

'99 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 제어봉구동장치의 선형펄스모터 설계

Design of Linear Pulse Motor for Control Element Drive Mechanism of SMART

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

감도현
한국전기연구소
경남 창원시 성주동 28-1

요 약

일체형원자로 SMART에는 원자로 중앙덮개 상부에 선형펄스모터형 제어봉구동장치 49대가 설치되는데 좁은 공간에 많은 수의 제어봉구동장치가 조밀하게 설치되므로 유지보수, 권선의 배치 또는 권선에서 발산되는 열을 냉각하기 위한 공간을 확보할 수 있는 구조설계가 필요하다. 본 논문에서는 제어봉구동장치의 하부용기 부품중 외경이 가장 큰 선형펄스모터의 직경을 줄이고 여기에서 감소된 추력을 다른 구조치수를 변경함으로써 보상하는 방법으로 제어봉구동장치 사이의 공간을 확보할 수 있는 방안을 제시하였다.

Abstract

49 Control Rod Drive Mechanisms(CEDMs) are densely installed on the reactor central head of SMART. The structural design should ensure the space for maintenance/repair, cable routing, and heat release from the motor. In this paper, an improved design is presented to enlarge the space between CEDMs by decreasing the diameter of linear pulse motor. The reduction of motor thrust force due to the decrease of the motor diameter is compensated by resizing the other structural components.

1. 서 론

일체형원자로 SMART[1]에 장착되는 선형펄스모터(Linear Pulse Motor ; LPM)형 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism ; CEDM)[2]는 총 행정거리가 2,000mm로서 그림 1에서 보는 바와 같이 길고 훅쭉한 형태이다. 설계온도는 350°C,

설계압력은 17 MPa 이고 압력경계 내부는 일차 냉각재로 채워져 있다. 이 구동장치
의 주요 구성 부품은 선형펄스모터집합체, 위치지시기 및 상하부 한계스위치, 연
장봉 집합체, 수력댐퍼, 압력용기 등이다

선형펄스모터는 입력펄스 신호에 의하여 코일의 여자조건이 바뀔 때마다 정확하게
일정 피치씩 직선방향으로 전진운동을 하는 모터이다. 회전형의 펄스 모터가 입력펄스
신호에 따라 일정 회전각씩 회전하는 것과 기본원리는 동일하기 때문에 양자의 특성
에는 유사성이 있고 회전 펄스 모터와 같은 방식으로 사용할 수 있다. SMART의 제어봉구
동장치에 사용되는 선형펄스모터는 원통형의 4상 가변 릴럭턴스형 스테핑 모터로서 별
도의 밀봉이 필요 없는 Canned Motor 형태이다. SMART에는 이러한 선형펄스모터를
구동모터로 하고 있는 제어봉구동장치 49대가 원자로 중앙 덮개 상부에 장착되는데
좁은 공간상에 많은 CEDM을 설치하게 되므로 유지보수를 위한 공간, 권선의 배치
를 위한 공간 혹은 권선에서 발산되는 열을 냉각시키기 위한 공간이 필요하다. 이
를 위해서는 선형펄스모터의 직경을 가능한 작게 설계해야 하는데 모터 직경을 줄
이면 고정자 권선의 유효 단면적이 작아져서 결국 모터의 추력이 감소하게 된다.
본 논문에서는 추력에 관계되는 구조 변수인 고정자 치의 크기, 치 개수 등을 변수
로 하여 모터 직경을 가능한 한 작게 설계할 수 있는 방안을 살펴보았다.

2. 선형펄스모터의 설계기법[3]

그림 1에서 보는 바와 같이 선형펄스모터는 연장봉과 연결되어 상하운동을 하는 가동자 및
내,외부 고정자 치, 그리고 압력용기 바깥쪽에 상하 구동방향으로 선형적으로 배치된 4개의 권
선블럭으로 이루어져 있다. 가동자, 연장봉 및 제어봉그룹을 포함한 모든 구동부분이 선형펄스
모터의 전자력만으로 지지되고 있으며 고정자를 내부고정자와 외부고정자로 분리하여 그 사이
로 가동자가 상하운동을 하도록 하였다. 가동자와 고정자가 직접 접촉하는 것을 방지하기 위
하여 각 외부고정자 치구조물 사이, 그리고 내부고정자 사이에 마찰베어링을 설치하였으며, 가
동자는 이 마찰베어링에서만 접촉하게 된다. 이 마찰베어링 재질은 고온에서도 내마모성이 우
수하고 마찰계수가 적은 Graphite-fluoroplast를 사용함으로써 마찰에 의한 저항을 최소화할
수 있도록 하였다. 각 상권선에서의 권선의 배치는 여러 가지 방법이 있을 수 있는데 본 구동
장치에 사용되는 것과 같이 4개의 권선을 설치하는 경우는 그림 2와 같이 배치될 수 있다. 자
력선 방향을 원활히 하기 위하여 압력용기, 외부고정자 치구조물, 가동자의 네 모서리를 비자
성체로 용접하여 제작한다.

