

자동차용 솔레노이드 밸브의 동특성을 위한 연성해석

김기찬*

¹한밭대학교 전기공학과

Co-simulation for Dynamic Characteristic Analysis of Solenoid Valve for Vehicle

Ki-Chan Kim^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

요약 본 논문에서는 자동차용 솔레노이드 밸브의 전자기 해석 기반의 동특성 해석 모델을 통하여 성능을 향상시키는 방법을 제안한다. 종래의 솔레노이드 밸브의 요크와 플런저의 형상 최적설계를 통하여 저전류 고추력의 고성능 솔레노이드 모델을 도출하였다. 동특성 해석을 수행하기 위해 솔레노이드 밸브의 입력 전류 패턴을 분석하고, 이를 통해 밸브의 개폐시 속도, 추력 정보를 해석하였다. 입력 전류 패턴을 출력하는 제어로직의 회로모델과 스프링 및 댐핑 등을 고려할 수 있는 솔레노이드 밸브의 전자기 해석모델의 연동해석기반을 제안하여 입력전류 패턴의 변화가 밸브 동특성에 주는 영향을 분석할 수 있었다. 마지막으로 종래모델과 최적모델의 동특성 해석을 통하여 최적설계 모델의 성능이 개선됨을 확인하였다.

Abstract This paper proposes a methodology for developing the performance of a solenoid valve for vehicles based on the dynamic analysis model by an electromagnetic field. The high performance solenoid model with a low current and high thrust was induced through the shape optimal design of the yoke and plunger. To perform the dynamic analysis of the solenoid valve, the input current profile was analyzed. The speed and thrust information was analyzed by FEM with this current profile. The co-simulation method of the circuit model of control logic and electromagnetic model of the solenoid valve was also proposed to analyze the performance with several current patterns. Finally, the performance of the original model and optimal one was compared.

Key Words : Co-simulation, Dynamics analysis, Electromagnetic analysis, Optimal design, Solenoid valve

1. 서론

솔레노이드는 원통형 코일을 의미하는데 일반적으로 자기장을 이용하여 힘을 발생시키는 가장 간단한 장치로써 산업계에 많이 이용되고 있는 부품이다. 솔레노이드 코일에 전류가 흐르게 되면 자기장이 발생되고, 이 전류를 제어하게 되면 자기장의 세기 또한 조절할 수 있다. 이 장치는 전기에너지를 자기에너지로 변환 후 기계에너지로 다시 변환하는 에너지 변환장치라 할 수 있으며 현재 밸브, 개폐기, 액츄에이터 등 선형적인 기계운동을 요구하는 시스템에 응용되고 있다.

본 논문에서 응용된 솔레노이드 분야는 차량용 연료 인젝션 밸브이다. 기존에는 기계식으로 연료의 인젝션을 수행하였지만 연비 향상에 한계가 있었다. 현재는 연비 개선을 위하여 전자식 인젝션 밸브를 사용하여 차량의 운행상태에 적합한 인젝션 제어를 수행한다. 따라서 최근 연비 개선을 목표로, 전자식 인젝션 밸브가 연구되고 있다[1-4].

본 논문에서는 솔레노이드 밸브의 인젝션 성능을 향상시키고 가변 인젝션을 위하여 제어 전류 프로파일을 구현하는 동특성 해석 방법의 제안이다. 인젝션 성능을 개선시키기 위해 솔레노이드 밸브의 형상 설계를 통하여

*Corresponding Author : Ki-Chan Kim(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1090 email: kckim@hanbat.ac.kr

