



프로판가스의 화재 및 폭발 특성치에 관한 연구

†하 동 명

세명대학교 보건안전공학과

(2006년 3월 17일 접수, 2006년 6월 20일 채택)

A Study on Fire and Explosion Characteristics of Propane Gas

†Dong-Myeong Ha

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

(Received 17 March 2006, Accepted 20 June 2006)

요 약

대부분의 가스공정의 안전한 설계와 조작을 위해서는 취급물질의 확실한 폭발한계, 인화점, 최소자연 발화온도, 최소산소농도 등을 알아야 하고, 또한 고온 및 고압에서의 폭발한계도 알아야 한다. 본 연구에서 프로판 안전한 취급을 위해서 프로판의 연소특성치인 폭발한계와 최소자연발화온도를 고찰하였다. 문헌 자료를 고찰한 결과 프로판의 폭발하한계와 상한계는 공기 중에서 각각 2.8 vol%와 10 vol%를 추천하며, 최소자연발화온도는 전면 가열인 경우는 454°C, 국소 고온표면인 경우는 약 960°C를 추천한다. 또한 프로판의 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 and minimum oxygen concentration of handling substances. Also it is necessary to know explosion limit at high temperature and pressure. For the safe handling of propane, explosion limit and autoignition temperature of combustion characteristics for propane were investigated. By using the literatures data, the lower and upper explosion limits of propane recommended 2.0 vol% and 10.0 vol%, respectively. Also autoignition temperatures of propane with ignition sources recommended 450°C at the electrically heated crucible furnace(the whole surface heating) and recommended about 960°C at the local hot surface. The new equations for predicting the temperature and the pressure dependence of the explosion limits of propane are proposed. The values calculated by the proposed equations were a good agreement with the literature data.

Key words : Propane, Explosion limit, Autoignition temperature, Safety design and operation

I. 서 론

가스란 위험성과 편의성이라는 양면성을 동시에 가지고 있는 물질로서 그 사용이 해마다 확대하고 있는 반면 중대 사고를 비롯한 크고 작은 사고들 역시 증가하고 있는 실정으로 가스 산업의 성패는 가스 공정의 효율적인 안전관리에 있다고 본다. 가스 공정의 효과적인 안전관리를 위해서는 공정에서 취급하는 가연성가스의 연소 특성 파악이 중요한 문제 중 하나이다. 가연성가스를 취급함에 있어 부주의로 인해 가스가 누출되면 주위의 공기와 혼합하여 화재 및 폭발이 발생할 수

있는 위험성을 가지고 있다. 따라서 취급 물질들의 잠재적 위험성을 평가하기 위해서는 취급 물질의 위험성 평가가 반드시 선행되어야 한다.

가연성물질의 연소 특성들 가운데 폭발한계는 온도, 압력, 산소농도, 불활성가스, 화염전파방향 등에 따라 영향을 받으며, 최소자연발화온도는 발화원의 종류, 온도, 압력, 농도 등에 영향을 받는다[1].

가연성물질의 위험성평가는 이론만으로 완전한 예측을 하는 것은 그리 쉽지 않다. 따라서 실험과 병행해야지만 보다 확실한 위험성평가가 가능하다. 그러나 실험이 불가능할 경우 이론에 의해서도 어느 정도 가능하다고 본다. 부득이 하게 실험하기 어려운 가연성물질인 경우 예측식을 사용하여 안전을 확보할 수밖에 없다.

†주저자:hadm@semyung.ac.kr(www.chollian.net/~hadm)

실제와 가까운 경험식을 사용하는 것은 실험에 소요되는 시간, 노력 및 경비를 줄일 수 있으며, 또한 중요한 것은 상황에 따라 제한된 실험을 할 수밖에 없는 경우 실험에서 얻어진 측정 결과의 신뢰성 고찰을 뒷받침해 준다.

화학 공정의 중대 사고를 예방하고, 근로자 및 지역 주민의 안전을 위해서 OECD-IGUS(International Group of Experts on the Explosion Risk Unstable Substance)에서는 폭발현상과 열역학적인, 위험물질의 실험, 사고 배경분석 그리고 폭발특성치 예측과 같은 연구 분야에 대한 정보를 교환할 것을 권고하고 있다. 이들 가운데 위험물질의 실험은 유해·위험성 문제로 인해 제약이 있으므로, 최근에는 폭발특성치 예측 연구에 많은 비중을 두고 있는 것을 볼 수 있다[2].

