# DBM 공정에 의한 구형 솔더볼 분말의 제조기술 연구동향

송인혁 · 한유동 · 박환영 · 최일동*
한국기계연구원 재료연구부, *한국해양대학교 재료공학과

## 1. 서 론

최근 전자제품의 소형화, 경량화가 가속적으로 진행 될 수 있었던 것은 반도체 등의 전자 산업에서 고밀도, 고집적화가 뒷받침되고 있기 때문에 가능한 것이며, 이러한 전자 산업의 고성능화를 위해서는 무엇보다도 패키징 기술의 개발이 요구된다. 패키징 기술 중의 하나인 BGA(Ball Grid Array) 패키징 기술은 다른 공정과 비교하여 작은 크기의 부품을 사용하며 정밀도를 요구하는 기술이다. 그리고 이와 같은 BGA 패키징 기술의 주요 부품중의 하나가 솔더볼 분말이다. 솔더볼은 칩과 회로 모듈, 모듈과 기판을 연결하는 부품으로서 현재 가장 널리 사용되어지는 것은 63Sn-37Pb 공정 조성의 솔더이다[1-4]. 이와 같은 조성의 솔더는 낮은 융점(183°C)과 전기적, 기계적 성질이 우수하다. 전자부품의 소형화에 따라 솔더 접합부의 크기도 미소화되고 이에 따라 내피로특성과 신뢰성이 높은 솔더가 요구되고 있으며, 전자부품의 고기능화, 복합화로 인해 다층 패키징등과 같은 곳에서 저융점 솔더에 대한 요구가 증대되고 있다[5]. 그리고 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 Pb의 환경오염과 인체상의 해로움으로 인하여 그 사용의 규제를 위한 법안이 마련중이다[1-5]. 따라서 63Sn-37Pb의 공정조성 솔더를 대체할 수 있는 새로운 솔더에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

솔더볼을 제조하는 기존의 공정은 솔더 재료를 와이어 형태로 제조하여 일정한 크기로 잘라 용융시켜서 볼의 형태로 구형화시키는 방법이 널리 사용되어지고 있다[6]. 그러나 이와 같은 방법은 솔더볼의 크기가 미소 정밀화됨에 따라, 대량 생산 등의 측면에서 한계점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 미국 MIT의 Chun등은 솔더볼을 제조하기 위한 공정으로서 DBM 공정을 제안하였다[6-12].

DBM(Droplet-Based Manufacturing) 공정은 재료를 용융시킨 후, 오리피스를 통해 압전체를 이용하여 유체내의 강제 진동과 압력차이로 재료를 분사시켜 균일한 크기의 분말을 제조하는 공정이다. 이와 같은 DBM 공정의 장점은 첫째, 압전체의 균일한 진동에 의하여 액체 금속을 균일한 크기의 솔더 분말로서 제조가 가능하다. 둘째, 사용되어지는 오리피스의 크기 변화에 따라 60~1000 μm의 원하는 크기의 금속 분말 제조가 용이하다. 셋째, 기존의 솔더 분말 제조공정과는 달리 지속적인 분사를 통하여 대량으로 균일한 분말의 제조가 가능하다. 넷째, 전자 패키징, rapid prototyping, spray forming, solder bumping 등의 다양한 분야에 응용되어질 수 있다.

본 고에서는 DBM 공정기술 연구를 KIMM-MIT 기술협력사업의 일환으로 3년간 수행하였으며, 부산대학교 및 해양 대학교와 학연 공동 연구를 수행한 연구 경험을 통하여 DBM 공정 기술에 대한 기술 현황 분석을 실시하였다. 그리고 이를 통하여 전자 산업 등 각종 관련 산업에 대한 DBM 공정의 효용가치를 높임으로서 앞으로의 DBM 공정에 대한 새로운 연구 방향을 제시하고자 한다.

