

풍력발전용 링플랜지의 유도가열 해석 Analysis on Induction Heating of Ring Flange for Wind Power

윤동원*† · 박희창** · 이인철*** · 김상영*** · 박노경***

D. W. Yun*†, H. C. Park**, I. C. Lee***, S. Y. Kim*** and N. K. Park***

(접수일 : 2011년 12월 23일, 수정일 : 2012년 08월 05일, 채택확정 : 2012년 08월 07일)

Key Words : Induction Heating(유도가열), Ring Flange(링플랜지), Wind Power(풍력)

Abstract : This paper presents an analysis on the induction heating of ring flange for wind farm. Ring flange is used for the connection of poles when building a column of wind power plant. Heat treatment of ring flange with the diameter of Ø1,000mm has been considered. For analysis on the induction heating, FEA is used. Firstly, electromagnetic filed analysis was performed to get the induction current distribution on the steel, After that, heat transfer analysis was performed using the magnetic filed analysis results. for more precise analysis, some measurement for permeability has been performed and the measurement data was used during the analysis. From the analysis, we get the temperature distribution on the ring flange.

1. 서 론

유도가열이란 가열하고자하는 강관 외부에 유도코일을 감고 교류전류를 흘리면, 자속이 발생하고, 이 자속의 변화에 의해 와전류가 강관의 표면에 유도되면 전기 저항에 의해 열이 발생하게 된다.

이러한 유도가열 기술은 전기용융로, 금속표면열처리, 파이프 전기용접제작, 히팅롤, 인덕션쿠커 등 다양한 분야에서 활용범위가 확대되고 있다.

유도가열기술은 산업용 기기분야에서 사출금형의 국부가열을 위한 유도가열기에 대한 연구를 통해 금형의 가열효율을 증가시키는 연구가 진행되었으며¹⁾, 아연도금로용 정밀온도 제어를 위하여 유도가열 기술이 사용되었으며, 스위치간의 부드러운 전환을 통하여 시스템의 안정성을 확보하였다²⁾. 또한, 과열 증기를 생성하기 위한 수단으로써 유도가열기가 적용되었고³⁾, 균일 가열에 대한 연구가 진행되었으며, 코일의 분포와 온도균일도에 대한 관계가 연구되었다⁴⁾. 또한, 코일의 형상 및 크기에 따라서 피가열체의 변

형량에도 영향을 줄 수 있었다⁵⁾. 유도가열기에서는 교류자계를 생성시키는 것이 필수적인 요소이며, 이를 위해서는 인버터가 꼭 필요하다. 따라서, 보다 효율적이고, 성능이 좋은 인버터를 만들기 위한 연구도 많이 진행되어 왔다^{6)~10)}.

본 논문에서는 풍력 발전 설비의 지지구조물에 사용되는 링플랜지(Ring flange) 개발을 위한 유도가열 열처리 방법에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 유한요소법을 이용하여 전자장 해석을 수행하였으며, 전자장 해석을 통해 구해진 유도전류를 이용하여 열전달 해석을 수행함으로써, 유도가열기의 가열 성능을 비교분석하였다.

2. 링플랜지 소재에 대한 전자기적 물성치 분석

외경 Ø1,000mm인 링플랜지의 유도가열 해석을 위한 유도 전류 발생에 대한 해석과 발생한 유도전류에 의한 부재내의 열전달 현상에 대한 해석을 수행

*† 윤동원(교신저자) : 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실

E-mail : dwyun@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7769

**박희창 : 한국기계연구원 로봇 메카트로닉스 연구실

***이인철, 김상영, 박노경 : 진성 C&I 기술연구소

*† D. W. Yun(corresponding author) : Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Marterials. E-mail : dwyun@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7769

**H. C. Park : Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Marterials.

*** I. C. Lee, S. Y. Kim, N. K. Park : JinSung C&I Co. Ltd.

하였다. 이를 위하여, 유한요소법을 사용하여 해석을 수행하기로 하였으며, 상용 소프트웨어인 Maxwell 2D/3D를 사용하기로 하였다. 그리고, e-Physics와의 연성 해석을 통하여 발생하는 유도전류에 의한 피가열체에서의 열발생과 열전달에 대해서 해석을 수행해 보았다.

