

## 초음파 개질 경유의 점도 및 표면장력 측정을 이용한 발열량 직접 계산

A Direct Calculation of Higher Heating Values of Ultrasonic Reformed Diesel Fuels  
by Using Their Viscosity and Surface Tension Measurements

이병오\* · 류정인\*\*

B. O. Lee, J. I. Ryu

### Abstract

The objective of this study is to develop the new equations for the calculation of higher heating values(HHVs) of reformed diesel fuels by ultrasonic treatment. Therefore, higher heating values of reformed diesel fuels by ultrasonic treatment are determined experimentally and calculated from their viscosity and surface tension measurements. The HHVs of the fuels are supposed to be a function of viscosity(Pa · s) and surface tension(N/cm). The equations developed for the samples represent the correlation obtained by means of regression analysis. The HHVs calculated by developing new equations using viscosities shows the differences from the measured values ranging from -0.66 to 1.19 % and the correlation coefficient was -0.9411. The HHVs calculated by developing new equations using surface tensions showed the differences from the measured values ranging from -0.70 to 1.51 % and the correlation coefficient was 0.9999. The viscosity and the surface tension are characteristic properties of ultrasonic reformed diesel fuels for developing new formulae.

주요기술용어 : Higher Heating Value(고위발열량), Viscosity(점도), Surface Tension  
(표면장력), Correlation coefficient(상관계수), Regression analysis(회귀분석)

### 1. 서 론

일반적으로 연료의 연소분석을 위한 연료특성치들은 편의상 물리적 특성, 화학적 특성 및 열적 특성치로 구분된다. 물리적 특성에는 점도, 표면장력, 밀도, 유동점, 비점, 비등점, 빙점 및 굴절율 등이 있으며, 화학적 특성에는 화학구조, 발

열량, 물 및 잔류 침전물, 발화성 및 열분해 생성물 등이 있다. 끝으로 열적 특성으로는 증류온도, 열분해점, 잔류탄소, 비열량, 열전도도 등이 포함된다.

이중 화학적 특성인 연료의 발열량은 연료의 단위중량(g)당 연료가 완전연소할 때 발생하는 열량으로, 발열량 측정에는 크게 화학적 분석 방법과 실험측정 방법으로 이용된다. 화학적 분석 방법에는 원소분석에 의한 방법과 공업분석에 의한 방법이 있으며, 실험측정 방법에는 열량계에 의한 방법이 있다. 이중 화학적 분석 방법인 원소 분석에 의한 방법은 연료중에 포함되어 있는 성

\* 충남대학교 기계공학과 대학원

\*\* 충남대학교 기계공학과

분들을 화학적 조성분석, 즉 원소분석 결과를 이용하여 이론적인 발열량을 산출하는 방법으로 탄소, 수소, 산소, 유황, 인, 질소 등의 성분을 분석하여 발열량을 구하는 방법으로 이들 성분들의 중량비를 알기 위해 탄소정량, 수소정량, 황분정량, 질소정량, 인정량 및 산소정량이 전제되어야 할 뿐만 아니라 산소성분이 어떠한 형태로 존재할 것인가에 대한 가정이 이루어져야 한다. 공업 분석에 의한 방법은 간이적으로 성분을 분석하는 방법으로 비교적 많이 사용되며 누구나 비교적 쉽게 분석할 수 있을 정도로 간편하나 이것 또한 휘발분, 수분, 회분 및 고정탄소의 성분 분석 결과를 토대로 이루어지기 때문에 수분정량, 회분정량, 휘발분정량 및 고정탄소정량에 의해 이들의 중량비를 알고 있어야 한다.

열량계에 의한 방법은 다소 비용이 많이 들뿐만 아니라 생성산의 열보정, 점화선의 열보정, 젤라틴으로 만든 캡슐의 열보정 등과 같은 열보정이 이루어져야 한다.

이처럼 데이터의 화학적 분석내지 봄베 열량계를 필요로 하는 실험 측정에 의한 발열량 측정방법은 대단히 복잡할 뿐만 아니라 비용도 비교적 많이 들기 때문에 이 방법들 대신, Demirbas는 밀도 및 점도 측정과 같은 단순한 물리적 측정이나 요오드값, 가수분해값과 같은 화학적 측정을 이용하여 식물유나 알콜, 경유, 알칸과 같은 일부 연료의 열량을 상대적으로 비교적 쉽게 계산하였다.<sup>1)-3)</sup>

따라서, 본 연구에서는 초음파 에너지를 조사하여 디젤유를 개질한 다음, 이 개질된 디젤유의 점도 및 표면장력 측정을 이용하여 디젤유의 고위발열량을 계산할 수 있는 새로운 식을 개발하는데 목적이 있다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 초음파의 지향성 및 공동현상

