

## 유한요소법을 이용한 전자석클러치의 토크향상에 대한 연구

### Study to Improve Torque of Electromagnetic Clutch by Using FEM

박창호 \*      조종두 \*\*      이상우 \*\*\*  
Piao Changhao      Cho Chongdu      Lee Sangwoo

#### ABSTRACT

In this paper, we try to analyze the torque of electromagnetic clutch by using FEM. For Analysis of the magnetostatic field, we constitute axi-symmetric FEM model of an electromagnetic clutch. By resorting to the theory of magnetic circuits, we obtain a solution of theoretical torque to compare with the result of numerical analysis. From the result of numerical analysis, the air gap of electromagnetic clutch between armature and rotor is important to influence on the torque and the torque changes with the air gap of 0.2mm~0.1mm. Also we observe the characteristic of the torque by changing the relative permeability of each parts. Finally an optimized design of the electromagnetic clutch is proposed.

#### 1.서론

자철광의 발견으로부터 시작된 자기장 연구는 오랜 시간을 거쳐 발전되어 왔다. [1] 전자석이론을 응용한 전자기클러치는 사무용 복사기, 프린터등 각종 기기에 광범위하게 사용되고 있다. 사무용 기기에 효율적으로 사용되기 위하여 전자기클러치는 빠른 토크향상, 고속응답성, 높은 에너지효율, 뛰어난 내구성 등이 요구된다. 위에서 제기된 여러 가지 성능 중 현재 전자기클러치에서 가장 문제시되는 것이 토크의 향상이다. 지금까지 생산현장에서 토크의 향상을 위하여 많은 실험들을 진행하였으나 전체적인 이론적 지식의 미흡으로 만족한 결과에 도달하지 못하고 있으며 상품의 개발주기를 최대한 단축시켜 단가를 낮추어야 하는 현황이다.

이러한 배경으로, 본 논문에서는 연자성체, 자기회로, 전자기장 이론을 기반으로 정자기장 (Magnetostatic Field) 유한요소해석을 진행하여 전자기클러치의 토크변화 경향들을 찾아냈다. 전자기 해석을 진행하기 전에 전자기클러치에 대해서 축대칭 유한요소 모델링을 하였으며 기본이론을 기반으로 하는 수식적 유도를 하여 해석결과의 정확성을 확인하였다. 본 논문에서는 주요하게 전자기클러치의 각 부품의 재질에 따른 토크변화 경향과 Armature와 Rotor사이의 Air gap의 변화에 따른 토크변화경향에 대해 연구하였다. 본 연구 결과를 이용하면 빠른 시간 내에 전자기클러치의 신제품 설계의 시간을 단축할 수 있으며 신제품의 성능에 대한 정확한 평가를 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 2.이론적 기초

본 연구에서는 다음과 같은 이론들이 이용되었다.

- (1) 연자성체 이론 [2]
- (2) 자기회로 이론 [3]
- (3) 정자기장 이론 [4]

\* 인하대학교 기계공학과 통합과정

\*\* 정회원 · 인하대학교 기계공학과 교수

\*\*\* 인하대학교 기계공학과 석사과정

위의 이론들을 전자기클러치의 해석과정에 유기적으로 결합시켜서 정확한 해석결과를 얻는데 기여하였다.

## 2.1 연자성체 이론과 연자성체의 모형화

Fig.1에서 보여주는 자기이력곡선(Hysteresis Loop)의 형상에 따라 자성체를 강자성체(Hard Magnetic Material)와 연자성체(Soft Magnetic Material)로 나눌 수 있다. 연자성체의 특성은 투자율(Permeability)이 크고 보자력(Coercive Force:  $H_c$ )는 작아야 하며, 고주파손실( $\tan \delta$ )이 낮아야 한다. 강자성체는 잔류자속밀도(Remanent Magnetic Flux Density:  $B_r$ ), 최대 에너지 곱(Maximum Energy Product:  $(BH)_{max}$ )이 크면 클수록 성능이 우수하다고 본다. 고투자율(High Permeability)인 연자성체는 외부자기 유도 신호에 대한 응답이 빠르고 높은 자속밀도를 최소 에너지 손실에서 얻을 수 있는 재질적 특성이 있다.

