

플랜트 시설물의 확률론적 폭발 위험도에 따른 설계폭발하중 모델 개발

이 승 훈¹·최 보 영²·김 한 수^{3†}

¹건국대학교 건축학과 박사과정, ²건국대학교 건축학과 석사과정, ³건국대학교 건축학과 교수

Development of Design Blast Load Model according to Probabilistic Explosion Risk in Industrial Facilities

Seung-Hoon Lee¹, Bo-Young Choi² and Han-Soo Kim^{3†}

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

²Graduate Student, Department of Architecture, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

³Professor, Department of Architecture, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

Abstract

This paper employs stochastic processing techniques to analyze explosion risks in plant facilities based on explosion return periods. Release probability is calculated using data from the Health and Safety Executive (HSE), along with annual leakage frequency per plant provided by DNV. Ignition probability, derived from various researchers' findings, is then considered to calculate the explosion return period based on the release quantity. The explosion risk is assessed by examining the volume, radius, and blast load of the vapor cloud, taking into account the calculated explosion return period. The reference distance for the design blast load model is determined by comparing and analyzing the vapor cloud radius according to the return period, historical vapor cloud explosion cases, and blast-resistant design guidelines. Utilizing the multi-energy method, the blast load range corresponding to the explosion return period is presented. The proposed return period serves as a standard for the design blast load model, established through a comparative analysis of vapor cloud explosion cases and blast-resistant design guidelines. The outcomes of this study contribute to the development of a performance-based blast-resistant design framework for plant facilities.

Keywords : stochastic processing technique, explosion return period, explosion risk, blast load, blast-resistant design

1. 서론

플랜트 시설물은 일반 건축물과 달리 가연성 물질을 대량으로 포함하고 있어 재난 발생 시 피해가 크고 유독 가스, 위험 물질 등의 급격한 누출 및 확산으로 인한 대량 인명피해의 우려가 높다(CCPS, 2012). 세계 위험 보고서 MARSH(2020)에서 탄화수소를 사용하는 정제, 석유 화학, 가스 처리, 터미널 및 유통, 석유 생산 등의 플랜트 시설에서 경제적 손실을 유발하는 위험요소 상위 100건 중 62건이 폭발사고로 보고된다. 따라서 플랜트 시설물의 특성을 반영한 폭발 위험도의 분석과 이에 상응하는 확률론적 내폭설계 체계의 개발이 필요하다.

많은 연구기관에서 성능기반 내진설계를 중심으로 다양한 하중에 대하여 위험도를 고려한 성능기반 설계의 연구를 진행

하고 있다. 지진하중의 경우 신축 및 기존건물의 성능기반 내진설계와 평가 가이드라인 뿐만 아니라 지진 위험도를 고려한 초고층 또는 플랜트 구조물에 대한 성능기반 내진설계법을 제시하고 있다(ASCE, 2020; PEER, 2017). 풍하중의 경우 ASCE (2019)는 성능기반 내풍설계를 위한 선행 가이드라인을 출간하여 풍하중 위험도에 따른 사용성 수준과 강도 수준을 고려할 수 있는 진보된 설계법을 제시하였다. 화재하중의 경우 AIK & KSSC(2022)는 사양기반 내화구조설계법과 함께 건축물의 내화성능 확보를 위하여 위험 시나리오 기반 강구조물의 성능기반 내화설계 절차를 제시하였다. 폭발하중은 지진하중, 풍하중과 같이 하중의 불확실성이 있기 때문에 플랜트 시설물의 폭발 위험도를 고려한 성능기반 설계법의 개발이 필요하다.

일반적으로 성능기반 설계의 중점은 해당 재해의 재현주기

†Corresponding author:

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

Received October 4 2023; Revised December 8 2023;

Accepted December 8 2023

© 2024 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.

와 위험도를 고려하여 설계하중과 성능목표를 적용한다. Jeong 등(2021)은 고층건물의 성능기반 설계를 위하여 풍하중 재해도 및 성능목표를 평가하였다. Sun과 Luo(2014)는 화재 재현주기와 성능목표에 대한 위험 분류 또는 위험도 매트릭스를 제안하였다. Mohamed Ali와 Louca(2008)는 해양플랜트의 플랫폼 상부에 대하여 폭발 재현주기에 따른 폭발하중을 추정하여 구조 부재의 거동을 분석하였다. 플랜트 시설물의 성능기반 내폭설계를 위해서는 폭발 위험도 및 재현주기에 따른 하중 규모를 추정하는 방법이 필요하다.

본 연구는 증기운 폭발을 유발하는 누출 및 점화의 확률적 방법론을 적용하여 폭발 재현주기에 따른 증기운의 부피 및 범위를 분석하고 폭발하중 산정법의 도입을 통하여 재현주기에 따른 폭발하중을 제시한다. 본 연구는 시설물의 폭발 위험도를 산정하기 위한 확률처리 방법론과 함께 향후 성능기반 내폭 설계 및 평가 기준의 설계폭발하중 모델 개발에 활용될 수 있다.

2. 확률론적 접근법을 통한 폭발 위험도 산정

Read와 Vogel(2015)에 의하면 재해 위험도는 해당 재해의 빈도 및 재현주기로 표현된다. 폭발 위험도의 경우 ERA(Explosion Risk Analysis) 또는 QRA(Quantitative Risk Analysis)를 수행한다. 이와 같은 방법은 폭발 위험도 및 폭발하중의 산정에 많은 시간의 소요와 복잡성이 존재한다. 따라서 단순화 및 이상화된 사건수목 형태의 확률론적 접근법을 통하여 폭발 위험도를 산정한다.

