

비선형모델링을 통한 온습도 바이어스 시험 중의 다층 세라믹축전기 수명 예측

권대일[†] · Michael H. Azarian · Michael Pecht

Failure Prediction of Multilayer Ceramic Capacitors (MLCCs) under Temperature-Humidity-Bias Testing Conditions Using Non-Linear Modeling

Daeil Kwon[†], Michael H. Azarian and Michael Pecht

(2013년 9월 13일 투고; 2013년 9월 16일 수정; 2013년 9월 25일 게재확정)

Abstract: This study presents an approach to predict insulation resistance failure of multilayer ceramic capacitors (MLCCs) using non-linear modeling. A capacitance aging model created by non-linear modeling allowed for the prediction of insulation resistance failure. The MLCC data tested under temperature-humidity-bias testing conditions showed that a change in capacitance, when measured against a capacitance aging model, was able to provide a prediction of insulation resistance failure.

Keywords: Prognostics, Reliability, MLCC, THB testing

1. 서 론

전자제품의 다양한 부품 중에 축전기는 DC 블로킹, 필터링, 에너지 저장 등 다양한 역할을 담당하고 있다.¹⁾ 축전기의 한 종류인 다층 세라믹 축전기(MLCC)는 세라믹 재료가 얇게 적층된 형태를 가지며 이를 통해 정전용량(capacitance)을 높인다. 새로운 기술과 제품이 개발될수록 MLCC의 수요는 날이 갈수록 증가하고 있으며 제품 안에서의 중요도 또한 커지고 있다. 그러나, 유전체의 두께가 얇아지고 이를 지나는 전하량은 증가하면서 MLCC의 고장률도 높아지게 되었고 MLCC와 보드물 기계적 전기적으로 결합하는 인터커넥트의 불량과 결합하여 제품 고장의 일으키는 원인이 되기도 한다.²⁻⁵⁾

MLCC의 건전성은 절연저항, 정전용량, 손실 계수(dissipation factor) 등의 전기적 파라미터를 통해 비파괴적으로 측정할 수 있다.⁶⁾ 정전용량과 손실계수는 LCR 미터를 이용하여 비교적 손쉽게 측정할 수 있는 반면 절연저항의 측정은 시간이 오래 걸리고 직렬 바이어스를 인가해야 하는 고저항미터(high resistance meter)를 주로 이용한다. MLCC의 고장은 종종 절연저항 값의 감소로 측정될 수 있으나 고저항미터의 단점들로 인해 절연저항 값을 실시간으로 모니터링 하여 MLCC의 건전성을 측정하는 데에는 한계가 있다.

이 연구는 정전용량 노화 모델을 통해 MLCC의 절연

저항 고장을 예측하는 방법을 제시한다. 온습도 바이어스 시험에서 절연저항의 고장을 보이지 않은 MLCC의 정전용량 데이터를 이용하여 노화 모델을 만든 후, 동일한 시험에서 절연저항의 고장을 일으킨 MLCC의 정전용량 데이터와 노화 모델 사이의 비교 및 분석을 통해 고장을 예측하였다.

2. 실험방법

앞서 언급한 MLCC의 세가지 전기적 파라미터를 실시간으로 모니터링하며 온습도 바이어스 시험을 약 1240시간 동안 수행하였다. 이 연구에 사용된 데이터는 온도 85°C, 습도 85%, 그리고 50 V의 직류 바이어스를 MLCC에 가해 얻은 데이터이다. 절연저항, 정전용량, 손실 계수 이 세 파라미터들은 데이터 수집 장치에 문제가 생긴 실험 시간 100시간에서 200시간을 제외하고는 연속적으로 모니터링 되었다. 데이터 수집은 고저항미터를 이용하여 약 3시간 20분마다 이루어졌다. 이번 분석에 총 10개의 MLCC가 이용되었다. 이들 MLCC는 제조사, 터미네이션 타입, 시험 조건 등 모든 동일한 환경 조건이 제공 되었다. 세 파라미터 중 손실 계수는 모델링이 가능한 형태가 아닌 관계로 이번 데이터 분석에 포함되지 않았다.

