

리드스위치를 이용한 일체형원자로용 제어봉 위치지시기 설계 제작 및 특성해석

論文

52D-8-2

The Design, Fabrication, and Characteristic Experiment for Control Rod Position Indicator Using Reed Switch in System-Integrated Modular Advanced Reactor

許 炯* · 金 鍾 仁** · 金 建 中***

(Hyung Huh · Jong-In Kim · Kern-Jung Kim)

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 indicator 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 indicator. The hysteresis of reed switches is one of the important factors in a repeat accuracy of control rod position indicator as well. This paper investigates efficiency of the magnetic flux concentrator and the hysteresis using FEM and verified differences in physical characteristics by comparing the results of FEM and those of the experiment. As a result, it is shown that the characteristics of prototype control rod position indicator have a good agreement with the results of FEM.

Key Words : Control Rod Position Indicator Design, Reed Switch, FEM, Hysteresis, Experiment

1. 서 론

현재 개발중인 중소형 일체형원자로 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor; 이하 SMART)에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 요구된 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 측정되는 안전 계통의 신호는 높은 신뢰성과 정확성을 가져야 한다.

SMART에서 필요로 하는 위치지시기는 기존 상용로에서 쓰이는 위치지시기 형태에서 한 단계 더 진보된 성능을 가지도록 설계 제작되어야 한다.

위치지시기의 최적 설계를 위해 상용로에 쓰이고 있는 RSPT(Reed Switch Position Transmitter; 이하 RSPT) 형태의 위치지시기의 관련 기술을 기초로 SMART CEDM(Control Element Drive Mechanism; 이하 CEDM) 제어봉 위치지시기의 설계 및 제작을 수행하였다.

위치지시기의 설계 과정 중 영구자석과 리드스위치의 상

대 위치를 결정하는 작업은 위치지시기의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 적절한 계산을 통한 부품선정 작업이 필요하다.

본 논문에서는 자기장 영역을 조절하여 원하는 리드스위치에만 영향을 줄 수 있는 영구자석의 자속집속기에 대한 설계와 리드스위치의 히스테리시스 영향이 위치지시기의 반복 정확도에 큰 영향을 미치기 때문에, 히스테리시스 분석을 통한 적절한 위치선정 및 위치지시기 하부에 위치한 전자석 설치에 따르는 리드스위치의 전자기장 영향 평가에 대하여 유한요소법과 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 제어봉 위치지시기의 구조

제어봉 위치지시기는 그림 1과 같이 CEDM의 상부압력 용기 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 분압 회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 대응되는 전압신호가 출력된다.

* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博

接受日字 : 2002年 11月 27日

最終完了 : 2003年 6月 17日

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.

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

제어봉 위치지시기의 구성부품은 크게 위치감지용 네오디뮴 영구자석, ALEPH사의 HYR-2001 리드스위치 및 전기적 분압회로로 나눌 수 있다. 여기서 특히 영구자석과 리드스위치는 위치지시기의 정밀도 및 신뢰도와 관계가 있는 부품으로 제품의 선택과 배치는 매우 중요하다.

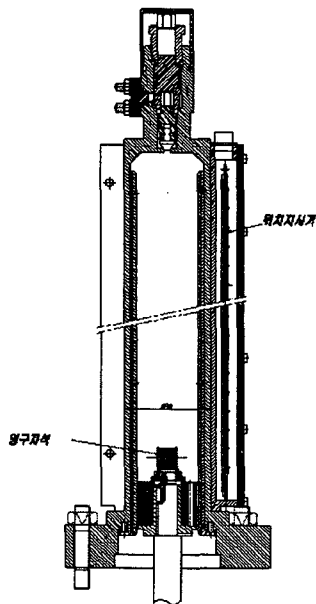


그림 1 위치지시기 장착도
Fig. 1 Cross-sectional front view of CRPI

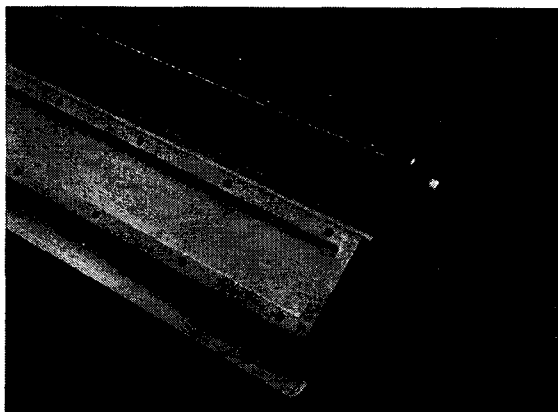


그림 2 위치지시기 알루미늄 홀더 및 위치지시기
Fig. 2 Photograph of the control rod position indicator

위치지시기는 상부압력용기 주위에 설치되며 상부압력용기 아래쪽으로 결합된 하부압력용기 주위에는 제어봉의 긴급삽입을 위한 전자석이 설치된다.

상부압력용기에 주위에 설치되는 위치지시기는 긴급 삽입용 전자석의 전자기 영향에 둔감해 질 필요가 있기 때문에 위치지시기에 사용되는 리드스위치는 HYR-2001(Type 1) 중에서 Pull-In 범위가 23~32AT을 사용한다. 이 때 영구자석의 극성을 상부가 N극, 하부가 S극이 되도록 하고 상부압력용기 아래쪽에 설치된 전자석은 극성이 상부가 N극, 하부가 S극으로 순방향인 되도록 정격 입력 전류밀도 (2.3A/mm²)를 인가하면, 위치지시기 집합체에서 가장 아래 설치된 하부 한계스위치용 리드스위치에 전자석의 영향이 미치지 않는다.

