

Reliability assessment of mica high voltage capacitor through environmental test and accelerated life test

Seong Hwan Park, Young Jae Ham, Jeong Seok Kim*, Kyoung Hun Kim**, Seong Min So** and Min Seok Jeon***,†

Research & Development Team 1, Hamwha Corporation, Gumi 39370, Korea

*Expantech Co. Ltd., Suwon 16648, Korea

**Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

***Material & Components Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul 08389, Korea

(Received November 19, 2019)

(Revised December 12, 2019)

(Accepted December 12, 2019)

Abstract Mica capacitor is being adopted for high voltage firing unit of guided weapon system because of its superior impact enduring property relative to ceramic capacitor. Reliability of localized mica high voltage capacitors was verified through environmental test like terminal strength test, humidity test, thermal shock test and accelerated life test for application to high voltage firing unit. Failure mode of mica capacitor is a decrease of insulation resistance and its final dielectric breakdown. Main constants of accelerated life model were derived experimentally and voltage constant and activation energy were 5.28 and 0.805 eV respectively. Lifetime of mica capacitor at normal use condition was calculated to be 38.5 years by acceleration factor, 496, and lifetime at accelerated condition and this long lifetime confirmed that mica high voltage capacitor could be applied for firing unit.

Key words Mica high voltage capacitor, Lifetime, Mean time to failure, Firing device, Fuse

마이카 고전압 커패시터의 환경시험과 가속 수명시험을 통한 신뢰성 평가

박성환, 함영재, 김정석*, 김경훈**, 소성민**, 전민석***,†

(주)한화 구미사업장 개발1팀, 구미, 39370

*익스팬테크(주) 부설연구소, 수원, 16648

**한국세라믹기술원 기업성장지원센터, 진주, 52851

***한국산업기술시험원 재료기술센터, 서울, 08389

(2019년 11월 19일 접수)

(2019년 12월 12일 심사완료)

(2019년 12월 12일 게재확정)

요약 마이카 커패시터는 세라믹 커패시터에 비해 내고충격 특성이 우수하여 다양한 유도무기체계의 고전압 기폭장치에 적용된다. 본 연구에서는 국산화된 마이카 고전압 커패시터의 고전압 기폭장치 적용을 위해 단자강도시험, 내습성시험, 열충격시험과 같은 환경시험과 함께 가속 수명 시험을 진행하였다. 마이카 고전압 커패시터의 고장모드는 절연저항 감소 및 이를 통한 절연 파괴이다. 가속수명모델의 중요 상수를 실험적으로 도출하였으며 전압계수 n 및 활성화 에너지 E_a 는 각각 5.28 및 0.805 eV이었다. 가속모델식을 이용하여 도출한 가속계수는 496이었으며 가속수명시험을 통해 도출된 정상 사용 조건에서의 마이카 고전압 커패시터의 수명은 38.5년으로 기폭장치 적용에 문제가 없는 것으로 확인되었다.

1. 서론

정밀 유도무기체계에서 신관 혹은 폭발 장치로 고전압

기폭장치가 많이 적용되고 있다. 고전압 기폭장치는 고전압 에너지를 발생시키는 고전압 발생장치, 이를 저장하는 고전압 커패시터 그리고 고전압 에너지를 기폭관으로 전달하는 고전압 스위치 3종의 핵심부품으로 구성된다[1].

이 중에서 고전압 커패시터는 기폭관을 기폭시키기 위

†Corresponding author
E-mail: msjeon@ktl.re.kr

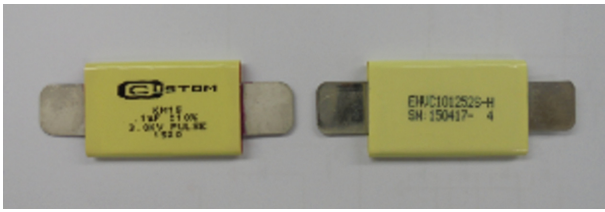


Fig. 1. Mica high voltage capacitor.

