

가스폭발에 따른 폭발에너지를 평가하기 위한 TNT 등가량 환산방법에 대한 고찰

권상기^{1)*}, 박정찬²⁾

A Review of TNT Equivalent Method for Evaluating Explosion Energy due to Gas Explosion

Sangki Kwon, Jung-Chan Park

Abstract Accidents related to gas explosion are frequently happened in foreign countries and in Korea. For the evaluation and the analysis of gas explosions, TNT equivalent methods are used. In this study, the influence of the selection of chemical equation in TNT explosion and the selection of enthalpy of the products on the explosion energy, detonation pressure, velocity of detonation, and temperature was calculated. Depending on the chemical equations, the maximum detonation pressure can be 2 times higher than the minimum. As an example for applying TNT equivalent method, an explosion of methane gas in a confined volume was assumed. With the TNT equivalent, it was possible to predict the variation of peak overpressure and impulse with the distance from the explosion location.

Key words TNT equivalent, Detonation, Explosion energy, Gas explosion, Methane gas

초 록 국내외에서 가스폭발 사고가 빈번하게 발생하고 있으며 가스 폭발의 평가와 분석을 위해 TNT 등가량 산정법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 TNT 폭발 시 화학반응식의 선택과 반응 생성 물질들의 엔탈피의 선택에 따른 폭발에너지, 폭발압력, 폭굉속도 및 온도의 차이를 계산하였다. 화학반응식의 선택에 따라 계산되는 폭굉압은 최고값이 최저값에 비해 2배까지 나타났다. 밀폐된 공간에서의 메탄가스 폭발을 가정하고 TNT 등가량을 산정하였으며 이를 통해 폭발지점에서의 거리에 따른 최대압력과 임펄스 변화를 추정할 수 있었다.

핵심어 TNT 등가량, 폭굉, 폭발에너지, 가스폭발, 메탄가스

1. 서 론

폭발이란 다양한 원인에 의해 발생한 에너지의 급속한 분출을 의미한다. 폭발이 발생하면 대기 중으로 전파되는 폭발압력(blast overpressure)과 지반을 통한 충격하중의 형태로 에너지가 분출된다. 폭발에 의한

에너지의 분출에 의해 인근에 위치하는 인명과 구조물은 손상을 받게 되며 손상의 정도는 폭발물의 폭발력과 폭발지점의 상황, 폭발지점으로부터의 거리에 따라 영향을 받게 된다(Singla et al., 2015). 폭발 충격의 지속시간은 지진하중에 비하여 수천분의 1초로 짧은 것이 특징이다. 폭발규모에 따라 충격파의 크기는 300kbar에 이르며, 3000~5000℃의 온도로 공기와 지반을 통해 급속히 팽창된다(황일현, 2012). 폭발 현상은 암반 굴착이나 광물채굴을 위해 폭약을 기폭시키는 의도적인 경우와 석탄 광산에서 발생하는 메탄가스와 탄진(coal dust)의 폭발, 화학공장에서의 가

¹⁾ 인하대학교 에너지자원공학과 부교수

²⁾ 인하대학교 에너지자원공학과 석사과정 재학중

* 교신저자 : kwonsk@inha.ac.kr

접수일 : 2015년 7월 15일

심사 완료일 : 2015년 8월 17일

게재 승인일 : 2015년 8월 27일

스 폭발, 도시가스나 LPG 가스의 폭발과 같은 의도하지 않은 폭발로 나눌 수 있다. 석탄 광산의 메탄가스 폭발의 경우 석탄 내에 있던 메탄가스가 적정 농도로 농축된 상태에서 열원과 접촉하면서 발생하게 된다.

국내에서는 대부분의 석탄 광산이 폐광되어 폭발사고의 발생은 감소하였으나 가스연료의 사용 증가와 함께 가스 관련 폭발 및 화재사고는 증가하고 있는 상황이다. 국내 정유 및 석유화학 플랜트에서의 화재 및 누출에 의한 폭발사고 가능성은 잠재하고 있으며 터널 내의 가스 폭발 가능성이나 폭탄 테러의 발생을 대비한 폭발 안정성 검토가 필요한 것으로 보고되고 있다(문과 신, 2008; 이경구, 2005).

2. 국내외 폭발사고 사례 및 연구 동향 분석

2.1 국내외 폭발사고 사례

우리나라는 도심지 부근에 에너지 시설이 밀집되어 있어 고압가스, 도시가스, LP 가스와 관련된 크고 작은 가스 사고 발생 시 복합재난으로의 확산 가능성이 높은 것으로 여겨지고 있다. 과거 가스폭발과 관련한 대형사고로는 2015년 7월 울산 석유화학단지에서 발생한 폭발사고(6명 사망)를 비롯하여 대연각 호텔 LP 가스 폭발(사망 165명, 부상 67명), 신반포아파트 가스폭발(사망 5명, 부상 40명), 대한생명빌딩 LP가스 폭발(사망 5명, 부상 40명), 대구 대명동 LP가스 폭발 사고(사망 2명, 부상 11명), 대구지하철 공사장 가스 폭발(사망 101명, 부상 201명)을 들 수 있다. 2015년 울산 석유화학단지에서 발생한 폭발사고는 폐수조 내부에 농축된 메탄가스와 바이오 가스 등이 폐수조 상부에서의 용접작업 시 발생한 용접 불씨와 접촉하면서 발생한 것으로 추정하고 있다. 2009년부터 2013년간 발생한 가스사고는 총 651건으로 총 인명 피해는 사망 77명, 부상 929명으로 보고되었다(산업통상자원부, 2014).

해외에서 최근 발생한 가스폭발 사고로는 뉴욕빌딩 가스폭발사고('14.3월)와 32명이 사망하고 321명이 부상을 입은 대만 고압가스배관 폭발사고('14.7월)를 들 수 있다. 2004년 벨기에에서 발생한 가스 파이프라인 폭발은 TNT 40톤이 폭발한 위력으로 평가되며 사고로 인해 20명이 사망하였다. 이러한 다양한 원인

에 의한 폭발에 대비하여 폭발에 의한 영향을 평가하는 것은 폭발물의 관리 및 시설물의 설계를 위해 필요하다. 해외 가스 폭발 사례의 경우, TNT 등가량(TNT Equivalent) 개념으로 폭발 현상을 모사하고 그 폭발 충격을 분석하고 있으나 국내 폭발 사례에서는 TNT 등가량을 사용하는 경우가 드물었다. 향후 발생할 수 있는 폭발을 TNT 등가량으로 산정함으로써 폭발의 영향을 보다 명확히 파악할 수 있도록 하기 위해 본 연구가 수행되었다.

