

C-11

SIS를 이용한 장치산업의 위험감소 방안에 관한 연구

김인태, 고재욱*, 진상화**, 김인원**

한국화재보험협회, *광운대학교 화학공학과, **건국대학교 화학공학과

A study on method of risk reduction of process industries for using SIS

In-Tae Kim, Jae-Wook Ko*, Sang-Hwa Jin**, In-Won Kim**

Korean Fire Protection Association, *Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Korea, **Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Korea

1. 서론

산업의 발전에 따라 새로운 위험이 발생하고 있으며 위험성이 증가되고 있어 장치산업에 존재하는 잠재위험을 발견하고, 위험성을 줄이기 위한 위험성 평가 방법이 관심이 되고 있다. 결정론적 평가 방법인 정성적·정량적 위험성 평가 방법을 비롯하여 확률론적 평가 방법 등이 발전되면서 공정의 설계, 운전, 유지, 보수에 많은 영향을 주고있다. 최근 이러한 평가 자료로 인하여 안전성 향상과 더불어 비용효과를 얻고 있으며, 경영자의 의사결정자료로 활용할 수 있게 되면서 새로운 연구분야가 되고 있다.

장치산업에 대한 위험을 최소화하고 간단한 수치로 안전도를 평가하기 위하여 1990년대 중반부터 Instrument Society of America (ISA)와 International Electrotechnical Commission (IEC)에서는 Safety Instrumented System 기준을 개발하였으며, 1996년 ANSI/ISA S84.01 "Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries" 기준을 공정산업에 적용하도록 하였다.

본 연구에서는 정량적 위험성 분석을 수행하여 장치가 가지고 있는 이용가능상태(Availability) 또는 이용불능상태(Unavailability)를 평가하고, SIL(Safety Integrity Level)을 이용하여 위험도를 설정하였다. 그리고 장치의 중요도(Importance)와 위험성 증가요소(Risk Increase Factor, RIF) 및 위험성 감소요소(Risk Decrease Factor, RDF)를 분석하여 신뢰도가 높은 장치로 교체하거나 안전장치의 추가 설치와 같은 방법으로 Safety Instrumented Systems(SIS)를 수행하였다. SIS를 수행한 시스템에 대하여 다시 위험성 분석을 하여 본래 가지고 있던 이용가능 상태와 개선 후의 이용가능 상태를 비교하여 SIL 등급의 변화를 평가하였다.

본 연구에서는 연속 교반 탱크 반응기를 대상으로 발열반응으로 인한 반응기의 파열을 정상사상으로 설정하여 시스템에 대한 중요도 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

Safety Instrumented System(SIS)은 하나 이상의 센서와 제어기로 구성되어 있으며 사람, 장비, 환경을 보호할 수 있는 시스템이다. SIS의 수행 목적은 잠재위험의 모니터링을 통하여 사전에 계획된 프로그램으로 사고를 예방하고, 사고가 발생하였을 경우에 대한 피해 결과를 최소화하는데 있다. 장치산업에 이용되는 SIS는 공정장치, 제어시스템 및 다른 방호장비에 대한 기계적 결함을 확인하고 효율적인 안전대책을 결정하기 위해 이용된다. 한편, 이러한 SIS는 공정에 대한 생산량 또는 공정의 효율을 증가시키는 것은 아니며, 사고로 인하여 발생할 수 있는 유지보수 비용의 절감과 risk cost를 감소시키는 특성을 가지고 있다[1].

그러나 안전등급의 향상은 기업휴지와 같은 간접손실로 인한 피해를 예방하거나 감소시킬 수 있으며, 사업장의 안전분위기 형성으로 생산효율을 증가시킬 수 있다.[2]

SIS를 수행하기 위해서는 어떤 장치나 시스템에 대한 Safety Integrity Level(SIL)의 설정이 필요하다. SIL 또는 이용가능 상태(Availability)는 공정에서 사고가 발생하였을 경우 SIS의 무결성에 대한 간단한 통계학적인 설명을 의미한다.

Fig. 1은 IEC 61508과 ISA S84.01에서 제시된 SIL 등급에 따른 이용가능 상태 및 대표적인 장치산업의 SIL 등급을 나타낸 것이며, 독일에서 설정한 SIL과 비교하였다.

