

PTH Crack 을 고려한 저항 변화 추정 모델

김기영¹ · 박부희¹ · 김선진¹ · 유기훈¹ · 설동진¹ · 장중순¹ · 이형록² · 김태혁²

아주대학교 산업공학과¹ · 삼성전기²

A Study on Estimation Model of Resistance Value from Change of PTH Crack Size

Gi-young Kim¹ · Boo-hee Park¹ · Seon-jin Kim¹ · Ki-hun Yoo¹ ·
Dong-jin Seol¹ · Joong Soon Jang¹ · Hyung-rok Lee² · Tae-hyuk Kim²

Department of Industrial Engineering, Ajou University¹ · Samsung Electro-mechanics²

Abstract

PTH cracks are caused by the mismatch of coefficient of thermal expansion(CTE) between polymer and laminated materials, and are one of the main failure mechanisms of multi layer boards. In spite of its importance, it is usually hard to measure or detect them because of its small size and invisibility. To detect PTH cracks more effectively, this paper proposes a theoretical model that can estimate the resistance value from crack size of PTHs. Using four-point probe resistance measurement method, the resistance value of test coupons is measured. Through measured data, we verify the validity of the proposed theoretical model and set up criteria of failure.

Keyword : Plated Through holes(PTH), Crack(크랙), Resistance(저항), Coefficient of Thermal Expansion(열팽창 계수), Four point probe measurement method(4 단자 측정법)

1. 서론

Plated Through Hole (이하 PTH) 은 다층 기판 (이하 MLB) 의 홀 내벽에 도전성을 부여하기 위하여 층과 층 사이에 금속 도금을 통해 전기적인 접촉이 가능하도록 만든 구조이다. 전자제품이 소형화 되면서 과거 인쇄기판을 다층화 하는데 필수적인 구조이며 또한

많은 고장을 유발하는 구조이다. PTH 에서 가장 많은 고장모드로 알려져 있는 것이 크랙이며, 주로 금속 물질인 구리와 유기물질인 폴리머의 열팽창 계수의 차이로 인해 발생한다. 평면 방향보다는 수직 방향으로 열팽창 계수가 크기 때문에, 수직 방향 응력으로 인해 수평 방향으로 주로 크랙이 발생하며 MLB 불량률의 주요 원인이 된다 [4].

MLB 불량률을 방지하기 위하여 PTH 크랙을 탐지하는 방법은 파괴검사 또는 비파괴검사가 사용된다. 파괴 검사의 가장 대표적인 방법은 섹션이다. MLB 를 구성하고 있는 PTH 를 수직방향으로 절단하고, 단면을 광학 현미경으로 관찰하여 크랙의 유무를 검사한다. 섹션은 크랙을 눈으로 확인할 수 있는 장점이 있지만 검사 및 분석에 소요되는 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 또한 제품을 파괴하여야하고 일부 크랙은 관찰할 수 없기 때문에 생산 단계에서는 적용이 불가능하다.

비파괴 검사는 X-ray 촬영, Time Domain Reflectometry (이하 TDR) 측정, 전압 측정, 저항 측정, 초음파 탐지 등의 방법이 사용된다. 비파괴 방법으로 미세하게 금속에 발생한 크랙을 발견하기 위한 연구는 먼저 Huggins (1974) 에 의해 이루어졌다. Huggins 는 PTH 에서 측정된 전압을 이용하여 크랙을 발견하는 이론을 제안하였다 [9]. 크랙이 성장하면 전압의 변화가 발생하지만 중형비의 변화가 없을 때 크랙의 위치변화는 전압 변화에 영향을 주지 않는다고 하였다. Rudy (1976) 는 PTH 저항을 측정하여 크랙을 발견하는 이론을 제시하였다[2]. 측정 프로브와 크랙의 위치에 따라 저항 값이 변화하는 사실을 발견하고 실험을 실시하였다. 하지만 PTH 크랙의 성장에 관해서는 원주 방향으로의 증가만을 고려했을 뿐 크랙의 깊이, 높이의 성장에 대하여 고려하지 않은 문제점을 가지고 있다.

Moore (2002) 는 X-ray Laminography 를 이용하여 BGA 패키지의 결점을 검출해 내는 방안을 연구하였다 [10]. Saka (2006) 는 초음파를 이용하여 금속의 표면에 발생하는 미세 크랙을 탐지하였다 [5]. Chen (2006) 등은 TDR 을 이용하여 BGA 의 불량률 검출해 내는 방안을 제안하였다 [7]. 하지만 TDR 은 다른 물질에서 유사 파형이 존재하는 단점이 있어 크랙을 발견하지 못하는 경우도 있다. 때문에 과거의 연구들은 크랙의 발생과 크기를 추정하는 방법으로 적절하지 못하다.

