

쉐이딩 코일의 추가에 의한 솔레노이드 밸브의 소음 특성 개선

論 文

57-7-8

Acoustic Noise Characteristics Improvement of Solenoid Valve by the Shading Coil Application

鄭泰旭[†]
(Tae-Uk Jung)

Abstract - Recently agriculture has been intelligenced and automatized because the number of agricultural population is reduced, and the various agricultural machine is developed and utilized actively, In these agricultural automation system, the solenoid valve is widely used for the supply of water and fertilizer to the plant and soil.

In this solenoid valve system, AC excitation solenoid valve is widely used because of economic merit and simple system scheme. However, the instantaneous chattering vibration and noise of plunger caused by the alternative MMF variation is very important performance characteristics.

In order to reduce vibration the DC excitation solenoid valve is sometimes applied for the high-end applications. In this case, the control circuit is essential to control DC excitation current. It may causes the cost increase and system complexity and it is not suitable for the outdoor agricultural machine.

In this paper, the electromagnetic structural improvement of AC solenoid valve is studied to reduce the dynamic vibration and noise. As an economical solution, the shading coil is additionally implemented to the conventional solenoid valve. As a result of this study, the vibration and acoustic noise is largely reduced by the compensating MMF of shading coil and it is verified by the test of prototype.

Key Words : Electric Valve, Solenoid, Shading Coil, Acoustic Noise

1. 서 론

최근 농업 종사자의 감소와 노령화로 인해 선진국을 중심으로 농업분야에서도 지능화와 자동화의 움직임이 크게 일고 있다. 이러한 산업의 변화에 의해 작물에 관수 및 비료를 공급하는 관수기, 관비기 및 양액기와 농업용수 자동 공급 설비에 가장 많이 활용되고 있는 기본 부품은 자동화 제어 프로그램에 의해 작물에 영양분과 수분을 공급하기 위한 전자 밸브이다.

국내외 시장규모로 볼 때 농업 관수용 전자밸브의 수요는 연간 약 20억원 정도이며, 세계시장의 크기는 연간 약 1,000억원 정도로 추정된다.

현재 농업 관수용 Diaphragm Type 전자밸브는 신뢰성 및 성능의 문제로 인해 국내에서 생산되지 않고 유럽의 Bermad, Netafirm 회사 등으로부터 거의 수입에 의존하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 이러한 농업 관수용 전자밸브의 국산화 개발에 있어 가장 크게 성능과 신뢰성을 좌우하는 솔레노이드 부에 대한 설계에 대해 고찰하였다.

솔레노이드 밸브는 자기(磁氣) 코어(core)가 있는 솔레노

이드(전자석)와 한 개 또는 그 이상의 오리피스(orifice)가 있는 밸브 몸체로 구성된다.

솔레노이드 밸브는 전원 사용형태에 따라 보통 AC 밸브와 DC 밸브로 구분된다.

AC 솔레노이드 밸브는 간단한 전원인가구조로 인해 경제적이므로 폭넓게 많이 활용되고 있다. 하지만 AC 솔레노이드 밸브에서는 교류 전류파형에 의한 교번 기자력에 의해 플런저(plunger, 구동자)를 당기게 되므로 플런저의 채틀링(chattering) 진동과 소음이 발생하는 단점이 있다[1][2].

반면에, DC 솔레노이드 밸브는 AC 타입에 비해 소음이 작고 효율적인 장점이 있지만 별도의 정류 및 제어회로가 필요하다. 그러므로 주로 냉장고와 정수기 같은 실내 가정용으로만 적용되며 옥외의 농업용으로는 적합하지 않다.

본 논문에서는 농업용 AC 솔레노이드 전자밸브의 진동 및 소음의 동특성 개선을 위한 전자계 구조 개선에 대해 고찰하였다.

이를 위해 기존 설계된 솔레노이드의 구조 및 동작특성을 해석하였으며, 진동 및 소음 특성을 개선하기 위한 경제적이면서 효과적인 기술안으로서 쉐이딩 코일(shading coil, 단락환)을 설치하고 이에 의한 개선효과를 검증하였다.

2. AC 솔레노이드의 전자계 구조 및 특성

2.1 솔레노이드 밸브의 구조

본 논문에 적용된 전자밸브의 전체 구조는 그림 1과 같은

[†] 교신저자, 正會員 : 慶南大學校 電氣工學科 專任講師 · 工博

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr

接受日字 : 2008年 4月 24日

最終完了 : 2008年 6月 13日

구조로서 용수를 급수하기 위한 유로와 이를 제어하기 위한 솔레노이드 밸브로 구성된다.

솔레노이드 밸브는 자기(磁氣) 철심이 있는 솔레노이드 전자석 부분과 솔레노이드의 전자력에 의해 움직이는 플런저(plunger)와 오리피스(orifice)가 있는 밸브 몸체로 구성된다. 그 구조는 그림 2와 같다.

