2003 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회

설비예방보전을 위한 TBM의 최적보전주기 설정모델 연구

A Research on the Determining Model of the Optimizing Maintenance Interval in TBM for the Preventive Maintenance of Facilities

권 오 운 * 이 홍 철 **
Oh-Woon Kwon * Hong-Chul Lee **
* 고려대학교 산업시스템정보공학과, KSA ** 고려대학교 산업시스템정보공학과

Abstract

The purpose of this research aimed at performing the easy design, and also the easy on-the-job application of the maintenance interval determination methodology by presenting the determining model of the optimizing maintenance interval in TBM for the preventive maintenance of facilities TBM(time-based maintenance) as the preventive maintenance requires the adequate determination of the maintenance interval. The maintenance interval of TBM shall be applied differently for the each interval such as the patrol inspection, maintenance, overhaul inspection, exchange. And it is based on the composition level of equipment. The already informed theories of interval determination methodology for the patrol inspection, repair, and overhaul inspection are difficult for adopting because of the several restriction problems in applying in the maintenance schemes as the theory. So, the model for determining the optimizing exchange interval of part, maintenance interval of auxiliary machine, unit equipment, etc. was presented to apply in the maintenance easily and appropriately.

Keywords : 시간기준 예방보전(TBM), 최적보전주기, 최적교체주기, 최적수리주기, 최적검사주기

1. 서 론

본 연구의 목적은 설비의 예방보전을 위한 TBM에서의 최적보전주기의 설정모델 제시에 의하여 예방보전의 원활화와 보전주기 설정의 실무적 적용의 용이화를 위함에 있다. 설비의 예방보전방식의 핵심인 시간기준 예방보전(TBM)과 상태기준 예방보전(CBM)의 적절한 선택 및 적용을 통한 장치설비의 고장을 감소시키고 안정적인 조업을 위한 예방보전 체계 수립에 기여하기 위한 점검, 정비, 검사의 합리적인 주기설정이 주가 되고 있다.

설비의 보전(점검, 정비, 검사, 교체)주기를 경제적으로 결정하는 것은 예방보전을 위한 중요한 사항이다. 과거의 실적자료에서 성능열위경향, 열위에 의한 손실, 검사 및 수리 등의 보전비용을 알고 있으면 OR이나 시뮬레이션에 의하여 최적해를 구할 수도 있다. 설비설치 후의 PM초기에는 이러한 자료가 부족하므로 경험적으로 주기를 정하여 시행하면서 정확한 자료를 축적하는 체제를 정비하는 것이 선결문제가 될 것이다.

그러나 예방보전 방식의 설계를 위한 시간기준 예방보전(TBM)방식의 적용을 위한 최적보전주기의 설정이 불명확한 상태에서 보전주기를 정해서 시행은 되고 있으나 이의 합리적 근거에 의거한 설정이 되지 못하다 보니 현실성이 있는 보전이 되지 못하는 실정이다.

기업에서의 실무적인 현실은 보전주기를 정할 시에 MTBF 그 자체를 보전주기로 하는 것, 보전과 점검, 정비, 검사에 대한 용어의 혼용, 부품·유니트·설비의 레벨별 구분적용 모호, 이미 소개된 이론의 실무에의 적용 난이 등의 문제점이 있으므로 합리적이면서도 용이한 최적보전주기의 설정에 대한 필요성이 큰 실정이다.

그래서 본 연구에서는 시간기준 예방보전(TBM)을 위한 최적보전주기의 설정에 대한 기존의 이론들에 대한 한계점들을 살펴 본 후 최적보전주기 설정에 대한 제안 모델을 제시하기로 한다.

2. 설비의 예방보전과 보전주기 설정의 이론적 고찰

2.1 설비의 예방보전 및 TBM의 기본 개념

설비의 보전방식은 설비가 고장이 나기 전·후에 실시하는 것을 기준으로 하여 분류하여 보면 <그림 1>과 같이 예방보전(Preventive Maintenance : PM)과 사후보전(Breakdown Maintenance : BM)의 2가지 방식으로 크게 분류할 수 있다.

먼저 예방보전(PM)은 사용시간을 근거로 하여 보전을 실시하는 시간기준 예방보전(Time Based Preventive Maintenance : TBM), 설비를 정기적으로 분해 또는 점검하고 그 시점에 적부를 판단하여 불량인 것을 교환하는 것인 분해점검형 보전(Inspection & Repair : IR), 설비진단기술(CDT)에 의해 설비의 상태(machine condition)를 관측하여 그 관측치에 따른 보전을 실시하는 상태기준 예방보전(Condition Based Preventive Maintenance : CBM)으로 분류된다(JIPM, 1992).

그리고 사후보전(BM)은 경제성을 고려하여 계획적인 정책으로서「고장이 날 때까지 사용하여 보전한다」라고 하는 계획사후보전(Planned Breakdown Maintenance : PBM)방식과「예상외의 고장을 긴급교체 또는 복구」하는 긴급사후보전(Emergency Breakdown Maintenance : EBM)으로 분류할 수 있다(豊田, 1996). 사후보전 중 계획사후보전(PBM)은

