

유도가열시 중형 크랭크샤프트의 열전달 해석

박상철^{1*}

¹거제대학교 조선해양공학과

Heat Transfer Analysis of Medium-Size Crankshaft during Induction Heating

Sang-Chul Park^{1*}

¹Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Kojje College

요약 본 연구는 중형 크랭크샤프트 제작 과정에서 환봉을 가열하기 위한 최적의 유도가열조건을 결정하기 위한 것으로, 4가지 가열조건(가열코일 개수, 위치 등)에 대하여 수치해석적인 방법을 사용하여 전자기장 및 열전달해석을 순차적으로 수행하였다. 이러한 수치해석 결과로부터 일정시간 가열 후 크랭크샤프트 환봉 가열부에 발생하는 최고온도와 두께에 따른 내, 외부 최소 온도차를 평가하여 현장에 적용 가능한 가열코일의 위치 및 개수 등의 유도가열조건을 결정하였다.

Abstract This study was performed to determine optimum induction heating conditions for a round bar of crankshaft. Four induction heating conditions were proposed and evaluated, employing numerical method, based on electromagnetic and sequential heat transfer analyses, resulting in optimum induction heating conditions which are finally proposed based on peak temperatures at heating zone and minimum temperature gradient through thickness of a round bar after 1 hour induction heating.

Key Words : Crankshaft, Electromagnetic & Thermal Analyses, Induction Heating, Numerical Analysis

1. 서론

일반적으로 유도가열은 금속의 열처리 및 용해, 성형 공정 등 다양한 분야에 사용되는 기술로서 안정성, 고효율 및 고출력, 신뢰성, 제어의 용이성 등 많은 장점을 가지고 있다. 특히 표면경화처리 및 금속 소재의 국부가열에 적용시 신속한 가열이 가능하고 스케일 같은 표면 산화물의 발생량이 적으며 또한 가열 작업시간이 짧아 입자조대화 및 탈탄이 적어 단조용 환봉 소재의 가열에 널리 사용되고 있다. 이러한 유도가열방법은 가열 대상물의 형상이나 크기에 따라 서로 다른 가열작업조건을 사용하여야 하며, 이러한 작업조건은 유도가열시 발생하는 물리적 현상을 실험적, 수치적 해석을 통한 평가에 의하여 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 종류의 크랭크샤프트 중에서 대표적으로 많이 사용되는 형상에 대하여

수치해석적인 방법을 사용하여 단조용 환봉 소재를 작업 온도 1200℃까지 내, 외부를 균일하게 가열할 수 있는 최적의 유도가열 작업조건을 결정하고자 하였다.

2. 본론

2.1 유도가열의 기본원리

도체를 감싸고 있는 솔레노이드(solenoid) 코일에 교류 전류를 흐르게 하면 Fig. 1과 같이 코일주변에 발생하는 자기장에 의하여 도체에는 유도전류가 발생하는데 이러한 현상을 이용한 것이 고주파 유도가열이다. 유도전류에 의하여 도체 표면에는 주울열(joule heat)이 발생하게 되는데 이러한 주울열은 대부분 와전류손실에 의한 것이며, 또한 유도가열시 도체의 표면에는 자속과 와전류(eddy

*Corresponding Author : Sang-Chul Park(Koje College)

Tel: +82-55-680-1698 email: spark@koje.ac.kr

Received June 17, 2013

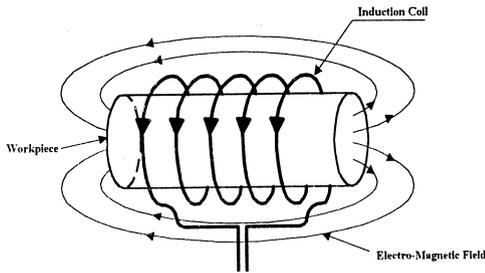
Revised (1st July 15, 2013, 2nd August 5, 2013)

Accepted September 6, 2013

current)가 집중되며 이때 발생하는 2가지의 손실(와전류 손실, 이력손실)에 의해 피가열체의 표면층을 가열시키는 표면효과(skin effect)가 발생한다. 이러한 표면효과에 의한 침투깊이는 전류가 전계나 자계에 의해 얼마나 도체 표면에 집중되어 있는가를 나타내는 특성치로서 f, μ, ρ 에 의하여 결정되나 실제 도체에서는 μ (투자율), ρ (고유저항)은 거의 일정하므로 주파수(f)에 의하여 크기가 결정된다. 특정 주파수에서 표면효과가 나타나는 표면깊이(skin depth)는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[1].

