

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 원자력발전소 시범계통 정비 최적화 분석

### Maintenance Task Analysis for Pilot System of NPP

정현종, 최광희, 김영호  
전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요약

신뢰도 기반 정비(RCM : Reliability Centered Maintenance)) 분석 단계는 고장이 발생할 경우 발전소 안전성 또는 전력생산에 영향을 미치거나 한번 고장이 발생하면 많은 정비비용이 소요되므로 이를 예방하기 위한 예방정비가 필요한 필수 기기를 선정하는 계통분석 단계와 가장 적합한 정비업무 및 주기를 결정하는 정비분석 단계로 구분된다. 이러한 RCM 분석과정 중 시범계통의 계통분석결과에 대하여 정비업무 분석을 수행하여 현행 예방정비프로그램과 비교한 결과 현행 예방정비 업무(1761건)의 약 46%는 유지, 17%는 수정, 38%는 삭제, 20%는 새로 추가되어 전체적으로는 현행 대비 약 18% 정도의 예방정비 업무가 축소되는 것으로 나타났다. 그리고 변화된 내용을 정비 유형별로 비교해 보면 현재 75%를 차지하던 주기정비는 55%로 축소되고, 상태감시와 고장발견 업무는 각각 2%, 23%에서 9%, 36%로 증가되는 것으로 나타났다. 이 결과는 RCM을 통해 정비계획을 체계적으로 수립, 이행하면 정비비용을 낮추면서 발전소의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 보여주는 결과로 평가된다.

#### Abstract

Analysis process of Reliability-Centered Maintenance(RCM) is composed of system analysis and maintenance task analysis. This paper describes the result of maintenance task analysis for the pilot systems. The result of preventive maintenance(PM) task comparison between current PM program and RCM recommendations, the 46% of the current PM tasks are retained, 17% of the current PM tasks are modified, 38% of the current PM tasks are deleted, and 20% of the current PM tasks are added. Consequently the number of current PM tasks reduced by 18%. And PM methods are changed, time-directed tasks are reduced to 55% and condition-directed tasks and failure finding tasks are increased to 9% and 36%. This result showed that maintenance labor cost can be reduced and the plant reliability will be increased when maintenance program optimized by systematic method.

## I. 서론

계통분석 및 정비분석으로 구분되는 RCM 분석과정 중 계통분석결과 필수 기기로 선정된 기기에 대하여 최적 정비업무를 분석하였다. 최적 정비업무는 필수 고장모드별(Critical Failure Mode)로 고장원인을 분석한 후 이를 예방, 예측 또는 최소화하기 위한 예방정비 업무를 분석하였다. 고장원인은 RCM 분석용 전산프로그램의 참고데이터를 활용하여 분석하였으며, 정비업무는 고장원인을 예방, 예측 또는 최소화할 수 있는 정비업무 중 정비효율 측면을 고려하여 가장 비용 효과적인 정비업무를 최적정비업무로 결정하였다. 시범계통 정비분석 결과는 [그림.1]의 정비분석 흐름도와 같이 각 단계별로 발전소 실무자의 정비경험을 반영하여 보완하였다. 이 과정에서 기기의 고유 특성을 반영하여 분석결과를 수정하였으며, 장비 및 전문인력의 부족으로 즉시 이행이 불가능한 경우는 차선의 업무를 제시하고 RCM권고업무에 대해서는 장기적인 이행방안을 별도로 수립하였다.

