

고각형비 금속입자 복합화를 통한 광대역 전자파 흡수체 개발

글 _ 이상관, 좌용호*김기현**, 오승택***
 재료연구소 복합재료연구그룹, *한양대학교 재료화학공학부,
 영남대학교 물리학과, *서울산업대학교 신소재공학과

1. 전자파 흡수체 개요

최근의 전기전자기기 및 차세대 정보통신기기 발전에 따라 회로의 동작 주파수가 수~수십 GHz의 고주파 대역으로 증가하고 기기가 다기능 소형화되는 추세이다. 이러한 기기들에서는 전자파 간섭 및 노이즈 발생에 따른 오작동 및 신호품질의 저하와 함께 전자파 방출로 인한 인체 유해성 등 다양한 문제가 심각하게 대두되고 있다. 그러나 전도성 재료 등을 이용한 기존의 전자파 차폐 방법은 외부에서 입사되는 전자파 간섭 (EMI)의 차폐 (shield)를 의미하는 것으로, 단순히 전자파의 power를 표면에서 흡수/반사 시켜 내부로 power가 전이되는 것을 방지하는 것이다 (Fig. 1). 따라서 반사된 전자파가 다시 기기에 영향을 미치기 때문에 근본적인 해결방법이 될 수 없다. 반면, 전자파 흡수는 외부에서 입사되는 power

를 열로 변환하여 근본적으로 전자파를 흡수하여 제거하는 방법이다. 따라서 기존의 차폐체로 처리하지 못하는 문제를 해결할 수 있다는 점에서 전자파를 흡수·소산시킬 수 있는 전자파 흡수소재의 기술 개발이 주목 받고 있다.^{1,2)}

전자파 흡수소재는 최근 경박·단소화 되고 있는 전자장치(회로패턴, 탑재부품, 케이블 등)에서 기기의 오작동을 야기시키는 노이즈를 억제하고, 회로 block 간의 cross-talk나 근접 기관에서의 유전 결합을 억제하며, 안테나의 수신감도를 개선하거나 전자파로 인한 인체 영향을 감소시키는 중요한 기능을 담당하고 있다. 특히 다양한 주파수 대역에서 사용되고 있는 전자부품에 공히 적용되기 위해서는 전자파 흡수소재의 광대역화가 필수적이다.

전자파 흡수체는 크게 근접장 및 원역장 적용기술로 구분하며, 근접장의 경우는 부품의 고밀도 실장 및 고주

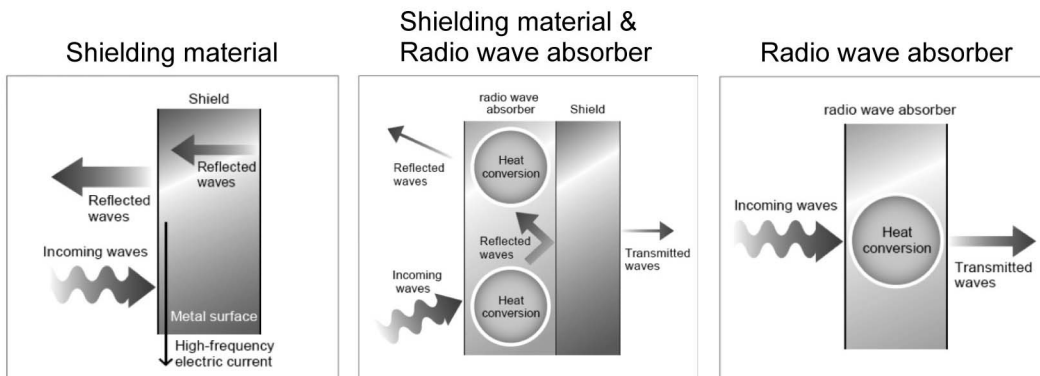


Fig. 1. 전자파 차폐 및 흡수 개념.

