

Ethyl Benzene 공정에서 화재 · 폭발방지를 위하여 안전건전성수준을 이용한 안전장치시스템의 신뢰도 분석

Reliability Analysis on Safety Instrumented System by Using Safety Integrity Level for Fire · Explosion Prevention in the Ethyl Benzene Processes

고재선[†] · 김 호 · 이수경*

Jae-Sun Ko[†] · Hyo Kim · Su-Kyoung Lee*

서울시립대학교 화학공학과, *서울산업대학교 안전공학과
(2005. 10. 4. 접수/2006. 7. 14. 채택)

요 약

본 논문의 목적은 Ethyl Benzene 플랜트의 공정에서 과압 현상이 Column 상부의 반응폭주 및 화재 · 폭발의 원인이 되기 때문에 안전장치시스템의 신뢰도가 압력방출밸브가 요구하는 안전건전성수준으로 설계되어 있는지를 정량적으로 분석한 것이다. 압력방출밸브의 요구시 실패확률은 일반신뢰도 자료 조사결과를 근거로 하여 안전장치시스템에 대한 안전건전성수준의 목표등급을 SIL3으로 설정하였고, 이에 대한 PFD를 1.00E-3에서 1.00E-4로 결정하였다. 신뢰도 모델의 구축 및 결함수 분석기법을 이용하여 SIS의 요구시 실패확률에 대한 정량화를 수행한 결과 SIS에 대한 PFD는 Benzene Prefractionator Column, Benzene Column, EB Column에 대해 각각 8.97E-04, 5.37E-04, 5.37E-04로 계산되었다. 따라서 SIS의 신뢰도가 SIL3 등급에 요구되는 안전건전성수준으로 설계되어 있다고 판단되며 컨트롤밸브에 대한 6개월 주기의 Partial Stroke Test가 수행될 경우 각 Column의 SIS는 약 22~27%의 신뢰도 향상이 기대된다.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze quantitatively if the safety instrumented system(SIS) like the pressure safety valves(PSV) in the processes of ethyl benzene plant have been designed relevantly to the safety integrity level because overpressure in the benzene or ethyl benzene columns causes the explosive reactions, fires and reactor explosions. The safety integrity level(SIL) 3 has been adopted as a target level of SIS based on the general data of the Probability of Failure on Demand of PSV, 1.00E-4~1.00E-3. The standard model of the reliability has been set up and then the fault tree analysis of it has been carried out to get the PFD of SIS, and the results show 8.97E-04, 5.37E-04, 5.37E-04 for benzene prefractionator column, benzene column and EB column, respectively. Thus, we conclude that the SIS is designed to fulfill the condition of SIL3, and when the partial stroke test for the control valve are carried out every sixth month, the SIS of each column is expected to increase its reliability up to 22~27%.

Keywords : Pressure safety valve, Safety instrumented system, Safety integrity level, Fault tree analysis, Probability of failure on demand, Reliability block diagram

1. 서 론

화학 산업은 시스템이 복잡한 장치산업으로서 설비 상 잠재위험요소 및 각종 위험물 보유량이 많기 때문

에 화재 및 폭발 사고가 발생할 경우 대형사고를 유발하기 쉽고 이러한 피해의 광역화와 인명피해를 방지하기 위하여 유사한 사고로부터의 교훈을 토대로 하여 특히 안전설계, 작업안전관리 등에 공학적, 기술적 연구가 진행되어오고 있다. 화재 및 폭발로 인한 중대 사고를 야기할 수 있는 대형 위험사업장의 종류로는 크

[†]E-mail: 119kjs@hanmail.net

계 정유, 석유화학, 화학비료, 가스관련 산업 등으로 구분할 수 있으며 전국에 약 300개소의 사업장이 분포되어 있다. 이들 중에는 설치 후 10년 이상이 경과한 사업장이 약 60%를 점하고 있고 20년 이상도 10%를 넘고 있다.¹⁾ 또한 1999년부터 2004년까지 화학공업분야의 중대사고(사망자 발생 사고나 사회물의를 일으킨 사고) 발생현황은 총 46건으로, 발생형태로서 가장 많은 점유율을 나타낸 것은 폭발이 41%를 차지하고 있으며, 중대사고 발생원인을 분석한 결과로는 설비결합이 39%를 차지하고 있어 설비결합에 의한 사고 발생가능성이 높음을 보여주고 있다.^{2,3)} 따라서 본 연구에서는 화학공정의 중, 개축시 중요설비 중 반응폭주에 관계된 안전장치의 적절한 신뢰성을 확보하기 위해 보편타당한 정량적인 평가방법론을 제시하고 실현함으로써 향후생산능력의 증대 및 안전성확보를 하고자 함이다.

