

# 울산항 위험물 환적부두 지정을 위한 폭발 위험성 평가에 관한 연구

강민균\* · 이윤석\*\* · † 안영중

\*,\*\*한국해양대학교 해사대학 교수, † 한국해양수산연수원 교수

## A Study of Explosion Risk Assessment for Designation of Dangerous Goods Transshipment Pier at Ulsan Port

Min-Kyoon Kang\* · Yun-Sok Lee\*\* · † Young-Joong Ahn

\*\*,\*\*Professor, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

† Professor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, 49111, Korea

**요 약** : 울산항 부두에 이중 접안하여 환적작업 중이던 케미컬 탱커선 폭발로 주변 선박화재 등 울산항 내에서 큰 피해가 발생하였다. 유사 사고의 재발을 방지하기 위한 후속 조치로 ‘항만 내 위험물 안전관리 종합대책’이 수립되었으며 사고 발생 시에 폭발 위험성과 항내 주요 시설에 대한 영향 등을 고려한 위험물 환적부두의 지정이 요구된다. 본 연구는 폭발 위험성 기반의 환적부두 제시를 위하여 울산항 주요 환적화물 대상의 Fire & Explosion Index 평가를 실시하였다. 스티렌모노머와 벤젠의 Fire & Explosion Index 평가결과 심각한 폭발 위험성을 확인하였고, 평가결과를 기준으로 노출반경을 산출 하였다. 노출반경 결과를 기반으로 주요 부두별 위험범위를 산정하였으며, 항만시설, 주변 위험시설 및 거주시설을 고려한 환적가능 부두 후보지로 12개 부두를 제시하였다. 본 연구는 위험반경만을 고려하였기 때문에 향후 실질적인 위험물 환적 부두의 지정 시에는 해상교통안전성, 부두 및 계류시설, 안전설비 및 비상대응을 위한 접근성 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 할 것이다.

**핵심용어** : 환적부두, Fire & Explosion Index, 폭발 위험성 평가, 노출반경, 위험범위

**Abstract** : The explosion of a chemical tanker ship during cargo transshipment via double-banking at Ulsan Port, resulted in major damage including fires involving nearby ships. As a follow-up measure to prevent the recurrence of similar accidents, the ‘Safety Management of Dangerous Goods in Port’ was established, and the designation of a transshipment pier for dangerous goods is required given the risk of explosion and the impact on major facilities in the port. This study evaluated the Fire & Explosion Index of major transshipment cargoes in Ulsan Port to design a transshipment pier based on the Explosion Risk Assessment. Based on the results of Fire & Explosion Index evaluation of styrene monomer and benzene, severe explosion risk was confirmed, and the exposure radius was calculated. Based on the results of the exposure radius, the risk range for each major pier was calculated, and 12 terminals were proposed as transshipment pier candidates considering port facilities, surrounding dangerous facilities, and residential aspects. Since the results of the study suggest transshipment piers based on the risk radius alone, maritime traffic safety, pier and mooring facilities, safety facilities and accessibility for emergency response should be considered comprehensively to designate actual transshipment piers.

**Key words** : transshipment pier, fire & explosion index, explosion risk assessment, exposure radius, risk range

### 1. 서 론

2019년 9월 환적작업을 위해 울산항 염포부두에 접안 중이던 ‘스톨트 그로이란드(Stolt Groenland)호’에서 폭발과 함께 대형화재가 발생하였다. 이로 인해 이중 접안 되어 있던 바우달리안(Bow Dalian)호에 화재가 확산되었고, 적재되어 있던 화학물질의 연소로 사고현장 반경 500m까지 출입이 통제되었다. 다행히 사망자는 없었으나, 화재 진압까지 18시간 30분이 소요되면서 선원과 소방대원 등 부상자가 발생하였고, 폭발

시 액체 화학물질의 유출과 사고대응으로 항만에 큰 손실이 발생하였다(MAIB, 2019).

‘스톨트 그로이란드호’ 폭발사고를 계기로 해양수산부는 ‘항만 내 위험물 안전관리 종합대책’을 수립하여 2019년 12월 발표하였다(MOF, 2019b). 종합대책의 주요 내용은 위험물운반선의 자체 안전관리 확보와 항만에 반입되는 위험물에 대한 모니터링 강화 및 위험물 하역 안전관리 개선 등이다. 항내 선박의 안전관리 부분은 폭발로 인한 인명피해 저감을 위해 시급히 개선되어야 하는 사항으로 위험물 환적 가능 부두에 대

† Corresponding author : 종신회원, yjahn@seaman.or.kr 051)620-5795

\* 종신회원, captkang@kmou.ac.kr 051)410-5082

(주) 이 논문은 “울산항 위험물 환적부두의 폭발 위험성 평가에 관한 연구”란 제목으로 “2021년 한국해양과학기술협의회 춘계공동학술대회 한국항해항만학회논문집(2021.5.13-14)”에 발표되었음.

해 사고 발생 시 위험성, 주요시설, 주변 민가 접근성 등을 종합적으로 고려하여 적정성을 검토할 것을 강조하였다.

특히 사고가 발생한 염포 부두는 위험물 취급부두가 아닌 일반부두로, 소화시설 및 비상대응을 위한 설비가 없어 화재 진압에 많은 어려움이 있었고, 울산대교와 같은 항만 주요시설에 인접하여 2차 피해 발생 및 인근주민들의 인명피해 위험성도 존재하였다. 유사사고의 재발을 원천적으로 차단하는 방법은 항만 내 환적작업을 전면 금지하는 것이다. 그러나 울산항 환적작업 화물량은 매년 증가하여 항만 취급 화물량에 기여하고 있으므로 안전을 확보하고 지속성을 유지할 수 있도록 검토되어야 한다.

