

수소화 탈황 반응기 히터의 안전계장기능 신뢰도 향상에 관한 연구

곽흥식 · 박달재*

서울과학기술대학교 산업대학원 안전공학과 · *서울과학기술대학교 안전공학과
(2017. 5. 8. 접수 / 2017. 6. 12. 수정 / 2017. 8. 14. 채택)

A Study on the Improvement of Reliability of Safety Instrumented Function of Hydrodesulfurization Reactor Heater

Heung Sik Kwak · Dal Jae Park**

Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry, Seoul National University of Science and Technology

*Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received May 8, 2017 / Revised June 12, 2017 / Accepted August 14, 2017)

Abstract : International standards such as IEC-61508 and IEC-61511 require Safety Integrity Levels (SILs) for Safety Instrumented Functions (SIFs) in process industries. SIL verification is one of the methods for process safety description. Results of the SIL verification in some cases indicated that several Safety Instrumented Functions (SIFs) do not satisfy the required SIL. This results in some problems in terms of cost and risks to the industries. This study has been performed to improve the reliability of a safety instrumented function (SIF) installed in hydrodesulfurization reactor heater using Partial Stroke Testing (PST). Emergency shutdown system was chosen as an SIF in this study. SIL verification has been performed for cases chosen through the layer of protection analysis method. The probability of failure on demands (PFDs) for SIFs in fault tree analysis was 4.82×10^{-3} . As a result, the SIFs were unsuitable for the needed RRF, although they were capable of satisfying their target SIL 2. So, different PST intervals from 1 to 4 years were applied to the SIFs. It was found that the PFD of SIFs was 2.13×10^{-3} and the RRF was 469 at the PST interval of one year, and this satisfies the RRF requirements in this case. It was also found that shorter interval of PST caused higher reliability of the SIF.

Key Words : partial stroke testing, safety instrumented function, risk reduction factor, probability of failure on demands

1. 서론

화학 및 석유화학, 가스 산업 등의 장치산업은 기술 집약적이며 설비가 밀집되어 있어 중대사고가 발생할 때 피해 영향은 사고발생 현장뿐만 아니라 인근 지역으로까지 인명 및 재산 피해를 야기시킬 가능성이 높다. 특히 정유, 석유화학 산업에서의 사고 피해는 10년마다 2배 이상으로 위험성이 크다¹⁾. 이에 산업현장에서는 허용하기 어려운 위험을 감소하기 위하여 여러 단계의 방호계층 (Protection Layers)을 적용하고 있다. 안전무결성 수준 (Safety Integrity Level, 이하 SIL)을 적용하는 안전계장기능 (Safety Instrumented Function, 이하 SIF)은 여러 방호계층의 하나로 사고 발생을 예방하거나 결과의 심각성을 저감시키는 역할을 한다. 국제전기기술위원회 (International Electrotechnical Commission, 이하 IEC)

에서는 IEC 61508²⁾과 IEC 61511³⁾ 표준을 제정하여 장치산업에 SIF를 적용할 시 SIL을 선정하고 검증할 것을 제안하고 있으며, SIF에 의해 안전성이 향상되는지는 SIL기법 적용 관련 연구⁴⁻⁸⁾를 통해 확인되고 있다.

SIF의 목표 SIL을 선정할 때 리스크 그래프, 리스크 매트릭스, 방호계층분석 (Layer of Protection Analysis; 이하 LOPA) 등과 같은 다양한 방법이 사용되고 있다^{2,9)}. LOPA 기법은 반정량적인 위험성 평가 기법으로 SIF의 목표 SIL 선정 방법으로 많이 활용되고 있다¹⁰⁾.

LOPA 기법을 이용하여 SIF에 SIL 등급을 결정할 때 해당 위험의 심각성과 독립방호계층 (Independent Protection Layer; 이하 IPL) 등을 고려하여 대상 SIF는 해당 위험이 허용 가능한 위험 (Tolerable Risk) 수준으로 도달하는데 요구된 위험감소계수 (Risk Reduction Factor, 이하 RRF)를 가지게 된다. SIF에 필요한 RRF에 의하여 관련 SIF의

* Corresponding Author : Dal Jae Park, Tel : +82-2-970-6308, E-mail : pdj70@seoultech.ac.kr

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

목표 SIL이 정해진 후 SIL 검증단계를 통하여 관련 SIF가 목표로 하는 SIL의 신뢰도 수준으로 설계했는지 확인한다. 이와 같이 SIF의 목표 SIL 충족 여부만을 검증하게 되면 일부 SIF들의 신뢰도는 목표로 하는 SIL을 충족하지만 Tolerable Risk 수준으로 도달하는데 요구되는 RRF는 충족하지 않는 경우가 발생할 수 있다.

