

SMART 제어봉 위치지시기에서 영구자석과 리드스위치의 배치

Arrangement of Permanent Magnet and Reed Switches for Control Rod Position Indicator of 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 설계개발 제작하였다. 이러한 일련의 제어봉 위치지시기 설계 과정에서 가장 중요한 부분이 영구자석과 리드스위치의 배치이다. 본 논문에서는 영구자석과 리드스위치의 특성에 대해 소개하고 위치지시기 설계에 필요한 영구자석과 리드스위치 사이의 거리를 적절한 가정을 이용하여 손쉽게 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 이 계산 방법을 실제 설계에 응용하는 절차를 설명하였다.

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. A survey 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. The control rod position indicator having the high performance for SMART was developed on the basis of RSPT technology identified through the survey. The arrangement of permanent magnet and reed switches is the most important procedure in the design of control rod position indication. In this study, the characteristics of permanent magnet and reed switches are introduced and the calculation method for arrangement of permanent magnet and reed switch is presented.

1. 서론

현재 개발중인 중소형 일체형원자로 SMART에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능을 유지해야 한다. 또한 제어봉 위치지시기는 제어봉의 실제 위치를 센싱하는 역할을 하므로 위치지시기의 신호는 제어계통 신호와 독립적이어야 하고 측정된 위치신호도 만일의 고장에 대비하여 신호 채널이 다중화되어야 한다. 따라서 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. 위치지시기의 기본설계를 위해 상용로에 쓰이고 있는 RSPT(Reed Switch Position Transmitter ; 이하 RSPT) 형태의 위치지시기의 관련기술을 근간으로 SMART CEDM 제어봉 위치지시기의 기본설계를 수행하였다. 위치지시기의 기본설계 과정 중 영구자석과 리드스위치의 상대 위치를 결정하는 작업은 위치지시기의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 적절한 계산을 통한 부품선정 작업과 예비 실험이 필요하다. 본 논문에서는 영구자석과 리드스위치의 특성에 대해 소개하고 위치지시기 설계에 필요한 영구자석의 최소 자속밀도와 리드스위치 사이의 거리를 적절한 가정을 이용하여 손쉽게 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 위치지시기 설계 특성

제어봉 위치지시기는 그림 1과 같이 CEDM의 상부압력용기 주위에는 리드스위치를 이용한 4대의 위치지시기 집합체가 독립적으로 설치된다. 압력용기 내부의 연장봉 상부에는 제어봉과 함께 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있으며 이 영구자석의 위치에 비례하여 압력용기 외벽에 설치된 리드스위치를 이용한 위치지시기는 계단식 아날로그 전압신호를 출력한다 [1,2]. 위치지시기는 제어봉의 위치를 일정 간격으로 감지할 수 있도록 설계되어야 하며 운전 중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 단히게 된다. 위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 단함에 합당되는 전압신호가 출력된다. 4개의 리드스위치를 이용한 위치지시기는 2개가 한 조가 되어 알루미늄으로 제작된 2개의 위치지시기 홀더에 각각 장착되며 이 위치지시기 홀더는 압력용기 외벽을 감싸는 형태로 장착된다 [3].

4대의 위치지시기 중 2대에는 제어봉의 상한, 하한을 지시할 수 있는 비안전등급의 상부한계스위치, 하부한계스위치가 위치지시기 센서와 독립적으로 설치되어 있다. 또한 선형펄스 모터의 전원이 차단되어 제어봉이 가동부 자중에 의해 최하한의 위치에 있는 경우, 이를 감지할 수 있는 제어봉 낙하 스위치가 2채널 설치된다.

제어봉 위치지시기는 구성부품은 크게 위치감지용 영구자석, 리드스위치 및 전기적 분압회로로 나눌 수 있다. 여기서 특히 영구자석과 리드스위치는 위치지시기의 정밀도 및 신뢰도와 관계가 있는 부품으로 제품의 선택과 배치는 매우 중요하다 [4].

