

CO와 CH₄, C₂H₄의 혼합 가스 폭발에 대한 TNT 등가량 계산

김민주¹⁾, 권상기^{1)*}

Calculation of the TNT Equivalent Mass of the Possible Explosion of CO, CH₄, and C₂H₄

Minju Kim, Sangki Kwon

Abstract Gas explosion accidents are steadily being issued due to increased gas consumption in Korea and foreign countries. To analyze the effects of these gas explosions, a TNT equivalent method is used. In this study, the TNT equivalent was calculated in the event of an explosion due to the volume content in the air of CO, CH₄ and C₂H₄, the typical flammable gases emitted by coal. Also, the peak overpressure and impulse variation with the distance from explosion point were compared and analyzed by gas using the calculated equivalent value of TNT. The upper limit of the TNT equivalent for the three mixed gases is up to five times larger than the other gases mixture. In addition, the peak overpressure and impulse, which are factors of the TNT characteristic curve, are also increasing as the number of gases increases.

Key words Gas explosion, TNT equivalent, Peak overpressure curve, Flammable gas, Gas mixture

초 록 국내외에서 가스 소비량 증가에 따라 가스 폭발 사고가 꾸준히 발행하고 있으며 석탄 저장소 옥내화 대책에 따른 가스 폭발 위험성이 대두되고 있다. 이러한 가스 폭발의 영향을 분석하기 위하여 TNT 등가량 산정법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 석탄이 배출하는 가연성 가스인 CO, CH₄, C₂H₄의 공기 내 부피 함량에 따른 폭발 사례에 대한 TNT 등가량을 산정하였다. 또한 계산된 TNT 등가량을 이용하여 거리에 따른 최대 압력과 임펄스 변화량을 가스 폭발 사례별로 비교, 분석하였다. 3개 혼합 가스의 TNT 등가량 증가 양상은 C₂H₄의 공기 중 부피 함량에 의존하는 경향을 보이고 있다. 또한 TNT 특성곡선의 인자인 최대 압력과 임펄스도 가스의 개수가 증가함에 따라 그 값이 증가하는 양상을 띠고 있다.

핵심어 가스 폭발, TNT 등가량, 폭발압력곡선, 가연성가스, 가스혼합물

1. 서 론

가스 폭발(gas explosive)이란 기체가 빠른 반응 속도로 발열 반응을 일으켜 급격히 팽창하면서 열과 압력을 발생시키며 파괴 작용을 하는 현상이다. 가스

폭발은 가연성 가스, 공기 중의 증기가 산화 반응을 일으켜 발생된다(Ha, 2005). 산업의 발전에 따라 국내 가스 소비량이 증가하는 추세이며, 이에 따라 매년 수십 건 이상의 가스 폭발 사고가 지속적으로 발생하고 있다(Fig. 1).

국내외에서 발생하는 천연가스로 인한 폭발 사고는 전북 익산 동양 가스 충전소 폭발, 청주 아파트 메탄가스 폭발, 오스트리아 천연가스 설비 폭발 등이 발생하였고, 광산에서 발생하는 폭발 사고는 강원도 태백 탄광 폭발사고, 중국 산시성 탄광 폭발사고, 체코 탄광 메탄가스 폭발 등이 있다. 이와 같은 사례같

1) 인하대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 kwonsk@inha.ac.kr

접수일 : 2020년 1월 29일

심사 완료일 : 2020년 2월 7일

게재 승인일 : 2020년 2월 12일

이 광산에서 발생하는 가스 폭발은 대부분 탄광에서 발생하고 있으며(KOSIS, 2018), 탄광의 가스 폭발은 메탄가스의 증가 및 석탄 분진 발생과 관련되는 것이 일반적이다(Amyotte and Pegg, 1993).

국내의 석탄 생산량은 꾸준히 줄어들고 있지만, 석탄 소비량은 오히려 증가하고 있는 추세이다(KOSIS, 2019). 또한 국내에서는 미세먼지 저감 대책의 일환으로 석탄 저장소의 옥내화가 진행되고 있다(환경부, 2019). 석탄의 옥내 저장소를 위한 사일로를 건설하게 될 경우, 일정한 공간 안에 적재되어 있는 석탄으로부터 배출되는 기체인 메탄, 일산화탄소, 에틸렌과 같은 가연성 가스에 의한 폭발 가능성에 유의해야 한다.

가스 폭발 피해 예측 방법은 다중 에너지 방법(Multi-Energy method), BST방법(Baker-Strehlow-Tang method)방법 등이 있다(Han et al., 2015). 다중 에너지 방법은 폭연을 기초로 하여 증기운(vapor cloud) 폭발의 평가를 위한 계산방법이다. 증기운 폭발은 주로 폭연의 형태로 발생하며 TNT 등가량 산정 방법과 다르게 다중 에너지 방법은 증기운 중 일부분에서 폭발한다고 가정한다(Van, 1985). BST 방법은 다중 에너지 방법에 기반으로 한 방법으로, 다중 에너지 방법과 마찬가지로 증기운 중 일부분에서 폭발이 일어난 것을 가정하고 있다. BST 방법은 광범위한 범위

의 장애물 밀도, 연료 반응성을 기반으로 폭발 속도에 대한 지침을 제공한다(Pierorazio, 2005). TNT 등가량 산정법은 가스 폭발 시 증기운 전체에서 폭발한다는 전제하에 폭발로 방출되는 에너지를 TNT의 질량으로 환산한 값이다(Han et al., 2015). 이러한 피해 예측 방법 중 TNT 등가량 산정법은 폭발 환산 거리와 폭발로 인한 피해 예측에 주로 사용되고 있으며(Crowl, 1969), 폭발물 제조 및 저장과 관련된 국외 정부의 규제 근거로 사용되고 있다(Cooper, 1994). 또한 TNT 등가량은 폭발 현상에 적용할 때 보수적이며 단순한 방법으로 활용될 수 있다(Kwon and Park, 2015).

Kwon and Park(2015)에 따르면, 해외의 가스 폭발 사례는 TNT 등가량 산정법을 사용하여 폭발 현상을 분석하는 반면, 국내 가스 폭발 사례는 TNT 등가량 산정법을 활용한 연구가 드물다고 보고된 바 있다. Kwon and Park(2015)은 CH₄ 가스에 대하여 TNT 등가량을 계산하고, TNT 특성곡선과 경험식을 이용하여 거리에 따른 폭발 압력과 임펄스의 변화를 추정, 분석하였다. Kwon and Kim(2016)은 TNT 등가량 산정을 통하여 중국 텐진항 폭발 사례와 같이 화학반응에 의해 발생하는 폭발성 가스의 폭발과 폭발 곡선을 해석한 바 있다. Yoon(2018)은 화학 공장의 씨클로헥

