

‘99 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 볼스크류형 제어봉구동장치의 회전형스텝모터 설계

**Design of Rotary Step Motor
for Ballscrew Type Control Element Drive Mechanism of SMART**

김지호, 허 형, 김종인, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

강도현
한국전기연구소
경남 창원시 성주동 28-1

요 약

SMART의 반응도 제어용 제어봉구동장치로 개발되고 있는 볼스크류형 구동장치의 핵심 부품중 하나인 회전형스텝모터를 설계하였다. 제어봉구동장치의 원자로 중앙덮개 상부 배치 및 유지보수를 위한 공간, 그리고 용기에 걸리는 하중 등을 고려하면 모터의 크기는 작을수록 좋지만 제어봉그룹을 포함하는 모든 가동부위를 규정된 속도로 구동하기 위해서는 필요한 토크를 가져야 한다. 이러한 두 가지의 상충된 조건을 최적으로 만족할 수 있도록 하기 위하여 모터의 전자기 해석을 수행하고, 부하 및 모터 주요 구조 치수의 변동에 따른 모터토크를 계산함으로써 설계요건에 따른 최적의 스텝모터를 설계하였다.

Abstract

The rotary step motor for the ballscrew type CEDM of SMART was designed. The motor is required to be small with high torque for easier installation of the CEDMs on the reactor central cover and for provision of spaces for maintenance access. A design solution for the stepping motor which meet such conflicting requirements was proposed by optimizing the geometrical dimensions using the finite element electromagnetic field analyses. The motor designed by applying the proposed method generates torque enough to drive all the movable parts including the control element assembly at specified speed.

1. 서론

일체형원자로 SMART[1]는 핵분열 반응열을 이용한 원자로 기동 및 무방산 운전 요건에 따라 제어봉만으로 노심을 제어해야 하므로 미세 조정성능이 우수한 제어봉구동장치(수동봉구동장치)가 필요한데 이와 같은 설계요건을 만족하는 반응도 제어용 제어봉구동장치로서 볼스크류형 제어봉구동장치가 개발 중에 있다[2]. 그림 1에서 보는 바와 같이 볼스크류형 제어봉구동장치는 볼스크류 집합체, 회전형스텝모터, 위치측정기, 잠금장치, 감속기어, 압력용기 등으로 구성되어 있다. 볼스크류형 제어봉구동장치의 압력용기 내부는 일차수로 채워지므로 스텝모터의 내부고정자 및 회전자, 볼스크류 등도 일차수 내부에서 구동되며 냉각재가 아닌 다른 윤활유는 공급되지 않는다.

본 논문에서는 모터의 토크에 관계되는 구조 치수인 모터 반경, 치(齒)폭, 스크류 피치 등의 변화에 따른 모터의 토크를 계산함으로써 주어진 공간 내에서 모터의 최적의 치수를 계산하고자 한다.

2. 회전형스텝모터 설계 개념

볼스크류형 제어봉구동장치의 회전형스텝모터는 4상 직류 동기성 모터로서 자체밀봉이 필요 없는 캔드 모터형이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 회전형스텝모터 집합체는 압력용기 및 용기내부에 용기의 일부로 만들어진 외부 고정자 치, 그리고 4개의 상권선 블럭으로 이루어진 외부 고정자, 용기중심에 들어 있는 내부 고정자, 두 고정자 사이에 들어 있는 회전자로 구성되어 있다. 단면도는 그림 3과 같으며 이 그림에서 보는 바와 같이 권선은 압력용기(외부고정자 치)를 감고 있는 형태이다. 또한 외부 고정자 권선은 모두 압력용기의 외부에 설치되므로 일차수가 직접 닿지 않으며 외부고정자 상권선 블럭이 있는 공간은 다시 얇은 스테인리스 스틸로 된 용기로 덮는다. 압력용기의 역할도 하는 외부고정자 치 구조물은 자체의 형성을 원활히 하기 위하여 각 상권선 사이를 비자성 용접재로 용접하며 그림 2에서 보는 바와 같이 유니플러형 자계가 형성된다. 회전자와 고정자의 치는 다단식 구조로서 4개의 단으로 구성되어 있으며 모두 동일 피치로 되어 있고 각 단 사이에는 비자성체 링이 용접되어 있다. 이 스텝모터는 2상 여자 방식으로 구동된다.