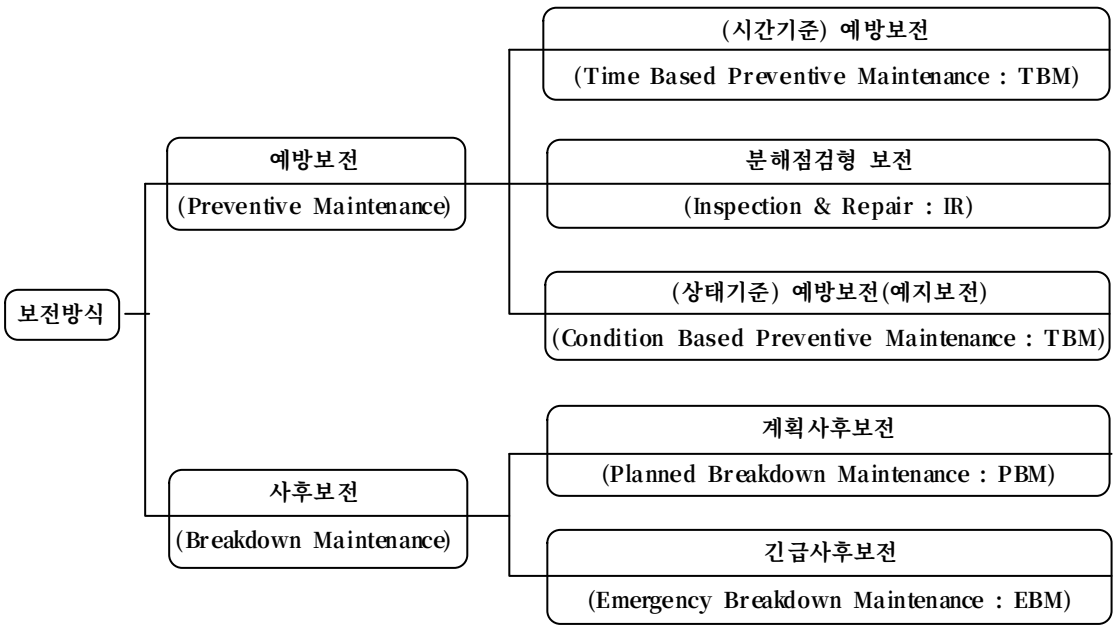

그림 1. 설비 보전방식의 분류

정책적으로 행하는 보전이므로 있어도 좋지만 긴급 사후보전(EBM)은 적을수록 좋다고 하는 것이 된다. 이 긴급사후보전(EBM)을 제외한 4가지의 보전 방식은 어느 것이 좋고 어느 것이 나쁘다고 말할 수 없고, 설비의 열화특성과 예방보전의 코스트, 돌발 고장에 의한 생산손실의 크기에 의해 선택하여야만 하는 것이다. 예방보전(PM)은 진보된 방식이고 사후보전(BM)은 나쁜 방식이라고 단정해 버리는 것은 잘못된 판단이라고 볼 수 있는 것이다(豊田, 1996).

한편 자주 언급되는 보전인 개량보전(CM, Corrective Maintenance)은 현존 설비의 설계 및 설치상의 불합리점을 개선하는 보전으로서, 예방보전 또는 사후보전을 실시할 때에 모두에서 발생될 수 있는 보전의 성격을 지닌다. 수명 연장이나 수리 시간 단축 등의 대책이나 비용을 절감하기 위한 대책을 취하기 위해 사용되는 보전의 성격을 지닌다. 개량보전은 수명이 짧고 고장 빈도가 높으며 고장의 수리비가 큰 것, 수리 시간이 길고 다른 데 미치는 영향이 크며 유지 관리 비용이 큰 것, 열화경향의 산포가 크거나 점검·검사하기 어려운 것에 적용한다.

보전방식의 선택은 그 플랜트 설비가 처한 경제적 환경과 대상 설비의 중요성 및 열화특성에 의해, 최적인 방법을 선택해야 된다는 것을 유의하지 않으면 안된다.

2.2 설비의 구성 레벨별 보전주기 설정 개념

설비의 구성 레벨은 다음 <그림 2>와 같이 정리

주기의 설정을 달리하여 관리하는 것이 관건이 된다 권오운, 1998). 즉 부품 레벨은 교환주기를 설정하여 예방보전을 실시하고, 조립품, 컴포넌트, 서브시스템, 시스템 레벨에서는 보전주기를 설정하여 예방보전을 실시하도록 한다.

예방보전주기의 설정 및 관리 측면에서 볼 때 마모 부품인 경우는 어느 정도 교환주기 예측이 가능하나, 여러 부품들로 구성된 단위설비(Component)나 보조기계(Unit)의 보전주기를 MTBF에 근거하여 평균수명 m (MTBF) 수치보다 짧은, 엄밀하게는 보전주기(t_P)가 m에서 표준편차 s 의 3배를 뺀 값보다 작은 $t_P \leq (m-3s)$가 되도록 설정하여 관리하는 데는 현실적으로는 어려움이 있는 실정이다(豊田, 1996).

그래서 단위설비나 보기(보조기계)는 반복적으로 수리해서 사용이 가능하므로 TPM실무에서는 평균수명인 MTBF의 표준편차를 일일이 구하기 어려우므로 경험에 의거하여 편의상 MTBF보다 짧은 주기 부품인 베어링, 임펠러, 벨트 등은 MTTF(고장시까지의 평균시간)를 구해서 MTTF보다 짧은 주기(예, MTTF×0.8)에 교환주기를 정해 예방보전을 하도록 한다.

또한 부품에 대해서는 마모 부품인 베어링, 임펠러, 벨트 등은 MTTF(고장시까지의 평균시간)를 구해서 MTTF보다 짧은 주기(예, MTTF×0.8)에 교환주기를 정해 예방보전을 하도록 한다.

한편 생산 라인(혹은 세부공정)이나 복잡한 설비를 대상으로 한 보전주기에 대해서는 보전주기가 1

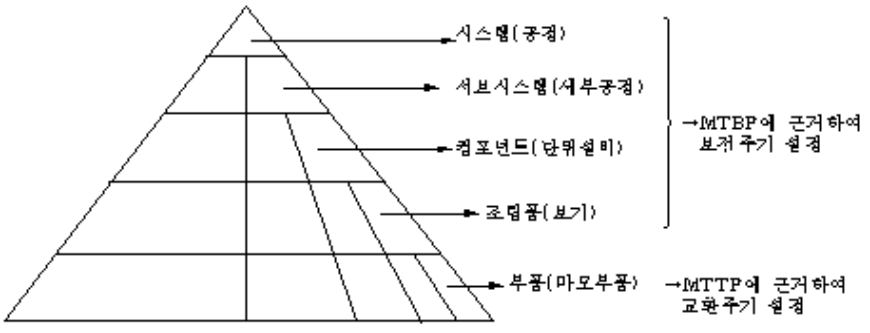

그림 2. 설비의 구성 레벨

가 많다. 이 때의 Overhaul주기는 ①생산량 ②작동 횟수 ③작동시간 ④메이커 추천 Overhaul주기 ⑤단위설비 레벨의 MTBF 등을 고려하여 TBO(Time Between Overhaul)를 설정하여 보전계획 수립 및 관리하고 있다(권오운, 1998).

3. 시간기준 예방보전(TBM)방식의 보전주기 결정의 이론적 고찰

3.1 시간기준 예방보전(TBM)방식의 이론적 배경 및 제약점

종래부터 시간기준 예방보전(TBM)을 적용해 오고 있는 데, 이 방식에서는 보전대상이 되는 설비의 고장률 $l(t)$가 시간과 함께 증가하는 IFR(Increasing Failure Rate)형이라는 것을 전제로 하고 있다.

