

SMART 제어봉구동장치에 장착되는 초음파 회전감지기 및 위치측정기의 설계 및 실험  
Experiment and Design of Ultrasonic Rotation and Position Detector  
for SMART Control Rod Drive Mechanism

허 형, 김지호, 구길모, 김종인

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART는 기동을 위하여 핵분열 반응열을 이용하므로 제어봉구동장치는 미세한 반응도 조절이 가능해야 한다. 제어봉구동장치로는 선형펄스모터형이 채택되었지만 볼스크류형도 대안으로 검토되고 있다. 볼스크류형 제어봉구동장치는 회전형 스텝모터형으로 회전축이 외부로 노출되지 않고 고온, 고압의 일차 냉각수속에서 회전하기 때문에 기존의 근접센서로는 가동부의 움직임을 감지할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 제약조건내에서 사용가능한 초음파 회전감지기 및 위치측정기를 설계하였으며 최적의 측정조건을 찾기 위하여 보정시험편을 제작하여 실험하였다.

Abstract

Integral reactors require a fine reactivity control CEDM since the nuclear heating is used during the startup. Although a linear pulse motor type had been chosen for the SMART CEDM, a ball screw type is being considered as an alternative. Since all the moving parts are immersed in the primary coolant, the proximity sensors cannot be used to detect their movement. Therefore, ultrasonic sensors have been selected for the movement detection. This paper describes the design parameters for effective operation and the optimum design point was determined by experimenting the trend of the ultrasonic characteristics with calibration block.

1. 서론

일체형원자로 SMART는 핵분열 반응열을 이용한 원자로 기동 및 무봉산운전 요건에 따라 제어봉만으로 노심을 제어해야 하므로 미세조정성능이 우수한 제어봉구동장치가 필요한데 이와 같은 설계요건을 만족하는 제어봉구동장치로서 선형펄스모터형 제어봉구동장치를 개발중에 있다.

그러나 보다 더 미세한 위치제어가 가능하고 동적하중에 강한 볼스크류형 제어봉구동장치도 대안으로서 검토되고 있다. 볼스크류형 제어봉구동장치는 볼스크류 집합체, 회전형 스텝모터, 위치지시기, 회전감지기, 감속기어, 긴급삽입장치, 상·하한 완충장치, 압력용기, 연결봉 집합체 및 해제스프링 집합체 등으로 구성되어 있다. 제어봉구동장치의 압력용기 내부는 일차냉각수로 채워지므로 고정자 및 회전자, 볼스크류 등도 일차냉각수 내부에서 가동되며 일차냉각수가 베어링의 윤활재로 사용된다. 제어봉구동장치는 기동시나 장시간 운전 되는 동안에 회전형 스텝모터의 작동여부에 대한 회전정보의 측정이 필요하며 원자로가 비상정지상황이 발생하여 노심의 손상이 발생되지 않는 시점내에 제어봉이 노심내로 삽입하기 위한 긴급삽입장치 이동앵커의 상·하한 위치의 측정도 필요하다.

SMART CEDM은 상용원자로와 달리 스텝모터의 회전축과 긴급삽입장치 이동앵커는 고온·고압의 일차 냉각수 속에 잠겨 있어 기존의 근접센서 등으로 회전속도나 위치를 측정하기에는 여러 가지 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 초음파의 원리를 이용한 회전감지기와 위치측정기를 설계하였다. 이 초음파 회전감지거나 위치측정기는 압력경계면을 뚫지 않고 설치할 수 있기 때문에 일차 냉각수의 누수문제를 걱정하지 않아도 된다. 그리고, 좁은 장소에 설치되어 여러 채널에서 동시에 회전속도와 위치를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 위와 같은 조건들을 만족시키는 초음파 회전감지기와 위치측정기를 설계하였으며, 최적의 측정조건을 찾기 위하여 초음파 보정시험편을 제작하여 실험하였다.

## 2. 초음파 측정 원리

그림 1과 같이 측정하고자 하는 물질내로  $0.5\sim 25MHz$  고주파수의 음파를 보냈을 때 대상체(target), 즉 불연속부 또는 음향 임피던스가 다른 두 매질의 경계면에서 반사되어 수신된 반사파의 모양에 의해 크기나 위치 등을 알 수 있는 방법이다[1].

