

## CNT-Ag 복합패드가 Cu/Au 범프의 플립칩 접속저항에 미치는 영향

최정열 · 오태성<sup>†</sup>

홍익대학교 공과대학 신소재공학과

### Effect of CNT-Ag Composite Pad on the Contact Resistance of Flip-Chip Joints Processed with Cu/Au Bumps

Jung-Yeol Choi and Tae Sung Oh<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received August 31, 2015; Corrected September 15, 2015; Accepted September 18, 2015)

**초 록:** 이방성 전도접착제를 이용하여 Cu/Au 칩 범프를 Cu 기판 배선에 플립칩 실장한 접속부에 대해 CNT-Ag 복합패드가 접속저항에 미치는 영향을 연구하였다. CNT-Ag 복합패드가 내재된 플립칩 접속부가 CNT-Ag 복합패드가 없는 접속부에 비해 더 낮은 접속저항을 나타내었다. 각기 25 MPa, 50 MPa 및 100 MPa의 본딩압력에서 CNT-Ag 복합패드가 내재된 접속부는 164 mΩ, 141 mΩ 및 132 mΩ의 평균 접속저항을 나타내었으며, CNT-Ag 복합패드를 형성하지 않은 접속부는 200 mΩ, 150 mΩ 및 140 mΩ의 평균 접속저항을 나타내었다.

**Abstract:** We investigated the effect of CNT-Ag composite pad on the contact resistance of flip-chip joints, which were formed by flip-chip bonding of Cu/Au chip bumps to Cu substrate metallization using anisotropic conductive adhesive. Lower contact resistances were obtained for the flip-chip joints which contained the CNT-Ag composite pad than the joints without the CNT-Ag composite pad. While the flip-chip joints with the CNT-Ag composite pad exhibited average contact resistances of 164 mΩ, 141 mΩ, and 132 mΩ at bonding pressures of 25 MPa, 50 MPa, and 100 MPa, the flip-chip joints without the CNT-Ag composite pad had an average contact resistance of 200 mΩ, 150 mΩ, and 140 mΩ at each bonding pressure.

**Keywords:** stretchable packaging, flexible packaging, CNT-metal, flip chip, contact resistance

## 1. 서 론

최근 스마트폰 기술이 ICT 산업의 지속적인 성장을 견인할 추진력을 상실해 감에 따라 스마트폰을 대신하여 ICT 산업을 이끌 성장동력으로서 웨어러블 디바이스에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.<sup>1-12)</sup> 웨어러블 디바이스 중에서 특히 심장박동 모니터링, 혈압 모니터링 및 체온 모니터링 디바이스와 같이 헬스케어 제품에 적용하기 위해서는 유연성과 더불어 신축성을 갖춘 전자패키징 기술이 요구되고 있다.

신축성 전자패키지에서 가장 어려운 기술이 신축성 회로배선기술로서, 일반적으로 두가지 회로배선기술이 사용되고 있다. 첫 번째 회로배선기술은 말굽 형태의 금속 도선을 사용한 기술로서 현재 대부분의 신축성 전자패키

지에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 기술이나, 신축성이 제한적이며 배선의 고밀도화가 어려운 단점이 있다. 두 번째 회로배선기술은 카본나노튜브(CNT), 나노금속과 고분자로 구성된 신축성 복합배선기술로서 복합배선의 전도도가 말굽형태의 금속배선에 비해 낮은 단점이 있으나, 신축성이 우수한 장점이 있다.<sup>1,2,4-18)</sup> CNT-금속-고분자 구조의 복합배선을 사용하여 신축성 전자패키지를 구성하기 위해서는 Si 반도체 칩을 기판의 복합배선과 연결하는 플립칩 공정기술의 개발이 요구된다.<sup>1,13)</sup>

전자패키징에서 사용되는 플립칩 공정기술로는 크게 솔더 리플로우를 이용하는 플립칩 공정과 이방성 전도필름(anisotropic conductive film: ACF), 이방성 전도접착제(anisotropic conductive adhesive: ACA) 또는 비전도성 접착제를 사용하는 플립칩 공정으로 나눌 수 있다.<sup>18-21)</sup> 이

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: ohts@hongik.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

중 솔더 리플로우 플립칩 공정은 CNT와 고분자에 대한 솔더의 젖음성이 없기 때문에 CNT-금속-고분자 복합배선에 대한 플립칩 공정에는 적용하기 어렵다.<sup>18,19)</sup> 반면에 ACF 또는 ACA를 이용한 플립칩 공정에서는 이들 접착제에 함유되어 있는 전도성 입자들과 복합배선의 CNT 및 금속분말 사이의 접촉에 의해 전기전도가 이루어지게 되므로,<sup>21-23)</sup> CNT-금속-고분자 복합배선에 대한 플립칩 공정에 적용이 가능하다.

