

SEM 내부에서의 정밀 접합기술

서 정·강희신·김정오

Precision Joining Technology in the SEM

Jeong Suh, Hee-Shin Kang and Jeong-O Kim

1. 서 론

산업분야에서 접합기술로 사용되고 있는 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. 기존의 적외선 레이저(CO₂ 레이저, Nd:YAG 레이저)를 이용한 접합방식이 미소부품, 광통신 부품의 정밀접합에 사용되고 있으나, 빔 특성상 100 μ m 수준의 정밀용접에만 가능하고 레이저 빔직경을 최소화 또는 고속화(scanner)를 위한 광학장치의 구성이 매우 복잡하며, 또한, 광학계가 진동 및 외부의 영향에 매우 민감할 뿐 아니라 접합재료의 선택에 제한이 크다.

MEMS, NEMS, BIO부품 중에는 청결, 고신뢰성, 밀봉(hermetic sealing), 열적 손상 방지가 가능한 미세접합기술이 요구되며, nanoelectronics 분야에서는 나노접합(예: carbon nano-tube connection)기술도 요구된다. 따라서, 전자빔 리소그래피, 전자빔 직접묘화(e-beam direct writing)에서 확인된 나노패터닝 수준의 전자빔의 빔 집속특성을 활용하면 마이크로 및 나노 범위의 나노지향 미세접합이 가능할 것이다. 한편, 기존의 전자빔 용접기에서도 고속 전자빔 편향 특성을 활용하면 연속 미세접합이 가능하고 공정시간을 최대한 단축할 수 있으며, 기존의 SEM 기능과 전자빔 용접기술을 접목하면 미세 포지셔닝(positioning), 3차원 접합 및 측정이 동시에 가능하게 된다.

따라서, MEMS, NEMS, BIO 부품 등 마이크로/나노 부품 패키지를 위한 나노지향 고속 다수부품 일괄 미세접합기술 개발에 대한 국내외 기술 개발 동향을 분석하고, 나노지향 미세접합 기술 개발을 위해 SEM과 전자빔 용접기술을 융합한 초정밀 미세접합기술 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 나노접합기술 동향

최근에 Ruoff 등^{1,2)}은 나노튜브의 기계적 조작에 관한 연구보고를 통해 전자주사현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)의 집속된 전자빔(focused electron beam)이 탄화수소(hydro-carbon) 오염물을 용착(deposition)시켜 Fig. 1과 같이 AFM(atomic force microscopy) 팁(tip)에 나노튜브를 부착하였다. 이러한 기술을 "nano-welding" 혹은 "SEM nano-welding" 기술이라고 하였으며, SEM 내부에서 CNT를 조작하고 CNT의 기계적 물성 평가 실험을 수행하는데 이용되었다.

SEM에서 전자빔이 반복적으로 주사되는 물체의 표면에는 고체 탄소 물질이 용착된다^{3,4)}. 용착속도는 전자빔 이미지 변수, 진공도, 샘플의 표면 오염정도에 의존된다. SEM의 진공 챔버 내에 잔류 유기물이 전자빔에 의해 분해된 후 뒤이어 용착이 일어날 수 있으며, 또 한편으로는 유기오염물이 전자빔이 집속되는 표면

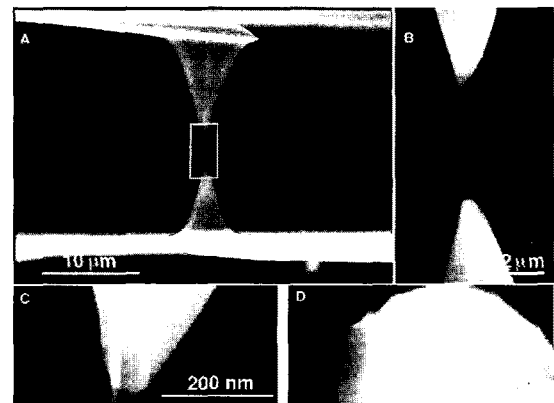


Fig. 1 An individual MWCNT mounted between two opposing AFM tips (A): SEM image, (B): High-magnification of (A), (C) and (D): High magnifications of top and lower AFM tips

쪽으로 이동하여 분해 및 용착되는 2가지 공정으로 구분하여 설명되고 있다.

