

# 차기구축함 통합마스트에 적용을 위한 전자기파 메타물질 흡수체의 온도 환경 내구성 검증

## Verification of Durability of Electromagnetic Metamaterial Absorber in Temperature Varying Environment for Its Application to Integrated Mast of Next-Generation Destroyer

라 영 은\*, 김 용 준\*\*★, 정 현 준\*\*, 박 평 원\*\*\*, 조 정 대\*\*\*, 이 준 식\*\*\*\*, 김 명 준\*\*\*\*\*,  
정 준 교\*\*\*\*\*, 이 건 민\*, 이 종 학\*★, 이 학 주\*\*

Young-Eun Ra\*, Yongjune Kim\*\*★, Hyun-June Jung\*\*, Pyoungwon Park\*\*\*, Jeongdai Jo\*\*\*,  
Joonsik Lee\*\*\*\*, Myungjoon Kim\*\*\*\*\*, Joonkyo Jung\*\*\*\*\*, Gun-Min Lee\*, Jong-Hak Lee\*★, Hak-Joo Lee\*\*

### Abstract

In this paper, the durability of an electromagnetic metamaterial absorber is verified in a temperature varying condition mimicking a maritime environment for the purpose of applying it to reduce the radar cross section of an integrated mast of the next-generation destroyer. To validate the durability, the reflectance of the electromagnetic metamaterial absorber was measured after storing it in a chamber that can control the temperature according to Procedure I of Method 501.7 included in MIL-STD-810H. Before and after the environmental test, both of the measured reflectances were retained less than -10 dB over the X band, that can guarantee the stealth functionality.

### 요 약

본 논문에서는 차기구축함에 탑재될 통합 마스트의 레이더 반사면적을 감소시킬 수 있는 스텔스 기술로 응용하기 위해 해양 환경이 모사된 온도 환경 조건에서 전자기파 메타물질 흡수체의 내구성을 검증하였다. 이를 위해 미국 군사 규격인 MIL-STD-810H의 Method 501.7 중 Procedure I 조건에 따라 주기적으로 온도를 조절할 수 있는 항온 챔버에 저장 후 전자기파 메타물질 흡수체의 반사도를 측정하였다. 고온 환경시험 전과 후 모두 X 밴드 전체에서 스텔스 성능을 충족시킬 수 있는 -10 dB 미만의 반사도가 확인되었다.

*Key words : Electromagnetic Metamaterial Absorber, Carbon Ink, High-Temperature Environmental Test, Integrated Mast, Next-Generation Destroyer*

\* LIG Nex1, \*\* Center for Advanced Meta-Materials, \*\*\* Department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials, \*\*\*\* Composite Research Division, Korea Institute of Materials Science, \*\*\*\*\* Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

★ Corresponding authors

E-mail : yjkim7826@gmail.com, leejonghak27@lignex1.com, Tel : +82-42-868-7821, +82-31-8026-4819

※ Acknowledgment

This work was supported by the Center for Advanced Meta-Materials (CAMM) funded by the Ministry of Science and ICT of the Korean government (Global Frontier Project 2014M3A6B3063700).

Manuscript received Mar. 14, 2020; revised Mar. 19, 2020; accepted Mar. 23, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서론

레이더 흡수 물질(Radar Absorbing Material)은 입사되는 전자기파를 감쇠시킴으로써 아군 무기 체계의 레이더 반사면적(Radar Cross Section)을 감소시킬 수 있는 스텔스 소재이다. 지금까지 보고된 레이더 흡수 물질은 페라이트(Ferrite)와 같은 자성 물질의 자성 손실[1] 또는 카본(Carbon) 입자에 의한 전도성 손실[2]을 이용하여 성공적으로 개발되어 왔다. 하지만 소재 기반의 스텔스 기술은 상대적으로 비중이 높고 유지, 보수에 많은 비용이 소요되는 문제점으로 인해 함정이나 항공기와 같은 이동체에 응용되는데 제약이 있다.

