

Electromagnetic Analysis of a Shading Ring Type AC Solenoid

양형열†
(Hyong-Yeol Yang)

Abstract - A shading ring in an AC solenoid plays an important role in reducing vibration and humming sound. Estimation of performance of the shading ring placed in a stator pole of the AC solenoid is not an easy task due to the difficulty in measurement of the current and flux linkage of the shading ring. In this paper, dynamic performance of an AC solenoid with a shading ring is analyzed through the simulation using electromagnetic analysis software and the results are verified by simple AC and DC voltage tests. Both the simulation and experimental results show that the shading ring in the AC solenoid not only increases pull force, but also reduces operation time, vibration and humming sound.

Key Words : Solenoid, Shading Ring, Electromagnetic Analysis, Vibration, Humming Sound

1. 서론

솔레노이드는 가장 기본적인 동력원을 비교적 소형으로 복잡한 구조를 필요로 하지 않고 구할 수 있다는 장점을 가지며, 설계가 비교적 간단하고 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 저가로 제작할 수 있다. 그리고 정밀제어가 가능하기 때문에 스위치, 릴레이, 밸브 등 여러 산업분야에서 광범위하게 이용되고 있다[1].

솔레노이드는 사용하는 전원에 따라 직류 솔레노이드와 교류 솔레노이드로 구분된다. 이 중에서 교류 솔레노이드는 직류 솔레노이드와는 달리 동작 시에 노이즈와 채터링이 발생하고 교류 주파수에 해당하는 진동이 발생하게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 교류 솔레노이드의 스테이터 폴에 작은 쉐이딩 링을 삽입함으로써 회로의 자속을 두 부분으로 나누어서 위상을 시프트시키게 된다[2]. 이렇게 쉐이딩 링을 사용하면 교류 솔레노이드에서 발생하는 진동 및 소음을 제거할 수 있다.

그러나 쉐이딩 링의 자속과 전류를 측정하기 어렵기 때문에 쉐이딩 링의 정확한 동작을 실험으로 측정하여 이해하기는 쉬운 일이 아니다. 따라서 쉐이딩 링의 정확한 동작을 분석하기 위해서는 실험과 매우 유사한 시뮬레이션이 필요하며, 이를 통하여 쉐이딩 링 및 솔레노이드 코일의 전류와 자속을 각각 비교함으로써 쉐이딩 링의 동작을 이해할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 먼저 다양한 시뮬레이션 결과와 실제 솔레노이드 실험 결과를 비교, 분석하여 시뮬레이션의 정

확성을 검증함으로써, 시뮬레이션을 통하여 쉐이딩 링의 동작을 분석함이 적절함을 보여주었다. 그리고 시뮬레이션 결과를 통해 쉐이딩 링의 유무에 따른 솔레노이드의 동작을 보임으로써 가시적으로 쉐이딩 링의 역할을 이해할 수 있도록 하였다.

2. 솔레노이드

2.1 직류 솔레노이드와 교류 솔레노이드의 비교

직류 솔레노이드의 특징을 요약해 보면 다음과 같다.

- (1) 스트로크의 길이에 따라서 흡인력이 크게 차이가 나므로 동작 시작 시에 흡인력이 약해 동작 속도가 느리다.
- (2) 스트로크의 끝에서 폴이 완전히 접촉하지 않도록 하여 솔레노이드의 수명을 크게 연장시킬 수 있다[3].
- (3) 스테이터 코어를 적층하지 않아도 된다.
- (4) 코일이 자화되어 동작이 완료된 후에는 유지 전류가 적어도 되므로 코일 전압을 감소시키기 위한 회로를 구성할 필요가 있다.
- (5) 교류 솔레노이드와 같은 히스테리시스나 과전류에 의한 손상이 적기 때문에 온도 상승이 적다.
- (6) 여자전류는 코일저항으로 결정되며 전 스트로크를 통해서 일정하므로 교류처럼 과전류에 의한 손상은 없다.
- (7) 여자전류가 일정하여 플런저가 흡착면에서 떨어지면 흡인력이 약해지기 때문에 스트로크를 크게 할 수 없다.

