



공정안전성과지표 적용을 위한 공정안전시스템 분석방안 연구

고병석·임동휘*·김민섭**·설지우·유병태***·†고재욱****

광운대학교 화학공학과 박사, *광운대학교 화학공학과 석사, **광운대학교 화학공학과 박사과정,
한국교통대학교 안전공학과 교수, *광운대학교 화학공학과 교수
(2022년 4월 11일 접수, 2022년 4월 20일 수정, 2022년 4월 28일 채택)

A Study on Process Safety System Analysis for Application Process Safety Performance Indicators

Byung Seok Ko · Dong-Hui Lim · Min-Seop Kim
Ji Woo Seol · Byung Tae Yoo* · †Jae-Wook Ko

Dept. of chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

**Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Korea*

(Received April 11, 2022; Revised April 20, 2022; Accepted April 28, 2022)

요약

선진국에서는 공정안전관리제도의 도입으로 사고는 상당히 감소하였으나, 규제적 성격을 띄며, 실질적인 사업장안전관리의 실패를 보여주기 어렵다는 한계를 보인다. 많은 기관에서 공정안전상태를 포괄적으로 모니터링 할 수 있는 공정안전성과지표의 사용을 권장하고 있다. 본 연구에서는 공정안전성과지표 적용을 위하여 관련 Guideline을 비교·분석하고 사업장의 공정안전시스템을 분석하여 지표로 활용하는 방안을 검토하였다. 문헌적 지표에서는 절차의 준수 여부 위주로 확인하는 반면, 시스템 기반의 지표에서는 안전시스템의 특정 목적을 위한 절차나 검사 등을 명확하게 식별할 수 있도록 하고, 운영상태가 어떤지 측정하여 모니터링 할 수 있다. 이러한 특성은 안전관리 활동을 운영함에 있어 도출되는 보완사항들의 명료성 측면에서 더 유리함을 알 수 있다. 이를 활용하여 사업장 안전관리 수준을 효과적으로 보여줄 수 있다.

Abstract - In developed countries, the number of accidents has significantly decreased with the introduction of the process safety management system, but it has a regulatory nature and it is difficult to show the actual situation of workplace safety management. Many organizations recommend the use of process safety performance indicators to comprehensively monitor process safety status. In this study, for the application of process safety performance indicators, the related guidelines were compared and analyzed, and the method of using the process safety system of the workplace as an indicator was reviewed. In literature indicators, compliance with procedures is mainly checked, whereas in system-based indicators, procedures or inspections for a specific purpose of the safety system can be clearly identified, and the operation status can be measured and monitored. It can be seen that this characteristic is more advantageous in terms of the clarity of the supplements derived in operating safety management activities. Using this, it is possible to effectively show the level of safety management in the workplace.

Key words : process safety performance indicators, risk assessment, system analysis, bow-tie analysis

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

산업화 이후 정유·화학공정 산업은 급속히 고도화되었다. 더욱 다양하고 정밀한 설비들이 사용되고, 더 세밀한 제어를 요구하게 되었으며, 플랜트 구성요소의 상호작용이 중요해짐에 따라 설비 간에 미치는 영향이 점차적으로 커졌다. 이에 따라 설비 상태를 파악하기 위한 다양한 검사방법이 개발되어 운영되고 있지만 공정안전사고는 계속 발생하고 있다. 이것은 단순한 설비검사만으로는 플랜트의 안전상태를 제대로 모니터링하기 어렵다는 것을 보여준다.

이를 보완하기 위하여 우리나라를 포함한 미국, 영국 및 독일 등 유럽연합 선진국에서는 공정안전관리 제도를 도입·운영하고 있다.[1] 공정안전관리제도의 도입으로 사고는 상당히 감소하였으나, 규제적 성격을 띄며, 보고서를 중심으로 형식적 작업을 위주로 수행되어 실질적인 사업장안전관리의 실태를 보여주지 어렵다는 한계를 서서히 보이고 있다. 다만 공정안전관리제도의 도입은 중대산업사고를 상당히 감소시킴으로써 체계적인 공정안전관리의 중요성을 잘 보여 주었고, 이와 함께 효율적인 제도의 운영과 공정안전관리 실태의 인지가 더욱 필요함을 나타내 주고 있다.

실태를 인지하기 위한 중요한 요소는 공정안전관리 요소에 대한 감시체계이다. 현재 공정안전관리 요소들이 효율적이고 효과적으로 운영되고 있는지 판단하기 위한 방법으로 CCPS(Cheical Process Safety), OECD(Organization for Economic Cooperation and Development), API(American Petroleum Institute), HSE(The Health and Safety Executive) 등 많은 기관에서 공정안전상태를 포괄적으로 모니터링 할 수 있는 공정안전성과지표의 사용을 권장하고 있다. 각 기관마다 공정안전성과지표를 도출하고 활용하기 위한 가이드라인을 제시하고 있지만, 실제 적용에 다소 어려움이 있어 공학적이고 기술적인 추가 연구가 필요하다. 이는 산업현장의 공정 및 환경적인 다양성으로 인하여, 기관에서 제시하는 가이드라인에 지표를 일괄적인 방법으로 적용하도록 기술하는 데에는 어려움이 따르기 때문이기도 하며, 강제하지 않고 사업장에서 적용할 수 있는 다양한 방법으로 가이드라인에서 제시하고 있는 방향성을 따라갈 수 있도록 자율성을 보장하기 위함이기도 하다. 하지만 도리어 이러한 부분들이 공정안전에 대한 노하우와 기술이 부족한 개별 기업들에게는 지표를 적용하기 어렵게 만드는 요인이 되어버리는 역설적인 상황이 발생하고 있다.

