

# 램집합체 이상진단 시스템의 개발

변승현, 조병학\*, 신창훈, 양장범(한전 전력연구원)

## Development of Fault Diagnosis System for Ram in PHWR Plant

S. H. Byun, B. H. Cho\*, C. H. Shin, J. B. Yang(KEPRI, KEPCO)

### ABSTRACT

In this paper, a fault diagnosis system for ram in PHWR plant is developed. The developed diagnosis system can detect the ram stuck phenomena due to increased ball wear and damage in ball nut using discrete wavelet transform before the ram is stuck. The validity of developed diagnosis system is shown via experiments using ball nut characteristic test equipment.

**Key Words :** Ram assembly(램 집합체), Fault diagnosis(이상 진단), Wavelet transform(웨이블렛 변환)

### 1. 서론

램 집합체는 운전 중에 연료교환이 가능한 중수로 원전에서 연료교환의 핵심설비이며, 램 집합체의 고장은 발전소 운영에 차질을 초래한다. 운전 중 연료를 교체하는 작업이 빈번하게 수행됨에 따라 램 집합체의 고장으로 인한 발전소 정지 등의 위험이 상존하고 있다. 따라서 중수로 원전의 불시 정지를 미연에 방지하고 운영의 안전성과 효율을 높여주며, 램 집합체의 상태에 관한 정보를 제공함으로써 원활한 운전에도움을 줄 수 있는 램 집합체 이상진단 시스템의 개발이 요구되어진다.

본 논문에서는 램 집합체 이상 사례를 소개하고, 램 집합체 이상 사례 중 가장 빈번한 사례로 분류되는 볼 마모로 인한 램 고착 현상에 대한 감지 시스템을 웨이블렛을 이용하여 구현한다.

2절에서는 램 집합체의 개요와 램 집합체 이상 현상 사례에 대해서 설명한다. 3절에서는 램 집합체 이상현상 중 가장 빈번한 사례인 볼 마모로 인한 램 고착 현상을 감지하기 위한 알고리즘을 기술하고, 4 절에서는 볼넷특성시험 장치를 이용한 실험 결과를 통해서 진단 알고리즘의 효용성을 보이며, 5절에서 결론을 맺는다.

### 2. 램 집합체의 개요 및 이상 사례

#### 2.1 램 집합체의 개요

본 논문에서 이상진단의 대상으로 삼은 연료교환기의 램 집합체의 구조는 그림 1과 같다.

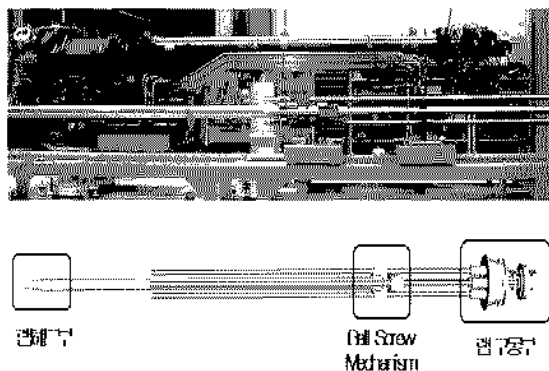


Fig. 1 Ram assembly structure

램 집합체는 중수로 원자로에서 연료다발, 각종 마개 및 안내관의 설치와 제거를 위하여 필요한 동작과 힘을 제공한다. 램 집합체는 B-램, L-램, 및 C-램이 3개의 동심원 램으로 되어 있고, 램 하우징에 의해 지지되는데 B-램은 가장 외곽에 위치하여 주역할을 담당한다. 그 안쪽에 L-램이 있고 그 다음에는 중수압으로 작동되는 C-램이 있는데 이 두 개의 램은 B-램과 함께 움직이지만 독립적으로 움직일 수도 있다. 램들은 연료 교환운전시 중요한 역할을 한다. 즉 연료 다발을 교환하는 이외에 연료 교환기 스나우트 마개, 연료관 마개, 차폐 마개, 램 어댑터, 안내관들을 제거 또는 재설치하는 역할을 한다. 이와 같은 역할의 수행은 B-램, L-램, C-램 공동작용으로 이루어진다. 각종마개를 운반하여 매거

진에 넣었다가 빼는 일, 연료관 상류에서 신연료를 장전하고 하류에서 사용후 연료를 받아내는 일들은 B-램에 의하여 수행되어진다. 각 램은 각종 마개의 설치와 연료교환 작업을 위하여 별개의 헤드를 가지고 있으며 B-램과 L-램은 유압모터에 의하여 움직이고 C-램은 중수 압력에 의하여 움직인다[1].

