IE Interfaces
Vol. 14, No. 3, pp. 272-285, September 2001.

불완전 보전모형의 특성에 관한 연구†

이진식[1] · 유정모[2]

[1]전주대학교 공학부/[2]전주공업대학 시스템정보경영과

A Study on the Characteristics of the Imperfect Maintenance Models

Jin-Shik Yi[1] · Jeong-Mo Lyu[2]

Proper maintenance techniques have been emphasized in recent years due to increased safety and reliability requirements of systems, increased complexity, and rising costs of material and labor. In the related literature, most studies assume that the system after cm or pm is 'as good as new'(perfect maintenance) or 'as bad as old'(minimal maintenance). But many maintenance activities may not result in these two extreme situations but in a complicated intermediate one. Therefore, perfect maintenance and minimal maintenance are not practical in many actual instances and so realistic imperfect maintenance should be modeled. For this study, various imperfect preventive maintenance models are investigated and analyzed. From the analysis of the imperfect maintenance models modeling methods and maintenance policies are arranged and presented some tables providing informations to the maintenance managers.

1. 서 론

운용단계에 있는 대부분의 생산 및 서비스 시스템들은 사용기간이 경과함에 따라 자연적인 원인 및 사용영향 등의 내·외부적 요인에 의해 기능이나 성능이 열화되거나 고장이 발생하게 된다. 생산시스템의 운용중에 고장이 발생하면 시스템을 교체하거나 수리하는 데 시간과 비용이 소요될 뿐만 아니라 생산활동에도 많은 지장을 주게 되어 기회손실비용을 발생시킴은 물론 환경이나 인명에도 치명적인 손실을 줄 수 있다.

보전은 시스템을 수용 가능한 운전상태로 유지 또는 복원하는 계획적인 예방활동 또는 비계획적인 활동들을 포함한다. 최적보전정책은 가능한 한 최저의 비용으로 시스템의 최적 신뢰도와 안전한 기능수행을 제공하는 것을 목적으로 한다. 최근에는 증가되는 시스템의 복잡성, 자재비와 인건비의 증가, 고도의 안전과 신뢰성에 대한 요구 때문에 적절한 보전기술의 중요성이 크게 증대되고 있다. 수리나 교체 등의 보전 문제는 시스템의 운용효율에 미치는 영향이 지대하기 때문에 의사결정자의 주관적 판단이나 작업자의 임의적인 활동에 맡길 수 없는 것이다. 보전활동에 관계되는 제반 요소들을 과학적이고 체계적으로 분석하여 최적의 보전정책을 찾는 것이 매우 중요하다. 과거 수십년 동안 시스템 고장발생을 예방하고 보전비용을 감소시키기 위해 보전, 검사, 교체 등에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 최적보전정책에 관한 문제들은 아직도 만족할 만큼 해결되지 않았고 많은 보전모델들이 비현실적인 가정하에서 제시되고 있을 뿐만 아니라 많은 연구자들이 제시하고 있는 보전모형들이 체계적으로 정리되어 있지 않기 때문에 현장의 보전담당자들이 이용하기에 불편함을 겪고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 생산시스템의 생산성, 품질, 납기와 같은 성과에 직결되고, 그 자체로도 기업의 중요한 경쟁요소가 되고 있는 생산시스템의 경제적, 효율적인 운용을 위해 불완전 보전모형의 특성을 분석하고 체계적으로 정리하여 보다 쉽게 이용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 불완전 보전의 모형화 방법

보통 불완전 보전은 보전 후의 시스템의 동작 상태가 'AGAN (as good as new)'이나 'ABAO(as bad as old)'의 어느 사이에 있도록 보전되는 것으로 가정한다. 분명히 불완전 보전은 2가지 극단적인 경우인 최소수리와 완전보전을 포함하는 일반적인 보전이다.

† 이 연구는 전주대학교의 학술연구비 지원을 받아 이루어졌음.

기존의 불완전 보전문헌에서는 불완전 보전정책의 모형화를 위해 다양한 방법들을 사용하고 있다. 기존의 연구문헌들은 주로 단일 유닛 시스템과 이에 대한 모형화 방법들이지만 이것들이 다중 구성품 시스템의 모형화에도 유용하게 사용될 수 있다. 이것은 각각의 서브시스템들은 단일 유닛 시스템으로 간주될 수 있기 때문에 단일 유닛 시스템을 위한 불완전 보전을 다루는 방법은 각각의 서브시스템의 불완전 보전 모형화에 유용할 것이다. 기존의 연구문헌에서 보전정책을 위한 모형화 방법은 다음의 6가지 범주로 분류할 수 있다.

2.1 (p, q) 방법

Nakagawa는 이 방법의 불완전 보전에 대해 다루고 있다. 한 유닛이 PM 후에 p의 확률로 'AGAN' 상태(완전한 PM)로 돌아가고, $q=1-p$의 확률로 'ABAO' 상태(최소 PM)로 돌아간다. 분명하게 $p=1$이면 완전보전의 PM이 되고, 만일 $p=0$이면 PM은 최소 PM에 합치된다. 이러한 의미에서 최소보전이나 완전한 보전은 불완전 보전의 특별한 사례에 해당하며, 불완전 보전은 일반적인 보전이 된다.

불완전 보전에 대한 이러한 연구방법을 사용하여 Nakagawa (1979a,b, 1980)는 단일 유닛 시스템의 수명 및 주기적 PM 정책에 대해 기대보전비용비율을 최소화하는 최적 PM 정책들을 개발하였다. 이와 유사하게 Helvic(1980)은 PM 후에 내고장성의 시스템은 보통 보전 후에 확률 θ_2로 새로워지는 반면, 이 시스템의 작동 조건은 때때로 확률 θ_1으로 변화되지 않는다(ABAO)고 언급하고 있다.

Brown과 Proschan(1983)은 유닛이 고장날 때마다 수리되어지고, 수행된 수리는 p의 확률로 완전수리 또는 $1-p$의 확률로 최소수리가 되며, 이 과정은 무한히 반복되는 것으로 가정하여, 만일 어떤 유닛의 수명분포가 F, 이것의 고장율이 r이면, 계속되는 완전수리 사이의 시간에 대한 분포함수는 $F_p=1-(1-F)^p$이고, 이에 대응하는 고장률 $r_p=\mathrm{P}r$라는 유용한 결과를 얻었다.

Bhattacharjee(1987)는 체류시간의 충격모델을 통하여 같은 결과를 도출하였으며, 불완전 수리의 Brown-Proshan의 모델을 위한 몇 가지 새로운 결과를 제시하였다. 위의 결과에 근거하여 Fontenot과 Proschan(1984)은 단일 구성품 시스템을 위한 다양한 최적 불완전 보전정책들을 제시하였다.

2.2 $(p(t), q(t))$ 방법

$(p,\ q)$ 방법을 가진 Brown-Proschan (1983)의 불완전 수리모형의 확장은 단일유닛시스템에 대한 수명의존 불완전 수리이다. 한 아이템이 고장나서 수리(CM)되어질 때, 확률 $p(t)$로 완전수리이고, 확률 $q(t)=1-p(t)$로 수리는 최소수리가 된다고 가정한다. 여기서 t는 고장시각(이전의 완전한 수리로부터의 고장까지의 시간)에 사용되는 아이템의 수명이다. Block, Borges와 Savits(1985)는 아이템의 수명분포 F가 연속함수이고, 이의 고장률이 r이면, 계속되는 완전수리 시간들은 다음과 같은 간격시간분포를 갖는 재생 과정임을 제시하였으며, 이에 대응하는 고장률 $r_p(t)=p(t)r(t)$로 나타내었다.

$$F_p=1-\exp\left\{\int_0^t p(x)[1-F(x)]^{-1}dF(x)\right\}$$

이와 유사한 결과들을 Beichelt와 Fischer (1980)의 연구에서 찾아볼 수 있다. Block, Borges와 Savits (1985)는 역시 $p(t)$에 대한 적절한 가설 아래서 Brown과 Proschan (1983)의 수명보전 결과에 대해 증명하였다.

Block, Borges와 Savits(1988)는 동작중인 유닛이 수명 T에 도달하면 교체되는 수명의존 PM 정책에 대해 논의하였다. 이들은 만일 유닛이 $t<T$에서 고장나면 이것은 확률 $p(t)$로 새 것으로 교체되거나, 확률 $q(t)=1-p(t)$로 소수리를 하고, i번째 소수리의 비용은 수리의 수와 수명의 함수 $c_i(t)$로 모형화 하였다.

Brown과 Proschan의 모델, Block, Borges와 Savits의 모델에서는 수리시간은 무시할 수 있는 것으로 가정하였으나 Iyer (1992)는 수리시간을 무시할 수 없는 것으로 생각하고, $(p(t),\ q(t))$ 방법을 사용하여 불완전 수리를 위한 가용도를 산출하였다. Whitaker와 Samaniego(1989)는 Block, Borges와 Savits(1985)에 의한 위의 모델이 m번째 완전한 수리 시간까지 관측되어질 때의 수명분포를 찾는 평가치를 제안하였다. 이러한 연구에 부가하여, Sumita와 Shanthikumar(1988)는 재생과정으로부터 나타나는 수명-종속 계수과정에 대해 연구하고 이 계수과정을 단일 유닛시스템의 수명-종속 불완전 수리에 적용하는 방안을 제시하였다.

