

# 일체형 원자로 SMART의 제어봉 위치지시기 개발

유제용 · 김지호 · 허 형 · 김종인 · 장문희

## Development of Position Indicator for System-Integrated Reactor SMART

Je-Yong Yu, Ji-Ho Kim, Hyung Huh, Jong-In Kim and Moon-Hee Chang

**Key Words:** SMART(일체형 원자로 SMART), CEDM(제어봉구동장치), Position Indicator(위치지시기), Reed Switch(리드스위치)

### Abstract

The reliability and accuracy of the information on control rod position are very important to the reactor safety and the design of the core protection system. In this study, a thorough investigation on the RSPT(Reed Switch Position Transmitter) type control rod position indication system and its actual implementation in the existing nuclear power plants in Korea was performed first. A design of the control rod position indication system using reed switch for the CEDM on the system-integrated reactor SMART was developed based on the position indicator technology identified through the investigation. The feasibility of the design was evaluated by test of manufactured control rod position indicator using reed switch for SMART.

### 1. 서론

현재 개발중인 중소형 일체형 원자로 SMART에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능을 유지해야 하고 높은 신뢰성과 정확성을 가져야 한다. 일체형 원자로 SMART에서 필요로 하는 위치지시기는 기존 상용로에서 쓰였던 위치지시기 형태에서 한 단계 더 진보된 성능을 가지도록 설계 제작되어야 한다. 본 연구에서는 상용로에 쓰이고 있는 RSPT(Reed Switch Position Transmitter; 이하 RSPT) 형태의 위치지시기의 관련 기술을 바탕으로 일체형 원자로 SMART에 적합한 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 설계 제작하였다. 또한 제작된 리드스위치를 이용한 제어봉 위

치지시기의 성능 확인을 위하여 영구자석을 이동시키면서 리드스위치를 이용한 위치지시기에서 출력되는 전압신호를 측정하고 분석하였다.

### 2. 제어봉 위치지시기의 기술 개념

국내의 발전용 원자로 및 연구용 원자로에 사용되고 있는 제어봉 위치지시기는 구조 및 구동 원리가 원자로 노형별로 서로 다르며, 모두 외국에서 도입되었으므로 국내 개발품은 전혀 없는 상태이다. [1-4] 영광 3, 4호기 이후에 국내에 건설된 ABB-CE형 상용로에서 사용하는 위치지시기 형태는 부피가 작고 위치지시 신호선 수가 적은 리드스위치(Reed Switch) 센서를 이용한 위치지시기가 대부분이다. [5-6] 측정 원리는 자석에 의해 만들어진 정자계를 검출의 매체로 하여, 검출체의 위치에 따라 변화하는 자계를 검출 소자인 리드 스위치로 검출하는 방식이다. 이 방식은 무접촉 검출이며 검출체에 반력이 가해지지 않으며 스위치의 접촉을 유도하는 기계적 장치를 가지고 있지 않아 고빈도, 고속 응답이 가능하고 비교적 수

명이 길다. 리드스위치의 접촉 형태는 평상시 자기장이 없을 때에는 리드가 단락 되어 있다가 자기장의 영향이 있으면 리드가 접촉하는 형태이다. 리드스위치는 한 쌍의 유연한 자성체로 이루어져 있으며 불활성(Inert) 가스로 채워진 유리관 속에 밀폐되어 있다. 두 리드는 유리관 속에서 약간 겹쳐져 있으나 간격을 두고 엇갈려 있다. Fig. 1은 리드스위치의 작동 모습을 보여주고 있다.

