



위험성평가를 이용한 노후설비에 대한 비용 편익분석 방법

정수민·정창모·강석민·채승빈·강승균*·[†]고재욱**

광운대학교 화학공학과 석박사통합과정, *광운대학교 화학공학과 박사과정,

**광운대학교 화학공학과 교수

(2020년 7월 27일 접수, 2020년 8월 24일 수정, 2020년 8월 25일 채택)

Cost-Benefit Analysis Method for Ageing Equipment of Chemical Plants Using Risk Assessment

Soomin Jung · Changmo Jung · Seok-Min Kang · Seungbeen Chae ·
Seung-Gyun Kang · [†]Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

(Received July 27, 2020; Revised August 24, 2020; Accepted August 25, 2020)

요약

대부분의 화학공장 내 설비는 유해물질을 취급하거나, 일상적으로 접할 수 있는 온도 및 압력의 범위를 벗어난 환경에서 가동되며 이러한 응력 및 환경조건으로 인하여 노후화에 취약하다. 이러한 조건에 노출된 설비는 지속적인 손상이 누적되어 고장이 발생할 가능성이 높아짐은 물론, 정비 및 교체를 하지 않는다면 사고로 이어진다. 전세계적으로 위험성기반검사(Risk Based Inspection)라는 권고지침이 통용되고 있다. 하지만 RBI는 이미 일정시간 경과한 설비에 대해서는 한계가 존재한다. 적절한 점검을 수행하는 우리나라 울산 산업단지의 노후화 실태 조사 결과, 많은 수의 설비들이 사용기간이 20년을 경과하였다. 또한, 사고가 일어난 설비 대부분이 20년 이상 운영해 왔다. 따라서 본 연구에서는 일정 사용기간이 초과된 장치를 노후설비로 분류하는 기준을 제시하였다. 또한, 이에 대하여 정량적 위험성평가를 진행하였다. 이로 인해 도출된 해당 노후설비의 위험성을 Economic index로 표현하여 손실비용을 산정하고 Risk를 감소하기 위하여 비용편익 분석 방법을 활용한 안전투자 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 정량적 위험성 평가를 이용한 노후설비의 비용편익 분석 방법을 활용하여 노후 설비의 성능 향상 및 수명 연장, 생산 효율성 및 설비 계통 신뢰도 향상, 안전관리 비용 인식 변화, 그리고 직원의 안정감 증대, 손실비용의 감소를 기대할 수 있다.

Abstract - Most facilities in chemical plants operate in environments that are outside the range of temperature and pressure that can be encountered on a daily basis, and are vulnerable to aging due to these stresses and environmental conditions. The facilities exposed to these conditions are not only likely to fail due to cumulative damage, but also lead to accidents if maintenance and replacement are not performed. Recommendation guidelines called risk-based inspection are widely used around the world-wide. However, limits exist for facilities that have already elapsed for a certain. As a result of the survey on the aging of Ulsan industrial complex in Korea, which carries out proper inspection, many of the facilities have been used for 20 years. Also, most of the facilities where the accident occurred have been in operation for more than 20 years. Therefore, this study suggested criteria for classifying devices that have exceeded a certain period of use as obsolete facilities. In addition, quantitative risk assessment was conducted. The safety investment method using the cost-benefit analysis method was proposed in order to calculate the loss cost and reduce the risk by expressing the risks of the corresponding aged facility as an Economic index. By utilizing the method of cost-benefit analy-

[†]Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

-sis of old facilities using the quantitative risk assessment presented in this study, it can be expected to improve the performance and life of old facilities, improve production efficiency and reliability of the system of facilities, change the recognition of safety management costs, increase employee stability, and reduce loss costs.

Key words : Cost-Benefit, Risk Assessment, RBI, Wear-out Failure, Ageing

I. 서 론

석유화학산업은 인화성 물질 및 유독물을 다루는 거대장치산업이며, 첨단화, 고도화, 대형화 복잡화되어 있다. 또한 사고 발생 시 사고의 피해규모가 크며 중대산업사고로 이어질 확률이 높다. 따라서 기업은 안전관리에 대한 규제에 자발적이고 체계적으로 대응할 필요가 있다. 화학공장의 안전관리 문제는 오랜 시간에 걸친 누적 손상의 결과거나 주변 환경의 유해·위험 물질 노출에 의한 복합 작용의 결과이다. 이와 같은 대형사고는 해당 기업의 사활과 직결된다. 따라서 효과적인 예방관리 대책 수립과 노후설비의 안전성을 확보할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서 개발된 정량적 위험성 평가를 이용한 노후설비에 대한 비용편익분석방법은 그 기능에 따라 노후설비 분류 및 잠재위험 분석, 정량적 위험성평가[시나리오 분석, 사고 빈도 분석, 피해 예측 분석, 위험성 판정(Economic Index)] 비용편익 분석(cost-benefit analysis)로 구성되어 있으며, 평가 체계는 기본적인 4단계로 이루어져 있다.