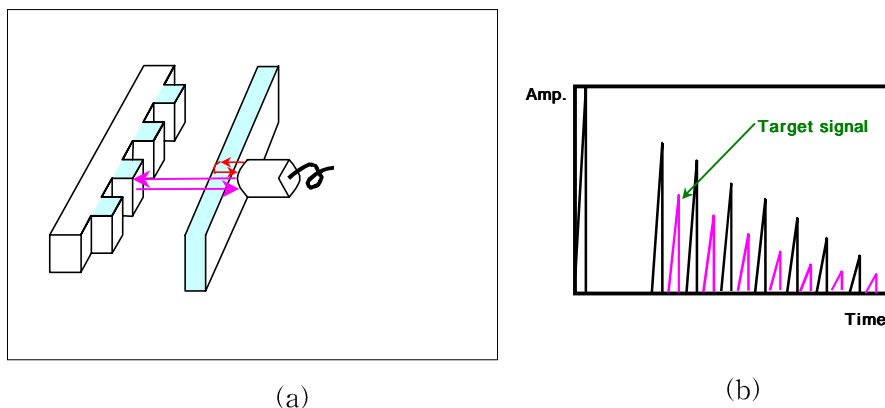


그림 1 초음파 측정원리

그림 1(a)와 같이 초음파 종파탐촉자, 압력용기벽, 대상체(target), 접촉매질(couplant), 냉각수로 구성되며, 초음파빔의 행정은 다음과 같이 두가지 형태이다.

- ① 초음파탐촉자 -> 압력용기 전면 -> 압력용기 후벽에서 반사 -> 초음파탐촉자
- ② 초음파탐촉자 -> 압력용기 전면 -> 냉각수 -> 대상체 치면에서 반사 -> 압력용기 후벽 -> 초음파탐촉자

초음파 종파의 속도는 매질에 따라 다르다. 물에서는 약 1,480 m/s, STS 302에서는 약 5,660m/s로 약 4배 정도 차이가 난다. 그러므로 명확하게 구분되는 대상체의 신호를 얻기 위해서는 여기서 주의할 점은 압력용기 내부에서 2차 반사신호가 오기전에 대상체 치면 반사신호를 얻도록 물거리(water path)의 조정이 필요하다.

압력용기와 대상체간의 거리[ $x$ ]의 결정은 다음과 같다.

$$\frac{1}{5,660} + \frac{x}{1,480} < \frac{2}{5,660} < \frac{1}{5,660} + \frac{2x}{1,480}$$

$$0.131 < x < 0.262 [mm]$$

즉, 압력용기의 두께가 1[mm]라고 가정하면  $x$ 는 0.262[mm] 미만으로 설계하여야 한다. 특히 초음파의 산란과 흡수 등으로 손실을 생각하면  $x$ 는 작을수록 좋으나 0.131[mm]보다는 커야 대상체 치면과 압력용기 사이를 오가며 반사하는 2번째 신호를 뒤로 보낼 수 있다. 이와 같이하여 얻을 수 있는 최종의 신호배열은 다음과 같다.

- ① 초음파탐촉자 고유신호(main bang)
- ② 압력용기 저면신호
- ③ 대상체 치면 신호
- ④ 두 번째 압력용기 저면신호

### 3. 초음파 회전감지기 및 위치측정기의 구조

#### 3.1 초음파 회전감지기

그림 2는 초음파 회전감지기가 설치될 공간과 구조를 나타낸 것으로 초음파탐촉자, 대상체, 탐촉자 고정용 housing 등으로 구성된다. 그림 2(a)와 같이 초음파탐촉자는 고정용 housing 내에서 접촉매질(couplant)과 함께 초기 설치압력으로 두께 11mm인 압력용기 외벽에 부착되며 그림 2(b)는 스텝모터 축에 연결되어 최대 100 rpm으로 회전하며 1회전은 스텝모터의 48스텝으로 매 스텝 작동여부를 감지하기 위하여 24개의 톱니바퀴로 된 대상체 치면에서 반사되어 오는 초음파를 감지하여 회전각도를 측정하도록 되어 있다[2].

