

열 유동해석을 통한 무선충전기 발열 성능 향상에 관한 연구

김평준¹, 박동규^{2*}

¹서연전자 전자신뢰성시험팀, ²한국기술교육대학교 기전융합공학과

A Study on the Thermal Flow Analysis for Heat Performance Improvement of a Wireless Power Charger

Pyeong-Jun Kim¹, Dong-Kyou Park^{2*}

¹Electronics Reliability Test Team, Seoyon Electronics

²Department of Electromechanical Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 자동차 편의 장치에 대하여 고객들은 높은 효율과 많은 기능을 요구하고 있으며, 이러한 자동차 어플리케이션에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 본 연구에서는 최근 자동차 편의 사양으로 개발된 무선충전기의 PCB(printed circuit board) 발열 성능 향상을 위한 열 유동해석에 관한 연구를 진행하였다. 무선충전기는 PCB의 전력 손실 및 열 저항의 특성 발열에 따라 충전의 성능이 급격히 저하된다. 따라서 열 유동해석 시뮬레이션을 통해 최적의 PCB 설계 및 부품의 실장 위치를 제안하고, 각 설계 단계에서 해석을 통해 디자인을 결정한다. 이후, 실제 환경 조건에서 해석 결과 정합성 검증을 위해 시험을 수행하고 결과를 비교 분석한다. 본 논문에서는 HyperLynx Thermal와 FloTHERM 프로그램을 사용하여 PCB 모델링 및 과도 응답 열 유동해석을 수행하였다. 또한, 해석 및 측정 결과의 정합성 검증을 위해 적외선 열화상 카메라를 사용하여 시험을 진행하였다. 최종 결과 비교에서 해석과 시험의 오차는 10 % 이내로 확인되었고, PCB의 발열 성능도 향상되었다.

Abstract In automotive application, customers are demanding high efficiency and various functions for convenience. The demand for these automotive applications is steadily increasing. In this study, it has been studied the analysis of heat flow to improve the PCB(printed circuit board) heating performance of WPC (wireless power charger) recently developed for convenience. The charging performance of the wireless charger has been reduced due to power dissipation and thermal resistance of PCB. Therefore, it has been proposed optimal PCB design, layout and position of electronic parts through the simulation of heat flow analysis and PCB design was analyzed and decided at each design stage. Then, the experimental test is performed to verify the consistency of the analysis results under actual environmental conditions. In this paper, The PCB modeling and heat flow simulation in transient response were performed using HyperLynx Thermal and FloTHERM. In addition, the measurement was performed using infrared thermal imaging camera and used to verify the analysis results. In the final comparison, the error between analysis and experiment was found to be less than 10 % and the heating performance of PCB was also improved.

Keywords : Thermal Flow Analysis, WPC(Wireless Power Charger), CFD(Computational Fluid Dynamics), PCB(Printed Circuit Board), Transient Response Analysis

*Corresponding Author : Dong-Kyon Park(Korea University of Technology and Education)
email: pdongkyou@koreatech.ac.kr

Received April 16, 2019

Revised May 13, 2019

Accepted July 5, 2019

Published July 31, 2019

1. 서론

최근 자동차 기술 개발은 단순한 이동수단이 아닌 운전자의 안정성과 편의성을 극대화 할 수 있는 지능형 자동차로 개발되고 있다. 따라서 지능형 자동차 ICT(information and communications technologies)는 융합 기술에 크게 의존하고 있으며, 그 영향력은 갈수록 높아질 것으로 예상된다. 또한, 자동차산업에 환경, 에너지, ITS(intelligent transport systems) 등 다양한 분야가 접목되면서 자동차 전장부품이 화두로 떠오르고 있다. 이러한 자동차 전자화에 따른 자동차용 핵심 부품인 PCB는 온도, 습도, 먼지, 진동에서 전기적 특성을 유지할 수 있는지 우선적으로 판단하여 품질을 확보하고 개발해야 한다.