본 논문 중의 해석대상으로 되는 전자기클러치는 빠른 시간적 응답성과 최소 에너지 손실, 그리고 작은 외부자계의 작용 하에서의 큰 자화밀도 즉 고투자율이 있어야 하는 재질을 사용하여야 하기에 연자성체를 사용하는 것이 제일 적합하다.

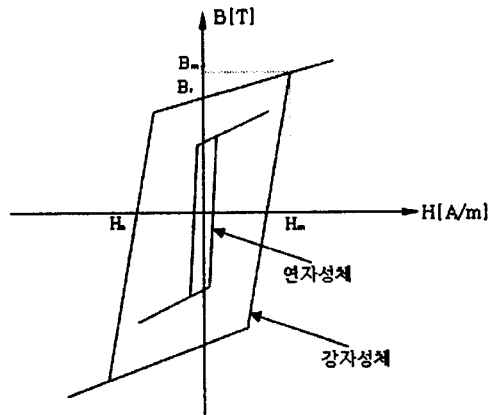


Fig.1 연자성체와 강자성체의 자기이력곡선

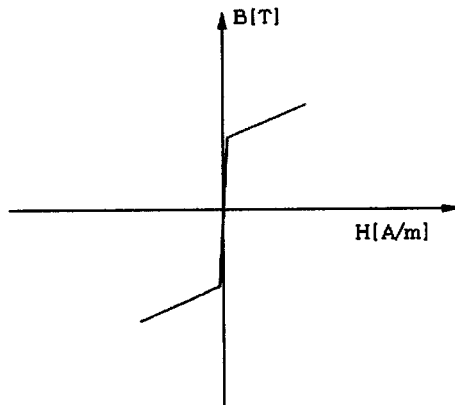


Fig.2 연자성체의 자기이력곡선 모델

연자성체의 자기 이력곡선으로부터 본 논문에서는 Fig.2와 같이 자기이력곡선을 모델링하여 해석 중에 사용하였다. 모델에서 연자성체에서 발생하는 에너지 손실을 무시하고 보자력(Coercive Force:  $H_c$ )은 0으로 놓았으며 전체 자기유도 과정을 3개의 선형과정으로 근사화 하였다. 이러한 모델은 연자성체의 고투자율, 저 에너지손실 특성에 대한 근사화이다.

2.2 자기회로 이론과 전자기클러치의 자기회로 모델

자기해석에서도 전기해석에서와 마찬가지로 자기회로라는 개념을 도입할 수 있다. [4] 자기장의 자속은 전기장에서의 전류에 해당하고 기자력은 전압에 해당하고 자기장에서도 전기저항과 같은 자기저항을 사용한다.

Ampere의 법칙에 의하여

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \tag{1}$$

$N \cdot I$  외부에서 인가되는 기자력이다.

자속 밀도  $B$ 와 자기장의 세기  $H$  사이에는 아래의 관계식이 있다.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{2}$$

$\mu$ 는 자성체의 투자율(Permeability)을 표시하며 단위는  $[H/m]$ 이다.

그리고 자속과 자속밀도 사이에는 아래의 식이 성립된다.

$$\Phi = B \cdot S \tag{3}$$

여기서  $S$ 는 자속밀도가 관통하는 수직 단면적이다.

전기저항과 마찬가지로 자기저항을 아래의 식으로 간단하게 정의할 수 있다.

$$\Omega = \frac{l}{\mu \cdot S} \tag{4}$$

위의 식에서  $l$ 은 자속이 자성체를 통과하는 길이이다. 식 (4)에서와 같이 투자율이 큰 자성체의 자기 저항은 작게 되므로 전류와 마찬가지로 자속의 대부분이 투자율이 큰 자성체 내부에서 전달된다. [4]

식(1)을 정리하면 기자력 평형방정식을 얻어낼 수 있다.

$$\Omega \Phi = N \cdot I \tag{5}$$

평형 방정식에서  $l$ 는 자기회로의 자기저항이고  $\Phi$ 는 자속이다.

