

## Analysis of the Electromagnetic Expansion Force on the Multi-Turn Layer Solenoid Coil

Hui Min Kim\*, Yong Kyu Lee, and Meung Geun Song

Research Institute, Hamwha Defense, Changwon 51561, Korea

(Received 16 November 2020, Received in final form 11 December 2020, Accepted 15 December 2020)

The solenoid coil is one of the most important design component for efficient electrical energy conversion in the structure of electric machines such as motors, generators, and transformers. When the current is applied to a multi-turn solenoid coil, a uniform magnetic field which is proportional to the number of coil windings is generated inside the coil, and the high-density magnetic field generated by the coil can be converted into mechanical kinetic energy by applying the strong electromagnetic force to a ferromagnetic object. However, the interaction between the current and magnetic field of the solenoid coil generates a strong electromagnetic force between each coil wire. In this paper, when the current flows in the multi-turn solenoid coil, the analysis method and numerical equation for calculating the electromagnetic expansion force generated in the radial direction of a multi-turn solenoid coil are proposed. Calculated results are verified by simulated ones.

**Keywords** : solenoid coil, electromagnetic force, magnetic expansive force, magnetic field, coilgun

### 다중 권선형 솔레노이드 코일에 작용하는 전자기적 팽창력 해석

김희민\* · 이용규 · 송명근

한화디펜스 종합연구소, 경남 창원시 성산구공단로 69, 51561

(2020년 11월 16일 받음, 2020년 12월 11일 최종수정본 받음, 2020년 12월 15일 게재확정)

솔레노이드 코일은 전동기, 발전기, 변압기 등과 같은 전기기기 구조에서 효율적인 전기에너지 변환을 위해 가장 보편적으로 설계 및 적용되는 구성 요소이다. 솔레노이드 코일에 전류를 인가하면 코일 권선수에 비례하는 균일한 자기장이 코일 내부에서 발생하고, 코일에서 발생한 고밀도의 자기장은 강자성체 물체에 강한 전자기력을 작용시켜 기계적인 운동에너지로의 변환이 가능하다. 하지만 솔레노이드 코일 내부의 인접한 권선 간에 흐르는 전류와 자기장의 상호 작용은 각각의 코일 권선 사이에도 강력한 전자기력을 발생시킨다. 본 논문에서는 다중 권선층 구조의 솔레노이드 코일 구조에서 인가 전류에 따라 코일 반경 방향으로 발생하는 전자기적 팽창력을 산출하는 방법과 수식을 제안하였고, 유한요소법을 이용한 수치해석 결과와 비교 및 검토를 통하여 제안한 수식 결과의 타당성을 검증하였다.

**주제어** : 솔레노이드 코일, 전자기력, 자기 팽창력, 자기장, 코일건

### I. 서 론

일반적으로 솔레노이드는 도선을 원통형으로 말아서 만든 코일 기구물을 뜻한다. 원통형으로 감은 솔레노이드 코일에 전류를 인가하면 코일 내부에는 균일한 자기장이 발생하고, 내부 자기장의 크기는 인가한 코일 전류의 크기에 비례하며 코일의 단위 길이당 권선 수에 비례한다. 또한, 솔레노이드

코일 내부에 강자성체를 넣으면 자성체의 높은 투자율 특성으로 인해 자기장의 크기가 더욱 강해지는 효과가 발생한다. 즉, 솔레노이드 코일은 전기에너지를 자기에너지로 변환하는 가장 기본적인 에너지변환 장치라고 할 수 있다[1].

솔레노이드 코일은 구조 및 제조공정이 간단하여 주로 일상생활 용품에서의 전자석 및 가정용 전자 부품으로 사용되고 국내·외 전기산업 부문의 다양한 응용 분야에서도 폭넓게 사용된다. 특히, 솔레노이드형 코일은 전동기, 발전기, 변압기와 같은 전기기기 응용 분야에서 고효율 전기에너지변환 시스템 구현을 위해 반드시 필요한 설계구조 요소 중 하나이다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

