

연속교반탱크 반응기에 대한 민감도 및 불확실성 분석에 관한 연구

진 상 화 · 김 인 태* · 송 희 열 · † 김 인 원 · 여 영 구**

건국대학교 화학공학과

* 한국화재보험협회

** 한양대학교 화학공학과

(2001년 9월 30일 접수, 2001년 11월 15일 채택)

A Study on Sensitivity Analysis and Uncertainty Analysis for Continuous Stirred Tank Reactors

Sang-Hwa Jin · In-Tea Kim* · Hee-Oeul Song · In-Won Kim
and Yeong-Koo Yeo**

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Korea

**Korean Fire Protection Association*

*** Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Korea*

(Received 30 September 2001 ; Accepted 15 November 2001)

요 약

설비가 공정에 어느 정도 중요도를 가지고 있는지 분석하기 위해 연속교반탱크 반응기를 대상으로 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 민감도 분석결과가 가지는 불확실성을 평가하기 위해 불확실성 분석을 수행하였다. 또한 비용효과 분석을 통하여 장치가 가지는 신뢰도 데이터 대 가격을 고려하여 보다 좋은 신뢰도를 가지는 장치를 사용함으로써 경제적 효율을 높일 수 있음을 보여주었다.

불확실성 분석의 수행결과로 연속교반탱크 반응기의 파열사고는 $8.09 \times 10^{-04}/\text{year} \sim 5.50 \times 10^{-02}/\text{year}$ 의 범위에서 가능성을 가지고 있다. 비용효과 분석은 VLU(Voting Logic Unit) 장치를 교체함으로써 가장 큰 위험성 감소효과를 제시하였다.

Abstract - In order to find out which equipment failures were mostly contributed to the rupture of a continuous stirred tank reactor, the sensitivity analysis was carried out. The uncertainty of likelihood of the rupture of reactor was studied by the uncertainty analysis. And the cost effectiveness analysis resulted in the recommendation of the exchange with a better reliable unit if you want to maintain the process efficiently from the view point of cost.

The uncertainty analysis showed that the likelihood of catastrophic rupture of the reactor was distributed from 8.09×10^{-04} to $5.50 \times 10^{-02}/\text{year}$. As a result of cost-effectiveness analysis, it was proposed to exchange the voting logic unit for a better safer system.

Key words : Sensitivity Analysis, Uncertainty Analysis

1. 서 론

1960년대 이후 성장 위주의 경제정책에 따라서 지어진 화학공장들의 장치 및 설비의 노후화로 화학공장에서 많은 문제점들이 발생하고 있다. 한 예로 여친 석유화학단지의 사고로 막대한 재산 및 인명 피해가 발생하였다. 이러한 석유공장에 대해 발생한 사건에 대해서 공식화되지 않은 것을 포함한다면 화학공장에서 발생한 경제적 손실 및 인적상해를 비용으로 환산하면 상당할 것으로 추정된다. 또한 화학공장 및 화학산업에서 사용하는 물질은 고온·고압에서 반응하는 물질로 구성되어 있으며, 이러한 물질은 독성, 부식성, 가연성 및 조연성의 특성을 가지고 있으며, 많은 잠재위험을 포함하고 있다. 이에 따라서 1996년도부터 위험 물질을 취급하는 화학공장에서는 PSM(Process Safety Management) 보고서 제출이 의무화되었으며, 그 후로 많은 위험성 평가 방법들이 개발·발전되었다[1], [2]. 이러한 위험성 평가 방법들은 장치 및 설비에 대한 최악의 시나리오를 가정하여 시스템에 대한 위험도를 평가하는 결정론적 방법이 주로 이용되어왔다. 따라서 장치가 시스템에 어느 정도의 중요도를 가지고 있는지 평가할 수 없으며 장치가 가지고 있는 신뢰도 데이터에 따른 불확실성 분포를 평가할 수 없다.

