

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.11.841

DME 체적탄성계수의 측정 및 계산

조승환[†] · 이범호* · 이대엽**

(2008년 5월 9일 접수, 2008년 9월 23일 수정, 2008년 10월 6일 심사완료)

Measurement and Calculation of Bulk Modulus for DME

Seunghwan Cho, Beomho Lee and Daeyup Lee

Key Words: DME(Di-methyl Ether), Bulk Modulus(체적탄성계수), Compression Ignition Engine(압축착화 엔진), Compressibility(압축성), Alternative Fuel(대체연료)

Abstract

DME(Di-methyl Ether) has been expected to be one of the promising alternative fuels for compression ignition engines due to its low emission characteristics for particulate matter. However, its physical properties such as density, bulk modulus and viscosity are not comparable to those of conventional diesel fuel. Especially, problems caused by low lubricity and high compressibility need to be understood more thoroughly, when a DME fuel is used for compression ignition engine, especially with mechanical fuel supply system. In this study, measurement and calculation of DME's bulk modulus were carried out over the range of temperatures from -3°C to 53°C, and pressures from 50 bar to 250 bar using an experimental apparatus built in this work. The results show that DME is prone to be compressed more easily compared to diesel fuel. A comparison of bulk modulus with butane and propane were also made in this work.

1. 서론

최근 자동차로 인한 대기오염이 날이 심각해지고 있으며, 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증대하고 있는 시점에서 대기질을 향상할 수 있는 대책 마련이 시급한 상황이다. 디젤엔진은 열효율이 높고, 온실가스인 이산화탄소의 배출이 상대적으로 적다는 장점을 가지고 있는 반면, 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM : particulate matter)의 배출이 많은 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 LPG, CNG 등의 저

공해 자동차가 보급되고 있으나, 종래의 디젤엔진과 같이 높은 열효율에서 압축 연소가 가능한 연료인 DME에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

DME(Di-methyl Ether : CH₃OCH₃)는 천연가스를 원료로 하여 제조되고 있으며, 현재 국내에서 DME 제조단가는 경유에 비하여 높지만, 생산기술 개발 및 설비 개선을 통해 경유와 비슷한 수준으로 생산 가능할 것으로 예측되고 있다. 세탄가가 약 55정도로 경유와 비슷하고, 기존 압축착화 엔진의 형상을 근본적으로 변화시키지 않고 적용할 수 있으며, 연료공급시스템은 공급라인 및 인젝터 교체를 통해 적용이 가능한 것으로 연구가 진행되고 있다.^(1,2) DME는 약 34.8wt%의 산소를 함유하고 있기 때문에 입자상물질을 거의 배출하지 않는다. 상온에서 연료의 증기압이 LPG 연료와 유사하여 저장에 용이하고, 기존 시설을 사용하는 것이 가능하다는 장점도 갖고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

E-mail : shcho7018@inhaian.net

TEL : (032)876-7443 FAX : (032)874-1443

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 인하대학교 기계공학과

하지만 기존의 연료와 다른 물성으로 인해 연료공급계통 및 분사계통에 문제가 생길 수 있기 때문에 DME를 자동차 연료로 사용하기 위해서는 DME의 기본적인 물성을 이해할 필요가 있다. 따라서 DME의 비체적, 밀도, 증기압, 점도, 체적탄성계수 그리고 임계점 등의 기본 물성에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽³⁻⁵⁾ 차량용 연료로서 필수적으로 파악되어야 하는 주요 물성치는 증기압, 점도 그리고 체적탄성계수 등이 있다. DME는 경유에 비해 약 20분의 1 정도로 낮은 점도로 인해 연료공급계통 및 분사계통에 마모가 발생하게 되는데 이는 윤활성 향상 첨가제(Lubrizol 등)의 사용으로 해결이 가능하다.⁽⁶⁾ 그러나 체적탄성계수는 온도에 따라 크게 변하기 때문에 기계식 가압 연료 펌프를 사용하여 고압으로 분사하였을 경우 분사 시기가 변하게 될 것으로 예상된다. Beohman⁽⁷⁾은 온도(37.8℃) 및 압력(~300bar) 조건에서, Kegl⁽⁸⁾은 (20℃, 40℃) 및 압력(~400bar) 조건에서 각각 경유 및 경유 합성연료에 대한 체적탄성계수를 측정하였고, Rodriguez-Anton⁽⁹⁾은 diesel의 체적탄성계수를 측정 후 기존의 연구 결과와 비교하였다. Sorenson⁽¹⁰⁾의 경우 압력(20bar, 200bar) 및 온도(-20~200℃) 조건에서 DME의 체적탄성계수를 계산하였다. Sorenson을 제외하고는 DME의 체적탄성계수에 대해 연구결과를 발표된 것이 없는 것으로 파악되고 있고, 대부분의 연구는 해석을 통해 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 DME를 압축착화 엔진에 적용시 정확한 분사시기를 파악하는 것이 가능하도록 하기 위하여 온도(-3℃~53℃) 및 압력(~250bar) 조건에서 DME 및 경유의 체적탄성계수를 측정하였고, 상태방정식을 이용한 물성치의 계산을 수행하여 실측치와 비교 분석 및 오차분석을 수행하였다.

