2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국표준형원전 제어봉구동장치의 전자장해석

Electromagnetic Analysis of Control Element Drive Mechanism for KSNP

김현민, 김일곤, 김인용
한국전력기술㈜
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국표준형원전에 사용되고 있는 자석 잭형 제어봉구동장치는 제어봉구동장치 제어계통으로부터 구동신호를 제공받아 제어봉집합체를 선형적으로 구동시키는 전기적인 구동장치이다. 이 제어봉구동장치는 원자로 냉각재 압력경계 내에서 인양자석과 구동 걸쇠에 공급되는 자기력에 의해 구동된다. 제어봉구동장치 설계는 제어봉집합체를 인출하는 자기력을 포함한 전기적인 시험을 통해 개발되었으나, 이러한 시험은 제어봉구동장치의 성능향상을 위한 설계인자 개발시에는 시간소모 및 고 비용으로 인해 비효율적인 방법이다. 본 논문에서는 제어봉구동장치의 자기력 발생에 대한 2차원 전자장해석 모델을 개발하였고, 제어봉구동장치의 제어봉집합체의 인출력을 구하여 시험결과와 비교검토 하였다. 해석결과 인출력은 시험결과 및 설계요건을 비교적 만족하였으며, CEDM의 인출력을 위해서는 구동부품의 형상, 누설자속 및 재질의 B-H curve 등을 고려해야 함을 보여주었다.

Abstract

The magnetic jack type Control Element Drive Mechanism (CEDM) for Korean Standard Nuclear Power Plant (KSNP) is an electromechanical device which provides controlled linear motion to the Control Element Assembly (CEA) through the extension shaft assembly (ESA) in response to operational signals received from the Control Element Drive Mechanism Control System (CEDMCS). The CEDM is operated by applying localized magnetic flux fields to movable latch and lift magnets, which are in the coolant pressure boundary.

The CEDM design had been developed through electromechanical testing of the system including the magnetic force lifting the ESA. But it will be inefficient if parametric studies should be performed to improve the CEDM by test due to the consumption of high cost and long duration. So it becomes necessary to develop a computational model to simulate the electromagnetic characteristics of the CEDM to improve the CEDM design efficiently. In this paper, the electromagnetic analysis using a 2D finite element model has been carried out to simulate magnetic force of the lift magnet of the CEDM, to provide effective evaluation between leakage flux and lift force and to compare with test results. Analysis results show the lift force satisfied the test results and design requirement and the lift force depend on the shape of the components, leakage flux and B-H curve.

1. 서 론

현재 한국표준형원전(Korean Standard Nuclear Power Plant, 이하 KSNP)에 사용되고있는 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, 이하 CEDM, 그림 1)는 제어봉구동장치제어시스템(Control Element Drive Mechanism Control System, 이하 CEDMCS)으로부터 구동 전류신호를 제공받아 자기력에 의해 제어봉집합체 (Control Element Assembly, 이하 CEA)와 CEA를 연결하는 제어봉연장축 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[1]. 즉 시험을 통해 성능을 평가하고, 그 결과에 따라 주요 부품에 대한 설계변경 및 부품을 교체하는 방법으로 수행하였다. CEDM의 성능을 향상시키기 위해서는 주요 부품인 모터집합체, 코일집합체 및 모터하우징 사이에서 자기력과의 상관 관계를 평가하여 주요 설계인자에 대한 연구를 수행해야 하는데, 현재와 같은 시험을 통한 평가는 시험부품 제작에 대한 고비용 및 시간소요로 설계 개발시 비효율적이다. 따라서 최근에는 보다 효율적인 설계응용 및 개발을 위해 전산코드를 이용한 해석방법[2]을 활용하려는 노력이 이루어지고 있다.

SMART(System-Integrated Modular Advanced Reactor) 원자로의 선형펄스모터 방식의 CEDM에는 유한요소법을 적용한 전자장 해석기술을 적용하여, 자속분포와 자기력을 구하여 설계에 응용된 바 있으며[3][4], 또한 KSNP와 동일한 설계인 APR 1400의 CEDM에 대해서 Kirchhoff의 편미분방정식과 앙페르 법칙(Ampere' s law) [5]을 적용하여 CEA를 holding하기 위한 기계적인 힘 등이 수식화 된 바 있다[6].

본 논문에서는 KSNP의 CEDM 구동부에 대해 유한요소법을 적용한 전자장 해석을 수행하여, CEDM의 자기력 및 자속 분포 결과를 분석하였다. 또한 CEA를 들어 올리는 모터집합체의 인양자석(lift magnet)의 인출력을 유한요소법으로 해석하고, 그 결과를 성능시험 결과[1]와 비교하였다.

