

염화탄화수소의 화재 및 폭발 특성치 간의 상관관계

하 동 명

세명대학교 안전공학과

(2002. 7. 3. 접수 / 2002. 11. 14. 채택)

Interrelationships of Fire and Explosion Properties for Chlorinated Hydrocarbons

Dong-Myeong Ha

Department of Safety Engineering, Semyung University

(Received July 3, 2002 / Accepted November 14, 2002)

Abstract : By using the reference data, the empirical equations which describe the interrelationships of explosion properties and physical properties of n-chlorinated hydrocarbons have been derived. The properties which have been correlated are the lower and upper explosive limits, the stoichiometric coefficients, the heats of combustion, the carbon numbers. Also, the new equations using the mathematical and statistical methods for predicting the temperature dependence of lower explosive limits(LEL) of chlorinated hydrocarbons on the basis of the literature data are proposed. The fire and explosion properties calculated by the proposed equations in this research were a good agreement with literature data within a few A.A.P.E.(Average Absolute Percent Error) and A.A.D.(Average Absolute Deviation). From a given explosive properties, by using the proposed equations, it is possible to predict to the fire and explosion characteristics for the other chlorinated hydrocarbons.

Key Words : n-chlorinated hydrocarbons, explosion properties, temperature dependence, empirical equations, statistical method

1. 서 론

가연성물질의 여러 가지 화재 및 폭발 특성치는 대표적으로 폭발한계, 인화점, 최소발화온도, 연소열 등을 들 수 있다. 이 가운데 폭발한계(Explosive Limits)는 가연성물질(가스 및 증기)을 다루는 공정 설계 시 고려해야 할 중요한 변수로써, 발화원이 존재할 때 가연성가스와 공기가 혼합하여 일정 농도 범위 내에서만 연소가 이루어지는 혼합범위를 말한다¹⁾. 특히 폭발한계 자료는 초기 온도, 초기 압력, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태, 실험자의 숙련도 등에 따라 다른 값을 가지므로 문헌 자료 역시 다양하게 제시되고 있다.

폭발한계의 연구로는 Zabetakis 등²⁾의 증기 중에서 파라핀족탄화수소의 폭발한계에 관한 실험적 연구

구, 北川徹三³⁾은 여러 유기화합물에 대한 폭발상한계 예측에 관한 연구, Affens 등⁴⁾의 공기중에서 노말 탄화수소의 화재 및 폭발 특성치의 연구, Lovachev 등⁵⁾의 연소한계에 대한 화염전파 방향에 관한 연구, High 등⁶⁾에 의한 그룹기여법(Group Contribution Method)를 이용한 폭발상한계 추산에 관한 연구를 들 수 있으며, 최근에 Kondo 등⁷⁾은 F-Number를 이용한 폭발한계 예측 연구를 행하였다. 또한 폭발한계의 온도의존성 연구로 Hustad 등⁸⁾과 Karim 등⁹⁾이 저온가스의 폭발한계의 온도의존성에 관한 실험적 연구를 한 바 있으며, Ha^{10,11)}는 파라핀족 탄화수소의 폭발한계의 온도의존성 예측식을 제시하였고, 알코올화합물의 화재 및 폭발 특성치에 관한 연구를 통해 알코올화합물의 온도의존성에 관한 연구를 발표하였다.

지금까지의 폭발한계에 관한 연구는 대부분의 순수물질 가운데에서도 탄화수소에 국한된 연구가 많

hadm@semyung.ac.kr

이 이루어지고 있다. 그러나 산업현장에서 취급하는 유기용제는 다양하므로 공정의 안전성 확보를 위해 많은 자료와 연구가 필요하다.