위의 문제점들을 해결하고 효과적으로 크랙을 발견하기 위한 비파괴 평가법으로 4 단자를 이용하여 저 저항 측정을 통해 얻어진 값의 변화를 이용하는 방법이 사용된다 [1]. 저 저항 측정법은 작은 크랙의 발생에도 값의 변화를 나타낸다. 이러한 이유로 IPC 규격에서는 BGA 관련 PTH 검사 방법으로 데이지 체인을 이용하여 저항 변화를 측정하고 얻어진 값을 통해 불량률의 유무를 판단하는 방법을 제안한다 [6].

본 연구는 PTH 크랙 발생에 따라 저항의 변화를 추정하는 모델을 제시하고자 한다. PTH 를 전기적 특성을 고려하여 모델링하고 가로, 두께, 높이 방향 크랙의 크기 정도에 따라 발생 저항을 예측한다. 저 저항을 이용한 4 단자 측정법을 사용하여 모델링한 이론을 실험 시료에 적용하여 검증한다.

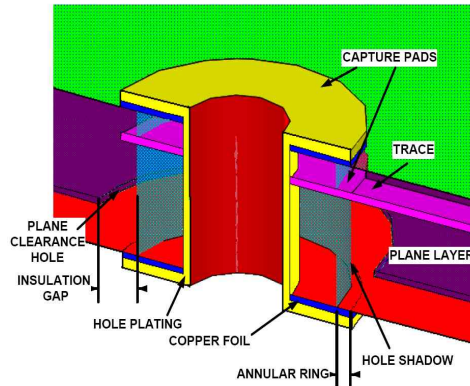
2. PTH 크랙 저항 모델

본 장에서는 발생한 크랙의 크기에 따라 저항의 변화를 추정할 수 있는 이론 모델을 제안하고자 한다. 제안된 이론은 옴의 법칙과 키르히호프 제 1 법칙을 기초로 한다. 실측한

데이터를 통해 경험적인 부분을 고려하여 이론 모델을 도출한다.

2.1 PTH 의 구조

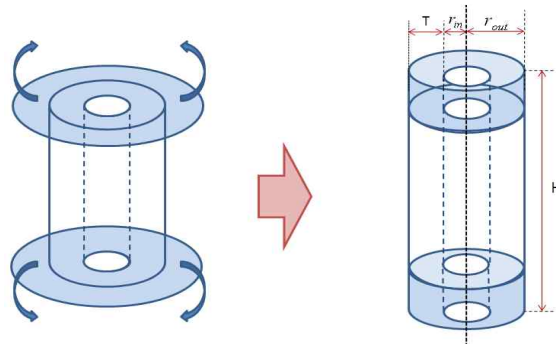
PTH 는 <그림 1> 과 같은 원통의 형태이며 중심에는 빈 공간이 있고, 층과 층 사이의 도전을 가능하게 하는 금속 도금 부분이 있다. 도금 부분은 크게 두 부분으로 나뉘어진다. 홀의 내부를 구성하고 있는 홀 도금 부분과 MLB 외부 면에 노출되어 있는 패드 또는 랜드 부분으로 구성된다. 금속 도금의 외부는 MLB 에서 가장 많은 부분을 차지하는 폴리머 재질로 원통을 감싸고 있다.



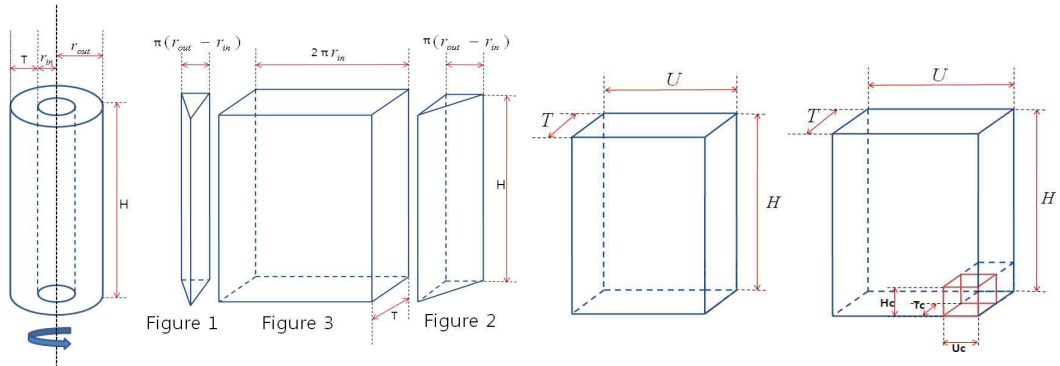
<그림 1> PTH 의 구성

2.2 이론 모델

PTH 의 크랙을 추정하는 이론 모델은 저항이 단면적으로는 반비례 하고, 길이에 비례한다는 전기적 성질을 기초로 한다. 이러한 성질과 PTH 의 형태를 고려하여 모델링을 실시한다. PTH 아래 랜드 부분과 위 랜드 부분을 수직으로 전개하여 <그림 2> 와 같은 속이 빈 원통형 기둥의 모형을 얻을 수 있다.