PCB의 성능을 저하시키는 발열, 먼지, 전자파 등 다양한 문제점을 개선하기 위해 해석과 시험의 비교를 통한 복합적인 검증은 요구하는 추세이다. 따라서 PCB의 성능 향상을 위해 국내외 관련 산업 분야의 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

최근에는 PCB의 소형화 및 고실장화로 인해 단위체적당 열에너지 밀도 증가로 인해 전자소자의 고장원인이 과도한 온도에 의해 발생하는 것으로 판단하여 이러한 발열 문제를 해결하기 위해 제품의 초기 설계 단계에서 수치해석적 방법으로 PCB 전자소자의 발열을 개선하였다[3].

또한, 자동차 연비효율 향상을 위해 ISG(interated starter generator) 모터의 고속 운전조건에서 철손 증가로 인한 내부 온도 상승을 줄이기 위해 방열설계에 대한 열 해석 및 특성 평가를 수행하고 기본 모델 및 개선 모델을 개발하여 성능 비교 평가를 하였다[4]. 2015년 연구에서는 시스템의 온도 예측을 위해 열 유동해석 모델을 구성하여 해석 및 분석을 통한 실시간 온도 예측 모델을 개발하여 발열 성능 개선 최적화 방법을 고안하였다[5]. 그리고 CFD 프로그램을 사용한 System Level 열 유동해석의 모델링 방법에 관한 구체적인 방법들도 제시되었다[6].

따라서, 본 연구에서는 무선충전기의 디자인 설계 단계에서 2단계의 해석 기법을 적용하고, PCB 열 해석 및 열 유동해석 통해 무선충전기의 발열 성능을 향상한다. 또한, 해석 결과와 시험 결과의 정합성 검증을 수행하여 결과를 비교하고 오차를 분석한다.

2. 본론

2.1 연구의 필요성 및 해석 방법

다양한 차량 전용 앱 및 멀티미디어 사용으로 인해 차량과 스마트폰을 연동한 사용 시간이 증가하고 있다. 최근 자동차 회사들은 유선 방식이 아닌 무선방식으로 편리하게 충전이 가능한 무선충전기를 고객 편의사양으로 개발하여 장착되는 추세이다.

하지만, 차량용 무선충전기는 스마트폰 내부의 발열 및 충전 시 발생하는 발열을 개선해야만 고속 충전 및 효율을 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 과도 응답 열 유동해석을 통한 무선충전기의 발열을 개선하여 충전의 성능을 향상한다.

무선충전기의 충전 원리는 전자기 유도방식을 적용하여 스마트폰 내부와 충전패드에 있는 2개의 코일이 유도 전류를 발생하여 배터리를 충전하는 방식이다. 무선충전 모듈은 크게 수신부와 송신부로 분류되며, 송신부의 코일이 전기에너지를 전파로 변환하여 자기장을 통해 전송하면 수신부의 코일이 받은 전파를 통해 전기에너지로 변환되어 충전되는 방식이다. 아래의 Fig. 1은 무선충전 시스템 모식도이다. 시스템 구성은 충전 Pad, Coil, Upper PCB, Lower PCB, Heat sink Low Case로 구성되어 있다.

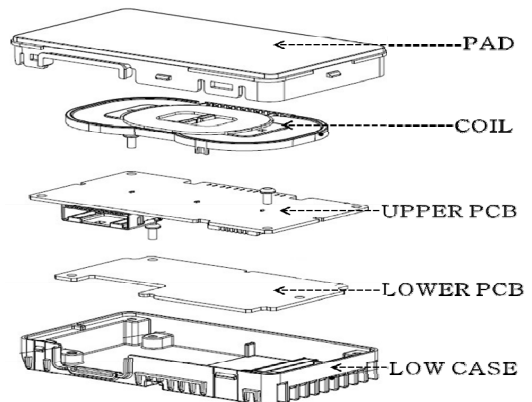


Fig. 1. Block diagram of the wireless charger system

차량용 무선충전기는 제품 설계 초기 단계에서 PCB의 열 해석을 진행한 후 전자소자 및 PCB의 온도 특성을 파악한다. 이후 열 유동해석을 위한 PCB, Coil, Low Case, Pad 모델링을 완료한 후 CFD(computational fluid dynamics) 프로그램을 사용하여 과도 응답 열 유

