

# 원전 펌프의 성능저하 특성

## Degradation characteristics of pumps in nuclear power plants

이도환† · 박성근\* · 홍성대\*\* · 이병학\*\*\*

DH. Lee, SG. Park, SD. Hong, and BH Lee

**Key Words** : Pump (펌프), Degradation mechanism(성능저하 메커니즘), Stressor(스트레서)

### ABSTRACT

In the present study, degradation characteristics of pumps in nuclear power plants were investigated to provide the information of degradation mechanism and stressors. The failure records of pumps for the periods 2000 to 2006 on INPO(Institute of Nuclear Power Operations) EPIX(Equipment Performance and Information Exchange System) DB were reviewed. The 1,834 failure records reveal that the critical areas of pump failures are bearing, mechanical seal, gasket/o-ring, shaft, impeller, coupling and packing. Based on the failure rate of critical areas, the important degradation mechanism and stressors were determined. Additionally, the relationship between degradation mechanism and stressors such as wear was examined. Finally, the monitoring parameters related to degradation and stressors were discussed for the future development of degradation evaluation and prognosis technology of pumps.

### 1. 서론

원자력발전소에 설치된 펌프의 고장은 펌프의 정지로 인한 발전소 효율 감소는 물론 발전소의 안전성에도 영향을 미치게 된다. INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 2003년도 연구결과에 따르면 원자력발전소에 설치된 설비 중 펌프가 운영에 가장 영향을 주는 것으로 나타났으며 많은 결함 진단 기술의 개발에도 불구하고 펌프의 고장이 많이 발생한 것으로 분석되었다[1].

펌프의 고장을 예방하기 위해서는 펌프에 대한 고장 분석을 통해 적절한 감시와 진단 방법이 개발되어야 한다. 지금까지 많은 연구를 통해 펌프에 대한 고장 모드와 증상 분석(FMSA : Failure Mode and Symptom Analysis)이 수행되었으며 이를 통해 결함 여부와 결함 위치를 진단하는 결함 진단 기술이 개발되었다. 그러나 결함 진단 기술은 결함의 증상에만 의존하기 때문에 기기의 현재 상태만을 알

수 있을 뿐 기기의 상태를 예측하는 데에는 어려움이 있다.

기기의 손상 정도는 기기에 가해지는 운전과 환경 부하에 따라 달라지므로 기기의 손상을 예측하고 기기의 고장 원인을 밝히기 위해서는 먼저 기기의 성능저하를 촉진하는 조건인 스트레서와 성능저하 메커니즘을 분석해야 한다. 성능저하 메커니즘을 야기하는 스트레서의 강도를 지속적으로 측정하면 기기가 받는 손상의 정도를 추정할 수 있으며 손상의 정도가 한계치를 넘어서는 시간, 즉 기기의 수명을 예측할 수 있다.

펌프의 결함 진단은 진동, 모터 및 윤활유 등의 상태 감시를 통해 이루어질 수 있으나 스트레서 이력을 추적함으로써 기기의 손상 상태를 추정하는 예측진단 방법에 있어서는 기기 손상에 영향을 주는 스트레서와 성능저하 메커니즘에 따라 감시 방법을 결정해야 한다. 또한, 스트레서를 직접 측정하지 못하는 경우에는 스트레서를 물리적으로 추정할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 EPIX(Equipment Performance and Information Exchange System) DB에 저장되어 있는 2000~2006년까지의 펌프의 고장 이력을 조사하여 성능저하 메커니즘과 스트레서를 분석하였다. 또한, 주요 스트레서와 성능저하 메커니즘의 관계를 분석하고 성능저하 예측을 위해 필요한 스트레서 감시 방안을 소개하였다.

† 이도환 ; 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : dhsmf@kepri.re.kr  
Tel : (042) 865-5633, Fax : (042) 865-5604

\* 한국전력공사 전력연구원

\*\* (주)엠앤디

\*\*\* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

따라 본 연구에서는 원전 펌프의 약 80%를 차지하는 원심 펌프의 성능저하 특성 분석에 초점을 맞추었다.

