

## Halon-1301과 CO<sub>2</sub>의 물성에 관한 실험식 Empirical Equations for Physical Properties of Halon-1301 and CO<sub>2</sub>

노경호<sup>†</sup> · 송명석 · 한순구 · 김재덕\* · 이윤우\*

Kyung Ho Row<sup>†</sup> · Myong-Seok Song · Soon-Koo Han ·  
Jae-Duck Kim\* · Youn-Woo Lee\*

조정밀분리기술센터, 인하대학교, 화학공학과  
\*한국과학기술연구원, 국가지정 초임계유체연구실  
(2002. 04. 30. 접수/2002. 06. 14. 채택)

### 요 약

몬트리올 의정서에 의해서 규제받는 Halon-1301과 대체 물질중의 하나인 CO<sub>2</sub>의 물성(밀도, 점도, 엔탈피)의 실험식을 구하였다. 문헌에서 얻은 실험값을 이용하여 온도에 대한 회귀분석에 의해서 실험식을 얻었다. 압축인자를 이용하여 온도에 대한 2차 함수로서 밀도에 관한 실험식을 제안하였다. 점도는 온도에 대한 지수함수로 표시되며, 보정인자를 사용하여 사용 온도범위를 확장하였다. 엔탈피는 열용량과 마찬가지로 온도에 대한 2차 함수로 정의하여 나타내었다. 본 연구에서 제안된 위의 실험식의 상관계수는 0.99 이상이었다.

### ABSTRACT

For Halon-1301 regulated by Montreal Protocol and CO<sub>2</sub> as its alternatives, the empirical equations of density, viscosity, and enthalpy were correlated in terms of temperature. They were obtained by regression analysis from the experimental data in the literature. The empirical equation of density was expressed as compressibility factor by the second-order function of temperature. The empirical equation of viscosity was formulated as a power function, and a correction factor was considered to cover the wider range of temperature. Finally, heat capacity as well as enthalpy were well fitted by empirical form of the second-order temperature. The correlation coefficients of the empirical equations in this work were more than 0.99.

**Keywords** : Halon-1301, Carbon dioxide, Physical property, Density, Viscosity, Enthalpy, Empirical equation

### 1. 서 론

Halon은 브롬이 포함된 프레온(Freon)을 통칭으로 하는 물질이다. Halon은 소화 성능이 뛰어나며 Halon의 소화원리는 주로 연소의 화학적 반응을 억제하는 것이다. Halon의 소화제로서 특징은 저농도로 소화가 가능하고, 전기화재에 매우 효과적이다. 또한, 독성이 나 부식성이 매우 낮고, 소화 후 잔류물이 없으며 물질의 내부까지 침투가 가능하다는 것이다.<sup>1)</sup> 따라서, 컴

퓨터실 및 위험물 저장고, 전차나 잠수함 등 무기의 소화제, 미사일의 마찰 방지제로 사용된다. 그렇지만, 1987년 몬트리올 의정서에서<sup>2)</sup> 협의한 결과, 1989년부터 CFCs 생산 및 소비량을 1986년 수준으로 동결한 후 단계적으로 감축하여 2000년 이후부터는 생산 및 사용을 금지하는 것으로 되어있다. 그러나, 오존층 파괴가 가속화되고 새로운 오존층 파괴물질이 추가로 발견됨에 따라 1990년 영국 런던에서 의정서를 1차 개정한 이후, 1992년 11월 덴마크 코펜하겐에서 개최된 제4차 당사국 총회에서 규제일정을 대폭 단축하고 규제물질을 새로 추가하는 제2차 개정서를 채택하였으

<sup>†</sup>E-mail: rowkho@inha.ac.kr

며, 제 7차 당사국 총회, 제 9차 당사국 총회에서 규제대상물질에 대한 감축일정을 강화하였다. 몬트리올 의정서에서 규제대상물질로 규제되는 물질은 CFC, 사염화탄소, 메틸클로로포름과 Halon(Halon-1211, Halon-1301, Halon-2402) 및 브롬을 함유한 소화물질이다. Halon이 몬트리올 의정서에 의해서 규제물질로 지정된 이유는 Halon의 구조 안에 브롬이 염소보다 오존파괴 능력이 크기 때문이다. 프레온(Freon)11에 비해 Halon-1211은 3배, Halon-1301은 10배나 오존층 파괴능력이 높다. 몬트리올 의정서는, Halon-1211, Halon-1301, Halon-2402를 규제하고 있다. 앞서 규제물질로 규정된 물질 중에서 가장 일반적으로 많이 사용하는 물질이 Halon-1301이다. Halon-1301의 구조식은  $CBrF_3$ (분자량은 148.9), 끓는점은  $-57.78^\circ\text{C}$ , 어는점은  $-168^\circ\text{C}$ , 임계온도는  $67^\circ\text{C}$ 이고, 임계압력은  $39.1\text{ atm}$ 이다.<sup>3)</sup>

