

특집 : 카본 나노튜브의 활용

전자 패키징 Interconnect 소재로의 카본 나노튜브의 활용

이종현

서울산업대학교 신소재공학과

Utilization of Carbon Nanotubes for New Interconnect Materials in Electronic Packaging

Jong-Hyun Lee

서울산업대학교 신소재공학과

(2009년 6월 11일 접수: 2009년 9월 21일 게재확정)

Abstract: Carbon nanotube(CNT)s have been considered as one of the most unique materials due to their superior mechanical, thermal and electrical properties. Therefore, numerous studies have been performed for the utilization of CNTs. This review article focuses on the recent research trends on the utilization of CNTs for new interconnect materials in electronics packaging. Major contents mentioned are the direct interconnection technology using CNTs and the main properties of polymer/CNTs composite materials. This article is aimed at the reviewing of important results from the recent studies and providing the straightforward understanding of the results through the mutual analysis and a industrial viewpoint.

1. 서 론

현재 상업적으로 양산되고 있는 나노 소재 중 카본 나노튜브(carbon nano tube, CNT)는 많은 연구자들의 관심을 받고 있는 대표 물질 중 하나이다. CNT는 1991년도부터 그 정체가 보고된 이후¹⁾ 신소재로서의 적용 가능성이 지속적으로 검토되고 있는데, 이는 CNT가 우수한 기계적, 열적, 전기적 특성을 가지고 있는 것에 기인한다. 일례로 CNT의 최대 인장강도는 30~150 GPa에 이르고,^{2,4)} 열팽창계수(Coefficient of Thermal Conductivity, CTE)는 300 K에서 약 $-1.0 \times 10^{-6}/K$ 로 극히 낮으며,⁵⁾ 열전도도는 3,000~6,000 W/mK,^{6,7)} 전기전도도는 10^4 S/cm에 이르는 것으로 보고되고 있다.⁸⁾ 전자 패키징 분야도 예외가 아니어서 다양한 형태의 전자 패키징용 소재로의 적용을 목표로 CNT를 사용한 연구 결과들이 최근 몇 년간 매우 빈번히 보고되고 있다. 그리고 그 중 가장 많은 내용을 차지하는 것이 interconnect 소재로의 CNT 적용 사례이다.^{9,12-28,30-33,40,41)} 현재 interconnect 소재로 CNT를 적용하는 대표적인 연구주제로는 직접적인 CNT interconnect를 형성하기 위한 효과적으로 공정을 제시하거나, 고분자 레진 또는 솔더와 CNT를 섞은 복합재료로 가공하여 interconnect 소재로서 원하는 물성을 획득하는 내용으로 나눌 수 있다.

전자 패키징의 interconnect 소재로서 CNT가 적용되어야 하는 이유를 설명하면 다음과 같다. Fig. 1은 interconnect의 높이에 따른 기생 R, L, C 값의 변화와 각 interconnect 높이 영역에서의 대표 소재를 결합시켜 보여준다.⁹⁾ R, L, C 값 중 특히 인덕턴스 L 값은 interconnect의 높이에 따라 매우 급격하게 변화되는 것을 알 수 있는데, 미래의 10~28 GHz의 고주파수 및 20 Gbps의 고 signal bandwidth를 만족시키기 위해서는 10 pH 이하의 L 값이 요구되는 것으로 분석되고 있다. 따라서 전기적 물성 입장에서 바라본 미래의 interconnect의 높이는 20 미크론 이내로 형성되어야 하는 상황인데, 이는 interconnection 기술의

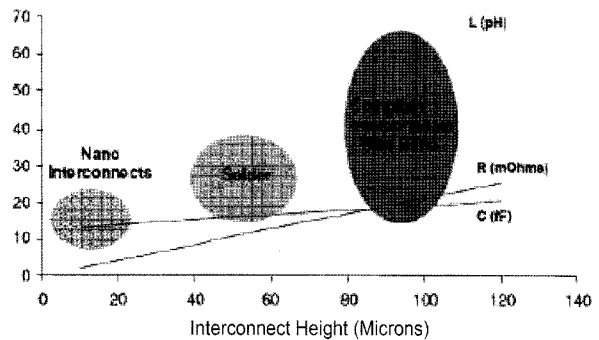


Fig. 1. Electrical parasitic for different chip/package interconnection technologies.⁹⁾

*Corresponding author
E-mail: pljh@snut.ac.kr

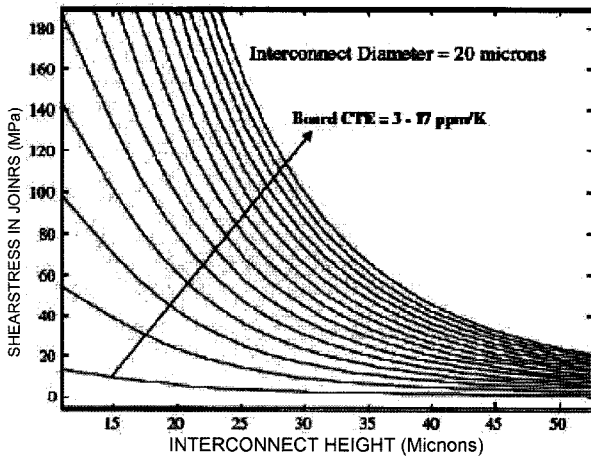


Fig. 2. Role of interconnect height in lowering the interfacial stress in interconnects.⁹⁾

roadmap을 보여주는 보고 자료들에서 제시하고 있는 interconnect dimension의 목표치와도 잘 일치한다.¹⁰⁾ 현재로서는 이러한 전기적 특성을 만족시키는 interconnection 재료가 무엇이라고 단정적으로는 말하기 힘든 상황이나 많은 연구자들이 그것은 나노 물질이 사용된 소재가 될 것이라는 데에 주목하며 관련 연구를 수행하고 있다.

앞서 언급된 수준의 미세 접합부 설계는 필연적으로 열적, 기계적 거동의 저하를 야기시키게 되는데, 그 예로서 Fig. 2는 interconnect의 높이에 따라 열팽창계수의 차이에 의해 접합부에서 발생하는 전단 응력(shear stress)값의 변화를 보여준다.⁹⁾ Interconnect의 지름을 20 μm 으로 설정했을 때, 보드(board)부의 열팽창계수 값이 3 ppm/K 수준까지 극적으로 작아지지 않는 한 interconnect의 높이가 감소함에 따라 접합부의 전단 응력은 기하급수적으로 증가하는 거동이 예측됨을 알 수 있다. 즉, 솔더와 같은 현재의 접합 소재는 이러한 수준의 응력을 견딜 수 없는 것으로 판단되기에 기계적 물성 관점에서 기존 솔더보다는 충분히 향상된 피로 특성을 나타내는 새로운 interconnect 소재의 개발이 요구된다고 하겠다. 많은 연구자들은 이러한 기계적 물성 관점에서의 문제점을 해결할 수 있는 소재로도 역시 나노 물질이 사용된 소재를 고려하고 있어 나노 물질이 사용된 interconnect 소재의 개발은 전기적, 기계적 관점에서 필수불가결한 흐름으로 판단된다.

현재로서는 앞서 언급된 차세대 interconnect 부의 문제점, 즉, 전기적, 열적, 기계적 특성의 부족을 동시에 해결할 수 있는 가장 적합한 나노 소재로 CNT가 고려되고 있다. 종횡비가 큰 CNT의 전형적인 형태는 복합재료의 필러로 첨가 시 매우 적은 첨가량으로도 전기적 percolation 현상을 유도할 수 있으므로 일차적으로 전기적 interconnect의 재료로서의 적용이 기대되고 있다.¹¹⁾ 또한 CNT의 고열전달 특성은 단위 면적 또는 부피당 발열량이 매우 큰 LED(Light Emitting Diode) 소자나 미래형 고성능 모듈의 interconnection 시 사용해야 하는 TIM

(Thermal Interface Material)의 첨가 물질로도 매우 유용할 것으로 판단된다.