동해석을 진행한다. 해석 결과와 측정 결과를 비교하기 위해 실제 제작된 하드웨어를 열화상 카메라를 사용하여 충전 Pad의 온도를 측정한다. Fig. 2는 단계별 해석 및 측정 모델을 나타낸다.

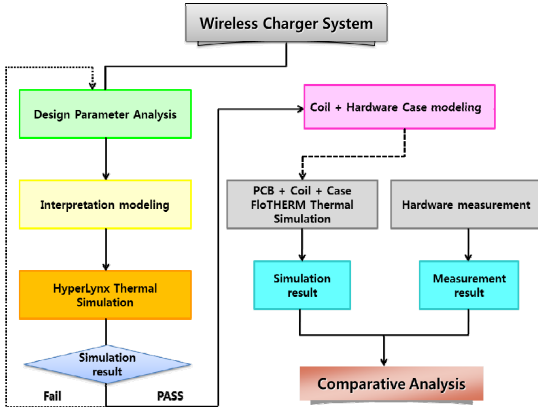


Fig. 2. Block diagram of the wireless charger system verification procedure

2.2 해석의 수학적 모델링

본 논문에서 사용된 해석 기법은 유한체적법(Finite Volume Method)이다. 이 기법은 다양한 형태의 대류에 의한 열 유동을 분석하기 위해 구조물을 무한개의 체적으로 공간 차분한다. 그리고 질량, 모멘텀, 에너지 보존 법칙에 의해 수치적으로 풀릴 수 있는 대수의 형태를 취하고, 열원에 대해 아래의 Navier-Stokes equation으로 정의한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho \vec{V}\varphi - \Gamma_{\varphi} \text{grad}\varphi) = S_{\varphi} \quad (1)$$

이 식을 아래의 CFD Steady State 방정식으로 표현한다.

$$a_P\phi_P = a_{hx}\phi_{hx} + a_{lx}\phi_{lx} + a_{hy}\phi_{hy} + a_{ly}\phi_{ly} + a_{hz}\phi_{hz} + a_{lz}\phi_{lz} + S_P \quad (2)$$

Where φ : dependent variable(변수)

Γ_{φ} : exchange coefficient(확산계수)

ρ : density(밀도)

\vec{V} : velocity vector(속도벡터)

S_{φ} : source or sink terms

경계 조건들에 대해 반복적인 연산을 하고, 대류 열전달계수의 순차적 대입 및 수렴에 의해 열전달 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것이다.

2.3 PCB 회로 설계 및 해석 모델

초기 회로 설계 완료 후 PCB Level에서 해석을 진행하였다. 해석 결과 특정 소자에서 시스템에 영향을 미치는 발열이 발생하여 PCB 발열 저감을 위해 회로 디자인을 변경하였다.

Upper Top PCB의 Thermistor 주변 Via를 소자로 부터 1 mm 이격, thermal pattern width 0.7 mm로 적용하였고, Upper Bottom의 경우 5 V Regulator 전원부 IC를 Lower PCB로 실장 위치를 변경하였다.

또한, Lower PCB의 경우 3.3 V 전원단의 회로 재설계 및 발열 개선을 위한 PCB 구조 변경을 통해 Fig. 3의 회로 디자인을 결정하고 해석을 위한 모델링을 진행하였다.

