

## Ultrasonic Atomization 공정에 의한 Cream Solder용 분말 제조에 관한 연구

배경원 · 정 은  
울산대학교 재료금속공학부

### <요약>

새로운 기술인 초음파 분무공정으로 SMT(Surface Mount Technology)에 사용되는 크림솔더용 분말을 제조하였다. 초음파 분무공정으로 분말을 제조할 경우 타 공정에 비해 제조 비용을 효율적으로 절약할 수 있다. 본 연구에서는 초음파 혼 위에 얇은 막으로 도포된 용융금속을 초음파로 진동시켜 생성된 모세관 파동으로 분무시켰다. 초음파 분무공정의 변수로는 초음파의 주파수, 혼의 재질, 분무분위기, 과열도 이고 그 중 28kHz의 주파수로 Ti 합금의 초음파 혼을 사용해 Ar가스 분위기에서 분무시켰을 경우 평균입자 크기가  $74\mu\text{m}$ ( $\sigma = 1.58$ )인 고품질의 솔더분말을 얻을 수 있다.

## A Study on the Fabrication of Powders for Cream Solder by Ultrasonic Atomization Process

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

### <Abstract>

The use of a new technology, Ultrasonic Atomization Process, to produce solder powders for cream in SMT(Surface Mount Technology) is described. The ultrasonic atomization used capillary wave atomization so that a thin layer of liquid metal covers the surface of an active solid resonator. The process parameters that have been

evaluated are frequency, horn material, gas atmosphere, and superheating. It was found that solder powders with  $157\mu\text{m}$  and  $129\mu\text{m}$  in diameter can be produced using 20kHz and 28kHz frequencies, respectively. And other process parameters are varied for producing high quality and advanced properties of solder powder.

## 1. 서 론

최근 전자기기의 고기능화, 고성능화에 따라 경박단조(소형, 경량, 박형)의 필요성이 높아지고 있는 현 시점에서 크림솔더는 Microsoldering의 분야에서 각광받고 있다. 즉 부품을 종래의 플로우(flow)방식 대신에 크림솔더를 사용하여 리플로우(reflow) 방식으로 실장하는 표면 실장기술(Surface Mount Technology, SMT)방식이 크게 대두되고 있다.

SMT에서는 금속의 조성, 용접, 크림의 점착력 시간, 잔류 플릭스의 신뢰성, 세정성등이 우수한 크림솔더가 필수적으로 요구된다.<sup>1)</sup> 그러나 국내 전자기기들을 생산하는 업체에서 사용하는 크림솔더는 국내에서 소량 생산되고 있으나 품질면에서 많이 부족하여 거의 전량을 일본, 미국 및 독일 등에서 수입하고 있는 실정이므로 품질향상 및 수입 대체효과로의 국산화가 시급한 실정이다.

현재 크림솔더용 분말제조에 사용되고 있는 방법은 가스분무법, 압력분무법, 원심분무법, 초음파 분무법 등이 있으나 가장 많이 사용되고 있는 방법은 원심분무법이다.<sup>2)</sup> 그러나 이 방법은 15,000~60,000rpm 정도로 Motor를 고속으로 회전하는 기술과 이에 따른 큰 설비가 동반되어야 한다. 이에 비해 본 연구에서 소개하는 초음파 분무법은 용융 온도가 높은 금속(M.P>1000°C)에서는 적용이 어렵지만 저용접 금속에 사용할 경우 좁은 입도 분포와 동시에 구형도가 우수하고, 불활성 분위기에서 낮은 산소함량(0.01W/O이하)을 가지는 양질의 솔더 분말을 얻을 수 있으며, 또한 액적의 비산속도가 작으므로 장치규모가 작아도 되는 장점이 있다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 표면실장에 사용되는 크림솔더용 분말을 초음파 분무공정을 이용하여 제조하고 여러 가지 제조 공정 인자들을 변화시켜 분말의 특성에 미치는 영향을 조사하여 보았다.

## 2. 초음파 분무법

초음파 분무법은 타 공정에 비해 제조단가 측면에서 잠재력을 갖는 분말 공정 기술이다. 초음파 분무공정의 장점들은 다음과 같다.<sup>5)</sup>

- (1) 고압의 가스를 이용하여 유체에 충격을 가하지 않으므로 다른 공정에 비해 가스 소모가 적다.
- (2) 액적들의 비산 속도가 작아 다른 타 공정에 비해 장치의 소형화가 가능하다.

- (3) 분말 입도 분포가 좁다. ( $\sigma = 1.4 \sim 1.6$ )
- (4) 초음파 주파수에 따라 분말의 크기를 조절할 수 있다.
- (5) 낮은 산소함유량(0.01% 이하)을 가지고 구형의 분말을 제조할 수 있다.

초음파 분무공정의 원리는 다음과 같다.

## 2.1 모세관 파동 분무공정

초음파 혼(horn)은 표면에서 수직으로 진동하고, 증가된 진폭이 특정 한계 값을 넘을 때, 정상 모세관 파동(Standing Capillary Wave)을 형성하면서 초음파 혼의 표면을 균일하게 덮은 액상 금속 막이 모세관의 끝에서 작은 액적으로 분무되게 된다. 공정 개략도는 Fig. 1에, 모세관 파동 분무법의 원리는 Fig. 2에 각각 나타내었다. 액적의 직경은 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 모세관 파동의 길이와 관계된다.

