한국화재소방학회, 제18권 제2호, 2004년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 18, No. 2, 2004

불활성가스계 단일 성분 및 혼합물 성분의 대체 소화제의 물성 비교

Comparison of the Physical Properties for Alternative Fire Extinguishing of Pure and Mixture Component of Inert Gases

김재덕**† · 이광진 · 한순구 · 이윤우** · 노경호*

Jae-Duck Kim**† · Kwang-Jin Lee · Soon-Koo Han · Youn-Woo Lee** · Kyung-Ho Row*

인하대학교 화학공학과, *청정기반기술연구소,
**한국과학기술연구원, 국가지정 초임계유체연구실
(2004. 2. 13. 접수/2004. 5. 28. 채택)

요 약

지구 환경 보호를 고려한 불활성가스계의 혼합물인 IG-541소화제가 개발되었다. 소화제는 물성에 의한 특성 및 효율성, 환경에 미치는 영향 뿐만 아니라 안정성, 경제성을 고려해야한다. 이러한 불활성 가스계의 대체 소화제에 사용되는 N_2, Ar, CO_2의 순수 및 혼합물의 물성을 수집하여 비교하였다. 불활성 가스계 대체소화제의 물성 중 밀도, 점도, 표면장력을 온도에 대한 변화와 혼합물에서 몰 분율의 변화에 관해 비교하였다. 3성분계 혼합물 중 50% N_2, 40% Ar, 10% CO_2(mol. %)의 조성인 혼합물에서 밀도가 높고, 점도가 낮으며, 표면장력이 순수 성분 보다 높지 않아 소화제로서 유리하다.

ABSTRACT

The commercially available IG-541 extinguished agent composed of inert gases was developed for environmental protection. The extinguished agents were considered in terms of physical properties, efficient characteristic, environment, stability, and economical efficiency. The pure and mixture components of physical properties of N_2, Ar and CO_2 were chosen and compared. The physical properties of density, viscosity and surface tension of inert gases were plotted with the molar ratios of N_2/CO_2 and Ar/CO_2 in terms of a temperature. The extinguished agent in the composition of N_2, Ar and CO_2, 50/40/10 (mol %) showed relatively high density, low viscosity and moderate surface tension, therefore it was suitable for the alternative extinguished agents.

Keywords : Extinguished agents, Inert Gas, Physical property, CFC

1. 서 론

급속한 현대 산업발전에 부수적으로 발생하는 환경문제는 UN에서 최우선과제로 다루어지고 있다. 그 중에서 지구온난화현상과 오존층 파괴의 가속화는 각종 국제회의에서 중요한 요인이 되고 있으며, 오존층 파괴에 원인이 되는 CFC계 화합물은[1] 프레온 물질로 인한 지구환경의 변화가 인간의 삶과 동·식물에 미치는 영향이 매우 크다. 그 중에서 심각한 문제로 일어나고 있는 대기오염 문제는 미래 산업발전과 새로운 성장 모델에 가장 중요한 요소가 될 것이다. 국제환경연합(UNEP)은 1985년 비엔나에서 회의를 열고, 오존층 보호를 위한 비엔나 협약을 채택하였으며, 그 후 캐나다 몬트리올에서 오존층 파괴물질에 대한 1987년 몬트리올 의정서 협약, 1992년 덴마크 코펜하겐에서 개최된 제4차 총회에서 규제일정을 대폭 단축하고 전 세계적으로 서로 대립되는 문제의 타당성을 합의하여 제 3세대의 통합적 환경관리체제의 보호정책이 필요하다.[1-3] 그 중에서 우수한 물성 때문에 소화약제로 널리 이용되는 할론 화합물은 1994년 1월 1일부터 100% 전폐키로 합의하였으며, 2000년까지는 전 세계적으로 생산과 사용이 중단될 것이다. 따라서 할론 대체물질의 연구 개발 방안이 매우 필요하게 되었다.[2] 대체소화제는 일반적으로 수계, 가스계로 구분하고 있으며,

