

최소발화에너지와 온도의 관계

Relationship Between the Minimum Ignition Energy(MIE) and the Temperature

하 동 명*
Ha, Dong-Myeong

Abstract

Attempts are being made to investigate temperatures dependence of minimum ignition energy(MIE) based on concept of quantity of heat and thermal ignition theory.

Regression equations for predicting MIE by means of temperature variations on the basis of statistical and mathematical methods are proposed. This study is undertaken to learn what proposed method is satisfactory hydrocarbons (propane and pentane).

The proposed method has been tested and compared successfully with previously reported data in various journal.

Key word : minimum ignition energy, temperature dependence, thermal ignition theory

국문요약

열량과 열발화이론의 개념을 근거로 최소발화에너지의 온도의존성에 대한 이론적 고찰을 시도하였다. 이 이론적 근거를 바탕으로 통계학적 및 수학적 방법을 기초로 하여 온도 변화에 의한 최소발화에너지를 예측하는 식을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 방법론에 의해 탄화수소인 프로판과 노말펜탄에 적용한 결과 제시한 예측식과 문헌값이 거의 일치함을 알 수 있다.

1. 서 론

화재, 폭발에서 발화원의 관리는 무엇 보다 중요하다. 발화원의 형식으로는 크게 기계적, 화학적, 전기적, 열적 등으로 나눌 수 있다. 이 발화원들의 가장 기본이 되는 개념이 최소발화에너지(MIE, minimum ignition energy)인데, 이

에너지는 가연성가스와 공기의 혼합물에 착화원으로 점화시 발화하기 위하여 착화원이 갖는 최소에너지를 말한다.

최소발화에너지에 영향을 주는 인자로는 분자의 구조, 당량비, 온도, 압력, 조성 및 전극의 형태 등을 들 수 있으며 이들의 조건을 고정시키면 결정되는 물리적 특성치로서 일반적으로 온도 및 압력이 높은 조건에서 낮은 최소발화에너지 값을 갖고, 또한 연소속도가 큰 혼합기체일수록,

*세명대학교 산업안전공학과 교수

열전도율이 작을수록 역시 작은 에너지 값을 갖는다^{1,2)}.

최소발화에너지에 대한 여러 연구가 있으나 그 가운데 대표적인 연구로는 Blanc 등³⁾은 혼합물의 조성, 연료의 형태, 압력, 전극의 형상에 의한 최소발화에너지를 연구하였고, Lewis 등⁴⁾은 화염전파이론과 화학반응이론을 기초로 한 최소발화에너지를 수치적으로 고찰하였고, Fenn⁵⁾은 화학반응속도이론과 열발화이론을 근거로하여 희박연소한계와 최소발화에너지의 관계를 연구하였으며, Ballal 등⁶⁾에 의해서는 흐르는 기체에서의 최소발화에너지에 대한 전기불꽃 특성의 영향에 관한 연구가 이루어졌다. 최근에는 Subulkin 등⁷⁾은 확산에 의한 열손실과 화학반응에 의한 열생성을 기초로한 발화에 의한 연소의 연구, Maas 등⁸⁾은 반응메카니즘과 전달모델(transport model)을 이용한 수소-산소 혼합물의 발화 연구, 그리고 Frendi 등⁹⁾에 의해 메탄과 공기의 화학양론적 혼합물에 대해 수학적 모델을 이용한 최소발화에너지의 연구 등을 들 수 있다.

본 연구에서 최소발화에너지가 초기온도 영향을 받는다는 사실을 이론적 배경으로 고찰한 후 이를 근거로 온도에 대한 최소발화에너지의 관계를 수학적 및 통계학적 방법^{10,11,12)}으로 표현될 수 있는지를 살펴보고, 또한 실험에 의해서만 규명될 수 있는 여러 가지 현상들을 제시한 방법론을 이용하므로써 시간, 노력, 경비를 줄일 수 있는 방도를 모색하는데 그 목적이 있다.

