

벗김강도 측정법에 의한 파워 모듈의 솔더접합 특성 평가

Characterization of the Soldering Interface in Power Modules by Peel Strength Measurement

김남균*, 이희홍**, 방 옥*, 서길수*, 김은동*
(Nam-Kyun Kim*, Hee-Heung Lee**, Wook Bahng*, Kil-Soo Seo*, and Eun-Dong Kim*)

Abstract

The strength and characteristics of the soldering interface of the power semiconductor chip in a power module has been firstly surveyed by the peel strength measurement method. A power module is combined with several power chips which generally has 30~400mm² chip area to allow several tens or bigger amps in current rating, so that the traditional methods for interface characterization like shear test could not be applied to high power module. In this study power diode modules were fabricated by using lead-tin solder with 10x10mm² or 7x7mm² soldering interface. The peel strengths of soldered interfaces were measured and then the microscopic investigation on the fractured surfaces were followed. The peel test indicated that the crack propagated either through the bulk of the soft lead-tin solder which has 55-60 kgf/cm peel strength or along the interface between the solder and the plated nickel layer which has much lower 22 kgf/cm strength. This study showed that the peel test would be a useful method to quantify the solderability as well as to recognize which is the worst interface or the softest material in a power module with a large soldering area.

Key Words : Peel test, Solder interface, Solderability, Power module, Ceramic insulator

1. 서 론

파워 모듈(power module)[1,2]은 전력반도체 즉 다이오드, 사이리스터 및 IGBT[3,4] 소자들의 대표적인 패키지 형태로 자리잡았다. 통상적으로 전류 용량이 수십에서 수백 암페어 범위의 전력반도체 칩을 2개 이상 탑재한 파워 모듈은 그 패키지 구조상 전극단자, 절연기판 등이 여러 층의 솔더에 의하여 서로 결합된 이른바 적층형 구조로서, 집적회로에 이용되는 flip chip 및 BGA(ball grid array)

등[5,6]의 패키지 기술과는 구별된다. 그림 1(a)와 (b)는 수십~수백 암페어급 파워 모듈의 전형적인 열개와 실제모습을 각각 보여주고 있다.

그림 1(a)와 같은 파워 모듈 열개에서 가장 아래의 베이스판(base plate)과 대기의 외부전극단자(terminal)에 이르기까지 최소한 3개, 많게는 8개의 솔더층으로 구성된다. 그런데 파워 모듈의 장기 신뢰성 특성은 솔더 층의 특성 특히 전력반도체 칩과 접합되는 솔더층의 계면특성과 내재된 결함에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다[7-10].

파워 모듈의 솔더층의 특성을 평가하기 위하여 다양한 방법들이 시도되어왔다. 특히 근래에는 비파괴 평가방법이 많이 시도되고 있는데, 초음파나 X-선 투과법이 그 대표적인 예이다. X-선 투과법은 물질의 종류에 따라 그리고 물질의 투과 두께에 따라 흡수 에너지가 상이함을 이용하는 것으로 솔

* : 한국전기연구원 전력반도체연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1,
Fax: 055-280-1590
Corresponding Author : nkkim@keri.re.kr)
** : (주)화인컨트로닉스 기술연구소
2003년 8월 29일 접수, 2003년 9월 26일 1차 심사완료,
2003년 10월 24일 최종 심사완료

더층 내에 존재하는 기포의 알아내는데 아주 유용한 방법이다. 초음파법은 시편 내부에서 반사되는 모든 신호를 보는 것으로 이 반사파는 모든 계면에서의 영향을 반영하므로 솔더가 잘 부착되지 않은 계면을 알아내는데 가장 유용하다[11].

