

원자로 제어봉 구동용 전동기의 설계에 관한 연구

정 연호, 강 도현, 김 종무, 임 태운  
한국전기연구소

A Study on the Design of the Motor Driving a Control-Rod for SMART

Y.H. Jeong, D.H. Kang, J.M. Kim, T.Y. Im  
KERI

**Abstract** - In the System-integrated modular advanced reactor(SMART), the motor for Control element drive mechanism(CEDM) requires high density power and simple drive mechanism to reduce volume because of restriction by install-space and must satisfy the reactor operating circumstances with high pressure and temperature.

In this paper, we perform the basic design of the two kinds (Variable reluctance type and Hibrid-reluctance type) of the transverse flux motor to develop the prototype motor for the control element drive mechanism of SMART. Analyzed these motors by the FEM in the 2-dimension, we show the characteristics for each of the analysis model.

1. 서 론

최근 제작기술의 발전으로 인하여 원자로 제어봉 구동용으로 선형전동기를 응용하는 원자로가 출현하였지만, 보다 큰 힘이 요구되는 구동용 장치로는 아직도 변속기어의 활용을 위해 회전형 전동기가 이용되고 있는 추세이다. 원자로의 제어봉 구동장치(Control Element Drive Mechanism : CEDM)는 원자로의 상부에 설치되기 때문에 설치공간과 무게의 제약이 다르므로 원자력 운전조건을 만족하는 고효율 전동기가 요구된다.

본 연구에서는 새로운 설계개념을 도입한 횡축형 전동기를 원자로 제어봉 구동용 전동기로 선정하였다. 횡축형 전동기는 자속의 방향과 회전자의 이동방향이 횡방향으로 즉, 전류의 방향과 이동방향이 같은 구조로서 자기 회로와 전기회로가 분리되어 있고, 링 형태의 권선을 이용함으로써 오버행 권선에서 발생하는 손실이 없기 때문에 단위 체적당 높은 출력과 효율을 얻을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 제어봉 구동용 전동기의 원형을 선정하기 위해 2가지 형태, 즉 리럭턴스 형태와 영구자석을 삽입한 하이브리드 리럭턴스 형태의 횡축형 전동기를 기본 설계하고 해석하여 그 특성을 분석하였다.

2. 본 론

CEDM에는 동력전달을 위한 매개체로서 베벨기어가 사용되며, 전동기에서 발생한 동력은 이것을 통해 볼스크류에 전달되고 동시에 부하에 전달된다. 요구되는 전동기의 사양은 외경 180(mm) 이내, 최대 정지토크 24(N·m) 이상, 설계온도 180(℃), 최대 속도 100 (rpm) 이다. 원자로 내부의 압력과 온도가 높기 때문에

전동기의 고정자 및 회전자에는 적층 철심을 사용할 수 없으며, 냉각수가 공극에 흐르기 때문에 자기 특성이 상대적으로 낮은 Stainless제열의 재료를 사용해야 한다.

2.1 리럭턴스형 횡축형 전동기

2.1.1 형태 및 동작원리

리럭턴스 형태의 횡축형 전동기는 그림 1과 같이 고정자가 외부 고정자와 내부 고정자로 구성되며, 그 사이에 회전자가 위치한 2중 공극 구조로 되어 있다.

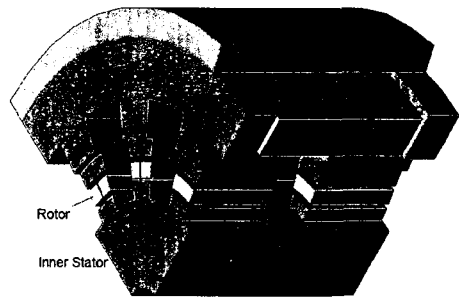


그림 1. 리럭턴스형 횡축형 전동기의 외형

회전자의 위치에 따라 기자력  $\theta$ 와 발생 추력  $F_x$ 를 그림 2에 나타내었다. 극간격  $0 \sim \tau_p$ 구간에서는 한쪽 방향으로 힘을 발생시키기 위해 전류를 흘리고,  $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 다른 방향으로 힘을 발생시키므로 일정한 방향의 힘을 얻기 위해서 전류를 흘리지 않는다.<sup>4)</sup>

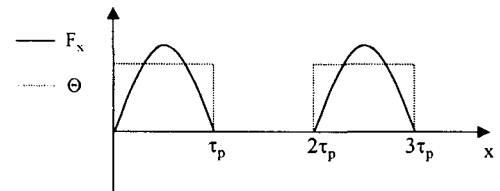


그림 2. 리럭턴스형 횡축형 전동기의 전류-추력 패턴

전동기가 4상으로 구성된 경우, 각 상을  $1/4 \tau_p$  거리만큼 이동하여 배치하고 2상 여자를 하면 전동기에는 회전자의 위치에 따라 항상 2상의 전류가 흐르며,  $1/4 \tau_p$  위치에서 최대 힘을 발생시킨다.

