

신뢰성 평가를 위한 자동차 전장 부품의 기계적 접합강도 특성 및 오차범위에 관한 연구

전유재¹, 김도석¹, 신영의^{1,a}

¹ 중앙대학교 기계공학부

A Study on the Characteristics and Error Ranges of Automotive Application Component's Mechanical Bonding Strength for the Its Reliability Evaluation

Yu-Jae Jeon¹, Do-Seok Kim¹, and Young-Eui Shin^{1,a}

¹ School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received November 3, 2011; Revised November 17, 2011; Accepted November 21, 2011)

Abstract: In this study, the characteristics and error ranges of the mechanical bonding strength were analyzed according to before and after thermal shock test for various chips of automotive application component using Sn-3.0Ag-0.5Cu solder. In the after thermal shock test, the mechanical bonding strengths tend to decrease, meanwhile decreasing rates of mechanical strengths were less than 12% at specimen's bonding area below 3.5mm², and were from 17 to 21% at specimen's bonding area above 12 mm². On the other hand, Specimen's mean deviation rates were about 5% at specimen's bonding area more than 12 mm². Inversely, at specimen's bonding area is less than 3.5 mm², mean deviation rates were increased to about 8%. It means that the smaller device size is, the larger mean deviation rate. In addition, error ranges and deviation rates of the mechanical bonding strengths may differ slightly depending on their bonding area. Furthermore, process conditions as well as method of mechanical reliability evaluation should be established to reduce the error ranges of bonding strength.

Keywords: Thermal shock test, Mechanical bonding strength, Lead-free solder, Automotive application component, Error range, Reliability evaluation

1. 서 론

자동차 산업이 발전하면서 고지능형과 안전성을 갖춘 자동차가 급증하고 있으며, 동시에 유럽연합 (EU) 의 환경규제에 따라 2006년 7월부터 모든 전기전자부품에 납, 수은, 카드뮴 등 6개 유해물질의 사용이 제

한되고 있어 친환경 전장부품이 요구되고 있는 추세이다.

기존의 Sn-Pb계 솔더를 대체하여 대표적인 3원계 무연솔더 Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi 그리고 Sn-Ag-In 등이 널리 사용되고 있다. 하지만, 인듐 (In), 비스머스 (Bi)는 모두 산화하기 쉬우므로 플럭스 (flux)에 대하여 특별한 연구를 하거나 질소분위기에서의 작업을 필요로 하는 경우가 있어 작업 공정에 어려울 뿐

a. Corresponding author; shinyoun@cau.ac.kr

아니라 신뢰성 확보에도 취약한 부분이 있어, Sn-Ag-Cu 계의 솔더가 가장 많이 사용되고 있다 [1,2].

최근에 자동차 전장부품 (automotive application component) 및 전기·전자부품들은 점점 다기능화, 경박단소화 경향으로 인하여 열적·기계적 신뢰성에 대한 취약점이 대두되고 있다. 따라서, 안전성과 직접 연관되는 장기 신뢰성 평가인 열충격 시험 (thermal shock test)을 통한 기계적 신뢰성 평가에 대한 기준이 확보되어야 한다. 기존의 연구는 무연솔더 접합면에 형성되는 금속간화합물 (intermetallic compound)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 실제 무연솔더 적용 제품의 신뢰성 평가에 대한 자료는 미비한 실정이다. 특히, 자동차 전장부품의 경우 다른 전기·전자 부품에 비해 훨씬 가혹한 환경에 노출되어 있기 때문에, 신뢰성 시험 또한 다른 제품들 보다 가혹한 조건이 요구되기에 대부분의 국내 완성차 업체에서 자체 시험법 및 규격을 이용하여 자사 제품의 신뢰성 확보를 위해 노력을 기울이고 있다 [3,4].