본 연구는 '항만 내 위험물 안전관리 종합대책'의 이행사항으로 폭발 위험성 평가를 통해 항만설비, 주변 위험시설, 거주시설 등과의 안전거리를 확보할 수 있는 환적작업 가능 부두를 제시하기 위해 수행되었다. 폭발 위험성을 고려한 환적부두 지정은 2차 사고 및 주변 시설 피해 예방에 필수적이며, 정량적인 기준으로 제시하기 위해 다음과 같은 연구 방법을 적용하였다. 먼저, 환적작업 허용 필요성과 폭발 위험성 평가대상을 식별하기 위해 울산항의 환적작업 현황을 조사하였다. 그리고 주요 환적화물인 벤젠과 '스톨트 그로이란드 호'의 폭발 추정화물인 스티렌모노머를 대상으로 화재 및 폭발지수(F&EI, Fire & Explosion Index)를 평가하였다. 두 가지 화물의 F&EI에 따라 선박의 접안 위치기준으로 위험범위와 노출면적을 전자해도 및 위성지도에 도식화 하였다. 이 결과를 기반으로 부두별 위험범위를 산정하고 항만시설, 주변 위험시설 및 거주시설을 고려한 환적가능 부두 후보지 제시가 가능할 것이다.

## 2. 위험물 환적작업 현황

### 2.1 울산항 환적화물 취급현황

Table 1과 같이 울산항의 총 화물 취급량은 2017년까지 지속적으로 증가하였으나, 2018년부터 총 화물 취급량은 정체 현상을 보이고 있다. 울산항만공사 2021년 화물취급량 자료에 따르면 연안화물 감소에 비해 환적 화물은 매년 높은 증가세를 보이고 있으며, 2019년 기준으로 최근 5년간 75% 화물량이 증가하였다(UPA, 2021). 울산항의 환적화물 처리는 해상에서의 선박 간 작업보다 부두에 이중접안(Double berthing or Double banking)하여 화물을 이송하는 방식으로 이루어지고 있다. 이중접안 방식은 해상에서의 선박 간 작업보다 기상의 영향을 적게 받고, 선체동요가 적은 조건에서 작업할 수 있는 장점이 있지만 국제적으로는 안전을 문제로 항내에서 허용되지 않는 경우가 일반적이다. 싱가포르항과 대만 타이베이항은 이중접안 방식을 금지하고 있고, 벨기에의 앤트워프항은 특정 기준 및 항만의 요건을 만족하는 경우에 한하여 이루어지고 있다(MOF, 2019a).

울산항의 경우 정박지는 기상 영향이 많이 받기 때문에 해상 환적작업이 어렵고, 두 선박이 인접한 부두에 각각 접안하여 환적하는 방식은 육상의 설비와 선석을 동시에 요구하기 때문에, 이중접안 방식이 가장 효율적으로 평가된다. 단, 국제적으로 안전 문제에 의한 이중접안 방식이 제한되는 만큼 환적작업에 대한 위험성 평가와 안전 확보를 위한 관리방안이 고려되어야 한다.

Table 1 Trend of cargo throughput by year at Ulsan (Unit: Thousand tonnes)

	2015	2016	2017	2018	2019
Import	102,758	107,997	109,119	109,382	108,389
Export	66,156	65,565	67,827	70,206	70,414
Coastal	20,099	22,246	22,587	20,353	20,336
<b>Transshipment</b>	<b>1,856</b>	<b>1,801</b>	<b>2,812</b>	<b>2,919</b>	<b>3,243</b>
Total	190,869	197,610	202,345	202,861	202,383

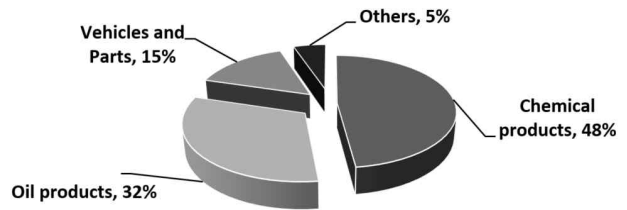


Fig. 1 Cargo throughput by type at Ulsan Port in 2019

울산항에서 취급되는 환적화물의 종류는 액체 화학공업 생산품(Chemical products)부터, 석유 정제품(Oil products), 차량 및 부품, 석유가스, 철강제품, 전기기기, 방직용 섬유 등 종류가 다양하지만 Fig. 1과 같이 2019년 기준 액체 화학공업 생산품 47.9%, 석유 정제품 31.7%로 환적 화물량의 대부분을 차지하고 있다(UPA, 2021). 또한 액체 화학공업 생산품과 석유 정제품에 대한 환적 수요가 급격히 증가하면서 울산항 전체 환적화물 총량이 증가한 것으로 확인된다. 그러나 액체 화학공업 생산품과 석유 정제품은 인화점이 낮고 휘발성이 강한 물질들이 많아 환적작업 시 화재안전의 확보가 필요하다.