†E-mail: jdkim@kist.re.kr

그 것의 특성은 물리적, 화학적으로 안정하며 독성이 적고 보다 높은 안전성이 필요한 우수한 소화약제의 보급과 대응이 필요하게 되었다. 소화원리는 주로 연소의 화학적 반응을 억제하고 저 농도(5% 미만)로 소화가능하며, 전기화재에 매우 효과적이고, 독성과 부식성이 매우 낮으며, 물질의 내부까지 침투가 가능하여야 한다.[4,5] 불활성가스계 대체물질로서 ODP가 0이며, 성층권의 오존 감소에 거의 영향을 끼치지 않는 것이며, 소화약제는 불꽃소화농도, 독성, 환경영향성, 약제 저장안정성 및 부식성, 상용성, 물성, 경제성 평가와 특징으로 무색, 무취, 비전도성 가스로 약 1.0 kg/cm^2 정도의 압력을 지니고 있다. 또한 혼합물의 조성(±5%)은 CO_2(허용치 7.6~8.4 %), Ar(허용치 37.2~42.8%), N_2(허용치 48.8~55.2%)로 되어 있다. 이들 중 CO_2의 경우 단일 성분이나 다른 불활성가스를 혼합한 형태로 사용되며, 침투성이 좋고 위험시설 등의 화재를 유효하게 방호할 수 있는 우수한 소화효과를 갖고 있지만 안전성의 확보가 필요하다. 따라서 단일 성분으로도 사용이 가능하지만 대부분 혼합물 상태로 사용한다.[6] 대체소화제의 기술 개발 현황은 Inergen을 기초로한 혼합물의 연구를 중심으로 청정소화약제의 소화농도 및 소화기구, 독성, 환경영향성, 소화분해물 연구를 통해 적합한 약제를 선정하는데 중요하다. 본 연구의 목적은 대체소화제로 사용되고 있는 순수 물질의 단일 성분인 Ar, N_2, CO_2에 관한 열역학적 물성의 특징과 불활성가스계 혼합물의 몰분율에 따른 조성비를 적용하여 실제적인 상용화된 불활성가스계 IG-541 물성의 특성을 알아내고 필수적으로 고려해야 할 소화 방출 시간을 예상하는데 물성인 밀도, 점도, 표면장력의 특성을 비교하여 국내, 외에서도 기술적 영향 및 관련기관들의 기초 자료로 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 대체소화제의 특성

대체소화제의 조건 및 특성에는 소화성능, ODP, 독성, 저장안정성 및 부식성, 상용성, 물성이 있으며, 청결(잔사), 비전도성, 낮은 소화농도, 빠른 불꽃의 진화, 침투의 우수성, 낮은 독성을 기준으로 하여 절대적 소화성능과 상대적 소화성능으로 나눠질 수 있다. 절대적 소화성능의 측정은 소화시스템이 특정 화재를 진압할 수 있는지의 여부를 측정하기 어려우므로 상대적 성능을 측정하고 오존파괴 지수가 적은 대체 소화물질의 선정과 밀폐된 실내에서 사용해야 하므로 독성이 낮아야 한다. 이외에 물리적 화학적 특성을 고려한 액체 및 가스가 적절히 방사될 수 있도록 하며, 사람이 상주하는 곳에서도 사용할 수 있어야 한다.

2.2 대체소화제의 주요 물성

온도와 압력에 대한 상관관계를 알기 위해서 기체상태 방정식을 이용하며, 기체상태방정식[7]을 이용하였다. 기체상태방정식은 다음과 같다.

$$PV = nRT \tag{1}$$

2.2.1 밀도

기체의 밀도는 포화 상태(STP 25°C 1atm)를 기준으로 한다. 물질의 단위 부피당 질량, $\rho = M/V$이고, 물질의 무게특성을 나타낸다. 밀도를 계산할 때 가장 대표적으로 많이 사용되는 식은 기체상태방정식이며 다음과 같다.[8]

$$\rho = MP/zRT \tag{2}$$

z는 압축인자를 나타내고 압축인자는 온도에 관한 식으로 구해진다. 그리고 z는 압력(P)과 부피(V)에 관하여 다음과 같이 표시할 수 있다.[12]

$$\begin{aligned} z &\equiv 1 + BP + CP^2 + \cdots \\ &= 1 + B'/V + C'/V^2 + \cdots \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)에서 B와 C는 압력, B'와 C'는 온도에 관한 함수에서의 상계수이다. z는 일반적으로 온도의 함수로 주어진다. 실제 기체에서 온도에 대한 밀도는 압축인자와 식 (2)에 의하여 알 수 있다.

이성분계 이상의 기체 혼합물에서 혼합된 기체의 밀도는 식 (4)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\rho_m = \sum_i^n y_i \rho_i \tag{4}$$

여기서, ρ_i는 단일 성분의 밀도를 나타내며, y_i는 각 성분의 몰분율을 나타낸다.

2.2 점도

흐름방향 x축에 직각인 y축 방향에서 유속의 변화가 있을 때, 유속은 x축에 평행인 면에 유체의 속도기울기에 비례하여 작용한다. 이 때의 비례상수는 점도, η이다.

점도를 계산할 때 가장 일반적으로 많이 사용되는 식은 다음과 같다.[8]

$$(\eta_T/\eta_{273}) = (T/273)^n \tag{5}$$

식 (5)에서와 같이 점도는 일반적으로 온도에 대한

함수로 표기된다. 이를 식 (6)과 같이 온도에 대한 다항의 실험식으로 나타낼 수 있다. 이때, 각 항의 계수는 실험에서 얻은 결과를 이용하여 구할 수 있다.

$$\eta = A + BT + CT^2 + DT^3 \tag{6}$$

상압과 같은 낮은 압력에 혼합된 기체 조성물의 점도는 Reichengberg는 다음과 같은 식을 제안하였다.[10,13]

$$\eta_m = \sum_{i=1}^{n} K_i \left(1 + 2\sum_{j=1}^{i=1} H_{ij} K_j + \sum_{j=1\neq i}^{n} \sum_{k=1\neq i}^{n} H_{ij} H_{ik} K_j K_k \right) \tag{7}$$

