

유한요소해석 및 실험에 의한 S45C 시편의 고주파 유도경화에 관한 연구

박관석¹ · 최진규² · 이석순^{2,†}¹대성종합열처리²경상대학교 대학원 기계항공공학부, ERI

A Study on High Frequency Induction Hardening of S45C Specimen by FEA and Experiment

Kwan-Seok Park¹, Jin-kyu Choi² and Seok-Soon Lee^{2,†}¹Daesung Total Heat Treatment CO.,²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, ERI

Abstract

In this study, we proposed a high frequency induction hardening analysis method based on electromagnetic-thermal co-simulation. In the high frequency induction heating analysis, the results of the finite element analysis (FEA) (considering the change of the material property and the cooling factor according to the temperature) and those of the high frequency induction hardening experiment (using the S45C specimen) were compared. The hardness of the S45C specimens was measured using the micro Vickers hardness test to determine the depth of hardening. The measurement results were then compared with the results of FEA. The result of high frequency induction heating analysis showed that the temperature was more than 750 °C, which is the A2 transformation point of S45C, while the temperature during quenching was below 200 °C. The results showed that the difference of the depth of hardening between the FEA and the experiment is 0.2mm.

초 록

본 연구에서는 전자기-열 연동 모사를 기반으로 한 고주파 유도경화 해석방법을 제안하였다. 고주파 유도가열 해석 시 온도에 따른 재료의 물성치 변화 및 냉각 요소를 고려한 유한요소해석 및 이를 S45C 시편을 이용한 고주파 유도경화 실험결과와 비교하였다. S45C시편을 마이크로 비커스를 사용하여 경도를 측정하여 경화깊이를 확인하였고 이를 유한요소해석 결과와 비교하였다. 고주파 유도가열 해석결과 온도는 S45C의 A2변태점인 750°C도 이상 가열되었으며, 급랭 시 200°C이하였다. 유한요소해석결과와 실험에 의한 경화깊이 차이는 0.2mm 수준인 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Induction Hardening(유도경화), High frequency induction heating(고주파 유도가열), Electromagnetic-Thermal Co-Simulation(전자기-열 연동 모사), Vicker's Hardness(비커스 경도)

1. 서 론

고주파 유도가열(High frequency induction heating)은 유도가열 코일에 고주파 교류전류가 흐르게 되면 발생하는 자기장이 가열물을 투과할 때 발생

하는 와전류(Eddy current)를 이용하여 가열하는 방법으로 짧은 시간에 급속가열이 가능하다.[1]

최근 환경규제의 강화에 따른 생산 공정의 녹색화 및 에너지 고 효율화가 요구되고 있다. 고주파 유도가열은 기존의 가스나 기름을 이용한 가열방식과 다르게 전기를 이용하여 열에너지를 만들기 때문에 친환경적이고 경제적이며 응용범위가 넓고 가격, 생산성, 환경문제에 대한 강점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인해 다양한 산업체에서 고주파 유도가열에 의한 열처리

Received: Feb. 28, 2018 Revised: May. 13, 2018 Accepted: May. 24, 2018

† Corresponding Author

Tel: +82-055-772-1622, E-mail: leess@gnu.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

를 사용하고 있으며, 특히 자동차 산업에서 부품의 국부 경화열처리 기술로 가장 많이 사용되고 있다.

기존의 고주파 유도경화 연구는 Guterres 등[2]과 같이 시편 실험을 통하여 연구를 진행하였다. 하지만 최근 컴퓨터 소프트웨어와 하드웨어의 발전으로 유한요소해석을 활용한 고주파 유도가열 및 경화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee 등[3]은 SCM440 환봉을 고주파 유도가열 후 온도측정 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교하였으며, Oh 등[4]은 유한요소해석을 통하여 유도가열 코일의 반경, 간격 등의 설계인자에 따라 온도분포를 계산하였다. Ji 등[5]은 고주파 유도가열을 이용한 기어 제조를 위한 압연공정을 설계하기 위해 유한요소해석을 사용하였다. Choi 등[6]은 스프라켓을 유도경화 후 유한요소해석결과와 경화 깊이를 실험으로 측정하여 결과를 비교하였다. 기존의 고주파 유도가열 및 경화 연구는 온도에 따른 재료의 물성치 및 냉각 요소를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 온도에 따른 재료의 물성치 변화 및 냉각 요소를 고려한 유한요소해석 및 이를 S45C 시편을 이용한 유도경화 실험결과와 비교하여 해석결과를 입증하였다. 이 결과를 이용하여 전자기-열 연동 모사를 기반으로 한 고주파 유도경화 해석 방법을 제안하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 방법

