

한국형 원자로의 제어봉 구동용 선형전동기 설계에 관한 연구

장기찬*, 하경덕*, 강도현*, 허형**, 김지호**, 김종인**
*한국전기연구소, **한국원자력연구소

A Study on the Linear Pulse Motor Driving Control-Rod for Korean Nucle Power Plant

K. C. Chang*, K. D. Ha*, D. H. Kang*, H. Huh**, J. H. Kim**, J. I. Kim**
*KERI, **KAERI

Abstract - This paper introduces the design method of a variable reluctance liner pulse motor to be analysed by a 3-dimensional problem in the 2-dimension. And it shows the thrust force density with respect to the ratio of the slot width to the teeth width, the height of mover and the height of tooth.

1. 서 론

최근 산업의 고도화 및 국민 생활수준 향상으로 전기 에너지 수요가 급증하고 있는 추세이다. 현재 전기에너지의 발생은 주로 화력, 수력, 원자력 발전에 의존하고 있다. 원자력 발전은 비교적 경제적으로 전기에너지를 발생할 수 있는 장점으로 인하여 그의 중요성이 강조되고 있다. 원자력 발전은 핵분열과 핵융합 에너지를 이용할 수 있으나 핵융합은 아직 실용화 되지 않았고 핵분열을 이용하고 있다. 핵분열은 우라늄 등의 무거운 원자의 원자핵이 중성자의 충격을 받았을 때 발생하므로 핵분열에서 발생하는 중성자 수를 제어하므로써 핵분열 방출 에너지를 제어할 수 있다. 원자로에서 연쇄핵분열시 발생하는 중성자 수를 제어하기 위하여 중성자를 잘 흡수하는 붕소 등의 제어봉을 이용한다.

원자로의 CEDM(Control Element Drive Mechanism)의 제어봉 구동용으로 회전형 전동기나, 선형 액츄에이터를 많이 이용하고 왔다. 최근 제작기술의 발전으로 인하여 원자로 제어봉 구동용으로 선형전동기를 응용하는 원자료가 출현하였다.

본 논문에서는 한국형 원자로 제어봉 구동용으로 선형전동기를 이용하기 위하여 가변릴럭턴스(Variable Reluctance)형의 선형펄스전동기(LPM)를 선정하고 이에 대한 기본적인 이론을 논하고, 최적 추력이 발생하는 설계변수를 도출하기 위하여 각 변수에 대한 추력발생 경향을 유한요소법으로 해석하여 최적치를 결정하고 분석한다.

2. 선형펄스전동기(LPM)

2.1 힘발생 원리

VR형 선형펄스 전동기의 힘 발생원리를 간략히 설명하기 위해서 투자율이 무한대인 철심을 가정하여 그림 1과 같은 1차원 해석모델을 고려할 수 있다. 그림에서 r는 pole pitch, δ는 공극, B는 공극자속밀도이다. 자기회로에 저장되는 자기에너지 W_m과 자기수반에너지 W_{co}는 다음 식 (1), 식 (2)와같이 된다.

$$W_m = \int_V \int_0^B H(B) dB dV \quad (1)$$

$$W_{co} = \int_V \int_0^H B(H) dH dV \quad (2)$$

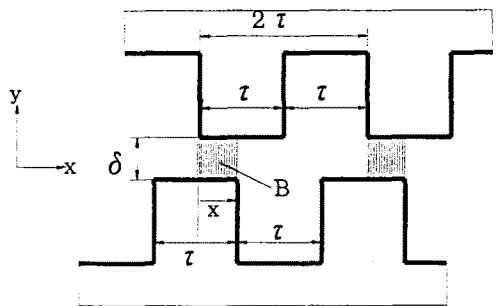


그림 1 VR형 선형펄스전동기의 1차원 모델

그림 1에서 전류(기자력)가 일정할 때 발생하는 추력 F_x(θ_δ, x)는 다음 식 (3)과같이 된다.

$$F_x(\theta_\delta, x) = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial x} \right]_{\theta_\delta = const} \quad (3)$$