따라서 이 연구에서는 공정안전성과지표 적용을 위하여 관련 Guideline을 비교·분석하고 사업장의 공정안전시스템을 분석하여 지표로 활용하는 방안을

검토하고자 한다.

II. 공정안전성과지표

서론에 설명한 내용과 같이 많은 기관에서 안전관리활동에 대한 성과를 측정하기 위하여 안전성과지표를 정의하고 수립하는 방안에 대한 Guideline을 제시하고 있다. 공정안전성과지표의 구성 및 특성을 비교하기 위하여 주요 기관에서 제시하고 있는 공정안전성과지표 Guideline을 정리하였다.

2.1. OECD Guidance on Safety Performance Indicators

OECD에서는 직접 측정이 어려운 안전의 개념을 파악하고 측정할 수 있도록 의미를 부여하기 위하여 지표를 사용하고 있다. 위험을 감소시키기 위한 조치를 취하고 있는지 확인하는 활동지표와 그러한 조치들이 사고 발생 가능성 또는 피해영향을 감소시키는 지 여부를 확인하는 결과지표, 두 가지 유형의 지표개념을 기반으로 안전성과지표로 사용하도록 가이드하고 있다. OECD에서 제시하고 있는 지표 항목들은 전문가들이 축적한 문헌적이고, 경험적인 내용으로 구성되었으며, 사업장에서 필요한 항목들을 선택적으로 활용할 수 있도록 구성되었다.[2]

OECD에서 제시하고 있는 지표들 중 산업계에서 사용하고 있는 6개 지표 항목과 그 세부 항목을 Table 1에 정리하였다.

2.2. CCPS Guidelines for Process Safety Metrics

CCPS 지침은 현대적인 공정안전성과지표 개념의 기초가 된 지침이다. CCPS 지침은 Process Safety Pyramid 개념을 바탕으로 중대산업사고에 대하여 아차사고부터 예방하면 충분히 많은 중대산업사고를 막을 수 있다고 설명한다.[3]

이 개념을 바탕으로 CCPS 지침에서는 공정안전사고와 관련된 사항들을 후행지표로 정의하고, 사고 예방활동과 관련된 사항들을 선행지표로 정의하였다. 이 지침에서 설명하고 있는 지표 선택 방법은 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

- (1) 경험적인 방법
- (2) 문헌적인 방법
- (3) 방호설비를 이용하는 방법

경험적이고, 문헌적인 방법은 OECD 지침에서 제시하고 있는 내용과 유사하나, 특별히 CCPS에서는

공정안전성과지표 적용을 위한 공정안전시스템 분석방안 연구

Table 1. Safety Indicators in OECD guidelines

지표항목	세부항목	목표	
안전정책 및 일반안전관리	종합정책	최고 경영진을 포함하는 모든 근로자가 실행할 수 있는 포괄적인 안전정책 개발	
	안전목표 및 목적	안전정책 실행을 위한 각 계층별 목표 및 목적 수립 및 성취	
	안전리더십	경영진 및 모든 근로자의 적극적 참여 및 책임감을 부여할 수 있는 리더십 개발 및 실행	
	안전관리시스템	잠재위험 식별 및 평가와 설비 운영관리를 포함하는 효율적인 안전관리시스템 개발	
안전정책 및 일반안전관리	인력	인적자원관리	근로자 역량 관리
		훈련 및 교육	유해 물질을 취급하는 모든 근로자에 대한 교육 훈련 시행
		내부의사소통/정보	근로자에 대한 정보 제공 및 안전관리 의사결정에 근로자 참여
	작업환경	작업장 및 장치의 적절한 설계를 포함한 우수한 작업환경과 정비방법 개발 및 유지	
안전 감사	안전관리 활동에 대한 검토 및 평가를 위한 효율적인 시스템을 개발하고 실행		
행정절차	잠재위험 식별과 위험성평가	잠재위험 분석과 위험성 평가를 위한 시스템 개발 및 실행	
	지침화	안전관리 정보를 지침화 되도록 하고 필요시 사용할 수 있도록 체계 개발 및 운영	
	절차(작업허가)	설비의 설계 목적을 만족시키고 안전 운전에 대한 보증이 가능하도록 유지보수 운영 절차 개발 및 실행	
	변경관리	변경이 위험을 증가시키지 않도록 하기 위한 시스템 개발 및 실행	
	협력업체 근로자 안전	협력업체의 근로자도 회사의 안전요구사항, 정책 및 절차 준수	
	제품 책임주의	전 수명주기에 걸쳐 유해물질의 안전관리 시행	
기술문제	연구 개발	제품, 공정 및 절차/방법이 지속 개선될 수 있도록 함	
	설계 및 엔지니어링	위험설비에 관한 공정 및 장비의 설계, 엔지니어링 관련하여 안전이 적절하게 고려 되도록 함	
	본질안전 공정	본질적으로 보다 안전한 공정 및 활동을 개발하고 실행	
	산업표준	모든 관련 외부표준을 고려하여 적절한 내부표준을 개발하고 실행	
	유해 물질의 저장	유해물질의 안전한 저장을 유도함	
	무결성 유지/ 유지보수	유지보수 및 검사를 통하여 장비 및 설비의 무결성을 보장	
외부협력	정부기관과의 협력	정부기관과의 협력을 위한 효과적인 시스템을 보장	
	주민 및 이해관계자와의 협력	주민 및 기타 이해관계자와의 효과적인 협력을 유도	
	타기업체와의 협력	인근 기업체 및 동종업계, 유사공정 등을 사용하는 기업들 간의 효과적인 협력 유도	
비상대응	내부 대응계획	사고의 유해 영향을 저감하기 위한 효과적인 대응계획 수립	
	외부 대응계획	정부기관 및 사고영향범위 내의 타 기업체와의 대응계획 개발 및 실행	
	산업체의 대응 협력	비상대응계획 개선을 목적으로 동종업계 산업체와의 협력 체계 개발 및 실행	
사고 조사 및 보고	사고, 아차사고 및 기타 학습경험 보고	경험에 기반한 안전관리 개선을 위해 사고, 아차사고 및 기타 학습경험을 보고하기 위한 시스템 개발 및 운영	
	조사	사고, 아차사고 및 기타 학습경험을 조사하고 근본원인을 결정하기 위한 시스템 개발 및 운영	
	사후처리	사고, 아차사고 및 기타 학습경험으로부터 습득된 경험으로 적절한 조치가 취해지도록 함	

