

## 초기설치비를 고려한 의존적 $k$ -out-of- $n$ : $G$ 시스템의 보전정책 결정

### A Maintenance Policy Determination of Dependent $k$ -out-of- $n$ : $G$ System with Setup Cost

조성훈\* · 안동규\*\* · 성혁제\*\*\* · 신현재\*\*\*\*

S.H. Cho · D.K. An · H.J. Sung · H.J. Shin

(1999년 1월 4일 접수, 1999년 5월 13일 채택)

#### ABSTRACT

In estimating the system reliability, most widely used method is to estimate the systems reliability from components reliability. In this case, it assumes that components failure is mutually independent, but it may not true in real systems.

In this study, the mean cost per unit time is computed as the ratio of mean life to the mean cost. The mean life is obtained by the reliability function under power rule model. The mean cost is obtained by the mathematical model based on the inspection interval. A heuristic method is proposed to determine the optimal number of redundant units and the optimal inspection interval to minimize the mean cost per unit time.

The assumptions of this study are as following : First, in the load-sharing  $k$ -out-of- $n$ : $G$  system, total loads are applied to the system and shared by the operating components. Secondly, the number of failed components affects the failure rate of surviving components as a function of the total load applied. Finally, the relation between the load and the failure rate of surviving components is set by the power rule model.

For the practical application of the above methods, numerical examples are presented.

---

\* 건국대학교 대학원 산업공학과 박사과정

\*\* 경민대학 사무자동화과

\*\*\* 순천제일대학 산업안전관리과

\*\*\*\* 인천대학교 산업공학과

## 1. 서 론

직·병렬시스템을 가정한 기존의 신뢰도 연구를 포괄하여 최근에는  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템에 관한 연구로서 Boland·Proschan은 시스템의 신뢰도를 구하였고<sup>6)</sup>, Gupta와 Sharma는 부품의 상태를 작동상태, 수리상태 그리고 설치상태의 3가지로 가정하고 부품의 고장을 수리하는 설비가 1개 있는 경우에 시스템의 가용도를 구하였으며<sup>6)</sup>, Kenyon과 Newal은 부품이 작동상태나 수리상태에 있다고 가정하여 시스템의 가용도를 유도하였다<sup>9)</sup>.

최근에는 병렬시스템에서 부품간의 고장률의 의존성을 갖는 경우, 부하분담모형을 이용하여 최적 중복부품수와 검사주기를 결정하는 연구가 수행되고 있다. 윤원영·김귀래는 부하를 분담하는 병렬구조 시스템에서 구성된 부품이 동일하지 않는 경우의 일반적인 신뢰도 함수를 유도하고, 최적설계와 운영문제로서 정기적으로 검사하는 경우를 가정하여 최적 중복부품수와 검사주기를 동시에 고려한 모형을 제안하고 단위시간당 평균비용을 최소로 하는 최적 중복부품수와 검사주기를 구하였다<sup>2)</sup>.

그러나 기존 병렬시스템의 부하분담형 시스템에 대한 연구에서는 구성부품중 한 개라도 생존하면 시스템이 작동한다고 가정하고 있으나, 현실에서는 하나 이상의 부품이 생존하는 경우에만 시스템이 작동하는 경우가 더욱 일반적이라 할 수 있다. 이에 성희제·이상용은  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템에서 고장률과 부하의 관계를 거듭제곱모형의 부하분담형으로 가정하고, 병렬시스템에 적용되었던 최적 중복부품수와 검사주기에 대한 연구를 확장하여  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템에서 부품이  $k$ 개 생존하는 경우를 대상으로 최적 설계모형에서의 신뢰도 함수를 제시하였다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 이를 이용하여  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템에서 단위시간당 평균비용을 최소화하는 최적화 방안을 제시하고, 이와 함께 초기설치비를 고려한 최적화 정책을 결정함으로써 현실적인  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템의 보전정책을 수립하고자 한다.

## 2. 부하분담형 $k$ -out-of- $n$ : $G$ 시스템의 신뢰도

의존성에 대한 기존연구는 크게 선형종속(linear dependence)모형, 마코프종속(Markov dependence)모형, 공통원인고장(common cause failure)모형 그리고 부하분담(load sharing)모형으로 나뉘어진다.