(1) : 노후설비 분류 및 위험성평가 대상 선정
공정자체의 잠재위험을 평가하는 단계이며, 일정 사용기간이 지난 설비에 대한 Screening을 통하여 노후설비를 분류한 후, 공정 및 물질의 특성에 따른 잠재위험성을 평가하여 위험도가 Heavy/Severe 인 설비를 정량적 위험성 평가 대상 장치로 선정한다.

(2) : 정량적 위험성 평가를 통한 노후설비의 손실 비용 산정
설비별 시나리오 분석, 사고 빈도 분석과 피해 예측 분석을 이용하여 (1)에서 선정한 잠재적 위험성이 높은 설비에 대한 정량적 위험성 평가를 실시하여 위험성을 산정한다. 정량적 위험성 평가 결과를 바탕으로 설비별 손실비용을 산정하여 평가를 종료할 것인지 혹은 대안을 선정하여 비용·편익 분석을 수행할 것인지를 결정한다. 또한, 대안을 선정하게 된다면 각 대안에 대하여 위험성 평가를 수

행하고 손실비용을 재 산정하게 된다.

(3) : 교체, 유지보수, 폐기비용 산정

(3)의 원안이 unacceptable zone에 포함되면 위험성을 감소시킬 수 있는 여러 대안들을 선정하고, acceptable zone에 포함된다면 경제성 평가를 실시하지 않아도 된다. 대안은 설비의 안전장치의 추가설비, 방호장비의 설치 및 교체 등 위험성을 감소시킬 수 있는 조치를 고려한다. 또한, 선정된 대안들에 대하여 (2)로 다시 돌아가 위험성 평가 및 위험성의 가용여부를 판단하게 된다.

(4) : 비용편익 분석

(4)의 대안에 대한 정량적 위험성 평가를 실시하여 그 결과가 acceptable zone에 포함될 때, (3)의 위험성평가 결과와 비교분석한다. 해당 설비에서 감소되는 위험성은 편익으로 분류, 안전투자에 대한 비용은 비용으로 고려하고 비용·편익 분석 시스템을 통한 경제성을 판단한다.

II. 노후설비 분류 및 위험성평가 대상선정

2.1. 우선평가 대상설비

화학공장은 시간이 지남에 따라 손상이 누적되고 있다. 사용기간이 경과하면서 노후화 된 화학공장의 설비들은 크고 작은 누적 손상에 의해 성능의 저하, 설비의 위험성이 점진적으로 증가한다.

대부분의 화학공장 내 설비는 유해물질을 취급하거나, 일상적으로 접할 수 있는 온도 및 압력의 범위를 벗어난 환경에서 가동되며 이러한 응력 및 환경조건으로 인하여 노후화에 취약하다. 이러한 조건에 노출된 설비는 지속적인 손상이 누적되어 고장이 발생할 가능성이 높아짐은 물론, 정비 및 교체를 하지 않는다면 사고로 이어진다.

설비의 노후화에 대한 대처를 하기 위한 연구들이 계속하여 진행되고 있고, 위험성기반검사(RBI)라는 권고지침이 전 세계적으로 통용되고 있다. “설비의 노후화는 사용기간에 따른 것이 아니라, 상태에 대한 정보의 유무“라는 개념으로 접근한

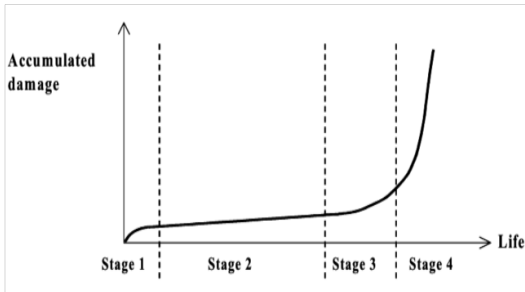


Fig. 1. Variation of accumulated damage during equipment service

RBI는 최적화된 점검 주기를 통한 노후화 설비의 위험성 감소이다.