유기용제 가운데 염화탄화수소는 금속세정제, 드라이 크리닝, 페인트 산업, 유기합성, 전자 산업뿐만 아니라, 윤활류에 관련된 산업, 화학 최종제품을 만들기 위한 중간제품 등으로 폭넓게 사용되고 있다. 일반적으로 염화탄화수소는 다른 물질에 비해 낮은 폭발하한계, 낮은 증발잠열 등을 지니고 있으므로 안전을 더 고려해야한다.

본 연구에서는 그 동안 문헌에 발표된 여러 이론과 문헌자료(실험자료)를 고찰하여 수학적 및 통계적 방법에 의해 염화탄화수소의 화재 및 폭발의 특성을 평가할 수 있는 새로운 이론을 제시하고자 한다. 산업현장 및 화학공정에 널리 사용되고 있는 염화탄화수소류에 대해 폭발특성치들 간의 상관관계를 고찰하고, 폭발한계의 온도의존성에 대한 연구를 통해 공정 상에 안전을 확보할 수 있는 자료로 이용되고, 또한 아직 까지 밝혀지지 않은 다른 염화탄화수소 화합물에 대한 화재 및 폭발 특성치 연구에 도움을 주는데 목적이 있다.

2. 염화탄화수소의 폭발 특성

염화탄화수소 계열의 물질들은 합성수지원료, 유기용제, 살충제, 이온교환수지 등으로 다양한 분야에 사용되고 있는 1,2-Dichloroethane과 1,1,1-Trichloroethane에 대한 물리적 및 화재, 폭발 특성을 Table 1에 나타내었다¹²⁻¹⁴. 노말염화탄화수소의 특성치간의 상관관계를 고찰하기 위해 화재 및 폭발 특성¹³⁻¹⁵을 Table 2에 나타내었다.

3. 화재 및 폭발 특성치 간의 상관관계를 찾기 위한 수학적 및 통계적 방법

폭발특성치들의 실험자료 분석을 통하여 특성치 간의 상관관계를 나타낼 수 있는 추산 모델들 가운데 최적화된 모델을 찾기 위해 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 이용하였다^{16,17}.

제시한 모델을 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같은데,

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots + px^p + \dots \quad (1)$$

여기서 각 매개변수 a, b, c, d, e, \dots 을 추산하기 위해 최소화(Minimization) 방법을 이용하였다. 이 방법은 S.S.D.(Sum of Square of Deviation)을 구하기 위해 각 매개변수를 편미분하여 이를 영(Zero)으로 두어서 얻어지는 정규식(Normal Equation)의 해를 구하면 된다.

염화탄화수소 화합물에서 연소열과 탄소수, 탄소수와 폭발하한계, 폭발하한계와 연소열, 완전연소시 화학양론계수와 폭발하한계 등의 관계를 예측하기 위해 제시한 여러 가지 모델들 가운데 최적화된 모델을 선정하여야 한다. 최적화된 모델을 선정하기 위해서 통계학에서 많이 이용하는 A.A.P.E.(Average Absolute Percent Error)와 A.A.D.(Average Absolute Deviation)를 사용하였으며 다음과 같다^{10,11,18}.

$$A.A.P.E. = \frac{\sum \left| \frac{X_{est.} - X_{exp.}}{X_{exp.}} \right|}{N} \times 100 \quad (2)$$

$$A.A.D. = \frac{\sum | X_{est.} - X_{exp.} |}{N} \quad (3)$$

Table 1. Physical, fire and explosion properties of chlorinated hydrocarbons

Properties	1,2-Dichloroethane	1,1,1-Trichloroethane
Chemical formular	C ₂ H ₄ Cl ₂	C ₂ H ₃ Cl ₃
Molecular weight	98.96	133.41
Boiling point(°C)	83.5	74.1
Melting point(°C)	-35.7	-32.5
Specific gravity	1.256	1.325
Density(20°C)	1.2531	1.3376
Viscosity(15°C)	0.887	0.903
Solubility(wt%) water in solvent	0.9	0.13
Flash point(°C)	13	≤25
Explosive limit(Vol %)	6.2-15.9	7.5-15
Auto-ignition temperature(°C)	476	458