몬트리올 의정서에 의하여 규제되는 물질에 대한 대체물질로  $\text{CO}_2$ , CFC-22, CFC-134a, CFC-123, CFC-141b, HFC 등이 제안되었으며, 그 중에 가장 대표적인 물질이  $\text{CO}_2$ 이다.  $\text{CO}_2$ 는 일반적으로 다른 대체물질에 비해서 가격이 저렴하기 때문에 경제적인 면에서  $\text{CO}_2$ 는 다른 어느 대체소화제보다 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서, 소화제 및 세정제로 많은 관심을 갖는  $\text{CO}_2$ 의 물성에 대해서 연구하면  $\text{CO}_2$ 가 대체물질로서 어떤 효율성을 갖게 되는지를 정성적으로 알 수 있게 된다.  $\text{CO}_2$ 는 건조한 공기 중에는 약 0.03% 함유되어 있으며, 무색 무취의 기체로, 비중은 1.529, 승화점은  $-78.50^\circ\text{C}$ , 임계온도는  $31.06^\circ\text{C}$ , 임계압력은  $73.8\text{ bar}$ 이며, 상온에서 약간 비활성 기체이지만, 고온에서는 다른 물질과 반응하여 포름산이나 일산화탄소로 변한다.<sup>4)</sup>  $\text{CO}_2$ 의 소화원리는 공간 내의 산소 농도를 낮추어 주는 질식반응에 의한 것이다.  $\text{CO}_2$ 의 소화제로서의 특징은 소화 후 약제의 잔류물이 없고, 대형화재에 효과적이며, 증거보존이 가능하고, 전기, 유류, 기계화재에 유효하고, 약제수명이 반영구적이며 가격이 저렴하다. 하지만  $\text{CO}_2$ 는 인명, 가축 등에 질식 피해가 예상되며, 고압가스로서 용기 배관 및 관 부속이 고압용을 사용해야 하고, 냉해가 있어 정밀 기기의 손상우려가 있으며, 사용할 때 소음이 매우 심하며 시야를 가린다는 단점이 있어 이를 보완하여야 한다.<sup>1)</sup>

본 연구의 목적은 Halon-1301과  $\text{CO}_2$ 의 물성에 관한 실험식을 구하는 것이다. 소화제로서 필수 불가결하게 고려해야 할 물성인 밀도, 점도, 엔탈피를 선정하고 온도에 관한 다항식 또는 지수함수로서의 상관도( $r^2$ )를 비교하여 Halon-1301과  $\text{CO}_2$  실험식을 도출한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 밀도

밀도는 물질의 단위 부피 당 질량,  $\rho = M/V$ 이고, 물질의 무게 특성을 나타낸다. 기체의 밀도는 STP를 기준으로 한다.

밀도를 계산할 때 가장 대표적으로 많이 사용되는 식은 기체상태방정식<sup>5)</sup>이며 다음과 같다.

$$\rho = MP/zRT \quad (1)$$

$z$ 는 압축인자를 나타내고 압축인자는 온도에 관한 식으로 구해진다. 그리고  $z$ 는 압력( $P$ )과 부피( $V$ )에 관하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$z \equiv 1 + BP + CP^2 + \dots \quad (2)$$

$$= 1 + B/V + C/V^2 + \dots$$

식 (2)에서  $B$ 와  $C$ 는 압력,  $B'$ 와  $C'$ 는 온도에 관한 함수에서의 상계수이다.  $z$ 는 일반적으로 온도의 함수로 주어진다. 실제 기체에서 온도에 대한 밀도는 압축인자와 식 (1)에 의하여 알 수 있다.

### 2.2 점도

흐름방향  $x$ 축에 직각인  $y$ 축 방향에서 유속의 변화가 있을 때, 유속은  $x$ 축에 평행인 면에 유체의 속도 기울기에 비례하여 작용한다. 이 때의 비례상수는 점도,  $\mu$ 이다.

점도를 계산할 때 가장 일반적으로 많이 사용되는 식은<sup>5)</sup> 다음과 같다.

$$(\mu_T/\mu_{273}) = (T/273)^n \quad (3)$$

식 (3)에서와 같이 점도는 일반적으로 온도에 대한 함수로 표기된다. 온도와 각각의 물질에 대한 고유  $n$  값을 알게 되면, 구하고자 하는 온도에서 점도를 계산할 수 있다.

