

## SMART 제어봉 위치지시기에 쓰이는 리드스위치의 자기장 및 히스테리시스 분석

### Analysis of Magnetic Field and Hysteresis of Reed Switches for Control Rod Position Indicator of SMART CEDM

유제용, 김지호, 허형, 김종인, 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 위치지시기의 반복위치 정밀도에 영향을 미치는 인자가 바로 리드스위치의 히스테리시스 임이 밝혀졌다. 따라서 영구자석의 진행방향 및 위치에 따른 리드스위치의 히스테리시스에 대해 분석하고 이 결과를 위치지시기 설계에 반영하였다. 본 논문에서는 전자기해석을 이용한 설계방법과 위치지시기 성능에 영향을 미치는 리드스위치의 히스테리시스 특성에 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 hysteresis of reed switches is one of the important factors in a repeat accuracy of control rod position indication. In this study, the hysteresis of reed switches is introduced and the design method using the magnetic analysis of reed switches 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 리드스위치의 히스테리시스 영향이 위치지시기의 반복 정확도에 큰 영향을 미치기 때문에 위치지시기에 사용하는 리드스위치에 대한 히스테리시스 분석을 통한 적절한 위치선정 작업이 필요하다. 본 논문에서는 리드스위치의 전자기해석과 히스테리시스 분석을 이용한 리드스위치 위치선정 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 리드스witch는 항상 한 개 또는 두 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.

제어봉 위치지시기의 구성부품은 크게 위치감지용 영구자석, 리드스위치 및 전기적 분압회로로 나눌 수 있다. 특히 영구자석과 리드스witch는 위치지시기의 정밀도 및 신뢰도와 관계가 있는 부품으로 제품의 선택과 배치는 매우 중요하다 [4, 5].