PSM(Process Safety Management)의 구성요소와 매우 유사한 CCPS RBPS(Risk Based Process Safety) 지침의 구성요소들을 문헌적 지표로 제시하고 있다. 실제로 지표 내용들은 PSM 구성요소의 이행확인과도 유사하다.

방호설비를 이용하는 방법은 중대재해를 야기하는 사건의 개시를 막기 위한 방호장치와 중대재해로 전개되지 않도록 피해를 경감시키기 위한 방호장치의 분석을 통해 선행지표와 후행지표로 활용하는 방법이다. 방호설비에 대한 분석과 함께 경험적이고 문헌적인 지표 자료들을 활용하는 방법을 통해 사업장 환경에 더욱 적합한 지표를 개발하고 활용할 수 있다.

2.3. HSE HSG254 Developing Process Safety Indicators

HSE에서는 HSG(Health and Safety Guide) 254 지침을 발행하여 선행지표와 후행지표를 다음과 같이 정의하고 있다.[4]

- 선행지표(Leading Indicator): 미래 성과에 영향을 미칠 수 있는 조치들을 측정할 수 있는 위험기계의 유지관리 수준, 변경관리 수준과 같은 지표
- 후행지표(Lagging Indicator): 과거 조치들에 의하여 발생한 결과를 측정할 수 있는 재해율과 같은 지표

HSG254에서는 CCPS에서 설명하고 있는 지표 선정 방법 중 방호설비를 이용하는 방법을 사용하여 지표를 선정하고 있다. 지침에서는 Fig.1 과 같이 방호설비들은 RCS(Risk Control System)로 지칭하며, 방호설

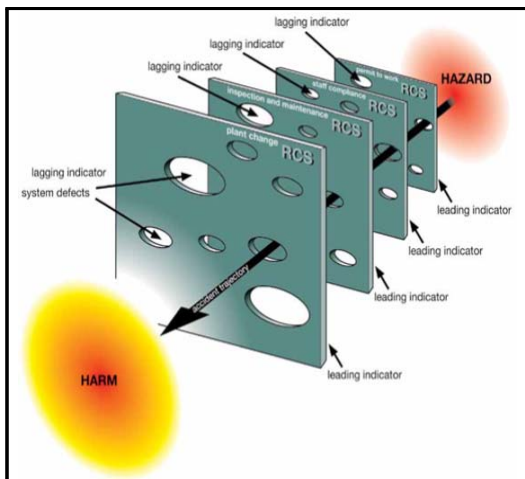


Fig. 1. Indicators from Risk Control System.

비가 가지고 있는 특성에 따라 계층을 구분하고 있다.

RCS의 특성에 따른 약점들을 후행지표로 선정하고, 방호계층 자체의 건전성을 선행지표로 선정한다. 방호계층의 건전성 확보를 통해 사고를 예방하는 목적을 달성하기 위해 지표를 선정하고 운영한다.

HSE의 지표 작성 절차는 총 6단계이며, Table 2에 정리하였다.

HSE 가이드라인은 선행지표와 후행지표간 연관성을 잘 나타내면서도, 사고 발생을 예방하기 위한 위험관리시스템에 대하여 독립적으로 지표를 선정하고 측정할 수 있다. 이상적인 위험관리시스템의 후행지

Table 2. The Six steps to setting indicators

1단계	지표 수행 조직체계 확립	관리자 또는 책임자 임명
		실행 팀 구성
		최고 경영진의 관심과 지원 필요
2단계	대상범위 결정 문제발생 가능성 있는 요소 및 발생원인 확인	측정 단위 조직 수준 선택
		측정 시스템 범위 규명 - 사고시나리오 확인 - 유해위험요인 시나리오별 원인 확인
3단계	중대산업사고 방지를 위한 위험관리시스템 확인 각 시스템의 성과 결정 및 후행지표 설정	어떤 위험관리시스템이 마련되어 있는지
		성과설명
		후행지표 설정 허용기준을 벗어난 이탈 추적
4단계	각 위험관리시스템의 필수요소 확인 및 선행지표 설정	위험관리시스템에서 가장 중요한 부분은 무엇인지
		선행지표 설정
		허용기준 설정 허용기준에서 벗어난 이탈 추적
5단계	데이터수집 및 보고시스템 확립	정보수집, 정보/측정 단위의 가용여부 또는 설정 가능여부 확인
		프레젠테이션 형식 결정
6단계	검토	공정관리시스템의 성과검토
		지표 범위 검토
		허용기준 검토

