

# Failure Cost와 Life Cycle Cost를 고려한 연속시스템에 대한 최적 장치 선택에 관한 연구

진상화 · 김용하\* · 송희열 · 여영구\*\* · 김인원†  
건국대학교 화학공학과 · \*서울대학교 화학공학과 · \*\*한양대학교 화학공학과  
(2004. 5. 27. 접수 / 2004. 12. 10. 채택)

## A Study on the Optimal Equipment Selection of Series Systems using Life Cycle Cost and Failure Cost

Sang-Hwa Jin · Yong-Ha Kim\* · Hee-Oeul Song\* · Yeong-Koo Yeo\*\* · In-Won Kim†  
Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Korea  
\*School of Chemical Engineering, Seoul National University, Korea  
\*\*Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Korea  
(Received May 27, 2003 / Accepted December 10, 2004)

**Abstract** : In this study, the required life cycle cost is evaluated in consideration of the equipment's availability during its life cycle. In order to meet the maximum availability required by the process, the failure cost and life cycle cost is assessed. The optimal equipment selection method is presented according to the analysis of the failure cost and life cycle cost. For the systems in which equipments are connected serially, the optimal equipments are selected by minimizing the life cycle cost and satisfying the required system availability goal. In addition, the selection methods and life cycle cost are analyzed according to the cost variation of the equipment.

By using the life cycle evaluation procedure, the failure cost and maintenance cost needed during the life cycle of the equipment can be presented.

**Key Words** : life cycle cost, failure cost

### 1. 서론

석유화학 또는 가스 산업은 생산수단으로 각종 대규모 장치를 설치함으로써 생산이 가능한 산업이다. 이러한 석유화학 공장의 설계는 원료물질로부터 원하는 생산물로의 전환을 위한 일련의 공정 과정의 선택과 그것들의 상호 연관을 공정도에 반영하는 것으로부터 출발한다. 또한 화학공정의 설계는 공장주변에 대한 환경적 영향, 공정에서 사고가 발생하였을 경우에 대한 안전성 확보, 공장 생산품에 대한 경제성 등을 고려하여 화학공장을 건설한다<sup>1)</sup>.

일반적으로 화학공장을 설립할 때 책정된 예산에 따라서 장치의 구입 및 조립, 시운전 비용, 유지·

보수비용 등이 고려되어진다. 구입가격과 시운전 비용만을 고려하여 장치를 구입할 경우에는 장치가 가지는 수명(life cycle)동안 공정에서 고장이나 사고가 발생하였을 경우에 필요한 failure cost를 고려하지 않고 일반적인 유지 보수비용(maintenance cost)을 고려하여 선택한다. 이렇게 설계 용량에 맞게 설정된 장치를 선택할 경우 생산 용량의 증가에 따른 장치를 교체 할 경우 재평가가 필요하다. 또한 공정에서 사고가 발생하였을 경우 failure cost가 필요 이상으로 많이 드는 경우가 발생할 수 있다<sup>2,3)</sup>.

이러한 문제점을 분석하기 위하여 장치의 이용가능도(availability)와 구입가격의 변화에 따라서 life cycle cost를 분석하였다. 구입에서 폐기하기까지의 비용인 구입, 설치, 시운전, 교육, 유지·보수비용과 시스템 또는 생산과정 중에서 사고로 인하여 발생할 수 있는 failure cost 등의 비용을 순현재가치(net

†To whom correspondence should be addressed.  
inwon@konkuk.ac.kr

present value)로 평가한 금액이 life cycle cost이다. 일반적으로 장치는 이용가능도(availability)가 좋을 수록 고가의 구입가격을 갖는다<sup>4,6)</sup>.

Life cycle cost를 분석함으로써 본 연구에서는 장치의 구입가격에 따른 failure cost와 유지·보수비용이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 또한 구입가격을 고려하여 장치를 선택할 경우에 발생할 수 있는 문제점을 제시하였으며, 연속 시스템(series systems)에 대하여 failure cost와 유지·보수비용을 고려하여 최적의 이용가능도를 유지하기 위한 장치선택 및 life cycle cost를 평가하였다.