<그림 2> PTH 그림 모형

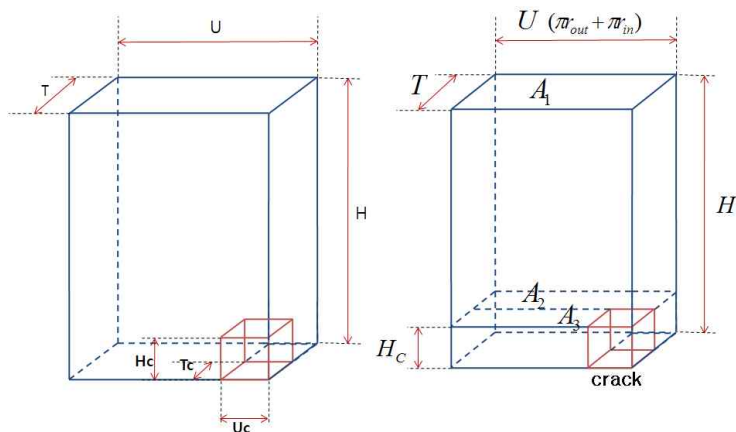


<그림 3> PTH 전개 모형

여기서 내부지름을 r_{in} , 외부지름을 r_{out} , 두께를 T , 높이를 H 라 하자. 원통의 한 부분을 높이 H 와 평행하게 절단하여, 2개의 삼각기둥과 직육면체 형태로 나누어 <그림 3> 과 같이 전개하고, 3개의 분리된 도형을 합쳐 하나의 직육면체의 형태로 만든다. 이를 통해 원통형의 PTH 를 가로 U , 두께 T , 높이 H 인 직육면체 형태의 모형으로 모델링 한다. 위의 과정을 통해 크랙이 없는 PTH 가로 방향의 길이, U 의 값은 $\pi r_{in} + \pi r_{out}$, 도금의 두께가 T , 높이가 H 인 모형의 초기 저항 값을 구하면 식(3.1) 과 같이 나타낼 수 있다. ρ 는 해당 물질의 고유 저항 값을 나타내는 것이고, k 는 경험에 의한 상수 값이다.

$$R_0 = \rho k \frac{H}{\pi(r_{in} + r_{out}) \times T} \quad (3.1)$$

PTH 크랙 모델링은 <그림 3> 유사하게 크랙의 성장 방향을 3차원으로 고려하여 실시 한다. 원통 형태에서 원주와 평행하게 크랙이 발생하면 이러한 방향으로 증가한 만큼의 크랙을 U_c 라 한다. 원주의 방향과 수직으로 성장한 크랙을 H_c 라 하며 도금의 두께에 대하여 발생한 크랙을 T_c 로 나타낸다.



<그림 4> PTH 크랙 발생 모형

<그림 4> 에서 붉은 부분으로 표시된 곳이 크랙이 발생하여 도금이 소실된 부분이다. 크랙을 제외한 금속 도금 부분은 크게 3개의 직육면체로 구성되고 단면적이 각각 A_1 , A_2 , A_3 인 도형의 저항 값은 식(3.2), 식(3.3), 식(3.4) 와 같이 추정할 수 있다.

$$R_1 = \rho k \frac{(H - H_c)}{T \times \pi(r_{in} + r_{out})} \quad (3.2)$$

$$R_2 = \rho k \frac{H_c}{(T - T_c) \times \pi(r_{in} + r_{out})} \quad (3.3)$$

$$R_3 = \rho k \frac{H_c}{T_c \times \{\pi(r_{in} + r_{out}) - U_c\}} \quad (3.4)$$

측정 프로브가 A_1 면에 접촉되고 다른 하나는 A_2 또는 A_3 부분의 아래에 접촉되며 전류는 위에서 아래 또는 아래에서 위의 방향으로 이동한다. 전류의 이동 방향을 고려할 때 A_2 , A_3 는 A_1 과 병렬로 결합됨으로 A_2 와 A_3 는 상호 직렬로 결합된다. U_c , T_c , H_c 는 각각 가로, 두께, 높이의 방향으로 발생한 크랙의 크기를 나타내는 값이다.

