

전기유도보일러의 발열효율개선을 위한 권선최적설계

김윤현¹, 김솔^{2*}

¹한밭대학교 전기공학과, ²유한대학교 전기공학과

Optimal Design of a Coil for Improved Heating Efficiency of Electric Induction Boiler

Youn-Hyun Kim¹, Sol Kim^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Hanbat University

²Department of Electrical Engineering, Yuhan University

요 약 본 기후변화협약, 온실가스배출규제와 같은 규제적 규약들은 고효율 에너지 기자재 개발과 에너지의 효율적 이용을 촉진하는 촉매로 작용하고 있다. 에너지소비가 큰 분야 중 전열기기가 효율이 좋지 못한 편이다. 전기보일러는 히터에 물을 접촉시켜 순환시키는 방식을 주로 사용하고 있다. 기존 전기보일러를 활용할 경우 물의 미네랄이 고온의 히터와 접촉하여 탄화되어 흡착되는 과정에서 히터의 부식을 촉진시키고 히터의 효율을 저하시킨다. 이러한 이유로 에너지 효율이 높고, 전도나 대류가열보다 피가열물을 균일하게 가열시킬 수 있는 유도가열방식을 보일러에 적용시킨 전기유도보일러가 각광을 받고 있는데, 이 방식은 물이 담겨 있는 보일러 관로를 유도가열방식으로 가열하여 직접가열시 발생하는 문제를 해결시킬 수 있는 대안으로 인정받고 있다. 비교적 오랜 기간 유도가열에 대한 연구가 이루어졌음에도 불구하고 유도가열을 이용한 전열기술에 대한 연구결과는 그리 많지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 전기유도보일러의 발열효율을 개선하기 위하여 매개변수연구방법을 통하여 권선의 단면적, 권선의 수 및 권선의 겹수에 의한 영향을 유한요소법을 이용하여 해석하고 발열의 요소가 되고 있는 동손과 철손을 분석하여 발열을 극대화시킬 수 있는 권선설계방법으로 총손실이 최대가 되는 설계점을 찾는 방법을 제시하였다.

Abstract Regulatory protocols such as the Convention on Climate Change and the regulation of greenhouse gas emissions act as catalysts for the development of high-efficiency energy equipment and the efficient use of energy. Among the fields where energy consumption is high, the electric heating equipment is not efficient. The electric boiler mainly uses a method of circulating water by contacting the heater. When the existing electric boiler is used, the water minerals are contacted with the high-temperature heater to be carbonized and adsorbed, thereby promoting the corrosion of the heater and lowering the efficiency of the heater. For this reason, an electric induction boiler, which has high energy efficiency and is applied to an induction heating system that can uniformly heat the object to be heated rather than conduction or convection heating, is in the limelight. This method induces a boiler pipe And it is recognized as an alternative that can solve the problem that occurs when heating is performed by direct heating. Despite the fact that research on induction heating has been conducted for a relatively long period of time, there have been few studies on the electrothermal technology using induction heating. Therefore, in this paper, to improve the heat efficiency of electric induction boiler, the influence of the cross sectional area, number of windings and winding layers is analyzed by finite element method through parametric study method. The method of finding the design point which maximizes the total loss is proposed by the alternating winding design method which can maximize the heat generation by analyzing copper and iron losses.

Keywords : Core Loss, Electric Induction Boiler, FEM, Induction Heating, Parametric Study

*Corresponding Author : Sol Kim(Yuhan Univ.)