\*Corresponding author: Tel: +82-55-711-7664,

Fax: +82-55-280-6115, e-mail: huimin.kim@hanwha.com

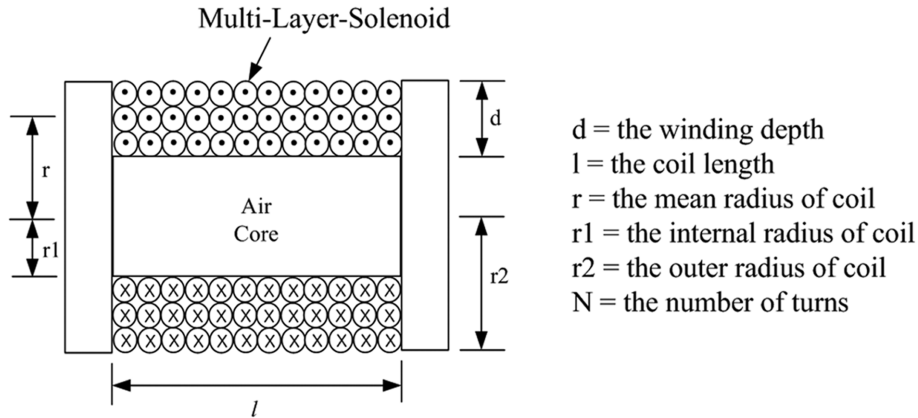


Fig. 1. The basic structure of multi-turn layer solenoid coil.

원통형 구조를 가지는 다층 권선형 솔레노이드 코일 내부에서 발생하는 자기장의 크기와 방향은 솔레노이드를 이루는 각각의 원형 도선들에 의해 발생한 자기장들의 벡터합으로 표현할 수 있고, 솔레노이드 내부 자기장의 방향은 앙페르의 오른나사 법칙에 따라 코일 축방향으로 형성되며 그 크기는 아주 균일하다. 반면, 솔레노이드 외부 자기장의 크기는 내부 자기장의 크기에 비해 상대적으로 매우 작고 솔레노이드 길이가 무한히 길어질수록 0에 수렴하는 특징을 가진다. 따라서, 솔레노이드 권선 코일의 가장 큰 특징은 균일한 크기의 축방향 내부 자기장을 형성하는 것이다. 그리고 내부 자기장이 균일하기 때문에 공간상에 저장되는 자기에너지의 밀도 분포도 균일하다[1].

그러나, 원통형 솔레노이드 코일 구조에는 코일 내부에 형성된 자기장과 코일에 흐르는 전류에 의해서 로렌츠 힘이 동시에 작용한다[2]. 특히 권선수가 많고 다층 구조로 설계된 원통형 솔레노이드 코일의 경우, 균일한 자기장 내에서 전류가 흐르는 각각의 개별 도선들이 받는 전자기적인 힘의 상호작용으로 인해 물리적인 팽창력이 발생하게 된다. 이러한 물리적인 팽창력은 코일 권선의 구조적인 안정성을 저해하여 권선의 단선, 단락 및 절연파괴 등을 야기하고 코일 지지구조물의 파손 및 고장을 유발하는 기계적 원인이 될 수 있다[2,3].

다층 권선형 솔레노이드 코일에 작용하는 전자기적인 팽창력은 크게 원통형 구조에서 축방향으로 작용하는 힘과 원주방향으로 작용하는 힘으로 구분할 수 있다. 통상적으로, 단층으로 구성된 원형 솔레노이드 코일의 도선 간에 축방향으로 작용하는 팽창력에 관한 연구 및 산출 방법은 이미 기존 연구에서 다루어져 왔다[3-5]. 그러나 다층 권선형 코일 구조에서는 원주방향으로 작용하는 전자기적 팽창력이 코일 장치의 구조 안정성에 더 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 코일 원주방향으로 작용하는 물리적인 팽창력 해석은 코일의 형상 구조 및 지지구조물의 기초설계 단계에서 반드시 분석해야 할

주요 요소이다. 본 논문에서는 다층 솔레노이드 코일에서 원주방향으로 발생하는 전자기적 팽창력 산출 방법과 수학적 모델식을 제안하였다.

## II. 다층 권선형 솔레노이드 코일

### 1. 코일 내부 임피던스 및 전류

Fig. 1은 다층 권선형으로 구성된 솔레노이드 코일의 형상 개념도를 나타낸다. Fig. 1에서 제시한 솔레노이드 코일은 각각 층당 권선 수, 총 권선 수, 권선코일의 축방향 길이, 권선코일의 두께, 권선코일의 평균 반지름의 형상 수치로 구조적인 설계가 가능하다.

본 논문에서는 솔레노이드 코일의 인가 전류에 따른 코일 반경 방향으로 작용하는 전자기력을 분석하기 위해 교류 정전압 전원을 입력소스로 가정하였고, 다층 권선형 솔레노이드 코일의 저항과 인덕턴스를 계산하여 코일에 인가되는 전류를 산출하였다.

Fig. 2는 솔레노이드 코일의 간략화 등가회로를 나타낸다. 일반적으로 솔레노이드 코일 등가회로의 회로정수는 저항 및

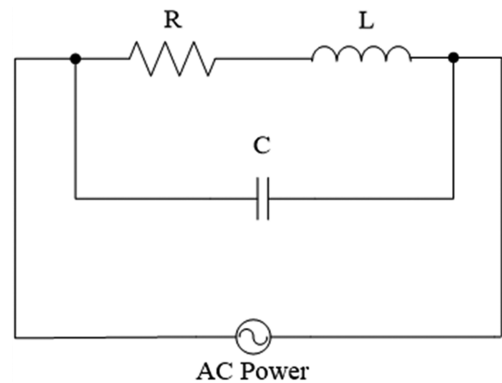


Fig. 2. The equivalent circuit for a solenoid coil.

