

전자파 차폐제로서의 전도성 고분자 재료 응용



윤중락

명지대학교 전기공학과 공학박사
삼화콘덴서 연구소 주임연구원

이현용

명지대학교 전기전자공학부 교수

이석원

호서대학교 제어계측공학과 교수



하재목

국립기술품질원 화학부 무기화학과의 연구사

1. 서론

최근 정보화 시대를 맞이하여 마이크로파를 이용한 정보 통신량이 급증하고 있으며 반도체 기술의 현저한 진보와 실용화에 따라 고속 마이크로프로세서 및 대용량 메모리의 입수가 용이하게 되어 가전기기, 산업기기, 의뢰기기 분야에서 기기의 소형·경량화, 다기능화, 고 신뢰성을 목적으로 디지털화가 급속히 진행되고 있을 뿐만 아니라 컴퓨터를 중심으로 하는 OA, FA기기 및 디지털 오디오 기기, TV, VTR 등의 영상기기도 본격적으로 디지털화 되고 있으며 이와 더불어 파생되어지는 전자파장해(EMI/EMC)에 대한 우려도 점차 높아가고 있다. 세계 각국에서는 전자파방해를 방지하기 위하여 규제를 강화하고 각종 법규로 강력하게 대처할 전망이며 선진국에서는 비관세 무역장벽의 수단으로 활용할 뿐 아니라 전자파 내성(EMS)의 유지 강화를 강제화 하여 전자파 환경 보호에 적극적으로 대처하고 있다. 전자파 장해 대책 재료 및 부품의 경우, 전자파 장해 대책 재료를 크게 대별하면 전자파 흡수체와 전자파 차폐제로 구분할 수 있으며 표 1에 노이즈 발생원별 전자파 장해 대책 부품을 나타내었다.

전자파 흡수체를 응용 분야별로 분류하면 표 2와 같다. 전자파 흡수체는 재료의 도전손실, 자성손실, 유전손실을 이용하여 입사하는 전파에너지를 흡수시킴으로서 최소한의 에너지만을 반사시키는 기능성 재료로서 ①도전손실을 이용한 탄소 고무, 탄소 섬유를

함유한 우레탄 재료 ②자성손실을 이용한 페라이트 타일, 고무페라이트 재료 ③ 도전손실 재료와 자성손실 재료를 조합시킨 페라이트, 탄소계 다층형 재료가 현재 실용화되고 있다.

일반적으로 전자파 차폐는 전기적 특성이 잘 알려진 금속재료에 의해 이루어져 왔으나 금속재료에 비하여 값이 싸고, 가벼우며, 가공하기 쉽기 때문에 전기, 전자기기의 외장재료로서 급속히 금속재료를 대체하고 있으며 섬유강화 복합재료, 플라스틱에 도전성 표면처리를 하거나 플라스틱에 도전성 충전제를 혼합하는 방법등이 많이 이용되고 있다. 차폐재료를 분류하면 표 3과 같다.

최근에는 국내외적으로 전자파 장해 규제가 본격화됨에 따라 일반적인 섬유강화 복합재료와 각종 플라스틱 재료로서는 관련 규제에 효과적으로 대응하기 어려우므로 이들 재료에 전도성을 부가한 전도성 고분자 및 복합재료에 관한 관심이 크게 증대되고 있다 [1, 2].

전도성 고분자 물질 중 전자파 차폐제로 응용될 수 있는 polyaniline과 polypyrrole의 전기전도도는 현재까지 전형적인 금속에 비하여 10^1 에서 10^2 [S/cm] 정도 낮지만 높은 유전 상수 때문에 비교적 높은 전자기파 차폐효율을 보여준다[2]. 또한, 전도성 고분자의 질량밀도가 전형적인 금속에 비해 가볍고 합성 방법에 따라 전기전도도와 유전상수의 조절이 가능하므로 다양한 전자파 차폐물질을 개발할 수 있으며 고분자가 가지고 있는 유연성의 잇점이 있으므로 종전의 전자파 차폐용의 전형적인 금속을 대치