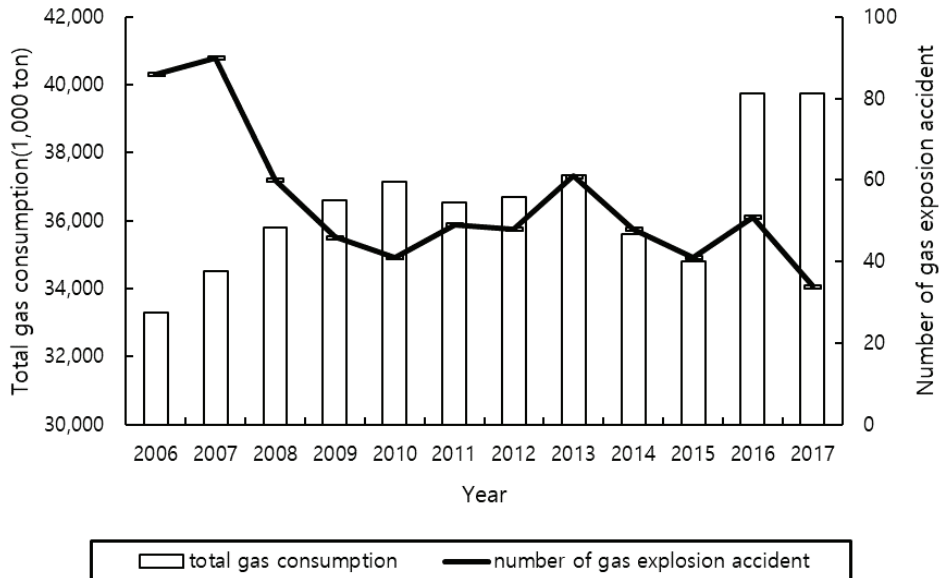


Fig. 1. Explosion incidents and total gas consumption calories per year in Korea(KOSIS, 2019).

산(cyclohexane) 유출에 의한 증기운 폭발 사고에 대한 TNT 등가량 산정법과 다중에너지법(multi-energy method)을 적용하여 추정된 과압(overpressure)의 크기와 피해 상황을 비교, 분석하여 두 방법의 타당성을 검토한 바 있다. LÓPEZ et al.(2015)은 여러 가지 시나리오를 가정하여 수소 차 안의 H₂가 폭발할 때 CH₄와 H₂의 TNT 등가량을 비교, TNT 등가량 산정 방법의 타당성을 검증하였다.

TNT 등가량 산정법의 경우, 단독 가스의 폭발 영향 분석에 관한 연구는 있었지만, 혼합 가스를 대상으로 TNT 등가량을 계산하고 폭발 영향을 분석한 사례는 미미한 실정이다. Choi and Kim(2015)은 LNG 혼합 가스의 데이터를 활용하여 중소 규모의 LNG 혼합 가스 폭발 상황에 적용 가능한 실제적인 TNT 해석 기법을 제안하였다. 또한 유한요소 폭발 해석 모델의 타당성을 기존의 TNT 해석법과 비교 분석한 바 있다. Deng et al.(2010)은 석탄 광산에 주로 방출되는 가스인 CO, C₂H₄, CH₄를 CH₄+CO와 CH₄+C₂H₄로 혼합하여 다양한 가스 혼합 비율에 따른 폭발 압력의 하한과 상한을 분석한 바 있다. CH₄와 CO가 혼합되어 있을 때, CO의 농도가 증가함에 따라 폭발 한계 압력의 상한, 하한이 모두 증가하는 양상을 보였다. 반면, CH₄와 C₂H₄가 혼합되어 있을 때, C₂H₄의 농도가 증가함에 따라 폭발 한계 압력의 하한은 감소하지만, 상한은 증가하는 양상을 보였다. 또한 C₂H₄와 CO의 CH₄ 혼합 부피 비율에 따른 위험도를 비교한 결과, C₂H₄의 농도가 증가함에 따라 CO보다 더 큰 위험성을 보였다. Addai et al.(2015)은 점화 장치를 이용하여 옥수수 전분(C₆H₁₀O₅), CH₄, 아세톤의 혼합 비율에 따른 폭발 압력 하한, 상한을 각각의 물질, 두 성분을 혼합한 경우와 비교 분석하였다. 이처럼 혼합 가스 폭발 영향의 경우 폭발 한계의 상, 하한을 분석한 연구가 주로 진행되어 왔으며, TNT 등가량을 산정하여 폭발의 영향을 평가하는 연구는 진행이 미미한 상황이다.

TNT 등가량 산정을 하고 난 뒤, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 폭발 위력 해석과 TNT 특성곡선을 직접적으로 확인할 수 있다. 대표적인 폭발 해석 프로그램은 AUTODYN, LS-DYNA, ABAQUS, CONWEP 등이 있으며 이러한 프로그램들은 현장 실험을 수행하는 것보다 안전하고 경제적이다. 국내의 경우 여건상 현장 실험의 어려움이 있기 때문에 신뢰성 있는

수치 해석이 필요한 실정이며 수치 해석을 위해서는 최대압력(peak overpressure)의 산정과 폭발 압력의 시간에 따른 감쇄 형상에 대한 이해가 필수적이다(Kwon, 2017). 그러므로 폭발 현상의 정확한 해석을 위해서 TNT 등가량의 변화 추세를 나타내는 TNT 특성곡선을 도출해야 할 필요성이 있다.

Costa and Doz(2017)는 폭발 해석 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 1D, 2D, 3D의 상황을 모델링하고, 최대압력과 이론식을 비교 분석한 바 있다. Park(2019)은 폭발 해석 프로그램인 ELS의 폭발 하중에 대한 적용성을 평가하였고, 단순 해석 모델에 대해 특성 비교하기 위해 다른 해석 프로그램인 AT-Blast, RC-Blast, AUTODYN과 Kinney와 Graham의 경험식을 사용하여 비교하였다.

본 연구에서는 밀폐되어 있는 일정 공간 안의 CO, CH₄, C₂H₄ 가스가 다양한 비율로 혼합되어 있을 때 TNT 등가량을 계산하고 CO, CH₄, C₂H₄의 혼합 비율에 따른 폭발의 영향을 분석하고자 한다. 또한 계산된 TNT 등가량을 사용하여 TNT 특성곡선을 도출하고 거리에 따른 폭발 압력과 임펄스의 변화를 단독 가스 폭발과 혼합 가스 폭발로 구분하여 비교, 분석하였다.

2. TNT

트라이나이트로톨루엔(TNT, TriNitroToluene)은 화약의 일종으로 화학식은 C₆H₂(NO₂)₃CH₃이다. TNT는 성분과 폭발력이 일정하기 때문에 폭약의 위력을 나타내는 RE계수(Relative Effectiveness factor)로 쓰인다. 또한 TNT의 폭발 특성은 실험을 통해 상세히 측정되어 있기 때문에 신뢰도가 높다(Kim et al., 2015). TNT의 밀도는 1.654 g/cm³, TNT의 분자량은 227 g/mol, 엔탈피는 -54.4 kJ/mol이다(Kinney and Graham, 1985).