한편 교류 솔레노이드는 직류 솔레노이드와 비교할 때 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 스트로크의 길이에 따라서 비교적 흡인력 변동이 심하지 않으므로 기동 시 흡인력이 커서 속도가 빠르다.

† 교신저자 정회원 : 지오토(주) 연구소장 · 공박

E-mail: sfish2000@gmail.com

접수일자 : 2009년 3월 19일

최종완료 : 2009년 5월 22일

- (2) 솔레노이드가 자회된 상태에서 더 많은 면적이 닿게 함으로써 잡음과 진동의 양을 감소시켜야 하므로 플런저 폴과 스테이터 폴이 보다 정밀하게 정렬되어야 한다.
- (3) 매 스트로크마다 버터밍 아웃(Bottoming out: 플런저 폴이 스테이터 폴과 완전히 닿는 것)이 되며 이러한 금속끼리의 충돌은 동작 시 큰 소음을 유발하고 폴에 손상을 입히게 된다. 폴 표면이 손상되고 닿는 면적이 적어지면 동작 시 채터링은 더욱 커지게 된다.
- (4) 와류손을 막기 위하여 적층을 할 필요가 있다.
- (5) 기동 시 큰 전류가 흐른다.
- (6) 어떤 원인으로 플런저의 움직임이 늦거나 흡착이 안 될 때는 큰 전류가 흘러서 코일이 손상을 입게 된다.
- (7) 플런저가 떨어지면 전류가 커져 흡인력도 커지므로 스트로크를 크게 할 수 있다.

이와 같이 직류 솔레노이드와 교류 솔레노이드는 각각 장 단점을 가지고 있지만 교류 솔레노이드에서 가장 큰 단점은 잡음과 진동이라고 할 수 있다. 입력 전압의 주파수에 따른 진동으로 인해 플런저와 스테이터 폴이 손상되고 이로 인해 흡인력이 약해져 더욱 진동 및 잡음이 심해지게 된다. 웨이딩 링은 이러한 진동 및 잡음을 줄여주는 중요한 역할을 하기 때문에 교류 솔레노이드에서 필수적인 부분이라고 할 수 있다.

2.2 교류 솔레노이드 이론

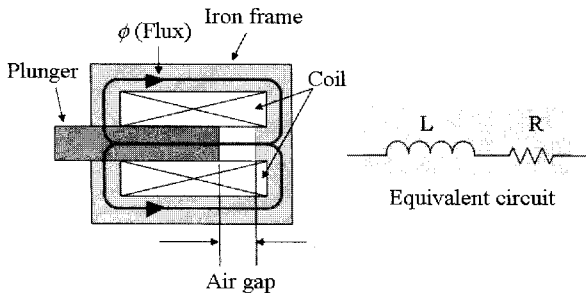


그림 1 솔레노이드 구조 및 등가회로
Fig. 1 Structure and equivalent circuit of a solenoid

일반적인 교류 솔레노이드의 단면 구조와 전기적 등가회로를 그림 1에 나타내고 있다.

솔레노이드의 코일의 저항을 무시하고, 입력전압을 $e = \sqrt{2} E \sin(\omega t)$ 라 하면 식 (1)이 성립한다.

$$e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

- L : 권선의 인덕턴스
- i : 권선에 흐르는 전류
- N : 솔레노이드 코일의 권선 수
- ϕ : 자속
- 이때 자속의 변화는

$$\phi = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f N} E \sin(2\pi f t - \frac{2}{\pi}) \tag{2}$$

이 된다[4].