Received February 21, 2014

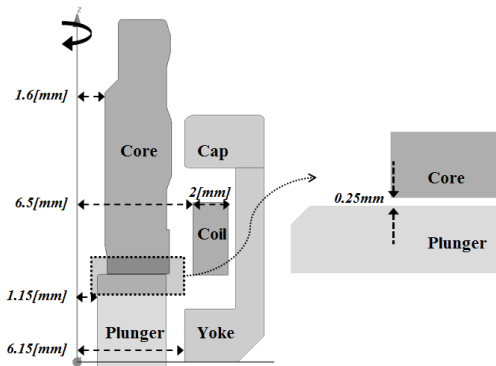
Revised March 10, 2014

Accepted June 12, 2014

저전류 고추력의 솔레노이드 밸브를 연구하였으며, 제어 전류 프로파일에 따른 인젝션 밸브의 특성을 확인하기 위해 제어로직을 구현한 회로모델과 전자기 유한요소법 모델의 솔레노이드 밸브의 연성해석 모델을 제안하고 이를 통해 전류패턴에 따른 인젝션 밸브 동특성을 분석하였다.

2. 솔레노이드 밸브 해석 모델

Fig. 1은 축대칭 전자기 해석을 위한 솔레노이드 해석 모델이며 전류가 인가되는 코일과 자속의 통로가 되는 코어, 캡, 요크, 플런저로 구성되어 있다. 코일의 입력 전류에 의해 코일을 둘러싼 자속이 발생하면 플런저는 자기적 공극이 최소가 되는 방향, 즉 z축 방향으로 힘이 발생한다. 해석모델에서 자기적 공극 갭은 0.25[mm]이고 나머지 치수는 Fig. 1과 같다.



[Fig. 1] Original analysis model for FEM

2.1 추력 개선 연구

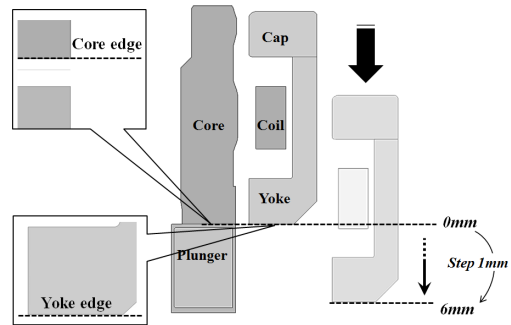
2.1.1 솔레노이드 코일부의 위치에 따른 추력 증가

기본 모델을 사용하여 코일에 인가되는 전류를 12[A]로 고정시키고, 솔레노이드 코일부의 위치를 변경하면서 추력의 변화를 해석하였다. 자로의 자기저항이 최소가 되는 위치가 동일 전류에 가장 큰 자속값과 추력을 발생시키므로, 본 해석을 통하여 솔레노이드 코일부의 최적 위치값을 확인하였다. 초기 위치를 코어 하단과 요크 하단을 기준으로 0[mm]로 지정하고 Fig. 2와 같이 요크의 위치를 1[mm] 간격으로 아래로 변경한 결과 자속 량과 추력 값이 위치에 따라 Fig. 3과 같이 계산되었다. Table 1의 데이터 값에 따라 자속 및 추력 모두 기준점에서 아

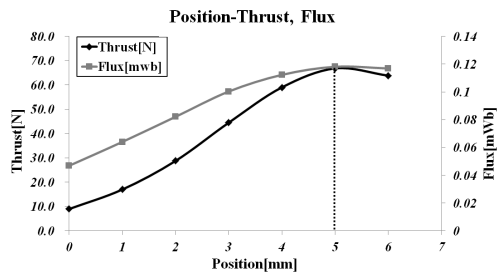
래로 5mm에 위치하였을 때 최대 추력을 발생하는 것을 확인하였다.