파화로 인한 전자파 간섭 및 디지털-아날로그 신호의 간섭 등을 저감시킴으로써 광대역(~GHz)에서의 신호품질 향상을 위해 전자파 노이즈 제거 및 간섭을 제어할 수 있는 칩 레벨의 극박형 흡수소재의 개발이 요구된다. 원역장에서는 차세대 EMC, RFID 및 군사용 은폐기술의 핵심으로 새로운 유전 및 자성재료가 복합화된 광대역 흡수소재의 개발이 요구된다.³⁾

우수한 전자파 흡수능을 위해서는 고투자율의 자성재료가 주로 이용되고 있으나 고주파수화에 따라 공진현상이 일어나기 때문에 GHz 대역에서는 투자율을 거의 상실하게 된다. 또한 자성스핀이 방향성을 갖기 때문에 소자나 회로의 복잡한 방향성에 따른 전자파 에너지 흡수를 위한 미세 조절이 매우 어렵다. 이를 극복하기 위해서는 극미세 고각형비의 자성 금속입자 제조와 함께 이들의 배향 및 분산 기술이 필수적이다.

한편, 전자파 흡수체에서는 입사된 전자파 에너지를 흡수하여 열로 변환되는 과정에서 고 직접화된 칩 상에서 발생하는 열을 효과적으로 제어하는 것이 중요하다. 따라서 고각형비의 극미세 금속입자와 함께 열전도 특성이 고려된 극박의 전자파 흡수소재를 설계하는 것도 중요하다. 또한, 단순 차폐체와 비교하여 흡수체 개발에 있어 어려운 점은 전자파 흡수 성능을 정확히 측정할 수 있는 평가 시스템의 부재이다. 따라서 이 글에서는 광대역 전자파 흡수체의 최근 기술동향과 함께 근접장 및 원역장 흡수체를 개발하기 위한 구체적인 기술적 접근방법 및 응용전망 등을 설명하고자 한다.

2. 국내외 기술동향

기존의 전자파 흡수소재는 주로 수~수십 μm 크기의 자성 페라이트 또는 전도성 나노 카본소재가 고분자기지에 분산된 형태이며, 1 GHz 이하 저 주파수 대역에서 전파 암실용 및 반사파 방지용과 radar 주파수 대역에서 스텔스 기능을 지닌 군사용 등으로 사용되고 있다. 전자기기

Table 1. 해외 주요국의 기술개발 동향

구분	기술명	개발단계	개발 내용	개발주체
일본	자성입자	Pilot	1 μm 이상의 입자크기, ~10 각형비, 편평화 금속입자 개발	Daido Steel
			1~150 nm 입자크기, 자성나노입자 제조	Sumitomo
	근접장 흡수체	상용화	0.05(0.025)~1 mm 두께, 자성 폴리머 복합재, 5~10 dB (10 MHz~5 GHz)	NEC-TOKIN
			0.13~0.5 mm 두께, 자성 폴리머 복합재, 10~30 % 노이즈 감쇠율 (10 MHz~5 GHz)	Hitachi Metals
		Pilot	0.05~1 mm 두께, 2.5~4.5 dB 노이즈 감쇠율(VCO, FPC), (100 MHz~10 GHz)	TDK
	원역장 흡수체	상용화	5.3~8.4 mm 두께, Ferrite 폴리머복합재, 1~4 GHz 대역폭	TDK
미국	근접장 흡수체	상용화	~0.4 mm 두께, (Soft ferrite+resin) sheet, 원역장 흡수band 폭 : 3dB	Intermark
	원역장 흡수체	상용화	1 mm 이상 두께, 다양한 주파수 대역별 흡수체	Cuming Microwave
			0.9~12.7 mm 두께, CIP, FeSi 등의 연자성 금속 + Silicon, Rubber, Polymer	Laird Tech.
			graphite filament or metal-coated graphite filament+resin	Martin Marietta
			Fe-Cr-Ni-Al+water miscible polysilicate or cement	Lockheed Martin

