

◆특집◆ Nano Manufacturing I

## 나노 접합기술

서 정\*, 이재훈\*\*

### Nanoscale Joining

Suh Jeong\*, Jae Hoon Lee\*\*

**Key Words** : Nanoscale joining(나노접합), SEM(전자주사현미경), Nanowelding(나노용접), Nanosoldering(나노솔더링), Nanotube(나노튜브), Nanowire(나노와이어)

#### 1. 서론

산업분야에서 널리 사용되고 있는 기술인 용접(welding), 브레이징(brazing), 솔더링(soldering), 접착(adhesive bonding) 그리고 기계역학적 결합(mechanical fastening) 등은 매크로(macro)에서 마이크로(micro) 수준의 접합(joining)분야에 적용되고 있다. 특히, 레이저 미세접합기술을 미소부품, 광통신부품의 정밀접합에 사용되고 있으며, 빔 특성상 100  $\mu\text{m}$  수준의 정밀용접이 가능하다. 또한, 청결, 고신뢰성, 밀봉(hermetic sealing), 열적 손상방지가 요구되는 전자부품 패키징에 적합한 접합기술로는 전자빔 미세접합기술이 있다. 그러나, 향후에는 전자산업이 microelectronics에서 nanoelectronics로 발전되고, 나노선(nanowire), 나노튜브(nanotube) 등의 접합을 위한 나노접합 기술이 필요하게 될 것이다.

\* 한국기계연구원 레이저응용시스템 그룹

Tel. 042-868-7445, Fax. 042-868-7431, Email jsuh@kimm.re.kr  
레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템 개발에 관심을 두고 있으며, 정밀용접/미세접합/미세패터닝이 주요 연구활동분야임.

\*\* 한국기계연구원 레이저응용시스템 그룹

Tel. 042-868-7471 Fax. 042-868-7431, Email jaholee@kimm.re.kr  
레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템 개발에 관심을 두고 있으며, 극미세가공 및 표면처리가 주요 연구활동분야임.

따라서, 본 논문에서는 나노접합에 관련된 국내외 연구동향을 분석하고 나노접합 기술에 대한 기계공학적 접근방향을 알아보고자 한다.

#### 2. 나노 접합 기술 동향

##### 2.1 나노용접 및 솔더링

전자소자의 크기가 소형화됨에 따라서 미세소자간의 폭도 감소되어야 하며, 기존의 금속막 배선 방법대신에 탄소 나노튜브(CNT: Carbon Nanotube)를 배선으로 사용하면 매우 유용하다고 보고되고 있다.<sup>1</sup> CNT로 회로를 만들기 위해서는 튜브들을 전기적으로 연결하는 기술이 요구되며, 이전의 연구에서는 나노튜브들을 전기 전도적으로 연결하는 방법이 간단하지 않았으며, 저항접촉부(ohmic contact) 대신 터널 연결부(tunnel junction)를 만드는 방식을 제시하고 있다. Fig. 1과 같이 단일벽(single wall) 금속 나노튜브의 교차하는 연결부의 연구결과 약 200k $\Omega$ 의 전기 저항값이 나타났다.<sup>2</sup> 이러한 높은 저항은 1nm<sup>2</sup>의 미소접촉 면적의 관점에서 설명될 수 있으며, 이는 교차하는 튜브들이 한점에서 접촉하고 있기 때문이다. 따라서, 더 넓은 면적에서 도전물질과 튜브들을 접합시키기 위해 용접, 솔더링, 페이스팅(pasting) 기술개발을 해왔으나, 전도성 액폭시를 이용한 pasting이나 액체상태의 주석(tin)을 이용한 솔더링은 거의 적용되지 못하고 있다.

