

형상 기억 성질을 갖는 인체팬텀용 XLPE 복합재료의 유전 특성

문경식 · 최형도* · 정호용 · 조광윤* · 윤호규[†] · 문탁진

고려대학교 재료공학과, *한국전자통신연구원 전파기술부

(1999년 4월 13일 접수)

Dielectric Properties of Human Phantom Material Using XLPE Composite with Shape Memory Characteristics

Kyoung Sik Moon, Hyung Do Choi*, Ho Yong Jung, Kwang Yoon Cho*,
Ho Gyu Yoon[†], and Tak Jin Moon

Department of Materials Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea

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

[†]e-mail : hgyoon@kuccnx.korea.ac.kr

(Received April 13, 1999)

요약: 카본블랙, 유전체 그리고 crosslinked polyethylene (XLPE)로 구성된 복합재료의 유전 성질과 형상 기억 특성을 조사하였다. 카본블랙만을 첨가한 XLPE 복합재료는 카본블랙 함량이 증가함에 따라 복소 유전율이 증가하였으며 주파수에 따라 유전율이 감소하는 주파수 의존 특성을 보였다. 카본블랙/유전체/XLPE 복합재료는 동일한 카본블랙 함량에서 유전체 함량이 증가함에 따라 복소 유전율이 증가하였으며 카본블랙의 영향을 받아 주파수가 증가함에 따라 유전율이 감소하였다. 카본블랙과 유전체의 함량을 적절히 조절하여 600 MHz~2 GHz 범위에서 두개골 및 뇌 조직과 유사한 유전특성을 갖는 비흡수율 측정용 팬텀 모델 재료를 제조할 수 있었다. 열기계적 반복 시험을 행한 결과, 충전제가 첨가됨에 따라 상대적인 잔류 변형률이 증가하였으나 두개골과 뇌를 모사하는 조성의 XLPE 복합재료는 우수한 형상 회복 성능을 나타내었다. XLPE를 팬텀 모델의 모수지로 적용함으로써 비흡수율 측정 프로브와 팬텀 모델의 삽입구 사이에서 발생하는 에어갭을 최소화시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

ABSTRACT: Dielectric properties and shape memory characteristics of carbon black/dielectrics/crosslinked polyethylene (XLPE) composite for human phantom materials were investigated. The complex dielectric constants of only carbon black filled XLPE composite were increased with the content of carbon black and showed the frequency dependence decreased with increasing frequency. The carbon black/dielectrics/XLPE composite showed the complex dielectric constant increasing with the amount of dielectrics at the constant concentration of carbon black. The decrease of dielectric constant with the frequency was also occurred by the effect of carbon black. The dielectric constant and conductivity required for the phantom material such as skull and brain at 600 MHz~2 GHz could be obtained by adjusting the composition ratio of dielectric powder and carbon black. The XLPE composites simulating the skull and brain showed the good shape recoverability even though the relative increase of the residual strain was found in the thermomechanical cycling test by the addition of fillers. The solution to minimize the effect of air gap between a specific absorption rate measurement-access probe and a probe hole on the phantom model would be proposed in this study.

Keywords: phantom model, carbon black/dielectrics/XLPE composite, complex dielectric constant, shape memory, thermomechanical cycling test.

서 론

최근 이동통신 기기의 보급률이 기하급수적으로 증가하면서 휴대전화기로부터 발생하는 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 인체에 미치는 전자파의 영향을 평가하는데 중요한 것은 전자파에 노출된 상태에서 인체의 비흡수율을 정량화하는 것이다.¹ 이것은 이론적 방법으로부터 예측할 수 없는 복잡한 환경에서의 비흡수율을 알아내는 데 매우 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다. 이러한 비흡수율은 인체에 전자파를 노출시키는 임상실험이 불가능하기 때문에 동물을 대상으로 하거나 인체와 부합되는 특성의 재료를 이용하여 시험하고 있다. 이때 인체의 각 기관에 해당되는 특성을 지닌 재료로 구성된 대상물을 팬텀 모델이라고 한다. 팬텀 모델을 이용하여 실험적으로 비흡수율을 측정하는 방법 중 피부온도 측정 그래프법과 삽입 가능한 전기장 탐침 기법이 가장 유용한 것으로 알려져 있다.^{2,3} 이때 팬텀은 생체 조직과 동일한 외형 및 크기이어야 하며 각 조직의 비유전율과 도전율이 같아야 한다. 유전율이나 도전율은 주파수에 의존하는 재료상수이므로 주파수에 따른 물질의 유전특성과 도전특성을 아는 것이 매우 중요하다. 인체 조직은 수분의 함량에 따라 뇌, 근육 등의 고수분 함량체와 지방이나 뼈와 같은 저수분 함량체로 분류되는데,^{4,5} 고수분 함량체의 유전상수는 저수분의 그것보다 10배 이상 크기 때문에 다양한 인체의 생체 조직에 부합하는 팬텀재료 개발에 어려움을 주고 있다.

80년대까지의 팬텀 모델은 다량의 수분을 함유한 젤리타입 등이 사용되었다.² 이러한 팬텀 모델은 반복 사용이 불가능하고 시간이 지남에 따라 수분이 증발하며 열화되는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 근육조직을 모사한 세라믹으로 만든 비탈수 팬텀 재료를 적용하려는 시도가 있었으나, 이것은 각 세라믹 조각의 에어갭을 제거하기 위해 특수한 접착제를 사용하여야 하는데 이때 접착제 사용이 어렵고 세라믹의 가공 특성상 자르거나 형상을 만들기가 쉽지 않은 단점이 있다.⁶ 1990년대에 이르러 새로운 재료를 통하여 기존 팬텀재료의 문제점을 극복하려는 시도가 이루어지고 있으며, 세라믹 분말이나 카본섬유를 polyvinylidene fluoride나 실리콘 고무에 적용

한 것 등이 그 예이다.