그러므로 본 연구에서는 장치가 가지는 신뢰도 데이터를 기본으로하여 시스템의 불확실성을 평가하고 또한 장치가 가지고 있는 가격의 변화에 따른 고장을 데이터를 기본으로 시스템에 대한 위험성 감소효과를 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 민감도 분석

민감도 분석(Sensitivity Analysis)은 기본사상이나 구성요소에 전체적으로 기여하는 가장 큰 불확실성을 가지는 항목을 확인 할 수 있는 분석방법이다. 가상모델을 작성하여 분석된 결과를 통하여 모델에 대한 가정을 확인할 수 있다. 이렇게 분석된 데이터를 통하여 최종 위험성 평가에 중요한 자료로 이용된다[3]. 매개변수에 대한 중요도는 변수의 변화에 따라서 평가된 위험성의 변화로 표현할 수 있다.

기본사상과 모든 매개변수에 대한 민감도 분석은 기본적으로 아래와 같은 방법에 따라서

계산되어진다.

이용불능상태, 발생빈도 또는 개개의 매개변수 값을 고려하여 설정된 값은 일반적인 값(normal value)을 SensFactor에 의해 나눈 값과 같다. SensFactor은 1보다는 큰 값을 가지며, 기본적으로 10이라는 값을 가진다. 기본사상 그룹에 대한 경우, 그룹내의 모든 기본사상에 대한 이용불능상태는 SensFactor에 의해 나누어진다.

최소단절군 분석의 계산형태에 의존한 이용불능도 또는 발생빈도를 바탕으로 새로운 정상사상의 결과를 계산한다. 새로운 결과 값은 $Q_{TOP, L}$ 이라고 한다.

이용불능상태 발생빈도 또는 개별적인 매개변수를 고려하여 설정된 값은 일반적인 값(normal value)에 SensFactor를 곱한 값과 같다. 기본사상에 대한 그룹의 경우, 모든 기본사상에 대한 이용불능상태에 대한 값에 10을 곱한다. 만약 10을 곱한 후에 어떠한 값이 범위를 벗어났다면 수용되는 값의 최대 값으로 잘라낸다.

최소단절군 분석의 계산형태에 의존한 이용불능도 또는 발생빈도를 바탕으로 새로운 정상사상의 결과를 계산한다. 새로운 결과 값은 $Q_{TOP, U}$ 라고 한다.

민감도는 아래의 식으로 표현되며, 민감도를 평가·분석할 수 있다[3].

$$Sens = \frac{Q_{TOP, U}}{Q_{TOP, L}} \quad (1)$$

여기서,

$Q_{TOP, U}$: unavailability, frequency or individual parameter value에 10을 곱한 값

$Q_{TOP, L}$: unavailability, frequency or individual parameter value에 10으로 나눈 값

이러한 민감도 분석의 결과는 Sens, $Q_{TOP, U}$, $Q_{TOP, L}$ 을 표로 정리하여 비교·분석하였다.

2.2. 불확실성 분석

신뢰도 분석은 안전과 효율 그리고 경제성 설계와 산업시설의 운전에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 이러한 신뢰도 분석은 미래의 수

