

증기운 폭발 사례 비교를 통한 멀티에너지법의 폭발강도계수 지침 개선

이 승 훈¹·김 한 수^{2†}

¹건국대학교 건축학과 석사과정, ²건국대학교 건축학과 교수

Improvement of Charge Strength Guideline for Multi-Energy Method by Comparing Vapor Cloud Explosion Cases

Seung-Hoon Lee¹ and Han-Soo Kim^{2†}

¹Graduate Student, Department of Architecture, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

²Professor, Department of Architecture, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

Abstract

Various blast pressure calculation methods have been developed for predicting the explosion pressure of vapor cloud explosions. Empirical methods include the TNT equivalent method, and multi-energy method. The multi-energy method uses a charge strength that considers environmental factors. Although the Kinsella guideline was provided to determine the charge strength, there are limitations such as guidelines related to ignition sources. In this study, we proposed an improved charge strength guideline, by subdividing the ignition source intensity and expanding the type classification through literature analysis. To verify the improved charge strength guideline, and to compare it with the result obtained using the Kinsella guideline, four vapor cloud explosion cases which could be used to estimate the actual blast pressure were investigated. As a result, it was confirmed that the Kinsella guidelines showed an inaccurate, that is, wider pressure than the actual estimated blast pressure. However, the improved charge strength guideline enabled the selection of the intensity of the ignition source, and more subdivided types through the expansion of classification, hence it was possible to calculate the blast pressure relatively close to that of the actual case.

Keywords : vapor cloud explosion, blast pressure, TNT-equivalent method, multi-energy method, guideline

1. 서론

현재 세계적으로 플랜트 산업의 형태가 가속화 및 노후화에 따른 플랜트에서 발생하게 되는 피해와 재난이 증가하고 있다. 세계 위험 보고서(MARSH)에 의하면 폭발사고는 세계적으로 경제적 손실 비율 중 2/3에 해당하고 주된 폭발은 증기운 폭발로 집계되었으며, 발생하게 될 경우 큰 재산 손실과 인명피해를 초래한다(MARSH, 2016).

CPR14E(2005)는 플랜트에서 발생하는 대표적인 폭발은 증기운 폭발이며 연소속도가 빠를 경우 폭풍을 유발하거나 연소속도가 느릴 경우 폭연을 유발하지만, 증기운 폭발은 일반적으로 폭연 양상을 나타낸다고 하였다. 증기운 폭발의 폭발을

예측하거나 위험성 분석을 위하여 다양한 폭발 산정법이 개발되었으며, 대표적으로 실험 결과로부터 얻어진 상관관계를 정립한 경험적 방법이 있다(Park and Lee, 2009).

경험적 방법으로 주로 TNT 등가량 환산법과 Van den Berg (1985)가 제안한 멀티에너지법이 사용된다. Assael와 Kakosimos (2010)는 증기운 폭발 사례를 적용하여 TNT 등가량 환산법과 멀티에너지법의 최대 폭발을 비교하였으며, TNT 등가량 환산법은 과소평가를 나타내고 멀티에너지법은 실제 최대 폭발과 유사한 결과를 나타낸다고 하였다. Sari(2011)는 증기운 폭발에 대하여 멀티에너지법과 Baker 등(1996)이 개발한 BST(Baker-Strehlow-Tang)법의 폭발을 비교하였으며, 멀티에너지법이 더욱 정확하다고 분석하였다. 또한, Ree 등(2020)은 가스 폭발

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-2049-6110; E-mail: hskim@konkuk.ac.kr

Received August 31 2021; Revised September 24 2021;

Accepted September 24 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시나리오를 가정하여 TNT 등가량 환산법, 멀티에너지법, BST 법을 적용한 거리에 따른 폭발을 분석하였다. Lee와 Kim(2021)은 실제 증기운 폭발 사례를 적용하여 TNT 등가량 환산법과 멀티에너지법으로 폭발을 산정한 후 피해 구조물의 변형과 손상 정도를 비교·분석하였으며, 멀티에너지법을 사용할 경우 폭발 강도와 관련이 있는 폭발강도계수(charge strength) 선정에 대한 문제점과 개선점을 제시하였다. CPR14E(2005)에서는 다양한 폭발강도계수 선정 가이드라인을 제시하고 있으며, Kinsella(1993) 가이드라인이 대표적이다. 하지만 HSE(1998)는 Kinsella 가이드라인이 올바른 지침형식이지만 주로 정성적 방법이며 제시된 정량적인 값들은 맞지 않은 결과를 산출한다고 평가하였다. 본 논문에서는 증기운 폭발 실험의 어려움을 고려하여 실제 폭발 사례를 분석하여 멀티에너지법에 기반한 개선된 폭발강도계수 선정 가이드라인을 제시한다.

본 연구의 결과는 증기운 폭발에 대한 폭발 예측의 정확성을 향상시켜 안전하고 경제적인 내폭설계에 활용될 수 있다.

2. 폭발 산정법 및 개선사항

이 장에서는 다양한 폭발 산정법 중 실험 결과로 얻어진 상관관계를 적용한 대표적인 경험적 모델인 TNT 등가량 환산법과 멀티에너지법을 소개하고자 한다. 또한, 멀티에너지법에서 폭발 강도를 적용할 수 있는 폭발강도계수와 관련한 기존 가이드라인의 소개와 정확한 폭발강도계수 선정을 위한 개선된 가이드라인을 제안하고자 한다.

