수리시간이 일반적인 분포를 갖는 다중디스크시스템의 신뢰성 분석

박 광 규† · 민 병 의† · 이 범 렬† · 임 성 호† · 오 길 록†††

요 약

대량의 데이터를 저장하는 시스템은 다중디스크 시스템이 필수적이다. 그러나 디스크의 갯수가 늘어나면 디스크시스템의 신뢰성이 떨어진다. 디스크시스템을 구성하는 디스크 중 하나의 디스크가 고장났을 경우에는 정상 동작하지만, 두 개이상의 디스크가 고장일 경우에는 저장된 데이타를 잃게되는 디스크시스템을 고려하였다. 또한 각 디스크의 수명은 서로 다른 매개변수를 갖는 지수분포를 따르며, 수리시간은 일반적인 확률분포를 갖는다고 가정한다. 이 가정을 바탕으로 하여 주어진 디스크시스템의 신뢰성을 MTTF(Mean Time To Failure)로서 분석하였다. 그리고 디스크시스템의 설계에 필요한 파라미터를 도출하였으며, 특별한 경우에 대하여 선형 비용 구조하에서 디스크시스템의 수명을 주어진 값보다 크게 하는 최소 비용 문제를 고찰하였다.

The MTTF Analysis of Multiple-Disk System with General Repair Time Distribution

Kwang Kyu Park† · Byungeui Min† · Beom Ryeol Lee† · Sung Ho Im†† · Gil Rok Oh†††

ABSTRACT

The reliability of the multiple-disk system is degraded as the number of disks are increased. In this paper, we find the reliability, in terms of MTTF(Mean Time To Failure) of the single-disk-failure-tolerant disk systems in which the distributions of repair times of failed disk are heterogenous and general. Also, we derive thresholds of the design parameters such as the mean of life time and repair time, and we consider the cost minimization problem in the special cases under a linear cost structure and constraints to the life of the disk system.

1. 서 론

컴퓨터의 사용 환경이 복잡화, 지능화 및 멀티미디어화 함에 따라 대량의 데이타를 처리하고, 저장하는 요구가 증대되고 있다. 또한 중앙처리장치, 메모리 장치등의 성능 향상의 속도에 비하여 입출력 장치의 성능 향상 속도가 매우 느리기 때문에 컴퓨터 시스템의 성능향상에 입출력 장치가 병목이 되고 있다.

Patterson등은 입출력 병목현상을 비용면에서 유리한 방법으로 해결한 RAID(Redundant Array of Inexpensive Disks)를 제안하였다[4]. 이것을 통하여 비용이 싼 많은 수의 디스크를 병렬로 연결하여 입출력 성능을 향상시키고, 동시에 많은 수의 디스크에 대량의 데이터를 저장할 수 있다. 이들은 디스크 수가 증

† 정 회 원:한국전자통신연구소
†† 종신회원:한국전자통신연구소
논문접수:1996년 2월 8일, 심사완료:1996년 8월 12일

가할수록 신뢰도 문제의 비중이 늘어남을 지적하였고, 각 디스크의 수명 및 각 디스크의 수리시간이 지수분포를 가지고 하나의 디스크에 고장을 고칠 수 있는 RAID 시스템의 신뢰도를 MTTF(Mean Time To Failure)로서 분석하였다. Gibson등은 RAID시스템을 이루고 있는 디스크의 고장이 독립적 및 종속적인 경우에 디스크시스템의 신뢰성을 분석하였다[2].

디스크시스템을 이루고 있는 디스크 중에서 어떤 이유에서든지 하나의 디스크에 고장이 나더라도 이 디스크시스템은 정상적으로 작동할 수 있으나 두개 이상의 디스크에 고장이 발생한 경우 전체 디스크시스템이 고장나는 모델인데 본 논문에서는 이것을 "하나의 디스크 고장을 인내하는 디스크시스템"이라고 정의한다.

