RF 스텔스용 RAM의 전파흡수능 측정기법에 관한 연구

최창묵* · 임봉택** · 고광섭***

A Study on Measurement Techniques of EM Wave Absorbing Ability of a RAM for RF Stealth

Chang-Mook Choi* · Bong-Taeck Lim** · Kwang-Soob Ko***

이 논문은 해군해양연구소의 2010년도 국고 연구비 지원을 받아 연구되었음

요 약

본 논문에서는 국방과학의 RF 스텔스 구현을 위해 필요한 RCS 감소용 RAM의 전파흡수능 측정기법에 대하여 연구하였다. 먼저 RAM의 전파흡수능에 대한 이론 정립 후 측정기법에 대하여 실제 레이더 시스템과 유사한 자유공간법과 실험실에서 용이한 전송선로법을 분석하여 실제 RAM 샘플을 제작하여 측정기법에 따라 측정후 비교 분석하였다. 비교 분석결과 전파흡수능은 자유공간법에서 다소 우수한 특성이 보였으나 전체적인 패턴이 유사한 것을 확인하였다. 따라서 RAM 개발시 초기단계부터 최종단계까지 단계별/주파수별 제시하는 측정기법을 차등 적용한다면 보다 효과적으로 RAM을 개발 할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In this paper, measurement techniques of absorbing ability for a RAM were studied for RCS Reduction needed for materializing ADD's RF stealth. As for the measurement techniques of absorbing ability, the theories of the free space method, similar to real radar system, and transmission line method, suitable for lab scale, were established. And we made real RAM samples, measured absorbing ability according to each, and compared the results. After comparison, electromagnetic(EM) wave absorbing ability was measured to be somewhat superior in free space method and overall uniform pattern was observed. Therefore, by applying measurement techniques by stage and by frequency we could develop RAM in a more efficient way.

키워드

자유공간법, 전송선로법, 흡수능, RAM, RCS 감소

Key word

Free Space Method, Transmission Line Method, Absorbing ability, RAM, RCS Reduction

* 해군사관학교(교신저자, navsun@naver.com)
** 해군사관학교
*** 해군사관학교

접수일자 : 2010. 05. 28
심사완료일자 : 2010. 05. 28

Ⅰ. 서 론

스텔스 기술이란 상대방의 탐지센서로부터 생존을 보장하기 위해 신호의 크기를 차단 또는 축소하는 기술로서 주요 위협신호 분야는 레이더, 적외선, 음향신호 등으로 이중에서도 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section)을 최소화 하는 것이 핵심 기술로 알려져 있다[1], [2].

레이더 반사 단면적을 최소화하는 전자파 기술은 두 가지의 방법으로 발전해 왔다. 그 중 하나는 플랫폼의 표면을 형상화 하는 것이며, 다른 하나는 전체적이나 부분적으로 표면에 RAM(Radar Absorbing Materials)을 붙이는 것이다[3].

대부분의 레이더 반사 단면적의 감소는 형상화로부터 기인되며, RAM을 필수불가결한 장소에 적용함으로써 레이더 반사 단면적을 더욱 최소화하는 역할을 수행한다[1].

그럼으로 레이더 반사 단면적 최소화에 필수불가결한 RAM을 설계하고 개발하기 위해서는 개발단계에서 성능을 측정하는 기법이 보다 현실적으로 묘사 가능하고 간편해야 한다. 일반적으로 전파흡수능을 측정하는 기법은 실제 레이더 시스템과 유사한 자유공간법(Free space method)과 실험실에서 편리하게 측정 가능한 전송선로법(Transmission line method)이 있다[2].

따라서 본 논문에서는 자유공간법과 전송선로법을 이론 정립 후 특성에 따라 한계점을 분석하였다. 그리고 실제 RAM 샘플을 제작하여 측정기법별 성능을 비교분석하여 동일한 효과를 얻을 수 있음을 확인하였으며 RAM 개발 초기단계에서 최종단계까지의 효과적인 측정기법을 제시하였다.

