

Natech 재난에 의한 석유 화학 산업 다수호기 사고 시 위험성 평가

김희태, 김화평, 정승호[†]
아주대학교 환경안전공학과

A study on risk assessment of multi-vessel accidents in petrochemical industry by natech disaster

Hee-Tae Kim, Whapeoung Kim, Seungho Jung[†]
Environment and Safety Engineering, Ajou University

1. 서론

2011년 리히터 규모 9.0의 지진을 동반한 쓰나미가 발생하여 후쿠시마 제1원자력 발전소에서 국제 원자력 사고 등급(INES) 7등급에 해당하는 대형 원자력 발전소 사고가 발생했다. 1~4호기에 수소폭발, 노심용해 등이 연쇄적으로 일어났고 대량의 방사선 물질이 외부로 방출되었다. 대규모 자연재해 경험도 많고 준비가 잘된 국가 중 하나로 알려진 일본도 비상계획이 제 기능을 하지 못하고 신속하지 못한 조치로 인해 복구되기 힘든 막대한 피해를 입게 되었다. 이러한 Natech 재난은 자연재해 및 기술오류의 복합적인 사고로서 피해규모 및 환경오염이 대형화되는 중대사고로 이어질 수 있다. 한반도 또한 지진이 매해 3차례 이상 발생하고 있고 리히터 규모 5이상(경미한 건물의 피해: 건물 벽 균열)의 지진도 다수 발생하는 등 지진안전지대라고 생각하고 있을 수만은 없다. 이에 한국의 원자력 산업은 토지 여건상 한 개 부지 내 4개호기 이상이 운영되는 국내의 원자력 발전소에 대해 자연재해 등에 의한 다수호기 사고 시나리오 연구 및 다수호기 안전성 평가에 대한 관심이 높아졌고 연구를 진행하고 있다. 다수호기 사고 경험이 거의 없는 원자력 산업의 경험을 보충하기 위하여 화학공정 산업의 다양한 교훈을 분석하여 반영하고자 하는 노력도 하고 있다.

이에 본 연구는 사고 경험도 많으며 공정 특성상 다수의 반응기와 저장소가 집약되어 있는 석유화학산업에 대한 연구를 살펴보았다. 그 중 11기의 탱크들이 집약되어 있는 국내의 한 LPG 저장소의 위험성 평가를 한 선행연구를 바탕으로 하여 Natech 재난에 의해 도미노 효과 사고로 이어지는 Multi-unit failure 시나리오를 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 위험성을 평가하였다.

2. 이론

2-1. 위험성 평가 방법론

지진과 도미노효과를 결합한 위험성 평가 방법론의 제안은 다음의 순서로 진행 되고 방법론의 PGA(Peak Ground Acceleration) 값은 최대지반가속도로서 각 위치에서 지반이 얼마나 강하게 흔들리는지 나타내는 크기로서 지반의 지질학적 특성이 모두 반영되어 있다.

-
1. Risk assessment without considering the seismic event & domino effect
 2. Identification of reference scenarios for a Peak Ground Acceleration(PGA)
 3. Estimation of accident frequency for a given PGA
 4. Frequency calculation for each combination
 5. FN curve compared with calculation consequence for each combination
-

Table 1. flow-chart of the procedure for risk assessment of domino accident by seismic event

2-1-1. 선행 연구 분석

본 연구에서 수행하려는 것이 지진과 도미노를 고려한 LPG 탱크 저장소의 사고 위험성 평가에 있으므로 지진과 도미노를 고려하지 않은 위험성 평가의 결과(FN curve) 값과 어떻게 다른지를 비교하는 것이 중요하다. 따라서 LPG 저장 및 충전시설에 대한 잠재적 위험성을 평가하기 위하여 국내의 한 LPG 저장 기지를 통해 사례연구를 한 “대중의 안전을 위한 중대산업사고의 위험성 평가”라는 논문을 바탕으로 연구를 하였다.



Fig 1. Arrangement of 11 vessels

Tank # (i)	Material	Quantity (tons)	Rupture Frequency /year
1~9	Propane	645	1.00E-6
10	Butane	1,116	1.00E-6
11	Butane	2,232	1.00E-6

Table 2. Storage material & capacity of tank

Phast risk ver.6.7을 통해 기존에 있던 사례연구를 재현하였으며 11개의 LPG 탱크를 인근 구역 전체의 인구수를 8,100으로 가정하고 탱크 1기의 Catastrophic Rupture 사고빈도는 지진으로 인한 사고를 제외하고 10^{-6} /year로 가정하였다.

