

일체형원자로 제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 설계 및 특성해석

허 형, 김종인, 김건중*
한국원자력연구소, *충남대학교

The Design, Fabrication and Characteristic Experiment of Electromagnet for SMART Control Element Drive Mechanism

Hyung Huh, Jong-In Kim, *Kern-Jung Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, *ChungNam National University

Abstract - This paper describes the finite element analysis(FEA) for the design of electromagnet for SMART CEDM and compared with the lifting power characteristics of prototype electromagnet. As a result, it is shown that the characteristics of prototype electromagnet have a good agreement with the results of FEA.

1. 서 론

일체형원자로 SMART의 볼너트-스크류형 제어봉구동장치에서는 비상시 제어봉의 삽입속도를 빠르게 하기 위하여 그림 1과 같이 상부압력용기 밑에 고정 전자석을 설치하였다. 고정 전자석에의 전류를 차단함으로써 전자석의 기자력으로 결합해 있던 볼너트집합체가 스크류와 함께 노심설계에서 요구되는 비상 삽입거리 만큼 빠른 속도로 낙하하여 노심을 아이계상태로 전환하게 된다. 전자석은 원자로 기동시 스텝모터의 회전에 의하여 비상 삽입길이 만큼 상승하여 접근한 앵커 집합체를 전자석 힘만으로 결합시켜 계속해서 이 상태를 유지하는 역할을 하기 때문에 충분한 인력이 요구된다[1].
본 연구에서는 위와 같은 조건들을 만족시키는 SMART 볼너트-스크류형 제어봉구동장치용 전자석을 설계하여 추력특성을 해석하였으며, 실제 제작된 시제품과도 비교, 분석하였다

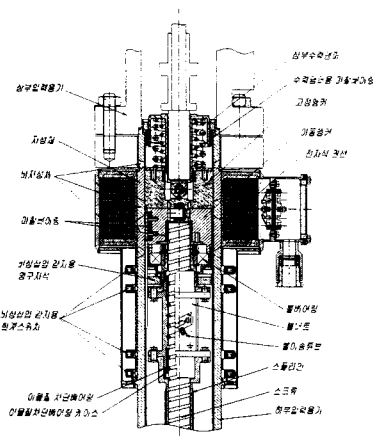


그림 1 전자석, 상부수력댐퍼 및 볼너트-스크류

2. 본 론

2.1 전자석 설계

전자석의 설계는 전체시스템의 일반적인 사양 즉 제어봉 볼너트집합체의 무게, 기하학적인 구조, 외력등의 영향에 따라 전자석의 정격추력, 전자석의 형태등을 결정하고 분석적인 방법으로 전자석의 면적, 코어의 폭, 코일의 형태, 입력전류 등을 계산하며 수치해석적인 방법으로 전자석의 정적 및 동적인 특성을 조사하여 전체 시스템에 맞는 전자석을 설계하였다. 전자석의 성능은 전자석 자중에 대한 추력의 비와 단위하중을 들어 올리는 데 소요되는 전력량과의 비로 나타내는 데 전자석의 효율을 향상시키기 위해서 좋은 코어의 재질(포화자속밀도가 높은 것)과 고효율의 코일 재료가 사용되어야 한다. 그림 1에서 전자석의 자속밀도를 $B [Wb/m^2]$ 로 하고 공극공간에서 자속확산이 없다고 가정하면, 공극 내부나 전자석, 고정앵커, 이동앵커내부도 자속밀도는 일정하므로 B 이다. 즉, 정상상태에 저축되는 전체 에너지 W_H 는 다음과 같이 표시된다[2][3].

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} B \cdot H dv$$

$$B = \mu_0 H \text{ 인 관계를 이용하면 위 식은}$$

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \mu_0 H^2 dv$$

또는

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \frac{B^2}{\mu_0} dv$$

와 같다.

여기서, μ_0 는 진공중의 투자율, $H [A/m]$ 는 자계의 세기이다.

이 때 위 식에서 자계에너지의 증가량 dW_H 는

$$dW_H = FdL = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} SdL$$

이며, S 는 철심의 단면적이다. 따라서,

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$$

이다. 여기서, 이 때 코일의 단위길이 당(1 m당) 권선수를 N , 코일의 전류를 I 라고 하면, 철심내의 자계의 세기는 NI 이므로 철심의 자화곡선에서 자속밀도를 구할 수 있다. 이상의 식은 전자석에서 발생하는 흡인력으로 설계추력이 결정되면 이 식에 의하여 철심단면적이 결정되고, 이에 따라 공극에서 필요한 자속밀도를 발생하는데 필요한 기자력 M 을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$M = NI = R_m \Phi = \frac{l}{\mu_0 S} \Phi = \frac{l}{\mu_0 S} BS = \frac{Bl}{\mu_0} = HI$$

여기서, $R_m [A \cdot T/Wb]$ 은 리랙탄스(자기저항)이며, l 은 전체자로에 대한 공극의 길이, Φ 는 자속이다.