2. DME의 물성치 계산

본 연구에서는 DME의 여러 가지 물리적 성질(비체적, 점도, 액체밀도, 체적탄성계수, 증발잠열, 증기압 등)을 상태방정식 (Modified Benedict-Webb-Rubin (MBWR))을 이용하여 계산하였다.

MBWR 상태방정식은 Jacobsen and Stewart)에 의해 제안되었고, 넓은 범위의 온도, 압력, 밀도에서 다양한 hydrocarbons (Younglove and Ely),

refrigerants (Huber and Ely, Younglove and McLinden) 등의 상태량 계산에 이용되고 있다.⁽¹¹⁻¹⁴⁾

MBWR 상태방정식은 절대온도 T와 몰 밀도 ρ 의 함수이고, 압력 P로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$P = \sum_{n=1}^9 a_n \rho^n + \exp(-\delta^2) \sum_{n=10}^{15} a_n \rho^{2n-17} \quad (1)$$

여기서 $\delta = \rho/\rho_c$

$\rho_c = \text{critical density}$

이고, 온도에 의존하는 32개의 계수는 다음과 같다.

$$a_1 = RT$$

$$a_2 = b_1 T + b_2 T^{1/2} + b_3 + b_4/T + b_5/T^2$$

$$a_3 = b_6 T + b_7 + b_8 T + b_9/T^2$$

$$a_4 = b_{10} T + b_{11} + b_{12}/T$$

$$a_5 = b_{13}$$

$$a_6 = b_{14}/T + b_{15}/T^2$$

$$a_7 = b_{16}/T$$

$$a_8 = b_{17}/T + b_{18} T^2$$

$$a_9 = b_{19}/T^2$$

$$a_{10} = b_{20}/T^2 + b_{21}/T^3$$

$$a_{11} = b_{22}/T^2 + b_{23}/T^4$$

$$a_{12} = b_{24}/T^2 + b_{25}/T^3$$

$$a_{13} = b_{26}/T^2 + b_{27}/T^4$$

$$a_{14} = b_{28}/T^2 + b_{29}/T^3$$

$$a_{15} = b_{30}/T^2 + b_{31}/T^3 + b_{32}/T^4$$

이전의 개발되었던 다른 유체들에 대한 결과와 MBWR 상태방정식이 일관성을 유지하기 위해서 압력은 bar, 온도는 K, 밀도는 mol/L, 기체상수는 0.08314510 L·bar/(mol·K)로 표시하도록 하였다.