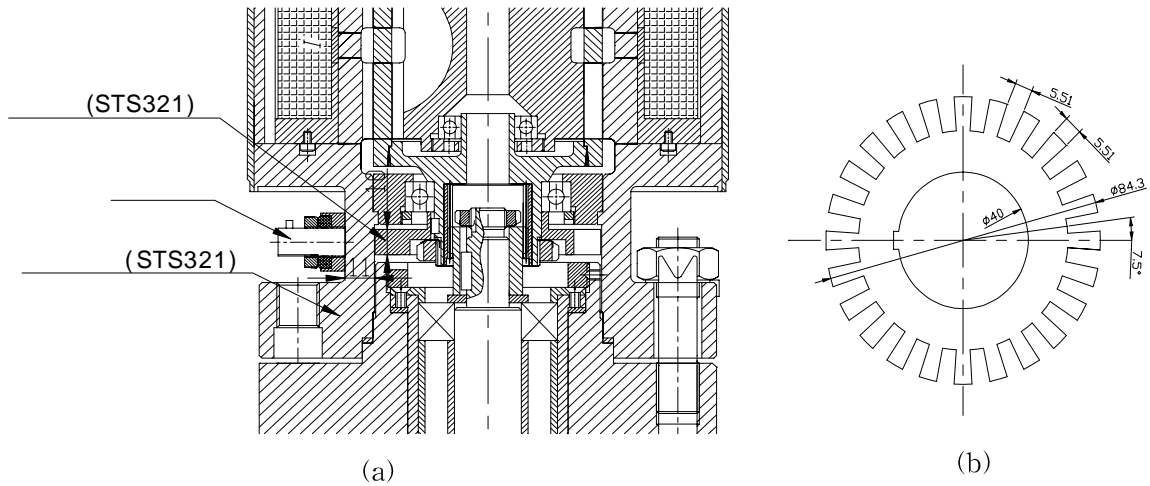


그림 2 초음파 회전감지기의 위치 및 구조

### 3.2 초음파 위치측정기

그림 3의 대상체는 68mm 범위내에서 낙하 및 상승을 반복하며 초음파 위치측정기는 대상체의 존재 여부를 감지하여 대상체가 상승위치 혹은 낙하위치에 있는지를 판단한다. 대상체는 두께 8mm의 디스크형상으로 두께 10mm의 압력용기 내부에 들어 있다.

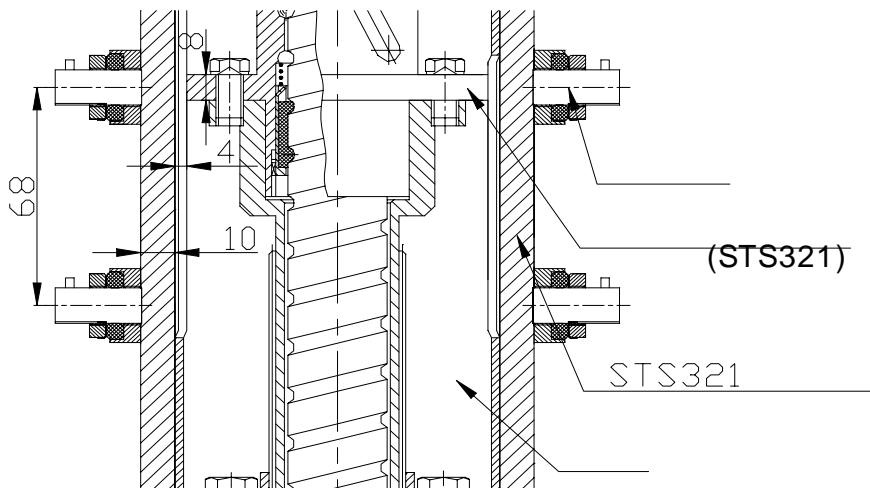


그림 3 초음파 위치측정기의 구조

### 4. 초음파 보정시험편 제작

초음파 보정시험편은 그림 4와 같이 실제 설치될 환경과 같게 같은 재료와 치수로 제작되었다. 주어진 공간적인 제약조건내에서 최적의 초음파 주파수와 대상체의 치/골의 깊이를 얻기 위하여 대상체의 치의 피치와 골의 깊이를 다르게 제작하였다.