이에 Marszal 및 Scharpf¹¹⁾는 목표 SIL은 충족하지만 필요 RRF는 충족하지 못하는 SIF들에 대해 한 단계 상위등급의 SIL 신뢰도 수준으로 SIF는 설계되어야 한다고 언급하고 있다. 그러나 이는 SIF에 추가 기기 비용 및 설치 후 정비 비용 등이 발생하게 되어 실행하는데 어려움이 있다. SIF의 신뢰도를 고려할 때 기기의 Failure Rate뿐만 아니라 SIF의 Stroke Test Interval도 중요한 인자이다. Full Stroke Testing (이하 FST)은 비용의 손실이 크기에 최근에는 부담이 작은 Partial Stroke Testing (이하 PST) 방법이 관심을 받고 있다. Summers 및 Zachary¹²⁾는 PST는 블록밸브의 요구 작동시 고장확률을 감소시키는데 FST을 보완할 수 있다고 언급하였고, Lundteigen 및 Rausand¹³⁾는 PST는 공정에 방해를 야기시키는 없이 기능점검에 의해 알려진 고장을 검출할 수 있다고 하였다. 기능점검 주기가 짧을 경우 SIF의 신뢰도를 향상시키는데 도움을 줄 수 있지만 설비의 운전 정지/바이패스를 요하게 되어 경제적·시간적 손실을 발생시킬 수 있다¹⁴⁾. 이에 본 연구에서는 수소화 탈황 반응기 히터 긴급차단시스템 SIF를 대상으로 Partial Stroke Testing를 적용하여 SIF의 필요한 RRF 충족 및 신뢰도를 향상시키는지 고찰하고자 한다.

2. 대상 공정 및 안전무결성수준 선정

본 연구에서 고려한 대상공정은 ○○석유화학 공장의 고도화 정제공정이며 이 공정의 많은 SIF 중에서 수소화 탈황 (Hydrodesulfurization, 이하 HDS) Reactor Heater에 설치된 긴급차단(Emergency Shutdown Device, 이하 ESD)시스템을 SIF로 선정하였다. HDS Reactor Heater (F-502)에서 ESD 시스템은 과열 시 발생할 수 있는 위험을 미리 예방하는 차원에서 설치된다. Fig. 1은 ESD의 개략도를 나타낸 것으로 ESD는 온도상승 감지시스템, Logic Solver 시스템 그리고 최종 밸브차단 시스템으로 이루어진다. 온도상승 감지시스템은 Heater outlet line에 Temperature Transmitter TE-071 1대가 설치되어 있고, HDS Reactor Heater의 outlet line의 온도가 설정온도 이상으로 상승하는 경우 TE-071에서 전송된 신호는 Trip 신호를 발생시킨다. 이 Trip 신호는 PLC로 통합되어 최종적으로 HDS 반응기 히터로 유입되는 연료가스

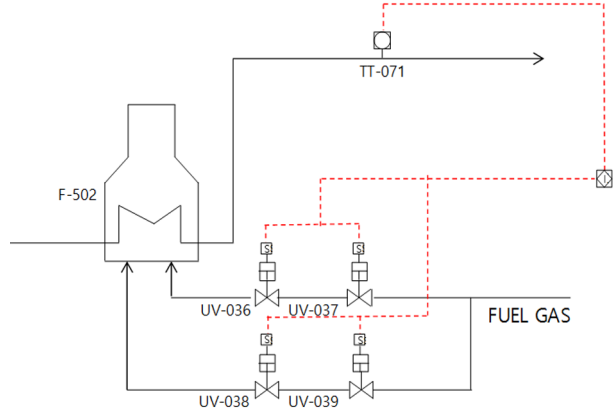


Fig. 1. Schematic diagram of ESD.

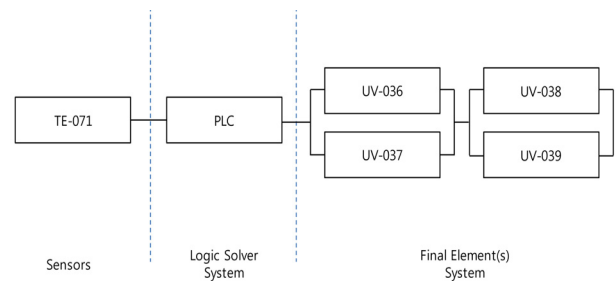


Fig. 2. Reliability block diagram of ESD.

line상에 설치된 긴급차단 밸브들을 동시에 차단시킨다.

ESD의 성공 기준은 TE-071이 성공하고, 삼중 구조 (Triple Modular Redundancy, TMR)방식의 PLC 시스템이 성공적으로 작동하여 HDS 반응기 히터로의 Fuel 공급라인이 차단되어야 한다. HDS Reactor Heater로의 Fuel 공급라인 차단의 성공기준은 각각의 Fuel 라인 (2 Gas 라인)에 설치된 2개의 긴급차단밸브 중에 각각의 Fuel 라인에서 최소 하나 이상이 차단되어야 한다. 성공기준을 바탕으로 작성된 ESD의 신뢰도 블록도를 나타내면 Fig. 2와 같다.