SIL 1등급의 의미는 잠재위험(hazard)이나 경제적 위험(economic risk) 등급이 비교적 높은 90%의 이용가능 상태로서 10%의 고장이 발생할 가능성으로도 표현할 수 있다. 즉, SIL 1등급의 시스템은 10번 운전되어 질 때 한번은 고장이 발생한다는 것을 의미한다[3].

Safety Integrity Level		Corresponding German Appl. Class(AK)	Availability Required	Risk Reduction Factor	Typical Application
ISA S84	4	7	>99.99%	>10,000	Rail Transportation ↕ Nuclear Power
	3	5 - 6	99.90 - 99.99%	1,000 - 10,000	Utility Boilers
	2	4	99.00 - 99.90%	100 - 1,000	Industrial Boilers
	1	2 - 3	90.00 - 99.00%	10 - 100	Chemical Process

Fig. 1. Safety integrity level correlation with availability and risk reduction factor.

SIL 등급을 설정하기 위해서는 위험성 평가 방법론에 근거하여 등급을 설정한다. 이러한 위험성 평가 방법론으로는 modified HAZOP, consequence analysis, risk matrix, risk graph, quantitative assessment 와 corporate mandated SIL의 방법론을 포함한다. 위의 위험성 평가 방법론은 SIL 등급 평가의 절차와 지침을 개발하기 위해 필요하다.

본 연구에서 SIS를 이용하여 위험성을 평가하는 절차를 Fig. 2에 제시하였다. 우선 시스템을 구성하고 있는 운전상태를 파악한 후 잠재위험을 평가한다. 평가된 잠재위험을 기본

으로 하여 SIL 등급을 설정하여 SIL 등급이 만족할 수준일 경우 SIS 평가는 종료된다. 그러나 SIL 등급이 만족스럽지 못할 경우에는 신뢰도 분석을 수행하여 안전성 향상 방법을 모색한다. 즉, 시스템에 맞는 안전성 향상 방법을 선택하여 시스템을 재 구성한후 다시 SIL 등급을 평가한다. 이때 분석된 SIL 등급이 만족할 경우에는 SIS 평가는 종료되며 그렇지 않을 경우 평가 과정을 반복 수행한다[4].

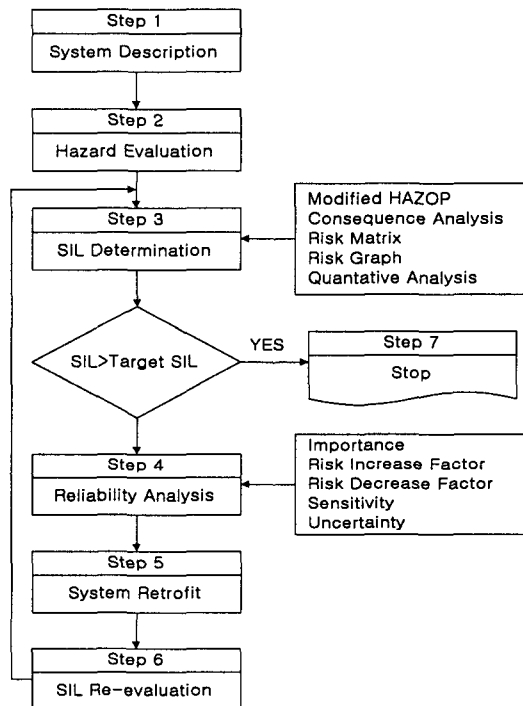


Fig. 2. Procedure of the SIS evaluation method based on reliability analysis

3. 사례연구

발열반응을 사용하는 연속 교반 탱크 반응기에 대하여 Fig. 2에서 제시된 절차에 따라 SIS 평가를 수행하였다.

단계 1 : System Description

반응기는 연중 운전되며 유지·보수를 위해 연간 2주정도 조업이 정지된다. 연속 교반 탱크 반응기에 대한 공정도를 Fig. 3에 나타내었다. 바람직하지 않은 사건으로는 반응기 내부온도가 한계온도 이상으로 상승하여 반응기가 과열되는 것이며, 이를 방지하기 위해 반응물을 2개의 덤프밸브 (V1과 V2) 통하여 water-filled sump로 방출하도록 되어 있다. 밸브 액추레이터는 공기압식(pneumatic)이며 보팅 논리장치(VLU; Voting Logic Unit)에서 제어한다. 보팅 논리장치는 3개의 채널 중 2개 이상이 설정온도를 표시할 때 개방하라는

신호를 밸브에 전달한다. 각 온도 채널은 자체의 온도 감지요소(temperature sensing element), 온도 트랜스미터(temperature transmitter) 및 온도 스위치(temperature switch)를 갖고 있다. 온도 스위치는 같은 온도(High-High)에서 작동되도록 설정되었다[5].