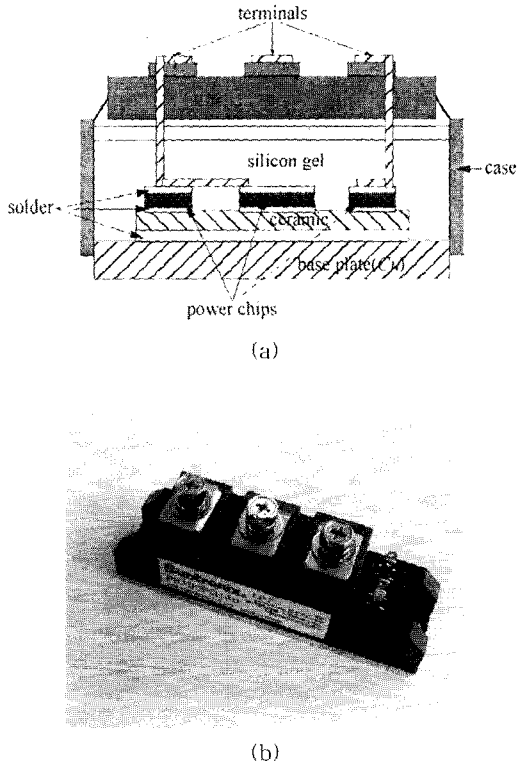


그림 1. 전형적인 파워 모듈의 열개(a)와 외관(b).
Fig. 1. (a) A schematic and (b) outline of a power module package.

이러한 장점에도 불구하고 비파괴 평가방식이 갖는 한계는 많다. 우선 파워 모듈과 같이 여러층의 재료가 적층된 다층구조에서는 여러 층에서 비롯되는 복합적인 정보를 일관적으로 해석해야 하는 어려움이 있다. 또한 실질적으로 다층 패키지 구조에서 가장 중요한 부위인 솔더층만을 선택적으로 평가하기 어렵다는 단점이 있다.

솔더층의 특성을 평가하는 가장 오래되고도 직접적인 방법은 기계적 강도를 측정하는 것이다. 파워 모듈의 동작·사용 중에 외부단자 솔더 전력소자 간에 발생하는 응력의 양태는 전단강도(shear strength)와 벗김강도(peel strength)의 측정방식이 복합된 양태를 띠게 된다. 솔더 접합의 전단강도

측정은 표면실장 소자 등에서 아주 널리 사용되고 심지어 상업적으로 개발된 측정장비도 보급되는 실정임에도 불구하고 파워 모듈에서는 벗김강도를 측정하는 것이 더 유리한 점이 많다.

큰 전류를 스위칭하는 파워 모듈에는 칩 면적이 수십~수백mm²에 이르는 전력반도체가 탑재되므로 그와 동일한 정도의 솔더 접합면적이 필요하다. 이처럼 수십~수백mm²에 넓은 면적의 반도체 칩을 대상으로 더구나 실리콘 칩의 잘 깨지는 특성을 감안하면 파워 모듈에서 기존의 전단응력에 의한 솔더 접합 계면 평가는 현실적으로 불가능하다.

벗김강도의 측정에 의한 파워 모듈의 솔더접합 특성 평가는, 비록 아직까지 파워 모듈에서 벗김강도의 보고 사례가 거의 발견되지 않고 있지만, 현실적인 대안으로서의 측면 뿐만이 아니라 실제 사용 모드에서 외력 인가 양상과 유사한 점이 있기 때문에 연구의 필요성이 커지고 있다. 즉 그림 1(a)에서 보는 것처럼 수 센티미터 길이의 전극단자(terminal)가 접합된 파워모듈에서 외부전원과 연결하는 단자에 외력이 전달되거나 혹은 사용 중에 전력반도체 소자에서 발생한 열에 의하여 모듈 내에 채워진 실리콘 겔(silicon gel)이 팽창하면 전극단자를 들어 올리는 형태로 응력이 가해지게 되는데, 이는 벗김강도의 응력인가양상과 동일하다. 더욱이 벗김강도를 측정하면 실제적으로 솔더층의 접합강도 평가 이외에도 솔더 파단면에 대한 분석으로부터 다양한 정보를 얻을 수 있다는 것도 중요한 동기 중의 하나이다.

본 연구에서는 파워 모듈 제작에 사용되는 동일한 재료를 사용하여 리플로우(reflow) 솔더링 장치에서 솔더 접합하여 파워 모듈을 제작하였다. 솔더 접합된 절연기판과 구리전극간의 접합강도를 벗김강도 방식으로 측정하였으며 그 파단면을 관찰하여 파워 모듈의 솔더접합 특성을 평가하고 그 효율성에 대하여 토론하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 솔더 강도 측정용 시편 제작

솔더접합이 이루어지는 구리 전극단자는 솔더 공정중에 전극단자의 하중이 솔더층에 균일하게 전달되어 솔더층 두께가 균일해지도록 Fig. 2와 같이 "C"자 형태로 구부러서 제작하였다. 제작된 전극단자는 두께(t) 0.5mm, 높이(h)는 강도 측정시 지그를 물릴 수 있는 충분한 길이인 20mm였으며, 솔더접합이 이루어지는 면적($w_1 \times w_2$)은 10x10mm² 혹은

7x7mm였고 솔더의 젖음 특성이 우수한 금(Au)으로 표면을 도금하였다.