본 논문의 목적는 기본적으로 Patterson등[4]의 결과중에서 신뢰성에 관련된 부분을 확장하는 것이다. Patterson등은 하나의 디스크의 수명 및 고장난 디스크의 수리시간이 지수적이라고 가정하여 디스크시스템의 신뢰성을 분석하였으나 우리는 고장난 디스크의 수리시간이 일반적인 확률분포를 가지는 것으로 확장하여 신뢰성을 분석하였다.

제 2장에서 마코프연쇄(Markov chain)의 분석에 쓰이는 방법인 보조변수방법(supplementary variable method[1]) 사용하여 디스크시스템 수명의 확률분포 및 평균 즉, MTTF를 구하고 특별한 경우에 대하여 선형비용구조하에서 최적 디스크의 수명 및 수리시간을 구하였다.

2. 모델 및 신뢰성 분석

본 논문에서 고려하는 디스크 시스템 모델은 디스크 시스템을 이루는 디스크 중에서 단 하나만의 디스크에 고장이 발생한 경우 이를 복구할 수 있으나 두개이상의 디스크에 고장이 발생한 경우 디스크시스템 전체가 저장된 데이터를 잃는 모델이다.

n개의 디스크로 구성된 디스크시스템을 대상으로 하고, 하나의 디스크 수명이 지수분포를 갖고 다른 디스크와는 확률적으로 독립이라고 하자.

그리고 디스크 시스템의 파라미터를 다음과 같이 정의 하자.

- k번째 디스크 수명의 분포는 평균이 $1/b_k$인 지수분포를 따른다($1 \le k \le n$).

- k번째 디스크가 고장났을 때 이 디스크의 수리시간은 평균이 $1/b_k$인 일반적인 확률분포 $r_k(x)$를 따른다. $r_k(x)$의 라플라스 변환을 $r_k^*(\theta) = \int_0^\infty e^{-\theta x} r_k(x)\,dx$ ($Re(\theta) = \text{real part of } \theta \ge 0$)라고 하자.

R을 디스크시스템이 고장나는데 걸리는 시간을 나타내는 확률변수라고 하자. 이때 디스크시스템이 고장나기까지 걸리는 시간 분포의 라플라스 변환 $E(e^{-\theta R})$ 및 그것의 평균 $E(R) = MTTF$는 다음의 정리로써 주어진다.

Theorem 1.

$$E(e^{-\theta R}) = \sum_{k=1}^{n} \frac{c_k}{\theta + c_k} \frac{b_k(1 - r_k^*(\theta + c_k))}{\left(\theta + \sum_{j=1}^{n} b_j(1 - r_j^*(\theta + c_j))\right)}, \tag{1a}$$

$$MTTF = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} b_k(1 - r_k^*(c_k))} \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{b_k(1 - r_k^*(c_k))}{c_k} + 1 \right). \tag{1b}$$

단, 여기에서 $c_k = \sum_{j=1, j \ne k}^{n} b_j, \; k = 1, \ldots, n.$

증명.

먼저 다음과 같은 확률을 정의하자.

$$P_n(t) = P(\textit{All of n disks are operating normally at time t}), \tag{2a}$$

$$P_{n-1}^k(t, x)\,dx = P(\textit{k-th disk is failed at time t } \text{and } \textit{remaining repair time of the disk is x}).\quad 1 \le k \le n \tag{2b}$$

라고 정의하자. $P_n(0) = 1$, $P_{n-1}^k(0) = 0$, (단, $1 \le k \le n$)이라고 가정하자. 즉, 시각 0에는 모든 디스크가 정상적으로 작동하고 있다고 가정한다. 확률 과정론에서 자주 쓰이는 보조변수방법[1]을 사용하면 식(2a) 및 식(2b)가 만족해야 하는 식은 다음과 같다.

$$P'_n(t) = -\left(\sum_{j=1}^{n} b_j\right) P_n(t) + \sum_{j=1}^{n} P_{n-1}^j(t, 0), \tag{3a}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x}\right)P_{n-1}^{k}(t,x)=-\left(\sum_{j=1, j\neq k}^{n} b_j\right)P_{n-1}^{k}(t,x)+b_k r_k(x)P_n(t) \tag{3b}$$