부하분담모형은 시스템이 받는 부하를 기준으로 구축된 모형이다. 시스템이 작동하는 동안, 부하는 작동중인 부품들에 분담되어 부품의 고장률이나 신뢰도 등을 변화시킨다. 이러한 시스템에는 구조물지지 부분 등이 대표적인 경우라고 할 수 있다. 이 모형하에서는 시스템이 작동하는 동안에 시스템내의 생존 부품들이 부하를 분담하므로 일부 부품들이 고장나면 작동중인 잔여 부품들에 분담되는 부하의 양이 증가되고, 이에 따라 작동하는 부품들의 고장률은 분담하는 부하의 양에 비례한다고 가정한다. 부하분담모형은 부하와 고장률간의 관계를 구체적으로 표현한 경우와 표현하지 못한 경우로 나눌 수 있으며, 부하와 고장률간의 관계를 구체적으로 표현한 경우는 가속수명이론에 입각하여 부하와 고장률의 관계를 거듭제곱모형 등으로 가정하고 표현하지 못한 경우는 부하와 선형으로 비례하여 고장률의 변화를 가정한다<sup>1)</sup>.

### 2.1 부품고장간 의존적인 $k$ -out-of- $n$ : $G$ 시스템의 신뢰도

본 연구에서 사용되는 가정과 기호는 다음과 같다.

#### 가정

- 부품고장확률은 지수분포를 따른다.
- 시스템에 가해지는 총 부하는 시간에 관계없이 언제나 동일하다.
- 시스템에 가해지는 총 부하는 작동중인 부품들에 의해 균등하게 분담된다. 즉 생존부품이 총부하를 분담함으로써 부품간의 고장에는 부하의존적인 관계가 성립한다.

#### 기호

$n$ : 총 중복부품수

$k$ : 시스템의 작동에 필요한 최소부품수

L: 시스템에 가해지는 총 부하  
 $\lambda$ : 초기 부품의 고장률  
 $\lambda_i$ : 부품에 1의 부하가 걸렸을 때 부품 고장률  
 $\alpha(i)$ : i개의 부품이 고장났을 때 나머지 작동중인 (n-i)개의 부품들이 갖게 되는 고장률  
 $\alpha(i)$ : (i-1)번째 부품 고장과 (i)번째 고장사이의 시간  $X_i$ 의 개별고장률  
 여기서  $i=1, 2, \dots, n-k+1$   
 $p_0, p_1$ : 거듭제곱모형과 관련된 모수  
 $X_i$ : (i-1)개의 부품이 고장난 후 1개 부품이 다시 고장날 때까지의 시간  
 T: k-out-of-n:G 시스템이 고장날 때까지의 시간

$$T = \sum_{i=1}^{n-k+1} X_i$$

$f_T(t)$ : 확률변수 T의 확률밀도함수  
 $R(t)$ : k-out-of-n:G 시스템 신뢰도 함수  
 k-out-of-n:G 시스템은 (n-k+1)개의 부품이 고장날 때까지 작동하므로 수명시간 T는 식(1)과 같다.

$$T = \sum_{i=1}^{n-k+1} X_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $X_i$ 는  $\alpha(i)e^{-\alpha(i)t}$ 로 (i-1)번째 고장과 j번째 고장 사이의 시간을 나타내는 확률변수이며, 모수  $\alpha(i)$ 를 갖는 지수분포를 따른다. 모수  $\alpha(i)$ 는 식(2)와 같이 정의된다.

$$\alpha(i) = (n-i+1)\lambda(i-1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

식(2)를 바탕으로 고장률 함수를 정의하면, 확률변수  $X_1, X_2, \dots, X_{n-k+1}$ 이 각각 고장률  $\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(n-k+1)$ 을 가지며 서로 독립인 지수분포를 따를 때 시스템 고장까지 걸리는 시간  $T = \sum_{i=1}^{n-k+1} X_i$ 의 고장확률밀도 함수는 식(3)과 같다.

$$f_T(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n-k+1} A_i \alpha(i) e^{-\alpha(i)t} & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $A_i = \prod_{j=1, j \neq i}^{n-k+1} \frac{\alpha(j)}{\alpha(j) - \alpha(i)}$ 이다.  
 신뢰도 정의에 의해서  $R(t)$ 는 식(4)와 같다.