2.1 폭발 빈도 및 재현주기 산정 절차

폭발 재현주기는 연간 폭발 빈도의 역수 개념이며, Fig. 1과 같이 사건 수목 방법으로 연간 누출 빈도와 점화 확률의 곱으로 정의된다. Bai 등(2021) 연구진은 점화 확률에 대하여 증기운 폭발로서 전이되는 단계에 해당하는 점화 상태와 공간의 밀

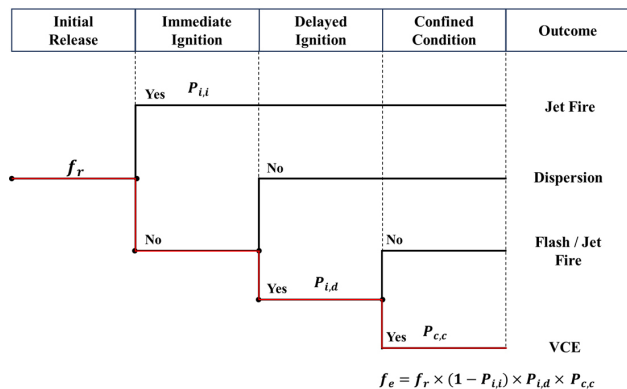


Fig. 1 Event tree analysis for vapor cloud explosion

집도 또는 구속정도에 따른 확률 모델을 적용하였다. 연간 폭발 빈도와 최종 점화 확률은 각각 식 (1)과 (2)와 같다. 각각의 누출 빈도와 점화 확률의 산정을 통한 증기운 폭발의 빈도를 도출하는 과정으로 수행되며, 최종적으로 재현주기로서 위험도를 표현한다.

$$f_e = f_r \times P_i \tag{1}$$

$$P_i = (1 - P_{ii}) \times P_{id} \times P_{cc} \tag{2}$$

여기서, f_e 는 연간 폭발 빈도, f_r 는 연간 누출 빈도, P_i 는 최종 점화 확률을 의미하고 P_{ii} 는 즉시 점화 확률, P_{id} 는 지연 점화 확률, P_{cc} 는 구속 및 밀집된 공간에서의 점화 확률을 의미한다.

2.2 누출 데이터의 정규성 검정

영국 보건 안전청(HSE)에서 제공하는 해양플랜트 시설물의 분기별 탄화수소 누출 보고서(2015~2022)의 데이터 중 가스 유형의 누출량을 활용하여 폭발 규모에 따른 확률 분포를 추정하였다. 노르웨이에서 운영하는 국제 공인 등록 기업 DNV (2013)에 의하면 HSE에서 제공하는 해양 플랜트 시설물의 탄화수소 누출 데이터는 육상 플랜트 시설물에 사용 가능한 최상의 누출 빈도 추정치를 제공하는 것으로 평가된다.

HSE(2015~2022)에서 제공하는 분기별 해양 플랜트 시설물의 탄화수소 누출 보고서를 통하여 확률을 산정한다. 이 데이터는 2015년 4분기부터 2022년 2분기까지 약 6년 동안 수집된 데이터로 영국 해협의 석유 및 가스 시설에서 발생한 탄화수소 누출 사고이다. 보고서에는 누출 사고 일자, 누출 연료의 유형, 누출량, 사업자, 시설명, 심각도가 기록된 약 650건의 사고가 수집되어 있으며, 누출 연료는 가스, 오일, 2-단계 유형으로 분류되어 있다. 본 연구에서는 오일 유형의 증발률 고려의 어려움, 2-단계 유형의 누출된 탄화수소의 불명확성 등의 문제로 약 415건의 가스 유형 누출량만을 사용하였다. Table 1은 HSE (2015~2022)에서 제공하는 분기별 해양 플랜트 시설물의 탄화수소 누출 보고서에 기록된 누출 연료의 유형과 유형별 심각도를 나타낸다.

415건의 가스 유형의 누출 데이터에 대한 확률 분포 분석을 위하여 데이터 정규성 검정이 필요하다. 데이터의 정규성을 검정할 수 있는 대표적인 세 가지 방법으로 Shapiro-Wilks Test, Kolmogorov-Smirnov Test(KS Test), Quantile-Quantile Plot이 있다. 본 연구에서는 415개의 가스 유형 누출량 데이터를 사용하기 때문에 표본수(n)가 50개 이상인 데이터의 정규성 검정에 적합한 KS Test를 수행하였다. KS Test의 검정 통계량은 관

Table 1 Release type and severity in HSE (2015~2022)

Severity \ Release Type	2-Phase Type	Gas Type	Oil Type	Total
Major	0	6	2	8
Significant	8	98	84	190
Minor	14	216	91	321
Awaiting Classification	6	95	27	128
Sum	28	415	204	647

측 누적 분포함수와 이론 누적 분포함수 사이의 최대 차이(절대값)로 계산되며 검정 통계량을 z값이라고 한다. 검정 데이터가 정규분포와 같은 분포를 가질수록 z값이 작아지고, 유의확률이 커진다. 즉, 해당 유의확률이 유의수준보다 크면 정규분포의 형태로 본다. Ross(2017)에 의하면 유의수준은 일반적으로 1%, 5%, 10%를 사용한다.

