

이산함수를 사용한 신뢰도 최적화에 의한 장치 선택에 관한 연구

진 상 화* · 송 광 호** · †여 영 구

*건국대학교 화학공학과

** (주) LG 화학 기술연구소

한양대학교 화학공학과

(2002년 3월 4일 접수, 2002년 3월 26일 채택)

A Study on the Equipment Allocation using Reliability Optimization with Discrete Functions

Sang-Hwa Jin* · Kwang Ho Song** and Yeong-Koo Yeo

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

*** LG Chemical Ltd., Research Park, Daejeon, Korea*

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Korea

(Received 4 March 2002 ; Accepted 26 March 2002)

요 약

본 연구에서는 장치가 가지고 있는 신뢰도 데이터와 가격을 고려하여 공정에서 요구하는 신뢰도에 도달할 수 있도록 최적화 분석을 수행하여 어떠한 장치를 선택하는가에 대한 방법을 제시하였다. 이산함수를 이용한 목적함수와 제한 조건을 이용하여 보다 실질적인 최적화 문제를 구성하였다.

재킷 반응기를 대상으로 하여 시스템에서 요구하는 신뢰도 목표 값에 도달하기 위해 가격에 따라 다른 고장률을 가지는 장치에 대하여 최적화 분석을 수행하였다. 이러한 최적화 분석을 수행하기 위해 mixed-integer programming(MIP) 방법을 사용하였다. 재킷 반응기의 신뢰도 목표값이 1.65×10^{-4} 일 경우에 최적화 분석 수행결과는 가격과 고장률이 모두 좋은 장치로 분석되었다. 그러나 신뢰도 목표값이 낮을 경우 최적화 분석의 수행결과는 비싼 장치의 선택보다 가격과 신뢰도가 낮은 장치를 선택함으로써 원하는 신뢰도 목표값에 도달할 수 있었다.

Abstract - This study introduces a method that selects equipments, so as to reach the reliability level, carrying out an optimization analysis which considers the reliability data and cost of the equipments. A more practical optimization problem has been formed using the object function based on the discrete function and the constraints.

The jacked reactor being the subject, an optimization analysis was performed on equipments that have different failure rates depending on costs in order to reach the target reliability level required by the system. The mixed-integer programming (MIP) was used for this optimization analysis. When the jacked reactors target level of reliability was 1.65×10^{-4} , the result of the analysis showed the equipments with high cost and low failure rate were selected. However when the target level of reliability

was low, the result showed that by choosing the equipments with lower cost and reliability over the more expensive one, the desired target level could be reached.

Key words : Mixed-integer Programming, Optimization Analysis

I. 서 론

1990년대 후반에 대형 산업시설물의 안전성 확보를 위하여 산업안전보건법에는 공정안전보고서(PSM; process safety management, SMS; safety management system)로 인하여 국내 안전문화에 많은 영향을 가져왔다. 공정안전보고서 작성의 의무화로 인하여 HAZOP(hazard and operability study)연구, PHA(preliminary hazard analysis) 등의 정성적 위험성 평가를 시작으로 ETA(event tree analysis), FTA(fault tree analysis), QRA(quantitative risk analysis) 등의 위험성 평가방법으로 진행되었다. 현재에는 이러한 결정론적인 위험성 평가방법보다는 확률론적인 위험성 평가방법으로 공장의 잠재위험을 확인하고 평가하여 공장에 대한 위험성 증가·감소를 분석하였다. 이러한 위험성 평가방법의 개발 및 분석의 수행으로 인하여 사건·사고의 발생횟수는 감소하였지만 사고의 발생으로 생기는 재산 및 인명피해는 증가하였다.