또한, 전자석의 원도우 크기의 결정은 다음 식으로 결정하였다.

$$M = S_x k J$$

여기서, $S_x [mm^2]$ 는 원도우 면적, k 는 점적율,

$J [A/mm^2]$ 는 전류밀도이다. 코일은 폴리이미드를 사용하여 정격 전류밀도를 $1.5 [A/mm^2]$ 로 하고, 점적을 S 는 0.7로 택했다. 윈도우 면적은 전자석의 형상을 최종적으로 결정하는 과정이므로 이 형상에 따른 전자석의 특성 즉 추력, 누설자속, 코일내부의 온도상승 등을 분석하여 선정하였다. 표 1은 설계 최적화를 통하여 결정된 설계사양으로 전자석 윈도우의 폭과 높이를 각각 46.5mm와 48mm로 선정하였다.

표 1 최종 선정된 설계값

번호	항목	치수	
1	Mover	내경	39mm
		외경	87mm
		길이	67mm
2	Stator	내경	39mm
		외경	92mm
		길이	67mm
3	Sleeve	내경	88mm
		외경	95mm
		길이	49mm
4	PRV	내경	95.2mm
		외경	115mm
		길이	49mm
5	Core	외경	252mm
		밀폭	19mm
		축폭	18mm
6	Coil	UP	46.5x48mm
		DN	46.5x48mm
7	요구 추력[kgf]	550 이상	
8	축공극[mm]	0.1이하	
9	축면공극[mm]	0.5	
10	점적율	0.7	

2.2 전자석 유한요소해석

축대칭 문제이기 때문에 2차원 형태로 등가변환하여 해석하였다. 이 축대칭 문제는 좌우 대칭이기 때문에 전체 해석영역중 절반만 계산하여 해석시간을 줄였다. 해석 변수중 공극들은 shell로 정의하여 mesh generation시 문제점을 일소하였다. 유한요소해석은 전자장 수치해석 전용 툴인 Maxwell-2D를 이용하여 계산하였다[4].

2.2.1 해석모델

그림 2는 전자석에 대한 2차원 해석모델로 이때 입력사양은 표 2와 같다.

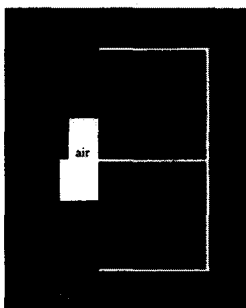


그림 2 2차원 해석모델

표 2 기본적인 해석 조건

해석 solver	Magnetostatic
해석좌표계	Axisymmetric
해석모델	Half
Shell	0.1mm 이하
경계조건	Dirichlet
Source	Upcoil = $1.5 [A/mm^2]$
Stator	STS304
Mover	STS304
Core	S20C

2.2.2 해석결과

그림 3은 위에서 결정된 전자석 형상에 대해 유한요소법으로 해석한 벡터 포텐셜의 최대값과 최소값을 30 등분한 등전위선(equipotential line)이다.

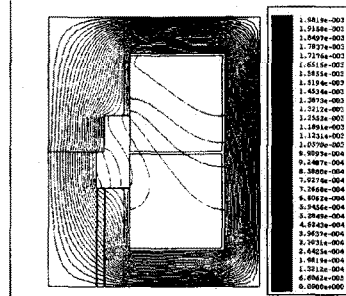


그림 3 전자석의 등자속선 분포

그림 4는 전류밀도를 $0.5 [A/mm^2]$ 에서 $6 [A/mm^2]$ 까지 변화시키면서 추력을 계산한 결과로 $1.5 [A/mm^2]$ 에서 550[kgf]를 초과하는 것을 알 수 있었다.

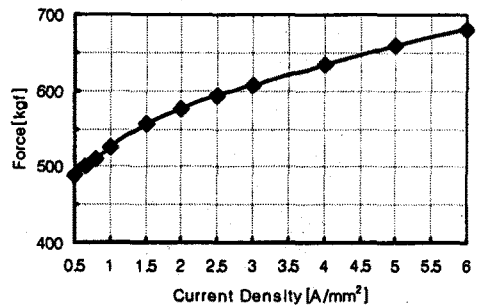


그림 4 전류밀도별 추력변화

2.3 전자석 시제품의 특성시험

2.3.1 시험장치

전자석 시험장치의 구조는 그림 5와 같다. 전자석 시험장치 구조의 부품 명칭은 표 1에 나타내었다.

전자석 시험장치의 설치는 그림 6과 같이 전자석 장치의 Base 부분을 인장시험기 하부에 고정시키고 Load Rod 부분을 상부에 연결한다. 그리고, 주변 기기로 전류를 공급하는 Power Supply와 전압을 측정하는 Multimeter, 전자석 내부의 온도를 측정하는 Thermometer, 컴퓨터와 인터페이스 되어 있다. 전자석 시험방법으로 테스트를 시작하면 인장시험기의 스크류가 이동하면서 전자석 시험장치의 이동앵커와 고정앵커 부분의 간극이 벌어지게 된다. 이 간극이 생기면서 전자석 추력이 변하는데 이 변위에 대한 추력의 변화를 PC에서 데이터로 받아 저장하였다.