Tel: +82-2-2610-0733 email: slamsol@yuhan.ac.kr

Received December 10, 2018

Revised January 15, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

1. 서론

석유자원의 고갈과 고유가의 지속은 이미 수십 년간 인류의 과제로 남아있다. 이로 인해 각국은 새로운 대체 에너지원의 개발, 기존 에너지 과소비 제품의 퇴출과 더불어 효율개선 기술개발을 장려하고 있다. 기후변화협약, 온실가스배출규제와 같은 규제적 규약들은 고효율 에너지 기자재 개발과 에너지의 효율적 이용을 촉진하는 촉매로 작용하고 있다. 국내에서도 에너지효율등급제와 고효율기자재인증과 같은 에너지 절약정책을 적극적으로 활용하고 있다. 특히 에너지소비가 큰 분야 중 전열기기가 효율이 좋지 못한 편으로, 따라서 정부의 지속적 관심과 더불어 업계에서도 전열기기의 효율을 높이기 위한 기술개발이 적극적으로 이루어지고 있다.

이중 전기온풍기는 히터를 가열시켜 팬으로 열기를 불어주는 방식을 사용하고 있으며, 전기보일러는 히터에 물을 접촉시켜 순환시키는 방식을 주로 사용하고 있다. 기존 전기보일러를 활용할 경우 물의 미네랄이 고온의 히터와 접촉하여 탄화되어 흡착되는 과정에서 히터의 부식을 촉진시켜 히터의 효율을 저하시키는 원인이 되며, 공기 중의 수분이 뜨겁게 가열되어 상승되는 건조현상과 증발된 공기가 차가운 물체에 붙는 결로현상을 일으키게 된다. 이러한 이유로 에너지 효율이 높고, 전도나 대류 가열보다 피가열물을 균일하게 가열시킬 수 있는 유도가열방식[1]을 보일러에 적용시킨 전기유도보일러가 각광을 받고 있는데, 이 방식은 물이 담겨 있는 보일러 관로를 유도가열방식으로 가열하여 직접가열시 발생하는 문제를 해결시킬 수 있는 대안으로 인정받고 있다.

그러나 비교적 오랜 기간 유도가열에 대한 연구가 이루어졌음에도 불구하고 유도가열을 이용한 전열기술에 대한 연구결과는 그리 많지 않은 실정이다. Soon-Kyrl Kwon의 1명은 공진형 ZVS PWM 인버터를 이용한 유도히터온수시스템에서 스위칭 방식에 대하여 연구하였고[2], 서은숙외 5명은 Half Bridge 직렬공진인버터를 이용한 유도가열 시스템을 제안하였다[3]. 송성근의 2명은 Full Bridge ZVS PWM 인버터를 이용한 치과용 고주파 주조기를 설계하고 타당성을 검증하였다[4]. 신대철외 1명은 Full Bridge 고주파 직렬 부하 공진형 인버터를 전기온풍기에 적용하여 효율개선 효과를 제시하였고[5], 이상훈외 2명은 유도가열시스템을 위한 전류형 Full Bridge 공진형 인버터의 구성회로를 단순화시킬 수

있는 토폴로지를 제안하였다[6]. 최낙선의 2명은 국부 유도 가열용 권선의 최적 설계에 방법론을 제시하였고[7], 오동욱외 4명은 유도가열 권선 설계를 위한 설계인자의 민감도 해석을 발표하였다[8]. 그러나 선행된 연구들은 유도가열을 위한 인버터 설계에 집중되고 있으며, 권선의 최적설계에 의한 발열부의 최적화에 대한 연구는 부족한 실정이며 우형균외 1명만이 평판 유도발열체를 이용하여 발열체와 권선 간의 거리에 따른 특성과 주파수 가변에 따른 특성을 연구결과를 제시하였으나 권선자체의 최적화 검토가 부족하였다[9].

따라서 본 논문에서는 전기유도보일러의 발열효율을 개선하기 위하여 매개변수연구방법을 통하여 권선의 단면적, 권선의 턴수 및 권선의 겹수에 의한 영향을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 특히 발열 요소인 동손과 철손의 분석을 통하여 발열을 극대화시킬 수 있는 권선 설계방법으로 총손실이 최대가 되는 설계점을 찾는 방법을 제시하였다.

