

# 볼스크류형 제어봉구동장치용 회전형 스텝모터의 설계 및 특성시험 The Design, Characteristic Experiment of Rotary Step Motor for Ball Screw Type CEDM

허 형, 유제용, 김지호, 김종인, 여지원

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요 약

선형펄스모터형 제어봉구동장치의 대안으로 검토되고 있는 볼스크류형 제어봉구동장치의 동력원인 회전형 스텝모터를 설계와 관련하여 모터 토크가 발생하는 설계변수를 도출하고, 토크특성을 3차원 유한요소법으로 해석하여 설계 최적치를 계산하였다. 스텝모터는 원자로 운전중 항상 여자되어 있는 상태이기 때문에 열발생에 의하여 권선의 온도가 절연재의 허용온도를 넘지 않는 것도 중요하기 때문에 폴리이미드-공기층의 복합으로 이루어져 있는 권선을 대상으로 유한요소 열해석도 병행하였다. 시제품을 제작하여 시험한 결과 홀딩토크의 최대값은 해석 결과에 비해 약 20% 정도 낮게 측정되었다.

## Abstract

This paper describes the 3-dimensional finite element analysis(FEA) for the design of rotary step motor(RSM) for ball screw-type Control Element Drive Mechanism(CEDM) and compares with the holding torque characteristics of prototype RSM. A thermal analysis was performed for the RSM. A model for the thermal analysis of the electromagnet was developed and theoretical bases for the model were established. It is important that the temperature of the RSM windings be maintained within the allowable limit of the insulation, since the electromagnet of CEDM is always supplied with current during the reactor operation. So the thermal analysis of the winding insulation which is composed of polyimide and air were performed by finite element method. But the test results show that the holding torque is less than those by analysis.

## 1. 서론

제어봉구동장치(control element drive mechanism, 이하 CEDM)는 원자로가 운전중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하여 노심 반응도를 적절히 제어하며, 또한 원자로계통에 사고가 발생하여 긴급한 출력정지가 요구될 때, 제어봉을 신속하고 정확하게 원자로 내부로 삽입시켜 원자로를 정지시키는 장치로서 원자로 계통의 안전성과 직접 관련된 매우 중요한 기능을 가지고 있다.

원자로 집합체의 CEDM으로 개발되고 있는 볼스크류형 CEDM은 회전형 스텝모터의 회전운동이 베벨기어를 통하여 볼너트로 전달되며 볼너트의 회전운동이 스크류의 직선운동으로 변환되어 스크류와 연결되어 있는 제어봉을 상하로 구동하는 원리이다.

볼스크류형 CEDM의 주요 구성부품은 볼스크류 집합체, 회전형 스텝모터, 위치측정기, 감속기어, 압력용기 등이다. 압력용기 내부는 냉각재로 채워지므로 스텝모터의 회전자, 볼스크류 등도 냉각재 내부에서 구동되며 냉각재가 아닌 다른 윤활유는 공급되지 않는다.

볼스크류형 CEDM은 스텝모터의 스텝에 따라 스크류의 이동거리가 조절되므로 무봉산 운전 및 제어봉 인출에 의한 기동 등의 요건에 따라 미세 조정성이 특히 우수한 CEDM이 필요한 원자로 계통에 적합하다[1].

기본설계된 볼스크류형 CEDM의 주요사양은 다음과 같다.

- 설계온도 : 350°C
- 설계압력 : 17MPa
- 내부 냉각재 온도 : 120°C 이하
- 구동거리 : 680mm
- 긴급삽입장치의 삽입량 : 1초 내에 68mm
- 스크류 피치 : 15mm
- 제어봉구동속도 : 0~15mm/sec
- 스텝모터 종류 : 4상 2여자 방식의 직류 동기성 캔드 모터
- 스텝모터 한 펄스당 회전자 회전각 : 7.5°
- 스텝모터 한 펄스당 제어봉 이동거리 : 0.25mm

주요 부품에 사용된 재질은 다음과 같다.

