전력변환모듈용 Cu terminal 초음파 접합부의 전단강도에 미치는 환경시험효과

김경열* · 민경득* · 김용일* · 윤정원** · 정승부*,†

*성균관대학교 신소재공학과

**한국생산기술연구원 용접접합그룹

The Effect of Environmental Test on the Shear Strength of the Ultrasonic bonded Cu Terminal for Power Module

Kyung-Yeol Kim*, Kyung Deuk Min*, Yongil Kim*, Jeong-Won Yoon**, and Seung-Boo Jung*,†

*School of Advanced Materials Science & Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

**Welding and Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Incheon, 21999, Korea

†Corresponding author : sbjung@skku.edu

(Received March 13, 2019 ; Revised April 10, 2019 ; Accepted April 22, 2019)

Abstract

The wider band gap, higher thermal conductivity and larger critical electric field allow SiC devices to operate at higher temperatures, higher current density and higher blocking voltages than Si power devices. Therefore, the SiC base power module for electric vehicle can operate well over 400°C. The mechanical strength of ultrasonic bonded Cu terminal and AMB (Active metal brazing) substrate was evaluated with various bonding load and bonding times. AMB substrate consisted of 300 μm copper layer and 320 μm Si3N4 substrate in thickness, respectively. Also bonding strength of the Cu terminal and AMB substrate was investigated with high temperature storage (HTS) test and thermal shock (TS) test. The shear test was conducted with 200 μm of shear height and 200 $\mu\text{m/s}$ of shear speed. The cross-sectional micrographs in Cu terminal and AMB substrate consisted of unbonded zone and bonded zone. As a whole, fracture was induced at the interface between Cu terminal and AMB substrate. The highest shear strength was 41.5 MPa at 50 kgf of bonding load for 1.25 s in bonding time.

Key Words : Ultrasonic bond, Cu terminal, Power conversion module, Shear test, Environmental reliability.

1. 서 론

기존의 화석연료를 사용하지 않는 친환경적인 전기자동차의 개발과 사용이 늘어가면서 자동차의 전자장비화되는 속도도 매우 빠르게 변화하고 있다. 전기자동차는 화석연료를 사용하지 않기 때문에 구동을 위해서 전력 공급 및 변환을 위한 다양한 형태의 전력변환모듈을 적용하고 있다¹⁻²⁾. 전력변환모듈은 전기자동차의 전원공급 및 변환을 위한 핵심부품으로 자동차의 안전성 및 사람의 생명과 직결되기 때문에 일반적인 전자제품에서

요구되는 기준에 비하여 매우 엄격한 기준으로 관리된다. 또한, 전력변환모듈의 실리콘 칩, 터미널 등의 부품들은 솔더와 와이어를 이용하여 전기적으로 연결되어있는데, 자동차의 구동환경은 열, 진동, 충격 등과 같은 가혹한 환경이므로 전력변환모듈의 접합부는 장기간 사용이 가능한 고내구, 고신뢰성의 특성이 요구된다³⁻¹⁰⁾. 전장품은 위치에 따라 다양한 온도범위에 노출되는데, 실내전장품의 경우 -40~85°C, 엔진룸용 전장품은 -40~125°C의 온도에 노출된다. 또한, 전력변환모듈의 효율 및 신뢰성을 증가시키기 위해 기존에 사용해온 Si 소자 기반 모듈에서 SiC 소자 기반 모듈로 개발이 진행되고

Table 1 Characteristics of SiC Devices Versus Si Devices

Electrical property	Si	SiC (4H)	SiC (6H)	Diamond
Band gap energy (ev)	1.12	3.28	2.96	5.5
Critical electrical field (MV/cm)	0.29	2.5	3.2	20
Electron mobility (cm ² /VS)	1200	800	370	2200
Hole mobility (cm ² /VS)	490	115	90	1800
Thermal conductivity (W/cmK)	1.5	3.8	3.8	20
Maximum junction temperature (°C)	150	600	600	1927