2.1.2 설계 및 해석

횡축형 전동기는 전류의 방향과 회전자의 이동 방향이 같기 때문에 정확한 발생 추력을 계산하기 위해서는 3차원 해석을 수행해야 하지만 해석모델의 복잡성과 계산 시간의 과다 등으로 2차원 등가해석모델을 이용하여 유

한요소법에 의해 계산을 수행하였다.

먼저 전동기의 최적 치수를 결정하기 위하여 기본모형을 대상으로 회전자 치 높이와 폭의 변화에 따른 힘 밀도를 비교하였다. 힘 밀도는 전동기 설계시 기본이 되는 항목으로서 고정자와 회전자 치가 완전히 일치하는 위치와 어긋나는 위치에서 Co-Energy를 이용하여 식(1)에 의해 계산된다.<sup>[1]</sup>

$$F_{xd} = \frac{CoE_{.x=0} - CoE_{.x=\tau_p}}{2\tau_p \times n \times L \times 2\Delta x \times 1000} \quad [kN/m^2] \quad (1)$$

여기서, n은 치수, L은 치 길이, Δx는 이동거리를 나타낸다.

기차력 2000[AT]에서 계산결과, 회전자의 치 높이가 6.5[mm]일 때 힘이 포화를 시작하기 때문에 전동기의 체적을 고려하여 6.8 [mm]로 결정하였고, 극간격에 대한 치폭비( $b_p/\tau_p$ )가 0.45일 때 최대 힘밀도를 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 리랙턴스형 횡축형 전동기의 결정된 사양은 표1과 같다.

표 1. 리랙턴스형 횡축형 전동기의 설계사양

구분		사양	비고
외부 고정자	외경 [mm]	166	
	내경 [mm]	86	
	치폭 각[deg]	13.5	10.13[mm]
	치 높이 [mm]	13	
	극 간격 [deg]	30	
내부 고정자	외경 [mm]	71	
	치폭 각[deg]	13.5	8.35[mm]
	치 높이 [mm]	4	
	극 간격 [deg]	30	
회전자	외경 [mm]	85.3	
	내경 [mm]	71.7	
	치폭 각 [deg]	13.5	
	치 길이 [mm]	6.8	
	극 간격 [deg]	30	
권선	코일장 [mm]	50×16.5	
	점적율	0.6	
	재질	220 Class Polyimide	
	공극	0.35	2중 공극
상수	4		

그림3과 같은 2차원 등가해석모형을 이용하여 기차력에 따른 평균토크와 발생 힘밀도를 계산하여 표2 및 그림4에 나타내었다.

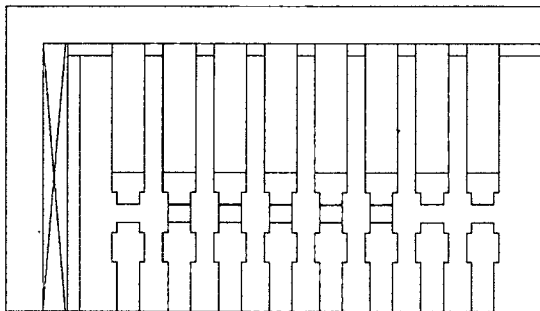


그림 3. 리랙턴스형 전동기의 2차원 등가해석모형

온도해석결과에 따르면 현재의 설계사양에서는 요구하는 설계온도 180(°C)에서 평균토크가 약 55[N·m]로 나타났다.

