

PX 공장에서의 공정위험성 재평가에 의한 위험관리

임종우* · 우인성*

*인천대학교 안전공학과

Risk Management for PX Plant Through Revalidation of Process Hazard Analysis

Jong Woo Lim* · In Sung Woo*

*Department of Safety Engineering, Incheon National University

Abstract

Process Hazard Analysis(PHA) have been performed for a risk management of process (petrochemical) industry for nearly 50 years. There are many PHA methods for application in the process industry, Hazop Study method has been recognized as a good method used typically in most of phase of process plant. And also there was inconvenient opinion that Hazop Study is too resource (man power, time etc.) consuming comparing its result performance (a quality of recommendations) for a good operating and existing plant.

In this study, two types of PHA method - checklist and K-PSR - were performed respectively for a new para-xylene(PX)plant and 30 year old PX plant. Past history and experience of incident, operation, maintenance and so on are very important in PHA by those two methods. The higher effectiveness were realized in PHA by a checklist and K-PSR Method than prior Hazop study. And also some suggestions including PHA cycle determination, RBPS application, Follow-up plan of PHA result etc. were proposed about PHA improvement measures for a best risk management.

Keywords : Hazard Analysis, Hazop Study, K-PSR, Checklist, Re-Validation, PX Plant

1. 서론

석유화학공정에서 위험관리를 위한 공정위험성평가는 지난 50 여 년간 지속적으로 수행되어 왔으며 대부분의 회사는 자체 공정안전관리 체계에 법적인 의무 수행 요건을 포함하여 위험성평가를 관리하여 왔다. 많은 안전관리 기관 및 전문단체가 안전관리 프로그램에 위험성평가의 주기적인 개정 즉 재평가 요건을 포함하고 있다. AIChE CCPS (Center for Chemical Process Safety) 는 3 ~ 5년 주기로 위험성 재평가를 수행하되 사고 발생이나 공정 변경사항을 고려하여 주기를 조정, API(American Petroleum Institute) 는 3 ~ 10년 주기로 수행하되 공정 기술이나 설비에서의

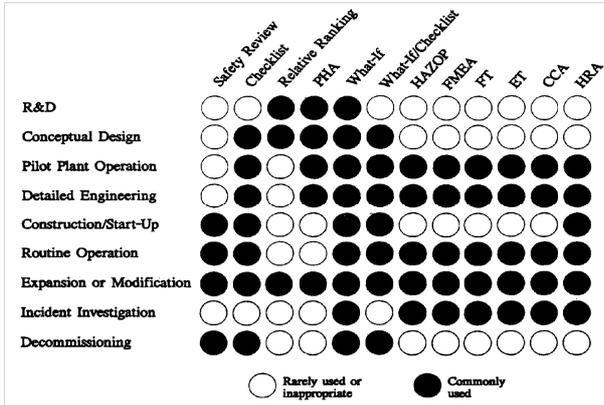
변경 사항 및 공정 위험도를 재평가 주기 선정에 반영, USA OSHA 와 EPA 는 5년 이내 주기로 재수행을 권고하고 있으며, 국내에서도 산업안전보건법에서 1 ~ 4년 주기, 고압가스안전관리법은 5년 주기 위험성평가 재수행을 권고하고 있다.

산업계에서의 실질적 위험성평가 수행 필요성 요구에 부합하여 학계 및 연구계에서도 일반적인 위험성평가 수행 관련하여 다양한 연구 검토가 수행되어 왔고, 위험성평가 기법 및 수행 방법에 대한 참고 서적도 다수 출간되었다. 그러나 신규 건설 이후 계속 운전 중인 공정에 대해 주기적으로 재수행되는 '위험성 재평가' 관련 주제로 수행된 연구는 그 사례가 국내 연구

†Corresponding Author : In Sung Woo, Safety Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, , E-mail: insung@incheon.ac.kr

Received July 12, 2017; Revision Received August. 12, 2017; Accepted September. 12, 2017.

논문 및 학술지에서는 파악되지 않았다. 위험성 평가는 대상 공정의 수명 단계 (설계, 건설, 운전, 변경 등) 별로 적절한 평가 기법이 사용될 수 있는데, [Figure 1] 에 공정 수명 단계별로 사용되는 위험성 평가 기법이 정리되어 있다.