따라서 본 고에서는 최근에 발표된 직접적인 CNT interconnect의 형성 공정과 보고된 전기적 특성 결과를 요약하고, 고분자 레진과 CNT를 섞은 복합재료에서 관찰된 전기적, 열적, 기계적 특성 결과들을 상호 비교하여 현재의 기술 수준과 산업적인 적용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구 내용 및 결과 고찰

2.1. 직접적인 CNT interconnect의 형성 기술과 interconnect 부의 물성

W. Lin 등(2008)은 CVD로 open-ended CNT bundle을 성장시킨 후 그 끝 부위를 기능화 처리한 다음 self-assembled monolayer(SAM) 처리된 Au 표면과 110°C에서 장시간 반응시키는 화학적 anchoring 방법으로 연결, 전이시킨 interconnect 부의 전기적 특성을 측정한다. 측정된 I-V 커브는 명확한 직선적 거동을 나타내어 Ohmic contact이 형성되었음을 알 수 있었다. 또한 2 mm 지름의 interconnect 부에서 측정된 저항값은 0.02 Ω 이었으며, 예측된 개별 CNT의 저항값은 $2.0 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 이었다. 한편 동일 연구실의 L. Zhu 등(2008)은 앞서의 SAM 및 화학적 anchoring 방법 대신 솔더를 사용한 접합 방법으로 유사한 연구를 실시하였는데, 이 경우에는 지름 2 mm의 interconnect 부에서 0.0056 Ω 의 보다 낮은 저항값이 측정되어 수직으로 정렬된 CNT의 전이공정 및 도전 interconnect의 적용 가능성을 보여주었다.¹³⁾

K. P. Yung 등(2009)은 Fig. 3과 같이 CNT를 범프(bump) 재료로 직접 PECVD로 성장시켜 상, 하부 CNT 범프간을 서로 삽입, 결합시키는 방법으로 flip chip interconnection을 수행하였다.¹⁴⁾ 한 쌍의 범프만을 제조한 후 상호 삽입 시 가해진 힘은 0.03 g~3 kg이었다. Interconnect 부의 전기적 특성은 상부 범프로 전압을 인가하고, 하부 범프로 전류로 인가하는 방식으로 4-point probe 측정을 실시하였다. 그 결과 일반적인 Ag 필러 첨가 도전성 접착제를 사용한 경우보다도 interconnect 부의 총 저항값이 우수한 결과를 얻을 수 있었는데, 이는 성장시킨 CNT의 물성이 금속성이라 자체적으로 금속보다 저항값이 낮고, 삽입 후 접촉된 CNT간에서는 adhesion이 발생하여 접촉저항이 크게 개선되었기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 interconnect 부의 총 저항값은 CNT의 삽입 깊이가 증가함에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 보여주어 CNT간의 접촉부가 Ohmic contact 특성을 나타냄을 보여주었다. 결론적으로 CNT 범프간의 삽입, 접촉 방식만으로도 자연스러운 Ohmic contact을 얻을 수 있었다는 점은 매우 고무적이며, 향후 CNT를 사용한 interconnection 기술의 가능성을 보여주는 대표적인 예라 할 수 있다.

이와 같이 수직으로 배열된 CNT들은 polycarbonate(PC)

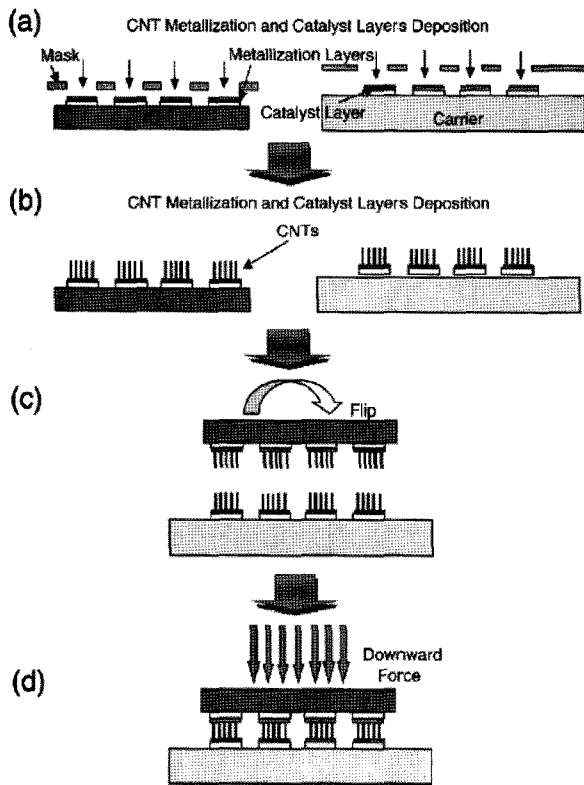


Fig. 3. Proposed CNT insertion process for flip chip application: (a) deposition of under CNT metallization and catalyst layer, (b) deposition of CNTs, (c) align die to its carrier, and (d) assembly of die to its carrier with downward force.¹⁴⁾

와 같은 유기 기판과도 강한 접합력을 가지며, 극도의 bending 상태에서도 견딜 수 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁵⁾ 따라서 이와 같은 interconnection 기술은 미래의 휘어지고 늘어나는 flexible 전자모듈의 전기적 interconnect부 형성에도 적용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

2.2. CNT 필러만을 첨가한 고분자 기지 복합재료의 물성

M. Heimann 등(2007)은 고분자 레진 기지(matrix)에 CNT 첨가시의 전기전도도 및 열전도도를 측정된 결과를 발표하였다.⁹⁾ 그는 고분자/CNT 접착제를 인쇄, 경화시킨 후 4-point probe 방법으로 고분자/CNT 복합재료의 전기전도도를 측정하였다. 당연하게도 CNT가 전혀 첨가되지 않는 경우에는 도체의 특성을 전혀 나타내지 않으나, CNT가 적절량 이상 첨가된 경우는 도전 특성을 나타내는 것이 관찰되었다. 이러한 거동은 고분자/CNT 접착제가 일반적인 고분자/금속 필러 접착제가 나타내는 percolation threshold 거동을 동일하게 따르는 것을 보여준다.¹¹⁾ 즉, 고분자/CNT 접착제를 사용한 interconnect의 형성 시의 전기적인 통전은 CNT 필러간의 접촉에 크게 의존하게 된다. 그러나 측정된 접촉 저항값이 일반적인 Ag 입자 첨가 접착제에 비해 매우 높은 접촉 저항값이 관찰되었는데, 그들은 이의 원인으로 CNT 필러간의 높은 전기적 transition 저항, CNT 자체의 불균일한 도전 특성

및 CNT의 불균일 분산 상태를 지목하였다. CNT 필러간의 전기적 transition 저항의 평균값은 10 kΩ에 이르는 것으로 보고되고 있어,¹⁶⁻¹⁸⁾ 고분자/CNT 접착제 내에 다량으로 존재하는 CNT 필러간의 물리적 접촉부는 전자의 이동을 방해하는 병목구간으로 판단된다. 또한 일반적인 CNT의 대량 생산 공정에서는 약 1/3 정도의 CNT만이 금속과 같은 우수한 전기 전도도를 나타내는 것으로 보고되고 있어 CNT를 도전성 필러로 사용하기 위해서는 금속 특성을 나타내는 CNT의 수율 향상 또는 금속 특성과 반도체 특성을 나타내는 CNT의 분리 기술이 반드시 필요한 것으로 판단된다. 아울러 첨가된 CNT들의 분포 조직을 살펴본 바에 의하면 CNT들이 국부적으로 매우 뭉쳐있어 구상의 균집체 조직이 형성된 것이 관찰되었다. CNT들의 균일한 분산은 전기전도도와 같은 물리적 특성의 향상을 위해 매우 필요하며, 이를 통해 첨가 CNT의 양을 최소 수준으로 줄이는 효과도 얻을 수 있다.