실제로 화학공장에서 운전상태, 설계, 위치선정, 장치의 배치에 따른 많은 잠재위험이 존재하며, 이러한 잠재위험이 원인이 되어 크고 작은 사고들이 발생한다. 공장의 운전중이나 운전상태에서 존재하는 잠재위험은 정량적 위험성평가 방법을 통하여 잠재위험에 대해서 종합적이고 체계적으로 평가하여 사고발생 가능성 및 사고결과로 인한 설비 손상 및 조업자에 대한 피해 결과와 환경에 미치는 영향 등을 분석하였다.

그러나 설계단계, 즉 공정을 구성하고 있는 장치의 선택 및 위치선정 또는 배치로 인하여 공정에서 어느 정도의 위험성이 감소 또는 증가의 효과가 발생하는가? 또는 어떠한 장치를 사용하는 것이 공정운전에 최상의 운전조건을 만족하는가? 그리고 어느 정도의 가격에 고장률을 가지는 장치를 사용하는 것이 시스템에서 요구되는 최적의 신뢰도에 도달할 수 있는가에 대한 연구결과는 국내에는 많지 않은 것으로 조사되었다. 그러나 국외에서는 시스템에서 요

구되는 최적의 신뢰도에 맞는 장치의 분배와 시스템의 최적화에 대한 연구는 여러 사람들에 의해 다양하게 연구되어왔다.

본 연구에서는 시스템을 구성하고 있는 각각의 장치 및 설비가 가지고 있는 고장률을 기본으로 위험성 증가·감소효과를 분석하였다. 그리고 분석된 위험성 증가·감소로 인하여 공정에서 필요한 유지·보수 기간의 변경 및 설계상의 문제점을 개선하였으며, 장치가 가지는 고장확률을 상·중·하로 구분하였으며 장치가 가지는 가격을 고려하여 시스템에서 요구되는 신뢰도를 만족하는 장치 및 설비를 선정하여 시스템에 필요한 신뢰도에 도달할 수 있도록 장치가 가지는 신뢰도와 가격을 고려하여 최적화 분석을 수행하였다. 그리고 공정에서 필요로 하는 신뢰도 값에 따라서 어떠한 장치를 선택하여야 공정에서 요구하는 신뢰도에 도달할 수 있는지를 분석하였다.

II. 이론적 배경

최적화 문제를 해결하기 위해서는 문제에서 제시된 운전상태와 제한조건에 맞게 문제를 수식화(formulation)하는 것이 가장 중요한 부분이다. 문제에 대한 수식화는 제시된 조건에 대해서 개념적 또는 함축적 의미로 필수 구성요소에 대한 확인과, 목적함수(objective function : economic criterion)와 공정모델(process model : constraints)에 대한 규정된 수학적 형태로 편성하는 것이 필요하다. 위에서 제시된 목적함수는 공정에서 분석된 주요 변수에 의해 이익, 비용, 에너지, 생산량 등으로 표현된다. 공정모델과 제한(constraints)조건은 공정에서 분석된 주요 변수의 상관관계로 표현한다. 이러한 목적함수와 공정모델은 공정변수의 상호관계를 조합하기 위해 체계적인 연구를 수행하는데 매우 중요한 역할을 담당한다[1].

시스템에 필요한 최적의 신뢰도 값은 시스템에 존재하는 장치 및 설비를 대상으로 최적의 장치 및 설비를 선정하기 위해서 아래의 조건을 만족하여야 한다. 우선적으로 분석모델은

입력변수로써 장치 및 설비에 대한 분석된 고장률(failure rate)이 필요하다. 장치 및 설비가 가지고 있는 고장률 및 품질에 따른 가격의 변화는 연속함수(continuous function)가 아니고 이산함수(discrete function)를 따른다. 그러므로 이산함수에 대한 최적화 문제 해결 방법이 고려되어야 하며 이러한 이산함수에 대한 최적화 문제의 해결 방법으로는 mixed-integer programming(MIP)이 주로 사용되고 있다[1]. n 개의 구성요소 및 장치를 가지고 있는 시스템에 대해 고려하여보자. 이러한 시스템에 대한 신뢰도의 목표는 시스템 내에 구성성분 또는 장치를 최소의 가격으로 공정에 필요한 최적의 신뢰도에 도달하기 위해 장치를 배치하는 것이다. 제시된 조건에서 발생할 수 있는 문제점으로는 식(1)에서 제시된 것처럼 비선형 프로그래밍 문제로 제시할 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \text{Minimize Cost} &= \sum_{i=1}^n C_i(R_i) \\ \text{Subject to } R_{i,\min} &< R_i < R_{i,\max} \quad (1) \\ R_s &\geq R_G \end{aligned}$$

