B-11

LNG 생산기지 내 저장탱크에 대한 Risk Matrix을 이용한 안전투자비용의 산정

고재선*, 김 효
서울시립대학교 화학공학과

Costing of Safety investments for the storage tanks in LNG receiving terminal using Risk Matrix

Ko Jae-Sun, Kim Hyo
Department of Chemical Engineering University of Seoul

1. 서론

화학공장은 대부분 거대 장치산업이며, 여러 물질들을 고온, 고압상태에서 다루는 경우가 많으므로 안전사고의 위험을 내포하고 있다. 안전사고로 인한 범위는 공정시설의 파괴는 물론 인명의 살상, 더 나아가 환경파괴와 같은 범 지구적인 범위로 확대될 수 있다. 따라서 국내에서도 화학공정에 대한 안전관리에 초점이 강화되고 있으며, OSHA의 조사에 의하면 전체 투자액 중에서 핵 처리 공장의 경우는 30%, 일반 화학공장에서는 5%정도가 안전관리에 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 LNG(Liquefied Natural Gas) 생산기지의 저장시설에서 예상되는 사고의 피해를 Fire and Explosion Index의 도구를 이용하여 포괄적인 위험 정도와 손실지수를 이용한 휴지일수를 산정 하고, 이를 이용하여 회사차원의 합리적인 안전 투자비용 산출하고자 한다. 구체적인 안전투자비용의 산정Matrix는 먼저 사고진행과정에 따른 발생빈도와 사고 피해 정도를 등급으로 나누고, 사고 피해 정도를 인명손실, 환경손실, 비용손실 등 사고피해의 여러 가지 형태를 지수화 한 후 하나의 경제지표로 합산하여 사고처리비용으로 나타내므로서, 최종적으로 위험성을 비용으로 나타낼 수 있는 tool을 마련하고자 한다. 따라서 회사차원의 안전을 위한 투자비용을 결정할 수 있는 방법을 제시하므로서, 사고 시 피해를 최소화 할 수 있는 방법 및 계획을 수립하는데 활용할 수 있고, 전반적인 LNG생산기지의 안전성 향상에 기여 될 것이다.

2. 본론

2.1 Fire and Explosion Index를 이용한 위험성평가 절차 [6][7]

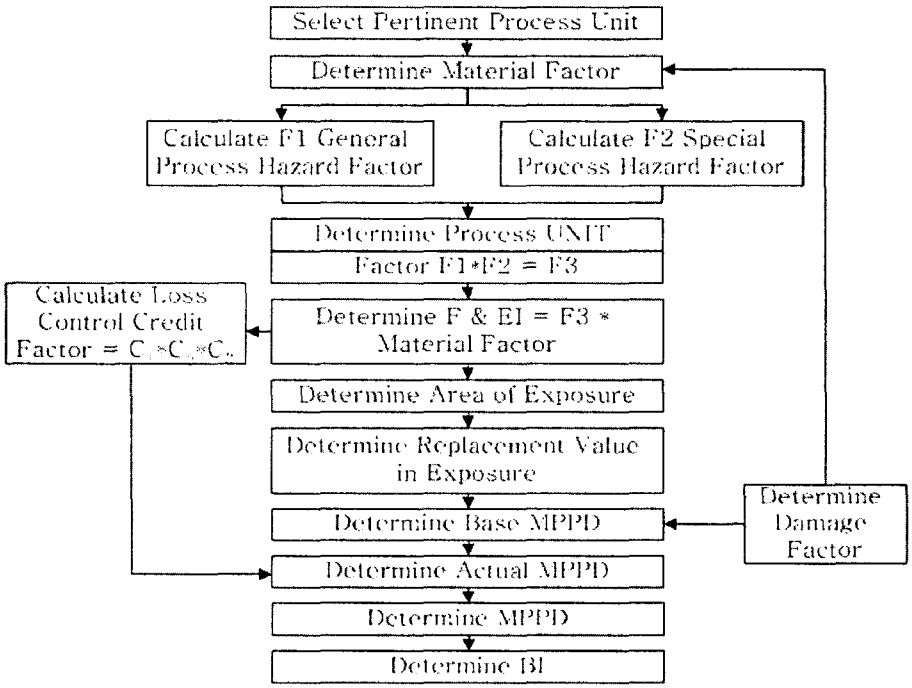

Fig. 1. Procedure for calculating the Fire & Explosion Index.

