HDPE 플랜트의 SIS에 대한 신뢰도 분석

고재선*, 김 효
서울시립대학교 화학공학과
(119kjs@hanmail.net*)

Reliability Analysis on Safety Instrumented System of High Density Polyethylene Plant

Ko Jae-Sun*, Kim Hyo
Department of Chemical Engineering, the University of Seoul
(119kjs@hanmail.net*)

1. 서론

본 분석에서는 HDPE 플랜트의 중합공정에서 반응기 후단설비의 가압방지를 위해 설치된 SIS(SIL : Safety Instrument Level)의 신뢰도가 압력방출밸브(PSV : Pressure Safety Valve)가 요구되는 안전건전성수준(SIL)으로 설계되었는지를 정량적으로 분석하는 것이다.

2. 공정설명

2-1 HDPE Plant의 Safety Instrument System

HDPE 공정은 중합반응을 통해 고밀도 폴리에틸렌을 생산하는 공정으로 공정흐름을 간략히 나타내면 Fig 2-1과 같다. 고밀도 폴리에틸렌 생산에 필요한 원료는 에틸렌과 지글러타입의 촉매, 촉매의 활성을 높여주는 조촉매, 용제로 사용되는 헥산, 반응종결물질인 수소 등이 있다. 이러한 원료들은 반응기에서 중합반응을 거쳐 반응한 후 분리, 건조, 압축공정을 거쳐 최종 제품을 생산하게 된다. 중합반응이 이루어지는 반응기(R-2103)에서 폭주반응(Run Away Reaction)발생시 반응기의 압력이 상승하게 되는데 그 압력이 반응기 후단의 압력방출밸브의 설정치 이상으로 상승하게 되면 반응기가 폭발할 수도 있고 2차적인 사고현상으로 화재의 위험성을 내재하고 있다. 이러한 사고를 대비하여 반응기내 압력상승을 감지하여 고압시 주촉매 펌프와 원료공급라인의 밸브를 차단하는 SIS(Safety Instrument System)가 설치되어 있다.

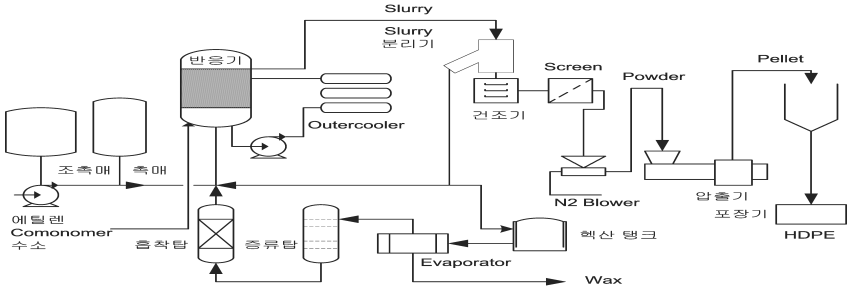

Figure 2-1. P&ID on product unit of high density polyethylene.

2-2 Target Safety Integrity Level

Table 2-1과 같이 PSV의 PDF(요구시 열림실패 : Fails to Open on Demand)데이터는 최대 7.03E-03, 최소 2.1E-04로 분포되어있다. Table 2-1 및 2-2를 비교하여볼 때 PSV의 PFD는 SIL의 3등급(0.001~0.0001)에 해당한다. 따라서 HDPE 플랜트의 SIS는 3등급의 SIL을 만족해야 한다.

Table 2-1. Probability of Failure on demand of pressure safety valve

No.	PFD	Data Source	Others
1	4.15E-3*	CCPS 4.3.3.1	Pilot operated type
2	2.12E-4*	CCPS 4.3.3.2	Spring loaded type
3	3.20E-3*	IEEE-500 11.2.b.1	Pressure relief valve
4	1.00E-3**	EPRI ALWR URD Annex A Table A2-1	Pressurizer safety valve for PWR
6	7.00E-3**	EPRI ALWR URD Annex A Table A2-1	Safety/relief valve for BWR, actuation mode
7	5.00E-3**	EPRI ALWR URD Annex A Table A2-1	Pilot operated type

* : mean 값을 기준, ** : 점추정치 기준, E-3는 10-3을 의미함.