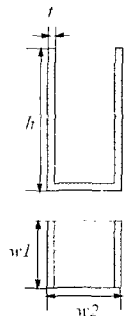


그림 2. 벗김강도 측정용 구리 전극단자의 설계.
Fig. 2. Design of copper terminal for peel test.

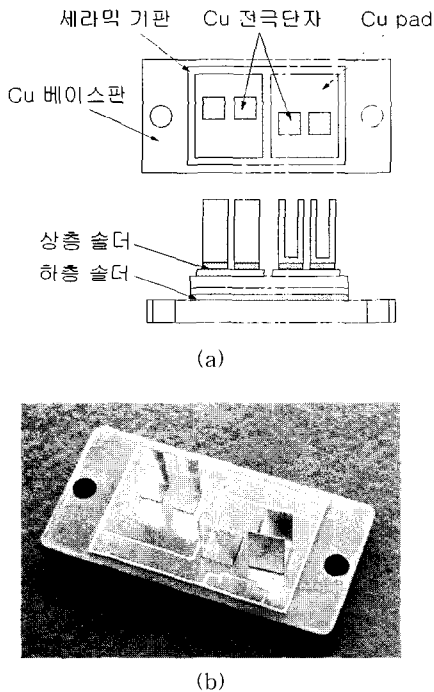


그림 3. 제작된 파워모듈. (a) 열개, (b)실제 외관.
Fig. 3. Fabricated power module. (a) schematics and (b) outline.

본 연구에서 제작한 벗김강도 측정용 시편의 모식도와 제작후 모습을 그림 3의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 먼저 맨 아래쪽에 90x45mm의 면적을 가진 3mm 두께의 구리 베이스 판(copper base plate)을 놓고 그 위에 솔더, 알루미늄 절연기판, 솔

더, 그리고 구리 전극단자를 차례로 쌓은 다음 최고온도가 350℃로 맞추어진 리플로우 로(reflow furnace)에서 솔더 접합강도 측정용 샘플을 제작하였다. 흔히 파워 모듈은 전극단자와 절연기판 사이에 실리콘계 전력 소자가 솔더접합된 형태로 제작되지만 벗김강도를 측정할 경우 취성이 강한 실리콘 칩이 먼저 파괴되어 솔더층 계면의 강도를 측정하지 못할 우려가 있어 실리콘 소자를 배제하고 솔더링하였다.

사용된 솔더 재료는 납(Pb)-주석(Sn)계로서 납의 함량이 95%인 것이었다. 알루미늄 절연기판은 이른바 직접접합 기판(DBC; direct bonded copper)과 Mo-Mn 금속접합기판(Mo-Mn metallized alumina)의 두 종류가 사용되었는데, 직접접합 기판은 60x40mm의 크기로 알루미늄의 양면에 두께 약 0.2mm의 구리 박판을 직접 접합하여 표면을 두께 약 3μm의 니켈로 도금한 것이며, Mo-Mn 금속접합기판은 알루미늄의 양면을 Mo-Mn 층으로 금속화한 후 역시 그 표면을 니켈로 도금한 것이다. 결국 직접접합 기판이든 Mo-Mn 금속접합 기판이든 솔더와의 접합은 양쪽 표면의 니켈 도금층에서 이루어지도록 하였다.

니켈 도금층의 표면 상태가 열처리에 따라 달라지고 이에 따라 솔더링 특성도 달라질 수 있으므로 Mo-Mn 층으로 금속화한 후 도금층에 대한 고온 열처리를 행한 경우와 열처리하지 않은 경우로 구별하여 파워모듈을 제작하였다. Mo-Mn 금속화 알루미늄의 도금층에 대한 사전 열처리는 800℃ 아르곤 분위기에서 행하였다.

