



안전한 수소 이용을 위한 연소특성치 고찰

†하동명

세명대학교 보건안전공학과

(2008년 3월 23일 접수, 2008년 4월 29일 수정, 2008년 4월 29일 채택)

Investigation of Combustion Properties for Using Safe Hydrogen

†Dong-Myeong Ha

Dept. of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

(Received March 23, 2008, Revised April 29, 2008, Accepted April 29, 2008)

요 약

대부분의 가스공정의 안전한 설계와 조작을 위해서는 취급물질의 확실한 폭발한계, 인화점, 최소자연 발화온도, 최소산소농도 등을 알아야하고, 또한 고온 및 고압에서의 폭발한계도 알아야 한다. 본 연구에서는 수소의 안전한 취급을 위해 수소의 연소특성치인 폭발한계와 최소자연발화온도를 고찰하였다. 문헌 자료를 고찰한 결과 수소의 폭발하한계와 상한계는 공기 중에서 4.0 vol%와 77.0 vol%를 추천하고, 최소 자연발화온도는 전면 가열인 경우는 400°C, 국소 고온표면인 경우는 640°C를 추천한다. 또한 수소의 폭발한계의 온도 및 압력의존성에 대한 새로운 예측식을 제시하였으며, 제시된 식에 의한 예측값은 문헌값과 일치하였다.

Abstract – For the safety design and operation of many gas process, it is necessary to know certain explosion limit, flash point, autoignition temperature (AIT) and minimum oxygen concentration of handling substances. Also it is necessary to know explosion limit at high temperature and pressure. In this study for the safe handling of hydrogen, explosion limit and AIT of combustion properties for hydrogen were investigated. By using the literatures data, the lower and upper explosion limits of hydrogen recommended 4.0 vol% and 77.0 vol%. Also the AIT of hydrogen with ignition sources recommended 400°C at the electrically heated crucible furnace (the whole surface heating) and recommended 640°C at the local hot surface. The new equations for predicting the temperature and the pressure dependence of the explosion limits of hydrogen are proposed. The values calculated by the proposed equations were a good agreement with the literature data.

Key words : hydrogen, explosion limit, autoignition temperature (AIT), safety design and operation

I. 서 론

산업현장에서 취급하는 위험물질의 화재 및 폭발 특성 파악은 공정의 안전 확보에 중요하다. 그 이유는 위험물질의 취급, 처리, 수송 등에 있어 기기의 불안정한 상태 혹은 인적오류에 의해 위험물질이 누출되는 경우 누출된 물질이 공기와 혼합하여 혼합기체를 형성하고 주위에 발화원이 존재한다면 화재 혹은 폭발이 발생할 수 있기 때문이다. 대표적인 화재 및 폭발 특성치로는 폭발한계, 인화점, 최소자연발화점, 최소산소농도, 최소 발화에너지, 연소열 등을 들 수 있다[1,2].

산업현장에서 취급하고 있는 대부분의 물질의 화재 및 폭발 특성치는 한국산업안전공단에서 제공하고 있는 MSDS(Material Safety Data Sheet)를 통해 얻을 수 있다. 또한 잘 알려진 D/B인 미국화학공학회 DIPPR (Design Institute for Physical Property Data)의 환경, 안전, 보건 특성치(Properties in the Environmental, Safety and Health Database)에서 화재 및 폭발 파라미터(Fire and Explosion Parameters)에서 폭발하한계와 상한계, 인화점, 최소발화온도, 연소열의 자료를 얻을 수 있다 [3]. 그러나 화재 및 폭발 특성치는 다양한 조건에서 실험함으로써 정확한 자료를 추출하는 데는 많은 연구와 고찰이 필요하다.

재해 예방의 중요성을 인식한다면, 완전하지 않은 예

†주저자:hadm@semyung.ac.kr

측식을 사용하기보다는 실험에 의해 확인하는 것이 바람직하나, 부득이 하게 실험하기 어려운 때는 예측식을 사용하여 안전을 확보할 수도 있다. 또한 실제와 가까운 예측식을 사용할 수 있다면 상황에 따라 제한된 실험을 해야만 할 때 실험에서 얻어진 측정 결과의 신뢰성을 고찰하는데 큰 역할을 할 수 있다.

