

열경화성 잉크 에폭시의 두께 변화에 따른 마이크로 퓨즈 용단의 최적 조건

김도경^{1,a}, 황능환¹, 길태홍¹, 이수화¹, 서대만¹, 김민호¹, 김종식¹

¹ ㈜에스엠 하이테크 기술연구소

Optimum Condition of Micro Fuse Fusing as a Function Changed Thickness of Thermosetting Ink Epoxy

Do-Kyeong Kim^{1,a}, Neung-Hwan Hwang¹, Tae-Hong Kil¹,
 Soo-Hwa Lee¹, Dae-Man Seo¹, Min-Ho Kim¹, and Jong-Sick Kim¹

¹ Department of Technical and Research, SM HI-TECH Co., Ltd., Ulsan 689-870, Korea

(Received September 1, 2014; Revised September 24, 2014; Accepted September 24, 2014;)

Abstract: For the semiconductor device safety from over current in the digital electronic circuit system must be surely designed that it's surface mount type micro fuse device. In this paper, We has analysed to the fusing character of micro fuse as a function changed thickness of thermosetting ink epoxy. To the change of thermosetting ink epoxy thickness with in production lot, in the electrically character (fusing test in the 2 multiple over current and 10 multiple over current, surface temperature test in the 1.25 multiple over current) of micro fuse has been tested. According to the electrically character result, changed thickness of thermosetting ink epoxy in designed micro fuse withheld direct effect in both end resistance changes. Also, because high thermal energy in the micro fuse test of over current was occurred to effect such as thermal runaway and explosion. Therefore, screen printing process in the design of micro fuse using thermosetting ink epoxy is very important for production quality improvement.

Keywords: Micro fuse, Thermosetting ink epoxy, Screen printing, Thickness, Explosion

1. 서 론

디지털 시스템의 전자회로에 설계되는 R·L·C 수동 소자와 능동소자 중 마이크로 퓨즈는 전자기기의 안전을 위해서 반드시 설계되어야 하는 매우 중요한 전자 소자이다. 일반적으로 와이어 본딩 구조의 표면 실장

형 (surface mount type) 마이크로 퓨즈는 전원부 또는 반도체 소자의 회로 구성 간에서 발생할 수 있는 이상전류 (abnormal current)로부터 타 전자소자를 보호하기 위한 목적으로 설계하고 있다 [1,2].

특히, 직류 전압 5 V 미만을 사용하는 소형화된 전자 회로 시스템이라도 일부 회로 구간에서 높은 전류를 요구할 수 있는 회로 설계가 필요할 수 있다. 정격전류 이상의 과잉전류 (over current)가 마이크로 퓨즈 소자에 통전 시 용단이 발생됨과 동시에 방폭 (explosion) 현상과 같은 열 폭주 (thermal runaway)는 마이크로 퓨즈 설계에서 반드시 해결해야 할 문제이다. 마이크로

a. Corresponding author; dkkim@shmhitech.com

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

퓨즈가 용단 시 짧은 시간에 발생하는 에너지 밀도는 패키지 내부에서 매우 크게 포화 (saturation)된다. 그리고 저 (low)전류보다 고 (high)전류에서 방폭 현상은 빈번하게 발생된다. 방폭 에너지는 열에너지와 함께 동반되는 에너지로서 소자의 사이즈가 작을수록 방폭 확률은 증가 될 수밖에 없다. 마이크로 퓨즈 용단 시 방폭 현상을 해결하기 위해서 열경화성 잉크 에폭시를 이용한 스크린 프린팅 공정에서 여러 가지 방법이 고안되고 있다.

