

⊗ 연구논문

제조 시스템의 최적 신뢰도 및 보전도 할당
-Allocation of the Optimal Reliability and Maintainability in
Manufacturing Systems-

이 상 철 *
Lee, Sang Cheol

Abstract

Reliability and maintainability allocation in the analysis of the system's design, with the objective of planning and installing the individual components in such a way that the system performance is achieved.

This paper has been made to solve an important task in reliability management of manufacturing systems within the general objective being to increase productivity while maintaining costs low. Thus, the purpose of this paper is to provide an analytical approach to determine an optimal reliability and maintainability allocation, trading off among system performance and parts investment costs

Two important considerations will be addressed in this regard : (i) determine the reliability and maintainability allocation of parts which maximizes a given production index, having fixed the total cost of investments ; and (ii) determine the reliability and maintainability allocation which minimizes the total cost of investments, having fixed a minimum acceptable level of productivity.

The procedure proposed in this paper is able to provide to managers and designers useful indications on the reliability and maintainability characteristics of parts in series - parallel systems.

And this heuristic model is a decision support tool for contractors who are involved in large scale design projects such as ship and aircraft design.

Numerical examples prove that an approximate expression of the average throughput rate is sufficiently accurate to be used in a numerical optimization method.

1. 서론

신뢰성 및 보전성은 시스템을 관리하기 위한 척도로 사용되고 있으며, 또한 최소 수락 가능한 시스템 성능 수준을 확정하기 위한 일련의 운영상의 필요사항이 되어 이러한 사항들은 시스템 사용 현장에서의 성능을 측정하기 위하여 명시되기도 한다.

예를 들어, 공군에서는 가용성, 신뢰도 등을 추적하고 측정하는데 이러한 척도들은 성능에

* 동명대학 공업경영과

** 본 연구는 1998년도 동명대학 학술연구조성비에 의하여 연구되었음

영향을 끼치는 모든 요인으로서 중요하며 특히 운용가용성등은 모든 고장과 실제 보전시간, 공급으로 인한 지연 및 다른 요소에 중요하게 사용되기도 한다[1].

본 연구의 목적은 제조시스템의 신뢰도 관리에 중요한 신뢰도 및 보전도 할당 문제를 비용 함수를 고려하여 최적화 시키는 분석적 절차를 제시하고자 하는 것이다.

시스템의 신뢰도를 향상시키기 위한 가장 전형적인 형태가 병렬 구조 시스템이다.

전기 및 항공 통제 시스템과 같은 시스템의 의존도(dependability) 즉 신뢰도, 가용도(availability) 그리고 시스템 유효도를 증가시키기 위하여 다음과 같이 제시되고 있다[2].

- i) 성능요구에 대응할 수 있는 한 시스템을 단순화하라. 비본질적인 구성요소와 불필요하게 복잡한 구성은 체계의 고장 확률을 증가시킨다.
- ii) 부품 신뢰도 값을 낮게 하여 체계 신뢰도를 높이기 위해서는 병렬인 용장성(redundancy)을 사용하라.
- iii) 고장이 발생하였을 때 활용하는 구성요소를 대기(standby) 용장성을 사용하라.
- iv) 고장난 구성부품이 자동으로 교환되어지지 않을 때는 수리보전절차를 사용하라.
- v) 구성 부품이 정해진 시간 구간으로 교체되거나 고장이 발생되었을 때 교체 될 때에는 예방보전을 사용하라.

본 연구는 여기에서 제시한 사항을 근거로 시스템이 여러 제약조건을 가진 경우에 병렬시스템의 신뢰도 및 보전도 할당을 통하여 제조시스템을 신뢰성관리에 초점을 맞추고 있다.

신뢰도 및 보전도 할당은 시스템 성능을 달성하기 위한 개개의 구성 부품의 설치 및 계획의 목적을 위한 시스템 설계 분석이라 할 수 있다.