Figure 1과 같이 6kW 고주파 유도가열 실험 장비를 구축하였고 실험에 사용한 시편은 지름 10mm, 길이 30mm의 S45C 환봉을 사용하였다. Figure 2는 S45C 시편을 고주파 유도가열 장치에 위치한 모습과 고주파 유도가열 시 작업조건을 나타내었다. 2초 동안 가열하였고, 입력 전압은 DC 265V이며, 주파수는 243.3kHz이다. 오실로스코프(HDS3102 M-N)를 사용하여 AC 25.4V의 교류전압을 측정하였고 AC 236.2A의 교류전류를 구하였다. 이때, $6kW=AC25.4V \times AC236.22A$ (전력=전압 \times 전류)로 가정하여 유도가열 코일에 흐르는 전류를 구하였다. 유도경화 프로세서는 Fig. 3과 같이 2초간 가열 된 시편을 냉각수(20℃)에 약 3초간 냉각하는 과정을 거쳐 유도경화 실험을 진행하였다.

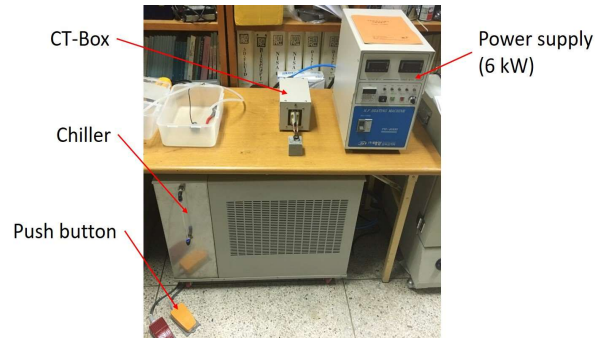


Fig. 1 Configuration of induction heating device



- Input voltage : DC 265 V
- Output voltage : AC 25.4 V ← ①
- Output ampere : AC 236.2 A
- Frequency : 243.3 kHz ← ②
- Heating time : 2 sec