초음파는 구형파와 비교하여 일정방향으로 강하게 방사하는 성질을 가지고 있는데 이 성질을 지향성(directionality)이라고 한다. 이 지향성에 의해 크기가 같은 구형파보다 훨씬 큰 방사압을 가지게 되므로, 초음파를 초점에 집속하면 매우 큰 음압강도를 만들 수 있게 된다. 또한 이 방사압은 매우 크기 때문에 음압이 큰 소밀파를 발생시

키며 이 소밀파에 의해 매질 입자에 매우 큰 가속도를 줌으로서 액중에 용존하고 있는 공기나 다른 가스가 액체에 가해진 팽창력 또는 감압력에 의해서 팽창하여 큰 부압을 일으켜 공동을 만드는 현상인 초음파 공동현상(ultrasonic cavitation)이 발생하게 된다. Fig. 1은 캐비테이션 분열모델을 나타낸 것으로서, 초음파를 조사하면 액중에 용존하고 있는 기체 분자가 집합, 성장, 발달 및 압파가 되며, 기포가 압파가 되는 순간에 매우 큰 순간압력의 충격파가 발생하여 액체 내에 격렬한 잡음이 발생하며 액체가 충돌하여 합쳐지고 파파되고 다시 합쳐지면서 방사압이나 직진류도가 더해져 액면이 발달하여 솟아오르며 유괴도 생기면서 주파수 고유의 가느다란 분무가 발생된다.<sup>4)-6)</sup>

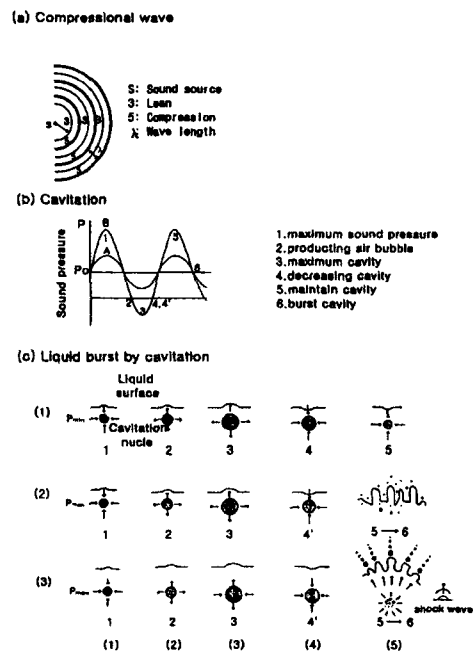
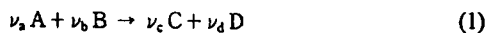


Fig. 1 Model of liquid division by cavitation

한편, 초음파 에너지가 계속하여 부가되는 경우 이미 공동현상으로 인하여 생성된 기포는 수축하면서 온도 및 압력이 상승하는 것으로 알려져 왔다.<sup>7)</sup> 그러므로 이런 현상은 경유에서도 같은 결과가 예상되어지며, 혼에 의한 충격에너지와 국부적 온도상승 및 압력상승 효과가 연료에 작용하여 연료를 개질하게 된다.

2.2 발열량

연료가 산소와 반응하여 다량의 열을 방출하는 발열반응에서 발생하는 열량은 상태(조성, 온도, 압력)에 따라 다르기 때문에 표준상태의 조건에서 반응하여 완전 연소가 되고 다시 표준상태로 돌아간 후 외부로 방출된 열량을 발열량이라 한다. 표준상태는 1기압, 25℃로 정의하여 사용하며 아래와 같이 반응식을 표시할 경우 발열량은 각 생성 엔탈피(enthalpy of formation)의 차로 구해진다.



$$\text{Heating value} = \sum_{i=1}^n (\nu_c C + \nu_d D) - \sum_{i=1}^n (\nu_a A + \nu_b B)$$

여기서, 반응물은 연료와 산소이고 생성물은 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O이다. 한편, 생성물 중에 포함된 H<sub>2</sub>O의 상태에 따라 발열량의 구분이 달라지는데 기체상태로 방출되는 경우는 저위발열량(lower heating value)이라 하고 액체상태로 배출되는 경우를 고위발열량(higher heating value)이라 한다.

열량표시는 단위질량(kg, 기체는 m<sup>3</sup>)의 물질이 완전 연소하였을 때 방출되는 열량으로 단위는 Kcal/kg 으로 표시한다.