2. 설계특성

CEDM은 그림1과 같이 상부 및 하부 압력하우징, 모터하우징, 모터집합체, 코일집합체, 제어봉연장축 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 같으며, 주요 설계조건은 표 1과 같다.

2.1 모터집합체

모터집합체는 상부 자석 및 걸쇠 그리고 하부 자석 및 걸쇠로 구성되며, 모터하우징 내부에 삽입 고정되어 CEA를 선형운동시킨다. 상부 및 하부 걸쇠는 정해진 작동순서에 의해 하중전달 기능을 수행하면서, CEA를 이송한다. 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 인양 자석에 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.

2.2 코일집합체

코일집합체는 상, 하부 인양코일 및 상, 하부 걸쇠코일 등 4개의 대용량 환형 직류자석코일로 이루어지며, 모터하우징 외벽에 부착되어 있다. 자석코일의 전력은 제어봉구동장치 제어계통으로부터 2개의 분리된 동작전원으로부터 공급된다. CEA를 정지시키기 위해서는 상부 걸쇠코일에 저전류를 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 부착되며, 상부 압력하우징의 하단은 모터하우징의 상단에 나사체결과 Omega seal부의 밀봉용접에 의하여 부착된다. 모터하우징 및 상부 압력하우징 내부에는 ESA가 운동하게 된다. 모터하우징의 4개의 코일이 접촉되는 부분은 코일집합체로부터 집중된 자속을 유도하기 위해 일정한 홈으로 설계되어 있다.

3. 자석 잭형 CEDM의 전자장 해석

3.1 인양자석의 힘 (lift force)

CEDM의 솔레노이드형 코일에 전류를 흘리면 기자력(mmf, N)이 발생하며, 이 기자력에 의해 자속(ϕ, wb)이 발생한다. 기자력은 앙페르 법칙을 적용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 자속은 단위 면적당 자속의 분포를 나타내는 자속 밀도(B, wb/m^2)로 나타내며, 자속 밀도는 CEDM 부품 재질의 투자율(m)과 자기장의 세기(H, A/m)의 곱으로 계산된다[5][7]. 이들의 관계식은 다음과 같다.

$$mmf = \oint H \cdot dl = A \times T \text{ (전류 × 코일 권수)} \qquad (1)$$

$$m \quad = B / H \tag{2}$$

식(2)에서와 같이 CEDM 코일의 전자석으로부터 자속밀도 B와 자기장의 세기 H가 비례하는 경우 자기장의 단위체적당 축적되는 에너지 W_m은 다음과 같다.

$$W_m = \frac{1}{2}\int_{vol} B \cdot H dv \tag{3}$$

식(2)를 식(3)에 대입하면,

$$W_m = \frac{1}{2}\int_{vol} mH^2 dv \tag{4}$$

와 같다. 코일에 축적되는 자기에너지는 코일의 인덕턴스(L, Henry)와 전류 (I, Ampere)에 의해 나타나는데, 코일로부터 발생한 에너지는 코일하우징, 모터하우징 및 이들 사이의 공기틈을 통해 모터 집합체의 자석을 기계적인 힘으로 유도한다. 이와 같은 자기시스템 (magnetic system)은 식 (1)과 에너지 보존의 법칙을 이용하여 해석할 수 있다[5].

$$dW_{코일} = dW_{코일하우징+모터하우징+공기틈} = dW_{인출자석} \quad \text{(에너지보존의 법칙)} \tag{5}$$

코일의 에너지가 기계적인 힘을 발생하기 까지 코일을 쇄교하는 자속 ϕ은 일정하여야 한다. 이를 위해서는 그림 2와 같이 코일로부터 자속이 흐르는 코일하우징, 공기틈(1), 모터하우징 및 공기틈(2)의 체적에서의 변화(dv)로 인한 저장된 자기에너지의 변화를 식 (3),(4) 및 (5)를 이용하여 나타내면,

$$dW_{코일하우징+모터하우징+공기틈} = (w_c + 2w_{a1} + w_m + w_{a2})dv = \frac{B_c^{\,2}}{2m_c} S_c dx + 2\frac{B_{a1}^{\,2}}{2m_0} S_{a1} dx + \frac{B_m^{\,2}}{2m_m} S_m dx + \frac{B_{a2}^{\,2}}{2m_0} S_{a2} dx \tag{6}$$