Fig. 1은 MBWR 상태방정식을 이용하여 구한 DME의 압력-비체적 선도의 예이다. MBWR 상태방정식에 사용한 DME의 임계값은 다음과 같다.

$$P_c = 53.405 \text{ bar}, T_c = 400.3 \text{ K},$$

$$\rho_c = 6.0951 \text{ mol/L}$$

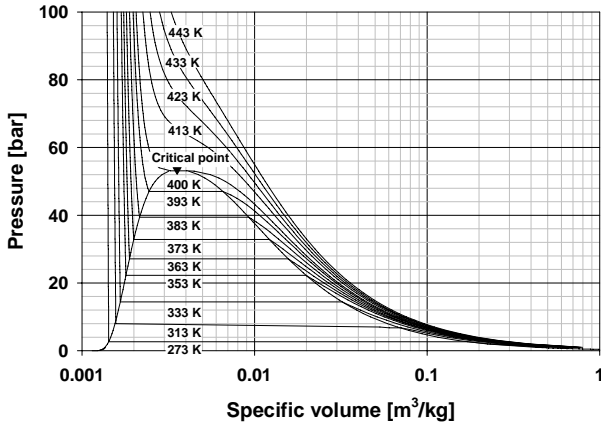


Fig. 1 The pressure-specific volume diagram of DME

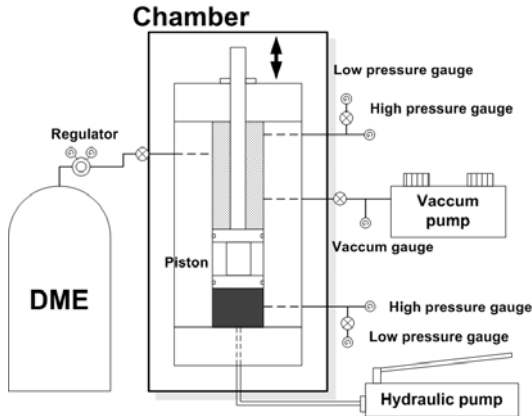


Fig. 2 External view of the experimental apparatus to measure the bulk modulus of DME

3. DME 연료의 압축성

3.1 압축성(체적탄성계수) 측정 장치

DME의 압축성(isothermal bulk modulus)을 측정하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 측정 장치를 설계 및 제작하여 실험에 사용하였다. 장치는 압축기, 압력게이지, 진공게이지, 진공펌프, 유압펌프 등으로 구성되어 있다. 압축기 내부를 진공상태로 만들어준 후 DME[순도 99.9%(Table 1 참조)]를 주입하고, 유압펌프를 이용하여 압력을 가하게 되면 DME는 부피 변화(행정 변화)를 일으키게 된다.

본 실험에서 압축성 측정 장치의 변위는 매우 천천히 증가시켜서 마찰 등에 의한 온도 상승이 발생하지 않도록 하였다. 온도 및 압력에 따른

Table 1 Component analysis for DME with 99.9% purity

Purity % w/w	min. 99.9(wt %)
Carbon dioxide % w/w	max. 0.01(wt %)
Free-Methanol % w/w	max. 0.01(wt %)
Methyl Formate % w/w	max. 0.01(wt %)
Moisture % w/w	max. 0.02(wt %)
Evaporation residue % w/w	max. 0.02(wt %)
Vapor pressure	4.2±0.2(kg/cm ² G) at 20°C
Specific gravity	0.67±0.01 (20°C/4°C)

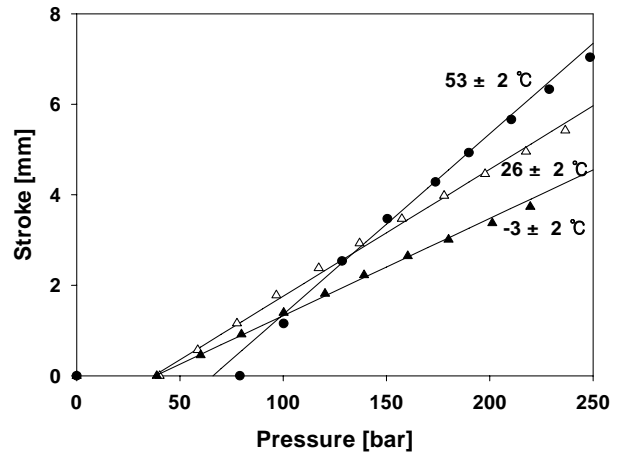


Fig. 3 Stroke change of the high pressure chamber as a function of pressure and temperature

DME의 부피 변화를 측정하여 DME의 체적탄성계수를 구하였다. 측정 결과의 한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 그러나 이 측정 결과로부터 직접 다음 식 (2)과 같은 체적탄성계수(isothermal bulk modulus)를 구하는 것은 곤란하기 때문에 본 연구에서는 다음과 같은 해석방법을 도출하였다.

