

<기술논문>

# 원자로냉각재펌프 예측진단 기술개발 현황 및 추진방안

김희찬<sup>†</sup>

## The Study of Predictive Diagnosis Technology Development Status and Promotion Plan for Reactor Coolant Pump

Hee Chan Kim<sup>†</sup>

(Received 25 May 2023, Revised 15 June 2023, Accepted 21 June 2023)

### ABSTRACT

The RCP is one of the main components in nuclear power plants and plays an important role in circulating coolant to the RCS system. Currently, nuclear plants are monitored using various monitoring systems. However, since they operate independently according to their functional purpose, it is not able to analyze vibration and operation/performance information comprehensively, and thus failure diagnosis accuracy is limited. In addition, these systems do not provide some important information (such as fault type, parts and cause) necessary for emergency actions, but provide only alarm information. To improve these technical problems, this study proposes a diagnosis technique (M/L, Rule-based model, Data-driven model, Narrow band model) and methodology for comprehensive analysis.

**Key Words** : RCP(Reactor Coolant Pump, 원자로냉각재펌프), Predictive diagnosis(예측진단), SVM(서포트벡터머신), Data-driven model(데이터기반 모델), Narrow band model(협대역 모델), Rule-based model(규칙기반 모델)

### 기호설명

RCP	= reactor coolant pump
PMS	= plant monitoring system
VMS	= vibration monitoring system
TBA	= thrust bearing assembly
HPU	= hydraulic power unit
CCW	= component cooling water system
CVCS	= chemical & volume control system
SVM	= Support vector machine
RCS	= reactor coolant system

### 1. 서론

원자력발전소 능동형 기기들 중 펌프설비는 주요 계통 설비들에 유체 공급과 배출을 담당하는 주요 기기로써, 발전소 운전과 안전성에 직결된 관리대상이다.

특히, 원자력발전소 1차측 원자로냉각재펌프(RCP)와 같은 대형 수직펌프는 원자로냉각재계통(RCS) 라인에 냉각재를 강제로 순환시켜 원자로에 공급하는 중요 기능을 담당하는 설비로 발전소 안전운전에 큰 영향을 주는 기기이다.

국내 발전소에서는 RCP의 운전상태를 실시간 모니터링하기 위해 다양한 감시시스템들을 도입하여 운영중이다. 표준형 원전의 RCP 감시시스템은 펌프 운전감시용 시스템, 진동감시용 시스템 등이 있다. 이들은 RCP와 관련 보조장치 및 연관계통에 설치된

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국수력원자력 중앙연구원  
E-mail : heechankim@khnp.co.kr  
TEL : (042)870-5221 FAX : (042)870-5599

계측기를 통해 펌프 운전데이터 및 진동데이터를 수집하고 베어링과 밀봉부(Seal) 및 모터 등의 주요 부품/기기들의 상태를 감시한다.

그러나, 이들 시스템은 데이터나 진단결과가 공유되지 않고 각각 독립적인 구조를 가지고 운영되기 때문에 진동과 운전 및 성능 변화 특성을 종합적으로 고려한 진단이 불가능하다. 각각의 시스템은 감시를 통해 단순 이상상태 발생에 대한 알람 정보만을 제공하고, 고장 조치에 필요한 결합유형, 원인 및 필요부품 등의 상세정보들은 제공하지는 않는다. 이로 인해 RCP 운전 중 경보 발생시 신속한 대응이 어렵고, 원인파악과 정비과정에 많은 시간이 소요된다.

이에 본 논문에서는 표준원전 RCP를 대상으로 고장 진단기술 개발 방안들을 도출하기 위해서 발전소 감시시스템들의 기술조사와 해외 최신기술동향 분석을 통해 기술적 제약사항과 개선사항들을 분석하였다. 분석결과를 기반으로 적용가능한 설비진단 기술유형들과 개발방법론들의 제안하고 기술개발 방법을 수립하였고, 발전소 현장데이터에 RCP 진단기술을 적용하여 실증시험으로 검증할 예정이다.