2.1 TNT 등가량

일반적으로 TNT 등가량은 물질이 폭발할 때 발생하는 에너지를 동일한 양의 에너지를 발생시키는 TNT의 질량으로 나타낸 값을 의미한다(Sochet et al., 2011). 가스 폭발 시 TNT 등가량 계산을 위해 화학 반응식에 관여하는 물질들의 물성, 엔탈피 또는 생성열, 그리고 TNT의 엔탈피가 필요하다. TNT 등가량은 가스 내 연료의 총량과 경험적 요인에 관련이 있

다. Sochet(2010)은 폭발 에너지를 기반으로 다음과 같은 TNT 등가량에 대한 경험 식을 제시하였다.

$$W_{TNT} = \eta_e \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \quad (1)$$

이 식에서, W_{TNT} 는 TNT 등가량(kg), W_f 는 공기 중에 있는 폭발물의 총량(kg), H_f 는 연료의 연소열 (MJ/kg), H_{TNT} 는 TNT의 폭발 에너지(4.5 MJ/kg), η_e 는 TNT의 efficiency factor(=0.03) 이다. Lea(2002)는 TNT 등가량을 계산하는 또 다른 식을 제안하였다.

$$W_{TNT} = 10 \times \eta \times W_{HC} \quad (2)$$

이 식에서, W_{TNT} 는 TNT 등가량(kg), W_{HC} 는 공기 중에 있는 탄화수소의 실제 양(kg), η 는 실험에 기반한 yield factor(=0.03-0.05) 이다. 식(2)의 상수 10은 대부분의 탄화수소가 TNT보다 10배 높은 연소열을 가지고 있다는 사실을 나타낸다. 식(1)은 탄화수소를 포함한 폭발물의 질량을 의미하는 것에 반해, 식(2)는 폭발물을 탄화수소로만 특정 지었다는 점에 차이점이

있다. Table 1은 대표적인 가연성 물질들의 열화학적 성질, 물성, 폭발 상한과 하한을 보여주고 있다. Table 2는 본 연구의 혼합 가스 화학 반응식에 요구되는 기체의 몰 질량, 생성열, 폭발할 수 있는 가스 농도의 범위를 나타낸다. 본 연구에서는 식(1)과 식(2)를 사용하여 TNT 등가량을 산정하였다.

2.2 화학 반응식

연료의 연소열, 즉 폭발 에너지를 계산하기 위해 폭발에 대한 여러 가지 화학 반응식이 제안되어 왔다 (Sochet, 2010; Kwon and Park, 2015). 본 연구에서는 KW rule (Kistiakowsky-Wilson rule)을 사용하여 TNT의 화학 반응식을 선정하였다. KW rule은 폭발 물질의 산소 평형(Oxygen Balance, OB)이 -40% 보다 큰 경우와 -40% 보다 작은 경우로 나누어진다.

a) OB > -40%일 때,

- 탄소 원자는 일산화탄소로 전환
- 산소가 남는 경우, 수소 원자는 물로 전환
- 산소가 계속 남아있는 경우, 일산화탄소가 이산화탄소로 전환
- 질소 원자는 N₂로 전환

Table 1. Data of combustible gases (298K, 1atm) (ASTM, 2001)

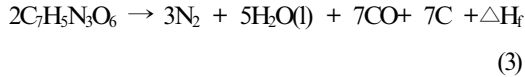
Gases	Molecular weight (g/mol)	Heat of formation (kJ/mol)	Density (kg/m ³)	Explosion range (% in volume)	
				low	High
Butane C ₄ H ₁₀	58.12	-2877	2.48	1.8	8.4
Propane C ₃ H ₈	44.1	-119.8	1.83	2.1	9.5
Ethane C ₂ H ₆	30.07	-83.7	1.282	3	12.5
Acetylene C ₂ H ₂	26.04	226.73	1.098	2.5	81
H ₂	1	0	0.07	4	75
NH ₃	17.03	-46.11	0.771	15	28

Table 2. Data for possible explosions (ASTM, 2001)

Gases	Molecular weight (g/mol)	Heat of formation (kJ/mol)	Density (kg/m ³)	Explosion range (% in volume)		
				low	high	
Sources	CH ₄	16	-75	0.668	5	15
	CO	28	-110.5	1.145	12.4	74.2
	C ₂ H ₄	28	52.26	1.26	2.7	36
	O ₂	32	0	1.43		
Products	CO ₂	44	-393.5	1.96		
	H ₂ O (g)	18	-241.82			

- b) OB < -40%일 때,
 - 수소 원자는 물로 전환
 - 산소가 남는 경우, 탄소 원자는 일산화탄소로 전
 - 산소가 계속 남아있는 경우, 일산화탄소는 이산화탄소로 전환
 - 질소 원자는 N₂로 전환

KW rule은 다른 rule에 비하여 폭발 반응에서 물의 생성을 먼저 고려하기 때문에 비교적 정확한 폭발 압력을 계산할 수 있다(Kim et al., 2017). 그러므로 본 연구에서 TNT의 화학 반응식은 KW rule을 사용하였다. 식(3)은 KW rule을 사용하여 계산한 TNT의 폭발에너지다. TNT의 산소 평형은 -74%이기 때문에 다음과 같은 화학 반응식을 따른다.



$$\begin{aligned} \Delta H_f &= 2(-54.4) - 3x0 - 5x(-285.5) - 7x(-110.5) - 7x0 \\ &= 2092 \text{ KJ} = 2029 \text{ kJ/454g} = 4.5\text{MJ/kg} \end{aligned}$$

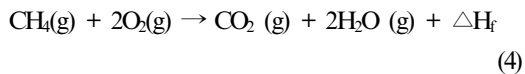
즉, TNT 1kg은 4.5MJ의 폭발 에너지를 발생 시킨다고 할 수 있다.

3. 가스 폭발에 따른 TNT 등가량 계산 결과

밀폐된 일정 공간 내에 존재하는 가스가 폭발하는 경우를 가정하여 TNT 등가량을 계산하였다.

3.1 단독 가스 폭발

본 연구에서 각 가스의 경향성을 파악하기 위하여 메탄, 일산화탄소, 에틸렌의 단독 폭발에 대한 TNT 등가량 계산을 진행하였다. TNT 등가량을 계산하기 위해서 기체의 반응열, 질량이 요구된다. 25°C, 1기압에서 계산된 메탄의 반응열은 아래 식과 같다.



$$\Delta H_f = 191 \text{ kcal/mol} = 50000 \text{ kJ/kg} = 50 \text{ MJ/kg}$$

따라서 반응열 기준으로 1kg의 메탄은 약 TNT 11kg에 해당하는 폭발 에너지를 발생한다. 메탄은 공

기 중에 5~15%의 부피 비율로 있을 때 폭발할 수 있다. 그러므로 메탄가스로 인한 폭발이 발생한 공간의 부피를 알 수 있으면, 폭발에 관여한 가스의 양을 추정할 수 있다. 폭발이 발생한 공간의 Vm³일 때, 25°C 1기압에서 폭발에 관여하는 메탄의 질량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &V \text{ m}^3 \times (0.05\sim 0.15) \times 0.668 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0.0334V \sim 0.1002V \text{ kg} \end{aligned} \quad (5)$$

