리로부터의 위치에 따라 Hα형(메틴기), Hβ형(메틸렌기), Hγ형(메틸기)의 세 그룹으로 나눌 수 있는데, NMR 분석결과 두 연료 모두 Hα형은 2.1~2.4ppm 사이에, Hβ형은 1.1~1.9ppm 사이에, 그리고 Hγ형은 0.5~1.1ppm 사이에 나타나고 있다. 양자핵자기 공명 스팩트로미터에서 브랜치의 정도를 나타내는 브랜치 인덱스는 메틸렌기에 대한 메틸기의 비(Hγ/Hβ)로 정의되는데, 디젤유의 경우 0.686이었으며 초음파 처리한 연료는 0.541로 약 21%가 감소하였다. 이것은 연료가 초음파 진동에너지를 받아 메틸기(CH_3)의 브랜치가 깨져 메틸렌기(CH_2)나 메킨기(CH)로 바뀌었음을 의미한다. 메틴기의 비율도 2%에서 초음파 처리유의 경우 3%로 상승했다.

이상에서 고찰한 바와 같이 초음파 에너지를 받은 연료는 브랜치의 깨짐에 의해 연료의 분자량 감소, 점도 및 비중 감소 등의 영향으로 분무가 개선[9]되어 미세한 액적분포를 이루는 것으로 생각된다.

4. 결 론

디젤기관의 분무특성을 개선하기 위하여 초음파 연료공급장치를 구성하여 분무액적의 입경 측정실험을 통하여 기존의 분사장치와 그 특성을 비교하였다. 액적의 입경분포와 SMD를 구하여 비교하고 NMR법을 사용해 분자구조를 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 초음파장치를 사용한 경우는 전 압력 범위에서 SMD가 감소하는데 그 경향은 압력이 증가할수록 둔화된다.
2) 분무거리가 멀어질수록 초음파에 의한 액

적감소 효과보다는 증발에 의한 영향이 지배적이었다.

3) Branchness Index 값이 0.686에서 초음파 에너지를 가한 경우에 0.541로 낮아져 이에 의해 분자량 및 비중 감소 등의 영향으로 분무가 개선되어 자동차기관과 같이 소형 디젤기관에 적용시 연소개선으로 기관성능 향상이 기대된다.

* 이 연구는 1990~1993년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임.
과제번호 : 90-02-00-07

참 고 문 헌

1. Tohio Kurabayash : "On the Atmization of Liquid for the Internal Conbustion Engine Engineers" Gunma University. Vol.15, No.118.
2. Mitsushige nakayama : "Study of Uniform-Size Liquid Droplet Formation by Ultrasonic Vibration" JSME(B). 52. 482. 1986.
3. 김시욱, 김지윤 : "연소공학", 집문당.
4. Matin A. Elliott : "Combustion of Diesel Engine" SAE Paper 1949. pp.490-511.
5. 角田敏一 外 2人 : "氣流における 炭化水素液適例の 發", 日機論 Vol.54 No.503, pp.1843-1947, 1988.
6. B. J. Azzopard : "Measurement of Drop Size." Int J. Heat Mass Transfer, Vol.22, pp.1245-1279, 1978.
7. B. E. Holting : "Cavitation Produced by Ultrasonics" Proc, Phys. Soc, 64B. pp.1245-1279, 1978.
8. 千葉近 : "Ultrasonic Spray", 山海堂.
9. 류정인, 정명진 : "디젤기관에서의 저질유 연소를 위한 기초연구" 충남대학교 공업교육연구소 논문집, 1991. 2.