

비례솔레노이드 밸브의 해석을 위한 전후처리기에 대한 연구[§]

윤동원^{*†} · 함상용^{*} · 박중호^{**} · 윤소남^{**} · 김철성^{***}

* 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실, **한국기계연구원 에너지기계연구실, *** (주) SVC

Research on Pre- and Post-Processor for Analysis of Proportional Solenoid Valve

Dongwon Yun^{*†}, Sangyong Ham^{*}, Jungho Park^{**}, Sonam Yun^{**} and Chilsung Kim^{***}

* Robotics and Mechatronics Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials,

** Department of Energy Systems, Korea Institute of Machinery and Materials

*** SVC Inc.

(Received December 19, 2011 ; Revised June 8, 2012 ; Accepted June 14, 2012)

Key Words: Solenoid(솔레노이드), Valve(밸브), FEM (유한요소법), Proportional Valve(비례밸브)

초록: 본 논문에서는 기존의 유한요소 프로그램을 이용하여 솔레노이드 밸브의 해석을 용이하게 하는 프로그램 개발에 대해서 다루었다. 비례솔레노이드 밸브에서 정확한 해를 얻기 위해서는 이론적인 식보다 기존의 유한요소 해석틀을 이용하는 것이 유리하며, 이때 사용자의 편의성을 위해서 솔레노이드의 형상을 삼각형, 사각형 등의 간단한 도형의 조합이라고 가정하여 모델링하도록 하였다. 이러한 가정을 사용하여 개발된 솔레노이드 해석 프로그램은 사용자가 솔레노이드의 유한요소 모델을 쉽게 생성할 수 있도록 해주었다. 개발된 프로그램의 유용성을 검증하기 위해 실제 솔레노이드 밸브에 대한 해석을 수행하였으며, 해석결과 개발된 프로그램은 솔레노이드 밸브의 비례특성을 잘 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract: In this study, a wrapping program was developed to analyze a proportional solenoid valve more easily using a conventional finite element method (FEM) tool. To achieve an accurate solution when analyzing a solenoid valve, finite element analysis (FEA) is more suitable than a lumped method. To develop a program for modeling and analyzing the valve performance using FEA code for the user's convenience, it is assumed that the solenoid valve is composed of some simple geometries, namely, a triangle and a rectangle. This assumption helps users to model a solenoid valve simply. To check the feasibility of the developed code, an actual solenoid valve is analyzed, and it is found that the code can suitably analyze this valve. The characteristics of the proportional valve are well identified as indicated through the graphs.

- 기호설명 -

- I : 전류 (current)
- N : 권선수(number of turns)
- S_i : Stroke of plunger

1. 서 론

기계시스템이 점점 자동화되어 감에 따라, 유

량을 자동으로 제어하기 위한 기계요소 및 제어 기술 또한 비약적으로 발전되어 왔다. 그 중, 솔레노이드 밸브는 기존의 수동식으로 작동되어 오던 유량 제어를 전자제어식으로 할 수 있도록 하면서, 기계의 자동화 분야에서 중추적인 역할을 하면서 비약적인 발전을 해왔다.^(1~3)

기존에는 솔레노이드 해석을 위해서 크게 두가지 방법이 사용되어져 왔다.^(4~6) 하나는 이론적인 수식을 이용한 lumped method에 의한 방법이며, 또다른 하나는 상용 소프트웨어를 사용하여 FEM 등의 방법으로 해석하는 것이다. 일반 상용틀을 이용한 해석법은 해의 정확도가 우수하나, 모델링 및 해석까지 많은 시간과 노력이 필요하며,

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, dwyun@kimm.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

