

SMART CEDM용 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기 개발

Development of Control Rod Position Indicator Using Reed Switch for SMART CEDM

유제용, 김종인, 김지호, 허형, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART는 무봉산 운전요건에 따라 제어봉만으로 노심 반응도를 조절해야 하므로 제어봉의 위치정보는 노심보호계통 설계에 매우 중요하다. 따라서 신뢰성이 우수하고 정확도가 높은 위치지시기의 개발이 필요하다. 이를 위하여 기존 상용원자로에서 채택하고 있는 RSPT 제어봉 위치지시기에 대한 기술을 바탕으로 하여 일체형원자로 SMART에 사용될 분해능과 신뢰성이 향상된 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 설계제작 하였다. 또한 제작된 4채널 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 성능을 테스트하기 위하여 영구자석의 위치를 변화시키면서 출력 전압신호를 측정하여 설계 출력 전압값과 비교평가 하였다. 이러한 일련의 실험을 통하여 개발된 SMART용 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 기본성능을 확인하였다.

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 exiting 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 integral 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 일체형원자로 SMART에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능을 유지해야 하고 높은 신뢰성과 정확성을 가져야 한다. 일체형원자로 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 관련기술을 바탕으로 일체형원자로 SMART에 적합한 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 설계 제작하였다. 또한 제작된 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 성능 확인을 위하여 영구자석을 이동시키면서 리드스위치를 이용한 위치지시기에서 출력되는 전압신호를 측정하고 분석하였다.

2. RSPT 제어봉 위치지시기의 기술 개념

국내의 발전용 원자로 및 연구용 원자로에 사용되고 있는 제어봉 위치지시기는 구조 및 구동원리가 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] 측정원리는 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 수명이 길다. 리드스위치의 접촉 형태는 평상시 자기장이 없을 때에는 리드가 단락되어 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. 그림 1은 실제 리드스위치의 모습을 보여주고 있다.

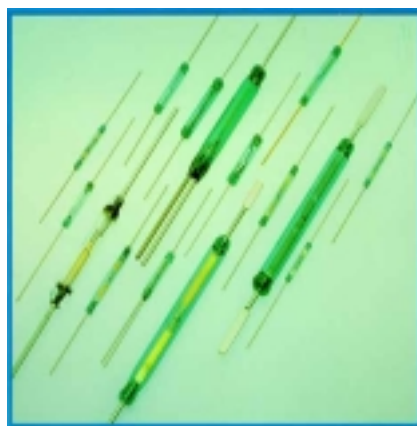


그림 1 실제 리드스위치의 사진

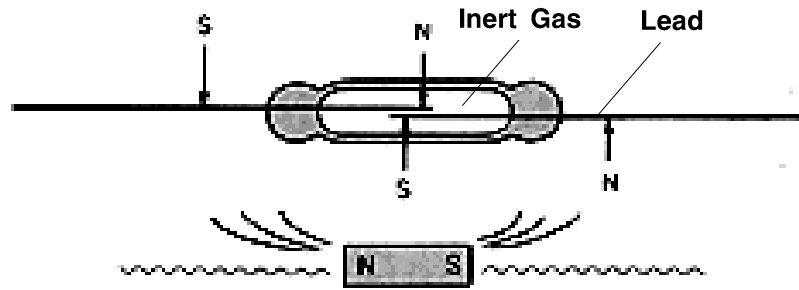


그림 2 리드 스위치의 리드의 자기화

제어봉 구동축의 상단에 N-S극으로 이루어진 영구자석을 설치하여 제어봉이 상하로 움직일 때 영구자석도 같이 움직인다. 이때 영구자석이 위치하는 지점에 설치된 리드 스위치의 리드는 그림 2와 같이 접촉을 하게 되어 회로가 닫히게 된다. 리드스위치를 이용한 위치지시기는 제어봉 구동축을 둘러싸고 있는 상부압력용기의 바깥에 설치되는데 안쪽의 영구자석의 자기장을 최대한 이용하기 위해서 위치지시기를 상부압력용기에 최대한 근접시킨다. 수 십 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 그림 3과 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 닫히게 된다. 압력용기 안의 영구자석의 자기장의 영향을 최대한 이용하기 위해서 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 압력용기에 최대한 근접시킨다. 상부압력용기 내부는 높은 온도의 일차수로 채워지게 되는 데, 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 리드 스위치를 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 스테드볼트와의 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 닫히게 될 경우를 대비하여 매 스텝마다 2개의 리드스위치를