LPG 가운데 프로판은 탄소수 3개인 지방족 사슬 포화탄화수소로서 가정용 연료 외에 냉매, 에어로졸제, 용제, 화학원료용 등으로 사용되고 있으며, 녹는점 -187.69°C, 끓는점 -42.07°C, 비중 1.5(공기=1)의 특이한 냄새를 가진 무색의 기체이다. 천연가스의 한 성분으로서 산출되며, 또 원유 속에 녹아 있어 석유정제에서의 증류가스에 함유된다. 증질유의 분해(크래킹), 접촉 리포밍 등에서 부산물로 생성된다. 화학반응성은 낮지만 염소와 반응하여 염화프로판, 탈 수소되어 프로필렌 그리고 니트로화에 의하여 니트로프로판 등을 생성한다.

본 연구에서는 가정뿐만 아니라 여러 산업분야에서 다양하게 사용되고 있는 프로판의 안전한 취급, 처리, 수송 및 저장을 위해 연소 특성을 고찰하고자 한다. 또한 본 연구에서 제시한 방법론이 산업현장에서 사용되는 다른 가연성가스의 위험성평가 방법론으로 이용하는데 도움을 주고자 한다.

II. 가스폭발에 영향을 주는 인자 및 방지 기술

2.1. 가스폭발에 영향을 주는 인자

일반적으로 가스폭발은 가연성 가스나 증기가 공기와 혼합하여 기상부분의 용적이 크고, 밀폐 공간 상태에 있을 때 착화원이 존재한 경우 발생하는 폭발 형태로서, 공정의 설비, 파이프 그리고 빌딩 등에서 발생할 수 있다. 만일 가연성가스나 증발 액체가 대기 중에 방출하였을 때, 누출로부터 형성된 것이 가스 운(gas cloud)이 폭발범위 안에 존재하지 않거나, 발화원(ignition sources)이 부족하다면, 가스 운은 희석되거나 대기 중으로 사라질 것이다[3].

예를 들어 공기와 산화제가 혼합되기 전에 발생한 직접적인 점화의 경우 화재가 발생할 것이고, 가장 위험한 상황은 아주 큰 가연성연료가 공기와 예혼합(pre-mixed) 형성하여 점화할 경우 발생할 것이다. 방출시작으로부터 점화까지의 시간은 수초에서 수십 분의 범위 안에 있으며, 연료의 양은 수 kg에서 수 ton까지 이른다.

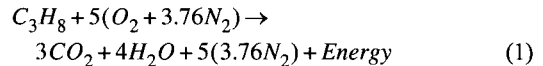
가스폭발 결과에 따른 영향은 여러 변수에 따라 달라진다. 주요 변수는 연료와 산화제의 형태, 증기운의 연료 농도와 크기, 점화원의 세기와 위치, 폭발방출 면적의 크기, 위치 및 형태, 구조요소와 설비의 위치와 크기, 착화지연시간, 밀폐계 및 개방계 등에 의한 주위의 기하학적 조건 등을 들 수 있다. 가스폭발은 이들 인자에 대해 대단히 민감하므로 폭발 특성을 예측하기란 쉬운 일이 아니다.

2.2. 가스폭발 방지기술

폭발 방지에 기초적인 방법으로는 산화제의 농도저하와 가연성가스의 농도 저하를 들 수 있다. 손실 예방에 대한 방법으로는 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 그리고 폭발의 발화원으로 작용하는 스파크의 진화설비 등을 들 수 있다. 또한 설비설계는 예방방법의 유효성, 설비의 신뢰성 그리고 인명에 대한 위험성 등의 요소를 고려해야 한다.

III. 프로판의 연소

가연성물질은 열과 빛을 수반하는 산화반응이다. 공기 중의 메탄의 완전 연소반응은 다음과 같다.