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (1)$$

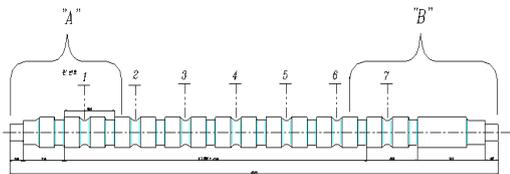
여기서, d : 침투깊이(m)
 μ : 자성 투자율($\mu = \mu_0 \mu_r$, 자성재료 $\mu > 1$)
 f : 주파수(Hz)
 ρ : 고유저항($\Omega \cdot m$)



[Fig. 1] Basics of Induction Heating

2.2 크랭크샤프트 환봉 형상

본 연구에서는 여러 종류의 중형 크랭크샤프트 중에서 가장 많이 사용되고 직경이 큰 환봉(직경: 저널부분 340mm, 핀부분 270mm, 전체 길이: 6,618mm)에 대하여 부분 단조작업을 위한 국부가열 유도가열 조건을 결정하고자 하였다. 해석에 사용된 환봉의 형상은 Fig. 2에 나타내었으며 사용된 재질 SM45C(ASM 1042)의 화학적 성분은 Table 1과 같다.



[Fig. 2] Configuration of Crankshaft

[Table 1] Chemical Compositions of ASTM 1042 Carbon Steel(SM45C, unit : %)

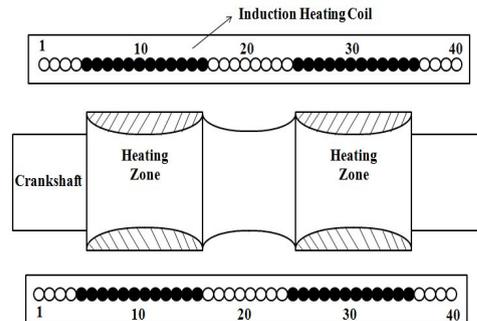
	C	Mn	Si	P	S
ASTM 1042	0.42	0.78	0.30	0.01	0.01

2.3 유도가열로 및 가열 작업

Fig. 3에 나타낸 유도가열로를 사용하여 직경 340mm 환봉을 원하는 온도상태로 가열하기 위하여 필요한 가열 조건에는 입력전력, 주파수, 가열코일 개수 및 가열위치, 가열방법(1차/2차 가열시간, 가열/비가열시간) 등이 있다. 이전의 유도가열연구에서 가열방법 중 가열/비가열시간은 최종 온도분포에 크게 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있었으므로 본 연구에서는 입력전력과 주파수는 일정한 값으로 하고, Fig. 4처럼 전체 40개의 고정된 코일 중에서 점퍼를 사용하여 조절한 가열코일의 개수 및 코일의 위치변화에 따른 환봉의 온도분포 영향을 평가하고자 하였다. 따라서 Table 2에 나타낸 Case-A~Case-D의 4가지 가열방법에 대하여 1시간 유도가열시 환봉의 온도분포를 수치적인 방법을 사용하여 평가하였다.



[Fig. 3] Induction Heating Equipment



[Fig. 4] Heating Coil Arrangement

[Table 2] Induction Heating Conditions(unit : mm)

Case	Coil No. (left/right)	Coil length	Coil distance	Moving distance
A	#10~19 / #30~40	174/191	174	14 mm/sec
B	#6~12 / #31~37	121/121	313	-
C	#6~18 / #25~38	226/243	104	-
D	#6~#38	574	0	-

2.4 수치해석

2.4.1 기본이론

유도가열시 코일 주변 및 피가열체에 발생하는 전자기장의 시간에 따른 변화는 다음과 같은 전자기장 해석의 기본 방정식인 Maxwell 방정식으로부터 유도할 수 있다 [2]-[4].

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

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

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

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

여기서 E는 전기장의 세기, B 자속밀도, H 자기장의 세기, J 전류밀도, D 전속밀도, ρ는 전하밀도이다. 등방성재료(isotropic material)로 피가열체를 가정하면 전자기장의 구성 방정식은

$$D = \epsilon E, \quad B = \mu H \quad (6)$$

여기서 ε는 유전율이고 μ는 투자율이다.