신뢰도 및 보전도 할당 모형의 일반적인 정식화는 다음과 같다[3].

$$i) \max e(r_1, r_2, \dots, r_k)$$

$$\text{제약조건 } c(r_1, r_2, \dots, r_k) \leq c \quad 0 \leq r_i \leq R_i, 1 \leq i \leq k$$

여기서 r_i 는 i 번째 자원의 양을 나타내며, R_i 는 상수로 i 형태의 자원을 의미한다. 그리고 c 는 체계에 허용된 비용 상한 값이다.

$$ii) \min c(r_1, r_2, \dots, r_k)$$

$$\text{제약조건 } c(r_1, r_2, \dots, r_k) \geq E \quad 0 \leq r_i \leq R_i, 1 \leq i \leq k$$

여기서는 E 는 체계의 최소 성능 수준을 의미한다.

따라서, 시스템 성능과 부품투자 비용을 상쇄시키면서 최적 신뢰도와 보전도를 할당하는 신뢰도관리라는 특수한 관점으로 볼 때 첫째, 총투자 비용을 고정시키면서 주어진 생산지수를 최대화시키는 방법으로 부품의 신뢰도와 보전도를 할당하고 둘째, 수락 가능한 최소의 생산성 수준을 고정시키면서 총투자비용을 최소화하기 위한 방법으로 보전도 및 신뢰도를 할당하는 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 두 가지 관점을 이용하였으며, 시스템의 효율적 관리를 위한 신뢰도 및 보전도 할당법으로 직병렬체계(Series - Parallel System)인 경우에 하부체계(subsystem)의 신뢰도 및 보전도 특성치 함수로 생산지수를 평가하는 생산능력 모형과 비용함수를 사용하여 신뢰도 및 보전도의 최적화로 구성하였다. 최적 값을 구하는 방법으로는 발견적 기법을 사용하였다.

2. 신뢰도 배분

신뢰도 배분(apportionment)은 부품의 병렬 용장과는 달리 개별적인 부품 신뢰도를 배분하여 지정된 체계(system) 신뢰도 수준을 달성하는 것이며 때로는 여기에 비용, 무게, 부피 등의 제약이 가해질 수 있다[4][5].

이러한 제약조건을 가진 경우에 병렬시스템의 체계 신뢰도를 증가시키기 위한 최적화 문제를 Tillman등[6]은 다음 2가지 형태로 분류하고 있다.

- i) 비용 제약 조건하에서 체계 신뢰도 R_s 를 최대화시키기 위하여 N개의 하부체계(subsystem)로 구성된 체계에서 최적용장의 개수 X_j 를 구하는 문제
- ii) 원하는 성능수준보다 동일하거나 큰 값으로 시스템 신뢰도 R_s 를 고정시키면서 시스템 비용을 최소화하는 방법으로 최적 용장의 개수 X_j 를 구하는 문제

이러한 2가지 형태의 문제는 j번째 하부체계의 신뢰도 R_j 를 알고 있다는 가정 하에서 목적함수를 최적 화시키는 방법으로 문제를 해결하고 있다.

여기에 관련된 또 다른 문제는 신뢰도 배분 문제이다. 신뢰성 배분은 각 하부 체계에 적절한 신뢰도를 할당하여 전체 체계의 신뢰도 수준 목적을 달성하는 것이다.

일단 하부체계의 신뢰도 값이 할당되면 체계 설계자는 요구되는 전체 체계 신뢰도가 달성될 수 있도록 자재, 구성, 형태 등을 선택할 수 있다.

N개의 단계로 병렬 연결된 체계에서 j번째 단계에서의 하부체계 신뢰도 R_j , 하부체계의 수를 X_j 라 할 때 체계 신뢰도는 다음과 같이 표현된다.

$$R_s(\bar{R}, \bar{X}) = \prod_{j=1}^N [1 - (1 - R_j)^{X_j}] \dots\dots\dots (1)$$

제약 식으로

$$\sum_{j=1}^N g_{ij}(R_j, X_j) \leq b_i, \quad i=1, 2, \dots, r$$

여기서

- $R_s = R_s(R_1, R_2, \dots, X_1, X_2, \dots, X_N)$ 으로 체계 신뢰성을 의미하며
- $R_j, j = 1, 2, \dots, N$ 은 0과 1사이의 실수(real numbers)
- $X_j, j = 1, 2, \dots, N$ 은 양의 정수 값으로 표현된다.

