

전기자동차용 판형 인덕션 히터의 인덕턴스 및 철손 최적설계 연구

A study on Optimal Design for the Inductance and Coreloss of Plate Type Induction Heater for Electric Vehicle

강준규, 조병욱, 김기찬
한밭대학교 전기공학과

Jun-Kyu Kang(here91@naver.com), Byoung-Wook Jo(jbwjwbw@naver.com),
Ki-Chan Kim(kckim@hanbat.ac.kr)

요약

전기자동차 배터리 시스템은 낮은 온도에서 배터리 출력과 수명이 감소하는 문제가 발생한다. 상온 유지를 목적으로 Positive Temperature Coefficient(PTC) 히터가 사용되고 있다. 하지만 PTC 히터는 복잡한 절연구조로 인해 중량이 크다. 중량이 클수록 전기자동차의 연비가 감소한다. 반면에 인덕션 히터는 단순한 절연 구조로 중량 저감에 효과적이며 빠른 온도 상승 특성을 가지고 있다. 따라서 전기자동차용 히터는 인덕션 히터가 적합하다. 인덕션 히터는 LC공진 회로로 구성된다. 정전용량이 클수록 가격과 중량이 상승하기 때문에 인덕턴스를 높여 정전용량을 감소시켜야한다. 또한 인덕션 히터의 주 발열원은 철손이다. 따라서 전자기장 설계 관점에서 인덕턴스 및 철손의 최적화가 중요하다. 본 논문에서는 인덕션 히터 구조 변경에 따른 인덕턴스 및 철손을 다구찌 기법과 유한요소법(FEM) 시뮬레이션을 통해 분석하고 최적화 설계하였다.

■ 중심어 : | 발열체 구조 | 인덕션 히터 | 인덕턴스 | 정전용량 | 철손 |

Abstract

The battery system of an electric vehicle suffers from the problem the battery output and the service life decrease at low temperature. A Positive Temperature Coefficient(PTC) heater is used for maintaining room temperature but is heavy due to a complicated insulation structure. The larger the weight is, the lower the fuel economy of the electric vehicle is. On the other hand a induction heater have a simple insulation structure, which is effective in weight reduction and has a rapid temperature rise. The induction heater consists of an LC resonance circuit. The larger the capacitance is, the higher the price and weight is. Therefore, the inductance should be increased to reduce the capacitance. Also, the main heat source of the induction heater is coreloss. So, it is important to optimize inductance and coreloss in terms of electromagnetic field design. In this paper, the inductance and the coreloss according to the change of the induction heater structure were optimized through the Taguchi method and Finite Element Method(FEM) simulation.

■ keyword : | Heating Element Structure | Induction Heater | Inductance | Capacitance | Core Loss |

* 본 연구는 한국산업기술평가관리원 연구과제로 수행되었습니다.

* This work was supported by the Technology Innovation Program (10070181, 6 kW Integrated Induction Coolant Heater System Development for Battery and Cabin Heating) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (M/I, South Korea).

* 본 논문은 한국콘텐츠학회 2018 춘계 종합학술대회 우수논문입니다.