본 연구에서는 신축성 전자패키지를 개발하기 위한 기초연구로서, ACA를 사용하여 형성한 플립칩 접속부의 접속저항에 미치는 CNT-Ag 복합패드의 영향을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 기판에 CNT-Ag-고분자 복합배선을 형성하고 이에 Cu/Au 칩 범프를 ACA로 플립칩 본딩하는 대신에, 실험의 수월성을 위해 Cu/Au 칩 범프가 플립칩 본딩되는 부위에만 CNT-Ag 복합패드를 형성하여 이를 기판의 Cu 배선에 ACA로 플립칩 본딩하였다. CNT-Ag-고분자 복합패드 대신에 CNT-Ag 복합패드를 사용한 이유는 고분자를 함유한 복합패드 페이스트의 제조공정이 어렵기 때문에 이에 대한 선행연구로서 고분자를 함유하고 있지 않은 CNT-Ag 복합패드를 사용하여 기초자료를 얻고자 하였다. 향후 CNT-Ag-고분자 복합 페이스트가 개발되면 CNT-Ag-고분자 복합패드에서의 접속저항을 본 연구의 결과와 비교하고자 한다.

## 2. 실험 방법

신축성 전자패키지에서는 기판 재료로서 신축성이 뛰어난 탄성 고분자인 polydimethylsiloxane (PDMS)를 주로 사용하고 있으나,<sup>2,13,14)</sup> 본 연구는 신축성 PDMS 기판에 플립칩 공정을 적용하기 위한 기초연구로서 플립칩 공정용 칩과 기판을 모두 Si 웨이퍼를 사용하여 형성하였다. 또한 CNT-Ag 복합패드를 기판 배선에 형성하고 이에 Cu/Au 칩 범프를 플립칩 본딩하는 대신에, 용이한 실험을 위해 Cu/Au 칩 범프에 CNT-Ag 복합패드를 형성한 후 이를 기판 배선의 패드에 플립칩 본딩하여 Fig. 1의 모식도와 같은 시편을 제작하였다.

Cu/Au 범프 위에 CNT-Ag 복합패드가 형성되어 있는 칩 시편은 Si 웨이퍼에 daisy-chain 구조로 제작하였다. Si 웨이퍼에 접착층으로서 Ti를 0.1  $\mu\text{m}$  두께로 스퍼터링한 후, 그 위에 접속저항 측정을 위한 배선층과 Au 전기도금의 씨앗층 역할을 할 Cu를 2  $\mu\text{m}$  두께로 스퍼터링하였다. 이와 같이 Ti/Cu를 스퍼터링한 Si 웨이퍼에 포토레지스트 패턴을 형성한 후, Cu 도금액에 장입하고 20 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 인가하여 10  $\mu\text{m}$  두께의 Cu를 전기도금하였다. 이와 같은 시편에서 포토레지스트 패턴을 제거하지 않고 증류수로 세척한 후, Au 도금액에 다시 장입하여 2 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도로 Au를 전기도금하였다. Cu 전기도금액의 조성은 CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 62.42 g/L, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98 g/L, CuCl<sub>2</sub> 0.17 g/L, PEG600 300 ppm, MPSA 10 ppm

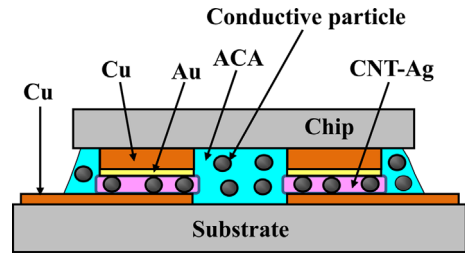


Fig. 1. Schematic illustration for the flip-chip bonded specimen with the CNT-Ag composite pad formed at the flip-chip joint.