2. 기존모델 모델링 및 손실분석

Fig. 1은 기존 유도보일러의 구조를 나타낸다. 스테인리스 보일러 관 내부는 도금된 스틸관이 위치한다. 내부 스틸관은 발열체인 코어를 스틸로 사용하여 유도 가열원으로 사용한다. 내부스틸관과 코어스틸관 사이에 유도권선을 배치하고 전류를 흘려 열을 발생시키는 구조를 가지고 있다. 이때 하부 입수부로 들어온 물이 내부스틸관의 내외부로 흐르면서 온수열교환이 이루어지게 된다. 기존 유도보일러의 사양은 Table 1과 같다. 유도권선은 알루미늄 재료를 이용하여 총 4층의 구조로 이루어져 있으며 층별로 서로 다른 턴수를 가지고 있다.

내부 발열코어부는 도전율이 6,000,000[siemens/m]를 갖는 SPP38 탄소강관을 이용하여 열이 많이 발생하도록 하였으며, 내외부 파이프는 누설자속을 최소화 할 수 있는 스테인레스 스틸을 사용하여 쇄교자속이 코어에 집중되도록 하였다. 코어, 외관 및 권선의 재료적 특성을 Table 2에 나타내었다.

1차 권선의 권선저항은 도전율이 이용하여 식(1)로부터 계산하였으며, 알루미늄의 온도계수를 고려하여 온도에 따른 저항값을 보정하였다. Table 3은 1차권선저항의 계산 결과를 나타낸다.

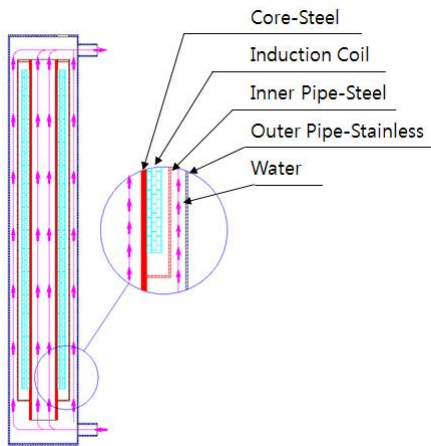


Fig. 1. Structure of Induction Boiler

Table 1. Specification

Spec.	Value	Unit
Input Voltage	220	V_{rms}
Input Frequency	60	Hz
Layer	4	-
Turns per layer (1F/2F/3F/4F)	95/93/91/89	Turns

Table 2. Materials

Item	Materials	Conductivity [siemens/m]	Density [kg/m^3]
Core	Carbon Steel Pipe(SPP38)	6,000,000	7,830
Pipe	Stainless Steel	1,100,000	8,055
Winding	Aluminium	38,000,000	2,689

$$R_1 = \frac{1}{\sigma S} [ohm], \rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

기존모델의 특성을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용하여 특성을 해석하였다. 해석대상모델은 Z축방향의 원통형 구조를 갖지만, 권선이 축길이의 전체에 감겨 있지 않기 때문에 길이방향으로 모델링하였으며 대칭성을 고려하여 1/2로 모델링하였다. 유도보일러의 발열성능을 확인하기 위하여 발열부인 코어의 손실을 계산하였다.

