

Improving Applicability of Incident Event and Frequency Analysis for Off-site Risk Assessment and Safety Enhancement in Korea

Sol Lim Kwak^{1#}, Jin Seon Lee¹, Jung Kon Kim¹⁺, Chuntak Phark², Seungho Jung², Ji Sung Ryu¹

¹ National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Dajeon, Korea

² Department of Environmental Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Yeongton-gu, Suwon, Korea

Abstract

Both the Layer of Protection Analysis (LOPA) and the Oil & Gas Producer (OGP) have mainly been used to calculate the incident frequencies in ORA (Off-site Risk Assessment). Because the incident frequencies in OGP are calculated under the assumption of well-equipped safety devices, they are a lot lower than those of LOPA. Furthermore, the definition of incident event is not clear and the incident frequencies of LOPA used in ORA are conservatively evaluated compared to other methods. In order to solve these problems, we investigated the incident frequencies of FRED (Failure Rate of Equipment Data) and TNO Purple book and compared them with the incident frequencies of the current domestic ORA. Following that, we adjusted the incident events in the domestic method using LOPA incident events to reduce the gap with other methods. In addition, because the currently-used IPLs are limited, we suggested ten IPLs (Independent Protection Layers) for current applications and ten IPLs for future applications based on the analysis of CCPS guidelines, FRED, and RIVM manual.

Key words: KORA(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool), ORA(Off-site Risk Analysis), LOPA(Layer of Protection Analysis), IPL(Independent Protection Layers), PFD(Probability of Failure on Demand)

1. 서론

2012년 9월 구미 불화수소 누출사고를 계기로 화학설비의 설계 단계에서 부터 사업장 외부로 미치는 영향을 고려하여 안전한 취급시설의 설치를 유도하고 위험도에 따라 안전성을 확보하는 제도적 장치 마련의 필요성이 제기되었다. 이에 따라 화학물질관리법 시행과 함께 장외영향평가 제도가 도입되었다.(Kim, *et. al.*,

2018). 장외영향평가 제도가 시행되고 5년이 되는 2019년을 기점으로 국내의 모든 유해화학물질 취급 사업장이 장외영향평가를 수행하게 된다. 이와 같은 중요한 전환 시기를 앞둔 현재 시점에서 장외영향평가 제도를 점검하고 미비점을 보완하는 것은 시의적절하다 할 수 있다. 장외영향평가의 위험성 분석에 필요한 사고시나리오 환경부 화학물질안전원 「사고시나리오 선정에 관한 기술지침」을 활용하여 작성되도록 되어있다.

[#] The 1st author: Sol Lim Kwak, Tel. +82-42-605-7069, Fax, +82-43-605-7065, e-mail, safety11@korea.kr

⁺ Corresponding author: Jung Kon Kim, Tel. +82-42-605-7052, e-mail, jungkon@korea.kr

그러나, 위험성 분석 방법에 대한 적합한 분석기법이나 개시사건에 대한 정의가 명확하지 않고, 적용 가능한 완화장치의 종류가 적어 사업장의 상황을 정확히 반영하는 것이 어려운 상황이다. 장외영향평가서는 개시사건의 빈도분석과 완화장치는 기존의 위험도 분석 방법론을 참고하고 일부를 차용하여 적용하고 있다. 참고된 방법론은 다음과 같다.

미국 화공학회(The American Institute of Chemical Engineers, AIChE)의 화학공정안전분과(Center for Chemical Process Safety, CCPS)는 2001년 ‘Layer of protection analysis-simplified process risk assesment’를 발간하면서 LOPA(Layer of Protection Analysis)를 하나의 위험성 평가기법으로 발전시켰다. LOPA 분석기법은 사고위험성을 반정량적으로 평가하기 위한 도구로서, 개시사건(Initiating Event, IE)의 빈도와 사고의 심각도, 그리고 독립방호계층(Independent Protection Layer, IPL)의 실패가능성을 이용하여 사고 시나리오의 위험도를 개략적으로 추정하는 방법이다. LOPA 분석기법은 공정 위험 분석(Process Hazard Analysis, PHA)와 같은 정성적 위험성 평가 방법론을 통해 도출한 정보를 토대로 이루어진다(CCPS, 2010). LOPA는 정량적 위험성 평가를 수행하기 전 해당 위험성평가 실시가 필요한지 여부를 확인하기 위한 선별도구로 사용되지만 한 번에 단일 원인-결과쌍과 단일 사고 시나리오만을 다룰 수 있다는 단점이 있어, 사고의 인과관계가 복잡한 시나리오의 위험성 평가에 다소 부적합하다(ISO, 2009). IPL은 잠재적 사고위험을 확인하는 것에서 시작되고 해당 설비에서 발생 가능한 사고 시나리오와 개시사건 및 빈도를 확인한다. 이때 LOPA의 사고발생빈도는 각 사업장의 예방정비에 따라 매우 달라질 수 있으며, 사업장은 각자의 위험허용기준에 적합하도록 보수적이고 일괄적인 자체 빈도를 적용해야 한다고 명시되어 있다. 하지만, 현재 장외영향평가 제도에서는 각각의 사업장의 안전관리 수준을 개별적으로 고려하는 것이 불가능하기 때문에 개시사건별로 대표 사고발생빈도를 적용하도록 하고

있다. 다음으로 적합한 IPLs을 규명하고 각 IPLs의 PFD(Probability of Failure on Demand)을 산정한다. PFD는 실패확률 또는 감소율이라 불리는 수치로 개시사건 빈도와 결합되어 최종 사고빈도를 결정한다. 추정된 위험도가 허용할 수 있는 수준의 위험도보다 높을 경우, 추가적인 위험도 감소 대책을 수립한 후 위험도의 재산정 및 재평가를 실시하고, 추정된 위험도가 허용할 수 있는 수준 이하의 위험도일 경우 IPL 분석을 끝낸다(CCPS, 2015).

OGP(Oil&Gas Producer)의 사고발생빈도는 HCRD(Hydrocarbon Release Database)에서 차용하였다. HCRD는 영국에서 모든 해상(Offshore) 플랜트들에게 법적으로 누출사고를 보고할 것을 의무화하여 집계된 신뢰성있는 데이터이다. 하지만, 육상(Onshore) 시설에서 해상의 사고빈도를 이용하는 것에 대한 정당성은 해상 위의 작업 환경은 육상보다 부식성 등이 높으며 이는 해당시설에 좀 더 엄격한 설계, 검사 및 유지보수가 실시되므로 육상 시설에도 적용될 수 있다. OGP 위험도 분석기법은 개시사건을 용기, 배관 등 각 장치유형에 따라 총 16가지로 구분하고 설비별 연결배관의 직경과 누출공 크기를 고려하여 개시사건 발생빈도를 결정하는 방법이다. 16가지 이외에 설비 중에서도 흡수탑, 정제타워, 넥아웃드럼, 반응기 등은 공정용기로 간주하여 산정할 수 있으며, 배관 연결부는 플랜지로 간주하여 위험도 분석을 실시한다. 그러나, OGP 안내서에서는 사고발생을 예방하거나 사고영향을 완화할 수 있는 장치들에 대한 설명이 없다. 그 이유는 OGP 방식은 모든 설비가 적절한 안전장치들이 잘 설치되어 있다고 가정하고 사고발생 빈도를 추정하기 때문에, LOPA에서의 IPL과 같은 개념은 찾아볼 수 없다(OGP, 2010). 따라서, OGP 사고발생 빈도를 적용할 수 있는 사업장은 장외영향평가 제도의 취지인 안전성 향상장치를 되도록 많이 설치된 사업장에 한하여 고려되도록 하여야 한다.