따라서, 본 연구에서는 Sn-3.0Ag-0.5Cu계 무연솔더를 이용하여 현재 자동차에 탑재된 다양한 크기의 핵심 전장부품을 선정하여 열충격 시험 전·후 무연솔더 접합부의 기계적 접합강도를 측정하고, 그 강도값에 따라 자동차 전장부품의 접합강도 신뢰성 평가 오차범위 값을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험시편

본 실험에서는 Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더를 이용하여 240°C 피크 (peak) 온도 조건으로, 평균 220°C에서 약 60초 동안 리플로우 (reflow) 공정을 통해 접합된 실제 차량에 탑재되는 핵심 전장부품을 각각 10개씩 60개를 선정하여 열충격 시험 전·후 접합 강도값을 측정하였다. 리플로우 공정을 마친 시편은 25°C의 건조 챔버 (dry chamber)에 보관하여 습도 및 기타 외부 환경 조건의 영향을 최소화하였다. 그림 1은 실험에 사용한 시편의 형상을 사진으로 나타낸 것이며, 솔더 접합부의 면적은 표 1에 나타내었다. 솔더 접합부의 접합면적은 솔더의 필렛 (fillet)형상 및 전단 강도시험의 기준에 따라 접합면적을 산출하였다.

2.2 열충격 시험

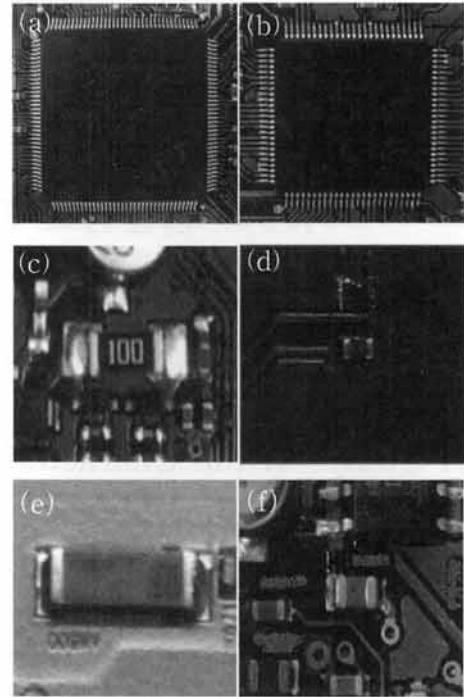


Fig. 1. Image of specimens. (a) QFP1, (b) QFP2, (c) R1 chip, (d) R5 chip, (e) AN chip, (f) HB chip.

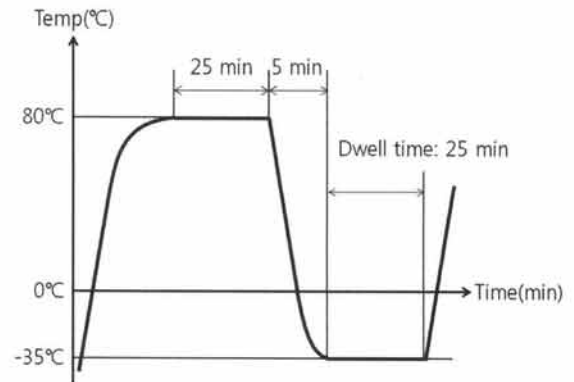


Fig. 2. Temperature profile of thermal shock cycle.

장기 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 열에 대한 솔더 접합부 특성을 분석하기 위해 대표적인 가속 환경 시험방법 중의 하나인 열충격 시험을 ESPEC社 TSE-11-A를 이용하여 수행하였다 [5]. 열충격 시험 조건은 그림 2에서와 같이 저온구간 -35°C와 고온 구간 80°C에서 각각 25분씩을 유지시켰으며, 램핑 (ramping) 시간은 10분으로 총 60분을 1 cycle로 하여 N社의 사내 규격인 432 cycle의 열충격 시험을 수행하였다.

2.3 기계적 접합강도 시험

기계적 접합강도 시험은 같은 조건 하에서 접합한 크기 및 역할이 다른 6가지 전자부품 총 60개를 선정하였다. 각 부품마다 열충격 시험 전 5개, 열충격 시험 후 5개씩 접합부의 강도를 RHESCA社의 PTR-1000의 시험 장비를 사용하여 접합강도를 측정하였다. QFP1, QFP2는 JIS Z 3198-6 [6]에 준하여 167 $\mu\text{m/s}$ 의 속도로 당겨 인장강도 시험을 수행하였으며, 그림 3과 같이 시편을 45° 기울어지게 한 뒤 훅(hook)을 시편의 리드에 걸어 일정한 속도로 당겨서 시편이 파단에 이를 때까지 인장하중을 가하여 최대 인장강도를 측정하였다.

