

## 기계적 분석을 통한 송전용 자기 애자의 열화 판단 및 파손 부위에 대한 연구

손주암<sup>1,2</sup>, 최인혁<sup>2</sup>, 구자빈<sup>2</sup>, 김태용<sup>1</sup>, 전성호<sup>1</sup>, 이윤정<sup>1</sup>, 이준신<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> 성균관대학교 정보통신대학

<sup>2</sup> 한국전력공사 전력연구원

### Determination of Deterioration and Damage of Porcelain Insulators in Power Transmission Line Through Mechanical Analysis

Ju-Am Son<sup>1,2</sup>, In-Hyuk Choi<sup>2</sup>, Ja-Bin Koo<sup>2</sup>, Taeyong Kim<sup>1</sup>, Seongho Jeon<sup>1</sup>, Youn-Jung Lee<sup>1</sup>, and Junsin Yi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

<sup>2</sup> Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, Daejeon 34056, Korea

(Received August 13, 2019; Revised September 4, 2019; Accepted September 25, 2019)

**Abstract:** Porcelain insulators have been used for a long time in 154 kV power transmission lines. They are likely to be exposed to sudden failure because of product deterioration. This study was conducted to evaluate the quality of porcelain insulators. After stresses were applied, the damaged regions of aged insulators were investigated in terms of chemical composition, material structure, and other properties. For porcelain insulators that were in service for a long time, the mechanical failure load was 126 kN, whereas the average mechanical failure load was 167.3 kN for new products. It was also determined that corrosion occurred at the metal pin part due to the penetration of moisture into the gap between the pin and the ceramic. Statistical analyses of failure were performed to identify the portion of the insulators that were broken. Cristobalite porcelain insulators fabricated without alumina additives had a high failure rate of 54% for the porcelain component. In the case of the addition of Alumina ( $Al_2O_3$ ) to the porcelain insulators to improve the strength of the ceramic component, a more frequent damage rate of the cap and pin of 73.3% and 27%, respectively, was observed. This study reports on the material component of  $SiO_2$  and the percentage of alumina added, with respect to the mechanical properties of porcelain insulators.

**Keywords:** Mechanical characteristic, Electromechanical failing load, Transmission line, Porcelain insulator

## 1. 서론

현재 우리나라의 경제 성장률은 연 2% 때의 성장률

을 보이고 있다. 약 50년 동안 연간 2%의 경제 성장률을 보일 때 전력수요는 약 2배 증가할 것으로 예측된다 [1]. 수용가의 전력수요 증가에 따라 1935년경 154 kV 평양 송전간선 완공으로부터 현재까지 84년간 우리나라는 154 kV 고전압 송전을 이어오고 있다 [2]. 오랜 기간 전력설비는 발전소에서 송, 배전을 통해 수용가로 공급되기까지 활선상태에서 전기적·기계적 스트레스 누적으로 인해 열화가 진행되고 있다 [3]. 활선상태의 누적 스트레스가 지속됨에 따라 지락 및 단락

✉ Junsin Yi; [junsin@skku.edu](mailto:junsin@skku.edu)

사고로 인한 인적·물적 사고 및 정전사고 발생으로 엄청난 금액의 경제적 손실이 초래되는 위험이 증가되고 있다 [4]. 노후 설비의 위험이 증가되는 전력설비 중 애자, 전선 및 금구류의 고장 불량률이 80% 이상을 차지한다. 80%의 높은 불량률에 비해 철탑과 전선의 절연 및 지지를 담당해 주는 송전용 애자에 대한 연구는 다른 전력설비에 비해 턱없이 부족한 게 현실이다. 본 연구에서는 국내 154 kV 송전선로에서 오랜 기간 활선 중인 약 120만 개의 자기 애자 중 alumina 성분의 신제품 및 두 가지 경년 시료를 발취하였고, cristobalite 성분의 세 가지 경년을 발취하여 기계적 특성 시험인 과전파괴하중 시험을 실시하였다. 신제품애자와 각 경년의 자기 애자의 인장하중 값 및 품질관리지수를 분석하였으며, 해당 자기 애자의 cap, pin 및 자기부 파손 부위에 대한 분석을 실시하여 결과를 통한 송전용 자기 애자의 건전성 판별을 위한 데이터 취득 및 연구를 실시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료 선정 및 과전파괴하중 시험 실시

자기 애자의 기계적 특성 연구를 위한 시험 시료를 표 1과 같이 구성하였다. 시험 시료는 N.G.K사의 25,000 lbs 규격의 현수애자로서, alumina 성분 및 cristobalite 성분으로 구성하였다. 시료는 신제품 시료를 기준으로 장기간 사용된 애자를 선별하여 시험을 실시하였으며, 시험데이터의 오차를 줄이고 신뢰도를 높이기 위해 시험당 3회 반복하여 시험을 실시하여 신제품 대비 열화되는 정도에 대한 연구를 진행하였다.