### 2.2 램 집합체 이상 현상 사례

본 절에서는 이상 진단 알고리즘 구현을 위해 램 집합체 이상 진단 사례를 기술한다. 현장에서의 램 정비 사례를 B-램을 중심으로 조사하고, 조사한 램 정비 사례를 이상부위에 따라 분류하여 요약하면 표 1과 같다[2].

표 1의 램 이상 현상의 이상 부위별 분류표를 보면 램 deflector rod 절단으로 인한 spacer 및 load 볼 마모/파손, 볼 스크류 스크래치/손상, spacer 볼 마모로 인한 램 고착 현상, seal return 유량 과다 또는 과소로 인한 램 seal 계통 이상, Catenary 호스 파열, 연료 교체 관련 걸쇠링 동작 불능 등 타기 고장 등이 있는데, 볼 마모로 인한 램 고착현상이 가장 빈번하게 발생하는 사례임을 볼 수 있다. 그림 2는 손상된 deflector rod와 손상된 볼의 현장 사진을 보여주고 있다.

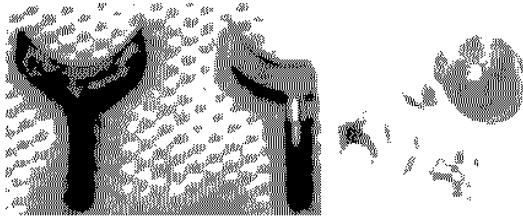


Fig. 2 Damaged deflector rods and balls

### 3. 램 고착 감시 진단 알고리즘

2.2절에서 기술한 램 이상 유형을 보면 볼 마모로 인한 램 고착 현상이 가장 빈번함을 볼 수 있다. 볼 너트의 볼과 볼 스크류 등이 램의 deflector rod의 절단 등으로 칩이 유입되어 손상을 입거나 오랜 사용으로 인해 볼의 마모가 진행된 상태에서 계속 램이 구동될 경우 램이 고착될 수 있다. 이 경우에 램을 구동하는 유압모터에 의한 토크가 증가되며 램이 고착되기 바로 직전에는 토크를 지시하는 유압모터의 서비스 포트 양단 차압이 정상상태보다 훨씬 증가하게 된다. 본 논문에서는 웨이블렛 변환을 이용한 고주파 성분 추출을 통해 램 고착현상이 일어나기 전에 진행되는 간헐적 회전현상을 고주파 성분의 평균과 표준편차를 이용한 임계치를 이용하여 감지한다.

#### 3.1 웨이블렛 변환

웨이블렛 변환은 푸리에 변환이 하기 어려운 신호의 국소적 변화를 추출할 수 있고, 신호의 불연속성, 단절 등을 잘 식별할 수 있다. 웨이블렛은 진동 특성과 수렴 특성을 동시에 만족하는 함수이다. 웨

Table 1 Ram fault examples

이상부위	원인 및 현상	조치내용	
볼 스크류	B-램 Deflector 손상되어 칩 유입으로 Spacer 및 Load 볼 마모로 드라이브 고착	B-램 Deflector Rod 교체 Spacer 볼 Load 볼 교체	
	B-램 Top Deflector Rod가 절단으로 부러지고 볼 스크류 Groove 손상	B-램 Load 볼 Spacer 볼 교체 Deflector Rod 교체	
	B-램 볼 스크류 Nut의 Deflector Rod가 부러지며 Spacer 볼 손상으로 입구 막힘	Deflector Rod 교체	
	B-램 Top Deflector 파손으로 볼 스크류 스크래치 발생	B-램 Deflector Rod 교체 볼 스크류 Scratch 부분 Lapping	
	Deflector Rod 부러지며 Spacer 볼 및 Load 볼 파손으로 드라이브 고착	Deflector Rod 교체 Spacer 볼 및 Load 볼 교체	
	B-램 Bottom측 Deflector가 손상되어 B-램 드라이브 고착	Deflector Rod 교체 B-램 볼 교체	
	Spacer 볼 마모	Spacer 볼 교체	
	L램 Pot측의 Deflector Rod가 깨지면서 B-램 및 L램 드라이브 고착	L램 Pot측 볼 스크류 교체 Load 볼 및 Spacer 볼 교체 L램 Deflector Rod 교체	
	B-램 Spacer 볼 마모 및 볼 스크류 스크래치 발생으로 B-램 드라이브 고착	B-램 Bottom 볼 스크류 교체 Spacer 볼 교체	
	램 Seal	B-램 Top 및 Latch 램 Seal Return 유량 과다	볼 스크류 seal 어셈블리 리퍼팅 lapping B-램 Bottom측 Deflector Rod 교체 spacer 볼 및 load 볼 교체
		High Pr 상태에서 B-램 드라이브 고착 B-램 Top측 seal return 유량 과소	볼 스크류 seal assembly stator 및 rotor 교체
	타기 고장	연료 교체중 연료관에서 걸쇠링이 작동되지 않아 고착됨	B-램 Bottom #1 Deflector Rod 교체
B-램 Bottom Deflector Rod 불량		Load 볼 및 Spacer 볼 교체	
B-램 Load 볼 및 Spacer 볼 파손			
고장	Catenary Hose 파열로 C-램 동작 불량	B-램 Bottom 볼 스크류 및 볼 너트 교체 B-램 수동 드라이브 can follower 교체 B-램 볼 스크류 베어링 교체	

