

예방보전정책에 대한 문헌조사연구

A Review on the Preventive Maintenance Policy

양정회*
Jeong-Hoe Yang*

Abstract

Technological advances in recent decades have increased the complexity of devices required by industry and service sectors. An important problem associated with such devices is the determination of their reliability in performing the job they are designed to do. A closely related, but more important, problem faced by the practitioner is concerned with the maintenance of such devices. Many preventive maintenance policy have been studied by many others, since the replacement and repair policy at failure was first proposed by R. Barlow and L. Hunter at 1960.

This paper represents the guidelines to establish the preventive maintenance policy through reviewing and summarizing the literatures related. The criteria to classify the maintenance models are as follows ; ① replacement time, ② types of repair, ③ the conditions of repair, and ④ types of failure. The categories of preventive maintenance policy are ① failure time-based replacement model, ② failure number-based replacement model, and ③ integrated model of failure time and failure number.

* 인덕전문대학 공업경영과

1. 서 론

현대의 생활 및 작업환경은 하나의 Man-Machine System이라 볼 수 있다. 과학기술의 발전과 더불어 설비는 점점 더 복잡화, 정밀화, 총체화되어 Man-Machine System에서 설비에의 의존도가 더욱 더 높아지고 있다. 따라서 설비의 효율적, 경제적 운용은 생산성 향상이나 품질향상을 위해서 뿐만 아니라 그 자체로도 기업경쟁의 중요한 요소로 인식되고 있다.

제조 및 서비스의 모든 설비들은 자연적인 원인 또는 사용효과 등의 내·외부적 요소로부터 상태가 나빠지거나 고장이 발생하는데, 설비가 작동중에 고장이 발생한다면 경영활동에 많은 지장을 주게 되어 많은 비용을 야기시킴은 물론 환경이나 인명에도 치명적인 피해를 줄 수 있다. 그러므로 설비의 성능을 유지하기 위한 방편으로 시스템의 신뢰도(reliability), 가용도(availability), 또는 보전도(maintenability)를 향상시키는 방안들이 연구되어 왔다. 신뢰도를 향상시키는 기본적 원칙에는 규격을 만족하는 범위 내에서 시스템을 가능한 단순화하거나, 부품개선을 통해 부품신뢰도를 증가시키거나, 신뢰도가 낮은 부품이나 모듈을 병렬 또는 대기중복하거나, 운영단계에서 예방보전을 실시하여 운영신뢰도를 제고하는 것 등 여러 가지가 있을 수 있다.

운영신뢰도를 향상하는 예방보전정책에는 교체 및 수리정책, 지원 및 보급정책

그리고 고장진단 및 감시정책 등이 있다. 교체 및 수리정책은 설비가 증가고장률(increasing failure rate ; IFR)을 가지고 확률법칙에 따라 고장이 발생할 경우, 설비 고장시마다 교체 없이 수리를 계속 반복한다면 시간이 지날수록 고장 빈도수가 커지게 되어 수리비용이 증가할 것이며, 반면에 고장시마다 교체만 계속한다면 교체비용이 많이 소요된다. 여기서, 두 비용간에 비김점(trade-off)이 존재하며, 총비용은 비김점에서 최소가 된다. 일반적으로 교체 및 수리정책의 목적은 단위시간당 평균비용을 최소화하는 부품 또는 설비의 최적교체시점을 결정하는 문제이다.

예방보전의 중요성이 나날이 증가하는 현실에도 불구하고 설비에 대한 수명, 고장형태, 경제성 등의 제반요소들을 고려한 체계적인 예방보전활동을 정립하기란 쉽지 않다. 예방보전문제에 그 성패여부에 따라 설비운용의 목적에 대한 영향력이 지대하기 때문에 보전분야의 기초지식이 없는 의사결정권자의 판단이나 정비담당자의 어렵짐작에 맡길 수 없다. 그러므로 정비활동에 관계되는 제반요소들의 과학적이고 체계적인 분석을 통하여 최적의 정비활동에 대한 지침을 찾는 것은 매우 중요한 일이다.

따라서, 본 연구에서는 교환 및 수리와 관련된 예방보전정책에 대해 분류기준을 제시하고, 그 기준에 따라 각각의 모형들을 체계적으로 분석·정리함으로써 과학적인 예방보전정책의 확립에 대한 지침을 제시하

고자 한다.