FRED(Failure Rate of Equipment Data)는 영국 HSE(Health and Safety Executive)에서 제공하는 위

험성평가를 위한 각종 빈도에 관한 자료이다. FRED은 크게 설비의 실패확률(Failure Rate, FR)과, 낙뢰나 홍수 등 외부사건 발생 빈도(Event Data, ED)와, 인적요소(Human Factors, HF)로 구성되어 있다. 장외영향평가의 관점에서 볼 때, 3종의 FRED 구성요소 중 FR이 가장 의미 있는 데이터라고 판단된다. FR은 다시 상압탱크나 반응기 등 각종 설비(Vessel)의 실패확률과, 밸브나 파이프 등 부수적인 설비(Component)의 실패확률, 그리고 파이프라인의 실패확률로 나뉜다. 여기서 Components는 밸브, 펌프, 입/출하 공정, 플랜지 등의 가스켓 파열의 사고빈도를 나타낸다. 또한, 위험도 분석기법에서는 용기의 종류에 따라 누출상황 빈도를 제시하고 있다. 또한, Components에 관한 고장빈도 중 밸브의 작동실패 빈도에 대해 살펴보면 밸브를 수동밸브, 원격조정밸브, 자동격리밸브, 과류방지밸브 4종류로 분류해 작동실패 빈도를 제시하였다(HSE, 2012).

네덜란드 RIVM (Netherlands National Institute for Public Health and the Environment) 기관의 TNO Purple book의 위험성평가 기법에서는 안전관리 시스템이 예측 범위 안의 모든 고장 및 사고에 대해 충분한 대책이 마련되어 있다고 가정하고 있다. OGP의 위험도 분석기법에서는 각 장비의 세부 규격별로 개시사건 빈도를 제시하고 있다면, TNO Purple book의 위험도 분석기법에서는 압력탱크 및 용기, 상압탱크 및 용기 등 설비 별로 구체적인 개시사건 빈도를 제시하고 있다. 예를 들어, 압력탱크 및 용기의 누출시나리오 빈도는 압력용기, 공정용기, 반응기용기에 따라 즉시 전량누출, 10분 연속누출, 누출공 직경 10 mm에서 연속 누출 형태로 분류하여 각각의 누출사고 빈도를 제시하고 있다. RIVM에서 파이프의 누출시나리오 빈도를 살펴보면 공정배관이나 이송용 배관의 구분 혹은 내부 물질이나 압력의 차이에 대해서 다른 값을 제시하지 않으며, 파이프 라인의 누출시나리오의 빈도는 지상 및 지하배관의 파열에 대한 빈도를 배관의 직경 및 재질에 따라 완전파열과 누출로 구분하여 적용하고 있다

(RIVM, 2009).

현재 장외영향평가에서 적용하고 있는 위험도 분석기법으로는 LOPA와 OGP 방식이 주로 사용되고 있으나, 방식 선택에 대한 기준과 개시사건 및 완화장치의 정의가 명확하지 않고, 사고발생빈도가 상대적으로 낮은 OGP를 적용할 경우 위험도가 대체적으로 낮아지는 경향이 있다(Kim, *et. al.*, 2017). 이러한 이유로 장외영향평가 위험도 분석 방식의 공정성과 객관성을 위해 두 방식의 활용 기준에 대한 객관적인 근거 마련, 개시사건 및 완화장치의 정의, 추가적인 완화장치에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 앞서 언급한 4가지 위험도 평가 방법론 및 근거데이터를 분석하여 장외영향평가 위험성평가의 공정성과 객관성을 확보하는 것을 목표로 하였다. 이를 통해, 현재 장외영향평가에서 적용중인 위험도 분석의 객관적인 근거를 마련하고 사업장 스스로 피해 저감을 위한 안전장치를 합리적으로 설계 및 설치할 수 있도록 하고자 수행하였다.

일반적으로 위험도란 사고영향과 빈도의 결합으로 정의되는데 이번 연구에서는 논란이 되고 있는 사고발생빈도와 안전성 확보방안의 완화장치에 대한 연구를 주목적으로 하였다.

II. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 위험도분석 기법의 합리적인 사고발생빈도를 제시하기 위해 미국 화공학회 내의 화학공정 안전분과인 CCPS에서 발간한 LOPA의 위험도평가 기법, OGP의 사고발생빈도, 네덜란드 RIVM 기관의 TNO Purple book 위험성평가의 빈도, 영국 HSE 기관의 FRED 빈도 기법을 조사하였으며, 현재 장외영향평가 제도에서 적용중인 LOPA를 통한 16가지 개시사건의 객관적 적용성 및 빈도의 합리성 등을 고려하여 다른 위험도 분석기법과 비교연구를 수행하여 개선안을 도출하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 위험성 기법의 비교·분석

〈Table 1〉과 같이 CCPS LOPA 방식의 빈도값은 다른 위험도 평가기법에 비해서 전반적으로 보수적인 빈도를 적용하고 있는 것을 알 수 있으며 특히 플랜지 등 가스켓 파손, 펌프고장, 입·출하시설 누출의 빈도값들이 보다 10배 이상 높은 것으로 확인하였다. 또한, 외부 충격, 냉각수 공급중단, BPCS결함, 조절밸브 고장의 개시사건들은 CCPS(2015)의 LOPA에서만 확인할 수 있는데 이러한 개시사건들은 용기/배관파열의 원인이 될 수 있는 사건들이다. 실제 사고데이터를 사용하는 OGP, TNO Purple book, FRED 위험도 분석기법에서는 이러한 빈도들이 모두 전단의 배관/용기 파열 사고 빈도에 반영되어 있는 것으로 판단된다. 이러한 이유로 CCPS LOPA의 개시사건 빈도의 합이 다른 기법들을 사용한 개시사건 빈도의 합보다 높게 평가되는 주요 원인 일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 CCPS LOPA의 각 개시사건별 다른 위험도 분석 방식들과 차이 나는 부분들을 개선하기 위한 방안을 모색하였다.