이블렛은 사인함수와 창함수의 시간상에서의 내적을 통해 형성될 수 있다. 일반적으로 이와 같이 정의되어지는 웨이블렛  $\psi(t)$ 를 웨이블렛 모함수라고 정의하며 이 모함수로부터 웨이블렛의 스케일, 즉 주파수를 변화시키는 웨이블렛 압축계수  $a$ 와 시간상에서의 웨이블렛의 전이를 나타내는 전이계수  $b$ 와의 합성을 통해 다음과 같이 웨이블렛 집합이 정의되어진다[3].

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

웨이블렛 모함수  $\psi(t)$ 로부터 웨이블렛 계수  $a$ 와  $b$ 를 변화시켜 정의한 웨이블렛의 집합을 웨이블렛 패밀리라 한다.

연속 웨이블렛 변환은  $f(t)$ 가 분석하고자 하는 신호이며  $\Psi_{a,b}^*(t)$ 가 웨이블렛 함수의 공액 복소수라 할 때 다음 식으로 정의되어진다.

$$W'(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

위 식은 함수  $f(t)$ 와 웨이블렛 패밀러  $\Psi_{a,b}(t)$ 의 내적을 적분한 것이다. 웨이블렛 변환은 여러 센서로부터 연속적으로 발생하는 신호 중 아주 불규칙적이며 시간대역이 짧은 신호들의 해석에 있어서 기존의 신호처리 방식에서 잡음으로 처리할 수도 있는 데이터로부터 의미 있는 정보를 추출할 수 있는 특징이 있다. 이 웨이블렛 변환의 수치적 연산을 위해서는 웨이블렛 압축계수  $a$ , 전이계수  $b$ 는 적절한 방법으로 이산화되어야 한다. 가장 흔히 이용되어지는 웨이블렛의 이산화 방법은 다음의 식에 의해 주어지는 이분법적인 이산화이다[4].

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (3)$$

정규 직교 기저 웨이블렛인  $\Psi(t)$ 를 얻는데 사용한 다중 해상도 근사화를 적용함으로써 다음과 같은 스케일링 함수인 기저 함수  $\phi(t)$ 를 얻을 수 있다.

$$\phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \phi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (4)$$

식 (4)의 기저 직교 웨이블렛을 이용한 웨이블렛 변환은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi_{j,k}^*(t) dt \quad (5)$$

위 식에서  $d_{j,k}$ 는 스케일링 계수이며,  $j$ 보다 큰 레벨의 해상도에 대한 스케일링 계수와 웨이블렛 계수는 반복적으로 다음의 식을 이용해서 구할 수 있다.

$$d_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i-2k) d_{j,k} \quad (6)$$

$$C_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(i-2k) d_{j,k} \quad (7)$$

시퀀스  $h$ 는 스케일링 함수  $\phi(t)$ 로부터 얻은 저주파 통과 필터 계수이며,  $g$ 는 웨이블렛  $\Psi(t)$ 로부터 얻은 고주파 통과 필터 계수이다. 스케일링 계수  $d_{j,k}$ 는 원래 신호의 저주파 필터링을 거친 저주파 성분을 나타내는 유사계수이며, 웨이블렛 계수  $C_{j,k}$ 는 원래 신호의 고주파 필터링을 거친 고주파 성분을 나타내는 상세계수이다. 본 논문에서는 이상 진단에 흔히 이용되고 있는 Daubechies를 웨이블렛으로 채용하였다.

### 3.2 램 고착 감시 알고리즘

본 논문에서 구현한 웨이블렛을 이용한 램 고착 감시 알고리즘은 다음과 같다.