II. 최소발화에너지와 온도 관계의 이론적 배경

가연성 혼합기체의 발화 한계에 대한 지식은 대부분의 연소계(combustion system)에서 중요하다. 가연성가스가 발화되기 위해서는 에너지의 충분한 양이 필요하다. 발화가 될 수 있는 에너지의 최소량을 최소발화에너지(MIE)라고 한다. 이 최소발화에너지에 영향을 주는 요소로는 초기 온도, 압력, 혼합물의 조성, 활성화에너지, 인덕턴스(inductance), 전극의 전압, 간격

등을 들 수 있다^{1,2)}.

본 연구에서는 최소발화에너지가 온도의 함수임을 열량의 개념과 수학적 방법에 의해 이론적으로 고찰하고자 한다.

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 화염 온도, T_0 는 미연소가스의 초기 온도이다.

층류 화염 두께 δ 를 계산하기 위해 열해석을 이용하였다. 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 다음과 같고,

$$c_p(T_\infty - T_0)w\delta = \lambda(T_\infty - T_0) / \delta \quad (5)$$

이를 화염폭 δ 로 정리하면

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda}{c_p w}} \quad (6)$$

와 같이 된다.

화염폭과 연소속도 v_0 는 서로 상관관계가 있으므로 식 (6)에서 화염폭을 연소속도의 관계로 나타내기 위해 화염면에 들어온 미연소가스의 질량유속을 $\rho_0 v_0$ 로 표시될 수 있고, 한편 화염면에서 이 혼합기가 소비되는 속도는 모든 미연소가스가 반응하였다고 하면

$$\int_0^\infty w \, dx = w\delta \quad (7)$$

가 된다. 따라서 질량유속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 v_0 = w\delta \quad (8)$$

그러므로

$$v_0 = (1/\rho_0) \sqrt{\frac{\lambda w}{c_p}} \quad (9)$$

따라서 식 (6)과 식 (9)에서 w 를 제거하면 다음과 같다.

$$\delta = \lambda / c_p \rho_0 v_0 \quad (10)$$

식 (10)를 식 (2)에 대입하면

$$\begin{aligned} E_{ig} / A &= (\lambda / c_p \rho_0 v_0) \rho_0 [c_p (T_\infty - T_0)] \\ &= \lambda (T_\infty - T_0) / v_0 \end{aligned} \quad (11)$$

이 된다.

여기서 slab에 대해 A 의 단면적을 알므로서 E_{ig} 를 계산할 수 있다. Slab 단면적 (A)는 소멸거리(quenching distance)에 대한 동일 길이 제곱의 면적 보다 크다($A \geq d^2$). 따라서 최소발화 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ig} = d^2 \lambda (T_\infty - T_0) / v_0 \quad (12)$$

여기서

$$d = a\delta \quad (13)$$

로 표시될 수 있다.

소멸거리를 식 (13)로 나타낼 수 있음을 간단히 증명하면 다음과 같다.

열해석에 의해 반응에 의한 열의 방출속도(release rate)와 전도에 의한 손실속도(loss

rate)가 같다는 개념에 의해 다음과 같은 식이 성립된다.

$$Q'' V = Q_{cond}. \quad (14)$$

여기서 Q'' 는 반응에서 생성된 열량이고, $Q_{cond.}$ 는 전도에 의한 손실 열량으로 각각을 보다 자세히 나타내기 위해 열량의 개념과 Fourier의 법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Q'' = -m_F \Delta h_c \quad (15)$$

$$Q_{cond.} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_\infty - T_0}{d/b} \quad (17)$$

여기서 m_F 는 부피질량 생성속도, h_c 는 엔탈피, b 는 임의의 상수이다.

따라서 식 (15)~식 (17)을 이용하면 식 (14)는 다음과 같다.

$$(-m_F \Delta h_c)(\delta dL) = k(2\delta L) \frac{T_\infty - T_0}{d/b} \quad (18)$$

식 (18)을 정리하면

$$d^2 = \frac{[\alpha \rho_u c_p] [b]}{[\alpha \rho_u c_p]} \delta^2 \quad (19)$$

$$d = \sqrt{b} \delta \quad (20)$$

된다. 즉, 식 (19)는 식 (13)인 $d = a\delta$ 의 형태로 됨을 알 수 있다.

식 (10)을 식 (13)에 대입하면

$$d = a\lambda / c_p \rho_0 v_0 \quad (21)$$

가 된다.