또한 식 (3)에서와 같이 공극에서의 자기저항만을 고려한다면 솔레노이드에 생성되는 자속은

$$\phi = \frac{Ni}{R_m} = \frac{Ni}{R_i + R_g} \approx \frac{Ni}{R_g} = \frac{Ni}{\mu_0 A_g} \tag{3}$$

$$\left(\because R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \right)$$

- R_m : 자기저항의 총합
- R_i : 철심의 자기저항
- R_g : 공극의 자기저항
- l_g : 공극의 길이
- μ_0 : 공극의 투자율
- A_g : 공극부의 단면적

이 되므로 공극의 길이에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 그리고 자극 표면에 작용하는 흡인력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = \frac{B_g \cdot A_g}{2\mu_0} \tag{4}$$

여기에서 B_g 는 공극부의 자속 밀도로서

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \tag{5}$$

이다. 따라서 흡인력은 식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = \frac{(Ni)^2}{2\mu_0 A_g R_m^2} = \frac{(Ni)^2 \mu_0 A_g}{2l_g^2} \tag{6}$$

식 (6)에서 공극의 흡인력은 기자력의 제곱에 비례하고 공극 길이의 제곱에 반비례한다는 것을 알 수 있다.

2.3 웨이딩 링(Shading Ring)

웨이딩 링은 솔레노이드 뿐만 아니라 교류 contactor [Comparison of Shading Ring Arrangements], Phase converter[6], 웨이딩 코일형 유도 전동기 등 많은 곳에 사용되고 있다. 웨이딩 링은 구리나 은(銀)으로 만들어지며 보통 스테이터 코어에 홈을 내어 중간에 끼워진 형태로 조립된다. 이것은 자기회로에서 단락된 2차 코일의 역할을 하며 솔레노이드 코일이 1차 코일로서 전원이 공급된다. 이러한 구조는 1차 코일에 흐르는 교류 전류로 인한 상호인덕턴스가 2차 코일에 전류를 유도하는 변압기와 유사하다.

웨이딩 링에 유기되는 전류는 솔레노이드 코일에 의해 생성되는 자속의 변화에 의한 것이며, 웨이딩 링에 쇄교하는 자속변화율이 0을 지나는 시점에서 웨이딩 링에 유기되는 전류는 최대값이 된다. 마찬가지로 코일 자속의 최대값에서는 그 변화가 0 이므로 웨이딩 링에 유기되는 전류는 0이 된다. 이와 같이 웨이딩 링에 생성되는 교류자속은 코일에 의해 발생하는 자속과는 이상적으로 90도의 위상차를 갖는다. 하지만 실제로는 링의 저항, 자기회로의 자기저항 등으로 인해 정확히 90도가 되지는 않는다[6].

이와 같이 두 가지 다른 위상을 갖는 자속으로 인하여 여

자된 솔레노이드 내에서 자속이 0이 되는 일은 발생하지 않으므로 플런저와 스테이터의 접촉은 계속 유지될 수 있다.

2.4 실험용 솔레노이드

2.4.1 실험용 솔레노이드의 구조

실험에 사용된 솔레노이드의 구조는 그림 2와 같다. 실제 실험에 사용된 솔레노이드는 그림 (a)와 같으나 2D 시뮬레이션을 위해서 (b)와 같이 간략화 하였다.

솔레노이드는 코일, 웨이딩 링, 헤드, 보빈, 브라켓, 그리고 내부에서 움직이는 플런저로 구성되어 있다. 그림 3에서 조립도를 보여주고 있다.

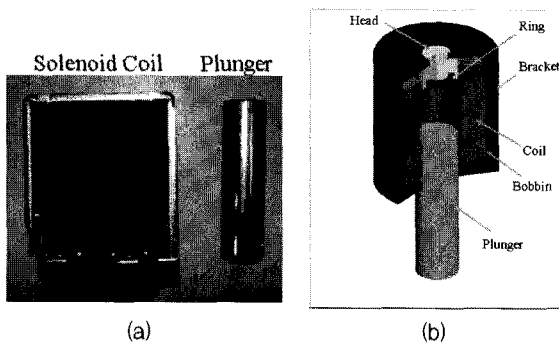


그림 2 (a)실험용 솔레노이드, (b)시뮬레이션용 솔레노이드
Fig. 2 (a)Solenoid for experiment, (b) Solenoid for simulation