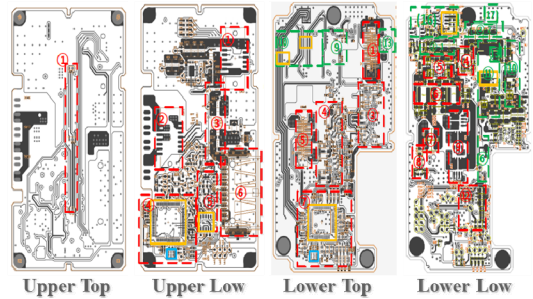


Fig. 3. Configuration of the PCB Circuit

무선충전기 선행 열 해석을 수행하기 위하여 PCB 설계 데이터를 기반으로 상용소프트웨어인 HyperLynx를 사용하여 모델링을 진행하였다.

해석 과정은 설계 초기 단계에서 PCB 열 해석을 수행하여, 발열 소자의 온도 상승 및 분포를 예측하여 발열의 전도, 대류, 복사 현상을 분석한다. 또한, PCB 해석이 용이한 HyperLynx Thermal을 사용하였고, PCB 구조는 4층으로 총 2장의 Upper PCB, Lower PCB로 모델링되었다. 아래의 Fig. 4는 HyperLynx 기반의 PCB 모델 형상이다.

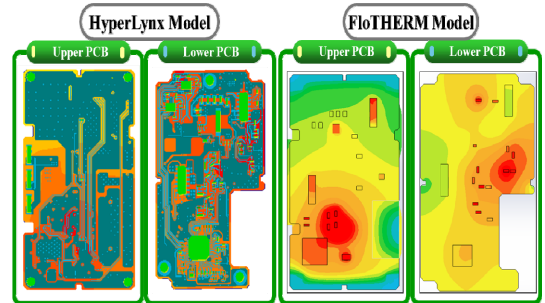


Fig. 4. Configuration of the PCB model

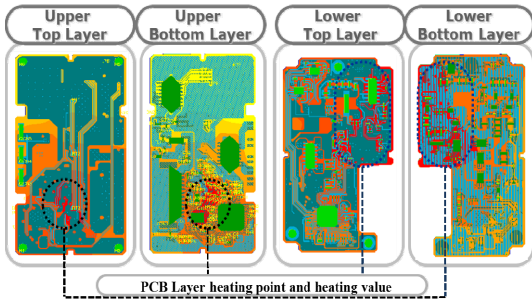


Fig. 5. Configuration of the heat point PCB(HyperLynx)

본 해석에서 사용된 PCB 모델링 정보는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Simulation modeling conditions

Condition	Index
Physical Dimensions	77.2×128×1.6(mm)
PCB Layer	4 Layer
PCB Material	FR4
Thermal diffusivity	$0.508 \times 10^{-6} [m^2/s]$
Thermal conductivity	1.24[W/(m·k)]

PCB의 선형 열 해석을 통해 각 PCB Layer에서 발생하는 특정 소자의 발열 온도, 분포, 발열량을 확인하고, 다음 과정에서 열 유동해석 모델링을 진행한다. PCB의 발열 소자 및 발열량은 Fig. 4와 같다.

2.4 열 유동해석 모델

앞에서 소개한 수학적 모델링 및 PCB 모델 기반으로 과도 응답 열 유동해석을 위한 시뮬레이션 모델링 방법을 기술한다. Table 2는 시뮬레이션 환경 조건이다. PCB 해석의 환경 조건과 동일하지만, System Level 해석에서는 충전 시간에 따른 발열을 확인하기 위해 120분의 과도 응답 열 유동해석을 추가적으로 실시하였다.

Table 2. Simulation and experiment conditions

Condition	Index
Ambient Temp.	25 °C
Input Voltage	12.5V
Lode	5W
Cooling	Natural Convection
Fluid	Air at 25 °C
Transient time	120min

위의 해석 환경 및 조건을 입력하여 PCB 모델링 후 시뮬레이션을 통해 각 PCB Layer에서 발생하는 발열 소자 및 온도가 PCB 해석 결과와 근사한지 확인한다. Fig. 5와 6을 비교하여 보면 발열 소자 및 발열량이 일치한다는 것을 확인할 수 있다. PCB 시뮬레이션 해석 결과는 다음의 결론에서 상세히 확인한다.