삽입 가능한 전기장 탐침법을 이용하여 비흡수율을 측정할 때에는 팬텀재료에 탐침기의 형태에 맞는 삽입 가능한 모양이 존재하여야 한다. 이때 dry팬텀 모델의 경우 삽입구를 미리 가공하여야 하는데, 이러한 삽입구에는 필연적으로 탐침기와 사이에 에어갭이 발생한다. 에어갭은 탐침기 끝단이나 돌레에 발생할 수 있으며 공기로 채워지기 때문에 비흡수율 측정시 오차를 유발할 수 있다. 따라서 에어갭은 신뢰성 있는 비흡수율을 평가하기 위해 해결해야 할 중요한 문제이다. 이때 형상 기억 특성을 갖는 재료를 이용하여 팬텀 모델을 제조할 경우 이러한 문제를 최소화할 수 있다. 형상 기억 효과는 일반적으로 일정한 온도 영역에서 변형 가공시킨 재료의 형상이 재가열에 의해 본래의 형상으로 회복되는 것을 의미한다.^{7,8} 그러므로 특정 고분자의 형상 기억 특성을 이용하면 탐침기와 팬텀 재료 사이의 에어갭을 최소화하여 비흡수율 측정 오차를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 기존의 팬텀재료의 단점을 보완하고 반복시험이 가능한 팬텀 모델로써 crosslinked polyethylene (XLPE)를 기저로 사용하였으며, 이동통신 단말기용 주파수 대역에서 생체 조직의 전자기적 성질과 유사한 팬텀재료를 구현하기 위해 고주파 유전체 세라믹 분말 및 카본블랙을 적용한 복합재료의 유전특성을 고찰하였다. 또한 팬텀조성을 갖는 형상 기억 복합재료의 형상 회복 특성을 조사함으로써 탐침기와 팬텀재료간에 발생하는 에어갭의 문제점을 최소화할 수 있는 방안을 제시하였다.

실 험

원재료. Table 1은 실험에 사용된 원재료를 나타낸 것이다. Crosslinked polyethylene (XLPE)는 low density polyethylene (LDPE, HY830, HAN-WHA Chemical Co.)과 가교제인 dicumyl peroxide (DCP)를 이용하여 제조하였다. 고주파 유전체는 SrTiO₃ (purity 99.9%, High Purity Chemical Co. Ltd., Japan)와 (Ba, Ca)(Sn, Ti)O₃를 적용하였다. SrTiO₃는 1380 °C에서 3시간 동안 열처리하여 사용하였다. (Ba, Ca)(Ti, Sn)O₃는 BaTiO₃ (Ferro Co., Japan)와 CaSnO₃ (CaCO₃ : SnO₂ = 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 °C에서 24시간 건조한 뒤, 다시 1200 °C에서 3시간 동안 하소, 분쇄 및 건조과정을 거친 후, 1400 °C에서 2시간 동안 열처리하여 제조하였다. 이와 같이 준비된 유전체를 분쇄하고 100, 75 그리고 45 μm용 sieve mesh를 이용하여 45 μm이하의 분말을 얻었다. 전도성 재료로는 카본블랙 (Ketjenblack EC-300J, LION Co., Japan)을 적용하였다. 또한 충전제와 수지의 접착력을 향상시키기 위하여 계면 결합제를 적용하였다. 그리고 가공성을 향상시키기 위하여 2종의 wax를 첨가하였다.

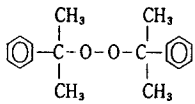
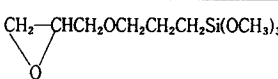
시편제조. LDPE, DCP, wax, 계면 결합제, 카본블랙 그리고 유전체 분말을 120 °C에서 two roll mill을 이용해 용융 혼련하였으며 상온에서 시료를 잘게 절단한 뒤 120 °C에서 용융 성형하였다. 그 후 180 °C에서 5시간 동안 가압 상태에서 가공하여 시편을 제조했다. 유전특성을 측정하기 위한 시편은 내경 3 mm, 외경 7 mm의 동축형 시편으로 정밀가공하고 표면을 sand paper로 처리하여 표면을 고르게 하였으며 동축형 에어라인과의 전기접촉을 확실히 하기 위하여 내외면에 은전극 (D-500, Dotite®, Fujikura Kasei Co., Ltd)을 도포하였다.

용융 온도. XLPE 및 XLPE 복합재료의 용융 온도는 시차주사열량계 (differential scanning calorimeter, TA-2020, TA Instruments Co.)를 이용하여 결정하였다.

전자기적 특성. 복소 유전율 및 복소 투자율을 측정하기 위하여 HP8510C, HP8517B 및 HP83651B로 구성된 45 MHz~50 GHz용 회로망분석기 (HP8510C, Hewlett Packard, 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 전송선을 보정한 후 매 측정마다 PTFE (Teflon)의 유전율 (2.04~2.05-j0) 및 투자율 (1-j0)을 측정함으로써 보정검증을 실시하였다. 검증 후에 길이를 알고 있는 시편을 airline에 삽입한 후 회로망 분석기를 통하여 S-parameter를 얻어 Nicolson-Ross-Weiss (NRW) 계산법에 의하여 복소 유전율을 결정하였다.⁹

형상 회복 성질. 재료의 형상 기억 성질을 평가하기 위하여 열기계적 반복 실험을 행하였다. 열기계적 반복 실험은 온도가 제어되는 오븐이 장착되어 있고 컴퓨터에 의해 제어되는 만능시험기를 이용하였다. 반복실험은 다음과 같은 4단계로 실시하였다. (1) 용융 온도보다 30 °C만큼 높은 온도 (T_h)에서 일정한 변형 속도로 최대 변형률까지 인장시키고 (2) 그 변

Table 1. Chemical Structure of Raw Materials

| component | structure |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| polyethylene (PE) low density polyethylene | $-(CH_2-CH_2)-_n$ |
| crosslinking agent dicumyl peroxide |  |
| coupling agent γ-glycidyloxypropyltrimethoxysilane |  |
| carnauba wax | $CH_3-(CH_2)_{14}-C(=O)-CH_2-(CH_2)_{18}-CH_3$ |
| wax stearic acid | $CH_3-(CH_2)_{16}-C(=O)-OH$ |