전자장이론에 대한 지식이 없이는 접근하기가 어려운 단점이 있다. 이를 보완할 수 있는 것이 자기 등가회로법을 적용한 설계 프로그램이다. 이는 자속이 흐르는 경로를 회로의 저항과 같이 상사하여 회로 이론으로 솔레노이드의 성능을 분석하는 방법이다.⁽⁷⁾ 하지만, 자기 등가회로법은 재료물성치의 비선형성을 감안하기가 어려워 자속포화가 크게 일어나는 시스템에서는 해석결과는 실험결과와 많은 오차를 보이는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 두 가지 방법의 단점을 보완하고자 하는 측면에서 연구가 진행되었다. 우선 해석을 수행시에 해의 정확도가 가장 중요하므로, 이를 우선적으로 고려하였으며, 솔레노이드 개발 전공자가 아닌 비전공자도 용이하게 해석을 수행할 수 있는 것을 목표로 하였다. 이를 위하여, 해석의 solver는 유한요소코드를 이용하고, 외부에서 해석에 필요한 입력인자를 일반 Text 모드 또는 GUI 모드에서 입력이 가능하도록 하며, 사용자가 입력하여야 하는 데이터량을 최소화하여 비전공자도 손쉽게 솔레노이드 해석을 수행할 수 있도록 하였다.

2. 프로그램 개발

본 절에서는 앞절에서 설명한 프로그램 수행

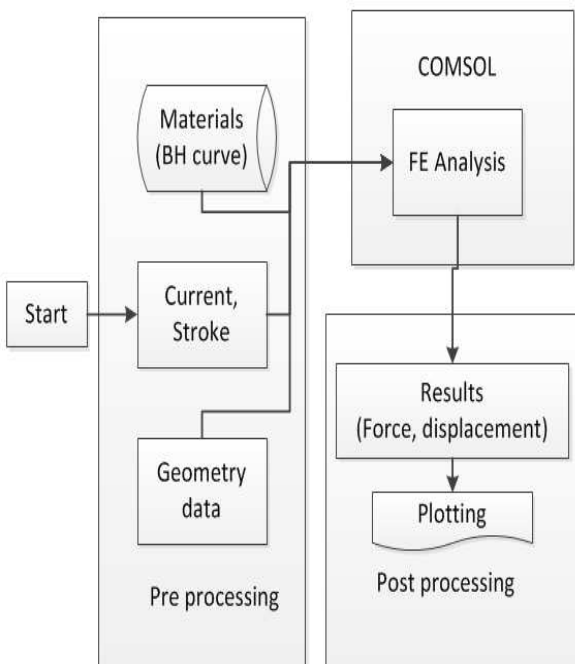


Fig. 1 Analysis procedure

개요에 따른 솔레노이드 해석 프로그램 개발에 대해서 설명하고자 한다.

Fig. 1에 프로그램 개발을 위한 해석절차를 보여주고 있다. 사용자 입력 창(pre processing)에서는 해석을 위해서 사용자로부터 입력받아야 할 최소한의 필요한 데이터만 입력받도록 하였다. 이러한 최소한의 필요 입력데이터는 코일의 턴수, 전류, 플런저의 위치, 솔레노이드 형상 정보 등이다. 이러한 값들 중, 다른 값들은 스칼라값으로 단순입력이 가능하나, 형상 정보값은 단순한 값으로 입력이 곤란하다. 특히, 비례제어 솔레노이드의 경우 제어콘의 역할이 크므로, 제어콘의 형상 정보도 반드시 들어가야 한다. Fig. 2에 400W급 비례 솔레노이드 밸브의 형상을 보여주고 있다. 제어콘이란 Fig. 2에 도시되어 있는 바와 같이, 공극 주위의 삼각형의 단면을 가진 코어 부분을 말하는 것으로써, 이 부분의 형상과 치수에 의해서 솔레노이드 밸브의 변위 및 입력전류에 따른 흡입력 특성이 달라지게 된다⁽⁸⁾. 그림에서 알 수 있듯이, 코일 주위의 코어는 모델에 따라 다양한 형상을 띄게 된다. 이러한 다양한 형상의 솔레노이드에 대해 범용으로 적용할 수 있는 해석 프로그램을 제작하기 위해서는 형상 모델링부터 시작하여야 하고, 이에 따라 메

