

# 입도에 따른 Flake Sendust 전파 흡수체의 특성 분석

## Analysis of Properties of Flake Sendust EM Wave Absorber according to Granularity

박수훈 · 김동일 · 최동한 · 김성연\*

Soo Hoon Park · Dong Il Kim · Dong Han Choi · Seong Yeon Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 연자성 금속 분말인 sendust를 flake화 과정을 통하여 형상과 입도를 변화시켜 전파 흡수체를 제작하고, 그 특성을 분석하였다. 먼저 attrition milling에 의해 입도를 달리한 세 종류의 flake sendust 분말과 지지재인 CPE(Chlorinated Polyethylene)를 이용하여 전파 흡수체를 제작하고, 이 전파 흡수체로부터 재료 정수를 계산하여 입도에 따른 변화를 조사한 후 전파 흡수능을 측정하여 비교·분석하였다. 그 결과 평균 입도가 140 μm 인 flake sendust 분말로 제작된 전파 흡수체가 와전류 손실의 감소(복소비 투자를 증가)와 입자간의 정전 용량의 증가(복소비 유전율 증가)에 기인하여 고주파 대역에서 우수한 전파 흡수능을 보임을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we analyzed the characteristics of the EM wave absorber which was fabricated by using flake sendust (soft metal magnetic powder). The flake sendust was made of 3 different granularity by attrition mill. First, we have fabricated 3 kind of EM wave absorbers using the flake sendust and CPE(Chlorinated Polyethylene) and measured the S-parameters of the EM wave absorber. The complex relative permittivity and permeability were calculated from the measured data and the variations according to a change of granularity were researched. As a result, it was confirmed that the EM wave absorber using flake sendust with the 140 μm average granularity has outstanding absorption ability in high frequency range(C band) for the reduction of eddy current loss(increase of permeability) and the increase of space charge polarization(increase of permittivity).

Key words : Electromagnetic Wave Absorber, Sendust, Flake, Permittivity, Permeability

### I. 서 론

PC, 휴대전화를 비롯한 무선 통신 기기 등 각종 전자 기기의 고속 정보 처리 및 소형·경량화 추세에 따라 동작 주파수의 고주파화, 회로 부품의 고집적화 및 고밀도화가 급속히 이루어지는 동시에 발생하는 전자파 노이즈의 주파수도 GHz 대역으로 높아지고 있다. 이에 따라서 전자파 노이즈에 의한 내부

반사, 회로 기판 간의 상호 간섭 및 주변 전자 기기의 간섭 등의 심각성도 크게 증대되어 다양한 EMI/ EMC 대책들이 강구되고 있으며, 문제를 일으키는 발생원을 원천적으로 흡수할 수 있는 전파 흡수체의 사용이 증대되고 있다<sup>[1]</sup>.

전파 흡수체 재료는 손실에 기인하는 항에 따라서 크게 도전 손실 재료, 유전 손실 재료, 자성 손실 재료로 분류할 수 있으며, 도전성 손실 재료는 도전

「이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-005-J00502).」  
한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University)

\*한국해양대학교 산업기술연구소(Research Institute of Industrial Technology, Korea Maritime University)

· 논문 번호 : 20080718-090

· 수정완료일자 : 2008년 9월 8일

전류에 따라 전파를 흡수하는 것으로 카본 및 도전성섬유 등이 있으며, 유전성 손실 재료로는 가해진 전계에 의해 전파를 흡수하는 것으로 카본 고무, 카본 함유 발포 우레탄, 카본 함유 발포 폴리에틸렌 등이 있다. 또, 자성 손실 재료는 가해진 자계에 의해 전파를 흡수하는 것으로 스피넬 구조를 갖는 Mn-Zn ferrite나 Ni-Zn ferrite 같은 soft ferrites와 Sr ferrite나 Ba ferrite 같은 hard ferrites가 가장 대표적이며, GHz 대역에서 자기적 손실이 증가되어 전파 흡수체 재료로서 널리 이용되고 있다<sup>2)</sup>.

