

[Research Paper]

KORA 프로그램을 활용한 벤젠 누출사고 피해영향범위에 관한 연구

차정민

경북전문대학교 소방안전관리과 교수

A Study on the Range of Damage Effects of Benzene Leakage Accidents using the KORA Program

Jeong-Min Cha

Professor, Dept. of Fire Safety Management, Kyungbuk College

(Received July 8, 2019; Revised July 15, 2019; Accepted July 17, 2019)

요 약

본 연구에서는 위험물안전관리법상 제4류 위험물에 해당하는 벤젠을 대상 물질로 선정하여 항만시설의 하역 과정에서 화재 및 누출사고가 발생하는 경우 가상의 시나리오를 통해 “독성(Toxic)”과 “액면화재(Pool fire)”에 대한 피해 규모를 정량적으로 평가하고자 하였다. 평가방법은 국내 화학물질안전원에서 범용프로그램으로 지원하는 KORA 프로그램을 활용하였으며, 벤젠의 화재 및 누출사고에 대한 피해영향 범위를 예측한 결과 독성으로 인한 피해 범위의 경우 누출공의 크기가 감소함에 따라 “최악의 사고시나리오” 대비 사고 피해영향 범위가 최대 5.11%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 누출시간에 대한 피해영향 범위의 경우 누출시간 5 min 대비 10 min에서 145.12% 증가하였으며 20 min에서는 212.29%로 증가하였다. 또한, 액면화재로 인한 피해의 경우 “최악의 사고시나리오”에서 복사열에 의한 피해영향 범위는 취급시설을 중심으로 반경 228.8 m로 나타났으며, “대안의 사고시나리오”의 경우 복사열에 의한 피해영향 범위는 누출공의 크기가 배관 단면적이 감소함에 따라 “최악의 사고시나리오” 대비 사고 피해영향 범위가 최대 8.26%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Benzene is a class 4 hazardous material according to the Act on the Safety Control of Hazardous Substances. This study qualitatively evaluated the damage size of a “toxic” accident and “pool fire” accidents based on benzene in a virtual scenario of a fire and leakage accident during unloading at a port facility. The KORA program was used as an evaluation method, which is supported as a universal program by the National Institute of Chemical Safety. The range of damage effects of a benzene-induced fire and leakage accident was predicted. In the case of toxic damage range, the accident’s damage effect range for the “worst case scenario” was reduced by up to 5.11% with a decrease in the size of the leakage hole. In the case of the leakage time, the damage effect range increased to 145.12% with a 10 min leakage time compared to that of a 5 min leakage time and went up to 20 min (212.29%) with a 20 min leakage time. In the case of pool-fire-induced damage, the damage effect range by radiant heat in the “worst case scenario” was 228.8 m in radius from the center of the handling facility. In the “alternative scenario,” the damage effect range by radiant heat was reduced by up to 8.26% compared to that in the “worst case scenario” since the size of the leakage hole was decreased by reducing the cross-sectional area of the pipe.

Keywords : Benzene, Port fire, Hazardous materials unloading, Korea off-site risk assessment supporting tool (KORA)

1. 서 론

항만은 선박의 출입, 사람의 승선·하선, 화물의 하역·보관 및 처리, 해양친수활동 등을 위한 시설과 화물의 조립·

가공·포장·제조 등 부가가치 창출을 위한 국가의 기간시설로서⁽¹⁾ 육상운송과 연결기능을 수행하는 중계지로서의 중요한 역할을 하고 있다⁽²⁾. 2018년 한 해 동안 국내에서 취급하는 전체 화물 중 90% 이상이 해운항만을 통해 이루어

† Corresponding Author, E-Mail: jmcha@daum.net. TEL: +82-54-630-5202, FAX: +82-54-630-5233

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

졌으며 이 중 화재 개연성이 높은 원유, 석유, 석유 정제품, 케미컬 등의 화물이 약 22.77%에 해당한다⁽³⁾.

위험물질을 하역하는 과정에서 발생한 사고사례를 조사한 결과 대표적인 원인으로는 고압용기 파열, 배관 파열, 플랜지 파손, 조절 밸브 고장, 화물선 충돌, 송유관 충돌 등으로 나타났으며 이로 인해 화재·폭발 및 위험물이 누출되는 피해가 발생하였다. 국내의 경우 지난 2013년 8월 19일 전남 여수시 여수 국가산업단지 내 중흥부두에서 화학제품 수송선에서 A사 제품 펜테인(Pentane)을 선적한 뒤 로딩암을 제거하고 제품 샘플링 작업을 위해 맨홀 뚜껑을 열어 점검하는 중 화재가 발생했으며, 펜테인(Pentane)을 선박 탱크에 주입하는 과정에서 더운 날씨로 인해 발생한 유증기에 원인 미상의 스파크로 인해 발생한 화재로 추정할 수 있다⁽⁴⁾. 또한, 울산항에서는 지난 2014년 화학물질 운반선 하역설비에서 화물을 선적하는 작업 중 수송관과 연결된 공기흡입밸브가 폭발하는 사고가 발생하였으며, 같은 해 여수에서 원유 부두로 진입하던 싱가포르 국적 초대형 유조선이 원유 부두와 원유 이송 송유관과 충돌하여 송유관 내부에 있던 유류가 해상으로 유출되는 사고가 발생하였다⁽⁵⁾. 이듬해인 2015년에도 케미컬 운반선에서 화물 선적 작업 중 평형수 탱크에서 원인 미상의 폭발이 발생하는 사고가 발생하였으며, 같은 해 울산항 부두에서 화학 케미컬 운반선이 혼산을 적하하던 중 원인을 알 수 없는 폭발사고가 발생하여 화물창고 내에 있던 혼산과 바닷물이 반응하면서 대기 중으로 유독가스를 방출하여 울산항 정박지로 긴급 이동하여 계류하는 사고가 발생하기도 하였다⁽⁶⁾.

