

최소발화에너지의 압력의존성에 관한 연구

하동명 · 이수경*

세명대학교 산업안전공학과

*서울산업대학교 안전공학과

(1997년 10월 15일 접수, 1997년 10월 29일 채택)

A Study on Pressure Dependence of Minimum Ignition Energy

Dong-Myeong Ha and Su-Kyung Lee*

Dept. of Industrial Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 390-230, Korea

**Dept. of Safety Engineering, Seoul National Polytechnic University, Seoul 139-743, Korea*

(Received 15 October 1997; accepted 29 October 1997)

요 약

최소발화에너지의 압력의존성을 고찰하기 위해 열발화이론, 열전달개념, 이상기체법칙, 그리고 반응속도론에 의해 시도하였다. 최소발화에너지와 압력의 상관관계식을 문헌자료의 다중회귀분석을 통하여 수식화하였다. 이 방법에 적용한 물질은 대표적인 탄화수소인 프로판과 노말펜탄이었다. 제시된 방법론에서 압력변화에 따른 예측된 최소발화에너지는 아주 작은 평균오차에서 문헌값과 일치하고 있다. 따라서 제시된 방법론은 탄화수소의 최소발화 에너지를 예측하는 일반적인 방법으로 제시하고 있다.

Abstract - To investigate the pressure dependence of minimum ignition energy(MIE), thermal ignition theory, concept of heat transfer, ideal gas law, and kinetic theory are discussed. Correlation equations for the MIE and pressure were obtained through a regression analysis of reported data. In the proposed methodology the predicted MIE with pressure variations agree with reported data within a few average absolute deviations(A.A.D.). Therefore the proposed methodology has provided to be the general method for predicting the MIE of hydrocarbons.

Key words : pressure dependence, minimum ignition energy(MIE), heat transfer, thermal ignition theory, regression analysis

1. 서 론

발화공정에서 폭발 현상은 크게 물리적폭발과 화학적폭발로 나눌 수 있으며, 화학적 폭발 가운데 가스폭발과 분진폭발은 가장 많이 발생하는 폭발중 하나이다. 이들 폭발에 있어서 발화원(ignition sources)의 관리는 중요하며 발화원들의 가장 기본이 되는 개념이 안전특성치

(safety property)의 하나인 최소발화에너지(MIE, minimum ignition energy)이다. 이 에너지는 가스폭발인 경우 가연성가스와 공기의 혼합물에 착화원으로 점화할 때, 또한 분진폭발인 경우에는 분진과 공기의 혼합물에 착화원으로 점화시 발화하기 위하여 착화원이 갖는 최소에너지를 말한다[1].

최소발화에너지에 영향을 주는 인자로는 온

도, 압력, 연료의 형태(물질의 구조), 혼합가스의 조성비(폭발한계), 활성화에너지, 분자확산(molecular diffusion) 및 전극의 형태(전압, 전극) 등을 들 수 있다. 일반적으로 온도 및 압력이 높은 조건에서 낮은 최소발화에너지값을 갖고, 또한 일반적으로 연소속도가 큰 혼합기체일수록, 산소농도가 클수록, 열전도율이 작을수록, 가연성혼합기체인 경우 양론적 혼합비에서 역시 작은 에너지를 갖는다[2].

