

원전용 CEDM 원형 설계

이종무, 김춘경, 김석주, 권순만, 장기찬*
한국전기연구원, *그린모텍(주)

A Prototype Design of Control Element Drive Mechanism for Nuclear Power Plants

J. M. Lee, C. K. Kim, S. J. Kim, S. M. Kwon, K. C. Chang*
KERI, *Green MoTech Co. Ltd.

Abstract - This paper deals with a design experience of Control Element Drive Mechanism (CEDM) that is used to withdraw or insert control rods in nuclear reactor. The design is carried out to satisfy the performance requirements for CEDM that were given to ensure reliable and secure actions of the rods. The electrical parameters for four coils that energize the mechanical actuators in CEDM are determined first. Then, a computer simulation for CEDM with these coils is performed to see how it works. An adjustment of the coil parameters is made from the simulation results. Finally, it is shown that our final design is valid to guarantee the required performance since the FEM(finite Element Method) calculation shows sufficient vertical attraction forces of a lift armature and a latch magnet, and good dynamics with a full load.

1. 서론

최근 산업의 고도화 및 국민 생활수준 향상으로 전기에너지 수요가 급증하고 있는 추세이다. 현재 전기에너지의 발생은 주로 화력, 수력, 원자력 발전에 의존하고 있다. 원자력 발전은 비교적 경제적으로 전기에너지를 생산할 수 있다는 장점으로 인하여 그 필요성이 강조되고 있다. 핵분열은 우라늄 등 무거운 원자의 원자핵이 중성자의 충격을 받았을 때 발생하므로 핵분열에서 발생하는 중성자의 수를 제어함으로써 핵분열에서 발생하는 중성자의 수를 제어하기 위하여 중성자를 흡수하는 붕소 등의 제어봉을 사용한다.

현재 국내 경수로형 원자력발전소의 출력을 제어하기 위하여 사용하고 있는 제어봉 구동장치인 CRDM (Control Rod Drive Mechanism)과

CEDM 2가지 형태로 되어 있다. 전자는 3개의 코일로 되어 있고 후자는 4개의 코일로 구성되어 있으며 각 코일의 전류를 순차적으로 조합하여 인출과 삽입동작을 하도록 설계되어 있으며 본 논문에서는 CEDM의 설계에 관하여 논한다.

2. 본론

2.1 자기력의 원리

힘 발생원리를 간략히 설명하기 위해서 투자율이 무한대인 철심을 가정하여 그림 1과 같은 1차원 해석모델을 고려하고, 공극 g , 폭 W , 길이 D 의 자기구조에서 공극의 자속밀도를 B 라 할 때 자기회로에 저장되는 자기에너지 W_m 과 자기수반 에너지 W_{co} 는 다음 식 (1), (2)와 같이 된다.

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

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

그림 1에서 전류(기자력)가 일정할 때 발생하는 자기력 $F_z(\theta, z)$ 는 다음 식 (3)과 같이 된다.

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

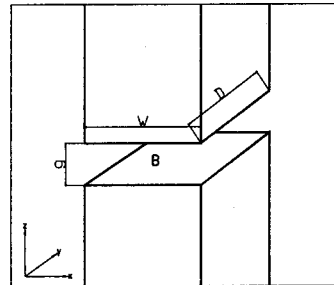


그림 1. 전자석의 구조

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

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

$$B = \mu_0 \frac{\theta}{g} \text{ [Wb/m}^2\text{]} \quad (5)$$

식 (4), (5)로부터 자기수반에너지 W_{co} 는 다음과 같이 유도된다.

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

식 (3)에 대입하여 힘을 구하면 다음과 같다.