해서 방전시 손실이 적고, 짧은 방전 시간을 가진 고밀도 에너지 방출용으로 주로 마이카(Mica) 소재와 세라믹 소재의 커패시터를 사용하고 있다. 마이카 소재 커패시터(Fig. 1)는 낮은 에너지 손실 및 인덕턴스 특성을 만족시키기 위해 외부전극이 플랫 단자(flat lead) 형태를 갖고 있다. 고전압 커패시터에 이용되는 마이카 소재는 종이 형태로 플렉시블하고 연속적이며 일정한 마이카 결정 레이어를 가지고 있으며 이 레이어들은 중첩되어 작고 얇은 판상체로 구성되는 종이와 같은 전기절연소재로 재구성된다. 마이카 소재의 커패시터는 세라믹 소재의 커패시터보다 사이즈가 큰 단점을 갖고 있으나, 결정질 마이카 필름과 전극은 레진에 의해 함침되어 기공의 거의 없는 매우 치밀한 구조를 가지므로 50,000 g 수준의 내고충격 특성을 가지고 있으나 세라믹 커패시터의 경우 고충격 시험시 소결체에 크랙 형성으로 고장(절연파괴)이 발생하는 경우가 빈번하다. 이와 같이 높은 내전압특성과 높은 수준의 내고충격성을 가지는 마이카 고전압 커패시터는 다양한 유도무기체계에 적용되고 있다[1-5].

마이카 커패시터는 고전압 기폭장치는 물론 고전압 전력공급장치(High voltage power supplier), 전기차 점화 코일용 고전압 커패시터 또는 에너지 저장분야 고전압 전원장치에도 적용될 수 있다. 언급한 응용 분야는 중진 기기로서 사용되는 커패시터는 고전압에 견뎌야 하며 장수명을 필수적으로 요구한다. 본 연구의 마이카 커패시터는 유도무기의 기폭장치에 사용되며 임무는 단 1회에 국한된다. 즉, 기폭장치 마이카 커패시터 재사용될 수 없으므로 고장까지의 평균수명(Mean time to failure, MTTF)이 중요하며 수리가 가능하여 재사용까지의 수명을 나타내는 고장간의 평균수명(Mean time between failure, MTBF)은 적용할 수 없다. 따라서, 다양한 환경스트레스에서 본연의 성능을 유지하여야 하며 목표 서비스 기간을 초과하는 장수명을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 국산화 된 마이카 소재의 고전압 커패시터의 제작, 시험평가 및 수명시험 결과에 대한 내용을 기술하였다. 특히, 복합스트레스 가속수명시험을 위해 전압-온도 가속모델을 적용하였고 수명예측에 필요한 상수인 전압계수 및 활성화에너지를 실험적으로 도출하여 정상 사용조건에서의 수명을 예측하였다.

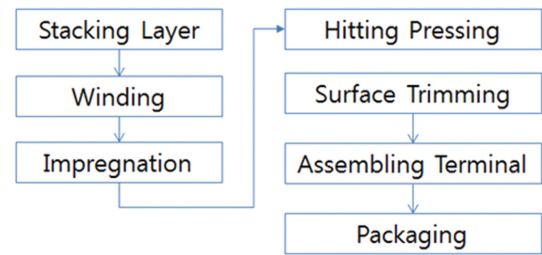


Fig. 2. Fabrication process of mica high voltage capacitor.

2. 실험 방법

2.1. 마이카 고전압 커패시터 제작

본 연구에 사용된 마이카 고전압 커패시터는 크게 3가지 재료로 구성된다. 먼저 핵심재료인 마이카 페이퍼는 천연의 마이카를 여러 공정을 거쳐 페이퍼로 제조된 것이다[5]. 두 번째로는 마이카 페이퍼의 물리적인 단점을 보완해 주는 함침제이다. 함침제에 의해 마이카 고전압 커패시터의 사용온도가 결정된다[6-8]. 마지막으로 내부 전극으로 사용되는 고밀도의 알루미늄박이다. 이외에도 내부 절연재로 PET(Poly-Ethylene Terephthalate) 필름이 사용되고, 주석을 도금한 구리 재질의 단자가 사용된다.

마이카 커패시터의 주요 제조 공정은 Fig. 2와 같다. 일정한 폭과 길이로 재단된 마이카 페이퍼, PET 필름, 알루미늄 전극을 적층하여 권취한다. 권취시에는 시제품의 두께와 내전압에 영향을 미치는 구김 현상이 발생되지 않도록 해야 한다. 권취된 시제품은 진공 함침 공정을 통해 내부 기공을 제거한다. 커패시터의 단자는 내부단자와 외부단자로 분리되는데, 내부단자를 함침 공정 시에 삽입한다.

