

## 멀티그리드 고정용 전자석 해석 및 설계

김희섭

요 약. 그리드 고정용 전자석은 절단금형에서 여러 조각으로 나누어진 매우 얇고 가벼운 그리드를 전자석에 흡착시켜 그리드를 부착한 장소까지 이송하는 역할을 하는 전자석이다. 설계목표는 (1)그리드 고정용 전자석이 착자, 탈자 및 이동시 전자석에 흡착된 그리드 조각의 정렬상태가 동요되지 않는 전자석의 설계, (2)금형(그리드 흡착면)에 잔류자기가 최소화되는 설계, (3)전자석이 탈자되었을 때, 잔류자기가 최소화되는 설계에 초점을 두었다. 자장분포는 유한요소법으로 계산하였고, 전자력 계산은 Maxwell stress tensor법을 사용하였다.

### 1. 서 론

#### 가. 설계목표

그리드 고정용 전자석은 절단금형에서 여러 조각으로 나누어진 매우 얇고 가벼운 그리드를 전자석에 흡착시켜 그리드를 부착할 장소까지 이송하는 역할을 하는 전자석이다. 이를 위하여 아래와 같이 설계목표를 설정하였다.

- (1) 그리드 고정용 전자석이 착자, 탈자 및 이동시 전자석에 흡착된 그리드 조각의 정렬상태가 동요되지 않는 전자석의 설계
- (2) 금형(그리드 흡착면)에 잔류자기가 최소화 되는 설계
- (3) 전자석이 탈자되었을 때 잔류자기가 최소화 되는 설계

#### 나. 적용환경

위 설계에 있어 제약조건 및 그리드의 재질은 아래와 같다.

- (1) 착자시간 : 300 ms 이내 (짧을 수록 유리함)
- (2) 탈자시간 : 300ms 이내 (짧을 수록 유리함)
- (3) 이송속도 : 약 300 mm/sec (등가속운동)
- (4) 그리드 재질 : sus 430
- (5) 금형 재질 : STD 11, 담금질 처리
- (6) 그리드 성형 : 냉간 가공 (750 kgf)

---

2000 Mathematics Subject Classification: Primary 65D99

Keywords and phrases: Multigrid, Maxwell stress tensor, Magnetization  
본 연구는 2002년도 경원대학교 학술연구비의 지원을 받아 이루어졌음

## 2. 전자석

### 가. 자석구조 및 제작방법

- (1) 전자석의 코어는 교류손실이 적고 투자율이 높은 0.5 mm 두께의 규소강판을 사용한다.
- (2) Teeth와 Slot 모양은 그림 1과 같으며 규소강판을 적층하여 방전가공기(wire cutter)로 가공한다. 단 teeth의 방향은 자화용이 축(easy axis)으로 한다. 여기서 teeth pitch는 적을수록 좋은데 본 연구에서는 가공상 1.5 mm 로 하였다.
- (3) 권선은 절연동선을 그림 2와 같이 8자 모양으로 감았다. 따라서 각 teeth 당 6회 (slot 당 12 도체)를 감았다.
- (4) 임의의 크기의 자석을 만들려고 할 때는 자석의 길이는 그림 1 에서 teeth 수를, 자석의 폭은 규소강판의 적층수를 조정하여 결정한다.