2.1 TNT 등가량 환산법

TNT 등가량 환산법은 실험 결과를 바탕으로 다양한 변수를 조정 및 환산계수를 사용하여 정립시킨 것으로서 다양한 폭발 물질에 대하여 TNT 등가량을 환산한 후 TNT의 폭발을 이용하여 증기운 폭발의 과압을 산정하는 방법이며, 식 (1)을 통하여 TNT 등가량을 산정한다.

$$W_{TNT} = \eta(\Delta H_c / \Delta H_{TNT}) W_G \quad (1)$$

여기서, W_{TNT} 는 TNT 등가량(kg), ΔH_c 는 폭발물질의 연소열(kJ/kg), ΔH_{TNT} 는 TNT 연소열(kJ/kg), W_G 는 폭발물질의 질량(kg), η 는 수율 계수(yield factor)이다.

ASCE(2010)에서는 환산된 TNT 등가량이 가스 폭발에 대하여 유사하다는 가정에 기초한 방법이라고 하였지만, TNT 등가량에 의존적이기 때문에 증기운 폭발에 적용하기에 어려움이 크다. 이에 대해 CPR14E(2005)는 다양한 연구진들이 수

율 계수를 0.02~0.3 등 다양하고 정립되지 않은 값을 제시한다고 하였다. 따라서 증기운 폭발의 폭발 산정에 부적절하거나 차이가 큰 폭발이 산출될 수 있다.

2.2 멀티에너지법

멀티에너지법은 Van den Berg(1985)가 고안한 방법으로 증기운 폭발을 예측하기 위하여 가스 폭발을 모델링하여 제안하였다. 이 방법은 증기운 폭발의 강도를 공간의 장애물, 구속 정도, 점화원 등 환경적 요인의 중요성을 고려하여 폭발강도계수를 사용한다. 폭발강도계수는 1~10으로 구성되어 있으며 앞서 나열한 환경적 요인의 영향을 고려하여 Fig. 1과 같은 Van den Berg의 특성 곡선을 선정하여 폭발을 산정하며, 이를 적용한 폭발을 구하는 과정은 식 (2)~(4)와 같다.

$$E = V_{doud} \times \Delta H_c \times \rho \times \beta \approx V_{doud} \times 3.5(MJ/m^3) \quad (2)$$

$$R' = R \times (E/P_0)^{-1/3} \quad (3)$$

$$P = P' \times P_0 \quad (4)$$

여기서, E 는 폭발에너지(MJ), V_{doud} 는 증기운 부피(m^3), ΔH_c 는 연소열(kJ/kg), ρ 는 물질 밀도, β 는 공기와 폭발물질 비율, R 은 거리(m), R' 은 환산 거리, P_0 은 대기압(kPa), P 는 최대 폭발압(kPa), P' 은 환산 최대 폭발압을 의미한다.

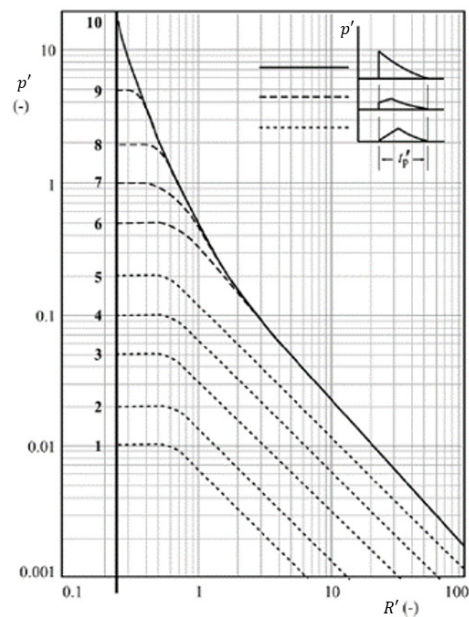


Fig. 1 Multi-energy method: scaled overpressure-distance curve (Assael and Kakosimos, 2010)

특성 곡선을 이용하여 폭발을 산정하는 방법은 Alonso 등 (2006)이 제시한 회귀방정식을 적용하는 방법이 있으며, 본 논문에서도 제안된 방정식을 사용하여 폭발을 산정하였다.

Fig. 1의 오른쪽 상단은 폭발 형상을 나타내며, 폭발강도계수 1~5는 점선으로 느린 폭연, 6~9는 파선으로 폭연, 10은 실선으로 TNT 폭발과 유사한 폭발을 의미한다. 환경적 요인으로 10개의 폭발강도계수 중 적절한 선택이 필요하며, 대표적인 지침은 Roberts와 Crowley(2004), Kinsella(1993)가 제시한 가이드라인이 주로 사용된다.

두 가이드라인에서 영향을 미치는 환경적 요인은 대체로 비슷하지만, Kinsella는 점화원의 강도를 사용하고 Roberts와 Crowley는 물질의 반응성을 고려한다. 하지만, 이는 Zhang과 Li(2017)는 물질의 반응성에 따른 과압의 영향을 분석한 결과 불균일한 과압을 나타냄에 따라 물질의 반응성의 영향이 불확실하다고 하였다.

따라서 본 연구는 Kinsella 가이드라인의 문제점을 파악한 후 수정 및 추가를 통하여 세분화된 폭발강도계수를 선정하는 개선한 가이드라인을 제안한다.