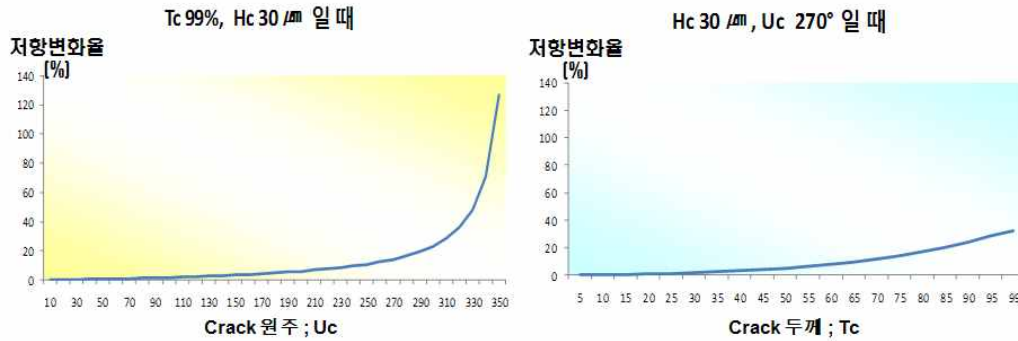
위의 수식의 저항 값을 통해 크랙이 존재하는 PTH 의 총 저항을 나타내는 모델은 식(3.5) 와 같다. 식(3.6) 은 초기 저항 값 식(3.1) 과 크랙이 발생한 경우 총 저항 값 식(3.5) 를 이용하여 저항 값의 변화율 ΔR 나타내는 것이다.

$$R_{TC} = \rho k \left(\frac{(H - H_c)}{T \times \pi(r_{out} + r_{in})} + \frac{2 \times H_c^{3/2} \times T_c^{1/2}}{\pi(r_{out} + r_{in})(T - T_c) + T_c \{\pi(r_{out} + r_{in}) - U_c\}} \right) \quad (3.5)$$

$$\Delta R = \frac{R_{TC} - R_0}{R_0} = \frac{-H_c \times \{\pi(r_{in} + r_{out}) \times T - U_c T_c\} + 2 \times \pi(r_{in} + r_{out}) \times T \times H_c^{3/2} \times T_c^{1/2}}{\{\pi(r_{in} + r_{out}) \times T - T_c \times U_c\} \times H} \quad (3.6)$$

저항 값을 이용하여 이론 모델인 식(3.6)을 기초로 PTH 에 대한 고장 판정 기준을 수립할 수 있다. PTH 의 사양을 통해 U , T , H 를 알고 있다면 발생한 크랙의 정도인 U_c , T_c , H_c 값을 정할 수 있다. 이를 식(3.5) 에 적용시키면 U_c , T_c , H_c 만큼의 크랙이 발생한 경우 저항 값을 추정할 수 있고, 식(3.6) 에 적용시키면 저항 변화율 ΔR 을 구할 수 있다. 이론 모델을 이용하여 T_c 가 99%, H_c 가 $30\mu\text{m}$ 일 때 PTH 의 원주를 따라 성장하는 크랙 U_c 의 증가에 따른 저항의 변화율은 <그림 5> 와 같다. 저항의 전체적인 변화는 지수적으로 증가하며 그 증가분이 약 300° 이상이 되는 부분에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 H_c 가 $30\mu\text{m}$, U_c 270° 일 때 크랙의 두께인 T_c 가 증가함에 따른 저항의 변화율을 관찰하였다. 증가폭은 U_c 와 차이가 존재하지만 전반적으로 지수적으로 증가하는 유사한

형태를 지닌다고 할 수 있다. 이와 같이 이론 모델을 통해 비파괴 검사과정에서 일정부분 크랙이 발생한 경우, 추정된 저항 값의 변화율을 고장 판정 기준으로 사용할 수 있다.



<그림 5> 이론 모델 저항 변화율

2.3 이론 가정

PTH 에서 측정되는 저항 값은 크랙의 위치와 크기, 측정 프로브의 위치와 접촉되는 힘 등에 의해 많은 영향을 받게 된다. 이러한 현상은 전류 밀도 및 금속 재질의 고유저항과 관련을 맺고 있다. PTH 의 측정된 저항이 크랙의 위치에 의한 영향을 받지 않으려면 전류 밀도가 균일해야 하고, 프로브와 크랙 사이에 충분한 거리가 확보되어야 한다.

본 논문에서 제시하는 이론 모델은 PTH 의 저항 측정 시 전류 밀도가 일정함을 가정한다. Rudy 와 Huggins 는 시험을 통해 가로 세로 거리의 비율인 중횡비가 1 이상의 값을 가지면 전류밀도가 균일해 진다는 것을 보였다 [2]. 프로브와 크랙의 위치를 고려할 때 높이가 가로의 길이보다 큰 값을 가지면 전류밀도가 일정하다는 것을 증명하였다.