용장의 갯수와 하부체계에 대한 신뢰도가 증가할수록 비용(cost)을 발생시키는 데 비용은 화폐단위(dollars), 무게, 부피로써 명시되며 이것들은 제약조건으로 최적화기법에서는 이러한 제약조건들의 조합으로 사용되기도 한다[7][8][9].

무게와 부피를 결합한 식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^N g_{ij}(X_j) = \sum_{j=1}^N W_j V_j(X_j)^2 = \sum_{j=1}^N P_j(X_j)^2 \leq P \dots\dots\dots (2)$$

화폐단위(dollars)의 제약이 있는 경우는

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j \left(\frac{-t}{l_n \cdot R_j} \right)^{\beta_j} (X_j + \exp(x_j/4)) \leq C \dots\dots\dots (3)$$

이 되며, 여기서 α_j 는 축적요소(scale factor), β_j 는 형상요소로 $\beta_j > 1$ j번째 단계에서의 각 하부체계의 고유(inherent)특성치를 나타낸다.

무게제약이 있는 경우의 식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^N g_{ij}(X_j) = \sum_{j=1}^N W_j X_j \exp(X_j/4) \leq W \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $W_j X_j$ 는 j번째 단계에서의 모든 하부체계에 대한 무게를 나타낸다.

Tillman등은 이와 같은 비선형 정수계획법 문제를 해결함으로써 다음과 같이 결론을 요약하고 있다.

- i) 해가 반드시 정수로 되어야 하기 때문에 일반적인 비선형계획 문제보다 풀이하기가 난해한다.
- ii) 용장이 포함된 최적화 문제를 풀이하는 기법들 중에 우월하다고 입증된 기법이 없다.
- iii) 정수계획법은 정수 해를 추출한다. 그러나 정수계획법이 적용될 수 있도록 선형 형태의 제약조건과 비선형목적함수의 변형은 어려운 작업이 된다.
- iv) 동적 계획 문제는 상태 변수(state variable)의 증가에 따라 차원(dimensionality)의 어려움을 가지며, 제약조건이 3개보다 많을 때는 문제 풀이가 까다롭다.

이와 같은 문제점으로 인하여 Aggarwal등[10]은 발견적 기법을 제시하고 있는데 기본 개념은 자원 사용 증분에 대한 생산량 증분과 신뢰도 증분과의 비로 최적값을 구하는 데 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$F_j(X_j) = \frac{\Delta(1-R_j)^{X_j}}{\prod_{i=1}^j \Delta g_i(X_i)} \dots\dots\dots (5)$$

여기서

$$\Delta(1-R_j)^{X_j} = (1-R_j)^{X_j} - (1-R_j)^{X_j+1} = R_j(1-R_j)^{X_j}$$

$$\Delta g_{ij}(X_j) = g_{ij}(X_j+1) - g_{ij}(X_j)$$

가 된다.

3. 신뢰도 특성치 함수와 비용함수

각 하부체계에 최적의 신뢰도 및 보전도를 할당하여 시스템을 효율적으로 관리하기 위해서는 하부체계의 신뢰도 및 보전도 특성치 함수로 생산지수를 평가하는 생산능력 모형과 하부체계의 보전도 및 신뢰도 비용 함수 그리고 절차의 최적화를 구성할 수 있다[11].

모형의, 정확도(accuracy)는 MTBF(Mean Time Between Failure), MTTR(Mean Time To Repair)과 같은 신뢰도 및 보전도 명세(specification)상에 요구되는 정밀도 수준을 충족시켜야 한다. 그러나, 실행 가능하게 보이는 전형적인 최적화 접근법이 없기 때문에 적절한 민감도(sensitivity) 요소에 근거한 분석적 절차가 정형화되고 있다.

최적화 절차는 최적해가 조사되어지는 허용 영역을 감소시킬 수 있기 때문에 MTBF와 MTTR에 대한 비용 함수의 형태와 생산지수 형태로 구성하는 것이 도움이 된다[12].

