

팬텀 모델 제작을 위한 SBS/도전체/유전체 3상 복합재료의 유전특성 연구

김윤진 · 최형도* · 조광윤* · 유돈식* · 윤호규[†] · 서광석

고려대학교 재료공학과, * 한국전자통신연구원 무선방송기술 연구소 전자파환경 연구팀

(2000년 12월 1일 접수)

A Study on the Dielectric Properties of SBS/Conductive Filler/ Dielectrics Composites for Phantom Model

Yoon Jin Kim, Hyung Do Choi*, Kwang Yun Cho*, Don Sik Yoo*, Ho Gyu Yoon[†], and Kwang S. Suh

Department of Materials Science, Korea University, Korea

*Radio Technology Department, Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejeon 305-350, Korea

[†]e-mail: hgyoon@korea.ac.kr

(Received December 1, 2000)

요약: 팬텀 모델 제작을 위해 도전체로서 전도성 카본블랙을, 유전체로서 (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃와 SrTiO₃를 적용한 SBS 복합재료의 유전 특성과 형상 회복 특성을 조사하였다. 카본블랙만을 첨가한 복합재료는 카본블랙 함량이 증가함에 따라 복소유전율과 도전율이 증가하였으며, 주파수가 증가함에 따라 유전율이 감소하고 도전율은 증가하는 주파수 의존 특성을 보였다. 카본블랙과 유전체를 동시에 적용한 3상 복합재료는 동일한 카본블랙 함량에 대해서 유전체의 함량이 증가할수록 복소유전율과 도전율이 증가하는 특성을 나타냈으며, 카본블랙의 영향으로 주파수가 증가함에 따라 유전율이 감소하였고 도전율은 증가하였다. 유전체/SBS 복합재료의 유전성질과 도전체/SBS 복합재료의 주파수 의존도를 조절하여 현재 이동전화 사용 주파수 대역인 775 MHz~2 GHz 범위에서 인체의 뇌와 두개골 조직의 유전율, 도전율과 상응하는 비흡수를 측정용 팬텀 모델 재료를 제작할 수 있었다. 열기계적 반복시험에서는 충전제의 함량이 증가함에 따라 잔류변형률이 증가하였으나, 인체 조직을 모사한 SBS 복합재료는 우수한 형상 회복 성능을 보였다.

ABSTRACT: Dielectric properties and shape memory characteristics of SBS composites filled with carbon black as conductive filler and (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃ or SrTiO₃ as dielectrics were investigated for the development of phantom model. SBS/ carbon black composite showed an increment of complex dielectric constant with increasing the content of carbon black and the frequency dependence that the dielectric constant decreases with the frequency. The complex dielectric constant and the conductivity of SBS/carbon black/dielectrics composites increased with the increase of dielectrics and the characteristics of the frequency dependence also occurred by the effect of carbon black. Phantom materials with the dielectric properties and the conductivity corresponding to human tissues for the measurement of specific absorption rate (SAR) within the frequency range of current mobile phones (775 MHz~2 GHz) could be developed by adjusting the composition ratios of carbon black, dielectrics and SBS and by controlling the characteristic of frequency dependence of composite. From thermomechanical cycling test good shape recoverability could be obtained in SBS composite even though the residual strain was increased by the effect of filler.

Keywords: phantom model, complex dielectric constant, conductivity, shape memory.

서 론

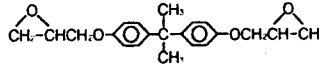
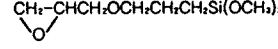
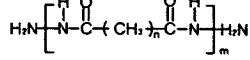
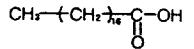
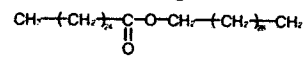
눈부신 정보통신산업의 발전과 더불어 IMT-2000의 글로벌 로밍 서비스가 곧 실현될 전망이다. 이처럼 정보통신사회가 구축됨에 따라 기하급수적으로 증가하는 휴대전화기 등으로부터 발생하는 전자파가 뇌종양, 백혈병 뿐만 아니라 고혈압, 두통, 기억감퇴 등의 원인이 될 수 있다는 연구 결과가 보고되는 등 제반 문제점이 나타나고 있다.^{1,2} 따라서 무선 전자파에 대한 새로운 인식이 필요해지고 있으며, 앞으로 더욱 더 전자파가 인체에 미치는 유해 여부에 관한 논의가 활발히 전개될 전망이다.

전자파의 인체에 대한 영향을 분석하기 위해서는 전자파에 노출된 상태에서 인체 조직의 질량 당 흡수된 에너지로 정의되는 비흡수율 (SAR, specific absorption rate)을 정량화해야 하는데 전자파에 인체를 노출시키는 임상실험이 불가능하기 때문에 인체에 부합되는 특성을 갖는 재료, 즉 팬텀 모델을 이용하여 실험하고 있다.³

대표적인 SAR 측정 방법의 하나인 전기장 탐침기 삽입법은^{4,5} 팬텀 재료에 탐침기의 형태에 맞는 삽입 가능한 모양이 존재하여야 한다. 이 때 dry 팬텀 모델의 경우 측정 프로브를 삽입할 구멍을 팬텀 모델에 미리 가공하게 되는데, 이러한 삽입구에는 필연적으로 탐침기 끝단이나 둘레에 에어갭이 발생하며, 이 에어갭이 캐패시턴스로 작용함으로써 전자기적 특성 측정에 비흡수율이 과대 평가되는 오류를 유발하게 된다. 따라서 신뢰성있는 비흡수율 측정을 위해서는 이 에어갭을 최소화해야 한다. 에어갭을 최소화하기 위해서 기저수지로서 형상기의 특성을 가지는 재료를 이용할 수 있으나, 측정 프로브 끝단이 약 105 ℃의 상전이점을⁵ 갖는 poly(methyl methacrylate) (PMMA) 등으로 구성될 경우에는 형상회복 작동온도가 100 ℃이하를 나타내는 팬텀 모델이 필요하다.⁶

그러므로 본 연구에서는 낮은 형상회복 작동온도를 갖는 styrene-butadiene-styrene copolymer (SBS)를 기저 수지로 선정하여 두개골의 전자기적 특성과 유사한 팬텀 모델을 구현하기 위해 고주파 유전체 세라믹 분말과 카본블랙을 적용한 복합재료의 유전특성을 조사하였으며, 충전제 첨가에 따른 형상회복 특성을 평가함으로써 실제 사용 가능한 팬텀 모델의 조성

Table 1. Chemical Structures of Raw Materials

component	structure
resin	SBS styrene-butadiene-styrene copolymer
	YD-128 
coupling agent	A-187 
hardener	G-0331 
solvent	acetone CH_3COCH_3
wax	stearic acid 
	carnauba 

을 제시하였다.