메탄의 질량과 식(1)을 이용하여 TNT 등가량을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{TNT} &= 0.03 \times (0.0334V \sim 0.1002V \text{ kg}) \times (55.6/4.5) \\ &= 0.01238V \text{ kg} \sim 0.03714V \text{ kg} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 메탄이 일정 공간 안에 부피 비율로 5%가 존재할 시 TNT 등가량은 0.01238V kg이다. 식(2)를 이용하여 yield factor가 0.03인 경우와 0.05인 경우 TNT 등가량을 계산하면,

$$\begin{aligned} &10x0.03x(0.0334V \sim 0.1002V \text{ kg}) \\ &= 0.01002V \text{ kg} \sim 0.03006V \text{ kg} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &10x0.05x(0.0334V \sim 0.1002V \text{ kg}) \\ &= 0.0167V \text{ kg} \sim 0.0501V \text{ kg} \end{aligned} \quad (8)$$

식(7), (8)에서 메탄이 가정한 공간 안에 부피 비율로 5%가 존재할 시 TNT 등가량은 0.01002V~ 0.0167V kg이다. Table 3은 식(1), (2)에서 Yield factor가 0.03일 때, 각 기체의 화학식과 TNT 등가량을 비교한 것이다. Table 3에서, C₂H₄의 TNT 등가량 범위가 가장 넓으며, TNT 등가량 범위의 상한값이 가장 크다. 본 연구에서 사용한 세 가스를 비교했을 때, C₂H₄가 폭발 위험성과 폭발력이 가장 크다(Deng et al., 2015). 이는 TNT 등가량의 범위가 넓을수록 폭발할 수 있는 가능성이 크다는 것을 의미하기 때문에 C₂H₄의 폭발 위험성이 다른 가스들보다 비교적 크다는 것을 시사한다. 또한 TNT 등가량 범위의 상한값이 클수록 같은 부피로 폭발했을 때 더 큰 폭발력을 지니는 것으로 해석된다.

Table 3. TNT equivalent of gas and air mixture

Gas	Chemical formula	TNT Equivalence (kg)
CH ₄	CH ₄ (g)+2O ₂ (g) → CO ₂ (g)+2H ₂ O(g)+ΔH _f ΔH _f = 50 MJ/kg	0.012V ~ 0.030V
CO	2CO(g)+O ₂ (g) → 2CO ₂ (g)+ΔH _f ΔH _f = 10.1 MJ/kg	0.043V ~ 0.057V
C ₂ H ₄	2C ₂ H ₄ (g)+5O ₂ (g) → 4CO ₂ (g)+2H ₂ O(g)+ΔH _f ΔH _f = 42.67 MJ/kg	0.0092V ~ 0.12V

3.2 2개 혼합 가스 폭발 TNT 등가량 계산

가연성 가스 혼합물의 폭발 한계는 Le Chaterlier 공식으로 계산할 수 있다.

$$V_m = \frac{100}{P_1/V_1 + P_2/V_2 + \dots + P_n/V_n} \quad (9)$$

이 식에서, V_m 는 혼합물의 하한 또는 상한 폭발 한계 퍼센트(%), P_i 는 혼합물의 단일 가연성 성분의 농도($\sum P_i = 100\%$) V_i 는 단일 구성 성분의 폭발 부피 상한, 하한 퍼센트이다. 이 공식은 혼합물의 상부 및 하부 폭발 한계가 가스의 비율에 따라 다르다는 것을 의미한다. 폭발 가스 혼합물의 폭발 한계는 온도가 증가함에 따라 폭발 범위가 넓어진다(Ha, 2005). 이러한 폭발 가스의 온도 의존성을 고려한 식이 Zabetakis et al.(1958)에 의해 제시되었다.

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

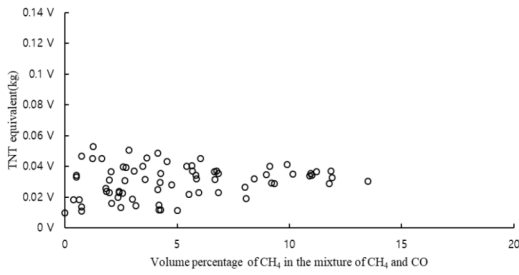
여기서 $L_i(t)$ 은 온도가 t°C 일 때의 폭발 한계 값(%), $L_i(25)$ 은 25°C일 때 탄화수소의 폭발 한계 값(%)을 의미한다. 본 연구에서는 폭발 가스의 온도 의존성을 고려하지 않고 혼합 가스 폭발을 용이하게 계산하기 위해 식(9)를 사용하여 TNT 등가량 계산을 수행하였다. 각 가스들의 폭발 범위를 고려하여 각 폭발 가스의 폭발 범위를 선정하고, 가스 비율을 일정 범위 내에서 무작위(randomly)로 가정한 뒤 TNT 등가량 계산을 수행하였다(Table 4).

Table 4. Explosion range of 2 mixed explosive gases

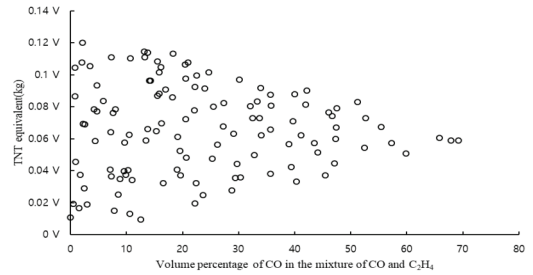
Gas mixture type	Gas name	Gas volume percentage in air (%)
CH ₄ +CO	CH ₄	0~20
	CO	0~80
CH ₄ +C ₂ H ₄	CH ₄	0~20
	C ₂ H ₄	0~40
CO+C ₂ H ₄	CO	0~70
	C ₂ H ₄	0~30

Fig. 2~4는 두 개의 가스가 혼합된 혼합 가스의 각 TNT 등가량 추세를 나타낸 것이다. Fig. 2의 CO+CH₄ 폭발은 CO의 공기 중 부피 비율이 증가함에 따라 TNT 등가량이 선형으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 CH₄보다 CO가 더 폭발 위험성이 크기 때문으로 사료된다. 공기 중 CH₄의 부피 비율이 증가하면서 TNT 등가량은 분산하는 양상을 보이며, 부피 중의 CH₄ 함량이 증가함에 따라 TNT 등가량은 0.036V kg으로 수렴한다.