### 2.2 위험물 환적작업 부두

울산항 환적가능 부두는 '스톨트 그로이란드호' 사고 전에 총 31개 부두였으나, 본항 3개 부두에 대한 환적이 금지되면서 현재 28개 부두만 환적작업이 가능하다. 울산 본항의 경우 2개의 국유 부두에서 위험물 환적작업이 이루어지고 있으며, 온산항의 경우는 6개 민간 부두에서 이루어지고 있다. 신항 북항은 1개의 국유 부두에서 위험물 환적이 허용되고 있으며, 신항 남항은 1개 국유부두와 6개 민간 부두에서 액체 화학물질 및 유류의 환적이 허용되고 있다. 울산항 내 환적작업 실적 이 가장 많았던 곳은 울산 본항의 부두에 집중되어 있었으며,

다음으로 신항 남항 환적부두들의 실적이 많았다. 울산 본항은 염포부두와 8부두, 6부두가 환적실적이 많았고, 신항 남항은 대부분 남방 TS부두의 실적으로 확인되었다. Fig. 2는 울산항 주요 환적부두들의 위치를 나타낸 것이며, ‘◎’ 표시된 곳은 2017년부터 2019년까지 환적실적이 많았던 부두들이다. 염포부두의 경우 울산항 기본계획 상 취급화물은 철재 및 잡화로 구분되어 있으나 ‘스톨트 그로이란드호’ 사고 당시 액체 화학물질이 취급되었다.

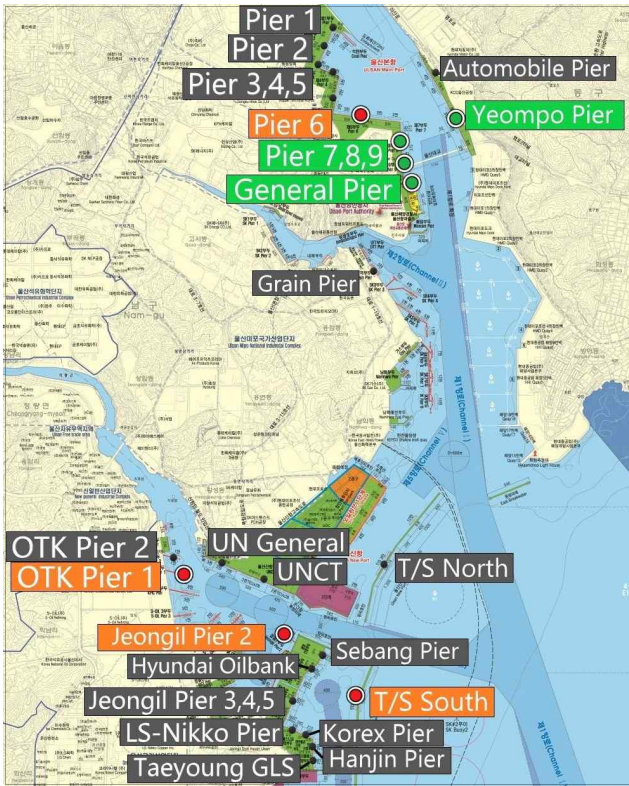


Fig. 2 Transshipment pier of Ulsan port

액체 화학물질 및 유류의 환적이 허용되는 부두를 기준으로 최근의 환적작업 실적을 조사한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Number of transshipment operations by location in the Ulsan port

Location in the port	2017	2018	2019
Ulsan main port	186	218	138
Onsan port	32	34	37
New port - North	2	1	1
New port - South	104	110	153
Total	324	363	329

### 3. 환적화물의 화재 및 폭발지수 평가

#### 3.1 화재 및 폭발 위험성 평가방법

액체 및 기체의 화재와 폭발에 대한 위험성 평가에는 비등 액체 팽창 증기폭발(BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 모델, 증기운 폭발(VCE, Vapor Cloud Explosion) 모델 및 화재 및 폭발지수(F&EI, Fire & Explosion Index) 등이 사용된다.

BLEVE 모델은 고압의 가연성 액화가스 탱크의 폭발위험 평가에 주로 사용되며(Chung et al, 2020), VCE 모델은 인화성 액체 및 액화가스의 저장탱크에서 유출되는 가연성 가스의 폭발 위험평가에 주로 사용된다(Leem et al, 2007). DOW CHEMICAL사의 F&EI 방법은 인화성, 가연성 물질뿐만 아니라 반응성 물질을 저장, 취급 또는 공정에서 사용하는 화학공장에 적용하기 위해 개발되었다(AIChE, 1994).

울산항의 주요 환적화물은 액체 화학물질 및 석유 정제품이며, ‘스톨트 그로이란드호’ 사고의 폭발 추정 물질도 스티렌 모노머(SM, Styrene Monomer)로써 중합반응(Polymerization)을 일으키는 대표적인 반응성 액체 화학물질이다(MAIB, 2019). 따라서 BLEVE 모델과 VCE 모델은 가연성 액화가스에 대한 폭발 위험성 평가에 적합하지만, 반응성 액체 물질에 대한 화재 폭발 위험성 평가에는 F&EI를 이용한 평가가 적합하다. F&EI를 이용한 연구사례로 He et al.(2013)은 유류 저장탱크의 위험성 평가에 사용하였고, Li and Huang(2012)은 LNG 선박에 적용하였으며, Wang and Wang(2012)은 스티렌 모노머의 제조공정에 적용하였다. 또한 F&EI를 이용한 평가 방법은 한국화재안전기준(KFS, Korea Fire Safety Standards)의 화재·폭발위험평가지침(KFS 1171)에 반영되어 육상 액체 화학물질 저장탱크들의 위험성 평가에도 적용되고 있다(KFPA, 1997).