최근 화석연료를 대체할 에너지원 가운데 수소는 에너지원 보다는 에너지를 전달하는 매체로 가장 매력적인 것으로 여겨지고 있다. 현존하는 가스 가운데 가장 가벼운 수소는 상온에서 무색, 무취, 무미한 가연성 가스이고, 무독성가스로서 폭발범위가 매우 넓은 물질이다. 수소는 석유화학이나, 석유정제 분야에 주로 사용되고 있으며, 고압가스 안전 관리법령에 따라 고압가스로 규제 받고 있다. 또한 수소 충전 차량용기의 압력은 최고 700기압(70 Mpa)의 초고압이므로 밀폐공간에 가스가 누출될 때 큰 사고가 일어 날 수 있다. 따라서 수소를 생산, 수송, 저장하기 위한 제품의 개발과 더불어 안전 기술개발은 무엇보다 중요하므로 수소의 안전성 평가가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 수소의 화재 및 폭발 특성치 고찰을 통해 수소를 취급, 수송 및 저장하는 공정에서 안전성을 확보하여 중요한 자료로 이용하는데 목적이 있다. 또한, 본 연구에서 제시한 방법론을 사용하여 다른 가

연성가스의 위험성평가에 도움을 주고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1. 가스폭발에 영향을 주는 인자 및 방지 기술

일반적으로 가스폭발은 가연성 가스나 증기가 공기와 혼합하여 기상부분의 용적이 크고, 밀폐 공간에 있을 때 착화원이 존재할 때 발생하는 폭발 형태로서, 공정의 설비, 파이프 그리고 빌딩 등에서 발생할 수 있다. 만일 가연성가스나 증발 액체가 대기 중에 방출될 때, 누출로부터 형성된 가스 운(gas cloud)이 폭발범위 안에 존재하지 않거나, 발화원(ignition sources)이 부족하다면, 가스 운은 희석되거나 대기 중으로 사라질 것이다[4].

가스폭발에 영향을 주는 주요 변수는 연료와 산화제의 형태, 증기운의 연료 농도와 크기, 점화원의 세기와 위치, 폭발방출 면적의 크기, 위치 및 형태, 구조요소와 설비의 위치와 크기, 착화지연시간, 밀폐계 및 개방계 등에 의한 주위의 기하학적 조건 등을 들 수 있다. 따라서 가스폭발은 이들 인자에 대해 대단히 민감하므로 폭발 현상을 예측하기란 쉽지 않다.

가스폭발 방지의 일반적 방법은 산화제의 농도저하와 가연성가스의 농도 저하를 들 수 있다. 또한, 손실

Table 1. Comparison of hazard of fuels.

Fuel properties	Gasoline	Propane	Methane	Hydrogen
Ignition limit	1	2	3	4
Flash point	1	3	2	4
Autoignition temperature	4	3	2	1
Minimum ignition energy	3	2	1	4
Heat of combustion	4	3	2	1
Density	4	3	2	1
Toxicity of fuel	4	3	2	1
Toxicity of combustion	4	3	2	1
Specific heat	4	3	2	1
Detonation limit	1	2	3	4
Flame temperature	4 (2470 K)	2 (2198 K)	1 (2148 K)	3 (2348 K)
Lower limit flame temperature	3	2	4	1
Burningvelocity	1	2	3	4
Diffusion coefficient	4	3	2	1
Adiabatic maximum pressure	4	3	2	1
Total score	46	39	33	32
Relative score (hydrogen = 1)	1.44	1.22	1.03	1

예방에 대한 방법은 제한된 공간에서의 연소를 초기 단계에 감지, 저지함으로써 폭발의 결과를 가져올 수 있는 압력 발달을 예방하는 폭발억제기술, 용기 내부에서 일어난 폭연으로 발생하는 압력에 견디도록 용기와 그 부속장치를 설계하는 폭연압력억제기술 및 폭발의 발화원으로 작용하는 스파크의 진화설비 등을 들 수 있다. 또한 설비설계는 예방방법의 유효성, 설비의 신뢰성 그리고 인명에 대한 위험성 등의 요소를 고려해야 한다.