① 램 구동 유압모터의 서비스 포트의 토출압 신호를 취득하여 국부 결합에 의한 특성 주파수를 산출한다. 특성 주파수는 그림 3과 같은 베어링의 물리적인 구조(볼 직경, 베어링 피치 직경, 볼의 수, 볼과 면의 접촉각 등)와 취득한 신호로부터의 회전 주파수로부터 식 (8)에 의해 산출한다[5].

$$f_o = \frac{BD}{PD} f_r \left[ 1 + \left( \frac{PD}{BD} \right)^2 \cos^2 \beta \right] \quad (8)$$

② ①에서 산출한 특성 주파수와 샘플링 주기로

부터 웨이블렛 분해 레벨  $J$ 를 결정하고,  $J$  레벨에서 이산 웨이블렛 변환을 하여 레벨  $J$ 에서의 상세계수  $D_j(k)$ 를 구한다.

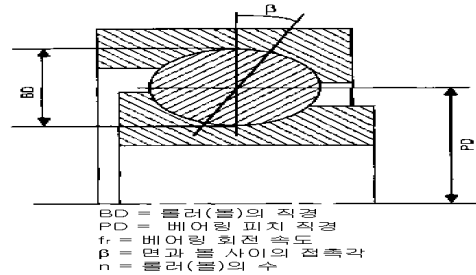


Fig. 3 Physical structure of bearing

③ 상세계수의 절대값의 평균을 구한다.

$$m = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |D_j(k)|}{N} \quad (9)$$

④ 상세계수의 절대값의 표준편차를 구한다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} (|D_j(k)| - m)^2}{N}} \quad (10)$$

⑤ 위에서 구한 평균과 표준편차를 이용하여 임계치를 설정하고, 임계치 보다 작은 값들은 0으로 설정하고, 임계치 이상의 값들은 1로 설정한다.

$$TH = m + 4\sigma, \quad D_{jTH}(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } |D_j(k)| < TH \\ 1 & \text{if } |D_j(k)| \geq TH \end{cases} \quad (11)$$

⑥ ⑤의 결과로부터 임계치 이상의 값들이 나오는 경우에 램 고착으로 가는 과정에 있는 간헐적 회전으로 진단한다.

## 4. 시험 결과

### 4.1 시험 환경

가장 빈번한 램 이상 현상인 볼넷의 볼 손상에 의한 마찰 증가로 인한 램의 고착을 모사하기 위해 그림 4와 같은 볼넷 특성 시험 장치를 제작하였다.

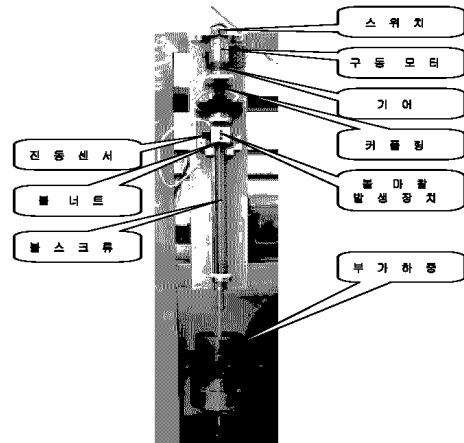


Fig. 4 Ball nut characteristic test equipment

그림 4의 볼넷 특성 시험 장치에서는 구동모터로 DC 모터인 MicroMo Electronics사의 3557 K 024 CR078을 이용하였다. 볼트의 조임상태와 부가하중을 이용하여 마찰을 증가시키면서 토크 데이터를 취득하였다. 데이터 취득 장치로는 NI사의 PCI-6014를 이용하였으며, 데이터 취득 프로그램과 분석 프로그램은 NI사의 Labwindows/CVI상의 C로 구현하였다.

#### 4.2 시험 내용

볼넷 특성 시험장치를 이용하여 볼트를 조정하여 볼 마찰을 증가시키면서 취득한 데이터는 그림 5와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 볼 마찰이 증가하여 볼이 고착된 경우에는 토크가 증가함을 볼 수 있다. 이 경우는 실패값의 변화를 통해서도 알 수 있다.

