2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART CEDM RSPT 제어봉 위치지시기 개념설계

Conceptual Design of RSPT Type Control Rod Position Indicator for SMART CEDM

유제용, 박석하, 허형, 김지호, 김종인

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART는 무붕산 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 분석하고 이를 바탕으로 일체형원자로 SMART에 사용될 RSPT 제어봉 위치지시기의 개념설계를 수행하였다. 또한 개념 설계된 일체형원자로 SMART의 RSPT 제어봉 위치지시기의 설계와 개념 성립성을 상용원자로의 RSPT 제어봉 위치지시기와 비교평가 하였다.

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 conceptual design of the RSPT type control rod position indication system for the CEDM on the integral reactor SMART was developed based on the RSPT technology identified through the investigation. The feasibility of the conceptual design was evaluated further by comparing with the existing RSPT currently in operation.

1. 서론

전세계적으로 신형원자로 개발의 기술적 중점은 원자로의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 고유 및 피동 안전개념 등의 신기술 접목으로 인위적 조치 없이 자동적으로 사고에 대처할 수 있는 사고방지 능력 제고이다. 1980년대부터 원자력기술 자립을 목표로 원자로 계통설계, 기기설계 등 많은 분야의 기술이 축적되어 왔다. 현시점은 상용로에서 축적된 기술을 바탕으로 독자적인 고유모델의 개발로 나아가는 단계라고 할 수 있다. 현재 세계적으로는 모든 주기기를 원자로 내에 장착하여 안전성 및 신뢰성을 획기적으로 향상시킨 개념인 일체형원자로를 개발하는 추세이다. 원자력 선진국에서 일체형원자로를 개발하는 주된 이유는 모든 주기기가 원자로용기 안에 배치되므로 원자로의 안전성을 한층 높일 수 있기 때문이다.

현재 개발중인 중소형 일체형원자로 SMART에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능을 유지해야 한다. 또한 위치지시기에서 나오는 안전 계통의 신호는 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 우선 상용로에 쓰이고 있는 RSPT(Reed Switch Position Transmitter ; 이하 RSPT) 형태의 위치지시기의 관련기술을 정확히 파악하고 이를 근간으로 SMART CEDM 제어봉 위치지시기의 개념설계를 수행하였다.

2. 상용원전의 RSPT 제어봉 위치지시기의 기술분석

국내는 현재 발전용 원자로로서 미국 Westinghouse의 가압경수형 원자로(PWR) 6기와 프랑스 프라마톰의 PWR 2기, 미국 ABB-CE사의 PWR 3기가 가동중이며 카나다의 CANDU형 원자로 3기가 또한 가동 중에 있다. 연구용 원자로는 미국 General Atomic사의 TRIGA형 원자로 2기 및 한국원자력연구소가 설계 건설한 HANARO가 현재 운전 중에 있다. 이들 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. 그림 1은 여러 종류의 리드스위치의 실제 모습을 보여 준다. [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 단락 되어 있다가 자기장의 영향이 있으면 리드가 접촉하는 형태이다. 리드스위치의 구조는 그림 2와 같다. 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.