식 (21)의 d 를 식 (12)에 대입하면 E_{ig} 는 다음과 같다.

$$E_{ig} = a^2 \lambda^3 (T_\infty - T_0) / c_p^2 \rho_0^2 v_0^3 \quad (22)$$

식 (10)은 $\lambda = \delta c_p \rho_0 v_0$ 이 되므로, 식 (22)의 λ 에 $\delta c_p \rho_0 v_0$ 를 대입하면 다음과 같이 되고,

$$E_{ig} = a^2 \delta \lambda^2 (T_\infty - T_0) / c_p \rho_0 v_0^2 \quad (23)$$

가 되고, 이를 다시 정리하면 식 (23)은 다음과 같다.

$$E_{ig} = a^2 \delta^3 c_p \rho_0 (T_\infty - T_0) \quad (24)$$

이상과 같은 증명으로 식 (24)에 나타내듯이 최소발화에너지(MIE, E_{ig})는 온도의 함수임을 알 수 있다.

III. 실험자료 분석 및 추산 모델 설정

최소발화에너지가 온도 함수라는 사실에 대해 열량의 개념과 수학적 방법에 의해 증명되었다. 그러나 본 연구에서는 최소발화에너지와 온도 어떤 관계로 표현되는지를 수치적 및 통계학적 방법을 사용하여 살펴보고자 한다¹⁰⁾.

최소발화에너지와 온도의 관계로 고찰하기 위해 문헌에 발표된 자료를 분석하였는데 이 자료의 폭발 분위기는 양론적 혼합에서 이루어 졌다⁵⁾. 이 자료 분석에 이용된 물질은 석유화학 제품에서 널리 사용되는 탄화수소 물질 가운데 가스 물질인 프로판(C_3H_8)과 가장 저급가솔린인 펜탄($n-C_5H_{12}$)이다.

프로판과 펜탄에 대해 최소발화에너지와 온도의 관계를 plotting하여 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

그림 1과 그림 2에서의 plotting을 도식법(graphical method)에 의해 분석한 결과 수학적 모델(mathematical model)들을 생각할 수 있다.

$$\text{Model 1) } \frac{1}{Y} = a + bX + cX^2 + dX^3 + \dots \quad (25)$$

$$\text{Model 2) } Y = a + b/X + c/X^2 + d/X^3 + \dots \quad (26)$$

$$\text{Model 3) } \ln Y = a + bX + cX^2 + dX^3 + \dots \quad (27)$$

$$\text{Model 4) } Y = aX^{-2} \quad (28)$$

여기서 X 는 온도(T)이고 Y 는 최소발화에너지(MIE)이다.

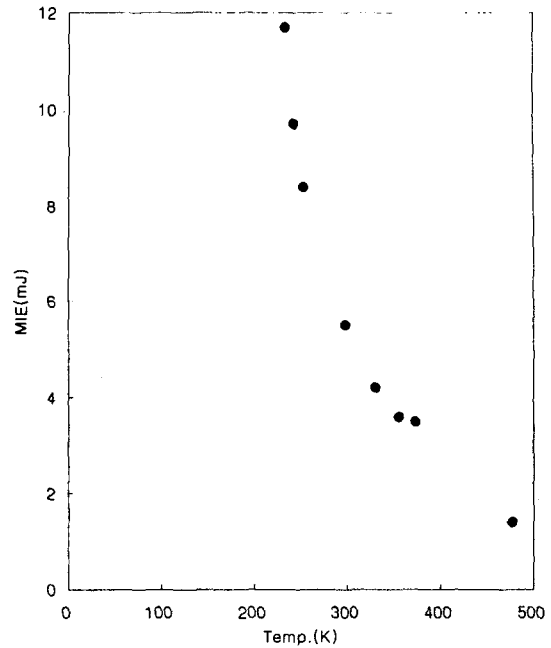


그림 1. 프로판에서 온도 변화에 따른 최소발화 에너지의 변화.