2.3 멀티에너지법의 폭발강도계수 가이드라인 개선

HSE(1998)는 멀티에너지법의 폭발강도계수 선정을 위한 Kinsella 가이드라인은 전반적으로 적절한 형태이지만 다양한 시나리오의 미반영 및 실험 결과의 부족에 따른 부정확한 결과를 초래할 수 있다고 평가하였다. 특히, 점화원의 강도를 낮게 평가하는 형식을 문제점으로 지적하고 있다. 또한, 기존 Kinsella 가이드라인은 사용하기에 세부적이지 못하며 불명확한 지침 형태로서 개선이 필요하다.

기존 Kinsella 가이드라인의 분류체계로서 점화원의 강도(ignition strength), 장애물 정도(obstacle), 구속 정도(confinement)로서 제시되며, Table 1과 같다. 특히 점화원의 강도는 Low(spark, flame, hot surface)와 High(confined vented explosion)로서 구분된다.

하지만 앞에서 언급한 문제점을 고려하여 점화원 강도를 수정 개선한 폭발강도계수 선정 가이드라인을 제시한다. RR226 (2004)은 다양한 연구진의 문헌 및 실험 등을 통하여 점화 가능성 및 점화 에너지를 검정하여 점화원의 형식에 따른 점화원의 강도를 표 형식으로 제시하였으며, 해당하는 점화 영향 요인은 점화원의 개수와 밀도, 시설물의 유형, 점화 지연 등의 요인을 포함하였다. Chen 등(2020)은 RR226(2004)의 점화원의 강도를 채택하여 증기운 폭발과 관련된 프로세스 공장의 취약성 평가를 하였다. 이를 적용함과 동시에 기존 Kinsella 가이드라인과의 비교·분석을 통하여 개선된 폭발강도계수 가이드라인을

Table 1 Original of kinsella guideline(Kinsella, 1993)

Category	Ignition Strength		Obstacle			Confinement		Charge Strength
	L	H	N	L	H	C	U	
Type*								1~10
1		○			○	○		7~10
2		○			○		○	7~10
3	○				○	○		5~7
4		○		○		○		5~7
5		○		○			○	4~6
6		○	○			○		4~6
7	○				○		○	4~5
8		○	○				○	4~5
9	○			○		○		3~5
10	○			○			○	2~3
11	○		○			○		1~2
12	○		○				○	1

Type* N:No, L:Low, H:High, C:Confined, U:Unconfined

Table 2 Proposal of charge strength guideline

Category	Ignition Strength			Obstacle			Confinement		Charge Strength
	L	M	H	N	L	H	C	U	
Type*									1~10
1			○			○	○		10
2			○			○		○	8~10
3			○		○		○		6~8
4			○		○			○	4~6
5			○	○			○		4~6
6			○	○				○	4~5
7		○				○	○		8~9
8		○				○		○	6~8
9		○			○		○		5~7
10		○			○			○	4~5
11		○		○			○		3~4
12		○		○				○	2~3
13	○					○	○		4~6
14	○					○		○	4~5
15	○				○		○		3~5
16	○				○			○	2~3
17	○			○			○		1~2
18	○			○				○	1

Type* N:No, L:Low, M:Medium, H:High, C:Confined, U:Unconfined

Table 2에 제시하였다. 점화원의 분류체계는 Low(Weak), Medium, High(Strong)로 분류되며, 해당하는 폭발강도계수 선정 범위는 기존 12가지에서 총 18가지로 확장하였다.

3. 증기운 폭발 사례를 적용한 폭발 산정법 검증

기존 Kinsella 가이드라인과 개선한 가이드라인을 각각 적용하여 산정된 폭발과 과거 증기운 폭발 사례에서 조사된 추정 폭발과의 비교하여 개선한 가이드라인의 정확성 및 합리성을 검증하였다. 증기운 폭발 사례에 대한 보고서와 문헌은 구조물의 손상 양상 및 감식을 통하여 실제 폭발을 추정하거나 CFD 소프트웨어를 이용하여 공간 및 구름 확산을 모델링 후

실제 폭압을 추정하였다. 본 연구는 조사된 실제 추정 폭압을 기존 Kinsella 가이드라인과 개선한 가이드라인을 적용한 멀티에너지법을 비교하며, TNT 등가량이 제시된 경우 입사압력과 반사압력의 범위를 비교하였다. 비교한 증기운 폭발 사례는 거리에 따른 실제 추정 폭압의 대조가 가능한 4가지 증기운 폭발 사례를 선정하였다.

3.1 Case 1: Flixborough(1974)

1974년 6월 1일 영국 내 플릭스보로(Flixborough, UK)에 위치한 화학공장에서 약 30ton의 사이클로hex산이 누출되었다. RR1113(2017)에 의하면 증기운은 약 300m×200m 면적을 뒤덮었고, 높이는 물질 농도에 따라 변화가 있었으나 평균적으로 약 4m이고 감식 결과로 점화원은 과열기로 추정되었다. 또한 장애물 정도(L), 구속 형태(C)로 평가되었다. CCPS(1994)에서는 TNT 등가량 환산법을 사용하기 위한 TNT 등가량을 16ton으로 제시하였으며, 멀티에너지법을 사용할 경우 폭발에 관여하는 V_{cloud} 가 약 60,000m³으로 추정하였다. 점화원의 강도 분류는 개선한 가이드라인에서 참고한 RR226(2004)을 적용할 경우 High이고 기존 Kinsella 가이드라인을 적용할 경우 Low이다. 각각의 가이드라인을 사용할 경우의 영향 요인 분류는 Table 3과 같다.