Fig. 2 Working conditions of induction hardening

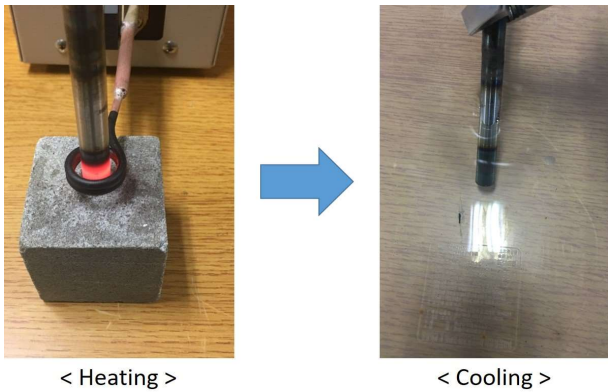


Fig. 3 Induction hardening process

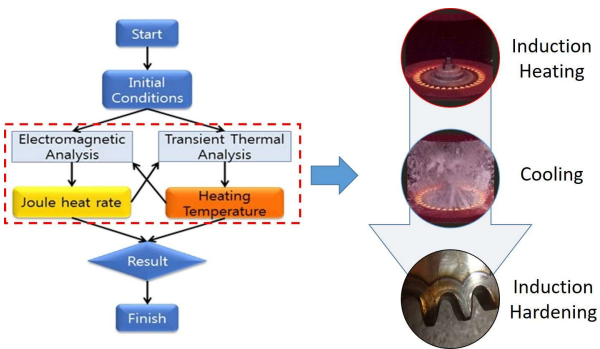


Fig. 4 Induction hardening process using co-simulation

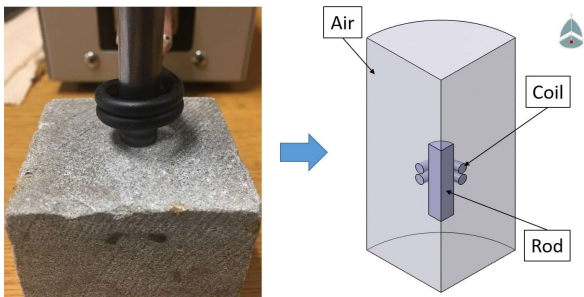


Fig. 5 3D modeling of S45C specimen

2.2 고주파 유도경화 해석 방법

고주파 유도경화 해석을 진행하기 위하여 전자기-열 연동해석(Co-simulation)을 사용하여 유한요소해석을 실시한다. Fig. 4는 가열, 냉각, 경화를 잘 나타낼 수 있도록 정립한 전자기-열 연동해석 프로세스를 표시하였다. 유한요소해석에 사용된 S45C 시편은 Fig. 5에 나타나 있다. 3D 모델링 프로그램을 사용하여 공기, 코일, 로드(시편)를 모델링 하였다. 유도가열 코일은 시편을 둘러싸고 있는 원형의 모양이고 해석시간을 줄

이기 위하여 원래 크기의 1/4형상으로 축소하였다. 교류전류가 유도가열 코일을 따라 흐르면 자기장이 발생하는데 이 자기장을 전달하는 매개체로 공기가 사용되었다. Figure 6은 유한요소해석 시 필요한 조건을 나타낸 것이다. 유도가열 코일에 흐르는 전류밀도(교류전류 / 유도가열 코일 단면적)는 $5.57 \times 10^7 \text{A/m}^2$, 주파수 243.3kHz, 가열시간 2초, 냉각시간 3초로 실제 실험 조건과 동일하게 적용하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 Abaqus를 사용하였으며, 전자기장 해석에는 62,684개의 전자기장 요소이며 육면체인 EMC3D8가 사용되었고 열전달 해석에서는 4,850개의 열전달 요소이며 육면체인 DC3D8이 사용되었다.[7] 전자기장 해석에는 Air, Coil, Rod 형상에 대하여 요소를 생성해야 하지만 열전달 해석에는 Rod 형상에 대해서만 요소를 생성하여 하였다. Table 1에는 유한요소해석에 사용된 재료의 물성치를 나타내었다. 공기와 구리의 전기 전도도는 실제 값이 아닌 해석을 위한 값을 적용하였다. 이는 해석 시 솔버의 문제를 규칙화 하고 해석의 올바른 결과를 도출하기 위하여 실제와 다른 전기전도도 값을 입력하였다.[8] 본 연구에서는 실제 실험과 동일한 결과를 얻기 위하여 온도에 따른 물성치 정보를 따로 입력하였으며, Fig 7, 8에 온도에 따른 전기전도도(Electrical conductivity), 비투자율(Relative permeability, 투자율의 역수), 열전도도(Thermal conductivity), 비열(Specific Heat)을 나타내었으며 유한요소해석 프로그램에 적용하였다. 이온도에 따른 물성치는 Tong등[9]의 논문에서 참조하여 S45C 환봉에 대한 연구를 진행하였다. 고주파 유도경화 해석을 수행할 때 냉각조건을 적용하기 위하여 경막계수(Film coefficient)를 입력한다. Figure 9는 실험 시 냉각수의 경막계수값을 구할 수 없어 물속 자유전달 값[10]을 참조하여 유한요소해석에 적용하였다.