표 1. 노이즈 발생원별 전자파 장애 대책 부품

제품 \ 노이즈 발생원	전원 라인			신호 라인		인터페이스		
	단자 잡음	SW 노이즈	외부 썬지	디지털 노이즈	펄스 노이즈	디지털 노이즈	ESD	외부 썬지
전해 콘덴서				○	●	○		
중, 고압 콘덴서	●	●	●					
반도체 콘덴서	○	○			●	○	○	○
고용량 바리스터	○	●		○	○	○	●	○
산화아연 바리스터			●				○	●
콘덴서 블록				○	○	○	●	
노이즈 필터	●	●						
페라이트 비드 코어		○	○	●		●		
고 전력용 인덕터	○	○						

◎ : 효과 큼, ○ : 효과 적음

표 2. 전파흡수체의 응용 예

적용 대상	전파흡수체의 종류
TV 고스트 대책용	페라이트 전파 흡수체
	콘크리트, 페라이트 복합 전파 흡수체
레이더 위장 대책용	고무·페라이트계 전파 흡수체
	고무, 탄소계 전파 흡수체
	페라이트수지 복합전파흡수체(도료계, FRP계)
	저항섬유계 전파흡수체
전파 무향실용	페라이트 전파 흡수체
	페라이트·탄소계 다층형 전파흡수체
	탄소계 피라미드형 전파흡수체
電磁 차폐용	전자레인지용 고무·페라이트계 전파 흡수체
	電磁차폐용 탄소·페라이트다층계 전파흡수체

표 3. 차폐 재료의 분류

금속 하우징	동판, 알루미늄판 등
플라스틱 하우징	표면에 도전층을 형성한 플라스틱 하우징 - 도전성 도료 - 금속테이프, 금속 mesh, 금속 박 - 무전해 도금 - 아연 용사 - 도전지, 도전성 섬유
	도전성 충전제를 혼합한 플라스틱 하우징 - 금속 입자, 카본 블랙, 금속 플레이크 - 금속 섬유, 탄소 섬유 - 유리 섬유(알루미늄 코드)
부품	개스킷, 팽거, 실드 스크린, 전파 흡수체, 케이블, 커넥터등

또는 보완할 수 있는 신소재라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전도성 고분자의 기본적 이론과 전자파 차폐 재료의 성능을 평가하기 위한 전자파 차폐 측정방법 및 실제의 응용 예를 고찰하고자 한다.

2. 전도성 고분자 재료

전도성 고분자 재료는 polymer backbone을 따라 넓게 펼쳐진 π -conjugation과 전자가 비편재화된 구조를 갖는 특이한 유형의 고분자이다. 일반적으로 π -conjugation 형태가 고분자 골격에 존재하면 도핑에 의해 전자 밀도가 비 편재화되며 이것으로 부터 전기 전도가 일어 날 수 있게된다. 1976년 펜실베니아 대학의 A.G. MacDiarmid교수 연구팀에서 전도성 폴리아세틸렌 (CH)_x 필립에 할로겐 원소들을 도핑한 결과 전기전도도가 급격히 증가하여 금속의 전도도에 가까운 ~5000[S/cm]의 값이 나타남을 보고한 이후 전도성 고분자에 대한 본격적인 연구가 시작되어 폴리파라페닐렌(PPP), 폴리피롤(PPy), 폴리티오펜(PT), 폴리아닐린(PANI) 등 현재까지 많은 다른 유형의 전도성 고분자들이 개발되었으며[3] 대표적 전도성 고분자의 예를 그림 1에 나타내었다.

이들 고분자에 있어서 하나의 공통점은 도핑후에 비편재화된 전자 밀도를 가질 수 있도록 넓게 확장된 π -conjugation을 polymer backbone에 가진다는 것이다. 그림 2는 전도성 고분자의 전기전도도영역을 나타낸 것으로서 종래의 3차원적 무기물 금속에서와는 달리 전자나 정공이 아닌 부분적인 하전 입자들인 입자들의 집단운동에 의해 1차원적인 전기전도도를 나타내며 어느 도핑영역에서는 전기적으로는 금속이나 자기적으로는 자유전자가 존재하지 않는 기존의 고체물리학으로 설명되지 않는 현상들을 나타내었다. 이러한 현상을 설명하기 위하여 전자나 정공이 아닌

유사입자(quasi particle)로서의 고립파(soliton), 폴라론(polaron), 바이폴라론(bipolaron)등의 비선형 여기가 제안되고 있으며 그림 3에 soliton 및 polaron의 에너지 준위를 나타내었다[4].