Table 3. Safety Performance Indicators in HSG254

관리	후행지표	선행지표
검사/유지관리	<ul style="list-style-type: none"> 연성호스, 연결장치, 펌프, 밸브, 플랜지, 고정 파이프, 벌크 탱크 또는 계기의 고장으로 인한 예상 밖의 위험물 누출 횟수 	<ul style="list-style-type: none"> 검사시 규격 내에서 작동하는 필수 안전설비/장비의 비율 규정된 시한에 따라 완료된 유지관리 조치의 비율
직원역량	<ul style="list-style-type: none"> 올바른 조치를 내리는데 필요한 이해, 지식 또는 미숙한 직원의 실수로 계획대로 진행되지 않은 제품이송 횟수 	<ul style="list-style-type: none"> 제품의 성공적인 이송 및 저장에 필요한 역량수준을 갖춘 제품 이송 담당 직원의 비율 (교육 및 경험의 유형은 사업자가 결정)
작업절차	<ul style="list-style-type: none"> 잘못된 작업 절차로 인하여 계획대로 이송되지 않은 제품 이송 횟수 	<ul style="list-style-type: none"> 규정된 기한 내에 검토/개정된 절차의 비율
계기 및 경보	<ul style="list-style-type: none"> 사용 또는 테스트 도중 설계한대로 작동하지 않은 필수 안전계기/경보의 횟수 	<ul style="list-style-type: none"> 일정에 따라 완료된 필수 안전계기 및 경보의 기능테스트 비율 일정에 따라 완료된 필수 안전계기 및 경보의 결함을 수정하기 위한 유지관리 조치의 비율
설비변경	<ul style="list-style-type: none"> 설비 변경이 불충분하여 장비 또는 설비가 올바른 표준을 준수하지 못한 건수 	<ul style="list-style-type: none"> 변경 이전에 적절한 위험평가를 수행한 설비변경 조치의 비율 실행 전에 허가를 받은 설비변경 조치의 비율
연락	<ul style="list-style-type: none"> 통신 시스템의 고장으로 인하여 계획대로 이송되지 않은 제품 이송 횟수 	<ul style="list-style-type: none"> 이송 시작 허가가 이송 시작 전에 성공적으로 완료된 제품 이송 비율 펌프를 중지하고 밸브를 폐쇄했는지 확인하기 위하여 착수한 점검 비율
작업허가	<ul style="list-style-type: none"> 작업허가 대상 위험작업관리 활동 실패로 인하여 설비/장비가 손상될 수 있는 사건의 수 	<ul style="list-style-type: none"> 유해위험요인, 위험 및 관리수단이 제대로 명시된 경우 허용된 작업허가 비율 허가 조건에 따라 시행된 작업 비율
설비설계	<ul style="list-style-type: none"> 설비 변경 부족이 원인으로 판명된 설비고장, 유해물질의 누출횟수 또는 필수안전설비/장비의 고장과 관련된 사건의 수 	<ul style="list-style-type: none"> 현재 설계기준 또는 규정을 준수하는 설비 또는 장비의 필수 안전항목 비율
비상대책	<ul style="list-style-type: none"> 계획된 성과 표준에 따라 작동하지 않은 비상대응절차 구성요소의 수 	<ul style="list-style-type: none"> 테스트시 올바른 성과표준에 따라 작동하는 차단/격리 시스템 비율

표 수준은 해당 지표가 측정되지 않는 것이지만 목표치를 너무 낮게 수립한다면 위험관리시스템의 의미가 없고, 너무 높게 설정한다면 과도한 관리가 이루어질 것이다. 사고 예방을 위한 위험관리시스템의 기능적, 계층적 관계 분석을 통해 효율적으로 이루어질 수 있다.

이 지침은 위험관리시스템 분석을 바탕으로 하는 지표 선정 방법을 포함하고 있어, 사용자가 지표 도출의 정의와 역할에 대하여 이해하고 사용하는데 참고하고 사용하는데 용이하다. 지침에서 설명하고 있는 지표 예시를 Table 3에 정리하였다.

2.4. API RP754 PSPIs for the Refining and Petrochemical Indicators

API RP 754 지침에서는 지표를 개발하는 방법보다

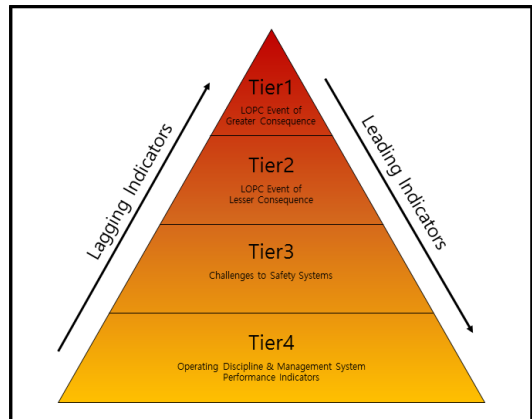


Fig. 2. Process safety indicator Pyramid.

는 지표를 정의하고 활용하는 방안에 대하여 설명한다. 지표는 4개의 Tier를 구분하고 있으며, 각 지표 Tier 간의 관련성을 바탕으로 중대재해를 유발하는 취약점을 찾아 낼 수 있음을 설명하고 있다. Fig. 2의 공정안전피라미드에서 설명하고 있는 것과 같이 Tier1, Tier2의 지표는 사고의 규모에 따른 주요 누출로 구분하고, 주요 누출을 방지하는 공정시스템의 취약점을 Tier3, 취약점 관리를 위한 관리시스템의 건전성을 Tier4로 구분한다.[5]

API RP 754에서 제시하고 있는 지표들을 Table 4에 정리하였다.

