

## 금속입자 충전 복합재료의 전단응력에 따른 점도 및 전기 전도도 변화

이전웅 · 최동욱 · 이상수 · 김준경 · 박 민<sup>†</sup>

한국과학기술연구원 고분자하이브리드연구센터

(2002년 5월 4일 접수, 2002년 7월 31일 채택)

### Effect of Shear Stress on the Viscosity and Electrical Conductivity for the Metal-Filled Composite Materials

Geon-Woong Lee, Donguk Choi, Sang-Soo Lee, Junkyung Kim, and Min Park<sup>†</sup>

Polymer Hybrid Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>†</sup>e-mail : minpark@kist.re.kr

(Received May 4, 2002; accepted July 31, 2002)

**요약:** 전자파 차폐용 가스킷으로 적용할 수 있는 금속계 입자와 상온경화형 실리콘 수지의 페이스트계에 대한 정량적인 해석을 수행하였다. 금속입자 충전 복합재료의 전기 전도성 및 유변학적 거동은 입자의 형상, 크기, 분산상태에 많은 영향을 받는다. 고충전계에서 입자들은 매우 복잡한 응집 상태를 형성하며 전단속도와 같은 외부요인에 의해 응집구조가 변하고 이에 따라 전기 전도도가 달라지게 된다. 본 연구에서는 금속입자의 평균직경 및 분산성에 따른 영향을 점도측정 및 전기 전도도 측정 방법을 통해 해석하였으며 이를 통해 금속입자의 선정기준을 제시하였다. 금속입자의 종류에 따라 점도분포, 전단응력의 영향, 전기 전도성의 변화 등이 차이를 보였다. 상대적으로 직경이 큰 입자에서 전단응력에 의한 영향이 두드러지게 나타났으며 동일 함량에서 분산성의 제어를 통해 점도 및 전기 전도도의 개선이 가능함을 보였다.

**ABSTRACT :** This study aims at developing the conductive pastes consisting of room temperature vulcanizing (RTV) silicone and metal powder as matrix and filler, respectively. Electrical and rheological properties of metal-filled polymer composites are in general strongly affected by particle shape, size and dispersion state of the filler. In highly filled systems, particles tend to form very complex agglomerated structure which is easily changed when subjected to shear deformation. And the breakdown of agglomerated particles due to shear usually leads to the change of electrical conductivity of the composite. In this study, the effect of particle size and dispersion state of filler on the electrical conductivity of the composites are investigated to offer the selection criteria of conductive filler by measuring the rheological properties of uncured composites and the electrical conductivity of the cured composites. It was found that the type of metal filler systematically affected the rheological property, the susceptibility to shear and the degree of change of electrical conductivity of the composite. The effect of shear on the properties is more conspicuous in the composites containing large particle, indicating that both rheological and electrical properties can be improved by controlling the dispersion state at a given filler content.

**Keywords :** electrical conductivity, metal-filled polymer, RTV silicone, shear viscosity, dispersion state.

서 론

고정밀 전기·전자기기들은 회로가 소형화되고 정교해짐에 따라 전자파잡음에 장애를 받기 쉬운 상태로 되어가고 있으며 이러한 문제점의 해결을 위해 전자파의 방출을 억제하는 방법이 주로 사용된다. 일반적으로 통상의 차폐재료는 금속성질을 갖는 재료를 사용하여 전자파를 반사시키는 방법이 적용되고 있다. 특히 실리콘계 도전성 페이스트는 실리콘 자체의 고무성질을 이용한 개스킷으로의 용도가 포함되어 있다. 이들 개스킷의 목적은 첫째, 기기의 함체나 유닛에서 전자파가 내·외부로 방출 및 유입되는 틈을 없애주며, 둘째, 기기의 함체나 유닛에서 전자흐름의 연속성을 보장해 주고, 셋째 기타 방수 및 충격 등 외부적 요인에 대응할 수 있어야 한다.

본 연구에서 사용되는 금속입자 충전 복합재료의 중요한 특징은 입자의 충전비율이 높고, 페이스트 내에서 금속입자가 응집 상태로 존재하며 입자의 직경 분포가 다분산에 가까운 것이다. 입자 충전 복합재료의 유변학적 특성은 Einstein 연구 이후 많은 연구자들이 다루어 왔으나 고충전 및 다분산계의 점도거동은 현재까지 이론적인 접근이 어려운 상황이다.<sup>1-3</sup> 입도 분포와 점도의 관계는 Metzner에<sup>4</sup> 의해 잘 정리되었는데 입도의 분포가 단일에서 이중일 때 가장 큰 점도변화를 보이게 된다. 또한 금속입자들은 입자 상호간의 여러 가지 힘에 의해 서로 물리적으로 결합된 상태를 형성하며 분산에너지 증가에 따라 입자의 결합된 형태가 변화하며 단일 입자로 분산시키기 위해서는 높은 에너지가 필요하게 된다.<sup>5</sup>