최근 각광 받고 있는 전자기파 메타물질(Metamaterial) 기반 흡수체는 1/4 파장 공진을 이용하는 솔즈베리 스크린(Salisbury Screen) 흡수 구조[3]에 공학적으로 설계된 2차원 전도성 패턴을 더한 인공 구조 기반의 흡수체이다. 전자기파 메타물질기반 흡수체는 강한 표면 전류를 유도할 수 있는 패턴을 설계하여 전도성 손실을 극대화함으로써 기존 소재 기반의 레이더 흡수 물질 대비 두께를 더 얇게 하거나 흡수 성능이 만족되는 대역폭을 더 넓힐 수 있는 장점을 갖는다[4, 5]. 특히 잉크 종류, 혼합 비, 또는 소결 온도 및 시간에 따라 면 저항을 자유롭게 조절할 수 있는 전도성 잉크 기반의 전자기파 메타물질 흡수체는 패턴 형상뿐만 아니라 면 저항 조절을 통해 전자기파 흡수 성능을 달성하기 용이한 장점을 갖는다[6]. 하지만 전도성 잉크로 인쇄된 패턴의 경우 면 저항이 온도에 영향을 받으므로 주변 환경의 온도 변화에 의해 전자기파 흡수 성능에 변화가 있을 수 있으며 이에 대한 분석은 보고된 바 없다.

본 논문에서는 차기구축함(Next-Generation Destroyer)에 탑재될 통합 마스트(Integrated Mast)에 적용 가능성을 타진하기 위하여 카본 잉크로 제작된 전자기파 메타물질 흡수체를 고온 환경에 주기적으로 노출시킨 뒤, 상온에서 전자기파 반사도를 측정하여 극한의 고온 환경을 거처도 전자기파 흡수 성능이 우수하게 유지됨을 실험적으로 검증하였다. 전자기파 흡수 성능은 함정의 주요 위협 요소인 전투기 및 대함미사일 레이더에 사용되는 X 밴드를 기준으로 평가하였다[7]. 고온 환경에 노출시키기 전과 후 전자기파 메타물질 흡수체의 반사도는 모두 X 밴드 전체에서 10 dB 이상 감소되었

다. 이로부터 다수의 탑재 장비의 발열, 태양열에 의해 온도가 상승할 수 있는 극한 환경에서도 전도성 잉크로 제작된 전자기파 메타물질 흡수체가 통합 마스트에 안정적으로 적용될 수 있음을 검증하였다.

## II. 본론

### 1. 제작 및 성능 예측

고온 환경시험에 사용된 전자기파 메타물질 흡수체는 그림 1과 같다. 메타물질 패턴은 유전 알고리즘을 이용하여 X 밴드 대역에서 반사도가 10 dB 이상 감소되도록  $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$ 의 면적을 갖는 픽셀을 최적으로 배치한 패턴을 사용하였다[6]. 그림 1의 패턴은 스크린 프린팅 방법을 이용하여 폴리이미드(Polyimide) 필름 상에 카본 잉크로 인쇄되었다. 전자기파 메타물질 흡수체의 전체 구조는 솔즈베리 스크린 흡수 구조와 동일하게 하부에는 구리 반사막이 결합되고 상부에 최적의 패턴이 결합된다. 유전체 기판으로는 두께 4 mm, 면적  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ 인 아크릴 기판을 사용하였다. 아크릴 기판의 상대 유전율은 X 밴드 중심 주파수 10 GHz에서 약  $2.6 - j0.01$ 이다[8].