국외의 경우 지난 2015년 8월 중국 4대 항구인 텐진 항의 위험물질 저장창고에서 화재진압을 위해 분사한 물로 인해 화재가 오히려 확산 되었으며, 초기대응의 잘못 외에 관리 소홀 및 규정된 이격거리를 준수하지 않아 피해가 주변으로 확산되는 허점이 노출되었다. 이와 같은 사고를 통해 알 수 있듯이 위험물 하역 항만에서 위험 특성상 대규모 화재·폭발이 발생하게 되면 초기진화가 이루어지지 않는 경우 많은 인적·물적 피해를 동반하게 된다. 특히, 선박에서의 화재폭발은 부두에 계류 중인 경우 건물화재와 같이 다른 선박으로 계속 확산되는 대형화재로 일어날 가능성이 높고, 위험물을 적재한 선박일 경우 폭발 위험성이 높으며 연쇄폭발의 원인이 될 위험성도 도사리고 있다⁽⁷⁾. 이러한 위험물 취급시설에 대한 제도적 장치의 불완전으로 인한 해양사고를 사전에 방지하기 위해서는 잠재적으로 대규모 화재·폭발의 위험성이 존재하는 위험물 하역 항만에서의 안전관리가 체계적으로 이루어져야 하지만 현재 국내에서의 법 규정 및 안전설비 기준에 대한 관련 연구가 미흡한 실정이며, 최근 5년간(13~17년) 국내에서 발생한 해양 사고는 연평균 1,882건으로 매년 증가하고 있다⁽⁸⁾. 이와 같은 항만에서의 위험물 하역과정 중 발생하는 사고사례를 조사·분석하여 항만 화재의 특수성에 대해 고찰하고 이를 통해 위험물 하역과정 중 화재·폭발 및 누출사고가 발생하

면 인적, 설비적인 피해가 매우 크기 때문에⁽⁹⁾ 잠재적인 위험요소를 찾아 위험이 얼마나 자주 발생할 수 있고 위험이 발생할 경우 그 피해가 얼마나 클 것인가를 평가하는 것은 사고 예방을 위해 매우 중요한 것이라 사료된다.

본 연구에서는 국내에서 유류 및 액체 화물의 물동량이 가장 많은 울산항을 중심으로 주요 취급화물 중 인화성 액체로서 벤젠을 대상 물질로 하여 누출 및 화재폭발 사고의 위험 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 보통 국내에서 유해화학물질의 누출사고 시 화학사고 시나리오별로 피해영향 범위를 평가해야 하는데, 이때 사용되는 대표적인 Software로는 환경부 산하 화학물질안전원에서 개발한 Korea off-site risk assessment supporting tool (KORA) 프로그램이 있다. KORA 프로그램의 경우 초기에는 염산 등 일부 수용액 물질에 대해 피해 범위를 산정하는 게 불가능하였던 제한점을 보완하고, 확산모델을 통해 영향 범위를 산정할 수 없었던 물질(액상포함)의 영향 범위 산정이 가능한 기능을 추가시킨 버전을 개발하여 활용하도록 범용으로 보급하고 있다. 본 연구에서 활용된 KORA는 화학물질안전원에서 배포한 작성지원 프로그램으로서 범용을 이행하기 위한 사업장 담당자가 쉽게 영향 범위를 산정할 수 있으며 최근 장외영향평가서 작성을 위한 기본 틀로 널리 사용되고 있다⁽¹⁰⁾.

본 연구에서는 이와 같은 KORA 프로그램을 활용하여 위험물안전관리법에서 제4류 위험물(인화성액체)로 분류되는 벤젠을 대상물질로 누출 시 피해영향범위에 대해 알아보려 하였다. 화학물질관리법과 동시에 시행된 장외영향평가 제도의 조속한 안착을 지원하기 위해 개발된 KORA는 지금까지 제출된 장외영향평가서가 모두 이 프로그램을 활용하여 작성되었다는 점을 고려할 때⁽¹¹⁾, 신뢰성 측면에서 그 개발목적에 충족했다고 할 수 있다.