금속입자 충전계에서 전기 전도성은 두 가지 요인에 의해 결정된다. 첫째는 입자간의 직접 접촉에 의한 것이고, 둘째는 터널링 효과, 즉 입자사이의 절연성 매트릭스 사이로 전자의 전도에 의한 전도성 부여이다. 전기전도는 페이스트 내에서 금속입자간의 전도 네트워크를 통해서 이루어지고 전기 전도도는 금속입자의 크기, 중횡비, 물리화학적 성질 뿐만 아니라 금속입자 함량, 분산 상태에 의존한다고 알려져 있다.<sup>6,7</sup> 체적 비저항과 금속입자 함량의 관계는 퍼콜레이션 이론에 의해 설명될 수 있다.<sup>8,9</sup> Figure 1에서 보여지듯이 초기에 입자를 첨가함에 따라 복합재료의 전기 저항은 거의 변함이 없다가 어느 일정 함량에서 저항

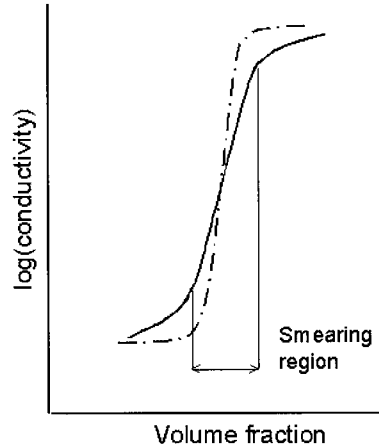


Figure 1. Idealized view of percolation threshold and dependence of composite conductivity on particle concentration.

이 급격히 낮아진다. 이 때의 입자 함량을 임계 함량이라 하고 임계 함량 이상에서는 계속 입자를 첨가해도 저항의 변화는 그리 크지 않다. 또한 점도에 있어서는 이와 유사하게 임계 함량을 기준으로 급격한 증가를 보인다. 이런 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. 낮은 입자 함량에서는 대부분 전도성 입자들이 서로 직접 혹은 근접하게 접촉되어 있지 않다. 따라서 전자가 터널링에 의해 전기전도를 할 수 있을 만큼 입자 간극이 작지 않기 때문에 페이스트의 체적 비저항은 저항이 높은 실리콘 매트릭스에 의해 좌우된다. 임계 입자 함량에서는 전도성 입자들이 서로 직접 혹은 근접하게 접촉되어 있는 경우의 수가 급격히 증가한다. 따라서 전자가 터널링에 의해 작은 입자 간극을 뛰어넘어서 전기전도를 할 수 있는 확률이 증가하고 페이스트 내에서 전도 네트워크의 형성에 의해 저항은 급격히 감소한다. 임계 함량 이상에서 일단 전도 네트워크가 형성되면 입자를 계속 첨가해도 전류방향으로 전기전도 통로의 가지수만 늘어나기 때문에 저항은 서서히 감소한다. 임계 함량은 입자의 중횡비의 영향을 많이 받는다. Figure 1에서 입자의 중횡비가 증가할수록 보다 적은 함량에서 전도 네트워크가 형성되기 때문에 그림의 곡선은 왼쪽으로 이동할 것이다. 또한 금속입자의 형상, 크기, 입도 분포에 따라서 곡선의 smearing 영역이 달라지게 된다.

대부분의 금속입자들은 제조방법상의 제한으로 불규칙한 구형에 가까운 즉 중형비가 1인 경우가 많다. 반면 크기에 있어서는 수 나노미터에서 수백 마이크로미터까지 가능하며 본 연구에서 다루는 도전성 페이스트에서는 중형비 효과보다는 금속입자의 평균크기, 분산도 등에 따른 변화, 혼합방법 등 외적인 영향에 따른 변화를 예측하고 검증하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 서로 다른 크기의 금속계 미세입자 2종과 상온 일액형 실리콘 수지를 도입하여 이들의 조합에 의한 도전성 페이스트를 제조하고 금속입자가 충전된 복합재료계의 유변학적 특성과 이에 따른 전기 전도도 특성을 분석하고자 한다. 세부적으로는 도전성 페이스트의 입자 함량, 입도 크기의 영향, 전단응력의 영향을 체계적으로 해석하고 고함량으로 충전된 금속입자 충전 복합재료에서 입자의 선정기준을 제시하고자 한다.

## 실 험

**재 료.** 금속입자는 은 (Ag)으로 코팅된 구리 (Cu)계 입자를 선정하였다. 은으로 코팅된 구리입자는 전도성 측면에서 은 입자와 유사하나 경제적인 면에서 우수하여 최근 전자과 차폐용 재료에 많이 적용되고 있다. 입자는 크기에 따라 두 종류를 선정하였으며 입자의 분산도 측정은 입도분석기, 입자의 형상은 주사현미경 (SEM)으로 파악하였다. 매트릭스로서 전기절연성, 내화학성, 내열성, 환경친화성 등이 우수한 실리콘 수지계를 선정하였으며 일액형 상온 습기경화형을 선택하였다. 실리콘고무는 전기적인 특성과 함께 환경적인 특성으로 개스킷류로 적용되는 차폐재료로 적용하기에 우수한 특성을 가지고 있다.