Fig. 2는 SEM의 전자빔에 의한 탄소나노튜브의 nano-soldering 결과를 보여주고 있다⁵⁾. 전자빔 조사에 의해 비결정 탄소(amorphous carbon)가 집성되어 교차하는 나노튜브가 접합된다. 튜브가 합체되는 것이 아니라 비결정탄소가 solder 재료의 역할을 하므로 nano-soldering이라고 한다. 공기 중에서 이미 탄소나노튜브의 표면에 붙어 있는 탄화수소 분자가 전자빔 조사에 의해 비결정탄소로 변형된 것이다. 이러한 방법을 활용하면 초미세 나노 크기의 전자회로의 제작도 가능하다.

3. 전자빔 응용 접합 장치 및 공정

3.1 Flip chip packing 공정

최근 전자제품의 소형 고기능화에 따라 고밀도 면실장기술이 발전되어 왔으며, BGA (ball grid array), CSP(chip scale package), 플립칩(Flip chip) 패키지의 수요가 증가하고 있다. 플립칩 기술은 표면실장기술(surface mount technology)의 진보한 형태로서, 반도체 칩 윗면을 아래로 향하게 하여 PCB 또는 칩캐리어 기판에 직접적으로 접합하게 된다. 즉, 플립칩에

서는 Fig. 3과 같이 칩 접합패드와 칩을 놓는 기판 사이에 범퍼(bump)에 의해서 직접 전기적으로 연결된다. 현재는 환경적인 문제로 solder bump 형성을 위해 무연(Pb-free) 무플럭스(fluxless) 범핑공정이 요구된다.

μ -BGA나 Flip chip에서 사용되는 무연 solder ball에 E-beam을 조사하여 직접 BGA 패드위에 무플럭스 접합한 결과를 Fig. 4와 5에서 보여주고 있다. Fig. 4는 solder ball을 개별 용융시키고 반면 Fig. 5는 전

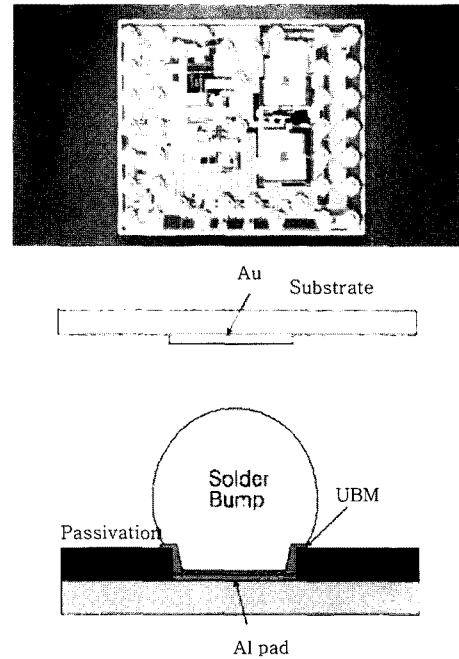
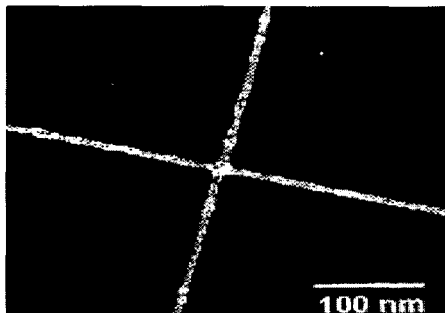
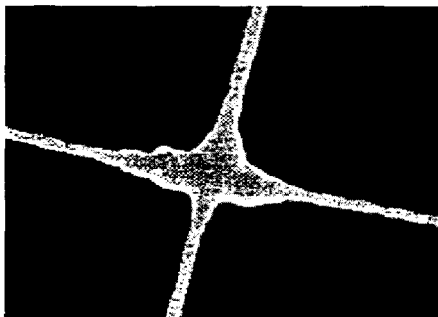