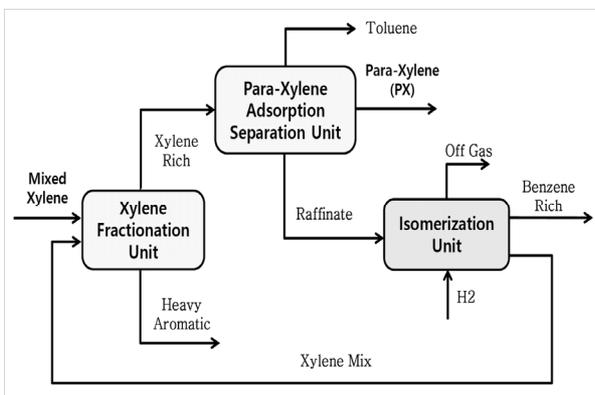
[Figure 1] Typical Uses for Hazard Evaluation Techniques

본 연구는 최근 국내는 물론 세계적으로 증설 붐이 일었던 Para-Xylene 공장을 대상으로 하여 위험관리의 핵심 요소인 위험성평가의 재평가를 안전 측면 및 비용 측면에서 효과적으로 수행하는 방안에 대해 연구 검토를 수행하였다.

2. 위험성 재평가 준비

2.1 평가 대상 공정

평가 대상인 Para-Xylene 공장은 운영하는 회사에 따라 조금씩 다른 여러 단위 공정으로 구성되어 있지만, 일반적으로 [Figure 2] 와 같이 구성되어 있다.



[Figure 2] Para-Xylene(PX) Plant Block Diagram

Main 공정인 Para-Xylene 흡착/분리 공정 (PX Adsorption Separation Unit)에서 혼합 Xylene을 원료로 Para-Xylene을 흡착/분리 생산하며, 원료인 혼합 Xylene은 Xylene 분리공정(Xylene Fractionation Unit)에서 생산된다. 일부 부산물 성분 (Raffinate)은 이성화 공정 (Isomerization Unit)으로 이송되어 Xylene 성분을 다량 함유하는 물질로 이성화 반응 처리된 후 Xylene 분리공정으로 순환된다. 본 연구 대상으로는 가동을 시작하지 2년이 경과하지 않은 신규 공장과 가동 한지 30여 년이 경과된 공장을 선정하였다.

2.2 평가 기법 선정

위험성평가 기법은 통상적으로 공장의 수명 단계 (설계, 건설, 운전, 변경 등), 공정 복잡도, 규모 등을 고려하여 선정되지만, 위험성 재평가 시에는 재평가 목적이 추가적으로 중점 고려되어 위험성평가 기법이 선정되어야 한다. 재평가 목적으로는 첫째 공장의 현재 조건과 환경에 맞추어 기존 위험성평가 사항을 개정하는 것이고 둘째로는 회사가 보유한 자원 (시간, 인력 등)을 고려하여 효율적으로 수행하는 것이다.

국내에서 위험성 재평가 시 Hazop Study (Hazard & Operability Study) 기법이 통상적으로 사용되고 K-PSR (KOSHA Process Safety Review), Checklist 기법 등이 공정 특성이나 평가 투입 자원 여건에 따라 대체적으로 사용되고 있다. Hazop Study 기법은 7 개의 제시어(Guide Words)와 공정변수 (Process Parameter)를 일대일로 조합한 가상의 이탈현상 (Deviation)을 검토 시나리오의 출발점으로 하여 해당 검토 구간 (Study Node), 그리고 대상 공정 전체에 대하여 반복적인 검토를 수행함으로써 공정의 위험요소를 찾아내고 그 제거 방안을 제시하는 기법이다. [Figure 3]은 일반적인 Hazop Study 수행 결과 기록 (Work Sheet) 예시를 나타낸다. K-PSR 기법은 영국 ICI사의 PHR (Process Hazard Review) 기법 (기존 공정에 대해 Hazop Study 기법 대체용으로 개발된 기법)을 근간으로 개발되었다.

본 연구에서 대상으로 선정된 2개 공정에 대한 위험성 재평가는 신규 공정 (이전 평가는 Project 수행 단계인 2년 전 Hazop Study 기법 수행)에 대해서는 Checklist 기법, 30여년 운영된 공장 (이전 평가는 5년 전 Hazop Study 기법 수행)에 대해서는 K-PSR 기법을 적용하여 수행하였다.