보다 정확한 해석을 위해서는 피가열체의 전자기적인 물성치를 정확히 측정하는 것이 중요하다. 본 연구에서 유도가열의 피가열체인 링플랜지의 재질로 SCM440가 사용되었다. 정확한 해석을 위해서는 SCM440에 대한 정확한 전자기적 특성을 아는 것이 중요하다. 유도가열에서 중요한 물성치는 피가열체의 BH curve 특성이나 투자율 등의 특성이 중요하다. 물질의 투자율 또는 BH 특성은 물질의 종류, 열처리 방법, 형상 등에 의해 각기 다른 값을 가질 수 있다. 기존의 전자기기를 연구하는 논문에서는 이러한 투자율을 선형으로 가정하여 해석하는 경우가 많다^{11)~13)}. 이러한 가정은 자속의 포화가 일어나지 않는 구조에서는 어느 정도 정확성을 가지나, 자속의 포화를 무시하지 못하는 시스템에서는 해석결과에 에러를 발생시키게 된다. 따라서, 본 연구에서는 보다 정확한 해석을 위하여 BH 분석기(BH analyzer)를 이용하여 재질의 전자기적 물성치를 측정하여 해석을 수행하기로 하였다.

측정을 위해서 사용된 측정기기는 일본의 IWATSU사에서 제작한 BH 분석기인 SY-8258을 사용하였으며, Fig. 1에 보여지고 있다.



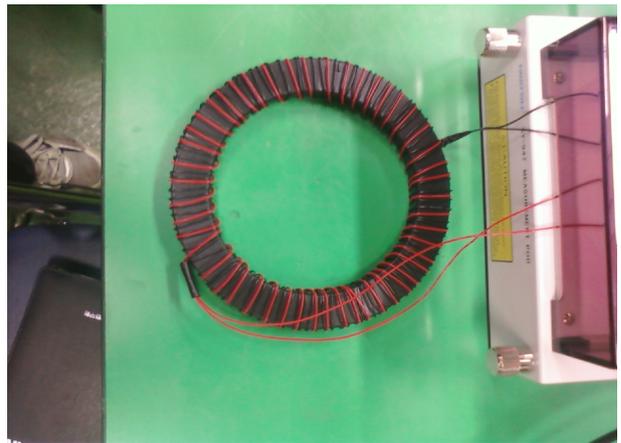
Fig. 1 BH analyzer (SY-8258)

BH 분석기를 이용하여 시편의 전자기적 특성을 측정하기 위해서는 시편을 링타입으로 만들어서 1차측 코일과 2차측 코일을 감은 로랜드링(Roland ring)이라는 시편을 제작하여야 한다. 이를 위해서 본 연구에서 피가열체 재질로 선택된 SCM440을 외경 150mm, 내경 110mm, 두께 10mm의 링으로

만들어 시편을 제작하였으며, 실제 형상이 Fig. 2에 나타나 있다. 1차측 턴수는 100턴, 2차측 턴수는 50턴으로 제작하였다. Table 1에 시편의 사양이 나타나 있으며, 실험을 위한 장치의 모습이 Fig. 3에 있다.



(a) Manufactured specimen



(b) Wounded specimen

Fig. 2 Specimen for measurement

Table 1 Specification of specimen

Material	SCM440	
Inner radius	109.68mm	
Outer radius	147.2mm	
Thickness	10mm	
Mass	586.5g	
Turns	1st	100
	2nd	50