η_m은 혼합물의 점도이며, η_i는 i 성분의 점도를 의미한다. M_i는 성분, i의 분자량을 의미한다.

$$K_i = \frac{y_i \eta_i}{y_i + \eta_i \sum_{k=1:=i}^{n} y_k H_{ik} [3 + (2M_k/M_i)]} \tag{8}$$

서로 다른 성분의 혼합에 의한 물성의 변화는 식 (8)-(10)을 통해 얻을 수 있다.

$$U_i = \frac{[1 - 0.36T_{ri}(T_{ri} - 1)]^{1/6} F_{Ri}}{(T_{ri})^{1/2}} \tag{9}$$

$$C_i = \frac{M_i^{1/4}}{(\eta_i U_i)^{1/2}} \tag{10}$$

여기서 $T_{ri} = T/T_{ci}$이고, F_{Ri}는 이온화에 대한 보정값이다.

$$F_{Ri} = \frac{T_{ri}^{3.5} + (10\mu_{ri})^7}{T_{ri}^{3.5}[1 + (10\mu_{ri})^7]} \tag{11}$$

여기서, μ_{ri}는 성분 i의 쌍극자 모멘트의 환산값을 나타내고 쌍극자 모멘트가 0인 경우 FRi는 1의 값을 가지게 된다.

$$H_{ij} = \left[\frac{M_i M_j}{32(M_i + M_j)}\right]^{1/2} (C_i + C_j)^2 \frac{[1 + 0.36T_{rij}(T_{rij} - 1)]^{1/6} F_{Ri}}{(T_{rij})^{1/2}} \tag{12}$$

또한, T_{rij}는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{rij} = \frac{T}{(T_{ci} T_{cj})^{1/2}} \tag{13}$$

2.3 표면장력

Miqueu 등의 연구자들은 메탄, 에탄, 질소와 같은 휘발성 유체들의 실험적으로 얻은 표면장력 데이터를 이용하여 표면장력 σ와 임계온도 및 임계부피에 관한 식 (14)와 같은 실험식을 제안하였다.[14]

$$\sigma = kT_C \left(\frac{N_A}{V_C}\right)^{2/3} (4.35 + 4.14w) t^{1.26} (1 + 0.19t^{0.5} - 0.25t) \tag{14}$$

여기서, $t \equiv (1 - T/T_C)$이며, k, N_A, V_C는 각각 Boltzmann 상수, Avogadro 상수, 임계부피를 말한다. ω는 acentric factor를 말한다. 식 (14)는 임계온도 이하의 온도 범위에서만 표면장력을 구할 수 있다. 이성분계 이상의 혼합물에서의 표면장력은 다음과 같이 식 (15)을 통해 구할 수 있다.[10]

$$\sigma^{1/4}_m = \frac{\rho_{Lm} \sum_{i=1}^{n} x_i \sigma^{1/4}_i}{\rho_{Li}} \tag{15}$$

2.4 데이터 분석

본 연구에서는 데이터 분석은 인하대학교 고순도분리연구실의 Pentium PC(1.6 GHz/256 RDRAM)를 사용하였으며, 분석도구로는 Excel™을 이용하였다. 문헌을 통해 얻은 실험값을 다항식, 지수, 역수관계등의 상관관계를 이용하여 실험식을 가정하고, 이를 실험값과의 상관도(r^2)를 측정하여 검토하였다. r^2는 다음과 같이 정의된다.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_{est})^2}{\sum (y_i - \langle y_i \rangle)^2}, \quad \langle y_i \rangle = \frac{\sum y_i}{N} \tag{16}$$

3. 결과 및 고찰

본 연구는 불활성가스계를 원료로 하는 소화제의 혼합물의 비율에 따른 밀도, 점도, 표면장력의 영향 및 온도에 따른 단일 성분에서 기체의 물성 변화를 알아보았다. 또한 현재 상용화 되어있는 불활성가스계 혼합 소화약제의 3성분계 혼합물의 비율 50% N_2(mol. %), 40% Ar(mol. %), 10% CO_2(mol. %)의 특성을 단일 성분과 혼합물의 조성비에 따른 물성을 대기압(1기압)에서 일정한 온도에 따른 밀도, 점도, 표면장력을 이전에 알려진 실험 자료를 이용하여 물성에 특성을 알아보았고, 또한 각 성분간의 조성비에 따라 물성의 변화를 알아보았다. 대체 소화제의 요건 중 중요한 물성들은 낮은 전기전도도, 높은 비열, 적당한 증기압 및 잔사가 없는 것 등으로 알려져 있다. 그 외에도 높은 밀도, 높은 엔탈피와 낮은 점도를 지니는 것도 중요하다. 그 중에서 우리가 대체 소화제로 사용하는 불활성가스계 소화약제의 혼합물에 대한 열역학적 물성 특성을 Table 1, 2에 비교하여 나타내었다.[6,9] Table 2에서