결국 <그림 3>의 설비의 Bathtub곡선에 있어서, 시간기준 예방보전(TBM)이 유효한 것은 마모고장기간(그림 중의 L점으로부터 우측)이고, 그 이외에서는 시간기준 예방보전(TBM)이 무의미하다고 볼 수 있는 것이다(豊田, 1996).

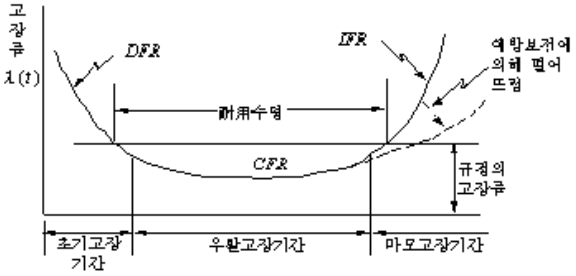

그림 3. 설비의 욕조(Bathtub)곡선

지금까지 알려진 바에 의하면 기간별 적절한 보전방식은 다음과 같다(川崎, 1992).

① 초기고장기간 : 설비의 신 설치시 또는 복구 직후의 기간으로서, 이 기간은 높은 고장률을 나타내지만, 점차로 안정되어 일정치를 나타내게끔 된다. 이 기간에서는 디버깅과 스크리닝이 유효하다.

② 우발고장기간 : 고장률이 일정한 기간이다. 이 기간은 고장의 타이밍·원인에 의해 랜덤한 예방보전(TBM)은 무의미하며, 설비운용 관리 및 예지보전 방식이 유효하다.

③ 마모고장기간 : 마모와 피로가 진행되어 고장률이 상승하기 시작하는 기간이다. 이 기간에서는 예방보전 방식이 효과적이다.

그러나 최근의 연구에 의하면, 대부분의 플랜트 생산설비의 고장률 $l(t)$는 시간에 의존하지 않고 일정하며, 고장률 $l(t)$가 <그림 3>처럼 시간과 함께 증가하여 IFR형을 나타내는 설비는 일부에 지나지 않는다고 한다(豊田, 1996).

미국의 한 항공회사의 기계 및 기계 부품의 고장률 $l(t)$의 시간에 대한 특성 조사에 의하면, 고장률 $l(t)$가 시간과 함께 증가하는 것은 11%에 지나지 않고, 고장률 $l(t)$가 일정한 것이 약 89%를 차지하고 있는 것으로 나타났었다. 또, 복잡한 기계일수록 고장률 $l(t)$가 시간에 대해서 일정수치를 나타낸다는 것이 신뢰성공학에서 증명되어 있다. 따라서, "TBM은 원리적으로 복잡한 기계의 보전에 적합하지 않다."고 한다(豊田, 1996, 川崎, 1992).

<그림 4>는 TBM에 있어서의 고장률 $l(t)$와 고장의 빈도분포(엄밀하게는 고장밀도함수 $f(t)$)를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 고전적인 예방보전(TBM)에서는, 전체의 2%가 고장이 나는 시간을 예방보전 타이밍으로 하고 있다(豊田, 1996). 그렇게 하 면 2%의 설비는 예방보전이 실시되기 전(결국 가동중)에 고장이 나는 것을 의미한다.

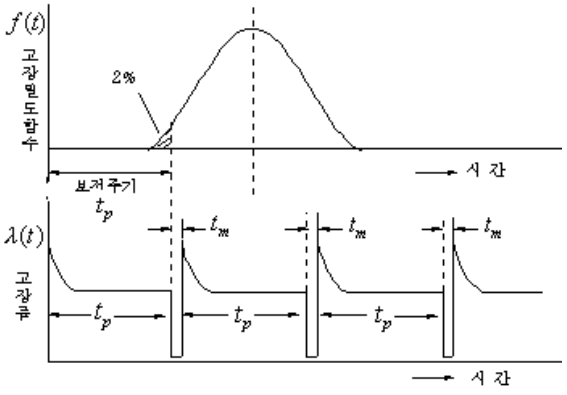

그림 4. 시간기준 예방보전(TBM)의 보전주기 t_p

또, 이 예방보전의 실시로 인하여 다른 대부분의 가동중의 보조기계가 초기불량영역으로 되어 고장률 $l(t)$가 일시적으로 상승한다. 한편, 남은 98%의 보조기계는 아직 충분히 수명을 남겨 놓고 있음에도 불구하고 예지보전에 의해 교체되어 버리는 경우도 발생한다. 이처럼, TBM에 있어서는 보전의 타이밍에 대한 검토가 중요하게 되는 것이다,

통계적으로 볼 때 예방보전에 의해 고장률 $l(t)$를 충분히 작은 값으로 하기 위해서는 평균수명 m에서 표준편차 s의 3배 이상을 뺀 짧은 주기로 보전을 하지 않으면 안된다(권오운, 1998).

<그림 5>에 의하면 고장밀도함수 $f(t)$가 정규분포 $N(m,s^2)$일 때, $N(m,s^2)=N(5,1)$로부터 알 수 있는 것처럼, 평균수명($m=5$)으로부터 $3s$ (이 경우 $s=1$)만큼 짧은 $t=2$ 이전에서 예방보전하면 고장률은 거의 $l(t)=0$이 된다는 것을 알 수 있다.

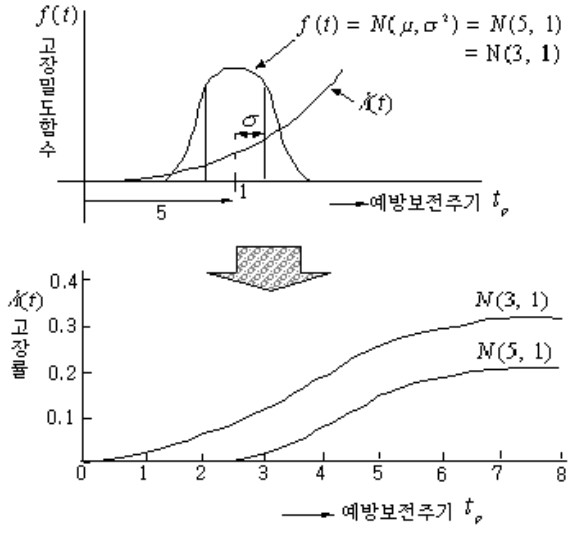

그림 5. 예방보전(TBM)의 주기 t_p와 고장률 $l(t)$의 관계

신뢰성 이론에 의하면, 시간기준 예방보전(TBM)에 있어서 고장 혹은 고장률 $l(t)$를 거의 0으로 하기 위해서는, 예방보전주기 t_p를 다음과 같이 하지 않으면 안된다(豊田, 1996).

$$t_p \le m-3s \qquad (1)$$

여기에서,

t_p : 예방보전주기

m : 보전대상설비의 평균수명(MTBF)

s : 보전대상설비의 수명의 표준편차

그러나, 설비의 수명데이터 분포의 산포 파라미터(표준편차 s)는 품질관리 데이터 등과 비교하여 현격하게 크기 때문에, (1)식을 만족하는 예방보전주기 t_p는 상당히 짧은 주기가 되어 버린다.