Seo⁽¹²⁾는 화학사고 다수 발생물질로서 질산, 암모니아, 톨루엔을 선정한 후 KORA 프로그램을 활용하여 화학물질 누출사고에 대한 가상의 화학사고 영향 범위를 평가한 바 있으며, Lim 등⁽¹⁰⁾은 KORA 프로그램을 활용하여 암모니아 누출사고의 기여요인에 관한 연구에서 4가지 환경인자로서 지면 굴곡도, 밀폐 여부, 운전온도, 압력, 누출공 크기를 달리하여 영향 범위를 산출한 바 있다. 또한, Kwak 등⁽¹³⁾은 KORA를 활용하여 정수장에서 염소 누출 사고 시 피해를 최소화하는 방안을 연구하였다.

따라서, 본 연구에서도 여러 연구자로부터 검증된 KORA를 활용하여 방호계층분석(Layer of protection analysis-simplified process risk assessment, LOPA)⁽¹⁴⁾에 근거하여 위험물 하역 항만시설에서 있을 수 있는 주요 개시사건을 중심으로 사고 발생 빈도가 비교적 높게 나타나는 배관누출로 시뮬레이션을 진행하였다. 또한, 액체화물의 누출에 따른 Toxic (독성), Pool fire (액면화재)의 사고 피해영향 범위를 측정하고자 하였으며 사고 조건에 따른 피해영향 범위를 비교하고자 “최악의 사고시나리오”와 “대안의 사고시나리오”를 산정한 후 연구를 통해 사고 피해영향 범위를 감소

Table 1. Handling Amount of Each oil Cargo Port

t (R/T)

Port	Crude oil, Petroleum	Petroleum Refined Product	Total	Ratio (%)
Gwangyang	65,749,960	63,918,550	129,668,510	35.06
Ulsan	71,580,588	51,812,547	123,393,135	33.36
Daesan	28,716,764	36,967,907	65,684,671	17.76
Incheon	8,384,983	19,424,417	27,809,400	7.52
Other	1,591,678	21,729,081	23,320,759	6.30
Total	176,023,973	193,852,502	369,876,475	100

시킬 방안을 고찰함으로써 위험물 하역 항만에 대한 안전성 확보를 위한 신뢰성 있는 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 연구배경

국내 수출입화물 전체 중 90% 이상이 해상운송을 통해 수송되며 2018년 한 해 동안 해운항만을 통해 취급되는 화물 중 잠재적으로 화재 개연성이 높을 것으로 예측되는 유류 물량은 석유 정제품(11.93%), 원유(역청유), 석유(10.83%) 등으로 전체대비 약 33.59%를 차지하였으며 이들 유류 물량을 취급하는 주요 항만별 취급량은 Table 1에 나타내었다.

유류 화물을 가장 많이 취급하는 항만은 광양항(35.06%), 울산항(33.36%) 순으로 나타났으며 해양안전심판원 해양사고 현황 통계에 따르면 2013~2017년까지 해양에서 발생한 485건의 화재·폭발사고 중 울산항이 포함된 부산 해양심판원 관할에서의 화재·폭발 사고는 99건으로 이는 국내 전체 항만에서의 화재·폭발사고의 20% 정도에 해당한다. 이는 화재 개연성이 비교적 높은 것으로 분류되는 유류 화물을 많이 취급함에 기인하는 것으로 사료되며, 향후 항만의 주요 취급화물의 위험 특성에 따라 그에 따른 소방 안전확보 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

국내 항만에서 하역되는 화물의 양은 2018년 한 해 동안 약 16억 톤 정도이며 이 중 화재의 개연성이 높은 원유, 석유, 석유 정제품, 케미컬 등이 약 22.77%를 차지하고 있다. 위험물 하역 항만에 재화중량톤수(DWT)가 10만 톤 이상인 “초대형석유탱크” 선박이 접안하는 경우 많은 양의 위험물이 하역되며 유류저장 탱크 및 유류 터미널 등의 고인화성의 취급화물을 저장·취급하는 시설 등이 동반 운영되고 있으며 이들 시설의 특성상 대규모 화재·폭발의 위험성이 잠재되어 있다.

또한, 화물의 특성 및 선박의 접안능력에 따라 항만의 형태는 중력식, 잔고식, 널말뚝식, 돌핀식, 계선부표 등으로 다양하며 항만의 특성상 지리적으로 해안에 위치하며 육상에서 멀리 떨어져 수심이 확보되는 위치인 바다 가운데에 위치하는 경우도 있으므로 화재 등의 사고 발생 시 육상에서의 소방차 등의 소방력 접근이 곤란하여 초기진압에 어려움이 있다. 따라서 대규모 화재·폭발로 확대될 위험성이 내재되어 있다. 또한, 해안에 위치한 항만의 특성상 염분을 포

함한 해풍의 영향으로 설치된 소화 설비의 경우 부식에 취약한 단점이 있기 때문에 유지·관리의 어려움 및 효과적인 소화 성능을 기대하기 어려우며, 화재의 확산속도가 빠르게 증가할 위험성이 있다는 점과 방사하는 소화약제의 경우 유효하게 방사 거리에 도달하지 못하여 화점에 유효하게 방사하기 어렵다는 문제점이 있다⁽¹⁵⁾.