Fig. 3 Flip chip package



(a)



(b)

Fig. 2 Scanning electron microscopy images of a nano-tube junction before (a) and after (b) soldering by deposition of amorphous carbon

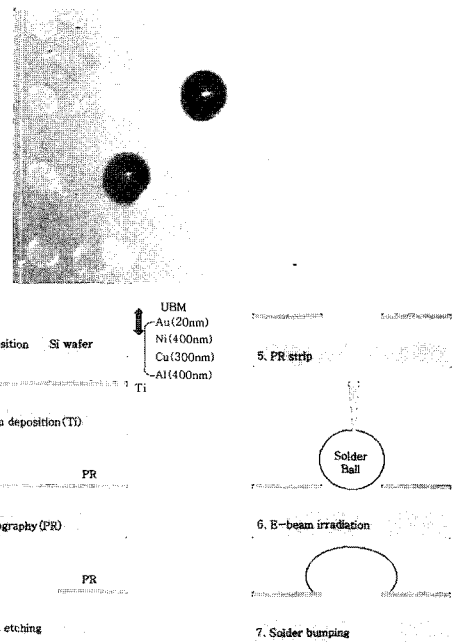


Fig. 4 Soder balls on BGA pad

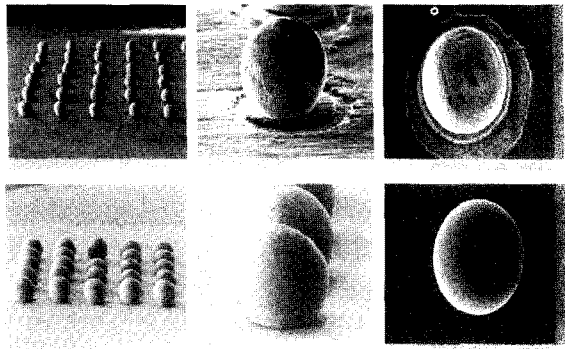


Fig. 5 Melted solder balls on PCB and BGA (Sn-3.5Ag, $\phi 500\mu\text{m}$)

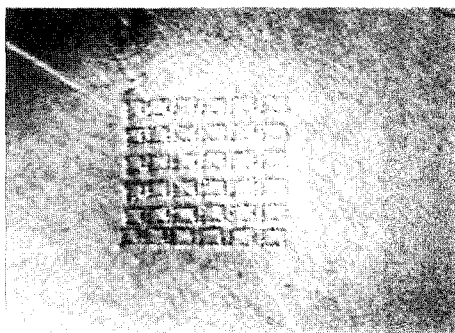


Fig. 6 Dynamic deflection of e-beam

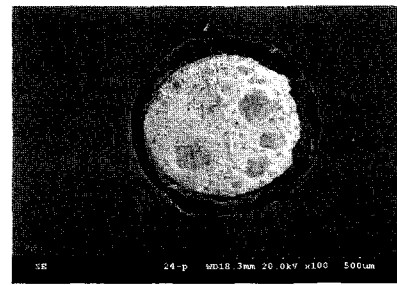
자빔 고속 편향기술(Fig. 6 참조)를 접목하여 여러개의 솔더 볼들을 고속으로 접합한 결과이다.

Fig. 7은 Fig. 5의 접합된 솔더볼들의 접합강도를 측정실험을 한 후의 파단면 사진이다. 측정 결과 $500\mu\text{m}$ ball의 양호한 접합강도(력)는 $7\sim 8\text{ N}$ 이며, PCB의 경우에는 확보가 되었으며, 파단면에 솔더볼의 용융물이 남아 있음을 알 수 있다.

