

# 웨이블릿 변환을 이용한 원자로 제어봉구동장치 동작 감시 방법

## A Monitoring Method of Movements in Control Rod Drive Mechanism using Wavelet Transform

천종민\*, 김춘경\*\*, 이종무\*\*, 박민국\*\*\*, 권순만\*\*\*\*

Jong-Min Cheon, Choon-Kyoung Kim, Min-Kook Park, Jong-Moo Lee and Soonman Kwon

**Abstract** - In this paper, we proposed a new method detecting actions of some components driven by the coil excitation. Nuclear power reactors are typically controlled by the movement of several neutron-absorbing control rods into or out of the reactor core. For moving control rods, we use an electromagnetic-jack-typed mechanism, which is called Control Rod Drive Mechanism. This mechanism moves control rods by the step composed of sequential actions of components. In case any mechanical problems happen in the mechanism, the orders for the control rod movement from the higher system cannot be performed properly. This abnormal state must be monitored and the sequential actions of the components can be the monitoring target. The actions of components generate some deviations in the profiles of the currents flowing into the coils in the mechanism. We focused on this phenomena and devised a new method of detecting the actions of the components in Control Rod Drive Mechanism by using the wavelet transform for observing the current profile.

**Key Words** : Control Rods, Control Rod Drive Mechanism, Monitoring Method and Wavelet Transform

### 1. 서 론

원자력 발전소의 원자로 출력은 중성자 흡수재로 만들어진 제어봉들이 원자로 내부로 오르내리는 수직 방향 이동을 통해 제어된다. 이들 제어봉들을 구동시키는 것이 제어봉구동장치(Control Rod Drive Mechanism)이다. 제어봉은 정해진 길이의 스텝 단위로 이동하는데, 제어봉구동장치가 제어봉들을 구동시킬 때에는 이동 방향 별로 상이한 일련의 과정들을 통해 스텝 이동을 수행한다. 제어봉구동장치 내의 부품들이 방향 별로 정해진 순서에 의해 동작하여 제어봉을 잡고 있는 구동축이 스텝 이동하는 것이다[1].

만약 제어봉구동장치를 구성하고 있는 부품들에서 기계적 결함이 생기면, 원자로 출력 제어를 위하여 상부의 제어시스템으로부터 하달된 제어봉 이동 관련 명령은 실제로 구현되지 못한다. 이러한 사실을 상부에서 신속하고 정확하게 파악하기 위해서는 제어봉구동장치의 동작을 감시할 방법이 필요하다. 제어봉구동장치의 기구들은 코일에 의한 여자로 동작하게 되는데 기구의 동작과 코일 전류 파형 사이에는 밀접한 연관이 있다. 따라서 제어봉구동장치의 동작을 감시하기 위해서 각 코일의 전류 파형을 관찰하는

것이 유리하며 본 논문에서는 코일 전류 파형을 분석하기 위하여 국소적인 왜곡을 잘 검출하는 웨이블릿 변환을 사용하였다[2].

### 2. 본 론

#### 2.1 제어봉구동장치

제어봉구동장치는 전자기-잭(Electromagnetic-Jack) 타입을 취하며 구동 코일에 전류를 흘려서 이를 통해 발생하는 자기력을 이용하여 집게들이 구동축을 잡거나 제어봉 집합체

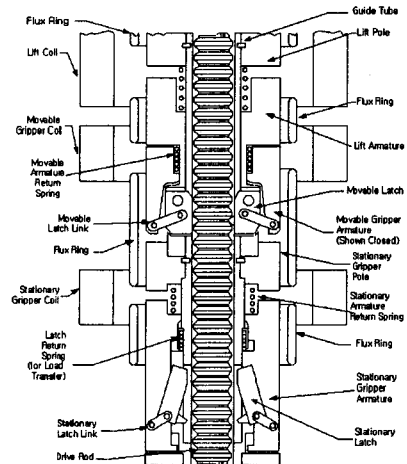


그림 1. 3-코일 형식 제어봉구동장치

저자 소개

- \* 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 研究員
- \*\* 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 先任研究員
- \*\*\* 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 責任技能員
- \*\*\*\* 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 責任研究員

