제어봉구동장치의 동작 시뮬레이션

김현민 † 김인용* 김일곤*

Simulation of the Operation of the Control Element Drive Mechanism

Hyun Min KIM, In Yong KIM, Il Kon KIM

Key Words: control element drive mechanism(제어봉구동장치), electromagnetic analysis(전자장해석), current trace(전류파형)

Abstract

The magnetic jack type Control Element Drive Mechanism (CEDM) had been developed and verified through electromechanical testing including the testing of the magnetic force required to lift the control element assembly. It would become inefficient in view of cost and time for parametric studies to be performed by test to improve the CEDM system. So it becomes necessary to develop a computational model to simulate the electromagnetic characteristics of the CEDM in order to improve the CEDM design efficiently. In this paper it is presented that the electromagnetic analysis using a 2D axisymmetric FEM model has been carried out to simulate the operation of the latch magnet of the CEDM to generate a current trace for latch coil. The results show the calculated current trace is very similar to the real current trace taken from the CEDM.

1. 서 론

현재 한국표준형원전 (Korean Standard Nuclear Power Plant, 이하 KSNP)에 사용되고 있는 제어봉구동장치 (Control Element Drive Mechanism, 이하 CEDM, Fig. 1)은 CEDM 제어시스템 (CEDM Control System, 이하 CEDMCS)으로부터 구동 전류신호를 제공받아 자기력에 의해 제어봉집합체 (Control Element Assembly, 이하 CEA)와 제어봉 연장축 집합체(Extension Shaft Assembly, 이하 ESA)를 원자로 내에서 수직방향으로 인출, 삽입, 정지 및 낙하시키고, 그 위치를 표시하는 기능을 수행하는 자석 잭 (magnetic jack)형 구동장치이다.

CEDM의 구동에 대한 성능평가는 전기적인 성능시험을 통해 이루어졌다. 즉 시험을 통해 성능을 평가하고, 그 결과에 따라 주요 부품에 대한 설계변경 및 부품을 교체하는 방법으로 수행되었다. CEDM의 성능을 향상시키기 위해서는 구동부품들 사이에서의 자기력과의 주요 설계인자에 대한 연구를 수행해야 하는데, 현재와 같은 시험을 통한 평가는 시험부품 제작에 대한 고 비용 및 시간소요로 설계 개발시 매우 비효율적이다. 따라서 보다 효율적으로 정확하게 CEDM 작동성능을 평가하기 위하여 시험을 수행하지 않고도 CEDM의 최적설계 및 설계변경에 응용할 수 있는 전산코드를 이용한 전자장해석 유한요소모델 [(1)] 개발의 필요성이 대두되어 왔다.

† 한국전력기술(주)
E-mail : hmkim@kopec.co.kr
TEL : (042)868-4131 FAX : (042)863-486
* 한국전력기술(주)

SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor) 원자로의 선형펄스모터 방식의 CEDM에는 유한요소법을 적용한 전자장 해석기술을 적용하여, 자속분포와 자기력을 구하여 설계에 응용된 바 있으며[2], 또한 APR 1400의 CEDM에 대해서 Kirchhoff의 편미분방정식과 앙페르 법칙(Ampere's law)[3]을 적용하여 CEA를 지지하기 위한 기계적인 힘 등이 수식화 된 바 있다[4]. KSNP CEDM에서도 유한요소법을 이용한 전자장해석을 통해 시험을 수행하지 않고 인출력을 향상시킬 수 있는 설계변수를 도출한바 있다[5].

본 연구에서는 CEDM의 구동부에 대한 동작을 모사한 전자장 해석모델을 개발하여, CEDM의 걸쇠/인양자석을 움직이는 자속분포를 확인하고, CEDM 구동부의 정상작동 여부를 확인할 수 있는 전류파형(Current Trace)을 생성하였으며, 그 결과를 발전소에서 CEDM 작동시 취득한 실제 전류파형과 비교하였다.