구리 반사막과 패턴이 인쇄된 폴리이미드 필름은 얇은 실리콘 양면 접착 필름을 이용하여 유전체 기판에 결합되었다. 특히 폴리이미드 필름의 경우 인쇄된 면을 양면 접착 필름에 결합함으로써 카본 잉크 패턴이 폴리이미드 필름에 덮여 외부 환경으로부터 보호될 수 있도록 제작 하였다. 이때 양면 접착 필름의 중심부에는 약  $25 \mu\text{m}$  두께의 PET (Polyethylene Terephthalate) 필름이 포함된다. 실

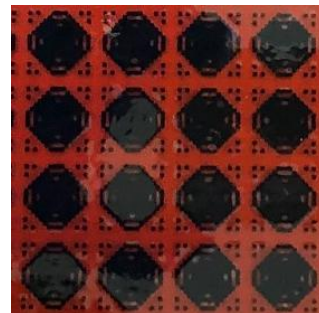


Fig. 1. A metamaterial pattern printed on polyimide film using a carbon ink and covered by a protecting PET film.

그림 1. 카본 잉크로 폴리이미드 필름 상에 인쇄된 후 PET 보호 필름이 결합된 메타물질 패턴

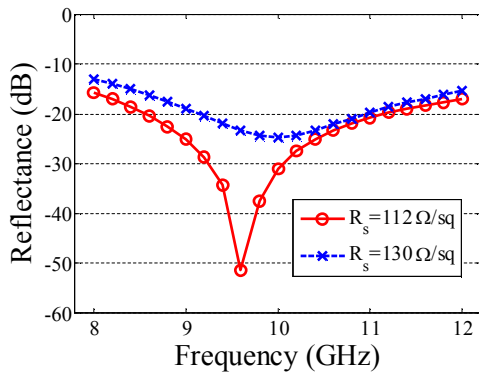


Fig. 2. Simulation results considering effects of including adhesive films and protective PET film (Sheet resistance for minimizing reflectance: 112 Ω/sq, Sheet resistance for adjusting the center frequency to 10 GHz: 130 Ω/sq).

그림 2. 접착 필름과 PET 보호 필름이 포함된 효과를 반영한 시뮬레이션 결과 (반사도를 최소화 시킬 수 있는 패턴 면 저항: 112 Ω/sq, 중심 주파수를 10 GHz에 맞출 수 있는 패턴 면 저항: 130 Ω/sq)

리콘 점착 층의 두께까지 고려하였을 때 유전체 기판의 두께는 약 0.1 mm 증가되며, 총 2장의 양면 접착 필름이 사용되므로 아크릴 유전체 두께는 4.2 mm로 증가한다. 외부 환경에 대한 내구성을 극대화하기 위하여 75 μm 두께의 폴리이미드 필름 상부에는 한쪽 면에만 점착 층이 포함된 약 95 μm 두께의 PET 필름이 보호 필름으로 결합되었다. 폴리이미드와 PET 필름의 상대 유전율은 10 GHz에서 각각  $3.3-i0.01$ 와  $3.2-i0.01$  이다[9]. 카본 잉크는 카본 블랙(Carbon Black) 복합재의 상대 유전율을 이용하여 약 8.72 로 근사할 수 있다[10]. 카본 잉크의 유전율의 허수부  $\epsilon''$ 는 등가 전도도를  $\sigma_e$ , 각주파수를  $\omega$ , 자유 공간에서의 유전율을  $\epsilon_0$ 이라고 할 때  $\epsilon'' = \sigma_e / (\omega \cdot \epsilon_0)$ 로 표현되므로 면 저항을 이용하여 시뮬레이션 상에 반영할 수 있다[11]. 이때 면 저항을  $R_s$ , 패턴의 두께를  $d$ 라고 하면 등가 전도도  $\sigma_e$ 는  $\sigma_e = 1 / (R_s \cdot d)$ 로 계산 된다[12].

그림 2는 패턴의 면 저항이 112 ohm/sq일 때 상용 유한 요소(Finite Element Method) 해석 툴인 Comsol Multiphysics로 계산된 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 보호 필름에 사용된 폴리이미드와 PET의 유전율에는 큰 차이가 없으므로 효율적인 시뮬레이션을 위해 PET의 유전율로 통일하였다. 전도성 패턴은 2차원 구조에 전도도와 두께를 입력하여 계산할 수 있는 전이 경계 조건(Transition Boundary

Condition)을 이용하여 해석하였다.