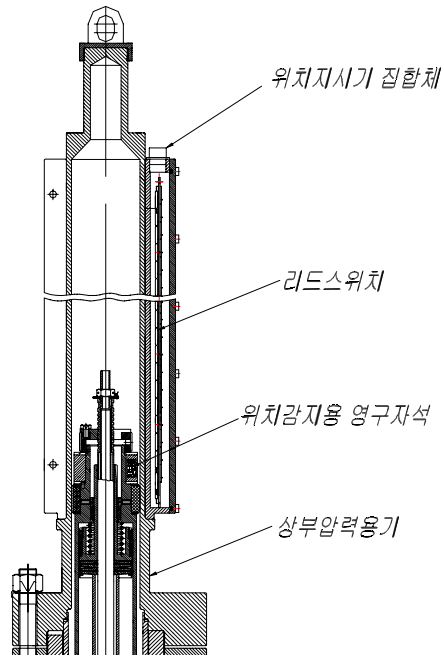


그림 1 위치지시기의 설치도

2.1 영구자석

일반적으로 영구자석은 ALNICO Magnet, Ferrite Magnet, Rare-Earth Magnet 그리고 Bonded Magnet로 크게 4종류로 나눈다. 아래 표 1은 4종류의 영구자석에 속하는 일반적인 영구자석들을 분류한 것이다 [5].

표 1 영구자석의 분류

ALNICO Magnet	Ferrite Magnet	Rare-Earth Magnet	Bonded Magnet
Cast ALNICO Sintered ALNICO Fe-Cr-Co	Ba-Ferrite Sr-Ferrite	Sm-Co Nd-Fe-B	Ferrite Bonded Magnet(PLAMAG) ALNICO Bonded Magnet Nd Bonded Magnet Sm Bonded Magnet

이들 4가지 종류의 영구자석에서 각 분류에 속하는 대표적인 영구자석에 대한 특성비교는 아래 표2와 같다.

표 2 영구자석의 특성비교

구 분	Br(G)	Hc(Oe)	(BH)max
Cast-Al 5	9,500~13,500	570~850	3.0~6.8
Cast-Al 8	7,500~9,500	1,380~2,150	4.8~7.0
Cast-Al 9	10,000~11,000	1,350~1,700	9.0~11.0
Cast-HiMag.	13,000~14,000	700~800	6.8~8.2
Sint-Al 8	5,500~9,000	1,100~1,600	2.0~5.5
Ba-Ferrite	3,900~4,200	1,800~2,200	3.5~4.1
Sr-Ferrite	3,800~4,400	2,200~3,900	2.7~4.6
Sm-Co	10,300	5,700	25.0
Nd-Fe-B	11,500	10,500	30.0
Bond Magnet	7,000	5,300	9.0

※ 용어설명

- Br(G) : 잔류자속밀도(Residual Magnetic Flux Density)
이력곡선에 있어서 자계의 강도를 영으로 했을 때의 자속밀도, 단위 Gauss
- Hc(Oe) : 보자력 (Coercive Force)
포화까지 자화시킨 후, 그 자속밀도를 영으로 하는데 필요한 감자계의 강도, 단위 Oersted
- (BH)max : 최대에너지적 (Maximum Energy Product)
감자곡선상의 동작점에서 자속밀도와 감자계 강도의 곱셈값 중에서 최대치이다.

표 2에서 보는바와 같이 각 부류의 대표적인 영구자석들 중에서 가장 큰 자기에너지를 가지는 자석이 네오디뮴 자석(Nd-Fe-B Magnet)이다. 따라서 동일한 자기세기를 얻을 수 있도록 영구자석을 배치할 때, 네오디뮴 자석을 사용하면 다른 종류의 영구자석을 사용할 때 보다 영구자석의 크기를 줄일 수 있다.

상부압력용기 주위에 설치된 위치지시기 집합체 내의 리드스위치를 단락 시킬 수 있는 자기에너지를 갖는 영구자석을 상부압력용기 안의 연장봉에 부착시킨다. 위치지시기용 영구자석의 선택 시, 영구자석의 높이는 제어봉구동장치의 길이와 관계가 있으므로 자기에너지가 가장 큰 네오디뮴 영구자석을 선택하여 제어봉구동장치의 전체 길이를 줄인다. 네오디뮴 영구자석의 물리적 성질은 아래 표 3과 같다.