Table 2. Fire and explosion parameters for n-chlorinated hydrocarbons

Compounds	LEL	UEL	Flash Points [°C]	Heats of Comb. [kJ]	AIT [°C]	Cst
CH ₃ Cl	7.1	19	-45	675.4	632	0.17
C ₂ H ₅ Cl	3.6	16	-50	1284.9	519	0.061
n-C ₃ H ₇ Cl	2.1	11	<-18	1867.0	520	0.042
n-C ₄ H ₉ Cl	1.8	10	-9	2508.7	240	0.035
n-C ₅ H ₁₁ Cl	1.4	9	13	3122.6	260	0.026

여기서 X_{est} 는 추산식에 의해 추산된 특성값이고, X_{exp} 는 문헌값이며, N 은 자료(data)수이다.

또한 통계 분석을 위해 결정 값의 표준편차와 표본 결정계수(Coefficient of Determination)를 사용하였다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - y_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (5)$$

여기서 S 는 결정값의 표준오차, Y_i 는 문헌값, y_i 는 추산값이다. r^2 은 표본 결정계수, SSR 은 회귀에 의한 제곱합(Sum of Squares due to Regression), SST 는 SSR 과 잔차에 의한 제곱합(Sum of Squares due to Residual Error)의 합이다.

3. 화재 및 폭발 특성치 간의 상관관계

3.1. 연소열과 탄소수

노말 염화탄화수소화합물의 화재 및 폭발 특성치 간의 상관 관계를 고찰하기 위해 우선 탄소수 증가에 의한 연소열의 관계를 살펴보았다. 앞서 제시한 수학적 및 통계적 방법론에 의해 다음과 같은 최적화된 예측식을 얻었다.

$$\Delta H_c = 57.044 + 611.828n \quad (6)$$

식 (6)에 의해 추산된 연소열 값과 문헌값¹³⁾을 비교한 결과 통계적 방법인 $AAPe$ 는 0.56, AAD 는 8.6, 표준편차는 12.09 그리고 결정계수는 0.99로서 예측값과 문헌값은 거의 일치함을 보여주고 있다. 따라서 탄소수를 이용하여 다른 노말염화탄화수소의 연소열 예측이 가능해 졌다.

3.2. 폭발하한계와 탄소수

지금까지 파라핀족 탄화수소에 대한 연구 결과에서 폭발하한계가 탄소수와 상관관계가 있음을 여러 문헌들에서 알 수 있으므로 이를 근거로 염화탄화수소류 역시 폭발하한계와 탄소수가 상관관계가 성립되는 지를 살펴보고자 한다. 먼저 문헌자료를 통하여 폭발하한계와 탄소수의 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\frac{1}{L} = 0.00553 + 0.14247n \quad (7)$$

식 (7)에 의해 추산된 폭발하한계 값을 문헌값과 비교한 결과 $AAPe$ 는 4.63, AAD 는 0.156, 표준편차는 0.028 그리고 결정계수는 0.99로서 예측값은 문헌값과 거의 일치함을 보여주고 있다. 따라서 문헌에 제시되어 있지 않은 다른 염화탄화수소의 폭발하한계 예측이 어느 정도 가능해 졌다.

3.3. 폭발하한계와 연소열

일반적으로 화염에는 그 이하의 온도는 없다고 하는 최저온도가 있고, 그 값은 탄화수소화합물 등에서 약 1200°C가 된다. 이와 같은 단열화염온도(Adiabatic Flame Temperature)의 한계가 생기는 이유는 탄화수소의 폭발하한계와 연소열의 관계를 이용한 Burgess-Wheeler법칙으로 설명이 가능하다. 이 법칙은 즉 두 값(폭발하한계와 연소열)의 곱은 일정하고 폭발하한계의 단위를 Vol%, 연소열의 단위를 kcal/mol로 표시하면, 그 값은 약 1050이 된다고 고려하면 쉽게 이해할 수 있다.

