

# 신뢰성 중심 유지 보수(RCM)와 신뢰성 기반 검사(RBI)

“공정 플랜트에 사용되는 장비의 신뢰성 손실의 위험성을 감소시키기 위한 방법인 신뢰성 중심 유지 보수(RCM)와 신뢰성 기반 검사(RBI)를 소개한다.”

## I. 신뢰성 중심 유지 보수(RCM)

신뢰성 중심 유지 보수(Reliability Centered Maintenance, RCM)는 위험 요소 확인 및 등급 결정을 위한 일반적인 접근 방식 중 특별한 경우이다. 겉으로 보기에 위험이 높은 시나리오 또는 심각한 영향이 예상되는 시나리오의 경우 예상 장비의 결함 또는 고장으로 인해 발생되고 이러한 사고 예방을 위해 유지 보수 옵션이 고려된다. 예방적 차원의 유지 보수를 실행하는 검사 프로그램을 감독하기 위해 RCM을 신뢰성 기반 검사(RBI)와 연결하는 것이 바람직하다.

RCM 프로그램 개발에 있어서 핵심 장비보다 핵심 기능에 중점을 두는 것이 문제 해결에 도움이 된다. 이것은 보기에 따라서는 용어 개념의 문제로 볼 수 있지만 유지 보수가 필요한 대상에 중점을 두고자 하는 것이며 장비가 고장 나기 전에 관련 예상 비용을 평가하는 사무직 직원(예: 회계사 및 경영진)에게 도움을 준다.

효과적으로 RCM 프로그램을 개발하려면 다양한 분야의 엔지니어 및 관련 분야 종사자, 조직의 다양한 레벨의 직원을 포함하여 적절한 범위의 경험과 전문 지식을 가진 구성원으로 팀을 구성하여 관련 장비에 대한 정보를 수집하고 해당 설비 구축 시 적절한 도움을 받는 것이 매우 중요하다.

과거에는 RCM을 수리비용 및 고장으로 인한 생산 손실 비용 측면에서 보는 경우가 많았다. 제련, 화학, 석유 및 가스과 같이 고위험 공정 산업(이러한 산업 분야의 위험이 반드시 높지는 않음)의 경우 장비 결함, 인명 피해, 환경 피해, 추가 개발에 대한 법적 승인을 견제하는 여론, 기존 운영 시설에 대한 철저한 제어 및 징역형 이상의 판결 가능성을 동반하는 법적 요구 사항을 포함하여 모든 결과에 대해 고려하는 것이 중요하다.

### 1.1 RCM 발전의 역사

몇 년 전까지, 유지 보수는 장비에 결함이 발생하는 경우 주로 수행되었다. 그 이후 일부 고장은 상당한 피해를 주고 이러한 고장을 방지하기 위해 장비를 유지 보수하기 시작했으며 이를 통해 정기 유지 보수의 필요성이 대두되었다.

너무 빈번한 사전 유지 보수(불필요한 작업 수행에 따른 비용 발생) 및 너무 가끔 수행하는 사전 유지 보수(고장에 의한 초과 비용 발생) 사이에 균형을 맞추기는 어렵다. 많은 기업들은 사전 및 사후 유지 보수 비율을 모니터링하고 50:50과 같이 임의의 비율을 설정한다.

그러나 여러 유형의 장비에 대한 사전 유지 보수를 수행해도 사후 유지 보수 비율이 반드시 감소되지 않고 일부 경우 오히려 증가되는 것으로 밝혀졌다.

또한 고장으로 인한 피해 비용이 상당하거나(예: 항공 운송) 위험 상황이 발생할 수 있는 (예: 기타 여러 산업) 산업 분야의 경우 유지 보수 관리에 적절한 방법이 필요한 것으로 밝혀졌다.

미국에서는 관련 산업 및 감독 기관이 참여하는 항공 산업 전담 특별팀이 구성되어 다음과 같은 결론을 얻었다.

(a) 사전 정비 작업은 확실한 결함 모드를 제외하고 복잡한 장비의 안정성에 영향을 거의 주지 않았다.