접수일자 : 2018년 09월 07일

심사완료일 : 2018년 09월 27일

수정일자 : 2018년 09월 27일

교신저자 : 김기찬, e-mail : kckim@hanbat.ac.kr

I. 서론

배기가스 규제 강화로 인해 자동차 시장은 내연기관 자동차에서 전기자동차나 수소 자동차로 변하고 있다 [1]. 대부분 내연기관 자동차는 엔진의 열을 이용해 난방을 하지만 전기자동차는 엔진의 열을 이용하지 못하므로 별도의 난방 시스템이 필요하다[2]. 또한 전기자동차에 사용되는 배터리는 낮은 온도에서 배터리 출력이 떨어지고 배터리 수명이 감소하는 문제가 발생한다. 자동차 실내 난방과 배터리 난방 목적으로 PTC 히터가 사용되고 있다. 전기자동차용 PTC 히터에 관한 여러 논문들이 있다. 하지만 PTC 히터의 중량 저감에 관한 논문은 없다. 따라서 PTC 스톤의 고중량과 발열체와 전극 사이에 절연구조로 인한 중량이 더해져 자동차 연비 효율을 떨어뜨린다. 반면에 인덕션 히터는 코일과 발열체로 이루어진 단순한 구조이며 발열체와 전극 사이에 절연이 필요하지 않아 중량 저감에 효과적이며 빠른 온도 상승 특성을 가지고 있기 때문에 전기자동차용 난방 시스템에 인덕션 히터가 적합하다[3-7]. 인덕션 히터의 전자기장 설계 관점에서 고려해야 할 파라미터는 인덕턴스와 철손이다. 인덕턴스는 교류 회로에서 전자 유도의 크기를 나타내는 정수이고 철손은 시간적으로 변화하는 자기장에 의해 철심에 발생하는 전력 손실이다. 인덕션 히터는 배터리 전압과 인버터를 이용하여 코일에 교류 전류를 인가한다. 교류 전류에 의해 시간에 따라 변하는 자기장이 발생하고 이 자기장에 의해 철심에 전류가 흘러 철손이 발생한다. 인덕션 히터는 출력을 높이기 위해서 LC 공진회로를 구성한다. 또한 인덕턴스와 정전용량에 의해서 공진주파수가 결정된다. 정전용량에 비례하여 가격 및 중량이 상승한다. 따라서 인덕턴스를 증가시켜 정전용량을 감소시키는 것이 인덕션 히터를 가볍고 저렴하게 제작할 수 있다 [8-10]. 인덕션 히터의 출력은 곧 발열량이다. 발열량은 철심에 전류가 흘러 발생하는 철손과 코일에 전류가 흘러 발생하는 동손이 존재한다. 동손이 높으면 코일에 절연 레벨을 높여져 가격상승의 원인이 된다. 또한 코일에 고온이 발생하여 절연이 파괴되면 인접한 턴끼리 쇼트가 일어난다. 이로 인해 턴수가 줄어들고 턴수 감

소에 의해 인덕턴스가 떨어지고 인덕턴스가 떨어지면 공진주파수가 변경되어 출력이 떨어진다. 또한 열전달률을 고려할 때 방열면적이 넓은 철심에 발생하는 철손을 증가시켜야 한다. 인덕션 히터에 대한 여러 논문들이 있지만 LC공진 회로를 구성한 전기자동차용 인덕션 히터 구조 변경에 따른 인덕턴스 및 철손에 관한 논문은 없다. 유한 요소법은 유한개의 요소로 분할하여 각기의 영역에 관하여 계산을 해가는 계산법이고 다구찌 기법은 품질의 개선 기법으로 최적화 설계나 잡음에 강한 설계 등에 이용되는 기법이다.

본 논문에서는 minitap을 이용한 다구찌 기법과 maxwell을 이용한 유한요소법 시뮬레이션을 통하여 인덕션 히터 구조 변경에 따른 인덕턴스 및 철손을 분석하고 최적화 설계 모델을 도출한다.

II. 본론

1. 인덕션 히터 모델 사양 및 해석 조건

[표 1]은 인덕션 히터 Base 모델 FEM 시뮬레이션 모델 사양을 나타낸다. 철손은 정현파 전류 인가 시 히스테리시스 손실과 와전류 손실의 합으로 나타낸다. 강자성체는 와전류 손실과 히스테리시스 손실이 발생하는 물질로 히스테리시스 손실은 교류 전류 인가 시 물질의 히스테리시스 루프에 의해 발생하는 손실이고 와전류 손실은 교류 전류인가 시 시간에 따라 변하는 자기장이 발생하고 이 자기장에 의해 유도기전력이 발생하는데 이 유도기전력에 의해 도전율을 가진 발열체에 와전류가 흐르게 되고 이 와전류에 발생하는 손실을 와전류 손실이라고 부른다. 따라서 인덕션 히터의 발열체는 두 손실을 모두 이용할 수 있는 강자성체인 SUS430f로 선정하였다. 식 (1)은 정현파 전류 인가 시 철손 공식이다. K_h 는 Hysteresis 상수, K_e 는 Classical Eddy 상수, f 는 주파수, B_m 은 자속밀도의 최대값을 나타낸다. 또한, 식 (1)을 보면 알 수 있듯이 히스테리시스 손실은 주파수에 비례하고 와전류 손실은 주파수에 제곱에 비례하기 때문에 인덕션 히터는 철손을 높이기 위해서 고주파수를 사용한다. 본 논문에서는 26[kHz]의 고주파수를 사