Deviation	Causes	Consequences	Safeguards	R	Recommendations
No Flow	Pump failure	No flow to Oxygen Stripper (5/4/5)	FC-4001 low flow alarm; Oxygen Stripper low level alarm; Standby Pump	4	Update P&ID to show high & low alarms to DCS system
No Flow	Block valves closed	No flow to Oxygen Stripper	Operating procedures; FC-4001 low flow alarm	4	NAR
No Flow	Control valve FC-4001/fail-closed	No flow to Oxygen Stripper	By-pass valve used in emergency	4	NAR
No Flow	Blind flange left in the line	No flow to Oxygen Stripper	FC-4001 low flow alarm; Oxygen Stripper low level alarm	4	NAR
No Flow	Strainer plugged	No flow to Oxygen Stripper	FC-4001 low flow alarm; Oxygen Stripper low level alarm	4	NAR
No Flow	Pipeline plugged downstream of pumps	No flow to Oxygen Stripper and Possible cavitation (5/1/1)	FC-4001 low flow alarm; Oxygen Stripper low level alarm; In-line strainers; Operation procedures	3	NAR
No Flow	Burst Pipe	No flow to Oxygen Stripper	Low flow alarm	3	NAR
More Flow	Both pumps are running	Overflowing of Oxygen Stripper (5/5/5)	High flow alarm in FC-4001; FIC-4001 control loop; Regular patrol; Discharge valve normally closed on stand-by pump; High level alarm in Oxygen Stripper	4	NAR
More Flow	Failure of FIC-4001 control loop	Overflowing of Oxygen Stripper (5/4/5)	High level alarm in Oxygen Stripper; TI-4006	4	NAR
More Flow	By-pass valve open	Overflowing of Oxygen Stripper (5/5/5)	(Same as above); Operating procedures for manual by-pass valve	4	NAR
Higher Temperature	Failure of TIC-4007 loop	Unstable operation in Oxygen Stripper (5/2/2)	None	3	Consider the install of a separate TI on the inlet of Oxygen Stripper block valves around TV-4007
Higher Temperature	Less flow feed stock	Unstable operation of Oxygen Stripper (5/2/2)	TI/TR-4007; High/low temp alarm from TIC-4007	4	NAR

[Figure 3] Typical Work Sheet of Hazop Method

2.3 평가 자료 준비 및 평가팀 구성

일반적인 위험성평가에서도 적용되는 평가 기법에 따라 여러 필수적인 기본 자료가 요구되는데 위험성 재평가에서는 특히 사고 사례, 운전 이력, 검사 및 정비 이력, 공정 설비 및 절차 (작업표준) 변경 이력 등 과거 경험 이력 자료가 중요하다. 이러한 자료는 평가 시작 전에 준비되어 어느 정도 사전에 미리 검토되어 지고 평가 회의 시 중점 사항 또는 추가적인 보완 사항에 대해 협의가 진행된다면 평가 회의가 상당히 효율적으로 진행될 수 있다. 위험성 재평가를 수행하는 팀 구성에 있어서도 평가팀 리더가 가장 핵심 인력이지만, 경험 이력이 중요한 만큼 공정 시설의 운전과 정비에 경험이 있는 인력이 반드시 참여하도록 하여야 한다. 위험성 재평가 결과의 수준은 자료의 준비와 평가팀의 전문 경험인력 구성이 전제되지 않으면 좋은 결과를 기대할 수는 없다. 본 연구 사례에서도 위험성 재평가지기 사전에 자료 준비를 충분히 하였고, 평가 인력 구성에서도 각 분야 전문 경험 인력이 참여하였다.

3. Checklist 위험성 재평가

3.1 Checklist 평가 항목 개요

본 연구에서 Checklist 위험성평가 시 사용되는 Checklist 는 10개 Issue 항목 (Categories) 별로 각각 작성된 서식이며, 10 개 항목의 선정은 위험성평가 관련한 법적 기준, 위험성 평가 관련 참고 문헌 및 공

정 경험자 의견을 반영하여 작성되었다. <Table 1> 에 Checklist 10 개 Issue 항목의 제목을 나타내었다.

<Table 1> Issue categories to be reviewed in Checklist PHA

No.	Issue Categories
1	Prior Results of Hazard Analysis
2	Incident History
3	Management of Change
4	Inspection & Maintenance History
5	Process Safety & Reliability Issue
6	Work Procedure Review
7	Audit Results by Internal/External Body
8	Employee Competency
9	Regulation / Standard Compliance
10	Process Risk

[Figure 4] 는 평가 시 사용되는 10개 Issue 항목 (Categories) 별 Checklist 평가 기록지 (Work Sheet) 의 제목 행만을 모아서 나타낸 것이다.

1	PHA Method (Year)	Unit or Process	Issues (Include Unsolved Action Items)	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks
2	Incident Title (Year)	Incident Descriptions (Include Cause)	Lessons Learned (Include Action Items)	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks
3	Key Process Change	Change Descriptions	Problem and Present Status	Existing Safeguard	Scenario No.	Recommendations	Remarks
	MOC Related Work	Work Descriptions	Problem and Present Status	Existing Safeguard	Scenario No.	Recommendations	Remarks
4	Inspection Facility	Inspection History	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
	Maintenance Facility (Repeated or key items)	Maintenance History	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
	Maintenance Policy and Procedures	Key Change	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
5	Process Safety & Reliability Issue	Descriptions	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
	Process Safety Suggestions	Descriptions	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
6	Work Procedures (Title & Process)	Review Contents	Problem and Present Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
7	Audit/Inspection (Work Date)	Issues and Recommendations	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	
8	Employee Competency & Mindset	Problem and Present Status			Scenario No.	Recommendations	Remarks
9	Regulations/Standards	Revision History	Problem and Action Status	Scenario No.	Recommendations	Remarks	

[Figure 4] Review Checklist for Issue Categories

3.2 Checklist 평가 내용 및 결과

위험성평가는 10 개 Issue 항목별 세부 검토 항목으로 수행되었으며, 평가 결과 위험 개선이 필요하다고 판단되는 사항에 대해 권고사항이 제시되었다. [Figure 5]는 평가된 Issue 항목 중 1 개 항목인 '검사 및 정비 이력'에 대한 평가 결과 기록 Work Sheet 이다.

