

Au wire와 Al pad사이의 IMC(Intermetallic Compound) 형성에 의한 수명예측

손정민[†] · 장미순* · 곽계달**

Lifetime Estimation due to IMC(Intermetallic Compound) formation between Au wire and Al pad

Jung-Min Son, Mi-Soon Chang and Kae-Dal Kwack

Key Words: Intermetallic Compound(금속간 화합물), Kirkendall effect(컬켄달 효과), Shrinkage stress(수축압력), Thermal diffusion(열확산), Void(기공), Purple plague(자색 역병)

Abstract

During the manufacturing and the service life of Au - Al wire bonded electronic packages, the ball bonds experience elevated temperatures and hence accelerated thermal diffusion reactions that promote the transformation of the Au - Al phases and the IMC growth. In this paper, the IC under high temperature storage (HTS) tests at 175°C, 200°C, and 250°C are meticulously investigated. Thermal exposure resulted in the IMC growth, Kirkendall void and the crack of the Au - Al phases. The crack propagation occurs resulting in the failure of the Au - Al ball bonds. As the IC was exposed at the high temperature, decreased in the lifetime.

1. 서 론

Chip의 interconnection 패키지 공정은 주로 3가지 기술로서 Wire Bonding(WB), Tape Automated Bonding(TAB) 그리고 Flip Chip(FC)기술이 있다. 이 기술들 중 wire bonding 이 90%이상 사용되어진다. Wire bonding은 chip과 lead frame을 wire로 연결하는 공정으로 ball-wedge bonding과 wedge-wedge bonding두 종류로 분류되는데 각각 Thermosonic bonding(T/S), Ultrasonic Bonding(U/S)방법이 사용된다. 통계적으로 wire bonding에 의해 연결된 wire-pad사이의 고장은 전체 패키지 신뢰성의 25%를 차지 할 만큼 영향이 크다. Intermetallic Compound(이하 IMC 로 칭함) wire-pad간에 형성되어 초기 금속간 접합에 중요한 부분이지만, 계속 성장하면 고장을 일으키는 금속간 화합물로

서 1970년대 Philofsky⁽¹⁾에 의해 연구된 이후 지금까지도 여러 방법으로 연구 되어져 왔다. 2002년 European Directive에서 RoHS (Restriction of Hazardous Substances)가 발효됨에 따라 lead free solder나 halogen free epoxy가 포함된 친환경 물질을 사용하게 되었는데, 이 새로운 물질 또한 패키지 공정시 높은 온도를 필요로 하기 때문에 IMC에 직접적인 영향을 끼친다.⁽²⁾ 또한 T/S에 의한 ball-wedge bonding은 T/S 공정시 고온이 발생하는데, 이것 또한 패키지 공정시 IMC성장을 가속화 시키게 된다.

패키지 공정시 IMC성장가속을 줄이기 위해 U/S에 의한 wedge-wedge bonding이 있다. U/S는 초음파로 wire-pad를 접합하여 패키지 공정시 IMC성장은 없지만 방향성이 있고, 양산성이 떨어져 IC 업체 사이에서는 T/S공정이 주로 사용되고 있다. 최근에는 wire 에 Palladium(Pd)을 첨가 시켜 wire-pad간의 IMC의 성장을 늦추는 기법도 사용되고 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 현재 많은 IC package 제조업체

[†] 손정민, 한양대학교 전자전기컴퓨터 공학부

Email: ison2080@naver.com

TEL: 010-7295-7179

* 한양대학교 신뢰성분석연구센터(RARC)

** 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부

들이 채택하는 wire bonding에 의해 만들어진 IC의 Au wire와 Al pad 간에 형성되는 IMC를 고온 가속시험을 통해 IC의 고장모드를 알아내고 수명을 예측 하고자 한다.