이 공정에서, 액상금속이 노즐을 통해 경사진(45° 이상) 초음파 혼 표면에 얇은 막을 형성하며 도포 되어지고, 초음파 혼의 발진에 의해 진동되어진다. 이때 요구되는 특성으로는 초음파 진동자의 표면온도가 액상 금속의 용융점 이상의 온도가 유지되어야 하고 또한 액상의 금속과 반응하지 않아야 한다. 일단 임계값 이상의 진동을 갖는 진폭에 이르면 작은 액적들이 분무되고, 원형의 금속 분말로 응고된다. 입자의 직경은 진동자의 주파수가 증가함에 따라 감소한다.<sup>7)</sup>

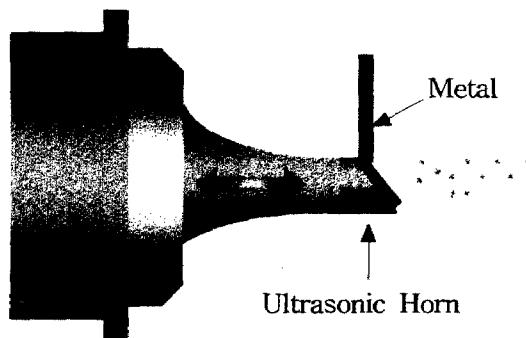


Fig. 1. Schematic diagram of the Ultrasonic Atomizer.

용융금속을 주파수  $f$ 로 표면의 수직방향으로 진동하는 초음파 혼 표면에 얇은 막을 형성하며 도포 되어지고 진동이 임계값을 넘으면 체스판 모양의 패턴을 가지는 모세관 파동(capillary wave)이 형성된다. 초음파 분무과정의 모델링으로 유명한 독일의 Hohmann과 Jonsson은 모세관 파동( $\lambda_k$ )주파수와 액적의 표면장력, 밀도로부터 유도하였으며 액적 크기( $dh$ )를 식 (2)와 같이 정의하였다.<sup>6)</sup>

$$\lambda_k = 2 \sqrt[3]{\frac{\delta \pi}{\rho f^2}} \quad (1)$$

$\delta$  = 용융금속의 표면장력

$\rho$  = 용융금속의 밀도

$$d_h \approx \frac{\lambda_k}{2} \quad (2)$$

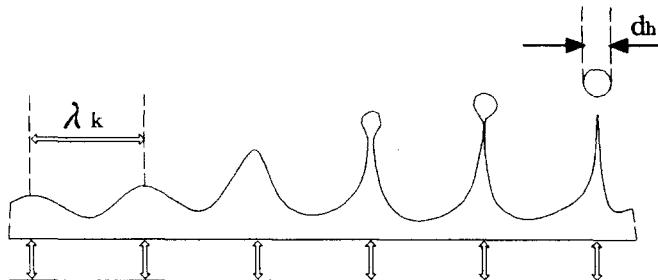


Fig. 2. Principle of capillary-wave atomization.

액적 진폭속도가 증가함에 따라 특성한계치  $Vn$ 을 초과하게 되면 모세관 파동의 끝부분에서 작은 액적(droplet)들이 떨어져 나가게 된다. (Fig. 2)

$$V_n \approx 30 \frac{\eta}{\rho} \sqrt[3]{\frac{\rho f^2}{\delta \pi}} = \frac{60 \eta}{\lambda_k \rho} \quad (3)$$

$\eta$  = 액적의 점도

### 3. 실험방법

#### 3.1 실험장치

Fig. 3는 본 실험에 사용되어진 장치의 개략도이고 Fig. 4는 실제 장치를 나타낸 것이다. 초음파 분무 장치의 구성은 크게 (A) 2개의 용해로, (B) 턴디쉬, (C) 노즐 (D) 진공펌프가 연결된 분무탱크, (E) 초음파 전동자, (F) 분말 포집기 등으로 구성되어 있다.

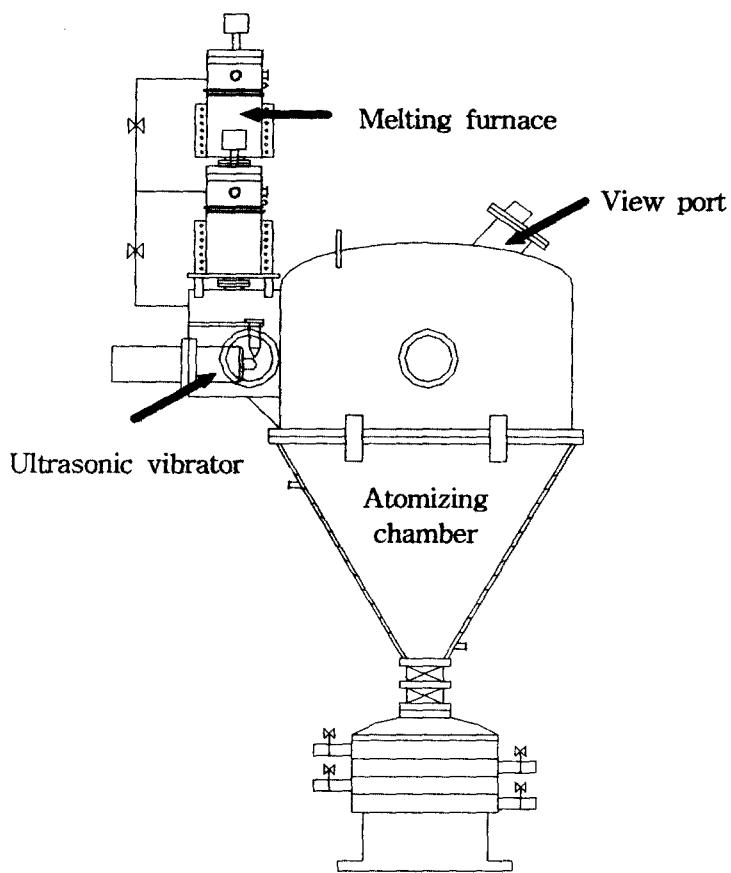


Fig. 3. Schematic diagram of the ultrasonic atomization unit.



Fig. 4. Ultrasonic atomization unit at advanced materials lab.