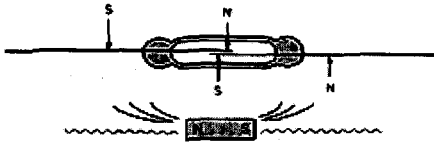


Fig. 1 Magnetization of reed switch

제어봉 구동축의 상단에 N-S극으로 이루어진 영구자석을 설치하여 제어봉이 상하로 움직일 때 영구자석도 같이 움직인다. 이때 영구자석이 위치하는 지점에 설치된 리드 스위치의 리드는 접촉을 하게 되어 회로가 단하게 된다. 리드스위치를 이용한 위치지시기는 제어봉 구동축을 둘러싸고 있는 상부압력용기의 바깥에 설치되는데 안쪽의 영구자석의 자기장을 최대한 이용하기 위해서 위치지시기를 상부압력용기에 최대한 근접시킨다. 수십 개의 리드스위치를 연결하기 위해서 얇은 비자성체 판 위에 리드스위치를 배열하고 뒷면에는 각 리드스위치의 리드와 저항을 연결한다. 이렇게 완성된 리드스위치 조합은 다시 가는 튜브에 장착되어 압력용기 외벽에 설치된다. 위치지시기 안에 설치된 리드스위치는 영구자석의 위치에 따라 직렬로 연결된 저항들을 선택적으로 동작시키고 이에 따라 전압으로 출력되는 위치신호의 크기가 변화한다.

### 3. 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 설계 개념

SMART CEDM의 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기는 Fig. 2와 같이 가동축 상단에는 영구자석을 설치하고 제어봉과 함께 움직이는 이 영구자석의 위치를 상부압력용기 바깥쪽에 설치된 리드스위치를 이용해 감지하여 제어봉의 위치를 측정하는 원리이다. 영구자석이 제어봉과 함께 상하로 위치변위를 일으키면 상부압력용기 바깥쪽에 등간격으로 설치된 리드스위치들 중 영구자석과 근접한 리드스위치의 리드는 자화 되어

단하게 된다. 압력용기 안의 영구자석의 자기장의 영향을 최대한 이용하기 위해서 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 압력용기에 최대한 근접시킨다. 상부압력용기 내부는 높은 온도의 일차수로 채워지게 되는데, 이 높은 온도의 일차수에 견딜 수 있는 큐리온도점이 높고, 잔류자기와 보자력이 큰 내부식성 영구자석을 사용해야 한다. 그리고 자력선방향이 내부벽 측에 수직으로 충분히 통과하도록 하여 리드스위치의 리드를 자화시킬 수 있도록 설계하여야 한다.[7] 수 백개의 리드스위치를 연결하기 위해서 얇은 비자성체 판 위에 리드스위치를 배열하고 뒷면에는 각 리드스위치의 리드와 저항을 연결한다. 이렇게 완성된 리드스위치 조합은 비자성체 판 위에 고정되어 가는 튜브에 장착되어 압력용기 외벽에 설치된다. 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기는 상부압력용기의 스택트 볼트와의 간섭을 피하기 위해 120° 와 60° 간격으로 압력용기 외벽에 4개를 설치하여 하나는 예비센서로 사용하고 다른 세 개의 센서에서 얻은 신호를 분석하여 노심보호계통을 작동시킨다. 위치지시기 안에 설치된 리드스위치는 직렬로 연결된 저항들을 선택적으로 동작시킨다. 만일의 경우 영구자석이 해당 스텝에 존재하지 않는데도 리드스위치가 단하게 될 경우를 대비하여 매 스텝마다 2개의 리드스위치를 직렬로 연결하여 사용한다. 제어봉 위치지시기 안에서 몇 번째 스텝의 리드스위치가 영구자석에 의해 단하게 되냐에 따라 제어봉 위치 신호인 전압이 달라지게 된다. 위치지시기에서 출력되는 위치 신호인 전압을 통해 역으로 제어봉 위치지시기 안의 몇 번째 리드스위치가 단해졌는지 알게되고 이 정보는 제어봉의 현재 위치를 제공하게 된다. 위치지시기에서 나온 신호는 콘트롤 캐비닛에서 처리되어 기타 표시장치에 입력된다. [8-9]

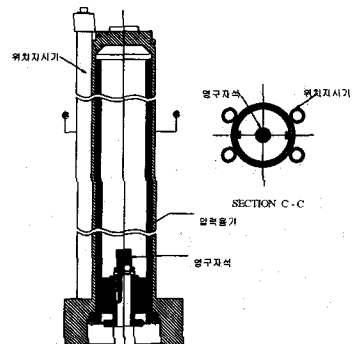


Fig. 2 Section view of position indicator

리드스위치를 이용한 SMART 제어봉 위치 지시기는 상용원전 RSPT의 리드스위치 일렬 배치로 인한 분해능 저하를 극복할 수 있도록 리드스위치 장착을 일렬형태가 아닌 엇갈린 형태로 배치하여 원하는 분해능을 충분히 얻을 수 있도록 설계제작 하였다.[10]