2. IMC 형성 메커니즘

일반적으로 IC는 paddle위에 신호를 처리하기 위한 chip(die)이 epoxy resin 으로 접착 되어 있으며 Fig. 1 에서처럼 chip의 신호전달을 위해 lead frame과 chip위의 Al pad가 Au wire로 연결되고 그 사이에 IMC가 형성 된다. 이들 모두 epoxy로 제작된 epoxy molding compound(EMC)에 packaging 되어 보호된다.⁽³⁾

IMC 형성 메커니즘을 Fig. 2에서 자세히 설명 하였다. 그림처럼 wire bonding 과정에서 Au wire와 Al pad는 Phase1처럼 완전히 접합하게 되고, thermal stress를 받아 thermal diffusion 된 Au, Al 두 원자는 일정한 MOL비율로 결합하여 IMC를 형성하게 된다. 짧은 시간 안에 AuAl, AuAl₂(Phase2)의 화합물이 형성하게 되고, 다음 단계로 Au₈Al₃ 화합물(Phase3)로 구성되어 있는 층이 Al원자가 거의 없어 질 때까지 결합하여 두꺼워 진후 Au₈Al₃ 화합물은 몰비가 Au원자가 더 높은 Au₄Al 화합물로 변하게 하기 위해 Au원자와 빠른 속도로 결합하게 된다. 이때 Au 원자가 Au₄Al 화합물로 확산이 되면서 빈공간이 생기는데 이것을 kirkendall void라고 한다.⁽⁴⁾

이렇게 IMC가 형성되면서 IMC의 특성상 저항과 부피가 변하게 되는데 저항값의 변화를 Table 1에 나타내었다. 표에서 처음 Au(2.35 ρ) Al(2.65 ρ)에 비해 AuAl₂(50 ρ)등 저항이 20배 이상 증가된 것을 볼 수 있다. 또한 IMC의 구성이 변할 때마다 IMC의 색깔이 변하는걸 알 수 있는데 IMC형성 시 처음 짧은 시간동안 AuAl₂가 되는데 AuAl₂의 저항을 가장 크고 색깔이 purple색을 띄고 있어서 일반적으로 Au wire와 Al pad 사이에 생기는 IMC를 purple plague라고 부른다.⁽⁵⁾

또한 IMC성장 과정에서 Au₄Al 화합물은 열에 의해 이온화된 epoxy의 Br과 화학반응을 일으켜 AlBr₃로 변하게 되어 corrosion을 일으키게 되고, AlBr₃과 O₂가 결합하여 Fig. 1에서 처럼 oxidation을 일으키면서 IMC와 마찬가지로 wire-pad 사이의 저항율이 커지게 된다.⁽⁶⁾

