

최소발화에너지의 압력 의존성

하동명, 이수경*

세명대학교 산업안전공학과, 서울산업대학교 안전공학과*

Pressure Dependence of Minimum Ignition Energy

Dong-Myeong Ha and Su-Kyung Lee*

Dept. of Industrial Safety Engineering, Semyung University

Dept. of Safety Engineering, Seoul National Polytechnic University*

1. 서론

발화공정에서 폭발 현상은 크게 물리적폭발과 화학적폭발로 나눌 수 있으며, 물리적폭발 가운데 가스폭발과 분진폭발은 가장 많이 발생하는 폭발 중 하나이다. 이들 폭발에 있어서 발화원(ignition sources)의 관리는 무엇 보다 중요하며 발화원들의 가장 기본이 되는 개념이 안전특성치(safety property)의 하나인 최소발화에너지(MIE, minimum ignition energy)이다. 최소발화에너지는 일반적으로 온도 및 압력이 높은 조건에서 낮은 최소발화에너지값을 갖고, 또한 일반적으로 연소속도가 큰 혼합기체일수록, 산소농도가 클수록, 열전도율이 작을수록, 가연성 혼합기체인 경우 양론적 혼합비에서 역시 작은 에너지 값을 갖는다[1].

최소발화에너지에 대한 최근의 연구로는 Frendi 등[2]에 의해 수학적 모델을 이용한 최소발화에너지의 연구를 들 수 있으며, Siwek[4]는 분진의 위험성평가에 영향을 주는 기술적 안전 지수 및 인자에 관한 연구의 일부에서 최소발화 에너지와 온도의 관계를 나타내고 있다. 또한 하와 김[5]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 보고자 한다.

2. 최소발화에너지의 압력 의존성에 대한 이론적 고찰

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

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.

$$\begin{aligned} E_{ig} &= \rho V c_p \Delta T \\ &= (A \delta) \rho [c_p (T_\infty - T_0)] \end{aligned} \quad (1)$$

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 을 계산하기 위해서 열해석을 이용하면 다음과 같다.

$$qw\delta = \lambda (T_\infty - T_0) / \delta \quad (2)$$

$$q = c_p (T_\infty - T_0) \quad (3)$$

여기서 q 는 반응혼합물의 단위질량당 방출된 에너지(반응열)이고, w 는 반응속도이며, λ 는 기체의 평균 열전도도이다. 그러므로 식 (3)의 q 를 식 (2)에 대입하면 화염폭 δ 는 다음과 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda}{c_p w}} \quad (4)$$

와 같이 되고, 이를 다시 정리하면

$$\delta = \lambda / c_p \rho_0 v_0 \quad (5)$$

식 (5)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{ig}/A &= (\lambda / c_p \rho_0 v_0) \rho_0 [c_p (T_\infty - T_0)] \\ &= \lambda (T_\infty - T_0) / v_0 \end{aligned} \quad (6)$$

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 면적 보다 커야한다($A \geq d^2$). 그러므로 최소발화에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ig} = d^2 \lambda (T_\infty - T_0) / v_0 \quad (7)$$

식 (7)의 a 는 이론과 실험의 결과로 다음과 같은 식으로 예측할 수 있다.

$$d = a\delta \quad (8)$$

여기서 a 는 계(system)의 특성치 크게 의존하지 않는 다중인자(multiplicative factor)이다. 식 (5)을 식 (8)에 대입하고, 이때의 d 를 식 (7)에 대입하면 최소발화에너지는 다음과 같이 되고,

$$E_{ig} = a^2 \lambda^3 (T_\infty - T_0) / c_p^2 \rho^2 v_0^3 \quad (9)$$

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

또한 최소발화에너지가 온도의 함수뿐만 아니라 압력의 함수로 나타내기 위해서 식 (9)에서 우측항의 밀도(ρ)가 압력(P)의 함수로 표현되어야 하는데, 이를 ρ 와 P의 관계로 표현하기 위해 이상기체법칙을 도입하였다.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하면

$$E_{ig} = \frac{a^2 \lambda^3 (T_\infty - T_0) R^2 T_0^2}{c_p^2 v_0^3 M^2 P^2} \quad (11)$$

이를 최소발화에너지와 압력의 관계를 함수 형태로 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$E_{ig} \approx P^{-2} \quad (12)$$

이 관계식에 의해서 최소발화에너지를 압력의 함수로 나타낼 수 있다.