본 연구에서는 울산항에서 취급하는 주요 위험화물과 스티렌모노머의 화재 및 폭발지수를 평가하기 위해 위험 액체화물의 포괄적인 평가가 가능한 F&EI 방법을 적용하였다. 특정 물질에 대한 F&EI와 저장 위치 기준의 화재 및 폭발 노출반경, 노출면적 계산과정 절차는 Fig. 3과 같다. F&EI의 산출 절차에 따라 화재와 폭발에 대한 위험성 평가를 위한 저장시설의 위치를 특정하고, 위험화물의 물질계수(MF, Material Factor)를 선정 후 위험분석을 통하여 일반공정 위험계수(F1), 특수공정 위험계수(F2)를 산출한다. 일반공정 위험계수와 특수공정 위험계수를 기반으로 단위공정 위험계수(F3)를 산정하여 물질계수를 반영한 F&EI를 통하여 화재 및 폭발의 노출반경 및 노출면적을 계산할 수 있다(Suardin, 2005).

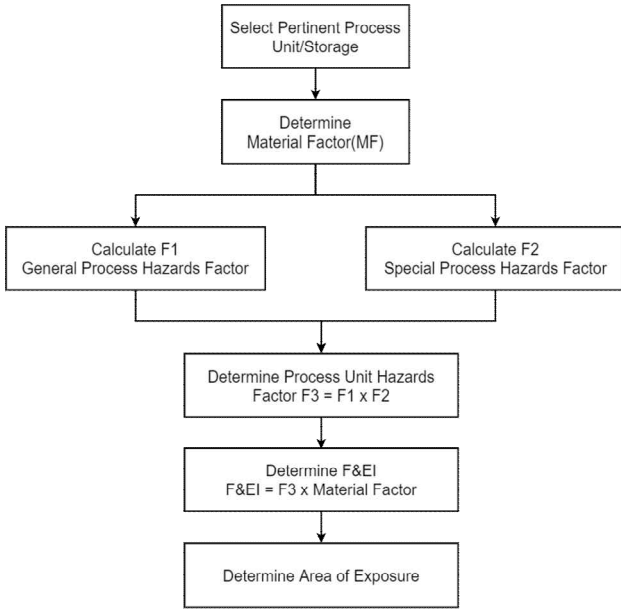


Fig. 3 Procedure for calculating fire and explosion index (Suardin, 2005, Modified by author)

### 3.2 울산항 주요 환적화물 F&EI 평가

F&EI 평가대상 물질은 ‘스톨트 그로이란드호’ 사고 폭발 추정 물질인 스티렌모노머와 울산항의 주요 환적화물로 높은 화재 폭발 위험성을 갖는 액체 화학물질을 대상으로 하였다. Table 3은 스티렌모노머를 포함한 울산항의 주요 환적화물들에 대한 물질계수(MF), 연소열(Hc), NFPA(National Fire Protection Association, 전미방화협회) Data 및 인화점(Flash point)을 나타낸 표이다(NFPA 49, NFPA 325). 물질계수는 Fig. 3에 설명된 것과 같이 F&EI 및 다른 위험도 분석치의 계산 시점에서 기본값이며, 연소 또는 화학반응으로 발생하는 화재 및 폭발 시 잠재 에너지의 고유 방출률에 대한 추정값이다(Zarranejd A. and Ahmadi O., 2016). Table 3의 물질계수와 NFPA Data를 근거로 F&EI의 평가대상 물질을 스티렌모노머와 벤젠으로 특정하였다.

Table 3 Material Factor(MF) and Properties of major hazardous chemicals handled in Ulsan port

HAZARDOUS CHEMICALS	MF	Hc BTU/lb x 10 <sup>3</sup>	NFPA Data			Flash Point (°F)
			NH	NF	NR	
STYRENE MONOMER	24	17.4	2	3	2	88
BENZENE	16	17.3	2	3	0	12
ETHYL ALCOHOL	16	11.5	0	3	0	55
ETHYLENE GLYCOL	4	7.3	1	1	0	232
TOLUENE	16	17.4	2	3	0	40
(P-)XYLENE	16	17.6	2	3	0	77

스티렌모노머와 벤젠의 일반공정 위험계수(F1) 평가결과 Table 4와 같다. 표에서 ‘\*’는 중합반응 화물에 대한 반응위험성이 반영된 Penalty이며, ‘\*\*’는 두 화물 모두 가연성 등급(NF)이 3으로 취급공정에 대한 위험성 Penalty가 동일하게 반영되었다. 일반 공정은 저장 위치에 대한 접근과 유출 관리 등에 대한 조건이므로 동일하게 적용되고, 화물의 특성이 주요하게 반영되는 위험계수(F1)는 스티렌모노머가 3.5, 벤젠이 3.0으로 평가된다.

Table 4 General Process Hazards Factor(F1) for styrene monomer and benzene

General Process Hazards	Penalty	
	Styrene Monomer	Benzene
Base Factor	1.00	1.00
Exothermic Chemical reactions	0.50*	0
Endothermic Processes	0	0
Material Handling and Transfer	0.85**	0.85**
Enclosed or Indoor Process Units	0.45	0.45
Access	0.20	0.20
Drainage and Spill Control	0.50	0.50
<b>General Process Hazards Factor (F1)</b>	<b>3.50</b>	<b>3.00</b>

Table 5 Special Process Hazards Factor(F2) for styrene monomer and benzene

Special Process Hazards	Penalty	Remarks
Base Factor	1.00	
Toxic Material(s)	0.40	NH = 2
Sub-Atmospheric Pressure	0	(<500 mmHg)
Operation In/Near Flammable range(Inerted or Not inerted)	0.50	Tank Farms Storage Flammable Liquids
	0.30	Process Upset or Purge Failure
	0.80	Always in Flammable Range
Dust Explosion	0	N/A
Pressure(psig)	0.17	Operating Pressure : 2.84 Relief Setting : 3.13
Low Temperature	0	N/A
Quantity of Flammable Material & Heat of Combustion(Hc)	1.10	4,000tonnes, 17400BTU/lb (Liquids/Gases in Storage)
Corrosion and Erosion	0.20	
Leakage-Joints and Packing	1.50	
Use of Fired Equipment	0	N/A
Hot Oil Heat Exchange System	0	N/A
Rotating Equipment	0	N/A
Special Process Hazards Factor(F2)		<b>5.97</b>