행능력 및 장치의 수명 그리고 시간의 경과에 따른 위험성을 평가하기 위한 중요한 도구로 이용된다. 이러한 신뢰도 분석의 한 분야로 불확실성 분석(Uncertainty Analysis)이 장치 및 시스템이 가지고 있는 불확실성을 평가하기 위해 수행되어진다. 이러한 불확실성 분석을 수행하기 위해서는 정량적 위험성 분석(Quantitative Risk Analysis)이 우선적으로 수행되어야 하며, 정량적 위험성 분석이 수행된 후 분석결과가 가지는 불확실성을 평가하기 위해 불확실성 분석을 수행한다. 불확실성 분석은 정량적·정성적 분석을 모두 수행하며, 민감도 분석은 불확실성 분석의 보조적 역할을 담당한다. 불확실성이 나타나는 이유로는 두 가지 원인 때문에 발생하게 되는데 첫 번째는 기계의 고장이 임의로 발생하기 때문이고, 두 번째로는 데이터의 신뢰수준(Certainty Level)의 부족 때문이다. 임의의 편차가 생기는 이유는 여러 가지가 있지만 기계가 사용되는 계통이나 주변환경에 지배를 받기 때문에 고장율이 다르게 나타날 수 있으며, 이러한 임의 편차에 의해 생기는 불확실성은 줄여가기가 매우 어렵지만, 자료의 부족으로 인한 불확실성은 많은 자료의 수집에 의해 보완할 수 있다. 불확실성을 정량화하는 방법은 확률함수(probability function)나 확률밀도함수(probability density function)가 가장 폭 넓게 사용되고 있다. 발생한 사고에 대한 정량적 위험성 분석이 수행되고 기본사상에 대한 확률밀도함수가 주어지면 불확실성 분석은 Monte Carlo 모사방법을 이용하여 불확실성을 정량화한다. Monte Carlo 모사방법을 통해서 불확실성을 정량화하는 방법은 각 기본사상의 확률분포함수로부터 하나의 기본사상 확률 $P(X_i)$ 를 임의로 구한다. 위의 과정을 반복하여 모든 기본사상에 대해 $[P(X_i), i=1, 2, \dots, n]$ 가 구해진다. 최소단절군과 기본사상의 발생확률 $P(X_i)$ 를 이용하여 하나의 사고 발생확률 $P(T_k)$ 를 계산한다. 위의 단계를 반복 계산하여 각각의 기본사상에 대한 발생확률을 계산한다. 기본사상에 대한 발생확률 $P(T_k)$ 값을 크기대로 정리하면 사고 발생확률의 누적분포함수(cumulative distribution function)를 간단히 계산할 수 있다. 즉, n 이 매우 클 경우 i 번째로 큰 $P(T)$ 는 분포함수의 $i/n \times 100\%$ 값이 된다. 다시 말해 50%(median) 값은 $n/2$ 번째 값이고 95% 값은 $95/100 \times n$ 번째 값이다.

아래의 식은 확률밀도함수에 대한 불확실성

분포가 존재하는 부분을 나타낸 것이다. 개개의 경우에 대한 평균값을 계산하기 위한 식이 제공되었다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

$$\sigma = \ln(EF)/1.6449 \quad (3)$$

$$M = \exp(\mu) \quad (4)$$

$$E(x) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (5)$$

위의 식에서 표준편차를 계산하기 위해서는 error factor의 값이 필요하다. Error factor는 불확실성 분석을 수행하기 위해 필요한 필수 입력변수이며, error factor는 공학적 계산에 의해 3~10사이의 값을 입력한다[4]. 본 연구에서는 3~10사이의 error factor 값을 입력하여 불확실성 분포가 어떻게 변화하는지 비교·분석하였다.

2.3. 비용·효과 분석

비용이란 안전성 향상을 수행하는데 있어서 사회전체가 지불해야 하는 일체의 비용을 금액으로 표시한 값을 말한다[4]. 화학공장뿐만 아니라 모든 공장들은 장치의 신뢰도, 비용, 동력 소비, 물리적 크기 등을 고려하여 공장을 설계한다. 일반적으로 화학공장에서 사용하고 있는 장치는 생산하는 업체에 따라서 가격의 차이가 발생할 뿐만 아니라 가격에 따라서 높고 낮은 장치 고유의 고장율 데이터를 가지고 있다. 장치가 가지고 있는 고장율 데이터를 기본으로 하여 신뢰도의 높고 낮음에 따라서 시스템 상에서 어느 정도의 위험성이 감소되는지 또는 위험성이 증가되는지에 대하여 분석하였다. 장치가 가지는 신뢰도에 따른 가격의 증·감에 따라서 정상사상의 발생확률이 어느 정도 증가·감소하였는지 분석하여 플랜트 전체에 어느 정도 위험성의 변화가 발생하였는지 제시하기 위한 것이다. 장치에 대한 신뢰도의 증·감에 따른 위험성의 증가·감소의 효과는 아래의 식으로 표현할 수 있다[5].

$$Reliability \ Upgrade = \frac{Y_3/Y_2}{X_3 - X_2} [/\text{won}] \quad (6)$$

$$Reliability\ Degrade = \frac{Y_2/Y_1}{X_2 - X_1} [/\text{won}] \quad (7)$$

여기서,

X_1, X_2, X_3 : 각 구성성분인 1, 2, 3의 가격

Y_1, Y_2, Y_3 : 각 구성성분 1, 2, 3에 대한 정상사상의 발생 확률

위의 식에서 사용한 X_1 은 가격 및 신뢰도가 가장 낮은 장치를 말하며, X_2 는 중간 값을 X_3 는 가격에 따른 신뢰도의 비가 가장 좋은 장치를 말한다. 위의 식에서는 가격 대 신뢰도의 비가 중간 값을 가지는 2번 장치를 기준으로 위의 식을 작성하였다.