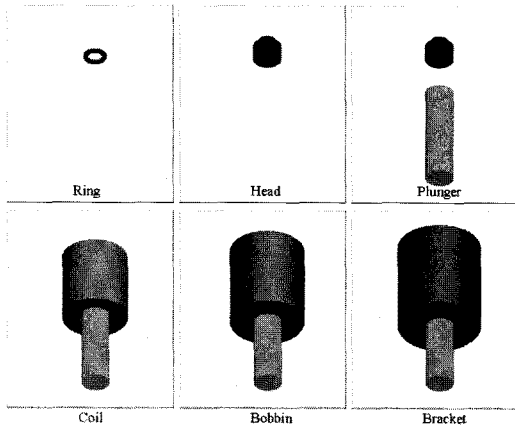


그림 3 솔레노이드의 조립도
Fig. 3 Assembly of the solenoid

2.4.2 솔레노이드의 제원

실험에 사용된 솔레노이드의 제원은 표 1과 같다.

표 1 솔레노이드의 제원
Table 1 Specification of the solenoid

항목	값
정격	110V, 60Hz, 465mArms(657.6mAmax)
코일	φ0.28, 2230 Turns, 42Ω
플런저	무게: 45g. Stroke: 18mm
웨이딩 링	반경: 4.075mm 저항: 0.223m

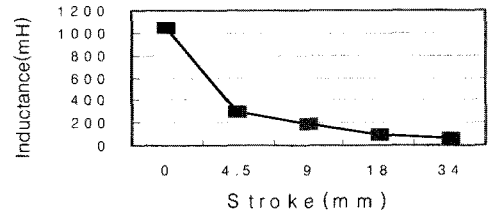


그림 4 스트로크에 따른 인덕턴스
Fig. 4 Inductance according to stroke

거리에 따른 솔레노이드의 인덕턴스는 그림 4와 같다. Stroke가 18mm인 경우는 플런저가 최대 동작점까지 빠져있는 경우이며, 34mm는 플런저가 완전히 솔레노이드 몸체 밖으로 빠져나온 상태이다.

3. 시뮬레이션의 신뢰성 검증

실험을 통해서 웨이딩 링의 동작을 정확하게 파악하기는 쉽지 않으므로 본 연구에서는 전자기해석 소프트웨어인 Maxwell 2D™를 사용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 실시할 때 가장 중요한 것은 그 시뮬레이션의 정확성이라고 할 수 있겠다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위하여 다양한 시뮬레이션 결과와 실제 솔레노이드 실험 결과를 분석, 비교하였다.

(1) 직류실험

직류 전압을 인가하여 실험한 결과와 시뮬레이션 한 결과를 비교하였다. 이때 직류 전압은 솔레노이드 교류 정격전압인 465mA가 흐르도록 20V를 인가하였다.

그림 5에서 보는 바와 같이 실험 결과와 시뮬레이션을 비교하면 전류 형상이 거의 유사하고, 표 2에서와 같이 동작시 전류의 최대값, 동작이 완료되는 시점이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

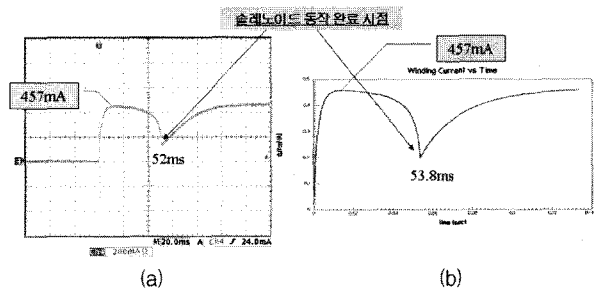


그림 5 솔레노이드 직류실험: (a)실험, (b)시뮬레이션
Fig. 5 DC test of the solenoid: (a)Experiment, (b)Simulation

표 2 직류 실험 결과
Table 2 Results of DC test

항목	실험	시뮬레이션
전류의 최대값	457mA	457mA
동작 완료 시점	52ms	53.8ms

(2) 교류실험(110V, 0°)

교류전압을 인가하여 위상이 0°부터 시작될 때의 시뮬레이션과 실험파형을 그림 6에서 보여주고 있다.