실 험

원재료. Table 1에 연구에 사용된 원재료를 나타내었다. 두개골 제조를 위한 기저수지로는 SBS (styrene-butadiene-styrene, KTR-301, Kumho Chemical Co., Korea)를 사용하였다. 도전성 충전제로서 카본블랙 (Ketjen EC, AKZO Co., Japan)을, 고주파 유전체로는 SrTiO_3 와 $(\text{Ba}, \text{Ca})(\text{Sn}, \text{Ti})\text{O}_3$ 를 적용하였다. SrTiO_3 (purity 99.9% High Purity Chemical Co. Ltd., Japan)는 1380 ℃에서 3시간 동안 열처리하였다. $(\text{Ba}, \text{Ca})(\text{Sn}, \text{Ti})\text{O}_3$ 는 BaTiO_3 (Ferro Co., Japan)와 CaSnO_3 ($\text{CaCO}_3 : \text{SnO}_2 = 1 : 1$, purity 99.9% High Purity Chemical Co. Ltd., Japan)를 0.88 : 0.12의 몰비로 메틸알코올에서 Zr ball을 이용하여 16시간 동안 습식 혼합하고 120 ℃에서 24시간 건조하고 난 후, 다시 1200 ℃에서 3시간 동안 하소하였다. 이후 분쇄 및 건조과정을 거친 뒤 1400 ℃에서 2시간 동안 열처리하여 제조하였다. 이와 같이 준비된 유전체를 분쇄하고 100, 75 그리고 45 μm 용 sieve mesh를 이용하여 45 μm 이하의 분말을 얻었다. Table 2에 도전성 카본블랙의 성질을, 또한 제조된 유전체 분말의 특성을 Table 3에 각각 나타내었다. 그리고 충전제와 수지의 접착력을 향상시키기 위하여 계면 결합제를 적용하였으며, 가공성 향상을 위해 2종의 wax를 첨가하였다.

Table 2. Properties of Ketjen Black EC

properties	value
surface area (BET) (m ² /g)	1000
particle size (nm)	37
volatiles (%)	0.5
density	1.91

Table 3. Properties of Ceramic Powders

properties	SrTiO ₃	(Ba, Ca)(Sn, Ti)O ₃
ϵ_r at 900 MHz	120	16000
$\tan \delta$ at 900 MHz	1~2	5
resistivity ($\Omega \cdot m$)	$\sim 10^{11}$	10^{11}
density (g/cm ³)	5.1	5.8
specific heat (J/kg K)	-	420
mean size (μm)	10.996	9.388

근육조직용 기저 수지로 bisphenol-A계 액상 에폭시 (YD-128, Kukdo Chemical Co.)를 사용하였고, 경화제로는 polyamide (G-0331, Kukdo Chemical Co.)를 적용하였다. 점도 저하를 위한 용매로는 두개 골의 기저 수지인 SBS의 부타디엔 도메인의 녹는점이 60 °C임을 고려하여 낮은 끓는점을 갖는 아세톤을 선정하였다.

시편제조. 두개골/뇌 조성 실험용 시편은 SBS, 충전제, 그리고 왁스 등을 120 °C에서 15분간 2축 롤 밀을 이용하여 용융 혼련한 후 시료를 상온에서 절단하였으며, 이와 같이 준비된 시료를 200 °C로 가열된 금형에서 60분간 가압 유지하여 시편을 제조하였다. 전자기적인 특성을 측정하기 위하여 내경 3.5 mm, 외경 7 mm의 도우넛 모양의 동축형 시편을 사용하였으며, 형상회복 특성을 위한 시편의 크기는 50 × 10 × 5 mm였다. 근육 조직용 시편제작을 위해서 에폭시와 경화제의 당량비를 1 : 1로 하였으며, 용매와 에폭시를 30 : 70, 용매와 경화제를 25 : 75의 무게 비로 먼저 혼합한 후 각각을 다시 혼합하는 방법으로 용액을 제조하였다. 이 용액에 충전제를 조금씩 첨가하여 교반하는 방법으로 충전제와 기저 수지와 혼합도를 극대화하였다. 동축형 시편제작을 위해서는 용액을 60 °C에서 10분 정도 가열하여 용매를 날려 보낸 후 예열된 원기동형 압축성형 몰드에서 0.4~0.6 kg/mm²의 압력으로 성형하였다. 12 mm(ϕ) × 10 mm(t) 성형물을 80 °C에서 2시간 동안 후경화 하

였다. 이와 같이 준비된 경화물을 내경 3.5 mm, 외경 7 mm의 도우넛 모양의 동축형 시편으로 정밀가공하고 표면을 사포로 처리하여 표면을 고르게 하였다.

