

펄스 인가시 솔레노이드 내의 자기력 해석에 관한 연구

조원영*, 정병훈*, 이문용*, 조윤현*
 (주)성우하이텍 기술연구소, 동아대학교 전기공학과**

A Study of Analysis for Electromagnetic Force of Solenoid impressed by pulse-voltage

WonYoung Jo*, ByungHun Jung*, MoonYong Lee*, YunHyun Cho**
 Sungwoo Hitech Technical Institute*, Dong-A University Dept. of Electrical Engineering**

Abstract - 본 연구는 유한 길이를 갖는 솔레노이드 내에 원통형 도체가 존재하는 경우, 코일에 펄스 전압을 인가했을 때 정적, 동적 특성을 고찰하였다. 또한 솔레노이드 내에 자속을 한 부분으로 집중시켜주는 B-field shaper를 삽입하여 같은 방법으로 펄스 전류 인가시의 정적, 동적 특성을 고찰하였다. 원통형 도체의 재질로는 Al, Cu, Fe 계열을 사용하였으며, 인가 전압은 고압용 콘덴서를 충전하여 수백 micro sec 단위의 짧은 시간에 통전하였다. 본 논문에서는 유한 길이 솔레노이드는 설계 기본 방법을 제시하였고, 설계된 시작품에 대한 동적 특성 해석은 유한요소법을 이용하여 검증하였다. 해석 결과로는 현상에 따른 솔레노이드 내의 원통 도체에 작용하는 자기력 분포, 인덕턴스 등 설계 변수에 대한 자기력 특성 값을 제시하였다.

1. 서 론

일반적인 솔레노이드의 경우 전자석이나 영구자석 계자를 갖는 자기회로와 가동코일로 이루어져 왕복운동을 위한 추력 발생장치인 액추에이터로 사용된다. 그러나 본 논문에서는 솔레노이드 내부에 원통형 도체를 삽입시키고 고압의 콘덴서에 저장된 에너지를 순간적으로 방출시켜 솔레노이드 프레임 바디와 내부 도체 사이의 반발력을 발생시키는 구조의 솔레노이드에 대하여 논하였다. 본 구조를 이용하여 내부 도체가 받는 힘(압력)을 이용한 가공 기술로의 응용이 가능하다.

본 논문에서는 유한 길이를 갖는 솔레노이드와 내부 도체 사이의 반발력을 최대화 할 수 있는 구조의 설계 기본 방법을 제시하였고, 유한요소법을 이용한 특성 해석을 통하여 이를 검증하였다. 특성 해석 결과로는 내부 도체의 물성치와 자기력 분포, 인덕턴스 등의 설계 변수에 대한 특성값을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 특성 방정식

그림 1(a)는 본 연구에서 사용한 고압 펄스용 솔레노이드의 모델이다. 솔레노이드 내부의 원형 도체가 받는 자기압력을 이용하여 도체 내부의 형상 변화 등의 가공을 목적으로 하는 본 솔레노이드는 직류 저항 성분 R과 인덕턴스(Inductance) L로 이루어져 있으며, 솔레노이드를 자화시키는 기전력은 직류저항 성분 R과 인덕턴스 L에 의한 전압 강하량 V_L 로 나타낼 수 있으므로, 등가 전기회로는 그림 1(b)과 같다.

코일 내에 유도되는 기전력 e 는 다음과 같이 된다.

$$e = \frac{d}{dt}(Li) = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

시간에 따른 전압의 변화 특성은 다음과 같다.

$$V(t) = iR + L(x) \frac{di}{dt} + \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

그리고 펄스 인가시 솔레노이드 내부 파이프형 도체에 작용하는 힘의 변화는 (3)과 같이 나타내어진다.