D.-Q. Yang 등(2005)은 multi-wall CNT(MWCNT)를 용액 내에서 초음파(sonication) 처리하여 분산시킴으로써 분산 안정성 및 Au finish pad와의 반응성을 향상시킨 연구 결과를 발표하였다.¹⁹⁾ 이는 CNT에 존재하는 CH₃ 그룹을 COOH 그룹으로 변화시킨 초음파 처리의 영향 때문인데, 그럼에도 불구하고 CNT에서는 어떠한 물리적인 결합들이 관찰되지 않았다. 따라서 고분자/CNT 접착제의 제조에서도 최근 광범위하게 출시되고 있는 초음파 또는 고속 유동방식의 CNT 분산장치를 적절하게 적용하는 공정이 필요할 것으로 판단된다. 물론 고분자/CNT 접착제를 jar에 장입한 상태에서 jar에 진공 분위기의 초고속 공정 및 자전운동을 가하는 방법이 CNT의 균일 분산 공정으로 가장 효율적일 수 있지만, 이는 고분자/CNT 복합재료의 점도에 따라 그 분산 결과가 크게 달라질 수 있으므로 이러한 공정에 대한 보다 구체적인 연구 결과가 필요한 상태이다.

M. Heimann 등(2007)은 또 다른 연구에서 초음파 bath, speed mixer, calander, 초음파 finger 등의 다양한 공정으로 MWCNT의 분산을 유도해 보았다.²⁰⁾ 이후 에폭시 레진에 MWCNT를 첨가시킨 복합재료의 전기전도도를 4-point probe 방법으로 측정된 결과에서 초음파 또는 calander를 사용한 복합재료의 분산 공정이 초음파와 calander를 연속으로 사용한 분산 공정보다 상대적으로 우수한 전기전도도를 나타내었다. 그들은 이러한 결과가 연속적인 분산 공정의 적용 과정에서 CNT가 손상을 입었기 때문이라고 언급하고 있다. 또한 그들은 MWCNT의 다양한 전처리 공정에 따른 에폭시/CNT의 점도 변화 측정을 통해 동일 CNT의 첨가량일지라도 전처리 방법에 따라 그 점도가 100배까지도 변할 수 있음을 보여주었다.

CNT의 균일 분산이 고분자/CNT 복합재료의 전기전도도에 매우 중요한 인자라는 것은 M. Wirts-Rütters 등(2008)의 연구 결과에서도 관찰되는데, 그들은 0.1 wt%의 MWCNT를 고분자 레진에 첨가하여 4-point probe 방법

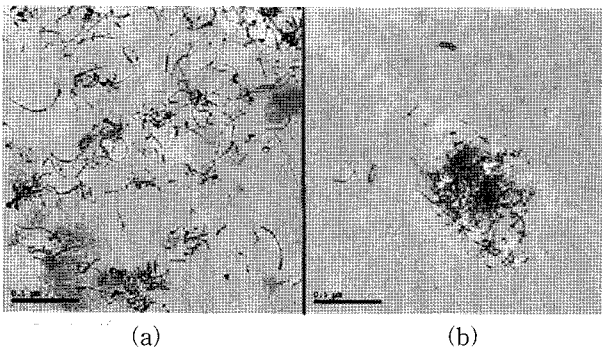


Fig 4. TEM images of CNT-filled in (a) cycloaliphatic and (b) bisphenol-A resin (0.1 wt% CNT, after ultrasonic dispersion).²¹⁾

으로 전기전도도를 측정하고 고분자 레진의 종류에 따라서 전기전도도 값이 매우 차이가 나는 것을 관찰하였다.²¹⁾ 그들은 그 이유를 Fig. 4와 같은 MWCNT의 분산 상태에 의한 결과로 분석하였는데, cycloaliphatic 레진에서는 균일하게 분산된 MWCNT가 Bisphenol-A 레진에서는 매우 뭉쳐있는 상태로 존재하게 됨을 발견하였다. 이는 복합재료의 제조 과정에서 실시된 초음파 처리 과정에서 cycloaliphatic에 비해 초음파 에너지의 흡수 정도가 높은 Bisphenol-A 레진의 특성에 의해 동일한 수준의 초음파 에너지가 MWCNT 군집체들을 분산시키는데 사용되지 못했기 때문인 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 M. Heimann 등(2007)이 laser-flash 방법으로 측정하고 고분자/CNT 복합재료에서 CNT의 첨가량에 따른 열전도도의 변화를 보여주는데,⁹⁾ 20 wt%의 CNT가 첨가된 경우 약 3.6 배가량 향상된 3.6 W/mK의 열전도도 값이 계산되어 예상대로 CNT 첨가가 복합재료의 열전도도 향상에 효과적임을 알 수 있었다.²²⁻²⁴⁾ 한편 Fig. 5의 결과는 CNT의 첨가량에 비례하여 열전도도 값이 직선적으로 증가하는 현상을 보여주고 있는데, 즉, 열전도도 측면에서는 앞서와 같은 percolation threshold 거동이 관찰되지 않아 CNT간의 물리적인 접촉을 통한 통전 path의 형성

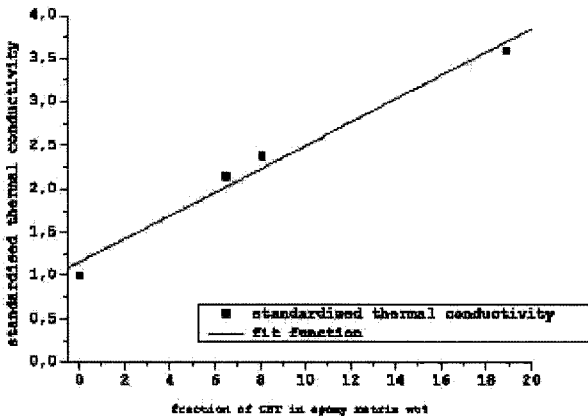


Fig. 5. Standardized thermal conductivity as a function of CNT content (unit: W/mK).⁹⁾

이 복합소재의 열전달 향상에 기여하는 바가 미미함을 알 수 있었다. 물론 이러한 현상은 앞서 언급된 CNT간의 높은 전기적 transition 저항, CNT 자체의 불균일한 도전 특성 및 CNT의 불균일 분산 상태 등의 문제점과도 직접적으로 관련되는 것이므로 이를 극복한 복합소재를 제조한 후 CNT 함량에 따른 열전도도의 변화를 다시 면밀히 평가해보는 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 기계적인 특성과 관련해서는 CNT 첨가 복합재료의 경우 CNT 첨가량에 비례하여 60°C 이상의 고온에서의 modulus 값이 크게 증가하는 현상이 관찰되었다.

K. -S. Moon 등(2008)은 Si 기판에 CVD로 성장시킨 MWCNT에 다양한 전처리를 실시한 후 수직으로 배열된 CNT 사이에 에폭시 레진을 infiltration시키는 방법으로 고분자/CNT 복합소재를 제조하였다.²⁵⁾ 전처리의 목적은 CNT 표면에서의 에폭시의 젖음성 향상 및 CNT와 에폭시 기지와의 화학적 결합을 유도하여 열전도도를 향상시키는 것인데, 그들은 microwave 조사 및 UV/ozone 처리 방법을 사용하였다. 이 중 microwave 조사의 경우 전처리 전의 2.498에서 조사 후 2.600 W/mK로 열전도도 값이 향상되는 결과를 보여주었다. 반면 UV/ozone 처리 방법은 microwave 조사법에 비해 보다 효과적으로 CNT의 표면을 기능화할 수 있었지만, CNT 구조에 충격을 가하고 결합을 만드는 것으로 분석되어 최종적으로 1.506 W/mK의 가장 낮은 열전도도 값이 측정되었다. 따라서 고순도 CNT의 표면 기능화와 경우에 따라서는 적절한 열처리의 수행이 최종적인 고분자/CNT 복합재료의 열전도도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 해석되었다.