Table 1. Comparison of physical properties of pure and mixture components

Class	Chemical Formula	M.W	Gas density (25℃, 1atm, Kg/m^3)	Viscosity (25℃, 1atm, cP)	Surface tension (25℃ N/m)	Boiling Point. (℃)	Concentration of Fire extinguishing (Vol. %)	ODP	GWP
Pure	Ar	39.94	0.2246	0.02233	0.0000976	−185.89	-	0	na
	N_2	28.01	125.0863	0.01695	0.0001136	−195.78	-	0	na
	CO_2	44.01	89.9401	0.01518	0.0005784	−78.44	-	0	na
Mixture (Inergen)	50% N_2 40% Ar 10% CO_2	34	98.541	0.01279	0.0000038	na	29.1	0	na

Table 2. Physical properties of inert gases

Chemical Formula	T_C(K)	P_C(bar)	V_C(cm^3/mol)	Z_C	ω
Ar	150.87	48.98	75	0.2928	0.0001
N_2	126.21	33.90	90	0.2907	0.0390
CO_2	304.14	73.75	94	0.2741	0.2390

T_C는 임계온도를 나타내며, P_C와 V_C는 임계압력과 임계부피를 나타낸다. Z_C는 임계압축률을 나타내며, ω는 이심인자(acentric factor)를 말한다. 이들은 열역학적인 물성을 계산하는데 있어서 주요한 인자들로서 활용범위가 넓다. 불활성가스계의 특성을 알아보기 위하여 각각의 몰분율 N_2/CO_2는 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0과 Ar/CO_2는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0에 따른 조성비를 적용하여 실제적인 물성의 특성을 알아내고자 한다. 또한 CO_2의 10(mol. %)이하의 조성에 대하여 불활성가스계에서 중요한 기준인 밀도, 점도, 표면장력을 비교하였다.

3.1 밀도

독립변수인 온도에 종속변수인 밀도는 기체상태방정식, 식 (1)에서 압축인자(Z)에 의하여 영향을 받게 된다. 압축인자는 Virial 식에서 온도의 함수로 B_i로 표기하였다.

$$Z_{(i)} \equiv \sum_{i=0} B_i V^i \tag{17}$$

Fig. 1에서 보는 것과 같이 식 (17)을 적용한 V는 온도에 대한 함수이다. 따라서 식 (17)은 온도에 대한 함수로 표현되어진다.

$$z_{(i)} \equiv \sum_{i=0} B_i' T' \tag{18}$$

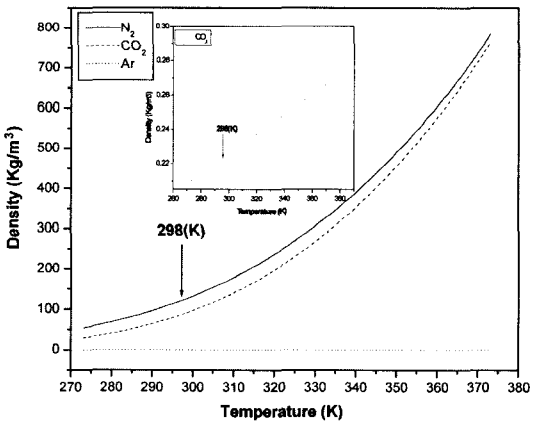

Fig. 1. Effect of temperature on densities with inert gases.

기체상태방정식과 Virial식을 함께 적용하여 밀도를 압력과 온도를 독립변수로 하는 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_{(i)} = \sum_{i=0} \frac{MP_{sat(i)}}{Z_{(i)}RT} \tag{19}$$

따라서 밀도 $\rho = f(T, Z, P_{sat})$로 표시된다. 기체상태방정식과 Virial 식을 함께 적용하여 밀도를 나타내었다. 선행된 김 등[2]의 연구에 의해 발표된 온도에 따른 밀도의 실험식을 이용하여 298 K에서 380 K까지의 온도 범위에서의 각각 Ar이 0.210185 kg/m^3, N_2 53.300006

