

SMART 제어봉구동장치용 위치지시기와 전자석의 상호 전자기장 영향 평가  
Evaluation of Electromagnetic Interference between Electromagnet and Permanent  
Magnet of Reed Switch for SMART Control Rod Drive Mechanism

허 형, 김지호, 박진석, 유제용, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART는 기동을 위하여 핵분열 반응열을 이용하므로 제어봉구동장치는 미세한 반응도 조절이 가능해야 한다. 제어봉구동장치로는 선형펄스모터형이 채택되었지만 볼스크류형도 대안으로 검토되고 있다. 볼스크류형 제어봉구동장치는 회전형 스텝모터형으로 전자석을 이용한 긴급삽입장치가 설치되어 있으며 전자석 상단 압력 용기내에는 위치지시기 작동용 영구자석이 설치되어있다. 이 들은 서로 전자기장 영향을 주어 오작동이 예견되어 보다 정밀한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 공간적 제약 조건내에서 상호 전자기장 영향을 주지 않는 설계범위를 해석 하였고 검증하였다.

Abstract

Integral reactors require a fine reactivity control CEDM since the nuclear heating is used during the startup. Although a linear pulse motor type had been chosen for the SMART CEDM, a ball screw type is being considered as an alternative. A ball screw type CEDM driven by a rotary step motor has an emergency insertion system using electromagnet and also has a permanent magnet for RSPT in the upper pressure housing above the electromagnet. So it is necessary to evaluate an electromagnetic interference for reed switches in the vicinity of the electromagnet. This paper describes the design parameters for effective operation and the optimum design point was determined by analyzing the trend of the EMI characteristics.

1. 서론

일체형원자로 SMART는 핵분열 반응열을 이용한 원자로 기동 및 무봉산운전 요건에 따라 제어봉만으로 노심을 제어해야 하므로 미세조정성능이 우수한 제어봉구동장치가 필요한데 이와 같은 설계요건을 만족하는 제어봉구동장치로서 선형펄스모터형 제어봉구동장치를 개발중에 있다.

그러나 보다 더 미세한 위치제어가 가능하고 동적하중에 강한 볼스크류형 제어봉구동장치도 대안으로서 검토되고 있다. 볼스크류형 제어봉구동장치는 볼스크류 집합체, 회전형 스텝모터, 위치지시기, 회전감지기, 감속기어, 긴급삽입장치, 상·하한 완충장치, 압력용기, 연결봉 집합체 및 해제스프링 집합체 등으로 구성되어 있다. 제어봉구동장치의 압력용기 내부는 일차냉각수로 채워지므로 고정자 및 회전자, 볼스크류 등도 일차냉각수 내부에서 가동되며 일차냉각수가 베어링의 윤활재로 사용된다. 제어봉구동장치는 기동시나 장시간 운전 되는 동안에 회전형 스텝모터의 작동여부에 대한 회전정보의 측정이 필요하며 원자로나 비상정지상황이 발생하여 노심의 손상이 발생되지 않는 시점내에 제어봉이 노심내로 삽입하기 위한 긴급삽입장치 이동앵커의 상·하한 위치의 측정도 필요하다. SMART CEDM에는 4대의 RSPT(Reed Switch Position Transmitters)가 독립적으로 설치되어 있다. 압력용기 내부에는 볼스크류 집합체의 안내 베어링 상부에 스크류와 함께 상하운동하는 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있으며 이 영구자석의 위치에 비례해서 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 닫히도록 되어있다.

CEDM에는 스크램신호가 들어오면 볼너트의 회전없이 제어봉 집합체가 68mm 만큼 긴급히 수직하강할 수 있는 긴급삽입장치가 설치되어 있다. 긴급삽입장치는 고정앵커, 이동앵커 및 권선블럭으로 이루어진 전자석, 이동앵커와 볼너트를 연결해주는 볼베어링, 베벨기어의 회전력을 볼너트에 전달하고 스크류의 수직방향 이동을 자유롭게 해주는 스플라인, 그리고 긴급삽입장치의 완전인출/삽입여부를 감지하기 위한 상, 하부 한계스위치로 구성되어 있다.