유전 알고리즘을 이용하여 중심 주파수를 10 GHz에 맞춘 기존 설계안 [6]과는 달리 제작 과정에서 아크릴 기판의 두께가 증가하여 반사도가 최소화되는 주파수가 낮은 주파수로 이동하였으나, X 밴드 전체에서 반사도는 레이더 흡수 물질의 성능 평가 시 기준이 되는 -10 dB 미만[4, 5]으로 감소된 결과를 확인할 수 있다. 또한 면 저항을 조절할 경우 그림 2의 면 저항이 130 Ω/sq인 결과와 같이 X 밴드 전체에서 반사도를 -10 dB 미만으로 감소시키면서 중심 주파수를 10 GHz로 이동 시킬 수 있다. 차기구축함에 적용되는 통합 마스트의 스텔스 성능을 평가하는 데는 특정 주파수에서 반사도를 감소시키는 것보다 X 밴드 대역 전체의 반사도를 감소시키는 것이 중요하므로 제안된 전자기파 메타물질 흡수체가 스텔스 소재로써 성능을 만족함을 확인할 수 있다.

## 2. 환경시험

그림 3은 고온 환경시험에 사용된 항온 챔버 사진을 나타낸다. 고온 시험은 24시간을 1주기로 30 °C에서부터 63 °C까지 변화를 주는 방식으로 총 7회 반복하였다. 열 충격을 방지하기 위해 온도 변화는 3 °C/min 이내로 조절하였으며, 온도프로파일 등 자세한 세부 사항은 MIL-STD-810H의 Method 501.7 중 Procedure I 조건에 따라 설정되었다[13].

그림 4로부터 고온 환경시험 이후 전자기파 메타물질 흡수체 표면을 확인할 수 있다. 총 두 개의 샘플을 제작하여 고온 환경시험을 진행하였으며, 그림4(a)는 그림 2와 같이 중심 주파수가 10 GHz에 위치하도록 패턴 면 저항을 130 Ω/sq에 맞추기 위



Fig. 3. A temperature controllable chamber used for high-temperature environmental test.

그림 3. 고온 환경시험에 사용된 항온 챔버

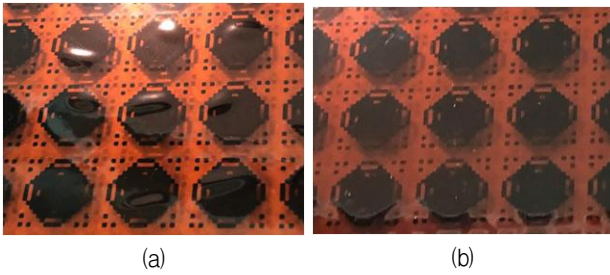


Fig. 4. Surfaces of electromagnetic metamaterial absorbers covered by protective PET films after processing high-temperature environmental test. (a) Pattern sintered during 10 minutes at the temperature 80 °C, (b) Pattern sintered during 10 minutes under the temperature 90 °C.

그림 4. 고온 환경시험 이후의 PET 보호 필름이 덮인 전자기파 메타물질 흡수체 표면 (a) 80 °C에서 10분간 소결된 패턴, (b) 90 °C에서 10분간 소결된 패턴

해 80 °C에서 10 분간 소결한 전자기파 메타물질 흡수체 표면이다. 그림 4(b)는 반사도가 최소가 되는 주파수가 10 GHz 보다 낮은 주파수로 이동하지만 반사도를 전체적으로 최소화 시킬 수 있는 면저항 112 Ω/sq의 구현을 위해 90 °C에서 10 분간 소결한 전자기파 메타물질 흡수체 표면이다.