이다. 여기서 w_c 는 코일하우징의 자기에너지 밀도, $2w_{a1}$ 은 코일하우징과 모터하우징 사이의 공기틈 내부의 자기에너지 밀도, w_m 은 모터하우징의 자기에너지 밀도, w_{a2} 는 모터하우징과 모터집합체 사이 공기틈의 자기에너지 밀도이다. 그리고 m_c, m_0 및 m_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_m 은 코일하우징과 공기틈(1)(2) 및 모터하우징의 유효단면적이다. 여기서 저장된 자기에너지의 변화 식(6)을 식(5)에 대입하면 다음과 같다.

$$dW_{인출자석} = F\ dx = 0 - (w_c + 2w_{a1} + w_m + w_{a2})dv \quad (7)$$

여기서 (–) 부호는 인양자석의 변위 *dx*가 작아진다는 것을 의미한다. 식 (6) 및 (7)을 인출력 *F* 에 대해 정리하면 인양자석의 기계적인 힘을 구하는 식(8)이 되며, CEDM의 기본 설계에 응용할 수 있다.

$$F = \frac{{B_c}^2}{2m_c}S_c + \frac{2{B_{a1}}^2 S_{a1} + {B_{a2}}^2 S_{a2}}{2m_0} + \frac{{B_m}^2}{2m_m}S_m \quad (8)$$

3.2 자기벡터 전위 (Magnetic vector potential)

코일의 전류밀도 및 자성체 재질의 B-H curve에 의해 발생되는 자기 에너지에 의한 힘은 벡터의 합으로 표현되고[5], 유한요소 해석을 위한 자기요소(magnetic element)를 사용하여 다음과 같이 자기벡터 전위 함수로 나타내며, 인출력 해석의 함수로 응용된다.

$$\{B\} = \nabla \times [N_A]^T \{A_e\} \quad (9)$$

여기서 *{B}*는 자속밀도, ∇는 벡터연산자, $[N_A]^T$ 는 요소형상의 함수, $\{A_e\}$ 는 절점의 자기벡터 전위이다.

3.3 해석

CEDM 전자장 해석의 평가는 ANSYS code [8]를 이용하였으며, 아울러 해석결과의 경향을 좀더 넓게 검토하기 위해서 전자장 수치 해석용 code인 FEMM [9]을 부가적으로 활용하였다. 해석방법 및 결과는 다음과 같다.

가. 해석 모델

자석 잭형 CEDM의 전자장 해석을 위하여 CEDM의 구동부인 코일, 코일하우징, 모터하우징, 고정자석 및 인양자석에 대해 원통 좌표계를 사용하여 축 대칭 2차원으로 모델링하였다. CEDM과 같은 축 대칭인 원통형 부품은 2차원 모델만으로도 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그림 2는 자석 잭형 CEDM의 구동부에 대한 단면이며, 해석모델의 입력으로 사용하였다. 자성체인 코일하우징, 모터하우징 및 모터집합체의 자석 재질에 대한 투자율은 그림 4-a 및 4-b와 같은 B-H curve (magnetization curve)로 나타난다. 이들 재질은 자기장이 증가함에 따라, 자속 밀도가 어느 정도 크기에 이르면 자기장을 더욱 증가시켜도 자속 밀도는 거의 증가하지 않는 자기포화 (magnetic saturation) 상태가 되는데, 주어진 자기장에 대해 여러 값의 자속밀도가 존재하는 비선형 관계로

고려해야 된다[5][7]. 따라서 CEDM 전자장 해석은 비선형 해석으로 수행하였다. 모터하우징을 경계로 모터집합체의 공간은 원자로냉각재로 채워지는데 이는 공기와 투자율이 같으므로 동일하게 1로 적용하면 된다. 입력 전류의 경우 CEDM 성능시험 결과와 비교하기 위해 동일한 전류조건을 적용하였다. 경계조건은 경계면으로부터 자속이 수직방향으로 유동하므로 노이만 경계조건 (Neumann boundary condition, $\partial j / \partial n = 0$)으로 설정하였다[2][5]. 완성된 CEDM의 2차원 해석모델은 그림 3과 같다.

나. 해석조건

CEDM 전자장 해석은 다음과 같은 해석순서 및 조건으로 해석하였다.