$$\beta = -v \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T \quad (2)$$

3.2 등가 체적탄성계수 식의 유도

행정(stroke)으로부터 부피 계산은 다음과 같이 할 수 있다.

$$V_i = \text{단면적} \times \text{초기변위} + V_d$$

$$V_{i+1} = \text{단면적} \times (\text{초기변위} - \text{행정}) + V_d$$

- V_i : 초기 부피(cm^3)
- V_{i+1} : 압축 후의 부피(cm^3)
- V_d : 장치내의 고정부피($38.8 \pm 0.2 \text{cm}^3$)

이와 같은 행정변화의 증분적 측정값을 이용하여 체적변화를 계산할 수 있고, 압력변화와 체적변화를 이용하면 식 (2)과 같이 정의된 체적탄성계수를 계산할 수 있다. 그러나 실험값의 측정 구간이 이상적으로 미소하지 않기 때문에 유한개의 실험값으로부터 등가 체적탄성계수를 계산하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서 적용한 압력 및 온도 변화 범위 내에서는 체적탄성계수를 압력변화에 대하여 다음 식 (3)과 같이 선형으로 가정한 후 체적탄성계수를 구하였다.

$$\beta_T(P) = a_T P + b_T \quad (3)$$

체적탄성계수의 정의[식 (2)]로부터 온도가 일정하면

$$\beta_T \approx - \frac{dp}{\left(\frac{dV}{V}\right)} \quad (4)$$

따라서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{V_i}{V_0} = \left(\frac{P_i + b_T/a_T}{P_0 + b_T/a_T}\right)^{-\frac{1}{a_T}} \quad (5)$$

또는

$$V_{iT}^a (P_i + b_T/a_T) = V_{0T}^a (P_0 + b_T/a_T) \quad (6)$$

식 (6)에서 우변은 초기 조건이므로 상수가 되어 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$V_i^a (P_i + b_T/a_T) = \text{const.} \quad (7)$$

식 (5)를 이용하여 체적탄성계수를 구하는 방법은 다음과 같다. 여기서 V_0 , V_i , P_0 와 P_i 는 실험을 통하여 얻은 값들이고, 회기분석을 이용하여 계수 a_T 와 b_T 를 구할 수 있고, 이로부터 식 (3)

을 이용하여 체적탄성계수를 구할 수 있게 된다.

3.3 압축성(체적탄성계수) 측정

이상과 같은 관계로부터 본 실험에서 $-3^\circ\text{C} \sim 53^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 일정온도에서 압력 변화에 따른 DME의 체적탄성계수를 측정한 결과는 다음과 같다. Fig. 4에서와 같이 온도가 증가할수록 DME의 체적탄성계수는 감소함을 알 수 있다. 또한 압력이 증가할수록 체적탄성계수는 증가한다. 문헌값과 비교한 결과 높은 온도구간에서 체적탄성계수의 값이 유사하게 나타났다.⁽¹⁰⁾ 5회 이상의 반복실험으로 부터 평균값 및 표준편차를 구하였고, 이를 각 실험조건에서 error bar로 표시하였다.