진공 함침 후에는 고온 프레스를 이용하여 정해진 온도, 압력, 시간 조건에 따라 가열 압착을 가하면서 함침액을 경화시킨다. 경화가 완료되면 커패시터의 기본 형태가 갖추어지고, 커패시터의 고유 특성이 결정된다. 따라서 가열 압착 공정은 커패시터 성능을 결정짓는 마지막 공정이다. 가열 압착이 완료된 제품은 표면 가공과 외부단자 조립 후, 전기적 성능검사를 수행하여 정상인 확인되면 포장 공정으로 마무리한다.

2.2. 환경시험

마이카 고전압 커패시터의 환경시험 내역은 Table 1의 3개 항목이며, 미국 국방부의 전기전자부품 시험규격인 MIL-STD-202에 제시된 시험 항목 중에서 단자강도시험(Test method 211), 내습시험(Test method 102), 열충격

Table 1
Environmental test details

Title	Test method
Terminal strength	Pull test Method 211A test condition A
	Flat terminal bend test Method 211A test condition B
Humidity (Steady state)	Method 103B test condition B
Thermal shock	Method 107G test condition B

시험(Test method 107)을 수행하였다[9].

단자강도시험은 커패시터 단자의 물리적인 힘에 의한 영향성을 확인하기 위한 것으로 시험 방법에 따라 당김 시험(Pull test)과 굽힘 시험(Bending test)을 수행한다. 당김 시험은 MIL-STD-202 규격에 따라 20 lbf(9.07 kgf)의 힘을 단자 방향으로 10초 이상 가하여 이상이 없음을 확인한다. 굽힘 시험은 커패시터의 단자를 기준 위치에서 한 방향으로 45°로 굽히고, 다시 반대 방향으로 45°로 굽힌 후 기준 위치로 복귀시키는 것을 1회로 했을 때, 5회 수행하여 이상이 없음을 확인한다. 이때 굽힘 속도는 각 방향으로 약 3초로 하여야 한다.

내습시험은 습기에 의한 영향성을 확인하기 위한 것이다. 시험 전에 시험 대상인 커패시터의 특성값(커패시턴스(C_p), 손실 계수(Dissipation factor, DF), 절연저항(Insulation resistance, IR)을 먼저 측정하고, 3.7 kV_{DC}에서의 내전압(Breakdown voltage, BV)을 확인한다. MIL-STD-202의 Test Method 103의 시험 조건(Test condition D)에 따라 습도 90~95%, 온도 40 ± 2°C의 조건에서 부품을 1,344시간 저장한다. 저장이 종료되면 24시간 동안 상온에서 안정화를 시킨 후, 시험 대상 커패시터의 특성값을 다시 측정하고, 내전압을 확인한다.

열충격시험은 극한의 고온/저온에 노출된 부품의 내성을 확인하기 위한 것이다. 시험 전에 시험 대상인 커패시터의 특성값을 먼저 측정하고, 3.7 kV_{DC}에서의 내전압을 확인한다. MIL-STD-202의 Test Method 107의 시험 조건(Test condition A3)에 따라 -55°C에서 15분, 25°C에서 5분 이하, 85°C에서 15분, 다시 25°C에서 5분 이하 저장하는 것을 1주기로 하여, 100주기를 저장한다. 저장이 종료되면 24시간 동안 상온에서 안정화를 시킨 후, 시험 대상 커패시터의 특성값을 다시 측정하고, 내전압을 확인한다.

2.3. 가속수명시험

마이카 고전압 커패시터의 가속수명시험은 전압, 고온의 가속수명시험으로 수행하였다. 수명을 도출하기 위해서 식(1)의 가속모델식을 적용하였다[10,11]. 본 가속모델식은 역승 모델과 아레니우스 모델이 동시에 적용되는 모델로서 전압 스트레스는 역승 모델에 온도 스트레스는

아레니우스 모델에 포함되어 있다.

$$AF = \frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (1)$$

여기서 AF(Acceleration factor)는 가속계수이다. t_1 과 t_2 는 각각 정상조건에서의 평균수명(시간)과 가속조건에서의 평균수명, V_1 과 V_2 는 각각 정상조건에서의 인가전압(V_{DC})과 가속조건에서의 인가전압, T_1 과 T_2 는 각각 정상조건에서의 절대온도(K)와 가속조건에서의 절대온도이다. n 은 전압계수이고, E_a 는 활성화 에너지(eV)이며, k 는 Boltzmann 상수이다.