첫 번째로 패키지 내부에 여유 공간을 설계하여 순간적으로 에너지 밀도가 증가할 때 발생하는 알짜력 (net force)을 완충시키는 방법과 두 번째로 분자 결합 구조 특성이 매우 우수한 열경화성 잉크 에폭시를 스크린 프린팅 시 사용하는 것이다. 세 번째로 가용체로 사용되는 금속의 녹는점보다 더 높은 온도에서 견딜 수 있는 열경화성 잉크 에폭시를 사용하는 세 가지 공정 방법이 제안되고 있다. 우수한 분자 결합 구조 특성과 가용체의 녹는점보다 더 높은 온도에서 견딜 수 있는 열경화성 잉크 에폭시를 마이크로 퓨즈의 패키지로 사용한다는 것은 가용체가 용단 시 발생하는 방폭 에너지를 충분히 차단할 수 있다는 것이다.

본 논문은 동일한 생산 로트 (production lot)의 스크린 프린팅 공정이라도, 최종 검사 과정에서 마이크로 퓨즈의 열경화성 잉크 에폭시 두께 변화가 전기적 특성에 어떠한 영향이 있는지 분석하였다. 그 분석 방법은 당사 제품의 시험 규격에 의하여 정격전류의 2.5배와 10배의 과잉전류에서 퓨징 특성과 정격전류의 1.25배의 과잉전류에서 표면 온도를 중심으로 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 마이크로 퓨즈 용단 시 방폭 에너지의 밀도 확률이 큰 시간 지연 (time delay) 마이크로 퓨즈로 고정하였다. 실험을 위하여 정격전압 125 V와 250 V에 해당하는 정격전류 1.25 A 마이크로 퓨즈를 분석하였다 (모델명 : N6125 AF125, N6125 AF250). 초음파 방식의 와이어 본딩 장비 (ASM사 Eagle 6)로 순차적인 공정(sequence process)에 의하여 와이어 본딩하였고, 광학 현미경을 사용하여 그림 1에 나타내었다 [3].

스크린 프린팅 공정 시 불량률의 최소화를 위해서 와이어의 높이는 0.3 mm 이하의 와이어 본딩이 필요하다. 그리고 와이어 본딩 시 모세관 (capillaries)의 선택은 와이어 본딩력에 영향을 준다 [4].

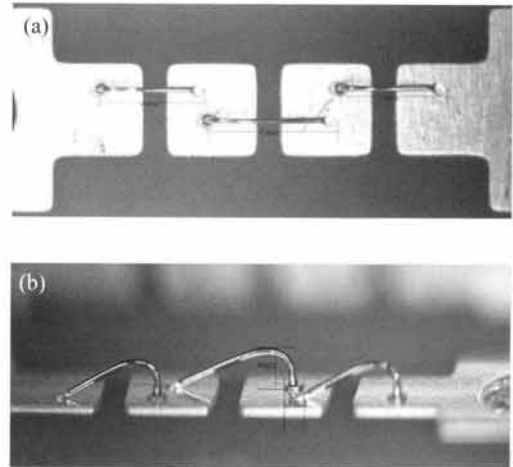


Fig. 1. Wire bonding process picture of micro fuse for time delay. (a) front face and (b) side face.

또한, 마이크로 퓨즈의 정격전압과 정격전류는 와이어 길이와 지름에도 영향을 받지만, 와이어의 높이도 매우 신중하게 고려해야 한다. 이는 와이어의 높이에 따라 장력이 변화되며 저항치 변화에 영향을 준다. 더불어, 퓨징 특성의 변화에도 큰 오차가 발생되기 때문이다. 와이어 길이와 지름의 변화에 따른 금속 진도체를 사용한 마이크로 퓨즈의 문턱 퓨징 전류 (threshold fusing current)에 대한 최적화의 결정 방법도 보고되었다 [5]. 그리고 금속의 성질이 다른 이중 접합에서 오믹 저항 (ohmic resistance)은 마이크로 퓨즈의 전기적 신뢰성에 큰 영향을 준다. N6125 마이크로 퓨즈의 두께 기준인 1.2 mm 두께 까지 공정을 위해서 열경화성 잉크 에폭시를 반복적인 스크린 프린팅 공정 방법의 과정을 그림 2에 나타내었다.