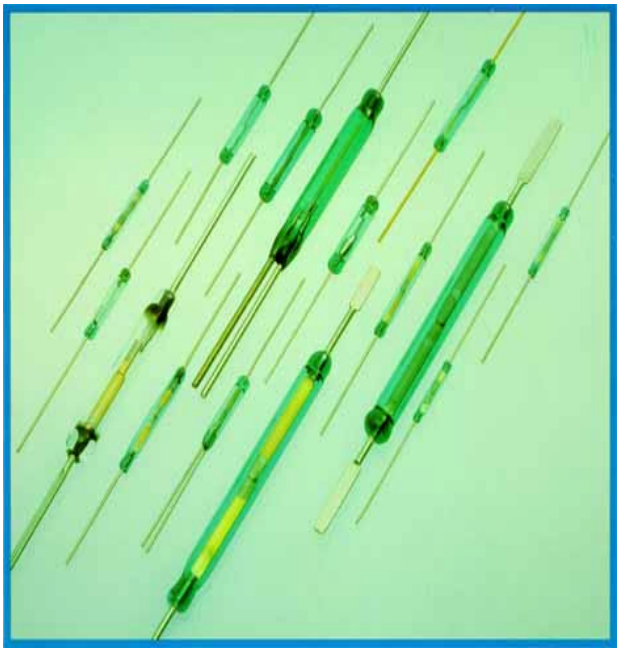


그림 1 실제 리드스위치의 사진

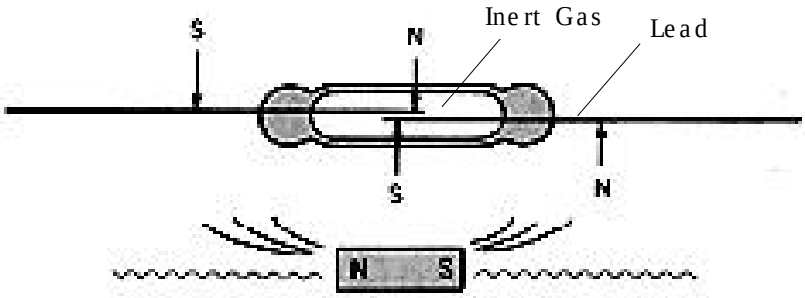
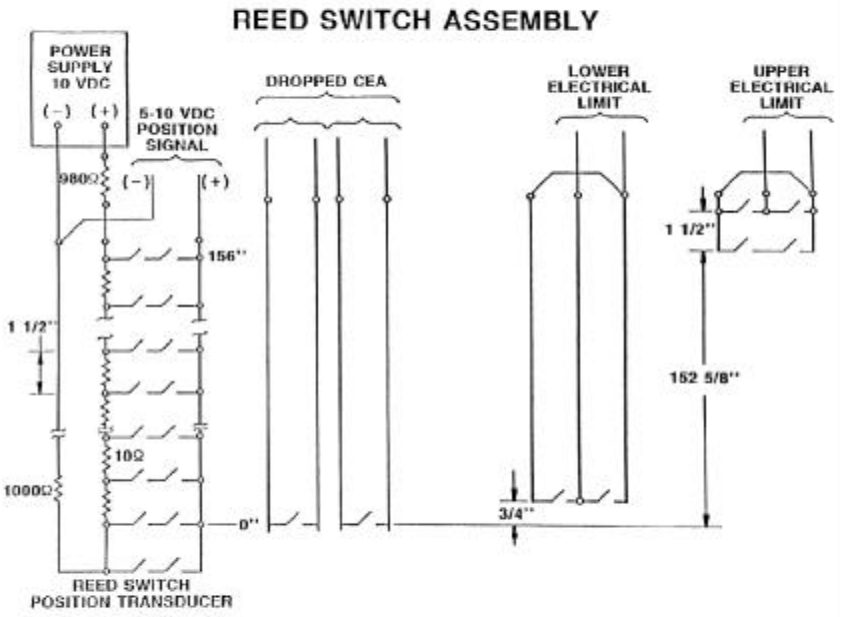


그림 2 리드 스위치의 리드의 자기화

ABB-CE형 상용원자로의 위치지시기는 직렬로 연결된 2개의 리드스위치가 한 쌍을 이룬 104 스텝으로 구성되어 있다. 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 닫히게 된다. 리드스위치를 이용한 위치지시기는 제어봉 구동축을 둘러싸고 있는 상부 하우징의 바깥에 설치되는데 안쪽의 영구자석의 자기장을 최대한 이용하기 위해서 위치지시기를 상부 하우징에 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.