## 2. RCP 펌프구성 및 주요결합

### 2.1 표준형 원전 RCP 펌프

표준 한국형 원전 RCP는 KSB사 펌프와 Siemens사 모터로 구성된 수직 단단형 원심펌프이다. RCP는 모터와 TBA 및 밀봉부(Seal), 수력부로 구성되어 있으며, 이외에도 구성 기기/부품들 운전에는 필요한 각종 보조장치(HPU)와 연관 계통으로 연결되어 있다.

### 2.2 RCP 주요기능 및 부품구성

RCP는 모터, TBA, 밀봉부(Seal)과 수력부로 구성되어 있다.

모터는 수직형 단일속도 공랭식 3상 유도전동기로 펌프 동작시 요구되는 구동력을 제공하는 기능을 담당하고, 이를 위해 외부에서 전원을 공급받아 구동력을 생성시키기 위한 고정자와 회전자와 있고 킬팅 패드형 저널베어링과 트러스트 베어링이 있다.

TBA는 펌프 회전체의 축방향과 반경방향 작용력 지지 기능을 담당하고 킬팅 패드형 저널베어링과 트

**Table 1** RCP's component configuration

Component	configuration
Motor	rotator, stator
	journal brg./ tilting pad no.
	thrust brg./ tilting pad no.
	anti-rotator
TBA	journal brg./ tilting pad no.
	thrust brg./ tilting pad no.
	mechanical seal
	HPU system
Seal	Motor shaft - TBA shaft
	seal assembly
	TBA shaft - pump shaft
	hydraulic bearing
Hydraulic part	impeller blade no.
	diffuser vane no.

러스트베어링이 상하부에 각각 세트로 있다.

밀봉부(Seal)는 고정자와 회전자 접촉을 통해 밀봉하는 기계식 밀봉이며, 펌프 케이싱 내부에서 흐르는 고온고압의 냉각재가 축을 따라 상부로 누설되는 것을 방지하는 기능을 담당한다.

수력부는 블레이드가 펌프 케이싱 내에서 회전하면서 유체를 흡입하여 원심력에 의해 속도에너지를 제공하는 기능을 담당한다(Table 1).

### 2.3 RCP 기기/부품별 운전 및 고장 분석

모터는 외부 전원을 이용하여 전기에너지를 기계적 회전에너지로 변환시키는 장치이며, 상하부에 설치된 베어링은 회전 중 발생하는 축 힘을 지지한다. 정상운전 중 베어링 윤활유와 모터 내부 순환형 공랭식 공기는 기기냉각수계통에서 공급된 냉각수를 이용하여 일정한 온도를 유지한다. 계통 내 다른 펌프가 운전 중일 때 정지된 펌프가 역회전하는 것을 방지하기 위해 역회전방지 장치가 있다. 모터의 주요고장 원인은 크게 5가지이며, Table 2와 같다.

TBA는 모터 구동력 전달 회전축을 지지하는 베어링 결합체이며, 저널베어링과 트러스트베어링으로 구성되어 있다. 베어링에 공급된 윤활유 온도를 일정하게 유지하기 위해 냉각기가 있으며, 기기냉각수계통에서 냉각수를 공급받아 윤활냉각을 한다. TBA의 주요고장 부위는 크게 2가지이며, Table 3과 같다.

**Table 2** Causes of motor failure

Field	Causes
Mechanical	bearing fatigue damage by shaft overload
	bearing contamination, poor lubricant
	brinnelling due to depression (bearing face/face)
	misalignment
Electrical	low voltage or single phase operation
	insulation breakdown by open/close surge
Environmental	motor ambient temperature rise (above 40°C)
	motor insulator condensed moisture
Operation	frequent startup/shutoff
	inadequate motor capacity
etc	Bad design & manufacturing

**Table 3** Causes of TBA failure

Field	Causes
Bearing assembly	excessive bearing preload
	bearing contamination, poor lubricant
	bearing wear by instability
	inappropriate bearing installation, misalignment
	bad design & manufacturing
TBA components	upper & lower oil seal leakage
	HPU line check valve leakage & stuck
	HPU line filter blocking by dirt accumulation
	chamber drain line valve leakage by seal damage
	RTD sensor leakage by seal-ring damage
	oil cooler leakage

밀봉부(Seal)는 3개의 밀봉부(Seal)로 구성되어 있으며, 1단과 2단은 동역학적 밀봉부(Seal)이고, 3단은 베이퍼 밀봉부(Seal)이다. 밀봉부(Seal)의 주요고장 부위는 크게 2가지이며, Table 4와 같다.