표 3 네오디뮴(Nd-Fe-B) 자석의 물리적 성질

Curie Point	310~340℃
최고 허용온도	100~180℃
밀도	7.4~7.5 g/cm ³
경도	Hv 600
온도 계수	-0.1~0.12 %/℃
Recoil 투자율	1.1

2.1 리드스위치

그림 2는 여러 종류의 리드스위치의 실제 모습을 보여 준다. 측정원리는 자석에 의해 만들어진 전자계를 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 3와 같다. 리드스witch는 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 [6].

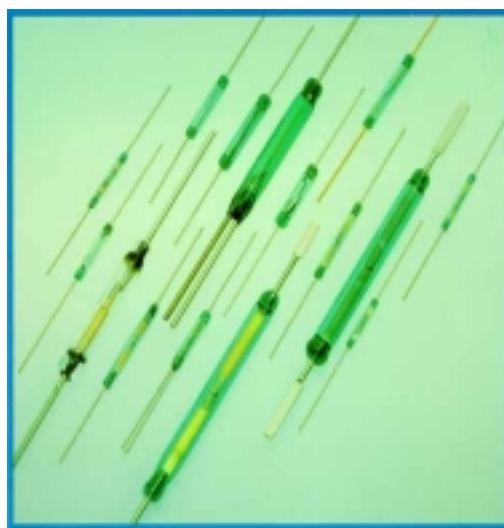


그림 2 실제 리드스위치의 사진

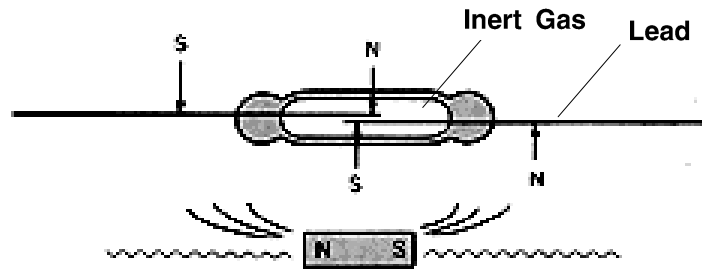


그림 3 리드스위치 리드의 자기화

제어봉 구동축의 상단에 N-S극으로 이루어진 영구자석을 설치하여 제어봉이 상하로 움직일 때 영구자석도 같이 움직인다. 이때 영구자석이 위치하는 지점에 설치된 리드 스위치의 리드는 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 [7].

SMART CEDM 제어봉 위치지시기에 사용되는 리드스위치는 상용원전에서 그 성능이 검증된 ALEPH사의 HYR2001을 선택한다. ALEPH사 리드스위치 HYR2001의 상세한 제품 특성은 아래 표4와 같다.

표 4 리드스위치(ALEPH HYR2001)의 특성

Contact Material	Rhodium	Min. Breakdown Voltage	300VDC
Max. Contact Rating	10W	Max. Contact Capacitance	0.4pF
Max. Switching Voltage	200VDC	Min. Insulation Resistance	10^{10} ohms
Max. Switching current	0.5A	Typ. Resonant Frequency	3kHz
Max. Initial Contact Resistance	100m ohms	Electrical Life (Resistive loads)	10^7 (5VDC, 10mA) 10^6 (100VDC, 100mA)
Pull in Value (AT)	23-32	Test Coil	TC-0502
Min. Drop out Value (AT)	6	Features	General application

리드스위치 HYR2001의 특성시험에 사용한 Test Coil TC-0502의 대략적인 크기는 아래와 같다.