이 연구에서 MLCC 절연저항의 고장은 10^7 Ohms 아래로 감소하며 측정 에러를 줄이기 위해 이 현상이 최소 2

[†]Corresponding author
E-mail: dkwon@unist.ac.kr

© 2013, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

Table 1. Time to IR Failure of the MLCCs.

| MLCC # | Time to IR failure (hours) | Failure type | Description |
|--------|----------------------------|------------------------------|-------------|
| 1 | N/A | N/A | Not failed |
| 2 | N/A | N/A | Not failed |
| 3 | 856 | Permanent | Failed |
| 4 | N/A | N/A | Not failed |
| 5 | N/A | N/A </td <td>Not failed</td> | Not failed |
| 6 | 962 | Permanent | Failed |
| 7 | 856 | Permanent | Failed |
| 8 | 317 | Intermittent | Failed |
| 9 | N/A | N/A | Not failed |
| 10 | 172 | Permanent | Failed |

번 이상 연속적으로 일어나는 것으로 정의하였다. 또한, 절연저항에 있어서 영구 고장과 간헐 고장이라는 고장 형태가 정의 되었다. 절연저항이 10^7 Ohms 아래로 감소한 후, 영구 고장의 경우 남은 시험 기간 동안 그 상태를 유지하는 것을 가리키는 반면, 간헐 고장의 경우 얼마의 시간 후에 다시 원상태로, 즉 10^7 Ohms 이상으로, 회복하고 남은 시험 기간 동안 원상태가 유지된 것을 의미한다.

Table 1은 온습도 바이어스 실험에 사용된 10개의 MLCC들로부터 얻은 절연저항의 고장 시간 값을 보여준다. 5개의 MLCC들은 시험 중 고장을 일으키지 않았으나 나머지 5개의 MLCC들은 고장을 일으켰다. 고장을 일으킨 MLCC 들 중 MLCC #8은 간헐 고장의 형태였으며 317시간에 절연저항이 처음으로 10^7 Ohms 이하로 감소하였다가 337 시간에 원상태로 회복하였다. Fig. 1은 MLCC #8의 절연저항 값을 시간에 따라 나타내었다. 나머지 4개의 MLCC들의 고장은 영구 고장의 형태를 나타내었다.

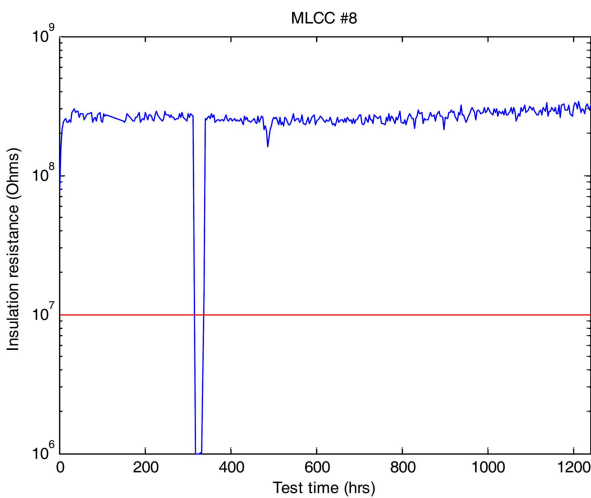


Fig. 1. Insulation resistance profile of MLCC #8, which had an intermittent failure.

3. 비선형 모델링

절연저항의 고장을 정전용량의 변화로 예측하기 위해서는 이 두 파라미터 사이의 상호관계가 반드시 존재해야 한다. 상호관계는 다음의 공식에서 얻을 수 있는 상관 계수, R, 을 계산하여 정량화 할 수 있다.

$$R(i, j) = \frac{C(i, j)}{\sqrt{C(i, i)C(j, j)}}$$

C는 파라미터들간의 공분산 행렬을 나타낸다. 상관계수는 -1과 1사이의 값을 가지며 이들 값에 가까울수록 파라미터들 사이에 강한 상호관계가 있음을 의미한다. 주어진 10개의 MLCC 데이터를 바탕으로 계산한 결과 절연저항과 정전용량 사이의 상관계수는 -0.3766이며 이는 그 상호관계가 매우 강함을 보여준다. 또한, 비상호관계를 가정된 가설검정에서 p-value가 0.05보다 작게 나온 결과를 바탕으로 MLCC의 절연저항과 정전용량 사이에는 상당한 상호관계가 있음을 검증하였다. 따라서, 정전용량의 변화를 이용하여 절연저항의 고장을 예측하는 것은 가능하다.

Fig. 2는 고장을 일으키지 않은 MLCC #1에서 수집한 온습도 바이어스 시험 중 정전용량의 변화를 보여준다. MLCC의 노화로 인해 정전용량은 시간에 따라 그 노화 속도가 증가하는 형태를 보였다. 이는 고장을 일으키지 않은 MLCC 뿐만 아니라 고장을 일으킨 MLCC에서도 고장시간 전까지 거의 동일한 형태로 나타났다. 고장을 일으키지 않은 5개의 MLCC로부터 시간에 따른 정전용량 값을 얻어 비선형 회귀 분석을 실시하였다. 정전용량은 10^{-8} F 이하의 매우 작은 값을 가지므로 회귀 분석시 잔차 값이 너무 작아 정확한 분석을 실시하지 못하는 경우를 대비하기 위해 nano-farad (nF)으로 단위를 환산하여 계산을 수행하였다. 그 결과 얻어진 정전용량 노화 모델은 다음과 같다.