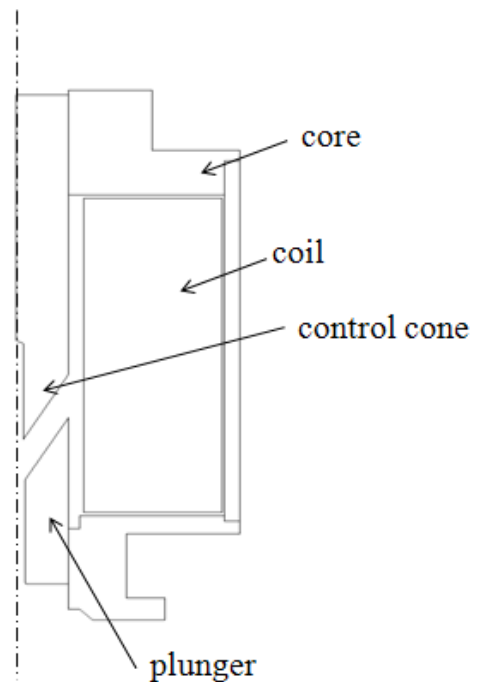


Fig. 2 Model of the solenoid valve

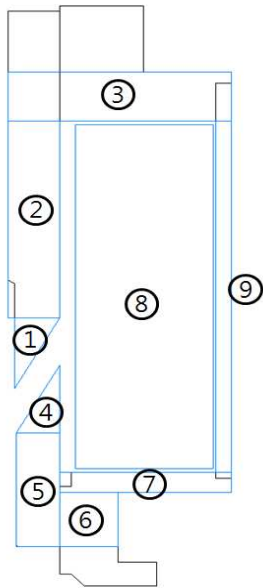


Fig. 3 Modified model of the solenoid valve

쉬 생성, 경계조건 및 입력조건 등 일반적인 FEA 과정을 거쳐야 하므로, 비전공자가 접근하기에는 어려움이 있다.

따라서, 솔레노이드 해석 과정을 간소화하기 위해서, Fig. 2와 같은 임의의 형상의 축대칭 형태의 솔레노이드 밸브를 Fig. 3과 같은 다수의 영역으로 이루어진 밸브로 가정하고, 자로중심으로 간략화하여 모델링하는 법을 제안하였다. 이를 위하여 자로의 형상을 단순한 사각형과 삼각형의 간단한 기하학적 도형의 조합으로 나타냄으로써, 어떠한 임의의 솔레노이드 단면도 Fig. 3과 같이 사각형 또는 삼각형의 도형의 집합으로 표현할 수 있게 된다. 따라서, 솔레노이드 해석을 위해 개발되는 프로그램에서는 각 9개 영역을 삼각형 또는 사각형과 같은 단순 도형으로 나타낼 수 있음을 제안하였다.

Fig. 4에 해석에 이러한 가정에 적용되는 기본 도형에 대해서 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 사각형 도형으로써, 왼쪽 아래의 꼭지점의 좌표 $P_i(x_i, y_i)$ 와 가로, 세로 길이 a_i, b_i 로 정의된다. Fig. 4(b)는 제어 콘에 적용하기 위한 삼각형 영역으로써, 왼쪽 아래 꼭지점의 좌표 $P_j(x_j, y_j)$ 와 두변의 길이 a_j, b_j 로 정의할 수 있다.

따라서 임의의 솔레노이드 밸브는 Fig. 4의 기본 요소로써 모델링할 수 있으며, 사용자는 Fig.