(1) 축대칭 모델작성
(2) 해석 조건 입력
  - 전류밀도(J, MA/m^2) 입력
  - 입력전류 : 14A, 22 A, 24 A, 28A, 30 A
(3) 재질 : 자성체 = B-H curve
(4) 경계조건 : Neumann boundary condition
(5) 해석 수행 및 post- processing

모터집합체의 자석과 모터하우징은 410 SS와 ASME code case N-4-11 그리고 코일하우징은 1010 – 1026 C.S인 자성체 재질로 설계되어 있다. 이들 재질의 투자율은 자기장에 대해 자속밀도가 변하는 B-H curve로 나타내며, 해석에는 수치로 입력된다. 재료의 B-H curve는 해석결과에 중요한 영향을 미친다. B-H curve는 실제 CEDM 제작에 사용된 재료에 대해 실험을 통해 구해야 하나, 다소 어려움이 있어 본 논문에서는 모터하우징과 코일하우징은 동일한 재료계열에 대해 일반적으로 사용한 B-H curve를 사용하였으며, 모터하우징의 경우 동일한 재료 계열인 403 SS 값을 사용하였다. 해석에 사용된 B-H curve의 예는 그림 4-a와 4-b와 같다

다. 해석결과

(1) 인양자석의 인출력

해석결과는 그림 5와 같으며 설계요건 만족여부, B-H curve와의 비교, 성능시험 결과와의 비교, ANSYS code 및 FEMM code와의 해석 결과값 등을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 설계요건 만족여부 평가

CEDM의 인출력의 설계요건은 CEA, ESA 무게 및 모터집합체 사이에 있는 스프링의 힘을 포함하여 600 lbs 이상이다. 표 1의 설계요건에서 인양자석이 CEA를 들어올리는 시점의 전류조건은 약 14 A 이상이며, 이 전류 이상의 조건에서 해석 값과 비교한 결과 인출력은 그림 5와 같이 설계요건을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

- 해석 결과와 B-H curve와의 비교

인출력은 B-H curve를 사용한 비선형 해석을 적용하였으므로, 해석결과도 B-H curve와 같이 어떤 범위의 H 값에서 B가 더 이상 증가하지 않고 그림 4-a 및 4-b와 같이 자기포화 되는 경향으로 나타나야 한다. 그림 5의 해석 결과는 22 A까지는 인출력이 급격히 증가하지만, 24 A 이후에는 인출력의 증가 정도가 둔화되어 점점 자기포화 되는 경향으로 나타났음을 알 수 있다.

- 성능시험 결과와 해석 결과와의 비교

CEDM 성능시험과 동일한 입력 전류조건으로 해석한 인출력 비교결과, ANSYS code와 FEMM code의 해석결과 경향은 비슷한 것으로 나타났으며, 결과 값은 약 9 % 정도의 차이를 보였다. 성능시험 결과와 비교하면 입력전류 24A, 28A, 30A에서 ANSYS code 해석결과와는 4 % – 13 % 정도, FEMM code 해석결과와는 1 % - 8% 정도로 만족스러운 결과를 보여주었다. 그러나 22 A에서는 성능시험 값이 매우 낮은 경향을 보였으며, 이에 따라 해석 결과와는 각각 약 28 %, 12 %로 차이가 좀더 크게 나타났다. 또한 22 A – 30 A 구간에서 인출력이 자기포화하는 해석결과와는 달리 성능시험결과는 상대적으로 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 시험결과의 경우 평균 전류값에 대해 인출력을 측정하였으나, 정확한 측정결과의 추출 및 측정 방법을 알 수 없고, 측정값도 4개 밖에 없어 정확한 경향을 비교 하기에는 어려운점이 있다. 또한 CEDM 제작에 사용된 재질과 해석입력과의 B-H curve 차이, 성능시험 조건에서 코일의 온도에 의한 저항 변수 등의 원인도 예상되며, 성능시험은 자석 잭형 CEDM 개발초기의 1980년 이전에 수행한 것으로써 시험 내용도 부족하므로, 추후 좀더 상세한 검토를 수행할 예정이다.

(2) 자속

전자장해석 결과 코일의 기자력에 의한 자속은 그림 6-a와 같다. 자속은 손실 자속을 최소화하여 자로의 내부를 통과하여야 입력 기자력 대비 충분한 자기력을 얻을 수 있다. 또한 공기틈 근처에서 자속선이 둥그렇게 솟아있는 프린징(fringing) 현상은 자속선을 넓게 퍼지게 하여 약한 자장을 발생한다. 약한 자장은 힘의 손실을 의미한다[5]. 그림 6-a의 해석결과에서 알 수 있듯이 코일하우징과 모터하우징 사이, 모터하우징과 모터집합체 사이의 공기틈에서의 프린징은 그리 크지 않은 것으로 나타났는데, 이는 공기틈이 충분히 작고 이들 부품재질의 투자율이 높아 자속이 집중되고 있음을 나타낸다. 그러나 코일 하우징 외부에는 누설자속 (leakage flux)이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이는 코일하우징의 자속밀도가 높거나, 코일 및 코일하우징이 자기포화 되어있음을 의미한다[5][7]. 누설자속을 제거하기 위해 현재의 코일 하우징 두께를 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 in 증가시켜 해석한 결과 그림 6-b와 같이 두께 0.20 in에서 코일하우징 외부로의 누설 자속이 줄어들었음을 알 수 있다. 그림 7은 코일하우징의 두께 증가에 따른 인출력의 변화 곡선을 나타낸 것이며, 코일하우징의 두께 증가에 따라 누설자속이 감소하면서 인출력은 약 17 % 증가하였다.