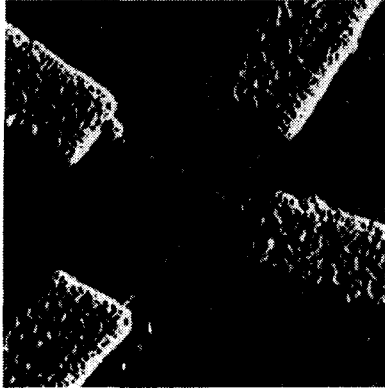


Fig. 1 Tapping-mode AFM image of a crossed SWNT (single-walled carbon nanotube). Two SWNTs can be seen spanning between the Cr/Au electrodes

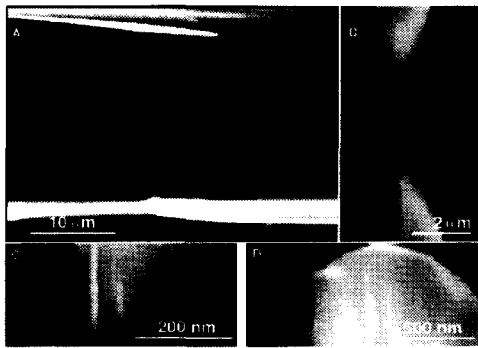
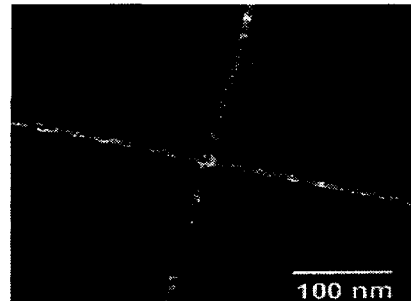


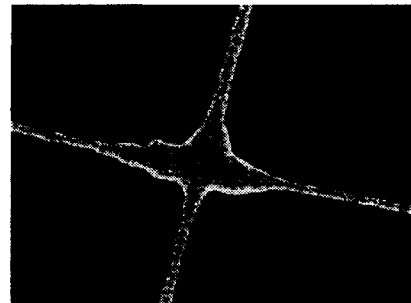
Fig. 2 An individual MWCNT mounted between two opposing AFM tips, (A): SEM image, (B): High-magnification of (A), (C) and (D): High magnifications of top and lower AFM tips

최근에 Ruoff 등<sup>3,4</sup>은 나노튜브의 기계적 조작 (mechanical manipulation)에 관한 연구에서 전자주사현미경(SEM, scanning electron microscope)의 집속된 전자빔(focused electron beam)이 탄화수소(hydrocarbon) 오염물을 용착(deposition)시켜 Fig. 2와 같이 AFM(atomic force microscopy) 팁(tip)에 나노튜브를 부착하였다. 이러한 기술을 “nanowelding” 혹은 “SEM-nanowelding” 기술이라고 하였으며, SEM 내부에서 CNT를 조작하고 CNT의 기계적 물성 평가 실험을 수행하는데 이용되었다.

SEM에서 전자빔이 반복적으로 주사되는 물체의 표면에는 고체 탄소 물질이 용착된다.<sup>5,6</sup> 용착속도는 전자빔 이미지 변수, 진공도, 샘플의 표면 오염 정도에 의존된다. SEM의 진공 챔버 내에 잔류 유기물이 전자빔에 의해 분해된 후 뒤이어 용착이 일어날 수 있으며, 또 한편으로는 유기오염물이 전자빔이 집속되는 표면쪽으로 이동하여 분해 및 용착되는 2가지 공정으로 구분하여 설명되고 있다. Fig. 3은 SEM의 전자빔에 의한 탄소 나노튜브의 nanosoldering 결과를 보여주고 있다.<sup>7</sup> 전자빔 조사에 의해 비결정 탄소(amorphous carbon)가 집성되어 교차하는 나노튜브가 접합된다. 튜브가 합체되는 것이 아니라 비결정탄소가 solder 재료의 역할을 하므로 nanosoldering이라고 한다. 공기 중에서 이미 탄소 나노튜브의 표면에 붙어 있는 탄화수소 분자가 전자빔 조사에 의해 비결정탄소로 변형된 것이다. 이러한 방법을 활용하면 초미세 나노 크기의 전자회로의 제작도 가능하다.