이들 전도성고분자의 대부분이 열적, 대기안정성이 떨어지며 일반적인 유기용매에 녹지 않은 단점을 가지고 있으며 특히 폴리아세틸렌의 경우 I₂로 도핑 하였을 때 1.5×10⁶ [S/cm]정도의 전기전도도를 보이 나 대기안정성이 부족하여 대기중에서는 급격히 산화되어 전기전도성이 떨어진다. 반면에 폴리아닐린은 합성및 유도체화가 쉽고 유기용매에 대한 용해도도 다른 고분자에 비하여 비교적 크며 도핑에 의해 전기 전도도를 조절하기가 용이하며 도핑 후에 높은 전기 전도를 나타냄과 더불어 열적, 대기안정성이 큰 장점을 가지고 있다. 폴리아닐린의 구조식은 그림 4와 같이 환원상태와 산화상태가 반복되는 형태로 구성되어지며 고리와 질소 위치로 여러 작용기의 치환 및 산화상태의 조절에 따라 다양한 조성으로 존재가 가능한 화합물들의 총칭이다.

폴리아닐린은 산화상태 (1-y)값에 따라 leucoemeraldine(1-y=0: 완전 환원형), emeraldine(1-y=0.5 : 중간 산화형), pernigraniline(1-y=1 : 완전 산화형)으로 불리워진다. 폴리아닐린은 10⁻¹¹[S/cm]에서 부터 10² [S/cm]까지 13 order정 도나 되는 넓은 전기전도도 영역을 도핑농도 및 dopant의 선택에 의해 임의로 조절할 수 있는 특징을 갖는 고분자 물질로서 실용성 및 잠재적인 응용성으로 인하여 전 세계적으로 경쟁적인 연구가 진행되고 있다.

3. 전자파 차폐효율 측정[5, 6]

재료의 전자파 차폐효율(shielding efficiency :

