

연동해석을 통한 SCM440 환봉의 고주파 유도가열 해석 및 실험
비교분석에 관한 연구이인영¹ · 탁승민¹ · 백인석¹ · 이석순^{1,†}¹경상대학교 대학원 기계항공공학부,ERIComparative Study on Numerical Analysis using Co-simulation and
Experimental Results for High Frequency Induction Heating on SCM440
Round BarInyoung Lee^{1,*}, Seungmin Tak¹, Inseok Pack¹ and Seoksoon Lee^{1,*}¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang University, ERI

Abstract

The applications of high-frequency induction heating has recently been studied in various industrial fields. In this study, induction heating is applied to a SCM440 specimen that is widely used in industry. The specimen was made up of a cylinder 20 mm in diameter and 160 mm long. An induction heating power supply module was used to generate heat in the cylinder at a high frequency (approximately 85 kHz) for 50 seconds. The temperature of the specimen was measured at the 150 mm length in 5 second intervals. Results such as joule heat and temperature are compared with the numerical model analysis using an electromagnetic-thermal co-simulation technique. The analytical model of the cylinder was modeled by considering the skin effect. The median measured temperature after induction heating was conducted for 50 seconds was 57.65 °C, compared to a predicted analytical value of 57.27 °C. Thus, the analytical results are in good agreement with the experimental results, and this model can predict the induction heating phenomenon numerically.

초 록

고주파 유도가열은 최근 활발히 연구되고 다양한 산업분야에서 적용되고 있다. 본 논문에서는 산업체에서 많이 사용되고 있는 SCM440 시편을 대상으로 유도 가열한다. 시편은 지름 20 mm, 길이 160 mm의 환봉으로 제작하였다. 유도 가열 전원 공급 장치 모듈을 이용하여 약 85 kHz의 고주파로 환봉을 50 초 동안 유도가열 하여 5초 단위로 바닥면에서 150 mm 지점의 온도를 얻는다. 이 실험을 총 10회 반복하여 측정된 실험의 중앙값과 전자기-열 연동해석을 통해 환봉의 저항열과 온도에 대한 해석 결과값을 서로 비교·분석하였다. 환봉의 해석모델은 표피효과를 고려하여 모델링을 하였고, 50 초 동안 유도가열을 했을 때의 실험의 중앙값은 57.65 °C, 해석값은 57.27 °C이다. 이 결과로 해석결과는 실험결과와 잘 일치함을 보이고, 본 해석방법으로 유도가열 현상을 수치적으로 예측할 수 있음을 보였다.

Key Words : High frequency heat treatment(고주파 열처리), Induction heating(유도가열), Round bar(환봉), Co-simulation(연동해석), ZVS(영전압스위칭)

1. 서 론

고주파 유도가열(High-frequency induction heating)

은 가열코일인 도체에 고주파 전류를 인가할 때 코일 속의 환봉 표면을 급속으로 가열하는 기법으로서, 피가열체에 발생하는 와전류(Eddy current)를 이용하여 짧은 시간에 급속 가열이 가능하다.[1]

기존의 가스나 기름을 이용한 열처리에 비해 전기를 이용하여 친환경적이며 표면층만 가열할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 자동차 부품의 국부

Received: Apr. 20, 2017 Revised: June. 22, 2017 Accepted: June. 23, 2017

† Corresponding Author

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

© The Society for Aerospace System Engineering

경화열처리 기술로 가장 많이 사용되고 있다.

대부분 유도가열의 해석 및 연구는 실험 또는 단순한 형상의 유한요소해석 대부분이었다. 과거 소프트웨어와 하드웨어의 발전이 동시에 비약적으로 이루어졌고, Do 등은 이중재료를 사용한 선택적 유도가열 기법을 적용하여 사철금형의 국부가열 기술을 개발하였고 [2], Park 등은 초박형 플라스틱 제품의 성형에 고주파 유도가열 기술을 적용하였으며 [3], Park 등은 고주파 유도가열을 유한요소해석을 이용하여 주파수가 높을수록 더 높은 온도를 나타냄을 확인하였다 [4]. 또한 Choi 등은 유한요소해석을 이용하여 스프라켓의 유도경화 해석과 실험에 의한 경화깊이에 대해서 비교 분석하였다 [5]. 본 연구와 유사함을 보이거나 실험의 과정과 해석을 결과를 비교하는 과정에 있어 다르다고 볼 수 있다.