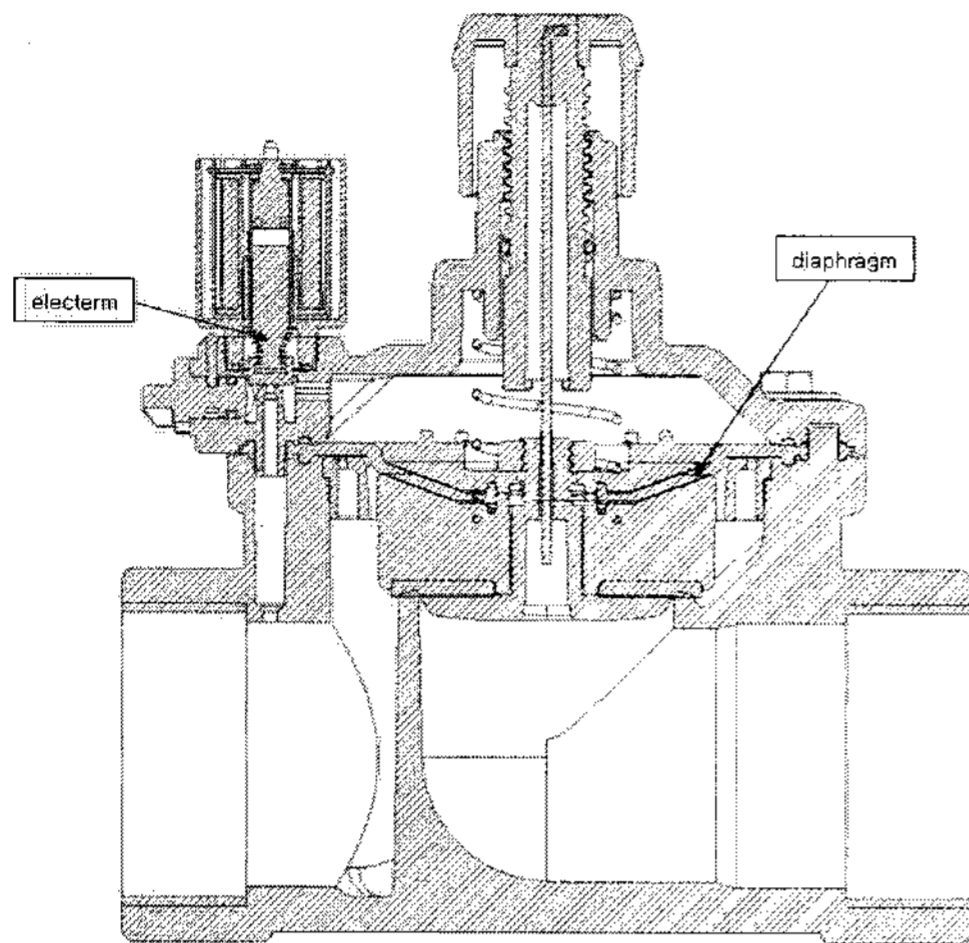


그림 1 전자밸브의 전체 구조
Fig. 1 The general view of electric valve

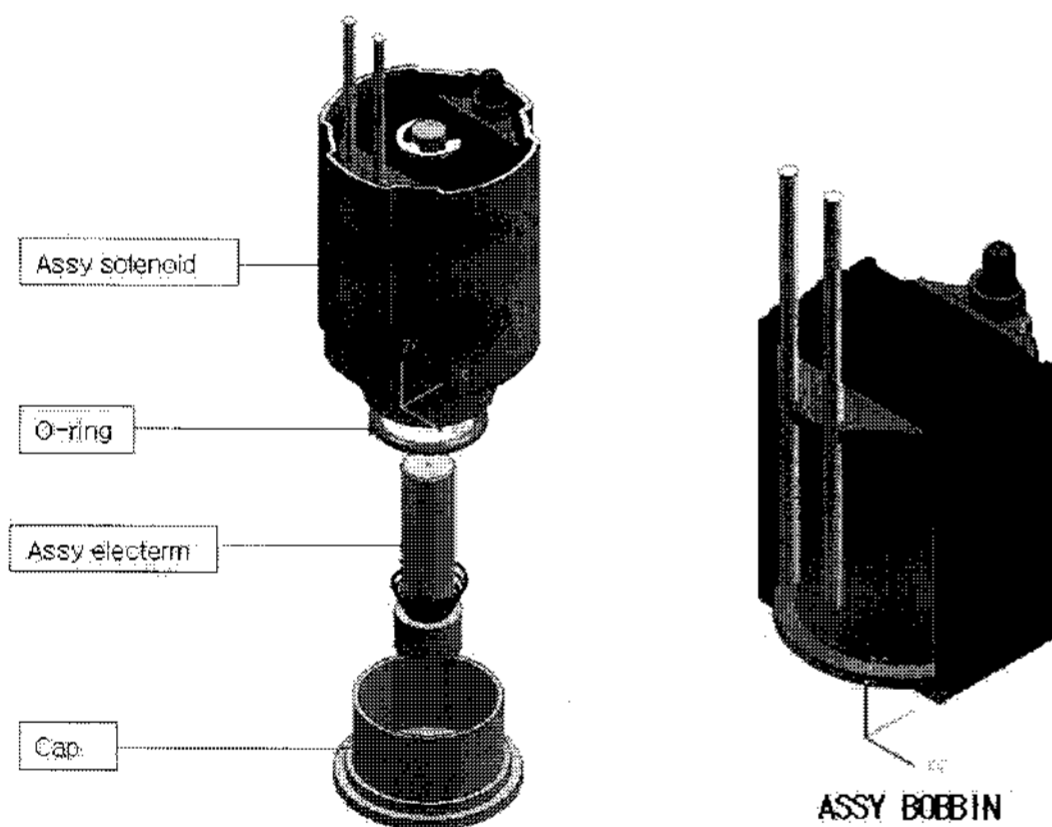


그림 2 솔레노이드 밸브의 구조
Fig. 2 The structure of solenoid valve

솔레노이드 밸브는 솔레노이드 코일에 전류가 인가되면 전자력에 의해 플런저가 흡인되면서 오리피스가 개방되어 유로가 열리고, 전류가 차단되면 스프링에 의해 플런저가 후퇴하여 유로가 닫히게 된다.

2.2 솔레노이드 밸브의 전자계 특성

솔레노이드 밸브는 전원 사용형태에 따라 보통 AC와 DC 타입으로 구분된다.

AC 타입 솔레노이드는 단상 AC 전원이 인가되기 때문에 간단한 전원 인가 구조로 인해 폭넓게 많이 활용되고 있지만 AC 여자 기자력의 변동이 심하기 때문에 플런저(plunger, 구동자)의 채틀링 진동 및 소음이 크게 발생하는 단점이 있다.

AC 솔레노이드 권선에 교류 전압을 인가하면 솔레노이드 코일에는 60Hz의 교류 전류가 양과 음을 반복하면서 흐르게 된다. 이 때 이러한 교번 기자력에 의해 플런저를 당기게 된다.

AC 기자력에서 전류의 방향이 변하지만 솔레노이드 플런저에 발생하는 자기력은 전류의 방향에 관계없이 항상 인력으로 작용하기 때문에 플런저가 개방위치에 와서 정지해 있게 된다. 이 때의 기자력은 아래의 식에서와 같이 자속밀도(B)의 자승에 비례하기 때문에 전류의 방향과는 무관하다.

$$F_m = \frac{B_g^2 \cdot A_g}{2\mu_0} \quad (1)$$

여기서, B_g : 공극부의 자속밀도, A_g : 자기력이 발생된 공극부의 면적, μ_0 : 공기의 투자율을 나타낸다.

이 때의 기자력 파형은 아래의 그림과 같다.

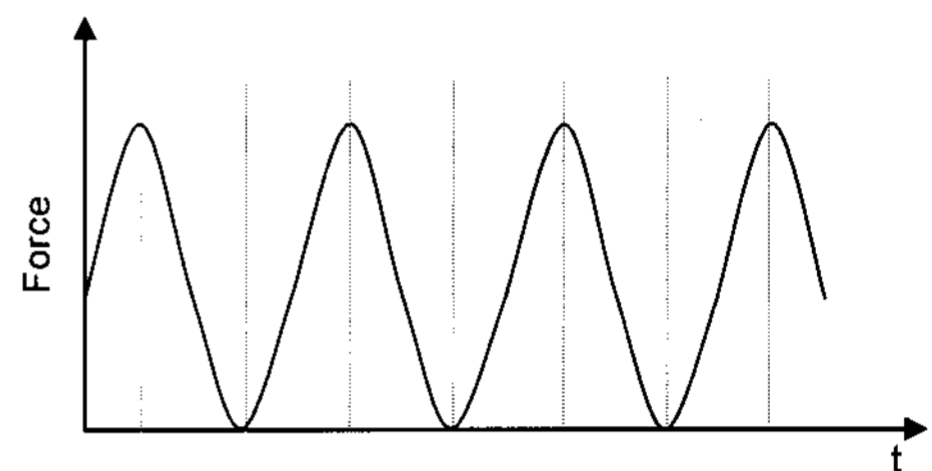


그림 3 교류 전압 인가시의 공극 기자력 파형
Fig. 3 MMF waveform of air-gap when ac voltage is applied

위의 기자력 파형에서와 같이 전류의 방향과 기자력의 방향은 무관하지만, 전류가 zero point를 지나게 될 때 기자력 또한 영이 되므로 플런저가 채틀링을 하게 된다.

이러한 전류파형에 따른 교번 기자력의 순시 변동에 의한 플런저의 채틀링에 의해 소음이 발생하게 된다. 이러한 채틀링 진동을 억제하기 위해서는 기자력이 영으로 떨어지지 않도록 하는 방법이 필요하다.

2.3 AC 솔레노이드 밸브의 전자계 특성 해석

기존 솔레노이드 밸브의 동작특성을 파악하기 위해 유한 요소법을 이용한 전자계 해석을 수행하였다. 해석에 활용된 모델링 형상은 그림 4와 같이 해석시간의 단축을 위해 1/2 모델인 Half 모델을 이용하였다.