토크에 영향을 미치는 주요 변수중 하나인 회전자와 고정자 치 사이의 공극은 작을수록 좋지만 보통 가공이 가능한 최소치로 결정되는데 본 논문에서는 0.35mm로 고정하였다. 이 공극은 회전자 치 안팎으로 두 개가 있다.

3. 회전형스텝모터의 필요 토크

회전형스텝모터를 설계하기 위해서는 스크류에 걸리는 부하에 따른 스텝모터에서의 필

요 토크를 알아야 한다. 이를 계산하기 위하여 볼스크류에서 스템모터까지의 하중전달경로를 도식적으로 표시하면 그림 4와 같다. 또한 볼스크류 너트에서의 토크 T_{BS} 를 구하기 위하여 볼스크류 자체의 하중전달 경로를 2차원으로 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서 d_2 는 볼스크류의 볼중심 회전 직경이고 ρ 는 스크류의 피치이므로 경사각도 x 는 다음 식에 의해서 계산될 수 있다.

$$x = \tan^{-1} \frac{p}{\pi d_2}$$

Q 는 스크류에 걸리는 부하를 의미한다. 한편, x , y 방향의 하중의 합은

$$\sum F_x = F \cos x - Q \sin x,$$

$$\sum F_y = Q \cos x + F \sin x$$

이므로 마찰계수를 μ 라 하면 평형조건 $\sum F_x = \mu \sum F_y$ 로 부터

$$F \cos x - Q \sin x = \mu(Q \cos x + F \sin x)$$

가 되므로 $\rho = \tan^{-1} \mu$ 라 하면

$$\begin{aligned} F &= Q \frac{\tan \rho \cos x + \sin x}{\cos x - \tan \rho \sin x} = Q \frac{\tan \rho + \tan x}{1 - \tan \rho \tan x} \\ &= Q \tan(x + \rho) \end{aligned}$$

와 같이 된다. 볼스크류의 너트에서의 필요토크는 그림 5로 부터

$$T_{BS} = \frac{d_2}{2} F = \frac{d_2}{2} Q \tan(x + \rho)$$

이므로 스템모터에서 요구되는 토크 T_{RSM} 은

$$T_{RSM} = \frac{T_{BS}}{\eta_{zmi}} G_r$$

와 같이 계산될 수 있다. 여기서 G_r 은 감속기어비이며 η_{zmi} 는 볼스크류에서 스템모터까지의 총효율로서 볼스크류 효율, 볼스크류쪽 베벨기어 효율, 스템모터쪽 베벨기어 효율, 볼베어링 효율을 모두 곱한 값이다.

4. 회전형스템모터의 토크 특성

회전형스템모터의 모터특성인 정추력 곡선을 구하기 위하여 유한요소법에 의한 전자기 해석을 수행하였다. 해석을 위해서 전자장 수치해석용 툴인 Flux2D[3]를 이용하였으며, 회전형스템모터의 형상으로 형성된 자속과 힘의 방향을 고려하여 2차원으로 모델링한 것이 그림 6이다. 이 모델은 자력선이 지나가는 경로는 실제의 재료성질을 사용하고 자력선

을 연결하는 역할만 하는 가상 구조물은 투자율을 매우 크게 두었으며 외부는 차폐한 형태이다. 이 모델에 사용된 각종 변수들은 다음과 같다.

- 회전자 및 고정자의 자성체부 재질 : SUS430
- 회전자 및 고정자의 비자성체부 재질 : SUS321
- 해석방법 : Magnetostatic
- 공극 : 0.35mm(고정)
- 가상구조물 투자율 : 1,000,000
- 차폐체 투자율 : 0.001
- 권선 기자력 : 1500AT(고정)

그림 7은 이러한 전자기 해석모델을 사용하여 회전자를 0에서 $2r_p$ 까지 $2r_p/20$ 만큼의 간격으로 이동시키면서 구한 모터의 정추력 값이다. 여기서 r_p 는 회전자 피치의 반으로서 8.9mm로 하여 계산하였다. 그림 8은 회전자 치가 5mm 이동하였을 때의 등자속선 분포의 예를 나타내고 있다. 그림 7에서 보는 바와 같이 회전자 위치 5mm와 12mm부근에서 가장 큰 추진력을 발생하고 있는데 이 곡선을 바탕으로 모터의 구조치수의 변화에 따른 모터의 토크를 계산할 수 있다.