여기서,

- Cost : total system cost
- C_i : cost of component/subsystem i
- n : number of components within the system
- R_i : reliability of component/subsystem R_{ii}
- $R_{i,\min}$: minimum achievable reliability of component i
- $R_{i,\max}$: maximum achievable reliability of component i
- R_s : system reliability
- R_G : system reliability goal

식 (1)은 시스템의 최소 비용에 도달하기 위해 형성되었으며, 제시된 R_G 는 시스템 신뢰도에 대한 하한(lower limit) 값이다. 식(1)을 계산하기 위해서는 먼저 각 시스템 내의 장치에 대한 분석된 신뢰도 함수가 필요하며, 또한 신뢰도 함수에 대한 개개의 장치에 대한 비용의 관계를 포함하여야 한다. 식 (1)에서 $C_i(R_i)$ 는 각 구성성분의 신뢰도 R_i 에 대한 비용을 나타

내는 함수이다. 이 비용함수가 비선형 연속함수이면 위의 최적화 문제는 nonlinear programming 기법을 사용하여 계산할 수 있다[2]. 그러나 실제적으로 각 구성요소의 $C_i(R_i)$ 는 신뢰도에 따른 이산함수로서 주어진다. 이 경우에는 식(1)을 mixed integer programming (MIP)이 된다.

MIP는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize Cost} &= \sum_{i=1}^n C_i(R_i) \times x_{ij} \\ x_{ij} &= 0 \text{ or } 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to } R_s &\geq R_G \quad (2) \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, \quad j=1 \cdots m \\ R_i &= \sum_{j=1}^m R_{ij} x_{ij}, \quad j=1 \cdots m \end{aligned}$$

여기서 x_{ij} 는 0과 1을 나타내는 이산함수로서 설비의 존재 유무를 나타낸다. 구성된 MIP 문제는 GAMS를 사용하여 계산하였다.

III. 사례연구

Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 재킷 반응기는 여분의 냉각펌프에 의해 냉각되어진다. 정상적인 운전상태일 때는 두 개의 펌프는 50%의 용량으로 운전되어지며, 모든 냉각수단이 고장이 발생하였을 경우 재킷 반응기는 반응기 내의 온도상승으로 인한 폭발사고가 발생할 수 있는 공정이다[3].

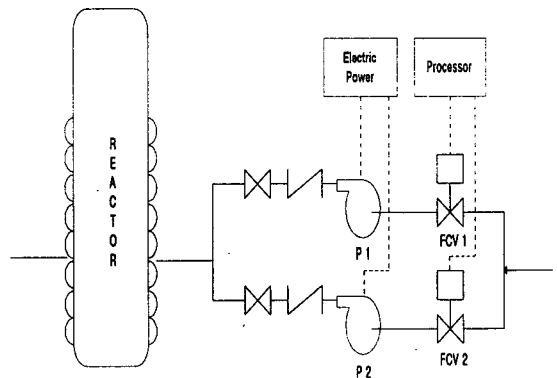


Fig. 1. System diagram for the jacketed reactor.

재킬 반응기의 폭발사고가 발생할 수 있는 정상사상(top event)으로는 반응기에 냉각시스템의 고장으로 설정하였다. 재킬 반응기에는 병렬로 연결된 2개의 pump와 두 개의 flow control valve(FCV)를 가지고 있으며, pump에 동력을 전달하는 electric power(EP)와 FCV를 제어하는 processor로 구성되어 있다.