(b) 여러 유형의 장비를 위한 사전 정비 작업에 대해 효율적인 형식은 없다.

특별팀은 유지 보수를 위한 권장 사항에 대해 보고서를 작성했으며 그 이후 여러 번 개정되었다. 3차 보고서가 비공식적으로 산업계에서는 RCM(신뢰성 중심 유지 보수)으로 알려져 있다.

미 국방부는 UA(유나이티드 에어라인) 항공사에게 유지 보수, 안정성 및 안전성 사이의 관계에 대한 지침서를 작성할 것을 의뢰했다. 이 지침서를 "RCM(신뢰성 중심 유지 보수)"이라 한다.

## 1.2 RCM의 원리

RCM의 원리는 다음과 같은 네 가지 원칙을 기반으로 한다.

1. 사전 유지 보수의 목적은 고장 발생을 최소화하거나 예방하고자 하는 것이다. 장비가 여러 모드에서 고장 나는 경우 일부 모드는 다른 경우보다 매우 심각한 결과가 발생할 수 있다. 가장 중점을 두어야 할 사항은 이러한 고장을 예방하거나 발생 빈도 또는 그에 따른 영향을 최소화하는 것이다.
2. 결함에 따른 결과는 설치되어 작동하는 장비에 따라 결정된다. 따라서 한 기업에서 특정 유형의 장비에 대한 사전 유지 보수는 다른 기업의 동일 장비에 전혀 맞지 않을 수 있다.
3. 사전 유지 보수를 통해 모든 결함을 예방할 수 없으며 그렇게 기대하는 것도 바람직하지 못하다.
4. 가장 핵심적으로 중점을 두어야 하는 것은 장비로부터 필요한 기능이며 장비 자체는 의미가 없다.

### 1.3 RCM 프로세스의 절차

RCM 프로세스 절차는 다음과 같다. (이러한 절차는 원칙적으로 위험성 관리 단계와 동일하다.)

1. 유지 보수 관리의 목표를 정의한다. 목표 수립 시, 예를 들어 안전성, 중단 없는 생산, 환경 영향 및 자산 보전과 같이 다양한 유형의 성과에 대한 우선순위를 정의하는 것이 중요하다. 성과 기준은 이러한 각각의 사항에 대해 정의되어야 한다.
2. 이러한 유형의 성과와 관련하여 장비에 필요한 성능(또는 기능)을 정의한다. 성능 또는 기능은 명사-동사 쌍의 형태로 정의된다. 예를 들어 핫 오일 가열 플랜트의 경우 펌프에 필요한 성능은 다음과 같다.
  - 압력을 생성한다.
  - 오일을 포함한다.
3. 필요한 유형의 성과에 영향을 주는 결합 모드를 정의한다.
4. 이러한 결합 모드에 대한 영향 유형을 식별한다.
5. 필요한 유형의 성과에 대한 영향 규모를 평가한다.
6. 성능 또는 기능의 우선순위, 고장 모드 및 영향에 대해 분석하여 관련 결합 또는 영향의 개선, 제거 또는 감소를 위한 방법에 대해 고찰한다. 우선순위 평가 프로세스는 결합으로 인한 잠재적 결과 및 측정된 상대적 발생 가능성 측면에서 고려해야 한다. 이 평가에는 일반적인 유지 보수 및 대상 플랜트의 유지 보수에 대한 경험을 가진 유지 보수 직원이 참여해야 한다.
7. 수행해야 할 조치를 정의한다. 이러한 조치에는 다음이 포함된다.
  - 사전 계획된 검사(결합이 발생할 가능성이 높은 장비의 상태를 미리 감지하여 개선함으로써 결합이 발생한 후 소요되는 상당한 비용을 절감할 수 있다.)
  - 사전 계획된 복구 작업(항공기의 구성 부품의 경우 일상적인 작업 수행을 통해 새로운 상태로 복원 가능)
  - 폐기 및 교체

위에서 언급한 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 시스템 성능 보존에 중점을 둔다.(장비 자체 상태의 보존이 아님)
- 성능 손실을 가져올 수 있는 특정 결합 모드를 식별한다.
- 상대적으로 발생 가능성이 높은 결합을 우선적으로 고려하여 성능에 영향을 주는 중요성에 따라 고장 모드 우선순위를 결정한다.
- 우선순위가 높은 고장 모드를 최소화하거나 예방하기 위해 효과적이고 작업 가능한 사전 유지 보수 작업을 식별한다.