최소발화에너지에 대한 많은 연구가 있으나 그 가운데 대표적인 연구로는 Blanc 등[3]에 의한 혼합물의 조성, 연료의 형태, 압력, 전극의 형상에 의한 최소발화에너지 연구, Lewis 등[4]에 의한 화염전파이론을 기초로한 최소발화에너지의 연구, Fenn[5]에 의한 희박연소한계와 최소발화에너지의 관계의 연구, Calcote 등[6]은 분자구조에 의한 최소발화에너지의 영향에 관한 연구, Ballal 등[7]에 의한 흐르는 기체에서의 최소발화에너지에 대한 전기불꽃 특성의 영향에 관한 연구가 있으며 그리고 Subulkin 등[8]은 확산에 의한 열손실과 화학반응에 의한 열생성을 기초로 한 발화에 의한 연소의 연구 등이 있다. 최근에는 Frendi 등[9]에 의해 수학적 모델을 이용한 최소발화에너지의 연구를 들 수 있으며, Siwek[10]은 분진의 위험성평가에 영향을 주는 기술적 안전 지수 및 인자에 관한 연구의 일부에서 최소발화 에너지와 온도의 관계를 나타내고 있다. 또한 하[11,12]의 연구에서 최소발화에너지가 온도의 영향을 받는다는 사실을 열량의 개념, 열전달의 개념, 화염전파이론 그리고 열발화이론(thermal ignition theory) 등을 이용하여 수리적인 방법에 의해 이론적으로 고찰하였으며, 이를 바탕으로 최소발화에너지와 온도의 관계를 나타낼 수 있는 새로운 관계식을 제시하였다.

본 연구에서는 최소발화에너지가 초기압력에 의해 변화하고 있다는 사실에 대해 최소발화에너지와 온도의 관계를 고찰하기 위해서 사용된 이론과 이상기체법칙 및 반응속도론 등을 이용하여 고찰해 보았다. 또한 이를 근거로 수학적 및 통계적방법에 의해 최소발화에너지와 압력의 관계를 나타낼 수 있는 새로운 실험식을 제시하여 기존의 이론식과 비교 검토하였다. 여기서 제시된 방법론을 이용하여 이제까지 제어할 수 없었던 화재 및 폭발을 예방하는데 그 목적이 있다.

2. 최소발화에너지의 압력 의존성에 대한 이론적 고찰

최소발화에너지에 영향을 주는 요소로는 최

기온도, 초기압력, 연료의 형태(물질의 구조), 혼합가스의 조성비(폭발한계), 활성화에너지, 분자확산(molecular diffusion), 인덕턴(inductance), 전극의 전압, 간격 등을 들 수 있다[2].

본 장에서는 최소발화에너지에 영향을 주는 인자들 가운데 초기압력에 대한 관계에 대해 최소발화에너지와 온도의 관계를 고찰하기 위해서 사용된 이론(화염전파이론, 열발화이론, 열량 및 열전달 개념)과 이상기체법칙 및 반응속도론 등을 이용하여 이론적으로 고찰해 보려고 하고, 이를 근거로 최소발화에너지와 압력의 관계를 수학적 및 통계학적 방법으로 어떻게 표현될 수 있는지를 살펴보고자 한다.

최소발화에너지와 압력의 의존성 관계를 규명하기 위해서 우선 최소발화에너지와 온도의 관계를 규명한 이론을 간략히 소개하고, 이를 근거로 최소발화에너지와 압력의 관계를 설명한다.

최소발화에너지와 온도의 관계를 설명하기 위해서 불꽃(spark)에 의해 공급된 최소발화에너지는 초기상태에서 화염온도 까지 혼합가스 부피에 요구된 에너지의 열과 같다는 가정 하에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ig} = mc_p \Delta T \quad (1)$$

이를 다시 정리하면

$$E_{ig} = \rho V c_p \Delta T = (A \delta) \rho [c_p (T_{\infty} - T_0)] \quad (2)$$

여기서 A 는 slab의 단면적, δ 는 단열 상태에서 층류 화염의 두께, ρ 는 혼합물의 초기 밀도, c_p 는 일정 압력하에서 평균 비열이며, T_{∞} 는 단열 화염온도, T_0 는 미연소가스의 초기 온도이다.

층류 화염 두께 δ 를 계산하기 위해서 열해석을 이용하여 화염면에서 열생성속도는 화염면으로 부터 열이 손실되는 속도가 같다는 가정으로 방출된 에너지로서 $qw\delta$ 로 놓을 수 있고, 열 손실은 전도에 의한 것으로 $\lambda dT/dx = \lambda (T_{\infty} - T_0) / \delta$ 로 놓을 수 있다.

