

---

# 핵연료 교환기 진단시스템의 설계 및 개발

강권우\* · 김병호\*\* · 은성배\*\*\*

Design and Implementation of a Diagnosis System for Nuclear Fuel Handling Machine

Gwonu Kang\* · Byungho Kim\*\* · Seongbae Eun\*\*\*

---

이 논문은 2010년도 한남대학교 교비학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

---

## 요 약

본 논문에서는 핵연료 교환기 헤드를 제어하는 진단시스템을 설계하고 구현하였다. 제안하는 핵연료 교환기 진단시스템은 신호 수집 시스템, 진단 알고리즘, 고장 시뮬레이터의 세 부분으로 구성된다. 핵연료 교환기를 직접 사용하는 실험은 원전 운영상 불가능하여 본 연구에서는 고장 시뮬레이터로 베어링 이상 상태를 생성시키고 FFT 및 웨이블릿 변환을 이용하여 고장 진단 실험을 수행하였다. 베어링 볼 이상 상태 진동 분석과 베어링 내륜 이상 상태 진동 분석을 통해 이론값과 실험값이 거의 일치함을 확인하였다.

## ABSTRACT

In this paper we proposed and implemented a diagnosis system to control nuclear fuel handling machine. The proposed system consists of data acquisition system, diagnosis algorithm and faults simulator. Since the test on real operation of the fuel handling machine is impossible, we evaluated the proposed system by diagnosis experiments using the faults simulator, with which test signals on abnormal states of the bearing ball and the inner race of the bearing are generated. The experiments showed that resulting diagnosis analysis are consistent with the theoretical expectations.

## 키워드

핵연료 교환기, 핵연료 교환기 헤드, 진단시스템, 고장 시뮬레이터, 웨이블릿 변환

## Key word

fuel handling machine, diagnosis system, faults simulator, wavelet transform

---

\* 준회원 : 한남대학교 정보통신공학과

접수일자 : 2010. 10. 18

\*\* 정회원 : 경상대학교 컴퓨터학부

심사완료일자 : 2010. 11. 03

\*\*\* 정회원 : 한남대학교 정보통신공학과(교신저자, sbeun@hannam.ac.kr)

## I. 서 론

중수로 원전의 핵연료 교환기는 핵연료 교환을 담당하는 일종의 로봇으로써 연료관을 밀봉하는 스나우트 부분, 핵연료와 각종 마개를 저장하는 매거진, 핵연료와 마개를 설치하고 제거하는 램, 연료를 매거진에 저장하기 위해 연료와 연료사이를 분리시키는 분리기로 구성된다. 핵연료 교환 작업을 수행하기 위해서는 2개의 핵연료 교환기 헤드가 필요한데 하나는 새 핵연료를 연료관에 장전하는데 사용되고 다른 하나는 교체된 연료를 저장하는데 사용된다[1].

핵연료 교환기는 그 역할의 중요성에도 불구하고 그 구성이 복잡하고 감시와 진단을 수행할 장비나 기술의 부재로 인해 정기적 검사와 결함 발생 이후 조치를 중심으로 운영되어 왔다. 하지만 중수로 원전의 핵연료 교환기는 거의 매일 핵연료 교환 작업을 수행해야 하기 때문에 부품의 노후화 등으로 인한 고장이나 이상 작동 가능성을 사전에 감지하기 위한 상태 감시 및 진단시스템에 대한 연구가 필요하다[2].

중수로 원전을 많이 보유하고 있는 캐나다의 핵연료 교환기 진단은 정비실에서 작동 모사 장치를 이용하여 직접 핵연료 교환기를 운전시키면서 핵연료 교환기의 주요 부분의 작동 여부를 확인하는 방법으로 수행되고 있다. 이 방법은 핵연료 교환기가 원자로 내에서 핵연료 교체 작업을 수행하기 전에 이상 유무를 사전에 점검하는 유용한 방법이지만 하지만 동작 상태에 대한 정보를 제공하지는 못한다. 다른 국가에서도 핵연료 교환기에 대한 연구는 거의 진행되지 않았고 특히 핵연료 교환기 진단에 대한 연구는 전무하다[1].