## 2. DBM 공정 원리 및 공정 변수

### 2.1. DBM 공정 원리

DBM 공정은 기존의 분말 공정과는 달리 압전 재료(piezo-electric material)를 이용하여 유체 내부의 강제 진동에 의해 입자분산과정을 제어함으로서 균일한 크기의 금속 구형 분말을 제조한다. DBM 공정에서 금속 용탕의 분산과정은 압전체의 강제 진동에 의한 운동에너지와 급속한 열전달 현상에 의해 진행된다[6-11].

DBM 공정의 구체적인 원리(그림 1) 및 특징은 다음과 같다. 일정량의 금속을 용해한 후 45~200 μm 직경의 오리피스(orifice)를 통해서 금속 용탕을 밀어

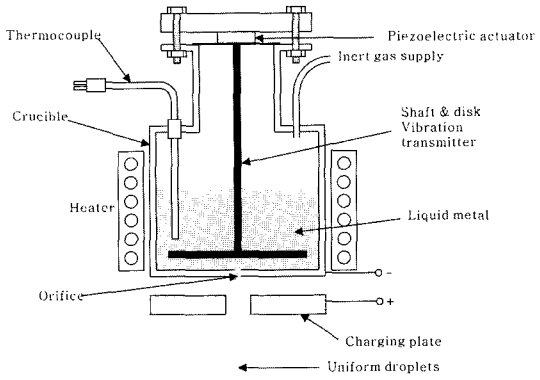


**Fig. 1. DBM 공정의 구형입자 형성 장치(generator) 개략도[10].**

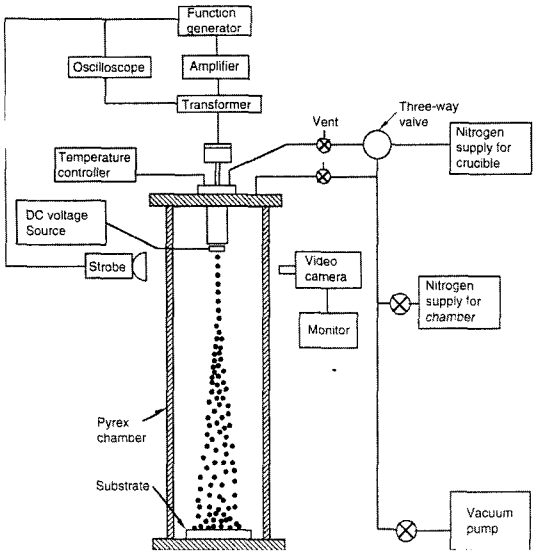


**Fig. 2. DBM 공정의 개략도[10].**

내어 층류(laminar)의 유체흐름을 형성한다. 이 유체는 압전 변환기(piezo-electric transformer)로부터 부가된 진동에 의해 규칙적인 간격으로 절단되고 일정한 크기의 구형으로 흘러내린다[13]. 각 구형 입자는 유체로부터 절단될 때 300~400 V의 고전압판에 의해 대전된다. 이 대전 장치는 용융 금속을 분무하고, 비산시 분무구형 분말끼리 뭉쳐지는 현상을 방지하기 위한 것이다[6]. 용융 금속을 분무함에 있어, 압전 변환기를 용융체의 열로부터 영향을 받지 않게 하는 것이 중요하다. 이는 모든 압전체들은 큐리(Curie) 온도라고 하는 고유의 온도가 존재하며 이 온도 이상에서는 압전거동을 나타내지 않기 때문이다[6]. 용탕이 분무되는 오리피스의 직경은 45 μm~500 μm 범위이며, 직경이 45 μm인 오리피스를 사용할 경우 직경이 70~110 μm인 구형 입자(droplet)들을 만들 수 있다. 직경이 100 μm인 오리피스를 사용할 경우 직경이 140~220 μm인 구형 입자를 만들 수 있다. 이 구형 입자들은 5~30 kHz 사이의 진동속도에서 형성되고, 6~10 m/s의 초기속도를 가지며 구형 입자당 $10^{-12}$ Coulomb 정도의 전하량을 가지고 있다[6-12].