본 연구에서는 고장율과 가격에 따라서 아래의 3등급으로 장치를 분류하였다.

- 1등급 : 높은 고장 발생확률을 가지며 상대적으로 가격이 낮은 장치
- 2등급 : 1등급보다는 고장 발생확률이 낮으며, 가격이 높은 장치
- 3등급 : 위의 두 등급보다 고장 발생확률이 낮으며, 가격이 높은 장치

3. 사례 연구

사례연구에서는 일반적으로 화학공장에서 합성물을 생성하기 위해 이용되는 연속교반탱크

크 반응기(CSTR; Continuous Stirred Tank Reactor)에 대해 신뢰도 분석을 수행하여 여러 가지 위험성 감소방법에 대해 논의하였다.

3.1. 공정개요

화학 합성물을 산출하기 위해 발열성이 높은 반응을 사용하는 연속교반탱크 반응기의 설계를 고려한다. 연속교반탱크 반응기는 연속 운전되며 유지·보수를 위해 연간 2주정도 조업이 정지된다[6]. Fig. 1은 연속교반탱크 반응기에 대한 공정도를 나타낸 그림이다. 정상사상은 연속교반탱크 반응기의 폭주 발열 반응이 발생하여 연속교반탱크 반응기의 과열로 정의하였다. 바람직하지 않은 사건은 연속교반탱크 반응기 내부 온도가 현재의 한계 온도 이상으로 상승할 때 water-filled sump를 열어 그 안에 있는 반응 혼합물을 저지하는 2개의 연속교반탱크 반응기의 덤프 밸브 (V_1 과 V_2)에 의해 보호된다. 밸브 액추에이터는 기압식(pneumatic)이며 보팅논리장치(VLU; Voting Logic Unit)에서 제어한다. 보팅논리장치는 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.

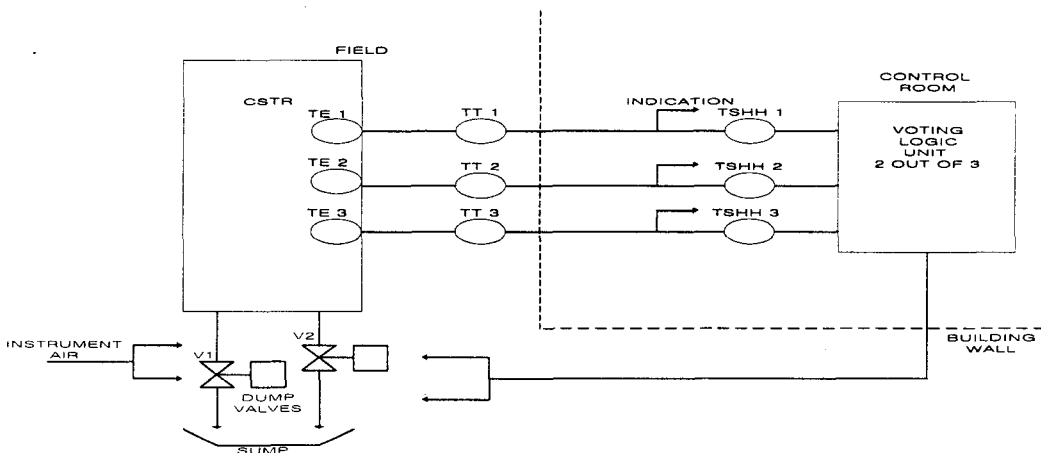


Fig. 1. Line Diagram of Continuous Stirred Tank Reactor.

모든 온도채널은 매 분기마다 시험하고 같은 날 교정한다. 뿐만 아니라 통제실에 있는 온도 표시기를 통해 센서와 트랜스미터의 결합을 감지할 수 있다(8시간마다 이러한 온도 변화를 점검 및 기록할 운전자가 필요하다). 그러나 온도 스위치의 결합은 다음 분기 시험까지 감지되지 않은 상태를 그대로 유지하게 된다. 밸브와 VLU는 3가지 온도 채널에서 온 신호를 수집하여 종합적으로 검토하여 연간 보수 기간 중에 시험하게 된다. 연속교반탱크 반응기에서는 용기, 온도채널, VLU, 밸브 및 밸브 운전자의 문제에 관해서만 정의하였다. 계기공기(IA: Instrument Air) 시스템은 두개의 공기 밸브 액추에이터에 공급하여 요구 즉시 0.001의 고장 발생확률을 가지는 것으로 가정하였다. 기타 지지 장치는 보호 장치를 성공적으로 운전하는데 필요하지 않다.