2.3 회귀분석 및 상관분석

회귀분석은 자료를 매개체로 하여 관련된 독립변수와 종속변수간의 상호 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 자료로부터 수학적 관계식을 추정하고 분석하는 통계적인 분석 방법으로, 회귀식을 추정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 실제 측정치와 회귀식에서 구한 예측치와의 차를 제공한 값의 합이 최소가 되게 하는 회귀식이 가장 좋은 회귀식으로 이를 결정하는 기준인 최소자승법이 가장 많이 이용되고 있다.

또한 회귀분석은 종속변수, 독립변수가 각각 하나인 모형을 분석하는 경우를 단순회귀분석이라 하며 이들 변수간에는 선형적인 관계가 있다. 한편, 종속변수가 하나이고 독립변수가 2개 이상인 모형을 분석하는 경우를 중회귀분석이라 하며 중회귀분석의 특수한 형태로서 독립변수가 비록 1개이지만 독립변수와 종속변수간의 관계가 선형인 아닌 독립변수끼리의 곱이나 지수 등의 형태와 같은 비선형의 경우<sup>9)</sup>가 있다.

종속변수가 k개의 독립변수와 선형으로 연관되어 있는 경우에 이들간의 회귀식<sup>9)</sup>은 다음과 같이 계산된다.

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k \quad (2)$$

여기서,

Y : 종속변수

X : 독립변수

k : 독립변수들의 수

a, β : 모수

상관분석은 확률변수들 사이의 상호관련성을 자료를 이용하여 연구하는 통계적 분석 방법으로 한 변수의 값이 다른 변수의 값과 밀접한 관련이 있는 정도인 상관관계를 측정하는 기법으로, 변수가 2개이면 단순상관분석, 변수가 3개 이상이면 중상관분석이라 한다.

따라서 상관분석은 한 변수를 기초로 하여 다른 변수를 예측하는데 그 목적을 둔 회귀분석과는 차이가 있다. 즉, 회귀분석은 독립변수는 조절되는 변수로서 확률변수가 아니고 종속변수를 이러한 독립변수의 함수로서 설명하려는 것이 목적인 반면, 상관분석에서는 두 변수가 모두 확률변수이며, 이러한 확률변수의 직선적인 관련성에 대해 두 변수사이에 존재하는 상호관계와 방향과 정도를 나타내는 상관계수를 통하여 설명이 될 뿐만 아니라 회귀분석을 해석하는데 유용하게 사용된다.

단순상관계수는 표본공분산을 독립변수와 종속변수의 표준편차로 나눈 것으로 아래의 식<sup>10)</sup>으로 계산된다.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} \quad (3)$$

여기서,

S<sub>xy</sub> : 표본공분산

S<sub>xx</sub> : 독립변수의 표본편차

S<sub>yy</sub> : 종속변수의 표본편차

한편, 종속변수와 k개의 독립변수 전체 사이의 동시적 결합도를 측정하기 위해서는 중상관계수를 이용하여야 한다. 일반적으로 총자승합에 대한 회귀자승합의 비율은 독립변수와 종속변수간의 상관계수를 자승한 값과 같다. 따라서 중상관계수<sup>10)</sup>는 아래의 식으로부터 계산된다.

$$SS_{reg} = \beta_1 \sum x_{1,y} + \dots + \beta_k \sum x_{k,y} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{\frac{SS_{reg}}{\sum y^2}} \quad (5)$$

여기서,

k : 독립변수들의 수

SSreg : 회귀자승합

$\sum y^2$  : 총자승합

r : 중상관계수

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 초음파 연료공급장치

Fig. 2는 초음파 연료공급장치의 개략도로서 크게 초음파 발전장치와 연료에 초음파에너지를 조사하는 부가장치로 구성되어 있다.

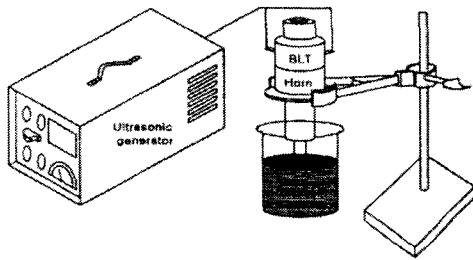


Fig. 2 Ultrasonic energy adding system on diesel oil.