생산지수 형태는 생산체계의 성과(performance)척도로 나타내며 일반적으로 평균 완성율(the average throughput rate)이 사용된다[13].

m개의 작업장이 각각의 가동률 $\hat{i}_1, \hat{i}_2, \dots, \hat{i}_m$ 을 가지면서 병렬로 연결되었을 때 그들의 평균 완성율은 식(6)과 같다.

$$i_{av} = \sum_{j=1}^m \frac{MTBF(j)}{MTBF(j) + MTTR(j)} \hat{i}(j) \dots\dots\dots (6)$$

각 작업장(station)이 $\hat{i} = \hat{i}_1 + \hat{i}_2 + \dots + \hat{i}_m$ 의 가동률을 가질 때 평균 완성율 $\overline{i_{av}}$ 는 다음 (7)식을 만족한다.

$$\overline{i_{av}} = \frac{\overline{MTBF(j)}}{\overline{MTBF} + \overline{MTTR}} \hat{i} = i_{av} \dots\dots\dots (7)$$

(6)식과 (7)식은 다음(8)식을 함축하고 있다.

$$\frac{\overline{MTTR}}{\overline{MTBF}} = \frac{\hat{i}}{\sum_{j=1}^m \frac{MTBF(j)}{MTBF(j) + MTTR(j)} \hat{i}(j)} - 1 \dots\dots\dots (8)$$

(8)식을 작업장이 n개로 직렬로 연결된 경우의 식(9)에 결합함으로써 병렬인 경우의 전체 체계의 평균 완성율을 구할 수 있다.

$$i_{av} = \frac{\min \{ \hat{i}(1), \dots, \hat{i}(n) \}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{MTTR(j)}{MTBF(j)}} \dots\dots\dots (9)$$

여기서, $\hat{i}(j)$, $j=1, \dots, n$ 은 j번째 작업장(workstation)의 공칭완성율(nominal rate)을 의미한다. 외형적으로 평균 완성율은 공칭생산율상에서 병렬로 연결된 작업장의 수, 그리고 각 작업장에서의 신뢰도 및 보전도 특성치에 의존한다. 그러나, 실질적으로 작업자의 공칭생산율은 작업장이 수행하고 있는 작업공정의 종류에 의존하고 유사작업장간에는 중요한 변화가 일어나지 않는다. 따라서, 공칭생산율은 가능한 한 서로 유사하며, 공칭생산율의 합은 원하는 수준의

생산율과 거의 근접하기 때문에 체제 개선을 위해서는 작업장의 신뢰도 및 보전도, 그리고 비용함수로 최적해가 결정되어야 한다.

Lambert등은 작업장의 MTBF변화는 작업장의 수리시간에 영향을 끼치지 않고, 그 역도 성립함을 제시하고 있다[14][15].

여기서 구한 MTBF와 MTTR을 사용하여 비용함수로 나타낼 수 있다. 비용함수가 오직 MTBF에만 의존할 때를 $C_B(MTBF)$, 그리고 오직 MTTR에만 의존할 때를 $C_R(MTTR)$ 로 하면 실질적 고려사항으로 다음의 기본 조건을 만족한다.

- i) $C_B(0) = 0, \quad \lim_{MTTR \rightarrow \infty} C_R(MTTR) = 0$
- ii) $C_R(0) = \infty, \quad \lim_{MTBF \rightarrow \infty} C_B(MTBF) = \infty$
- iii) 신뢰도와 보전도 증가는 항상 비용 증가를 유발시킨다. 따라서, 비용은 MTBF에 대하여 단조 증가 함수이며 MTTR에 대해서는 단조감소 함수이다.
- iv) 신뢰도를 향상시키기 위한 비용 효과는 신뢰도 및 보전도가 증가할수록 상승한다. 따라서, MTBF와 MTTR에 관한 비용의 도함수는 역시 단조 증가 함수이다.

이러한 모든 필요조건을 만족시키는 비용 함수는 식(10)과 같다.

$$C(MTBF, MTTR) = C_{B1} \left(\frac{MTBF}{V_B} \right)^{K_B} + C_{R1} \left(\frac{MTTR}{V_R} \right)^{K_R} \dots \quad (10)$$

여기서 $K_B > 1, K_R < 0$ 이고, V_B 와 V_R 은 각각 $C_B(V_B) = C_{B1}, C_R(V_R) = C_{R1}$ 이 되는 MTBF, MTTR 값을 의미한다.