인덕턴스 성분으로 구성할 수 있고 권선 된 도선 간에는 커패시터 성분도 일부 포함된다. 그러나, 본 논문에서는 솔레노이드 코일이 완전한 유도성 부하이며 60 Hz 이하의 저주파 정전압 전원을 입력으로 가정하였기 때문에 커패시터에 의한 코일 임피던스 영향은 무시하였다.

솔레노이드 코일에 흐르는 전류를 계산하기 위하여, 우선 다중 권선형 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 아래 식(1)과 같이 코일의 형상 함수로 정의할 수 있다[6].

$$L_c = \frac{0.8(r^2 N^2)}{6r + 9l + 10d} \quad (1)$$

여기서  $r$ ,  $l$ ,  $d$ 는 각각 솔레노이드 코일의 반경방향 평균 길이, 권선 코일의 축방향 길이, 권선 코일의 두께를 나타낸다. 식(1)으로부터, 다중 권선형 솔레노이드 코일의 임피던스는 권선 수의 제곱에 비례하고 코일의 길이와 두께 치수에 반비례하는 관계를 확인할 수 있다. 특히 코일 권선 수는 자기장의 크기에도 결정적인 영향을 미치는 형상 변수에 해당한다.

권선된 솔레노이드 코일 전체의 길이와 도선의 단면적, 구리 도선의 비저항 값을 고려한 저항을  $R_c$ 라고 정의하면 코일 전체의 임피던스와 인가되는 전류의 RMS 크기를 식(2), (3)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_c = R_c + j\omega L_c = \sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2} \angle \tan^{-1} \frac{\omega L_c}{R_c} = |Z_c| \angle \tan^{-1} \frac{\omega L_c}{R_c} \quad (2)$$

$$I_c = \frac{V_{ac}}{|Z_c|} = \frac{V_{ac}}{\sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2}} \quad (3)$$

식(2), (3)에서  $V_{ac}$ ,  $\omega$ ,  $I_c$ 는 각각 코일에 인가한 교류 입력전압, 각속도, 입력 전류를 RMS 값으로 나타낸 값이다.

### 2. 코일에 작용하는 전자기 팽창력

일반적으로 Fig. 3과 같이 전류가 흐르는 솔레노이드 코일

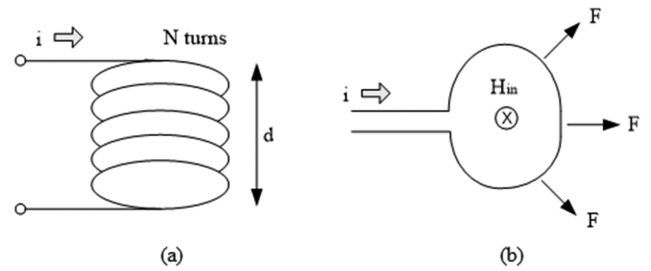


Fig. 3. The concept of a solenoid coil. (a) The shape of solenoid coil. (b) Directions of the magnetic field and the magnetic force.

내부의 자계의 세기  $H_i$ 는

$$H_i = \frac{NI}{d} \quad (4)$$

와 같다. 이때,  $N$ ,  $I$ ,  $d$ 는 각각 코일의 권선수, 전류의 크기, 코일의 축방향 길이에 해당한다.

Fig. 3(b)는 솔레노이드 코일 내부에 발생하는 자기장과 1개의 루프를 형성된 코일에 전류가 흐를 때 발생하는 자기력의 방향을 나타낸다. 여기서 코일의 반경방향으로 작용하는 자기력의 크기는 로렌츠의 힘 방정식으로부터 식(5)와 같이 정의된다.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

$\vec{F}$ ,  $q$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$ 는 각각 힘, 전하량, 전계의 세기, 전하의 속도, 자속밀도를 나타낸다. 이 방정식에서 전계의 세기에 의한 힘을 무시한다고 가정하면, 식(6)과 같이 전류밀도  $\vec{J}$ 로 표현된 수식으로 간략화 할 수 있다.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cong \vec{J} \times \vec{B} \quad (6)$$

하지만, 솔레노이드 코일이 여러 가닥으로 권선되어 있는 경우 각각의 개별 코일에서 작용하는 로렌츠 힘의 크기는 복합적으로 작용한다. 또한 전원 공급기가 정전압원일 경우 코