5. 최적 치수의 결정

앞 3절의 계산과정을 바탕으로 부하의 변동에 따른 스팀모터의 필요토크를 스크류의 피치변화에 따라 구하면 그림 9와 같다. 여기서 $d_2=30\text{mm}$, $\mu=0.02$, $G_r=1/1.5$, $\eta_{total}=0.652$ 로 두었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 부하에 따라 모터의 필요토크는 선형적으로 증가하며 볼스크류의 피치가 작을수록 필요토크도 작아지지만 피치가 작으면 제어용 삼입속도가 작아지므로 이를 고려하여 설계에 반영하여야 한다.

그림 10은 치 개수가 12개인 모터에 대하여 모터반경 및 치 높이의 변화에 따른 모터 토크의 변화를 나타낸 것으로서 앞의 전자기해석 결과인 정추력 곡선을 바탕으로 구한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 모터 반경이 커짐에 따라 모터토크도 거의 선형적으로 증가하며 모터 치 높이에 대하여도 모터 토크값이 비교적 민감하게 변화함을 알 수 있다.

현재 개념설계된 볼스크류에 걸리는 모든 가동부위에 대한 설계하중은 500kg이며 이 하중을 구동하는데 필요한 모터토크는 그림 9로부터 약 13.5N-m임을 알 수 있다. 현재의 배치개념 및 유지보수개념을 고려하면 이 토크를 내기 위해 필요한 설계치는 그림 10으로부터 스크류 피치가 15mm일 때 모터반경 35mm, 치폭 15mm로 하는 것이 최적인

것으로 판명되었다.

6. 결 론

회전형스텝모터의 토크에 영향을 미치는 주요 구조 변수의 변동에 따른 토크값을 구하여 주어진 설계요건에 맞도록 설계하였다. 해석결과, 부하의 증가에 대하여 모터에서의 필요 토크는 선형적으로 증가하며, 또한 모터반경 및 치높이의 변화에 따라서 모터토크도 선형적으로 변화함을 알 수 있었다. 현재 개념설계된 볼스크류에 걸리는 모든 가동부위에 대한 설계하중 500kg을 고려하면 필요한 토크는 약 13.5N-m이며 이 토크를 내기 위해서 현재의 배치개념상 볼스크류 피치가 15mm일 때 모터반경 35mm, 치폭 15mm로 설계하는 것이 최적인 것으로 판명되었지만 기본설계단계에서 상세한 배치개념 및 유지보수개념이 수립되는 경우, 상세 설계요건에 따라 최적치는 변할 수 있다. 또한 이러한 이론적 계산결과는 많은 불확실성을 내포하고 있으므로 향후 시제품을 제작하여 성능시험을 통한 검증이 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 장문희 외, “테마기획-중소형 일체형원자로 SMART 개발”, 대한기계학회 기계저널, Vol.39, No. 4, 1999. 4.
- [2] 김종인 외, “일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999. 3.
- [3] Flux2D Version 7.2x, MAGSOFT corporation.

