

유/무기 하이브리드 감촉센서의 재료설계와 응용

좌용호 · 新原 皓一

1. 서론

일반적으로 사람(system)의 주변(surrounding)에 대한 인지방법 중 피부(boundary)를 통하여 많은 정보를 얻는다고 할 수 있다. 즉, 사람이 피부를 통해 접촉하거나 접촉 되는 경우에 물질과 생체의 중량/모양/크기를 인지하고 그것에 대해서 반응한다. 예를 들면, 뜨겁고, 춥고, 아프고, 부드럽고, 단단하고 등의 감촉으로부터 다양한 판단을 한다. 또한 이것들의 감촉과 시각 등의 감각을 엮어서 종합적인 판단을 한다. 이들의 감각은 주로 피부를 매개로 감지하는 것이며 이에 재료공학적인 측면에서 인간이 가진 촉감을 재료기능에서 감지하고자 하는 다양한 재료/시스템 개발이 있으리라 판단된다. 그러나 이와 같은 재료시스템을 개발하기 위해서는 신뢰성 있는 재료의 선택 및 복합화 등을 통한 특성구현, 새로운 재료특성의 설계 등이 필요하다고 할 수 있다.

저자 등은, 이와 같은 다양한 감촉을 감지하는 재료를 “감촉센서”라 명명하고 산업적 측면에서 응용 가능한 센서를 개발하는 연구를 보고하였다.¹⁻⁶ 이하, 유/무기 하이브리드 감촉센서의 재료설계와 실용화 예에 대해 소개하고자 한다.

가능하리라 생각된다.

원리로는 무가압 상태에서 온도차에 의한 재료의 신축을 감지하거나 또는 압력을 가했을 때에 압력의 분포를 센싱하는 것에 의해 아프고, 부드럽고, 딱딱하고 등을 감지하는 것이 가능하다. 이러한 감촉을 감지하기 위해서는 인간의 피부처럼 부드럽고 또한 유연성을 가진 재료가 적절하리라 생각된다. 이러한 유연성이 우수하고 역시 인간의 피부감각에 비슷한 재료특성은 금속이나 세라믹 재료로는 발현이 어렵고 유기 고분자재료라 생각된다. 또, 열 또는 압력을 감지하는 기능을 주기 위해서는 미묘한 촉감(압력)을 전기와 자기적 신호에 변환하는 기능이 필요하다. 이를 위해서는 전자기적 신호로 변환되는 기능을 갖는 재료를 첨가할 필요가 있다. 또한 여러 환

2. 감촉센서의 기본구상 및 재료설계

2.1 감촉센서의 기본구상

재료의 온도가 높거나 낮은 상태는 열전체(열전대 : 온도차에 대응하고 기전력이 발생한다)에서 평가하는 경우가 가능하다. 또한, 재료가 단단하거나 부드러운 재료의 경도(탄성변형에 대한 저항)에서 평가가 가능하다.

그러나 이러한 평가는 재료의 상태 또는 특성차체의 평가이며, 재료의 상태/특성의 변화를 감지하는 것은 아니다. 이러한 특성들을 인간의 피부와 같이 하나의 재료에서 감지/평가가 가능하다면 인간의 피부를 대신하여 적용이 가능하리라 사료된다.

예를 들면 로봇 피부에 적용(이 경우 로봇이 어떠한 외력에 대해서 뜨겁고, 춥고, 아프고, 부드럽고, 딱딱하고 등의 감지를 한다)이



좌용호

1989 한양대학교 무기재료공학과(학사)
1993 Osaka Univ. 프로세스공학(석사)
1996 Osaka Univ. 프로세스공학(박사)
2000 Osaka Univ. 산업과학기술연구소(조수)
2002 전북대학교 재료공학과(조교수)
2002~ 한양대학교 공과대학 화학공학과
현재 (부교수)



新原 皓一

1966 Osaka Univ. 원자력공학과(학사)
1968 Osaka Univ. 원자력공학과(석사)
1974 Osaka Univ. 원자력공학과(박사)
1968 Tohoku Univ., The Institute for Materials Research(조수)
1976 Tohoku Univ., The Institute for Materials Research(조교수)
1986 National Defense Academy, Department of Physics(교수)
1989 Osaka Univ. 산업과학기술연구소(교수)
2004~ Nagaoka University of Technology
현재 Extreme Energy-Density Research Institute(교수)
2005~ Tokyo Institute of Technology So-
현재 lution Research Organization/Inte-
grated Research Institute(교수)

Application and Materials Design of Organic/Inorganic Hybrid Contact Sensor

한양대학교 화학공학과(Yong-Ho Choa, Department of Chemical Engineering, Hanyang University, 1271 Sa-1 dong, Ansan, Kyunggi-do 425-791, Korea) e-mail: choa15@hanyang.ac.kr
Nagaoka University of Technology(Koichi Niihara, Extreme Energy-Density Research Institute, Nagaoka University of Technology, Niigata 940-2188, Japan)

경에 대에 적용하기 위해서는 기계적 특성을 고려할 필요가 있으리라 생각된다.