권선은 온도에 대한 저항력이 약하므로 권선블럭은 압력용기의 외부에 설치되도록 하여 일
차수가 직접 접촉되지 않도록 하였으며, 권선블럭이 설치된 공간은 외부공기와 닿지 않도록
얇은 스테인리스강으로 된 용기로 덮는다. 선형펄스모터는 4개의 상권선 중 두개의 상권선에

여자(2상 여자)함으로써 가동자를 상하로 구동하게 되는데, 그림 3에 표시된 것처럼 각 상권선을 위에서부터 차례로 1, 2, 3, 4 라고 할 경우, 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 의 순서로 여자하면 제어봉이 삽입되고, 4-3, 3-2, 2-1, 1-4 의 순서로 여자하면 제어봉이 인출된다.

제어봉의 삽입 및 인출속도는 제어장치에서 선형펄스모터로 보낸 펄스의 수에 의해 결정된다. 가동자 및 고정자의 치 피치를 p 라 하면 가동자 치가 고정자 치와 상이 바뀔 때마다 $p/4$ 만큼 어긋나도록 설계함으로써(그림 3) 가동자는 4회의 펄스마다 한 피치만큼 이동하게 되며, 결국 한 펄스당 가동자의 이동거리(제어봉 이동거리)는 $p/4$ 가 된다. 따라서 가동자 및 고정자의 치 피치를 조절함으로써 한 펄스당 이동거리를 조정할 수 있다. 현재 개념 설계된 선형펄스모터의 주요 치수는 다음과 같다.

모터 외경(mm)	188
고정자 치 개수	8
고정자 치폭(mm)	6.5
고정자 슬롯폭(mm)	9.5
권선 단면적(mm ²)	784
공극(mm)	0.35
내부고정자 치높이(mm)	5
외부고정자 치높이(mm)	4

3. 힘 발생원리[4]

선형펄스모터의 힘 발생 기본 원리를 설명하기 위하여 투자율이 무한대인 철심을 가정하여 고려하면, 자기회로에 저장되는 자기에너지는 W_m 과 자기수반에너지 W_∞ 는 다음 식과 같이 된다.

$$W_m = \int \int^B H(B) dB dV$$

$$W_\infty = \int_V \int_0^H H(B) dB dV$$

전류가 일정할 때 발생하는 추력 $F_x(\theta_\delta, x)$ 는 다음과 같다.

$$F_x(\theta_\delta, x) = \left[\frac{\partial W_\infty}{\partial x} \right]_{\theta_\delta = const}$$

여기서, τ 는 pole pitch, δ 는 공극, B 는 공극자속밀도, θ_δ 는 기자력을 나타낸다. 자기수반에너지 W_∞ 를 구하면 다음과 같다.

$$W_\infty = \frac{B^2}{2\mu_0} \delta x l$$

여기서, l 은 z 방향 길이를 나타낸다. 이 때 자속밀도 B 는

$$B = \mu_0 \frac{\mathcal{O}_\delta}{\delta}$$

이므로 자기수반에너지 W_∞ 는

$$W_\infty(\mathcal{O}_\delta, x) = \frac{\mu_0 \mathcal{O}_\delta^2}{2\delta} x l$$

와 같이 되고 이 식으로부터 추력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$F_x(\mathcal{O}_\delta, x) = \frac{\mu_0}{2\delta} \mathcal{O}_\delta^2 l$$

$$F_{x_w} = \frac{1}{2} F_x = \frac{\mu_0}{4\delta} \mathcal{O}_\delta^2 l$$

따라서, 단위면적당 발생하는 힘 밀도 F_{AX} 는 다음 식과 같다.

$$F_{AX} = \frac{F_{x_w}}{2\tau l} = \frac{\mu_0}{8\delta\tau} \mathcal{O}_\delta^2$$

4. 전자기 해석

4.1 해석 모델

3장에서 설명한 바와 같은 과정에 따라 선형펄스모터의 추력을 구하기 위한 전자기 해석 모델이 그림 4에 주어져 있다. 이 모델은 회전방향의 자로 길이를 고려하여 2차원으로 등가화한 모델이다. 모델의 위, 아래 면은 Dirichlet 경계조건으로 두었고 왼쪽과 오른쪽면은 Neumann 경계조건으로 두었다. 입력 파라미터들은 다음과 같다.