$$F_{fld} = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (3)$$

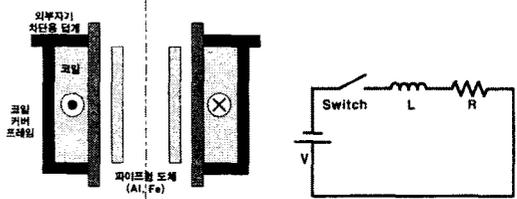


그림 1. (a)고압펄스 인가용 솔레노이드 (b)등가회로

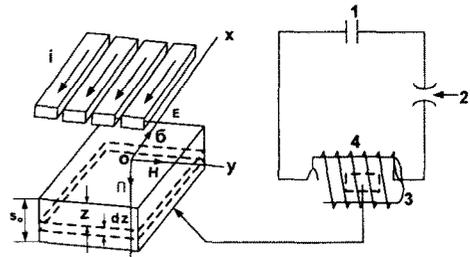


그림 2. 원통형 도체를 갖는 솔레노이드 구조

그림 2는 원통형 도체를 갖는 솔레노이드의 구조를 나타낸 것이며, 이 도체가 갖는 단위 체적당 힘 분포 및 압력 분포는 다음과 같다.

$$f_m = \mu_0 \sqrt{\gamma \mu_0 \sqrt{\delta^2 + \omega^2}} H_m e^{-2(\delta t + \alpha z)} \times \sin(\omega t - \beta_0 z + \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{\delta}{\omega}) \times \sin(\omega t - \beta_0 z) \quad (4)$$

$$P(z, \phi) = \frac{\mu_0 H_m^2}{4} e^{-2\alpha z} - \cos \phi - e^{-\frac{2z}{\Delta}} \left[1 - \cos 2 \left(\phi - \frac{z}{\Delta} \right) \right] \quad (5)$$

2.2 동적 특성 해석

2.2.1 유한요소 모델링

본 논문에서는 펄스 인가시의 솔레노이드 내의 도체에 발생하는 현상을 정량적으로 분석하기 위하여 유한요소법을 적용하였고, 시변자계 방정식은 다음과 같다.

$$\text{curl}(\nu \text{curl}(A)) + \sigma_e \frac{DA}{Dt} = J_{ex} \quad (6)$$

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{\partial A}{\partial t} - v \times \text{curl}(A) \quad (7)$$

여기서 ν 는 자기 저항율, σ_e 는 전기 도전율, J_{ex} 는 여자 전류 밀도, v 는 velocity이다.

$$F = J \times B \quad (8)$$

여기서 J 는 와전류 밀도, B 는 자속밀도이다. 또한 자기 압력은 다음과 같은 수식으로 계산되어 진다.

$$P = \frac{2\pi \iint F_r r dr dz}{2\pi r h_2} \quad (9)$$

여기서 F_r 는 방사 전자기력이고, h_2 는 길이이다.

2.2.2 해석 결과 및 고찰

본 논문에서 연구되어지는 솔레노이드에 인가되는 펄스 전압을 5[kV], 전류 주파수 5[kHz], 통전시간 200[us], 충전커패시터 용량 490[uF], 인덕턴스 482[nH]일 때에, 솔레노이드 내부에 삽입되는 원통형 도체가 없는 경우와 Al, Cu, Fe의 물성치를 가지는 도체를 삽입하였을 경우에 자속 분포, 도체에 유기되는 전류, 솔레노이드와 도체 사이의 반발력(자기 압력)을 계산하였다. 표1은 삽입된 도체의 물성치를 나타낸다. 펄스 인가시의 현상을 정확히 예측하기 위하여 2차원 유한요소 상용 프로그램인 Flux2D를 사용하였다. 자기력 특성은 일반적인 등방성, 균질성 물질의 자기장에 존재하는 맥스웰 응력 텐서법을 적용하여 계산하였다.