실험은 최대 입력 자계강도가 1200A/m일 때로 가정하여 실험을 수행하였으며, 가진주파수는 500Hz,

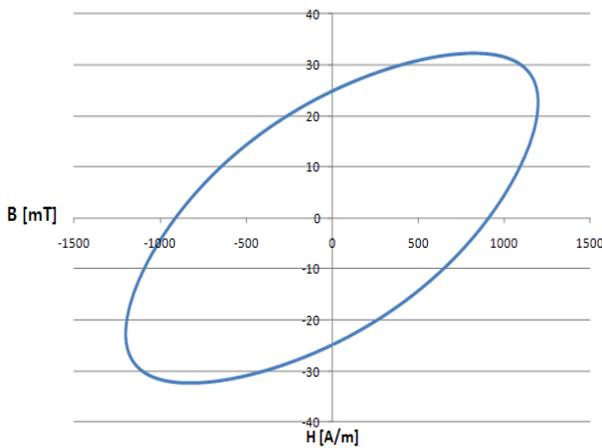


Fig. 3 Experimental set for measuring BH curve

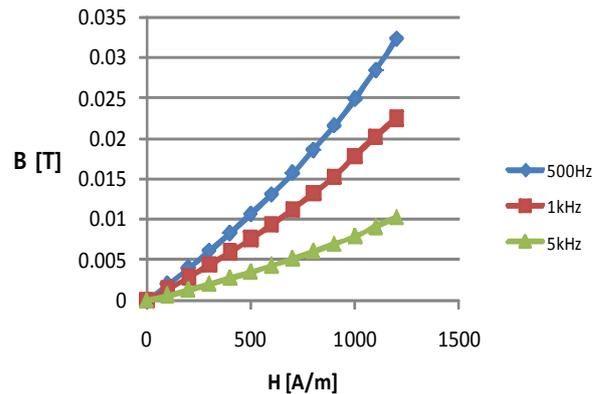
1kHz, 5kHz의 세가지 경우에 대해서 실험을 수행해 보았다. 유한요소법 해석시에는 각각의 주파수에서의 감자(Demagnetization) 곡선이 필요하므로, 각각의 주파수에서 자계강도의 최대값을 100~1200A/m까지 100A/m의 간격으로 측정을 하여 각각의 주파수에 대한 감자곡선을 구해보았으며, 그 중 최대 자계강도가 1200A/m이고, 가진 주파수가 500Hz일때와 5kHz일 때 BH 곡선의 측정치의 일례가 Fig. 4에 나타나 있다.

Table 2 Averaged relative permeability at each frequency

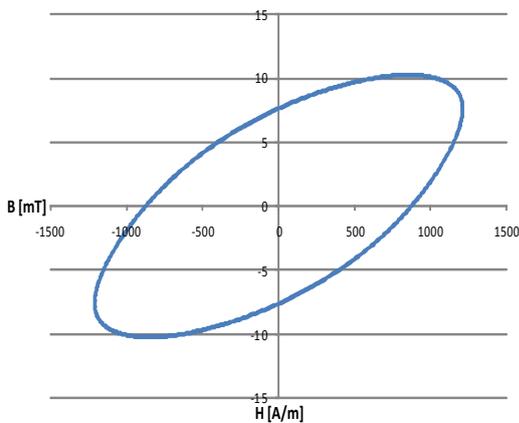
Frequency (Hz)	Relative permeability (μ_r)
500Hz	21.43
1kHz	14.93
5kHz	6.78



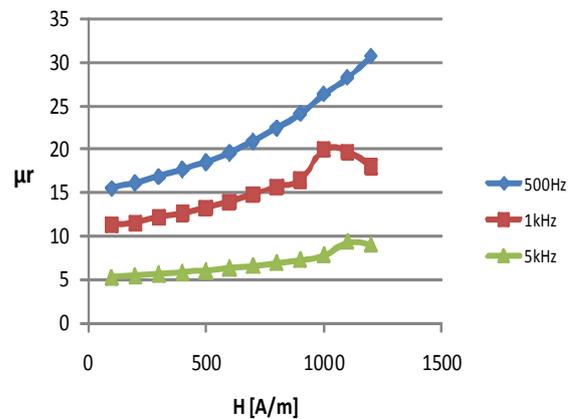
(a) 500Hz



(a) Demagnetization curve



(b) 5kHz



(b) Relative permeability

Fig. 4 BH curve (At maximum magnetic field of 1200A/m)

Fig. 5 BH curve (At maximum magnetic field of 1200A/m)

Fig. 4를 이용하여 재료의 비투자율을 구해보았으며, 그 결과가 Fig. 5에 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이 SCM440의 투자율은 각 주파수에 따라 다른 값을 가짐을 알 수 있었다. Fig. 5(b)에서 투자율의 값이 1000A/m 근방을 지나면서 구부러지는 양상을 보이는데, 이는 자계강도의 세기가 세지면서 재료 내부에서 발생하는 자속포화에 의해 투자율이 감소하기 때문에 나타나는 현상이다. Maxwell에서 와전류 해석시에는 비투자율을 상수라 가정하고 계산하므로, 각 주파수에서의 실험값의 평균을 구하여 해석에 사용하기로 하였으며, 각 주파수에서 비투자율의 평균값이 Table 2에 나타나 있다.