측정. 복소유전율을 측정하기 위하여 HP8510C, HP8517B, 및 HP83651B로 구성된 45 MHz~50 GHz용 회로망분석기 (Network Analyzer, Hewlett Packard Co., U.S.A.)를 이용하였다. 이때 시편 홀더는 45 MHz~18 GHz용 APC 7 airline (HP85050-60007, 7 mm, 50 Ω)을 이용하였으며 HP85052D를 이용하여 케이블 및 airline을 보정하였다. 그리고 airline의 한쪽 면을 기준면 (reference plane)으로 정하여 OSLT (open short load transmission) type의 full 2 port calibration을 적용하였다. 이와 같이 보정한 후 매 측정마다 공기의 유전율 (1-j0)이나 PTFE (Teflon)의 유전율 (2.04~2.05-j0) 및 투자율 (1-j0)을 측정함으로써 보정검증 (calibration verification)을 실시하였다. 검증 후에 길이를 알고 있는 시편을 airline에 삽입한 후 회로망 분석기를 통하여 S-parameter인 S₁₁ 및 S₂₁를 얻어 Nicolson-Ross-Weiss (NRW)계산법에 의하여 복소 유전율 및 복소투자율을 결정하였다.⁷ 그리고 형상회복 특성을 알아보기 위해서 이전의 연구와 같은 방법으로 열기계적 반복 실험을 수행하였으며,⁸ 최대변형은 30 %로, 변형 속도는 12 mm/min로 하였다.

결과 및 고찰

전기적 특성. Figure 1은 500 MHz~2.8 GHz에서의 SBS의 복소유전율을 나타낸 것이다. 측정 주파수 대역에서 거의 일정하게 약 2.75정도의 유전상수를 가지며, 유전율 허수는 거의 0에 가까운 값을 보이고 있다. 또한 유전손실이 거의 없는 것으로부터 절연특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Figure 2에 카본블랙의 함량을 변화시킨 SBS 복합재료의 주파수에 따른 복소유전율을 나타내었다. 카본블랙의 함량이 증가함에 따라 복소유전율이 증가하고 있으며, 또한 주파수가 증가함에 따라 유전율이 감소하는 주파수 의존특성을 나타내고 있다. 주파수의존도는 카본블랙 함량이 비교적 많을수록 크게 나타났다. 카본블랙 입자는 전도성 입자로서 그 자체로서는 유전율을 갖지 않지만 절연성 물질에 둘러 쌓이

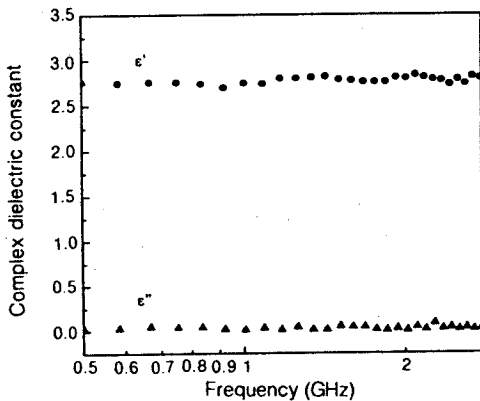


Figure 1. Complex dielectric constants of SBS as a function of frequency.

계 되면 카본블랙과 절연체 사이의 계면에 공간 전하가 축적될 수 있다. Maxwell 등은 두 이종 물질의 유전율과 도전율이 각각 ϵ_1, ϵ_2 와 σ_1, σ_2 일 때 $\epsilon_1\sigma_2 \neq \epsilon_2\sigma_1$ 의 관계를 가지고 계면을 형성하면 계면에 축적되는 전하에 의하여 분극현상이 발생한다고 하였다.⁹ 따라서 절연성 고분자 수지에 분산된 카본블랙 입자는 계면에서 발생하는 계면 분극현상에 의하여 공간 전하를 유발하게 되어 유전체로서 작동하게 된다. 이와 같이 카본블랙이 첨가된 고분자 복합재료의 유전율이 카본블랙 함량에 따라 증가하는 것은 카본블랙과 고분자 수지사이의 계면의 증가에 기인하며, 계면 분극은 주로 저주파수 대역에서의 재료의 유전특성에 큰 영향을 미치기 때문에 주파수가 증가할 경우 유전율은 급격히 감소하는 것이다.¹⁰ 특히 주파수가 증가함에 따라 복소 유전율이 감소하는 현상은, 분극 현상은 교류의 형태로 인가되는 전자기파에 의하여 재료 내에서 쌍극자의 움극과 양극이 서로 방향을 바꾸어 가며 반응하는 것인데, 인가되는 전자기장의 파장이 짧아질 때 즉 주파수가 증가할 때 쌍극자의 반응 속도가 인가 주파수에 미치지 못하여 분극이 지연되기 때문에 발생하는 것이다. 특히 이러한 분극 현상은 Debye나 Cole-Cole 등에 의하여 정량적으로 해석되기도 하였다.¹¹ 또한 주파수의 증가에 따른 유전율 감소율은 카본블랙 함량이 많을수록 크다는 것을 알 수 있다.

Figure 3에 카본블랙 함량에 따른 도전율을 나타내었다. 여기서 도전율은 다음과 같은 식에 의하여 계산되었다.¹²

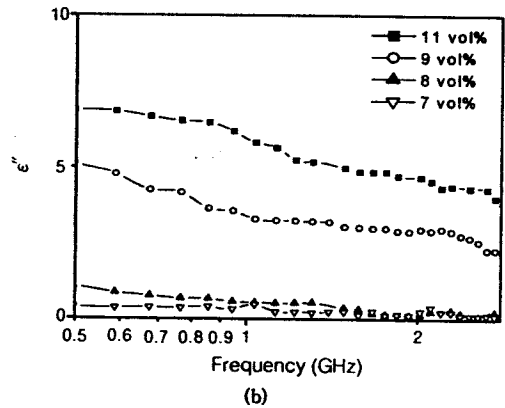
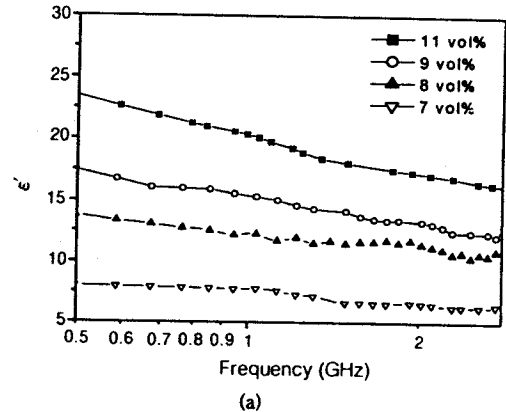


Figure 2. Complex dielectric constants of SBS-carbon black composites with the content of carbon black.

$$\sigma_{dc} = \epsilon'' \cdot \epsilon_0 \cdot \omega \text{ (S/m)}$$

여기서 σ_{dc} 는 유효도전율, ϵ_0 는 자유 공간에서의 유전율, ϵ'' 는 유전율 허수 그리고 ω 는 인가장의 주파수이다. 카본블랙 함량과 주파수가 증가함에 따라 도전율이 증가하는 주파수 의존성을 나타내고 있다. 이러한 결과는 유전율 허수는 주파수가 증가함에 따라 감소하지만, 인가장의 주파수가 ϵ'' 를 무시할 만큼 상대적으로 커서 주파수가 증가함에 따라 증가하는 주파수 의존성을 나타낸다고 생각할 수 있다.