$$R(t) = \Pr(T > t) = \int_t^{\infty} f(s) ds$$

$$= \int_t^{\infty} \sum_{i=1}^{n-k+1} A_i \alpha(i) e^{-\alpha(i)s} ds$$

$$= \sum_{i=1}^{n-k+1} A_i e^{-\alpha(i)t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

2.2 부하분담모형 k-out-of-n:G 시스템의 신뢰도

거듭제곱모형에서 부품의 고장률은 부하가 증가할수록 부하의 거듭제곱에 비례하여 증가하므로 이 모형을 수식으로 표현하면 식(5)와 같다.

$$\lambda_i = p_0 l^{p_1}, \quad p_0 \geq 0, \quad p_1 \geq 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

식(5)를 이용하여 거듭제곱형태를 따르는 부하분담모형에서 부품 i개가 고장났을 때 잔여부품의 고장률은 식(6)과 같다.

$$\lambda_i = p_0 \left( \frac{L}{n-i} \right)^{p_1} \quad i=0, 1, \dots, n-k \quad \dots\dots\dots (6)$$

식(6)을 이용하여, 부품고장간격  $X_i$ 의 고장률을 유도하면 식(7)과 같다.

$$\alpha(i) = (n-i+1)\lambda(i-1)$$

$$= p_0 (n-i+1) \left( \frac{L}{n-i+1} \right)^{p_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$i=1, 2, \dots, n-k+1$

여기서  $A_i$ 는 식(8)과 같다.

$$A_i = \prod_{j=1, j \neq i}^{n-k+1} \frac{\alpha(j)}{\alpha(j) - \alpha(i)}$$

$$= \prod_{j=1, j \neq i}^{n-k+1} \frac{(n-i+1)^{p_1-1}}{(n-i+1)^{p_1-1} - (n-j+1)^{p_1-1}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

따라서 식(3), (7), (8)로부터 신뢰도 함수는 식(9)와 같다.

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n-k+1} A_i e^{-\alpha(i)t}$$

$$= \sum_{i=1}^{n-k+1} \left\{ \prod_{j=1, j \neq i}^{n-k+1} \frac{1}{1 - \left( \frac{n-j+1}{n-i+1} \right)^{p_1-1}} \right\}$$

$$\times \exp \left( -p_0 (n-i+1) \left( \frac{L}{n-i+1} \right)^{p_1} t \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

3. 보전정책 결정을 위한 최적화모형

본 장에서는 초기설치비가 고려된 경우에 단

위시간당 평균비용을 최소화하는 최적 중복부품 수와 최적 검사주기를 동시에 구하는 최적화 방법을 설계하였다. 추가 가정 및 기호는 다음과 같다.

**추가 가정**

- 시스템의 초기설치비는 최초 1회에 한한다.
- 시스템의 고장을 제외한 시스템의 상태는 단지 검사로만 알 수 있다.
- 검사시점 T 이전에 시스템이 고장나면 전체 시스템을 교체하고 검사시점까지 시스템이 고장나지 않으면 검사하여 고장난 부품만 새부품으로 교체한다.
- 검사시간과 교체시간은 무시한다.

**추가 기호**

$S_n(n, k, T)$ : 중복부품수가 n, 최소생존부품개수 k, 검사주기가 T인 경우의 평균수명

$S_c(n, k, T)$ : 중복부품수가 n, 최소생존부품개수 k, 검사주기가 T인 경우의 평균비용

$R_x(t)$ : 고장개수가 x, 중복부품수가 n, 최소생존부품개수 k, 검사주기가 T인 경우의 시스템 신뢰도

$\alpha$ : 시스템의 안정성 지수,  $1 \leq \alpha < \infty$

$c_1$ : 부품 1개의 획득비용

$c_2$ : 시스템의 초기설치비용

$c_3$ : 검사 1회당 소요비용

x: 검사주기 T시간 동안 고장난 부품수

$p(X=x)$ : 검사시 고장난 개수가 x개일 확률

시스템의 고장시 발생하는 비용의 경우에는 필요부품비용은  $c_1 \times n$  으로서 동일하지만, 시스템의 안정성 요구수준에 따라 초기설치비용과는 다른 수준의 추가비용이 소모된다고 할 수 있다. 만일 엘리베이터와 같이 안정성이 중요시되는 시스템에서는 초기설치비용에 비하여 고장시 발생하는 교체추가비용은 사고처리비용 등을 포함하여야 하므로 초기설치비용보다는 커진다고 할 수 있다. 따라서 분석자는 연구대상이 되는 시스템의 특성에 따라 적절한 시스템 안정성 지수  $\alpha$  를 도입함으로써 초기설치비용을 기준으로 고장시 교체추가비용을 산정할 수 있으며, 이는  $c_2 \times \alpha$  로서 정의될 수 있다.