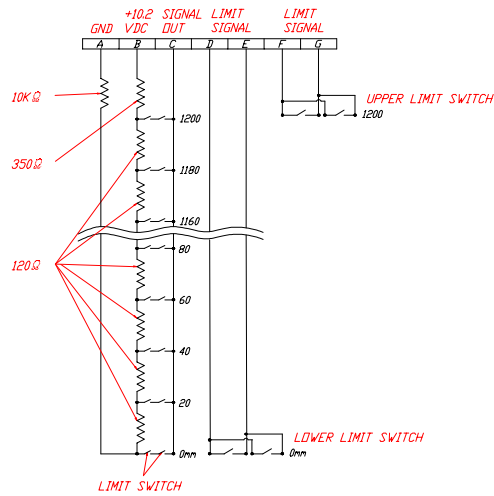


그림 5 위치지시기 분압회로도

4. 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 제작 및 기초 실험

제어봉구동장치의 위치지시기는 리드스위치(ALEPH HYR-2001) 집합체와 영구자석(Neodymium Iron Boron, N35)으로 구성된다. 압력용기 안에 배치된 영구자석은 볼스크류 집합체의 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 비자성체 판 위에 리드 스위치를 배열하고 뒷면에는 각 리드스위치의 리드와 저항을 연결하여 고정시킨다. 이렇게 완성된 리드스위치 조합은 다시 가는 튜브에 장착되어 압력용기 외벽에 설치된다. 운전중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 닫혀져 있어 제어봉 이동시 항상 위치신호를 출력한다. 위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 합당되는 전압신호가 출력된다.

성능검증실험용으로 제작된 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기의 측정범위는 1200mm이고 분해능은 20mm이다. 각 20mm 마다 설치된 리드스위치 사이에는 120 Ω 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. 그림 6은 제작된 4개의 위치지시기 집합체가 상부압력용기에 장착된 실험장치를 보여주고 있고 그림 7은 상부압력용기에서 분리된 위치지시기 집합체의 모습이다.

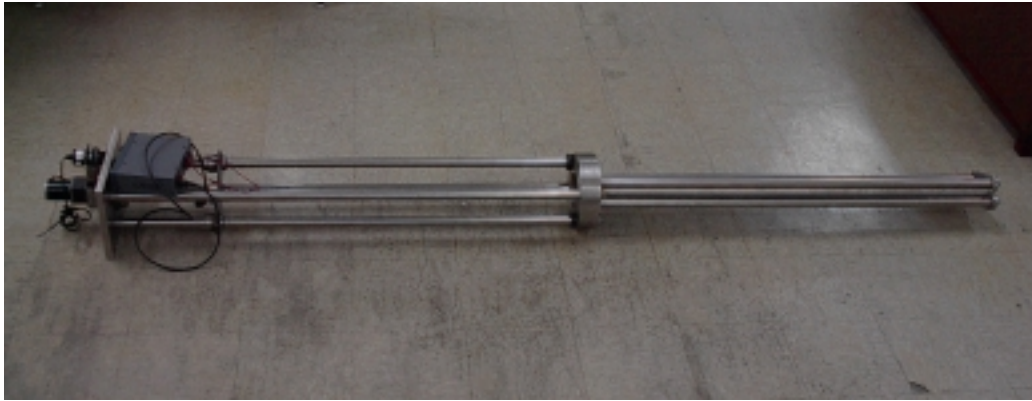


그림 6 제작된 위치지시기 실험 장치



그림 7 위치지시기 집합체

그림 8은 얇은 비자성체 판 윗면에 엇갈려서 장착된 리드스위치들의 모습을 나타내고 그림 9는 비자성체 판 뒷면에 장착된 저항과 리드스위치와 저항을 연결하는 내열성 전선을 보여 준다. 두 그림에서 보이는 비자성체 판 둘레의 원형지지대는 비자성체 판을 튜브에 고정시키는 역할을 한다.



그림 8 비자성체 판 윗면의 리드스위치 배열 모습



그림 9 비자성체 판 뒷면의 저항 및 내열성 전선 모습

위치지시기의 영구자석은 일차수로 채워진 환경에서 동작해야 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 그림 10과 같은 신호변환장치(아날로그-디지털 변환기) 및 디스플레이 장치를 통해 측정하였다.



