

# Parametric study를 통한 무선충전기 수동 냉각방식 설계

황순재<sup>1</sup>, 홍석무<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>공주대학교 미래자동차공학과

## Wireless charger passive cooling method design through parametric study

Soonjae Hwang<sup>1</sup>, Seokmoo Hong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University

**요약** 휴대용 전자기기의 사용량 증가와 더불어 간편하게 충전이 가능한 무선 충전 기술이 지속적으로 요구 되고 있다. 무선 충전 기술들 중 상용화 가장 많이 되어있는 스마트폰 무선 충전기는 충전 시 높은 열이 발생하며 이로 인한 고장에 대한 연구가 사전에 수행되었다. 이를 해결하기 위해 발열로 인한 변형에 관한 연구를 사전에 수행하였고 그 결과 유한 요소 해석을 통해 무선 충전기 내 PCB(Printed Circuit Board) 부품에 대해 실제 열변형 거동을 근사하게 예측할 수 있었다. 이 현상은 충전속도와 용량의 증가로 인해 더 심해지게 되었고, 변형을 경감시키기 위한 냉각 시스템이 절실히 요구되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 냉각 효율이 개선되는 무선 충전기의 형태를 설계하기 위해 외부 케이스의 냉각 홀 위치를 변수로 설정하여 Parametric study를 수행하였다. 설계 목표는 무선충전기의 스마트폰과 맞닿는 면적에서 가장 낮은 온도가 발생하는 케이스의 형태이다. 특히 가장 낮은 온도가 나타나는 냉각 홀의 위치를 특정하기 위해 3차원 유한요소해석 프로그램 Ansys Discovery로 열 유동 해석을 진행하였다. 해석 결과 상단부의 양쪽 측면에 냉각 홀이 위치했을 때 최소의 온도가 나타남을 확인하였다. 찾아낸 냉각 홀의 위치를 기반으로 위상 최적화를 진행하였고, 최적화 결과를 통해 냉각 홀의 최대 크기를 결정하였다. 연구 결과로 얻어진 최적 설계 형상은 3D프린팅을 통해 직접 제작 후 열화상 카메라로 온도를 측정하여 본연구의 유용성을 검증하였다.

**Abstract** With the increasing use of portable electronic devices, wireless charging technology has gained importance. Wireless chargers for smartphones are prone to heat deformation and thermal failure. A highly effective cooling system becomes essential because this is aggravated by a higher charging speed and capacity. Previous research showed that the actual thermal deformation behavior of the PCB (Printed Circuit Board) could be predicted accurately by finite element analysis. In this parametric study, the cooling efficiency should be improved by optimizing the cooling hole position of the outer case. The design goal is a case shape that generates minimal heat in the area in contact with the smartphone. Thermal flow analysis was performed using Ansys Discovery to evaluate the optimal location of the cooling hole. The temperature was minimum when the holes were located on both sides of the upper part. The topology was optimized based on the hole location, and the maximum hole size was determined through optimization. A sample case with the optimized shape was made by 3D printing, and the temperature distribution was measured using a TIC (Thermal Imaging Camera). Good agreement was found between the TIC measurements and FE results.

**Keywords** : Cooling System, Passive Cooling, Wireless Charger, Thermal Fluid Analysis, 3D Printing

---

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (G012001306003)

\*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju Univ.)