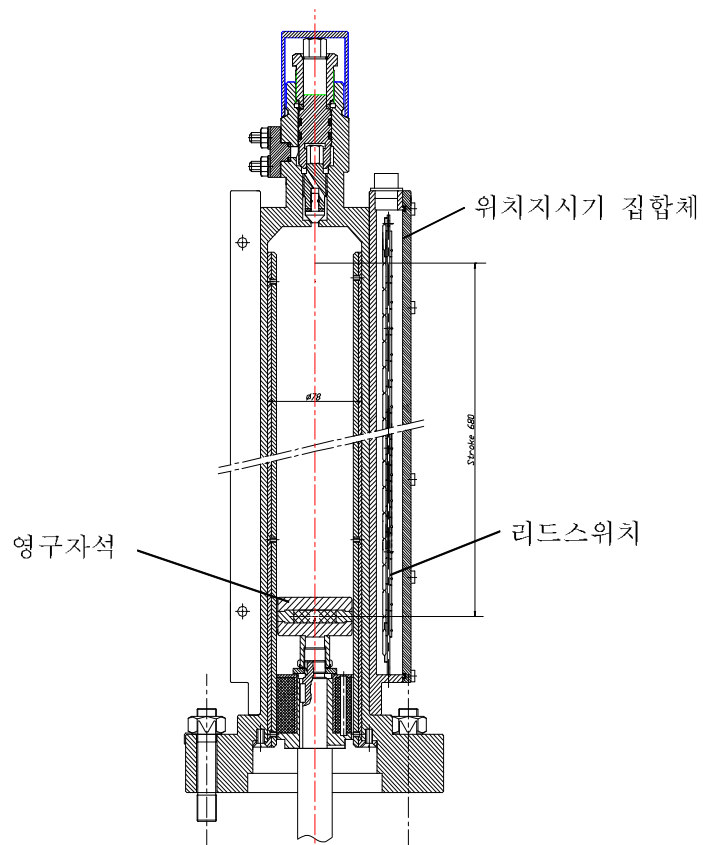


그림 1 위치지시기 장착도

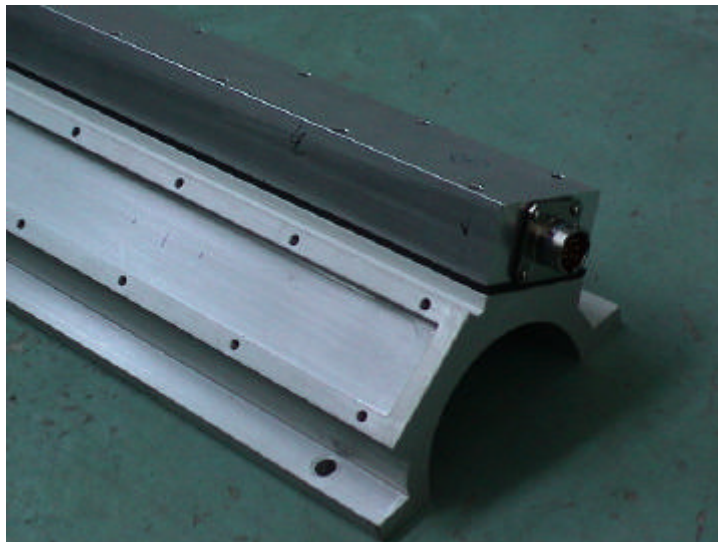


그림 2 위치지시기 알루미늄 홀더 및 위치지시기

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

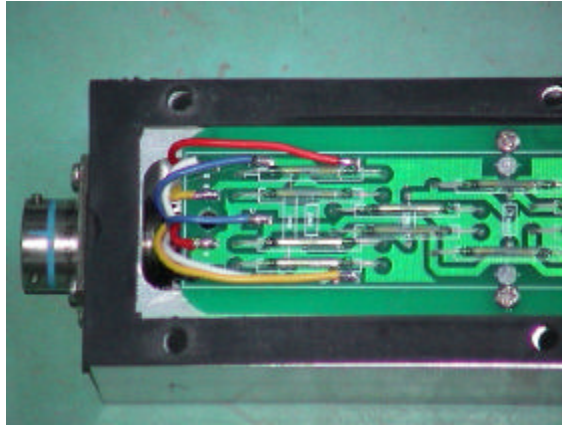


그림 3 위치지시기에 장착된 리드스위치

### 3. 리드스위치의 특성 분석

#### 3.1 리드스위치

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 ON/OFF 형태는 평상시 자기장이 없을 때에는 리드 접점이 단락되어 있다가 자기장의 영향이 있으면 리드 접점이 도통하는 형태이다.

리드스위치의 구조는 그림 4와 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.

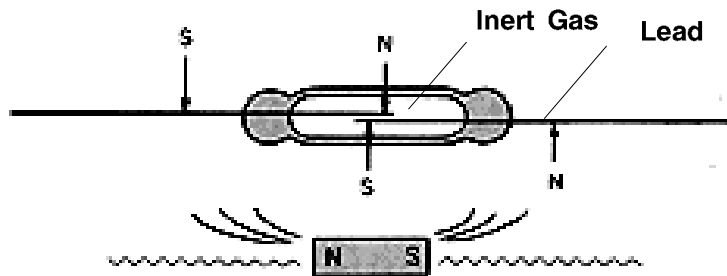


그림 4 리드스위치의 리드의 자기화

제어봉 구동축의 상단에 N-S극으로 이루어진 영구자석을 설치하여 제어봉이 상하로 움직일 때 영구자석도 같이 움직인다. 이때 영구자석이 위치하는 지점에 설치된 리드 스위치의 리드 접점은 접촉을 하게 되어 회로가 닫히게 된다. 리드스위치를 이용한 위치지시기는 제어봉 구동축을 둘러싸고 있는 상부압력용기의 바깥에 설치되는데 안쪽의 영구자석의 자기장을 최대한 이용하기 위해서 위치지시기를 상부압력용기에 근접시킨다.