- 해석 solver : Magnetostatic
- 재질
 - o 가동자 및 고정자 치 : SUS430
 - o 권선 코어 : S20
- 공급전류밀도 : $1A/mm^2$

그림 5는 모델에 사용된 변수들을 나타낸 것이며 그림 6은 계산에 사용된 재질에 대한 B-H 특성 곡선으로서 모두 실험에 의해 얻은 값들이다.

4.2 해석 방법

고정자 치폭(a)과 슬롯폭(b)을 더한 값(a+b)은 피치로서 이 피치는 한 스텝당 제어봉의 삽입/인출량과 직접 관계가 있으므로 이 수치는 개념 설계된 대로 16mm로 고정하고 대신 치폭과 슬롯폭의 비인 b/a를 변화시키면서 추력의 변화를 살펴보았다. 공극은 작을수록 좋으므로

가공 가능한 최소길이인 0.35mm로 고정시켰다. 치높이 및 치 개수도 추력에 많은 영향을 주므로 설계변수로 택하였다. 전자기 해석은 전자장 수치해석용 프로그램인 Flux-2D[5]를 이용하였다.

4.3 해석결과 및 고찰

그림 7은 4.1절의 해석모형을 사용하여 얻은 고정자 치폭과 슬롯폭의 비에 대한 추력밀도 곡선으로서 b/a 의 값이 커질수록 추력도 크게 증가하지만 b/a 가 1.6 이상인 경우는 증가량이 둔화되는 경향을 보임을 알 수 있다. 그림 8은 고정자 치 높이에 대한 추력밀도 변화 곡선인데 치 높이가 커질수록 추력밀도도 커지지만 치높이가 4mm 이상 되면 더 이상 추력이 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로, 그리고 제작 및 가공성을 고려하면 $a=6.0\text{mm}$, $b=10.0\text{mm}$ (따라서 $b/a=1.67$), 그리고 치 높이는 5mm로 설계하는 것이 최적임이 판명되었다. 그림 9는 이와 같이 치폭과 슬롯, 그리고 치높이가 결정된 상태에서 모터의 직경과 직철 관계가 있는 권선 단면의 반경방향 길이 변화율(권선 단면적의 변화율과 동일)에 대한 추력의 변화율을 구한 곡선인데 권선 단면이 작아짐에 따라 추력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 모터의 직경이 추력에 미치는 영향이 매우 민감하다는 것을 보이는 것이다. 한편 치 개수의 증가는 바로 권선길이의 증가를 의미하므로 추력도 그림 10과 같이 선형적으로 변화하게 된다. 그림 9 및 10으로부터 치 개수를 증가시키는 경우 이에 대한 모터직경의 감소 가능량을 정리하면 표 1 과 같다. 치 개수가 증가하면 가동자의 길이가 길어지는데 가동자는 그 구조특성상 제작 및 가공이 매우 어려운 부품이므로 길이가 증가하는 경우는 이를 고려하여 결정하여야 한다.

5. 결론

선형펄스모터의 반경을 최소화하기 위하여 추력과 관계되는 여러 가지 구조치수의 변화에 대한 추력의 변동 경향을 살펴보았는데 고정자 치폭과 슬롯폭의 비(b/a)가 증가하면 추력밀도도 증가하지만 b/a 가 1.6 이상인 경우는 증가량이 급격히 둔화되며, 고정자 치 높이가 증가하면 추력밀도도 증가하지만 치높이가 4mm 이상 되면 더 이상 추력이 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 모터 직경과 직철 관련이 있는 권선 단면적을 감소시키면 추력은 급격히 감소하며, 고정자 치 개수와 추력은 거의 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 이러한 계산 결과 및 제작/가공성을 고려하여 치 개수가 정해지면 이에 따른 모터직경의 감소 정도를 결정할 수 있다. 향후 설계가 진행됨에 따라 모터 권선 열해석을 포함한 보다 정밀한 평가를 수행할 계획이며 최종적으로는 시제품 제작 및 시험을 통하여 계산결과들을 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 장문희 외, “테자기획-중소형 일체형원자로 SMART 개발”, 대한기계학회 기계저널, Vol.39, No. 4, 1999. 4.
- [2] 김지호 외, “SMART 선형펄스모터형 제어봉구동장치 설계”, 한국원자력학회 ‘98 추계 학술발표회 논문집, 1998. 10.
- [3] 김종인 외, “일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서”, 한국원자력 연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999. 3.
- [4] K.C.Chang et al. “A Design of the Cylindrical VR Type Linear Pulse Motor for the CEDM of Reactor”, ICEE '99(International Conference on Electrical Engineering 1999), 1999. 8.
- [5] Flux2D Version 7.2x, MAGSOFT corporation.