상기의 유기고분자소재 중에서 유연하며 탄성을 가진 재료로는 탄성중합체(엘라스토머)를 들 수 있다. 엘라스토머는 일반적으로 체적고유저항이 $10^{10} \Omega\text{cm}$ 이상의 절연재료이지만 금속, 탄소 등의 도전재료를 분산시킨 경우에 따라 도전성 재료가 된다. 당초에는 절연 파괴를 막고 대전 방지재로서 사용했지만, 전자기술의 발전에 의하여 도전성 엘라스토머는 접점재료, 도전성 접착제 등 다양한 목적으로 사용되고 있다.

도전성 고분자는 고분자 분자 중에 도전성 분자구조를 도입한 반도체계 도전성 고분자와 고분자(엘라스토머) 중에 카본블랙과 금속입자 등의 도전성 필러를 분산시킨 분산 복합계 도전성 엘라스토머로 크게 나누어 진다. 반도체계 도전성 고분자로서는 폴리아세틸렌, 폴리피롤, 폴리피오렌, 폴리아닐린 등이 알려져 있지만 대부분은 경질 고분자이다.

분산 복합계 도전성 엘라스토머에는 압력변화에 따라 절연상태에서 도전상태까지 저항치가 변화하는 가압(또는 감압)도전특성을 보인다. 도전성 필러로서는 주로 카본블랙, 또는 금속입자가 사용되어지며 엘라스토머는 실리콘 엘라스토머가 많이 사용되어진다. 실리콘 엘라스토머는 내환경성이 우수하며, 오염원인 불순물이 없는 절연성과 내전압성에 우수한 등의 특징이 있다. 또한, 가압 도전성 엘라스토머는 크게 On-Off 적으로 변화하는 것과 가변저항성 가압도전성 엘라스토머로 크게 나뉜다. On-Off 기능을 이용한 용도로서는 키보드용 스위치 소자, 카메라와 오디오 등에 사용하는 소형 스위치 등을 들 수 있다. 또한 압력을 신호로서 검출하는 응용 예로서는 방법 경보용 센서, 각종 도형 입력용 소재 등이 있다. 가변저항성 도전성 엘라스토머의 경우는 압력센서로서 자동 판별용 센서 등의 응용이 기대된다.

이 중에서 상기한 감촉센서의 설계로 합당하고 응용 가능한 재료는 그 특성을 고려할 때, 가변저항성 도전성 엘라스토머라고 생각된다. 그러나 일반적으로 가변저항성 도전성 엘라스토머는 엘라스토머자체의 특성 또는 도전성을 주기 위해 첨가되는 금속과 카본 등의 필러와의 상호작용으로 시간 혹은 실험회수에 따라서 특성의 변화(저하)가 발생한다. 이러한 특성저하를 향상시킴과 동시에 내구성성을 개선하고 미묘한 촉감(압력)과 온도변화까지도 전기와 자기적 신호로 신뢰성 있게 디지털화하는 기술이 필요하다 할 것이다.

2.2 감촉센서의 설계

유기 고분자와 함께 금속 및 세라믹 등 재료에는 다양한 구조와 기능을 가지고 서로의 특성을 상호 보완하여 사용되고 있다. 이 중에서 한 방법으로 이중재료의 복합화가 연구 개발되고 있다. 예로는 유기고분자에 필러의 첨가와 세라믹스에 금속 혹은 금속에 세라믹스를 분산하여 복합화한 것을 들 수 있다. 이 중에서 위에서 기술한 바와 같이 감압센서로서 도전성 입자를 분산시킨 고분자계 복합재료는 전기특성의 제어가 손쉽게 가능하여 폭 넓게 연구되고⁷⁻⁹ 있으며 이 복합체의 저항치 혹은 전기전도도는 도전입자의 체적분율에 따라서 크게 변화하고 체적 분율이 작을 때의 저항치는 고분자기지의 저항치가 거의 변하지 않고 전기적으로 절연상태로 된다. 그러나 임계 체적 분율 범위에서는 저항치는 크게 변화한다. 이 거동은 복합체 중의 도전경로(path)의 형상에 따라서 저항치가 변화한다고 유추되는 General Effective Media 이론에 따라서 설

명되어진다.¹⁰⁻¹³

고분자/카본 복합재료는 고분자 기지에 카본 입자를 분산시킨 것이어서 도전입자의 체적분율이 증가함에 따라 전기저항은 서서히 감소하고 임계 체적분율에 가까운 조성에서는 압력에 따라서 저항이 크게 감소한다. 따라서 체적분율이 임계치에 가까운 조성에서는 압력에 따라서 저항이 크게 변화하므로 이러한 특성을 이용하여 상기의 각종센서에의 응용되고 있다.

그러나 이러한 입자 분산형 감압 도전성 고분자 엘라스토머의 경우는 주로 가압 및 압축 변형에 대해 저항값의 변화에 기인하나, 변형기구는 기지상인 비도전성 엘라스토머의 변형에 기초한 것이며 일반적으로 변형(변위)에 대한 저항값의 변화는 직선적인 관계가 아니며, 고분자기지와 분산전도성 입자사이의 계면에서의 미세균열 등의 발생으로 내구성에 기인한 신뢰성이 저하되는 것이 일반적이다.