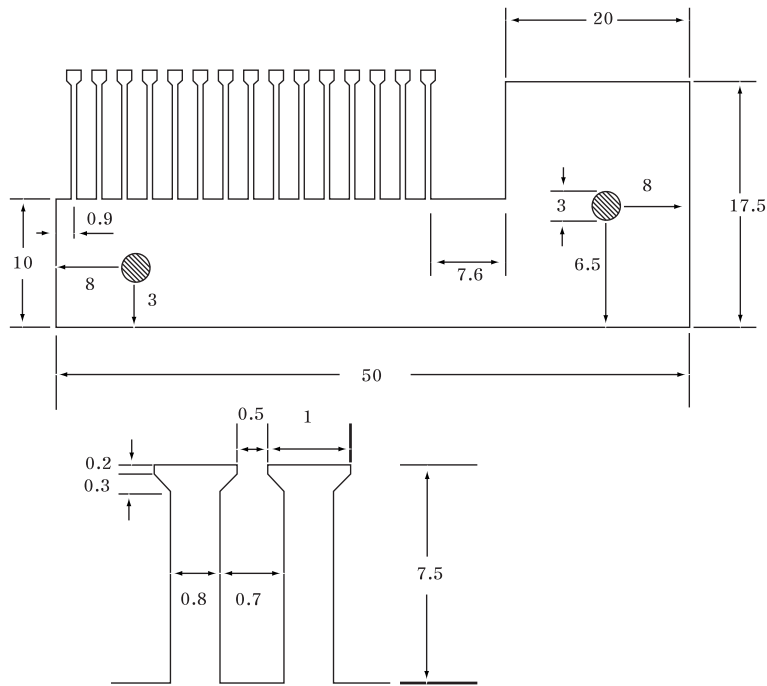


그림 1 자석의 구조

## 3. 전원 및 제어회로

### 가. 기본개념

전자석에 가하여 주는 전류는 금형 및 전자석에 잔류자기가 가능한 적게 되도록

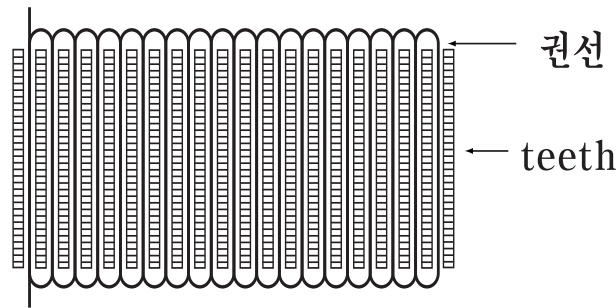


그림 2 권선 방법

교류를 채용하되 전자력에 맥동이 적어 그리드 조각의 배열이 흐트러지지 않도록 한다. 이를 위하여 그림 3과 같은 전류를 공급한다.

- (1) 전자력의 맥동을 줄이기 위하여 구형파 전류를 가한다. 본 연구에서는 200Hz를 택하였다.
- (2) 착자시는 가능한 빠른 시간에 전류가 정상상태에 이르도록 한다. 본 연구에서는 1 Cycle (5ms)로 하였다.
- (3) 탈자시에는 전류가 서서히 감소하는 것이 요망된다. 본 연구에서는 10 Cycle (50ms)로 하였다.

#### 나. 전원회로

흐르는 전류가 구형파가 되게 하기 위하여 구형파 전압발생 장치를 사용하였다.

#### 다. 제어회로

이송시의 전자석 전류를 원하는 값으로 조정 (Setting) 할 수 있게 하고 전원 전압의 변동에 대하여도 조정된 전류가 흐르도록 가변정전압 전원을 사용하였다.

### 4. 전자석의 특성 해석 및 실험

#### 가. 자장분포 및 자속량

제작된 전자석에 그리드 없이 전류를 1A 흘린 경우 자장분포를 유한요소법으로 계산한 결과 그림 4와 같은 결과를 얻었다.

여기서, 규소강판의 적층 두께는 21mm이고 비투자율은 1500으로 가정하였다. 자극위치별 자속량을 보면 그림 5와 같다.

자극을 통하여 외부로 나오는 자속은  $0.3 \times 10^{-6}$  Wb로서 그리드가 없기 때문에 전체적으로 유효자속량이 적음을 알 수 있다. 계산된 자속량을 확인하기 위하여 자극 상단에 써치코일을 삽입하여 자속을 측정하여 보았다. 즉, 자속량은 써치코일에 유기되는 전압을 적분하여 얻는다. 코일에 유기되는 전압은