2. 연구방법

본 연구는 Ethylene과 Benzene을 원료로 Ethyl Benzene을 생산하는 공장의 생산능력 증대 및 안전성확보를 위해 설비개선을 진행 중인 Ethyl Benzene의 공정사례에서 냉각장치의 고장으로 인한 과압 발생시 반응폭주 및 화재 · 폭발 방지를 위해 계획하고 있는 안전장치시스템(SIS : Safety Instrument System)의 신뢰도가 압력방출밸브가 요구하는 안전건전성수준(SIL: Safety Integrity Level)으로 설계되었는지를 정량적으로 분석함으로써 안전설계를 도모하고자 함이다. 본 분석을 수행하기 위한 개략적인 방법은 Fig. 1에 나타내었고 그

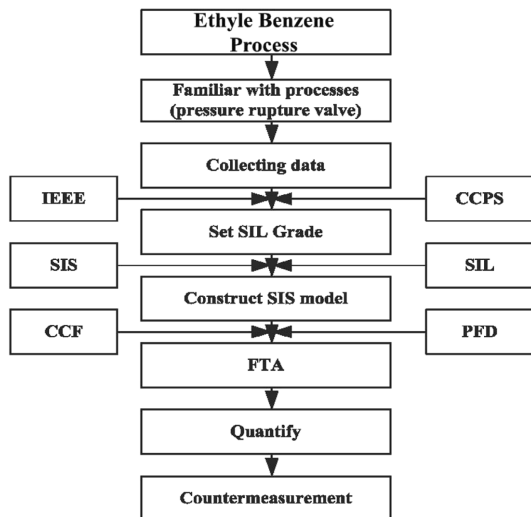


Fig. 1. Flow chart on study.

내용은 다음과 같다. 먼저, 해당 공정관련 자료를 검토하여 사고발생원인 및 현재의 안전조치들을 파악하였고 이로부터 SIS의 기능 및 구성을 파악하였다. 다음으로 일반신뢰도 데이터 자료를 조사하여 SIS에 대한 안전건전성수준(SIL)의 목표값을 결정하였으며, SIS에 대한 성공기준을 마련하기 위하여 신뢰도 모델(RBD : Reliability Block Diagram)을 구축하였다. 이를 토대로 결합수분석(FTA: Fault Tree Analysis) 기법을 이용하여 SIS의 요구시 실패확률에 대한 정량화를 수행하였다. 마지막으로 도출된 SIS에 대한 요구시 실패확률(PFD: Probability of Failure on Demand)이 목표 안전건전성수준(Target Safety Integrity Level)에 부합되는지를 판단하였다.

3. 안전장치시스템(SIS : Safety Instrumented System)²⁾의 신뢰성확보를 위한 이론적 고찰

3.1 안전건전성수준(SIL : Safety Integrity Level)²⁾

SIL(Safety Integrity Level)은 주어진 공정에 대한 안전수준을 측정하는 것이다.

특별히 안전한 방법에 의한 공정 수행시 일어날 수 있는 실수 및 고장의 경우에 있어서 나타나는 의문점들에 대해 마지막 사용자가 공정을 예측할 수 있는 것은 어떤 범위까지인가 하는 것이다. 이런 측정치들에 대한 사양은 IEC 61508, IEC 61511, JIS C 0508 그리고 ISA SP84.01 기준들에 요약되었다.^{3,5)} Fig. 2는 공정과 관련하여 SIL 등급들이 연계되고 추론되기 위한 필요도구인 RAT(Risk Assessment Tree)²⁾이다. RAT는 해당 공정에 대해 안전과 위험을 평가하는 도구로서 특히 위험에 대해 수용가능하거나 수용 가능하지 못함을 분류하는 것이다.

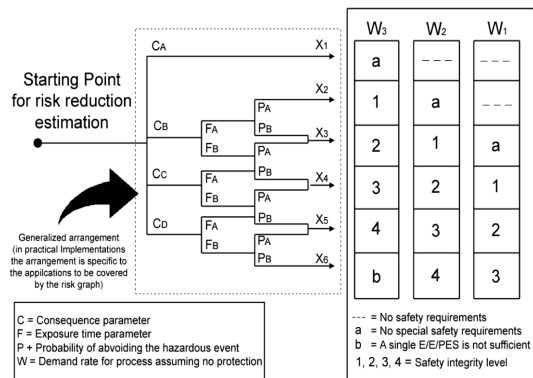


Fig. 2. Draw on risk assessment tree.²⁾

Table 1. Safety integrity level : probability of failure on demand^{2,6,8)}

Demand Mode of Operation		
Safety Integrity Level	Average Probability of Failure on Demand	Risk Reduction
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10,000$ to $\leq 100,000$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	> 1000 to $\leq 10,000$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	> 100 to ≤ 1000
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	> 10 to ≤ 100