email: smhong@kongju.ac.kr

Received October 7, 2022

Revised November 8, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

## 1. 서론

최근 휴대용 전자기기의 사용량 증가에 따라 휴대용 전자기기를 케이블 없이 간편하게 충전이 가능한 무선 충전 기술의 사용량 또한 증가하고 있다. 이 중 가장 많이 사용되는 스마트폰 무선 충전기는 자기유도 방식을 이용하여 충전하는 구조로 Fig. 1과 같이 상단부에 기기를 올려 충전하는 형태이다. 이런 형태의 무선 충전기는 충전 시 휴대 기기와 무선 충전기 사이에 열이 발생하여 화재 사고의 발생하기도 한다. 앞선 연구를 통해 무선 충전 시 PCB(Printed Circuit Board)에 최대 39 °C에 가까운 열의 발생을 측정하였고 측정 데이터를 입력 데이터로 활용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 결과 PCB에 최대 0.06 mm의 열 변형을 확인하였다. 앞선 연구 결과에 따르면 배터리의 온도가 약 40 °C 올라가더라도 리튬 배터리에 손상이 야기된다고 알려져 있다[1]. 따라서 자체 온도가 40 °C 이하로 유지되는 무선 충전기의 발열 설계 방안이 필요하다. 앞선 연구에서는 열이 발생하는 것을 막기 위해 외부 케이스의 소재를 변경하거나, PCB의 설계를 변경하였다. 본 연구에서는 필연적으로 생성되는 열을 막기 보다는 발생한 열을 빼내는 개선방법을 연구하였다. 개선 방안으로 케이스 구조의 변경을 통한 수동 냉각방식의 개선을 연구하였다. 수동 냉각 방식은 발생한 열을 자연적인 공기의 흐름으로 냉각하는 방식으로, 상용 무선 충전기는 공기가 흐를 수 있는 냉각 홀을 설치하여 내부에서 발생한 열을 바깥으로 빼내는 방식을 사용한다. 본 연구는 열을 빼내는 통로인 열 배출 냉각 홀의 위치 값을 변수로, 충전 시 케이스 상단에서의 온도가 가장 낮은 형태를 목표로 진행한다. 서로 다른 위치의 냉각 홀을 가진 케이스들을 후보로 지정하여 열 유동 해석을 진행하였고, 목표 점에 맞는 케이스의 형태를 찾았다. 해석결과를 검증하기 위해 설계한 케이스를 3D프린팅으로 실제 모델을 제작하였고, 이를 동일한 조건 하에 열 화상 카메라로 온도를 측정하였다.



Fig. 1. A commercial sample of wireless charger

## 2. 본론

### 2.1 무선충전 모듈의 구성

상용 무선 충전 모듈의 필수 구성 요소는 무선 충전기를 가동하는 PCB와 송신 코일이다. 본 연구에 사용된 무선 충전 모듈은 Fig. 2와 같은 형태로 상용 무선 충전기와 마찬가지로 PCB와 코일로 이루어져 있다. 추가적으로 PCB 하단부에 흔들림 방지를 위한 폼 테이프가 부착되어 있으며 코일과 PCB 사이에 금속 구조물을 통해 PCB와 코일이 흔들리지 않도록 설계되어 있다. 본 연구에 사용된 무선 충전 모듈의 자세한 성능은 Table 1에 기재하였다. 무선 충전기는 송신 코일과 스마트폰 내부의 수신 코일 사이의 전기 유도 현상을 통해 충전하는데 이때 에너지 보존 법칙에 의해 코일에 Joule heating이 발생한다. 또한 이전 연구의 사전 조사에 따르면 PCB 또한 충전 시에 발열이 생김을 확인하였다. Fig. 3은 무선 충전 모듈에 스마트폰 (SM-G960N)[2]을 120 s 동안 충전 후 열화상 카메라를 통해 온도를 측정된 결과이다. 열화상 카메라에 관한 자세한 설명은 Table 2에 기술하였다. 측정 결과 실험에 사용된 무선 충전 모듈은 PCB와 코일에서 38.2 °C가 되었는데 이는 상온인 23.5 °C보다 14.5 °C 높은 온도이다.

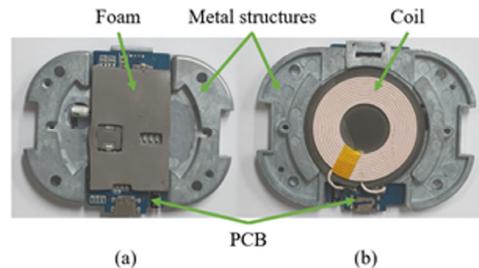


Fig. 2. The wireless charging module used in the study (a) back (b) front

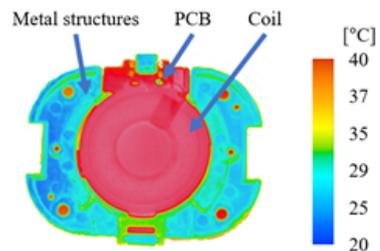


Fig. 3. Temperature distribution of wireless charging module measured by a thermal image camera

Table 1. Specification of wireless charger

Rated input	Rated output	Coil size
5~12V/2A (MAX)	15 W (MAX)	Diameter 43 mm

Table 2. Thermal imaging camera used in the study

Manufacturer/model name	Nec Corporation/H2630
Number of pixels	640 × 480 pixels
Minimum sensing temperature	0.03°C
Temperature measurement range	-40 ~ 500 °C