ESD에 대한 목표 SIL을 LOPA 기법을 이용하여 SIL Classification Meeting을 통하여 결정하였다. HSD Reactor Heater에서 설비 손상 등의 있음직한 위험을 예방하고자 ESD 평가에서 4개의 over temperature 있음직한 시나리오를 선정하였다. 각 시나리오별 IPL을 고려한 결과, 최종적으로 해당 위험이 허용 가능한 수준으로 도달하는데 필요한 RRF는 400으로 나타났고, SIL 2의 안전무결성수준이 필요한 것으로 확인되었다. ESD에 대한 SIL Worksheet를 나타내면 Table 1과 같다. Table 1에서 Safety 0, Environment 0은 Over temperature가 발생 시 심각성 수준에서 안전/환경에 영향이 없음을 의미한 것이고, Asset 4는 Heater 손상에 의한 주요 기기 손상으로 Asset 등급이 4로 확인되었다는 것을 나타낸 것이다.

Table 1. SIL Classification worksheet of ESD

1	2	3	4	5			6	7	8	9	10		
				Protection layers(PLs) enter 1 if no PL present									
Impact Event Description	Severity Level	Initiation Cause	Initiation Likelihood (events per year)	General Process Design	BPCS	Alarms, Etc.	Additional Mitigation, Restricted Access	Independent Protection Layers (IPLs)	Intermediate Event Likelihood (per year)	SIF Integrity Level & PFD	Target Mitigated Event Likelihood (events per year)		
				(probability)									
SIF No : 105-UC-010-1 Sensors : 105-TE-071 HH Final Elements : 105-UV-036/037 (C); 105-UV-038/039 (C)													
Potential damage to HDS Reactor Heater (105-F-502)	Safety 0	Cause 1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		N/A			
			-	-	-	-	-	-	-				
		Cause 2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
			-	-	-	-	-	-	-				
		Cause 3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
			-	-	-	-	-	-	-				
		Cause 4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
			-	-	-	-	-	-	-				
									0.00E+00	N/A	N/A		
	Environment 0	Cause 1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		N/A			
			-	-	-	-	-	-	-				
		Cause 2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
			-	-	-	-	-	-	-				
		Cause 3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
			-	-	-	-	-	-	-				
		Cause 4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
			-	-	-	-	-	-	-				
									0.00E+00	N/A	N/A		
	Asset 4	Overheating	overheating	N/A	N/A	105-TAH-075 with response	N/A	N/A		in SIL 2 range			
			0.10	1.00	1.00	0.10	1.00	1.00	1.00×10 ⁻²				
Overheating		105-F-502 tube leaks	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A						
		0.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00×10 ⁻²					
Overheating		105-PV-014 open	N/A	N/A	105-TAH-075 with response	N/A	N/A						
		0.10	1.00	1.00	0.10	1.00	1.00	1.00×10 ⁻²					
Overheating		Vent line blocked	N/A	N/A	105-TAH-075 with response	N/A	N/A						
		0.10	1.00	1.00	0.10	1.00	1.00	1.00×10 ⁻²					
								4.00×10 ⁻²	2.50×10 ⁻³			1.00×10 ⁻⁴	

Risk Reduction Factor(RRF) 400 Net Individual SIL In SIL 2 range 2.5×10⁻³

3. 결과 및 고찰

3.1 SIF의 신뢰도 분석

ESD용 SIF가 목표 SIL로 설계되었는지 평가하기 위하여 2가지 측면을 고려하였다. 첫 번째는 SIF의 하위 시스템의 구조적 제약으로 현재 SIF의 구성 상태를 확인하였고, 두 번째는 SIF의 요구작동 시 고장확률 (Probability of Failure on Demand, 이하 PFD)을 계산하여 목표 SIL을 충족하는지 평가하였다. SIF의 하위시

스템의 구조적 제약을 평가하기 위해서 EC 61511³⁾에서 제시한 Table 2를 기준으로 하였으며, SIF의 요구작동 시 고장확률 PFD를 계산하는 과정에서 사용된 가정은 다음과 같은 KOSHA¹⁵⁾의 석유화학공정 심사기술 편람에서 언급된 사항을 고려하였다.

- SIF에 Full Stroke Test는 4년에 1회씩 플랜트 정기 조업중지 시에 실시한다¹⁵⁾.
- PFD 계산을 위한 각 하위시스템에 대하여 제작사에서 제공하는 값이 있을 경우는 그 값을 사용하고,

Table 2. Structural constraints on type A subsystems and type B subsystems³⁾

Safe Failure Fraction (SFF)	Hardware Fault Tolerance (HFT)					
	0		1		2	
	Type A	Type B	Type A	Type B	Type A	Type B
< 60%	SIL 1	Not Allowed	SIL 2	SIL 1	SIL 3	SIL 2
60%~<90%	SIL 2	SIL 1	SIL 3	SIL 2	SIL 4	SIL 3
90%~<99%	SIL 3	SIL 2	SIL 4	SIL 3	SIL 4	SIL 4
≥99%	SIL 3	SIL 3	SIL 4	SIL 4	SIL 4	SIL 4