하지만 스피넬 구조를 갖는 다결정 페라이트인 경우, Snoek는 허수부 투자율  $\mu''$ 이 최대로 되는 주파수  $f_{r(max)}$ 와 초투자율  $\mu_i$ 의 곱  $S$ 가 페라이트의 조성에 의존하지 않고

$$S = \mu_i \cdot f_{r(max)} = 5,600 \text{ (MHz)} \quad (1)$$

식 (1)과 같이 정해진 값의 상한을 넘을 수 없다고 하였다<sup>3)</sup>. 즉, 초투자율  $\mu_i$ 는  $1/f_{r(max)}$ 에 비례하므로 고주파 영역에서는 페라이트에 큰 투자율은 바랄 수 없다. 따라서 기존의 페라이트는 전파와 노이즈 주파수의 고주파 화에 의해 사용 주파수 대역이 한계가 있으며, 이를 대체하기 위해서 포화자화가 페라이트보다 2배 이상 높은 철계 연자성 금속에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1),4)</sup>.

일반적으로 자성체에 교류 자기장  $H = H_0 \cos \omega t$  ( $\omega$ : 각 주파수,  $t$ : 시간)이 인가될 때 발생하는 에너지 손실( $P$ )은 식 (2)와 같다<sup>5)</sup>.

$$P = \frac{1}{2} \omega \mu'' H_0^2 \quad (2)$$

여기서  $\mu''$ 는 이 자성체의 복소비 투자율의 허수 항

이다. 식 (2)에서 보면 높은 주파수 대역에서 우수한 에너지 손실을 보기 위해서는 자성체의 복소비 투자율이 높은 주파수 대역에서 커야 한다는 것을 알 수 있다. 높은 주파수 대역에서 큰 투자율을 얻기 위해서 재료의 공명주파수를 높게 하여야 하며, 이를 위하여 재료를 열처리(annealing) 하거나 형상을 조절하는 등의 방법이 시도되고 있다<sup>6)</sup>.

따라서 본 논문은 철계 연자성 금속 분말인 sendust를 형상과 입도를 변화시켜 전파 흡수체를 제작하고 특성을 분석하였다. 먼저 sendust를 attrition mill에 의해 flake화 하고, 분쇄 시간을 달리하여 3가지 종류의 입도로 가공하였다. 그리고 지지체인 CPE를 이용하여 전파 흡수체를 제작하고 재료 정수를 측정하여 입도에 따른 변화를 조사한 후 전파 흡수능을 측정하여 비교·분석하였다.

## II. 전파 흡수 재료의 가공 및 샘플 제작

### 2-1 전파 흡수 재료 가공

본 연구에서 철계 연자성 금속 분말인 sendust를 전파 흡수 재료로 사용하였다. 원형 분말을 평판상으로 가공(flake화)하기 위하여 attrition mill을 사용하였으며, 분쇄 시간을 달리하여 가공함으로써 표 1과 같은 평균 입도(판상 입자의 직경)가 다른 3가지 flake sendust 분말을 만들었다. 각 flake sendust 분말의 SEM 사진은 그림 1에 나타내었다.

### 2-2 전파 흡수 제작

분쇄 시간을 달리하여 가공한 서로 다른 평균 입도를 가진 전파 흡수 재료인 flake sendust와 지지체



(a) Sendust(140  $\mu\text{m}$ )

(b) Sendust(50  $\mu\text{m}$ )

(c) Sendust(1  $\mu\text{m}$ )

그림 1. 평균 입도에 따른 flake sendust 분말의 SEM 사진

Fig. 1. The SEM images of flake sendust powders.

표 1. Flake sendust 분말의 제원

Table 1. Specification of sendust powders.

FSSS( $\mu\text{m}$ )	Shape	Composition	A/D(g/cc)	A/D(g/cc)
140	Flake	Fe-Si-Al	0.9	1.6
50	Flake	Fe-Si-Al	0.7	1.0
1	Flake	Fe-Si-Al	0.5	0.8

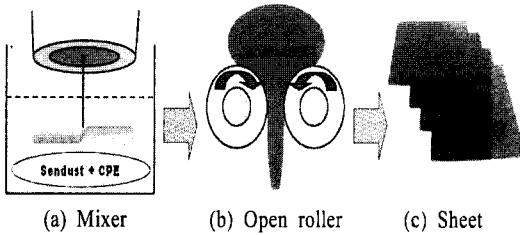


그림 2. 전파 흡수체 제작 과정

Fig. 2. Manufacturing process of EM wave absorber.

