

압력 용기의 폭발로 인한 파편 비산 거리 및 최대 과압에 관한 연구

박미진, 정윤주, 김용하*, 김구희**, 윤인섭*

연세대학교 화공생명공학부, *서울대학교 응용화학부, **서울대학교 화학공정신기술연구소

Fragment Range and Peak Overpressure for Explosion of Pressured Vessel

Mi Jin Park, Yun Ju Jung, Yong Ha Kim*, Ku Hwoi Kim, and En Sup Yoon***

Division of Chemical and Biotechnology, Yonsei University, Seoul, Korea

**School of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea*

***Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul, Korea*

1. 서론

장치산업에 있어서 화재와 함께 가장 중대한 위험은 폭발이다. 폭발은 사업장내만이 아니라 지역사회에도 상당한 재산 및 인명 손실을 초래한다. 폭발사고에 의한 피해는 폭발과 방사열, 지반충격, 그리고 비산물 등에 의해 발생한다. 특히 폭발은 충격파(shockwave), 즉 폭발파(blastwave)를 생성하여 그로 인한 과압으로 장치나 건물 등이 파괴되고 인명 피해까지 발생하게 된다. 또 폭발에 의해 생성된 비산물은 질량과 비산 속도에 따라 먼 거리까지 피해를 줄 수 있다. 본 연구에서는 폭발로 인한 비산물과 최대 과압을 중심으로 총괄적인 폭발의 영향을 예측하였다.

2. 이론

압력 용기가 폭발하면 급격한 압력 상승과 충격파가 발생한다. 충격파의 과압 파형은 급격히 상승하여 최대 과압에 도달한 후 점차 감소해간다. 충격파가 진행하는데 따라 파면의 과압은 저하한다.

압력 용기 폭발의 경우, 폭발 과압에 의한 피해도 크지만 폭발에서 동반되는 비산물의 피해 역시 중요하다. 용기에서 폭발이 일어나면 그 파편이 비산물이 되어 주변 지역에 피해를 주게 된다. 또한 폭발이 유발하는 폭발이 주변의 다른 물체를 비산시키기도 한다. 본 연구에서는 용기 폭발로 발생한 파편의 비산 영향을 다루도록 하겠다.

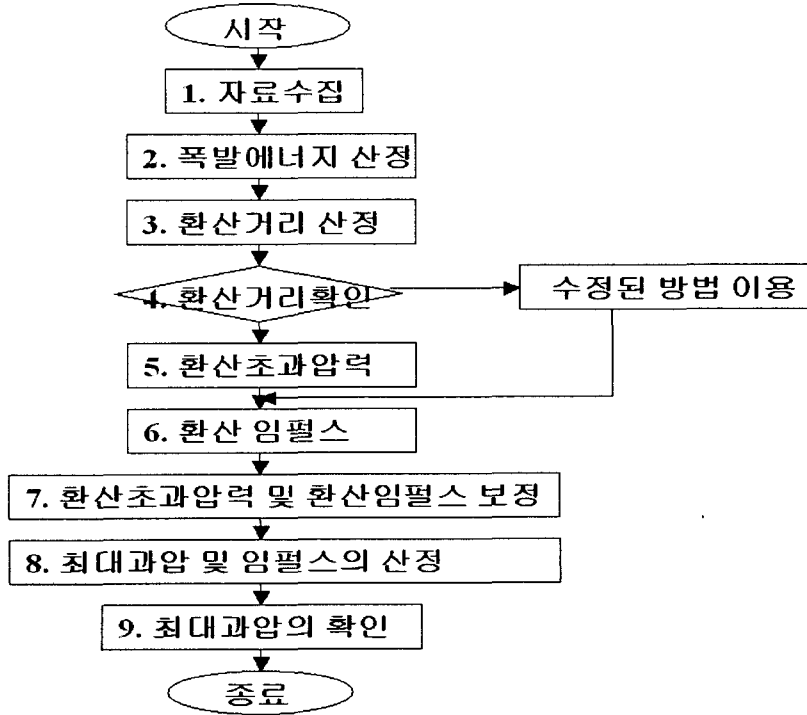


Fig. 1. 폭발파에 의한 피해 예측 흐름도.