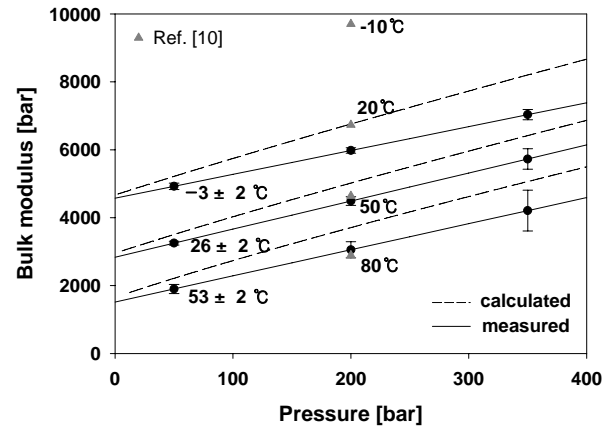


Fig. 4 The bulk modulus of DME with temperature and pressure changes

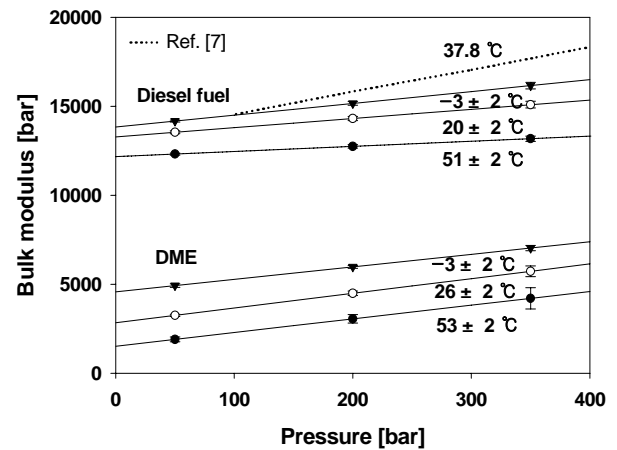


Fig. 5 Comparison of bulk modulus between DME and light oil

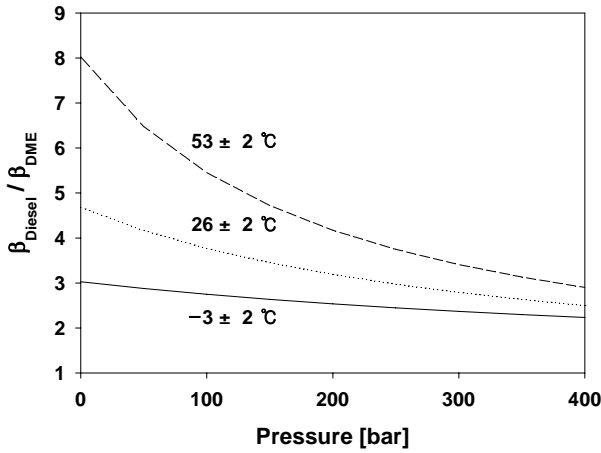


Fig. 6 Comparison of bulk modulus between DME and light oil

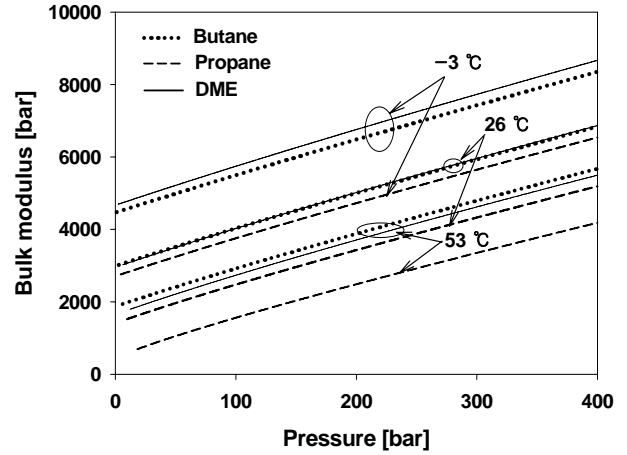


Fig. 8 Comparison of bulk modulus for DME with Butane and Propane

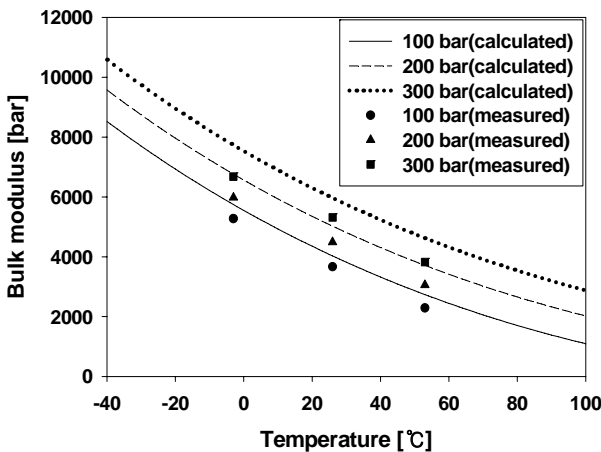


Fig. 7 Comparison of bulk modulus of DME between measurement and calculation

Fig. 5에는 경유와 DME의 체적탄성계수를 비교하였고, 경유의 체적탄성계수는 DME의 약 3배(상온 및 압력 200bar에서)가 됨을 알 수 있다.