**페이스트 제조 방법.** 페이스트 제조를 위해 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 금속입자 표면의 잔류 용제와 내부 수분제거를 위해 혼합 전 80 °C 이상의 송풍건조기에서 2시간 건조하여 사용하였다. 일액형 상온경화형 실리콘 수지는 반응성의 억제를 위해 냉동보관하였다. 두 재료의 혼합은 수분이 차단된 글로브 박스 내에서 실시하였으며 상대습도는 10% 이내로 조절하였다. 글로브 박스 내에서 두 재료를 혼합한 후 주사기에 삽입하고 냉동보관하였다. 특히 점도 측정을 위한 페이스트 제조는 혼합 시 습도에 따라

**Table 1. Material Composition for Metal-Filled Polymeric Paste**

sample code	particle A	particle B	RTV silicone		
	(%)	(%)	(%)	wt%	vol %
CUA1	75	-	25	75	23
CUA2	80	-	20	80	28.5
CUA3	82.5	-	17.5	82.5	32
CUB1	-	70	30	70	20.5
CUB2	-	75	25	75	25
CUB3	-	80	20	80	30.5

재현성에 문제가 발생하므로 상대습도를 5%로 유지하였고 측정시에도 습도 차단이 되도록 주의하였다. 페이스트의 총량은 20 g으로 하였으며 소형 페이스트 믹서를 이용하여 혼합시간을 10분으로 일정하게 유지하였다. 금속입자 A와 B 그리고 실리콘 수지의 혼합비율은 Table 1에 나타내었다. 혼합은 중량비 (wt%)로 하였으며 부피비 (vol%)는 각 금속입자의 고유밀도를 이용하여 환산하였다.

**점도 측정.** 실리콘 수지 및 페이스트의 점도는 정적 조건에서 전단속도에 따라 측정하였다. 비교적 저점도계인 실리콘 수지와 저함량 페이스트는 Brookfield HBDV III+ 모델의 cone/plate method를 사용하였으며 고점도 페이스트계의 점도는 Paar UDS기종의 plate/plate method를 사용하였다. 페이스트의 점도 측정시 습기 노출에 따른 경화반응이 진행될 수 있으므로 탈수처리된 공기를 주입하면서 수행하였으며 온도는 30 °C를 유지하였다. 점도측정은 전단속도 0.1 ~ 10 sec<sup>-1</sup> 범위에서 정적 점도측정, 동일 전단속도 범위에서 증가-감소-증가의 방법으로 3회 연속측정, 일정 전단속도에서 시간에 따른 점도측정 등을 실시하였으며 plate/plate 간격을 1, 0.8, 0.5 mm로 하여 각각 측정하였다. Plate 간격의 감소는 전단응력의 증대를 의미하며 전단응력 증가에 따른 입자의 분산성 및 점도, 전기전도도의 영향을 측정하였다.

**체적 비저항 측정.** 제조된 금속입자 충전 페이스트의 체적 비저항은 접촉저항의 효과를 없애기 위하여 ASTM D991-89에 따른 4 탐침법을 이용하여 측정하였다. 이 때 시편의 길이는 160 mm, 폭은 20 mm로 하였으며 전위 전극간의 거리 및 전류 전극간의 거리는 각각 40 mm와 120 mm로 하였다. Figure 2는 체적 비저항 측정을 위한 장치를 도식적으로 나타

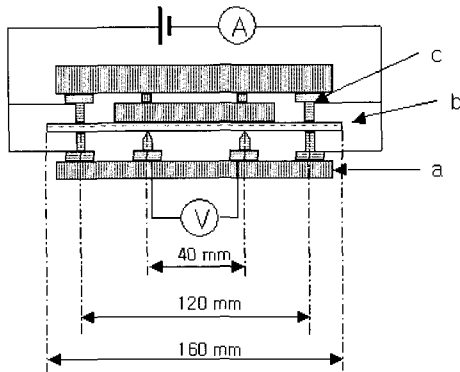


Figure 2. Set-up of measuring volumetric resistivity of paste sheet using a four-probe method (a: Teflon, b: test sheet, d c: metal).

내고 있다. 안정된 전압은 Type 2553 DC Voltage Current Standard (Yokogawa Electric Works Ltd, Japan)을 사용하여 공급하였고, 전류계는 3466A Digital Multimeter (Hewlett-Packard, USA), 전압계로는 6512 Programmable Electrometer (Keithly, USA)를 각각 사용하였다. 비저항 값은 시편 당 5회 실시하였으며 5~6 시편에 대한 시험결과의 평균값으로 하였다.

체적 비저항의 값은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\rho = \frac{Vwdk}{Il}$$

여기서  $\rho$ 는 체적비저항 ( $\Omega \cdot m$ ),  $V$ 는 전위 전극간의 전위차,  $I$ 는 전류 전극간의 전류,  $w$ 는 시편의 폭,  $d$ 는 시편의 두께,  $l$ 은 전위 전극사이의 간격,  $k$ 는 단위 환산인자이다.

