

마이크로 솔더볼의 용융에 관한 기초연구

A fundamental study of the melting of micro solder ball

강희신*, 서정, 이제훈, 김정오

1.서론

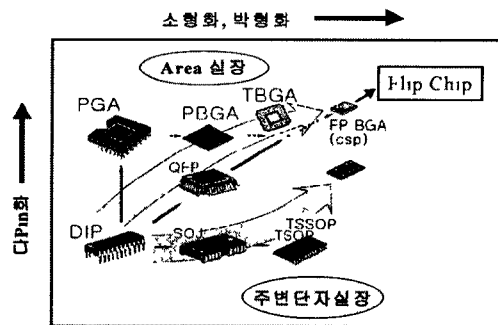
본 연구는 레이저를 이용한 3차원 미세접합 기술을 개발하기 위한 기초 실험이다. 선택적 부가가공 공정기술의 확보를 위해서 솔더볼의 용융에 관해 기초 실험을 수행하였다. 연구를 통해 Nd:YAG 레이저를 이용한 솔더볼의 범핑 공정의 개념을 정립하고자 하였다. 마이크로 솔더볼 이동 노즐과 레이저 집속헤드를 설계 및 제작하여 솔더볼의 범핑 실험을 수행하였다. 100 μ m, 300 μ m, 500 μ m의 솔더볼에 대해 범핑 실험을 수행하여 레이저를 이용한 솔더볼의 용융조건을 분석하였다. 상용장비인 PAC TECH사의 범퍼장비(SM²-SM)를 이용해서 100 μ m 솔더볼에 관해 범핑 실험을 하고 용융조건과 범핑 현상을 상호 비교 및 분석하였다.

Opto-MEMS 등 광통신 부품의 소형화에 따라 조립(패키징) 공정의 초미세화가 요구되고 있으며, 여기에는 미세접합기술, 미세액적제어 및 실링(sealing)기술이 핵심요소 기술이다. 휴대전화, 노트북 컴퓨터, IC카드와 같은 개인용 및 휴대용 전자제품의 발달로 전자 제품 업계는 제품의 소형화와 경량화의 요구에 부응하기 위한 노력을 기울이고 있으며, 한 예로 실장밀도가 가장 높은 솔더 범퍼 플립칩 패키지(solder bump flip chip)는 많은 수의 입출력 단자를 가지지만 열적 손상 및 환경적인 문제로 무연(lead-free)접합이 가능한 레이저 솔더링 기술을 적용하고자 시도중이다. 최근 macro/micro로부터 micro/nano 인터페이싱을 위한 조립(패키징)기술이 요구되므로 현재의 레이저 솔더링 수준의 2차원 접합기술을 3차원 접합기술로 한단계 발전시켜야 하며, 이 분야의 기술이 확립되면 당장에 산업에 미칠 효과가 매우 크며, 국내 전자부품 산업의 지속적인 발전을 도모할 수 있을 것이다.

전자 및 반도체 산업의 조립 및 상호접속공정에서 마이크로 부품(또는 선)과 거시 부품의 scale bridging 접합, 접합부(또는 선)의 간극(gap)이 큰 경우, 박막소재(thin foil)의 무응력(strength free) 접합, 고반사율 부품의 접합기술이 요구되고 있으나, 2차원 접합방식인 레이저 솔더링 기술로는 이를 극복하기 어려우며 새로운 3차원 접합 기술이 필요하다. 특히, 3차원 미세접합 기술은 접합부를 마이크로 조형하는 기술이라고 할 수 있으므로 개발될 기술은 금속 패속조형기술로도 적용될 수 있다. 기존의 금속 패속조형 공정(Direct Metal Solid Freeform Fabrication)은 적층 제작 시 매 층(layer)에서 금속 재료가 완전히 용융/응고됨으로써 제작된 금속부품의 치수정밀도, 표면정밀도 등에 악영향을 미치게 되고 잔류응력이 존재하여 뒤틀림이 발생할 수 있다. 마이크로 접합 금속부 입체성형을 위해 기존 RP 공정(μ

