

Ag-Pd 후막도체와 솔더범프 사이의 접합특성 및 계면반응

김경섭* · 한완옥* · 이종남** · 양택진**

*여주대학 전자과, **한국델파이 전자연구소

Characteristics of Joint Between Ag-Pd Thick Film Conductor and Solder Bump and Interfacial Reaction

Kyung-Seob Kim*, Wan-Ok Hwan*, Jong-Nam Lee**, and Taik-Jin Yang**

*Department of Electronic Eng., Yeojoo Institute of Technology, Yeojoo 469-705, Korea

**Electronics Technology Center, Korea Delphi Automotive Systems Corporation,
Seoul 156-714, Korea

초 록: 자동차 전자제품의 시험환경 조건이 엄격해짐에 따라, 전자제품 개발 기술자들은 이에 부합하는 성능, 신뢰성, 비용 등을 고려한 보다 효과적인 제품 설계를 위해 노력하고 있다. 본 논문에서는 ECM 알루미늄 기판의 플라즈마 세척 영향과 리플로우 후 Sn-37wt%Pb 솔더와 패드 접합부 계면에서 형성되는 금속간 화합물을 관찰하였다. 기판의 플라즈마 세척은 계면 접착력을 저해하였던 C에 의한 유기 잔류물 층이 제거되어 계면 접착력을 향상시키는 효과가 있다. 또한 AFM 분석 결과 도체 패드의 표면 거칠기는 304 nm에서 330 nm로 증가하였다. 리플로우 과정에서 솔더와 TiWN/Cu 패드 계면에서 형성된 Cu_6Sn_5 는 리플로우 횟수가 증가할수록 결정립의 크기도 조대화되었다. 솔더와 Ag-Pd 도체패드 계면에서는 세포질 형태의 Ag_3Sn 화합물이 관찰되었다. Ag_3Sn 는 지름이 약 0.1~0.6 μm 이며, 솔더 내부에서는 침상 모양도 관찰되었다.

Abstract: The requirements for harsh environment electronic controllers in automotive applications have been steadily becoming more and more stringent. Electronic substrate technologists have been responding to this challenge effectively in an effort to meet the performance, reliability and cost requirements. An effect of the plasma cleaning at the ECM(Engine Control Module) alumina substrate and the intermetallic compound layer between Sn-37wt%Pb solder and pad joints after reflow soldering has been studied. Organic residual carbon layer was removed by the substrate plasma cleaning. So the interfacial adhesive strength was enhanced. As a result of AFM measurement, conductor pad roughness were increased from 304 nm to 330 nm. Cu_6Sn_5 formed during initial reflow process at the interface between TiWN/Cu pad and solder grew by the succeeding reflow process, so the grains became coarse. A cellular-shaped Ag_3Sn was observed at the interface between Ag-Pd conductor pad and solder. The diameters of the Ag_3Sn grains ranged from about 0.1~0.6 μm . And a needle-shaped was also observed at the inside of the solder.

Keywords: Automotive, Ag/Pd conductor, Engine control module, Plasma cleaning, Intermetallic compound

1. 서 론

자동차 전자부품은 일반 가전제품보다 긴 보증

기간과 연관해서 오랜 동작수명을 필요로 한다. 때문에 자동차에 사용될 전자부품의 패키지는 높은 신뢰성과 함께 소형화, 경량화, 저가격의 특성이 요구된다. 자동차 전자부품들의 사용환경은 자동차 내부에서의 각각의 위치에 따라 다르다. 부

*Corresponding author
E-mail: kkseob@mail.yeojoo.ac.kr

폼들중 ECM(Engine Control Module)은 각종 센서로 받아들인 자동차의 상태 및 운전자의 지시를 통합, 판단하여 각종 엔진 구성품 및 액츄에이터들을 구동시킨다. 이를 통해서 배기가스의 저감, 연료절감, 출력향상, 운전성 향상 등을 도모한다. 현재 ECM은 다층 세라믹 기판위에 기반으로 설계되고, 플립칩 기술을 적용하고 있다. Fig. 1은 자동차 보닛 내부의 서로 다른 위치에서 받는 대표적인 온도를 나타내었다.¹⁾

