

원전용 제어봉 구동장치 원형 설계

이 종무, 권순만, 변한섭, 김국현, 장기찬  
한국전기연구소

A Prototype Design of the Control Rod Drive Mechanism for Nuclear Power Plants

J.M. Lee, S.M. Kweon, H.S. Pyon, K.H. Kim, K.C. Chang  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper introduces the design method of a Control Rod Drive Mechanism that consists of 3 coils -lift, movable gripper and stationary gripper coil. The vertical attraction forces of the lift, movable gripper, and stationary gripper armatures are calculated by FEM, then the dynamics with full load is demonstrated.

1. 서론

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 발생시킬 수 있는 장점으로 인하여 그 중요성이 강조되고 있다. 핵분열은 우라늄 등의 무거운 원자의 원자핵이 중성자의 충격을 받았을 때 발생하므로 핵분열에서 발생하는 중성자 수를 제어함으로써 핵분열 방출에너지를 제어할 수 있다. 원자로에서 연쇄 반응시 발생하는 중성자 수를 제어하기 위하여 중성자를 흡수하는 붕소 등의 제어봉을 이용한다.

원자로의 제어봉 구동용으로 회전형 전동기나, 선형 액츄에이터, 선형 전동기를 많이 이용하고 있다.

본 논문에서는 현재 원자로 제어봉 구동용으로 사용되고 있는 CRDM(Control Rod Drive Mechanism) 설계에 관하여 논한다.

2. CRDM

2.1 자기력 원리

힘 발생원리를 간략히 설명하기 위해서 투자율이 무한대인 철심을 가정하여 그림 1과 같은 1차원 해석모델을 고려하고, 공극 g, 폭 W, 길이 D의 자기구조에서 공극의 자속밀도를 B라 할 때 자기회로에 저장되는 자기 에너지  $W_m$ 과 자기수반에너지  $W_{co}$ 는 다음 식 (1), 식 (2)와 같이 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 1에서 전류(기자력)가 일정할 때 발생하는 자기력  $F_z(\theta, z)$ 는 다음 식 (3)과 같이 된다.

$$F_z(\theta, z) = \left[ \frac{\partial W_{co}}{\partial z} \right]_{\theta = const} \quad (3)$$

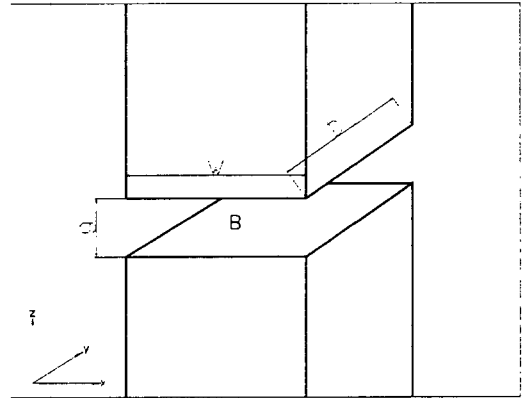


그림 1 전자석 구조

여기서  $\theta$ 는 기자력을 나타낸다. 자기수반에너지  $W_{co}$ 를 그림 1의 모델에서 구하면 다음 식 (4)와 같고, 자속밀도 B는 식 (5)와 같다.

$$W_{co} = \frac{B^2}{2\mu_0} g WD \quad (4)$$

$$B = \mu_0 \frac{\theta}{g} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)에서 자기수반에너지  $W_{co}$ 는 다음과 같다.

$$W_{co}(\theta, z) = \frac{\mu_0 \theta^2}{2g} WD \quad (6)$$

식 (3)에서 힘을 구하면 다음과 같다.

$$F_z(\theta, z) = \frac{\mu_0 \theta^2}{2g^2} WD \quad (7)$$

2.2. CRDM의 설계

2.2.1 CRDM의 구조 및 동작

CRDM의 구조는 그림 2에 나타난 것과 같이 Lift부와 Stationary Latch부로 대별되고, Lift부는 주 하중이 작용하는 제어봉 집합체를 삽입, 인출하는 Lift Armature와 가동부 Shaft를 Latching하는 Movable Gripper로 구성된다. CRDM은 제어봉의 삽입 또는 인출 동작을 수행하며 그 동작순서를 표 1에 나타내었으며, CRDM의 설계사양을 표 2에 나타내었다.