Table 1은 각각의 장치가 가지고 있는 고장률(failure rate)을 상, 중, 하로 분류하였으며, Table 2는 개개의 장치가 고장이 발생하였을 경우 수리하는데 드는 시간과 개개의 장치에 대한 가격을 제시하였다. 여기서 A, B, C는 제시된 고장률과 수리시간(restoration time) 그리고 가격이 서로 다른 장치를 나타낸다. 즉, A는 신뢰도가 낮고 가격이 저렴한 장치이며 C는 신뢰도가 높고 가격이 비싼 제품을 나타낸다. 그리고 B는 고장률과 가격이 중간정도의 값을 나타내는 장치를 나타낸다. 수리시간은 제품이 가지는 고장률에 관계없이 일정한 시간을 가진다고 가정하였다. 제품 A, B, C에 대한 가격은 고장률이 낮을수록 높은 가격을 갖는 것으로 간주하였으며 설정된 가격은 임의로 선정된 가격이며 고장률이 낮을수록 비싼 가격을 설정하여 최적화 분석을 수행하였다.

Table 1. Failure rates of each equipment.

Component	A	B	C
FCV 1	2.00E-04	2.00E-05	2.00E-06
P 1	4.00E-03	4.00E-04	4.00E-05
FCV 2	2.00E-04	2.00E-05	2.00E-06
P 2	4.00E-03	4.00E-04	4.00E-05
EP	5.00E-04	5.70E-05	5.00E-06
PR	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06

Table 2. The restoration time and cost of equipments.

Component	Restoration Time(hr)			Component Cost(임의가격)		
	A	B	C	A	B	C
FCV 1	4	4	4	10	20	30
P 1	8	8	8	10	20	30
FCV 2	4	4	4	10	20	30
P 2	8	8	8	10	20	30
EP	2	2	2	10	20	30
PR	4	4	4	10	20	30

Table 1에서 제시된 고장률을 기본으로 하여 정상사상 즉 반응기의 폭발사고가 발생할 수 있는 확률을 분석하였다. 정상사상의 발생 확률은 스웨덴의 Relcon AB사에서 개발한 Risk Spectrum이라는 프로그램을 사용하여 계산하였다[4].

Fig. 2는 재킬 반응기에 대한 결함수목(fault tree)을 나타낸 그림이다. 재킬 반응기의 파열 사고가 발생할 수 있는 중간사상으로는 펌프 1과 2가 고장이 발생하였을 경우로 분석되었으며, 정상사상을 발생시킬 수 있는 기본사상으로는 pumps transfers off, flow control valve의 폐쇄, 그리고 동력전달 장치의 손실로 분석되었다.

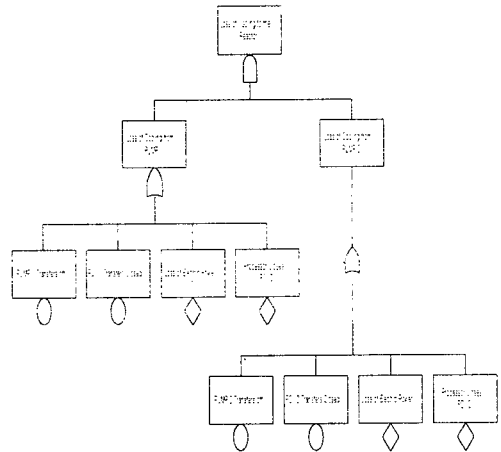


Fig. 2. Fault Tree of Jacketed Reactor.

Table 3은 반응기의 파열사고에 대한 MCS(minimal cut sets)를 나타낸 표로 정상사상에 가장 큰 영향을 주는 기본사상으로는 EP(electric power)가 69.2%로 분석되었으며, 다음으로 PR(processor) 24.3%로 분석되었다. 재킬 반응기에 대한 사고발생 확률은 1.65×10^{-05} /year로 분석되었다.