핵연료 교환기를 제어하는 기존 진단시스템은 그림 1과 같이 핵연료 교환기 헤드와 제어시스템으로 구성된다. 제어 신호와 측정 신호는 핵연료 교환기와 제어시스템간에 연결된 실배선을 통해 전달된다. 제어 신호는 제어시스템에서 핵연료 교환기 헤드로 보내지며 아날로그 및 디지털 신호로 전달된다. 측정 신호는 제어시스템의 요청에 따라 제어시스템으로 보내지는 핵연료 교환기 동작 상태에 대한 정보이다. 이와 같은 기존 진단시스템에서는 제어 신호나 측정 신호를 별도로 저장하지 않기 때문에 진단시스템이 작동되는 상황에서만 진단을 할 수 있다.



그림 1. 핵연료 교환기 진단시스템 구성도  
Figure 1. Architecture for diagnosis system of nuclear fuel charging and discharging machine

본 논문에서는 핵연료 교환기 진단시스템의 제어 및 측정 신호를 저장하는 신호처리 시스템을 개발하고, 진동, 전류, 압력을 측정하는 센서를 추가로 부착하여 기기 이상 여부 진단은 물론 정비 이력 관리를 통해 기기의 신뢰성을 높일 수 있는 핵연료 교환기 진단시스템을 설계하고 개발한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 핵연료 교환기 진단시스템의 3개 구성 요소에 대한 설계를 기술하고, 3장에서 5장까지 각 구성 요소, 즉 고장 시뮬레이터, 진단 알고리즘, 신호 수집 시스템에 대한 구현을 설명하고, 6장에서 실험을 통한 성능 평가 및 분석 결과를 제시하고 7장의 결론으로 맺는다.

## II. 시스템 설계

핵연료 교환기 진단시스템의 요구 기능은 다음과 같다.

- 신호 취득의 시작 및 정지(자동 및 수동)
- 신호의 전처리
- 취득 데이터의 저장 및 이력관리(DBMS)
- 이상 진단에 필요한 신호처리 알고리즘
- 진단 결과보고서 생성
- 취득 데이터의 캡처

진단시스템은 크게 세 부분, 즉 신호 수집 시스템, 진단 알고리즘, 고장 시뮬레이터로 구성된다. 본 장에서는 각 부분에 대한 설계를 기술한다.

### 2.1 고장 시뮬레이터

고장 시뮬레이터는 진단 알고리즘 개발과 신호 수집 시스템 검증에 사용된다. 고장 시뮬레이터에서 사용되는 고장 시나리오는 고장 모드 조사, 시스템 기능 분석,

고장 메커니즘 분석을 통해 만들어지고, 고장 시뮬레이터는 이와 같이 사전에 계획된 고장 메커니즘에 따라 베어링 이상 신호와 솔레노이드 밸브 제어에 관련된 이상 신호를 발생시킨다.

### 2.2 진단 알고리즘

센서들은 핵연료 교환기 헤드에 비침투 방식으로 부착되기 때문에 측정된 신호를 의미있는 데이터로 변환하기 위해 별도의 진단 알고리즘이 필요하다. 진단 알고리즘은 베어링의 진동과 솔레노이드 밸브 제어 신호의 전류를 해석 가능한 신호로 변환한다. 진단 알고리즘 개발은 전류 레벨 공식과 웨이블릿의 Daubechies, FFT, Polar를 이용하여 개발한다[2][3].