용한다.

$$CoreLoss = K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 \quad (1)$$

고주파수를 이용하는 인덕션 히터는 근접효과 및 표피효과를 유의해야 한다. 표피효과는 코일 내부에도 교류 전류가 흐르기 때문에 유도기전력이 발생하는데 중심부로 갈수록 유도기전력이 커서 전류가 중심부에 흐르지 못하고 표면에만 흐르는 현상이다. 근접효과는 2개 이상의 도체가 근접한 경우 전류가 한쪽으로 몰리는 현상이다. 위의 현상들로 인해 전류가 도체에 부분적으로 흐르게 되어 면적이 줄어드는 효과가 발생하여 저항이 증가한다. 동일 전류 인가 시 저항 증가로 인해 동손이 커지기 때문에 표피효과 및 근접효과를 줄이기 위해서 코일은 여러가닥으로 트위스트된 Litz wire를 선정하였다. Litz wire 사양은 200reels, 릴의 직경은 0.05[mm]이다. 이 모델의 경우 인가주파수 26[kHz]일 때 침투깊이가 0.41[mm]이므로 표피효과에 영향을 받지 않는다.

2D FEM 시뮬레이션 해석 조건은 인가 주파수 26[kHz], 정현과전압 162.63[V_{rms}], 정전용량 1[μF]이다.

표 1. 인덕션 히터 Base 모델 FEM 시뮬레이션 사양

	사양	단위
발열체 재질	SUS430f	-
발열체 두께	1	mm
발열체 반경	76	mm
발열체 사이 간격	24	mm
권선 재질	Cu(Litz wire)	-
권선 반경	9.7	mm
코일 턴수	32	-
코일 층수	2(16/16)	-
코일 사이 간격	3.6	mm
코일 직경	1.97(0.1mmX200reels)	mm

2. FEM 시뮬레이션 및 다구찌 기법

[그림 1]은 인덕션 히터 2D FEM 시뮬레이션 Base 모델을 나타낸다. R축은 발열체의 반경 축이고 Z축은 발열체의 높이 축이다. [그림 1]을 통해 인덕션 히터는

발열체와 코일로 이루어진 단순한 구조임을 알 수 있으며 PTC 히터와 달리 복잡한 절연패키지가 필요하지 않음을 확인할 수 있다.

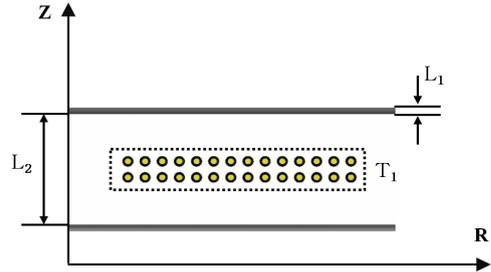


그림 1. 2D FEM 시뮬레이션 Base 모델

[표 2]는 제어 인자 배치를 나타낸다. [표 2]에 나타난 인덕턴스 및 철손 값은 FEM 시뮬레이션을 통해 도출된 값이다. 제어인자는 턴수(T1), 발열체 두께(L1), 발열체 사이 간격(L2)을 3수준으로 제작성을 고려하여 선정하였고 목적함수는 철손 및 인덕턴스로 선정하였다.

