

## 이방성 도전성 접착제를 이용한 고밀도 전자 패키징 기술

이진운·이성혁·김종민

### High-Density Electronic Packaging Technology using Anisotropic Conductive Adhesives

Jin-Woon Lee, Seong Hyuk Lee and Jong-Min Kim

#### 1. 서 론

21세기에 들어서면서 정보통신기기의 진보에 따라 반도체 패키지의 고집적화, 고성능화, 저비용화, 소형화가 가속화되고 있다. 또한, 최근 차세대 디스플레이로 주목받고 있는 e-paper와 같은 플렉서블 디스플레이는 우수한 굴곡성을 가져 접거나 말 수 있는 특징을 가지고 있어 장착될 마이크로부품의 안정적인 전기적/기계적 특성과 고집적화에 대한 연구가 급속히 진행되고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 요구에 발맞추어 BGA(Ball Grid Array), CSP(Chip Scale Package), FC(Flip Chip), 3-D package 등과 같은 고밀도 전자 패키징 기술 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>2,3)</sup>. 이러한 전자 패키징 기술 중, 솔더링 접합 기술은 납(pb)이 가지는 우수한 특성<sup>4)</sup>으로 Sn-37Pb 공정 솔더를 이용한 기술이 폭넓게 이용되어 왔지만, 인류환경문제 인식에 따른 각종 국제 환경규제 조치로 인해 기존 접합재료를 대체할 새로운 접합재료로 각종 Pb-free 솔더<sup>5)</sup> 및 친환경 도전성 접착제 개발<sup>6)</sup>, 이를 이용한 친환경 접합공정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 친환경 대체 재료인 무연 솔더(Pb-free solder)를 이용한 기존 접합방법에 비해 이방성 도전성 접착제(anisotropic conductive adhesives: ACAs)를 이용한 접합방법은 공정의 저온화, 프로세스의 간이화, 솔더링이 불가능한 재료 및 폭넓은 재료에 사용이 가능하며 미세 피치화 대응이 가능한 큰 장점들을 가지고 있다<sup>7)</sup>. 그러나 ACAs에 의한 도전메커니즘은 혼합된 금속 입자들의 기계적, 물리적 접촉에 의해 이루어지므로 기존 솔더링에 비해 상대적으로 낮은 도전성, 불안정한 접촉 저항, Ag 마이그레이션(migration) 등의 치명적인 단점을 가지고 있다<sup>8,9)</sup>. 또한, 리페어(repair) 특성이 없어 수천-수 만개의 접합부 중 하나의 접합 불량은 부품 및 제품의 불량으로 이어지는 가

장 취약한 단점으로 지적되고 있다.

본 연구에서는 ACAs를 이용한 고밀도 전자 패키징 기술을 살펴보고, 저융점 합금재료를 이용한 이방성 도전성 접착제의 합성과 이를 이용한 고 신뢰성 접속공정을 제안, 소개할 것이다. 또한, 이론 개발 연구를 통해 본 연구에서 새롭게 제안하는 솔더 입자의 용융, 유동(rheology), 융합(coalescence)현상에 대한 이론해석 및 도전 메커니즘을 규명하기 위한 수치 해석적 연구내용을 소개할 것이다. 이러한 연구결과를 통하여 원천 핵심기술을 보유함으로써 관련 전자 패키징 분야와 그 응용분야에서 국가 경쟁력을 확보할 것으로 기대된다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 ACAs를 이용한 전자 패키징 기술

ACAs는 고분자 바인더에 금속 분말이나 흑연을 혼합해 금속의 전기적, 자기적, 광학적 특성과 함께 고분자의 기계적 특성 및 가공성을 동시에 가지는 물질로 디스플레이 Panel Glass나 Flexible PCB에의 구동 IC나 Package 등을 접속하는데 필수적으로 사용되는 핵심소재다<sup>10)</sup>. ACAs는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 단자 사이에 구속된 도전입자에 의해 통전되며, 전류가 오직 한 방향 즉 z축 방향으로만 흐를 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 ACAs는 크게 필름 형태와 페이스트 형태로 구분 지을 수 있다. ACAs에는 굉장히 다양한 종류의 도전 입자를 사용하고 있는데 Au, Au가 도금된 금속 및 플라스틱(acrylic rubber, polystyrene 등) 입자와 프로세스 중에 쉽게 파괴되고 녹을 수 있는 절연막을 입힌 입자, 솔더 입자 등을 함유한 ACAs<sup>11)</sup>가 개발되고 있다. 접합부의 전기적, 기계적 특성 등을 향상시키고자 다양한 종류와 형태의 도전 입자<sup>12)</sup> 및 접속 프로세스<sup>13,14)</sup>에 대한 연구, 개발이 가속화되고 있다.