2.2 연구 동향 분석

지진이나 유성충돌의 위력이나 원자탄의 위력, 원자로 폭발, 화산폭발, 태풍의 위력은 일반적으로 TNT 등가량으로 표시하고 있다. 예를 들면, 히로시마에 떨어진 원자폭탄은 12,500~15,000톤의 TNT와 맞먹는 위력을 가지며, 규모 6.0의 지진은 TNT 1백만톤의 위력을, 수소폭탄의 경우 5천만톤의 위력을 가진다고 알려져 있다. 폭죽 사고, 가스폭발의 분석에도 TNT 등가량 개념이 적용되고 있다. 1947년 미국 텍사스 정유공장에서 발생한 폭발사고는 TNT 1,134톤에 해당하는 것으로 보고되고 있다.

TNT 등가량 개념은 어떤 폭발물의 폭발 충격이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위한 해석을 위해 가장 일반적으로 사용되고 있다. TNT 등가량 산정은 폭발 가능 물질의 운송, 포장, 취급 및 폭발물 저장시설의 위치 선정 및 규모에 관한 규제, 폭발물 취급 시설의 방폭 설계를 위해 필요하다. TNT 등가량을 알면 TNT 실험을 통해 이미 파악이 된 환산거리(scaled distance)에 따른 폭발압력의 변화 곡선을 이용하여 폭발에 따른 충격을 실제와 유사하게 모사할 수 있게 된다. Table 1은 다양한 폭약에 대한 TNT 등가량을 보여준다. Table 1에서 등가량은 폭발에 의해 발생하는 에너지 비율로 계산된 것이다. 이 때 기준 폭발물인 TNT의 폭발 에너지로는 4520kJ/kg을 사용하였다. 하지만 폭발과정에서의 화학반응식을 어떻게 도출하는가에 따라, 실험조건에 따라 계산 또는 측정되는 폭발에너지에 차이가 발생할 수 있기 때문에 문헌에 따라 TNT 폭발에너지는 차이를 보이고 있다.

폭약의 화학조성식을 도출한 후, 폭발 전후 화합물의 생성열(heat of formation)과 몰 열용량(molar heat

Table 1. TNT equivalent for different explosives(Singla et al., 2015)

Explosives	Specific Energy (kJ/kg)	TNT equivalent
Compound B (60% RDX+40% TNT)	5190	1.148
RDX	5360	1.185
HMX	5680	1.256
NG	6700	1.481
TNT	4520	1.0
Explosive gelatine	4520	1.0
60% NG dynamite	2710	0.6
Semtex	5660	1.250
C4	6057	1.340

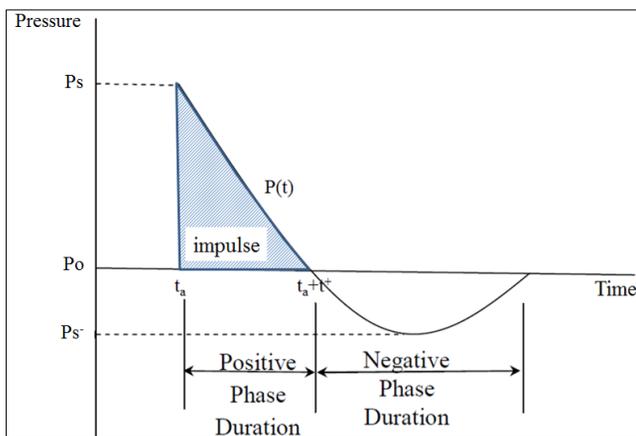
capacity), 폭약의 밀도, 발생되는 반응물질 양을 사용하여 폭굉압(detonation pressure), 폭굉속도(VOD, Velocity of Detonation), 온도증가, 발파공압(blasthole pressure) 등을 계산하게 되는데 폭약과 반응생성물의 생성열과 비열용량 또한 문헌에 따라 상이한 값을 보이고 있다(Sochet, 2010). 따라서 화학반응식 도출 방식 및 반응생성물의 물성 선택에 따라 계산 결과에는 차이가 발생할 수 있다. Sochet(2010)는 TNT의 화학반응식 및 사용한 물성에 따라 폭발에너지가 2.673~6.702MJ/kg까지 차이가 날 수 있다는 것을 보였다. 이는 TNT 폭발시 화학조성식 및 물성 선택에 따라 온도, 폭굉압, 폭굉속도 등에서도 차이가 나타날 수

있음을 의미한다.

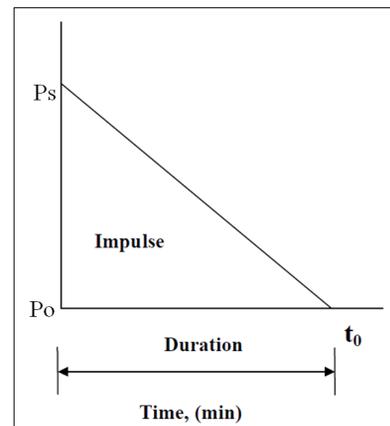
본 연구에서는 TNT의 화학반응식 도출 방법에 따른 폭발에너지와 폭굉압, 가스 발생량, 폭굉속도 등의 변화를 분석하고 가스폭발이나 기타 폭발물의 영향을 평가하는데 사용되는 TNT 등가량 산정법에 대해 고찰하였다. 또한 TNT 등가량 산정법을 밀폐된 공간에서 메탄가스가 폭발하는 경우를 가정하여 적용하고 폭발 시 거리에 따른 압력과 임펄스(impulse)의 변화를 예측하였다.