4. 결론

KSNP의 CEDM에 대한 전자장해석을 ANSYS code와 FEMM code를 활용하여 수행하였으며, 해석 및 평가 결과는 다음과 같다.

1) 인양자석은 전류 14 A 이상에서 설계 요건인 인출력 600 lbs 이상을 모두 만족하였으며, 인출력의 경향은 재질의 입력값인 B-H curve와 같이 자기포화되는 경향으로 나타났다.

2) 성능시험과 해석 결과의 인출력 차이는 1 % - 13 %정도로 만족스러운 결과를 보여주었으나, 22 A에서 발생한 28 % 차이 및 인출력 경향의 차이는 성능시험의 여러가지 변수에 의한 것으로 판단되며, 추후 좀더 상세한 검토가 요구되었다.

3) ANSYS code와 FEMM code의 해석결과 전류에 대한 인출력 분포는 자기포화 측면에서 상호 일치된 경향으로 나타났다.

4) 해석결과 CEDM의 코일하우징으로부터 발생한 누설자속을 코일하우징의 두께를 약 0.2 in 증가하여 누설자속을 감소시킨 결과 인출력은 약 17 % 증가하였다.

5) KSNP CEDM의 인출력 향상을 위해서는 구동부품의 형상, 누설자속 및 재질의 B-H curve 등을 고려해야 한다.

본 논문의 내용은 KSNP용 자석 잭형 CEDM의 성능향상을 위한 전자장 해석 모델개발의 1단계 업무로 수행하였다. 다음 단계에서는 과도해석을 통해 CEDM의 정상적인 작동 여부를 평가하는 코일의 current trace curve를 생성하고, 고 전류에서 발생하는 코일의 열로 인해 권선 절연의 파괴 등이 CEDM 성능에 영향을 미치므로, 열 해석을 수행하여 CEDM의 주요 설계인자를 평가할 수 있는 보다 상세한 해석모델을 개발할 예정이다.

참고문헌

[1] Test Report, WEC, TR-ESE-412, 1981.

[2] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1987.

[3] 허형, SMART 제어봉구동장치용 선형펄스모터의 전자장 수치해석, KAERI/TR-1549, 2000.

[4] K.C.Chang, D.H. Kang, J.H.Kim, J.I.Kim, J.P.Hong, A Design of the Cylindrical VR type Linear Pulse Motor for the CEDM of Reactor, ICEE ' 99, Volume 2, August 1999.

[5] 홍의석 외 7인, 전자기학, 제 4판, 청문각, 2001.

[6] Suhn Choi, Seop Hur, Yong Suk Suh, Gwi Sook Jang and Jong Kyun Park, E.G. Sirica, Simulation of a Single Motor of Latch Type CEDM for Korean Next Generation Reactor, SMiRT 16th International Conference, 2000.

[7] 오성균 외 2인, 전기이론, 성안당, 1998.
[8] ANSYS Revision 5.5, “ANSYS User’ s Manual”, ANSYS, Inc., 1999.
[9] FEMM Version 3.1, “FEMM User’ s Manual”, 2002.

표 1. 자석 잭형 CEDM의 주요 설계조건

항 목		설계조건	비고
설계압력		2500 psia	
설계온도		650 °F	
정상구동속도		10 - 30 in/min	
총 행정거리		150 in	
1 cycle 이동거리		0.75 in/cycle	
인출력		600 lbs 이상	CEA, ESA 무게 및 spring의 장력
전압	CEA Engagement	0 – 150 Vdc	22 Amp (typical)
	CEA Holding	0 – 45 Vdc	5 Amp (typical)

