

SMART 제어봉 위치지시기용 영구자석의 자속집속기 설계

Design of Magnetic Flux Concentrator of Permanent Magnet for Control Rod Position Indicator of SMART CEDM

유제용, 김지호, 허형, 김종인

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 리드스위치의 위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 설계개발 제작하였다. 이러한 일련의 제어봉 위치지시기 설계 과정에서 가장 중요한 부분이 영구자석과 리드스위치의 배치이다. 본 논문에서는 영구자석의 자속을 집속하여 리드스위치에 영향을 미치는 자기장의 영역을 조절할 수 있는 자속집속기의 특성과 설계방법에 대하여 소개하고자 한다.

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 magnetic flux concentrator of permanent magnet is introduced and the calculation method for effective flux area for 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 작업이 필요하다. 본 논문에서는 자속영역을 조절하여 원하는 리드스위치에만 영향을 줄 수 있는 영구자석의 자속집속기에 대한 설계 방법을 소개하고자 한다.

2. 제어봉 위치지시기

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 닫히게 된다. 위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 합당되는 전압신호가 출력된다. 그림 2와 같이 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 위치지시기의 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].

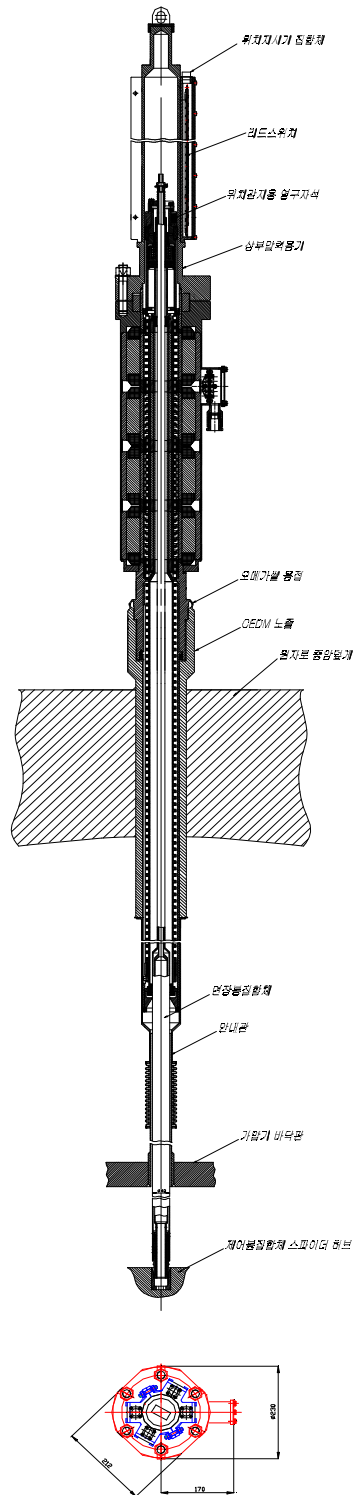


그림 1 위치지시기의 설치도

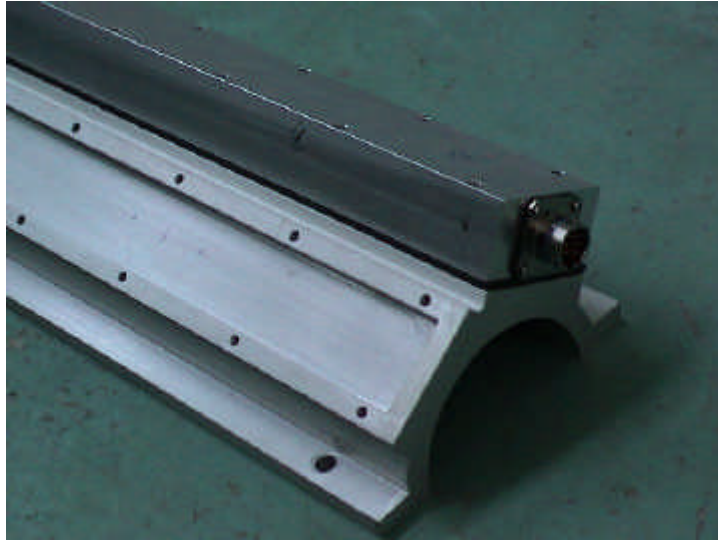


그림 2 위치지시기 알루미늄 홀더 및 위치지시기

3. 자속집속기의 설계

3.1 영구자석

일반적으로 영구자석은 ALNICO Magnet, Ferrite Magnet, Rare-Earth Magnet 그리고 Bonded Magnet로 크게 4종류로 나눈다. [5] 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. 위치지시기용 영구자석의 선택 시, 영구자석의 높이는 제어봉구동장치의 길이와 관계가 있으므로 자기에너지가 가장 큰 네오디뮴 영구자석을 선택하여 제어봉구동장치의 전체 길이를 줄인다. 위치지시기에 사용되는 영구자석은 운전온도에서 자성을 잃지 않아야 한다. 따라서 제어봉구동장치의 운전온도인 180℃에서 견디기 위해서는 네오디뮴 자석 중에서 최고 허용온도가 180℃인 UH급을 사용해야 한다. 참고로 일반 등급의 네오디뮴 자석은 최고 허용온도가 100℃, H급은 120℃, SH급은 150℃ 이다. 또한 영구자석의 부식을 방지하기 위하여 캔으로 밀봉해야 한다. 네오디뮴 자석 N35UH의 자기적 특성은 다음과 같으며 물리적 성질은 표 2과 같다.

