

## 신뢰도 분석에 근거한 연속 교반 탱크 반응기의 SIS 평가 방법 개발에 관한 연구

진상화, 김인원  
건국대학교 화학공학과

### A Study on the Development of SIS Evaluation Method for Continuous Stirred Tank Reactors Based on Reliability Analysis

Sang-Hwa Jin and In-Won Kim

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Korea

#### I. 서론

공정산업에 대해서 위험성 최소화 또는 안전성 향상을 위하여 Instrument Society of America (ISA)와 International Electrotechnical Commission (IEC)에서는 Safety Instrumented System 표준을 개발하였다[1]. 1996년에 ANSI/ISA S84.01 표준 “Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries”을 공정산업에 적용하도록 하였다.

따라서 본 연구에서는 정량적 위험성 분석을 수행하여 장치가 가지고 있는 이용가능상태(Availability) 또는 이용불능상태(Unavailability)를 평가하여 SIL(Safety Integrity Level) 등급을 설정하였다. 그리고 신뢰도 분석을 수행하여 장치의 중요도(Importance)와 위험성 증가 요소(Risk Increase Factor) 그리고 위험성 감소 요소(Risk Increase Factor)를 분석하여 새로운 장치의 설치 또는 좋은 신뢰도를 가지는 장치의 교체와 같은 Safety Instrumented Systems(SIS)를 수행하였다. SIS를 수행한 시스템에 대하여 다시 위험성 분석을 평가하여 본래 가지고 있던 이용가능 상태와 개선 후에 이용가능 상태를 비교하여 SIL 등급의 변화를 평가하였으며 시스템에 대한 중요도 분석을 연속 교반 탱크 반응기를 대상으로 수행하였다.

#### II. 이론적 배경

Safety Instrumented System은 센서와 한 가지 또는 그 이상의 제어기로 구성된 제어 시스템을 말한다. 즉, SIS는 개인, 장비, 환경 또는 세 가지 모두에 대한 보호 시스템을 말한다. 이러한 SIS의 수행 목적은 안전성 증가 또는 위험의 감소를 위해 잠재위험의 monitoring과 사고가 발생하였을 경우 사전에 계획된 프로그램으로 인한 예방 또는 사고가 발생하였을 경우에 대한 피해결과를 최소화하는데 그 목적이 있다. 또한 이러한 SIS는 공정에 대한 생산량 또는 공정의 효율을 증가시키는 것은 아니며 손실감소로 인해 발생할 수 있는 유지보수 비용을 감소시키는 특성을 가지고 있다[1].

SIS는 1996년 Industrial Society of American에서 ANSI/ISA S84.01 Standard 출간 후 공정산업에 적용되기 시작하였다. ANSI/ISA S84.01과 IEC 61508 Standard는 Safety Instrumented System에 대한 새로운 장치의 설치 또는 새로운 개선을 위해서는 Safety Integrity Level의 설정이 필요하다. ANSI/ISA S84.01과 IEC 61508에서의 Safety Integrity Level의 지정은 Safety Instrumented System의 유용성과 매우 밀접한 관련이 있다[2].

Fig. 1은 IEC 61508과 ISA S84.01에서 제시된 SIL에 따른 이용가능 상태를 나타낸 그림이며, 독일에서 설정한 SIL과 비교 제시하였다. 그리고 그에 따라서 SIL에 따른 산업의 분포를 나타내었다. 그중 화학산업은 보통 SIL 2~3등급으로 분류되어있다. Fig. 1에서 Risk Reduction Factor는 식 (1)로 정의되어지며 SIS에서 사용되어진다[3].

$$\text{Risk Reduction Factor} = \frac{\text{Inherent Risk}}{\text{Acceptable Risk}} \quad (1)$$

SIS에서 RRF는 사건을 예방하기 위해 또는 잠재위험을 모니터링하기 위해 이용되어지는 요소이다.