Inspection Facility	Inspection History	Problem and Action Status	Scena. No.	Recommendations	Remark
O2 Stripper Condenser (AT-E0105) Outlet	Piping Elbow Erosion / Corrosion and Leak (5/2)	Temporary Patching Repair and Piping Material Change (In Next Overhaul)	4-1		
O2 Stripper Condenser (AT-E0105) Tube	Tube Erosion/Corrosion and Leak (5/23)	Temporary Plugging Repair and Tube Bundle Change (In Next Overhaul)	4-2		

Maintenance Facility (Repeated or key Items)	Maintenance History	Problem and Action Status	Scena. No.	Recommendations	Remark
Chamber Analyzer Probe (AI-0003)	Analyzer Sample Probe Damage	Damaged Probe Change	4-3	o After Trouble Cause Analysis, Make Action Plan including Probe Type Change	
Annubar Flowmeter (FT-0023)	Flowmeter Hole Plugging and Shaft Bending	Material Change and Size-up (In Next Overhaul)	4-4		

Maintenance Policy and Procedures	Key Change	Problem and Action Status	Scena. No.	Recommendations	Remark
Facility Classification Level	No Change.	No Issue.	4-5		
Maintenance Procedure	No Change.	No Issue.	4-6		

[Figure 5] Checklist Work Sheet of One Review Category 'Inspection & Maintenance History'

[Figure 6]은 전체 평가 결과를 요약 정리한 사항이다. 평가 결과 제시된 권고사항은 해당 공정에서 검토 과정을 거쳐 조치 계획을 수립하여 조치를 완료하게 되었다.

Issue Categories	Summery of PHA Results (Recommendations)
1 Prior Results of Hazard Analysis	To Follow-up of Recommendation and Carry-out Quantitative Risk Assessment.
2 Incidents Case	To share incident case from other Similar Process (No Incidents after Start-up of Process)
3 Management of Change	To Apply a Proper Method for Process Change. (Most of Change use Checklist Method for PHA.
4 Inspection & Maintenance History	To Review Chamber Analyzer Probe Damage and Flow Transmitter Hole Plugging
5 Process Safety & Reliability Issue	To Process Noise Protection for Vent Gas Compressor. To Review a Suggestion about PSM Improvement from Field Employees
6 Work Procedure Review	To Revise Operation/Work Procedure according to PSM Requirement
7 Audit Results by Internal or External Body	Need to Maintain Good Follow-up Status for Recommendations of Audit.
8 Employee Competency	No Change in Shift Organization, Training Program and PPE Management Policy
9 Regulations/ Standard Compliance	Good Practice for Compliance on Safety Regulations and Standards
10 Process Risk	No Major Process Change and No Risk Change

[Figure 6] Summery of Checklist PHA Results

3.3 Checklist 평가 효과

대상 신규 공정은 공정이 가동을 시작한지 2년이 되지 않아 아직은 공정에서 중대 변경이 이루어지지 않았으며, 이전 위험성평가 (Hazop Study 기법 적용) 수행 이후 2년이 경과되지 않아 시간과 인력이 장시간 참여해야하는 Hazop Study 와 같은 복잡한 평가 기법은 필요하지 않은 시점이어서 통상의 Hazop Study 기법 대신 Checklist 평가 기법이 적용되었다. 본 연구에서 사용한 Checklist는 위험성평가관련 참고 자료 및 공정의 특성을 적절하게 반영하여 개발함으로써 이전 Hazop Study 평가기법과는 다른 시각에서 공정의 위험요소를 효과적으로 검토할 수 있게 되었고, 회사의 자원 (인력, 시간) 또한 적절하게 투입되는 효과 (기존 Hazop Study 기법 적용 시 1개월여 소요, Checklist 기법 적용 시 1 주 소요, 자료 준비기간은 제외)를 가져 왔다.