### 2.3 엔탈피

엔탈피는 열함량을 나타내고, 주어진 체계의 상태를 나타내는 열역학적 양의 하나로서  $H$ 로 표현되고, 열함수라 한다.<sup>6)</sup> 물질계의 내부에너지가  $U$ , 압력이  $P$ , 부피가  $V$ 일 때, 그 상태에서의 엔탈피는 다음과 같다.

$$H \equiv U + PV \quad (4)$$

$$\Delta H \equiv \Delta U + \Delta(PV) \quad (5)$$

내부에너지는 절대값을 얻기 힘든 양이므로 보통 엔탈피는 열적 변화에 따르는 증감만을 고려한다. 부피

가 일정하면 물질계가 주고 받은 열량은 그대로 내부 에너지의 증감과 같고, 압력이 일정하면 물질계에 이동하는 열량은 물질계의 엔탈피의 증감과 같게 된다.

엔탈피에서 내부에너지는 온도에 관한 함수로 정의되어 있다. 엔탈피에 대한 관계식은 온도를 독립변수로 하는  $H = f(T)$ 으로 나타낼 수 있다.

식 (5)에서 일정압력의 공정의 경우에서 다음 식을 사용할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$\Delta H = \int \langle Cp \rangle_H dT \quad (6)$$

$\langle Cp \rangle_H$ 는 온도변화에 따른 엔탈피 계산을 위한 평균 열용량이다.

### 2.4 데이터 분석

본 논문에서 데이터 분석방법은 인하대학교 고순도 분리연구실의 Pentium PC(1.6 Ghz/256 RAM)를 사용하여 Excel™을 이용하여 문헌에서의 실험값을 다항식, 지수, 또는 역수관계의 상관관계를 이용하여 실험식을 가정하고, 이를 실험값과의 상관도( $r^2$ )를 측정하여 실험식의 타당성을 검토하였다.  $r^2$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_{est})^2}{\sum (y_i - \langle y_i \rangle)^2}, \quad \langle y_i \rangle = \frac{\sum y_i}{N} \quad (7)$$

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 압력을 대기압(1기압)에서 온도에 따른 밀도 점도 엔탈피를 계산하고 다양한 형태의 실험

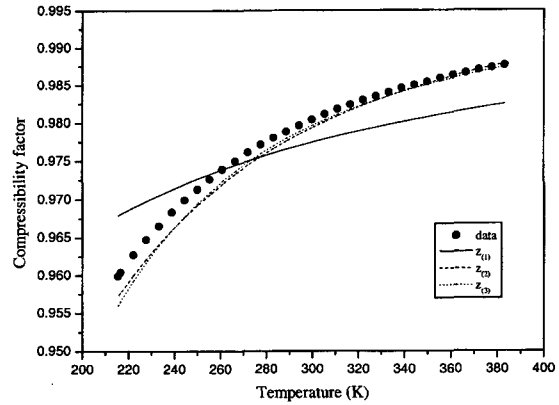


Fig. 1. Comparison of experimental and calculated compressibility factor with temperatures for Halon-1301 at 1 atm.

식을 제안하였다.

### 3.1 밀도

#### 3.1.1 Halon-1301

독립변수인 온도, 압력과 종속변수인 밀도에 관한 상관관계를 우선 규명하였다. Halon-1301에 대한 밀도는 기체상태방정식, 식 (1)에서 압축인자( $z$ )에 의하여 영향을 받게 된다. 압축인자는 Virial식 (2)에서 온도의 함수로  $A_i$ 로 다시 표기하였다.

$$z_{(i)} \equiv \sum_{i=0} \frac{A_i}{V^i} = \sum_{i=0} A_i (P/RT)^i \quad (8)$$

Fig. 1에서는 식 (8)에 의하여 구한 압축인자의 실험

Table 1. Comparison of experimental and calculated compressibility factor and density with temperatures for Halon-1301 and CO<sub>2</sub> at 1 atm

Material	Property	z, ρ	Equation	r <sup>2</sup>
Halon-1301	Compressibility factor z <sub>(i)</sub>	z <sub>(1)</sub>	-6.641(1/T)+1.000	0.7290
		z <sub>(2)</sub>	-1941.536(1/T) <sup>2</sup> +0.526(1/T)+1.000	0.9990
		z <sub>(3)</sub>	-260297.526(1/T) <sup>3</sup> -27.577(1/T) <sup>2</sup> -2.889(1/T)+1.000	1.0000
	density ρ <sub>(i)</sub>	ρ <sub>(1)</sub>	1/(5.511×10 <sup>-4</sup> T - 3.682×10 <sup>-3</sup> )	0.9994
		ρ <sub>(2)</sub>	1/[-1.070(1/T)+5.511×10 <sup>-4</sup> T+2.899×10 <sup>-4</sup> ]	0.9999
CO <sub>2</sub>	Compressibility factor z <sub>(i)</sub>	z <sub>(4)</sub>	-1.12089(1/T)+1.000	0.4720
		z <sub>(5)</sub>	-890.873(1/T) <sup>2</sup> +1.353(1/T)+1.000	0.9870
		z <sub>(6)</sub>	-145582.749(1/T) <sup>3</sup> -82.820(1/T) <sup>2</sup> +0.402(1/T)+1.000	1.0000
	density ρ <sub>(i)</sub>	ρ <sub>(3)</sub>	1/(1.865×10 <sup>-3</sup> T - 2.090×10 <sup>-3</sup> )	0.9999
		ρ <sub>(4)</sub>	1/[-1.660(1/T)+1.865×10 <sup>-4</sup> T+2.523×10 <sup>-4</sup> ]	1.0000