3. 링플랜지 유도가열에 대한 해석

본 절에서는 외경이 $\varnothing 1,000\text{mm}$ 크기의 링플랜지의 유도가열에 대한 연구를 수행해 보았다. 해석을 위한 조건으로써 인가 주파수 1kHz, 출력 1200kW 용량의 유도코일에 대한 해석을 수행해 보았다.

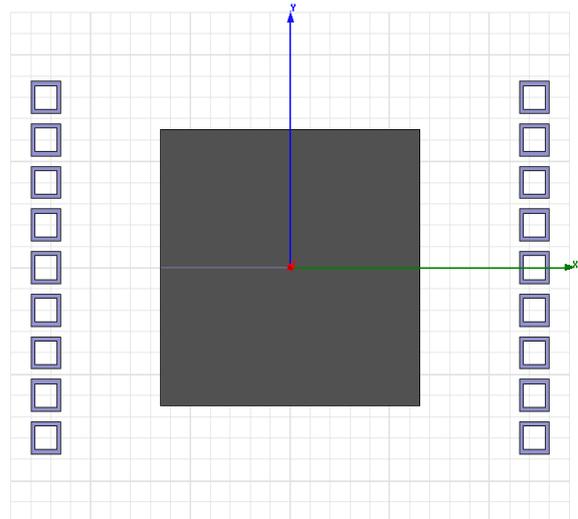
본 연구에서 사용되는 유도코일은 공정 중, 열에 의한 손상을 방지하기 위해 코일의 중앙에 냉각수를 흘려주게 된다. 따라서, 코일의 두께에 따른 성능 변화에 대한 2D 전자장 유도현상에 대한 해석을 수행해 보았다. Fig. 6(a)에 해석을 위해 만들어진 Maxwell 2D 모델을 보여주고 있으며, 해석을 위해서 침투깊이(skin depth)를 고려하여 만들어진 메쉬의 형상이 Fig. 6(b)에 나타나 있다.

각각의 재료는 코일은 구리, 링플랜지 부분은 SCM440 이라 하였으며, 인가주파수가 1kHz이므로, 비투자율은 Table 2에 따라 14.93이라 가정하였다.

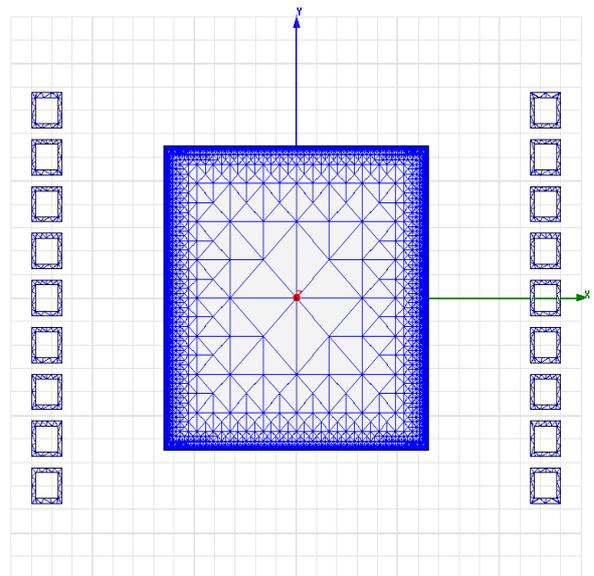
Fig. 7에 전자장 해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 교류자장에 의해 피가열체 내부에 발생하는 유도전류 밀도 분포를 나타내며, Fig. 7(b)는 교류자장에 의한 자속선의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 침투깊이 부근에서 유도전류가 발생하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 코일의 두께에 따른 전자장 해석을 수행해 보고, 코일의 두께의 영향을 살펴보기로 하였다. 코일의 단면은 가로*세로 = 15mm*15mm이며, 냉각수를위해 얇은 판(shell) 형태의 형상을 지닌다. 이때, 얇은 판의 두께를 1.5 ~ 3.5mm까지 0.5mm씩 변할 때, 피가열체의 중심을 따라 생성되는 유도전류의 차이를 살펴보았으며, 그 결과가 Fig. 8(a)에 나타나 있다. Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이 두께에 따른 유도전