여기서 θ_δ는 기자력을 나타낸다. 자기수반에너지 W_{co}를 그림 1의 모델에서 구하면 다음 식 (4)와 같다:

$$W_{co} = \frac{B^2}{2\mu_0} \delta x l \quad (4)$$

여기서 l은 해석 모델의 z방향 길이를 나타낸다. 이때 자속밀도 B는 식 (5)와 같다.

$$B = \mu_0 \frac{\theta_\delta}{\delta} \quad (5)$$

식 (4)와 식(5)에서 자기수반에너지 W_{co}는 다음과 같다.

$$W_{co}(\theta_\delta, x) = \frac{\mu_0 \theta_\delta^2}{2\delta} x l \quad (6)$$

식 (3)에서 힘을 구하면 다음과 같다.

$$F_x(\theta_\delta, x) = \frac{\mu_0}{2\delta} \theta_\delta^2 l \quad (7)$$

1차원 해석모델에서 발생하는 평균 힘은 식 (7)값의

절반에 해당된다.

$$F_{xmi} = \frac{1}{2} F_x = \frac{\mu_0}{4\delta} \theta_0^2 l \quad (8)$$

따라서 단위면적당 발생하는 힘 밀도 F_{Ax} 는 다음 식 (9)와 같다.

$$F_{Ax} = \frac{F_{xmi}}{2\tau l} = \frac{\mu_0}{8\delta\tau} \theta_0^2 \quad (9)$$

이상의 식 (9)는 VR형 선형전동기에서 발생하는 힘 밀도로 전동기 설계시 기본식으로 이용하고 있다.

2.2. 설계

2.2.1 설계사양

표 1. 전동기 설계 사양

번호	항 목	값	비고
1	전 체 구 동 거 리 [mm]	2,000	
2	1 pulse당 이동거리 [mm]	4.0	
3	구 동 속 도 [mm/s]	0~50	
4	제어봉집합체 중량 [kg]	30	
5	가 동 자 중 량 [kg]	16	
6	가 동 부 총 중 량 [kg]	60~70	
7	Holding Force [kg]	150	48 [V]
8	Dynamic Thrust Force [kg]	100	138 [V]
9	공 극 [mm]	0.4이하	
10	베 어 링 마 찰 력 [kg]	15~20	
11	기 타 저 항 력 [kg]	10	

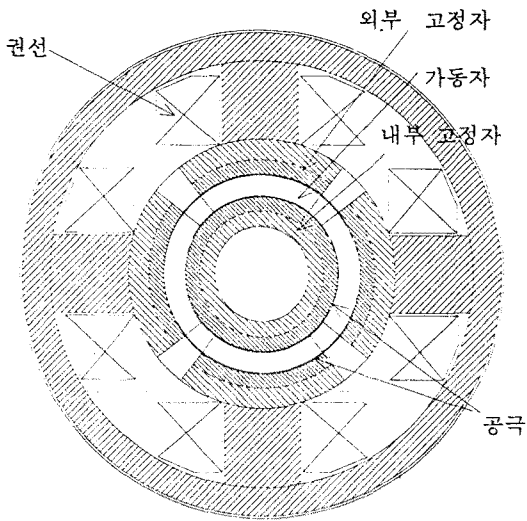


그림 2. 제어봉 구동용 LPM 단면도

단위체적당 고추력을 얻기위하여 그림 2와같이 2중 공극을 갖는 VR형 선형필스전동기를 선정한다. 그림 2에서 치는 원주방향으로 형성시키고 권선이 여자되면 자로는 외부 고정자, 공극, 가동자, 공극, 내부 고정자로 형성되어 공극자속에 의해서 추력이 발생한다. 그림 2의

추력을 계산하기 위하여 3차원으로 모델링 해야지만 본 설계에서는 2차원으로 등가화하여 해석한다. 그림 2의 2차원 등가화 모델의 일부와 설계변수를 그림 3에 나타내었다.