2.2 벗김강도 측정

파워 모듈의 솔더접합 강도는 인장강도추정기(Instron Model 6022)를 이용하여 측정하였다. Fig. 4는 본 실험에서 벗김강도 측정시 시편과 지그의 결합상태 및 하중 방향을 보여주는 모식도이다. Fig. 4에서와 같이 인장강도 측정기의 상단과 하단에 각각 구리 전극단자와 구리 베이스판을 각각 물리어 인장응력을 가함으로써 강도를 측정하였다. 한편 파워 모듈의 베이스판을 인장강도추정기의 하단에 고정하기 위한 지그를 별도로 설계하여 제작하였다. 스테인레스 강을 사용하여 제작된 하단 지그는 파워 모듈의 구리 지지판이 쉽게 끼워지고 빠지도록 베이스판의 두께보다 0.5mm 더 넓게 제작하였다. 이러한 허용오차를 가지더라도 하중이 인가되어도 베이스판의 강한 마찰계수 때문에 지그-베이스판 사이에서 미끄러움이 발생하지는 않았다.

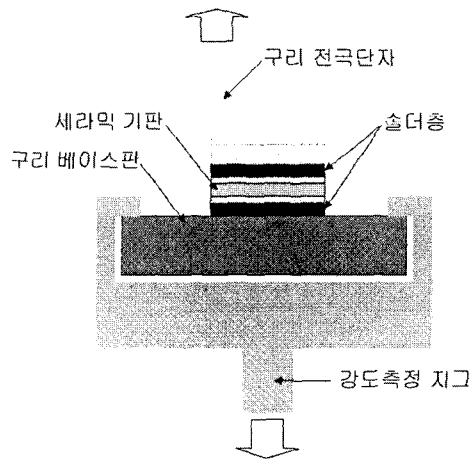


그림 4. 파워모듈의 벗김강도 측정을 위한 인장시험 개념도.

Fig. 4. A schematic of peel test for a power module.

최대하중이 200kg으로 선정된 인장강도측정기에 서 하부 지그는 인장시험기에 고정되고 상부의 클 랩프가 일정한 속도로 움직이게 하여 벗김강도를 측정하였다. 벗김강도 측정시 상부 클랩프의 이동 속도는 분당 10mm로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 5는 본 연구에서 측정된 전형적인 벗김강도 측정시 나타난 지그 이동거리에 따른 하중변화를 보여주고 있다. 즉 지그의 이동 속도를 분당 10mm로 설정하여 시험한 경우 초기 수 초간 하중이 급격히 증가하여 정점에 이른다. 일단 하중이 어느 정도에 이르면 구리 전극단자와 절연기판 사이의 솔더층에서 파괴가 일어나게 되며 이 시점부터 하중은 급격히 감소하여 솔더층의 잔열이 전파되는데 필요한 약 5kg 정도의 미소한 하중만이 부과된다. 이 때 벗김강도(peel strength)는 다음과 같이 계산 된다.

$$\sigma_{peel} = \frac{F_{max}}{w} \quad (1)$$

F_{max} 는 피크치의 하중을, w 은 하중이 인가되는 전극단자의 한쪽 폭을 의미하며(0.7cm 혹은 1.0cm) 이 경우 벗김강도는 kgf/cm의 단위를 갖는다.

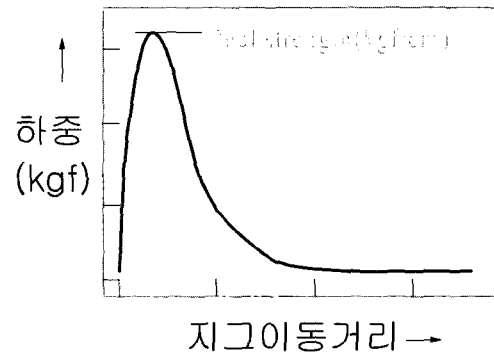


그림 5. 벗김강도 측정시의 전형적인 하중곡선.
Fig. 5. Typical load curve at the peel test.

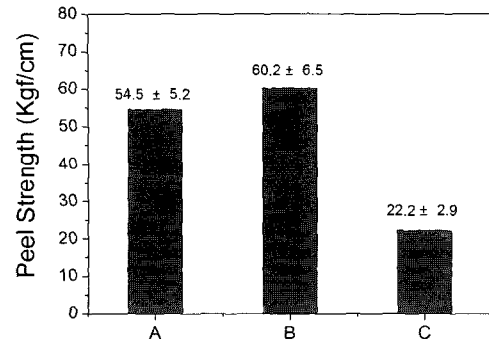


그림 6. 파워모듈에서의 솔더접합 벗김강도. (a) 직접접합 알루미늄 기판의 경우, (b) 급속접합 알루미늄 기판을 사용하되 표면 도금막의 사전 열처리를 행한 경우, (c) 급속접합 알루미늄 기판을 사용하되 표면 도금막의 사전 열처리를 행하지 않은 경우.