Ⅱ. RAM 전파흡수능 이론

그림 1과 같이 두께 d인 RAM과 뒤쪽에 금속판이 놓여있다면, 전면에서 들여다본 정규화 입력임피던스 η는 식(1)처럼 나타낼 수 있다[2].

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\, tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\, d\right) \tag{1}$$

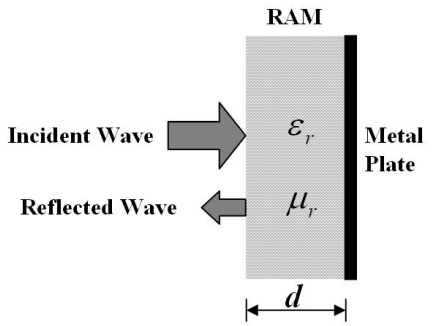


그림 1. RAM
Fig. 1 RAM

여기서, d는 RAM의 두께이고, λ는 입사한 평면파의 자유공간상의 파장이며, ε_r은 복소 비유전율($\varepsilon/\varepsilon_0$), μ_r은 복소 비투자율(μ/μ_0)이다.

정규화 입력임피던스 η는 다음 식(2)와 같이 반사계수 R의 계산에 의해 구해진다.

$$R = \frac{\eta - 1}{\eta + 1} \tag{2}$$

위에서 구해진 반사계수 R은 전압에 대한 비율이기 때문에 반사전력비인 전파흡수능 A을 데시벨로 나타내면 식(3)과 같다[2], [4].

$$A\ [dB] = 20\log_{10}|R| \tag{3}$$

RAM의 전파흡수능은 가능한 한 넓은 주파수 대역에서 우수한 특성을 보이는 것이 좋다.

Ⅲ. RAM 전파흡수능 측정 기법

3.1 개요

RAM의 특성을 평가할 경우에는 주파수 특성, 수직입사 특성, 사입사 특성 등을 측정할 필요가 있으며, 입사각도나 주파수를 변화시켜서 측정하는 것이 일반적이다. 크게 자유공간법과 전송선로법으로 나누어 볼 수 있다[5], [6].

3.2 자유공간법

자유공간법은 자유공간에 놓여진 평판상의 측정 샘플에 평면파를 조사하고 그 때의 반사계수 또는 투과계수를 이용하여 전파흡수능을 측정한다. 자유공간법은 실제 사용되는 레이더를 이용하여 동일한 환경 속에서 측정하는 기법과 전파암실이나 그에 준한 실험실에서 측정하는 기법으로 나눌 수가 있으나 통상 후자를 자유공간법이라 한다. 자유공간법은 자유공간환경에 준한 모의실험을 할 수 있어서 보다 현실적인 특성을 측정할 수 있다는 장점이 있지만 제작하여 측정하는 샘플의 크기가 주파수에 비례하여 일정크기 이상으로 제작해야 됨으로 많은 제작비와 시간의 소비로 개발단계에서는 부적합하다.

자유공간법에서 가장 많이 쓰이는 측정법은 NRL Naval Research Laboratory) Arch 법과 RCS 법이 있다.

Arch 법은 1945년경 미해군연구소에서 최초 사용한 기법으로 Arch는 측정판의 중앙으로부터 일정한 각으로 고정된 두개의 안테나가 있는 단순한 수직형태의 프레임이다. 각각의 혼안테나는 Arch에 부착되어 각을 조절할 수 있으며, 받침대는 측정판의 중심 연결선상에 있도록 디자인되었다. 송수신 안테나는 안테나의 개구의 폭보다 먼거리에 놓여있어야 된다. 때로는 혼과 혼사이 직접적인 커플링을 줄일 수 있도록 작은 흡수판이 필요할 수 있다[2].

그림 2는 NRL Arch 개념도이다.