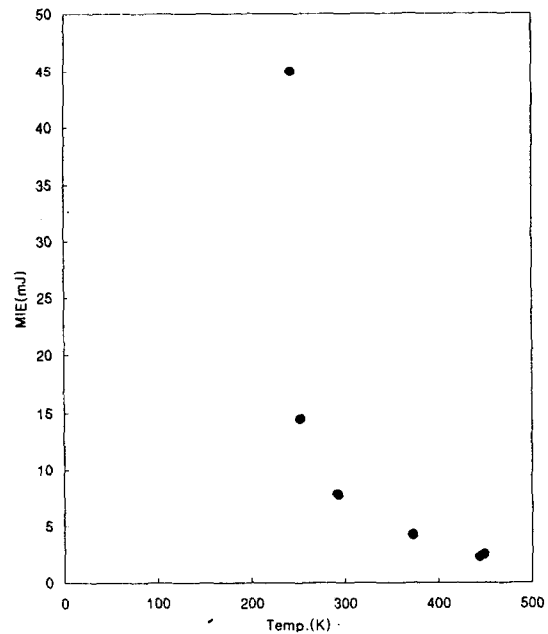


그림 2. 노말펜탄에서 온도 변화에 따른 최소발화 에너지의 변화.

위에서 제시한 각 항의 모델에서도 여러가지 모델을 고려할 수 있는데, 한 예로서 Model 1)에 대해 살펴 보면 다음과 같다.

$$\frac{1}{Y} = a + bX \quad (29)$$

$$\frac{1}{Y} = a + bX + cX^2 \quad (30)$$

$$\frac{1}{Y} = a + bX + cX^2 + dX^3 \quad (31)$$

$$\frac{1}{Y} = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4 \quad (32)$$

$$\frac{1}{Y} = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4 + fX^5 \quad (33)$$

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

IV. 최적화된 모델의 선정 및 매개변수 추산 (parameter estimation)

앞 절에서 최소발화에너지와 온도의 관계를 plotting한 결과 곡선관계(curvilinear relationship)를 보여 주고 있으므로 식(25)에서 식(28)의 가운데 최적화된 모델을 찾기 위해 통계학에서 자주 사용하는 다중회기분석(multiple regression analysis)을 이용하였는데, 다중회기분석이란 독립변수와 종속변수들 간의 관련성을 규명하기 위해 수학적 모형(model)을 이용하여 측정된 변수들의 자료로부터 추정하고 분석하는 통계적인 방법을 말한다^{10,11,12}.

제시된 모델을 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{Y} = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4 + fX^5 + \dots + pX^p + \dots \quad (34)$$

여기서 각각의 매개변수(parameter)를 결정하기 위해 최소화(minimization) 방법을 이용하였는데 이 방법은 수치적으로 널리 사용하는 방법이므로 간략히 소개하면 sum of square of deviation(S.S.D.)을 구하여 위해 각 매개변수를 편

미분하여 이를 영(zero)으로 두고 얻어지는 정규방정식(normal equation)의 해를 구하면 된다. 이 방법은 여러 수학 및 통계학 관련 책이나 문헌에 수록되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

이 매개변수를 구하는 계산 방법으로는 Abbreviated-Doolittle법과 Gauss-Jordan 소거법이 있는데 본 연구에서는 Gauss-Jordan 소거법을 이용하여 계산하였다. 이와같은 수리적인 계산방법에 의한 온도 변화에 의한 최소발화에너지 관계를 규명하고자 한다.

앞서 제시한 식(25)에서 식(28)의 각 식마다 각각의 모델 가운데 최적화된 모델을 찾고 또한 각 식 가운데 최적화된 모델을 찾아서 그 가운데 최적화된 모델을 선정하고자 한다. 최적화된 모델을 선정하기 위해 통계학에서 자주 사용하는 A.A.D.(average absolute deviations)과 A.A.P.E. (average absolute percent errors)을 이용하였다^{11,12}.

$$A.A.D. = \frac{\sum |Y_{est} - Y_{exp}|}{N} \quad (35)$$

$$A.A.P.E. = \frac{\sum | \frac{Y_{est} - Y_{exp}}{Y_{exp}} |}{N} \times 100 \quad (36)$$