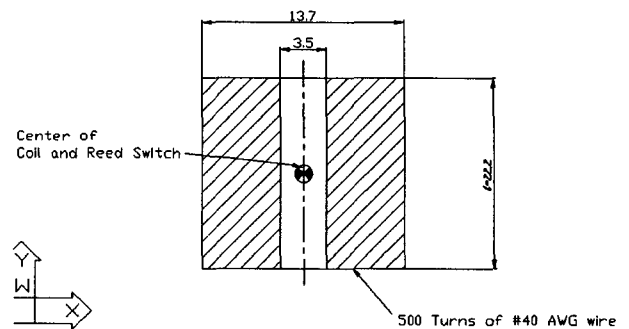


그림 3 리드스위치 테스트 코일 TC-0502의 치수
Fig. 3 Configuration of reed switch test coil(TC-0502)

중심점에서의 자속밀도는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$B^* = \mu_0 H 104 = (4\pi \times 10^{-7})(104)H$$

$$= 0.0126 H = 0.0126 \left(\frac{NI}{l} \right) \text{ [Gauss]}$$

리드스위치 HYR-2001(Type 1)의 Pull-In 범위가 23~32AT이므로, 이 AT값과 그림 3에서 나타난 Test Coil TC-0502의 치수를 이용하여 리드스위치 HYR-2001(Type 1)이 단락되는데 필요한 자속밀도를 아래와 같이 구할 수 있다. 그 결과 상부압력용기 내부에 있는 영구자석에 의해서 생성되는 자속밀도가 최소한 18.45 Gauss 이상 되어야만 리드스위치를 동작시킬 수 있다.

$$B^*_{low} = 0.0126 (23/0.0222) = 13.26 \text{ Gauss}$$

$$B^*_{high} = 0.0126 (32/0.0222) = 18.45 \text{ Gauss}$$

각 CEDM에는 4대의 RSPT가 독립적으로 설치된다. 압력용기 내부의 연장봉 상부에는 제어봉과 함께 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있으며, 이 영구자석의 위치에 비례하여 압력용기 외벽에 설치된 RSPT는 계단식 아날로그 전압신호를 출력한다.

위치지시기는 제어봉의 위치를 20mm 간격으로 감지할 수 있도록 설계되어 있으며, 운전중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 단락된다.

위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 그림 4의 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 합당되는 전압신호가 출력된다.

4개의 RSPT는 2개가 한 조가 되어 알루미늄으로 제작된 2개의 위치지시기 홀더에 각각 장착되며, 이 위치지시기 홀더는 압력용기 외벽을 감싸는 형태로 장착된다.

입력전원은 15 VDC, 출력전원은 영구자석의 위치(제어봉의 위치)에 따라 5.0V에서 10V 까지 변하며, 영구자석이 20mm 이동시마다 0.05V의 전압변동이 발생한다. 이는 이웃 리드스위치 사이의 전압변동량이 0.05V 임을 의미한다. 이러한 전압 변동량 및 각 위치에서 출력되는 전압값은 아래 식과 같은 분압회로식에 의해서 계산된 것이다.

$$V_o = \frac{R_{\text{⑤}} + R_{\text{⑦}} \times (\text{단락된 리드스위치의 스텝})}{R_{\text{⑤}} + R_{\text{⑥}} + 101 \times R_{\text{⑦}}} \cdot V_{in}$$

이 때 전압변동은 리드스위치 사이의 저항값에 따라 달라지며, 그라운드에 연결된 5번 저항값은 $1000 \Omega \pm 0.25\%$, 6번은 $990 \Omega \pm 0.25\%$, 7번은 $10 \Omega \pm 0.25\%$ 의 저항이 설치된다.

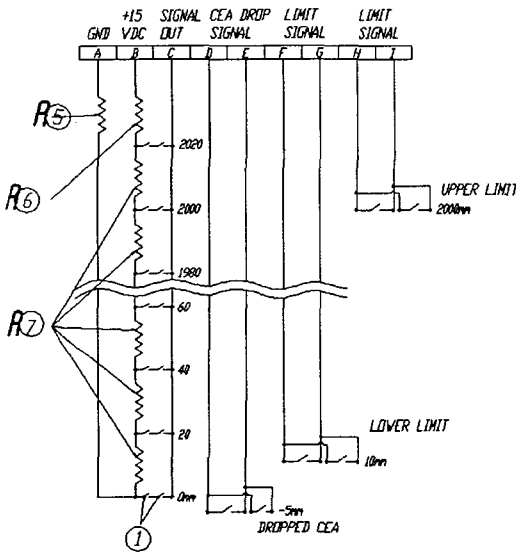


그림 4 위치지시기의 위치검출 분압회로
Fig. 4 The structure of voltage divider for CRPI

2.2 영구자석 형태 결정을 위한 2차원 해석모델

영구자석의 적절한 선택을 위해서는 자극배치에 따른 자속밀도 분포를 파악하는 것이 중요하다.

자극 배치는 그림 3과 같이 3가지 형태에 대해서 자기장 해석을 수행하였다[4].

리드스위치가 위치하는 곳에 해석선을 정의하고 그 곳의 자속밀도의 크기를 계산하기 위하여 그림 1과 같이 원통형 형태로 좌우 대칭이기 때문에 1/2-축대칭 모델을 그림 6, 그림 7과 같이 설정하고 Maxwell S/W를 사용하여 계산하였다.

표 3은 영구자석 (a), (b)형의 해석시 사용된 설계 파라미

터와 변수들이며 그림 6은 2차원 해석모델이다.