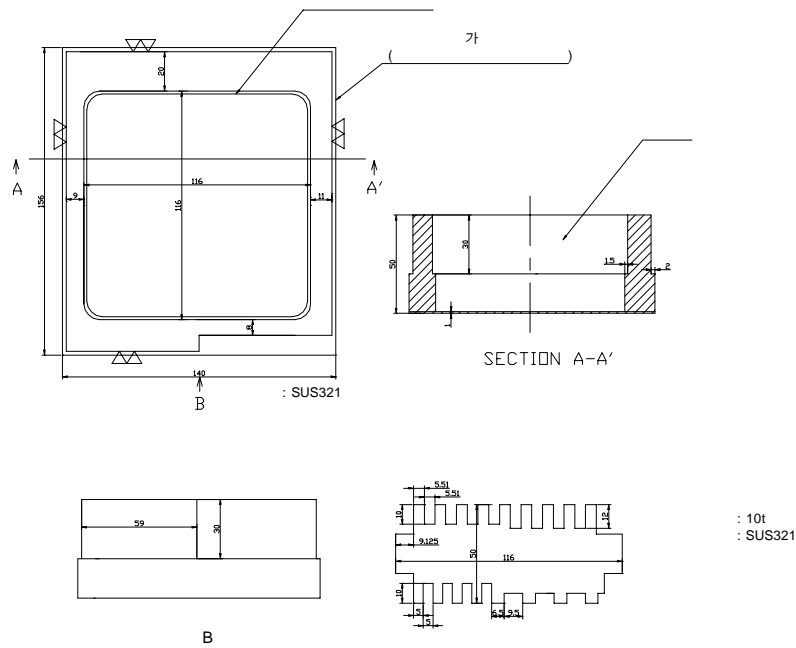


그림 4 초음파 대비시험편

## 5. 실험 및 고찰

### 5.1 실험장치

실험장치는 그림 5와 같이 초음파 보정시험편, 초음파탐촉자, pulser/receiver 와 A/D board, DAS용 PC 및 카운터로 구성된다. pulser에서 초음파탐촉자로 구동신호를 보내게 되면 초음파탐촉자의 압전소자가 진동하며 이 때 생성된 초음파는 보정시험편으로 입사된다. 보정시험편 내에서 반사된 초음파는 다시 초음파탐촉자를 진동시켜 기계적에너지가 전기적에너지로 변환되어 receiver에 수신된다. 이 신호는 A/D board를 통하여 DAS PC에 저장된다. 또한 이 때 보정을 통하여 설치된 게이트위치에 일정진폭 이상의 신호가 발생되면 보정시험편의 치면에서 반사된 신호로 간주되어 카운터의 enable 신호로 작동하는 방법으로 치의 이동개수를 파악한다.

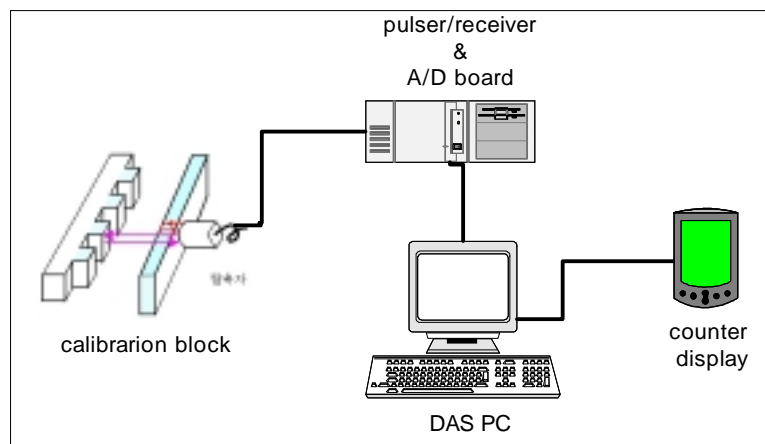
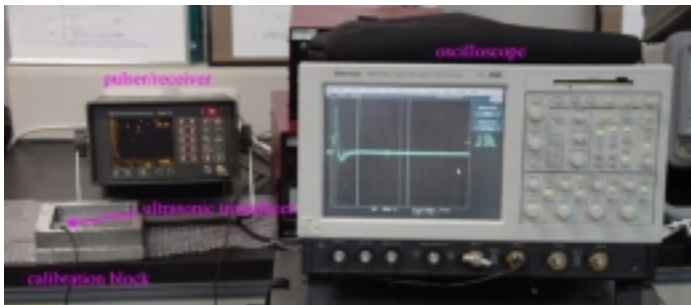