Halon-1301 : 213K<T<383K

CO<sub>2</sub> : 200K<T<2000K

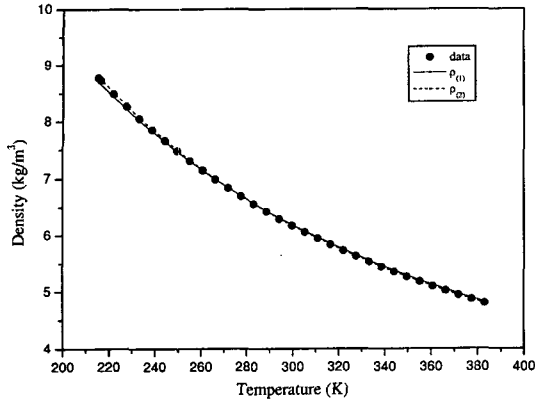


Fig. 2. Comparison of experimental and calculated density with temperatures for Halon-1301 at 1 atm.

식과 문헌<sup>3)</sup>의 실험값을 비교하였다. 1차로 표시된 압축인자에 관한 실험식(Table 1에서 식  $z_{(1)}$ )은 실험값과 잘 일치하지 않았고, 2차이상의 실험식은  $r^2$ 가 0.999로 문헌의 실험값에 근접하였다.

식 (8)에서 Halon-1301의 압축인자는 온도에 대한 2차 실험식으로 다음과 같이 표기하였다.

$$\begin{aligned} z_{(2)} &= -13.074(1/RT)^2 + 0.04316(1/RT) + 1.000 \\ &= -1941.536(1/T)^2 + 0.526(1/T) + 1.000 \end{aligned} \quad (9)$$

(215.4K < T < 383K)

식 (9)에서 K는 Kelvin 온도를 나타낸다.

밀도  $\rho = f(z, T)$ 로 표시된다.  $z$ 는 다항식 형태로 표시된 식을 이용하여 온도에 관한 단일 변수로 표현하고, Fig. 2에서 보는 바와 같이 1차 이상의 실험식에서 모두  $r^2$ 가 0.999 이상이 되었다.

식 (1)에서 Halon-1301의  $z = z_{(2)}$ 를 대입하여 구하였고, 온도에 대한 다음과 같은 관계로 표시하였다.

$$\rho_{(2)} = 1/\{-1.070(1/T) + 5.512 \times 10^{-4}T + 2.899 \times 10^{-5}\} \quad (10)$$

(215.4K < T < 383K)

기체상태방정식 (1)과 Virial식 (2)을 함께 적용하여 밀도를 압력과 온도를 독립변수로 하는 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_{(i)} = \sum_{i=0}^M \frac{M}{A_i(P/RT)^{(i-1)}} \quad (11)$$

### 3.1.2 CO<sub>2</sub>

Halon-1301과 같은 방법으로 Fig. 3에서 보는 것과 같이 압축인자는 1차로 표시된 실험식(Table 1에서 식

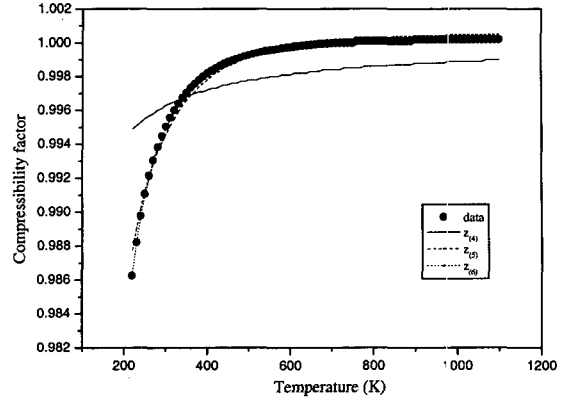


Fig. 3. Comparison of experimental and calculated compressibility factor with temperatures for CO<sub>2</sub> at 1 atm.

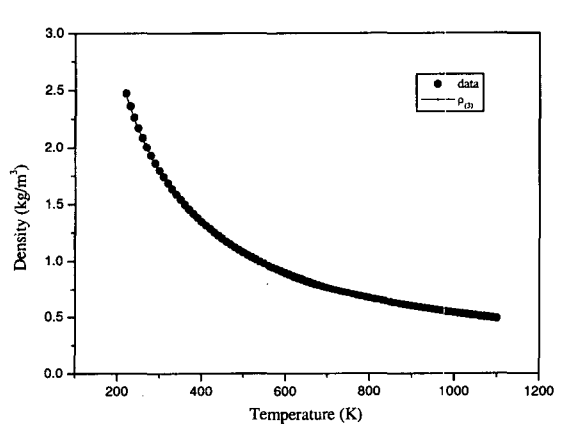


Fig. 4. Comparison of experimental and calculated density with temperatures for CO<sub>2</sub> at 1 atm.