CEDM 제어봉 위치지시기에 사용되는 리드스witch는 상용원전에서 그 성능이 검증된 ALEPH사의

HYR-2001을 선택한다. ALEPH사 리드스위치 HYR-2001의 상세한 치수와 제품 특성은 아래 그림 5와 표 1에 나타내었다. 그림 5에서 괄호 안의 치수는 인치 (inch) 단위이고 나머지 치수는 mm단위이다. 리드스위치의 리드는 유리진공관으로 밀봉되어 있으므로 절단 및 굽힘은 작업지침에 따라 정밀하게 작업한다. [6]

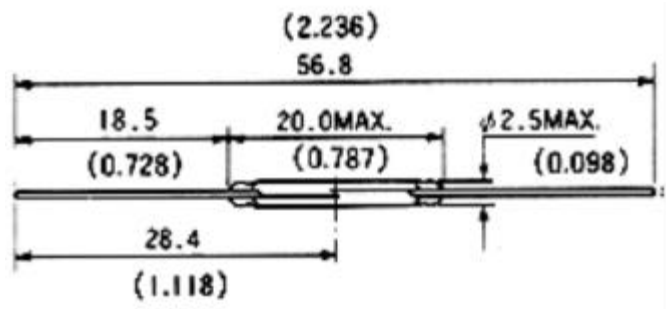


그림 5 리드스위치 HYR-2001의 제품치수

표 1 리드스위치(ALEPH HYR-2001)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 <sup>10</sup> ohms
Max. Switching current	0.5A	Typ. Resonant Frequency	3kHz
Max. Initial Contact Resistance	100m ohms	Electrical Life (Resistive loads)	10 <sup>7</sup> (5VDC, 10mA) 10 <sup>6</sup> (100VDC, 100mA)
Pull in Value (AT)	15-50	Test Coil	TC-0502
Min. Drop out Value (AT)	6	Features	General application

위 표에서 리드스위치의 리드가 단락 되는데 필요한 기자력값을 Pull In Value로 정의하고 단위는 Ampere Turn(AT)으로 나타내고 있다. 리드스위치 HYR-2001의 Pull In Value는 사용자의 요구에 따라 Type1 (15-25AT), Type2 (30-40AT) 그리고 Type3 (40-50AT) 세 가지로 세분화되어 생산되어 진다.

위치지시기는 상부압력용기 주위에 설치되며 상부압력용기 아래쪽으로 결합된 하부압력용기 주위에

는 제어봉의 긴급삽입을 위한 전자석이 설치되어 있다. 상부압력용기에 주위에 설치되는 위치지시기는 긴급 삽입용 전자석의 전자기 영향에 둔감해 질 필요가 있기 때문에 위치지시기에 사용되는 리드스위치는 HYR-2001 중에서 가장 Pull In Value가 높은 Type3 (40-50AT)을 사용한다. 이때 영구자석의 극성을 상부가 N극 하부가 S극이 되도록 하고 상부압력용기 아래쪽에 설치된 전자석은 극성이 상부가 N극 하부가 S극이 되도록 정격 입력 전류밀도( $2.3A/mm^2$ )를 인가하면 위치지시기 집합체에서 가장 아래 설치된 하부 한계스위치용 리드스위치 HYR-2001 (Type3)에 전자석의 영향이 미치지 않는다.

Ampere Turn(AT)으로 나타낸 리드스위치의 감도를 자속밀도에 대한 감도로 나타내기 위해서는 리드스위치 HYR-2001의 감도 테스트에 사용된 Test Coil TC-0502의 형상과 코일 권선수를 이용한다. Test Coil TC-0502 형상은 아래와 같다.