표 1. 내부 원통형 도체 재료 물성치

재료	저항율($\mu\Omega cm$)	투자율(N/A^2)
Al	2.65	1.0000065
Cu	1.7241	0.99991
Fe	9.8	4000

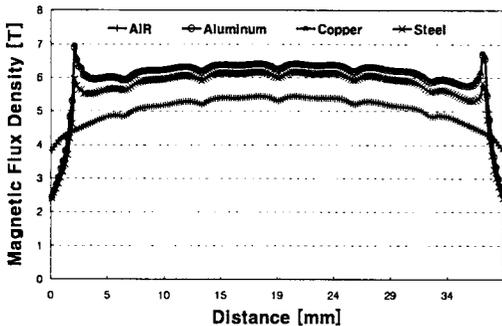
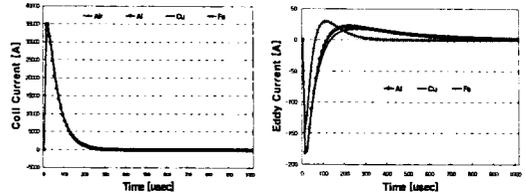


그림 3. 각 도체별 공극 자속밀도 비교

그림 3은 솔레노이드에 펄스 전압을 인가했을 경우 각 도체에 따른 공극의 자속 분포, 그림 4(a)와 (b)는 솔레노이드 코일에 인가된 전류 및 코일 전류에 의해서 유

된 와전류를 각각 나타낸다. 이 해석결과와 식 (4), (5)로부터 도전율이 커질수록, 투자율이 낮을수록 내부 원통형 도체에 유기되는 전압이 커지는 것을 예측할 수 있다. 따라서 코일 전류에 의한 자속과 내부 도체의 와전류에 의해 발생하는 자속 사이에 반발력(자기 압력)이 작용한다는 것을 알 수 있다. 각 도체의 경우에 발생하는 자기 압력의 분포는 그림 5에 나타내었다.



(a)코일 전류 (b)도체내 유기 전류
그림 4. 코일내 입력 전류 및 유기 전류 비교

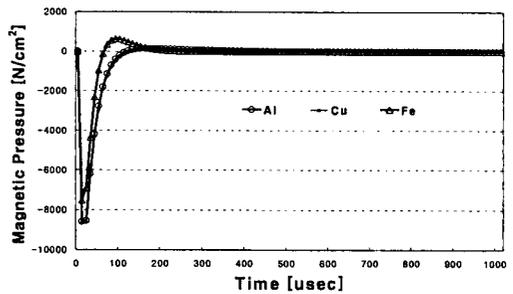


그림 5. 솔레노이드와 도체 사이의 자기 압력

3. 결 론

본 논문에서는 내부에 원통형 도체를 갖는 솔레노이드에 고압의 콘덴서에 충전된 전압을 수백 micro sec 단위의 펄스파로 인가하였을 때 나타나는 특성에 대하여 연구하였다. 보다 정확한 결과 예측을 위하여 전자계 유한요소해석을 이용하였고, 내부 원통형 도체의 물성치 변화에 따라 솔레노이드와 도체가 갖는 자기력 특성의 상관 관계에 대해 미치는 영향을 자세히 검토하였다. 해석 결과로부터 저항율이 작을수록, 투자율이 클수록 내부 도체에 발생하는 와전류량은 커지게되며 이로부터 반발력(자기압력)이 발생하게 된다는 것을 알 수 있었다. 향후에는 고압 펄스 인가시 발생하는 자기압력을 이용하여 도체 내부의 성형이나 가공 등으로 응용 활용하는 방안을 검토해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역산업기술개발사업인 "이종재료 차체부품 접합기술 개발" 과제에 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조윤현, "자기적 비선형을 고려한 축방향 릴럭턴스 전동기의 정·동특성해석", 동아대학교, 2000
- [2] 김덕현, 강규홍, 홍정표, 김규탁 "영구자석 다극 배치에 의한 가동 코일 형 리니어 진동 액추에이터의 특성", 전기학회 논문지 50B-6-3. 2001.3.
- [3] Dallas, D.B., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook", 3rd ed. Society of Manufacturing Engineers, N.Y. McGrawHill, P.17-1
- [4] 성백주, 이은용, 김형의, "고속 솔레노이드 액추에이터의 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2004년