- 잔류자속밀도 (Br): 11.7 - 12.1 KGs
- 보자력 (Hc) : 10.8 - 11.5 KOe
- (BH)max : 33 - 35 MGOe

※ 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 1 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 |

상부압력용기 주위에 설치된 위치지시기 집합체 내의 리드스위치를 단락 시킬 수 있는 자기에너지 갖는 영구자석을 상부압력용기 안의 연장봉에 부착시킨다.

3.2 리드스위치

SMART CEDM 제어봉 위치지시기에 사용되는 리드스witch는 상용원전에서 그 성능이 검증된 ALEPH사의 HYR-2001을 선택한다. 그림 3은 실제 위치지시기 집합체에 장착된 리드스위치의 실제 모습을 보여 준다.

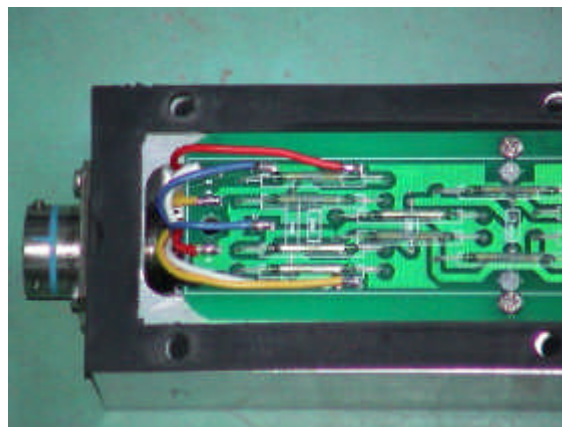


그림 3 위치지시기에 장착된 리드스위치

측정원리는 자석에 의해 만들어진 정자계를 검출의 매체로 하여, 검출체의 위치에 따라 변화하는 자계를 검출 소자인 리드 스위치로 검출하는 방식이다. 이 방식은 무접촉 검출이기 때문에 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 접

축하는 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. [6] 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.

리드스위치 HYR-2001의 평균적인 Pull-In 범위가 35-40 Ampere Turn이므로 이 AT 값과 Test Coil TC-0502의 치수를 이용하여 리드스위치 HYR-2001이 단락 되는데 필요한 평균 자속밀도(Flux Density)는 19.8-22.7 Gauss 이다. [7]

3.3 자속집속기

자속집속기의 구성도는 그림 4에 나타난 바와 같이 자속집속기의 상하 부분이 영구자석의 아래위에 장착되며 영구자석은 부식 방지를 위하여 비자성체인 STS304을 레이저용접을 이용하여 밀봉된다. 자속집속기의 재료는 자로의 원활한 소통을 위하여 자성체 재료인 STS430을 이용한다. 자속집속기 끝부분의 바깥쪽으로 자력선이 쏠리는 것을 방지하기 위하여 둥글게 가공하며 자속집속기 끝부분의 안쪽은 구부려서 자속집속기의 중앙으로 자력선이 밀집할 수 있도록 설계하였다.

이때 비자성체인 STS304의 상대투자율은 1.04이하가 되어야 하며 자성체인 STS430의 포화자속밀도는 1.6T이상이어야 한다. 만약 이러한 재료적 특성을 만족하지 못하면 자력선의 분포에 이상이 생겨 자속집속기에 요구되는 자속분포를 얻을 수 없다.