2.2. 수소와 기존 연료의 위험성 비교

본 연구에서는 미래 에너지인 수소를 현재 널리 사용되고 있는 LNG, LPG 및 가솔린 등과 위험성을 비교하고자 한다.

수소는 모든 원소에서 가장 가벼우므로 연료로서, 현재 사용되고 있는 연료인 LNG, LPG 그리고 가솔린 등과 비교할 때 빠르며, 부력도 매우 빠르게 증가한다. 또한 수소는 상온에서 무색, 무취, 무미한 가연성 가스이고, 무독성가스로서 LNG나 LPG와 비슷한 성질을 가지고 있다. 폭발위험성은 폭발범위가 넓으므로 다른 연료보다 위험하다고 할 수 있으며, 폭굉위험성 역시 폭발위험성과 상관관계가 있으므로 위험성이 크다고 볼 수 있으나, 밀폐계가 아니고 개방계인 경우는 다른 연료들과 비슷하다고 보고되어 있다[2].

수소의 폭발에 필요한 최소발화에너지의 경우 기존의 연료보다 적은 에너지로 폭발이 일어 날 수 있으므로 위험성은 크며, 또한 화염속도는 LNG나 LPG에 비해 약 6-7배 정도 빠르므로 위험성은 크다고 할 수 있다.

최근 문헌[5]에는 수소, 가솔린 그리고 메탄의 연소 특성을 비교하여 수소를 기준으로 상대적 안전도를 제시하였는데, 본 연구에서는 수소를 기준으로 LNG의 주 성분인 메탄, LPG의 하나인 프로판 및 가솔린의 연소 특성을 구체적으로 구분하여 위험도를 비교하여 Table 1에 나타내었으며, Table 1에서 안정성의 순서는 $1 > 2 > 3 > 4$ 로 규정하였다. 4가지의 연료를 기준으로 할 때 수소를 1로 기준하여 상대 위험도를 나타내면 메탄은 1.03, 프로판은 1.22 그리고 가솔린은 1.44로서 수소가 가장 작은 값을 보이고 있으며, 메탄보다는 약간 큰 값으로 안전한 결과로 나타나고 있다.

III. 수소의 화재 및 폭발 안전 특성치 고찰

가연성혼합가스의 폭발한계는 초기온도, 초기압력, 산소농도, 연소열, 분자량, 발화원의 특성, 불활성가스의 비, 측정용기의 크기, 혼합기체의 물리적 상태, 화염

전파방향 및 실험자의 숙련도 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 수소의 폭발한계값들에 대해 여러 문헌에 제시된 자료를 분석하여 고찰하였으며, 폭발한계의 온도 및 압력의존성을 고찰할 수 있는 새로운 예측식을 제시하였다. 또한 최소자연발화온도 역시 발화원, 온도, 압력, 농도, 용기 등에 따라 달라지기 때문에 여러 문헌들을 고찰하여 공정의 안전을 확보할 수 자료를 제공하고자 한다.

3.1. 화염전파 방향에 따른 수소의 폭발한계

폭발한계는 실험에 있어 점화원의 위치에 따라 폭발한계 값이 달라지는데, 일반적으로 폭발범위는 점화할 때 화염이 위쪽으로 올라가는 상향전파에서는 폭발하한계(LEL, Lower Explosion Limit)가 낮고, 폭발상한계(UEL, Uower Explosion Limit)는 높다. 그러나 화염이 아래쪽으로 내려가는 하향전파는 하한계가 높고, 상한계가 낮으며, 수평전파에서는 중간값을 나타낸다[6,7].

Table 2는 실험장치의 크기나 모양 및 화염전파방향에 따라 정리한 폭발한계 값이다. 그 동안 안전을 위해 폭발하한계의 자료를 사용하는데 있어 하한계는 4.0 vol%를, 상한계는 약 74.0 vol%를 많이 인용하였다. 그러나 최근 문헌[7]을 검토한 결과 8~120 L 구형 장치로 측정된 결과 폭발하한계는 5.0 ± 0.5 vol%로 나타났으며, 폭발상한계의 경우 8L 구형 장치로 측정된 결과 76.8 ± 0.2 vol%로 나타났다. 따라서 공정 안전의 목적을 위해서는 폭발하한계는 4.0 vol%, 상한계는 77.0 vol%를 사용하는 것이 타당하다.