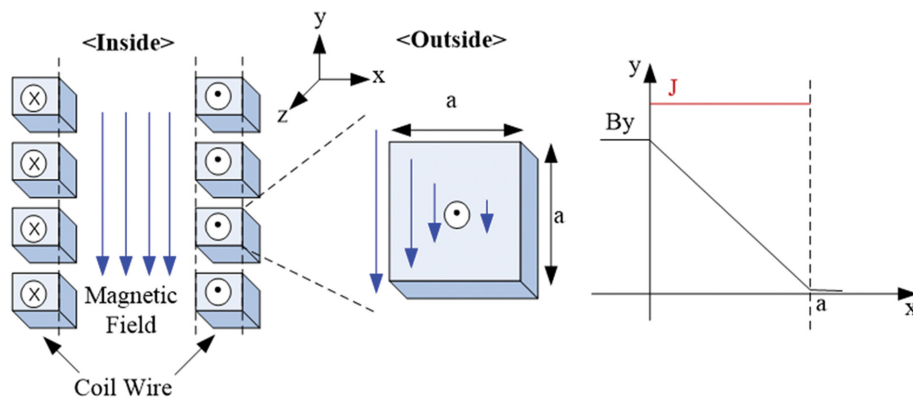


Fig. 4. (Color online) Variations of the magnetic field and current density inside or outside the coil.

일의 권선수에 따라 코일 인덕턴스가 달라지고 전류가 변하여 솔레노이드 코일 내부의 자기장 세기 또한 달라지므로 코일에 작용하는 힘 또한 달라진다.

본 논문에서는 우선 다중 권선된 솔레노이드 코일에서 발생하는 복합적인 반경 방향의 자기 팽창력을 간략하게 계산할 수 있는 수학적 모델식을 제안한다. Fig. 4는 솔레노이드 코일에서 자기적인 팽창력을 산출하기 위해 1층으로 구성된 코일 내·외부에서의 자계의 세기 분포를 간략히 나타낸 것이다.

일반적으로 축방향 길이가 충분히 긴 솔레노이드 코일 내부에서는 자기장 세기가 균일하다고 가정할 수 있으며, 이때 코일 외부에서의 자기장 세기는 상대적으로 0에 가깝다. 이 경우 코일 동선 각각의 내부에서는 Fig. 4의 그래프와 같이 자속 밀도의 세기가 선형적으로 감소할 것으로 예상할 수 있다. 그리고, 전류가 흐르는 도선의 표피효과와 근접효과를 무시할 경우, 동선 내부에서의 전류 밀도  $\vec{J}$ 는 일정하고 식(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$J(x, y) = J(x) = J = \frac{I}{a^2} \quad (7)$$

여기서  $a$ 는 동선 내부의 폭 길이를 나타낸다.

솔레노이드 코일 안쪽에서의 자속 밀도 크기를  $B_y$ 라고 한다면, 코일 동선 면적 내부에서의 자속밀도의 크기는 식(8)과 같다.

$$B_y = \mu_0 H_y = 4\pi \times 10^{-7} \frac{NI}{d} \quad (8)$$

$$B_y(x) = -\frac{1}{a} B_y x + B_y = -\frac{\mu_0 NI}{ad} x + \frac{\mu_0 NI}{d} \quad (9)$$

$d, \mu_0, l$ 는 각각 솔레노이드 코일의 축방향 길이, 공기 투자율, 전류의 크기를 나타내며 각 동선 면적 내부에서는 식(9)와 같은 자기장 분포가 형성된다. 즉, 솔레노이드로 구성된 코일 동선의 한 가닥에 작용하는 자기적인 팽창력은 동선 내부에 인가되는 자속 밀도 크기 분포와 균일하게 흐르는 전류 밀도의 벡터곱으로 산출할 수 있다. 코일 동선 한 가닥의 미소 단면적에 작용하는 자기적인 팽창력  $\vec{F}_{r1}(x, y)$ 은 식(7)을 이용하여 식(10), 식(11)로 정의할 수 있다.

$$\vec{F}_{r1}(x, y) = \vec{J}(x, y) \times \vec{B}(x, y) \quad (10)$$

$$= \int_0^a \left[ \frac{I}{a^2} \times \int_0^a \left( -\frac{\mu_0 NI}{ad} x + \frac{\mu_0 NI}{d} \right) dx \right] dy$$

$$|F_{r1}| = \frac{I}{a^2} \left[ -\frac{1}{2} \frac{\mu_0 NI}{ad} x^2 + \frac{\mu_0 NI}{d} x \right]_0^a [y]_0^a \quad (11)$$

$$= \frac{\mu_0 NI^2}{2d}$$

$\vec{F}_{r1}(x, y)$ 의 크기는 동선 Wire 내부 미소 단면적에 작용하는 자기적인 팽창력을 나타내고, 이 때 솔레노이드를 구성하는 원형코일 1개에 작용하는 팽창력의 크기는 코일을 이루는 원주 방향으로의 둘레 길이를 곱한 값과 일치할 것으로 가정할 수 있다. 따라서, 솔레노이드 원형 코일 1개에 작용하는 자기 팽창력  $\vec{F}_{r1\phi}(x, y)$ 은

$$|F_{r1\phi}| = \int \frac{\mu_0 NI^2}{2d} dl = \frac{\mu_0 NI^2}{2d} (2\pi r) = \frac{\mu_0 \pi r NI^2}{d} \quad (12)$$