그림 5 실험장치 구성

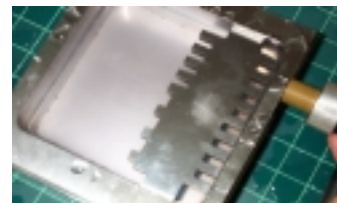
그림 6은 실험에 사용된 장비 및 시험편 들의 전경이다.

표 1 실험 장비 및 시험편 제원

종 류	제 원
초음파탐촉자	1.0, 2.25, 5.0 MHz, 1/4"-round
UT 장비	krautkramer USD-10
digital storage oscilloscope	tektronix TDS-7104
calibration block	STS321, 140x156[mm]
반사체 길이	5, 5.51, 6.5[mm]



(a) 실험장비



(b) 초음파 시험편 및 탐촉자

그림 6 실험장치 전경

표 1은 실험에 사용된 장비 및 시험편의 제원들이다.

## 5.2 실험결과

실험은 초음파탐촉자의 주파수와 압전소자의 크기를 달리하며 실험하였다. 사용된 탐촉자의 주파수는 1.0, 2.25, 5.0[MHz]로 1.0/2.25[MHz]의 탐촉자에서는 대상체의 신호가 아주 미약하여 카운터의 enable 신호로 사용하는 데는 문제점이 있다. 그림 7은 5.0[MHz]의 탐촉자 사용시 얻은 신호로 그림 8과 같이 압력용기 2차 저면신호 사이에 대상체의 신호가 명확하게 구분됨을 알 수 있고 이 위치에 게이트신호를 걸어 카운터의 enable 신호로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 그림 9와 10은 치끝의 위치의 신호로 치면신호와 명확히 구분됨을 알 수 있다.

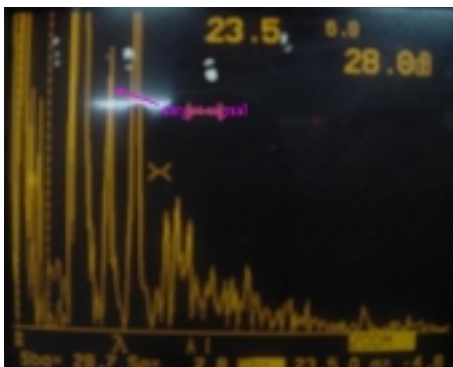


그림 7 대상체 치면위에 탐촉자가 위치할 때 얻은 video 신호(5MHz, 1/4")

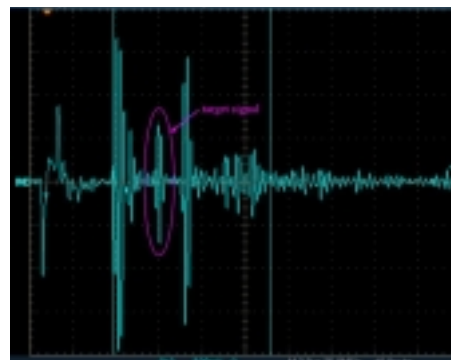


그림 8 대상체 치면위에 탐촉자가 위치할 때 얻은 RF 신호(5MHz, 1/4")

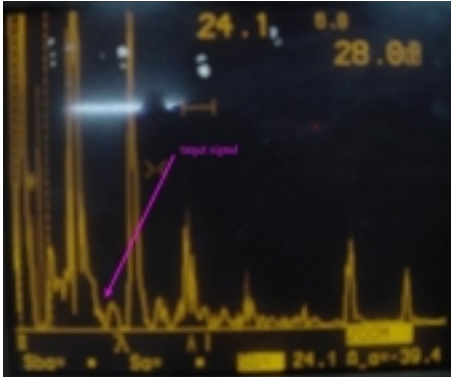


그림 9 대상체 치끝위 탐촉자가 위치할 때 얻은 video 신호(5MHz, 1/4")