Table 3. Subsystem data of ESD

Element		λ	λ_{DD}	λ_{DU}	SFF	Note
ESD	Temperature sensor	3.97×10^{-7}	3.30×10^{-7}	3.60×10^{-8}	90.9%	Vendor Data
	PLC	-	-	-	SIL 3 satisfaction	Vendor Data
	Solenoid Valve	5.15×10^{-7}	0	1.88×10^{-7}	73.3%	Vendor Data
	ESD Valve	5.40×10^{-6}	7.00×10^{-6}	2.00×10^{-6}	63.0%	Generic Data ¹⁵⁾

λ : Rate of failure, λ_{DD} : Rate of dangerous detected failure, λ_{DU} : Rate of dangerous undetected failure

Table 4. Results of structural constraint evaluation of subsystem on ESD

Subsystem	Tag No. (Voting)	Target SIL	Type	Current HFT	SFF (%)	Calculated SIL		
						Sub	Final	
ESD	Sensors	TT-071 (1 out of 1)	SIL 2	B	0	90.9	SIL 2	SIL 2
	Logic Solver	PLC (2 out of 3)	SIL 2	B	1	-	SIL 3	
	Final Elements	UV-036/037 (1 out of 2)	SIL 2	A	1	63.0	SIL 3	
		UV-038/038 (1 out of 2)	SIL 2	A	1	63.0	SIL 3	

그러하지 경우에는 generic 데이터를 사용한다¹⁵⁾.

- SIF를 구성하고 있는 하위시스템이나 그 구성요소의 고장 발생 시에 보수에 소요되는 시간을 산정할 때는 제작사에서 제공하는 값이 있을 경우는 그 값을 사용하며, 그러하지 않는 경우에는 공학적 판단에 의해 8시간으로 하는 것을 가정한다¹⁵⁾.
- 연료 공급라인 긴급차단밸브는 계기용 공기상실, 설비의 전원상실 또는 Logic solver module이 trip 될 경우 자동으로 닫힘 상태가 된다¹⁵⁾.

ESD는 온도 감지시스템 (TT-071), 삼중 구조 (TMR) 방식의 PLC, 긴급차단밸브들의 하위시스템으로 구성되었으며 분석에 사용한 데이터는 Table 3와 같다.

Table 2 및 Table 3에 제시된 값을 이용하여 ESD의 하위시스템의 구조적 제약에 대해 평가한 결과를 나타내면 Table 4와 같다. Sensor system, logic solver system, final element system과 같은 ESD의 하위시스템에 대해 구조적 제약을 검토해 보았을 때 logic solver system과 final element system은 SIL 3, sensor system은 SIL 2 수준으로 설계되었음을 확인하였고, 여기서 ESD는 SIL 2

의 수준으로 목표 안전무결성수준인 SIL 2를 충족한다. ESD의 요구작동 시 고장확률(PFD)을 계산하기 위한 결함수목 (Fault Tree)은 Fig. 3에 나타난 바와 같고, 이에 대한 결과는 4.92×10^{-3} 으로 IEC 61511³⁾에 제시된 SIL 등급 2에 해당된다. 본 연구에서의 결함수목분석은 한국원자력연구소에서 개발한 AIMS-PSA 소프트웨어 패키지를 이용하였다.

3.2 필요 위험감소계수 (RRF)

일반적으로 SIF의 PFD 계산에 의한 신뢰도 분석은 허용 가능한 수준에 도달하기 위한 요구되는 RRF와의 비교가 아닌 SIL의 비교로서 어떤 SIF는 목표 SIL을 충족할 수 있지만 관련 위험이 허용 가능한 수준에 도달하기 위한 필요 RRF에는 못 미치는 신뢰도를 나타낼 수 있다. 예를 들어 SIF가 SIL 선정을 통하여 위험성이 허용 가능한 수준으로 도달하기 위하여 990의 RRF가 필요하다면 이 SIF는 SIL 2의 SIL의 신뢰도가 필요하다. 만약 이 SIF의 요구작동시 고장확률 (PFD)이 9.01×10^{-3} 으로 계산된다면 이 SIF는 목표 SIL을 충족하는 결과가 나온다. 그러나 실질적인 이 SIF의 RRF