위에 언급한 분석은 전문가로 구성된 "특별 연구" 팀이 은밀하게 수행하는 것보다 이러한 기능을 담당하는 작업자에 의해 수행되는 것이 바람직하다.

## 1.4 적절한 기술

HAZOP 연구 및 결합 모드 및 영향 분석(FMEA)은 고장 모드 식별 및 필수 성능에 대한 영향 규모 평가에 매우 적절한 기술이다. 각각의 기술은 관련 팀이 특정 유형의 기술을 가진 전문가와 작업자가 함께 수행해야 한다. FMEA는 일반적으로 결과 및 발생 가능성의 심각도를 계량화하는 FMECA(결합 모드 및 영향 치명도 분석)로 확장된다. 따라서 FMECA는 신속한 등급 결정을 위한 특별한 방법이다.

FMEA 또는 FMECA는 기계 플랜트를 위해 개발되고 널리 사용되고 있으며 반면에 HAZOP은 공정 플랜트를 위해 개발되고 널리 사용되고 있다. 두 가지 방식은 기타 산업 분야에도 적용할 수 있다.

신속한 등급 결정은 HAZOP 및 FMECA와 동일한 원칙을 사용하며 특정 기술의 적용 여부 분석 시 고려하는 고장 모드 유형을 정의할 때, 광범위한 기술이 적용되도록 구성할 수 있다. 측정된 상대적 발생 가능성을 고려하여 서로 다른 유형의 영향(안전성, 환경, 생산 연속성, 자산 피해 등)을 동시에 고려하는 경우 매우 적합한 방법이다.

## II. 신뢰성 기반 검사(RBI)

신속한 등급 결정 접근 방식은 이러한 검사가 가장 비용 효율적인 장비 또는 시스템에 중점을 두는 검사 프로그램 개발에 사용된다.

결국 보기에 위험성이 높은 시나리오 또는 심각한 결과가 예상되는 시나리오의 경우 예상 장비 결합 또는 고장, 작업자 실수에 의해 발생할 때 감지되며 이러한 검사에 의해 즉각적이고 효과적으로 사전 조치를 수행하기 충분할 정도로 초기에 감지되어 검사 일정이 수립된다. 물론, 검사 및 사전 조치 비용과 비교하여 예상되는 연간 비용 절감 효과를 산출하기 위해 예상 결합 및 발생 빈도에 대한 전체 비용을 고려해야 한다.

따라서 신뢰성 기반 검사(Reliability-Based Inspection, RBI) 프로그램 설치 및 새로운 검사를 프로그램에 추가할 때 고려해야 할 일부 요소는 다음과 같다.

- 전체 결합 비용(피해를 입은 장비 및 생산 손실 등과 같은 유형 비용 및 부상, 환경 피해, 시장 손실 및 기업 이미지 손실 등과 같은 무형 비용 포함)
- 검사가 필요한 빈도 및 교대 근무자 또는 해당 직원에 의한 교대 수행 필요 여부를 결정하는 기준으로 사용되는 사고가 전개되는 속도
- 테스트를 수행하는 담당자에게 필요한 교육 및 경험의 레벨 표시하는데 필요한 검사 및 테스트 장비의 특성
- 충분한 시간 동안 증상을 감지하는 검사를 통해 효과적인 조치 수행
- 개선 조치를 결정하고 승인하는 데 필요한 경험 및 전문 지식
- 제시된 검사의 실질적인 경제성 여부를 결정하기 위해 필요한 검사 및 조치에 수반되는 비용

일부 경우 감지 실패로 인해 발생하는 사고 비용과 비교하여 검사 비용이 상당히 저렴하다. 이것은 작동할 것으로 예상된 보호 시스템의 작동 불능 상태로 인해 사고가 발생할 때까지 결함을 감지할 수 없는 경우가 특히 그렇다. 이 경우, 사고가 발생했을 때 보호 시스템의 결함을 확인할 방법이 없다.