2.2 LNG생산기지 현황 및 전반적인 공정소개

Table 1. Facilities present of Pyeong-Taeg LNG receiving terminal

구분	하역설비	저장탱크	저압펌프	고압펌프	기화기	송출능력(th)
평택	2	16	22	20	18	2,016

Table 2. General process introduction for LNG receiving terminal

펌핑공정 (Pumping Process)	저장탱크(100,000m^3)의 내부에 설치된 1차 펌프로 시간당 150톤을 저압기화기 및 고압펌프 쪽으로 15kg/cm^2, -160도 조건으로 펌핑.
저압기화공정 (Low Evaporation Process)	해수를 가열하여 저압해수식 기화기(Low Pressure Open Rack Vaporizer)에 공급하여 LNG를 기화시키는 공정으로 저압기화기의 1대당 처리능력은 시간당 90톤으로 3대가 있음.
증발가스압축기 (BOG Compressor)	증발가스압축기는 3대로서 1대가 시간당 처리할 수 있는 능력은 12,000 Nm^{2}이며 토출 측 가스상태는 10kg/cm^2, 50도이다.

2.3 LNG 생산기지 저장탱크에 대한 위험성평가

2.3.1 위험분석

Table 3. Risk analysis by Fire & Explosion Index and loss prevention calibration factors

<table>
<tr><td colspan="6">공정위험(F)</td></tr>
<tr><td colspan="3">일반공정위험(F1)</td><td colspan="3">특수공정위험(F2)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Total Penalty</td><td>F1 = 1.0</td><td colspan="2">Total Penalty</td><td>F2 = 3.9</td></tr>
<tr><td colspan="3">단위공정위험지수(F3)</td><td colspan="3">F3 = F1 × F2 =1.0 × 3.9 = 3.9</td></tr>
<tr><td>A</td><td colspan="2">화재폭발지수</td><td colspan="3">F3(3.9) × <u>MF</u>*(21) = 81.9</td></tr>
<tr><td colspan="2">공정관리(C1)</td><td colspan="2">물질차단(C2)</td><td colspan="2">방화조치(C3)</td></tr>
<tr><td colspan="2">0.8228</td><td colspan="2">0.8561</td><td colspan="2">0.6281</td></tr>
<tr><td colspan="6">손실방지 신뢰계수 = C1 × C2 × C3 = 0.4424</td></tr>
<tr><td rowspan="2">B</td><td colspan="4">노출반경</td><td>21m</td></tr>
<tr><td colspan="4">F & EI × 0.84 × 0.3048</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">C</td><td colspan="5">노출지역의 자산가치</td></tr>
<tr><td colspan="3">구축물</td><td colspan="2">21,229,000 천원</td></tr>
<tr><td colspan="3">설비</td><td colspan="2">858,000 천원</td></tr>
<tr><td colspan="3">합계</td><td colspan="2">22,087,000천원</td></tr>
<tr><td rowspan="2">D</td><td colspan="5">손실지수</td></tr>
<tr><td colspan="4">단위공정위험지수(F3)3.9와 물질계수(MF)21을 이용하여 Fig. 2에서 찾음.</td><td>0.66</td></tr>
<tr><td rowspan="2">E</td><td colspan="5">**<u>기본</u> 예상최대손실계수(MPPD)</td></tr>
<tr><td colspan="4">C (total) × D</td><td>14,577,000천원</td></tr>
<tr><td>F</td><td colspan="4">손실방지 신뢰계수</td><td>0.4424</td></tr>
<tr><td rowspan="2">G</td><td colspan="5">**<u>실제</u> 예상최대손실계수(MPPD)</td></tr>
<tr><td colspan="4">D × G</td><td>6,449,000천원</td></tr>
<tr><td rowspan="4">H</td><td colspan="5">***조업중단일수(MPDO)</td></tr>
<tr><td colspan="4" rowspan="3">실제 MPDO를 이용 Fig 3에서 찾음.</td><td>평균 : 70일</td></tr>
<tr><td>최소 : 40일</td></tr>
<tr><td>최대 : 120일</td></tr>
</table>

*MF : Material Factor
**MPPD : Maximum Probable Property Damage
***MPDO : Maxium Probable Days Outrage