## 2.2 연구 개요

본 연구는 가장 높은 온도를 40 °C 이하로 온도를 유지하는 것을 목표로 한다. 케이스의 '상단부 그리고 하단부', '정면, 후면 그리고 측면'에 열 배출 냉각 홀을 위치하는 것을 변수 삼아 Fig. 4와 같이 설계하였다. 각각 다른 변수를 적용한 후보군을 주변 공기와 열 유동에 대한 유동 해석을 진행하고 목표에 가장 가까운 후보를 선정하였다. 선정된 후보를 3D프린팅을 통해 직접 형상을 제작하고 동일 조건에서 측정하여 오차를 검증하였다. 3차원 시뮬레이션 해석 프로그램 Ansys Discovery는 파라미터 설정을 통해 다양한 조건 별 결과값을 바로 확인이 가능하며, 구조해석과 유동해석 하나의 프로그램에서 수행할 수 있는 연성 해석이 가능한 장점을 가지고 있으므로 본 연구의 해석 프로그램으로 채택하였다[3]. Fig. 6은 본 연구의 순서도이다.

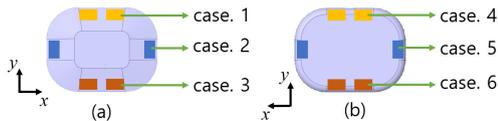


Fig. 4. Case naming based on the location of the cooling holes on the wireless charger case  
(a) Case top (b) Case bottom

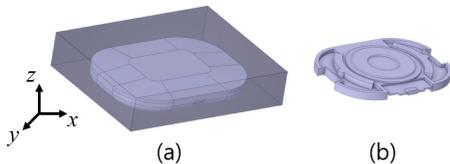


Fig. 5. 3D modeling used in analysis  
(a) Air flow box modeling  
(b) Wireless charger module modeling

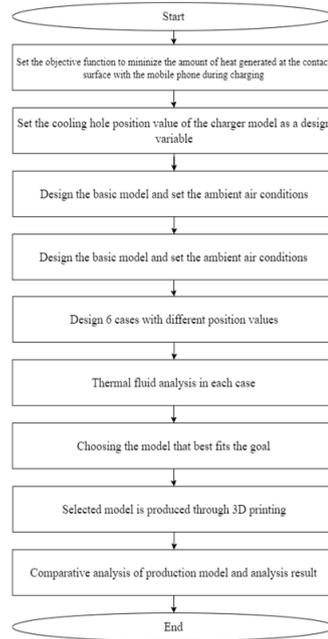


Fig. 6. Flow chart of study progress

## 2.3 3D 모델링

모델링은 선행 연구를 참고하여 진행하였다[4]. 모델링은 크게 내부 모듈과 외부 케이스로 나누어 설계하고 이를 3차원 CAD 프로그램 CATIA V5를 사용해 모델링 하였다[5]. 케이스의 기본 모델은 100 mm × 75 mm × 13 mm 크기에 1.2 mm 두께로 모델링을 하였다. 앞선 케이스 기본 모델에 설치할 냉각 홀의 규격은 1.2 mm × 5.5 mm이고, 2 mm 간격으로 6개씩 2쌍을 Fig. 4와 같이 배치한다. 냉각 홀이 서로 다른 위치에 배치된 케이스를 각각 case. 1~6으로 구분하였다. 해석 시 케이스 주변과 내부의 공기 유동의 영향을 확인하기 위해 공기 유체 영역 모델링(Air box)을 Fig. 5 (a)와 같이 제작하였다. 모델링은 -z 방향으로 1.5 mm 나머지 방향으로 9.9 mm 떨어진 면을 가진 육면체 형태로 제작한다. 무선 충전 모듈의 경우 PCB의 부품들, 금속 구조물 그리고 코일의 형태가 복잡한 형상을 띄고 있어 해석 시간과 수렴성을 고려하여 형태를 Fig. 5 (b)와 같이 단순화하였다.

## 2.4 유한요소 해석

### 2.4.1 재료의 기계적 성질

소재의 기계적 물성은 ANSYS Discovery의 Database

에서 활용하였고 Table 3에 제시하였다. 내부 모듈의 PCB는 PCB laminate, FR4 그리고 코일의 경우 구리가 주로 사용된다. 온도변화에 따른 플라스틱의 진동감쇠 특성 연구에 따르면 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 소재는 온도 변화에 따라 손실계수와 Young률의 변화폭이 비교적 안정적임을 밝혔다[6]. 따라서 ABS 플라스틱을 직접적으로 열을 받는 외부 케이스의 물성으로 적용하였다. 열분해 금속은 알루미늄 그리고 폼 테이프는 Foam, PET을 적용하여 해석을 진행하였다.