따라서 DME를 고압으로 가압해서 분사하는 연료 공급 장치에서는 DME의 이와 같은 온도와 압력에 따른 압축성의 변화 특성을 충분히 고려하여 장치를 설계해야 할 것으로 판단된다.

3.4 압축성(체적탄성계수) 계산

체적탄성계수의 계산은 압력(100, 200, 300bar), 온도(-40~100°C) 조건에서 수행하였다. Fig. 7에서와 같이 동일 압력 조건에서 온도가 증가할수록 체적탄성계수는 감소함을 보인다. 측정치가

계산값에 비해 약 8~18% 낮게 나타나고 있으나, 전체적인 경향은 유사함을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 DME와 Butane, Propane에 대한 체적탄성계수를 비교하였다. Butane의 경우 온도별 압력증가에 따른 체적탄성계수는 DME와 매우 유사한 값을 보이나, Propane의 경우 DME와 Butane에 비해 압축되기 용이한 것으로 예측되었다.

3.5 체적탄성계수 측정값의 오차분석

Fig. 4에서와 같이 DME의 체적탄성계수는 계산값과 측정값에 차이가 있다. 두 값이 차이를 나타내는 원인은 여러 가지 있을 수 있으나, 압축성 측정 장치를 진공으로 펌핑한 후 DME를 주입할 때 남아있는 초기 소량의 잔류공기의 영향이 가장 클 것으로 예측된다. 따라서 초기 잔류공기의 부피에 따른 영향이 측정결과에 미치는 효과에 대한 분석을 수행하였다.

DME와 공기의 체적탄성계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{DME} \approx -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V_D}{V_D}}, \quad \beta_{air} \approx -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V_a}{V_a}} \quad (8)$$

위 식에서 초기에 압축기에 남아있는 소량의 공기의 체적으로 인한 체적탄성계수의 측정오차를 구하면 다음과 같다.

$$\beta \approx -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V_D + \Delta V_a}{V_D + V_a}} = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V_D}{V_D} + \frac{\Delta V_a}{V_D}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{V_a}{V_D}}$$

$$= \left(1 + \frac{V_a}{V_D}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta V_a}{\Delta V_D}}\right) \cdot \beta_{DME}$$

여기서

$$\left[\epsilon = \left(1 + \frac{V_a}{V_D}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta V_a}{\Delta V_D}}\right)\right] \quad (9)$$

로 나타낸다.

위의 식 (9)에서 알 수 있듯이 초기 압축성 측정 장치에 남아있는 공기의 양은 체적탄성계수의 값에 ϵ 값만큼의 영향을 미치는 것을 알 수 있다. ϵ 값을 구하기 위해서는 공기의 부피(V_a)와 DME의 부피(V_D)를 알아야 한다. 천천히 압축되는 과정에서 공기의 부피는 등온상태이므로 $V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2}$ 로부터 구할 수 있다. 체적탄성계수를 압력변화에 대하여 선형으로 가정한 식 (3)에서의 a_T, b_T 값으로 이루어진 식 (5)를 이용하여 DME의 부피를 구할 수 있다.

위에서 구한 공기의 부피와 DME의 부피로부터 ϵ 값을 구하고, 압력에 따른 ϵ 값의 영향이 작은 부분($\epsilon < 3\%$)의 압력 범위에서 체적탄성계수를 측정하면 측정결과의 정확도를 높일 수 있다.

Fig. 9에는 압력 및 초기 잔류공기의 부피에 따른 측정값의 정확도를 나타내었다.