이다. 위의 식을 풀기위하여 다음과 같은 라플라스 변환을 정의하자.

$$P_n^*(\theta_1)=\int_0^\infty e^{-\theta_1 t}P_n(t)dt, \tag{4a}$$

$$P_{n-1}^{k*}(\theta_1, 0)=\int_0^\infty e^{-\theta_1 t}P_{n-1}^{k}(t,0)dt, \tag{4b}$$

$$P_{n-1}^{k*}(\theta_1, \theta_2)=\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\theta_1 t-\theta_2 x}P_{n-1}^{k}(t,x)dtdx. \tag{4c}$$

단, 위의 정의식에서 $Re(\theta_1)$과 $Re(\theta_2)$는 음이 아니고, k는 1에서 n까지의 정수이다. 식(3a) 및 식(3b)에 t와 x에 관하여 라플라스 변환을 취하면,

$$-1+\theta P_n^*(\theta_1)=-\left(\sum_{j=1}^{n} b_j\right)P_n^*(\theta_1)+\sum_{j=1}^{k}P_{n-1}^{j*}(\theta_1, 0), \tag{5a}$$

$$\left(\theta_1-\theta_2+\left(\sum_{j=1, j\neq k} b_j\right)\right)P_{n-1}^{k*}(\theta_1,\theta_2)=-P_{n-1}^{k*}(\theta_1,0)+b_k r_k^*(\theta_2)P_n^*(\theta_1) \tag{5b}$$

를 얻는다. 단 여기서 $1\le k\le n$이다. 이제 식(5a) 및 식(5b)에서

$$P_{n-1}^{k*}(\theta_1,\theta_2)=\frac{b_k(r_k^*(\theta_2)-r_k^*(\theta_1+c_j))}{(\theta_1-\theta_2+c_k)\left(\theta_1+\sum_{j=1}^{n}b_j(1-r_j^*(\theta_1+c_j))\right)} \tag{6}$$

을 쉽게 얻을 수 있다. 단, $c_k=\sum_{j=1, j\neq k}^{n} b_j$이다. 지금 n개의 디스크 중에서 하나가 고장나서 그 고장난 디스크가 수리중이라고 할때, 이 디스크 시스템이 고장나기 위하여는 그 고장난 디스크의 수리가 완성되기 이전에 다른 디스크가 고장이 나야한다. 따라서 디스크 시스템이 고장나는 데 걸리는 시간을 나타내는 확률변수를 R이라고 할 때 R의 라플라스 변환 $R^*(\theta)=E(e^{-\theta R})$는 다음과 같이 주어진다.

$$R^*(\theta)=\sum_{k=1}^{n}c_k P_{n-1}^{k*}(\theta,\theta_2)|_{\theta_2=0}$$

$$=\sum_{k=1}^{n}c_k\frac{b_k(1-r_k^*(\theta+c_k))}{(\theta+c_k)\left(\theta+\sum_{j=1}^{n}b_j(1-r_j^*(\theta+c_j))\right)} \tag{7}$$

따라서 n개의 디스크가 있는 디스크 시스템의 $MTTF$는 다음과 같이 주어지고,

$$MTTF=-\frac{d}{d\theta}R^*(\theta)|_{\theta=0}$$

$$=\frac{1}{\sum_{k=1}^{n}b_k(1-r_k^*(c_k))}\left(\sum_{k=1}^{n}\frac{b_k(1-r_k^*(c_k))}{c_k}+1\right) \tag{8}$$

이것이 바로 우리가 증명하고자 하는 것이다. (증명끝)

Remark 2. 식(8)로부터 함수 $r(x)$가 변할 때 최대의 $MTTF$는 어떤 k에 대하여 $r_k(\theta)=1$ 일 때, 즉 다시 말하여 어떤 디스크의 수리시간이 0일 경우이다. 그러나 이러한 경우는 불가능하므로 이 경우에 대한 것은 앞으로는 배제할 것이다.