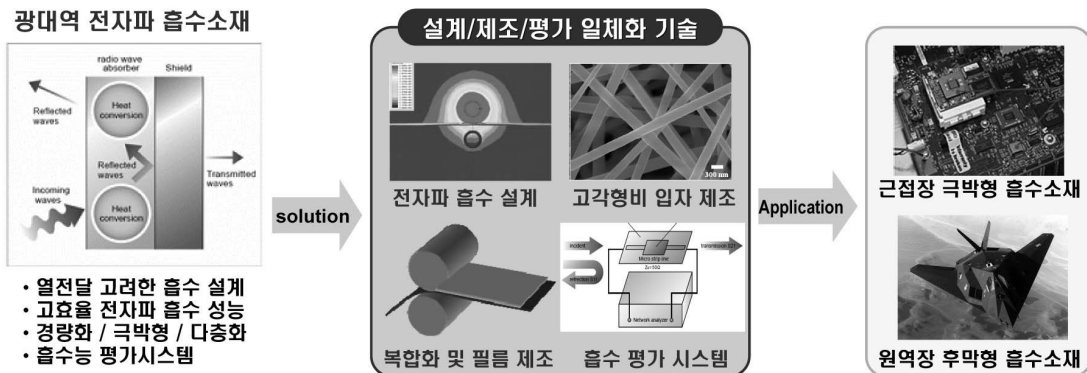


Fig. 2. 고성능 전자파 흡수소재 개발을 위한 핵심기술 및 응용.



용은 일본이, 스텔스용은 미국이 기술을 선도하고 있으며 주요 개발동향을 Table 1에 나타내었다. 최근에는 나노기술을 응용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 고주파 대역에서 전자파 흡수성능의 향상을 위해 고각형비를 가지는 판상형 자성금속입자와 경량 극박의 흡수소재 개발에 대한 연구가 진행 중이다. 그러나 섬유상 형태의 고각형비 극미세 금속입자 및 이를 이용한 흡수소재 연구는 미비하며, 또한 흡수소재 설계에서 평가 및 표준화에 이르는 일련의 요소기술에 대한 체계적이고 종합적인 연구는 전무한 실정이다.

국내의 경우는 전자파 흡수보다 단순 차폐개념의 소재가 주를 이루고 있으며, 금강고려화학, 제일모직, 삼화페인트, 삼성코닝, LG마이크론 등에서 Ag, Cu, 탄소섬유 등의 도전성 소재를 이용한 전자파 차폐 페인트와 필름을 생산하고 있다. 전자파 흡수소재에 대해서는 나노기술 및 금속의 자성입자를 이용한 연구가 일부 진행 중이며 현재 새로운 시장이 형성되고 있다.

KIST는 수십 μm 크기의 비정질 금속분말을 고 에너지 mill을 통해 수 μm 두께 및 고각형비를 가지는 판상화 금속입자를 개발하였으며, 창성은 KIST 및 성균관대학교와 공동연구를 통해 $\sim 50 \mu\text{m}$ 두께의 전자파 차폐용 초박형 필름을 개발하였다. 또한 AMIC는 고주파 영역에서 사용 가능한 후막형 연성 흡수체를 개발하였다. 아모센스는 국가연구개발과제를 통해 연자성 나노 결정립 합금을 이용한 전자파 흡수체에 대해 연구 중이며, 자화전자는 자성 소재분야의 기술력을 바탕으로 전자파 흡수

소재에 관심을 가지고 개발 중이다. 이외에 나노닉스, STECH, RF 솔텍 등의 EMC재료 안테나 및 부품 중소기업체들이 소규모 자체 개발을 시도하고 있으나 아직까지는 수입에 주로 의존하고 있는 실정이다.

그러나 현재 국내의 연구 개발과 상업화는 주로 후막형 흡수체에 집중하고 있으며 흡수가 요구되는 주파수 대역과 흡수율 또한 제한적이다. 특히 극박형 필름을 이용한 근접장 흡수체의 국내 개발은 전무한 상태인데, 이는 흡수성능이 우수한 새로운 자성소재의 개발과 고각형비 형상제어 및 분산기술이 이 부족하기 때문이다.

3. 고성능 광대역 전자파 흡수체 개발

원역장 및 근접장 용 전자파 흡수체에서 요구되는 특성으로는 스텔스 기에 적용 가능한 원역장의 경우는 경량성과 광대역 전자파 흡수성이고, 칩에 적용되는 근접장의 경우는 얇은 두께와 광대역 전자파 흡수성능이다. 이러한 고성능 흡수소재 개발을 위한 핵심기술로는 1) 고각형비 극미세 자성입자의 제조, 2) 자성입자와 고분자의 복합화를 통한 경박 흡수소재 제조, 3) 흡수특성 평가기법 개발 및 표준화이며, 전체적인 개념을 Fig. 2에 나타내었다.