2. 예방보전정책의 고찰

설비의 예방교체 및 수리와 관련된 예방보전정책은 1960년 R. Barlow와 L. Hunter가 처음으로 제시한 이후 많은 사람들에 의해 연구되어 왔다. 이들 정책은 크게 고장시간기준 모형(failure time-based model), 고장횟수기준 모형(failure numbers-based model), 고장시간 및 고장횟수의 통합모형(integrated model of failure time and failure numbers) 등으로 나누어 진다.

이들 각각의 모형은 다음과 같은 분류기준에 따라 각각의 상황에 적합한 여러 가지 정책이 제시될 수 있으며, 분류기준의 상호 조합에 의해 좀 더 일반화되어 보전문제의 현실에 가까워 진다.

① 교체시점은 시스템이 고장나기 전에 미리 교체해주는 예방교체(preventive maintenance)와 고장이 났을 경우 교체하는 고장교체(failure maintenance)로 분류된다

② 수리형태는 수리후 신품과 같아지는 완전수리와 수리 후 고장직전의 상태와 같아지는 최소수리(minimal repair) 그리고 수리후 상태가 여러 가지가 되는 불완전수리로 나뉘어 진다.

③ 수리조건은 수리비용(repair cost)이 제한된 경우와 수리시간(repair time)이 제한된 경우로 분류된다.

④ 고장형태는 수리가 가능한 고장과 수리

불가능한 고장으로 분류할 수 있으며, 운용시간에 따라 수리가 가능한 고장발생확률이 변하는 경우가 있다.

교체 및 수리와 관련한 예방보전정책들의 주요 연구들 이들 기준에 따라 요약해 보면 다음과 같다.

2.1 고장시간 기준 예방보전모형

1960년 R. Barlow와 L. Hunter는 두 가지의 예방보전정책을 제시하였다. 하나의 정책(policy I)은 수명교체정책(age replacement policy)으로 부품 또는 설비가 예방교체시점(T) 이전에 수리불가능한 고장이 발생하면 고장 즉시 교체하고, 예방교체시점(T)까지 고장이 나지 않으면 시점 T에서 예방교체를 하는 정책이며, 다른하나 정책(policy II)는 수리사용 후 교환정책(periodic replacement policy with minimal repair)으로 예방교체시점(T) 이전에 발생하는 수리가 가능한 고장에 대하여 최소한의 수리를 하여 사용하다가, 시점 T에 이르면 예방교체하는 정책으로서, 주로 규모가 크고 복잡한 설비의 예방보전문제에 적용한다.

1960년 고장시간기준모형에 대해 R. Barlow와 L. Hunter가 연구발표한 이후 많은 일반화 연구가 있어 왔는데, 요약하면 <표 1>과 같다.

1974년 T. Nakagawa는 수리시간을 고려한 모형을 제시하였고, 1979년 R. Cleroux 등은 수리비용을 고려하였으며, 1980년 F. Beichelt는 고장형태가 두가지인 경우를 고

<표 1> 고장시간기준 예방보전정책 모형

기존연구	교체시기	수리형태			수리조건		고장형태		비고
		완전수리	최소수리	불완전수리	비용일정화 C	시간고려 무시 C/N	수리가능	수리불가능	
Barlow & Hunter[60]	T(예방교체시점), 고장시	○			C	N	○	○	age replacement
	T		○		C	N	○		periodic replacement
Nakagawa[74]	T, 수리시간한계초과 고장시	○	○		R	C	○		
Muth[77]	T후 첫번째고장시		○		C	N	○		
Nakagawa[78]	T, 고장시	○			C	N		○	Block replacement
Cleroux[79]	T, 수리비한계 초과 고장시		○		R	N	○		cost limit replacement
Beichelt[80]	T, 수리불가부품 고장시	○	○		C	N	○	○	two type failures
Nguyen[80]	T, 수리시간한계초과 고장시		○		R	C	○		time limit replacement
Nakagawa[81]	T		T0전		C	N	○		modified replacement
Nguyen[81]	T, 수리시간한계초과 고장시			○	C	N	○		two type repair
Bergman[82]	T, 고장시			○	C	N	○		graphical method
Boland[82]	T, 수리비한계 초과 고장시	○	○		R	N	○		repaircost considered
Kaio[82]	수리시간한계 초과 고장시	○	○		R	C	○		repaircosts considered
Nguyen[84]	T, 수리비 한계 초과 고장시		○		R	N	○		many units
Bae[86]	T이후첫번째고장, 수리비한계초과 고장시	○	○		R	N	○		
Nakagawa[87]	T			○	C	N	○		imperfect repair
Makis[93]	T, 수리비 한계 초과 고장시			○	R	N	○		

고려한 모형을 제시하였다. 1993년 V. Makis는 수리후 상태가여러가지인 불완전 수리를 고려하여 일반화 하였다.