초음파 발전장치는 초음파 진동자에 전기신호를 가하여 기계적 진동신호로서 초음파 출력을 내는 장치로 고주파를 발전하여 증폭부에 가해주는 발전부, 발전된 주파수로 진동자를 구동시킬 수 있는 전력으로 증폭해주는 증폭부, 증폭된 구형파를 사인파로 바꾸어 임피던스를 정합하여 진동자에 가해주는 정합부로 구성되었다. 초음파에너지 부가장치는 연료의 무화를 최대한으로 하여 연료에 공동현상이 극대화될 수 있는 구조로서 볼트체결형 랑주빈 진동자와 혼 등으로 구성되어 있다. 전원 AC 110V로 초음파 발전기를 작동시키면 볼트체결형 랑주빈 진동자 및 혼이 28KHz로 진동하면서 메스실린더 내의 연료에 초음파에너지를 조사하게 된다.

실험에 사용된 시료의 수는 총 7개로서, 1개는 시판경유이고, 6개는 초음파에너지 부가연료이다. 여기서, 6개의 초음파에너지 부가연료의 제조는 초음파에너지 부가방법에 따라 개방계에서 6개의 메스실린더에 시판 경유 약 30cc를 채우고, 초음파에너지 부가장치를 이용하여 초음파 부가시간

을 각각 30, 60, 90, 120, 150, 180초 부가하여 제조하였다.

#### 3.2 열량계

고위발열량(HHV)은 단일열량계(LECO AC-300)를 사용하여 측정하였다. 연료의 발열량, 점도 및 표면장력 측정에 사용된 7개의 시료는 원칙적으로 실제조건에 가깝게 하기 위해서는 밀폐계에서 시료채취가 이루어져야 하지만, 밀폐계에서 시료채취를 하려면 우선 조건이 매우 까다롭고, 고가의 장비를 필요로 하기 때문에 개방계에서 채취를 하였다. 그러므로, 경유에 초음파 에너지를 부가할 경우 연료 안에 들어있는 공기 또는 가스가 공동현상을 일으키면서 극부적인 온도상승에 의하여 대기중으로 방출되기 때문에 시료의 발열량, 점도 및 표면장력은 액상만을 대상으로 하였다.

#### 3.3 점도 및 표면장력

점도는 대기압 상온하에서 로터리 점도계(HAAKE VT500)를 사용하여 측정하였다. VT500 점도계는 측정하는 동안에 연료의 온도를 일정하게 조절하기 위하여 항온조와 연결되어 있으며 기본 원리는 동심축을 갖는 두 개의 실린더에서 하나는 회전하고, 다른 하나는 정지 상태에 있도록 하여 두 실린더 사이에 점도를 측정하고자 하는 시료를 넣어 하나의 실린더를 회전시킴으로써 발생하는 토오르크를 측정하여 점도를 계산하는 방식으로 이루어져 있다.

점도의 측정은 아래의 식을 이용하였다.

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (6)$$

VT500점도계를 20℃로 설정한 다음, 7개의 시료의 점도를 3회 측정하여 평균하였다.

표면장력은 대기압 상온(20℃)하에서 표면장력계(쥬메이씨 type 3010)를 사용하여 측정하였는데, 이 표면장력계는 가는 금속링을 수평으로 매달고 규정 실험시료의 표면에 접촉시키고 서서히 들어 올리면, 액체시료는 금속링에 부착되어 금속링이 아랫방향으로 인장된다. 금속링을 끌어 올렸을 때, 시료의 액체표면으로부터 링이 떨어지는 순간의 값을 측정하여 아래식을 이용하여 표면장력을 구하였으며 3회 측정하여 평균값을 취하였다.

$$T = \frac{F}{2\pi(r_1+r_2)} \quad (7)$$

$$F = 2\pi(r_1+r_2)T$$

여기서,

- T: 표면장력
- F: 금속링과 액체표면이 떨어지는 순간에 필요한 힘
- r<sub>1</sub>: 금속링의 내반경
- r<sub>2</sub>: 금속링의 외반경

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 점도에 의한 발열량 계산

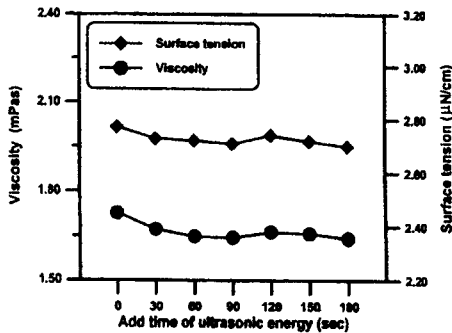


Fig. 3은 초음파에너지 부가에 따른 시료의 점도 및 표면장력 변화를 측정된 결과이며 Fig. 4는 단열열량계로 측정된 시료의 고위발열량과 본 실험의 점도범위(1.641 ≤ μ ≤ 1.726)에 대한 Demirbaş의 계산식 (8)과 본 연구에서 개발한 계산식을 비교하여 나타낸 그래프로써 점도를 이용한 계산식은 1개의 독립변수에 대해 중속변수사이의 관계가 선형인 단순회귀분석을 이용하여 개발한 단순회귀식과 독립변수의 곱으로 나타난 비선형의 모양은 중회귀모형의 특수형태이기 때문에 중회귀분석을 사용하여 개발한 중회귀식은 다음과 같다.