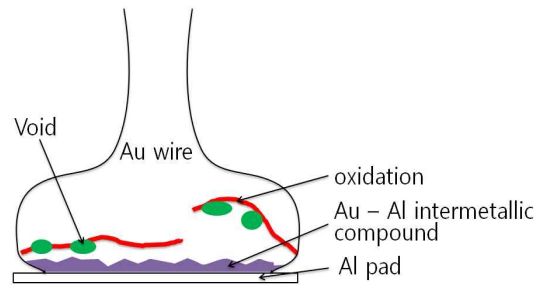


Fig. 1 The cross section of ball bond

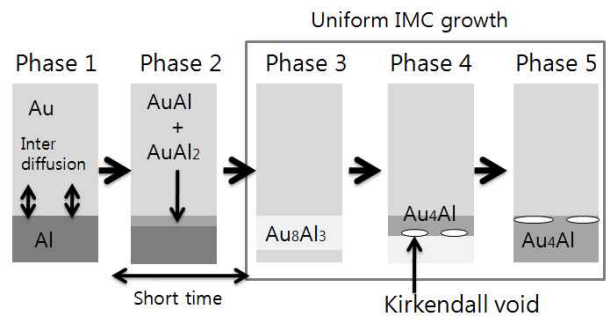


Fig. 2 Process of kirkendall effect

Table 1 Data for the resistivity of IMC

Phase	Composition (at.%Au)	Colour	Resistivity ρ (mΩ cm)
Al	0-0.06	Silver	2.65
AuAl ₂	32.92-33.92	Purple	50
AuAl	50	White / grey	12.4
α-Au ₂ Al	66.3-66.7	Light brown	31.1
β-Au ₂ Al	65.1-66.1	Light brown	—
γ-Au ₂ Al	65-66.1	Light brown	—
α-Au ₄ Al	65-66.8	Matte yellow	37.5
β-Au ₄ Al	80	Matte yellow	—
Au ₅ Al ₂	71.43	White / grey	25.5
Au	84-100	Yellow	2.35

IMC가 성장하면서 여러 kirkendall void가 생기게 되는데 이때 IMC의 열팽창 계수 차이에 의해 IMC간 부피 변화율의 차이가 생기게 된다. IMC의 몰수비가 변화할 때 수축이 되면서 여러 kirkendall void에 shrinkage stress을 가하게 된다. 압력을 받은 각각의 kirkendall void는 void line을 형성하면서 연결되는데 이것이 crack으로 발전된다. 그렇게 지속적으로 crack이 확산이 되면 저항율이 급격히 커져 wire-pad간에 open이 발생한다.

다.⁽⁷⁾

위의 고장 메커니즘을 FTA(Fault Tree Analysis)를 이용하여 Fig. 3로 나타내었다. 그림에서 IMC는 wire와 pad의 Au-Al 두 금속이 thermal stress에 영향을 받아 두 금속의 원자에너지가 활성화되어 원자가 thermal diffusion(열확산)을 하게 되면서 IMC가 형성이 되어 저항율이 커지게 되고 IMC성장 과정에서 void/crack와 corrosion/oxidation 반응이 생기면서 저항율이 더욱더 커지면서 open을 일으키게 된다.

3. IMC 성장 가속 시험

IMC는 thermal stress받아 thermal diffusion(열확산)되어 형성이 되기 때문에 IMC 성장을 가속시키기 위해 고온저장시험(High Temperature Storage, HTS)시험을 실시하였다.

3.1 시료선정 및 고장판정기준

여러 전자제품의 IC중 N사의 부품을 시료로 선정하였다. 이 시료는 비디오 AFE(Analog Front End)로 쓰이는 128pins IC로서 Table 2처럼 99% 이상의 순도를 가진Au으로 된 wire와 Al으로 된 pad를 사용하고 있다. 또한 IMC 성장을 억제시키는 Palladium(Pd)가 함유되어있지 않아서 시험에 적합할 것으로 보인다. 그리고 시료의 고장 판단 기준은 wire-pad간의 저항 값이 1kΩ 이상 될 때 chip의 신호전달에 영향을 주어 오동작을 일으키므로 고장기준을 저항 값이 1kΩ 이상 일 때로 정하였다.

3.2 시험장치 및 시험방법

시험은 고온저장시험(HTS)으로 고온의 환경에 IC를 노출시켜 IMC성장을 가속화시키는 것으로 하였다. 175℃, 200℃, 250℃의 온도의 챔버에 각각 10개의 시료를 넣어 고온의 환경을 유지하였다.

3.3 측정 방법

저항 측정방식은 시험 중 7일(168h)을 주기로 멀티 테스터로 저항을 측정 하되 각각 시료의 GND핀 사이의 저항을 측정하였다. GND핀은 서로 chip안에서 short되어있고 회로 내의 컨덕터 같은 소자를 거치지 않기 때문에 비교적 정확한