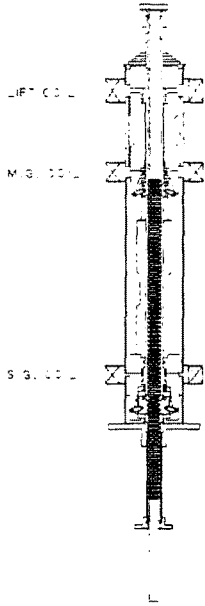


그림 2 CRDM의 구조

표 1 CRDM의 동작 순서

동작	순서	여자코일	여자전류 (A)	동작	이동거리 (mm)
인출 동작	0	SG Coil	4.0	-	0
	1	SG & MG Coil	8.0	↑	1.6
	2	SG Coil	0	↓	1.6
	3	L Coil	44.0	↑	16.0
	4	SG Coil	8.0	↑	1.6
	5	L Coil	16.0	-	0
	6	MG Coil	0	-	0
	7	L Coil	0	-	0
삽입 동작	8	SG Coil	4.0	↓	1.6
	0	SG Coil	4.0	-	0
	1	SG Coil	8.0	↑	1.6
	2	L Coil	44.0	-	0
	3	MG Coil	8.0	-	0
	4	L Coil	16.0	-	0
	5	SG Coil	0	↓	1.6
	6	L Coil	0	-	16.0
	7	SG Coil	8.0	↑	1.6
8	MG Coil	0	-	0	
9	SG Coil	4.0	↓	1.6	

표 2 CRDM의 설계사양

항목	단위	값	비고
가동부 총 중량	kg	130	
총 이동 Step		20	
1 Step 이동거리	mm	16.0	
전류	LC	lifting	A 40.0
		profiled	A 16.0
	MGC		A 8.0
		SGC	latching
profiled	A 4.0		
최대속도	mm/s	1.300	

## 2.2.2 CRDM의 기초설계

그림 3과 같이 S10C의 구조용 탄소강을 철심재료로 선정하여 Lift의 가동부가 완전히 이동했을 때, 철심의 자속밀도를 약 1.4T, 발생힘을 약 10,000N으로 설정했을 때의 필요 단면적은 약 11,000mm<sup>2</sup>가 요구된다. 자기력 발생부를 원통으로 결정하여 내경 52mm, 외경 130mm로 정하면 필요 단면적을 얻을 수 있다. 설계사양에서 제약조건으로 각 권선의 전류가 결정되어 있으므로 턴수를 조정하여 원하는 자기력을 얻는다.

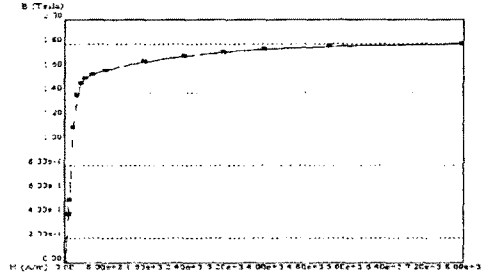


그림 3 S10C의 자기특성

## 2.3. CRDM의 해석

### 2.3.1 CRDM의 자체 해석

그림 4, 5, 6은 CRDM Lift 부의 각 권선의 전류에 대한 등자속선 분포를 해석한 결과이며, 그림 7은 Stationary부의 등자속선 분포를 보여 준다.

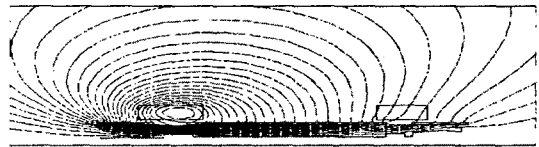


그림 4 Lift Part의 Flux line(LC=20,000AT, MGC=0AT)

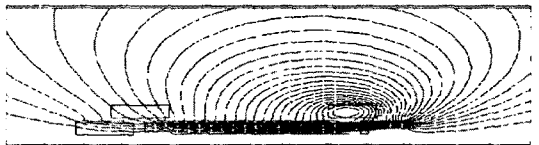


그림 5 Lift Part의 Flux line(LC=0AT, MGC=12,000AT)

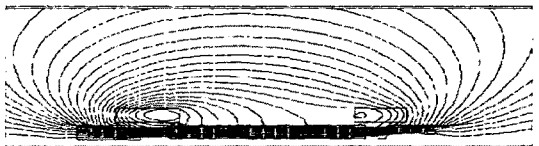


그림 6 Lift Part의 Flux line(LC=20,000AT, MGC=12,000AT)

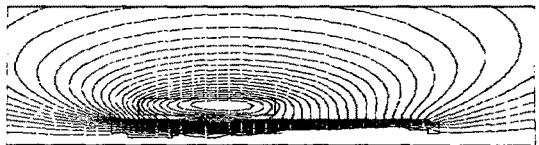


그림 7 Stationary부의 Flux line 분포

그림 8, 9는 Lift와 Movable gripper armature의 기자력이 각각 20,000, 12,000AT일 때의 자기력을 나타낸다. 그림 10은 Stationary gripper Coil의 기자력이 12,000, 6,000AT일 때의 발생힘이다.