이였으며, Au 도금액의 조성은 KAu(CN)<sub>2</sub> 3 g/L, make-up 용액 500 ml/L로 구성되었다. 이와 같이 15  $\mu\text{m}$  높이의 Cu/Au 범프가 형성된 Si 칩에서 회로배선을 제외한 부위의 Ti/Cu 박막을 습식에칭으로 제거하였다. Cu/Au 범프들은 직경 150  $\mu\text{m}$ 의 원통형 형상으로 범프들 사이의 피치는 300이며, 한 칩에 88개의 범프를 형성하였다.

Cu/Au 칩 범프 위의 CNT-Ag 복합패드는 (주)바이오니아에서 제공한 CNT에 Ag 나노입자가 결합된 CNT-Ag 나노복합 페이스트(Fig. 2 참조)를 사용하여 형성하였다. 80  $\mu\text{m}$  두께의 스테인레스 강으로 제작한 메탈 마스크를 칩 시편의 Cu/Au 범프 위에 배열한 후 CNT-Ag 나노복합 페이스트를 스크린 프린팅하고 120°C에서 20분간 유지시켜 CNT-Ag 나노복합 페이스트를 경화시켜 Cu/Au 칩 범프 위에 CNT-Ag 복합패드를 형성하였다.

Cu 배선이 형성되어 있는 플립칩 본딩용 기판 시편을 제작하기 위해 Si 웨이퍼에 칩 시편의 제작시와 동일한 방법으로 0.1  $\mu\text{m}$  두께의 Ti와 2  $\mu\text{m}$  두께의 Cu 박막을 순차적으로 스퍼터링하고, 그 위에 AZ4620 포토레지스트를 사용하여 daisy chain 형상의 패턴을 형성하였다. 이후 노출된 Ti/Cu를 10% HNO<sub>3</sub>와 10% HF를 순차적으로 이용하여 습식에칭하고 포토레지스트 패턴을 제거하여 Cu 배선이 형성된 기판 시편을 제작하였다.

약 4  $\mu\text{m}$  직경의 Ni-코팅 폴리머 전도입자가 함유된 Hujikura Kasei의 ACA를 CNT-Ag 복합패드를 도포한 Cu/Au 칩 범프에 도포하고 기판의 Cu 패드에 플립칩 배열한 후, 본딩압력을 25 MPa에서 100 MPa 범위에서 변화시키

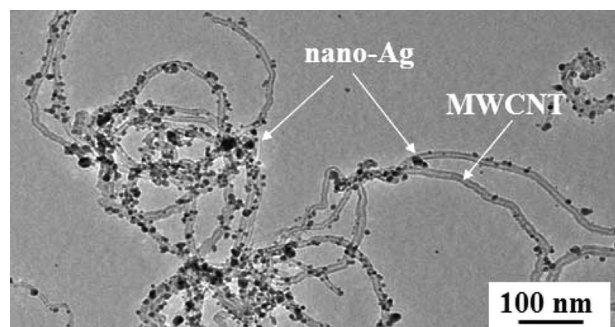


Fig. 2. Transmission electron microscopy of the CNT-Ag nano-composite used to form CNT-Ag composite pads (Courtesy of Bioneer Inc.).

면서 18°C/sec의 승온속도로 180°C까지 승온하여 30초간 유지하여 플립칩 본딩하였다. CNT-Ag 복합패드가 플립칩 접속부의 접속저항에 미치는 영향을 분석하기 위해 Cu/Au 칩 범프 위에 CNT-Ag 복합패드를 형성하지 않은 칩을 기판의 Cu 패드에 플립칩 실장한 시편도 함께 제작하여 CNT-Ag 복합패드의 유무에 따른 플립칩 접속부의 접속저항을 비교 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3에 Si 칩에 전기도금으로 형성한 Cu/Au 범프의 광학현미경 사진과 주사전자현미경 사진을 나타내었다. 제작된 플립칩 공정에서는 금속 범프의 평탄도가 플립칩 접속저항에 영향을 미치는데, 본 실험에서는 전기도금으로 Fig. 3과 같이 평탄도가 비교적 우수한 Cu/Au 범프를 형성하였다.