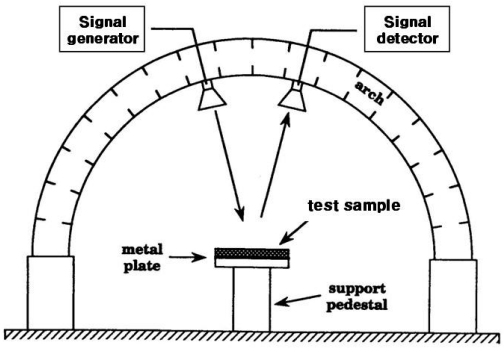


그림 2. NRL Arch 개념도
Fig. 2 A concept of NRL Arch

RCS 법은 arch 법의 금속판과 샘플에 입사되는 위상이 차이를 보상해 줄 수 있으며, 전면에 금속판이 부착되고 후면에 샘플이 부착되는 측정판을 이용하게 된다.

측정판 지지대는 상부에 측정판을 지지할 수 있고 잡아줄 수 있는 홈이 있는 플라스틱 재료의 낮은 밀도의 물질로 만들어 져야 한다. 전체적인 개념은 그림 3과 같다[2].

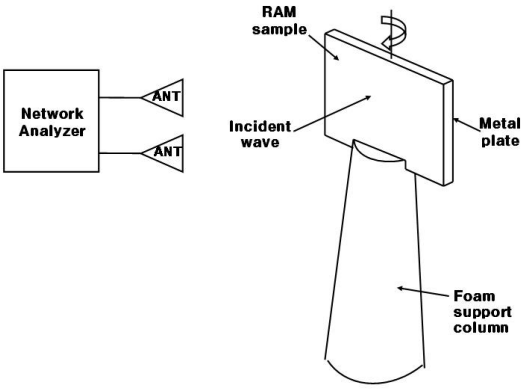


그림 3. RCS 개념도
Fig. 3 A concept of RCS

이 측정방식은 실제 레이더 시스템과의 모사성이 우수하며, 다양한 입사각에서 측정이 가능한 장점이 있어서 많이 이용되고 있다.

자유공간법에서 사용되는 측정 판은 너무 작으면 측정에 영향을 미칠 수 있기 때문에 일반적으로 판의 크기는 사용되는 주파수에 따라 파장의 5 ~ 20배가 좋다[2].

또한 자유공간법에서 사용되는 혼안테나는 원역장이 되는 거리까지 이격되어야 한다. 사용된 혼안테나로부터 전파가 원역장이 되는 프라운호퍼 영역을 나타내는 식(4)와 안테나 이득을 고려한 식(5)를 이용하여 최소 이격거리를 식(6)과 같이 나타내었다.

$$R \geq 2D^2/\lambda \tag{4}$$

$$G_d = 4\pi D^2/\lambda^2 \tag{5}$$

$$R \geq G_d \lambda / 2\pi \tag{6}$$

여기에서, D는 안테나 유효면적이고, λ는 파장, G_d는 안테나 이득, R은 프라운호퍼 영역으로 이격되는 거리를 나타낸다.

그림 4는 식(6)을 이용하여 프라운호퍼 영역과 안테나 이득의 관계를 나타낸 것이다[7].

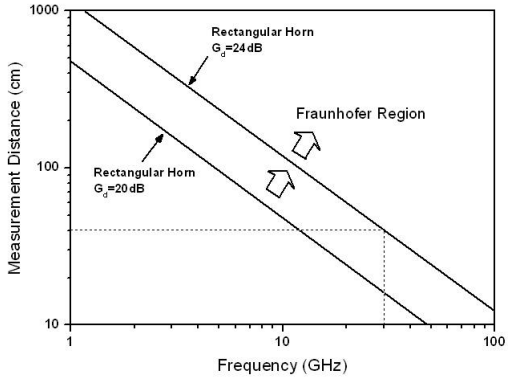


그림 4. 프라운호퍼 영역과 안테나 이득을 고려한 측정거리
Fig. 4 Measurement distance using Fraunhofer region and antenna gain