탄화수소는 공기와의 완전연소로부터의 화학적 생성물인 이산화탄소와 수증기가 발생한다. 공기중의 가스 연료의 연소는 두개의 다른 형태로 발생될 수 있다. 하나는 연료와 산소가 연소 공정 중에서 혼합된 곳에서 화재가 발생하는 것이고, 다른 하나는 연료와 공기(다른 산화제)가 예혼합되어 폭발범위 안에 있을 때 착화원에 의해 빠른 연소(폭발)가 발생할 수 있다.

IV. 프로판의 연소 특성치 고찰

가연성혼합가스의 폭발한계는 초기온도, 초기압력, 산소농도, 연소열, 분자량, 발화원의 특성, 불활성가스의 비, 측정용기의 크기, 혼합기체의 물리적 상태, 화염 전파방향 그리고 실험자의 숙련도 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 프로판의 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.

4.1. 폭발용기 및 화염전파 방향에 의한 프로판의 폭발한계 고찰

폭발한계는 실험에 있어 점화원의 위치에 따라 폭발한계 값이 달라지는데, 일반적으로 폭발범위는 점화시 화염이 위쪽으로 올라가는 상향전파에서 폭발하한계(LEL, lower explosion limit)는 낮고, 폭발상한계(UEL, upper explosion limit)는 높아서 폭발범위가 넓어진다. 그러나 화염이 아래쪽으로 내려가는 하향전파에서 하한계가 높고, 상한계가 낮아서 폭발범위가 좁아진다. 수평전파에서는 중간값을 나타낸다.

프로판의 폭발하한계와 상한계에 대해 화염전파방향에 의한 폭발한계의 여러 값들과 구형폭발장치를 이용한 측정값들을 비교하여 Table 1에 나타내었다[4-6].

폭발한계의 자료를 검토한 결과 실험장치의 크기나 모양 그리고 화염전파방향에 따라 달라진다는 사실은 Table 1에서 알 수 있었다. 그 동안 안전을 위해 폭발하한계의 자료를 사용하는데 있어 하한계는 2.1 vol%

를, 상한계는 약 9.5 vol%를 많이 인용하였다. 그러나 최근 문헌을 검토한 결과 공정안전의 목적을 위해서는 하한계는 2.0 vol%, 상한계는 10 vol%를 사용하는 것이 바람직하다.

4.2. 프로판의 폭발하한계의 새로운 온도의존식

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

Zabetakis 등[7]은 Burgess-Wheeler 법칙을 이용하여 탄화수소의 폭발한계 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

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

여기서 $L_i(t)$ 는 폭발한계의 온도의식이고, $L_i(25)$ 는 25°C 일 때의 폭발하한계 값이다.

Hustad 등[8]은 파라핀족탄화수소화합물의 폭발한계 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_i(25)[1 - 8.5 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (3)$$

Ha[9]는 기존의 폭발하한계 온도의존식들의 매개변수를 평균하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$L_i(t) = L_i(25)[1 - 7.69 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (4)$$

최근 Cashdollar[5]은 Burgess-Wheeler식을 수정하여 고온에서의 폭발하한계를 예측할 수 있는 식을 제시하

Table 1. Explosion limits by means of the direction of flame propagation for propane.

Vessel state	Direction of propagation	Tube [cm or L]		Explosion limits [vol%]	
		Diameter	Length	LEL	UEL
Confined tube	Upwards	4.0	80	2.4	9.5
		-	-	2.1	9.5
	Downwards	4.5	120	2.0	8.8
		2.0	40	2.4	6.69
Unconfined tube	Horizontal	1.0	-	2.3	7.0
		2.5	1400	2.2	7.8
Sphere	Upwards	2L	-	2.3	7.3
		120L	-	2.05±0.05	9.8±0.2

였다.

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

여기서 C_T 는 온도 T 에서 질량농도 [g/m^3]에 의한 한계, C_{T_0} 는 온도 T_0 에서 한계, 온도는 $^{\circ}C$ 이다.