Table 1 Material properties

	Density [kg/m ³]	Thermal conductivity [W/m·K]	Specific heat [J/kg·K]	Electrical conductivity [S/m]	Magnetic permeability [H/m]
Air	-	-	-	1000 (3×10 ⁻¹⁵)	1.26×10 ⁻⁶
Copper	-	-	-	1000 (5.96×10 ⁷)	1.26×10 ⁻⁶
S45C	7850	Dependent of temperature	Dependent of temperature	Dependent of temperature	Dependent of temperature

- Input values

		Input value
Current Density [A/m ²]		5.57 × 10 ⁷
Frequency [kHz]		243.3
Time [sec]	Heating	2
	Cooling	3

- Meshing in FEA



- <Electromagnetic Analysis>
 - Type of Element : EMC3D8
 - Number of Elements : 62,684
- <Transient Thermal Analysis>
 - Type of Element : DC3D8
 - Number of Elements : 4,850

Fig. 6 Input values and Meshing in FEA

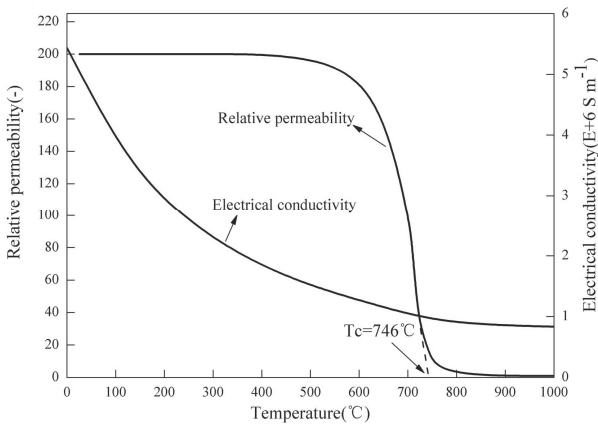


Fig. 7 Electrical conductivity and relative permeability of S45C according to temperature

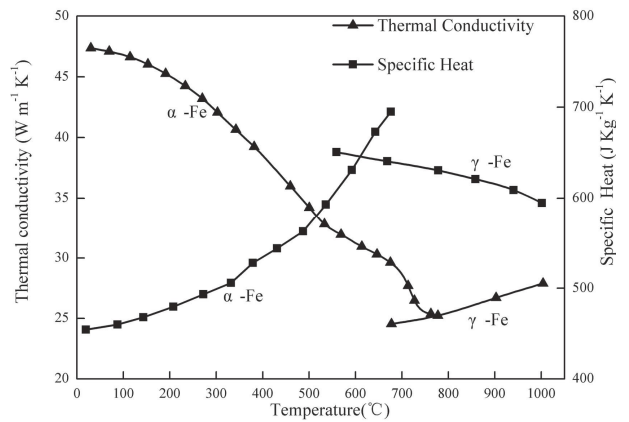


Fig. 8 Thermal conductivity and specific heat of S45C according to temperature

Apply film coefficient = 1200 W/m² · K



Conditions of heat transfer	W/(m ² K)
Gases in free convection	5-37
Water in free convection	100-1200
Oil under free convection	50-350
Gas flow in tubes and between tubes	10-350
Water flowing in tubes	500-1200
Oil flowing in tubes	300-1700
Molten metals flowing in tubes	2000-45000
Water nucleate boiling	2000-45000
Water film boiling	100-300
Film-type condensation: of water vapor	4000-17000
Drops-size condensation of water vapor	30000-140000
Condensation of organic liquids	500-2300

Fig. 9 Film coefficient of thermal transfer for cooling

3. 유한요소해석 결과

3.1 전자기장 해석결과

Figure 10은 2초간 가열하였을 때 S45C 시편의 자속밀도(Magnetic flux density)를 나타낸 것이다. 유

도가열 코일에 교류전류가 흐르면 암페어의 법칙(Ampere's law)에 따라 자기장이 발생한다. 시편을 투과하는 최대 자속밀도의 세기는 1.571 T이며, 자속 밀도가 표면뿐만 아니라 일정 깊이까지 투과된 것을 알 수 있다. 자속밀도가 시편을 투과할 때, 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 따라 시편에 전압이 유도된다. 유도된 전압에 의해 전류가 흐르게 되고 이 전류를 와전류(Eddy current)라고 한다. 와전류가 흐르면 시편의 전기저항에 의해 줄열이 발생한다. 시편에 발생한 줄열은 Fig. 11에 나타내었으며, 자속밀도 분포와 비슷한 분포를 나타내고 있으며 최대 줄열은 $2.863 \times 10^{10} \text{ W/m}^3$ 이다. 줄열은 표면에서 최대값이 나타났지만 시편의 일정한 깊이에도 줄열이 발생하는 것을 알 수 있다. 단면에서의 줄열이 집중되는 것은 자기장이 시편을 통과하면 전압이 유도되고 전류가 흐르는데 이 전류가 표면근처에 흐르게 된다. 이 현상을 표피효과(skin effect)라고 한다.