4. K-PSR 위험성 재평가

4.1 K-PSR 평가 항목 개요

본 연구에서는 통상적인 K-PSR 기법의 4개 위험요소 (4 Hazard Factor : 누출, 화재 폭발, 공정 이상, 인체상해)의 시나리오들을 포함하는 평가 기록지 (Work Sheet) 항목 외 보다 실질적인 잠재 위험 요인을 도출하기 위한 4개 항목이 추가 항목으로 포함되어 위험성 재평가가 수행되었다. <Table 2>에 본 연구의 위험성평가에서 평가된 5 개 Issue 항목을 나타내었으며, 포함 항목 중 Employee Concern Point 는 위험성평가가 수행되기 전에 대상 공장 근무 인력을 대상으로 '공장에서 사고를 유발할 수 있는 위험요소가 무엇인지?'에 대한 사전 설문을 실시하여 그 결과를 정리한 내용이다.

<Table 2> Issue categories to be reviewed in K-PSR PHA

No.	Issue Categories
1	K-PSR 4 Hazard Factors
2	Prior Results of Hazard Analysis
3	Incident History
4	Management of Change
5	Employee Concern Point

[Figure 7] 은 평가 시 사용된 K-PSR 기법 4 개 위험요소 검토 항목이 포함된 Work Sheet 양식을 보여 준다.

Node No.	Company / Plant		Date/ Participant		P&ID No.			Action to be considered
	Process/System	Node Description	FI	CI	RI	Scena. No.		
Loss of Containment	Corrosion, Erosion							
	Leak & Puncture							
	Rupture							
	Opening Mis-Operation							
	Others							
Fire & Explosion	Flammables Existed							
	Ignition Source							
	Others							
Process Trouble	Temp.							
	Pressure							
	Flow							
	Level							
Human Injury	Falling, Contact, Burn, Toxication, Asphyxiation etc.							

(*) FI : Frequency Index, CI : Consequence Index, RI : Risk Index, Scena. No. : Scenario Number

[Figure 7] Review Work Sheet for K-PSR

4.2 K-PSR 평가 내용 및 결과

위험성평가는 5개 Issues(Table 2 참조)에 대해 수행되었으며, 평가 결과 위험 개선이 필요하다고 판단되는 사항에 대해 권고사항이 제시되었다. [Figure 8] 은 평가 시 구분된 여러 검토 구간 (Study Node) 중 하나의 검토 구간에 대한 검토 결과를 기록한 Work Sheet 일부분이다.

Hazard	Causes & Consequences	Problem/Concern	Safeguards	FI	CI	RI	Scena. No.	Action to be considered
Loss of Containment	Corrosion, Erosion	Rotary Valve Erosion by Contaminant	Rotary Valve Teflon seat Damage PX Off Spec.	2	4	5	2-1	
	Leak & Puncture	Press. Increase by FV-0110 Fail Close	P-0109 Discharge Press. Decrease	2	2	3	2-2	
	Rupture	P-0108A/B Seal Rupture		2	2	3	2-3	
	Opening Mis-Operation	HS-0106A Mis-operation	Selector Switch type	2	2	3	2-5	Install Switch cover
	Others	No Findings						
Fire & Explosion	Flammables	P-0108A/B	Double seal pump	2	2	3	2-6	
	Ignition	No Findings						
	Others	No Findings						
Process Trouble	Temp.	TV-0163 I/A Fail	Desorbent Function Decrease. PX Off Spec.	2	3	4	2-7	
	Pressure	Dome Press Increase by FV-0119 Fail Close		2	2	3	2-8	
	Flow	FV-0110 Fail close	Process Shut down	2	3	4	2-9	Track By-pass under Procedure
	Level	P4103AR/BR Trip	Desorbent drum Level Decrease	2	2	3	2-11	LI-0104 LAL-0104
	Others	No Findings						
Human Injury	Falling	ME-0104A/B No Ladder Cage (During Cleaning)		2	3	4	2-13	Review Cage Installation

[Figure 8] Review Result Work Sheet for One Study Node of K-PSR PHA

[Figure 9] 는 전체 평가 결과를 요약 정리한 사항이다. 평가 결과 제시된 권고사항은 전문가 그룹에 의한 추가적인 상세 검토를 수행하거나 해당 공정에서 검토 과정을 거쳐 조치 계획을 수립하여 조치를 완료하게 되었다.

	Issue Categories	Summary of PHA Results (Recommendations)
1	K-PSR Worksheet (4 Hazards Factor)	Hardware Improvement : 24 Items Procedure Revision : 2 Items P&ID Up-date : 2 Items
2	Prior Results of Hazard Analysis	No Issues.
3	Incident History	To Review 2 Items out of Lessons Learned in detail
4	Management of Change	To Confirm Status of One Item Conditionally Approved (No Issues in 80 Items)
5	Employee Concern Point	To Review 4 Items in detail To Reflect 9 Items on Work Site and Procedures

[Figure 9] Summary of K-PSR PHA Results

4.3 K-PSR 평가 효과

최초 가동 이후 30여년이 경과한 대상 공정은 공장 운영 과정에서 중대 변경이 있을 경우 위험성평가 주기가 5년보다 짧아진 경우도 있었지만 대체적으로 법적 5년 위험성평가 수행 주기에 맞추어 위험성평가를 지속적으로 실시하여 왔다.