플립칩 기술은 소자와 기판의 전기적인 연결이 소자의 AI 전극에 형성된 돌기형태의 외부 접속단자를 통해 직접 기판의 랜딩 패드(landing pad)에 연결된다. 따라서 와이어 본딩 방식보다 짧은 접속 길이로 전기적·열적인 성능의 향상을 도모할 수 있다²⁾. 그러나 ECM 세라믹 기판을 보관하거나 제조 도중에 도체 패드 등의 표면에 유기물이 형성되어 재료들간의 계면 접착력을 저하시킨다. 이러한 요소에 의해 도체 패드와 솔더 범프의 솔더링 불량, 과도한 금속간 화합물(intermetallic compound, IMC)의 성장과 균열등의 문제점이 발생하고 있다^{3,6)}. 때문에 솔더 접합부의 장기신뢰성에 대한 문제점이 해결해야 할 과제로 남아있다. 본 연구에서는 플라즈마 처리에 따라 세라믹 기판 표면의 오염세척 정도와 표면거칠기를 분석하였다. 또한 솔더와 TiWN/Cu UBM(Under Bump Metallurgy)과 솔더와 Ag-Pd 도체 패드 계면에서 리플로우시 형성되는 각각의 IMC의 형상과 성장변화를 관찰하였다. 이와 같은 연구는 자동차 전장품인 ECM 제품의 장기 신뢰성 향상에 크게 기여할 것이다.

2. 실험방법

실험에 사용된 제품은 32bit 마이크로 프로세서가 실장된 ECM 제품이다. 96% 알루미늄(Al_2O_3) 기판의 크기는 69.5×82.5 mm이고, 두께는 0.9 mm이다. 도체 패드는 스크린 인쇄 공정으로 제조하였고, 도체 페이스트는 Ag/Pd(3:1)로 Ag 분말, Pd 분말, 레진과 솔벤트로 구성되었다. 후막 페이스트를 이용하여 회로를 구성한 후 $150^\circ C$ 분위기의 이송 노에서 10분간 건조하였다. 이후 최고 온도 $850^\circ C \pm 3^\circ C$ 에서 10분간 소결하였고, 전체 소성 시간은 30분이며, 승온속도는 $10^\circ C/min$ 이다.

플립 칩 패키지의 크기는 $8230 \times 8344 \mu m$ 이고, 두께는 $737 \mu m$ 이다. 표면에 199개가 형성된 솔더 범프의 높이는 $122 \pm 25.4 \mu m$, UBM 직경은 $114 \mu m$ 이다. UBM 구성은 $TiWN(2700 \text{ \AA})/Cu(5300 \text{ \AA})$ 의 비율로 스퍼터 증착하였고, 상부에 Sn-37wt% Pb 조성의 솔더를 전기도금법(electroplating)으로 제조하였다.

리플로우에 사용된 장비는 적외선·열풍 혼합 방식으로 전체 리플로우 시간은 530초이고, 컨베이어 속도는 1.5 m/min이다. 최고 온도 설정은 $225 \pm 2^\circ C$ 에서 12초, 액상상태 유지시간은 80초로 하였다. 솔더 표면의 산화막을 제거하고, 솔더의 접합 특성을 향상시키기 위해 RMA(Rosin Mildly Activated) 플럭스를 사용하였다. 플라즈마 처리는 13.56MHz의 RF 제너레이터로 발생되는 PX-1000 (March Co.) 장비를 사용하였다. 플라즈마 처리 조건은 아르곤 가스 중에서 RF 전력 300 ± 10 watt, 시간 300 ± 10 sec, 압력 100 ± 20 torr, 유량 300 ± 10 sccm의 조건에서 행하였다. 시료의 표면성분 분석은 AES(Auger Electron Spectroscopy: PHI-680)를 이용하였고, 인가 전압과 전류는 각각 10kV, 10nA를 이용하여 분석하였다. 그리고 as-received 분석이 끝난 후 raster size를 5×5 mm 크기로 0.5분 표면 에칭(etching) 후 분석하였다. 통상적으로 0.5분 표면 에칭할 경우 oxide 기준으로 약 20~30Å 정도 에칭이 된다. 플라즈마 처리에 따른 표면의 거칠기를 분석하기 위해 기판에 설계된 도체 패드와 탄소 저항을 AFM(Atomic Force Microscope)으로 관찰하였다. $10 \times 10 \mu m^2$ 의 scan area에 대해서 제곱평균(root mean square, RMS) 거칠기를 측정하였다. 또한 솔더범프의 치수 정밀도를 분석하기