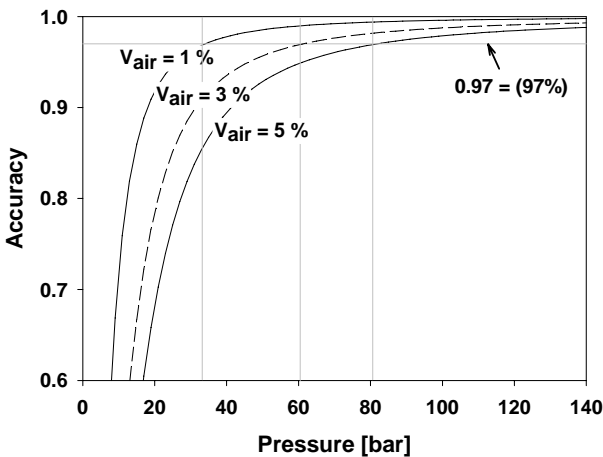


Fig. 9 The effect of residual air on the measurement of bulk modulus of DME

Fig. 9에서 알 수 있듯이 압축성 측정 장치 초기에 남아있는 공기의 양에 따라 저압 영역에서 측정치의 정확도가 낮아짐을 알 수 있다. 즉 초기 잔류공기가 1% 정도 포함된 경우에는 약 30bar 이상의 압력에서 높은 정확도(97% 이상)를 나타내지만, 초기공기가 약 3% 정도 포함된 경우에는 약 50bar의 압력부터 신뢰도가 높은 측정치를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 진공게이지를 통한 측정으로부터 초기에 공기가 약 3% 정도 잔류해 있는 것으로 추정할 수 있기 때문에 약 50bar의 이상의 압력에서 측정된 데이터를 사용하여 DME의 체적탄성계수를 구하였다.

4. DME 체적탄성계수의 압력 및 온도관계식

앞에서 계산과 실험을 통하여 구한 DME의 체적탄성계수를 이용하여 온도와 압력이 주어지면 그 조건에서의 체적탄성계수를 계산할 수 있도록 DME의 체적탄성계수의 일반화된 식을 유도하였다. 식 $\beta_T(P) = a_T P + b_T$ 의 a, b 값을 온도에 대하여 회기분석하면 다음과 같이 된다.

$$\beta_T(P) = (a' + a'' T + a''' T^2)_T P + (b' + b'' T + b''' T^2)_T \quad (10)$$

온도에 대하여 회기분석한 a_T, b_T 의 계수를 Table 2에 나타내었다.

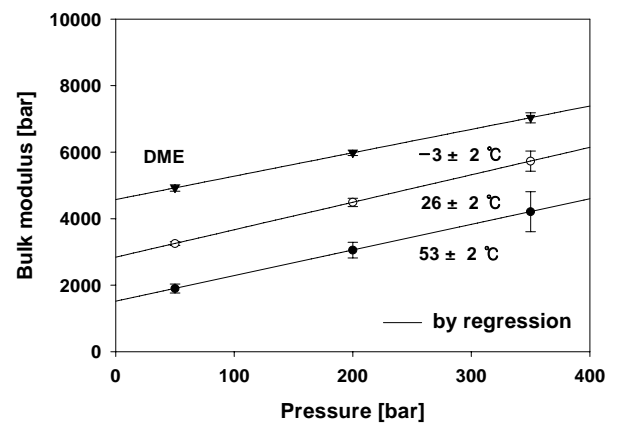


Fig. 10 The bulk modulus of DME obtained from the correlation over the temperature range of -3 °C ~ 53 °C