고주파 영역에서 옴(Ohm)의 법칙을 적용하면 식(3)은 식(7)로 표현된다(σ: 전기전도도).

$$J_e = \sigma E \quad (7)$$

$$\nabla \times H = \sigma E$$

한편 자기벡터 포텐셜 A와 전기스칼라 포텐셜 V를 도입하면 자속밀도와 전기장의 세기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B = \nabla \times A, \quad E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (8)$$

교류전원을 사용하면 전기스칼라 포텐셜 V의 영향은 무시할 수 있으므로 위 식을 식(7)에 대입하면 피가열체에 대한 와전류 지배방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + i\omega\sigma A = J_s \quad (9)$$

여기서 ω는 주파수, J_s는 원전류밀도이며 주어진 조건에서 자기벡터 포텐셜 A가 얻어지고 이로서 와전류 분포 및 주울열(와전류밀도 J_e=σE=-iωσA, J_{heat}=J_e²/σ)을 계산할

수 있다.

온도분포는 위와 같은 전자기장의 주울열 분포로부터 비정상상태 열전달해석을 위하여 다음과 같은 열전도 지배방정식을 사용하여 평가할 수 있다[5-7].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \bar{q} \quad (10)$$

여기서 T는 온도, ρ 밀도, c_p 비열, λ 열전도도, q̄는 주울열에 의한 단위체적당 열에너지 발생률이다.

2.4.2 수치해석 절차

유도가열시 환봉 및 코일 주위에 발생하는 물리적 현상을 수치적으로 해석하기 위하여 유한요소해석 전용프로그램인 ANSYS를 사용하여 전자기장과 열전달 해석을 순차적으로 수행하였다[8]. 해석절차는 우선 조화 전자기장해석을 수행하여 유도 코일에 교류 전류가 흐를 때 코일 주변 및 소재 표면에 발생하는 자기장 강도와 주울열을 평가하고, 이러한 주울열에 의하여 소재가 점차적으로 가열되는 순간 열전달해석을 순차적으로 수행하였다. 또한 좀 더 정확한 온도분포 해석을 위하여 온도에 따른 소재의 물리적 특성변화를 고려하여 온도에 따른 정확한 소재의 물성치를 사용하도록 하였다.

2.4.3 유한요소 해석모델

유도가열작업이 축대칭인 특성을 갖기 때문에 크랭크 샤프트 환봉 해석모델을 2차원 축대칭으로 치환하여 Fig. 5와 같이 유한요소 해석모델을 구성하였다. 그림에서 y축이 회전축, x축이 반경방향이며 해석모델은 총 14,100 요소, 13,498 절점으로 구성되어 있으며 표면효과를 충분히 고려하기 위하여 저널(journal) 표면부는 매우 작은 요소로 유한요소망을 구성하였다. 또한 조화 전자기장해석을 하기 위하여 코일 및 코일 주변의 공기에 대하여도 유한요소로 모델링하였으며 열전달해석에서는 코일 및 코일주변의 공기에 대한 유한요소를 제거하고 단지 크랭크 샤프트 환봉에 대해서만 열전달해석을 수행하였다. 한편 경계조건으로 환봉 표면에서의 열대류, 열방사 등을 모두 고려하였다.

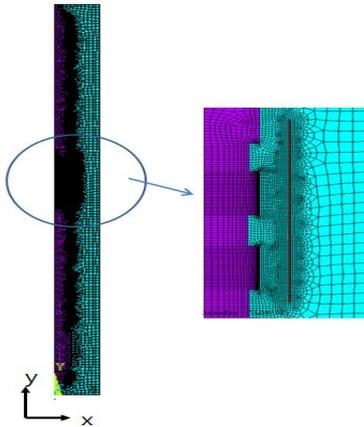
2.5 해석 결과

Table 2에 나타낸 4가지 유도가열 조건으로 환봉을 가열하는 경우에 대하여 수치적으로 전자기장, 열전달해석을 수행하였으며 각각의 유도가열조건에 대한 해석결과는 다음과 같다.

Case-A 가열조건을 사용하여 1시간 유도가열 후 환봉에 발생하는 최종 온도분포를 Fig. 7.(a)에 나타내었다. 예

상대로 Fig. 6에 나타난 B 저널 부위 온도가 다소 높음을 알 수 있으며 온도분포를 좀 더 자세히 평가하기 위하여 환봉 가열부의 두께에 따른 온도분포를 Fig. 7.(b)에 나타내었다.