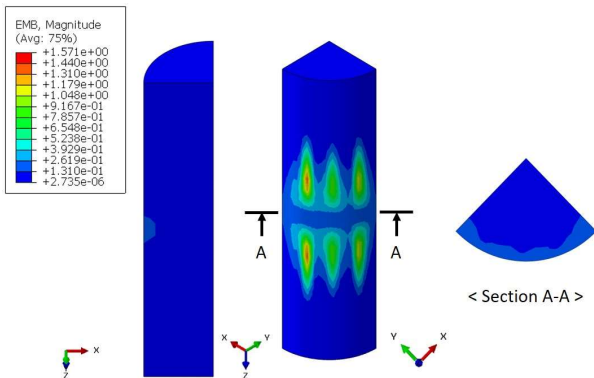


Fig. 10 Distribution of Magnetic flux density

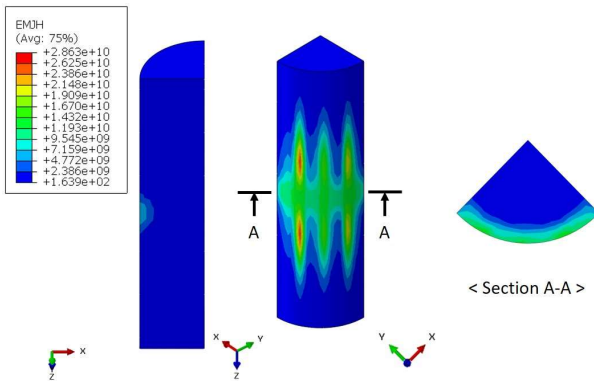


Fig. 11 Distribution of Joule heat

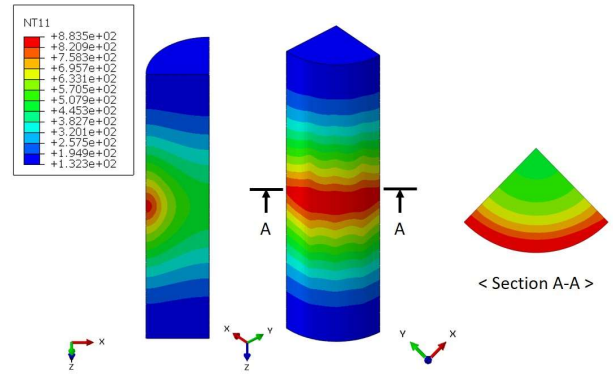


Fig. 12 Distribution of heating temperature

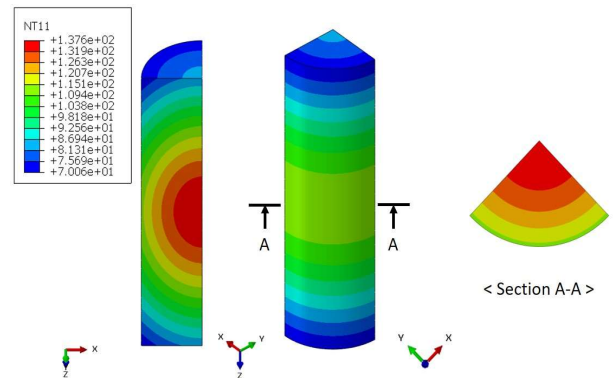


Fig. 13 Distribution of cooling temperature

3.2 열전달 해석결과

열전달 해석은 가열 및 냉각의 단계를 거쳐서 진행한다. 전자기장 해석에서 얻은 줄열결과를 열유동으로 변환시켜 시편에 적용하여 2초간 가열 후 3초간 냉각하는 단계를 거쳐 수행한다. Figure 12는 시편을 2초간 고주파 유도가열을 하였을 때의 결과이다. 최대 온도는 883.5℃이며, 전자기장 해석결과에서 줄열이 표면 근처에서 집중적으로 발생하는 것과 비슷한 가열 패턴을 보이고 일정 깊이 이상 S45C의 A2변태점인 750℃이상 가열되는 것을 확인할 수 있다. Figure 13은 2초간 가열 후 냉각수를 이용하여 냉각한 해석 결과이다. 해석결과 가열 후 시편이 급랭 온도의 기준인 200℃ 이하로 냉각되는 것을 확인할 수 있었다. 전자기장 해석으로 얻은 줄열을 이용한 열전달 해석으로 고주파 유도경화가 되었음을 알 수 있다.