따라서 이를 정리하면 아래와 같다.

$$qw\delta = \lambda (T_{\infty} - T_0) / \delta \quad (3)$$

$$q = c_p (T_{\infty} - T_0) \quad (4)$$

여기서 q 는 반응혼합물의 단위질량당 방출된 에너지(반응열)이고, w 는 반응속도이며, λ 는 기체의 평균 열전도도이다. 그러므로 식 (4)의

q 를 식 (3)에 대입하면 화염폭 δ 는 다음과 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda}{c_p w}} \quad (5)$$

와 같이 된다.

화염폭을 연소속도(v_0)로 나타내기 위해서, 화염폭과 연소속도의 관계로 부터 화염면에 들어온 미연소가스의 질량유속을 생각하면 $\rho_0 v_0$ 로 표시되고, 한편 화염면에서 이 혼합기가 소비되는 속도는 모든 미연소가스가 반응하였다고 한다면

$$\int_0^\infty w dx = w \delta \quad (6)$$

가 된다. 따라서 질량유속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 v_0 = w \delta \quad (7)$$

그러므로 연소속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$v_0 = (1/\rho_0) \sqrt{\frac{\lambda w}{c_p}} \quad (8)$$

따라서 식 (5)과 식 (8)에서 w 를 제거하면 화염폭은 다음과 같이 되고

$$\delta = \lambda / c_p \rho_0 v_0 \quad (9)$$

식 (9)를 식 (2)에 대입하면

$$E_{ig}/A = (\lambda / c_p \rho_0 v_0) \rho_0 [c_p (T_\infty - T_0)] = \lambda (T_\infty - T_0) / v_0 \quad (10)$$

이 된다.

여기서 slab에 대해 A 의 단면적을 알므로서 E_{ig} 를 계산할 수 있다. Slab 단면적 (A)는 소염거리(quenching distance)에 대한 동일 길이 제곱의 면적보다 커야 한다($A \geq d^2$). 그러므로 최소발화에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ig} = d^2 \lambda (T_\infty - T_0) / v_0 \quad (11)$$

식 (11)의 d 는 이론과 실험의 결과로 다음과 같은 식으로 예측할 수 있다.

$$d = a \delta \quad (12)$$

여기서 a 는 계(system)의 특성치에 크게 의존하지 않는 다중인자(multiplicative factor)이다.

식 (9)을 식 (12)에 대입하면

$$d = a \lambda / c_p \rho_0 v_0 \quad (13)$$

식 (13)의 d 를 식 (11)에 대입하면 최소발화에너지는 다음과 같이 되고,

$$E_{ig} = a^2 \lambda^3 (T_\infty - T_0) / c_p^2 \rho_0^2 v_0^3 \quad (14)$$

식 (9)를 λ 로 다시 정리하면 $\lambda = \delta c_p \rho_0 v_0$ 이 되므로, 이를 식 (14)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$E_{ig} = a^2 \delta^3 c_p \rho_0 (T_\infty - T_0) \quad (15)$$

이와 같은 이론적 배경에 의해서 최소발화에너지(MIE, E_{ig})는 온도의 함수임을 증명하였다 [11,12].

또한 최소발화에너지가 온도의 함수뿐만 아니라 압력의 함수로 나타내기 위해서 식 (14)에서 우측항의 밀도(ρ)가 압력(P)의 함수로 표현되어야 하는데, 이를 ρ 와 P의 관계로 표현하기 위해 이상기체법칙을 도입하였다.

$$PV = nRT \quad (16)$$

$$PM = \rho RT \quad (17)$$

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (18)$$

식 (18)을 식 (14)에 대입하면

$$E_{ig} = \frac{a^2 \lambda^3 (T_\infty - T_0) R^2 T_0^2}{c_p^2 v_0^3 M^2 P^2} \quad (19)$$

이를 최소발화에너지와 압력의 관계를 함수 형태로 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$E_{ig} \approx P^{-2} \quad (20)$$

이 관계식에 의해서 최소발화에너지를 압력의 함수로 나타낼 수 있다.