자기회로는 전기회로와 구별되며 주의하여야 할 점이 몇 가지 있다. [3]

(1) 전기회로에서의 일반 도체의 유전율(Conductivity)은  $10^8 [\Omega/m]$ 이고 공기의 유전율은 0이므로 도체에서 흐르는 전류가 공기 중에 누설되는 것을 무시할 수 있다. 그러나 자기장에서 자성체의 투자율(Permeability)은  $10^{-2} [H/m]$  정도이고 공기는  $10^{-6} [H/m]$  이므로 자속이 자성체뿐만 아니라 공기 중에서도 분포되어 있다.

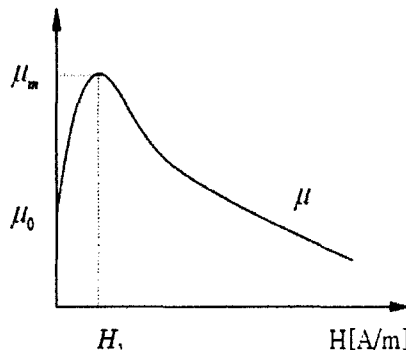


Fig.3 자화에 따른 투자율의 변화

(2) 자성체에의 자기투자율  $\mu$ 는 Fig.3 에서와 같이 전체과정에서 일정한 것이 아니다. 이와

같은 결과는 자기이력곡선(Hysteresis Loop)에서도 보아낼 수 있다. 자기이력곡선상의 한 점에서의 기울기의 값이 자기투자율에 해당한다.

이와 같은 이유 때문에 자기장을 이용하는 기기의 해석이 더욱 어려워졌으며 현재까지도 정확한 해석을 보여주기 위해서는 상당한 어려움이 따르고 있다.

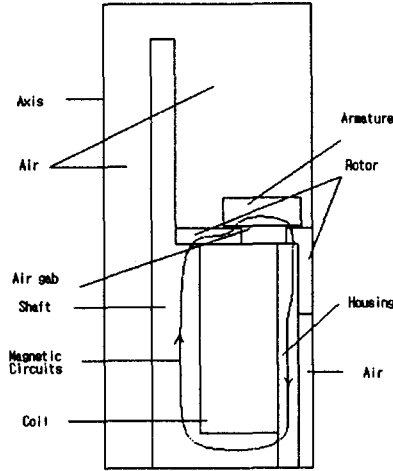


Fig.4 축대칭 전자기클러치 FEM모델의 자기회로

자기회로 이론을 응용하여 본 논문에서는 Fig.4와 같이 전자석클러치의 축대칭 FEM모델에 대한 자기회로를 구성하였다. 위의 자기회로에 대해서 식(5)에 대응하는 자기회로 평형 방정식을 구성하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(\Omega_{R-A} + \Omega_S + \Omega_R + \Omega_A + \Omega_{H+C})\Phi = N \cdot I \quad (6)$$

여기에서

$\Omega_{R-A}$ : Rotor와 Armature사이 공기간극 자기저항

$\Omega_S$ : Shaft의 자기저항

$\Omega_R$ : Rotor의 자기저항

$\Omega_A$ : Armature의 자기저항

$\Omega_H$ : Housing의 자기저항

$\Omega_C$ : Correction 자기저항

실제로는 위에서 표기된 몇 개의 자기저항 이외에도 여러 가지 요인들이 자기저항에 영향을 주고 있다. Correction 자기저항은 이런 영향을 고려하는 자기저항 교정치이다. 본 논문에서는 교정자기저항을 0으로 한다.

### 2.3 정자기장 이론

자성체의 투자율을 라고 하면 자기장의 에너지 밀도는

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad (7)$$

총 에너지는

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \cdot \vec{H} dv = \frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dv = \frac{1}{2\mu} \int_V B^2 dv \quad (8)$$

에너지 방정식을 이용하여 자계의 에너지 변화량을 구해내고 그 변화량에 대해 각 방향에 대한 미분을 하면 힘을 구할 수 있다.

$$\vec{F} = \frac{\delta W}{\delta x} \vec{i} + \frac{\delta W}{\delta y} \vec{j} + \frac{\delta W}{\delta z} \vec{k} \quad (9)$$

### 3. 유한요소 해석결과와 분석

본 논문에서 진행한 유한요소 해석들은 아래와 같은 몇 가지 가정을 따른다.

