

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 IX

## V-groove 를 가진 모재에서 코일 형상에 따른 유도가열 해석

### Analysis of Induction Heating according to Coil Shapes on the V-groove Weld Joint

안수덕<sup>1</sup>, 조영태<sup>1,✉</sup>, 정윤교<sup>1</sup>  
Soo Deok Ahn<sup>1</sup>, Young Tae Cho<sup>1,✉</sup>, and Yoon Gyo Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)  
✉ Corresponding author: ytcho@changwon.ac.kr, Tel: +82-10-5228-8912

Manuscript received: 2014.12.8 / Revised: 2015.1.11 / Accepted: 2015.1.23

*In order to prevent crack in thick weld zones, the preheating process such as induction and gas torch heating needs to be applied. Among them induction heating is the most effective heat source because it has rare thermal effect and very rapid heating characteristics. In this paper, when the induction heating method is used to improve arc welding, the temperature distribution and magnetic field density of the welding zones are analyzed by simultaneously solving heat transfer and electromagnetic field equation. In particular, cone and flat type coils are designed and induction heating effects of each type are compared to identify heating characteristics on a V-groove weld joint. As a result, a cone shape coil is more efficient in the preheating process. When induction heating and arc welding system is designed for thick plate with V-groove weld joint, the results in this paper could be applied.*

Key Words: Induction heating (유도가열), V-groove welding (V형 개선용접), Temperature distribution (온도분포), FE analysis (유한요소해석)

#### 기호설명

D: Electric flux density  
H: Magnetic field  
J: Current density  
A: Vector potential  
 $\epsilon$ : Dielectric constant  
 $\mu$ : Permeability  
 $\sigma$ : Electric conductivity  
 $\omega$ : frequency  
 $\rho$ : density

#### 1. 서론

두꺼운 모재를 용접하는 경우 용접부의 냉각 속도가 빠르고, 용접 부에 수축 균열이 생기기 쉽기 때문에 이를 방지하기 위해 예열을 실시하는 것이 필요하다. 산업에 널리 사용되는 예열의 방식으로는 가스 토치 등을 이용한 화염 예열법과 유도가열을 통한 예열법 등이 있다. 그 중 유도코일을 이용한 유도가열 방식은 산업의 다양한 분야에 적용되고 있다. 이러한 방식은 단순한 장비 구조로 인해 휴대성이 높아 설치 및 용접장소의

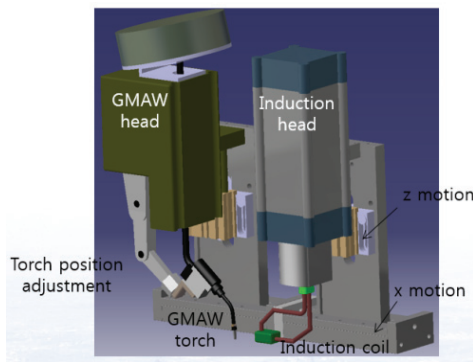


Fig. 1 Induction preheating system with GMAW

제한이 적으며 적절한 제어를 통해 용접부 표면으로 가열 부위를 제한할 수 있어 열영향부를 최소화 할 수 있을 뿐만 아니라, 용접 자세에 대한 제한을 받지 않기 때문에 로봇을 이용한 용접 자동화에 쉽게 적용될 수 있다는 장점이 있다.<sup>1,2</sup> 이에 유도가열은 용접에서 예열 및 후열을 하기 위한 보조열원으로 사용되고 있으며 후판 용접에서는 GMAW나 FCAW와 조합하여 사용되기도 하고 laser와 조합하여 추가적인 가열 수단으로 사용되기도 한다.<sup>3</sup> 그러나 현재까지는 용접부의 형상에 따라 적절한 형태의 유도가열 장치를 설계한 사례가 없으며 특히 후판 용접을 위해 V형태의 groove를 낸 후 다층 용접을 실시할 때 초기에 루트 부의 예열이 필요한 경우 groove의 형상에 맞는 새로운 형태의 유도 코일 설계가 요구된다. 본 논문에서는 생산성 향상 및 품질 향상을 위해 유도가열을 기반으로 한 예열 방식을 적용할 때 용접부 형상에 따른 적절한 코일 형상을 제안하고 자기장 분포 해석 결과를 이용하여 아크 용접과 함께 사용하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