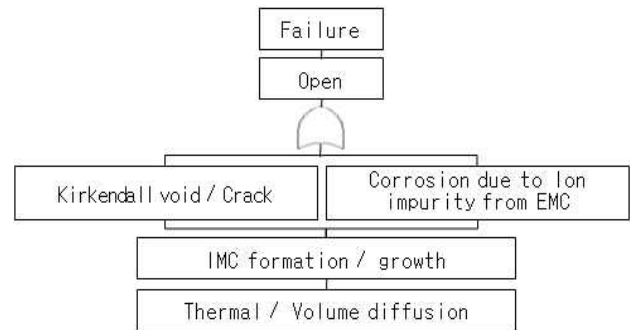


Fig. 3 Failure mode / Mechanism of IMC using FTA

Table 2 Parts Specification

Brand	Package Type	Wire(Au)	Pad(Al)	Wire bonding thickness
N	PQFP 128 pins	99.99%	99.99%	54μm

wire-pad간의 저항을 측정 할 수 있다. 그리고 open이 된 시료를 광학 현미경 (Optical Microscope, OM)과 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 Au wire-Al pad간의 ball bond부위를 관찰하였고, EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)로 IMC의 성분을 분석하였다.

3.4 시험 관측 결과

3.4.1 시험 관측 결과

고온저장시험 중 전기적 저항값의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 250℃ 고온에 놓인 시료를 7일(168h) 마다 측정한 결과 시험 초기 14일(336h) 동안 IMC가 형성이 되면서 2Ω내외로 저항이 늘어났다. 약 27일(648h)이 지난 후 void의 수가 늘어나면서 crack이 발생하기 시작하여 저항이 급격이 올라 1kΩ이상 오른 것을 알 수 있다. 시험시간이 약 49일(1,176h)이 지난 후 crack이 확산되어 저항이 10MΩ이상 늘어나 open이 되었다. 또한 200℃와 175℃에서도 각각 약 63일(1,512h), 98일(2,352h)이 지난 후 저항이 1kΩ이상 올랐으며, 약 84일(2,016h)이 지난 후 200℃에서도 저항이 10MΩ이상 늘어나 open이 되었다. 그리고 저항값이 1kΩ이상 되면 IC가 오동작을 일으키기 때문에 약 98일(2,352h)이 지난 후 175℃에서의 저항이 1kΩ이상인 후 가속 시험을 종료하였

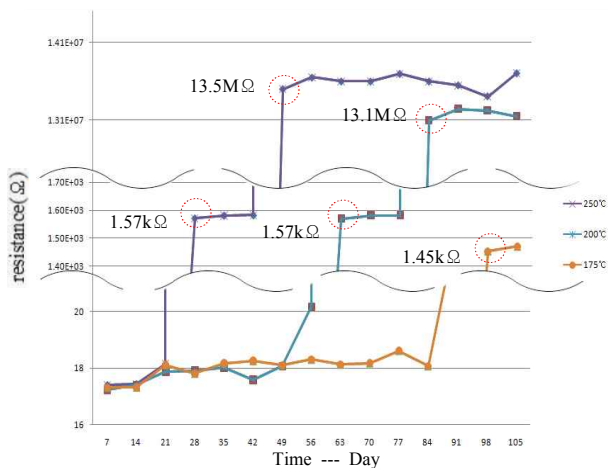


Fig. 4 Electrical resistance after HTS

다.

HTS시험을 종료한 후 open이 된 시료를 추출하여 Fig. 5 (a)~(d)에 나타내었다. 그림(a)의 고장 시료는 OM으로 (b)~(d)의 고장시료는 SEM으로 촬영 하였다. (b)는 고장시료를 707배 확대한 것으로 wire-pad의 전체적인 모습을 관찰할 수 있고, (c)와 (d)는 각각 고장시료를 1,000배, 3,000배 확대한 사진으로 ball bond에 IMC가 형성되어 있는 것과 여러 void를 관찰 할 수 있었다. 또한 crack이 확산하여 wire-pad사이가 거의 분리 되어 있음을 알 수 있었다. 그리고 ball bond에 형성된 IMC를 EDX로 구성요소를 분석한 결과 Fig. 6에서처럼 IMC가 Au와 Al으로 이루어져 있음을 알 수 있었다.