### 결과 및 고찰

재료 선정 및 분석. 상온경화형 일액형 (RTV) 실리콘은 전기·전자·일반공업용으로 사용되는 액상 또는 페이스트상 고무이다. 오늘날 소형·경량화, 고성능·다기능화 추세에 따라 전기·전자기기의 구성 부품과 재료에 있어서도 한단계 높은 품질과 고도의 기능을 요구하고 있으며 실리콘 수지계는 내열, 내한

성, 내후성, 전기특성 등 수 많은 뛰어난 성능을 발휘하여 전기·전자기기 및 통신기기의 신뢰성 향상에 기여하고 있다.<sup>10</sup> 일반적으로 RTV 실리콘은 경화제, 촉매, 반응억제제, 용제 등이 미리 혼합되어 습기 노출시 경화반응에 의해 고무화되는 소재로서 경화 조성에 있어 신뢰도가 높은 편이나 보관 및 사용기간의 문제점이 있다. 특히 경화시에 발열, 취속 등의 문제가 없어 고정밀기기에 직접 적용할 수 있다는 장점이 있어 본 연구에서 목표로 하는 고성능 도전성 페이스트의 기본재료로서 매우 적합하다 할 수 있다.

도전성 페이스트에 적용하기 위한 RTV 실리콘 수지계 선정을 위해 주요 실리콘 생산회사 제품들의 특성을 비교 평가하였다. 도전성 페이스트의 매트릭스로서 사용시 금속계 입자들의 충전에 의해 페이스트 자체의 점도가 매우 높아지므로 비록 유기용매에 의해 미세 조정이 가능하다 하더라도 초기 실리콘 수지의 점도는 낮은 제품을 사용하는 것이 유리하다. 고점도 제품의 경우 혼합효과가 매우 떨어져 입자 분산이 원활하지 않았으며 유기용매를 도입하면 점도 시험 중 휘발성에 의한 점도변화를 보이게 된다. 예비 실험을 통하여 전기전도성이 부여되는 입자 함량에서 주사기를 통한 도포가 가능한 수준의 페이스트를 얻기 위한 초기 실리콘 수지의 점도를 결정하였다. 전단속도  $1 \text{ sec}^{-1}$ 에서  $20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  이하의 점도를 갖는 실리콘 수지의 사용이 분산효과에 있어 가장 우수함을

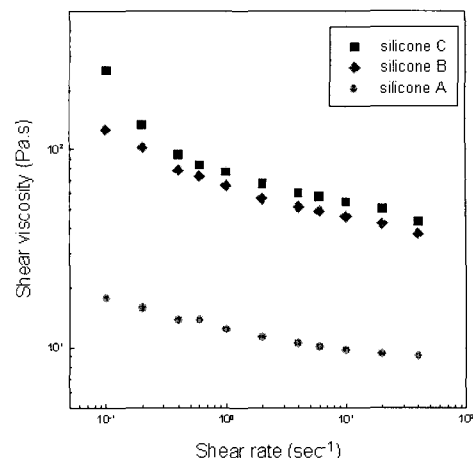


Figure 3. Plot of shear viscosity vs. shear rate for various RTV silicone resins.

확인하였다. Figure 3은 대표적인 몇 종의 실리콘 수지의 기본 점도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 실리콘 수지의 점도는 제품에 따라 매우 다르며 특히 페이스트형은 자체적으로 미세입자(예, fumed silica)를 포함하고 있거나 분자량이 큰 올리고머 상태에 존재하여 매우 높은 점도분포를 보여준다. 종합적으로 각 제품의 특성으로부터 혼합의 용이성과 페이스트의 점도 제어를 위해 신에츠사의 무색 저점도 제품(A)을 선정하여 페이스트계에 적용하였다.

도전성 재료로 적용가능한 입자 종류의 예를 들면 카본블랙이나 그래파이트 그리고 은, 니켈, 구리 등의 각종 금속분말, 각종 비도전성 분체나 단섬유 등의 표면을 은, 니켈 등의 금속계로 처리한 것, 탄소섬유, 금속섬유 등을 혼합한 것이 적용되고 있다. 이와 같은 도전성 재료들은 요구되는 체적 비저항의 범위에 따라 그 종류와 함량이 결정되며, 특히  $10 \Omega \cdot \text{cm}$  이하의 고도전성 재료를 얻고자 하는 경우에는 이들 중 은, 니켈 등의 금속분말이 다량으로 사용되고 있다.