과거 위험성 재평가 수행의 경우 대부분은 Hazop Study 기법으로 수행하다 보니 자원 (시간, 인력 등) 이 많이 투입 되었으나, 그 결과는 이전에 수행한 평가 결과에서 크게 변경되는 사항은 없었다. 즉 관심이 될만한 권고 사항이 거의 없거나 이전과 유사한 유형의 P&ID Update 사항, 감시 계기의 보완 등의 권고 사항이 제시되었다. (상기 사항은 공장에서 공정 Revamp 등 중대 변경이 수행된 시기에 별도로 수행된 Hazop Study 결과는 비교 분석에서 제외함)

본 연구 K-PSR 기법 평가에서는 K-PSR 기법 특성상 검토 시나리오가 실제 사고가 발생하였거나 사고가 발생할 가능성이 있는 항목으로 선정되었고 평가 과정에서도 그 동안의 운전/정비 경험이 팀원들과의 협의 시 반영되어 기존 Hazop Study 평가 결과와는 다른 시각에서의 위험요소 경감 방안이 다수 제시되었다. 검토 소요시간 또한 Hazop Study 평가의 1/2 정도(2주) 수준 이었다.

5. 위험성 평가 개선 방안 검토

5.1 위험성평가 수행 주기 변경

국내 대부분 공장은 법적인 수행 주기 (1년 ~ 4년)에 맞추어 위험성평가를 수행하는 것으로 파악되고 있다. 그러나 공장마다 위험 특성이 동일하지 않기 때문에 사고 예방을 위한 위험성평가가 어떤 공장에 대해서는 사후 약방문이 될 수도 있다. 최초 위험성평가 수행 이후 재수행 주기를 반드시 법적인 주기에 맞추어 수행하기 보다는 위험도에 근거하여 주기를 탄력적으로 운영하는 것이 바람직하다. 그렇게 평가를 수행하려면 각 공장에 대한 상대적 위험도가 상대위험순위평가 또는 정량적 위험성평가를 통해 파악되어야 하고, 회사 위험관리방침에도 반영되어야 한다. 정량적 위험성평가 관련 사항은 다음 5.3 항에서 좀 더 기술된다.

5.2 위험성평가 기법 순환 적용

본 연구의 대상 2 개 공장에서 K-PSR 기법을 적용한 가동이 오래된 공장의 경우 최초 신규 건설 시 Hazop Study 기법으로 위험성평가를 실시하였고, 국내 PSM 법 시행(1996년)으로 1998년 Hazop Study 기법 재평가 이후 평가 기법을 변경하면서 위험성평가를 실시하여 왔으나 재평가 시 K-PSR 기법 적용은 이번이 처음이다.

많은 국내 사업장이 위험성 재평가 시 이전 평가 시 적용한 평가 기법과 동일하거나 해당 공장에 적절하지 않은 간소한 평가 기법을 사용하는 경향이 있다. 아직 위험성평가에 대한 전문성 부족이 주 원인이지만 위험 관리 측면보다는 법적 요건 충족을 고려한 바람직하지 않은 업무 관행이라고 할 수 있다. 재평가를 주기적으로 수행함에 있어서 하나의 기법을 계속 적용하기보다는 순차적으로 기법을 변경해 가며 수행하도록 하는 것이 효과적임이 본 연구 위험성평가 수행결과에서 파악되었다. (다른 시각에서의 위험요소 발굴 및 제거/경감 방안 제시, 수행 소요 시간 경감 등 효과, 본 논문 3.3 항, 4.3 항 참조) 다만 이러한 효과는 해당 공정 특성에 적합한 기법 적용, 전문성과 경험을 가진 인력이 참여해야 하는 것을 전제로 한다. 또한 적절한 평가 Checklist 나 Work Sheet, 과거 이력 (사고, 운전, 검사 및 정비 등) 관련한 자료가 사전에 충분히 준비되어야 한다. 이렇게 수행 기법을 순차적으로 변경 적용하게 되면 위험성평가가 이전의 결과를 그대로 반영하는 형식적인 수행을 방지하고 실질적인 위험성을 식별