주파수에 따른 유전율 및 도전율에 부합되는 재료를 구현하기 위해서는 유전율이 주파수 의존특성을 거의 갖지 않고 그 첨가량으로만 유전율을 제어할 수 있어야 하며, 카본블랙과 같은 전도성 충전재를 첨가함

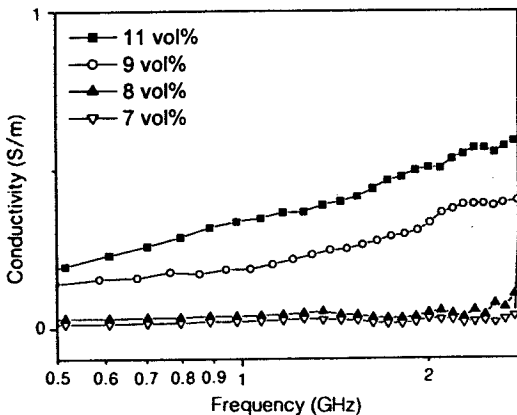


Figure 3. Conductivity of SBS-carbon black composites with the content of carbon black.

로써 도전율도 제어할 수 있어야 한다.¹³ 따라서 적절한 함량의 유전체 분말을 카본블랙과 함께 첨가하여 생체의 유전상수 및 도전율을 결정하는 것이 바람직하다.

SBS/카본블랙/(Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃ 3상 복합재료의 유전율과 도전율을 측정하였으며, 그 결과를 Figure 4에 나타내었다. 이때 카본블랙의 함량을 8 vol%로 일정하게 적용하였고 유전체의 함량을 조절하였다. 유전체 함량이 증가할수록 유전율이 증가하고 있으며 주파수 증가에 따른 유전율은 감소하고 있다. 고분자 재료에 유전체 분말만을 분산시킬 경우, 유전율은 주어진 주파수 범위 내에서 거의 일정한 값을 가지며 이때의 유전율은 유전체 함량에 따라 대수 혼합법칙에 의해 증가한다.¹⁴ 따라서 SBS/카본블랙/(Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃ 3상 복합재료에서는 카본블랙 함량이 동일하므로 유전체 함량이 증가하면 유전율이 증가하게 되며, Figure 2에서와 같은 주파수의 의존 특성에 미치는 카본블랙의 영향에 의해 주파수가 증가함에 따라 유전율은 감소하고 있는 것이다.

Figure 5에 유전체의 성분을 다르게 적용한 SBS/카본블랙/SrTiO₃ 복합재료의 복소유전율 변화를 나타내었다. 카본블랙의 함량은 각각 7, 8 및 9 vol% 적용하였다. 카본블랙의 함량이 8 vol%로 동일한 A, B조성은 Figure 4에서와 마찬가지로 SrTiO₃의 함량이 많을수록 높은 복소유전율을 나타냈으며, (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃ 유전체를 사용한 경우 보다 유전율 감소가 더 큰 주파수 의존 특성을 보였다. 또한 B조

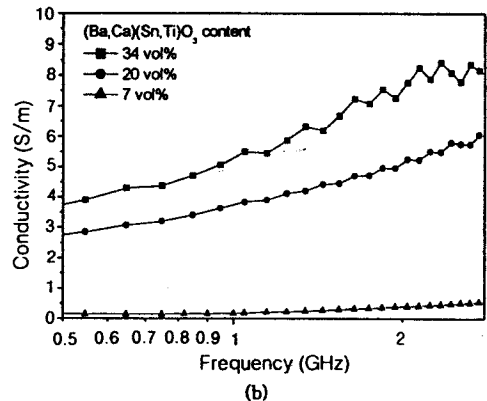
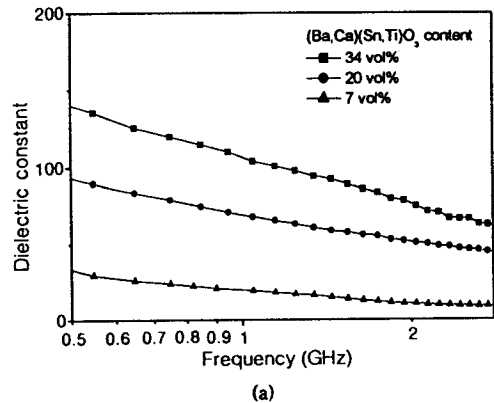


Figure 4. (a) Dielectric constant and (b) conductivity of SBS/carbon black/(Ba, Ti)(Ca, Sn)O₃ composites as a function of frequency. The amount of carbon black is constant to 8 vol% in all compositions.

성과 D조성의 유전율 곡선이 약 1.54 GHz에서 교차하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 비록 B조성이 D조성보다 유전체 함량이 많다 하더라도 저주파수에서의 유전율은 전도성 입자인 카본블랙 함량에 더욱 민감하게 영향을 받으며, 고주파에서는 유전체 함량에 더욱 많은 영향을 받기 때문에 판단할 수 있다. 그리고 SrTiO₃ 함량이 34 vol%로 동일한 A, C, D의 경우 카본블랙 함량이 증가함에 따라 유전율이 증가함을 알 수 있으며, 또한 유전율 허수부도 카본블랙 함량이 많을수록 증가함을 알 수 있다.