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

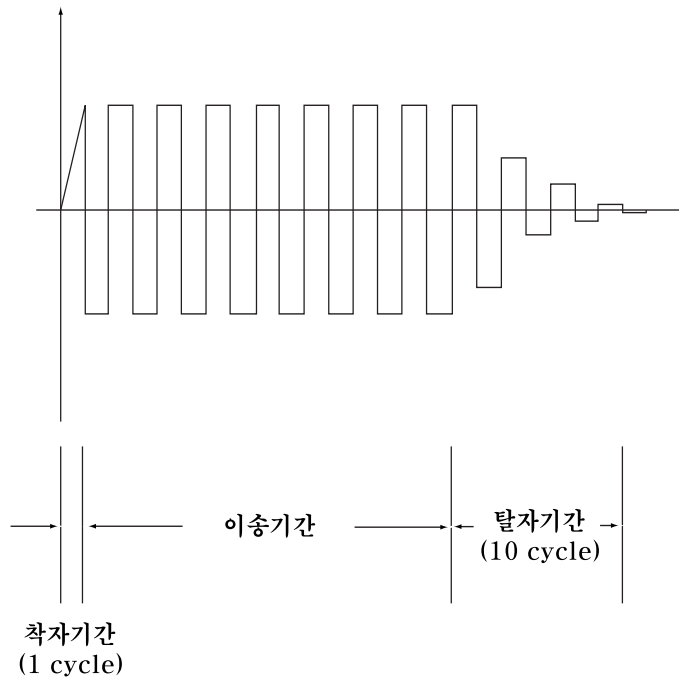


그림 3 이상적인 전자석 전류

이고,

$$\int_{\phi_1}^{\phi_2} d\phi = \frac{1}{N} \int_0^5 edt$$

이다. 코일의 전류가 +1A에서 -1A로 바뀔 때 자속은  $+\phi$  에서  $-\phi$  로 바뀌므로

$$2\Phi = \frac{1}{N} \int_0^5 edt$$

이고

$$\Phi = \frac{1}{2N} \int_0^5 edt$$

로부터 자극의 자속  $\Phi$ 를 계산하였다.  
이 실험에서는

$$\Phi = \frac{1}{2 \times 10} \times 26 \times 10^{-3} [Wb]$$

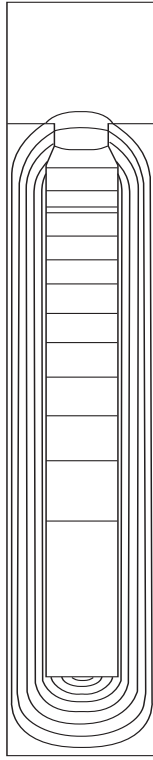


그림 4 전자석의 자력선 분포

가 얻어졌는데, 이것은 계산치보다 약 15% 많은 값으로 나타났다.

#### 나. 코일의 저항 및 인덕턴스

코일의 저항은 20°C, 도전을 100%

$$R = \rho \frac{l}{A} = 0.0172 \times \frac{l(m)}{A(mm^2)} [\Omega]$$

로 계산한다. 본 연구에서 쓰인 코일선은 직경 0.4 mm 에나멜선 (동단면적 0.096 mm<sup>2</sup>)이고 코일의 총 길이는 약 4.8m이므로 저항값은 0.85 Ω이 된다. LRC 미터에 의한 측정치는 0.8 Ω이었다.

코일의 인덕턴스는

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

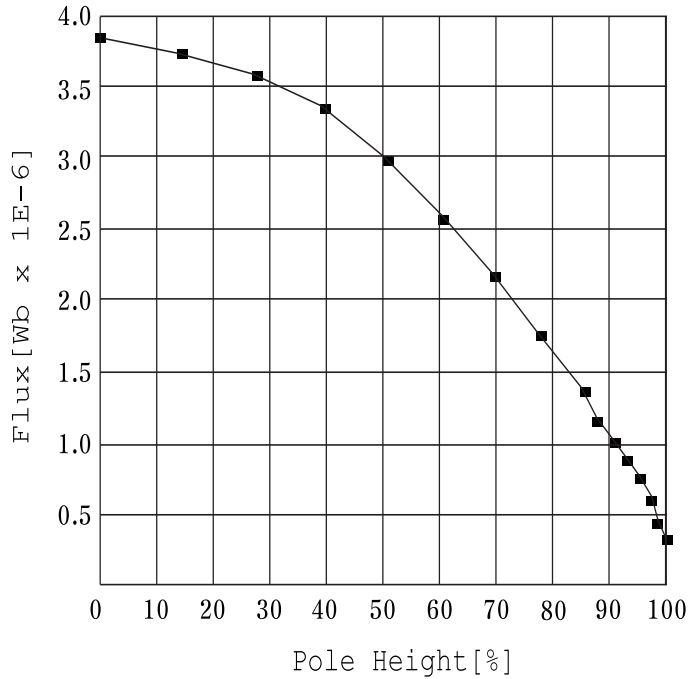


그림 5 자극 위치별 자속량

로 계산한다. 그림 5에서 코일의 평균 자속량은 약  $3 \times 10^{-6} \text{Wb}$  이고 권회수는 6 이므로 teeth 한 개 당의 인덕턴스는  $18 \mu\text{H}$  이고 14개의 teeth를 합하면  $252 \mu\text{H}$  가 된다. LRC 미터로 측정한 결과 약  $280 \mu\text{H}$  가 측정되었다.