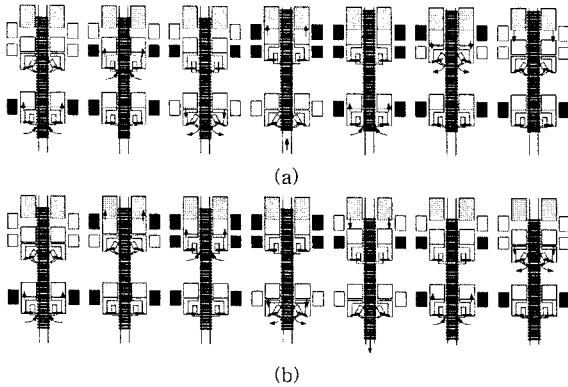


그림 2. 3-코일 형식 제어부구동장치 동작(a-인출, b-삼입)

가 달린 구동축을 들어 올리거나 내리게 된다. 제어부구동장치는 구동 코일 개수에 따라 3-코일 형식과 4-코일 형식으로 나누어진다.

그림 1에서는 본 논문에서 다루는 3-코일 형식의 제어부구동장치의 구조를 보여주고 있다. 이 구동장치에는 총 3개의 코일들이 설치되어 있으며 이들은 정지 상태로 구동축을 잡는 정지 집게 구동용 코일(Stationary Gripper Coil), 구동축을 잡고 이동하는 이동 집게 구동용 코일(Movable Gripper Coil) 그리고 이동 집게를 이동시키는 올림 코일(Lift Coil)이다. 제어부들은 제어부구동장치 중심에 있는 구동축의 하단에 다발 형식으로 묶여서 부착되어 있으며 제어부구동장치의 기구들이 제어부 방향 별로 정해진 일련의 과정으로 한 스텝 길이만큼 홈이 파여진 구동축을 잡거나 놓고, 올리거나 내리면서 제어부가 상·하로 이동하게 된다. 그림 2에서는 이러한 과정을 상세히 보여 주고 있다. 우선 제어부 인출 과정을 설명하면, 처음에는 정지 집게가 구동축을 잡고 있다가 이동 집게가 잡으면 정지 집게가 구동축을 놓는다. 이동 집게가 연결되어 있는 올림 전기자(Lift Armature)가 올림 자극(Lift Pole)에 부착되면서 이동 집게가 구동축을 잡고 함께 올라간다. 한 스텝 올라가면 정지 집게가 다시 구동축을 잡고 이동 집게가 구동축을 놓는다. 고정자(Lift Pole)에 부착되었던 이동 집게가 다시 내려가서 제자리로 되돌아오면 제어부 인출 스텝 과정이 마무리된다.

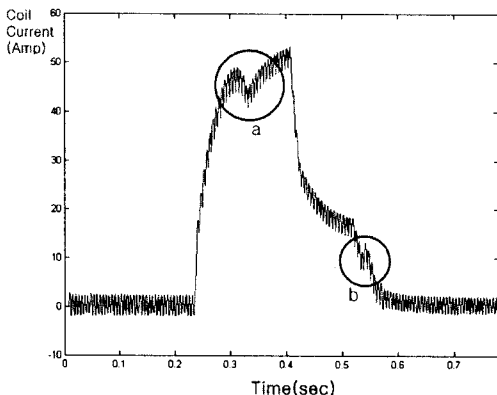


그림 3. 올림 코일 전류 파형

그림 3은 세 개의 코일들 중에서 올림 코일의 전류 파형을 보여 준다. 올림 코일의 전류 흐름에 따라 이동 집게와 연결된 올림 전자가 이동자가 되어 고정자인 올림 자극에 부착되거나 분리된다. 코일의 인덕턴스는 이동자와 고정자 사이의 거리에 반비례하는데[2] 이동자가 고정자에 접근할수록 인덕턴스가 증가하여 전류는 감소(그림 3의 a)하고 이동자가 고정자에서 분리되면서 감소되는 인덕턴스로 인해 전류는 증가(그림 3의 b)한다[3].