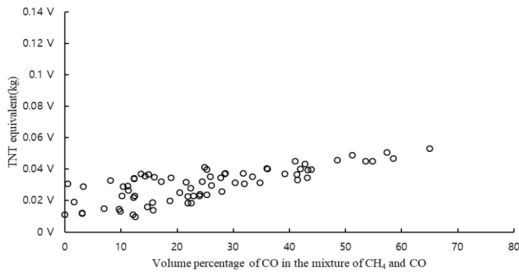
Fig. 3~4에서 CH₄+C₂H₄, CO+C₂H₄의 공기 중 부피 함량에 따른 TNT 등가량 추세에서 C₂H₄가 폭발 위험성이 크기 때문에 C₂H₄의 부피 비율이 증가하면서 TNT 등가량이 선형 증가하는 양상을 띠고 있다. 이 중, CO+C₂H₄ 폭발의 경우 C₂H₄의 부피 비율에 따른 TNT 등가량은 비교적 분산이 크고 선형 증가하는 양상을 보이는 반면, CH₄+C₂H₄ 폭발의 경우 비교적 분산이 적은 형태로 C₂H₄의 부피 비율에 따른 TNT 등가량이 선형 증가하는 양상을 보인다. 이는 CH₄와 C₂H₄간의 폭발 위험성 차이가 더 크기 때문이다.



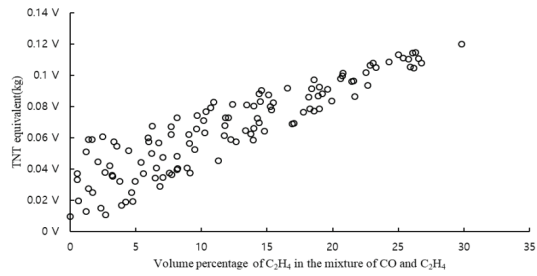
(a) Volume percentage of CH₄



(a) Volume percentage of CO



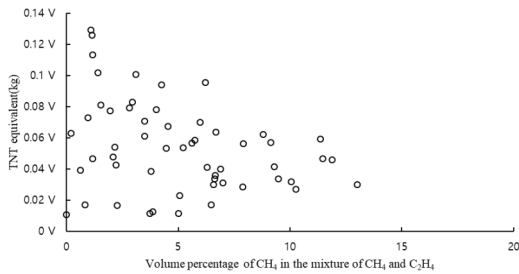
(b) Volume percentage of CO



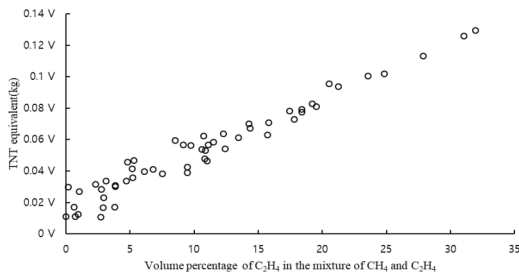
(b) Volume percentage of C₂H₄

Fig. 2. Variation of TNT equivalent for the variation of gas content in the mixture of CH₄ and CO.

Fig. 4. Variation of TNT equivalent for the variation of C₂H₄ content in the mixture of CO and C₂H₄.



(a) Volume percentage of CH₄



(b) Volume percentage of C₂H₄

Fig. 3. Variation of TNT equivalent with the variation of volume percentage of CH₄ in the mixture of CH₄ and C₂H₄.

3.3 3개 혼합 가스 폭발 TNT 등가량 계산

일정 공간 안에 가연성 가스 CH₄와 CO, C₂H₄가 혼합되어 있을 때, 화학 반응식은 이와 같다.



CH₄와 CO, C₂H₄가 특정한 비율로 혼합되어 있을 때 O₂의 양이 결정되고, 반응물의 변수인 e, f가 결정된다. CH₄와 CO, C₂H₄의 부피 비율에 따라 TNT 등가량은 변동될 것이다. 또한 실제 폭발이 일어날 수 있는 부피 비율에서 TNT 등가량 계산을 수행할 필요가 있다. 메탄과 일산화탄소, 에틸렌의 부피 퍼센트가 200개인 경우를 무작위로 선정, 식(9)를 만족한 경우만 TNT 등가량 계산을 수행하였다. 각 가스의 폭발 범위를 고려하여 CH₄의 경우, 공기 속 부피의 범위를 0~10%로 선정되었으며, CO는 0~60%, C₂H₄는 0~30% 일 때 선정되었다.

무작위로 선정된 200개의 부피 퍼센트의 경우 중, 72개의 경우가 Le Chaterlier 공식으로 계산되는 폭발 한계식을 만족하였다. Fig. 5는 공기 중에서 CH₄가

스의 공기 중 부피 퍼센트에 따른 TNT 등가량을 나타낸다. 낮은 CH₄ 농도에서 TNT 등가량의 분산이 큰 이유는 다른 농도의 CO, C₂H₄가 폭발할 수 있기 때문이다. 메탄의 농도가 증가하면서 TNT 등가량은 약 0.053V kg으로 수렴하는 형태를 보인다. Fig. 6은 공기 중에서 일산화탄소의 부피 퍼센트에 따른 TNT 등가량을 계산한 것이다. 공기 중 CO의 부피 비율이 증가함에 따라 TNT 등가량은 CH₄의 양상과 마찬가지로 낮은 농도에서 TNT 등가량의 분산이 크며, TNT 등가량은 0.066V kg로 수렴하는 형태를 보인다. Fig. 7은 공기 중에서 C₂H₄의 공기 중 부피 퍼센트에 따른 TNT 등가량을 나타낸다. 공기 중 C₂H₄의 부피 비율이 증가함에 따른 TNT 등가량은 선형 증가하는 양상을 보인다.

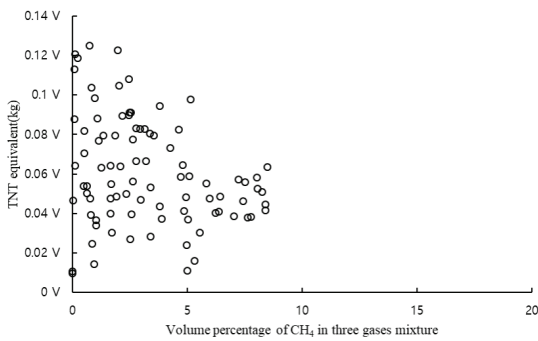


Fig. 5. Variation of TNT equivalent with the variation of volume percentage of CH₄ in three gases mixture.

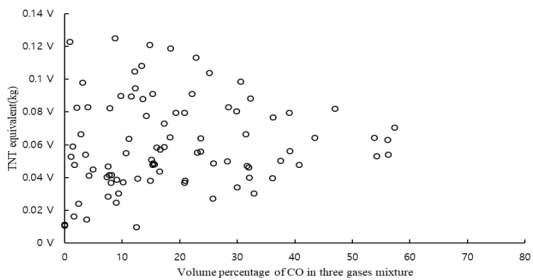


Fig. 6. Variation of TNT equivalent for the variation of CO content in the three gases mixture.

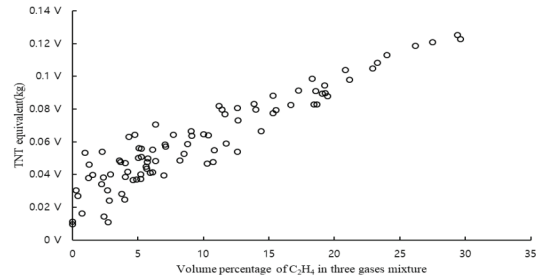


Fig. 7. Variation of TNT equivalent for the variation of C₂H₄ content in three gases mixture.