본 기고에서 소개하는 감촉센서는 이처럼 감압센서와 원리적으로는 같지만, 뜨겁고, 춥고, 아프고, 딱딱하고, 부드럽고 등의 정확한 인지를 목적으로 환경변화(온도와 압력의 변화 및 분포)와 인간이 가하는 힘(압력의 변화 및 분포)과의 상관을 어떠한 형태(여기서는 전도도/저항치)로 센싱하는 것이다. 이하 감촉센서에서 필요한 조건을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 인간이 압력을 가할 경우, 재료의 변위변화가 감지 될 것.
 - 엘라스토머 탄성을 보일 것.
 - 금속 등의 일반적인 무기계 고체와 비교하여, 탄성을 값은 약 10만분의 1정도이며 신장은 수 100퍼센트에 가까운 전형적인 고 탄성을 보일 것.
 - 2) 인간이 압력을 가할 때 압력에 의한 변위 또는 특성의 변화가 완만히 변화하는 경우.
 - 압력/저항 곡선의 기울기가 되도록 직선성을 가질 것.
 - 3) 압축, 뒤틀림, 인장, 굴곡 등의 각종 변형에 대해서 3차원 방향에 대해 일정한(일련의) 특성의 변화를 보일 것.
 - 입자분산에 의한 기능부여가 적당하고, 이방성 구조 특성을 보이는 재료의 분산은 부적당.
 - 4) 재료가 높은 신뢰성을 가질 것.
 - 반복시험, 또는 경시변화가 작을 것.
 - 산업적 응용으로 하여 특수한 장치가 없이 직접감지가 바람직함. 즉 신호의 증폭/감쇠 처리 없이 직접 또 간단히 압력/변위/저항치의 변화를 감지 할 것.
 - 5) 인간이 생활하는 환경에서 변위 또는 특성의 변화를 유지할 것.
 - 온도-20 ℃부터 +70 ℃의 범위에서 온도의 변화에 대해 일련의 변화를 보일 것.
 - 고습도의 91%부터 99%RH의 범위에서도 특성변화가 작을 것.
 - 6) 엘라스토머기지의 유연성을 유지하면서, 우수한 역학적 특성, 내환경성, 새로운 기능부여를 가능하게 하는 구조로 하여 극소량의 분산에 특성의 현저한 개선이 가능한 나노복합구조가 적합함.
- 이상의 조건을 만족하는 새로운 무기/유기 감촉센서재료를 설계하기위해 기지상으로서의 내열성/내식성에 우수하고, 또 인간이 가하는 힘에 신속하게 변형하는 탄성중합체(엘라스토머)가, 도전성입자로서는 카본입자가 적당하리라 사료된다. 또한 압력/저항의 변화에 직선성을 주기위해서는 엘라스토머 기지상 이외에도 탄성률이 다른 엘라스토머 입자를 첨가가 필요하며, 동시에 신뢰성의 향상, 기계적 특성과 내환경성을 개선하기 위해, 세라믹스 나노입자의 균일

첨가가 유익할 것으로 사료된다. 본 기고에서는 이와 같은 배합에 의해 제조된 엘라스토머/카본/세라믹스 나노입자계 복합재료에 대하여, 구성입자가 엘라스토머 기지상 중에 어떠한 형태로 분산/배합되고, 압축 시의 구조의 변화 및 변형에 대한 저항값의 변화를 미세조직 관찰을 통하여 평가하고, 또한 온도 의존성, 내구성 등의 실험을 통해, 도전성 입자/세라믹 나노입자의 분산성과 전기저항의 상관관계를 밝혀, 감촉센서로서의 기능향상을 도모하는 실험결과를 소개하고자 한다.

3. 도전원리 및 시료의 작성

3.1 도전원리

그림 1에는 감압 또는 감촉센서로서의 무기/유기 감촉센서재료의 도전원리를 도식화한 것이다. 도전원리는 고분자 매트릭스에 도전성 입자인 카본이 무가압 시에는 입자간 거리가 크지만, 가압의 경우에는 순차적으로 도전성 입자간 거리가 짧아지며 도전경로가 증가하여 전기저항값이 대수적으로 감소하는데 기인한다.

또한, 고분자는 온도에 의한 수축 및 팽창이 크기 때문에 저온에서는 수축하여 도전성입자 간 거리가 짧아지고, 고온에서는 팽창하여 입자간 거리가 길어지므로 같은 압력하에서도 온도변화에 의해 저항값은 변화한다.

즉, 이들의 특성은 기본적으로는 도전성입자의 입자간 거리에 의존하는 것에 있고 압력 및 온도의 변화에 의한 입자간 거리가 변화하고 다른 전기전도도가 얻어지는 것이다.

그러나 단순히 이 경우에는 on-off 적인 특성변화를 보이리라 생각되며 압력 및 변위에 대한 저항값의 직선성을 위해서는 엘라스토머 기지상 이외에도 탄성률이 다른 가교 엘라스토머 입자를 첨가하여 이를 개선할 수 있을 것이다.

3.2 시료의 작성

상기한 경우와 같이, 감촉센서는 전기저항값이 1~1000 kΩcm 사이에 변화하는 것이며, 압력/저항 특성의 직선성이 필요하다. 즉, **그림 2**에서 보는 바와 같이 압력/변위/저항값의 상관관계가 on-off 적인 특성 (a)가 아니라 직선성을 나타내는 (c)를 나타내는 재료 설계가 필요하다.