고압용기파열 시나리오는 공정고압용기와 고압저장용기를 모두 포함한다. 일반적으로 최대 허용압력이 0.5 barg 보다 높고 암모니아, 염소 등의 액화고압가스를 저장하고 있는 것들을 포함한다. CCPS LOPA 분석기법에서 가정하는 사고발생 빈도는 적절한 기술의 사용 및 예방정비 프로그램이 잘 적용되고 있을 때 $10^{-5}/\text{yr} \sim 10^{-7}/\text{yr}$ 의 빈도 범위를 제시하고 있다(CCPS, 2015). 현재 장외영향평가에서는 공정 중의 고압용기와 고압저장용기를 구분하지 않고 $10^{-6}/\text{yr}$ 을 사용하게 되어 있으나 빈도가 매우 낮아서 위험도 계산에는 큰 영향을 미치지 않게 된다. 배관파열은 설비 자체의 재질 및 제작 결함에 의해 발생하는 사고로, 사고 발생 시 배관 내부 물질이 즉시 고압 방출한다. CCPS(2015)에서는 지상배관과 지하배관의 빈도를 나누어 놓지 않았지만 2015년의 CCPS 가이드라인에서는 지하배관(underground)에 대하여 European Gas Pipeline

Incident Data Group(EGIG, 2011)에서 지난 40년간의 사고빈도를 바탕으로 평균을 낸 결과 $3.5 \times 10^{-7}/(\text{m} \cdot \text{yr})$ 라는 빈도를 제시하였다는 언급이 있다. 이를 100 m 당 사고 발생 빈도로 환산하면 $3.5 \times 10^{-5}/(100 \text{ m} \cdot \text{yr})$ 이 된다. 따라서 현재 장외영향평가에서 이용되고 있는 빈도는 적당한 것으로 판단된다. 배관누출은 사고발생 시 공칭 직径의 10%에 해당하는 유효직径에서 누출이 발생한다. 그러나 CCPS(2015)에서는 플랜지 등의 가스켓 파열의 빈도가 표시되어 있지 않다. 즉, 배관누출에 물리적인 결함으로 인한 플랜지 등의 가스켓 파열을 합친 것이다. RIVM(2006)에서도 플랜지 등의 가스켓 파열을 배관누출에 포함하여 위험성 평가를 하도록 하고 있다. 그러나 CCPS의 빈도는 기계적, 금속적 결함으로 인한 것만 포함을 시킨 것이고 비정상적인 공정 상태에서 용기나 배관의 파열보다 먼저 발생하는 플랜지 등의 가스켓 파열이기 때문에 본 연구에서 제시하는 중복 개시사건(BPCS 결함, 조절밸브 고장)을 삭제할 경우 이를 플랜지 등의 가스켓 파열에 포함하여야 한다. 상압 탱크파열 개시사건은 완전파열(즉시 전량방출 또는 10분 전량누출)과 10 mm 크기의 누출공으로부터 연속적으로 누출하는 시나리오를 모두 포함한 것이다. 그러나 OGP와 RIVM 그리고 FRED에서는 파열과 누출을 각각 분리하여 사고발생빈도를 제시하고 있다. CCPS LOPA(2015)에서 제시하는 상압탱크파열의 사고발생빈도는 $10^{-3}/\text{yr} \sim 10^{-5}/\text{yr}$ 의 범위 빈도이다. 반면 Purple book(RIVM, 2006)에서는 상압탱크의 파열 시나리오에 과충전이나 과압에 의한 오작동으로 야기되는 실패 확률은 포함시키지 않았으며, 그 사고 발생 빈도를 $10^{-3}/\text{yr}$ 로 정하고 있다. 이를 이용할 경우, 입·출하시설 등의 사고 시나리오는 별도의 LOPA 시나리오로 간주하여 평가되어야 한다. 영향평가는 즉시 전량방출로 가이드라인에서 제시되어 있으나 10분 전량방출로 영향평가를 하는 것도 크게 벗어나지 않다고 판단되어 기존의 방식을 그대로 유지하는 것이 합리적이라 판단한다. 플랜지 등의 가스켓 파열은 플랜지 가스켓과 밸브의 패킹 누출을 모두 포함한다. CCPS(2015)에서 배관누출은 기

계적 또는 금속학적 결합으로 플랜지 가스켓 누출을 포함하는 시나리오라고 정의되어 있으나, 현재 장외영향평가에서는 상대적으로 낮은 배관누출 빈도를 적용하고 있으므로 플랜지 가스켓 및 밸브 누출을 별도 시나리오로 정의할 필요가 있다. 다만, 10^{-2} /yr로 되어 있는 빈도를 OGP와 형평성을 맞추기 위해 10^{-3} /yr로 낮춰야 한다. OGP방식에서 플랜지/밸브에서의 누출로 가장 높은 값이 3.5×10^{-4} /yr이고 FRED방식에서도 사고영향이 클 수 있는 5×10^{-6} /yr의 큰 플랜지의 크랙만을 고려하고 있으므로 10^{-3} /yr도 어느 정도 보수적으로 정해진 값이라고 할 수 있다. 터빈 등의 과회전으로 인한 케이싱 파손은 터빈과 디젤 엔진의 과회전으로 인한 고장으로 케이싱이 파손되어 발생하는 누출을 뜻한다. CCPS 가이드라인(2015)의 개시사건에서는 제외되었으며 대신에 pump failure(10^{-1} /yr)가 새롭게 반영되었다. Pump failure는 냉각수공급 손실 등 필요한 역할을 하지 못해서 그 후에 폭발반응이나 플랜지 등의 가스켓 파열 등으로 발전되는 사고에 대한 개시사건이 된다. 따라서 pump failure 개시사건은 최종적인 누출을 다루는 장외영향평가서에 적합하지 않다. 또한 pump seal failure로 대표되는 펌프로부터의 사고발생빈도는 10^{-1} /yr로, 다른 방법론과 비교하였을 때 너무 보수적이다. 이에 pump failure와 pump seal failure의 개시사건을 펌프/컴프레서 누출로 명칭을 바꾸고 1×10^{-3} 으로 빈도를 통합하는 것이 합리적이다. 빈도조정의 근거로는 RIVM(2006)에서 seal이 없는 펌프의 사고 발생 빈도인 5×10^{-5} /yr와 seal이 있는 터빈 등의 사고 발생 빈도인 4.4×10^{-3} /yr의 평균값에 FRED에서 제시하고 있는 casing 파손빈도인 3×10^{-5} /yr, 그리고 단일 seal 펌프의 누출빈도인 5×10^{-4} /yr를 합하여 반올림한 것이다. OGP에서 제시하는 펌프 고장빈도는 연결된 배관 직경 50 ~ 150 mm의 경우 4.8×10^{-3} /yr이고 150 mm를 초과하는 경우 또한 4.8×10^{-3} /yr이다. FRED에서 제시하는 사고빈도는 펌프 casing 실패로 발생하는 누출 빈도의 경우 3×10^{-5} /yr, single seal의 경우 펌프의 누출 빈도의 경우 5×10^{-4} /yr, double seal의 경우