따라서, 각 작업장이 병렬로 구성된 직 병렬체계에서의 총 비용함수는 식(11)이 된다.

$$C_T(\overline{MTBF}, \overline{MTTR}) = \sum_{j=1}^m m(j) \left[C_{B1}(j) \left(\frac{MTBF(j)}{V_B(j)} \right)^{K_B(j)} + C_{R1}(j) \left(\frac{MTTR(j)}{V_R(j)} \right)^{K_R(j)} \right] \dots \dots \quad (11)$$

여기서 $\overline{MTBF} = \{MTBF(1), \dots, MTBF(n)\}$

$\overline{MTTR} = \{MTTR(1), \dots, MTTR(n)\}$

을 나타낸다.

이와 같이 생성한 비용함수를 이용하여 생산지수 형태로 나타낸 최적화 모형 식은 식(12)과 같다.

$$Max T_{AV}(\overline{MTBF}, \overline{MTTR}) \dots \dots \dots \quad (12)$$

제약식 $C_T(\overline{MTBF}, \overline{MTTR}) \leq C \max$

$MTBF(j) > 0, \quad j = 1, \dots, n$

$MTTR(j) > 0, \quad j = 1, \dots, n$

여기서 T_{AV} 는 평균완성율을 의미한다.

만약 생산체계가 m개의 작업장으로 구성된 단일 병렬 체계인 경우에는 식(11)과 식(12)를 이용하여 분석적 방법으로 구할 수 있으나 보다, 복잡한 직병렬체계에서는 수리적 복잡성으로 인하여 경사기법(gradient technique)등의 분석적 방법은 타당하지가 못하다.

따라서, 발견적 방법의 적용이 보다 실용적임을 알 수 있다. 본 연구에서는 GPSS를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 연구에서는 신뢰도 및 보전도 특성치로 MTBF, MTTR을 사용하여 생산지수로 평가하였으며 비용함수를 구하여 절차의 최적화를 형성하였다. 이에 대한 수리 예는 GPSS를 이용하여 시뮬레이션으로 해결하였다.

본 예제에서는 전형적인 병렬 작업장으로 4개의 단계(stage) 즉 $m(j)$, $j = 1, \dots, 4$ 로 구성된 직병렬(series - parallel) 체계에 대하여 다룬다.

수리예의 체계 구성은 그림 1과 같다.

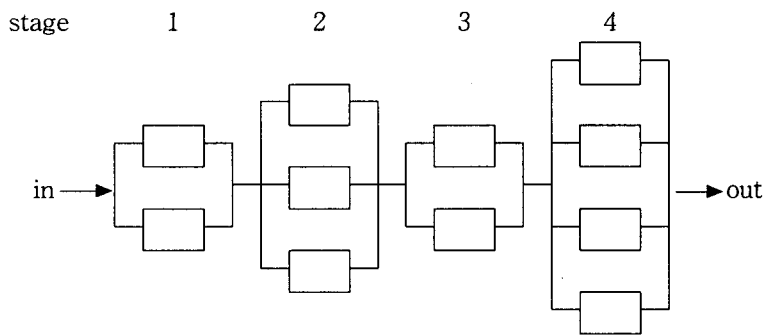


Figure 1. Block diagram of the manufacturing system in the numerical example

복잡한 직병렬체계에서는 라그란지 승수법, 경사기법(gradient technique)등의 적용이 타당하지 못하므로 시뮬레이션을 사용하여 최적해를 구하였다.

수리예에 대한 자료는 표 1과 같다.

Table 1. Data of numerical example

단 계	작 업 장 수	A		B		C		D		E		F	
		MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR
1	2	200	0.5	700	0.5	400	2.0	300	3.0	500	10.0	1,000	3.0
2	3	100	3.0	400	0.3	100	1.0	400	0.5	300	0.1	500	2.0
3	2	500	10.0	800	2.0	500	0.5	300	1.0	1,000	0.2	200	5.0
4	4	300	1.0	300	0.5	100	1.0	500	1.0	100	5.0	400	0.5

표 1에서 제시한 신뢰도 및 보전도 특성치 값인 MTBF와 MTTR은 앞에서 제시한 최적해 절차에 의해 구한 값으로 이를 시뮬레이션을 위한 초기해로 사용하였다.