류 밀도의 변화는 크게 나타나지 않았으며, 보다 상세히 고찰하기 위해서 Fig. 8(a)의 점선안을 확대한 것이 Fig. 8(b)이다. 확대한 결과 Fig. 8(b)와 같이 각각의 두께에 따라 약간의 차이는 있으나 거의 무시할 수 있을 정도임을 알 수 있었다. 따라서, 주어진 코일의 단면에서 코일의 두께는 냉각수의 유량 등을 고려하여 정하면 됨을 알 수 있었으며, 본 연구에서는 두께를 2mm로 하였다.



(a) Maxwell 2D model

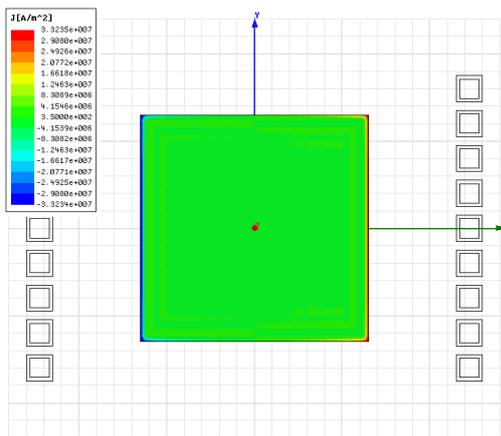


(b) 2D mesh

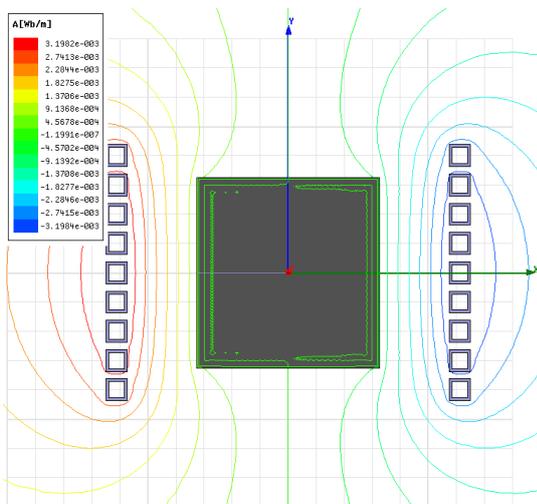
Fig. 6 2D FE model

다음으로 정해진 코일의 두께를 가지는 유도코일에 대한 3D 전자장 해석을 수행해 보았다. Fig. 9에 링플랜지 유도코일의 3D 형상이 나타나 있다. 이를 그대로 해석하게 되면, 코일의 형상이 복잡하고, 전

체 크기도 큰 모델이라 해석이 수행되지 않는다. 실제로, 14G 메모리 용량을 가지는 64비트 서버급 컴퓨터에서 해석이 되지 않음을 확인하였다. 따라서, 해석을 위한 유도코일의 모델을 Fig. 10과 같이 만들었으며, 이 때, 코일의 턴수는 전류의 인가치에 반영하였다. 실제로, 대부분의 Maxwell을 이용한 전기기기 해석시에는 각각의 코일 턴을 Fig. 9와 같이 모사하지는 않으며, Fig. 10같이 하나의 전체적인 코일로 형상화하고, 전류 인가시에 턴수를 고려한다. 해석시의 조건은 2D 해석의 조건과 같이 인가 주파수 1kHz, 출력 1200kW 이라고 가정하였으며, 피가열체의 재질은 SCM440, 코일의 재질은 구리라 가정하였다. 피가열체인 Ring flange의 사이즈는 외경이 1000mm이며, 단면은 case 1: 100mm*100mm case 2: 130mm*130mm의 2가지 경우에 대해서 해석해 보았다.