(a)



(b)

Fig. 3 Scanning electron microscopy images of a nanotube junction before (a) and after (b) soldering by deposition of amorphous carbon

## 2.2 나노튜브의 합체 용접(coalescent welding)

나노튜브사이 에 접착제(glue material)를 사용하지 않고 서로 교차하는 나노튜브의 접촉부에 전자빔을 조사하여 원자를 튀어나가게 할 수 있다. 그 결과 나노튜브들은 부족한 원자를 공유하므로써 결합을 제거하고 Fig. 4에서와 같이 여러 가지 접합부(crossbar, transistor)를 형성하게 한다. 이를 합체 또는 합체용접이라고 하며 초고집적 회로 제작에 사용 가능하다고 보고 되고 있다.<sup>8</sup>

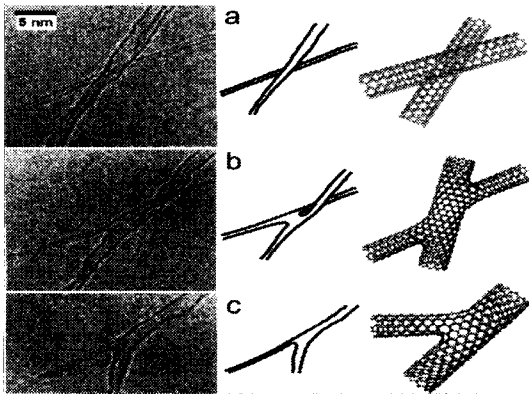


Fig. 4 Where single-walled nanotubes touch (a), an electron beam creates defects, enabling both cross bar (b) and transistor-like three-terminal junctions (c)

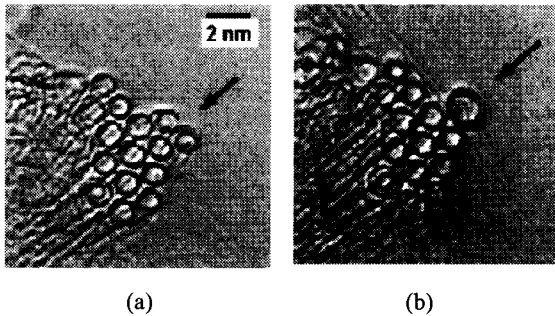


Fig. 5 HRTEM images of SWNT rope cross section of ~15 nanotubes. (a) Starting bundle, and (b) bundler after a few seconds of high-intensity electron irradiation (1.25Mev) at 800°C

Fig. 4의 기초 연구결과의 하나인 Fig. 5는 투과전자 현미경(transmission electron microscope, TEM) 내부에서 전자빔 조사에 의해 화살표 부위의 2개의 나노튜브들이 1개의 나노튜브로 합체되는 현상을 보여주고 있으며, 그 합체되는 과정을 시뮬레이션한 결과가 Fig. 6과 같다.<sup>9</sup>

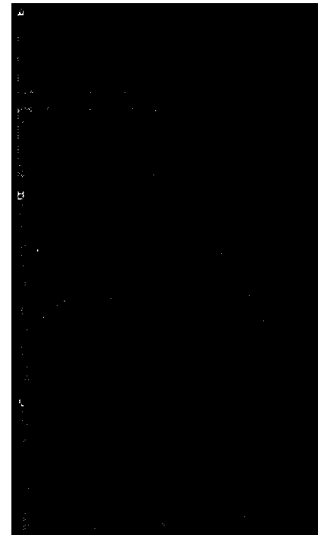


Fig. 6 Sequences of coalescence [side view (left) and sectional view (right)] between two adjacent (10,10) carbon nanotubes (diameter: 1.36nm) into a unique single-walled tube of larger diameter

## 2.3 반도체 나노와이어의 용융 및 용접

Fig. 7은 Ge 나노와이어의 국부 용접을 보여주고 있다.<sup>10</sup> 이를 위해 Ge 나노와이어의 표면은 전처리과정에서 약 1nm의 탄소 겉집 박막 코팅층을 가지고 있다. 탄소 겉집(carbon sheath)의 기공성(porous nature)과 박막이라는 특성으로 인해 접촉부에서 용융된 Ge은 쉽게 교환되어 접촉부(homo junction)를 형성한다. 이는 Fig. 8과 같이 나노튜브의 내부에서 두개의 나노튜브가 연결되는 국부적인 나노범위의 반응성을 이용한 것으로 반도체 나노와이어와 탄소 나노튜브를 재료로 사용하는 여러 가지 접촉부를 만드는데 활용될 수 있을 것이다.