있고, Table 1과 같이 SiC 소자는 400°C 이상의 온도에서 안정적으로 구동가능하다¹¹⁻¹⁴⁾. 동작온도의 상승으로 인해, 기존의 솔더로 접합되었던 구리 (Copper, Cu) 터미널에서는 고온으로 인한 솔더의 용융과 열팽창으로 피로파괴와 같은 문제가 발생할 수 있다. 대표적인 고상접합인 초음파접합공정은 금속, 고분자 등과 같은 용가재 없이 Cu 터미널과 active metal brazing (AMB) 기판의 직접 접합이 가능하므로 낮은 열팽창 계수차를 갖으며 계면에서의 반응층이 없고 상온에서 접합이 수초내에 완성되는 친환경적인 접합방법이다. 따라서 본 연구에서는 Cu 터미널을 AMB 기판전극에 초음파로 접합한 뒤, 최적하중 및 최적접합시간을 검토하고 전단시험으로 접합강도를 평가하였다. 최적접합조건에서 AMB 기판에 Cu 터미널을 초음파접합한 후 고온방치시험과 열충격시험을 이용하여 신뢰성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 Cu 터미널과 AMB 기판의 초음파 접합공정

Fig. 1은 초음파 접합공정의 모식도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 AMB 기판은 Si₃N₄ 기판에 양면에

Fig. 1 The schematic diagram of ultrasonic bonding process

Cu 전극이 구성되었다. Cu 및 Si₃N₄ 기판의 두께는 각각 300 μ m, 320 μ m이다. 터미널은 Cu 재질로 이루어져 있으며, 두께는 1 mm, 폭은 4 mm이며 초음파 접합 면적은 4 × 4 mm²이다. Cu 터미널의 산화막은 10%의 황산용액에서 약 1분간 에칭으로 제거하였다. 베이스 플레이트와 AMB 기판은 Sn-3.0%Ag-0.5%Cu 무연 솔더를 사용하여 접합되었다. 초음파접합은 30 kHz의 주파수조건으로 0.75~1.25 초 동안 30~70 kgf의 하중을 인가하여 총 9가지 조건으로 최적조건을 검토하였다. 전단강도값은 각 조건당 5번의 실험값을 평균하였다.

2.2 초음파 접합부의 환경시험조건

Fig. 2는 전단시험의 모식도를 나타낸 것으로 전단시험기 (Nordson Dage Series 4000 multipurpose bond tester, Nordson Corporation, USA)를 이용하여 전단높이 200 μ m, 전단속도는 200 μ m/s로 진행하였다. 초음파접합공정으로 Cu 터미널과 AMB 기판을 접합한 뒤, 고온방치시험 (High temperature storage test, HTS)과 열충격시험 (Thermal shock test, TS)으로 접합부의 신뢰성을 검토하였다. 고온방치시험로 (OF-22GW, JEIO TECH, Korea)를 이용하여 JESD22-103D 규격의 D 조건으로 200°C의 온도에서 1000 시간을 진행하였다¹⁵⁾. 열충격시험은 열충격장비 (TSA-70L-W, ESPEC, Japan)를 이용하여 Fig. 3과 같이 -50~150°C의 온도조건 ($\Delta T = 200^\circ\text{C}$)에서 각각 10분간 유지하였으며, 온도변화 시간은 3분 이내로 하여 1,100 회까지 진행하였다. 고온방치시험과 열충격시험 후 전단시험을 통하여 초기시험과 전단강도를 비교분석하였다. 고온방치시험과 열충격시험 후 접합부의 파단면과 미세조직은 scanning electron microscope (SEM, Hitachi, S-3000H, Japan)를 사용하여 분석을 실시하였다. 접합부 단면의 미세조직 관찰은 50%의 질산용액으로 수초간 에칭한 뒤 실시하였다.