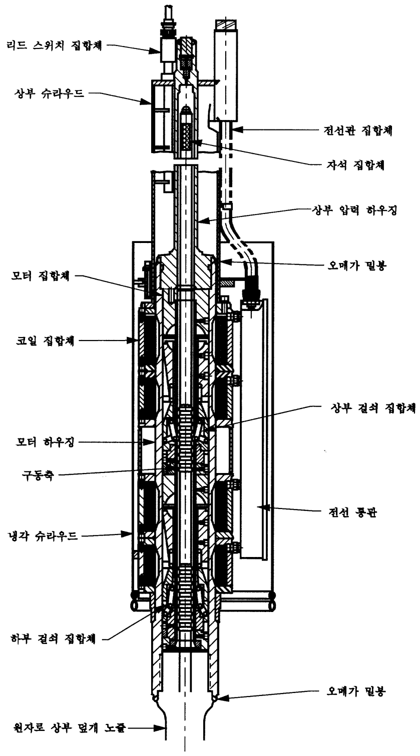

그림 1. 자석 잭형 CEDM

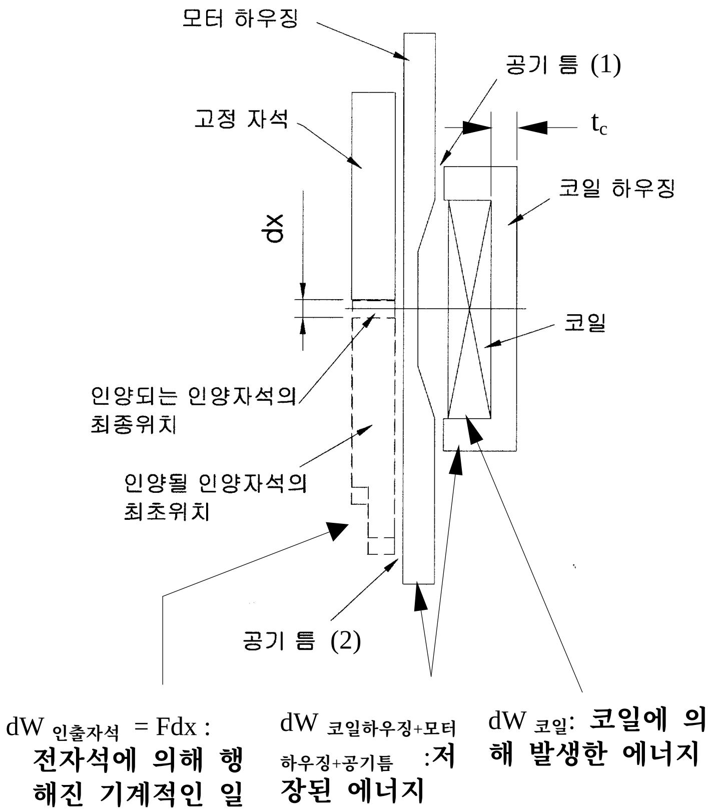

그림 2. 자기력 발생부 단면도

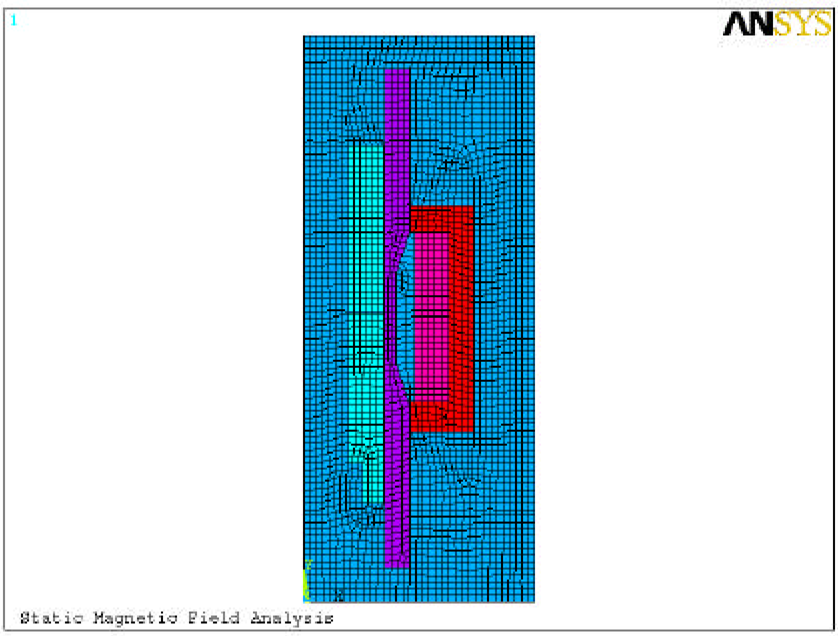

그림 3. CEDM의 2차원 해석모델

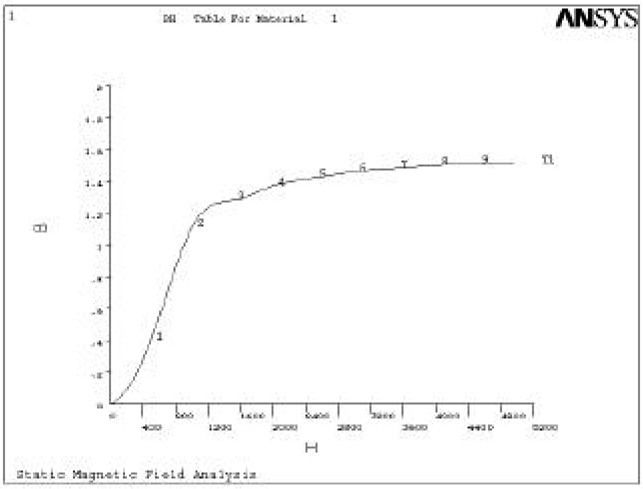