$z_{(4)}$ 은 문헌에<sup>4)</sup> 일치하지 않았고, 2차로 표시된 실험식(Table 1에서 식  $z_{(5)}$ )은 문헌과의  $r^2$ 가 0.9870이었다. 식 (8)에서 온도에 대한 2차의 관계로서 CO<sub>2</sub>의 압축인자는 다음과 같이 표시하였다.

$$\begin{aligned} z_{(5)} &= -5.999(1/RT)^2 + 0.1110(1/RT) + 1.000 \\ &= -890.873(1/T)^2 + 1.353(1/T) + 1.000 \end{aligned} \quad (12)$$

(220K < T < 1100K)

Halon-1301과 같은 방법으로 밀도를 구하면 Fig. 4에서 보는 것과 같이 1차 이상에서 모두 문헌에 근접하게 된다. CO<sub>2</sub>에서는 Halon-1301에서 제안한 식보다 간단하게 1차로 표현되는 실험식(Table 1에서 식  $\rho_{(3)}$ )을 사용 할 수 있다. CO<sub>2</sub>의 밀도는 온도에 대한 1차의 관계로 다음과 같이 표시하였다.

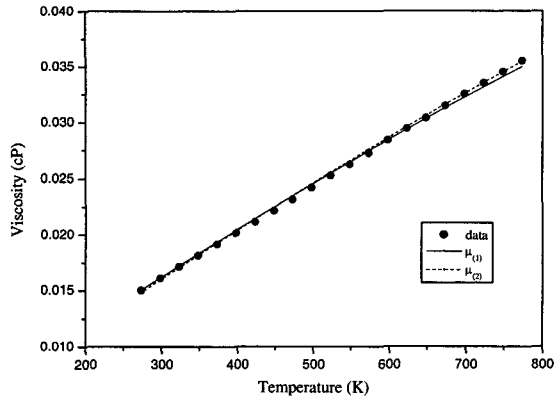


Fig. 5. Comparison of experimental and calculated viscosity with temperatures for Halon-1301 at 1 atm.

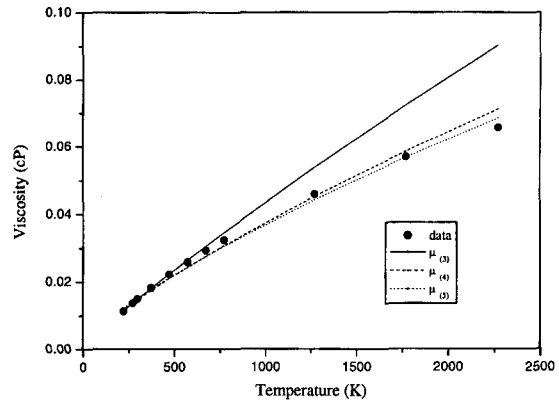


Fig. 6. Comparison of experimental and calculated viscosity with temperatures for CO<sub>2</sub> at 1 atm.

$$\rho_{(3)} = 1/\{1.865 \times 10^{-3}T - 2.090 \times 10^{-3}\} \quad (220K < T < 1100K) \quad (13)$$

### 3.2 점도

#### 3.2.1 Halon-1301

일반적으로 가장 많이 사용하는 점도에 관한 실험식 (3)을 이용하여 n값을 구하였다. Halon-1301에서 문헌의 21개의 실험값을 이용하여 n=0.9983과  $\mu_{273}=0.015$ 을 구할 수 있었다. Fig. 5에서의  $\mu_{T(1)}$ 에서 보는 바와 같이 계산된 점도는 충분히 문헌에 근접하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 형태의 실험식의 타당성을 검토하였다.

$$(\mu/\mu_{273}) = (T/273)^n + X \quad (\text{단, } X \text{는 상수}) \quad (14)$$

식 (14)에서 보정인자 X를 추가하였고 양변에 로그를 취하여 선형화하였다. 계산된 결과는 n=0.9987, 보정인자 X=-0.01371를 얻었고 Fig. 5에 표시하였다. 결

과적으로 보정된 Halon-1301의 점도에 대한 관계는 다음과 같다.

$$\mu = 0.015\{(T/273)^{0.9987} - 0.01371\} \quad (273K < T < 773K) \quad (15)$$

#### 3.2.2 CO<sub>2</sub>

널리 알려진 CO<sub>2</sub>에서는 실험식 (3)에서 사용되는 n=0.89 문헌에 의하여 확인하였다.<sup>6)</sup> 그러나 Halon-1301과 같은 방법으로 문헌<sup>8)</sup>의 11개의 실험값을 이용하여 새로운 n을 구하면 n=0.7779이 되어 차이가 있었다.  $\mu_{273}=0.0137$ 을<sup>3)</sup> 이용하여 500°C와 2000°C까지 실험식을 구하였다.