본 연구에서는 기존의 추식들의 매개변수를 평균한 식인 식 (4)을 이용한 예측값을 문헌값과 비교한 경우 A.A.D.가 약 0.130 vol%로 차이를 보이고 있으므로, 다중회귀분석[10]을 이용하여 다음과 같은 새로운 예측 모델을 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25} [0.964 - 8.831 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (6)$$

$$L_i(t) = L_{25} [1.029 - 1.501 \times 10^{-3}(t - 25) + 1.284 \times 10^{-6}(t - 25)^2] \quad (7)$$

제시한 모델들 가운데 추산식에 의해 추산된 추산값과 실험값의 차이 정도를 알기 위해 통계학에서 많이 이용하는 A.A.P.E.(average absolute percent error)와 A.A.D.(average absolute deviation)를 사용하였으며[1], 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 알 수 있듯이 기존의 추산식에 의한 추산값은 문헌값과 0.130 vol%를 보인 반면, 기존의 추산식과 같은 형태의 예측 모델인 식 (6)에 의한 예측값은 문헌값과 0.015 vol%로 일치하였으며, 식 (7)에 의한 예측값은 문헌값과 0.005 vol%로 거의 일치하였다. 따라서 프로판 공정의 안전 확보를 위해서 매개변수 3개인 새로운 예측식을 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

4.3. 탄화수소화합물의 폭발한계의 압력의존성

폭발한계와 압력의 관계는 폭발한계의 온도와 마찬가지로

가지로 압력이 증가하면 폭발한계는 감소하고, 상한계는 증가한다. 이는 분자간의 거리가 가까워져서 화염 전파가 용이하기 때문이다. 일반적으로 압력변화에 따른 폭발한계의 변화는 온도 변화에 따른 폭발한계의 변화 보다 그 변화 폭이 크지 않으므로 압력 변화에 의한 폭발한계가 거의 변하지 않는다고 한다. 그러나 정확한 공정 설계와 안전성 확보를 위한 방폭구조 설비에서는 폭발한계에서 압력 변화에 의한 폭발 범위의 변화에 대한 자료가 필요하다.

일반적 폭발한계가 압력에 크게 변화되지 않으므로 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 그러나 Bodurtha는[11] 압력범위 0.1~20.7 MPa에서 포화탄화수소의 폭발상한계의 압력의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$U(P) = U_0 + 20.6(\log P + 1) \quad (8)$$

여기서 U_0 는 1 atm, 298 K에서의 폭발상한계이고, P 는 절대압력으로 MPa이다.

Vanderstraeten 등[12]은 메탄과 공기 혼합물에서 압력을 5500 kPa까지 올려 폭발상한계의 압력의존성을 고찰하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$U(P_1) = U(P_0) \left[1 + 0.0466 \left(\frac{P_1}{P_0} - 1 \right) - 0.000269 \left(\frac{P_1}{P_0} - 1 \right)^2 \right] \quad (9)$$

여기서 $U(p_0)$ 는 1 atm, 298 K에서의 폭발상한계, p_1 는 절대압력으로 kPa이다.

최근 하[1]는 메탄의 폭발한계와 상한계의 압력의존성에 대한 새로운 예측식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(P) = L_i(P_0) [0.999 + 8.627 \times 10^{-3}(P - 1) - 2.722 \times 10^{-4}(P - 1)^2 + 1.643 \times 10^{-6}(P - 1)^3] \quad (10)$$

$$U_i(P) = 15.011 + 3.835 \log P - 7.128 \log P^2 + 5.826 \log P^3 \quad (11)$$

4.3.1. 프로판의 폭발한계 압력의존성의 새로운 추산식

지금까지 문헌에서는 프로판에 대한 폭발한계의 압력의존식이 제시된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 문헌자료를 분석하여 새로운 추산식을 제시하였다. 다중회귀분석을 통하여 프로판의 폭발한계와 압력의 관계를 예측할 수 있는 다음과 같은 추산식들을 얻었으며, Table 3에 각 추산식들에 의한 추산값들과 문헌

Table 2. Comparison of A.A.D. of the LEL with temperature variation using several correlation for propane.