이러한 개념으로 접근한 RBI는 노후설비의 적절한 점검, 유지보수 및 수리를 통해 고장확률을 소폭 감소시킬 수 있지만 이미 일정시간 경과한 설비에 대해서는 한계가 존재한다. 적절한 점검을 수행하는 우리나라 울산 산업단지의 노후화 실태 조사 결과, 많은 수의 설비들이 사용기간이 20년을 경과하였다. 또한, 사고가 일어난 설비 대부분이 20년 이상 운영해 왔다. 본 연구에서는 20년 이상 가동 중인 설비들을 ‘마모고장기간’에 들었다 가정하여 정량적 위험성 평가를 이용한 노후설비의 비용편익분석 방법을 진행하였다

노후설비로 분류된 설비들을 또 한 번의 스크리닝을 통해 위험성이 높은 설비들을 우선평가 대상설비로 선정하였다. 해당 기준은 다음과 같다.

- 취급용량이 5m³ 이하 설비는 제외
- 운전 조건이 상온, 상압 설비는 제외
- 물질(공기, 질소, 물, 스팀 등)이 상대적으로 위험성이 낮은 설비 제외

먼저 노후설비를 분류하기 위하여 A 산업단지 안에 존재하는 설비의 기본정보를 수집하여 DB화하였다. DB화를 위해 수집한 정보는 화학설비의 종류, 설비의 용량 및 규격, 최초설치 년도, 취급 및 저장물질의 종류, 점검주기 등이 있다.

해당 데이터베이스를 활용하여 사용기간이 20년 이상 된 설비를 노후설비로 선정하여 잠재위험 평가 대상 설비로 분류하였다. 잠재위험 평가 대상설비는 DB화된 NFPA Rating을 기반으로 Dow F&EI를 이용하여 일반적인 공정 위험요소 및 특수적인 공정위험요소에 대한 평가를 진행하였다. Dow F&EI

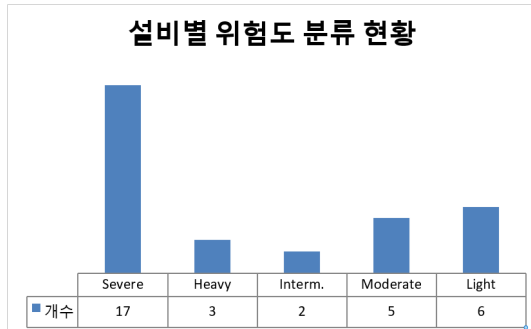


Fig. 2. Risk assessment targets within national cluster

를 통한 결과가 Heavy/Severe인 설비를 위험성평가 분류 대상 노후설비로 선정하였다.

2.2. 위험성 평가 대상 노후설비 선정

우선평가 대상 설비들을 선정한 후, 해당 설비들의 잠재위험을 다시 확인해 보기 위해 Dow F&EI 기법을 사용하였다. Dow F&EI는 일반적인 공정의 위험요소(F1), 특수적인 공정 위험요소(F2), 물질요소(MF) 세 가지의 조합으로 설비의 잠재위험(F3)을 평가하는 기법이다. Dow F&EI를 진행하여 설비의 위험성이 Heavy/Severe인 경우에 정량적 위험성 평가 대상설비로 선정, 위험성평가를 진행하였다.

사례는 A 국가 산업단지 내 모든 설비를 대상으로 선정하여 본 연구에서 제안하는 정량적 위험성 평가를 이용한 노후설비의 비용편익분석을 진행하였다. 노후 설비의 위험성을 평가하여 손실 비용을 산정하고 최적의 대안을 도출하였다.

III. 위험성 평가

위험성평가 대상설비로 선정된 설비들의 잠재위험의 식별과 위험성 분석을 통하여 위험성 평가를 진행하였다. 위험성의 표현은 CPQRA에서 제시하는 Economic index를 활용하여 노후설비 사고에 대한 손실비용을 산정하였으며, 비용편익분석 우선순위 대상 노후설비를 도출하였다.

정량적 위험성 평가 진행을 위한 첫 단계는 사고 시나리오 선정이다. 사고시나리오 선정은 여러 분야의 전문가가 브레인스토밍을 통하여 진행할 필요가 있으므로, 기존에 사용한 HAZOP Study를 참고하여 사고 시나리오를 선정하였다.