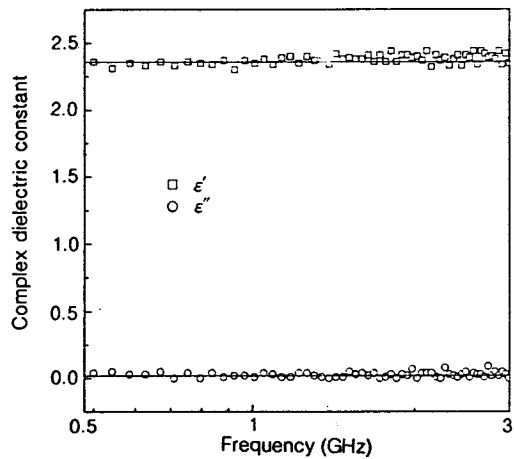


Figure 1. Complex dielectric constants of XLPE as a function of frequency. ε' and ε'' represent the real and imaginary part of complex dielectric constant, respectively.

형을 유지한 상태에서 상온으로 냉각하여 5분간 유지시킨 후 (3) 용력을 제거한 다음 다시 (4) $T_m + 30\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 승온하여 5분간 유지시키는 것을 1회로 하여 (1)~(4)의 과정을 5회 반복하였다.¹⁰ 최대변형은 50%이하로 하였으며 변형 속도는 $12\text{ mm}/\text{min}$ 로 설정하였다.

결과 및 고찰

카본블랙/XLPE 복합재료의 전자기적 성질. Fig. 1은 기저수지로 사용한 XLPE의 복소 유전율을 나타낸 것이다. $500\text{ MHz}\sim 3\text{ GHz}$ 의 주파수 대역에서 약 2.3 정도의 유전상수를 가지며 유전율 허수는 거의 0에 가까운 값을 나타내고 있다. 또한 주파수 변화에

따라 복소 유전율이 일정하였다. LDPE의 경우 1 kHz 에서 유전상수는 2.2, $\tan\delta$ 는 0.0003의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며,¹¹ 본 연구에서의 측정 결과와 잘 일치하였다.

Fig. 2는 카본블랙/XLPE 복합재료의 유전상수를 주파수에 따라 카본블랙 함량별로 나타낸 것이다. 카본블랙 함량이 증가함에 따라 유전상수가 증가하였으며, 주파수가 증가함에 따라 유전상수가 감소하는 주파수 의존성을 보였다. 또한 카본블랙 함량에 따른 유전상수의 차이가 주파수가 증가할수록 감소하였다. 이와 같은 주파수 의존성은 카본블랙 함량 8 vol% 이상에서 비교적 크게 나타났으며 그 이하의 함량에서는 주파수가 변하여도 거의 일정하였다. 이와 같은 경향은 카본블랙 함량에 따른 여러 주파수에서의 유전율을 도시한 Fig. 3에 잘 나타나 있다. 고분자 재료에 도전성 카본블랙을 첨가하면 그 함량이 증가함에 따라 유전율 및 도전율이 증가한다. 이때 카본블랙 자체는 유전물질이 아닌 반도체적 물질이다. 그러나 카본블랙 입자가 절연물질에 둘러 쌓이게 되면 절연물질과 카본블랙 입자 사이의 계면의 공간전하에 의하여 유전 특성을 나타나게 된다. Maxwell 등은 두 이종 물질의 유전율과 도전율이 각각 ϵ_1, ϵ_2 과 σ_1, σ_2 일 때 $\sigma_1\epsilon_2 \neq \sigma_2\epsilon_1$ 의 관계를 가지고 계면을 형성하면 계면에 축적되는 전하에 의하여 분극현상이 발생한다고 하였다.¹² 따라서 계면 분극에 의하여 카본블랙을

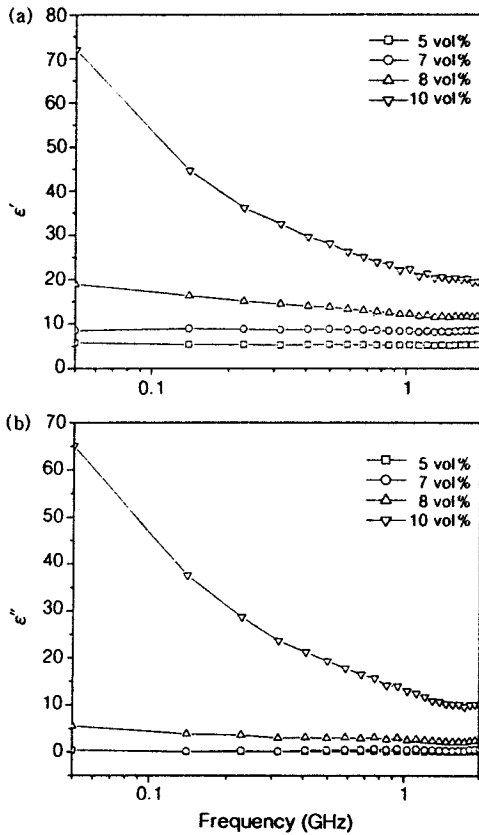


Figure 2. Complex dielectric constants of carbon black/XLPE composite as a function of frequency with the content of carbon black; (a) ϵ' and (b) ϵ'' .

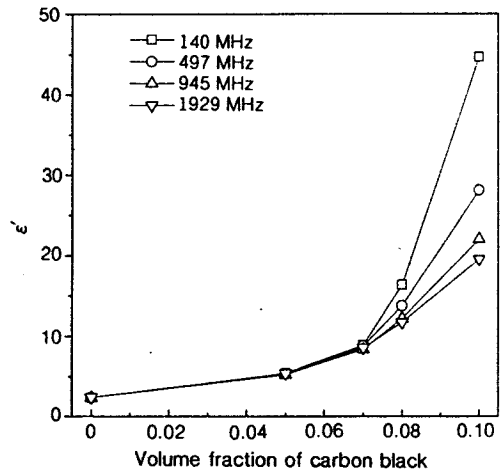


Figure 3. Dielectric constants versus the content of carbon black at different frequencies.