### III. 사례연구

화학 합성물을 산출하기 위해 발열성이 높은 반응을 사용하는 연속 교반 탱크 반응기에 대하여 SIS 평가를 수행하였다. 우선 시스템을 구성하고 있는 운전상태를 파악한 후 잠재위험을 평가한다. 평가된 잠재위험을 기본으로 하여 SIL 등급을 설정한다. 초기의 SIL 등급이 만족 수준일 경우 SIS 평가는 종료된다. 그러나 SIL 등급이 만족하지 못할 경우에는 신뢰도 분석을 수행하여 안전성 향상 방법을 모색한다. 그리고 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 위의 과정을 반복 수행한다[4]. 위와 같은 절차에 의해 연속 교반 탱크 반응기에 대한 SIS 평가를 수행하였다.

연속 교반 탱크 반응기는 연중 운전되며 유지·보수를 위해 연간 2주정도 조업이 정지된다. Fig. 2은 연속 교반 탱크 반응기에 대한 공정도를 나타낸 그림이다. 정상사상은 연속 교반 탱크 반응기의 폭주 발열 반응이 발생하여 연속 교반 탱크 반응기의 과열로 정의하였다. 바람직하지 않은 사건은 연속 교반 탱크 반응기 내부 온도가 현재의 한계 온도 이상으로 상승할 때 water-filled sump를 열어 그 안에 있는 반응 혼합물을 저지하는 2개의 연속 교반 탱크 반응기의 덤프 밸브 ( $V_1$ 과  $V_2$ )에 의해 보호된다. 밸브 액추에이터는 기압식(pneumatic)이며 보팅 논리장치(VLU; Voting Logic Unit)에서 제어한다. 보팅 논리장치는 최소한 3개의 채널 중 2개가 고온의 온도를 동시에 표시할 때 열리는 명령을 밸브에 전달한다. 각 온도 채널은 자체의 온도 감지요소(temperature sensing element), 온도 트랜스미터(temperature transmitter) 및 온도 스위치(temperature switch)를 가지고 있다. 온도 스위치는 모두 같은 온도(High-High)에서 작동되도록 설정되었다[5].

### IV. 결과 및 고찰

Table 1은 연속 교반 탱크 반응기의 정상사상이 발생할 수 있는 결함수목 분석을 수행한 결과로써 이때의 연속 교반 탱크 반응기의 이용가능 상태는 97.94%로 이는 SIL 등급 1등급에 포함되는 것을 Fig. 1에서 알 수 있다. Table 1에서 제시된 결함수목 분석 결과에서 시스템에 가장 중요한 영향을 주는 기본사상으로는 CCF valve와 CCF TC(Common Cause Failure Temperature Channel)로 분석되었으며, Table 3에서 중요도 분석결과 위험성 증가요소와 위험성 감소요소(Risk Increase Factor and Risk Decrease Factor)의 분석으로 다른 안전장치를 설치하는 것이 시스템의 안전성 향상과 위험성 감소 효과를 제시할 수 있는 것으로 분석되었다.

Table 2는 다른 안전장치(반응기 상부에 relief valve 설치)의 설치하였을 경우에 대한 위험성 분석을 수행한 결과이다. 이때의 시스템의 이용가능 상태는 99.96%로써 이는 SIL 등급 3등급에 포함된다. Table 4는 relief valve를 설치한 후 시스템의 중요도 분석결과를

제시한 것으로 중요한 역할을 수행하고 있는 장치로는 relief valve와 TC로 분석되었다.

relief valve를 설치함으로써 시스템의 이용가능 상태가 97.94%에서 99.96%로 변화하였으며, SIL 3등급으로 향상되었다. 이러한 등급 변화는 연속 교반 탱크 반응기를 대상으로 안전성 향상 및 위험성을 감소 하기 위해 새로운 SIS 장치의 설치(relief valve)를 통하여 시스템에 대한 이용가능 상태를 증가함으로써 SIL 등급의 변화가 발생하였다.

또한 중요도 분석결과를 보면 SIS 장치를 설치하기 전에 시스템에 중요한 요소는 CCF valve와 CCF TC로 분석되었지만 SIS 장치 설치 후에는 relief valve와 TC로 분석되었다.

## V. 결론

본 연구에서는 정량적 위험성 분석을 수행하여 이용가능 상태를 분석하였으며, SIL 등급을 평가하였다. 그리고 원하는 SIL 등급에 도달하지 못하였을 경우에는 구성요소에 대하여 RDF와 RIF를 분석하여 SIS를 평가하였다.