보정인자를 가지는 식 (14)을 이용하여 n을 구하면 n=0.7567이 되고, 보정인자 X=0.03138이었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 2000°C까지 점도는 보정인자 X=0.03138인 실험식(Table 2에서 식  $\mu_{(5)}$ )의 r<sup>2</sup>가 0.9936으로 실험값에 가장 근접하였다. n=0.89인 실험식  $\mu_{(3)}$

Table 2. Comparison of experimental and calculated viscosity with temperatures for Halon-1301 and CO<sub>2</sub> at 1 atm

Material	$\mu$	Equation	r <sub>1</sub> <sup>2</sup>	r <sub>2</sub> <sup>2</sup>
Halon-1301	$\mu_{(1)}$	$\mu_{273}(T/273.15)^{0.8142}$	0.9983	-
	$\mu_{(2)}$	$\mu_{273}((T/273.15)^{0.8324} - 0.01371)$	0.9987	-
CO <sub>2</sub>	$\mu_{(3)}$	$\mu_{273}(T/273.15)^{0.89}$	0.9941	0.7248
	$\mu_{(4)}$	$\mu_{273}(T/273.15)^{0.7779}$	0.9913	0.9871
	$\mu_{(5)}$	$\mu_{273}((T/273.15)^{0.7567} + 0.03138)$	0.9905	0.9936

$$\mu_{273} : \text{Halon-1301} = 0.015$$

$$\text{CO}_2 = 0.0137$$

$$r_1^2 : \text{Halon-1301} \quad 273K < T < 773K$$

$$\text{CO}_2 \quad 223K < T < 773K$$

$$r_2^2 : \text{CO}_2 \quad 223K < T < 2273K$$

은  $r^2$ 가 0.7248로서 문헌의 데이터로 구해진 실험식  $\mu_{(4)}$ ,  $\mu_{(5)}$ 에서의 각각  $n=0.7779$ 와  $0.7567$ 과는 많은 오차가 있었다. 그렇지만  $500^\circ\text{C}$ 이하에서는 식  $\mu_{(3)}$ 의  $r^2$ 가 0.9941로서 가장 문헌에 근접하여 다음과 같이 서로 다른 온도영역에 대해서 다음과 같은 두 개의 실험식으로 표시하였다.

$$\mu = 0.0137(T/273)^{0.89} \quad (223\text{K} < T < 773\text{K}) \quad (16)$$

$$\mu = 0.0137\{(T/273)^{6.7567} + 0.03138\} \quad (773\text{K} < T < 2773\text{K}) \quad (17)$$

### 3.3 엔탈피

#### 3.3.1 Halon-1301

엔탈피는 정의에 의해서 내부에너지와 압력과 부피의 곱의 합으로 표시된다. 내부에너지는 온도에 관한 함수이고 식 (4)에서 압력과 부피의 곱으로 표현되어

지는 항은 기체상태 방정식 (1)에 의해서  $PV=RT$ 로 된다. 그러므로 식 (4)는 온도에 관한 함수, 형태  $H = f(T)$ 로 표시된다. 엔탈피에 관한 식을 다음과 같이 다항식의 형태로 표시하였다.

$$H_{(i)} = \sum_{i=0}^{\infty} C_i T^i \quad (18)$$

Fig. 7에서 엔탈피는 1차로 제안되는 실험식(Table 3에서 식  $H_{(1)}$ )에서는  $r^2$ 가 0.9982이었다. 하지만 2차로 제안되는 실험식  $H_{(2)}$ 에서는  $r^2$ 가 0.9994로 실험값에<sup>3)</sup> 거의 일치하였다. Halon-1301의 엔탈피를 온도에 대한 2차식으로 표시하면 다음과 같다.

$$H_{(2)} = 3.773 \times 10^{-5} T^2 + 0.2408T + 37.179 \quad (215.4\text{K} < T < 383\text{K}) \quad (19)$$

엔탈피 변화량은 온도 변화에 따른  $\langle C_p \rangle_H$ 을 구함

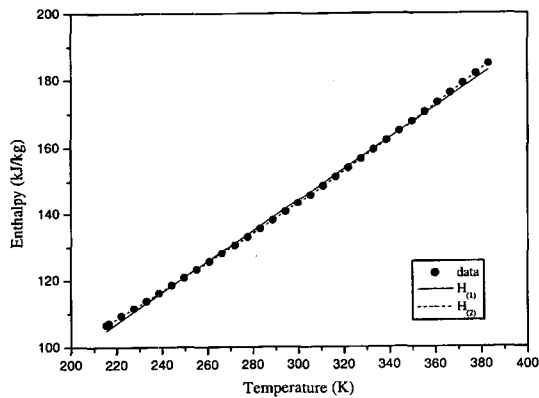


Fig. 7. Comparison of experimental and calculated enthalpy with temperatures for in Halon-1301 at 1 atm.