Fig. 2 The schematic diagram of shear test for shear strength

Fig. 3 Temperature profile of thermal shock test process

3. 실험 결과

3.1 초음파 변수에 따른 전단강도

Fig. 4는 초음파접합시간 (0.75 s, 1.0 s, 1.25 s), 하중(30 kgf, 50 kgf, 70 kgf)에 따라서 Cu 터미널과 AMB 기판의 접합강도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 1.0 s 이내의 접합시간에서는 접합하중이 증가할수록 전단강도값은 감소하였다. 초음파 하중, 30 kgf 조건에서는 접합시간이 증가함에 따라 37.9 MPa에서 40.4 MPa로 전단강도 값의 큰 증가 없이 안정된 값으로 측정되었다. 초음파접합 하중, 50 kgf 조건에서는 접합시간이 증가함에 따라 각각 27.9 MPa, 38.0 MPa, 41.5 MPa로 전단강도값이 크게 증가하였다. 또한, 70 kgf 하중에서는 접합시간이 증가함에 따라 각각 29.7 MPa, 31.6 MPa, 40.1 MPa의 전단강도값을 나타냈다. 앞서 설명했듯이 50 kgf와 70 kgf 조건에서는 접합시간에 따라 전단강도값이 크게 증가하였다. 접합시간에 크게 영향을 받지 않는 30 kgf 조건이 안정적인 값을 갖는 조건으로 나타났으나, 30 kgf

Fig. 4 The shear strength of Cu terminal and AMB substrate with various bonding conditions

의 압력으로 AMB 기판 위에 Cu 터미널을 접합시 alignment 문제가 발생하였고, 70 kgf은 높은 하중으로 AMB 기판에 손상을 줄 가능성이 존재하여, 본 연구에서는 50 kgf 하중에서 가장 높은 전단강도 값을 갖는 1.25 s 조건을 최적조건으로 선정하여 환경신뢰성 실험을 진행하였다.

3.2 환경시험 후 초음파접합 전단강도

Fig. 5는 200°C에서 1,000 시간을 고온방치한 후 Cu 터미널과 AMB 기판의 전단강도 그래프이다. 50 kgf, 1.25 s의 최적조건으로 접합한 초기 전단강도와 200°C에서 1,000시간의 고온방치시험 후 전단강도는 각각 41.5 MPa와 39.2 MPa의 값을 나타냈다. 200°C에서 1,000 시간의 고온방치시험 후 전단강도가 평균적으로 약 5.5% 감소하였다. Cu 터미널과 AMB 기판의 초음파 접합부는 200°C 1,000 시간 고온방치시험에서 우수한 신뢰성을 나타내었다. Cu 터미널과 AMB 기판의 접합부는 동종소재접합으로 Cu의 용점인 1,095°C와 같기 때문에 용점대비 낮은 온도인 200°C의 고온방치시험에서 전단강도값은 안정되게 유지되었다. 또한, Fig. 6은 -50~150°C 조건에서 1,100 cycles 열충격시험 후 Cu 터미널과 AMB 기판의 전단강도 값을 나타내었다. 열충격시험 후 전단강도는 39.2 MPa의 값을 나타냈으며, 초기전단강도 값 대비 약 5.6%의 감소를 나타냈다. 예를 들어, Sn-Ag-Cu계 솔더는 -40~125°C 1,000 cycles 열충격시험후 약 20% 이상의 전단강도가 감소하는 보고¹⁶⁻¹⁷⁾와 비교했을 때, Cu 터미널과 AMB 기판의 접합부는 Cu간의 동종소재접합으로 인하여 열팽창계수차가 적으므로 열충격시험 후 솔더에 비해 우수한 열적신뢰성을 나타낸 것으로 사료된다.

Fig. 5 The shear strength of Cu terminal and AMB substrate after high temperature storage test at 200°C

Fig. 6 The shear strength of Cu terminal and AMB substrate after thermal shock test at condition of $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$

3.3 초음파접합부의 파단면

Fig. 7은 고온방치시험과 열충격시험 전과 후의 단면을 50%의 질산용액으로 에칭한 SEM 조직 사진이다.

그림에서 알 수 있듯이, Cu 터미널과 AMB 기판의 접합계면에서는 초기시험, HTS 그리고 TS 모두에서 접합영역 (Bonded zone)과 비접합영역 (Unbonded zone)이 혼재하여 관찰되었다. 또한, 접합계면의 접합영역 내부는 비접합영역에 비하여 과에칭 (Over etching) 발생하였는데, 타연구에서 보고되었듯이 초음파접합시 접합영역에서는 초음파에너지의 영향으로 결정립 미세화되고 그에 따른 응력의 증가로 인한 것으로 사료된다¹⁸⁻²²⁾.