## 2. 원전 펌프의 성능저하 특성

### 2.1 원전 펌프 분포 특성

표 1은 한국표준형원자로(KSNP)에 설치된 주요 펌프의 설계 특성을 나타낸 것이다. 표 1에서 펌프의 작동방식을 살펴보면 원전에 적용되는 주요한 펌프 중 Auxiliary charging pump, Motor driven fuel oil feed pump와 Pre-lube oil pump가 왕복동 펌프이며 그 이외의 펌프는 대부분 원심형인 것을 알 수 있다. 또한, 참조문헌[2]로부터 웨스팅하우스가 설계한 가압경수로형(Pressurized Water Reactor, PWR) 원전에는 Reactor coolant pump와 Residual heat removal pump를 제외하면 수평형 원심 펌프가 설치된 것을 알 수 있다.

펌프 명칭	설계 압력 (psig)	설계 온도 (°F)	작동 방식
Safety injection pump	2050	350	원심
Auxiliary charging pump	3025	200	왕복동
Component cooling water pump	200	200	원심
Component cooling water makeup pump	150	150	원심
Essential chilled water pump	150	150	원심
Centrifugal charging pump	3025	200	원심
Containment spray pump	900	400	원심
Shutdown cooling pump	900	400	원심
Diesel fuel oil transfer pump	50	150	원심
Spent fuel pool cooling pump	150	200	원심
Essential service water pump	150	150	원심
Boric acid makeup pump	200	200	원심
Essential service water screen wash pump	200	150	원심
Motor driven fuel oil feed pump	152	150	왕복동
pre-lube oil pump	152	167	왕복동
Motor driven auxiliary feedwater pump	2828	140	원심
Turbine driven auxiliary feedwater pump	2828	140	원심
Essential chilled water makeup pump	150	150	원심

표 1 한국표준형원자로의 주요 펌프 설계 특성

국내 원전 펌프의 유형을 한수원(주) DREAMS(Digital Realtime Enterprise Asset Management System) DB를 이용하여 분석하고 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 한수원(주)의 DREAMS DB에는 펌프의 유형을 커플링이 있는 수평형 펌프, 수직형 펌프, 용적식 펌프, 기어펌프와 캔드 펌프로 분류하고 있다. 그림 1로부터 국내 원전 펌프의 80%정도가 원심펌프이며 그 외의 유형이 20%정도 사용되어 지는 것을 알 수 있다. 이에

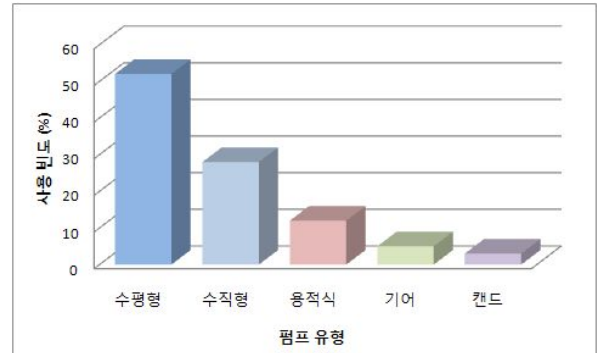


그림 1 국내 원전 펌프의 유형별 분포

### 2.2 원전 펌프의 고장 모드

펌프의 성능저하 특성을 분석하기 위해 미국의 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 EPIX(Equipment Performance and Information Exchange System) 데이터베이스에 나타난 7년간의 (2000~2006) 고장이력을 조사하였다. 가압경수로 원전에서 7년간 발생한 펌프의 고장 수는 총 1,834건으로 나타났으며 펌프의 주요한 고장 모드와 분포는 표 2와 같다.

펌프 고장 모드	분포(%)
위밍업 이후의 비정상 정지	22.9
기동명령 동작 실패	19.6
부족한 유량 및 압력 운전	6.8
외부 누설	6.2
위밍업 도중의 비정상 정지	2.6
지속운전 불가 확인	1.7
정지명령 동작 실패	1.4
기타 13가지 모드	38.8

표 2 원전 펌프 고장모드별 분류 및 분포

고장모드별 분포를 살펴보면 위밍업 이후의 비정상 정지 모드가 22.9%로 가장 높게 나타났고 기동명령 동작 실패 모드가 19.6%로 두 번째로 빈번하게 발생하는 것을 알 수 있다. 그 다음으로 부족한 유량 및 압력 운전 고장모드와 외부 누설 고장모드가 많은 것으로 나타났는데 이는 펌프가 운전하고 있는 상태에서 요구되는 성능에 이상이 발생한 것이다. 이러한 성능이상으로 발생하는 고장을 줄이기 위해서는 온라인으로 감시하여 조기에 결함을 감지하는 것이 요구된다. 부족한 유량 및 압력 운전과 같은 성능이상

고장모드에 대한 대처 방안으로는 펌프 효율, 축동력 및 수동력의 온라인 감시가 요구되며, 외부 누설과 같은 성능이상 고장모드의 경우에는 진동 및 음향센서 등을 이용하여 패키징 및 메카니칼셀에서의 누설을 조기에 감지하는 것이 필요하다.