유도가열에 의한 주울열은 전류가 흐르는 코일의 하단부에 국한되어 발생하며 따라서 코일의 영향을 받지 않은 부분은 코일의 주울열 전도에 의하여 가열이 이루어지기 때문에 결과적으로 저널 부위 중앙부가 온도가 높고 양 모서리 부분에 온도가 낮으며 핀(pin) 부분은 두께에 따른 온도차이가 작게 나타남을 알 수 있다.



[Fig. 5] Finite Element Analysis Model

Case-B는 가열코일을 A, B 저널 끝단부에서 안쪽으로 각각 7개 코일(코일길이 121mm)을 배치하여 유도가열을 수행한 경우로 1시간 유도가열 후 환봉에 발생하는 온도분포를 Fig. 8.(a), 환봉 가열부의 두께에 따른 온도분포를 Fig. 8.(b)에 나타내었다.

가열코일이 저널 모서리에 위치하기 때문에 모서리 부분은 코일에 의한 주울열에 의하여 국부적으로 온도가 증가하나 코일에서 멀리 떨어진 핀 부분은 열전도에 의하여 온도가 증가하며 환봉 두께에 따른 온도차이는 크게 발생하지 않는 경향을 나타내고 있다.

Case-C는 Case-B와 동일하게 핀을 중심으로 대칭적으로 가열하는 반면에 가열온도를 증가시키기 위하여 가열 코일 개수를 13, 14개로 증가시키고 코일과 코일간격을 104mm로 감소시켜 가열하는 방법이다.

1시간 유도가열 후 환봉에 발생하는 온도분포를 Fig. 9.(a) 그리고 2,800sec. 가열 후 환봉 가열부의 두께에 따른 온도분포를 Fig. 9.(b)에 나타내었다. 저널 모서리 부분을 제외하고 대부분 기준온도 1,200℃를 넘고 있으며 온도분포 양상은 Case-A와 유사한 경향을 나타내나 온도 편차는 증가함을 알 수 있다.

Case-D는 코일과 코일사이의 간격 없이 574 mm인 코일 길이를 사용하여 유도가열하는 방법으로 1시간 유도가열 후 환봉에 발생하는 온도분포를 Fig. 10.(a) 그리고 1,800sec. 가열 후 환봉 가열부의 두께에 따른 온도분포를 Fig. 10.(b)에 나타내었다.

전체적으로 가열부의 온도가 1,200℃ 보다 훨씬 높아 지나치게 가열된 양상을 보여주고 있으며, 핀 부분은 다른 경우와 비교하여 상대적으로 온도가 크게 증가함을 알 수 있다.

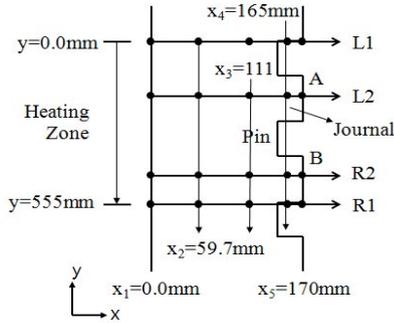
이러한 4가지 유도가열조건에 대한 해석결과를 정리하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 L1~R2는 Fig. 6에 나타난 것처럼 L1은 y=0mm, R1은 y=555mm지점, L2는 저널 A 표면에서 최고온도가 발생하는 부분, R2는 저널 B 표면에서 최고온도가 발생하는 부분에서 환봉 내부중심 까지 길이이다. 각각의 유도가열 조건에서 저널 A, B부분의 L1, L2, R1, R2 지점에 대하여 최고온도, 최소온도 및 온도차, 환봉 내부중심부의 온도가 기준온도인 1,200℃까지 도달하는데 걸리는 유도가열시간을 마지막 항목에 나타내었다.

Case-A에서는 저널 모서리 부분에서 최대온도 1,244℃, 최소온도가 875℃이며 온도차는 125~174℃사이이며, Case-B는 1시간 유도가열 후 환봉 온도가 1,200℃에 미달하여 현업적용이 어렵다는 것을 알 수 있다. 한편 Case-C, Case-D에서는 각각 유도가열 후 2,800sec., 1,800sec. 후에 가열부 온도가 1,200℃에 도달하나 표면