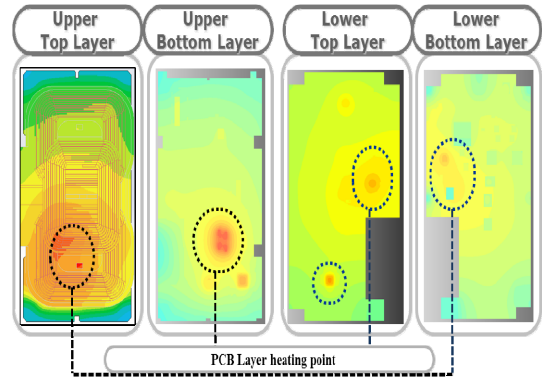


Fig. 6. Configuration of the heat point PCB(FloTHERM)

무선충전기 PCB Level의 열 해석을 완료한 후 충전 코일을 모델링한다. 코일 특성에 따른 자성재료는 크게 Sendust, Ferrite, Ribbon이 있다. 시뮬레이션 코일 물성 및 재질은 본 무선충전기에 적용한 Sendust로 모델화하였다. Coil 재질은 구리, 전도율(thermal conductivity) 1.24 W/(mK), Power consumption 3.75 W로 조건을 입력하였다. 모델링된 코일은 Upper PCB Top layer에 결합한다. 이후 Case를 결합하여 시뮬레이션을 진행한다. 또한, 하부 Case에 방열판을 적용하여 모델링하였고, 방열판의 열전도율은 96.2 W/(mK)로 설정하였다. Fig. 7은 최종적으로 모델링이 완료된 무선충전기 형상이다.

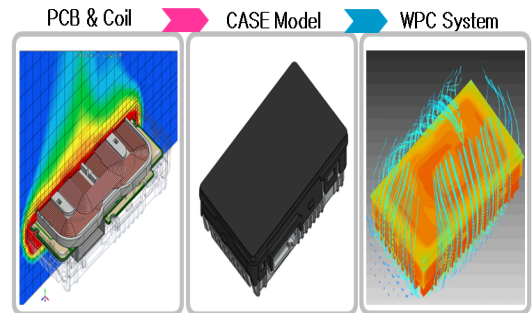


Fig. 7. Configuration modeling for wireless Power charger system using FloTHERM

2.5 해석 결과

본 논문에서 제안한 모델링 및 해석 방법의 정확성을 입증하기 위해 다양한 시뮬레이션 및 시험을 진행하였고, 해석 시험 결과를 통해 차량용 무선충전 시스템의 발열 성능 향상에 대해 입증하고자 한다.

HyperLynx를 사용하여 설계 초기 단계에서 Upper, Lower PCB의 열 해석 결과는 다음과 같다.

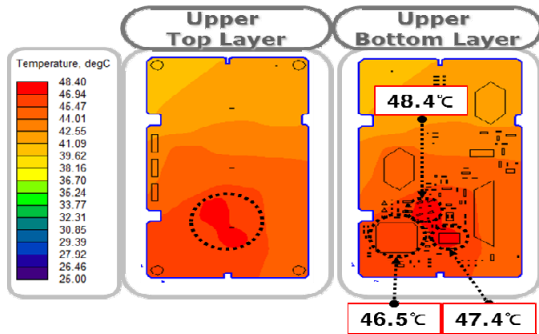


Fig. 8. Results of upper PCB thermal simulations using the HyperLynx Thermal

위의 Fig. 8은 Upper PCB의 열 해석 결과이며, bottom layer의 최고온도는 48.4 °C로 트랜지스터와 MCU 소자의 발열이 높다는 것을 확인할 수 있다.