펌프의 누출 빈도는 5×10^{-5} /yr로 CCPS(2016)에서 제시하고 있는 빈도인 10^{-1} /yr보다 매우 낮다. FRED(HSE, 2012)에서의 빈도는 배관파열과 같은 영향을 가지는 경우를 casing 파손으로 인한 누출로 정의하였다. 외부충격은 외부적으로 사고가 발생할 수 있는 개시사건으로 CCPS(2015), RIVM(2006)에서는 외부사건에 대한 사고 개시 빈도를 특정화하지 않았다. FRED에서는 낙뢰에 대해서 별도의 빈도를 정리하였지만 외부화재 사고빈도에 대한 것은 특정하지 않았다(HSE, 2012). 이러한 외부사건들은 설비의 고장에 직접적으로 영향을 주는 사건들이기 때문에 외부사건에 의한 시나리오를 별도로 규정하는 것은 사고 시나리오의 중복산정이 될 수 있다. 따라서 외부충격, 낙뢰와 같은 외부 사건은 개시사건에서 제외하는 것이 합리적이다. 안전밸브 고장은 비정상 작동 및 조기 개방으로 인하여 안전밸브를 통해 기체 성상의 물질이 방출되는 것으로 개시사건의 명칭을 안전밸브 오작동 및 조기개방으로 바꾸는 것이 합리적이다. 이 개시사건의 사고발생빈도는 후처리 장치가 없는 안전밸브의 사고 빈도를 근거로 한다. CCPS LOPA(2015)는 냉각수 공급 중단을 대표 빈도값에서 제외하였다. 냉각 실패는 사고를 방지하기 위해 설치한 냉각수 공급장치의 밸브가 실수로 닫혔거나, 냉각 펌프의 고장, 냉각수 배관의 누출, 전원상실 등의 다양한 이유로 야기된다. 즉, 이는 개시사건이 아닌 독립방호계층의 실패로 판단하는 것이 합리적이다. 그러나 RIVM(2006)에서는 폭발반응이 확실하게 존재하는 반응기 시나리오에 해당 개시사건을 포함시키며, 이 사고 시나리오에서는 냉각수 공급 중단은 IPL의 실패가 아니라 설비의 실패로 판단하는 것이 적합하다. 따라서 냉각수 공급중단으로 폭발반응이 일어날 수 있는 반응이나, 반응기가 있는 사업장에 한해서 이를 개시사건을 반영하여 위험도 분석을 하여야 한다. 입·출하 시설 누출은 호스 파손 및 호스와 연결된 장비에서 누출이 발생하는 것들을 포함한다. CCPS(2015)의 LOPA에서는 입·출하시 호스 파손에 대한 개시사건 빈도가 $1 \sim 10^{-2}$ /yr로 제시되어 있고 현재 장외영향평가에서는 10^{-1} /yr의 빈

도를 이용하고 있다. 그러나 CCPS의 LOPA 빈도는 다른 방법들의 빈도와 비교했을 때 너무 보수적인 것을 확인할 수 있다. OGP(2010)에서는 434-05 Human factors in QRA 항목의 '예시'에서 입·출하 공정의 누출빈도를 4.3×10^{-4} /yr로 제시하였다. Purple book에서는 호스의 완전 파열과 Leak를 구분해 각각 4×10^{-6} /hr와 4×10^{-5} /hr의 빈도를 제시하고 있다(RIVM, 2006). FRED는 호스의 완전파열에 대해 4×10^{-5} /hr ·

operation)의 기준을 제시하고 15 mm 직경의 누출과 5 mm 직경의 누출은 각각 10^{-6} /operation, 1.3×10^{-5} /hr · operation) 으로 나타내고 있다(HSE, 2012). Purple book과 FRED의 완전파열에 대한 빈도를 이용해 사용시간 및 입·출하 횟수별 빈도를 산정하면, 1년에 2,500 시간 즉, 연간 1일 8시간, 연간 300회 이상의 입·출하를 할 경우에 호스의 누출 빈도가 CCPS LOPA(2015)에서 적용하고 있는 10^{-1} /yr로 산정된다.

Table 1. Comparison of incident data in four methods for risk analysis

#	Incident data	Frequency(/yr)									
		LOPA	OGP			RIVM(TNO Purple Book)			FRED		
1	Pressure vessel residual failure (/vessel · yr)	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	7.4×10^{-4}			1.0×10^{-6} ($5.0 \times 10^{-7} + 5.0 \times 10^{-7}$) *Immediately +10minutes entire quantity			4.0×10^{-6} (median)		
2	Piping Rupture failure -100m-Full Breach (/100m · yr)	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	-			1.0×10^{-4} (< 75 mm)	3.0×10^{-5} (75~150 mm)	1.0×10^{-5} (> 150 mm)	1.0×10^{-4} (< 50 mm)	3.0×10^{-5} (50~150 mm)	5.0×10^{-5} (> 150 mm)
3	Piping leak(10% section) -100m (/100m · yr)	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	8.0×10^{-3} (50 mm)	3.8×10^{-3} (150 mm)	3.4×10^{-3} (300 mm)	5.0×10^{-4} (< 75 mm)	2.0×10^{-4} (75~150 mm)	5.0×10^{-5} (> 150 mm)	1.5×10^{-4} (< 50 mm)	3.0×10^{-4} (50~150 mm)	2.0×10^{-4} (> 150 mm)
4	Atmospheric tank failure (/vessel · yr)	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	Liquid spill outside		Rupture	Liquid spill outside		Rupture	Flammable	Non flam	
			2.8×10^{-3}		3.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}		3.0×10^{-6}	1.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}	
5	Gasket/Packing Blowout (/Flange yr) (2")	$10^{-2} \sim 10^{-6}$	Manual valve	Actuated valve	Flange	Included in piping leakage frequenct			5.0×10^{-6}		
			3.2×10^{-5}	3.5×10^{-4}	3.8×10^{-5}						
6	turbine/diesel engine overspeed with casing breach (/yr)	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	Reciprocating		Centrifugal	Leak		Full bore		3.0×10^{-5}	
			4.5×10^{-3}		4.8×10^{-3}	5×10^{-4}		1×10^{-4}			
7	Third-party intervention (external impact by Back-hoe, vehicle, etc) (/yr)	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	-								
8	Lightning strike (/yr)	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	-						Calculate in complex ways		
9	Safety valve opens spuriously (/valve · yr)	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	-			2×10^{-5}			1.0×10^{-2}		
10	Cooling Water failure (/yr)	$1 \sim 10^{-2}$	-			Restrict use only in explosion reators			-		
11	Pump Seal Failure (/pump yr)	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	-			-			3.0×10^{-3}		
12	Unloading/ Loading Hose Failure	$1 \sim 10^{-2}$	-			Leak		Full bore		Full bore	
						3.2×10^{-1} (/yr)		3.2×10^{-2} (/yr)		4.0×10^{-5} (/operation) Work # 25	
13	BPCS Instrument Loop Failure (/yr)	$1 \sim 10^{-2}$	-			-			-		
14	Regulator failure(/yr)	$1 \sim 10^{-1}$	-			-			-		
15	Small external fire (aggregate causes) (/yr)	$1 \sim 10^{-2}$	1.5×10^{-4}			8.8×10^{-4}			-		
16	Large external fire (aggregate causes) (/yr)	$10^{-1} \sim 10^{-2}$									

* This table shows the differences in frequency of incidents between ORA(Off-site Risk Assessment) and other methods.