2-1. 최대 과압의 산정

피해 예측에 필요한 자료는 압력 용기의 폭발 과압, 대기압, 가스로 채워진 부분의 압력 용기의 체적, 비열계수, 압력용기의 중심으로부터 피해 지점까지의 거리, 그리고 압력 용기의 형태 등이 있다. 압력용기의 형태는 압력 용기가 원통인 경우와 지상보다 높이 설치된 구형인 경우로 나누었는데, 여기서 지면으로부터의 높낮이는 지표면이 폭발에 있어 장애물이 되어 반사압을 형성하기 때문에 고려하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 과정으로 최대 과압을 확인하고, 폭발 지점으로부터 피해거리를 바꾸어 계산하여 폭발 지점으로부터 일정 거리별 최대 압력 및 임펄스를 산정하고 피해 범위를 예측하였다.

2-2. 비산물의 분포 예측

파편의 비산 거리는 비디자인 단계에 적용할 수 있으며 실제 사고가 발생한 지역에서의 비산물에 의한 피해 영역을 설정하는 데 있어 결정적인 역할을 한다. 따라서 최대 비산 거리(비산 반경)와 비산물의 분포를 예측하는 것이 중요하다. 이를 예측하는 데에는 사고 사례를 근거로 한 통계학적 기법과 이론적으로 계산하는 방법론이 있으며 본 연구에서는 이론적인 방법론을 중심으로 모사하였다.

비산 반경과 비산물의 분포를 계산하기 위해서는 파편이 가지는 운동 에너지와 초기 속도, 파편의 수와 질량 등이 먼저 결정되어야 한다. 우선, 파편의 수와 그 질량을 예측해야

하는데 이론적으로 파편의 수를 예측하는 것은 불가능하므로 경우에 따라 경험적으로 추측한다.

파편의 질량은 모든 파편의 질량이 동일하다는 가정 하에 용기의 질량을 M , 파편의 수를 n 이라 할 때, M/n 으로 하는 것이 일반적이었다. 이는 편리하지만 오차의 요인이 된다. Baker(1978)의 통계적 실험결과에 따르면 파편의 질량 분포는 정규분포를 따르고 있다. 그러므로 본 연구에서는 통계적인 방법을 접목하여 파편 질량이 평균 M/n 을 기준으로 정규분포를 이룬다고 가정하여 계산하였다.

폭발이 일어나면서 발생하는 에너지는 파편을 비산시키는 것 외에 폭풍파를 생성하고 용기를 전파시키고, 폭발음을 발생시키기 때문에 실제 파편의 운동 에너지는 전체 에너지의 0.2~0.6배 정도가 된다.

파편에 초기 속도에 관해서는 Moore(1967), Baker(1983) 등이 경험식을 제시하였다. 파편의 수와 질량, 운동 에너지 등이 결정되면 이미 알려진 여러 경험식 중 적절한 것에 적용하여 파편의 초기 속도를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 이 계산값으로써 Baker(1983)가 제시한 그래프를 이용하여 비산 반경을 구하였다. 이때 파편의 질량분포에 따라 비산 반경 분포가 결정되는데, 이로써 폭발 과압에 의한 피해와 관련하여 폭원 중심으로부터 주변 지역의 피해정도를 예측하였다.

또한 비산 반경을 계산하는 과정에서 여러 인자들을 독립적으로 변화시킴으로써 각 인자들이 비산 반경에 미치는 영향을 비교할 수 있었으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 용기폭발압력 1000kPa, 용기체적1m³, 압력용기무게 10kg, 파편단면적 0.01m² 파편무게 0.1kg, 물질무게 10kg를 기준으로 구형용기 형태에서 계산하였으며 기준값에서의 비산 반경은 77.8m이다. Table 2을 보면 파편 단면적과 파편의 무게가 비산 반경에 가장 큰 영향을 주는 인자임을 알 수 있다.