가스 유형 탄화수소 누출량 데이터의 최소값은 0.00023kg, 최대값은 55,000kg으로 데이터 간의 간격이 크기 때문에 정규성을 높이기 위해 데이터를 로그형식으로 변환하였다. 가스형 자료의 최소 로그값은 -3.64, 최대값은 4.74, 평균은 0.7964, 표준편차는 1.1283이다. 가스 유형 누출량 데이터의 KS Test 결과값은 유의확률 0.1391(13.91%)로 유의수준의 값보다 크기 때문에 정규분포 형태를 따른다고 본다. 또한, 로그값을 사용함에 따라 왜도와 첨도도 각각 12.91, 190.08에서 0.20, 1.43으로 감소하였다. Kline(2015)에 의하면 왜도가 절대값 3.0, 첨도가 절대값 8.0을 초과하지 않으면 정규분포로 간주하며, 본 연구의 가스 유형 누출량 데이터의 로그값의 왜도와 첨도는 정규분포에 적합한 결과를 나타내었다.

2.3 누출 빈도와 점화 확률을 통한 폭발 재현주기 산정

정규성 검정된 가스 유형의 누출 데이터를 통하여 누출량에 따른 확률을 산정하여야 한다. 관측 자료의 분포로부터 원 변수들의 확률 분포 특성을 추정하는 밀도 추정 방법은 모수적 방법과 비모수적 방법으로 구분할 수 있다. Cho와 Lee(2017)는 지진 자료를 이용한 비모수적 방법을 이용하여 회귀 주기에 따른 지진 규모와 신뢰도 범위를 분석하였다. 비모수적 밀도 추정 방법은 사전 정보나 지식 없이 순수하게 관측 자료를 이용하여 확률 밀도 함수를 추정할 수 있으며, 가장 간단한 형태는 관측 자료로부터 히스토그램을 구하고 정규화하여 확률밀도함수로 사용하는 것이다. 추가적으로 히스토그램의 bin 크기에 따른 정밀도의 감소가 유발될 수 있음에 따라 kernel 밀도 추정법을 적용한다. kernel 함수를 이용하여 확률 밀도를 추정하는 것을 의미하며, 이를 적용하여 확률 분포를 추정하게 되고 기존 히스토그램 방법의 단점을 해결하는데 도움이 된다.

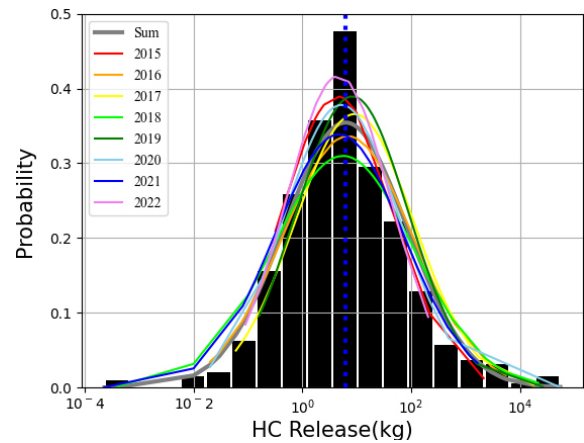


Fig. 2 Histogram and probability density function of annual gas type hydrocarbon release data

본 연구에서는 식 (3)과 같이 gaussian kernel 함수를 이용하여 확률밀도함수와 누적밀도함수를 추정하였다.

$$K(u) = \frac{\exp(-u^2/2)}{\sqrt{2\pi}} \tag{3}$$

여기서, u 는 실수값을 정의한 확률변수를 의미한다.

Fig. 2는 HSE에서 제공하는 2015~2022년 분기별 해양 플랜트 시설물의 탄화수소 누출 보고서 데이터 중 가스 유형의 탄화수소 누출 데이터를 히스토그램과 연도별 확률밀도함수로 나타낸 것이다. 데이터를 구간이 18개인 히스토그램으로 구하였으며, 정규화하여 확률밀도함수와 누적분포함수를 도출하였다.

변수 x 가 100kg이라고 가정하였을 때 탄화수소가 100kg 누출될 확률은 해당 확률, 탄화수소가 100kg과 같거나 적게 누출될 확률을 비초과 확률, 탄화수소가 100kg 보다 많이 누출될 확률을 초과 확률이라고 정의한다. 해당 확률, 초과확률은 각각 식 (4)와 (5)를 통하여 산정할 수 있다.

$$P(X = x) = P_X(x) \tag{4}$$

$$F_X(x) = P(X > x) \tag{5}$$

여기서, P는 확률밀도함수, F는 누적분포함수를 뜻한다. X는 확률변수를 의미하며, $F_X(x)$ 의 변수 범위를 바꾸어 주면 비초과 확률의 산정이 가능하다.

수집된 데이터로부터 Table 2와 같이 0.001kg부터 100,000kg까지의 가스 유형의 누출량에 따른 해당 확률, 비초과 확률, 초과 확률 값을 도출하였으며, 초과확률은 누출 확률을 의미하게 된다.

Table 2 Calculation of release probability from Gas Type Hydrocarbon Release Data

Release Quantity (kg)	Probability	Non-exceedance Probability	Exceedance Probability
0.001	0.120	0.037	100.000
0.005	0.803	0.296	99.700
0.01	1.620	0.648	99.400
0.05	6.240	3.120	96.900
0.1	9.910	5.520	94.500
0.5	22.000	16.500	83.500
1	27.600	24.000	76.000
5	35.300	46.500	53.500
10	34.900	57.200	42.800
50	25.700	78.900	21.100
100	20.000	85.700	14.300
500	8.500	95.400	4.550
1,000	5.220	97.500	2.520
5,000	1.280	99.500	0.496
10,000	0.618	99.800	0.222
50,000	0.087	100.000	0.026
100,000	0.033	100.000	0.009

플랜트 시설물의 누출량에 따른 연간 누출 빈도를 산정하기 위하여 식 (6)과 같이 누출 확률과 플랜트당 추정된 연간 누출 빈도의 곱으로 정의 가능하다.

$$f_r = P_r \times f_l \tag{6}$$

여기서, f_r 은 누출량에 따른 연간 누출 빈도, P_r 은 누출 확률, f_l 은 플랜트당 추정된 연간 누출 빈도를 의미한다.