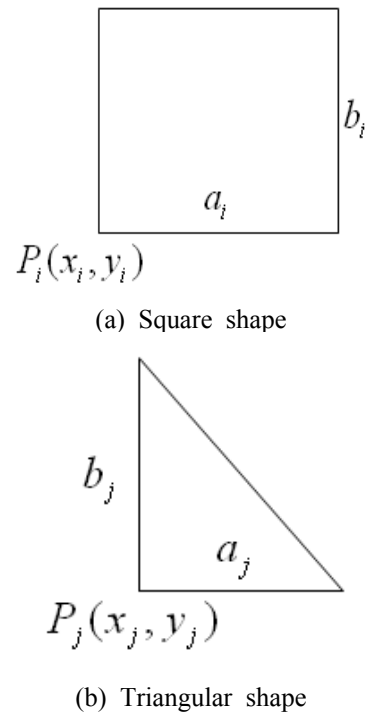


Fig. 4 Definition of basic elements

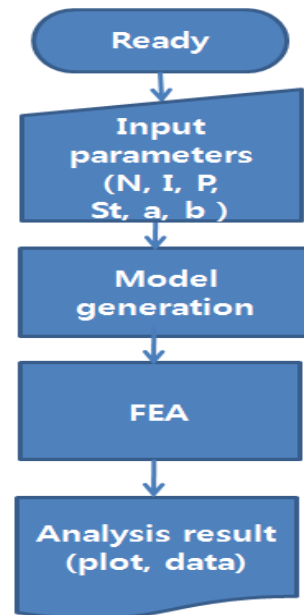


Fig. 5 Flow chart of the developed program

3에서 9개 영역으로 이루어진 각 기본 형상의 한 꼭지점의 좌표와 가로, 세로 길이를 반복적으로 입력함으로써, 전체적인 모델링을 할 수 있게 된

다. Fig. 5에 개발된 해석 프로그램의 전체적인 해석 순서를 요약하여 보여주고 있다. 본 개발된 프로그램에서는 FEM 해석을 위해서 COMSOL를 사용하였으며, 사용자의 데이터 입력을 위해서 COMSOL Livelink와 Matlab을 이용하였다. 사용자는 Matlab의 코멘드창이나 GUI에서 Table 1에서 열거한 데이터를 입력하기만 하면, 개발된 코드가 모델링-해석의 과정을 자동으로 수행하게 되며, 해석된 데이터를 사용자에게 그래프 또는 수치적인 값으로 보여주게 된다.

개발된 프로그램을 이용하여 솔레노이드 밸브의 해석을 수행해보기로 하였다. 이를 위하여 400W급 솔레노이드 밸브의 도면을 바탕으로 해석을 수행해 보았다.

해석을 위한 각 부분의 재질은 코일은 구리, 자성체 부분은 soft iron이라고 가정하였으며, 자성체의 비선형성을 고려하기 위하여 BH curve 데이터를 사용하였다. Fig. 6에 해석에서 사용된 soft iron의 BH 데이터를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 인가되는 자계에 대해서 발생하는 자속은 비선형적인 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 개발된 프로그램에서는 이러한 BH 커브 특성을 텍스트로써 입력할 수 있게 하여, 물성치의 특성이 해석에 반영될 수 있게 하였다. 해석은 코일의 턴수는 8600턴이며, 입력 전류는 1A~3A가 인가되며, 플런저의 변위가 초기위치에서 0~35mm 사이에서 변할 때 발생하는 전자기력에 대해서 해석을 해보았다.

먼저 재질의 비선형성을 고려할 때와 고려하지 않을 때의 차이를 알아보기로 하자, 재질의 BH 특성을 고려하지 않고 해석을 수행한 결과와 Fig. 6의

Table 1 Input parameters

Parameters	Definition
I	Input current
N	Coil turns
St	Stroke of plunger
geometry data	$\sum_{i=1}^9 (P_i(x_i, y_i), a_i, b_i)$

BH 특성을 고려한 경우의 해석을 수행해 보았다. 인가 전류가 1A 일 때, 각각의 경우에 대한 해석을 수행해 보았으며, 그 결과가 Fig. 7에 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 재질의 비선형 특성을 고려하지 않고 선형적으로 해석을 수행하게 되면, 비선형 해석과 비교하여 상당한 오차가 발생함을 알 수 있으며, 특히, 자속의 포화도가 증가하는 부분인 stroke가 커지는 영역(공극이 줄어드는 부분)에서 많은 오차가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 8에 해석의 결과로서 플런저의 변위가 35mm일 때 발생하는 자속밀도와 자속선의 분포를 보여주고 있다. 개발된 프로그램은 그림과 같