- 압력용기, 내부구조물 : STS 321
- 내부구조물중 자성체 : STS 430
- 외부구조물중 자성체 : S20
- 볼스크류, 스테드 볼트 : Incoloy 925
- 스프링 : Inconel X750
- 권선 : 폴리 아미드
- 볼베어링, 볼너트, 베벨기어 : STS 440C
- 마찰베어링 : Superple PVX100

표 1은 기본설계 단계에서 설계 변경된 내역이다[2].

표 1 설계변경 내역

항목	설계변경 전	설계변경 후
총 행정	720 mm	680mm
긴급삽입 거리	72 mm	68 mm
스텝모터 크기 변경	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 외경 : 171mm</li> <li>- 치폭 : 23mm</li> <li>- 공극 : 0.35 mm</li> <li>- 권선창 : 44x16.5mm</li> <li>- 공급전류 : 7.7A (2,800 AT)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 외경 : 180mm</li> <li>- 치폭 : 30mm</li> <li>- 공극 : 0.2mm</li> <li>- 권선창 : 58x21 mm</li> <li>- 공급전류 : 3.33A (1,990 AT)</li> </ul>
감속기어비 변경	1.5	1.25
스텝당 이송거리 변경	0.2083mm	0.25mm
전자석 권선 단면 크기 변경 (가로x세로, mm)	47x41	39x41

그림 1은 볼스크류형 CEDM 집합체 도면이다.

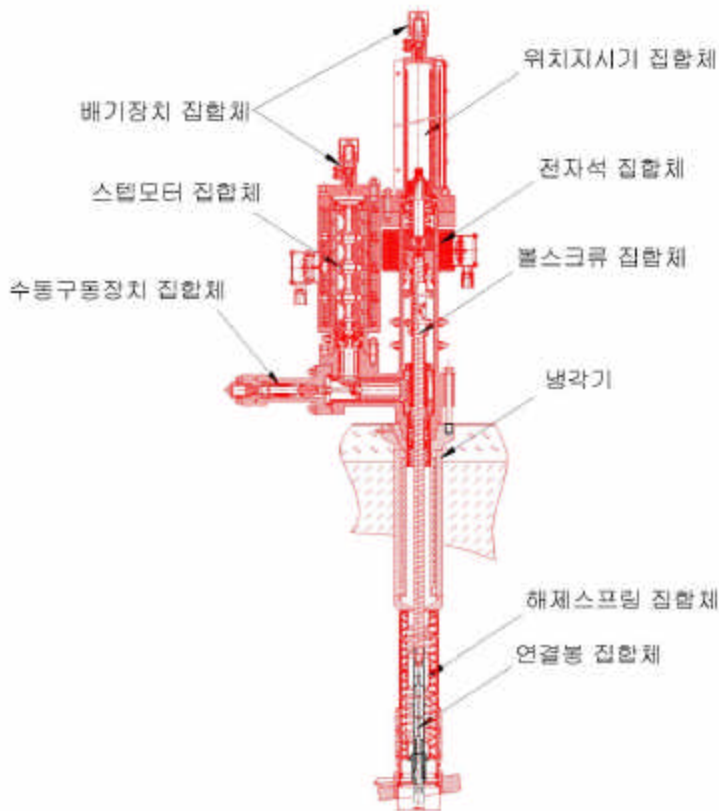


그림 1 볼스크류형 CEDM 집합체



## 2.2 해석방법

스텝모터는 회전력을 발생하는 로터의 치가 12개로 이루어진 축대칭 형태로 1개의 치만을 선택하여 축방향으로 이등분하여 그림 3과 같이 최종 3차원 해석 모델을 구성하였다. 이 모델은 스텝모터 전체의 1/24에 해당한다[3].

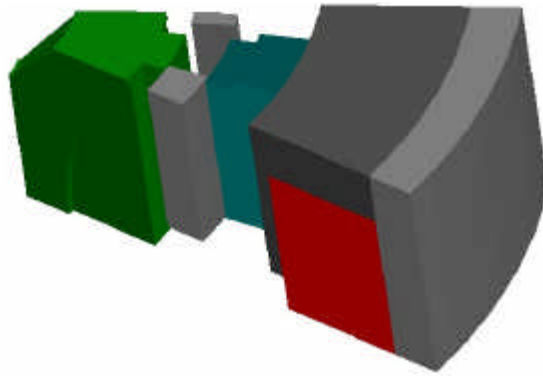


그림 4 CEDM 3차원 해석모델

그림 5와 6은 로터가 이동된 예로 그림5는 로터가 기준선에서  $0.75^\circ$  이동된 상태이고, 그림 6은  $12^\circ$  이동된 상태이다.