Table 2 The coefficients of a_T , b_T obtained from the correlation

a	a'	-95.59
	a''	0.6848
	a'''	-1.129e-4
b	b'	36320
	b''	-169.7
	b'''	0.1930

Fig. 10에는 측정된 체적탄성계수와 회귀분석으로 유도한 식 (10)를 비교한 결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서 측정한 DME의 등온체적탄성계수(Isothermal bulk modulus)는 경유의 체적탄성계수에 비하여 약 1/3배(상온 및 압력 200bar)인 것을 알 수 있었다. 추가적으로 계산(상온 및 압력 200bar)한 Butane은 DME의 체적탄성계수와 유사하나, Propane의 경우 DME 보다 약 1/2배인 것으로 확인 되었다. 또한 DME의 체적탄성계수는 온도에 따라서 크게 변하기 때문에 연료의 압축성으로 인하여 정확한 분사시기를 확보하기가 곤란하게 된다. 기계식 고압펌프를 사용한 일부 차량 연구에서는 연료 냉각기를 사용하여 연료온도를 일정하게 유지하도록 하거나 커몬레일 분사 방식을 사용하여 물성치의 변화에 대응한 최적 분사가 이루어지도록 하고 있으나, 경유 사용 차량과 비교하여 경제적이고 실용적인 보급을 위해서는 보다 간단한 구조로 DME 연료의 온도를 유지시켜주는 기술의 연구개발이 필요할 것으로 예상된다. 본 연구에서 도출한 온도 및 압력에 대한 DME의 체적탄성계수 관계식은 DME를 고압 및 고온에서 사용하는 내연기관을 비롯한 다양한 연소장치의 설계에 유용하게 사용할 수 있다.

후 기

본 연구과제는 한국 에너지 관리공단의 자원에너지 기술 개발사업(주관기관 한국에너지기술연구원)과 BK(Brain Korea) 21 Program사업의 지원으로 수행되었고, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- (1) Masaaki Kato, Hisaharu Takeuchi, Kazutoshi Koie, Hitoshi Sekijima, Shuichi Kajitani, Zhili L. Chen and Satoshi Hashimoto, 2004, "A Study of Di-methyl Ether(DME) Flow in Diesel Nozzle," *SAE Paper*, No. 2004-01-0081.
- (2) Zhang, G. D., Liu, H., Xia, X. X. and Yang, Q. L., 2004, "Study on the Injection Process of a Direct-injection Diesel Engine Fuelled with Di-methyl Ether," *Processing of the Institution of Mechanical Engineering*, pp. 1341~1347.
- (3) Ho Teng, James C. McCandless and Jeffrey B. Schneyer, 2001, "Thermochemical Characteristics of Di-methyl Ether - An Alternative Fuel for Compression-ignition Engines," *SAE Paper*, No. 2001-01-0154.
- (4) Inmels, E. C. and Lemmon, E. W., 2007 "Experimental Densities, Vapor Pressure and Critical Point and a Fundamental Equation of State for Di-methyl Ether," *Fluid Phase Equilibria*.
- (5) Reid R. C., Prausnitz J. M. and Poling B. E., 1987, "The Properties of Gases and Liquids," 4th edition, New York, McGraw-Hill Book Company.
- (6) Lee, D. Y., Cho, S. E., Lee, B. H. and Kim, C. S., 2006, "Measurement of Viscosity for Liquid DME," *The 3rd Asian DME Conference*.
- (7) Andre L. Bohman, David Morris and James Szybist, 2004, "The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing," *Journal of Energy and Fuels*, Vol. 18, pp. 1877~1882.
- (8) Breda Kegl, 2006, "Numerical Analysis of Injection Characteristics using Bio-diesel Fuel," *Journal of Fuel*, Vol. 85, pp. 2377~2387.
- (9) Rodriguez-Anton, L. M., Casanova-Kindelan, J. and Tardajos, G., 2000, "High Pressure Physical Properties of Fluids used in Diesel Injection Systems," *SAE Paper*, No. 2000-01-2046.
- (10) Spencer C. Sorenson, Michael Glensvig and Duane L. Abata, 1998, "Di-methyl Ether in Diesel Fuel Injection Systems," *SAE Paper*, No. 981159.
- (11) Jacobsen, R. T. and Stewart, R. B., 1973, "Thermodynamic Properties of Nitrogen Including

- Liquid and Vapor Phases from 63K to 2000K with Pressures to 10,000 Bar," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2: pp. 757~992.
- (12) Younglove, B. A. and Ely, J. F., 1987, "The Physical Properties of Fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane and Normal Butane," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 16: pp. 577~798.
- (13) Huber, M. L., Friend, D. G. and Ely, J. F., 1992, "Prediction of the Thermal Conductivity of Refrigerants and Refrigerant Mixtures," *Fluid phase equilibria*, Vol. 80, pp. 249~261.
- (14) Younglove, B. A. and McLinden, M. O., 1994, "An International Standard Equation of state for the Thermodynamic Properties of Refrigerant 123," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 23 No. 5, pp. 731~779.