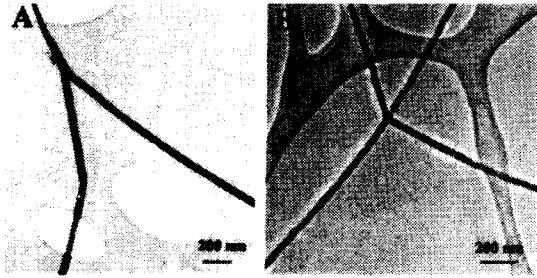


Fig. 7 Two nanowire junctions formed through local welding between nanowires. The nanoscale welding occurs at 800-900°C, depending on the diameter of the nanowires, and the junctions are quenched and recrystallized after welding

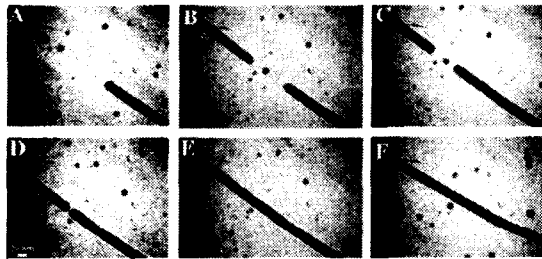


Fig. 8 The TEM image sequence of linking two nanowires within a nanotube. The temperature is kept at 850°C during the operation (A-E). After interconnection, the wire is quenched and recrystallized at 540°C(F)

#### 2.4 공정 시뮬레이션

지금까지의 마크로한 용접과 접합 분야의 연구로부터 나노 단위의 용접과 접합현상을 규명하므로써 더욱더 근본적이고 원초적인 용접과 접합의 원인과 원리를 찾고 이를 바탕으로 좀더 완벽하고 결점이 없는 용접과 접합을 구현할 수 있을 것이다. 이와 관련하여 분자동력학(Molecular dynamics, MD)을 이용한 원자단위의 접합원리를 구현하려는 연구가 진행 중이다.<sup>11</sup> 유한차분법(Finite Difference Method)를 이용하여 구리(copper)의 나노접합에 대한 시뮬레이션 결과가 Fig. 9에 나타나 있다. 조건은 압축력을 9.6nN으로 하였으며, 적당한 길이 수

축에 도달하면 힘을 제거하는 조건을 가지고 있다. 또한, 원자들 사이의 결합에너지, 결합각 에너지, 비틀림 에너지, 전자기적 에너지, 반데르발스 등 여러 결합에너지를 통합하여 Morse Potential Energy를 사용하였다.

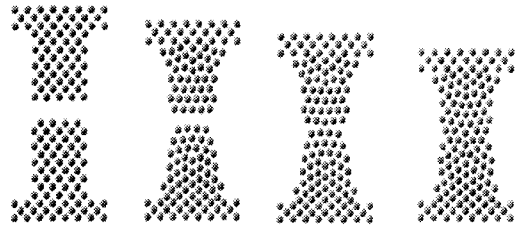


Fig. 9 Atomic-bonding of copper

앞의 2.2항에서 언급된 나노튜브의 coalescence welding에 대하여 적합 레이저 펄스를 이용한 열적 용접(thermal welding)해석이 시도되었으며,<sup>12</sup> Fig. 10이 해석을 위한 개략도이다. 우선 플립 결합(flipped bond)으로 튜브를 연결하고, 이후 목(neck)이 형성되며, 마지막으로 튜브가 완전 재결합하는 과정을 가지게 된다.

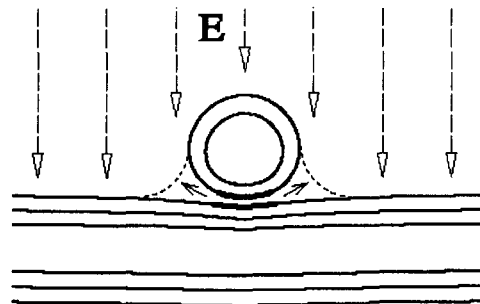


Fig. 10 Coalescent welding of crossed single-wall (SWNT) or multi-wall (MWNT) carbon nanotubes induced by adaptive laser pulses. Local time-dependent excitation heats a micro-size region of the nanotubes, and enables controlled atomically-precise restruct-urization of C bonds at the pressured tube crossing (thin dashed lines)