### 2.3 신호 수집 시스템

신호 수집 시스템은 핵연료 교환기 헤드에서 수집된 신호를 진단시스템으로 전달하기 위한 시스템으로써 진동, 전류, 힘을 측정하는 센서 부분과 측정된 신호를 수집하여 서버로 전달하는 데이터 수집 장치, 데이터 수집 장치의 신호를 사용자가 볼 수 있는 데이터로 변환하고 저장 및 관리 기능을 제공하는 서버로 구성된다.

#### 2.3.1 서버

서버는 데이터 수집 장치로부터 수집된 신호를 LabView를 통해 데이터로 변환하고 그 결과를 그래프, 도표, 트랜드 등으로 시각화하는 사용자 인터페이스를 제공한다. 또한 취득 데이터를 데이터베이스에 저장하여 데이터 이력을 관리하고, 부착된 계측장치의 시작 및 중지, 취득 주기의 설정과 같은 계측 장치 제어와 진단 결과 보고서를 생성한다.

#### 2.3.2 데이터 수집 장치

데이터 수집 장치(Data Acquisition, DAQ)는 빛, 온도, 압력, 소리와 같은 물리적 현상을 측정하기 위한 장치이다. 데이터 수집 장치는 트랜스듀서, 신호처리, 신호 조절과 같은 소프트웨어 모듈들로 구성되고, 측정된 물리적 현상의 데이터를 서버로 전달한다.

#### 2.3.3 센서

센서는 연료교환기 헤드에 부착되어 신호를 측정한다. 본 연구에서는 빛, 온도, 압력 센서와 진동 측정 센서

및 솔레노이드 밸브 제어 전류 측정 센서를 사용한다. 센서 부착에서 고려해야 할 사항은 기존 설비에 물리적 변형을 수반하지 않아야 한다는 점이다. 특히 진동 센서는 핵연료 교환기 헤드에 직접 부착되기 때문에 헤드 변형을 방지하기 위해 스티드를 이용하여 설치한다. 센서와 데이터 수집 장치 연결에는 신호의 왜곡이나 손실을 방지하기 위해 절연 배선을 사용한다.

## III. 고장 시뮬레이터의 개발

고장 시뮬레이터의 역할은 가상의 고장 신호 및 정상 상황 신호를 발생시켜 신호 수집 시스템에 제공해 주는 것이다. 상황 신호의 전달 형태는 그림 2와 같이 신호 수집 시스템의 고속 데이터 취득 장치를 통하여 제공하거나 신호를 파일 형태로 만들어 헤드 및 램 모의 시스템에 입력할 수 있다.

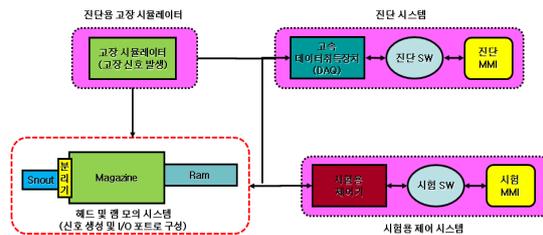


그림 2. 고장 시뮬레이터 역할  
Figure 2. Role of fault simulator

### 3.1 핵연료 교환기 헤드 고장 모드 분석

핵연료 교환기 헤드의 이상 현상 및 원인으로는 볼 파손, 베어링 파손, retract drive stuck, O-Ring 및 Backup Ring 파손, 솔레노이드 코일 부하 전류 이상 등이 있다 [4]. 본 연구에서는 진동 측정 센서를 이용하여 볼 베어링 이상을 진단하고 전류 측정 센서를 이용하여 솔레노이드 밸브 제어 신호를 측정하고 진단한다.

### 3.2 고장 시뮬레이터 제작

완성된 고장 시뮬레이터는 그림 3과 같다. 고장 시뮬레이터는 솔레노이드 밸브 ON/OFF 시의 전류 변화 및 베어링 이상에 따른 고장 신호, 축 이상에 따른 고장 신호를 발생시킨다. 전원은 220V를 사용하였고 규격은

40cm x 40cm로써 이동이 용이하게 제작하였다.