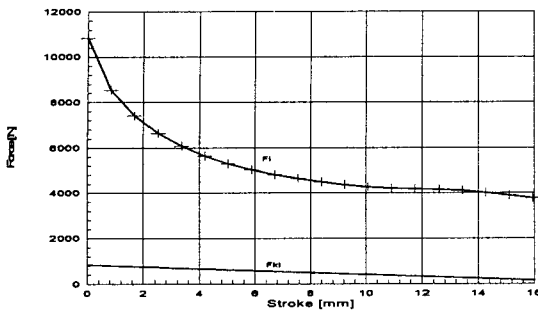


그림 8 Lift armature의 발생힘

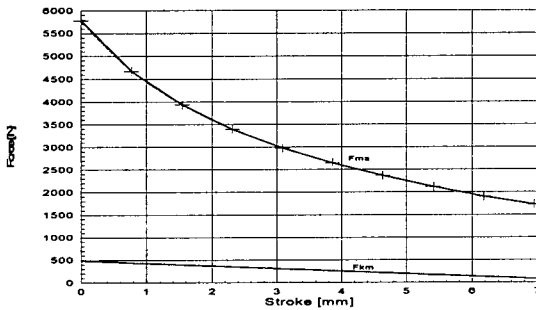


그림 9 Movable gripper armature의 발생힘

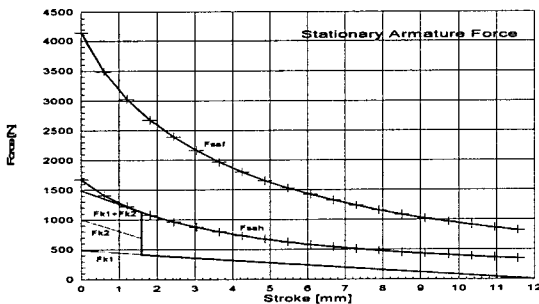


그림 10 Stationary gripper armature의 발생힘

### 2.3.2 CRDM의 동특성

그림 11은 Lift armature에 그림 8의 자기력 F1과 스프링 복귀력 Fk1이 작용할 때의 130kg의 부하를 인출하는 동역학 곡선이다.

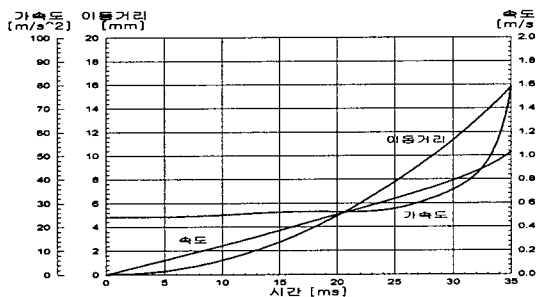


그림 11 Lift Armature의 동특성

그림 12은 Movable gripper armature에 그림 9의 자기력 Fm과 스프링 복귀력 Fk2이 작용할 때의 gripper를 latching하는 동특성 곡선이다. 그림 13은 Stationary gripper armature에 그림 10의 힘이 작용할 때의 동특성 이다.

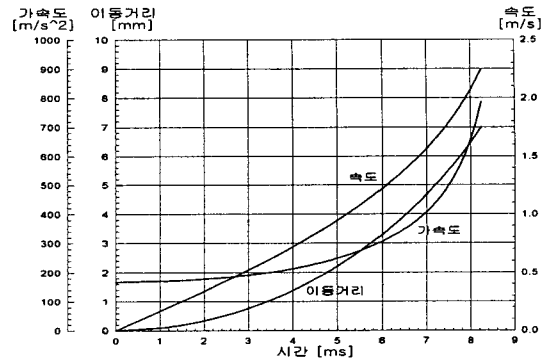


그림 12 Movable gripper armature의 동특성

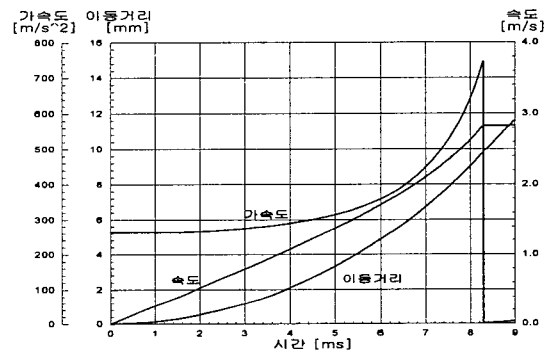


그림 13 Stationary gripper armature의 동특성

## 3. 결 론

원자력발전소용의 제어봉 구동장치인 CRDM을 설계하고 해석한 결과 설계사양에서 분당 인출, 삽입 최대속도가 1,300mm/mim이 되는 1 step 동작완료 시간은 750ms이다. 본 설계 CRDM이 표 1에 나타난 동작을 완료하는데 필요한 시간은, Stationary Gripper Armature가 부하를 1.6mm 인출하는 시간 약 1ms, Movable Gripper Armature가 동작을 완료하는 시간 약 10ms, Lift Armature가 130kg의 하중을 16mm 인출하는 시간 약 35ms, 마지막 순서에서 Stationary Gripper Armature가 제어봉을 latching하고 고정하는 시간 약 10ms를 합한 시간 약 56ms에 추가로 각 동작간에 필요한 시간과 각 armature가 복귀하는 시간을 합하더라도 최고속도인 750ms 이내를 충분히 만족하는 것으로 해석되었다.

### [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.