2.2 고장횟수 기준 예방보전모형

1979년 K.S. Park에 의해 제시된 고장횟수 기준 예방보전정책은 R. Barlow와 L.

Hunter에 의해서 처음 소개된 수리사용 후 정기교체정책과 착상이 비슷하나 한가지 다른점이 있다면 장비교체 시기가 정기적으로 수행되는 대신 운용중 고장은 수리하여 사용하다가 고장횟수가 이미 정해진 횟수에 이를 때 교체해 주는 것으로, R. Barlow와 L. Hunter의 고장시간기준 교체정책을 고장

<표 2> 고장횟수기준 예방보전정책 모형

기존연구	교 체 시 기	수리형태			수리조건		고장형태		비 고
		완전수리	최소수리	불완전수리	비용 일정 확률 적R	시간 고려 무시 C N	수리 가능	수리 불 가능	
Park[79]	N		○		C	N	○		
Nakagawa[81]	N, 수리불가능 고장시	○	○		C	N	p	1-p	two type failures
							○	○	two type units
Bai[83]	N, type2 unit 고장시	○	○		C	N	○	○	two type units
Park[85]	N, catastrophic고장시, major limit 초과시	○	○		R	N	○		major failure 수
Park[87]	N, 수리비용초과고장시	○	○		R	N	○		minor failure 수
Suh[91]	N, 수리불가능 고장시	○	○		C	N	p_t	$1-p_t$	p_t 시간에따라 감소
Sheul[93]	N, type 2발생시, 수리비용한계초과고장시	○	○		R	N	p	1-p	two type failure repair cost limit

2.2 고장횟수 기준 예방보전모형

1979년 K.S. Park에 의해 제시된 고장횟수 기준 예방보전정책은 R. Barlow와 L. Hunter에 의해서 처음 소개된 수리사용 후 정기교체정책과 착상이 비슷하나 한가지 다른점이 있다면 장비교체 시기가 정기적으로 수행되는 대신 운용중 고장은 수리하여 사용하다가 고장횟수가 이미 정해진 횟수에 이를 때 교체해 주는 것으로, R. Barlow와 L. Hunter의 고장시간기준 교체정책을 고장횟수 기준으로 변형한 모형이다. 이 모형은 (N-1) 번째 고장까지는 최소한의 수리를 하여 사용하다가 N번째의 고장에서 고장교체하는 정책으로써 고장시간을 기록하는 번거

로움을 덜어 현장적용을 보다 간편하게 하였다. R. I. Phelps는 K.S. Park의 고장횟수 기준 모형이 R. Barlow와 L. Hunter의 모형보다 비용효과면에서 유리하다고 밝혔다.

K.S. Park의 고장횟수기준 모형은 1981년 T. Nakagawa에 의해 두가지 고장형태를 고려한 모형으로 일반화 되었으며, 1987년 K.S. Park에 의해 수리비용을 고려한 모형으로 일반화 되었다. 요약하면 다음 <표 2>와 같다.

2.3 고장시간 및 고장수 통합모형

1983년 T. Nakagawa에 의해 제시된 고장시간 및 고장횟수 통합모형은 R. Barlow와 L. Hunter의 모형을 좀 더 일반화한 모

<표 3> 고장시간 및 고장횟수의 통합모형

기존연구	교체시기	수리형태			수리조건		고장형태		비고
		완전수리	최소수리	불완전수리	비용 일정 확률적 R	시간 고려 무시 C N	수리 가능	수리 불 가능	
Nakagawa[83]	T, N		○		C	N	○		
Bai[83]	T, N, tpe2 unit 고장시	○	○		C	N	○	○	two type units
Nakagawa[89]	T, N(shock), Z(damage)		○		R	N	○		C(T,N,Z)

형이다. 이 모형은 교체간 고장에 대해서는 최소수리를 하여 사용하다가 예방교체시점 T와 고장횟수 N중 먼저 발생하는 시점에서 교체하는 정책이다. 이 모형은 예방교체시점 T 이전에 많은 고장이 발생하거나, 고장시 교체비용이 예방교체비용보다 많이 소요되는 경우에 이점을 갖는다.