본 연구에는 유도가열 전원공급장치 모듈을 이용한다. 이를 통해 고주파 유도가열 실험을 진행하고, 실험에서 얻은 온도값과 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS로 얻은 온도값을 통하여 실험값과 결과값을 비교 분석 함으로써 고주파 유도가열의 해석방법을 정립하는데 목적을 두었다.

2. 기초 이론

도체에 고주파 교류 전류가 흐를 경우 전류밀도가 단면의 외주 근방에 집중하는 현상이 발생하는데, 이를 표피 효과(Skin effect)라 한다. 표피 효과에 의해 전류가 표면의 $1/e(36.8\%)$ 만큼 감소하는 침투깊이(Penetration depth, δ)는 Eq. 1과 같이 정의되며, 주파수가 높을수록 침투깊이는 감소하는 경향을 보인다. [5]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (1)$$

여기서 σ 는 도체의 전기 전도도(Electric conductivity), f 는 주파수, μ_0 와 μ_r 은 각각 진공의 투자율(Permeability) 및 피가열체의 상대투자율(Relative permeability)에 해당한다.

고주파 유도가열을 해석하기 위해서는 일차적으로

유도전류에 의한 전자기장(Electromagnetic field)을 계산 한다. 전자기장 분포에 관한 지배방정식은 Maxwell 방정식을 사용하여 Eq. 2-5와 같이 표현한다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

여기서 E는 전기장의 세기(Electric field intensity), H는 자기장의 세기(Magnetic field intensity), D는 전속 밀도(Electric flux density), ρ 는 전하 밀도(Charge density), B는 자속 밀도(Magnetic flux density), J는 전류 밀도(Current density)이다. 전기장의 세기와 전속 밀도, 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 각각 유전율을 ϵ 과 투자율 μ 를 사용하여 Eq. 6-7과 같이 표현된다.

$$D = \epsilon E \quad (6)$$

$$B = \mu H \quad (7)$$

고주파 영역에서 Eq. 3의 변위전류항을 무시할 수 있으며, 이 때 Eq. 8의 옴의 법칙을 Eq. 3에 대입하여 정리하면 Eq. 9와 같다.

$$J = \sigma E \quad (8)$$

$$\nabla \times H - \sigma E = 0 \quad (9)$$

한편 자기 벡터 포텐셜 A와 전기 스칼라 포텐셜 V를 도입하면 자속 밀도와 전기장의 세기는 Eq. 10-11과 같이 표현 된다.

$$B = \nabla \times A \quad (10)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (11)$$

고주파 유도가열의 경우 교류 전원에 대한 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜 V의 영향을 무시할 수 있다. 이때 Eq. 7, Eq. 10, Eq. 11을 Eq. 9에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜 A에 대한 수식으로 정리

된다[4].

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

유한요소에 대한 수식화가 식 (12)로 구성되고 이를 적용하여 전자기장 해석을 수행하였다.[6]

3. 유도가열 실험

3.1 실험 방법

Figure 1과 같이 실험 장비를 구축하였고, 실험에서 사용한 시편은 지름 20 mm, 길이 160 mm의 SCM440 환봉을 사용하였고 사용한 실험장비는 Table 1에 정리하였다.

최초 48 V의 전압을 유도 가열 전원 공급 장치에 입력하여 Fig. 2와 같이 코일 중앙에 SCM440 환봉을 넣고 50초 동안 5초 간격으로 온도측정을 진행한다. 이 실험은 총 10회 반복한다.

온도측정은 바닥면에서 환봉의 150 mm 지점을 비접촉식 온도계를 이용하여 온도를 측정하였다. 접촉식 온도계는 유도가열시 발생하는 간섭을 받아 정확한 측정에 어려움이 있어 비접촉식 온도계를 사용하였다. 오실로스코프를 이용하여 발진 시 발생하는 주파수와 전류를 측정하였다.