## II. 이론적 배경

Life cycle cost는 장치의 구입가격, 고장이 발생하였을 경우 필요한 failure cost에 의한 유지·보수비용뿐만 아니라 장치의 수명동안 필요한 모든 비용을 고려한 금액이다. 구매가격과 failure cost에 따른 유지·보수비용의 변화를 분석하여 장치의 이용가능도의 증가 또는 감소에 따라 life cycle cost의 변화효과를 제시하였다. Failure cost의 변화에 따라서 life cycle cost를 분석하여 장치선택에 관한 연구의 최종목표는 모든 가격을 비교·분석하여 시스템의 최적화 분석을 수행하는 것이다.

Life cycle cost는 구입가격( $C_{Procurement}$ )과 운전비용( $C_{Operating}$ )의 합으로 계산할 수 있다. 구입가격으로는 장치의 설계에 필요한 비용( $C_{Design}$ ), 구매가격( $C_{Purchase}$ ), 설치비용( $C_{Installation}$ ) 그리고 시운전할 때 필요한 비용( $C_{Start-up}$ )의 합으로 계산된다. 구매가격은 이용가능도( $A_i$ )의 함수로 표현할 수 있으며, 이용가능도의 변화에 따라 가격은 지수함수로 표현할 수 있다.

$$LCC = C_{Procurement} + C_{Operating} \quad (1)$$

$$C_{Purchase} = f(A_i) \quad (2)$$

$$C_{Procurement} = C_{Design} + C_{Purchase} + C_{Installation} + C_{Start-up} \quad (3)$$

또한 운전비용( $C_{Operating}$ )은 기능을 향상시키기 위해 필요한 비용( $C_{Engineering\ Changes}$ ), 고정적으로 드는 비용( $C_{Fixed-Maintenance}$ ), 소비성으로 사용되는 비용( $C_{Consumption}$ ) 그리고 장치 및 설비에서 고장이 발생하였을 경우 필요한 비용( $C_{Failure}$ )의 합에 장치의 수명의 곱으로 표현할 수 있다.

$$C_{Operating} = (C_{Engineering\ Changes} + C_{Fixed-Maintenance} + C_{Consumption} + C_{Failure}) \times \text{life time} \quad (4)$$

그리고 장치 및 설비에서 고장이 발생하였을 경우 필요한 비용( $C_{Failure}$ )은 시간에 따른 time-based failure cost와 사건에 의한 event-based failure cost 두 가지 경우로 계산할 수 있다. Time-based failure cost는 시간당 수리비용( $C_{Repair}$ )과 시간당 생산 손실비용( $C_{Lost\ Production}$ )에 이용불능도(unavailability)와 운전시간의 곱으로 표현할 수 있다. event-based failure cost는 사고가 발생하였을 경우 필요한 비용( $C_{Event}$ )과 일년 동안 사건이 발생할 확률( $U_E$ )의 곱으로 표현할 수 있다.

$$C_{Failure} = C_{Failure, Time} + C_{Failure, Event} \quad (5)$$

$$C_{Failure, Time} = [ \sum_j (C_{Repair, j} + C_{Lost\ Production, j}) \times U_j ] \times \text{operating hours} \quad (6)$$

$$C_{Failure, Event} = C_E \times U_E \quad (7)$$

순현재가치(net present value)를 고려한 전체 운전비용(total operating cost)은 다음과 같다<sup>7)</sup>.

$$C_{Total\ Operating} = \sum_{j=1}^{Life\ Time} \frac{(C_{Engineering\ Changes} + C_{Fixed-Maintenance} + C_{Consumption} + C_{Failure})}{(1 + interest)^j} \quad (8)$$

공정에 적합한 장치를 선택하는 방법은 전체 시스템이 요구하는 이용가능도(system availability goal)를 만족하면서 life cycle cost를 최소로 하는 장치들을 선택하는 것이다. 시스템 이용가능도 목표치는 공정에 따라 system integrity level로 결정할 수 있다<sup>7,8)</sup>. 각각의 장치들의 가격은 식 (1)~(8)과 같이 이용가능도의 함수로 표현된다. 이와 같이 life cycle cost를 최소로 하는 가장 적합한 장치들을 구하는 문제는 아래와 같이 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize Cost} &= \sum_{i=1}^n LCC_i(A_i) \\ \text{Subject to } &A_{i, \min} < A_i < A_{i, \max} \\ &A_S \geq A_G \end{aligned} \quad (9)$$

Table 1. The Procurement cost of components.