- (1) 연자성체의 자화이력곡선에 대해 선형 근사화 한다. 일반적으로 탄소강 연자성재료의 상대투자율(Relative Permeability)은 1000~4000 사이로 한다.
- (2) 전자기클리치에 사용되는 코일에 흐르는 전류 즉 기자력(Magnetomotive Force)의 크기가 연자성체에서 자기유도 포화상태를 일으키는 전류 이하라고 가정한다.
- (3) 해석중의 보정자기저항  $\Omega_C$ 의 크기는 0으로 본다. 실제로는 보정 자기저항은 0이 아니며 여러 부품사이의 공기간극에 의한 자기저항과 부품결합으로 인한 자기저항의 합으로 나타낸다. 그러나 이러한 교정자기저항을 무시하더라도 전체적인 경향은 변화하지 않으므로 0으로 근사화 할 수 있다.

표1.전자기클리치 부품별 상대투자율

명칭	재질	상대투자율
Air gap	Air	1
Shaft	SMF1015	4000
Rotor	SPCC	2000
Armature	SPCE	2000
Housing	STKM11C	2000

해석 중에서  $\Omega_{R-A}$ 는 0.1mm, 0.2mm 두 가지 경우로 나누었으며 마찰계수는 0.4로 사용하고 있다. 코일회수와 전류는 실제 측정치를 사용한다.

#### 3.1 Shaft의 상대투자율에 따른 토크변화

Shaft의 재질 변화에 따른 토크변화를 알기 위하여 Shaft의 주요 상대투자율 범위인 1000~5000 사이를 500간격으로 변화시켜 토크를 계산했다.

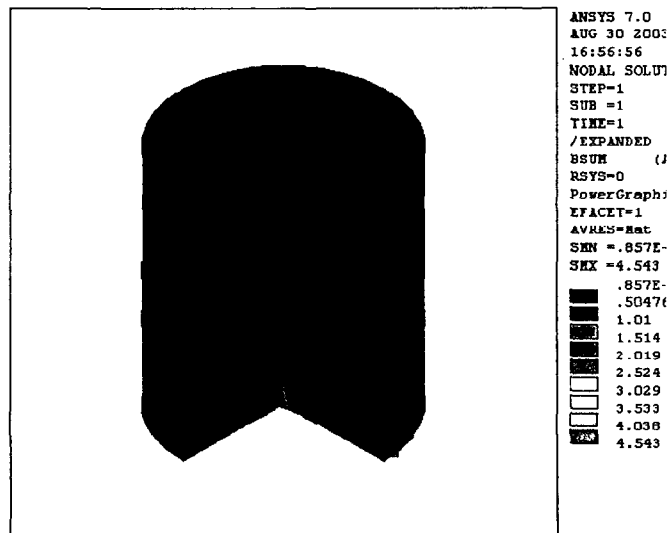


Fig.5 표1의 상대투자율에서의 전자기클리치의 자속밀도분포

Fig.5에서는 표1에 의한 상대유전율에 대응하는 자속밀도의 분포정황을 보여 준다. Fig.5에서 보여 주는 것처럼 전자기클러치의 Armature와 Rotor 사이 Air gap에서의 자속밀도의 값은  $1 \text{ Wb/m}^2$ 이다. 이 값을 자기회로 이론을 이용하여 구한  $0.949b/m^2$ 와 일치하다. 이론적 해법에서는 전체 회로의 자기저항을 공기부분의 자기저항으로 대체하고 식(6)에 기자력을 대입하여 자속을 구하고 자속을 접 축면적으로 나누어주어 이론적 값을 구하였다.

Fig.6에서는 Shaft의 상대유전율의 변화에 따른 토크의 변화를 보여준다. Fig.6에서 보여주는 것처럼 상대투자율이 1일 때, 즉 공기로 되어 있을 때 토크의 크기는 0이 된다. 그 원인은 자기회로의 자기저항이 매우 커져 자속은 상대적으로 급격히 적어진다. 따라서 자속밀도가 작아지며 Armature를 끌어당기는 힘이 0된다. Fig.6중에서  $\Omega_{R-A}$ 가 0.1mm, 0.2mm인 두 가지 경우에 대해서 결과를 보여주었다. 결과에서 보여주는 것처럼  $\Omega_{R-A}$ 가 0.2mm에서 0.1mm로 변화하였을 때 토크의 크기는 거의 2배로 증가하였으며 0.1mm일 때 실제 생산 중에서 요구하는 토크의 크기  $5 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ 를 만족하게 된다. 이번 해석을 통하여 공기간극의 자기저항이 전체저항의 대부분을 차지하며 공기간극의 거리가 변함에 따라 토크도 현저하게 변화한다는 것을 알아낼 수 있다.