### 2.2. 일반적인 DBM 장치의 구성 요소

그림 2는 DBM 장치의 개략도를 보여주고 있다. DBM 장치는 크게 구형입자 형성 장치(droplet generator)와 컨트롤 시스템(controller system)의 두 부분으로 나눌 수 있으며, 7가지의 주요한 구성요소가 있다. 구성요소에는 용기(crucible), 오리피스(orifice), 분무 챔버(spray chamber), 가스 제어 장치(gas control system), 용탕 진동 장치(melt vibration system), 대전장치(charging system), 감시 장치(montioring system)로 구분할 수 있다.

① 용기(crucible) : 용기는 일반적으로 솔더볼 제조 시에는 스테인레스 스틸 재질이 사용되어지며, 구리(Cu)나 알루미늄(Al) 등의 고온 재료의 용해 시에는 흑연(graphite) 재질을 사용한다. 형태는 컵 모양으로 밑 부분에 2 mm 정도의 오리피스를 결합할 수 있도록 구멍을 내었으며, 용기 상부에는 흑연 종이(graphite paper)로 밀봉하여 아르곤 가스가 새어나가지 않도록 한다. 온도를 제어하는 PID 컨트롤러와 K-type 열전대, 발열체가 연결되어져 있다. 용기 윗부분에는 냉각수를 이용해 압전체로의 열전달을 차단한다.

② 오리피스(orifice) : DBM 공정시 오리피스는 균일한 구형입자를 형성하기 위하여 정밀하게 가공되어야 한다. 일반적으로 고순도 알루미나를 정밀 가공하여 사용한다. 오리피스는 용기 바닥의 구멍 부분에 세라믹 접착제를 이용하여 장착시킨다.

③ 분무 챔버(spray chamber) : 분무 챔버는 다른 부품과 연결되어 있으므로, 기밀 현상을 유지하기 위해 연결부에 O-ring을 삽입한다. 분무 챔버 내부는 불활성 분위기이다. 한편, 대기 중에서는 용탕의 유체가 구형입자들로 분리되지 않고 긴 와이어(wire)형태로 나타난다. 따라서 분무 챔버는 분말 분사 작업 전에는 내부를 진공 분위기로 만든 후 아르곤 가스

에 의한 불활성 가스 분위기를 형성시켜야 한다.

④ 가스 제어 장치(gas control system) : 가스 제어 장치는 분무 챔버 내에 불활성 분위기를 만들고, 용기내의 용탕을 오리피스를 통하여 뿜어내어 층류의 유체 흐름을 형성시킨다. 가스 제어 시스템은 두개의 제어된 가스 공급원, 진공펌프, 3단 밸브로 구성된다.

⑤ 용탕 진동 장치(melt vibration system) : 용탕 진동 장치는 오리피스에 미세하고 규칙적인 압력 펄스를 가하는데, 이 펄스는 규칙적인 간격으로 유체을 끊어서 일정한 크기의 구형입자를 만들어 낸다. 용탕 진동 장치는 압전 변환기(piezoelectric transducer), 기능 발생기(function generator), 증폭기(amplifier), 변환기(transformer), 진동 전달자(shaft and disk vibration transmitter) 그리고 주파수 측정기(frequency counter)로 구성되어 있다. 기능 발생기, 증폭기 그리고 변환기는 압전체을 400 V까지 0.1 – 30 kHz의 범위에서 작동되게 한다. 주파수 측정기는 작동 신호의 주파수를 관찰한다. 이 진동은 진동 전달자를 통하여 용탕으로 전달된다.

⑥ 대전 장치(charging system) : 대전 장치는 구형입자들이 유체에서 분리될 때 전기적으로 대전시켜 주어서, 형성된 구형입자들이 서로 밀어내는 힘을 갖는다. 구형입자들이 대전되지 않을 경우에는 입자들끼리는 서로 뭉치는 현상이 발생한다. 그러나 충분한 대전을 할 경우, 입자들끼리는 동일한 극성을 갖게 되므로 서로 뭉치지 않고 서로 흩어지게 된다. 분산률은 대전 전압을 변화시킴으로서 제어할 수 있다. 대전 장치는 일반적으로 DC 전압 장치와 스테인레스 스틸로 구성된다.