인 CPE를 사용하여 전파 흡수체를 제작하였으며, 제작 과정은 그림 2와 같다. 먼저 전파 흡수 재료와 CPE의 조성비를 60:40 wt.%로 하고, 각각을 믹서를 이용하여 혼합한 후 본 연구실에서 자체 제작한 Open roller를 이용하여 두께 1 mm, 2 mm의 sheet형 전파 흡수체를 제작하였다. 이때 open roller의 표면 온도는 전파 흡수능에 영향을 미치기 때문에 70 °C의 균일한 온도를 유지하였다<sup>7)</sup>.

### 2-3 측정 시스템

그림 3과 같은 샘플 홀더에 도넛 모양의 외경 7

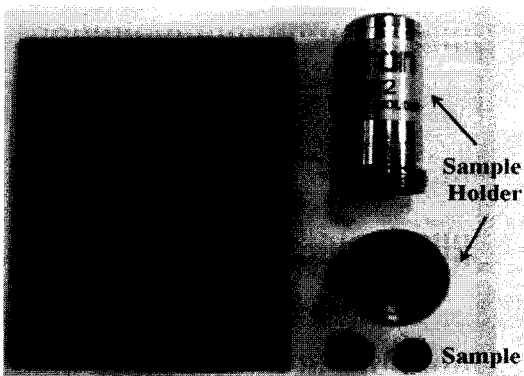


그림 3. 전파 흡수체 및 샘플 홀더

Fig. 3. A photo of EM wave absorber and sample holder.

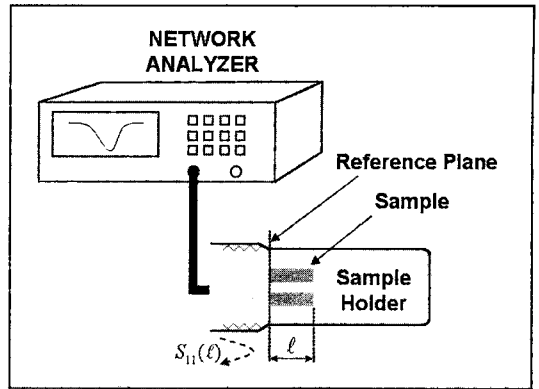


그림 4. 측정 시스템

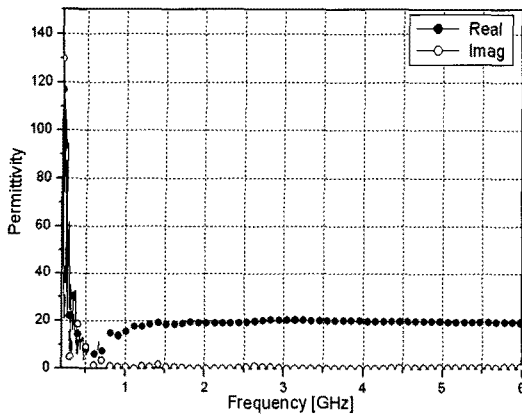
Fig. 4. Measurement system.

m, 내경 3.05 mm 크기의 전파 흡수체를 삽입한 후 그림 4와 같이 Network Analyzer(HP 8753D)에 연결하여 반사 계수를 측정하였다. 그리고 측정된 데이터를 이용하여 MATLAB 프로그램으로 각 샘플의 입력 임피던스를 계산하고, 1-2법으로 재료 정수인 복소비 유전율과 복소비 투자율을 계산하였다<sup>[8],[9]</sup>.