Fig. 4에 CNT-Ag 복합패드가 형성된 Cu/Au 범프를 갖는 칩을 사용하여 본딩압력을 25 MPa에서 100 MPa 범위에서 변화시키며 플립칩 본딩한 시편에서 관찰한 플립칩 접속부의 단면 주사전자현미경 사진을 나타내었다. 이와 더불어 Fig. 5에는 CNT-Ag 복합패드가 없는 Cu/Au 범프를 갖는 칩을 플립칩 실장한 시편에서 관찰한 플립칩 접속부의 단면 주사전자현미경 사진을 나타내었다. CNT-Ag 복합패드의 유무에 상관없이 Cu/Au 칩 범프와 기판 Cu 패드 사이에 ACA의 Ni-코팅된 전도 입자들이 포획되어 플립칩 접속부를 형성하고 있는 것이 관찰되었다. CNT-Ag 복합패드가 존재하는 접속부와 존재하지 않는 접속부에서 모두 Ni-코팅된 전도 입자들이 변형되어 칩과 기판 사이의 전기 통로를 형성하고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 플립칩 접속부에 CNT-Ag 복합패드가 있는 경우에는 CNT-Ag 복합패드가 없는 접속부와 비교하여 동일한 본딩압력에서 Ni-코팅된 전도 입자들의 변형되는 정

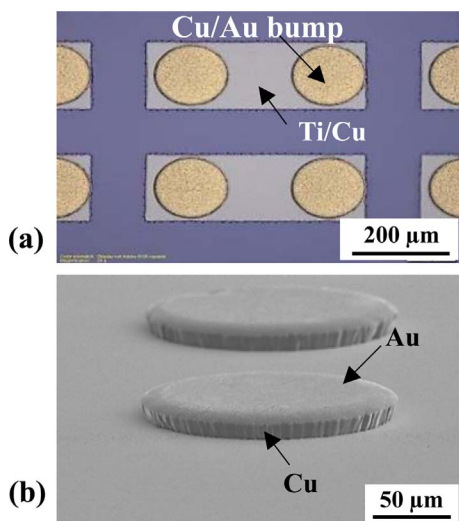


Fig. 3. (a) An optical micrograph and (b) a scanning electron micrograph of Cu/Au chip bumps.

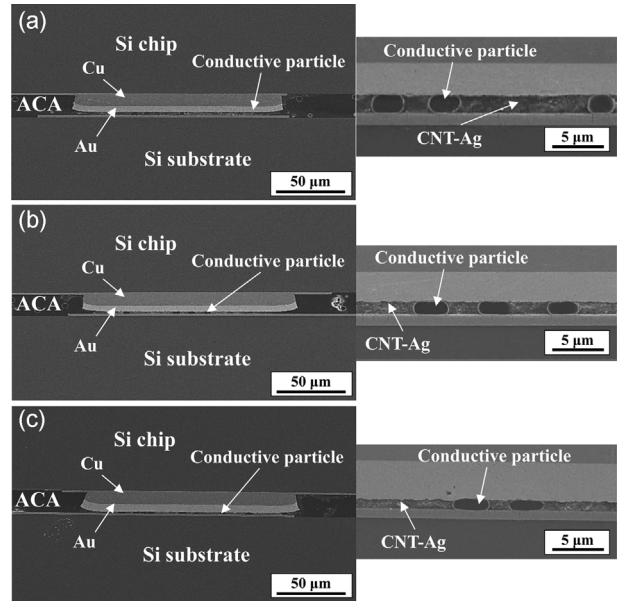


Fig. 4. Cross-sectional scanning electron micrographs of the flip-chip joints processed by flip-chip bonding the Cu/Au chip bumps with CNT-Ag composite pads to Cu substrate pads at a bonding pressure of (a) 25 MPa, (b) 50 MPa, and (c) 100 MPa.