Figure 6은 SBS/카본블랙/SrTiO₃ 복합재료의 도전율을 주파수에 대하여 나타낸 것이다. 식 (1)로부터 계산된 Figure 3과 Figure 4(b)의 결과와 마찬가지로

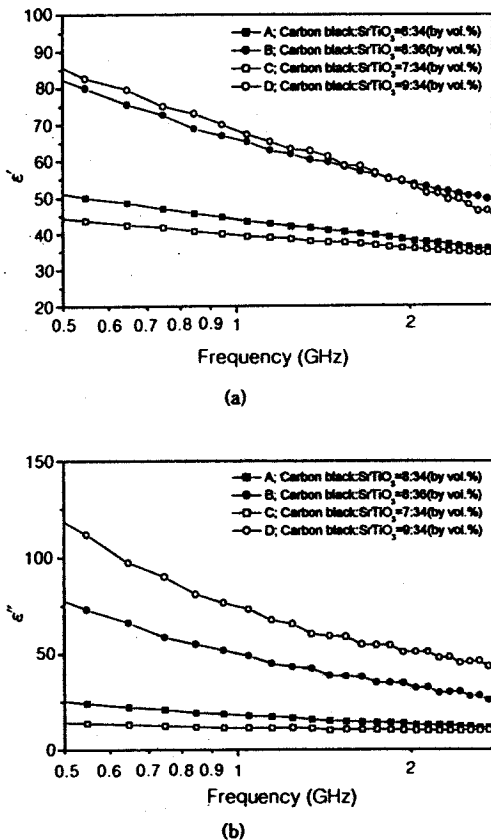


Figure 5. Complex dielectric constant of SBS/carbon black/SrTiO₃ composites as a function of frequency; (a) ϵ' and (b) ϵ'' .

가지로 카본블랙 함량이 클수록 유전율 허수부가 증가하게 되고 도전율이 상승하는 결과를 보이고 있다. 이때의 도전율은 동일한 함량의 카본블랙과 (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃를 적용한 복합재료보다 낮은 값을 나타내고 있으며 (Figure 4(b)), 이것은 (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃의 SrTiO₃보다 높은 자체 유전율 값에 기인하고 있다.

Figure 7은 근육 조직용 팬텀 모델을 제작하기 위한 재료로써 에폭시/카본블랙 복합재료의 유전율과 도전율을 카본블랙 함량을 3, 5, 7, 10 vol%로 달리 적용하여 주파수에 따라 나타낸 것이다. SBS/카본블랙 복합재료와 같이 주파수 의존 특성을 나타내고 있으나 동일한 함량의 카본블랙을 첨가한 경우 모수지로 에폭시를 적용하였을 때 주파수 의존도가 더욱 컸

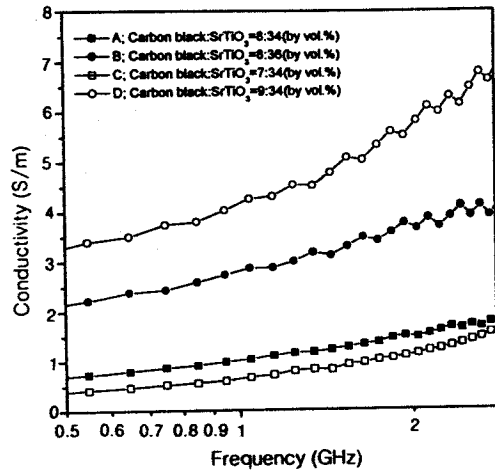


Figure 6. Conductivity of SBS/carbon black/SrTiO₃ composites as a function of frequency.

다. 일반적으로 유전율 및 도전율의 주파수 의존도는 카본블랙의 함량, 크기, 분산성 그리고 이에 따른 카본블랙 입자들의 수지에서의 망상구조 형성 영향 등에 민감하게 영향을 받는다. 카본블랙 입자들은 절연성의 고분자 층과 분리되어 있고 유전율과 주파수의 상관관계로부터 카본블랙의 분포를 짐작할 수 있다. 또한 모수지의 형태와 분자단위의 배열, 그리고 화학적 구조 등에도 영향을 받는다. 그리고 카본블랙의 강한 응집력에 기인하여 동일한 카본블랙이라 하더라도 결국 모수지로 적용하는 고분자 재료에 따라 가공 조건 등이 다르므로 입자의 분산 특성이 변화할 수 있게 된다. 따라서 카본블랙 입자를 첨가한 경우 모수지에 따라 유전상수 값은 다소 다르게 나타날 수 있다고 판단되며, Moon 등에 의해 보고된^{13,15,16} XLPE나 에폭시를 모수지로 하는 카본블랙 복합재료의 유전율 값이 본 연구에서의 결과와 다소 다르게 나타난 것은 이와 같은 원인으로 해석할 수 있다.

인체 조직의 유전, 도전 특성과 유사한 복합재료의 유전율과 도전율을 FCC (federal communications commission) 등에서 보고된 값과¹⁷ 함께 775 MHz ~ 2 GHz의 범위에서 Figure 8에 나타내었다. 두께 골과 뇌 조직은 SBS/카본블랙/유전체 복합재료이며, 근육 조직은 에폭시/카본블랙/SrTiO₃ 복합재료이다. 본 연구의 목적 재료가 휴대용 이동 전화기의 전파 측정용 팬텀 재료이며 셀룰라폰이나 PCS 등

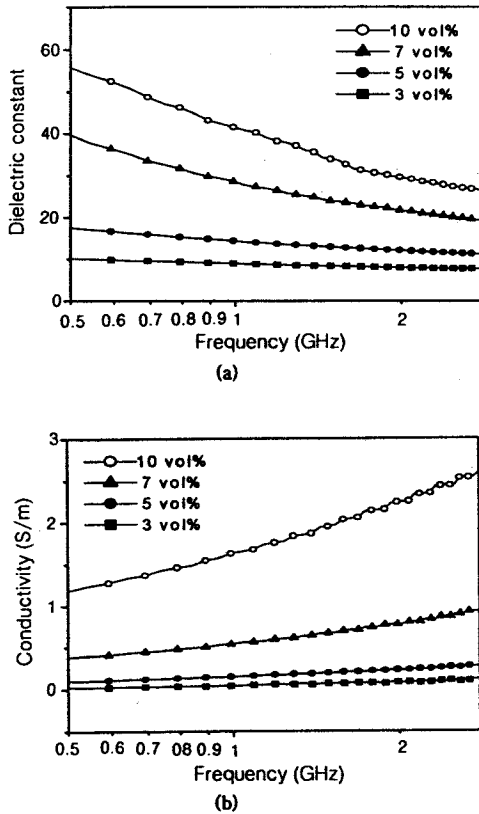


Figure 7. (a) Dielectric constant and (b) conductivity of epoxy-carbon black composites with the content of carbon black.