2. 설계 특성

CEDM은 Fig. 1과 같이 상부 및 하부 압력하우징, 모터하우징, 모터집합체, 코일집합체, 제어봉 연장축 집합체, 상부슈라우드, 냉각슈라우드, 그리고 리드스위치집합체 등으로 구성되어 있으며, 원자로상부덮개 노즐에 설치된다. CEA의 인출 및 삽입은 자기력에 의한 일련의 단계적 운동에 의해 이루어진다. 코일로부터 자기장에 의해 자속이 통과하여 움직이는 구동부의 주요부품 및 기능은 다음과 같다.

2.1 모터 집합체

모터집합체는 상부 자석 및 걸쇠 그리고 하부 자석 및 걸쇠로 구성되며, 모터하우징 내부에 삽입 고정되어 CEA를 선형운동 시킨다. 즉 코일집합체의 걸쇠 코일에 적절한 전류를 공급하면, 미끄럼 운동을 하는 자석이 2단 링크로 하여금 걸쇠를 안쪽으로 움직이게 함으로써 CEA 연결축을 걸게 된다. 다음 단계로 인양코일에 전류를 공급하면 코일에 자기력이 발생하고, 이로 인해 인양자석에 힘이 발생하여 CEA를 걸고있는 걸쇠 자석을 끌어올리게 된다. 이러한 일련의 운동이 상, 하부 자석 및 걸쇠에 의해 1 cycle당 2중 스텝동작에 의해 CEA가 움직이게 된다.

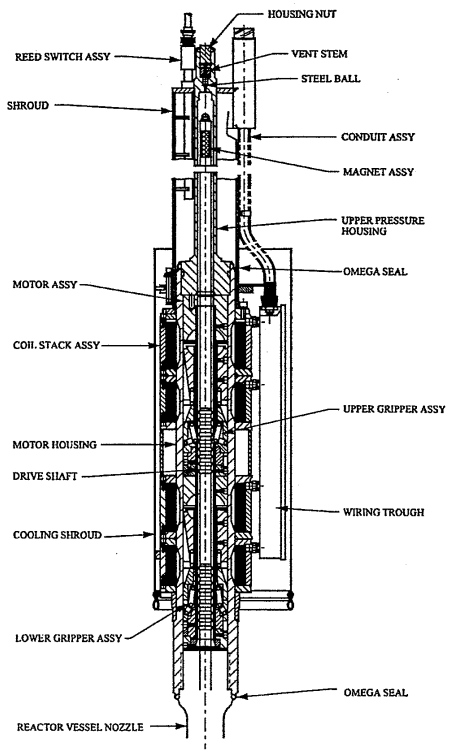

Fig. 1 Magnet Jack type CEDM for KSNP

2.2 코일 집합체

코일집합체는 상, 하부 인양코일 및 상, 하부 걸쇠코일 등 4개의 대용량 환형 직류자석코일로 이루어지며, 모터하우징 외벽에 부착되어 있다. 자석코일의 전력은 CEDM 제어계통으로부터 2개의 분리된 동작전원으로부터 공급된다. CEA를 정지시키기 위해서는 상부 걸쇠코일에 저 전류를 보내고 나머지 코일에는 전류를 차단시킨다. CEA를 인출하기 위해서는 인양코일에 고 전류를 보낸다. CEA를 낙하시키기 위해서는 모든 코일에 전력을 차단시키며, CEA는 자중에 의해 낙하하게 된다. 코일집합체의 외부는 코일로부터 자속의 생성 및 누설자속 방지를 위하여 코일 하우징이 감싸고 있다.

2.3 모터하우징

CEDM의 압력하우징은 모터하우징과 상부 압력하우징으로 구성되며, 코일로부터 자기장에 의한 자속이 통과하는 부분은 모터하우징이다. 모터하우징은 원자로상부덮개 노즐에 나사체결 및 Omega seal부의 밀봉용접에 의하여 부착된다. 모터하우징 및 상부 압력하우징 내부에는 ESA가 운동하게 된다. 모터하우징의 4개의 코일이 접촉

되는 부분은 코일집합체로부터 집중된 자속을 유도하기 위해 일정한 홈으로 설계되어 있다.