그림 4-a. 인양자석(410 SS)의 B-H curve

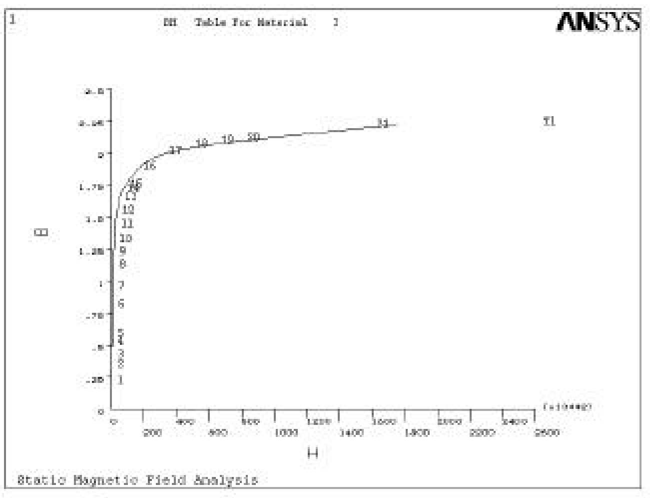

그림 4-b. 코일하우징(1010 C.S)의 B-H curve

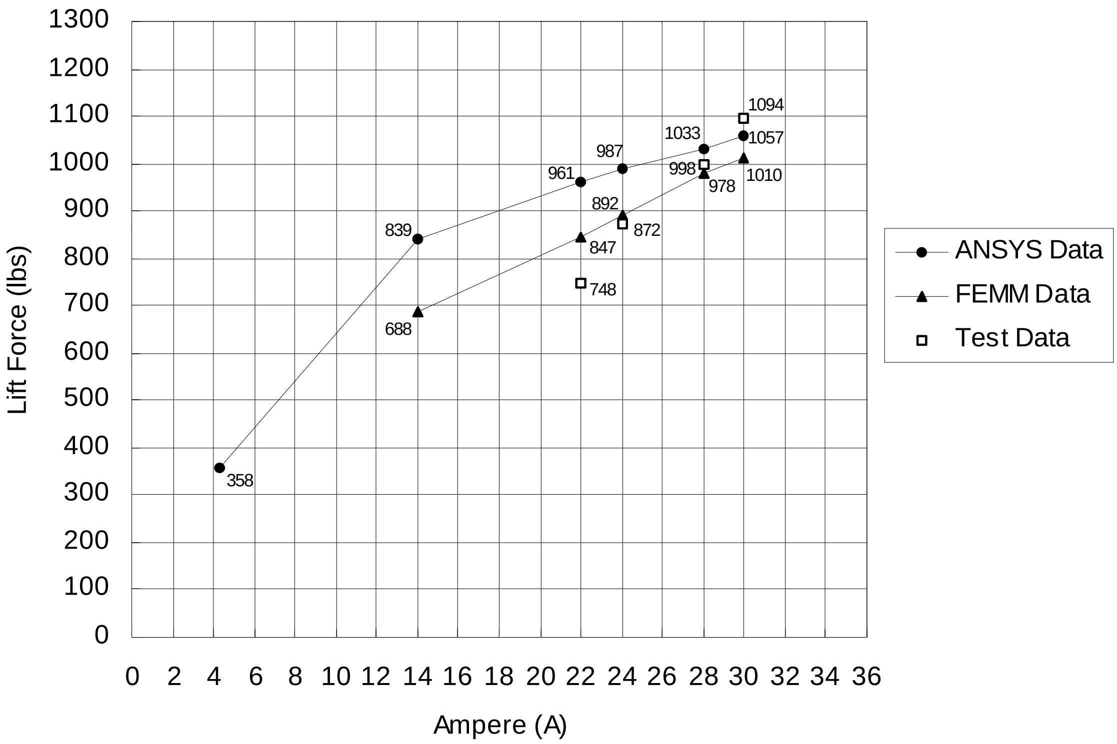

그림 5. 인출력에 대한 성능시험과 해석결과와의 비교

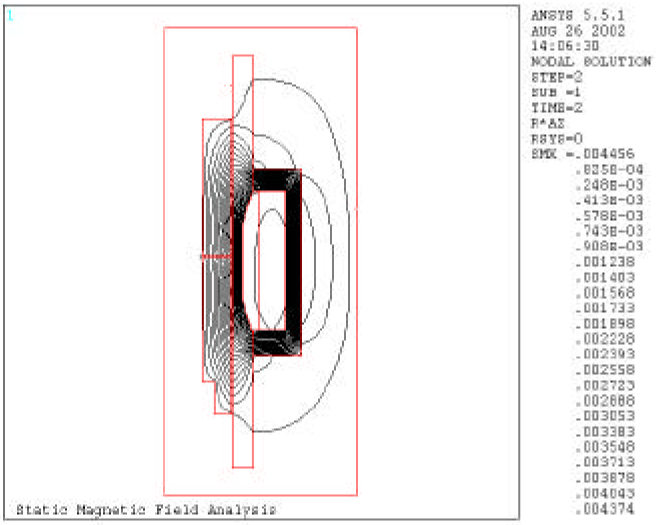