대표적으로 DNV(Det Norske Veritas) 기관은 플랜트당 연간 누출 빈도를 제시한다. DNV(2013)은 해양 플랜트 시설물의 데이터에 근거하고 있지만 일반적으로 육상 플랜트 시설의 정량적 위험성 평가에서도 해양 플랜트 시설물의 데이터를 사용한다. 일반적으로 해양 플랜트 시설물의 데이터는 대부분의 육상 플랜트 시설물의 데이터보다 더 높은 누출 빈도를 제공하는데 그 이유는 첫째, 염수로 인한 외부 부식과 모래로 인한 내부 침식 등으로 설비의 작동, 절차상의 문제가 생기는 기계적 결함이다. 두 번째로 해양 플랜트 시설물의 데이터는 운영자 및 컨설턴트의 정밀 조사를 위하여 공개되기 때문이다. 세 번째는 해양 플랜트 시설물의 요구사항이 육상 플랜트 시설물보다 복잡하다는 점이다. 이에 따라 해양 플랜트 시설물의 데이터는 최근까지의 누출 사고에 대하여 많은 정보를 포함하는 고품질 데이터로 평가받고 있다.

DNV(2013)는 Table 3과 같이 HSE의 HCRD를 사용한 연간

Table 3 Estimated annual leakage frequency (DNV, 2013)

Data Source	Estimated Annual Leakage Frequency (f_l)
DNV	0.021
Dutch Government	0.006
Belgium Government	0.012

누출 빈도와 네덜란드, 벨기에에서 산정한 플랜트당 연간 누출 빈도를 함께 제시하였다. 3개의 기관에서 제시한 값 중 DNV의 값이 큰 이유는 플랜트당 연간 누출 빈도 산출 과정에서의 설비가 포함되었기 때문이다. 네덜란드와 벨기에에는 설비 시설 중 플랜지 및 밸브를 제외하고 빈도를 산정하기 때문에 작은 값을 보인다. 본 연구에서는 보다 세부적인 정량적 값을 의미하는 DNV의 연간 누출 빈도인 0.021을 적용한다.

모든 가연성 물질의 누출이 직접적인 점화로 이루어지지 않기 때문에 점화 확률을 고려해주어야 한다. 점화 확률은 일반적으로 가연성 가스의 종류, 가연성 가스의 존재 시간, 물질 반응성 등으로 이루어진 함수의 형태이다. 이 때문에 점화 확률은 다양한 형태와 값으로 존재한다. CCPS(2012)의 점화 확률은 0.051이며 He와 Weng(2020)의 점화 확률은 0.228, Badri 등(2011)은 점화 확률을 0.3375로 제시한다. 또한, RR1034(2015)은 누출 속도에 따른 점화 확률을 0.05~0.5의 값을 제시하였다.

산정된 연간 누출 빈도와 누출 확률에 대하여 식 (1)을 통하여 폭발 빈도를 유도할 수 있으며, 폭발 재현주기는 폭발 빈도의 역수 관계로서 도출 가능하다. Table 4와 Fig. 3은 산정된 누출량에 따른 누출 빈도와 Badri 등(2011)가 제시한 0.3375의 점화 확률을 적용할 경우의 폭발 재현주기 도출 형태이다.

3. 폭발 재현주기에 따른 설계폭발하중 모델

폭발 위험도에 대하여 CIA(2010)과 UKOOA(2003)은 목표 재현주기로 각각 10,000년 100,000년에 해당하는 값을 제안하며, 이는 연성 수준 설계의 합리적인 빈도 또는 폭발 손상에 대한 합리적인 추정치라고 평가한다. 본 연구에서 폭발 위험도를 제시할 수 있는 산정된 폭발 재현주기에 대하여 증기운의 부피 및 반경을 고찰하고 설계폭발하중 모델을 개발한다. 설계폭발하중 모델의 개발을 위하여 기준거리를 제시하고 증기운 폭발에 해당하는 폭발하중 산정법으로서 재현주기에 따른 폭발하중 범위를 제안한다.

3.1 재현주기와 증기운 부피 및 반경 관계

폭발 위험도에 대하여 폭발 재현주기-누출량의 관계만으로는 폭발 에너지의 평가 및 누출 범위를 식별하기 어려움에 따라 증기운 부피의 관계를 분석하여야 한다. CPR 14E(2005)에

Table 4 Explosion return period according to release gas type data

Release Quantity (kg)	Release Probability	Estimated Annual Leakage Frequency	Annual Release Frequency	Ignition Probability	Annual Explosion Frequency (/year)	Explosion Return Period (years)
0.1	94.500	0.021 (DNV, 2013)	1.9845	0.3375 (Badri <i>et al.</i> , 2011)	0.00670	149
1	76.000		1.5960		0.00539	186
10	42.800		0.8988		0.00303	330
100	14.300		0.3003		0.00101	987
1,000	2.520		0.0529		0.00018	5,599
10,000	0.222		0.0047		0.00002	63,556