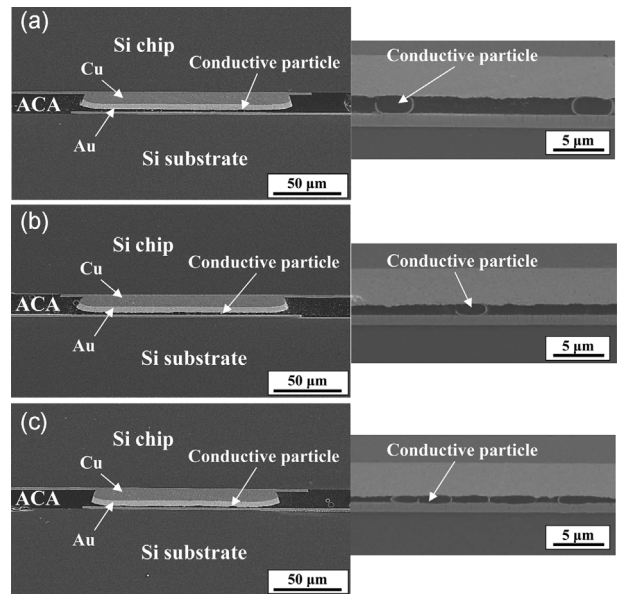


Fig. 5. Cross-sectional scanning electron micrographs of the flip-chip joints processed by flip-chip bonding the Cu/Au chip bumps without CNT-Ag composite pads to Cu substrate pads at a bonding pressure of (a) 25 MPa, (b) 50 MPa, and (c) 100 MPa.

도가 약간이나마 작았는데, 이는 플립칩 접속부에 존재하는 CNT-Ag 복합패드가 플립칩 본딩압력에 대한 완충제 역할을 어느 정도 한 것으로 판단된다.

CNT-Ag 복합패드가 형성된 Cu/Au 칩 범프를 사용하여 플립칩 본딩한 시편과 CNT-Ag 복합패드가 없는 Cu/Au 칩 범프를 사용하여 플립칩 본딩한 시편에 대해 본딩압력에 따른 플립칩 접속부의 평균 접속저항을 측정하였

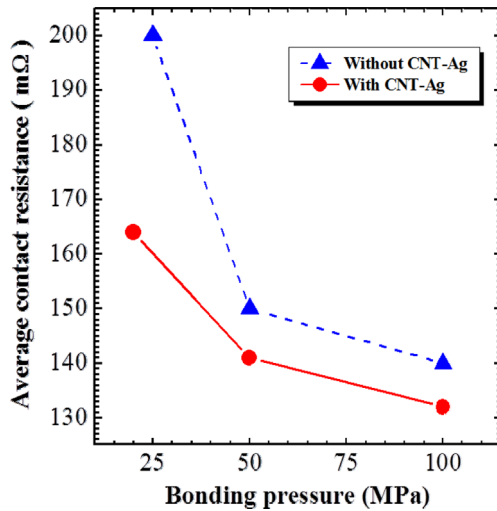


Fig. 6. Average contact resistance of the flip-chip joints processed by flip-chip bonding the Cu/Au chip bumps with and without CNT-Ag composite pads vs. bonding pressure.

으며, 이들을 Fig. 6에 나타내었다. CNT-Ag 복합패드가 형성된 Cu/Au 칩 범프를 사용하여 25 MPa의 본딩압력에서 플립칩 본딩한 시편은 164 mΩ의 평균 접촉저항을 나타내었으며, 50 MPa의 본딩압력 조건에서는 141 mΩ, 100 MPa의 본딩압력 조건에서는 132 mΩ의 평균 접촉저항을 나타내었다. 반면에 CNT-Ag 복합패드를 형성하지 않은 Cu/Au 칩 범프를 사용하여 25 MPa의 본딩압력에서 플립칩 본딩한 시편은 200 mΩ의 평균 접촉저항을 나타내었으며, 50 MPa의 본딩압력 조건에서는 150 mΩ, 100 MPa의 본딩압력 조건에서는 140 mΩ의 평균 접촉저항을 나타내었다. CNT-Ag 복합패드의 유무에 무관하게 본딩압력이 25 MPa에서 100 MPa로 증가함에 따라 플립칩 접촉저항이 감소하였다. ACF를 사용한 플립칩 공정에서 플립칩 접속부의 접촉저항은 본딩압력에 의존하는데, 본딩압력을 증가시키면 따라 접촉저항이 증가하다 최소값에 도달한 후 본딩압력을 더 감소시키면 접촉저항이 증가한다고 보고되고 있다.<sup>22,23)</sup>