각각의 폭압 산정법 결과를 비교·검증하기 위한 자료는 Assael와 Kakosimos(2010)에 의하여 수집된 5개의 거리별 구조물의 손상에 따른 실제 추정 폭압을 사용하였다. 따라서 Table 4는 실제 추정 폭압, TNT 등가량 환산법(입사압력), 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 적용한 멀티에너지법(MEM, C.S.6~8)으로 산정된 폭압을 나타낸다.

Table 3 Application of guidelines for flixborough case

Guideline Type	Ignition Strength	Obstacle	Confinement	Charge Strength
Kinsella Guideline	L	L	C	3~5
Proposal of Charge Strength Guideline	H	L	C	6~8

Table 4 Comparison of pressures for flixborough

Distance	Estimated Pressure (Sadce <i>et al.</i> , 1976)	TNT 16ton (CCPS, 1994)	MEM (C.S.6)	MEM (C.S.7)	MEM (C.S.8)
A.120m	45~55kPa	47.1kPa	32.6kPa	44.2kPa	54.1kPa
B.130m	40~55kPa	40.9kPa	29.8kPa	40.1kPa	45.8kPa
C.220m	20~35kPa	17.9kPa	16.6kPa	21.3kPa	21.3kPa
D.230m	17~28kPa	16.8kPa	15.8kPa	20.2kPa	20.2kPa
E.290m	17~20kPa	12.3kPa	12.2kPa	15.3kPa	15.3kPa

Fig. 2는 Flixborough 사례의 환산 거리 대비 환산 폭압으로 멀티에너지법 특성 곡선(C.S.1~10)과 TNT 등가량 환산법(16ton)의 입사압력과 반사압력 곡선을 보이고 있다.

실제 추정 폭압은 TNT 등가량 환산법의 입사압력과 반사압력 곡선 사이에 있는 것으로 보아 TNT 등가량 환산법은 비교적 적절하게 폭압을 모사하는 것을 알 수 있다.

기존 Kinsella 가이드라인을 적용할 경우 폭발강도계수 C.S.3~C.S.5로 선정되므로 멀티에너지법은 실제 추정 폭압에 비하여 과소평가함을 나타낸다. 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 적용할 경우 C.S.6~C.S.8로 선정이 되며, 실제 추정 폭압과 대조할 경우 비교적 정확한 폭압이 산정된다.

3.2 Case 2: Beek(1975)

1975년 11월 7일 네덜란드 비크(Beek, Netherland)의 가스 정제 플랜트에서 탄화수소 5.5ton으로 추정되는 누출이 발생하였다. Wingerden 등(1995)에 의하면 점화원은 과열기에서 발생하였고 증기운의 반지름은 약 30~90m, 높이는 약 3~3.5m, 장애물 정도(L), 구속 형태(C)로 평가되었다. MoSA(1976)는 TNT 등가량을 2.2ton으로 제시하였으며, 멀티에너지법에 사

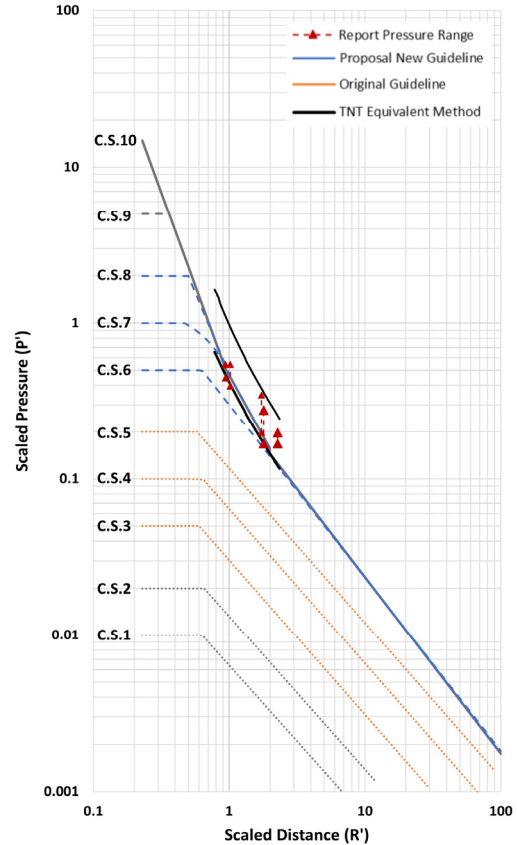


Fig. 2 Flixborough: comparison of actual estimated pressure and blast pressure using calculation method

용하는 V_{cloud} 를 약 11,200m³으로 추정하였다. 점화원의 강도는 개선한 가이드라인에서 High이지만 기존의 Kinsella 가이드라인을 적용하면 Low로 분류된다. 기존 Kinsella 가이드라인과 개선한 가이드라인으로 결정된 영향 요인의 분류 값을

Table 5 Application of guidelines for beek case

Guideline Type	Ignition Strength	Obstacle	Confinement	Charge Strength
Kinsella Guideline	L	L	C	3~5
Proposal of Charge Strength Guideline	H	L	C	6~8

Table 6 Comparison of pressures for beek(kPa)