-droplet 이용 SIM)의 한계 극복이 필요하며 개발하고자 하는 본 기술을 통해 고용점 금속 사용, 열적 변형 방지, 공정단축, 초정밀(미세) 가공이 가능하다. 최근에는 과열된(superheated) μ 금속방울(μ -droplet)을 레이저 예열된(laser preheated) 금속분말층에 선택적으로 용침(infiltration)하여 금속부품을 쾌속 제작함으로써 제작된 금속 내부의 잔류응력을 최소화하고, 제작시간을 절감할 수 있는 선택적 용침 공정(Selective Infiltration Manufacturing)이 개발되었으나, 히터 내에서 금속방울의 생성 그리고 노즐을 통한 이동 및 용침 등의 공정이 복잡하며 정밀 제어가 요구될 뿐만 아니라, 저융점의 금속(주석-납 합금 등)의 사용에만 적합한 실정이다. 따라서, 고용점의 금속을 사용할 수 있으며, SIM 공법보다 단순하면서 마이크로 조형이 가능한 기술이 필요하다. 레이저 가공기술과 SIM 기술을 활용하여 마이크로 조형 기술을 개발하고자 한다

최종 연구목표는 마이크로 금속(μ -ball, μ -wire 형상)의 선택적 레이저 용융 및 그 생성물(μ -droplet)을 이용한 3차원 정밀 미세접합 및 마이크로 조형기술을 개발이다. 본 연구는 마이크로 금속 용융 입체화기술 개발에 앞서 레이저를 이용한 솔더볼의 범평 실험을 통해 선택적 부가가공 공정기술의 기초실험 데이터를 확보하고자 하였다.



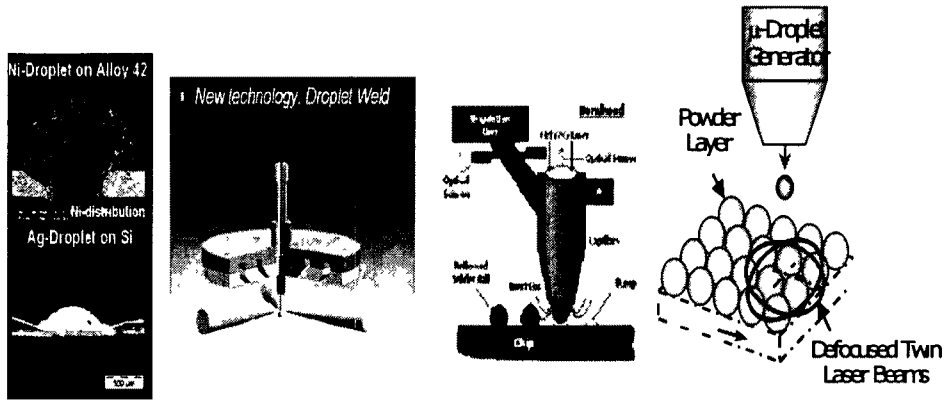
<그림 1 전자부품의 고집적화 경향>

2. 실험 장치 및 방법

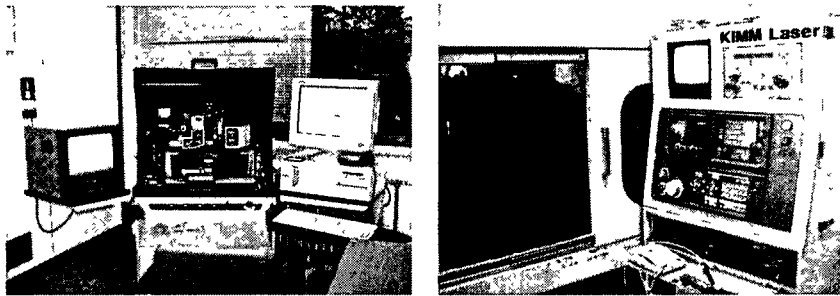
지금까지의 국내외 연구개발 동향을 살펴보면 레이저를 이용한 선택적 부가가공(additive process)에 대한 연구는 연구소와 업체를 중심으로 laser cladding, 쾌속조형(RP, Rapid Prototyping) 등에 대해 주로 수행되었으나, 적용되는 금속재료를 완전히 용융/응고시킴으로써 입열량이 크므로 미세부품 조형에는 부적합하다. KAIST에서는 과열된(superheated) μ 금속방울(μ -droplet)을 레이저 예열된 금속분말층에 선택적으로 용침(infiltration)하여 금속부품을 쾌속 제작하는 기술이 개발되었으나, 히터 내에서 금속방울의 생성 그리고 노즐을 통한 이동 및 용침등의 공정이 복잡하며 정밀 제어가 요구될 뿐만 아니라, 저융점의 금속(주석-납 합금 등)의 사용에만 적합하다 KAIST