첨가한 절연물질이 유전체로 작동하게 된다. 그러므로 카본블랙의 함량이 증가할수록 계면이 증가하므로 유전율이 증가하게 된다. 이와 같이 발생된 계면분극은 저주파 유전특성에 주로 영향을 미치고 인가 주파수가 증가할수록 감소하는 성질이 있다고 알려져 있으며,¹³ 따라서 Fig. 2 및 3의 결과와 같은 유전율의 주파수 의존 특성이 잘 설명되어질 수 있다.

카본블랙의 함량이 증가할수록 유전율과 주파수 의존성이 증가하는 경향은 카본블랙/에폭시 복합재료에 대한 결과에서와 비슷하지만,¹⁴ XLPE를 적용한 경우가 동일한 카본블랙 함량에서의 유전상수 및 주파수 의존성이 훨씬 작았다. 일반적으로 카본블랙 등을 첨가한 복합재료의 유전 성질은 카본블랙의 함량, 크기, 분산성 그리고 이에 따른 카본블랙 입자들의 수에서의 망상 구조 형성 등에 민감하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^{11,13} 이는 카본블랙의 강한 응

집력에 기인하는 것으로서 동일한 카본블랙이라 하더라도 결국 모수지로 적용하는 고분자 재료에 따라 가공조건 등이 다르므로 입자의 분산 특성이 변화할 수 있게 된다. 따라서 카본블랙 입자를 첨가한 경우 모수지에 따라 유전상수 값은 다소 다르게 나타날 수 있다고 판단된다.

카본블랙/유전체/XLPE 복합재료의 전자기적 성질. Gabriel 등은 생체조직의 유전율과 도전율은 주파수에 따라 변화하는 주파수 의존 성질을 가진다고 하였다.¹⁵ 이와 같이 나타난 생체조직의 주파수에 따른 전기적 특성 값을 복합재료로 모사하기 위해서는 첨가 입자의 함량을 적절히 조절하여야 한다. 특히 뇌나 근육 등은 유전상수 값과 도전율이 비교적 높다. 따라서 카본블랙/XLPE 복합재료를 적용할 경우 카본블랙의 첨가량을 조절해야 할 필요가 있으나, 유전율과 도전율을 동시에 고려할 경우 두 값을 충족시

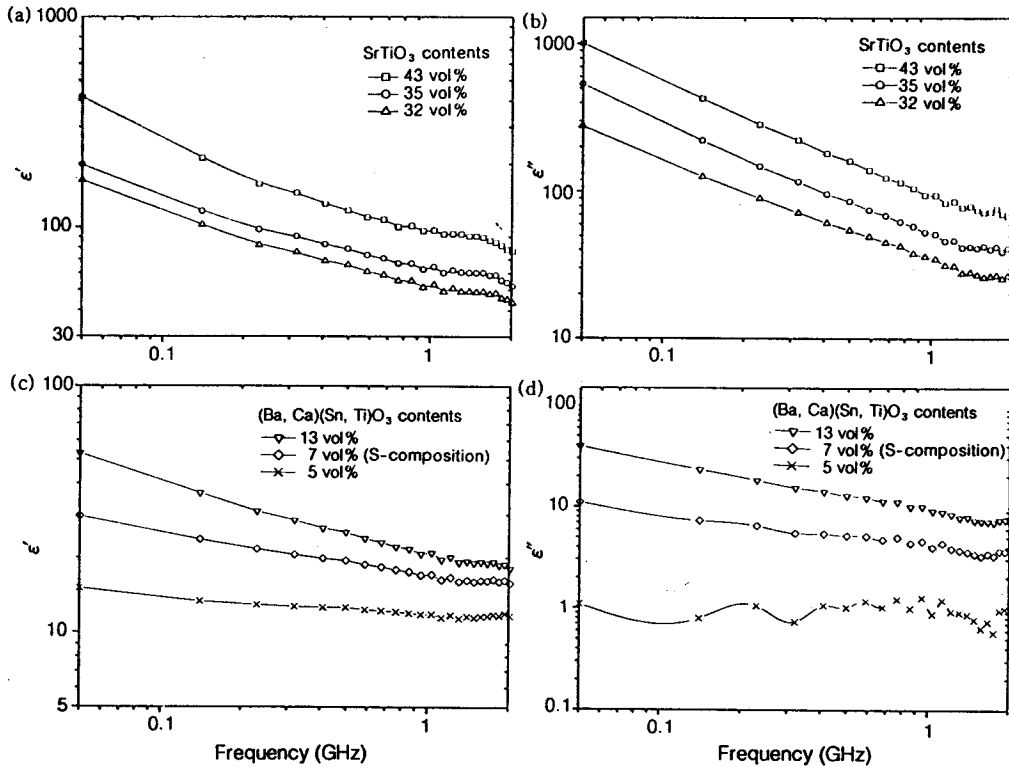


Figure 4. Complex dielectric constants of carbon black/dielectrics/XLPE composite as a function of frequency; (a) and (b) are ϵ' and ϵ'' of carbon black/SrTiO₃/XLPE, and (c) and (d) are ϵ' and ϵ'' of carbon black/(Ba, Ca)(Ti, Sn)O₃/XLPE, respectively. The carbon black content is constant to 8 vol% in all compositions.

키는 카본블랙 함량을 결정하기는 매우 힘들다. 따라서 적절한 함량의 유전체 분말을 카본블랙과 함께 첨가하여 생체의 유전 상수 및 도전율을 결정하는 것이 바람직하다.