제어부구동장치의 각 기구는 이를 구동하는 코일 전류 파형을 통해 그 동작 여부를 판단할 수 있으므로 본 논문에서도 코일 전류 파형을 분석하여 기구의 정상 동작 여부를 감시하는 방법을 제시한다.

## 2.2 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환의 여러 장점들 중에서 본 논문에서는 국부 분석(local analysis) 능력에 관심을 두었다[4]. 웨이블릿의 국부 분석 능력을 이용하여 그림 3에서 제어부구동장치의 기구 동작으로 인해 생기는 전류 파형의 왜곡 부분을 검출한다.

웨이블릿이란 적분하여 0의 값을 가지는 곡선 신호를 뜻하는데, 여러 가지 모(母) 웨이블릿들 중에서 본 논문에서는 Morlet 웨이블릿을 웨이블릿 변환에 사용한다. Morlet 웨이블릿 식은 다음과 같다.

$$\psi(t) = e^{-t^2} \cos(2\pi t) \quad (1)$$

식 (1)의 웨이블릿에서 유도되는 웨이블릿 그룹 식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-0.5} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \forall a, b \in \mathbb{R} \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 웨이블릿 파형의 높이와 폭을 조절하는 스케일 인자이고  $b$ 는 웨이블릿 파형을 수평으로 이동시키는 위치 인자이다. 코일 전압  $v$ 에 대하여 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 연속 웨이블릿 변환하는 식은 다음 식 (3)과 같다.

$$C_{a,b}(b) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v(n) \psi_{a,0}(n-b) \quad (3)$$

실제 시스템에서는 코일 전압이 0.56msec로 샘플링되므로 이산 식을 사용하며 연속 웨이블릿 변환은 코일 전압 신호와 웨이블릿 그룹 식을 교차상관(cross correlation)한 결과와 같다[5]. 식 (3)은 식 (2)에서 위치 인자  $b$ 가 0인 웨이블릿 그룹 식을 교차상관식에 사용한 것을 알 수 있다.

## 2.3 제어부구동장치 동작 검출

그림 4는 올림 전자가 이동하여 올림 자극에 부착되는 순간의 전류 파형과 웨이블릿 변환 결과를 보여 주고 있다. 그림 3의 a 부분 부근의 전류 데이터를 이용하여 웨이블릿 변환한 결과 이동자가 고정자에 붙는 순간(약 0.03 초)에 상대적으로 큰 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 진동의

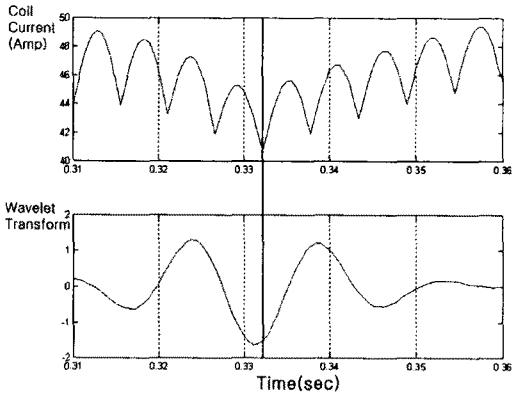


그림 4. 올림 전기자(이동자)가 올림 자극(고정자)에 부착 결과

유무로 제어부동장치의 각 기구의 정상 동작 여부를 판단할 수 있다.

#### 2.4 모의 실험

제어부동장치에는 총 세 개의 코일이 있으나 본 논문에서는 올림 코일을 대상으로 하여 모의실험을 수행하였다. 이동자인 올림 전기자가 고정자인 올림 자극에 부착될 때의 결과는 그림 4에 보여주고 있으므로 그림 5에서는 이동자가 고정자에서 분리될 때(그림 3의 b)의 결과를 보여준다. 분리되는 시점인 0.54초 부근에서 웨이블릿 변환 결과에 진동이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 6과 그림 7에서는 각각 이동자가 고정자에 부착되지 못하는 경우와 이동자가 고정자에서 분리되지 못하는 경우의 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 실선의 비정상 동작에서의 웨이블릿 변환 결과는 점선의 정상 동작에 비해서 진동이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

전 영역에 대해서 감시하는 부담을 줄이기 위하여 본 논문에서는 기구 동작 예상 발생 시점을 기준으로 0.05초 동안에 대해서만 웨이블릿 변환을 통한 동작 감시 영역으로 설정하였다.