Fig. 1은 유도 가열 조합 용접 시스템의 개략도로서 GMAW와 유도 가열 코일을 동시에 사용할 때의 구조를 보여주고 있다. 직선 모터의 구동을 통해 GMAW 토치와 유도 가열 코일 사이의 거리 및 높이를 조절하여 적절한 유도 가열 코일의 위치를 결정해야 한다. 본 논문에서는 전자기장 해석과 열전달 해석을 동시에 수행할 수 있는 COMSOL Multiphysics 프로그램을 사용하여 V-groove상에서 유도 코일에 의한 유도가열 현상을 시뮬레이션 하였다. 후판의 V-groove 용접을 하는 경우에 결함을 최소화 하기 위해서는 루트 부의 확실한 열 입력이 필요하다. 따라서 루트 부와 형

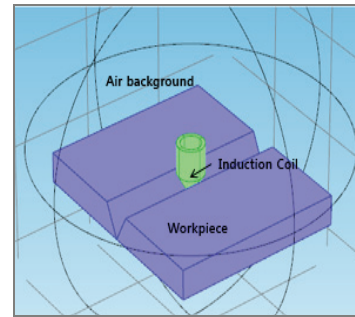


Fig. 2 Analysis model for induction heating on V-groove of thick AISI4340 steel

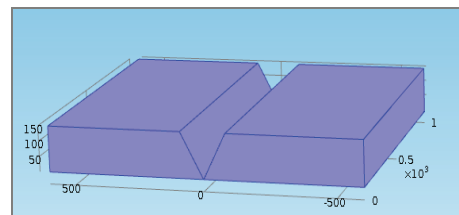


Fig. 3 Work piece design with V-groove shape

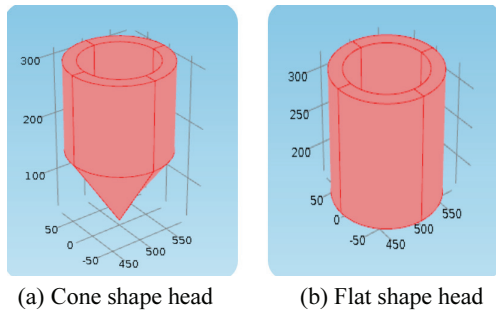
Table 1 Properties of AISI4340 steel

Property	Value	Unit
Electrical conductivity	$4.03 \times 10^6$	S/m
Heat capacity at constant pressure	475	J/(kg·K)
Density	7850	kg/m <sup>3</sup>
Thermal conductivity	44.5	W/(m·K)

상이 유사한 Cone 형 코일을 고안하고 Flat 형 코일과 비교를 통해 V-groove에서 루트 부 예열효과를 파악하고 적절한 코일형상을 제안하였다.

## 2. 해석 모델

Fig. 2는 V-groove 상에 유도코일이 놓여 있는 형상을 모델링 한 것으로 크게 코일, 모재, 주변 공기 영역으로 구성된다.<sup>4</sup> 모재는 일반적으로 선박, 해양 구조물 등 중공업 분야에 널리 사용되고 있는 극후판에 대한 해석을 위해 150 mm의 두꺼운 후판으로 모델링 하였다. 또한 해석에 사용된 강재는 기계 구조물, 해양 구조물에 주로 사용되며 유도가열 특성이 우수한 AISI4340으로 선정하였다. AISI4340에 대한 물성 값은 Table 1과 같다. V-groove의 개선 각은 60도로 선정하였으며 루트 갭이 없는 형태로 Fig. 3에 해석에 사용된 모재의 두



(a) Cone shape head (b) Flat shape head

Fig. 4 Types of coil head shape

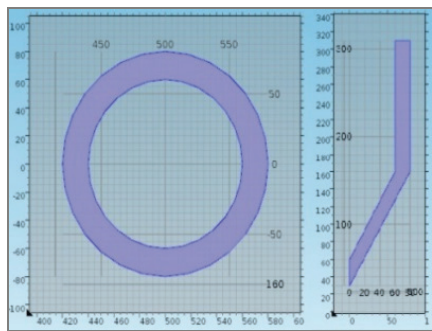


Fig. 5 Cross section of cone shape coil

계와 V-groove를 보여주고 있다.