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

프로판에서 온도에 의한 최소발화에너지의 관계를 식 (25)에서 식 (28) 가운데 최적화된 추산식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\text{Model 1) } \frac{1}{MIE} = -1.9336 + 1.8356 \times 10^{-2}T - 5.5864 \times 10^{-5}T^2 + 6.0667 \times 10^{-8}T^3$$

$$A.A.P.E. = 4.340, \quad A.A.D. = 0.288$$

$$\text{Model 2) } MIE = -35.3906 - 36480/T - 1.1932 \times 10^7 / T^2 + 1.3983 \times 10^9 / T^3$$

$$A.A.P.E.=4.752, \quad A.A.D.=0.223$$

$$\text{Model 3) } \ln(MIE)=4.9715-1.2547 \\ \times 10^{-2}T+6.0536 \\ \times 10^{-6}T^2$$

$$A.A.P.E.=5.094, \quad A.A.D.=0.315$$

$$\text{Model 4) } MIE=553103.3T^{-2}$$

$$A.A.P.E.=20.264, \quad A.A.D.=0.748$$

펜탄에서 온도에 의한 최소발화에너지의 관계를 식 (25)에서 식 (28) 가운데 최적화된 추산식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\text{Model 1) } \frac{1}{MIE}=-0.4256+1.8685 \times 10^{-3}T$$

$$A.A.P.E.=15.550, \quad A.A.D.=2.952$$

$$\text{Model 2) } MIE=-797.5625+836736/T \\ -2.8626 \times 10^8/T^2+3.2170 \\ \times 10^{10}/T^3$$

$$A.A.P.E.=46.192, \quad A.A.D.=4.156$$

$$\text{Model 3) } \ln(MIE)=12.8629-5.3855 \\ \times 10^{-2}T+6.0679 \\ \times 10^{-5}T^2$$

$$A.A.P.E.=22.687, \quad A.A.D.=4.448$$

$$\text{Model 4) } MIE=1489602T^{-2}$$

$$A.A.P.E.=134.142, \quad A.A.D.=9.029$$

제시한 방법론에 의해 프로판과 펜탄에서 온도와 MIE의 관계를 살펴본 결과 프로판의 경우 제시한 각 항의 최적화된 모델의 A.A.P.E.는 4.340~20.264 까지의 값을 가지며, 펜탄의 경우 프로판의 자료 보다 자료의 분산력이 크므로 A.A.P.E.가 15.550~134.142 까지의 값을 보이고 있다.

각 항의 최적화된 모델 가운데 A.A.P.E.가 가장 작게 나타나는 모델의 형태는 프로판과 펜탄 모두 다음과 같은 형태로 표현된다는 것을 알 수 있다.

$$\frac{1}{MIE}=a+bT+cT^2+dT^3+eT^4 \dots \quad (37)$$

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

프로판 :

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

펜 탄 :

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

V. 결과 및 고찰

최소발화에너지(이하 MIE라고함.)가 온도에 의존한다는 이론적 근거를 배경으로 문헌에 제시된 자료를 이용하여 MIE가 온도 함수로써 어떤 형태로 표현되는지를 살펴보았다.

MIE와 온도의 관계를 고찰하기 위해 앞에서 프로판과 펜탄에 대해 온도 변화에 따른 MIE를 추산할 수 있는 최적화된 수학적모형을 찾았다. 그 결과 프로판과 펜탄 각각에 대한 MIE 추산식에서 항의 수는 다르나 MIE와 온도 관계식이 수학적으로 표현되는 형태는 같음을 알 수 있었다.

프로판과 펜탄에 대해 본 연구에서 제시한 MIE의 추산식에 의한 추산값과 문헌값을 비교하여 표 1과 표 2에 나타내었다.

제시된 추산식의 타당성을 검토하기 위해서 추산에 이용된 최적화된 모델 1)과 모델 3)을 문헌값과 비교하여 나타내었다. 최적화된 모델 1)과 최적화 되지 않는 모델 3)을 비교한 이유는 MIE가 활성화에너지(activation energy)와의 관련성이 있으므로 지수 함수로 표현될 수 있다는 것이 일반적인 생각이기 때문에 지수 함수의 모델형인 모델 3)과 비교하여 표 1과 표 2에 나타낸 것이다.

프로판의 경우 모델 1)과 모델 3)의 A.A.P.E.와 A.A.D.가 큰 차이를 보이고 있지 않으나 펜탄의 경우 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 일반적으로 MIE가 지수형태의 함수로 표현이 가

표 1. 모델 1)과 모델 3)을 근거로 프로판에 대한 MIE의 예측값과 문헌값의 비교.