이와 관련하여 하나의 접근 방식은 보호가 필요한 상황이 발생하거나 보호 시스템에 결함이 발생하는 상황에 대한 최대 수용 가능한 확률을 정의하는 것이다. 예를 들면 고압 경보 시스템 및 트립 시스템이 결함 상태일 때 압력 제어기의 결함 빈도를 들 수 있다.

이 경우 빈도 계산에 필요한 수학 공식을 사용하거나 제어 시스템 및 경보/트립 시스템의 연간 결함 확률 빈도에 대한 데이터를 사용하여 장비를 테스트하기 위한 원하는 최대 빈도를 계산할 수 있다. 이를 통해 적절한 컴퓨터 스프레드시트를 작성하여 많은 수의 보호 시스템을 신속하게 분석할 수 있다.

## 2.1 신뢰성 기반 검사 빈도

다음과 같이 가정한다.

T년은 결함을 거의 감지할 수 없는 결함 조건에 대한 시간.

p(범위 0-1)는 T 기간 내에서 진행되는 결함 조건을 성공적으로 감지할 검사 확률.

c(범위 0-1)는 실패하기 전에 진행되는 결함을 감지하는 데 필요한 확률(확실성).

진행되는 결함 조건을 감지하지 못할 검사 확률:  $(1-p)$

실패하기 전에 감지하지 못할 진행되는 결함 조건의 최대 수용 가능한 확률:  $(1-c)$

그러면 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$(1-c) = (1-p)^n$$

여기서 n은 필요한 감지 확률에 도달하기 위해 T 시간 내에서 필요한 테스트 수이다.

따라서,

$$n = \log(1-c)/\log(1-p)$$

그렇다면,

$$\text{연간 필요한 검사 빈도, } F = \log(1-c)/T\log(1-p)$$

### 예제 1:

프로세스 조건이 변경하는 경우 용기에 부식이 진행될 수 있다. 부식은 용기 결함을 감지할 정도로 진행하는 데 3개월이 소요된다고 가정한다. 한 번의 검사로 결함을 감지할 확률은 75%로 가정한다. 결함이 발생하면 결과의 심각도로 인해 실패하기 전에 진행되는 결함 조건을 감지하는 데 필요한 확률은 95%이다. 필요한 검사 빈도를 계산하라.

$$T = 0.25\text{년}$$

$$\begin{aligned}
p &= 0.75 \\
c &= 0.95 \\
F &= \log(1-0.95)/0.25\log(1-0.75) \\
&= (\log 0.05)/(0.25\log 0.25) \\
&= (-1.30)/0.25 \times (-0.6) \\
&= 8.6/\text{년}
\end{aligned}$$

즉, 약 6주마다 실시한다. (실제로는 장비 검사를 월별 또는 분기별로 실시하는 경우가 많다.)

## 예제 2:

부탄 액체를 취급하는 대형 펌프가 이중 기계적 씰로 처리되어 있다. 씰은 베어링 결함으로 인해 손상될 수 있다. 이 펌프에 대한 대부분의 베어링 결함은 씰 손상을 감지하기 충분한 정도로 노이즈가 발생하는 데 약 2일이 걸린다고 가정한다. 작업자가 펌프의 노이즈 검사를 통해 문제를 감지할 확률은 50%로 가정한다. 대형 화재 또는 증기 폭발 가능성으로 인해 씰 손상 이전에 베어링 결함을 감지할 확률은 최소 90% 이상이어야 한다. 작업자가 펌프에 대한 베어링 노이즈 검사를 얼마나 자주 실시해야 하는가?

$$\begin{aligned}
T &= 2/365; \quad p = 0.5; \quad c = 0.9 \\
F &= (365 \times \log 0.1)/(2 \times \log 0.5) \\
&= 365 \times (-1)/2 \times (-0.301) \\
&= 601/\text{년}
\end{aligned}$$

즉, 실제의 경우 약 2회/일 또는 교대 시 1회 실시한다.