그림 7은 영구자석 (c)형의 2차원 해석모델로 XY-plane에 depth만을 입력하여 모델링하였고, 리드스위치 위치에 해석선 AB를 정의하여 자속밀도크기를 계산하였다.

표 4는 해석에 사용된 파라미터와 변수들이다.

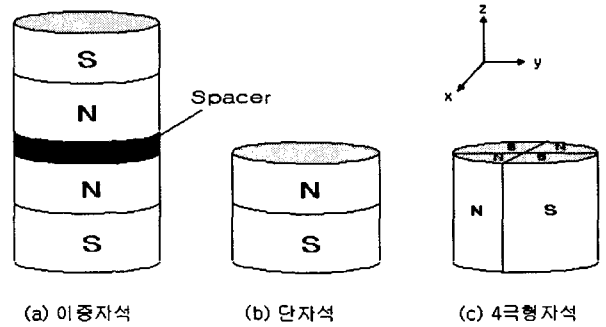


그림 5 영구자석 형태
Fig. 5 The typical magnetized orientation of permanent magnet

표 1 영구자석 (a), (b)형 해석 사양
Table 1 The FEM condition of permanent magnet type(a) & (b)

번호	항목	치수 [mm]	재질
1	영구자석	외경	NdFeB
		높이	
2	Spacer, (a)형	외경	STS430
3	압력용기	내경	STS321
		외경	
4	RSPT 동작점에서 요구되는 자계의 세기, Gauss	18	Tangent 성분
5	축공극, mm	1.5	공기

표 2 영구자석 (c)형 해석 사양
Table 2 The FEM condition of permanent magnet type(c)

번호	항목	치수 [mm]	재질
1	영구자석	외경	NdFeB
		높이	
2	압력용기	내경	STS321
		외경	
3	RSPT 동작점에서 요구되는 자계의 세기, Gauss	18	Tangent 성분
4	축공극, mm	1.5	공기

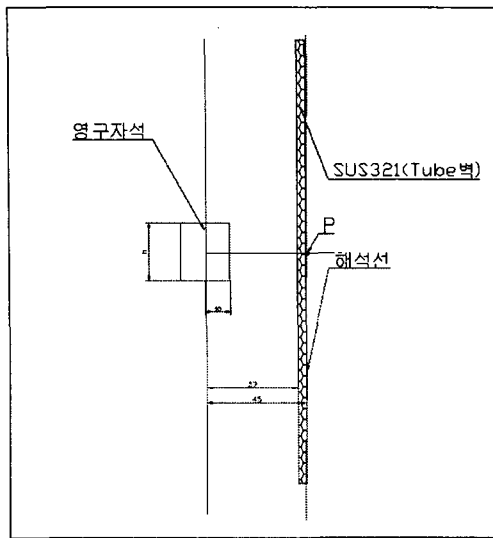


그림 6 단자석형 해석모델
Fig. 6 FEM model for single-PM CRPI

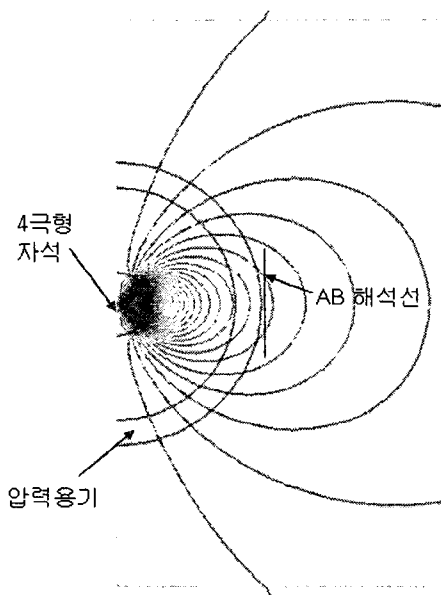


그림 7 4극형 배열 해석모델
Fig. 7 FEM model for 4 pole-PM CRPI

FEM 해석 결과 그림 8은 그림 5(a)의 이중자석형에 따른 자속밀도 분포도로 스페이스가 있는 경우가 없는 경우보다 약 10 Gauss 높게 계산되었으며, 스페이스의 높이를 조절하여 리드스위치의 동작점에서의 자속밀도값을 조정 가능함을 알 수 있다.

그림 9와 10은 그림 5(b), 5(c)의 영구자석 형태에 따른 자속밀도 분포도이다.

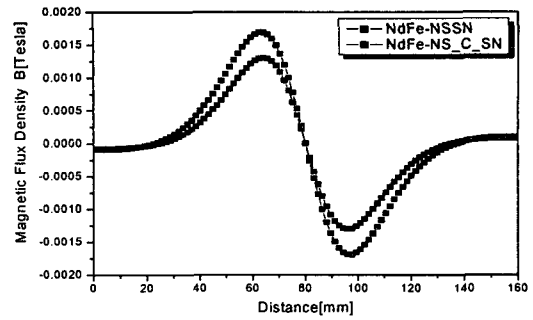


그림 8 이중자석(NS-SN)배열시 스페이스 유무에 따른 자속밀도분포
Fig. 8 Magnetic flux density distribution to 2 pole-PM with NS-SN arrangement and spacer