No.	T(K)	Reported data(mJ)	Model iii)	Model i)
1	233.15	11.7	10.7452	12.7663
2	243.15	9.7	9.7640	10.1010
3	253.15	8.4	8.8755	8.5143
4	298.15	5.5	5.8638	5.5172
5	330.15	4.2	4.4327	4.5310
6	355.15	3.6	3.5934	3.8911
7	373.15	3.5	3.1037	3.4530
8	477.15	1.4	1.4378	1.4351
A.A.P.E.	-	-	5.0938	4.3400
A.A.D.	-	-	0.3153	0.2879

표 2. 모델 1)과 모델 3)을 근거로 노말펜탄에 대한 MIE의 예측값과 문헌값의 비교.

No.	T(K)	Reported data(mJ)	Model iii)	Model i)
1	243.15	45.0	28.6628	34.8430
2	253.15	14.5	22.6034	21.0970
3	293.15	7.8	9.0250	7.6050
4	373.15	4.2	3.3738	3.6820
5	444.15	2.3	2.4928	2.4730
6	448.15	2.5	2.4958	2.4280
A.A.P.E.	-	-	22.6867	15.5500
A.A.D.	-	-	4.4481	2.9520

능하다고 볼 수 있으나 문헌값과 추산값의 비교 결과 본 연구에서 제시한 일반형의 표현으로 새로운 추산의 가능성을 제시하고 있다.

VI. 결 론

최소발화에너지가 온도의 함수라는 사실을 열량의 개념으로 수학적으로 고찰하였고, 이를 근거로 파라핀족탄화수소인 프로판과 펜탄에 대해서 온도에 의한 최소발화에너지의 관계를 나타내기 위해서 수학적 및 통계학적 방법에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최소발화에너지와 온도의 관계에서 기존의 이론을 고려하면 Arrhenius법칙에 의한 추산식 형태를 갖을 것으로 사려되나 문헌값에 의해 추산한 결과 다음과 같은 추산식을 얻었다.

프로판 :

$$\frac{1}{MIE} = -1.9336 + 1.8356 \times 10^{-2}T - 5.5864$$

$$\times 10^{-5}T^2 + 6.0667 \times 10^{-8}T^3$$

펜 탄 :

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

2) 프로판과 펜탄 각각에 대한 최소발화에너지 추산식에서 항의 수는 다르나 수학적으로 표현 형태가 같음을 알 수 있었다.

3) 실험에 의해서만 규명될 수 있는 여러 가지 현상들을 본 연구에서 제시한 방법론을 이용함으로써 시간, 노력, 경비를 줄일 수 있는 방도가 모색될 수 있다고 보며, 또한 제어할 수 없는 폭발 예방에 기초적인 자료로 사용되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. Williams, F. A., "Combustion Theory", 2nd. ed., Addison-Wesley Publishing Company

- 1985.
2. Turns, S. R., "An Introduction to Combustion -Concepts and Applications-", McGraw-Hill Inc., 1996.
 3. Blanc, M. V., Guest, P. G., von Elbe G. and Lewis, B., J. of Chem. Phys., Vol. 15, No. 11, 798, 1947.
 4. Lewis, B. and von Elbe G., J. of Chem. Phys., Vol. 15, No. 11, 803, 1947.
 5. Fenn, J. B., Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 43, No.12, 2865, 1951.
 6. Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., Combustion and Flame, Vol. 24, 99, 1975.
 7. Subulkin, M. and Siskind, K. S., Combustion and Flame, Vol. 69, 49, 1987.
 8. Maas, U. and Warnatz, J., Combustion and Flame, Vol. 74, 53, 1988.
 9. Frendi, A. and Subulkin, M., Combust. Sci. and Tech., Vol. 73, 395, 1990.
 10. Box, G. E. P. and Draper, N. R., "Empirical Model-Building and Response surface", John Wiley and Sons, Inc., 1987.
 11. Ha, D. M. and Park, J. C., HWAHAK KONGHAK, Vol. 29, No. 3, 284, 1991.
 12. Park, J. C., Ha, D. M. and Kim, M. G., Korean J. of Chem. Eng., Vol. 13, No. 2, 115, 1996.