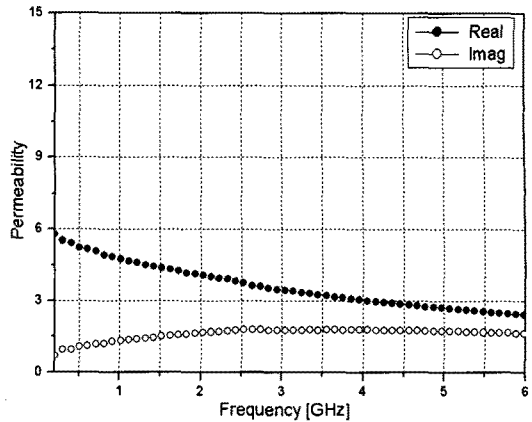
## III. 실험 결과 및 고찰

### 3-1 재료 정수

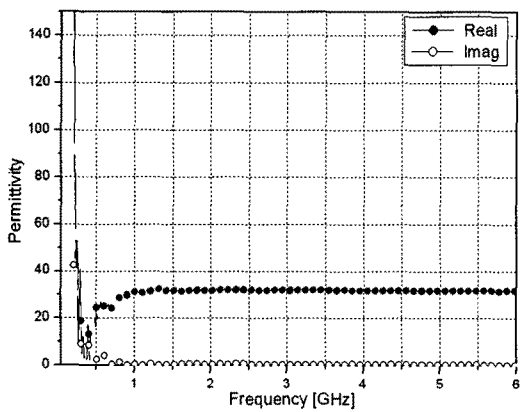
그림 5는 평균 입도가 다른 3가지 flake sendust 분말을 CPE와 조성비 60:40 wt.%로 제작한 전파 흡수체의 복소비 투자율과 복소비 유전율의 주파수 분산 특성을 보여준다. Flake sendust 분말의 평균 입도가 감소하면서 aspect ratio가 증가함에 따라 복소비 투자율의 허수, 실수 및 복소비 유전율의 실수가 증가함을 볼 수 있다. 이는 sendust 분말이 flake 형태로 입자의 크기가 감소하는 동시에 표피 깊이 정도로 얇게 만드는 편상화 즉, 아스펙트 비(aspect ratio)가 큰 분말로 가공이 되었다. 따라서 형상 이방성에 기인하는 이방성 자장이 증대되면서 공명주파수가 높아지고 와전류 손실이 저감되었고, 아스펙트 비가 큰 분말일수록 두께가 얇아서 상대적으로 많은 양의 분말이 적층되어 높은 투자율 값을 가진 것으로 사료된다. 또한, 복소비 유전율의 증가는 원형 분말에서 flake 형태로 입자 면적의 증대와, 얇은 두께의 분말이 상대적으로 많은 양이 쌓여 입자간 정전 용량의 증가에 의한 것으로 사료된다.



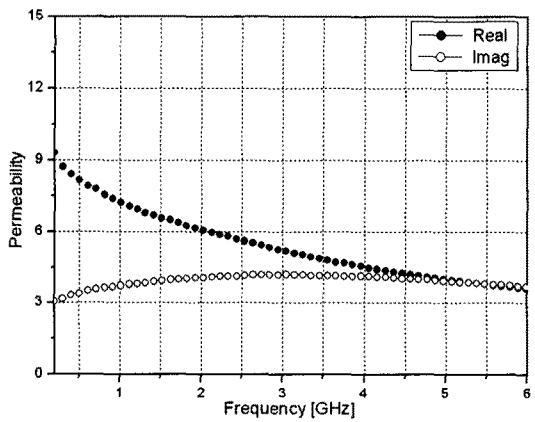
(a) Permittivity(140 μm)



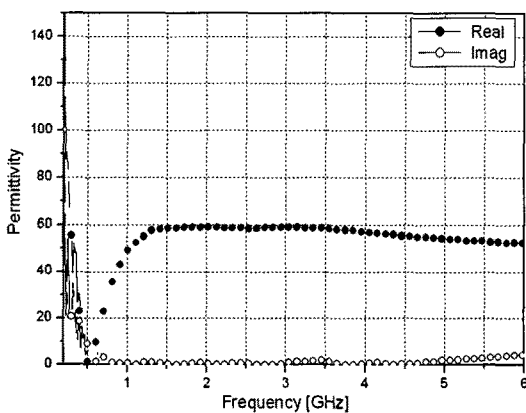
(b) Permeability(140 μm)