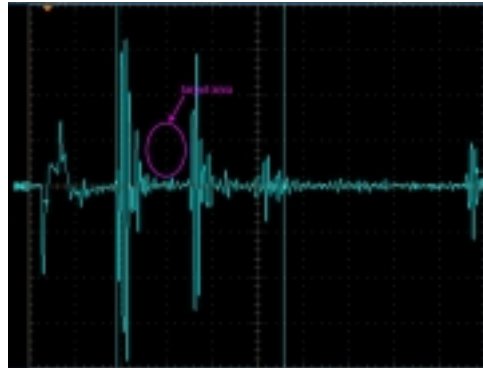


그림 10 대상체 치끝에 탐촉자가 위치할 때 얻은 RF신호(5MHz, 1/4")

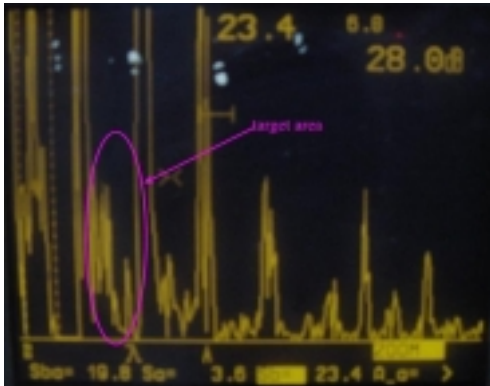


그림 11 대상체 치면위에 탐촉자가 위치할 때 얻은 신호(2.25MHz, 1/4")

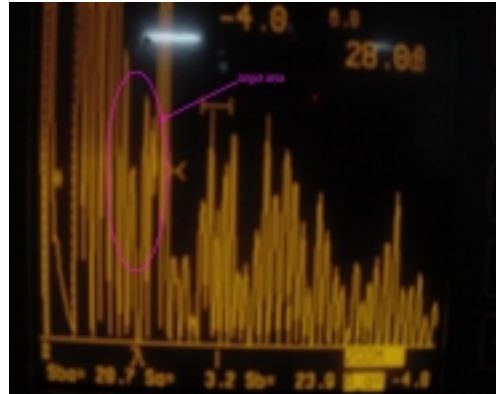


그림 12 대상체 치끝에 탐촉자가 위치할 때 얻은 신호(2.25MHz, 1")

탐촉자 압전소자의 크기를 1", 1/2", 1/4"로 달리하여 대상체의 반사신호를 비교한 결과 반사체의 길이보다 작은 압전소자의 크기를 가진 탐촉자, 즉 1/4"-탐촉자의 신호가 가장 분해능이 좋았으며 S/N 비(signal to noise ratio)가 현저하게 좋았다. 1"와 1/2"는 그림 12와 같이 대상체의 반사신호들이 압력용기 저면반사신호와 같이 공존하여 각각의 신호를 분리하기가 어려웠다.

## 6. 결론

SMART 볼스크류형 제어봉구동장치는 가동부위가 외부로 노출되지 않고 고온, 고압의 일차 냉각수 속에서 잠겨 있기 때문에 이러한 제약조건 내에서 사용 가능한 초음파 회전감지기 및 위치측정기를 설계하였으며 최적의 측정조건을 찾기 위하여 보정시험편을 제작하여 실험하였다.

실험결과 두께가 10~11[mm]이고 STS321 로 제작된 압력용기를 투과하여 대상체의 변위 정보를 가장 잘 반영하여 나타내는 초음파탐촉자의 주파수는 5.0 [MHz]이었으며, 초음파탐촉자의 크기는 대상체의 반사면적보다 작으면 작을수록, 즉 1/4[inch] 탐촉자가 가장 분해능이 좋았다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Albert S. Birks et al., Nondestructive Testing Handbook, 2nd editon, Vol. 7, ASNT, 1991
- [2] 제어봉구동장치의 초음파 회전감지기 및 위치측정기 요건서, SMART-CD-DR622-01, Rev. 00, 한국원자력연구소, 2001