이처럼, 시간기준 예방보전(TBM)방식은 본질적으로 극복곤란한 문제가 있다. 아래에 TBM의 본질적인 문제점을 나타내었다.

① 예방보전을 해도, 항상 "어느 정도의 고장"은 발생한다.

② 예방보전에 의해 일시적으로 고장률이 상승한다.

③ 예방보전주기 t_p가 통계적으로 결정되기 때문에, 과도한 정비가 될 확률이 크다.

④ 복잡한 기계에는 효과가 적다. 즉 적용할 수 있는 기계(마모 열화형)의 비율이 적으며, 약 10% 정도에만 적용할 수 있다.

⑤ 보전주기가 짧게 되는 정기적인 예방보전에 의해 가동성(Availability)을 저해한다.

이와 같은 제약점들을 발본적으로 해결하기 위해서는, 서두에서 본 상태기준 예방보전방식(CBM) 혹은 예지보전(Predictive Maintenance)방식과의 병용이 필요하게 된다(권오운, 1998).

시간기준 예방보전(TBM)방식의 이론적 배경 및 사례를 살펴 보았으나 이 방식의 실무 적용상 제약점으로서는 다음과 같이 지적할 수 있다.

① 고장분포에 의거한 표준편차, 평균값 등 파라미터 파악을 위한 신뢰성이 있는 데이터의 축적이 관건이 된다.

② 보전주기를 설정에 대한 실무적으로 적용이 가능한 방법이 빈약하다.

③ 설비의 구성레벨의 복잡성으로 장치설비의 경우 보전주기를 설정했더라도 생산의 연속적 조업특성상 TBM방식의 부품교환, 보조기계나 단위설비

레벨의 보전주기에 의거한 정기보전의 적용이 곤란하다.

④ 부품, 보조기계, 단위설비에 대한 보전주기가 취급설명서에 설정되어 있지 않는 경우 사내표준에 지정되어 잇는 교환주기나 보전주기의 설정에 대한 근거가 미약하다.

3.2 설비의 최적수리(정비)주기 결정의 이론 및 제약점

보전비가 최소화 될 수 있도록 하는 것을 중심으로 하는 설비의 최적수리(정비)주기의 설정에 대한 알려진 이론을 살펴보면 다음과 같다(이진식, 1997; 이순요, 1993).

① 설비의 보전비와 열화손실비와의 합계를 최소로 하는 것이 가장 경제적인 방법이다.

② 단위기간당의 열화손실비는 시간(또는 처리량)의 증대와 더불어 증대한다.

③ 단위기간당의 보전비는 수리주기(시간 또는 처리량)를 길게 하면 할 수록 감소한다.

④ 이 두 가지 비용곡선의 합계곡선으로부터 최소비용점을 구할 수 있으며, 이는 <그림 5>와 같다.

⑤ 최소비용점까지의 주기로 수리하는 것이 가장 경제적이며, 이를 최적수리주기라고 한다.

<그림 6>의 (a)그림에 있어서 열화손실곡선을 $f(x)$, 1회의 보전비를 a원(일정)이라 하고, 최적수리(정비)주기 x_0를 구해 보기로 한다.

$$\text{단위기간당 보전비} = \frac{a}{x} \quad (2)$$

$$\text{단위기간당 열화손실비 합계} = \frac{1}{x}\int_0^x f(x)dx \quad (3)$$

$$\text{양자의 합계} = \frac{a}{x} + \frac{1}{x}\int_0^x f(x)dx \quad (4)$$

이를 미분하여 0으로 놓고 x_0를 구한다.

$$-\frac{a}{x^2} - \frac{1}{x^2}\int_0^x f(x)dx + \frac{1}{x}f(x) = 0$$

$$-a - \int_0^x f(x)dx + xf(x) = 0$$

$$xf(x) - \int_0^x f(x)dx = a \quad (5)$$

이 식의 물리적 의미는 <그림 6>의 (a)도표에 있어서 사선부분이 바로 a원이 되는 점 x_0가 구하는 최적수리(정비)주기이다.

$$x_0 f(x_0) - \int_0^{x_0} f(x)dx = a$$

열화손실비가 직선으로 증가할 경우, 열화손실곡선은 <그림 6>의 (b)도표에 있어서

$$f(x) = l + mx \quad (6)$$

이고, 수리주기 x_0를 구하기 위해 다음과 같이 유도한다.

$$\int_0^{x_0} f(x)dx = \int_0^{x_0} f(l+mx)dx$$

$$= \left[lx + \frac{1}{2}mx^2 \right]_0^{x_0}$$

$$= lx_0 + \frac{1}{2}mx_0^2$$

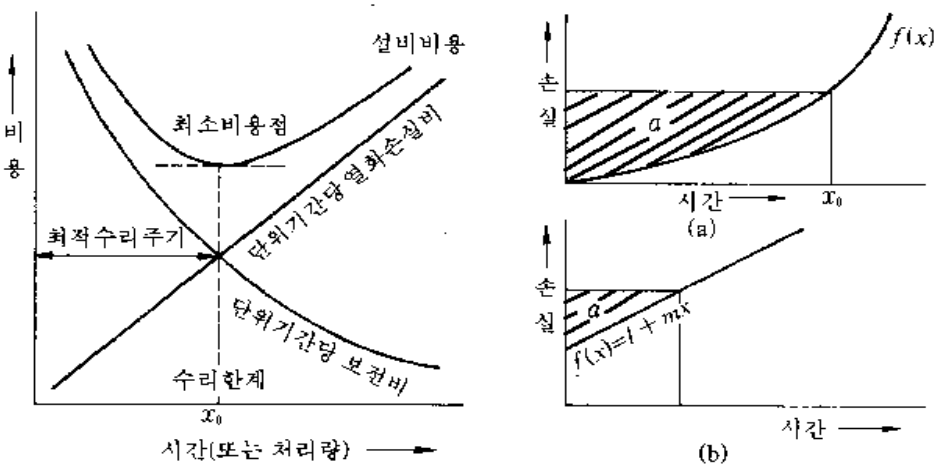

그림 6. 최적수리주기 산출

이므로

$$x_0 f(x_0) - \int_0^{x_0} f(x)dx = a$$

에서

$$x_0(l + mx_0) - \left(lx_0 + \frac{1}{2} mx_0^{\,2} \right) = a$$

위에서와 같은 요령으로 유도하면 수리주기 x_0 는 다음과 같이 구해진다.

$$x_0 = \sqrt{\frac{2a}{m}} \qquad (7)$$

여기서, a =100만원/회, m=50만원/월이라고 하면, x_0 =2개월이 된다.