### 2.3 원전 펌프의 부품별 고장 비율

본 연구에서는 원전 사용 빈도가 가장 높은 원심펌프에 대한 성능저하 특성을 연구하기 위하여 원심펌프의 부품별 고장 비율을 분석하고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 원심펌프에 대한 부품별 고장 비율을 분석한 결과, 원인불명을 포함한 총 40개의 부품에서 고장이 발생한 것으로 나타났다. 펌프의 중요 부품에 따른 고장 비율을 살펴보면 (1)베어링/부싱, (2)메카니칼셀, (3)가스켓/오링, (4)축, (5)임펠러, (6)커플링, (7)패킹의 순으로 고장 빈도가 높음을 알 수 있다. 메카니칼셀과 패킹은 축 밀봉을 위한 부품으로 기능이 같다는 점을 고려하면 축 밀봉과 관련된 고장 비율은 20%로 고장 중 가장 높음을 알 수 있다. 부품별 고장 분포는 원전 펌프의 성능저하를 감시하기 위해 필요한 대상을 선정하는데 중요한 근거 자료이다.

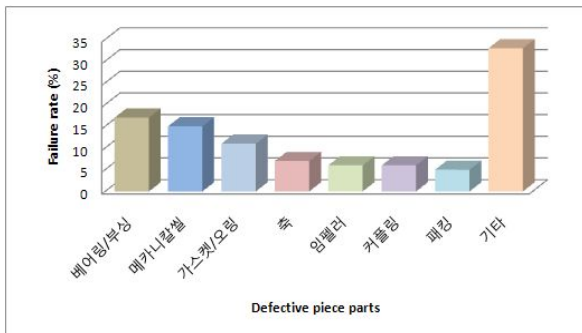


그림 2 원심펌프에 대한 부품별 고장 비율

### 2.4 성능저하 메커니즘 및 스트레스

모든 고장 부품에 대하여 성능저하 메커니즘과 성능저하를 일으키는 근본 원인인 스트레스를 분류하는 데에는 매우 방대한 작업이 소요된다. 또한, 성능 저하 특성 분석의 목적이 고장 감소를 위한 감시 방안을 수립하는 데 있다는 것을 고려하면 40여개의 부품 모두에 대한 성능저하 특성을 분석하는 것은 실용적이지 못하다. 그러므로 본 연구에서는 부품에 대한 고장 분석결과 그 고장 비율이 높은 상위 7가지 부품에 대하여 성능저하 메커니즘 및 스트레스를 분석하였다. INPO의 EPIX DB의 고장 보고서의 내용과 한수원(주)의 예방정비기준 분류표에 명시된 성능저하 메커니즘과 스트레스와 가장 가까운 것을 일치시킴으로써 부품의 성능저하 특성을 분류하였다.

#### (1) 베어링/부싱

베어링의 주된 성능저하메커니즘은 마모-피로로 나타났다으며 표 3에서 알 수 있듯이 베어링의 주된 스트레스는 오정렬과 윤활불량으로 나타났다.

펌프의 오정렬이 발생하면 베어링의 외륜에 가해지는 하중이 증가하고 이 하중은 베어링과 외륜 및 내륜 사이의 접촉 응력을 증가시키는데, 이때 발생하는 높은 접촉 응력에 의하여 Spalling과 같은 마모-피로가 일어난다. 베어링에는 오정렬에 의한 하중뿐만 아니라 진동 등에 의한 하중도 전달되므로 마모를 감시하기 위해서는 베어링에 가해지는 하중과 회전속도를 측정하는 것이 필요하다.