3. 고 찰

이제 Theorem 1의 특별한 경우 및 그 의미를 고찰한다.

Corollary 3. (각 디스크의 고장률이 일정한 경우)

각 디스크의 고장률 b_k가 b로서 일정한 경우에는 위의 $MTTF$는 다음과 같이 된다.

$$E(e^{-\theta R})=\frac{(n-1)b}{\theta+(n-1)b}\;\frac{b\sum_{k=1}^{n}(1-r_k^*(\theta+(n-1)b))}{\theta+b\sum_{j=1}^{n}(1-r_j^*(\theta+(n-1)b))}, \tag{9a}$$

$$MTTF=\frac{1}{(n-1)b}+\frac{1}{b\sum_{k=1}^{n}(1-r_k^*((n-1)b))}. \tag{9b}$$

Corollary 4. (각 디스크의 수리시간의 분포가 동일할 경우)

각 디스크의 수리시간의 분포가 일정할 경우에는, 즉 모든 k에 관하여 $r_k(x)$가 어떤 확률밀도함수 $r(x)$와 같을 경우는 $MTTF$는 다음과 같이 주어진다.

$$E(e^{-\theta R})=\sum_{k=1}^{n}\frac{c_k}{(\theta+c_k)}\frac{b_k(1-r_k^*(\theta+c_k))}{\left(\theta+\sum_{j=1}^{n}b_j(1-r_j^*(\theta+c_j))\right)}, \quad (10a)$$

$$MTTF=\frac{1}{\sum_{k=1}^{n}b_k(1-r_k^*(c_k))}\left(\sum_{k=1}^{n}\frac{b_k(1-r_k^*(c_k))}{c_k}+1\right). \quad (10b)$$

Corollary 5. (수리시간의 분포 및 고장률이 일정한 경우)

$$E(e^{-\theta R})=\frac{(n-1)b}{\theta+(n-1)b}\frac{b}{\theta+nb(1-r^*(\theta+(n-1)b))}, \quad (11a)$$

$$MTTF=\frac{1}{(n-1)b}+\frac{1}{nb(1-r^*((n-1)b))}. \quad (11b)$$

Corollary 6.

수리시간의 확률 분포가 파라미터가 $(0, 2r)$인 균등 분포(Uniform distribution) 및 파라미터가 $\frac{1}{nr}$인 감마분포(Gamma distribution)인 경우 각각의 $MTTF$는 다음과 같다.

$$MTTF_{uniform}=\frac{1}{(n-1)b}+\frac{1}{nb\left(1-\frac{1-e^{-2(n-1)br}}{2(n-1)br}\right)}, \quad (12a)$$

$$MTTF_{gamma}=\frac{1}{(n-1)b}+\frac{1}{nb\left(1-\left(\frac{1}{1+n(n-1)rb}\right)^n\right)}. \quad (12b)$$

Corollary 7. (수리시간의 분포가 지수적이고 각 디스크의 고장률이 일정한 경우)

수리시간의 확률분포가 매개변수가 r인 지수분포를 따르고 각 디스크의 고장률이 b로서 일정한 경우는 (11b)에 $r_k^*(\theta)=\frac{r}{\theta+r}$ 과 $c_k=(n-1)b$를 대입하여 간단히 하면 $MTTF$는 다음과 같이 된다.

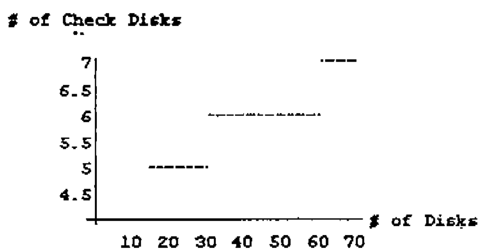
$$MTTF=\frac{r+(2n-1)b}{n(n-1)b^2}=\frac{\beta((2n-1)\gamma+\beta)}{n(n-1)\gamma} \quad (13)$$

단, 여기서 $\beta=1/b$, $\gamma=1/r$이다.