저항값의 경우, 주로 carbon의 체적분율에 의존하기에 본 연구에서는 먼저, 저항값이 1~1000 kΩcm 사이에서 변화되게 카본의 최적첨가량을 결정하기 위해서 카본의 첨가량이 미치는 저항치

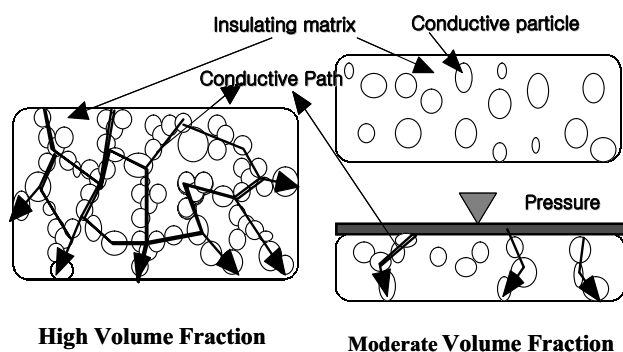


그림 1. 감압도전 원리와 구조.

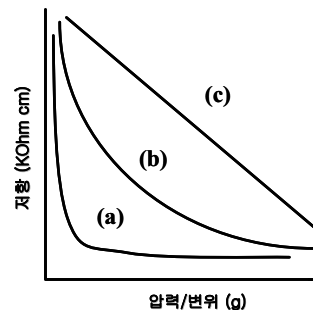


그림 2. 압축시험시의 저항/변위곡선 (a) On-Off 특성, (b), (a)와 (c)의 사이 특성, (c) 직선성을 가진 특성.

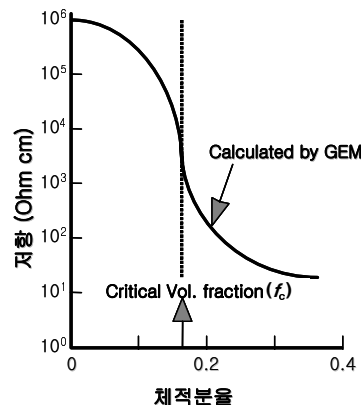


그림 3. 기지상인 엘라스토머의 저항값이 10⁶ Ωcm이고, 도전성 입자의 저항값이 1 Ωcm일 때 도전성입자의 체적분율에 의한 저항값의 변화(General Effective Media 이론으로 계산한 값). 그러나 본 계에 대해서는 실제의 임계체적분율 f_c 는 30 vol% 부근임.

의 변화를 조사하였다. General effective media(GEM)이론에서는 **그림 3**과 같이, 카본의 첨가량이 16 vol% 부근에서 저항값이 현저히 변화하지만(여기에서는 체적분율 f_c 로 표현)일반적인 실제의 재료에서는 f_c 는 16 vol% 이상이다. 또한, 분산이 특이한 경우에는 f_c 가 1 vol%이하의 경우도 있다. 본 계에서는 20 vol%부터 저항치가 급격히 변화를 시작하여 카본의 첨가량이 40 vol%까지 변화를 계속하여 이 이상이 되면 일정한 값을 나타내었다. 이것으로부터, 카본량이 30 vol%부터 40 vol%까지의 경우가 상기의 저항치의 조건에 부합되었다는 것으로 판단된다. 그러므로 시료전체의 체적에 대해 카본의 체적이 30~40 vol% 사이에 오도록 조제하고, 직선성을 개선하기 위하여 가교엘라스토머 분말과 알루미나나노입자(10 vol% 이하)를 첨가하여 특성을 평가하였다.

또한, 종래의 제조공정(혼합법)과는 다른 초음파 분산법과 엘라스토머를 용매에 부분적으로 녹이는 공정(초음파/용액법)을 적용하여, 도전성 카본입자의 분산과 기지상과 카본입자 혹은 기지상과 가교 엘라스토머와의 젖음성을 동시에 개선하는 방법도 제안하였다.

4. 압력/변위에 따른 저항특성

4.1 압력/저항특성

그림 4에는 카본의 양이 20 vol% 이하인 것(시료 a)과 30부터

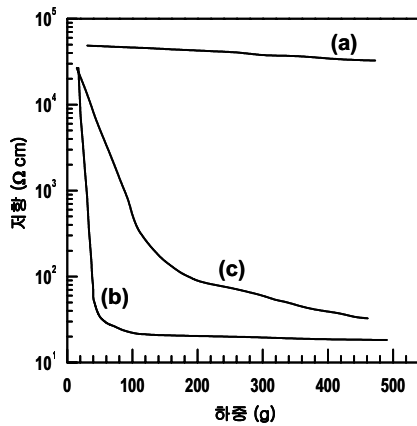


그림 4. (a) 카본량이 20 vol% 이하의 경우, (b) 카본량이 30 vol%에서 40 vol%첨가 엘라그토머/카본만의 복합체, (c) 카본량이 30 vol%에서 40 vol%첨가 엘라그토머/카본/세라믹나노입자/가교엘라스토머의 복합체.