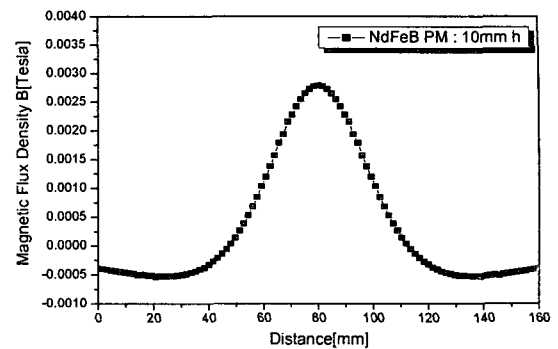


그림 9 단자석 배열시 자속밀도분포
Fig. 9 Magnetic flux density distribution to single PM

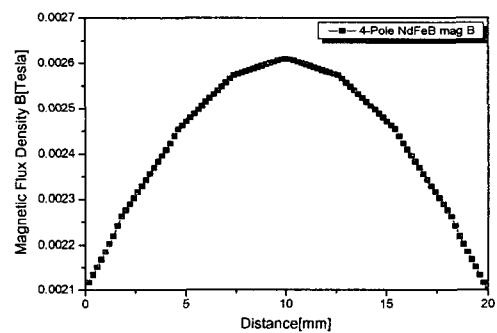


그림 10 4극형 영구자석의 자속밀도분포
Fig. 10 Magnetic flux density distribution to 4 pole-PM

자속밀도 분포도로 스페이스가 있는 경우가 없는 경우보다 약 10 Gauss 높게 계산되었으며, 스페이스의 높이를 조절하여 리드스위치의 동작점에서의 자속밀도값을 조정 가능함을 알 수 있다.

그림 9와 10은 그림 5(b), 5(c)의 영구자석 형태에 따른 자속밀도 분포도이다.

그림 8, 9, 10과 같이 각 영구자석 형태별 자기장 해석결과 얻어진 내용을 정리하면 다음과 같다.

표 3 영구자석 형태별 특성

Table 3 Characteristics of selected PM

이중자석형 영구자석	단자석형 영구자석	4극형 영구자석
자속밀도가 낮고 대역폭이 좁음	자속밀도가 높고 대역폭이 넓음	자속밀도가 낮고 대역폭이 좁음
영구자석 높이가 큼	영구자석 높이가 작음	영구자석 높이가 작음
영구자석 sizing 복잡	영구자석 sizing 단순	영구자석 sizing 복잡

그림 5(a)의 영구자석의 경우 리드스위치가 한 개 또는 두 개 항상 단혀져 있는 20mm의 대역폭을 얻으려면, 영구자석 높이가 상대적으로 커야하지만, 원하는 분해능을 얻기가 힘들며, 그림 5(c)의 영구자석의 경우 영구자석의 측면 뿐만 아니라 상, 하단부에도 복잡한 형태의 자장이 형성되어 원하는 곳에 자장을 집속하기가 어렵다.

그림 5(b)의 영구자석의 경우 대역폭이 넓고 자장 형태가 단순하므로 Field Concentrator(이하 자속집속기)를 사용하여 원하는 곳에 자장을 집속시킬 수 있기 때문에 유리함을 알 수 있다.

그림 11은 해석 결과의 한 예로 등자속선 분포를 나타내며 이 때 리드스위치 설치선에서 자속밀도 분포를 구하였다.

그림 12는 영구자석의 높이를 10mm 씩 증가시키면서, 리드스위치의 위치에서 자속밀도를 계산한 것으로 자속밀도 최고점이 28 Gauss에서 95 Gauss 까지 분포함을 알 수 있다.

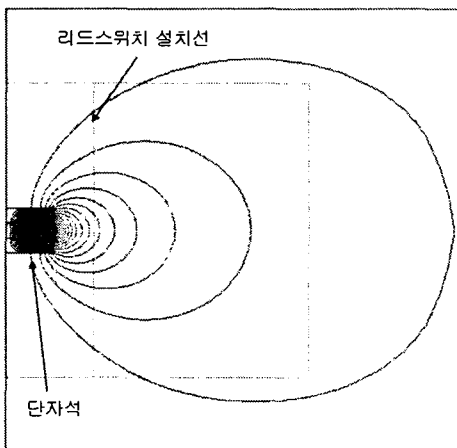


그림 11 등자속선 분포도
Fig. 11 Equipotential line to single PM type

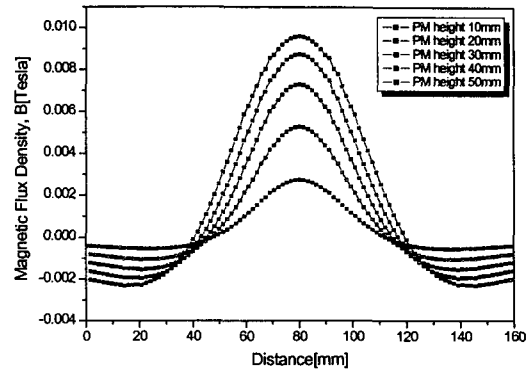


그림 12 영구자석 높이별 자속밀도분포
Fig. 12 Comparison of magnetic flux density in various single PM height

그림 13은 그림 12를 정리한 것으로 영구자석 높이에 따른 최대 자속밀도값이며, 그림 14는 이 때의 동작점의 넓이를 계산한 것이다.