3. CEDM 동작 시뮬레이션

3.1 CEDM 구동부의 인출력

CEDM의 솔레노이드형 코일에 전류를 흘리면 기자력(mmf, AT)이 발생하며, 이 기자력에 의해 자속(Φ, wb)이 발생한다. 기자력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. A는 Amper, T는 코일의 감김수이다. 자속은 단위 면적당 자속의 분포를 나타내는 자속 밀도(B, Wb/m^2)로 나타내며, 자속 밀도는 CEDM 부품 재질의 투자율(μ)과 자기장의 세기(H, AT/m)의 곱으로 계산된다[(3)(7)]. 투자율 관계식 μ = B / H를 이용하여 CEDM 구동부에서 자기장의 단위체적당 축적되는 에너지 W_m을 구하면 다음과 같다.

$$W_m = \frac{1}{2}\int_{vol} \mu H^2 dv \qquad (1)$$

코일의 에너지가 기계적인 힘을 발생하기 까지 코일을 쇄교하는 자속은 일정하여야 한다. 이를 위해서는 그림 Fig. 2와 같이 코일로부터 자속이 흐르는 코일하우징, 공극(1), 모터하우징 및 공극(2)에서 저장된 자기에너지의 변화는 식 (1)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dW_{coilhousing+motorhousing+airgaps} = -F\,dx = \left(\frac{B_c^2}{2\mu_c}S_c + \frac{2B_{a1}^2 S_{a1} + B_{a2}^2 S_{a2}}{2\mu_0} + \frac{B_m^2}{2\mu_m}\right)dx \qquad (2)$$

여기서, w_c는 코일하우징의 자기에너지 밀도 2 w_{a1}은 코일하우징과 모터하우징 사이의 공극 내부의 자기에너지 밀도, w_m은 모터하우징의 자기에너지 밀도, w_{a2}는 모터하우징과 모터집합체 사이 공극의 자기에너지 밀도이다. 그리고 μ_c 및 μ_m은 각각 코일하우징과 공기 및 모터하우징의 투자율(H/m)을 나타낸다. B_c와 B_a는 각각 코일하우징 및 공기에서의 자속밀도, B_m은 모터하우징에서의 자속밀도이며, S_c, S_{a1}, S_{a2} 및 S_m은 코일하우징과 공극(1)(2) 및 모터하우징의 유효단면적이다. 여기서, 저장된 자기에너지는 latch magnet를 움직이는 힘으로 나타나며 식(3)로 표현할 수 있다.

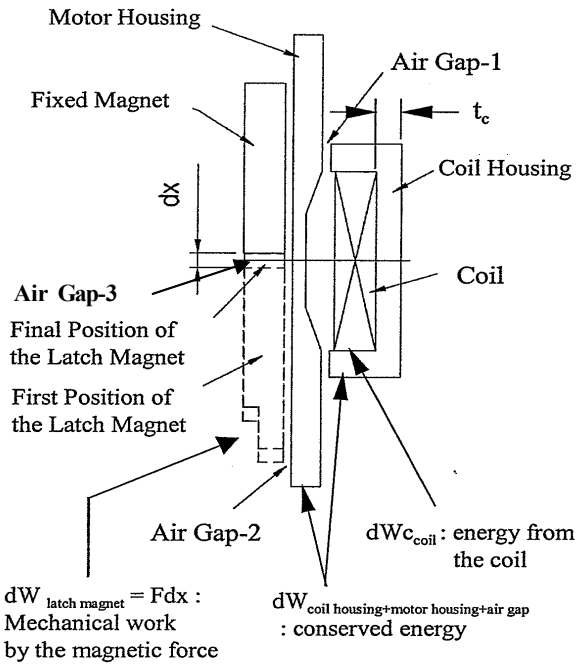

Fig. 2 Energy related to the CEDM operation

$$-F = \frac{B_3^2}{2\mu_0}S_3 \qquad (3)$$

여기서, B_3^2는 fixed magnet와 latch magnet사이 공극의 자속밀도, S_3는 fixed magnet와 latch magnet사이 공극의 유효단면적이고 μ_o는 공극(3)에서의 투자율이다. (-) 부호는 인양자석의 변위 dx가 작아진다는 것을 의미한다.