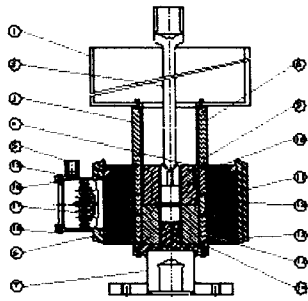


그림 5 전자석 시험장치 구조

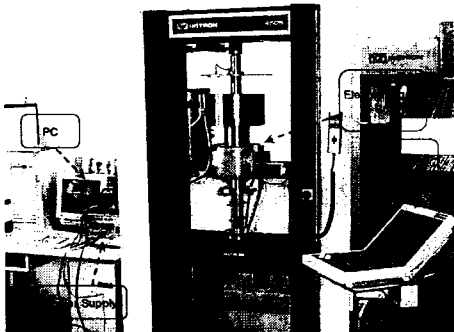


그림 6 인장시험기에 설치된 전자석 장치

2.3.2 시험결과

그림 7은 전류밀도를 $0.5 \sim 3 A/mm^2$ 사이에서 변화시키면서 얻어진 추력곡선을 나타내고 있다. 전류밀도가 $0.5 \sim 3 A/mm^2$ 의 범위에 있을 때 최대추력은 400~600(kgf) 사이의 값을 가짐을 알 수 있다.

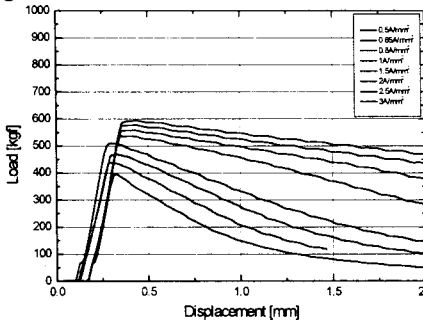


그림 7 전류밀도변화에 대한 추력

그림 8은 전류밀도를 $3 A/mm^2$ 로 주고 전자석 내부 온도가 $28^\circ C$ 일 때와 $146^\circ C$ 인 경우의 추력변화 곡선을 나타낸 것이다. 여기서, 전류밀도를 $3 A/mm^2$ 로 일정한 전류를 공급하면 전자석 내부 온도가 시간에 따라 올라가며 내부 온도가 $146^\circ C$ 일 때 인장시험을 하여 추력을 비교하였다. 시험 결과에서 알 수 있듯이 설계온도범위에서는 전자석의 추력에 거의 영향이 없었다.

2.3.3 해석결과와 시험결과와의 비교

그림 9는 상부권선에 인가하는 전류밀도값을 변화시키면서 시험값과 해석값을 비교한 것으로 초기에는 해석값이 시험값보다 약간 크게 나오지만, 전류밀도가 $1 A/mm^2$ 이후에는 5% 이내에서 잘 일치하고 있다.

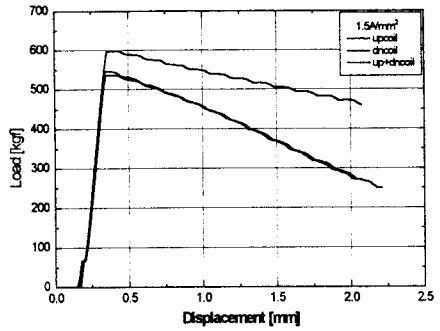


그림 8 상부권선, 하부권선 및 상/하부권선 동시 여자시 출력변화

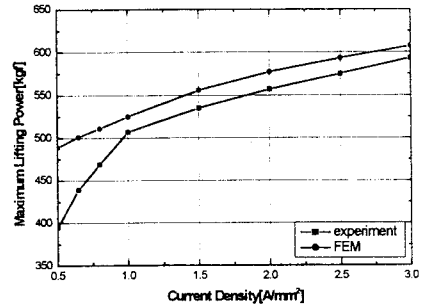


그림 9 해석값/시험값의 비교

3. 결 론

일체형원자로 SMART의 볼너트-스크류형 제어봉 구동 장치에 장착되는 전자석을 설계하였으며 유한요소해석을 통하여 추력을 평가하였다. 해석결과 전자석은 모두 설계요건을 만족하였다.

이에 대한 검증을 위하여 시제품을 제작하여 추력시험을 수행하였다. 전류밀도를 변화시키면서 시험결과와 해석값을 비교한 결과 초기에는 해석값이 시험값보다 약간 크게 나오지만 전류밀도 $1 A/mm^2$ 이상인 경우 5% 이내에서 잘 일치하였다. 또한 권선부의 온도가 $100^\circ C$ 증가함에 따라 전압이 약 20% 증가하였지만 설계온도 범위내에서는 전자석의 추력에 거의 영향이 없었다

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1]김지호 외, "볼스크류형 제어봉구동장치 개념설계", KAERI/TR-1448/99, 1999.12.
- [2]허 형 외, "제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 전자장 수치해석", KAERI/TR-1352/99, 1999. 6.
- [3]William H. Hayts, Jr., "Engineering Electromagnetics", McGRAW-HILL Book, 1981
- [4]Ansoft, Maxwell 2D Ver. 2.0 User's Guide, 1999