3.3 전송선로법

전송선로법은 전송선로 홀더 내에서 샘플을 측정하는 기법으로 RF 에너지의 반사계수는 물론 매질의 재료 정수까지 측정하는 기본 기법으로써 많이 이용되고 있다. 전송선로법은 실험실에서 저비용으로 단시간 내에 측정할 수 있다는 장점이 있지만 입사각도나 측정주파수에 제한이 나타나거나 삽입되는 샘플의 가공정밀도에 따라 측정치에 큰 오차가 포함 될 수 있다는 단점이 있다. 전송선로법은 측정 방법에 따라 그림 5와 같이 반사계수를 이용하는 1-port 법과 투과계수를 이용하는 2-port 법으로 나누어 볼 수 있다. 그러나 군사용으로 사용되는 RAM의 경우에는 플랫폼 앞쪽에 부착되는 것으로 샘플의 뒤쪽에 금속판이 놓여져 반사계수를 이용하는 1-port 법이 이용된다[5], [6].

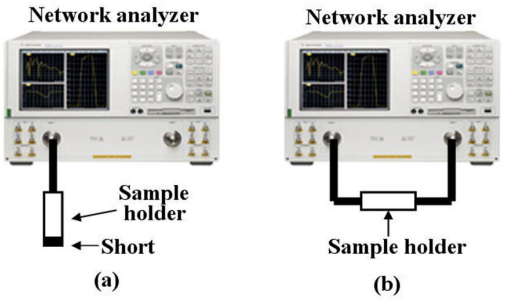


그림 5. 측정법; (a) 1-port 법, (b) 2-port 법
Fig. 5 Measurement method; (a) 1-port method, (b) 2-port method

그리고 측정샘플 형상에 따라 크게 동축관 샘플 홀더법과 도파관 샘플 홀더법으로 나눌 수 있다.

동축관은 TEM 전송선로로써 도파관 보다 사용이 용이하고 차단 주파수가 사용되지 않는 장점이 있다. 사용 주파수는 보통 10 GHz 이하로 제한되며 그 이상의 주파수에서는 도파관법보다 샘플의 물리적 크기가 작아지며, 측정시 선로가 완전도체가 아니므로 오차가 발생 때문에 도파관 내에서 측정을 요하게 된다. 10 GHz 이상에서도 동축선로를 이용하여 측정하는 것이 가능하지만, 선로에서 고유모드가 전파되지 않도록 하기 위해서는 선로의 크기가 매우 작아져야하기 때문에 샘플의 제작도 어려울 뿐만 아니라 샘플홀더 제작에도 고 비용을 요하게 된다. 따라서 동축관 샘플 홀더법은 보통 50 MHz에서 10 GHz 사이의 주파수에서 사용되며, 도파관 샘플 홀더법은 10 GHz에서 100 GHz사이에서 사용된다[8].

Ⅳ. 측정 및 결과

4.1 RAM 샘플 제작

본 논문에서는 RAM의 주재료는 카본을 사용하였으며, 바인더로서 CPE (chlorinated polyethylene)를 사용하였다. RAM 제작과정은 먼저 Mixer에서 카본과 CPE를 특정 조성비에서 혼합하고, 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하여 70 ℃의 일정한 온도[9]에서 A와 B 타입의 Sheet형 RAM 샘플을 제작하였다. 그림 6은 RAM 제작과정이다.

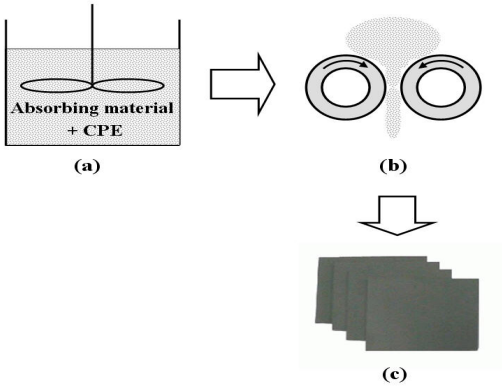
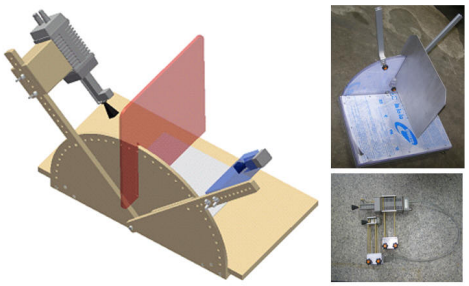