T. Nakagawa의 통합모형은 1983년 D.S. Bai에 의해 두가지 부품(two types of unit)을 가진 시스템으로 일반화되었고, 1989년 T. Nakagawa에 의해 수리비용을 고려한 모형으로 일반화되었다. 요약하면 <표 3>과 같다.

3. 예방보전정책의 방침

예방교체 및 수리모형들은 수리적인 모형 분석을 통해 최적의 예방교체 및 수리 시점을 구해야 되는데, R. Barlow와 L. Hunter (1960)의 해결방법을 요약하면 다음과 같다.

① 최소수리를 가정한 수리가능한 고장의

경우, Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP)를 적용하고, ② 수리후 상태가 신제품 또는 중간품 등 여러가지 형태가 되는 경우, Markov Decision Process 또는 Stochastic Process를 적용하며, ③ 수리불가능한 고장의 경우는 Renewal Theory를 적용한다. 전술한 예방교체 및 수리모형들에 대해 교체시기, 수리형태, 수리조건, 그리고 고장형태에 따라 각각의 예방보전 방침을 제시하면, 다음의 정책들이 가능하다.

3.1 교체시기

- 정책 1 : 예방교체시점 T에서 교체한다.
- 정책 2 : 예방교체시점 T이후 첫 번째 고장에서 교체한다.
- 정책 3 : 한계최소수리 수 N번째 고장에서 교체한다.
- 정책 4 : 예방교체시점 T와 N번째 고장중 먼저 발생하는 시점에서 교체한다.

3.2 수리형태

- 정책 5 : 예방교체시점 이전의 고장은 완전수리(고장교체)한다.
- 정책 6 : 예방교체 및 N번째 고장시점 전의 고장은 최소수리를 한다.
- 정책 7 : 예방교체 및 N번째 고장시점 전의 고장은 불안전수리를 한다.
- 정책 8 : 예방교체시점 이전의 특정시점 전(T_0)에는 최소수리를 하고, 특정시점(T_0)에서 예방교체시점까지는 고장교체를 한다.

3.3 수리조건

- 정책 9 : 한계수리비용을 초과하면 고장교체한다.
- 정책 10 : 한계수리비용을 넘지 않으면 수리를 한다.
- 정책 11 : 한계수리시간을 초과하면 고장교체한다.
- 정책 12 : 한계수리시간을 넘지 않으면 수리를 한다.

3.4 고장형태

- 정책 13 : 수리가능한 고장이 발생하면 수리를 한다.
- 정책 14 : 수리불가능한 고장이 발생하면 고장교체한다.

4. 결 론

부품이나 시스템의 신뢰도를 높이는 것은

기업경영에 있어 원가절감이나 품질향상 등과 함께 중요한 전략적 경쟁요인이 되고 있다. 교체 및 수리정책을 통해 운용신뢰도를 높이는 연구는 1960년 Barlow & Hunte가 소개한 이후 많은 일반화 연구가 있었다.

예방교체 및 수리정책은 고장시간기준 모형, 고장횟수기준 모형, 그리고 고장시간 및 고장횟수 통합모형으로 대별할 수 있다. 이들 모형은 교체시기, 수리조건, 그리고 고장형태에 따라 여러 가지 예방보전정책으로 나누어 진다.

본 연구는 예방교체 및 수리정책의 문헌들을 체계적으로 분류, 요약, 검토하여 예방보전정책의 가능한 지침을 제공하였다. 추후 이러한 지침을 기반으로 좀 더 현실적인 정책이 개발되고, 과학적이며 체계적인 수리적 해법연구가 신뢰도, 가용도 그리고 보전도 향상 관점에서 접근될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] D.S. Bai, J.S. Jang and Y.I. Kwon, *Generalized Prevented Maintenance Policies for a System Subject to Deterioration*, IEEE Transactions on Reliability, Vol, R-32, No. 5, December 1983.
- [2] Richard Barlow and Larry Hunter, *Optimum Preventive Maintenance Policies*, June 1959.