Table 3. Mechanical properties of module

	Density [ $kg/m^3$ ]	Poisson's ratio [-]	Thermal conductivity [ $W/m \cdot K$ ]	Specific heat [ $kJ/kg \cdot C$ ]
Aluminum alloy	2,710	0.33	155	0.9
PCB laminate, FR4	1,900	0.14	0.38	1.1
Plastic, ABS	1,050	0.41	0.23	1.4
Magnet, Ferrite	4,800	0.25	4.2	1.0
Copper	8,940	0.35	397	0.4

### 2.4.2 경계조건

본 연구의 해석은 3차원 유한요소해석 프로그램 Ansys Discovery를 사용하여 진행하였고 사용된 경계 조건은 Fig. 7에 표기하였다. 연구에 사용된 무선충전기의 부품은 서로 접촉되어 있으므로 접촉하는 면적 사이에 구속조건을 부여하여 떨어지지 않도록 하였다. 공기의 영향을 확인하기 위해 앞서 제작한 Air box에 유동 조건을 부여하였다. Air box는 해석 시 일반적인 대기와 같은 조건을 부여하였고 실내에서 대기의 일반적인 온도인 23.5°C를 부여하였고 측면에는 각각 Inlet 조건과 Outlet 조건을 설정하였다. 무선 충전기는 바닥에 놓아 두고 사용하는 제품으로 Air box의 하단부에 No slip을 설정하여 통과하지 못하도록 설정하였고 공기가 무선 충전기와 접촉된 면을 통과하지 못하기 때문에 무선 충전기와 공기가 접촉된 모든 면들 또한 No slip을 설정하였다. Air box의 나머지 면들은 Free slip을 부여하여 자유롭게 통과할 수 있도록 설정하였다. 요소망의 크기는 최소 0.1mm, 최대 5.3mm로 설정했다. 자세한 요소 설정은 Table 4와 같으며 Mesh결과는 Fig. 8 과 같다.

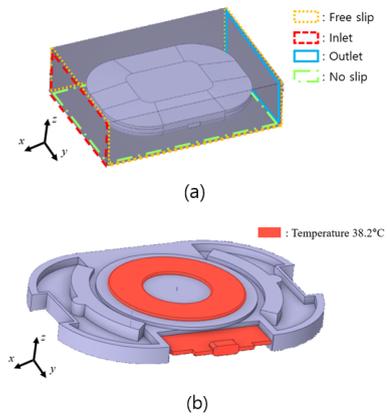


Fig. 7. Boundary conditions in modeling  
(a) Inlet / Outlet / Wall (b) Temperature

Table 4. Mesh setting of FEA modeling

Minimum size	0.1mm
Maximum face size	5.3mm
Maximum size	5.3mm
Growth rate	1.2
curvature normal angle	15°

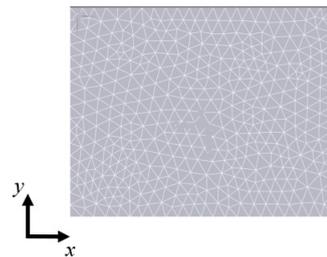


Fig. 8. Mesh of FEA modeling

### 2.5 FEA 결과

유동 해석 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 내부에서 최대 공기 유속은 냉각 홀 근처에서 0.01m/s, 최소 공기 유속은 금속 구조물과 PCB 사이 공간에서 0m/s로 나타났다. 이를 통해 냉각 홀을 통해 공기의 순환이 일어남을 알 수 있다. 해석을 통해 정상상태가 되었을 때 케이스의 온도 분포 결과를 Table 5와 Fig. 10에 제시하였다. 전체적인 온도 분포 경향은 case. 1~6 모두 비슷한 형태로, outlet을 부여한 측면에서 가장 낮은 온도가 나타났다. 하단 부의 온도 분포는 금속 구조물과 직접 맞는 부분에서 가장 높은 온도가 나타났으며 가장 온도가 높은 곳에서부터 바깥으로 갈수록 온도가 선형적으로 낮아