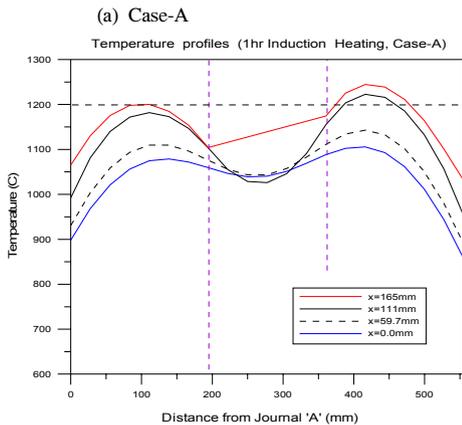
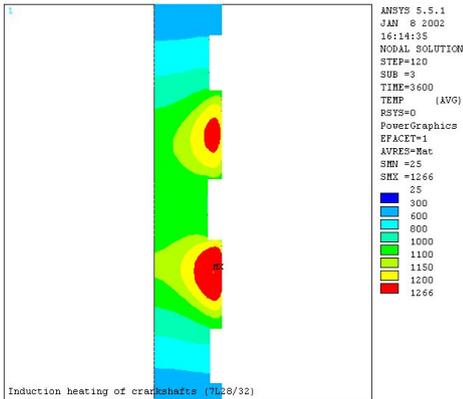
[Table 3] Temperature Distributions with 4 Induction Heating Conditions

	Case-A				Case-B				Case-C				Case-D			
	L1	L2	R1	R2	L1	L2	R1	R2	L1	L2	R1	R2	L1	L2	R1	R2
Max. temp.(℃)	1065	1200	1031	1244	772	886	774	870	1164	1425	1204	1460	1209	1651	1241	1668
Min. temp.(℃)	898	1075	857	1105	723	707	722	694	962	1250	1018	1288	835	1294	885	1315
Temp. difference(℃)	167	125	174	139	49	179	52	176	202	175	186	172	374	357	356	353
1200℃ time	3,600sec.				-				2,800sec.				1,800sec.			

부의 최고온도가 1,460℃, 1,668℃로 매우 높고 반면에 최소온도는 962℃, 835℃로 내, 외부 온도차가 172~202℃, 353~374℃ 범위에 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 가열조건은 환봉의 표면산화 문제로 인하여 적용이 어렵다는 것을 알 수 있다.

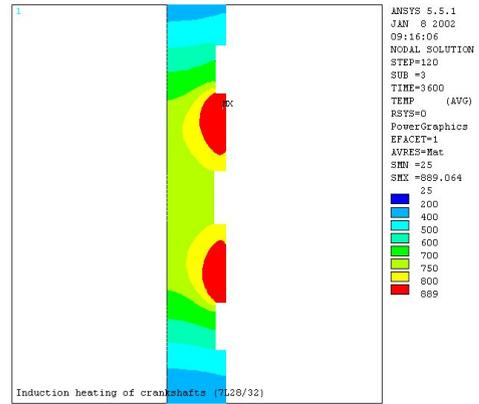


[Fig. 6] Location of Temp. Evaluation

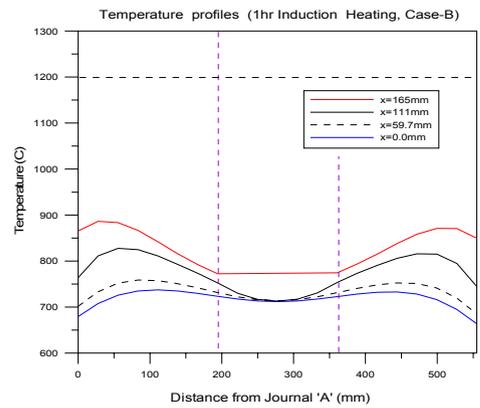


(b) Case-A

[Fig. 7] Temp. Distribution after 1hr Induction Heating (Case-A)

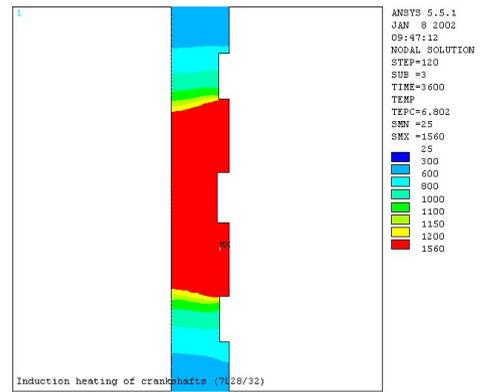


(a) Case-B

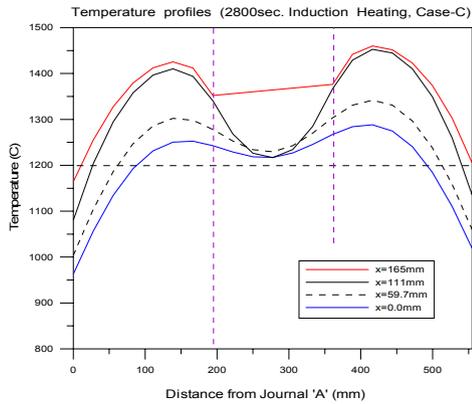


(b) Case-B

[Fig. 8] Temp. Distribution after 1hr Induction Heating (Case-B)