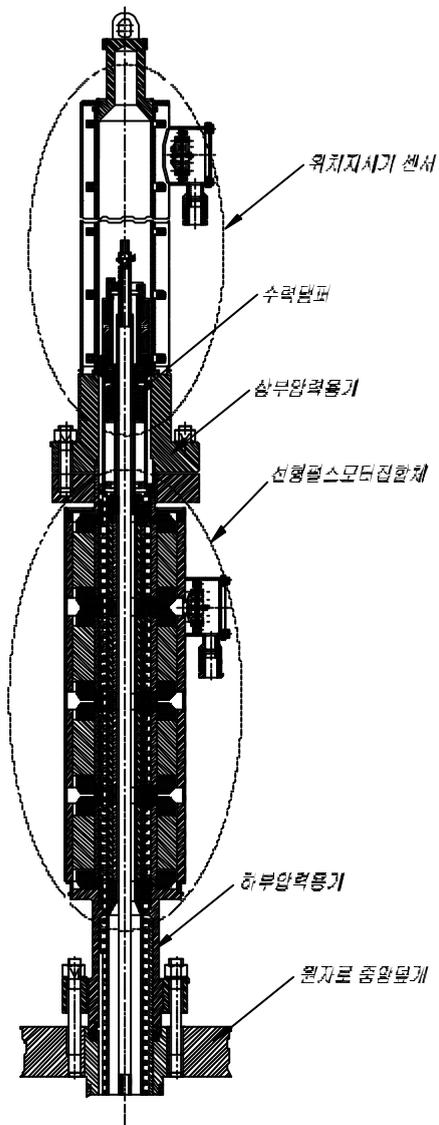


그림 1 선형펄스모터형 제어봉구동장치

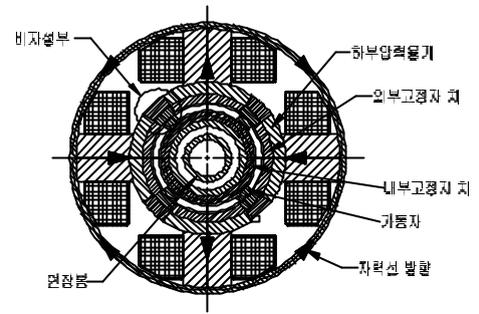


그림 2 선형펄스모터의 횡단면도

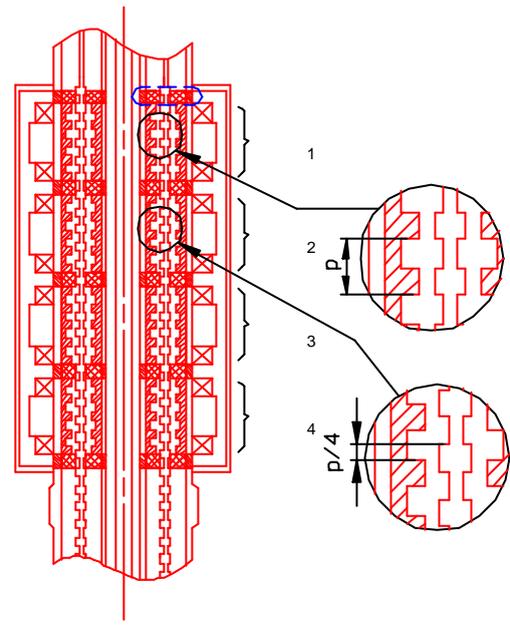
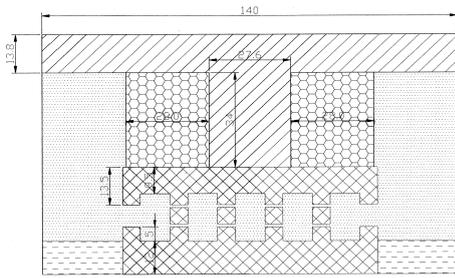