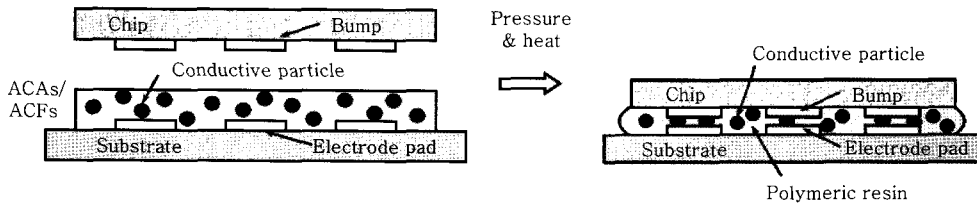


Fig. 1 Schematic of typical anisotropic conductive adhesives (ACAs) bonding

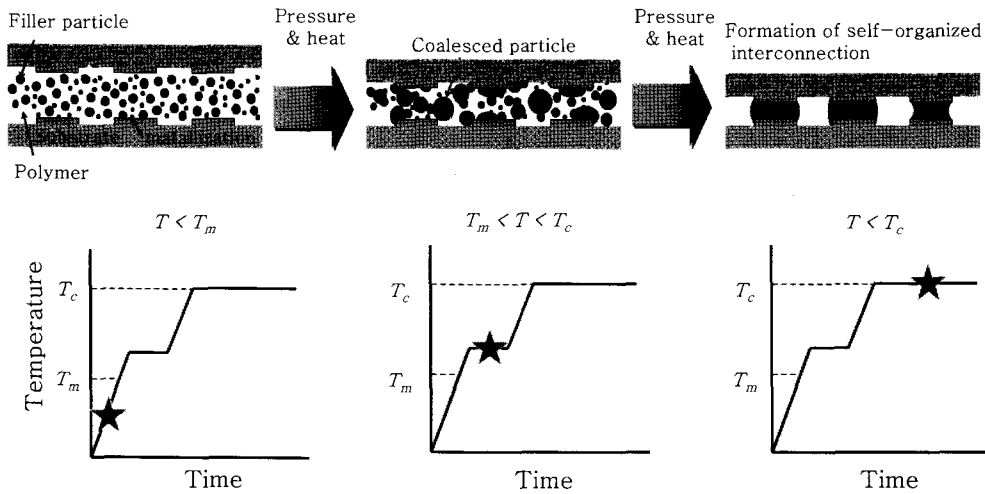


Fig. 2 Schematic of ACA bonding process ( $T_m$  : melting point of LMPA,  $T_c$  : curing temperature of the epoxy resin)

## 2.2 저융점 합금 재료를 이용한 도전성 접착제 접합 기술

본 연구에서 개발한 ACAs의 주요 구성 성분은 일반적인 수지혼합물(polymer matrix)과 저융점 합금 재료의 도전입자로 구성된다. 주요 구성 성분 외에 플럭스, 표면활성제 및 경화제 등의 소량의 첨가물이 함유되어 있다. 저융점 합금 재료로는 주석(Sn), 인지움(In), 비스머스(Bi), 은(Ag), 동(Cu), 아연(Zn), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 갈륨(Ga), 은(Ag), 타리움(Tl) 등의 금속이나, 이러한 금속으로부터 이루어지는 합금으로 이루어진다. 저온에서 용융 가능한 도전입자 함유 접착층에 사용되는 합금으로는 예를 들어, Sn/48In, Sn/57Bi/1Ag, Sn/9Zn, Sn/8Zn/3Bi, Sn/3.5Ag 등을 들 수 있고, 고온에서 용융 가능한 도전입자에 사용되는 합금으로는 Sn/3Cu, Bi/5Sb, In/82Au, Au/12Ge, Sn/80Au 등을 들 수 있다.