재킬 반응기를 대상으로 신뢰도 분석을 수행하였다. Table 4는 재킬 반응기에 대한 신뢰도 분석결과로서 Fussell-Vesely 중요도, Risk Increase Factor 그리고 Risk Decrease Factor의 분석값을 제시하였다[5]. 신뢰도 분석결과 EP와 PR이 정상사상에 가장 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. 이는 신뢰도 분석결과와 MCS 분석결과를 비교해 보면 같은 기본사상

이 정상사상에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 마찬가지로 Table 4에서도 역시 EP와 PR이 시스템의 안전에 크게 영향을 주는 것을 RIF와 RDF 값을 통하여 알 수 있다. 신뢰도 분석결과로는 여분의 electric power의 설치 또는 다른 안전장치의 설치와 보다 자주 processer의 정기점검을 실시함으로써 사고를 감소시킬 수 있다.

Table 1과 2에서 제시된 고장률과 장치의 가격을 이용하여 이산함수에 대한 최적화 방법인 MIP(mixed-integer programming) 방법을 이용하여 시스템에 대한 최적화 분석을 수행하였다. 최적화를 계산하기 위해 이산함수를 최적화 할 수 있는 GAMS 최적화 프로그램을 이용하였다[6].

Table 3. Minimum cut sets.

No.	Probability	%	Event 1	Event 2
1	1.14E-04	69.22	EP	
2	4.00E-05	24.29	PR	
3	1.02E-05	6.18	P 1	P 2
4	2.55E-07	0.15	FCV 2	P 1
5	2.55E-07	0.15	FCV 1	P 2
6	6.40E-09	0	FCV 1	FCV 2

Table 4. Results of reliability analysis.

No.	ID	FV	RDF	RIF
1	EP	6.92E-01	3.25	6070
2	PR	2.43E-01	1.32	6070
3	P 2	6.33E-02	1.07	20.8
4	P 1	6.33E-02	1.07	20.8
5	FCV 2	1.58E-03	1.00	20.8
6	FCV 1	1.58E-03	1.00	20.8

Table 5는 시스템에서 요구하는 신뢰도를 만족하기 위해 최적화분석을 수행한 결과를 제시한 것으로 고장률과 가격을 이용하여 시스템에서 최적의 신뢰도를 가지는 장치를 선정할 결과이다. Table 5에서는 reliability goal을 1.65×10^{-4} 로 설정하여 개개의 장치에 대해 다른 가격과 고장률을 가지는 세 가지 경우를 놓

고 최적화를 수행한 결과 FCV 1(flow control valve)은 첫 번째의 장치가 선정되었다. 신뢰도 분석과 MCS 분석결과로 반응기의 폭발사고에 가장 큰 영향을 주는 기본사상으로 선정된 EP(electric power) 장치의 경우 최적화 수행결과는 장치 C가 분석결과로 제시되었다.

Tables 6과 7은 재킬 반응기 시스템에서 요구하는 신뢰도의 값의 변화에 따른 장치의 선택을 제시한 표이다.

Table 5. Results of optimization when the reliability goal is 1.65×10^{-4} .

	A	B	C
FCV 1	×	×	○
P 1	×	×	○
FCV 2	×	×	○
P 2	×	×	○
EP	×	×	○
PR	×	×	○

Table 6. Results of optimization when the reliability goal is 1.65×10^{-2} .

	A	B	C
FCV 1	○	×	×
P 1	×	×	○
FCV 2	○	×	×
P 2	×	○	×
EP	×	×	○
PR	×	○	×

Table 6은 시스템에서 요구하는 신뢰도 값이 1.65×10^{-2} 일 때에 구성할 수 있는 최적의 장치들이다. Table 5와는 다르게 고장률이 낮고 가격이 높은 장치의 선택보다는 flow control valve와 pump의 고장률이 높은 장치를 사용함으로 시스템에서 요구하는 최적의 신뢰도에 도달할 수 있는 것으로 분석되었다. 즉, flow control valve는 장치 B를 사용하는 것이 시스템에서 요구하는 신뢰도 목표 값에 도달할 수 있는 것으로 분석되었다.