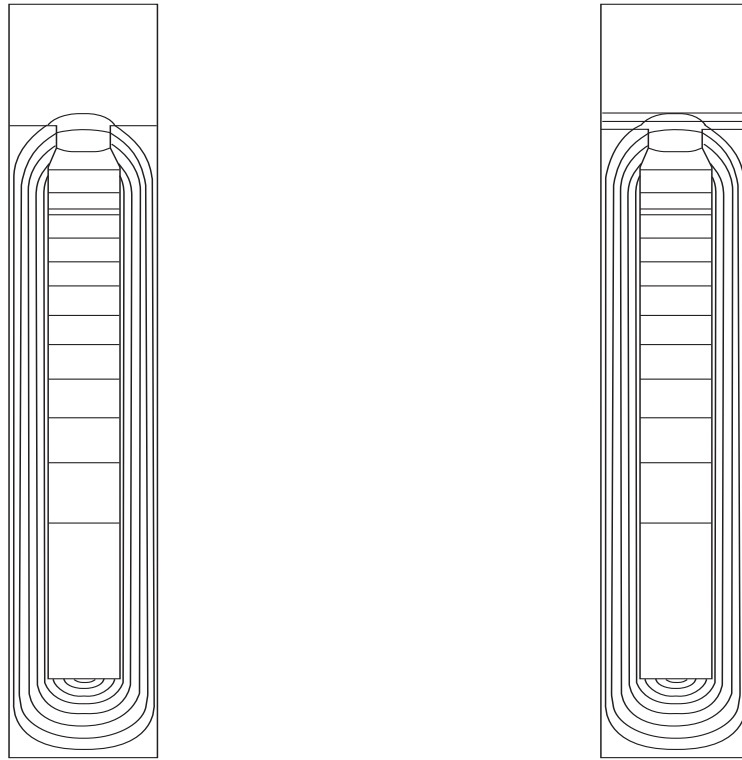
#### 다. 전자력 해석

전자석에 의하여 그리드를 흡인하는 전자력을 해석하는 방법으로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 Maxwell의 stress tensor 법을 사용하였다. 본 방법의 이론은 부록에 수록하였다.

위 방법은 우선 유한요소법으로 자장 분포를 계산하고 그리드를 포함하는 페루프를 따라 힘의 밀도를 구하여 이를 적분하면 된다.

본 연구에 사용된 그리드는 두께가  $0.1 \text{ mm}$  정도이고 그리드에 구멍이 많이 뚫려 있으며 그리드의 자화 특성도 알려져 있지 않기 때문에 정확한 자장계산이 불가능하였다. 따라서, 본 연구에서는 그리드의 비투자율을  $1.3 \sim 2.0$  으로 가정하여 전자력을 해석하여 보았다.

그림 6은 계산 사례인데 그리드를 전자석과  $0.1 \text{ mm}$  떨어뜨려 놓았을 때 자장 분포를 보여준다. 코일 전류는  $1 \text{ A}$  이고 그리드의 비투자율은  $1.5$  일 때이다. 이때의 전자력을 계산하여 보면  $18 \text{ mg}$  (한 pole 당)이 된다.



(a) 그리드가 없을 때

(b) 그리드가 있을 때

그림 6 전자력 계산을 위한 모델

그림 7은 그리드의 비투자율을 1.3에서 2.1까지 변화시킬 때의 전자력을 나타낸다. 비투자율 증가에 따라 전자력이 거의 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

한편, 그리드의 무게는 폭 21mm (자석 폭과 같음), 길이 1.5mm (자극피치)에 대하여 약 1.5mg 이므로 그리드의 비투자율이 1.4정도 이상이면 충분한 전자력이 얻어질 수 있다고 본다.

## 5. 결론

멀티그리드 고정용 전자석을 설계하여 그 특성을 조사 분석한 결과 코일 전류가 구형파 교류이기 때문에 전자력의 맥동이 적어 그리드의 진동이 적었다. 전류의 주파수는 200Hz로 하였고 착자 기간은 1 cycle (5ms), 탈자시간은 10 cycle (50ms)로 하였으며 제한치 300ms 보다 월등히 단축하였다.