Fig. 4는 카본블랙/유전체/XLPE 복합재료의 복소 유전율을 주파수에 대하여 나타낸 것이다. 이때 유전체는 SrTiO_3 와 $(\text{Ba}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ 의 함량을 각각 다르게 적용하였으며 카본블랙 함량은 8 vol%로 동일하게 적용하였다. 유전체 함량이 증가할수록 복소 유전율이 커지게 되나 주파수 증가에 따라 복소 유전율이 감소하는 주파수 의존 특성을 나타내고 있다. 고분자 재료에 유전체 분말만을 분산시킬 경우 복소유전율은 주어진 주파수 범위내에서 거의 일정한 값을 가지며, 이때의 유전율은 유전체 함량에 따라 대수 혼합법칙에 의해 증가한다.¹⁶ 따라서 Fig. 4의

3상 복합재료에서는 카본블랙 함량이 동일하므로 유전체 함량이 증가하면 유전율이 증가하게 되며, Fig. 2에서와 같이 카본블랙의 주파수 의존 특성에 영향을 받아 주파수가 증가함에 따라 유전율은 감소하고 있고 또한 그 감소율은 유사하였다. Fig. 5는 유전체 함량에 따른 특정 주파수에서의 유전율을 나타낸 것이다. 유전체 함량이 증가할수록 유전율은 증가하고 있으며 특히 낮은 주파수 영역에서 증가폭이 크게 나타났다.

Fig. 6은 카본블랙의 함량이 6과 7 vol%인 경우 카본블랙/ SrTiO_3 /XLPE 복합재료의 주파수에 따른 복소 유전율을 나타낸 것이며 Fig. 7은 카본블랙 함량이 7 vol%인 경우 SrTiO_3 함량에 따른 유전율을 도시한 것이다. 유전체 함량이 증가할수록 복소 유전율이 증가하였고 주파수가 증가함에 따라 유전율이 감

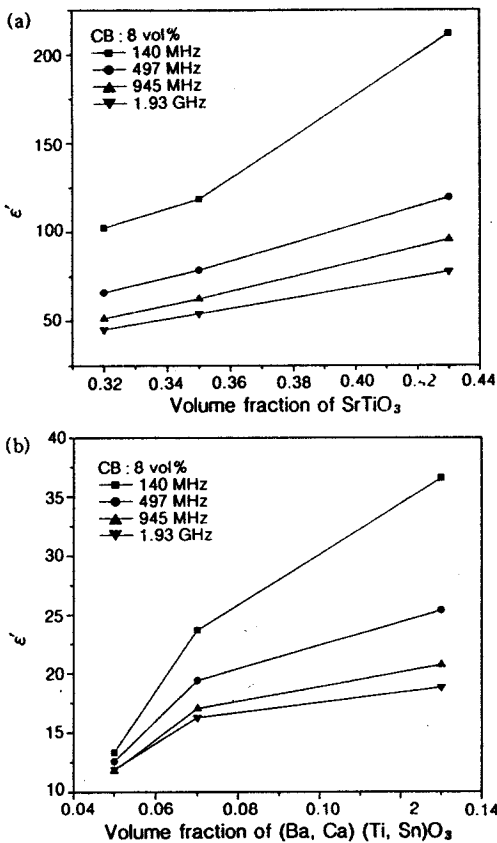


Figure 5. ϵ' versus the content of (a) SrTiO_3 and (b) $(\text{Ba}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ at different frequencies.

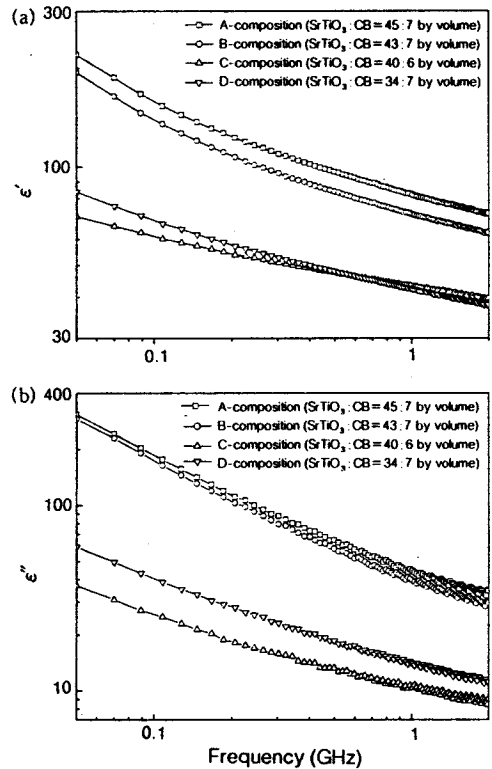


Figure 6. Complex dielectric constants of carbon black/ SrTiO_3 /XLPE composite as a function of frequency for different compositions; (a) ϵ' and (b) ϵ'' .

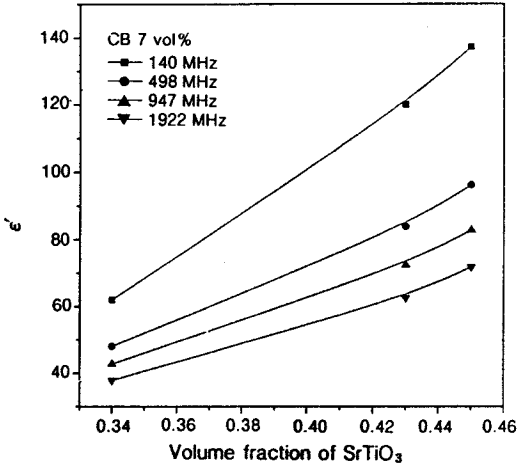


Figure 7. ϵ' versus the content of SrTiO_3 at different frequencies.