전자석은 원자로 운전중에 항상 여자되어 있는 상태로 전자석 상단에 위치하는 RSPT에 영향을 줄 가능성이 있다. 또한 RSPT용 영구자석도 전자석과 결합하여 RSPT에 영향을 줄 수도 있기 때문에 보다 정확한 전자기장 상호 영향 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 전자석과 영구자석의 결합에 따른 전자기장 상호 영향을 평가하여 주어진 공간 제약 조건내에서 RSPT가 잘 작동될 수 있는 설계 조건을 찾아내고 실험을 통하여 검증하였다.

## 2. 볼스크류형 스텝모터형 제어봉구동장치의 구조

회전형 스텝모터는 4상 가변 릴럭턴스 스텝모터로서 자체 밀봉이 필요없는 캔드모터 형태이다. 스텝모터 집합체는 밀봉용기 및 용기내부에 용기의 일부로 만들어진 외부 고정자 치, 그리고 독립적인 4상의 권선으로 이루어진 외부고정자, 용기중심에 들어 있는 내부 고정자, 주 고정자 사이에 들어 있는 회전자로 구성되어 있다. 권선은 압력용기를 감고 있는 형태이며 고정자 및 회전자 치는 12개로 이루어져 있다. 또한 외부 고정자 권선은 모두 압력용기의 외부에 설치되므로 일차수가 직접 닿지 않으며 외부고정자 권선블럭이 있는 공간은 다시 얇은 스테인레스 스틸로 된 용기로 덮고 있다.

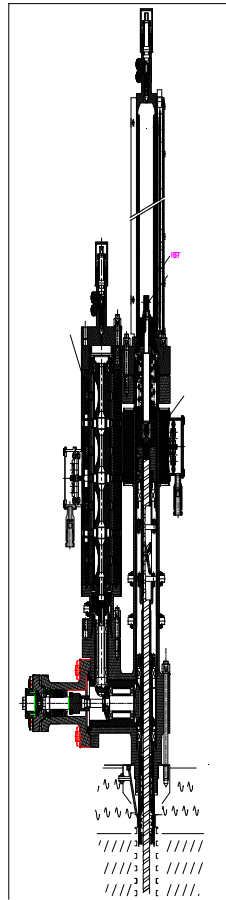


그림 1 제어봉구동장치 집합체

그림 1에서 전자석, 영구자석 및 RSPT의 위치를 확인할 수 있으며 요구되는 공간제약 조건때문에 서로 근접되어 있다. 영구자석은 전자석 상부판에서 약 160mm 위에 위치하며 RSPT의 Rod Drop Switch(RDS)는 약 130mm 위에 위치한다.

### 3. 전자기장 영향 평가

#### 가. 2차원 해석모델

영구자석과 전자석의 전자기장 영향 평가를 하기 위하여 원통좌표계를 사용하여 1/2만 모델링하였다. 전자석 상단으로부터 매 10mm씩 해석선을 설치하여 해석결과로부터 자속밀도값을 계산하였다. 이 때 각 점에서 tangential 방향 최대 자속밀도값을 구하였다. SMART에 사용되는 RSPT용 리드 스위치는 Aleph사의 HYR-2001로 구동 자속밀도가 19.8 ~ 22.7 Gauss(35 ~ 40AT)이다.