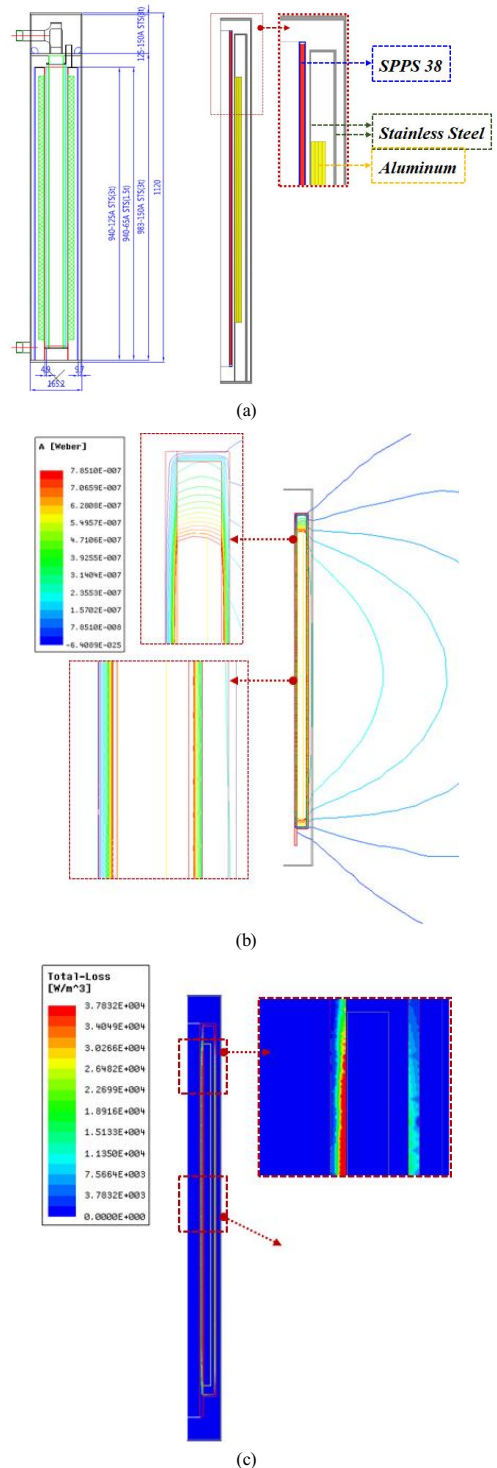


Fig. 2. FEA of a conventional model
(a) FEM modeling (b) Flux Line (c) Total Loss Distribution

Table 3. Resistance of primary coil

Item	Value	Unit
Total Turns	368	Turns
One-Turn Length	0.299	m
Total Winding Length	110.119	—
Winding Cross-section Area	0.000315	mm ²
Conductivity of Aluminium(σ)	38,000,000	siemens/m
Temperature Coefficient of Aluminium(α)	0.00429	
Winding Resistance(0℃)	0.0920	Ω
Winding Resistance(30℃)	0.1039	Ω
Winding Resistance(130℃)	0.1315	Ω

Fig. 2는 FEM모델과 자속선도 그리고 총 손실분포를 보여준다. 유한요소해석은 Maxwell 3D를 사용하였다. 총손실은 동손과 철손을 구하여 합산하였다. 철손은 히스테리시스손과 와전류손이며, 코어인 탄소강관과 내부 파이프인 스테인레스강에서 발생하는 손실을 합산하였다. 철손의 계산식은 식(2)와 같다.

$$P_C = P_h + P_e = K_h f B_m^n + K_e f^2 B_m^2 \quad (2)$$

여기서, K_h 는 히스테리시스손계수이며, K_e 는 와전류손계수, n 은 Steinmetz상수이다.

해석결과 철손의 평균값은 17.2663[kW]였으며 동손이 1.4844[kW]로 총손실은 18.7507[kW]로 계산되었다.

3. 권선 매개변수연구에 의한 최적설계

3.1 권선 단면적에 의한 설계

권선의 단면적 크기 변화에 따른 발열량을 비교하기 위하여 권선수를 기존 모델과 동일하게 설정하고 권선의 가로축 길이와 세로축 길이를 가변시키면서 기존 모델과 비교하였다. Fig. 3에는 권선 단면적 설계변수와 최소단면적과 최대단면적의 크기를 비교하였다. 저항의 단면적이 작을수록 높아지기 때문에 모델 10의 저항값이 가장 높고 모델 40은 가장 낮았다. 각 모델의 저항값을 이용하여 유한요소법을 이용하여 손실을 계산하면 Table 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 권선저항이 작아질수록 도선에 흐르는 전류량이 증가하기 때문에 손실은 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 권선 세로길이에 따른 출력 변화가 크게 영향을 주고 있다. 1층 권선수가 95턴이

므로 세로길이가 1[mm] 증가시 전체길이가 95[mm] 증가되기 때문이다. 권선 당 세로길이가 1[mm] 증가하게 되면 약 27[W]의 손실량이 증가하게 되어 발열성능을 개선시킬 수 있다.