2.5. 싱가포르 Workplace Safety and Health Guideline

싱가포르 노동부(Ministry of Manpower)의 WSH (Workplace Safety and Health) 가이드라인은 CCPS의 공정안전 성과지표 개념을 기반으로 한 API RP 754를 참고하여, PSM 구성요소의 이행상태를 지표로써 모니터링 할 수 있도록 개발되었다. WSH 지침의 지표 항목들을 Table 5에 정리하였다.[6]

WSH (Workplace Safety and Health) 가이드라인은 PSM 구성요소 이행상태의 적절성에 대해 판단하기 어렵다는 한계가 있지만, 적절한 지표를 손쉽게 적용할 수 있는 지표항목으로 구성되어 활용성이 좋다.

Table 4. Safety Performance Indicators in API RP 754

Tier1	공정안전사고	<ul style="list-style-type: none"> • ‘작업중 상해에 의한 근로자 불가한’ 근로자 부상이나 사망 • 병원 입원, 제3자(시민 등) 사망 • 인근 주민의 비상대피 • \$25,000 이상의 손실을 가져오는 화재/폭발 • 화학물질 누출량이 Tier1 기준량 이상인 사고
Tier2		<ul style="list-style-type: none"> • 근로자의 부상, 상해 • \$2,500 이상의 손실을 가져오는 화재/폭발 • 화학물질 누출량이 Tier2 기준량 이상인 사고
Tier3	안전시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 공정안전 한계 이상의 운전 • 허용범위를 초과하는 누출감지검사 • 안전시스템의 작동 • Tier1,2에 미치지 못하는 소량의 화학물질 누출 • 전문가 판단을 근거로 하는 공정 운전상의 의미있는 현상
Tier4	운전전문성 및 관리시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 위험성평가 진행률 • 개선권고사항 이행률 • 일정에 따른 교육 진행률 • 절차 개정 및 검토 비율 • 작업허가서 완료 비율 • 공정안전관련 주요설비검사 진행률 • 변경관리 및 가동전 안전 점검 준수비율 • 비상대응 훈련 및 교육 진행률 • 근로자 피로도 관리

Table 5. Safety Performance Indicators of WSH Guideline

PSM 요소	Criteria	Leading/Lagging	지표
Process safety information (PSI)	Safety data sheet(SDS) management system	Lagging	SDS의 가용성 및 최신화 비율
	PSI 문서 식별을 위한 PSI 프로시저	Lagging	공정안전문서(자료)의 가용성, 현황 및 비율
	PSI 관리 프로시저	Leading	사용자가 식별된 공정안전문서 비율
Process hazard analysis (PHA)	잠재위험식별 및 검토계획	Leading	PHA 또는 계획에 따른 검토완료 비율

공정안전성과지표 적용을 위한 공정안전시스템 분석방안 연구

Table 5. continue

PSM 요소	Criteria	Leading/ Lagging	지표
Process hazard analysis (PHA)	잠재위험식별 및 작업계획 준수	Leading	공개된 PHA 작업항목과 기한이 초과된 PHA 작업항목 개수
	PHA 프로시저	Leading	PHA와 문서들에 의하여 분석된 process 비율
Operating procedures	효율적으로 문서화된 절차를 통해 관리되는 Critical Activities	Leading	일정에 따라 검토된 프로시저의 비율
	프로덕트 이송실패한 운영 기록	Lagging	부정확한 운전으로 인하여 프로덕트 이송이 실패한 횟수
	Safety critical activities 인벤토리	Leading	SOP(표준운전절차)에 언급된 Safety Critical Action의 비율
	효율적으로 문서화된 절차를 통해 관리되는 Critical Activities	Leading	현장의 SOP준수 비율
Employee participation	사고 및 아차사고 보고 시스템	Leading	공정위험상태 또는 아차사고의 보고에 참여하는 직원 비율
	공정안전 작업계획	Leading	일상적인 공정안전활동에 참여하는 Direct/Operational/Technical 직원 비율
	직원 제안 시스템	Leading	공정안전 개선을 위한 제안 또는 개선프로젝트에 참여하는 직원 비율
Training	공정안전 교육훈련	Leading	계획에 따라 완료된 교육훈련 비율
	공정안전 교육훈련 및 자격평가 프로시저	Lagging	효율성을 평가받은 교육훈련의 비율
	공정안전 교육훈련 요구사항 분석	Lagging	교육훈련 요구 및 계획이 수립된 작업 비율
Contractors	협력업체 직원 평가	Leading	기술표준에 따라 평가한 협력업체 직원 비율
	협력업체의 안전 환경 관리 시스템 성과 평가	Leading	협력업체의 안전 및 보건 성과를 검토한 비율
	사고 분석	Both	협력업체를 포함한 연간 아차사고와 사고 비율
	적절한 협력업체 교육훈련 계획	Leading	작업 전 우선시되는 안전교육훈련에 참가한 협력업체 비율
Pre-Startup Safety Review (PSSR)	PSSR 체크리스트	Leading	공개된 작업항목과 그 위험수준이 식별된 PSSR의 수
	PSSR 프로시저	Leading	PSSR에서 검증된 장치(equipment) 비율
Mechanical integrity	Safety critical equipment/instruments의 Preventive maintenance (PM)	Leading	PM, 검사, 조정 등 주기를 초과한 safety critical equipment/ instrument 비율
	표준유지보수절차의 가용성(SMP, Standard Maintenance Procedure)	Lagging	검사시 SMP를 따르지 않은 Task 비율
	PM, 조정 및 검사 일정	Leading	PM, 조정 및 검사 시기를 준수한 비율
	수리작업지시 시스템	Lagging	고장으로 유지보수가 요구되는 장치 비율
	안전장치의 고장 기록 시스템	Lagging	정상운전 중 safety device 작동신호를 내렸으나 작동 실패한 횟수