PTH 에서 크랙은 다수 발생할 수 있지만 이론 모델에서는 단일 크랙을 가정한다. 만약 PTH 에 다수의 크랙이 발생한 경우, 다수 크랙의 총 합과 동일한 크기의 단일 크랙이 존재한다고 한다. 두 경우 측정되는 저항 값에는 차이가 없다고 가정하고 <그림 4> 와 같이 모델링 한다 [8]. 결론적으로 이론 모델에서 크랙의 발생 위치와 수는 고려하지 않는다.

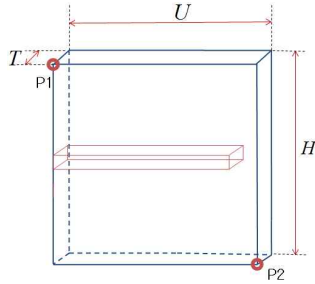
3. 실험 및 모델 검증

본 장에서는 실험 시료를 통해 이론 모델에 대한 검증을 실시한다. 실험 시료를 제작하여 크랙의 변화에 따른 저항 값을 측정하고 이를 이론 모델의 추정 값과 비교하여 검증을 실시한다. 또한 이를 바탕으로 고장판정 기준으로 사용될 수 있는 저항변화율을 도출한다.

3.1 실험 설계

이론 모델 설계에 사용된 직육면체 형태를 지니는 실험 시료를 <그림 6> 와 같이 제작한

다. 시료의 크기는 가로 U 와 높이 H 이며 그 크기가 $10000\mu\text{m} \times 10000\mu\text{m}$, $10000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$, $10000\mu\text{m} \times 30000\mu\text{m}$, $20000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$, $20000\mu\text{m} \times 30000\mu\text{m}$ 이며 두께 T 는 $15\mu\text{m}$ 로 동일한 5가지 종류로 제작한다.



<그림 6> 실험 시료와 저항 측정 지점

본 실험에 대한 분석을 위하여 크랙 발생에 의한 저항 값의 변화에 영향을 주는 인자는 <그림 7> 과 같이 3 가지로 선정하였다. 먼저 크랙의 두께 T_c 는 4 수준으로 그 값이 각각 25%, 50%, 75%, 90% 일 때를 목표로 제작한다. 크랙의 길이 U_c 는 원통형의 모양을 가질 때를 고려하여 크랙의 증가가 원주를 따라 90° , 180° , 270° , 350° 만큼 발생한 상황을 가정하여 4 수준으로 나누어 제작한다. 크랙의 높이 N_c 는 $20\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ 값을 목표로 나누어 제작되었고 크랙의 수로 표현하였다. $20\mu\text{m}$ 일 때에는 하나의 크랙이 존재하고, $60\mu\text{m}$ 일 때에는 3개, $100\mu\text{m}$ 일 때에는 5개의 크랙이 존재한다. 이를 바탕으로 크랙에 대한 3인자 4-4-3 수준으로 완전요인 배치법으로 실험을 실시하고 이에 대한 저항 변화를 측정하여 이론 모델에서 도출한 저항 변화와 동일한 값을 가지는지 비교한다.

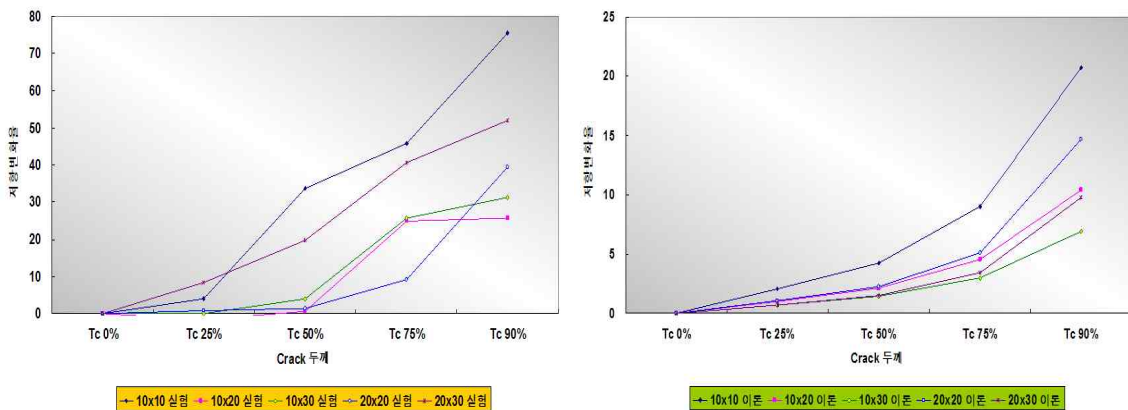
대상모델				인자 수준	Tc : Crack 두께	Uc : Crack 원주율	Nc : Crack 갯수
No.	기호	내용	단위				
(1)	U	TestCoupon의 원주(가로길이)	μm	1수준	25%	90	1
(2)	H	TestCoupon의 높이	μm	2수준	50%	180	3
(3)	T	TestCoupon의 두께	μm	3수준	75%	270	5
DOE를 위한인자				4수준	90%	350	
No.	기호	내용	단위				
(4)	Tc	Crack의 두께	μm				
(5)	Uc	Crack의 원주(가로길이)	$^\circ$ (각도)				
(6)	Nc	Crack의 수	개수				