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

2.2 CEDM의 설계

2.2.1 CEDM의 구조 및 동작사양

CEDM의 구조는 그림 2에 나타난 바와 같이 전기에너지 변환이 발생하는 전자석이 상부와 하부로 구성되어 있고, 각 부는 Lift부와 Latch(Gripper)부로 구성되어 있다. Lift부는 제어봉의 중량을 원하는 시간 내에 충분히 인출/삽입하여야 할 뿐만 아니라 견고히 유지할 수 있어야 한다. Latch부는 제어봉에 연결된 축을 잡을 수 있는 구조를 가지며 이 또한 제어봉의 중량을 견고히 유지할 수 있어야 한다. Lift Coil이 여자되어 Lift Armature가 이동할 때에는 Latch Magnet가 같이 이동하지만 Latch 동작은 하지 않으며, Latch 동작은 Latch Coil이 여자되면 Latch Magnet가 Lift Armature 방향으로 이동하여 Latch가 축을 잡는 구조이다.

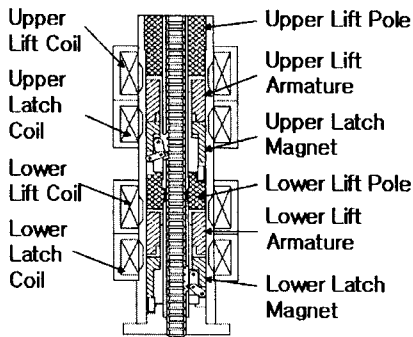


그림 2. CEDM의 구조

각 가동부 Magnet 사이에는 복귀 스프링이 있다. 상부 Lift부의 공극은 11.1mm이고, 나머지

상부 Latch부, 하부 Lift부 및 하부 Latch부의 공극은 9.5mm이다. 표 1은 CEDM의 전기적 설계사양이다. 그림 3, 그림 4는 CEDM의 제어봉의 인출과 삽입 시퀀스를 나타내며 직류의 1은 145V의 전압, 0.5는 45V의 전압을 각 코일에 인가한 것을 나타낸다.

표 1. CEDM의 설계사양

항		목	값	단위
제어봉 총 중량			260	kg
1 Step 이동거리			19.1	mm
전	Lift	lifting	32.9	A
		profiled	10.2	A
류	Latch	latching	26.8	A
		profiled	8.3	A
최대 속도			10.0	mm/s

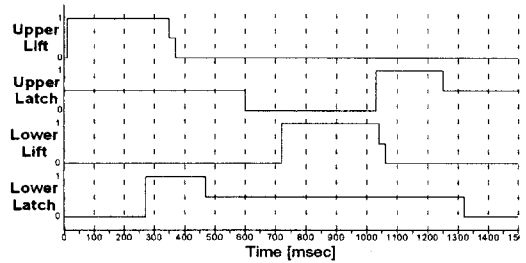


그림 3. 인출 시퀀스 동작

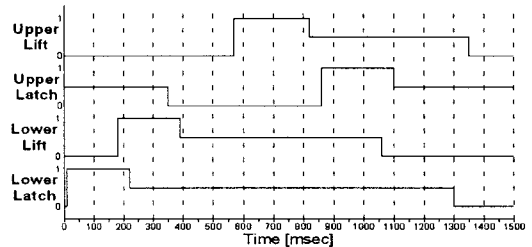


그림 4. 삽입 시퀀스 동작

2.2.2 CEDM의 기초 설계

그림 3의 인출 동작시 주어진 Lift Armature의 동작시간은 약 330msec이고 Latch Amature의 동작시간은 약 200msec이다. Lift부의 전자력은 제어봉의 하중과 복귀 스프링의 초기 압축에 의한 힘을 고려하여 주어진 동작 시간 내에 충분히 동작을 완료할 수 있는 초기 전자력은 제어봉의 하중과 마찰력 등을 고려하여 약 8,000N으로 선정하고, Latch부의 초기전자력은 약 5,000N으로 선정하여 각 여자코일의 기자력을 조절하여 설계한다. 설계시 제약조건으로 인가 전압이 145Vdc, 전류는 Lift Coil이 32.9A,

Latch Coil이 26.8A이므로 각 Coil의 턴수와 저항을 조절하여 원하는 전자력을 발생해야 하며, 그 결과 Lift Coil은 약 860턴수와 4.4Ω의 저항이고, Latch Coil은 약 800턴수와 5.4Ω의 저항이다. 그림 5는 설계에 사용한 철심재료의 자기특성을 보여준다.