Point	Distance (m)	Estimated Pressure (Wingerden <i>et al.</i> , 1995)	TNT 2.2ton (MoSA, 1976)	MEM (C.S.6)	MEM (C.S.7)
M1	35~40	20.2~101	109.8	50.5	84.3~101
M2	20~25	20.2~101	310.8	50.5	101
M3	40~50	60.6~70.7	70.1	46.2~50.5	64.5~84.3
M4	20~25	30.3~101	310.8	50.5	101
M5	30~35	70.7	146	50.5	101
M6	90~100	14.1~21.2	21.6	21.4~24	28.7~33.8
M7	10~15	70.7	997	50.5	101
M8	15~20	> 70.7	520	50.5	101

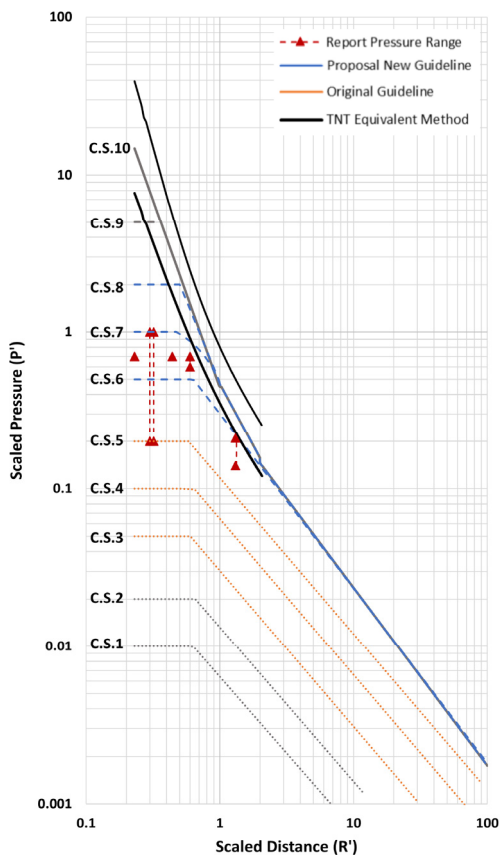


Fig. 3 Beek: comparison of actual estimated pressure and blast pressure using calculation method

Table 5에 나타내었다.

각각의 폭발 산정법 결과를 비교·검증하기 위한 자료는 Wingerden 등(1995)의 수집된 폭발 정보이며, 측정지점 M1~M8로 선정되어 거리별 구조물의 손상에 따른 실제 추정 폭발을 사용하였다. Table 6은 실제 추정 폭발, TNT 등가량 환산법(입사압력)과 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 적용하여 멀티에너지법으로 산정된 폭발을 보여준다. Fig. 3은 Beek 사례의 환산 거리 대비 환산 폭발으로서 멀티에너지법 특성 곡선(C.S.1~10)과 TNT 등가량 환산법(2.2ton)을 입사압력과 반사압력 곡선을 포함한다.

실제 추정 폭발과 TNT 등가량 환산법을 비교해 보면 TNT 등가량 환산법은 실제 추정 폭발보다 전반적으로 큰 값을 보여준다. 멀티에너지법은 기존의 Kinsella 가이드라인을 적용할 경우 폭발강도계수 C.S.3~C.S.5로 선정이 되며, 실제 추정 폭발 범위에 비하여 과소평가하는 결과를 나타낸다.

반면, 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 적용할 경우 C.S.6~C.S.8로 선정이 되며, 실제 추정 폭발과 비교적 근접한 폭발이 산정된다.

3.3 Case 3: Skikda(2004)

2004년 1월 19일 알제리 스킨다(Skikda, Algeria)의 가스 정제 플랜트에서 파이프 결함에 따른 LPG, 탄화수소 등 누출이 발생하였다. RR1113(2017), Oran 등(2020)에 의하면 점화원은 과열기로 추정되며, 증기운의 반지름은 50m 이상, 높이는 약 3.5m, 장애물 정도(H), 구속 형태(C)로 평가되었다. TNT 등가량을 제시한 문헌은 존재하지 않으며, Oran 등(2020)은 멀티에너지법에 필요한 V_{cloud} 를 약 20,000m³으로 추정하였다. 점화원의 강도 분류는 Chamberlain 등(2019)에서 폭발 정보를 제시함과 동시에 RR226(2004)을 통하여 기존의 Kinsella 및 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 모두 High로서 선정이 가능하며, 각각의 가이드라인의 영향 요인을 정의할 경우 Table 7과 같다.

각각의 폭발 산정법 결과를 검증하기 위한 자료로서 Oran 등(2020)에 의해 거리별 구조물 및 장비의 손상과 관련 소프트웨어를 이용한 실제 추정 폭발을 사용하였다.

Table 8은 거리에 따른 실제 추정 폭발, 개선한 폭발강도계

Table 7 Application of guidelines for skikda case

Guideline Type	Ignition Strength	Obstacle	Confinement	Charge Strength
Kinsella Guideline	H	H	C	7~10
Proposal of Charge Strength Guideline	H	H	C	10

수 가이드라인을 적용한 멀티에너지법(MEM, C.S.10)으로 산정된 폭압을 나타내며 Fig. 4는 Skikda 사례의 환산 거리 대비 환산 폭압으로 멀티에너지법 특성 곡선을 보인다.