Item	Procurement Cost				Remarks
	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	
Design Cost	52hr @\$75/hr	65hr @\$75/hr	45hr @\$75/hr	75hr@\$75/hr	engineering time
	22hr @\$45/hr	40hr @\$45/hr	18hr @\$45/hr	60hr@\$45/hr	drawing/documentation time
	16hr @\$75/hr	35hr @\$75/hr	10hr @\$75/hr	50hr @\$75/hr	safety review
Purchase Cost	\$120,000	\$200,000	\$80,000	\$400,000	
Installation Cost	\$300	\$300	\$300	\$300	truck rental
	32hr @\$75/hr	32hr @\$100/hr	32hr @\$100/hr	32hr @\$100/hr	
Start-up Cost	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	training course fee
	80hr @\$75/hr	80hr @\$75/hr	80hr @\$75/hr	80hr @\$75/hr	training time
	10hr @\$75/hr	10hr @\$75/hr	10hr @\$75/hr	10hr @\$75/hr	equipment assembly

여기서,  $Cost$  : total life cycle cost

$LCC_i$  : cost of component/subsystem  $i$

$n$  : number of components within the system

$A_i$  : availability of component  $i$

$A_{i,min}$  : minimum achievable availability of component  $i$

$A_{i,max}$  : maximum achievable availability of component  $i$

$A_s$  : system availability

$A_G$  : system availability goal

제시된 life cycle cost를 이용하여 최적의 시스템을 선택하기 위하여 비선형 방정식에 대한 최적의 값을 찾기 위해 MATLAB program에서 비선형 최적화 tool인 fmincon 방법을 이용하여 최적화 문제를 해결하였다<sup>9)</sup>.

### III. 결과 및 검토

본 연구에서 제시한 life cycle cost를 최소로 하는 장치들을 선택하는 방법들을 검증하기 위해 세 개의 장치가 직렬로 연결된 연속 시스템을 선택하였다<sup>10)</sup>. 각각의 장치는 서로 다른 이용가능도와 설계 사양들을 가지고 있다고 가정하였다. Table 1은 각각의 장치에 대한 구매가격을 나열한 표이다. 각 장치마다 가격의 차이가 발생하는 이유는 장치가 가지는 이용가능도가 다르기 때문이다. 장치는 이용가능도가 클수록 장치의 신뢰도가 커지며 구입가격이 지수함수 형태로 증가한다.

첫번째 사례연구로 component 1, 2와 3이 연결된

연속시스템을 구성하였다. Component 1, 2와 3이 연결된 연속 시스템에 대한 life cycle cost를 분석한 결과를 Fig. 1에 제시하였다.

Fig. 1에서와 같이 장치가 갖는 이용가능도가 증가 할수록 구매가격은 지수함수 형태로 증가한다. 그와는 반대로 life cycle cost 및 연간 발생하는 failure cost는 이용가능도가 증가 할수록 장치의 성능이 우수하기 때문에 적은 유지보수 비용을 필요로 하므로 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

첫번째 사례와 같은 경우에서 장치는 이용가능도가 증가할수록 구매가격은 증가한다. 그러나 life cycle cost 및 failure cost는 감소하기 때문에 최소의 life cycle cost를 갖는 장치를 선택하는 것이 시스템에서 요구하는 최적의 장치를 선택할 수 있다. 이렇게 분석된 장치를 선택함으로써 공정에서 불필요한 유지보수 비용을 최소화 할 수 있다.

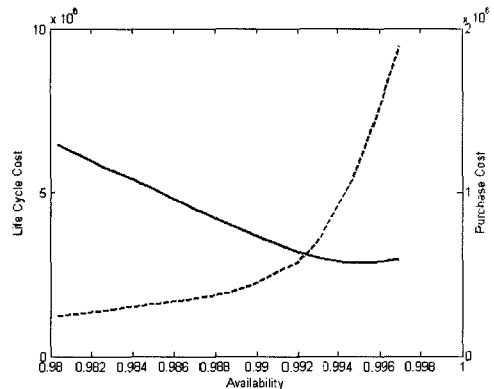


Fig. 1. Purchase cost and life cycle cost with respect to the availabilities for the first case.