현재 민생용 이동통신 단말기의 주파수 대역이 각각 800~900 MHz, 그리고 1.8~1.9 GHz인 것을 고려할 때 인체의 유전 특성 및 도전 특성과 매우 유사함을 알 수 있다. 측정된 뇌 조직, 근육 조직의 조성파 FCC에서 보고된 주파수에 따른 전기적 특성을 비교해 본 결과 다소 편차는 있으나 본 연구에서 삼고있는 목적 주파수 범위에서 적용 가능하리라 판단된다.

형상회복 특성. SBS수지는 60 °C에서 녹는점을 나타내는 부타디엔이 가역상이고, 스티렌이 고정상으로 작동한다.^{18,19} 그러나 녹는점을 정확히 확인할 수 없었는데, 부타디엔이 갖는 일부 결정질은 주로 주사슬이 trans배열을 이루어 형성되는 것으로써 그 용융열이 매우 작고 그 함량이 적기 때문이라고 판단된다. 따라서 60 °C 근처의 온도별로 열기계적 반복시

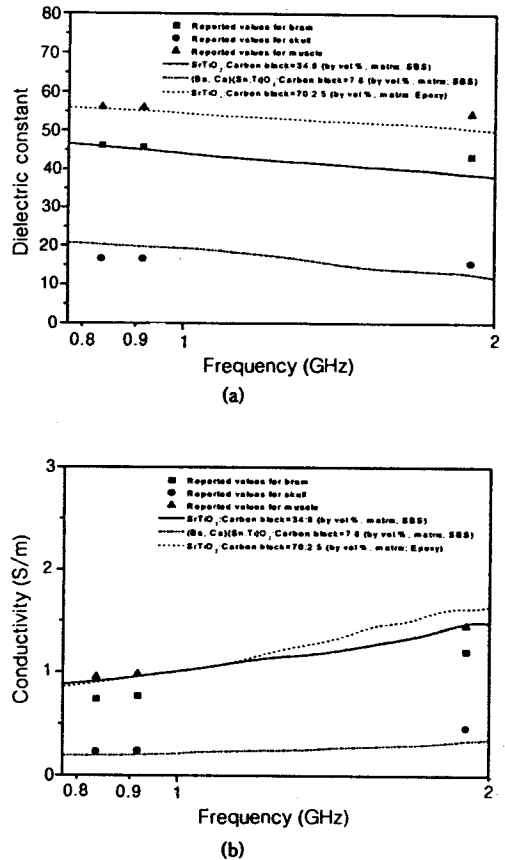


Figure 8. Comparison of experimental data with the reported values for muscle, brain, skull; (a) dielectric constant and (b) conductivity.

험을 실시하여 형상회복 작동온도를 결정하였다. 반복 횟수에 따른 최대변형률에서의 응력을 Figure 9에 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 최대변형에서의 응력이 감소하고 있으며 각 온도에서 반복 횟수가 늘어남에 따른 응력 역시 감소하였다. 그러나 시험 온도에 따라 응력의 감소율이 다르게 나타났으며, 특히 80 °C에서의 경우가 반복 횟수에 따른 응력 감소율이 가장 작은 것을 알 수 있다.

Figure 10은 잔류 변형률을 반복 횟수에 따라 나타낸 것으로, 반복 횟수가 증가함에 따라 잔류 변형률이 증가하고 있다. 형상기억 재료의 회복률 혹은 잔류 변형률은 최대변형률, 형상 고정점의 정도, 그리고 가역상의 상태 등에 영향을 받는다.¹⁸ 반복 횟수

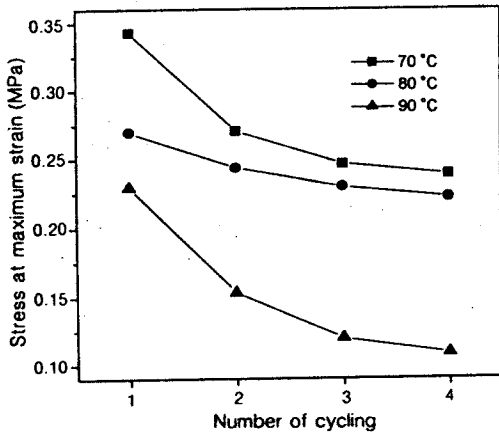


Figure 9. Stress at maximum strain for SBS at different temperature.

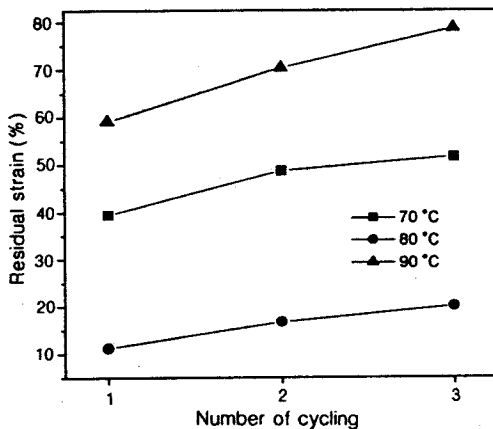


Figure 10. Recovery strain versus the number of cycling of SBS at different temperature.