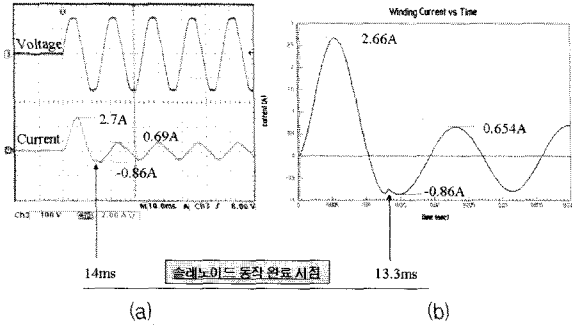


그림 6 솔레노이드 교류실험(110V, 0°): (a)실험, (b)시뮬레이션
Fig. 6 AC test of the solenoid(110V, 0°): (a)Experiment, (b)Simulation

표 3 교류 실험 결과(110V, 0°)

Table 3 Results of AC test(110V, 0°)

항목	실험	시뮬레이션
전류의 최대값	2.7A	2.66A
동작 완료 시점	14ms	13.3ms
동작 직후 전류 최소값	-0.86A	-0.86A
동작 직후 전류 최대값	0.69A	0.654A

표 3에서와 같이 교류전압을 인가하였을 경우에도 솔레노이드 동작 시 코일에 흐르는 전류의 최대값, 동작이 완료되는 시점, 동작 완료 직후 전류의 최소치 및 최대치의 실험 및 시뮬레이션 값이 매우 근접하고 있음을 알 수 있다.

(3) 교류실험(110V, 90°)

교류전압을 인가하여 위상이 90°부터 시작될 때의 시뮬레이션과 실험파형을 그림 7에서 보여주고 있다.

그림 7과 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 교류전압의 위상이 90°부터 시작되는 경우에도 실험 및 시뮬레이션 결과가 매우 근접한 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하기 위하여 실험과 시뮬레이션의 결과 비교를 한 결과, 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과가 매우 정확하므로 웨이딩 링의 해석에 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

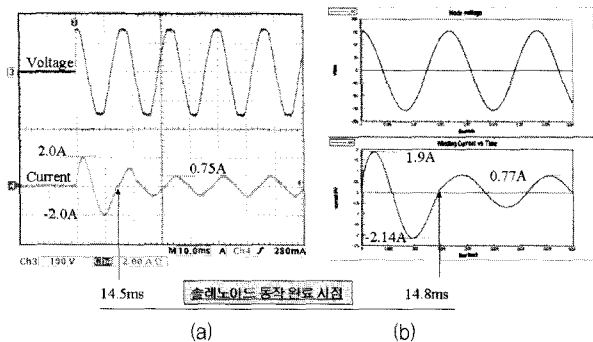


그림 7 솔레노이드 교류실험(110V, 90°): (a)실험, (b)시뮬레이션
Fig. 7 AC test of the solenoid(110V, 90°): (a)Experiment, (b)Simulation

표 4 교류 실험 결과(110V, 90°)

Table 4 Results of AC test(110V, 90°)

항목	실험	시뮬레이션
전류의 최대값	2.0A	1.9A
동작 완료 시점	14.5ms	14.8ms
동작 직후 전류 최소값	-2.0A	-2.14A
동작 직후 전류 최대값	0.75A	0.77A

4. 웨이딩 링의 시뮬레이션 결과

그림 8은 웨이딩 링을 사용하는 경우와 제거된 경우의 전류를 보여주고 있다. 웨이딩 링을 제거하게 되면 동작 전류가 약간 상승하면서도 솔레노이드 동작 속도는 더 느려지고 있음을 알 수 있다.