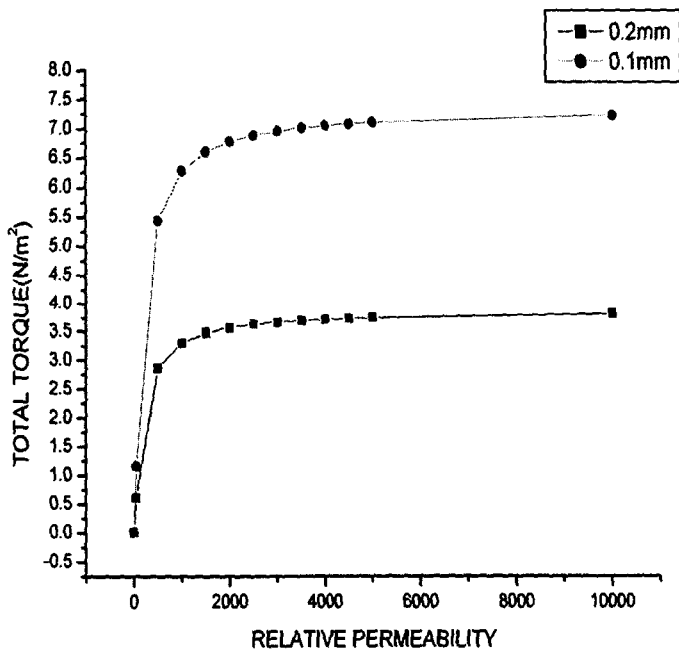


Fig.6 Shaft상대투자율에 따른 토크변화

해석결과에서 보여주는 것처럼 Shaft의 상대유전율이 2000정도에서부터 토크는 포화상태에 이르게 된다. 즉 재료 선택할 때 2000에서 5000사이의 연자성재료 중에서 가격적 관점으로 선택하면 된다.

### 3.2 Rotor의 상대투자율에 따른 토크변화

Rotor의 재질 변화에 따른 토크변화경향을 알기 위하여 Shaft에서와 마찬가지로의 해석을 진행하였다.

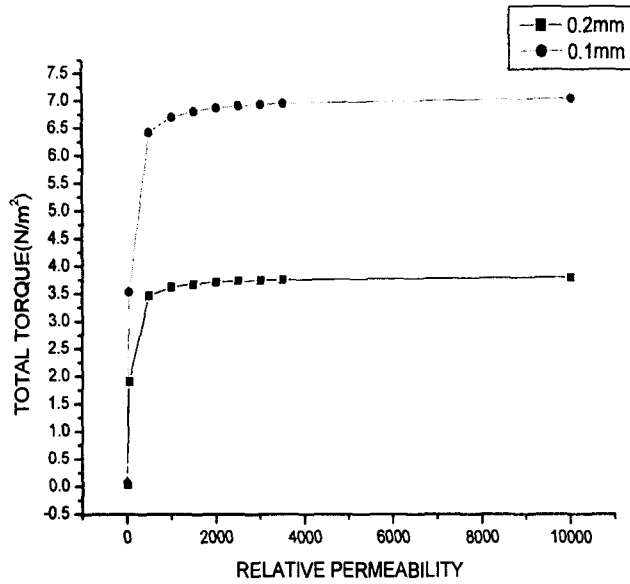


Fig.7 Rotor 의 상대투자율에 따른 토크변화

Fig.7에서도 Fig.6과 같은 경향을 보여주고 있으며 그 원인도 3.1에서 해석한 원인과 같다. Rotor 에 사용되는 재료를 선택할 때 Fig.7을 참고할 수 있다.