3.1. 고각형비 극미세 자성입자 제조

고각형비 자성입자는 전기수력학적 분사법 또는 도금법을 이용하여 제조한다 (Fig. 3). 전기수력학적 분사법

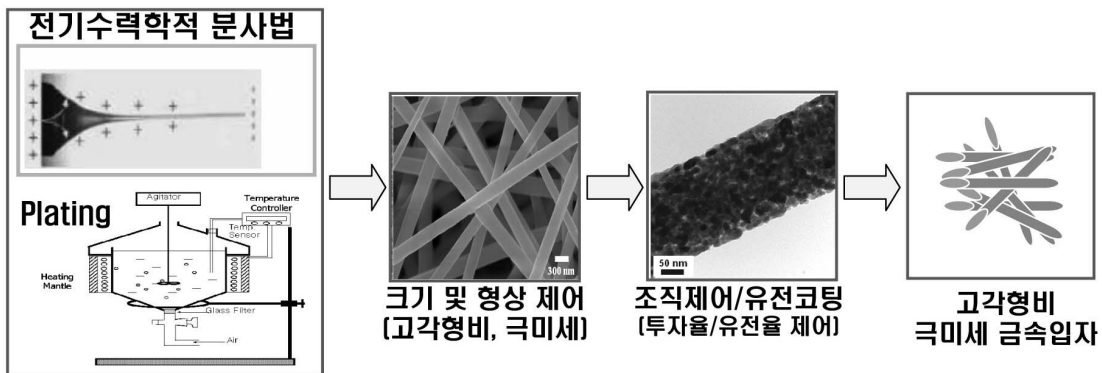


Fig. 3. 고각형비 극미세 자성입자 제조 기술.

은 고분자 용액이나 그 용융물, 그리고 고분자 용액 상에 전구체 염 등을 용해시킨 점탄성체를 이용하여 1축 구조물을 형성하는 방법으로, 이례적으로 긴 섬유상을 가진 일반 섬유와 중공 섬유를 제조할 수 있는 방법이다.⁴⁾ 이러한 섬유상의 열분해를 통한 고분자의 선택적 분해와 전구체 금속 염의 산화 분해를 통해 최종 물질을 금속계 섬유상으로 얻어낼 수 있다는 장점뿐만 아니라 연속 공정을 통한 제조 방법으로 높은 생산 수율을 기대할 수도 있다.

전기수력학적 분사법으로 나노 섬유가 만들어지는 원리는 Fig. 4와 같이 설명할 수 있다. 먼저 용액에 수~수십 kV의 전압을 인가하게 되면 용액과 포집부 사이에 전장(electric field)이 형성되고, 이 전장이 증가할수록 모세관 끝의 액체는 반구형(hemispherical)에서 테일러 콘이라 알려진 원뿔형(conical) 형태로 바뀐다. 전장이 더욱 증가하게 되면 전장에 의해 형성된 반발력이 용액의 표면장력 보다 커지게 되고, 정전기력을 가진 액체는 테일러 콘 형태에서 얇은 섬유형태로 방사된다.

고각형비 자성 나노입자는 PVP (Poly vinyl pyrrolidone) 고분자와 Fe nitrate 전구체를 사용하여 전기수력학적 분사법으로 섬유상을 방사한 후, 최종적으로 열처

리 및 수소환원 공정을 거쳐 Fe 나노섬유가 형성되게 하여 제조한다. Fig. 5는 제조 단계별 섬유상의 미세조직과 X선 회절 분석결과를 나타낸 것으로 약 100 nm 크기의 Fe 나노섬유를 성공적으로 제조할 수 있음을 보여준다.