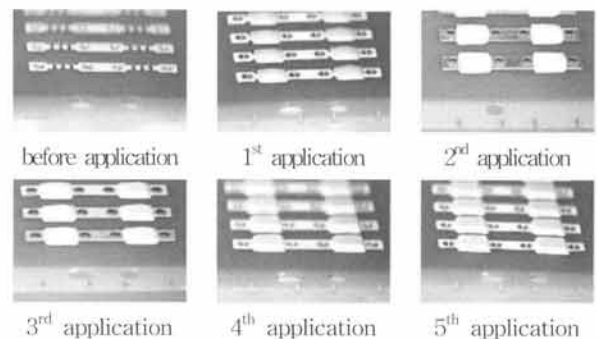


Fig. 2. Screen printing process picture of micro fuse for time delay.

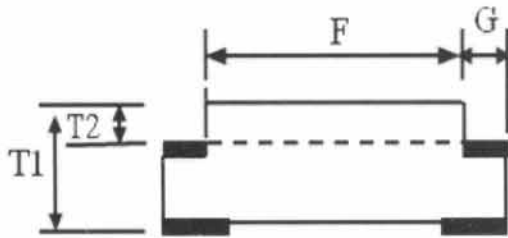


Fig. 3. Contour height (T1) measurement of micro fuse for time delay.

Table 1. Design basic dimension of micro fuse for N6125 time delay.

unit : mm				
Division	T1	T2	F	G
Dimensions	1.2	0.5	4.5	0.8

Table 3. Thickness inspection and both end resistance after screen process parameter of micro fuse for time delay.

Division	Height(mm)	Both end Resistance(mΩ)
Sample 1	1.20 below	95~97
Sample 2	1.20~1.24	95~97
Sample 3	1.25~1.30	95~98
Sample 4	1.30 excess	96~99

동일한 스크린 프린팅 공정이라도 열경화성 잉크 에폭시 두께 변화가 발생할 수 있다. 스크린 프린팅 공정 후 출하 검사 과정을 위하여 날개의 마이크로 퓨즈로 절단 공정을 하였다. 제작 완료된 마이크로 퓨즈의 외곽 높이의 측정 기준을 그림 3에 나타내었다. 마이크로 퓨즈의 높이 측정 기준은 소자 밑면부터 열경화성 잉크 에폭시 상단 부분 (T1)까지 하였다.

표 1은 N6125시간 지연 마이크로 퓨즈의 설계를 위한 표준 치수를 보여준다. 표 2와 같은 방법으로 마이크로 퓨즈의 높이는 버니어 캘리퍼스 측정에 의하여 구분하여 표 3에 나타내었다. 그리고 Tektronix사의 디지털 멀티 테스터기 (모델명 : DMM 4040)를 사용해서 마이크로 퓨즈의 양단 저항 측정을 하였다. 측정 결과, 열경화성 잉크 에폭시의 높이 변화가 양단

Table 2. Thickness measurement of micro fuse for designed time delay.

Division	Measurement Sample	Measurement Photo
Sample 1		
Sample 2		
Sample 3		
Sample 4		

저항에 크게 영향을 주지 않은 것을 확인할 수 있었다. 마이크로 퓨즈의 용단시험에서 양단의 저항치는 매우 중요하다고 말할 수 있다. 그 이유는 금속 결합 구조론을 설명할 때 속박 전자 (bound electron)와 자유 전자 (free electron)로 분류할 수 있는데, 전류 전도에 기여하는 자유 전자가 외부 에너지의 영향으로 불규칙한 운동을 함으로써 열에너지가 발생하게 된다. 그 영향으로 마이크로 퓨즈 가용체의 녹는점 이상이 되면 용단되는 것인데, 저항치와 인가되는 전류에 비례하여 열에너지가 발생하게 되는 것이다. 자동화 방법에 의해서 대량으로 생산되는 마이크로 퓨즈의 합

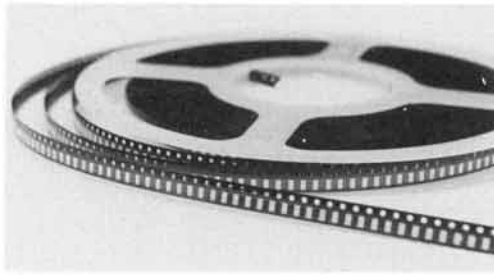


Fig. 4. Wire bonding structure type micro fuse of completed reel packing process after inspection resistance.