3.2. 수소의 폭발한계 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.

그 동안 발표된 폭발하한계의 온도의존성에 관한 연구를 살펴보면 Zabetakis는 연소열과 폭발한계의 관계를 다음과 같이 나타내었다[8].

$$L_i(t) = L_{25} - 0.75(t - 25)/\Delta H_{ci} \quad (1)$$

여기서 $L_i(t)$ 는 온도 t 에서의 폭발하한계, L_{25} 는 25°C에서의 폭발하한계, ΔH_{ci} 는 연소열이다.

Burgess-Wheeler 법칙을 근거로 하여 연소열과 폭발하한계의 관계에서, $\Delta H_c \cdot (L_{25}) = 1040$ 을 식 (1)에 적용하여 폭발하한계의 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

Table 2. Explosion limits by means of the vessel state and the direction of flame propagation for hydrogen.

Vessel state	Direction of propagation	Tube or Sphere		Explosion limits [vol%]	
		Diameter	Length	LEL	UEL
Confined tube	Upwards	7.5 cm	150 cm	4.15	75.0
		2.5 cm	150 cm	4.25	73.0
	Horizontal	7.5 cm	150 cm	6.50	-
		2.5 cm	150 cm	7.15	-
	Downwards	7.5 cm	150 cm	8.8	74.5
		2.5 cm	150 cm	9.4	71.5
Unconfined tube	Upwards	10.2 cm	150 cm	4.0	75.0
		2.5 cm	150 cm	4.2	-
	Horizontal	2.5 cm	150 cm	6.2	-
		0.9 cm	150 cm	6.7	65.7
	Downwards	21.0 cm	31 cm	9.3	-
		2.5 cm	150 cm	9.7	-
Sphere	Upwards	8 L	-	5.0 ± 0.5	76.8 ± 0.2
		20 L	-	5.0 ± 0.5	-
		120 L	-	5.0 ± 0.5	-
		1 L	-	8.7	75.5
		0.81 L	-	5.0	73.5
		0.35 L	-	4.6	70.3

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.21 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (2)$$

또한 Zabetakis는 폭발하한계의 온도의존성을 고찰하기 위해 연소열, 폭발한계, 비열 및 폭발하한계에서의 화염온도를 이용하여 다음과 같은 온도의존식을 나타내었다.

$$L_i(t) = L_{25} \left[1 - \frac{t - 25}{t_{lim} - 25} \right] \quad (3)$$

식 (3)에서 폭발하한계에서의 화염온도(t_{lim})를 1300°C 라는 가정하여 다음과 같은 식을 제시하였으며, 이 식에서는 연소열과 비열의 온도의존성을 고려하지 않고 있다.

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

최근 Cashdollar는 다음과 같은 Burgess-Wheeler식을 수정하여 고온에서의 폭발한계를 예측하는 식을 제시하였다[7].

$$C_T = C_{T_0} \left(\frac{273 + T_0}{273 + T} \right) [1 - 0.000072(T - T_0)] \quad (5)$$

여기서 C_T 는 온도 T 에서 질량농도[g/m³]에 의한 한계, C_{T_0} 는 온도 T_0 에서 한계, 온도는 °C이다.

Hustad 등은 대기압, 450°C까지의 온도에서 메탄과 수소의 폭발하한계의 온도의존성을 연구하였는데, 수소의 폭발하한계 온도의존성에 대해 다음과 같은 식을 제시하였다[9].

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 0.00129(t - 25)] \quad (6)$$

식 (1)을 이용하여 수소의 폭발하한계 온도의존식을 얻는다면, 수소의 연소열을 필요로 한다. 수소의 연소열은 57.79 kcal로서 이 값을 식 (1)에 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$L_i(t) = L_{25} - 0.0134(t - 25) \quad (7)$$

본 연구에서는 참고문헌[10]에 제시된 수소의 온도 증가에 따른 폭발하한계와 상한계 값을 이용하여 회귀 분석에 의해 새로운 예측식을 제시한다. 본 연구에서 제시한 예측식에 의한 예측값과 문헌값의 차이의 정도는 A.A.P.E.(average absolute percent error)와 A.A.D.(average absolute deviation)을 사용하였다[11].

$$A.A.P.E. = \sum \left| \frac{L_{est.} - L_{exp.}}{L_{exp.}} \right| \times 100 \quad (8)$$

$$A.A.D. = \sum \frac{|L_{est.} - L_{exp.}|}{N} \quad (9)$$

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

회귀분석에 의해 최적화된 수소의 폭발하한계와 상한계의 온도 의존식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 8.56 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (10)$$

$$U_i(t) = U_{25}[1 + 3.62 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (11)$$

Table 3. Comparison of A.A.D. and A.A.P.E of the LEL with temperature variation using several correlation for hydrogen.