3.4.2 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검토

가속수명시험을 통하여 수집된 데이터에 적합한 수명분포를 가정하기 위하여 와이블, 지수, 대수정규분포의 우도함수(likelihood function)값을 비교하여 Table 3에 나타내었다. 표에서 3개 수명분포의 우도함수 값이 가장 큰 와이블 분포가 가장 적합한 수명 분포로 나타났다.

가속수명시험에서 관측된 고장 시간을 시험조건별로 와이블 확률용지에 타점한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 수명분포 추정선이 각 시험조건별로 서로 평행하게 나타난 것을 볼 수 있으며, 이로부터 와이블 분포가 적합하고 시험조건 사이에 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.

3.4.3 가속수명시험 모델

가속 모형은 IC의 수명과 가속변수인 온도에

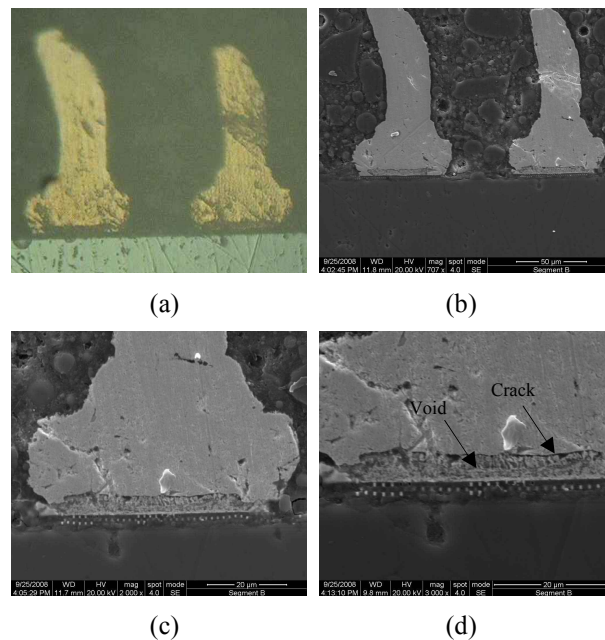


Fig. 5 IMC formation between Au wire and Al pad using OM/SEM

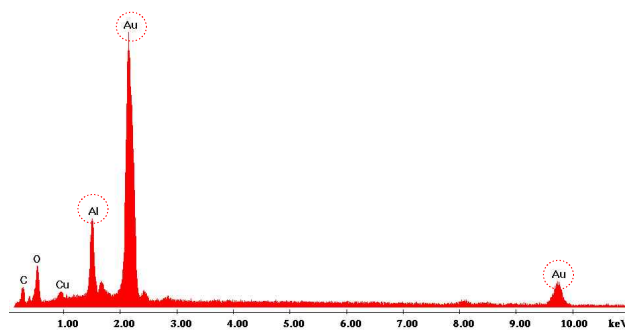


Fig. 6 Elements analysis of IMC using EDX

따른 가속수명 추정 모델로 온도 스트레스에 관한 수명시험에서 가장 널리 사용되는 아레니우스 모델을 사용하였다.

$$\eta(T) = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

여기서 T는 각 스트레스에 대한 절대온도이며 C는 재료, 구조 및 시험방법 등에 의한 상수이고 B는 활성화 에너지를 볼츠만상수 K(8.617385 × 10⁻⁵ eV · K⁻¹)로 나눈 값이다.

Table 3 Conformance result of life distribution

Distribution	Weibull	Exponential	Lognormal
Likelihood function	-196.25368	-250.74002	-197.56117

3.4.4 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계

와이블 분포와 수명-스트레스 관계식을 식 (1)로 가정하고, ALTA소프트웨어를 이용하여 가속수명시험으로 얻어진 데이터를 분석한 결과 다음과 같다.

$$\beta = 10.9690, \quad B = 3218.2473, \quad C = 1.9967$$

따라서 IC의 가속수명시험에 의한 수명-스트레스 관계식 (2)과 가속계수 (3) 및 B_{10} 수명식 (4)은 다음과 같이 각각 추정 될 수 있다.