단계 2 : Hazard Evaluation

정상사상은 연속 교반 탱크 반응기의 폭주 발열 반응이 발생하여 반응기가 과열하는 것으로 하였다. 정상사상을 일으킬 수 있는 기본사상은 시스템에 가장 중요한 영향을 미치는 CCF TC(Common Cause Failure Temperature Channel)와 밸브 고장을 비롯하여 Instrument Air 고장, VLU 고장과 Temperature Channel 고장의 조합으로 구성하였다.

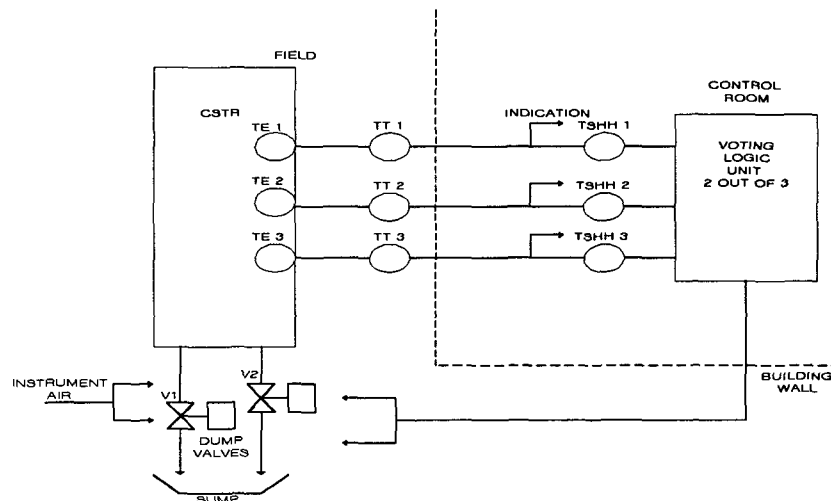


Fig. 3. Line Diagram of Continuous Stirred Tank Reactor.

연속 교반 탱크 반응기에 대한 결함수목 분석을 수행한 결과를 Table 1에 제시하였다. 반응기의 과열사고에 가장 큰 영향을 주는 기본사상으로는 CCF valve가 48.17%, CCF TC가 24.25%로 분석되었다. 분석 결과에서 제시된 CCF란 단일 사건에 의해 여러 개의 장치가 고장나는 경우를 말한다[6].

Table 1. Minimum cut sets before installed relief valve.

No.	Probability	%	Event 1	Event 2
1	9.93E-03	48.17	CCF valve	
2	5.00E-03	24.25	CCF TC	
3	2.50E-03	12.10	VLU	
4	2.34E-03	11.35	Valve 1	Valve 2
5	1.00E-03	4.85	Inst. Air	
6	2.93E-10	0	TC 1	TC 2
7	2.93E-10	0	TC 1	TC 3
8	2.93E-10	0	TC 2	TC 3

단계 3 : SIL Determination

분석된 결과를 평가하여 시스템이 가지고 있는 이용가능 상태 또는 이용불능 상태를 평가하여 SIL 등급을 설정하였다.

Table 1에서 분석된 정상사상의 확률 값은 2.062×10^{-2} 으로 계산되었다. 따라서 연속 교반 탱크 반응기에 대한 이용가능 상태는 97.94%이며 Fig. 1으로 부터 SIL 1등급이라는 것을 확인할 수 있다.

단계 4 : Reliability Analysis

신뢰도 분석을 수행하여 위험성 증가 요소 또는 감소 요소를 평가하여 새로운 안전 장치나 방호 장비의 설치 또는 구성요소에 대해 신뢰성이 높은 장치로 교체하여 시스템이 갖게되는 새로운 이용가능 상태를 평가하여 기존의 SIL 등급과의 변화를 비교하였다.

연속 교반 탱크 반응기에 대한 신뢰도 분석을 수행한 결과를 Table 2에 제시하였는데 시스템에 가장 중요한 역할을 수행하는 기본사상으로는 CCF valve로 분석되었다.