3. 폭발 이론

폭발 시 폭발 에너지와 상당량의 가스발생 및 팽창이 발생한다. 폭굉(detonation)에 의한 충격파(blast wave)가 초음속으로 주변 대기 중으로 이동할 압력의 시간 이력 곡선은 Fig. 1(a)와 같다(Sochet, 2010). 폭발과의 도달 전 압력은 대기압 P_0 로 있다가 최대압력(P_s , peak overpressure)로 급속히 증가한다. 이후 음압(negative pressure)로 감소하였다가 최저값에 도달한 후 P_0 로 복구되는 경향을 보인다. 폭연(deflagation)의 경우, 압력은 시간에 따라 서서히 증가하여 최대값은 폭굉에 의한 압력보다 상당히 낮게 나타난다. 최대 압력, 임펄스 그리고 과압기간(T, duration of positive pressure)이 폭발 영향 평가에 중요한 인자가 된다. 임펄스는 Fig. 1(a)와 같이 양의 압력이 유지되는 동안 압력-시간 이력곡선의 면적을 의미하며 다음 식과 같다.



(a) Pressure distributions in a typical blast wave (modified from Sochet, 2010)



(b) Typical profile of blast load

Fig. 1. Pressure distributions and Typical profile of blast load.

$$i = \int_{t_a}^{t_a+t^+} P(t)dt \quad (1)$$

단순화를 위해 Fig. 1(b)와 같이 삼각형 형태로 가정하여 사용하기도 한다. 이 경우, 임펄스는 다음과 같다.

$$i = 0.5 \times P_s \times T \text{ (Pa-sec)} \quad (2)$$

4. TNT (Trinitrotoluene)

4.1 TNT 소개 및 특징

TNT는 독일 화학자인 Julius Wilbrand에 의해 개발되었으며 개발초기에는 황색 염료로 사용되다가 1900년대 초부터 폭약으로 사용되기 시작하였다. TNT는 다이내마이트에 비해 충격이나 마찰에 둔감하기 때문에 사고의 위험이 적으며 다른 고성능 폭약 재료와 일정 비율로 혼합하여 많이 사용되고 있다. TNT는 군사용 및 산업용으로 널리 사용되며 특히 투수계수가 낮은 세일 저류층에서 석유나 가스 회수율을 높이기 위한 저류층 인공균열 생성 작업에 사용되고 있다. 즉, 자연균열이나 수압파쇄(hydraulic fracturing)에 의해 생성된 균열에 나이트로글리세린을 주입한 후에 펠렛 모양으로 성형된 TNT를 기폭하여 저류층 암반의 투수계수를 대폭 높일 수 있다.

TNT는 폭발물의 강도에 대한 기준 폭약으로 사용된다. 폭약의 폭발력을 나타내기 위해 사용되는 RE 계수(Relative Effectiveness factor)는 동일한 질량의 폭발 시 TNT 대비 폭발력의 강도비를 의미한다. 초유폭약(ANFO, 94%AN+6%FO)의 경우 0.74이고 니트로글리세린은 1.54이다. TNT에는 필요 이상의 탄소가 포함되어 있기 때문에 산소가 많은 성분과 혼합하여 사용하는 경우 TNT만 사용하는 것보다 높은 폭발 에너지를 얻을 수 있다. 초안(AN)과 TNT를 일정 비율로 혼합한 Amatol은 군사용 폭약으로 많이 사용되고 있는데 TNT 50%+AN50%로 혼합된 Amatol의 경우, RE 계수는 0.91, TNT 80%+AN20%로 혼합된 Amatol은 1.1의 RE 계수로 표현된다. 즉, TNT와 RE 계수가 낮은 초안폭약을 적정비율로 혼합하면 TNT 자체보다 더 높은 폭발력을 얻을 수 있다. Table 2는 인터넷에서 공유되고 있는 TNT의 주요 물성을 정리하여 보여주고 있다.

Table 2. Material properties of TNT

Properties	Value	Comments
Chemical equation	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆	
Molecular weight	227.131g/mole	
Density	1.694g/cm ³	
Oxygen balance	-74%	
Strength	300cm ³ /10g	Trauzl lead block test
RE factor	1.0	
Volume of explosion gas	835l/kg	
Specific heat at 20°C	1.38kJ/kg	
VOD	6900m/sec	
Impact sensitivity	15Nm	insensitive
Friction sensitivity	up to 353N	insensitive
Critical diameter	5mm	steel sleeve test
Melting point	80.35°C	
Boiling point	295°C	

4.2 초과압력 및 임펄스 경험식

폭발 시 인체와 주변 구조물 및 환경에 발생하는 손상을 평가하는 주요 인자중 하나가 최대압력(Peak overpressure, P_s)이다. Fig. 2와 Fig. 3은 TNT 기폭시 환산거리(Z') 변화에 따른 초과압력과 임펄스의 변화를 보여준다. 이들 그림은 TNT를 지표면에서 반구형 형태로 기폭시켰을 때 얻어진 특성 곡선으로 환산거리(Z')는 기폭되는 TNT의 양(W_{TNT})과 측정지점과 기폭지점 사이의 거리(R)를 사용하여 계산한다.

$$Z' = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (3)$$

이들 그림을 이용하여 가스폭발이나 기타 폭발물의 경우에도 TNT 등가량을 계산한 후 환산거리에 따른 최대압력과 임펄스를 예측할 수 있게 된다. Fig. 3의 환산임펄스(Scaled impulse, i_{TNT})에서 임펄스 i 를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$i = i_{TNT} W_{TNT}^{1/3} \quad (4)$$

TNT의 특성곡선을 표현하기 위해 여러 가지 추정 방정식이 제안되었다. Brode (1955)는 환산거리를 이

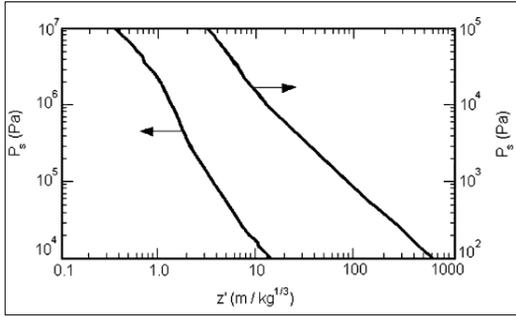


Fig. 2. Characteristics curve of overpressure vs. scaled distance(Z') for TNT (ICE, 1994).