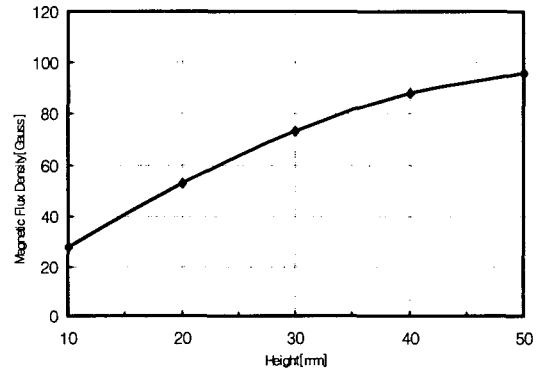


그림 13 영구자석의 높이에 따른 자속밀도변화
Fig. 13 Effect of magnetic flux density on various single PM height

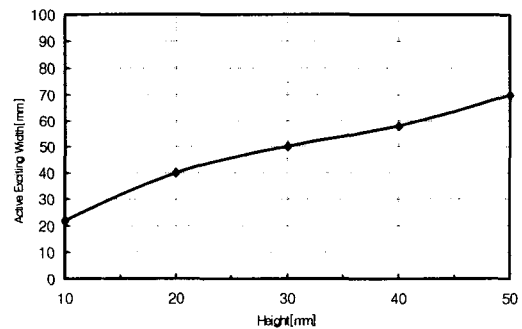


그림 14 영구자석 높이에 따른 동작점의 넓이
Fig. 14 Comparison of operating region in various single PM height

2.3 자속집속기의 설계

그림 15와 같이 자속집속기는 기존의 영구자석만으로 구성할 때 나타나는 축방향 동작점, 즉 리드스위치를 단락시킬 수 있는 축방향 범위의 좁음을 인위적으로 자로를 집중시켜 축방향 동작점의 범위를 증가시키는 역할을 한다[6].

그림 16은 자석의 크기는 동일하고 자속집속기의 장착 유무에 따른 자속밀도 분포를 예를 들면, 자속밀도가 10 Gauss 지역에서의 자속집속기는 동작점 넓이는 약 1.5배와 최대 자속밀도값을 2배 이상 증가시키음을 알 수 있다.

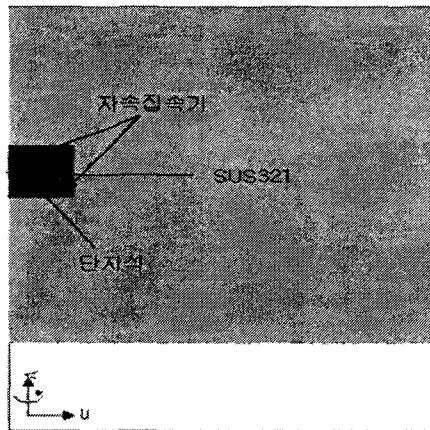


그림 15 자속집속기 해석모델
Fig. 15 FEM model for field concentrator

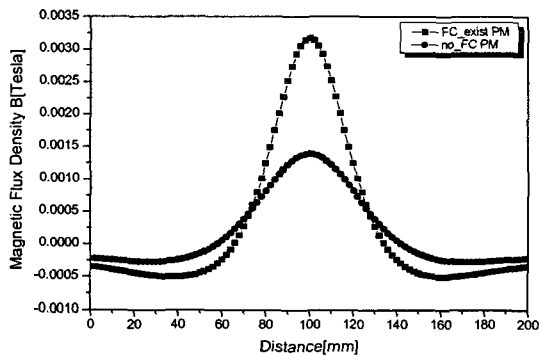


그림 16 Field Concentrator 유무에 따른 자속밀도 분포
Fig. 16 Comparison of magnetic flux density with or without field concentrator

그림 17과 같은 여러 가지 형태의 자속집속기에 대해서도 자속밀도 분포를 평가하였다.

그림 17(a)는 자속집속기의 축기둥 두께는 5mm이고, 날개 두께는 3mm이며, 그림 16(b)는 축기둥 두께는 7mm, 날개 두께는 5mm이다.

이 두 형태는 자료가 포화될 때 어떤 영향을 미치는가를 확인하기 위하여 선택하였고, 그림 16(c)는 자속집속기 날개 부분을 구부려서 집중시킬 때의 영향을 평가하였으며, 그림

16(d)는 자속집속기 하단부에 연결된 연장봉 구조재의 영향을 평가하였다.

그림 17은 그림 16에 나타난 4개의 모델에 대하여 자속밀도를 계산한 결과로 그림 16(c)의 형태가 가장 성능이 우수하게 나타났으며 자속집속기 하부의 연장봉 구조재의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

또한 자속집속기의 날개 두께가 3mm와 5mm 일 때의 영향평가 결과도 약 5 Gauss 정도로 그림 16(c)의 형태와 비교해서 차이가 많음을 알 수 있다.

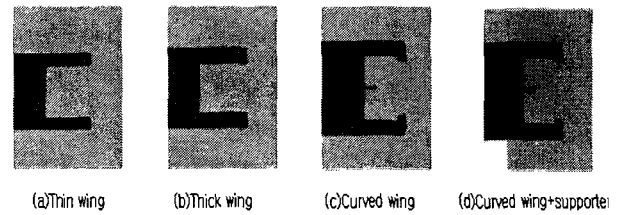


그림 17 자속집속기의 여러 형태
Fig. 17 Various types of field concentrator

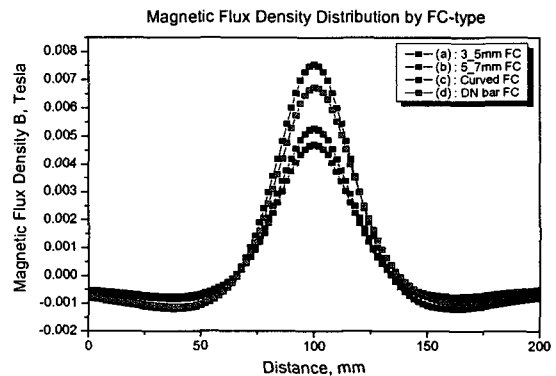


그림 18 자속집속기 형태별 자속밀도분포
Fig. 18 Effect of magnetic flux density distribution on various types of field concentrator

2.4 리드스위치와 전자석간의 상호 전자기장 영향 평가

제어봉 위치지시기 구조물 하부에는 제어봉의 신속한 삽입을 위하여 전자석이 설치되어 있으며 운전중에는 항상 직류전원이 인가되어 있다.