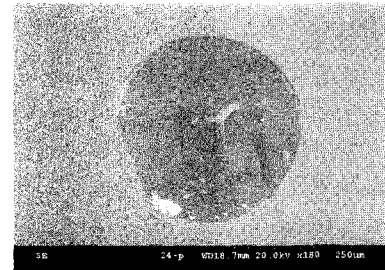
3.2 SEM 이용 접합 장치

기존의 전자빔 용접기를 개조한 전자빔 미세접합장치(Fig. 8)에서는 수십 μA 의 빔전류를 얻기가 어렵다. 최근에는 고밀도 집적빔(E-beam)의 특성을 이용해서 재료의 표면 관찰이나 반도체 공정 중 리소그래피에 사용되어 왔던 주사전자현미경(SEM)을 미세접합에 적용하고자 하는 노력이 있어 왔다. 일반적으로 SEM이 관찰용 도구나 리소그래피용으로 사용될 경우에 얻을 수 있는 최대전류는 100 pA 수준이다.

Fig. 9와 같이 EB-welder와 SEM의 개념은 유사하며 최근, KAIST에서는 SEM을 Fig. 10과 같이 slit와 aperture의 hole 직경을 모두 $30\mu\text{m}\rightarrow 1\text{mm}$ 로 확대



(a)



(b)

Fig. 7 Fractured surface after shear test on (a) PCB and (b) BGA



Fig. 8 Modified EB welder (KIMM)

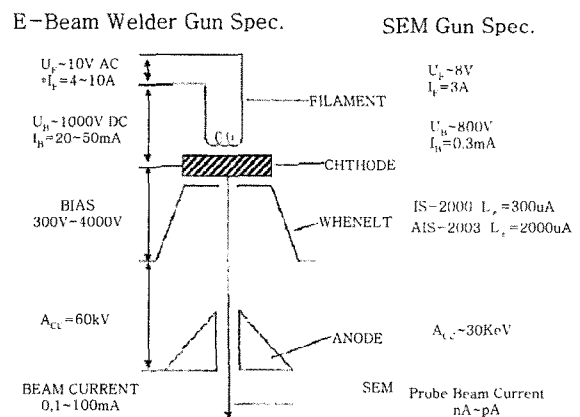


Fig. 9 Comparison of EB-gun

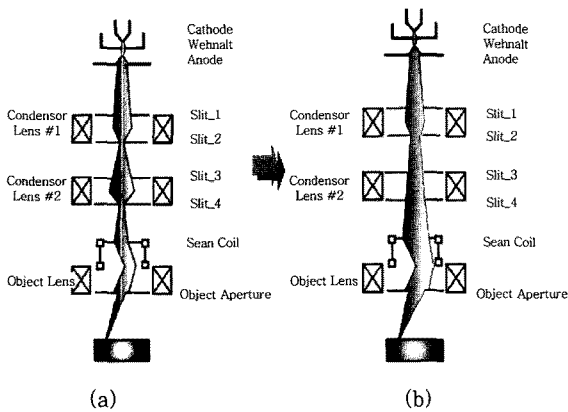


Fig. 10 Schematic of beam profile (a) with 2nd condenser lens on, (b) with 2nd condenser lens off

하고, 2nd condenser lens를 off시켜 최대 빔전류(I_b) 얻을 수 있음을 보고하고 있다⁶⁾. 그러나, SEM으로 사용코자 하는 경우 aperture의 hole 직경을 다시 복원시켜야 하는 단점이 있으므로 SEM을 접합공정 중에 실시간 관측용으로 사용할 수가 없다.

빔전류(I_b)의 상승을 위해서는 기계적인 방법과 전기적인 방법을 함께 고려할 수 있다. 우선 기계적인 방법으로는 moving aperture를 사용할 수 있다. SEM(관측)으로 사용시에는 적은 hole을 통해 전자빔이 이동하며, moving aperture를 완전히 당기면 전자빔이 모두 관통하도록 되어 있어 SEM-welder로 사용할 수 있다. 빔전류를 Faraday Cup으로 측정된 결과, 최대 $I_b = 13\mu A$ 을 얻을 수 있었다. I_b 를 더 높이기 위해 SEM 고압회로부에서 배압기 구조를 변경, s/w 주파수 낮게(짧게) 조절, Reflector 단의 COCKROFT-WALT ON capacitor를 변경한 결과, 최대 = $35\mu A$ 까지 상승시킬 수 있다. Fig. 11은 개발한 SEM-welder를 보여주고 있다.