### 3.2 분말의 제조

분무탱크 내의 분위기를  $1 \times 10^{-3}$  torr 까지 진공시킨 후 He이나 N<sub>2</sub>, Ar등의 불활성 가스를 주입하여 작업환경을 대기압으로 맞춰주었다. 합금을 230℃로 용해시킨 후, 턴디쉬의 수위조절기로 용탕 수위를 조절하면서 자중에 의해 일정량의 용탕이 초음파 혼에 공급될 수 있도록 하였다. 용융 합금의 분사는 압전소자(piezoelectric transducer)에 의해 20, 28kHz에서 초음파 혼의 진동에 의해 분사시켰으며, 이때 발생되는 액적들은 불활성 분위기에서 응고되며, 생성된 분말들은 분무탱크 아래에 부착된 분말 포집기에 포집하였다. Fig. 5는 본 연구에서 실제 액적이 분무되는 모습을 CCD 카메라에 의해 촬영된 모습을 나타낸 것이다.

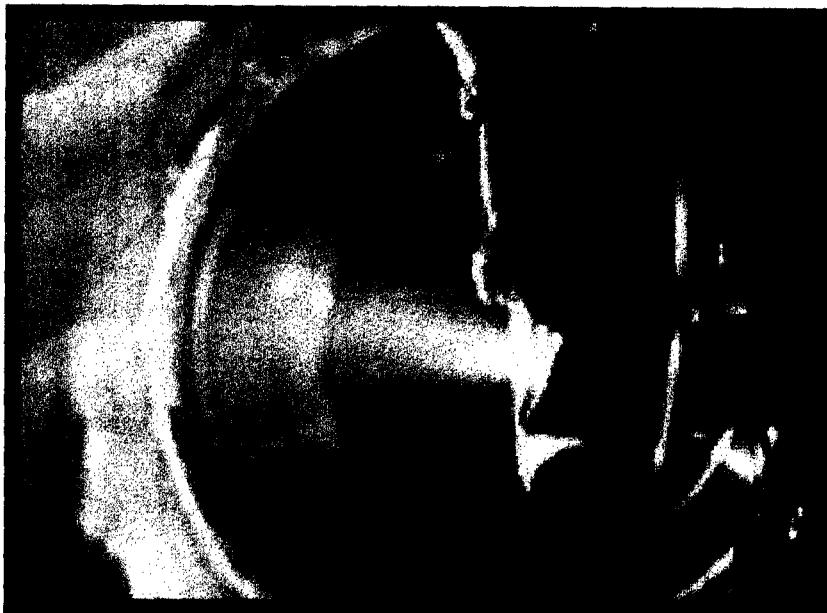


Fig. 5. Spraying powders in ultrasonic atomization process. (Sn-37w/oPb).

### 3.3 특성평가

#### 3.3.1 분말의 형상 및 입도분석

제조된 분말의 형상 또는 크기분포와 미세구조를 관찰하기 위하여 전자현미경(SEM, JSM-820)을 이용하였다. 입도분석은 영국의 Malvern社의 Laser Deflector를 이용한 Master Sizer(Serial Number 33442-44)를 사용하였고, 입도분석의 정확성을 기하기 위해 각 시료를 5회 측정하여 평균값을 내었다. 또한 분말 제조 후 재용용 특성을 조사하기 위해 Dupon社의 DSC 2100을 이용하였다.

#### 3.3.2 재용용 특성검사 및 Solder Ball 검사

크림솔더의 안전성 시험인 재용용 특성을 실제로 현장에서 적용되고 있는 방식대로 실행하고, 열흐름 곡선을 Fig.6에 나타내었다.

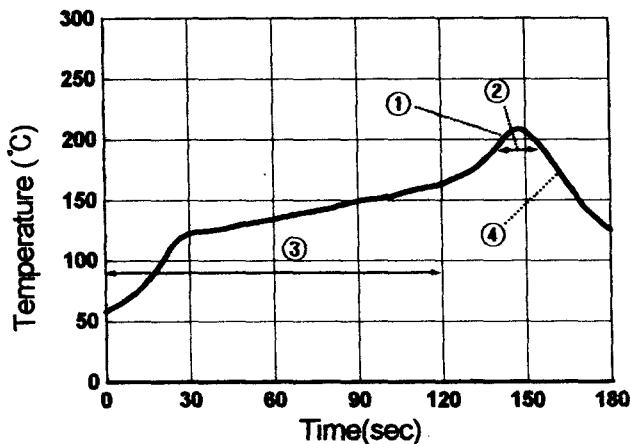


Fig. 6. Reflow curve of solder cream.

- ① The maximum temperature is 20~40°C higher than the liquid temperature.
- ② Liquidus condition(for 20~40 seconds).
- ③ Pre-heated for 30 seconds to 2 minutes at 120~150°C.
- ④ Rapid cooling.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 분말의 입도 크기에 미치는 주파수의 영향

분무공정에서 여러 가지 공정변수들이 있지만, 그 중에서 분말의 입자 크기에 가장 큰 영향을 미치는 주파수를 변화시켜 분말의 입도크기를 조사해 보았다.

Table. 1는 실험의 공정조건과 결과를 나타낸 것이다.

Table 1. Comparison of the test condition and results that the effects of frequency on particle of solder powder.

Frequency(khz)	20	28
Horn Material	304 Stainless Steel	
Nozzle Dia.(mm)	0.3	
Gas	$N_2$	
Melt Temperature(°C)	183+50(superheating)	
D84( $\mu m$ )	264	252
D50( $\mu m$ )	157	129
Standard Deviation( $\sigma$ )	1.68	1.95

Fig. 7은 초음파 흔 채질을 304 스테인레스 강을 사용하여 노즐(Nozzle)구멍 크기를 0.3 mm로, 분무탱크내 분위기를  $N_2$ 가스로 유지한 후 각각 주파수를 20, 28kHz로 변화시켜 얻어진 분말의 사진이며, Fig. 8 은 입도 분석을 나타낸 것이다.