도금법에 의한 고각형비 자성입자제조는 18~20 μm 하도형 폴리에스터 원사⁵⁾를 알칼리 분위기에서 극미세화

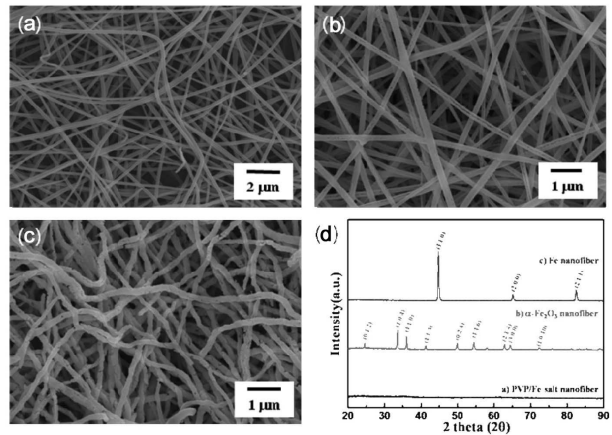


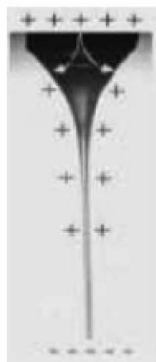
Fig. 5. 전기수력학적 분사법으로 제조한 고각형비 Fe 나노입자의 FE-SEM 및 X선 회절 분석 결과 : (a) PVP/Fe 전구체 나노섬유, (b) Fe oxide 나노섬유, (c) Fe 나노섬유, (d) X선 회절 분석.

Hemispherical shape



Conical shape

Surface tension > Repulsive electrostatic force



Charged jet

Surface tension < Repulsive electrostatic force



Increasing the strength of voltage

Fig. 4. 전기수력학적 분사법의 원리.



Fig. 6. 무전해 도금을 이용한 고각형비 자성입자 제조 개념도

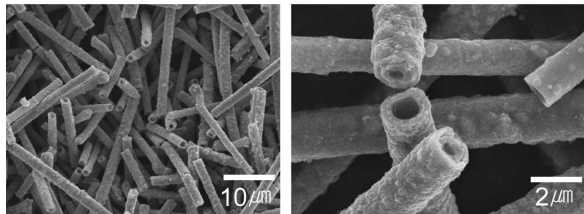


Fig. 7. Ni/Fe 고각형비 중공형 자성입자.

한 섬유를 substrate로 사용한다(Fig. 6). 극미세화 된 섬유는 직경이 ~2 μm이며 자성 금속을 표면에 코팅하기 위해 전처리 공정을 시행한다. 전처리 공정은 민감화, 활성화 및 가속화를 통해 Pd을 섬유 표면에 deposition 시키고 이 Pd이 활성점으로 작용한다. 전처리 된 극미세 섬유에 무전해 도금⁶⁾을 이용하여 Ni 또는 Fe 등의 자성 금속을 표면에 코팅함으로써 고각형비의 자성 금속 섬유가 제조되며 열처리를 통해 중공형으로도 가능하다. (Fig. 7)

3.2. 전자파 흡수 복합소재 제조

자성입자와 고분자의 복합화를 통한 경박 흡수소재 제조기술의 개념도를 Fig. 8에 나타내었다. 극미세 자성입자는 표면적이 매우 넓고 고분자 기지소재와의 비중차이가 커서 균일 분산과 체적을 제어할 위해 유기 코팅 기술이 요구된다. 실란 또는 계면 활성제 등을 통해 금속 입자 표면으로의 선택적 유기물 코팅을 이용하면 금속 입자와 고분자 기지와의 상호 작용을 향상 시켜 균일 분산을 유도할 수 있다. (Fig. 9) 따라서 이러한 균일 분산 기술을 통해 다양한 체적율의 금속 입자가 투입된 복합소재를 제조할 수 있다. 더불어 고각형비 자성입자는 입자의 배향성에 따라 전자기 특성이 증가되기 때문에 외부에 전기장 또는 자기장을 걸어줌으로써 복합소재 내부에서 방향성을 가질 수 있다.