이와 같은 방법으로 최소발화에너지와 압력의 관계를 나타낼 수도 있고, 한편 다른 방법에 의해 최소발화에너지와 압력의 관계를 표현할 수 있다. 여기서는 이상기체법칙과 화학반응속도론을 이용하였는데, 식 (8)의 우측항 ρ 와 w 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 \propto P \quad (21)$$

$$w \propto e^{(-E/RT_0)} [P]^n \quad (22)$$

식 (8)을 다시 정리하면

$$v_0 \propto P^{(n/2)-1} e^{-E/2RT_0} \quad (23)$$

식 (23)의 v_0 를 식 (9)에 대입하면 화염폭과 압력은 다음과 같은 관계를 갖고,

$$\delta \propto P^{-\frac{n}{2}} \quad (24)$$

식 (24)의 δ 를 식 (15)에 대입하면

$$E_{ig} \propto P^{-\frac{3n}{2}+1} \quad (25)$$

만일 $n=2$ (2차 반응)이라고 하면 최소발화에너지는 다음과 같은 압력의 함수로써 표현될 수 있다.

$$E_{ig} \propto P^{-2} \quad (26)$$

이와같이 최소발화에너지가 압력의 함수 관계임을 증명하였다.

3. 최소발화에너지와 압력의 실험자료 분석 및 추산 모델 설정

최소발화에너지에 대한 연구는 이론적 배경 및 실험에 국한되어 이루어져 왔으나, 최근에는 이를 바탕으로 최소발화에너지에 관련된 여러 가지 실험식(empirical equation)이 발표되고 있다.

가연성혼합가스인 프로판과 펜탄에 대하여 폭발하한계에서의 최소발화에너지와 온도의 관계를 나타낸 실험식은 다음과 같은데, 프로판의 경우 온도에 의한 최소발화에너지의 관계를 다음과 같이 나타내고 있으며[11]

$$MIE = (-1.9336 + 1.8356 \times 10^{-2}T - 5.5864 \times 10^{-5}T^2 + 6.0667 \times 10^{-8}T^3)^{-1} \quad (27)$$

펜탄에서 온도에 의한 최소발화에너지의 관계식은 다음과 같다[11].

$$MIE = \frac{1}{-0.4256 + 1.8685 \times 10^{-3}T} \quad (28)$$

분진폭발의 경우 최소발화에너지와 온도의 관계를 묘사한 실험식으로는 다음과 같다[10].

$$MIE(T) = 10 \exp(-4.056 + (1.873 - 0.624 \log T) \times (\log MIE(T_0) + 4.56)) \quad (29)$$

가연성혼합가스폭발 및 분진폭발에서 최소발화에너지와 온도의 실험식이 연구되고 있다. 본 연구에서는 최소발화에너지가 압력의 함수라는 사실에 대해 열량의 개념, 열전달, 반응속도론, 이상기체상태방정식과 수학적 방법에 의

해 증명하였으며, 특히 최소발화에너지와 압력의 관계는 $E_{ig} \propto P^{-2}$ 라는 근거를 제시하였다. 따라서 최소발화에너지가 압력의 함수 관계로써 어떻게 표현될 수 있는지를 수치적 및 통계학적 방법을 사용하여 살펴보고자 한다.

지금까지는 최소발화에너지와 압력의 관계를 이론적으로만 제시하였으나, 여기서는 최소발화에너지와 압력이 어떤 관계로 나타낼 수 있는지를 고찰하기 위해 문헌에 발표된 자료를 분석하였다. 이 자료 분석에 이용된 물질은 석유화학 제품에서 널리 사용되는 탄화수소 물질 가운데 가스물질인 프로판과 가장 저급가솔린인 펜탄이며, 이 자료의 폭발 분위기 조성은 폭발하한계에서 갖는 최소발화에너지 값이다.