스티렌모노머와 벤젠의 특수공정 위험계수(F2)의 평가 결과는 Table 5와 같다. 표에서 압력(Pressure)은 화학제품운반선의 중력식 탱크(Gravity tank)에 설치된 일반적인 증기 고속 배출밸브(High velocity vent valve)의 표준 압력인 3.13 psig를 사용하였으며, 압력(P)에 대한 Penalty(Y)는 식(1)을 통해 산출된다. Fig. 4는 식(1)에 대한 0~1,000psig 범위의 작동 압력에 대한 Penalty를 보여주며, 압력식 탱크(Pressure tank)가 설치되면 가압범위에 따라 더 높은 Penalty가 부여된다.

$$Y = 0.16109 + 1.61503(P/1000) - 1.42879(P/1000)^2 + 0.5172(P/1000)^3 \quad (1)$$

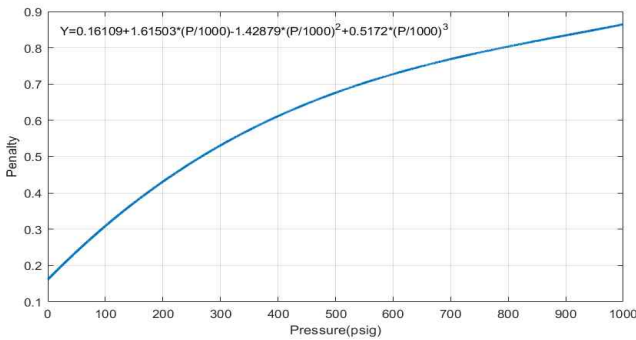


Fig. 4 Penalty for operating pressures in the range of 0 to 1,000psig (Plot of Equation(1))

Table 5에서 가연성 물질의 양과 연소열(Quantity of Flammable Material & Heat of Combustion)을 고려한 Penalty는 식(2)를 통해 산출하며, 화물량은 한 화물창에 적재할 수 있는 최대량을 4,000톤으로 가정하여 평가하였다. 식(2)에서의 Y는 Penalty이고, X는 공정상의 총 에너지(Hc; BTU x 10<sup>3</sup>)를 의미한다. Fig. 5는 식(2)에 따라 저장 중인 액체 또는 기체 가연성 물질의 양에 따른 Penalty를 나타낸다.

$$\text{Log}(Y) = -0.403115 + 0.378703(\text{Log}X) - 0.046402(\text{Log}X)^2 - 0.015379(\text{Log}X)^3 \quad (2)$$

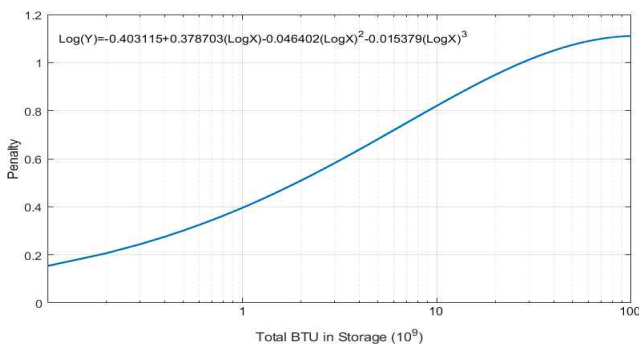


Fig. 5 Penalty for quantity of liquids or gaseous flammable material in storage (Plot of Equation(2))

스티렌모노머와 벤젠은 인화성 액체로써 식(2)를 이용하여 계산하면 페널티 값이 각각 1.1022 및 1.1027 이며, 이 값이 위

험화물의 총량에 대한 F&EI 평가의 결정요소이다. 독성 위험성에 있어 스티렌모노머와 벤젠은 NFPA의 유해등급이 2로 동일하며, 이외에 화물고유의 위험성 반응이 없기 때문에 특수공정 위험계수(F2)는 두 화물 모두 5.97로 동일하게 평가되었다. 식(3)과 같이 단위공정 위험계수(F3)는 일반공정 위험계수(F1)와 특수공정 위험계수(F2) 값으로 산출하고, 물질계수를 반영하면 식(4)와 같이 평가물질에 대한 F&EI를 확정할 수 있다.

$$\text{Process Unit Hazards Factor}(F3) = F1 \times F2 \quad (3)$$

$$\text{Fire \& Explosion Index}(F\&EI) = F3 \times \text{Material Factor} \quad (4)$$

Table 6 Calculation of F&EI for 4,000tonnes of styrene monomer and benzene in storage

Material	Styrene Monomer	Benzene
F1	3.50	3.00
F2	5.97	5.97
F3	20.89	17.91
MF	24	16
F&EI	501	287

식(3)과 (4)에 따라 4,000톤의 스티렌모노머를 운송하는 화학제품운반선의 F&EI는 501, 벤젠의 경우 287로 평가되었다 (Table 6).

#### 4. 울산항 환적부두 노출반경 및 위험범위 분석

##### 4.1 주요 환적화물의 노출반경 및 노출면적

노출반경(Radius of Exposure)은 위험물질의 저장 위치 중심을 기준으로 단위공정 내에서 발생할 수 있는 화재 또는 폭발로 인해 주변에 미칠 수 있는 피해 면적을 산출하기 위해 필요하며, 식(5)와 같이 F&EI에 따라 평가된다. 노출반경을 기준으로 노출면적(Area of Exposure)은 식(6)으로 산출하고, Fig. 6과 같이 실제적으로 피해를 미칠 수 있는 노출체적(Volume of Exposure)을 확인할 수 있다.