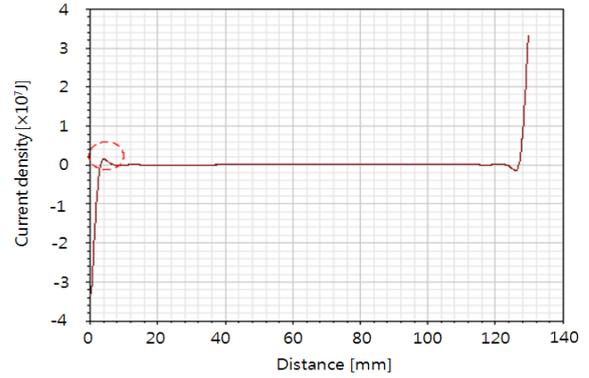


(a) Induction current distribution

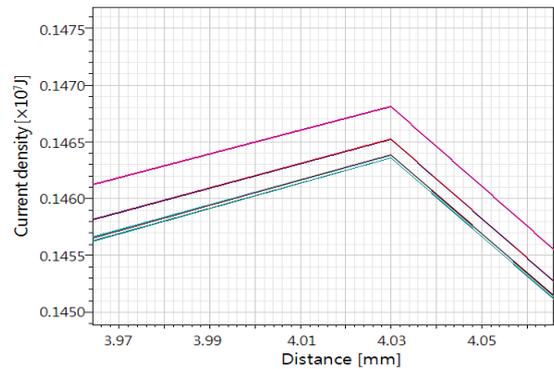


(b) Flux line distribution

Fig. 7 FEA results



(a) Induction current density



(b) Zoom of circle

Fig. 8 Induction current w.r.t coil thickness

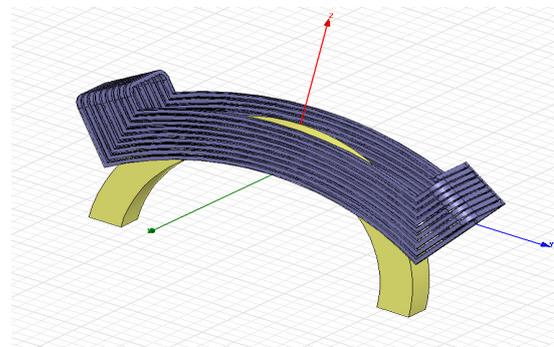


Fig. 9 3D model for ring flange induction analysis

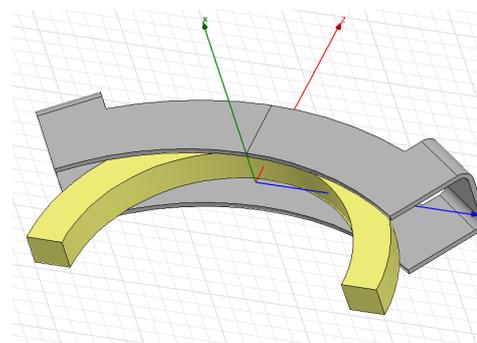


Fig. 10 Modified model for ring flange induction analysis

Fig. 11에 유도전류밀도에 대한 해석 결과가 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유도전류밀도의 최대값이 case 1의 경우 3.74×10^7 J, case 2의 경우 3.96×10^7 J로써, case 2의 경우 약간 더 높음을 알 수 있었다. 이는 case 2의 경우 case 1에 비해 두께가 더 두꺼워 코일과 피가열체 사이의 공극이 작기 때문일 것이다.

