

<논 문> SAE NO. 97370027

초음파연료공급장치를 이용한 EFI기관의 성능에 관한 연구(I)

— 초음파에 의한 연료의 물성변화를 중심으로 —

A Study on the Performance of EFI Engine Used Ultrasonic Energy Adding Fuel System(I)

— Attaching Importance to Fuel Characteristics for Ultrasonic —

윤 면 근*, 류 정 인**
M. K. Yoon, J. I. Ryu

ABSTRACT

This experimental study was performed to find fuel property variations of the ultrasonic energy adding gasoline and improve the spray characteristics of the multi-point injector for EFI engine.

The cause and effect of the characteristic improvement of the ultrasonic energy adding fuel was found out by the chemical structure analysis(NMR, IR), distillation and viscosity test.

The results are obtained that the chemical property of gasoline organization was changed aromatics to paraffins and branch index as the physical characteristics of gasoline were improved by ultrasonic energy. There were higher distillation and lower viscosity in ultrasonic energy adding gasoline.

주요기술용어 : Gasoline(가솔린), Ultrasonic energy(초음파에너지), fuel property(연료특성), NMR(핵자기공명분광법), IR(적외선분광법), Branch index(브랜치인덱스), Distillation(증류)

1. 서 론

최근 가솔린 기관에 대한 국제적 연구 동향은 총상급기연소, 직접분사식 가솔린기관의 개발 등 저공해, 고효율을 이루기 위한 연구가 계속되고 있고, 대체 연료의 개발 및 적용에 대한 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

기관에 대한 연구는 과거 고효율 측면이 강조 되어진데 반하여 오늘날 환경에 대한 관심도가 커짐과 동시에 에너지의 고갈이라는 측면에서도 연구¹⁾의 필요성이 새롭게 인식²⁾되고 있다.

본 논문은 현재 가장 많이 사용되고 있는 전자 제어 가솔린 분사기관에 적용하기 위한 초음파 연료 분사장치를 개발하고자 한다. 본 장치로 가솔린에 초음파 에너지를 조사하여 연료의 화학적 특성과 물리적 성질을 개방계에서 측정하고, 초음파 에너지 부가의 효과를 연료적 측면에서 해

* 정회원, 충남대학교 대학원

** 정회원, 충남대학교

석하여 추후 기술련의 분무 특성을 파악하고 실기관 적용시 성능 분석을 하기위한 기초 자료를 얻는 데 그 목적이 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 초음파

음파는 인간의 귀로 포착할 수 있는 가청음파($f=25\text{Hz}\sim 15\text{kHz}$)와 인간이 들을 수 없는 불가청음파로 나누며, 불가청음파는 다시 주파수가 낮은 초저음파($f < 25\text{kHz}$)와 주파수가 높은 초음파($f > 25\text{kHz}$)로 나누고, 초음파 중 $f > 1000\text{kHz}$ 의 초음파를 과초음파라 부른다³⁾.

초음파의 음속은 $c = \lambda f$ 와 같고 액체 매질을 통과할 때의 음파속도는 다음과 같다.

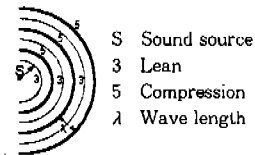
$$c = \left[\frac{\gamma}{\rho \beta} \right]^{1/2}$$

이때, γ 는 비열비율, ρ 는 밀도를, β 는 압축성을 나타낸다. 따라서 연료에 초음파를 가하면 음파의 전달은 밀도와 압축성에 관계되어진다.

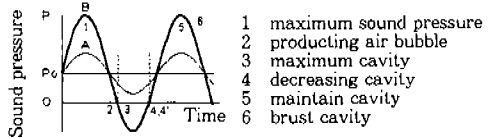
2.2 공동현상

초음파 진동자를 이용하여 연료에 직접적인 방법으로 초음파를 부가할 경우는 진동자 혼의 신속 진동으로 연료에 충격 하중을 가하게 되고 순수한 초음파 효과에 의한 공동현상⁴⁾이 발생한다.