Makis와 Jardine(1992)는 불완전 수리 모델에 대해, 확률 $p(n, t)$로 시스템을 'AGAN' 상태로 복원하거나, 확률 $q(n, t)$)로 'ABAO' 상태로 복원 또는 확률 $s(n,\ t)=1-p(n,\ t)-q(n,t)$로 수리가 성공적이지 못할 때에는 이 시스템을 폐기하고 새 것으로 대치하는 방법을 고려하였다. 여기서 t는 시스템의 나이이고 n은 교체 후의 고장의 수이다. 위에서 살펴본 바와 같이 불완전보전을 위한 $(p,\ q)$ 방법과 $(p(t),\ q(t))$ 방법은 상당히 실제적이며, 현실적이다.

2.3 개선요소 방법

Malik(1979)은 보전계획문제에 있어서 개선요소 개념을 소개하였다. Malik은 보전은 고장률 곡선에서 시스템의 수명을 약간 새로운 수명으로 변화시키지만 완전히 0으로 변화시키지는 못하는 것으로 생각하였다. 불완전 보전에 대한 이러한 방법 역시 PM 후의 고장률은 'AGAN'와 'ABAO' 사이의 어디인가 상태에 있게 되는 것을 알게 한다. 고장률에 있어서 개선의 정도를 '개선 요소'라고 부른다. 시스템은 나이가 들어가면서 보다 자주 보전을 받아야 할 필요가 있기 때문에 계속되는 PM

간격을 결정하는 일반적인 방법을 제시하였다. Malik(1979)은 이렇게 계속되는 PM 간격을 결정하는 알고리듬을 제안하였으며, Lie와 Chun(1986)은 이 PM 간격을 결정하는 일반적인 방법을 제시하였다. Malik(1979)은 개선요소를 평가하기 위해 전문가의 판단에 의존하고, Lie와 Chun(1986)은 개선요소를 위하여 시스템의 나이와 보전비용의 함수로서 일련의 곡선을 제공하였다. Suresh와 Chaudhuri(1994)는 출발상태, 종말상태, 작동상태의 퍼지 집합으로서 시스템의 보전형태를 고려하고, 보전 후에 시스템의 출발상태를 결정하기 위해 개선요소를 사용하였다.

Chan과 Shaw(1993)는 각 PM 후에 고장률이 감소되는 것을 제시하였는데, 이 고장률의 감소는 아이템의 나이와 PM의 수에 종속됨을 밝혔다. 이들은 두 가지 형태의 고장률 감소를 제시하였다.

2.4 가상수명 방법

Kijima, Morimura와 Suzuki(1988)는 유닛의 가상수명 과정의 개념을 사용하여 불완전 수리 모형을 개발하였다. 만일 유닛이 $(n-1)$번째의 수리 후에 즉시 가상수명 $V_{n-1}=y$를 갖는다면, n번째의 고장시간 X_n은 분포함수를 갖는 것으로 가정하고 다음과 같이 나타내었다.

$$\Pr\{Xn \leqq x \mid Vn-1=y\} = \frac{F(x+y)-F(y)}{1-F(y)}$$

여기서 $F(x)$는 새로운 유닛의 고장시간에 대한 분포함수이다. α를 상수라 하고 $0 \leq \alpha \leq 1$라고 하면 이들은 한 수리 모형을 구성하게 된다. n번째의 수리는 $(n-1)$번째 수리 전에 발생된 손상(damage)을 제거할 수는 없다. 그것은 부가적인 수명 X_n을 αX_n으로 감소시키며, n번째 수리 후의 가상 수명을 $V_n = V_{n-1} + \alpha X_n$으로 나타내었다. 여기서 $\alpha=0$은 완전수리에 대응하며, $\alpha=1$은 최소수리에 대응하는 것이다. Kijima(1989)는 위의 모형에서 α가 0에서 1의 값을 갖는 확률변수의 경우로 확장하였으며 또 하나의 다른 불완전 수리모형 $V_n = A_n(V_{n-1}+X_n)$을 제시하였다. 여기서 An은 $n=1$,2, 3,⋯일 때 0과 1 사이의 값을 갖는 확률변수이다. 극한값 0과 1에서, $A_n=1$은 최소수리, $A_n=0$은 완전한 수리를 의미한다. 이 방법을 Brown과 Proschan의 방법과 비교하면, 만일 An이 0과 1의 2개의 극한 값을 갖는 독립적이고 동일한 분포이면 이들은 같게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 Kijima(1989)의 두 번째 방법은 보다 일반화된 것으로 볼 수 있다. Uematsu와 Nishida (1987)는 Kijima(1989)의 특별한 사례로서 위의 두 가지 모델을 포함하는 보다 일반화된 모형을 고려하였으며, 관련된 고장-수리 과정의 몇 가지 기본 속성들을 찾아내었다.

2.5 충격 모형 방법

한 유닛의 고장에 이르는 시간은 충격의 수준을 나타내는 적절한 통계적 과정에서의 어떤 경계를 최초로 통과하는 시간으로 나타낼 수 있다. 시간적으로 무작위하게 발생하는 충격에 종속되는 한 유닛에 대해 생각해 보자. 시간 $t=0$에서 유닛에 대한 충격의 수준은 0으로 가정한다. 한 충격에 의하여 이 유닛은 비음적인 랜덤 손상(damage)을 겪게 된다. 각 손상은 그것들의 발생시점에서 그 유닛의 현존하는 손상수준에 부가되며, 이러한 충격 사이에서 손상의 수준은 일정하게 된다. 이 유닛은 누적 손상이 최초로 규정된 수준을 초과하면 고장난다. 이 유닛을 수용가능한 작동조건 내로 유지하기 위해서는 어떤 PM이 필요하다. Kijima와 Nakagawa (1991)는 불완전 주기의 PM을 갖는 누적손상충격 모형을 제시하였다. 이 PM은 각각의 PM을 통하여 총 손상의 100(1-b)% 수준으로 손상 수준을 감소시키는 의미에서 불완전한 것이다. 여기서 $0 \leq b \leq 1$이다. 만일 $b=1$이면 PM은 최소수리, 만일 $b=0$이면 PM은 완전한 PM과 일치하는 것이 된다. 이들은 IFR분포를 갖는 고장시간에 대한 충분한 조건을 유추하였으며, 기대보전 비용비율을 최소화하는 PM의 수를 찾아내는 문제에 대해 논의하였다. Kijima와 Nakagawa(1992)는 PM이 불완전하다는 것을 가정한 순차적인 (sequential) PM 정책을 가진 다른 누적손상충격 모형을 제시하였다. 이들은 PM 전에 손상이 Y_k였을 때 k번째 PM 후에 손상의 양이 b_kY_k가 되는 의미의 불완전 PM을 모델화하였다. 즉, k번째 PM은 손상의 양 Y_k를 b_kY_k로 감소시키는 것으로, Kijima와 Nakagawa(1992)는 b_k를 개선요소라고 하였다. 이들은 한 시스템이 포아송 과정에 따라 발생하는 충격들에 종속하는 것을 가정하고, 이 시스템은 부가되는 비음적인 랜덤 손상을 겪는다고 생각하였다. 충격을 받을 때의 총 손상이 Z일 때는 확률 $p(z)$로 각 충격은 시스템 고장을 일으키게 된다. 이 모델에서는 고정된 시간간격 X_k $(k=1, 2, 3, \cdots, N)$에서 PM이 수행되며, 수명에 따라 보다 자주 보전이 필요하기 때문에, N번째 PM은 완전한 것으로 생각한다. 만일 시스템이 PM 사이에서 고장나게 되면 단지 소수리만 받게 된다. 이들을 교체할 때 $p(z)$는 지수분포이고, 손상들은 독립적이며 동일한 분포(i, i, d)인 것을 가정하여 기대 보전 비용 비율을 유추하였으며, 최적 교체정책들에 대해 논의하였다.

2.6 다중 (p, q) 방법

Shaked와 Shanthikumar(1986)는 다변량 불완전 수리개념을 소개하였다. 이들은 구성품들이 독립적인 수명들을 갖고 구성품들이 교체될 때까지 각각 불완전수리에 종속되는 시스템을 고려하였다. 각 구성품의 수리는 (p, q) 방법에 따라 불완전하다. 즉, 고장시에 확률 p로 수리가 완전하며, 확률 q로 소수리가 된다. 시스템의 n개의 구성품이 같은 시각 0에서 동작을 시작하고, 한 번에 한 구성품 이상이 고장날 수 없는 것으로 가정하고, 이들은 소수리나 완전수리 후에 동작하는 장치들의 다음 고장까지 시간의 결합분포를 형성시켰으며, 다른 확률적인 양들과 구성품들의 결과적인 수명시간의 결합밀도를 도출하였

다. 이로부터 시스템의 수명분포를 얻을 수 있었다. Sheu와 Griffith(1992)는 이 연구를 보다 확장시켰다.

이상의 불완전 보전에 대한 모형화 방법에 따른 문헌을 <표 1>에 요약하였다.

3. 불완전 보전정책

보전정책은 크게 계획보전과 비계획보전으로 분류할 수 있으며, 계획보전은 다시 예방보전과 사후보전으로 분류할 수 있다. 예방보전정책에서는 열화되는 부품들을 수리하거나 교체하는 정책으로 이루어지는데 이들 수리와 교체의 시기를 정하는 방법에 따라서 수명기준, 주기기준, 고장한계와 비용한계, 순차적 기준 등으로 나눌 수 있다. 이들 보전정책에 대해 6가지로 분류하여 정리한다.