그림 10 신호변환 및 디스플레이 장치

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 그림 11, 그림12, 그림 13 그리고 그림 14에 나타내었다.

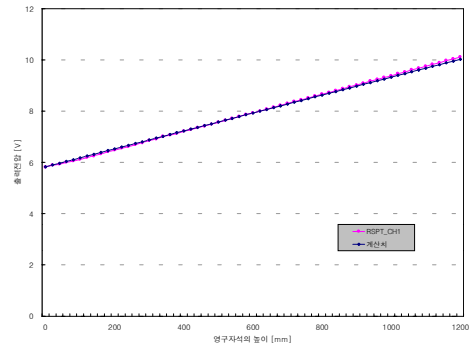


그림 11 리드스위치를 이용한 위치지시기 채널1의 출력전압과 계산값

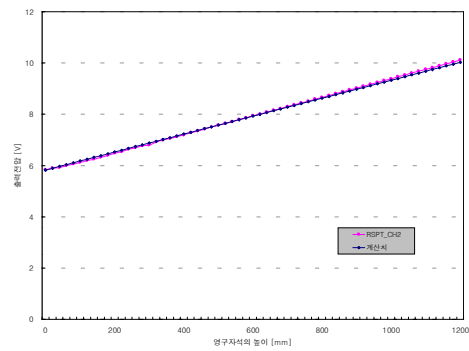


그림 12 리드스위치를 이용한 위치지시기 채널2의 출력전압과 계산값

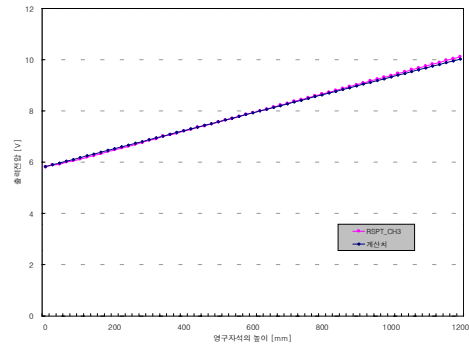


그림 13 리드스위치를 이용한 위치지시기 채널3의 출력전압과 계산값

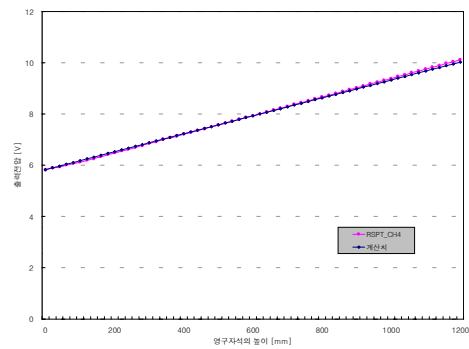


그림 14 리드스위치를 이용한 위치지시기 채널4의 출력전압과 계산값

5. 결론

일체형원자로 SMART에서는 대용량 상용원자로와 달리 미세조정 기능이 중요하므로 미세 조정 기능을 보유한 제어봉 구동장치의 개발과 아울러 실제 제어봉의 위치를 감지하여 안전계통에 위치신호를 보내는 위치지시기의 개발도 중요한 개발분야이다. 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 가지는 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, 제어봉 위치지시기의 설계기술 분석-KAERI/AR-551/99, 한국원자력연구소, 1999
- [2] 유제용 외 다수, SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계, pp. 105, '99 춘계 원자력학술발표회 요약집, 1999
- [3] Systems Manual Pressurized Water Reactors Combustion Engineering design Vol. 1, Inspection and Enforcement Training Center
- [4] Systems Manual Pressurized Water Reactors Combustion Engineering design Vol. 2, Inspection and Enforcement Training Center
- [5] Aleph Reed Switches - Products Catalog, 1999
- [6] Reed Electronics AG - Products Catalog, 1999
- [7] 김종인외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험-KAERI/RR-1889/98-1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, 1999
- [8] 백수현, 센서 핸드북, 도서출판 세화, 1990
- [9] Richard Eugene Kronk, Granby and Conn, Magnetic-Electric Position Sensor, US Patent 3,906,469, 1975
- [10] 유제용 외 다수, SMART CEDM RSPT 제어봉 위치지시기 개념설계, '2000 춘계 원자력학술발표회, 2000