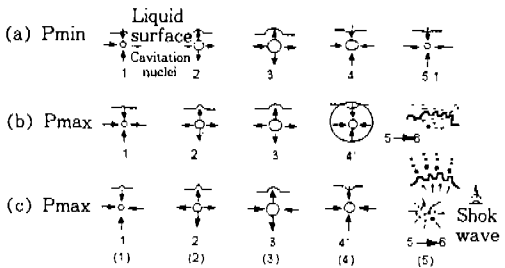
일반적으로 공동현상은 액체 중에 용존하고 있는 공기 또는 다른 가스가 액중에 가해지는 팽창력, 즉 감압력에 의해 공동을 만들고 집합, 성장 및 발달에서 압괴까지 일어나게 된다. Fig.1은 공동현상의 분열 모델을 설명하는 것으로 (A)는 점 도는 구형 음원에서 매질이 팽창과 압축을 반복하여 소밀파를 형성하는 것을, (B)는 음압과 시간의 관계를 나타내는 것이고, (C)는 공동의 생성, 발달, 압괴가 일어나는 과정을 나타낸 것이다.⁵⁾ 그림에서 (a)의 경우는 음압차이가 적은 경우를 나타내고 이 때에는 공동이 생성된 후 발달하지 못하게 된다. (b)는 음압차이가 큰 경



(A) Compressional wave



(B) Cavitation behavior



(C) Liquid burst by Cavitation

Fig.1 Model of cavitation burst

우로 공동이 생성후 발달 압괴가 일어나는 경우를, (c)의 경우는 음압차이가 (b)보다 더 큰상태로 공동이 생성되어 압괴가 일어나며 동시에 충격파를 동반한 경우를 나타낸다.

2.3 공동현상과 압력 및 온도와의 관계

공동현상 발생시 공동이 극히 작은 경우의 온도 및 압력은 Noltingk⁶⁾에 의해 물의 경우 공기에 대하여 계산되었으며 이때 정수압을 p_1 , 액중 공기의 최초 압력을 p_0 , 최초액의 온도를 T_1 이라 할 때 기포의 크기가 극소로 되는 때의 온도 T 와 압력 P 를 계산하였다.

$$T = T_1(\gamma - 1) \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{-\frac{1}{\gamma}}$$

$$P = p_1(\gamma - 1)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

이때 γ 는 정압비열과 정적비열의 비이다. 따라

서 기포 내의 온도 및 압력은 수천 내지 수만 배⁹⁾가 되는 것으로 알려져 왔으며 이런 현상은 연료인 가솔린에서도 같은 결과가 예상되어지며 혼에 의한 충격 에너지와 국부적 온도 상승 및 압력 상승 효과가 연료의 분무에 영향을 미치게 된다.

2.4 유기분광학

핵자기 공명 분광법은 각각의 원자핵들이 독립적으로 자기장에서 분리된 낮은 에너지의 스핀 상태가 전자기 복사선을 흡수함으로써 높은 에너지의 스핀 상태로 전이한다는 핵자기 공명 이론을 이용한 것이며, 이는 핵이 외부자기장과 회전 자기장에 노출되었을 때 낮은 에너지 상태에서 높은에너지 상태로 전이가 일어나고 이때 흡수되어진 두 스핀 상태의 에너지차이는 수소의 경우 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta E &= h\nu = E_{-\frac{1}{2}} - E_{+\frac{1}{2}} \\ &= \mu_m \beta H_0 - (-\mu_m \beta H_0) \\ &= 2\mu_m \beta H_0\end{aligned}$$

$$\nu = \frac{2\mu_m \beta H_0}{h}$$

이때, h 는 프랑크상수, ν 는 진동수, β 는 핵 마그네톤, μ_m 은 입자의 자기모멘트, H_0 는 외부자기장의 세기를 나타낸다. 따라서 회전자기장의 세기를 일정하게 한 후 외부자기장의 세기를 천천히 변화시켜 낮은 에너지 상태의 핵을 높은 에너지 상태로 전이시켜가며 흡수되는 에너지를 측정하게 된다.