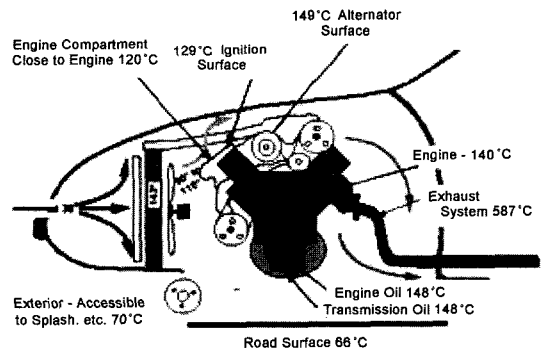


Fig. 1. Engine compartment thermal profile.

위해 3차원 자동 검사 장비(NTS-300)로 측정하였다. 신뢰성 실험후 시편은 에폭시로 마운팅하고 절단하여 시편의 단면을 0.05 μm Al_2O_3 분말로 연마하였다. 에칭은 ortho-nitrophenol과 NaOH를 혼합한 용액을 사용하여 IMC층만을 남기고 솔더부분을 선택적으로 녹여내었다. 솔더접합부의 분석은 FESEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy: S-4700)과 TEM(Transmission Electron Microscopy: JEM-2010UHR), EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)을 이용하여 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 플라즈마 세척

솔더접합부의 접합특성에 영향을 미치는 인자는 모재 표면의 오염(contamination), 접합부 계면에서의 기공(void), IMC의 성장 두께, 솔더범프의 형상과 리플로우 온도 및 시간 등이다.

일반적으로 X선 투과 검사는 솔더접합부의 기공이나 단락과 같은 특정한 불량을 찾아낼 수 있다. 플립 칩의 실장을 마친후 X선을 사용하여 검사한 결과 Fig. 2와 같이 솔더범프가 접합되지 않은 솔더링 불량 현상이 발생하였다. 그림에서 우측 상단에 표시된 화살표 부분이 접합되지 않은 부분이다. 솔더접합부가 원형 형상에서는 상단 그림과 같은 불량이 발생하였고, 타원형에서는 양호한 접합 상태를 나타내었다. 이와 같은 원인은 패드 오염, 리플로우 프로파일 조건, 범프의 치수 정밀도 등을 원인으로 들 수 있다. Ag-Pd 도체 패드 부분의 오염정도를 분석하기 위해서 ECM 알루미늄 기판을 대상으로 플라즈마 처리 유무에 따른 도체 패드 표면을 AES로 분석하여 이 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Pd은 330eV의 에너지 영역에서 AES peak가 나타난다. Fig. 3(a)에서 플라즈마 처리 이전의 시료인 Pd2에서는 C와 Pd가 혼재되어 나타난다. 그러나 Fig. 3(b)와 같이 플라즈마 처리 후에는 C 성분이 제거되어 나타나는 것으로 판단된다. 플라즈마 처리된 시료는 플라즈마 처리를 하지 않은 시료에 비해 주로 C 성분이 감소하였고, Cl, Na 등의 성분도 감소하는 경향을 보였다. 따라서 계면 접착력에 영향을 미치는 오염 성분은 C 성분으로 판단된다. 즉, energetic species인 Ar에 의한 이온충격(bombardment) 효과에 의해 반응성