회전축은 모터의 구동력을 임펠러에 전달해주는 연결부로 모터부와 TBA에서 저널베어링과 트리스트베어링으로 지지하며, 펌프 임펠러부에서는 수운활베어링으로 지지한다. 그러므로 회전축은 직접적으로 힘을 받는 중요 부품으로 베어링과 더불어 펌프 회전체의 동적 거동에 매우 크게 영향이 미치는 요소들 중 하나이다. 회전체의 주요고장 원인은 크게 2가지이며, Table 5와 같다.

**Table 4** Causes of seal failure

Field	Causes
Seal	excessive CBO flow by sealing failure
	worn seal
	friction between shaft surface and seal
	bad design & manufacturing
Seal cooler	HP cooler or throttle cooler leakage
	excessive flow and leakage in connection pipe
	lack of cooling water supply
	seal cooler damage
	dirt accumulation of seal cooler surface

**Table 5** Causes of shaft failure

Field	Causes
Shaft bent/bowed	inappropriate installation
	unbalancing
	rubbing, misalignment,
	loose parts
Shaft crack	thermal fatigue
	stress corrosion breaking

**Table 6** Causes of hydraulic parts failure

Field	Causes
Shaft bent/bowed	wear of low suction pressure
	physical damage of loose parts
	looseness of vibration

수력부는 케이싱에 들어온 냉각재를 원자로로 이송하기 위한 임펠러, 케이싱 및 디퓨저의 결합체이며, 수직으로 들어온 냉각재는 임펠러를 통해 속도 수두를 높이고, 디퓨저를 통해 압력수두로 변환하여 외부 반경방향으로 내보낸다. 임펠러는 펌프축에 콘너트로 결합되어 있으며, 냉각재와 직접적인 접촉되어 있다. 수력부의 주요고장 원인은 Table 6과 같다.

### 3. 표준원전 RCP 결합 진단기술 개발 방안

#### 3.1 해외 진단 기술 분석

RCP 진단과 관련하여 해외 연구들을 조사하였으며, 발전소 적용사례와 연구 중인 기술들을 각각 분석하였다. 실제 발전소에 적용한 기술 사례는 3건을 조사하였다.

2010년 Ashraf Mohamed Aboshosha 발표 자료에서는 뉴로퍼지 진단 시스템(Neurofuzzy Fault Diagnosis System, NFDS)을 이용한 RCP 포함 1차계통 진단용