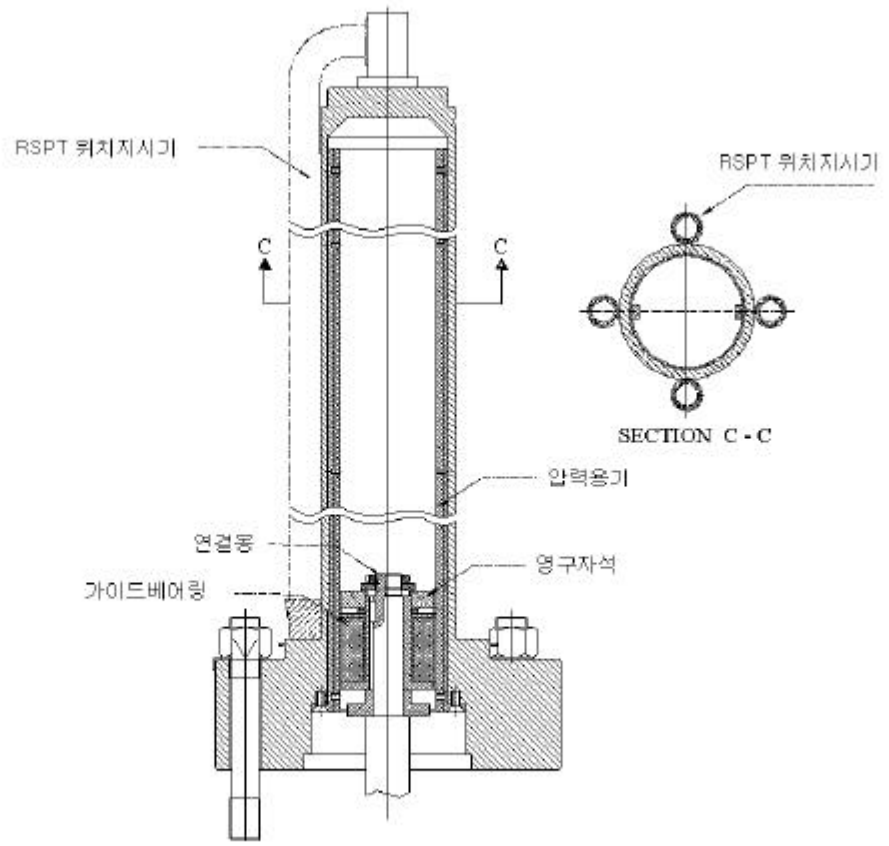


위치지시기 안에 설치된 리드스위치의 전기적 동작 회로는 그림 3과 같다. 위치지시기 안에 설치된 리드스위치는 영구자석의 위치에 따라 직렬로 연결된 저항들을 선택적으로 동작시키고 이에 따라 전압으로 출력되는 위치신호의 크기가 변화한다.

3. 개념설계된 SMART CEDM RSPT 제어봉 위치지시기

개년설계된 SMART CEDM의 RSPT 제어봉 위치지시기는 그림 4에서 보는 바와 같이 가동축 상단에는 영구자석을 설치하고 제어봉과 함께 움직이는 이 영구자석의 위치를 상부압력용기 바깥쪽에 설치된 리드스위치에 의해서 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 RSPT 제어봉 위치지시기를 압력용기에 최대한 근접시킨다. 상부 압력용기 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 축에 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. RSPT 제어봉 위치지시기는 그림 4에서 보는 바와 같이 90 ° 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 직렬로 연결하여 사용한다.



2접점 리드스위치와 3접점 리드스위치로 이루어진 RSPT 제어봉 위치지시기의 위치검출 회로는 그림 5와 같다. 가령 제어봉의 상단에 설치된 영구자석이 RSPT 제어봉 위치지시기 내에서 위에서 4번째 스텝의 리드스위치와 같은 높이에 있다고 가정하면, 4번째 스텝의 3접점 리드스위치는 같은 높이에 배치된 2접점 리드스위치와 연결되고 2접점 리드스위치도 닫히게 되어 RSPT 제어봉 위치지시기 안의 나머지 리드스위치들과는 단락 된다. 따라서 그림 5의 회로도에 나타나 있는 대로 입력전원에서 공급되는 일정한 전압은 직렬로 연결된 4개의 저항에 의해 이에 해당하는 전류값을 생성하게 되고 이 전류신호는 제어봉 위치신호로 쓰이게 된다. 따라서 제어봉 위치지시기 안에서 몇 번째 스텝의 리드스위치가 닫혀있느냐에 따라 제어봉 위치 신호인 전류가 달라지게 된다. 위치지시기에서 출력되는 위치 신호인 전류를 통해 역으로 제어봉 위치지시기 안의 몇 번째 리드스위치가 닫혀졌는지 알게되고 이 정보는 제어봉의 현재 위치를 제공하게 된다. 위치지시기에서 나온 신호는 컨트롤 캐비닛에서 처리되어 기타 표시장치에 입력된다.