Fig. 6. Peel strength of the solder interface in power modules using (a) direct bonded copper alumina substrate, (b) Mo-Mn metalized alumina with pre-heat treatment of Ni plate and (c) Mo-Mn metalized alumina without heat-treatment of Ni plate.

제작된 파워모듈에서의 솔더접합 강도를 벗김강도법으로 측정하고 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 A,B,C 시편의 구분은 알루미늄 절연기판의 접합방식과 그 표면의 니켈 도금층의 열처리 유무에 따른 것인데, A시편은 직접접합 기판

으로 Ni 도금 후 열처리되었으며, B시편은 Mo-Mn 금속접합기판으로 Ni 도금 후 역시 열처리되었으며, C시편은 Mo-Mn 금속접합기판으로 Ni 도금후 열처리되지 않은 것을 사용하여 솔더링한 것이다. 그림 6에서 나타난 Ni 도금 후 열처리를 행한 시편(A, B 시편)에서 솔더층의 벗김강도는 각각 54.5, 60.2kgf/cm로 오차 범위 내에서 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 솔더의 접합강도가 알루미늄이나 절연기판의 금속접합 방식에 따른 의존성이 없음을 의미한다.

한편 Ni 도금층의 열처리를 행하지 않은 경우(C시편)에는 동일한 시편에서 열처리한 경우(B시편)보다 접합강도가 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 이는 솔더와 접합이 일어나는 Ni 도금층에 대한 표면처리의 중요성을 시사하는 것으로 해석된다. 실험방법에서 서술된 바와 같이 Mo-Mn 금속화 알루미늄 절연기판과 직접접합 알루미늄 기판 모두 그 표면이 두께 약 3 μ m의 니켈로 도금되었다는 점에서 동일하다. 즉 솔더층의 접합은 Ni 도금층과의 계면에서 이루어지므로 Ni 도금층의 표면상태가 솔더접합에 매우 중요하리라고 예상할 수 있다.

Mo-Mn 금속화 알루미늄 절연기판을 사용한 시편에서 Ni 도금층에 대한 사전 열처리의 유무가 솔더접합강도에 어떠한 영향을 미쳤는지 조사하고자 솔더접합 파단면을 분석하였다. 그림 7은 Ni 도금층에 대한 사전 열처리를 행한 다음 솔더링한 경우(B시편)의 솔더 파단면을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 전체적으로 밝은 은회색의 전형적인 Pb-Sn 솔더층의 파단조직을 보여주고 있다. 특히 솔더층 내부의 기포는 둥근 모양으로 파단면 전체에 걸쳐 산포함을 알 수 있었다. 파단조직에서 드러난 B시편의 기공률은 5~11%였으며 특히 직경 0.5mm 이상의 큰 기포는 발견되지 않았다. 일반적으로 솔더층 내에 큰 기포가 편재할 경우 전력반도체의 열점(hot spot)을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있는데[12-14], 그림 7에 나타난 기포의 크기와 분포로 미루어 양호한 솔더접합이 이루어진 것으로 생각된다. 한편 A 시편은 B시편과 유사한 파단 미세조직을 보였다.

A 및 B 시편의 파단면에 대한 EDX 분석을 행한 결과 기공이 자리한 영역과 그렇지 않은 영역을 막론하고 솔더 성분인 Pb와 Sn만이 검출되었다. 이는 균열이 연성 솔더(soft solder)인 Pb-Sn 층 내부를 따라 진행되었음을 의미하는 것이다. 즉 파워 모듈을 구성하는 모든 재료 또는 재료간 계면 가운데에서도 Pb-Sn 솔더층의 강도가 가장 낮고 이에 따라 이 재료층을 따라 파괴가 일어났음을 보여주

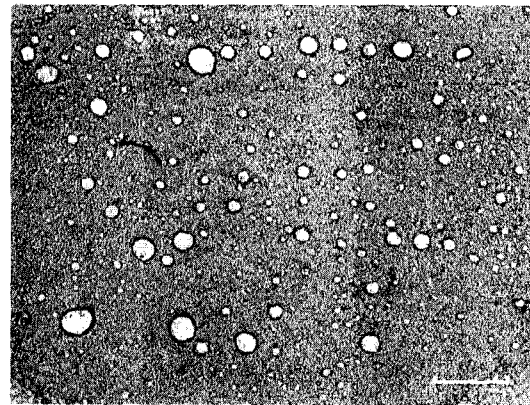


그림 7. B시편의 파단 미세조직. (Bar=1cm).