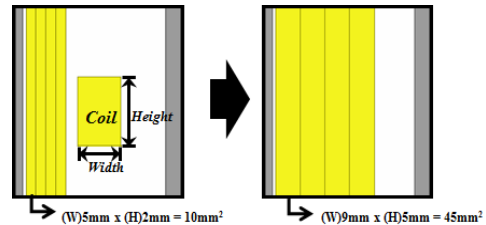


Fig. 3. Placement of Coil cross-section

Table 4. Coil cross-sectional design variables and Loss Analysis by Coil Cross Section

	existing	model 10	model 21	model 40
Width [mm]	4.5	2	3	5
Height [mm]	7	5	7	8
Cross- section [mm ²]	31.5	10	21	40
Resistance (30°) [Ω]	0.1038	0.3279	0.1558	0.0818
Current [Arms]	119.563	84.048	117.347	135.164
Inductance [mH]	31.2171	41.2533	33.4077	27.6854
Copper Loss [KW]	1.4844	2.3166	2.1448	1.4939
Core Loss [KW]	17.2663	11.5739	16.8478	18.5493
Total Loss [KW]	18.7507	13.8905	18.9926	20.0432



Fig. 4. Loss comparison by a Coil Cross-Section

3.2 권선수에 의한 설계

권선의 층별 권선수에 의한 영향을 비교하였다. 4층 권의 구조를 유지하고 각층별 권선수를 달리하였다. 내측 1층이 권선법의 용이성 때문에 최대로 감을 수 있으며 층이 올라갈수록 권선수가 줄어드는 것으로 하였다. 기존 모델의 층별 감소간격을 비교모델에도 동일하게 적용하였다. 권선의 저항값은 권선수를 반영하였다. 권선의 권선수가 적을수록 저항이 감소되어 전류는 증가하나 인덕턴스는 감소한다. 손실의 전류량에 의존하기 때문에 권선수가 가장 작은 328모델이 21.1688[KW]로 가장 많이 발생하였다.

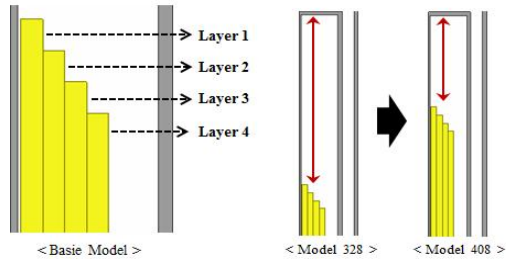


Fig. 5. Coil layers

Table 5. Coil turns per layer

	1 st Layer	2 nd Layer	3 rd Layer	4 th Layer	Total Turn	Winding Resistance (30°) [Ω]
existing	95	93	91	89	368	0.1038
model 328	85	83	81	79	328	0.0925
model 348	90	88	86	84	348	0.0982
model 388	100	98	96	94	388	0.1095
model 408	105	103	101	99	408	0.1151

Table 6. Loss Analysis by Coil Cross Section

	Current [Arms]	Inductance [mH]	Copper Loss [KW]	Core Loss [KW]	Total Loss [KW]
existing	119.617	30.9336	1.4844	17.2668	18.7507
model 328	144.604	23.0851	1.9805	18.9684	21.1688
model 348	130.608	26.6281	1.6930	18.1421	19.9209
model 388	110.877	35.9336	1.3336	16.3650	17.6168
model 408	103.331	40.1555	1.2100	15.4313	16.5183