Table 1. 각 영향인자에 대한 비산반경의 상대민감도

비산반경에 대한 영향인자	기준값 대비 변화			
	-10%		+10%	
	비산반경[m]	상대민감도[-]	비산반경[m]	상대민감도[-]
용기폭발압력[kPa]	75.88	0.2468	79.4	0.2057
용기체적[m ³]	76.55	0.1607	78.88	0.1388
압력용기무게[kg]	78.54	0.0951	77.09	0.0913
파편단면적[m ²]	85.06	0.9332	71.71	0.7828
파편무게[kg]	71.09	0.8625	84.34	0.8406
물질무게[kg]	78.24	0.0566	77.37	0.0553

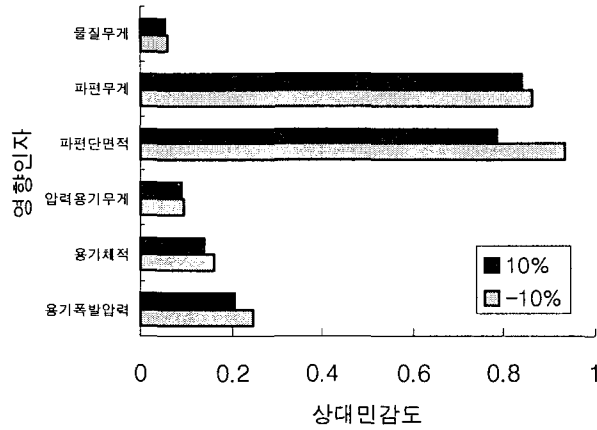


Fig. 2. 각 영향인자에 대한 비산반경의 민감도 도표.

3. 결론

본 연구는 화학 산업에서의 폭발에 의한 피해 중 폭발시 최대 과압과 비산물에 의한 영향을 종합하여 폭원 중심으로부터 거리별 피해 정도를 알아보았다.

본 연구의 결과 폭발시 최대 압력에 의한 영향은 폭원 중심으로부터의 거리에 반비례하는 경향을 보이는 반면, 비산물에 의한 피해는 평균 비산 반경을 중심으로 정규분포를 이루는 형태를 띠는 것을 알 수 있었다. 또한 비산반경의 상대 민감도를 계산한 결과, 비산반경에 가장 큰 영향을 주는 인자는 파편 단면적과 파편의 무게임을 알 수 있었다. 사고 발생시 폭원으로부터의 거리에 따라 폭발 과압과 비산물 분포에 의한 피해영향을 Fig. 3에 나타내었다.

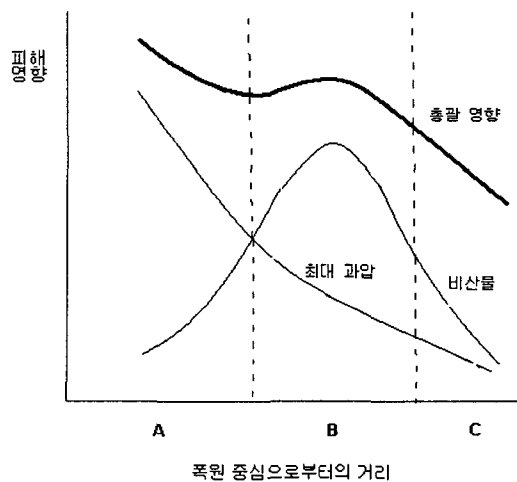


Fig. 3. 폭발 과압 및 비산물에 의한 피해 영향 분포.

일반적인 피해 예측에서는 Fig. 3의 A 지역을 주요 피해 지역으로 설정하나, 본 연구의 결과에서 보듯이 A지역뿐만 아니라 B 지역도 비산물에 의해 상당한 피해가 발생하므로 이 지역 또한 위험성 평가시 고려되어야 할 것이다.

이러한 결과를 폭발에 의한 피해를 최소화하기 위해 공정의 디자인 단계에서 고려하면 그 공정뿐만 아니라 주변 지역의 안전을 확보할 수 있으며, 인적 물적 자원을 절감하는 효과도 가져올 수 있을 것이다. 또한 실제 사고가 발생한 지역에서의 안전대책 수립에도 이 용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업(NRL) 및 교육인적자원부의 Brain Korea 21 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Baker, W. E. et al, Workbook for Estimating the Effects of Accidental Explosions in Propellant Handling Systems, NASA Contractor report no. 3023, (1978).
2. CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, CCPS of the AIChE, (1989).
3. Moore, C. V., "The Design of Barricades for Hazardous Pressure Systems," Nucl Eng Des, 5 (1967).
4. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth & Co, 1986.
5. Baker, W. E., Explosion Hazards and Evaluation, Elsevier Science, (1983).
6. Woodward, J. L., D. E. Ketchum, "Investigation and Modeling of an Explosion in a Propane Absorption Column," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 14 (2001).