위에서 취급한 최적수리주기 도출 사례는 기능저하형의 경우인데, 기능정지형의 경우에는 고장부품의 대체법에 의하여 비용이 다르게 되며, 대체방법이 문제가 된다. 대체방법의 대표적인 예로서는 개별대체법과 일제대체법이 있으며, 일반적으로 이 두 극단 예의 중간에 최적해가 있는 것이 보통이다.

▶ 최적수리(정비)주기의 계산 사례(이순요,1993)

K 화학공장에 있는 반응탑이 과거의 자료에 의하면 <표 1>과 같이 사용기간이 길어짐에 따라 생산량이 저하되어 가고 있다.

이 생산량의 저하라는 성능열화에 의한 매기의 손실은 톤당 한계이익(공헌이익)을 2,000원이라고 하면 등가환산의 결과 <표 2>의 ⑦열과 같이 된다.

표 1. K 화학공장의 반응탑 자료

연 수	0.5	1	1.5	2	2.5
생산량 저하(톤)	0	500	1,000	1,500	2,000
연 수	3	3.5	4	4.5	5
생산량 저하(톤)	3,000	4,000	5,000	7,000	10,000

여기서, 이자율은 반기에 10%이다.

보전비는 수리비, 검사비, 수리를 위한 정지손실비, 수리후 안정생산까지의 회복손실비 등을 포함하고 있으나, 이 경우에는 1회당 보전비로서 공사비와 정지손실비를 합하여 10,000,000원(9,000,000원+1,000,000원)이 소요된다고 하면 연수에 따른 매기의 보전비는 <표 2>의 ⑧열과 같이 된다. <그림 7>은 이 사례의 최적수리주기 도표를 나타내 주고 있다.

설비의 최적수리(정비)주기 결정의 이론 및 사례에 대해 살펴 보았으나 이 이론의 실무 적용상 제약점으로서는 다음과 같이 지적할 수 있다.

① 수리비 산출을 위한 기초적인 데이터의 축적이 관건이 된다.

② 보전비는 "재료비+노무비+보전경비+외주공사비"로 구성되는데, 수리비, 검사비에 대한 용어의 명확화, 수리를 위한 정지손실비, 수리후 안정생산까지의 회복손실비 등에 대한 기준이 설정되어 있어야 하며, 사례의 경우처럼 1회당 보전비로서 공사비

표 2. 등가환산의 결과표

연수	생산량 저하 ①	손실액 (①×한계이익) ②	현가계수 ③	현재가치 (②×③) ④	현가누계 (Σ ④) ⑤	자본회수계수 ⑥	매기의 열화손실비 (⑤×⑥) ⑦	매기의 보전비/회×⑥ ⑧	매기의 비용합계 (⑦+⑧) ⑨
	톤	천원		천원	천원		천원	천원	천원
0.5	0	0	0.909	0	0	1,100	0	11,000	11,000
1	500	1,000	0.826	826	826	0.576	475	5,760	6,235
1.5	1,000	2,000	0.751	1,502	2,328	0.402	935	4,020	4,955
2	1,500	3,000	0.683	2,049	4,377	0.315	1,375	3,150	4,525
2.5	2,000	4,000	0.621	2,730	6,861	0.264	1,810	2,640	4,450
3	3,000	6,000	0.565	3,390	10,251	0.230	2,360	2,300	4,660
3.5	4,000	8,000	0.513	4,104	14,355	0.205	2,930	2,050	4,980
4	5,000	10,000	0.447	4,670	19,025	0.187	3,550	1,870	5,420
4.5	7,000	14,000	0.424	5,950	24,975	0.174	4,340	1,740	6,080
5	10,000	20,000	0.385	7,700	32,675	0.163	5,320	1,630	6,950

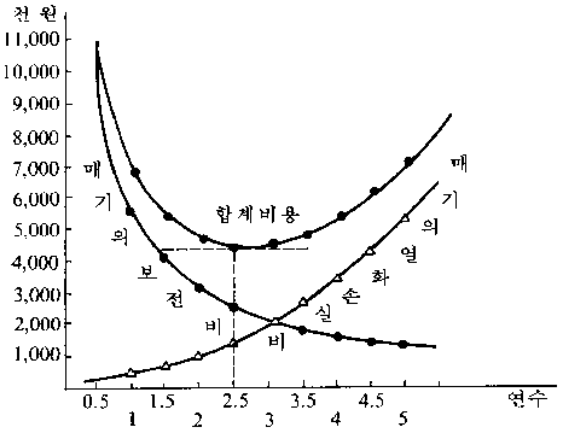

그림 7. 최적수리주기 도표

와 정지손실비를 합하여 보전비를 산출하였듯이 공사비, 정지손실비에 대한 산출체계가 갖추어진 경우에만 가능하다.

③ 한계이익(공헌이익) 산출을 위한 직접원가계산 체계가 수립되어 있어야 한다.

④ 부품별 고장부품의 대체법에 대한 체계가 완비되어 있어야 한다.

⑤ 화학장치의 설비와 같이 정기적인 일괄보전이 이루어지는 경우에는 사용기간별 생산량저하를 파악하여 최적수리주기를 파악할 수 있으나, 보조기계나 부품에 대한 보전주기나 교환주기를 산출하는 경우에는 적용이 곤란하다.

3.3 설비 최적검사주기의 산출 및 제약점

설비별. 부품별로 알맞은 보전주기의 설정은 설비의 고장을 최소화 하여 보전비 절감에 기여하는 중요한 요소라 할 수 있다. 적절한 보전주기의 산출은 통상 경험적인 요소가 가미되어 정기적인 보전활동이 행하여지나 설비의 중요도, 부품의 중요도에 따라 수치적인 데이터를 통한 보전주기의 산출이 필요하다.