핵자기 공명 스펙트럼에서 흡수선의 위치는 자기장의 세기 즉 주파수가 일정할 경우 원자의 결합상태에 따라 달라지게 되는 현상으로 화학적 구조를 알 수 있게 된다.

적외선 분광법은 최근 비약적인 발전을 하고 있으며 분자의 작용기를 비교적 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 분자에 중간영역의 적외선(파장 = 2.5~15 μ m)에 해당하는 빛을 쬐어 주면 에너지가 작기 때문에 원자내의 전자가 전이를 일으키지 못하고, 대신 분자의 진동, 회전 및 병진과

같은 여러가지 분자운동을 일으키게되는데 이러한 진동을 일으키기 위해서는 결합의 종류 및 세기, 그리고 결합하고 있는 원자의 종류에 따라 각각 고유한 주파수에 해당하는 빛에너지를 흡수해야 한다.

따라서, 작용기 마다 독특한 흡수 스펙트럼을 가지고 있으므로 화합물의 구조를 해석할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 초음파 에너지 부가장치

초음파 에너지 부가장치 및 시료 채취는 Fig.2에서 보는 바와 같이 초음파 발생장치, 초음파 진동자와 혼으로 구성되어 있다.

시료 채취는 초음파에너지 부가시 연료가 대기 중에 노출된 상태에서 이루어졌다. 따라서 가솔린에 초음파 에너지를 부가할 경우 연료 안에 들어 있는 공기 또는 가스가 공동현상을 발생시키면서 국부적인 온도 상승에 의하여 대기중으로 방출되어 버리므로 시료의 화학적, 물리적 특성은

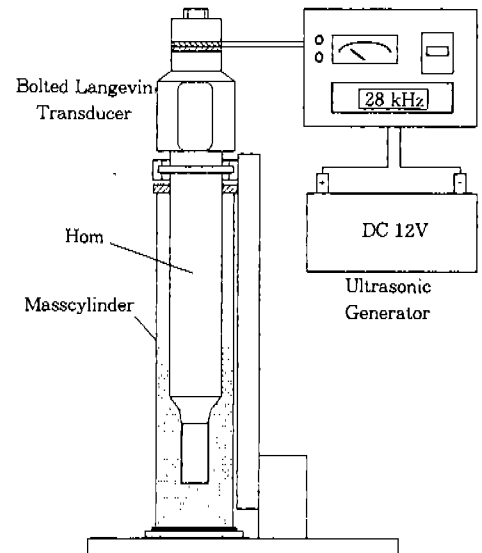


Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic energy adding system for chemical and physical experiment

역상만을 실험대상으로 하였다. Table 1은 시료 샘플을 나타낸 것으로서 초음파 에너지를 가하지 않은 상용괴솔린과 초음파 에너지를 부가한 시료를 나타내며 초음파 에너지 부가 시간은 가솔린 30ml당 5초에서 40초까지 매 5초씩 초음파 에너지 부가 시간을 증가시키면서 가솔린 시료를 채취하였다.

3.2 화학구조 분석장치

Fig.3은 핵자기공명분광기의 개략도이며 본 실험에 사용한 분광기는 Varian GEMINI 200을 사용하였고 이 분광기의 진동수는 200MHz이다. 시료의 희석 촉매로는 가장 일반적인 CDCl₃를 사용하였고, 영점조정을 위하여 TMS를 사용하였다. NMR cell에 시료를 넣고 외부자장과 cell

Table 1 Test samples about ultrasonic adding times

Ultrasonic adding time	Sample	Ultrasonic adding time	Sample
Non-ultrasonic	Non.	-	-
5 sec	U 5	10 sec	U10
15 sec	U15	20 sec	U20
25 sec	U25	30 sec	U30
35 sec	U35	40 sec	U40