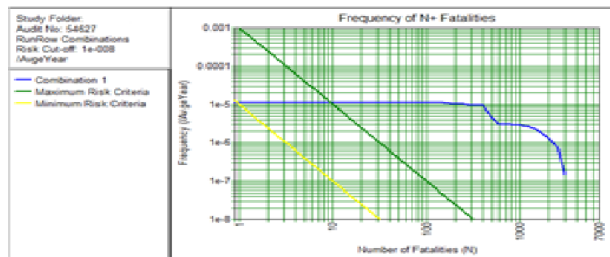


Fig 2. FN curve

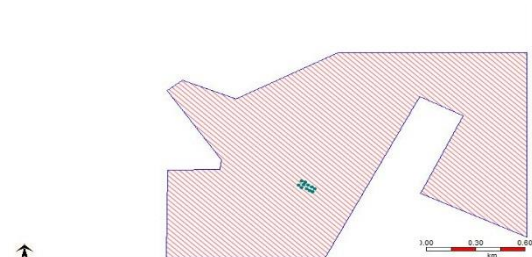


Fig 3. Population Polygon

기존연구에서처럼 prevention 이나 mitigation 과 같은 공정안전 기법들이 적용되지 않은 상태에서는 LPG 단지 주변 인구 8,100중 3,000여 명이 사망할 수 있다. 또한, 11개의 각 용기 당 10^{-6} /year 인 Catastrophic Rupture 사고빈도들이 누적되어 FN curve에서 시작점이 1.1×10^{-5} /year로 표시되었다.

2-1-2. 지진에 의한 용기 손상 계산

PGA 값에 대하여 pressurized storage의 손상 probit은 지진에 의한 각종 용기 파손 빈도를 계산한 Cozzani et al. 논문에서 제시한 표에 있는 식을 인용하였다.

scenario	target	Probit equation	Dose, D
Seismic event	Atmosph. Storage unanch	$Y=-0.833+1.25\ln(D)$	PGA
Seismic event	Atmosph. Storage anched	$Y=-2.43+1.54\ln(D)$	PGA
Seismic event	Pressurized Storage, any	$Y=5.146+0.884\ln(D)$	PGA

Table 3. Probit equation for equipment seismic fragility (Cozzani Valerio 2006)

Dose(PGA) 값을 구하기 위하여 논문 “국내 광역도시 및 일부 지역에 대한 확률론적 지진재해도 분석”의 지역별 지진재해도 곡선을 인용하여 PGA값과 연초과확률AEP(Annual Exceedance Probability)을 바탕으로 압력용기의 파손 백분율을 계산하였다.

2-1-3. 도미노 효과에 의한 압력용기 손상 계산

Phast risk에서 Propane을 5°C Saturated liquid로 입력하여 Catastrophic Rupture를 사고 시나리오로 프로그램을 실행시키면 그 Consequence들은 주로 Propane의 즉시 점화로 인한 30%의 BLEVE, 확산 후 Delayed ignition으로 인한 70%의 Flash fire로 이루어진다. BLEVE로 인하여 발생한 폭발과압 1barg를 기준으로 일반적인 압력용기(LPG vessel)는 99% 이상의 확률로 파손된다고 알려져 있다. 파손 후 다시 BLEVE와 Flash fire로 가는 확률을 3:7로 가정하여 각각의 탱크가 주변의 탱크에 영향을 미쳐 도미노 현상이 일어난다고 가정하였다.

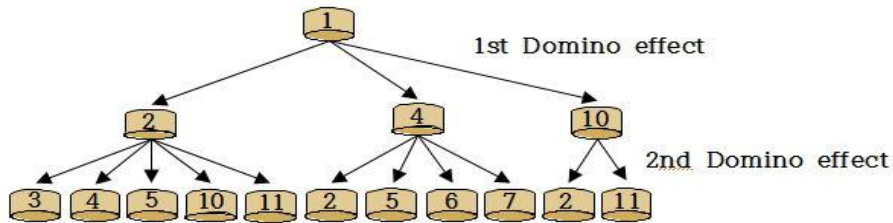


Fig 4. Sequence of domino effect by 1st tank

그림5는 첫 번째 탱크를 시작으로 Propagation 되어 일어나는 Domino effect 사고 경우의 수를 그림으로 표현한 것이다. 같은 방법으로 11기의 탱크 별 경우의 수를 가정해 보았고 30% 확률의 BLEVE로 인접 탱크에 손상을 입힌다는 시나리오를 사용해 빈도들을 총합하여 손상 발생빈도를 구하였다.

3. 결과

지진으로 인한 압력용기 파손 빈도의 누적 공식은 아래와 같다.

$$S = \sum_{i=1}^{11} [\alpha + AEP_k(PC)_i] \quad (1)$$

여기서 S 는 지진으로 인한 압력용기 파손 빈도의 총합이고 α 는 용기의 지진을 제외한 연간 파손빈도 10^{-6} , $AEP_k(PC)_i$ 는 k 지역에서 i 번째 용기에 따라 어느 한 PGA 값에 해당하는 연초과확률(AEP)과 파손되는 percentage conversion의 곱을 뜻한다. 50% 확률로 압력용기의 파손이 일어나는 PGA값이 0.85인 것을 알아내었고 그 AEP는 $5 \times 10^{-7}/\text{year}$ 임을 알 수 있었다. 이를 식(1)에 대입하면 지진으로 인한 압력용기 파손 빈도의 누적된 F 값은 $1.38 \times 10^{-5}/\text{year}$ 로 알 수 있다.