⑦ 감시 장치(Monitoring system) : 감시 장치는 초기 구형입자 크기, 구형입자 사이의 간격을 제어하는데 있어 피드백을 제공한다. 감시 장치는 용탕이 오리피스를 나와서 분리 거동 현상을 관찰할 수 있게 줌 렌즈가 부착된 CCD 카메라 등으로 구성된 비디오 시스템으로 구성한다.

### 2.3. DBM 공정 변수

DBM 공정은 기존의 구형 분말 제조 공정 분야인 atomization법에 비하여 분말의 크기 편차를 최소화할 수 있다는 장점 뿐만 아니라, 여러 가지의 제조 공정변수가 비교적 독립적으로 작용함으로서 공정의 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있다[14-15]. DBM 공정에서 균일한 구형입자를 제조하는데 영향을 주는 변수는 용기 압력차(ΔP), 유체 흐름 속도(jet velocity), 오리피스 직경(orifice diameter), 주파수(frequency), 잔류 산소 함량(oxygen content), 대전 전압(charge voltage) 그리고 용융 온도(melting temperature) 등이 있다[14].

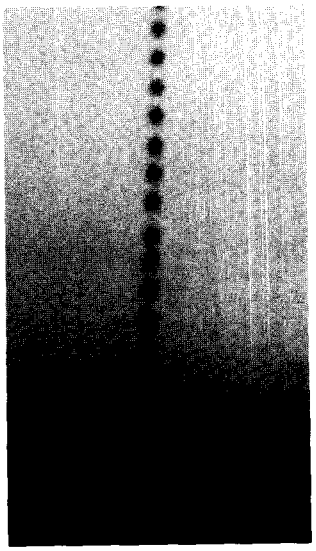

**Fig. 3. DBM 공정에 의하여 분무된 용탕의 분리 (break up) 현상을 관찰한 사진.**

그림 3은 DBM 공정시 상기의 각종 변수의 조절에 따른 액상 구형입자의 분리 거동(break-up of droplets)을 나타내고 있다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 액상 구형입자사이의 거리는 일정하게 유지되고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 압전체의 강제 진동이 액상 용탕의 분산을 원활하게 일으키기에 충분한 것으로 판단된다. 그러므로 이와 같이 적정한 입자 분리 거동을 보이는 적정 변수 범위를 찾음으로서 솔더볼의 제조를 위한 각각의 공정 변수 변화를 확립할 수 있다. 그림 4와 표 1은 상기에 언급한 바와 같이 균일한 구형입자간의 분리 거동을 보일 경우 KIMM 연구 그룹에 의하여 제조된 솔더볼(조성 : Sn-3.5 wt.Ag)의 외형 사진 및 조건을 나타낸 결과이다. 비교적 높은 구형도를 가지고 있으며, 크기 분포가 ±5% 이하의 편차를 가지는 매우 균일한 상태임을 관찰할 수 있었다. 이는 DBM 공정에 의해서 형성된 볼의 크기 분포가 비교적 일정하여 실제적으로 전자 패키징 BGA 볼에 적용이 가능한 범위 안

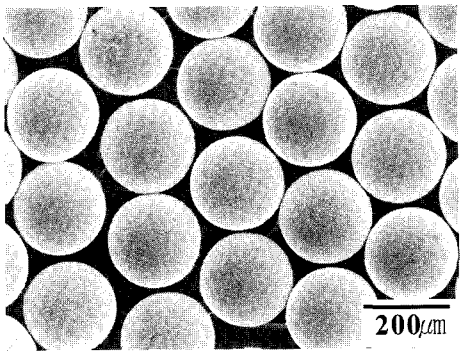


**Fig. 4. 구멍의 직경이 150 μm인 오리피스를 사용하여 제조된 Sn-3.5 wt.%Ag 조성의 BGA용 솔더볼.**

**Table 1. 솔더 볼(그림 4)의 제조 조건**

| Parameter | Value |
|---|---|
| Material | Sn-3.5 wt%Ag |
| Melt temperature | 250°C |
| Pressure difference | 120 kPa |
| Orifice diameter | 150 μm |
| DC charge plate voltage | 600 V |
| Piezo transducer | 200 V(AC) |
| Transducer frequency | 7 kHz |

에 있음을 알 수 있다.