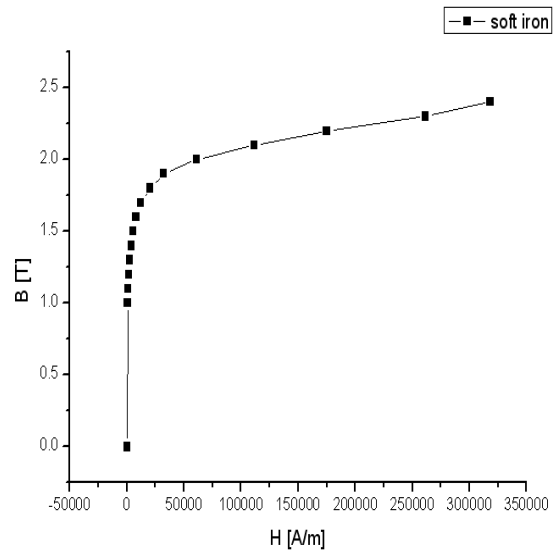


Fig. 6 BH curve of soft iron

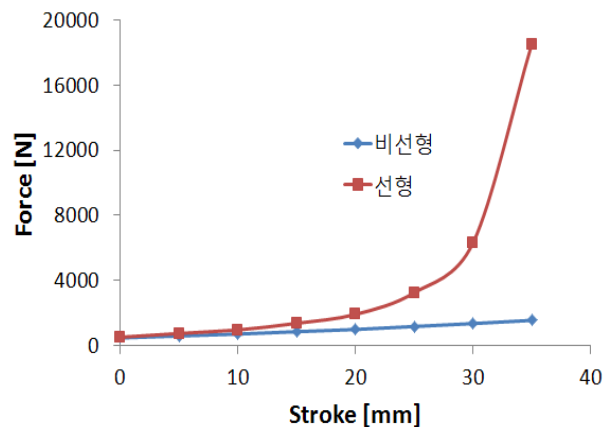
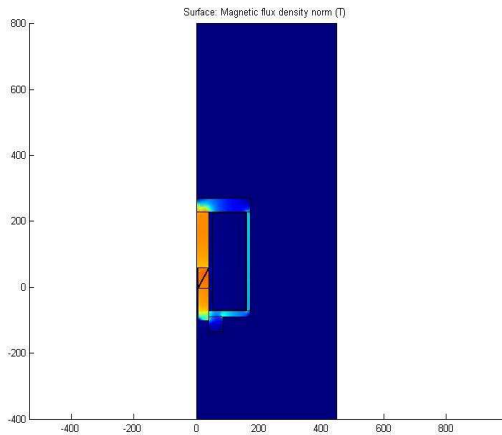
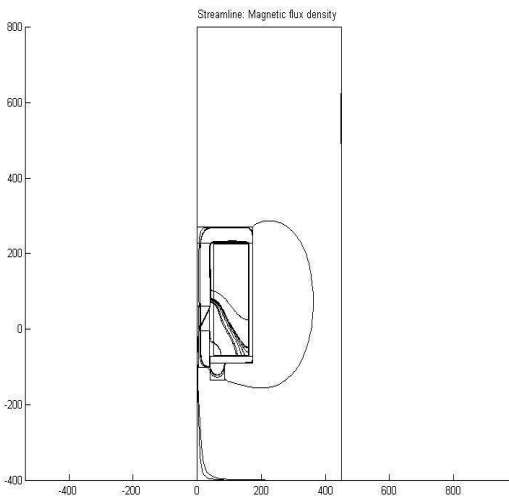


Fig. 7 Comparison between linear and nonlinear analysis



(a) Magnetic flux density



(b) Magnetic flux line

Fig. 8 Electromagnetic Analysis results

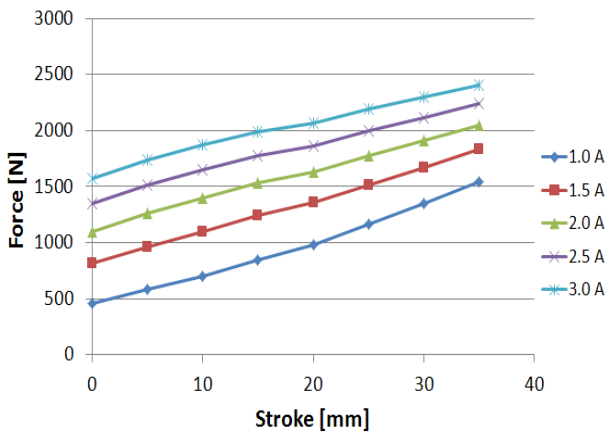


Fig. 9 Electromagnetic force according to current and displacement of the plunger

이 솔레노이드에서 발생하는 전자기 자속과 자속 밀도를 그래프로 표시함으로써, 사용자가 입력한 치수와 형상을 가지는 솔레노이드의 자속포화 정도와 자속누설을 확인할 수 있게 하였다.