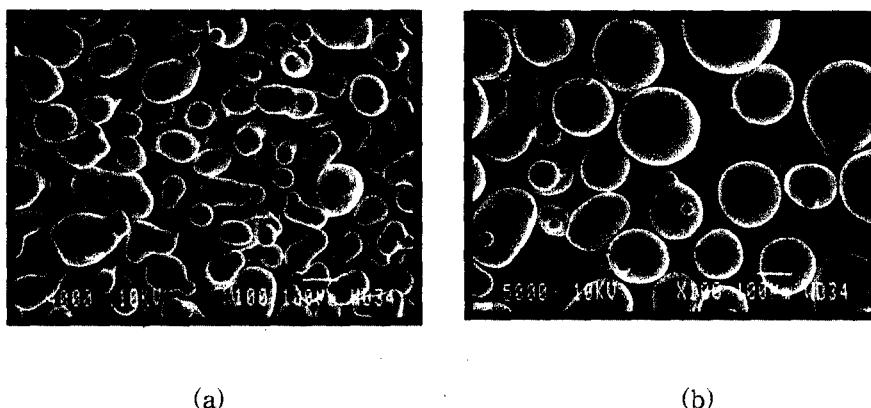


Fig. 7. Comparison of SEM micrographs. ( $\times 100$ )  
Frequency : (a) 28kHz and (b) 20kHz.

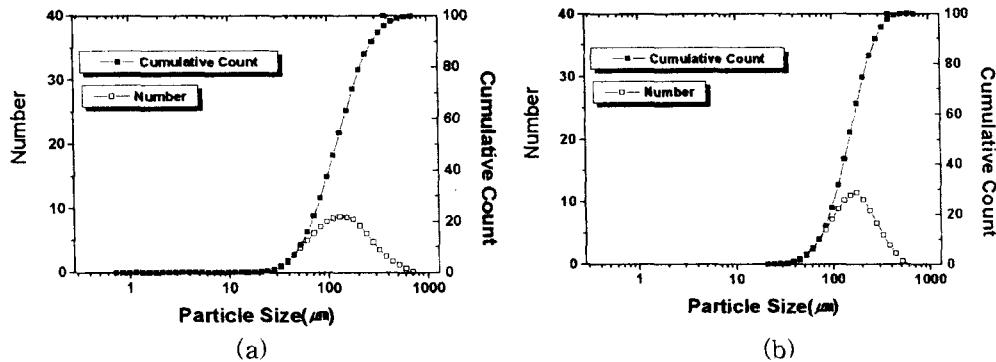


Fig. 8. Variation in particle size distribution plots.

Frequency : (a) 28kHz and (b) 20kHz.

분말의 크기는 주파수가 20kHz에서 28kHz로 증가함에 따라 평균 입도 크기가  $157\mu\text{m}$ 에서  $130\mu\text{m}$ 로 미세해 점을 알 수 있다. 이는 앞의 계산식 1에서 고찰한 바와 같이 단위시간 당 진동수가 커짐에 따라 상대적으로 모세관 파장( $\lambda k$ )이 작아지기 때문에 액적의 크기가 줄어드는 것으로 사료된다.<sup>10)</sup> 계산식의 입도 크기와 차이가 나는 것은 Fig. 7에서 나타나듯이 서로 붙어있는(Merge) 입자들이 존재하는데 이러한 것은 입자들이 비산되면서 서로 충돌이 일어나 충돌 액적들간의 반발, 합작, 분리 등의 현상이 발생되었기 때문으로 사료된다. 액적끼리 충돌할 때 액적간의 상대속도와 상대적인 크기에 따라 일단 두 가지의 경우, 즉 반발(bounce)과 액적간 연결상태 형성(bridge formation)으로 나타나는데 이러한 경우 입자 크기를 크게 또는 작게 하므로 오히려 분말의 입도분포를 나쁘게 만드는 원인이 된다.

#### 4.2 분무탱크내 분위기에 따른 분말의 특성 변화

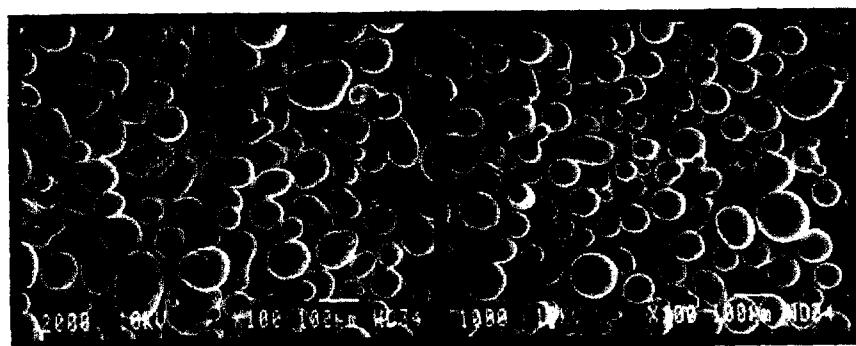
공정변수중 분위기에 따른 영향을 조사하기 위해 28kHz의 주파수에서 Ti 합금인 초음파 혼을 이용해 각각 He, N<sub>2</sub>, Ar, 그리고 Air중에서 실험을 실시하였다. Table 2는 분무탱크 내의 분위기에 따른 실험조건과 결과를 정리한 것이다.

분위기에 따른 실험결과로 나온 분말의 모양과 표면을 각각 Fig. 9, 10에 각각 나타내었고, Fig. 11에서는 입도분포를 나타내었다.