일반적으로 금속의 전기 전도도는 원소의 화학적 및 물리적 특성에 의존하며 고유 비저항 수치는 은 ( $1.59 \mu\Omega\text{cm}$ ), 구리 ( $1.67$ ), 금 ( $2.35$ ), 알루미늄 ( $2.65$ ), 니켈 ( $6.84$ ) 등의 순으로 알려져 있다.<sup>7</sup> 이상에서 보는 바와 같이 은(Ag)은 모든 원소들 중에서 최고의 전기 전도도를 보여주며 유일한 단점은 매우 고가라는 점이다. 본 연구에서는 차폐효율을 높이면서 경제성을 얻을 수 있는 은으로 코팅된 구리입자를 선정하

였다. 예비실험을 통해 다양한 직경을 갖는 입자들의 전기전도성 및 점도 특성을 비교하였다. 실험에 사용된 금속입자들 중 가장 극단적인 차이를 보여주는 입자들의 입도분석 결과를 Figure 4에 도시하였으며 입자의 형상은 Figure 5에서 보여주고 있다. 그림에서 각 입자의 상대적인 크기 차이는 대략 10배 정도이며 외관은 불규칙적인 구형의 형상이다. 두 금속입자는 각 입자의 크기 및 형상에 기인한 점도 및 전기 전도도의 변화를 분석하기 위해 선정되었으며 페이스트에서 다른 거동을 보여주었다.

정적 점도 분포. 일반적으로 실리콘 수지에 미세금

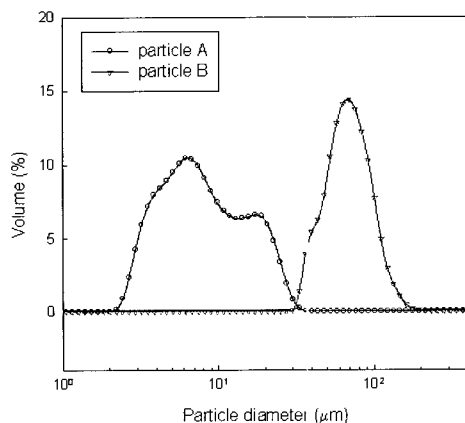
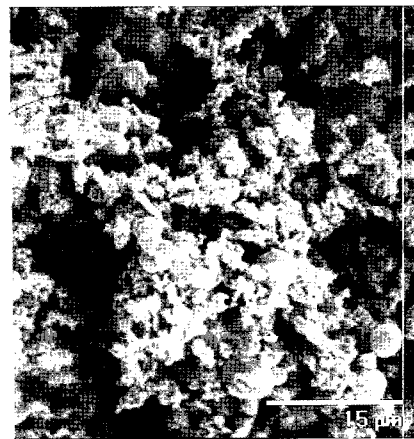
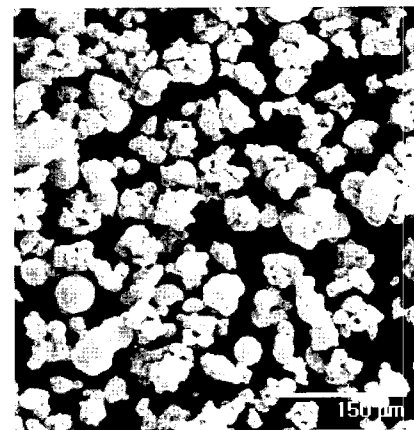


Figure 4. Particle size distributions of selected metal powders.



(a)



(b)

Figure 5. SEM Photographs of selected metal powders. (a) particle A and (b) particle B.

속입자를 함유한 경우 페이스트의 점도분포는 몇가지 특성을 보이게 된다. 첫째는 전단박화(shear thinning) 현상으로 전단속도의 증가에 따라 점도가 감소하는 현상이며 둘째는 thixotropy 현상으로 동일한 전단속도하에서 시간에 따라 점도가 감소하는 현상이다.<sup>11,12</sup> 이는 미세 입자계의 특징으로서 전단응력장(shear field)에서 시간에 따른 입자의 재배열이 발생함에 기인한다. 금속입자 A, B를 포함한 실리콘 페이스트의 함량별 전단속도에 따른 점도분포를 Figure 6에 나타내었다. 작은 직경의 입자 A는 두 가지 특징을 보여주고 있는데 함량에 따른 점도변화 폭이 좁고, 전단박화의 정도인 power law index가 큰 것이다. 반면 큰 입자로 구성된 B는 함량에 따라 점도변화 폭이 크고 상대적으로 전단박화 정도가 적은 특징을 보여준다. 입도분포 결과에서 보듯이 A의 경우가 분포도가 크며 이에 기인하여 전단응력 증가에 따른 입자의 재배열에 의해 전단박화 현상이 커진 것으로 해석할 수 있다. 입자 직경에 따라 최대 충전부피가 달라지며 입자 B의 경우 충전함량에 따라 급격한 점도증가를 보인다. 또한 부피분율 30.5%에서는 매트릭스가 전단응력을 견디지 못하고 박리(delamination)가 발생함을 알 수 있다. 이 때에는 이론적으로 shear thickening이 발생할 수 있으며 실험적으로는 매트릭스 박리 문제로 확인할 수 없었다.<sup>13</sup> 점도측정에서 plate/plate 간격을 1, 0.8, 0.5 mm로 하여 함량별로 측정된 결과는 Figure 7에서 보여주고 있다. Plate 간격의 감소는 전단응력의 증가를 의미하며 입자 A