3.2 실험 결과

가열 시간이 지남에 따라 코일 내부의 환봉이 와전류에 의해 가열되는 것을 확인할 수 있었다. 실험을 하는 총 50초 동안 5초 단위로 온도를 기록하였고, 총 10회의 실험 결과를 Table 2에 정리하였다.

10회의 실험이 진행되는 동안 시편의 초기 온도는 약간의 편차를 보인다. 따라서 중앙값(Median)을 연동해석의 분석 지표로 사용하였다.

4. 연동해석을 이용한 환봉 유도가열

4.1 해석 방법

고주파 유도가열의 공정해석을 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였고, Fig. 3

과 같이 유한요소해석을 위한 환봉과 가열코일을 3D

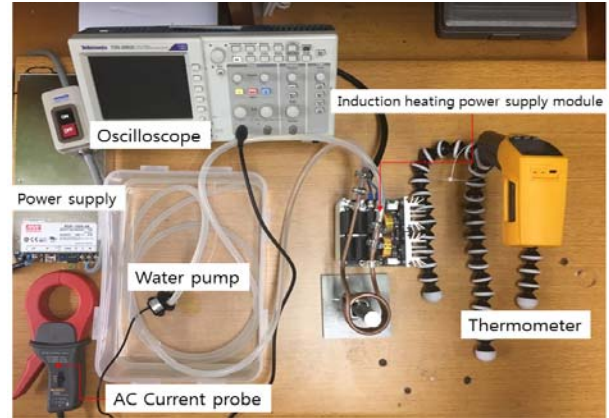


Fig. 1 Configuration of experiment device

Table 1 Experimental equipments

	Brand	Model
Power supply	MEAN WELL	RSP-1000-48
AC Current probe	FLUKE	i1000S
Thermometer	FLUKE	568 IR THERMOMETER
Oscilloscope	Tektronix	TDS 2002C
Induction heating power supply module	-	1000W 48V

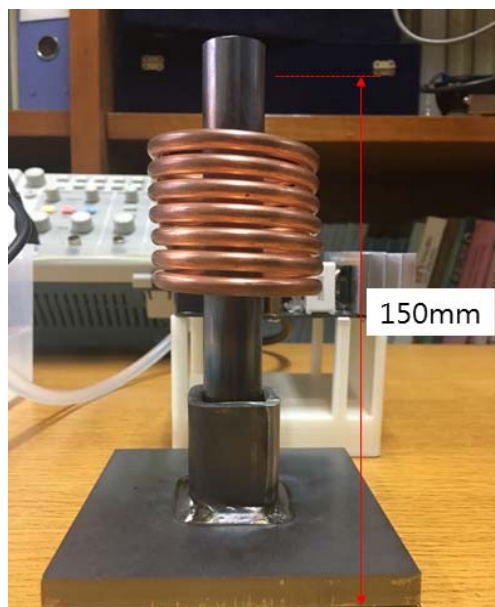


Fig. 2 Placement of coil and specimen

Table 2 Results of experiment

Time(s)	Results(°C)										
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	Median
0	16.6	16.8	16.5	16.5	16.7	16.8	16.9	16.6	16.5	16.9	16.65
5	20.8	19.1	19.8	19.3	20	19.2	19.7	18.2	19.5	19.9	19.6
10	23	21.8	23.5	22.8	23.2	22.4	24	21.9	22.8	23.1	22.9
15	26.6	26.1	27	26.1	28.1	26.5	28.6	25.5	27	27.8	26.8
20	30.3	29	31	30.1	32	29.7	32.4	29.8	31.5	31.4	30.65
25	34.6	33	34.5	34.3	36.4	35	37.9	33.4	35.5	35	34.8
30	38.3	37	39.1	38.2	40.3	38.8	41.9	37	39.7	39.9	38.95
35	42.8	41.1	44.4	42.6	44.9	43.7	46.6	40.9	44.8	44.3	44
40	47.3	45.7	48.3	47.4	49.9	48.1	52.1	45.1	48.6	49.2	48.2
45	52.6	50.4	53.5	52	54.4	52	57	50.4	53.6	54.2	53.05
50	57.4	54.8	57.9	56.6	59.9	56.8	62.4	54	58.3	58.9	57.65