문헌의 자료를 분석하기 위해서 프로판과 펜탄에 대한 최소발화에너지와 압력의 관계를 도시하여 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

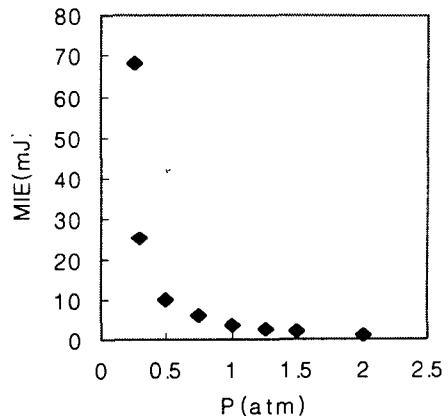


Fig. 1. Variation of minimum ignition energy with pressures for propane.

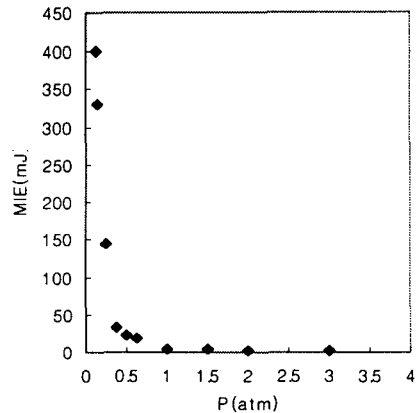


Fig. 2. Variation of minimum ignition energy with pressures for n-pentane.

Fig. 1과 Fig. 2에서 도시한 것을 분석한 결과 수학적 및 통계학적 방법에 의해 다음과 같은 여러가지 추산 모델들을 고려할 수 있다.

$$Model\ i) Y = \frac{1}{a + bX + cX^2 + dX^3 + \dots} \quad (30)$$

$$Model\ ii) Y = a + b/X + c/X^2 + d/X^3 + \dots \quad (31)$$

$$Model\ iii) \ln Y = a + bX + cX^2 + cX^3 + \dots \quad (32)$$

$$Model\ iv) Y = aX^{-2} \quad (33)$$

특히 *Model iv)*는 기존의 이론을 근거로 제시한 최소발화에너지와 압력의 관계식인 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 의 모델 형태를 나타낸 것이다. 여기서 X는 압력(P, atm) 이고, Y는 최소발화에너지(MIE, mJ)이다.

위에서 제시한 각 항의 모델에서도 또한 여러가지 추산 모델을 고려할 수 있는데, *Model i)*에 대해 살펴 보면 다음과 같다.

$$Y = \frac{1}{a + bX} \quad (34)$$

$$Y = \frac{1}{a + bX + cX^2} \quad (35)$$

$$Y = \frac{1}{a + bX + cX^2 + dX^3} \quad (36)$$

$$Y = \frac{1}{a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4} \quad (37)$$

$$Y = \frac{1}{a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4 + fX^5} \quad (38)$$

이와같이 각 항마다 여러 개의 모델들을 고려하여 그 가운데 수학적 및 통계적인 방법에 의해 가장 최적화된 추산 모델을 찾고자 한다.

4. 최소발화에너지 추산 모델의 최적화

식(30)에서 식(33)의 여러 추산 모델 가운데 가장 최적화된 모델을 찾기 위해서 다중회기 분석(multiple regression analysis)을 이용하였다. 다중회기분석이란 독립변수와 종속 변수들 사이의 함수적인 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형(model)을 가정하고 이 모형을 측정 변수들의 자료로부터 추산하는 통계적인 방법이다.