졌다. 상단 부 또한 코일과 가까운 면에서 높은 온도가 나타났으며 이를 중심으로 바깥으로 갈수록 온도가 선형적으로 낮아졌다. 모든 case에서 모듈에서의 온도인 38.2 °C보다 상단부의 온도가 0.6 ~ 1.4 °C 낮아졌다. 모든 case는 열 분포가 비슷한 경향을 보였으나 최대, 최소 그리고 평균 온도가 차이가 있었다. 특히 case. 4에서 충전 시 스마트폰과 접촉되는 상단 부에서 최대온도가 36.8 °C로 가장 낮게 나타났다. 기존 냉각 시스템이 없는 케이스에서 최대온도와 최소온도의 열 분포 차이가 8°C로 나타났으나 case. 4의 열 분포 차이는 6.2 °C로 두 값을 비교한 결과 29 % 감소하였다. 이를 통해 설계 목표에 가장 가까운 케이스 형태는 case. 4이다.

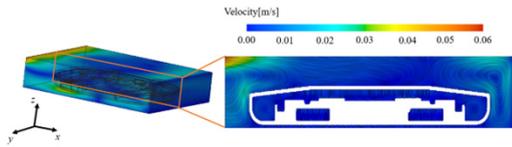


Fig. 9. Air flow velocity distribution as viewed from the y-direction

Table 5. Temperature at the contact surface

Point[-]	Temperature[°C]					
	Case.1	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5	Case.6
Maximum temperature	36.9	36.9	36.9	36.8	37.6	37.6
A	36.9	36.9	36.9	36.8	37.5	37.5
B	36.1	36.1	36.1	35.8	36.6	36.5
C	35.9	36.0	36.0	35.7	36.5	36.5
D	36.2	36.2	36.2	35.9	36.7	36.7
E	36.1	36.1	36.1	35.7	36.6	36.7

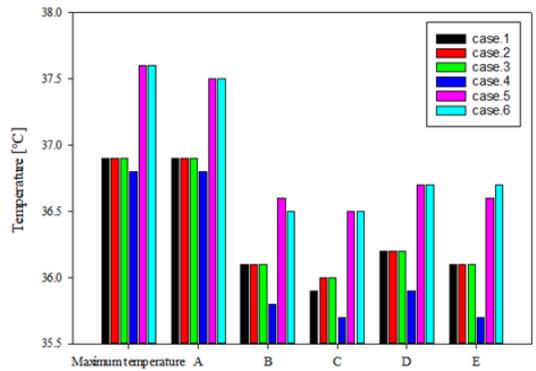
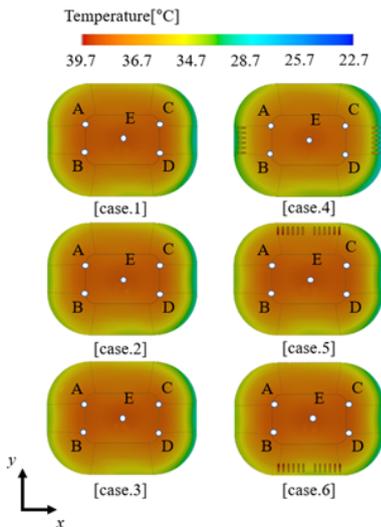


Fig. 10. Temperature distribution of the wireless charger case when charging a smartphone for 120 s

## 2.6 3D프린팅 모델과 해석 결과의 비교

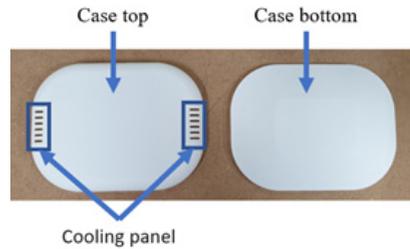


Fig. 11. 3D printed model of the outer case

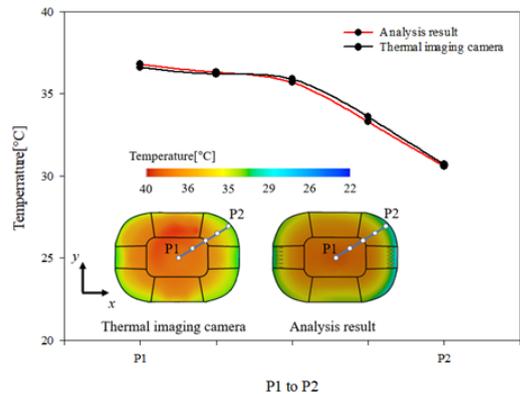


Fig. 12. Temperature comparison between analysis results and 3D printing model measurement results