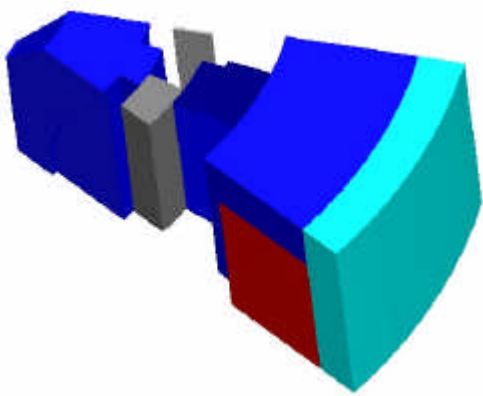


그림 5  $0.75^\circ$  로터이동 예

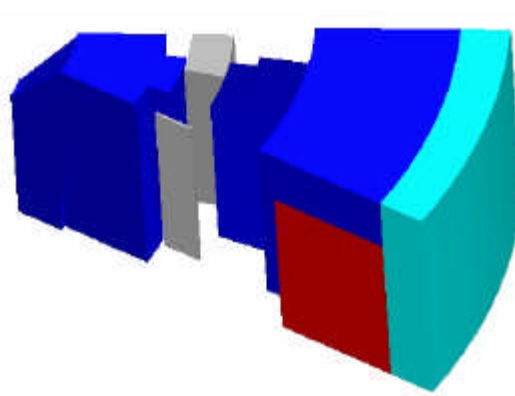


그림 6  $12^\circ$  로터이동 예

그림 7은 계산에 사용된 재질에 대한 B-H 특성곡선으로서 모두 실험에 의해 얻은 값들이다. 공극은 작을수록 좋으므로 가공 가능한 최소길이인 0.2mm로 고정시켰다. 회전자는 총  $30^\circ$  를  $1.5^\circ$  씩 20스텝을 움직여 가면서 추력을 계산하였다. 전자기 해석은 전자장 수치해석용 프로그램인 Maxwell-3D를 이용하였다.

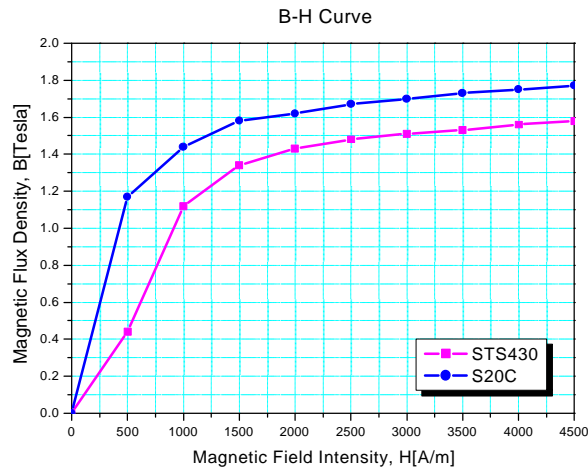


그림 7 B-H 특성 곡선

### 2.2.1 source 입력

전류밀도 입력시에 위치함수로서 변화되는 소스입력의 양을 정의하여야 한다. 그림 8에서 원통체내의 등전류밀도는 다음과 같이 함수로 전류밀도를 나타낼 수 있다[4].

$$J_x = \frac{-J_{mag} \times z}{\sqrt{x^2 + z^2}}$$

$$J_y = 0$$

$$J_z = \frac{J_{mag} \times x}{\sqrt{x^2 + z^2}}$$

여기서,  $J_{mag}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\frac{1}{2} model\ mmf = \text{가} \times = \frac{3.3[A] \times 603[turn]}{2} = 994.95[A\ T]$$

$$J_{mag} = \frac{mmf}{window} = \frac{994.95}{29 \times 21 \times 10^{-6}} = 1,633,743[A/m^2]$$