ALEPH사의 HYR-2001은 평균적인 Pull-In 범위가 23~32 Ampere-turn이므로, 리드스위치 HYR2001 위치에서 상부압력용기 내부에 있는 영구자석에 의해서 생성되는 자속 밀도는 최소한 18.45 Gauss 이상 되어야 동작된다.

그러나, 하부에 설치된 전자석의 극성에 따라 리드스위치용 영구자석과 상호 결합하여 리드스위치에 전자기장 영향을 주므로 그림 19와 같이 실제 제작한 치수로 모델링을 하여 평가하였다.

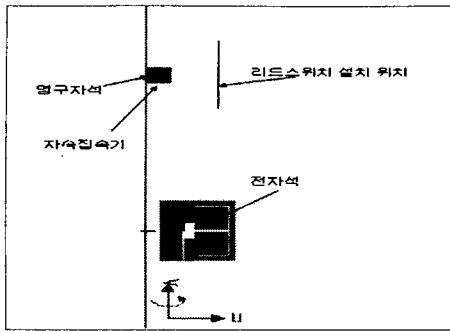


그림 19 해석모델
Fig. 19 FEM model for EMI between PM and electromagnet

영구자석과 전자석의 극성이 순방향인 경우 그림 20, 21과 같이 영구자석의 도움으로 18 Gauss 이상의 지역 분포가 보다 넓어짐을 알 수 있다.

또한, 하부 한계스위치용 리드스위치가 있는 지역은 항상 18 Gauss 이상(ON 상태)으로 스위치로서 역할을 하지 못함을 알 수 있다.

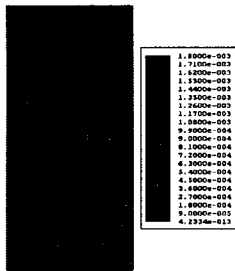


그림 20 순방향 경우
(1.5A/mm²)
Fig. 20 Forward path

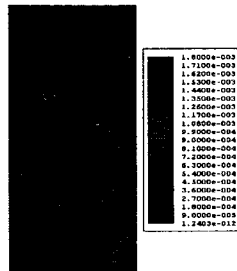


그림 21 순방향 경우
(2.3A/mm²)
Fig. 21 Forward path

영구자석과 전자석의 극성이 역방향인 경우 그림 22, 23과 같이 영구자석의 반발력을 받아 18 Gauss 이상의 지역 분포가 다소 작아짐을 알 수 있으나, Rod Drop 스위치용 및 하부 한계스위치용 리드스위치가 있는 지역은 여전히 18 Gauss 이상(ON 상태)로 스위치로서 역할을 하지 못함을 알 수 있다.

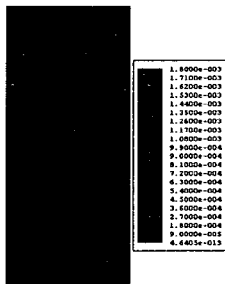


그림 22 역방향 경우
(1.5A/mm²)
Fig. 22 Reverse path

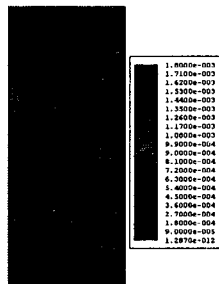


그림 23 역방향 경우
(2.3A/mm²)
Fig. 23 Reverse path

그림 24와 25는 전자석 하우징 상단으로부터 해석선의 높이를 증가시키면서 전자석과 영구자석간의 상호 간섭을 평가하기 위하여 작성된 도표로, 전자석의 상부 표면에서 Rod Drop 스위치용 리드스위치가 위치한 거리는 x-축으로 60mm, y-축으로 140mm 근방이다.

리드스위치 동작에 영향을 주는 영역에서 영구자석의 극성에 따라 최대 자속밀도값이 약 60 Gauss 정도 차이가 있음을 알 수 있다.

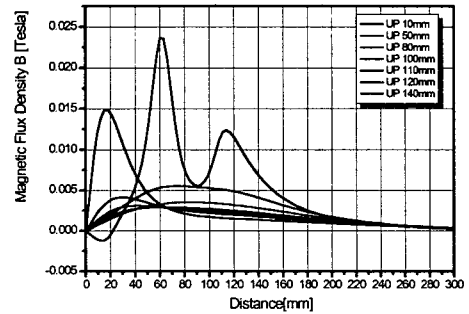


그림 24 순방향시 자속밀도분포도(1.5A/mm²)
Fig. 24 Magnetic flux density distribution under forward path(1.5A/mm²)

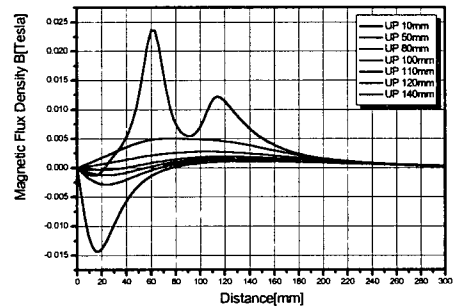


그림 25 역방향시 자속밀도분포도(1.5A/mm²)
Fig. 25 Magnetic flux density distribution under reverse path(1.5A/mm²)