압력용기가 지진에 의해 도미노 사고가 일어나는 경우의 수를 가정하고, 압력용기별 파손 빈도를 누적공식은 아래와 같다.

$$\sum D_i = \sum_{i=1}^{11} \{ \sum_{j=0}^2 (E^j R_{ij}) \times [AEP_k(PC)_i] \} \quad (2)$$

여기서 $\sum D_i$ 는 지진에 의해 도미노 사고가 일어나는 용기 파손 빈도의 누적 총합이고 $AEP_k(PC)_i$ 는 위와 같다. R_{ij} 은 i 호기가 j 번째 도미노 효과에 의해서 파손될 경우의 수이고, E^j 는 j 번째 차수에 도미노 효과에 의해 propagation 될 확률을 지수로 표현한 것인데 도미노 효과에 의해 propagation 될 확률을 구할 때 2차 도미노 효과 이후의 영향은 빈도가 너무 낮아 위험성 평가는 2차 도미노 효과까지로 제한하였다. 각 호기별 지진에 의해 도미노 사고가 일어나는 압력용기의 파손 빈도 D_i 를 도표로 만들어 보았다.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$D_i = \sum_{j=0}^2 (E^j R_{ij}) \times [AEP_k(PC)_i]$	0.72	1.06	0.72	1.03	1.03	0.99	0.99	0.63	0.63	0.68	0.68

table 4. Domino effect frequency of tank due to seismic event (E-06/year)

구해진 빈도들을 Phast risk에 대입하여 LPG 탱크의 손상확률의 세 가지 비교 FN curve를 생성하였다.

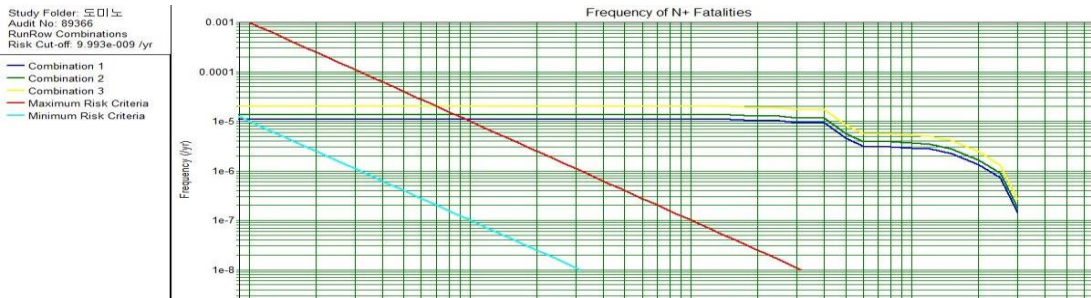


Fig 5. Comparing FN curve

Red line: Maximum Risk Criteria / Sky blue line: Minimum Risk Criteria
Blue line: neither seismic nor domino effect considered
Green line: seismic considered, domino effect not considered
Yellow line: both seismic and domino effect considered

4. 결론

결과값의 특이한 점은 3 경우의 FN curve들이 모두 같은 N값을 나타낸다는 것인데 가장 큰 용량을 가진 용기 (탱크 10, 11)이 파손될 때 가장 큰 사망자를 발생시키고 이는 다른 탱크들의 사고 시 lethality 면적을 거의 포함하기 때문으로 보인다. 실제 다수호기를 보유한 원자력 발전소에서도 각 호기의 거리가 Accident impact, 즉 lethality 영역에 비하여 작으므로 N값에 유의미한 변화는 보기 어려울 것이다. 하지만 다수호기의 존재 시에 어떤 상황으로 escalation이 일어나는지에 따른 빈도의 영향성은 단순히 단일 호기로 표현되는 것보다는 클 것이라고 예상된다. 단 본 연구는 Multi-unit failure의 위험성을 알아보기 위하여 보수적으로 사망자 수가 제시되는 민감한 FN curve들을 표현한 만큼, 가정한 장소와 FN curve의 수치 등은 정확하게 기재하지 않았다.

5. 감사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구개발사업의 연구결과입니다. (NO.1403003)

Reference

1. Antonioni, G., G. Spadoni, and V. Cozzani, *A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events*. Journal of hazardous materials, 2007. **147**(1-2): p. 48-59.
2. 강태희, *대중의 안전을 위한 중대산업사고의 위험성 평가*. 1999, 광운대학교: 서울.
3. 이현미, et al., *국내 광역도시 및 일부 지역에 대한 확률론적 지진재해도 분석*. 지질학회지, 2012. **48**(3): p. 259-273.