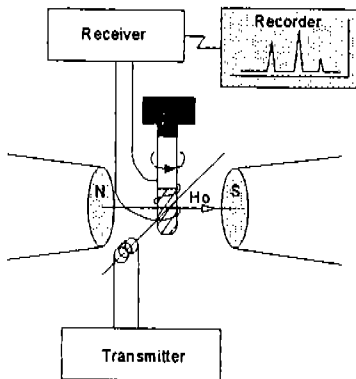


Fig.3 Schematic diagram of nuclear magnetic resonance spectrometer

을 회전시킴으로써 분자에 에너지를 공급하고 흡수되어지는 신호를 검출한 후 FFT처리를 하여 흡수 스펙트럼을 얻는다.

Fig.4는 적외선분광기의 개략도로 분자는 중간영역의 적외선에 의하여 작은에너지를 받아 진동(진동방식은 stretching과 deformation으로 구분됨)을 일으키게 되며 이를 측정하여 분자구조를 해석하게 된다.

본 실험에 사용된 적외선 분광기는 FT-IR로 Bio-rad digilab division FTS-80을 사용하였고 시료는 희석하지 않은 상태로 실험하였으며 측정 시간이 대단히 빠르고 이러한 분해능을 가지고 있다는 장점이 있다. 그리고 NaCl로 된 원판모양의 cell을 사용하였다.

3.3 물리적 분석장치

시료의 물리적 특성분석을 위하여 시료의 증류 실험과 점도를 측정하였으며 증류시험은 ASTM 증류시험법⁷⁾을 기준으로 하여 초자기기로 제작하였다.

시료의 점도측정은 구마찰 점도계를 사용하여 구가 낙하하는 시간을 측정하여 점도로 환산하였으며, 20°C에서 측정하였다.

점도환산식은 다음과 같다.

$$\mu = K'(\rho_s - \rho_l)t, \text{ cp}$$

로 K'는 보정계수로 0.00809, ρ_s는 구의 밀도를,

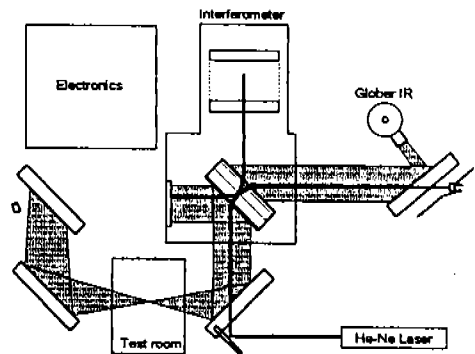


Fig.4 Schematic diagram of Fourier transform infrared spectrometer

ρ 는 시료의 밀도로 계산되고 사용구의 지름은 15.81mm이고 질량은 4.586g이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분자구조분석

Fig.5은 초음파를 가하지 않은 가솔린의 핵자기공명 스펙트럼이고, Fig.6은 초음파 에너지를 5초 부가한경우의 핵자기공명 스펙트럼이다. 이때 가로축은 작용기의 흡수위치(spectral region, ppm)를 나타내고, 세로축은 흡수 픽의 높이를 나타낸다.

두 스펙트럼에 대한 분석은 Table 2에서와 같이 핵자기공명법에 의하여 얻어진 스펙트럼에 대

한 각 작용기의 종류와 위치를 나타낸 것으로 부터 각 작용기의 상대 비교를 할 수 있다.

두 스펙트럼의 경우(Fig.5와 6)를 비교하면 스펙트럼의 위치는 같은 것으로 보아 작용기의 변화는 거의 일어나지 않고 있으며 상대강도의 차이와 각 작용기의 누적 상대강도의 차이를 확인할 수 있다.

따라서 초음파 에너지 부가시 초음파에너지가 연료에 공동현상을 일으켜 화학적 변화를 가져온 것이다.