R1, R2, AN, HB chip은 JIS Z 3198-7 [7]에 준하여 167 $\mu\text{m/s}$ 속도로 밀어 전단강도를 측정하였으며, 시험 방법은 그림 4와 같이 테이블에 chip을 180° 수평으로 고정하고 기판으로부터 솔더 접합부의 높이는 규격에 따라, 솔더 접합 높이의 1/4 이하로 높이를 설정하였으며, 일정한 속도로 전단하중을 가하여 시편이 파단이 일어날 때까지의 최대 전단강도를 측정하였다.

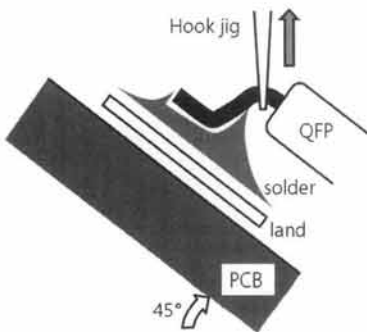


Fig. 3. Schematic diagram of pull strength test.

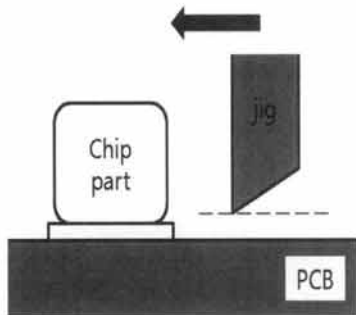


Fig. 4. Schematic diagram of shear strength test.

2.4 시편의 단면관찰

열충격 시험 전·후 시편의 단면을 관찰하여 보이드(void), 초기균열, 접합부 형상 등 열충격 시험 전·후의 영향을 분석하기 위해 시편을 클립에 끼워 에폭시로 마운팅(mounting)을 하였다.

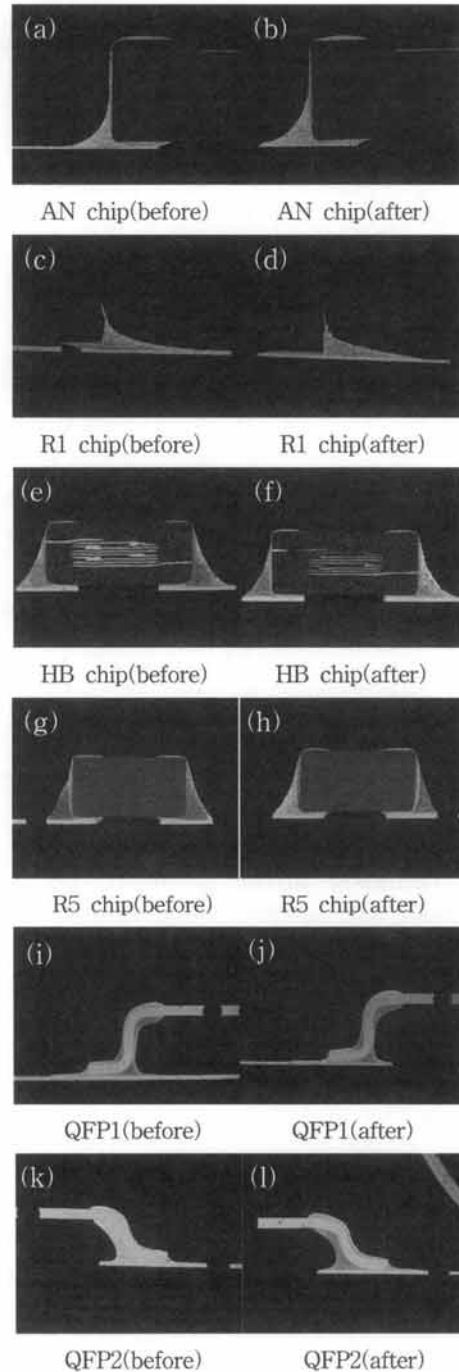


Fig. 5. Cross section of solder joints: (a, c, e, g, i, k) before and (b, d, f, h, j, l) after thermal shock test.