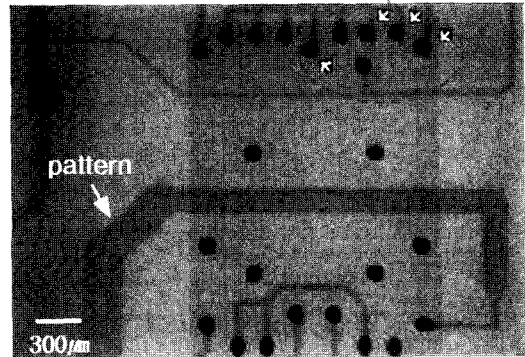
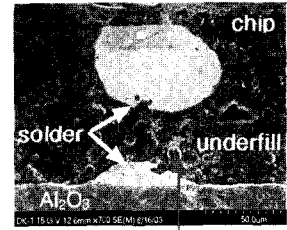


Fig. 2. The X-ray radiography of sample after solder bumps bonding on substrate.

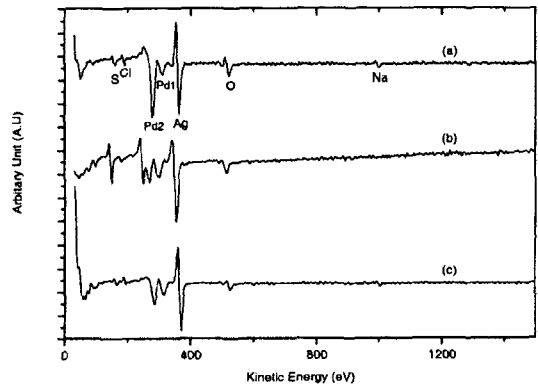


Fig. 3. Auger analysis of ECM substrate before and after plasma cleaning (a) before, (b) after, (c) etch.

이 강한 CO 등의 휘발성(volatile) 물질이 생성되어 표면에서 탈리되어진다. 이를 통해 계면 접착력을 저해하였던 C에 의한 유기 잔류물 층(residue layer)이 제거되어 계면 접착력을 향상시키는 것으로 판단된다^{7,8)}.

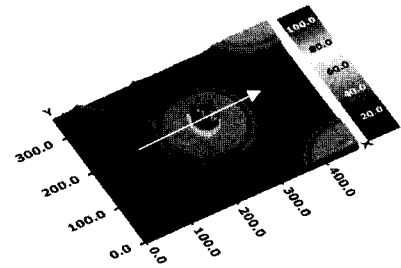
Fig. 4에 ECM 기판을 플라즈마 처리 한 뒤 Ag-Pd 도체 패드와 탄소 저항의 거칠기를 AFM으로 분석하였다. Fig. 4(a)는 플라즈마 처리를 하지 않

은 도체 패드로 304 nm를 나타내었고, Fig. 4(b)의 플라즈마 처리된 도체 패드는 330 nm를 보였다. 또한 플라즈마 처리를 하지 않은 탄소 저항 표면은 17.8 nm을, 플라즈마 처리된 탄소 저항은 21.6 nm로 측정되었다. 따라서 플라즈마 처리 효과로 표면의 RMS 거칠기가 증가하였다. 이와 같은 결과는 세라믹 기판에서 접합부 표면의 표면적을 증가시켜서 이종 재료간의 접착력을 향상시키는 요소로 판단된다⁷⁾.