Fig. 2에 본 연구에서 개발한 저융점 합금 재료를 함유한 ACAs를 이용한 단자 간 접속방법 및 반도체 장비의 실장 방법<sup>15,16)</sup>을 나타내었다. 본 실장방법은 크게 3단계로 구성되며, 다음과 같이

- 1 단계 : 반도체 칩 또는 미세부품의 단자와 상기 단

자와 대응하도록 설치된 배선 기판상의 회로 단자를 저온에서 용융 가능한 저융점 합금 도전입자와 이 도전입자의 용점에서 경화가 완료되지 않는 ACAs를 개입시켜 대향하도록 배치하는 단자 배치 단계

- 2 단계 : 저융점 합금 도전입자의 용점보다 높고, 한편 상기 수지 성분의 경화가 완료하지 않는 온도까지 가열하며, 도전입자가 상하 단자에 연결될 정도로 가압하는 가열·가압 단계

- 3 단계 : 수지 성분을 경화시키는 경화 단계로 구성된다. 또한, 외부의 충격이나 하중에 기인한 접합부에서의 미세균열, 파단 등에 기인한 기계적, 전기적 특성의 열화가 발생하였을 때 접합부를 형성하고 있는 저융점 합금 도전입자의 용점 이상으로 국부적 및 전체적으로 재 가열시키는 리페어 프로세스를 통해 접합부의 도전성 성분을 재 용융시켜 접합부를 재 형성시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

## 2.3 수치해석

본 연구에서는 도전 필러의 유동 해석을 위해 기본적으로 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 모두 고려한다. 특히, 표면 장력을 고려한 운동량 방정식

과 압력에 관하여 변형된 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = -\rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g_x + \frac{\sigma \kappa}{\rho} \frac{\partial f}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g_y + \frac{\sigma \kappa}{\rho} \frac{\partial f}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} = -\rho C_s^2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

여기서  $\nu$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ,  $f$  그리고  $C_s$ 는 각각 동점성계수, 표면장력계수, 곡률 반경, 특성 함수, 음속을 의미한다. 위의 지배방정식은 각각 대류 단계와 비대류 단계로 나누어 계산한다. 대류 단계의 이산화방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial \rho^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial \rho^n}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial u^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial u^n}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{v^* - v^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial v^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial v^n}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{p^* - p^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial p^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial p^n}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

대류 단계에서의  $\rho^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$ ,  $p^*$ 은 CIP (Cubic Interpolated Propagation) 법<sup>17)</sup>을 이용하여 구한다. 비대류 단계의 이산화방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^*}{\Delta t} = -\rho^* \left( \frac{\partial u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial v^{n+1}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{u^{n+1} - u^*}{\Delta t} = - \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^2} \right) + g_x + \frac{\sigma \kappa}{\rho^*} \frac{\partial f}{\partial x} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{v^{n+1} - v^*}{\Delta t} = - \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial y} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^2} \right) + g_y + \frac{\sigma \kappa}{\rho^*} \frac{\partial f}{\partial y} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{p^{n+1} - p^*}{\Delta t} = -\rho^* C_s^2 \left( \frac{\partial u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial v^{n+1}}{\partial y} \right) \quad (12)$$

비대류 단계의 식 (9)-(12)를 보면 (n+1) 시간단계

의 속도와 압력이 존재하기 때문에 직접 계산이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 Predictor-Corrector법<sup>18)</sup>을 도입하였다. 예측 단계에서는 양함수법 (explicit method)을 도입하여 계산을 수행하며, 수정단계에서는 예측 단계에서의 값을 이용해 계산을 수행한다.

- Predictor step

$$\begin{aligned} \frac{u^{**} - u^*}{\Delta t} = - \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^2} \right) + g_x + \frac{\sigma \kappa}{\rho^*} \frac{\partial f}{\partial x} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{v^{**} - v^*}{\Delta t} = - \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^2} \right) + g_y + \frac{\sigma \kappa}{\rho^*} \frac{\partial f}{\partial y} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{\rho^*} \left( \frac{\partial \delta p}{\partial x} + \frac{\partial \delta p}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{1}{\rho^*} \left( \frac{\partial \delta p}{\partial x} + \frac{\partial \delta p}{\partial y} \right) \right\} \\ = \frac{\delta p}{\rho^* C_s^2 \Delta t^2} + \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{\partial u^{**}}{\partial x} + \frac{\partial v^{**}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $\delta p = p^{n+1} - p^*$