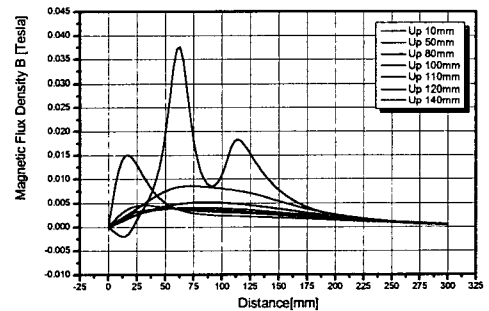


그림 26 순방향시 자속밀도분포(2.3A/mm²)
Fig. 26 Magnetic flux density distribution under forward path(2.3A/mm²)

그림 26은 전자석의 요구추력 증가로 인하여 인가 전류밀도를 $1.5\text{A}/\text{mm}^2$ 에서 $2.3\text{A}/\text{mm}^2$ 으로 증가시켰을 때 해석선에서의 자속밀도 분포로 기존 보다 약 20Gauss 정도 높이가 되었다.

해석결과 하부 한계스위치로써 리드스위치의 역할은 전자석의 입력 전류밀도가 $1.5\text{ A}/\text{mm}^2$ 와 $2.3\text{ A}/\text{mm}^2$ 에서 리드스위치 동작점인 18 Gauss를 모두 초과하는 것으로 평가되어 작동하지 못함을 자기장 해석을 통하여 알 수 있었다.

해결방안으로는 하부 한계스위치의 높이를 상승시키는 방법과 리드스위치의 동작점 범위가 40~50Gauss 범위인 ALEPH사의 HYR-2001 (Type 3)를 사용하는 것이 바람직하다.

2.5 리드스위치의 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 (Hysteresis) 현상이 항상 존재하게 된다.

이러한 히스테리시스 효과는 리드스위치의 종류에 따라서 그 정도가 다르며 설명 같은 종류의 리드스위치라도 생산일자 및 생산 라인에 따라 달라질 수 있다.

그러므로 리드스위치의 히스테리시스는 위치지시기의 정확도에 영향을 미치기 때문에 위치지시기 설계 시에 고려되어야 할 사항이다.

그림 27은 네오디뮴 N35UH 영구자석(지름 30mm, 두께 10mm 원형)을 상부하우징 센터라인에 일치시키고 상하 왕복 실험을 수행하여 HYR-2001에 동작영역을 도시한 그림이다.

실험에 사용된 영구자석과 자속집속기는 그림 28과 같다.

실험 결과에서 히스테리시스 현상이 약 8mm 정도 존재하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 영구자석의 상승시와 하강시에 히스테리시스 구간에서는 위치 오차가 필연적으로 발생시킨다.

이를 위하여 우선 HYR-2001에 대한 FEM해석을 수행하고, 해석결과와 실험결과를 비교, 검토하기 위하여 Pull-In 범위가 Type 1보다 좀 더 높은 30~40 Ampere-Turn인 HYR-2001 (Type 2)를 이용하였다.

식(1)을 이용하여 동작점의 자속밀도는 17.0~ 22.7 Gauss 이상이면 리드스위치를 단락시킬 수 있다.

리드스위치가 위치하는 곳에 해석 라인을 설정하고, 리드스위치 단락에 필요한 평균 자속밀도 값 19.81 Gauss를 기준으로 하여 실험치와 비교하였다.

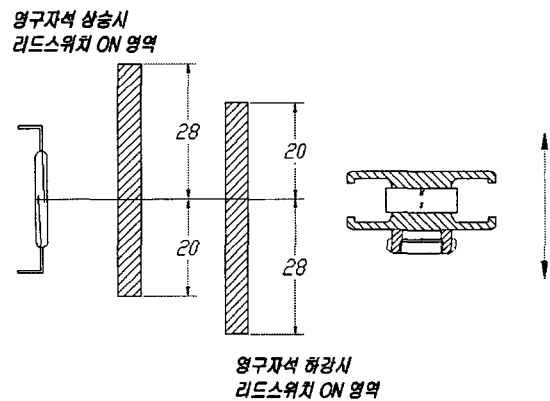


그림 27 HYR-2001(Type 2)RW의 동작 영역 실험
Fig. 27 Apparatus for measurement of reed switch (HYR-2001, type 2) operating region

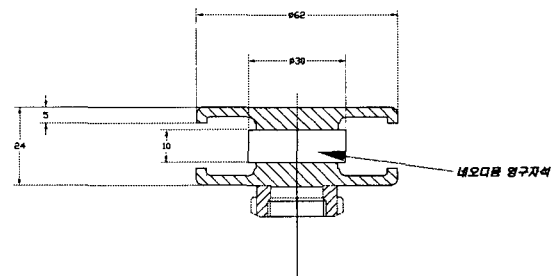


그림 28 예비 제작된 자속집속기 형태
Fig. 28 The structure of filed concentrator

그림 29는 FEM 해석을 통해 HYR-2001 (Type 2)의 히스테리시스와 예비 제작된 자속집속기의 성능을 평가하기 위하여 실제 예비 제작된 자속집속기와 HYR-2001 (Type 2)를 이용하여 자속밀도를 측정 한 결과이다.

중앙에서의 최대치는 실험치와 계산치가 거의 일치함을 알 수 있으며, 19.81 Gauss를 기준으로 할 때 리드스위치 동작 범위는 대략 48mm 입을 알 수 있고, 이 값은 실험치와도 일치함을 알 수 있다.