이 법칙은 폭발하한계에 있어서 발생하는 열량은 연료의 종류에 관계없이 동일하다. 따라서 그것에

Table 3. Comparison between reported and predicted values of heats of combustion with carbon numbers for n-chlorinated hydrocarbons

Compounds	Reported data[kJ]	Predicted data[kJ]
CH ₃ Cl	675.4	668.87
C ₂ H ₅ Cl	1284.9	1280.7
n-C ₃ H ₇ Cl	1871	1892.53
n-C ₄ H ₉ Cl	2508.7	2504.36
n-C ₅ H ₁₁ Cl	3122.64	3116.18
A.A.P.E.	-	0.5648
A.A.D.	-	8.6114

Table 4. Prediction of lower explosive limits with carbon numbers for n-chlorinated hydrocarbons

Compounds	LEL	Eqn. (7)
CH ₃ Cl	7.1	6.76
C ₂ H ₅ Cl	3.6	3.44
n-C ₃ H ₇ Cl	2.1	2.31
n-C ₄ H ₉ Cl	1.8	1.74
n-C ₅ H ₁₁ Cl	1.4	1.39
A.A.P.E.	-	3.3796
A.A.D.	-	0.1560

Table 5. Prediction of lower explosive limits with carbon numbers for n-chlorinated hydrocarbons

Compounds	LEL	Heat of Com.[kJ]	Eqn. (8)
CH ₃ Cl	7.1	675.4	6.90
C ₂ H ₅ Cl	3.6	1284.9	3.63
n-C ₃ H ₇ Cl	2.1	1867	2.50
n-C ₄ H ₉ Cl	1.8	2508.7	1.86
n-C ₅ H ₁₁ Cl	1.4	3122.64	1.49
A.A.P.E.	-	-	6.4906
A.A.D.	-	-	0.1550

관계되는 화염온도는 일정하고 동시에 최저가 되기 때문이다. Burgess-Wheeler 법칙에 의하면 연소열과 폭발한계의 관계는 $(\Delta H_c) \times (LEL) = 1050$ 로 나타낸다.

본 연구에서도 염화탄화수소의 연소특성의 규칙성을 살펴보기 위해 폭발하한계와 연소열의 관계를 고찰한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$(\Delta H_c) \times (LEL) = 4663.37 \quad (8)$$

식 (8)에서 연소열의 단위를 kJ/mol로 이용한 결과이나, 만일 연소열 단위를 kcal/mol을 사용할 경우에는 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$(\Delta H_c) \times (LEL) = 1115 \quad (9)$$

Table 5에는 연소열에 의한 폭발하한계의 예측값을 나타내었다. 여기서 표준 편차는 0.229, 결정계수는 0.99로서 예측값과 문헌값은 일치함을 보여 주고 있다.

3.4. 화학양론계수와 폭발하한계

지금까지 탄화수소화합물에 대해 완전연소 시 양론계수와 폭발한계의 관계에 대해 많은 연구가 이루어 왔으며, Jones¹⁹⁾는 탄화수소화합물에 대해 연료몰수와 완전연소에 필요한 공기몰수를 이용하여 화학양론적계수 (C_{st})를 계산한 후 이를 사용하여 폭발하한계와 상한계를 추산하는 식을 제시하였다.

$$LEL = 0.55C_{st} \quad (10)$$

$$UEL = 3.50C_{st} \quad (11)$$

Table 6. Prediction of lower explosive limits with stoichiometric coefficients for n-chlorinated hydrocarbons