No.	Temp. [K]	LEL	Eqn. (3)	Eqn. (6)	Eqn. (7)
1	148	1.82	1.90	1.80	1.81
2	180	1.72	1.85	1.74	1.74
3	218	1.65	1.79	1.67	1.65
4	285	1.53	1.58	1.53	1.52
5	380	1.38	1.53	1.37	1.38
A.A.P.E.	-	-	6.660	0.840	0.480
A.A.D.	-	-	0.130	0.015	0.005

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

No.	P [atm]	LEL	Eqn. (12)	Eqn. (13)
1	1.00	2.30	2.23	2.30
2	7.80	1.90	2.03	1.90
3	14.60	1.90	1.83	1.90
A.A.P.E.	-	-	4.475	0.000
A.A.D.	-	-	0.089	0.000

값을 비교하여 그 결과를 나타내었다.

$$L_i(P) = L_i(P_0)[0.971 - 1.279 \times 10^{-2}(P-1)] \quad (12)$$

$$L_i(P) = L_i(P_0)[1.000 - 3.836 \times 10^{-2}(P-1) + 1.881 \times 10^{-3}(P-1)^2] \quad (13)$$

식 (12)에 의한 추산값은 문헌값과 약 0.089 vol%의 차이를 보이고 있으며, 식 (13)에 의한 추산값은 문헌값과 일치하였다.

4.3.2. 프로판의 폭발상한계 압력의존성의 새로운 추산식

폭발상한계와 압력의 관계에서 압력의 항이 log 형태로 된 추산식들은 다음과 같다. Table 4에 각 추산들에 의한 추산값과 문헌값을 비교하여 나타내었다.

$$U_i(P) = 9.263 + 18.775 \log P \quad (14)$$

$$U_i(P) = 9.500 + 11.272 \log P + 6.840 \log P^2 \quad (15)$$

프로판의 폭발상한계의 압력의존성을 고찰하기 위해

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

No.	P [atm]	UEL	Eqn. (8)	Eqn. (14)	Eqn. (15)
1	1.00	9.50	9.50	9.26	9.50
2	7.80	25.00	27.88	26.01	25.00
3	14.60	31.90	33.49	31.12	31.90
A.A.P.E.	-	-	5.501	2.990	0.000
A.A.D.	-	-	1.490	0.675	0.000

기준에 탄화수소의 폭발상한계 예측에 이용되었던 식 (8)에 의한 예측값과 본 연구에서 제시한 새로운 추산식에 의한 예측값을 문헌값과 비교하여 Table 4에 나타내었다.

기준의 식인 Bodurtha 식에 의한 예측값은 문헌값과 약 1.49 vol%의 차이를 나타냈으며, 본 연구에서 제시한 추산식인 식 (14)에 의한 예측값은 문헌값과 비교에서 A.A.D.가 0.675로 어느 정도 차이를 보이고 있으나, 식 (15)에 의한 예측값은 문헌값과 정확히 일치하고 있다. 따라서 Bodurtha 식을 이용하여 폭발상한계의 압력의존성을 예측하기에는 무리가 있으므로 본 연구에서 제시한 추산식인 식 (15)를 사용하는 것이 바람직하다.

4.4. 프로판의 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[2].

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 가까워져서 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 경우에는 충분한 검토를 하는 것이 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. 일반적으로 발화지연시간의 micro sec는 엔진의 연소 연구에 이용되며, 1~5 sec는 일반적 화학공정 연구에 관련되어 이용되고, 10 sec 혹은 그 이상은 화재의 방호 목적에 적용되고 있다.

특히 자연발화온도 측정은 여러 인자에 의해 실험값이 달라짐에 따라 문헌에 제시된 자료도 다양하다. 따

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

Compound	T _b [°C]	AIT [°C]							
	NFPA	NFPA	Sigma	Hilado	Jackson	SFPE	Scott	Kong	Smyth*
C ₃ H ₈	-42	450	467.8	493	504.4	450	493	500	960