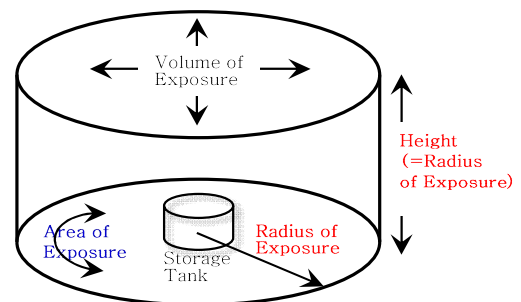


Fig. 6 Radius of Exposure and Area of Exposure



$$Radius\ of\ Exposure(ft) = F\&E\ I \times 0.84 \text{ or}$$

$$Radius\ of\ Exposure(m) = F\&E\ I \times 0.84 \times 0.3048 \quad (5)$$

$$Area\ of\ Exposure(m^2) = \pi R^2 \quad (6)$$

3절에서 산출된 4,000톤의 스티렌모노머와 벤젠의 F&EI를 적용한 노출반경은 각각 129m와 73m이다. 추가적으로, 화학제품운반선이 적재할 수 있는 최대 화물량을 32,000톤으로 설정하여 그 선박의 최대 노출반경과 면적을 Table 7과 같이 산출하였다. 분리된 8개의 화물창에 적재된 화물 32,000톤의 경우 스티렌모노머와 벤젠의 노출반경은 각각 294m와 168m로 평가된다.

Table 7 Calculation of Radius of Exposure and Area of Exposure

Material	Styrene Monomer		Benzene	
	Quantity(tonnes)	4,000	32,000	4,000
F&EI	501	1,148	287	656
Radius of Exposure(m)	129	294	73	168
Area of Exposure(m <sup>2</sup> )	51,764	271,402	16,902	88,621

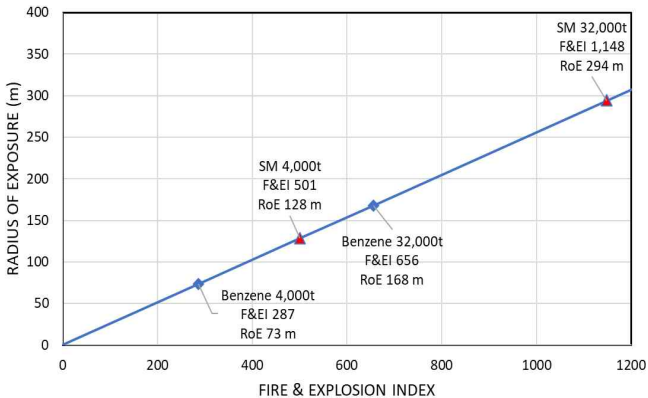


Fig. 7 Radius of Exposure for Fire & Explosion Index

#### 4.2 울산항 환적부두의 위험범위

위험범위는 노출반경에 대한 노출면적으로 나타낼 수 있으며, 평가물질이 저장된 위치를 중심으로 한다. 울산항의 경우 선박이 접안하여 환적작업을 수행하므로, 각 부두에 접안한 선박이 저장위치가 되며, 부두 위치가 확인되는 전자해도를 이용해 가상의 노출반경 0.1해리(185미터)를 울산 본항과 온산항 및 신항으로 구분하여 Fig. 8에 표시하였다. 전자해도에 표시할 수 있는 최소 반경인 0.1해리는 Table 7에 평가된 4,000톤 스티렌모노머의 노출반경 129미터와 32,000톤 벤젠의 노출반경 168미터 범위를 포함한다. 전자해도 상에는 수역시설에 대한 정보가 상세하게 확인되며, 위험범위 내 중요 수역시설에 대한 영향은 없을 것으로 평가되었다. 다만, 울산대교와 인접하여 주행차량들이 위험범위 내에 있으며, 주변 통항선박들에 대한 영향도 발생할 것으로 예상된다.