$$HHV = 46.263 - 0.329 v \quad (8)$$

여기서, HHV : 고위발열량(kJ/g)

단위환산(1kJ/g=0.23885kcal/g)

v : 점도(mm<sup>2</sup>/s)

ρ : 밀도(0.826g/cm<sup>3</sup>, 20℃)

$$HHV = 20907.1597 - 5858.5142 \mu$$

$$HHV = -0.4162673 + 18913.3942 \mu - 7334.161596 \mu^2$$

여기서, HHV : 고위발열량(kcal/kg)

μ : 점도(mPa.s)

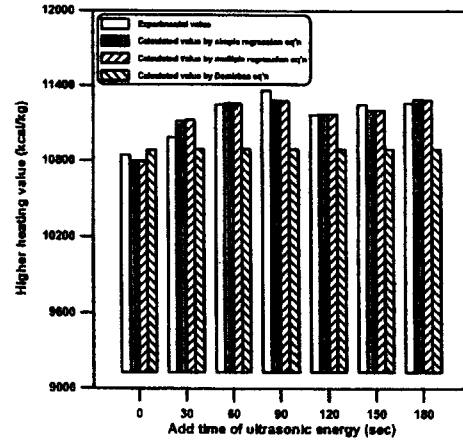


Fig. 4 Comparisons of experimental HHVs and calculated HHVs from viscosity of samples

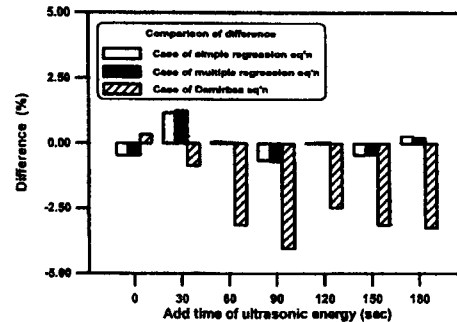


Fig. 5 Differences between experimental HHVs and calculated HHVs from viscosity of samples

Fig. 5는 고위발열량의 측정값과 점도의 함수로 표시된 계산식을 이용한 계산값들과의 차이를 비교한 것으로서 Demirbaş계산식의 경우 초음파에너지 미부가시에만 측정값보다 약간 높게 나타났고 초음파에너지 부가시에는 측정값보다 모두 작게 나타났으며 이들 범위는 -4.08~+0.36%으로 다소 큰 반면, 본 개발식의 경우 단순회귀식 및 중회귀식 모두 초음파에너지 부가시간에 따라 일부는 측정값보다 작게 나타났으며 단순회귀식의 범위는 -0.66~+1.19%, 중회귀식의 범위는 -0.71~+1.26%으로 상당히 작게 나타났다. 따라서 Demirbaş식을 본 실험의 점도범위내에 적용시키기에는 다소 무리가 있다고 판단된다. 한편 점도

에 대한 본 개발식 모두 측정값과 약간의 차이를 보이고는 있지만 전반적으로 잘 일치하고 있을뿐만 아니라 이들 개발식 사이에서 차이를 거의 보이지 않았다.

Fig. 6은 산점도와 상관계수에 대한 관련성을 나타낸 그래프로서, 실선은 회귀분석을 이용하여 개발한 점도에 대한 표준회귀계산식이고 산점도는 열량계로 측정된 시료의 고위발열량을 나타낸 것이다.