n개의 디스크로 주어진 디스크시스템에 데이타를 저장할 때 오류교정부호(Error Correcting Code)를 사용하여 저장한다면 C를 패리티를 저장하는 디스크라고 할 때 n과 C는 다음 부등식을 만족한다[2].

$$C \geq \log_2(n+1) \quad (14)$$

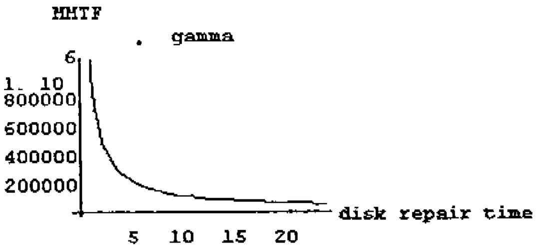
n이 고정되어 있을 때 위의 부등식을 만족하는 최소의 C를 취하면, n이 증가함에따라 C는 (그림 1)같이 계단모양으로 변한다. 따라서 이후에는 n이 특별한 수치적인 대상이 될 때에는 7, 15, 31, 63 등 일 경우만을 생각하기로 한다.



(그림 1) 디스크 수 대 체크디스크의 수
(Fig. 1) Number of disks vs. number of check disks

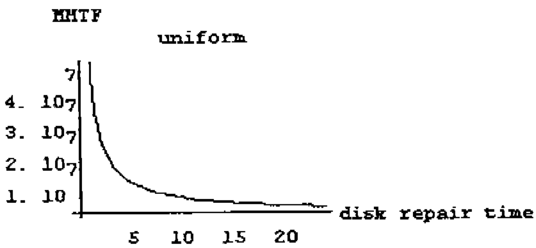
(그림 2), (그림 3) 및 (그림 4)는 $n=15$, $\frac{1}{b}=10^5$이고 디스크의 수리시간의 분포가 감마, 균등 및 지수분포일 때 수리시간의 평균인 r에 따른 $MTTF$의 변화를 보여주고 있다. 주목할 것은 감마 분포일 경우에 $MTTF$가 가장 작고 균등분포 및 지수분포일 경우에는 거의 비슷하다.

Corollary 8. Corollary 7에서 γ가 β에 비하여 매우 작다면



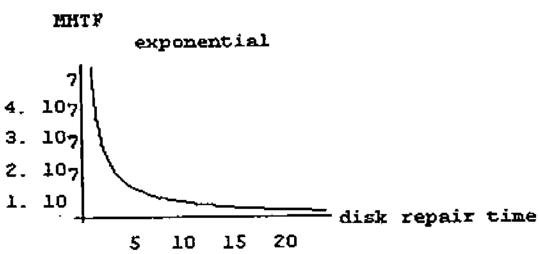
(그림 2) 수리시간이 감마분포, $n=15$, 및 $\frac{1}{b}=10^6$일 때의 $MTTF$의 변화

(Fig. 2) $MTTF$ when repair time distribution is gamma, $n=15$ and $\frac{1}{b}=10^6$



(그림 3) 수리시간이 균등분포, $n=15$ 및 $\frac{1}{b}=10^6$일 때의 $MTTF$의 변화

(Fig. 3) $MTTF$ when repair time distribution is uniform, $n=15$ and $\frac{1}{b}=10^6$



(그림 4) 수리시간이 지수분포, $n=15$ 및 $\frac{1}{b}=10^6$일 때의 $MTTF$의 변화

(Fig. 4) $MTTF$ when repair time distribution is exponential, $n=15$ and $\frac{1}{b}=10^6$

$$MTTF \approx \frac{\beta^2}{n(n-1)\gamma} \tag{15}$$

가 되고, 이 식은 Pattern et al. [4]의 결과와 일치한다.