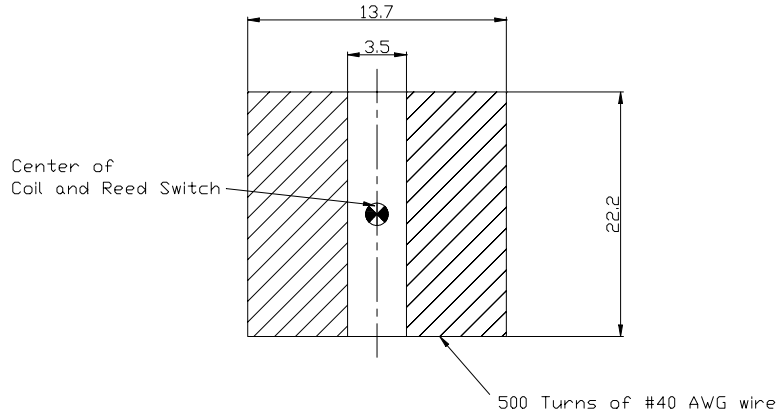


그림 4 리드스위치 테스트 코일 TC-0502의 치수

중심점에서의 Flux Density는 아래 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$B^* = \mu^o H 10^4 = (4\pi \times 10^{-7})(10^4)H = 0.0126 H \quad (1)$$

Here

B^* : Equivalent flux density

μ^o : 진공에서의 투자율

H : Magnetic field [AT/m]

식 (1)을 다시 정리하면 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B^* = 0.0126 \left(\frac{NI}{l} \right) \quad (2)$$

표4에서 리드스위치 HYR2001의 Pull-In 범위가 23-32 Ampere Turn이므로 이 AT값과 그림 3에서 나타난 Test Coil TC-0502의 치수를 이용하여 리드스위치 HYR2001이 단락 되는데 필요한 자속밀도(Flux Density)를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$B^*_{low} = 0.0126 \left(\frac{23}{0.0222} \right) = 13.05 \text{ Gauss} \quad (3)$$

$$B^*_{high} = 0.0126 \left(\frac{32}{0.0222} \right) = 18.16 \text{ Gauss} \quad (4)$$

따라서 리드스위치 HYR2001 위치에서 상부압력용기 내부에 있는 영구자석에 의해서 생성되는 자계(Magnetic Field)는 최소한 18.16 Gauss 이상 되어야만 리드스위치를 동작시킬 수 있다.

3. 영구자석의 자속밀도 계산

위치지시기용 리드스위치로 선택된 HYR2001을 이용하여 위치지시기용 영구자석의 세기를 계산하여 상부압력용기 내 영구자석이 존재할 때 영구자석과 동일한 높이의 해당 리드스위치가 단히도록 적정한 영구자석을 선정해야 한다. 그림 5는 상부압력용기와 영구자석, 리드스위치의 대략적인 배치를 나타내고 있다. 만약에 자계(Magnetic Field)가 축방향으로 퍼지지 않는다면 자속밀도(Flux Density)는 영구자석으로부터 반경방향으로 멀어지면 감소한다. 그리고 상부압력용기 및 위치지시기집합체가 모두 완벽한 비자성체로 가정하고 에너지 보존의 법칙을 이용하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\phi = B_{magnet} [2\pi R_{magnet} l] = B_{housing} [2\pi R_{mag} l] = B_{reed} [2\pi R_{reed} l] \quad (5)$$

윗 식을 정리하여 영구자석 표면 및 상부압력용기 표면에서의 최소 요구 자속밀도를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$B_{magnet} = B_{reed} \left[\frac{R_{reed}}{R_{magnet}} \right] \quad (6)$$