kg/m^3, CO_2 28.411520 kg/m^{3}의 순수한 밀도를 구하였다. 일반적으로 고체나 액체와 비교하였을 때, 기체는 온도가 증가할수록 부피의 변화가 크기 때문에 밀도의 변화가 크다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 각 기체의 온도에 따른 밀도 변화가 크게 일어난 것을 알 수 있다. Ar의 경우 상대적으로 낮은 기체 밀도를 가지고 있어 변화량이 거의 보이지 않으나, 다른 기체들과 동일한 경향을 보이고 있었다. 구해진 단일성분의 밀도를 식 (4)를 이용하여 각 기체의 조성비에 따른 밀도의 변화를 알아보았다. 여기서 N_2, Ar, CO_2의 조성비는 CO_2에 대한 N_2/CO_2와 Ar/CO_2의 몰비로 변환하여 사용하였고 CO_2를 기본으로 한 일정량 10(mol. %)[6] 이상이 첨가되는 경우 화재 지역 이외에 소화제가 분사되는 지역 내에 있는 사람들의 질식사를 유도할 수 있다. 따라서 CO_2를 기본으로 한 N_2/CO_2의 범위는 1에서 9까지, Ar/CO_2는 1에서 5까지 변화시켜 각 조성비에 따른 밀도의 변화를 알아보았다. Fig. 2에서는 X축과 Y축을 각각 N_2/CO_2, Ar/CO_2로 하고, Z축을 밀도로 하는 3차원의 그래프로 나타냈었다. 이 경우 밀도는 CO_2의 양이 감소할수록 증가하였으며, Ar/CO_2보다는 N_2/CO_2의 양이 증가할수록 증가폭이 컸다. 이는 상대적으로 N_2와 CO_2의 기체 밀도가 Ar보다 상대적으로 큰 값을 가지고 있어, N_2/CO_2의 양이 증가할수록 밀도는 증가하였고, Ar/CO_2의 경우 다른 기체들보다 낮은 기체 밀도를 가지고 있어, 밀도의 증가폭이 낮았다. 밀도는 높을수록 물질의 무게가 크기 때문에 소화성능이 뛰어나다. 따라서, 소화에 적합한 높은 밀도를 가지기 위해서는 상대적으로 밀도가 낮은 Ar/CO_2의 양이 적어야 하고, 밀도가 높은 N_2, CO_2의 함유량을 높여야 함을 알 수 있었다. 상용화된 Inergen의 밀도는 Fig. 2에 보이는 화살표의 값인 98.541 kg/m^{3}이며, 높은 값을 가지는 것을 알 수 있었고, N_2와 Ar는 온도의 변화에 따라서 밀도변화가 상대적으로 적었으며, 소화제로 사용하는데 있어서 적합하다고 보여준다. 또한, 밀도가 높을수록 소화제를 분사하는 데 소요되는 기계적 에너지가 증가하는 단점이 있고, 화재로 인해 연소물질의 연소로 인한 화학적 반응이 일어나 유독성물질로 전환될 수 있다. 이러한 이유로 인해 순수한 단일 성분보다는 혼합물의 소화제의 우수성을 입증하였다.[5,6,12,13]

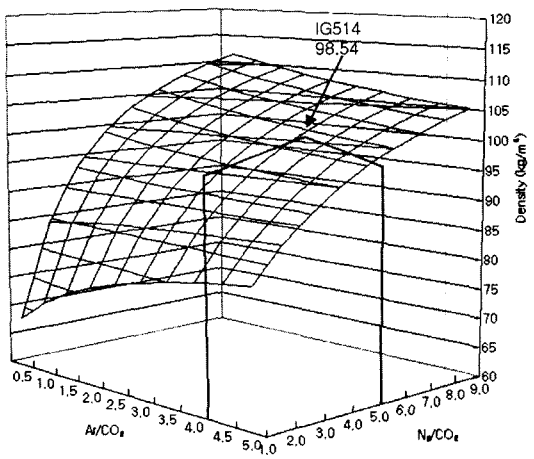

Fig. 2. Effect of mole fraction of inert gases on densities.

3.2 점도

불활성 가스계 소화제는 Ar, CO_2, N_2의 단일 또는 혼합물로서, 일반적인 연소의 구성이 연료, 열, 산소의 3가지 요소의 결합에 의해서 발생한다. 연소의 형태가 고체인지, 액체인지 또는 기체인지에 따라 연소는 확산, 증발, 분해, 표면연소에 의하여 점도의 영향력이 다르다. 점도가 너무 높으면 소화제의 기계적 특성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 불활성가스계 소화제의 소화원리인 공기를 불활성가스로 희석하는 질식소화방법으로 혼합소화제의 희석이 물질의 화합상태로 적절히 적용되는 것이 바람직하다. 점도는 높은 것 보다 적절한 수준의 점도의 특성을 갖고 있을 때 물질의 무게가 소화기 성능의 미치는 영향을 기계적 특성에 중요한 요인이 될 것이며 소화성능에 미치는 영향이 클 것이다. 일반적으로 가장 많이 사용하는 점도에 관한 특성은 Table 3에 문헌[2,5,6,9] 실험값을 통해 얻은 실험식을 이용하여 계산하였다. 이 때 실험식은 상관도가 0.99이상이었다. 순수한 Ar, CO_2, N_2를 온도변화에 따른 298 K에서 380 K까지의 범위에서 단일성분의 점도를 식 (6)을 이용하여 점도의 특성을 Fig. 3에 나타내었으며, 점도는 소화제의 방출에서 중요한 역할을 한다. 점도가 너무 크면 방출하는데 높은 압력이 필요하고 이에 따라 방출장비의 기계적인 에너지 소모가 크며, 방출속도가 늦어지는 문제점이 있다. 단일성분의 점도는 선행된 김 등[2,6]의 연구에 의해 발표된 온도에 따른 점도의 실험식을 참조하여 구하였다. 상온에서 단일성분의

Table 3. Parameters of empirical eq. (6) for viscosity

	N_2	Ar	CO_2
A	3.04×10^{-3}	4.39×10^{-3}	2.55×10^{-3}
B	4.99×10^{-5}	6.40×10^{-5}	4.55×10^{-5}
C	-1.10×10^{-8}	-1.30×10^{-8}	-8.60×10^{-9}
r^2	0.99	0.99	0.99

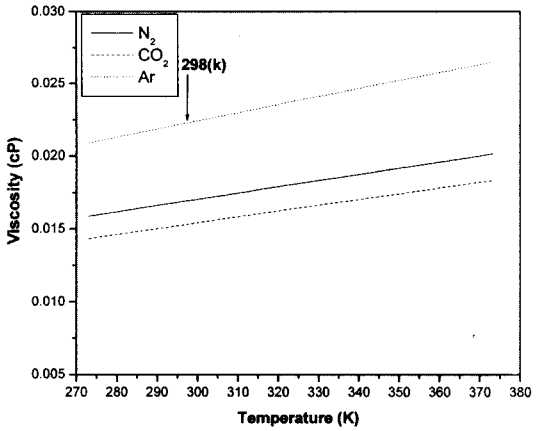

Fig. 3. Effect of temperature on viscosities with inert gas.