Table 2-2. Probability of failure on demand from Safety Integrity Level

Ranking	PFD	(1-PFD)
SIL 1	0.1 to 0.01	0.9 to 0.99
SIL 2	0.01 to 0.001	0.99 to 0.999
SIL 3	0.001 to 0.0001	0.999 to 0.9999

3. 신뢰도모델

3-1 SIS의 구성 및 성공기준

SIS는 압력상승감지시스템, Logic Solver 시스템 그리고 공급라인 밸브차단 시스템 등의 3부분으로 이루어진다. SIS의 성공기준은 Sensor System 중 하나와 Logic System 중 하나가 작동하고 원료공급라인이 성공적으로 차단되는 것을 기준으로 하였다. 이와 같은 성공기준을 바탕으로 SIS의 RBD(Reliability Block Diagram)을 작성하면 아래 Fig 3-1과 같다.

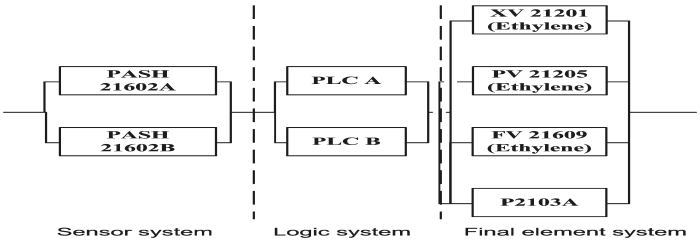

Figure 3-1. Reliability block diagram by success criteria of SIS.

3-2 고장수목분석구성

Table 3-1. Fault tree by failure on demand of SIS for HDPE Plant

classification	description
Sensor System이 요구시 이용불능	반응기 R-2103상부에 설치된 압력스위치, PASH21602A와 21602B가 모두 요구시 실패해야만 이용불능이 되며, 압력스위치가 이용불능이 되는 경우는 압력상승에 대응하여 PLC로 신호를 전송하지 못하는 경우
Logic System이 요구시 이용불능	병렬로 연결된 PLC가 모두 이용불능인 경우로서 압력스위치로부터 받은 신호를 Final Element에 전송하지 못하는 경우
에틸렌 공급라인 혹은 주촉매 라인이 요구시 차단실패	에틸렌 공급라인의 유량조절밸브(FV21609) 압력조절밸브(PV21205) 긴급차단밸브(XV21201)가 모두 요구시 닫힘 실패하여 에틸렌 공급라인이 차단실패하고 조촉매 펌프가 요구시 정지실패 하였을 때의 경우

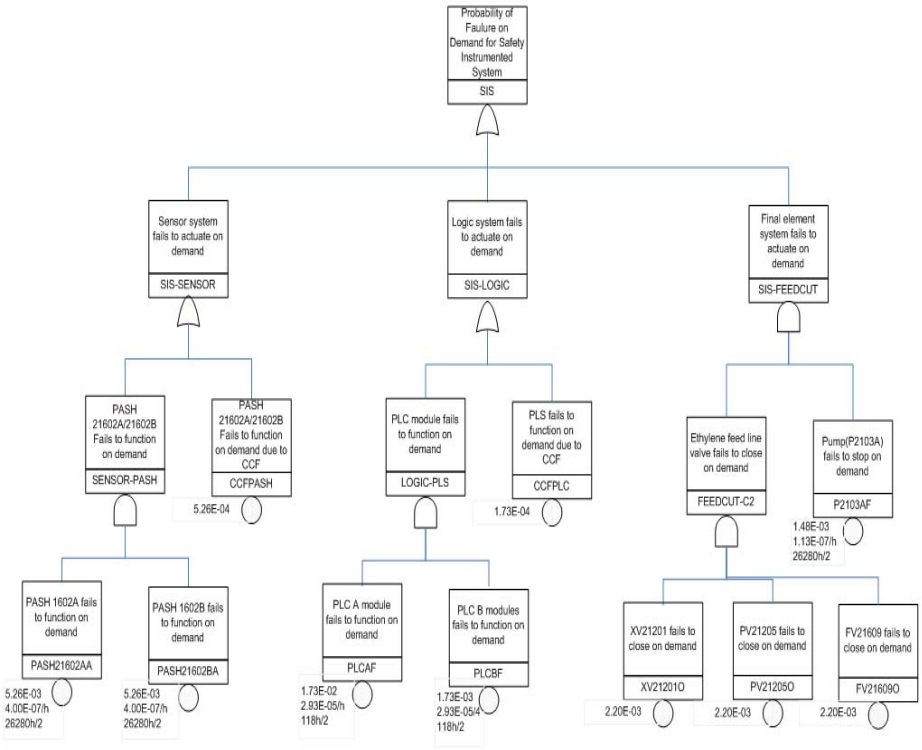

Figure 3-2. Fault tree for SIS failure on demand.