만일  $\alpha$  를 1로 고정하면 시스템 고장발생시 교체추가비용이 초기설치비시 추가비용과 동일

하다고 간주하는 것이며,  $\alpha$  가 커질수록 고장발생시 교체추가비용은 초기설치시 추가비용에 비하여  $\alpha$  만큼의 가중치를 갖는다고 할 수 있다. 따라서 시스템의 고장발생시 발생하는 비용은 필요부품비용과 교체추가비용을 더한  $(c_1n + c_2\alpha)$  로서 정의할 수 있다.

시스템 설치로 인한 초기설치비 발생 이후, 검사시점 T에서 시스템이 무고장인 경우에는 검사비용만 발생하며, 1개 고장에서 n-k개 고장(k개 생존)의 경우에는 검사비용과 부품의 교체추가비용이 발생한다. 그리고 n-k+1개 고장에서 n개 고장(시스템고장)의 경우에는 검사 이전에 시스템이 정지되므로 검사비용은 발생하지 않고 부품의 교체비용과 시스템의 고장시 발생하는 교체추가비용이 발생된다. 따라서 평균비용은 초기설치비와 함께 검사주기 동안에 무고장, 1개 고장에서 n-k개 고장, n-k+1개 고장에서 n개 고장의 경우에 발생하는 비용으로 분리하여 모형화할 수 있다. 이를 수식화하면 식 (10)과 같다.

$$S_c(n, k, T) = [c_3 R_1(T)] + [ \sum_{x=1}^{n-k} (c_1x + c_3) p(X=x) ] + [(c_1n + c_2\alpha)(1 - R_{n-k+1}(T))] \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $p(X=x)$ 는 검사시 고장난 개수가 x개 일 확률로, 이는 식(11)과 같다<sup>2)</sup>.

$$p(X=x) = p(T(x) < T \text{ and } T(x+1) > T) = \sum_{i=1}^x A_{ix} \alpha(i) \frac{e^{-\alpha(x+1)T} - e^{-\alpha(i)T}}{\alpha(i) - \alpha(x+1)} \dots\dots\dots (11)$$

여기서  $A_{ix}$ 는  $\prod_{j=1, j \neq i}^x \frac{\alpha(j)}{\alpha(j) - \alpha(i)}$  이다.

최적 검사주기를 단위시간당 평균비용(Mean Cost Rate)이 최소인 검사주기로 가정하면<sup>2)</sup>, 단위시간당 평균비용은 평균비용을 평균수명으로 나눈 것이다. 여기서 평균수명은 식(12)에 의하여 정의할 수 있다.

$$S_n(n, k, T) = \int_0^T R_{n-k+1}(t) dt = \sum_{i=1}^{n-k+1} A_i \left( \frac{1}{\alpha(i)} \right) (1 - e^{-\alpha(i)T}) \dots\dots (12)$$

식(12)에서  $\alpha(i)$ ,  $A_i$ 는 앞에서 구한 거듭제곱

모형으로 정의되며, 식(7), (8)을 대입하여 각각의 평균수명을 구한다.