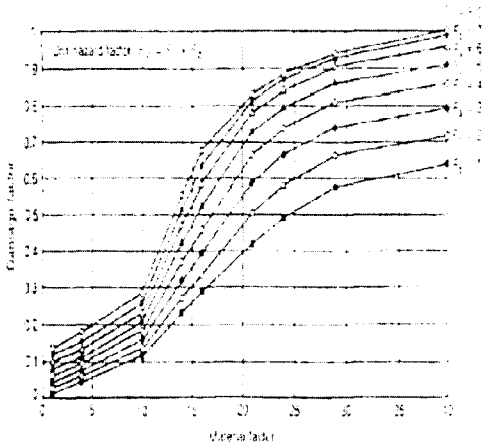

Fig. 2. Dow Fire and Explosion Index: Damage Factor[6]

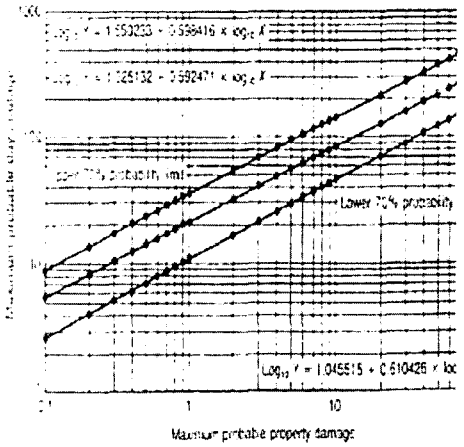

Fig. 3. Dow Fire and Explosion Index: Maximum Probable Days Outage[6]

2.4 Risk Matrix를 이용한 안전투자비용의 산정

공정위험평가에 의해 위험요소들이 분석되었을 때 화사 차원에서는 수용(acceptable)할 만한 위험요소와 투자를 통해 제거해야 하는 위험요소(unacceptable)를 결정해야 한다. 그러나 국내나 국외의 OSHA나 EPA 어떤 규정에도 규정이 명시되어 있지 않다. 이것은 각 회사들이 지향하는 안전목표에 따라 다르게 설정되기 때문이다. 회사가 안전투자에 대한 결정을 하기 위해서는 위험요소들을 제거하는데 필요한 비용을 나타내 주는 자료가 필요하다. 본 논문에서는 사고진행과정에 따른 발생빈도와 피해 정도를 고려하여 이로부터 위험성을 계산하였고, 사고 발생빈도와 피해 정도를 등급으로 나누어 사고 피해 정도를 인명손실, 환경손실, 비용손실, 휴업일수 등 사고피해의 여러 가지 형태를 하나의 경제지표로 합산한 사고처리비용으로 나타냄으로써 최종적으로 위험성을 절대평가한 비용으로 계산하여 회사차원의 안전을 위한 투자비용을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2.4.1 사고발생빈도

사고발생빈도는 잠재적 위험요소의 이탈빈도와 사고가 전개되는 것을 막을 수 있는 가능성(예방)을 기초로 계산하였다. Table 4의 왼쪽은 잠재적 위험요소의 이탈빈도와 사고피해 정도를 등급으로 나누어 나타낸 것이다.

Table 4. Frequencies & severities from potential risk for accidents.

빈도			사고피해정도(심각도), **M : million					
지수 크기	회/년	내용	지수 크기	손실 비용	인적 영향	공공 영향	환경 영향	휴업 일수
+2	10E+2	2회/주	7	$10M	치명적	치명적	광범위 장기간	151-180
+1	10E+1	1회/월	6	$1M	영구 장애	영구 장애	광범위 단기간	121-150
0	1	1회/년	5	$10E+5	중상	중상	국한적 장기간	91-120
-1	10E-1	1회/년 10번 작동	4	$10E+4	작업 휴무	병원 치료	국한적 단기간	61-90
-2	10E-2	1회/년 10^2번 작동	3	$10E+3	병원 치료	허용한계 이상노출	허용한계 이상변화	31-60
-3	10E-3	1회/년 10^3번 작동	2	$10E+2	응급 치료	허용한계 이하노출	허용한계 이하변화	1-30
-4	10E-4	1회/년 10^4번 작동	1	$10	피해 없음	피해 없음	피해 없음	0

*지수크기는 잠재적 위험 요소들을 10의 지수형태로 나타낸 값.