그림 3 선형펄스모터의 피치개념



-  Vacuum
-  Winding
-  S20
-  SUS430
-  $\mu_r = 100,000$

그림 4 선형펄스모터의 2차원
등가변환 모델

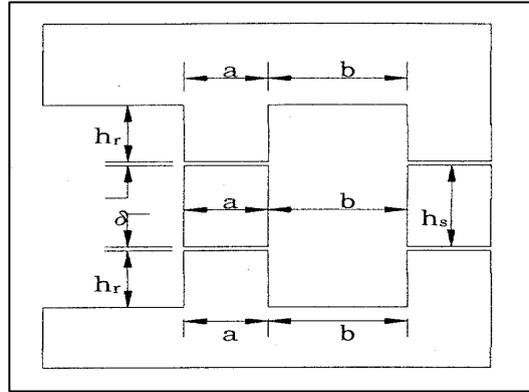


그림 5 2차원 등가화 모델 변수

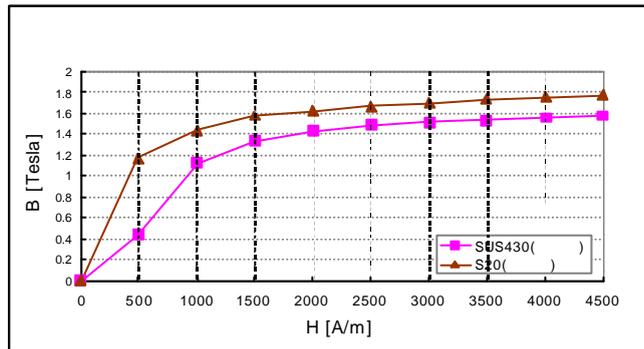


그림 6 재료의 B-H 특성곡선

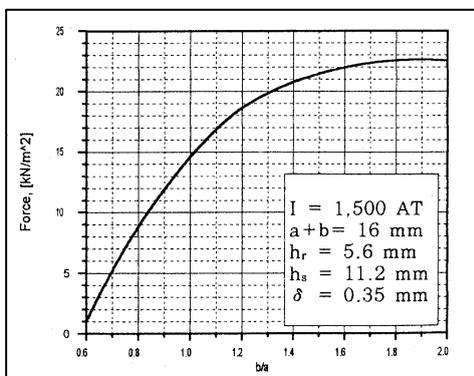


그림 7 치폭과 슬롯에 대한
추력밀도 곡선

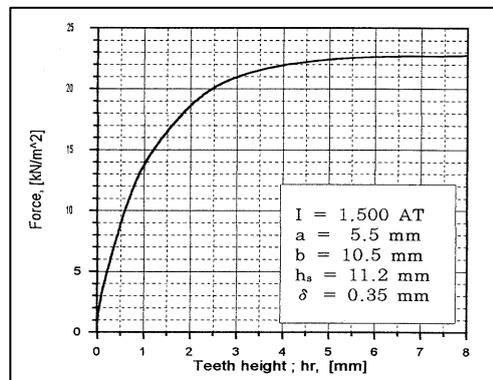


그림 8 고정자 치 높이에 대한
추력밀도 곡선

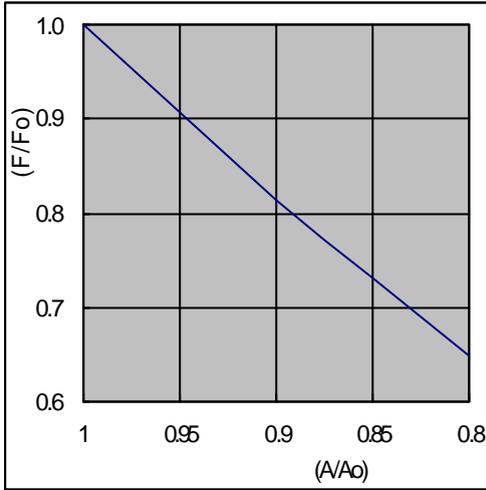


그림 9 권선 단면적 변화에 따른 추력 변화 곡선

F_0, A_0 : 치수변경 전의 추력 및 단면적
 F, A : 치수변경 후의 추력 및 단면적

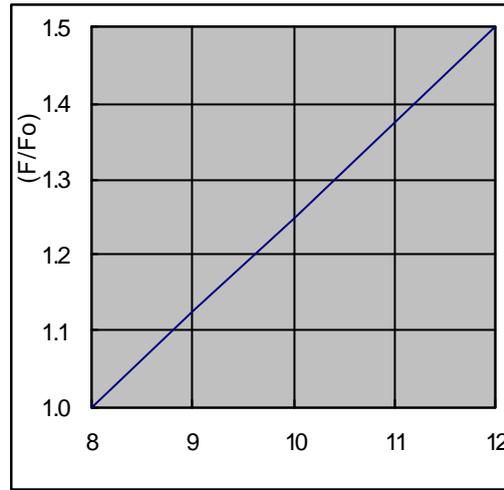


그림 10 모터 치 개수에 따른 모터 추력 변화 곡선

표 1 치개수와 모터직경 감소 가능량

치 개수	직경 감소가능량(%)
8	0
9	5
10	10
11	15
12	20