는 plate 간격이 작아짐에 따라 상대적으로 더 큰 점도 차이를 보여준다. 이는 입자의 종류에 따라 두께 방향의 입자분산에 영향을 미칠 수 있는 전단응력 정도가 다름을 의미한다. 입자 B는 함량 증가에 따라 전단응력의 영향이 감소하여 30.5 vol%에서는 유사한 점도분포를 보여주고 있다. Figure 7에서 보는 바와 같이 입자의 직경에 따라 점도 상승곡선이 달라지며 입자 B는 급격한 증가를 입자 A는 완만한 증가를 보여준다. 퍼콜레이션 이론에서 임계점을 기준으로 점도의 급격한 증가를 보임에 상기할 때 입자 B는 세 개의 함량 모두 임계점을 넘어선 것으로 판단된다. 반면 입자 A는 적용된 혼합 함량 범위 내에 임계점이 있는 것으로 판단된다.

Figure 8은 전단속도 반복시험에서 나타나는 현상을 보여주고 있다. 일반적으로 금속입자들은 여러 가지 응집력에 의해 많은 응집체를 형성하며 이는 전단응력 등에 의해 분리된 후 다시 재결합하는 가역적 응집과 분리된 상태를 유지하는 비가역 응집으로 구분되며 본 연구에 사용된 입자 모두 전 함량에서 비가역적 응집현상이 관찰되었다. 그림에서 전단속도 증가 후 감소할 때 나타나는 이력현상(hysteresis) 즉, 초기 점도로부터 감소하는 현상을 명확하게 보여주며 이는 입자가 외부응력에 의해 분산된 후 외부응력을 제거해도 분산성이 변하지 않는 비가역적 응집상태임을 의미한다. 상대적으로 직경이 큰 입자 B는 입자간 응집력이 크다 할 수 있는데 그림에서 보는 바와 같이 plate 간격이 감소할수록 즉 전단응력이 증가할수

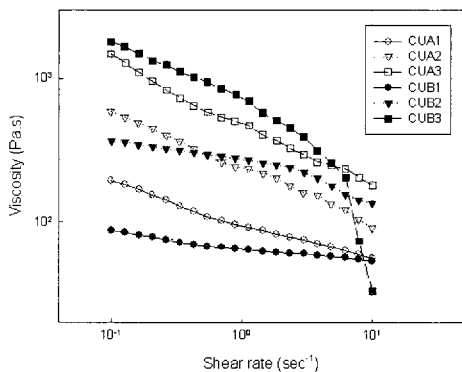


Figure 6. Plot of shear viscosity vs. shear rate for various mixing compositions(plate depth, 1mm).

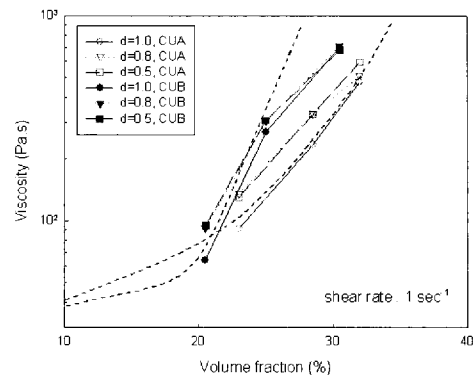
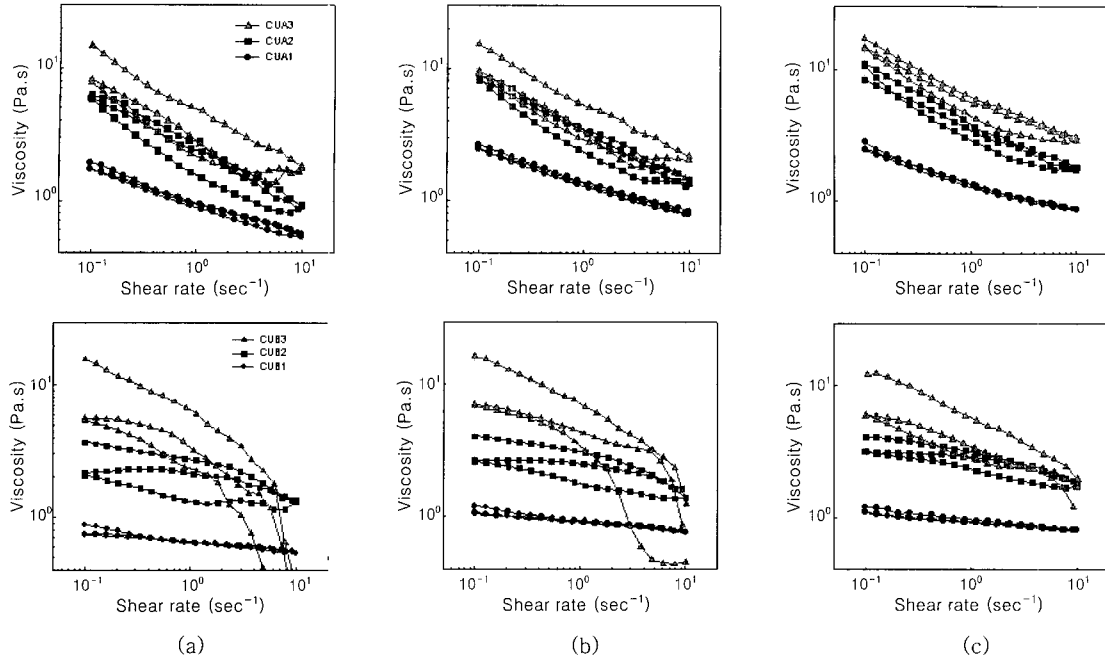


Figure 7. Viscosity vs. particle concentration at different plate depths(shear stress).  
----- estimated profile.