Fig. 11 Developed SEM-welder

4. SEM-welder를 이용한 초미세 접합결과

Fig. 12는 SEM-welder를 이용하여 2개의 solder ball($\phi 300\mu m$)이 용융되어 1개의 ball로 형성됨을 보여주고 있다.

Fig. 13은 $\phi 200\mu m$ 의 Cu Wire를 SEM welder의 용융조건 $V_{acc} = 20kV$, $I_b = 35\mu A$ (BSE mode)에서 2 min간 주사한 후의 결과이다. Fig. 14는 $\phi 20\mu m$ 인 Cu Wire를 SEM welder의 용융조건 $V_{acc} = 20kV$, $I_b = 14\mu A$ (BSE mode)에서 1 min간 주사한 후의 SE image와 주사하기 전의 image를 보여준다. 주사 전 사진의 사각 안에 빔을 주사하였다. 오른쪽 사진은 용융된 끝단부를 확대 촬영한 사진이다.

Fig. 15는 카본나노튜브(CNT : Carbon Nano Tube)의 접합(nano-soldering)실험 결과를 보여준다. 실험

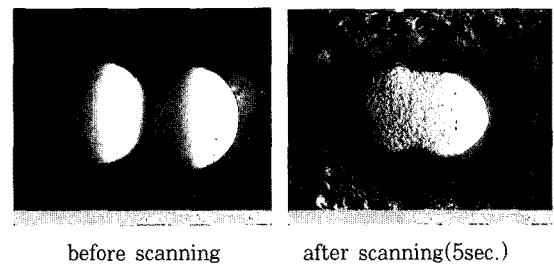


Fig. 12 SEM melting of solder ball($300\mu m$) ($V_{acc} : \sim 20 kV$, $I_b : \sim 30 \mu A$)

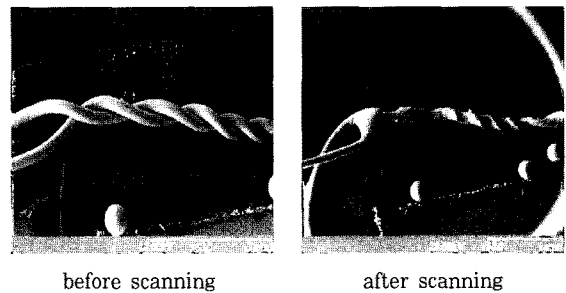


Fig. 13 SEM melting of Cu Wire($\phi 200\mu m$) ($V_{acc} : \sim 20 kV$, $I_b : \sim 30 \mu A$)

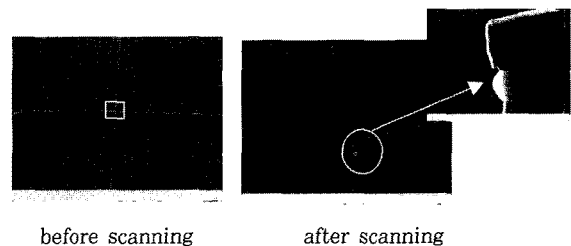


Fig. 14 SEM images of Cu wire($\phi 20\mu m$) ($V_{acc} : \sim 20 kV$, $I_b : \sim 14 \mu A$, $t=1min$)

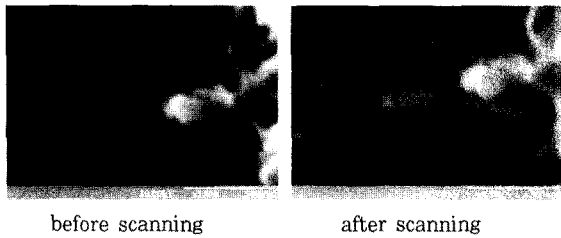


Fig. 15 SEM-soldering of carbon nano tube ($\phi 10\text{nm}$) ($V_{\text{acc}} : \sim 30 \text{ kV}$, $I_b : \sim 100 \text{ pA}$)