각 작용기의 분포비율은 누적강도의 양을 작용기에 포함되어 있는 수소의 갯수로 나눈값의 비

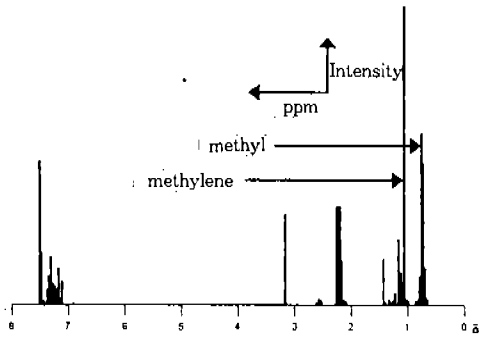


Fig.5 NMR spectrum of non-ultrasonic energy adding gasoline

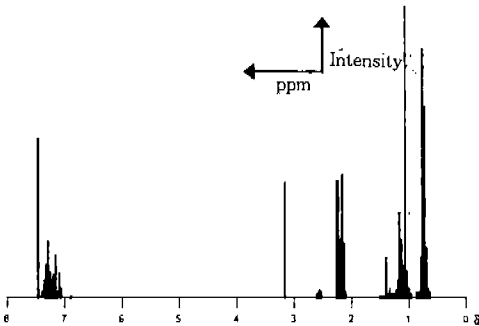


Fig.6 NMR spectrum of ultrasonic energy adding gasoline(5sec)

Table 2 Organic functional groups of NMR

	Proton type	Spectral region	Integral designation	Total No.C
Aromatic	H-	6.6~8.0	A Ring-aromatic	KA
	CH ₃ - CH ₂ -R ^b ↑	2.0~3.5	B α -methyl	K(B/3)
Paraffin	CH ₃ CH ₃ CCH ₂ CH ₂ CH ₃ H-	1.5~2.0	C methine	KC
	CH ₃ CH ₃ CCH ₂ CH ₂ CH ₃ H			
	CH ₃ - ↓ ↓ CH ₃ CCH ₂ CH ₂ CH ₃ H	1.0~1.5	D methylene	K(D/2)
	CH ₃ - ↓ ↓ CH ₃ CCH ₂ CH ₂ CH ₃ H	0.6~1.0	E methyl	K(E/3)

로 표시되며 가솔린 속에 포함되어 있는 작용기의 비율^{8),9)}을 구할 수 있고, 브랜치인덱스는 E와 D의 스펙트럼의 강도비로 나타낸다.

$$BI(\text{branch index}) = \frac{\text{메틸 픽의 높이}}{\text{메틸렌 픽의 높이}}$$

$$\text{Aromatic} = \frac{(A+B/3) \times 100}{(A+B/3) + (C+D/2+E/3)}$$

$$\text{Paraffin} = \frac{(C+D/2+E/3) \times 100}{(A+B/3) + (C+D/2+E/3)}$$

위식들은 석유제품을 구별하기 위한 방법으로 연료에 수 많은 성분들이 존재하고 각각의 물질은 전체에 비해 그양이 매우 작으므로 작용기의 양적비로 연료를 구별할 수 있다.⁹⁾

적외선 분광법은 핵자기공명법에서 구한 브랜치인덱스값과 각작용기로 부터 계산된 아로메틱과 파라핀의 부피비를 Table 3에 나타내었다.

여기서 가솔린에 초음파 에너지를 부가한 경우 공동현상에 의해 연료의 화학적 구조가 바뀔을 알 수 있으며 초음파에너지 부가 시간에 따라 아로메틱과 파라핀의 비율과 브랜치인덱스가 변화되는 것을 알 수 있다.