성능저하 메커니즘	스트레스	비율(%)
마모-피로	오정렬	32
	윤활불량	31
	부적절한 설치	15
	정상마모	11
	과부하	11
계		100

표 3 베어링/부싱의 성능저하 메커니즘 및 스트레스

베어링에서 윤활불량에 의한 마모는 윤활유 부족, 유온 상승, 수분 유입 등에 의하여 발생한다. 윤활유 부족은 베어링의 마모를 일으키는 주된 요인이며 Galling과 같은 형태의 마모를 일으킨다. 베어링의 윤활이 불충분하면 회전 부품과 고정 부품 사이의 접촉부에서 발열로 인하여 베어링의 온도가 급격하게 상승하며 회전이 일어나는 부위의 표면이 용접시와 같이 녹아 뜨기는 현상이 발생하고 이에 의해 마모율이 증가 한다. 그러므로 윤활불량에 기인하는 베어링 마모를 감시하기 위해서는 베어링에서의 온도변화를 감시하는 것이 필요하다.

펌프 베어링의 마모는 전술한 바와 같이 오정렬과 윤활유 부족 외에도 윤활유의 온도 상승 및 수분 유입 등에 의해서도 발생한다. 윤활유의 온도 상승은 윤활 막두께를 감소시키고 윤활 성능을 저하시키는 요인으로 작용하여 회전 부품과 고정 부품 사이에 윤활을 원활하지 못하게 한다. 수분 유입도 윤활유의 성능을 저하시키는 주요 요인이므로 베어링의 마모율을 감소시키기 위해서는 이에 대한 감시가 필요하다. 이에 따라 베어링의 마모 수명을 예측하기 위해서는 베어링에 가해지는 하중, 회전속도, 베어링 온도를 감시하는 수단과 더불어 윤활유 온도와 수분 함량을 감시할 수 있는 방법이 필요하다.

#### (2) 메카니칼셀

표 4는 메카니칼셀의 주된 성능저하 메커니즘과 스트

레스를 분석하여 나타낸 것이다. 메카니칼셀의 주된 성능저하메커니즘은 누설이며 이의 주된 스트레서는 부적절한 설치와 셀 손상 및 마모로 분석되었다.

메카니칼셀을 냉각시키고 축의 회전으로 인한 마찰을 줄이기 위해서는 셀 면에 1 $\mu$ m 정도의 유체막이 형성되어야 하는 데 유체의 압력이 상승하면 셀 면에서 막의 두께가 얇아져 완전한 유체 순환상태에서 혼합 순환(약간의 고체 접촉이 있는 순환)상태로 바뀌고, 더 나아가 경계 순환(고체 접촉)상태가 된다. 혼합 순환 상태에서는 셀 면에 마모를 가속화하고 경계순환 상태에서는 심한 마찰에 의하여 열을 발생시키는 데 이러한 발열은 종종 셀 면에 심각한 손상을 입히고 과도한 누설과 함께 소음을 동반한다.

셀면과 축사이의 유체 순환의 정도를 정량적으로 나타내는 방법으로 유체압력과 회전속도의 곱이 일반적으로 사용된다. 유체 압력과 회전속도의 곱이 허용범위를 벗어나게 되면 과도한 마찰로 인한 마모가 증가하게 되고 결국 셀 면의 누설을 일으키는 것이 알려져 있다[4]. 메카니칼셀의 마모를 감시하기 위해서는 셀 면에서의 유체 압력, 온도를 지속적으로 측정하는 것이 필요하다.

성능저하 메커니즘	스트레서	비율(%)
누설	부적절한 설치	34
	셀 손상 및 마모	27
	과도한 축방향 유동	12
	밀봉수의 오염	12
	온도	6
	Off-BEP 운전	6
	원인불명	3
계		100

표 4 메카니칼셀의 성능저하 메커니즘 및 스트레서

### (3) 가스켓/오링

원전 펌프에 사용되어지는 가스켓/오링에 대한 성능저하 메커니즘은 변형, 부식/침식과 열화로 분류되며 이에 대한 스트레서를 표 5에 나타내었다.

분석 결과에서 알 수 있듯이 가스켓/오링의 주된 성능저하 메커니즘은 변형이며 스트레서는 과토크로 분류되었다. 여기서 과토크로 분류되는 스트레서에는 부적절한 설치가 포함되어 있다. 성능저하 메커니즘이 부식/침식인 경우 주요 스트레서에는 부적절한 설치, 재질 및 표면 상태로 나타났는데 이외에도 오염, 높은 온도가 부식/침식의 원인으로 조사되었다. 가스켓/오링의 성능저하 특성을 분석한 결과 비율이 가장 높은 스트레서인 과토크를 줄이기 위해서는 가스켓/오링의 기밀에 요구되는 시팅 용력을 설계 특

성에 따라 실험적으로 구하고 이를 가스켓/오링 체결시 적용하는 것이 필요하다.