으로 정의할 수 있다. 여기서  $r$ 은 솔레노이드 코일의 반경 길이를 나타낸다. 솔레노이드 코일이  $N$ 개의 개별 코일로 권선되어 있다고 가정하면, 다중 권선된 솔레노이드 코일에 작용하는 전체적인 자기 팽창력은 식(13)과 같이 산출 된다.

$$|F_{rN\phi}| = N |F_{r1\phi}| = \frac{\mu_0 \pi r N^2 I^2}{d} \quad (13)$$

일반적으로 솔레노이드 코일은 권선수가 높아지면 여러 개의 층(layer)로 구성되기도 한다. 솔레노이드의 코일이  $n$ 개의 층으로 설계되어 총  $N$ 턴 권선된 구조라고 가정하면, 다중 권선형 솔레노이드 코일 전체에 작용하는 전자기적 팽창력은 최종적으로 식(14)와 같이 정의할 수 있다.

$$|F_{r, Solenoid}| = \frac{\mu_0 \pi N^2 I^2}{d} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{2} \{ (r_k + r_{k+1}) \} \quad (14)$$

### III. 수학적 해석모델 설계 및 적용

#### 1. 해석 모델 및 사양

Fig. 5는 솔레노이드 코일에 작용하는 전자기적인 팽창력 산출 결과의 타당성을 검증하기 위해 설계한 다중 권선형 솔레노이드 코일의 해석모델 형상을 나타낸다. 솔레노이드 코일의 해석 모델은 전자기력을 이용한 코일건 발사대의 구조물 중에 고장장을 발생시키는 고정자 코일의 형상 치수를 기준으로 선정하였다[8,9]. 전자기식 코일건은 솔레노이드 코일 양단에 고전압 전원을 인가하여 자기장을 발생시킨 후 자기적인 반발력을 이용하여 전도성 재질의 구조물을 발사하는 시스템을 말하며, 일반적으로 고정자 코일과 전기자(이동자) 코일 구조로 구성 된다[7].

Table I은 다중 권선형 솔레노이드 코일에 해당하는 고정자 코일의 형상 치수 및 전기적인 저항, 인덕턴스의 계산 결과를 나타낸다. 직경 2.6 mm인 구리 도선을 총 17 turn으로 권선하여 총 5층 구조의 85 turn 권선수를 가진 다중 솔레노이드 코일로 설계한 구조이며, 솔레노이드 코일에 전류가 흐를 시 각 권선된 도선 간에는 축방향 및 반경 방향으로 힘이

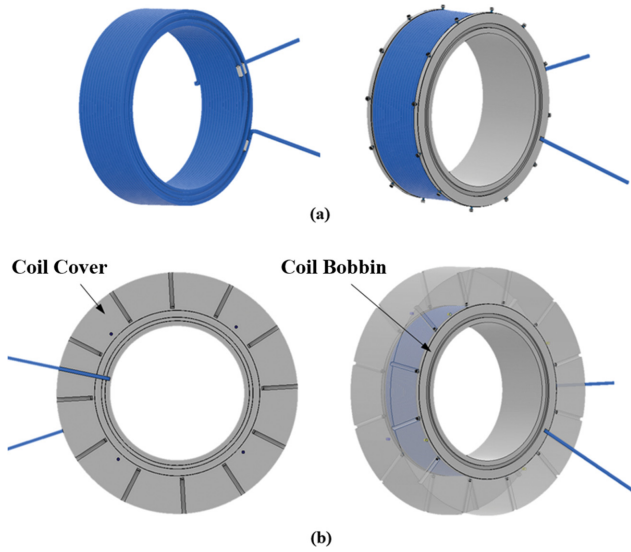


Fig. 5. (Color online) Analysis models for the solenoid coil. (a) Coil structure. (b) Coil cover and supporting structure.