증가에 따라 잔류 변형이 증가하는 것은 반복 변형에 따라 가역상인 부타디엔 도메인 중에서 trans구조를 갖는 일부 결정질의 영구 변형량이 증가되기 때문이다. 즉, 반복 변형시 녹은 결정질이 응력 방향으로 배향되었다가 재결정을 통해 되돌아오는 과정을 거치는데, 이때 파괴되거나 재결정되지 못하는 부분이 발생함으로써 이와 같이 영구 변형된 성분이 고정화되어 점차 잔류 변형량이 증가하는 것이다. 또한 Figure 9의 응력의 경우와 마찬가지로 온도에 따라 잔류 변형율이 다르게 나타났다. 특히 80 °C에서 잔류 변형량이 가장 작은 것을 알 수 있다. 70 °C에서는

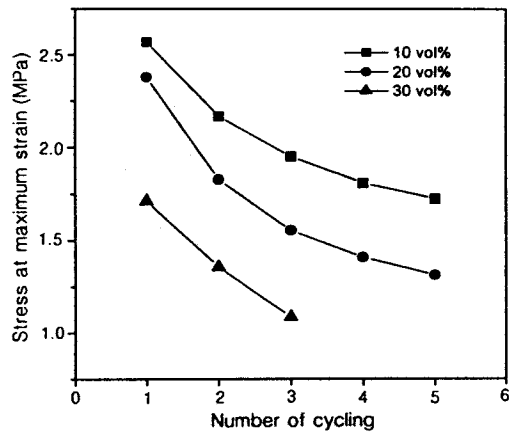


Figure 11. Stress at maximum strain for SBS composites for different content of filler.

탄성율과 최대 변형량에서의 높은 값을 보이는 반면 부타디엔의 재결정이 일어나기에는 다소 낮은 온도라고 할 수 있다. 또한 90 °C의 경우에는 고정상인 스티렌의 유리전이 온도와 거의 같은 온도이므로 고정상이 움직이게 되어 영구 변형되는 부분이 많이 발생하게 되고, 따라서 형상회복 특성이 저하되는 것이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서 적용한 SBS 공중합체의 경우 80 °C에서 가장 우수한 형상회복 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

Figure 11 및 Figure 12는 80 °C를 형상회복 작동온도로 설정하여 SBS 복합재료의 열기계적 반복 시험 결과를 충전제 함량별로 나타낸 것이다. Figure 11의 최대변형에서의 응력은 Figure 9에서와 같이 반복 횟수가 증가함에 따라 감소하고 있으며 충전제 함량이 증가함에 따라 응력이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 충전제를 첨가하지 않은 경우와 비교하여 탄성율은 증가하고 있으나, 충전제 함량이 증가함에 따라 응력은 다소 감소하는 것으로 나타났다. Figure 12의 잔류변형은 반복 횟수가 증가함에 따라 증가하고 있으며 이것은 Figure 10의 결과와 동일한 경향을 보이고 있다. 또한 충전제를 첨가하지 않은 경우와 비교했을 때 잔류변형이 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 충전제를 첨가할 경우 탄성율이 증가하여 변형에 반하는 힘은 크게 걸리지만 가역상의 함량이 상대적으로 적고 항복이 발생하는 변형율이 작기 때문이라고 판단되며, 충전제 함량이 증가함에 따라 잔류

변형률이 증가하는 경향으로서 더욱 명확하게 설명되어질 수 있다.

실제 인체 뇌 조직을 모사한 SBS 복합재료 (카본블랙 : $\text{SrTiO}_3 = 8 : 34$ by vol%)를 직경 5.95 mm와 5.33 mm의 구멍을 갖는 시편으로 제조하여 형상회복 특성을 평가하였다. 시편을 80 ℃에서 30분간 유지하고 약 10%와 18%로 각각 변형시킨 후 냉각하고, 그 후 시편을 다시 80 ℃에서 30분간 유지시켜 형상회복 성능을 시험한 결과, 각각 약 97.64%와 93.81%의 높은 회복율을 보였다. 이러한 회복율은 SAR 측정용 탐침기를 삽입할 때 실제로 radial 방향으로 10% 정도 변형시키면 비흡수를 측정용 프로브를 충분히 삽입가능하기 때문에 더욱 적합한 회복 성능 평가라 판단된다. 그리고 두개골 조성의 경우 충전제 함량이 뇌 조성의 것보다 작기 때문에 Figure 12에서 보여주는 결과로부터 더욱 우수한 형상회복 특성을 보일 것으로 판단된다. 따라서 삽입된 측정 프로브와 팬텀 모델간의 에어갭의 문제를 최소화할 것으로 예상된다.

두개골 제작용 금형 설계 및 다조직 팬텀 모델 제작. 본 연구에서는 기존의 liquid-type이나 semiliquid-type의 팬텀 모델이 가지고 있는 탈수화나 열화 등의 문제점을³⁴ 극복하고 재사용이 가능한 solid-type의 형상회복 특성을 갖는 근육/두개골, 근육/뇌 조직의 다층형 팬텀 모델 개발에 역점을 두었다. 즉, 두개골과 뇌의 조직을 SBS를 기저 수지로 한 고상의

두개골 반상을 제조한 후 근육을 도포하여, 다조직 팬텀 모델을 제조하는 것이다. 이때 고려할 사항은 팬텀 모델은 생체조직과 동일한 외형 및 동일한 크기이어야 하며 각 조직의 비유전율, 도전율, 그리고 밀도가 같아야 한다. 앞에서 언급했듯이 비유전율 및 도전율은 여러 3상 복합재료의 조성 실험을 통하여 실제 인체의 두개골과 뇌, 그리고 근육에 매우 상응하는 재료 조성을 설정할 수 있었다. 따라서 팬텀 모델의 나머지 필요 조건인 인체조직과 동일한 외형, 크기를 만족시키기 위해서 IEC에서 제안한 규격으로⁶ 실제 두개골 형상의 금형을 설계하였으며, Figure 8에서 나타낸 뇌와 두개골 조직을 모사한 복합재료를 적용하여 가압성형 방법으로 두개골 형상의 팬텀 모델을 제작할 수 있었다. Figure 13은 실제 두개골의 형상에 근육 조직을 도포한 다층형 팬텀 모델의 모습이다.