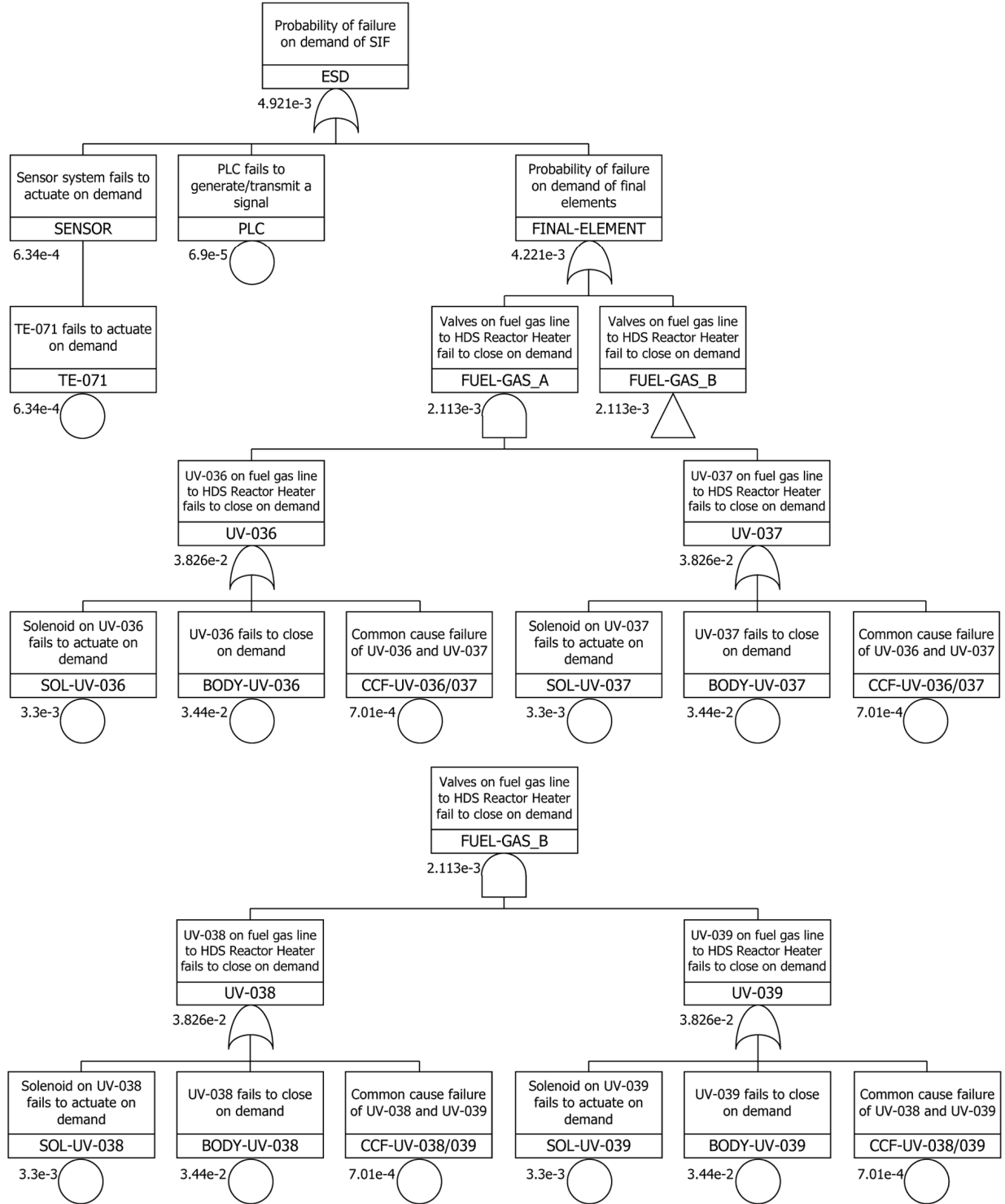


Fig. 3. Result of fault tree analysis for ESD.

는 110으로 990인 필요 RRF와는 큰 차이가 있다. 본 연구의 대상인 ESD가 이와 같은 경우로 대상 SIF는 관련 위험이 허용 가능한 수준으로 도달하기 위하여 400의 RRF가 필요하다. 그러나 PFD는 4.92×10^{-3} 으로 RRF

는 203으로 나타났으며 이에 대한 결과를 나타내면 Fig. 4와 같다.

ESD는 목표로 하는 SIL은 충족하지만 허용 가능한 수준에 도달하기까지 197의 RRF가 부족하게 된다. 이

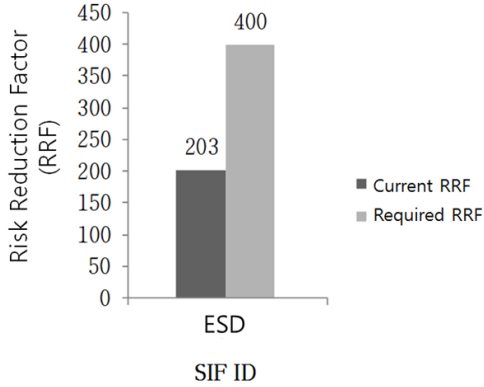


Fig. 4. Comparison of current RRF and required RRF for SIF.