열융착 경박 흡수소재 제조는 크게 접착성 필름용 고분자 조성 개발과 두께 제어 가능한 필름 형성 기술로 이루어져 있다. 열융착 필름은 기본수지, 잠재성 경화제 및

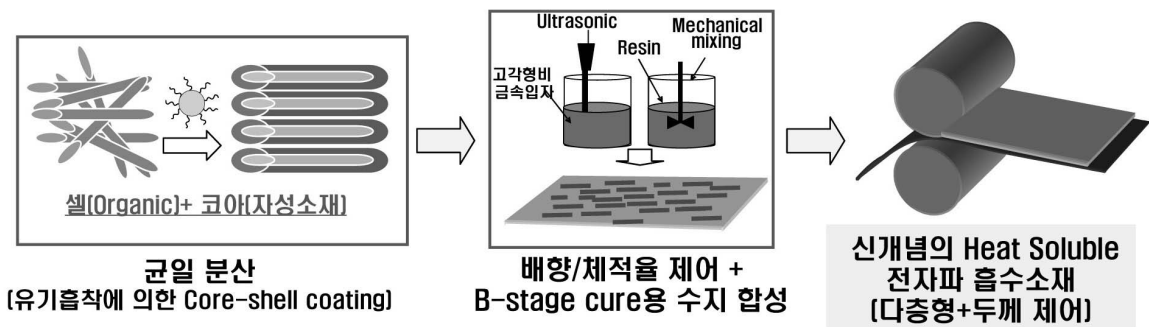


Fig. 8. 전자파 흡수 복합소재 제조 기술

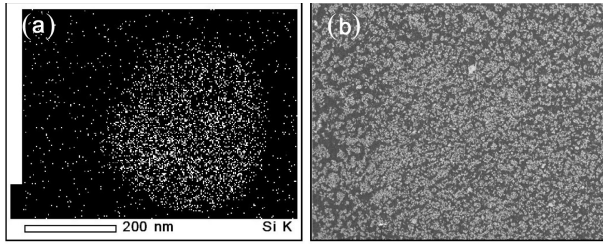


Fig. 9. 유기물 코팅된 나노 자성 입자의 성분 mapping 및 분산도 평가: (a) 실란 코팅된 Barium ferrite의 실리콘 원소 mapping, (b) 코팅된 나노 입자가 투입된 복합재료 단면.

첨가제를 최적 조성으로 혼합하고 B-stage 경화를 통해 구현할 수 있다. 고각형비 입자가 투입된 복합소재의 B-stage 경화를 위한 경화제와 첨가제 선정이 중요하며 최적의 경화 조건을 확보하는 것이 핵심기술이다. 필름 형성은 일반적으로 roll, curtain, blade 및 lip 코팅 등의 방법으로 구현 가능하나, 경박 필름 제조와 그 두께 제어를 위해서는 필름 형성부의 설계가 중요하며 복합소재 또한 정밀한 점도 조절이 요구된다. 특히 다층형 흡수소재를 위해서는 흡수체 설계에 따라 다양한 함량의 고각형비 자성 입자가 투입되기 때문에 복합소재 조성 시스템과 최적 공정 조건이 확보되어야 한다.

3.3. 흡수특성 평가기법 및 표준화

현재, 30 MHz에서 30 GHz의 주파수 영역에서 사용되는 디지털 부품 및 장치용 전자기 잡음 억제체의 평가 기법에 대한 국제 전기전자 표준화 (IEC Standard)는 일본을 중심으로 진행 중에 있으며 일부는 이미 확정되었다.⁷⁾ 여기에서 언급하는 근접장용 잡음 억제체는 자유공간에서 사용하는 RF파 흡수체와 구별된다.

근접장 전자파 흡수체 개발에 있어서 가장 중요한 인자중의 하나는 주파수 변화에 따른 재료의 복소 투자율과 유전율의 변화이다. 그러므로 재료의 주파수에 따른 유전율과 투자율의 변화에 따른 전자파 흡수체의 근접장 흡수특성을 해석하는 것이 우선적이다. 이러한 근접장 전자파 흡수 특성을 해석하기 위해서는 전자파 노이즈원에 따라 전도성 노이즈 및 방사 노이즈에 대한 설계를 하는데 실제 소자에 사용되는 전자기파의 전송선 및 전송선의 임피던스를 고려하여 설계하고 전송선 위에서의 전