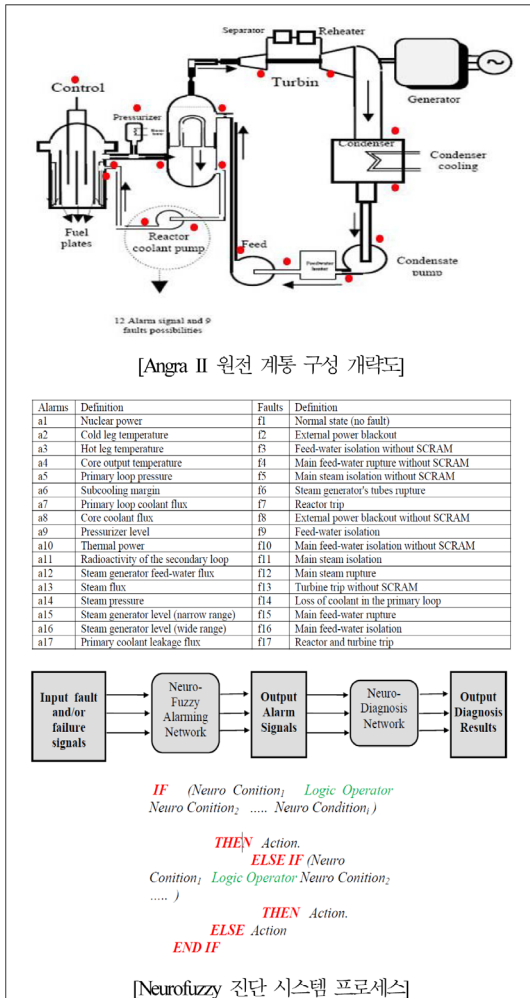


Fig. 1 Neurofuzzy fault diagnosis system in RCP.

운전자 지원시스템 개발 후 Brazil Central Nuclear ALMIRANTE Alvaro Alberto Angra Plant II (1350 MWe)에 적용하였다. 신경망 학습 기반 접근 방식의 데이터학습에 오랜시간이 필요한 약점을 극복하기 위해 다른 알고리즘보다 커스터마이징이 쉬운 신경망 학습 기반 접근 방식과 경계가 모호한 값들의 처리가 가능한 퍼지 논리 간의 통합 기술을 적용하였으며, 두 가지 접근법의 장점만을 사용하였다. 그리고 선형 자동회귀 모델인 ‘Local’ Dynamic Model과 Fuzzy 결합으로 ‘Global’ Nonlinear Multi-step ahead Prediction Model 비선형 다단계 전방 예측 모델을 구축하여 운영하는 반복적인 뉴로퍼지 네트워크를 사용하였다(Fig. 1)<sup>(1)</sup>.

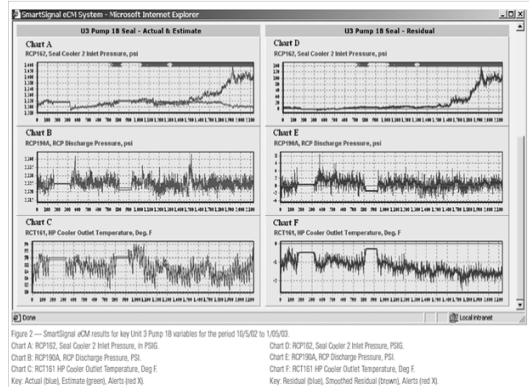


Fig. 2 Seal leakage diagnosis based on aakr model.

미국 GE사 자료에서는 AAKR(Auto-associate Kernel Regression) 모델 기반 진단 기술을 PALO VERDE 원전의 RCP 밀봉부(Seal) 누설 진단에 적용하여 우수성을 확인하였다고 발표하였다. RCP 밀봉부(Seal)과 관련된 계측기 정상상태 데이터들을 기반으로 데이터 기반 모델을 생성한 후 실시간 측정값을 입력 받아 현재의 정상상태를 추정하고, 이들을 상호 비교하여 잔차(residual)의 변화 상태 정보를 토대로 이상상태 발생을 조기에 검출하는 기술이다. AAKR 조기경보 기술은 RCP의 1단 밀봉부(Seal) 누설 발생을 기존에 발전소에서 운영하는 시스템보다 두 달 이전에 감지하여 운전자에게 제공하였으며, 실제 기존 시스템에서 결과를 최종 확인하여 기술의 우수성을 확인하였다(Fig. 2)<sup>(2)</sup>.

시안 자오퉁 대학(Xi'an Jiaotong University)에서는 서포트벡터머신(SVM) 알고리즘 기반의 기술을 개발한 후 Qinshan Nuclear Power Plant RCP의 결합 진단에 적용하였다. 설비의 운전 모드별 진단이 가능하도록 SVM을 각각 구성하여 펌프 운전 중 활용성을 최적화하였다. 그리고 Multi-band FIR Filter를 사용하여 노이즈 제거와 불필요한 주파수 성분을 제거하고, Kernel PCA를 이용한 특징 벡터의 차원을 축소하여 계산 속도와 정확성을 향상시켰다. 그리고 Two-kind classifier와 multiple classifier를 사용하여 각기 다른 운전상태들을 분류하였고, 각종 주파수 특징 정보들을 기반으로 Unbalance fault, Friction fault, Misalignments fault, Cracked fault on the rotor 등의 결합이 진단할 수 있도록 방법을 제안하였다(Fig. 3)<sup>(3)</sup>.