B. T. Wang 등(2006)은 도전성 pressure-sensitive adhesive (PSA)를 제조하는데 있어 polyvinyl alcohol(PVA)과 반응시킨 single-walled CNT(SWCNT)를 필러로 polybutyl acrylate(P(BuA)) 라텍스에 첨가한 연구 결과를 발표한 바 있다.²⁶⁾ 그들은 SWCNT를 정제하여 사용하였으며, PVA 용액에 첨가한 후 초음파 및 원심력을 사용한 혼합으로 균일 분산을 유도하였다. 그 결과 Fig. 6과 같이 0.25와

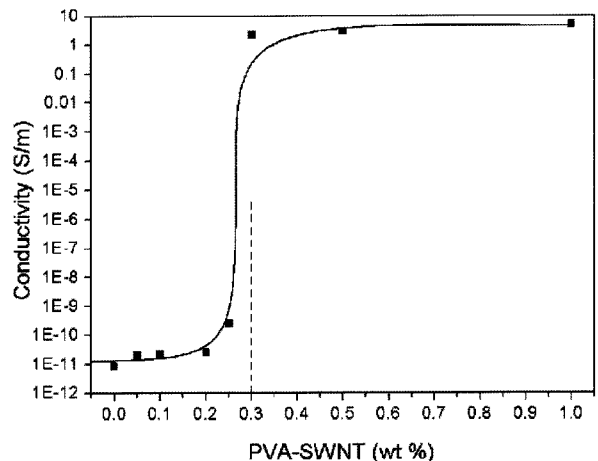


Fig. 6. Electrical conductivity of P(BuA)/PVA-SWCNT composite PSAs as a function of PVA-SWNT concentration.²⁶⁾

0.03 wt%의 사이의 PVA-SWCNT 첨가량 영역에서 10 order 이상의 전기 전도도 향상이 관찰되어 percolation threshold 거동이 명확하게 관찰되었다. 이러한 결과는 0.03 wt% 이상의 PVA-SWCNT가 첨가된 경우에서 SWCNT간의 연속적인 network가 형성되었음을 의미하는데, 이와 같이 매우 적은 CNT 첨가량에서도 percolation threshold 거동이 관찰된 이유는 CNT의 분산이 매우 균일하게 최적화되었기 때문으로 파악된다. 그러나 0.03 wt% 이상의 PVA-SWCNT를 첨가하는 경우에도 전기전도도가 증가하지 않고 수 S/cm 수준에 수렴하는 결과를 나타내어 만족스럽지 않은 도전 결과가 획득되었다.

K. Mantena 등(2008)은 MWCNT를 필러로 사용한 에폭시 기지 접착제의 특성 평가 연구에서 4-point probe 방법으로 측정된 volume 저항값과 daisy chain 패턴을 이용하여 측정된 접촉저항 값을 제시한 바 있다.²⁷⁾ 측정된 volume 저항값은 일반적인 도전성 페이스트에 비해 수 order가 높은 것으로 보고하였는데, 저자는 이의 원인으로 과도한 에폭시 양에 따른 probe tip과 CNT간의 접촉 방해, CNT 필러간의 접촉 방해 및 CNT와 금속 pad간의 접촉 방해를 제시하였다. 한편 접촉저항 값의 경우 경화시 에폭시/CNT 페이스트에 가해지는 압력 조건의 영향을 받게 된다. 일례로 압력이 전혀 없는 상태에서 경화시킨 경우에서 본 연구의 에폭시/CNT 접착제는 k Ω 수준의 접촉저항 값을 나타내었으나, 무게로 압력을 가하며 경화시킨 경우에는 수백 Ω 수준의 접촉저항 값이 관찰되었다. 이러한 경화법으로 Ag finish pad 상에서 첨가 CNT의 양을 2~4 wt% 수준으로 변화시켜 첨가하면서 최종 접촉저항 값을 측정된 결과, 2 wt%의 첨가 조건에서 가장 낮은 접촉저항 값이 관찰되었다. 그러나 3 wt%의 첨가 조건에서 가장 높은 접촉저항 값이 측정되고, 4 wt%에서 다시 접촉저항 값이 감소하는 현상이 관찰되어 이러한 결과로부터는 접촉저항 값 측면에서의 최적 CNT 첨가량을 결정할 수 없었다. 또한 2 wt%의 CNT 첨가 조건에서도 그 접촉저항 값은 200 Ω 에 이르는 것으로 보고되어 도전성 접착제로의 충분한 특성을 달성할 수 없었다. 앞서 M. Heimann 등의 결과와 이상의 volume 저항 및 접촉저항 측정 결과는 아직까지는 CNT만을 단독으로 필러 성분으로 첨가할 때 10^{-5} Ω cm 수준 이상의 충분한 전기전도도를 획득한 예가 없음을 보여주었다.

이에 따라 H. Jiang 등(2008)은 MWCNT를 에폭시 레진에 균일하게 소량 분산시킨 복합재료의 적용 분야를 NCA(Nonconductive Adhesive) 재료로 잡고 제조한 NCA 복합재료의 전기적, 열적, 기계적 특성을 평가하였다.²⁸⁾ 전기적 특성으로는 current-voltage(I-V) 커브와 current-resistance(I-R) 커브를 제시하였는데, CNT를 함유하지 않은 순수 에폭시 레진의 경우 3.7 A의 전류 이송능력을 나타냈지만, 0.03 wt%의 CNT가 첨가된 NCA의 경우 4.2 A를 나타내어 극소량, 즉, 0.03 wt%의 CNT 첨가만으로도 약 14%의 전류 이송능력이 향상되는 결과를 관찰할 수

있었다. 또한 NCA interconnect에서 CNT를 함유하지 않은 순수 에폭시 레진의 경우 5.6×10^{-4} Ω 의 접촉저항 값을 나타냈지만, 0.03 wt%의 CNT가 첨가된 NCA의 경우는 4.6×10^{-4} Ω 를 나타내어 0.03 wt% CNT 첨가만으로도 약 20%가 향상된 접촉저항 값을 얻을 수 있었다. 또한 0.03 %의 CNT가 함유된 NCA는 25°C의 온도에서 0.128 W/mK의 열전도도 값을 나타내어 CNT가 없는 NCA에 비해 약 17%가 향상된 열전도 특성을 나타내었다. 저자들은 이렇게 향상된 열전도도 특성이 NCA interconnect 재료에서 발생하는 주열(Joule) 열을 신속하게 배출시키는데 매우 유용한 역할을 할 것이라 주장하였다.

한편 CNT가 첨가되지 않은 에폭시 레진의 경화 후 열팽창계수 값은 α_1 기준으로 $71.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 였지만, 0.02 wt%의 CNT 첨가 시 NCA 복합재료의 α_1 은 $62.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 수준으로 감소했으며, 0.03 wt%의 CNT 첨가 시 α_1 은 $60.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 수준까지 감소하였다.²⁸⁾ 따라서 CNT를 0.02~0.03 wt% 수준으로 미량 첨가한 경우에서도 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도의 CTE 감소 효과를 얻을 수 있었는데, 이는 열팽창계수가 낮은 특성이 유리한 전자 패키징 interconnect 재료로서의 적용 가능성을 보여준다고 하겠다. 그러나 0.02 wt%의 CNT를 첨가한 경우와 0.03 wt%의 CNT를 첨가한 경우에서 얻어진 열팽창계수의 차이가 매우 미미하다는 점을 주목할 때, 현재의 일반적인 interconnect 재료의 열팽창계수인 20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 또는 Fig. 2에서 제시된 미래형 interconnect 재료의 열팽창계수인 3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 수준의 열팽창계수 값을 얻기 위해서는 다량의 CNT가 첨가되어야 함을 알 수 있었다. 따라서 공정에 부담이 없는 점도 수준에서 CNT의 첨가량을 최고로 올렸을 때 얻을 수 있는 열팽창계수의 측정 결과에 대한 연구가 요청된다. 페이스트 접착제 안의 CNT는 미세구조적으로 종횡비가 큰 형태이고, 그 지름도 균일하기 때문에 다양한 입도의 구형 필러를 사용한 close packing 조직의 형성으로 페이스트의 점도를 최소화시킬 수 있다는 Mooney 이론의 적용을 받지 않을 것이다.²⁹⁾ 따라서 낮은 점도를 최대한으로 유지하며 첨가 CNT의 양을 증가시키기 위해서는 보다 적절한 surfactant의 개발이 요구된다.