멀티에너지법을 비교할 경우 기존의 Kinsella 가이드라인은 폭발강도계수 C.S.7~10으로 선정되며, 실제 추정 폭압 내에 존재하지만 넓은 폭압 범위가 제시된다. 반면, 개선한 가이드라인을 적용할 경우 C.S.10으로 하나의 폭압 곡선 선정할 수 있으므로 정확하고 축소된 범위의 결과를 얻을 수 있다. 한편, 환산 거리(R')가 10 이상인 원거리에 해당하는 실제 추정 폭압은

가이드라인 모두 부적절한 결과를 나타낸다. 이는 증기운 폭발의 특징인 증기(기체)의 확산과 공간의 형태가 크게 영향을 주기 때문으로 판단된다. 일반적으로 증기의 누출이 지속되며, 증기운 형태로 넓은 면적으로 확산이 가속화된다. 확산된 증기운은 공간의 구성과 장애물에 따라 변화가 발생하며, 근거리인 경우 대부분 일정한 증기운 분포의 예측이 가능하다. 반면, 원거리인 경우 증기운의 확산이 일률적이지 못하고 바람 및 공간의 점유도에 따라 소멸되기 때문에 폭압의 예측이 어렵다(CPR14E, 2005).

Table 8 Comparison of pressures for skikda

Damage Type	Distance (m)	Estimated Pressure (Oran et al., 2020)	MEM (C.S.10)
Car crushed(a)	≤30	>505kPa	>591kPa
Oil drum crushed(a)	40~50	202~303kPa	174.3~297kPa
Maintenance Building destroyed(a)	60~70	>101kPa	78~112.8kPa
Train 5 window failure(b)	1,000	>0.2kPa	2kPa
Only window failure(c)	2,000	>0.2kPa	0.9kPa

Note. According to extent of damage (Oran et al., 2020)

- (a) Heavy damage: ≤ 150m(Approx.)
- (b) Minor damage: ≤ 1,000m(Approx.)
- (c) Few windows damage: ≤ 2,000m(Approx.)

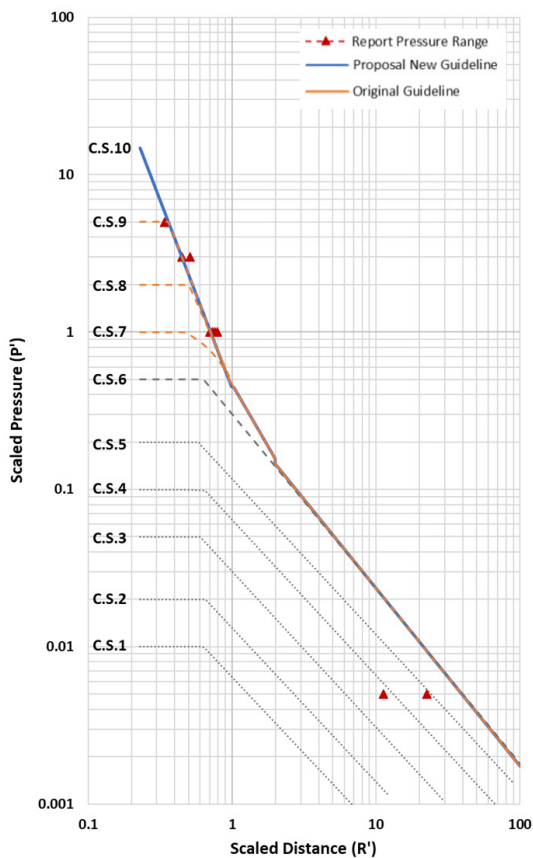


Fig. 4 Skikda: comparison of actual estimated pressure and blast pressure using calculation method

3.4 Case 4: BP Texas(2005)

2005년 3월 23일 미국 텍사스(Texas City, USA)의 화학공장에서 핵산 등 누출이 발생하였으며, CSB(2007)의 보고서에 의하면 증기운의 확산은 약 8,000~10,000m² 추정되며, 트럭 엔진에 따른 점화에너지가 발생하였을 것으로 보고되었다. 폭압 산정법을 활용하기 위한 TNT 등가량을 제시한 문헌은 없으며 FAIR(2005)는 멀티에너지의 V_{cloud} 를 약 9,400m³으로 추정하였다. 점화원의 강도는 개선한 가이드라인에서는 Medium이지만 기존 Kinsella 가이드라인을 적용할 경우 Low로 분류된다. 또한, CSB(2007)에 의하면 장애물 정도(L)와 낮은 구속 형태(U)를 제시하였으며, 각각의 가이드라인을 사용할 경우 영향 요인은 Table 9와 같다.

폭압 산정법 결과를 검증하기 위한 자료로 FAIR(2005), CSB(2007)의 거리별 구조물 및 장비의 손상 분석과 관련 소프트웨어를 적용한 실제 추정 폭압을 사용하였다.

Table 10은 FAIR(2005), CSB(2007) 자료로서 6개의 거리별 실제 추정 폭압과 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 적용하여 멀티에너지법(MEM, C.S.4~5)으로 산정된 폭압을 나타내었다.