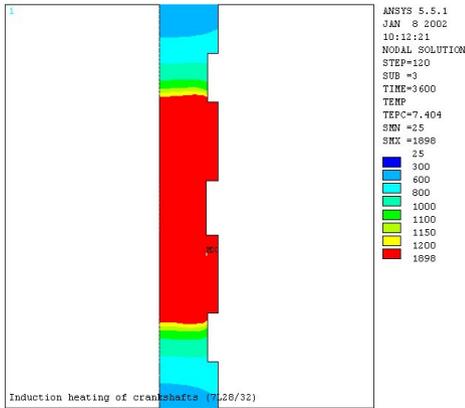


(a) Case-C

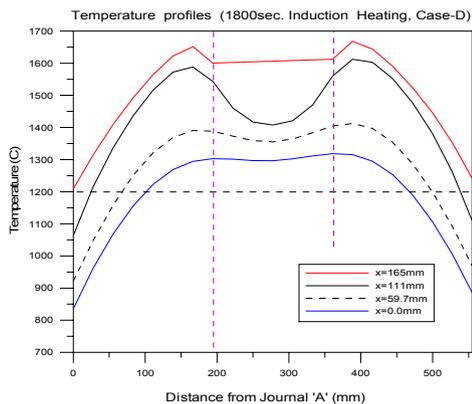


(b) Case-C

[Fig. 9] Temp. Distribution after 1hr Induction Heating (Case-C)



(a) Case-D



(b) Case-D

[Fig. 10] Temp. Distribution after 1hr Induction Heating (Case-D)

3. 결론

크랭크샤프트 제작용 환봉의 유도가열조건을 결정하기 위하여 수치적인 전자기장, 열전달해석을 순차적으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 좌, 우측 코일길이 174mm/191mm, 코일이동거리 14mm/sec인 Case-A 유도가열조건을 사용하여 환봉을 1시간동안 가열하는 경우에 표면과 내부중심부에 최대 174°C 정도의 온도 차이가 발생한다.
- 2) 제안된 4가지 유도가열조건에서 Case-A를 사용하여 1시간 동안 가열하는 것이 다른 3가지 가열조건보다 환봉 내, 외부 온도차를 최소화할 수 있다.

References

- [1] Induction Heating Handbook, J. Davies and P. Simpson, McGraw-Hill Edition, 1979.
- [2] K. Sadeghipour, J. A. Dopkin and K. Li : "A Computer Aided Finite Element/Experimental Analysis of Induction Heating Process of Steel", Computers in Industry, Vol. 28, pp. 195-205, 1996.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0166-3615\(95\)00072-0](http://dx.doi.org/10.1016/0166-3615(95)00072-0)
- [3] F. Dughiero, S. Lupi and S. Ponchiroli : "The Prediction of Thermal Transients in the Induction Heating of Rectangular Billets", The Int. J. Comp. Math. Electr. Electr. Engineering, Vol. 19, pp. 712-717, 2000.
- [4] J.G.Kang, J.H.Lee and J.G.Shin : "Numerical Analysis of Induction Heating for the Application of Line Heating", Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 37, pp. 110-121, 2000.
- [5] Introduction to Heat Transfer, F.P.Incropera & D.P. De Witt, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [6] H.S.Jang, J.S.Lee and D.K.Park : "Heat Analysis for Heat Sink Design Using Finite Element Method", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 3, pp. 1027-1032, 2013.
- [7] T.W.Lim and D.H.Cho : "Study on Heat Transfer Characteristic of Shell-and-Tube Heat Ex-changer with Plate Fin", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 10, No. 1, pp. 46-51, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.1.046>
- [8] ANSYS Users' Manual Version 8.1, 2007.

박 상 철(Sang-Chul Park)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (조선공학석사)
- 1998년 3월 : 오하이오주립대학교 용접공학과 (용접공학박사)
- 1987년 12월 ~ 2008년 8월 : 산업기술연구소 수석연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 거제대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

용접공학, 주·단조공학, 열탄소성 수치해석