Compounds	LEL	Eqn. (14)
CH ₃ Cl	7.1	7.56
C ₂ H ₅ Cl	3.6	2.71
n-C ₃ H ₇ Cl	2.1	1.86
n-C ₄ H ₉ Cl	1.8	1.56
n-C ₅ H ₁₁ Cl	1.4	1.16
A.A.P.E.	-	14.61
A.A.D.	-	0.4134

$$C_{st} = \frac{Fuel\ Moles}{Fuel\ Moles + Air\ Moles} \times 100 \quad (12)$$

그러나 최근의 문헌²⁰⁾을 보면, 폭발하한계 예측에 필요한 보정계수 0.55 대신에 0.5를 많이 사용하고 있다.

$$LEL = 0.5C_{st} \quad (13)$$

그러나 다른 가연성 물질에 대한 연구는 파라핀족 탄화수소에 비해 많지 않은 편이다. 따라서 본 연구에서는 염화탄화수소의 폭발하한계와 화학양론계수의 관계를 3장에서 소개한 다중회귀분석으로 규명한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$LEL = 0.44C_{st} \quad (14)$$

Table 6에 화학양론계수를 이용한 폭발하한계의 예측값 결과를 나타내었다. 여기서 표준 편차는 0.541, 결정계수는 0.946로서, 다른 특성치를 이용하여 폭발하한계를 예측한 경우보다 문헌값과 예측값이 약간의 차이를 보이고 있으나, 기존의 경험식 (Empirical Equation)인 Jones식과 다른 결과를 얻을 수 있었다.

4. 폭발한계의 온도의존성

일반적으로 폭발한계의 온도의존성을 살펴보면 계의 온도가 증가할 경우 폭발하한계는 작아지고, 폭발상한계는 커져서 폭발범위가 넓어진다. 이는 온도가 증가함에 따라 분자간의 운동이 활발하여 폭발이 용이하기 때문이다.

Zabetakis²¹⁾는 Burgess-Wheeler 법칙을 근거로 하여

연소열과 폭발하한계의 관계에서, 폭발하한계의 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.21 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (15)$$

또한 Zabetakis²⁾는 폭발하한계에서의 온도의존성을 고찰하기 위해서는 연소열, 폭발한계, 비열 그리고 폭발하한계에서의 화염온도를 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{L_{25}}{100} \cdot \Delta H_c = C_p(t_{lim} - 25) \quad (16)$$

$$\frac{L_i(t)}{100} \cdot \Delta H_c = C_p(t_{lim} - t) \quad (17)$$

식 (16)과 식 (17)을 조합하면 다음과 같은 온도의존 관계식을 얻을 수 있다.

$$L_i(t) = L_{25} \left[1 - \frac{t - 25}{t_{lim} - 25} \right] \quad (18)$$

식 (18)에서 폭발하한계에서의 화염온도(t_{lim})를 1300℃라는 가정 하에서 다음과 같은 식을 제시하였으며, 이 식에서는 연소열과 비열의 온도의존성을 고려하지 않고 있다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.8 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (19)$$

Hustad 등⁸⁾은 대기압, 450℃까지의 온도에서 메탄과 노말부탄의 폭발하한계의 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 0.00085(t - 25)] \quad (20)$$

최근 Ha¹⁰⁾는 알코올화합물의 폭발하한계의 온도의존성을 예측할 수는 새로운 예측식을 제시한 바 있다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 9.50 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (21)$$

본 연구에서는 염화탄화수소의 1,2-Dichloroethane과 1,1,1-Trichloroethane에 대한 새로운 폭발하한계

의 온도의존식을 제시하고자 한다.

앞서 제시한 수학적 및 통계적 방법을 이용하여 각 물질의 폭발하한계의 온도의존성을 예측할 수 있는 최적화된 식을 다음과 같이 얻었다.

1,2-Dichloroethane :

$$L_i(t) = 6[0.9623 - 1.93 \times 10^{-3}(t - 25)] \quad (22)$$

1,1,1-Trichloroethane :

$$L_i(t) = 6.8[0.9936 - 7.47 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (23)$$

Table 7과 8에서는 1,2-Dichloroethane과 1,1,1-Trichloroethane에 대해 폭발하한계의 온도의존성의 문헌자료²¹⁾를 이용하여, 본 연구에서 제시한 예측식과 Zabetakis가 제시한 식을 비교하여 결과를 나타내었다.