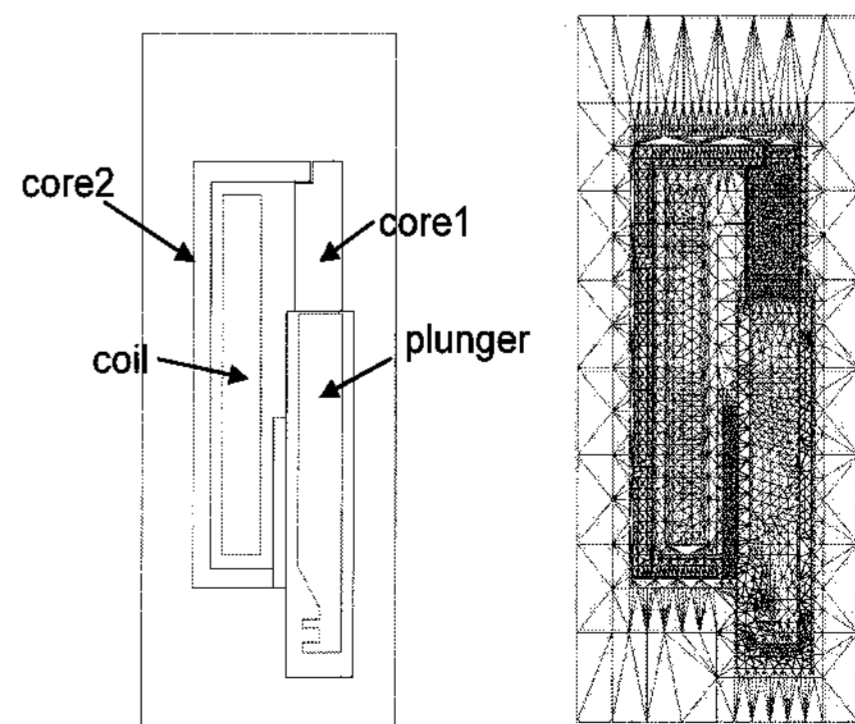


그림 4 기존 AC 솔레노이드의 모델링
Fig. 4 Modeling of conventional AC solenoid

그리고, AC 전압 인가시의 시간에 대한 자기장의 변화 결과를 해석하기 위해 시변계 해석(time transient analysis)을 수행하였으며, Maxwell 2D의 transient solver를 이용하였다. 기본적인 전자계 방정식은 아래와 같이 시간변화에 따른 자기장의 물리량의 변화를 계산하게 된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} (\nabla \times \hat{A}) \right) = \hat{J}_o - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, μ 는 투자율, A 는 벡터퍼텐셜, J 는 전류밀도, σ 는 전도도를 나타낸다.

기존 AC 솔레노이드 밸브에서 행해진 전자계 해석 결과에서 구해진 자속선의 분포 특성은 그림 5와 같다.

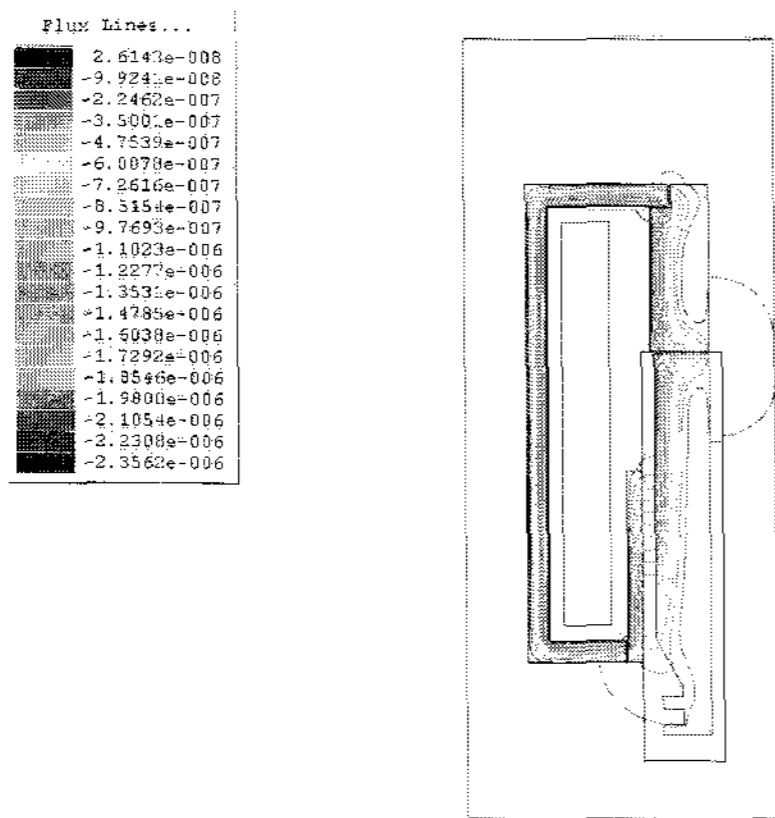


그림 5 기존 AC 솔레노이드의 자속 분포 특성
Fig. 5 Flux line distribution characteristics of conventional AC solenoid

그림 6은 권선에 인가된 교류 인가 전류 파형을 보여주고 있다.

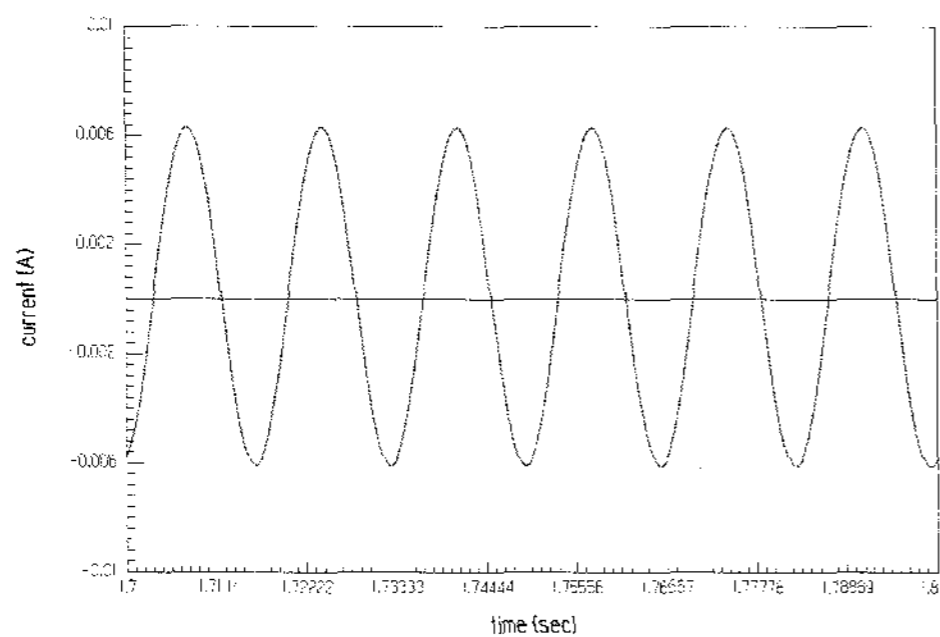


그림 6 기존 AC 솔레노이드의 인가 전류 파형
Fig. 6 Excitation current waveform of conventional AC solenoid

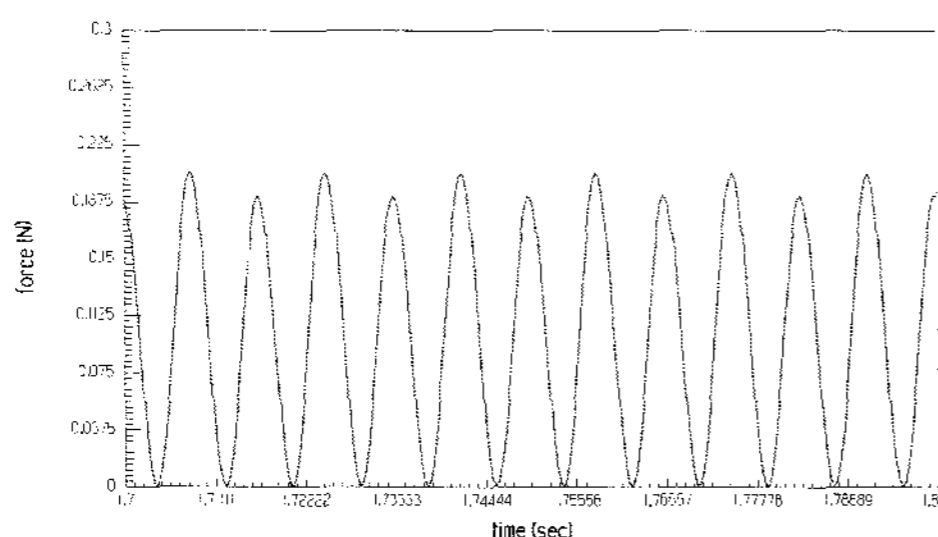


그림 7 기존 AC 솔레노이드 플런저의 자기 흡인력
Fig. 7 Magnetic force of plunger in conventional AC solenoid

이러한 전류와 자속 분포 특성에 의해 동작되는 플런저에 인가되는 흡인력은 그림 7과 같으며, 교류 전류파형과 같이 오실레이션(oscillation)하는 형태가 된다.