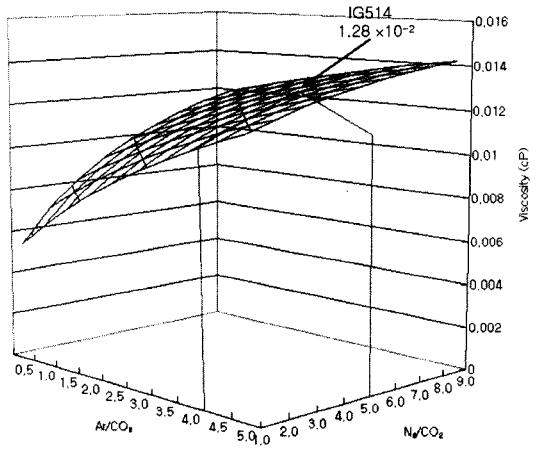

Fig. 4. Effect of mole fraction of inert gases on viscosities.

점도를 비교하였을 때 Ar의 경우 0.02233 cP로 다른 기체인 N_2의 0.01695 cP와 CO_2의 0.01518 cP에 비하여 상대적으로 높은 경향을 보이고 있었다. 구해진 단일성분의 점도를 식 (7)를 이용하여 각 기체의 조성비에 따른 점도를 혼합물의 조성비에 따라 구하였다. 여기서 N_2, Ar, CO_2의 조성비는 CO_2에 대한 N_2와 Ar의 몰비로 변환하여 사용하였다. N_2/CO_2의 범위는 1에서 9까지, Ar/CO_2는 1에서 5까지 변화시켜 각 조성비에 따른 점도의 변화는 Fig. 4에서 보는 것과 같다. 혼합물의 점도는 CO_2의 양이 감소할수록 증가하였으며, 반대로 Ar/CO_2과 N_2/CO_2의 양이 증가할수록 점차 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 N_2/CO_2보다 Ar/CO_2의 양에 따라 점도의 증가폭이 컸다. Ar의 경우 다른 기체들보다 높은 기체 점도(0.02233 cP)를 가지고 있어, 점도의 증가폭이 큰 것으로 사료된다. 기존의 할로계 소화제와 비교하였을 때 Halon-1301(0.015 cP)보다 전체적으로 낮은 값을 가졌으며, Freon-23(0.0132 cP)과 HFC-227ea(0.0117 cP)와는 일정 범위($N_2/CO_2 \geqq 5.0$, $Ar/CO_2 \geqq 2.5$)에서 유사한 값을 가졌다. 따라서, 불활성가스를 이용한 소화제를 개발하는데 있어서 혼합물 조성비를 N_2/CO_2가 5.0이상, Ar/CO_2가 2.5이상에서 결정하는 것을 제안한다.

3.3 표면장력

액체의 자유표면에서 표면을 작게 작용하는 장력과 액체 분자간의 위치에너지가 크고, 액체가 표면적에 비례한 에너지를 갖기 때문에 되도록 작게 하려고 하는 작용이 표면장력으로 나타난다. 기체상에서의 표면장력은 접하고 있는 액체나 고체 상에 비해 표면에너지가 미세하거나 그 값이 아주 작은 것으로 알려있다. 따라서 순수한 기체상에서의 표면장력을 구하는 실험식은 아직 알려지지 않았다. 또한 Inergen의 소화약제는 50% N_2, 40% Ar, 10% CO_2로써 약제 조성에 가장 중요한 특성을 보면 소화용기내에 규정량의 CO_2가 압축충전되어 액화하고 있지만 온도에 따라 압력은 변화하고 충전비에 따라 다르다. 또한 CO_2의 농도가 높아지면 인간의 호흡율은 min/호흡량이 증가하고 CO_2 물질의 흡입과 자극은 인체에 위험을 야기시키며, 현기증, 어지러움증, 두통 등의 징후가 생긴다.