Table 2. Importance for basic event.

No.	Basic Event	F-V	RDF	RIF
1	CCF valve	4.82E-01	1.91E+00	4.85E+00
2	CCF TC	2.42E-01	1.31E+00	4.85E+00
3	VLU	1.21E-01	1.13E+00	4.85E+00
4	Valve 1	1.13E-01	1.13E+00	3.19E+00
5	Valve 2	1.13E-01	1.13E+00	3.19E+00
6	Inst. Air	4.85E-02	1.05E+00	4.85E+00
7	TC 1	2.84E-08	1.00E+00	1.00E+00
8	TC 2	2.84E-08	1.00E+00	1.00E+00

단계 5 : System Retrofit

단계 4에서 제시된 신뢰도 분석결과로부터 CCF valve에 대한 RDF와 RIF를 분석하여 보면 RDF는 1.91이며 RIF는 4.85로 나타났다. CCF TC에 대한 RDF와 RIF는 각각 1.31과 4.85로 분석되었다. CCF valve와 CCF TC의 RDF와 RIF를 비교하여 분석한 결과 반응기 상부에 relief valve와 같은 안전장치를 설치함으로써 정상사상의 발생확률이 감소한다는 것을 유추할 수 있었다.

Table 3은 반응기 상부에 relief valve를 설치한 후에 결함수목 분석을 수행한 결과이다. 반응기에 relief valve를 설치한 후에 CCF 그룹은 정상사상의 발생확률에 주는 영향이 아주 적은 것으로 분석되었다.

Table 3. Minimum cut sets after installed relief valve.

No	Probability	%	Event 1	Event 2	Event 3
1	9.59E-05	25.01	Relief valve	TC 1	TC 2
2	9.59E-05	25.01	Relief valve	TC 1	TC 3
3	9.59E-05	25.01	Relief valve	TC 2	TC 3
4	5.15E-05	13.42	CCF valve	Relief valve	
5	2.59E-05	6.76	CCF TC	Relief valve	
6	1.29E-05	3.37	Relief valve	VLU	
7	1.21E-05	3.16	Relief valve	Valve 1	Valve 2
8	5.18E-06	1.35	Inst. Air	Relief valve	

단계 6 : SIL Re-evaluation

연속 교반 탱크 반응기에 relief valve를 설치한 후에 시스템의 이용가능 상태는 99.96%로 상승되었다. 이는 SIL 1등급에서 3등급으로 안전성이 향상 된 것을 알 수 있다.

단계 7 : Stop the procedure

SIL 등급이 만족되면 평가를 종료하고 보고서를 작성한다.

4. 결과 및 토론

(1) 연속 교반 탱크 반응기의 정상사상에 대하여 결함수목 분석을 수행한 결과 반응기의 이용가능 상태는 97.94%로서 SIL 1등급으로 나타났다.

(2) 시스템에 가장 중요한 영향을 주는 기본사상으로는 CCF valve와 CCF TC로 분석되었으며, 위험성 증가요소와 감소요소에 대한 중요도 분석결과 추가적인 안전장치를 설치하는 것이 시스템의 안전성 향상과 위험성 감소 효과를 제시할 수 있는 것으로 분석되었다.

(3) 반응기 상부에 relief valve를 설치하였을 경우에 대한 위험성 분석을 수행한 결과 시스템의 이용가능 상태는 99.96%로써 SIL 3등급에 해당하였다.

(4) 시스템의 중요도를 분석한 결과 SIS 장치를 설치하기 전에는 시스템의 중요한 요소는 CCF valve와 CCF TC로 나타났지만 SIS 장치 설치 후에는 relief valve와 TC로 변경되었다.

참고문헌

1. William M. Goble, Control Systems Safety Evaluation and Reliability, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society(1998).
2. 김인태, 화재·폭발사고 분석시스템 구축 및 BLEVE로 인한 위험평가에 관한 연구 (1999).

3. Angela E. Summers, Techniques for assigning a target safety integrity level, ISA Transactions, 37, 95-104(1998).
4. 진상화, 송광호, 여영구, 김인원, 신뢰도 분석에 근거한 SIS 평가 방법론 개발, Submitted (2002).
5. CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed., AIChE, New York(2000).
6. 제무성, 정재희: 시스템 안전공학개론, 신광문화사 1999.