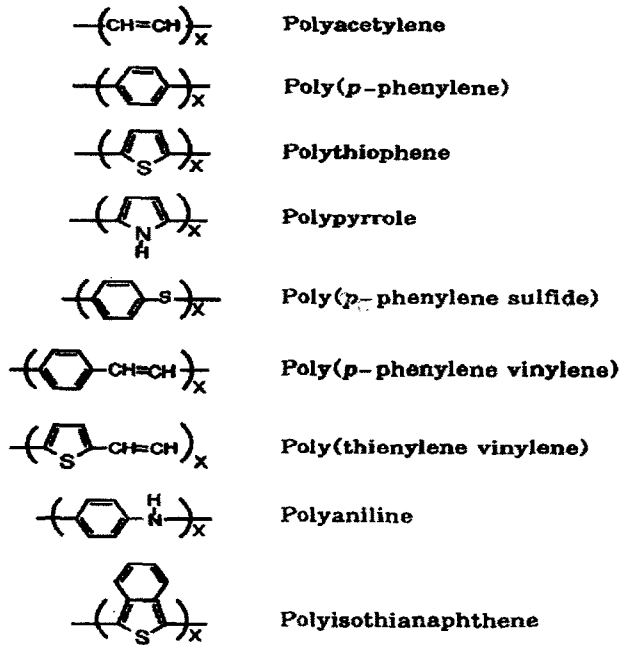


그림 1. 대표적인 전도성 고분자의 예

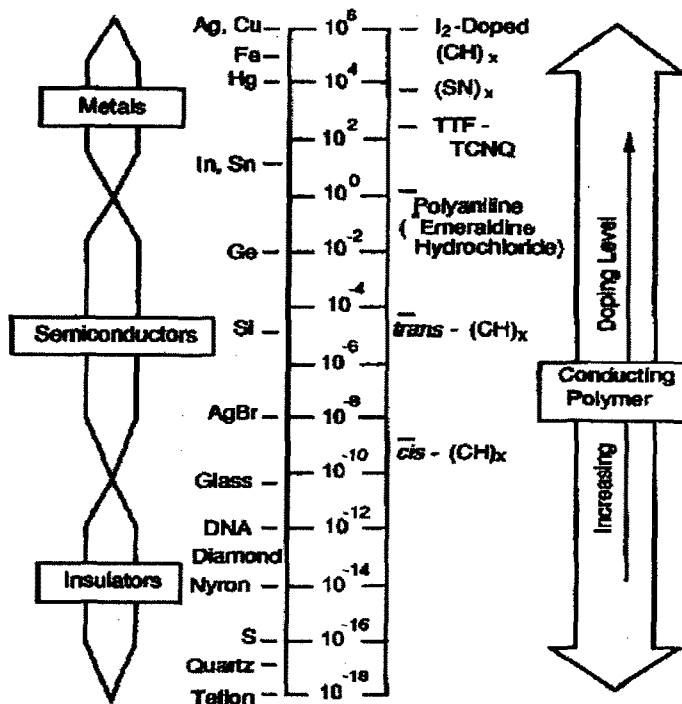


그림 2. 전도성 고분자의 전기전도영역

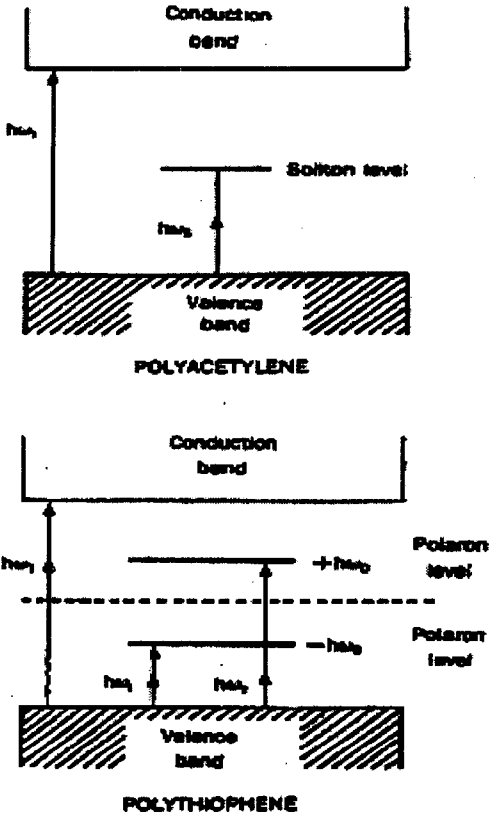


그림 3. soliton 과 polaron의 에너지 준위

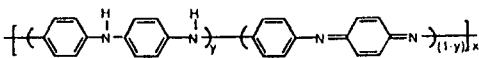


그림 4. 폴리아닐린 구조식

SE)는 일정한 송신전력에 대해 차폐 재료가 있을 때의 수신 전력(P_r)과 없을 때의 수신 전력(P_r)의 차를 측정 후 식 (1)을 이용하여 계산한다.

$$SE = 10\log(P_r/P_r) \quad (1)$$

전자파 차폐효율은 식 (2)와 같은 세가지 항의 합으로 표현된다.

$$SE = SE_A + SE_R + SE_M \quad (2)$$

여기서 SE_A 는 물질 내부 흡수에 의한 차폐효율, SE_R 는 차폐물질 경계면에서의 반사에 의한 차폐 효율, SE_M 은 물질 내부의 전자기파 다중 반사에 의한 항이다. 실질적 응용에 관련된 미국 FCC(Federal Communications Commission) 규정에 의하면 상업용의 경우 SE가 40 [dB]이상 군사상 목적으로는 80[dB]이상으로 규정하고 있다. 전자기파 차폐효율을 계산하거나 측정하는 경우 두 개의 영역이 존재하는 데 사용되는 측정기구의 기하학적 구조에 의해 원역장(far-field) 인지 근역장(near-field) 인지가 결정되는 데 전자기파 발원지로부터 차폐 물질까지의 거리가 $\lambda/2\pi$ 보다 큰 경우 원역장 영역으로 정의하고 전자기학의 평면파 이론을 적용할 수 있으며 외부 전자파에 대한 피 시험기의 내성 평가에 있어서 구조물 재료의 원역장 차폐효과 분석에 응용된다. 반면, 전자파원과 전자파 차폐 물질과의 거리가 $\lambda/2\pi$ 보다 작다면 근역장 영역으로 정의되고 근역장 차폐효과는 전자파원의 특성 임피던스에 따라 고 임피던스(전계)와 저 임피던스(자계) 전자파 효과로 구별된다. 표 4에 차폐재료에 대한 원역장의 차폐효율 측정종류, 주파수 범위, 전자계 형태를 나타내었으며 측정종류 중 대표적인 플렌치형 동축선 측정법에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다.