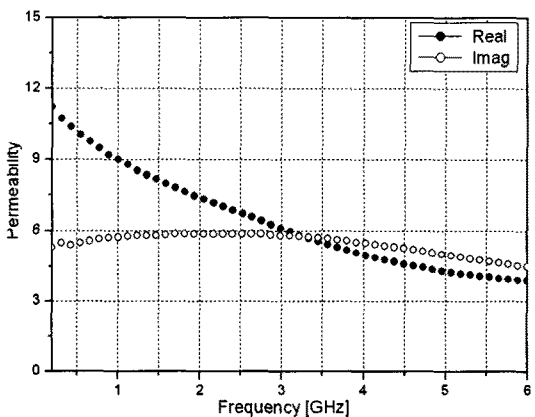
(c) Permittivity(50 μm)



(d) Permeability(50 μm)



(e) Permittivity(1 μm)



(f) Permeability(1 μm)

그림 5. 입도에 따른 전파 흡수체의 재료 정수(flake sendust:CPE=60:40 wt.%)

Fig. 5. Material constants of EM wave absorber according to granularity(flake sendust:CPE=60:40 wt.%).

### 3-2 전파 흡수능

그림 6은 원형 sendust와 flake sendust를 각각

CPE와 60:40 wt.%의 조성비로 두께가 4 mm인 전파 흡수체를 제작하여 전파 흡수능을 측정 한 것으로, sendust 분말의 형태에 따른 전파 흡수체의 전파 흡수능

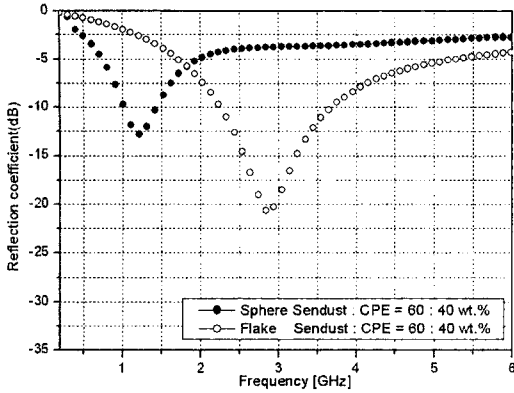


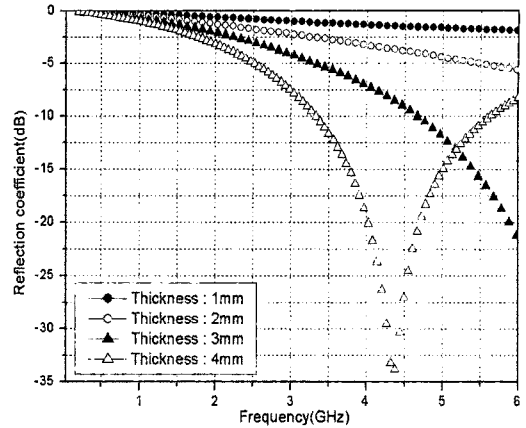
그림 6. Sendust 분말의 형태에 따른 전파 흡수능 (전파 흡수체의 두께: 4 mm)

Fig. 6. Absorption ability of EM wave absorber according to shape of sendust powder (전파 흡수체의 두께: 4 mm).

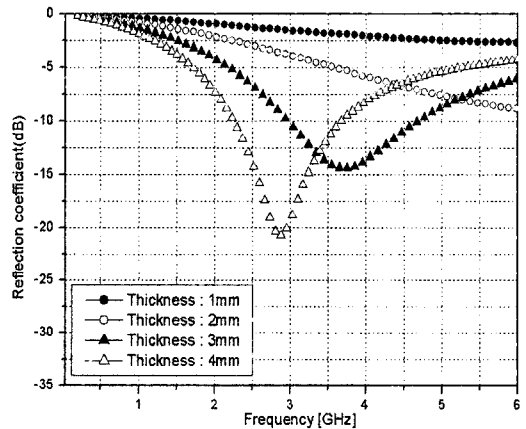
을 보여준다. 원형 sendust로 제작된 전파 흡수체는 중심 주파수 1.2 GHz에서 13 dB의 전파 흡수능을 보이는 반면, flake sendust로 제작된 전파 흡수체는 중심 주파수가 2.8 GHz로 고주파로 이동하였으며, 전파 흡수능 또한 21 dB로 증가하였다.