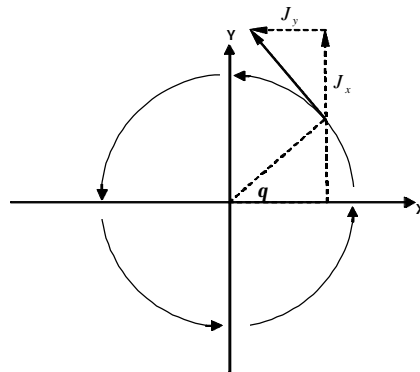


그림 8 원통좌표에서의 소스입력 예

### 2.3 해석결과 및 고찰

그림 9는 회전자의 치가  $12^\circ$  이동시 자속밀도 벡터의 분포도이며 이 때의 자속밀도분포 그림 10과 같다.

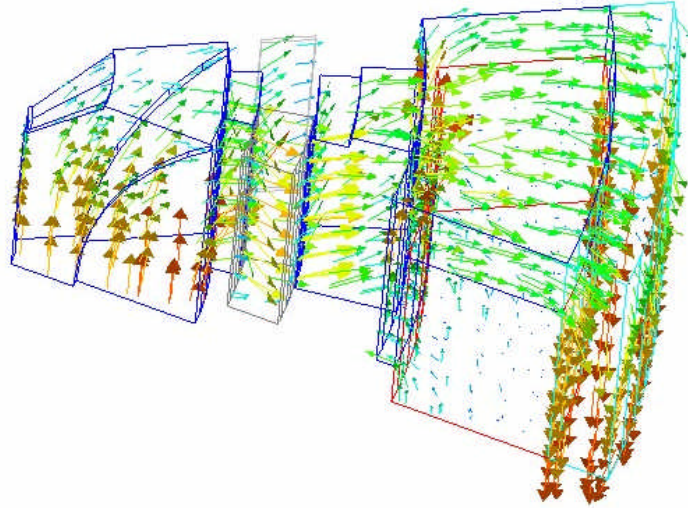


그림 9 회전자 치의  $12^\circ$  이동시 Vector B 의 분포

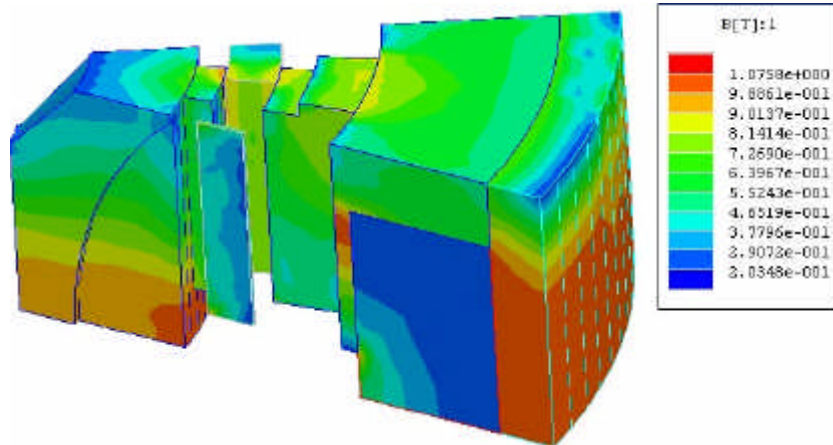


그림 10 회전자 치의  $12^\circ$  이동시 자속밀도분포

그림 11과 12는 회전자의 치가  $1.5^\circ$  와  $12^\circ$  이동시 자속밀도분포의 단면도이다.