### 3.3 Armature의 상대투자율에 따른 토크변화

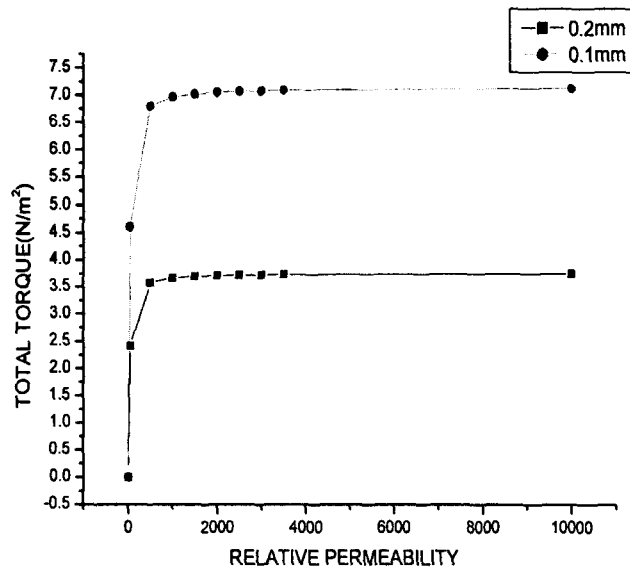


Fig.8 Armature의 상대투자율에 따른 토크변화

3.1에서와 같은 방법으로 Armature의 상대투자율에 의한 토크변화경향을 구해냈다.

### 3.4 Housing의 상대투자율에 따른 토크변화

같은 방법으로 Housing의 재질이 토크에 미치는 영향에 대해 연구했다.

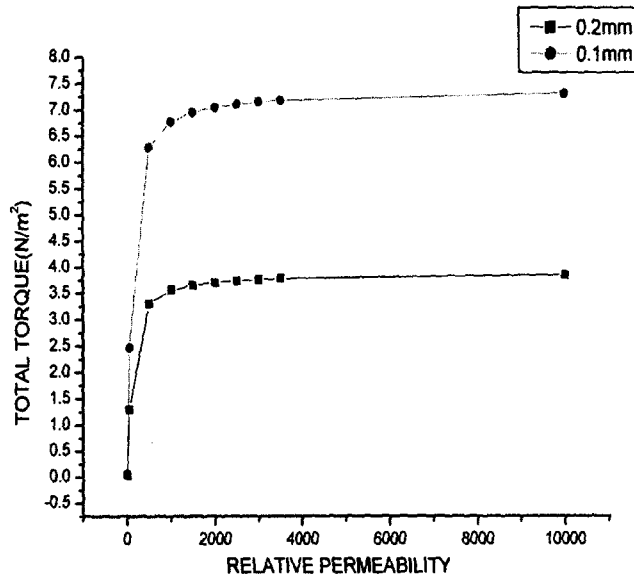


Fig.9 Housing의 상대투자율에 따른 토크변화

## 4. 결론

- (1) 연자성체이론, 자기회로이론, 전자기장이론으로부터 전자기클러치의 토크를 해석하는 방법을 제시하였다. 그리고 해석 중에 유용하게 쓰이는 축대칭 전자기클러치 유한요소 모델을 만들었다.
- (2) FEM방법으로 구한 토크 값과 이론적 근사화 방법으로 구한 토크 값이 거의 같다.
- (3) 전자기클러치의 초기상태로부터 작동상태로 이동할 때, 즉 Air gap이 0.2mm로부터 0.1mm로 이동할 때 토크는 증가되는 경향을 보였으며 실제 필요한 토크  $5Kg \cdot cm$ 를 만족하게 된다.
- (4) 부품간의 Air gap을 줄여 자기저항을 줄이면 자속이 증가하고 따라서 토크는 증가하게 된다.
- (5) Armature와 Rotor의 접촉면을 더 균일하게 하여 접촉 시에 생기는 Air gap을 줄이면 토크를 증가시킬 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 고재귀, 송재만, 자성물리학의 기초와 응용, 숭실대학교 출판부
2. 김광윤, 김동엽 공역, 자성재료학, 반도출판사
3. 田春生, 標準電磁氣學, 동명사, pp382
4. John R. Reitz, Foundations of electromagnetic theory, Addison-Wesley Publishing Company