표 2. 제어 인자 배치

	T1	L1[mm]	L2[mm]	Inductance [μH]	Coreloss [W]
1	28	0.5	21	31.52	4980.6
2	28	1.0	24	31.19	5267
3	28	1.5	27	31.99	5684.62
4	32	0.5	24	38.16	5505.31
5	32	1.0	27	37.68	5860.52
6	32	1.5	21	35.52	5043.9
7	36	0.5	27	46.05	5768.74
8	36	1.0	21	41.42	4915.72
9	36	1.5	24	42.56	5263.33

[그림 2]과 [그림 3]은 제어인자에 따른 인덕턴스 및 철손 분석결과를 나타낸다. 인덕턴스는 턴수의 제곱에 근사적으로 증가하였지만 턴수를 증가시킬수록 코일은 점차 외곽에 배치되기 때문에 누설 자속이 증가하여 턴수의 제곱만큼 증가하지 못하였다. 발열체 두께는 얇아질수록 인덕턴스가 증가하였다. 자속은 사선을 그리면서 쇠퇴하기 때문에 발열체 두께가 두꺼워지면 자속이

침투하기 어려운 경로를 지나가게 되면서 쇠교자속량이 떨어지게 된다. 즉 인덕턴스가 떨어지게 된다. 발열체 사이 간격이 증가할수록 인덕턴스는 증가한다. 기자력이 높은 곳에서 포화하는 SUS430f를 사용하여 고출력을 얻었지만 투자율과 도전율이 높아 표피효과가 크기 때문에 오히려 자성체가 없을 때 인덕턴스 값이 66.79[μH]로 더 높으므로 발열체 사이 간격이 멀수록 인덕턴스는 증가한다. 식 (2)는 인덕션 히터의 철손 공식이다. K_h 는 Hysteresis 상수, K_c 는 Classical Eddy 상수, K_e 는 Excess 상수, B 는 자속밀도이다. 여기서 K_e 는 전류의 고주파에 비례한다. 와전류 손실과 히스테리시스 손실을 고려하여 철손을 분석해보면 철손은 턴수가 증가함에 따라 증가했다가 감소했다. 또한 발열체 두께가 얇아질수록 발열체에 쇠교하는 자속량이 많아져서 철손이 증가하였으며 발열체 간격은 멀어질수록 발열체에 쇠교하는 자속량이 많아져서 철손이 증가함을 확인할 수 있다.

$$CoreLoss = K_h \frac{1}{\pi} \frac{\partial B}{\partial t} + K_c \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 + K_e \frac{1}{C_e} \left[\left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)_{\max} \right]^{-0.5} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

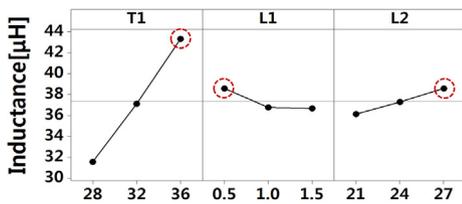


그림 2. 제어인자에 따른 인덕턴스 분석 결과

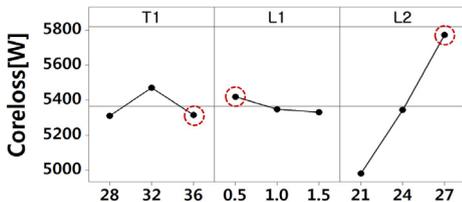


그림 3. 제어인자에 따른 철손 분석 결과

3. 최적 설계 결과 분석

[그림 4]와 [그림 5]는 각각 Base 모델 및 최적화 모델 자속 선속 분포도를 나타낸다. 인덕턴스의 최적 설계 포인트는 턴수 36턴, 발열체 두께 0.5[mm], 발열체 사이 간격 27[mm]이다. 철손의 최적 설계 포인트는 턴수 32턴, 발열체 두께 0.5[mm], 발열체 사이 간격 27[mm]이다. 최적화 모델은 위의 결과를 토대로 발열체 두께와 발열체 사이 간격은 인덕턴스 및 철손의 최적 설계 포인트가 동일하므로 0.5[mm]와 27[mm]으로 선정하였고 턴수는 인덕턴스가 최적이면서 철손이 중간인 36턴을 선정하였다.