에서는 레이저 접합(솔더링)공정을 연구하였으며, KIMM에서는 레이저를 이용한 micro-soldering 기술 개발을 수행한바 있다. 반도체의 경박단소화 추세에 힘입어 특수시장으로 간주되는 플립칩의 수요가 증대하고 있으며, 중요한 범핑공정은 진공증착법, electroplating 방식, printing 방식으로 이루어지고 있으며 선진국에서는 레이저 솔더 볼 범핑 기술 채택하고 있다. 최근, 독일 BLZ gmbh에서 개발한 “Laser Droplet Weld” 기술은 gap이 큰 조인트부를 접합하거나 thin foil의 접합에 적용할 수 있다고 보고하고 있다. 독일 Pac Tech gmbh는 레이저 솔더 볼 범퍼를 개발하여 판매하고 있으며, Flip Chip 솔더 범핑에 사용하고 있다

아래 그림 2는 레이저를 이용한 금속의 국부용융, 적층배열 등과 같은 새로운 부가공정의 개념을 보여준다. 이러한 기본 개념을 가지고 본 연구에서는 솔더볼의 기초 용융조건의 도출 실험과 실험장치를 구성하였다.



<그림 2 새로운 개념의 부가공정>



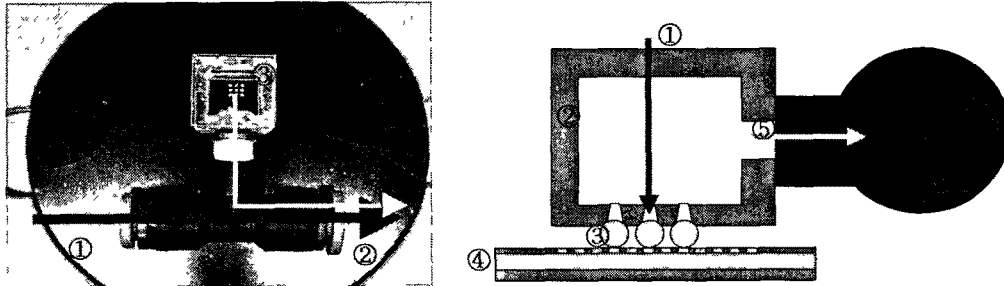
(a) Excimer laser

(b) Nd:YAG laser

<그림 3> 솔더볼 범핑 실험을 위해 사용한 레이저 장비

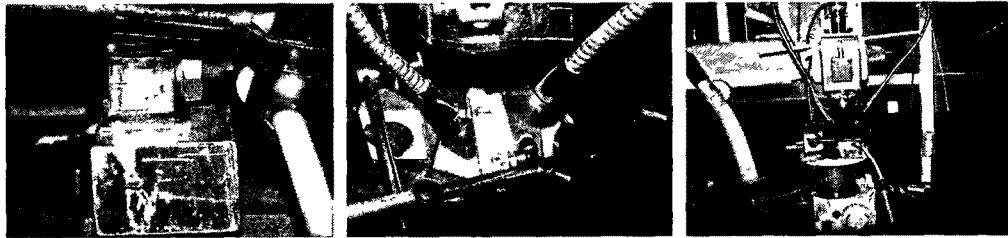
그림 3은 Nd:YAG 레이저와 Excimer 레이저의 사진이다. 솔더볼의 범핑 공정 실험을 위해 사용하였다. Excimer 레이저는 quartz를 이용한 실험장치의 출가공을 하는데 이용하였고 Nd:YAG 레이저는 실제 범핑 실험을 하는데 사용된 레이저 소스이다. 그림 4는 제작한 솔더볼 array의 최종 모습이며 홀이 가공된 quartz 상자에

솔더볼이 고정되는 원리를 보여 준다 ①에서 ②방향으로 빠른 유속의 공기(적색)가 지나가면 오리피스스의 원리에 의해 챔버 ③의 내부가 저압의 상태를 유지하게 되며, quartz 상부의 홀에 솔더볼을 위치시키면 저압 상태의 quartz 상자에 고정이 된다.