3.1 수명-종속 PM 정책

수명-종속 PM 모형에 있어서는 미리 정해진 수명 T 또는 고장중에 먼저 발생하는 것에 따라 예방보전을 하거나 수리를 하게 된다. 이 정책에서는 PM(preventive maintenance)과 CM(corrective maintenance)이 동시에 불완전하거나 또는 어느 하나가 불완전한 상태에 따라 다양한 불완전 보전 모형들이 있다. 수명-종속 PM 정책의 선구적인 불완전 보전모델의 하나는 Nakagawa(1979a)에 의한 것이다.

Nakagawa(1979a)는 (p, q) 방법을 사용하여 불완전 PM, 완전 PM, 고장시에 소수리를 하는 세 가지 수명-종속 PM 모형들을 제시하였다. 그는 기대보전 비용 비율을 유도해 내었으며, PM 시간간격 T를 사용하는 최적 보전정책들에 대해 논의하였다. $(p(t), q(t))$ 방법을 사용하여 Block, Borges와 Savits(1988)는 CM이 불완전하고, i번째 소수리의 비용이 수명과 수리의 횟수의 함수 $C_i(y)$인 수명-종속 PM에 대해 논의하였다. 수명-종속 PM 정책의 두 가지 확장방법은 Sheu, Kuo와 Nakagawa(1993) 그리고 Sheu, Griffith, Nakagawa(1995)에 의해 제시되었다. Sheu, Kuo, Nakagawa(1993)는 수명-종속 PM 정책을 보다 일반화시켰는데, 만일 유닛이 수명 $y<t$에서 고장나면 $p(y)$로 완전수리가 이루어지고, 또는 확률 $q(y)=1-p(y)$로 소수리를 받게 된다. 그렇지 않으면 이 유닛은 t 후에 최초의 고장 또는 총운전시간이 수명 $T(0 \leq t \leq T)$에 도달하는 것 중 먼저 발생하는 것에 의해 교체된다. 이들은 기대비용비율을 최소화시키는 최적정책 (t^{*}, T^{*})에 대해 논의하였다. Sheu, Griffith, Nakagawa(1995)는 이 모형을 좀 더 확장시켰으며, 이들은 유닛이 수명 Z에서 두 가지 형태의 고장을 갖는 것으로 가정하였으며, 유닛은 n번째 형태 1의 고장 또는 첫 번째 형태 2의 고장, 또는 나이 T 중 먼저 발생하는 것에 따라 교체된다. 형태 1의 고장은 확률 $p(z)$로 발생하고, 소수리에 의해 보전된다. 형태 2의 고장은 확률 $q(z)=1-p(z)$로 발생하고 완전한 수리로 보전된다. 이들은 $(p(t), q(t))$ 방법과 랜덤 소수리 비용을 사용하여, 기대비용비율을 산출하고 최적정책을 논의하였다.

3.2 주기-종속 PM 정책

주기적인 PM 정책하에서 유닛은 고정된 시간간격에서 예방보전을 받고, 그 사이의 고장들은 수리된다. Liu, Makis, Jardine (1995)은 가상 수명의 기호를 사용하여 주기적인 PM 모형의 확장에 대해 연구하였다. 이들은 유닛이 시간단위 T마다 PM(불완전 또는 완전)을 받게되고, 그 사이의 고장들은 소수리를 받게 되며, 정해진 PM 횟수마다 교체되는 것으로 가정하였다.

표 1. 불완전 보전에 대한 모형화 방법[Wang(1997)의 표 2.1]

모형화 방법	참 고 문 헌
(p, q) 방법	Chan/Down(1978), Helvic(1980), Nakagawa(1979, 1980, 1987), Brown/Proschan(1982, 1983), Fontenot/Proschan(1984), Lie/Chun(1986), Yun/Bai(1987), Bhattacharjee(1987), Goel/Agnihotri/Dupta(1991a, 1991b), Sheu/Liou(1992), Srivastava/Wu(1993)
$(p(t), q(t))$방법	Beicheit(1980, 1981a, 1981b), Block/Borge/Savits(1985, 1988), Abdel-Hameed(1987), Whitaker/Samaniego(1989), Sheu(1991a, 1992, 1993), Makis/Jardine(1991), Iyer(1992), Hollander/Presnell/Sethuraman(1992), Sheu/Kuo(1994), Sheu/Griffith/Nakagawa(1995)
개선 요소법	Malik(1979), Canfield(1986), Lie/Chun(1986), Jayabalan/Chaudhuri(1992a, 1992b, 1992c, 1995), Chan/Shaw(1993), Surech/Chaudhuri(1994)
가상 수명법	Uematsu/Nishida(1987), Kijima(1988, 1989), Makis/jardine(1993), Liu/Makis/Jardine(1995)
충 격	Bhattacharjee(1987), Kijima/Nakagawa(1991, 1992), Sheu/Liou(1992c)
다중 (p, q)방법	Shaked/Shanthikumar(1986), Sheu/griffith(1992)
기 타	Nakagawa(1979b, 1980, 1986,19'88), Subramanian/Natarajan(1980), Nguyen/Murthy(1981), Yak(1984), Yun/Bai(1988), Dias(1990), Subramanian/Natarajan(1990), Zheng/Fard(1991), Jack(1991), Chun(1992), Dagpunar/jack(1994), Zhao(1994)

Nakagawa (1986)는 비슷한 모형이지만 PM 후에 고장률이 변화하는 의미의 불완전한 보전을 가정하였다.

3.3 고장한계 PM 정책

이 정책에서는 유닛의 고장률 또는 신뢰도가 미리 결정된 수준에 도달하면 그때에만 PM이 수행되는 것으로 가정한다.

Malik(1979)은 유닛이 신뢰도의 최소 수용가능 수준 또는 그 이상에서만 작동하게 하는 PM 계획을 유도하였다. Lie와 Chun (1986)은 유닛이 미리 정해진 최대 고장률에 도달할 때마다 PM이 수행되는 보전비용 모형을 제시하였다. Jayabalan과 Chaudhuri (1992a)는 PM과 시스템 설치를 위한 정지시간을 무시할 수 있다는 조건하에서 시간의 특별주기에 대한 최적보전정책을 제시하였으며, 다른 연구에서 Jayabalan과 Chaudhuri (1992b)는 교체를 위한 정지시간이 0이 아닌 상수일 때에 대해 고려하였다. 유닛이 나이가 들어감에 따라 PM을 위한 계속되는 정지시간은 더 많이 소모하게 될 것이다.

이 점을 통합시키기 위하여 Jayabalan과 Chaudhuri(1992b)는 PM 시간은 지수분포를 따르고 수명에 따라 증가하는 것으로 가정하였다. Jayabalan과 Chaudhuri(1995)는 보다 계산시간이 적게 드는 최적 보전정책을 얻기 위한 알고리듬을 제시하였다.

3.4 순차적(sequential) PM 정책

Nakagawa(1986, 1988)는 한 고정된 시간간격 $x_k(x_k \le x_{k+1}$: $k=1,2,\cdots)$에서 PM이 수행되는 순차적 PM 정책에 대하여 논의하였다. 이 정책은 대부분의 유닛들이 나이가 증가됨에 따라 보다 자주 보전을 필요하므로 고장한계정책이 고장률, 수명, 신뢰도 등을 직접 관리하는 것과는 달리 x_k의 길이를 직접 관리하는 점이 다르다.

3.5 수리 한계 PM 정책

유닛이 고장나면 이것의 수리 비용을 견적하여 이 값이 미리 정해진 한계치보다 작으면 수리가 행해지고, 그렇지 않으면 이 유닛은 교체된다. 이 방법을 문헌에서는 수리 비용 한계 정책이라고 부른다. Yun과 Bai(1987)는 불완전 보전 가정하에서 최적 수리 비용 한계정책을 연구하였다. 수리시간 한계 교체정책은 Nakagawa와 Osaki(1974)에 의해 제시되었는데, 유닛은 고장시에 수리된다. 만일 규정된 시간 T 이내에 수리가 완전히 이루어지지 않으면, 새것으로 교체된다. 그렇지 않으면 이 유닛은 작동하게 한다. 여기서 시간 T를 수리한계 시간이라 부른다. Nguyen과 Murthy(1981a, b)는 지역과 중앙(집중) 두 가지 수리형태를 가진 불완전 보전의 수리시간 한계 교체정책을 연구하였다. 여기서 지역수리는 불완전한 반면 중앙수리는 완전한 것으로 가정하였다. 무한시간간격에 대한 기대비용비율을 최소화시키는 최적정책들을 유도하였다.

3.6 기타 PM 정책

Jack(1991)은 N번째 고장에서 교체를 하는 고장에 대한 불완전수리를 포함하는 보전정책에 대해 조사하였다. Dagpunar와 Jack(1994)은 한정된 범위 동안에 불완전 PM의 최적수를 결정하였는데, PM들 사이의 고장에서는 소수리가 이루어지며, i번째 PM은 유닛의 나이 x_i를 더 젊게 만든다(x규칙). Chun(1992)은 x 규칙을 이용하여 한정된 계획 범위하에서 주기적 PM의 최적수를 결정하는 연구를 하였다.