40 vol% 사이의 첨가제(시료 b)의 압력/저항 특성을 나타낸다. 시료 a의 경우는 100 g까지의 압력의 변화, 즉 변위의 변화에 의한 저항치의 변화는 거의 없었다. 이것은 카본의 첨가량이 적어 상기한 것처럼 카본 도전체의 입자간 거리가 너무 길기 때문으로 생각된다. 그러나 시료 b의 경우는 압력에 의한 저항값의 변화는 1부터 1000 kΩcm 사이에서 또한 세라믹스 나노입자와 가교 엘라스토머 분말을 첨가한 재료(시료 c)에 있어서는 카본의 뿐만의 첨가제(시료 b)와 비교하여 직선성이 개선된 결과를 얻었다. 이는 가교 엘라스토머 분말이 제조공정에 있어서 유연성을 줌과 함께 압력에 대해서 전기적 신호의 응답성을 개선하고, 또한 알루미늄 나노입자가 복합체의 탄성 및 가교 엘라스토머 분말과 매트릭스 혹은 도전성 카본 입자와 매트릭스의 계면 강도의 상승을 유도한 것이기 때문이라 사료된다.

4.2 반복시험/경시변화/응답성

그림 5는 상기의 시료 c의 조성에서 일반적인 혼합법으로 제조한 복합체와 초음파법 및 용액법으로 제조한 복합체의 전기저항/압력관계의 반복시험결과를 나타내는 것이다. 혼합법으로 제조한 복합체에 대해서는 최초의 저항값은 실험횟수의 증가와 함께 서서히 감소하여, 3회째부터 안정된 값을 나타낸다. 이것은 엘라스토머탄성의 특이한 변형과 전기전도성 카본의 분산성에 의한 것으로 재료설계에 있어서 개선해야할 문제로, 저항/압력/변위특성의 직선성을 유지하면서 경시변화가 작은 복합재료를 제조하기 위해서는 1) 카본 분산성의 향상, 2) 기지상인 엘라스토머와 카본의 젖음성 개선이 필요 할 것으로 생각된다. 그러므로 초음파분산법과 엘라스토머를 용해하여 부분적으로 용해시켜, 또한, 알루미늄나노입자를 첨가하여 분산성과 젖음성을 동시에 개선하였다. 그 결과, 직선성이 우수하고, 경시변화가 작은 유/무기 감촉센서를 얻을 수 있었다 (**그림 5(b)**).

일반적으로 입자분산의 경우는, 입자의 첨가량과 입자의 크기가 결정되면 이상적인 입자 간 거리와 단위체적당 입자의 수는 계산으로 구하는 것이 가능하고, 또한, 이상점(이상적인 분산상태)과 실제의 SEM 사진으로부터 구한 입자간 거리와 입자의 수의 점과의 편차로부터 분산성을 평가하는 것이 가능하다. **그림 6**에는 SEM 사진 관찰로부터 얻어진 카본입자의 분산성을 조사한 결

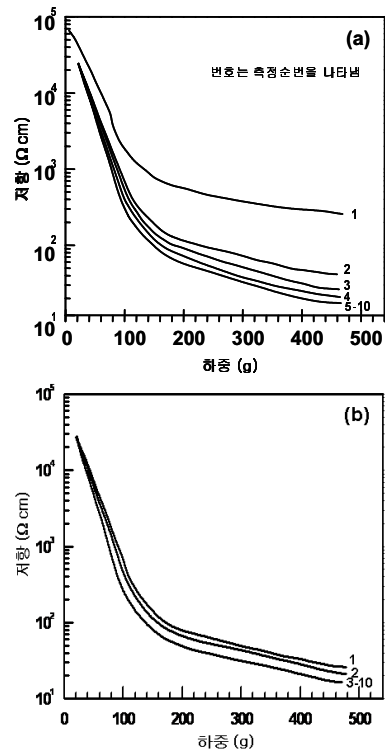


그림 5. (a) 혼합법에 의해 제조된 복합체의 저항/압력특성, (b) 초음파분산법과 용액법으로 제조된 복합체의 저항/압력특성.

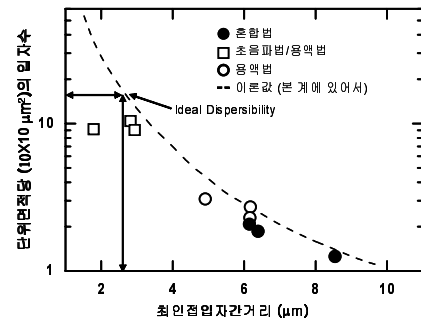


그림 6. 일반적인 혼합법으로 제조한 복합체와 초음파분산법과 용액법으로 제조한 복합체의 분산성.

과를 나타낸다.

일반적으로 혼합법으로 제조한 시료에서는 이상적인 분산상태로부터 단위체적당 입자의 수는 작고 제 1근접 입자간 거리는 긴 것의 결과로부터 분산성은 좋지 않다는 것으로 알았다. 반면에, 초음파법/용액법으로 제조한 시료에 대해서는 실험값이 이상분산상태에 가까운 것으로부터 카본의 분산상태가 향상된 것으로 판단된다.