2.4.2 사고피해 정도

사고손실형태와 각 형태에 따른 사고피해영향을 토대로 사고피해 정도를 등급으로 나누었다. 본 논문에서는 화학공정의 특성에 따라 사고 손실형태를 인명손실, 비용손실, 작업중단으로 인한 시간손실, 환경피해, 사회적 영향으로 구분한 일반적인 형태를 Table4의 오른쪽에 제시하였다.

2.4.3 누출사고 시나리오에 대한 사고 손실 및 안전투자비용 산정 식 적용

국내 한국가스안전공사가 보유하고 있는 가스사고사례연감에 제시된 자료를 기초로 가스사고사례 데이터베이스를 구축한 결과 Table 7에서 1992년부터 2001까지의 10년간의 12,196개의 시설물에 대한 누출 사고 수를 집계하였다.

Table 5. The number of gas accidents within domestic chemical facilities.

년	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	합
누출 건수	11	9	24	345	299	219	111	21	13	13	846
업체수	989	1,024	1,046	1,144	1,202	1,251	1,319	1,392	1,420	1,409	12,196

Table 6. Example calculation for safety investment costs from the risk matrix

사고형태	누출	상세내용
인명손실	7등급	사망1, 중상2
비용손실	4등급	$10E+4
환경손실	4등급	국한적/단기간
휴업일수	4등급	평균 70일(표 3)
사고방지가능성	0.44%	손실방지신뢰계수(표 3)

잠재 위험	전체사고 / (전체시설×년수)	
	846/(12,196×10)	10E-2/facilities* year
빈 도	잠재위험 × 사고방지가능성	
	(-2)×(0.44)	-1.66
	10E-2 × 10E+0.44	10E-1.66
심각도	Σ(인명피해+재산피해+환경피해+휴업일수)	
	$(10^7 + 10^2) + 10^4 + 10^4 + 10^4 = 10{,}130{,}000$	7.0056
위 험	빈도 × 심각도 = F(-1.66) × S(7.0056) = 5.3456	
	$10^{5.3456}$	$221,615

3. 결론

본 연구에서는 LNG 생산기지설비 중 저장탱크 설비에 있어서 위험성을 예측하기 위해서 Fire & Explosion Index를 적용한 결과 포괄적인 위험의 정도는 81.9로서 약간 위험한 정도로 나타났으며, 화재로 인해 탱크 군에 미치는 안전거리는 탄화수소군인 LNG탱크의 경우로서 상급화재의 ER = 3.6 W/cm^{2}값을 적용하여 계산한 결과 37.8m 54.6m로서 화재폭발지수를 사용한 결과인 노출반경 21m를 충족하고 있다. 또한 화재폭발지수와 손실보정계수를 이용하여 계산한 평균휴지일수는 70일, 로 나타나 만약 사고가 발생한다면 회사 차원의 엄청난 경제적 손실을 예측할 수 있다. 따라서 위험을 비용으로 나타낸 Risk Matrix에서 계산한 결과 안전투자비용은 대략 2억 8천 8백만원 정도로 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이 향후 이러한 것들은 첫째 기업이나 기타 사회적으로 포괄되는 위험목표와 비교할 수 있고, 둘째 사고의 결과나 발생의 빈도를 감소시킬 수 있는 위험감소 수단으로서, 마지막으로 유해 시설물의 위치 같은 보다 근본적인 설계변수도 모두 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서 각 시설의 옵션에 대한 비용효과가 밝혀지고 위험감소 수단을 고려하면 합리적인 기준이 보장될 수 있다.

참고문헌

1. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1989.
2. National Fire Protection Association, Identification of the Fire Hazards of Materials, NFPA1998.
3. IL, Hirst & D A Carter, A "Worst Case" Methodology for Risk Assessment of MajorInstallations, Paper for CCPS Conference, San Francisco, September. 1999.
4. Donald F. Othmer, "Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosion and Fires", Center for Chemical Process Safety of the American Institute ofEngineers, 1996.
5. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, andCenter for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemicalgineers, New York, 1994.
6. NFPA., "Explosion Prevention Systems", NFPA 69. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1986.
7. Loss prevention in the process industries, Frank P. Lees, 2^{nd}., 1996.