식(11), (12)에서 결정되지 않은 변수  $\alpha(i)$ ,  $A_i$ ,  $\alpha(x+1)$ 는 거듭제곱모형에 따라 정의되며, 이렇게 정의된  $\alpha(i)$ ,  $A_i$ ,  $\alpha(x+1)$ 를 대입하면 평균비용이 된다. 따라서 식(10), (12)를 이용하여 단위시간당 평균비용을 수식화하면 식(13)과 같다.

$$C_n(n, k, T) = \frac{S_c(n, k, T)}{S_n(n, k, T)}$$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-k+1} A_i \left(\frac{1}{\alpha(i)}\right) (1 - e^{-\alpha(i)T})}$$

$$\times [c_3 R_1(t) + \sum_{x=1}^{n-k} (c_1 x + c_3) p(X=x) + (c_1 n + c_2 \alpha)(1 - R_{n-k+1}(T))] \dots (13)$$

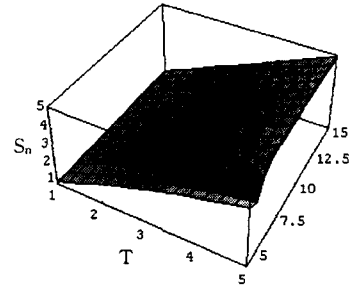
식(13)을 최소화하는 최적 중복부품수와 최적 검사주기를 구하기 위해서는 시스템의 형태에 따라 k를 결정한 후에,  $C_n(n, k, T)$ 가 최소값을 갖는 모수 n과 T의 값을 구하면 된다. 하지만 최적 중복부품수 n은 연속이 아니므로 미분이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 임의로 n의 범위를 결정하여 임시적인 값으로 n을 고정시킴으로서 비용함수  $C_n(n, k, T)$ 에 연속변수 T만을 포함하도록 하였다. 이를 통하여 비용함수를 연속함수 형태로 변환한 후 함수의 convexity를 보장할 수 없으므로 mathematica프로그램의 findMinimum명령을 이용하여 각 n에 대한 최적 검사주기 T\*를 구한다. 이와 같은 과정을 반복하여  $C_n(n, k, T)$ 의 값을 최소화하는 n\*과 T\*를 발견적해법으로 탐색한다.

#### 4. 수치 예

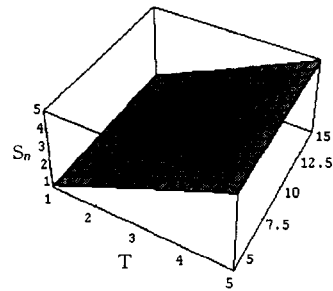
본 연구에서는  $p_0=0.1$ ,  $p_1=0.1$ ,  $L=1$ ,  $c_1=10$ ,  $c_2=50$ ,  $c_3=5$ 라고 가정하고 k를 변화시키면서, 시스템 신뢰도 변화에 따른 최적 중복부품수와 검사주기에 관한 변화를 고찰하였다. 수치 예에서는  $\alpha$ 를 4로 고정하였는데 이는 안정성이 보다 중요한 경우를 가정한 것으로서, 시스템 고장에 따른 교체추가비용이 초기화비용보다 4배의 중요성을 갖는다는 의미이다.

#### 4.1 k에 따른 평균수명의 변화

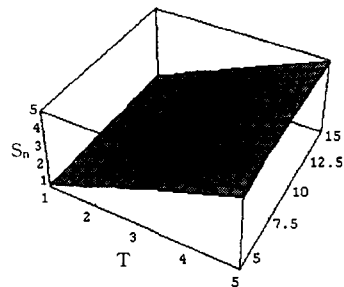
k의 변화에 따른 평균수명을 알아보기 위하여 k를 1, 2, 3으로 변화시키면서 n과 T에 대한 3차원 그래프를 그려보면 Fig. 1의 a, b, c와 같다.



(a) k=1



(b) k=2



(c) k=3

Fig. 1 Mean life in  $4 \leq n \leq 15$ ,  $1 \leq T \leq 5$

Fig. 1에서와 같이 주기 T에 따라서 평균수명이 선형적으로 증가하는데, 이는 부품이 고장나지 않더라도 주기 T에서 검사를 하면 수명은

주기 T가 되기 때문이다.

이는 k값이 커짐에 따라 중복부품수 n의 영향이 상대적으로 커진다는 것을 알 수 있으며, 또한 k값이 커짐에 따라 평균수명이 짧아진다는 것을 알 수 있다. 이는 최소생존 고장개수가 점점 커지기 때문이다. 따라서 평균수명이 짧아지므로 상대적으로 시스템의 유지비용이 높아진다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 k가 1인 경우의 최적 검사주기와 중복부품수의 결정

k가 1인 경우에 따른 총비용의 변화를 살펴보면 Fig. 2와 같다.