따라서 입·출하시설의 누출빈도를 10^{-2} /yr으로 조정하는 것이 합리적이다. BPCS 제어 루프 고장은 비정상적인 고온·고압 상황이 컨트롤 되지 않는 경우, 그 결과로 플랜지 가스켓 누출, 배관 누출 더 나아가 배관파손, 용기파손으로 이어질 수 있다. 보편적인 냉각수 손실을 IPL의 작동실패로 정의한 것과 마찬가지로, BPCS 제어 루프 역시 IPL의 작동실패로 간주하는 것이 합리적이다. 또한 플랜지 등의 가스켓 파손, 폭주반응으로 연결될 수 있는 냉각수손까지 모두 개시사건 빈도에서 다루고 있으므로 BPCS 제어루프 실패로 인한 누출시나리오를 제외해야 위험성평가의 중복성을 배제할 수 있다. 조절밸브 고장은 압력 조절 장치가 설계된 압력을 제어하지 못하는 경우에 발생한다. 압력조절기가 열리지 않거나 닫히지 못하거나 적절한 압력으로 제어하지 못하여 발생한다. 본 연구에서 이 개시사건은 플랜지 등의 가스켓 파손, 배관·용기 누출 및 파손 등의 원인이 될 수 있고 중복 적용될 수 있기 때문에 제외하는 것이 합리적으로 보인다. 소규모 외부화재는 현재 장외영향평가에서 크고 작은 사고 발생 빈도를 반영하였으며, 대규모 외부화재는 인화성 물질을 취급하는 사고시나리

오에 해당할 경우 반영하였다. CCPS 2015 가이드라인에서는 공정과 관련이 없는 순수한 용기의 외부화재를 의미하였으므로 소규모와 대규모 외부화재를 통합하여 10^{-2} /yr로 빈도를 조정하였다.

2. 개시사건 빈도의 개선안

4가지 위험도 분석기법을 비교·분석한 결과, 개시사건의 정리 및 개시사건 빈도 수치들이 <Table 2>와 같이 일부분 조정되었다. 플랜지 가스켓/밸브 누출은 RIVM과 HSE를 근거로 1×10^{-3} (/yr)으로 적용하였다. 터빈 등의 과회전으로 인한 케이싱파손은 RIVM과 FRED를 근거로 펌프실 실패와 합쳐져 펌프 파손으로 적용하였다. 안전밸브 고장은 대기로 방출되는 사례가 존재하기 때문에 특정 개시사건에만 적용하고, 냉각수 공급 중단은 폭주반응이 일어날 수 있는 반응이나 반응기에 한정하였다. 입·출하시설 누출 개시사건 빈도는 RIVM, FRED를 근거로 개시사건 빈도를 1×10^{-3} (/yr)으로 적용하였다. 외부충격, 낙뢰, BPCS결함 그리고 조절밸브 고장은 해당 개시사건에 대한 개시사건 빈도를 정의하기 어려우므로 삭제하였다. 외부화재는 화재

Table 2. Present frequencies of incidents in Off-site Risk Assessment and the frequencies suggested in this study

#	Incident event	Frequencies used in ORA (/yr)	Frequencies suggested in this study (/yr)
1	Pressure vessel failure(/yr)	10^{-6}	10^{-6}
2	Piping rupture failure(/100 m · yr)	10^{-5}	10^{-5}
3	Piping leak(/100 m · yr)	10^{-3}	10^{-3}
4	Atmospheric tank failure(/yr)	10^{-3}	10^{-5}
5	Gasket/packing blowout(/yr)	10^{-2}	10^{-3}
6	Turbine/diesel engine overspeed with breach(/yr)	10^{-4}	10^{-3}
7	Third-party intervention	10^{-2}	- ¹⁾
8	Lightning strike	10^{-3}	-
9	Safety valve open spuriously(/yr)	10^{-2}	10^{-2}
10	Cooling water failure	10^{-1}	10^{-1}
11	Pump seal failure	10^{-1}	-
12	Unloading/loading hose failure(/yr)	10^{-1}	10^{-2}
13	BPCS instrumentation loop failure	10^{-1}	-
14	Regulator failure	10^{-1}	-
15	Small external fire(/yr)	10^{-1}	10^{-2}
16	Large external fire	10^{-2}	-

1) “-” shows the deleted incident event.

2) BPCS: Basic Process Control System; ORA: Off-site Risk Assessment.

의 규모를 정의할 수 없으므로, 화재 발생 가능 물질에 한하여 규모에 관계없이 1×10^{-2} (/yr)으로 적용하였다. 또한, 현재 장외영향평가서는 사업장별 유형을 고려하기 어렵기 때문에 단일화된 빈도를 적용하고 있지만 향후에는 RIVM 방식과 같이 지상배관과 지하배관의 구분, 상압탱크파열의 즉시전량방출과 10분 연속방출 등을 나누어 빈도를 적용할 필요가 있다.

3. 사고위험 완화장치 사례분석

사고위험 완화장치 사례분석에서는 CCPS 가이드라인의 장치들을 발췌하여 장외영향평가서에서 적용하기 위한 전제를 제시하였다. FRED와 RIVM 매뉴얼로부터도 적용 가능한 완화장치들을 분석하였다. 현재 LOPA를 통한 위험도 분석 기법에서 적용되고 있는 완화장치는 <Table 3>과 같이 수동적 완화장치 7개와 능동적 완화장치 3개로 분류된다. 하지만, 적용할 수 있는 완화장치가 제한적이기 때문에 사업장 여건을 정확하게 반영하기 어려운 부분이 있다. 예를 들어, 본질적인 안전 설계의 경우는 용어에 대한 정의가 명확하지 않아 적용된 사례가 없으며, BPCS 같은 경우 Human Machine Interface를 통한 모니터링 및 제어를 위한 운영자 인터페이스가 제공되어야 하며, 알람/사건이 기록되고 추세 분석기능이 제공되어야 하고, 생산 데이터 보고서가 생성되어야 하는 등 완화장치로 적용되기 위한 요건이 까다로워 일부 대기업 외 적용 사례가 없는 실정이다.

또한, 방류벽, 통기관, 내화설비, 화염방지그리고 안전밸브 및 파열판 등은 설비의 설치 기준으로 규정되는 경우가 많아 추가적인 완화장치로 인정받기 어려운 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 사업장에서 안전성 향상장치를 합리적으로 선정할 수 있도록 CCPS LOPA와 TNO Purple book, 그리고 HSE-RIVM에서 제시하는 IPL들을 분석하였다. <Table 4>는 분석을 실시한 10 가지 완화장치를 정리한 것이다.