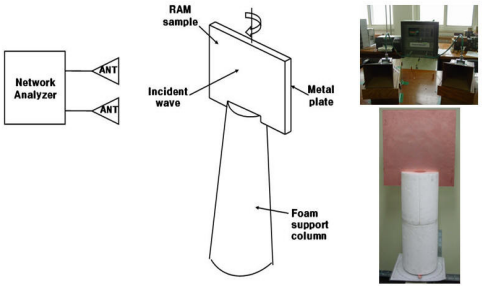
그림 6. RAM 제작과정;
(a) 혼합, (b) 롤러, (c) 시트
Fig. 6 Fabricated progress of RAM;
(a) mixing, (b) roller, (c) sheet

4.2 측정 시스템 구성

자체 제작된 RAM 샘플을 자유공간법인 NRL Arch법과 RCS법을 이용하여 그림 7과 같이 측정 시스템을 구현하고 전송선로법인 동축관 샘플홀더법과 도파관 샘플홀더법을 그림 8과 같이 구현하여 측정하였다.



(a)

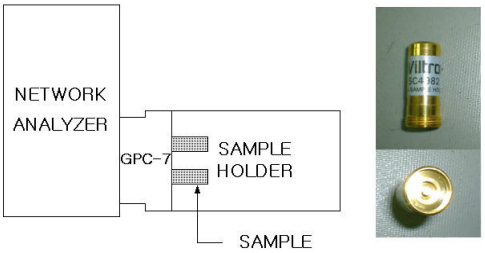


(b)

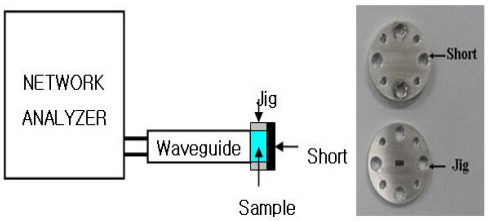
그림 7. 자유공간법; (a) NRL Arch법, (b) RCS법
Fig. 7 Free space method; (a) NRL Arch method, (b) RCS method

먼저, 자유공간법의 NRL Arch 시스템은 Arch에 신호발생기와 두 개의 혼안테나, Spectrum Analyzer를 연결하여 측정하였다. RCS 시스템은 측정판과 두 개의 혼안테나를 Network Analyzer에 연결하여 구현하였다.

전송선로법의 동축관 샘플 홀더는 N형 커넥터에 연결되도록 제작하여 Network Analyzer에 직접 연결하였다. 도파관 샘플홀더는 기본 모드인 TE10 모드만이 전송[10]될 수 있도록 사이즈를 제작한 후 Network Analyzer에 직접 연결하였다. 각각의 측정 시스템은 측정 단계에서 적절한 Calibration 후에 S11 또는 S21을 측정하였다.



(a)



(b)

그림 8. 전송선로법; (a) 동축관 샘플홀더, (b) 도파관 샘플홀더
Fig. 8 Transmission line method; (a) coaxial sample holder, (b) rectangular waveguide sample holder

4.3 측정결과 분석

먼저, 전송선로법인 동축관 샘플홀더와 자유공간법인 RCS법을 이용하여 A 타입 샘플의 전파흡수능을 주파수 2 ~ 18 GHz 내에서 측정하였다. 그림 9에 나타난 봐와 같이 동축관 샘플홀더에서 측정한 경우, 전파흡수능 최대치는 12.5 GHz에서 10.5 dB로 측정되었으며, RCS 법으로 측정한 경우, 전파흡수능 최대치는 12.5 GHz에서 12 dB로 측정되었다. 자유공간법이 좀 더 우수한 전파흡수능이 측정되었으며, 동축관 샘플홀더에서 측정된 경우, 15 GHz이상의 주파수에서는 오차가 일부 포함된 것으로 판단되나 전반적인 패턴은 일치함을 알 수 있다.