본 해석에서는 가열 특성을 향상 시키고자 Cone 형태의 코일을 제안하였으며 기존의 Flat 형 코일과의 비교를 위해 Fig. 4와 같이 Cone 형 유도 가열 헤드와 Flat 형 유도 가열 헤드를 동시에 모델링 하였다. Fig. 5는 해석 프로그램 상에서 Cone 형 코일을 모델링한 도면으로 재료는 전기전도도가 높은 구리를 사용하였으며 Cone의 각도는 V-groove의 각도와 동일하게 하였다.

### 3. 해석 방법

#### 3.1 지배 방정식

전자기장 해석을 위한 수학적 모델링은 Maxwell 방정식의 Ampere's 법칙에 기초한다.<sup>5</sup>

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

변위 전류 밀도가 전도 전류 밀도에 비해 매우 작으며 선형 등방성 매질인 경우  $B, H, J, D, E$ 에 대한 선형 관계식을 사용할 수 있으며 일정한 자

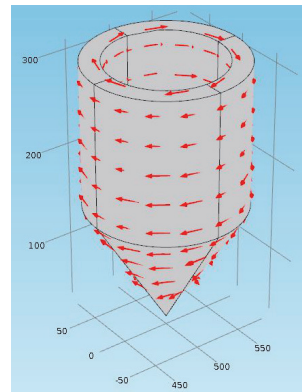


Fig. 6 Boundary condition of current flow by specifying clock wise direction

기 투과성을 고려할 때 다음과 같은 전자기장 해석을 위한 지배 방정식을 사용할 수 있다.<sup>5,6</sup>

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + J - j\omega \sigma \hat{A} = 0 \quad (2)$$

본 논문에서 열전달 문제는 열전도 방정식만을 고려하였으며 지배 방정식은 다음의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>7</sup>

$$k(\nabla^2 T) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 열전도도,  $q'$ 는 단위 시간당 유도 전류에 의해 유도되는 열속이며  $C_p$ 는 정압 열용량이다.

#### 3.2 해석 조건

유도가열 해석은 유도코일에 대한 전자기장 해석, 용접부의 열전달 해석, 전자기장 해석과 열전달 해석을 커플링 해주는 다중 물리해석의 세 단계 과정으로 진행된다.<sup>8</sup> 전자기장 해석은 교류전류를 고려한 주파수 영역에서 실시 되었으며 열전달 해석은 시간 영역에서 실시 되었다.

전자기장 해석을 위해 먼저 코일 내부에 흐르는 전류의 방향을 Fig. 6과 같이 시계 방향으로 설정하였고 코일의 종류는 구리선을 여러 번 감은 형태로 설정하였다.<sup>9</sup>

열전달 해석의 주요 조건으로 V-groove 및 코일의 초기 온도를 상온으로 정하였고 주변에서 공기의 흐름으로 인한 열손실은 고려하지 않았다. 유도 코일의 유도 전류에 의해 모재에서 열이 발

생한 후 전도에 의해 열전달이 일어나는 현상만을 고려하여 해석을 진행하였다.<sup>9</sup>

유도 가열 공정의 주요 변수는 전류의 세기와 주파수의 크기이다. 이 값에 따라 모재의 온도 분포 및 자기장 분포가 달라진다. Flat 형 코일과 Cone 형태의 코일을 비교하기 위해 본 연구에서 전류는 1.0 kA, 주파수는 2.5 kHz로 선정하였으며 코일의 감은 회수는 100회로 고정하였고 시간은 5 초로 하였다. 이 값은 유도 가열을 보조 열원으로 사용하는 선행 연구의 결과를 참조하였다.<sup>3</sup>

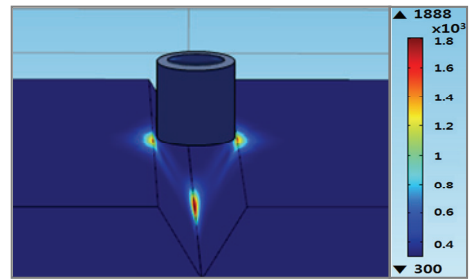
4. 해석 결과

좀 더 가열에 효율적인 코일의 형태를 찾기 위해 두 코일 형태에 따른 온도 분포 결과를 비교하였으며 아크 플라즈마와 동시에 사용되는 것을 고려하기 위해 자기장 분포 해석 결과를 검토하였다.