서론에서 살펴본 사고사례에서도 알 수 있듯이 많은 양의 위험물이 하역되는 항만에서 화재·폭발이 발생할 경우 대규모 피해로 이어질 수 있다는 것을 알 수 있다. 이처럼 매우 높은 위험성이 내재되어 있는 위험물 하역 항만에서의 화재·폭발사고의 대부분 원인은 인적 요인으로 발생하는 것 외에도 위험물을 하역하는 선박과 부두의 중간지대에 적절한 소화 설비가 갖추어져 있지 않아 사고가 확대되어 피해가 커지고 있으므로 위험물을 하역하는 과정에서의 하역 시설에 대한 안전성이 확보되어야 할 것으로 사료된다.

3. 연구방법

본 연구에서는 울산항에서 선박을 통해 하역되는 위험물의 누출·화재 등의 사고로 인한 위험성 및 피해 규모를 정량적으로 평가하고자 「화학물질관리법」 「사고시나리오 선정에 관한 기술지침」에 근거하여 “최악의 사고시나리오” 및 “대안의 사고시나리오”를 선정하여 피해영향 범위를 예측·비교하였다.

사고시나리오의 대상 물질은 울산항에서 취급하는 주요 위험물 중 비교적 물동량이 많고 위험성이 높은 액체화물로 벤젠으로 선정하였으며 개시사건으로는 방호계층분석⁽¹⁴⁾에 근거하여 위험물 하역 항만시설에서 발생할 수 있는 주요 개시사건을 중심으로 Table 2와 같이 사고 발생 빈도가 비교적 높게 나타나는 사건 중 “입·출하 시설 누출”(Unloading/Loading Hose Failure)을 선정하였다. Table 2에서 I-12로 분류되는 “입·출하 시설 누출”의 발생 빈도수인 10^{-1} 은 10년에 1회 발생할 수 있는 확률로 환산이 가능하다. 이는 10개의 시설에서는 연간 1회 정도 사고가 발생할 수 있다는 의미로 볼 수 있으며, 본 연구에서는 울산의 기상 조건 등을 고려하여 누출조건에 따른 피해영향 범위를 환경부에서 개발한 KORA 프로그램을 통해 예측하고자 하였다.

KORA 프로그램은 기본 평가정보로부터 사고시나리오

Table 2. Results of Frequency for Alternative Scenario⁽¹⁴⁾

Division	Initiating Event (IE)	Frequency
I-1	Pressure Vessel Failure	1×10^{-6}
I-2	Piping Rupture/100 m	1×10^{-5}
I-3	Piping Leak/100 m	1×10^{-3}
I-4	Atmosphere Tank Failure	1×10^{-3}
I-5	Gasket/Packing Blowout	1×10^{-2}
I-6	Turbine/Diesel Engine Overspeed with Casing Breach	1×10^{-4}
I-7	Third-Party Intervention (External Impact by Back-hoe, Vehicle, Etc)	1×10^{-2}
I-8	Lightning Strike	1×10^{-3}
I-9	Safety valve open Failure	1×10^{-2}
I-10	Cooling Water Failure	1×10^{-1}
I-11	Pump Seal Failure	1×10^{-1}
I-12	Unloading/Loading Hose Failure	1×10^{-1}
I-13	BPCS Instrument Loop Failure	1×10^{-1}
I-14	Regulator Failure	1×10^{-1}
I-15	Small External Fire	1×10^{-1}
I-16	Large External Fire	1×10^{-2}

를 도출하여 최악의 사고시나리오와 대안의 사고시나리오를 구성하여 주변 지역에 대한 영향평가를 통해 안정성을 확보하고자 하는 시뮬레이션 프로그램으로 많이 활용되고 있으므로 이를 최대한 활용하고자 하였다. KORA 프로그램에서 제시하고 있는 최악의 사고시나리오의 경우 유해화학물질의 최대량이 저장 용기 또는 배관 등에서 화재 폭발 및 유출누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향 범위를 의미하며, 대안의 사고시나리오는 최악의 사고 시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 경우의 시나리오로 한정하고 있다.