<그림 7> 실험 인자와 수준

실험 시료 <그림 6> 에서 시료의 중간 부분에 크랙이 존재하고, 측정 프로브를 대각선 방향인 P1 과 P2 지점에 접촉시켜 측정을 실시한다. 20개의 동일한 사양을 바탕으로 만든 시료들에 대하여 각각 1회 측정을 실시한다.

3.2 실험 결과 및 분석

이론 모델과 실험 데이터의 전반적인 형태를 확인하기 위하여, 먼저 도출된 저항의 변화율과 실제 실험에서 얻어진 저항 변화율을 <그림 8> 과 같이 나타내었다. 두 그래프를 비교하면 값이 동일한 형태를 가지는 것은 아니지만 전반적인 값의 증가 패턴을 살펴보면 매우 유사한 형태를 지니고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 이론 모델과 실험 데이터에서 모두 크랙의 크기가 일정 비율로 선형으로 증가함에 따라 저항 변화율이 지수적으로 증가하는 형태를 볼 수 있다.



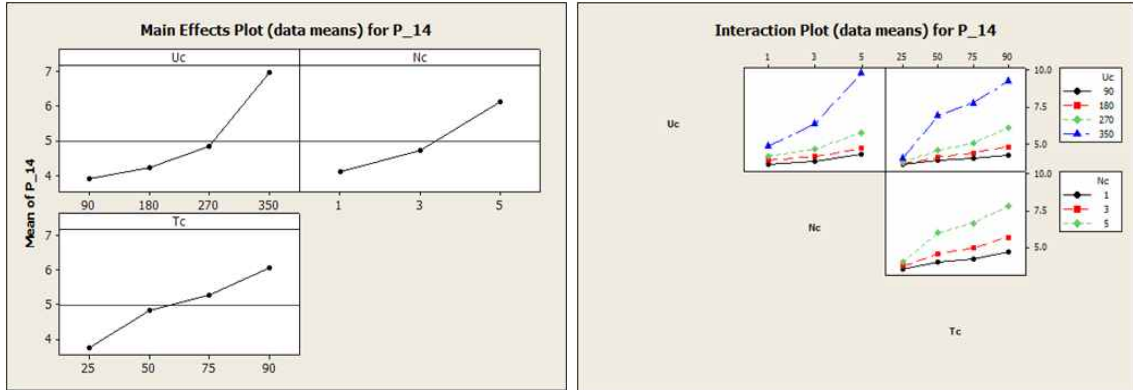
<그림 8> 측정값과 이론값

하지만 실험 데이터에서는 이론 모델을 통해 얻은 것과 상이하게 $10000\mu\text{m} \times 10000\mu\text{m}$ 의 시료의 경우에는 T_c 가 25% ~ 50% 인 구간이 저항변화율이 가장 크고 다른 시료에서도 T_c 가 50% ~ 75% 구간 변화율이 75% ~ 90% 구간 보다 큰 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 저항 측정 후 시료들을 섹션하여 그 크랙의 크기를 측정함으로써 원인을 알 수 있었다. 시료의 매우 작아 크랙을 발생시키는데 목표로 하는 값을 뛰어 넘거나 미치지 못하는 경우가 발생하였기 때문이다. 반면 $20000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$ 시료는 전반적으로 양호하게 시료가 만들어져 이론값에 가까운 형태의 저항변화율 형태를 나타내었다.

데이터 분석 프로그램을 이용하여 각각의 인자에 대한 분석 결과는 <그림 9> 와 같다. 해당 그래프를 통해 저항 값이 증가하는 현상에 U_c , T_c , N_c 인자가 모두 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 먼저 단일인자가 미치는 영향에 대하여 알아보면 크랙의 크기는 선형으로 증가하지만 그에 대한 저항 값의 변화는 지수적인 형태로 발생한다. 지수적인 저항 증가의 경향은 크랙이 커짐에 따라 모든 인자에서 더욱 강하게 나타난다.