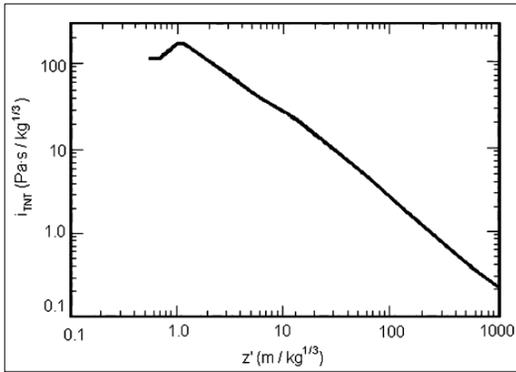


Fig. 3. Characteristics curve of scaled impulse vs. scaled distance(Z') for TNT(ICE, 1994).

용하여 다음 식을 제시하였다. $Z' = R/W^{1/3}$ 에서 W 단위는 kg 이고 거리의 단위는 m 이므로 Z' 의 단위는 $\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 이다.

$$P_s (\text{MPa}) = \frac{0.67}{Z'^3} + 0.1, \quad \text{PS} > 1 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$P_s (\text{MPa}) = \frac{00.975}{Z'} + \frac{0.1455}{Z'^2} + \frac{0.585}{Z'^3} - 0.0019, \quad \text{PS} < 1 \text{ MPa} \quad (6)$$

Newmark와 Hansen(1961)은 지표면에서 기폭된 고성능 폭약의 최대압력 계산을 위한 다음 식을 제시하였다.

$$P_s (\text{MPa}) = 678.4 \frac{W}{1000R^3} + 9.3 \left(\frac{W}{1000R^3} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Mills (1987)은 환산거리를 이용한 다음 식을 제시하였다.

$$P_s (\text{MPa}) = \frac{1.772}{Z'^3} - \frac{0.114}{Z'^2} + \frac{0.108}{Z'} \quad (8)$$

Alonso 등(2006)은 환산거리에 따라 다음과 같은 방정식을 제시하였다.

$$\begin{aligned} \text{i) } 1 \leq Z' < 10 \\ - P_s (\text{MPa}) &= 1.13Z'^{-2.01} \end{aligned} \quad (9)$$

$$- i_{TNT} = 203 \times Z'^{-0.91} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{ii) } 10 \leq Z' < 200 \\ - P_s (\text{MPa}) &= 0.183Z'^{-1.16} \end{aligned} \quad (11)$$

$$- i_{TNT} = 335 \times Z'^{-1.06} \quad (12)$$

Brode (1955)는 최대 음압(negative pressure, P_s^-)을 다음 식으로 추정하였다.

$$P_s^- (\text{MPa}) = -\frac{0.035}{Z'} \quad (13)$$

초과압력의 시간 이력식은 Friendlander-type 식으로 표현된다(Baker, 1973).

$$P(t) = P_o + P_s \left(1 - \frac{t}{T_s} \right) \exp(-bt/T_s) \quad (14)$$

여기서 P_s 는 최대초과압력, T_s 는 양의 압력이 나타나는 기간을 의미하며 b 는 감쇄상수이다.

4.3 TNT 화학 반응

TNT의 화학식은 $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$ 으로 분자량은 227이며 산소과부족량(Oxygen Balance)은 -74%로 산소가 부족한 상태이며 따라서 일산화탄소와 같은 유해가스가 발생한다. 폭발에 의한 폭발에너지를 계산하기 위해 폭약의 화학반응식을 도출하는 방식으로 여러 가지가 제안되어 있다(Sochet, 2010).

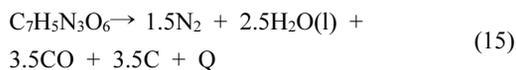
1) Kistiakowsky-Wilson rules(KW rules)

- (a) 산소과부족량이 -40%보다 큰 경우
- 탄소원자는 일산화탄소(CO)가 됨.
 - 산소가 남는 경우, 수소원자는 물(H₂O)가 됨.
 - 그래도 산소가 남는 경우, 일산화탄소는 이산화탄소로 바뀜.
 - 질소원자는 N₂로 바뀜.
- (b) 산소과부족량이 -40%보다 낮은 경우
- 수소원자는 물로 바뀜.
 - 산소가 남는 경우, 탄소는 일산화탄소가 됨.
 - 그래도 산소가 남는 경우, 일산화탄소는 이산화탄소로 전환.
 - 질소원자는 N₂로 바뀜.

TNT의 경우, 산소과부족량이 -74%로 다음과 같은 과정을 따름.

- $5H \rightarrow 2.5H_2O$
- 남은 3.5개의 산소는 $3.5CO$ 가 됨.
- 3개의 질소원자는 $1.5N_2$ 가 됨.

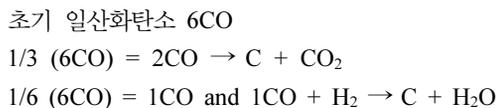
따라서,



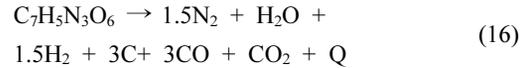
(2) Springall-Robert rule (SR rule) : KW rule을 기초로 하며 다음 조건을 고려한다.

- 모든 탄소는 초기에 일산화탄소로 전환
- 초기 일산화탄소의 1/3은 탄소와 CO₂로 전환
- 초기 일산화탄소의 1/6은 수소와 반응하여 탄소와 물로 전환

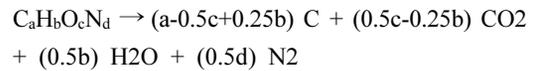
SR rule을 적용하면 TNT 화학식은



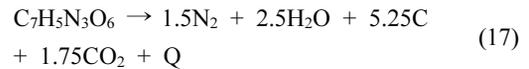
따라서,



(3) Scilly rule(Scilly, 1995)

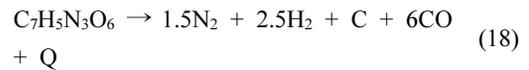


Scilly rule을 따를 경우,



(4) Kinney rule(Kinney and Graham, 1985)

- 모든 산소는 일산화탄소로 전환하는 것으로 본다.