Table 2에서 보듯이 평균 입도크기는 Ar<He<N<sub>2</sub><Air 순으로 나타났고, 입도분포에서는 N<sub>2</sub>가스 ( $\sigma = 1.80$ )보다 He과 Ar가스 ( $\sigma = 1.51, 1.57$ )에서 더 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

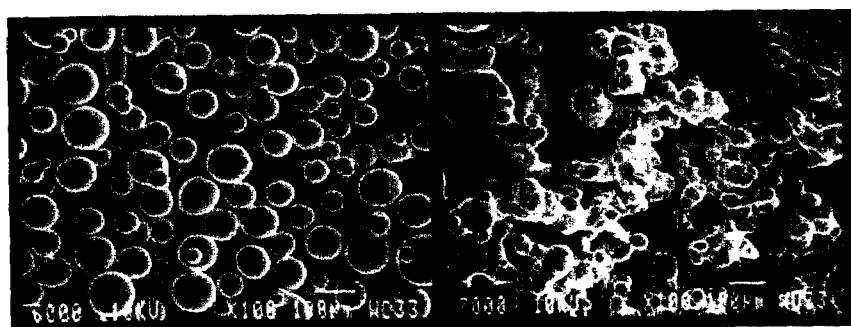
Table 2. Comparison of the test conditions and results showing the effects of atmosphere on particle of solder powder.

Frequency(khz)	28			
Horn Material	Ti Alloy			
Nozzle Dia.(mm)	0.3			
Gas	He	N <sub>2</sub>	Ar	Air
Melt Temperature (°C)	183+50(Superheating)			
D84(μm)	129	192	126	408
D50(μm)	85	106	80	168
Standard Deviation	1.51	1.80	1.57	2.42



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 9. Comparison of SEM micrographs ( $\times 100$ ).  
Ambient gas : (a) He, (b) N<sub>2</sub>, (c) Ar, and (d) Air.

표면조직에서는 He 가스가 Ar과 N<sub>2</sub>보다 냉각능이 크기 때문에 Fig 10에서 나타나듯이 금냉으로 인한 수지상 조직이 나타났다.

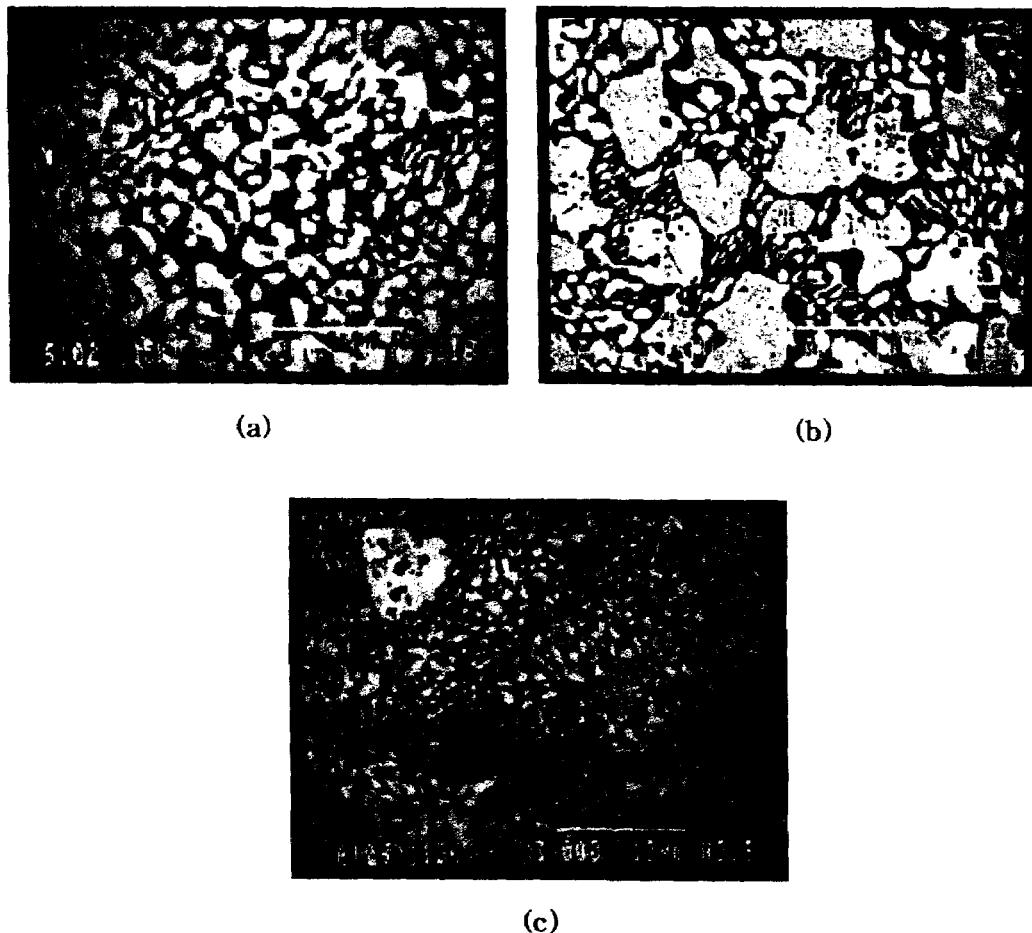


Fig. 10. Comparison of SEM micrographs ( $\times 3,000$ ).  
Ambient gas : (a) He, (b) N<sub>2</sub>, and (c) Ar.