본 연구에서 CO_2의 표면장력은 식 (14)을 이용하여 계산하였다. Ar과, N_2은 문헌[15,16]에 나온 실험값(Table 4)을 이용하여 식 (20)와 같은 실험식을 만들어 구하고, 각각의 A, B값은 Table 5와 같다. 다항식과 지수항의 식의 경우 일정온도(160 K)에서 음의 값이 계산되어졌다. 따라서 비교적 상관도가 0.93으로 낮지만, 식 (19)가 실험식으로 타당하다고 사료된다.

$$\ln(\sigma) = A\ln(T) + B \tag{20}$$

Fig. 5에서는 70 K에서 304 K의 온도범위에서 순수한 Ar, CO_2, N_2를 온도변화에 따른 표면장력이 Ar 0.0351598 N/m와 CO_2 0.0541927 N/m, N_2 0.0119936 N/m의 특징을 보여주고 있으며, 온도가 증가함에 따라 모두 감소하였으며, 특히 CO_2의 경우 다른 기체보다 높은 표면장력을 가졌으며 상대적으로 낮은 감소를 보였고, 특히 N_2, Ar은 160 K지점에서 급격히 감소하는 유사한 경향을 보였다. 298 K 지점에서 N_2의 표면장력은 0.0001136 N/m이었고, Ar은 0.0000976 N/m, CO_2는 0.0005784 N/m의 값을 가졌다. Fig. 6은 불활성가스계의 기체의 순수한 표면장력을 이용하여 조성비에 대한 표면장력의 영향을 나타내었다. N_2/CO_2의 양이 증가할

Table 4. Surface tension of inert gases with temperature

T (K)	N_2	Ar	CO_2
70	0.01054	-	-
80	0.00831	-	-
84	-	0.0133	-
86	-	0.0128	-
88	-	0.0123	-
90	0.00619	0.0118	-
92	-	0.0113	-
100	0.00419	-	-
110	0.00235	-	-
120.47	-	0.00498	-
125.19	-	0.00402	-
130.68	-	0.00293	-
135.15	-	0.00214	-
140.12	-	0.00124	-
259.53	-	-	0.00660
264.49	-	-	0.00600
270.57	-	-	0.00500
274.40	-	-	0.00400
280.26	-	-	0.00293
286.34	-	-	0.00207
292.42	-	-	0.00120
298.42	-	-	0.00047

Table 5. Parameters of empirical eq. (19) for surface tension (CO_2 : $240 \leqq T \leqq 300$)

	N_2	Ar	CO_2
A	-3.22	-3.99	-17.42
B	9.24	13.50	92.13
r2	0.94	0.94	0.91

수록 Ar/CO_2의 양이 감소할수록 표면장력은 감소하였다. 이는 CO_2의 표면장력이 다른 기체들 보다 상대적으로 높은 값을 가지고 있고, N_2의 경우 낮은 값을 가지고 있어 CO_2의 양이 감소하고 상대적으로 N_2의 양이 증가할수록 혼합물의 표면장력은 감소하는 경향을 보인 것으로 사료된다. Halon계 소화제와 비교하였을 때 전 조성비에서 상대적으로 낮은 값을 가졌다. 따라서, 불활성가스계 혼합물의 조성에서 상대적으로 N_2/CO_2의 양을 늘이고, Ar/CO_2의 양을 줄임으로써 적절한 표면장력 값을 가지는 것이 좋으리라 사료되며, 3

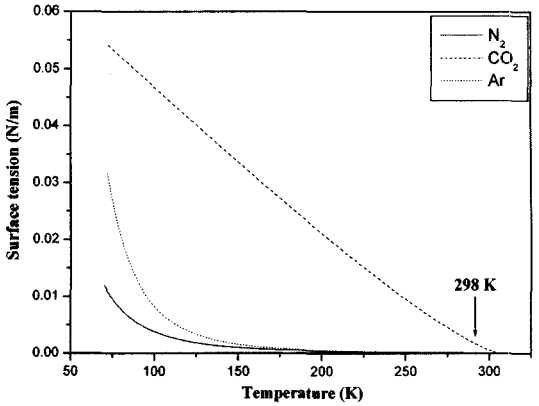

Fig. 5. Effect of temperature on surface tension with inert gas.

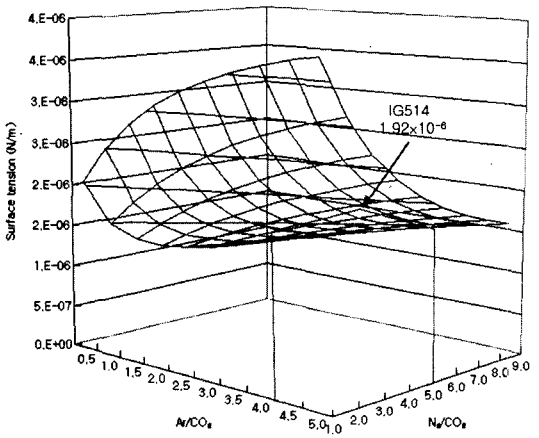

Fig. 6. Effect of mole fraction of inert gases on surface tension.

성분계 혼합물의 50% N_2, 40% Ar, 10% CO_2의 표면장력이 0.00006068 N/m로써 순수한 형태보다 혼합형태의 표면장력 값이 낮았다. 따라서 Inergen 소화제의 특성과 각각의 조성에 따른 표면장력이 소화력에 미치는 영향은 매우 중요하다.