또한, 그림 7은 조성비가 flake sendust:CPE=60:40 wt.%인 3가지 전파 흡수체의 재료 정수를 이용하여 시뮬레이션한 전파 흡수능을 나타낸다. 일반적인 전파 흡수체의 특성과 같이 전파 흡수체의 두께가 커질수록 전파 흡수 주파수 대역은 저주파로 이동하며 전파 흡수능은 향상되었다. 특히 평균 입도가 140  $\mu$ m이고, 조성비가 flake sendust:CPE=60:40 wt.%인 샘플의 두께가 4 mm인 경우에 중심 주파수 4.4 GHz에서 34 dB의 매우 높은 전파 흡수능을 보였으며, 20 dB 이상의 전파 흡수능을 보이는 주파수 대역폭도 700 MHz 이상이었다. 이상의 결과는 원형 sendust 분말을 flake화하여 전파 흡수체를 제작하였기 때문에 와전류 손실의 저감에 의해 에너지 손실을 보는 전파 흡수체의 투자율이 증가하였기 때문으로 사료된다.

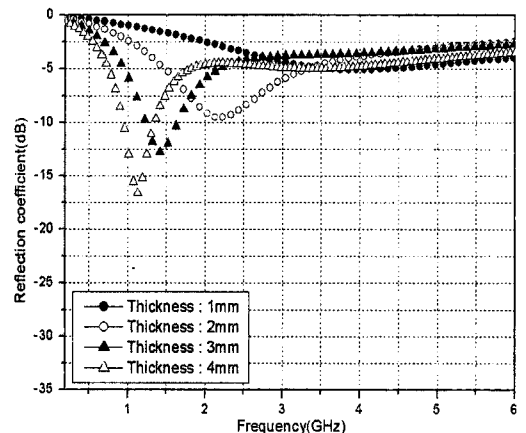
그리고 아스펙트 비가 작은 전파 흡수체일수록 저주파 대역에서 우수한 전파 흡수능을 보이는 것을 알 수 있는데, 이것은 3-1절에 설명한 바와 같이 아스펙트 비가 작은 전파 흡수체일수록 투자율이 높으며, 따라서 상대적으로 초투자율이 증가하여 저주파 대역에서 우수한 전파 흡수능을 보인 것으로 사료된다.



(a) 140  $\mu$ m



(b) 50  $\mu$ m



(c) 1  $\mu$ m

그림 7. 입도에 따른 전파 흡수체의 전파 흡수능 (flake sendust:CPE=60:40 wt.%)

Fig. 7. Absorption ability of EM wave absorber according to granularity (flake sendust:CPE=60:40 wt.%).

#### IV. 결 론

본 논문에서는 연자성 금속 분말인 sendust를 3가지 입도로 flake화하고, CPE와 혼합하여 전파 흡수체를 제작한 후 재료 정수와 전파 흡수능을 비교·분석하였다. Flake화 된 sendust 분말의 평균 입도가 감소하면서 aspect ratio가 증가함에 따라 복소비 투자율의 실수, 허수 및 복소비 유전율의 실수가 증가함을 볼 수 있었으며, 이는 와전류 손실의 감소에 의한 복소비 투자율의 증가와 입자간 정전 용량의 증가로 인한 복소비 유전율의 증가에 기인한다. 이에 따라 평균 입도와 아스펙트 비에 따라서 전파 흡수체의 정합 주파수가 이동하였으며, 전파 흡수능 또한 변화하였다.