3.2 과도 운동 (Transient dynamic)

자기력이 발생하는 코일의 인덕턴스는 투자율(μ_0)과 코일의 감김수(N) 모터집합체의 latch magnet의 유효단면적(S) 및 변위(x)의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다[(3)(6)(7)].

$$L_{magnet} = \frac{\mu_0 N^2 S}{x} \qquad (4)$$

구동력이 발생하는 CEDM 구동부의 전기적인 자기회로(Magnetic Circuit)는 Fig. 3과 같이 등가회로로 표현될 수 있으며, 인덕턴스와 저항 성분으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{(x)}\frac{di}{dt}=\{\frac{\mu_0 N^2 Sv}{x^2}-(R_c+R_d)\}i+V(t) \qquad (5)$$

여기서, v는 시간에 대한 구동거리의 변화 *(dx/dt)*, *i*는 전류이다. 이와 같이 코일에 가해지는 전압에 의한 vector potential은 시간이 지나면서 latch magnet를 들어올리는 기계적인 힘을 얻게 되며, 이들은 다음과 같이 절점의 운동방정식과 동작 구조의 무게, 감쇠 및 stiffness 함수에 의한 과도운동 식으로 표현된다[8].

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{Fa\} \qquad (6)$$

여기서, [M] = 부품의 무게 matrix, [C] = 부품의 damping matrix, [K] = 부품의 stiffness matrix, {Ü} = 절점 가속도 벡터, {Ú} = 절점속도 벡터 {U} = 절점 변위 벡터, {Fa} = 전압 벡터이다.

3.3 해석 모델

CEDM의 동작 시뮬레이션 해석을 위하여 CEDM의 구동부인 코일, 코일하우징, 모터하우징, 고정자석 및 인양자석에 대해 원통 좌표계를 사용하여 Fig. 4와 같이 축 대칭 2차원 형상을 적용하였다.

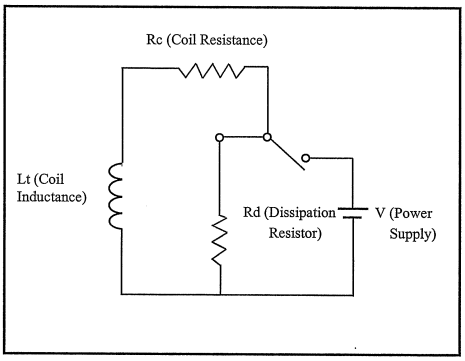

Fig. 3 Magnetic Circuit of the driving parts

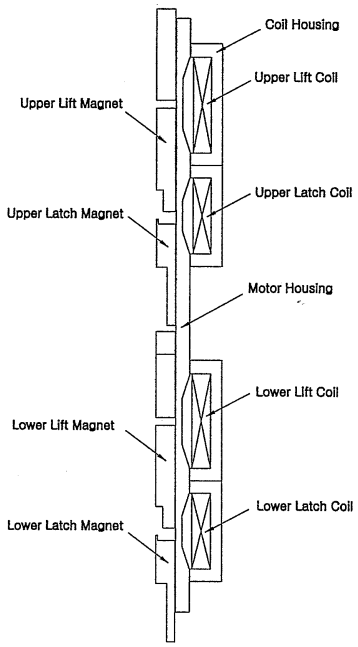

Fig. 4 Driving parts of the CEDM

CEDM 부품의 자석 재질에 대한 투자율은 B-H 곡선 (magnetization curve)로 나타난다. 이들 재질은 자기장이 증가함에 따라, 자속 밀도가 어느 정도 크기에 이르면 자기장을 더욱 증가 시켜도 자속 밀도는 거의 증가하지 않는 자기포화 (magnetic saturation) 상태가 되며, 주어진 자기장에 대해 여러 값의 자속 밀도가 존재하는 비선형으로 고려하였다.