전압계수(n)은 실험을 통해 산출한다. 일정 온도 85°C에서 2.75 kV_{DC}, 3.00 kV_{DC}, 3.25 kV_{DC}의 가속조건으로 고장까지의 시간을 측정하고, 5개의 시료에 대해 전압 및 가속수명을 활용하여 3-point linear fitting을 수행한다. 활성화 에너지(E_a)도 실험을 통해 산출한다. 일정 전압 2.75 kV_{DC}에서 85°C, 95°C, 105°C의 가속조건으로 고장까지의 시간을 측정하고, 6개의 시료에 대해 전압 및 가속수명을 활용하여 3-point linear fitting을 수행한다.

도출된 전압계수(n), 활성화 에너지(E_a)를 이용하고, Low stress 조건인 2.75 kV_{DC}/25°C 조건과 High stress 조건인 3.00 kV_{DC}/85°C 조건에서 식(2)을 이용하여 가속계수(AF)를 계산한다. 마이카 고전압 커패시터를 3.00 kV_{DC}를 인가한 상태에서 85°C 챔버에 저장한다. 24시간 주기로 고전압 커패시터의 절연저항 값을 확인하고, 절연저항이 기준에 벗어날 때의 시간을 각각 체크한다. 전체 시료에 대해 해당 시간을 평균하여 가속수명($t_{가속}$)으로 한다. 가속조건에서 얻은 가속수명($t_{가속}$)과 가속계수(AF)를 다음의 식에 대입하여 2.75 kV_{DC}/25°C에서의 평균수명을 구한다.

$$t_{정상} = t_{가속} \times AF \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 환경시험

단자강도시험 중 당김 시험은 Fig. 3의 프로파일이 적용되었으며, 사용된 장비는 Instron사의 E1000 모델이다. 5조를 시험하였으며, 커패시터는 이상이 없음을 확인하였다. 굽힘 시험은 정해진 방법에 따라 5조를 수행하였으며, 시험 후의 커패시터는 이상이 없음을 확인하였다. 실제 마이카 고전압 커패시터를 취급하거나, 조립 공정 및 적용 제품의 시험 과정에서 단자에 미치는 힘에 의한 영향성이 없음을 확인하였다. 내습시험의 결과는 Table 2에 나타내었다. 시험 전과 후의 커패시터 특성값의 차이는 미미했으며, 3.7 kV_{DC}에서의 내전압도 이상이 없었다.

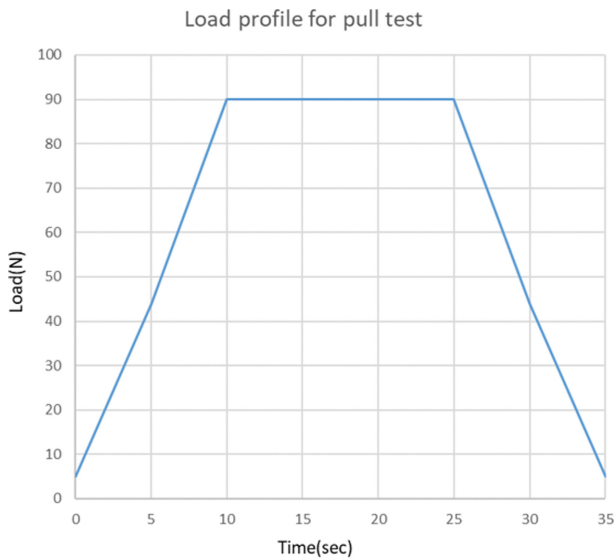


Fig. 3. Force profile of pull test.

열충격시험의 결과는 Table 3에 나타내었다. 내습시험과 마찬가지로 시험 전과 후의 커패시터 특성값의 차이는 미미했으며, 3.7 kV_{DC}에서의 내전압도 이상이 없었다.

3.2. 가속수명시험

기술의 지속적인 발전으로 산업에서 사용되는 많은 부

품 및 제품들은 다년간 또는 십년 이상의 수명을 가지게 되었다. 또한 장수명에 대한 요구는 더 증가하고 있는데 이는 고장에 도달하는 시간에 대한 충분한 마진을 가져 제품 이미지에 있어 고신뢰성을 확보하고자 함이다. 즉, 가속수명시험을 통해 높은 신뢰도를 가지는 제품에 대한 신뢰성평가지 직면하는 시간과 시료수의 벽을 극복하여 단기간에 제품의 신뢰도와 성능을 파악할 수 있게 된다. 방법상으로 보다 짧은 시간 내에 가혹한 조건에서 시험한 자료(수명 데이터)로 사용조건하의 수명, 신뢰도를 추정 및 예측하거나 약점을 발견하게 된다.