Makis와 Jardine(1992)은 PM이 없는 교체정책에 대해 고찰하였는데, 한 유닛은 어떤 시간에 비용 C_0로 교체될 수 있고, n번째 고장에서 이 유닛은 역시 비용 C_0로 교체되거나 비용 $C(n,\ t)$로 불완전 수리를 받게된다. 여기서 t는 유닛의 수명이다. 이들은 불완전 수리의 모형화를 위해 $(p(n,t), q(n,t), s(n,t))$ 방법을 사용하였다. Makis와 Jardine(1991, 1993)은 고장에서 불완전 수리를 갖는 최적 교체정책에 대해 논하였다. 어떤 유닛은 $(p(t), q(t), s(t))$ 방법과 가상수명 방법을 각각 사용하여 어떤 정해진 시간 후의 최초의 고장마다 교체된다. Fontenot과 Proschan (1984)은 다양한 보전정책하에서 (p, q) 방법을 사용하여 4가지 불완전 보전 모형을 탐색하였다.

4. 불완전 보전모형에 대한 분석

불완전 보전모형은 사용시간에 따라 수명-종속 보전모형과 주기-종속 보전모형으로 분류할 수 있으며, 수리 비용 · 수리시간 · 충격의 정도에 따라 모형화하는 비용한계 · 수리시간한계 · 충격 모형으로 구분할 수 있다. 또한 보전대상이 단일 유닛인가 다중구성품 시스템인가에 따라 각각 분리해서 생각할 수 있고, 또한 일련의 연속시스템에 대한 보전모형도 생각할 수 있으며, 특별한 가정하에서 $k-out-of-n$ 시스템에 대한 보전모형을 생각할 수 있다. 보전모형의 설정을 위한 가정과 전제 조건들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 보전 후 시스템의 상태에 대해서는 대표적인 것으로 (p, q)방법을 적용하고 있으며, 여기서 조금 더 확장된 것으로 시간에 따라 확률이 변화하는 $(p(t),\ q(t))$ 방법을 적용하고 있다.

둘째, 보전 후의 유닛이나 시스템의 수명이 감소하는 경우를 가정하는 경우가 대부분이나 개선요소 방법의 경우는 이와 반대의 가정을 하는 경우 도 있어 이에 대한 명확한 기준을 설정하기 어려운 점이 있다.

셋째, 보전의 계획기간은 대부분 무한범위를 가정하고 있으나 유한범위를 가정하는 경우도 상당히 있다.

넷째, 유닛이나 시스템의 고장율은 연속이며 단조증가하는 것으로 가정하는 것이 대부분이다.

다섯째, 보전에 소요되는 시간을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우를 살펴볼 수 있으며, 고려하는 경우에는 pm과 cm 시

간이 일정한 경우와 보전 횟수에 따라 증가하는 것으로 가정한 경우가 많음을 볼 수 있다.

여섯째, 보전비용도 일정한 경우와 보전횟수에 따라 변화하는 경우를 나타내고 있으며, pm과 cm의 비용을 구분하여 변화를 가정하는 경우도 있다.

일곱째, 최적보전정책의 선택 기준으로 대부분이 기대보전비용이나 기대보전비용비율을 사용하고 있다.

여덟째, 시스템의 가용도 요구조건이 먼저 설정되고 이를 만족하는 범위에서 보전비용을 최소화하는 최적보전정책을 요구하는 경우도 많다.

아홉째, 대부분의 모형에서 고장시간에 대해 Weibull 분포를 따르는 것으로 가정하여 수치예를 제시하고 있다.

열 번째, 주어진 여러 가지 모수들의 값들을 적용하여 최적보전정책을 결정하기 위해서는 분석적인 수학계산으로는 거의 불가능하고 이를 위한 비선형 s/w 프로그램을 사용하는 것이 필요하며, 이의 개발을 위해서는 상당한 수학적 지식과 프로그래밍 능력이 요구된다.

5. 불완전 보전모형 선택에 대한 가이드

생산현장에서 실제적인 보전정책의 수립 또는 보전모형의 선택을 위해서는 자사 설비 시스템과 보전에 대한 충분한 정보의 수집이 필요하다. 본 연구에서 제시된 가정에 따른 보전모형의 선택에 대한 가이드를 다음과 같이 제시한다.

보전모형을 찾고자 할 때에는 이 장에서 제시한 <표 2a>에서 <표 2c>까지를 살펴보고 해당하는 문헌을 찾아서 보전모형을 선택할 수 있을 것이다.

먼저 시스템의 수명에 따라서 불완전 예방보전을 계획하는 경우에 그 가정이 다음과 같은 경우에는 Nakagawa(1979a)의 모형 A를 검토한다.

[가 정]

① 유닛은 설치 또는 예방보전 이후 고장 시에 수리되거나 시간 T에서 예방보전을 받는다.

② 수리 후 유닛은 AGAN이다.

③ 예방보전 후 유닛은 확률 $p(0 \le p < 1)$로서 예방보전 전과 같은 고장률을 가지며, 또한 확률 $\bar{p}$로서 AGAN이다.

④ 수리와 예방보전 시간은 무시할 수 있다.

⑤ $c_2 \bar{p} > c_1$이다.

가정이 다음과 같은 경우에는 Nakagawa (1979a)의 모형 B를 검토한다.

[가 정]

① 유닛은 $kT(k=1,2...)$에서 예방보전을 받는다.

② 유닛은 예방보전 사이의 고장에서 최소수리만을 받는다. 즉, 유닛의 고장률 최소수리에 의해 일정하게 유지된다.

③ 예방보전 후 유닛은 확률 $p(0 \le p < 1)$로서 예방보전 전과 같은 고장률을 가지며, 또한 확률 $\bar{p}$로서 AGAN이다.

④ 수리시간과 예방보전 시간은 무시할 수 있다. 가정이 다음과 같은 경우에는 Nakagawa (1979a)의 모형 C를 고려한다.

[가 정]

① 유닛은 $kT(k=1,2...)$에서 예방보전을 받는다.

② 고장난 유닛은 오직 완벽한 예방보전에 의해서 발견되어지며, 그러므로 그것은 고장의 발생으로부터 다음의 완전예방보전까지의 시간 동안에 고장난 상태로 유지된다.

③ 예방보전 후 유닛은 확률 $p(0 \le p < 1)$로서 예방보전 전과 같은 고장률을 가지며, 또한 확률 $\bar{p}$로서 AGAN이다.

④ 수리시간과 예방보전 시간은 무시할 수 있다.

다음에 시스템이 최근에 대부분 CM을 받았으면 수명 T_1에서 PM을 수행하고, 최근의 대부분의 보전이 PM인 시스템에서는 수명 T_2에서 PM을 실시하는 것을 고려하고, 기대비용비율을 최소화하는 최적 PM 정책을 고려하는 경우에는 Nguyen과 Murthy(1981b)의 보전모형을 고찰한다. 이 때의 가정은 다음과 같다.

[가 정]

① a. 계획 범위는 무한하다.

b. 어떤 보전(PM 또는 CM) 후에 수명은 0으로 복원되지만 아이템을 새것처럼 복원할 필요는 없다.

② PM 또는 CM을 완료하는 시간은 무시할 수 있다.

③ 고장률은 2가지 속성을 가진다.

a. $r_1(t)$와 $r_2(t)$는 t, $r_1(\infty)$, $r_2(\infty)$와 함께 엄격하게 증가하지만 무한일 필요는 없다.

b. $t \ge 0$일 때 $r_1(t) \le r_2(t)$

다음과 같은 가정하에서의 수명-교체정책을 고려할 때는 Murthy와 Nguyen(1981)의 보전 모형을 검토한다.

[가 정]

① 계획범위는 무한하다.

② PM, 고장수리 시간은 무시할 수 있다.

③ PM의 불완전 성질은 다음과 같이 모형화된다.

고장나지 않은 시스템이 PM을 받게 될 때마다, 그 결과는

a. 시스템은 $(1-p)$의 확률과 비용 C_2로 새것처럼 되어진다.

b. 확률 p로 시스템이 즉시 고장나므로 이를 새롭게 하는 데 $(C_1 + C_2)$의 비용이 발생한다.

c. $c < 1$이다. 그렇지 않으면 우선적으로 PM은 비합리적이 된다.

교체를 위한 비용, 각 교체 사이에서 수행되는 중간 PM의 수의 결정, 계획 기간중의 기대 총비용을 최소화하는 교체의 수의 결정 및 중간 PM 후에 시스템 열화에 대해 고장률의 조정과 비용요소의 증가 경향을 함께 고려하는 경우에는 Jayabalan과 Chaudhuri (1992d)의 보전모형을 검토한다. 이 모형의 가정은 다음과 같다.

[가 정]

① 계획 범위는 유한하다.
② 개선 요소는 상수
③ 수용 가능한 고장률은 낮게 유지되므로 돌발 고장의 가능성은 무시한다.
④ 시스템이 최대 고장률에 도달했을 때에만 교체나 PM이 수행된다.
⑤ 계속되는 PM에서의 정지시간과 보전 비용은 증가한다.
⑥ PM을 위한 정지시간은 어떤 두 PM 사이의 운전시간 보다 훨씬 작다.
⑦ 교체를 위한 정시시간은 상수
⑧ 고장비용은 0
⑨ 이자율은 0
⑩ 시스템은 보다 높은 비용으로 비슷한 시스템으로 교체된다.
⑪ 시스템의 잔존가치는 무시할 수 있다.