기상조건은 “최악의 사고시나리오”의 경우 「화학물질안전원」 「사고시나리오 선정에 관한 기술지침」에 따라 풍속은 초당 1.5 m로 하였으며 대기안정도는 “A: 매우 불안정함, B: 불안정함, C: 약간 불안정함, D: 중립, E: 약간 안정함, F: 매우 안정함” 중 “매우 안정함”인 “F”로 하였다. 또한, 대기 온도는 25 °C로 하였으며 대기습도는 50%를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

“대안의 사고시나리오”의 경우 「기상청」 “국가기후데이터센터” 데이터를 통해 울산 기상정보의 1년 평균값으로 북동풍의 풍향에서 초당 풍속은 2.2 m로 하였으며 대기안정도는 “중립”인 “D”로 하였다. 또한, 대기 온도는 15 °C로 하였으며 대기습도는 64%를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

누출공 크기에 따른 누출조건은 “최악의 사고시나리오”의 경우 총 저장량이 모두 누출되는 것으로 가정하였으며 “대안의 사고시나리오”의 경우 누출공의 크기를 단면적의

100%, 66%, 20%인 6 in, 4 in, 1.2 in로 가정하여 20 min 동안 누출되는 양으로 가정하였다. 이는 API-581(미국 석유화학협회의 위험기반 검사기준)에 근거한 누출량으로 하역설비 배관의 경우 일반적으로 누출에 대해 육안으로 감지하여 수동으로 차단하는 Class를 기준으로 누출량을 20 min으로 가정하여 누출공에 따른 피해영향 범위를 비교·분석하고자 하였다.

또한, 누출시간에 따른 독성 피해영향 범위를 비교·분석하고자 API-581 code에서 누출량 기준으로 제시되는 누출되는 위험물의 감지, 차단형태에 따라서 누출공 4 in를 기준으로 Table 4와 같이 누출시간에 따른 시뮬레이션을 진행하였다.

“독성(Toxic)”, “액면화재(Pool fire)”에 대한 사고 피해영향 범위를 측정하였으며 시뮬레이션에 사용된 벤젠의 물질 정보는 MSDS에서 제시하는 정보를 사용하였다. 설비조건은 운전압력 0.3 MPa, 용기형태는 수직실린더, 저장량은 200 t, 저장상태는 액상으로 진행하였으며, 누출조건은 다음 Table 3, 4와 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1 누출공의 크기에 따른 벤젠의 독성 피해영향 범위

KORA 프로그램을 활용하여 울산항만시설에서 벤젠 누출에 따른 독성 위험성을 예측하고자 “최악의 사고시나리오”와 누출공 크기에 따른 사고 피해영향 범위를 비교하기 위하여 “대안의 사고시나리오”로 시뮬레이션을 진행하였다. 벤젠의 독성 피해 영향 범위에 대한 비교 데이터는 다

Table 3. Leakage Condition According to the Size of Leakage Hole

Category	Worst-case Scenario	Alternative Scenario I	Alternative Scenario II	Alternative Scenario III
Leakage Type	Worst Leakage	Pipe Leakage (100%)	Pipe Leakage (66%)	Pipe Leakage (20%)
Leakage Hole (inch)	-	6	4	1.2
Leakage Time (s)	600	1,200	1,200	1,200
Leakage Rate (kg/s)	333.3	108.5	40.4	1.9
Total Leakage (kg)	200,000	130,226.8	48,475.0	2,287.1

Table 4. Leakage Condition According to Leakage Time

Category	Alternative Scenario IV	Alternative Scenario V	Alternative Scenario II
Leakage Type	Pipe Leakage (66%)	Pipe Leakage (66%)	Pipe Leakage (66%)
Leakage Hole (inch)	4	4	4
Leakage Time (s)	300	600	1200
Leakage Rate (kg/s)	40.4	40.4	40.4
Total Leakage (kg)	12,118.7	24,237.5	48,475.0

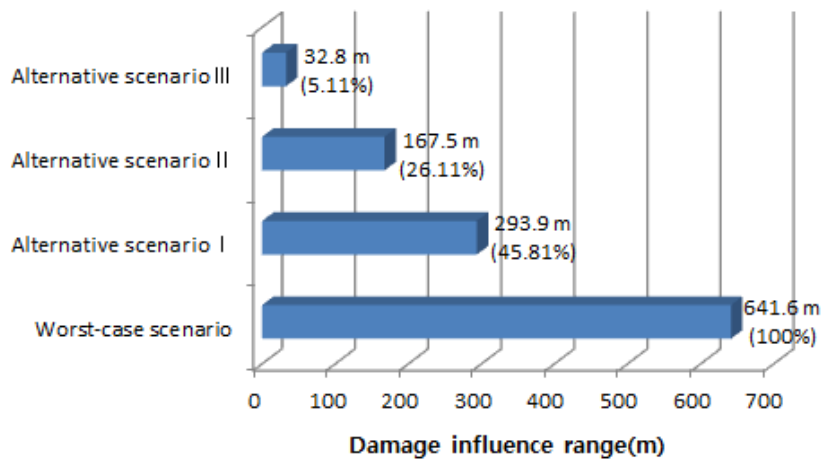


Figure 1. Comparison of the influence range of the toxicity damage of benzene.