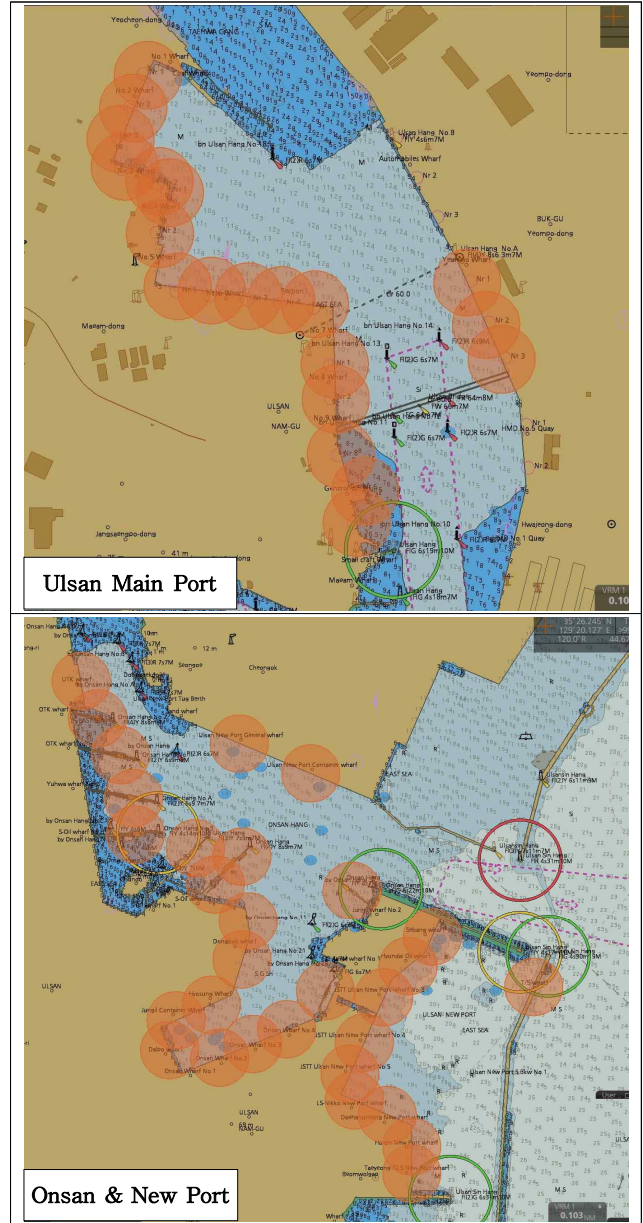


Fig. 8 185meters(0.1nautical mile) radius of each terminal in Ulsan port(on Electronic nautical chart)

위험 범위 내 육상 시설 및 인접지역에 대한 2차 피해를 최소화하고, 환적작업을 허용할 수 있는 부두는 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 스티렌모노머와 벤젠의 최대 노출반경을 위성사진에 전자해도 상 확인된 부두위치 중심으로 위험범위를 나타낸 것이다. 실선으로 연결된 범위는 벤젠의 노출반경에 대한 위험범위이고, 실선과 'X'로 연결된 범위는 스티렌모노머의 노출반경에 대한 위험범위이다.

최대 노출반경은 화학제품운반선이 적재할 수 있는 최대 화물량을 32,000톤을 가정한 것이며, 위성사진에 표시하여 육상시설과의 근접관계를 전자해도보다 명확하게 보여준다. '☑' 표시된 부두들은 위험범위 분석 결과에 따른 환적가능 부두 후보지로 제시될 수 있는 부두들을 의미한다.

## 5. 결 론

울산항 환적작업 화물량은 2015년 이후 매년 증가하여 항만 취급 화물량에 기여하고 있으나, ‘스톨트 그로이란드호’의 폭발사고로 인해 다수의 부상자와 재산피해가 발생하였다. 이후 유사 사고예방을 위한 안전관리 종합대책이 수립되었으며, 그 중 폭발로 인한 2차 피해 최소화 검토 필요성도 제기되었다. 본 연구는 폭발 위험성 평가 기반의 환적작업 가능 부두 제시에 목적이 있다. 폭발 위험성을 고려한 환적부두 지정은 2차 사고 및 주변 시설 피해 예방에 필수적이며, 다음의 연구를 수행하였다.

폭발 위험성 평가대상을 식별하기 위해 울산항의 환적작업 현황을 조사하였고, 주요 환적화물인 벤젠과 폭발추정화물인 스티렌모노머를 대상으로 F&EI를 평가하였다. 두 화물의 F&EI를 기준으로 노출반경과 위험범위를 산출하여, 전자해도 및 위성지도에 환적작업 부두별로 도식화 하였다.

연구 수행을 통해 4,000톤 화물량 기준의 F&EI는 스티렌모노머 501, 벤젠 287로 평가되었고, 심각(Severe)한 화재 폭발 위험성을 가지는 것으로 확인되었다. 평가된 F&EI 기준으로 스티렌모노머의 노출반경은 128m, 벤젠은 73m로 산출되었다. 노출반경은 화물량에 비례하므로, 울산항 내 화학제품운반선이 적재할 수 있는 최대 화물량을 32,000톤으로 가정하여 평가한 스티렌모노머의 노출반경은 294m, 벤젠은 168m이다. 선박 접안위치에서 최대 노출반경을 전자해도와 위성지도에 도식하여 주요 수역시설과 육상시설 유무를 평가한 결과 폭발 위험성 평가 기반의 환적작업 가능 부두는 다음과 같다.

- 1) 울산 본항 : 제2부두, 제6-3부두
- 2) 신항 및 온산항 : 신항 컨부두, OTK 1부두, 대한유화 부두, S-OIL 부두, 정일 2부두, 대한통운 신항부두, 한진 신항부두, 태영GLS 신항부두, T/S 북방 및 남방부두

연구결과 일부 환적작업 부두들은 주요 수역시설과 육상시설에 근접해 있어, 화재 폭발을 저감시킬 수 있는 시설이 마련되기 전까지 작업이 제한되어야 2차 피해를 예방할 수 있다. 본 연구는 위험반경만을 고려하였기 때문에 향후 실질적인 위험물 환적 부두의 지정 시에는 해상교통안전성, 부두 및 계류 시설, 안전설비 및 비상대응을 위한 접근성 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 할 것이다. 향후 추가적인 요소들을 함께 검토한 환적작업 가능 부두를 제시하고, 절차화 하기 위한 연구를 수행할 계획이다.