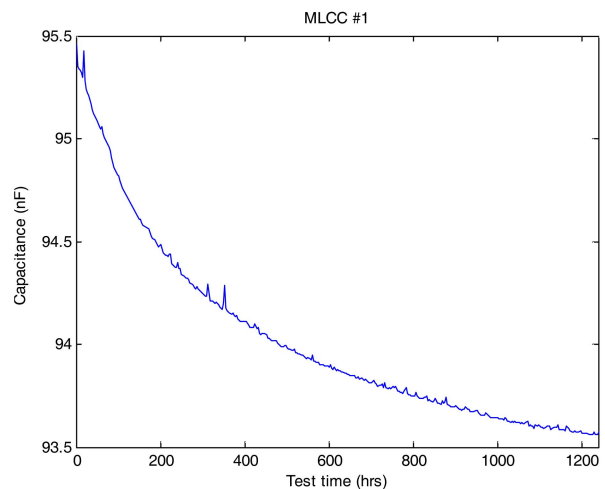


Fig. 2. Capacitance profile of MLCC #1.

동일한 MLCC들이 동일한 조건 속에서 시험이 진행되었지만 정전용량을 포함한 모든 파라미터들의 측정에 있어 샘플간의 차이가 있다. 이를 보정하기 위해 c라는 보정 요소를 모델에 추가하였으며 데이터 측정이 안정을 찾은 200시간에 측정된 정전용량 값을 기준으로 계산되었다.

보정된 정전용량 노화 모델과 실제 정전용량 측정값 사이의 차이를 잔차로 정의하였다. 고장을 일으키지 않은 MLCC들로부터 얻은 가장 큰 5개 잔차의 평균이 0.1409로 계산되었고 고장을 일으킨 MLCC들로부터 얻은 가장 큰 5개 잔차의 평균은 4.2764로 계산되었다. 이를 바탕으로 잔차 값 0.15가 정전용량 변화를 감지하는데 필요한 임계값으로 사용되었다.

4. 고장 예측

이전 단락에서 정의한대로 정전용량의 변화 시간은 정전용량의 잔차가 0.15를 넘어서는 시점으로 정의하였다. 측정오차를 줄이기 위해 이러한 현상이 최소 2번 연속적으로 일어난 후 첫번째 현상이 발생한 시간을 정전용량의 변화 시간으로 정의하였다. Table 2는 고장을 일으킨 5개의 MLCC로부터 얻은 정전용량의 변화 시간과 이들 절연저항의 고장시간을 나타낸다.

MLCC #3과 MLCC #6에서 정전용량의 변화는 절연저항의 고장보다 각각 7시간, 13시간 일찍 탐지되었다. 이 두 MLCC에 대해서는 정전용량의 변화를 이용하여 절연저항의 고장을 예측할 수 있었다. MLCC #7의 경우 정전용량의 변화가 일찍 탐지되지는 않았으나 절연저항이 고장을 일으키는 동시에 정전용량 또한 변화를 보였다. MLCC #10의 경우 절연저항의 고장이 초기 안정화 기간 중에 발생하였다. 노화 모델의 보정이 200시간에 이루어짐에 따라 절연저항의 고장 후에 정전용량의 변화를 통한 고장 예측이 이루어졌다.

간헐 고장을 일으킨 MLCC #8의 경우 이 예측 방법이 적용되지 않았다. Fig. 3에서 나타나는 바와 같이 317시간에서 337시간 사이의 20시간 동안만 절연저항의 감소가 발생하였고 이후 시험 종료까지 정상 범위로 회복하였다. 이러한 간헐적 고장은 정전용량의 변화에는 영향을 미치지 않았고 그 결과 노화 모델을 통한 고장 탐지가 이루어지지 않았다. 이 결과는 간헐 고장을 일으킨

Table 2. Time to the Deviation of Capacitance of the Failed MLCCs

| MLCC # | Time to IR failure (hours) | Failure type | Time to capacitance deviation (hours) |
|--------|----------------------------|--------------|---------------------------------------|
| 3 | 856 | Permanent | 849 |
| 6 | 962 | Permanent | 949 |
| 7 | 856 | Permanent | 856 |
| 8 | 317 | Intermittent | N/A |
| 10 | 172 | Permanent | 225 |