일반적으로 표본회귀선이 각 측정치들을 얼마나 잘 나타내고 있는가를 측정하는 적합도 측정에 대한 방법으로 추정표준오차로 측정하는 절대평가방법과 결정계수로 측정하는 상대평가방법이 있다. 절대평가방법 이용시 추정표준오차는 측정치의 값에 따라 달라지므로 별도로 분석된 여러 회귀분석결과의 적합도를 직접 비교할 수 없는 단점이 있어 이러한 문제점을 해결하기 위해 적합도의 측정방법을 개선할 필요가 있기 때문에 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선한 결정계수를 이용하는 상대평가방법<sup>11)</sup>을 이용하였다. 결정계수  $r^2$ 는 측정치의 총변동에 대한 회귀방정식에 의해 설명된 변동의 비율로 결정계수의 값  $r^2$ 이 1에 가까우면 가까울수록, 실제측정치들이 회귀선을 중심으로 밀집되어 있는 것을 의미한다. 결정계수  $r^2$ 는 상관계수  $r$ 을 제곱한 값으로도 표현이 가능한데, 단순회귀식의 경우 결정계수  $r^2 = 0.8857(=0.9411 \times 0.9411)$ 로서 발열량 변동의 약 88.6%를 회귀식이 설명할 수 있고, 약 11.4% 정도의 발열량 총변동은 설명할 수 없는데, 이는 분석에 포함되지 않은 변수들에 의한 것이거나 또는 내재된 확률적인 요인에서 기인한 것이다.<sup>11)</sup> 중회귀식의 경우 중결정계수는 독립변수의 수가 증가함에 따라 잔차의 제곱합이 감소하므로 증가하는 문제점이 있기 때문에 이를 보완하기 위하여 총변동뿐만 아니라 각 변동의 자유도도 함께 고려한 조정중결정계수(adjusted coefficient of multiple determination)를 이용하였으며 조정중결정계수는 다음과 같이 정의된다.<sup>11)</sup>

$$\bar{r}^2 = 1 - (1 - r^2) \left( \frac{n-1}{n-k-1} \right)$$

여기서,  $\bar{r}^2$  : 조정중결정계수  
 $r^2$  : 중결정계수  
 $k$  : 독립변수의 수

조정중결정계수  $\bar{r}^2=0.9994$ 로서 발열량 총변동의 약 99.9%를 회귀식이 설명할 수 있어 중회귀분석을 이용하여 개발한 계산식이 단순회귀식보다 더 좋다고 할 수 있다.

또한 이들 변수관계의 강도나 밀접도를 나타내는 상관계수는 단순회귀식의 경우  $r = -0.9411$ , 중회귀식의 경우  $r=0.9999$ 로 둘 다 거의 절대값 1에 가깝게 나타난 것으로 보아 이 두 변수사이에는 관련성이 매우 강할 뿐만 아니라 단순상관계수 ( $r = -0.9411$ )보다 중상관계수( $r=0.9999$ )가 좀더 밀접도가 좋음을 알 수 있다.

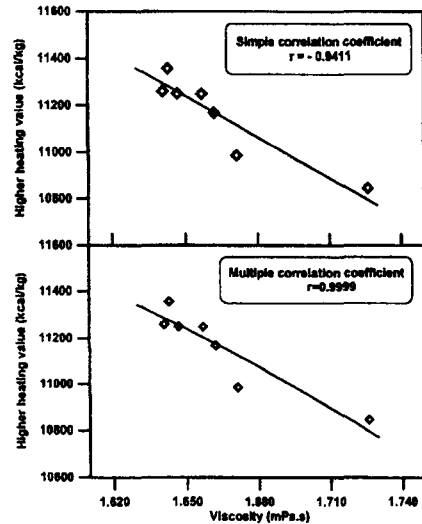


Fig. 6 Relation of scatter diagram and regression line

#### 4.2 표면장력에 의한 발열량 계산

Fig. 7은 고위발열량에 대한 시료들의 측정값과 본 실험의 표면장력범위( $2.7 \leq \sigma \leq 2.773$ )에 대해 본 연구에서 개발한 계산식을 비교하여 나타낸 그래프로서 1개의 독립변수에 대해 종속변수사이의 관계가 선형인 단순회귀분석을 이용하여 개발한 단순회귀식과 독립변수의 곱으로 나타난 비선형의 모양이 중회귀모형의 특수형태이므로 중회귀분석을 사용하여 개발한 중회귀식은 각각 다음과 같다.

$$HHV = 28601.5325 - 6395.073 \sigma$$

$$HHV = -0.0007 + 14508.044 \sigma - 3818.91 \sigma^2$$

여기서, HHV : 고위발열량(kcal/kg)

$\sigma$ : 표면장력( $\mu\text{N/cm}$ )

Fig. 8은 고위발열량의 측정값과 표면장력의 함수로 표시된 계산식을 이용한 계산값들과의 차이를 비교한 것으로서 단순회귀식 및 중회귀식 모두 초음파에너지 부가시간에 따라 일부는 측정값보다 작게 나타났다. 단순회귀식의 차이범위는  $-0.85 \sim +1.48\%$ , 중회귀식의 범위는  $-0.83 \sim +1.51\%$ 으로 단순회귀식과 중회귀식과는 별 차이를 보이지 않고 있다.