- Corrector step

$$u^{n+1} = u^{**} - \frac{\Delta t}{\rho^*} \frac{\partial \delta p}{\partial x} \quad (16)$$

$$v^{n+1} = v^{**} - \frac{\Delta t}{\rho^*} \frac{\partial \delta p}{\partial y} \quad (17)$$

$$\rho^{n+1} = \rho^* - \rho^* \left( \frac{\partial u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial v^{n+1}}{\partial y} \right) \Delta t \quad (18)$$

$$p^{n+1} = p^* + \delta p \quad (19)$$

또한 도전 필러의 상 경계면에서 작용하는 표면장력을 계산하기 위해 CSF 모델<sup>19)</sup>을 적용하여 부피에 관한 체적력으로 표현하였다. CSF 모델에서는 사용하는 곡률은 다음과 같이 계산된다.

$$\kappa = \frac{1}{|n|} \left[ \left( \frac{n}{|n|} \cdot \nabla \right) |n| - (\nabla \cdot n) \right] \quad (20)$$

여기서  $n$ 은 임의의 상 경계면에서 수직 벡터를 의미하고  $|n|$ 은 그 수직벡터의 크기를 나타낸다. 접촉각에 대한 효과를 고려하기 위해서 벽면의 임의의 수직 벡터를 다음과 같이 처리한다.

$$n = n_w \cos \theta + n_t \sin \theta \quad (21)$$

여기서  $n_x$ 는 벽면에 위치하고 있는 상 경계면과 벽면 사이의 접촉면에 수직인 단위 벡터를 의미하고  $n_w$ 는 벽면의 수직인 벽면 방향으로의 단위벡터를 나타낸다.

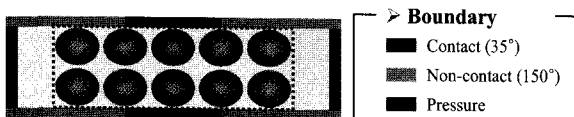
### 3. 결 과

리플로우 프로세스 동안에 기계적/금속학적 상호접속을 얻기 위한 이방성 도전성 접착제의 융합특성과 젖음 특성은 중요하다. 리플로우 프로세스 과정동안의 도전 입자들의 시뮬레이션을 위해 위, 아래의 칩과 기판은 벽 경계 조건을 주고, 젖음 영역과 비젖음 영역은 접촉각을 각각  $35^\circ$ ,  $150^\circ$ 를 주어 구분하였다. 좌우 옆의 경계조건은 칩의 압축성을 고려해 압력경계조건을 주어 왼쪽에는 30Pa, 오른쪽에는 0Pa를 설정하였으며, 본 연구에서 수행한 이방성 도전성 접착제의 시뮬레이션 개략도는 Fig. 3과 같다. 도전입자의 사이즈에 따른 결과를 비교해 보기 위해서 도전입자의 면적율은 60%, 접합 높이는  $100\mu\text{m}$ 고정하고, 각각의 도전입자의 지름( $d_f$ )은 40,  $22\mu\text{m}$ 으로 설정하였다. 중력 효과를 고려하기 위해  $9.81\text{m/s}^2$ 을 중력 가속도로 사용하였고, 시뮬레이션에서 사용된 레진과 도전입자의 물성치는 Table 1에 정리하였다.

Fig. 4는 도전입자의 지름이  $40\mu\text{m}$ 일 때 시뮬레이션 결과이다. 초기 도전입자들의 분포는 젖음 영역과 비젖음 영역에 직접 접촉하고 있는 상태를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시간이 지남에 따라 비젖음 영역에 있는 도전입자들은 벽면에 젖지 못하고, 주위에 다른 필러들과 융합하게 되고, 젖음 영역의 필러들은 벽면에 젖고, 다른 융합된 입자들과도 융합되어 칩과 기판의 젖음 영역을 연결하는 도전 패스를 형성하게 된다. 아래쪽 젖음 영역에서는 주위의 입자들이 먼저 융합해 벽

**Table 1** Physical properties of materials used in the simulation

	Resin	Conductive particle
Density $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	1150	6986
Viscosity $\mu$ [ $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ]	0.38	0.00181
Surface tension coefficient $\sigma$ [ $\text{N/m}$ ]	0.043	0.574