경계조건은 경계면으로부터 자속이 수직방향으로 유동하므로 고정 경계조건으로 설정하였다. Fig. 5 및 6은 해석절차 및 해석모델이다

4.0 CEDM 구동부의 유한요소해석 결과

4.1 자속(Flux Line) 분포

코일의 기자력에 의한 자속은 원하는 구동부위로의 자기력 분포를 확인할 수 있고, 또한 주변 전기기기로의 자기장 영향 여부도 판단할 수 있는 기준이 된다[6][7]. 본 해석결과 코일로부터 발생한 자속분포는 Fig. 7과 같으며, 모터하우징을 통해 latch magnet 구동부로 자속이 집중되고 있음을 알 수 있다.

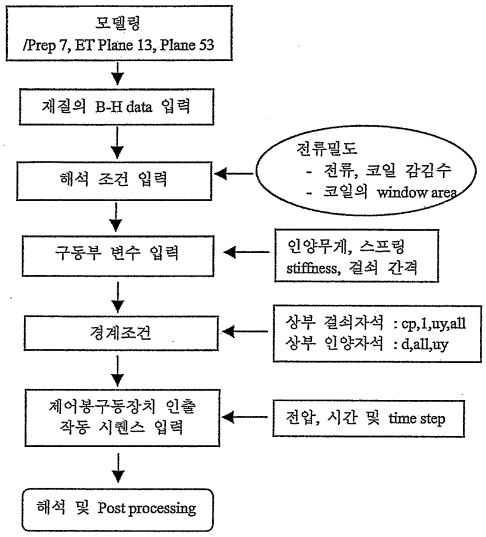

Fig. 5 Analysis procedure of the CEDM

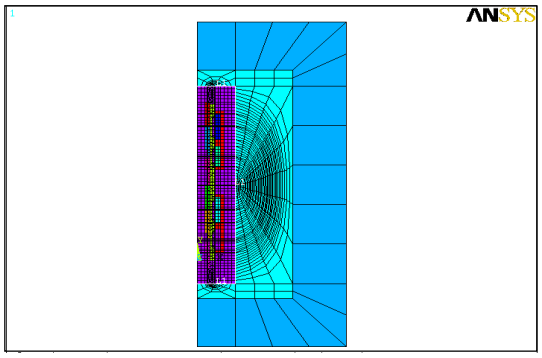

Fig. 6 2D axisymmetric model of the CEDM

4.2 전류파형

CEDM의 동작은 일련의 동작 순서에 따라 코일에 전압이 가해지면 시간이 경과함에 따라 CEA를 인양 할 수 있는 일정한 힘에 도달하게 되면, Fig. 2와 같이 인양자석과 걸쇠 자석간의 간격(dx)이 0이 되면서 engage 된다. Fig. 8은 CEDM 동작시 나타나는 전형적인 전류파형으로써, 여기서 engagement window는 CEA를 들어 올리는 인양 구간이고, hold window는 CEA를 물고 올라간 자석이 그 상태로 계속 유지하는 구간이며, drop out window는 전압이 0이 되어 자석이 원 위치하면서 CEA가 낙하하는 구간을 의미하는데, CEDM의 정상동작 여부를 나타내는 평가기준이 된다. 실제 발전소에서 적용한 동일한 동작 순서에 따라 상부 걸쇠자석의 인양동작을 위해 고전압(150 Vdc)으로 120 msec, 저전압 (45 Vdc)으로 1000 msec, 0 Vdc로 1200 msec의 순서로 적용하