그림 6-a. 자속 분포 (현재 설계조건인 코일하우징의 두께 tc = 0.62 in에서 누설자속이 발생한 경우)

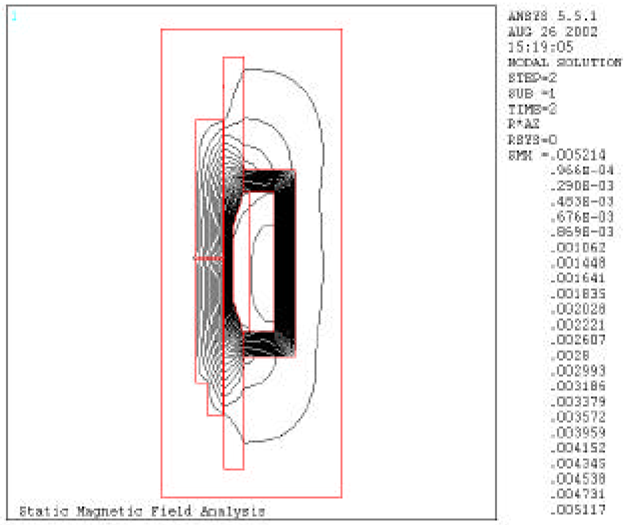

그림 6-b. 개선된 자속 분포 (코일하우징의 두께 tc = 0.82 in로 변경하여 누설자속을 감소시킨 경우)

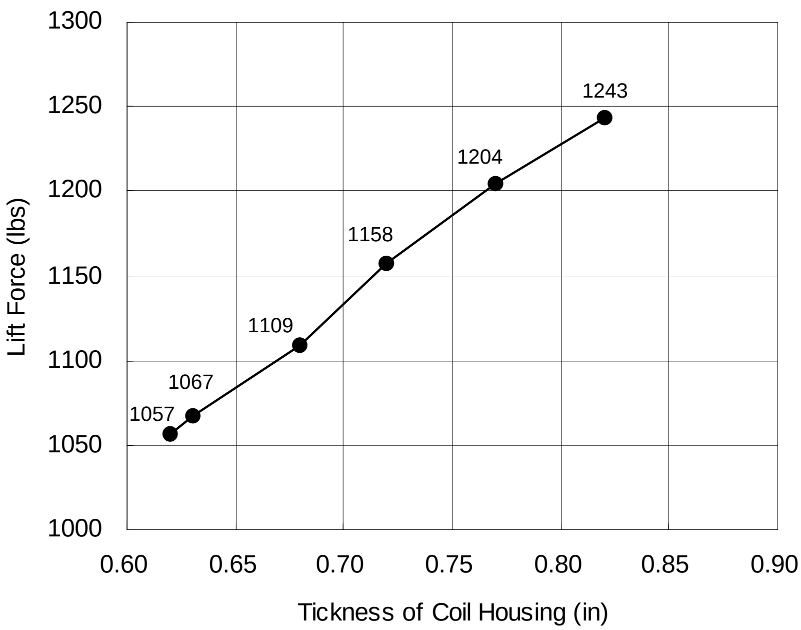

그림 7. 코일 하우징의 두께 증가에 따른 CEDM의 인출력 변화 곡선