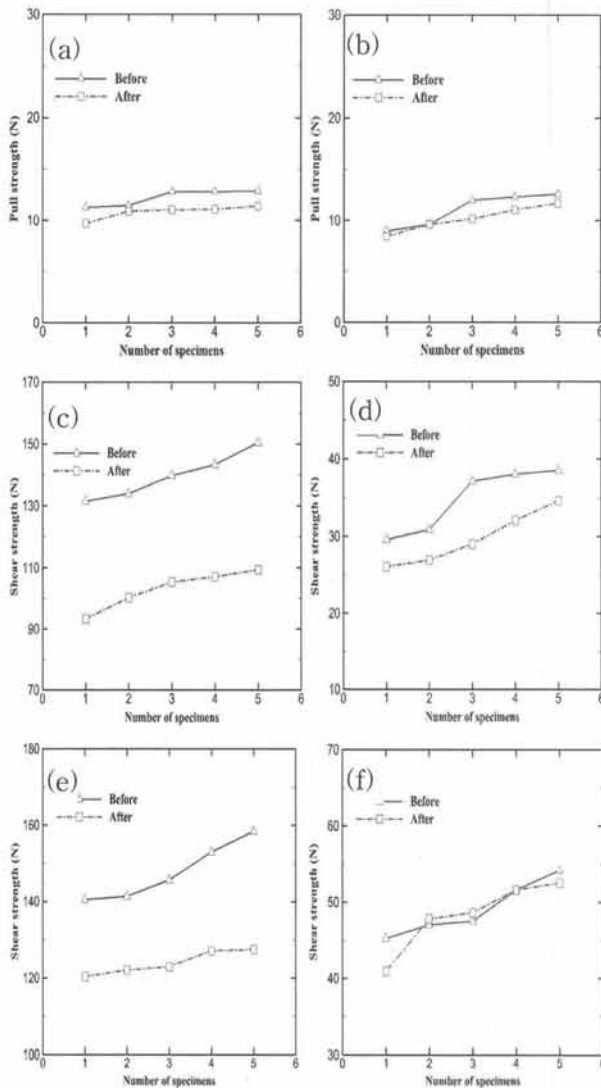


Fig. 6. Mechanical strength of before and after the thermal shock test. (a) QFP1, (b) QFP2, (c) R1 chip, (d) R5 chip, (e) AN chip, (f) HB chip.

Sand paper 및 SIC paper를 사용하여 폴리싱 (polishing)을 한 후 광학 현미경 (optical microscope)을 통해 관찰한 단면 사진을 그림 5에 나타내었다.

보이드가 접합부의 신뢰성에 미치는 영향은 작은 보이드인 경우 응력을 집중시켜 새로운 균열이 성장되어 진행되는 것을 막게되므로 결론적으로 기계적 수명에 도움을 줄 수 있다는 연구결과와 단면적의 50%가 넘는 보이드의 경우 솔더 접합부의 기계적·열적 수명에 30~45% 정도의 단축을 가져온다는 연구결과가 보고되고 있다 [8]. 기계적 강도에 영향을 미칠 수 있는 보이드 및 초기 미세균열의 유·무를 단면관찰을 통하여 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열충격 시험 후 접합강도 변화

보이드, 초기 미세균열, 접합부 형상 등 변형에 의해 기계적 접합강도값의 오차에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 시편의 솔더 접합부의 형상을 분석한 결과 그림 5와 같이 열충격 시험 전·후 각각의 시편 모두 접합부의 형상이 변형되지 않은 것을 확인하였다.

그림 6과 같이 대부분의 시편이 열충격 시험 후 기계적 접합강도가 떨어지는 결과를 확인할 수 있으며, 이는 장기 신뢰성에 큰 영향을 미치는 솔더 접합부의 열팽창계수의 차이에 의한 접합부 파괴, 솔더층, 금속 간화합물층의 특성이 변화하여 전단강도에 영향을 준 것으로 사료된다 [1].

열충격 시험 전·후 기계적 접합강도의 변화량과 감소율을 표 1에 나타내었다. AN은 25.2 N, R1은 29.7 N, HB는 1.2 N, R5는 3.3 N, QFP1은 1.4 N, QFP2는 1.0 N으로 평균 강도값이 감소하였으며, 감소율은 면적 대비 3.5 mm² 이하의 면적을 갖는 chip은 12% 이하, 12 mm² 이상의 면적을 갖는 시편 AN과 R1 chip은 각각 17%, 21%의 높은 감소율을 보였다. 면적이 커짐에 따라 기계적 접합강도가 비례하는 것과는 다르게 열충격 시험 후 불규칙한 접합강도 감소율을 보였다.