작용하기 때문에 코일을 고정하기 위한 별도의 지지구조물이 필요하다. Fig. 5(b)는 솔레노이드 코일 구조물의 고정을 위한 몸체와 덮개 구조물이 포함된 형상을 나타낸 그림이다. 코일의 외경을 지지하는 덮개 구조물은 비금속, 비전도성 소재인 E-Glass 소재로 선정하여 설계하였다. 일반적으로 복합소재 E-Glass는 엔지니어링 플라스틱 대비 강도, 비강성 성능이 우수하고 금속만큼의 인장강도를 가지며 가공성이 좋아 코일 조립체 형상 구조로 적합하다.

## 2. 전자기적 팽창력 해석 결과

다중 권선형 솔레노이드 코일에 큰 전류가 인가될 경우 코

Table I. Design specification & parameters of the coil.

	Value
The number of layers [Layer]	5
The number of turns per layer [Turn/Layer]	17
Total number of turns [Turn]	85
Coil length [mm]	110
Radius of inner coil [mm]	144.35
Radius of outer coil [mm]	173.85
Wire diameter [mm]	2.60
Cross-sectional area of the coil cover [m <sup>2</sup> ]	0.132
Resistance [Ω]	0.0593
Inductance [mH]	2.38

일조립체에는 입력 전류의 크기와 코일 형상 치수에 비례하는 전자기력이 코일 도선 간에 작용하게 된다. 특히 코일의 반경 방향으로 작용하는 자기 팽창력은 코일조립체의 구조적인 안정성을 저해하는 주요 요인이므로, 솔레노이드 코일 조립체 구조의 덮개 및 원통형 튜브 구조물의 기계적인 구조설계 단계에서 코일에 작용하는 전자기적 팽창력의 분석은 반드시 필요한 검증 요소이다.

본 논문에서는 솔레노이드 코일 양단에 각각 1 kV부터 5 kV까지의 정전압이 인가될 경우 코일에 흐르는 전류와 이에 따른 전자기력의 크기를 수학적인 모델식을 이용한 결과와 전자기 유한요소해석 시뮬레이션을 이용한 결과를 비교 분석하였다. 이는, 실제 유도미사일 사출 발사용으로 제작한 전자기식 코일건 발사대에서의 고정자 코일 단일조립체 형상과 코일에 인가되는 입력 전류 사양을 반영하여 모사한 것이다 [8,9]. 수치해석 시뮬레이션은 상용 전자기해석 프로그램인인 MagNET을 이용하여 솔레노이드 코일을 2차원 축대칭으로 모델링 한 후 코일의 설계 인자 및 재질특성, 공기 영역에서

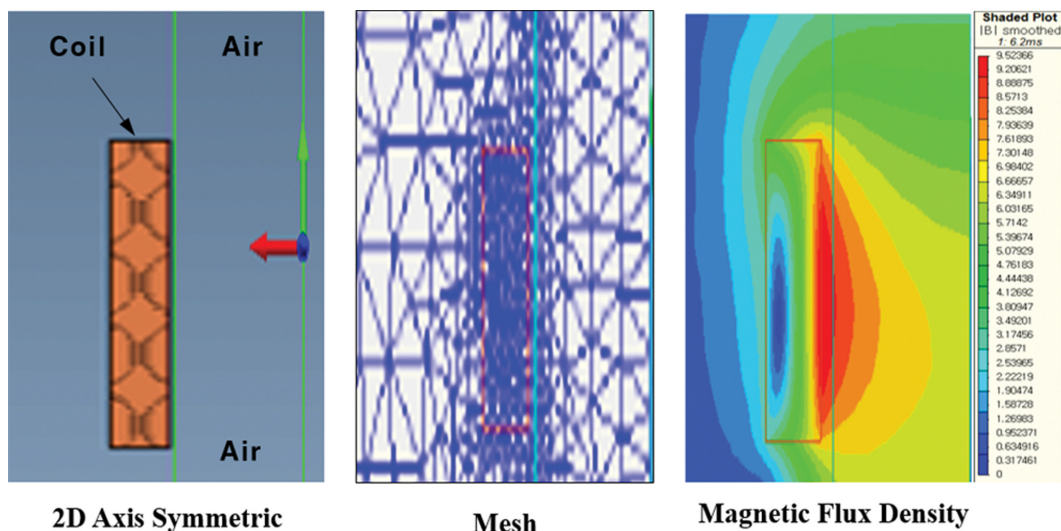


Fig. 6. (Color online) Results for numerical analysis and 2D axisymmetric modeling of the coil.