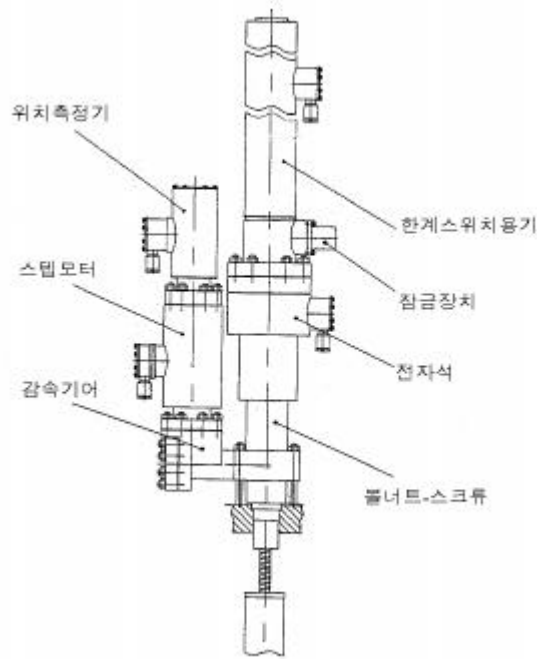


그림 1 볼스크류형 제어봉구동장치

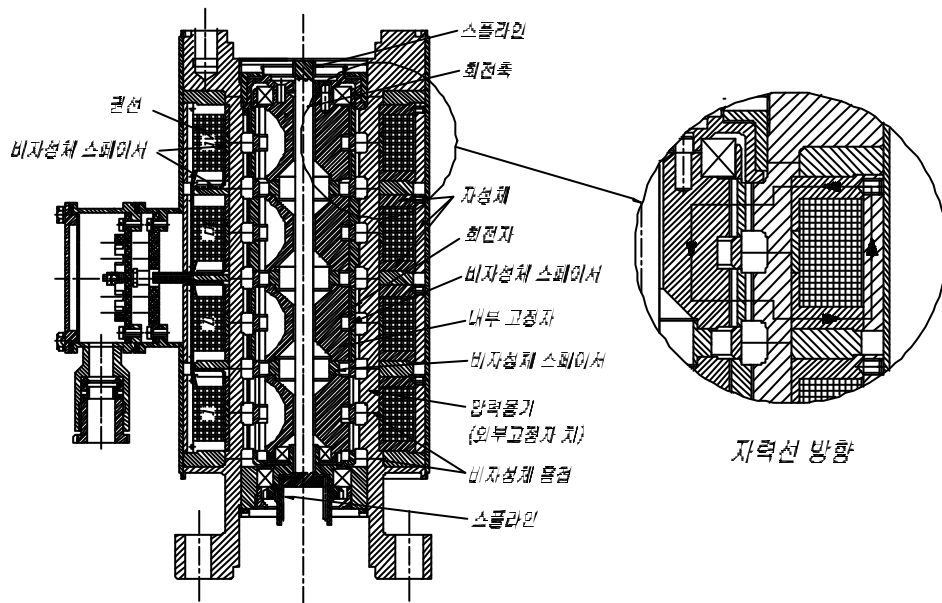


그림 2 회전형슬립모터 및 자력선 방향

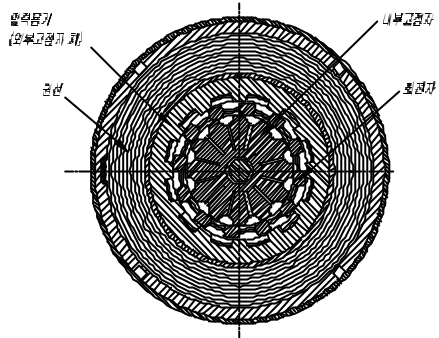


그림 3 모터 단면도

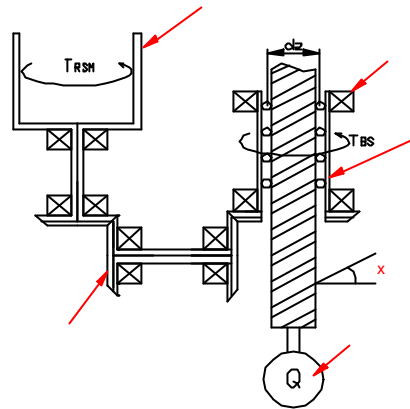


그림 4 볼스크류에서 스텝모터
까지의 하중전달 경로

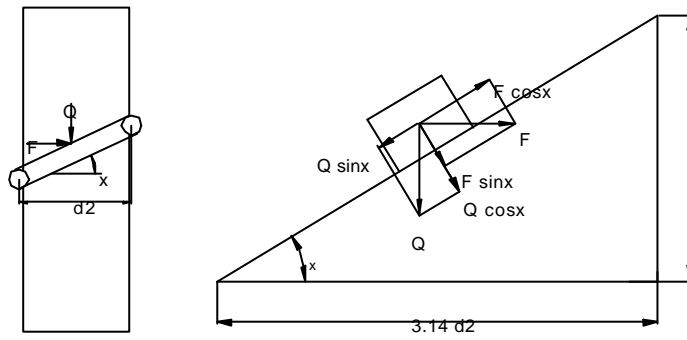


그림 5 볼스크류의 기하학적 모델링