1,2-Dichloroethane의 경우 본 연구에서 제시한 추산식에 의한 예측값은 Zabetakis식에 의한 예측 결과 보다 실험값과 일치함을 보여 주고 있다. 그러나 1,1,1-Trichloroethane 경우 본 연구에서 제시한 추산식에 의한 예측값은 Zabetakis식에 의한 예측 결과와 큰 차이를 보이지 않고 있다.

따라서 1,1,1-Trichloroethane 경우 100℃ 증가 시 초기 기준상태(일반적으로 1기압, 298 K)에 비해 약 8% 차이를 보였으며, 1,2-Dichloroethane는 약 19%의 차이를 나타내었다.

Table 7. Comparison of literature and predicted values for temperature dependence of LEL of 1,2-dichloroethane

Temp.(°C)	LELexp.(vol%)	Zabetakis	This work
25	6.0	6.0	5.77
100	4.5	5.68	4.90
200	3.9	5.24	3.73
A.A.D.	-	0.84	0.27

Table 8. Comparison of literature and predicted values for temperature dependence of LEL of 1,1,1-trichloroethane

Temp.(°C)	LELexp.(vol%)	Zabetakis	This work
25	6.8	6.8	6.76
100	6.3	6.43	6.37
200	5.9	5.94	5.87
A.A.D.	-	0.06	0.05

지금까지는 순수물질의 폭발한계의 온도의존성 및 혼합용제의 인화점을 예측할 경우 일반적으로 Zabetakis 식을 적용해 왔다. 그러나 본 연구에서 제시한 방법론에 의한 폭발하한계의 온도의존성 결과를 보면, 일반적으로 파라핀족탄화수소의 폭발한계 온도의존성을 평가하는 식인 Zabetakis 식을 다른 가연성순수물질이나, 화합물의 폭발한계의 위험성 평가뿐만 아니라 인화점 예측에 적용하기에는 약간의 무리가 있다고 본다. 따라서 파라핀족탄화수소 이외의 다른 가연성물질의 실험자료 신뢰성을 평가하기에는 바람직하지 못하므로, 본 연구에서 제시한 식을 적용함으로써 실험 자료의 신뢰성을 평가하는데 그 만큼 가치 있다고 사료된다.

5. 결 론

금속세제제, 드라이 크리닝, 페인트 산업, 유기합성, 전자산업, 금속 산업, 윤활유에 관련된 산업, 화학의 중간제품 등으로 널리 사용되고 있는 염화탄화수소류에 대한 화재 및 폭발 특성치들의 상관관계와 폭발하한계의 온도의존성 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연소열과 탄소수의 관계는 잘 일치하였다.

$$\Delta H_c = 57.044 + 611.828n$$

- 2) 폭발하한계는 탄소수와 상관관계를 보여주고 있다.

$$\frac{1}{L} = 0.00553 + 0.14247n$$

- 3) 폭발하한계와 연소열은 서로 상관관계가 있다.

$$(\Delta H_c) \times (LEL) = 4663.37$$

- 4) 폭발하한계와 양론계수의 관계식은 다음과 같다.

$$LEL = 0.44C_d$$

- 5) 1,2-Dichloroethane과 1,1,1-Trichloroethane에 대

한 폭발하한계의 온도의존식은 다음과 같다.