## 3. DBM 공정의 응용 분야

DBM 공정은 솔더볼 제조 이외에 다양한 응용 범위를 가지고 있다. 일반적으로 DBM 공정의 응용 범위는 크게 분말 제조 분야, solder bumping 분야, spray forming 분야 그리고 rapid prototyping 분야 등으로 구분할 수 있다.

### 3.1. 분말 제조 분야

분말 제조분야는 가장 많은 연구가 이루어진 분야로서 솔더볼 제조와 같은 균일한 직경의 분말 제조를 목적으로 한다. 이와 같이 제조된 구형 분말은 이미 언급된 바와 같이 BGA(ball grid array)등에 응용 가능하다. BGA 볼(ball)로서 사용되기 위해서는 구형입자의 크기 오차를 최소화 해야한다. 최근 연구결과 분말의 크기 오차는 9%에서 2.5% 수준으로 감소되었다[9,14]. 또한 분말 제조 가능 상한 온도를 증가시켜 철계 및 초내열 합금계와 같은 응용분야의 확대를 위한 연구가 요구되어 진다.

### 3.2. Solder bumping 분야

이 분야는 solder bump를 DBM 장치에 응용하여 자동으로 위치 및 시간 제어에 의해 연속적으로 제조하는 분야이다. 이 분야는 현재 연구가 초기 상태에 있으나, 장기적인 측면에서 실제 산업계에 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다. 앞으로 차세대 패키징 기술은 경량·박막·초소형으로서 휴대용이 가능하도록 하기 위한 기술개발이 이루어질 것이다. 이와 같은 기술을 만족시키기 위해서는 solder bumping 분야가 향후 패키징 기술을 선도하기 위한 하나의 분야로서 자리 매김 할 것이다. 그러나 현재 연구 현황은 구형입자의 분급 방법 및 분말의 경로(trajectory) 조정 등의 문제점에 대한 해결이 요구되어진다.

### 3.3. Spray forming 분야[12,14]

Spray forming 공정은 재료 내부의 구조적인 편석의 문제를 해결하며, 판상 등의 일정한 형태의 구조물을 *in-situ* 방법에 의하여 제조하는 방법이다. Spray forming 분야는 기존의 atomization 공정에 비하여 입도 분포가 매우 좁아서 정량적인 모델링 실험 등에 용이하며, 기공이 억제된 판재 제조분야에 많은 관심이 기울여지고 있다. 그러나 단점으로는 DBM 공정이 기존의 atomization법 등의 공정에 비해 생산성이 떨어진다는 점과 지금까지 대부분의 연구가 Sn, Sn-Pb 합금등 저용융 합금계에 치중되어 있다는 점이다.

### 3.4. Rapid prototyping 분야

Rapid prototyping 분야는 분산되어지는 구형입자가 원하는 정확한 위치에 분사가 가능하도록 함으로서 3차원 목적물의 제작이 가능하도록 하는 기술이다. 이 분야는 형상 및 제조 공정단계 감소를 통하여 경제성을 극대화시킴으로서 효율적인 공정으로 판단된다. 그러나 DBM 공정을 이 분야에 적용시키기 위해서는 구형입자의 경로조정에 대한 문제점 해결이 당면 과제이다.

## 4. DBM 공정 관련 연구 현황

DBM 공정을 통한 솔더볼 제조 기술은 전술한 바와 같이 미국 MIT의 J. H. Chun 교수에 의해서 제안되었고 지금까지 많은 연구가 지속적으로 진행