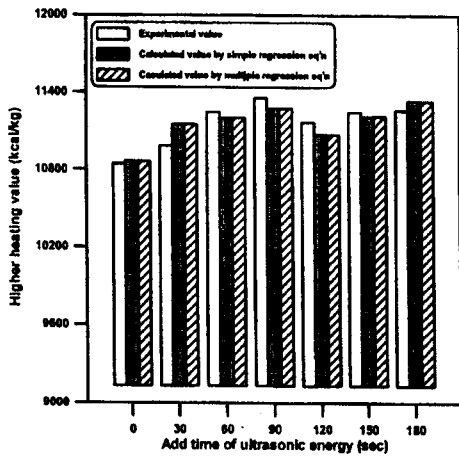


Fig. 7 Comparisons of experimental HHVs and calculated HHVs from surface tension of samples

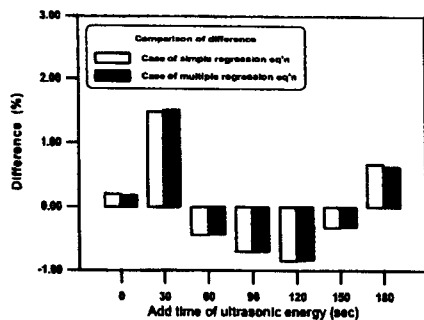


Fig. 8 Differences between experimental HHVs and calculated HHVs from surface tension of samples

Fig. 9는 산점도와 상관계수에 대한 관련성을

나타낸 그래프로서, 실선은 회귀분석을 이용하여 개발한 표면장력에 대한 표본회귀계산식이고 산점도는 열량계로 측정된 시료의 고위발열량을 나타낸 것이다.

단순회귀식의 경우 결정계수  $r^2=0.7319(=0.8555 \times 0.8555)$ 로서 발열량 총변동의 약 73.2%를 회귀식이 설명할 수 있는 반면, 중회귀식의 경우 조정중결정계수  $\bar{r}^2=0.9994$ 로서 발열량 총변동의 약 99.9%를 회귀식이 설명할 수 있어 이것 역시 점도를 이용하여 개발한 중회귀식과 마찬가지로 표면장력을 이용하여 개발한 중회귀식이 단순회귀식보다 좀더 나은을 알 수 있다.

또한 이들 변수관계의 강도나 밀접도를 나타내는 상관계수는 단순회귀식의 경우  $r=0.8555$ , 중회귀식의 경우  $r=0.9999$ 로 단순상관계수보다 중상관계수가 훨씬 더 절대값 1에 가깝게 나타난 것으로 보아 단순상관계수보다 중상관계수가 좀더 나은 상관성을 보이고 있다고 할 수 있다.

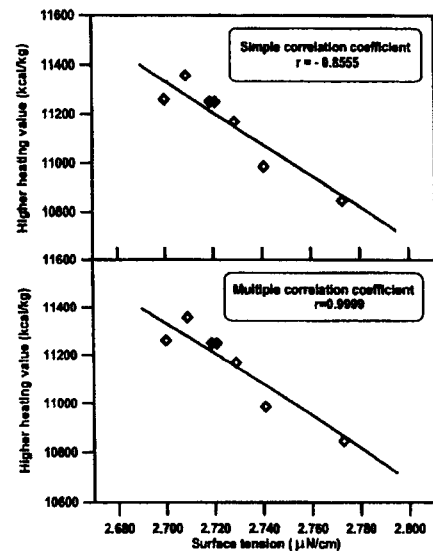


Fig. 9 Relation of scatter diagram and regression line

#### 4.3 점도 및 표면장력에 의한 발열량식 비교

Fig. 10은 고위발열량에 대한 시료들의 측정값과 점도 및 표면장력의 함수로 표시된 계산식들에 의해 계산된 값들을 비교한 것으로 점도의 경우 단순회귀식과 중회귀식, 표면장력의 경우 단

순회귀식과 중회귀식 모두를 나타낸 것이다.

이 그래프를 보면 알 수 있듯이 발열량계에 의한 측정값들과 계산값들의 차이는 초음파에너지 미부가시를 제외한 나머지 모두 점도에 의한 단순회귀식에 의한 계산값 및 중회귀식에 의한 계산값들이 전반적으로 표면장력을 이용한 단순회귀식 및 중회귀식들에 의한 계산값들보다 작다.

또한 전술한바와 같이 측정값들과 점도에 의한 계산값들과의 차이는 단순회귀식의 경우 -0.66~+1.19%, 중회귀식의 경우 -0.71~+1.26%, 표면장력에 의한 계산값들과의 차이는 단순회귀식의 경우 -0.85~+1.48%, 중회귀식의 경우 -0.83~+1.51%로 측정값들과 점도의 함수에 의한 계산값들과의 차이가 표면장력에 의한 계산값들과의 차이보다 작게 나타나는 것으로 볼 때 점도에 의한 예측값들이 표면장력에 의한 예측값들보다 좀 더 좋다고 판단된다.