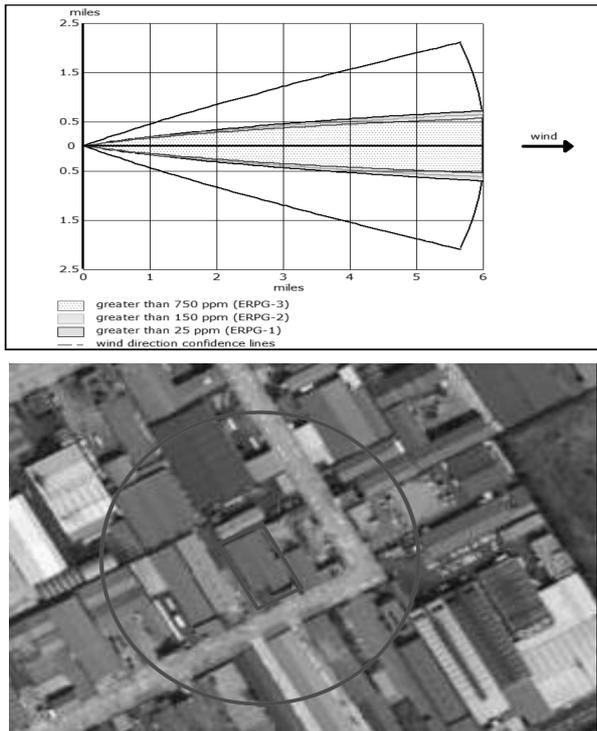
하는데 효과가 크고 구성원들의 위험성평가 역량 향상에도 도움이 된다.

5.3 정성적 평가와 정량적 평가의 연계 수행

2012년 구미 불산 누출 사고의 여파로 안전환경 관련 법적 요건이 상당히 강화되었는데 특히 정량적 위험성평가 및 비상대응 태세 확보에 집중되어 있다. 정량적 위험성평가는 대상 공장/공정에 대하여 사고가 발생 가능한 시나리오를 가상으로 선정하여 어느 정도 확률로 발생하고 그 피해 영향이 어디 까지 미칠 것인지 평가를 하는 것으로 그 시작점이 되는 가상사고 시나리오는 Hazop Study, K-PSR, Checklist 등 정성적 위험성평가 결과에서 위험도(Risk)가 크다고 판단되는 항목을 선택하는 것이다. 그러므로 어떤 공장/공정에 대해 정성적 위험성평가가 수행되면 반드시 그 결과를 근거로 정량적 위험성평가가 실시되고 정량적 위험성평가 결과는 우선 해당 공장/공정의 위험도를 낮출 수 있는 방안 (설비 개선, 절차 개정 등)을 마련하여 시행하고, 또한 회사 비상대응계획에 반영되어 어떠한 연유로 불가피하게 비상 상황이 발생하더라도 그 피해를 최소화할 수 있는 체계가 상시 마련되어 있어야 한다.

일반 사업장 입장에서도 예전에는 정량적평가를 수행하려면 전문 컨설팅회사의 용역에 의존하는 경우가 대부분이었으나 최근 일반 엔지니어가 큰 어려움 없이 사용할 수 있는 프로그램이 소개되고 관련 교육의 기회도 많아짐에 따라 최근에 유해위험물질을 취급하는 산업계에서의 정량적평가가 활성화되고 있다.

[Figure 10] 은 유해위험물질을 취급하는 공정에 대하여 국내에서 범용으로 사용할 수 있는 프로그램에 의한 정량적 평가 (피해영향범위산정) 결과 피해범위 거리가 표시된 일반 예시를 나타낸 것이다. 본 연구 대상 공장에 대해서도 별도 과제로 정량적 위험성평가가 계획되어 추진되고 있다.



[Figure 10] General Example of Effect Zone Diagram for Consequence Analysis

5.4 위험도기반 공정안전관리 적용

PSM(Process Safety Management, 공정안전관리)의 원조인 미국에서는 이미 2000년대 중반부터 ‘위험도기반 공정안전관리’ (RBPS, Risk Based Process Safety) 가 적극적으로 권장 추진되고 있다. RBPS의 20개 운영 요소 중 1개 요소인 위험성평가에 대해 핵심 추진 과제(Key Principles), 주요 활동 항목(Essential Features), 세부 실행 활동(Work Activities), 지속적 개선활동(Ways to Improve), 업무 수행활동 성과 측정 항목(Metrics), 경영층 검토(Management Review) 항목으로 구분하여 수행 업무를 관리하는 것이다. 회사의 자원에는 한계가 있다. 공정 위험도에 근거한 위험성평가 관리가 필요한 이유이다. 국내에서 아직 활발하게 추진되고 있지 않지만 한정된 자원의 선택과 집중이라는 개념의 도입이 필요한 시점이다. <Table 3>는 위험도 기반 공정안전관리 관점에서 위험성평가 업무에 대해 업무 수행활동 성과를 측정하는 항목(Metrics)의 예시이며 예시에 있는 항목이 성과 측정 항목 모두를 나타낸 것은 아니다.