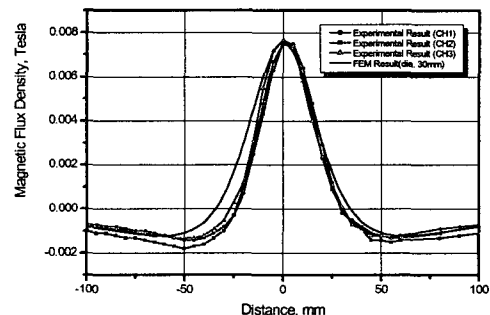


그림 29 리드스위치 설치 선상에서 자속밀도분포
Fig. 29 FEM result of MFD distribution at reed switch region to CRPI with field concentrator

또한, FEM 해석 결과는 3개 위치지시기 채널의 위치에서 측정된 자속밀도 값과도 잘 일치함을 알 수 있다.

2.6 시제품 위치지시기의 실험 결과

그림 4와 같은 분압회로에 의해 위치지시기가 제작되었을 때 20mm 간격마다 출력되는 전압값을 계산한 결과이다. 매 20mm 간격 중간에서 바뀌는 출력전압 신호는 리드스위치가 1개 붙는 영역에서의 출력전압이다.

그림 30은 영구자석 위치에 비례하는 출력전압 계산치의 그래프이다. 모든 제어봉 행정거리 구간 안에서 선형적으로 위치지시기 출력전압이 비례하여 출력되는 것을 알 수 있다.

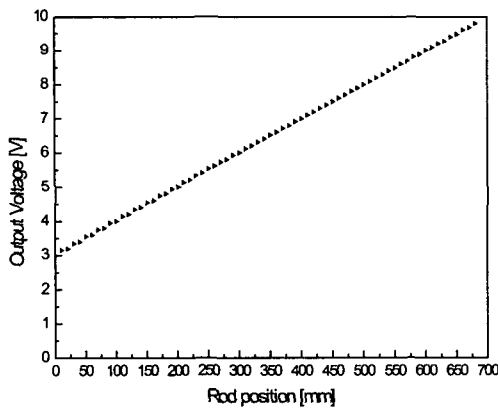


그림 30 위치지시기 출력 전압 분도표
Fig. 30 Experimental result for voltage output from prototype CRPI

3. 결 론

일체형원자로 SMART의 제어봉구동장치에 장착되는 리드스위치형 위치지시기 설계와 관련하여 전자기 FEM 해석을 수행하였다. 이 해석을 위하여 전자석을 2차원 등가모델로 기능상 요구조건과 공간제약 조건 내에서 이용 가능한 각 설계변수들에 대하여 최적 동작점 영역을 계산하였다.

해석결과 압력용기 외벽면에 설치될 리드스위치를 단락시키기 위하여 사용된 네오디뮴 영구자석의 Hc는 11.5 kOe, Br은 1.2 Tesla, 최대 에너지적, (BH)max는 33 MGOe 이상이어야 한다.

리드스위치 동작점의 넓이에 대한 평가에 있어서는 영구자석의 높이가 커짐에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있었다. 또한 동작점의 자속밀도 값도 영구자석의 높이가 커짐에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있었다.

영구자석과 전자석의 상호영향으로 인한 하부 한계스위치의 동작평가에서는 현재 결정된 구조물의 설계치수에서는 항상 ON됨을 알 수 있다. 즉, 영구자석과 전자석의 역방향 시 더 작은 Gauss로 동작 가능하지만 하부 한계스위치의 ON/OFF 동작에는 일관성이 없음을 알 수 있었다.

해결방안으로는 영구자석과 전자석을 순방향으로 유지하며 ALEPH사의 HYR-2001 리드스위치중 Pull-in 범위가 40~50 Gauss로 가장 높은 Type 3를 사용하는 것이 바람직하다.

리드 스위치의 히스테리시스현상은 실험결과 약 8mm 정도로 이 것은 위치측정 오차로 작용하며, 동작점 영역의 축 길이는 약 48mm로 FEM해석 결과와도 잘 일치됨을 알 수 있었다.

제작된 제어봉 위치지시기의 실험에서도 모든 제어봉 행정거리 구간 안에서 선형적으로 위치지시기 출력전압이 비례하여 출력되는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 허 형 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] Aleph Reed Switches - Products Catalog, 1999
- [4] 허 형 외 다수, SMART 제어봉구동장치에 장착되는 RSPT의 전자기장 해석, pp. 105, '00 춘계 원자력학술 발표회 요약집, 2000
- [5] 허 형 외 다수, 일체형원자로 SMART의 제어봉 위치지시기 개발, pp. 921, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집(D), 2001
- [6] 허 형 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기용 자속집속기 설계, 2002 춘계 원자력학술발표회, 2002

저 자 소 개



허 형 (許炯)

1957년 6월 19일생. 1983년 광운공대 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 전기공학과 석사 졸업. 1996년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-868-8097, Fax : 042-868-8990

E-mail : hhuh@kaeri.re.kr



김 종 인 (金鍾仁)

1955년 3월 7일생. 1979년 인하대 기계공학과 졸업. 1986년 프랑스 ENSM 대학원 기계공학과 졸업(공학). 1986년~현재 한국원자력연구소 기계공학연구부 책임연구원

Tel : 042-868-8646, Fax : 042-868-8990

E-mail : jikim@kaeri.re.kr



김 건 중 (金建中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1980년~현재 충남대 전기공학과 정교수

Tel : 042-821-5659, Fax : 042-823-7970

E-mail : kjkim@ee.cnu.ac.kr