화학조성식이 도출되면 폭발 전후 화학 성분들의 생성열(enthalpy) 차이를 통해 폭약의 생성열(Q)를 계산할 수 있다. 또한 다음 식들과 같이 폭발 후 생성된 성분들의 몰수와 몰 열용량(molar heat capacity)을 이용하여 온도 상승 정도를 계산할 수 있으며 반응열을 이용하여 폭굉속도, 폭굉속도와 밀도를 이용하여 폭굉압(P_d) 및 발파공압(blasthole pressure, P_b), 발파공 벽면에 작용하는 압력(blasthole rock pressure, P_r)을 계산할 수 있다.

$$Q = \sum n_i C_{vi} (T_2 - T_1) \quad (19)$$

여기서 Q는 1 mole의 TNT에서 발생하는 열(cal), C_{vi}는 몰 열용량 (cal/mole·k)

$$VOD = \sqrt{Q}(1+1.3\rho) \quad (\text{m/sec}) \quad (20)$$

여기서 Q는 생성열(J/kg), ρ는 폭약의 밀도(g/cm³)이다.

$$P_d = \rho \times \frac{VOD^2}{4} \quad (10^3 \text{ Pa}) \quad (21)$$

$$P_b = \rho \times \frac{VOD^2}{8} \quad (10^3 \text{ Pa}) \quad (22)$$

$$P_r = P_b \left(\frac{V_c}{V_b} \right) \quad (10^3 \text{ Pa}) \quad (23)$$

여기서, VOD 의 단위는 m/sec 이다.

4.4 TNT 폭발 영향 계산

TNT 폭발에 따른 영향을 계산하기 위해서는 TNT와 폭발 후 발생하는 물질의 엔탈피(enthalpy) 또는 생성열(heat of formation)을 알아야 한다. TNT와 반응 후 물질들의 entropy는 Table 3와 같이 문헌에 따라 약간의 차이를 보이고 있다. Table 4는 폭발 후 온도 상승을 계산하기 위해 필요한 폭발 후 생성물질들의 몰 열용량을 보여준다. Sochet (2010)은 기술한 여러 가지 TNT 화학조성식과 문헌에 따른 엔탈피 차이

를 고려하여 TNT 폭발에너지가 2.6MJ/kg~6.7MJ/kg 까지 예측될 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 TNT 화학조성식에 따른 폭발압력, 폭발속도, 가스 생성량 및 온도증가를 계산하였으며 결과는 Table 5와 같다. 본 계산에서 사용된 ASTM에서 제시한 폭발 반응물질의 엔탈피 값과 Kinney가 제시한 TNT의 엔탈피 -54.4kJ/mole을 사용하였다. TNT 밀도는 1.654g/cm³이다. 동일한 엔탈피 값을 사용하였음에도 화학조성식에 따라 온도상승은 2,879~4,291℃까지 차이가 나며 폭발속도는 5~7.6km/sec 까지 예측되었다. 폭발압의 경우 평균 17.65GPa이지만 최대 24.4GPa, 최소 10.9GPa로 화학반응식에 따라 2배 이상의 폭발압 차이를 보여준다. 엔탈피 값을 다르게 사용하는 경우, 그 차이는 더 크게 나타날 것이다. 이러한 결과는 다른 폭약의 경우에도 화학조성식 선택에 따라 결과에는 큰 차이가 나타날 것임을 보여주며 따라서 폭약의 폭발력 및 폭발 영향을 평가하기 위해서는 적절한 화학조성식의 도출이 중요함을 알 수 있다.

Table 3. Enthalpies of the materials involved in TNT explosion(Sochet, 2010)

Material	Enthalpy (kJ/mole)				
	ASTM	NASA	Cooper (1996)	Kinney (1985)	Meyer (1987)
TNT		-53.992		-54.4	-59.47
CO	-110.541	-110.541	-110.523	-118.8	-110.6
CO ₂	-393.296	-393.505	-393.512	-	-303.8
H ₂ O (gas)	-241.8352	-241.835	-241.826	-	-303.8
H ₂ O (liquid)	-	-	-285.840	-	-286.8
C	0	0	0	0	0
N ₂	0	0	0	0	0

Table 4. Moral heat capacity of the materials produced from TNT explosion

Material	Moral heat capacity (cal/mole·K)	Material	Moral heat capacity (cal/mole·K)
H ₂ O	18	O ₂	5.0
CO	4.86	N ₂ O	6.78
N ₂	4.9	H ₂	4.86
CO ₂	6.7	C	2.15
NO	4.9		

Table 5. Calculated results of TNT explosion for different chemical equations

Method	Chemical equation	Q (kJ/kg)	mole of gas	Temperature (°C)	VOD (m/s)	Detonation pressure (GPa)	Borehole pressure (GPa)
KW rule	$1.5\text{N}_2 + 2.5\text{H}_2\text{O(l)} + 3.5\text{CO} + 3.5\text{C}$	4600	11	3269	6765	18.9	9.45
SR rule	$1.5\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1.5\text{H}_2 + 3\text{C} + 3\text{CO} + \text{CO}_2$	4213	11	3801	6466	17.3	8.65
Scilly rule	$1.5\text{N}_2 + 2.5\text{H}_2\text{O} + 5.25\text{C} + 1.75\text{CO}_2$	5940	11	4291	7677	24.4	12.2
Kinney rule	$1.5\text{N}_2 + 2.5\text{H}_2 + \text{C} + 6\text{CO}$	2682	11	2879	5159	10.9	5.45
Average		4359	11	3560	6517	17.875	8.9375

5. TNT 등가량 계산

폭발물의 폭발 시 일정 거리에서의 폭발압력과 임펄스를 추정하기 위해 TNT 등가량을 사용하고 있다. TNT를 기준으로 등가량을 사용하는 이유는 TNT를 이용한 다량의 실험 자료가 축적되어 있으며 TNT가 이상적인 충격파를 생성하기 때문으로 보인다.

5.1 TNT 등가량 산정 방법

TNT 등가량을 산정하는 방법에는 여러 가지가 있다(Sochet, 2010).

1) Pressure 기반 산정법

초과압력을 기준으로 TNT 등가량을 산정하는 방법으로 동일한 거리에서 같은 크기의 초과압력을 발생시키는 TNT 양을 측정하여 TNT 등가량으로 본다. 프로판 가스의 경우 E_p 는 0.4-0.6 사이로 나타난다.

$$E_p = \frac{M_{TNT}}{M_{EXP}} = \left(\frac{Z'}{Z'_{TNT}}\right)^3_{P_{CSR}} \quad (24)$$

여기서 M_{TNT} 는 TNT의 질량, M_{EXP} 는 폭발물의 질량, Z' 은 폭발물의 환산거리, Z'_{TNT} 는 TNT 환산거리를 의미한다.