**Table 2. 미국에서 DBM 공정의 연구현황**

| 연구 기관 | 연구자 | 연구 내용 | 연구 시기 |
|---|---|---|---|
| MIT | J. H. Chun, C. H. Passow | Droplet 제조(Sn-40 wt%Pb) | 1992 |
| | J. H. Chun, S. Sahu | Sn-Pb droplet 열적상태 | 1994 |
| | J. H. Chun, P. J. Acquaviva | Deposit 응고 모델 | 1995 |
| | J. H. Chun, C. A. Chen | Sn-Pb droplet의 응고와 미세조직의 변화 | 1996 |
| | J. H. Chun, P. Yim | Break-Up 거동에 미치는 표면산화의 역할 | 1996 |
| | J. H. Chun, W. Williams | Bronze droplet의 제조 | 1996 |
| | J. H. Chun, S. Chey | Droplet의 다공성표면에 관한 연구 | 1996 |
| | J. H. Chun, J. Cherng | Al합금 droplet의 열적상태와 미세조직 관찰 | 1997 |
| | J. H. Chun, J. Rocha | Sn-38 wt%Pb 솔더볼 | 1997 |
| | J. H. Chun, H. Y. Kim | Droplet의 충격 거동 | 1997 |
| | J. H. Chun, J. Y. Lai | Sn lamination 제조 | 1997 |
| | J. H. Chun, J. Shin | RP(Rapid Prototyping) | 1998 |
| | J. H. Chun, T. G. Karahalios | DBM 장비의 진동 system | 1998 |
| | J. H. Chun, H. Y. Kim | Droplet의 spreading 거동 | 1998 |
| | J. H. Chun, J. C. Rocha | Fluxless 솔더볼 | 1998 |
| | J. H. Chun, P. Chai | 온도 microsensor | 1999 |
| | J. H. Chun, H. Y. Kim | Spreading 거동 | 1999 |
| | J. H. Chun, T. G. Karahalios | Microdroplet spreading 거동 | 1999 |
| | J. H. Chun, S. Chey | Deposit 표면의 다공성 연구 | 2000 |
| Tufts university | T. Ando, R. Shingavi, C. Tuffile | 미세조직 제어(Sn계, Al계) | 1995 |
| Northeastern university | T. Ando, A. Divenutil | Droplet의 응고 모델 | 1996 |
| | T. Ando, W. K. Forther | 100 μm 이하 분말(Sn-37 wt%Pb) | 1997 |
| | T. Ando, Y. Abesi | Droplet의 엔트로피 측정(Sn-5 wt%Pb) | 1997 |
| | T. Ando, C. Futtile, X. Dong | Droplet의 열적특성 측정(Sn-5 wt%Pb) | 1998 |
| | T. Ando, Y. Abesi | Al 합금(Al-6 wt%Cu-0.4 wt%Zn) | 1998 |
| | T. Ando, M. Beauregard | Multi-orifice용 DBM 공정 | 1998 |

되고 있다. 표 2는 미국의 MIT를 중심으로 구성되어 있는 DBM 관련 연구기관 및 연구내용을 정리한 것이다. 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 DBM 공정은 MIT를 중심으로 주도적으로 연구되고 있다. 또한 MIT의 DBM 연구를 재정적으로 지원하는 기관으로는 National Science Foundation, Chaparral Steel Company, Alcan Powders and Pigments, ALCOA Foundation, Aeroquip Corporation, United States Automotive Materials Partnership, Mitsui Mining and Smelting Co. Ltd., Fukuda Metal Foil and Powder Co. Ltd. 등이 있다[6-12].

지금까지의 MIT 중심의 DBM 공정 연구 경향을 보면 DBM 공정의 설계와 자동화에 의하여 Sn계 솔더볼에 제조에 관한 연구는 가시적인 성과를 거두었다. 그러나 DBM 공정에 관한 연구가 기계공학적인 관점에서 대부분 수행되고 있으므로 재료 공학적 측면에서 MIT의 연구를 재조명해 볼 필요성이 있을 것으로 판단된다.