그림 5(a)에 미 국립 표준과학 기술연구원(NIST)에서 개발되었으며 ASTM : D4935-89 규격의 측정기구로 채택된 플렌치형 동축선기구(Flanged circular coaxial transmission line sample holder)이고 측정기구의 등가회로는 그림 5(b)에 나타내었다. 두개의 동축플렌치 사이에 디스크형 시편을

표 4. 차폐 재료에 대한 원역장 전자파 차폐효율 측정방법

종류	주파수 범위	전자계 형태	동특성 범위	재현성
연속도체동축선 측정법	1[MHz] ~ 1.4[GHz]	평면파	90~100 [dB]	보통
MIL-STD-285법	30[MHz] ~ 20[GHz]	평면파	80~100 [dB]	보통
플렌치형 동축선 측정법	1[MHz] ~ 1.8[GHz]	평면파	90~100 [dB]	양호
시간 영역 방법	200[MHz] ~ 3.5[GHz]	평면파	40~60 [dB]	양호

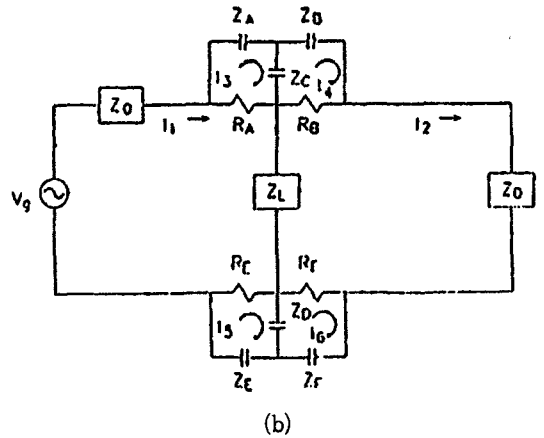
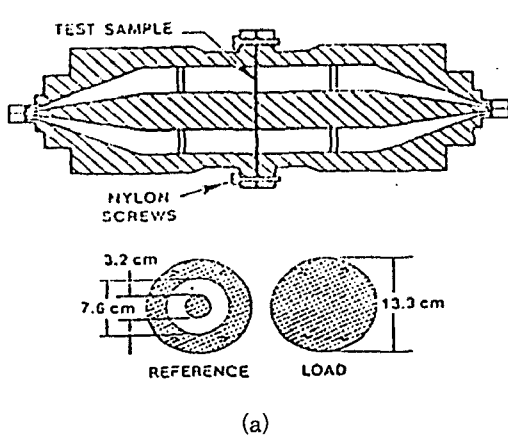


그림 5. 플렌치형 동축선치구 및 등가회로
(a) 플렌치형 동축선치구 (b) 등가회로

넣고 전자파를 입사시키면 시편을 통한 용량성 결합에 의해 TEM 모드의 신호가 전파된다. 측정방법은 기준시편을 측정치구 사이에 끼운 다음 기준레벨을 측정한 후 디스크형 시편을 측정치구 사이에 넣어 수신되는 전력을 측정하여 두 값으로부터 시편의 전자파 차폐효율을 계산한다.

$$IL = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2Z_L} \right| \quad (3)$$

그림 (b)의 등가회로에서 R_A, R_B, R_E, R_F 는 프렌지와 시편사이의 접촉저항이고 Z_A, Z_B, Z_E, Z_F 는 두 프렌지 사이의 용량성 결합이며 프렌지와 시편사이의 용량성 결합은 Z_C, Z_D 로 표현되며 키르히호프 법칙을 적용하여 삽입 손실을 계산하면 다음과 같다. 측정치구와 시편사이의 완전한 접촉한 이상적인 경우 모든 기생임피던스가 단락되어 삽입손실(IL)은 식 3과 같다.

반면에 실제 측정시 기생 임피던스가 존재하게 되고 이로 인하여 측정오차가 발생하게 된다. 또한, 측정주파수의 증가에 따라 용량성 임피던스가 감소하게되고 시편의 전기전도도가 낮으면 $R_A, R_B, R_E, R_F \gg |Z_C, Z_E, Z_F| \gg |Z_D|$ 이 되므로 식 (4)와 같이 됨을 알 수 있다.

$$IL = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2(Z_L + Z_C + Z_D)} \right| \quad (4)$$

따라서 정확한 측정을 위해서는 Z_C, Z_D 가 삽입손실 측정에 영향을 끼치므로 시편의 표면이 절연되어 있더라도 시편과 측정치구 사이의 용량성 임피던스가 작아지도록 하는 것이 요구된다.