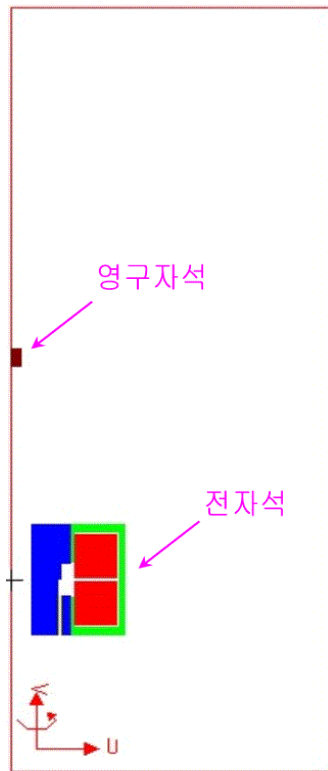


그림 2 2차원 해석모델

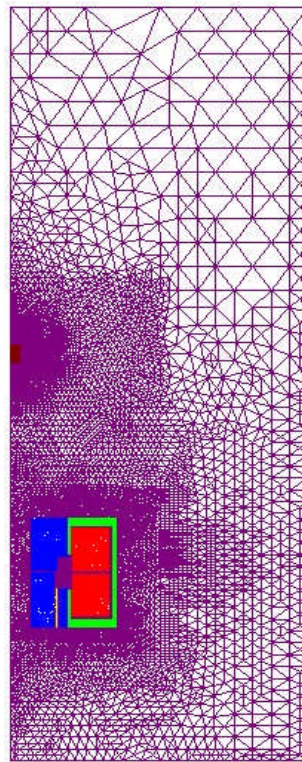


그림 3 사용된 Mesh

#### 나. 해석조건

전자장 수치해석용 툴인 Maxwell-2D를 이용하여 다음과 같은 순서로 계산하였다.

- ① 해석 solver : Magnetostatic
- ② 해석좌표계 : RZ-plane
- ③ 해석모델 설정(define model-draw model)
- ④ materials 설정 -BH Curve 작성, 재료입력
- ⑤ boundaries/sources 설정 - balloon, 영구자석 : 네오디뮴 35
- ⑥ executive parameter 설정
- ⑦ 해석방법(선택사항)설정
- ⑧ 해석수행
- ⑨ post-processing

표 1은 공간적인 허용범위내 결정된 제어봉 위치지시기의 설계치수로 수치해석을 위한 입력으로 사용되었으며 그림 3은 영구자석의 materials 설정에 있어 입력된 자료이다.

표 1 제어봉 위치지시기의 설계치수

번호	항 목		치수	재질
1	영구자석	외경, mm	30	NdFeB35
		높이, mm	30	
2	전자석	내경, mm	19.5	SUS430 S20
		외경, mm	107	
		윈도우, mm	39 x 47	
		입력	1.5A/mm <sup>2</sup>	
3	리드스위치 동작점에서 요구되는 자계의 세기, Gauss		19.8-22.7	tangential 성분
4	전자석상단에서 영구자석 하단까지 이격거리, mm		160	
5	전자석 상단에서 리드스위치 하단까지의 거리, mm		130	

다. 해석 결과

(1) 전자석만 있는 경우

영구자석을 배제시키고 전자석만 여자시켰을 때 전자석 상단의 해석선 레벨에 따른 자속밀도 분포를 계산한 것으로 그림 3과 같이 전자석에서 멀어짐에 따라 자속밀도의 크기가 감소됨을 알 수 있다. 즉 전자석 상단 10mm 위에서의 최대 자속밀도값은 240 Gauss 정도이며, 상단 120mm 인 경우에는 최대 자속밀도값이 약 20Gauss 정도로 약 10배 정도 감소됨을 알 수 있다.

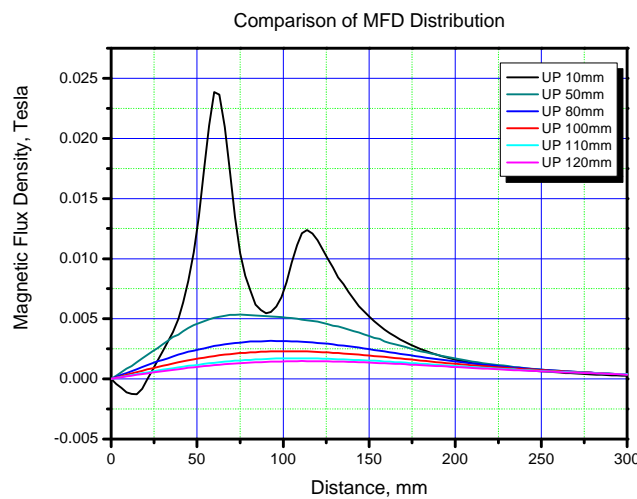


그림 3 전자석만 있는 경우의 레벨별 자속밀도 분포

(3) 전자석과 영구자석이 동시에 존재하는 경우A

전자석의 경우 전류방향을 일정하게 하여 상단을 N극으로 고정시키고 영구자석을 전자석과 역방향(S/N-N/S)으로 일치시키는 경우로 리드 스위치가 위치한 축방향 약 60mm 근방에서 영구자석과 전자석의 자기장 상쇄역할로 감소되어 거의 10 Gauss 보다 작게 평가되어 리드스위치를 동작시키지 못하는 결과를 야기시킨다.