3.2 안전건전성수준과 신뢰성(SIL Versus Reliability)^{2,6,7)}

SIL 등급의 중요한 요점은 공정의 본질적인 안전에 대해 해석하는 것이다. SIL 등급 계산에 사용된 중요한 통계적인 부산물로는 안전에 관한 신뢰성에 관한 것이며, 만약 신뢰성을 결정하기 위해서 어떤 안전에 관한 해석이 주어진 SIL 환경에서 사용되었다면 그 안전에 관한 해석은 예정된 등급에서 나타내는 임무를 수행함에 있어서 “수용 가능함”이라고 나타내어진다. “수용 가능함”을 결정할 때 MTBF(Mean Time Between Failure), MTTR(Mean Time to Repair), PDF(Probability to Fail on Demand)가 포함된 고려사항들을 참작해야 한다.⁶⁾ 이어서 이 신뢰성 데이터, 즉 안전한 방법으로 공정을 수행할 때 실수를 야기하는 가능성을 통계적으로 측정하고 조합하는데 SFF(Safe Failure Fraction)²⁾ 사용되며, 그 측정치로 최대로 등급화된 SIL 환경을 결정한다. SIL 등급은 공정에 대한 의문점들에 대한 “요구 시 실패 확률”을 방정식으로 나타낼 수 있다.^{2,6,7)} 아래의 Table 1은 공정이 “On Demand”인지에 대한 관계를 나타낸 것이다.

3.3 안전건전성수준의 결정(Determining SIL values)²⁾

주어진 공정에서 SIL의 등급을 결정하기 위해 사용되는 방법으로는 2가지가 있는데 이것들은 Fault Tree Analysis와 Markov Analysis로서 각각의 이러한 방법들에 대해 첫 번째 단계는 공정 구성품 각각에 대해서 PFD를 결정하는 것이다. 예를 들면 대상공정(Target Process)에서 PFD는 다음에 나타낸 관계식을 사용한다.

$$PFD_{ave} = (Failure Rate)^2 * Test Interval \quad (1)$$

여기서, Failure rate = 1/MTBF

다음 단계는 공정의 모든 구성품들에 대해 PFD 값

들을 합산하는 것이다. 합산된 PFD는 그 때 위의 Table 1에서의 공정에 관한 SIL 등급과 비교된다. 본 논문에서 사용된 Fault Tree Analysis 방법의 경우에 있어서의 다음 단계는 Fault tree를 다이어그램으로 작성하는 것이다. 이 다이어그램은 잠재적인 위험 사건을 포함하여 여러 가지 공정의 구성품들을 목록화한 것이다. 그 구성품들은 Boolean Logic을 거쳐 tree 안에서 연계되어진다. 일단 이것이 완료되면 각각의 계통에 대한 PFD는 논리적인 관계에 근거하여 결정되어진다. 마지막으로 PFDs(Sensor 시스템에 대한 Average PFD 값)는 공정에 관한 PFDave를 산출하기 위해서 합산되어지고, 다시 한번 PFDave는 적절한 SIL 등급을 위하여 Table 1을 참조하게 된다.

4. Ethyl Benzene Plant의 공정사례를 통한 SIS의 신뢰도 규명

4.1 Safety Instrumented System(SIS) 필요성

본 분석의 대상이 되는 사고시나리오는 EB/SM 플랜트의 동력부로부터 SHP(Saturated high pressure) Steam(이하 OSBL SHP)의 공급 중단시 Column의 상부에서 Cooling Medium의 상실로 인한 Overpressure 발생으로 설계압력을 초과하게 될 때 반응폭주 및 화재·폭발이 발생하는 사고이다. OSBL SHP(Off-site battery limit, Saturated high pressure)가 중단될 경우에 MP Condensate Drum, BFW(Boiler feed water)/MP (Medium pressure) Condensate Failure 시 나리오에 해당하는 장치들이 영향을 받는다. 즉 OSBL SHP가 중단되면 EB/SM 공장 운전에는 필요한 SHP 공급이 부족하게 되고 순차적으로 EB Distillation System의 Cooling 매체인 MP Condensate 공급이 부족하게 되어 최악의 경우에 Global MP Condensate Failure가 발생할 수 있다. 이상의 내용에서 OSBL SHP 공급중단에 의한 Global MP Condensate Failure시에 발생할 수 있는 Relief Load는 약 338,000 kg/hr이며, 이 값은 Common Flare Stack의 최대 처리 설계용량인 275,000 kg/hr을 초과한다. 따라서 EB/SM 플랜트는 설비의 안전성을 높이고 OSBL SHP Failure 시나리오에 대응하고자 기술적인 대안으로 Benzene Prefractionator Column, Benzene Column, EB Column에 대하여 PSV가 요구하는 SIL 수준의 Safety Instrumented System을 적용하여 Flaring이 최소화 되도록 설계하는 것이다.