그림 3. 고장 시뮬레이터  
Figure 3. Fault simulator

베어링 고장 신호 발생 모듈은 베어링과 축의 이상 신호를 발생시킨다. 정상 또는 비정상 베어링으로의 교체가 가능하며, 축 정렬에 따른 이상 신호를 측정하기 위하여 베어링 고정부를 좌우로 이동시킬 수 있도록 제작하였다. 또한 모터의 진동을 차단하기 위하여 커플링을 사용하였고, 밀판으로부터의 진동을 줄이기 위해 고무 완충 나사를 사용하여 2층으로 제작하였다.

모터 제어기는 모터의 ON/OFF 및 회전 속도를 제어한다. 모터 속도 제어기를 통해 회전 속도를 0에서 1000rpm까지 변화시킬 수 있으며 그에 따른 고장 신호를 측정한다.

#### IV. 진단 알고리즘 개발

##### 4.1 진단 항목 분석

핵연료 교환기 헤드 진단을 위해 주요 구성품인 차폐문, 매거진, 램에 대한 진단 항목 및 진단 내용을 분석하고 이에 필요한 알고리즘을 개발하였다. 차폐문은 실제 차폐문의 1/3 크기의 모형을 제작하였으며, 모형 대차의 구동부와 구동 부품들은 원전용과 동일한 구조로 구성하였다. 신호 측정을 위한 센서는 총 26개로써 전압계 6개, 전류계(홀센서) 6개, 위치 센서(LVDT) 2개, 가속도 센서 8개, 엔코더 4개이다.

매거진 모형은 작업의 편의성과 공간의 제한성을 고려하여 실제 매거진의 1/2 크기로 제작하였다. 하우징과 회전자, 구동부, 유압 모터 구동을 위한 유압 파워팩, 매거진이 조립되는 크래들 등으로 구성된다. 구성부품들은 현장 매거진과 동일한 구조로 제작되었다. 신호 측정을 위한 센서는 유압 모터의 공급 압력과 토출압을 측정하기 위한 유압 압력 센서, 가속도계 8개, 회전수 측정을 위한 엔코더 2개이다.

램 모형은 현장의 자문을 얻어 볼 스크류 2개를 채용하였다. 신호 측정을 위한 센서는 유압 모터의 공급 압력과 토출압을 측정하기 위한 유압 압력 센서, 위치 측정을 위한 Fine Potentiometer, 토크 및 유량측정 센서가 있다.

##### 4.2 신호처리 기법

비침투 방식으로 측정된 단순 신호를 물리적으로 의미있는 신호로 변환하기 위해 신호처리 기법이 필요하다. 본 연구에서는 진동 이상 신호 분석 및 솔레노이드 밸브 제어 신호의 이상 신호를 분석하기 위하여 시간 응답 분석, 주파수 분석, 웨이블릿 변환을 사용한다.

###### 4.2.1 시간 응답 분석

솔레노이드 밸브 고장 정비 사례에는 코일 부하 전류 이상으로 인한 교체 정비가 있다. 솔레노이드 밸브는 제어 신호의 OFF/ON 상태 변화시 In-Rush 상태가 발생한다. 이는 코일 부하에 따라 변화하므로 In-Rush 상태의 전류 변화 관찰이 필요하다. 전류레벨(rms)을 구하는 식은 아래와 같다[5].

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

이때  $x(t)$ 는 신호,  $T$ 는 적분 주기,  $X_{rms}$ 는 신호  $x(t)$ 의  $T$  구간의 실효값을 나타낸다. 전류레벨은 코일 부하의 변화에 따라 변화하고, 결함 발생 시 In-Rush 상태가 정상 상태보다 오래 나타난다.