연속 교반 탱크 반응기에 대하여 위험성 분석을 수행하였으며, 시스템이 가지고 있는 이용가능 상태를 평가하였다. 평가된 이용가능 상태로 SIL 등급을 설정하였으며, 신뢰도 분석방법인 RDF, RIF를 평가하여 SIS 장치인 relief valve를 설치 SIL 등급의 변화를 평가하였다. SIS의 수행 후 연속 교반 탱크 반응기에 대한 SIL 등급의 변화는 97.94%~99.96%로 1등급에서 3등급으로 상승하였다.

따라서 본 연구에서 제시한 SIL 등급 상승을 위해 SIS를 수행함으로써 시스템의 안전성 향상 및 위험성 감소 효과를 기대할 수 있으며, 사고예방과 손실감소로 일어나는 유지보수 비용의 절감 효과를 가져올 수 있다.

## VI. 참고문헌

- [1] William M. Goble, *Control Systems Safety Evaluation and Reliability*, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1998.
- [2] Paul Gruhn, P.E., "ISA S84--Use and What's Nest", *1st Annual Symposium of the Mary Kay O'Connor Process Safety*, 1998.
- [3] Angela E. Summers, "Techniques for assigning a target safety integrity level", *ISA Transactions* **37**, 95, (1998).
- [4] 진상화, 송광호, 여영구, 김인원, 신뢰도 분석에 근거한 SIS 평가 방법론 개발, Submitted, (2002).
- [5] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York, 1989.

Table 1. Top Event Probability  $Q=2.062 \times 10^{-02}$

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

Table 2. Top event probability  $Q=3.834 \times 10^{-04}$  in SIS

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	

Table 3. Reliability analysis result.

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

Table 4. Reliability analysis result in SIS.

No.	Basic Event	F-V	RDF	RIF
1	Relief valve	1.00E+00	9.99E+99	1.93E+00
2	TC	5.00E-01	1.91E+00	3.82E+00
3	CCF valve	1.34E-01	1.14E+00	1.35E+00
4	CCF TC	6.76E-02	1.07E+00	1.35E+00
5	VLU	3.37E-02	1.03E+00	1.35E+00
6	Valve 1	3.16E-02	1.03E+00	1.58E+00
7	Valve 2	3.16E-02	1.03E+00	1.58E+00
8	Inst. Air	1.35E-02	1.01E+00	1.35E+00

Safety Integrity Level		Corresponding German Appl. Class(AK)	Availability Required	Risk Reduction Factor	Typical Application	
IEC 61508	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.

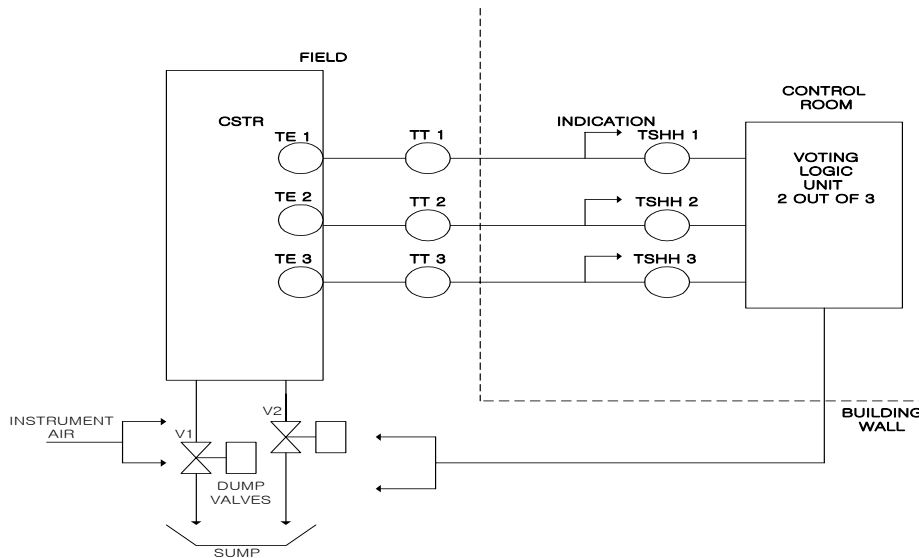


Fig. 2. Line Diagram of Continuous Stirred Tank Reactor.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호 R01-2001-00409)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.