표 2. 리랙턴스형 횡축형 전동기의 평균토크

기차력 [AT]	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
토크 [N·m]	1.7	7.09	16.07	27.84	39.84	51.05	61.39

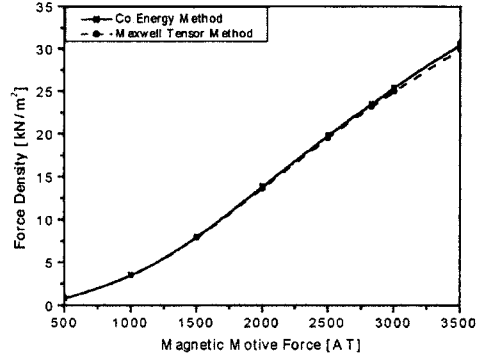


그림 4. 기차력에 따른 힘밀도 분포

## 2.2 영구자석형 횡축형 전동기

### 2.2.1 형태 및 동작원리

영구자석형 횡축형 전동기는 그림5와 같이 단일 공극 구조로서 좌·우 고정자 치를 극간격( $\tau_p$ )만큼 엇갈리게 설치하고, 회전자의 자성체 사이에 영구자석을 마주보게 배치하여 힘 밀도를 높인 형태이다. 따라서  $0 \sim \tau_p$  구간에서는 전기자 권선의 전류가 (+)가 되도록하고  $\tau_p \sim 2\tau_p$  구간에서는 (-)가 되도록 하면 일정한 방향으로 힘을 얻을 수 있다.<sup>[2],[3],[4]</sup>

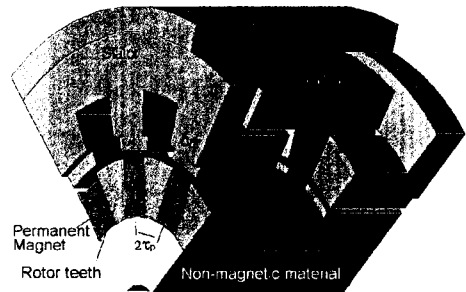


그림 5. 영구자석 여자 횡축형 전동기

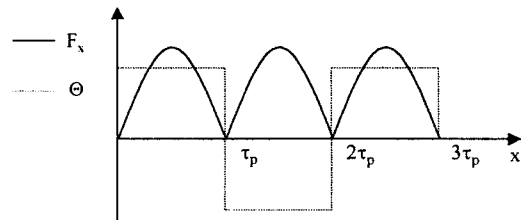


그림 6. 영구자석형 횡축형 전동기의 전류-추력 패턴

그림6은 영구자석형 횡축형 전동기에서 회전자의 위치에 따른 입력전류와 발생추력을 나타내고 있는데  $0 \sim \tau_p$  구간에서는 (+)방향 전류에 의해서 한쪽 방향으로 힘을 발생시키고,  $\tau_p \sim 2\tau_p$  구간에서는 계속 같은 방향으로

힘을 발생시키게 하기 위해서 전기가 권선에 (-)방향 전류를 흘린다. 따라서 4상 전동기인 경우, 각 상을 1/4  $\tau_p$  거리 만큼 이동하여 배치하고 회전자의 위치에 따라 각 상의 전류를 흘리면, 전동기에는 항상 4상의 전류가 흐르며, 1/8  $\tau_p$  위치에서 최대 힘을 발생시킨다.

### 2.2.2 설계 및 해석

영구자석형 횡축형 전동기의 기본 치수를 결정하기 위해 기본모델에 대한 2차원 등가해석모델을 이용하여 극간격에 대한 치폭비( $b_p/\tau_p$ ) 및 영구자석 두께비( $h_m/\tau_p$ )에 따른 힘밀도를 계산하여 비교하였다. 2차원 등가해석모델은 고정자 중앙을 반으로 펼친 후 자속이 지나가는 경로를 등가로 하고 누설을 막기 위하여 가상자료의 비투자율을 100,000으로, 자기 Shield는 0.0001로 설정하였다. 해석에 적용된 영구자석은 잔류자속  $B_r = 1.2$ (T), 비투자율  $\mu_r = 1.05$ 로 고려하였다. 그 결과 극간격대 치폭 비율( $b_p/\tau_p$ )이 0.8이고 극간격대 자석비( $h_m/\tau_p$ )가 0.4일 때 가장 큰 힘밀도를 나타내었으나, 본 연구에서는 작업성을 고려하여 극간격대 치폭 비율을 0.5로 선정하였다. 이러한 결과를 바탕으로 결정된 영구자석형 횡축형 전동기의 설계사양은 표3과 같다.