## II. 본론

### 1. 정비업무 분석

고장모드 영향평가(FMEA : Failure Modes and Effects Analysis)) 및 계측기 매트릭스 (Instrument Matrix)기법을 이용하여 고장영향을 평가한 결과 고장이 발생할 경우 발전소 안전성 또는 전력생산에 영향을 미치거나 한번 고장이 발생하면 많은 정비비용이 소요될 것으로 평가된 필수 기기에 대하여 이의 고장을 예방하기 위한 최적의 정비방법을 분석하였다. 정비업무는 필수 고장모드의 원인이 되는 고장원인을 결정하는 단계와 이를 예방하기 위해 가장 적합한 최적의 정비업무를 결정하는 단계로 나누어 분석하였다. 고장원인은 기기 유형별로 RCM 분석용 전산프로그램의 참고데이터를 활용하여 분석하였으며, 정비업무는 분석된 고장원인을 예방할 수 있는 정비방법 중 정비효율의 극대화 측면을 고려하여 가장 비용 효과적인 정비업무를 최적의 정비업무로 결정하였다. 예방정비는 크게 상태감시, 주기정비 및 고장발견 업무로 구분된다. 상태감시는 진동감시, 윤활유 분석 등과 같이 기기의 상태를 감시하기 위해 주요변수를 주기적으로 측정, 감시하는 것이며, 주기정비는 분해정비, 교정 등과 같이 정해진 주기로 기기의 상태를 새롭게 바꾸는 것이며, 고장발견은 정기점검과 같이 정상운전 중 대기상태를 유지하는 기기의 고장유무를 확인하기 위한 점검활동이다. 이러한 정비방법 중 고장을 예방할 수 있으면서, 비용측면에서도 효과적인 정비업무를 결정하기 위하여 [그림. 2]의 정비업무 선정 논리도에 따라 정비업무를 결정하였다. 정비업무 선정 과정에서 상태감시 업무는 기기를 계통으로부터 격리하지 않고 수행할 수 있고, 고장이 발생하기 전 미리 정보를 제공하므로 기기의 신뢰도를 향상시키며, 정비비용도 적게 소요되므로 첫 번째로 고려하는 정비방법이다. 그러나 고장을 예방하기 위한 적절한 상태감시 방법이 없는 경우는 주기정비를 선택하며, 주기정비보다 고장발견이 효과적인 경우는 고장발견업무를 선택하였다. 주요 기기 별 정비업무 분석결과는 [표 1]과 같다.

분석된 정비업무가 고장원인을 예방하기에 적절한가, 분석된 정비업무를 이행할 수 있는 장비 및 전문인력이 확보되어 있는가, 그리고 정비업무 분석 과정에서 간과했던 기기 고유의 특성이 있는가에 중점을 두고 분석결과를 발전소 실무자의 정비경험을 반영하여 보완하였다. 이 과정에서 적절하지 않은 정비업무나 장비 및 전문인력의 부족으로 즉시 이행이 어려운 경우는 차선의 대안 업무를 선정하였으며, 정비경험을 토대로 정비업무 분석 시 간과했던 부분에 대해서는 추가의 업무를 선정하거나 정비업무를 수정하였다.

## 2. 정비주기 분석

예방정비(PM : Preventive Maintenance)주기는 [그림. 3]의 정비주기 결정 논리도와 같이 먼저 FMEA와 계측기 매트릭스 기법으로 분석한 분석대상 기기의 기능상 중요도와 운전/정비 데이터 분석결과를 근거로 현행 PM주기의 적절성을 평가한 후 현행 PM주기가 적절하지 않은 경우 해외 데이터, 제작자 추천 PM주기, 동일유형 발전소의 정비프로그램 등의 신뢰성 있는 데이터 원과 비교 평가하여 결정한다.

### 가. 현행 예방정비 주기 평가

현행 PM주기의 적절성은 필수 기기 분석결과와 경험데이터를 근거로 평가하였다. 필수 기기 분석결과 고장이 발생하면 심각한 영향을 미치는 기기는 고장이 발생하지 않도록 PM주기를 결정해야 한다. 따라서 이러한 기기 들은 발전소 전체의 신뢰성 향상 측면에서 고장경험이 없는 경우 현행 PM주기를 적절한 PM주기로 평가하고, 고장경험이 있으면 이를 예방하기 위하여 정비주기의 단축을 고려한다. 그러나 그렇지 않은 경우는 현행 정비프로그램과 고장 및 정비경험을 분석하여 현행 PM주기의 적절성을 평가한다. 일정 주기로 PM을 수행하는데 고장경험도 없고 PM결과 특별한 결함이 발견되지 않는 경우는 정비주기의 연장이 필요하며, 고장이력은 거의 없지만 예방 정비결과 결함이 종종 발견된다면 예방정비가 적절한 주기로 수행되고 있음을 의미한다. 그리고 고장데이터 분석결과 고장이 빈번히 발생하는 경우는 현행 PM주기의 단축을 고려한다.