2) 임펄스 기반 산정법

측정방법은 pressure 기반 산정법과 동일하며 임펄스를 기준으로 TNT 등가량을 결정한다.

$$E_I = \frac{M_{TNT}}{M_{EXP}} = \left(\frac{Z'}{Z'_{TNT}}\right)^3_{I_{CSR}} \quad (25)$$

3) Chapman-Jouguet 상태 기반 산정법

$$E_{CJ} = \frac{P_{CJ}/2\rho_{CJ}}{P_{CJ\ TNT}/2\rho_{CJ\ TNT}} \quad (26)$$

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 V_{CJ}^2}{4} \quad (27)$$

$$\rho_{CJ} = \frac{4\rho_0}{3} \quad (28)$$

여기서, V_{CJ} 는 폭굉속도, P_{CJ} 는 폭굉압이다. 따라서,

$$E_{CJ} = \frac{VOD_E^2}{VOD_{TNT}^2} \quad (29)$$

4) 폭발에너지 기반 산정법

폭발 시 발생하는 에너지를 기반으로 다음과 같이 TNT 등가량(M_{TNT})을 산정한다.

$$M_{TNT} = \eta M_f \frac{Q}{Q_{TNT}} \quad (30)$$

여기서, M_f 는 폭발물의 질량, η 는 efficiency factor, Q 와 Q_{TNT} 는 폭발물과 TNT의 폭발 에너지(kJ/kg)를 의미한다. TNT 등가량 산정에 필요한 인자 결정은

다음과 같은 실험을 통해 얻을 수 있다(Cooper, 1994).

- a) Sand crush test
- b) Trauzl test
- c) Ballistic mortar test
- d) Plate dent test
- e) Air blast test

5.2 TNT 등가량 계산 시 유의사항

TNT 등가량 산정 시 특히 가스폭발에 TNT 등가량 개념을 적용하는 경우 다음에 유의하여야 한다.

a) TNT 등가량 산정은 1 order 정도의 불확실성을 가지는 것으로 보고되고 있다. 예를 들어, 2001년 프랑스 툴루제에서 발생한 비료공장 폭발사고에 대한 TNT 등가량은 15~200톤 범위로 산정된 바 있다.

b) 가스폭발의 경우, 등가량의 TNT폭발 시 발생하는 에너지량은 같으나 반응 화학식의 차이로 산소과 부족량은 동일하지 않을 것이다. 발생하는 가스의 양과 종류가 다르기 때문에 폭발에 의한 온도 증가량도 차이가 나며 폭발압에도 차이가 난다.

c) 폭발원이 가스인 및 분진운일 경우는 폭원의 에너지밀도가 TNT와는 커다란 차이난다. TNT 등가량으로 표현하는 경우 폭발원은 점으로 표현되며 이에 따라 폭발지점 부근에서는 실제 가스폭발에 의한 것보다 높은 압력을 예측하게 된다. 따라서 폭원 근방에서의 최대압력의 거리감쇠 특성에 대해서는 TNT 등가량 환산식의 적용 시 유의할 필요가 있다.

d) 가스폭발과 TNT폭발에서 발생하는 충격파는 초과압력의 경우 비슷한 양상을 보일 수 있지만 임펄스와 초과압력 지속 시간에서 차이가 발생하므로 이에 유의해야 한다.

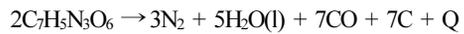
e) 가스폭발의 경우, TNT 등가량 산정법은 초과압력을 보수적으로 산정하는 경향이 있어 TNO 방법, MEM 방법, BST (Baker-Strehlow-Tang)방법 등이 대안으로 제시되고 있다(이와 강, 2014).

6. TNT 등가량 적용 예

메탄가스 폭발은 석탄광산, 석탄저장고, 폐수처리장 저장고 등에서 메탄가스가 농축된 상태에서 폭발원이

있을 경우 발생한다. TNT 등가량 산정법의 적용을 위해 30,000m³의 밀폐된 공간에서 메탄가스(CH₄)가 폭발한 경우를 가정하였다. TNT의 화학반응식은 KW rule을 따르는 것으로 가정하였으며 TNT의 엔탈피는 Kinney가 제시한 -54.4kJ/mole을, 폭발 생성물의 엔탈피는 ASTM에서 제시한 값을 사용하였다.

화학반응식:



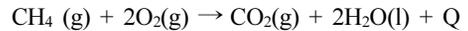
$$Q = 2(-54.4) \cdot 3 \times 0 - 5 \times (-285.84) - 7 \times (-110.5) \quad (31)$$

$$-7 \times 0 = 2092 \text{ KJ}$$

$$\Rightarrow 2092 \text{ kJ} / 454 \text{ g} = 2.092 \text{ MJ} / 454 \text{ g}$$

$$= 4.6 \text{ MJ/kg}$$

메탄가스의 밀도는 20°C, 1기압 하에서 0.668kg/m³이며 공기의 밀도는 약 1.225kg/m³이다. 메탄가스의 분자량은 16g/mole이며 엔탈피는 -75kJ/mole이다. 화학반응에 의해 생성되는 물은 액체인 것으로 가정한다. 즉,



$$Q = 212 \text{ kcal/mole} = 13250 \text{ kcal/kg} \quad (32)$$

$$= 55.6 \text{ MJ/kg}$$

따라서 반응열 기준으로 1kg의 메탄가스는 TNT 12kg에 해당하는 폭발에너지를 낸다는 것을 알 수 있다. 가스 폭발의 경우, 반응열과 efficiency factor를 고려하여 다음 식을 사용하여 TNT 등가량을 계산할 수 있다. 탄화수소 efficiency factor는 0.03~0.042가 주로 사용된다(Eckhoff, 2005).

$$M_{TNT} = (0.03 \sim 0.042) \times M_{CH_4} \frac{Q_{CH_4}}{Q_{TNT}} \quad (33)$$

메탄가스는 공기 중에 부피 비율로 5~15% 범위에 있을 때 폭발할 수 있다. Table 6은 가스폭발이 발생 가능한 가스농도의 범위를 보여준다.