90 °C에서 10 분간 소결한 패턴의 경우 외관상 큰 변형이 없었으나 80 °C에서 10 분간 소결한 패턴의 경우 보호 필름의 외형에 주름이 확인되었다. 이와 같은 변형은 잉크가 인쇄된 영역에서만 확인되었다. 이로부터 그림 3의 항온 챔버 내부에서 63 °C까지 온도가 상승할 때 패턴을 구성하는 카본 입자 사이의 결합 및 패턴과 폴리이미드 필름과의 결합이 약해지며 필름에 반복적인 변형이 가해진 것으로 판단된다.

3. 측정 및 성능 분석

고온 환경이 카본 잉크로 인쇄된 패턴에 미치는 영향을 정확히 분석하기 위해 고온 환경시험 전, 후에 전자기파 반사도를 측정하고 측정과 가장 잘 일치하는 시뮬레이션 결과를 통해 패턴 면저항 변화를 근사적으로 분석하였다. 전자기파 반사도는 그림 5와 같이 평면 전자기파 송수신이 가능한 X 밴드 대역 렌즈 혼 안테나 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 측정 시스템에는 Keysight 사 PNA N5227B 모델의 VNA(Vector Network Analyzer)가 사용되었다.

80 °C에서 소결된 전자기파 메타물질 흡수체의

반사도 측정 결과는 그림 6과 같다. 고온 시험 이후 중심 주파수 10 GHz를 기준으로 반사도가 약 3 dB 증가한 결과를 확인할 수 있으나 환경시험 전과 후 모두 X 밴드 전체에서 반사도가 10 dB 이상 감소된 결과가 확인되었다. 고온 환경시험 전과 후 패턴의 면저항은 중심 주파수인 10 GHz를 기준으로 측정 결과와 가장 잘 일치하는 시뮬레이션 결과를 통해 근사적으로 계산하였다.

주파수 변화에 따라 발생하는 유전율의 차이와 스크린 프린팅 방법으로 패턴을 인쇄할 때 발생하는 잉크의 퍼짐 현상은 시뮬레이션에 반영되지 않아 측정과 시뮬레이션의 그래프 개형에 약간의 차이가 발생하였다. 하지만 전체적인 경향성이 일치하므로 고온 환경시험 전, 후의 전자기적 특성 변화를 중심 주파수를 기준으로 계산된 면저항을 통해 근사적으로 분석할 수 있다. 그림 6과 같이 고온

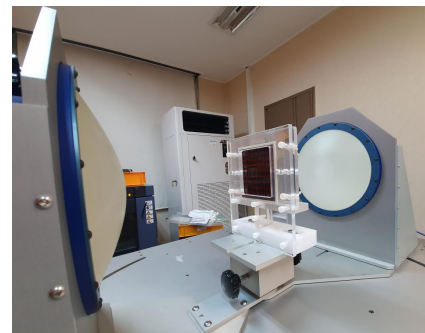


Fig. 5. Measurement system based on Lens-horn antennas. 그림 5. 렌즈 혼 안테나 측정 시스템

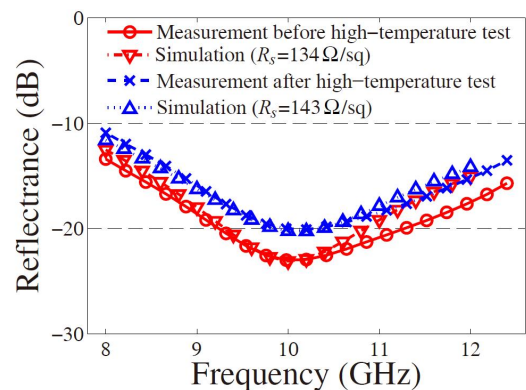


Fig. 6. Measured and simulated reflectances of electromagnetic metamaterial absorber sintered during 10 minutes at the temperature 80 °C before and after high-temperature environmental test.