1,2-Dichloroethane :

$$L_i(t) = 6[0.9623 - 1.93 \times 10^{-3}(t-25)]$$

1,1,1-Trichloroethane :

$$L_i(t) = 6.8[0.9936 - 7.47 \times 10^{-4}(t-25)]$$

참고문헌

- 1) 이수경, 하동명, "최신 화공안전공학", 동화기술, 1997.
- 2) M.G. Zabetakis, G.S. Scott and G.W. Jones, "Limits of Flammability of Paraffin Hydrocarbons in Air," Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 43, No. 9, pp. 2120~2124, 1951.
- 3) 北川徹三, "化學安全工學," 日刊工業新聞社, 1971.
- 4) W.A. Affens and G.W. McLaren, "Flammability Properties of Hydrocarbon Solutions in Air," J. Chem. Eng. Data, Vol. 17, No. 4, pp. 482~488, 1972.
- 5) L.A. Lovachev, V.S. Babskin, V.A. Bunev, A.V. V'Yun, V.N. Krivulin and A.N. Barotov, "Flammability Limits : An Invited Review," Combustion and Flame, Vol. 20, pp. 259~289, 1973.
- 6) M.S. High and R.P. Danner, "Prediction of Upper Flammability by a Group Contribution Method," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 26, No. 7, pp. 1395~1399, 1987.
- 7) S. Kondo, Y. Urano, K. Tokuhashi, A. Takahashi and K. Tanaka, "Prediction of Flammability Gases by Using F-Number Analysis," J. of Hazardous Materials, Vol. A82, pp. 113~128, 2001.
- 8) J.E. Hustad and O.K. Sonju, "Experimental Studies of Lower Flammability Limits of Gases and Mixtures of Gases at Elevated Temperature," Combustion and Flame, Vol. 71, pp. 283~294, 1988.
- 9) G.A. Karim, I. Wierzba and S. Boon, "The Lean Flammability Limits in Air of Methane, Hydrogen and Carbon Monoxide at Low Temperature," Cryogenics, Vol. 24, pp. 305~308, 1984.
- 10) D.M. Ha, "A Study on Explosive Limits of Flammable Materials - Prediction of Explosive

- Properties and Temperature Dependence of Explosive Limits for n-Alcohols," J. of the Korean Institute for Industrial Safety Vol. 14, No. 1, pp. 93~100, 1999.
- 11) D.M. Ha, "Prediction of Temperature Dependence of Lower Explosive Limits for Paraffinic Hydrocarbons" J. of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 15, No. 3, pp.71~77, 2000.
 - 12) D.R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics," 76th ed., CRC Press Inc., 1996.
 - 13) R.H. Perry and D.W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook," 7th ed., McGraw-Hill, 1997.
 - 14) R.E. Lenga and, K.L. Votoupal, "The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I ~III," Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc., 1993.
 - 15) J.A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry," 4th ed., McGraw-Hill Inc., 1992.
 - 16) G.E.P. Box and N.R. Draper, "Empirical Model-Building and Response Surface," John-Wiley & Sons, Inc., 1987.
 - 17) D.G. Kleinbaum, L.L. Kupper and K.E. Muller, "Applied Regression Analysis and Other Multi-variable Methods," 2nd ed., PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1988.
 - 18) M.G. Kim, D.M. Ha and J.C. Park, "Modified Response Surface Methodology(MRSM) for Phase Equilibrium. - Application," Korean J. of Chemical Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 39~47, 1995.
 - 19) G.W. Jones, "Inflammation Limits and Their Practical Application in Hazardous Industrial Operation," Chem. Rev., Vol. 22, No. 1, pp. 1~26, 1938.
 - 20) J.C. Jones, "Reid Vapor Pressure as a Route to Calculating the Flash Point of Petroleum Fractions," J. of Fire Sciences, Vol. 16, No. 3, pp. 222~229, 1998.
 - 21) J.M. Kuchta, et al., "Effect of Pressure and Temperature on Flammability Limits of Chlorinated Hydrocarbons in Oxygen-Nitrogen and Nitrogen Tetroxide-Nitrogen Atmospheres," J. of Chemical and Engineering Data, Vol. 13, No. 3, pp. 421~428, 1968.