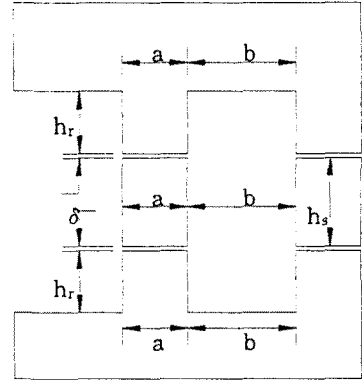


그림 3. 2차원 등가화 모델 변수

2.2.2 해석 결과

그림 4는 상용전자계해석틀을 이용하여 2차원 등가 모델에서 고정자치와 가동자치가 완전히 일치 되었을 때의 등자속선분포를 나타낸다.

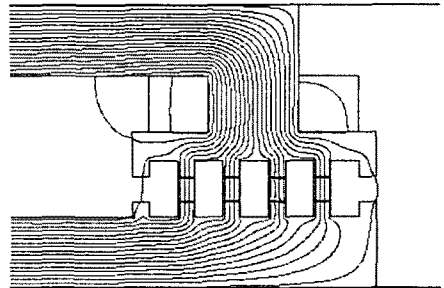


그림 4. 등자속선 분포

그림 3에 나타난 변수 값의 변화에 대하여 선형필스전동기에서 발생하는 추력밀도의 추이를 계산한다. 그림 5는 치폭 a에 대한 슬릿폭 b의 비가 변할 때 발생하는 추력밀도를 보여준다.

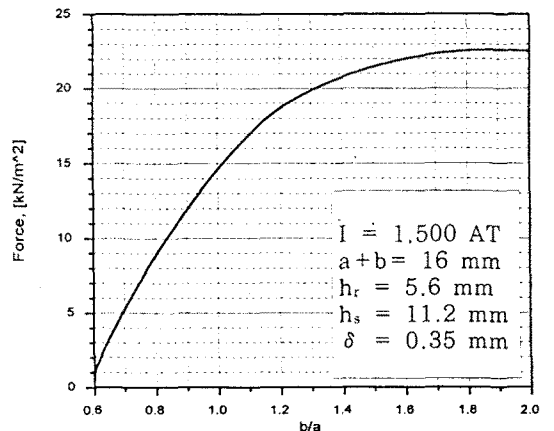


그림 5. 치폭과 슬릿폭에 대한 추력밀도 곡선

그림 6은 가동자 높이, h_s 에 대한 추력밀도 변화추이 곡선이다. 그림 7은 고정자치 높이에 대한 추력밀도 변화추이 곡선이다.