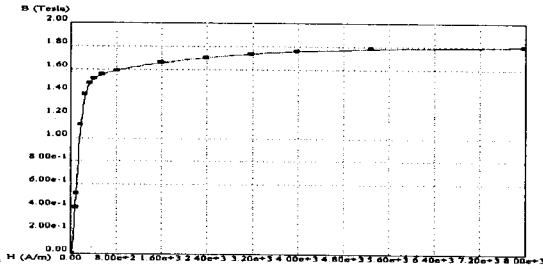


그림 5. 철심재료의 자기특성

2.3 CEDM의 해석

2.3.1 CEDM의 자체해석

CEDM 설계결과 Lift Coil의 기자력은 28,294AT이고, Latch Coil의 기자력은 21,440AT이다. 그림 6은 각 Coil에 전류가 흘러 여자 되고 공극이 완전히 열렸을 때의 등자속 분포이며, a는 Lift Coil만, b는 Latch Coil만, c는 Lift와 Latch Coil 둘다 여자되었을 때의 등자속선 분포를 해석한 결과이다.

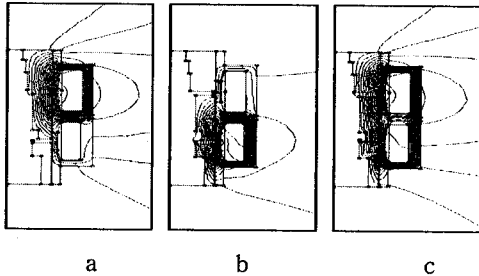


그림 6. CEDM의 등자속선 분포

그림 7, 그림 8은 그Lift Coil과 Latch Coil에 각각 28,294AT와 21,440AT의 일정한 기자력으로 여자 했을 때의 공극의 변화에 대한 전자력을 해석한 결과와 복귀 스프링의 압축 힘을 나타낸다. 해석결과 Lift부의 초기 전자력은 약 8,500N이고 최종 공극이 영일 때는 약 14,000N의 전자력이 발생하였고, Latch부는 초기 약 5,500N이고 공극이 영일 때는 약 11,000N의 전자력이 발생하였다. 각 복귀 스프링의 초기 압축력은 어느 Coil이 여자되지

않는 Coil의 전자력을 극복하고 영향을 받지 않는 수치로 결정하였으며, 초기 복귀 스프링의 압축력은 Lift부를 1,800N, Latch부를 1,200N으로 결정하였다. 그리고 Lift부와 Latch부의 스프링 상수는 각각 11kgf/m과 6.5kgf/m로 결정 하였다.