[Table 1] Thrust and Flux according to position

Model	Position[mm]	Thrust[N]	Flux[mWb]
Base	0	8.9361	0.047
1	1	17.0021	0.064
2	2	28.7714	0.082
3	3	44.4766	0.1
4	4	59.0215	0.112
5	5	66.8625	0.118
6	6	63.8452	0.117



[Fig. 2] Position of solenoid coil part



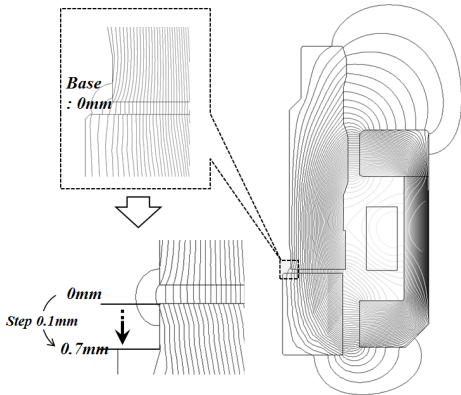
[Fig. 3] Thrust and Flux according to position parameter

2.1.2 플런저 형상 설계에 의한 추력 증가

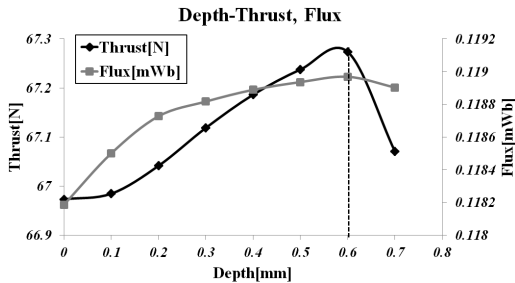
다음으로 추력을 증가시키기 위해 플런저의 형상설계를 수행하였다. 일반적으로 자기장은 서로 다른 투자율을 가지는 자성체에서 공기로 통과할 때 자속이 굴절되는 프링징(fringing) 자속이 발생한다. 이는 자속의 누설을 발생시켜 솔레노이드 추력이 감소하는 현상의 원인이 된다. 따라서 Fig. 4와 같이 프링징 현상을 최소화하여 자속을 집중시킬 수 있도록 Fig. 4와 같이 플런저의 안쪽 부분의 형상을 변경하였다. 유한요소법에 의한 전자기 해석 결과 Fig. 5와 Table 2에 플런저의 형상 변화에 따른 자속과 추력을 정리하였다. 이 결과 깊이 0.5mm에서 최대 추력을 발생함을 알 수 있었다.

[Table 2] Thrust and Flux according to plunger shape

Model	Depth[mm]	Thrust[N]	Flux[mWb]
Base	0	66.9731	0.118185621
1	0.1	66.9844	0.118499556
2	0.2	67.0412	0.118726834
3	0.3	67.1185	0.118816691
4	0.4	67.1862	0.11888827
5	0.5	67.2375	0.118935667
6	0.6	67.2734	0.118968228
7	0.7	67.0701	0.118902728



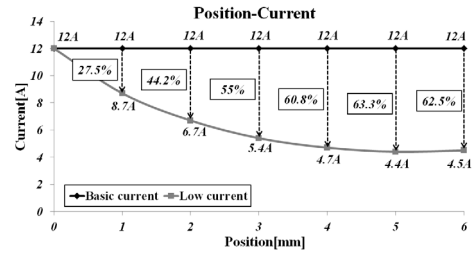
[Fig. 4] Depth parameter of plunger for increasing thrust



[Fig. 5] Thrust and Flux according to plunger depth

2.2 저 전류 특성 연구

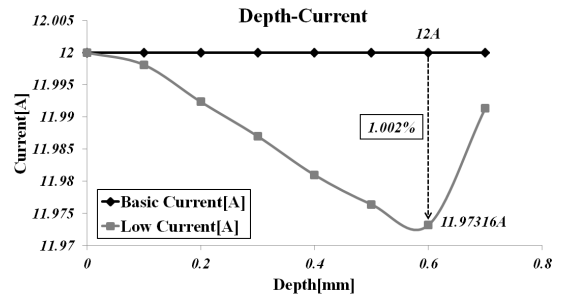
동일한 인가 전류를 주었을 때 추력이 증가한다는 추력을 고정시켰을 때 인가전류는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 솔레노이드 밸브의 동손을 감소시켜 효율을 증가시킬 수 있으며, 동손이 열원이므로 온도 상승 또한 저감할 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 2의 위치 변화에 따라 동일한 추력을 발생시키는 전류의 감소량을 나타낸 것이고, Table 3에 결과를 정리하였다. 동일한 방법으로 Fig. 4의 플런저의 형상 변화에 따른 전류 감소 결과를 Fig. 7과 Table 4에 나타내었다. 플런저의 형상 설계로 약 1%의 전류 감소가 발생하였다.