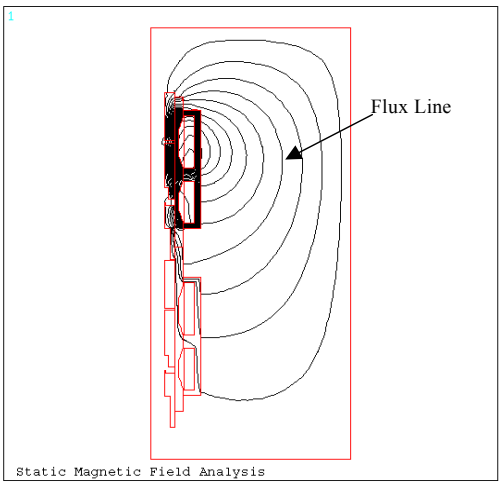

Fig. 7 Magnetic flux line due to the coil energized

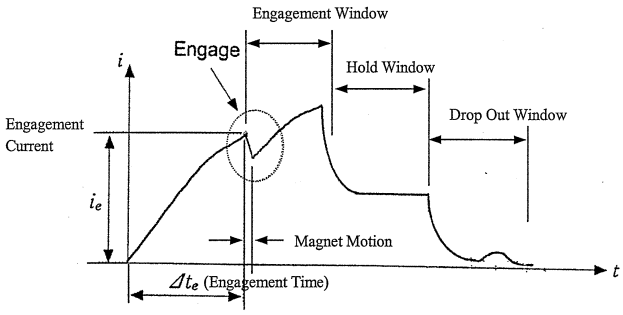

Fig. 8 Current trace due to the CEDM operation

였다.

전압을 가한 후 걸쇠자석의 초기상태는 Fig. 9와 같고, 약 110 msec후 걸쇠자석이 engage된 상태는 Fig. 10과 같다. 이러한 걸쇠자석의 동작에 따라 생성된 전류파형은 Fig. 11과 같다. 해석결과에서 볼 수 있듯이 걸쇠자석과 인양자석 사이의 간격이 0이 되어 걸쇠자석이 완전히 인양되어 engage된 상태가 전류파형에 나타나 있음을 알 수 있다.

본 해석결과와 실제 발전소에서 취득한 전류파형과 비교하면 Fig. 11 및 12와 같으며, 2가지 기준에 대해서 전류 값을 비교한 결과 실제 전류파형과는 최대 9%의 차이를 보였다. 이는 CEDM 구동을 위한 전압 주파수의 공차범위가 5%이고, 전류파형 생성을 위해 적용하는 time step의 차이 및 실제 파형결과에서 나타난 선의 표현 정도를 고려할 때, 해석에서 얻은 파형은 실제 파형과 거의 동일한 결과라고 판단된다.