소하였다. 이 결과는 위의 카본블랙 첨가량 8 vol% 일 경우와 동일하다. 카본블랙 함량이 7 vol%로 동일한 A, B 그리고 D조성의 경우는 주파수 증가에 따른 유전율 감소율이 비슷한 것을 알 수 있다. 반면 카본블랙 함량 6 vol%인 C의 경우 유전율 감소 기울기가 적으며 약 650 MHz에서 카본블랙 7 vol%인 D조성의 커브와 교차점을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 C조성의 유전체 분말 함량은 D조성의 그것보다 많은데도 불구하고 교차 주파수 이하에서는 D조성의 유전율보다 더 작게 나타났다. 저주파수에서의 유전율은 카본블랙 함량에 민감하게 영향을 받기 때문에 카본블랙 함량이 더 많은 D조성의 유전율이 C조성보다 더 크며, 고주파에서의 유전율은 유전체 함량에 영향을 주로 받으므로 650 MHz 이상에서는 C조성의 유전율이 D조성보다 더 큰 결과를 보인다.

Fig. 8은 본 연구에서 적용한 여러 조성의 복합재료 중 주파수에 따른 생체조직의 유전특성과 유사한 복합재료 (S조성과 D조성)의 유전율 및 도전율을 FCC (federal communications commission) 등에서 보고된 값과 함께 50 MHz~2 GHz의 범위에서 나타낸 것이다.¹⁷ 이때의 도전율은 재료의 복소 유전율과 도전율 사이의 다음과 같은 관계에 의하여 계산하였다.¹⁸

$$\epsilon'' = \epsilon_0 \cdot \omega / \sigma \quad (1)$$

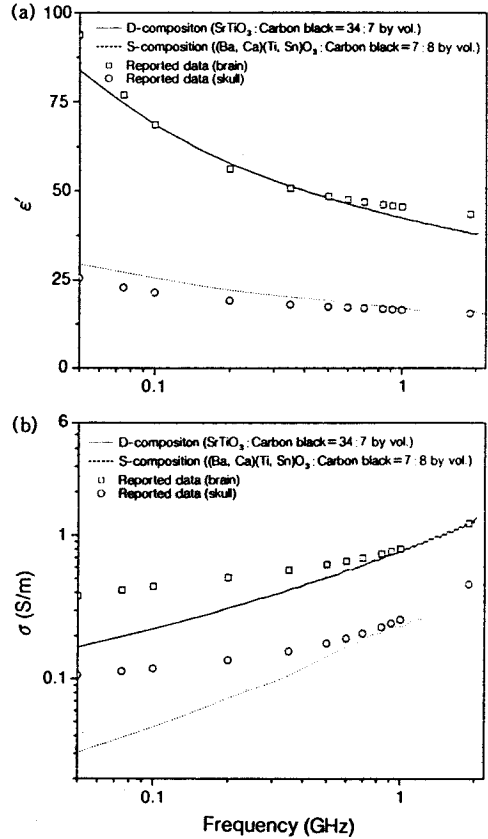


Figure 8. Comparison of the experimental data of the carbon black/dielectrics/XLPE composite with the reported data for human tissues; (a) ϵ' and (b) σ (conductivity).

여기서 ϵ_0 는 자유공간에서의 유전율, ω 는 인가장의 주파수, 그리고 σ 는 유효 도전율이다. S조성과 D조성 복합재료의 유전율 및 도전율은 여러 주파수에서 두개골 및 뇌의 유전율과 도전율에 근사하였다. 유전율은 거의 전 주파수 대역에서 생체조직과 유사한 특성을 보였으나 도전율은 저주파수 대역에서 다소 큰 편차를 보이고 있다. 그러나 유전율과 도전율 모두를 고려할 때 약 600 MHz~2 GHz 대역에서는 생체조직의 물성을 매우 잘 모사하는 특성을 보이고 있다. 특히 본 연구의 목적 재료가 휴대용 이동전화기의 전파 측정용 팬텀재료이며 셀룰라로나 PCS 등 현재 민생용 이동통신 단말기의 주파수 대역이 각각 800~900 MHz, 그리고 1.8~1.9 GHz인 것을 고

Table 2. Melting Temperature of Pure XLPE and Composites

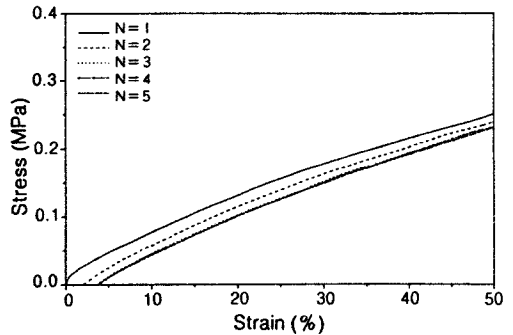
| component | T_m (°C) |
|---------------|------------|
| XLPE | 102 |
| S-composition | 103 |
| D-composition | 103 |

려하면 Fig. 8에 도시한 S와 D조성은 목적 주파수 대역에서 생체조직의 유전성질과 매우 유사한 특성을 갖는다고 할 수 있다.

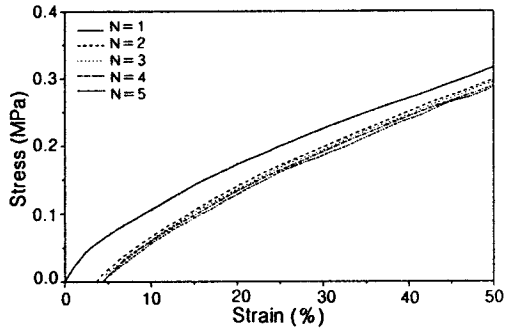
형상 기억 특성. XLPE와 Fig. 8의 S조성, D조성에 대한 각각의 용융온도 (T_m)를 Table 2에 나타내었다. 각 조성의 용융온도는 약 102~103 °C이며 충전제 함량에 거의 영향을 받지 않았다.