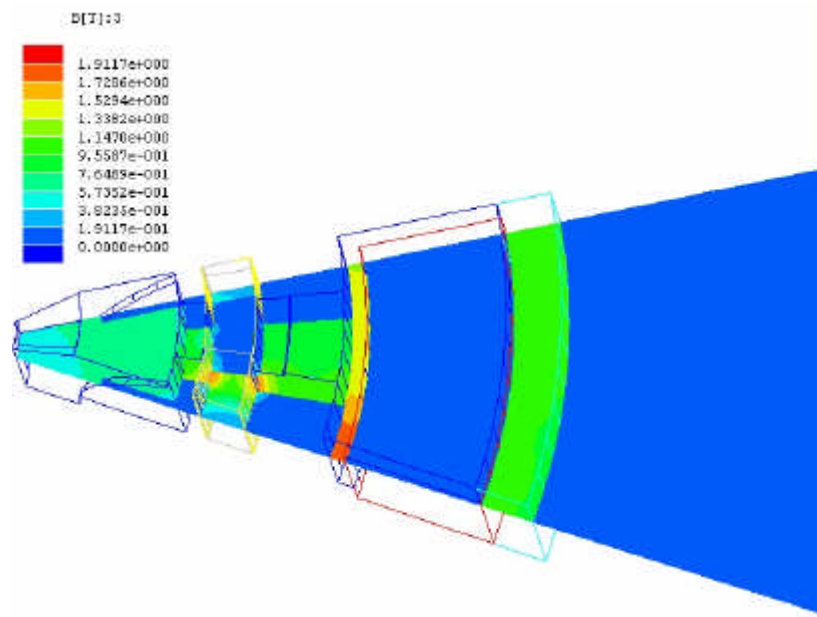


그림 11 회전자 치의 1.5° 이동시 자속밀도분포 단면도

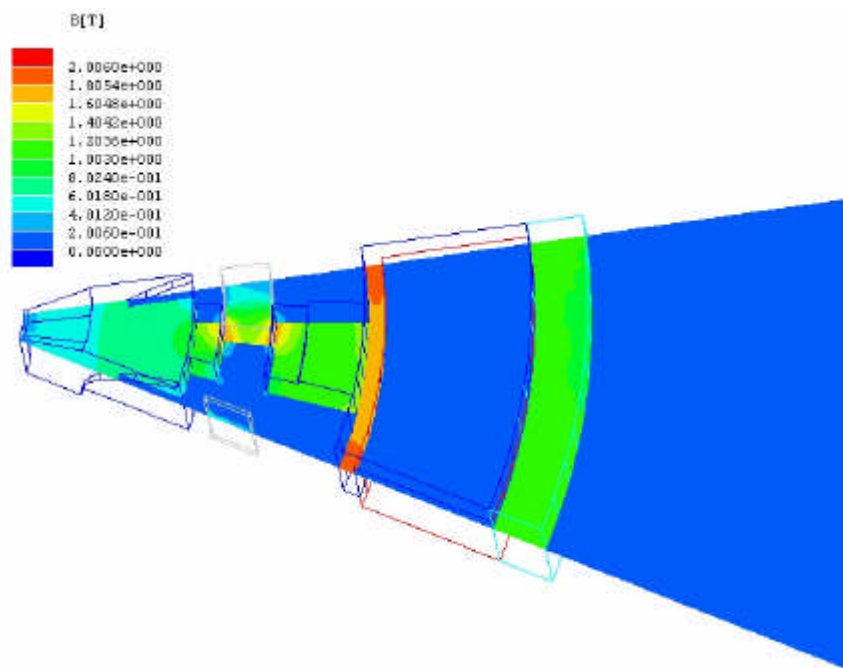


그림 12 회전자 치의 12° 이동시 자속밀도분포 단면도

그림 13과 14는 회전자의 치가 1.5° 와 18° 이동시 자성체 부위의 자속밀도 분포이다



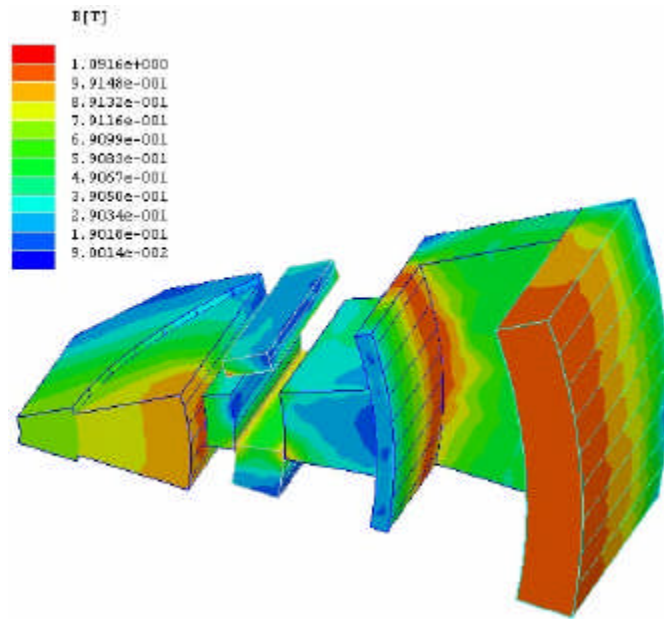


그림 13 회전자 치의 1.5° 이동시 자속밀도분포  
(자성체부위)