음 Figure 1과 같으며, 최악의 시나리오의 경우 독성 피해 영향 범위는 취급시설을 중심으로 반경 641.6 m로 나타났다. 이는 641.6 m 지점에서 벤젠의 “ERPG-2” 농도인 150 ppm에 노출될 수 있다는 의미이다. “대안의 사고시나리오 I”의 경우 독성에 의한 피해영향 범위는 293.9 m로 나타났으며 “대안의 사고시나리오II”는 167.5 m, “대안의 사고시나리오III”는 32.8 m로 나타났다. 즉, 최악의 사고시나리오 대비 최고 5.11%까지 피해영향범위가 감소할 수 있음을 보여주고 있는 것이다. Figure 2, 3, 4, 5에서는 누출공 크기에 따른 독성 피해영향 범위를 지도로 확인한 결과로써 최악의 사고시나리오 대비 피해영향범위는 최대 5.11%까지 감소함을 보여주고 있다.

4.2 누출시간에 따른 벤젠의 독성 피해영향 범위

벤젠의 누출시간에 따른 피해영향 범위를 비교하고자 누출공의 크기를 4 in로 고정된 후 누출시간을 5 min, 10 min, 20 min 동안 누출되는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 벤젠의 독성 피해영향 범위는 다음 Figure 6과 같이 누출시간 5 min에서의 피해영향 범위는 78.9 m로 나타났으며 누출시간 10 min에서는 114.5 m, 누출시간 20 min에서는 167.5 m로 나타났다. 이는 누출시간이 증가함에 따라 누출량이 증가하여 누출로 인한 독성 피해영향 범위는 점차적으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 또한, Figure 7, 8, 9에서는 누출시간대비 피해영향범위를 지도로 확인한 결과이다.



Figure 2. Influence range of the toxicity damage of benzene (Worst-case scenario).



Figure 3. Influence range of the toxicity damage of benzene (Alternative scenario I).



Figure 4. Influence range of the toxicity damage of benzene (Alternative scenario II).



Figure 5. Influence range of the toxicity damage of benzene (Alternative scenario III).

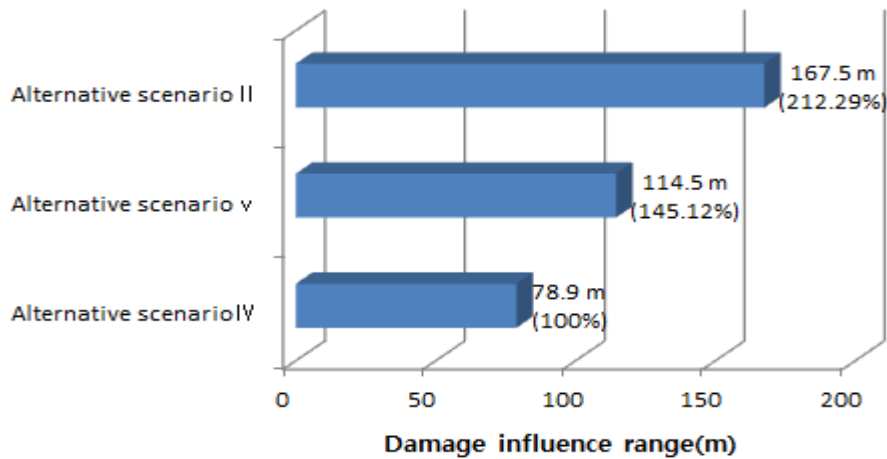


Figure 6. Comparison of the influence range of the toxicity damage of benzene according to leakage time.

따라서, “입·출하 시설 누출”에 의한 사고 등으로 위험물의 누출사고가 발생했을 때 누출량을 감소시킬 수 있다면 사고 피해영향 범위 또한 감소시킬 수 있을 것으로 예측할 수 있다는 것으로 추론해 볼 수 있다. 이에 누출량을 감소시키기 위한 조건으로는 누출공의 크기를 감소시키는 것과 누출시간을 단축하는 조건을 고려해볼 수 있다. 하지만, 누출공의 경우 예상치 못한 사고 등으로 발생하기 때문에 예측 및 제어가 어려운 반면, 누출시간의 경우 감지 및 차단 형태에 따라서 제어할 수 있어 누출시간을 단축시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4.3 누출공 크기에 따른 벤젠 액면화재(Pool fire)의 피해영향 범위

벤젠 누출에 따른 액면화재의 위험성을 예측하고자 “최악의 사고시나리오”와 누출공 크기에 따른 사고 피해영향 범위를 비교하기 위하여 “대안의 사고시나리오 I, II, III”으로 시뮬레이션을 진행하였으며 벤젠 액면화재의 직경 및 화염최대높이는 다음 Table 5와 같이 나타났다.