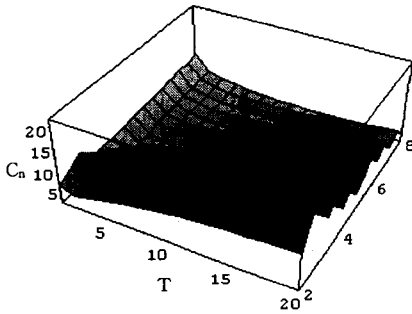


Fig. 2 Mean cost in  $k=1, 2 \leq n \leq 8, 1 \leq T \leq 20$

n을 2, 3, 4, 5, 6으로 변화한 후 T에 대한 최소값을 구하면 Table 1과 같다.

Table 1 Mean cost with redundant unit in  $k=1$

중복부품수	검사주기	평균비용
2	2.02	7.31
3	3.28	5.03
4	4.84	4.63
5	6.56	4.66
6	8.37	4.83

Table 1의 결과를 종합하면 k가 1인 경우에는 중복부품수 n을 4, 검사주기 T를 4.84로 할 때 시스템의 초기설치비를 고려한 보전비용이 4.63으로 최소화된다는 것을 알 수 있다.

#### 4.3 k가 2인 경우의 최적 검사주기와 중복부품수의 결정

Fig. 3은 k가 2인 경우 총비용의 변화를 나타낸 것이다.

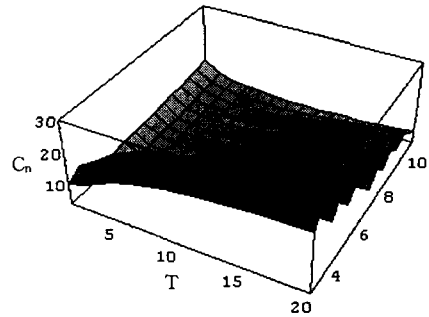


Fig. 3 Mean cost in  $k=2, 3 \leq n \leq 11, 1 \leq T \leq 20$

n을 3, 4, 5, 6, 7, 8로 변화한 후 T에 대한 최소값을 구하면 Table 2와 같다.

Table 2 Mean cost with redundant unit in  $k=2$

중복부품수	검사주기	평균비용
3	1.85	7.72
4	2.02	7.35
5	3.08	6.31
6	4.24	6.10
7	5.49	6.17
8	6.79	6.34

Table 2의 결과에 따르면, 중복부품수 n을 6으로 하고, 검사주기 T를 4.24로 하는 것이 가장 경제적인을 알 수 있다. 따라서 2-out-of-6-G 시스템이 단위시간당 평균비용을 최소로 하는 시스템이 된다.

본 연구에 의하면 초기설치비를 고려한 경우 최적중복부품수가 많아지는 것을 알 수 있는데, 이는 시스템의 중요성 지수  $\alpha$ 가 4이므로, 검사주기 이전에 시스템이 고장나서 발생하는 교체 추가비용이 재설치비용에 비하여 4배 정도 크며, 시스템의 보전비용을 최소화하기 위해서는 상대적으로 많은 수의 중복부품을 필요로 하기 때문이다.

초기설치비를 고려하지 않는 경우의 최적 검사주기와 중복부품수를 산출하여, 두 결과를 비교하면 다음의 Table 3과 같다.

Table 3 Comparison including setup cost and excluding setup cost

	최소생존 부품수	최적중복 부품수	최적 검사주기	평균 비용
초기설치비를 고려한 경우	k=1	4	4.84	4.63
	k=2	6	4.24	6.10
초기설치비를 고려하지 않은 경우	k=1	3	7.95	3.59
	k=2	5	5.48	5.22

Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 초기설치비를 고려한 경우는 초기설치비를 고려하지 않은 경우보다 경제적인 중복부품수가 상대적으로 많아지고 검사주기가 짧아짐을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 중요성 지수  $\alpha$ 가 1이상의 값을 갖는 경우 초기설치비에 비하여 고장시 발생하는 교체추가비용이 커지므로 시스템의 고장이전에 사전 예방을 취하는 것이 더욱 경제적인을 보여준다.