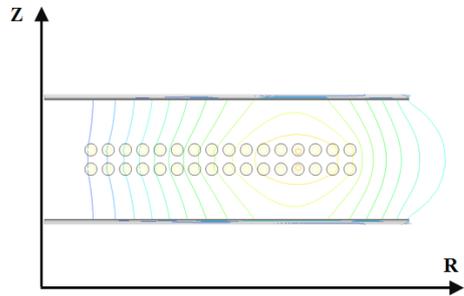


그림 4. Base 모델 자속 선속 분포도

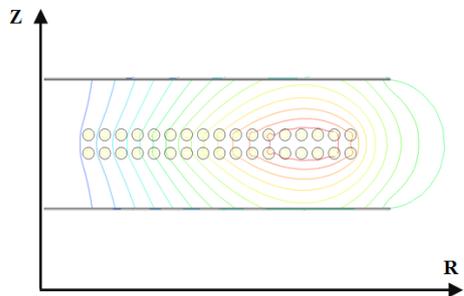


그림 5. 최적화 모델 자속 선속 분포도

[그림 4]와 [그림 5]를 보면 알 수 있듯이 Base 모델에 비해 최적화 모델의 쇠교자속량이 증가함을 확인할 수 있다. [그림 6]과 [그림 7]는 각각 Base 모델 및 최적화 모델 자속밀도 분포도를 나타낸다. 그림을 보면 알 수 있듯이 Base 모델에 비해 최적화 모델의 자속밀도가 증가했음을 확인할 수 있다.

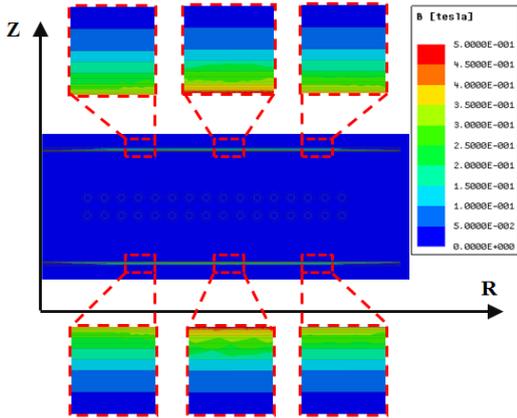


그림 6. Base 모델 자속밀도 분포도

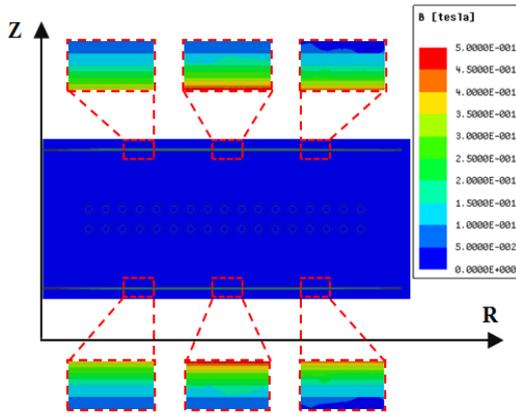


그림 7. 최적화 모델 자속밀도 분포도

[표 3]은 Base 모델과 최적화 모델 철손 및 인덕턴스를 나타낸다. Base 모델에 비해 최적화 모델의 인덕턴스가 26.65[%] 증가하였고 철손은 5.52[%] 증가하였다.