3.3 유한요소해석을 이용한 경화 깊이 예측

전자기-열 연동해석을 통하여 얻은 가열 및 냉각온도를 통하여 경화 깊이를 예측 하고 이를 4.2절에서 실험 결과와 비교하였다. Figure 14는 가열 시 S45C의 A2 변태점 온도인 750°C이상인 부분을 표시한 것이고, 그 깊이는 1mm인 것을 알 수 있었다. 가열 온도 결과만 표시한 것은 냉각은 시편의 모든 부분이 20°C이하로 냉각이 되었기 때문에 표시를 하지 않았다.

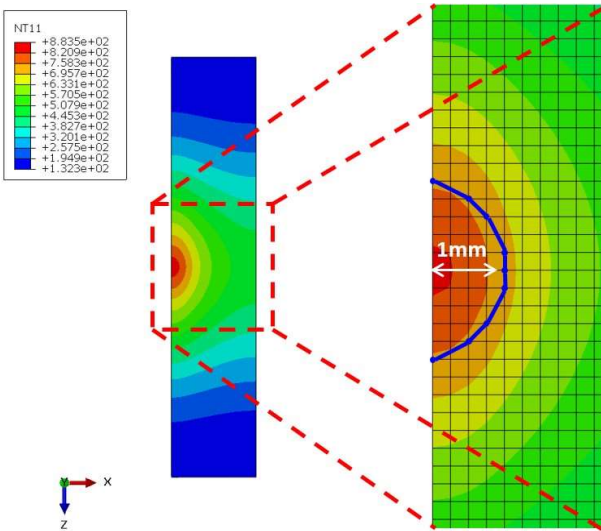


Fig. 14 Hardened area predicted from FEA

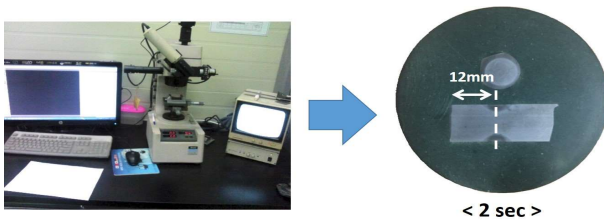


Fig. 15 Vickers hardness measurement equipment and S45C specimen

4. 경화 깊이 측정

4.1 경화 깊이 측정방법

S45C 시편을 고주파 유도경화 하였다. Figure 15는 경도를 측정할 비커스경도 시험기와 경도를 측정하기 위한 시편을 나타내었다. 시편의 깊이에 따른 경도는 그림에 표시 된 흰 점선을 따라 측정되었다. 경도는

시편이 다이아몬드 삼각뿔로 300gr의 하중으로 12초 동안 눌러질 때 형성 되는 사각형의 면적에 따라 계산 된다.

Table 2 Experimental hardness data

	Depth [mm]	Vickers hardness [Hv]	Rockwell hardness [HrC]
Surface section	0.05	520	50.5
	0.10	573	53.8
	0.15	580	54.2
	0.20	600	55.3
Near surface section	0.30	584	54.4
	0.40	590	54.7
	0.50	485	48.1
	0.60	498	49
	0.70	492	48.6
	0.80	500	49.1
	0.90	431	43.8
	1.00	409	41.8
	1.10	363	37
	1.20	367	37.5
	1.30	316	31.8
	1.40	334	33.8
	1.50	328	33.2
	1.60	269	25.7

4.2 경화 깊이 결과

Table 2에 고주파 유도경화 한 S45C 시편의 깊이 방향의 경도측정 결과를 나타내었다. 철의 고주파 유도경화 경도 기준은 Hv 450 이상이다.[11] 고주파 유도경화가 되지 않은 S45C의 비커스 경도는 Hv 265이며 시편의 경화 깊이는 표면부분은 0.05mm 단위로 경도를 측정하였고, 표면 근처부분은 0.1mm 단위로 경도를 측정하였다. 비커스 경도 측정기로 측정한 S45C 시편의 경화가 된 부분은 Table 2에서 초록색으로 표시하였고 0.8mm 까지 경화가 된 것을 알 수 있다.