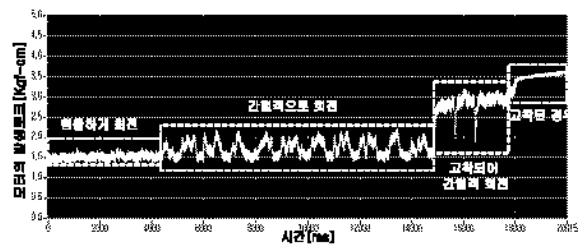


Fig. 5 Motor torque trend due to increased ball friction

#### 4.3 고착 감시 결과

볼이 고착되기 전의 볼의 간헐적 회전을 감지하기 위해서는 먼저 볼의 결함에 의한 특성 주파수를 산출하여야 한다. 볼넷 특성 시험장치의 볼의 수 21개, 볼 직경 3mm, 베어링 피치 직경 17.54mm, 그림 4의 볼넷 특성 시험 장치 구동 모터 상단에서 비접촉식 tachometer로부터 취득한 회전 주파수 245rpm, 그리고 볼넷 특성 시험 장치에서 채용한 모터의 감속기어(3.71:1)를 고려하면 볼의 마찰력 증가에 의한 특성 주파수 6.6Hz를 산출할 수 있다. 샘플링 주파수 1kHz를 고려하면 각 레벨에서의 웨이블릿 변환에 의한 유사계수와 상세계수가 갖는 주파수 대역은 그림 6과 같다. 위에서 산출한 특성 주파수는 D7에 해당함을 알 수 있다.

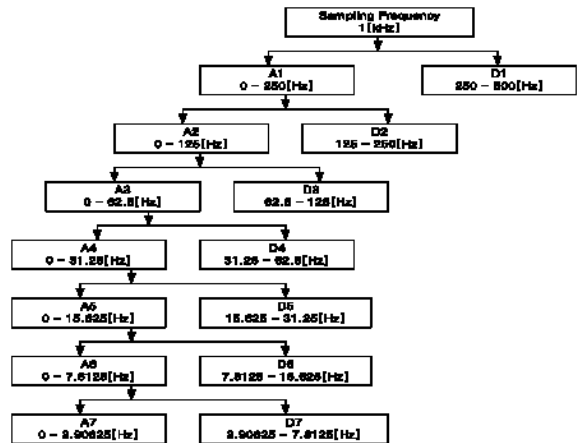


Fig. 6 Frequency bandwidth of wavelet decompositions

그림 5의 모터 토크 신호에 대해서 Daubechies 2를 웨이블릿으로 채용하고, 레벨 7에 대해서 웨이블릿 변환한 후, 상세계수 D7의 절대값에 대해서 식 (9), (10), (11)을 적용하면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 간헐적 회전시 임계치에 의한 신호에 의해 고착되기 이전에 간헐적인 회전 현상을 감지할 수 있음을 볼 수 있다.

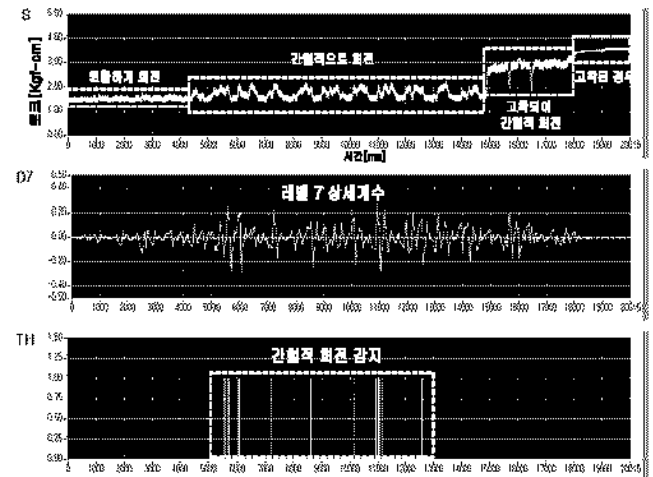


Fig. 7 Detection of discontinuous rotation using wavelet transform

### 5. 결론

본 논문에서는 증수로 원전의 연료교환 관련 핵심설비인 램 집합체의 이상진단 현상 중 가장 빈번한 사례인 볼 마모로 인한 램 고착현상을 고착되기 이전에 미리 감지할 수 있는 알고리즘을 웨이블릿 변환을 이용하여 개발 구현하였다. 볼 마찰로 인한 램 고착현상을 모사하기 위한 볼넷 특성 시험 장치를 이용한 시험을 통해 구현한 알고리즘의 효용성을 보였다.

### 참고문헌

1. “증수로 핵연료 교환설비”, 월성원자력본부
2. “램 집합체 이상진단 시스템 개발”, 최종보고서, 전력연구원, 2004
3. 이승훈, 윤동환, “알기쉬운 웨이블릿 변환”, 진한 도서, 2002
4. K.Mori, N.Kasashima, T.Yoshioka, Y.Ueno "Pre prediction of spalling on a ball bearing by applying the discrete wavelet transform to vibration signals", Wear, Vol 195, pp.162-168, 1996
5. C James Li and Jun Ma, "Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing-localized defects", NDT&E International, Vol 30, No. 3, pp.143-149, 1997
6. S.Prabhakar, A.R.Mohanty, A.S.Sekhar, "Application of discrete wavelet transform for detection of ball bearing race faults", Tribology International, Vol 35, pp.793-800, 2002