이중 벽 시스템은 제 1격납 건물 주위를 제 2격납 장치로 완전히 둘러싸아 제 1격납 장벽이 파손될 경우 격납 시스템이 완전히 붕괴되는 가능성을 줄이는 장치로 배관 및 탱크누출 시나리오에 적용될 수 있다. LOPA에서 사용되는 일반적인 PFD값은 0.1이며, 이중 벽 용기가 IPL로 적용되기 위한 조건은 누출에 대한 감지 및 대응이 포함되어야 한다. 이중 상압탱크는 액체 수위는 지면높이와 같거나 그 이하여야 하며, 이때 주변토양은 2차 컨테이너로 간주될 수 있다. LOPA에 사용되는 일반적인 PFD값은 0.1이다. 로딩암은 물질 이송 시 사용하는 flexible hose를 로딩암으로 교체하여 입·출하 단계에서 발생하는 누출 사고빈도를 줄일 수 있다. 로딩암은 경질 배관으로 이루어진 관절 파이프 시스템으로 구성되어 외부에 의한 손상 및 마모 발생 가능성이 현저하게 낮아질 수 있으며, LOPA에 사용되는 일반적인 PFD값은 0.01이다. 또한 Purple book의 Full bore

Table 3. The currently used independent protection layers and probability of failure on demand of layer of protection analysis

	IPLs	PFD
Passive	Dike	1×10^{-2}
	Underground drainage system	1×10^{-2}
	Open vent with no valve	1×10^{-2}
	Fire proofing	1×10^{-2}
	Blast wall / bunker	1×10^{-3}
	Inherently safety design	1×10^{-2}
	Flame detonation arrestor	1×10^{-2}
Active	Gas detector and emergency shut-off valve	1×10^{-2}
	Relief valve / rupture disc	1×10^{-2}
	Basic process control system	1×10^{-1}

IPLs: Independent Protection Layers; PFD: Probability of Failure on Demand.

arm의 빈도는 $3 \times 10^{-8}/h$, Full bore hose 빈도는 $4 \times 10^{-6}/h$ 로, 로딩암을 이용했을 때의 사고빈도는 hose를 이용했을 때의 사고빈도보다 0.0075배 만큼 낮게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 비산방지실드는 플랜지에서 화학약품이 누출되었을 경우 조기에 확인 가능하며 비산을 방지할 수 있다. 비산방지실드의 커버 재질은 내약품성으로 산, 알칼리, 자외선 등에 강한 저항력을 가지고 있어야 하며, 물질 누유시 색상의 변화 등으로 확인이 가능하여야 한다. 과류방지밸브가 인정되기 위한 조건으로는 갑작스러운 배관 고장 발생 시 흐름을 중지시키도록 적절하게 설계되고 배치되어야 하며, 파울링 및 부식이 발생하지 않는 구조를 갖춰야 한다. 또한, 진동이 없고 힘이 가해지지 않는 곳에서 올바르게 설치되어야 한다. 안전계기시스템 SIL(Safety Integrity Level)은 운영 환경에서 발생 가능한 무작위적이거나 체계적인 문제에 대한 SIS 루프에 의해 달성된 성과에 대한 성능을 나타낸다. LOPA에 사용되는 일반적인 PFD값은 SIL 1의 경우 0.1, SIL 2의 경우 0.01이다. 다중펌프봉쇄장치는 펌프의 봉쇄부에 유막을 생성하여 유체의 수위나 압력의 변화로 확인한다. 누출 발생으로 수위나 압력이 확인되면 기계적으로 차단시킨다. LOPA에서 사용되는 일반적인 PFD값은 0.1이며, 다중기계식 펌프 봉쇄 시스템에는 적어도 2개의 기계적 봉쇄부를 포함하고 1차 또는 2차 봉쇄부의 고장을 감지하여 표시하는 수단이 필요하다. 과회전 보호장치는 완전

기계식 장비 보호 시스템을 나타내는 것으로, 트립볼트가 중심에서 벗어나 스프링에 의해 고정되어 있는데 제 한 속도를 초과하면 트립볼트에 부하되어 원심력이 스프링의 탄성력보다 높아지게 되고 볼트의 연결이 해제되어 추가적인 힘을 받지 않게 된다. 장외영향평가의 펌프 및 컴프레서 고장에 대한 완화장치로 적용될 수 있으며, LOPA에 사용되는 일반적인 PFD값은 0.1이다. CCPS 가이드라인에서 권고하는 과류방지밸브의 일반적인 PFD 수치는 0.1로, 철저한 분석 및 청결한 시스템으로 파울링이 발생하지 않음을 증명할 수 있는 경우에 한해 PFD를 0.01까지 정의할 수 있다. 입·출하 시설의 완화장치로는 고임목, ACQC, Break away safety system이 있다. 고임목은 입·출하 시 탱크로리의 이동을 예방하기 위한 가장 기본적인 완화장치로 경사 및 급발진으로 인한 차량의 움직임을 제한하여 발생 가능한 시나리오를 방지한다. ACQC는 탱크로리를 이용하여 대량으로 충전 및 하역작업에서 자동청정 Coupler로서 질소 가압을 통해 이송한다. ACQC는 가압된 질소의 압력 변화를 확인할 수 있어 기존 펌프 출하 방식에서 확인 불가능한 미세한 누출을 감지하여 사고를 예방할 수 있다. Break away safety system은 대량충전 및 하역 작업에서 기준 이상의 장력을 받으면 연결부에서 이탈해 호스를 보호하는 동시에 유체의 경로를 차단하여 물질이 누출되는 것을 방지한다. FRED 방식에서는 고임목 외 1가지를 더 추가하는 경우 PFD는 0.1, 고

Table 4. New independent protection layers applicable to Off-site Risk Assessment

	IPLs	PFD	Reference
Passive	Double wall containment system	1×10^{-1}	LOPA ^(CCPS, 2015)
	Inground tank	1×10^{-1}	LOPA
	Loading arm	1×10^{-2}	LOPA
	Scattering prevention shield	1×10^{-1}	This study
Active	Excess flow valve	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-2}$	FRED ^(HSE, 2012)
	Safety instrumented system SIL 1, SIL 2	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-2}$	LOPA
	Multiple mechanical pump seal system	1×10^{-1}	LOPA
	Mechanical overspeed trip on a turbine	1×10^{-1}	LOPA
	Wheel choke + ACQC ⁽²⁾ , Break away safety system	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-2}$	FRED
	Water curtain	1×10^{-1}	This study

IPLs: Independent Protection Layers; ORA: Off-site Risk Assessment; PFD: Probability of Failure on Demand; SIL: Safety Integration Level; ACQC: Automatic Clean Quick Coupler System; FRED: Failure Rate of Equipment Data.