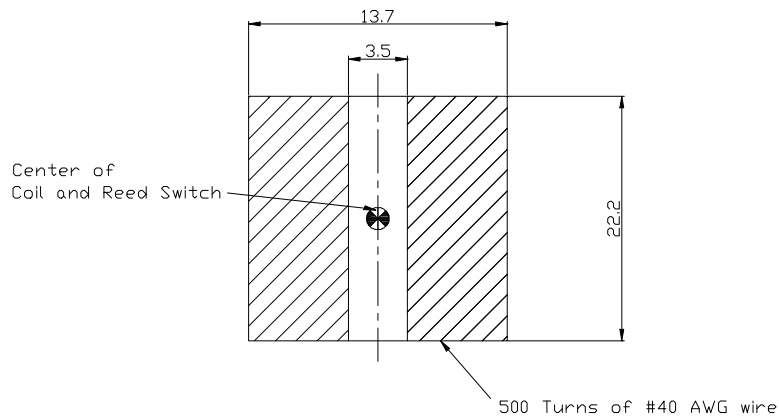


그림 6 리드스위치 테스트 코일 TC-0502의 치수

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

$$B^* = \mu_0 H 10^4 = (4\pi \times 10^{-7})(10^4)H = 0.0126 H \quad (1)$$

Here

$B^*$  : Equivalent flux density

$\mu_0$  : 진공에서의 투자율

H : Magnetic field [AT/m]

식 (1)을 다시 정리하면 아래 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

표 1에서 리드스위치 HYR-2001(Type 3)의 Pull-In 범위가 40-50 Ampere Turn이므로 이 AT 값과 그림 6에서 나타난 Test Coil TC-0502의 치수를 이용하여 리드스위치 HYR-2001(Type 3)가 단락 되는데 필요한 자속밀도(Flux density)를 아래와 같이 구할 수 있다. 그 결과 상부압력용기 내부에 있는 영구자석에 의해서 생성되는 자계(Magnetic field)가 최소한 28.38 Gauss 이상 되어야만 리드스위치 HYR-2001(Type 3)을 동작시킬 수 있다.

$$B_{low}^* = 0.0126 (40/0.0222) = 20.18 \text{ Gauss} \quad (3)$$

$$B_{high}^* = 0.0126 (50/0.0222) = 28.38 \text{ Gauss} \quad (4)$$

### 3.2 리드스위치의 전자기해석 및 히스테리시스

리드스위치의 ON/OFF 영역은 리드 양단에 작용하는 자계의 세기와 리드 자체의 탄성력의 세기에 의해 결정된다. 즉 리드스위치에 작용하는 자계의 세기가 리드탄성력 보다 크면 리드가 붙게(ON) 되며 작으면 리드가 떨어지게(OFF) 된다. 따라서 자기적 성질과 기계적 성질의 조합이 리드스위치의 성능을 결정짓는다. 하지만 리드가 떨어져 있을 때 ON 시키는 자계의 세기와 리드가 붙어 있을 때 OFF 시키는 자계의 세기가 다르게 나타나는 히스테리시스 (Hysterisis) 현상이 항상 존재하게 된다. 이러한 히스테리시스 효과는 리드스위치의 종류에 따라서 그 정도가 다르며 설령 같은 종류의 리드스위치라도 생산 일자 및 생산 라인에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 리드스위치의 히스테리시스는 위치지시기의 정확도에 영향을 미치기 때문에 위치지시기 설계 시에 고려되어야 할 사항이다.

본 논문에서는 기존에 입고되어 제작되어 있는 HYR-2001 (Type 2)에 대한 히스테리시스 시험과 전자기 해석 결과를 바탕으로 HYR-2001 (Type 3)의 히스테리시스를 예측하고 이를 이용하여 위치지시기를 설계하고자 한다.

그림 7은 네오디뮴 N35UH 영구자석(지름 30mm, 두께 10mm 원형)을 상부하우징 센터라인에 일치시키고 상하 왕복 실험을 수행하여 HYR-2001 (Type 2)에 동작영역을 도시한 그림이다. 실험에 사용된 영구자석과 자속집속기는 그림 8과 같다. 실험 결과에서 히스테리시스 현상이 약 8mm 정도 존재하는 것을 알 수 있었으며 이러한 결과는 영구자석의 상승시와 하강시에 히스테리시스 구간에서는 위치 오차가 필연적으로 발생시킨다.