본 연구에서 가정된 폭발 용기의 전체 부피가 30,000m³이므로 폭발에 관여하는 메탄가스의 질량은

Table 6. Minimum and maximum concentration of flammable gas for explosion in air (Zabetakis, 1965)

Gas	In air		in Oxygen	
	Lower bound volume %	Upper bound volume %	Lower bound volume %	Upper bound volume %
Ammonia	15	28	15	79
Butane	1.9	8.5	1.8	49
Carbon Monoxide	12.5	74	15.5	94
Gasoline	1.4	7.6		
Hydrogen	4	75	4	94
Methane	5	15	5.1	61
Toluene				
Natural gas	3.8-6.5	13-17		
Coal gas	5.3	32	7	70
Oil gas	4.7	33		

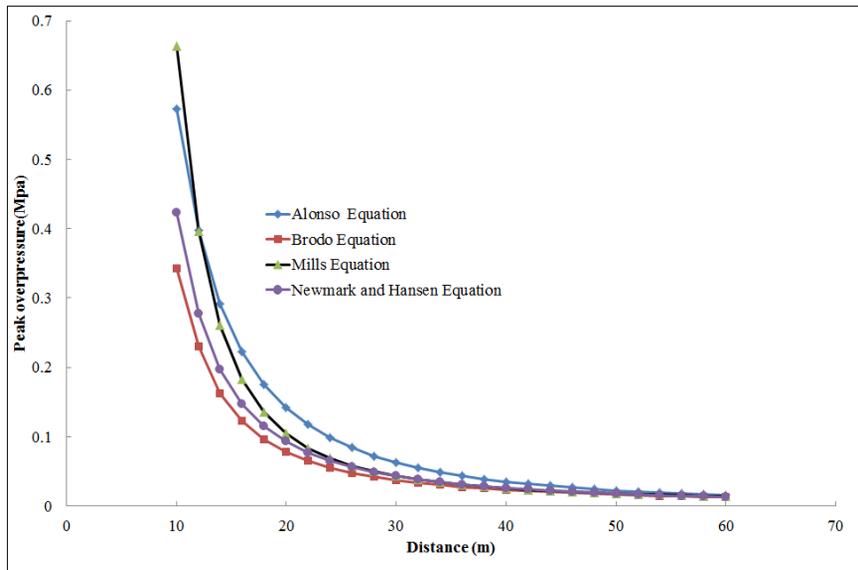


Fig. 4. Estimated peak overpressure using different equations for 5% CH₄ concentration.

$$M_{CH_4} = 30,000m^3 \times (0.05 \sim 0.15) \times 0.668kg/m^3 = 508kg \sim 1526kg$$

1002~3006kg

따라서, efficiency factor가 0.03인 경우와 0.042인 경우 TNT 등가량은

$$M_{TNT} = 0.03 \times (1002 \sim 3006kg) \times (55.6/4.6) = 363kg \sim 1090kg$$

$$M_{TNT} = 0.042 \times (1002 \sim 3006kg) \times (55.6/4.6) =$$

TNT 등가량 산정 후 TNT 특성 곡선이나 경험식을 이용하여 거리에 따른 폭발압력과 임펄스의 변화를 추정할 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 efficiency factor = 0.03 을 사용한 경우, 각 경험식에서 예측하는 메탄 가스의 농도가 5%(363kg TNT)와 15%(1090kg TNT)인 경우 폭발압력 변화를 보여준다. 폭발 중심에서 10m를 벗어나면 5% 농도의 경우, 경험식에 따라 약

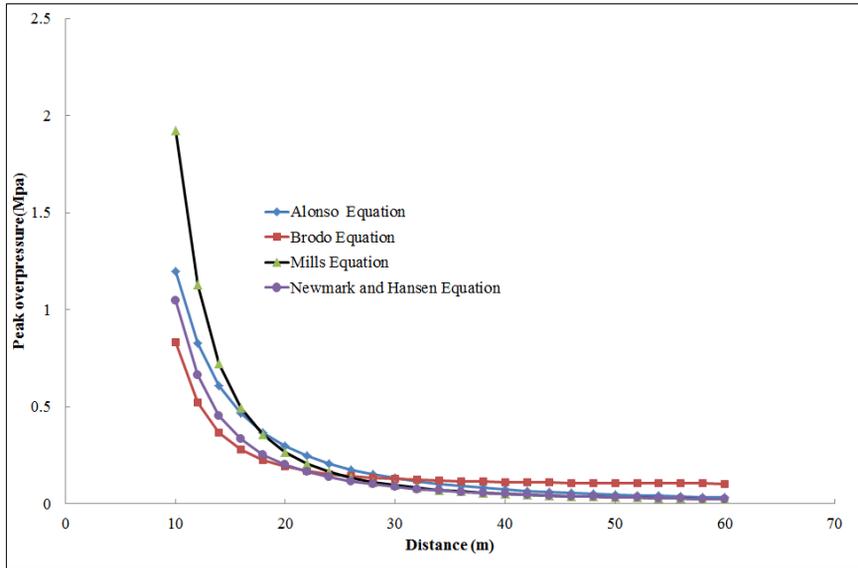


Fig. 5. Estimated peak overpressure using different equations for 15% CH₄ concentration.

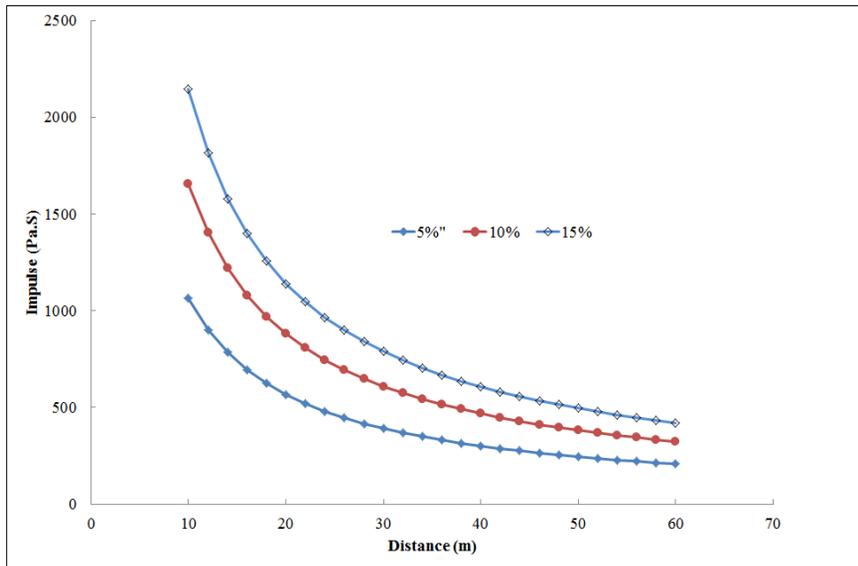


Fig. 6. Estimated impulse using Alonso equation for 5%, 10% and 15% of CH₄ concentration.