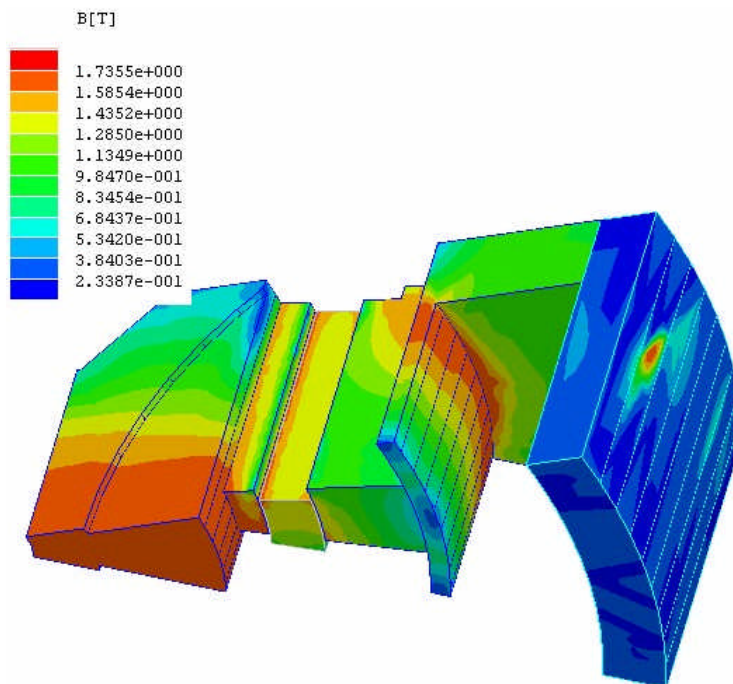


그림 14 회전자 치의 18° 이동시 자속밀도분포  
(자성체부위)

그림 15는 3D-FEA 결과로 입력전류가 3.3A(=1,990AT) 일 때 홀딩토크는 38.16 N·m 이다.