또한 DBM 공정과 유사한 공정으로서 D. J. Hayes 박사팀에 의한 "solder jet" 기술이 상당한 발전을 이룬 것으로 보고되고 있다. Solder jet 기술은 DBM 공정과 마찬가지로 압전체의 압전 효과를 이용하여 잉크젯 프린터와 같이 구형의 입자를 형성하는 기술로서 솔더볼 뿐만 아니라 광전 폴리머(optical and electronic polymer), 생체 재료, 각종 접착 재료(adhesives) 등에 응용이 가능하다[16-17]. 실제적으로 이와 같은 기술을 이용하여 MPM Corporation 이라는 업체가 설립되었으며, DARPA, NIST, NFS, USAF 등의 재정적 지원에 의해 연구가 이루어지고 있다. 또한 솔더젯 기술에 의한 시제품 장비가 현재 Motorola,

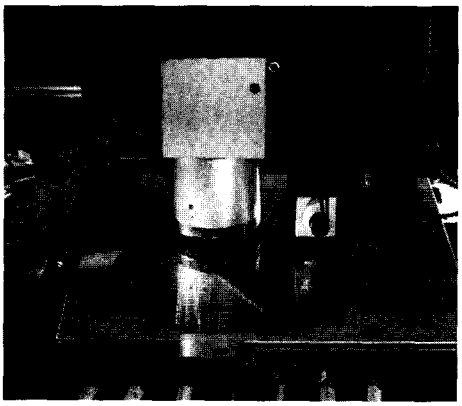

**Fig. 5. 솔더젯 (solder jet) 기술을 이용하여 제작된 bump 제작용 프린터 헤드(print head)[16,17].**

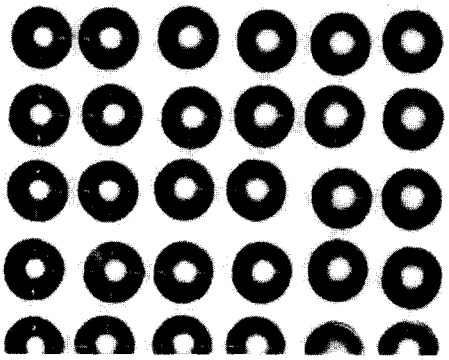

**Fig. 6. 솔더 젯(solder jet) 기술을 사용하여 제조된 63 wt.%Sn-37 wt.%Pb 조성의 25 μm 크기의 솔더 bump 들의 배열 모습[16,17].**

Delco, Philips, Texas Instrument, AMP, Kodak 등에 설치된 것으로 알려지고 있다. 그림 5와 그림 6은 솔더젯(solder jet) 기술을 이용하여 제작된 bump 제작용 프린트 헤드(print head) 사진과 솔더젯(solder jet) 기술을 사용하여 제조된 63 wt.%Sn-37 wt.%Pb 조성의 솔더 bumps 사진이다.

국내의 경우에는 한국 기계연구원에서 KIMM-MIT 기술협력사업의 일환으로 1998년 7월부터 2000년 7월까지 3년에 걸쳐서 DBM 공정에 의한 솔더볼의 제조와 특성 평가를 실시하였다. KIMM에서는 KIMM-MIT 기술협력사업을 통해서 DBM 장치의 제작 및 안정적인 구형의 솔더볼을 제조할 수 있게 되었고, 특히 무연 솔더볼을 제조하여 특성을 평가할 수 있었다. 또한 앞으로 DBM 공정을 응용하여 rapid prototyping 및 solder bumping 분야에 활용하고자 지속적인 연구가 진행되고 있다.

이외에도 울산대학교 정은 교수 연구팀에 의해서 반도체 패키징용 솔더볼과 솔더 분말제조 기술이 산·학 합동으로 연구되어 (주)덕산 하이메탈로 기술이전이 되었다. (주)덕산 하이메탈은 이 솔더볼 제조장치를 이용하여 상업용으로 사용이 가능한 솔더볼을 제조하고 있는 것으로 알려지고 있다. 이외에도 대주정밀화학 등이 MIT로부터 기술 이전을 통하여 무연 솔더볼을 제조 기술을 확보하고 있는 것으로 알려져 있다.