또한 감촉센서로의 응용을 위해 중요한 인자로 생각되어지는 응답성을 조사한 결과를 **표 1**에 나타내었다. 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합체와 무첨가제의 부하시 생기는 전기적신호의 간극시간을 의미한다. Sampling time은 0.1 msec로 하였다. 이 결과, 무첨가제에 대해서는 2.8~5 msec이었으며, 알루미늄나노입자첨가제에서는 0.1 msec 정도였다. 이러한 응답성의 개선은 알루미늄 나노입자첨가에 의한 엘라스토머탄성의 향상과 계면강도의 개선에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 환경변화에 의한 특성의 변화

저온 및 고온에서 어느정도 시간으로 방치한 후 다시, 저항/압력 특성을 측정한 결과를 **그림 7**에 나타내었다. 본 복합재료를 구성하는 각각의 원료가 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 구조변화가 없기에 방치시간에 따른 특성변화는 약간은 있었으나 커다란 특성변화는 일어나지는 않았다.

또한 **그림 8**에 나타난 것처럼, 측정온도에 의한 일련의 변화를 얻을 수 있었다. 이것은 온도변화에 따라 복합재료가 팽창 및 수축을 하기에 입자간 거리의 변화에 기인하는 것으로서, 압력의 변화만이 아닌 온도 차이를 식별하는 의미로는 새로운 유/무기 감촉센서의 설계에는 적합하다고 사료된다. 또한 습도의 변화에 따른 특성의 변화를 보기위하여 실험을 행하였으나, 습도에 의한 저항의 변화는 미소한 변화는 관찰되었으나 큰 변화는 없었다.

표 1. 알루미늄 나노입자 첨가복합체와 무첨가체의 전기응답성

	응답시간	Sample No.
알루미늄 나노입자 첨가	3.3	1
	3.5	2
	2.8	3
알루미늄 나노입자 무첨가	0.1	1
	0.9	2
	1.2	2

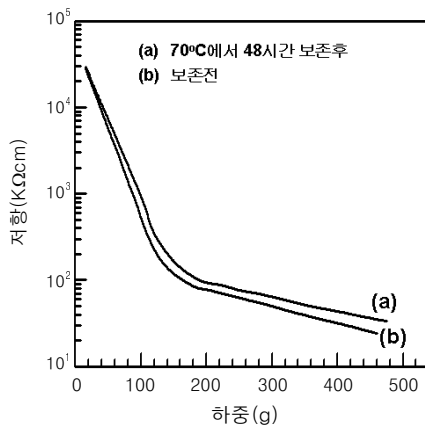


그림 7. 고온에서 방치 전후 측정한 저항/압력곡선.

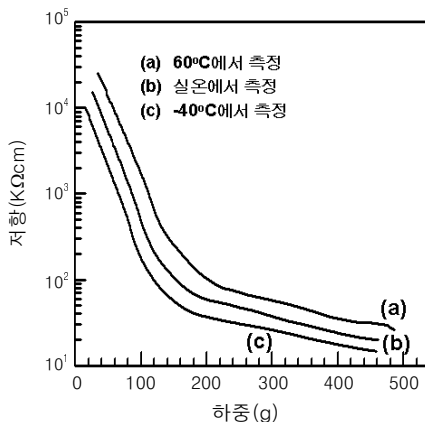


그림 8. 측정온도에 의한 저항/압력특성의 변화.

5. 기계적 특성

5.1 강도/신장률

표 2에는 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합재료와 무첨가재료의 인장강도와 신장률을 나타내었다(JIS K 6301 규격을 이용한 시험). 알루미늄 나노입자 첨가재료의 인장강도와 신장률에서 약 2배의 개선을 나타내었다. 이것은 알루미늄 나노입자가 복합체의 탄성변형 성능의 개선을 주는 것과 함께 기지상과 분산입자사이에 젖음성 또는 결합력을 강화한 것으로 판단된다. 무첨가체에 있어서의 파괴는 가교 엘라스터머 분말과 카본 분산상과의 계면으로부터 일어나는 것이 관찰되어 결국, 나노입자의 분산에 의해 계면강도의 비약적인 개선이 이루어졌다고 판단된다.

5.2 내구성

그림 9에는 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합재료와 무첨가체에 대한 최대하중 1 Kg까지의 평면가압 하에서 20만 회까지의 내구성시험 결과를 나타낸다. 알루미늄 첨가체에 대해서는 20만 회의 내구성시험 전후의 차는 무첨가체와 비교하여 현저한 개선을 보였다. 이것은 알루미늄 나노입자가 기지상과 카본 분산입자와 가교엘라스토머사의 젖음성을 개선하고, 또한 계면결합력을 개선한 결과에 기인함을 알 수 있었다.

그림 10에 나타난 것처럼 나노입자 무첨가체의 파괴는 가교엘라스토머나 카본 분산상의 계면에서 생기는 것으로 관찰되었으나, 알루미늄 나노입자 첨가체에 대해서는 계면에서의 microcracking