Table 1은 보호장치의 이용불능상태에 대한 자료이다.

분석방법으로 정상사상에 대한 사고발생 빈도를 정량적으로 분석하기 위하여 결합수목 분석 방법을 이용하여 정상사상의 발생확률을 분석하였다. 결합수목 분석 방법은 기계적 고장, 인적 오류, 공통원인 고장(CCF; Common Cause Failure)등 원치 않는 상태를 발생시키는 모든 종류의 고장에 대한 원인을 연역적인 방법을 통하여 찾아내는 분석방법을 말한다[7]. 위에서 말하는 공통원인 고장이란 단일 공통원인 때문에 복수개의 요소나 기기에 고장이 발생하여 시스템 기능에 영향을 주는 고장을 말한다[8].

본 연구에서는 민감도 분석 및 불확실성 분석을 수행하기 위해 Risk Spectrum이라는 프로그램을 사용하였다[3]. Risk Spectrum이란 프로그램은 스웨덴의 Relcon AB라는 회사에서 만든 프로그램으로 결합수목 분석, ETA(Event Tree Analysis) 작성 및 정량적 분석이 가능한 프로그램이며, 작성된 결합수목에 대하여 최소

Table 1. Preliminary Evaluation of Protection System Unavailability.

Contributor to system unavailability	Failure rate (per year)	Maximum exposure time (years)	Probability of failure on demand	Contribution to system unavailability(10 ⁻³)
Valve V1 or V2 fails to open	0.1	1	0.05	-
Both Valves V1 and V2 fail to open	-	-	(0.05) ²	2.5
CCF of Valves V1 and V2 to open	0.02	1	0.01	10
Voting logic unit failure	0.005	1	0.0025	2.5
Instrument air loss of air pressure	-	-	0.001	1
Temperature channel :				
Sensing element	0.3	8 hr	b	-
Transmitter	0.1	8 hr	b	-
Switch-low	-	-	0.0025	-
Two temperature channels fail to trip	-	-	3 × (0.0025) ²	1.9
CCF of temperature channels to trip	-	-	0.005	5

3.2. 사고원인 분석

연속교반탱크 반응기에서 발생할 수 있는 잠재위험을 확인하기 위하여 HAZOP(HAZard and OPERability) 연구를 실시하였다. HAZOP 연구는 정성적인 위험성 평가결과를 제시하는

단절군을 형성하여 기본사상이 정상사상에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 또한, 중요도 분석, 민감도 분석, RDF 및 RIF 중요도의 계산이 가능하며, 시스템에서 발생할 수 있는 불확실성을 분석 및 평가가 가능한 위험성 분석 도구이다.

3.3. 민감도 분석

연속교반탱크 반응기에 대해 잠재위험을 확인하기 위해 HAZOP study를 실시하여 9가지의 발생가능한 잠재위험을 발견하였다. 개개의 잠재위험이 가지고 있는 고장을 데이터를 바탕으로 하여 결합수목을 작성하였으며 작성된 결합수목을 분석하여 정상사상이 발생할 수 있는 확률 값을 계산하였다. 연속교반탱크 반응기에 대해 결합수목 분석을 수행한 결과로 정상사상인 고온에서 연속교반탱크 반응기가 파열될 경우에 대한 분석결과는 밸브와 Voting Logic Unit 그리고 계기공기(Instrument Air)의 조합에 의해서 생성된 최소단절군(Minimal Cut Set)에 의해 정상사상이 발생되는 것을 볼 수 있다. 그 중에서도 적재/적하(loading/unloading) 작업시, 외부사고, 그리고 초기 설계 단계에서의 오류(error)도 무시할 수 없는 잠재위험으로 파악되었다. HAZOP study 결과를 가지고 결합수목 분석 결과로 정상사상의 발생확률과 최소단절군이 생성되었다.