다음으로 전송선로법인 도파관 샘플 홀더와 자유공간법인 NRL Arch법을 이용하여 B 타입 샘플의 전파흡수능을 75 ~ 95 GHz에서 측정하였다. 그림 10에 나타난 봐와 같이 도파관 샘플홀더를 이용한 경우, 85.5 GHz에서 전파흡수능이 14 dB로 측정되었으며, NRL Arch법을 이용한 경우, 84 GHz에서 전파흡수능이 16.5 dB로 측정되었다. 전체적으로 저주파 쪽으로 1.5 GHz 정도 이동되었지만 패턴은 유사한 것을 알 수 있다.

따라서 기본모드인 TE10 모드가 도파관 전송될시 도파관 싸이즈 고려, 최대 110 GHz까지 전파흡수능이 측정 가능한 것으로 판단된다.

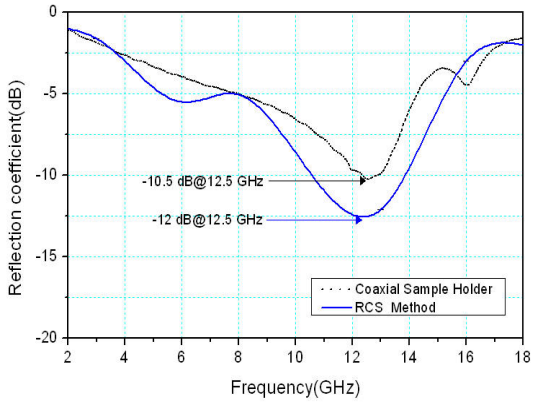


그림 9. 전송선로법(동축관)과 자유공간법(RCS)을 이용한 샘플 A의 전파흡수능 비교 (주파수 범위 : 2~18 GHz)
Fig. 9 Comparisons of absorbing ability of sample A using transmission line method(coxial) and free space method(RCS) (Frequency range : 2~18 GHz)

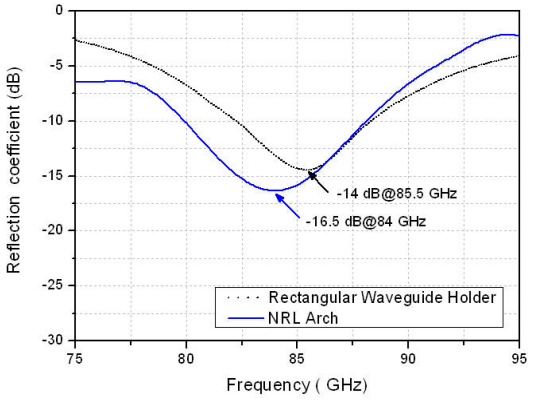


그림 10. 전송선로법(도파관)과 자유공간법(NRL arch)을 이용한 샘플 B의 전파흡수능 비교 (주파수 범위 : 75 ~ 95 GHz)
Fig. 10 Comparisons of absorbing ability of sample B using transmission line method(rectangular waveguide) and free space method(NRL arch) (Frequency range : 75 ~ 95 GHz)

V. 결 론

본 논문에서는 실제 RAM 샘플을 제작하여 측정기법에 따라 전파흡수능을 측정 후 비교 분석하였다. 비교 분석결과 전파흡수능은 자유공간법이 다소 우수한 특성이 보였으나 전체적인 패턴이 유사한 것을 확인하였다. 따라서 RAM 개발시 초기단계에서 주파수 18 GHz 이하의 주파수에서는 동축관 샘플 홀더법을 이용하여 측정하고, 18 GHz 이상의 주파수에서는 도파관 샘플 홀더법을 이용하여 측정하는 것이 타당하며, 최종단계에서는 자유공간상태를 유사하게 구현하는 자유공간법을 이용하여 특히, 고정된 틀 내에서 정밀하게 측정가능한 NRL Arch 법을 이용하여 측정하는 것이 보다 효과적으로 RAM을 개발 할 수 있을 것이다.