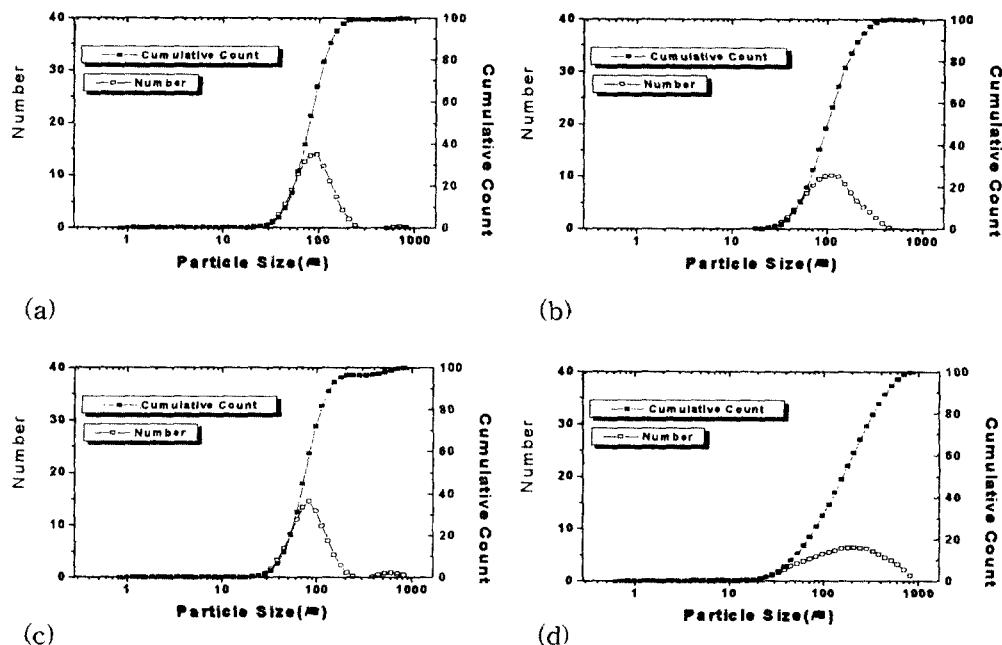


Fig. 11. Variation in particle size distribution plot.

Ambient gas : (a) He (b) N<sub>2</sub> (c) Ar and (d) Air.

#### 4.3 초음파 혼 재질에 따른 분말의 특징

공정변수중 초음파 혼 재질에 따른 영향을 알아보기 위해 28kHz의 주파수대역에 N<sub>2</sub> 가스 분위기 속에서 Ti 합금과 304 스테인레스강 재질의 초음파 혼을 이용해 실험을 실시하였다. Table 3은 티타늄 합금과 304 스테인레스강의 물리적 성질을 비교한 것이다.

동일한 실험조건에서 초음파 혼 재질의 차이에 따른 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Physical properties of ultrasonic horns

	Ti Alloy	304 Stainless Steel
Melting Point(°C)	1540-1640	1400-1427
Crystal Lattice	H.C.P<900°C <B.C.C	F.C.C
Specific Gravity	4.42	8.03
Thermal Conductivity (Cal/cm.sec.°C)	0.018	0.039
Coefficient of Expansion (cm/cm/°C)	$8.8 \times 10^{-6}$	$16.5 \times 10^{-6}$

초음파 혼 재질에 따른 실험결과로 나온 분말의 모양을 Fig. 12에 나타내었고, Fig. 13에서는 입도 분포를 나타내었다. 평균입자크기와 표준편차 모두 Ti 합금이 304 스테인레스강 보다 양호한 것으로 나타났는 데 이것은 Table 6에서 보듯이 Ti합금의 비중이 304 스테인레스강보다 낮아 상대적으로 압전 진동자에 대해 부하가 적게 걸리게 되어 초음파가 안정적으로 전달되고 Ti 합금은 내열성합금으로써 초음파 혼의 국부적인 가열에 대해 열적으로 안전하기 때문인 것으로 사료되며, 또한 304 스테인레스강은 Ti 합금보다 열팽창이 커 가열에 따른 혼의 길이의 변화로 온도 250°C에서 공진 주파수 대역이 28kHz에서 27.4kHz로 떨어졌기 때문에 분말의 평균크기가 스테인레스 강보다 130 $\mu\text{m}$ 에서 106 $\mu\text{m}$ 로 더 작게 나온 것으로 사료된다.

Table 4. Comparison of the test conditions and results that the effect of ultrasonic horn on particle of solder powder.

Frequency(khz)	28	
Horn Material	Ti Alloy	304 Stainless Steel
Nozzle Dia.(mm)	0.3	
Gas	$\text{N}_2$	
Temperature(°C)	183+50(Superheating)	
D84( $\mu\text{m}$ )	193	253
D50( $\mu\text{m}$ )	106	130
Standard Deviation( $\sigma$ )	1.80	1.95

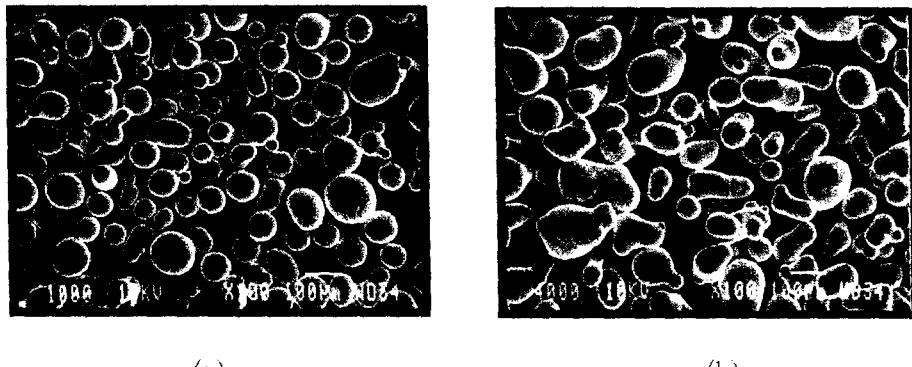


Fig. 12. Comparison of SEM micrographs. ( $\times 100$ ).  
Materials of used horn : (a) Ti alloy and (b) 304 Stainless steel.