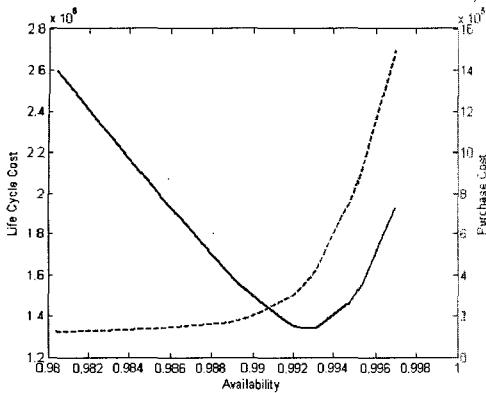


Fig. 2. Purchase cost and life cycle cost with respect to the availabilities for the second case.

두번째 사례로 적용한 component 1, 2와 4가 결합된 연속 시스템에 대하여 최적화 문제를 적용하였다. 그러나 위의 사례와 다른 점은 component 4는 component 3과는 다르게 이용가능도의 증가에 따라 구매가격이 다른 장치에 비하여 매우 크게 변화하는 장치를 선택한 경우이다. component 4는 매우 정밀한 장치로서 여겨질 수 있다. 두번째 사례에 대한 최적화 결과를 Fig. 2에 제시하였다.

이 경우에도 첫번째 사례와 같이 장치의 구매가격은 이용가능도가 증가할수록 점차적으로 증가한다. 그러나 시스템에서 필요로 하는 life cycle cost는 이용가능도가 증가할수록 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 component 4 장치의 구매가격이 다른 두 장치에 비하여 상대적으로 현저히 높고 기인한 것으로 판단된다. 아무리 장치의 이용가능도가 높아도 공정에서 유지 보수비용을 필요로 하지 않는 장치는 없기 때문에 이러한 현상이 발생한다.

따라서 시스템에서 필요로 하는 최적의 life cycle cost를 만족시키는 장치의 선택은 이용가능도가 높은 장치가 아니라 최소의 life cycle cost를 갖는 장치와 구매가격을 고려하여 선택하는 것이다.

Fig. 3은 각 장치가 갖는 이용가능도와 수명동안 필요로 하는 life cycle cost로 최적화 분석을 수행한 결과이다. 왼쪽의 dash-dot 수직선은 시스템에서 필요한 최소의 이용가능도를 나타내는 선이며, 중앙의 dot 수직선은 시스템에 필요한 availability goal line이다. 오른쪽의 dash-line은 선택할 수 있는 최대의 이용가능도를 나타내는 라인이다. Fig. 3에서 life cycle cost가 감소하다가 일정기간이 지난 후 life cycle cost가 증가하는 이유는 장치의 가격이 지수함

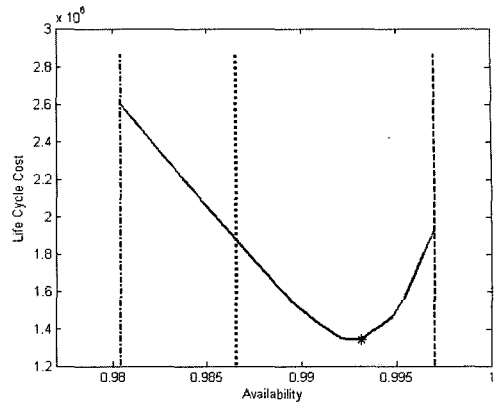


Fig. 3. Optimal life cycle cost.

수의 형식으로 증가하기 때문이다. 결과적으로 사용되는 시스템에서 요구하는 시스템 이용가능도인 중앙의 dot 수직선과 장치가 가질 수 있는 최대 이용가능도인 오른쪽의 dash line 사이에서 선택이 된다. 최적의 life cycle cost는 asterisk로 표현하였다.