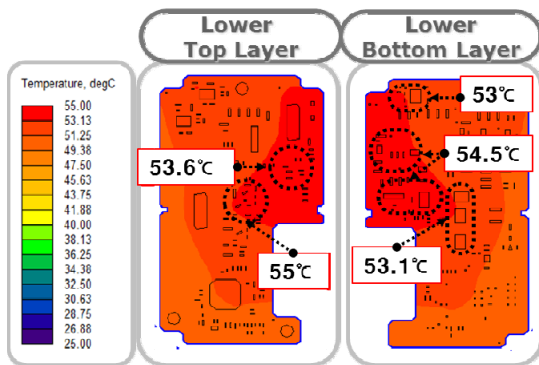


Fig. 9. Results of lower PCB thermal simulations using the HyperLynx Thermal

위의 Fig. 9는 Lower PCB 해석 결과이다. 여기서 Top layer의 최고온도는 55 °C, 평균온도 45 °C의 온도 분포를 나타내고 있으며, FET, PWM 제어를 위한 drive IC의 발열을 확인할 수 있다. 또한, Bottom layer의 최고온도는 54.5 °C, 평균온도는 45 °C의 Top, Bottom layer의 동일한 온도분포를 나타내고 있으며, FET 및

Regulator IC에서 발열이 발생하고 있다.

다음으로 Fig. 10은 FloTHERM 프로그램을 사용하여 해석한 결과이다.

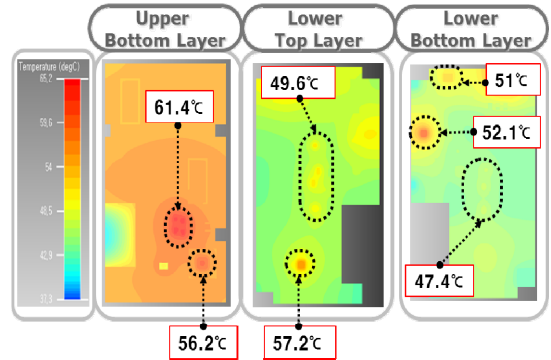


Fig. 10. Results of Upper and Lower PCB thermal Simulations using the FloTHERM

Fig. 10에서 보면 Upper PCB의 최고 상승온도는 61.4 °C, Lower PCB top layer의 최고온도는 57.2 °C, bottom layer의 최고온도는 52.1 °C이며, 특정 발열 구간 및 발열 소자는 Fig 8, 9의 결과와 동일하다.

온도 결과에 대한 오차는 Upper PCB 13 °C, Lower top layer, Lower bottom layer에서 약 2 °C의 오차가 발생하였다.

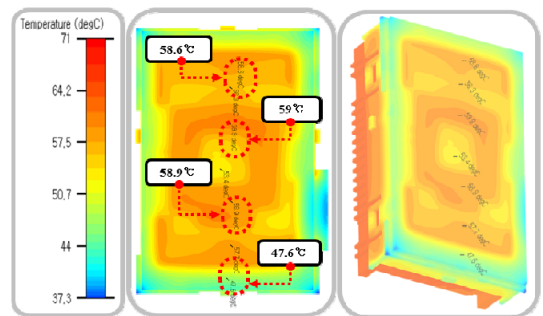


Fig. 11. Results of Wireless Charger system

Fig. 11의 경우 무선충전 시스템의 열 유동해석 정상 상태의 최종 결과이다. 최종 결과 확인은 충전 PAD 표면의 온도를 측정하였다. 최대온도는 59 °C, 평균온도는 58 °C의 결과를 본 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