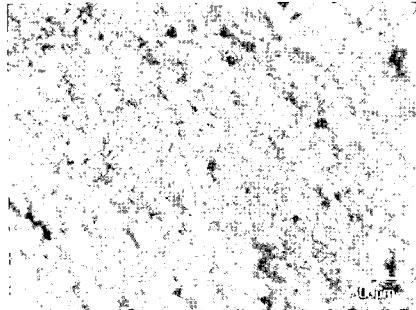
**Figure 8.** Viscosity hysteresis of different compositions at various plate depths. (a) depth=1.0 mm, (b) depth=0.8 mm, and (c) depth=0.5 mm.

록 비가역 응집현상을 보여주며 직경이 작은 입자 A에서는 작은 전단응력에도 비가역 응집현상을 보여준다. 간격 0.5 mm에서는 초기에 입자 재배열이 완료되어 두 번째 전단속도 증가에서도 유사한 점도를 보여주고 있다. 이상과 같이 금속입자 충전 복합재료계의 전단응력에 따른 점도측정으로부터 분산계에 대한 많은 정보를 얻을 수 있으며 이로부터 금속입자의 선정 및 설계자료로 활용할 수 있다.

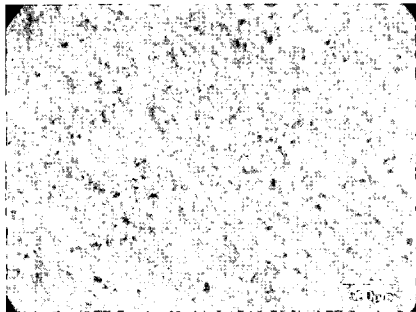
전단응력을 부여한 페이스트를 plate/plate 사이에서 자연경화시킨 후 단면을 현미경으로 관찰하였다. 입자 A는 모든 함량에서 균일한 분산이 관찰되었으며 입자 B는 전단응력 유무에 따라 많은 차이를 보여주고 있다. Figure 9에서 (a)는 단순 혼합 후 전단응력 없이 경화시킨 것이고 (b)는 0.5 mm 간격에서 전단응력을 부여한 것이다. Figure (a)에서 입자들의 응집체가 많이 보이며 전단응력하에서 다시 혼합된 (b)에서는 매우 균일한 분산상태를 확인할 수 있다.

전기 전도도 및 체적 비저항. 금속입자들은 분산도는 비슷하나 입자의 평균 직경이 다른 입자계로 선정되었으며 이들 페이스트상의 입자 함량 및 전단 응력

의 차이에 따른 체적 비저항을 측정하여 전기 전도도 (1/체적비저항) 향으로 Figure 10에 도시하였다. 그림에서 입자 A의 경우 퍼콜레이션 함량이 대략 75~80 wt% 범위내에 존재하며 입자 B는 70 wt% 이하에 존재함을 알 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이 함량에 따른 점도거동도 이와 유사한 경향을 보여주고 있다. Figure 7과 10에서 입자 함량에 따른 점도거동과 전기 전도도의 경향이 동일하게 나타나며 예상되는 변화곡선을 점선으로 표시하였다. 입자의 평균직경이 큰 경우 퍼콜레이션 농도가 상대적으로 작아지며 이는 입자의 크기가 커질수록 동일함량에서 입자들이 접촉할 수 있는 확률이 커지는 것을 의미한다. 두 번째는 전단응력에 따른 전도성의 변화를 보여주고 있는데 입자 B의 경우 전단응력 증가에 따라 비저항의 감소를 명확하게 보여준다. 즉 낮은 함량에서도 입자의 응집 제어를 통해 높은 전도성을 얻을 수 있음을 의미한다. 반면 입자 A는 전단응력에 따라 오히려 비저항이 증가하며 이는 두 금속입자의 응집 특성 및 분산성의 차이에 기인한다. Figure 11은 이와 같은 현상을 개략적으로 도시한 것이다. 작은 크

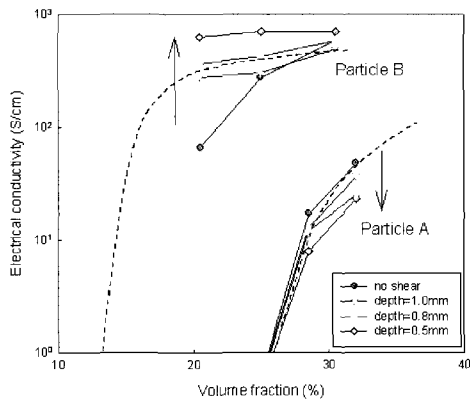


(a)