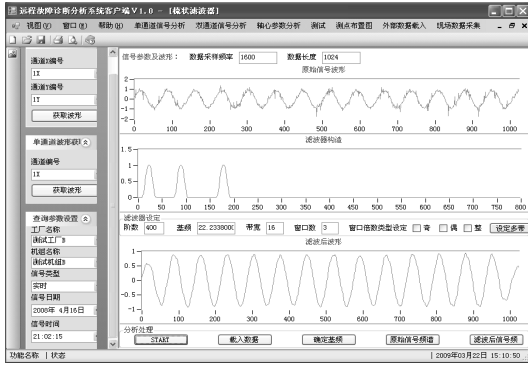


Fig. 3 Pump fault diagnosis based on SVM algorithm.

Table 7의 RCP와 관련하여 해외 진단기술 연구 사례를 조사한 결과이며, 기술 분야는 크게 3가지로 나누어서 주로 연구된 것으로 나타났다. 첫 번째는 에너지 모델(MFM, multi-flow model)을 기반으로 1 차계통 전체를 상세 모델링하여 진단하는 기술이다. 시스템 관점에서 연관 기기/설비의 운전상태까지 반영하여 진단을 수행하므로 진단정확도가 우수할 것으로 판단되나 전체 시스템을 모델링해야 하므로 구성이 복잡하고 RCP에 대한 상세 진단이 어려운 것으로 조사되었다.

두 번째는 머신러닝 모델(SVM, NN, Kohonen self-

organizing map) 기반으로 결합 식별용 특징 정보들을 기반으로 결합을 자동 진단하는 기술이다. RCP에서 수집된 다양한 계측 정보로부터 결합 식별이 용이한 특징적인 정보들을 추출하고, 훈련 모델을 학습시킨 후 실시간 입력되는 특징량 정보를 기반으로 상태를 분류하는 최신 진단 기술로써, 개발 복잡도가 높고 전문성이 요구되지만 결합유형과 결합심각도 평가 등 정밀진단에 매우 유용한 것으로 나타났다.

세 번째는 통계적인 모델(Statistics, AAKR)을 기반으로 대상기기의 상관 변수들을 모델링하여 진단하는 기술이다. 진단대상 기기의 운전과 직접적으로 상관성이 높은 측정 변수들 간의 관계를 모델링하여 변수의 정상상태 값을 추정한 후 측정값과 비교하여 이상 발생을 진단하는 기술로써, 비교적 개발이 간단하고 진단정확도가 우수하여 활용성이 높은 것으로 조사되었다. 이외에도 비틀림 진동 정보를 이용한 결합진단 등 다양한 기술들이 연구된 것으로 나타났다으나 대부분이 현장 적용보다는 연구 단계인 것으로 조사되었다.

### 3.2 국내 원전 감시 및 진단 기술 현황

국내 표준원전에서는 RCP 감시 및 진단을 위해서 다양한 시스템들을 도입하여 운영 중이다. 감시시스

Table 7 RCP diagnostic technology research<sup>(4-11)</sup>

Year	Research technology	Application technology	Target
2018	An intelligent hybrid methodology of on-line system-level fault diagnosis for nuclear power plant	Defect diagnosis	Primary System (RCP included)
2017	Oscillatory behavior-based wavelet decomposition for the monitoring of bearing condition in centrifugal pumps	Defect diagnosis	RCP Bearing
2014	Functional Modelling for Fault Diagnosis ITS Application for NPP	Defect diagnosis	Primary System (RCP included)
2014	Fault Detection in Nuclear Power Plant Components by a Combination of Statistical Methods	Defect diagnosis	RCP
2013	Nuclear power plant components condition monitoring by probabilistic support vector machine	Condition diagnosis	RCP Seal
2013	Stator Faults Detection and Diagnosis in Reactor Coolant Pump Using Kohonen Self-organizing Map	Defect diagnosis	RCP Motor
2004	Crack Detectability in Vertical Axis Cooling Pumps During Operation	Condition diagnosis	RCP
2003	Technology Development for Shaft Crack Detection Rotating Equipment	Defect diagnosis	RCP

템은 크게 3가지가 있으며, RCP 진동상태 감시용 시스템, 운전상태 감시시스템 및 이상상태 감시를 위한 조기경보시스템이 있다.