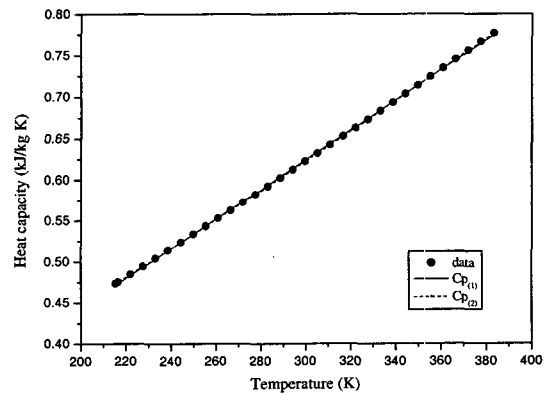


Fig. 8. Comparison of experimental and calculated heat capacity with temperatures for Halon-1301 at 1 atm.

Table 3. Comparison of experimental and calculated enthalpy and heat capacity with temperatures for Halon-1301 and  $\text{CO}_2$  at 1 atm.

Material	Property	H, $C_p$	Equation	$r^2$
Halon-1301	H	$H_{(1)}$	$0.465T + 4.762$	0.9982
		$H_{(2)}$	$3.773 \times 10^{-5} T^2 + 0.2408T + 37.179$	0.9994
	$C_p$	$C_{p(1)}$	$0.001806T + 0.08206$	0.9985
		$C_{p(2)}$	$5.301 \times 10^{-7} T^2 + 1.490 \times 10^{-3} T + 0.1276$	0.9998
$\text{CO}_2$	H	$H_{(3)}$	$1.089T + 466.481$	0.9968
		$H_{(4)}$	$2.596 \times 10^{-4} T^2 + 0.746T + 562.424$	0.9999
	$C_p$	$C_{p(3)}$	$5.314 \times 10^{-4} T + 0.7263$	0.9599
		$C_{p(4)}$	$-4.682 \times 10^{-7} T^2 + 1.149 \times 10^{-3} T + 0.5533$	0.9993

Halon-1301 :  $213\text{K} < T < 383\text{K}$   
 $\text{CO}_2$  :  $200\text{K} < T < 2000\text{K}$

으로서 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.<sup>3)</sup> 열용량은 온도를 독립변수로 하는 함수로서 다음과 같은  $C_p = f(T)$ 이다. 온도의 함수로서 열용량의 식을 식 (18)과 마찬가지로 다항식의 형태로 표시할 수 있다.

$$C_{p(i)} = \sum_{i=0}^{\infty} D_i T^i \quad (20)$$

Fig. 8에서 열용량과 온도에 다항식으로 표시된 실험식에서  $r^2$ 를 비교하면 1차로 제안되는 실험식(Table 3에서 식  $C_{p(1)}$ )은  $r^2$ 가 0.9985로 실험값에 근사하였다. Halon-1301의 열용량을 식 (19)과 유사하게 온도에 대한 2차의 관계로 다음과 같이 표시하면  $r^2$ 는 0.9998로서 거의 1에 일치하였다.

$$C_{p(2)} = 5.301 \times 10^{-7} T^2 + 1.490 \times 10^{-3} T + 0.1276 \quad (21)$$

(215.4K < T < 383K)

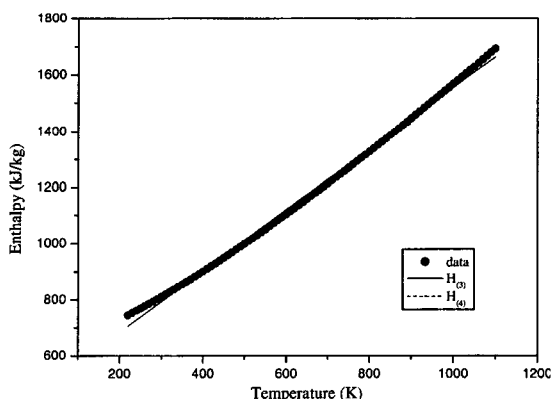


Fig. 9. Comparison of experimental and calculated enthalpy with temperatures for CO<sub>2</sub> at 1 atm.

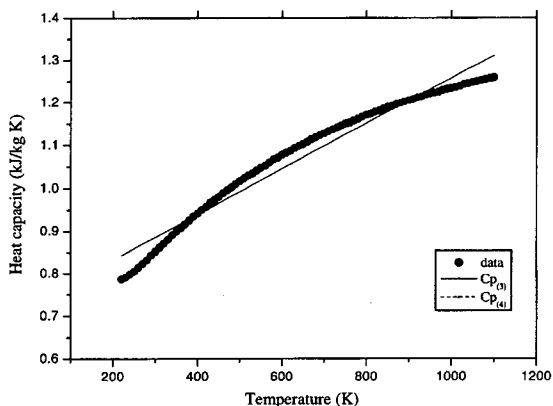


Fig. 10. Comparison of experimental and calculated heat capacity with temperatures for CO<sub>2</sub> at 1 atm.