Fig. 4는 최적의 life cycle cost를 찾아내는 과정을 표현한 그림이다. 최소이용가능도 0.9804에서 최대 이용가능도 0.9970 구간에서 최적의 이용가능도를 찾아내는 과정을 표현한 그림이다. 곡선라인이 이용가능도의 증가에 따라 최적의 life cycle cost의 변화 과정을 표현하는 선이며, 직선은 시스템의 availability의 해를 나타낸다. 전자인 life cycle cost의 변화 과정 곡선과 후자인 시스템의 이용가능도의 해를 나타내는 직선과의 교차점이 시스템에서 필요로 하는 최적의 이용가능도를 나타낸다. 이 그림은 두개 장치의 이용가능도가 변화할 때 life cycle cost가 어떻게 변화하는지를 나타내는 contour graphe이다. Fig. 4에서 life cycle cost가 최적값에 도달하는 점을 asterisk로 표현하였다.

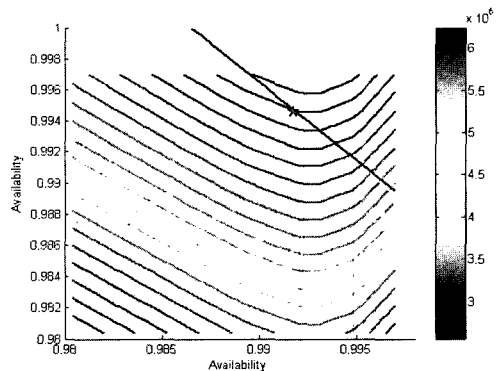


Fig. 4. Contour graph.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 장치가 가지고 있는 이용가능도를 기본으로 각각의 장치가 갖는 비용관계를 지수 함수형식으로 표현하였다. 제시된 장치에 대한 비용함수에서 장치의 수명동안 필요한 연속 시리즈 시스템 모델을 대상으로 life cycle cost를 분석하였으며, 시스템에서 필요로 하는 최적의 이용가능도를 갖는 장치 선택방법 및 최적의 life cycle cost를 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 세 개의 장치가 직렬로 연결된 시스템에 대하여 failure cost 및 life cycle cost를 분석하였다. 분석된 failure cost와 life cycle cost를 기본으로 하여 최적화 분석을 수행하여 공정에서 필요한 최적의 장치선택 방법을 제시하였다. 본 연구에서 life cycle cost 분석과 최적화 분석을 수행하여 선택된 장치를 이용하여 공장을 설립할 경우 불필요한 유지보수 비용을 절감 할 수 있으며, 공장에서 생산용량의 증가로 발생할 수 있는 장치의 교체비용 및 failure cost를 최소화할 수 있다.

**감사의 글 :** 본 연구는 한국과학재단 과제번호 R01-2001-00409-0의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 이문용, 정재학, "화학공정설계", 도서출판 아진, 1999.
- 2) 류병태, 서재민, 유진환, 김정원, 박경태, 최운혁, 김선재, 함정훈, 엄성인, 백중배, 고재욱, "화학설비의 비용·편익 분석 개발에 관한 연구", Theories and Applications of Chem. Eng., 7, 3223~3226, 2001.
- 3) Stewart, M. G., "Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses", Reliability Engineering and System Safety, 74, 263~273, 2001.
- 4) Woodward, D. G., "Life cycle costing-theory, information acquisition and application", International Journal of Project Management, 15, 335~344, 1997.
- 5) Hennecke, F. W., "Life cycle costs of pumps in chemical industry", Chemical Engineering and Processing, 38, 511~516, 1999.
- 6) Durairaj, S.K., Ong, S.K., Nee, A.Y.C. and Tan, R.B.H., "Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies", Corporate Environmental Strategy, 9, 2002.
- 7) Goble, W.M., Control Systems Safety Evaluation and Reliability, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2nd ed., 1998.
- 8) Edward M. M., Eric W. S., Safety Integrity Level Selection, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2002.
- 9) Hanselman, D. and Littlefield, B., MATLAB User's Guide, Prentice Hall, 1997.
- 10) Adamantios Mettas, "Reliability Allocation and Optimization for Complex System," IEEE Transaction, 2000.