RCP 진동감시시스템은 RCP 진동측정(진동변위, 가속도) 정보를 이용하여 동적거동과 진동레벨 등의 회전운전 상태를 실시간 감시 및 진단하는 시스템으로 진동변위 센서 2개와 가속도 센서 3개가 설치되어 있다. 측정 데이터들은 RCPVMS에서 수집되며, 알람 프로세스에 따라 Overall과 1X 및 2X 성분의 궤적상태와 진동레벨을 실시간 평가한 후 사용자 설정범위(제조사 권고 운전제한값)를 이탈하면 알람을 제공한다.

운전상태 감시시스템은 RCP 운전/성능 변수들의 측정 정보를 이용하여 설비의 운전상태를 실시간 감시 및 진단하는 시스템이다. 데이터 측정은 RCP 자체의 운전상태를 나타내는 변수(회전속도, 유량, 압력, 온도 및 수위 등)들 뿐만 아니라 연관계통의 운전상태를 나타내는 변수들을 감시하기 위해 다수의 계측기들이 설치되어 있다.

조기경보 시스템은 데이터 기반 모델(AAKR)을 이용하여 이상상태 발생을 조기에 검출하는 감시 및 진단 시스템이다. 조기경보 프로세스에 따라 실시간 수집되는 데이터들을 입력받아 정상값을 추정하고, 측정값과 비교 후 편차를 계산하여 설정 범위 이탈 여부를 평가한다.

기존 국내 표준원전 운영 RCP 관련 시스템들은 기능별 목적에 따라 진동상태, 성능/운전상태, 조기경보 등을 각각 독립적으로 감시하고 있다. 이 시스템들은 진동 또는 운전등과 같이 단일정보만을 이용하므로 종합적인 설비의 진단이 어렵다. 즉, 알람 발생 시 RCP 자체 결함에 의한 것인지 성능저하 또는 외부영향에 의한 것인지 정확히 식별하기 어렵다. 기존 시스템들의 기술적 한계들을 해결할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

### 3.3 RCP 진단기술 개발 방안

이에 본 논문에서는 앞서 3.1항과 3.2항의 조사 및 분석 결과들을 토대로 기존 시스템들의 기술적 제약 사항들을 극복하고 시스템 활용성을 높이기 위해 다음과 같은 RCP 진단기술을 적용한다.

진동-운전/성능-조기경보 등의 정보들을 통합하고 이들 정보를 토대로 종합적인 분석과 진단이 가능하

며 결합유형과 부품 및 원인 정보들을 제공할 수 있는 정밀진단기술들을 개발한다. 회전체 기기의 특성과 연관 계통들의 운전특성이 복합적으로 진단할 수 있는 RCP 설비진단개발을 한다.

RCP 설비진단에는 협대역기반 진단기술, 규칙기반 진단기술, 머신러닝 및 데이터기반 진단기술 4가지 진단기술을 사용한다.

협대역 진단기술은 RCP 진동 데이터로부터 추출된 결합주파수 성분들에 대한 변화 정보를 기반으로 펌프 주요 부품별 고장 진단이 가능하도록 개발하며, 진단알고리즘에서는 진동과 직접적으로 연관된 결합에 영향을 미치는 변수들을 고려한다.

규칙기반 진단기술은 RCP 운전변수들의 변화 정보를 기반으로 설비 자체와 영향 관계에 있는 보조계통 설비들까지 고장 진단이 가능하도록 개발하며, 진단 알고리즘에서는 펌프 진동유발 결합과 직접적으로 연관성이 높은 주파수 성분들을 포함한다.