### 나. 예방정비 주기 결정방법

현행 PM주기가 적합한 것으로 분석되었으면 PM주기를 현행 PM주기로 결정하고, 현행 PM주기의 조정이 필요한 경우는 다음과 같은 신뢰성 있는 데이터와 비교 평가하여 PM주기를 결정하며, 비교대상 데이터가 여러 개 있을 경우 데이터의 신뢰성을 고려하여 결정한 우선 순위에 따라 현행 PM주기와 비교할 비교대상 PM주기를 결정한다.

- ① EPRI PM Basis를 근거로 도출한 PM주기
- ② 제작자에서 추천한 PM주기
- ③ INI(Industry Normal Intervals) 히스토그램을 근거로 도출한 PM주기
- ④ 동일유형 발전소의 정비프로그램

현행 PM주기의 조정이 필요한 경우는 위에서 분류한 우선 순위에 따라 비교대상 PM주기를 결정한다. 그리고 정비주기의 과도한 변화에 따른 위험성을 줄이기 위하여 아래와 같이 현행 PM주기와 비교대상 PM주기의 평균값으로 PM주기를 결정한다.

$$PM\text{주기} = (\text{현행 } PM\text{주기} + \text{비교대상 } PM\text{주기})/2$$

그러나 현행 PM주기의 조정이 필요한 것으로 분석되었으나 비교대상 PM주기와 비교 분석한 결과 정비주기가 조정되지 않을 경우는 공학적인 판단을 통해 정비주기를 조정한다. 현재 수행되지 않는 새로운 정비업무에 대한 주기를 결정해야 하는 경우는 위에서 분류한 우선 순위에 따라 결정된 PM주기를 예비 PM주기를 결정한다. 예비 PM주기를 결정하는데 있어서 조사된 비교대상 데이터가 없는 경우는 경험데이터와 정비경험을 반영한 공학적 판단으로 적합한 정비주기를 결정한다.

시범계통 기기 고장데이터 분석결과를 기기 유형별로 미국의 Generic Data(IEEE 500-1984)와

비교한 결과 고장율과 고장 메카니즘이 서로 유사하므로 정비주기 결정에 미국의 데이터를 활용하여 연구한 결과를 사용하도록 하였다. 현행 PM주기의 적절성을 평가하는 단계에서 이미 기기의 고유 특성이 고려되었고, 비교대상 데이터는 현행 PM주기가 어떻게 조정되어야 하는가를 평가하기 위한 비교데이터로 보수적으로 사용된다. 따라서 이 방법은 국내 고유데이터의 부족을 보완하고 기기 특성에 적합한 정비주기 결정에 효과적인 방법으로 판단된다.