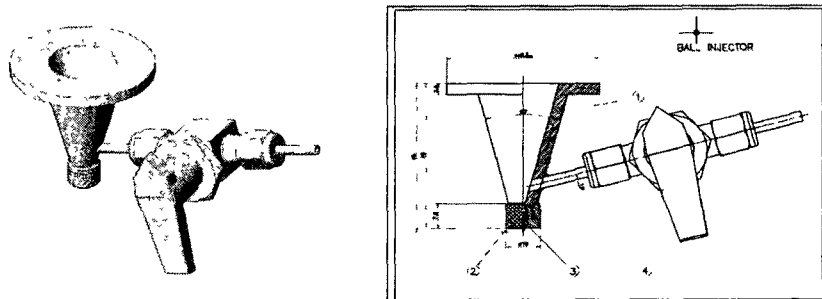


<그림 4> Quartz 상자를 이용한 솔더볼의 범핑 개략도

그림 5는 Nd:YAG 레이저 챔버 스테이지 위에 퀴츠 상자를 설치한 실험장치 사진이다 퀴츠 상자 밑에는 PCB 기판을 설치하였다. 솔더볼이 퀴츠 상자에 고정시킨 후 PCB 기판 위의 볼 범퍼에 위치시킨 후 레이저를 조사하여 솔더볼을 용융시켰다. 그림 6은 솔더볼을 공급과 레이저 빔을 조사하기 위한 레이저헤드와 솔더볼 이송 노즐의 3차원 모델링과 2차원 도면이다.



(a) (b) (c)
<그림 5> Quartz chamber와 PCB pad의 설치 사진



<그림 6> 솔더볼 이동 노즐 및 laser 집속 헤드의 3차원 모델링과 설계도면

3. 실험결과

가 Lee laser(Nd:YAG laser)를 이용한 솔더볼 용융 기초실험

(1) 실험조건

- 1) Solderball의 성분 : Sn-3.5Ag(500 μ m)
- 2) Beam spot size : 100 μ m (20 μ m의 빔을 키우기 위해 defocusing : Z축 3mm up)
- 3) Laser max power : 60W
- 4) Q-switch mode와 CW mode에서 실험
- 5) Q-switch mode에서의 실험조건 : 25A, 2kHz, 15W, 2초
- 6) CW mode에서의 실험조건
 - 15A에서 20A까지 순차적으로 전류를 증가시키며 10초간 빔 주사
 - 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5A 조건에서 5초간 빔 주사
 - 일반 뿔납에 20A, 2초간 빔 주사

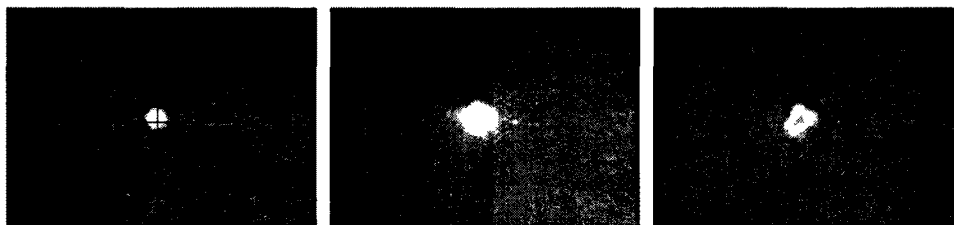
(2) 실험결과

Q-switch mode와 CW mode에서 실험을 수행하였으며 먼저 Q-switch mode에서 전류 25A(15W), 2kHz, 시간 2초의 조건으로 실험을 하였다. 침투 출력이 급격히 증가하여 솔더볼이 그림 7과 같이 빔 주사 시 뿔겨져 나갔다. 반복 실험을 수행하였으나 같은 현상으로 CW mode로 전환하여 실험을 수행하였다.



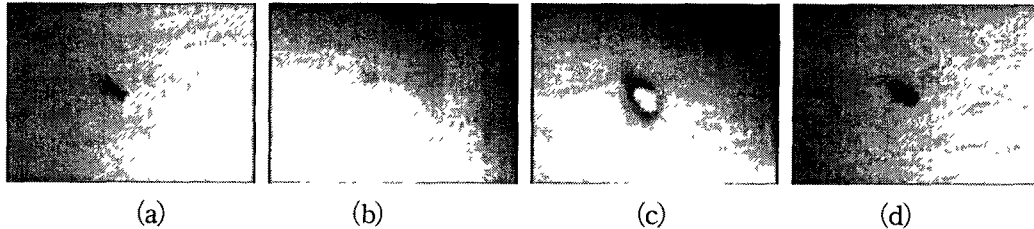
<그림 7> Q-switch mode(25A, 2kHz, 15W)에서 솔더볼 용융 실험

Q-switch mode에서 CW mode로 전환하여 실험을 수행하였다. 15A에서 20A까지 순차적으로 전류를 증가시키며 10초간 빔 주사하였다. 그림 8(a)는 초기 솔더볼의 모습이며 (b)는 빔이 주사되는 모습을 보여준다. 밝게 빛나며 용융이 되었다. (c)는 빔을 차단한 후의 결과 사진이다. 솔더볼의 형상이 완전히 변형되어 형태를 알아 볼 수가 없다.



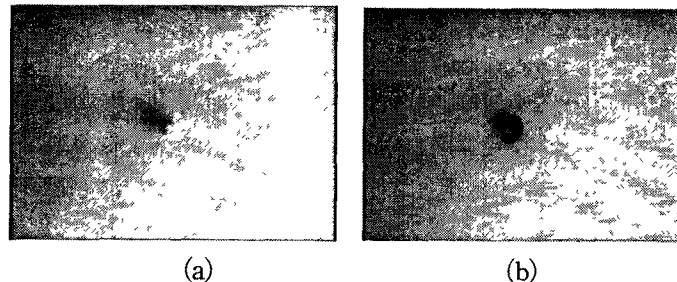
(a) (b) (c)
<그림 8> CW mode에서 솔더볼 용융 실험(15A-20A)

에너지가 너무 높아 완전 용융되는 것으로 판단하여 에너지를 낮추기 위해 빔 주사 시간을 10초에서 5초로 변경하고 전류값 전류 20A(25W), 22.5A(28W), 25A(32W), 27.5A(35W) 조건에서 빔을 주사하여 솔더볼의 용융현상을 관찰하였다. 그림 9는 전류 17.5A(22W), 5초의 조건으로 실험한 사진이다. (a)는 초기 솔더볼의 모습이며 (b), (c)는 빔이 주사되는 장면이다. 최종 (d)에서는 완전 산화된 모습으로 판단된다. 용융 시 화염이 더욱 강해지고 최종 결과 사진을 보면 산화가 심한 것을 볼 수 있다.



〈그림 9〉 CW mode, 17.5A(22W) 조건에서 솔더볼 용융 실험

그림 10은 전류 15A(18W), 5초의 조건으로 실험한 사진이다. (b)는 빔 조사 후의 결과 사진이다. 전체적으로 형태가 무너지고 완전 용융이 되었다. Lee laser의 최소 전류값 설정이 15A이므로 그 이하의 조건으로 실험을 수행할 수가 없었다. 최소 전류값인 15A(18W)에서 순간적으로 완전 용융이 되어 기초 실험을 종료 하였다.



〈그림 10〉 CW mode, 15A(18W) 조건에서 솔더볼 용융 실험

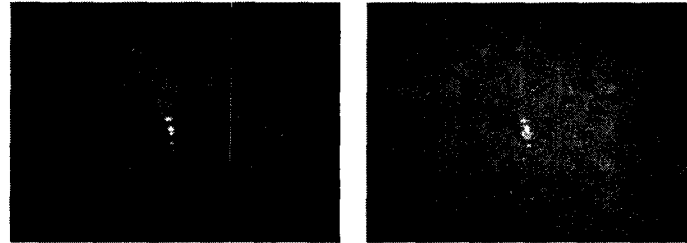
나. Lumonics Nd:YAG laser를 이용한 솔더볼 용융 기초실험

(1) 실험조건

- 1) Solderball의 성분 : Sn-3.5Ag(500 μ m)
- 2) Beam spot size : 300 μ m
- 3) Laser max. power : 600W
- 4) Pulse mode에서 실험
- 5) Pulse mode에서의 실험조건
 - Height 13%, Width 20ms, Frequency 5Hz

(2) 실험결과

Pulse mode에서 레이저 파워를 3W로 설정하여 실험을 수행하였다. 그림 11은 Height 10%, 20ms, 5Hz, 3W(0.65J)의 조건에서 1pulse의 빔을 솔더볼에 주사한 사진이다. 솔더볼 상부 표면이 용융되어 분화구 형상으로 변화된 모습을 사진 (b)에서 관찰할 수 있다. 2pulse, 3pulse, 4pulse로 빔의 pulse 수가 증가할수록 솔더볼의 상부 표면이 더 넓게 변화되었다.



(a)

(b)

<그림 11> Height 10%, 20ms, 5Hz, 3W, 1Pulse

솔더볼 이동 노즐과 레이저 집속헤드를 설계 및 제작하여 솔더볼의 범핑 실험을 수행하였다. Solderball의 성분은 Sn-3.5Ag이고 크기는 100 μ m, 300 μ m, 500 μ m을 사용하였다. Pulse width : 5ms, Frequency : 5Hz로 고정하고, Pulse height(%)를 20에서 30까지 변경하여 100 μ m 솔더볼의 용융 경계조건을 찾는 실험을 수행하였다. 100 μ m 솔더볼을 박판에 올려놓고 각 용융조건별로 관찰하였다. 100 μ m 솔더볼의 경우 너무 미세하여 설계한 노즐을 이용한 불 공급이 원활하지 않아 박판에 불을 올려놓고 설계한 레이저헤드를 통해 빔을 주사하였다. 표 1과 같이 레이저 조건을 변화시키며 빔 주사 후 솔더볼 형태를 카메라를 통해 관찰하였다.

<표 1> 100 μ m 솔더볼의 용융실험 조건 및 결과

No.	Pulse width	Pulse height	Energy	Result
1	5ms	30%	0.14J	비산
2	5ms	28%	0.12J	비산
3	5ms	26%	0.10J	비산
4	5ms	24%	0.07J	비산
5	5ms	22%	0.05J	녹음, 비산
6	5ms	21.5%	0.04J	녹음, 비산
7	5ms	21%	0.03J	녹음, 비산
8	5ms	20.5%	0.03J	움직임
9	5ms	20%	0.03J	변화없음(연속 5pulse)

Pulse width : 5ms, Frequency : 5Hz로 고정하고, Pulse height(%)를 22에서 50까지 변경하여 500 μ m 솔더볼의 용융 경계조건을 찾는 실험을 수행하였다. 500 μ m 솔더볼을 박판에 올려놓고 각 용융조건별로 관찰하였다. 표 2와 같이 레이저 조건을

변화시키며 빔 주사 후 솔더볼 형태를 카메라를 통해 관찰하였다.

<표 2> 500 μm 솔더볼의 용융실험 조건 및 결과

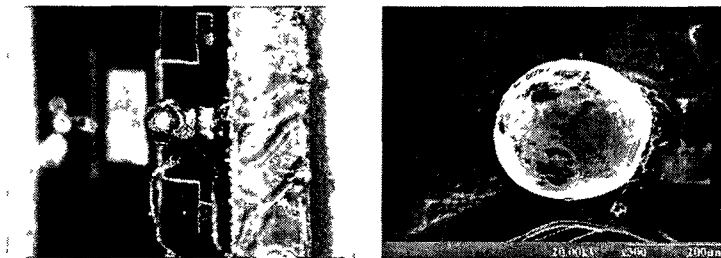
No.	Pulse width	Pulse height	Energy	Result
1	5ms	22%	0.05J	국부 용융
2	5ms	24%	0.07J	국부 용융
3	5ms	26%	0.10J	국부 용융
4	5ms	28%	0.12J	국부 용융
5	5ms	30%	0.14J	국부 용융
6	5ms	35%	0.18J	국부 용융 및 움직임
7	5ms	45%	0.24J	국부 용융 및 움직임
8	5ms	50%	0.30J	완전용융
9	5ms	55%	0.36J	완전용융

Pulse width : 5ms, Frequency : 5Hz로 고정하고, Pulse height(%)를 20에서 30까지 변경하여 300 μm 솔더볼의 용융 경계조건을 찾는 실험을 수행하였다. 300 μm 솔더볼을 웨이퍼에 올려 놓고 각 용융조건별로 관찰하였으며 실험결과는 표 3과 같다.

<표 3> 300 μm 솔더볼의 용융실험 조건 및 결과

No.	Pulse width	Pulse height	Energy	Result
1	5ms	20%	0.02J	국부 용융
2	5ms	22%	0.04J	국부 용융
3	5ms	24%	0.06J	국부 용융
4	5ms	26%	0.08J	국부 용융
5	5ms	28%	0.11J	국부 용융
6	5ms	28%	0.11J	국부 용융
7	5ms	30%	0.14J	국부 용융

그림 12는 300 μm 솔더볼의 범핑 실험 후 확대관찰하기 위해 촬영한 현미경 사진과 SEM 사진이다. 솔더볼을 현미경으로 사진을 찍고 SEM 사진을 촬영한 것이다. 솔더볼이 범핑이 되었고 전체적으로 볼 형상을 그대로 유지하고 있다.



(a) 현미경사진

(c) SEM 사진

<그림 12> 300 μm 솔더볼의 용융실험 결과 사진

다. Quartz 상자를 이용한 솔더볼 범핑 기초 실험

(1) Quartz 가공을 통한 솔더볼 array 제작

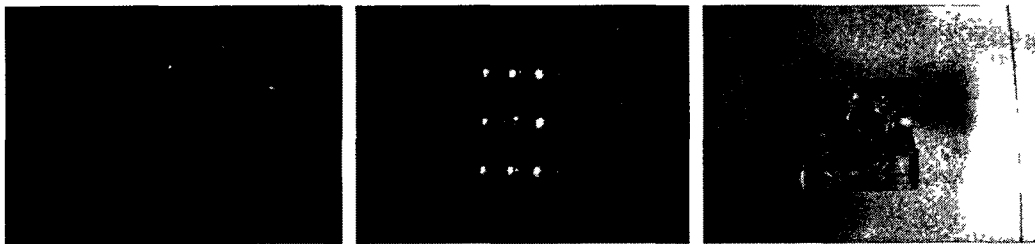
Excimer laser 장비를 이용하여 상부 500 μm , 하부 120 μm 의 사다리꼴 홀을 Quartz 에 가공하였다. 범핑 실험을 위해 사용된 레이저는 600W급 Lumonics Nd:YAG 레이저이다. 홀의 개수는 3x3로 총 9개로 제작하였다. 홀이 가공된 quartz를 이용하여 육면체의 상자를 만들고 에어 노즐을 연결하여 솔더볼 array를 제작하였다.

(2) Quartz 상자를 이용한 솔더볼 범핑 실험 조건

- 1) Lumonics Nd:YAG laser를 이용
- 2) Solderball의 성분 · Sn-35Ag(500 μm)
- 3) Beam spot size : 300 μm
- 4) Laser max. power · 600W
- 5) Pulse mode에서 실험
- 6) Pulse mode에서의 실험조건 (Height 18%, Width 20ms, Frequency 5Hz)

(3) 실험결과

Pulse mode에서 레이저 파워를 10W(2.2J)로 설정하여 실험을 수행하였다. Quartz 상자의 입력을 떨어뜨리기 위해 홀을 뚫고 공기 노즐에 연결된 상태에서 고압의 공기를 흘려보내 상자 내부를 저압 상태로 만들어 솔더볼을 상자의 홀에 부착시켰다. 솔더볼이 고정된 quartz의 홀과 PCB pad의 홀을 일치시키고 레이저 빔을 조사하여 솔더볼 범핑 실험을 수행하였다. Quartz 상단에서 레이저 빔이 주사되면 quartz를 통과한 빔이 솔더볼에 도달하여 용융이 된다. 그림 13은 솔더볼이 quartz 상자에 부착된 상태에서 PCB pad 위에 놓인 상태에서 빔이 솔더볼에 주사된 후 사진이다. 9개 중 중앙에 있는 솔더볼에만 빔을 주사하였다. 솔더볼 범핑 실험 조건은 Height 18%, 20ms, 5Hz, 10W(2.2J), 3Pulse이다. 그림 (c)에서 잘 관찰이 안 되지만 중앙의 솔더볼이 용융되어 quartz 상자 안으로 빨려 들어 간 것을 확인할 수 있다. 공기 노즐의 빠른 유속으로 인하여 솔더볼이 용융되는 순간 홀을 통해 상자 안으로 확산되어 상단부에 접합된 것을 보여준다. 빠른 유속으로 인한 문제를 해결할 방안을 검토 중이다.



(a)

(b)

(c)

<그림 13> 솔더볼 범핑 실험 (Height 18%, 20ms, 5Hz, 10W(2.2J), 3Pulse)

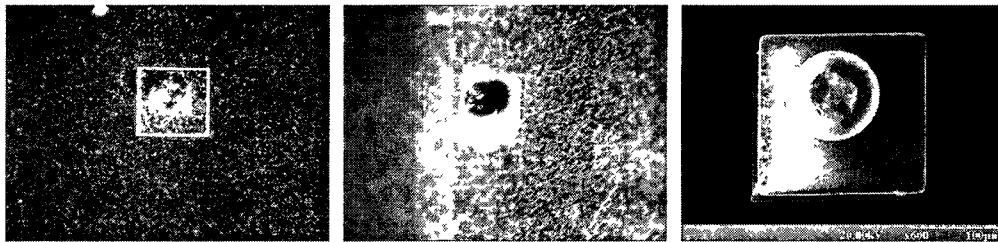
라. PAC TECH사의 솔더볼 범퍼를 이용한 실험 결과

(1) 실험조건

PAC TECH사의 솔더볼 범퍼를 이용한 솔더볼 용융 기초실험을 수행하였다. 솔더볼의 성분은 Sn/Pb/Ag-62/36/2이며 크기는 100 μ m(독일 Lotkugeln)이다. 빔 크기(Beam spot size)는 120 μ m이고 레이저 파장대는 1064nm이다. laser energy는 최대 4J(in 10ms)이다. Pulse width 1ms에서 20ms까지 조절할 수 있다 Current가 60A 이고 pulse width가 3ms에서 실험을 수행하였다.

(2) 실험결과

그림 14는 100 μ m의 솔더볼을 솔더볼 범퍼를 이용하여 웨이퍼 패턴에 범핑 실험을 한 사진이다 범핑된 솔더볼을 현미경으로 찍고 SEM 사진을 촬영한 것이다. 솔더볼이 범핑이 되었으며 전체적으로 볼 형상을 그대로 유지하고 있으나 상단부에 오목하게 들어간 흔적을 현미경사진과 SEM 사진을 통해 확인할 수 있다 범핑 작업 시 장비 앞에서 위치를 조절함으로써 해서 솔더볼이 정확한 위치에 놓이지 않는 단점이 있다. 정확한 위치 결정을 하기 위해서는 지금 방식의 개선이 필요하다.



(a) 평면사진

(b)경사사진

(c) SEM 사진

<그림 14> 100 μ m 솔더볼의 범핑 실험 결과

4. 결론

본 연구를 통하여 개발하고자하는 기술은 마이크로 금속분말, 볼 또는 wire를 사용하는 기술으로써 전자부품의 패키징 기술을 한 단계 발전시키는 기술이 될 것이며, 이를 잘 활용하면 나노급 수준의 새로운 미세조형기술의 개발도 가능할 것이다 지속적인 연구개발을 통해 향후 마이크로 금속볼의 레이저 국부 용융기술, 마이크로 금속볼의 배열/적층화 기술, μ -droplet을 이용한 미세접합공정, 미세조형기술을 개발하고자 한다

향후 계획은 Lumonics Nd YAG laser를 이용한 솔더볼 범핑 실험에서 확인된 문제점 보완하고 공기노즐의 빠른 유속으로 인한 솔더볼의 quartz 상자 안으로의 확산 문제를 해결을 하고자 한다. 솔더가 흡착된 quartz 상자와 PCB pad의 얼라인 방법 고안하고 quartz를 투과한 레이저 빔이 솔더볼을 용융시키는 적정 조건을 도출하고자 한다 또한 설계, 제작한 노즐과 집속 헤드를 이용하여 μ -ball 국부 레이저 용융 조건 도출하고 서울대학교에 있는 PAC TECH사의 솔더볼 범퍼를 이용한 실험 결과와 상호 비교, 분석하고자 한다.