표 3. 영구자석형 횡축형 전동기의 설계사양

구분		사양	비고
외부 고정자	외경 [mm]	166	
	내경 [mm]	86	
	치폭 각[deg]	15	11.23 [mm]
	치 높이 [mm]	13	
	극 간격 [deg]	30	
회전자	외경 [mm]	85.3	
	내경 [mm]	53.3	
	치폭 [mm]	11.2	
	치 높이 [mm]	16	
	치 간격 [deg]	30	
	영구 자석 $B_r$ [T]	1.2 (최대연속온도 180 [°C])	
권선	코일창 [mm]	50×16.5	
	점적율	0.6	
	재질	220 Class Polyimide	
공극	0.35	단일 공극	
상수	4		

그림7과 같은 2차원 등가해석모델을 이용하여 기자력에 따른 평균토크와 발생 힘밀도를 계산하여 표4 및 그림8에 나타내었다.

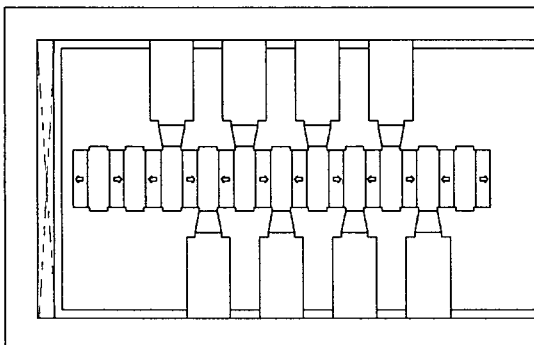


그림 7. 영구자석형 전동기의 2차원 등가해석모델

표 4. 영구자석형 횡축형 전동기의 평균토크

기자력 [AT]	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
토크 [N·m]	24.0	47.89	71.67	94.92	117.98	140.58	162.55

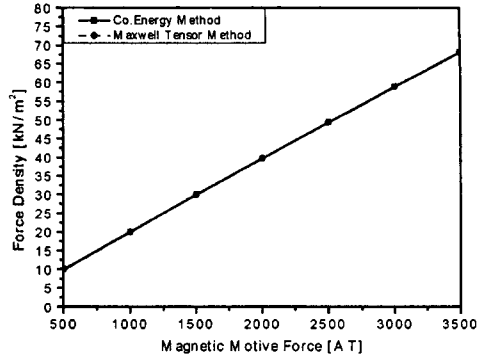


그림 8. 기자력에 따른 힘밀도 변화

온도해석결과에 따르면 180(°C)의 온도에서 평균토크가 약 107(N·m)로 해석되었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 원자로 제어봉 구동용 전동기로 횡축형 전동기를 선정하여 2가지 형태로 기본설계하고 그 특성을 해석하였다. 원자로 특성상 높은 압력과 온도로 인해 사용되는 재료가 제한되며, 철심을 적층할 수 없는 환경이기 때문에 전동기 철심으로 Stainless계열의 재료를 적용하였다. 기본 설계사양에 대한 전자계 및 온도해석 결과에 따르면 요구되는 설계온도 180(°C)에서 리턴형 횡축형 전동기는 약 55(N·m), 영구자석형 전동기는 약 107(N·m)의 토크를 발생시키는 것으로 해석되어 요구사양에 비해 각각 2배와 4배 정도의 토크를 발생시키고 있으나 경험상 2차원 등가모델 해석치와 제작된 전동기의 시험치와는 약 30%정도 이상의 차이를 보이므로 이를 고려하여 최종적인 설계사양을 결정해야 한다. 따라서, 향후 전동기의 체적 감소를 목적으로 최적설계가 수행되어야 하며, 정확한 특성예측을 위해 3차원 전자계 및 열 해석도 수행되어야 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Z. Jajtic. : Vortriebskraftoptimierung bei der elektrisch erregten Transversalflußmaschine. Dissertation, TU Braunschweig 1993.
- [2] Weh, H. "Permanentmagneterregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalflußkonzept". etzArchiv Bd. 10(1988), H.5
- [3] D.H. Kang. "Transversalflußmaschinen mit permanenter Erregung als Linearantriebe im schienengebundenen Verkehr". Dissertation, TU Braunschweig 1999.
- [4] H. Weh, "Drive Concepts with New Machines, Spedam'92, Positano, Italien.
- [5] 강도현, 김문환, "자기부상 열차용 부상 및 안내결합형 횡자속 선형전동기 설계에 관한연구", 전기학회논문지 49권 2호, pp102-109, 2000.
- [6] 강도현, 정연호 외3인, "Ropeless 승강기용 영구자석역자 횡자속 선형전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지 49권 3호, pp145-151, 2000.