초음파에너지 부가의 경우가 부가하지 않은 가솔린에 비하여 아로메틱의 비율은 감소되므로 브

Table 3 Total volume percent and branch index of samples

	Volume percent(%)		Branch Index	
	Aromatics	Paraffins	BI of NMR	BI of IR
Non	52.8	47.2	0.58	0.60
U5	50.1	49.9	0.76	0.71
U10	48.5	51.5	0.91	0.89
U15	48.5	51.5	0.86	0.71
U20	49.1	50.9	0.99	0.92
U25	47.5	52.5	0.71	0.70
U30	50.6	49.4	0.85	0.82
U35	51.9	48.1	0.76	0.76
U40	49.7	50.3	0.78	0.79

랜치인덱스는 증가한다. 이는 가솔린에 함유되어 있는 복잡한 구조인 고리모양의 탄화 수소계가 초음파에너지를 받음으로써 사슬 모양의 탄화 수소계로 바뀌어 진다는 것을 확인할 수 있다.

Fig.7와 Fig.8은 각작용기의 부피 퍼센트를 나타낸 것이다. 초음파 에너지 부가 시간에 따라 일정한 감소율로 나타나지않은 이유는 각 작용기마다 결합에너지(A<B<C<D<E)가 다르기 때문에 낮은 결합력을 가진것이 먼저 분해되어지고 높은 에너지의 것이 나중에 분해되기 때문이다. 그리고 저분자 탄화수소계(C, D or E)의 경우는 분해 후 일부는 액상으로 존재하지 못하고 증발하므로 전체 부피가 감소되므로 각 작용기의 부피비는 증가와 감소를 주기적으로 반복한다.

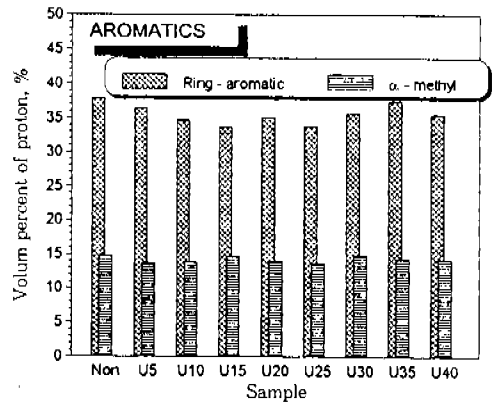


Fig.7 Volume percent of the aromatics

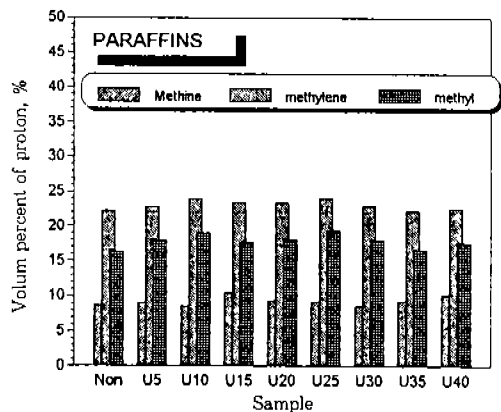


Fig.8 Volume percent of the paraffins

따라서 증가와 감소를 주기적으로 반복한다. 따라서 연료에 초음파에너지를 부가할 경우에는 분사 직전에 시행하는 것이 바람직하며 적절한 부가시간이 필요하다.

4.2 물리적 특성분석

Table 4는 시료에 대한 ASTM 증류시험 및 점도를 나타낸것으로 초음파에너지를 부가한 가솔린의 경우가 초유점, 10%, 30%의 증발량에 대하여 더 낮은 온도에서 증발을 일으키는 것은 연료의 시동성 및 가속성이 일반 가솔린에 비하여 뛰어나기 때문이다. 점도도 낮은 점성을 보이고 있으며 화학구조 분석과 비교하면 그 크기 및 정확도의 차이는 있으나 일치하는 경향이다. Fig.9은 화학분석을 통한 아로메틱과 점도를 그

Table 4 Distillation and viscosity of samples

Sam.	Distillation (°C)				Viscosity c-poise
	IBP	10%	30%	60%	
Non	41.4	57.4	77.2	113.7	0.231
U 5	39.0	55.8	72.4	115.0	0.220
U10	36.4	53.3	70.4	113.2	0.219
U15	32.3	53.0	70.2	113.8	0.218
U20	31.3	53.0	73.2	110.8	0.215
U25	38.4	56.1	76.2	116.6	0.218
U30	36.0	56.1	75.1	114.3	0.219
U35	31.0	55.3	74.0	113.9	0.217
U40	35.2	56.0	75.4	114.4	0.218