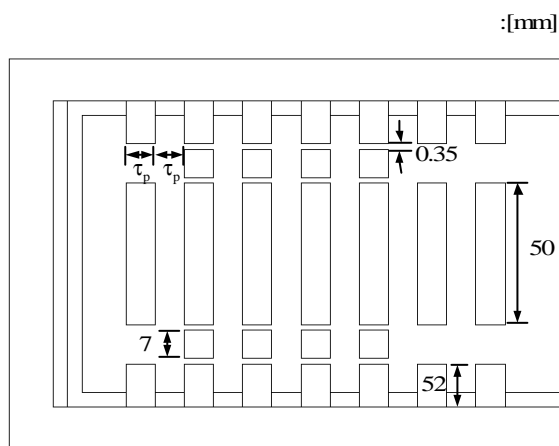


그림 6 회전형스텝모터 2차원 등가화 모델

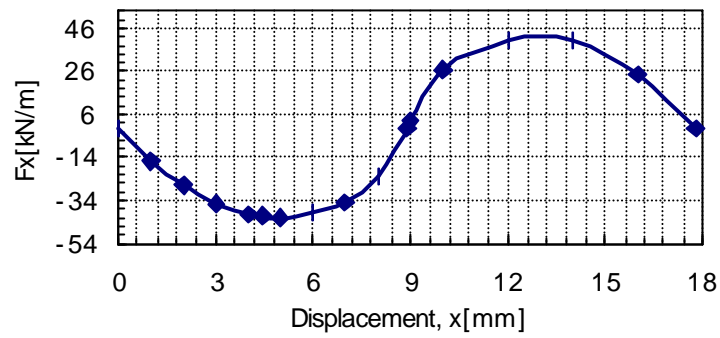


그림 7 회전자 위치에 따른 정추력곡선

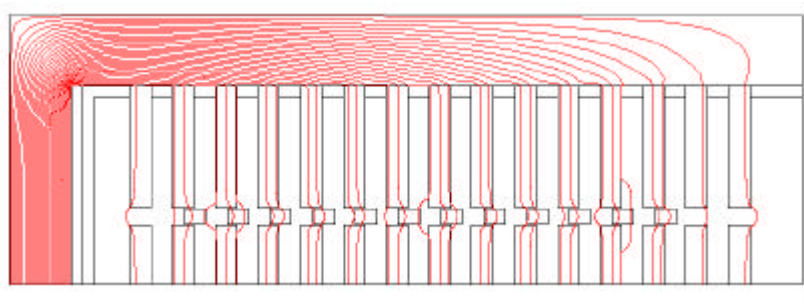


그림 8 회전자가 5mm 이동했을 때의 등자속선 분포

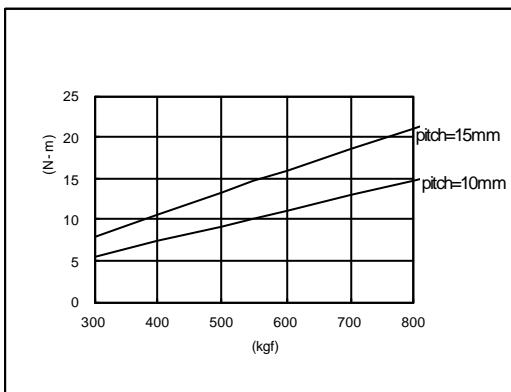


그림 9 부하에 따른 모터 필요토크

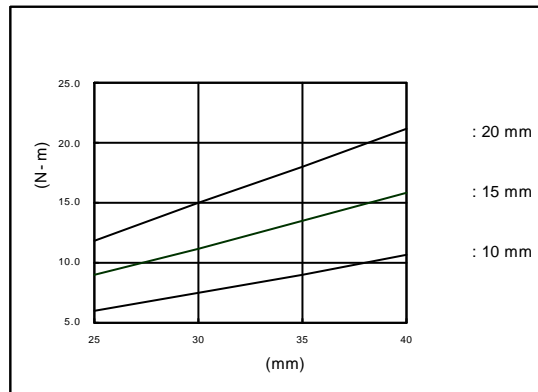


그림 10 모터반경 및 치높이에 따른 모터토크