Table 3 Material property of electromagnetic analysis

	σ , Electrical conductivity (S/m)	μ , Magnetic permeability (H/m)
SCM440	2.35×10^6	1.26×10^{-4}
Air	1×10^3	1.26×10^{-6}

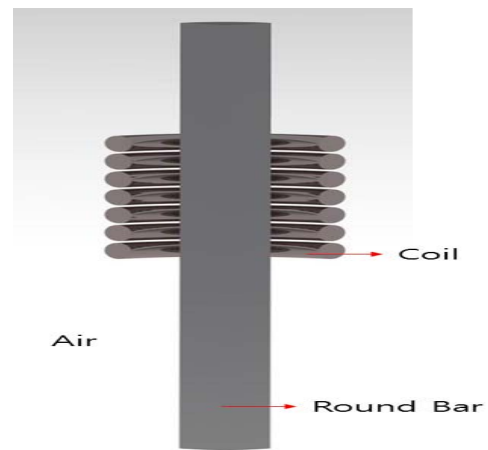
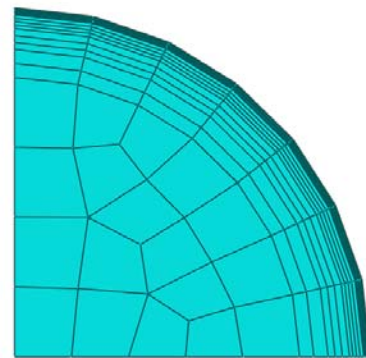
Table 4 Material property of heat transfer analysis

	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/m·K)	Specific heat (J/kg·K)
Steel	7800	43	450

모델링 프로그램인 CATIA를 이용하였다. 각각의 물성치는 Table 2에 나타내었고, 연동해석에 필요한 밀도와 열-전도도 그리고 비열은 Table 3에 나타내었다.

전자기장과 열전달을 연동해석(Co-simulation)을 하였다. 8절점 전자기 요소인 EMC3D8과 8절점 열전달 요소인 DC3D8을 사용하였다.

전자기 해석 시 14,556개의 EMC3D8 요소를 사용하였고, 열전달 해석 시 9,200개의 DC3D8 요소를 사용하였다.[7-9]

**Fig. 3** 3D modeling for analysis**Fig. 4** Fine mesh surface of Round bar

와전류의 분포가 시편 표면 부위에 집중되어 있고 중앙에는 와전류가 존재하지 않게 되는데 이를 표피효과라고 한다. 이러한 표피효과는 고주파일수록 표면에 집중되는 현상이 발생하여 유도가열 해석에 있어 표피효과를 고려하기 위해 Fig. 4와 같이 요소망을 표면으로 갈수록 조밀하게 형성하였다.

전자기-열 연동해석은 코일의 자기장에 의한 피가열도체에 유도된 와전류로 생성된 저항열을 계산하고, 이 저항열을 열 유속으로 변환을 하여 도체를 가열한다. 이때, 가열 시간동안 발생하는 증분을 실시간으로 매핑(Mapping)하는 방법이다. 프로세스는 Fig. 5에 나타내었고, 해석에 필요한 주파수와 가열시간은 85 kHz, 50초로 적용 하였다.

4.2 해석 결과

Figure 6은 전자기 해석 결과로 얻은 자속 밀도(Magnetic flux density)의 분포를 나타내었다. 분포된 자속 밀도는 표면 부위에 와전류를 형성하여 Fig. 7 과 같이 저항열(Joule heat)을 발생시킨다.

전자기 해석으로 구한 저항열(Joule heat)을 열 유속(Heat flux)로 변환하여 실제 유도 가열작업 공정과 같이 환봉을 50초 동안 가열한다. 유한 요소 해석 결과 Fig. 8 에서 확인할 수 있듯이 바닥면에서 150 mm 지점을 측정한 해석결과를 Table 5에 정리 하였다.