제시된 모델을 다항식의 일반적인 형태로 표

시하면 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$Y = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4 + fX^5 + \dots + pX^p + \dots \quad (39)$$

여기서 각 각의 매개변수(parameter)를 결정하기 위해 최소화(minimization) 방법을 이용한다. 이 방법은 수치적으로 널리 사용하는 방법이므로 sum of square of deviation(S.S.D.)을 구하여 위해 각 매개변수를 편미분하여 이를 영(zero)으로 두고 얻어지는 정규방정식(normal equation)의 해를 구하면 된다. 이 매개변수를 구하는 계산 방법으로는 Gauss-Jordan 소거법을 이용하여 계산하였다. 이와 같은 수학적인 계산 절차로 압력 변화에 의한 최소발화에너지 관계를 규명하고자 한다[13].

제시한 식(30)에서 식(33)의 여러 모델 가운데 최적화된 모델을 찾고 또한 각 식의 최적화된 모델을 비교하여 그 가운데 가장 최적화된 모델을 선정 한다. 최적화된 모델을 선정하기 위해 통계학에서 자주 사용하는 A.A.P.E. (average absolute percent errors)와 A.A.D. (average absolute deviations)를 이용하였다 [12,13].

$$A.A.P.E. = \frac{\sum \frac{Y_{est.} - Y_{exp.}}{Y_{exp.}}}{N} \times 100 \quad (40)$$

$$A.A.D. = \frac{\sum |Y_{est.} - Y_{exp.}|}{N} \quad (41)$$

여기서 $Y_{est.}$ 는 추산식에 의해 추산된 MIE값이고, $Y_{exp.}$ 는 문헌의 MIE값이며, N는 자료(data) 수 이다.

프로판에서 압력에 의한 최소발화에너지의 관계를 식 (30)에서 식(33) 가운데 최적화된 추산식을 살펴보면 다음과 같다.

$$i) MIE = (-0.1034 + 0.5449P - 0.3343P^2 + 0.1571P^3)^{-1}$$

A.A.P.E.=6.023, A.A.D.=0.922

$$ii) MIE = \frac{6.5195 - 23.2031/P + 32.8281}{P^2 - 14.5586/P^3 + 2.1929/P^4}$$

A.A.P.E.=9.404, A.A.D.=0.338

$$iii) \ln(MIE) = 7.4130 - 18.6113P + 22.3147P^2 - 12.1419P^3 + 2.3624P^4$$

A.A.P.E.=12.038, A.A.D.=3.177

$$iv) MIE = 3.566P^{-2}$$

A.A.P.E.=22.729, A.A.D.=3.909

또한 펜탄에서 압력에 의한 최소발화에너지의 관계를 식(31)에서 식(34) 가운데 최적화된 추산식을 살펴보면 다음과 같다.

$$i) MIE = (0.0106 - 0.1206P + 0.4834^2 - 0.2249P^3 - 0.0363P^4)^{-1}$$

A.A.P.E.=10.336, A.A.D.=8.731

$$ii) MIE = 13.3833 - 31.0635/P + 20.4326 / P^2 - 1.2851/P^3$$

A.A.P.E.=55.179, A.A.D.=4.968

$$iii) \ln(MIE) = 7.0394 - 9.8223P + 5.1615 / P^2 - 0.8805P^3$$

A.A.P.E.=21.820, A.A.D.=13.271

$$iv) MIE = 7.066P^{-2}$$

A.A.P.E.=20.985, A.A.D.=8.960

제시한 방법론에 의해 프로판과 펜탄에서 MIE와 압력의 관계식을 살펴본 결과 프로판의 경우 제시한 각 항의 최적화된 모델의 A.A.P.E.는 6.023~21.458 까지의 값을 가지며, 펜탄의 경우 프로판의 자료 보다 자료의 분산력이 크므로 A.A.P.E.가 10.336~51.742 까지의 값을 보이고 있다.

각 항의 최적화된 모델 가운데 A.A.P.E.가 가장 작게 나타나는 모델의 형태는 프로판과 펜탄 모두 모델 i)에서 가장 최적화된 모델을 찾을 수 있다.