다음의 등식은 최적의 검사(점검)주기를 산출하는 공식이다(이순요, 1993).

$$T = \sqrt{\frac{2C_i}{lC_e}} \qquad (8)$$

여기서, T : 최적검사(점검)주기

C_i : 점검 1회당 소요되는 비용

l : 고장률($l = 1/MTBF$)

C_e: 고장시 손실비용

공식에 의한 최적의 검사(점검)주기를 산출하는 절차는 다음과 같다.

① MTBF산출을 위한 자료 집계 - 해당 설비의 개소별 발생하는 여러 가지 보전작업 한 건, 한 건을 한 장의 카드에 기록하여 MTBF분석 기록표로서 활용한다. MTBF분석은 현장 스타일의 "눈으로 보는 고장 기록"으로서 설비별, 개소별 고장 발생 빈도를 알 수 있도록 한다. <표 3>은 KM사 승용차체 Robot설비의 년간 개소별 MTBF 분석 기록 예이다.

② 점검 소요비용 산출 - 설비별, 개소별 점검에 소요되는 비공을 평균하여 산출한다.

점검에 소요되는 시간은 기능의 높고 낮음에 따라 변동이 있으나 중간 수준의 기능보유자를 기준으로 한다.

③ 고장시 손실비용 산출 - 설비 고장시 발생되는 손실 비용을 라인 작업자의 인건비를 산출한다. <표 4>는 사례로서 KM사 승용차체공장 Robot 설비에

표 3. 승용차체 Robot 설비의 부위별 중요 구성 부품 MTBF 분석 자료

(조사기간 '00.1 '00.12)

중 요 부 품	가동시간 (시간)	고장 횟수(r)	MTBF (시간)	l (1/MTBF)
S/Motor	4,023	5	805	1.24×10^{-3}
기 판	4,023	16	251	3.98×10^{-3}
Nipple	4,023	5	805	1.24×10^{-3}
Bolt	4,023	11	366	2.73×10^{-3}
Arm	4,023	4	1,006	9.94×10^{-4}
Shank	4,023	4	1,006	9.94×10^{-4}
Bracket	4,023	7	575	1.74×10^{-3}
Guide	4,023	7	575	1.74×10^{-3}
유압계통	4,023	11	366	2.73×10^{-3}
냉각수	4,023	38	106	9.43×10^{-3}
Bus-Bar	4,023	44	91	1.10×10^{-2}
Trans	4,023	20	201	4.98×10^{-3}
축 불일치	4,023	13	309	3.24×10^{-3}
SCR Timer	4,023	19	212	4.72×10^{-3}
Cable	4,023	43	94	1.06×10^{-2}

표 4. 승용차체 Robot 설비의 Line별 C_e, C_i 산출 예

설비명	C_e (원)	C_i (원)
Robot	98,743	213,000(Gun)
		356,700(본체)
		162,000(인터록)

대한 점검 소요비용과 고장 손실금액을 나타내었다. 아래에 C_i, C_e의 산출에 대한 근거가 되는 자료를 제시하면 다음 <표 5>, <표 6>과 같다.

표 5. C_e : 설비 Down Time당 평균손실금액

Line	등급	작업 인원	인건비 (원/Hr)	계산치	평균손실 (C_e)
U/B	B	3	5,400	16,200	98,743
B/S	A	10	5,400	54,000	
S/C	A	35	5,400	189,000	
PO38	A	20	5,400	108,000	
SUB	C	30	5,400	162,000	
S/F	B	20	5,400	108,000	
B/D	C	10	5,400	54,000	
합 계		128	5,400	691,200	

표 6. C_i : 점검 1회당 소요되는 Cost

부 위	점검 소요 시간	보전 인건비	점검 인원	점검시 자재교환 비용(원)	C_i
Gun 계 통	150분	6,300 원/Hr	4명	150,000	213,000
Robot 계 통	180분	6,300 원/Hr	3명	300,000	356,700
인터록 계 통	60분	6,300 원/Hr	2명	150,000	162,600
비 고	C_i = (점검소요시간×보전비용×점검인원) +자재비용				

④ 최점점검(검사)주기 결정 - 설비별 개소별 MTBF를 분석하여 고장률을 집계하고 개소별 점검 소요비용과 고정손실비용을 산출하여 해당 부품별 최적점검(검사)주기를 결정한다. <표 7>은 승용차체 Robot의 최적점검(검사)주기 산출의 예를 나타내었다.

설비 최적검사(점검)주기의 설정에 대한 이론적 배

표 7. 보전점검 주기 산출의 예

사례 : Robot KI A급 설비

중 요 부 품	l (1/MTBF)	C_e (원)	C_i (원)	주기T (시간)
S/Motor	1.24×10^{-3}	98,743	356,700	76.3
기 판	3.98×10^{-3}	98,743	356,700	42.6
Nipple	1.24×10^{-3}	98,743	213,000	58.9
Bolt	2.73×10^{-3}	98,743	213,000	39.7
Arm	9.94×10^{-4}	98,743	213,000	65.9
Shank	9.94×10^{-4}	98,743	213,000	65.9
Bracket	1.74×10^{-3}	98,743	213,000	49.8
Guide	1.74×10^{-3}	98,743	213,000	49.8
유압계통	2.73×10^{-3}	98,743	162,000	34.7
냉각수	9.43×10^{-3}	98,743	162,000	18.6
Bus-Bar	1.10×10^{-2}	98,743	213,000	19.8
Trans	4.98×10^{-3}	98,743	356,000	38.1
축 불일치	3.24×10^{-3}	98,743	356,000	49.2
SCR Timer	4.72×10^{-3}	98,743	162,000	26.4
Cable	1.06×10^{-2}	98,743	162,000	17.6

경 및 사례를 살펴 보았으나 이 이론의 실무 적용상 제약점으로서는 다음과 같이 지적할 수 있다.

① MTBF산출을 위한 가동시간, 정지시간의 개념 확립이 전제가 된다.

② 점검 소요비용 산출을 위해 점검실시자의 평균 기능수준에 대한 표준설정이 필요하다.

③ 고장시 손실비용 산출을 위해 현장작업자의 인건비를 기준으로 하였으나, 타 설비의 정지 영향에 대한 고려나, 유틸리티 비용 등에 대한 고려 등이 포함될 수도 있을 것이다.

④ 본 사례는 부품레벨의 산출 사례를 들었으나, 보조기계 레벨, 단위설비 레벨과의 종합검토가 필요하다.