Table 1. Severity of asset

심각도	물적 손실	
	상태	설명
0	영향 없음	피해 없음
1	경미한 손실	USD 10,000미만의 손실
2	약간의 손실	USD 10,000 ~ USD 100,000의 손실
3	보통의 손실	USD 100,000 ~ USD 1,000,000의 손실
4	중대한 손실	USD 1,000,000 ~ USD 10,000,000의 손실
5	매우 심각한 손실	USD 10,000,000을 초과하는 손실

피해영향 분석은 해당 분야에 세계적인 권위를 가지는 DNV GL 사의 PHAST 프로그램을 사용하였다. 확산 모델에 사용되는 기상자료는 한국 기상청의 통계자료를 활용하였다.

해당설비의 저장용량, 압력, 온도, 상태 등의 기본정보를 활용하여 물질이 얼마나 누출되는지 산정한 후, 확산모델을 사용하여 물질이 어느 정도 범위까지 이동하는지 계산한다. 화재·폭발이 이루어지는 농도 또한 중요한데, 연소하한과 연소 상한으로 계산할 수 있다. 연소하한은 물질이 연소할 수 있는 최소 범위, 연소상한은 물질이 연소할 수 있는 최대 범위로서 해당물질의 농도가 그 사이에 있을 때 화재 및 폭발이 이루어진다. GHS기준의 MSDS 상 톨루엔과 아크릴로니트릴의 연소하한은 각각 1.2%, 2.4%이고 연소상한은 7.1%, 17.3%이다.

전 단계의 계산이 선행된 후, Effect Model이 사용되는데, 이는 인체 및 재산에 입히는 손해를 계산하는 단계이다. Effect Model에서 중요한 Endpoint는 화재, 폭발 및 독성누출이 피해를 줄 수 있는 농도에 대한 기준이다. 이러한 농도기준은 전 세계 여러 기관에서 진행한 실험 및 연구를 통해 제공한다. 본 연구에서는 화재 및 폭발에 대한 기준을 미국 화학공학회 CCPS(Center for Chemical Process Safety)의 저서인 Chemical Process Quantitative Risk Analysis에서 인용하였다.

독성 누출의 경우, Endpoint는 AIHA에서 제시하는 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)를 사용하였다.

Table 2. Impact range of fire explosion on worst-case scenarios by process

Process	Description	Dispersion (ppm)			Jet Fire (kW/m ²)		
		½ LEL	LEL	UEL	4	12.5	37.5
A	TOLUENE Overloading	34.5	24.9	2.5	99.3	58.1	33.2
B	Top Side PENTANE Rupture	49.4	16.5	2.0	117.3	69.8	40.4
C	Flexible Line BD Leak	48.8	34.3	6.6	25.9	15.7	12.5

Table 3. Impact range of fire explosion on worst-case scenarios by process(Continue)

Process	Description	Pool Fire (kW/m ²)			Explosion (bar)		
		4	12.5	37.5	0.02	0.21	0.8
A	TOLUENE Overloading	113.3	63.8	37.5	182.0	51.3	40.0
B	Top Side PENTANE Rupture	N/A	N/A	N/A	217.3	64.8	51.6
C	Flexible Line BD Leak	57.4	38.7	26.0	117.0	50.8	45.0

전 단계에서 선정된 정보 및 기준을 바탕으로 피해영향분석을 실행한 결과 최악의 누출시나리오에 대한 화재, 폭발 및 독성누출의 피해영향범위는 다음과 같다. 해당결과는 설비에서부터 Endpoint(끝점농도)까지의 직선거리를 계산한 것이며, 일반적으로 원(방사)형으로 표현된다.

피해영향분석을 진행한 후, 사고의 빈도분석을 진행하였다. 선정된 최악의 시나리오에 대한 설비의 실패 확률은 전 세계의 DB를 활용하여 해당 설비에 적합한 자료를 선정하였다. 또한, 사고빈도 분석을 진행하기 위해 설비 고장 이후 누출 물질의 전과과정에 대한 확률론적 분석이 필요하다. 이를 위해, 해당 산단 지역의 집화원의 위치 및 기상정보를 활용하여 ETA를 진행하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 4. Toxic damage range for worst-case scenarios by process

Process	Description	Toxic Effect (ppm)		
		ERPG1 (10)	ERPG2 (35)	ERPG3 (75)
A	AN Overloading	5,573.3	2,331.9	1,366.3
B	Flexible Line AN Leak	662.2	322.0	203.4
C	Flexible Line AN Leak	534.5	261.5	167.2

Table 5. Result of ETA

Accident Type	Jet Fire	Pool Fire	Explosion	Flash Fire	Dispersion	Pool
Likelihood	10%	12.7%	1.8%	5.4%	57.2%	12.9%

각 시나리오 별 피해영향분석(Consequence Analysis, 사고빈도분석(Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis)를 조합하여 위험성지수를 도출하였다.