프로판과 펜탄의 경우 역시 MIE와 온도의 관계와 같이 MIE와 압력 관계의 일반형은 다음과 같다.

$$MIE = \frac{1}{a + bP + cP^2 + dP^3 + eP^4 \dots} \quad (42)$$

이와같은 형태로 표현된 프로판과 펜탄의 압력의 함수로서 최소발화에너지를 추산할 수 있는 최적화된 모델은 다음과 같다.

프로판 :

$$MIE = (-0.1034 + 0.5449P - 0.3343P^2 + 0.1571P^3)^{-1}$$

펜 탄 :

$$MIE = (0.0106 - 0.1206P + 0.4834P^2 - 0.2249P^3 - 0.0363P^4)^{-1}$$

5. 이론식과 추산식 비교에 의한 결과 및 고찰

최소발화에너지(이하 MIE라고함.)가 압력에 의존한다는 이론적 근거를 배경으로 문헌에 제시된 자료를 이용하여 MIE가 압력의 함수로써 어떤 형태로 표현되는 지를 살펴보고 최적화된 추산 모델을 찾았다.

프로판과 펜탄 각각에 대한 압력 변화에 의한 MIE 추산식에서 항의 수는 다르나 MIE와 온도 관계식의 수학적 표현 형태는 같음을 알 수 있었다. 특히 MIE와 압력의 함수 관계 표현은 MIE와 온도 관계의 표현과 다르게 관계식을 일반형으로 나타낸 것이 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 아니고, 이론적 근거에 의하여 라는 관계로 구체적으로 표현하고 있다.

따라서 이론식인 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 식과 본 연구에서 제시한 최적화된 추산식과 차이점이 있는가를 살펴보고자 한다.

추산에 이용된 최적화된 모델 i)과 이론적 관계에 의해 제시된 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 식인 모델 iv)를 비교하였으며, 또한 추산식에 의한 추산값과 문헌값의 차이 정도를 각 모델에 대하여 Table 1 과 2에 나타내었다.

프로판의 경우 이론식인 모델 iv) 보다 본 연구에서 제시한 새로운 추산식인 모델 i)이 차이의 정도를 나타내기 위한 A.A.P.E. 와 A.A.D. 값이 월등히 작은 값을 나타내고 있으며, 펜탄 역시 이론식인 모델 iv) 보다 여기서 제시한 모델 i)이 A.A.P.E.와 A.A.D.가 작은 값을 보이고 있다. 프로판 보다 펜탄의 추산값이 문헌값과 비교하여 A.A.P.E.와 A.A.D.값이 조금 크게 나타나고 있는데 이는 자료(data)의 분산력이 크게 나타나고 있는 것으로 사려된다. 또한 프로판과 펜탄 모두 높은 압력 조건 보다 낮은 압력에서 문헌값과 추산값이 큰 차이를 보이고 있는데 이는 낮은 압력 조건에서 실험의 어려움이 있는 것으로 생각된다.

지금까지 고찰한 결과 MIE와 압력의 이론적 관계식인 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 의 식으로 추산이 가능하다고 할 수 있으나, 본 연구 결과에 의해 제시된 새로운 추산식에 의해 추산함으로써 보다 정확한 추산의 가능성을 제시하고 있다.

어떤 사실을 규명하기 위해서 실험을 행하는 것이 바람직 하나 여기서 제시한 방법론을 이용하므로 시간, 노력, 경비를 줄일수 있는 방법이 모색될 수 있다고 보며, 또한 제어할 수 없

는 화재 및 폭발에 기초적인 자료로 이용되기를 기대한다.