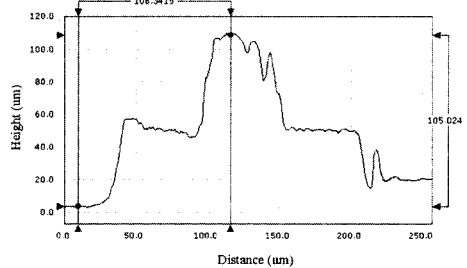
3.2 범프 형상과 계면 반응

범프 제조공정에서 칩 상에 형성 가능한 솔더범프의 크기와 높이는 수십 μm 에서 수백 μm 정도로 크기가 매우 작고 조밀하게 배열되어 있다. 칩 위에 형성된 솔더범프의 형상인 범프의 크기, 위치, 높이 등의 결합은 솔더접합에 나쁜 영향을 미친다. 전기도금 방식에 의해 형성되는 솔더 범프는 솔더와 젖음(wetting)이 잘되고 솔더로의 용융이나 IMC로부터 기지 금속의 완전한 소모를 막기 위해 상부에 5300Å 두께의 Cu를 형성하였다. 이후 두께 30~50 μm 의 후막 포토 레지스트(photo resist, PR)를 하드 베이킹하여 전기도금법으로 솔더를 형성시킨 후에 PR 스트립(strip)과 UBM을 에칭하면, 버섯(mushroom) 모양의 범프가 형성된다. 이러한 형상은 최종적으로 리플로우 공정을 거치면서 반구(dome) 모양의 솔더 범프를 완성시킨다.

Fig. 5에 솔더범프에 대한 3차원 이미지와 치수 측정 결과를 나타내었다. Fig. 5(a)의 내부에 표시된 화살표는 측정된 위치와 방향을 나타낸 것이다. 범



(a)



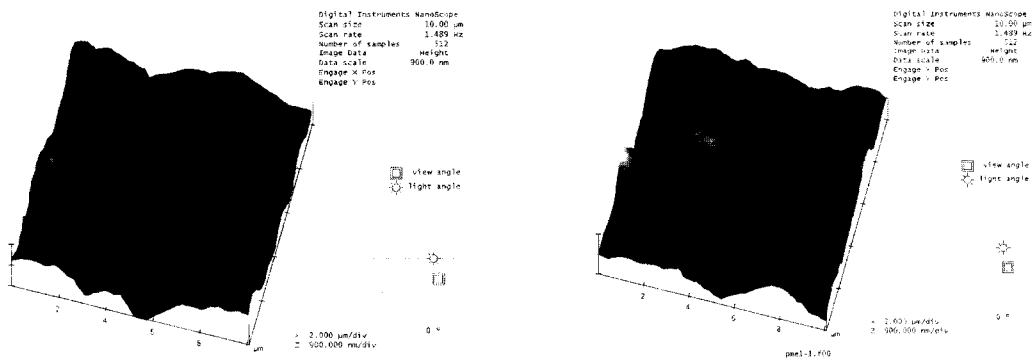
(b)

Fig. 5. Profile of solder bump (a) 3D contour, (b) bump dimension.

프의 최대 높이는 105 μm 이며, 범프 형상이 봉우리 모양으로 형성된 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 이상적인 반구 모양과 실제 제조된 범프 형상에서는 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 Sn-37wt%Pb 솔더와 TiWN/Cu UBM 계면에서 리플로우 후에 형성된 금속간 화합물의 형상과 성장 변화를 관찰한 것이다. 시편의 솔더층



(a)

(b)

Fig. 4. AFM surface micrographs of Ag-Pd conductor pads (a) before plasma cleaning, (b) after plasma cleaning.

을 선택적으로 녹여낸 후에 표면과 단면을 FESEM을 이용하여 관찰하였다. Fig. 6(a)에서 좌측 표면 형상은 솔더와 UBM 계면에서 Cu와 Sn의 반응에 의해 지름이 약 15~32 μm 인 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5(\eta)$ 가 형성되었다. 오른쪽 단면 사진에서 관찰된 부채꼴 (scallop) 모양의 η 두께는 2.0~2.8 μm 이다. 이때의 성분비는 EDS 분석결과 Cu:Sn=38.16:61.84(wt%)로 확인되었다. Fig. 6(b)와 같이 리플로우 과정에서 형성된 IMC는 리플로우 횟수가 증가할수록 결정립의 크기도 성장하였다. 리플로우 1회 시편이 리플로우 2회 처리과정을 거치면서 상대적으로 결정립이 조대화되고, 다각형 형상이 뚜렷하게 관찰되었다. Fig. 6(c)와 같이 리플로우를 3회 처리하면 표면에서 관찰된 결정립의 크기는 지름이 약 30~55 μm 로 조대화되었다. 또한 오른쪽 단면 사진에서와 같이 Cu_6Sn_5 의 두께는 약 2.5~3.4 μm 로 성