4. 정량화 분석결과

SIS의 요구시 이용불능확률(PFD)을 계산하기 위하여 구성된 고장수목 정량화 결과를 Table 4-1에 사고추이별로 나타내었다. Table 4-2는 기본목록에 의한 각 기기별 평균 고장률을 정리한 것이다. Table 4-1에서 SIS의 요구시 이용불능확률(PFD) 은 점 추정치 7.30E-04로 계산되었으며 압력스위치가 공통원인고장에 의해 요구시 이용불능 되는 사건과 PLC가 공통원인고장으로 요구시 이용불능사건이 각각 기여도 72%d와 24%로 가장 크게 영향을 미치는 사건으로 나타났다.

Table 4-1. Final Cut Set

No	Value(PFD)	f-v	acc	Cut set			Contribution
1	5.260E-004	0.7209	0.7209	CCFPASH			72.1%
2	1.730E-004	0.2371	0.9580	CCFPLC			23.7%
3	2.767E-005	0.0379	0.9959	PASH21602AA		PASH21602BA	3.8%
4	2.993E-006	0.0041	1.0000	PLCAF PLCBF		PLCBF	0.4%
5	1.576E-011	0.0000	1.0000	P2103AF	XV21201O	PV21205O	FV21609O
Report for SIS value				7.297E-004			

Table 4-2. Basic event list for sis

Name	Mean	Description	Lamda	Remark
CCFPASH	5.26E-04	PASH 21602A/21602B fails to function on demand	5.26E-04	CCPS 2.1.4.1.3 and CCF 0.1
CCFPLC	1.73E-04	PLC fails to function on demand due to CCF	1.73E-04	OREDA 4.1.2 and CCF 0.1
FV21609O	2.20E-03	FV21609 fails to close on demand	2.20E-03	CCPS 3.5.3.3
P2103AF	1.48E-03	Pump(P2103A)fails to stop on demand	1.13E-07	KOSHARI PAGE E-19CCPS 1.4.1.3
PASH21602	5.26E-03	PASH 1602A fails to function on demand	4.00E-07	CCPS 2.1.4.1.3
PASH21602	5.26E-03	PASH 1602B fails to function on demand	2.93E-07	OREDA 4.1.2
PLCAF	1.73E-03	PLC A module fails to function on demand	2.93E-05	OREDA 4.1.2
PLCBF	1.73E-03	PLC B module fails to function on demand	2.93E-05	OREDA 4.1.2
PV21205O	2.20E-03	PV21205 fails to close on demand	2.20E-03	CCPS 3.5.3.3
XV21201O	2.20E-03	XV21201 fails to close on demand	2.20E-03	CCPS 3.5.3.3

Table 4-3은 SIS의 요구시 이용불능확률의 정량화 결과에 대하여 몬테카를로(Monte Carlo)방법을 사용하여 불확실성의 분석을 수행한 결과이다.

Table 4-3 Result of inaccurate analysis

classification	frequency
5%	2.83E-4
50%	6.50E-4
Mean	7.31E-4
95%	1.52E-3
point estimation value	7.30E-4

5. 결론

HDPE 플랜트의 중합공정에서 폭주반응 등의 원인으로 반응기 R-2103 과 후단라인에 과압 사고가 발생할 경우를 대비하여 설치된 SIS(Safety Instrumented System)의 신뢰도를 고장수목분석을 사용하여 분석한 결과 SIS에 대한 점추정치 PFD는 7.30E-4로 계산되었고, SIS의 PFD는 2.83E-4와 1.52E-3의 범위 안에 존재하는 것으로 계산되어 SIS의 신뢰도는 SIL3등급을 만족하고 있다고 보여 지며 위와 같은 결과를 종합하여 볼 때 SIS의 신뢰도가 압력방출밸브가 요구되는 안전건전성수준(SIL)으로 설계되어있다고 판단된다.

참고문헌

1. "IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations," IEEE std-500-1984, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Nov. (1993).

2. "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", CCPS for American Institute of Chemical Engineers, (1989).

3. Offshore Reliability Data, 3rd Edition, OREDA-97, SINTEF Industrial Management, Norway, (1997).

4. "Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document (Volume III) Chapter 1, Appendix A, PRA Key Assumptions and Groundrules," Revision 7, Electric Power Research Institute, Inc., Dec. (1995).