Table 5. continue

PSM 요소	Criteria	Leading/Lagging	지표
Hot work permit	화기작업 허가 시스템 및 통제	Leading	Hazard, Risk 및 제어계측에 대하여 충분히 명시된 화기작업 허가 비율
	화기작업 준수	Leading	허가된 작업과 실제 수행한 작업이 일치한 비율
	화기작업과 동시 수행이 불가능한 작업 (Fire Risk Control)	Leading	동시에 수행 또는 양립할 수 없는 작업들로 인하여 작업허가가 반려된 비율
Management of Change (MOC)	MOC 시스템 하위에 정의된 임시 MOC 시스템	Leading	기한이 초과된 임시 변경관리의 개수 또는 비율
	MOC 준수 수준	Leading	변경관리(MOC)에 의하여 관리되지 않는 변경 개수 또는 비율
	MOC 수행	Lagging	MOC의 결함으로 인하여 발생한 사고 건수
Incident investigation	공정안전사고의 보고가 포함된 사고보고시스템	Lagging	공정안전사고율
	공정사고에 대한 즉각적인 사고조사	Leading	목표시간 내에 조사완료된 사고 비율
	시정조치항목	Leading	시정조치가 완료된 비율
	반복되는 공정안전사고의 정의가 포함된 사고보고시스템	Lagging	반복해서 발생한 사고 건수 또는 비율
Emergency planning and response	중요 비상대응장비 예방정비 목록	Leading	비상대응장비의 예정된 정비 일정을 준수한 비율
	비상대응 훈련/서류상 계획 및 일정 검토	Leading	일정에 따라 완료된 비상대응훈련 비율
Emergency planning and response	비상대응팀을 위한 초기 및 재교육훈련 계획	Leading	일정에 따라 비상대응교육을 이수한 비상대응요원 비율
	비상대응훈련으로부터 도출된 시정조치 목록	Leading	비상대응훈련으로부터 나타난 시정조치들이 제시간 내에 완료된 비율
Compliance audit	공정안전관리(PSM)와 연관된 감사 일정 및 체크리스트	Leading	제 시간 안에 실시된 내부감사 비율
	공정안전관리(PSM)와 연관된 감사 일정 및 체크리스트	Leading	예정된 시간 내에 완료된 시정조치 비율

III. 안전시스템 분석

공정안전시스템을 분석하는 것은 위험요소를 식별하고, 주요 위험요소가 중대사고로 전파되는 것을 방지하기 위한 관리요소들을 지표로 삼아 안전관리 모니터링을 수행하기 위한 기초 작업이다. 대부분의 위험성 평가 방법에서는 위험요소의 식별을 기본적인 작업으로 포함하고 있으며, PSM 대상 사업장에서도 공정안전보고서 작성을 위하여 위험요소 식별을

포함하는 공정위험성평가를 수행하고 있다. 식별된 위험요소를 관리하기 위한 안전시스템을 분석하고 이를 지표화하여 위험요소 관리 실태를 모니터링하는 방안을 검토하였다. 사건의 원인으로부터 결과까지의 과정을 분석하여 활용하기 위해 시스템 분석에 Bow-Tie 분석기법을 적용하였으며, Bow-Tie 분석기법을 통해 분석 가능한 안전관리시스템 구성요소들을 정리하였다. 또한 구성요소들이 기존의 문헌 지표의 영역을 다루고 있는지 확인하였다.

Table 6. Comparison of Safety Performance Indicator Guidelines

구분	HSE	OECD	CCPS	API
선행/후행 지표	○	○	○	○
기반 모델	Swiss Cheese Model	-	Swiss Cheese Model & Safety Pyramid	Safety Pyramid
시스템 분석	○	×	○	×
적용 범위 및 목적	위험관리시스템 건전성 확인	사업장, 정부 및 지역사회의 안전수준 확인	사업자 전체 안전관리 실태 확인	안전시스템 및 운영·관리시스템 운영 실태 확인
특징	선행지표에 초점을 맞추고, 이중보증 개념 도입과 계층적 접근법 사용	지표 운영목표 설정의 개념 도입, 목표에 따른 활동지표와 결과지표의 정의	방호계층 분석을 통한 지표 도출 개념소개 및 지표 운영의 기초이론 제시	Tier 개념의 도입, Tier 관계를 통한 선행지표와 후행지표의 연관성 강조
한계	시스템 분석 개념은 있으나, 안전관리시스템에 국한되며, 과도한 지표도출로 운영 및 관리의 어려움, 선행지표와 후행지표 해석범위 좁음	경험적이고 문헌적 지표 제시로 선택적 지표 사용, 지표 운영체계를 제시하였으나, 구체적 방법 제시하지 않음	지표 운영에 대한 다양한 관점 및 운영방향 제시하였으나, 구체적 방법 제시하지 않음	지표 활용에 대한 지침으로, 지표를 도출하기 위한 구체적 방법 및 지표 측정결과 활용방안을 제시하지 않음

3.1. 성과지표 Guideline 비교

국제기관에서 제시하고 있는 공정안전 성과지표 지침들은 기관별로 차이가 있지만, 그 주요 내용은 아래와 같다.