다음에 수리 후에 유닛의 수명이 바로 직전의 수명의 일정한 비율로 감소하고, 유닛의 수리시간은 바로 직전의 수리시간의 곱으로 증가한다고 가정하고, 보전과 수리에 들어가는 시간들을 고려하여 기대보전비용비율과 극한 평균 가용도를 구하고자 할 때에는 Wang과 Pham의 보전모형(1, 2, 3)(1996a)을 분석하고 검토한다.

이 보전모형에서의 가정은 다음과 같다.

[가 정]

① 수리 후에 유닛의 수명은 수리 바로 직전의 수명의 일정 비율로 감소한다(고정 수명 감소 규칙).
② 수리시간을 무시할 수 없는 것으로 생각한다.
③ 한 유닛이 시간 0에서 작동하기 시작한다.
④ 계획범위는 무한하다.
⑤ 유닛의 고장률 $r_1(t)$는 연속적이고 단조 증가하며 미분 가능하다.
⑥ 유닛의 누적분포함수 $F_1(t)$는 절대적으로 연속이며 $F_1(0)=0$.

Wang과 Pham의 수명-종속 예방보전 모형(1)에서는 어떤 유닛의 $i \le k-1$(i, k는 정수)인 i 번째 고장에서 $c_f+(i-1)C_v$의 비용으로 불완전수리되는 경우를 가정하고, 수리 후에 유닛의 수명은 수리 직전의 수명에 대해 α의 비율로 감소하는 불완전 수리이다. 각 불완전수리 때마다 수리 비용은 C_v 씩 증가한다. 새 유닛의 수명을 X_1이라 하고, 최초의 불완전 수리 시간을 Y_1이라 하면 이들은 확률변수로서 각각 평균이 μ와 η이다. 최초 불완전수리 후의 수명은 αX_1, 두 번째 불완전 수리시간은 βY_1이다. 이들의 평균은 각각 $\alpha\mu$, $\beta\eta$이며, 여기서 $0<\alpha\le 1$, $\beta \ge 1$이다. 마찬가지 방법으로 $(k-2)$번째 수리 후에 유닛의 수명은 $\alpha^{k-2}X_1$, 평균은 $\alpha^{k-2}\mu$이고 $(k-1)$번째의 수리 시간은 $\beta^{k-2}Y_1$, 평균은 $\beta^{k-2}\eta$이다. $(k-1)$번째 수리 후의 고장에서 이 유닛은 비용 c_{fr}로 교체되거나, 수명 T에서 예방교체비용 c_p로 교체된다. 이 둘 중 먼저 발생하는 것에 따라 교체된다. 이 모형의 한 가지 가능한 해석은 새로운 시스템이 운전되어질 때, 최초의 $(k-1)$번째 고장에서의 수리는 이 시스템이 이 시점에서 아직 새 것이기 때문에 낮은 비용 $c_f+(i-1)c_v$, $(i=1, 2, \cdots, k-1)$로 되어지고, 이 수리는 불완전 수리가 되어진다. 보통 이러한 수리들은 시스템이 아직 양호한 운전 상태에 있기 때문에 최소수리이다. 예를 들어 새 차를 처음 사용하면, 이 차는 좋은 동작상태에 있기 때문에 어떤 기간 동안은 큰 수리가 필요하지 않다. 즉 보통 처음 1년 동안은 $(k-1)$번의 불완전수리 후 이 차의 동작상태는 나빠져 있을 것이기 때문에 완전보전(pm)이 필요하며 이 때는 보다 높은 비용 c_p 또는 c_{fr}로 보전된다. 명백하게 고장에서의 수리비용 보다 pm 비용이 더 작다. 따라서 $c_p < c_{fr}$로 가정하는 것이 합리적이다.

Wang과 Pham의 수명-종속 예방보전 모형(2) 에서는 이 유닛이 $(k-1)$번째 수리 후에 다음 중 먼저 발생하는 것에 따라 수명 T에서 비용 c_p로 불완전 보전되거나 다음 고장에서 비용 c_{fr}로 수리되어지는 것을 제외하면 모형 (1)과 완전히 같다.

Wang과 Pham의 수명-종속 예방보전 모형 (3)에서는 $(k-1)$번째의 수리 후에 먼저 발생하는 것에 따라 시간 T에서 비용 c_p로 완전한 보전을 받거나 교체되거나, 또는 다음 고장에서 비용 c_{fr}로 불완전하게 수리된다는 것을 제외하고 모형 (1)과 완전히 같다.

다음에는 일정한 주기에 따라 불완전 예방보전을 하는 경우의 보전모형 선택에 대해 살펴본다. 다음과 같은 가정하에서의 보전정책은 Nakagawa(1979b)의 보전모형을 검토한다.

[가 정]

① 유닛은 시간 $kT(k=1,2,\ldots)$에서 예방적으로 보전된다. 여기서 $T(>0)$는 일정하고 사전에 정해진다. 안정상태는 $k=1$에서 달성된다.
② 만일 유닛이 고장나면, 이 유닛이 고장나기 전에 갖고 있던 것과 같은 고장률 곡선으로 즉시 복원시킨다. 원래의 수명은 변하지 않는다. 이것은 '최소수리'라고 불리우며, 'ABAO'로 알려져 있다.
③ PM을 하지 않을 때의 유닛의 고장률은 시간의 함수로 알려져 있다. PM은 유닛의 수명을 원래의 x로 돌아가게 한다.

다음에 수리와 PM 시간을 고려하여, 기대보전비용비율을 최소화하고 또한 가용도를 최대화하는 최적 보전정책을 위해서는 Wang과 Pham(1996b)의 보전모형 (1)을 검토한다. 이 모형의 가정은 다음과 같다.

[가 정]

① 이 모형에서 불완전 보전을 다루는 방법은 수리(또는 pm) 후에 유닛은 확률 p로 'AGAN'로 되고, 확률 $q=1-p$로 'ABAO'로 된다.
② 수리 후에 유닛의 수명은 수리 바로 직전의 수명의 일정

비율(α)로 감소한다(고정수명 감소규칙).
③ 유닛의 불완전수리에 대한 비용은 c_v로 증가한다.
④ 유닛은 시간 0에서 작동하기 시작하고, 보전의 계획범위는 무한하다.
⑤ 유닛의 고장률 $r(t)$는 연속적이고 단조 증가하며 미분가능하다.
⑥ 유닛의 누적분포함수 $F(t)$는 절대적으로 연속이며 $F(0)=0$이다.

수리 비용에 따른 불완전 보전정책을 고려하는 경우에는 Yun과 Bai(1987)의 보전모형을 검토한다. 한 시스템이 고장났을 때 그 수리 비용을 평가하고 그 평가된 금액이 미리 정해진 한계 비용 L보다 작으면 수리한다. 그렇지 않으면 그 시스템은 교체한다. 수리 후에 이 시스템은 $1-p$의 확률로 'AGAN' 또는 p의 확률로 소수리된 상태이다. 이 모형의 가정은 다음과 같다.

[가 정]
① 수리 비용은 검사를 통해 관찰할 수 있는 $i.i.d.$ 확률변수이다.
② 시스템의 위험률은 IFR이다.
③ 교체나 수리시간은 무시할 수 있다.
④ 계획기간은 무한하다.

수리와 PM 시간을 무시하지 않고, 기대보전비용비율을 최소화하고 또한 가용도를 최대화하는 최적 보전정책에서, k번째 불완전 수리 후에 이 유닛이 다시 고장이 났을 때, 이에 대해 완전한 검사를 한 후 이것을 수리할 것인가 또는 교체할 것인가를 결정하기 위해 수리 비용을 평가하는 경우에는 Wang과 Pham(1996b)의 보전모형 (3)에 대해 고려한다.

한 시스템이 고장났을 때 그 수리 비용을 평가하고 그 평가된 금액이 미리 정해진 한계 비용 L보다 작으면 수리한다. 그렇지 않으면 그 시스템은 교체한다. 수리 후에 이 시스템은 $1-p$의 확률로 'AGAN' 또는 p의 확률로 소수리된 상태이다. 이외에는 (1)의 모형과 같은 가정을 하고 있다.

다음과 같은 가정하에서 시스템에 허용할 수 있는 최대 고장률을 기초로 하여 최적 보전과 교체에 대한 정책을 수립하고자 할 때에는 Jayabalan, Chaudhuri(1992d)의 순차적 보전정책을 고려한다. 여기서는 엔진의 MTTF 자료에 근거하여 최우추정법에 의해 Weibull 분포의 모수들을 추정하였다. 엔진의 최적 수명, 교체전의 수행되어야 할 pm의 수 등을 엔진의 고장률이 λ_{max}를 초과하지 않는 범위에서 결정하였다.

정책 Ⅰ에서는 적절한 척도 모수를 선택함으로써, 정책 Ⅱ에서는 개선요소를 선택함으로써 같은 결과를 갖도록 하는 것이 가능하다.

또한 정책 Ⅱ는 정책 Ⅰ보다 더 실제적이다. 이는 시스템의 유효나이가 감소하는 각 pm에서 시스템의 개선요소를 고려하기 때문이다. 이 모형에서의 가정은 다음과 같다.
① 계획기간은 무한하다.
② 시스템의 고장률은 시간에 따라 증가하는 함수이다.
③ 시스템의 고장률이 λ_{max}에 도달할 때에만 pm이 수행된다.
④ pm들 사이에서의 중간고장들은 소수리에 의해 제거되며, 이 소수리는 시스템의 고장률을 고장 직전의 상태로 되돌린다.
⑤ 소수리와 pm 시간들은 무시할 수 있다.
⑥ 시스템의 교체비용이 가장 크고, 그 다음이 pm 비용, 소수리 비용의 순이다 ($C_0 < c_2 < c_1$).