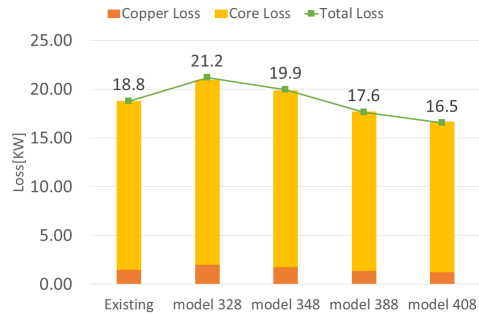


Fig. 6. Loss comparison by Coil Turns

3.3 권선접수에 의한 설계

권선접수에 따른 영향을 분석하기 위하여 전체 권선수를 기존모델의 권선수로 고정시키고 접수를 3접에서부터 내측파이프까지 이론적으로 증가가능한 최대접수까지 변화시켰다. 동일 권선수를 갖을 경우 권선의 접수가 작아질수록 전류가 많이 흘러 손실이 커지는 것을 볼 수 있다. 권선의 접수가 3접인 모델 3가 가장 많은 손실을 발생시켰는데 동손은 기존모델의 약 1.7배, 철손 약 1.3배 크게 발생했다. 총손실은 24.7008[KW]로 기존보다 132% 증가하여 발열량이 증가했음을 알 수 있다.

Table 7. Coil layers

	Existing	model 3	model 5	model 6
1 st Layer	95	125	77	67
2 nd Layer	93	123	75	65
3 rd Layer	91	120	74	62
4 th Layer	89	-	72	60
5 th Layer	-	-	780	58
6 th Layer	-	-	-	56
total turns	368	368	368	368
distance between inner pipe and winding [mm]	14.65	10.25	5.65	1.15

Table 8. Loss Analysis by the number of coil layers

	Current [Arms]	Inductance [mH]	Copper Loss [KW]	Core Loss [KW]	Total Loss [KW]
existing	119.617	30.9336	1.4857	17.2668	18.7525
model 3	155.599	22.5587	2.5140	22.1868	24.7008
model 5	98.947	36.8679	1.0166	14.0383	15.0549
model 6	85.483	42.3333	0.7588	11.8153	12.5741

4. 결론

본 논문에서는 전기유도보일러의 발열성능 개선을 위하여 권선의 최적화를 실시하였다. 발열성능지표를 보일러의 손실량으로 선정하고 유한요소법을 이용하여 기존 모델을 해석하여 손실을 계산하였다. 권선의 단면적, 권선수, 겹수를 설계변수로 선정하고 기존모델을 기준으로 비교모델을 만들어 전류, 인덕턴스, 동손, 철손 및 총손실을 계산하였다. 단면적은 모델40으로 선정하고, 권선의 겹수는 모델3의 파라미터를 활용하였으나, 권수는 모델328에서 층간 권선수비율을 고려하여 324턴으로 보정하였다.

최적의 파라미터를 동시에 고려하여 해석한 결과 총손실이 기존의 모델보다 약161% 더 발생한 것을 확인할 수 있었다. 손실량의 증가로부터 유도보일러의 발열량이 증가할 것으로 예측할 수 있으므로 동일한 기계형상에서 권선의 최적설계로 발열성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Hyun-Seob Cho, "The Study of Induction Heating Apparatus with High Efficiency", J. Korea Information Electron Communication Technology, vol. 9 No. 2, pp. 185-189, Sep. 2016. DOI: <https://doi.org/10.17661/jkiiect.2016.9.2.185>
- [2] Soon-Kurl Kwon, Sang-Pil Mun, "Development of Induction Heater Hot Water System using New Active Clamping Quasi Resonant ZVS PWM Inverter", J. the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 22, No. 11, pp. 23-29, Nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2008.22.11.023>
- [3] Eunsook Seo, Kyeungsoo Jeong, Sehyun Im, Dongmin Keum, Junhyeok Yang, Inhwan Jung, "Design and Implementation of an Induction Heating System", Proceeding of KIEE Summer Annual Conference, pp. 2189-2190, Jul. 2006.
- [4] Seung-Gun Song, Sang-Kil Lim, Sang-Hun Lee, "Design of High Frequency Casting Machine for Dental using Induction Heating System", J. the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 26, No. 8, pp. 79-87, Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2012.26.8.079>
- [5] Dae-Chul Shin, Hyoung-Gyun Woo, "A Study on the Electrical Fan Heater using High Efficiency Induction Heating", J. the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 26, No. 3, pp. 24-30, Mar. 2012.
- [6] Sang-Hun Lee, Sang-Kil Lim, Seung-Gun Song, "Design