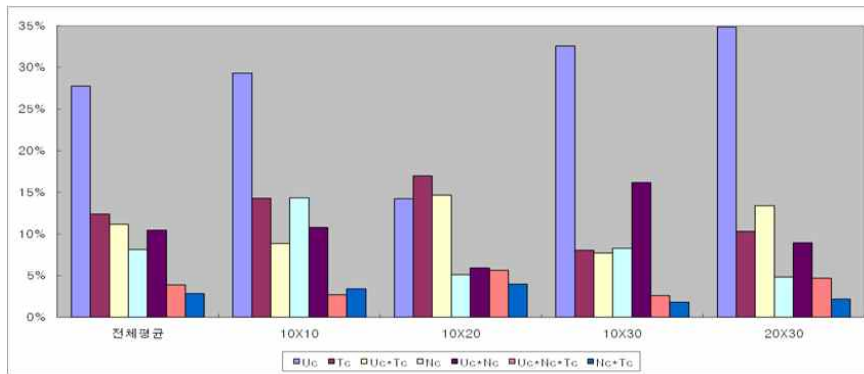
두 인자의 교호작용이 저항에 미치는 영향에 대하여 고찰해보면 동일하게 크랙이 증가함에 따라 저항 값에 대한 변화의 폭이 전반적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. $U_c - T_c$ 그래프에서는 두께에 대한 저항 값의 증가량이 U_c 가 90° 일 때 보다, 180° , 270° , 350° 로 증가하면서 그 저항 변화율의 양이 증가하는 것을 알 수 있다. $H_c - T_c$ 와 $H_c - U_c$ 간의 그래프에도 동일한 경향을 나타내며 결론적으로 각 인자 간에 저항 변화율에 대한 교

호 작용도 크랙이 증가함에 따라 저항 변화율이 증가한다.



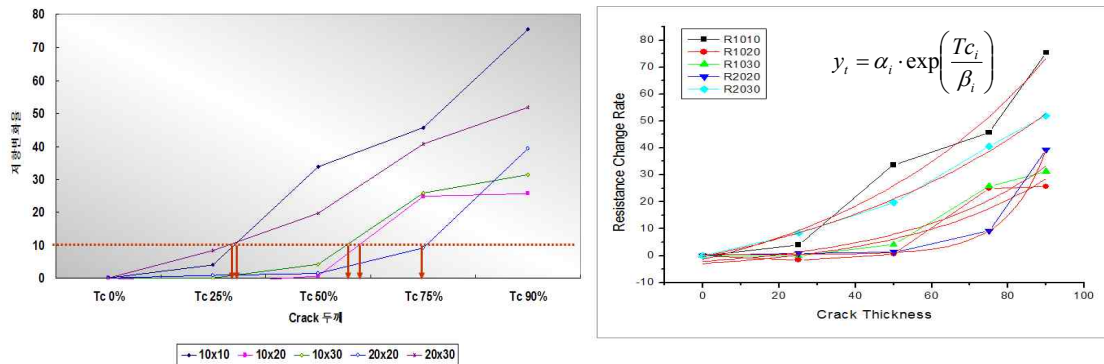
<그림 9> 인자와 저항 변화

각각의 인자가 전체에 미치는 영향을 알아보기 위해 분산분석을 실시한 결과를 요약하면 <그림 10> 과 같다. 히스토그램에서 볼 수 있듯이 가장 많은 영향을 미치는 인자는 크랙의 길이 U_c 라 할 수 있다. 다음으로 크랙의 두께 T_c 이며 단일 인자로는 유일하게 N_c 만 이 U_c 와 T_c 의 교호작용 보다 저항변화율에 적은 영향을 미치고 있다.



<그림 10> 인자와 기여율

위의 분석 결과를 바탕으로 고장 판정 기준을 수립하고자 한다. 다양한 인자가 저항의 변화율에 영향을 미치지만 그 중 가장 큰 영향을 주는 인자는 크랙의 길이인 U_c 이므로 고장 판정의 기준은 기본적으로 U_c 가 가장 큰 값을 나타내는 350° 인 경우를 기준으로 한다.



<그림 11> 인자와 저항 변화

이때 얻어진 데이터를 바탕으로 <그림 11> 과 같이 적합 모형을 찾고 그 에 적절한 상관계수들을 찾는다. 주어진 값들을 바탕으로 U_c 가 350° , N_c 가 1, T_c 가 25% 인 경우 각각의 저항 변화율을 살펴보면 $10000\mu\text{m} \times 10000\mu\text{m}$ 일 때 12%, $10000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$ 일 때 3%, $10000\mu\text{m} \times 30000\mu\text{m}$ 일 때 3%, $20000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$ 일 때 1%, $20000\mu\text{m} \times 30000\mu\text{m}$ 일 때 10% 라는 값을 도출 할 수 있다.