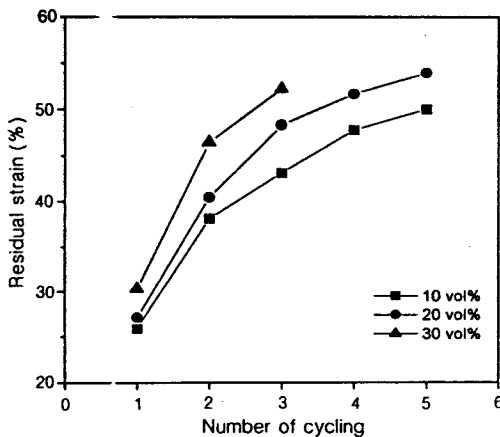


Figure 12. Recovery strain versus the number of cycling of SBS composites for different content of filler.

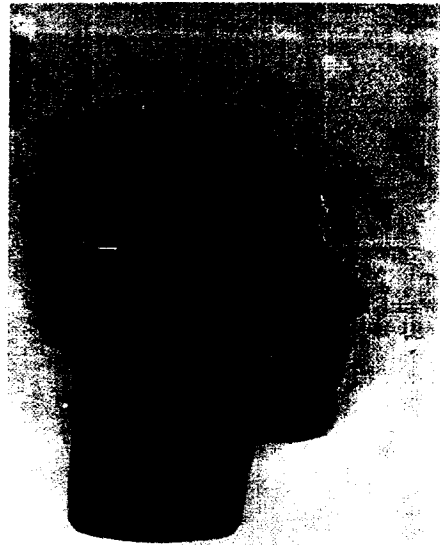


Figure 13. Feature of phantom-model simulating human skull with shape memory characteristics by using SBS composites.

결론

인체 팬텀 재료의 기저 수치로서 SBS 공중합체와 에폭시, 도전성 분말로 카본블랙을, 유전체로 (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃와 SrTiO₃를 적용한 복합재료의 유전 특성, 도전 특성 및 형상 회복 특성을 평가하였으며, 두개골 형상의 팬텀 모델을 제작하였다. SBS/카본블랙, 에폭시/카본블랙 복합재료는 카본블랙 함량이 증가함에 따라 유전을 및 도전을 증가하였으며, 주파수가 증가함에 따라 유전이 감소하고 도전을 증가하는 주파수 의존 특성을 나타내었다. 3상 복합재료의 경우 카본블랙의 함량이 동일할 때 유전체 함량이 증가할수록 유전율과 도전을 증가하였다. 또한 유전체의 적용여부와 관계없이 주파수 증가함에 따른 유전의 감소 특성은 카본블랙 함량이 많을수록 두드러지게 나타난다는 것을 알 수 있었다. SBS 공중합체의 가장 우수한 형상 회복 특성을 보이는 온도는 80 ℃이었다. 충전제 함량이 증가함에 따라 탄성과 잔류변형률은 증가하였으며, 반복 횟수에 따라 잔류변형률이 증가하였다. 기존 팬텀 모델의 단점을 극소화하면서 solid-type의 문제점인 탐침기와 삽입구 사이의 에어갭을 최소화할 수 있었으며, SBS/카본블랙/유전체, 에폭시/카본블랙/SrTiO₃의 3상 복합재료의 함량을 적절히 조절하여 0.775~2.0 GHz대역에서의 실제 인체의 두개골, 뇌와 근육 조직의 유전율과 도전에 부합하는 재료 조성을 개발할 수 있었다.

참고문헌

1. R. B. Goldberg and W. A. Creasey, *Med. Hypotheses*, **35**, 265 (1991).
2. W. Mack, S. Preston-Martin, and J. M. Peters, *Bioelectromagnetics*, **12**, 57 (1991).
3. H. Tamura, Y. Ishikawa, T. Kobayashi, and T. Nojima, *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, **39**, 132 (1997).
4. A. W. Guy, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-19**, 205 (1994).
5. S. Watanabe, M. Taki, T. Nojima, and O. Fujiwara, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-44**, 1874 (1996).
6. H. G. Yoon, "Development of Material Composition for Human Phantom Model", Final Report on Commission of Electronics and Telecommunications Research Institute, 1999.
7. A. M. Nicolson, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-19**, 377 (1970).
8. Y. S. Yoo, H. G. Yoon, and T. J. Moon, *Polymer(Korea)*, **22**, 462 (1998).
9. J. C. Maxwell, "Electricity and Magnetism", chap. 2, Oxford University Press, Oxford, 1892.
10. A. Paul and S. Thomas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **63**, 247 (1997).
11. A. K. Jonscher, "Dielectric Relaxation in Solids", Chelsea Dielectric, London, 1983.
12. C. H. Durney, H. Massouni, and M. F. Iskander, "Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook", 4th ed., chap. 3, The University of Utah, Salt Lake City, 1986.
13. K. S. Moon, H. D. Choi, H. Y. Jung, K. Y. Cho, H. G. Yoon, and T. J. Moon, *Polymer(Korea)*, **23**, 763 (1999).
14. H. D. Choi, H. W. Shim, K. W. Cho, H. J. Lee, C. S. Park, and H. G. Yoon, *J. Appl. Polym. Sci.*, **72**, 75 (1999).
15. K. S. Moon, H. D. Choi, A. K. Lee, K. Y. Cho, H. G. Yoon, and Kwang S. Suh, *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**, 1294 (2000).
16. C. C. Ku and R. Liepins, "Electrical Properties of Polymers", p. 252, Hanser Publishers, Munich, 1987.
17. Federal Communications Commission (FCC), *OET Bulletin* 65, Edition 97-01 (1997).
18. Y. S. Yoo, "The Relationship between Structure and Shape Recoverability of Shape Memory Polyurethanes", p. 15, Ph. D. Thesis, Korea University, 1998.
19. M. Irie, "Development and Application of Shape Memory Polymers" (Japanese), p. 24, CMC, 1989.