간의 차이가 발생하지만 1MPa 이하의 압력이 발생하며 15% 농도에서는 2 MPa 이하로 나타남을 알 수 있다. 폭발원에서 가까운 지점에서 방정식에 따른 차이가 크게 나타나며 10m 떨어진 지점에서 1 order 정도의 차이가 발생함을 알 수 있다. 전반적으로 Mills식이 폭발 부근에서 가장 높은 압력을 나타내며 Brode식이 가장 낮은 값을 예측하고 있다. Fig. 6은 Alonso

식을 이용한 메탄가스 농도 5%, 10%, 15% 일 때의 거리에 따른 임펄스 변화를 보여주고 있다.

7. 결론

급속한 에너지의 분출을 가져오는 폭발은 인명과 재산의 피해를 가져오기 때문에 폭발현상에 대한 이

해는 폭발성 구조물의 방폭 설계와 폭발성 물질의 안전한 관리를 위해 반드시 필요하다. 국내에서는 도심지 부근 에너지 시설의 밀집으로 가스 폭발 시 복잡재난의 가능성이 높다. 본 연구에서는 TNT 등가량 산정을 통해 가스 폭발에 따른 영향을 평가하는 기법을 소개하고 밀폐된 공간에서의 메탄가스 폭발을 가정하여 TNT 등가량을 산정하였다. 가스폭발에 대한 TNT 등가량 산정 시 유의사항을 검토하였고 TNT의 폭발에너지에 대한 이해를 위해 화학반응식 도출에 따른 결과 차이를 비교하였다. 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) TNT 등가량을 산정하여 가스 폭발을 모사하면 폭발양상, 임펄스와 초과압력 지속시간 등에서 차이가 있을 수 있다. 또한 산정방법에 따라 1 order 정도의 차이를 보일 수 있다. 그럼에도 TNT 등가량은 가스 폭발에 의한 영향을 추정할 수 있는 가장 단순하며 보수적인 방법으로 활용이 가능하다.
- 2) 폭약의 화학반응식을 도출하는 여러 가지 방법이 있으며 TNT의 경우, 화학반응식의 선택에 따라 폭발에너지는 2.673~5.94MJ/kg, 온도는 2879~4291℃, 폭굉속도는 5159~7677m/sec, 폭굉압은 10.9~24.4GPa까지 차이를 보였다. 문헌에 나타나는 다양한 엔탈피 값을 사용하는 경우, 그 차이는 더 크게 나타날 것으로 예상된다.
- 3) 메탄가스 폭발에 대한 TNT 등가량 산정 후, 여러 가지 방정식을 사용하여 최대압력과 임펄스를 예측하였으며 전반적으로 Mills식이 높은 압력을 나타내며 Brode식이 가장 낮은 값을 예측하고 있다. 방정식간의 차이는 폭원 부근에서 비교적 크게 나타나며 폭원에서 멀어지면 유사한 값을 예측한다.
- 4) 향후 가스폭발에 대한 TNO방법, MEM방법, BST (Baker-Strehlow-Tang)방법 등에 대한 평가가 필요하며 탄진(coal dust) 폭발에 대한 TNT 등가량 산정에 관한 연구도 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. 문훈기, 신중호, 2008, 발파진동이 터널구조물에 미치는 영향, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 207-219.

2. 산업통상자원부, 2014, 제 1차 가스안전 관리 기본계획 (2015-2019).
3. 이경구, 2005, 폭발 등 극한하중 하에서의 건물붕괴 방지를 위한 최근 연구동향, 한국강구조학회지, Vol. 17, No. 4, pp. 39-45.
4. 이수현, 강현구, 2014, 건축물에 작용하는 가스 폭발 초과압력 산정 방법의 비교 및 고찰 연구, 한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회 논문집, pp. 723-724.
5. 황일현, 2012, 폭발압력을 받는 부재의 탄소성 응답, 포스코엔지니어링 기술보, Vol. 28, No. 1.
6. Alonso, F. D., Ferradas, E. G., Perez, J. F. S., Aznar, A. M., Gimeno, J. R., Alonso, J. M., 2006, Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substance, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 19, pp. 724-728.
7. Baker, W. E., 1973, Explosions in Air, University of Texas Press, Austin.
8. Brode, H. L., 1955, Numerical solution of spherical blast waves, Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, New York.
9. Cooper, C. W., 1994, Comments on TNT equivalence, Proceedings of the Twenty-Sixth DoD Explosives Safety Seminar Held in Miami, FL.
10. Eckhoff, R. K., 2005, Explosion hazards in the process industries, Gulf publishing company, Huston, TX.
11. ICE (Institution of Chemical Engineers), 1994, Explosions in the Process Industries, Major Hazards Monograph, IChemE.
12. Kinney, G. F., and Graham, K. J., 1985, Explosives shocks in air, Second edition, Springer-Verlag.
13. Mills, C. A., 1987, The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects, Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections, Edinburgh, UK, pp. 61-73.
14. Newmark, N. M. and Hansen, R. J., 1961, Design of blast resistant structures, Shock and Vibration Handbook, Vol. 3, Eds. Harris and Crede. McGraw-Hill, New York, USA.
15. Scilly, N. F., 1995, Measurement of the explosive performance of high explosives. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 8(5), pp. 265-273.
16. Singla S., Singla, P., Singla, A., 2015, Computation of blast loading for a multi storied framed building, Int. J. of Research in Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, pp. 759-766.
17. Sochet, I., 2010, Blast effects of external explosions, Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Japan.
18. Zabetakis, M., 1965, Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, Bulletin 627, US Bureau of Mines.



권상기

인하대학교 에너지자원공학과 부교수

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



박정찬

인하대학교 에너지자원공학과 석사
재학중

Tel: 032-872-7551
E-mail: qwer9316@naver.com