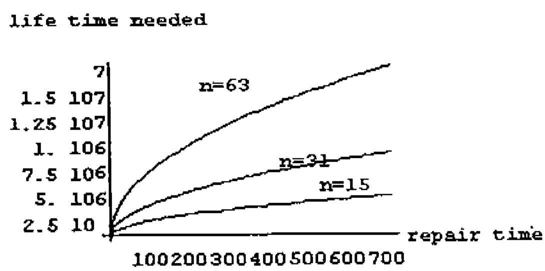
Remark 9. Corollary 7에서 디스크의 수리시간 γ가 주어져 있는 경우 $MTTF$를 일정하게 주어진 값인 K 이상으로 하려고 한다면, 하나의 디스크의 수명을 다음에 주어진 $\beta_{\min}$ 이상으로 하여야 한다.

$$\beta_{\min}(\gamma)=\frac{-(2n-1)\gamma+\sqrt{((2n-1)\gamma)^2+4n(n-1)K\gamma}}{2} \tag{16}$$

식(16)의 $\beta_{\min}$은 γ에 대하여 단조 증가한다. 한편으로 디스크의 평균 고장시간 β가 주어져 있는 경우 디스크 시스템의 $MTTF$를 주어진 K 이상으로 하고자 한다면, 디스크 하나의 수리시간은 다음에 주어진 $\gamma_{\max}$ 이하로 하여야 한다

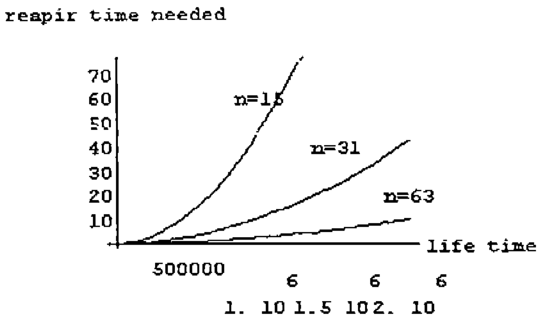
$$\gamma_{\max}(\beta)=\frac{\beta^2}{n(n-1)K-(2n-1)\beta} \tag{17}$$

(그림 5)는 $n=15$, 31, 63의 각각의 경우에 대하여 $MTTF$가 10^8 시간 이상이 되기위하여 필요한 디스크 하나의 수명의 평균값을 보여주고 있다. 디스크의 수가 늘어날수록 디스크시스템의 $MTTF$가 감소하므로 디스크시스템의 수명을 주어진 값 이상으로 하고자 한다면 많은 디스크로 이루어진 디스크 시스템일수록 디스크 하나의 수명이 길어야 함을 알 수 있다. 한편 (그림 6)은 $n=15$, 31, 63의 각각의 경우에 대하여 $MTTF$가 10^8 시간 이상이 되기위하여 필요한 디스크의 수리시간의 평균값을 도시한다. 이 그림에서는 디스크의 수가 적을수록 디스크의 수리시간이 길어짐을



(그림 5) $n=15$, 31 및 63 각각에 대하여 $MTTF$가 10^8 시간이 되기위한 디스크의 수명

(Fig. 5) Life Time Needed when $MTTF$ is greater than 10^8 hours with respect to $n=15$, 31 and 63



(그림 6) $n=15, 31$ 및 63 각각에 대하여 *MTTF*가 10^8 시간이 되기위한 디스크의 수리시간

(Fig. 6) Repair Time Needed when *MTTF* is greater than 10^8 hours with respect to $n=15, 31$ and 63

나타내고 있다.

Remark 10. 디스크시스템의 전체 비용은 하나의 디스크의 수명에 비례하고, 디스크시스템의 유지관리 비용은 수리시간의 평균에 반비례하는 비용 구조를 생각하면 디스크 시스템의 총비용 $C(\gamma, \beta)$는

$$C(\gamma, \beta) = B\beta = \frac{M}{\gamma} \quad (B>0, M>0) \tag{18}$$

으로 주어진다. 디스크시스템의 수명이 K이상, 즉 $\frac{(2n-1)\beta\gamma+\beta^2}{n(n-1)\gamma} \geq K$ 이라는 제한 조건하에 총비용 $C(\gamma, \beta)$를 최소화 하는 문제를 생각하자. 즉,