###### 4.2.2 주파수 분석

베어링 표면 위의 결함이 다른 표면과 만날 때마다 충격이 생성되고 베어링은 충격 응답의 결과를 낳는다. 결함과 상대 표면의 접촉은 주기적이기 때문에 충격 임펄

스는 결함의 위치에 따라 특정한 일정 시간 간격으로 재현된다. 이때 발생된 주파수를 결함 특성 주파수 (characteristic defect frequency)라 부른다[6]. 본 연구에서는 볼베어링을 사용하여 주파수 분석을 하였다.

#### 4.2.3 웨이블릿 변환

웨이블릿 해석 방법은 전체 시간 영역의 신호를 웨이블릿으로 분해하고 이를 다시 작은 시간 영역으로 분해함으로써 분석하고자 하는 성분이 나타날 수 있는 분해능까지 분석하는 방법이다. 웨이블릿 변환은 전통적으로 신호처리에 사용되는 푸리에 변환에 비해 처리 속도와 신호의 평탄성(smoothness) 측면에서 장점을 갖고 있다[7].

웨이블릿의 종류는 Haar, Daubechies, Symlets, Morlet 등이 있으며 각각이 유사한 형태의 집단을 형성하고 있다. 웨이블릿 해석의 핵심은 어떤 웨이블릿을 선택하여 사용할 것인가이다. 본 연구에서는 베어링 이상 진단을 위하여 Daubechies를 사용하였다.

### V. 핵연료 교환기 신호 수집 시스템 구현

#### 5.1 하드웨어 제작

##### 5.1.1 진동 측정 센서

연료교환기 헤드에 이미 설치된 센서들은 베어링 마모나 파열의 진동 특성을 갖는 이상 신호를 측정할 수 없다. 따라서 진동 측정 센서를 통해 베어링의 진동 특성으로 나타나는 이상을 측정한다.

##### 5.1.2 전류 측정 센서

핵연료 교환기 헤드는 솔레노이드 밸브에 의해 유압 모터를 제어한다. 전류 측정 센서는 솔레노이드 밸브의 상태를 진단하기 위해 솔레노이드 밸브의 전류를 측정한다.

##### 5.1.3 압력 측정 센서

매거진 구동은 유압 모터에 의해 동작된다. 유압 모터에 공급되는 오일은 펌프에서 공급되어진 129kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 감압 밸브 PRV2를 거쳐 35.16kg/cm<sup>2</sup>로 감압되어 진다. 매거진의 구동부 유회상상태, 유압 모터의 회전수,

회전자 조립 상태, 채널 보관 상태, 채널 정렬 상태, 압력 조절 밸브 이상, 구동 여유 압력, 캠과 캠 중동자의 상태를 진단하기 위해 유압 모터에 공급되는 유압(입구압, 출구압)의 측정이 필요하다. 압력 측정 센서의 요구사항은 아래와 같다.

- 0 ~ 100bar
- 4 ~ 20mA 출력

#### 5.1.4 데이터 수집 장치

데이터 수집 장치는 핵연료 교환기 헤드의 진동 신호, 전류 신호, 힘 측정 신호를 수집하여 데이터로 변환하는 장치이다. 현장의 이상 신호를 왜곡없이 수집하기 위해 충분한 처리 속도와 해상도가 필요하다. 또한 고주파 노이즈 등의 불필요한 잡음 신호를 전처리하는 기능을 가지고 있어야 한다. 데이터 수집 장치는 아날로그 신호의 경우 최소 20%, 디지털인 경우 최소 10%의 예비 입력 점을 가지도록 구현하였다. 신호 수집 연결로 인해 원래 신호가 왜곡되지 않도록 충분히 큰 입력 임피던스를 가져야 하며, 현장의 제어 캐비닛 안에 설치되는 경우와 단독 운용인 경우를 모두 고려하여 착탈식 구조를 가져야 한다. 구현된 데이터 수집 장치의 아날로그 입력점의 수는 68+14(예비)이고, 디지털 입력점의 수는 22+10(예비)이다.