위험성 지수는 단일 숫자, 절대적 위험성 및 상대적 위험성으로 표현할 수 있다. 복잡한 위험성을 단순화하여 의미(사망률, 개인적 사망률, 평균 사망률)를 가지며, 사고의 위험성에 의한 재무손실을 측정하는 지표인 Economic Index를 사용하여 표현하였다. 경제 지표는 FAR과 본질적으로 동일한 방식으로 취급되고 제시된다. 회사는 특정 재무 위험 목표를 개발하여 대안들과 비교한다. 특정 목표가 존재하지 않으면 다양한 위험 감소 조치의 상대적 장점을 쉽게 평가할 수 있다. 각 공정의 위험성 평가 결과는 **Table 6, Table 7**이다.

현장에서 쓰이는 데이터 및 엔지니어와의 면담을 통하여 설비에서 일어날 수 있는 사고에 대한 대안으로 선정한 시나리오는 **Table 8**에 제시하였으며, 더불어 대안 시나리오로 위험성평가를 한 번 더 진행하여 감소된 위험성을 산출하였고 **Table 9**에 표현하였다.

Table 6. Results of risk assessment for process A

No	Scenario	Accident
A1	Overloading	Toxic
A2	Overloading	Explosion
A3	Pump M/S	Fire
A4	Overloading	Explosion
A5	Overloading	Explosion
A6	Overloading	Explosion
A7	Overloading	Explosion
A8	Overloading	Explosion
A9	Overloading	Explosion
A10	Overloading	Fire
B1	Pump M/S	Explosion
B2	Flexible Line	Toxic
B3	Pump M/S	Fire
B4	Flexible Line	Fire
B5	Pump M/S	Fire
B6	Rupture Disk	Explosion
B7	Rupture Disk	Fire
C1	Flexible Line	Explosion
C2	Flexible Line	Toxic
C3	Pump M/S	Fire
C4	Pump M/S	Fire
C5	Flexible Line	Fire
C6	Rupture Disk	Fire

Table 7. Results of risk assessment for process A(Continue)

Scenario	Dis. (m)	Area (m ²)	Freq. (per yr)	Loss (Risk \$)
A1	2,331.90	355,720.0	5.00E-01	3,799,090
A2	137.6	14,863.0	1.35E-02	661,404
A3	48.0	904.3	5.00E-01	16,091
A4	54.6	2,340	1.35E-02	104,139
A5	54.5	2,332	1.35E-02	103,756
A6	54	2,289	1.35E-02	101,861
A7	52.7	2,180	1.35E-02	97,010
A8	51.5	2,082	1.35E-02	92,649
A9	51.3	2,066	1.35E-02	91,928
A10	56.4	1,248	1.35E-02	22,223
B1	26.0	530.7	5.00E-01	23,612
B2	322.0	6,782.7	1.00E-01	72,437
B3	21.7	184.8	5.00E-01	3284.1
B4	42.3	702.3	1.00E-01	12,505
B5	11.1	48.4	5.00E-01	863.3
B6	64.8	3,296.2	2.70E-03	146,681
B7	7.5	7.3	2.70E-03	133.5
C1	50.8	2,025.8	1.00E-01	47,775
C2	261.5	4,473.3	1.00E-01	2518.7
C3	19.0	141.7	5.00E-01	2518.7
C4	19.0	141.7	5.00E-01	2518.7
C5	36.1	511.5	1.00E-01	9,105
C6	20.4	54.4	2.70E-03	970.1

Table 8. Alternatives for ageing equipment's risk mitigation

No	Accident Scenario	Avr. Freq. (per yr)	Recommendation	Improved Frequency
1	Pump M/S	5.00E-01	Non-Seal	1.25E-02
2	Flexible Line	1.00E-01	-	-
3	Overloading	5.00E-01	LT-Valve Interlock	5.00E-03
4	Rupture Disk	2.70E-03	PT-Valve Interlock	2.70E-05