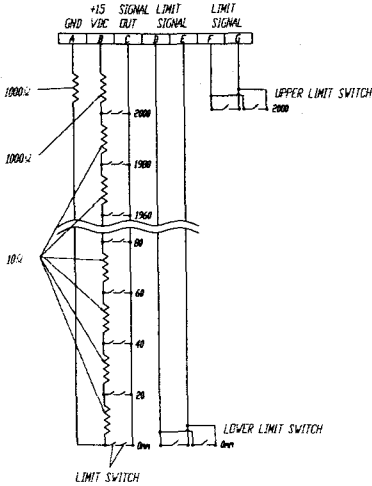


Fig. 3 Electric circuit for position indicator

이러한 리드스위치의 배치구조는 엇갈린 횡수를 증가시킴으로써 분해능을 더욱 향상시킬 수 있고 아울러 영구자석의 크기를 줄여 설계공간이 좁은 경우에도 위치지시기를 손쉽게 배치할 수 있도록 한다. Fig. 3은 위치정보를 전압으로 출력하는 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 전기적 분압회로 이다.

Fig. 4는 위치지시기의 분압동작을 개략적으로 나타내기 위하여 5 스텝으로 이루어진 위치검출 회로도이다. 개략도에서 각 영역에 상응하는 전압이 어떤 값을 지시하게 될 것인지에 대하여 계산하였다.

- 1) A영역 :  $V_o = \frac{R_b + R_c + R_d + R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$
- 2) A·B영역 :  $V_o = \frac{R_c + R_d + R_e}{R_a + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$
- 3) B영역 :  $V_o = \frac{R_c + R_d + R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$
- 4) B·C영역 :  $V_o = \frac{R_d + R_e}{R_a + R_b + R_d + R_e} \cdot V_{in}$

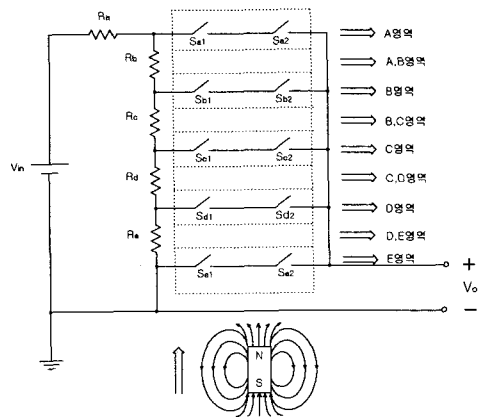


Fig. 4 Schematic circuit for position signal

- 5) C영역 :  $V_o = \frac{R_d + R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$
- 6) C·D영역 :  $V_o = \frac{R_e}{R_a + R_b + R_c + R_e} \cdot V_{in}$
- 7) D영역 :  $V_o = \frac{R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$
- 8) D·E영역 :  $V_o = 0$
- 9) E영역 :  $V_o = 0$

#### 4. 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 제작 및 기초실험

제어봉구동장치의 위치지시기는 리드스위치 (ALEPH HYR-2001) 집합체와 영구자석 (Neodymium Iron Boron, N35)으로 구성된다. 압력용기 안에 배치된 영구자석은 가동자 상단에 직접연결 되어 제어봉과 함께 상하운동을 하여 제어봉의 실제 위치를 감지한다. 위치지시기 집합체는 압력용기 외벽에 4개가 설치된다. 한 개의 위치지시기 집합체는 2개의 리드 스위치가 한 스텝으로 이루어져서 61스텝을 구현하고 2개의 리드스위치가 한 쌍으로 된 상부 및 하부 한계 스위치를 각각 1개씩 갖고있다. 리드스위치를 연결하기 위해서 얇은 합성수지 판 위에 리드 스위치를 배열하고 뒷면에는 각 리드스위치의 리드와 저항을 연결하여 고정시킨다. 이렇게 완성된 리드스위치 조합은 다시 가는 튜브에 장착되어 압

력용기 외벽에 설치된다. 운전중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 단혀져 있어 제어봉 이동시 항상 위치신호를 출력한다. 위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 단힘에 합당되는 전압신호가 출력된다.