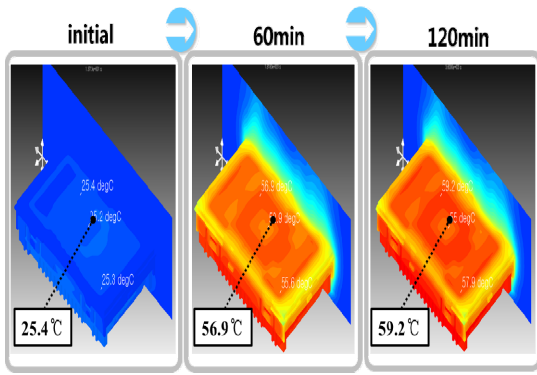


Fig. 12. Result of transient thermal simulation until 120min

시뮬레이션 마지막으로 충전 시간에 따른 발열을 확인하기 위해 120분의 과도 응답 해석을 시행하였다. Fig. 12는 120분간 충전상태의 해석 결과이다. 초기 온도는 25.4 °C, 60분 56.9 °C, 120분 59.2 °C의 최고온도를 확인하였다. 시뮬레이션의 최종 결론은 정상상태 해석 결과와 120분의 과도 응답 해석 결과가 유사하다는 것을 확인하였다.

2.6 시험 결과

본 무선충전 시스템의 시험 구성은 아래의 Fig. 13과 같다. 시험을 위해 측정용 PC, Power supply, 시뮬레이터, 통신 Interface로 구성되었으며, 무선충전기의 충전 상태 발열 측정은 열화상 카메라(FLIR P620)를 사용하여 시간에 따른 분포 및 온도 변화를 측정하고 비교한다.

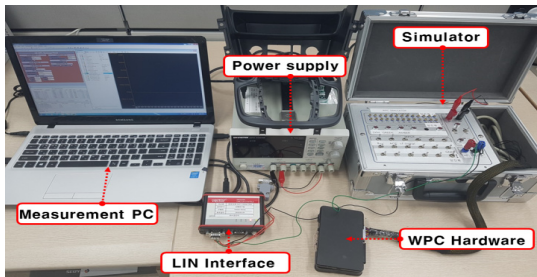


Fig. 13. Test setup to measure the temperature of the wireless charger device

본 연구에서는 해석 결과와 시험 결과의 신뢰성 검증을 위해 Fig. 13과 같은 시험 환경을 구축하고 소비자들이 대표적으로 사용하고 있는 갤럭시와 아이폰을 이용하여 충전상태에서 발열 측정을 하였다. 실내온도 25 °C 시험 환경에서 진행하였고, 충전 시간에 따른 온도 변화량

을 관찰하기 위해 최대 120분간의 시험을 통해 결과를 도출하였다. 초기 충전상태의 온도는 27 °C, 60분 45.7 °C, 120분 50.7 °C의 시험 결과를 확인하였다.

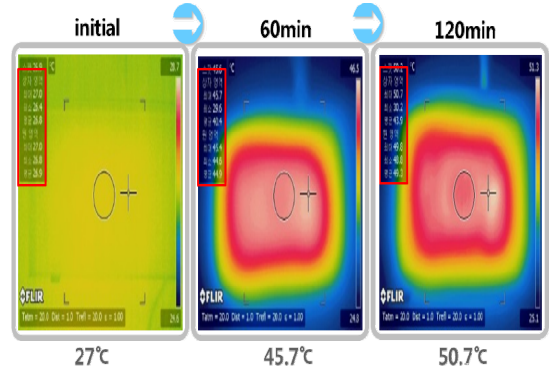


Fig. 14. Comparison of result obtained from IR thermography measurements

본 논문에서 도출한 해석 결과 및 시험 결과를 비교 분석을 통해 정합성 검증을 하였다.

Table 3. Temperature Comparison

	Results (°C)	Error (°C)	Simulation Tool
Upper bottom	48.4		HyperLynx
Upper bottom	61.4	13	FloTHERM
Lower top	55		HyperLynx
Lower top	57.2	2.2	FloTHERM
Lower bottom	54.5	2.4	HyperLynx
Lower bottom	52.1		FloTHERM
Steady state Analysis	59		FloTHERM
Transient response analysis(120min)	59.2	8.5	FloTHERM
Measurement(120min)	50.7		

Table 3을 통해 PCB Level의 HyperLynx와 FloTHERM 해석 결과를 비교해 보면 Upper Bottom PCB의 온도 오차가 최대로 발생하였고, System Level 열 유동해석 결과와 측정 결과 온도는 약 9 °C의 오차가 발생하였다.