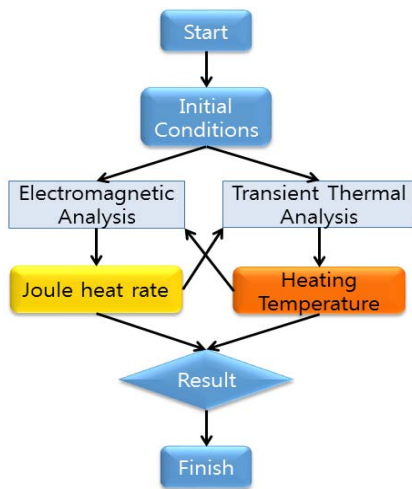


Fig. 5 Analysis process in FEM

Table 5 Results of analysis

Time(s)	Results(°C)	Time(s)	Results(°C)
5	20.8	30	38.3
10	23	35	42.8
15	26.6	40	47.3
20	30.3	45	52.6
25	34.6	50	57.4

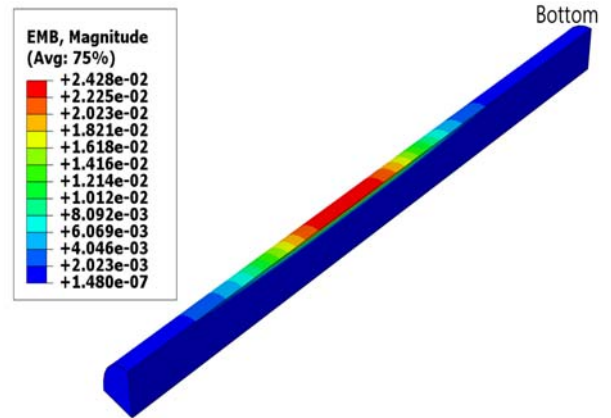


Fig. 6 Magnetic flux density distribution

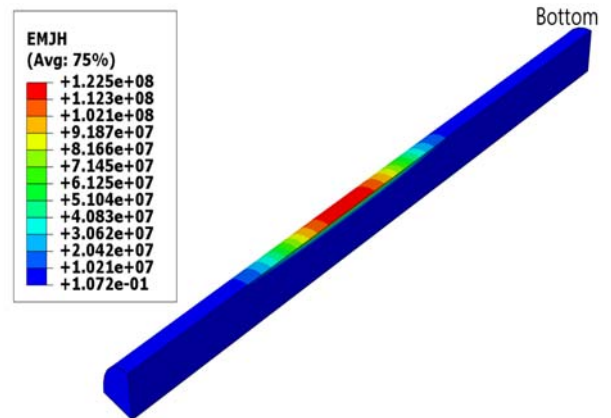


Fig. 7 Joule heat distribution

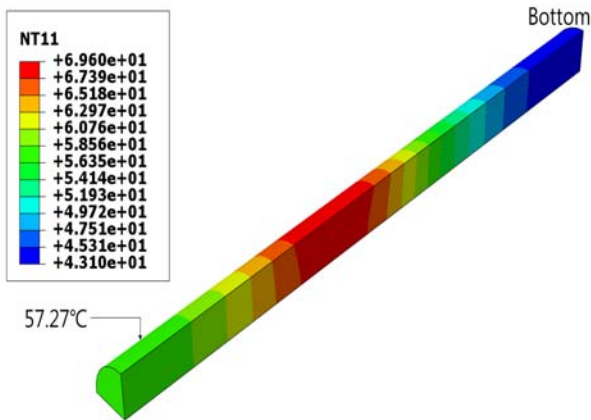


Fig. 8 Temperature distribution

Table 6 Temperature comparison between experiment and analysis

Time(s)	Experiment(°C)	Analysis(°C)	Error (%)
0	16.65	16.65	0
5	19.6	18.11	7.6
10	22.9	22.28	2.7
15	26.8	27.18	1.4
20	30.65	32.11	4.7
25	34.8	36.86	5.9
30	38.95	41.38	6.2
35	44	45.66	3.7
40	48.2	49.27	2.2
45	53.05	53.58	0.9
50	57.65	57.27	0.6