Fig. 9에는 전류와 플런저의 변위에 따른 발생하는 전자기력에 대한 해석결과가 나와 있으며, 플런저의 변위에 따른 전자기력의 변화를 여러 입력전류에 대해서 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 플런저의 변위에 따른 전자기력의 변화가 곡선의 관계가 아닌 직선의 평탄한 형태를 나타내는 것을 알 수 있으며, 이는 비례솔레노이드의 고유한 특성으로써, 이론적인 선형 해석으로 얻을 수 없는 결과이다.

다음으로, 단순 기하학적 도형의 조합으로 가정하여 모델링한 해석 결과의 타당성을 검증하고자, 본 연구에서 제안된 단순한 기하학 형상의 조합법을 사용하지 않고, 기존의 방식으로 전체 모델을 모델링하여 해석한 결과와 비교하여 보기로 하였다. 이를 위하여 비교대상 해석은 전자기 해석 전용 유한요소 코드인 Maxwell을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 10에 Maxwell을 이용하여 작성된 솔레노이드 모델을 보여주고 있다.

Maxwell을 이용하여 앞선 해석과 똑같은 조건에서 해석을 수행하였다. 자속선 분포와 자속밀도 분포에 대한 결과가 Fig. 11에 보여주고 있다. Fig. 9의 결과와 비교해 본 결과, 거의 유사한 결과를 보여주고 있다는 것을 알 수 있었다. 보다 세밀한 비교를 위하여 전류와 플런저의 변위에 따른 전자기력에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 제안된 단순 기하학 도형을 이용한 모델링 방법으로 해석된 Fig. 9와 비교해 본 결과 전반적으로 유사한 경향을 가짐을 알 수 있었으며, 최대 약 20% 정도의 오차가 발생하는 것을 알 수 있었으나, 이는 형상을 단순화 시키는 과정에서 생략된 자료의 형상에 의해서 누설 자속부분에서 차이에 의한 것이다. Fig. 7의 결과와 비교해 보면, 그림에서 알 수 있는 바와 같이, Fig. 7의 비선형성을 고려하지 않고 해석한 선형해석 결과에 비해서는 제안된 방법을 사용하여 수행한 해석의 정확도가 우수하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 제안된 해석 전후처리 알고리즘을 이용하면 재질의 비선형성을 고려함과 동시에 보다 용이한 방법으로 비례제어 솔레노이드 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

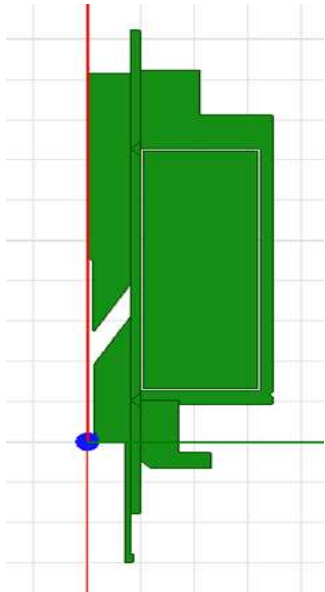


Fig. 10 Solenoid model by Maxwell

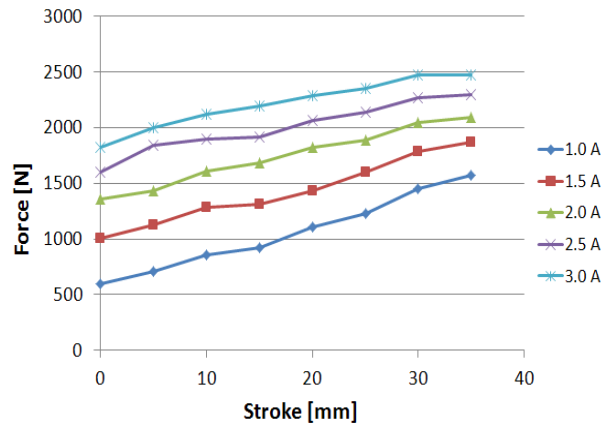


Fig. 12 Electromagnetic force according to current and displacement of the plunger for the full model by Maxwell