유한요소 해석 결과의 올바름을 확인하기 위해 3D프린팅을 통해 Fig. 11과 같이 형상을 직접 제작하였다. 제작한 형상에 모듈을 부착하여 스마트폰(SM-G960N)을 120 s 동안 충전하였다. 충전 후 case를 열화상 카메라를 통해 온도를 측정하였다. 이때 주변 온도는 동일하게 23.5 °C로 두어 해석과 동일한 조건을 맞추었다. 측정 결과 Fig. 12과

같이 나타났으며 온도 분포 경향이 두 결과 모두 비슷하게 나타났다. 중앙에서 바깥으로 선형적으로 낮아지는 온도 변화를 비교하기 위해 임의로 중앙에서 바깥으로 지정한 선 A-B를 따라 온도를 측정하였고 측정결과와 해석 결과를 비교하였다. 기존 Case. 4의 해석 값과 실험 값의 차이는 0.62 % 로 거의 일치함을 확인하였다.

### 3. 결론

본 연구는 무선충전기의 온도를 최소화하는 수동 냉각 시스템을 Parametric study를 통해 설계하였고 설계한 모델을 3D프린팅을 통해 제작하여 비교 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 냉각 홀은 자연적인 공기 유동을 통해 내부의 열을 바깥으로 순환시켜주는 역할을 하며, 열전도 법칙에 의거하여 냉각 홀의 위치, 크기에 따라 냉각 성능이 달라진다.
2. case.4에서 열 분포 차이는 최대 6.2 °C로 이는 냉각 홀이 없는 모델의 열 분포 차이 8 °C보다 1.2 °C 감소한 값으로 냉각 홀의 효능을 입증한다.
3. 냉각 홀의 위치 변경으로 냉각 효과를 강화할 수 있다는 점을 연구를 통해 증명하였고 스마트폰과 접촉되는 면의 온도를 최소화하는 수동 냉각 방식의 구조를 설계하였다.

자연 대류를 통한 수동 냉각 방식은 온도를 최소화하는 것에 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 무선 충전기 냉각 시스템에 추가적인 냉각 소재를 추가하여 온도를 낮추는 방법에 대한 연구를 하고자 한다.

### References

[1] M. S. Kim, B. H. Lee, J. H. Park, H. S. Lee, Antink, H. W., E. Jung, J. Kim, T. Y. Yoo, C. W. Lee, C. Y. Ahn, S. M. Kang, J. Bok, W. Ko, Wang, X., S. P. Cho, S. H. Yu, T. Hyeon, & Y. E. Sung, "Operando identification of the chemical and structural origin of Li-ion battery aging at near-ambient temperature.", *Journal of the American Chemical Society*, Vol.142, No.31, pp.13406-13414, Jul 2020.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/jacs.0c02203>

[2] -, SM-G960N manual[internet], -, -, <https://www.samsung.com/sec/support/model/SM-G960NZBASKO/> (accessed Oct. 15, 2022)

[3] -, Ansys Discovery site[internet], -, -,

<https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery> (accessed Oct. 15, 2022)

[4] C. Y. Kim, *Structural Parameters Study of a Battery Cooling System with an Air Tunnel*, Master's thesis Kongju University, pp11-15, 2022.

[5] -, CATIA V5 site[internet], -, -, <https://www.3ds.com/ko/products-services/catia/products/v5/portfolio/> (accessed Oct. 15, 2022)

[6] S. H. Shin, S. S. Jung, Y. B. Lee, D. H. Lee & H. D. Nam "Damping Properties of Plastic with Temperature Variation." *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.15, No.2, pp.213-218, Feb. 2005.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.5050/KSNVN.2005.15.2.213>

황 순 재(Soonjae Hwang)

[준회원]



• 2016년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 기계자동차공학부

<관심분야>

유한요소해석, 연성 해석

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[중신회원]



• 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 학사)  
• 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 석사)  
• 2007년 3월 : Technical University of Munich, Germany, Department of Mechanical Engineering (기계공학박사)

• 2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 GTC, 수석연구원  
• 2015년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 미래자동차공학과 교수

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조, 유한요소해석, 최적 설계