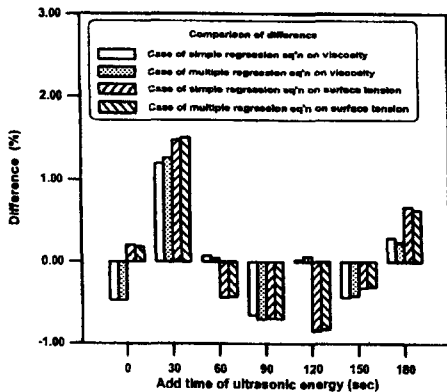


Fig. 10 Comparison of the differences between experimental HHVs and calculated HHVs from viscosity and surface tension of samples

### 5. 결론

본 연구에서는 연료의 고위발열량을 화학적 분석법인 원소분석법, 공업분석법 및 특수장비를 필요로 하는 실험측정법 대신, 비교적 손쉬운 연료의 물리적 특성인 점도 및 표면장력 측정을 토대로 고위발열량을 상대적으로 쉽게 계산할 수 있는 식을 개발하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 초음파로 개질된 경유의 점도의 함수로서 단순회귀식은  $HHV=20907.1597-5858.5142\mu$ , 중회귀식은  $HHV=-0.4162673+18913.3942\mu-7334.161596\mu^2$ , 측정값과 계산값과의 차이는 단순회귀식의 경우 -0.66~+1.19%, 중회귀식의 경우 -0.71~+1.26%로 나타났다.
- (2) 점도에 대한 함수로서 단순회귀식의 경우 결정계수  $r^2=0.8857$ , 중회귀식의 경우 조정중결정계수  $\bar{r}^2=0.9994$ 으로 중회귀식이 단순회귀식보다 발열량 총변동을 더 잘 설명하고 있다.
- (3) 초음파로 개질된 경유의 표면장력의 함수로서 단순회귀식은  $HHV=28601.5325-6395.073\sigma$ , 중회귀식은  $HHV=-0.0007+14508.044\sigma-3818.91\sigma^2$ , 측정값과 계산값과의 차이는 단순회귀식의 경우 -0.85~+1.48%, 중회귀식의 경우 -0.83~+1.51%로 나타났다.
- (4) 표면장력에 대한 함수로서 단순회귀식의 경우 결정계수  $r^2=0.7319$ , 중회귀식의 경우 조정중결정계수  $\bar{r}^2=0.9994$ 으로 중회귀식이 단순회귀식보다 발열량 총변동을 더 잘 설명하고 있다.
- (5) 발열량계에 의한 측정값들과 점도에 의한 예측값들과의 차이가 표면장력에 의한 예측값들과의 차이보다 작게 나타났다.

### 참고문헌

1. A. Demirbaş, "Calculation of higher heating values of biomass fuels", Fuel, Vol. 76, No. 5, pp. 431~434, 1997.
2. A. Demirbaş, "Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils", Fuel, Vol. 77, No. 9/10, pp. 1117~1120, 1998.
3. A. Demirbaş, "A direct route to the calculation of heating values of liquid fuels by using their density and viscosity measurements", Energy Conversion & Management, 41, pp. 1609~1614, 2000.
4. 최두석, "超音波 에너지 附加 디젤油의 噴霧特性과 機關性能特性에 關한 研究", 충남대학교 박사학위논문, 1996.
5. 류정인, 최두석, "噴射노즐 形狀 變化와 超音



- 波 에너지 附加裝置를 利用한 디젤기관의 性能特性(1)", 한국자동차공학회논문집, Vol.5, No.4, pp.160-170, 1997.
6. 千葉近, "超音波 噴霧", 山海堂, pp. 51-59, 1990.
  7. B. E. Noltingk and E. A. Neppiras, "Cavitation Produced by Ultrasonic; Theoretical Conditions for the Onset of Cavitation", Proc. Phys. Soc., 64B 1032, 1951.
  8. 안상형, 이명호, "현대통계학", 학연사, pp.403-448, 1993.
  9. 이봉주, 박지원, "응용통계학", 진명문화사, pp.431-443, 1993.
  10. 소명일, 이종민, "SPSS<sup>x</sup>를 활용한 중급통계학-회귀분석과 실험설계-", 법문사, pp.182-196, 1987.
  11. 유지성, 오창수, "현대통계학", 박영사, pp.395-476, 1995.