- 수행조직 정의
- 지표 적용 대상 범위
- 위험관리시스템 및 필수요소 확인
- 후행지표 및 선행지표 정의
- 데이터수집 및 보고 시스템
- 기록 및 검토

OECD에서는 활동지표와 결과지표를 사용하여 선행지표와 후행지표의 개념을 도입하였으나, 경험적이고 문헌적인 사항들을 지표로 나열함으로써 지표 요소를 선택 운영하도록 하였다. CCPS 지침은 성과 측정에 대한 전반적인 사항을 다루고 있고, 지표 도출의 구체적인 방법보다는 지표 운영에 대한 방향성을 제시하고 이론적 기반을 제공하고 있다. 지표 도출에 직접적으로 적용하기에는 어려움이 있으나, 지표 운영 개념을 이해하고 효율적으로 활용하기 위해 참고할 수 있다. HSE에서는 위험관리요소인 방호시스템에 대하여 개별적으로 선행지표와 후행지표를 설정한다. 개별 방호시스템에 대하여 지표 설정 및 관리를 해야 하고, 이를 사업장 수준에서 취합 관리해야 하므

로 대규모 사업장에서는 시스템 없이 적용하기 어려운 규모가 될 수 있으며 중복 지표 관리, 위험관리시스템간 연계성 확인 등 운영상의 어려움이 따를 수 있다. API에서는 지표의 개념을 쉽게 사용할 수 있도록 활용방안을 제시하고 지표를 정의한다. 공정안전사고를 방지할 수 있는 장치나 활동에 관련한 선행지표의 측정이 공정안전사고인 후행지표의 측정에 미치는 영향알 수 있다. 각 기관별 지침을 분석하여 Table 6에 정리하였다.

3.2. Bow-Tie Analysis 활용한 지표 도출

Bow-Tie 분석기법은 일반적으로 다른 정성적 위험성평가 결과 중 심각도가 클 경우, 새로운 공정이나 설비를 도입하는 경우, 공정 또는 작업 방법을 변경하는 경우, 새로운 물질을 사용하게 될 경우, 사고발생 시 원인을 파악하고 대책의 적절성을 평가할 경우, 이해당사자에게 사용하는 설비의 안전성을 쉽게 설명하고자 할 경우에 수행하게 된다.[7]

Bow-Tie Diagram은 유해위험요인, 사상의 원인, 사상의 결과, 사상의 발생을 예방하기 위한 대책, 사상의 결과를 감소시키기 위한 대책, 예방 대책 및 감소대책의 역할과 기능을 약화 또는 무효화시키는 악화요소와 이를 방지하는 악화요소 방지대책이 분석되어 표현된다. Bow-Tie 기법은 다른 위험성평가 기법들에서 다루지 않는 위험요인 및 그 관리요소까지 분석

Table 7. Bow-Tie data for Safety Performance Indicators

Bow-Tie 구성요소	주요 Data 내용
예방대책	COMPANY Recruitment & Training Program/Procedures
	HSE Awareness Programmes
	COMPANYs Vehicle and Road Safety Procedure
	Monitoring of Operational Activities
	Monitoring & Control of Equipment
	Physical Protection
	Pressure Relief Devices
	Regular Checks of Equipment
	PPEs
	Working Hours Policy
	Permit To Work system
	COMPANY Inspection, Maintenance and Testing Programmes
	Automatic Activation of Alarms & Trip Systems With Operator Intervention
	Lifting Exclusion/Restricted Lifting Zones
	Provision of Suitably Illuminated Safety Signs
	Procedures
	Emergency Device
	Design Process Equipment with Applicable Standards
	Post-Equipment Factory Acceptance Tests Undertaken
	감소대책
Implementation of Operation Procedures	
Implementation of Permit to work System	
Conducting Pre-Assessment	
Implementation of Policy	
Implementation of Procurement Procedure	
Install Safety System	
Implementation of Emergency Response Plan	

Table 7. continue

Bow-Tie 구성요소	주요 Data 내용
감소대책	Provide Person Protection
	Safer Design
악화요소 방지대책	Permit To Work System
	Monitoring of Work Activities
	Review Process
	Training Program
	Intervention Procedures
	Procurement Procedure
	Document Control Procedures
	Policy
	Quality Control Procedures
	Motivation Programs
	Emergency Response Plan/Procedures
	Hot work procedures
	Operation Procedures
	Contractors Safety Controls
	Periodic Inspection
	Accident Report System
	Management of change Procedure
	Audit Program
	Standards observance
	Provide Resources

범위에 포함하고 있다. 이러한 특성은 공정안전성과 지표의 선행지표로서 사용할 수 있는 요소들을 발굴하고 적용하는데 유용하다.

중대재해를 예방하기 위하여 선행지표 도출의 한 방안으로 Bow-Tie 분석기법이 적절한 방안임을 확인하기 위하여 플랜트에서 주로 적용되고 있는 공정안전관리 요소들을 Bow-Tie 구성요소에 따라 분석하여 Table 7에 나타내었다.

관리활동을 제대로 준수하지 못할 때 발생할 수 있는 문제들이 악화요소로 분류되며 절차 미준수, 시스템 실패, 작업자 실수 등과 같은 사항들이 포함된다. 일반적으로 Bow-Tie 분석기법으로 분석되는 요소들은