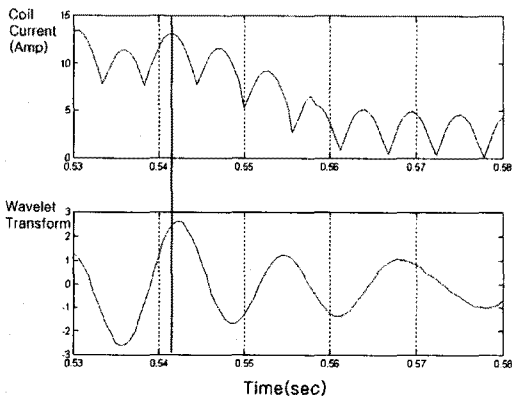


그림 5. 올림 전기자(이동자)가 올림 자극(고정자)과 분리 결과

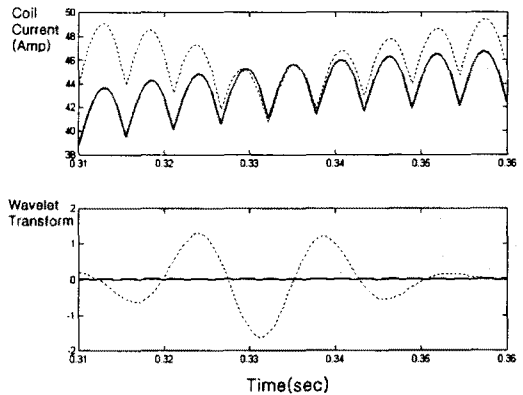


그림 6. 올림 전기자가 올림 자극에 부착되지 않은 결과

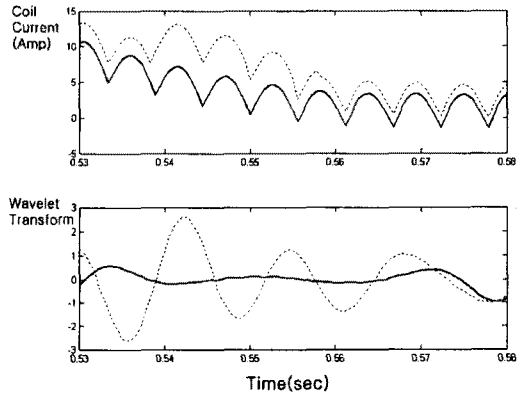


그림 7. 올림 전기자가 올림 자극에서 분리되지 않은 결과

## 2. 결론

본 논문에서는 원자로 출력의 주요 장비인 제어부동장치에 대한 기구 동작 건전성을 감시하기 위한 방법을 제시하였다. 전자기 힘에 의한 기구 동작은 여자 코일 전류 파형에 영향을 주므로 코일 전류 분석을 통해 기구의 정상적 동작 여부를 감시할 수 있다. 국부 탐색 능력과 잡음 제거 능력이 우수한 웨이블릿 변환을 이용하여 기구 동작의 건전성 감시에 대한 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] 정구관, "제어봉제어설비", 한국수력원자력(주), 1991.
- [2] 한국전기연구원, "부상 및 추진 제어기술 개발", 과학기술부, 1998.
- [3] Combustion Engineering, Inc., "Automatic Controller For Magnetic Jack Type Control Rod Drive Mechanism," US-Patent 4,363,778, 1982.
- [4] Wavelet Toolbox for Use with MATLAB<sup>®</sup>
- [5] R. M. Rad, A. S. Bopardikar, "Wavelet Transforms, Introduction to Theory and Applications", ADDISON-WESLEY, 1998.