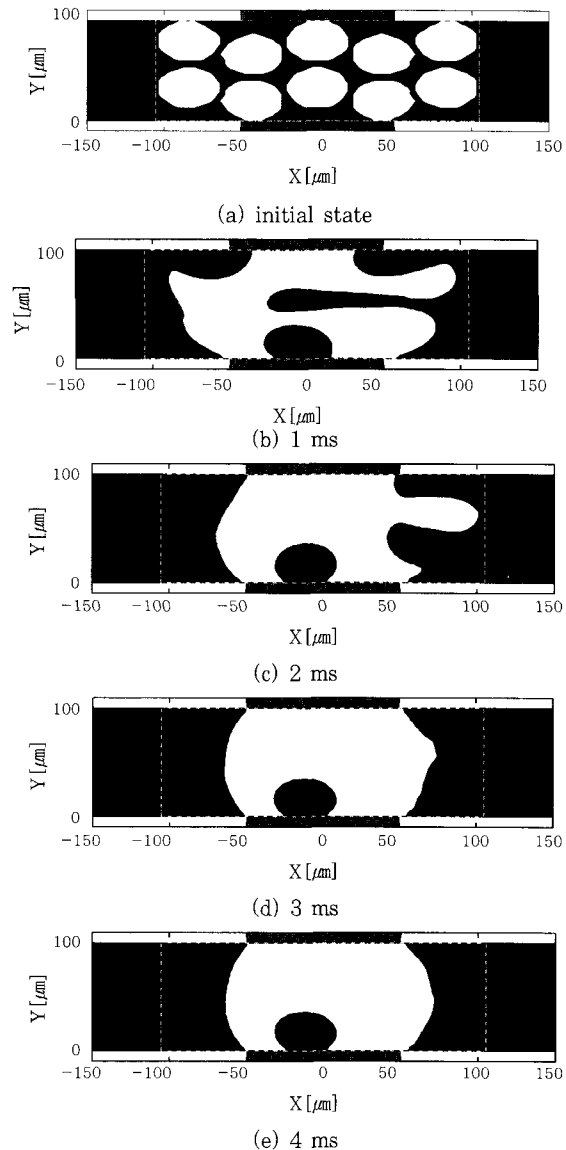


**Fig. 3** Schematics of anisotropic conductive adhesives

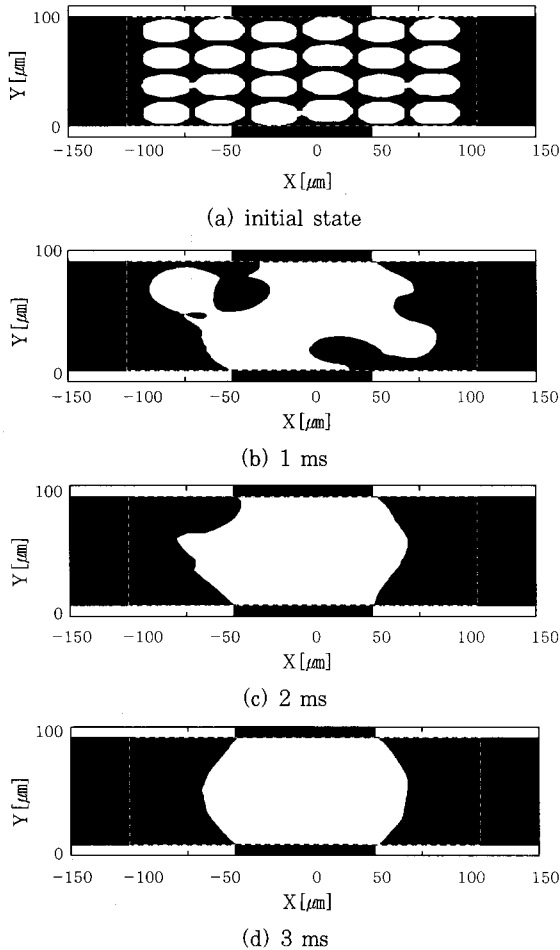
면에 젖어 수지가 빠져나가지 못해 ACF 내에 기공이 형성되는 것을 확인하였다.

Fig. 5에 도전입자의 지름이  $22\mu\text{m}$  일 때의 결과를 나타내었다. 도전입자 사이즈에 따른 결과를 비교하기 위해서 필러의 사이즈가 작아진 만큼 더 많은 도전 필러를 배열하였다.

결과에서 알 수 있듯이, 시간이 지남에 따라 벽면 근처의 도전입자들은 젖음 영역을 따라 벽면에 젖게 되고 내부의 입자들은 표면장력에 의해 주위의 입자들과 융합하여 도전 패스를 형성하였다. Fig. 4의 결과와 비교해 보면 입자 사이즈가 작아서 입자들을 보다 더 조밀하게 배열이 가능하고 이는 도전 필러들의 융합을 더 쉽게 일어나게 해 도전 패스 형성시간을 줄이는 효과가 있다. 또한 ACF 내에 기공이 형성되지 않아 도전 패스의 신뢰성이 더욱더 향상되었다.