성능검증실험용으로 제작된 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 측정범위는 1200mm 이고 분해능은 20mm이다. 각 20mm 마다 설치된 리드스위치 사이에는 120Ω 짜리 저항을 설치하여 각 위치에서 출력되는 전압 위치 신호가 0.07V 간격으로 5.83V에서 10.03V 사이에서 출력되어 압력용기 밖에서 영구자석의 실제 위치를 측정할 수 있도록 설계되었다.

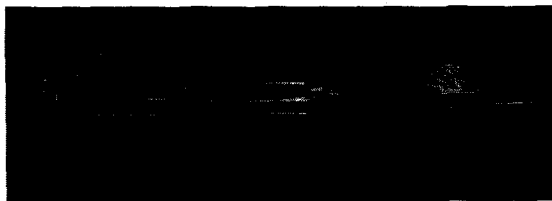


Fig. 5 Test facilities of position indicator

Fig. 5는 제작된 4개의 위치지시기 집합체가 상부압력용기에 장착된 실험장치를 보여주고 있고 Fig. 6은 상부압력용기에서 분리된 위치지시기 집합체의 모습이다.



Fig. 6 Position indicator assembly

Fig. 7은 얇은 합성수지 판 윗면에 엮갈려서

장착된 리드스위치들의 모습을 나타내고 Fig. 8은 비자성체 판 뒷면에 장착된 저항과 리드스위치와 저항을 연결하는 내열성 전선을 보여 준다.



Fig. 7 Reed switch arrangement on non-magnetic plate



Fig. 8 Resistor arrangement on non-magnetic plate

두 그림에서 보이는 합성수지 판 둘레의 원형 지지대는 합성수지 판을 튜브에 고정시키는 역할을 한다. 위치지시기의 영구자석은 일차수로 채워진 환경에서 동작하기 때문에 내부식성이 있는 재질로 캔으로 용접 밀봉하였다. 또한 영구자석의 높이와 직경을 바꾸어가면서 실험 및 교정작업을 수행 할 수 있도록 영구자석 홀더를 제작하였다. 제작을 위해 사용된 각종 전선 및 케이블은 KEPIC ECB 요건을 만족시키도록 하였다. 위치지시기의 기본성능 실험을 위하여 위치지시기 집합체는 압력용기 외벽에 밀착되어 흔들림이나 이탈이 없도록 장착하고 원통길이 방향에서 위아래가 N극과 S극으로 대칭을 이룬 영구자석을 모터를 이용하여 압력용기 중심축과 일치되게 20mm씩 상승 이동을 하면서 위치지시기에서 출력되는 전압신호를 Fig. 9와 같은 신호변환장치(아날로그-디지털 변환기) 및 디스플레이 장치를 통해 측정하였다.

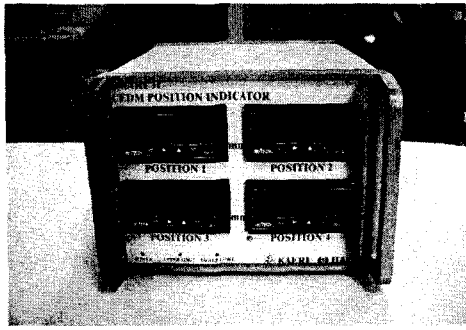


Fig. 9 Signal converter and display

시작품 시험을 수행 동안에 계수조정 등은 하지 않았다. 모터에 의해 영구자석을 이동하면서 실제 영구자석이 이동한 거리를 측정하고 위치지시기에서 출력되는 위치전압 신호를 비교하였다. 그리고 설계 시 계산된 각 위치에 따른 출력전압 계산값과 4개의 위치지시기에서 실제 출력된 측정 전압값을 비교하여 그 결과를 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 그리고 Fig. 13에 나타내었다.