4. 설비의 최적보전주기의 설정을 위한 제안 모델 및 사례

다음에 제시된 <표 8>의 최적보전주기 설정사례는 보전실무에서 최적보전주기를 합리적이고도 쉽게 사용할 수 있도록 하기 위해 제안하였다. 통상적으로는 최적보전주기를 설정하기 위해서는 데이터에 의한 실적치, 메이커 추천 이론치, 숙달자의 경험치

이 3가지의 단독 혹은 병용을 고려하는 경우가 일반적이다. 그러나 이들 3가지는 각각 장단점이 있으므로 이들 3가지를 종합 고려한 보전주기에서 보정계수를 고려하여 보정한 값을 사용함으로써 보다 안전하고 현실적인 보전주기를 구할 수 있을 것이다.

표 8. 평준화를 위한 보정계수

요소등급	숙련도	설비환경	작업방법	설비상태
A	10	10	10	10
B	8	8	8	8
C	5	5	5	5
평균	0	0	0	0
D	-5	-5	-5	-5
E	-8	-8	-8	-8
F	-10	-10	-10	-10

최적보전주기(Optimizing Maintenance Interval)란 실적치, 이론치, 경험치의 3가지 보전주기를 고려하여 보전주기를 구한 후, 보전요원 및 운전자의 숙련도, 작업환경, 작업방법, 조업중 설비상태 등의 보정계수를 고려하여 설비가 고장영역에 들어가지 않는 범위에서 예방보전을 실시할 수 있도록 설정하는 보전주기를 말한다.

이 정의에서 중요한 사항은 다음의 4가지 보정요소 사항이다.

① 보전원 및 운전원 숙련도
② 설비가 놓여진 작업환경
③ 일상조업의 작업방법
④ 조업중 설비상태

따라서 최적보전주기는 실적치, 이론치, 경험치의 3가지 보전주기를 고려하여 보전주기를 구한 산출한 보전주기에다 보정계수를 고려한 주기를 말한다.

보정(adjusting)이란 안전한 최적보전주기를 설정하기 위하여 제시된 보전주기에서 고장이 나지 않는 범위에서의 주기를 설정하기 위하여 제시된 주기를 수정하는 것이다.

보정방법으로는 <표 8>의 평준화(Leveling)를 위한 보정계수를 사용하도록 한다.

최적보전주기를 구하기 위한 방법은 다음의 절차와 같이 실시한다

Step 1 - 설비별 보전(점검, 정비, 검사, 교체)이 필요한 보조기계, 부품을 List -up한다.

Step 2 : 총가동시간을 구한다. “부하시간=가동시간+정지시간 ” 에서의 가동시간을 합한다.

Step 3 : 설비 및 보조기계인 경우 MTBF를 구하기 위해 보전(점검, 정비, 검사)회수, 마모부품의 교체인 경우 MTTF를 구하기 위해 고장회수를 과거 실적으로부터 구한다.

Step 4 : 보전(점검, 정비, 검사, 교체)주기를 실적치, 이론치, 경험치 3가지에 대해 각각 구한다. 단, 이들 3가지 중에서 구하는 것이 불가능할 때에는 가능한 항목만을 대상으로 구한다.

우선 실적치로서 점검, 정비, 검사주기의 실적치는 설비가동일지로부터 “MTBF= 총가동시간/보전회수”, 교체주기는 가동일지 혹은 설비이력대장에서 “MTTF= 총가동시간/고장회수”을 산출하고 난 후 이들의 각각의 값에서 0.8을 곱하도록 한다. 고장의 영역에 들어가지 않도록 하기 위해 MTBF(or MTTF)×0.8로 하는 것이다. 엄밀히 말해서 보전주기 이론에서 살펴 본 바와 같이 $t_p \le m-3s$ 로 하여 구해야 하나 고장분포의 표준편차 s 를 일일이 구해 두는 것이 현실적으로 어려우므로 $3s$ 를 $0.2m$ 정도로 하여 경험에 의거하여 구하는 것이다. 이론치는 메이커 추천 주기로 하며, 경험치는 숙달자가 과거 경험으로부터 구하도록 한다.

Step 5 : Step 4에서 구한 보전주기들의 산술평균인 “(실적주기 +이론주기 +경험주기)/n”을 구한다. 3가지를 다 고려하는 경우 n=3이 된다.

Step 6 : 보정계수의 값들을 각각 구한 후, 이들 4가지 보정계수들의 값을 합하여 산술평

균값을 구한다.

Step 7 : 최적보전주기를 다음 식 "(실적주기+이론주기+경험주기)/n×(1+보정계수 산술평균값/20) "에 의해 구한다.

상기 식에서 보정계수 산술평균값을 20으로 나누는 이유는 보정계수들의 값들의 범위가 각각 10~+10까지이므로 최대 20만큼의 범위가 되기 때문이다. 만약 보정계수들의 값들이 전부 +10인 경우를 상정하면 산술평균이 +10이므로 20으로 나누면 0.5가 된다. 즉 Step 5에서 구한 보전주기를 1.5배 만큼 연장하도록 허용하기 위한 보정치가 되는 것이며, 전부 10인 경우는 이와 반대가 되어 Step 5에서 구한 보전주기를 0.5배 만큼 차감하여 보전주기를 설정시켜 설비의 고장을 미연에 방지하도록 하는 것이다.

Step 8 : 산출기간을 연장하여 데이터의 축적이 더해 감에 따라 데이터의 신뢰성이 높아지므로 매년 단위로 기존에 구한

표 9. 설비의 최적보전주기 설정표 사례 (제안 모델)