4.2 SIS의 목표설정

Table 1과 같이 SIS에 요구되는 신뢰도 수준은 일반

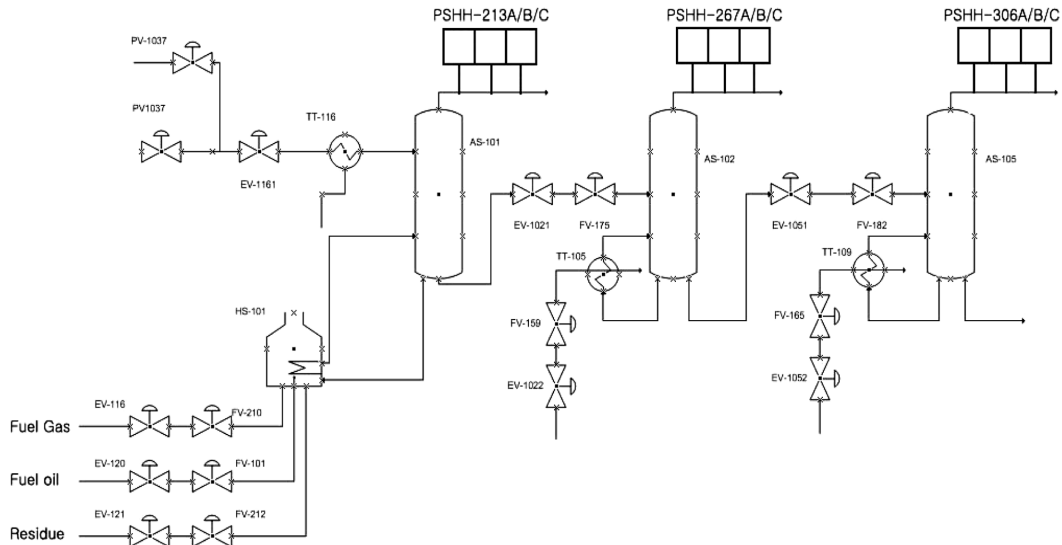


Fig. 3. Draft on safety instrumented system in ethyl benzene process.

Table 2. Fails to open on demand for PSV

No	PDF	Date Source	Other
1	4.15E-3	CCPS4.3.3.1	Pilot operated type
2	2.12E-4	CCPS\$.3.3.2	Spring loaded type
3	3.20E-3	IEEE-500 11.2b.1	Pressure relief valve
4	1.00E-3	EPRI ALWR URD Annex A Table A2-1	Pressurizer safety valve for PWR
5	7.00E-3	EPRI ALWR URD Annex A Table A2-1	Safety/relief valve for BWR actuation mode
6	5.00E-3	EPRI ALWR URD Annex A Table A2-1	Pilot operated type

적으로 안전진전성수준(SIL: Safety Integrity Level)으로 표현되는데 이는 작동 요구시 실패확률(PFD: Probability of Failure on Demand)에 대한 구간을 의미한다.

PFD와 SIL과의 관계는 “ISA-8401”(1996)와 “IEC-61508-1”(2000)³⁻⁵⁾ 지침을 따랐으며 압력방출밸브에 대한 PFD는 요구시 열림실패(Fails to Open on Demand) 확률로서 다음과 같은 일반 신뢰도 자료들을 조사하였으며 정리한 결과는 Table 2와 같다. Table 2에 제시된 PSV에 대한 PFD는 최대 7.03E-3부터 최소 2.1E-4에 걸쳐 분포되어 있으며 이를 바탕으로 PSV의 PFD에 대한 SIL 등급은 SIL3이라고 판단된다. 따라서 EB Plant의 SIS의 목표 등급은 SIL 3을 만족하여야 한다.

4.3 SIS의 신뢰도 모델의 구성

Local Condensate Failure(Cooling Medium 공급 실패)에 대한 SIS의 신뢰도 모델은 각각 Benzene

Prefractionator Column(ESD-15), Benzene Column(ESD-16), EB Column(ESD-17)으로 구성하고 각 SIS에 대한 성공기준을 정의하였다. 각 column은 압력상승감지시스템, Logic Solver 시스템 그리고 최종밸브차단시스템 등의 3부분으로 이루어진다. 이 중 대표적으로 Benzene Prefractionator Column인 ESD-15에 대해 SIS의 구성 및 SIS의 성공기준을 설명하면 아래와 같다.