5. 결 과

이 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 전자기-열 연동 모사를 고려한 유한요소해석을 이용하여 S45C 시편에 대한 고주파 유도경화 해석 방법을 제안하였다.

- (2) 유한요소해석을 이용하여 S45C 시편의 고주파 유도경화 영역(Fig. 14 파란색선 안쪽 영역)을 예측하였으며, 파란색선 바깥 영역은 경화가 되지 않았을 꺼라 예측하였고 이를 비커스 경도시험을 통하여 확인하였다.
- (3) 유한요소해석을 이용한 경화 깊이 예측한 결과(1mm)와 실험을 통한 경화 깊이 결과(0.08mm)는 0.2mm 차이를 나타내었다.
- (4) 고주파 유도경화는 전류밀도, 주파수 범위, 가열 속도, 냉각시간 및 A2변태온도 이상의 가열온도 등의 요소가 중요하므로, 최적의 열처리 공정을 달성하기 위하여 이 조합을 최적화 할 필요가 있다.

본 연구에서 온도에 따른 S45C의 물성치 변화를 고려한 고주파 유도경화 해석 및 실험에 관하여 수행하였다. 유한요소해석을 이용한 냉각해석 시 냉각수의 경막계수를 구하는 것은 실제로 구할 수 없어서 기존의 자료를 참고하였다. 향후 고주파 유도경화 해석의 정확도를 높이기 위하여 실제 입력변수를 적용하여 기존방법보다 정확도를 높일 것이다. 최근 고주파 열처리 산업에서 적용되고 있는 이중 주파수를 사용한 고주파 유도경화에 대한 연구도 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 차세대 기계항공 창의인재 양성사업인 BK Plus와 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(2017H1D5A1045319)

References

- [1] K. E. Telning, "Steel and Its Heat Treatment," *Elsevier*, pp.432-451, 1984.
- [2] N. F. D. S. Guterres, Rusnaldy and Widodo, "The Effect of Temperature in Induction Surface Hardening on the Distortion of Gear," *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*, 202, 012092, 2017.
- [3] I. Y. Lee, S. M. Tak, I. S. Pack and S. S. Lee, "Comparative Study on Numerical Analysis using Co-simulation and Experimental Results for High Frequency Induction Heating on SCM440 Round Bar," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, Vol.11, No.3, pp.1-7, 2017.
- [4] D. W. Oh, T. H. Kim, K. H. Do, J. M. Park and J. H. Lee, "Design and Sensitivity Analysis of Design Factors for Induction Heating System," *Journal of The Korean Society for Heat Treatment*, Vol.26, No.5, pp.233-240, 2013.
- [5] H. C. Ji, B. Wang and X. B. Fu, "Study on the Induction Heating of the Work Piece before Gear Rolling Process," *AIP Conference Proceedings*, 120010, 1896.
- [6] J. K. Choi, K. S. Nam, J. K. Kim, H. M. Choi, S. H. Yeum and S. S. Lee, "Study on Hardening Depth by Induction Hardening Analysis of Sprocket Using FEA and Experiment Result," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.33, No.5, pp.393-400, 2016.
- [7] Dassault systems, "Benchmarks Manual, 1.8 Elemtromagnetic analysis," 2012.
- [8] Dassault systems, "Workshop 1. Induction Heating of a Cylindrical Rod," 2016.
- [9] D. Tong, J. Gu and G. E. Totten, "Numerical simulation of induction hardening of cylindrical part based on multiphysics coupling," *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 25. 035009, 2017.
- [10] Heat transfer coefficient
: <http://www.thermopedia.com/content/841/>
- [11] Methods of measuring case depth for steel hardened by flame or induction hardening process, KS D 0027(Material part of Korean Industrial Standard)