Table 1. Comparison between the reported and the estimated values of the minimum gnition energy for the propane based on Model i) and Model iv)

No.	P(atm)	Exp.	Model iv)	Model i)
1	2.00	1.1	0.8889	1.1040
2	1.50	2.1	1.5803	2.0330
3	1.25	2.7	2.2756	2.7610
4	1.00	3.5	3.5557	3.7840
5	0.75	6.0	6.3212	5.4500
6	0.50	10.1	14.2226	9.5240
7	0.30	25.0	39.5072	29.2460
8	0.25	68.0	56.8904	69.6860
A.A.P.E.	-	-	22.7229	6.0200
A.A.D.	-	-	3.9089	0.9218

Table 2. Comparison between the reported and the estimated values of the minimum ignition energy for pentane based on Model i) and Model iv)

No.	P(atm)	Exp.	Model iv)	Model i)
1	3.00	1.33	0.7851	1.3370
2	2.00	2.20	1.7665	2.2280
3	1.50	3.20	3.1404	3.0580
4	1.00	4.90	7.0660	5.5460
5	0.63	18.00	17.8030	13.3650
6	0.50	23.00	28.2640	22.3600
7	0.38	33.00	48.9335	43.9950
8	0.25	144.00	113.0559	138.7940
9	0.15	330.00	314.0442	381.6790
10	0.13	400.00	418.1062	386.5480
A.A.P.E.	-	-	20.9854	10.3360
A.A.D.	-	-	8.9605	8.7314

6. 결 론

최소발화에너지가 압력의 함수라는 사실을 화염전파이론, 열발화이론, 열량 및 열전달 개념과 이상기체법칙 및 반응속도론 등을 이용하여 고찰하였다. 이를 근거로 파라핀족탄화수소인 프로판과 펜탄에 대해서 압력에 의한 최소발화에너지의 관계를 나타내기 위해서 수학적 및 통계학적 방법에 의해 추산식을 제시하였으며 제시된 추산식과 기존의 이론식을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열발화 이론, 이상기체법칙 및 반응속도론 등에 의해 최소발화에너지와 압력의 관계를 증명하였다.

(2) 최소발화에너지와 압력의 관계를 기존의 이론으로 검토한 결과 추산식은 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 의 형태로 추산이 가능하다고 제시하고 있으나, 문헌값에 의해 고찰한 결과 다음과 같은 추산 식을 얻었다.

프로판 :

$$MIE = (-0.1034 + 0.5449P - 0.3343P^2 + 0.1571P^3)^{-1}$$

펜 탄 :

$$MIE = (0.0106 - 0.1206P + 0.4834P^2 - 0.2249P^3 - 0.0363P^4)^{-1}$$

(3) 최소발화에너지와 압력의 관계식은 최소발화에너지와 온도의 관계식과 같은 형태의 추산 모형(model)을 나타내고 있다.

참 고 문 헌

- Griffiths, J. F. and Barnard, J. A.: "Flame and Combustion", 3rd ed., Blackie Academic & Propessional (1995).
- Turns, S. R.: "An Introduction to Combustion -Concepts and Applications-" McGraw-Hill Inc.(1996).
- Blanc, M. V., Guest, P. G., von Elbe G. and Lewis, B.: J. of Chem. Phys.,15, 11, 798(1947).
- Lewis, B. and von Elbe G.: J. of Chem. Phys., 15, 11, 803(1947).
- Fenn, J. B.: Industrial and Engineering Chemistry, 43, 12, 2865(1951).
- Calcote, H. F., Gregry, C. A., Barnett1. Griffiths, J. F. and Barnard, J. A.: "Flame, C. M. and Gilmer, R. B.: I & EC, 44, 11, 2656(1952).
- Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H.: Combustion and Flame, 24, 99(1975).
- Subulkin, M. and Siskind, K. S.: Combustion and Flame, 69, 49(1987).
- Frendi, A. and Subulkin, M.: Combust. Sci. and Tech., 73, 395(1990).
- Siwek, R.: J. Loss Prev. Process Ind., 9, 1, 21(1996)
- Ha, D. M. and Kim, M. G.:Theories and Applications of Chemical Engineering, 3, 1, 989(1997).
- Ha, D. M.: J. of the Korean Inst. for Ind. safety (KIIS), 8, 3, 50(1993).
- Park, J. C., Ha, D. M. and Kim, M. G. : Korean J. of Chem. Eng., 13, 2, 115(1996).