임목 외 2가지 이상 완화장치를 추가하는 경우 PFD는 0.01로 인정해주고 있다. 방호수막 시스템은 화재 발생 시 화염과 연기가 확산되는 것을 방지하는 목적으로 고안된 연기층 확산방지 시스템이다. 방호수막 시스템은 독성가스 누출 시 차단막을 형성하여 물 용해도가 높은 독성가스를 흡수시키거나 저온의 고밀도 가스의 온도를 상승시키는 효과를 일으킬 수 있다. 시스템을 구성하기 위해서는 용수 확보, 가압송수장치, 제어반, 분사노즐, 수동조작장치 등의 구성요소로 이루어진다. 예외적으로 급수성 물질은 물과 반응하여 폭발하므로 해당 물질에 의한 사고시나리오에서는 적용이 제한된다. 방호수막의 PFD는 0.1로 정의한다.

현재 인정되기는 어렵지만 추가적으로 고려해 볼 수 있는 완화장치는 라인을 통한 오버플로우 방지, 기계식 정지 장치, 진공 파괴 밸브, Frangible Roof on Flat-Bottom Tank, 방폭밸브, 유량 제한 오리피스, 파이프 라인 서지 감쇠 용기, Deflector plates, 감압 레귤레이터, 지속점화장치가 있다. 라인을 통한 오버플로우 방지는 물질이 과도하게 충전되어 탱크 또는 용기가 파손되는 것을 방지하기 위해 특정 수위에서 물질이 방출되도록 적절한 크기의 라인을 설치한다. 라인은 이물질이 없는 깨끗한 상태로 막힘 또는 중합현상이 일어나지 않아야 하고, 라인의 수직높이가 용기 또는 탱크의 상단 위보다 높지 않아야 한다. 라인은 과압으로 인한 탱크 손상을 효과적으로 예방할 수 있지만, 입·출하시 발생하는 호스의 절단으로 발생하는 누출사고에 관련해서는 크게 영향을 주지 못한다(CCPS, 2015). 기계식 정지 장치는 설치 시 용접하므로 설치 이후에 위치의 조정이 불가능하다. 영구적인 기계식 정지 장치는 특정 한계를 초과하는 유체의 흐름을 막아서 예상되는 시나리오를 방지한다. 이러한 장치는 무 결성을 보장하기 위해 구성 요소에 대한 지속적인 검사가 수행되어야 한다(CCPS, 2015). 진공 파괴 밸브는 진공에 의한 용기의 붕괴 및 손상을 방지한다. 또한, 시스템의 압력이 떨어졌을 때 발생할 수 있는 역류를 막아서 시스템이 오염되는 것을 방지한다. 단, 진공 차단기는 진공으로 발생되

는 시나리오 이외의 시나리오에서는 유효하지 않다. 발생 가능한 시나리오를 방지하기에 알맞은 크기로 설치되어야 하며 적절하게 유지되어야 한다. 시스템에서 유체가 동결되지 않아야 하며 동결 가능성이 있으면 시스템에 적절한 히트 트레이싱이 설치되고 유지되어야 한다(CCPS, 2015). Frangible Roof on Flat-Bottom Tank는 폭발 발생 시 탱크의 바닥에서 쉘까지의 조인트가 파손되어 탱크의 내용물이 지붕 방향으로 방출되도록 유도한다. 즉, 탱크의 결합이 발생 시 커다란 통기영역을 만들어서 탱크 내용물을 방출하도록 탱크 바닥의 접합부를 보호하며, 비실용적인 커다란 비상환기시스템이 필요할 때 사용된다. 해당 완화장치는 주변 공정장비 및 저장 용기의 손상을 효과적으로 방지하지만 폭발로 발생하는 복사열의 위험을 크게 완화시키지는 못한다(CCPS, 2015). 방폭 밸브는 폭연 시나리오에서 영향거리를 완화 시키지만 폭굉 시나리오에서는 큰 효과가 없다. 검사 빈도는 제조업체의 권장 사항 및 이전 검사 결과를 기반으로 설정하고, 검사는 현장에서 수행되어야 한다. 유량 제한 오리피스는 유체의 흐름으로 발생하는 압력강하가 특정 수치를 초과하면 유체의 흐름을 차단하여 시나리오 발생을 방지한다. 오리피스는 오염, 부식 및 침전물 발생이 일어나지 않아야 하며 상부의 압력과 조건에 관계없이 유속이 초과되는 것을 방지해야 한다(CCPS, 2015). 파이프라인 서지 감쇠 용기는 급격한 흐름 변화로 발생하는 압력의 충격을 방지한다. 서지 발생량이 높아 워터 해머에 의한 탱크 파열 가능성이 존재하는 경우에 효과적인 완화장치로 사용될 수 있다. 서지 감쇠 용기는 시나리오를 방지하기에 알맞은 크기여야 하며, 블래더 블랭킷 가스를 유지시키기 위해서 적절히 가압되어야 한다(CCPS, 2015). Deflector plates는 탱크의 순간적인 파열로 누출된 물질의 너울이 방류벽을 넘는 현상인 월파현상을 방지한다. 너울에 의해 발생하는 수압을 버틸 수 있을 정도로 견고하게 설계되어야 한다(Walton, 2014). 감압 레귤레이터는 압력 편차를 줄여서 고압으로 발생하는 탱크 파손을 방지한다. 감압 레귤레이터는 오염되거나 부식

되지 않은 깨끗한 상태로 운영되어야 하며, 스프링 장력 장치는 적절한 설정 값으로 수동 조정되어야 한다(CCPS, 2015). 지속점화장치는 후속 발화하는 인화성 물질이 축적되어 발생하는 폭발을 방지할 수 있다. 점화 장치는 독립적인 양질의 원료로 작동되어야 하며, 점화장치가 지속되는 것을 독립적인 수단으로 모니터링하여 확인할 수 있어야 한다. 단, 점화장치의 작동이 중지할 때를 대비하여 적절한 대책이 마련되어 있어야 한다(CCPS, 2015).

IV. 결론

본 연구에서는 안전성 확보방안에 대한 다양하고 구체적인 기준을 통해 사업장 스스로 피해저감을 위한 안전장치를 설계·설치할 수 있도록 하고자 수행하였고, 국내 수준에 적합한 보다 합리적인 빈도 및 완화장치를 제안하기 위해 다음과 같은 주요한 결과를 도출하였다.

(1) LOPA와 OGP 방식의 사고발생 빈도를 조사하여 네덜란드와 영국의 위험도 분석기법과 비교하여 개시사건의 정리 및 빈도조정을 하였다. 그 결과, 현재 LOPA에서 적용되고 있는 개시사건 빈도가 전반적으로 높게 제시되어 있음을 확인하고 그에 대한 개선방안을 다음과 제시하였다. 플랜지 및 밸브 누출과 입·출하시설 누출의 빈도조정, 터빈 등의 과회전으로 인한 케이싱 파손 및 펌프 씰 실패를 펌프/컴프레서 고장 누출로 명칭을 바꾸고 통합, 소규모 외부화재와 대규모 외부화재는 외부화재로 통합하고 빈도를 조정하였다. 또한, 일부 개시사건의 경우 적용의 객관성이 결여되거나 동일할 사고에 대하여 중복 적용되는 것을 확인하여 외부 충격, 낙뢰, BPCS 결함, 조절밸브 고장을 개시사건에서 삭제할 것을 제안하였다.