도성 및 방사 전자파 노이즈의 감쇠효과를 분석하는 것이 효과적이다.⁸⁾ 마이크로 스트립 전송선 및 안테나를 이용한 전도성 및 방사노이즈 측정에 관한 IEC 표준화를 소개하고자 한다. Fig. 10은 전도성 노이즈 평가대책으로서의 IEC 표준화(62333-2)에서 채택된 전도성 노이즈 측정 및 방사 신호의 전송 흡수 정도를 평가하는 인터 디커플링(Inter-decoupling)법과 신호선의 간섭 정도에 따른 흡수를 평가하는 인트라 디커플링(Intra-decoupling)에 대한 측정 모델에 대한 개략도를 보여 주고 있다. 전송선의 신호 입력은 벡터 네트워크 아날라이저 (Vector Network Analyzer)에 의해 검출되는 반사 및 전송 출력에 대한 결과를 산란인자(s-parameter)로 전자파 흡수 정도를 나타낼 수 있다.

현재는 흡수재료의 환경 시험평가를 위한 IEC 표준화 회의를 진행 중에 있으며 이 후 디지털 소자의 미세 전송선 신호 선들에 의한 신호 잡음을 제거하기 위한 전자파 흡수 평가에 대한 IEC 표준화 대책도 진행될 예정이다.

4. 파급효과 및 결론

광대역 전자파 흡수소재 개발은 세계를 선도할 수는

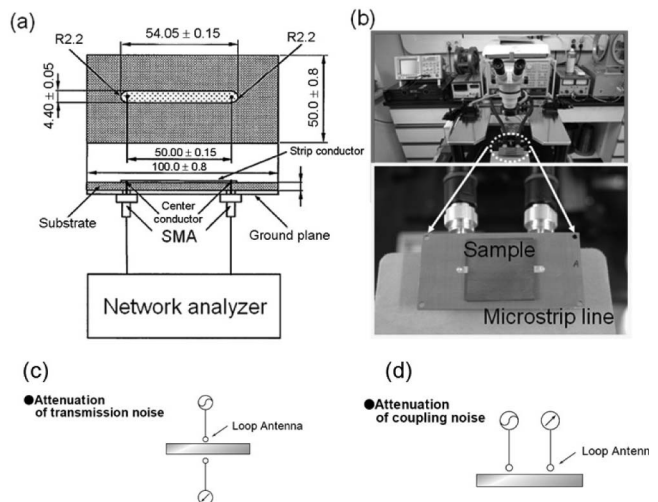


Fig. 10. 마이크로 스트립 라인을 이용한 전도성 노이즈 측정 개략도 (a), 측정 시스템 (b), 전송 노이즈 측정 (c) 및 커플링 노이즈 측정 개략도⁹⁾.



차세대 소재원천 기술로, 전기전자기기 및 차세대 정보 통신기기의 발전에 걸림돌이었던 전자파 간섭 및 노이즈 발생에 따른 오작동 및 성능저하와 유해 전자파 방출로 인한 전자파 공해의 문제점을 해결함으로써 관련기기의 고주파-광대역화, 소형화 및 고성능화의 혁신을 유발할 수 있다. 또한 소재 설계, 금속입자의 제조, 금속/고분자 복합화, 그리고 평가기법 개발 및 표준화에 이르는 일련의 요소기술들을 종합적으로 확보함으로써 전자파 흡수소재뿐만 아니라 기타 고성능 소재개발에 적극 활용이 가능하다. 광대역 전자파 흡수기술은 칩 레벨의 micro intra-system, 전자기판 내 부품간의 micro inter-system, 휴대폰, PC 등의 전자기기, RFID system 뿐만 아니라 군사용 스텔스 기능의 전자파 흡수소재 등 다양한 제품 분야로의 응용이 가능하다.