Fig. 9는 XLPE와 S조성 및 D조성으로 이루어진 복합재료에 대한 열기계적 반복 시험 결과로서 (a)는 최대 변형률 (e_{max}) 50%에서의 XLPE, (b)는 최대 변형률 50%에서의 S조성, 그리고 (c)는 최대 변형률 10%에서의 D조성에 대하여 나타낸 것이다. 반복이 진행됨에 따라 각 조성에 대한 최대 변형률에서의 용력이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이때의 각 조성에 대한 최대 변형률에서의 용력을 Fig. 10에 나타내었다. 충전제가 첨가된 것과 첨가되지 않은 경우에 반복 횟수에 따른 최대 변형률에서의 용력이 감소하는 거동은 비슷하였다. 각 조성의 130 °C에서의 탄성률을 Table 3에 나타내었다. 이때 S와 D조성의 충전제 함량은 각각 15와 41 vol%이다. 충전제 함량이 증가할수록 탄성률이 증가함을 알 수 있다. S조성의 경우 Table 3에서와 같이 탄성률은 다소 증가하나 Fig. 9(a)의 XLPE와 비교할 때 50%의 최대 변형에서는 회복량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. Fig. 9의 (a)나 (b)에서와 같이 D조성에 대하여서도 50%의 최대 변형을 가할 때 시편들은 파괴되었다. 이것은 충전제 함량이 XLPE나 S조성에 비해 많기 때문에 Table 3에서와 같이 탄성률이 상당히 증가하며 재료 자체가 가진 최대 변형률이 감소하므로 파괴 변형률이 50% 이하가 되는 것이다. 따라서 최대 변형률을 다소 낮게 설정하였다.

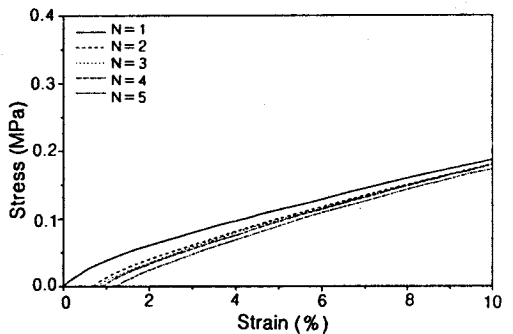
Fig. 11은 열기계적 반복실험을 통하여 얻은 각 반복시의 잔류 변형률을 조성별로 나타낸 것이다. 반복 횟수가 늘어날수록 잔류 변형률이 증가함을 알 수



(a)



(b)



(c)

Figure 9. Stress-strain curves in thermomechanical cycling tests; (a) XLPE at $e_{max} = 50\%$, (b) S-composition at $e_{max} = 50\%$, and (c) D-composition at $e_{max} = 10\%$.

있다. 형상 기억 재료의 회복률은 최대 변형률, 형상 고정점의 정도, 가역상의 상태 등에 영향을 받는다.¹⁹ XLPE에서는 망상구조를 이루는 가교점이 형상 기억을 위한 고정점이 되며 결정질은 가역상으로 작용하여 형상 회복 재료로 작동한다.¹⁹ 충전제를 첨가하지 않은 XLPE의 경우 전형적인 형상 회복 재료에서 나

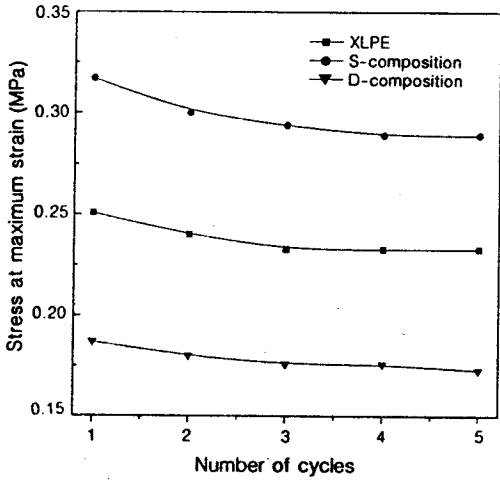


Figure 10. Stress at maximum strain for XLPE, S-composition, and D-composition.

Table 3. Tensile Modulus of Pure XLPE and Composites at 130°C

| component | modulus (MPa) |
|---------------|---------------|
| XLPE | 0.67 |
| S-composition | 0.91 |
| D-composition | 2.10 |

타나는 거동을 보이고 있다. 즉 반복 횟수가 증가함에 따라 잔류 변형의 증가율이 감소하고 있으며, 2회까지는 급격히 증가하다가 그 이후에서는 완만하게 감소하고 있다. 이것은 반복초기에 결정질이 응력 방향으로 배향되었다가 파괴된 부분들이 생김으로써 잔류 변형이 증가하나 반복 횟수가 늘어남에 따라 영구 변형되는 성분이 고정되어 점차 잔류 변형률이 작아져 일정한 값으로 되는 것으로 판단된다.²⁰ S 조성의 경우 충전제를 첨가하지 않은 것보다 전 반복구간에서 잔류 변형률은 많았다. 이것은 충전제를 첨가한 시편은 첨가하지 않은 것에 비해 탄성률이 증가하여 변형에 반하는 힘은 많이 걸리나 가역상 함량이 적고 항복이 발생하는 변형률이 작기 때문인 것으로 생각된다. D 조성의 경우 최대 변형률을 10%로 하였으므로 잔류 변형률이 가장 작았으나 반복 횟수에 따른 잔류 변형의 거동은 S 조성과 비슷하였다. 반복 횟수가 늘어남에 따른 잔류 변형률의 거동은 충전제를 첨가하지 않은 경우와 첨가한 경우에 다소 다른 경향을

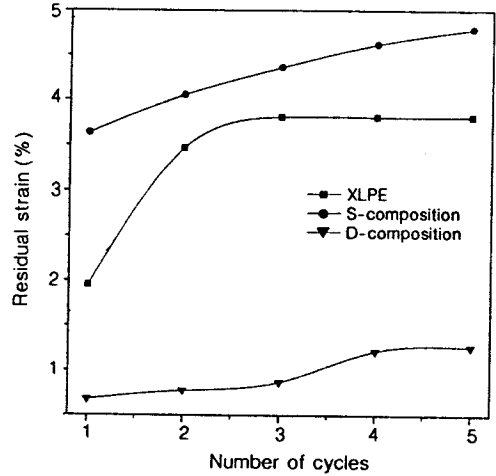


Figure 11. Recovery strain versus the number of cycling for XLPE, S-composition, and D-composition.