### 3.3.2 CO<sub>2</sub>

Table 3에서 H<sub>(3)</sub>의  $r^2$ 가 0.9968로 충분히 1에 근접하였다. Halon-1301과 마찬가지로 온도에 관한 2차 함수로 표시된 엔탈피는 다음과 같이 표시되었다.

$$H_{(4)} = 2.596 \times 10^{-4} T^2 + 0.746 T + 562.424 \quad (22)$$

(220K < T < 1100K)

CO<sub>2</sub>에서 열용량에 관한 식 (20)는 Fig. 10에서 온도에 관한 2차 실험식(Table 3에서 식  $C_{p(4)}$ )에서 충분히 실험값에 근접하였고, CO<sub>2</sub>의 열용량은 온도에 대해서 다음과 같이 표시하였다.

$$C_{p(4)} = -4.682 \times 10^{-7} T^2 + 1.149 \times 10^{-3} T + 0.5533 \quad (23)$$

(220K < T < 1100K)

CO<sub>2</sub>에서 온도에 대한 1차 함수로서 열용량을 표시하면 Halon-1301과는 달리 비교적 낮은  $r^2$ 인 0.9599이었다.

## 4. 결 론

Halon-1301과 CO<sub>2</sub>의 물성에 관한 실험식을 구하는 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 밀도는 온도와 압력에 대해서 변하는 고유한 물성이다. 실제 기체는 압축인자에 따라서 밀도가 이상 상태와 다른 값을 가지게 되며 압축인자를 이용하여 온도, 압력에 따른 밀도에 관한 실험식을 얻었다. Halon-1301과 CO<sub>2</sub>에 대한 압축인자와 밀도의 관계는 각기 2차, 1차 온도에 관한 실험식으로 나타내었다.
2. 점도는 온도에 대한 지수함수로 상관식을 도출하였으며, 온도범위에 따라서 2개의 실험식을 얻었다. 온도범위가 2000°C까지인 경우에는 보정인자를 사용한 실험식을 제안하였다.
3. 온도에 관한 함수로서 엔탈피는 2차 다항식으로 잘 표시되었고, 열용량도 마찬가지로 2차 다항식에 의해서  $r^2$ 가 거의 1에 근접하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원(가스계 혼합소화약제의 물성 연구)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. S. Y. Lee, D. M. Ha, "Study of Chemical Safety", (1977).

2. United Nation Environmental Program (UNEP), Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer(1987).
3. E.I. du Pont de Nemours and Company, Wilimington, Delaware(1989).
4. S. Angus, B. Armatrong, K.M. de Reuck, "International Thermodynamic Tables of the Fluid States Carbon Dioxide", London, UK(1973).
5. J.M. Smith, H.C. Van Nes and M.M. Abbott, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 5th(1997).
6. W.L. McCabe, J.C. Smith and P. HarriottUnit, "Operations of Chemical Engineering", 5th(1993).
7. R.C. Reid, J.M. Prausnitz and B.E. Poling, "The Properties of Gases & Liquids", 4th(1988).
8. R.P. Danner and T.E. Daubert, "Manual for Predicting Chemical Process Design Data".
9. Kaltetechnik 16 Jahrgang Heft 3,71(1964).

### 기호설명

$\rho$	: density [kg/m <sup>3</sup> ]	$A_i$	: nth order coefficient of compressibility factor
$\mu_T$	: viscosity at T K [cP]	$B_i$	: nth order coefficient of density
$\mu_{273}$	: viscosity at 273 K [cP]	$C_i$	: nth order coefficient of viscosity
		$D_i$	: nth order coefficient of enthalpy
		$E_i$	: nth order coefficient of heat capacity
		$z_i$	: nth order of compressibility factor
		$C_p$	: heat capacity [kJ/kg K]
		$\langle C_p \rangle_H$	: mean heat capacity [kJ/kg K]
		$i$	: number of order [-]
		$M$	: mass of gases [kg]
		$N$	: number of data
		$n$	: constant of the viscosity [-]
		$R$	: gas constant [L atm/kg K]
		$r^2$	: correlation coefficient [-]
		$T$	: temperature [K]
		$V$	: volume [L]
		$H$	: enthalpy [kJ/kg]
		$U$	: internal energy [kJ/kg]
		$y_{est}$	: calculated data from the empirical equation
		$y_i$	: experimental data from the literature
		$\langle y_i \rangle$	: average experimental data from the literature
		$z$	: compressibility factor of gases [-]