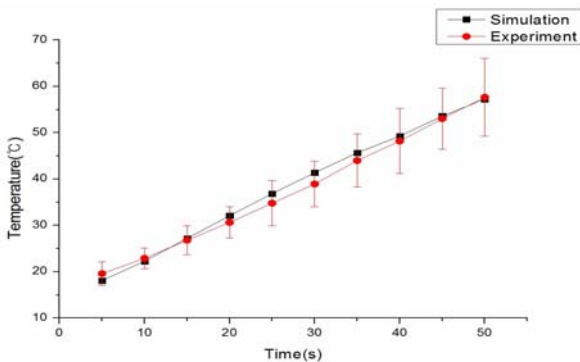


Fig. 9 Comparison of experiment and simulation graph

5. 실험 및 해석 비교 분석

실험결과와 해석결과의 비교분석을 Table 6에 정리하였다. 여기서 실험값은 Table 2의 중앙값을 사용하였고 해석값은 Table 5를 사용하였다. 오차율은 Eq. 13을 사용하여 정의하였다. 결과는 최대 7.6%의 오차율로 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

$$Error(\%) = \frac{|f_{\text{Experiment}} - f_{\text{Analysis}}|}{f_{\text{Experiment}}} \times 100 \quad (13)$$

Table 6으로부터 실험결과의 중앙값과 해석결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 실험결과의 범위는 Table 2의 측정시간대 별 최대, 최소값이다. 이 결과로부터 실험결과와 해석결과가 잘 일치함을 보인다.

6. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 많이 사용되고 있는 SCM440 재질의 환봉에 대한 유한요소 해석결과와 유도가열 온도 측정 실험결과를 비교하였다. 이러한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 고주파 유도가열을 전자기-열 연동해석을 사용하여 SCM440 환봉의 유도가열 과정을 해석하였고, 실험에서 환봉 측정점의 온도를 실측하였다.

2) 해석결과로부터 얻은 온도와 실험을 통해 얻은 온도를 비교하여 해석결과를 검증하였다. 해석 결과는 Fig. 9에 나타내었고, 결과는 Table 6에서 확인할 수 있었고, 최대 7.6%의 오차율로 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이 결과로 해석결과는 실험결과와 잘 일치함을 보이고, 본 해석방법으로 유도가열현상을 수치적으로 예측할 수 있음을 보였다.

현재 산업현장에서 고주파 유도가열은 작업자의 숙련도와 가장 크게 관련 있어 작업자에 따라 제품의 질도 달라지기 때문에 시간적 비용이 증가하는 구조다. 이 해석 기법으로 활용하여 산업현장에서 시간적 비용을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

차기 연구에서는 저주파와 고주파를 이용하여 이중 주파수를 동시에 인가하여 도체에 침투 깊이에 대하여

실험 및 해석을 진행할 것이다.

후 기

이 논문은 교육부 지방대학특성화(CK-I)사업의 재원으로 경상대학교 창의적항공IT기계융합인력양성사업과 BK21 플러스사업 차세대기계항공 창의인재양성사업단의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] K. E. Telning, "Steel and Its Heat Treatment," *Elsevier*, pp.432-451, 1984.
- [2] B. S. Do, J. M. Park, H. J. Eom, and K. Park, "Local Heating of an Injection Mold using Selective Induction Heating," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 1119~1123, 2008
- [3] K. Park, S. Choi, S. J. Lee, and Y. S. Kim "Injection Molding for a Ultra Thin-Wall Part using Induction Heating," *he Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 481~487, 2008
- [4] M. H. Park, S. S. Lee, H. B. Kang, I. S. Pack, J. H. Song and D. U. Lee "A Study on Analysis of Temperature of Target Material for Hardening in High Frequency Induction Heating," *Korean Society Of Precision Engineering*, pp.697-698, 2013.
- [5] 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 Results," *Korean Society Of Precision Engineering*, vol. 33, no. 5, pp. 393-400, May 2016.
- [6] W. I. Kim and S. J. Heo, "A Study on the Surface Roughness Influenced by SM45C Hardness in High Frequency Induction Hardening," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, March 1993.
- [7] K. Park, J. J. Hwang, O. K. Kwon and J. H. Yun, 2007, "Finite Element Analysis of Induction Heating Process for Development of Rapid Mold Heating System," *Trans. Mat. Proc.*, Vol. 16, pp. 113-119.
- [8] Abaqus 6.12 Documentation, Theory Manual, 13/02/2012 edition
- [9] S. M. Tak, J. W. Park, M. K. Kang, D. J. Park, J. S. Lee and S. S. Lee, 2010, "Transient heat transfer analysis of inertial measurement devices by outside frictional heat," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, Vol.4, No.1, pp32-37.