2.3. CNT와 기타 필러를 동시에 첨가한 고분자 기지 복합재료의 물성

J. Liu 등 (2006)은 MWCNT와 나노 Ag 등을 electrospinning 공정을 통해 고분자와 혼합하여 TIM을 제조한 후 열전도도 및 열저항을 측정하였다.³⁰⁾ Electrospinning 공정은 고분자 혼합물에 전기적 필드를 걸어주는 방법인데 이를 통해 보다 균일한 혼합을 유도할 수 있다. 그 결과 열전도도는 0.37~4.39 W/Km, 열저항은 0.11~1.17 K/W의 매우 넓은 범위에서 측정되었는데, 이는 레진의 종류, 측정 온도 등에 따라 매우 민감하게 변화되었다. 대체적으로 나노 Ag가 첨가된 경우에 보다 우

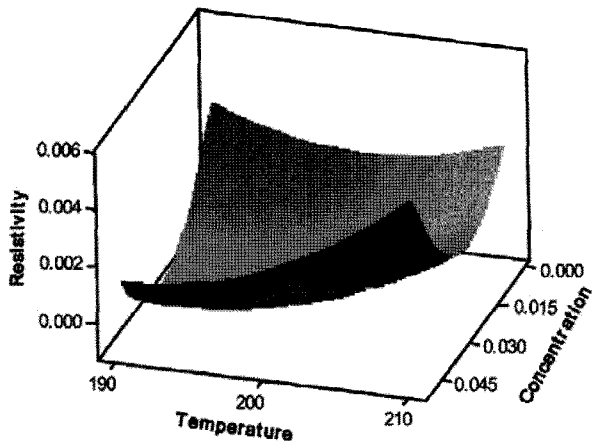


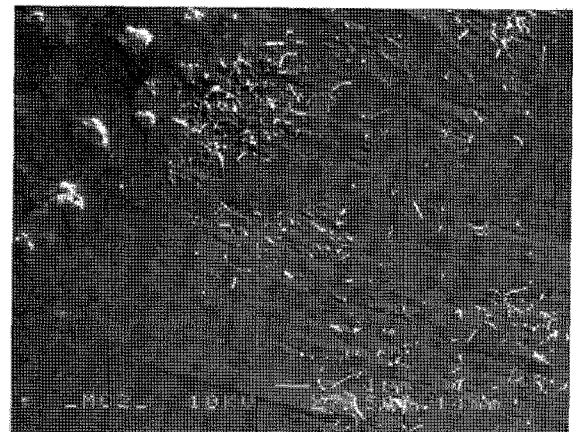
Fig. 7. Surface plot of resistivity vs. temperature and concentration.³²⁾

수한 열전도도 및 열저항 값이 측정되었음을 제시하였으나, 열전도도 및 열저항을 보다 향상시킬 수 있는 원리에 대한 이론은 제시되지 않았다. MWCNT와 나노 Ag 등을 함유한 고분자 복합재료의 기계적 물성의 향상은 보다 극적인 것으로 관찰되었는데, 파단까지의 최대 응력값은 4.48 Mpa, 최대 변형량(strain)은 455 %로 측정되어 각각 상용 TIM에 20배 또는 10배가량 우수한 기계적 물성이 보고되었다. 아울러 이러한 기계적 물성은 레진의 물성에 크게 의존하는 경향을 나타내었다.

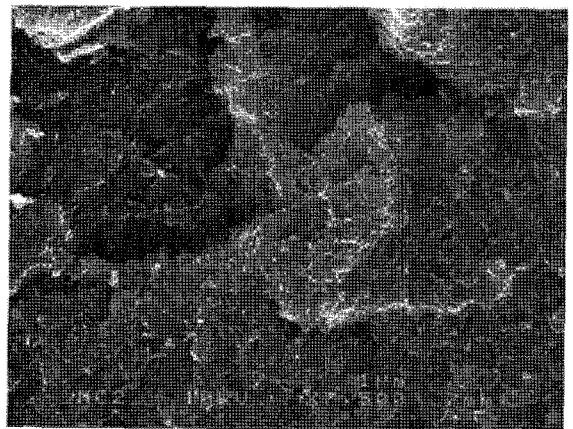
H. P. Wu 등(2007)은 Ag가 코팅된 CNT를 28 vol% 첨가한 경우에서 4-point probe 방법으로 측정한 복합재료의 bulk 저항값이 $2.2 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 에 이르는 발표하였다.³¹⁾ 이는 Ag 분말이 첨가되는 일반적인 도전성 페이스트의 bulk 저항값에 근접한 수준으로 Ag가 코팅되지 않은 CNT를 첨가한 경우보다는 6배가량 향상된 bulk 저항값을 보여준다. 또한 28 vol%의 percolation threshold 결과는 동일인이 측정한 Ag가 코팅되지 않은 CNT를 첨가했을 때 관찰된 percolation threshold 영역인 31 vol%보다 필러의 양이 감소된 영역에서 발생하는 것을 관찰하여 Ag가 코팅된 CNT의 필러로서의 성능이 보다 우수할 수 있음을 시사하였다.

Z. Wu 등(2009)은 CNT와 Ag flake 필러를 polymethyl methacrylate(PMMA)에 첨가한 복합재료를 hydraulic hot-press로 성형하면서 CNT 함량, 성형 온도 및 압력에 따른 bulk 저항값을 4-point probe 방법으로 측정하였다.³²⁾ Design of experiment(DOE)로서 response surface methodology(RSM)를 고려한 결과 Fig. 7에서와 같이 CNT 함량 및 성형 온도에 따른 저항값의 변화를 관찰할 수 있었는데, 성형 온도는 대체적으로 높을수록 저항값이 증가하는 거동을 보였으며, CNT 함량은 최적량이 존재함을 관찰할 수 있었다. DOE에 의해 성형 압력까지 최적화시킨 최적의 공정 조건(CNT 함량: 2%, 공정 온도: 199°C, 공정 압력: 6000 psi)에서 CNT 및 Ag flake 필러 함유 복합재료의 bulk 저항값은 $1.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 측정되었다.

Z. Zhang 등(2008)은 3~10 μm 크기의 Ag flake, 500~1000 nm 크기의 구형 Ag 나노 입자 및 5~20 μm 길이 MWCNT의 3종류의 필러가 첨가된 ICA(Isotropic Conductive Adhesive)를 제조하여 인쇄한 후, 4-point probe 방법으로 그 전기저항 값이 측정하였다.³³⁾ H. -H. Lee 등은 percolation threshold 이전 영역에서 첨가되는 나노 크기의 Ag 입자는 접촉 저항의 증가로 복합재료의 저항값을 증가시킬 수 있으나 percolation threshold 부근 영역에서 첨가되는 나노 크기의 Ag 입자는 전도 path를 형성하는데 도움을 주므로 전기저항 값을 낮춰준다고 보고한 바 있다.³⁴⁾ Z. Zhang 등의 결과에서는 Ag flake 및 나노 입자만을 넣는 경우에서보다 3종류의 필러를 모두 첨가한 경우 가장 향상된 $3 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ 의 우수한 전기저항 값이 측정되어 거의 금속 수준의 저항값에 근접하였음을 보고하였다. 이 때 첨가된 CNT의 양은 0.5 wt% 이하였으며, 첨가 전 16시간 동안 황산 및 질산의 강산을 가열하며 초음파를 세척을 실시하면서 CNT의 전처리를 실시하였다. 이와 같이 우수한 전기저항 값은 기타 기계적 물성 및 장기 신뢰성 결과에 따라서 솔더를 대신할 수 있는 미래의 interconnect 소재로의 기대를 갖게 한다. 언급된



(a)



(b)

Fig. 8. SEM micrographs of (a) non-treated CNTs and (b) treated CNTs in the ICA.³³⁾

CNT의 전처리 과정은 Fig. 8과 같이 레진 기지에서 CNT의 균일한 분산을 증진시키는 결과를 이끄는 것으로 보고되었다.