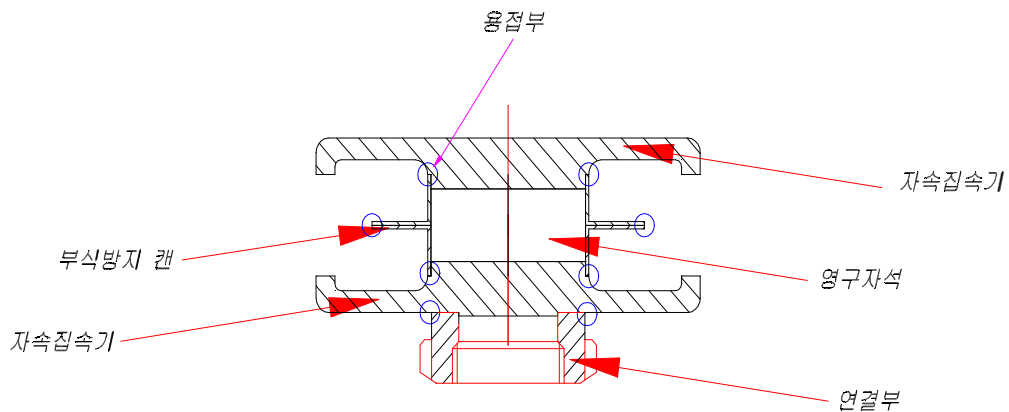


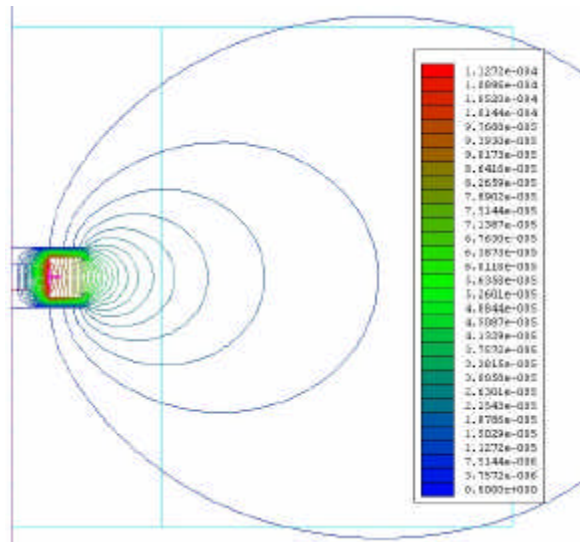
그림 4 자속집속기 구성도

그림 5는 영구자석을 안에 넣고 캔 용접을 실시하여 제작한 자속집속기의 실제 사진이다.



그림 5 자속집속기가 장착된 영구자석 사진

그림 6은 전자기 해석 프로그램 Maxwell을 이용하여 자속집속기에 대하여 2D 해석을 수행한 그림이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 대부분의 강력한 자속이 자속집속기의 상하부 날개 사이에 몰려서 분포된다. 따라서 영구자석과 나란히 위치한 부분에 상대적으로 높은 자력선이 형성되므로 영구자석과 같은 높이에 설치된 리드스위치가 확실하게 닫힌다. 또한 자력선을 영구자석의 중앙으로 집중하게 하므로 리드스위치에 영향을 주는 자력선의 상하영역을 좁게 하는 효과를 가져온다. 자속집속기를 이용하면 영구자석의 크기를 조절하지 않고 자속집속기의 크기를 손쉽게 바꿔서 원하는 자력영역을 얻을 수 있는 장점도 있다.



실험치와 계산치가 거의 일치함을 알 수 있고 자속분포의 넓이는 실험치가 약간 작음을 알 수 있다. 전체적인 실험결과 해석에 의해 설계 제작된 자속집속기는 자속집속 기능을 충분히 발휘하고 있음을 검증되었다. 또한 해석결과가 실험치와 잘 일치하므로 다른 모양의 자속집속기 설계시 전자기 해석이 유용한 도구임을 확인하였다.

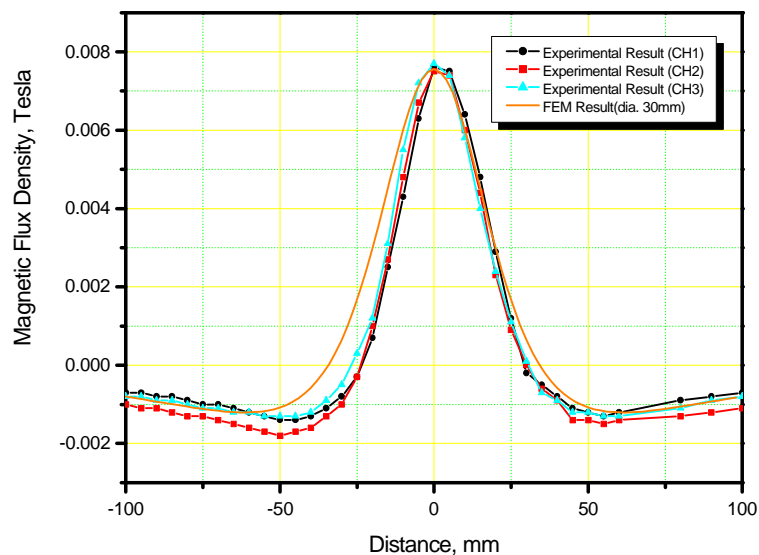


그림 7 리드스위치 설치 선상에서 자속분포

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 영구자석에 자속집속기를 설치하여 자속을 영구자석의 중심으로 분포시키며 리드스위치에 영향을 미치는 자속영역을 조절할 수 있음을 보였다. 따라서 자속집속기를 이용하여 위치지시기를 설계 제작하면 정확성과 신뢰성이 향상되리라 사료된다.

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, “Development of Linear Pulse Motor Type Control Element Drive Mechanism for SMART”, International Conference on Nuclear Engineering, ICONE9-No.318, 2001
- [3] 유제용 외 다수, SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계, pp. 105, '99 추계 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] 유제용 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기에서 영구자석과 리드스위치의 배치, 2001년 추계원자력학술발표회 요약집, 2001