그리고, 시뮬레이션을 위하여 다음의 가정을 설정하였다.

- i) 원자재의 부족, 완제품 정체로 인한 생산 중단은 없다.
- ii) 작업장에서의 고장은 확률적으로 그리고 오직 작업 중에만 발생된다.
- iii) 작업장은 수리가 가능하며 원래의 상태로 복구된다.
- iv) 수리행위에 대한 학습 현상은 없다.
- v) 작업장에서의 고장시간과 수리시간은 서로 확률적으로 독립이다.

시뮬레이션을 위하여 각 단계에서의 공칭 생산율은 각각 10, 7, 11, 5(items/min)로 두고 작업시간은 일정하다고 가정하였다. 또한, 작업장간 이동시간은 무시하였다.

표 2는 앞에서 제시한 자료로 시뮬레이션한 실행 결과를 나타내고 있다.

Table 2. Optimal solution of the numerical example

단 계	A		B		C		D		E		F	
	정상	고장	정상	고장	정상	고장	정상	고장	정상	고장	정상	고장
1	3,533	24	3,492	98	3,556	54	3,518	60	3,452	102	3,462	95
2	3,425	131	3,551	37	3,562	43	3,530	42	3,529	27	3,498	58
3	3,431	125	3,519	66	3,564	41	3,535	35	3,471	85	3,444	112
4	3,500	54	3,516	67	3,530	65	3,516	49	3,340	214	3,509	45
총생산량	13,889	334	14,078	268	14,212	203	14,099	186	13,792	428	13,913	310

표 2에서 총 생산량으로 비교하면 Case C인 경우 14,212로 최적임을 알 수 있다.

그리고, Case A, Case B, Case C의 MTTR 값으로 비교하면 MTTR 값이 적을수록 총생산량이 증가함을 알 수 있는데, 이것은 앞에서 제시한 보전도가 증가할수록 신뢰도가 증가한다는 사실과 일치하고 있다.

그리고, Case D와 Case E의 경우는 각 단계의 MTBF값이 유사 할 때 생산율이 큼을 보여주고 있다.

그리고, 투입 가능한 최대 비용을 30,000으로 두고 식(12)의 최적화 모형 식을 사용하여 시뮬레이션한 결과 최소비용이 21,000일 때 최적해로 총 생산량은 14,402로 나왔다.

이 때의 MTBF와 MTTR값은 각각 $MTBF(1) = 420$, $MTTR(1) = 2.0$, $MTBF(2) = 100$, $MTTR(2) = 1.2$, $MTBF(3) = 510$, $MTTR(3) = 0.6$, $MTBF(4) = 110$, $MTTR(4) = 1.0$ 으로 이는 총 생산량이 최대인 Case C인 경우의 MTBF와 MTTR 값과 근접됨을 보이고 있다.

이것은 최적의 MTBF와 MTTR은 생산지수로 평가할 때와 비용으로 평가할 때가 거의 같은 값으로 나타나야 한다는 예상과 일치함으로 제시된 방법의 타당성을 보여주는 것이라 할 수 있다.

5. 결론

제조 시스템의 신뢰성 관리에 있는 중요한 문제는 시스템 설계 단계에서의 신뢰도 및 보전도 값의 결정이라고 할 수 있다.

본 연구는 신뢰도 및 보전도 할당 척도를 제시하고 제 비용을 유지하면서 생산성을 증가시키기 위하여 최소 수락 가능한 시스템 성능 수준을 확정하기 위한 것이다. 제시한 방법은 설계 최적화라는 일반적 내용에서 직병렬로 연결된 체계의 신뢰도 및 보전도 특성치에 대한 유용한 지표를 경영자 및 설계자에게 제시할 수 있을 것이다.

설계 최적화 문제를 본 연구는 총 투자비를 고정시키면서 주어진 생산지수를 최대화하는 경

우와 수락 가능한 최소의 생산성 수준을 고정시키면서 총 투자비용의 최소화로 MTBF와 MTTR 값을 할당하는 방법을 이용하였다.