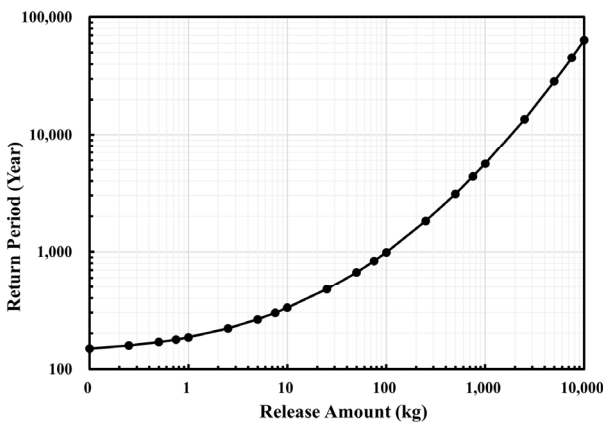


Fig. 3 Relationship between the amount of release and the return period of explosions

따르면 누출 질량에 따른 증기운 부피 산정법은 식 (7)과 같다.

$$V_c = Q_{ex} / (\rho \times c_s) \quad (7)$$

여기서 V_c 는 증기운 부피(m^3)이며 Q_{ex} 는 가연성 질량(kg), c_s 는 화학양론적 농도, ρ 는 물질의 밀도(kg/m^3)를 의미한다.

HSE(2015~2022)에서 제공하는 분기별 해상 탄화수소 누출 보고서의 데이터에는 탄화수소의 종류가 기록되어 있지 않아 증기운 부피 산정에 필요한 누출 연료의 밀도와 화학양론적 공연비를 알 수 없어 증기운 부피 산정을 위한 탄화수소의 일반화가 선행되어야 한다. 탄화수소의 일반화를 위해서 50건의 과거 플랜트 증기운 폭발 사례(Mannan, 2005; Oran *et al.*, 2020; RR1113, 2017) 중 가스 유형의 탄화수소를 가중평균하였다. 50건의 사례를 조사한 결과로 프로판은 38%, 에틸렌은 31%, 부탄은 19%, 수소 8%, 이외의 물질은 4%를 차지하였다. Table 5는 탄화수소에 상위 세 가지를 가중평균한 값이며, 탄화수소가중평균 결과값은 12.413이다.

누출 질량에 따른 체적비의 가중평균을 활용한 증기운의 부피를 산정할 수 있다. 앞선 다양한 연구진이 제시한 점화 확률을 고려하여 폭발 재현주기-증기운 부피를 산정할 경우, Fig. 4와 같이 표현 가능하다. 폭발 재현주기 10,000년과 100,000년에

Table 5 Normalized hydrocarbon by weight average

Hydrocarbon Type	Volume per 1kg (m^3/kg)
Butane	12.450
Propane	12.660
Ethylene	12.119
Weighted Average	12.413

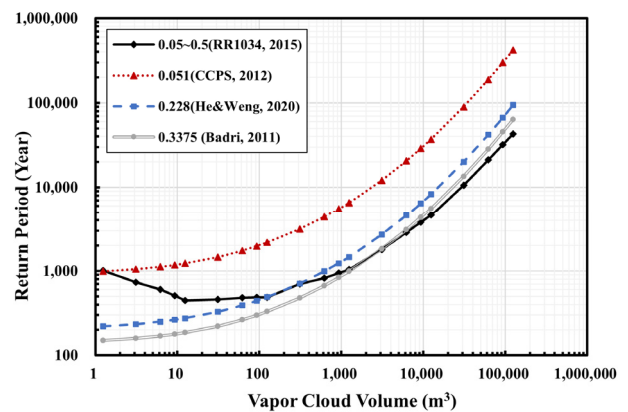


Fig. 4 Relationship between vapor cloud volume and explosion return period according to ignition probability

해당하는 증기운 부피는 각각 약 2,500~30,000 m^3 와 30,000 m^3 이상으로 평가된다.

플랜트 시설물에서 발생 가능한 폭발 위험도에 대하여 증기운의 누출 범위의 식별이 필요함에 따라 반경 또는 반지름을 분석하여야 한다. 또한 증기운 폭발이 발생할 경우, van den Berg(1985)는 증기운 부피내의 폭발하중에 대하여 복잡한 연쇄반응으로 인하여 증기운 반지름 이외 영역은 거리에 따른 폭발압력의 감소가 나타나지만 증기운 반지름 이내의 모든 거리에 대하여 최대값으로 표현하였다. 이에 대하여 특정거리를 기준으로한 설계폭발하중 모델을 개발하기 위하여 증기운의 부피에 따른 반지름을 분석하여 기준거리의 제안이 필요하다.

증기운 부피에 따른 반지름을 유도하기 위하여 Chen 등(2020)은 반구형 구름 형태와 실린더 구름 형태 등으로 이상화가 가능하지만 폭발하중 산정법의 적용을 위하여 반구형 구름으로 표현하는 것이 적절하다고 판단한다. 증기운 부피에 따

른 반구형 증기운의 반지름을 도출할 경우 Fig. 5와 같다. 폭발 재현주기 10,000년과 100,000년에 해당하는 반구형 증기운의 반지름은 각각 약 10~25m와 25m 이상으로 평가된다.