Fig. 7. Micrograph of the fractured surface of specimen B.

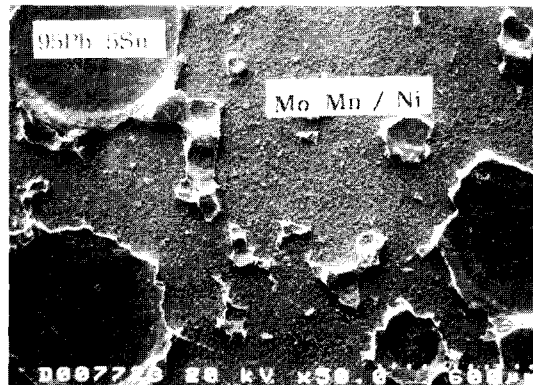


그림 8. C 시편의 파단 미세조직과 EDX 원소분석 결과.

Fig. 8. Micrograph and EDX analysis result of the fractured surface of specimen C.

고 있다.

한편 도금층 열처리를 하지 않은 시편에서 파괴 양태는 이와는 다른 것으로 나타났는데 그림 8은 C 시편에서 접합강도 측정후 파단면과 함께 EDX로 검출된 주요 금속원소들을 보여주고 있다. EDX 분석 결과 그림 7에 대한 분석결과와는 달리 그림 8에서는 Pb, Sn이 검출되는 영역과 Mo, Mn, Ni이 검출되는 두 가지 영역이 존재함을 알 수 있었으며 두 영역 중에서도 Mo, Mn, Ni이 검출되는 영역이 거의 대부분을 차지하였다. 이는 Mo-Mn 금속화층의 Ni 도금 표면이 꺾임강도 측정과정에서 노출되

있음을 의미하는 것으로, 솔더층과 Mo Mn 도금층이 서로 박리되었기 때문에 나타난 현상으로 이해된다. 즉 솔더와 접합하는 Ni 도금층의 표면이 불량하여 솔더의 젖음(wetting)이 일어나지 않았고 이에 따라 벗김강도 측정 중에 솔더층과 Ni 도금층이 쉽게 박리된 것으로 보인다.

또한 Ni 도금층에 대한 적절한 열처리인 Pb-Sn 솔더와 솔더접합대상 재료 간의 접합 강도를 증대시키는 것으로 나타났다. 이러한 솔더접합 강도의 향상은 Ni 도금층의 표면상태를 솔더 공정에 적합한 상태로 만들어 솔더와 도금층 계면의 접합강도를 이상적으로 유지하기 때문으로 생각된다.

일반적으로 재료의 파괴모드에서 균열면은 가장 취약한 계면을 따라 진행된다. 이는 재료의 파괴시에 균열의 전파에 따라 새로이 형성되는 균열면의 표면에너지를 최소화하고자 하는 특성에 기인한다. 따라서 이러한 특성으로 미루어 A와 B 시편에서는 솔더-Ni도금층간의 결합강도가 Pb Sn의 강도보다 컸지만 C 시편에서는 오히려 Pb Sn의 강도가 계면간 결합강도보다 컸음을 알 수 있다. 결국 파워 모듈에 대한 벗김강도 측정은 파워 모듈에 존재하는 수많은 계면 중에서 어떠한 계면이 가장 취약한 계면인가를 알아낼 수 있는 아주 좋은 수단으로 기능함을 알 수 있다.

따라서 벗김강도 측정에 의한 솔더층의 파괴 모드는 크게 두 가지로 분류될 수 있으며 그림 9와 같은 솔더내부 파괴모드(a)와 솔더계면 파괴모드(b)의 모식도로 나타내 보았다. 이상적인 파괴 모드는 Ni 도금층이나 도금계면 등이 아닌 그림 9(a)와 같이 솔더층 한 가운데로 균열면이 생성되는 경우로 생각된다. 이는 일반적으로 패키지에 사용되는 각종 재료 중에서 솔더(주로 Pb-Sn)가 가장 낮은 강도를 보이기 때문이다. 그러나 도금층의 접합이 불량하든지 혹은 도금층의 표면이 오염되었거나 산화되었을 경우 솔더와 Ni 도금층간의 접합이 불량하여 접합강도가 낮아지므로 그림 9(b)와 같이 일부 혹은 전체적인 균열면이 솔더층과 도금층의 계면을 따라 생성될 것으로 생각된다. 그림 7에서 보인 A 및 B 시편의 파괴 모드는 그림 9(a)의 파괴 모드를 따른 것으로 분류할 수 있으며 그림 8에서 보인 C 시편의 경우에는 그림 9(b)의 파괴 모드로 분류된다.