성능저하 메커니즘	스트레서	비율(%)
변형	과토크	68
부식/침식	부적절한 설치, 재질, 표면상태	29
열화	고온, 부적절한 설치	13
계		100

표 5 가스켓/오일의 성능저하 메커니즘 및 스트레서

### (4) 축

펌프의 구성 부품 중에서 축은 모터 축과 연결되는 커플링으로부터 유체에 노출되어 임펠러를 고정시키는 부분까지 모든 부품을 유기적으로 연결하는 중요한 부품이다. 이러한 축의 기능을 잘 말해주듯이 표 6과 같이 주된 성능저하 메커니즘은 굽힘으로 분석되었다.

성능저하 메커니즘	스트레서	비율(%)
축직경 감소	패킹마모, 오정렬	22
균열	열피로, Off-BEP 운전	21
	응력부식균열	4
굽힘	부적절한 보관 혹은 설치	14
	오정렬, 이물질	39
계		100

표 6 축의 성능저하 메커니즘 및 스트레서

모터 축과 펌프 축의 오정렬은 펌프 축에 굽힘 모멘트를 가할 뿐만 아니라 동력 전달도 감소시키므로 수평형 펌프에는 대부분 Flexible 커플링을 사용하고 있고 발전소에서는 일반적으로 허용범위가 정하여 이를 초과하지 못하도록 감시하고 있다. 그러나 Rigid 커플링이 사용되거나 오정렬이 허용 범위를 초과하는 경우에는 펌프 축에 과도한 굽힘 하중이 전달되어 펌프 축을 휘게 하거나 축에 크랙을 발생시킨다. 축의 굽힘은 축에 전달되는 하중에 기인하므로 축의 굽힘을 감시하기 위해서는 축에 전달되는 하중을 측정하거나 평가하는 것이 필요하다. 현재 펌프 축에 대한 토크를 감시하는 기술이 개발되고 있으므로 이를 활용할 수 있는 방안이 필요하다.

### (5) 임펠러

임펠러의 주된 성능저하메커니즘 및 스트레서의 분석 결과를 표 7에 나타내었다. 임펠러는 유체에 노출되는 부

품으로 다른 부품보다 성능저하 메커니즘이 매우 복잡하다. 본 연구에서는 펌프의 성능저하 특성을 분석하여 감시 방안을 도출하는 데 있으므로 성능저하 메커니즘을 3가지로 분류하여 단순화하였다.

성능저하 메커니즘	스트레서	비율(%)
마모	Off-BEP 운전 혹은 낮은 유효흡입수두	25
	정상마모/유체품질	16
물리적 손상	제작결함	21
	이물질	17
	압력진동	4
이완	부적절한 설치	13
	진동	4
계		100

표 7 임펠러의 성능저하 메커니즘 및 스트레서

분석된 결과로부터 알 수 있듯이 주된 성능저하 메커니즘은 마모이다. 임펠러의 마모는 최고효율점을 벗어난 상태에서 주로 발생한다. 펌프의 흡입양정이 낮거나 외류가 발생하여 유속이 급격하게 변화하면 압력이 국부적으로 포화증기압 이하로 내려가서 캐비테이션이 발생하는 데 캐비테이션은 임펠러의 성능을 저하시키는 가장 큰 원인이다. 캐비테이션은 진동과 소음을 수반하면서 임펠러를 손상시키므로 임펠러에 가해지는 손상 정도를 측정하기 위해서는 음향 방출 센서 또는 가속도계와 같이 임펠러에 가해지는 하중을 간접적으로 측정할 수 있는 센서가 필요하다.

### (6) 커플링

원전 펌프에 사용되어지는 커플링의 종류에는 여러 가지가 있어 INPO의 EPIX DB에서 각 커플링의 종류별 고장 이력을 분류하는 데에는 많은 어려움이 따른다. INPO의 EPIX DB에서 분석되지는 않았으나, EPRI 보고서에 의하면 원전 펌프에 다수 사용되어지는 기어 커플링의 성능저하 메커니즘으로는 마모와 누설이며 마모의 주된 스트레서는 윤활불량과 오정렬로 나타나 있다[6].