- [3] Frank Beichelt and Klaus Fischer, *General Failure Model Applied to Preventive Maintenance Policies*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-29, No. 1, April 1980.
- [4] Frank Beichelt, *A Replacement Policy Based on Limits for the Repair Cost Rate*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-31, No. 4, October 1982.
- [5] Philip J. Boland, *Periodic Replacement When Minimal Repair Costs Vary with Time*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 29, No. 4, December 1982.
- [6] R. V. Canfield, *Cost Optimization of Periodic Preventive Maintenance*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-35, No. 1, April 1986.
- [7] P.K.W. Chan and T. Downs, *Two Criteria for Preventive Maintenance*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-27, No. 4, October 1978.
- [8] S.S. Cheng, *Optimal Replacement Rate of Devices with Lognormal Failure Distributions*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-26, No. 3, August 1977.
- [9] R. Clerous, S. Duguc and C. Tilquin, *The Age Replacement Problem with Minimal Repair and Random Repair Costs*, O.R. Vol. 20, No. 2, 1979.
- [10] R.W. Drinkwater and N.A.J. Hastings, *An Economic Replacement Model*, O.R.Q, Vol. 18, No. 2, 1967.
- [11] N.A.J. Hastings, *The Repair Limit Replacement Method*, O.R.Q, Vol. 20, No. 3, 1969.
- [12] C.L. Hwang, F.A. Tilman, W.K. Wie, *Optimal Scheduled-Maintenance Policy Based on Multiple-Criteria Decision-Making*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-28, No. 5, December 1979.
- [13] Naoto Kaio and shunji Osaki, *Optimum Ordering Policies with Lead Time for An Operating Unit in Preventive Maintenance*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-27, No. 4, October 1980.
- [14] Naoto Kaio and Shunji Osaki, *Optimum Repair Limit Policies with a Time Constraints*, INT. J. Systems Sci. Vol. 13, No. 12, 1982.
- [15] Janusz Karpinski, *A Multistate System Under an Inspection and Repair Policy*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-35, No. 1, April 1986.
- [16] Pierre L'Ecuyer and Alain Haurie, *Preventence Replacement for Multicomponent Systems : An*

- Opportunistic Discrete-Time Dynamic Programming Model*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-32, No. 1, April 1983.
- [17] Kamran Moinzadeh and Hau L. Lee, *Approximation Order Quantities and Reorder Points for Inventory Systems where Orders Arrive in Two shipments*, Operations Research, Vol. 37, No. 2, March-April 1989.
- [18] D.N.P. Murthy, M.R. Maxwell, *Optimal Age Replacement Policies for Items a Mixture*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-30, No. 2, June 1981.
- [19] Eginhard J. Muth, *An Optimal Decision Rule for Repair vs Replacement*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-26, No. 3, August 1977.
- [20] Toshio Nakagawa and Shunji Osaki, *The Optimal Repair Limit Replacement Policies*, O.R.Q, Vol. 25, No.2, 1974.
- [21] Toshio Nakagawa, *Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-26, No. 3, August 1977.
- [22] Toshio Nakagawa, *Generalized Models for Determining Optimal Number of Minimal Repairs before Replacement*. Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 24, No. 4, December 1981.
- [23] Toshio Nakagawa, *A Modified Block Replacement with Two Variables*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-31, No. 4, October 1982.
- [24] Toshio Nakagawa, *Optimal Number of Failures before Replacement Time*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-32, No. 1, April 1977.
- [25] Toshio Nakagawa and Kazumi Yasui, *Optimum Policies for a System* R-36, No. 5, December 1987.
- [26] D.G. Nguyen and D.N.P. Murthy, *Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems*, J. O.R of America, 1981.
- [27] Kyung S. Park, *Optimal Number of Minimal Repair before Replacement*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-28, No. 2, June 1979.
- [28] Kyung S. Park, *Optimal Number of Major Failure before Replacement*, Microelectron Reliability, Vol. 25, No. 4, 1985.

- [29] Kyung S. Park, *Optimal Number of Minor Failures before Replacement*, Int. J. Systems Sci., Vol. 18, No. 2, 1987.
- [30] R.L. Phelps, *Replacement Policies under Minimal Repair*, J. O.R, Vol. 32, 1981.
- [31] Shey-Huei Sheu, *A Generalized Model for Determining Optimal Number of Minimal Repairs before Replacement*, European J. O.R, 1993.
- [32] S.H. Sim and J. Endrenyi, *Optimal Preventive Maintenance with Repair*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-37, No. 1, April 1988.
- [33] Charles E. Wells, *Replacement vs Repair of Failed Components for a System with a Random Lifetime*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-37, No. 3, August 1988.
- [34] Shigeru Yamada and Shunji Osaki, *Optimum Replacement Policies for A System Composed of Components*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-30, No. 3, August 1981.
- [35] Wolfgang Stadje and Dror zuckerman, *Optimal Maintenance Strategies for Replacement Systems with General Degree of Repair*, J. Appl. Prob, 1991.