No.	T (°C)	LEL	Eqn. (10)
1	20	4.5	4.51
2	150	4.0	4.01
3	300	3.5	3.43
4	400	3.0	3.05
A.A.P.E.	-	-	0.99
A.A.D.	-	-	0.03

Table 4. Comparison of A.A.D. and A.A.P.E of the UEL with temperature variation using several correlation for hydrogen.

No.	T (°C)	UEL	Eqn. (11)
1	20	75.0	75.39
2	150	79.5	78.92
3	300	83.0	82.99
4	400	85.5	85.71
A.A.P.E.	-	-	0.38
A.A.D.	-	-	0.30

Table 5. The autoignition temperature of several reported data for hydrogen.

Compound	T_b [°C]	AITs [°C]				
	NFPA	NFPA	SFPE	Welzel	Scott	Kuchta
H ₂	-252	500	400	560	572	635* 640**

*Hot surface

**Air jet gas

여기서 $L_i(t)$ 와 $U_i(t)$ 는 온도 t 에서의 폭발하한계와 상한계, L_{25} 와 U_{25} 는 25°C에서의 폭발하한계와 상한계이다.

식 (10)과 식(11)에 의한 폭발하한계의 온도 의존 예측값을 문헌값과 비교하여 Table 3과 4에 나타내었는데, 예측값과 문헌값은 일치하였다.

3.3. 수소의 최소자연발화온도

일반적으로 발화온도를 측정하는데 있어서 가연성물질과 지연성물질의 혼합물의 온도가 상승되는 시간부터 화재 및 폭발이 발생할 때까지 경과되는 시간을 발화전에 지체(time lag) 혹은 발화에 걸리는 시간이라 한다. 이 시간이 어느 정도 길어지면 발화온도와 일정하게 되는데 이 때의 온도를 자연발화온도(AIT: auto-ignition temperature) 혹은 최소자연발화온도(MSIT: minimum spontaneous ignition temperature)라고 한다 [12].

AIT에 영향을 주는 인자로는 초기온도, 초기압력, 농도, 용기크기, 촉매, 발화지연시간, 유속, 산소농도, 불순물, 실험장치 그리고 실험자의 숙련도 등을 들 수 있다. AIT는 조성에 영향을 받는데, 즉 혼합물 중 일반적으로 양론적 조성비를 기준으로 가연성물질의 농도에 따라 AIT가 커지거나 작아진다. 부피가 큰 계일수록 AIT는 낮아지며, 압력이 높아지면 AIT 역시 낮아지는데 이는 분자간의 거리가 가까워지기 때문에 분자의 이탈 현상을 막기 때문이다. 또한 산소의 농도가 높아지면 AIT는 감소하며, 유속이 빠르면 감소한다. 따라서 이와 같은 여러 조건에 의해 크게 영향을 받고 있으므로 AIT의 자료를 이용할 경우에서 충분한 검토가 중요하다.

AIT는 공정상에서 발생할 수 있는 화재 및 폭발 위험성인, 공정 조작에 있어 과잉 온도상태, 고온 표면에 연소물질의 누출 상태 그리고 저장 및 수송에서 과잉 온도 상태일 때 도움을 줄 수 있다. 그 동안 제시된 수소의 자연발화점을 정리하여 Table 5로 정리하였다 [13-17].