ICA의 도전성은 경화 과정에서의 에폭시 기지의 수축 (shrinkage)에 기인한 필러들간의 접촉에 기인한다.³⁵⁻³⁸⁾ 따라서 필러간의 접촉이 interconnect부를 가로질러 연속적으로 형성되었는지, 그리고 그 접촉부들의 면적이 얼마나 확보되었는지, 물리적으로 얼마나 탄탄한 접촉부들이 구축되는지의 여부가 궁극적으로 ICA의 도전 특성을 결정하게 된다. 한편 flake와 같은 마이크로 사이즈의 필러들 간에는 항상 불완전한 접촉부들이 존재하므로 나노 사이즈의 미세 입자들이 첨가되어 균일하게 분산될 경우 이러한 입자들은 마이크로 입자들 사이의 불완전한 접촉부, 즉, gap 부분들을 매워줄 수 있다.³⁹⁾ 결론적으로 Z. Zhang 등이 발표한 CNT 첨가 ICA의 우수한 도전성 결과는 Ag flake 및 Ag 나노 입자의 적절한 첨가에 의한 접촉부의 gap 매움이 접촉부들의 면적을 증가시킴으로써 도전성을 크게 향상시킨 것으로 판단된다. 따라서 적정량 첨가된 나노 Ag의 균일한 분산이 이루어진다면 점도의 과도한 증가 없이도 눈에 띄는 도전성의 향상을 이룰 수 있을 것으로 판단된다. 요컨대 고분자/CNT 필러 복합재료 접착제의 전기전도도를 향상시키기 위한 현재까지 발표된 가장 우수한 방법 중의 하나는 CNT와 Ag 필러를 동시에 첨가하고, Ag 필러의 입도를 다양하게 적용하는 것으로 판단된다. 아울러 첨가 필러 입자들의 표면 개질과 관련된 최적화 작업이 동시에 요구된다.

C. N. He 등(2009)은 CNT 이외에 Al₂O₃를 필러로 첨가한 복합소재의 기계적 물성을 평가하였다.⁴⁰⁾ 그들은 NiO/Al₂O₃에 CNT를 성장시킨 CNT/Al₂O₃의 hybrid 필러를 에폭시에 1 wt% 첨가한 후 기계적인 stirring 혼합으로 CNT/Al₂O₃ 필러의 균일한 분산을 유도하였다. 필러의 균일한 분산은 CNT/Al₂O₃와 에폭시 기지간의 계면 증가와 이에 따른 결합력 증가를 유도시켜 단 1 wt%의 CNT/Al₂O₃의 첨가 시에도 Fig. 9와 같이 인장 강도(약 34% 증가)와 인

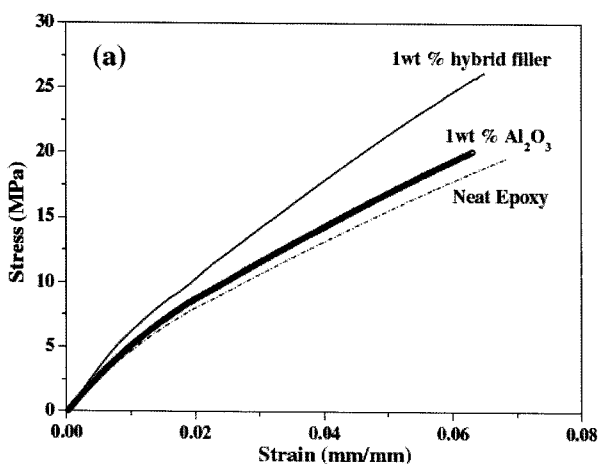


Fig. 9. Typical stress-strain curves for pristine epoxy and epoxy composite containing 1 wt% CNT/Al₂O₃ hybrid.⁴⁰⁾

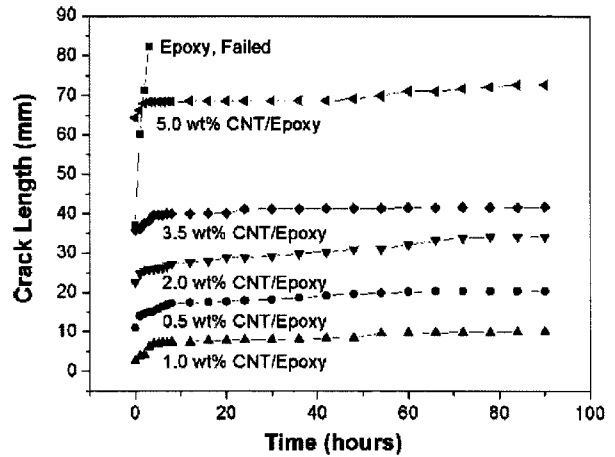


Fig. 10. Crack propagation of the CNT-filled epoxy adhesive joints as a function of immersion time.⁴¹⁾

성(toughness)이 눈에 띄게 향상되는 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 사전에 별도의 분산처리 없이 점도가 높은 에폭시 기지 내에서의 기계적인 혼합 방법으로도 균일한 분산을 유도한 점에서 의미가 있다. 따라서 보다 많은 양의 필러가 첨가되는 경우에서도 이러한 분산이 유도될 수 있는지에 대한 추가 연구가 필요하다.

CNT가 함유된 에폭시 접착제를 interconnect 재료로 사용되었을 때 실질적인 내구성의 향상도 기대할 수 있다. S. Yu 등(2009)은 MWCNT가 함유된 에폭시 접착제의 내구성을 고습 환경에 노출시킨 후 Boeing wedge 테스트를 통해 평가하였다.⁴¹⁾ 그 결과 Fig. 10과 같이 CNT가 첨가된 모든 경우에서 향상된 느린 crack의 전파 속도가 측정되었고, 1.0 wt%의 최적 CNT 첨가량에서 가장 짧은 초기 crack 길이 및 느린 전파 속도가 측정되어 가장 우수한 내구성을 나타냄을 관찰할 수 있었다. 이는 초기 crack 길이 기준으로 CNT를 첨가하지 않은 경우에 비해 93%나 감소한 crack의 길이 값이다. CNT의 양이 보다 감소하거나 증가한 경우에는 CNT의 부족 또는 CNT의 응집에 따른 불충분한 분산 상태로 인해 초기 crack 길이의 증가와 기계적 내구성의 저하가 발생하였음을 알 수 있었다. 아울러 저자들은 지나치게 응집된 CNT 영역은 결합과 같은 역할을 하여 오히려 접착제의 강도 및 내구성을 낮출 수 있음을 지적하였다. Fig. 11은 CNT 첨가량에 따른 wedge 테스트 후 파단면의 SEM 이미지를 보여준다. 필러가 첨가되지 않은 에폭시는 매끈한 표면을 보이며 파단 낮은 접합 강도의 파단 형상을 나타내었다. 반면 1 wt% CNT가 첨가된 시편은 파단면이 울퉁불퉁하고 CNT가 뿔쳐 나온 형태가 명확히 관찰되어 강한 접합 강도의 파단 형상을 나타내었다. 또한 5 wt% CNT가 첨가된 시편은 오히려 파단면이 보다 매끄러워졌으며 파단면에서 일부 CNT들이 관찰되었으나, 대부분의 CNT들이 에폭시 기지 내에 박혀 있어 1 wt% 첨가량에 비해 감소된 접합 강도를 나타내는 파단 형상이 관찰되었다.