Table 5. Comparison of RRF after a one-grade SIF design

SIF ID	Required RRF	Current RRF	RRF above one level	Results
ESD	400	203	1,000~10,000	Satisfaction of required RRF

러한 결과는 해당 위험을 허용 가능한 수준으로 도달하는데 다른 접근이 필요하다는 것을 나타낸다. Marszal과 Scharpf¹¹⁾는 목표 SIL은 충족하지만 허용 가능한 수준으로 도달하는데 요구된 RRF는 충족 못하는 SIF들에 대해 SIF의 설계를 목표 SIL보다 한 단계 상위등급 수준으로 설계하는 것을 제안하고 있다. 예를 들어 990의 RRF가 요구된 SIF (목표 SIL: SIL 2)를 SIL 3 수준으로 설계할 경우 SIL 3에 해당하는 RRF는 IEC 61511³⁾에서 제시된 1,000~10,000 범위가 된다. 이 범위의 RRF는 SIF의 필요 RRF인 990보다 큰 값이 되며 필요 RRF를 충족하게 된다. ESD에 대해 Marszal과 Scharpf¹¹⁾가 권장한 한 단계 상위등급의 SIL을 SIF 설계에 고려하여 반영된 신뢰도를 비교하면 Table 5과 같이 필요 RRF를 충족하게 된다. 그러나 목표 등급보다 한 단계 높은 등급의 SIL을 적용하여 SIF를 설계하게 되면 SIF의 기기 추가 설치비용과 관리비용이 증가하게 되어 실행하는데 어려움이 따른다. 이에 대한 대안으로 Partial Stroke Testing (PST)을 통한 SIF의 RRF 향상이 필요하다.

3.3 Partial Stroke Testing (PST) 적용

Table 6과 Fig. 5은 ESD 중 하나의 긴급차단밸브에 대하여 4년 주기의 Full stroke test를 포함하여 서로 다른 PST 주기를 적용한 결과로 Full Stroke Test (FST)를 할 경우, 밸브의 PFD는 3.51×10^{-2} 이고, PST 주기가 짧을수록 밸브의 신뢰도는 향상되는 것으로 나타났다. 여기서, PST Coverage는 신뢰성 핸드북^{16,17)}에서 제시한 0.7를 사용하였다.

Table 6. PFD values of an emergency shut-off valve according to both a full stroke test and different PST cycles

PST cycle	4 year (FST)	2 year	1 year	6 month	3 month
Results of PFD	3.51×10^{-2}	2.28×10^{-2}	1.67×10^{-2}	1.36×10^{-2}	1.21×10^{-2}

FST : Full stroke test

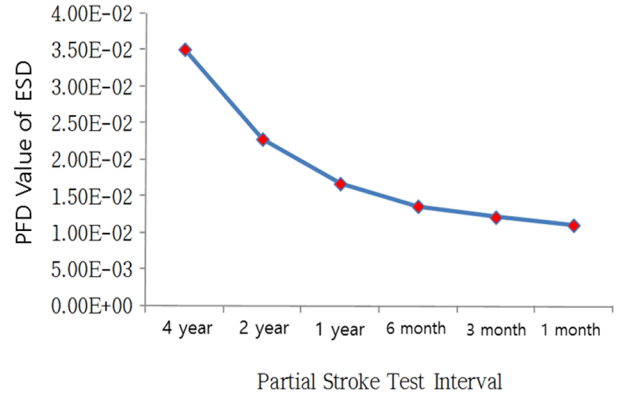


Fig. 5. Variations of PFD values of an emergency shut-off valve by both a full stroke test and different PST cycles.

ESD는 총 4개의 긴급차단밸브들을 Final Elements로 포함하고 있다. Fig. 6은 ESD에 대하여 PST(1년 주기)를 적용하여 결함수목분석을 수행한 결과를 나타낸 예시로, PFD는 2.13×10^{-3} 으로 계산됨을 알 수 있다. Table 7과 Fig. 7은 ESD에 대해 FST 및 서로 다른 PST를 적용한 결과로 FST에서 RRF는 203, PST 1년 주기에서 RRF는 469로 PST 1년주기는 ESD의 필요 RRF 400을 충족하는 것으로 나타났다. 이와 같이 목표 SIL은 충족하지만 필요 RRF에는 충족하지 못하는 신뢰도 수준의 SIF에 대해 PST를 적용하여 해당 SIF의 신뢰도를 증가 시킴으로 필요 RRF를 충족함을 확인하였다. 그러나 Fig. 5에 나타난 바와 같이 긴급차단밸브에 PST를 적용하여도 긴급차단밸브의 신뢰도 향상에는 한계가 있다. SIF의 필요 RRF와 SIF의 실제 RRF간에 차이가 많다면 PST를 SIF의 긴급차단밸브에 적용하여도 신뢰도 향상에는 한계가 있기에 필요 RRF를 충족하지 못하게 되므로 다른 접근 방법이 필요하다.

4. 결론

장치산업에서는 허용하기 어려운 위험을 감소시키기 위하여 다양한 방호계층들을 현장에 적용하고 있으며 IEC 61508 및 IEC 61511과 같은 국제표준은 이러한 산업에서의 안전계장기능(SIF)에 대한 안전무결성수준