격품의 기준은 가용체 길이와 지름에 의해 변화되는 양단 저항치를 매우 중요하게 고려하고 있다. 와이어 본딩 전 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해서 예상되는 저항치를 구하고, FR-4 보드의 구리 금속에 온도급 처리된 패드에 와이어 본딩 후 나타나는 실제 저항치를 분석한다.

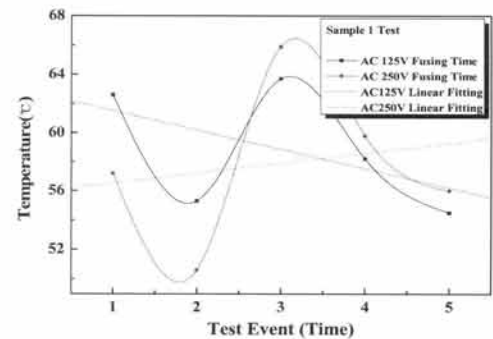
이 후 스크린 프린팅과 절단 공정 후에 변화되는 저항치를 분석하기 위해서 자동화 방법을 이용해서 릴 (reel) 포장 전 저항 검사를 마지막으로 수행한다. 이 모든 시험 조건은 당사의 시험 기준이며, 이에 부합되는 마이크로 퓨즈만을 선정하여 최종 출하를 한다. 포장 완료된 최종 출하제품 사진을 그림 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

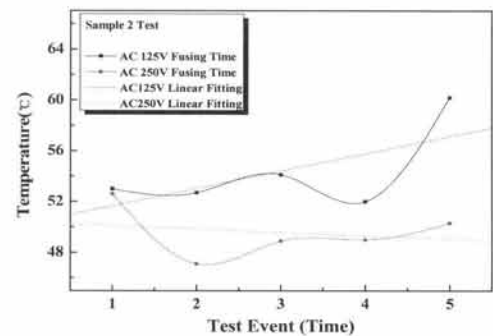
본 절에서는 열경화성 잉크 에폭시의 스크린 프린팅 공정 후 열경화성 잉크 에폭시 두께 변화가 전기적 특성에 미치는 영향을 논의하고자 한다. 먼저 잉크 에폭시 두께별로 무작위 추출된 마이크로 퓨즈에 대해서 1.25배 과잉전류에서 표면온도 검사를 하고, 동일한 마이크로 퓨즈에 대하여 정격전류의 2.5배와 10배의 과잉전류에서 마이크로 퓨즈의 퓨징 테스트 결과를 논의하였다. 2.5배와 10배의 과잉전류에서 측정된 평균값으로 계산된 퓨징 결과에 대하여 1차 선형 피팅 (linear fitting)을 한 후 출력된 그래프와 비교분석하였다. 그리고 정격전류의 10배 과잉전류에서 퓨징 시험 후 열경화성 잉크 에폭시의 패키지가 손상되는지 분석하였다.

3.1 1.25배 과잉 전류에서 표면온도 테스트

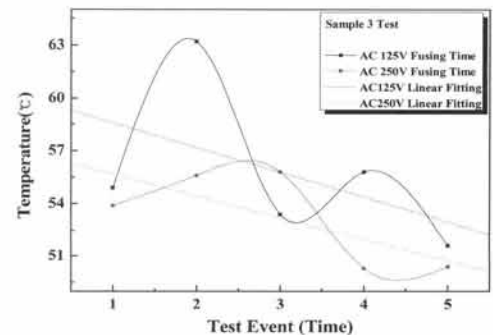
첫 번째 시험으로서, 마이크로 퓨즈의 표면온도 테스트 결과를 그림 5에 나타내었다.