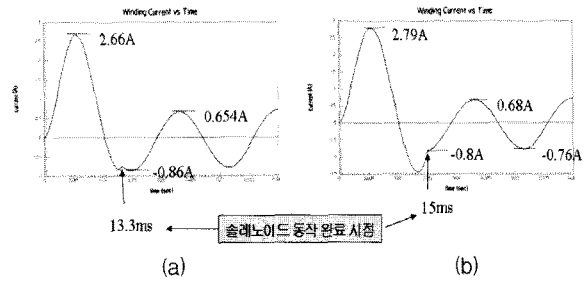


그림 8 솔레노이드 전류: (a)웨이딩 링이 있는 경우, (b)웨이딩 링이 없는 경우

Fig. 8 Current waveform of the solenoid: (a)with shading ring, (b)without shading ring

그림 9에서 웨이딩 링이 삽입되어있는 상태에서 코일과 웨이딩 링의 전류를 보여주고 있다. 권선 전류의 변화로 인해 자속이 변화하게 되고 이때 웨이딩 링에 기전력이 유도되어 전류가 흐르고 있음을 알 수 있으며, 이때 웨이딩 링에 흐르는 최대전류는 70.7Arms, 링에서 소비되는 전력은 1.115W로 계산되었다.

그림 10은 코일과 웨이딩 링에 쇄교하는 자속을 보여주고 있다. 코일이 여자된 후 28ms가 되는 시점에서 권선의 자속은 0점을 지나게 된다. 이때 웨이딩 링의 자속은 정(+)방향으로 나타나고 있음을 알 수 있고, 그림 11에서 권선과 웨이딩 링의

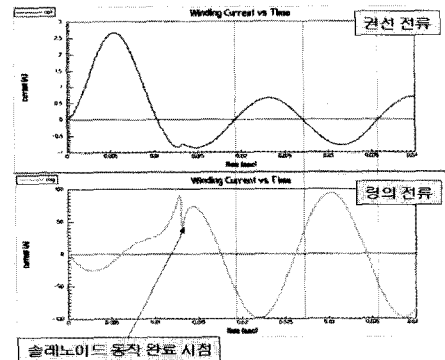


그림 9 솔레노이드 코일(상)과 웨이딩 링(하)의 전류
Fig. 9 Current waveforms of the solenoid coil(above) and shading ring(below)

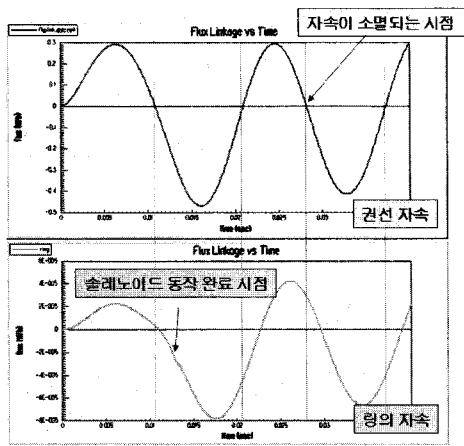


그림 10 솔레노이드 코일(상)과 웨이딩 링(하)의 쇄교자속
Fig. 10 Flux linkage of the solenoid coil(above) and shading ring(below)

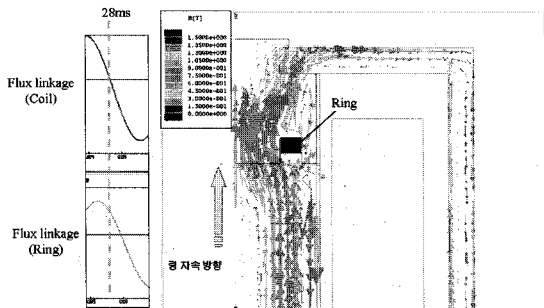


그림 11 솔레노이드 코일의 쇄교자속이 최소일 때의 자속 밀도 분포
Fig. 11 Flux density distribution at minimum flux linkage of the solenoid coil

자속밀도 분포를 보면 거의 모든 자속이 웨이딩 링에 의한 자속임을 알 수 있다. 29ms가 지난 후에는 권선과 웨이딩 링의 자속이 각각 정(+)-방향, 역(-)방향의 자속 방향을 가짐을 그림 12에서 보여주고 있다.