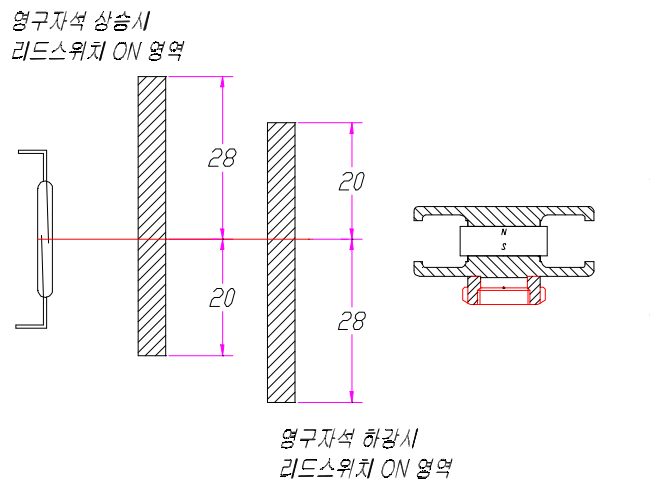


그림 7 리드스위치 HYR-2001(Type 2)의 동작 영역 실험

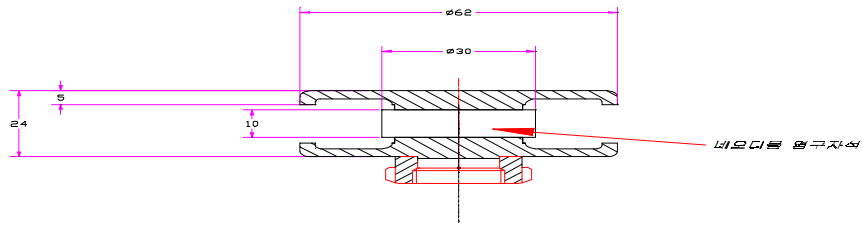


그림 8 예비 제작된 자속집속기 형태

HYR-2001 (Type 3)을 이용한 위치지시기는 전자기 해석 결과를 이용하여 정밀하게 설계를 하고 자 하므로 우선 전자기 해석의 신뢰성을 검증해야만 한다. 따라서 HYR-2001 (Type 2)에 대한 해석을 수행하고 해석결과와 실험결과를 비교하여 해석방법의 신뢰성을 입증하였다. 리드스위치 HYR-2001 (Type 2)의 Pull-In Value 범위가 30-40 Ampere Turn이므로 식(2)를 이용하면 영구자석에 의해서 생성되는 자계(Magnetic field)가 17.0 - 22.7 Gauss 이상이면 리드스위치를 동작시킬 수 있다. 리드스위치가 위치하는 곳에 해석 라인을 설정하고 리드스위치 단락에 필요한 평균 자속밀도 값 19.81 Gauss (35AT)를 기준으로 하여 실험치와 비교하였다.

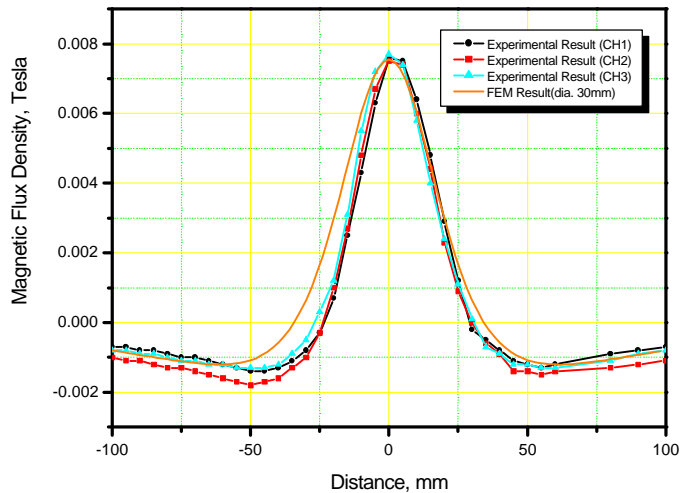


그림 9 리드스위치 설치 전상에서 자속분포

그림 9는 전자기 해석을 통해 HYR-2001 (Type 2)의 히스테리시스와 예비 제작된 자속집속기의 성능을 평가하기 위하여 실제 예비 제작된 자속집속기와 HYR-2001 (Type 2)를 이용하여 자속세기를