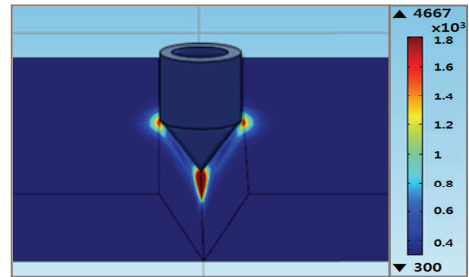
4.1 온도 분포

Fig. 7(a), (b)는 입력 전류 및 주파수가 각각 1.0 kA, 2.5 kHz 일 때 Flat 형 코일과 Cone 형 코일 각각에 대해 유도가열 해석 후 V-groove 상에 나타난 온도 분포 결과를 보여주고 있다. 각 그림에 나타나 있는 온도 분포는 상온 근처인 300 K에서부터 AISI steel의 용융점 근처인 1800 K까지를 기준으로 표현하였다. 해석 결과 두 코일 모두 용융점 이상으로 온도를 상승 시킬 수 있었으나 Flat 형 코일로 가열하였을 때 루트 부의 최고온도는 1,880 K이었으며 Cone 형 코일로 가열하였을 때 루트부의 최고온도는 4,660 K로 Flat 형 코일보다 매우 높은 온도로 가열이 됨을 알 수 있다. 실제로는 용융점 이상이 되는 경우 액체 상태로 상변화가 일어나기 때문에 용융 상태의 유동 해석이 필요하지만 Flat 형 코일과 Cone 형 코일의 가열 효율에 대한 비교를 하는 것이 목적이므로 해석의 용이성을 위해 액체 상태로 변화하는 것은 고려하지 않았다.

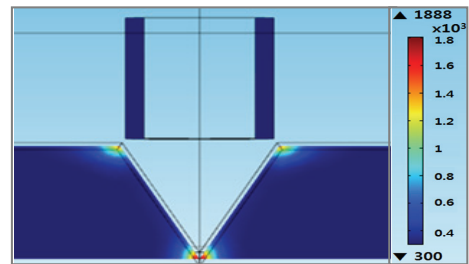
Fig. 7(c), (d)에는 코일의 중심이 위치한 단면의 온도 분포를 나타내었는데 Flat 형 코일보다 Cone 형 코일에서 용융점 이상되는 V-groove 루트 부의 영역이 훨씬 넓음을 알 수 있다. 두 코일 형상에 대해 루트 부 가열에 대한 효과를 확인하기 위해 전류와 주파수를 변화시켰을 때 유도 가열에 의한 루트 부의 최고 온도를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 두 코일 형상 모두 전류 세기와 주파수의



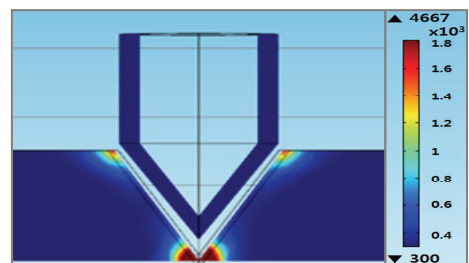
(a) Flat shape coil



(b) Cone shape coil



(c) Cross section of flat shape coil



(d) Cross section of cone shape coil

Fig. 7 Temperature distribution of each coil shape (Input current and frequency: 1 kA, 2.5 kHz)

증가에 따라 점차적인 온도 상승을 보여주는데 Cone 형 코일을 사용하여 가열하게 되면 모든 전류, 주파수 조건에서 루트 부 가열 효과가 Flat 형 코일을 통한 가열보다 더 우수함을 알 수 있다. 이러한 해석 결과를 통해 V-groove 상에서 루트 부 가열을 좀 더 효율적으로 하기 위해서는 코일

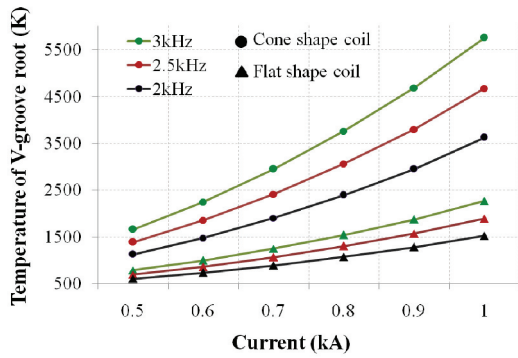


Fig. 8 Maximum temperature of root area of V-groove weld joint according to current variation

의 형상을 groove의 형상과 유사하게 가져가는 것이 용접부 예열을 위해 좀 더 효과적이라고 할 수 있다.