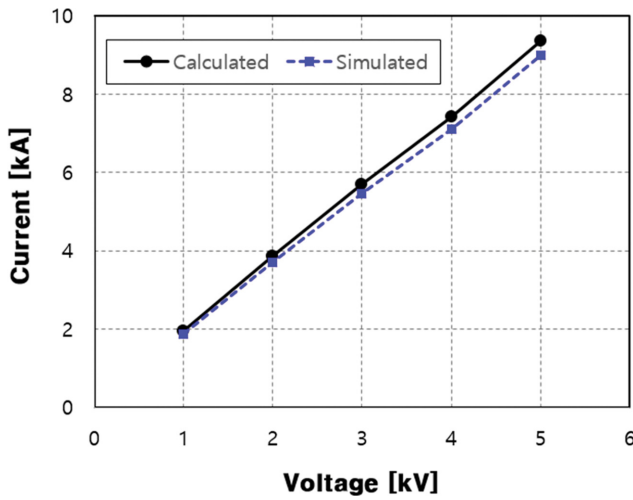


Fig. 7. (Color online) The magnitude of current on the coil with respect to the input voltage.

의 경계조건을 설정하여 해석을 수행하였다. Fig. 6은 전자기 유한요소해석을 위해 정전압원 해석 기반의 코일 2차원 축대칭 모델링 결과와 요소분할도, 코일 내부의 자속밀도 분포 결과를 나타낸다.

Fig. 7은 다층 권선형 솔레노이드 코일에서 인가 전압에 따라 발생하는 코일 전류의 크기 변화를 나타낸다. 코일에 흐

르는 전류 값은 식(3)을 이용하여 계산한 결과와 수치해석 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 고정자 코일의 입력 전압은 실제 전원장치의 동작 조건을 모사하여 1 kV부터 5 kV 크기의 전압이 60 Hz로 인가되도록 설정하였다. 해석 결과, 코일의 저항이 작아 코일에 흐르는 전류는 5 kV 전압 인가 시 최대 9 kA까지 흐르고 것을 확인하였고, 수학적 식으로부터 계산한 결과와 시뮬레이션 결과의 오차범위는 5% 이내를 만족하였다.

2장에서는 다층 권선된 솔레노이드 코일에 작용하는 팽창력의 크기가 코일 전류의 크기 및 코일 권선 수의 제공에 비례하고, 코일 내부 평균 반지름의 길이에 비례하는 동시에 코일 내부 물질의 투자율에 비례하며 솔레노이드의 축방향 길이에 반비례하는 결과를 도출하였다. 즉, 솔레노이드 코일에 작용하는 자기적인 팽창력은 코일 형상 인자와 코일에 흐르는 전류의 크기에 따라 지배적으로 결정되는 방정식임을 알 수 있었다.

Fig. 8은 전자기 유한요소해석 결과로부터 산출한 솔레노이드 코일 내부에서 발생하는 자기적인 팽창력의 크기와 분포를 나타낸다. 코일 내부 전류가 인가됨에 따라 코일의 반경방향으로 작용하는 팽창력은 뉴턴힘의 크기로 확인할 수 있고 전류값의 제공에 비례하는 비율로 산출되는 것을 확인할 수 있었다.