Table 2. The Minimal Cut Sets of Continuous Stirred Tank Reactor.

Top Event Probability= 8.32E-03				
No.	Probability	%	Event 1	Event 2
1	5.00E-03	60.07	CCF TC	
2	2.34E-03	28.11	Valve 1	Valve 2
3	1.00E-03	12.01	Instrument Air	
4	2.28E-06	0.03	CCF Valve	
5	2.85E-07	0.00	VLU	
6	2.93E-08	0.00	TC 1	TC 2
7	2.93E-08	0.00	TC 1	TC 3
8	2.93E-08	0.00	TC 2	TC 3

Table 2는 결합수목의 분석결과로 생성된 최소단절군을 제시한 표이다. 분석된 결과를 살펴보면 연속탱크 반응기의 파열사고는 대략적으로 8.32×10^{-03} /year로 분석되었다. Table 2에서 정상사상의 발생확률에 가장 큰 영향을 주는 기본사상으로는 CCF TC로 60%의 비중을 차지하고 있는 것으로 분석되었으며, 다음으로 두 개의 dump valve가 가장 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. Table 2에서 제시된 최소단절군을 이용하여 민감도 및 불확실성 분석을 수행하였다. Table 3는 연속교반탱크 반

응기에 대한 민감도 분석을 수행한 결과이다. Table 3에 대한 장치의 위험성 등급(Risk Rank)은 최소단절군 분석결과로 생성되었으며, 이는 장치가 시스템에 어느 정도 기여를 하고 있는지를 보여주기 위한 수학적 값을 제시하였다.

Table 3. Sensitivity Analysis of Basic Event for CSTR.

No	ID	Nom. Value	Sen	Sens High	Sens Low
1	CCF TC	5.00E-03	1.39E+01	5.32E-02	3.84E-03
2	Valve 2	4.84E-02	4.70E+00	2.93E-02	6.23E-03
3	Valve 1	4.84E-02	4.70E+00	2.93E-02	6.23E-03
4	Instrument Air	1.00E-03	2.32E+00	1.73E-02	7.43E-03
5	CCF Valve	2.28E-06	1.00E+00	8.34E-03	8.32E-03
6	VLU	2.85E-07	1.00E+00	8.33E-03	8.32E-03
7	TC 3	1.71E-04	1.00E+00	8.32E-03	8.32E-03
8	TC 2	1.71E-04	1.00E+00	8.32E-03	8.32E-03
9	TC 1	1.71E-04	1.00E+00	8.32E-03	8.32E-03

3.4. 불확실성 분석

연속교반탱크 반응기에서 반응기가 폭발할 빈도에 대해서 불확실성 분석을 수행하였다. 불확실성 분석을 위하여 각 기본 사건의 분포를 입력하였는데 모든 사건의 분포는 대수정규 분포(lognormal distribution)로 가정하였다. 불확실성 분석을 수행하기 위해 필요한 입력변수인 error factor는 공학적 계산에 의해 3과 10 사이의 값을 제시하였다. 본 연구에서는 error factor 3과 10을 입력하여 불확실성에 대한 분포가 어떻게 변화하는지 비교·분석하였다.

Table 4. The Result of Uncertainty Analysis for Error Factor 3 and 10.

	Error Factor = 3	Error Factor = 10
Mean	8.32E-03	8.32E-03
50%	7.28E-03	4.27E-03
5%	3.19E-03	8.09E-04
95%	2.14E-02	5.50E-02

Table 4에서 보여주는 것처럼 error factor가 3일 때와 10일 때의 값을 비교하여 보면, 평균 값은 같게 분석되었지만 5 percentile과 95

percentile 일 때 값이 현저하게 다르게 분석되었다. 이는 Fig. 2와 3에서 보여주는 것처럼 그래프의 퍼짐의 정도를 표현하는 값이며 또한, 사건의 발생확률의 분포를 표현하는 값이다.