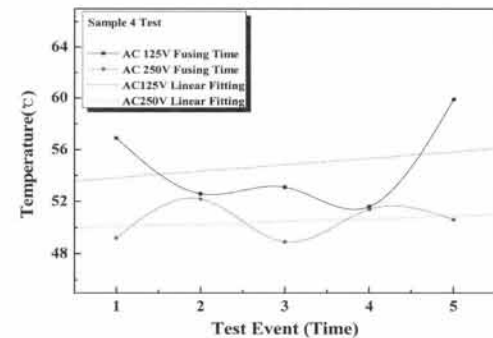
(Sample 1)



(Sample 2)



(Sample 3)



(Sample 4)

Fig. 5. Surface temperature (1.5625 A, during 5 minute measurement) analysis of micro fuse for designed time delay.

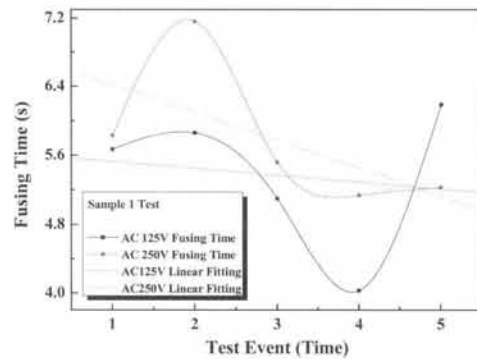
마이크로 퓨즈의 표면온도는 와이어 지름과 반비례하고 길이에 비례된다. 전류와 와이어 지름은 마이크로 퓨즈의 방폭과 밀접하다. 정격전류가 증가할수록 와이어 지름도 같이 증가하지만 저항은 감소된다. 표면 실장형 마이크로 퓨즈의 표면 온도는 전기안전인증규격 (K60127-4)기준에 의해서 정격전류가 6.3 A 이하인 경우 75℃와 6.3 A 이상인 경우 95℃를 초과하지 않도록 설계해야 한다 [6]. 샘플 1의 마이크로 퓨즈의 평균적인 표면온도에서 125 V는 58.56℃, 250 V는 57.9℃ 결과를 얻을 수 있었다. 샘플 2의 마이크로 퓨즈의 평균 표면온도에서 125 V는 54.82℃, 250 V는 50.46℃ 결과를 얻을 수 있었다. 샘플 3의 마이크로 퓨즈의 평균 표면온도에서 125 V는 55.78℃, 250 V는 53.08℃ 결과를 얻었다. 샘플 4의 마이크로 퓨즈의 평균 표면 온도에서 125 V는 54.82℃, 250 V는 50.46℃ 결과를 얻었다. 표면온도 테스트에서 온도가 매우 높을 경우, 마이크로 퓨즈의 열경화성 잉크 에폭시의 표면 탈색 현상이 발생되기 때문에 관찰할 필요가 있다.

3.2 2.5배 과잉전류에서 퓨징 테스트

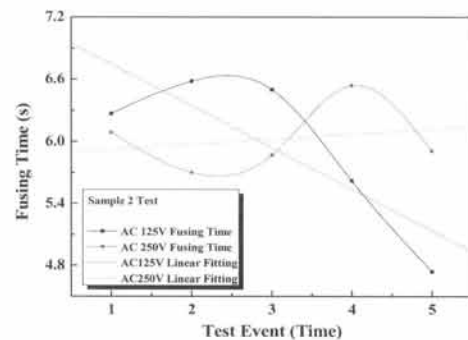
두 번째 시험 방법으로서 마이크로 퓨즈의 2.5배 퓨징 테스트 결과를 그림 6에 나타내었다. 정격전류 2.5배의 과잉전류 테스트는 5개의 마이크로 퓨즈를 대상으로 하였다. 샘플 1의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 5.37s, 250 V는 5.976s 결과를 얻었다. 샘플 2의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 5.942s를, 250 V는 6.022s 결과를 얻었다. 샘플 3의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 6.168s, 250V는 6.018s의 결과를 얻었다. 샘플 4의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 5.904s초, 250 V는 5.768s를 얻었다. 퓨즈 가용체에 전류가 통전 시 퓨즈가 용단되는 그 시간 동안 전류의 세기는 항상 일정하다. 전류의 세기에 따라 그 시간이 결정된다고 볼 수 있다. 전류는 전하의 흐름이므로 ΔQ 라고 정의할 것이다. Δt 시간 동안 ΔQ 전하가 이동해서 퓨즈 가용체에 이동하는 총 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \Delta Q / \Delta t$$