## References

- [1] American Institute of Chemical Engineers (AIChE) (1994), Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide, 7th Edition, pp. 1-51.
- [2] Chung, K. C. et al,(2020), Development of a Tool for

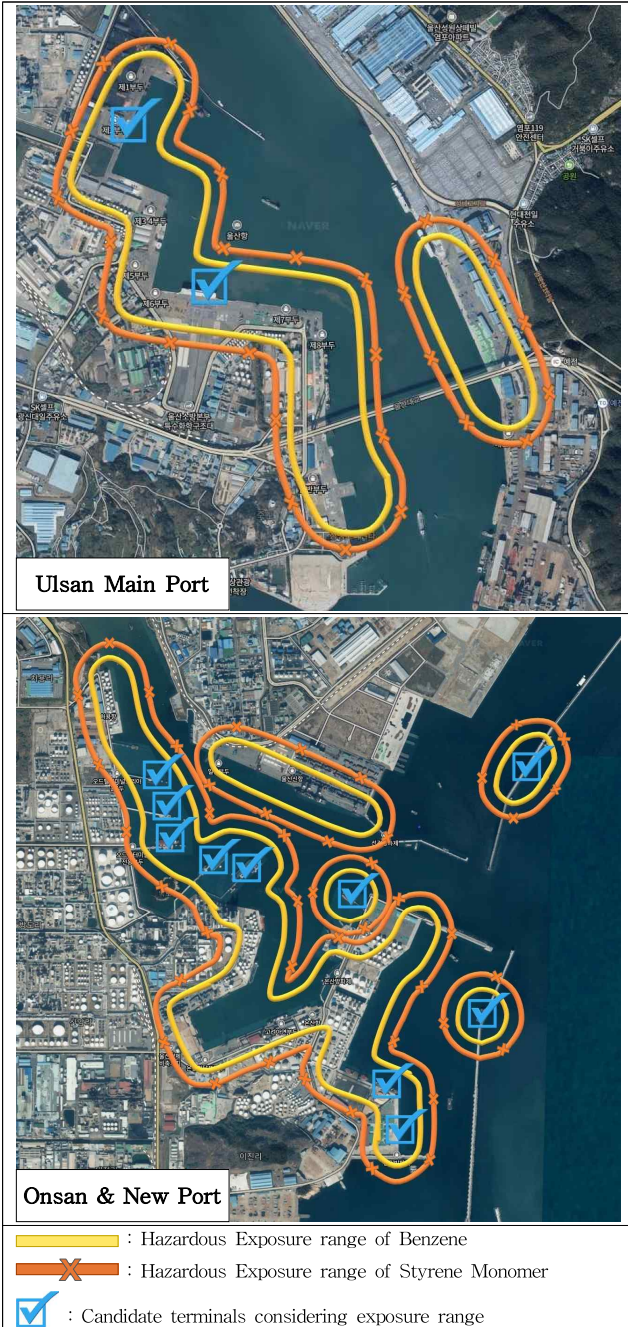


Fig. 9 Hazardous Exposure range at Ulsan port as shown on satellite map

환적작업 시 화물의 폭발로 인한 2차 피해 예방을 목적으로 위험범위만을 고려한 환적가능 부두는 울산 본항의 경우 제2부두와 제6-3부두가 가능하다. 온산항 및 신항은 신항 컨부두, OTK 1부두, 대한유화 부두, S-OIL 부두, 정일 2부두, 대한통운 신항부두, 한진 신항부두, 태영GLS 신항부두, T/S 북방 및 남방부두까지 10개 부두가 가능하다. 노출반경 결과를 기반으로 주요 부두별 위험범위를 산정하였으며, 항만시설, 주변 위험시설 및 거주시설을 고려한 환적가능 부두 후보지로 위의 12개 부두가 제시될 수 있다.

Predicting the Occurrence Time of BLEVE in Small LPG Storage Tanks, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 35, No. 4, pp. 74-83.

---

Received 07 April 2021  
Revised 06 May 2021  
Accepted 06 May 2021

- [3] He, S. H. et al.(2013), "Research on Oil Depot Safety Evaluation Based on Dow Chemical Fire and Explosion Index Assessment Method", Advanced Material Research, Vol. 748, pp. 1256-1261.
- [4] Korean Fire Protection Association (KFPA)(1997), KFS 1171 Guidelines for Fires & Explosion Hazard Assessment(1), pp. 1-46.
- [5] Leem, S. H., Lee, J. R. and Huh, Y. J.(2007), A Study on Estimation of Structure Damage caused by VCE, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 5, pp. 65-70.
- [6] Li, J. and Huang, Z.(2012), "Fire and explosion risk analysis and evaluation for LNG ships", Procedia Engineering, Vol. 45, pp. 70-76.
- [7] Marine Accident Investigation Branch (MAIB)(2019), "Interim report on the investigation of the explosion and fire on board the chemical tanker Stolt Groenland on 28 September 2019, Ulsan, Republic of Korea", pp. 1-8.
- [8] Ministry of Oceans & Fisheries(2019a), "Research report on the necessity and designation plan of the sea area for transshipment by sea", p. 58
- [9] Ministry of Oceans & Fisheries(2019b), "Safety Management of Dangerous Goods in Port", <https://www.mof.go.kr>
- [10] National Fire Protection Association (NFPA) (1994), NFPA 49 - Hazardous Chemicals Data, pp. 4-139.
- [11] National Fire Protection Association (NFPA) (1994), NFPA 325 - Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids, pp. 4-90.
- [12] Suardin, J.(2005), "The Intergration of Dow's Fire and Explosion Index into Process Design and Optimization to Achieve an Inherently Safer Design", PhD Dissertation, pp. 18-42.
- [13] Ulsan Port Authority(2021), "Statistics of cargo handling by year", <https://www.upa.or.kr>
- [14] Wang, F. and Wang, Y.(2012), "Safety assessment of production process of styrene", Procedia Engineering, Vol. 45, pp. 139-143.
- [15] Zarranejd A. and Ahmadi O.(2015), "Fire and explosion risk assessment in a chemical company by the application of DOW fire and explosion index", Journal of Occupational Health and Epidemiology, Vol. 4, No. 3, pp. 163-175.