### 3. 현행 예방정비 프로그램과의 비교분석

#### 가. 비교분석

정비업무 및 주기 분석결과를 현행 발전소 예방정비 프로그램, 점검 프로그램 및 제작자 권고 사항과 비교 분석하여 최적의 예방정비 업무 및 주기를 도출하였다. 비교분석결과는 현재의 예방정비 업무가 그대로 유지되거나, 수정되거나, 삭제되거나, 새로운 예방정비 업무가 추가되는 결과로 나타난다. 현행 정비업무가 RCM 분석결과와 동일한 경우는 현재의 PM을 유지하는 것으로 평가하였으며, 현행 PM이 RCM 분석결과보다 효과적인 정비방법이거나, 현행 PM을 RCM 분석결과로 수정할 필요가 있으나 장비 및 전문이력의 부족으로 새로운 정비방법을 즉시 이행할 수 없을 경우에도 현행 PM을 유지하는 것으로 평가하였다. RCM 분석결과 최적의 정비업무로 분석되었으나 장비 및 전문이력의 부족으로 이행이 불가능한 정비업무는 정비최적화를 위해 장기적으로는 이행해야 하는 정비방법이다. 또한 현행 PM의 주기, 범위, 또는 방법의 변경이 필요한 것으로 분석된 경우는 현행 PM을 수정하는 것으로 평가하였다. 고장영향이 미미하여 예방정비가 필요 없는 것으로 분석된 비 필수 기기의 경우는 현행 PM을 삭제하는 것으로 평가하였으며, 현행 예방정비 프로그램에 RCM 분석에서 선정한 고장원인을 예방할 수 있는 정비업무가 없는 경우는 RCM 분석결과로 도출한 PM을 새로 추가하는 것으로 평가하였다.

#### 나. 비교분석결과

현행 예방정비프로그램과의 비교분석 결과를 예방정비 건수로 비교해보면 현행 PM 건수(1771건)는 [그림. 4]과 같이 약 46%는 유지, 17%는 수정, 38%는 삭제, 20%는 새로 추가되어 전체적으로는 현행 대비 약 18% 정도의 예방정비 업무수가 축소되는 것으로 나타났다. RCM 분석결과 현행 PM 프로그램의 예방정비업무가 수정된 경우의 대부분은 정비주기를 조정한 경우이고, 현행 PM 프로그램의 예방정비업무가 삭제된 경우는 수동밸브의 분해점검(166건)과 현장 지시계의 교정점검(114건)이 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 그리고 현행 PM 프로그램에 예방정비업무가 새롭게 추가된 경우는 수동밸브의 패킹교체(75건) 및 분해점검(27건), MOV 운할유의 육안점검(46건), MOV 전동기의 Load test(46건) 등이 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 예방정비업무 수의 변화가 업무량의 변화를 대별하기는 곤란하지만 RCM을 통해 정비계획을 체계적으로 수립, 이행하면 정비비용을 낮출 수 있음을 보여주는 결과로 평가된다. 그리고 예방정비 업무가 20% 새롭게 추가된 결과로 볼 때 발전소에 중요한 기능을 수행하는 기기에 예방정비를 치중하여 이들 기기의 신뢰도를 향상시키도록 현행 PM프로그램을 개선하므로써 발전소 전체의 신뢰도 향상에 기여할 수 있음을 보여주는 결과로 평가된다.

그리고 변화된 내용을 정비 유형별로 비교해 보면 [그림. 5]와 같이 현재 75%를 차지하던 주기정비는 55%로 축소되고, 상태감시와 고장발견 업무는 각각 2%, 23%에서 9%, 36%로 증가되는 것으로 나타났다. 주기정비가 감소한 이유는 주기정비가 상태감시나 고장발견업무로 전환되었기 때문이기도 하지만, 많은 수의 주기정비업무가 삭제됨으로 인한 효과가 더 큼을 [그림. 5]를 통해서 알 수 있다. 이것은

RCM 분석 후에도 여전히 상태감시업무의 비율이 낮은 원인이며, RCM 분석결과 최적의 정비업무로 분석되었으나 장비 및 전문이력의 부족으로 상태감시업무의 이행이 불가능한 경우 이를 다시 주기정비업무로 전환하였기 때문이다. 따라서 상태감시를 위한 정비여건이 마련된다면, 주기정비가 상태감시로 전환되면서 상태감시업무의 비율이 증가될 것이고 RCM 분석의 효과는 더욱 더 증대할 것으로 판단된다.