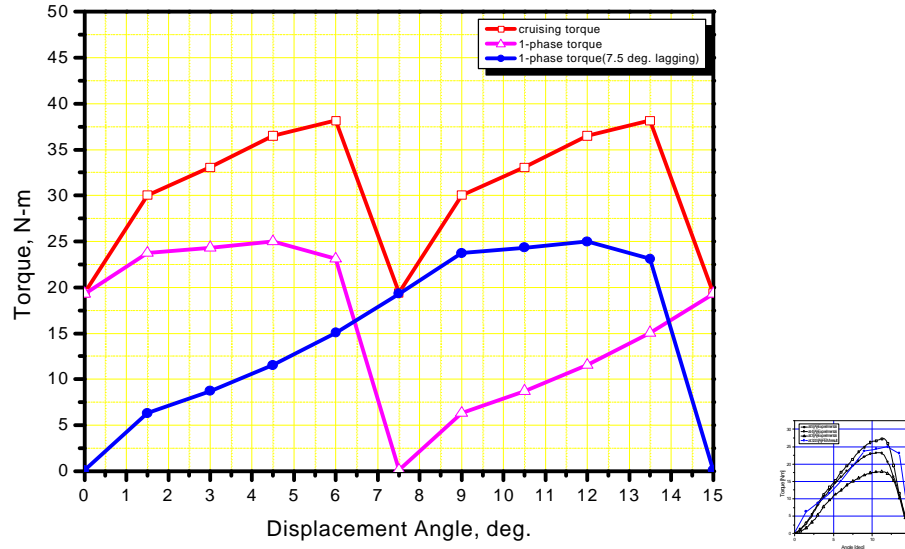
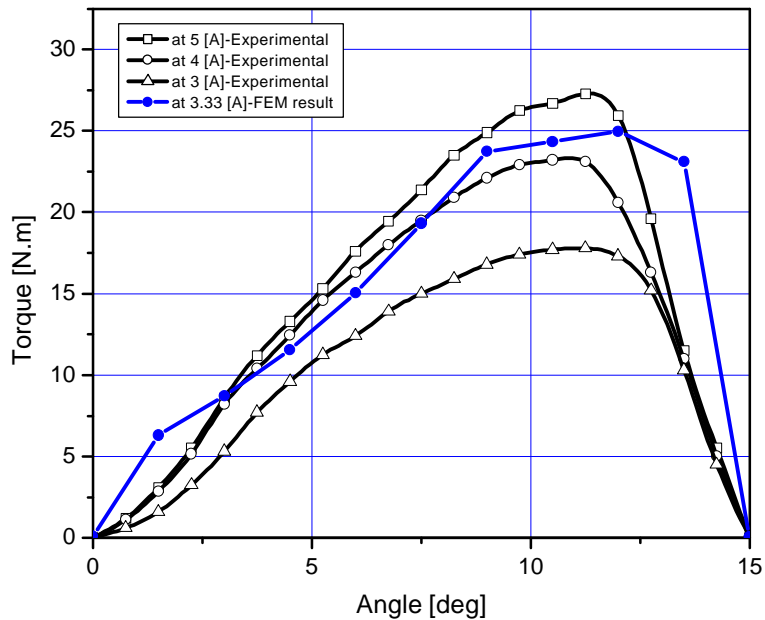


그림 15 정토크 특성

그림 16은 제작된 시제품에서 측정된 정토크 시험치로 해석결과와 비교하여 공급전류가 3.33A일 때 약 5 N·m 정도 작게 나타남을 알 수 있다.



### 3. 열해석

#### 3.1 2차원 해석모델

고정자 열해석시 권선에는 함침을 고려하여 열특성을 계산하였다. 실험식(1)은 CEDM-I의 권선 설계시 여러 기차력에서 열 특성을 시험한 결과를 근거로 산출된 권선의 열전도율 계산식이다.

함침시 열전도율(k)은 직접 시험에 의해 계산된 0.124[W/m°C]로 적용하였으며, 권선 창에서 권선을 둘러싸는 공기층을 0.1[mm]로 가정하여 열 특성을 계산하였다.

$$k = \frac{K_{air} \frac{A_{air}}{A_{insul}} + K_1 \frac{A_1}{A_{insul}} + K_2 \frac{A_2}{A_{insul}}}{3} \quad [W/m^\circ C] \quad (1)$$

여기서,  $k_{air}$ 는 공기의 열전도율 [W/m°C],  $A_{air}$ 는 권선부 단면에서 공기층이 차지하는 면적 [m<sup>2</sup>],  $A_{insul}$ 는 권선부 단면에서 권선을 제외한 면적 [m<sup>2</sup>],  $k_1$  와  $k_2$ 는 절연재료 1, 2의 열전도율 [W/m°C],  $A_1$  과  $A_2$ 는 권선부 단면에서 절연재료 1, 2가 차지하는 면적 [m<sup>2</sup>] 이다.

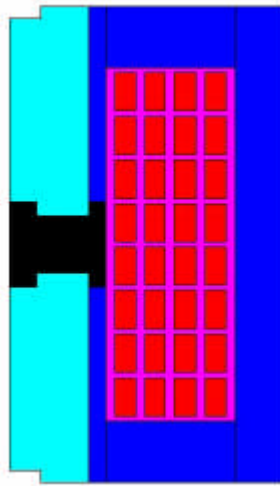


그림 18 2차원 열해석 모델

표 2 권선부 사양

구 분	Φ1.2 model	
권선 직경[mm]	1.2	
Turn수	603	
b [mm]	58	
h [mm]	21	
점적율	0.56	
절연한계	220℃	
주위온도	shell	50℃
	internal	120℃
권선피복재	폴리이미드	
열원, W/m <sup>3</sup>	233,755	
전류밀도, A/mm <sup>2</sup>	2.95	