Table 9. Risk assessment results for alternative scenarios

Scenario	Recommendation	Improved Frequency	Improved Risk \$
A1	LT-Valve Interlock	5.00E-03	37990.896
A2	LT-Valve Interlock	1.35E-04	6614.035
A3	Non-Seal	1.25E-02	402.28
A4	LT-Valve Interlock	1.35E-04	1041.389
A5	LT-Valve Interlock	1.35E-04	1037.562
A6	LT-Valve Interlock	1.35E-04	1018.605
A7	LT-Valve Interlock	1.35E-04	970.1
A8	LT-Valve Interlock	1.35E-04	926.49
A9	LT-Valve Interlock	1.35E-04	919.281
A10	LT-Valve Interlock	1.35E-04	222.233
B1	Non-Seal	1.25E-02	590.2925
B2	-	0.00E+00	-
B3	Non-Seal	1.25E-02	82.1025
B4	-	0.00E+00	-
B5	Non-Seal	1.25E-02	21.5825
B6	PT-Valve Interlock	2.70E-05	1466.809
B7	PT-Valve Interlock	0.00E+00	1.335
C1	-	0.00E+00	-
C2	-	0.00E+00	-
C3	Non-Seal	1.25E-02	62.9675
C4	Non-Seal	1.25E-02	62.9675
C5	-	0.00E+00	-
C6	PT-Valve Interlock	2.70E-05	9.701

IV. 비용·편익 분석

비용·편익 분석 방법을 활용하기 위해서는 비용 항목과 편익 항목을 분명히 하는 것이 중요하다. 각 항목간의 구분을 분명히 하기 위해 사고를 예방하기 위한 투자비용과 사고가 난 이후 지불하게 되는 비용을 구분하였다. 비용항목은 사고예방을 위하여 투자하는 항목으로써 본 연구에서는 화학공장 내 노후설비의 위험성 감소를 위해 투자해야 할 것으로 예상되는 모든 자원을 비용항목으로 설정하였다. 사업장이 사고 이후에 지불하게 되는 비용이 아닌 사고예방을 위하여 투자하게 되는 직접비용으로 계산하였다.

대안의 시나리오를 수행하기 위한 비용은 사고 예방을 위한 투자비용으로 기존의 비용 개념과 같다. 하지만, 사고가 난 이후의 지불하게 되는 비용은 대안을 수행함으로써 지불하지 않게 되는 편익으로 볼 수 있다. 따라서 사고 이후 발생하는 비용은 비용·편익 분석의 관점에서 해석하면 사고를 미리 예방을 하였을 때 추가적으로 지불하지 않아도 될 편익으로 고려해야 할 것이다. 산업안전 분야에서 비용 편익 분석을 이미 활용하고 있는 영국, 호주의 사례를 참고하여 노후 설비로 인해 발생하는 사고가 대안의 시나리오를 적용함에 따라 위험성을 감소시킴으로써 재해손실 예방으로 피할 수 있는 비용인 직접적 편익과 노후설비 개선으로 얻을 수 있는 기업평판의 상승, 생산성 향상 등과 같은 간접적인 편익을 편익항목으로 선정하였다. 화학제품 제조업의 경우 사고로 인해 발생하는 손실비용의 직·간접비용 평균 비율은 1:7.9로 조사되었으며, 노후설비와 대안 시나리오에 손실비용의 차를 이를 편익항목으로 구성하였다.

비용·편익 분석을 활용하여 노후설비의 위험성 감소를 위한 투자를 할 때 비용대비 편익을 산출하여 비용·편익 분석 방법에 따라 최적의 대안을 선정한다.

4.1. 대상 및 대안의 선정

노후설비의 현재 상태를 원안으로 설정하고 정량적 위험성 평가 결과에 따라 위험성이 높은 대상을 선정하여 해당 설비의 위험성을 감소시킬 수 있는 대안을 선정한다.

평가대상 및 대안을 선정하기 위한 위험성 기준은 위험성 감소를 필요로 하는 노후설비의 위험성을 낮추기 위한 결정을 지원하기 위하여 사용된다.

인적, 물적, 환경적, 사회적 및 경제적 각기 다른 분야의 기준에 따라 위험성 감소를 위한 투자의 결정에 영향을 미치며, 현재까지 인적·물적 기준이 환경적, 사회적 및 기타 기준보다 우선시되어 화학공장의 위험성 감소를 위한 투자의 수용 여부에 활용되었다.