따라서 효과적인 RAM 샘플 개발시에 본 논문에서 제시하는 봐와 같이 표 1에 나타낸 측정법에 따른 주파수와 샘플 크기를 고려하여 단계별, 측정환경에 맞는 최적의 측정법을 선택할 필요가 있다.

표 1. 측정법에 따른 주파수와 샘플 크기
Table. 1 Frequency and sample size with measurement techniques

구 분		주 파 수	샘플크기
자 유 공간법	NRL Arch 법	전대역	대형
	RCS 법	전대역	대형
전 송 선로법	동축관 샘플홀더법	수 MHz ~ 18 GHz	소형
	도파관 샘플홀더법	18 ~ 110 GHz	소형

참고문헌

[1] David Lynch Jr., *Introduction to RF STEALTH*, Scitech, 2004.

[2] Eugene F. Knott et. al., *RADAR CROSS SECTION, 2nd ed.*, Scitech, 2004.

[3] Francisco Saez de Adanna et al., "Method Based on Physical Optics for the Computation of the Radar Cross Section Including Diffraction and Double

Effects of Metallic and Absorbing Bodies Modeled With Parametric Surfaces," *IEEE Trans. Aatennas Propagat.,* vol.52, no.12, pp.3295-3303, Dec. 2004.

[4] Christopher L. Holloway et al., "Comparison of Electromagnetic Absorber Used in Anechoic and Semi-Anechoic Chambers for Emissions and Immunity Testing of Digital Devices," *IEEE Trans. Electromag. Compat.,* vol.39, no.1, pp.33-47, Feb. 1997.

[5] 김동일, *전파흡수체 공학,* 대영사, 2006.

[6] O. Hashimoto, *Introduction to Wave Absorber,* Morikita Shuppan, Tokyo, 1997.

[7] IEICE Standard, *Measurement Methods for Reflectivity of Electromagnetic Absorbers in Millimeter Wave Frequency,* IEICE, 2005.

[8] Carl H. Durney et al., *RADIO- FREQUENCY RADIATION DOSIMETRY HANDBOOK,* Forth-ed., Brooks Air Force Base, 1986.

[9] Sang-Hyun Moon et al., "Development of composite Ba ferrite EM wave absorbers for GHz frequency," *J. Korea Electromag. Engin. Soc.,* vol.14, no.12, pp. 1329-1334, Dec. 2003.

[10] O. Hashimoto and Y. Shimizu, "A Measurement of the Complex Permittivity Tensor by a Standing-Wave Method in a Rectangular Waveguide," *IEEE Trans. Electromag. Compat.,* vol.EMC-29, no.2, pp.141-149, May 1987.

저자소개

최창묵(Chang-Mook Choi)

1996년 해군사관학교 기계공학과 (공학사)
2001년 군사과학대학원 해양공학과 (공학석사)
2008년 한국해양대학교 전파공학과 (공학박사)
2003년~현재 해군사관학교 교수
※관심분야 : 전파/위성항법, 전파흡수체 개발

임봉택(Bong-Taeck Lim)

1985년 해군사관학교 국제관계학과 (문학사)
1991년 한국해양대학교 해양운송학과 (공학석사)
2000년 한국해양대학교 물류시스템공학과(공학박사)
1991년~현재 해군사관학교 교수
※관심분야 : 항해학, 선박조종론, 물류시스템, 퍼지 이론 및 시스템 평가

고광섭(Kwang-Soob Ko)

1979년 해군사관학교 (공학사)
1983년 한국해양대학교(공학석사)
1991년 미 클락슨대 전자공학과 (공학박사)
1983년~2008년 해군사관학교 교수
2008년~현재 해군대학 명예교수
2009년~현재 해군사관학교 명예교수 및 강의교수
※관심분야 : 전파/위성항법, 해양통신