4.3.1 SIS의 구성

압력상승감지시스템은 Benzene Prefractionator Column 상부의 Overhead Line에 압력스위치 PSHH-213A, PSHH-213B, PSHH-213C의 3대가 독립적으로 설치되어 있다. 설정압력이상으로 Overhead Vapor의 압력이 상승될 경우 PSHH-213A/B/C(2 out of 3 voting)에서 전송된 신호는 ESD-15라는 Trip 신호를 발생시킨다. 이 Trip 신호는 Programmable Logic Controller(PLC)로 통합되어 최종적으로 반응기 Effluent 라인으로부터 AS-

101로 유입되는 라인에 설치된 압력조절밸브(PV-1037과 PV-1055) 그리고 긴급차단밸브(EV-1161)를 동시에 차단하며 또한 Fired Heater(HS-101)로 유입되는 연료 공급라인 상에 위치한 Fuel Gas 유량조절밸브(FV-210) 및 긴급차단밸브(EV-116) 그리고 Residue 유량조절밸브(FV-212) 및 긴급차단밸브(EV-121)를 동시에 차단하게 된다.

4.3.2 SIS의 성공기준

본 SIS(ESD-15)의 성공기준은 PSHH-213A, PSHH-213B, PSHH-213C 중 적어도 2대 이상이 성공하고 3대의 PLC 시스템 중 적어도 2대 이상이 성공적으로 작동하여 반응기 Effluent 라인 및 Fired Heater(HS-101)의 연료공급라인이 차단되어야 하는 것으로 가정하였다. 반응기 Effluent 라인 차단 성공기준은 2대의 압력조절밸브(PV-1037과 PV-1055)가 모두 차단되거나 공통라인의 긴급차단밸브(EV-1161)가 차단되어야 성공한다. Fired Heater(HS-101)의 연료 공급라인의 차단 성공라인은 Fuel Gas 공급라인밸브(FV-210/EV-116)와 Residue 공급라인밸브(FV212/FV121)이 모두 차단되어야 하며 각 라인에는 유량조절밸브와 긴급차단밸브 등 2대의 차단밸브가 직렬로 배치되어 있음을 감안하여 적어도 하나의 밸브가 성공해야 하는 것으로 보았다. 이상에서 마련한 성공기준을 바탕으로 작성된 SIS(ESD-15)의 Reliability Block Diagram(RBD)은 Fig. 4와 같다.

4.4 결함수목의 구성

본 분석에서는 논의된 SIS의 구성과 성공기준을 토대로 SIS의 PFD를 구하기 위하여 결함수목분석(Fault Tree Analysis) 방법을 적용하였다. 결함수목분석은 Benzene Prefractionator Column, Benzene Column 그리고 EB Column에서 Overpressure 발생시 SIS가 이용불능이 되는 기기 또는 각 시스템의 고장사건들의 조합을 논리적으로 도식화하는 작업으로서 SIS가 요구시 이용불능에 대한 고장수목 모델이 완성되면 여러 사고추이의 빈도를 정량화하고, 빈도 정량화를 위해서 기기 고장률에 대한 일반 데이터를 이용하였다. 이상의 고장수목 및 데이터 개발이 완료되면 사고추이의 정량

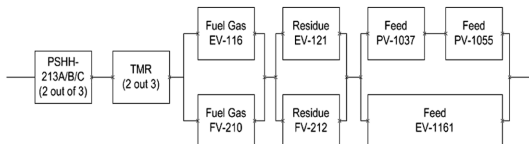


Fig. 4. Reliability block diagram by success criteria of SIS(ESD-15).

화를 실시하고 각 사고추이 빈도를 모두 합쳐 SIS의 PDF를 구한다. 고장수목은 전산코드를 사용하여 정량화되는데 본 분석에서는 한국원자력연구소에서 개발한 KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package (KIRAP) 소프트웨어 패키지를 사용하였다.

4.4.1 압력상승감지장치가 요구시 이용불능인 경우

각 Column의 상부에는 3대의 독립적인 압력스위치(Pressure Switch)가 설치되어 있다. 이들이 요구시 이용불능인 경우는 각 Column의 상부의 압력상승이 설정값(Set Point)에 도달하였음에도 2개 이상 압력스위치가 정상적으로 작동하지 못하여 Overpressure 신호를 PLC로 전달하지 못하는 경우이다. 여기서 3대의 압력스위치는 동일 Type의 동일기능을 가진 기기이므로 공통원인고장(CCF: Common Cause Failure)으로 인한 이용불능인 경우도 고려하였다.

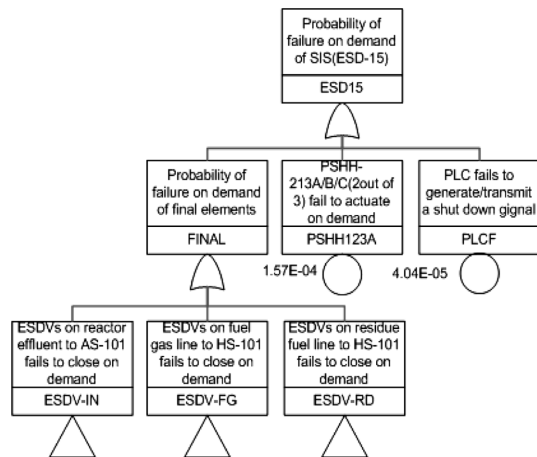


Fig. 5. Fault Tree for SIS(ESD-15) on EB Plant. (1)