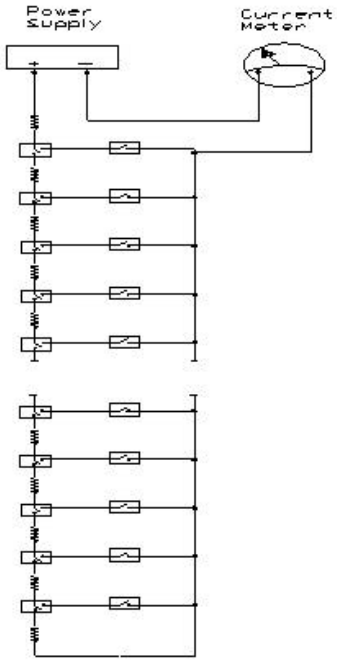


그림 5 개념설계된 RSPT 제어봉 위치지시기 위치검출회로

4. 상용원전 RSPT와 개념설계된 RSPT의 비교

(1) 위치검출회로의 비교

기존 상용원전의 RSPT는 신뢰성이 높고 신호선 수가 적다는 장점이 있는 반면 RSPT에서 나오는 출력이 리드스위치가 2개 이상 닫혀질 때는 검출회로의 출력이 선형성을 나타내지 못한다는 단점이 있다. 이러한 현상은 RSPT의 측정범위가 좁아져서 리드스위치의 개수가 준다던가 리드스위치의 간격이 넓어질수록 그 영향이 더욱 심각해진다. [8-9]

그림 6은 영광 3, 4호기 이후에 국내에 건설된 상용로에서 사용하고 있는 위치지시기를 개략적으로 나타내기 위하여 5 스텝으로 이루어진 위치검출회로도이다. 개략도에서 각 영역에 상응하는 전압이 어떤 값을 지시하게 될 것인지에 대하여 계산하였다. 계산 결과에서 알 수 있듯이 2조의 리드스위치들이 동시에 도통구간 즉 2), 4), 6) 계산식에서는 해당 저항값이 계산식에서 누락되는 현상이 발생하여 출력 전압값이 비선형성을 갖게된다.

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 : $V_o = \frac{R_c + R_d + R_e}{R_a + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$

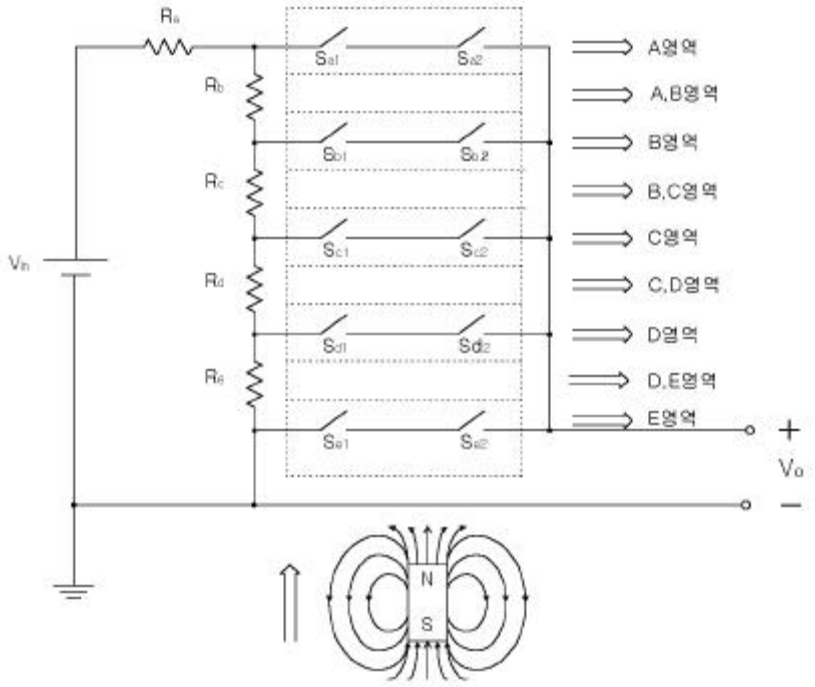


그림 6 상용원전 RSPT의 위치검출 회로

3) B**영역** : $V_o = \frac{R_c + R_d + R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$