설 비 명		Sifter(A)						
보조기계(Unit) 명		Motor		전동부				
보 전 작 업 부 위		베어링	V풀리	V벨트	B/R상	B/R하		
보 전 작 업 구 분		교체	교체	교체	교체	교체		
고장(혹은 보전) 횟수 (A라인)	# 1	4	2	6	5	1		
	(중 략)							
	# 5	2	1	5	4	4		
	평 균	2.8	1.6	5.6	5	2.4		
고장(혹은 보전) 횟수 (B라인)	# 6	2	1	4	3	2		
	(중 략)							
	# 12	3	2	6	5	6		
	평 균	3..4	1.4	4.8	3.2	2.8		
고장(혹은 보전) 횟수 (C라인)	# 13	2	1	3	1	1		
	(중 략)							
	# 18	4	0	3	2	4		
	평 균	2.4	0	3	2	4		
총가동시간 (HR)		72,000	72,000	72,000	72,000	72,000		
고장(혹은 보전) 횟수 (회)		50	23	83	54	34		
MTTF, MTBF	총가동시간/고장(보전) 횟수	1,440	3,130	867	1,333	2,117		
실적보전주기(HR) (A)	MTTF(or MTBF)× 0.8	1,152	2,504	693	1,066	1,693		
이론보전주기(HR) (B)	취급설명서 지정 보전주기	35,000	35,000	7,000	35,000	35,000		
경험보전주기(HR) (C)	직제경험에 의함	21,600	35,000	4,800	28,800	35,000		
조정 Factor	숙 련 도 ⓐ	5	8	-5	8	8		
	설비환경 ⓑ	-8	8	0	-5	-8		
	작업방법 ⓒ	5	5	5	5	5		
	설비상태 ⓓ	5	5	5	0	-5		
	평균 ⓔ =합계/4	2	5	1	2	0		
최적보전주기(HR) (E)	[A+B+C]/n× [1+ⓔ/20]	21,175	30,210	4,372	23,784	23,897		

데이터 기간에서 1년을 연장하여 새로운 데이터에 의거 최적보전주기를 업데이팅 하여 최적화된 주기를 산출하도록 한다.

실무에 적용시킨 사례로서 CJ사의 장치 설비의 대한 보전주기를 정한 사례를 제시했다. 부품의 교환주기로서 M TTF(고장시까지의 평균시간)를 구하고, 여기에서 고장 영역에 들어가지 않도록 하는 MTTF×0.8로 실적교체주기(A)를 구한 후, 이론(메이커 추천)주기(B), 그리고 경험교체주기(C)를 고려하여 이 A, B, C 세가지(또는 일부분만도 가능) 주기를 산술평균하여 구한 값에 보정계수의 값을 고려하여 설비의 최적보전주기를 구한 것을 <표 9>에 제시했다.

5. 결 론

본 연구에서 살펴 본 바와 같이 TBM은 보전주기의 설정이 중요하며, 보전주기는 점검, 정비, 검사, 교체 등의 주기가 설비 구성레벨 별로 달리 검토될 필요가 있다. 즉 부품레벨의 교체주기, 보조기계, 단위설비, 세부공정, 공정레벨은 보전주기(점검, 정비, 검사)의 설정에 대한 합리적 설계 및 적용이 중요한 것이다.

이미 알려진 점검, 정비, 검사 주기들은 이론대로 실무에 적용하기에는 여러 제약문제들로 인해 문제점이 있다는 것을 살펴 보았다. 그래서 실무에 합리적이고도 쉽게 적용할 수 있도록 수정된 부품의 최적교체주기, 보조기계, 단위설비 등에 대한 최적보전주기를 설정하도록 하는 모델을 제시하였다.

본 연구에서 제시하는 최적보전주기를 설정에 대한 제안 모델에 대해서 주기설정시의 가정, 즉 설정주기의 80% 정도에서 주기를 정하는 것에 대한 임의성 문제에 대해서는 보다 많은 실적 자료를 통한 추정 신뢰성을 높이도록 하고, 최적보전주기를 설정하기 위해 데이터의 누적을 통한 신뢰성이 있는 결과를 도출하도록 하면 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것이다. 그리고 제시된 최적보전주기 및 교체주기 설정 모델의 신뢰성을 더하기 위해서는 설비운용 데이터의 관리로 MTBF, MTTF의 합리적 산출, 신설비 도입시 취급설명서의 확보, 숙련된 보전유경험자의 활용 등을 꾀하고, 일단 최적보전 혹은 교체주기 데이터를 정기적으로 업데이팅을 하도록 한다.

고장현상에 대한 분석은 설비의 신뢰성 영역에 속하므로 모델로 제시된 최적보전주기 설정방법에 의한 값과 통계적으로 정해지는 값과의 상호 비교로써 더욱 합리적인 보전주기를 산출해 갈 수 있을 것이다.

장치설비가 고장이 나지 않도록 예방보전을 실시하여 안정된 조업을 유지하는 것이 매우 중요하다. 설비의 예방보전을 실시하기 위해서는 정기보전으로서 시간기준 예방보전인 TBM과 IR(Inspection & Repair), 예지보전으로서 설비진단기술(CDT)를 활용한 상태기준 예방보전(CBM)의 합리적 설계 및 적용이 중요하다(JIPM, 1992).

최적보전주기 설정 모델의 연구를 위해서 기존에 제시된 이론들의 고찰과 사례분석을 들었으나, 최근에 소개되고 많이 활용되고 있는 다구찌방법에 의한 예방보전방식의 설계에 의한 손실함수적인 축면에서의 비용적인 고찰이 고려되어 검토되면 더욱 합리적인 것이 될 수도 있을 것이다(田口, 1998). 본 연구에서의 최적보전주기 설정 모델에 대한 연구 범위로서는 제조설비를 중심으로 이루어 졌으나, 제조기업에서는 환경설비나, 유틸리티 설비 등에도 적용이 가능할 것이다.

▶ 참고문헌

1. 豊田利夫, 豫知保全(CBM)의 進め方, 日本プラントメンテナンス協會, Tokyo, 1996. 4
2. 권오운, 시간기준 예방보전(TBM)방식의 보전주기설정에 대한 방안, KSA 공장혁신지, 서울, 1998. 7
3. 川崎義人, 한국표준협회 역, 신뢰성·보전성총론,

시리즈 1, pp. 37~40, 서울, 1992. 2
4. 이상용, 신뢰성공학, pp. 31~33, 형설출판사, 서울, 1995. 8
5. 권오운, 설비상태에 의한 예지보전(CBM)방식의 추진방법, KSA 공장혁신지, 서울,1998.8
6. 이진식, 최신공정관리, 형설출판사, 서울, 1997. 8
7. 이순요, 신설비관리론 pp.245~246, ㈜양영각, 서울, 1993. 1
8. 日本プラントメンテナンス協會(JIPM), 新TPM展開プログラム-加工組立編, Tokyo, 1992
9. 日本プラントメンテナンス 協會(JIPM), 新TPM展開プログラム-裝置工業編, Tokyo, 1992
10. 日本プラントメンテナンス協會(JIPM), 설비관리 편람, p.53, Tokyo, 1992
11. 田口玄一, 제조단계의 품질공학, 품질공학강좌 2, 한국표준협회 역, 서울, 1998. 6