### 3. 검토

앞에서 언급한 SEM-nanowelding 기술을 활용하면 Fig. 11과 같은 기존의 나노핀셋 제조과정<sup>13</sup>을 대체할 수 있을 것이다. 그러나, nanowelding, nanosoldering 등의 나노접합시 nanotube, nanowire, nanopowder, nanoparticle 등의 나노크기의 입자들을 접합하고자 하는 위치까지 이동, 배치, 조작 등의 작업을 할 수 있는 도구가 필요할 것이다. 현재 나노 수준의 입자를 다룰 수 있는 가장 우수한 방법은 주사투과현미경(STM)을 사용하는 방법인데 이것은 매우 느리고 많은 작업을 요구한다.

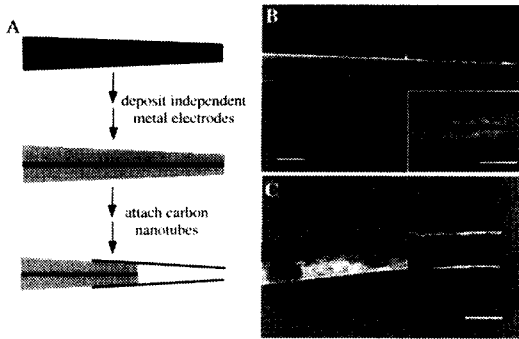


Fig. 11 Overview of the fabrication of carbon nanotube nanotweezer (Schematic illustrating the deposition of two independent metal electrodes and the subsequent attachment of carbon nanotubes to these electrodes)

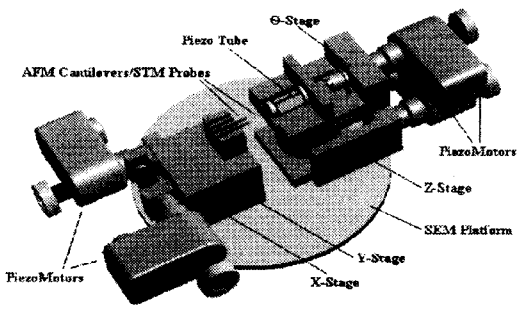


Fig. 12 Schematics of the nanomanipulator inside SEM

최근에 탄소 나노튜브를 자유로히 조작할 수 있도록 도구가 고안되었으며, Fig. 12와 같다. 이 장치는 SEM 내부에서 탄소 나노튜브를 3차원적으로 조작할 수 있는 기능을 가지고 있다.<sup>3,4</sup> 이를 이용한 나노접합 실험결과가 앞의 Fig. 2와 3이다.

원자를 정확히 공급할 수 있는 장치로 Fig. 13과 같은 원자펌프(laser-driven atomic pump)<sup>14</sup>를 예로 들 수 있다. 원자들로 채워진 원자펌프로부터 탄소 나노튜브를 통해 원자의 흐름을 두개의 다른 진동수( $w_0, 2w_0$ )의 레이저 빔의 간섭현상을 이용하여 제어 할 수 있다. 이러한 원리로 튜브의 끝에서 나온 원자들은 정확한 위치에 도달할 수 있게 된다.

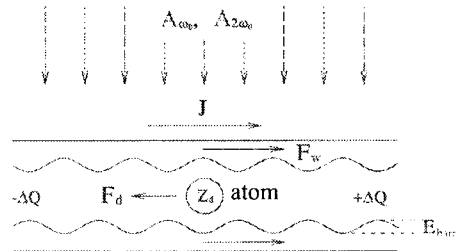


Fig. 13 Functional scheme of a nanotube-based atomic pump

Fig. 13의 원리와 유사하나, 하나의 레이저 빔으로 나노입자를 유도하는 장치를 Fig. 14에서 보여주고 있다.<sup>15</sup> 레이저 빔과 중공형 광섬유를 이용한 장치이며, 레이저의 광학적 힘(optical force)에 의하여 나노 입자를 중공 광섬유 내부로 유도하고 이동시켜 원하는 위치에 증착시키는 기술이다.