이러한 자기흡인력의 오실레이션 특성과 플런저 하단부를 당기는 용수철의 탄성계수에 의해 플런저가 채틀링 진동을 하게 되며 이에 의해 진동과 소음이 발생하는 문제점이 야기된다[3][4].

3. 웨이딩 코일 추가 설계 및 특성 개선

3.1 웨이딩 코일 추가 구조 및 동작 특성

AC 솔레노이드 밸브의 이러한 채틀링 진동과 소음을 억제하기 위해 고급형 DC 밸브에서는 DC 펄스형 전류를 권선에 인가하여 솔레노이드를 제어하는데, AC 타입에 비해 소음이 작고 효율이 높지만 별도의 정류 및 제어회로가 필요하게 된다. 그러므로 DC 밸브는 주로 냉장고와 정수기 같은 실내 가정용으로 많이 적용되지만, 제작 단가가 비싸고 밸브의 부피가 커지므로 농업용으로는 적합하지 않다.

AC 타입 솔레노이드에서 이러한 채틀링 소음을 방지하고 안정적인 플런저의 흡인력을 보장하기 위해서는 어떠한 경우에도 기자력이 "0"이 안 되도록 해야 하며, 이를 위해 가장 간단하면서도 효과적인 방법은 웨이딩 코일(shading coil)을 적용하는 것이다.

이러한 원리는 Shading coil형 단상유도전동기에서도 동일한 개념으로 적용되고 있으며, 주권선의 자속변화에 의해 주권선의 기자력에 대해 90° 위상차를 가지는 또 다른 보조 기자력을 플런저에 인가할 수 있어 자기흡인력이 영이 되는 점을 없앨 수 있다.

본 논문에서는 기존 솔레노이드 구조에 웨이딩 코일을 효과적이며 경제적으로 설치하기 위해 고안을 하였으며, 그 결과 아래 그림과 같은 웨이딩 코일이 부가된 솔레노이드 구조를 설계하였다.

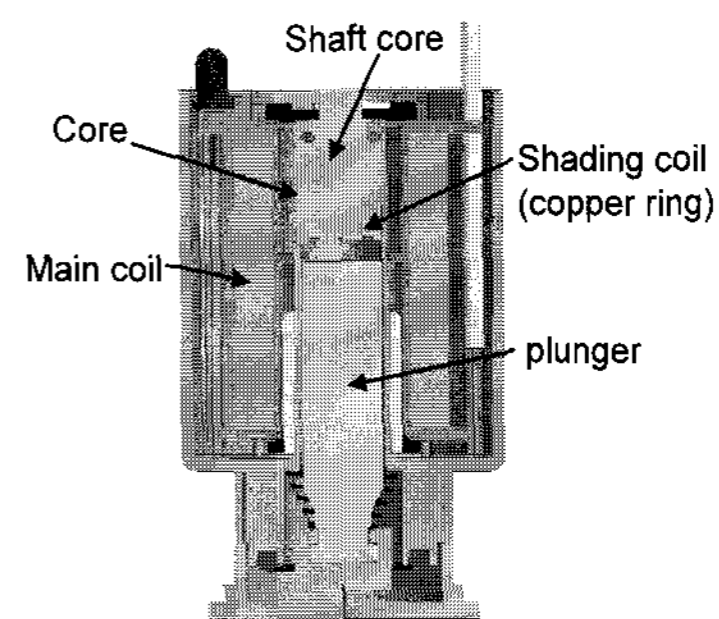


그림 8 웨이딩 코일이 추가된 개선된 AC 솔레노이드 밸브
Fig. 8 Improved structure of AC solenoid valve implemented shading coil

웨이딩 코일을 설치함에 있어 가공성 및 생산성을 고려하여 플런저 상단부 위의 주자속 통로의 중앙에 홈을 파고 동(銅)으로 만들어진 단락환(copper ring)을 취부하였다.

이러한 솔레노이드 구조에서 주권선(main coil)에 유입되는 교류전류에 의해 발생된 주자속의 시간당 변화에 의해 웨이딩 코일에 전류가 유기되고 이에 의해 위상이 지연된 또 다른 자기장이 생성된다. 이때의 전자기회로의 등가회로는 다음 그림과 같다.

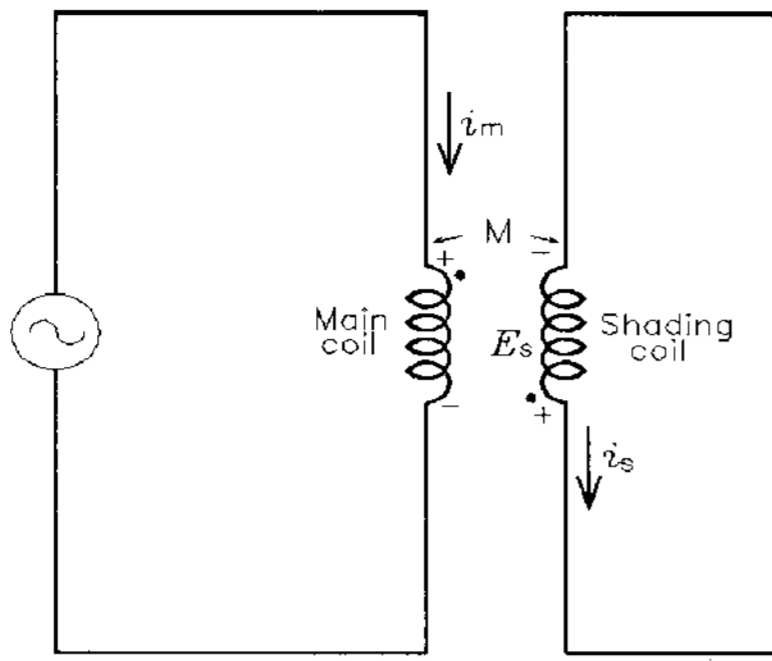


그림 9 웨이딩 코일이 추가된 솔레노이드 밸브의 등가회로
Fig. 9 Equivalent circuit of shading coil type solenoid valve

이상적인 경우 웨이딩 코일에 유기되는 전압, 전류 및 발생 자속은 모두 주권선에 대한 성분에 대해 전기각으로 90° 위상차를 가지게 되며, 아래 그림과 같은 특성을 가진다.

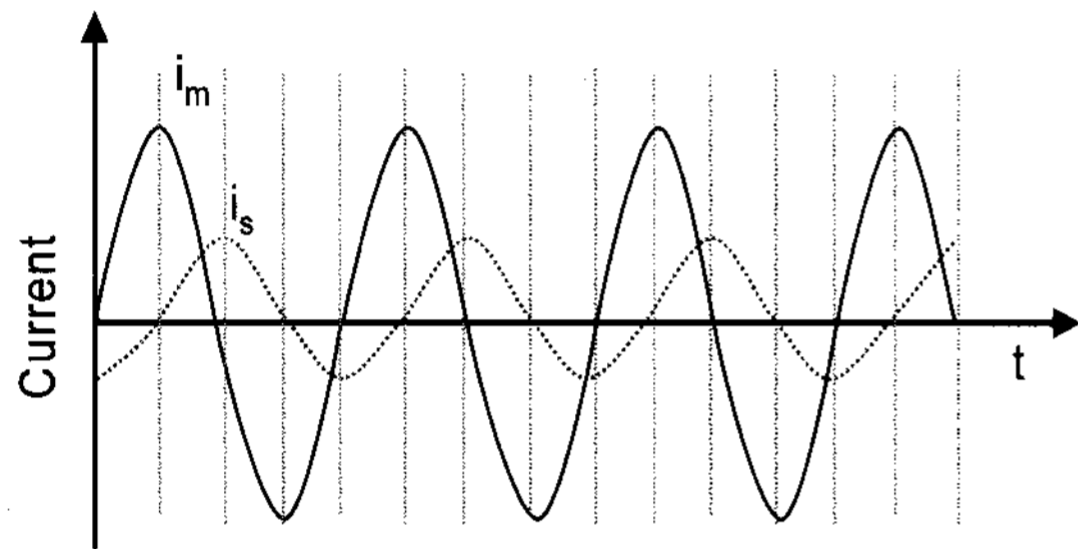


그림 10 웨이딩 코일이 추가된 솔레노이드 밸브의 전류파형
Fig. 10 Current waveform of shading coil type solenoid valve

이러한 2개의 전류파형에 의한 전자기력의 시간에 따른 특성은 아래 그림과 같이 나타난다. 이 경우 주권선 전류와 웨이딩 코일 전류가 모두 영이 되는 시간이 존재하지 않으므로 전자기력 또한 영까지 떨어지는 경우가 없어 합성 전자기력의 순시변동이 크게 억제될 수 있음을 알 수 있다.