다음에 순차적 예방보전정책을 누적손상충격 모형에 적용시키는 보전정책을 고려하는 경우에는 Kijima와 Nakagawa (1992)의 보전모형을 고려한다. 이들의 모형에서의 가정은 다음과 같다. 각 pm은 불완전하고 충격은 포아송 과정에 따라 발생하며, 충격들의 발생에 따라 시스템은 총손상 z일 때 확률 $p(z)$로 고장난다. 시스템이 고장나면 소수리를 받는다. pm은 고정된 간격 $x_k(k=1, 2, \ldots, N)$에서 행해지며, 개선요소 b_k에 따라 총손상을 감소시킨다. 교체까지의 기대비용비율은 $p(z)$가 지수함수이고 손상들이 $i.i.d$일 때 도출된다. 기대비용비율을 최소화하는 최적정책은 $x_k=x$ 및 $b_k=b$로 가정하여 고찰하였다. 즉, 고정된 x에 대하여 최적교체의 수 $N^*(x)$, 고정된 N에 대하여 최적 pm의 간격 $x^*(N)$과 최적 짝 (N^*, x^*)을 구하였다.

다음과 같은 가정하의 연속시스템의 보전정책에 대해서는 Wang(1997)의 연속 시스템의 보전모형을 고려한다. Wang의 보전모형에서 불완전 cm은 수리 수에, 각 구성품의 수명은 수리 직전의 수명에 비해 일정 비율로 감소하고, 수리시간은 직전의 수리시간의 일정 비율로 증가하는, 즉 (α, β)규칙에 따르는 것으로 가정하여 모형화하였다.

이 모형의 가정은 다음과 같다.

[가 정]
① 연속 시스템에서 모든 구성품은 시간 0에서 작동을 시작한다.
② 각 구성품의 고장률은 단조 증가한다.
③ 단지 $j < k_i$ 일 때만 고장에서 구성품 위치 i에 있는 구성품은 수리되며, 이 수리는 불완전하다.
④ k_i번째 고장에서 구성품 위치 i에 있는 구성품은 교체되며, 이것은 완전보전이다.
⑤ 시스템에 있는 각 구성품의 각 POS사이의 고장에 이르는 시간과 수리시간은 이에 대응하는 수리시간은 서로 관련되어 있다.
⑥ 같은 구성품 위치에서의 구섬품들의 POS 사이에 고장에 이르는 시간과 수리 시간은 이에 대응하는 구성품들이 같은 cm을 받았다면 s-독립적이고, 같은 분포들을 갖는다.
⑦ 안정 상태의 가용도가 존재한다.
⑧ 동시에 둘 또는 그 이상의 구성품이 고장날 수 없다.

⑨ 수리시간은 무시할 수 없다.

⑩ 이 시스템은 Shut-off 규칙의 적용을 받는다. 즉, 한 구성품이 수리중에 있으면, 다른 모든 구성품들은 가사상태로 있게 된다. 수리가 완료되면 시스템은 운전상태로 돌아간다. 바로 이 순간에 가사상태에 있던 구성품들은 시스템이 작동을 정지할 당시의 원 상태로 돌아간다. 환언하면 이 연속 시스템에서는 어느 한 구성품이 고장나면 다른 모든 구성품들도 정지되게 된다.

다음에는 다중유닛 시스템의 보전정책을 선택하는 경우에 대해서는 Wang(1997)의 다중유닛 시스템의 보전모형을 고려한다. Wang은 기회보전모형과 준비보전모형으로 구분하여 제시하였다. 시스템이 $n+1$의 서브시스템으로 구성되고, 이들 모두가 감시된다고 가정하고, 또한 이 시스템에서 한 서브시스템은 증가하는 고장률을 갖고 나머지 n개의 서브시스템은 상수 고장률을 가지는 것으로 가정하는 경우에는 기회보전모형에 대해 고려한다. 다중 구성품 시스템의 기회보전모형의 최적보전정책은 $(n+1)$개의 결정변수로 정해지며, 시스템 가용도를 최대화 또는 시스템 보전비용비율의 최소화 또는 다른 하나가 만족되어질 때의 요구조건을 최적화하는 최적 $(t_1, t_2, \cdots t_n)$을 결정함으로써 얻어진다. 시스템의 양호한 작동특성을 달성하기 위해서는 시스템의 가용도를 함께 고려하는 것이 좋다. 왜냐하면 시스템의 보전비용비율이 최소화되었을 때 시스템의 가용도가 수용할 수 있는 상태에 도달하지 않을 수도 있기 때문이다.

서브시스템 0과 함께 다른 서브시스템들의 보전을 행하는 것이 각 서브시스템을 개별적으로 보전하는 것보다 비용과 시간이 더 적게 드는 것으로 가정했기 때문에, 서브시스템 0에 대한 최적 활동은 다른 서브시스템들의 상태에 종속된다.

이 경우에 (p, q) 방법에 의한 최적보전정책과 $(p(t), q(t))$ 방법에 의한 최적보전정책에 대한 가용도와 최소비용비율을 구할 수 있다.

다음에 어떤 시스템이 저장중에 있고 예측할 수 없는 긴급상황이 발생하는 특별한 경우에만 기능을 수행하는 경우에는 이 시스템이 저장중에 있거나 또는 장기간 사용되지 않고 대기 상태에 있을 동안에 어떤 보전활동이 이루어지며, 이 보전활동의 목적은 가장 최적의 준비된 상태를 제공하기 위한 보전활동절차를 선택하여 행하는 것이다. 이러한 시스템의 경우에는 준비보전모형을 고려한다.

불완전 보전과 경제적 의존성을 고려한 $(n+1)$개의 서브시스템들을 가진 시스템의 최적 준비보전정책의 경우에는 경제적 의존성과 pm의 불완전성을 고려한, 즉 보전비용들과 시간들은 각각의 서브시스템들을 개별적으로 보전하는 것보다 몇 개의 서브시스템들을 동시에 보전하는 것이 더 작게 든다. 이 시스템에서 서브시스템들의 고장시간들은 확률적으로 독립적이라고 가정하고, 한 서브시스템은 증가하는 고장률을 가지지만 나머지 다른 서브시스템들의 고장률은 일정하다고 가정한다. 증가하는 고장률을 가진 서브시스템은 검사 받지 않은 서브시스템이며, 다른 n개의 서브시스템들은 검사를 받는다. 이런 종류의 시스템들을 위한 최적보전정책은 기회적 특성을 갖는다. 예를 들어 한 서브시스템의 고장은 다른 서브시스템들의 pm을 수행할 기회를 주게 된다.

준비보전모형들의 구별된 특징은 검사나 보전할 때에만 시스템이 상태가 확인된다는 점이다. 그러므로 준비 모형들은 3가지 다른 불확실성에 영향을 받게된다.

첫째, 시스템 고장의 정확한 시간을 예지하는 것이 불가능하다.

둘째, 긴급상황의 발생 시간 역시 정확한 예지를 할 수 없다.

셋째, 시스템의 상태는 단지 보전 또는 검사활동이 있을 때에만 알 수 있다

준비보전모형에서의 가정은 다음과 같다.

(i) 만일 서브시스템 0의 나이가 $[0, t]$시간 사이에 있을 때 서브시스템 i가 고장 나면, 서브시스템 i를 비용 c_i, 시간 w_i 단독 교체한다.

(ii) 만일 서브시스템 0의 나이가 $[t_i, T]$사이에 있을 때 서브시스템 i가 고장나면, 서브시스템 i를 교체하고, 서브시스템 0도 완전 pm을 한다. $(i=1, 2, \cdots, n)$. 총보전비용은 c_{0i}, 총보전시간은 w_{0i}이다.

(iii) 만일 서브시스템 0가 그의 수명 $x=T$까지 고장나지 않으면, 시간 $x=T$에서 비용 c_0, 보전시간 w_0로 단독 pm을 받게 한다.

(iv) 만일 서브시스템 0가 완전 pm을 받지 못했다면, 이것이 완전 pm을 받을 때까지 시간 jT에서 단독으로 pm을 받게 한다. $(j=2, 3, \cdots)$, 만일 서브시스템과 0가 완전 보전을 받지 않았고, 서브시스템 i가 약간의 pm을 받은 후에 고장이 났다면, 서브시스템 i를 교체하고 서브시스템 0에 대해 완전 pm을 실시한다. 그러나 총보전비용은 아직 c_{0i}이고, 총보전시간은 w_{0i}이다. 이 과정은 서브시스템 0가 한 완전 보전을 받을 때까지 계속한다.

마지막으로 $k-out-of-n$ 시스템의 보전정책을 고려하는 경우에는 Wang(1997)의 $k-out-of-n$ 보전모형을 고려한다. $k-out-of-n$ 시스템은 n개의 독립적인 구성품들로 이루어진 복합 시스템으로서, 이 시스템은 n개의 구성품 중에 최소한 k개의 구성품들이 제 기능을 성공적으로 수행할 때에만 작동하는 시스템으로 정의된다. 복합적이고 값비싼 시스템 특히 $k-out-of-n$ 시스템에서 한 구성품이 고장났을 때 전 시스템을 교체하는 것은 적절하지 않다. 실제 고장난 구성품을 수리하거나 새것 또는 사용하던 것으로 교체하면 이 시스템은 작동상태로 복원된다. 이러한 보전활동은 시스템을 완전히 새것처럼 만들지 못하지만 운전 상태를 지속할 수 있게 한다. 어쨌든 이 시스템은 일반적으로 사용과 시간이 지남에 따라 열화되어진다. 사용중에나 어떤 시점에서 시스템의 작동상태가 나쁘기 때문에 완전보전이 필요하게 된다.