4.2. 노후설비의 비용·편익 분석

노후설비의 비용·편익분석 방법은 대안을 수행하기 위한 비용과 그로인해 얻을 수 있는 편익을 비교하여 이를 실행하였을 때 발생하는 순편익을 산출한다. 해당 대안에 대한 효용성을 산정하여 노후설비의 위험성 감소를 위한 투자 결정을 돕기 위한 방안을 제시한다.

- BC Ratio

비용·편익 분석 방법을 활용한 의사결정의 기본 원칙은 가장 큰 순편익을 제공하는 대안을 선정하는 것이다. 본 연구에서는 여러 가지 비용·편익 분석 방법 중 BC Ratio기법을 사용하였다.

4.3. 비용·편익 항목

(1) 비용항목

비용이란 대안 시나리오를 수행할 때 투입되는 자원을 의미하며, 다음은 본 연구에서 선정한 비용 항목이다.

(2)편익항목

편익이란 원안의 위험성 평가 결과와 대안을 수행한 위험성 평가 결과의 비교·분석을 통해 얻을 수 있으며, 재해 손실 회피로 얻을 수 있는 모든 직·간접적인 편익을 의미한다. 화학공장에서의 재해 손실 회피로 인한 직접편익과 간접비용의 비율은 1:7.9이다. 본 연구에서는 대안 수행에 따른 직접적 편익과 간접적 편익의 2가지로 크게 분류하였다.

4.4. 비용·편익 분석 방법 및 결과

현장의 데이터를 활용하여 대안의 시나리오를 설정할 때 드는 비용을 산정하였고, 평가를 재진행한 후, 기존 위험성평가 결과와 비용편익분석을 진행하였다. 대안의 비용·편익 분석 시스템을 통하여 평가된 경제성은 결과를 정리하면 다음과 같다.

비용·편익 분석을 진행한 결과 비용대비 편익이 높은, 즉, B/C Ratio가 1보다 높은 대안은 총 9가지이다. 해당 대안들은 집행의 필요조건을 충족시킨다고 할 수 있으며, 사업장의 예산이 허락하는

Table 10. Cost-Benefit Analysis result for alternative scenarios

Scenario	Risk \$	Improved Risk \$	Benefit \$	Cost \$	B/C Ratio
A1	3,799,090	37990.896	3,761,099	47,900	78.51981
A2	661,404	6614.035	654,789	47,900	13.66993
A3	16,091	402.28	15,689	97,900	0.160255
A4	104,139	1041.389	103,098	47,900	2.152349
A5	103,756	1037.562	102,719	47,900	2.144439
A6	101,861	1018.605	100,842	47,900	2.105259
A7	97,010	970.1	96,040	47,900	2.005008
A8	92,649	926.49	91,723	47,900	1.914875
A9	91,928	919.281	91,009	47,900	1.899975
A10	22,223	222.233	22,001	47,900	0.459312
B1	23,612	590.2925	23,021	97,900	0.235152
B2	72,437	-	72,437		
B3	3284.1	82.1025	3,202	97,900	0.032707
B4	12,505	-	12,505		
B5	863.3	21.5825	842	97,900	0.008598
B6	146,681	1466.809	145,214	47,900	3.031609
B7	133.5	1.335	132	47,900	0.002759
C1	47,775	-	47,775		
C2	2518.7	-	2,519		
C3	2518.7	62.9675	2,456	97,900	0.025084
C4	2518.7	62.9675	2,456	97,000	0.025317
C5	9,105	-	9,105		
C6	970.1	9.701	960	47,900	0.02005

한 수행을 하는 것이 바람직하다. 사업장의 예산이 부족하다면 다음과 같은 순서로 대안들을 집행하는 것이 필요하다.

$$A1 > A2 > B6 > A4 > A5 > A6 > A7 > A8 > A9$$

이는 B/C Ratio가 높은 순으로, 투자의 효율성을 고려하여 비용대비 편익이 높은 사업을 추진할 수 있도록 도움을 제공한다.

V. 결론

본 연구에서는 석유화학 산업의 노후설비 문제를 해결하기 위해 특정 사용기간이 경과한 국내 화학 공장 내 설비를 노후설비로 분류하고, 정량적 위험성 평가를 진행하여 손실비용을 산정한 후, 비용편익 분석 방법을 활용한 안전투자 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 기존 설비 노후화의 상태 관리 관점에서 접근한 위험성 기반 검사방법이 간과하는 부분을 보완함과 동시에 사용기간이 경과함에 따른 노후설비의 정량적 위험성 평가를 수행할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

본 연구에서 제시한 정량적 위험성 평가를 이용한 노후설비의 비용편익 분석 방법을 활용한다면 다음과 같은 효과를 기대한다.