Fig. 8은 고온방치시험과 열충격시험 전, 후의 AMB 기판에서 발생한 파단면을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 Fig. 7에서와 같이 접합영역과 비접합영역의 혼합된 파단면이 관찰되었다. AMB 기판 상의 접합영역에서 전형적인 전단파단조직이 관찰되었다. Fig. 9는 파단의 진행경로를 나타낸 모식도이다. 전단시험시 파단은 비접합영역에서 발생하여 접합영역으로 발전하여 파단이 발생하였다. 전체적으로 볼 때, 접합계면의 존재하는 결함 (석출물, void 등)은 접합강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. Fig. 8에서 관찰되었듯이, 비접합영역

Fig. 7 Cross-sectional SEM micrographs of the Cu terminal and AMB joint bonded with 50 kgf for 1.25 s. a) As bonded, b) after HTS test, c) after TS test, d) As bonded, e) after HTS test and f) after TS test

Fig. 8 The fracture surface of AMB substrate bonded with 50 kgf and 1.25 s of bonding condition after shear test. a) As bonded, b) after HTS test and c) after TS test

Fig. 9 The schematic diagram of crack propagation during shear test

역의 void의 양과 크기가 접합강도와 상관관계가 있을 것으로 생각되며, 그에 대한 구체적인 연구는 향후 보완연구를 통하여 밝혀야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 전력변환모듈에 사용되는 Cu 터미널과 AMB 기판을 초음파접합 후 접합강도를 환경시험과 같이 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 접합계면은 접합영역과 비접합영역이 혼합된 조직으로 관찰되었다.

2) 30 kgf 하중에서는 전반적으로 안정한 접합강도를 나타냈으나, 50 kgf와 70 kgf 하중에서 접합강도는 접합시간에 따라서 증가하였고, 50 kgf 하중, 1.25 초의 접합시간에서 41.5 MPa의 가장 높은 전단강도값을 나타냈다.

3) Cu 터미널과 AMB 기판을 초음파접합한 접합강도는 환경시험 (고온방치시험, 열충격시험) 이후에도 10% 이내의 안정된 접합강도를 나타냈다.

초음파 접합을 이용한 Cu 터미널과 AMB 기판의 접합은 HTS와 TS 후에도 접합강도의 변화율이 낮아 높은 신뢰성을 나타냈다. 따라서, 높은 구동온도를 갖는 SiC 기반의 전력변환모듈에 적용가능한 친환경적이고 높은 신뢰성을 갖는 접합방법으로 생각된다.

ORCID: Kyung-Yeol Kim: <http://orcid.org/0000-0001-9768-2949>

ORCID: Jeong-Won Yoon: <http://orcid.org/0000-0001-8708-542X>

ORCID: Seung-Boo Jung: <http://orcid.org/0000-0002-7360-9859>

후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(과제번호: 10063263)을 받아 수행된 연구결과입니다.