표 2a. 보전정책 및 보전모형 선택을 위한 가이드

보전정책	pm	cm	모형화 방법	최적화 준거	계획범위
수명-종속 보전모형					
Chan/Downs(1978)	불완전	완전	(p, q) 규칙	가용도 비용 비율	무한
Nakagawa(1979a) 보전모형(A,B,C)	불완전	완전	(p, q)규칙	비용 비율	무한
Beichelt(1980)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	비용 비율	무한
Nguyen/Murthy(1981)	불완전	완전	Semi-Markov	비용 비율	무한
Murthy/Nguyen(1981)	불완전	완전	(p, q)규칙	비용 비율	무한
Fontenot/ Proschan(1984)	완전	불완전	(p, q)규칙	비용 비율	무한
Block/Borges/Savits (1988)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	비용비율 총비용	무한/유한
Rangan/Grace(1989)	완전	불완전	(p, q)규칙	총비용	유한
Sheu(1991)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	비용비율 (random cost)	무한/유한
Jayabalan/ Chaudhuri(1992d)	불완전	완전	최대고장률	비용비율	무한
Sheu/Kuo(1993)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	비용 비율 (random cost)	무한
Sheu/Griffith/ Nakagawa(1995)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	비용 비율 (random cost)	무한
Wang/Pham(1996)	불완전	불완전	(p, q)규칙	비용비율 가용도	무한
주기-종속 보전모형					
Nakagawa(1979a)	불완전	최소수리	(p, q)규칙	고장률	무한
Nakagawa(1980)	불완전	완전, 최소수리	(p, q)규칙, X 규칙	고장률	무한
Beichelt(1981a,b)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	고장률	무한
Fontenot/Proschan (1984)	완전	불완전	(p, q)규칙	고장률	무한
Nakagawa(1986)	불완전	최소수리	서로 다른 고장	고장률	무한
Abdel-Hameed(1987a)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	고장률	무한
Nakagawa/Yasui(1987)	불완전	완전	(p, q)규칙	가용도	무한
Kijima/Morimura /Suzuki(1988)	완전	불완전	가상 나이	고장률	무한
Kijima/Nakagawa(1991)	불완전	완전	충격모형	고장률	무한
Jack(1991)	완전	불완전	기타	총비용	유한
Chun(1992)	불완전	최소수리	X 규칙	총비용	무한
Sheu(1992)	완전	불완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	고장률	무한
Liu/Makis/Jardine(1995)	불완전	최소수리	가상 나이	고장률	무한
Wang/Pham(1996) 보전모형(1)	불완전	불완전	(p, q)규칙	비용비율	무한

표 2b. 보전정책 및 보전모형 선택을 위한 가이드

고장한계 보전모형	pm	cm	개선측정치	최적화준거	모형화도구	계획범위
Malik(1979)	불완전	없음	신뢰도	신뢰도	확률	무한
Canfield(1986)	불완전	없음	고장률	비용비율	재생이론	무한
Lie/Chun(1986)	불완전	불완전 (p, q)규칙	고장률	비용비율	재생이론	무한
Jayabalan/ Chaudhuri(1992a)	불완전	최소수리	고장률	총비용	확률	유한
Jayabalan/ Chaudhuri(1992c)	불완전	최소수리	수명 등	비용비율	확률	무한
Jayabalan/ Chaudhuri(1992d)	불완전	없음	수명	총비용	확률	유한
Chan/Shaw(1993)	불완전	완전	고장률	가용도	확률	무한
Suresh/Chaudhuri (1994)	불완전	없음	신뢰도 고장률	총비용	확률	유한
Jayabalan/ Chaudhuri(1995)	불완전	최소수리	수명	총비용	재생이론	유한

수리한계 보전모형	비용한계 도달전 cm	비용한계 도달 후 cm	모형화 방법	최적화준거	모형화도구	계획범위
Beichelt(1981b)	최소수리	완전	($p(t)$, $q(t)$)규칙	비용 비율	재생이론	무한
Nguyen/Murthy (1981a,b)	불완전	완전	기타	비용 비율	재생이론	무한
Yun/Bai(1987)	불완전	완전	(p, q)규칙	비용 비율	재생이론	무한
Yun/Bai(1988)	최소수리	완전	기타	비용 비율	재생이론	무한

비용한계	pm	cm	모형화 방법	최적화 준거	수리조건		계획범위
					비용고려 C 무시 R	시간고려 C 무시 N	
Yun/Bai(1987)	완전	불완전	(p, q)	비용 비율	C	N	무한
Wang/Pham(1996) 보전모형(3)		불완전	(p, q)	비용 비율 가용도	C	C	무한
순차적 보전 모형							
Jayabalan/Chaudhuri(1992c)	불완전	소수리	최적 pm 수 N^* 개선요소	비용 비율	C	N	무한
충격 보전 모형							
Kijima /Nakagawa(1992)	불완전	소수리	개선요소	비용 비율	C	N	무한

표 2c. 보전정책 및 보전모형 선택을 위한 가이드

기 타							
연속시스템	pm	cm	수리조건		계획범위	모형화 방법	최적화 준거
			비용고려C 무시 R	시간고려C 무시 N			
Wang(1997)		불완전	C	C	무한	(p, q)	비용비율 가용도
다중유닛시스템							
Wang(1997) 기회보전모형	완전	불완전	C	C	무한	(p, q), $\{p(t), q(t)\}$	비용비율
Wang(1997) 준비보전모형	불완전	소수리	C	C	무한	(p, q)	비용비율 가용도
k-out-of-n시스템							
Wang(1997) 보전모형(1,2,3)	완전 /불완전	소수리	C	C	무한	재생이론	비용비율 가용도

Wang(1997)의 $k-out-of-n$ 시스템에 대한 보전정책에서 새 시스템은 시간 0에서 작동을 시작하며, 시간 (τ, T) 사이에서 이 시스템의 구성품의 고장난 것은 소수리를 통하여 즉시 제거된다. 시간 (τ, T) 사이에서 고장난 구성품들은 유휴상태로 놓아 둘 수 있고, 고장난 구성품에 대한 cm과 함께 고장나지는 않았으나 열화된 모든 구성품에 대한 pm을 m개의 구성품들이 유휴상태일 때 한번씩 비용 c_f로 시행하거나 또는 총운전시간이 T에 도달할 때마다 전체 시스템에 대한 pm을 비용 c_p로 시행한다. 단, 이 두 가지 중 먼저 발생하는 것에 따라 처리한다. pm이 수행되고, 시간 (τ, T) 사이에서 m개 미만의 구성품들이 고장 나면 시간 T에서 pm이 수행되며 이 과정은 반복된다. 이 모형의 가정은 다음과 같다.

[가 정]

① 모든 고장 사상은 s-독립적이다.

② 모든 구성품들은 IFR을 갖는다.

③ 완전보전 시간에 비해 최소수리 시간은 더 작기 때문에 무시할 수 있다.

④ 최소수리 비용은 수명과 최소수리의 수에 종속하는 확률변수이다.

⑤ 계획범위는 무한

⑥ $k-out-of-n$ 시스템은 n개의 $i.i.d.$ 구성품들로 이루어져 있다.

위에서 고찰한 보전모형과 기타의 보전모형을 정리하여 <표 2a>에서 <표 2c>에 제시한다. 이 표들이 보전정책의 연구나 보전모형의 선택을 위한 기초적인 가이드를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결 론

대부분의 연구문헌에서는 보전 후의 시스템을 'AGAN' 또는 'ABAO'로 가정하고 있으나 실제적인 많은 보전활동들은 이 두 가지 극단적인 상황으로 나타나지 않을 수 있으며, 보다 복잡한 중간 상태에 있게 된다.

또한 종래의 예방보전 정책은 사용시간 기준모형(T)과 고장수 기준모형(N) 및 이들을 통합한 사용시간 · 고장수 기준모형(T, N) 등으로 분류할 수 있는데 이들 대부분의 연구는 완전보전과 최소수리를 가정하고 있어 현실적 적용에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 불완전 보전을 모형화하는 방법과 불완전 보전정책에 대해서 조사하여 하나의 도표에 종합하여 정리함으로써 보전연구를 위한 참고자료로 활용할 수 있게 하였으며, 현장의 보전담당자들의 보전모형 선택을 위해 본 연구에서 제시한 보전모형을 그 가정에 따라 분석하여 제시하였고, 이를 도표화하여 보전모형 선택의 지침이 되도록 제시하였다.

이러한 분석과 고찰을 통하여 몇 가지 제언을 한다.

첫째, 보전담당자들은 자기 기업에서 사용하고 있는 설비시스템의 현황에 대한 정확한 자료를 수집하여 실정에 가장 적합한 보전정책과 보전모형을 선택하는 것이 필요하다.

둘째, 보전자료의 수집과 이에 대한 분석을 위하여 보전정보 시스템의 구축이 필요하며, 이를 위해서는 관련지식의 보급과 실무에 능한 인재의 양성이 요구된다.