- (1) 적시의 예방정비를 통한 노후 설비의 성능향상 및 수명 연장
- (2) 생산 효율성 및 설비 계통의 신뢰도 향상
- (3) 안전관리에 사용되는 비용에 대한 인식 변화
- (4) 위험성 감소를 통한 직원의 안전감 증대, 손실비용의 감소

노후설비에 대한 비용·편익 분석 분야는 아래와 같은 내용의 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 노후설비의 기계적 건전성을 정량화하여 운영현황과 사용연한에 따른 노후화 정도를 보정하기 위한 연구가 필요하다. 변화하는 사회적 시선에 맞춰 다각도로 접근하여 비용편익 분석 방법을 보완하면 더욱 효과적으로 노후설비의 위험성을 감소시킬 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 광운대학교의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] 고용노동부, “울산 산업단지 노후설비 실태조사 결과”, (2014)

- [2] A. Peiravi, "Estimation of Expected Lifetime and Reliability During Burn in and Field Operation Using Markov Chain Monte Carlo Simulations", *World Applied Sciences Journal*, 4(6), 748-754, (2008)
- [3] HSE, "Research Report 823 Plant Ageing Study", Norwich, (2010)
- [4] HSE, "Research Report 509 Plant Ageing", Norwich, (2010)
- [5] API, "API RP 581 Risk Based Inspection Technique", Washington, (2008)
- [6] API, "API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry", Washington, (2011)
- [7] API, "API RP 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service", Washington, (2016)
- [8] API, "API RP 580 Risk Based Inspection", Washington, (2009)
- [9] ASME, "Risk-based Methods for Equipment Life Management : An Application Handbook", CRTD-Vol. 41, (2003)
- [10] ASME, "Inspection Planning Using Risk Based Methods", The Post Construction Subcommittee on Inspection Planning, (2006)
- [11] 김홍배, "비용·편익 분석론", 제 2 판, 홍문각, (2000)
- [12] 한국산업안전공단, "화학사고와 안전설비의 경제성 분석 모델 개발", 연구보고서, (2002)
- [13] 한국산업안전공단, "화학공장의 위험기반 비용·편익분석기법개발", 연구보고서, (2001)
- [14] Shell, "Hazards and Effects Management Process Recommended Practice", Shell, (2010)
- [15] Shell, "Guidance of Shell HSSE & SP Framework Restricted : Risk Assessment Matrix(RAM) Guide", Shell, (2010)
- [16] CCPS, "Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria", Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2010)
- [17] CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", Third Edition, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2010)
- [18] D. A. Crowl, J. F. Louvar, "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", Second Edition, Prentice-Hall, New Jersey, (2002)
- [19] H. R. Greengerg, J. J. Cramer, "Risk assessment and risk management for the chemical process industry", Van Nostrand Reinhold, New York, (1991)
- [20] R. E. Bollinger, D. G. Clark, A. M. Dowell III, R. M. Ewbank, D. C. Hendershot, W. K. Luts, S. I. Meszaros, D. E. Park, E. D. Wixom "Inherently Safer Chemical Processes, A life Cycle Approach", Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (1966)
- [21] CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", Third Edition, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2010)
- [22] M. Tweeddale, "Managing risk and Reliability of process plant", Gulf Professional Publishing, Burlington, (2003)
- [23] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", Second Edition, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2010)
- [24] 안전보건공단, KOSHA Guide(P-8-2012), "위험성평가 실시를 위한 우선순위 결정기술지침", (2012)
- [25] 서재민, "화학공장의 안전 설비 투자를 위한 비용·편익 분석 시스템 개발", 광운대학교 화학공학과 박사학위 논문, (2002)
- [26] 한국산업안전공단, "산업재해로 인한 경제적 손실비용의 체계적 분석방안 연구", (2007)
- [27] 산업안전학회, "산업재해로 인한 업종별 직간접 손실액 산출기준에 관한연구", (1999)
- [28] 김두열, "비용편익분석 입문: 기초원리와 사례", 입법평가 Issue Paper 17-15-1, (2017)