References

1. K. Rajashekara, Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies, *IEEE J. Emerg. Select. Topics Power Electron.*, 1(1) (2013), 3-10
<https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2259614>
2. Z. Xu, M. Li, F. Wang, Z. Liang, Investigation of Si IGBT operation at 200 °C for traction applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(5) (2013), 2604-2615
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2217398>
3. Jeong-Won Yoon, Jung-Hwan Bang, Yong-Ho Ko, Se-Hoon Yoo, Jun-Ki Kim, Chang-Woo Lee, Power Module Packaging Technology with Extended Reliability for Electric Vehicle Applications, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 21(4) (2014), 1-13
<https://doi.org/10.6117/kmeps.2014.21.4.001>
4. Yong-Ho Ko, Sehoon Yoo and Chang-Woo Lee, Evaluation on Reliability of High Temperature Leadfree Solder for Automotive Electronics, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(4) (2010), 35-40
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.26>
5. Tuan-Yu Hung, Li-Ling Liao, C.C. Wang, W.H. Chi, and Kuo-Ning Chiang, Life Prediction of High-Cycle Fatigue in Aluminum Bonding Wires Under Power Cycling Test, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 14(1) (2014), 484-492
<https://doi.org/10.1109/TDMR.2013.2288703>
6. Won Sik Hong and Chul Min Oh, Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead-free Automotive Electronics, *Journal of KWJS*, 31(3) (2013), 22-30
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.3.22>
7. Jun-Hwan Bang, Dong-Yurl Yu, Young-Ho Ko, Jeong-Won Yoon, Chang-Woo Lee, Lead-free Solder for Automotive Electronics and Reliability Evaluation of Solder Joint, *Journal of Welding and Joining*, 34(1) (2016), 26-34
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.26>
8. B Ji, V Pickert, W Cao, B Zahawi, In situ diagnostics and prognostics of wire bonding faults in IGBT modules for electric vehicle drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12) (2013), 5568-5577
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2251358>
9. U. Scheuermann, Reliability challenges of automotive power electronics, *Microelectron. Rel.*, 49(9-11) (2009), 1319-1325
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.06.045>
10. Y. Yamada, Y. Takaku, Y. Yagi, I. Nakagawa, T. Atsumi, M. Shirai, I. Ohnuma and K. Ishida, Reliability of wire-bonding and solder joint for high temperature operation of power semiconductor device, *Microelectronics Reliability*, 47(12) (2007), 2147-2151
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2007.07.102>
11. J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler and Johann W. Kolar, SiC versus Si-Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC-DC Converter Systems

- by SiC Power Semiconductors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(7) (2011), 2872-2882
<https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2072896>
12. Won-Mook Choi and Ho-Gyun Ahn, The Switching Characteristic and Efficiency of New Generation SiC MOSFET, *J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.*, 21(2) (2017), 353-360
<http://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.2.353>
 13. K. Hamada, Present status and future prospects for electronics in electric vehicles/hybrid electric vehicles and expectations for wide bandgap semiconductor devices, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 245(7) (2008), 1223-1231
<https://doi.org/10.1002/pssb.200844079>
 14. Hangseok Choi, Overview of silicon carbide power devices, *Fairchild semiconductor*, (2016)
 15. JEDEC solid state Technology Association, JESD22-A103D "High Temperature Storage Life" (2010)
 16. Luhua Xu, John H.L. Pang and Faxing Che, Impact of Thermal Cycling on Sn-Ag-Cu Solder Joints and Board-Level Drop Reliability, *ournal of Electronic Materials*, 37(6) (2008), 880-886
<https://doi.org/10.1007/s11664-008-0400-0>
 17. Y.D Han, H.Y Jing, S.M.L. Nai, L.Y. Xu, C.M Tan and J. Wei, Interfacial reaction and shear strength of Ni-coated carbon nanotubes reinforced SneAgeCu solder joints during thermal cycling, *Intermetallics*, 31 (2012), 72-78
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.06.002>
 18. Farid Haddadi and Dimitrios Tsivoulas, Grain structure, texture and mechanical property evolution of automotive aluminium sheet during high power ultrasonic welding, *Materials Characterization*, 118 (2016) 340-351
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.06.004>
 19. P. Prangnell, F. Haddadi and Y. C. Chen, Ultrasonic spot welding of aluminium to steel for automotive applications – microstructure and optimisation, *Materials Science and Technology*, 27(3) (2011), 617-624
<https://doi.org/10.1179/026708310X520484>
 20. Hiromichi T. Fujii, Yuta Goto, Yutaka S. Sato and Hiroyuki Kokawa, Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel, *Scripta Materialia*, 116 (2016), 135-138
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.02.004>
 21. A. Panteli, J.D. Robson, I. Brough and P.B. Prangnell, The effect of high strain rate deformation on intermetallic reaction during ultrasonic welding aluminium to magnesium, *Materials Science & Engineering A*, 556 (2012), 31-42
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.055>
 22. Meng-Nan Feng and Zhen Luo, Interface morphology and microstructure of high-power ultrasonic spot welded Mg/Al dissimilar joint, *Science and Technology of Welding and Joining*, 24(1) (2019), 63-78
<https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1483598>