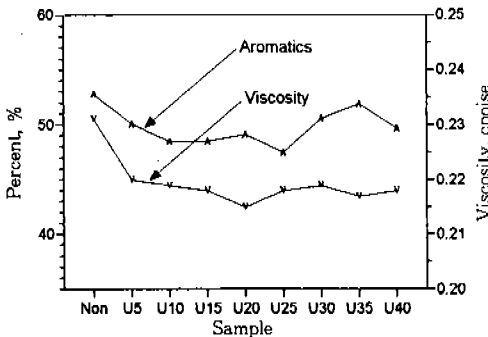


Fig.9 Aromatics volume percent and viscosity

래프로 나타낸것으로 두 측정값의 경향이 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

따라서 복잡한 화학적 분자구조를 분석하지 않아도 간단한 증발실험 또는 점도측정을 거쳐 연료의 특성을 예측할 수 있다. 본 연구에서 얻은 결과는 연료의 특성 변화조사 결과 분자구조의 변화와 증발성의 향상, 점성의 감소로 연료의 분무특성이 향상 될 것으로 예측된다.

5. 결 론

본 연구는 전자제어분사식 가솔린기관에 적용하기 위하여 초음파에너지가 가솔린의 특성에 미치는 영향에 대하여 알아 보기 위해 계방계에서 시료를 채취하여 유기분광학, ASTM 증류시험법 및 점도 측정용 초음파 부가시간에 따라 측정하고 상용가솔린과 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파에너지를 가솔린에 부가할 경우 가솔린에 포함된 일부의 링 구조가 사슬구조로 전이 된다.
- 2) 브랜치인덱스의 경우 초음파에너지를 부가함으로써 커지는 것을 확인 할 수 있었다.
- 3) 증류시험결과 초음파에너지 부가시 시동성 및 가속성이 뛰어나는 반면 증기폐쇄현상이 커지게 되므로 연료분사의 경우 분사직전에 초음파에너지를 부가하는 것이 바람직하다.
- 4) 점도측정결과 초음파에너지 부가시 가솔린의 점성이 더 낮아짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. K. Horie & K. Nishixzawa, "Development of a high fuel economy and high performance four-valve lean burn engine", International Conference IMechE, London, C448/014, 1992
2. A. K. Oppenheim, "The future of combustion in engines", International Con. IMechE, London, C448/022, 1992

3. 류정인, “액체연료의 미립화기술(1)” 자동차공학회지 Vol.15, No.4, pp. 59~68, 1993
4. 류정인, “액체연료의 미립화기술(2)”, 자동차공학회지 Vol.15, No.5, pp. 31~41, 1993
5. 島川正憲, “超音波工學” 工業助詞會, pp.20~21, 1975
6. B. E. Noltingk & E. A. Neppiras, “Cavitation produced by ultrasonics : theoretical conditions for the onset of cavitation”, Proc. Phys. Soc., 64B 032, 1951
7. American Society for Testing Materials, Standard Specification for Distillation Equipment, E133-86
8. Lalji Dixit, R B Gupta, P V Dogra, Pra-deep Kumar & P L Gupta, Hydrocarbon type Distirbution and Structural Parame-ters of Gasolines by ¹H-NMR and IR Spectroscopy, Indian Journal of Technolo-gy Vol.23, pp. 315~317, August 1985
9. Mark E. Myers, Jr., Janis Stollsteimer & Andrew M. Wims, Determination of Hy-drocarbon Type Distribution and Hy-drogen/Carbon Ratio of Gasolines by Nu-clear Magnetic Resonance Spectrometry, Analytical chemistry, Vol. 47, No. 12, pp. 2010~2015, October 1975