**Fig. 4** Transient behavior of conductive particles for  $d_f=40\mu\text{m}$



**Fig. 5** Transient behavior of conductive particles for  $d_f=22\mu\text{m}$

동일한 면적율에서 도전입자의 사이즈에 따라 입자들의 배열과 수가 다르게 되며 이는 입자들의 유동이 다르다는 것을 의미한다. 이를 통해 ACF 내 기공 형성을 억제하고 신뢰성 있는 도전 패스를 형성할 수 있는 최적 조건을 찾을 수 있다.

#### 4. 토 의

본 연구에서는 저융점 합금재료를 이용한 이방성 도전성 접착제와 이를 이용한 고밀도 전자 패키징 기술을 소개하였다. 또한, 접합 프로세스동안 도전입자들의 융합특성을 수치해석 통해 알아보았다. 도전입자들은 리플로우 프로세스 동안 서로 녹아 표면 장력에 의해 주위의 필러들과 융합되어 도전 패스를 형성하게 된다. 도전 필러의 사이즈가 작아질수록 동일 면적율에 대해서 더 많은 필러들과 조밀한 배열이 가능하기 때문에 도전 패스의 형성 시간을 향상시켰다. 본 수치해석 기법은 통하여 이방성 도전성 접착제의 최적화된 합성 및

이를 이용한 고밀도 패키징 조건을 설정 할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 차세대 LCD, PDP, PLED, 플렉서블 일렉트로닉스 분야와 그 응용분야에서 국가 경쟁력을 확보할 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 과학재단 특장기초연구(R01-2006-000-10702-0) 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. C. Wang and P. J. Bos, *Displays*, **25** (2004), 187
2. K. Haru, Y. Kurashima, N. Hashimoto, K. Matsui, Y. Matsuo, I. Miyazawa, T. Kobayashi, Y. Yokoyama and M. Fukazawa, *IEEE Trans. Adv. Packag.*, **28-3** (2005), 367
3. V. Kripesh, S. W. Yoon, V. P. Ganesh, N. Khan, M. D. Rotraru, W. Fang and M. K. Iyer, *IEEE Trans. Adv. Packag.*, **28-3** (2005), 377
4. M. Abteu and G. Selvaduray, *Mater. Sci. and Engineer. :R Rep.*, **27** (2000), 95
5. K. Sukanuma, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, **5** (2001), 55
6. J. C. Jagt, P. J. M. Beris and G. F. C. M. Lijten, *IEEE Trans. CPMT- Part B*, **18-2** (1995), 292
7. Z. Lai and J. Liu, *IEEE Trans. CPMT*, **19-3** (1996), 647
8. J. C. Jagt, *IEEE Trans. CPMT Part A*, **21-2** (1998), 215
9. Y. Li, K.-S. Moon, C. P. Wong, *Science*, **308-5727** (2005), 1419
10. M. J. Yim and K. W. Paik, *Int. J. Adhesion & Adhesives*, **26** (2006), 304
11. K. S. Moon, J. Wu and C. P. Wong, *IEEE Trans. Comp. Pakag. Technol.*, **26-2** (2003), 375
12. J. M. Kim, *J. of KWJS*, **25-2** (2007), 136
13. M. J. Yim, *J. Elecon. Mater.*, **33-1** (2004), 76
14. Y. Li and C. P. Wong, *Mater. Sci. and Engineer. R*, **51** (2006), 1
15. J. M. Kim, K. Yasuda and K. Fujimoto, *J. Electron. Mater.*, **34-5** (2005), 600
16. K. Fujimoto, K. Yasuda and J. M. Kim, *JP 3769688* (2006.2.17)
17. H. Takewaki, A. Nishigushi, and T. Yabe, *J Comput Phys.*, **61**(1985), 261
18. S. Y. Yoon, and T. Yabe, *Comput Phys Commun.*, **119**(1999), 149
19. J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, *J Comput Phys.*, **100**(1992), 335



- 이진운(李振雲)
- 1981년생
- 중앙대학교 기계공학부 석사과정
- 열, 유체공학
- e-mail : verovero00@naver.com



- 이성혁(李晟赫)
- 1971년생
- 중앙대학교 기계공학부 부교수
- 마이크로열전달, 전산유체역학
- e-mail : shlee89@cau.ac.kr



- 김종민(金鍾珉)
- 1972년생
- 중앙대학교 기계공학부 조교수
- 마이크로시스템 패키징
- e-mail : 0326kjm@cau.ac.kr