### 4.2 자기장 분포

유도 가열 코일에 의해 생성된 자기장은 GTAW, GMAW 등에서 발생하는 아크 플라즈마에 영향을 주게 된다.<sup>11</sup> 대표적인 현상으로 아크 편향이 있으며 이러한 현상이 발생하게 되면 아크의 위치와 거동이 변화하여 용접 품질에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 아크와 유도 코일과의 거리와 코일에서 방출하는 자기장의 세기 분포를 파악할 필요가 있다.

Fig. 9는 V-groove에서 1.0 kA의 전류와 2.5 kHz 주파수 조건일 때 Cone 형 코일과의 거리에 따른 자기장 세기의 변화를 보여준다. 코일 표면으로부터 거리가 10 mm 이내인 경우 약 0.32 T의 일정한 자기장이 형성되며 10 mm에서 30 mm사이에는 0.27 T 이상의 자기장이 형성됨을 알 수 있다. 이후 코일로부터 거리가 멀어질수록 자기장의 세기는 점점 낮아져 75 mm 부근에서 0.13 T가 형성된다.

자기장의 세기는 전류 및 주파수의 크기에 따라 달라지므로 값 자체 보다는 분포 경향을 확인하여 유효한 거리를 확인하고자 하였다. Fig. 10은 코일과의 거리에 따른 자기장 세기의 최대값을 보여주고 있다. 코일과의 거리가 약 35 mm이내에서는 자기장 세기 값의 변화가 적고 그 이후 자기장의 세기가 크게 감소함을 알 수 있다. 결론적으로 아크 플라즈마에 자기장의 영향을 적게 주기 위해서는 아크로부터 유도 코일의 거리를 일정 거리 이상 떨어뜨리는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

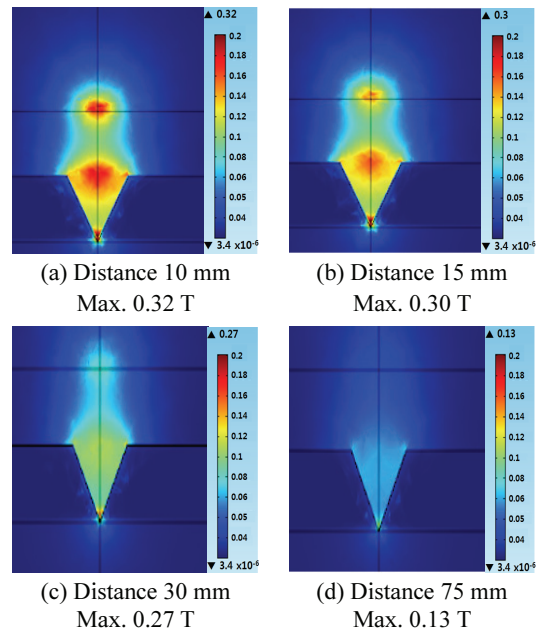


Fig. 9 Variation of magnetic field intensity distribution of the cone shape coil on the V-groove

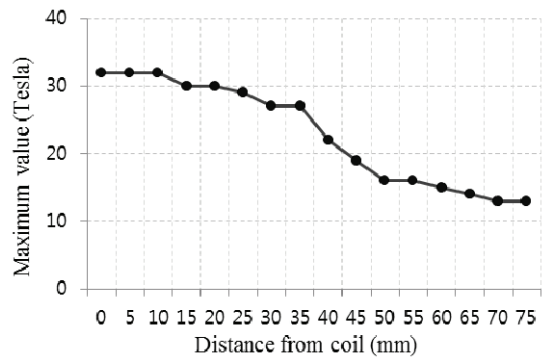


Fig. 10 Magnetic field intensity according to distance from coil

### 5. 결론

유도 가열 현상의 시뮬레이션을 위해 열전달 해석과 전자기장 해석을 동시에 수행하여 V-groove 상에서 유도 코일의 형상에 따른 모재의 온도 분포를 구하였으며 그 결과 Flat 형 코일 보다 Cone 형의 코일을 사용하게 되면 루트 부 가열에 좀 더 효과적임을 알 수 있었다.