머신러닝은 RCP 측정 진동값으로부터 추출된 결합 식별용 특징정보를 기반으로 불평형, 오정렬, 접촉마모 등의 주요 부품별 결합 유형들을 진단하도록 개발하며, 진단알고리즘은 앞서 수행된 협대역 진단 결과 및 규칙기반 진단결과를 바탕으로 머신러닝 모델에서 진단된 결합 정보들을 최종 판정한다.

데이터기반 진단기술은 RCP 및 연관계통의 운전 변수 정보들을 기반으로 모델을 통해 누설 또는 성능저하 등의 고장 또는 결합 진단이 가능하도록 개발하며, 진단 알고리즘은 머신러닝 진단기술과 동일하게 협대역진단결과 및 규칙기반 진단결과를 토대로 데이터 모델에서 진단된 고장 정보들을 최종 판정한다.

RCP 설비 감시 중 경보 발생시 Fig. 4과 같이 진단모델을 구성하고 원인이 기기 자체 결합 발생에 의한 것인지를 식별한다. 이를 위해서는 협대역기반 진단 모델과 규칙기반 진단 모델 개발 시 진동특성 변수와 운전/성능 변수를 복합적으로 고려한 알고리즘을 적용한다. 즉, 보조설비와 연관계통 기기의 운전상태 변화가 펌프 자체의 운전상태에 영향을 미치고 있는지에 대해 평가한다.

펌프 자체의 회전체 부품결합이 예상되는 경우에는 다중 결합 유형들 중 상태식별이 가능한 머신러닝 진단결과와 종합적으로 분석하여 최종 결합부품과 원인을 판정한다. 만일 보조설비나 연관계통 기

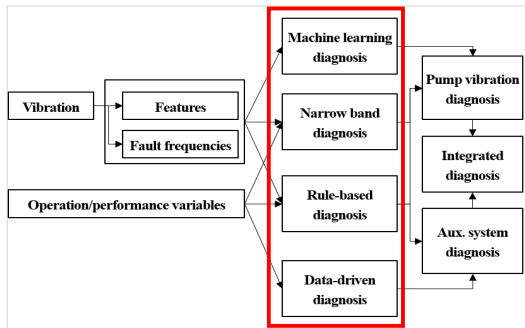


Fig. 4 Diagnostic algorithm processing.

기의 고장 또는 결함이 예상되는 경우에는 계통 운전데이터를 이용하여 설비 고장을 진단하는 데이터 모델 진단결과와 종합적으로 고려하여 진단한다.

위와 같은 기술 개발 방안들은 앞서 3.2항에서 기술된 기존 감시시스템들의 기술적 제약사항들이 해결 가능하고, 3.1항에서 조사된 최신기술들을 반영한 것으로 RCP의 건전성과 운전 안전성의 확보가 가능하다.

#### 4. 결 론

국내 표준원전 운영 RCP 펌프를 대상으로 진단기술 개발을 위하여 기존에 운영 중인 감시시스템들의 기능적 제약사항 분석과 해외 진단기술개발 동향분석을 수행하였고, 이들을 통해 진단기술 관점에서의 개발 방안들을 도출하였다.

1) 기존 발전소 운영 RCP 감시시스템들에 대한 조사결과, 기능적 목적에 따라 독립적으로 운영되고 운전제한값 범위인지만 감시하고 있으므로 다양한 정보들(진동, 운전, 성능 등)을 종합적으로 진단이 필요한 것으로 확인하였다.

2) RCP 진단 관련 해외 최신기술을 반영하기 위해 해외 발전소 적용사례 3건과 다수의 연구 자료들을 조사하였으며, 그 결과 SVM 알고리즘과 AAKR 모델이 RCP 설비진단에 매우 효과적인 알고리즘으로 확인하였다.

3) RCP 설비진단 기술개발 방안에서는 기존 감시시스템의 기술적 제약사항들을 해결하기 위해 펌프의 회전체 특성과 연관 보조계통의 영향을 고려하여 진동과 운전/성능 정보들을 종합적으로 반영할수 있는 머신러닝, 협대역정보기반 진단기술, 규칙기반 진단기술 및 데이터기반 진단기술을 개발한다.