그림 6. 80 °C에서 10분간 소결된 전자기파 메타물질 흡수체의 고온 환경시험 전, 후 반사도 측정 및 시뮬레이션 결과



환경시험 전 패턴 면 저항은 134 Ω/sq로 계산되었고, 고온 환경시험 후의 면 저항은 143 Ω/sq으로 계산되었다. 이 결과로부터 80 °C에서 소결된 패턴의 면 저항은 고온 환경시험 이후 9 Ω/sq 증가하여 약 6.7% 변형되었음을 알 수 있다.

90 °C에서 소결된 전자기파 메타물질 흡수체의 고온 환경시험 전과 후의 반사도 측정 결과는 그림 7과 같다. 고온 환경시험 전 패턴 면 저항은 119 Ω/sq으로 계산되었고, 고온 환경시험 후 면 저항은 116 Ω/sq으로 계산되었다. 이로부터 고온 환경시험 후 면 저항은 3 Ω/sq 감소하여 환경시험 전 면 저항 대비 2.5% 변형되었음을 알 수 있다. 이는 80 °C에서 소결된 패턴과 비교하였을 때 1/3 수준의 면 저항 변화를 나타낸다. 또한 X 밴드 전체에서 반사도가 10 dB 이상 감소될 뿐만 아니라 그림 2에서 제시한 112 Ω/sq으로 설계된 결과와의 차이가 줄어들면서 환경시험 전 보다 반사도의 최소값이 오히려 더 감소된 결과가 확인되었다.

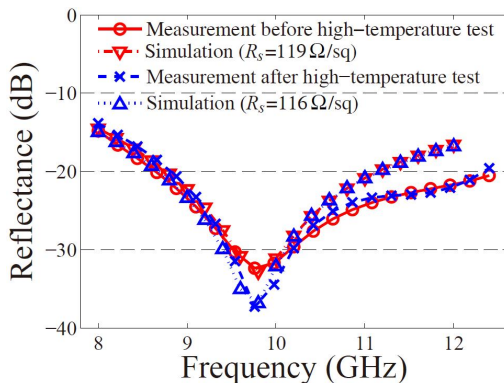


Fig. 7. Measured and simulated reflectances of electromagnetic metamaterial absorber sintered during 10 minutes at the temperature 90 °C before and after high-temperature environmental test.

그림 7. 90 °C에서 10분간 소결된 전자기파 메타물질 흡수체의 고온 환경시험 전, 후 반사도 측정 및 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 이용한 분석 결과로부터 고온 환경 시험에 적용된 최대 온도 63 °C보다 충분히 높은 온도인 90 °C에서 소결된 패턴의 경우 소결 온도의 증가에 따라 면 저항이 낮아지는 경향성에 따라 무시할 수 있는 정도의 변형이 발생하였음을 알 수 있다. 반면 80 °C에서 소결된 패턴의 경우 외관상 확인된 변형과 같이 소결된 잉크의 변형으로 패턴

내부에 균열이 발생하여 면 저항이 증가된 것으로 판단된다[12]. 면 저항의 변화에 따라 전자기파 흡수 성능에 일부 변화가 확인되었으나, 80 °C, 90 °C에서 소결된 패턴 모두 X 밴드 대역 전체에서 10 dB 이상 반사도가 감소됨을 확인하였다. 이로부터 온도가 다양하게 변화하는 해상 환경 상에서 차기 구축함 통합 마스트의 산란 단면적을 감소시키기 위한 용도로써 전자기파 메타물질 흡수체가 안정적으로 적용될 수 있음을 검증하였다.