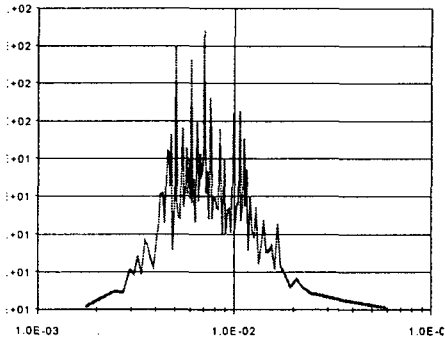


Fig. 2. Uncertainty Distribution for Error Factor 3.

Fig. 2는 error factor 값이 3일 때 확률밀도 함수를 나타낸 것으로 5 percentile일 때는 $3.19 \times 10^{-03}/\text{year}$, 중간 값은 $7.28 \times 10^{-03}/\text{year}$ 마지막으로 95 percentile일 때의 값은 $2.14 \times 10^{-02}/\text{year}$ 로 분석되었다. 그래프에서 보여주는 것처럼 낙관적으로 판단한다면 정상사상의 발생확률 즉, 반응기의 폭발사고에 대한 발생확률은 대략적으로 300년에 한 번($3.19 \times 10^{-03}/\text{year}$) 정도 발생한다고 볼 수 있지만, 비관적으로 본다면 50년에 한 번($2.14 \times 10^{-02}/\text{year}$) 정도 발생한다고 볼 수 있다.

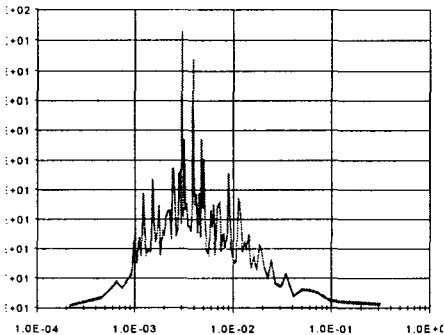


Fig. 3. Uncertainty Distribution for Error Factor 10.

Fig. 3은 error factor 값이 10일 때의 확률 밀도함수를 나타낸 그림이다. 위의 그림에서도 마찬가지로 낙관적으로 본다면 $8.09 \times 10^{-04}/\text{year}$ 로 정상사상의 발생확률은 거의 발생하지 않는다고 보여지며, 비관적으로 보면 $5.50 \times 10^{-02}/\text{year}$ 로 대략적으로 18년에 한번정도 발생한다고 보면 된다. Fig. 2와 3에서 보여주는 것처럼 5 percentile과 95 percentile은 그래프의 퍼짐의 정도를 보여주는 것이다.

Fig. 2와 3에서 보여주는 것처럼 불확실성 분석을 수행하는 이유는 그래프의 확률분포를 줄여서 정량적 위험성 분석을 수행한 값에 대한 불확실성을 줄이기 위해 수행되어지는 분석 방법이다.

3.5. 비용 · 효과 분석

앞 절의 최소단절군 분석의 결과에서 어떤 기본사상이 정상사상 발생확률에 가장 중요한 영향을 주는지 살펴보았다. 이번 절에서는 기본사상에 대해 신뢰도 대 가격 변화를 고려하여 정상사상의 발생확률을 비교하여 어느 정도 위험성 감소 · 증가의 효과가 발생하는지 분석하였다.

Table 4는 장치의 고장확률에 따른 정상사상의 발생확률을 표시하였으며, 정상사상의 발생확률과 가격비를 고려하여 위험성 감소 · 증가가 어느 정도 발생하는지 분석하였다.

Table 4는 분석된 결과 장치의 고장율이 좋은 장치를 사용할 때 가장 많은 위험성을 감소시키는 장치는 VLU(Voting Logic Unit)으로 분석되었으며, 장치가 가지는 고장율의 변화에 따라 위험성의 증 · 감에 영향을 주지 않는 장치는 TC(Temperature channel)로 나타났다. 분석 결과 최소단절군으로 분석된 장치의 중요도와는 다소 차이가 발생하였다. 따라서 비용 효과 분석과 최소단절군 분석 결과를 적당히 이용하여 공장의 안전성을 향상시키고, 최소단절군 분석과 중요도 분석에서 제시된 위험성 등급에 따라 적절한 유지 · 보수를 수행하며, 검사 주기를 자주 시행함으로써 장치가 가지고 있는 고장율을 감소시키는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속교반탱크 반응기에 대해서 신뢰도 분석의 한 분야인 민감도 분석(Sensitivity Analysis) 및 불확실성 분석

Table 5. Cost Effectiveness Factor for Continuous Stirred Tank Reactor.