이상의 결과로부터 연자성 금속 분말인 sendust를 전파 흡수체로 사용할 경우 조성비 및 전파 흡수체의 두께와 더불어 분말의 형태와 입도가 중요한 설계 요소이며, 원형 sendust 분말을 flake화하여 재료의 입도를 변형하고 최적 조성비 및 두께를 탐색하면 기존의 원형 sendust를 재료로 한 전파 흡수체보다 고주파 대역에서 높은 전파 흡수능을 보이는 동시에 더욱 박형화된 전파 흡수체의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] B. Zhang, G. Lu, and Y. Feng, "Electromagnetic and microwave absorption properties of Alnico powder composites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 299, pp. 205-210, 2006.
- [2] S. S. Kim, D. H. Han, and S. B. Jo, "Microwave absorbing properties of sintered Ni-Zn ferrites", *IEE Trans. Mag.k* 30, pp. 4554-4556, 1994.
- [3] J. L. Snoek, "Dispersion and absorption in magnetic ferrite at frequency above one Mc/s", *Physica*, vol. 14, pp. 207-217, 1948.
- [4] O. Hashimoto, et al., *Technologies & Applications of Wave Absorber*, CMC Publication Co., pp. 132-142, 2004.
- [5] T. H. Noh, T. G. Lee, "Effects of annealing temperature on electromagnetic wave absorption characteristics in FeCuNbSiB alloy flakes/polymer composite sheets", *Journal of the Korea Magnetics Society*, vol. 17, no. 5, 2007.
- [6] S. T. Kim, S. K. Kim, and S. S. Kim, "Microwave absorbing properties of iron particles-rubber composites in mobile telecommunication frequency band", *Journal of the Korea Magnetics Society*, vol. 14, no. 4, 2004.
- [7] S. H. Moon, S. J. Shin, J. M. Song, D. I. Kim, and K. M. Kim, "Development of composite a ferrite EM wave absorbers for GHz frequency", *Journal of Korea Electromagnetic Engineering Soc.*, vol. 14, no. 12, pp. 1329-1334, 2003.
- [8] C. M. Choi, D. I. Kim, D. H. Choi, Li, Rui, "Development of broad-band electromagnetic wave absorber for X-band sensors in double-layered type using carbon", *12th IAIN World Congress*, vol. 1, pp. 297-300, 2006.
- [9] Y. Naito, *Electromagnetic Wave Absorbers*, New Ohm, Tokyo, pp. 69-76, 1987.
- [10] 김동일, 전파 흡수체공학, 대영사, pp. 176-203, 2006년.

박 수 훈



2007년 2월: 한국해양대학교 전파공학  
학과 (공학사)  
2007년 3월~현재: 한국해양대학교  
전파공학과 석사과정  
[주 관심분야] EMI/EMC 분석 및  
대책, 고성능 전파 흡수체의 개  
발, RFID 시스템 등

최 동 한



1998년 2월: 경성대학교 전산통계  
학 (이학사)  
2000년 2월: 부경대학교 전자계산  
학 (이학석사)  
2002년 2월~2006년 2월: 한국해양  
대학교 전파공학과 (공학박사)  
[주 관심분야] 고성능 전자파 흡수  
체 개발, EMI/EMC 대책, 안테나

김 동 일

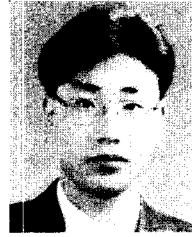


1975년 2월: 한국해양대학교 항해  
학과 (공학사)  
1977년 2월: 한국해양대학교 전파  
공학전공 (공학석사)  
1984년 3월: 일본 동경공업대학원  
전기전자공학과 (공학박사)  
1975년 3월~1993년 9월: 한국 해양

대학교 조교~부교수

1990년 3월 10일: 산학협동상 대상 수상  
1993년 12월 11일: 한국전자과학회 학술상 수상  
1995년 4월 21일: 과학기술진흥 대통령 표창 수상  
1998년 9월 30일: 한국항해학회 우수논문상 수상  
1993년 10월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수  
2002년 1월~2003년 12월: 한국전자과학회 학회장  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로의 설계,  
CATV 전송 회로의 설계, 고성능 전파 흡수체의 개발,  
EMI/EMC 대책 등

김 성 연



1996년 2월: 성균관대학교 금속공  
학과 (공학사)  
1998년 2월: 성균관대학교 신소재  
공학과 (공학석사)  
2003년 2월: 성균관대학교 신소재  
공학과 (공학박사)  
2006년 3월~현재: 한국해양대학교

산업기술연구소 전임연구원

[주 관심분야] EMI/EMC