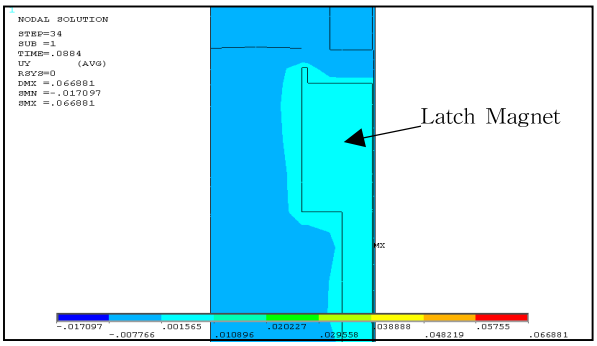

Fig. 9 Initial situation after input the voltage

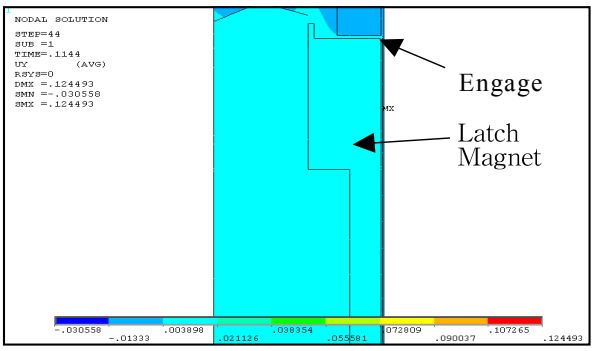

Fig. 10 Engage situation after input the voltage

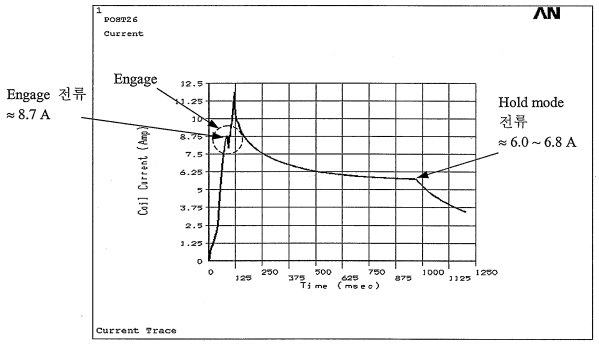

Fig. 11 Current trace of the latch magnet (analysis)

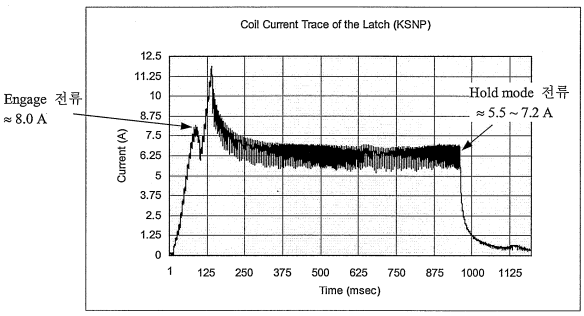

Fig. 12 Current trace of the latch magnet (plant)

4. 결 론

1) 본 연구에서는 실제 시험을 수행하지 않고도 CEDM 동작을 확인할 수 있는 전자장해석 모델을 개발하였다. 이 해석모델에 의해 CEDM 걸쇠자석의 전류파형을 생성하였으며, 걸쇠자석의 정상적인 인출동작을 판단할 수 있는 engage 모드 형상을 확인하였다.

2) CEDM 전자장해석을 통해 코일로부터 발생하는 자속 분포를 확인하였으며, 자속은 모터하우징을 통해 걸쇠자석을 구동할 수 있도록 CEDM 구동부에 집중되고 있는 것으로 나타났다.

3) 전자장해석을 통해 생성한 걸쇠자석의 전류파형을 실제 CEDM 작동시 취득한 전류파형과 비교하였으며 engage mode 전류 및 hold mode 전류의 비교결과 실제 파형과 거의 동일하다고 판단된다.

참고문헌

(1) Dal Ho Lim, 1987 *FEM of the Electromagnetic* Field, Dong Myung Sa.

(2) Hyung Huh, Jiho Kim and Jongin Kim, 1998, "Design of Linear Pulse Motor Type Control Element Drive Design Mechanism for SMART", *Proc. of the Korean Nuclear Society '98 Autumn Conference,* Korean Nuclear Society.

(3) William H. Hayt, Jr. John A. Buck, 2001, *Engineering Electromagnetics,* 6th Edition, McGraw-Hill.

(4) Suhn Choi, Seop Hur, Yong Suk Suh, Gwi Sook Jang, Jong Kyun Park and E. G. Sirica, 2000, "Simulation of a Single Motor of Latch Type CEDM for Korean Next Generation Reactor", *Proc. of the 16th* SMiRT.

(5) Hyun Min Kim, In Yong Kim, Il Kon Ki, 2003, "Electromagnetic Analysis of the Magnetic Jack Type Control Element Drive Mechanism", Proc. of the 17th, SMiRT.

(6) Seong Kun Oh, 1998, *Theory of the Electricity*, Seong Ahn Dang.

(7) Yea Suk Hong, 2001, Electromagnatics, 4th Edition, Chung Moon Gak.

(8) ANSYS Revision 5.5 *User's Manual*, 1999.