4. TNT 등가량에 의한 특성 곡선 도시 결과

TNT 등가량 산정 후 환산 거리를 이용한 경험식을 이용하여 TNT 특성곡선을 도시할 수 있다. TNT 특성곡선은 거리에 따른 폭발 압력의 변화를 추정할 수 있다. 환산 거리는 발파 지점으로부터 거리가 멀어질 때 전체 장약 무게가 초기 지반 충격에 미치는 영향과 기하학적 확산 현상이 지반 운동 파에 미치는 영향을 결합한 것이다.

$$Z = \frac{D}{W^{1/3}} \quad (\text{m/kg}^{1/3}) \quad (12)$$

이 식에서, D는 발파 지점으로부터의 거리(m), W는 장약 무게(kg)이다.

Fig. 8은 공기 중 이상적인 폭발과의 시간에 따른 압력 곡선을 나타내고 있다. 이는 충격 지점에서 불연속적인 압력 증가 뒤 주변 압력으로 되돌아가는 양상을 보이고 있다. 그 후 압력이 주변보다 작은 음의 압력 단계가 뒤따르고 있다(Formby, 1995).

양의 압력 단계를 양압 구간(positive phase), 음의 압력 단계를 음압 구간(negative phase)이라 한다. 양의 압력이 작용하는 구간의 면적을 양압 구간의 임펄스(Positive impulse), 음의 압력이 작용하는 구간의 면적을 음압 구간의 임펄스(negative impulse)라 한다.

일반적으로 구조물의 손상은 음압보다는 양압에 의해 발생하며, 폭발 시 인체와 주변 구조물 및 환경에 발생하는 손상을 평가하는 주요 인자 중 하나가 최대압력(peak overpressure) 이다(Kwon, 2017). 또한 임펄스가 발파에 의해 구조물에 작용하는 힘의 총량,

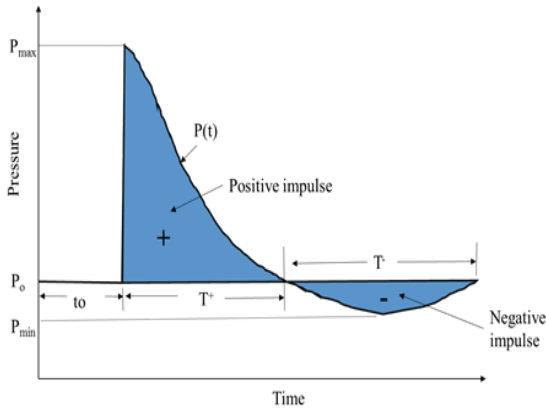


Fig. 8. Pressure-time history of air blast.

즉 충격량과 관계되기 때문에 임펄스도 중요한 인자로 고려된다(Kwon and Park, 2015). 본 연구에서는 거리에 따른 양압 구간의 최대압력과 임펄스(impulse)의 변화를 가스 폭발 형태별로 비교, 분석을 진행하였다.

폭발파의 특성 곡선을 표현하기 위한 여러 가지 경험식이 제시되었다(Kwon, 2017). 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 Kinney와 Blumash(1984)의 식을 이용하여 최대 압력(peak overpressure)을 계산하였다.

$$P_{max} = \exp(A + B \ln Z + C(\ln Z)^2 + D(\ln Z)^3 + E(\ln Z)^4) \quad (\text{kPa}) \quad (13)$$

여기서 Z는 환산거리(m/kg^{1/3}), A, B, C, D, E는 상

수로써, Table 5와 같다.

양압 구간에 작용하는 임펄스(Impulse)는 Kingery (1966)식을 사용하여 계산하였다.

$$I_s = W^{\frac{1}{3}} \exp(A + B \ln Z + C(\ln Z)^2 + D(\ln Z)^3 + E(\ln Z)^4) \quad (\text{kPa} \cdot \text{s}) \quad (14)$$

이 식에서 W는 TNT 등가량(kg), Z는 환산거리(m/kg^{1/3}), A, B, C, D, E는 상수로써 그 값은 Table 6과 같다.

본 연구에서는 각 사례 별로 산정된 TNT 등가량을 이용하여 부피가 30,000m³라 가정할 때, 양압 구간에 작용하는 최대 압력과 임펄스 계산을 수행하였다.

4.1 단독 가스 폭발 TNT 특성곡선

단독 가스가 폭발할 때, 각 가스의 폭발 범위를 고려하여 공기 중 부피 비율이 13%로 동일하게 지정한 뒤, TNT 특성곡선을 도시하였다. Fig. 9는 식(13)을 이용한 가스 별 폭발 압력 변화를 나타낸 것이고, Fig. 10은 식(14)를 이용한 가스 별 임펄스의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 10과 11에서, C₂H₄의 최대 폭발 압력과 임펄스가 가장 큰 값을 나타내고 있다. 임펄스가 충격량과 관련된 인자임을 고려하면, C₂H₄가 충격량과 폭발 피해에 미치는 영향이 가장 큼을 알 수 있다. CO의 폭발 위험성과 폭발력이 CH₄ 보다 크다고 알려진 바 있다. 그러나 CO의 임펄스와 충격량이 CH₄ 보다 작

Table 5. Coefficients for peak overpressure (Swisdak, 1994)

Z(m/kg ^{1/3})	A	B	C	D	E
0.2-2.9	7.1206	-2.1069	-0.3229	0.1117	0.0685
2.9-23.8	7.5938	-3.0523	0.40977	0.0261	-0.01267
23.8-198.5	6.0536	-1.4066	0	0	0

Table 6. Coefficients for positive impulse (Swisdak, 1994)

Z(m/kg ^{1/3})	A	B	C	D	E
0.2-0.96	5.522	1.117	0.6	-0.292	-0.087
0.96-2.38	5.465	-0.308	-1.464	-1.362	-0.432
2.38-33.7	5.2749	-0.4677	-0.2499	0.0588	-0.00554
33.7-158.7	5.9825	-1.062	0	0	0

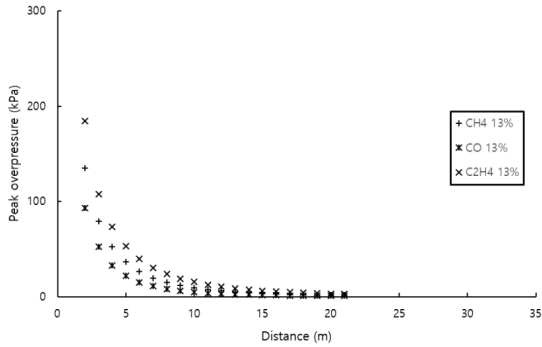


Fig. 9. Variation of peak overpressure for the variation of distance in gases percentage.