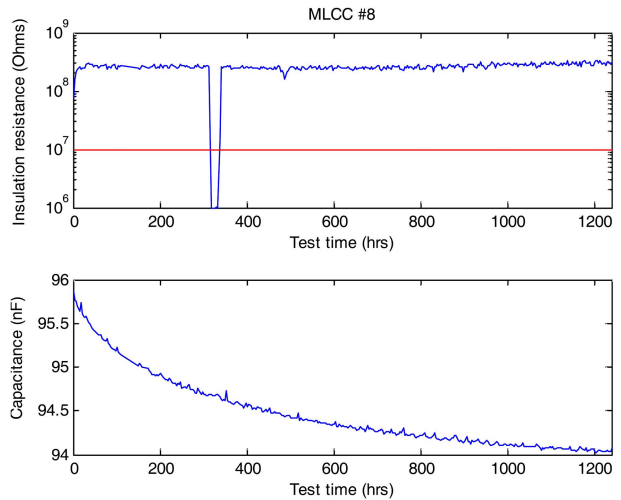


Fig. 3. IR (top) and capacitance (bottom) profiles for MLCC #8, which experienced intermittent failure at 317 hours and recovered back to normal at 337 hours.

MLCC는 해당 시간을 제외한 다른 시험 동안 고장을 일으키지 않은 다른 MLCC들과 동일한 건전성을 보였다는 것을 의미한다.

4. 결 론

이 연구에서 온습도 바이어스 시험 동안 MLCC들의 정전용량 데이터를 분석하였고 정전용량 노화모델을 통해 MLCC의 절연저항 고장을 예측하였다. 절연저항과 정전용량 사이의 상관관계 계산으로부터 이 두 파라미터 사이에는 상당한 상호관계가 있음을 확인하였다. 온습도 바이어스 시험동안 MLCC로부터 수집한 정전용량 데이터를 비선형 모델링을 통해 노화 모델을 얻고 이를 고장을 일으킨 MLCC의 정전용량 데이터와 비교한 결과 절연저항의 고장을 성공적으로 미리 예측할 수 있었다. 반면 간헐고장을 일으킨 MLCC로부터는 절연저항의 고장을 예측하지 못하였다. 이는 간헐고장을 일으킨 MLCC가 정전용량의 변화에는 큰 영향을 미치지 않았으며, 나아가 해당 MLCC의 건전성이 고장을 일으킨 MLCC보다 고장을 일으키지 않은 MLCC에 가깝다는 것을 의미한다.

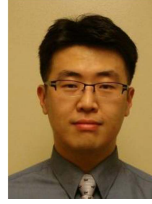
다른 온습도 바이어스 조건에서의 노화 모델링, 시험 조건과 노화 모델 사이의 스케일링 및 관계 도출, 고장 분석을 통한 노화 모델의 물리적인 검증 등 관련 연구주제를 통해 MLCC 고장 예측의 정확성 및 범위를 넓혀갈 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 University of Maryland, College Park의 Electronic Products and Systems Consortium과 울산과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. H. Lee, "Embedded Passives", J. Microelectron. Packag. Soc., 9(2), 55 (2002).
2. M. Keimasi, M. Azarian, and M. Pecht, "Flex Cracking of Multilayer Ceramic Capacitors Assembled with Lead-Free and Tin-Lead Solders", IEEE Trans. Device Mater. Reliability, 8(1), 182 (2008).
3. J. Prymak and J. Berganthal, "Capacitance Monitoring While Flex Testing", IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol., 18(1), 180 (1995).
4. N. Kubodera, T. Oguni, M. Matsuda, H. Wada, N. Inoue and T. Nakamura "Study of the Long Term Reliability for MLCCs", Proc. CARTS International, Las Vegas, Electronic Components Industry Association (ECIA) (2012).
5. K. Kim, S. Huh and J. Jang, "Failure Mechanism and Test Method for Reliability Standardization of Solder Joints", J. Microelectron. Packag. Soc., 18(4), 85 (2011).
6. S. Jianzhong, S. Cheng and M. Pecht, "Prognostics of Multilayer Ceramic Capacitors via the Parameter Residuals", IEEE Trans. Device Mater. Reliability, 12(1), 49 (2012).



- 권대일 (權大日)
- UNIST, 인간 및 시스템 공학과
- 전자패키징, 고장예측, 신뢰성
- e-mail: dkwon@unist.ac.kr



- Michael H. Azarian
- University of Maryland, Mechanical engineering
- 신뢰성, 전자패키징, 마찰학
- e-mail: mazarian@calce.umd.edu



- Michael Pecht
- University of Maryland, Mechanical engineering
- 고장예지, 건전성관리, 신뢰성
- e-mail: pecht@calce.umd.edu