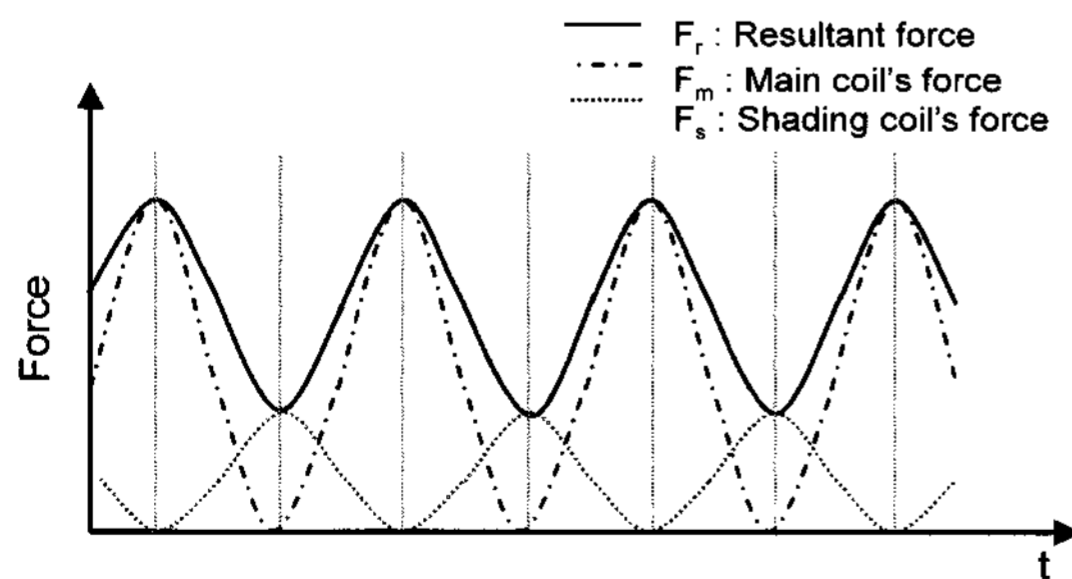


그림 11 웨이딩 코일이 추가된 솔레노이드 밸브의 전자기력
Fig. 11 Magnetic force of shading coil type solenoid valve

그러므로, 웨이딩 코일의 역할에 의해 솔레노이드의 플런저를 끌어당기는 합성 전자기력의 순시변동이 억제되므로 기존의 AC 솔레노이드에 비해 좀 더 안정적으로 플런저를 흡인하게 되어 채틀링 진동 및 소음이 억제될 수 있다.

3.2 웨이딩 코일 추가시의 전자계 특성 해석

솔레노이드 밸브의 웨이딩 코일에 의한 전자기력 순시변동의 억제 효과를 확인하고 그 형상 및 치수를 결정하기 위해 시변계 전자계 해석을 수행하였다.

전자계 해석에 활용된 모델링 구조는 그림 12와 같으며, 1/2 모델링 구조이다.

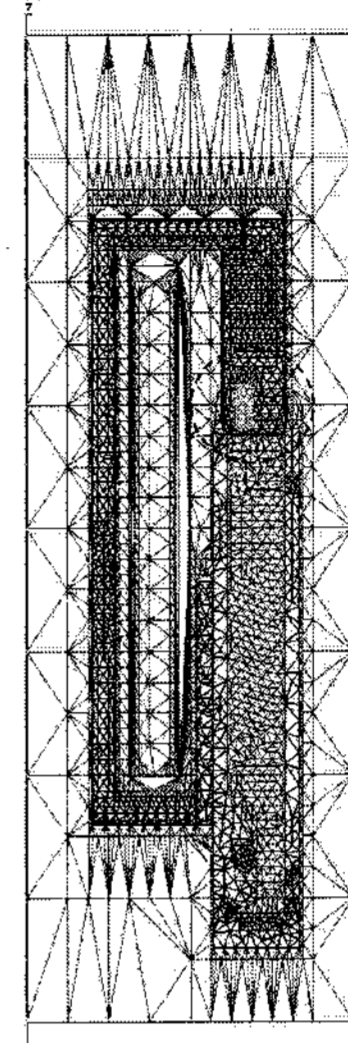


그림 12 웨이딩 코일이 추가된 솔레노이드 밸브의 해석 모델
Fig. 12 Analysis model of shading coil type solenoid valve

다음의 그림 13은 웨이딩 코일이 추가된 개선된 솔레노이드 모델을 해석 결과로서 전류밀도와 자속선 분포특성을 보여주고 있다.

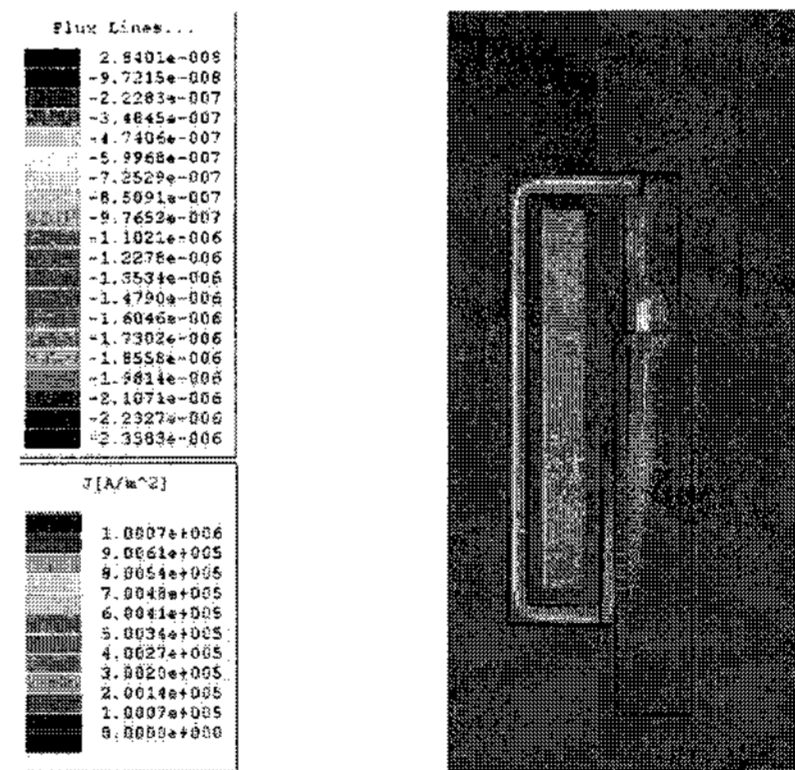


그림 13 웨이딩 코일이 추가된 솔레노이드 밸브의 전자계 특성
Fig. 13 Electromagnetic characteristics of shading coil type solenoid valve

위 그림에서 기존의 솔레노이드에서와 달리 웨이딩 코일에 전류가 유기되고 이에 의한 자속의 영향으로

위 그림의 원부분은 웨이딩 코일로서 주권선의 순시 자기변화에 의해 전류가 유기되고 이로 인해 또 다른 자기장이 형성됨을 알 수 있다. 이 때 웨이딩 코일에 유기되는 전류의 해석 파형은 그림 14와 같으며, 주권선 전류와 약 90° 이상 위상차연이 된 비교적 큰 전류가 유기됨을 알 수 있다.