앞선 50건의 실제 증기운 폭발사례에 대하여 각 물질별 공연비의 계산을 통하여 부피를 산정할 수 있다. 산정된 부피를 통하여 반구형 반지름으로 도출한 결과로 평균과 표준편차는 각각 43m, 33.09m를 나타낸다. Fig. 6은 50건의 실제 증기운 폭발 사례를 통한 0~20m, 20~40m, 40~60m, 60~80m, 80~100m, 100~120m, 120~200m 구간에 따른 반구형 증기운의 반지름 비율을 나타낸다.

석유화학 공장의 배치 및 설계를 위한 기준인 KFS 701(2020)은 인화성물질을 포함하는 단위공정으로 부터 최소 이격거리를 대피소, 변전소, 조정실과 관련하여 각각 15m, 30m, 60m를 제시한다. 설계 가이드라인에서 제시하는 최소 이격거리 기준은 증기운 중심에서의 거리를 의미하는 증기운 반지름에 대하여 10,000년과 100,000년에 해당하는 10~25m와 25m 이상인 결과와 유사하다. 또한 실제 플랜트 폭발 사례의 분석을 통한 반지름 결과는 평균 43m로서 최소 이격거리 기준과 유사함을 보인다. 이에 따라서 보수적으로 설계폭발하중 모델을 위한 기준거리는 60m로 제안한다.

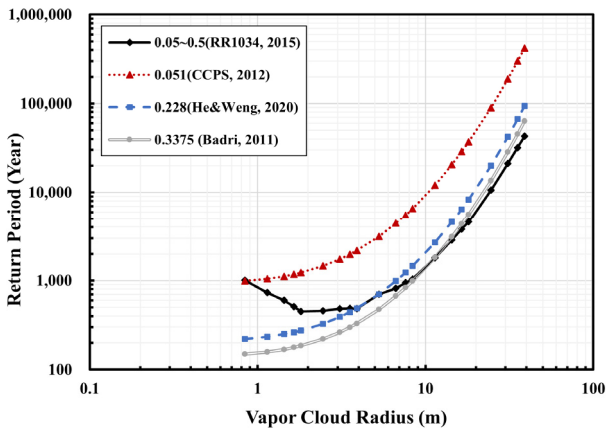


Fig. 5 Relationship between vapor cloud radius and explosion return period according to ignition probability

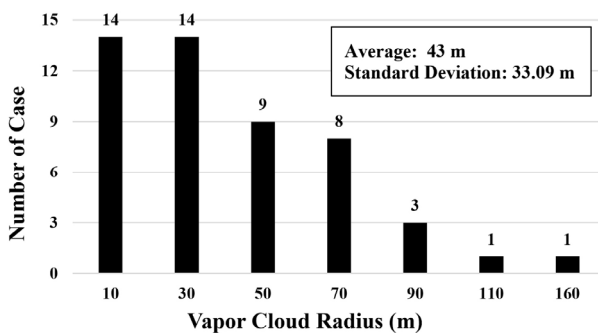


Fig. 6 Radius ratio of hemispherical clouds from past cases

3.2 재현주기와 폭발하중의 관계

폭발 재현주기와 폭발하중의 관계를 통해 설계폭발하중 모델 개발 및 활용이 가능하다. CPR 14E(2005)는 증기운 폭발에 대하여 폭발하중 산정법인 멀티에너지법의 절차를 제시하였다. 증기운 부피에 따른 폭발 에너지를 산정하고 특정 거리에 상응하는 환산거리를 산정한다. 환산거리는 실제 거리와 에너지의 관계로서 도출되며, 이격거리는 앞서 제안한 기준거리인 60m로 산정하였다. 증기운 부피를 통한 폭발 에너지와 환산거리의 산정 절차는 각각 식 (8), (9)와 같다.

$$E = V_c \times \Delta H_c \times \rho \times \beta \approx V_c \times 3.5 (MJ/m^3) \quad (8)$$

$$r' = r \left(\frac{E}{P_a} \right)^{-1/3} \quad (9)$$

식 (8)의 E 는 폭발 에너지(MJ), V_c 는 증기운 부피(m^3), ΔH_c 는 연소열(MJ/kg), ρ 는 가연성 물질의 밀도(kg/m^3), β 는 화학양론적 공연비이다. 식 (9)의 r' 은 환산거리, r 은 이격거리(m), P_a 는 대기 압력($0.1MPa$)을 의미한다.

산정된 환산거리로 van den Berg(1985)가 제시한 멀티에너지법의 특성 곡선에 대입하여 폭발 하중을 산정할 수 있다. 특성 곡선은 환경적 변수 등에 의해 1~10 사이의 폭발강도계수를 채택한다. 폭발 강도 계수 10은 폭발인 충격파 형태를 나타내며, 폭발 강도 계수 1~9는 폭연인 압력과 형태를 나타낸다. Lee와 Kim(2021)은 폭발강도계수 7~8을 제안함에 따라 보수적으로 폭발강도계수 8을 적용한다. 앞선 다양한 연구진이 제시한 점화 확률을 고려하여 폭발 재현주기-폭발 압력을 산정할 경우, Fig. 7과 같다. 폭발 재현주기 10,000년과 100,000년에 해당하는 폭발 압력은 각각 약 30~150kPa과 150kPa 이상으로 평가된다.