3. 최소발화에너지와 압력의 실험자료 분석 및 추산 모델 설정

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. 프로판에 대한 최소발화에너지와 압력의 관계를 plotting하여 Fig. 1에 나타내었다.

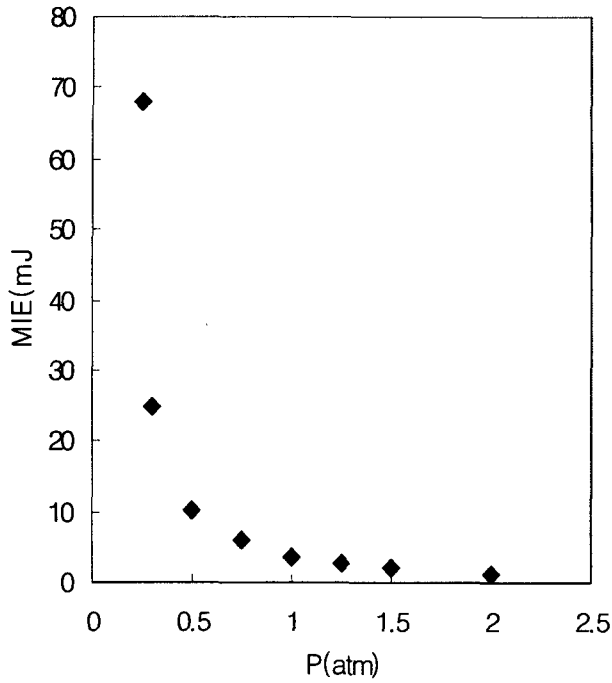


Fig. 1. Variation of minimum ignition energy with the pressures for the propane.

Fig. 1에서 plotting을 분석한 결과 수학적 및 통계학적 방법에 의해 다음과 같은 여러가지 추산 모델들을 고려할 수 있다.

$$\text{Model i)} Y = \frac{1}{a + bX + cX^2 + dX^3 + \dots} \quad (13)$$

$$\text{Model ii)} Y = a + b/X + c/X^2 + d/X^3 + \dots \quad (14)$$

$$\text{Model iii)} \ln Y = a + bX + cX^2 + cX^3 + \dots \quad (15)$$

$$\text{Model iv)} Y = aX^{-2} \quad (16)$$

특히 Model iv)는 기존의 이론을 근거로 제시한 최소발화에너지와 압력의 관계

식인 $E_{ig} \approx P^{-2}$ 의 모델 형태를 나타낸 것이다. 여기서 X는 압력(P, atm) 이고, Y는 최소발화에너지(MIE, mJ)이다. 이와같이 각 항 마다 여러 개의 모델들을 고려하여 그 가운데 수학적 및 통계적인 방법에 의해 가장 최적화된 추산 모델을 찾고자 한다[5,6].

4. 최소발화에너지 추산 모델의 최적화

앞 장의 식(13)에서 식(16)의 여러 추산 모델 가운데 가장 최적화된 모델을 찾기 위해서 통계학에서 자주 사용하는 다중회기 분석(multiple regression analysis)을 이용하였다.

앞서 제시한 식(13)에서 식(16)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)과 A.A.D.(average absolute deviations)를 이용하였다[6].

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

프로판 :

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

펜 탄 :

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

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.

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 ii)를 비교하였으며, 또한 추산식에 의한 추산값과 문헌값의 차이 정도를

각 모델에 대하여 Table 1에 나타내었다.

프로판의 경우 이론적인 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 이론적인 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.

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.

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

No.	P(atm)	Reported data(mJ)	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

참 고 문 헌

1. Turns, S. R.: "An Introduction to Combustion -Concepts and Applications-", McGraw-Hill Inc.(1996).
2. Frendi, A. and Subulkin, M.: Combust. Sci. and Tech., **73**, 395(1990).
3. Siwek, R.: J. Loss Prev. Process Ind., **9**, 1, 21(1996).
4. Ha, D.M. and Kim, M.G.: Theories and Applications of Chemical Engineering, **3**, 1, 989(1997).
5. Ha, D. M.: J. of the Korean Inst. for Ind. Safety (KIIS), **8**, 3, 50(1993).
6. Park, J. C., Ha, D. M. and Kim, M. G.: Korean J. of Chem. Eng., **12**, 1, 39(1995).