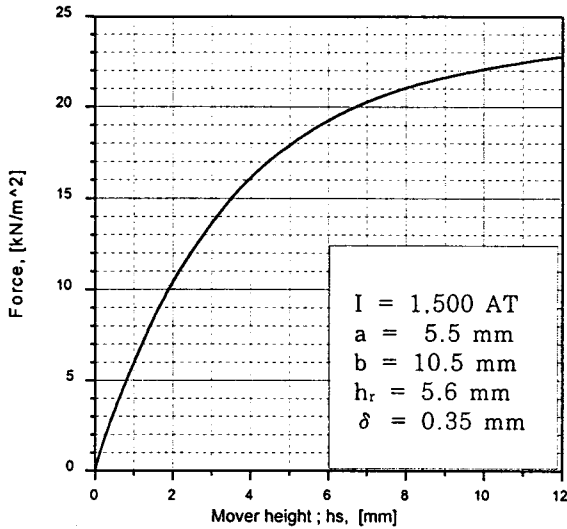


그림 6 가동자 높이에 대한 추력밀도 곡선

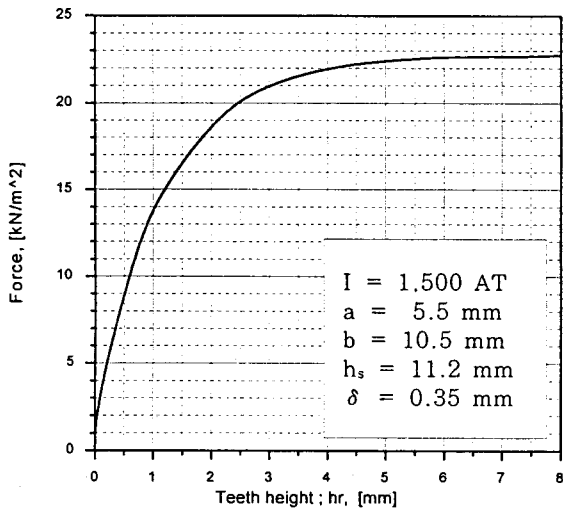


그림 7 고정자치 높이에 대한 추력밀도 곡선

이상과같은 계산결과로부터 표 1의 사양과 제작상 제약 조건 및 조립조건을 고려하여 그림 2의 원자력 제어봉 구동용 VR형 선형펄스전동기의 세부 설계치를 결정 한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2의 설계치수로 모델링하고 여자전류가 1.500AT일 때, 유한요소법으로 변위에 대한 정추력을 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 변위 x 가 8mm인 점은 고정자와 가동자의 치가 서로 완전히 어긋난 상태를 나타내고, x 가 0인 점은 고정자와 가동자의 치가 서로 완전히 일치한 상태를 나타낸다. 최대정추력 즉 Holding Force는 1.490(N)으로 사양을 만족하고 평균 추력은 약 700(N)으로 계산되었다. 따라서 2상 전파로 할 경우 전 상에서 발생하는 총 추력은 1.400(N)이다.

표 2 설계치수

가동자	내경	59.7 mm
	외경	72.3 mm
	치폭	6.0 mm
	치피치	16.0 mm
	길이	2,200 mm
외부 고정자	내경	73.5 mm
	외경	84.0 mm
	치폭	6.0 mm
	치높이	4.0 mm
	치피치	16.0 mm
내부 고정자	내경	40.0 mm
	외경	59.0 mm
	치폭	6.0 mm
	치높이	5.0 mm
공	극	0.35mm×2
상	수	2상 bipolar
정격전류/턴수		1.500/N

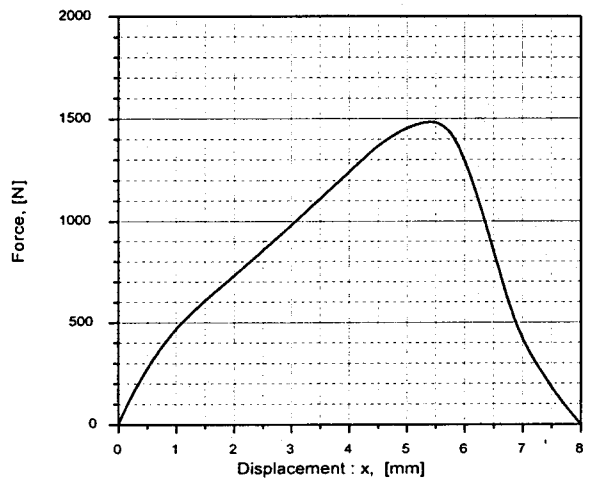


그림 8 설계품의 정추력곡선

3. 결론

원자력 제어봉 구동용 선형펄스전동기의 3차원 모델을 2차원으로 등가모델로 변환시켜 각 설계변수에 대한 특성을 해석한 결과, 어떤 특정한 치수에서 최대 추력이 발생하는 현상을 발견하였다. 본 설계 선형펄스전동기의 구조가 복잡한 관계로 인하여 최적치를 설계치수로 결정하지 못하고 충분한 구조적인 여유를 두고 설계치수를 결정하였다. 본 연구를 통하여 계산된 특성은 사양을 만족하는 것으로 1차적으로 판명되었지만, 차 후 시제품이 제작된 후 계산결과와 시험결과를 비교할 필요가 있다.

(참 고 문 헌)

- (1) Takashi Kenjo, "Stepping Motor and their Micro-processor Controls", Oxford, 1984
- (2) Zeljko Jajtic, "Vortriebskraftoptimierung bei der elektrisch erregten Transversalflußmaschine", 1993