*Ignition source of hot surface

라서 본 연구에서 여러 문헌[13-20]에 제시된 프로판의 자연발화온도를 정리하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5에서 알 수 있듯이 ASTM의 실험장치를 근거한 경우 프로판의 자연발화온도는 약 450°C 정도 얻었으며, 최근 Kong[16]은 봄베통에 의한 실험에서 500°C 정도의 값을 제시하고 있으며, 최근의 Smyth[17]는 고온금속표면(hot metal surface)을 발화원을 사용한 결과 960°C를 제시하고 있다. 프로판의 자연발화온도는 발화원에 따라 450°C~960°C의 범위를 가지고 있다. 프로판의 자연발화온도는 여러 문헌을 고찰한 결과 안전 목적을 위해서는 450°C를 사용하며, 가스 공정상에서 용접 및 용단 시 고온 표면이 발화원으로 작용되는 경우는 약 960°C의 자료를 이용하여도 안전에서는 문제가 없을 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 프로판 공정에서 보다 정확한 안전을 확보하기 위해 프로판의 화재 및 폭발 특성치를 여러 문헌을 통해 고찰하였으며, 또한 폭발한계의 새로운 온도 및 압력 의존식을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최근 문헌을 고찰한 결과 프로판의 공정 안전을 위해서는 프로판의 폭발한계는 2 vol%, 상한계는 10 vol%를 사용해야 한다.

2) 프로판의 새로운 폭발한계 온도의존식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[1.029 - 1.501 \times 10^{-3}(t-25) + 1.284 \times 10^{-6}(t-25)^2]$$

3) 프로판의 폭발한계와 상한계의 새로운 압력의존식은 다음과 같다.

$$L_i(P) = L_i(P_0)[1.000 - 3.836 \times 10^{-2}(P-1) + 1.881 \times 10^{-3}(P-1)^2]$$

$$U_i(P) = 9.500 + 11.272 \log P + 6.840 \log P^2$$

4) 프로탄의 자연발화온도는 일반적으로 450°C를 사용하며, 고온 표면을 발화원으로 이용되는 경우 960°C (약 1000°C)의 자료를 사용하여도 된다.

참고문헌

- [1] 하동명, “메탄의 화재 및 폭발 위험성 평가”, 한국가스학회지, 9(2), 1-7, (2005)
- [2] Lees, F. P., “Loss Prevention in the Process Industries Vol. 1”, 2nd ed., Oxford Butterworth-Heinemann, (1996)
- [3] Bjerketvedt, D., J. R. Bakke and K. van Wingerden, “Gas Explosion Handbook”, *J. of Hazardous Materials*, 52, 1-150, (1997)
- [4] 柳生昭三, “蒸氣の爆發限界”, 安全工學協會, (1979)
- [5] 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)
- [6] Britton, L. G., “Two Hundred Years of Flammable Limits”, *Process Safety Progress*, 21(1), 1-11, (2002)
- [7] Zabetakis, G. M., S. Lambiris and G. S. Scott, “Flame Temperature of Limit Mixture”, 7th Symposium (International) on Combustion, Butterworths Scientific Publication, London, 434-487, (1959)
- [8] 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)
- [9] 하동명, “파라핀족탄화수소의 폭발한계의 온도의존성 예측”, 한국산업안전학회지, 15(3), 71-77, (2000)
- [10] Kleinbaum, D. G., L. L. Kupper and K. E. Muller, “Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods”, 2nd ed., PWS-KENT Publishing Company, Boston, (1988)
- [11] Bodurtha, F. T., “Industrial Explosion Prevention and Protection”, McGraw-Hill, (1980)
- [12] Vanderstraeten, B. et al., “Experimental Study of the Pressure and Temperature Dependence on the Upper Flammability Limit of Methane/Air Mixtures”, *J. of Hazardous Materials*, 56, 237-246, (1997)
- [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] Lenga, R. E. 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)
- [16] Kong, D., R. K. Eckhoff and F. Alfert, “Auto-ignition of CH₄/air, C₃H₈/air, CH₄/C₃H₈/air and CH₄/CO₂/air Using a 11 Ignition Bomb”, *J. of Hazardous Materials*, **40**, 69-84, (1995)
- [17] Smyth, K. C. and N. P. Bryner, “Short-Duration Autoignition Temperature Measurement for Hydrocarbon Fuels Near Heated Metal Surfaces”, *Combustion Sci. and Tech.*, **126**, 225-253, (1997)
- [18] Jackson, J. L., “Spontaneous Ignition Temperature”, *Industrial and Engineering Chemistry*, **43**(12), 2869-2870, (1951)
- [19] Hilado, C. J. and S. W. Clark, “Autoignition Temperature of Organic Chemicals”, *Chemical Engineering*, **4**, 75-80, (1972)
- [20] 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)