Table 7. Results of optimization when the reliability goal is 1.65×10^{-1} .

	A	B	C
FCV 1	○	×	×
P 1	○	×	×
FCV 2	○	×	×
P 2	×	○	×
EP	×	×	○
PR	○	×	×

Table 7은 시스템에서 요구하는 신뢰도 값이 0.165일 경우에 최적의 신뢰도에 만족하는 장치를 나타낸 표이다. 즉, 재킬 반응기 시스템이 분석된 잠재위험으로 인해서 장치의 1년에 한번의 사고가 확실하게 발생할 경우에 대한 최적화 분석결과이다. Table 7에서는 장치의 고장률이 높고 가격이 저렴한 장치를 선택하는 것이 장치의 life-cycle 동안에 최적의 신뢰도에 도달하는 것을 알 수 있는데, 이는 장치의 정기적인 유지보수 보다는 일정기간 사용 후 다른 장치로 교체하는 것이 시스템에서 안전성 및 신뢰도 향상에 더 효과가 있는 것으로 분석할 수 있다.

Tables 5, 6과 7의 세 가지 경우를 놓고 비교해 보았을 때 시스템에서 요구하는 신뢰도 값이 클수록 공정에서 필요로 하는 장치는 낮은 고장률과 비싼 가격을 요구한다. 그러나 유지보수가 어려운 장치 또는 공정에서는 일정기간 사용 후 새로운 장치로 교체를 하는 것이 시스템에서 요구하는 최적의 신뢰도에 도달할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 장치가 가지고 있는 신뢰도 데이터와 가격을 고려하여 공정에서 요구하는 신뢰도에 도달할 수 있도록 최적화 분석을 수행하여 어떠한 장치를 선택하는가에 대한 방법을 제시하였다. 이산함수를 이용한 목적함수와 제한 조건을 이용하여 보다 실질적인 최적화 문제를 구성하였다.

재킬 반응기에 대해서 최적화 문제를 수행하였으며 결합수목 모델을 이용하여 시스템의 신뢰도를 계산하였다. 최적화분석 결과를 보면 신뢰도 목표 값이 1.65×10^{-04} 일 경우에는 고장률이 낮은 장치들이 선정되는 것을 알 수 있다. 이와는 반대로 신뢰도 목표 값이 낮아질수록 장치가 가지는 고장률이 높은 쪽으로 선택되어진다. 신뢰도 목표 값이 낮을수록 낮은 고장률을 가지는 고가의 장치의 선택보다는 다소 저렴한 장치를 선택하는 것이 시스템에서 요구하는 신뢰도 목표 값을 만족시키면서 경제적인 장치를 구성할 수 있다.

본 연구에서 개발한 방법을 이용하면 화학공장에서 사용하는 장치 및 설비에 대해서 경제성 분석 없이 무조건 고장률이 낮은 장치를 사용하는 것보다는 최적화 분석을 통하여 목표한 시스템 신뢰도를 만족시키면서 비용절감 효과를 볼 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] T. F. Edgar, D. M. Himmelblau, *Optimization of Chemical Processes*, McGraw-Hill Book Company, 1998.
- [2] Adamantios Mettas, "Reliability Allocation and Optimization for Complex System," *IEEE Transaction*, 2000.(???)
- [3] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York, 1989.
- [4] Relcon AB, *Risk Spectrum User's Guide*, 1998.
- [5] 진상화, *가스시설에 대한 위험성 평가 및 신뢰도 분석*, 석사학위논문, 건국대학교, 2002.
- [6] Ignacio E. Grossmann, *GAMS User's Guide*, 1991.