본 연구에서의 수리 예를 생산량 최대화 및 비용 최소화를 구한 결과는 두 가지 경우 모두 MTBF와 MTTR의 할당 값이 유사함을 보이고 있다. 이것은 이러한 방법의 타당성을 보여주는 것이라 할 수 있다.

운용 가용성은 모든 고장과 실제 보전시간, 공급으로 인한 지연 및 다른 요소 등에 중요한 요인으로 작용한다. 본 연구에서 제시한 MTBF, MTTR 명세는 계약자 측에서는 사용자 지향적인 통제권을 가질 수 있도록 하는 것이며, 기업 측에서는 저 비용을 유지하면서 시스템 성과 투자 비용을 상쇄시키는 최적 신뢰도 및 보전도 값을 할당하는 척도로서 계약체결 당시에 경제적 타당성 검토도 가능하게 될 것이다.

특히, 이러한 방식은 선박, 항공 등의 대형 제품의 기술 영업 부문에서 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

그리고 명세서 상에 사용자가 필요한 신뢰도, 보전도의 변환과정 방법 개발과 PC software tool로서 사용자 지향적으로 통합하는 방법의 설계가 앞으로의 연구과제라 할 수 있다.

참고문헌

- [1] Born, F., Criscimagna. N. H. ; “ Translating User Diagnostics, Reliability, and Maintainability Needs into Specifications, ” Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium , pp. 106 - 111, 1995.
- [2] Jacobson, D. W., Arora, S. R. ; “ Simultaneous Allocation of Reliability & Redundancy Using Simplex Search, ” Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 243 - 250, 1996.
- [3] Byrd, W., Ntuen, C. A., Park, E. H. ; “ A Computer - Based Model for System Level Reliability and Maintainability Allocation, ” Computer and Industrial Engineering, 23(1-4) : 177 - 180, 1992.
- [4] 박경수, 신뢰성 개론, 영지문화사, pp. 106 - 111, 1993.
- [5] Rau, J. G. ; Optimization and Probability in Systems Engineering, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 177 - 181, 1970.
- [6] Tillman, F. A., Hwang, C. L., Kuo, W. ; “ Optimization Techniques for Systems Reliability with Redundancy - a Review, ” IEEE Transaction on Reliability, 26(3) : 148 - 155, 1977.

- [7] Sharma, J., Venkateswaran, K., V. ; “ A Direct Method for Maximizing the System Reliability, ” IEEE Transactions on Reliability, 20(4) : 256 - 259, 1971.
- [8] Tillman, F. A., Hwang, C., L., Fan, L., T., Balbale, S., A. ; “ System Reliability Subject to Multiple Nonlinear Constraints, ” IEEE Transactions on Reliability, 17(3) : 153 - 157, 1968.
- [9] Tillman, F. A., Liittschwager, J. ; “ Integer Programming Formulation of Constrained Reliability Problems, ” Management Science, 13 : 887 - 899, 1967.
- [10] Aggarwal, K., K., Gupta, J., S., Misra, K., B. ; “ A New Heuristic Criterion for Solving a Redundancy Optimization Problem, ” IEEE Transactions on Reliability, 24(1) : 86 - 87, 1975.
- [11] Calabria, R., Pulcini, G., Rapone, M. ; Optimal Reliability and Maintainability Allocation in Manufacturing Systems, ” Quality and Reliability Engineering International, 11 : 183 - 188, 1995.
- [12] Fratta, L., Montanari, U., G. ; “ Synthesis of Available Networks, ” IEEE Transactions on Reliability, 25(2) : 81 - 87, 1976.
- [13] Phillis, Y., A., D' Angelo, H., Saussy, G., C ; “ Analysis of Series - Parallel Production Networks Without Buffers, ” IEEE Transactions on Reliability, 35(2) : 179 - 184, 1986.
- [14] Lambert, B., K., Walverkar, A., G., Hirmas, J., P. ; “ Optimal Redundancy and Availability Allocation in Multistage System, ” IEEE Transactions on Reliability, 20(3) : 182 - 185, 1971.
- [15] McNichols, R., J., Messer, G., H. ; “ A Cost-Based Availability Allocation Algorithm, ” IEEE Transactions on Reliability, 20(3) : 178 - 181, 1971.