4. 전도성 고분자의 전자기파 차폐효율[2, 6]

본 절에서는 전도성 고분자 물질중 응용성이 비교적 높은 폴리아닐린의 차폐 효율의 연구 결과를 중심으로 설명하며 전도성 고분자 물질의 경우 화학적 방법 방법에 따라 전기전도도와 유전율의 조절이 다양한 차폐효율을 가지는 시료의 제작이 가능하다[2].

그림 6은 전형적인 금속중의 하나인 구리와 PAN-CSA(m-cresol) 시료의 질량밀도를 고려하여 전자기 차폐효율을 나타낸 것으로 구리의 차폐효율이 물론 크지만 앞으로 현재의 전도도보다 높은 전도성 고분자 물질이 개발되면 구리와 상응하는 차폐효율을 가질것으로 예상된다.

그림 7은 근역장에서의 시료의 두께에 따른 차폐효율을 나타낸 것으로서 차폐효율의 기울기가 변화하는 주파수가 있음을 볼 수 있다. 이 주파수를 기준으로 하여 전기적으로 얇은 영역(electrically thin region)과 전기적으로 두꺼운 영역(electrically thick region)으로 나누며 일반적으로 앞의 영역의 시료의 표피효과(skin effect)에 의한 반사에 의한 차폐효과(SE_R)가 주를 이룬다. 반면에 전기적으로 두꺼운 영역의 경우 반사에 의한 차폐효과보다는 흡수에 의한 전자기 차폐효과(SE_A)가 우세하므로 두께에 따라 전체 차폐효율의 조절이 가능함을 볼 수 있다. 또한, 전도성 고분자의 유전율과 유전손실의 조절을 통하여 전체 차폐효율의 조절이 가능함을 볼 수 있다.

그림 8은 근역장에서의 차폐이론을 이용하여 전자기 차폐효율을 나타낸 그림으로서 전자기파원과 차폐물질과의 거리는 1.6[mm]로서 서로 다른 주파수영역에서의 두께에 대한 차폐효율의 변화이다. 주파수가 낮을수록 상대적인 차폐효율은 증가함을 볼 수 있으며 두께에 의한 증가는 그림 8의 경우에서와 같이