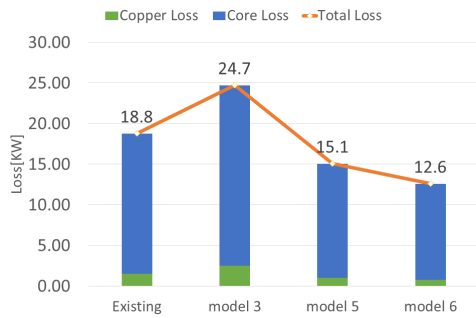


Fig. 7. Loss comparison by the number of coil layers

3.4 최적모델선정

권선의 단면적, 권선수, 권선 겹수에 따른 출력 결과로부터 각각의 변수에서 최대출력을 갖는 모델을 선택하여 최적의 권선 최적 설계를 시행하였다. 권선의 단면적은 최대출력을 갖는 모델40의 가로 5[mm] 세로 8[mm]로 정하고, 권선의 겹수는 모델3의 3겹으로 선정하였다. 권선의 턴수는 모델328이 가장 큰 손실을 나타내었으나 층별감소치를 고려하여 324턴으로 보정하였다. 표 9에 기존모델 대비 최적모델의 설계치와 해석결과를 비교하였다. 최적모델은 기존모델보다 저항과 인덕턴스는 감소하여 전류를 증가시켜 동손과 철손이 증가하였다. 각 파라미터별 최적화를 수행한 결과 총손실이 기존모델보다 약 161% 증가한 것을 확인할 수 있다.

Table 9. Optimal design of a coil

	Windings				
	1 st Layer	2 nd Layer	3 rd Layer	4 th Layer	Total Turn
Existing model	95	93	91	89	368
Optimal model	110	108	106	-	324
	Winding Cross-section			Winding Resistance (30°) [Ω]	
	W [mm]	H [mm]	W×H [mm²]		
Existing model	4.5	7	31.5	0.1038	
Optimal model	5	8	40		
	Current [Arms]	Inductance [mH]	Copper Loss [KW]	Core Loss [KW]	Total Loss [KW]
Existing model	119.617	30.9336	1.4857	17.2668	18.7525
Optimal model	211.255	14.9127	3.213	26.9582	30.1712

of New Current Full-Bridge Resonant Inverter for Induction Heating System”, J. the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 26, No. 7, pp. 59-69, Jul. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2012.26.7.059>

- [7] Nak-Sun Choi, Dong-Wook Kim, Dong-Hun Kim, “Optimal Design of Local Induction Heating Coils Based on the Sampling-Based Sensitivity”, J. the Korean Magnetics Society, vol. 23, no. 3, pp. 110-116 Jun. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.4283/JKMS.2013.23.3.110>
- [8] Dong-Wook Oh, Tae-Hoon Kim, Kyun Hyung Do, Jang Min Park, Jungho Lee, “Design and Sensitivity Analysis of Design Factors for Induction Heating System”, J. the Korean Society for Heat Treatment, vol.26, no.5, pp.233-240, Sep. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.12656/jksht.2013.26.5.233>
- [9] Hyoung-Gyun Woo, Dae-Chul Shin, “A Study on the Distance and Frequency Variable Characteristics of Flat Plate Induction Heating Element”, J. the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 27, No. 6, pp. 68-74, Jun. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.6.068>

김 윤 현(Youn-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 1999년 2월 : LG산전연구소 책임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기, 전력전자

김 솔(Sol Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 205년 8월 : 전기기기인력양성센터 수석연구원
- 2005년 9월 ~ 현재 : 유한대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기, 자동화설계