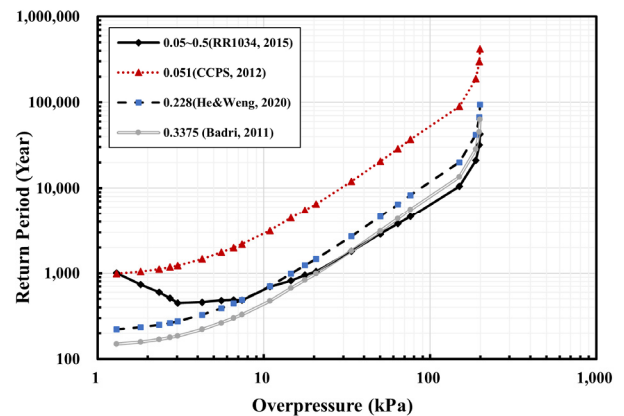


Fig. 7 Relationship between overpressure and explosion return period according to ignition probability

3.3 과거 플랜트 증기운 폭발 사례 및 가이드라인의 비교

앞선 과거 플랜트 증기운 폭발 사례 중 가스 유형의 누출 데이터에 대하여 폭발하중으로 환산이 가능하다. 과거 증기운 폭발 사례에 대한 폭발 압력의 경우 17.1kPa~200kPa 다양한 범위로 나타난다. 주요 손실이 발생한 사고에 대한 기록은 있는 반면, 큰 손실을 초래하지 않은 사고에 대한 정보는 거의 기록되어 있지 않아 실제 증기운 폭발사태에 대하여 200kPa에 근접한 높은 폭발 압력의 분포가 나타나는 것으로 분석된다. 본 연구에서 산정한 폭발 재현주기에 따른 폭발 압력을 비교할 경우 재현주기 1,000년과 100,000년 사이에 분포한다. Fig. 8은 과거 사례의 누출데이터만을 이용한 폭발 압력인 수직 점근선과 함께 Fig. 7에서 제시한 폭발 재현주기에 따른 폭발 압력을 제시하였으며, 목표재현주기 10,000년을 기준점으로 1,000년과 100,000년의 범위를 표현하였다.

내폭 설계 가이드라인인 ASCE(2010)는 구조물의 설계에 대하여 10.35kPa~103.5kPa의 설계 폭발 압력을 제안한다. 이를 산정된 폭발 재현주기로 환산할 경우 약 500년으로 평가된다. 누출 데이터를 통한 확률론적 폭발 위험도인 재현주기에 따른 폭발하중을 과거 증기운 폭발 사례 및 다양한 내폭 가이드라인을 비교하여 설계폭발하중의 재현주기를 제안한다. 국내 내진설계 가이드라인인 KDS 17(2018)은 50년, 100년, 200년, 500년, 1,000년, 2,400년, 4,800년을 적용한다. 이와 유사하게 내폭 설계를 위하여 폭발 재현주기로 최소 고려 폭발인 100년부터 500년, 1,000년, 5,000년, 10,000년, 특수한 경우의 최대 고려 폭발로서 100,000년에 해당하는 설계폭발하중 모델을 산정할 수 있다.

4. 결론

설계폭발하중 모델 분석 및 개발을 위하여 확률론적 재현주기에 따른 증기운 부피 및 반경, 폭발하중에 대한 폭발 위험도

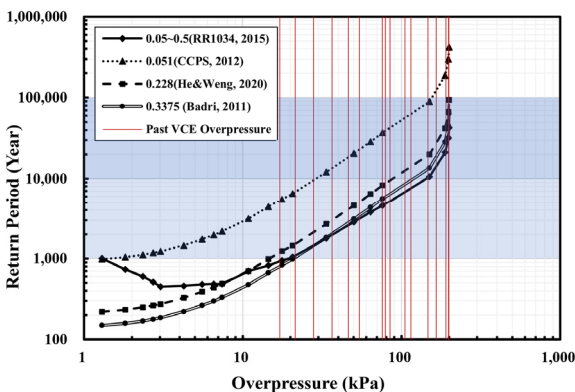


Fig. 8 Relationship between past explosion case and calculated overpressure with return period

를 분석하였다. 확률론적 폭발 위험도 산정을 위하여 HSE에서 제공하는 2015년 4분기부터 2022년 2분기까지 약 6년 동안 수집된 누출 데이터를 사용하였다. 플랜트당 추정된 연간 누출 빈도의 경우 DNV에서 제시한 0.021을 적용하였으며, 점화 확률의 경우 다양한 연구진이 제시한 값을 적용하여 누출량에 따른 폭발 빈도 및 폭발 재현주기를 산정하였다.

설계폭발하중 모델의 기준거리 제안을 위하여 폭발 재현주기에 따른 반구형 증기운의 반지름, 가이드라인에서 제시하는 플랜트의 배치 및 설계를 위한 최소 이격거리 기준, 과거 실제 증기운 폭발 사례의 증기운 부피에 따른 반지름을 검토하여 60m로 제안하였다. 폭발 재현주기에 따른 설계폭발하중의 범위를 산정하여 내폭 설계가이드라인에서 제시한 폭발 압력과 과거 실제 증기운 폭발 사례의 누출량에 따른 폭발 압력을 비교하였다. 이에 따라 폭발 재현주기는 100년, 500년, 1,000년, 5,000년, 10,000년, 100,000년에 해당하는 기준점으로 설계폭발하중 모델의 개발이 가능할 것으로 분석된다.

추후 플랜트 시설물의 다양한 폭발 시나리오를 고려한 QRA의 분석을 통하여 각각의 폭발 재현주기에 따른 설계폭발하중 예측 방법의 정확성을 향상시킬 예정이다. 본 연구의 결과는 확률론적 폭발 위험도 산정과 플랜트 시설물에 대한 성능기반 내폭설계법에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA163162).