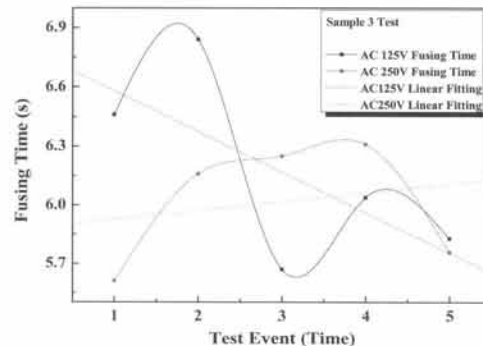
마이크로 퓨즈의 가용체가 정격전류 (A)를 유지하기 위해서 가용체의 조건 설정은 매우 중요하다. 시간 지연 마이크로 퓨즈의 가용체 설계에서 전류와 와이어의



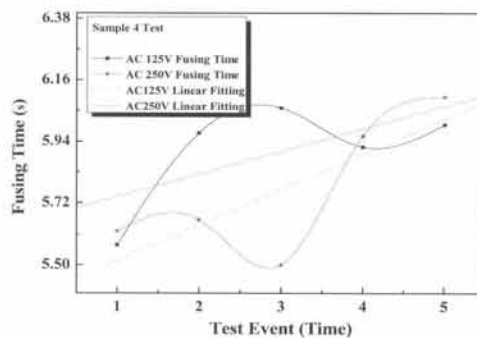
(Sample 1)



(Sample 2)



(Sample 3)



(Sample 4)

Fig. 6. Fusing analysis (3.125 A) in 2.5 multiple over current of micro fuse for designed time delay.

저항에 의해서 퓨즈 용단 시간을 예상할 해야 하지만 양단 전압 역시 크게 고려해야 한다.

키르히호프의 전류 법칙에 준하여 모든 회로 루프에서 전류는 절대 변하지 않은 불변의 파라미터이다. 양단에 걸리는 전압이 증가할수록 전류의 이동 속도는 증가되고 급속 결정체에서 전하의 입자 운동 속도는 지속적으로 증가될 것이다. 전하의 입자 운동 속도는 절대 규칙적일 수 없기 때문에 마이크로 퓨즈의 용단 시간도 항상 일정할 수 없다.

3.3 10배 과잉전류에서 퓨징 테스트

세 번째 시험으로서 마이크로 퓨즈의 퓨징 시험인 10배 퓨징 테스트 결과를 그림 7에 나타내었다. 정격전류 10배의 과잉전류 테스트는 5개의 마이크로 퓨즈를 대상으로 하였다.

샘플 1의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 26.6 ms, 250 V는 37 ms 결과를 얻었다. 샘플 2의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 34 ms, 250 V는 33 ms 결과를 얻었다. 샘플 3의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 28 ms, 250 V는 24 ms의 결과를 얻었다. 샘플 4의 마이크로 퓨즈의 평균 용단시험에서 125 V는 33 ms, 250 V는 29 ms를 얻었다. 또한, 마이크로 퓨즈 용단시험을 위한 과잉전류테스트에서 양단의 임피던스가 무한대 값에 근접 할수록 방폭 현상은 감소되고, 반대로 어드미턴스는 0의 값에 근접 할수록 방폭 현상은 증가된다. 간단히 설명해서, 도선에서 전류의 속도는 저항과 전압에 의해서 관련되기 때문에 세 가지의 파라미터는 반드시 상호 밀접하게 의존되어야 한다.