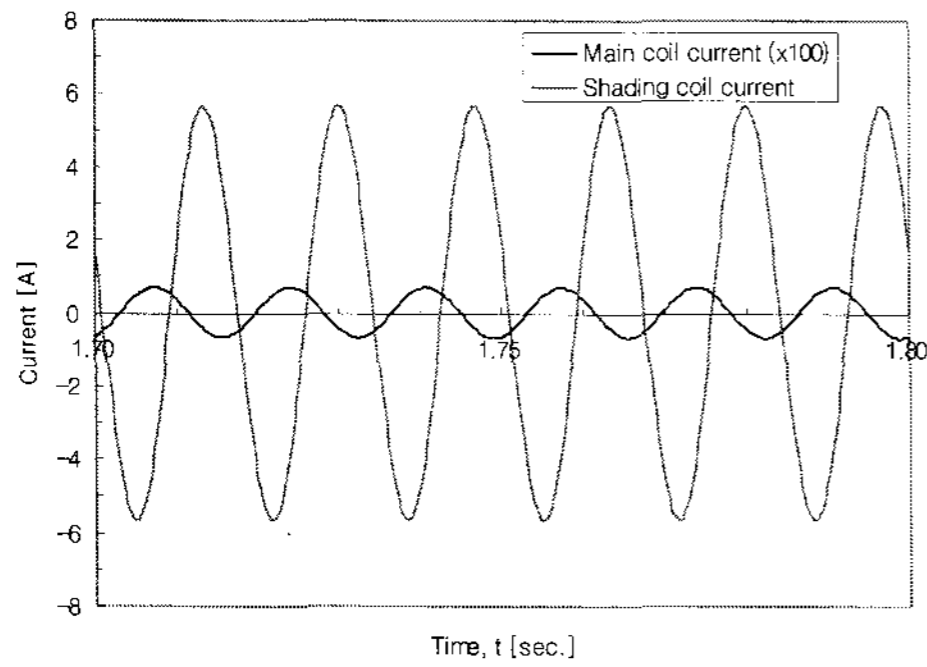


그림 14 쉐이딩 코일에 유겨된 전류 파형
Fig. 14 Induced current waveform of shading coil

이러한 쉐이딩 코일에 유겨된 전류에 의해 전자기력이 형성되고 이것은 주권선의 전자기력과 90° 정도의 위상차를 가진다. 주권선과 쉐이딩 코일에 의한 합성 전자기력의 파형은 아래 그림 15와 같다.

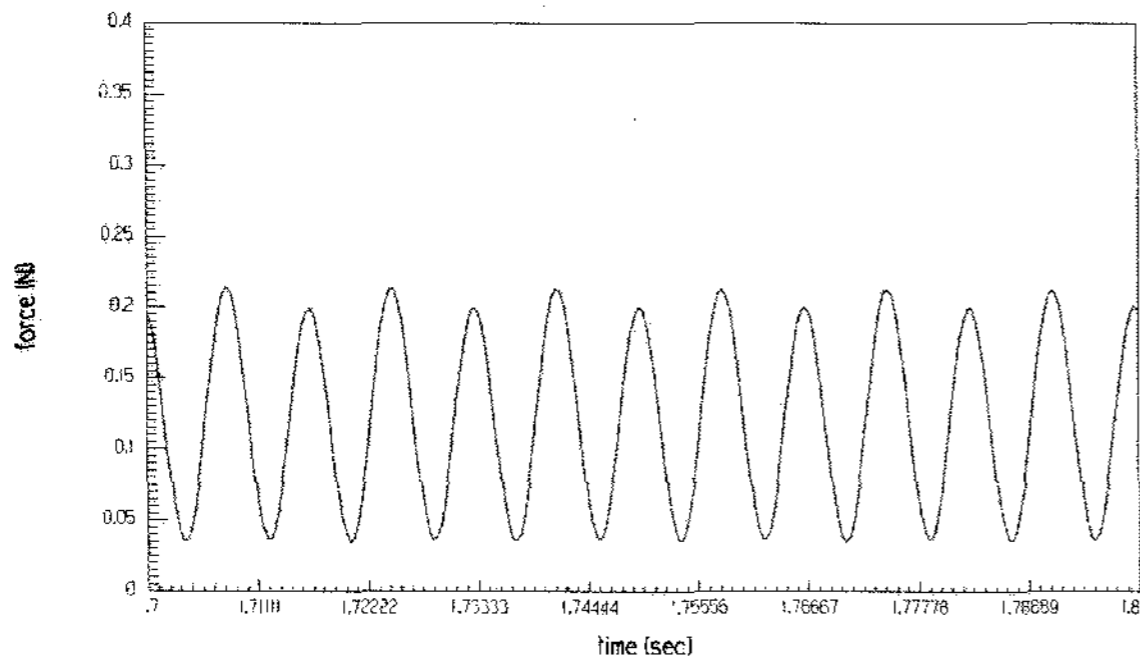


그림 15 쉐이딩 코일 타입의 전자기력 특성
Fig. 15 Electromagnetic force characteristics of shading coil type

위의 합성 기자력 파형에서 그림 7의 기존의 솔레노이드 모델의 경우와 달리 전자기력이 영까지 떨어지지 않고 일정 크기 이상의 최소치를 형성함을 알 수 있다. 이로 인해 플런저의 채틀링 진동이 상당 부분 억제될 수 있다.

3.3 실험 결과 및 고찰

전자계 해석 결과를 토대로 솔레노이드 밸브의 전자계 구조를 설계하였으며, 쉐이딩 코일의 형상과 치수는 그림 16과 같이 샤프트 코어의 하단부에 둥근 형태의 홈을 파고 그 안에 copper ring을 강제 압입한 구조로 설계하여 생산성을 확보하였다.

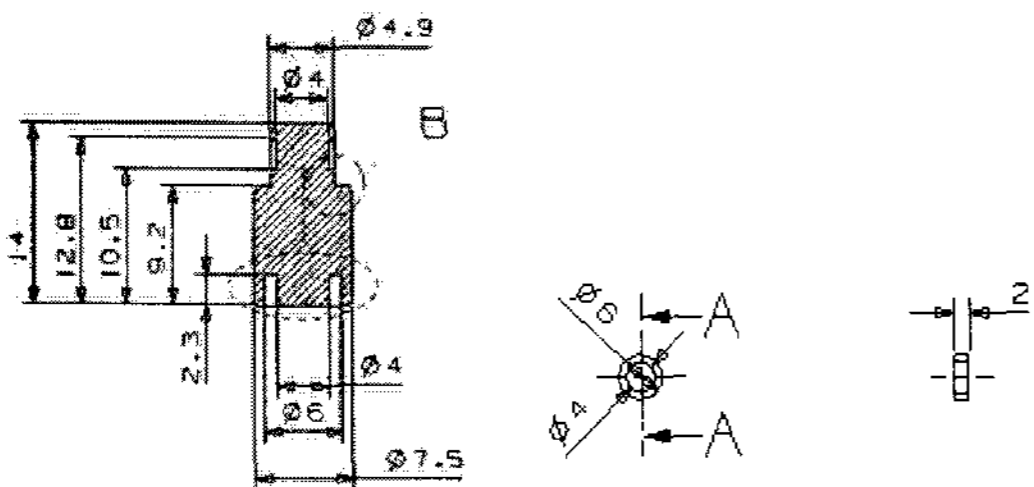


그림 16 설계된 샤프트 코어부와 쉐이딩 코일 형상 및 치수
Fig. 16 Structure and dimension of designed shaft core and shading coil

그림 17은 전체 솔레노이드의 구조물을 보여주고 있으며, 특히 (b)는 쉐이딩 코일이 압입된 샤프트 코어를 보여주고 있다. 이러한 솔레노이드를 적용해 만들어진 전체 밸브는 그림 18과 같다.