4) B•C**영역** : $V_o = \frac{R_d + R_e}{R_a + R_b + R_d + R_e} \cdot V_{in}$

5) C**영역** : $V_o = \frac{R_d + R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$

6) C•D**영역** : $V_o = \frac{R_e}{R_a + R_b + R_c + R_e} \cdot V_{in}$

7) D**영역** : $V_o = \frac{R_e}{R_a + R_b + R_c + R_d + R_e} \cdot V_{in}$

8) D•E**영역** : $V_o = 0$

9) E**영역** : $V_o = 0$

그림 7은 본 연구의 결과에 따른 RSPT 위치검출회로를 개략적으로 5 스텝으로 나타낸 회로도이다. 아래에 그림 7의 각 영역 조건에 상응하는 전류가 어떤 값을 갖는지 계산하였

다. 전자석이 상하로 이동하면서 영구자석의 자장이 A영역에 위치하게 되면, 리드스위치 S_{a1}과 S_{a2}가 동시에 도통되고 출력전류 I_o는 V_{in}/R_a이 된다. 같은 레벨에 위치한 2개의 2접점 리드스위치 중 하나를 3접점 리드스위치로 대체하여, 평상시에는 인접한 레벨의 3접점 리드스위치에 연결되어 있다가 영구자석의 자장의 영향을 받을 때만 같은 레벨의 2접점 리드스위치에 연결되도록 하였다. 3접점 리드스위치의 역할 때문에 영구자석의 자장이 A영역과 B영역 사이에 위치할 때에도 CT(Current Transformer)에 흐르는 전류는 영구자석이 A영역에 있을 때 흐르는 전류와 동일하다. 다시 영구자석이 B영역에 위치하여 있을 때에는 CT의 출력전류는 $I_o = V_{in}/(R_a + R_b)$ 값을 지시하게 되고, 이러한 전류값의 변화로 제어봉의 위치를 알아 낼 수 있다. 따라서 개념설계된 RSPT 제어봉 위치지시기는 원치 않는 중간 영역을 없애 신호분석을 용이하게 하였다.