표 3 유효전도율  
(폴리이미드와 공기층)

구 분	열전도율 [ W/m°C ]
폴리이미드	0.35
공기	0.0263
$k_{insl.}$	0.12414

FLUX2D 7.30/8 RSM\_SBX21\_0414 04/14/09 16:21 Analysis Display Color shade Temperature

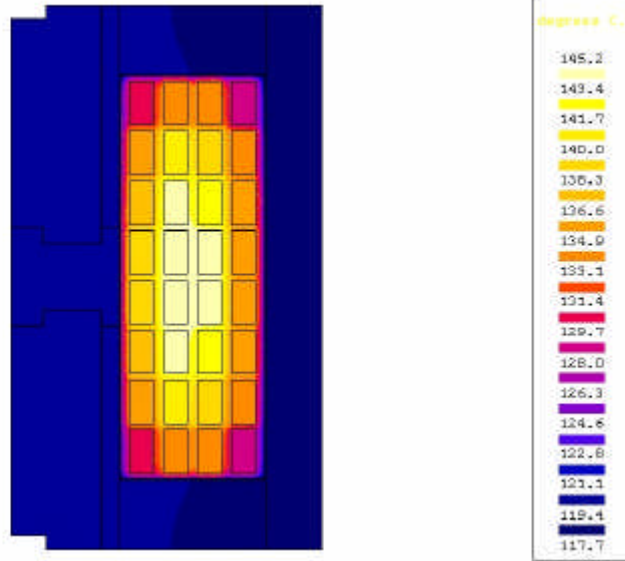
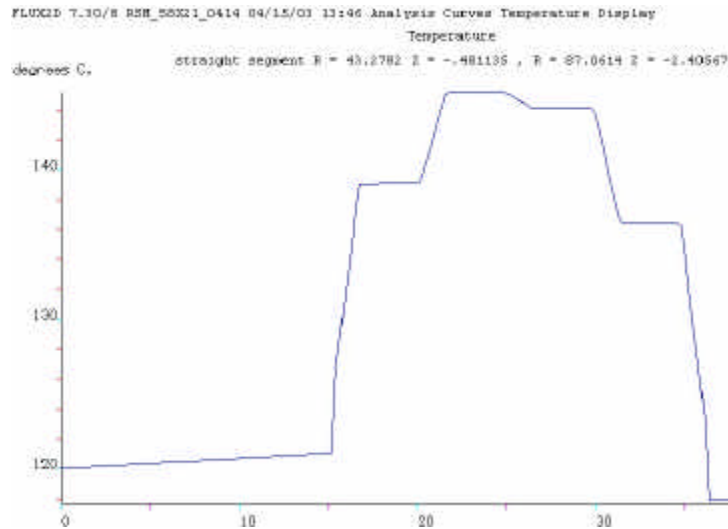


그림 19 열해석결과,  $J=2.95A/mm^2$



#### 4. 결론

볼스크류형 CEDM용 회전형 스텝모터의 치수변경에 따른 추력계산을 3차원 유한요소법을 이용하여 수행하였다.

해석을 위하여 입력된 소스 전류값은 3.33A(=1,990 AT)으로 이 때 계산된 홀딩토크 38.16 N·m으로 제작된 시제품에서 측정된 정토크 시험치로 비교하면 약 20% (약 5 N·m) 정도 작게 나타남을 알 수 있다.

열해석결과 소스 전류값권 3.33A 인가시 권선 중심부의 최대온도는 145.2°C로 평가되어 전선 피복제한계온도이내 임을 알 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

[1] 김지호 외, "SMART CEDM용 회전형 스텝모터의 설계", 1999년 한국원자력학회 춘계 학술발표대회

논문집, 1999.5.

[2] 김지호 외, “Design of Ballscrew-type CEDM for SMART”, 한국원자력학회 ‘02 춘계학술발표회 논문집, 2002. 4.

[3] 강도현 외, “SMART 제어봉 구동용 회전형 전동기 설계에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술발표대회 논문집, 1999.8.

[4] Maxwell 3D Version 3.0, Ansoft