## 5. 결 언

DBM 공정은 기존의 분말 공정과는 달리 압전 재료를 이용하여 유체 내부의 강제 진동에 의해 입자 분산 과정을 제어함으로서 일정한 크기 및 전기적으로 대전되어 있는 금속 구형 분말을 만들기 위해 개발되었다. DBM 공정의 응용범위로는 솔더볼 제조 분야 이외에 spray forming 분야, solder bumping 분야 그리고 rapid prototyping 분야 등으로 구분할 수 있었다. KIMM에서는 1998년부터 KIMM-MIT 기술 협력 사업으로 DBM 공정에 관한 연구를 시작하여 지금까지 지속적인 연구를 수행하고 있다. 본고 에서는 이와 같은 DBM 공정에 의한 솔더볼 제조 기술 및 응용 기술 현황을 분석하여 보았다. 그리고 이를 통하여 전자 산업 등 각종 관련 산업에 대한 DBM 공정의 효용 가치를 높임으로서 앞으로의 DBM 공정에 대한 새로운 연구 방향을 제시하고자 하였다.

## 참고 문헌

1. S. W. Yoon, B. J. Lee and H. M. Lee: "Alloy Design and Evaluation of Sn-Bi-In-Zn Solder through Thermodynamic Calculation," J. Kor. Mater. Res., **7(4)** (1997) 303-309.
2. S. J. Kim and K. S. Bae: "A Study on the Microstructure and Adhesion Properties of Sn-3.5Ag/Alloy 42 Lead-Frame Solder Joint," J. Kor. Mater. Res., **9(9)** (1999) 929-931.
3. Y. J. Seo, K. K. Lee and D. J. Lee: "A Study on Interfacial Reaction and Mechanical Properties of 43Sn-57Bi-X Solder and Cu Subsrate," J. Kor. Mater. Res., **8(9)** (1998) 807-812.

4. S. K. Hong, C. H. Ju, C. Y. Kang and I. B. Kim: "A Study on the Characteristics of Low Pb Sn-5 wt%Pb-1.5 wt%Ag-X%In Solder Alloy," J. Kor. Inst. Met. & Mater., **8(11)** (1998) 1011-1019.
5. W. Dreyer and W. H. Muller: "A Study of the coarsening in Tin/Lead Solder," Int. J. Solids and Structure, **37** (2000) 3841-3871.
6. C. H. Passow: "A Study of Spray Forming Using Uniform Droplet Sprays," M. S. Thesis, MIT (1994).
7. S. Sahu: "Thermal State of Sn-Pb Droplet in the Droplet-Based Manufacturing Process," M. S. Thesis, MIT (1994).
8. G. K. Abel: "Characterization of Droplet Flight Path and Mass Flux in Droplet-Base Manufacturing," M. S. Thesis, MIT (1994).
9. P. J. Acquaviva: "Modeling of Deposit Solidification in Droplet Based Manufacturing," M. S. Thesis, MIT (1995).
10. P. Yim: "The Role of Surface Oxidation in the Break-Up of Laminar Liquid Metal Jets," Ph. D. Thesis, MIT (1996).
11. J. C. Racha: "Control of the UDS Process for the Production of Solder Balls for BGA Elecrtonics Packaging", M. S. Thesis, MIT (1997).
12. P. J. Acquaviva, J. H. Chun and T. Ando: "Effects of Droplet Thermal State on Deposit Microstructure in Spray Forming," Scripta Mater., **34(5)** (1996) 689-696.
13. P. Berthoumieu, H. Carentz, P. Villedieu and G. Lavergne: "Contribution to Droplet Break-Up Analysis," Int. J. Heat and Fluid Flow, **20** (1999) 492-498.
14. J. H. Chun and C. H. Passow: "Droplet-Based Manufacturing," Annals of the CIRP, **42(1)** (1993) 492-498.
15. J. H. Chun, C. H. Passow and T. Ando: "Spray Deposition of a Sn-40 wt%Pb Alloy with Uniform Droplet," Metallurgical Transaction A, **24A** (1993) 1187-1193.
16. D. B. Wallace and D. J. Hayes: "Solder Jet Printing of Micropads and Vertical Interconnect," SMTA's Emerging Technology Symposium (1997).
17. D. B. Wallace and D. J. Hayes: "Solder Jet Techology Update," The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, **21(1)** (1998).