이상의 review 과정에서 저자가 느낀 점은 각 연구자들

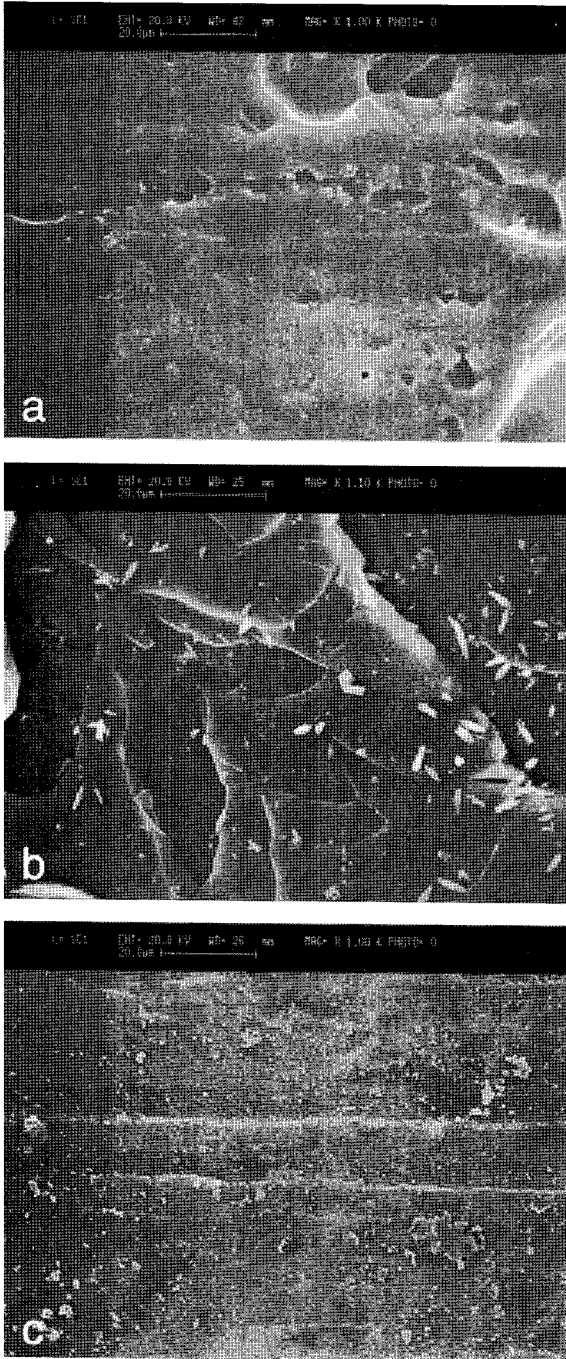


Fig. 11. Microstructures of the fractured surfaces of the wedge-tested specimens: (a) neat epoxy, (b) epoxy with 1 wt% CNTs, and (c) epoxy with 5 wt% CNTs.⁴¹⁾

이 실험에 사용한 CNT의 초기 물성에 대해 면밀한 정보를 제시되지 않고 있다는 것이다. 즉, 사용한 CNT가 single-wall인지 multi-wall인지, 금속성의 CNT와 반도체성 CNT 분율이 각각 얼마인지, defect의 형성 정도는 얼마인지 등에 대한 충분한 조사 후에 실험을 진행하는 것이 바람직하다. 이러한 상황은 특히 CNT를 필러로 첨가한 복합재료의 연구 시 그 최종 결과를 해석하는 단계에서 상당한 오류를 제시할 수 있다. 실제 M. Wirts-Rütters 등(2008)의 연구 결과에서도 알 수 있듯이 수급한 CNT의 제조회사에 따라 동일 고분자 소재의 사용 조건임에도 불

구하고 고분자/CNT 복합재료의 전기전도도 등의 최종 물리적 특성은 매우 다른 것으로 관찰되었다.²¹⁾ 또한 열전도도와 같은 물성의 표준 측정법의 정립도 매우 필요한데, 일례로 Inoue 등(2006)의 연구 결과는 동일한 소재라도 열전도도의 측정 방법에 따라서 3배 이상까지 결과값의 차이가 날 수 있음을 보여준다.⁴²⁾

3. 결 론

전자 패키징용 interconnect 소재로 CNT를 적용한 현재까지의 연구 결과를 살펴본 결과를 요약하면 다음과 같다. 직접적인 CNT interconnect의 형성 시 interconnect 부의 총 저항값은 일반적인 Ag 필러 첨가 도전성 접착제를 사용한 경우보다도 우수한 것으로 발표되어 CNT를 사용한 미래형 interconnection 기술의 가능성을 보여주었다.

CNT 필러만을 단독으로 첨가한 고분자 기지 복합재료의 전기적 특성 측정 결과는 $10^{-5} \Omega\text{cm}$ 수준 이상의 충분한 전기전도도를 획득한 예가 없음을 보여주었다. 이에 따라 CNT를 에폭시 레진에 소량 첨가시킨 복합재료의 적용 분야를 NCA 재료로 잡은 연구 내용이 발표되었는데, 향상된 열전도도가 NCA interconnect 재료에서 발생하는 주열 열을 신속하게 배출시켜 interconnect 부의 신뢰성 향상이 기대되었다. CNT 첨가 고분자 복합재료의 열전도도 특성은 첨가 CNT의 양에 비례하여 직선적으로 증가하는 거동을 나타내어 공정이 가능한 수준으로 복합재료의 점도를 제어하면서 최대한 많은 CNT를 첨가하는 연구가 필요한 것으로 분석되었다.

CNT와 Ag flake, 그리고 구형의 Ag 나노 입자를 동시에 고분자 기지에 첨가시킨 복합재료의 경우 금속 수준의 저항값에 근접한 $3 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ 의 전기저항 값이 측정되어 CNT 첨가 접착 재료를 사용한 interconnection 기술의 상용화가 임박했음을 유추할 수 있었다. 아울러 CNT 첨가 고분자 복합재료는 뚜렷이 향상된 기계적 물성 및 물리, 화학적 내구성을 나타내었다.

참고문헌

1. S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon", *Nature*, 354, 56 (1991).
2. P. M. Ajayan, "Nanotubes from Carbon", *Chem. Rev.*, 99(1), 1787-1799 (1999).
3. M. -F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli, and R. S. Ruoff, "Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and Their Mechanical Properties", *Phys. Rev. Lett.*, 84(24), 5552-5555 (2000).
4. B. G. Demczyk, Y. M. Yang, J. Cumings, M. Hatman, W. Han, A. Zettl, and R. O. Ritchie, "Direct Mechanical Measurement of the Tensile Strength and Elastic Modulus of Multiwalled Carbon Nanotubes", *Mater. Sci. Eng. A*, 334, 173-178 (2002).
5. Y. Yosida, "High Temperature Shrinkage of Single-walled Carbon Nanotube Bundles up to 1600K", *J. Appl. Phys.*, 87, 3338-3341 (2000).