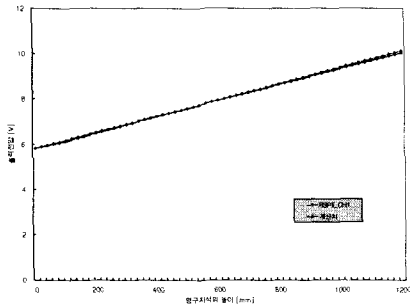


Fig. 10 Output voltage and calculation results of channel 1 position Indicator

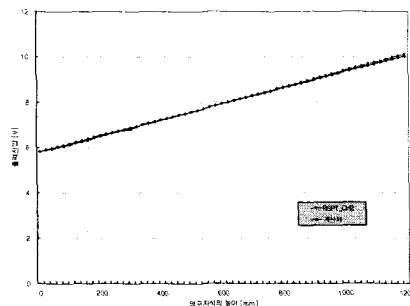


Fig. 11 Output voltage and calculation results of channel 2 position Indicator

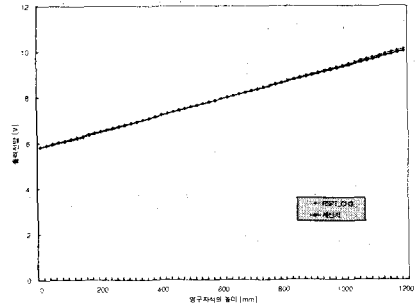


Fig. 12 Output voltage and calculation results of channel 3 position Indicator

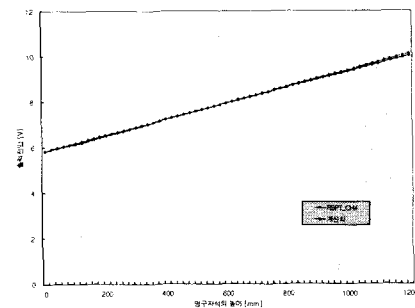


Fig. 13 Output voltage and calculation results of channel 4 position Indicator

## 5. 결론

일체형원자로 SMART에서는 대용량 상용원자로와 달리 미세조정 기능이 중요하므로 미세조정 기능을 보유한 제어봉 구동장치의 개발과 아울러 실제 제어봉의 위치를 감지하여 안전계통에 위치신호를 보내는 위치지시기의 개발도 중요한 개발 분야이다. 이러한 일체형원자로의 운전 특성을 고려하여 높은 정밀도와 신뢰도를 만족시킬 수 있는 제어봉 위치지시기를 리드스위치의 엇갈린 형태 배치를 이용하여 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 설계제작 하였다. 설계제작 과정을 통하여 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 조립성과 제작성을 확인하였고 성능시험을 통해 설계 제작된 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기가 목표 분해능(20mm)을 만족시키는 것을 확인하였다. 또한 제어봉과 함께 움직이는 영구자석의 위치에 따른 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 4채널 출력전압이 선형적인 관계를 가

지는 것도 설계 출력전압 계산값과 비교하여 검증하였다. 현재까지 수행된 기본 성능검증 시험을 바탕으로 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 신뢰성과 관련된 여러 가지 시험들을 향후 수행할 계획이다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 유제용 외 다수, 1999, "제어봉 위치지시기의 설계기술 분석", 한국원자력연구소, KAERI/AR-551/99
- (2) 유제용 외 다수, 1999, "SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계", 춘계 원자력학술발표회 요약집, pp. 105
- (3) Inspection and Enforcement Training Center, 1967, "Systems Manual Pressurized Water Reactors Combustion Engineering design Vol. 1", USNRC
- (4) Inspection and Enforcement Training Center, 1967, "Systems Manual Pressurized Water Reactors Combustion Engineering design Vol. 2", USNRC
- (5) Aleph Reed Switches, 1999, "Products Catalog"
- (6) Reed Electronics AG, 1999, "Products Catalog"
- (7) 김종인 외 다수, 1999, "일체형원자로 기기개발 및 검증시험", 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98
- (8) 백수현, 1990, "센서 핸드북", 도서출판 세화
- (9) Richard Eugene Kronk, Granby and Conn, 1975, "Magnetic-Electric Position Sensor", US Patent 3,906,469
- (10) 유제용 외 다수, 2000, "SMART CEDM RSPT 제어봉 위치지시기 개념설계", 춘계 원자력학술발표회