<Table 3> Risk Based Process Safety Metrics for Process Hazard Analysis (PHA)

No.	Metrics
1	Number of PHA that are Overdue
2	Number of Audit Findings for PHA
3	Number of Qualified PHA Leader, Scribes, and Participants
4	Number of PHA Scheduled
5	PHA Technique Used
6	Percentage of Recommendations for Administrative Controls, Engineered Controls, and Inherently Safer Alternatives
7	Number of Recommendations per Study or per Year
8	Number of Recommendations Unsolved by Their Due Date
9	Percentage of Repeated Recommendations
10	Average Time Corrective Actions Require for Completion
11	Percentage of Recommendations Rejected by Management
12	Residual Risks

5.5 위험성평가 사후 관리

어느 제도나 프로그램 운영에 있어서 이행성에 대한 사후 관리가 철저하지 않으면 이전에 얻어진 좋은 성과가 결국 무용지물이 되는 경우를 직접적으로든 간접적으로든 자주 경험할 수 있다. 위험성평가에서 사후 관리란 평가 결과 제시된 권고사항(위험요소 제거 또는 경감 방안)을 제대로 완료하고, 위험성 평가 결과 및 조치 현황을 해당 공장/설비에 관련되는 인력에게 공지(교육)하는 것이다. 위험성 평가를 통하여 발견된 위험요소에 대한 제거/경감 방안은 적절한 추진 계획 수립을 통하여 반드시 조치 완료되어야 한다. 조치하지 않고 관심에서 멀어지게 한다면 언젠가는 그 대가를 치루게 됨을 많은 사고 사례가 증명하고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 2 개의 가동 중인 Para-Xylene 공장을 대상으로 통상적인 Hazop Study 기법을 적용하는 것보다 각각 다른 위험성평가 기법 (Checklist, K-PSR) 에 의해 위험성평가를 수행하는 것이 어느 정도 효과적으로 수행될 수 있음을 확인하였다. 즉 공장의 위험 관리를 효과적으로 하기 위해서는 하나의 위험성평가 기법을 계속 적용하기 보다는 공장의 수명 단계나 특성에 따라서 적합한 위험성평가 기법을 선정하여 적용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

결론적으로 Para-Xylene 공장과 같은 Process Industry 의 위험 관리에 적용할 수 있는 위험성평가 개선 관련 제안 사항으로 공정 위험도에 근거한 위험성평가 수행 주기 설정, 주기적인 위험성 재평가 시 이전 평가 시와 다른 평가 기법의 순환적 적용, 정성적 평가 (Hazop Study, K-PSR, Checklist 등) 결과를 근거로 한 정량적 위험성평가 수행, 위험도 기반 공정 안전관리 요소로서의 위험성평가 관련 업무 수행, 위험성평가 결과의 철저한 사후 관리의 5 개 항목을 제시하였다.

본 연구는 Para-Xylene 공장을 대상으로 하여 수행되었지만, 연구 결과 제안 사항은 다른 Process 산업 및 일반 제조 산업 현장에도 충분히 적용될 수 있다. 국내 사업장이 본 연구 결과 제안 사항을 위험성평가 관련 업무에 제대로 적용할 수 만 있다면 회사 내에서 잠재적으로 발생할 수 있는 많은 사고가 사전에 효과적으로 예방될 수 있을 것으로 사료된다.

7. References

- [1] Walter L. Frank and David K. Whittle, (2001), "Revalidating Process Hazard Analysis", 1st Ed., CCPS of AIChE.
- [2] CCPS Working Group of AIChE, (2008), "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", 3rd Ed., A John Wiley & Sons, Inc.
- [3] A Law of KOREA MOEL (Ministry of Employment and Labor) Code 2016-17, (2016), "Industry Hazard Evaluation Code"
- [4] KOSHA Technical Guide P-82-2012, (2012), "Hazard and Operability Method for Continuous Process"
- [5] KOSHA Technical Guide P-81-2012,

(2012), "Checklist Hazard Analysis Method Application"

- [6] KOSHA Technical Guide P-111-2012, (2012), "K-PSR Method Application"
- [7] <http://nics.me.go.kr>, KORA Program
- [8] <https://www.epa.gov>, ALOHA Program
- [9] CCPS Working Group of AIChE, (2007), "Guidelines for Risk Based Process Safety", 1st Ed., A John Wiley & Sons, Inc.

저자 소개

임종우



SK 에너지 공정/안전환경 분야에서 30여년 근무 후, 현재 안전환경컨설팅 및 인천대학교 대학원 안전공학과 박사과정 중
관심분야 : 공정안전관리, 공정위험성평가, 장외영향평가, 방폭공학, 재해요인분석 등

우인성



명지대 대학원 박사학위 취득, 중부권 연구실담당 지원센터장, 현재 인천대학교 안전공학과 정교수로 재직 중
관심분야 : 화학공정, 유체역학, 화학안전공학, 방화방폭공학, 환경화학, 폐수처리공학 등