전자파 흡수소재 산업은 거의 초기단계로 정확한 시장 분석자료가 없는 실정이다. 전자파 차폐 시장을 기준으로 볼 때, 국내는 약 3,000억 원, 일본의 경우 3,000억 엔의 시장이 형성되어 있다. 흡수체 시장은 국내 약 500억 원 정도로 추정되며, 일본 NEC-Tokin사의 자료에 따르면 2007년도 일본 내에 83억엔 규모의 시장이 형성될 것으로 예상하였다. 최근 전자파의 인체 유해성이 대두됨과 동시에 EMC/EMI 대책을 요구하는 전자부품의 수요가 급증함에 따라, 전자파 흡수시장은 향후 급격하게 증가될 것으로 기대된다.

그러나 전자파 흡수소재는 대부분 일본 업체에서 주도하고 있으며, 국내의 경우 창성 및 자화전자 등의 기업에 의해 일부 상품화 되어 있으나 흡수성능과 주파수 대역이 한정되어 있다. 또한 원재료 대부분이 수입에 의존하고 있으므로 가격 경쟁력이 미흡한 상황이다. 따라서 광대역 전자파 흡수소재 개발은 차세대 소재원천 기술의 확보와 함께 국내 관련산업의 활성화 및 고부가가치화를 이룰 수 있다는 점에서 매우 중요한 기술적 산업적 의미를 갖고 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 진행중이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. L. Wallace, "Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations," *IEEE Trans. Magn.*, **29**[11] 4209-14 (1993).
2. S.H. Hong, K.Y. Sohn, W.W. Park, B.G. Moon, and Y.S. Song, "Effect of Annealing Temperature on the Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Nanocrystalline Soft-magnetic Alloy Powder (in Korean)," *J. Kor. Powder Met. Inst.*, **15** [1] 18-22 (2008).
3. K.J. Vinoy and R.M. Jha, *Radar Absorbing Materials from Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.
4. J. M. Deitzel, W. Kosik, S. H. McKnight, N.C.B. Tan, J. M. DeSimone and S. Crette, "Electrospinning of Polymer Nanofibers with Specific Surface Chemistry," *Polymer*, **43** 1025-29 (2002).
5. X. Gan, Y. Wu, L. Lei, B. Shen, and W. Hu, "Electroless Copper Plating on PET Fabrics using Hypophosphite as Reducing Agent," *Surface & Coatings Techn.*, **201** 7018-23 (2007).
6. G. Jiang, D. Hitt, G. Wilcox, and K. Balasubramanian, "Preparation of Nickel Coated Mica as a Conductive Filler," *Composites Part A: Applied Sci. and Manufact.*, **33** 745-51 (2002).
7. International Standard IEC 62333-1, 2 Noise Suppression Sheet for Digital Devices and Equipments
8. K. H. Kim, M. Yamaguchi, and K. I. Arai, "Effect of Radio Frequency Noise Suppression on the Coplanar Transmission Line using Soft Magnetic Thin Films," *J. Appl. Phys.*, **93** 8002-04 (2003).
9. K.H. Kim, J.-H. Yu, S.-B. Lee, S.K. Lee, Y.-H. Choa, S.-T. Oh, and J. Kim, "RF Conduction In-Line Noise Suppression Effects for Fe and NiFe Magnetic Nanocomposite," *IEEE Trans. Mag.*, **44**[11] 3805-08 (2008).

이상관



- 경북대학교 금속공학과 학사, 석사
- 한국과학기술원 재료공학과 공학박사
- 재료연구소 복합재료연구그룹 책임연구원

●● 좌용호



- 한양대학교 무기재료공학과 학사
- 일본 Osaka대학교 프로세스공학과 석사, 공학박사
- 일본 Osaka대학교 ISIR, Research Associate
- 전북대학교 재료공학과 교수
- 한양대학교 재료화학공학부 교수

●● 오승탁



- 한양대학교 재료공학과 학사, 석사
- 독일 Stuttgart대학교 화학부 이학박사
- 독일 Max-Planck금속연구소 연구원
- 일본 Synergy Ceramics연구소 NEDO-연구원
- 서울산업대학교 신소재공학과 교수

●● 김기현



- 명지대학교 물리학과 학사, 석사, 이학박사
- 한국과학기술연구원(KIST) 나노소재연구센터 연구원
- 일본 Tohoku대학 전기통신연구소 연구원
- 일본 Tohoku대학 전기통신공학과 부교수
- 영남대학교 물리학과 교수