그림 13은 권선의 자속이 거의 소멸되었을 때 웨이딩 링이 있는 경우와 웨이딩 링이 없는 경우의 자속밀도를 보여주고 있다. 웨이딩 링이 삽입되어있는 경우에 자속밀도가

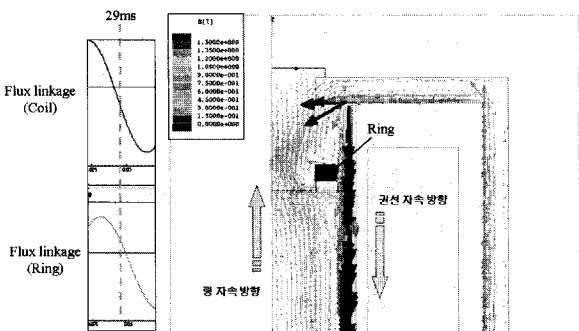


그림 12 솔레노이드 코일의 쇄교자속과 웨이딩 링의 쇄교자속이 반대 방향일 때의 자속밀도 분포
Fig. 12 Flux density distribution in the opposite direction of the flux linkages of the solenoid coil and shading ring

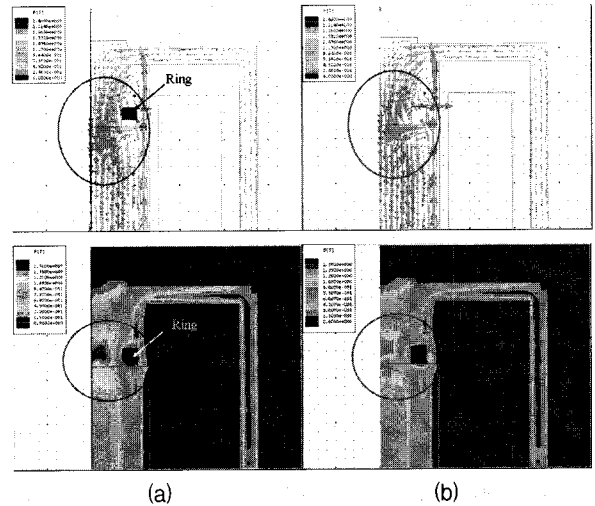


그림 13 자속밀도 비교:(a)웨이딩 링이 있는 경우, (b)웨이딩 링이 없는 경우

Fig. 13 Flux density comparison between : (a)with shading ring, (b) without shading ring

더욱 높다는 것을 알 수 있다. 웨이딩 링이 있는 경우는 자속의 크기가 약 1.35[T]이지만 링을 제거하고 난 후에는 약 1.2[T]로 떨어지고 있다.

이 시물레이션을 통하여 웨이딩 링이 삽입되어 있는 경우에는 교류전류에 기인한 자속의 공백을 막아줄 뿐만 아니라 자속밀도가 더욱 높아지게 하므로 흡입력 또한 더욱 강해진다는 것을 알 수 있다.

그림 14는 웨이딩 링이 있는 경우와 없는 경우의 흡인력을 나타내고 있다. 흡인력은 식 6과 같이 자속밀도의 제곱에 비례하므로 자속밀도의 방향과는 무관하게 정(+)-방향으로만 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 웨이딩 링이 있는 경우 자속밀도가 더욱 크므로 흡인력 또한 상당히 커지게 됨을 알 수 있다.