4. 결 론

대체 소화제로 쓰이는 불활성가스중 대표적인 것은 Ar, N_2, CO_2이다. 본 연구에서는 소화제 방출 시간 예측에 가장 중요한 밀도, 점도, 표면장력에 관하여 이들 물질의 혼합비율에 따라 열역학적 물성을 조절할 수 있으며, 밀도와 점도의 온도 범위 298(K)에서 380(K)와 표면장력 70(K)에서 304(K)이하의 온도 범위에서 예측할 수 있었다. 이러한 경우 Inergen 50% N_2, 40%

Ar, 10% CO_2(mol. %)과 혼합물의 조성비에 따른 물성을 비교하였다. 순수 물질에 대하여 온도에 대한 단일 변수와 3성분계 혼합물에 대한 N_2와 Ar, CO_2의 조성비를 N_2/CO_2와 Ar/CO_2의 몰비로 변환하여 물성의 특성을 확인하였고, 이를 통해 각 물성에서 소화제로서의 성능을 향상할 수 있는 조성비를 알 수 있었다. 이를 통해 선행 연구에서 보고된 김 등[2,6]의 연구 결과에 의하면 3성분계 혼합물 중 50% N_2, 40% Ar, 10% CO_2 (mol. %)의 조성에서 밀도가 높고, 점도가 낮으며, 표면장력이 순수 성분 보다 높지 않은 낮은 혼합물이 소화제로서 우수한 것을 알 수 있었다.

감사의 글

인하대학교 청정기반기술연구소의 연구비 지원에 감사드립니다.

기호설명

- β : acentric factor constant
- η : viscosity[cP]
- η_r : reduced viscosity
- μ : dipole moment
- ρ : density[kg/m^3]
- σ : surface tension[N/m]
- ω :acentric factor
- F_{Ri} : polar correction factor
- k : Boltzmann constant[J/K]
- n : constant of the viscosity
- N_A : Avogadro number[/mol]
- P : pressure[bar]
- P_r : reduced pressure[−]
- T : temperature[K]
- T_{br} : reduced boiling temperature[−]
- T_r : reduced temperature[−]
- V_C : critical volume[cm^3/mol]

참고문헌

1. J. D. Kim, Y. W. Lee, M. S. Song, and K. H. Row, "Empirical Equations for Thermodynamic Physical Properties of Freon-23 and HFC-227ea", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 16, No. 3 (2002).
2. J. D. Kim, M. S. Yeo, Y. W. Lee, and K. H. Row, "Empirical Equations for Thermodynamic Physical Properties of Inert Gas", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 17, No. 2(2003)
3. United Nation Environmental Program (UNEP). Montreal Protocol on Substances that Deplete The Ozone Layer.(1987).
4. Y. Zou, N. Vahdat, and M. Collins, "Fire extinguishing Ability of 1-bromo-1-propane and 1-methoxynonaflu-Orbutane Evaluated by Cup Burner Method", Journal of Fluorine Chemistry, 111, 33-40 (2001)
5. K. H. Row, M. S. Song, S. G. Han, J. D. Kim, and Y. W. Lee, "Empirical Equations for Physical Properties of Halon-1305 and CO_2", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 16, No. 2(2002).
6. J. D. Kim, M. S. Yeo, Y. W. Lee, and K. H. Row, "Thermodynamic Empirical Equations for Physical Properties of Inert Gas Mixtures", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 17, No. 2(2003).
7. J. M. Smith, H. C. Van Nes, and M. M. Abbott, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 5th Ed., McGraw-Hill(1997).
8. W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. HarriottUnit, "Operations of Chemical Engineering", 5th Ed., McGraw-Hill(1993).
9. S. Angus, B. Armatrong, and K. M. de Reuck, "International Thermodynamic Tables of the Fluid States Carbon Dioxide", London, UK(1973).
10. J. M. Prausnitz, R. N. Lichtenthaler, and E. G. de Azevedo, "Molecuar Thermodynamics of Fluid-phase Equilibria", 2nd Ed., Prentice-Hall PTR, Inc.(1986).
11. K. H. Row, "Excel for Chemical Engineering", A-Jin press(2001).
12. C. T. Lira and J. R. Elliott, "Inrtoductory Chemical Engineering Thermodynamics", 1st Ed., Prentice-Hall PTR, Inc.(1999).
13. B. E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. P. O'Connell, "The Properties of Gases and Liquids", 5th Ed., McGraw-Hill(2000).
14. C. Miqueu, D. Broseta, J. Satherley, B. Mendiboure, J. Lachaise, and A. Graciaa, "An Extended Scaled Equation for the Temperature Dependence of the Surface Tension of Pure Compounde Inferred from an Analysis of Experimental Data", Fluid Phase Equilibria 172, 169-182(2000).
15. D. D. Do, E. Ustionov, and H. D. Do, "Phase Equilibria and Surface Tension of Pure Fluids Using a Molecular Layer Structure Theory (MLST) Model", Fluid phase Equilibria 204, 309-326(2003).
16. J. L. Rivera, J. Alejandre, S. K. Nath, and J. J. Depablo, "Thermodynamic and Transport Properties of Nitrogen anD Butane Mixtures", Molecular Physics Vol. 98, No. 1, 43-55(2003).