Table 9 Application of guidelines for BP Texas case

Guideline Type	Ignition Strength	Obstacle	Confinement	Charge Strength
Kinsella Guideline	L	L	U	2~3
Proposal of Charge Strength Guideline	M	L	U	4~5

Table 10 Comparison of pressures for BP Texas

Distance (m)	Estimated Pressure (FAIR, 2005) (CSB, 2007)	MEM (C.S.4)	MEM (C.S.5)
50~60	13.78kPa	7.5~8.9kPa	13.5~16.2kPa
80~108	6.89kPa	4.2~5.6kPa	7.6~10.2kPa
117	5.17kPa	3.9kPa	7kPa
163	3.45kPa	2.8kPa	5kPa
295	1.72kPa	1.5kPa	2.8kPa
661	0.69kPa	0.7kPa	1.3kPa

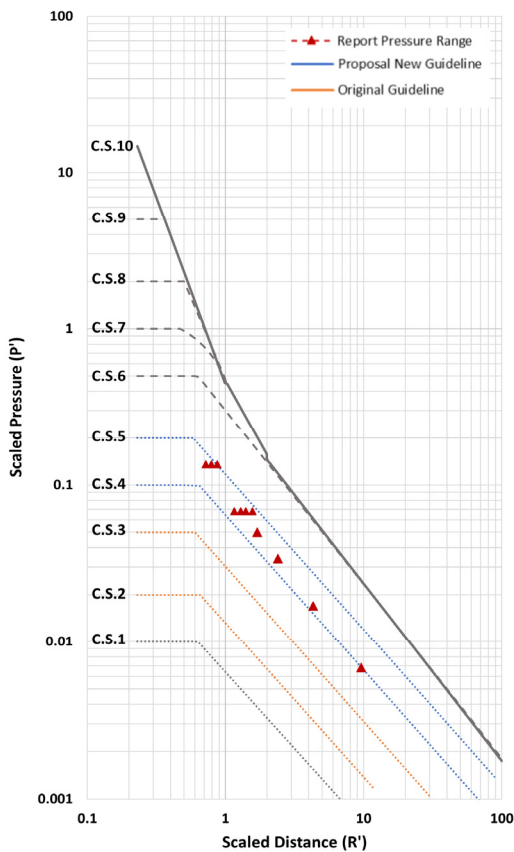


Fig. 5 BP texas: comparison of actual estimated pressure and blast pressure using calculation method

Fig. 5는 BP Texas 사례의 환산 거리 대비 환산 폭압으로서 멀티에너지법 특성 곡선을 보여준다. 멀티에너지법을 비교할 경우 기존의 Kinsella 가이드라인은 폭발강도계수 C.S.2~3으로 선정되며, 실제 추정 폭압에 비하여 낮은 폭압 범위가 제시된다. 반면, 개선한 가이드라인을 적용할 경우 C.S.4~5로 선정되고 실제 추정 폭압과 비슷한 결과를 보여준다. 낮은 폭압 결과에 큰 영향을 미친 비구속정도(U) 조건을 가진 증기운 폭발 사례이므로 각각의 가이드라인에 따라 크게 차이가 나는 폭압 산정 결과가 도출되었다.

4. 결론

증기운 폭발사고에 따른 구조물의 손상이나 위험성 분석을 위하여 경험적 폭압 산정법을 주로 사용하고 있다. 증기운 폭발에 적합한 경험적 폭압 산정법인 멀티에너지법에서는 환경적 요인을 반영한 폭발강도계수를 사용한다. 폭발강도계수를 결정하기 위한 대표적인 지침으로 Kinsella 가이드라인이 있지만 점화원의 강도와 관련된 사항이 명확하지 않아서 실제와 크게 차이가 나는 폭압이 산정될 수 있다. 본 연구에서는 다양한 문헌 분석을 통하여 기존 Kinsella 가이드라인을 개선한 폭

발강도계수 가이드라인을 제안하였다.

개선한 폭발강도계수 가이드라인의 검증을 위하여 4가지 증기운 폭발 사례에 대한 조사단 보고서 및 관련 문헌의 자료를 이용하여 기존 Kinsella 가이드라인을 이용한 폭압과 비교하였다. 4가지 증기운 폭발 사례에서 모두 기존 Kinsella 가이드라인을 적용한 결과에 비하여 개선한 가이드라인을 적용한 결과가 실제 추정 폭압과 유사한 폭압을 보여주었다. 이는 기존 가이드라인을 적용하여 멀티에너지법을 사용할 경우, 부족한 지침 정보 등의 영향으로 점화원의 강도가 낮게 선정되었을 뿐 아니라 폭발강도계수가 모호하게 분류되었기 때문이다. 이러한 문제점은 명확하게 점화원의 강도를 선정하고 폭발강도계수 분류의 확장을 통하여 더욱 세분화된 계수 값을 선정함으로써 해결될 수 있었다. 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 적용한 멀티에너지법을 사용하면 증기운 폭발에 따른 폭압 예측의 정확성을 향상시킬 수 있다. 한편, 환산 거리(R')가 10 이상인 경우, 실제 추정 폭압과 비교하여 경험적 폭압 산정법에 따른 폭압은 모두 부적절한 결과를 보여주었다. 증기운 폭발의 원거리 폭압에 영향을 주는 공간 및 장애물과 같은 환경적 요인에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(No. 21RMPP-C163162-01).

References

Alonso, F.D., Ferradas, E.G., Perez, J.F.S., Aznar, A.M., Gimeno, J.R. (2006) Characteristic Overpressure-Impulse-Distance Curves for Vapour Cloud Explosions Using the TNO Multi-Energy Model, *J. Haz. Mater.*, 137(2), pp.734~741.

ASCE (2010) Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, *American Society of Civil Engineers*, Virginia, p.300.

Assael, M.J., Kakosimos, K.E. (2010) *Fires, Explosions and Toxic Gas Dispersions*, CRC press, New York, p.346.