### Ⅲ. 결 론

시범계통 RCM 분석결과를 통하여 국내 원전 정비프로그램의 개선 필요성을 발견하였다. 몇 개의 시범계통에 대하여 분석한 결과이지만, 현행 예방정비 업무의 38%가 삭제될 수 있다는 것은 현행 예방정비프로그램이 보수적으로 수립되어 있음을, 그리고 20%의 예방정비업무가 새롭게 추가된 것은 현행 PM 프로그램이 체계적인 방법에 의해 개선할 여지가 있음을 나타내는 결과로 평가된다. 또한 RCM 분석과정에서 장비 및 전문이력의 부족으로 상태감시업무의 이행이 제한적임을 알 수 있었다. 정비효과 및 효율성 측면에서 최적정비업무인 상태감시업무 위주로 정비체계의 변화가 필요하며, 이렇게되면 RCM 분석에 의한 예방정비 최적화가 가속화될 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. "신뢰도 기반 정비 분석방법 개발 및 영광 1,2호기 시범계통 분석 연구"(중간보고서), 최광희 외, 전력연구원, 1998.2
2. Preventive Maintenance Basis(TR-106857), EPRI, 1998.7
3. Guide for Determining Preventive Maintenance Task Intervals, EPRI, 1993.12
4. Use of Reliability-Centered Maintenance for the McGuire Nuclear Station Feedwater System, EPRI, 1986.9
5. Reliability-Centered Maintenance Workstation Users Guide, EPRI, 1993.4
6. 신뢰도 중심정비 기술과정 해외훈련보고서, 한전기공주식회사, 1996
7. "신뢰도 중심정비 수행방안 수립", 이광남 외, 1995
8. "신뢰도 기반 정비를 위한 기기 고장데이터 분석" 정현종 외, 98춘계원자력학회 논문집, 1998.5