나타났다. 즉 충전제를 첨가한 경우 1회에서 2회 사이에서의 잔류 변형률 증가율이 충전제를 첨가하지 않은 경우보다 작으며 5회까지는 반복 횟수가 증가함에 따라 잔류 변형은 서서히 증가하였다.

결국 S 조성은 최대 변형률을 50%로 했을 때 백분율로 환산하면 5회 반복시 94% 이상이 회복되었다. 최대 변형률이 감소할수록 잔류 변형률이 감소하는 것으로 알려져 있다.¹⁹ 그러므로 50% 이하의 최대 변형률에서 S 조성의 잔류 변형률은 더욱 감소할 것이므로 형상 회복 특성은 더 향상될 것이다. D 조성은 최대 변형률이 50%일 때는 파괴되었으나 10%일 때는 5회 반복시 92%의 회복률을 보인다. 그러므로 10% 이하의 변형에는 D 조성을 사용하는데 무리가 없으나 많은 변형이 요구되는 경우에는 주의가 필요하다. 그러므로 충전제를 첨가한 형상 기억 고분자를 응용하여 원하는 형상 기억 특성을 얻기 위해서는 충전제의 함량과 그에 따른 최대 변형률 그리고 잔류 변형률 등을 고려해야 한다고 판단된다. 실제로 팬텀 모델 위의 프로브 삽입구가 측정용 프로브의 직경보다 10% 정도 작게 형성되었을 경우 재료의 형상 기억 효과를 이용하면 측정 프로브를 강하게 압착하여 삽입할 수 있다. 따라서 S와 D 조성의 복합재료를 적용하여 두개골이나 뇌를 모사하는 팬텀 모델을 제조할 경우 형상 기억 효과를 이용하여 에어갭을 최소화시킬 수 있다고 생각된다.

결 론

인체 팬텀용 카본블랙/XLPE 복합재료와 카본블랙/유전체/XLPE 복합재료의 전자기적 성질 및 형상 회복 특성에 관하여 연구하였다. 카본블랙/XLPE 복합재료는 카본블랙 함량이 증가함에 따라 복소 유전율이 증가하였으며 주파수가 증가함에 따라 복소 유전율이 감소하는 주파수 의존 특성을 나타냈다. 카본블랙/유전체/XLPE의 경우 카본블랙의 함량이 같을 때 유전체 함량이 증가할수록 유전율이 증가하였다. 또한 주파수 증가에 따른 복소 유전율의 감소율은 카본블랙 함량이 증가할수록 증가하였다. 저주파수 대역에서의 유전율은 카본블랙의 함량에 의하여 그리고 고주파수 대역에서의 유전율은 유전체 분말의 함량에 영향을 받음을 알 수 있었다. 카본블랙/유전체/XLPE 복합재료의 각 성분에 대한 함량비를 적절히 조절함으로써 600 MHz~2 GHz의 주파수 대역에서 두개골과 뇌에 대한 생체조직의 유전율 및 도전율을 모사할 수 있는 조성의 재료를 개발할 수 있었다. 충전제 함량이 증가함에 따라 탄성률과 잔류 변형량은 증가하였으며 최대 변형량은 감소함을 알았다. 각 팬텀재료 조성의 XLPE 복합재료에 대한 열기계적 반복 시험을 통하여 변형량에는 차이가 있으나 형상 회복 성능을 나타냄을 확인하였다. 따라서 XLPE를 적용함으로써 팬텀모델과 측정 프로브와의 에어갭을 최소화시킬 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. H. Tamura, Y. Ishikawa, T. Kobayashi, and T. Nojima, *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, **39**, 132 (1997).
2. A. W. Guy, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-19**, 205 (1994).
3. S. Watanabe, M. Taki, T. Nojima, and O. Fujiwara, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-44**, 1874 (1996).

4. N. A. Stuchly and S. S. Stuchly, *J. Microwave Power*, **15**, 19 (1980).
5. C. C. Johnson and A. W. Guy, *Proceedings of the IEEE*, **60**, 692 (1972).
6. T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada, and S. Uebayashi, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **41**, 136 (1993).
7. M. Irie, "Development and Application of Shape Memory Polymers (Japanese)", p. 24, CMC, 1989.
8. H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, "An Introduction to Rheology", p. 11, Elsevier, New York, 1989.
9. A. M. Nicolson, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-19**, 377 (1970).
10. Y. S. Yoo, H. G. Yoon, and T. J. Moon, *Polymer (Korea)*, **22**, 462 (1998).
11. C. C. Ku and R. Liepins, "Electrical Properties of Polymers", p. 335, Hanser Publishers, Munich, 1987.
12. J. C. Maxwell, "Electricity and Magnetism", Oxford University Press, Oxford, 1892.
13. A. Paul and S. Thomas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **63**, 247 (1997).
14. H. G. Yoon, "Development of Material Compositions for Human Phantom Model", Final Research Report on Commission of Electronics and Telecommunications Research Institute, 1998.
15. C. Gabriel, *Brooks Air Force Technical Report*, AL/OE-TR-1996-0037 (1996).
16. 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).
17. Federal Communications Commission (FCC), *OET Bulletins* 65, Edition 97-01 (1997).
18. C. H. Durney, H. Massouni, and M. F. Iskander, "Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook", 4th ed., chap. 3, The University of Utah, 1986.
19. Y. S. Yoo, "The Relationship between Structure and Shape Recoverability of Shape Memory Polyurethanes", p. 15, Ph. D. Thesis, Korea University, 1998.
20. L. Morbitzer and H. Hesse, *J. Appl. Polym. Sci.*, **16**, 2697 (1972).