본 연구에서는 커플링의 종류를 별도로 분류하지 않고 일괄적으로 성능저하메커니즘 및 성능저하원인에 따르는 비율을 분석하여 표 8에 나타내었다. 분석 결과에서 알 수 있는 것은 커플링의 주된 성능저하 메커니즘은 피로 손상이며 스트레서로는 오정렬이 지배적이라는 것이다.

모터로부터 펌프에 비틀림 힘을 전달할 때 작용하는 전단 응력과 축과 커플링의 오정렬에 의하여 발생한 국부적 강한 열응력이 커플링에 작용하여 커플링을 마모시키거나 파손시킨다. 커플링의 피로 손상을 감시하기 위해서는

토크와 같은 하중 측정이 필요하다.

성능저하 메커니즘	스트레서	비율(%)
피로 손상	오정렬	52
	가동시간	30
	과도한 추력	9
인적실수	부적절한 설치	9
계		100

표 8 커플링의 성능저하 메커니즘 및 스트레서

### (7) 패키징

표 9에 패키징의 성능저하 메커니즘 및 스트레서에 대하여 분석한 결과를 나타내었다. 분석 결과에서 알 수 있듯이 패키징의 주된 성능저하 메커니즘은 과도한 누설이다. 과도한 누설의 스트레서로는 부적절한 설치와 과도크가 포함되는데 이는 패키징의 재료와 기능을 고려할 때 예상할 수 있는 결과이다.

성능저하 메커니즘	스트레서	비율(%)
과도한 누설	부적절한 설치, 과도크	54
	다른 설비의 마모/고장	32
	유체품질/오염(침식/부식)	14
계		100

표 9 패키징의 성능저하메커니즘 및 스트레서

펌프 축이 회전하면서 패키징에 닿아 발생하는 마찰열은 비금속 재질인 패키징을 마모시킨다. 패키징이 마모되면 밀봉 기능이 상실되어 누설이 발생하고 누설 차단을 위한 패키징 그랜드의 반복 조임을 통해 패키징은 그 기능을 완전하게 상실하게 되며 중국에는 과도한 누설이 발생시키게 된다. 표 6에서 잘 드러나 있듯이 축에 대한 분석결과에서도 패키징이 사용되는 펌프의 축도 패키징의 과도크로 인하여 마모되는 것을 알 수 있다. 패키징의 과도한 누설을 감시하기 위해서는 메커니컬셀과 같이 압력 및 온도의 측정이 필요하다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 가압경수로 원전에 설치된 원심 펌프의 성능 저하 특성을 분석하기 위해 INPO의 EPIX DB에 저장된 7년간의 고장이력을 조사하였으며 고장 빈도에 따라 7가지 주요 부품에 대하여 각각의 주된 성능저하 메커니즘과 스트레서를 분석하였다. 분석 결과를 토대로 각 부

품에 대한 성능저하 메커니즘의 특성을 논하였으며, 이러한 분석 결과를 토대로 성능저하의 평가와 예측을 위한 스트레스의 감시 방안을 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

국내 원전 펌프의 80%정도를 차지하는 원심펌프에 대하여 부품별 성능저하 빈도를 분석한 결과 베어링, 메카니칼씸, 가스켓/오링, 축, 임펠러, 커플링, 패키징의 순으로 성능저하가 발생하였다.

펌프의 주요 부품별 성능저하 메커니즘 및 스트레스와 함께 그 발생 비율을 조사하였으며 마모, 누설과 같은 각 부품의 주요 성능저하 메커니즘에 대하여 성능저하를 예측하기 위한 감시방법을 제안하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 원자력기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) "Equipment Performance and Information Exchange System (EPIX) Summary of US Industry Valve Performance" 9th EPRI Valve Technology Symposium.
- (2) Karassik I. J., Messina J. P., Couper P., Heald C. C., 2008, Pump Handbook, fourth edition, McGraw Hill.
- (3) EPRI, 1999, Bearing Technology Topics, Vol. 1
- (4) EPRI, 2000, Mechanical Seal Maintenance and Application Guide
- (5) EPRI, 1999, Shaft Alignment Guide
- (6) EPRI, 2003, Flexible Shaft Couplings Maintenance Guide