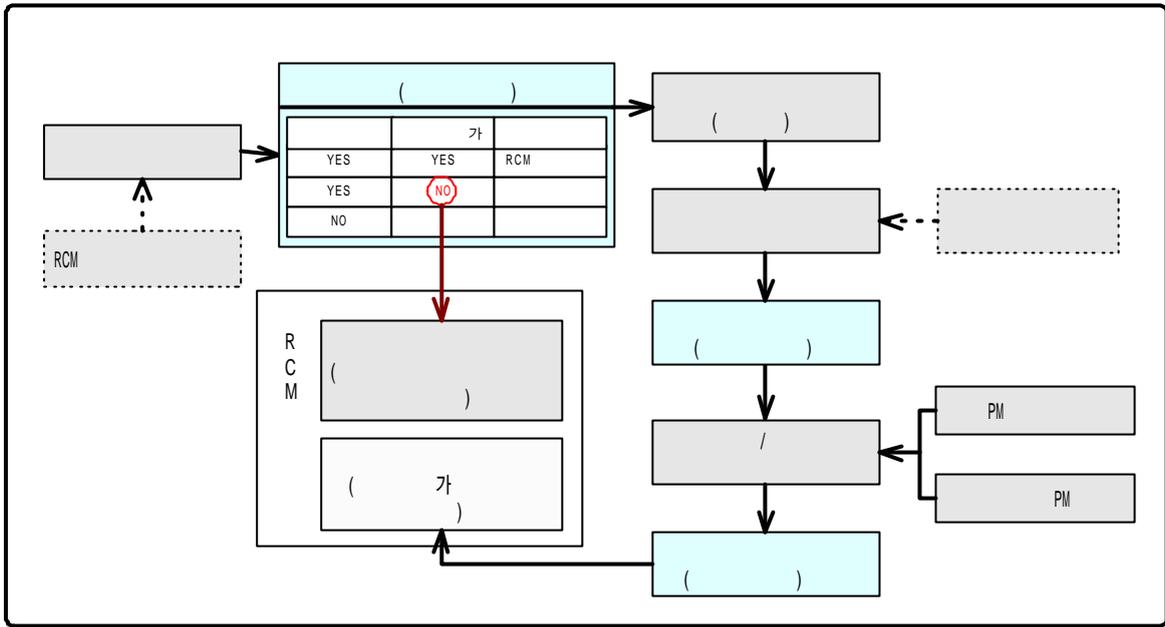


그림 1 정비분석 흐름도

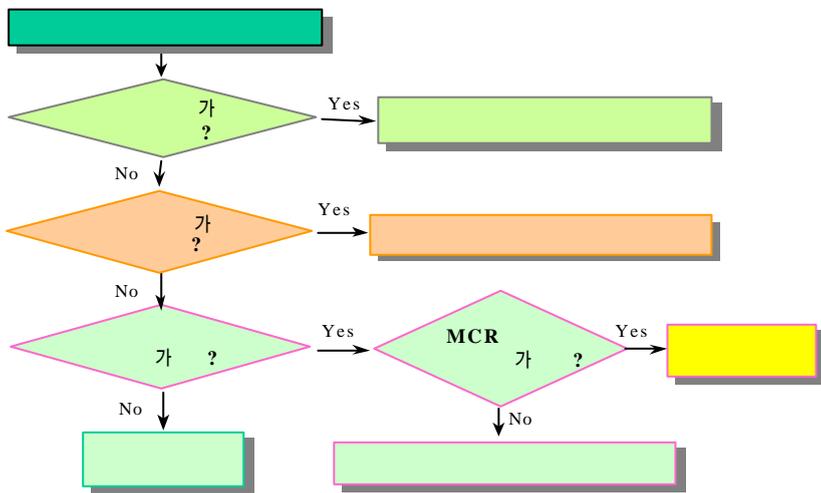


그림 2 정비업무 선정 논리도

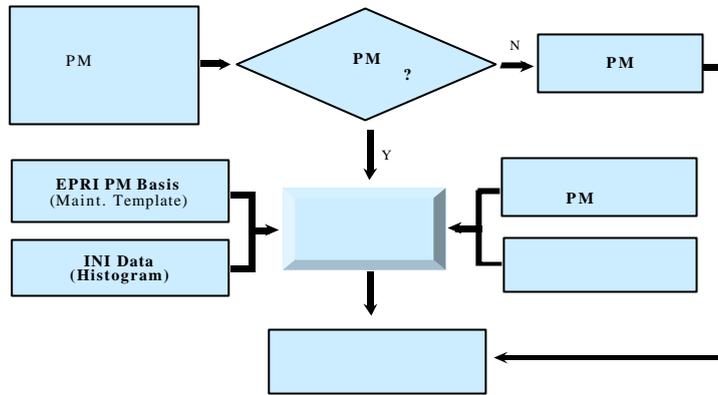


그림 3 정비주기 결정 논리도

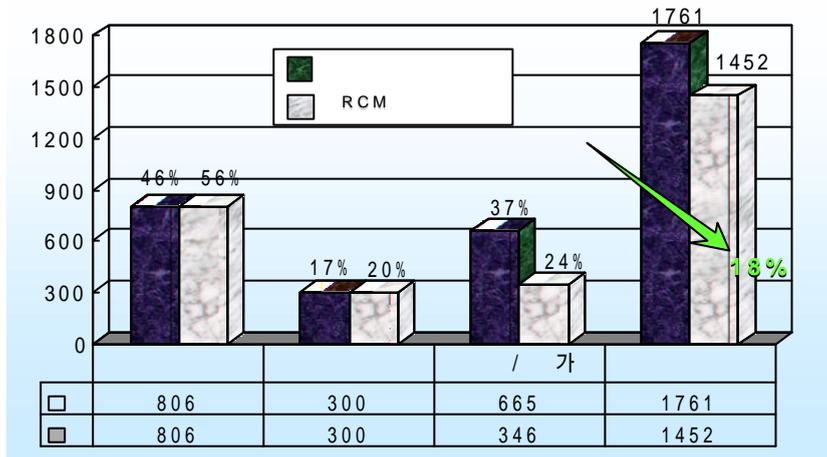


그림 4 RCM 분석 후 예방정비 업무 수의 변화

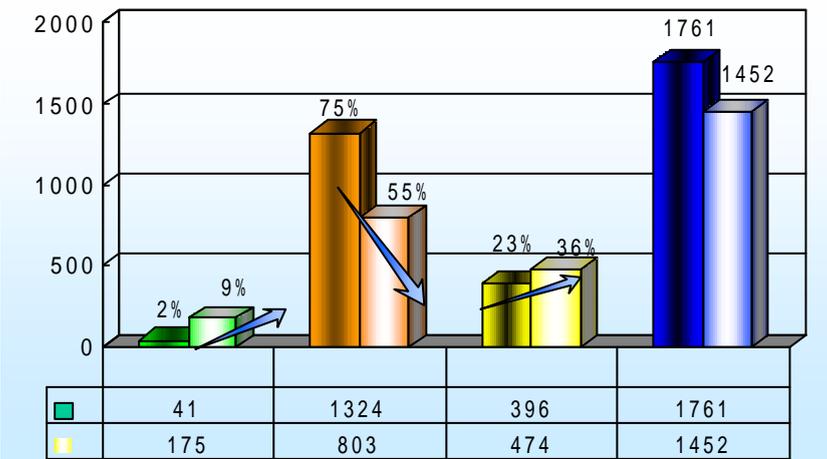


그림 5 RCM 분석 후 정비방법의 변화

[표. 1]주요 기기 별 정비업무 분석결과

기기유형	고장모드	고장원인	정비업무	비고
원심 펌프	계속운전 실패	• 베어링 손상 • 축 손상 • 임펠러 고착	• 진동 스펙트럼 분석 • 윤활유 마모 입자분석 (Ferrogaphy)	펌프의 고장 메커니즘을 베어링 손상→축 손상 →임펠러 고착으로 평가하고 베어링 손상에 초 점을 두고 정비업무를 선정
	저출력	• 외부누설	• 고장정비	Mechanical seal 및 플랜지 누설에 초점을 두 고 정비업무를 선정