표 2. 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합체와 무첨가체의 인장강도와 신장률

	나노입자 무첨가체	나노입자 첨가체
인장강도 (Kgf/cm^2)	8.05	14.46
신장률 (%)	68	145

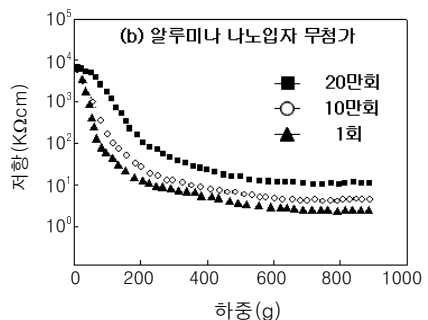
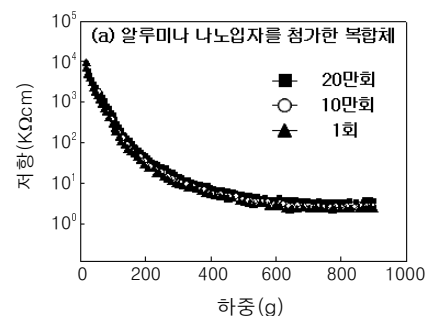
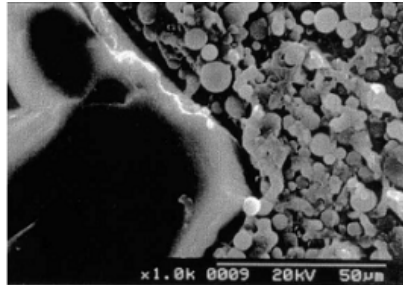
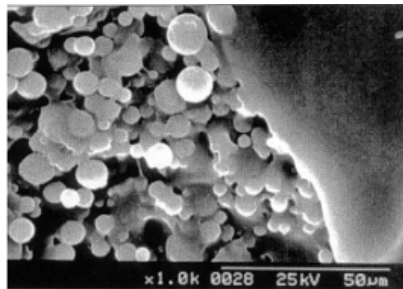


그림 9. 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합체와 무첨가체의 평면가압시 20만 회까지의 내구성.

이 생기지 않는 것뿐만 아니라, 기지상의 파괴도 관찰되지 않았다. 이러한 개선은 나노입자의 분산에 의해 계면강도의 비약적인 개선을 의미한다. 이는 **표 2**의 결과를 보더라도 알 수 있다. 그러나 **그림 11**에 나타난 것처럼, R 가압에서는 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합체에서는 20만회 내구성 시험 전후의 차이는 무첨가체와 비교하여 개선된 것으로 나타났지만 평면가압의 경우에는 다른 결과를 얻었다. 이는 후술할 FEM 해석에서 설명되는 응력분포의 차이에 기인한 것으로 사료된다.



(a)



(b)

그림 10. 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합체(a)와 무첨가체(b)의 평면가압에 의해 20만 회 내구성 시험을 한 후의 SEM 사진.

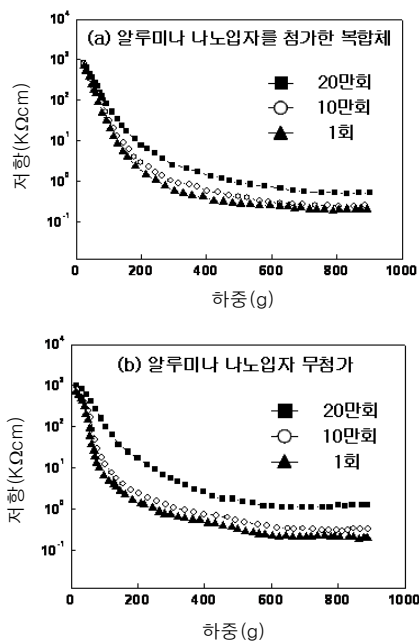


그림 11. 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합체와 무첨가체의 R가압시 20만 회까지의 내구성.

5.3 평면가압과 R가압의 응력분포

R가압에서는 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합재료의 20만회 내구성 시험 전후의 차이는 무첨가체의 결과와 비교하여 개선은 나타내었지만 평면가압과는 다른 결과를 보였다. 이는 평면가압과 R가압의 응력분포의 차이에 기인한다고 판단되는 바, FEM 해석을 행하였다. 실제응용에 있어서는 센서의 형상은 복잡하므로, 모델형상을 회전체로 변경하여 해석을 행하였다. 재료의 인자로 하여 직접 측정된 값을 사용한 결과, R가압의 경우가 평면가압의 경우보다 동일 하중일 경우 응력집중은 2~3배에 도달하고 이러한 높은 응력집중은 알루미늄 나노입자를 첨가한 복합재료의 계면강도 보다는 높다는 결과가 얻어졌다. 이 결과로부터, R가압에서는 **그림 10**에서도 나타난 것과 같은, 계면뿐만 아니라 기지상 내에서의 파괴가 관찰되었으나 한편 평면가압의 경우는 이러한 파괴는 관찰되지 않아 가압방법의 차이에 의한 응력분포에 의해 다른 파괴거동을 나타내는 것으로 판단된다.

6. 과제와 전망

유/무기 하이브리드 감촉센서의 개발을 목적으로 하여 유연성을 가지고, 내열성, 내식성에 우수한 엘라스토머를 기지상으로 하고, 도전성 입자로 하여서는 카본입자를 이용하고, 또한, 압력/저항변화의 직진성을 제어하기 위하여 가교 엘라스토머와 세라믹스 나노입자를 첨가한 하이브리드 소재를 제조하여, 제특성을 평가하였다. 그 결과, 제조한 복합재료는 감촉센서로의 응용에 불가결한 유연성을 가지며, 센싱에 필요한 압력/저항관계에 우수한 직진성과 신뢰성을 가지고, 또한 강도 및 신장 등의 기계적 특성이 개선되어, 다수의 공업 분야에서 그 응용이 넓어지리라 생각된다. 그 일례로 본재료는 Sony가 개발한[AIBO]로봇의 감촉센서로 실용화되어, **그림 12**에 나타낸바와 같은 [AIBO]의 머리부분에 탑재되었다.