6. S. Berber, Y. K. Kwon, D. Tománek, "Unusually Thermal Conductive of Carbon Nanotubes", *Phys. Rev. Lett.*, 84(20), 4613-4616 (2000).
7. P. Kim, L. Shi, A. Majumdar, and P. L. McEuen, *Phys. Rev. Lett.*, 87, 215502 (2001).
8. A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. Scuseria, D. Tománek, J. E. Fischer, and R. E. Smalley, "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes", *Science*, 273, 483 (1996).
9. M. Heimann, J. Lemm, and K. -J. Wolter, "Characterization of Carbon Nanotubes/Epoxy Composites for Electronics Applications", *Proc. of 30th ISSE*, 1-6 (2007).
10. The International Technology Roadmap for Semiconductors(ITIS) Report: Assembly and Packaging, 2007 Edition (2007).
11. Y. Li and C. P. Wong, "Recent Advance of Conductive Adhesives as a Lead-free Alternative in Electronic Packaging: Materials, Processing Reliability and Application", *Mater. Sci. Eng. R*, 51, 1-35 (2006).
12. W. Lin, Y. Xiu, L. Zhu, K. -S. Moon, and C. P. Wong, "Assembling of Carbon Nanotube Structures by Chemical Anchoring for Packaging Applications", *Proc. of 58th ECTC*, 421-426 (2008).
13. L. Zhu, K. -S. Moon, B. Bertram, D. W. Hess, and C. P. Wong, "Fine-pitch Carbon Nanotube Bundles Assembly Using CNT Transfer for Electronic Interconnects", *Proc. of 58th ECTC*, 309-313 (2008).
14. K. P. Yung, J. Wei, and B. K. Tay, "Formation and Assembly of Carbon Nanotube Bumps for Interconnection Applications", *Diam. Relat. Mater.*, 18, 1109-1113 (2009).
15. T. Y. Tsai, C. Y. Lee, N. H. Tai, and W. H. Tuan, "Transfer of Patterned Vertically Aligned Carbon Nanotubes onto Plastic Substrates for Flexible Electronics and Field Emission Devices", *Appl. Phys. Lett.*, 95, 013107-1 (2009).
16. M. Meyyappan, *Carbon Nanotubes Science and Application*, CRC Press, FL (2005).
17. W. Hnlein "New Prospects for Microelectronics: Carbon Nanotubes", *Jpn. J. App. Phys.*, 41(6B), 4370-4374 (2002).
18. A. M. B. Bara, "Polymer/CNT Composites for Electronic Packaging", *Proc. of ESTC 2006*, 334-336 (2006).
19. D. -Q. Yang, J. -F. Rochette, and E. Sacher, "Functionalization of Multiwalled Carbon Nano Tubes by Mild Aqueous Sonification", *J. Phys. Chem. B*, 109, 7788-7794 (2005).
20. M. Heimann, M. Wirts-Ruetters, B. Bohhme, and K. -J. Wolter, "Investigation of Carbon Nanotubes Epoxy Composites for Electronics Packaging", *Proc. of 58th ECTC*, 1731-1736 (2008).
21. M. Wirts-Rütters, M. Heimann, Jana Kolbe, and K. -J. Wolter, "Carbon Nanotube(CNT) Filled Adhesives for Microelectronic Packaging", *Proc. of 2nd ESTC*, 1057-1062 (2008).
22. M. B. Bryming, D. E. Milkie, M.F. Islam, J.M. Kikkawa, and A.G. Yodh, "Thermal Conductivity and Interfacial Resistance in Single-wall Carbon Nanotube Epoxy Composites", *Appl. Phys. Lett.*, 87, 161909-1 (2005).
23. F. H. Gojny, M. G. Wichmann, B. Fiedler, I. A. Kinloch, W. Bauhofer, A. H. Windle, and K. Schutle, "Evaluation and Identification of Electrical and Thermal Conduction Mechanism in Carbon Nanotube/epoxy Composites", *Polymer*, 47, 2036-2045 (2006).
24. A. Moisala, Q. Li, I. A. Kionloch, and A. H. Windle, "Thermal and Electrical Conductivity of Single- and Multi-walled Carbon Nanotube-epoxy Composites", *Comp. Sci. Tech.*, 66, 1285-1288 (2006).
25. K. -S. Moon, W. Lin, H. Jiang, H. Ko, L. Zhu, and C. P. Wong, "Surface Treatment of MWCNT Array and Its Polymer Composites for TIM Application", *Proc. of 58th ECTC*, 234-237 (2008).
26. B. T. Wang, C. -H. Lei, A. B. Dalton, C. Creton, Y. Kin, K. A. S. Fernando, Y. -P. Sun, M. Manea, J. M. Asua, and J. L. Keddie, "Waterborne, Nanocomposite Pressure-Sensitive Adhesives with High Tack Energy, Optical Transparency, and Electrical Conductivity", *Adv. Mater.*, 18, 2730-2734 (2006).
27. K. Mantena, J. Li, and J. K. Lupp, "Electrically Conductive Carbon Nanotube Adhesives on Lead Free Printed Circuit Board Surface Finishes", *Proc. of IEEE Aerospace Conference*, 1-5 (2008).
28. H. Jiang, M. J. Yim, K. -S. Moon, and C. P. Wong, "Novel Nonconductive Adhesives/Films with Carbon Nanotubes for High Performance Interconnects", *Proc. of 58th ECTC*, 1385-1389 (2008).
29. M. Mooney, "The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles", *J. Colloid. Sci.*, 6, 162-170 (1951).
30. J. Liu, M. O. Olorunyomi, X. Lu, W. X. Wang, T. Aronsson, and D. Shangguan, "New Nano-Thermal Interface Material for Heat Removal in Electronics Packaging", *Proc. of 56th ECTC*, 1-6 (2006).
31. H. P. Wu, X. J. Wu, M. Y. Ge, G. Q. Zhang, Y. W. Wang, and J. Jiang, "Properties Investigation on Isotropical Conductive Adhesives Filled with Silver Coated Carbon Nanotubes", *Comp. Sci. Tech.*, 67, 1182-1186 (2007).
32. Z. Wu, J. Li, D. Timmer, K. Lozano, and S. Bose, "Study of Processing Variables on the Electrical Resistivity of Conductive Adhesives", *Int. J. Adhes Adhes.*, 29, 488-494 (2009).
33. Z. Zhang, S. Jiang, J. Liu, and M. Inoue, "Development of High Temperature Stable Isotropic Conductive Adhesives", *Proc. of ICEPT-HDP*, 1-5, 2008 (2008).
34. H. -H. Lee, K. -S. Chou, and Z. -W. Shih, "Effect of Nano-sized Silver Particles on the Resistivity of Polymeric Conductive Adhesives", *Int. J. Adhes Adhes.*, 25, 437-441 (2005).
35. D. Lu, Q. K. Tong, and C. P. Wong, "Conductivity Mechanism of Isotropic Conductive adhesives(ICA's)", *IEEE Trans. Electron. Pack.*, 22(3), 223-227 (1999).
36. D. Lu and C. P. Wong, "Effects of Shrinkage on Conductivity of Isotropic Conductive Adhesives", *Int. J. Adhes Adhes.*, 20, 189-193 (2000).
37. M. Inoue and K. Saganuma, "Effects of Curing Conditions on the Electrical Properties of Isotropic Conductive Adhesives Composed of an Epoxy-based Binder", *Soldering & Surface Mount Technology*, 18(2), 40-45 (2006).
38. M. Inoue and K. Saganuma, "The Dependence on Thermal History of the Electrical Properties of an Epoxy-based Isotropic Conductive Adhesive", *J. Electron. Mater.*, 36(6), 669-675 (2007).
39. J. Hongjin, K. -S. Moon, Y. Li, and C. P. Wong, "Ultra High Conductivity of Isotropic Conductive Adhesives", *Proc. of ECTC*, 485-490 (2006).
40. C. N. He and F. Tian, "A Carbon Nanotubes-aluminium Network Structure for Fabricating Epoxy Composites", *Script. Mater.*, 61, 285-288 (2009).

41. S. Yu, M. N. Tong, and G. Critchlow, "Wedge Test of Carbon-Nanotube-Reinforced Epoxy Adhesive Joints", J. Appl. Polym. Sci., 111, 2957-2962 (2009).
42. M. Inoue, H. Muta, T. Maekawa, S. Yamanaka, and K. Suganuma, "Thermal Conductivity of Isotropic Conductive Adhesives Composed of An Epoxy-based Binder", Proc. of HDP'06, 236-241 (2006).



- 이종현(李宗炫)
 - 1973년생
 - 서울산업대학교 신소재공학과
 - 전자 패키징용 interconnection
재료 및 공정
 - e-mail: pljh@snut.ac.kr
-