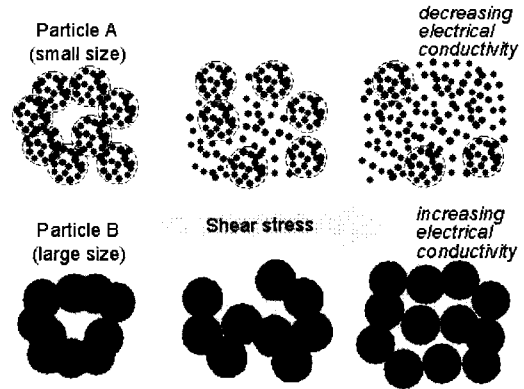
(b)

**Figure 9.** Photographs of cured composites by optical microscope. (a) no shear after mixing and (b) shear in depth 0.5 mm.



**Figure 10.** Electrical conductivity vs. particle concentration at different plate depth (shear stress). ----- estimated profile.

기의 입자들은 응집된 상태일 때 내부에 공극을 포함하여 오히려 부피분율이 높은 상태를 유지하므로 전



**Figure 11.** Schematic representation for depicting the change of agglomerated particle structure with increasing shear stress.

도 메카니즘을 충족하지만 입자 분산이 개선되어 응집구조가 깨지게 되면 단일 입자간 간극이 증가하게 되어 전도성의 저하를 초래하는 것으로 판단된다. 이상과 같이 유사한 형상의 입자에서도 평균직경의 차이에 따라 서로 다른 경향을 보여주며 입자 선정 문제가 중요함을 판단할 수 있다.

경제성 측면에서 고가의 은 또는 은으로 코팅된 구리 입자함량을 제어하는 것은 매우 중요한 문제이며 금속계 입자 충전 전자파 차폐재료 설계시 금속입자의 설계는 가장 중요한 문제가 된다. 본 연구는 고효율의 전자파 차폐를 달성하기 위한 개스킷용 페이스트계의 금속입자 선정을 위한 기반 연구로서 기존에 잘 알려진 중형비 효과 외에 금속입자의 크기 및 분산제어에 따른 영향을 분석하였다. 전기 전도도는 전자파 차폐재료의 차폐효율 (shielding effectiveness)을 결정하는 직접적인 요소이며 입자 종류에 따른 분산제어가 매우 중요함을 보여주고 있다.

## 결론

전자파 차폐용 개스킷으로 적용할 수 있는 금속계 입자와 RTV 실리콘 수지의 페이스트계에 대한 정량적인 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 금속입자의 평균직경 및 분산성 제어에 따른 영향을 점도측정 및 체적 비저항 측정 방법을 통해 해석하였으며 금속입자의 선정시 중형비의 제어 외에 입자 직경 및 분산



제어가 중요함을 제시하였다. 금속입자의 종류에 따라 점도분포, 전기 전도성이 차이를 보였으며 전단응력에 따른 입자 분산성의 변화와 이에 따른 전기 전도도의 영향을 규명하였다. 상대적으로 직경이 큰 입자에서 전단응력에 의한 영향이 두드러지게 나타났으며 동일 함량에서 분산성의 제어를 통해 점도 및 전기 전도도의 개선이 가능하며 도전성 페이스트의 경제성을 확보할 수 있음을 보였다.

### 참 고 문 헌

1. C. W. Macosko, "Rheology: Principles, measurements and applications", VCH Pub. Inc., NY, 1994.
2. G. K. Batcheler, *J. Fluid Mech.*, **83**, 97 (1977).
3. J. Mewis and A. J. B. Spaul, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **6**, 173 (1976).
4. A. B. Metzner, *J. Rheology*, **29**, 739 (1985).
5. R. N. Rothon, "Mineral Fillers in Thermoplastics: Filler Manufacture and Characterization", *Advanced in Polymer Science*, vol. 139, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
6. J. M. Margolis, "Conductive Polymers and Plastics", Chapman and Hall, NY, 1989.
7. S. K. Bhattacharya, "Metal-Filled Polymers: Properties and Applications", Dekker, NY, 1986.
8. V. I. Roldughin and V. V. Vysotskii, *Prog. Organic Coatings*, **39**, 81 (2000).
9. B. Lundberg and B. Sundqvist, *J. Appl. Phys.*, **60**, 1074 (1986).
10. H. R. Ryu, *Semiconductor monthly*, **Nov.** 67 (1996).
11. J. Mewis, L. M. DeGroot, and J. A. Helsen, *Colloids and Surfaces*, **22**, 271 (1987).
12. T. Lemke, F. Bagusat, K. Kohnke, K. Husemann, and H.-J. Mogel, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **150**, 283 (1999).
13. Y. Otsubo, *Chem. Eng. Sic.*, **56**, 2939 (2001).