“최악의 사고시나리오”의 경우 복사열에 의한 피해영향 범위는 취급시설을 중심으로 반경 228.8 m로 나타났으며, 화염의 최대높이는 80.2 m로 나타났다. 이는 40 s 동안 5 kw/m²의 복사열에 노출되는 지점으로 2도 화상의 피해가 발생하는 정도이다. “대안의 사고시나리오 I”의 경우 화염 최대높이 67.8 m, “대안의 사고시나리오 II”는 51.2 m로 나



Figure 7. Influence range of the toxicity damage of benzene according to leakage time (Alternative scenario IV).



Figure 8. Influence range of the toxicity damage of benzene according to leakage time (Alternative scenario V).



Figure 9. Influence range of the toxicity damage of benzene according to leakage time (Alternative scenario II).

Table 5. Diameter of Benzene Pool Fire, Maximum Height of Flame, Damage Influence Range

Type	Worst-case Scenario	Alternative Scenario I	Alternative Scenario II	Alternative Scenario III
Diameter of Benzene (m)	70.8	57.2	38.1	11.4
Maximum Height of Flame (m)	80.2	67.8	51.2	22.2

타났으며, “대안의 사고시나리오III”은 22.2 m 로 나타났다. 최악의 사고시나리오 대비 대안의 사고시나리오의 경우 화염최대높이는 27.68%까지 감소함을 알 수 있었다.

또한, 벤젠의 풀화재에 대한 피해영향범위를 분석한 결과 최악의 사고시나리오에서 228.8 m로 나타났다. “대안의 사고시나리오 I”의 경우 피해영향범위는 136.2 m, “대안의 사고시나리오II”는 84.4 m로 나타났으며, “대안의 사고시나리오III”은 18.9 m 로 나타났다. 최악의 사고시나리오 대비 대안의 사고시나리오의 경우 피해영향범위는 8.26%까지 감소함을 알 수 있었다.

다음 Figure 11, 12, 13, 14는 누출공 크기에 따른 피해영향범위를 지도로 확인한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 누출공의 크기가 배관 단면적의 100%, 66%, 20%로 감소함에 따라 “최악의 사고시나리오” 대비 사고피해영향 범위가 각각 59.53%, 36.89%, 8.26%로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 항만에서의 액면화재 발생 시 복사열로 인한 피해영향범위를 감소시키기 위해서는 위험물을 하역하는 선박과 항만 사이 중 최소한 매니폴더에 화재 시뮬레이션을 활용하여 소화활동이 가능한 이격거리를 산정 후 복사열 차단설비 및 소화설비를 설치하는 것이 위험물 하역 항만에서 화재 등의 사고로부터 안전을 확보하는데 중요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 여러 연구자로부터 검증된 KORA 프로그램을 활용하여 위험물안전관리법상 인화성액체에 해당하는 벤젠을 대상 물질로 선정하여 LOPA (방호계층분석)에 근거하여 위험물 하역 항만시설에서 발생할 수 있는 주요 개시사건을 중심으로 사고 발생 빈도가 비교적 높게 나타나는 배관누출로 시뮬레이션을 진행하여 피해영향 규모를 평가하였다. 또한, 액체화물로서 벤젠의 누출에 따른 Toxic (독성), Pool fire (액면화재)의 사고 피해영향 범위 측정하고자 하였으며 사고 조건에 따른 피해영향 범위를 비교하고자 “최악의 사고시나리오”와 “대안의 사고시나리오”를 산정한 후 연구를 통해 사고 피해영향 범위를 감소시킬 방안을 고찰함으로써 위험물 하역 항만에 대한 안전성 확보를 위해 다음과 같은 신뢰성 있는 기초자료를 얻었다.

1) 벤젠의 누출로 인한 독성 피해영향 범위는 취급시설을 중심으로 누출공의 크기가 감소함에 따라 “최악의 사고시나리오” 대비 사고 피해영향 범위가 최대 5.11%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 누출시간에 대한 피해영향 범위의 경우 누출시간 5 min 대비 20 min에서 212.29%로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

2) 벤젠의 액면화재로 인한 복사열에 의한 피해영향 범

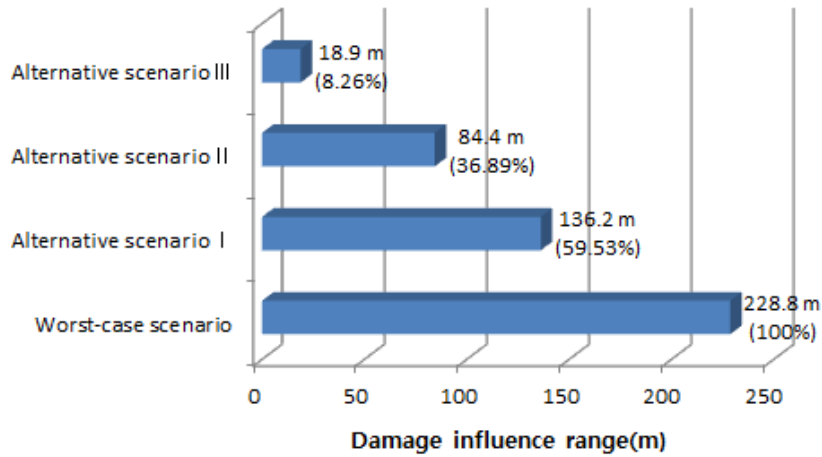


Figure 10. Comparison of the damage influence range of benzene pool fire.