[Fig. 6] Current reduction according to solenoid coil position

[Table 3] Current reduction according to solenoid coil position

Model	Position[mm]	Thrust[N]	Current[A]
Base	0	9	12
1	1	9	8.7
2	2	9	6.7
3	3	9	5.4
4	4	9	4.7
5	5	9	4.4
6	6	9	4.5



[Fig. 7] Current reduction according to plunger depth

[Table 4] Current reduction according to plunger depth

Model	Depth[mm]	Thrust[N]	Current[A]
Base	0	66.9731	12
1	0.1	66.9731	11.9981
2	0.2	66.9731	11.99234
3	0.3	66.9731	11.98699
4	0.4	66.9731	11.98096
5	0.5	66.9731	11.97638
6	0.6	66.9731	11.97316
7	0.7	66.9731	11.99132

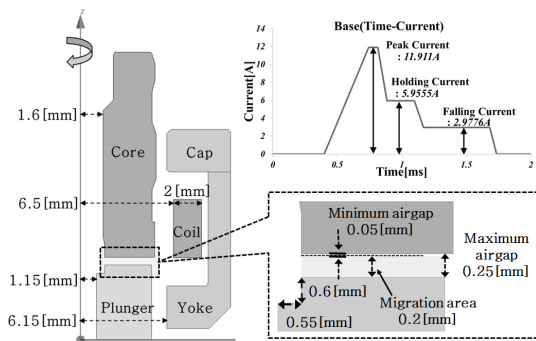
3. 동특성 해석

3.1 동특성 해석을 위한 개선모델

Fig. 8은 동특성 해석을 수행하기 위한 최종 개선 모델이다. 동특성 해석을 수행하기 위해 실제 제어에 의해 입

력되는 전류패턴을 이용하였고, 플런저의 질량, 스프링 상수, 중력 등의 외부 부하를 적용하였다.

플런저와 코어의 초기 간격은 0.25[mm]이고, 전류패턴을 인가하였을 때 밸브가 열리는 기계적 최대 변위는 0.2[mm]까지 움직인다. 즉 최종 공극은 0.05[mm]가 된다. Table 5는 동특성 해석을 위한 운동 방정식을 위한 상수를 나타낸다. k는 스프링상수를 의미하며, X는 플런저의 이동 거리, X_{pre}는 스프링의 초기 압축거리를 나타낸다.



[Fig. 8] Analysis model for dynamic analysis

[Table 5] Mechanical constants for laod equation

F = k(X+X _{pre}) + mg	
k(Spring constant)[mN/m]	14.7
X(Plunger migration area)[mm]	0.2
X _{pre} (initial spring compression distance)[mm]	1.36
m(mass)[g]	4
g(acceleration of gravity)[m/s ²]	10