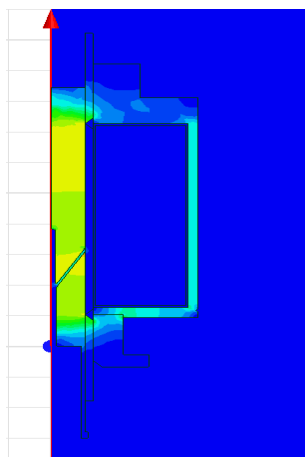
따라서, 개발된 프로그램을 이용하여 기존의 유한요소 해석에 비하면 간편한 모델링 방법을 이용하여 비선형해석결과를 용이하게 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

3. 결론

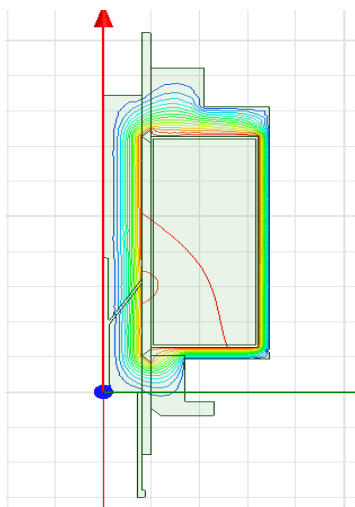
본 논문에서는 비례제어 솔레노이드 밸브에 대한 해석을 수행하였다. 특히, 사용자 편의성을 위해서 솔레노이드 밸브를 단순한 기하학적 요소들의 합이라 가정하여 프로그램을 작성하여 누구나 유한요소 모델링을 쉽게 할 수 있게 하였으며, 기존의 FEM 툴을 solver로써 사용함으로써, 제어 콘에서의 비선형 특성을 정확히 해석하여 해석의 정확도도 보장할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 개발된 프로그램을 활용하면 비전공자들도 쉽게 비례 솔레노이드의 비선형 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Yun, S.-N., Youn, D.-W., Jung, Y.-H., Ryu, J.-S. and Jo, J.-H., 2005, "High Pressure Control Valve for Common Rail System," KSAE 2005 Autumn Conference, pp.499~503.
- (2) Yun, S. N., Ham, Y. B. and Jo, J. D., 2003, "Pressure Control Characteristics of Proportional Pressure Reducing Valve," *Transactions of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol.7, No.1, pp.68~73.
- (3) Yun, S., Kang, B., Sung, B. and Kim, H.,



(a) Magnetic flux density



(b) Magnetic flux line

Fig. 11 Electromagnetic Analysis results

- 2000, "A Study on Characteristics of Nozzle/Flapper Type Flow Control Servo Valve," *Transactions of KSAE*, Vol.18, No.1, pp.54~62.
- (4) Ryu, J. S., Koh, C. S., Yun, S. and Ham, Y., 2003, "Characteristics Analysis of the Solenoid for High-Voltage Circuit Breaker," *Proceedings of KIEE*, pp.912~914.
- (5) Kim, D. S., Park, S. W. and Koh, C. S., 2005, "The Optimal Design by Micro On-Off Valve Analysis," *Proceedings of KSPE*.
- (6) Wang, S.-M., Miyano, T. and Hubbard, M., 1993, "Electromagnetic Field Analysis and Dynamic Simulation of a Two-Valve Solenoid Actuator," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 2, pp.1741~1746.
- (7) Mitsutake, Y. and Hirata, K., 1997, "Dynamic Response Analysis of a Linear Solenoid Actuator," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 33, pp. 1634~1637.
- (8) Kim, D. G., Jeong, H. H., Jung, E. A. and Yun, S. N., 2010, "A Study on Attraction Force Improvement by Control Cone Angle Variation of Proportional Solenoid Actuator," *Proceeding of KSPE*, pp. 1055~1056.