설계된 마이크로 퓨즈의 양단 저항을 기준으로 정격전류가 도선을 이동할 때 양단에 걸리는 전압을 이론적인 계산에 의하면 샘플 1은 0.12 V, 샘플 2는 0.12 V, 샘플 3은 0.12 V, 샘플 4는 0.12 V로 예상할 수 있다. 정격전류 이상의 과잉전류가 가용체에 인가되면 양단 전압 역시 증가될 것이다. 양단 전압의 증가는 도선에서 전류의 운동 속도를 증가시킨다. 전압과 전류는 절대적으로 분리할 수 없는 상호 일치된 파라미터로 간주하기 때문이다. 추가적으로, 마이크로 퓨즈가 용단 시 패키지 내부에서 온도를 비롯한 에너지 밀도가 매우 크게 증가하기 때문에 외부로 발산되는 방폭 현상을 비롯한 열폭주 에너지의 차단을 위한 열경화성 잉크 에폭시의 스크린 프린팅 공정은 중요하다 할 수 있다.

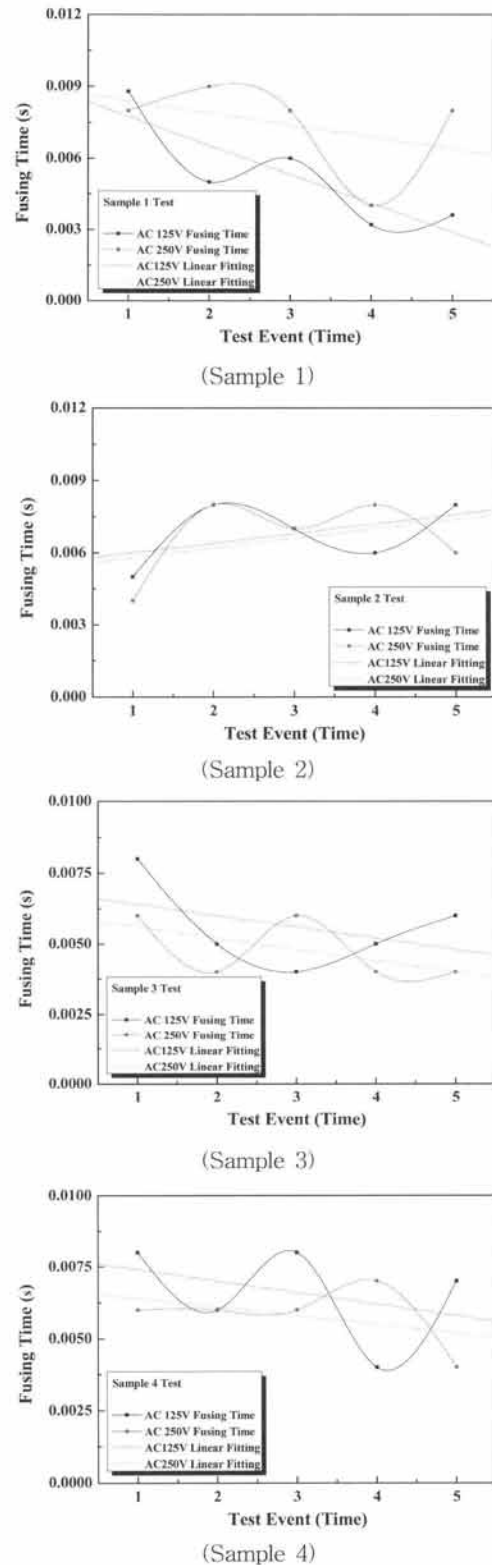
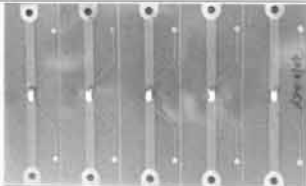