3.2 인가 전류 패턴

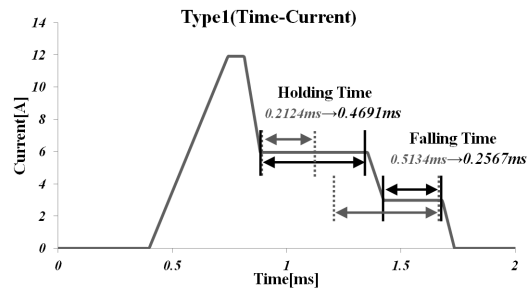
동특성 해석을 수행하기 위하여 인가 전류를 12A 정 전류가 아닌 전류패턴을 이용한다. 해석과정에서 전류패턴을 입력으로 하는 방법은 시간에 따른 전류 테이블을 지정해 주는 방법과 제어회로를 이용한 연동해석 방법이 있다. Table 6은 실제 자동차용 인젝션 밸브의 인가전류 테이블로서 Fig. 8에서의 전류 패턴 그림과 같이 라이징, 홀딩, 폴링의 3단계로 이루어져있다. 플런저는 라이징 시간에서 초기위치에서 최대 위치까지 이동하고, 홀딩 시간에는 최대지점에서 밸브의 개방을 유지하고, 폴링 시간에는 초기 위치로 복귀하여 밸브를 닫는다.

[Table 6] Current pattern for injection valve

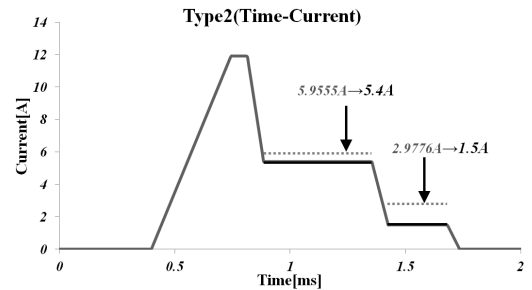
Base (Current Pattern)	
Time[ms]	Current[A]
0	0
0.3983	0
0.7435	11.9111
0.8143	11.9111
0.8851	5.9555
1.0975	5.9555
1.1683	2.9776
1.6817	2.9776
1.7348	0

3.2.1 전류 패턴 변경

Fig. 9와 Fig. 10의 전류 패턴 그래프는 기존에 인가했던 전류 패턴에서 솔레노이드 밸브의 성능 향상을 위하여 홀딩시간과 폴링시간의 시간과 전류 레벨을 변경한 것이다. Fig. 9는 기본 전류패턴에서 홀딩 시간은 2.2배 증가하고, 폴링 시간은 0.5배 감소한 전류패턴이다. Fig. 10은 Fig. 9에서 홀딩 전류를 5.9555A에서 5.4A로, 폴링 전류를 2.9776A에서 1.5A로 낮추어 타입 1에서 늘어난 평균전류를 기본 모델과 같게 하였다. 이에 따른 동특성 해석 결과 과형을 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었고, Table 8과 9에 정리하였다.



[Fig. 9] Time-Current pattern of Type 1



[Fig. 10] Time-Current pattern of Type 2

Table 7은 위의 Fig. 9와 Fig. 10에서의 전류패턴을 수치화 한 값들이다. 전류패턴은 기본 모델에서 순차적으로 Type 1, Type 2로 변경하였으며, 여기서 Type 1은 기본 모델보다 홀딩 시간을 증가시켜 플런저가 최대 지점에서 유지되는 시간을 늘렸고, Type 2는 Type 1의 홀딩 시간을 유지하면서 증가된 평균전류를 감소시키기 위해 홀딩과 폴링 시간의 인가 전류를 낮추었다.

Fig. 12 (a)와 Fig. 11을 비교하면 Type 1이 기본 모델보다 플런저의 최대 위치의 유지 시간이 약 1.8배 증가하였고, 늘어난 시간만큼 솔레노이드 밸브의 연료 배율이 늘어남을 알 수 있다. 또한 최종 힘의 결과에서 볼 수 있듯이 Type 1이 기본 모델에 비해 홀딩 구간에서의 힘 작용이 늘어남을 알 수 있다.