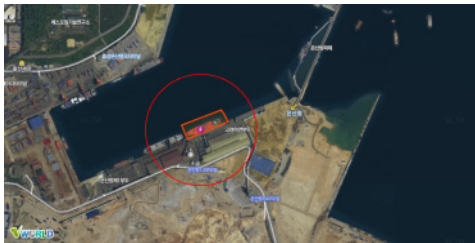


Figure 11. Damage influence range of benzene pool fire (Worst-case scenario).



Figure 12. Damage influence range of benzene pool fire (Alternative scenario I).



Figure 13. Damage influence range of benzene pool fire (Alternative scenario II).



Figure 14. Damage influence range of benzene pool fire (Alternative scenario III).

위는 취급시설을 중심으로 누출공의 크기가 감소함에 따라 “최악의 사고시나리오” 대비 사고 피해영향 범위가 최대 8.26%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 위험물 하역 항만시설에서 발생할 수 있는 주요 개시 사건 중 발생 빈도가 비교적 높게 나타나는 “입·출하 시설 누출”에 의한 사고 등으로 위험물의 누출사고가 발생했을 때 누출 양을 감소시킬 수 있다면 사고 피해영향 범위 또한 감소시킬 수 있을 것으로 예측할 수 있으며, 누출시간의 경우 감지 및 차단형태에 따라 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

4) 항만에서의 액면화재 발생 시 복사열로 인한 피해영향 범위를 감소시키기 위해서는 위험물을 하역하는 선박과 항만 사이 중 최소한 매니폴더에 화재 시뮬레이션을 활용

하여 소화 활동이 가능한 이격거리를 산정 후 복사열 차단 설비 및 소화설비를 설치하는 것이 위험물 하역 항만에서 화재 등의 사고로부터 안전을 확보하는데 중요할 것으로 사료된다.

References

1. Ministry of Oceans and Fisheries, “PORT ACT”, Article 2 Paragraph 1 of the Act (2018).
2. N. G. Park, “Economic and Social Impact Assessment Report by Improvement of Securing rate of Port Facilities”, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2010).
3. Ministry of Oceans and Fisheries, “PORT-MIS: Port

- Management Information System” (2018).
4. Ulsan Port Authority, “Construction of Safety Management System for Unloading Dangerous Goods in Ulsan Port” (2016).
 5. P. G. Chong, “A Legislative Study on the Introduction Certificate System on Dangerous Cargo Handling Facilities”, Master’s Thesis, Korea Maritime and Ocean University (2015).
 6. Ulsan Regional Office of Oceans and Fisheries, “A case study of Hanyang Ace Explosion Accident Ship” (2015).
 7. J. S. You and Y. J. Chung, “Study on the Ship Fire Analysis According to Explosion Hazard”, Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 80-86 (2015).
 8. Ministry of Oceans and Fisheries, “Marine Accidents Inquiry Agency” (2019).
 9. S. C. Cha, “A View of Chemical Process Hazard Evaluation Using Consequence Analysis”, Journal of the Korean Professional Engineers Association, Vol. 31, No. 5, pp. 60-68 (1998).
 10. H. J. Lim, S. L. Kwak, J. H. Jung, T. K. Ryu, W. S. Choi, J. E. Lee, J. S. Lee, Y. H. Lee, et al., “A Study on the Factors Affecting the Influence Ranges of Ammonia Leakage by Using KORA Program”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 22, No. 3, pp. 38-44 (2018).
 11. J. K. Kim, J. S. Ryu, T. K. Ryu, S. L. Kwak, H. G. Lim, W. S. Choi, J. H. Jung, J. E. Lee et al., “Suggestions for Increasing Utilization of KORA for Supporting the Off-site Risk Assessment System”, Korean Society of Environmental Health, Vol. 44, No. 2, pp. 124-132 (2018).
 12. Y. H. Seo, “A Study on Comparing Characteristics of Off-site Risk Assessment Supporting Tool of Chemical Accident Scenarios”, Master’s Thesis, Hoseo University (2017).
 13. S. L. Kwak, H. J. Lim, T. K. Ryu, W. S. Choi, J. H. Jung, J. E. Lee, J. K. Kim, Y. H. Lee et al., “Evaluation of Damage Range Variation Based on Operation System of Chlorine Facility in Water Purification Plant using KORA”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 22, No. 3, pp. 84-90 (2018).
 14. CCPS, “Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis”, WILEY, Agawam (2014).
 15. J. M. Cha, “A Study on Risk Characterization of Discharging Flammable Liquid Cargo in Port Area and Application of Fire Safety Standards”, Ph.D. Dissertation, University of Seoul (2016).