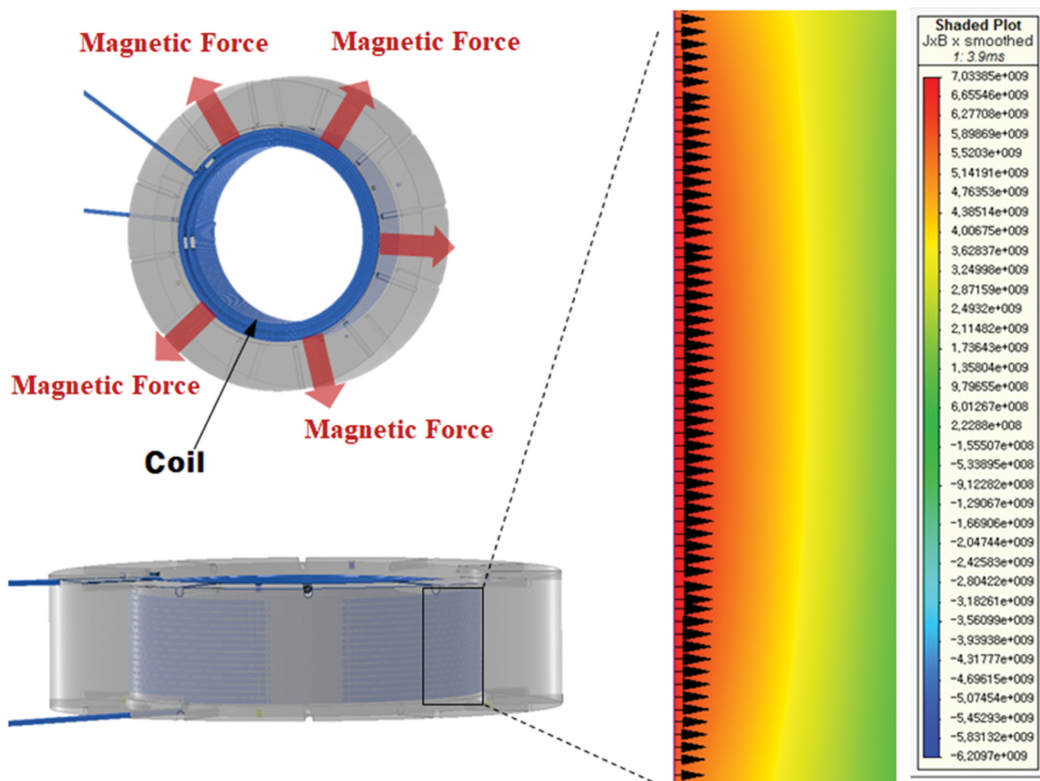


Fig. 8. (Color online) Analysis result of expansion force inside the coil assembly.

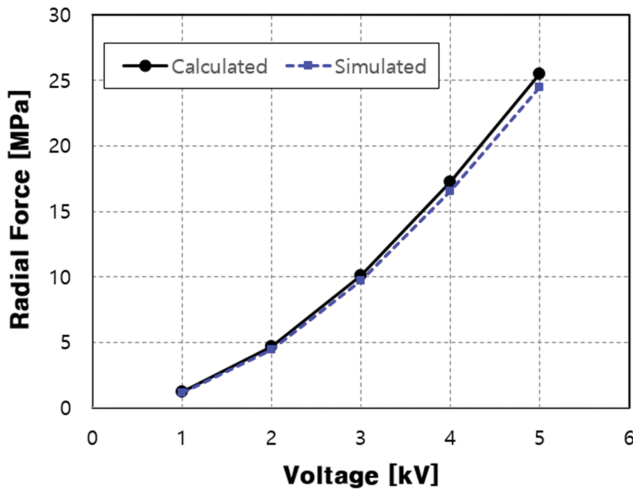


Fig. 9. (Color online) The magnitude of electromagnetic expansion force on the coil with respect to the input voltage.

Fig. 9는 2장에서 제안하였던 전자기적 팽창력 계산식인 식 (14)을 다층 권선형 솔레노이드 코일의 해석 모델에 적용하여 계산한 팽창력 해석 결과와 전자기 유한요소해석 시뮬레이션 후처리 결과 데이터를 비교한 도표를 나타낸다. 본 논문에서는 솔레노이드 코일을 지지하는 고정 구조물 덮개는 코일 최외각 권선 층 부분과 면 접촉된 상태라고 가정하였고, 전자기적인 팽창력의 크기를 코일 구조물 덮개에 작용하는 단위 면적 당 힘의 크기로 환산하여 전자기적인 팽창력의 크기를 분석하였다. Fig. 9의 비교 결과로부터, 수학적 모델식을 이용한 해석 결과는 유한요소법을 이용한 시뮬레이션 해석값과 5% 이내의 오차범위로 유사하게 나오는 것을 검증하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 다층 권선된 솔레노이드 코일에서 발생하는 자기적인 팽창력에 대한 수학적 모델식을 산출하였다. 솔레노이드 코일에서 반경 방향으로 작용하는 자기적인 팽창력은 권선된 코일의 형상구조 인자와 전류의 크기 값의 함수로 간략하게 표현할 수 있었고, 이로부터 코일 고정형 구조물에 작용하는 물리적인 반력을 분석하는 과정과 간략화 계산 방법을 구체화 하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 수학적 모델식은 유한요소법을 이용한 전자기 수치해석 시뮬레이션 해석 결과를 통해 그 유효성을 검증하였다.

#### References

- [1] T. H. Fawzi and P. E. Burke, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. **PAS-97**, 464 (1978).
- [2] S. I. Babic and C. Akyel, IEEE Trans. Magn. **44**, 445 (2008).
- [3] S. I. Babic and C. Akyel, IEEE Trans. Magn. **49**, 860 (2013).
- [4] Y. Cheng and Y. Shu, IEEE Trans. Magn. **50**, 7026806 (2014).
- [5] Z. J. Wang and Y. Ren, IEEE Trans. Applied Superconductivity **24**, 4901505 (2014).
- [6] J. H. Kim, B. B. Kim, J. H. Kang, and K. W. Kim, IEEE Magn. Letters **8**, 6506705 (2017).
- [7] J. A. Andrews and J. R. Devine, IEEE Trans. Magn. **27**, 639 (1991).
- [8] M. G. Song, Y. L. Lee, H. M. Kim, D. V. Le, B. S. Go, M. W. Park, and I. K. Yu, IEEE Trans. Plasma Science **47**, 2438 (2019).
- [9] B. S. Go, D. V. Le, M. G. Song, M. W. Park, and I. K. Yu, IEEE Trans. Plasma Science **47**, 2452 (2019).