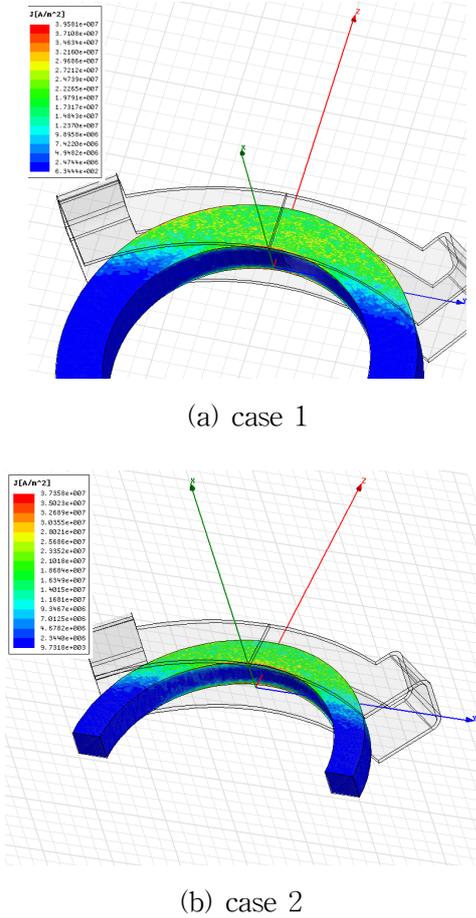


Fig. 11 Electromagnetic analysis for induction heating

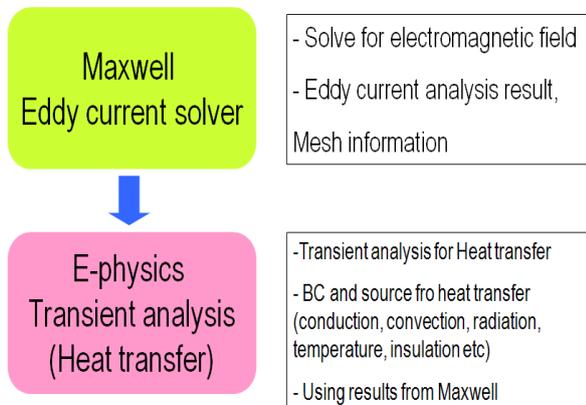


Fig. 12 Procedure for electromagnetic-thermal coupled analysis

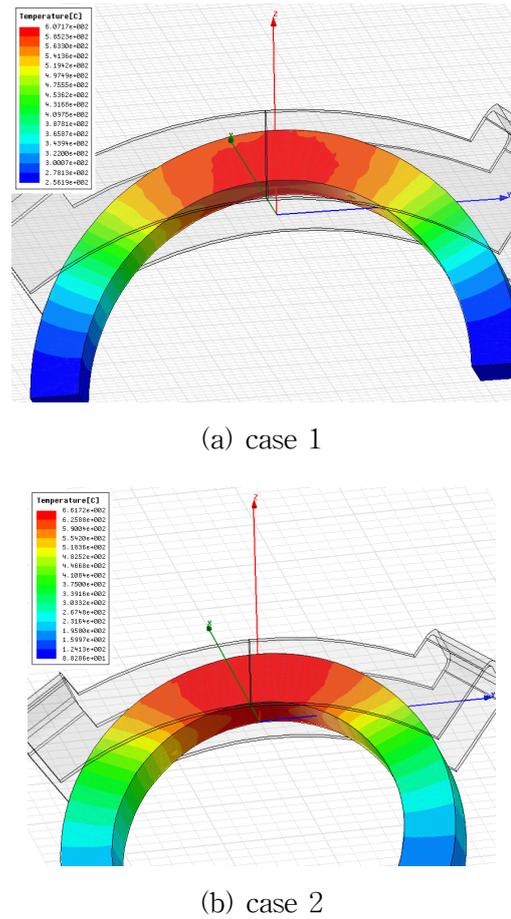


Fig. 13 Analysis results for heat transfer

다음으로, 발생하는 유도전류에 의해서 피가열체가 가열되는 온도에 대한 해석을 수행해보았다. 이를 위하여 열해석 유한요소 툴인 e-Physics를 사용하였으며, 그 수행절차가 Fig. 12에 나와 있다. 즉, 앞에서 Maxwell을 이용해서 구한 유도전류 밀도를 e-Physics의 입력으로 인가하여 열해석을 수행한 것이다. 열해석을 위한 해석 조건으로는 주위온도는 섭씨 20도로 가정하였으며, 대류열전달 계수는 $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, 복사방사율은 0.7, 코일의 전도도는 400 W/mK , 피가열체의 전도도는 79 W/mK 라 가정하였다.