측정한 결과이다. 중앙에서의 최대치는 실험치와 계산치가 거의 일치함을 알 수 있었고 19.81 Gauss를 기준으로 할 때 리드스위치 동작 범위는 대략 48mm 이고 이 값은 실험치와 동일하다. 전자기해석 결과는 3개 위치지시기 채널의 위치에서 측정된 자속밀도 값과 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 위치지시기 설계시 전자기 해석이 유용한 도구임을 확인하였다.

위치지시기용 리드스위치로 선택된 HYR-2001 (Type 3)을 이용하여 모든 위치에서 리드스위치가 항상 2개 또는 1개가 단락 되도록 자속집속기를 설계하고자 한다. 자속집속기를 이용하지 않고 영구자석만으로 리드스위치를 단락 시킬 경우 영구자석으로 인한 자속밀도 분포가 광범위하게 퍼지고 중앙부근의 최대 자속밀도 값이 크지 않기 때문에 필요이상의 리드스위치가 단락되게 된다. 따라서 영구자석 중앙에서의 자속밀도 값 향상과 리드스위치를 동작시킬 수 있는 자속밀도 이상되는 범위의 축소를 위해서 자속집속기가 필요하다. 자속집속기의 설계는 Maxwell 프로그램을 이용하고 리드스위치 HYR-2001 (Type 3)의 히스테리시스는 리드스위치 HYR-2001 (Type 2)와 동일하다고 가정한다. 영구자석이 존재하는 높이에 위치하는 리드스위치가 항상 2개 또는 1개가 단락되기 위해서는 영구자석의 중심을 기준으로 리드스위치가 존재하는 위치에서 리드스위치 HYR-2001 (Type 3)의 단락영역이 20mm-40mm이 되어야 한다. 그림 10은 지름이 35mm이고 두께가 10mm인 NdFeB N35UH 영구자석을 사용하여 설계된 자속집속기의 영구자석의 중심에서 리드스위치가 존재하는 위치까지의 거리에서 자속분포를 해석한 그림이다.