#### 5.2 소프트웨어 제작

##### 5.2.1 데이터 흐름

신호 수집 시스템의 데이터 흐름은 그림 4와 같다. 신호 수집 장치는 수집된 신호를 전처리하고, 전처리된 데이터는 진단 알고리즘으로 전달된다.



그림 4. 신호 수집 시스템의 데이터 흐름도  
Figure 4. Data flow of DAQ

진단 알고리즘은 신호 수집 장치로부터 받은 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)와 웨이블릿 변환 등의 신호처리를 통해 변환하고 그래프로 나타낸다. 시각화 단계는 LabView로 작성하였으며, 데이터 저장, 화면 캡처, 이력관리, 보고서 생성, 그래프 출력 등의 사용자 인터페이스를 제공한다.

### 5.2.2 사용자 인터페이스 구현

진단시스템의 주 화면은 3개의 탭으로 구성된다. 신호 수집 탭은 데이터 수집 상황 알람 및 들어오는 데이터를 모니터링하고, 신호 분석 탭은 저장된 파일로부터 원래 신호와 FFT, Wavelet Transform, Polar로 변환된 그래프를 보여주며, 설정 탭에서는 발전기 번호 및 설비 번호, 샘플링 주파수, 채널 수, 참고사항 등의 특징값을 변경 및 확인할 수 있다. 그림 5는 신호 분석 탭의 실행 화면에이다.

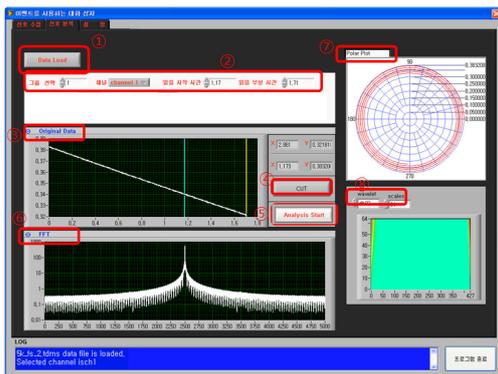


그림 5. 신호 분석 탭  
Figure 5. Signal analysis tab

## VI. 성능 평가 및 분석

### 6.1 실험 환경 및 조건

#### 6.1.1 실험 조건

핵연료 교환기를 직접 사용하는 진단 실험은 원전 운영상 불가능하므로 본 연구에서는 고장 시뮬레이터를 통해 베어링 이상 상태를 생성시키고 FFT 및 웨이블릿 변환을 이용하여 고장 진단 실험을 수행하였다.

실험 조건은 다음과 같다.

- 정상 상태 베어링에 편심을 주어 모터 회전 주파수 측정
- 정상 상태 베어링의 FFT 및 웨이블릿 분석
- 베어링 볼 이상 상태 FFT 및 웨이블릿 분석
- 베어링 외륜 이상 FFT 및 웨이블릿 분석

#### 6.1.2 베어링 특성

본 실험에 사용한 베어링은 구름 베어링으로이다. 베어링 결합으로부터 기인하는 특성 주파수들은 결합과 베어링의 기하학적 구조, 회전 속도 등에 의해 좌우된다. 베어링 치수와 회전속도가 주어지면 결합과 관련된 주파수를 계산할 수 있다[5]. 단, 계산식은 결합이 하나이고 외륜이 고정된 것으로 가정한다.

본 실험에서 사용한 베어링의 사양은 볼이 7개이며, 볼 직경과 피치 직경은 각각 5 mm와 18 mm이다. 여기서 볼 직경과 피치 직경은 직접 측정된 근사값이다. 외륜과 내륜 결합 주파수는 대략 회전속도와 볼 개수의 곱의 40%와 60%이다. 구름 베어링의 경우, 피치 직경에 대한 볼 직경의 비가 비교적 일정하여 이러한 근사값을 추정할 수 있다.