가속수명시험은 수행 후 가속조건에서 얻은 수명이 있으므로 정량적 시험이라고 할 수 있다. 이에 반해 정성적 가속시험이 있으며 Accelerated stress test와 Highly accelerated life test가 있다. Table 4에 정성적 가속시험과 정량적 가속시험의 특징을 비교하여 요약하였다. 고장을 발생시키는 가속방법은 사용률 가속과 스트레스 가속이 있다. 사용률 가속은 정상 사용 조건의 사용빈도보다 더 높은 사용 빈도로 시험을 실시하거나 정상 사용시보다 지속 시간을 늘이는 방법이다. 스트레스 가속은 제품의 고장 메커니즘을 가속시킬 수 있는 환경(온도, 습도 등) 또는 운용 스트레스 인자(전압, 압력)를 채택하여 시험을 실시한다. 이는 노화율(aging) 또는 제품 운용 스트레스 가속에 따라 고장을 짧은 시간내에 발생시킨 후, 수명과 스트레스 사이의 관계식을 이용하여 높은 스트레

Table 2 Humidity test results

No.	Before				After			
	Cp (nF)	DF (%)	IR (GΩ)	BV (kV _{DC})	Cp (nF)	DF (%)	IR (GΩ)	BV (kV _{DC})
1	105.5	0.34	42.4	3.7	106.2	0.41	39.2	3.7
2	108.4	0.38	38.6	3.7	106.4	0.35	41.5	3.7
3	107.5	0.36	43.5	3.7	103.8	0.31	45.5	3.7

Table 3 Thermal shock test results

No.	Before				After			
	Cp (nF)	DF (%)	IR (GΩ)	BV (kV _{DC})	Cp (nF)	DF (%)	IR (GΩ)	BV (kV _{DC})
1	106.3	0.37	36.4	3.7	107.5	0.35	34.9	3.7
2	107.1		42.7	3.7	108.1	0.39	37.8	3.7
3	108.1	0.33	37.3	3.7	106.5	0.41	36.8	3.7

Table 4 Comparison between qualitative and quantitative accelerated test

	Qualitative	Quantitative
Purpose	Design defect finding	Lifetime prediction
Characteristics	Design margin	Lifetime-stress relationship
Stress apply	Step, Progressive, Multiple	Constant
Object	Sub-system	Components
Failure mode	Un-expected	Expected

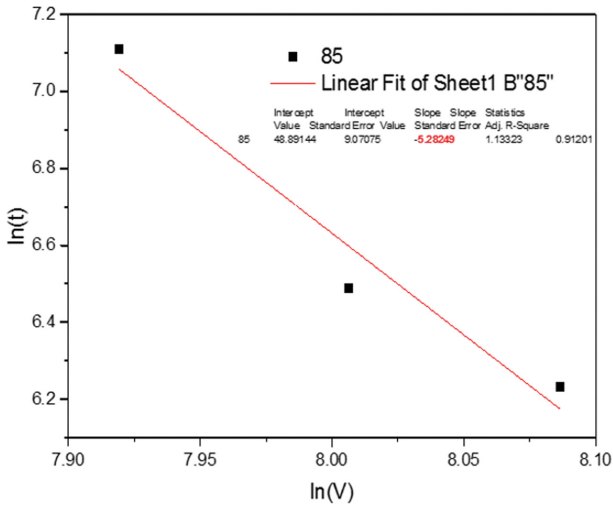


Fig. 4. Linear fitting result for voltage factor.

스 수준에서 수명자료를 정상 사용조건 수명자료로 환산하는 방법이다[12].