(2) 완화장치 사례분석 결과 과류방지밸브, 안전계기시스템, 다중 펌프봉쇄장치, 과회전 보호장치, 이중벽 용기, 지중용기, 로딩암, 입·출하시설 완화장치(고입목, ACQC, Break away safety system), 비산방지 실드, 방호수막의 완화장치를 새롭게 적용하였다.

본 연구를 통해 안전성 향상장치를 설치 목적에 맞게 설치하여 장외영향평가를 통한 사고예방 효과를 증대시킬 수 있으며, 합리적 빈도조정을 통한 보다 정확한 위험도 분석을 수행할 수 있게 되므로 사업장의 위험도 부여 및 관리의 객관성을 가질 수 있을 것으로 기대한다.

References

- CCPS. 2015. *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection*. New York: AIChE.
- EGIG. 2011. *8th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group*. European Gas Pipeline Incident Data Group.
- HSE. 2012. *Failure Rate and Event Data for use within Land Use Planning Risk Assessment*. Health and Safety Executive.
- Ian Walton. 2014. *Containment Systems for the Prevention of Pollution-Secondary, Tertiary and Other Measures for Industrial and Commercial Premises*. CIRIA.
- ISO. 2009. *Risk Management – Risk Assessment Techniques*. ISO 30101.
- Kim, Jung Kon, Ji Sung Ryu, Taek Won Ryu, Sol Lim Kwak, Hyeong Jun Lim, Woo Soo Choi, Jin Hee Jung, Ji Eun Lee, Dong Yeon Lim, and Jun Heon Yoon. 2018. Suggestions for Increasing Utilization of KORA for Supporting the Off-site Risk Assessment System. *Korea Environment Health Science*. 44(2): 124-132.
- Kim, Kun Ho, Young Woo Chun, Yong Woo Hwang, Ik Mo Lee, and In Ho Kwak. 2017. Establishment of the Appropriate Risk Standard through the Risk Assessment of Accident Scenario. *Korean Society Environment Engineering*. 39(2): 74-81.
- National Institute of Chemical Safety. 2018. Technical Guideline for Selecting the Accident Scenarios. 1-11.
- OGP. 2010. *Risk Assessment Data Directory*. International Association of Oil & Gas Producers.
- RIVM. 2006. *Guideline for Quantitative Risk Assessment*. Netherlands National Institute for Public Health and the Environment.

Korean References Translated from the English

김정곤, 류지성, 류태권, 박솔림, 임형준, 최우수, 정진희, 이지은, 임동현, 윤준현. 2018. 화학사고 장외영향평가 지원 프로그램(KORA)의 활용도 증대를 위한 제언. 한국환경보건학회지. 44(2): 124-132.

김건호, 천영우, 황용우, 이익모, 곽인호. 2017. 사고시나리오별 위험도 산정을 통한 적정 위험도 기준 설정. 39(2): 74-81.
화학물질안전원. 2018. 사고시나리오 선정에 관한 기술지침. 1-11.

Received: Aug. 22, 2018 / Revised: Sep. 17, 2018 / Accepted: Sep. 18, 2018

장외영향평가 안전성 확보방안의 개시사건 및 빈도 분석의 적용성 개선을 위한 연구

국문초록 장외영향평가의 위험도 분석기법에는 LOPA(Layer of Protection Analysis)와 OGP(Oil&Gas Producer)가 적용되고 있으나 OGP 방식은 완화장치가 설치되어 있다고 가정되어 있는 빈도이기 때문에 LOPA 방식보다 낮게 산정되는 경향이 있다. 또한, 현재 장외영향평가에서 적용하고 있는 LOPA의 개시사건의 정의가 명확하지 않고 일부 개시사건은 중복되거나 다른 방법론들에 비교하여 보수적으로 평가된다. 따라서, 본 연구는 위험도 분석 시 객관적인 근거를 마련하기 위하여 OGP의 사고발생 빈도, LOPA 위험도평가 기법, FRED(Failure Rate of Equipment Data) 빈도 기법, TNO Purple book 위험성평가의 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 장외영향평가에 적용되는 LOPA의 개시사건 빈도를 조정하였다. 또한, 현재 장외영향평가에서 적용할 수 있는 완화장치가 제한적이기 때문에 CCPS(Center For Chemical Process Safety) 가이드라인과 FRED, RIVM(Netherlands National Institute for Public Health and the Environment)을 분석하여 적용 가능한 완화장치 10개와 향후 고려해볼 수 있는 완화장치 10개를 제시하였다.

주제어 : 장외영향평가 작성지원 프로그램, 장외영향평가, 위험성평가, 독립방호계층, 완화율

Profiles Sol Lim Kwak : She is a first author, working at the National Institute of Chemical Safety. The major task is chemical accident prevention. The latest paper is “Evaluation of Damage Range Variation Based on Operation System of Chlorine Facility in Water Purification Plant using KORA”. The interested areas are ORA(Off-site Risk Assessment), provision information to the public and so on(safety11@korea.kr).

Jin Seon Lee : She is a second author, working at the National Institute of Chemical Safety. The major task is chemical accident prevention. The interested areas are ORA(Off-site Risk Assessment), survey of health impact and so on(own0211@korea.kr).

Jung Kon Kim : He is a corresponding author. After a doctor’s degree in Seoul National University, he is working at the National Institute of Chemical Safety. The major paper is “Suggestion for Increasing Utilization of KORA for Supporting the Off-site Risk Assessment System”. The interested areas are ORA(Off-site Risk Assessment), provision information to the public and so on(jungkon@korea.kr).

Chuntak Phark : He received his B.A., M.A. from Ajou University, Korea in 2018. He is currently pursuing PhD in environmental engineering from the Ajou University, Korea. His research subject is chemical process safety(phark.c.t@gmail.com).

Seungho Jung : He received his B.A., M.A. from Seoul National University, and Ph.D. from Texas A&M University, United States in 2010. He is a Professor of the Department of Environmental Engineering at Ajou University, in which he has taught since 2014. His interesting subject and area of research is chemical process safety. He has published 16 articles in journal(processsafety@ajou.ac.kr).

Ji Sung Ryu : He received his ph.D in Sungkyunkwan University, he is working at the National Institute of Chemical Safety. The major paper are “A study on the Factors Affecting the Influence Range of Ammonia Leakage by Using KORA Program” and so on. The interested areas are risk assessment, CCPS and so on(jsgood4u@korea.kr).