자동차 전장부품의 인쇄회로기판 (printed circuit board) 모듈 하에서의 리플로우 공정에 따른 서로 다른 chip의 온도 영향성 및 솔더 도포량의 미세한 차이에 의해 열충격 시험 후 솔더의 불규칙한 파괴에 기인한 오차범위일 수도 있으나, 전장부품 제작회사에서 확립한 정량적인 작업 공정 하에 이루어진 작업임을 감안할 때, 시편 사이즈 및 솔더의 특성에 따른 각 조건별 접합강도 신뢰성 평가 방법의 부재에 따른 접합강도 오차범위라 판단된다.

3.2 기계적 접합강도 오차범위

표 2에는 열충격 시험 전·후 각각의 시편을 통하여 기계적 접합강도의 표준편차를 나타내었으며, 평균 편차율은 열충격 시험전·후의 평균편차를 각각 계산하여 산출하였다. 그림 7에는 열충격 시험 전·후 각각 시편의 접합강도 평균편차와 평균 편차율을 비교하여 나타내었다. 그림 7과 표 2에서와 같이, 솔더 접합부 면적의 크기가 12 mm² 이상인 AN, R1 chip은 대체적

Table 1. Variations of mechanical strengths.

Specimen	Joining Area (mm ²)	Average Strength(N)		Variations (N)	Strength reduction rate (%)
		Thermal shock			
		Before	After		
AN	12.8	149.8	124.6	25.2	16.8
R1	12.0	139.8	110.1	29.7	21.3
HB	3.5	49.1	47.9	1.2	2.5
R5	3.00	35.6	32.3	3.3	9.2
QFP2	0.5	12.2	10.8	1.4	11.5
QFP1	0.3	11.0	10.0	1.0	9.0

으로 접합강도의 편차값이 증가하는 것을 확인하였으며, 상대적으로 접합 면적이 3.5 mm² 이하인 HB, R5, QFP1, QFP2의 경우 편차값이 작아지는 것을 확인할 수 있으나, 평균 편차율은 편차값과 반대의 결과를 나타내고 있다.

열충격 시험 전·후 시편의 평균 편차율은 솔더 접합부 면적이 12 mm² 이상에서는 평균 5%로 나타났으며, 3.5 mm² 이하에서는 평균 8%로 나타났다. 이는 접합면적이 커짐에 따라 평균 강도값 대비 편차는 커졌지만, 오히려 편차율은 큰 면적 (12 mm² 이상) 보다 면적 (3.5 mm² 이하)이 작아질수록 변동폭이 커지는 것을 알 수 있다. 결국 접합 면적이 미세화 될수록 접합강도의 변동폭이 커져 안정되고 재현성 있는 접합성을 확보하는 것이 어렵다는 것을 의미하고 있다.

본 실험에서는 JIS Z 3198-6과 JIS Z 3198-7의 기계적 강도 테스트 규격을 인용하여 총 60개의 시편 모두 인장 및 전단 방향, 높이, 속도를 동일하게 주어 실험을 수행한 결과 면적이 작아질수록 기계적 접합 강도 오차범위의 차이가 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 아울러 접합 면적이 작아짐에 따라 접합부의 접합상태 (접합 반응층, 미세균열, 보이드 등)를 고려하여야 하며, 기계적 접합강도 측정 시 접합부의 면적, 높이, 필렛의 형상 및 솔더의 특성을 고려한 접합강도 평가 방법이 확립되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 기계적 접합강도의 정확한 측정법의 부재로 인하여, 본 실험에 사용한 자동차 부품의 크기와 형상을 고려하면, 5~8%의 기계적 접합강도 오차범위를 적용하는 것이 타당하다고 사료된다.