수소의 자연발화온도에 대해 여러 참고문헌을 고찰한 결과 SFPE에서는 400°C를 나타내었고, 다른 문헌들

에서는 500~572°C의 온도분포로 약 70°C의 차이를 확인하였다. 발화원이 고온표면(hot surface)일 때는 635°C, 고온가스인 때는 640°C를 나타내고 있다. 안전 목적을 위해서 일반적으로 400°C 이하를 기준으로 하는 것이 바람직하며, 수소 가스 공정에서 공정을 변경하기 위해 용접 및 용단을 할 때 고온 표면이 발화원으로 작용될 때 640°C 기준으로 이용하는 것이 효율적이다.

IV. 결 론

수소의 화재 및 폭발 특성치를 여러 문헌을 통해 고찰하고, 폭발한계, 자연발화온도 및 폭발한계의 온도 의존성 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최근 문헌을 고찰한 결과 안전을 위해서는 수소의 폭발하한계는 4.0 vol%, 폭발상한계는 77.0 vol%를 사용하는 것이 타당하다.

2) 수소의 폭발하한계와 폭발상한계의 온도의존성에 대한 새로운 추산식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 8.56 \times 10^{-4}(t - 25)]$$

$$U_i(t) = U_{25}[1 + 3.62 \times 10^{-4}(t - 25)]$$

3) 수소 공정의 안전 확보를 위한 최소자연발화온도는 일반적으로 400°C 이하 조건으로 운전하는 것이 타당하며, 만일 공정에서 개방된 공간에서 고온 표면(hot surface)이 발화원인 경우는 640°C를 기준으로 하는 것이 효율적이다.

참고문헌

[1] Kline, A.A., C.R. Szydluk, T.N. Rogers and M.E. Mullins, "An Overview of Compiling, Critically Evaluating, and Delivering Reliable property Data AICHE DIPPER Project 911 and 912", *Fluid Phase Equilibria*, **150-151**, 421-428, (1998)

[2] Lees, F.P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 1, 2nd ed., Oxford Butterworth-Heinemann, (1996)

[3] Meyer, E. *Chemistry of Hazardous Materials*, 2nd ed., Prentice-Hall, (1990)

[4] Bjerketvedt, D., J.R. Bakke and K. Van Wingerden, "Gas Explosion Handbook", *J. of Hazardous Materials*,

52, 1-150, (1997)

[5] Abdel-Aal, H.K., et al., "A New Approach to Utilize Hydrogen as a Safe Fuel", *International J. of Hydrogen Energy*, **30**, 1511-1515, (2005)

[6] 柳生昭三, "蒸氣の爆發限界", 安全工學協會, (1979)

[7] Cashdollar, K.L., et al., "Flammability of Methane, Propane, and Hydrogen Gases", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **13**(3-5), 327-340, (2000)

[8] Zabetakis, G.M., *Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors*, US Bureau of Mines, Bulletin 627, (1965).

[9] Hustad, J.E. and O.K. Sonju, "Experimental Studies of Lower Flammability Limits of Gases and Mixtures of Gases at Elevated Temperature", *Combustion and Flame*, **71**, 283-294, (1988)

[10] Ciccarelli, G, D. Jackson and J. Verreault, "Flammability Limits of NH₃-H₂-N₂-Air Mixtures at Elevated Initial Temperature", *Combustion and Flame*, **144**, 53-63, (2006)

[11] Ha, D.M., "Prediction of Explosion Limits Using Normal Boiling Points and Flash Points of Alcohols Based on a Solution Theory", *T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, **19**(4), 26-31, (2005)

[12] Ha, D.M., "Measurement and Prediction of Autoignition Temperature (AIT) of Flammable Substances - Methanol and Ethanol -", *J. of the Korean Society of Safety*, **19**(2), 54-60, (2004)

[13] NFPA. *Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids*, NFPA 325M, NFPA, (1991)

[14] Kanury, A.M., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering: Ignition of Liquid Fuels*, 2nd ed., SFPE, (1995)

[15] Welzel, M.M., S. Schenk, M. Hau, H.K. Cammenga and H. Bothe, "Ignition of Combustible/Air mixtures by Small Radiatively Heated Surfaces", *Journal of Hazardous Materials*, **A72**, 1-9, (2000)

[16] Scott, G.S., G.W. Jones and F.E. Scott, "Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases", *Analytical Chemistry*, **20**(3), 238-241, (1948)

[17] Kuchta, J.M., 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*, **13**(3), 421-428, (1968)