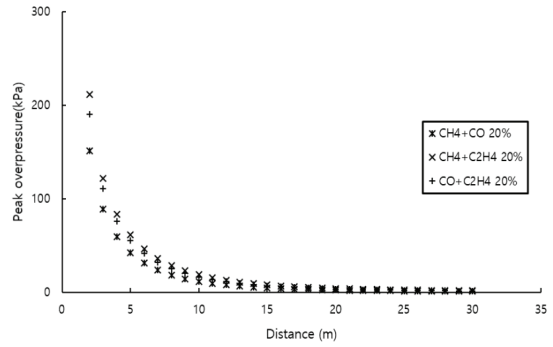


Fig. 11. Variation of peak overpressure for the variation of distance in 2 mixed gases percentage.

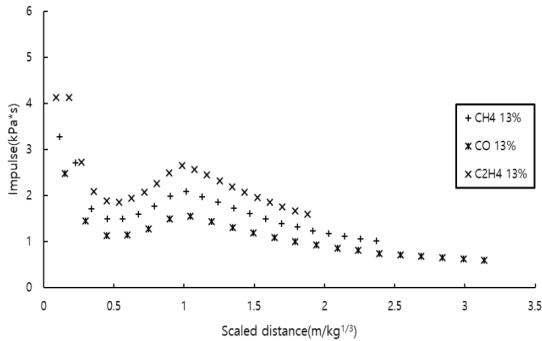


Fig. 10. Variation of impulse for the variation of scaled distance in gases percentage.

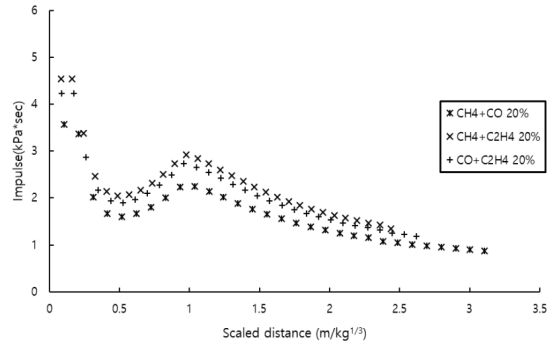


Fig. 12. Variation of impulse for the variation of scaled distance in 2 mixed gases percentage.

은 이유는 CO의 공기 중 폭발하한인 12.7%와 별로 차이가 나지 않는 13%에서 폭발 압력과 임펄스를 계산했기 때문이다.

4.2 2개 혼합 가스 폭발 TNT 특성곡선

2개의 가스가 혼합되어 폭발할 때, 각 가스의 폭발 범위와 식(9)를 고려하여 공기 중 부피 함량을 10%씩, 총 20%로 지정하여 특성 곡선을 도시하였다. Fig. 11은 각 가스 혼합 별 폭발 압력 변화를 나타낸 것이고, Fig. 12는 각 가스 혼합 별 임펄스 변화를 나타낸 것이다. 최대 폭발 압력과 임펄스의 값이 C₂H₄와 CH₄를 혼합한 경우에서 가장 큰 값을 보였다. 이러한 경향은 가스 폭발 사례별 TNT 등가량 계산과 비슷한 형상을 보이고 있다.

4.3 3개 혼합 가스 폭발 TNT 특성곡선

3개의 가스가 혼합되어 폭발할 때, C₂H₄의 부피함

량을 5%, 10%, 20%로 지정하고 최대 압력과 임펄스의 변화량을 도시하였다. Fig. 13에서 최대 압력과 임펄스의 값은 C₂H₄의 부피 함량이 증가할수록 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다.

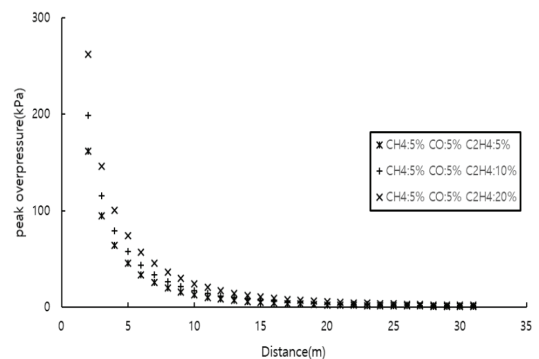


Fig. 13. Variation of peak overpressure for the variation of distance in 3 mixed gases percentage.

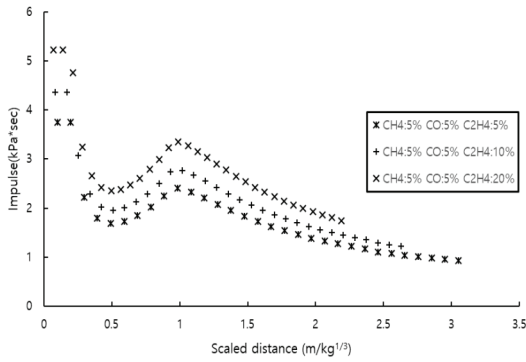


Fig. 14. Variation of impulse for the variation of scaled distance in 3 mixed gases percentage.

Table 7. Peak overpressure for each gas explosion cases at distance of 10m

Gas mixture type	Gas mixture case	Peak overpressure (kPa)
1 gas	CO 13%	5.1
	CH ₄ 13%	9.5
	C ₂ H ₄ 13%	15.6
2 gas	CH ₄ + CO 20%	11.5
	CO + C ₂ H ₄ 20%	16.3
	CH ₄ + C ₂ H ₄ 20%	18.9
3 gas	CH ₄ + CO + C ₂ H ₄ 15%	12.8
	CH ₄ + CO + C ₂ H ₄ 20%	17.4
	CH ₄ + CO + C ₂ H ₄ 30%	21.2

Table 8. Impulse for each gas explosion cases at scaled distance of 1m/kg^{1/3}

Gas mixture type	Gas mixture case	Impulse (kPa*sec)
1 gas	CO 13%	1.6
	CH ₄ 13%	2.1
	C ₂ H ₄ 13%	2.7
2 gas	CH ₄ + CO 20%	2.3
	CO + C ₂ H ₄ 20%	2.7
	CH ₄ + C ₂ H ₄ 20%	2.9
3 gas	CH ₄ + CO + C ₂ H ₄ 15%	2.4
	CH ₄ + CO + C ₂ H ₄ 20%	2.8
	CH ₄ + CO + C ₂ H ₄ 30%	3.4

Table 7은 폭발 지점으로부터 거리가 10m일 때 각 가스 폭발 사례별 최대 압력을 나타낸 것이고, Table 8은 환산거리가 1 m/kg^{1/3}일 때 가스 폭발 사례별 임펄스 값을 나타낸 것이다. 공기 중 가스 부피 함량은 사례 별로 상이하며, 혼합 가스의 종류가 증가할수록 폭발 범위가 증가하므로 최대 압력과 임펄스가 증가한 것으로 사료된다.