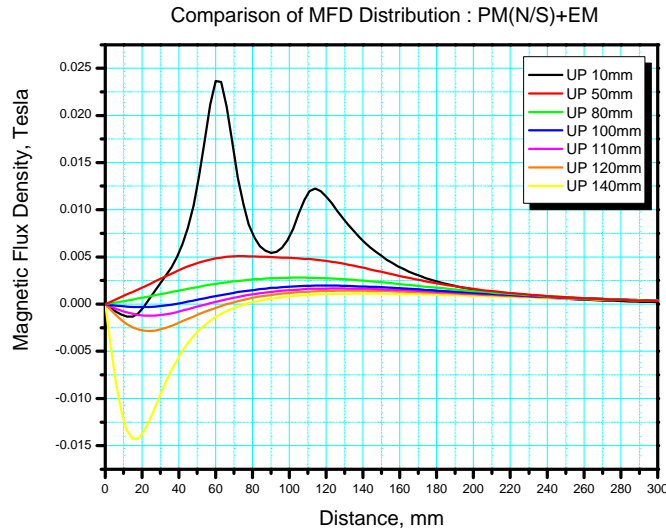


그림 4 전자석과 영구자석이 동시에 존재하는 경우(역방향)

(3) 전자석과 영구자석이 동시에 존재하는 경우B

전자석의 경우 전류방향을 일정하게 하여 상단을 N극으로 고정시키고 영구자석을 전자석과 순방향으로 (N/S-N/S)으로 일치시키는 경우로 리드 스위치가 위치한 축방향 약 60mm 근방에서 영구자석과 전자석의 자기장 상승효과로 증가되어 거의 30 Gauss 정도로 평가되어 리드스위치의 동작점인 약 22Gauss를 초과함을 알 수 있다.

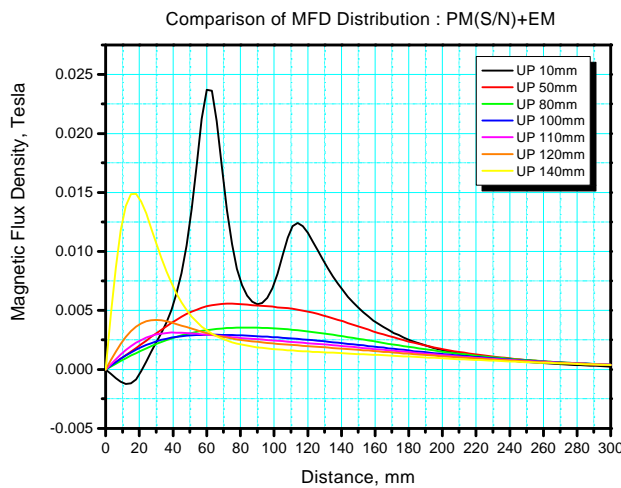


그림 5 전자석과 영구자석이 동시에 존재하는 경우(순방향)

(4) 리드 스위치의 동작점인 22Gauss 초과지역에 대한 해석

그림 6은 리드 스위치의 동작점인 22Gauss를 초과하는 지역에 대한 해석 결과로 전자석의 영향이 영구자석보다 큼을 알 수 있어 전자석의 입력에 따라 크게 자속밀도분포가 달라짐을 예측할 수 있다.