Table 8. Compare with HSG254 and Safety Indicator

HSG254 구성요소	Safety Performance Indicator
Inspection/maintenance	Periodic Inspection
	Post-Equipment Factory Acceptance Tests Undertaken
	Regular Checks of Equipment
Staff competence	COMPANY Recruitment & Training Program/Procedures
	Conducting Pre-Assessment
	HSE Awareness Programmes
	Motivation Programs
	PPEs
	Provision of Suitably Illuminated Safety Signs
	Training Program
	Working Hours Policy
Operation procedures	COMPANYs Vehicle and Road Safety Procedure
	Document Control Procedures
	Intervention Procedures
	Lifting Exclusion/Restricted Lifting Zones
	Operation Procedures
Provide Person Protection	
Instrumentation and alarms	Automatic Activation of Alarms & Trip Systems With Operator Intervention
	Install Safety System
	Monitoring & Control of Equipment
	Monitoring of Operational Activities
Plant change	Management of change Procedure
Communication	Accident Report System
	Audit Program
	Contractors Safety Controls
	Emergency Response Plan/Procedures
	Implementation of Policy
	Monitoring of Work Activities
	Policy
	Provide Resources
	Review Process
	Standards observance
Permit to work	Permit To Work System
Plant design	Design Process Equipment with Applicable Standards
	Emergency Device
	Follow Accordance Standards
	Implementation of Procurement Procedure
	Physical Protection
	Quality Control Procedures
Safer Design	

Table 8. 에서 나타난 바와 같이 HSG254의 구성요소를 잘 갖추고 있어 지표로서 활용하기에 적합하다.

IV. 결론 및 고찰

지표는 안전관리체계의 구성요소에 대한 상태측정을 통해 이를 성과로 명시할 수 있어야 한다. 적절한 공정안전 성과지표를 도출하는 데에는 공정안전관리시스템 및 공정안전장치 등 시스템 분석이 가장 중요하다. 위험성평가를 기반으로 하여 고위험 공정안전 사고에 대하여 사업장에서 어떤 안전장치 및 관리활동이 이루어지고 있는지 분석하는 작업이 시스템 분석과 함께 병행되어야 주요 안전관리 이슈에 대한 제대로 된 분석이 가능하다. 또한 대규모 사업장의 경우 각 Site별로 세부 지표들이 취합되어 사업장의 전체적인 안전성과를 보여줄 수 있도록 지표를 계층화하여 개발하고 측정하는 것이 좋다.

문헌적 지표에서는 절차의 준수 여부 위주로 확인하는 반면, 시스템 기반의 지표에서는 안전시스템의 특정 목적을 위한 절차나 검사 등을 명확하게 식별할 수 있도록 하고, 운영상태가 어떤지 측정하여 모니터링 할 수 있다. 시스템 기반 지표들의 이러한 특성은 안전관리 활동을 운영함에 있어 도출

될 수 있는 보완사항들의 명료성 측면에서 더 유리함을 알 수 있다. 이와 같이 안전관리시스템을 지표로 관리함으로써 사업장 안전관리 역량과 건전성을 정량적으로 확인할 수 있다.

Bow-Tie 분석기법을 사용하여 방호설비를 활용한 지표 도출 및 활용 방법의 구성항목을 살펴보면, WSH 지침의 문헌적이고 경험적 내용으로 선정한 지표와 비교하였을 때, MOC, 교육훈련, 비상대응 등의 분야에서는 WSH 지침의 지표가 더욱 상세한 모니터링을 가능하도록 하고 있다. 또한 방호설비를 사용한 방법은 사고조사와 사업장 개선 조치 이행을 확인할 수 있는 요소가 누락되어 공정안전시스템과 직접적으로 연관되어 있지 않은 안전관리 활동의 모니터링이 어려움을 알 수 있었다.

문헌적, 경험적 지표와 시스템 분석을 기반으로 하는 지표는 각각의 특성이 있다. 문헌적이고 경험적인 지표는 지표의 도출과 활용, 그리고 측정 범위가 넓다는 장점이 있으나, 사업장의 공정안전시스템과 직접적인 관련성이 약하다는 약점이 있다. 반면에 시스템 분석을 기반으로 하는 지표는 공정안전시스템과의 관련성이 강하지만, 전체적인 안전관리 활동 중 일부에 대하여 지표를 도출하는데 한계가 있다는 약점이 있다. 공정산업에서는 공정안전시스템과 직접 관련성이 높은 지표를 선정하면서도 문헌적, 경험적 지표를

보완적으로 사용하여 전체적인 안전관리 활동을 모니터링 할 수 있는 지표를 도출하는 것이 실질적이고 효과적으로 사업장 안전관리 수준을 보여줄 수 있다.

이러한 지표의 활용은 중대산업사고를 예방하기 위한 안전관리 활동에 대한 성과를 나타내어, 사업장의 안전관리 실태를 인지하게 함으로써 실효성 있는 안전관리에 기여할 수 있어 예방적 안전관리가 중요해지고 있는 최근 플랜트 산업에 매우 중요한 요소가 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 / 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 21ATOG-C162087-01).

REFERENCES

- [1] Lee, Y.S., Kang, M.J., and Yang, H.S., A Study on the Rationalization Plan of the Coverage Basis of PSM Regulation in Korea, Korea Occupational Safety Health Agency(Occupational Safety and Health Research Institute), Incheon, (2008)
- [2] Organization for Economic Cooperation and Development(OECD), “Guidance on Safety Performance Indicators”, (2003)
- [3] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, “Guidelines for Process Safety Metrics”, (2010)
- [4] Health and Safety Executive(HSE) HSG254, “Developing process safety indicators: A step-by-step guide for chemical and major hazard industries”, (2006)
- [5] American Petroleum Institute(API) RP 754, “Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries”, (2010)
- [6] Workplace Safety and Health(WSH) Council & the Ministry of Manpower in Singapore, “WSH Guidelines: Process Safety Performance Indicators”, (2012)
- [7] KOSHA Guideline X-39-2011, “정성적 보우타이(Bow-Tie) 리스크 평가기법에 관한 지침”, 안전보건공단, (2011)