Baker, Q.A., Tang, M.J., Scheier, E.A., Silva, G.J. (1996) Vapor Cloud Explosion Analysis, *Proc. Safety Progress*, 15(2), pp.106~109.

CCPS (1994) *Guidelines for Evaluating the Characteristic of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*, CCPS, New York, p.394.

Chamberlain, G., Pekalski, A., Oran, E.S. (2019) Mechanisms and Occurrence of Detonations in Vapor Cloud Explosions-Supplementary Material, Waverton Consultancy Ltd., UK, p.75.

- Chen, C., Khakzad, N., Reniers, G.** (2020) Dynamic Vulnerability Assessment of Process Plants with Respect to Vapor Cloud Explosions, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 200(2):106934, pp.1~15.
- CPRI4E** (2005) Methods for the Calculation of Physical Effects, TNO, Netherlands, p.870.
- CSB** (2007) Investigation Report Refinery Explosion and Fire, BP Texas, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, p.341.
- FAIR** (2005) Isomerization Unit Explosion Final Report Texas, Fatal Accident Investigation Report, USA, p.192.
- HSE** (1998) GAME: Development of Guidance for the Application of the Multi-Energy Method, TNO, Health and Safety Executive, p.124.
- Kinsella, K.G.** (1993) A Rapid Assessment Methodology for the Prediction of Vapour Cloud Explosion Overpressure, Int. Conf. and Exhibition on Safety, *Health and Loss Prev. in the Oil, Chemical and Process Industries*, Singapore.
- Lee, S.H., Kim, H.S.** (2021) Study on the Calculation of the Blast Pressure of Vapor Cloud Explosions by Analyzing Plant Explosion Cases, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 34(1), pp.1~8.
- MARSH** (2016) The 100 Largest Losses 1974-2015, Marsh Ltd., UK, p.44.
- MoSA** (1976) Report on the Explosion at DSM in Beek, Dutch Ministry of Social Affair, Netherland.
- Oran, E.S., Chamberlain, G., Pekalski, A.** (2020) Mechanisms and Occurrence of Detonations in Vapor Cloud Explosions, *Progress in Energy and Combustion Science*, 77, pp.1~37.
- Park, D.J., Lee, Y.S.** (2009) A Comparison on Predictive Models of Gas Explosion, *Korean J. Chem. Eng.*, 26(2), pp.313~323.
- Ree, S.H., Kang, T., Lee, H.R., Shin, M.S.** (2020) Empirical Gas Explosion Models for Onshore Plant Structure: Review and Comparative Analysis, *J. Perform. Constr. Facil.*, 34(4), pp.1~10.
- Roberts, M.W., Crowley, W.K.** (2004) Evaluation of Flammability Hazards in Non-nuclear Safety Analysis, *In Proc., EFCOG*, Las Vegas: EFCG.
- RR1113** (2017) Review of Vapour Cloud Explosion Incidents, Health and Safety Executive, p.326.
- RR226** (2004) Development of a Method for the Determination of on-site Ignition Probabilities, Health and Safety Executive, p.192.
- Sadee, C., Samuels, D.E., O'Brien, T.P.** (1977) The Characteristics of the Explosion of Cyclohexane at the NYPRO (UK) Flixborough Plant 1st June 1974, *J. Occup. Accid.*, 1(3), pp.203~235.
- Sari, A.** (2011) Comparison of TNO Multienergy and Baker-Strehlow-Tang Models, *Proc. Safety Progress*, 30(1), pp.23~26.
- Van den Berg, A.C.** (1985) The Multi-Energy Method: A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction, *J. Haz. Mater.*, 12(1), pp.1~10.
- Wingerden, K., Salvesen, H.-C., Perbal, R.** (1995) Simulation of an Accidental Vapor Cloud Explosion, *Proc. Safety Progress*, 14(3), pp.173~181.
- Zhang, Q., Li, D.** (2017) Comparison of the Explosion Characteristics of Hydrogen, Propane, and Methane Clouds at the Stoichiometric Concentrations, *Inter. J. Hydrogen Energy*, 42(21), pp.14794~14808.

요 지

증기운 폭발의 폭발압을 예측하거나 위험성 분석을 위하여 다양한 폭발 산정법이 존재하지만 대표적으로 경험적 방법인 TNT 등가량 환산법과 멀티에너지법을 주로 사용한다. 멀티에너지법은 환경적 요인을 고려한 폭발강도계수를 사용한다. 본 연구에서는 문헌 분석을 통하여 점화원 강도를 세분하고 강도분류를 확장하여 개선한 폭발강도계수 가이드라인을 제안하였다. 개선한 폭발강도계수 가이드라인의 합리성 검증과 기존 Kinsella 가이드라인과의 비교를 위하여 실제 추정 폭발압과 대조가 가능한 4가지의 증기운 폭발 사례를 적용하였다. 결과적으로 기존 Kinsella 가이드라인은 실제 추정 폭발압에 비하여 광범위하거나 부정확한 폭발 산정 결과를 나타내는 것으로 확인하였다. 반면, 개선한 폭발강도계수 가이드라인은 명확한 점화원의 강도 선정이 가능하고 분류의 확장을 통하여 더욱 세분화된 계수 값의 선정이 가능함에 따라 실제 사례와 비교적 유사한 폭발 산정이 가능하다.

핵심용어 : 증기운 폭발, 폭발, TNT 등가량 환산법, 멀티에너지법, 가이드라인