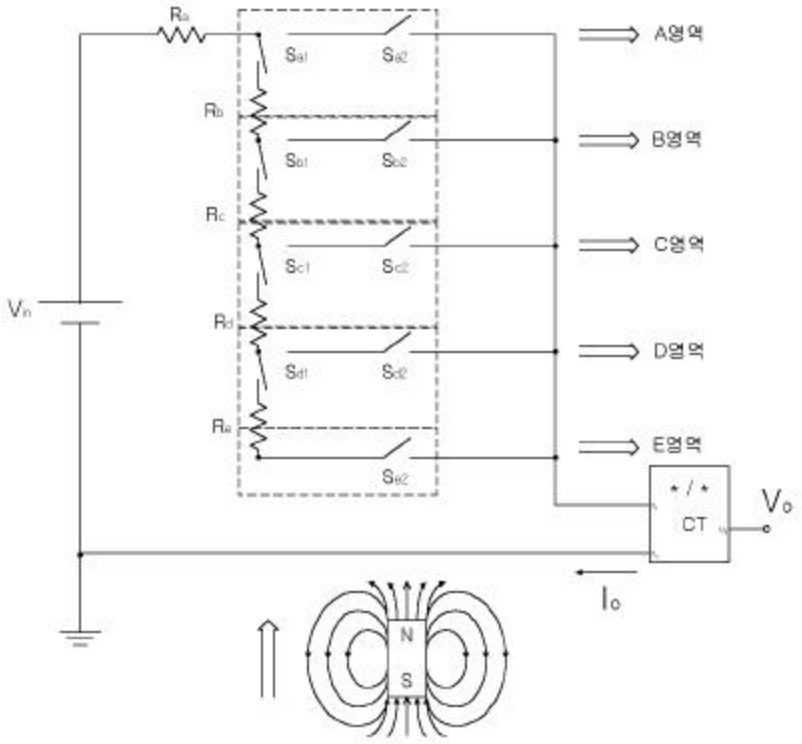


그림 7 개념설계된 SMART의 RSPT 위치검출 회로

1) A영역 : $I_o = V_{in}/R_a$

2) B영역 : $I_o = V_{in}/(R_a + R_b)$

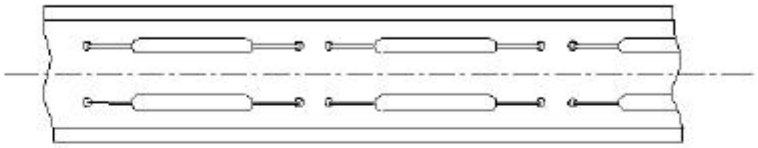
3) C영역 : $I_o = V_{in}/(R_a + R_b + R_c)$

4) D영역 : $I_o = V_{in}/(R_a + R_b + R_c + R_d)$

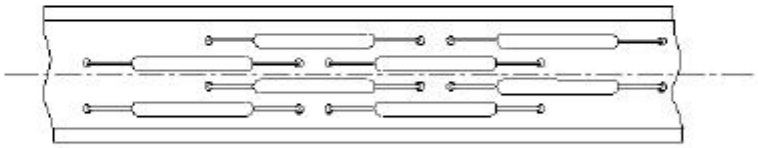
5) E영역 : $I_o = V_{in}/(R_a + R_b + R_c + R_d + R_e)$

(2) 리드스위치 장착 방법의 비교

그림 8에 나타나 있듯이 기존 상용원전의 RSPT는 리드스위치를 일렬로 배치하여 리드스위치 길이 이하의 분해능을 얻을 수 없다. 이러한 기존 RSPT의 리드스위치 배열구조는 미세조정성능이 우수한 제어봉 구동장치가 요구하는 정밀한 위치정보를 제공하지 못할 뿐만 아니라 RSPT 분해능의 한계는 결국 영구자석의 길이를 증가시켜 일체형원자로와 같이 설계공간이 협소한 원자로에서는 기존 RSPT를 사용할 수 없게 만든다. 개념설계 된 SMART용 RSPT 제어봉 위치지시기는 상용원전의 RSPT 제어봉 위치지시기가 가지고 있는 문제점을 극복할 수 있도록 RSPT 내의 리드스위치 장착을 일렬형태가 아닌 엇갈린 형



(a) 상용원전의 RSPT내의 리드스위치 배열



(b) SMART의 개념설계된 RSPT내의 리드스위치 배열

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 개발분야이다. 일체형원자로의 운전 특성을 고려하여 위치지시기는 높은 정밀도와 신뢰도를 가지고 있어야 한다. 이를 위해 상용원전의 RSPT 기술을 바탕으로 RSPT 제어봉 위치지시기를 개념설계 하였다. 개념 설계된 RSPT 제어봉 위치지시기가 가지고 있는 장점은 다음과 같다.

1) 3접점 리드스위치를 사용함으로써 영구자석의 자장이 2조 이상의 리드스위치를 동시에

닫는 경우에 발생되는 저항성분 누락현상에 의한 비선형적인 위치출력 신호를 없애 위치정보의 신뢰도를 높일 수 있다.

2) RSPT 내의 리드스위치를 엇갈린 형태로 배치하여 제어봉 위치지시기의 분해능을 향상시킬 수 있다.
3) 측정범위가 좁은 경우에도 원하는 분해능을 갖는 RSPT 제어봉 위치지시기를 적용 할 수 있다.
4) 복잡한 영구자석의 사이징 작업을 용이하게 하고 비좁은 설계 공간에서도 RSPT 제어봉 위치지시기를 사용할 수 있다.

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 추계 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