$$\eta(T) = 1.9967 \cdot e^{\frac{3218.2473}{T}} \quad (2)$$

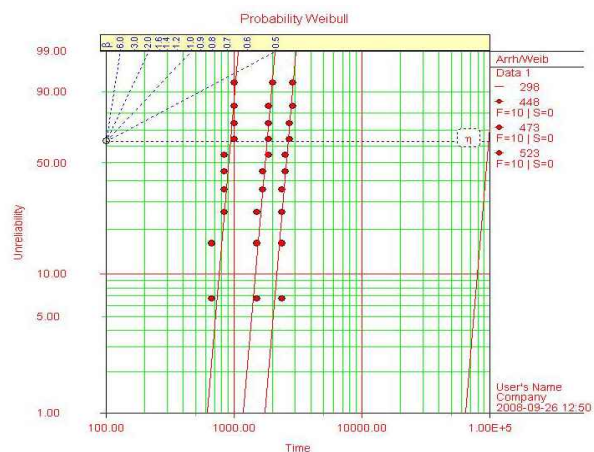
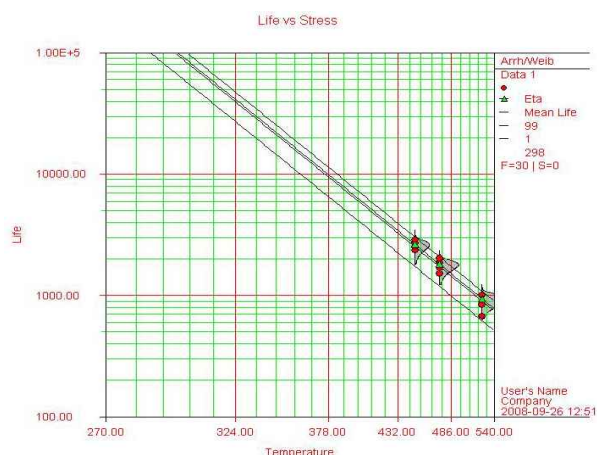
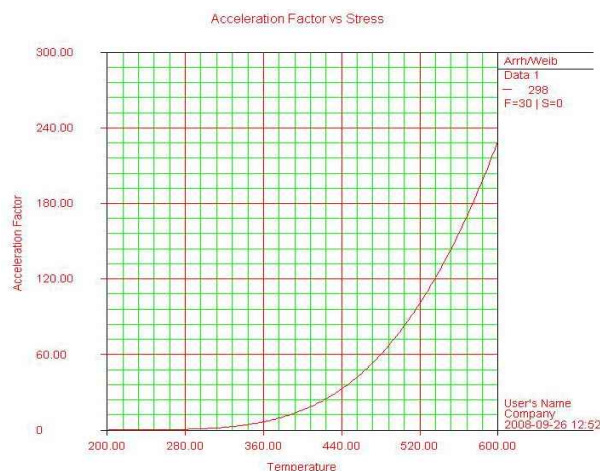
$$AF = \frac{C e^{\frac{B}{T_u}}}{C e^{\frac{B}{T_a}}} = e^{\left(\frac{3218.2473}{T_y} - \frac{3218.2473}{T_A} \right)} \quad (3)$$

$$B_{10} = \eta \cdot (-\ln(0.9))^{\frac{1}{10.9690}} \quad (4)$$

3.4.5 시험결과의 해석

IC의 thermal stress에 대한 수명-스트레스관계를 도식하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 온도에 따른 IC의 수명 분포가 상한선과 하한선에 잘 분포하는 것을 알 수 있다. 온도에 따른 가속계수의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 온도에 따른 가속계수의 변화를 살펴보면 온도가 높을수록 가속계수가 식 (3)과 같이 지수함수적인 형태로 증가하는 것을 알 수 있는데 이를 통해 Wire-pad 사이의 IMC가 온도가 상승할수록 성장이 가속화되어 고장이 발생하는 데 걸리는 시간이 짧아진다는 것을 알 수 있다.