에 사용된 CNT는 직경이 10nm 이며, 가압전압이 30kV이고 150,000 배율에서 실시되었다. 1분간 나노튜브가 교차하는 부분에 전자빔을 집중 조사한 결과 나노튜브가 접합됨을 알 수 있다. 튜브가 합체되는 것이 아니라 비결정탄소가 solder 재료의 역할을 하므로 nano-soldering(혹은 nano-welding)이라고 한다. 즉, CNT의 교차부분에 비결정 탄소가 집성(deposition of amorphous carbon)되어 교차하는 나노튜브가 접합되며, 이러한 원리를 이용하면 나노튜브가 부착된 AFM 팁 제작 및 초미세 나노크기의 전자회로 제작도 가능할 것이며, 빔전류 100pA는 SEM에서도 얻을 수 있는 빔 전류이므로 CNT의 경우 SEM을 이용하여 접합이 가능하다고 볼 수 있다.

SEM 내부에서 미세부품의 이동 및 조작을 용이하게 하기 위해 manipulator가 요구된다. SEM용 manipulator는 작동기에 해당하는 3축 manipulator와 제어 및 동작명령을 내리는 나노콘트롤러로 이루어진다. 3축 manipulator는 nano-motor로 정밀 위치제어가 가능하다. SEM-manipulator를 설치하기 위하여 SEM chamber 내에 고정용 브라켓을 제작한다. Fig. 16은 nano-manipulator가 브라켓에 조립된 상태를 보여준다. Fig. 17은 SEM-welder를 이용한 나노튜브 탐침 접합 실험결과를 보여주고 있다.

5. 결 론

E-beam direct writing 기능을 SEM 장치와 접목하



Fig. 16 Setup of SEM-manipulator

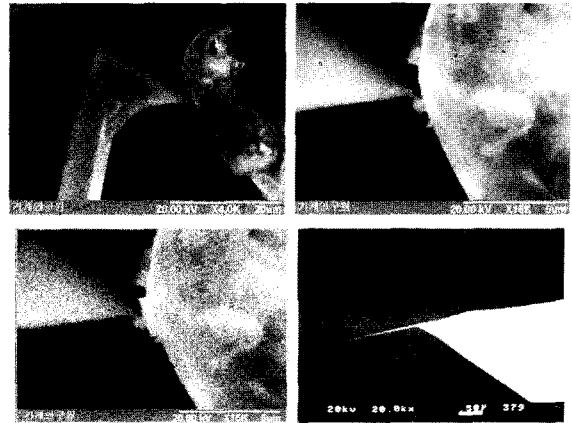


Fig. 17 Joining of CNT at AFM tip

여 미세 접합/측정 겸용, 실시간 관측기능, manipulator를 갖는 SEM-welder를 구성하고 접합 결과를 분석할 수 있었다. 확보된 기술이 적용될 수 있는 분야로는 Nano line, Nano tube, Nano switch, Nano transistor 등의 제작분야이며, 이를 위해 Nano 메카트로닉스 기술과의 접목이 요구되었다.(SEM + 3차원 manipulator) 또한, 본 기술은 MEMS, NEMS, BIO 부품 패키징, 마이크로 머신 부품 joining, Nano powder 응용 브레이징 기술에도 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 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, 637-640, 2000
2. 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, 244-252, 1999
3. Fujii, T. et al, *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. B9, 666, 1991
4. Koops, H. W. P et al, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, Vol. 33, 7099, 1994
5. Banhart, F., "The Formation of a Connection between Carbon Nanotubes in an Electron Beam," *Nanoletters*, 1-6, 329-332, 2001
6. Il-Han Hwang, Suck-Joo Na : A Development of SEM Applied Microjoining System, *Journal of KWS*, 21-4 (2003), 63-68 (in Korean)



- 서정
- 1960년생
- 한국기계연구원 지능형생산시스템
연구본부 레이저공정연구팀장
- 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
- email : jsuh@kimm.re.kr



- 김정오
- 1964년생
- 한국기계연구원 지능형생산시스템
연구본부 레이저공정연구팀
- 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
- email : jokim@kimm.re.kr



- 강희신
- 1972년생
- 한국기계연구원 지능형생산시스템
연구본부 레이저공정연구팀
- 용접공정 및 용접자동화
- email : khs@kimm.re.kr