Fig. 13에 유도가열에 의한 열전달 해석 결과가 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 발생하는 최고온도는 case 1의 경우는 섭씨 607도, case 2의 경우 섭씨 662도 가량임을 알 수 있으며, 이는 앞서 Fig. 11의 전자장 해석결과에서도 알 수 있듯이 case 2의 경우 유도전류가 더 크게 발생하기 때문에 이와 같은 온도차이가 나는 것이다. 본 해석은 와전류에 의한 발열만을 고려하였으므로, 실제 가열시에는 히스테리시스 손실에 의해서 가열온도는 좀 더 높아질 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 링플랜지의 유도가열에 대한 해석을 수행해 보았다. 유도가열에 의한 열전달 해석을 위해서 우선 Maxwell을 이용한 전자장 해석을 수행하여 링플랜지에서 발생하는 유도전류 분포에 대해서 해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 ePhysics를 이용한 열전달 해석시 입력조건으로 적용하여 링플랜지에서 발생하는 열과 열분포에 대한 해석을 수행할 수 있었다. 보다 정교한 해석을 위하여 BH analyzer를 이용하여 소재의 물성치를 측정하여 해석에 사용하였다. 해석결과 유도코일의 두께는 시스템에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었고, 같은 유도코일을 사용시 단면이 더 큰 링플랜지에서 더 많은 열이 발생함을 알 수 있었다. 제안된 해석 방법을 활용하여 임의의 형상을 가지는 유도코일에 의한 링플랜지에 대한 해석을 수행할 수 있음을 알았고, 각 형상의 치수에 의한 영향을 파악할 수 있었다.

참고 문헌

1. Bum-Suk Do et al., 2008, "Local Heating of an Injection Mold using Selective Induction Heating", Proceedings of KSME, pp.119-123.
2. Mu-Ho Han, Young_Min Yoon, 2005, "Induction Heating System for high accuracy Temperature Control of Zinc Pot", Proceedings of KIPE, pp.176-178.
3. Dae-Chul Shin, Jae-Hoon Yoo, 2010, "A Study on the Temperature Control of Vapor System Using Induction Heating", J. of KIIEE, Vol. 24, No. 1, pp.117-123.
4. Sung-Hyung Lee, Yun-Hyun Cho, 2009, "Study on the Design of Suitable Construction of High-Frequency Mass Heating Induction Coil", Proceedings of KIEE, pp. 849-850.
5. Young-Soo Yang, Kang-Yul Bae and Hee-Yun Shin, 2008, "Effects of Inductor Shape in Steel Forming Process with High Frequency Induction Heating", J. of KWJS, Vol. 26, No. 4, pp.66-72.
6. Kwang-Jeek Lee, Joo-Hong Kim, "A Resonant Circuit Design the Inverter for Induction Heating", J. of KIIEE, Vol. 11, No. 6, pp.90-95.
7. Jae-Hoon Yoo, Dae-Cheul Shin, 2008, "A Study on the Frequency Control on the Induction Heating System Using Two Step Resonant Inverter", J. of KIIEE, Vol. 22, No. 1, pp.95-103.
8. Hyun-Jung Kim, Young-Seok Kim, 1993, "A Partial Circulating Current Type PWM Controlled Cycloconverter with a Resonant Circuit for Induction Heating", J. of KIIEE, Vol. 42, No. 10, pp.19-28.
9. Jong-Oh Park, Young-Do Lim, 2008, "The study on Constant Power Control for the High Frequency Induction-Heating System using the PLL for Load Impedance Tracking", Proceedings of KIIT, pp.87-87.
10. Jeong-Tae Kim et al, 1998, "The Study on High-Frequency Switching Drive Method Using IGBT For Non-Magnetic Induction Heating System", Proceedings of KIPE, pp.24-26.
11. Y. S. Jung, 2002, "Modeling and Controller Design of electro-Magnetic Valve for Vehicle Engine", J. of KSPSE, Vol. 6, No. 4, pp. 81-87.
12. S.N. Yun, Y. B. Ham, J. D. Jo and B. S. Ryu, 2003, "Development of Solenoid Valve for Exhaust Brake of Diesel Engines", J. of KSPSE, Vol. 7, No. 4, pp. 19-24.
13. D. W. Yun, S. N. Yun, S. H. Lee and H. B. Shin, 2009, "Analysis on the influence of control cone of the proportional solenoid," Proceeding of KSPSE, pp. 119-122