표 3. Base 모델과 최적화 모델 철손 및 인덕턴스

	Base 모델	최적화 모델	단위
인덕턴스	36.36	46.05	[μ H]
철손	5467.2	5768.74	[W]

III. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 판형 인덕션 히터의 구

조 변경에 따른 인덕턴스 및 철손을 분석하였으며 최적화 설계를 제안하였다. 연구 결과, 최적화 모델이 Base 모델에 비해 인덕턴스 및 철손이 각각 26.65[%], 5.52[%] 증가하였다. 인덕턴스 증가로 인해 정전용량이 줄어들어 제작 단가 및 중량을 저감시킬 수 있다. 철손 증가로 인해 더 작은 배터리 전압을 이용하여 동일 출력을 낼 수 있다. 위와 같은 이유로 전기자동차의 연비를 향상시킬 수 있다. 이 논문은 기계적 강도를 고려하지 않았기 때문에 기계적 강도를 고려한 보완설계가 필요하다. 또한 향후 발열체 재질 변경에 따른 인덕턴스 및 철손을 분석할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 손영욱, 허건수, “국내의 전기자동차 기술 개발 동향 및 국내 전기자동차 핵심 부품 기술 개발 전략,” 전력전자학회논문지, 제22권, 제5호, pp.373-381, 2017.
- [2] A. Boadi, Y. Tsuchida, T. Todaka, and M. Enokizono, “Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method,” IEEE Trans. Magn., Vol.41, No.10, pp.4048-4050, 2005.
- [3] H. Kagimoto, D. Miyagi, N. Takahashi, N. Uchida, and K. Kawanaka, “Effect of temperature dependence of magnetic properties on heating characteristics of induction heater,” IEEE Trans. Magn., Vol.46, No.8, pp.3018-3021, 2010.
- [4] S. M. Jang, S. K. Cho, S. H. Lee, H. W. Cho, and H. C. Park, “Thermal analysis of induction heating roll with heat pipes,” IEEE Trans. Magn., Vol.39, No.5, pp.3244-3246, 2003.
- [5] T. Wang, P. Zheng, Q. Zhang, and S. Cheng, “Design characteristics of the induction motor used for hybrid electric vehicle,” IEEE Trans. Magn., Vol.41, No.1, pp.505-508, 2005.
- [6] P. Urbanek, A. Skorek, and M. B. Zaremba,

“Magnetic flux and temperature analysis in induction heated steel cylinder,” IEEE Trans. Magn., Vol.30, No.5, pp.3328-3330, 1994.

- [7] Z. Keyi, L. Bin, L. Zhiyuan, C. Shukang, and Z. Ruiping, “Inductance computation consideration of induction coil launcher,” IEEE Trans. Magn., Vol.45, No.1, pp.336-340, 2009.
- [8] Shinobu Kawashima, Takeshi Ishigohka, Akira Ninomiya, and Mitsuho Furuse, “Power System Voltage Stabilizer Using LC Resonance Circuit With Superconduction Coil and Capacitor,” Vol.19, No.3, 2009.
- [9] Oscar Lucfa, Jose M. burdio, Ignacio Millan, JesUs Acero, and Diego Puyal “Load-Adaptive Control Algorithm of Half-Bridge Series Resonant Inverter for Domestic Induction Heating,” Vol.56, No.8, pp.3106-3116, 2009.
- [10] Jesús Acero, Claudio Carretero, Rafael Alonso, and José M. Burdío, “Quantitative Evaluation of Induction Efficiency in Domestic Induction Heating Applications,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol.49, No.4, pp.1382-1389, 2013.

저 자 소 개

강 준 규(Jun-Kyu Kang)

정회원



- 2016년 8월 : 한밭대학교 전기공학과(공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과(공학석사)

<관심분야> : 전기기기, 전기 자동차

조 병 욱(Byoung-Wook Jo)

정회원



- 2018년 8월 : 한밭대학교 전기공학과(공학사)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과(공학석사)

<관심분야> : 전기기기, 전기 자동차

김 기 찬(Ki-Chan Kim)

정회원



- 1998년 2월 : 한양대학교 전기공학과(공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 전기공학과(공학박사)

▪ 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교전기공학과 교수

<관심분야> : 전기기기 및 제어, 전기자동차 구동 시스템