References

AIK & KSSC (2022) *Performance-Based Fire Resistance Design Guidelines for Steel Buildings*, Architectural Institute of Korea, Seoul, p.117.

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

ASCE (2019) *Prestandard for Performance-Based Wind Design*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, p.113.

ASCE (2020) *Seismic Evaluation and Design of Petrochemical and Other Industrial Facilities*, American Society of Civil Engineer, Virginia, p.346.

Badri, N., Nourai, F., Rashtchian, D. (2011) Improving Accuracy of Frequency Estimation of Major Vapor Cloud Explosions for Evaluating Control Room Location through Quantitative Risk Assessment, *Chem. Eng. Trans.*, 24, pp.1267~1272.

Bai, Y., Xin, B., Yu, J., Dang, W., Yan, X., Yu, A. (2021) Risk-based Quantitative Method for Determining Blast-resistant

- and Defense Loads of Petrochemical Buildings, *J. Loss Prev. Process Industries*, 70, p.104407.
- CCPS** (2012) *Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases*, Center for Chemical Process Safety, New York, p.219.
- Chen, C., Khakzad, N., Reniers, G.** (2020) Dynamic Vulnerability Assessment of Process Plants with Respect to Vapor Cloud Explosions, *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, 200, p.106934.
- Cho, H.Y., Lee, G.S.** (2017) Confidence Interval Estimation of the Earthquake Magnitude for Seismic Design using the KMA Earthquake Data, *J. Korean Soc. Coast. & Ocean Eng.*, 29(1), pp.62~66.
- CIA** (2010) *Guidance for the Location and Design of Occupied Buildings on Chemical Manufacturing Sites*, Chemical Industries Association, London.
- CPR 14E** (2005) *Methods for the Calculation of Physical Effects*, TNO, Netherlands, p.870.
- DNV** (2013) *Failure Frequency Guidance*, Det Norske Veritas, Norway, p.39.
- He, Z., Weng, W.** (2020) A Dynamic and Simulation-based Method for Quantitative Risk Assessment of the Domino Accident in Chemical Industry, *Process Safety & Env. Prot.*, 144, pp.79~92.
- HSE** (2015~2022) *Quarterly Offshore Hydrocarbon Release Report*, HSE, UK.
- Jeong, S.Y., Alinejad, H., Ahn, B.W., Thomas, H.K.** (2021). Performance-Based Design and Inelastic Wind Design of Tall Buildings, *J. Wind Eng. Inst. Korea*, 25(3), pp.119~128.
- KDS 17** (2018) *Seismic Design General*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- KFS 701** (2020) *Standard on Plant Layout and Spacing for Oil and Petrochemical Plants*, KFPA, Korea.
- Kline, R.B.** (2015) *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*, Guilford Publication, US, p.534.
- 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.
- Mannan, S.** (2005) *Lee's Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, p.3708.
- MARSH** (2020) *100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019*, MARSH Ltd., UK, p.76.
- Mohamed Ali, R.M., Louca, L.A.** (2008) Performance based Design of Blast Resistant Offshore Topsides Part 1: Philosophy, *J. Constr. Steel Res.*, 64, pp.1030~1045.
- Oran, E.S., Chamberlain, G., Pekalski, A.** (2020) Mechanisms and Occurrence of Detonations in Vapor Cloud Explosion, *Prog. Energy & Combust. Sci.*, 77, p.100804.
- PEER** (2017) *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Read, L.K., Vogel, R.M.** (2015) Reliability, Return Periods, and Risk under Nonstationarity, *Water Resour. Res.*, 51(8), pp. 6381~6398.
- Ross, S.M.** (2017) *Introductory Statistics*, Academic Press, US, p.63.
- RR1034** (2015) *Review of the Event Tree Structure and Ignition Probabilities used in HSE's Pipeline Risk Assessment Code MISHAP*, HSE, UK, p.63.
- RR1113** (2017) *Review of Vapour Cloud Explosion Incidents*, HSE, UK, p.321.
- Sun, X.Q., Luo, M.C.** (2014) Fire Risk Assessment for Super High-rise Buildings, *Procedia Eng.*, 71, pp.492~501.
- UKOOA** (2003) *Fire and Explosion Guidance-Part 1: Avoidance and Mitigation of Explosions*, UK Offshore Operators Association Limited, London, UK.
- 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.

요 지

본 논문에서는 확률론적 처리기법을 적용하여 플랜트 시설물의 폭발 재현주기에 따른 폭발 위험도를 분석하였다. HSE에서 제공하는 누출 데이터, DNV에서 제시한 플랜트당 연간 누출 빈도, 다양한 연구진이 제시한 점화 확률을 고려하여 누출량에 따른 폭발 재현주기를 산정하였다. 산정된 폭발 재현주기를 통해 폭발 위험도를 증기운의 부피 및 반경, 폭발하중에 대하여 평가하였다. 재현주기에 따른 증기운의 반경과 과거 실제 증기운 폭발 사례, 내폭설계 가이드라인을 비교 분석하여 설계폭발하중 모델을 위한 기준거리를 제시하였다. 멀티에너지법을 통하여 폭발 재현주기에 따른 폭발하중의 범위를 분석하였으며, 설계폭발하중 모델의 기준이 되는 재현주기를 제안하였다. 본 연구의 결과로 플랜트 시설물에 대한 성능기반 내폭설계의 간략한 표준안으로 활용이 가능하다.

핵심용어 : 확률론적 처리기법, 폭발 재현주기, 폭발 위험도, 폭발하중, 내폭설계