$$B_{housing} = B_{reed} \left[\frac{R_{reed}}{R_{housing}} \right] \quad (7)$$

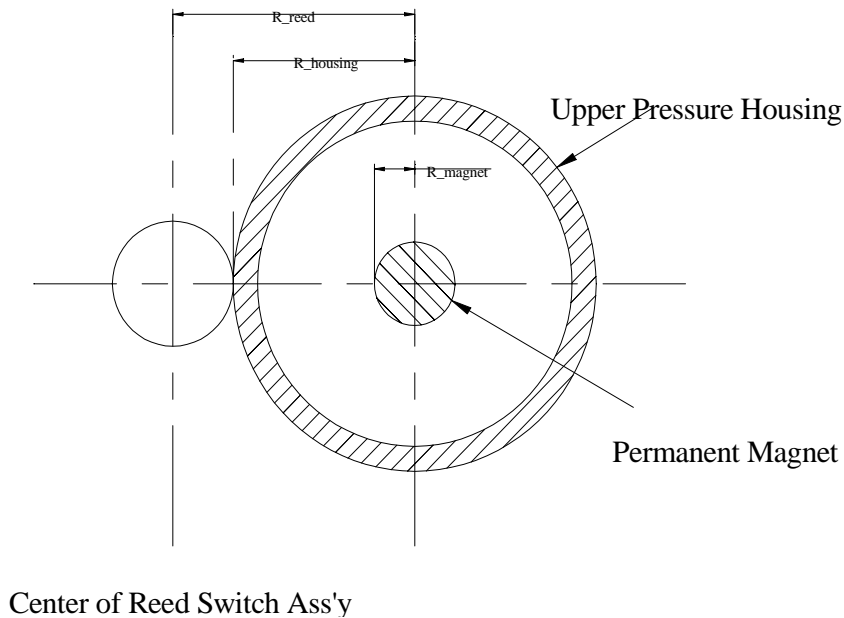


그림 4 리드스위치 집합체 단면도

상부압력용기의 반지름($R_{housing}$)은 45mm로 설계되고 위치지시기 집합체의 반지름은 제작성을 고려하면 20mm를 이내에서 설계가 가능하다. 따라서 정해진 구조물의 기초 치수와 테스트 코일을 이용하여 측정된 리드스위치의 최소 Pull_In 자속밀도를 식 (6), (7)에 대입하면 영구자석 표면 및 상부압

력용기 표면에서의 최소 요구 자속밀도를 계산하면 아래와 같다.

표 5 최소요구 자속 밀도

	최소 요구 자속밀도 [Gauss]
영구자석 표면 (반지름이 5mm인 경우)	236.08
영구자석 표면 (반지름이 10mm인 경우)	118.04
영구자석 표면 (반지름이 15mm인 경우)	78.69
상부압력용기 표면	26.23

위 표에서 계산한 자속밀도는 리드스위치의 리드를 닫히게 할 수 있는 최소 자속밀도이다. 이 계산된 최소 자속밀도 값을 이용하여 영구자석의 표면에서 자속밀도를 측정하여 영구자석을 결정한다. 영구자석의 종류가 결정되면 같은 종류의 영구자석은 직경에 비례하여 자계의 세기도 증가하므로 위치지시기용 영구자석으로 적절한 직경의 영구자석을 선택한다. 또한 동일한 직경을 같은 영구자석은 영구자석의 높이에 비례하여 자속밀도의 상하 방향의 분포가 넓어지므로 몇 개의 리드스위치가 단락 되는지는 영구자석의 높이를 변화시키면서 실험을 통해 구한다.

4. 결론

일체형원자로 SMART에서는 대용량 상용원자로와 달리 미세조정 기능이 중요하므로 미세조정 기능을 보유한 제어봉 구동장치의 개발과 아울러 실제 제어봉의 위치를 감지하여 안전계통에 위치신호를 보내는 위치지시기의 개발은 중요한 개발분야이다. 일체형원자로의 운전 특성을 고려하여 위치지시기는 높은 정밀도와 신뢰도를 가지고 있어야 한다. 이를 위해 수치적으로 계산된 각 부품들을 선정하기 위하여 본 논문에서는 위치감지용 영구자석이 가져야할 최소 요구 자속밀도를 계산하였다. 위치지시기는 정확성과 신뢰성을 요구하는 계측기이므로 계산결과에 따라 선정된 각 부품을 실제 위치할 공간상에 배치하여 정밀한 실험을 통하여 최종적인 위치지시기 설계를 수행하여야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 유제용 외 다수, 제어봉 위치지시기의 설계기술 분석-KAERI/AR-551/99, 한국원자력연구소, 1999
- [2] 김종인 외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험-KAERI/RR-1889/98-1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, 1999
- [3] 유제용 외 다수, SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계, pp. 105, '01 춘계 원자력학술발표회 요약집, 1999
- [4] 유제용 외 다수, 일체형원자로 SMART의 제어봉 위치지시기 개발, pp. 921, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집(D), 2001
- [5] 김봉열 역편, 전자통신공학 대계-재료,부품, 도서출판 기다리, 1988
- [6] Aleph Reed Switches - Products Catalog, 1999
- [7] 백수현, 센서 핸드북, 도서출판 세화, 1990