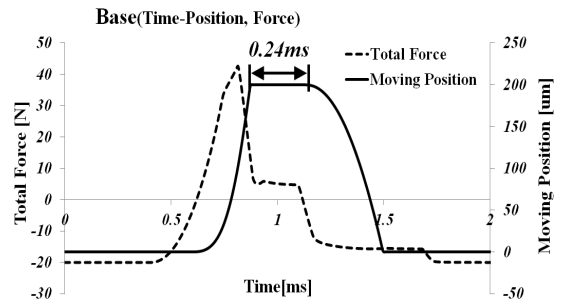
Fig. 12 (a)와 (b)를 보면 Type 2는 Type 1보다 플런저의 최대 위치의 유지시간이 0.44[ms]에서 0.4[ms]로 9% 감소하지만, 평균 전류를 낮게 인가한다. 총 힘 작용 결과에서 알 수 있듯이 Type 2가 Type 1에 비해 홀딩 힘과 폴링 힘이 낮다. 전류의 크기와 시간에 따라 플런저의 동특성은 어느 정도 예측되지만 정확한 라이징 시간, 홀딩 시간과 폴링 시간을 계산하는 것이 중요하다. 이러한 결과를 Table 8과 9에 정리하였다. Type 2가 Type 1보다 작은 홀딩 시간을 갖지만, 기본 모델의 평균전류를 유지하면서 저전류로 구동이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그리고 Type 2의 폴링 시간이 0.365[ms]로 다른 모델에 비해 초기 위치로 돌아가는 빠른 응답속도를 갖기 때문에 불필요한 연료손실을 줄일 수 있다.

[Table 7] Time-Current pattern data of each model

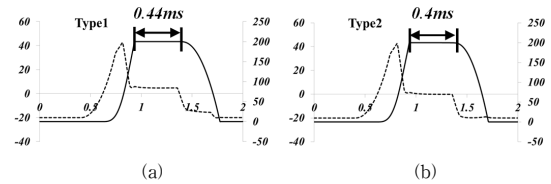
		Base	Type1	Type2
Holding	Current	5.9555	5.9555	5.4
	Time	0.2124	0.4691	0.4691
Falling	Current	2.9776	2.9776	1.5
	Time	0.5134	0.2567	0.2567
Average Current		3.851192	4.289227	3.847554

[Table 8] Time-Force data per Model

Model	Holding		Falling	
	Force[N]	Time[ms]	Force[N]	Time[ms]
Base	5.164309	0.2124	-15.2024	0.5134
Type1	4.915149	0.4691	-14.6395	0.2567
Type2	0.308419	0.4691	-19.4563	0.2567



[Fig. 11] Position and force of base model



[Fig. 12] Position and force of Type1 and Type2
(a)Type 1 (b)Type 2

[Table 9] Time-Position data per Model

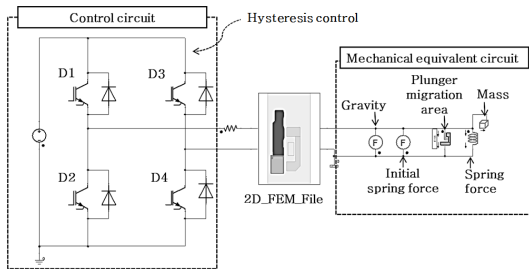
Model	Holding		Falling
	Position[mm]	Time[ms]	Time[ms]
Base	200	0.24	0.38
Type1	200	0.44	0.385
Type2	200	0.4	0.365

3.3 연동해석

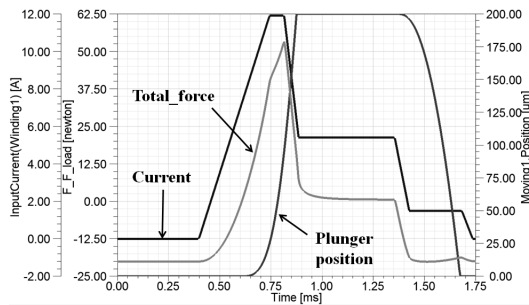
저전류 솔레노이드 모델에서 전류패턴을 이용하여 플런저의 동특성을 해석하는 과정을 제시하였다. 실제로 제어로직에 의해 전압의 PWM 제어를 수행하고, 이러한 전류 패턴이 만들어지므로 전류패턴과 같이 이상적인 전류가 인가되기 어렵다. 따라서 보다 정확한 분석을 위해 Fig. 15와 같이 인가되는 전류패턴의 테이블 방식이 아닌 제어로직의 회로부와 전자장 유한요소법을 이용한 솔레노이드 모델과 기계적 부하 등가회로를 이용한 연동해석을 진행하였다.