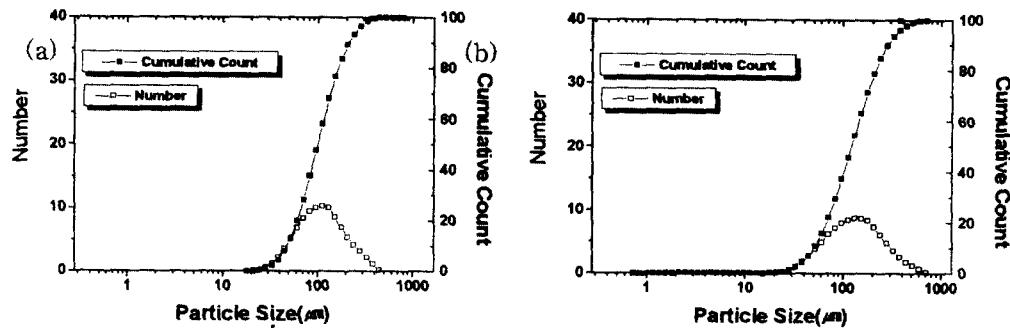


Fig. 13. Variation in particle size distribution plot.  
Material of used horn : (A) Ti alloy and (B) 304 Stainless steel.

#### 4.4 과열도에 따른 분말의 특징

공정 변수 중 과열도에 따른 영향을 조사하기 위해 28kHz의 주파수에서 Ti 합금 재질의 초음파 흔을 이용해서 He 가스 분위기 속에서 실험을 하였다. 과열도에 따른 실험조건과 결과를 Table 5에 나타내었다. 과열도 분위기에 따른 실험결과로 제조된 분말의 형상을 Fig. 14에 나타내었고, Fig. 16에서는 입도분포를 나타낸 것이다. .

Table 5. Comparison of the test condition and results that the effects of superheating on particle of solder powder.

Frequency(kHz)	28	
Horn Material	304 Stainless Steel	
Nozzle Dia.(mm)	0.25	
Gas	He	
Melt Temperature (°C)	183+50	183+100
D84(μm)	174	129
D50(μm)	99	86
Standard Deviation(σ)	1.75	1.51

Table 5에서 보듯이 과열도 온도가 50°C에서 100°C로 증가함에 따라 평균입도가 각각 99μm와 86μm로 감소하였고, 입도 분포도 표준편차가 각각 1.75와 1.51로 감소하는 경향을 보였다. 이는 식 (1)에서 보듯이 용탕의 온도가 증가함에 따라 표면장력이 감소하여 액적의 크기가 작아짐을 확인할 수 있었다. Fig. 15는 표면조직을 각각 ( $\times 300$ ) 나타낸 것이다. 분무탱크 내 분위기를 He으로, 입자들이 굽냉으로 인한 수지상 조직이 나타났지만 과열도를 100°C로 한 입자가 좀 더 미세하게 나타났는 데 이는 과열도가 50°C 때 보다 과냉도가 더 큼을 알 수 있다.

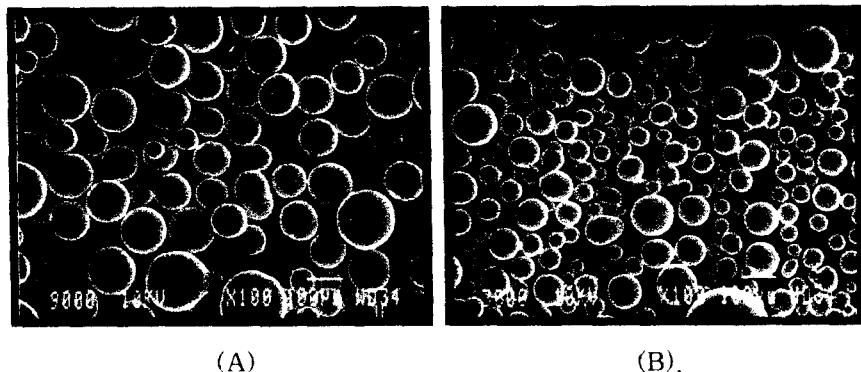


Fig. 14. Comparison of SEM micrographs ( $\times 300$ ).  
Temperature of molten metal : (A)  $183+50^\circ\text{C}$  and (B)  $183+100^\circ\text{C}$ .

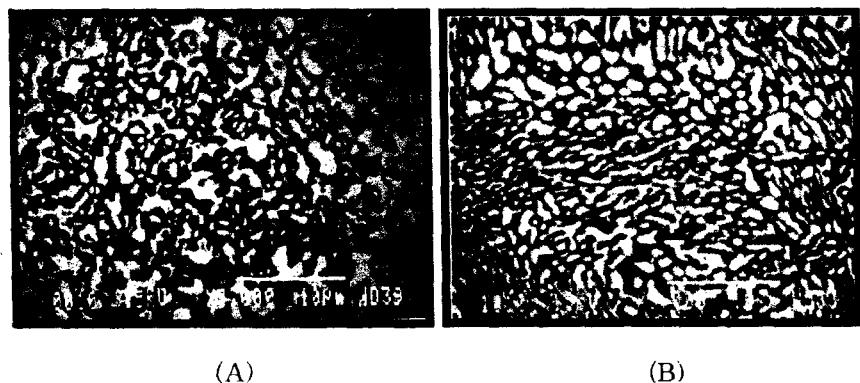


Fig. 15. Comparison of SEM micrographs ( $\times 3,000$ ).  
Temperature of molten metal : (A)  $183+50^\circ\text{C}$ , and (B)  $183+100^\circ\text{C}$ .

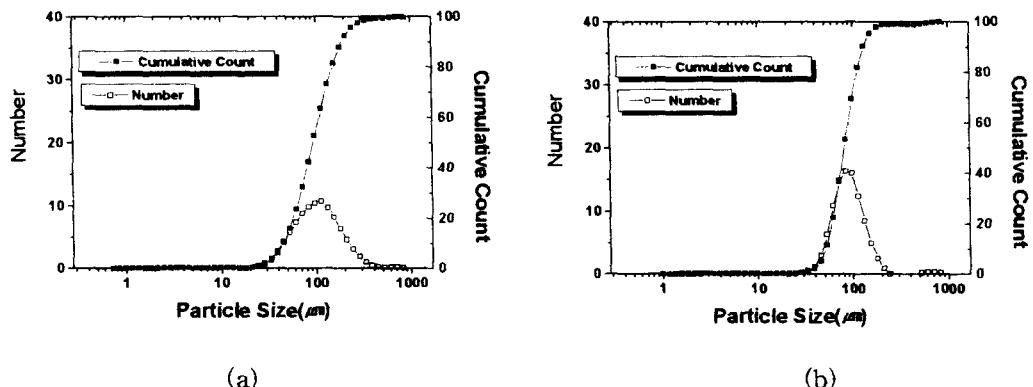


Fig. 16. Variation in particle size distribution plot.  
Temperature of molten metal : (a) 183+50°C and (b) 183+100°C.