$$Minimize\ C(\gamma, \beta) = B\beta + \frac{M}{\gamma}$$

$$Subjects\ to\ \frac{(2n-1)\beta\gamma+\beta^2}{n(n-1)\gamma} \geq K \tag{19}$$

을 생각하자. Lagrange의 승수법을 쓰면 함수

$$u(\lambda) = 4K^2 n(n-1)\lambda^3 - M((2n-1)\lambda + n(n-1)B)^2 \tag{20}$$

라고 할 때, $u(\lambda)=0$는 유일한 양근 λ_+를 갖는 데 이 λ_+에 대하여 하나의 디스크의 평균 수명 $\beta = \sqrt{\frac{n(n-1)M}{\lambda_+}}$ 및 $\gamma = 2\frac{\sqrt{\lambda_+ n(n-1)M}}{n(n-1)B-(2n-1)\lambda_+}$ 일 때 총비용 $C(\gamma, \beta)$는 최소이다.

4. 결 론

디스크 시스템을 이루는 디스크 하나의 고장을 인내할 수 있는 디스크 시스템, 즉 하나의 디스크가 고장이 나더라도 디스크시스템은 작동하나 2개이상의 디스크가 고장이나면 디스크시스템 전체가 고장나는 디스크 시스템의 신뢰성을 해석적인 입장에서 분석하였다. 또한 디스크 시스템 설계시 고려사항이 되는 조건들인, 디스크 시스템의 수명을 제한조건으로 하나의 디스크의 수명이 어느정도가 되어야 하는가를 결정하였으며, 간단한 경우에 선형 비용 구조하에서 디스크 시스템의 수명을 주어진 값보다 크게 하는 최소 비용 문제를 고찰하였다.

참 고 문 헌

[1] B.D. Choi and K.K Park, "The M/G/1 Retrial Queue with Bernoulli Schedule," Queueing Systems Theory and Applications, Vol. 7, pp. 219-227, 1990.

[2] G.A. Gibson and D.A. Patterson, "Designing Disk Arrays for High Data Reliability," Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 17, pp. 4-27, 1993.

[3] S.M. Ross, *Stochastic Processes*, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, Wiley, New York, 1983.

[4] D.A. Patterson, G.A.Gibson and R.H.Katz, "A case study redundant arrays of inexpensive disks (RAID)," *Proceedings of the 1988 ACM Conference on Management of Data(SIGMOD)*, Chicago, IL, June, pp. 109-116, 1988.

[5] Ng Spencer, Some Design Issues of Disk Arrays, *Proceedings of the 1989 IEEE Computer Society International Conference(COMCON '89)*, San Francisco, CA, Spring, pp. 137-142.

박 광 규

1985년 경희대학교 수학과(학사)
1987년 한국과학기술원 응용수학과(석사)
1991년 한국과학기술원 응용수학과(박사)
1991년~현재 한국전자통신연구소, 인공지능연구실 근무
관심분야: 멀티미디어 통신, 실시간 OS, 인공 지능, Wavelet

민 병 의

1982년 한양대학교 졸업(학사)
1984년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사)
1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사)
1984년~1987년 대림산업기술연구소
1987년~현재 한국전자통신연구소, 인공지능연구실 실장
관심분야: 멀티미디어시스템, 에이전트

이 범 렬

1987년 전북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1989년 전북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1989년~현재 한국전자통신연구소 선임연구원
관심분야: 멀티미디어 시스템, 실시간 운영체제

임 성 호

1986년 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1988년 전북대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
1988년~현재 한국전자통신연구소 선임연구원
관심분야: 멀티미디어 시스템, 패턴인식

오 길 록

1968년 서울대학교(학사)
1975년 한국과학기술원(석사)
1981년 프랑스 리옹 소재 국립응용과학원(박사)
1969년~1978년 한국과학기술연구소 선임연구원
1978년~1982년 한국과학기술연구소 책임연구원
1982년~1996년 한국전자통신연구소 컴퓨터연구단장
1996년~현재 시스템공학연구소 소장
관심분야: 광역분산컴퓨팅기술, 대용량병렬처리기술, 멀티미디어 데이타처리 및 가상현실