### III. 결론

본 논문에서는 차기구축함의 레이더 반사면적을 최소화시킬 수 있는 통합 마스트 설계를 목표로 메타물질 기반 전자기파 흡수체의 고온 환경에 대한 내구성을 검증하였다. X 밴드 대역에 최적으로 설계된 패턴을 이용하여 양면 접착 필름 및 보호 필름이 더해진 효과를 고려하여 반사도를 최대한 낮출 수 있는 패턴 면 저항을 계산하였으며, 이를 바탕으로 카본 잉크의 소결 온도를 결정하였다. X 밴드 전 영역에서 반사도가 최소가 되도록 90 °C에서 소결된 흡수체뿐만 아니라 반사도는 조금 상승하지만 중심 주파수가 10 GHz에 맞춰지도록 80 °C에서 소결된 흡수체 모두 고온 환경시험 이후에도 X 밴드 전체에서 반사도가 10 dB 이상 감소함을 확인하였다. 고온 환경시험 후 측정 결과 분석을 통해 90 °C에서 소결된 패턴의 면 저항 변화가 80 °C에서 소결된 패턴의 1/3 수준으로 확인되었으며, 이로부터 소결 온도가 높을수록 고온 환경에 대한 내구성이 개선됨을 검증하였다. 향후 전도성 패턴과 보호 필름을 하나의 구조로 통합하는 공정 및 소결 온도를 높일 수 있는 패턴 최적화를 통해 온도뿐만 아니라 습도, 염수, 일사 환경 조건에 대한 내구성이 더욱 향상된 메타물질 기반 전자기파 흡수체 제작이 가능할 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 전자기파 메타물질 흡수체를 차세대 스틸스 소재로써 차기구축함의 통합마스트에 성공적으로 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

### References

[1] M. R. Meshram, N. K. Agrawal, B. Sinha,

and P. S. Misra, "Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol.271, No.2-3, pp.207-214, 2004. DOI: 10.1016/j.jmmm.2003.09.045

[2] X. Liu, Z. Zhang, and Y. Wu, "Absorption properties of carbon black/silicon carbide microwave absorbers," *Compos. B. Eng.* Vol.42, No.2, pp.326-329, 2011. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.11.009

[3] W. W. Salisbury, "Absorbent body for electromagnetic waves," *U.S. patent* 1952.

[4] T. Li, K. Chen, G. Ding, J. Zhao, T. Jiang, and Y. Feng, "Optically transparent metasurface salisbury screen with wideband microwave absorption," *Opt. Express* Vol.26, No.26, pp.34384-34395, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.034384

[5] C. Zhang, J. Yang, W. Cao, W. Yuan, J. Ke, L. Yang, Q. Cheng, and T. Cui, "Transparently curved metamaterial with broadband millimeter wave absorption," *Photonics Res.* Vol.7, No.4, pp.478-485, 2019. DOI: 10.1364/PRJ.7.000478

[6] Joonkyo Jung, Myungjoon Kim, Min Sung Heo, Yunseok Jang, Hyun-June Jung, Yongjune Kim, Tae In Choi, Ilsung Seo, Tae-Jin Je, Eun-Chae Jeon, Jeongdai Jo, Hak-Joo Lee, and Jonghwa Shin, "Microwave Stealth Fabricated on Flexible Film based on Multiresonance-type Metasurface," *2018 Naval Ship Technology Seminar & Naval Weapon System Symposium*, p.65, 2018.

[7] Byeongjun An and Sangkui Seo, "A Study on the Setting Procedure of Standard Value and Design Target Value for the RCS Reduced Design for Naval Ships," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.26, No.6, pp.581-588, 2015. DOI: 10.5515/KJKIEES.2015.26.6.581

[8] C. Eyraud, J.-M. Geffrin, A. Litman and H. Tortel, "Complex permittivity determination from far-field scattering patterns," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol.14, pp.309-312, 2014. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2362995

[9] T. Rovensky, P. Lukacs, and A. Pietrikova, "Dielectric properties of substrates for inkjet technology in GHz area," *Period. Polytech. Electr.*

*Eng. Comput. Sci.*, Vol.63, No.1, pp.9-15, 2019. DOI: 10.3311/PPee.13310

[10] J. A. Reedijk, H. C. F. Martens, B. J. G. Smits, and H. B. Brom, "Measurement of the complex dielectric constant down to helium temperatures. II. Quasioptical technique from 0.03 to 1 THz," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.71, pp.478-481, 2000. DOI: 10.1063/1.1150227

[11] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, Addison-Wesley, 1989.