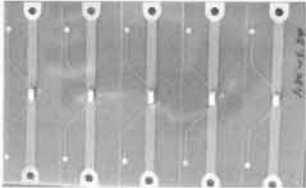

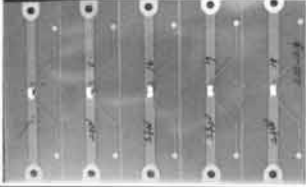

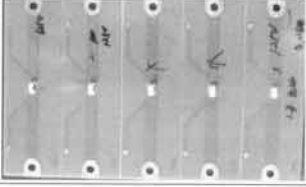



Fig. 7. Fusing analysis (12.5 A) in 10 multiple over current of micro fuse for designed time delay.

3.4 10배 과잉전류에서 퓨징 테스트 후 표면검사

정격전류의 10배 과잉전류에서 용단시험 후 표면 검사 결과를 표 4에 나타내었다.

Table 4. Surface damage analysis in 10 multiple over current fusing (12.5 A) of micro fuse for designed time delay.

Division	Whole Sample on the PWB	Enlarge Photo
Sample 1		
Sample 2		
Sample 3		
Sample 4		

전술한 바와 같이, 마이크로 퓨즈의 방폭 현상은 고 전류에서 발생 확률이 높기 때문에 출하를 위한 마이크로 퓨즈의 신뢰성 향상을 위해서 반드시 육안으로 검사를 수행해야 한다.

4. 결론

이제까지, 본 논문에서는 와이어 본딩 기술을 이용

한 마이크로 퓨즈 제작의 일부분인 열경화성 잉크 에폭시의 스크린 프린팅 공정 완료 후에 열경화성 잉크 에폭시 두께 변화에 따른 퓨징 특성과 표면 온도에 미치는 영향을 분석하였다. 열경화성 잉크 에폭시 두께 변화가 퓨즈 양단의 저항치에 크게 영향을 주지 않은 것을 확인 할 수 있었지만, 출하 적합 품목 기준에 의하여 4개 샘플 중 샘플 2가 가장 우수하다 말할 수 있다. 샘플 3, 4는 마이크로 퓨즈의 용단에 큰 문제는 없으나 자동화 방법에 의한 릴 (reel) 포장 공정이 정상적으로 진행되지 않은 문제점이 발생된다.

도선에 다수 분포된 기저 전자가 외부 에너지를 받아 불규칙한 브라운 운동으로 인하여 마이크로 퓨즈의 용단 시간은 절대 일정할 수 없다. 결정체에서 전자의 충돌 현상에 따른 불규칙한 운동 현상을 브라운 운동이라 하며, 평균 자유 행로 (mean free path)라 정의한다. 그러므로 이와 같은 물리학적 현상을 감안하여 공정 완료된 마이크로 퓨즈에서 몇 개의 샘플을 수집하여 평균 시간으로 계산해야 할 필요가 있다.

REFERENCES

- [1] D. K. Kim, N. H. Hwang, and J. S. Kim, *The 15th Korea Test Conference, The Institute of Semiconductor Test of Korea*, 181 (2014).
- [2] B. J. Kim, H. J. Kwon, and H. C. Kim, *The Institute of Electronics And Information Engineers*, 3, 125 (2014).
- [3] D. S. Cho, S. K. Kwak, and S. B. Hong, *The Institute of Korea Mechanical*, 2409 (2012).
- [4] L. Levine, *Choosing Capillaries for Fine Pitch Bonding, K&S Packaging Materials* (Willow Grove, Pennsylvania, 1999). p. 115.
- [5] K. C. Chen, L. K. Warne, Y. T. Lin, R. L. Kinzel, J. D. Huff, M. B. McLean, M. W. Jenkins, and B. M. Rutherford, *Proc. in Electromagnetics Research M*, 31, 199 (2013).
- [6] Electrical Supplies Safety, K 60127-4, Universal Module Fuse Link (UMF), Through Hole Type and Surface Mount Type, Korea Agency for Technology and Standards (2008).