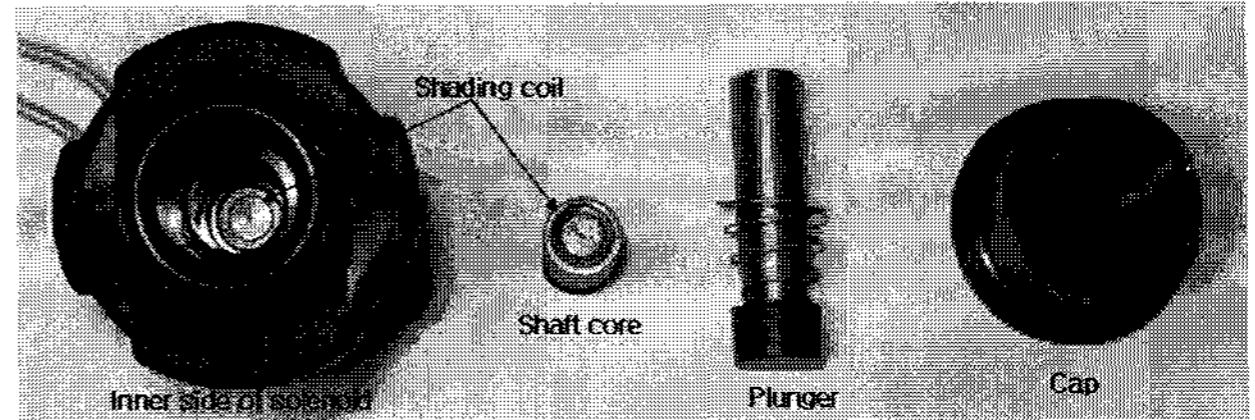


그림 17 설계된 코어부와 쉐이딩 코일 형상과 치수
Fig. 17 Structure and dimension of designed core and shading coil

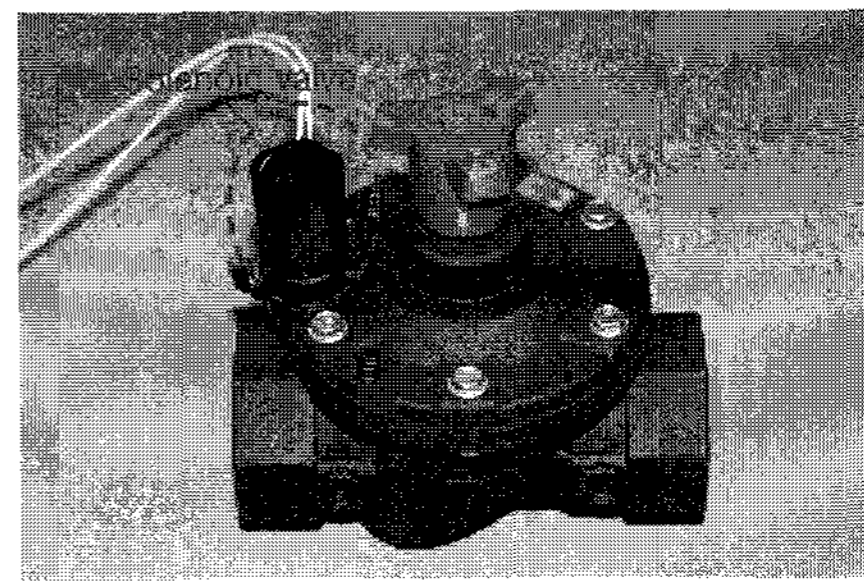
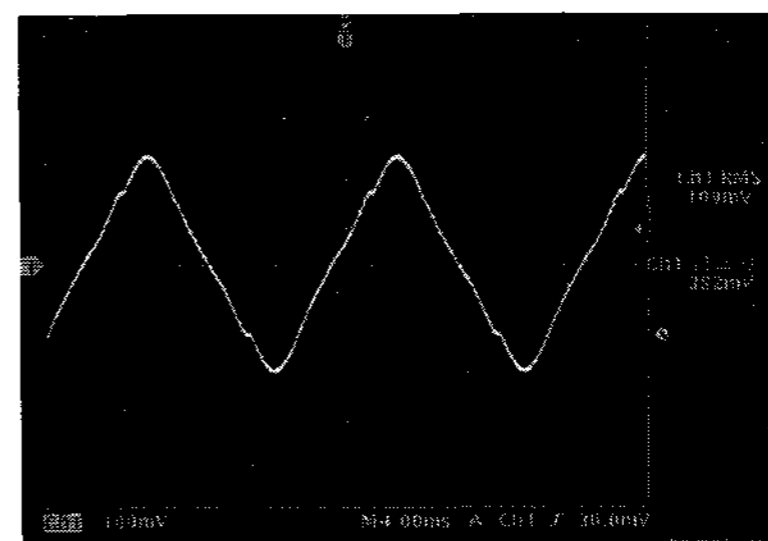
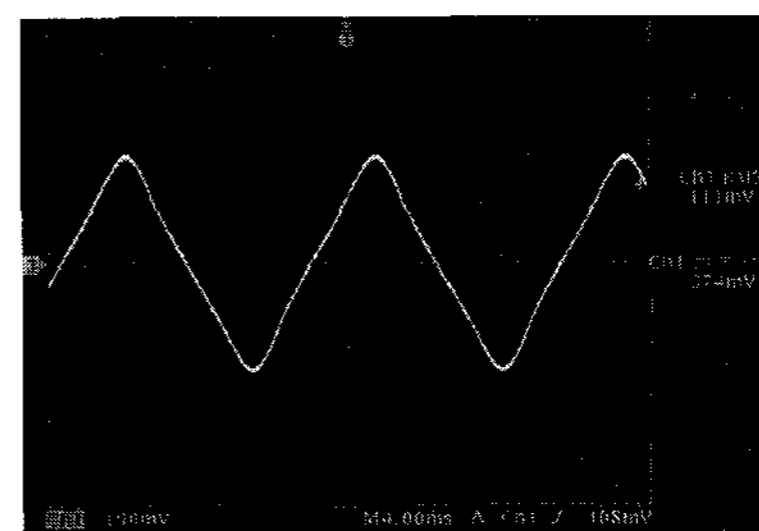


그림 18 제작된 시작기 전체 조립 사진
Fig. 18 Photograph of totally assembled prototype

먼저, 기존의 AC 솔레노이드와 개선 제작된 솔레노이드의 동작 전류 특성을 비교 하였으며, 주권선 전류의 동작 파형은 그림 19와 같다.



(a) conventional solenoid (4mA/div)

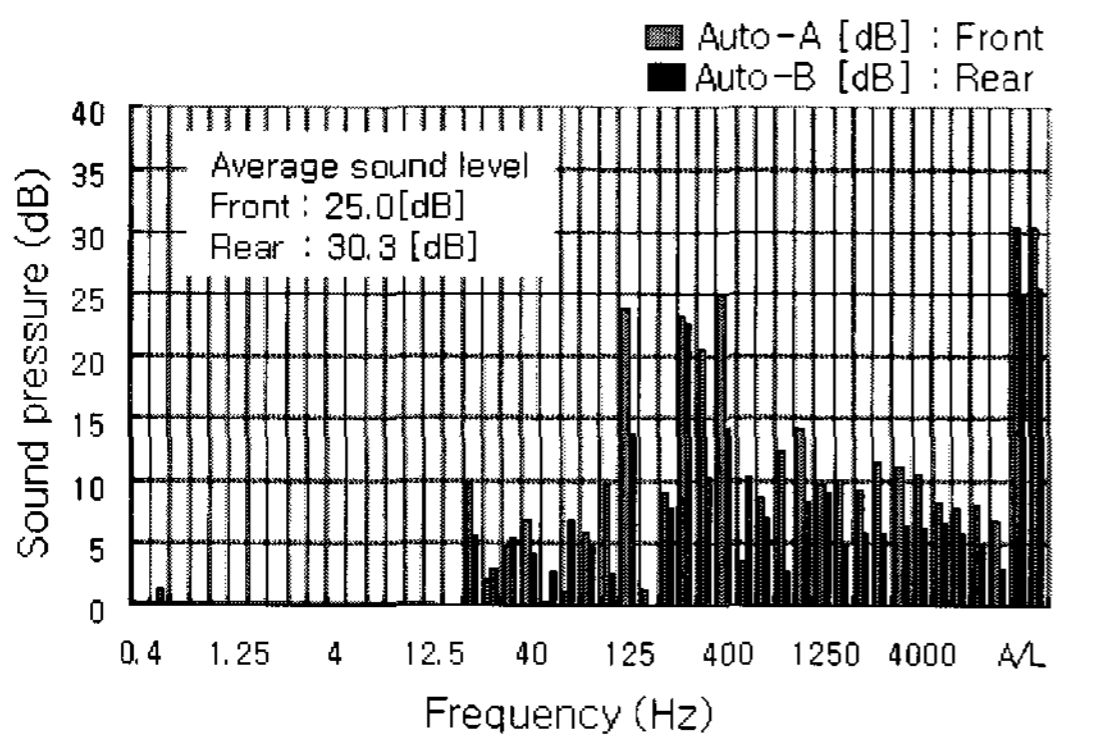


(b) shading coil type (4mA/div)