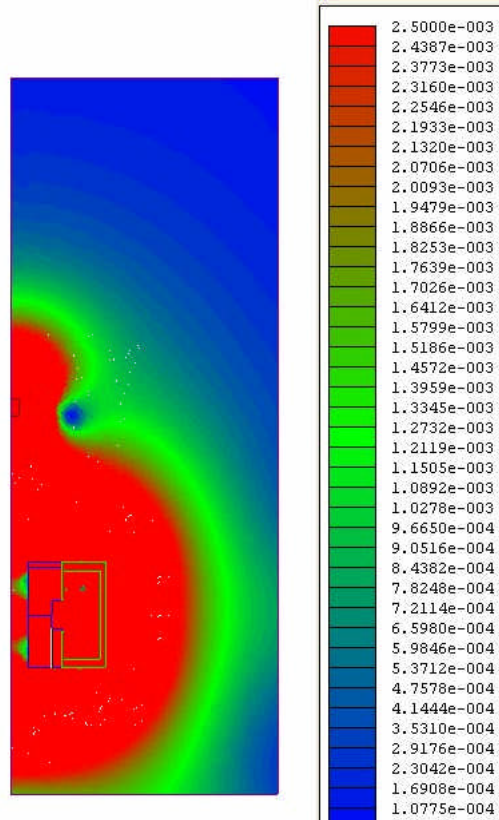


그림 6 리드 스위치의 동작점인 22Gauss 초과지역

라. 실험결과

성능시험을 위하여 제작된 회전형 스텝모터형 제어봉구동장치를 이용하여 전자석, 영구자석 및 위치지시기의 전자기장 간섭에 대하여 실험하였다. 실험방법은 전자석의 전류값을 조정하면서 리드스위치중 한계스위치가 ON/OFF되는 시점의 전류값을 측정하였다.

(1) 영구자석이 역방향시

표 2와 같이 전자석의 입력전류를 8A에서부터 내리면서 한계스위치가 꺼지는 순간의 전류값을 측정할 것이다. 최대 전류값은 3.0A이다.

표 2 한계스위치가 꺼지는 순간의 전류값(역방향)

위치	전류[A]	전류밀도[A/mm <sup>2</sup> ]
BLS1	3.0	2.7
RDS1	2.6	2.3

(2) 영구자석이 순방향시

표 3과 같이 전자석의 입력전류를 8A에서부터 내리면서 한계스위치가 꺼지는 순간의 전류값을 측정하였다. 최대 전류값은 2.5A이다.

표 3 한계스위치가 꺼지는 순간의 전류값(순방향)

위치	전류[A]	전류밀도[A/mm <sup>2</sup> ]
BLS1	2.5	2.2
RDS1	2.4	2.1

(3) 실험결과 고찰

영구자석의 순방향과 역방향에서 전자석의 입력전류를 8A에서부터 내리면서 한계스위치가 꺼지는 순간의 전류값을 측정한 값을 비교한 결과 영구자석을 순방향으로 한 것이 0.5A 정도 낮은 입력 전류에서 꺼짐을 알 수 있다. 이것은 FEM 해석결과와도 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

SMART 볼스크류형 제어봉구동장치에 장착되는 전자석과 위치지시기용 영구자석의 상호 간섭에 따른 전자기장 영향 평가 결과 다음과 같다.

- 1) 전자석만 존재하는 경우 입력 전류밀도 1.5A/mm<sup>2</sup> 인가시 전자석 상단 110mm 까지 자속밀도가 약 20Gauss로 평가되어 리드스위치가 작동됨을 알 수 있다.
- 2) 전자석과 영구자석이 동시에 존재할 경우 영구자석의 극성에 따라 리드 스위치의 작동점이 달라짐을 알 수 있다. 전자석과 영구자석의 극배치가 순방향시에는 전자석 상단 110mm 근방의 자속 밀도가 전자석만 존재하는 경우보다 자속밀도가 약 50Gauss로 역방향시의 자속밀도 10Gauss보다 5배 정도 높은 것을 알 수 있다. 그러므로 리드스위치 설계시에 영구자석의 극배치는 순방향이어야만 리드스위치가 작동됨을 알 수 있다.
- 3) 전자석과 위치지시기 간섭시험결과에서도 리드스위치에 영향을 주는 전류값이 영구자석과 전자석의 극배치가 영구자석을 순방향으로 한 것이 0.5A 정도 낮은 입력 전류에서 꺼짐을 알 수 있다. 이것은 FEM 해석결과와도 일치함을 알 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 유제용 외, 제어봉 위치지시기의 설계기술 분석-KAERI/AR-551/99, 한국원자력연구소, 1999

[2] 유제용 외, SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계, pp. 105, '99 추계원자력 학술 발표 회 요약집, 1999