또한 자기장 분포를 확인해 보면 일정 구간 이상에서 자기장 세기의 값이 감소하므로 아크 용접



시 예열을 위해 유도 가열을 실시할 경우 일정 거리 이상 두 열원 사이의 거리를 두어야 함을 해석적으로 보여 주었다.

본 논문에서는 향후 유도 가열법을 보조열원으로 하는 용접 시스템의 설계에 있어 V-groove에 Cone 형 코일을 사용하면 더 효과적인 가열을 할 수 있음을 알 수 있었다. 후관 용접에서는 크랙을 방지하기 위해 필수적인 예열 및 후열 처리 공정에 유도 가열 방식을 적용할 때 본 연구의 결과를 활용하면 용접 품질 및 생산성 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

본 논문의 기초적인 결과를 바탕으로 코일 형상의 최적화를 위해서는 코일이 고정되어 있지 않고 용접 속도에 따라 이동하게 되므로 이동 열원에 대한 해석이 요구되며 단순히 cone 형 코일 뿐만 아니라 썸기 형태를 포함한 다양한 형태의 코일에 대한 해석을 실시하여 보다 더 효과적인 코일 형상을 찾아내는 후속 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2014년~2015년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

또한 연구 진행에 있어 많은 도움을 주신 창원대학교 전기공학과 박민원 교수 및 최종호 연구원에게 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCES

1. Yang, Y. S., Bae, K. Y., and Shin, H. Y., "Effects of Inductor Shape in Steel Forming Process with High Frequency Induction Heating," J. of KWJS, Vol. 26, No. 4, pp. 76-76, 2008.
2. Bae, K. Y., Yang, Y. S., Hyun, C. M., Won, S. H., and Cho, K. Y., "Derivation of Simplified Formulas to Predict Deformations of Plate in Steel Forming Process with Induction Heating," J. of KWJS, Vol. 25, No. 4, pp. 58-64, 2007.
3. Stein, J. and Kalage, P., "Induction Assisted Welding Technologies in Steel Utilization," European Union, pp. 18-131, 2010.
4. COMSOL. INC, "Inductive Heating of a Steel Billet," <http://www.comsol.com/model/inductive-heating-of-a-steel-billet-330> (Accessed JAN. 23)
5. Park, M. H., Lee, S. S., Kang, H. B., Pack, I. S., Song, J. H., and Lee, D. U., "A Study on Analysis of Temperature of Target Material for Hardening in High Frequency Induction Heating," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 697-698, 2013.
6. Hayt, W. and Buck, J., "Engineering Electromagnetics 7<sup>th</sup>," McGraw-Hill Korea, pp. 319-340, 2012.
7. Cengel, Y. A., "Heat Transfer : A Practical Approach," McGraw-Hill Korea, pp. 113-280, 2009.
8. Park, K., Hwang, J. J., Kwon, O. K., and Yun, J. H., "Finite Element Analysis of Induction Heating Process for Development of Rapid Mold Heating System," Transactions of Materials Processing, Vol. 16, No. 2, pp. 113-119, 2007.
9. COMSOL. INC, "Single-turn and Multi-turn Coil Domains in 3D," <http://www.comsol.com/model/single-turn-and-multi-turn-coil-domains-in-3d-14067> (Accessed JAN. 23)
10. Choi, W. D., Ko, D. C., Min, G. S., Kim, B. M., and Choi, J. C., "Finite Element Analysis for Forming Process of Semi-Solid Material Considering Induction Heating," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 14, No. 8, pp. 82-91, 1997.
11. Reis, R. P., Scotti, A., Norrish, J., and Cuiuri D., "Investigation on Welding Arc Interruptions in the Presence of Magnetic Fields: Welding Current Influence," IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 40, No. 3, pp. 870-876, 2012.