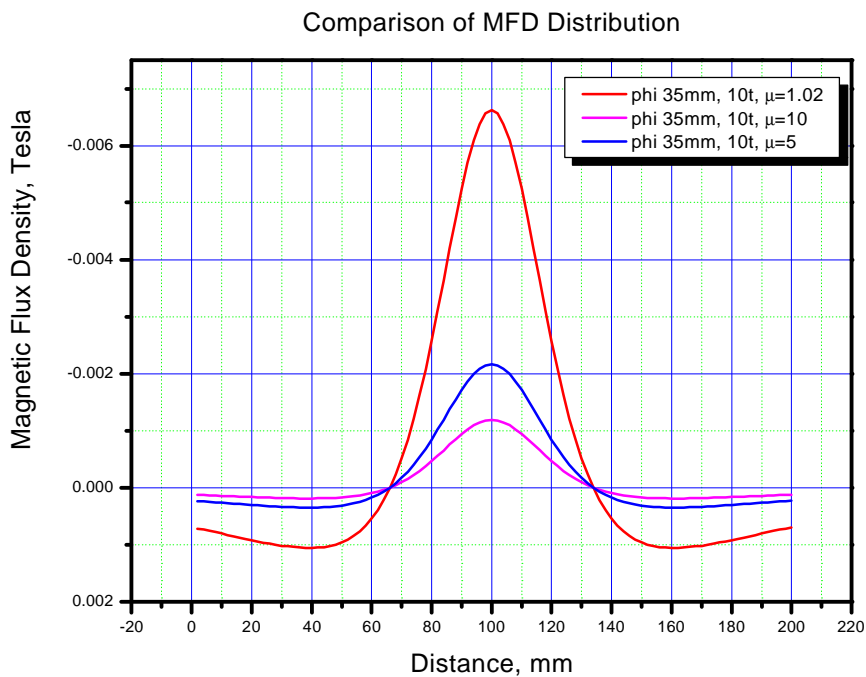


그림 10 리드스위치 위치에서 자속집속기에 의한 자속분포

해석 결과에서 알 수 있듯이 투자율이 1.02인 비자성 캔을 사용하고 리드스위치 HYR-2001 (Type 3)을 이용할 경우 단락에 필요한 28.38 Gauss 이상 되는 자속밀도 영역이 영구자석의 중심을 기준으

로 약 38mm 임을 알 수 있다. 따라서 그림 11과 같은 자속집속기와 리드스위치 HYR-2001(Type 3)을 사용할 경우 영구자석이 존재하는 위치에서 리드스위치는 항상 2개 또는 1개 단락된다.

리드스위치 HYR-2001(Type 3)의 전자기 해석 결과에 덧붙여 리드스위치 HYR-2001(Type 3)의 히스테리 일한 8mm이하

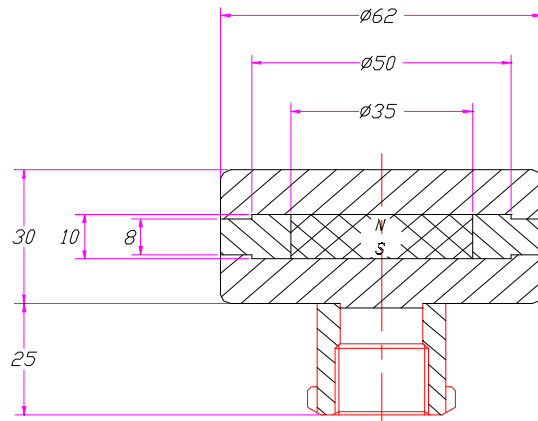


그림 11 최종 설계된 자속집속기

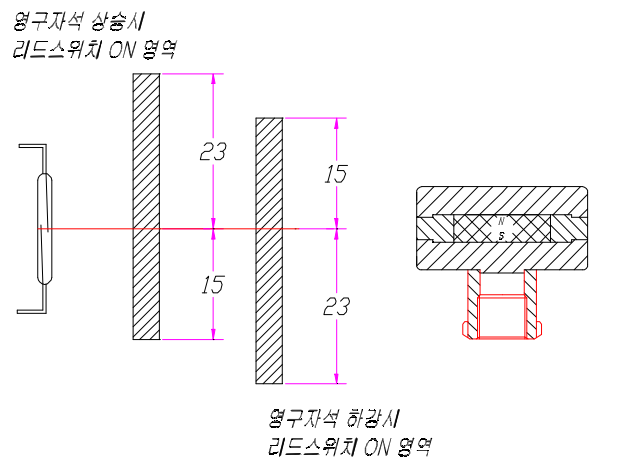


그림 12 리드스위치 HYR-2001(Type 3)의 동작영역

#### 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 전자기해석을 통해서 위치감지용 영구자석에 자속집속기를 설계하였으며 리드스위치의 성능에 영향을 미치는 히스테리시스를 분석하였다. 따라서 전자기해석과 리드스위치의 실험을 통하여 위치지시기를 설계 제작함으로써 위치지시기의 정확성과 신뢰성을 향상 시켰다.

## 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] 유제용 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기용 자속집속기 설계, 2002 춘계 원자력학술발표회, 2002
- [6] Aleph Reed Switches - Products Catalog, 1999