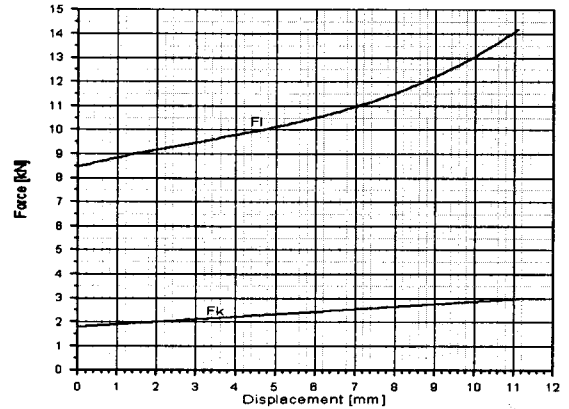


그림 7. Lift부의 전자력 해석 결과

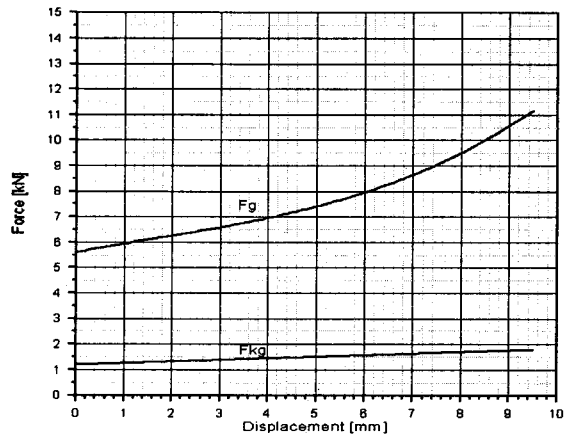


그림 8. Latch부의 전자력 해석 결과

2.3.2 CEDM의 동작해석

그림 7의 Lift부 전자력 해석 결과로부터 가동부의 총 중량을 260kg, 스프링의 복귀력 1,800N으로 하여 28,294AT의 기자력으로 Lift Coil을 여자하였을 때 동작특성을 수치해석으로 구한 결과를 그림 9에 나타내었다. Lift부의 동특성 해석결과로부터 전자석의 가동부가 11.1mm를 이동하는 시간이 약 5msec이므로 그림 3의 인출시 조건을 만족한다.

그림 10은 Latch부의 동특성 해석결과를 나타내고 그 결과로부터 Latch가 잡는 시간 또한 약

5msec 정도이므로 그림 3의 동작을 만족하는 것으로 나타났다.

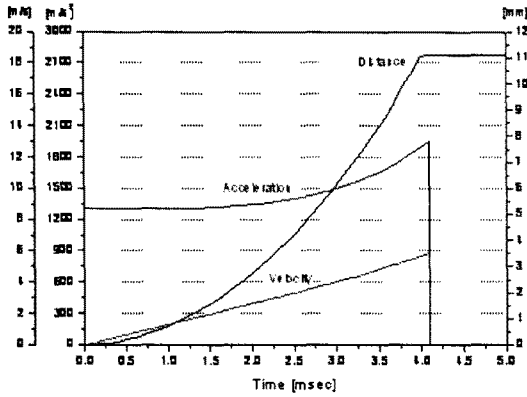


그림 9. Lift부의 동특성 곡선

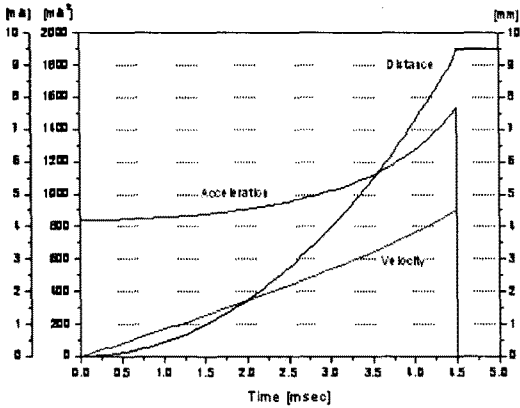


그림 10. Latch부의 동특성 곡선

3. 결론

원자력발전의 제어봉 구동용 CEDM을 설계하고 해석한 결과로부터 설계사양에서 분당 인출, 삽입 최대속도가 10mm/sec를 만족하는 전자력을 발생하는 것으로 판명되었다. 각 부가 동작하는 시간은 약 5msec로 해석되었지만 해석시 전류는 일정하게 통전한다는 가정으로 해석하였기 때문에 실제 동작시는 해석결과보다 시간이 더 소요된다. 즉 Coil은 인덕턴스와 저항을 포함하기 때문에 전압을 단자에 인가시 전류는 시정수 관계로 투입직후 바로 최종치에 도달하지 않는 관계로 인하여 시간이 더 소요되는 것이다. 하지만 그림 3과 4에서 동작완료에 주어진 시간이 수백 msec이기에 큰 문제점이 없는 것으로 사료된다.

[참고문헌]

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