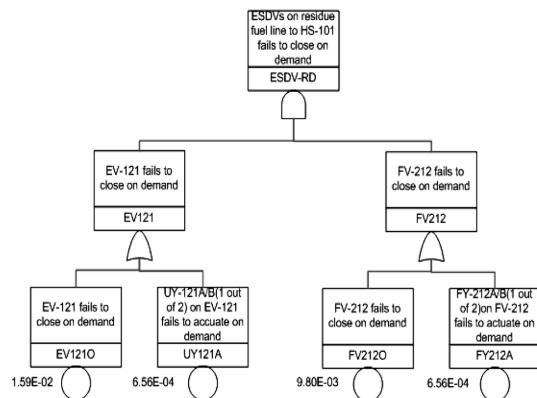


Fig. 6. Fault Tree for SIS(ESD-15) on EB Plant. (2)

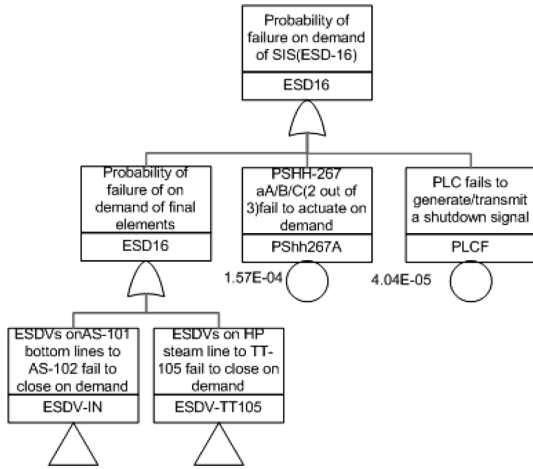


Fig. 7. Fault tree for SIS (ESD-16) on EB plant. (1)

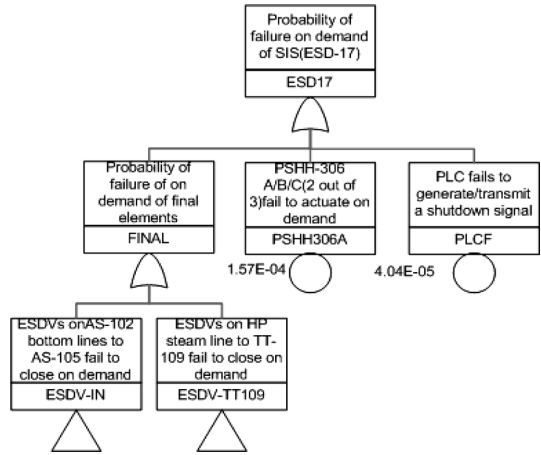


Fig. 9. Fault tree for SIS (ESD-17) on EB plant. (1)

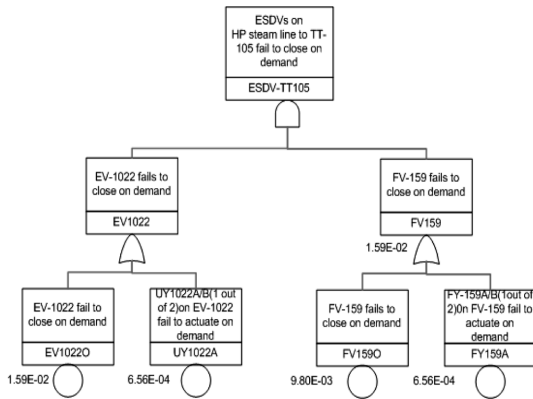


Fig. 8. Fault tree for SIS (ESD-16) on EB plant. (2)

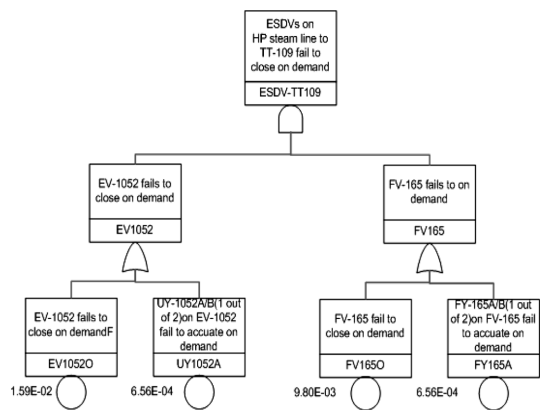


Fig. 10. Fault tree for SIS (ESD-17) on EB plant. (2)

4.4.2 Hardwired Logic Solver 시스템 요구시 이용불능 본 분석에서 Logic Solver 시스템이 이용불능인 경우에 Logic Solver 전체 시스템의 Average PFD 값을 사용하였다.

4.4.3 열원공급라인 밸브 요구시 닫힘실패

Final Element 시스템은 열교환기의 열원차단(또는 보일러의 연료공급 차단) 및 Feed 라인차단 등 2개의 채널로 구성되어 있으며 두 채널 중 하나라도 성공적으로 작동하지 않으면 SIS가 이용불능이 된다.