전류 패턴을 구성하기 위한 히스테리시스 전류 밴드 제어 기법을 통해 바이폴라 방식의 스위칭 회로를 구성하여 Fig. 15와 같은 전류파형을 발생시켰다. Fig. 14는 전류를 테이블화하여 솔레노이드 전자장 해석한 결과이며, Fig. 15는 실제 제어부와 기계부하 등가회로를 구성하여 연동해석한 그래프이다. 결과에서 알 수 있듯이 연동해석을 통해 인가된 전류 파형은 실제 스위치 동작에 의한 리플이 고려되기 때문에 플런저의 위치가 유지되는

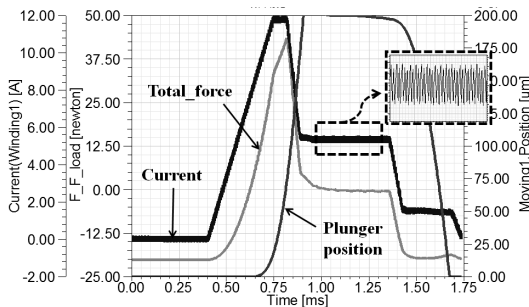
부분에서 전류 리플의 영향을 받아 실제로 플런저가 먼저 풀링되기 시작함을 알 수 있다.



[Fig. 13] Co-simulation for solenoid valve system.



[Fig. 14] Current, force, plunger position according to current pattern table



[Fig. 15] Current, force, plunger position according to co-simulation method.

4. 결론

본 논문에서는 자동차용 솔레노이드 밸브의 성능을 향상시키기 위해서 유한요소법을 이용한 전자장 해석으로 솔레노이드 코일의 최적 위치 및 플런저 형상을 설계하였다. 또한 실제 전류 패턴의 테이블 입력 및 제어로직에 의한 전류패턴 발생 회로에 의한 연동 해석 기법을 이

용하여 동특성 해석법을 제안하고 이를 통해 결과 분석을 비교하고 성능 개선 방안을 제시하였다.

제어회로와 전자장 해석의 연성해석기반으로 솔레노이드 밸브의 성능을 실제와 같이 구현할 수 있었으며 향후 효율적 제어 방식의 연구를 통하여 보다 최적화된 솔레노이드 밸브의 개선이 이루어 질 수 있다.

References

- [1] Wang Yupeng, Liu Xinghua, Chen Yuhang, Liu Fushui, "The Optimal Drive Current of Solenoid Valve and Its Effect on Fuel Injection Characteristics", *IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering(ICECE)*, pp. 2383-2387, June, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICECE.2010.588>
- [2] Liang Chu, Yanli Hou, Minghui Liu, Jun Li, Yimin Gao, M. Ehsani, "Study on the Dynamic Characteristics of Pneumatic ABS Solenoid Valve for Commercial Vehicle", *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion*, pp. 641-644, Sept, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544201>
- [3] Qirui Xu, Guo Wei, Xingzhong Li, "Characteristic analysis and control for high speed proportional solenoid valve", *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA)*, pp. 1578-1582, June, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566620>
- [4] Xue-Ling Song, Ying-bao Zhao, Chao-Ying Liu, Zhe-Ying Song, "Solenoid Valve Switching Characteristic Test System Design", *IEEE Conference on Hybrid Intelligent Systems(HIS) Ninth International*, pp. 388-391, Aug, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/HIS.2009.291>

김기찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과(전기공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과(전기공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
전기기기, 전기제어