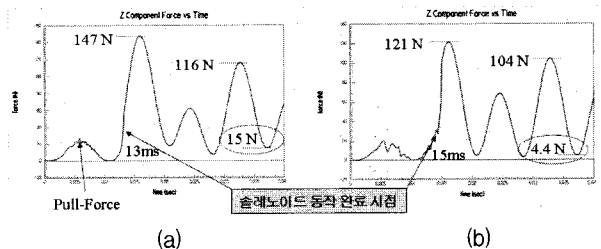


그림 14 흡인력 비교:(a)웨이딩 링이 있는 경우, (b)웨이딩 링이 없는 경우

Fig. 14 Pull-Force comparison between : (a)with shading ring, (b) without shading ring

그림 14에서 보는 바와 같이 웨이딩 링이 있는 경우 솔레노이드 동작 완료 시점이 약간 빨라지고, 동작 완료 후 흡인력의 최대값은 웨이딩 링이 있는 경우 147[N]이지만 웨이딩 링이 제거된 경우는 121[N]밖에 되지 않는다. 또한 전류가 0 점을 지나는 경우에는 각각 15[N], 4.4[N]으로 유지력에 있어서 큰 차이를 보여주고 있다. 이와 같이 웨이딩 링이 없는 경우는 입력 교류 전류의 방향이 바뀌는 순간에 자속밀

도가 매우 작아지게 된다. 그러므로 흡인력이 급격하게 떨어져 용수철의 힘을 버티지 못하고 플런저가 헤드에서 떨어지게 되어 진동, 소음을 유발하게 된다.

시뮬레이션 결과를 통하여 헤드에 웨이딩 링을 삽입함으로써 같은 조건에서도 흡인력을 향상시키고 자속의 공백을 제거할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 교류 솔레노이드에 삽입되는 웨이딩 링의 역할을 전자기 해석 소프트웨어를 통하여 분석하였다. 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교함으로써 시뮬레이션의 타당성 검증을 먼저 실시하여 그 신뢰성을 검증하였고, 시뮬레이션을 통해 메인권선과 웨이딩 링의 전류, 자속, 자속밀도를 비교함으로써 가시적으로 웨이딩 링의 역할을 이해하도록 하였다. 시뮬레이션 해석 결과를 통하여 웨이딩 링은 교류 전류에 기인하는 자속의 공백을 막아주어 진동 및 소음을 줄이는 역할을 하며, 솔레노이드의 동작 시간을 빠르게 할 뿐만 아니라 흡인력을 향상시키는 역할도 하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 권기태, 유한요소법을 이용한 고속응답 솔레노이드의 거동해석, 국민대학교대학원 석사학위 논문, 2001.
 [2] P. Chaudhuri, "Single and Double Shading Rings in Single-Phase Magnets: A General Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Volume PAS-89, Issue 4, pp. 663-669, 1970.
 [3] 문성득, "직류 솔레노이드에 대한 고찰", 부산공전 연구 논문집, 18호, pp. 293-298, 1978.

[4] 문성득, "교류 솔레노이드에 대한 고찰", 부산공전 연구 논문집, 17호, pp. 317-322, 1978.
 [5] E. Schmidt and A. Degwerth, "Comparison of shading ring arrangements of low voltage AC contactors", Universities Power Engineering Conference, 2007. AUPEC 2007. Australasian, pp. 1-6, 2007.
 [6] K. Tachino, Y. Hashiba, T. Maeda, K. Amei, and M. Sakui, "A phase converter using shading coil effect", Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 35, Issue 5, Part 2, pp. 3535-3537, 1999.

저 자 소 개



양 형 열 (梁煥烈)

1969년 5월 27일생. 1993년 전남대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2004년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993-1994년 현대자동차(주) 사원. 2005.10. - 2006.10. 미국 Virginia Tech. Post-Doc. 연구원. 2007.3.-2009.2. 호남대학교 전임 강사. 2009.3.-현재 지오토(주) 연구소장
 Tel : 062-974-3007
 Fax : 062-974-3010
 E-mail : sfish2000@gmail.com