가속수명시험에 있어 중요한 개념이 가속성과 가속계수이다. 가속수명시험의 조건 간에는 반드시 가속성이 성립하여야 한다. 이는 각 조건에서 동일한 고장 메커니즘으로 제품의 수명이 결정된다는 것을 의미한다. 즉, 스트레스 수준을 지나치게 올려 가속수명시험을 행할 때 다른 스트레스 조건과는 상이한 고장 메커니즘에 의해 가속수명이 결정될 경우 다른 스트레스 조건과 가속성이 없다고 할 수 있다. 이를 통계적으로 보면 두 가속조건에서 수명자료를 확률지에 타점하였을 때, 각 조건에서 적합한 직선이 서로 평행하면 두 조건 사이에 가속성이 성립하는 것으로 인정할 수 있다. 한편 임의의 두 스트레스 조건 1, 2 사이에 가속성이 성립한다고 하면(조건 1은 정상 사용 조건, 조건 2는 가속 사용 조건이라고 함) 가속계수는 정상 사용 조건 수명을 가속 사용 조건 수명을 나눈 값이다. 즉, 가속조건에서 얻은 제품의 수명에 가속계수를 곱하면 정상 사용 조건에서의 수명을 예측할 수 있게 된다.

마이카 커패시터의 가속수명시험에서 전압계수 n 을 도출하기 위한 시험 결과 및 Linear Fitting 결과는 Fig. 4와 같고, 도출된 전압계수 n 은 5.28이다. 활성화 에너지 E_a 를 도출하기 위한 시험 결과 및 Linear Fitting 결과는 Fig. 5와 같고, 도출된 활성화 에너지는 0.805 eV이다. 현재까지 마이카 커패시터에 대한 전압 및 온도 가속모델에서 전압계수와 활성화 에너지가 보고된 적이 없으며 본 논문에서 실험적으로 가속모델식의 두가지 상수를 도출한 것은 의미가 있다고 할 수 있다. 이러한 상수는 재료의 종류, 첨가물의 종류, 소재의 구성 등에 따라 변할 수 있는 상수로서 소재부품의 수명을 보다 정확히 도출하기 위해서는 대상 시험품 마다 상수를 얻고 가속시험

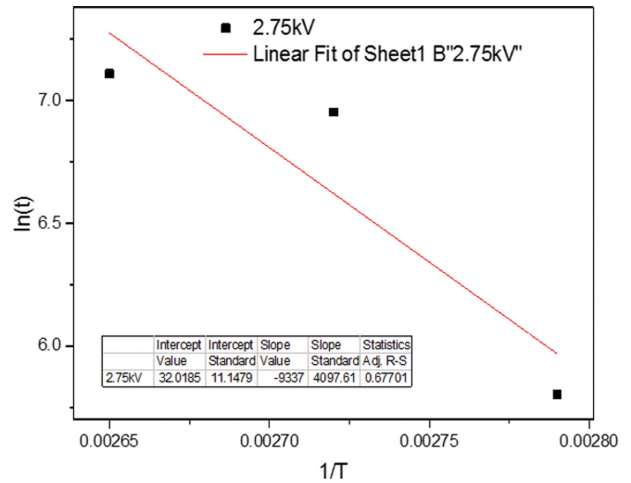


Fig. 5. Linear fitting result for activation energy (E_a).

을 통하여 정상사용조건에서의 수명을 결정하는 것이 바람직하다. 도출된 전압계수 n 과 활성화 에너지 E_a 를 이용하고, Low stress 조건인 T1 2.75 kV_{DC}/25°C 조건과 High stress 조건인 3.00 kV_{DC}/85°C 조건에서 식(1)을 이용하여 가속계수(AF)를 계산하면 가속계수가 496임을 확인할 수 있다.

마이카 고전압 커패시터 20개에 대해 가속조건인 3.00 kV_{DC}의 전압이 인가되도록 병렬로 연결하였으며 각 시험품에는 고정저항을 연결하여 조기에 고장이 발생하여 단락이 되는 시료에 대해 예방하였다. 온도조건은 85°C 챔버 저장 조건에서 전체 시료에 대해 24시간을 기준으로 각 시험품의 절연저항을 측정하였고 절연저항 기준 이하로 감소할 때를 가속조건에서의 각 시험품의 수명으로 결정하였다. 20개 시험품의 결과를 평균하여 마이카 고전압 커패시터의 가속수명($t_{1/3}$)이 679.2시간임을 확인하였다. 따라서 앞서 도출된 가속계수와 가속수명, 그리고 식(2)를 이용하여 정상조건에서의 수명이 336,883시간(38.5년)임을 확인하였다.