따라서 솔더, 도금층, 세라믹 재료 등이 쌓여 이루어진 파워 모듈에서 벗김강도의 측정을 통하여 솔더층 또는 접합계면의 결합 상태를 다음과 같이 판단할 수 있다. 첫째로 솔더링 공정과 도금 등이 모두 이상적으로 형성된 경우에는 구리 전극단자와

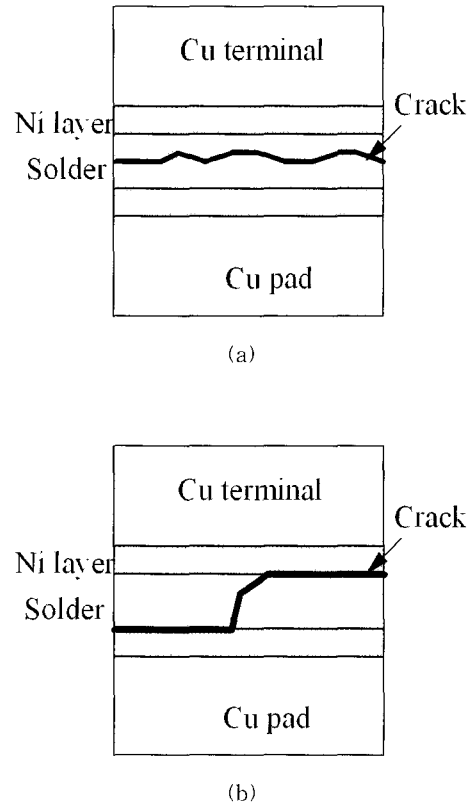


그림 9. 솔더층의 파괴 모드 모식도. (a) 솔더내부 파괴모드, (b) 솔더계면 파괴모드.
 Fig. 9. Fracture modes of solder layer, (a) intra-solder mode, (b) inter-layer mode.

구리 박판 사이에 존재하는 솔더층의 파괴강도가 벗김강도로 측정된다. 따라서 이 경우에 벗김강도는 솔더 합금의 종류, 솔더층 내부의 기포의 분포와 양에 의하여 결정될 수 있다. 둘째로 솔더 공정에서 오류가 발생하거나 또는 도금 표면이 불량한 경우로서 솔더층 내부가 아닌 다른 계면으로 균열이 진행될 수 있고 파단면의 관찰에서도 솔더층이 아닌 다른 물질이 관찰될 수 있으며, 이 경우의 벗김 강도는 솔더층의 강도보다는 현저히 낮은 가능성이 크다. 즉 구리 전극단자의 도금이 불량하거나 구리 박판의 도금막이 불량한 경우, 혹은 솔더링 시간이 과도하게 길어 솔더와 도금층 간에 반응이 일어난 경우, 혹은 솔더가 계면을 충분히 적시지(wetting) 못한 경우가 이런 경우에 해당될 수 있을 것이다. 결국 본 연구에서 파워모듈을 대상으로 실험한 벗김강도 측정법은 다층 구조에서 가장 취

약한 층 또는 계면을 밝혀낼 수 있는 매우 유용한 방법임을 알 수 있었다.

4. 결 론

파워 모듈에 내장되는 대면적 전력반도체 소자의 솔더 접합강도 및 솔더접합 특성을 평가하고자 벗김강도(peel strength)를 측정하고 그 특성을 관찰하였다. 벗김강도 측정을 위한 파워모듈은 구리 베이스 판(copper base plate)을 놓고 그 위에 Pb95%-Sn5% 솔더, 알루미늄 절연기판, 솔더, 그리고 구리 전극단자를 차례로 쌓은 다음 최고온도가 350℃로 맞추어진 리플로우 로(reflow furnace)에서 제작하였다.