온도에 따른 B_{10} 수명의 변화는 Fig. 10에 나타내었는데, 온도가 증가할수록 B_{10} 수명이 감소하는 것을 알 수 있다. 가속수명시험 결과 일반적인 IC사용 환경인 상온 (25℃)에서 수명은 약 3,320일(79,684시간)로 추정할 수 있었고, 10℃가 높은 35℃에서의 수명은 2,338일(56,117시간)로

**Fig. 7** Probability Weibull**Fig. 8** Life vs. Stress_temp**Fig. 9** Acceleration Factor vs. Stress

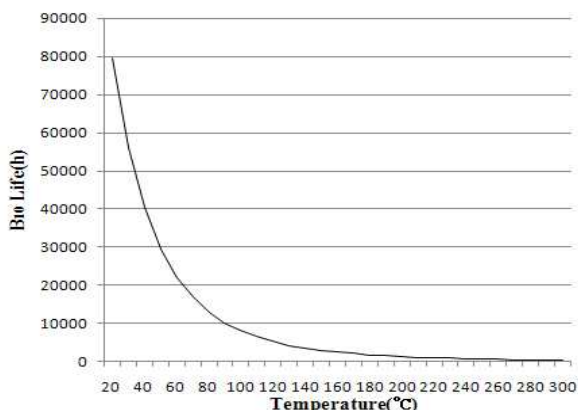


Fig. 10 B_{10} Life vs. Stress

982일(23,567시간)이나 줄어 든 것을 알 수 있다. 그러므로 IMC 고장을 예방하기 위해서는 25°C 이하에서 IC사용을 권장한다.

4. 결 론

본 연구에서는 IC에서의 wire & pad 사이의 IMC성장에 따른 고장 메커니즘을 재현할 수 있도록 온도를 가속인자로 정하여 가속수명시험을 실시하였다. 시험 결과 IMC는 높은 온도에 노출될 때 더욱 성장이 빨라지며 IMC의 특성과 oxidation, void에 의해 저항이 늘어나고, 결국 crack확산으로 인해 wire-pad사이가 open 되었다. 또한 측정 데이터와 통용되는 기준수명시간을 바탕으로 IC의 수명예측결과 B_{10} 수명이 일반적인 상온(25°C)에서 약3320일(79,684시간)로 예측되었고, 10°C가 높은 35°C에서의 수명은 2,338일(56,117시간)로 982일(23,567시간)이나 줄어 든 것을 알 수 있다. 그러므로 IMC 고장을 예방하기 위해서는 25°C이하에서 IC사용을 권장한다.

참고문헌

- (1) Philofsky, E., "Intermetallic formation in Gold-Aluminum systems", Solid State Electronics, Vol. 13, (1970), pp. 1391-1399
- (2) Gallo A., Dexter Electronic Materials, 2000, "Green Molding Compounds" Technology Information Technical Paper,
- (3) K. Toyozawa, K, Fujita, S. Minamide, T.

- Maeda, 1990, Development of copper wire bonding application technology, IEEE Trans. Compon. Hybr. Manuf. Texhnol. 13 (4) 762-767
- (4) Uno T, Tatsumi K, Ohno Y.1992 JSME Joint Conference on Elect. Pack, . p. 771.
- (5) Uno T, Terashima S, Onoue K, Tatsumi K. 1998. Sym. on Microelect., p. 591.
- (6) Naren J. Noolu 2004 Degradation and failure mechanisms in thermally exposed Au - Al ball bonds, IEEE Trans.
- (7) Imasato E., Araki M., Shimizu I., Ohno Y, 1998, "Effect of Mold Resin of Reliability in Gold-Aluminum Bonding", Proceedings of 2nd Electronics Packaging Technology Piscataway, NJ, USA, IEEE p. 338-44