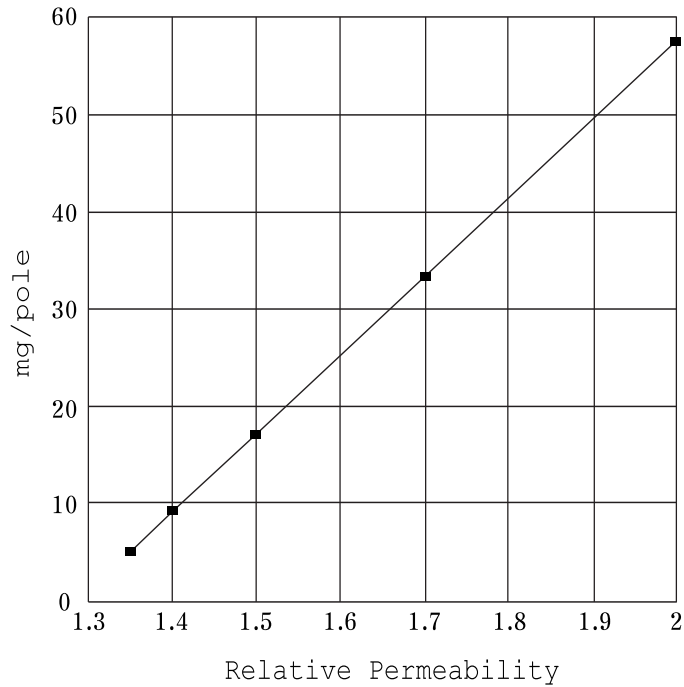


그림 7 그리드의 투자율 변화에 따른 전자력

## 6. 부 록

Maxwell stress tensor

전자력 밀도  $\vec{f}$ 는 전류밀도  $\vec{J}$  와 자속 밀도  $\vec{B}$  에 의해서 다음과 같이 표시된다.

$$(1) \quad \vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (N/m^3)$$

Maxwell 방정식을 사용하면 식 (1)은

$$(2) \quad \vec{f} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}$$

가 된다.

전체 체적이 인 물체에 작용하는 힘  $\vec{F}$ 는 식 (2)를 전 공간에 대하여 적분하여 얻어진다. 즉,

$$(3) \quad \vec{F} = \int_V \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} dv$$



이다. 벡터의 등식

$$(4) \quad (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} = (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2$$

를 사용하여 식 (3)을 변형하면

$$(5) \quad \vec{F} = \int_V \frac{1}{\mu_0} \left[ (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right] dv$$

가 된다.

식 (5)에서 첫째 항을 변형하면 아래와 같다.

$$(6) \quad \int_V (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} dv = \vec{x} \int_V (\vec{B} \cdot \nabla) B_x dv + \vec{y} \int_V (\vec{B} \cdot \nabla) B_y dv$$

또 벡터 등식

$$(7) \quad \nabla \cdot (B_i \vec{B}) = \vec{B} \cdot \nabla B_i + B_i \nabla \cdot \vec{B}$$

을 이용하면 식 (6) 우측의 첫째 항은  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ 를 적용하여

$$(8) \quad \begin{aligned} \int_V (\vec{B} \cdot \nabla) B_x dv &= \int_V \nabla \cdot (B_x \vec{B}) dv \\ &= \int_S B_x (\vec{B} \cdot \vec{n}) ds \end{aligned}$$

가 된다. 여기서 S는 체적 V를 둘러싼 표면이고  $\vec{n}$ 은 이 표면에 수직한 단위 벡터이다. 따라서 식 (6)은

$$(9) \quad \int_V (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} dv = \int_S \vec{B} (\vec{B} \cdot \vec{n}) ds$$

가 된다.

식 (5)의 둘째 항을 변형하면 아래와 같다.

$$(10) \quad \int_V \frac{1}{2} \nabla B^2 dV = \int_S \frac{1}{2} B^2 \vec{n} ds$$

식 (9)와 식 (10)을 식 (5)에 대입하면

$$(11) \quad \vec{F} = \int_S \vec{P} ds$$

이고 여기서,

$$(12) \quad \vec{P} = \frac{1}{\mu_0}(\vec{B} \cdot \vec{n})\vec{B} - \frac{1}{2\mu_0}B^2\vec{n}$$

이며 이것을 Maxwell stress tensor 라 한다.

#### 참고문헌

1. 윤재강 외역, 전자장, 동일출판사, 1990
2. 강형부 외, 전자장론, 청문각, 1989
3. 이상석, 교류회로이론, 보성각, 2002
4. 성영권 외, 일반전기공학, 형설출판사, 1992

경원대학교 수학과정보학과  
경기도 성남시 수정구 복정동 산 65  
e-mail: hskimm@mail.kyungwon.ac.kr