이를 입증하기 위하여  $\alpha$ 에 대한 주기  $T$ 의 감도분석을 실시한 결과,  $\alpha$ 가 커질수록 주기  $T$ 가 짧아지며 이는 초기화비용보다 고장시 교체추가비용이 커짐에 따라 시스템을 자주 검사하는 것이 경제적인 정책을 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템의 경우를 확장하여 초기설치비가 고려된  $k$ -out-of- $n$ : $G$  시스템에서의 최적 중복부품수와 검사주기를 구하였다. 현실적으로 중복부품수  $n$ 을 증가시킬수록 시스템의 초기 설치비용이 증가하므로 보전비용과 함께 초기 설치비를 고려하여 중복부품수를 결정하고 이에 대한 최적검사주기를 결정하는 것이 타당하다고 할 수 있다. 그리고 수치 예로서  $k$ 가 1인 경우와 2인 경우를 가정하여 최적 중복부품수  $n$ 과 최적 검사주기  $T$ 를 구하였다. 또한 본 연구에서는 단순히 고정된 초기비용을 가정하는 것이 아니라, 시스템에 따라 변동되는 시스템 고장의 중요성 지수  $\alpha$ 를 도입함으로써, 각각의 시스템 특성에 적합한 최적 보전정책 모형을 제시하였다.

수치 예에서 증명된 바와 같이, 초기설치비를

고려하는 경우에는 초기설치비를 고려하지 않은 경우보다 검사주기가 상대적으로 짧아지며, 중복부품수는 많아짐을 알 수 있다. 이는 고장으로 인하여 발생하는 교체추가비용이 초기설치비에 비하여 상대적으로 크기 때문에 고장이 발생하기 전에 미리 시스템을 검사하는 것이 경제적이라는 것을 의미한다.

본 연구에서는 동일한 역할을 하며 한가지 부하를 분담하는 시스템에 대한 경우만을 살펴 보았지만, 향후에는 이를 확장하여 전체 시스템 간의 의존성을 고려한 신뢰도 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 도형찬, "부품의 고장이 잔여 작동 부품의 고장률을 증가시키는  $K$ -out-of- $N$ : $G$  시스템의 신뢰도, 가용도 및 최적 중복 부품수", 한국과학기술원, 석사 학위논문, 1989.
- 2) 윤원영, 김귀래, "부하분담형 병렬시스템의 최적 중복부품수와 검사주기", 산업공학회지, Vol. 23, No. 4, pp. 817~824, 1997.
- 3) 성혁재, 이상용, " $K$ -out-of- $N$ : $G$  시스템의 최적화 방법", 설비관리학회, Vol. 3, No. 1, pp. 257~268, 1998.
- 4) Angus, J.E., "On Computing MTTF for a  $K$ -out-of- $N$ : $G$  Repairable System", IEEE Trans. Reliability, Vol. 37, pp. 312~313, Aug., 1998.
- 5) Bai, D.S. and Yun W.Y., "Redundancy Optimizations  $K$ -out-of- $N$  System with Common Mode Failures", IEEE Trans. Reliability, Vol. 40, No. 1, pp. 56~59, 1991.
- 6) Boland, P.J. and Proschan, F., "Linear Dependence in Consecutive  $K$ -out-of- $N$ : $F$  System", Probability in the Engineering and Information Science, Vol. 4, pp. 391~397, 1990.
- 7) Filus, J., "A Problem in Reliability Optimization", Jr. Opl. Res. Soc., Vol. 37, pp. 407~412, 1989.
- 8) Gupta, H. and Sharma, J., "A Method of

- Symbolic Steady State Availability Evaluation of  $K$ -out-of- $N:G$  System", IEEE Trans. Reliability, Vol. R-28, pp. 56~57, Apr., 1979.
- 9) Kenyon, R.L. and Newal, R.L., "Steady State Availability of  $K$  out of  $N:G$  System with Single Repair", IEEE Trans. Reliability, Vol. R-32, pp. 188~190, Jun., 1973.
- 10) Hsin-Hui Lin, Kaung-Hwa Chen, Rong-Tsormg Wang, "A Multivariate Exponential Shared-Load Model", IEEE Trans. Reliability, Vol. 42, No. 1, pp. 165~171, 1993.
- 11) Shao, J. and Lamberson, L.R., "Modeling a Shared-Load  $K$ -out-of- $N:G$  System", IEEE Trans. Reliability, Vol. 40, No. 2, pp. 205~209, 1991.
-