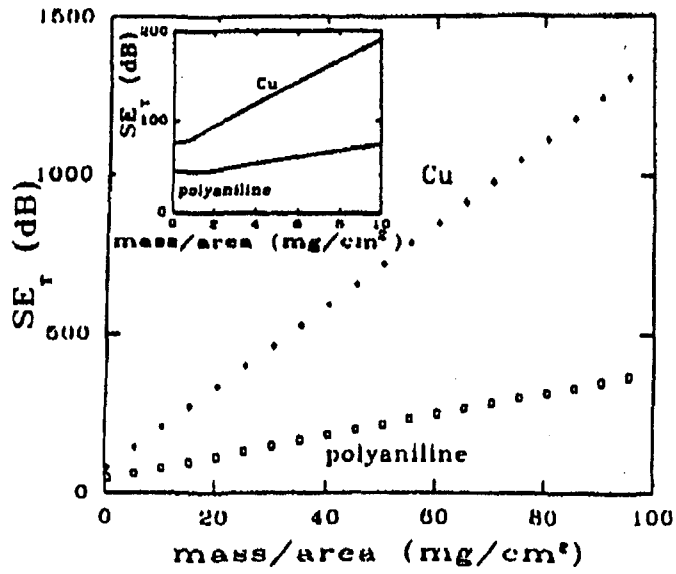


그림 6. 구리와 PAN-CSA(m-cresol) 시료의 질량 밀도를 고려한 전자기 차폐효율

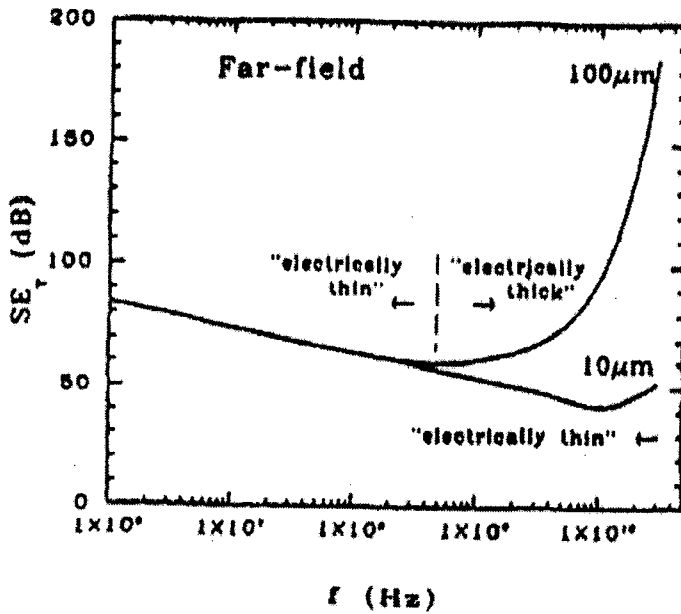


그림 7. 근역장에서의 시료의 두께에 따른 차폐 효율

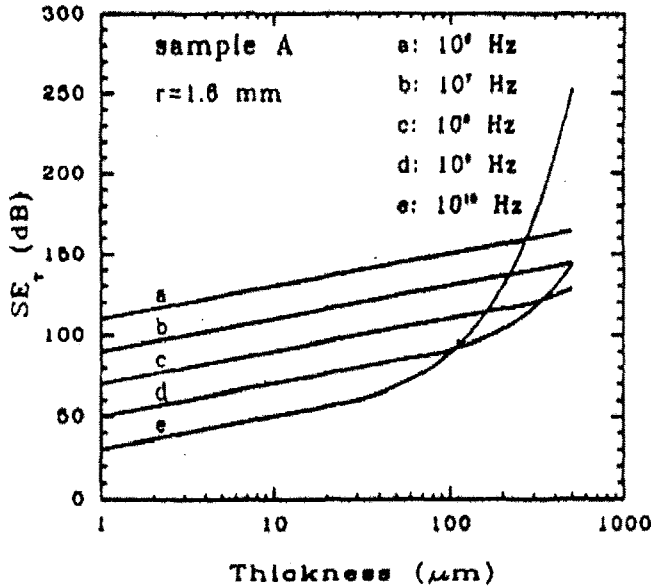


그림 8. 근역장에서의 차폐이론을 이용한 전자기 차폐효율

전자기적 차폐 효과와 흡수에 의한 효과와 유사함을 볼 수 있으며 전도성 고분자물질의 경우 강자성체의 성질을 갖고 있기 않기 때문에 근역장 영역에서의 자기파에 대한 차폐효과는 자성체에 비하여 상대적으로 차폐효율이 낮은 단점이 있다[7].

5. 결 론

마이크로웨이브 영역에 이용 가능한 고분자 전도성 고분자 물질의 전자파 차폐에 대한 고찰 결과 광범위한 주파수 영역에서 높은 전자기파 효율을 나타내고 있으며 산업적 응용이 가능함을 볼 수 있었으며 전자파 차폐효율에 관한 측정 방법의 정립도 요구됨을 볼 수 있다. 또한, 전도성 고분자를 이용할 경우, 다양한 합성방법에 의한 전기 전도도의 향상 뿐 아니라 유전율, 유전손실의 조절을 통하여 마이크로파 대역에서 차폐로서 사용 가능한 고분자의 재료의 개발 및 이를 이용한 차폐제로서의 설계 방법의 연구의 진행이 요구된다.

참 고 문 헌

1. N. F. Colaneri and L. W. Shacklette, IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-41, 291, 1992.
2. J. Joo and A. J. Epstein, Appl. Phys. Lett., 65, 2278, 1994.
3. C. K. Chiang, C. R. Fincher, Jr., Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau and A. G. MacDiarmid. Phys. Rev. Lett., 39, 1098, 1977.
4. A. J. Heeger, S. Kivelson and W. P. Su, Rev. Mod. Phys., 60, 781, 1990.
5. Perry F. Wilson, Mark T. Ma, and J. W. Adams, "Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials : Part I Far-field source simulation," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 239-250, 1988.
6. Perry F. Wilson and Mark T. Ma, "Shielding effectiveness measurements with dual TEM cell," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. EMC-27, No. 3 pp. 137-142, 1985.
6. 주진수, 오웅주, "Electromagnetic interference shielding capability by conducting polymers," 물리학과 첨단기술, pp.46-51, September. 1995.
7. J. Joo, E. J. Oh and A. J. Epstein, Proc. of the 6th Molecular Electronics and Device Symposium, Korea, pp. 107-111, May. 9-10. 1995.