3. 결론

열 유동해석을 통한 무선충전시스템의 발열 안정화를 위해 다양한 해석 모델 및 방법론을 적용하였다. 또한 해석과 시험의 결과를 비교하고 정확한 비교 분석 데이터를 산출하여 본 연구의 유효성을 검증하였다.

- 1) PCB의 동일한 환경 및 조건에서 PCB의 총 2단계의 열 유동해석을 진행하였다. HyperLynx Thermal, FloTHERM 소프트웨어를 사용하여 해석 모델화를 통해 결과 온도를 비교 분석하였다.
- 2) 발열의 근본적인 원인이 되는 PCB 개선을 위해 초기 단계에서 열 해석을 진행한 후 발열 개선을 위해 소자 실장 위치 변경, PCB Pattern Width 0.7mm, Thermistor 주변 Via 이격거리를 1 mm로 재설계, PCB Layout 변경 등을 통해 개선 전 디자인보다 발열이 감소된 것을 확인하였다.
- 3) PCB Level의 해석 결과를 비교해 보면 Upper PCB의 오차는 13 ℃, Lower PCB의 오차는 약 2 ℃, 또한, System Level의 정상상태 해석 결과와 과도 응답해석 결과를 비교해 보면 59 ℃로 결과는 동일하다. 120분의 해석과 측정 비교 결과는 약 9 ℃의 온도 오차가 발생하였다. 분석결과 시험 환경의 오차로 판단되며, 최종적으로 해석과 측정의 정합성 비교 분석결과 90 % 이상의 신뢰성 검증 결과를 입증하였다.
- 4) 해석 결과와 측정 결과를 당사의 Database로 구축하였고, 비교 결과 오차에 대한 개선 방법 및 제품의 발열 감소를 위한 지속적인 연구는 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] T. A. Asghari, "PCB Thermal via optimization using design of experiments," IEEE Tr. Thermal and thermomechanical proceedings 10th intersociety conference, pp.224-228, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ITHERM.2006.1645346>
- [2] Yi. Wang, S. W. H de Haan and J. A. Ferreira "Thermal design guideline of PCB traces under DC and AC Current," IEEE Tr. Energy conversion congress and exposition, pp.1240-1246, 2009.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316250>
- [3] S. C. Jang, M. S. Kweon and S. M. Han, "Heat Characteristics Analysis of Radiator for PCB-Board," Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.20, No.6, pp.20-26, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.6.020>
- [4] S. C. Kim, B "Thermal Design and Analysis Evaluation of ISG Motor for Hybrid Electric Vehicles Considering High-speed Driving Condition," Transactions of KASE, Vol. 22, NO.1, pp.59-64, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2014.22.1.059>

- [5] K. J. Park, D. W. Kim "A study of Temperature Predictions for Manual Transmission Clutch System Via Anti-fade and Hill Start Virtual Test," Transactions of KASE, Vol. 23, NO.1, pp.122-129, 2015. Available From:
DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2015.23.1.122>
- [6] T. Y. Tom Lee, J. "Application of a CFD Tool for System-Level Thermal Simulation," IEEE Tr. Packaging and Manufacturing Technology, Vol.17, No.4, pp.564-572, 1994.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/95.335043>

김 평 준(Pyeogn-Jun Kim)

[정회원]



- 2013년 8월 : 성균관대학교 일반대학원 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2014년 4월 ~ 현재 : 서연전자 연구소 주임연구원

<관심분야>

전자전기, 열해석

박 동 규(Dong-Kyou Park)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공과대학원 조선공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 서울대학교 공과대학원 산업·조선공학부 (공학박사)
- 1995년 12월 ~ 2010년 3월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 1월 ~ 2015년 3월 : 현대모비스 기술연구소 부장
- 2015년 3월 ~ 2017년 2월 : 한동대학교 기계제어공학부 교수
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기전융합공학과 교수

<관심분야>

구조해석, 충돌안전해석, 최적설계