각 채널은 긴급차단밸브와 긴급차단 성능을 가진 컨트롤밸브가 이중으로 설치되어 있으므로 2개의 밸브 중 하나만 성공하여도 정상적인 차단이 가능하므로 두 밸브가 모두 작동하지 않았을 때 이용불능상태가 된다. 또한 각 밸브에는 Logic Solver로 부터의 전

기신호를 공기신호로 바꾸어 주는 Solenoid 밸브가 2개씩 설치되어 있어 2개 중 1개의 밸브만 성공하여도 차단이 가능하도록 설계되어 있으므로 두 Solenoid 밸브가 동시에 작동하지 못한 경우 이용불능 상태가 된다.

여기서 2대의 Solenoid 밸브는 동일 Type의 동일 기능을 가진 기기이므로 압력스위치의 경우와 마찬가지로 공통원인고장(CCF : Common Cause Failure)으로 인한 이용불능의 경우도 고려하였다. Table 3은 결함수목에 사용된 각 Tag를 설명한 것이다.

4.5 기본사건의 이용불능확률 계산방법^{6,7)}

결함수목을 구성하는 기본 사건의 요구시 이용불능 확률(PFD)을 계산하기 위해서는 기기고장 모델을 구성해야 한다. 본 분석에서는 IEC-61508-6^{4,5)}에 정의된 바

Table 3. Description of tag & abbreviation for EB process

Tag & Abbreviation	Description	Tag & Abbreviation	Description
AS-101	Benzene Prefractionator Column	TT-113	Reboiler
AS-105	EB Column	EV-121	Emergency closed Valve
AS-106	PEB Column	EV-216	Emergency closed Valve
AS-206	Vent Gas Scrubber	EV-1052	Emergency closed Valve
HS-101	Prefractionator Reboiler	FV-165	Flow Control Valve
MS-114	EB Column Reflux Drum	FV-210	(Fuel Gas) Flow Control Valve
MS-453	MP Condensate Drum	FV-212	Residue Flow Control Valve
TT-103	Prefractionator Condenser	PV-291	Pressure control valve
TT-106	Benzene Column Condenser	PSHH A/B/C	Pressure Switch
TT-109	Reboiler	MS-104	Benzene Column Reflux Drum
TT-111 A/B/C	EB/Benzene Heat Exchange	MS-112	PEB Column Reflux Drum

에 따라 다음과 같은 기기고장모델⁷⁾을 적용하였으며 SIS의 요구시 이용불능확률(PFD)은 다음과 같은 시스템을 구성하고 있는 하위 시스템들의 Average PFD 값을 합하여 계산된다.

$$PFD_{sys} = PFD_s + PFD_L + PFD_{FE} \quad (2)$$

여기서

PFD_{sys} = 시스템 전체의 PFD 값

PFD_s = Sensor 시스템에 대한 Average PFD 값

PFD_L = Logic solver 시스템에 대한 Average PFD 값

PFD_{FE} = Final Element 시스템에 대한 Average PFD 값

본 논문에 사용된 각 하위 시스템의 Average PFD를 구하기 위한 모델은 “2 out 3” 시스템 모델로서 시스템이 동일 기능을 가진 동일 종류의 3개의 기기로 구성되어 있으며 그 중 두 기기가 모두 작동 실패해야만 시스템이 이용불능이 되는 경우이다. 이는 압력스위치 또는 Logic Solver의 요구시 작동실패확률을 계산하는데 적용된다.

5. 정량화 결과

SIS의 PFD에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두 가지 Case에 대해 민감도분석을 수행한 결과 중 ESD-15에 대한 정량화 결과를 Table 4에 나타내었고, ESD-15, 16, 17의 최종정리결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 개선효과는(Case 1의 PFD-Case 2의 PFD)/Case 1의 PFD로 정의되며, 여기서 Case 1은 모든 밸브에 대해 Partial Stroke Test없이 1년 주기의 Full Stroke Test

만 하는 경우이고 “Case 2”는 컨트롤 밸브만 Partial Stroke Test를 6개월 주기로 하고 Full Stroke Test는 1년 주기로 하는 경우이다.

최종적인 결과인 Table 5를 살펴보면 ESD-15, ESD-16, ESD-17에 설치된 각 SIS의 PFD는 각각 8.97E-04, 5.37E-04, 5.37E-04로 계산되었다. 컨트롤 밸브에 대해 6개월 주기로 Partial Stroke Test를 실시하였을 때의 개선 정도는 ESD-15가 26.5%로 가장 높았고 ESD-16과 ESD-17은 22.7%로 나타났다.