## 6.2 실험 결과 및 분석

### 6.2.1 회전 주파수 측정

고장 시뮬레이터에는 회전 속도를 측정할 수 있는 장치가 없기 때문에 베어링의 회전 주파수 측정을 위해 원판에 편심을 주었다.

그림 6은 진동 측정 센서를 이용한 원신호로써 5kHz의 샘플링 속도로 17초 측정된 신호이다. 원신호에는 여러 진동 신호가 섞여 있어 원신호 자체만으로 신호를 분석하기는 어렵다.

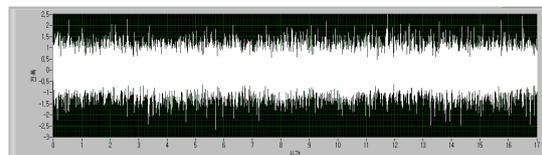


그림 6. 중심 주파수 측정을 위한 원신호  
Figure 6. Raw signal for sensing center frequency

그림 7은 원신호를 FFT로 변환한 그래프이다. 21.6Hz 부근에서 큰 값이 나타나고 42Hz와 63Hz 부근에서 하모닉스가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 회전 주파

수가 21.6Hz(1300 RPM)임을 알 수 있다.

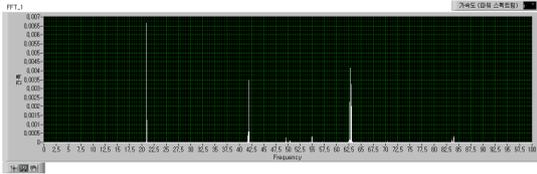


그림 7. 중심 주파수 측정을 위한 FFT 변환  
Figure 7. FFT for center frequency

### 6.2.2 정상 상태 베어링 진동 분석

그림 8은 정상 상태의 베어링 진동 신호이고, 그림 9는 정상 상태 베어링 진동 신호를 FFT로 변환한 그래프이다. 21.6Hz 부근에서 큰 값이 나타나며, 42Hz와 63Hz에서 하모닉스, 21.6Hz의 회전 주파수를 볼 수 있으나, 원판에 편심을 주고 변환한 그림 7과 비교하여 중심 주파수가 작게 나오는 것을 확인할 수 있다.

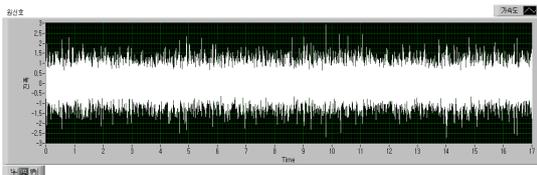


그림 8. 정상 상태 베어링 진동 신호  
Figure 8. Steady state vibration signal of bearing

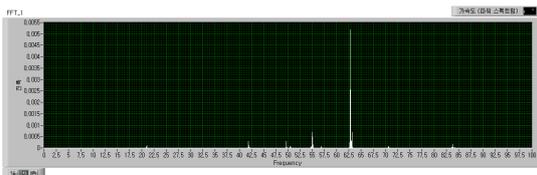


그림 9. 정상 상태 베어링 진동 신호의 FFT 변환  
Figure 9. FFT of Steady state vibration signal of bearing

### 6.2.3 베어링 볼 이상 상태 진동 분석

본 실험은 베어링 볼에 스크래치를 내고 진동 신호를 측정하여 변환하였다. 그림 10은 베어링 볼 이상 상태 진동 신호를 FFT로 변환한 그래프이다. 베어링 볼 결함이 발생하면 이론적으로 37Hz, 74Hz, 110Hz에 하모닉스가 발생하는데 실험 결과 33Hz, 69Hz, 98Hz에서 하모닉스

가 발생하여 이론값과 실험값이 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

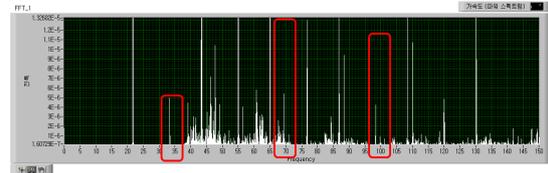


그림 10. 베어링 볼 이상 상태 진동 신호의 FFT 변환  
Figure 10. FFT of abnormal state vibration signal of bearing ball