장하였다. 특히 Cu_6Sn_5 가 부채꼴 형상에서 성장하여 점유하는 면적도 점차 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 리플로우시 Ag-Pd 도체 패드와 솔더 계면에 형성된 IMC의 형상을 관찰한 것이다. 초기 반응에서 세포질(cellular) 모양의 $\text{Ag}_3\text{Sn}(\gamma)$ 가 형성되었고, Ag_3Sn 결정의 크기는 직경이 약 0.1~0.6 μm 로 관찰되었다. 또한 솔더 내부에는 침상(needle)의 Ag_3Sn 도 관찰되었고, 이때의 성분비는 Ag:Sn=72.2:27.8(wt%)로 확인되었다. Fig. 8은 리플로우 후에 솔더와 기판 계면에서 관찰된 TEM의 암시야상(dark field image) 결과를 나타낸 것이다. 상단에 Ag와 Sn의 반응으로 형성된 IMC층이 관찰되었고, 회절상 분석 결과 Ag_3Sn (orthorhombic phase, S.G.: Pmmn)으로 확인되었다. 이때 형성된 Ag_3Sn 층은 10 μm 이상 두께로 성장하였다. 이후 장시간의 시효 처리나 반복된 리플로우 과정을 거치면서 PdSn_4 등이 생성되는 것으로 보고되었다.⁴⁾ 이와 같은 결과는 Pd와 Sn의 확산 반응속도에 비해 Ag와 Sn이 상대적으로 빠르기 때문이다. 따라서 솔더접합부 계면은 과도한 IMC의 성장을 억제

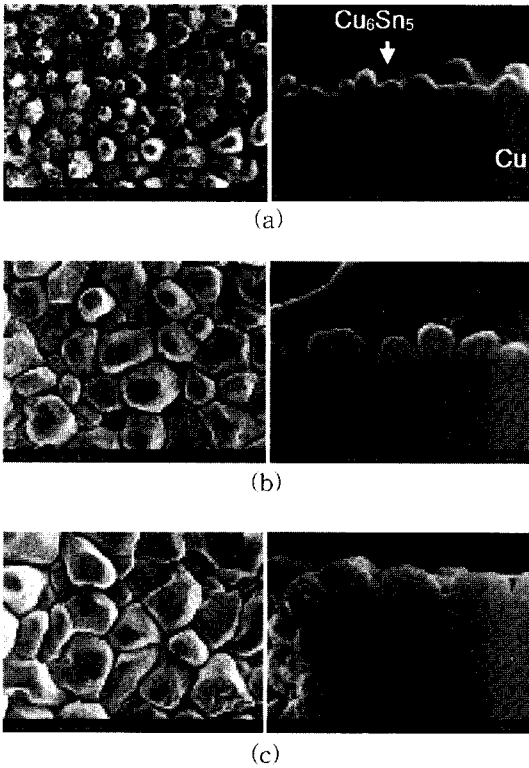


Fig. 6. SEM images of the morphology scallop-type Cu_6Sn_5 formed between Cu and Sn after etching the solder away (a) after one reflow, (b) after two reflows (c) after three reflows.

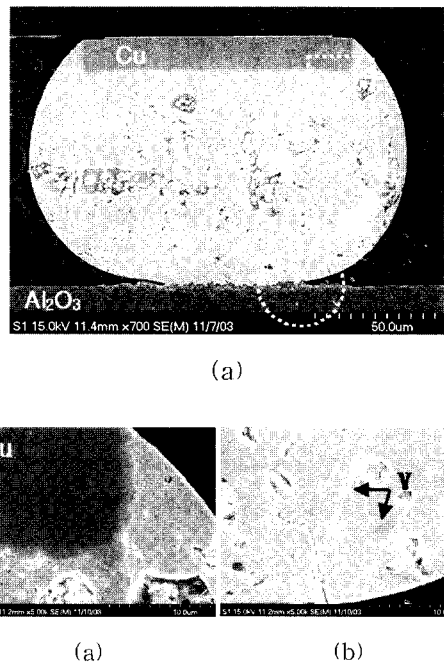


Fig. 7. Phases of the IMCs formed between Ag-Pd and Sn-37wt%Pb by reflow soldering (a) Cu_6Sn_5 , (b) Ag_3Sn .