6. 결 론

이상의 분석을 통하여 EB공정의 냉각장치 고장시 Column 상부의 과압 방지를 위해 계획하고 있는 SIS 신뢰도가 적정 안전건전성 수준으로 설계되어 있는지를 정량적으로 평가 하였다. 분석결과 SIS인 압력방출 밸브의 요구시 실패확률에 대한 안전건전성 수준의 목표등급인 SIL 3에 부합되는지 여부를 결함수 분석 방법에 의해 산출한 결과 ESD-15, ESD-16, ESD-17에 대해 각각 SIS의 신뢰도가 SIL 3등급인 PFD 1.00E-3에서 1.00E-4의 영역에 들어있어서 요구되는 안전건전성 수준으로 설계되어 있다고 판단된다. 또한 컨트롤밸브에 대한 6개월 주기의 Partial Stroke Test가 수행될 경우 각 Column에 대한 SIS는 약 22~27%의 신뢰도 향상이 기대된다. 향후 공정에 대한 개량 및 증축시 설계변경에 따른 공정안전장치의 신뢰성을 가장 적절하게 평가할 수 있는 수치적 이론 및 Software Model들을 더욱 더 검토하여 발전시킴으로서 세분화된 정량적인 유해위험성 평가기술을 마련해야 할 것이다.

Table 4. Probability of failure on demand SIS of ESD15

value = 8.978E-004								
no	value		f-v		acc		cut set	
	case 1	case 2	case 1	case 2	case 1	case 2	case 1	case 2
1	1.57e-4	1.6e-4	0.18	0.24	0.18	0.24	PSHH213A	PSHH213A
2	1.56e-4	1.0e-4	0.17	0.15	0.35	0.39	EV11610 PV10550	EV11610 PV10550
3	1.56e-4	1.0e-4	0.17	0.15	0.52	0.54	EV11610 PV10370	EV11610 PV10370
4	1.56e-4	1.0e-4	0.17	0.15	0.70	0.70	EV1210 FV2120	EV1210 FV2120
5	1.56e-4	1.0e-4	0.17	0.15	0.87	0.85	EV1160 FV2100	EV1160 FV2100
6	4.04e-5	4.0e-5	0.05	0.06	0.92	0.91	PLCF	PLCF
7	1.0e-5	1.0e-5	0.01	0.02	0.93	0.93	EV11610 PY1055A	EV11610 PY1055A
8	1.0e-5	1.0e-5	0.01	0.02	0.95	0.94	EV1160 FY210A	EV1160 FY210A
9	1.0e-5	1.0e-5	0.01	0.02	0.96	0.96	EV11610 PY1037A	EV11610 PY1037A
10	1.0e-5	1.0e-5	0.01	0.02	0.97	0.97	EV1210 FY212A	EV1210 FY212A
17	4.3e-7	4.3e-7	0.01	0.01	0.99	0.99	UY1161A PY1037A	UY1161A PY1037A
18	4.3e-7	4.3e-7	0.01	0.01	1.00	1.00	UY121A FY212A	UY121A FY212A

F-V : Fussel-Vesely 중요도(해당 기본사건이 포함되는 모든 최소단절군 빈도의 합과 전체 빈도의 비로 정의)

Table 5. Result of quantify of PFD on demand SIS

SIS/Case	Case 1	Case 2	Improvement Efficiency	Result
ESD-15	8.89E-04	6.63E-04	26.5%	SIL 3 satisfaction
ESD-16	5.43E-04	4.30E-04	22.7%	SIL 3 satisfaction
ESD-17	5.43E-04	4.30E-04	22.7%	SIL 3 satisfaction

참고문헌

1. 한국산업안전공단, “중대재해원인통계분석”, 한국산업안전공단 위험관리센터(2004).
2. Cramwood, “Functional Safety and Safety Integrity”, The Institution of Gas Engineering and Manager, Revision A(2002).
3. ISA, “ISA-84.01 : Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries”, Instrument Society of America, Feb(1996).
4. IEC, “IEC-61508-1 : Functional Safety of Electrical /Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems-Part 1 : General Requirements”, International Electrotechnical Commission, Apr(2000).
5. IEC, “IEC-61508-6 : Functional Safety of Electrical /Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems-Part 6 : Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3”, International Electrotechnical Commission, Apr(2000).
6. CCPS, “Guidelines for Process Equipment Reliability Data”, CCPS for American Institute of Chemical Engineering(1989).
7. “Reliability Data for Safety Instrumented Systems. PDS Data Handbook, 2004 Edition”, SINTEF Industrial Management, Norway, Sep(2004).
8. KIRAP-KWTREE Beta 1.0(Fault Tree Editor for Windows) 사용자설명서, 한국원자력 연구소(1996).