다른 방법으로 크랙의 두께에 관한 고장 판정의 기준을 수립하기 위하여 <그림 11>과 같이 저항변화율이 10% 인 지점을 고장이라 하면 위와 동일한 방법으로 데이터에 대한 모델과 계수를 찾는다. 얻어진 모형에 대하여 U_c 가 350° , N_c 가 1 인 경우 추정된 데이터 모델에 대한 크랙의 두께 T_c 의 값을 추정하면 $10000\mu\text{m} \times 10000\mu\text{m}$ 일 때 21.4%, $10000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$ 일 때 62.3%, $10000\mu\text{m} \times 30000\mu\text{m}$ 일 때 57.1%, $20000\mu\text{m} \times 20000\mu\text{m}$ 일 때 75.7%, $20000\mu\text{m} \times 30000\mu\text{m}$ 일 때 26.4% 라는 값을 도출 할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 실제 PTH 크랙을 모의하기 위하여 PTH 의 두께방향과 원주방향으로 크랙이 성장하고, 이러한 크랙이 여러 개 발생하여 단선이 되는 과정에서 저항이 증가하는 이론적 모델을 도출하였다. 개발된 이론 모델과 실험 결과 저항변화율의 절대값은 다소 차이가 발생했지만, 유사한 패턴과 트렌드를 보임으로써 향후 실제 개발 모델에 대한 크랙 성장에 따른 저항변화율에 대한 함수를 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

검증 실험에서는 실제 PTH 별로 정확한 저항을 측정할 수 없는 현실적인 제약 때문에, 개발된 모형을 적용하기 위하여 확대한 시료를 제작하여 실험을 실시하였으나, 개별적인 PTH 저항을 측정할 수 있다면 현재 실시중인 파괴검사를 비파괴검사방법으로 변경이 가능할 것으로 기대된다. 이를 위해 향후 연구 과제로는 이론 모델을 보다 정교하게 발전시켜 실측치와 예측치의 차이를 줄이는 것이다. 또한 PTH 는 매우 크기가 작고 저항 측정에 대한 노이즈가 많이 존재하기 때문에 이를 제거하고 적용하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

결론적으로, 기존의 파괴검사를 저항측정에 의한 비파괴검사 방법으로 변경하는 경우

검사시간을 대폭 단축시킬 수 있으며, 동시에 신뢰성 평가기간을 단축할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Andrew P. Schuetze, Wayne Lewis, Chris Brown, and Wilhelmus J. Geerts(2004), "A laboratory on the four-point Probe technique," American Journal of Physics, 72(2), pp.149-153.
- [2] D. A. Rudy(1976), "The Detection of Barrel Cracks in Plated Through Holes Using Four Point Resistance Measurements", Reliability Physics Symposium, pp.135-140.
- [3] Fu, C., Ume, I.C., and McDowell, D.L.(1998), "Thermal stress and fatigue analysis of plated-through holes using an internal state variable constitutive model" , Finite Elements in Analysis and Design, Volume 30, Issue 1-2, 15 July 1998, Pages 1-17.
- [4] Kobayashi, Tsuneo, Hayashida, Sumito(2000), "A Study on reliability modeling for through hole cracking failure in thermal enhanced PBGA laminate", Electronic Components and Technology Conference, pp. 1658-1660.
- [5] Masumi Saka, Hironori Tohmyoh, Takuma Suzuki and S Reaz Ahmed(2006), "Potential Drop Imaging Technique for Sensitive NDE of Small Surface Cracks", A-PCNDT 2006-Asia-Pacific Conference on NDT.
- [6] Michael Freda, Donald Barker(2006), "Predicting Plated Through Hole Life at Assembly and in the Field from Thermal Stress Data" , IPC Printed Circuits Expo, S36-01, p.1~37.
- [7] Ming-Kun Chen, Cheng-Chi Tai, and Yu-Jung Huang(2006), "Nondestructive Analysis of Interconnection in Two-Die BGA Using TDR", IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL.55, NO.2, pp. 400-405.
- [8] Pan, Tsung-Yu, Cooper, Ronald R., Blair, Howard D., Whalen, Thomas J. and Nicholson, John M.(1994) "Experimental analysis of thermal cycling fatigue of four-layered FR4 printed wiring boards" , Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME Volume 116, Issue 2, June 1994, Pages 76-82.
- [9] R.W. Huggins(1974), "Electrical Detection of a Circumferential Crack in the Wall of a Hollow Metal Cylinder", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Volume 7, pp.847-851.
- [10] Thomas D. Moore, Daniel Vanderstraeten and Pia M. Forssell(2002), "Three-Dimensional X-Ray Laminography as a Tool for Detection and Characterization of BGA Package Defects", IEEE TRANSACTIONS ON

166 / PTH Crack 을 고려한 저항 변화 추정 모델

COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 25, NO. 2, pp.
224-229.