Fig. 6에서 플립칩 접속부에 CNT-Ag 복합패드가 내재된 시편이 CNT-Ag 복합패드가 없는 시편에 비해 더 낮은 플립칩 접촉저항을 나타내었다. 이는 CNT-Ag 복합패드가 없는 플립칩 시편에서는 플립칩 접속부의 통전이 접촉부에 포획된 ACF 전도성 입자들에 의해서만 이루어지는 반면에, CNT-Ag 복합패드를 형성한 플립칩 시편에서는 ACF 전도성 입자들에 의한 주된 통전과 더불어 플립칩 접속부를 채우고 있는 CNT-Ag 복합패드의 전기비저항이 수 kΩ·m 정도로 상대적으로 높지만 이를 통해서도 원활하지는 않으나 보조적인 통전이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5에 나타낸 CNT-Ag 복합패드가 없는 플립칩 접속부와는 달리, CNT-Ag 복합패드가 내재된 플립칩 접속부에서는 그림 4와 같이 CNT-Ag가 Cu/Au 칩 범프와 Cu 기판패드 사이에 채워져 있는 것을 관찰할 수

있다. Fig. 6에서 본딩압력이 높아질수록 CNT-Ag 복합패드의 유무가 플립칩 접속저항에 미치는 영향이 작아지는 것으로 관찰되었다. 이는 본딩압력에 따라 ACF 전도입자의 변형정도가 변하여 전도입자를 통한 전기전도의 정도가 본딩압력에 민감한 반면에, CNT-Ag 복합패드의 비저항은 kΩ·m 단위로 상대적으로 높기 때문에 본딩압력에 따른 변화가 크지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에 나타낸 CNT-Ag 복합패드를 내재한 플립칩 접속부의 평균 접촉저항을 참고문헌에 보고된 값들과 비교해 보고자 하였다. 칩과 기판의 Au metallization에 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD)을 사용하여 CNT 번들을 수직으로 성장시켜 CNT 범프를 형성한 후, 칩 CNT 범프를 기판 CNT 범프에 플립칩 접속하였다는 보고가 있으나,<sup>24,25)</sup> 이와 같은 CNT-CNT 플립칩 접속부는 본 연구에서 사용한 Cu/Au/CNT-Ag/Cu 플립칩 접속부와 완전히 다른 구조로 접촉저항 특성의 직접적인 비교가 어렵다. CNT-금속 복합재료를 플립칩 접속용 범프 또는 패드로 사용하고자 하는 연구가 보고되었으나,<sup>26)</sup> 전기도금으로 CNT-Cu 복합도금을 형성하는 실험이 진행되었을 뿐 이를 이용한 플립칩 본딩에 대한 연구가 이루어지지 않아 본 연구의 결과와 비교할 수 없었다.

본 연구의 결과와 직접적인 비교가 가능한 연구로는 ACA를 사용하여 Cu/Sn 칩 범프를 플립칩 본딩한 접속부에서 CNT-Ag 복합패드가 접촉저항에 미치는 영향에 대한 보고가 있는데,<sup>1)</sup> 본 연구의 결과와는 달리 CNT-Ag 복합패드가 형성된 Cu/Sn 칩 범프의 접속부가 CNT-Ag 복합패드가 없는 접속부에 비해 더 높은 접촉저항을 나타내는 것으로 보고되었다.<sup>1)</sup> CNT-Ag 복합패드가 형성된 Cu/Sn 범프 접속부는 25 MPa와 50 MPa의 본딩압력에서는 접촉저항이 너무 커서 측정이 안 되며 100 MPa의 본딩압력 조건에서는 213 mΩ인 반면, CNT-Ag 복합패드가 없는 Cu/Sn 범프 접속부는 25 MPa, 50 MPa 및 100 MPa의 본딩압력 조건에서 각기 1370 mΩ, 372 mΩ 및 112 mΩ의 접촉저항을 갖는다고 보고되었다.<sup>1)</sup> 본 연구에서 측정된 Cu/Au 범프 접속부보다 기존 보고에 의한 Cu/Sn 범프 접속부가 CNT-Ag 복합패드의 유무에 무관하게 더 큰 접촉저항을 나타내었다.<sup>1)</sup> 이와 같이 두 연구에서의 상이한 결과는 기존 연구에서 사용한 Cu/Sn 칩 범프의 Sn과 본 연구에서 사용한 Cu/Au 칩 범프의 Au의 경도 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 1 N의 하중을 인가하면서 측정된 Au 전기도금 박막과 Sn 전기도금 박막의 비커스 경도 ( $H_v$ )는 각기  $34 \pm 2$ 와  $5 \pm 0.2$ 로 Au 전기도금 박막의 경도가 Sn 전기도금 박막보다 7배 정도 높은 값을 나타내었다. 기존 연구와 본 연구에서는 모두 플립칩 공정에 4 μm 입径의 Ni-코팅된 전도입자가 함유된 동일한 ACA를 사용하였다. 기존 연구의 Cu/Sn 칩 범프를 사용한 플립칩 접속부에서는 Sn 표면층의 경도가 낮아 ACA 전도입자의 변형 및 이에 의한 전도가 이루어지지 않는 반면에,<sup>1)</sup> 본 연구에서는 Cu/Au 칩 범프의 Au 표면층의 경도가 높