5. 결론

폭발 사고는 인적, 경제적인 손실을 가져오기 때문에 폭발 현상에 대한 이해는 폭발의 피해 예측과 폭발이 가능한 구조물의 방폭 설계를 위해 필요하다. 국내에서 실행되고 있는 석탄 옥내 저장소를 건설하게 될 경우 각종 가연성 가스로 인한 폭발 가능성에 유의해야 한다. 본 연구에서는 일정한 공간에서 석탄의 가연성 가스인 C₂H₄, CH₄, CO의 공기 중 부피 비율에 따른 TNT 등가량 산정을 통해 세 가스의 혼합 비율에 따른 폭발의 영향을 분석하였으며, TNT 특성곡선의 인자인 최대 압력과 임펄스를 계산하여 각 가스 혼합 별로 폭발 특성에 대하여 분석하였다.

본 연구를 통해 가연성 가스들의 위험성에 따라 TNT 등가량의 선형 추세가 상이함을 알 수 있었다. TNT 특성곡선 또한 혼합 가스의 개수가 증가할수록 최대 압력과 임펄스의 값이 증가하는 양상을 보였다. 또한 CH₄ 와 CO, C₂H₄가 혼합되어 폭발할 때, TNT 등가량은 C₂H₄의 농도에 따라 의존하며, TNT 등가량이 선형 증가하는 경향을 보였다.

본 연구는 TNT 특성곡선의 대표적인 인자 2개만 계산한 결과로 정확한 폭풍압(air blast)의 양상을 보기 위해 다른 인자들을 종합적으로 계산하여 정확한 TNT 특성곡선을 도출하는 것과 수치 해석을 병행한 연구 수행도 필요할 것으로 사료된다. 석탄 사일로와 같은 밀폐된 공간에서 탄진(Coal dust) 폭발에 대한 폭발 가능성이 있으므로 향후 4개 이상의 혼합 가스 폭발의 TNT 등가량 산정에 관한 연구도 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2019R1F1A1060884)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 권상기, 2017, 폭발파에 의한 폭발압력곡선 경험식에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 35, No. 1, pp. 1-17.
- 권상기, 박정찬, 2015, 가스폭발에 따른 폭발에너지를 평가하기 위한 TNT 등가량 환산방법에 대한 고찰, 화약·발파, Vol. 33, No. 3, pp. 1-13.
- 권상기, 김하영, 2016, 중국 텐진항 폭발사고 원인과 관련된 폭발 에너지 분석, 화약·발파, Vol. 34, No. 1, pp. 1-10.
- 김의수, 김종혁, 심종현, 김진표, 고재모, 박남규, 2015 AUTODYN은 이용한 LNG 폭발 사고 위험 평가에 관한 법공학적 연구, 한국안전학회지, Vol. 30, No. 4, pp. 56-63.
- 김현정, 이병훈, 조수경, 이성광, 2017, 화학 양론적 규칙으로 고에너지 물질의 폭발 생성물 조성 결정에 따른 폭발속도 비교분석, 분석과학, Vol. 38, No. 6, pp. 405-410.
- 박훈, 2019, 강체 기둥의 단순 해석 모델에서의 폭발 하중 비교, 화약·발파, Vol. 37, No.3, pp. 1-12.
- 윤용균, 2018, 폭발성 물질의 폭발에 따른 폭발압력 평가, 화약·발파, Vol. 36, No. 4, pp. 26-34.
- 최형빈, 김한수, 2015, 구조체에 작용하는 중소규모 혼합가스 폭발해석을 위한 최적 등가 TNT 해석 기법, 대한건축학회 논문집-구조계, Vol. 31, No. 11, pp. 3-10.
- 하동명, 2005, 메탄의 화재 및 폭발위험성 평가, 한국 가스학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 1-7
- 한우섭, 한인수, 최이락, 박상용, 2015, 화학물질의 폭발사고 피해예측 및 적용방안 연구, 안전보건공단 연구보고서, pp. 31-37.
- 환경부, 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024), 2019. 11. 01, pp. 62-63.
- KOSIS(한국가스안전공사, 연료가스 소비량 대비 가스 사고 현황), 2019.11.6.
- KOSIS(고용노동부, 산업재해현황), 2019. 12. 12.
- Addai, E. K., Gabel, D., & Krause, U. (2015). Explosion characteristics of three component hybrid mixtures. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 98, pp. 72-81.
- Amyotte, P. R., and Pegg, M. J., 1993, Explosion hazards in underground coal mines, *Toxicological & Environmental Chemistry*, Vol. 40(1-4), pp. 189-199.
- ASTM - The ASTM computer program for chemical thermodynamic and energy release evaluation CHETAH 7.3, August 2001.
- Cooper, P. W., 1994, Comments on TNT equivalence, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), No. SAND-94-1614C; CONF-940776-6.
- Costa Neto, M. L., & DOZ, G. N., 2017, Study of blast wave overpressures using the computational fluid dynamics, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Vol. 10, No. 3, pp. 669-677.
- Crowl, W. K., 1969, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300., US Army, Navy and Air Force, US Government Printing Office, Washington DC.
- Formby, S. A., 1995, Quantification of the air blast characteristics of commercial explosives, *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, Vol. 139, pp. 147-160.
- Jun DENG, Zhenmin LUO, Xiaochun WU, Yaoyuan HU, 2010, Explosive limits of mixed gases containing CH₄, CO and C₂H₄ in the goaf area, *Mining Science and Technology (China)*, Vol. 20, No. 4, pp. 557-562.
- Kingery, C. N., 1966, Air Blast Parameters Versus Scaled Distance for Hemispherical TNT Surface Burst, ARMY BALLISTIC RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD, No. BRL Report 1344.
- Kinney, G.F., Graham, K.J., 1985. *Explosive Shocks in Air*. Springer-Verlag, New York, 2nd. ed.
- Lea, C. J., and Ledin, H. S., 2002, A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling, Health and Safety Lab. report, HSL/2002/02.
- LÓPEZ, E., Rengel, R., Mair, G. W., Isorna, F., 2015, Analysis of high-pressure hydrogen and natural gas cylinders explosions through TNT equivalent method, *Iberian symposium on hydrogen, fuel cells and advanced batteries*, pp. 5-8.
- Pierorazio, A. J., Thomas, J. K., Baker, Q. A., Ketchum, D. E., 2005, An update to the Baker-Strehlow-Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table, *Process Safety Progress*, Vol. 24, No. 1, pp. 59-65.
- Sochet, I., 2010, Blast effects of external explosions, *Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, Japan, Vol. 1.
- Sochet, I., Gardebas, D., Calderara, S., Marchal, Y., & Longuet, B., 2011, Blast Wave Parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air, *Open Journal of Safety Science and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 31-42.
- Swisdak, M. M., 1994, Simplified Kingery airblast calculation, OMB No. 0704-0188.
- Van den Berg, A. C., 1985, The multi-energy method: A framework for vapour cloud explosion blast prediction, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-10.
- Zabetakis, M. G., Lambiris, S., Scott, G. S., 1958, Flame temperatures of limit mixtures, In *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, Vol. 7, No. 1, pp. 484-487.



김민주
인하대학교 에너지자원공학과 석사과정

Tel: 032-860-7554
E-mail: Minujjang11@gmail.com



권상기
인하대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 032-860-7554
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr