

초음파 분무공정에 의한 표면실장용 Solder Ball제조에 관한 연구

김경원 · 정 은
울산대학교 재료금속공학부

<요 약>

전자기기의 소형, 경량화와 고기능, 고성능화의 요구에 의해 배선기판에 고밀도로 실장하는 실장기술(surface mounting technology, SMT)이 요구되고 있다. 이러한 고밀도화에 발맞춰 등장한 것이 BGA(Ball Grid Array)기술이다. 이 BGA package기술에 사용되는 Solder Ball들은 많은 방법(melting cut solder wires, centrifugal atomization, ...)으로 제조되고 있다. 본 연구에서는 ultrasonic atomization 방법을 이용하여 액적 형성에 있어서의 인자들을 변화시킬 때 액적 거동에 미치는 영향을 분석하고 균일한 액적 제조의 최적조건을 규명하고자 하였다. 연구 결과, 낮은 비용으로 높은 표면조도, 높은 진구도 목표직경의 $\pm 3\%$ 이내의 좁은 입도분포, 균일한 미세조직, 및 균일한 remelting 특성을 갖는 Sn-37%Pb합금의 Solder Ball을 얻을수 있었다.

A Study on the Fabrication of Solder Ball for Electronic Package by Pulse Atomization Process

K.W.Kim · E.Jung
School of Materials and Metallurgical Engineering

<Abstract>

As the microelectronics industry rapidly progresses toward miniaturized, high-performance devices, chip packages with higher input/output(I/O) connections are required. One solution to this ever-demanding requirement is the BGA package, a type

of surface mount chip package. In this study, we have found that mono-sized balls of the eutectic Sn-37%Pb alloy was produced by controlling the break-up of a continuous laminar jet into uniform droplets and by rapidly solidifying the droplets in a silicon oil bath. We successfully fabricated solder balls, which have high sphericity, narrow size distribution(within $\pm 3\%$ of the target diameter), uniform, rapidly solidified microstructures, and uniform re-melting characteristics due to their homogeneous microstructures using PAP(pulsated atomization process)

1. 서 론

최근 휴대전화기나 노트북 등 휴대기기의 급증에 의해 전자기기의 고기능화, 고성능화와 함께 경박단소(소형, 경량, 박형)화의 움직임이 활발해지고 있다. 또한 개인이 조작하는 기기의 맨 머신 인터페이스적 역할의 증대로 취급의 용이성이나 조작성이 점점 중요시 되고 있으며 향후 이러한 경향은 본격 멀티미디어 시대의 도래와 함께 한층 증가될 것이다.

전자기기의 고기능화나 경박단소화는 반도체 IC의 고집적화에 기인된 것이지만 전자회로를 완성시키기가 어려워 Si칩에 들어가지 않는 많은 부품류와 반도체 IC를 고밀도로 조합하여 접속하는 실장기술(surface mounting technology, SMT)이 중요해지고 있다. 따라서 표면 실장 부품을 배선판에 삽입하는 SMT방식, 파인패턴(fine pattern)의 배선판에 IC의 배어칩을 실장하는 칩 온 보드방식(COB), 하이브리드 IC방식, 멀티칩모듈(MCM)방식 등이 고밀도 실장에서 담당하는 역할이 매우 커지고 있다. 이러한 결과로써 Fig. 1에서와 같이 삽입실장타입과 표면실장타입은 변화해가고 있으며, 다수의 기관 제조업체가 종래의 프린트 배선기판(PCB)이 직면하고 있는 고밀도화와 파인패턴(fine pattern)화의 한계를 돌파하기 위해 배선 피치가 좁고 층간을 접속하는 구멍도 적어 多Pin의 LSI 패키지(package)로서 최근 등장한 기술이 BGA(ball grid array)기술이다.¹⁾

BGA기술은 최근 2~3년 전부터 시장에 출시될 것으로 PGA의 면실장 타입이라 부르기도 하는데 PGA(pin grid array)와 Flip Chip개념의 장점을 응용한 것으로 동일 핀수의 QFP(quad flat package)와 비교할 때 50~60%까지 차지하는 공간을 줄일 수 있으며 전기적·열적 수행능력이 크게 향상됨은 물론 300핀이상 多Pin化에 유리하여 향후 매우 각광받을 주요 패키지가 될 것으로 본다.

현재 일반적으로 BGA 패키지에 사용되는 솔더 볼은 솔더 와이어를 절단하여 용융온도 이상의 오일탱크 내에서 제조하고있지만²⁾ 성공적인 상용화를 위해서는 낮은 비용으로 정확한 치수공차를 가진 고품질의 솔더 볼이 요구되고 있다. 이밖에도 구형의 솔더 볼을 제조하는 방법에는 용융 금속으로부터 금속입자들을 직접 제조하는 물 분사법³⁾, 가스 분사법⁴⁾, 원심분무법⁵⁾ 등이 있으며 이외에도 Melt extraction⁶⁾, 진공 분무법⁷⁾이 있다. 그러나 상기 방법들에 의해서는 mono-sized입자들을 제조하는데 어려운 점이 있다.

예를 들어 가스 분무법에 의해 제조된 입자들은 넓은 입도 분포를 갖으며, 원심분무법에 의해 제조된 입자들은 다소 좁은 입도를 갖으나 불균일한 크기의 입자를 얻을 뿐만 아니라 불균일한 미세 조직을 갖게되며 액적크기에 따라 열 이력에도 상당한 영향을 미치게된다.

본 논문에서 균일한 입자들이란 미세 조직이 동일한 균일한 크기의 고체입자를 의미하

며 같은 열 이력을 갖는 균일한 액적들을 의미한다. 이와 같이 기존의 분말제조 공정에 의해 제조된 분말들은 불 균일하여 균일한 입자를 제조하기 위해 용융 금속에 diaphragm을 이용하여 진동을 주는 drop-on-demand 기술을 이용하여 왔다.⁸⁾ 그러나 상기방법들은 초당 60개정도의 균일한 입자들밖에 얻을 수 없기 때문에 대량생산에 적합하지 않다. 그러므로 Rayleigh의 불안정성에^{9~12)} 기초를 둔 연속적이 균일한 젯트를 파쇄(break-up)시켜 균일한 입자를 얻는 방법이 대량생산에 적합하여, 주석-납, 아연과 그 외 합금, 알루미늄합금, 구리 합금등의 균일한 비금속 액적을 얻는데 이용하여 왔다.^{13~17)}

본 연구에서는 BGA 패키지에 사용되는 표면조도가 양호하고, 높은 진구도 및 균일한 크기를 갖는 (직경 $760\mu\text{m} \pm 3\%$) 공정조성(Sn-37^w/oPb) 솔더 불을 제조하기 위해 용융 금속에 진동을 주는 PAP(pulse atomization process)을 이용하였으며 제조공정 인자를 변화시켜 솔더 불의 특성을 조사하였다.

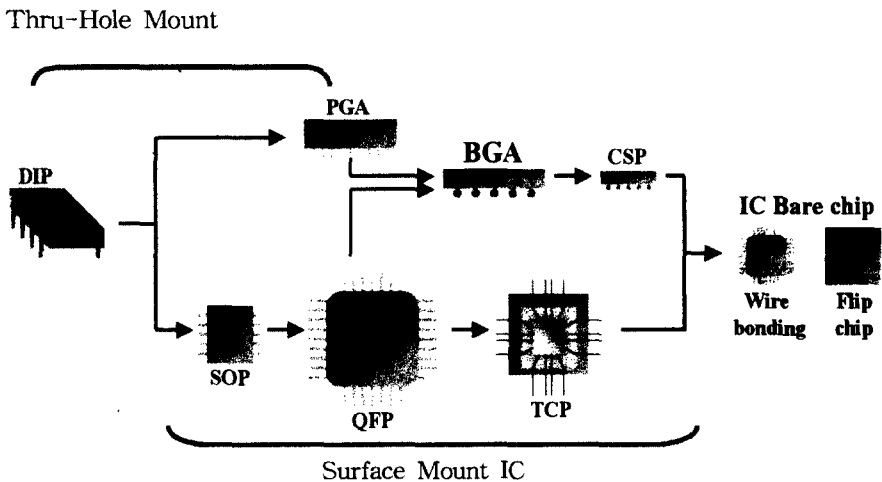


Fig. 1. Integrated circuit and packaging trends.

2.2 실험 장치

Fig. 2에 본 실험에서 사용된 장치의 개략도를 나타내었으며, Fig. 3는 실제 장치의 사진이다. PAP(pulse atomization process)의 장치본체구성은 도가니, 오리피스(Orifice), 진공 펌프가 체결된 분무 탱크, 가스 조절 시스템, 용융 금속 진동시스템, 오일탱크 (DC704), 액적 흐름을 관찰하기 위한 시스템으로 구성되고 이외에 제조한 솔더 불의 세척과 크기 선별을 위한 초음파세척기(BRANSON-3210)와 선별기(Twin-Roller Machine)로 구성되어 있다.

Sn-38w/oPb 공정 솔더 합금을 도가니에 장입, 가열시키며 분무탱크내는 산소함유량이 5ppm이하가 되도록 질소 가스를 계속 순환시키며 진공상태(10-2torr)로 유지한 후 용융 합금의 분사는 일정한 가스압력과 진동자로부터 전달된 주파수의 진동에 의해 1~10m/sec의 속도로 분사시켰으며 이때 발생하는 균일한 액적들은 오리피스 아래의 오일 탱크내부로 적하 시켰으며 본 연구에서 사용한 오일들의 특성을 Table. 1에 나타내었다. 이러한 공

정을 거쳐 응고된 솔더 볼을 세척한 후 크기와 형태를 선별하였다. 솔더 볼의 전체적인 제조 공정을 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 Jet 속력

Fig. 6에 PAP의 액적발생장치의 개략도에서 처럼 액적발생기는 바닥에 흑연 오리피스를 고정하는 스테인레스 강으로 된 지지대(holder)와 진동자(vibrator)로 구성되어있다. Jet 직경은 원칙적으로는 오리피스 직경과 같다. jet 속력은 용융재료의 성질 과 기능이나 오리피스 직경, 구동 압력에 좌우된다.

$$V_j = C_d \times \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

여기서, C_d 는 방전계수, ΔP 는 분출압력, ρ 는 밀도, V_j 는 분사속도이다. 위 식(1)에서 분출압력은 볼들의 제조 시 분사속도에 더 큰 영향을 미치므로 분출압력의 변화는 볼들의 평균 크기에 큰 편차를 생기게 한다.

2.4 액적 직경

균일한 액적들은 낮은 점도, laminar, 액상 jet의 break-up을 조절하기 위하여 부여된 기계적인 진동에 의해 얻어질 수 있다. 이 방법은 현재 ink-jet printing system에서 광범위하게 사용되고 있다. 최적의 개선이 이루어진 이 기술은 균일한 용융금속 액적의 형성을 위해서 사용될 수 있다.

균일한 액적 분사 장치에서 액적 직경은 실질적으로 분사와 액적들의 모든 현상(액적 merging, spray mass flow, 액적속력)들을 좌우한다. 액적직경은 액적들이 파쇄된 것로부터의 jet의 속력과 jet의 파쇄를 유도하기 위해 부여된 진동의 주파수로써 결정된다. 액적크기(d_d)의 결정은 아래 식(2)과 같다. (Jet의 직경(d_j)이 오리피스 직경과 같다고 가정)

$$d_d = d_j \left(1.5 \frac{V_j}{f \cdot d_j} \right)^{1/3} = d_j \left(1.5 \frac{\lambda}{d_j} \right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서, V_j 는 분사속도, f 는 진동수, λ 는 파장, d_j 는 jet의 직경이다.

고상화된 솔더 볼들의 직경 조절은 고체수축을 고려하여야 한다. Sn-37^w/oPb 합금은 응고과정에서 약 6%의 체적감소가 일어난다. 이것은 약 1.9% 선 수축을 한다는 의미이다. 예를 들면, 760 μ m의 용해된 합금 액적이 746 μ m의 고상입자로 고상화되었다면 이는 760 μ m의 평균 직경 분포이다.

파장이 진동수와 jet속력에 의존하면서부터 액적 직경은 이들 공정매개변수에 의해 직접적으로 조절될 수 있다. 낮은 파장과 더욱 작은 오리피스직경은 액적 직경을 정확한 요구 직경으로 조절시키기 위해 사용되어졌다.

2.2.6 특성평가

제조된 솔더 볼의 형상, 크기, 크기분포와 미세구조를 관찰하기 위하여 볼을 일정한 단면으로 연마한 후 0.05 μ m 알루미나 수용액으로 재 연마하였다. 부식액은 2% Nital 시약을 사용하였으며 15초간 부식하여 전자현미경(SEM, JSM-820) 및 광학 현미경을 이용하여 볼의 외양 및 조직을 관찰하였다. 볼 내의 주석과 납의 분포상에 따른 미세조직을 전자현미경(SEM)과 EPMA(Electro Probe Micro Analyzer, EPMA-11400)의 BSE(Back-Scattered Electron)상, EDAX상으로써 관찰하였으며 상변태 온도를 측정하기 위하여 시차 열분석기(Thermal Analyst-2100)를 이용하였다.

Table 1. Physical properties of silicon and hydrocarbon oil.

	Hydrocarbon (CLESUPAR-L)
Vapor pressure(torr)	1×10^{-7} at 25 $^{\circ}$ C
Viscosity(NSm $^{-2}$)	100.7 at 40 $^{\circ}$ C
Specific gravity(g/cc)	0.8825 at 1 $^{\circ}$ C
Boiling point($^{\circ}$ C)	139 at 0.01 torr

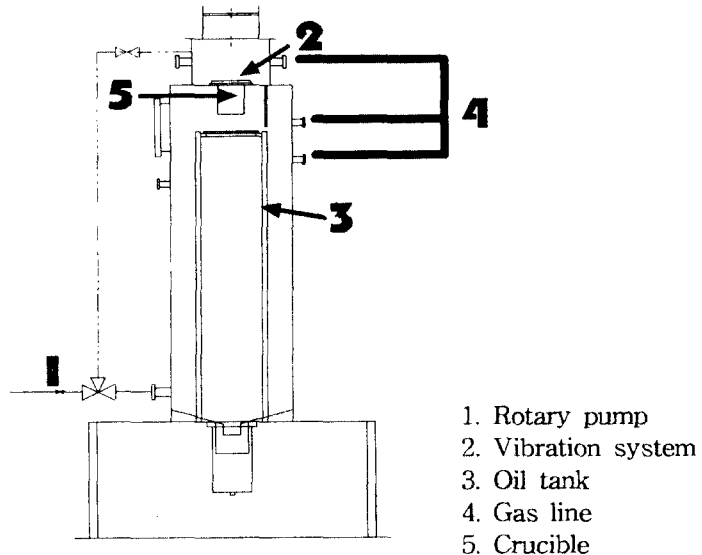


Fig. 2. Schematic diagram of the PAP unit.

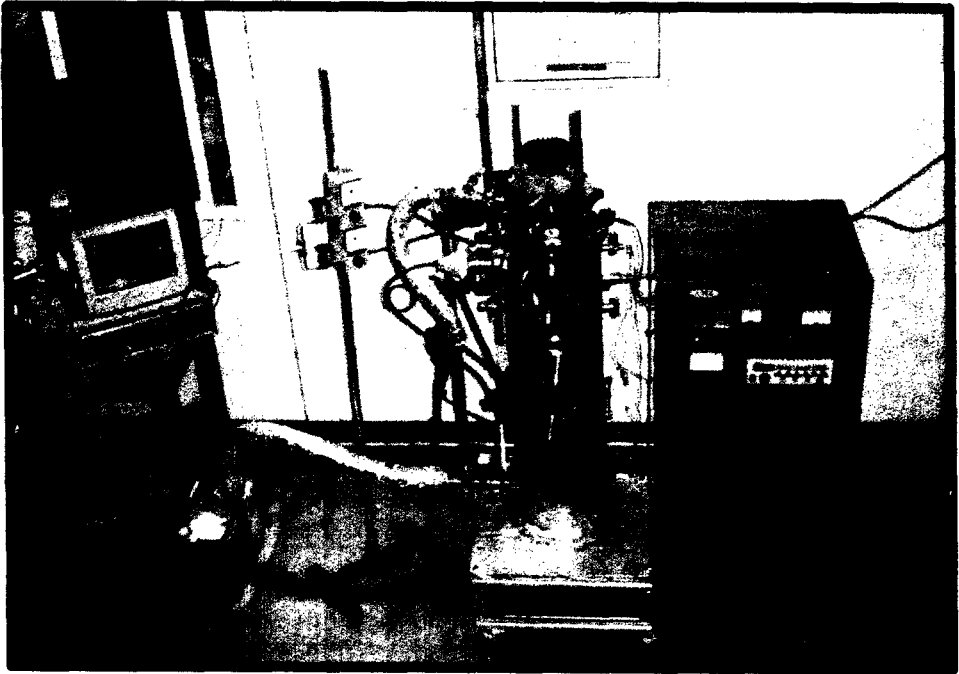


Fig. 3. Photographs of the PAP unit used in the present study.

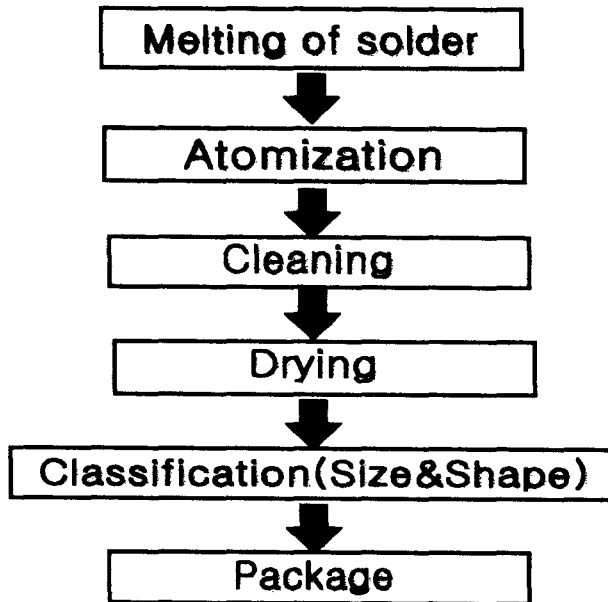


Fig. 4. Solder ball production route.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용융금속의 파쇄(Break-up)

Sn-37^w/oPb 합금의 용융 금속흐름의 파쇄 현상을 조사하기 위하여 많은 실험을 행하였다.

첫째, 파쇄된 액적들을 오일 탱크내에서 소입(quenching)시키지 않고 헬륨(He)분위기에 서 카메라를 이용하여 액적 거동을 조사하였으며, 두번째는 파쇄된 액적들을 오일 상온에 서부터 합금의 용해온도(183℃)까지 가열시킨 상태에서 액적들의 거동을 조사하였다. 용융 금속을 균일한 액적으로 파쇄시키기 위하여 진동자의 주파수, 노내의 압력을 조절한 후 액적을 급냉시키기위한 목적으로 오리피스 하부와 오일탱크의 거리를 2~70mm로 가변하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 파쇄된 액적들은 구형이며 균일하게 생성되나 오일 탱크로부터 얻어진 슬더 볼을 세척, 건조시킨 후 외형을 관찰한 결과 Fig. 6과같이 이형(irregular)과 구형(spherical)이 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

용융 금속이 균일한 액적으로 생성될 수 있는 조건으로는 재료의 성질(밀도, 점도 및 표면장력), 오리피스의 기하학적형태, 젯트의 속도, 진동자의 진동수 및 진폭과 같은 인자에 의해 크게 의존된다. 본 연구에서는 재료의 성질인 밀도, 점도 및 표면장력을 일정하게 설정한 후 진동자의 진동수의 변화에 따른 용융금속 흐름의 파쇄공정을 CCD카메라를 이용하여 조사하여 보았다.

액적들이 불규칙하고 서로 결합(merge)하게 되면 냉각 후 얻어지는 액적들은 전체적인 슬더 볼들의 입도분포를 넓어지게 하고 결합된 액적들로 인해서 일정한 오리피스에서 얻어지는 평균크기가 증가하게 된다.

3.2 슬더 볼의 진구도와 형상

본 연구를 수행하면서 새롭게 확인한 현상은 Sn-37^w/oPb합금의 성질 (밀도, 점도 및 표면장력)이 일정할 경우 오리피스와 오일과의 거리와 진동자의 진동수와 진폭을 변화시킨 후 상온의 오일내에서 냉각시킨 슬더 볼의 형상이 완전하게 구형으로 형성되지 않았고 오일의 온도를 높일수록 제조된 슬더 볼들은 표면조도도 양호하고(Fig. 7) 서로 결합한 형상도 발견할 수 없었다. 정량적인 진구도(sphercity) 측정은 시도하지 않았지만 진구도는 거의 "1"에 가까운 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8는 액적들의 결합(merge)으로 생긴 몇가지 불규칙한 형태의 입자들을 제시한 것으로 액적들이 결합될 때 액상의 분율에 따라 여러가지 형태의 액적들이 생길 수 있다(cylinder type, dumbell type 또는 sperm type). 용융금속의 파쇄조건이 최적화 되지 못하였을 경우 즉, Fig. 8에서와 같이 보다 작은입자가 균일한 입자와 결합하여 눈사람형태의 입자(snowman shaped particle)가 형성되는 경우도 있다

3.3 입도분포

균일하게 제조된 솔더 볼 제조 실험중에서 한 Batch를 선택해서 50개 솔더 볼을 무작위로 채취하여 측정된 입도분포 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

제조된 솔더 볼들은 표준편차가 16.80이고 평균직경 $760\mu\text{m}$ 의 $\pm 5\%$ 의 좁은 입도분포를 갖는다. BGA Chip에 사용되고 있는 솔더 볼의 규격은 $760\mu\text{m} \pm 3\%$ 임을 감안할 때 PAP공정에 의해서 제조된 솔더 볼들의 수율은 84% 이었다.

본 연구에서는 Sn-37^w/oPb 합금의 용해량 800g, 용융온도 250℃, 진동자의 주파수 변화(900Hz 와 1kHz)에 따른 수율(yield)을 상용 Sieve로 조사한 결과를 Table. 2에 나타내었다. 진동자 주파수가 증가할수록 솔더 볼의 입도는 감소함을 알 수 있었으며 상대적으로 +20~25mesh 사이의 솔더 볼의 수율이 크게 증가됨을 알 수 있었다.

PAP공정에서 솔더 볼의 평균크기는 진동자의 주파수, 진폭, 오리피스 크기, 노즐과 오일 탱크와의 거리, Ejection압력 및 진동자와 노즐사이의 거리와 같은 공정인자에 따라 변화한다. 본 연구는 공정인자 변화가 솔더 볼의 입도에 미치는 영향을 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Data of sieve test at different frequencies of pulsator.

Mesh \ Frequency	+20mesh	+24mesh	-24mesh
0.9kHz	16 %	80 %	4 %
1.0kHz	17 %	18 %	65 %

Table 3. Influence of primary process parameter of PAP.

Parameters(↑)	Solder ball size
Frequency	↓
Amplitude	↑
Orifice diameter	↑
Ejection pressure	↑
Distance between pulsator and nozzle	↑

3.4 미세조직과 재용융 특성

본 연구에서 제조한 균일한 공정합금(Sn-37^w/oPb) 솔더 볼의 단면을 저배율과 고배율

주사전자현미경 사진을 Fig. 10(a)에 나타내었다. 종래의 방법(wire-melting)에 의해 제조된 솔더 볼의 미세조직과 비교하기 위하여 제시하였다. 공정조성을 갖는 두가지 시료들은 층상조직이 아닌 등축정이상(two phase)미세조직을 보여주고 있다. BSE(back-scattered electron) Images(Fig. 11(a,b))와 EDAX(Fig. 12(a,b))분석을 통하여 보다 검은 상들은 주석(Sn)이 풍부한 상이고 보다 밝은 상은 납(Pb)이 풍부한 상임을 확인할 수 있었다. Fig. 12(a),(b)에서 보여주듯이 PAP공정에 의해 제조된 솔더 볼의 입자들(Sn-rich상)은 종래 공정에 의해 제조된 솔더 볼의 미세조직과 비교할 때 보다 미세하고 균일한 것을 확인할 수 있었다. 또한 Pb-rich상의 입도분포가 bimodal분포를 갖는 종래 공정에 의해 제조된 경우보다 이상종래 공정에 의해 제조된 솔더 볼의 무게는 직경이 $770\mu\text{m}$ 인 경우 2.013mg 인 반면에 PAP에 의해 제조된 솔더 볼의 무게는 직경이 $760\mu\text{m}$ 일 때 1.9307mg 이고 비중이 $8370\text{kg}/\text{m}^3$ 이었다.

3.5 Pulse Atomization Process(PAP)의 응용

$500\mu\text{m}$ 이상의 큰 솔더 볼을 제조하는 경우 PAP공정은 용융 금속흐름을 파쇄시킨 후 오일내에서 응고되기 때문에 길고, 큰 분무탱크가 필요한 가스 분위기 내에서 파쇄시키는 공정과 비교할 때 투자비가 적게 들며, 제조원가도 낮출 수 있는 장점이 있다. 솔더 볼의 품질을 균일한 미세조직, 양호한 표면조도, 입자들이 결합을 최소화 시킬 수 있는 오일종류와 오일온도(점도)를 선택하고 조절함으로써 개선할 수 있다.

PAP공정은 용융금속의 흐름을 파쇄하는 경우 큰 어려움 없이 많은 수의 오리피스(multiple orifice)를 갖는 노즐(nozzle) 사용이 가능하기 때문에 단위 시간당 많은 양의 솔더 볼을 제조할 수 있다. 예를 들면 10개의 오리피스를 갖는 노즐을 사용할 경우 직경이 $760\mu\text{m}$ 인 솔더 볼을 단위시간당 70kg 을 제조할 수 있다. 한 개의 오리피스를 갖는 노즐(single orifice)을 사용하여 솔더 볼을 제조할 경우 시간당 256개 솔더 볼이 소요되는 BGA Chip을 12,700개를 제조할 수 있다.

솔더 볼을 절단, 용융시켜 솔더 볼을 제조하는 경우에는 오일 탱크의 온도가 상승함에 따라 오일의 비등점(221°C)에 가까워지는 온도의 제한성이 있으나 PAP공정의 경우에는 온도의 제한성이 없는 장점이 있다. 그러므로 고용점 솔더합금(lead free solder)등은 통상적으로 사용하고 있는 Wire-melting공정에 의해 솔더 볼제조가 불가능한 반면에 PAP공정의 경우에는 고용점 솔더합금의 볼제조가 가능하다. PAP공정을 사용하면 솔더합금 이외의 공업적으로 유용한 금속, 합금의 입자 및 볼(Table. 4)을 제조할 수 있는 장점이 있다.¹⁶⁾

Table 4. Possible metals or alloys to be produced with PAP.¹⁶⁾

Metal or Alloys		Average size(μm)
Lead	Pure Pb, Pb-Sn	100~1,000
Silver	Pure Silver	500~1,000
Copper and Its Alloys	Pure Cu, Cu-Sn	200~1,400
Zinc	Pure Zn	250~3,000
Magnesium	Mg-Al-Zn Mg-Al-Zr	800~1,000
Neodymium	Nd-Fe-B	1,000
Aluminium and Its Alloys	Pure Al, Al-Cu 6061, 7075	200~800

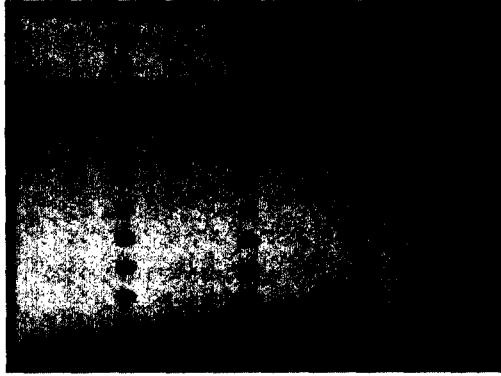


Fig. 5. Break-up of droplets by pulse atomization.

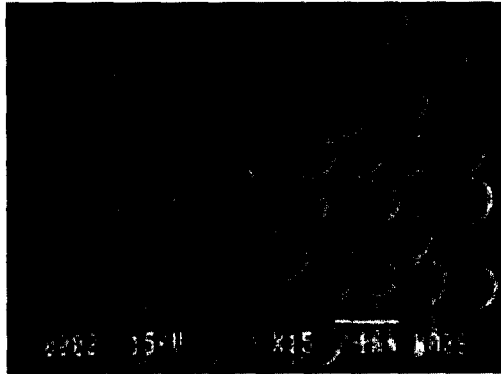


Fig. 6. Solder balls with oval and spherical shapes broken-up in Fig. 8.

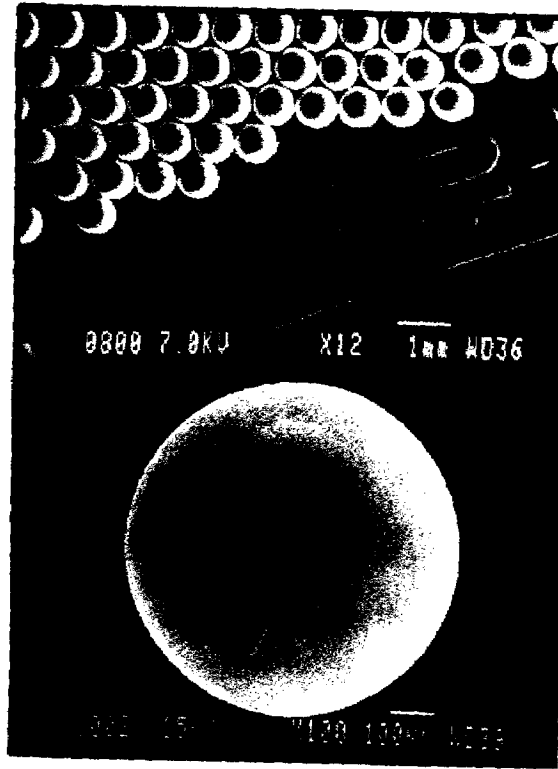


Fig. 7. Solder balls with smooth surface.

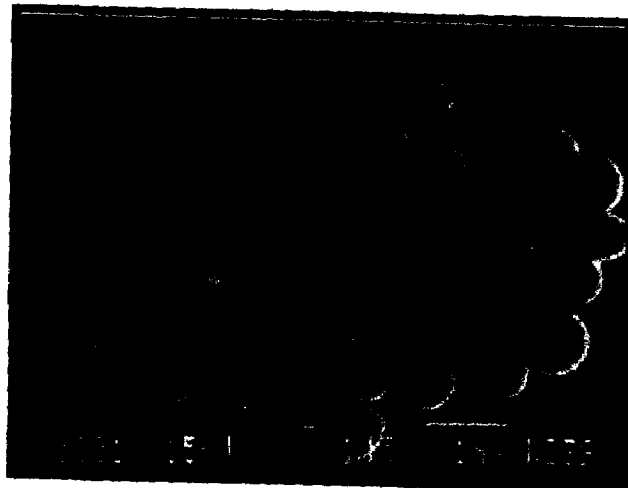


Fig. 8. Merging phenomena of solder balls.

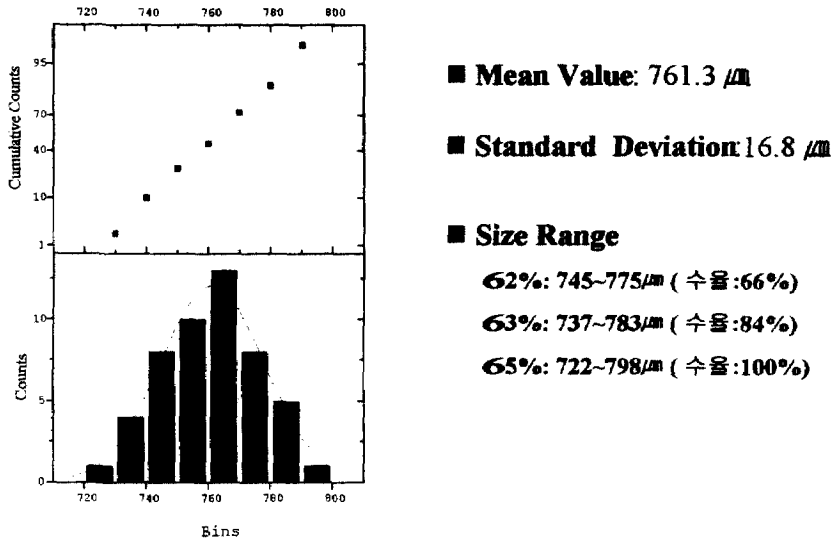


Fig. 9. Size distribution of uniform Sn-37%^W/oPb balls produced by UAP

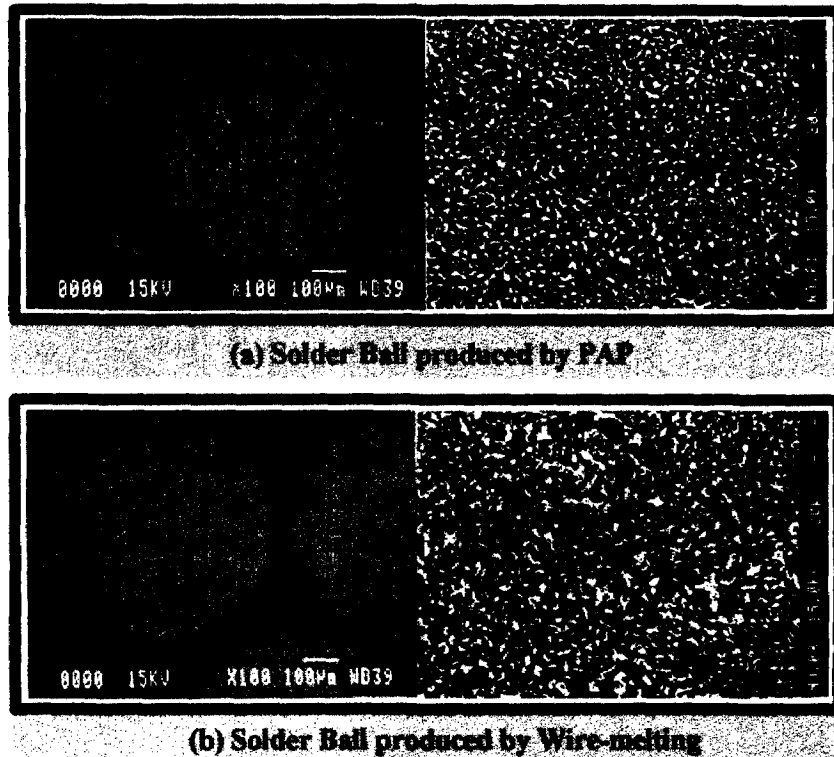
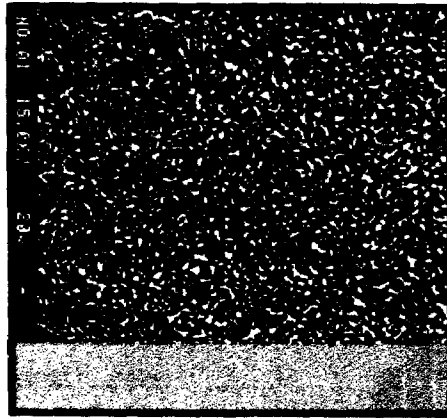
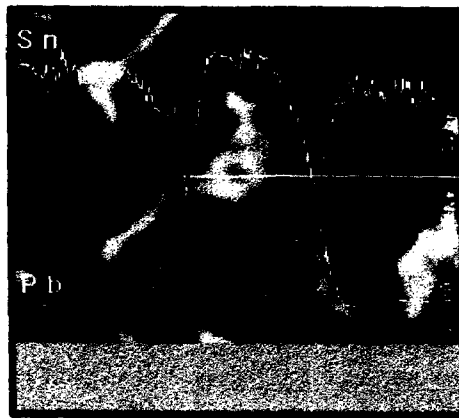


Fig. 10. SEM images of cross sections of solder ball produced by UAP and wire-melting process.

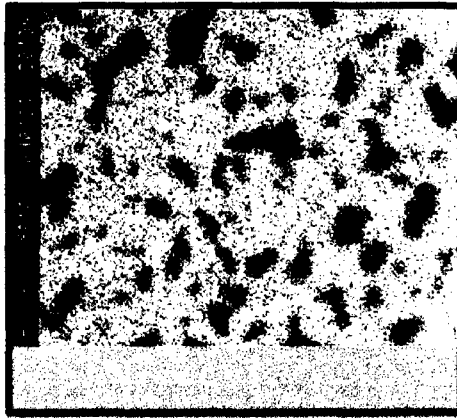


(a) BSE images of cross sections of solder ball.

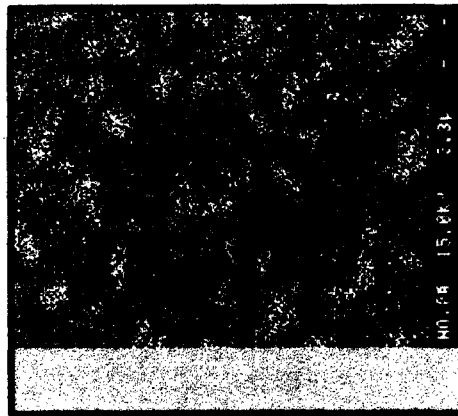


(b) Line profile of BSE images of solder ball.

Fig. 11. BSE images and line profile of cross sections of a solder ball.



(a) EDAX images analysis for Sn of a solder ball.



(b) EDAX images analysis for Pb of a solder ball.

Fig. 12. EDAX images of a solder ball.

4. 결 론

1. Laminar 제트의 흐름을 조절하고 실리콘 오일내에서 응고시키는 Pulse Atomization(PAP) 공정을 이용하여 BGA chip에 사용하는, 직경이 760 μ m이고 조성이 Sn-37%^w/Pb 합금의 균일한 솔더 볼을 제조할 수 있었다.
2. PAP 공정에서 용융금속에 Pulse를 주는 진동자의 주파수에 따라 진동자의 변위는 증가하며 주파수가 0.9kHz에서 1.0kHz로 증가함에 따라 솔더 볼의 평균 입도분포가 줄어들음을 알 수 있었다.
3. PAP 공정으로 솔더 볼을 제조할 경우 볼의 크기에 영향을 주는 변수로는 진동자의 주파수, 진폭, 오리피스의 직경, 용융금속에 가해주는 압력 그리고 진동자와 오리피스와의 거리임을 알 수 있었다.
4. PAP 공정에 의해서 제조된 솔더 볼의 조직은 기존공정인 Wire-melting 공정에 의해 제조된 조직에서 보다 Pb상과 Sn상들이 미세하고 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었으며 DSC 시험결과에서도 재용융특성이 양호하게 나타났으며 오일의 온도를 증가시킴에 따라 Pb-rich상이 조대화되는 경향을 보였다.
5. PAP 공정에서 한 개의 Hole을 가진 오리피스를 이용하여 직경이 760 μ m인 솔더 볼을 제조할 경우 시간당 3,240,000개를 제조할 수 있으며 이는 256개의 솔더 볼을 사용하는 BGA chip 12,700개를 제조할 수 있는 용량이다.

참고문헌

1. 김정일 : 대한금속학회지, 10(1997) 11.
2. U. S. Patent No. 4,097,266, (1978).
3. J. K. Beddow : The Production of Metal Powders by Atomization, (1978).
4. E. Y. Ting and N. J. Grant : Progress in Powder Metall., 41 (1986) 67.
5. B. Champagne and A. Angers : Int. J. Powder Metall. Powder Tech., 16 (1980) 359.
6. R. E. Maringer and C. E. Mobley : Spinning Wire from Molten Metal, 74(1978) 16.
7. J. M. Wentzell : J. Vac. Sci., Tech., 11(1974) 1035.
8. A. Kawasaki, Y. Kuroki and R. Watanabe : Proc. Powder Metallurgy World Congress, (1993) 27.
9. Lord Rayleigh : Proc. London Mathematical Society, 10(1878) 4.
10. N. R. Lindbald and J. M. Schneider : J. Sci. Inst., 42(1965) 635.
11. B. J. Mason, O. W. Jayaratne, and J. D. Woods : J. Sci. Inst., 40 (1963) 247.
12. R. G. Sweet : Rev. Sci. Inst., 36(1965) 131.

13. C. H. Passow, J.-H. Chun, and T. Ando : Metall. Trans. A, 24(1993) 1187.
14. T. Ando, S. Sahu and J.-H. Chun : Proc. Powder Metallurgy World Congress, (1993) 971.
15. Kristian P. olsen, Gerald Sterzik, and Hani Henein : J. of Metal, Oct. (1995) 14.
16. J. Paallavollita, D. Yuan, H. Henein, and R. Eadie : Metal Powder Report Mar. (1997) 23.
17. J. Fallavollita et al : EPD Congress (Warrendale, PA: TMS, 1994) 863.
18. P. Yim, J.-H. Chun, T. Ando, Vinod. K. Sikka : Int. J. of Powder Metall. 32(1996) 155.
19. C. H. Passow : M. S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA. (1992).
20. U. S. Patent No. 4,328,894 (1984).
21. D. Turnbull and R. E. Cech : J. Appl., Phys. 21(1950) 804.
22. J. H. Perepezko: Rapid Solidification Processing : Principles and Technologies, II,1980, edited by R. Mehrabian, B. H. Kear and M. Cohen, Claitors Pub., Baton Rouge, LA, (1980) 56.
23. M. G. Chu, Y. Shiohara and M. C. Flemings : Metall. Trans.A 15(1984) 1303.