아 Fig. 4과 같이 ACA 전도입자들의 충분한 변형 및 이에 의한 전기전도가 이루어져 Cu/Sn 범프 접속부보다 더 낮은 접속저항을 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

신축성 전자패키지를 개발하기 위한 기초연구로서, ACA를 이용하여 Cu/Au 칩 범프를 기관의 Cu 배선에 플립칩 실장한 접속부에 대해 CNT-Ag 복합패드가 접속저항에 미치는 영향을 연구하였다. CNT-Ag 복합패드의 유무에 상관없이 Cu/Au 칩 범프와 기관 Cu 패드 사이에 ACA의 Ni-코팅된 전도 입자들이 포획되어 플립칩 접속부를 형성하고 있었다. CNT-Ag 복합패드가 내재된 플립칩 접속부가 CNT-Ag 복합패드가 없는 접속부에 비해 더 낮은 접속저항을 나타내었다. 각기 25 MPa, 50 MPa 및 100 MPa의 본딩압력에서 CNT-Ag 복합패드가 형성된 접속부는 164 mΩ, 141 mΩ 및 132 mΩ의 평균 접속저항을 나타내었으며, CNT-Ag 복합패드를 형성하지 않은 접속부는 200 mΩ, 150 mΩ 및 140 mΩ의 평균 접속저항을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 ACA를 사용하여 CNT-Ag 복합배선에 플립칩 실장시 Cu 배선에 대한 기존의 금속 범프와 금속 패드간의 플립칩 본딩과 비교하여 접속저항이 증가하는 문제점은 발생하지 않을 것으로 판단할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음 [14-000-11-001, 인간친화형 디바이스(스킨패치, 멀티모달 서피스) 및 디바이스 소설 프레임워크 기술 개발].