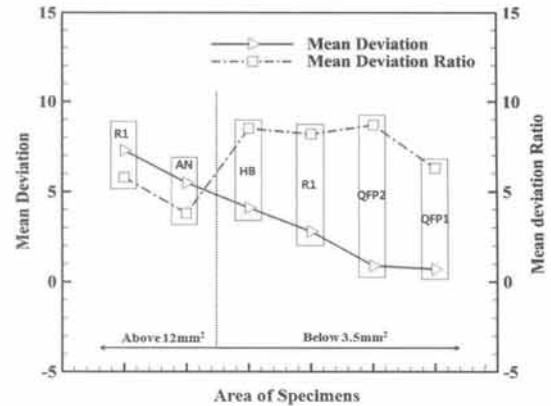


Fig. 7. Chart of mean deviation & mean deviation ratio.

Table 2. Mean deviation ratio of mechanical bonding strength.

Specimen	Thermal shock	Max (N)	Min (N)	Average Strength (N)	Standard Deviation (+)	Mean Deviation Rate (%)
AN	Before	160.4	142.5	149.8	7.7	4.2
	After	130.2	120.3	124.6	3.2	
R1	Before	150.5	131.4	139.8	7.6	5.9
	After	116.3	99.3	110.0	6.9	
HB	Before	54.2	45.3	49.1	3.7	8.5
	After	52.5	40.9	47.9	4.6	
R5	Before	38.5	31.9	35.6	3.1	8.2
	After	35.6	29.1	32.3	2.5	
QFP2	Before	11.9	9.6	10.8	1.0	8.8
	After	11.4	9.1	10.0	0.9	
QFP1	Before	12.8	11.3	12.2	0.8	6.3
	After	11.4	9.7	10.6	0.7	

향후 보다 미세한 부품을 대상으로 전단 높이, 방향, 솔더량에 따른 속도 등의 조건들로 실험을 진행하여 부품의 크기와 미세함에 따른 오차범위의 타당성과 공정조건 및 기계적 신뢰성 평가 기법을 확립하여 신뢰성 평가 기법을 제시하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 Sn-3.0Ag-0.5Cu계 무연솔더를 이용

한 자동차 전장부품을 솔더 접합부의 다양한 크기에 따라 열충격 시험 전·후 무연솔더 접합부의 기계적 접합강도를 측정하고, 그 강도값에 따라 다음과 같은 분석 결과를 얻었다.

- 1) 열충격 시험 전·후 시편 모두 보이드 및 초기 미세균열이나, 접합부의 형상이 변형되지 않은 것을 확인하였다.
- 2) 열충격 시험 후 시편별 기계적 접합강도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 열충격 시험 후 기계적 접합강도의 감소율은 솔더 접합 면적이 3.5 mm^2 이하에서는 12% 이하의 감소율을 보였으며, 12 mm^2 이상에서는 17~21%의 감소율을 보였다.
- 4) 열충격 시험 전·후 시편의 평균 편차율은 접합부의 면적이 작아질수록 커지는 경향을 보였으며, 이는 접합부가 미세화가 될수록 일정한 접합 강도를 유지하는 것이 어렵다는 것을 실험을 통하여 확인하였다.
- 5) 본 실험에 사용한 자동차 부품의 크기와 형상을 고려할 때 평균 편차율은 5~8% 범위에 있다는 것을 제시하였다.

- 6) 향후 부품의 미세화가 진행됨에 따라 기계적 강도의 오차범위를 줄일 수 있는 공정조건 및 기계적 접합 강도 신뢰성 평가 기법이 제시되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Y. J. Jeon, S. I. Son, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *J. KIEEME*, 23, 611 (2010).
- [2] Y. E. Shin and S. J. Hwang, *J. KIEEME*, 16, 549 (2003).
- [3] W. B. Hampshire, *The Search for Leadfree Solders* (Soldering & Surface Mount Technology, MCB University Press, 1993) p. 49.
- [4] S. S. Ha, J. W. Kim, and S. B. Jung, *Journal of Korean Welding Society*, 24, 457 (2006).
- [5] J. S. Park, I. J. Cho, and Y. E. Shin, *J. KIEEME*, 22, 199 (2009).
- [6] JIS Z 3198-6, Translated and Published by Japanese Standards Association (2003).
- [7] JIS Z 3198-7, Translated and Published by Japanese Standards Association (2003).
- [8] M. Yunus, K. Srihari, J. M. Pitarresi, and A. Primavera, *Microelectron. Reliab.*, 43, 2077 (2003).