#### 4.5 재용용 특성시험

재용용 특성검사를 하기 위해 솔더크림 제조회사인 꼬오끼 상에이 코리아社의 도움을 받아 솔더 분말에 폴릭스양을 9W/O로 섞어 페이스트를 제조하였다. 시험 순서로는 먼저 PCB 기판 위에 메탈 마스크를 올리고 제조한 크림솔더를 스퀴즈로 인쇄하였다. 메탈 마스크를 기판을 Fig. 6에 나타난 열 흐름 곡선을 따라 210°C로 불활성 가스 열풍을 30 초동안 가열시킨다. 그 후 입체 현미경으로 재 용용 여부를 관찰하였다.( $\times 50$ ) Fig. 17은 재용용 시킨 후의 PCB 기판을 나타낸 것으로 재용용 특성은 양호하게 나왔다.

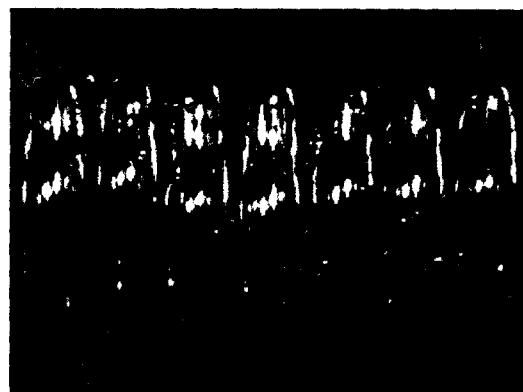


Fig. 17. Photograph of PCB board after reflow test.

#### 5. 결 론

"Ultrasonic Atomization 공정에 의한 Cream solder용 분말제조에 관한 연구"를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Ultrasonic Atomization 공정에 의해 양호한 표면(Smooth Surface)과, 높은 진구도 (High Spherical), 좁은 입도분포(Narrow particle size distribution)를 갖는 Cream Solder용 분말을 제조할 수 있었다.
2. 초음파 Horn의 주파수가 20kHz에서 28kHz로 증가시킴에 따라 분말의 평균입도는  $157\mu\text{m}$  ( $\sigma = 1.68$ )에서  $129\mu\text{m}$  ( $\sigma = 1.95$ )로 줄어듬을 알 수 있었다. 이는 단위시간당 진동 수가 커짐에 따라 상대적으로 모세관 파장( $\lambda k$ )이 작아지기 때문에 액적의 크기가 줄어드는 것으로 사료된다.
3. 분무탱크내 분위기에 따른 평균입도 변화와 분말의 미세조직을 관찰한 결과 분말의 평균입도는  $\text{Ar}(80\mu\text{m}) < \text{He}(85\mu\text{m}) < \text{N}_2(106\mu\text{m}) < \text{Air}(168\mu\text{m})$  순으로 증가하였으며 Pb rich

상과 Sn rich상의 분포는 Fig. 10에서 보듯이 N<sub>2</sub>, Ar일 때 보다 He 경우가 더 바람직함을 알 수 있다.

3. 초음파 혼의 재질을(304 Stainless stee, Ti alloy) 변화시켜 솔더분말을 제조하였을 때의 분말의 평균입자와 표준편차는 129 $\mu\text{m}$ ( $\sigma=1.95$ )에서 106 $\mu\text{m}$ ( $\sigma=1.80$ )로 초음파 분무공정에서 혼의 재질은 Ti 함금이 더 양호함을 알 수 있다.
4. 과열도에 따른 분말의 평균입도와 분말의 미세조직 변화를 관찰한 결과 과열도가 5°C에서 100°C로 증가함에 따라 평균입도 크기가 99 $\mu\text{m}$ 에서 86 $\mu\text{m}$ 로 줄어들고 입도분포도 좁아지는 더 양호한 특성을 얻을 수 있었다.
5. 초음파 분무공정으로 제조한 25~45 $\mu\text{m}$  범위의 솔더분말을 재용융특성 시험을 한 결과 재용융특성은 크림솔더용 분말에 적합함을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) J.J. dunkly: Powder Metall. (1994), 353.
- 2) Cherre J.P. and Accary A: A study of atomization mechanisms through centrifugal atomization, Powder Metall., 33 (1990), 11.
- 3) Animesh Bose: Advances in Particulate Materials, Butterworth -Heinemann, California, (1995) 112.
- 4) 한국공업규격, D6704 (1991).
- 5) R. Pohlman, K. Heisler and M. Cichos: Ultrasonics, January (1974) 11.
- 6) M. Hohmann, S. Jonsson and E. Lierke: Modern Developments in Powder Metallurgy, Gummerson and D.A. Gustafson, Metal Powder Industries Federation, vol 20, Princeton, NJ, (1988) 159.
- 7) Y. Boguslavskii; Physical Mechanism of the Acoustic Atomization of Liquid, Soviet Physics Acoustic, vol 15, no 1, (1968) 14.
- 8) E. Lierke, M. Heide and R. Grobach: Berührungslose Flüssigkeisterstaubung im intensiven Ultraschallfeld. Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Akustik, München, VDE Verlags GmbH, Berlin, (1980), 45.
- 10) 이상용: 액체의 미립화, 민음사, 서울 (1996) 38.