Pb95%-Sn5% 솔더의 벗김강도는 절연기판의 급속화 방식에 상관없이 각각 54.5±5.2 및 60.2±6.5 kgf/cm로 오차 범위 내에서 동일하였으나 솔더 접합 대상인 Ni 도금층의 열처리가 이루어지지 않은 시편에서는 현저히 감소하였다. 벗김강도 파단면에 대한 전자현미경 및 원소분석 결과 접합강도가 높은 경우 균열면은 솔더층 내부를 따라 진행하였으며, 강도가 현저히 낮은 경우 솔더와 솔더접합 대상재료의 계면간을 따라 진행되는 것으로 관찰되었다. 이와 같이 파워 모듈에서 벗김강도를 측정하는 방법은 솔더의 접합강도를 정량적으로 보여줌과 동시에 다층 구조의 파워 모듈에서 가장 취약한 재료 또는 계면을 검사할 수 있는 유용성을 가지는 것으로 요약할 수 있다.

벗김강도의 측정은 실제 사용 모드에서 파워 모듈의 전극단자에 가해지는 외력 인가 양상과 유사하므로 실장 시험과 매우 가깝다고 할 것이다. 뿐만 아니라 일반적으로 30~400mm의 넓은 칩 면적을 가지는 파워 모듈용 전력반도체에서는 표면실장 소자에 사용되는 기존의 전단응력에 의한 평가가 어려우므로 본 고에서 제시한 벗김강도 측정방법은 대면적 칩의 솔더접합 특성을 평가할 수 있는 좋은 대안으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중점국가 연구개발사업 "전력용 반도체 기술개발"의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] C. A. Neugebauer, A. F. Yerman, R. O. Carlson, J. F. Burgess, H. F. Webster, and H. H. Glascock, "The Packaging of Power Semiconductor Device", Gordon and Breach Science publishers, New York, p. 8, 1986.
- [2] R. Saito, Y. Koike, A. Tanaka, T. Kushima, H. Shimizu, and S. Nonoyama, "Advanced high current, high reliable IGBT module with improved multi-chip structure", Int. Symp. Power Semiconductor Devices, p. 109, 1999.
- [3] 추교혁, 강이구, 성만영, "Trap 주입에 의한 IGBT의 스위칭 특성 향상에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 13권, 2호, p. 120, 2000.
- [4] 강이구, 성만영, "래치업 특성의 개선과 고속 스위칭 특성개선을 위한 다중 게이트 구조의 새로운 IGBT", 전기전자재료학회논문지, 13권, 5호, p. 371, 2000.
- [5] 주철원, 김성진, 백규하, 이희태, 한병성, 박성수, 강영일, "플립칩용 웨이퍼레벨 Fine Pitch 솔더범프 형성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 11호, p. 874, 2001.
- [6] 신영의, 김경섭, "플라스틱 BGA 패키지의 아르곤 가스 플라즈마 처리효과", 전기전자재료학회논문지, 13권, 10호, p. 805, 2000.
- [7] H. de Lambilly and H. O. Keser, "Failure Analysis of Power Modules: A Look at the Packaging and Reliability of Large IGBT's", IEEE trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., Vol. 16, No. 4, p. 412, 1993.
- [8] J. F. Burges, R. O. Carlson, H. H. Glascock, C. A. Neugenbauer, and H. F. Webster, "Solder fatigue problems in power package", IEEE Trams. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., Vol. 7, No. 4, p. 405, 1984.
- [9] S. Vaynman, "Fatigue life prediction of solder material : Effect of ramp time, hold time and temperature", Proc. 40th Electronic Components and technology Conf., p. 505, 1990.
- [10] H. D. Solomon, "Low-frequence, high-temperature low-cycle fatigue of 60Sn/40Pb solder", ASTM STP-942, p. 342, 1988.
- [11] p. 41 in ref. [1].

- [12] A. J. Yerman, J. F. Burgess, R. O. Carlson, and C. A. Neugebauer, "Hot Spots Caused by Voids Cracks in the Clup Mountdown Medium in Power Semiconductor Packaging", IEEE Trans. Comp., Hybrid and Manuf. Tech. CHMT 6, p. 473, 1983.
- [13] J. M. Fusaro and R. Darveaux, "Reliability of Copper Baseplate High Current Power Modules", Int. J. Microcircuits & Electronic Packaging, Vol. 20, No. 2, p. 81, 1997.
- [14] C. Van Godbold, "Thermal Analysis of High Power Modules", IEEE Trans. Power Electron, Vol. 12, No. 1, p. 3, 1997.