셋째, 실제적인 보전정책의 수립과 시행을 위해서는 보다 간편하게 계산하여 사용할 수 있도록 S/W의 개발이 필요하고 이에 대한 보급이 일반화되어야 한다.

넷째, 보다 근본적인 대책으로서 현존 설비의 보전예방 정보가 설계부문과 생산기술 부문에 피드 백되어 신뢰성, 보전성, 안전성, 조작성, 자주보전성, 경제성, 유연성이 겸비된 설비를 개발, 개량하는 체계적인 보전예방 시스템이 구축되어야 한다.

다섯째, 경영관리자들은 보전의 중요성을 보다 깊게 인식하여, 보전비용들을 계량화하도록 노력하고, 보전부문에 대한 지원체제를 확립해야할 것이다.

이상에서 고찰한 문헌 외에도 더 많은 문헌들이 있기 때문에 본 연구에서 다루어진 범위 내에서만 활용이 가능한 제약이 있음을 밝혀둔다.

참고문헌

Bhattacharjee, M. C. (1987), New Results for the Brown-Proschan Model of Imperfect Repair, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 16, 305-316.

Block Henry, W., Borges Wagner, S., Savits and Thomas, H. (1985), Age Dependent Minimal Repair, *Journal of Applied Probability*, 22, 370-385.

Block Henry, W., Borges Wagner, S., Savits and Thomas, H. (1988), A General Age Replacement Model with Minimal Repair, *Naval Research Logistics, An International Journal*, 35(5), 365-372.

Brown, M. and Proschan, F. (1983), Imperfect Repair, *Journal of Applied Probability*, 20, 851-859.

Chan, Jack-kang and Shaw, L. (1993), Modeling Repairable Systems with Failure Rates that Depend on Age & Maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, 42, 566-570.

Chun, Y. H. (1992), Optimal Number of Periodic Preventive Maintenance Operations under Warranty, *Reliability Engineering & System safety*, 37(3), 223-225.

Dagpunar, J. S. and Jack, N. (1994), Preventative Maintenance Strategy for Equipment under Warranty, *Micro-electronics and Reliability*, 34(6), 1089-1093.

Fontenot, R. A. and Proschan, F. (1984), Some Imperfect Maintenance Models, in Abdel Hameed, Mohamed S., Cinlar, Erhan, and Quinn, Joseph (eds.), *Reliability Theory and Models*, Academic press, Orlando, Fla.

Helvic, B. E. (1980), Periodic Maintenance, on the Effect of Imperfectness, *10th Int. Symp. Fault-tolerant Computing*, 204-206.

Iyer, Srinivas (1992), Availability Results for Imperfect Repair, *Sankhya: the Indian Journal of Statistics*, 54 (2), 249-259.

Jack, Nat. (1991), Repair Replacement Modeling over Finite Time Horizons, *Journal of the Operational Research Society*, 42 (9), 759-766.

Jayabalan, V. and Chaudhuri, D. (1992a), Optimal Maintenance and Replacement Policy for a Deteriorating System with Increased Mean Downtime, *Naval Research Logistics*, 39, 69-78.

Jayabalan, V. and Chaudhuri, D. (1992b), Cost Optimization of Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability, *IEEE Transactions on Reliability*, R-41(1), 21-26.

Jayabalan, V. and Chaudhuri, D. (1992c), Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies : A Case Study, *Micro-electronics and Reliability*, 32(9), 1223-1229.

Jayabalan, V. and Chaudhuri, D. (1992d), Optimal Maintenance- Replacement Policy under Imperfect Maintenance, *Reliability Eng. and System Safety*, 36, 165-169.

Jayabalan, V. and Chaudhuri, D. (1995), Replacement Policies : A Near Optimal Algorithm, *IIEA Transactions*, 27, 784-788.

Kijima, M., Morimura, H. and Suzuki, Yasusuke. (1988), Periodical Replacement Problem without Assuming Minimal Repair, *European Journal of Operational Research*, 37(2), 194-203.

Kijimma, M. (1989), Some Results for Repairable Systems with General Repair, *Journal of Applied Probability*, 26, 89-102.

Kjiima, M. and Nakgawa, T. (1991), Accumulative Damage Shock Model with Imperfect Preventive Maintenance, *Naval research Logistics*, 38, 145-156.

Kjiima, M. and Nakgawa, T. (1992), Replacement Policies of a Shock Model with Imperfect Preventive Maintenance, *European Journal of Operations Research*, 57, 100-110.

Lie Chang Hoon and Chun young Ho (1986), An Algorithm for Preventive Maintenance Policy, *IEEE Trans. Reliability*, R-35(1), 71-75.

Liu Xiao-Gao, Makis Viliam and Jardine, A. K. S. (1995), A Replacement Model with Overhauls and Repairs, *Naval research Logistics*, 42, 1063-1079.

Makis, V. and Jardine, A. K. S. (1991), Optimal Replacement of a System with Imperfect repair, *Micro-electronics and Reliability*, 31(2), 381-338.

Makis V. and Jardine, A. K. S. (1992), Optimal Replacement Policy for a General Model with Imperfect Repair, *Journal of the Operational Research Society*, 43(2), 111-120.

Makis V. and Jardine A. K. S. (1993), A Note on Optimal Replacement Policy under General Repair, *European Journal of Operational Research*, 69, 75-82.

Malik, M. A. K. (1979), Reliable Preventive Maintenance Policy, *AIIE Transactions*, 11(3), 221-228.

Murthy, D. N. P. and Nguyen, D. G. (1981), Optimal Age-Policy with Imperfect Preventive Maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, R-30(1), 80-81.

Nakagawa T. and Osaki S. (1974), The Optimal Repair Limit Replacement Policies, *Operational Research Quarterly*, 25(2), 311-317.

Nakagawa, Toshio (1979a), Optimum Policies When Preventive Maintenance is Imperfect, *IEEE Transactions on Reliability*, R-28 (4), 331-332.

Nakagawa, Toshio (1979b), Imperfect Preventive Maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, R-28(5), 402

Nakagawa, Toshio (1986), Periodic and Sequential Preventive Maintenance Policies, *Journal of Applied Probability*, 23(2), 536-542.

Nakagawa, Toshio (1988), Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies, *IEEE Transactions on Reliability*, R-37(3), 295-298.

Nguyen, D. G. and Murthy, D. N. P. (1981a), Optimal Repair Limit Replacement Policies with Imperfect Repair, *Journal of Operational Research Society*, 32, 409-416.

Nguyen, D. G. and Murthy, D. N. P. (1981b), Optimal Maintenance Policy with Imperfect Preventive Maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, R-30(5), 496-497.

Shaked, Moshe and Shantikumar, J. George (1986), Multi-variate Imperfect Repair, *Operations Research*, 34, 437-448.

Sheu Shey-Huei and Griffith, W. S. (1992), Multi-variate Imperfect Repair, *Journal of Applied Probability*, 29(4), 947-956.

Sheu Shey-Huei, Kuo Chung Ming and Nakagawa, Toshio (1993), Extended Optimal Age Replacement Policy with Minimal Repair, *RAIRO, Recherche Operationnelle*, 27(3), 337-351.

Sheu Shey-Huei, Griffith, W. S. and Nakagawa, Toshio (1995), Extended Optimal Replacement Model with Random Minimal Repair Costs, *European Journal of Operations Research*, 85, 636-649.

Sumita, Ushio, Shanthikumar and George, J. (1988), An Age-dependent Counting Process Generated from a Renewal Process, *Advances Applied Probability*, 20(4), 739-755.

Suresh, P. V. and Chaudhuri, D. (1994), Preventive Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability Using Fuzzy Set Theory, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 1(4), 497-513.

Uematsu, Kouyu. and Nishida, Toshio (1987), One-unit System with a Failure Rate Depending upon the Degree of Repair, *Mathematics Japanese*, 32(1), 139-147.

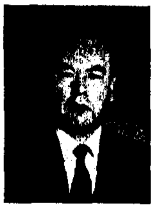
Wang, Hong-zhou (1997), Reliability and Maintenance Modeling for Systems with Imperfect Maintenance and Dependence, *PhD. dissertation, Dept. Industrial & Systems Engineering, The University of New Jersey*.

Wang Hong-zhou and Hoang Pham (1996a), Optimal Age-dependent Preventive Maintenance Policies with Imperfect Maintenance, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 3(2), 119-135.

Wang, Hong-zhou and Hoang, Pham (1996b), Optimal Maintenance Policies for Several Imperfect Repair Models, *International Journal of Systems Science*, 27(6), 543-549.

Whitaker, Lyn R. and Samaniego, Francisco J. (1989), Estimating the Reliability of Systems Subject to Imperfect Repair, *Journal of American statistical Association*, 84(5), 301-309.

Yun, W. Y. and Bai D. S. (1987), Cost Limit Replacement Policy under Imperfect Repair, *Reliability Engineering and System Safety*, 19(1), 23-28.



이 진 식
한양대학교 기계공학과 학사
전북대학교 기계공학과 석사
전북대학교 기계공학과 박사
현재: 전주대학교 공학부 산업공학전공 교수
관심분야: 설비관리, 공정관리

유 정 모
전북대학교 공업교육과 학사
전북대학교 경영학과 석사
전북대학교 경영학과 박사
현재: 전주공업대학 시스템정보경영과 교수
관심분야: TPM, 공정개선