Number	Comp. Name	Failure Rate	Cost ($\times 10^4$ won)	Top Event Probability	Degrade	Upgrade
1	VLU	1.70E+00	80	5.94E-01	8.15E-05	6.78E-05
2		1.08E+00	90	4.84E-01		
3		2.95E-02	110	1.67E-01		
1	Valve	1.08E+00	20	3.97E-01	4.06E-05	5.56E-05
2		3.14E-01	50	4.84E-01		
3		2.40E-02	80	2.90E-01		
1	IA	4.94E+01	200	5.74E-01	2.81E-05	2.31E-05
2		1.25E+01	170	4.84E-01		
3		2.70E-02	150	2.26E-01		
1	Temp. Channel	2.89E+02	80	3.04E-01	7.96E-05	7.96E-05
2		2.87E+01	100	4.84E-01		
3		9.46E-01	120	3.04E-01		

(Uncertainty Analysis)을 수행하였다. 민감도 분석의 수행결과로는 CCF TC 장치가 가장 시스템에 높은 비중을 차지하는 것으로 분석되었으며 위험성 등급이 설정되었다. 불확실성 분석은 error factor 3과 10을 사용하여 분석하였는데 분석결과로는 $7.28 \times 10^{-03}/\text{year}$ 에서 $5.50 \times 10^{-02}/\text{year}$ 의 범위 내에서 사건이 발생한다고 분석되었다. 이는 장치 및 시스템 상에서 불확실성이 존재하기 때문에 위와 같은 분포가 발생하였으며, 이러한 불확실성 분석의 목적은 발생분포를 줄이기 위해 불확실성 분석을 수행하며, 보다 정확한 불확실성 분석결과 값을 얻기 위해서는 회사의 작업환경과 작업조건에 대한 장치 및 시스템의 신뢰도 데이터 베이스 구축이 우선적으로 수행되어져야 한다.

그리고 비용·효과 분석을 수행하여 장치의 고장 발생확률에 따른 위험성의 증가·감소의 효과를 분석하였는데, 위험성 감소 효과가 가장 크게 나온 장치로는 VLU(Voting Logic Unit)으로 분석되었으며, 장치의 위험성에 영향을 주지 않는 장치로는 CCF TC(Common Cause Failure Temperature Channel)로 분석되었다. 이는 공정에서 보다 좋은 장치의 사용으로 인한 위험성 감소효과를 제시하였으며, 장치의 정기적인 유지·보수를 통한 고장을 감소의 필요성을 제시하였다.

따라서 본 연구에서 수행한 민감도 분석결과로 제시된 위험성 등급과 비용·효과 분석을

통하여 분석된 결과를 이용하여 공장에 존재하는 불확실성 분포를 최소화 시켜야 한다.

감사의 글

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

참고 문헌

- (1) 김운화, 화학공장의 데이터베이스를 기반으로 한 정량적 위험성 평가 시스템 개발, 박사학위논문, 광운대학교, 1998.
- (2) 김용하, HIRA 지수법을 이용한 BTX 공장의 위험성 확인에 관한 연구, 석사학위논문, 건국대학교, 1999.
- (3) Relcon AB, Risk Spectrum User's Guide, 1998.
- (4) CCPS, Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables, AIChE, 1989.
- (5) 류병태, 서재민, 유진환, 김정원, 박경태, 최운혁, 김선재, 함정훈, 엄성인, 백종배, 고재욱, "화학설비의 비용·편익 분석 개발에 관한 연구," Theories and Applications of Chem. Eng., 7(2), 3223-3226 (2001).

- (6) Ou Y., and J.B. Dugan, Sensitivity Analysis of Markov Chain Dependability Mode, *Technical Report 000131.0*, University of Virginia Department of Electrical Engineering, 2000.
- (7) CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York, 1989.
- (8) 김영수, 유종호, 정석열: "Batch Annealing Furnace 가스설비에 대한 정량적 위험성 평가," *Theories and Applications of Chem. Eng.*, 7(1) 497-500 (2001).
- (9) 제무성, 정재희, *시스템 안전공학 개론*, 신광문화사, 1999.