기폭장치에 사용되는 마이카 고전압 커패시터에 대한 가속수명시험을 통한 정상사용조건에서의 수명을 예측하였다. 앞서 서론에서 설명한 바와 같이 마이카 커패시터는 내충격성 및 내진동성이 매우 우수하다. 즉, 기계적인 스트레스는 수명에 치명적인 영향을 미치지 않을 것으로 생각할 수 있다. 기폭장치가 작동할 때 커패시터는 높은 전압으로 충전되고 순간적으로 방전한다. 즉, 커패시터 양단에 인가되는 전압이 중요한 스트레스이며 전압에 의한 커패시터의 열화는 주변 온도가 높을수록 증진될 것이다. 즉, 어떠한 소재부품의 수명이 어떠한 스트레스에 의해 치명적으로 결정되는지에 대한 정보가 필요하며 이러한 스트레스를 독립변수로 하는 가속수명식이 정의되어야 한다. 통상 가속수명식은 그 동안의 많은 경험에 의한 다양한 경험식이 존재하고 있으며 새로운 경험

식이 등장하고 있다. 마이카 고전압 커패시터의 수명을 좀 더 높은 신뢰성으로 도출하기 위해 본 논문에서 사용한 가속식을 수정할 필요가 있을 것이다. 한편, 전압과 온도 스트레스 하에서 어떠한 작용을 통해 마이카 고전압 커패시터의 절연저항이 감소되는 지 원인을 규명하고 고장 메커니즘을 확립하는 것이 향후 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 함침공정으로 제작된 국산 마이카 고전압 커패시터의 환경시험과 가속 수명시험을 실시하였다. 마이카 고전압 커패시터의 고장모드는 절연저항 감소 및 이를 통한 절연 파괴이며 핵심 가속 인자로 전압 및 온도를 선정하여 가속 수명시험을 실시하였다. 마이카 커패시터의 가속수명시험에서 가속수명모델의 중요 상수를 실험적으로 도출하였으며 전압계수 n 및 활성화 에너지 E_a 는 각각 5.28 및 0.805 eV이었다. 2.75 kV_{DC}/25°C 조건과 3.00 kV_{DC}/85°C 조건에서 위 상수값을 적용하여 가속모델식을 이용하여 도출한 가속계수는 496이었다. 마이카 고전압 커패시터 20개에 대하여 3.00 kV_{DC}/85°C 조건에서 가속수명시험을 실시하였으며 가속조건에서의 수명은 679.2시간이었으며 가속계수를 이용하여 도출된 마이카 고전압 커패시터의 수명은 38.5년으로 계산되었고 이를 통해 신관 및 기폭장치의 적용에 문제가 없음을 확인하였다.

References

- [1] M.Y. Yilmaz, "Design and analysis of a high voltage exploding foil initiator for missile system", Ankara: middle East Technical University (2013) 157.
- [2] Q. Tan, P. Irwin and Y. Cao, "Advanced dielectrics for capacitors", IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials 126 (2006) 1153.
- [3] D. Hennings, M. Klee and R. Waser, "Advanced dielectrics: bulk ceramics and thin films", Advanced Materials 3 (1991) 334.
- [4] J. Ho, T.R. Jow and S. Boggs, "Historical introduction to capacitor technology", IEEE Electrical Insulation Magazine 26 (2010) 20.
- [5] E.J. Yun, C.S. Choi, J.W. Kim and D.H. Lee, "A study on development of high voltage mica capacitors", The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 57 (2008) 1229.
- [6] T.E. Goodeve, G.C. Stone and L. Macomber, "Experience with compact epoxy-mica capacitors for rotating machine partial discharge detection", proceedings: Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. IEEE (1995) 685.
- [7] M. Saleem, M.A. Ansari and A.K. Saxena, "Study of standard mica capacitors with respect to time and temperature" Mapan 28 (2013) 25.
- [8] G.H. Rayner and L.H. Ford, "The stability of mica standards of capacitance" J. Sci. Inst. 28 (1951) 168.
- [9] MIL-STD-202H (Consolidated), Department of defense test method standard: Electronic and electrical component parts (April 18, 2015) 103.
- [10] L.A. Escobar and W.Q. Meeker, "A review of accelerated test models", Statistical Science 21 (2006) 552.
- [11] W. Nelson: Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, Data Analyses (Wiley, New York 2004) p.317.
- [12] J.F. Lawless: Statistical Models and Methods for Lifetime Data (John Wiley and Sons, New York 2002) p.269.