### 6.2.4 베어링 내륜 이상 상태 진동 분석

본 실험은 베어링 내륜에 스크래치를 내고 진동 신호를 측정하여 변환하였다. 그림 11은 베어링 내륜 이상 상태 진동 신호를 FFT로 변환한 그래프이다. 베어링 내륜에 결함이 발생하면 이론적으로 55Hz, 110Hz, 165Hz에 하모닉스가 발생하는데 실험 결과 54Hz, 105Hz, 170Hz에서 하모닉스가 발생한 것을 볼 수 있으며 이론값과 실험값이 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

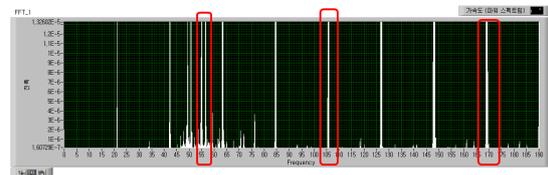


그림 11. 베어링 내륜 이상 상태 진동 신호의 FFT 변환  
Figure 11. FFT of abnormal state vibration signal of inner race of bearing

## VII. 결론

본 논문에서는 핵연료 교환기 헤드를 제어하는 진단 시스템을 설계하고 구현하였다. 핵연료 교환기를 직접 사용하는 실험은 원전 운영상 불가능하여 본 연구에서는 고장 시뮬레이터를 통해 베어링 이상 상태를 생성시키고 FFT 및 웨이블릿 변환을 이용하여 고장 진단 실험을 수행하였다. 베어링 볼 이상 상태 진동 분석과 베어링 내륜 이상 상태 진동 분석을 통해 이론값과 실험값이 거의 일치함을 확인하였다.

향후 연구 방향으로써 사용자가 고장 상황을 보다 쉽게 인지할 수 있는 사용자 인터페이스의 개선과 데이터 분석을 통한 고장 예측 방법에 대한 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- [1] “핵연료 교환설비”, 월성원자력본부, 2000
- [2] “중수로 운전 성능 향상 기술 개발”, 과학기술부, 2004
- [3] 이남용, 김윤영, “웨이블릿이란?”, 한국소음진동공학회, Vol. 9, No. 5, 1999, pp. 867-875.
- [4] 최부희, “신호해석 기법을 이용한 베어링의 이상진단에 관한 연구”, 기술시대, 한국산업인력관리공단, 1992, pp. 79-89
- [5] 김진수, “진동 신호처리에 의한 볼 베어링 고장진단”, 성균관대학교 석사학위논문, 2003
- [6] 조운수, “진동드림의 진동신호 분석을 이용한 고장진단”, 성균관대학교 석사학위논문, 2002
- [7] H. R. Martin, “Detection of Gear Damage by Statistical Vibration Analysis,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1992, pp. 395-401.

### 저자소개



강권우(Gwonu Kang)

2008년: 한남대학교  
전자정보통신공학과 학사  
2011년: 한남대학교  
정보통신공학과 석사

2008년-현재: (주)옥타컴 개발부 연구원  
※ 관심분야: 센서네트워크, RFID, 무선위치인식



은성배(Seongbae Eun)

1985년: 서울대학교 전산학과 학사  
1995년: KAIST 전산학과 석박사  
1995년-현재: 한남대학교  
정보통신공학과 교수

※ 관심분야: 실시간시스템, 유비쿼터스 센서네트워크



김병호(Byungho Kim)

1990년: 연세대학교 전산학과 학사  
1997년: KAIST 전산학과 석박사  
2007년-현재: 경성대학교  
컴퓨터학부 조교수

※ 관심분야: 센서네트워크, 모바일 OS