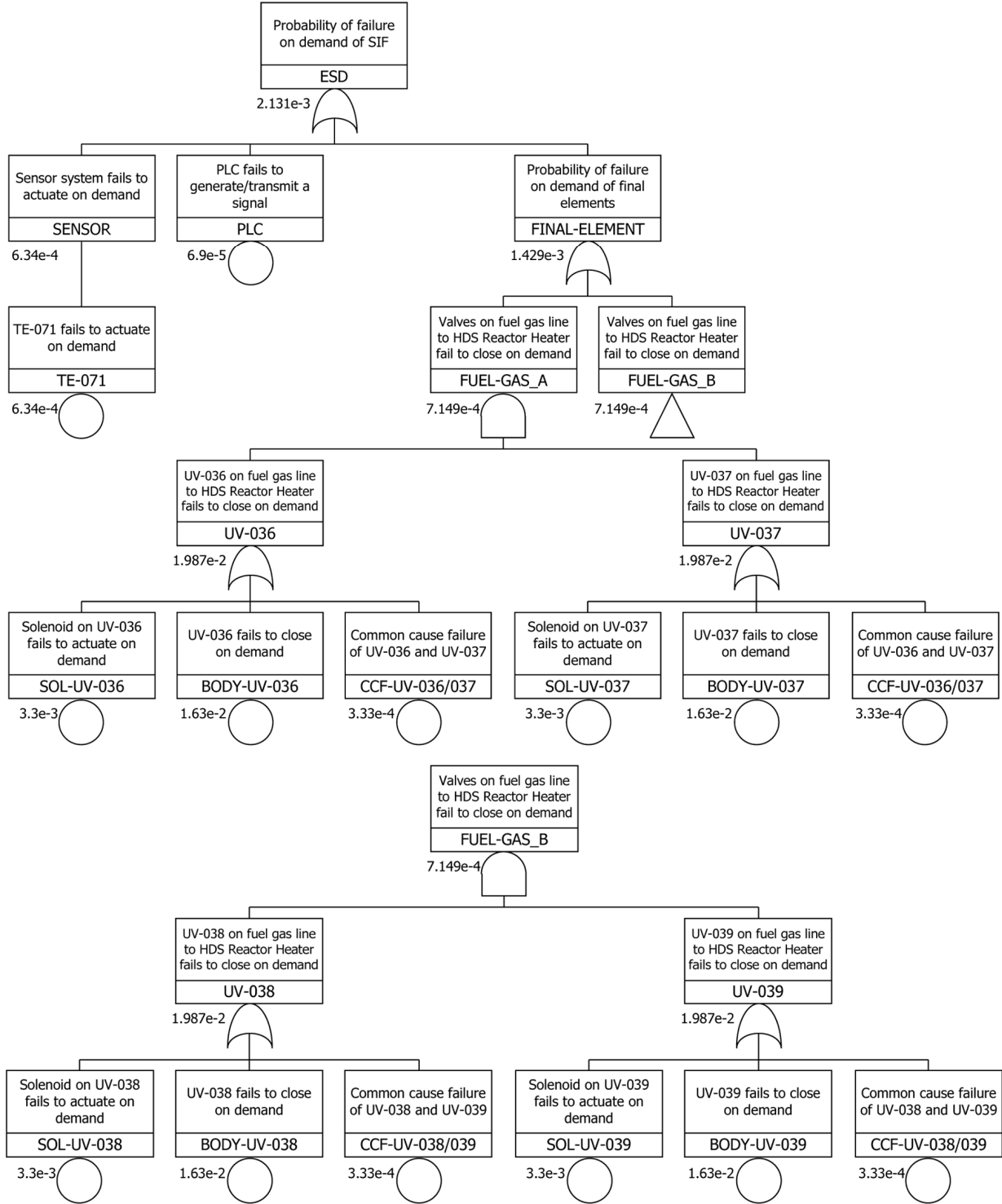


Fig. 6. Result of fault tree analysis of PST (one year cycle) applied to ESD.

(SIL)을 요구하고 있다. SIF의 신뢰도를 검증할 때 목표 SIL의 충족 여부만 확인할 뿐 SIF의 필요 위험감소 계수(RRF)는 고려하지 않는다. 그 결과 어떤 SIF들은 목표 SIL은 충족하지만 요구되는 RRF는 충족하지 못

하는 문제점이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서 수소화탈황 반응기 히터에 설치된 긴급차단시스템(ESD) SIF에 Partial Stroke Testing을 통하여 SIF의 신뢰도 향상 측면에서 고찰하였으며, 이에 대한 연구결과를 요

Table 7. Results of PFD and RRF according to different PST cycles for ESD

Required RRF	PST cycles	Values of PFD	No. of RRF	Results
400	4 year (FST)	4.92×10^{-3}	203	No satisfaction of required RRF
	2 year	2.92×10^{-3}	343	No satisfaction of required RRF
	1 year	2.13×10^{-3}	469	Satisfaction of required RRF

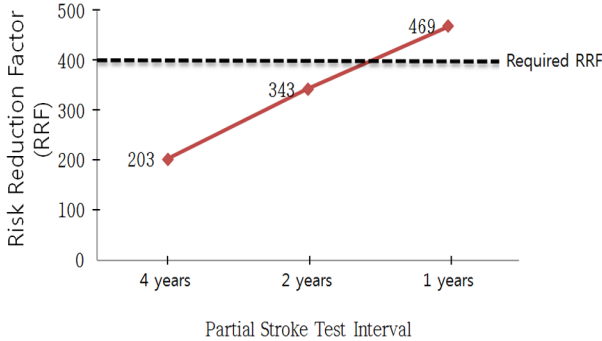


Fig. 7. Variations of number of RRF according to different PST cycles.