모터구동 벨브	작동실패	• 스팀 손상 • 디스크 손상 • 구동기 부품 손상	• MOV진단시험	MOV진단시험은 스팀 펌, 구동기의 Torque 스 위치 물량, 스프링 팩 압착, 너트의 풀림, 워/워 기어 손상 및 오 정렬, 등 광범위한 고장 감지 에 효과적인 정비업무임
조절형 공기구동 벨브(Modulati ng AOV)	벨브 작동실패	• 스팀 펌 • 부품고장	• 모의신호 입력 에 의한 성능시험	-
	작동기 작동 실패	• 부품고장 (다이아프 램, O-링, 필터, 실린더 등)	• 분해 점검	각 부품의 열화 및 마모를 감지할 적절한 상태 감시 업무가 없음으로 주기정비 업무를 선정함
공기구동 벨브(Non-mo dulating AOV)	작동실패	• 스팀 펌	• 전 행정 시험 및 경향 분석	-
광복동 공기 압축기	계속운전실패	• 베어링 • 축 • 크로스헤드 손상	• 진동 스펙트럼 분석 • 윤활유 마모 입자 분석	광복동 기관 특성상 진동분석에서 놓치기 쉬운 초기 마모 징후를 감지하기에 윤활유 마모입자 분석(Ferrogaphy)은 매우 효과적임
	저 출력	• 흡/배기벨브 • 피스톤 로드 패킹 손상	• 고장정비	고장을 쉽게 발견할 수 있고 정상운전 중 교체 가 용이하므로 고장정비 방법을 택함
저압 전동기(480V 이하)	계속운전 실패	기계적인 원인	• 진동 스펙트럼 분석	-
		궤연손상, 접지	• 궤연저항 점검	-
		권선의 단선, 연결 부 이완	• 권선저항 점검	-