[12] G. Tomaszewski, T. Wałach, J. Potencki, and M. Pilecki, "The influence of sintering conditions on the inkjet printed paths resistance," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Vol.62, No.2, pp.135-140, 2016.

DOI: 10.1515/eletel-2016-0018

[13] Department of Defense Test Method Standard, "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests (MIL-STD-810H)," <https://www.iest.org/Standards-RPs/MIL-STD-810H>

## BIOGRAPHY

### Youngeun Ra (Member)



2007 : BS degree in Mechanical Engineering, Hanyang University.  
2019 : MS degree in Mechanical Engineering, Yonsei University.  
2007~ : Research Engineer, LIG Nex1.

### Yongjune Kim (Member)

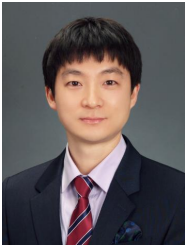


2008 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.  
2016 : MS and PhD degrees in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2016~2017 : Postdoctoral Researcher, National University of Singapore.

2017~ : Senior Researcher, Center for Advanced Meta-Materials.

**Hyun-June Jung** (Member)



2008 : BS degree in Advanced Materials Engineering, Kyungpook National University.  
2010 : MS degrees in Nano Technology, Chungnam National University.  
2014 : PhD degrees in Materials Science & Engineering, Chungnam National University.

2014~2015 : Postdoctoral Researcher, Chungnam National University.

2015~ : Postdoctoral Researcher, Center for Advanced Meta-Materials.

**Pyoungwon Park** (Member)



2009 : BS degree in Computer Engineering, Hanbat National University.  
2010~ : Researcher, Global Standard Technology (GST).  
2013~ : Senior Technologist, Korea Institute of Machinery & Materials.

**Jeongdai Jo** (Member)



2008 : PhD degree in Mechanical Engineering, Tohoku University.  
1996~ : Principal Researcher, Korea Institute of Machinery & Materials.  
2016~ : Head, Dept. of Printed Electronics in KIMM.

**Joonsik Lee** (Member)



2008 : BS degree in Physics, Yeungnam University.  
2017 : MS and PhD degrees in Physics, Yeungnam University.  
2017~2020 : Postdoctoral Researcher, Composite Research Division, Korea Institute of Materials Science.

**Myungjoon Kim** (Member)



2015 : BS degree in Materials Science and Engineering and Computer Science (Interdisciplinary), KAIST.  
2017 : MS degree in Materials Science and Engineering, KAIST.  
2018~ : PhD Candidate in Materials Science and Engineering, KAIST.

**Joonkyo Jung** (Member)



2016 : BS degree in Materials Science and Engineering, Yonsei University.  
2018 : MS degree in Materials Science and Engineering, KAIST.  
2018~ : PhD Candidate in Materials Science and Engineering, KAIST.

**Keonmin Lee** (Member)



2012 : BS degree in Mechanical Engineering, Hongik University.  
2012~ : Research Engineer, LIG Nex1.

**Jonghak Lee** (Member)



2000 : BS degree in Electrical Engineering, Ajou University.  
2009 : MS degree in Mechanical Engineering, Yonsei University.  
2000~ : Research Engineer, LIG Nex1.

**Hak Joo Lee** (Member)



1983 : BS degree in Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University.  
1985 : MS degree in Mechanical Engineering, KAIST.  
2003 : PhD degree in Mechanical Engineering, KAIST.  
1985~ : Research Fellow, Korea Institute of Machinery and Materials.  
2006~ : Convenor, MEMS, International Electrotechnical Commission.  
2014~ : Director, Center for Advanced Meta-Materials.