약하면 다음과 같다.

(1) LOPA 기법을 이용하여 위험의 중대성과 독립방호계층들을 분석하여 허용 가능한 위험 수준으로 도달하는데 ESD는 RRF 400이 필요한 것으로 확인하였으며 이로 인한 SIF의 목표 SIL은 SIL 2 등급으로 나타났다.

(2) ESD에 대하여 결함수목분석 기법을 적용하여 PFD를 산정하였고, ESD의 하위시스템의 구조적 제약 평가 결과 모든 하위 시스템들은 목표로 하는 SIL 2를 충족하는 것으로 나타났다. 그러나 ESD의 실제 RRF는 203으로 필요 RRF인 400은 충족 못하는 것으로 나타났다.

(3) ESD의 긴급차단 밸브들에 Partial Stroke Test를 적용한 결과 PST 1년 주기에서 PFD는 2.13×10^{-3} , RRF는 469로 ESD의 필요 RRF 400을 충족하는 것으로 확인되었다.

이와 같이 목표 SIL은 충족하지만 필요 RRF에는 충족하지 못하는 SIF에 Partial Stroke Testing을 적용하여 SIF의 신뢰도를 향상시킨다면 해당 산업현장의 위험성을 감소시키는데 도움을 줄 것으로 생각된다. 그러나 SIF의 필요 RRF와 SIF의 실제 RRF 간에 차이가 많다면 Partial Stroke Test를 ESD SIF에 적용하여도 신뢰도 향상에는 한계가 있어 필요 RRF를 충족하지 못하게 되므로 다른 접근 방법을 적용하는 연구가 요구되며, 또한 과거 데이터를 바탕으로 좀 더 정확한 PST coverage 산정치를 개발하는 후속 연구도 필요하리라 판단된다.

References

- 1) K. H. Kook, "A Study on Present Status and Prevention Measures of Safety-related Accidents in Chemical Plants", Master Thesis, Chongnam National University, pp. 45-48, 1999.
- 2) International Electrotechnical Commission, "Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related System", IEC 61508, 1998.
- 3) International Electrotechnical Commission, "Functional Safety - Safety Instrumented System for the process Industry sector", IEC 61511, 2003.
- 4) J. H. Kim, "A study on safety Enhancement of Chemical Plants using SIL(Safety Integrity Level)Method", Master Thesis, Kwangwoon University, Seoul, 2010.
- 5) I. J. Lee, "Safety Enhancement of LPG Terminal by SIL Method", Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2015.
- 6) T. Thepmanee and P. Khamkoon, "SIL Assessment and Implementation Case Study: A Safety Instrumented Function for Overpressure Protection in a Two-Phase Gas-Liquid Separator", ICIC Express Letters, Part B, Applications: an international journal of research and surveys, Vol. 5, No. 1, pp. 45-50, 2014.
- 7) P. Baybutt, "Using Risk Tolerance Criteria to Determine Safety Integrity Levels for Safety Instrumented Functions", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25, No. 6, pp. 1000-1009, 2012.
- 8) E. Colin, "Safety Integrity Verification of Legacy Systems", Measurement and Control, Vol. 42, No. 6, pp. 185-189, 2009.
- 9) C. A. Lassen, "Layer of Protection Analysis (LOPA) for Determination of Safety Integrity Level (SIL)", Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, pp. 6-17, 2008.
- 10) A. E. Summers, "Introduction to Layer of Protection Analysis", Journal of Hazardous Materials, Vol. 104, pp. 163-168, 2003.
- 11) E. M. Marszal and E. W. Scharpf, "Safety Integrity Level Selection: Systematic Methods Including Layer of Protection Analysis", International Society of Automation, pp. 181-182, 2002.

- 12) A. Summers and B. Zachary, "Partial-stroke testing of safety block valves", *Control Engineering*, Vol. 47, No. 12, pp. 87-89, 2000.
- 13) M. A. Lundteigen and M. Rausand, "The Effect of Partial Stroke Testing on the Reliability of Safety Valves", *The European Safety and Reliability Conference*, Stavanger, Norway, June 25 - 27, pp. 1-15, 2007.
- 14) Y. H. Lee, "Understanding the Partial Stroke Test", *Instrumentation technology*, pp. 133-137, 2011.
- 15) Korea Occupational Safety and Health Agency, "A Manual of Review Technique for Petrochemical Process - NCC Process part", pp. 79-81, 2007.
- 16) H. Stein and P. Hokstad, "Reliability Data for Safety Instrumented Systems : PDS Data Handbook", Trondheim, SINTEF Industrial Management, Norway, p. 64, 2004.
- 17) OREDA, "OREDA : Offshore Reliability Data Handbook (4th ed.)", SINTEF Industrial Management, Det Norske Veritas, Norway, p. 173, 2002.