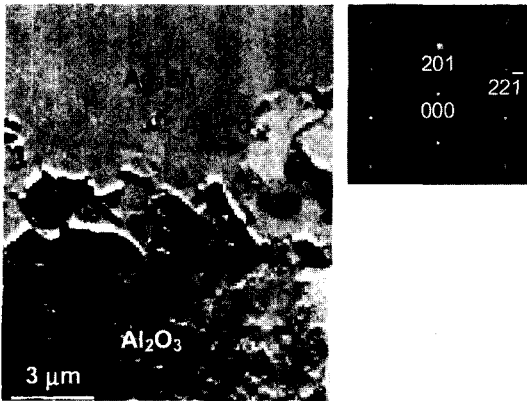


Fig. 8. TEM image and electron diffraction pattern showing interfacial reaction of Ag and Sn.

시키는 구조로 설계되어야 한다.

4. 결 론

ECM 세라믹 기판을 플라즈마 처리하여 접합부 표면의 세척 정도와 표면거칠기를 평가하였다. 또한 리플로우 후에 솔더와 TiWN/Cu UBM, 솔더와 Ag-Pd 도체 패드 계면에서 각각 형성되는 IMC 형상과 성장을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 플라즈마 처리는 계면 접착력을 저해하였던 C에 의한 유기 잔류물 층이 제거되어 계면 접착력이 향상되는 것으로 판단된다.

2. AFM 분석 결과 도체 패드에서는 플라즈마 처리로 RMS 거칠기 값이 304 nm에서 330 nm로 증가하였다.

3. 리플로우 과정에서 형성된 Cu_6Sn_5 는 리플로우 횟수가 증가할 수록 다각형 형상으로 조대화되

었다.

4. 솔더와 Ag-Pd 도체 계면에서는 직경이 약 0.1~0.6 μm 인 세포질 모양의 Ag_3Sn 가 형성되었고, 솔더 내부에서는 침상 모양도 관찰되었다.

참고문헌

1. M. R. Fairchild, R. B. Snyder, "Emerging Substrate Technologies for Harsh-Environment Automotive Electronics Applications", Society of Automotive Engineers, Inc (2002).
2. R. Tummala, Fundamentals of Microsystems Packaging, New York: McGraw-Hill pp. 101-105 (2001).
3. J. G. Duh, K. C. Liu, "Microstructural Evolution in Sn/Pb Solder and Pd/Ag Thick Film Conductor Metallization", Proc. Electron. Comp. Technol. Conf., pp. 653-657 (1991).
4. Y. Moriya, Y. Yamade, and R. Shinya, "Interface Reaction between Ag-Pd Conductor and Pd-Sn Solder", IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol. 21(4), pp. 394-397 (1998).
5. G. Y. Li, Y. C. Chan, "Diffusion and Intermetallics Formation between Pd/Ag Metallization and Sn/Pb/Ag Solder in Surface Mount Solder Joints", Materials Science and Engineering, 57 pp. 116-126 (1999).
6. J. Lenkkeri and T. Jaakola, "Rapid Power Cycling of Flip-chip and CSP Components on Ceramic Substrates", Microelectronics Reliability, 41 pp. 661-668 (2001).
7. C. Lee and K. Nyunt, "Plasma Cleaning of Plastic Ball Grid Array Package", Microelectronics Reliability, 39 pp. 97-105 (1999).
8. J. H. Hsieh, "Plasma Cleaning of Copper Leadframe with Ar and Ar/H₂ Gases, Surface and Coatings Technology", pp. 245-249 (1999).