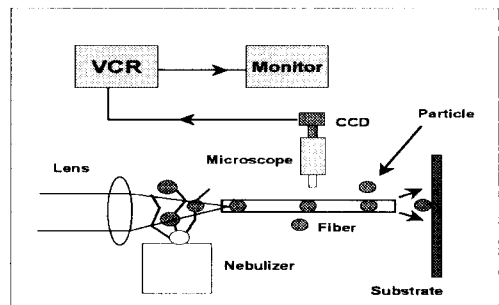


Fig. 14 Laser guidance apparatus for nanoscale particles

#### 4. 결론

향후에는 전자산업이 nanoelectronics로 발전되고, 전자소자의 크기가 소형화됨에 따라 미세소자 간의 배선길이와 폭도 감소되어 나노선(nanowire), 나노튜브(nanotube) 등의 나노접합 기술이 필요하게 될 것이다. 나노접합 뿐만 아니라 나노 가공을 포함한 나노 테크놀로지의 발전은 나노 크기의 물질을 다룰 수 있는 도구의 부족으로 지연되어 왔다고 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서도 나노 입자들의 접합부에 정확히 전송하는 장치의 개발이 시급함을 지적하였고 또한, SEM을 이용한 접합기술의 활용 가능성에 대해서 언급하였다. SEM-nanowelding은 전자빔 리소그래피, 전자빔 직접 묘화(e-beam direct writing)와 함께 나노 수준의 전자빔 가공기술의 큰 줄기를 이룰 것으로 판단되며, KIMM 레이저응용시스템그룹에서 연구를 진행하고 있다.

#### 참고문헌

1. 김근수, 이영희, "탄소 나노튜브의 응용," 기계저널, 제42권, 제11호, pp. 61-70, 2002.
2. Fuhrer, M. S., Nygard, J., Shih, L., Forero, M., Yoon, Y., Mazzone, M. S. C., Choi, H. J., Ihm, J., Louie, S. G., Zettl, A., McEuen, P. L., "Crossed Nanotube Junction," Science, Vol. 288, pp. 494-497, 2000.
3. Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., Ruoff, R. S., "Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load," Science, Vol. 287, pp. 637-640, 2000.
4. Yu, M. F., Dyer, M. J., Skidmore, G. D., Rohrs, H. W., Lu, X. K., Ausman, K. D., von Ehr, J. R., Ruoff, R. S., "Three-dimensional Manipulation of Carbon Nanotubes under a Scanning Electron Microscope," Nanotechnology, Vol. 10, pp. 244-252, 1999.
5. Fujii, T., et al., J. Vac. Sci. Technol., Vol. B9, p. 666, 1991.
6. Kooops, H. W. P., et al., Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, Vol. 33, p. 7099, 1994.
7. Banhart, F., "The Formation of a Connection between Carbon Nanotubes in an Electron Beam," Nanoletters, Vol. 1, No. 6, pp. 329-332, 2001.
8. <http://www.eetimes.com/story/OEG20020930S0061>
9. Terrones, M., Terrones, H., Banhart, F., Charlier, J.-C., Ajayan, P. M., "Coalescence of Single-Walled Carbon Nanotubes," Science, Vol. 288, pp. 1226-1229, 2000.
10. Wu, Y. and Yang, P., "Melting and Welding Semiconductor Nanowires in Nanotubes," Adv. Mater., Vol. 13, No. 7, pp. 520-523, 2001.
11. 박성제, 이세훈, "분자동력학을 이용한 나노단위의 구리분자의 인장 및 접합공정 시뮬레이션에 관한 연구," to be presented (참조: <http://imcs.hanyang.ac.kr>).
12. Kral, P., "Nanoscale Processing by Adaptive Laser Pulse," arXiv:cond-mat/0210583 v1 25 October 2002.
13. Kim, P. and Lieber, C. M., "Nanotube Nanotweezers," Science, Vol. 286, pp. 2148-2150, 1999.
14. Král, P. and Tománek, "Laser-Driven Atomic Pump," Phys. Rev. Lett., Vol. 82, No. 26, pp. 5373-5376, 1999.
15. [www.nanosciencecenter.com](http://www.nanosciencecenter.com)