#### References

1. J. Y. Choi and T. S. Oh, "Flip Chip Process on CNT-Ag Composite Pads for Stretchable Electronic Packaging", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(4), 17 (2013).
2. M. Gonzalez, B. Vanderveelde, W. Chistianens, Y.-Y. Hsu, F. Iker, F. Bossuyt, J. Vanfleteren, O. van der Sluis, and P. H. M. Timmermans, "Thermo-Mechanical Analysis of Flexible and Stretchable Systems", 11<sup>th</sup> International Conference of Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems (EuroSimE), Berlin, 1, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2010).
3. J. H. Ahn, H. Lee, and S. H. Choa, "Technology of Flexible Semiconductor/Memory Device", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(2), 1 (2013).
4. J. Xiao, A. Carlson, Z. J. Liu, Y. Huang, H. Jiang, and J. A. Rogers, "Stretchable and Compressible Thin Films of Stiff Materials on Compliant Wavy Substrates", *App. Phys. Lett.*, 93, 013109 (2008).
5. T. Löher, D. Manassis, R. Heinrich, B. Schmied, J. Vanfleteren, J. DeBaets, A. Ostmann, and H. Reichl, "Stretchable Electronic Systems", *Proc. 59<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, 893, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2009).
6. T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida, and T. Someya, "A Rubberlike Stretchable Active Matrix Using Elastic Conductors", *Science*, 321, 1468 (2008).
7. D. H. Kim, J. H. Ahn, W. M. Choi, H. S. Kim, T. H. Kim, J. Song, Y. Y. Huang, Z. Liu, C. Lu, and J. A. Rogers, "Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits", *Science*, 320, 507 (2008).
8. M. Gonzalez, F. Axisa, M. V. Bulcke, D. Brosteaux, B. Vanderveelde, and J. Vanfleteren, "Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits", *Microelectron. Reliab.*, 48, 825 (2008).
9. T. Sekitani, H. Nakajima, H. Maeda, T. Fukushima, T. Aida, K. Hata, and T. Someya, "Stretchable Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Display Using Printable Elastic Conductors", *Nature Mater.*, 8, 494 (2009).
10. J. H. Ahn and J. H. Je, "Stretchable Electronics: Materials, Architectures and Integrations", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45, 102001 (2012).
11. D. H. Kim and J. A. Rogers, "Stretchable Electronics: Materials Strategies and Devices", *Adv. Mater.*, 20, 4887 (2008).
12. J. Y. Choi, D. H. Park, and T. S. Oh, "Chip Interconnection Process for Smart Fabrics Using Flip-Chip Bonding of SnBi Solder", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(3), 71 (2012).
13. T. Löher, D. Manassis, R. Heinrich, B. Schmied, J. Vanfleteren, J. DeBaets, A. Ostmann, and H. Reichl, "Stretchable Electronic Systems", *Proc. 8<sup>th</sup> Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 271, IEEE Component, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2006).
14. S. P. Lacoura, S. Wagner, Z. Huang, and Z. Suo, "Stretchable Gold Conductors on Elastomeric Substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2404 (2003).
15. K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J. H. Ahn, P. Kim, J. Y. Choi, and B. H. Hong, "Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable Transparent Electrodes", *Mature Lett.*, 457, 706 (2009).
16. T. S. Hansen, K. West, O. Hassager, and N. B. Larsen, "Highly Stretchable and Conductive Polymer Material Made from Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and Polyurethane Elastomers", *Adv. Funct. Mater.*, 17, 3068 (2007).
17. J. A. Rogers, T. Someya, and Y. Huang, "Materials and Mechanics for Stretchable Electronics", *Science*, 327, 1603 (2010).
18. J. S. Ha, J. P. Jung, and T. S. Oh, "Effects of Intermetallic Compounds Formed during Flip Chip Process on the Interfacial Reactions and Bonding Characteristics", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(2), 35 (2012).
19. D. M. Jung, M. Y. Kim, and T. S. Oh, "Warping Characteristics of Bottom Packages for Package-on-Package(PoP) with Different Chip Mounting Processes", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(3), 63 (2013).
20. J. Y. Choi and T. S. Oh, "A Flip Chip Process Using an Interlocking-Joint Structure Locally Surrounded by Non-conductive Adhesive", *Korean J. Met. Mater.*, 50(10), 785 (2012).
21. K. J. Shin and T. S. Oh, "Micro-Power Generation Charac-

- teristics of Thermoelectric Thin Film Devices Processed by Electrodeposition and Flip-Chip Bonding”, *J. Electron. Mater.*, 44(6) 2026 (2015).
22. M. J. Yim and K. W. Paik, “Review of Electrically Conductive Adhesive Technologies for Electronic Packaging”, *Electron. Mater. Lett.*, 2(3), 183 (2006).
  23. M. A. Uddin and H. P. Chan, “Contact Resistance of Anisotropic Conductive Adhesive Film Based Flip-chip on Glass Packages”, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 27(2), 151 (2011).
  24. C. Brun, C. C. Yap, D. Tan, S. Bila, S. Paccini, D. Baillargeat, and B. K. Tay, “Flip Chip Based on Carbon Nanotube-Carbon Nanotube Interconnected Bumps for High-Frequency Applications”, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 12, 609 (2013).
  25. C. C. Yap, C. Brun, D. Tan, H. Li, E. H. T. Teo, D. Baillargeat, and B. K. Tay, “Carbon Nanotube Bumps for the Flip Chip Packaging System”, *Nanoscale Res. Lett.*, 7, 105 (2012).
  26. L. Aryasomayajula and K. J. Wolter, Carbon Nanotube Composites for Electronic Packaging Applications: A Review”, *J. Nanotechnol.*, 2013, 296517 (2013).