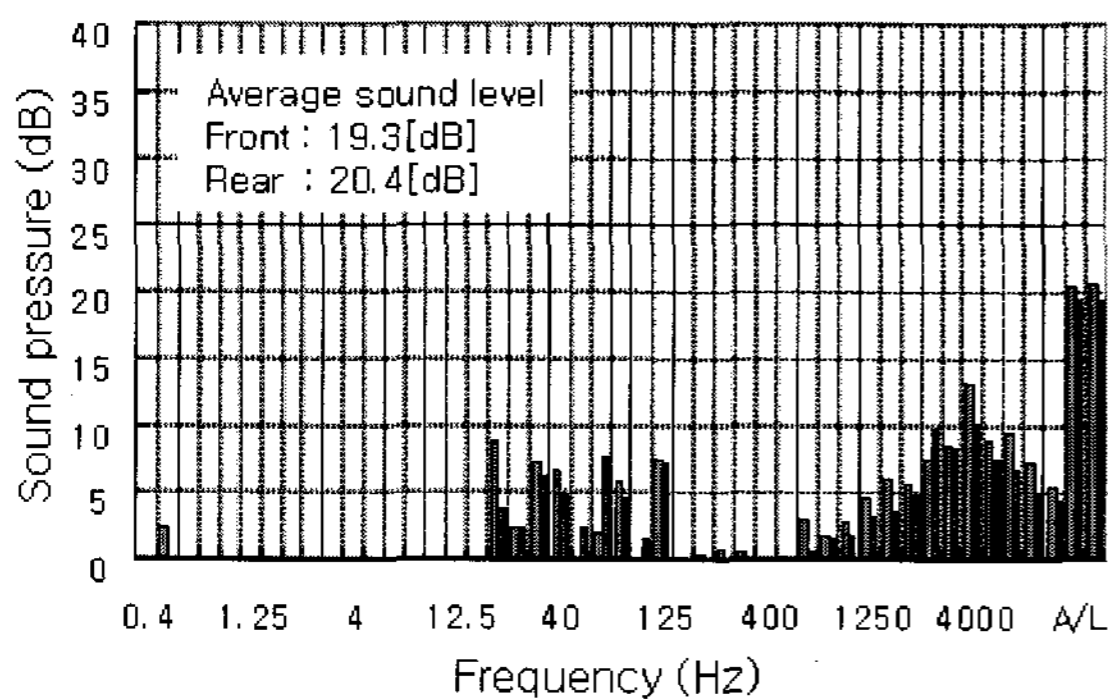
그림 19 동작전류 특성 비교
Fig. 19 Operating current characteristics comparison

그림 19에서 (a)의 기존의 AC 솔레노이드의 주권선 전류 파형에는 전류의 왜형(defamation)이 발생되는데 이것은 플런저의 채틀링 진동에 의한 인덕턴스의 변화에 의한 전류변화 현상이다, 이에 반해 그림 19(b)의 웨이딩 코일 타입에서는 전류파형이 안정적으로 변화하며 이것은 웨이딩 코일에 의한 전자기력에 의해 채틀링 진동이 저감됨을 보여주고 있다. 즉, 웨이딩 코일이 주권선과 자기적으로 아주 효과적으로 커플링 되어 안정적으로 동작함을 알 수 있다.

웨이딩 코일에 의한 소음특성 개선효과를 검증하기 위해 개선된 웨이딩 코일 타입 솔레노이드 밸브와 기존의 AC 솔레노이드와 소음 비교 측정을 무향실에서 행하였다. 소음은 솔레노이드로부터 전·후방의 50cm 이격거리에서 음압(sound pressure)을 측정하였으며 그 결과는 그림 20과 같다.



(a) conventional AC solenoid



(b) shading coil type

그림 20 소음 특성 비교

Fig. 20 Acoustic noise characteristics comparison

소음 측정 결과에서 기존 솔레노이드에서는 전체 소음레벨도 높으며 전원 주파수의 배수차인 특정 주파수에서의 피크 소음이 발생하는 특성을 가진다.

특히 전원 주파수 6Hz의 2차수인 120Hz에서 큰 소음이 발생됨을 알 수 있다. 이는 교류전류가 “영”점을 지나는 주파수에 해당하는 채틀링 진동에 의한 소음이다.

반면, 웨이딩 코일 추가시 전원주파수의 2배수인 120Hz와 그 배수의 대역에서 소음이 크게 저감됨을 알 수 있다. 이는 바로 교류전류가 영으로 떨어질 때 발생하는 채틀링 소음이 저감됨에 의한 효과이다.

이와 같이 웨이딩 코일을 추가함으로써 평균소음을 전방 5.7dB, 후방 9.9dB 이상 크게 저감시킬 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 농업용 자동설비에 응용되는 AC 솔레노이드 전자밸브의 동적 특성 개선을 위한 설계에 대해 고찰하였다.

기존의 AC 솔레노이드 밸브에서는 AC 전류에 의한 전자기력의 순시 변동에 의해 플런저의 채틀링 진동과 이에 의한 소음이 발생됨을 알 수 있었다.

이러한 채틀링 소음을 개선하기 위해 웨이딩 코일을 추가 설계하고 이에 의해 플런저에 미치는 전자기력의 순시변동 특성이 개선됨을 확인하였으며, 실제 시작기의 실험결과에서도 AC 전원 주파수의 1~10 배수차 대역에서의 소음이 현저히 저감됨을 확인하였다.

이로써 AC 솔레노이드 밸브에서 웨이딩 코일은 동특성 개선에 매우 효과적이며 경제적인 기술안임을 검증하였다.

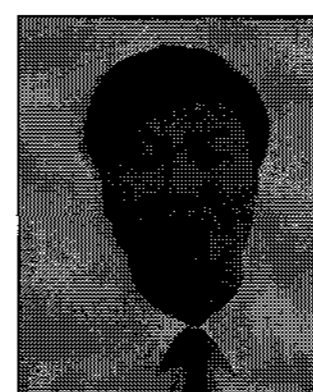
감사의 글

이 연구결과물은 2008학년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원에 의한 것임

참 고 문 헌

- [1] 권기태, 한화택, “비정상 유한요소법을 이용한 고속응답 솔레노이드 밸브의 동적거동해석”, 대한기계학회 논문집 B권, 제27권 제7호, pp. 959~965, 2002.
- [2] 김형진, 박윤식, “전동형 진동식 압축기 토출밸브의 동적해석”, 한국소음진동공학회지, 제10권 제4호, pp. 615~ 622, 2000.
- [3] 송창섭, 이용주, 유세준, “A/T용 솔레노이드 밸브의 동특성 해석에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제12권 제8호, 1995.
- [4] E.M. Benavideds, J.R.A. Perias, R.P. Herrero, “Numerical Simulation of the Injection Precess in a Two Stroke Diesel Engine”, SAE, 2000-01-0291.

저 자 소 개



정 태 옥 (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생, 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1996~2005 LG전자(주) 책임연구원, 2006~2007 한국생산기술연구원 광주연구센터 선임연구원, 2007~현재 경남대학교 전기공학과 전임강사

Tel : 055-249-2628, Fax : 055-249-2839

E-mail: tujung@kyungnam.ac.kr