이러한 센서에 의해 로봇이 머리 부분을 접촉하는 것을 상황에 따라 인지하여 학습하는 것이다. 이 이외에도 **그림 13**과 같은 의료기구용 터치센서, 게임기의 입력용, 카메라의 줌용 스위치, 정밀기기의 제어계, 음향기기 등의 응용에 적합한 소재라 사료된다.

그러나 본 복합재료의 경우, 엘라스토머 탄성을 나타내어 신뢰성의 면에서 금속 또는 세라믹스 등의 탄성을 나타내는 재료와 비교



그림 12. 실용화 예로 소개한 Sony의 [AIBO]로봇. 머리부에 감촉센서로 탑재되어 있음.

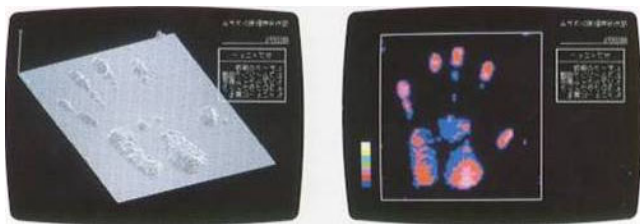


그림 13. 실용화의 예; 본 소재를 이용한 손압에 대한 전기신호 및 화상처리.

하여 아직 개선의 여지가 남아있고, 또한, 재료의 특성은 전극의 형태, 재료 표면의 형상 등의 재료·시스템에 의해 압력/온도의 센싱의 감도는 다르게 나타나며, 이후 많은 응용범위를 생각하는 경우, 재료설계뿐만 아니라 시스템의 설계도 이루어져야 한다고 판단된다.

7. 결론

본 기고에서는 감촉센서로 응용하기위한 조건을 제시하고, 이들의 특성을 얻기 위해 시료의 제조와 그 발현기구에 대해 조사하여, 그 결과를 이하에 나타내었다.

1) 감촉센서로 하여 중용한 특성의 하나로 생각할 수 있는 압력/저항특성에 대해 우수한 신뢰성/직진성을 나타내는 복합체가 얻어졌다. 이것은 엘라스토머/카본만의 복합체에서는 얻을 수 없었던 특성이었으며, 이는 엘라스토머에 세라믹 나노입자를 첨가하여 기지상과 각종의 분산상의 계면강도가 개선됨에 기인하고, 또한 이 계면 강도의 개선에 의해 기계적 특성이 개선되었다.

2) 초음파분산법과 엘라스토머를 용매에 부분적으로 용해시키고, 분산성과 젖음성을 동시에 개선하여, 카본의 분산성과 기지상인 엘라스토머와 카본간의 젖음성을 개선함으로 인해 직진성이 우수하고 경시변화가 작은 유/무기 감촉센서가 얻어졌다.

3) 환경의 변화(저온 및 고온에서의 방치, 습도변화 등)에 의한 특성의 변화는 본 계에서는 미미한 것으로 판단되어, 실용화의 면에서 감촉센서로의 기능을 나타내는데 있어 적당하다고 사료된다.

4) 온도에 의한 일련의 저항값의 변화가 감지되어, 압력의 변화뿐만 아니라, 온도차를 인지하는데 적당한 유/무기 센서예의 응용도 가능하리라 판단된다.

이를 바탕으로 일부 실용화에 적용된 감촉센서의 예를 소개하였다.

참고문헌

1. K. Niihara and Y.-H. Choa, *et. al.*, *Materials Integration*, **12**, 47 (1999).
2. Y.-H. Choa, M. Hussain, and K. Niihara, *Materials Integration*, **12**, 61 (1999).
3. M. Hussain, Y.-H. Choa, and K. Niihara, *J. of Materials Science Letters*, **20**, 525 (2001).
4. M. Hussain, Y.-H. Choa, and K. Niihara, *Scripta Materialia*, **44**, 1203 (2001).
5. M. Hussain, Y.-H. Choa, and K. Niihara, *Compos. Part A- Appl. Sci.*, **32**, 1689 (2001).
6. K. Niihara, Y.-H. Choa, *et. al.*, U.S. Patent US546861 (2000).
7. K. Bhattacharya and A. C. D. Chaklader, *Polym. Plas. Technol. Eng.*, **19**, 21 (1982).
8. E. K. Sichel, J. I. Gittleman, and P. Sheng, *Phys. Rev.*, **B18**, 5712 (1978).
9. D. Sherman, L. M. Middleman, and S. M. Jacobs, *Polym. Eng. Sci.*, **23**, 36 (1983).
10. D. S. McLachlan, *J. Phys. C; Solid State Phys.*, **C18**, 1891 (1985).
11. D. S. McLachlan, *Solid State Commun.*, **60**, 821 (1986).
12. D. S. McLachlan, *J. Phys. C; Solid State Phys.*, **C20**, 865 (1985).
13. D. S. McLachlan, *Solid State Commun.*, **72**, 925 (1989).