4) 진단기술 유형별 각각에 대한 개발 방안들을 적용하였고, 진단정확도 향상을 위해서 기술별 진단 결과의 순차적 처리 프로세스를 적용하였다. 또한 표준원전 RCP 예측진단기술개발 연구과제를 통해 발전소 현장 데이터에 RCP 진단기술을 적용하여 실증시험으로 검증 및 튜닝을 통한 최적화를 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 논문은 한국수력원자력 자체에서 추진하고 있는 표준원전 RCP 예측진단기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- (1) Ashraf Mohamed Aboshosha, 2010, "Neurofuzzy Computing aided Fault Diagnosis of Nuclear Power Reactors," *Proceedings of the 7th ICEENG Conference*, May 25-27, EE092-1.
- (2) Qinghu Meng, Qingfeng Meng and Wuwei Feng, 2012, "A New Application of Support Vector Machine Method: Condition Monitoring and Analysis of Reactor Coolant Pump," *25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering, Journal of Physics, Conference Series 364*, 012134, doi:10.1088/1742-6596/364/1/012134.
- (3) SmartSignal, 2003, "Early Warning of Reactor Coolant Pump Seal Degradation," Application NOTE NUMBER 6.
- (4) Min-jun Peng, Hang Wang, Shan-shan Chen, Geng-lei Xia, Yong-kuo Liu, Xu Yang and Abiodun Ayodeji, 2018, "An intelligent hybrid methodology of on-line system-level fault diagnosis for nuclear power plant," *Nuclear Engineering and Technology 50*, pp. 396-410, <https://www.elsevier.com/locate/net>.
- (5) Anil Kumar and Rajesh Kumar, 2017, "Oscillatory behavior-based wavelet decomposition for the monitoring of bearing condition in centrifugal pumps," *SAGE Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology*, Volume 232, issue: 6, pp. 757-772.
- (6) Morten Lind and Xinxin Zhang, 2014,

- “FUNCTIONAL MODELLING FOR FAULT DIAGNOSIS AND ITS APPLICATION FOR NPP,” *Nuclear Engineering and Technology Volume 46, Issue 6*, December 2014, pp. 753-77, <https://doi.org/10.5516/NET.04.2014.721>.
- (7) Francesco Di Maio, Pero Baraldi, Enrico Zio and Redouane Seraoui, 2014, “Fault Detection in Nuclear Power Plant Components by a Combination of Statistical Methods,” *IEEE Trans. On Reliability, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Vol 62(4), pp. 833-845.
- (8) Jie Liu, Redouane Seraoui, Valeria Vitelli and Enrico Zio, 2013, “Nuclear power plant components condition monitoring by probabilistic support vector machine,” *Annals of Nuclear Energy, Elsevier Masson*, 56, pp. 23-33.
- (9) Smail Haroun, Amirouche Nait Seghir and Said Touati, 2013, “Stator Faults Detection and Diagnosis in Reactor Coolant Pump Using Kohonen Self-organizing Map,” *Springer International Publishing Switzerland SCI*, pp. 17-26, DOI:10.1007/978-3-31900560-7-6.
- (10) N. Bachschmid, P. Pennacchi, and E. Tanzi, P. Verrier, F. Hasnaoui, and K. Aabadi, 2004, “Crack Detectability in Vertical Axis Cooling Pumps During Operation,” *Taylor and Francis International Journal of Rotating Machinery*10, pp. 121-133, DOI: 10.1080/10236210490276926.
- (11) Mitchell S, Lebold Kenneth P, Maynard, Martin W, Trethewey Dennis J, Bieryla, Clifford J, Lissenden Samuel P, Tissot, and Pierre Verrier Julien Metz, 2003, “TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR SHAFT CRACK DETECTION IN ROTATING EQUIPMENT,” *EPRI International Maintenance Conference Chicago, IL August 18-20*.