과전파괴하중 시험은 경성시험기사의 KSU-50M 인장하중기로서, 최대 하중 500 kN까지 인장하중이 가능한 시험기를 사용하였으며, 본 시험은 IEC 60383-1.

**Table 1.** Details of analyzed porcelain insulators.

Sample	Installed year	Age	Quantity [ea]	Component	Capacity [lbs]
A-1	2019	0	87	Alumina	25,000
A-2	1979	41	87		
A-3	1977	43	87		
C-1	1975	44	87	Cristobalite	
C-2	1969	51	87		
C-3	1966	54	87		

18항에 의하여 시험되었다. 해당 시험은 상용주파건조 섬락 시험 전압치(80 kV)의 75%의 전압, 즉, 60 kV 전압을 시험이 진행되는 동안 계속 유지시켰으며, 전기적 상황을 유지시킨 후 인장하중으로 118 kN이 넘어 파괴될 때까지 분당 규정 과전파괴하중치의 35~100% 비율로 점증시켜 파괴에 이를 때까지 증가시켰다. 시험이 끝난 후 자기 애자의 판정기준은 규정 과전 파괴하중치(118 kN) 이하에서 기계적 파손이 없어야 하며, 품질관리지수(Qs)값 3.0 이상이 충족되어야 한다. 측정된 값을 통해 품질관리지수를 계산하여 애자련의 이상 유무를 판단하였다. 품질관리지수 계산식은 식 (1)과 같다.

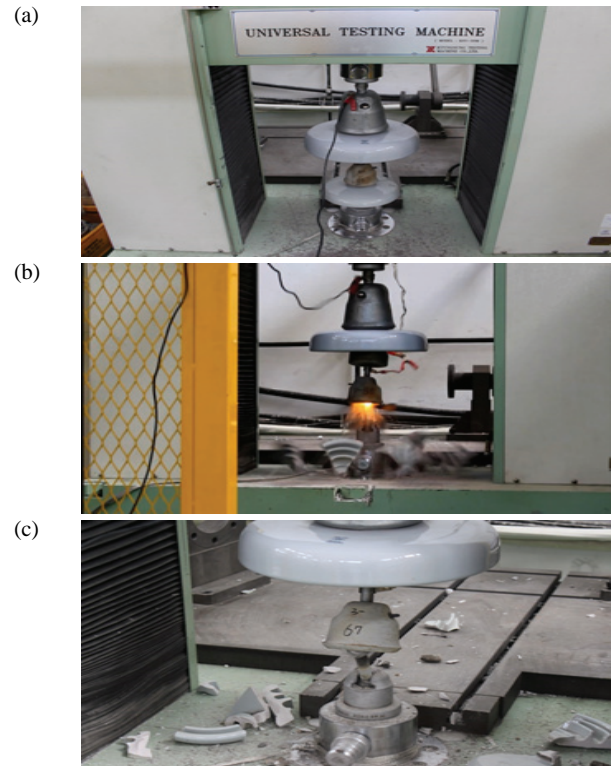
$$Q_s = \frac{\bar{R} - R_s}{S} \geq K(3.0) \tag{1}$$

$Q_s$  : 품질관리지수

$\bar{R}$  : 평균 과전파괴하중치

$R_s$  : 규정 과전파괴하중치

$S$  : 표준편차



**Fig. 1.** Electromechanical failing load test. (a) Before the experiment (sample c-2), (b) during an experiment (sample c-2), and (c) after experiment (sample c-2).

측정된 품질관리지수(Qs)를 산출하여 애자면에 대한 건전성 판별을 실시하였으며, 자세한 결과는 결과 및 고찰을 통해 제시되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 경년, 성분에 따른 인장하중의 측정 및 분석

그림 2(a)는 송전용 자기 애자의 성분 및 경년에 따른 인장하중 값을 나타낸 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 자기 애자 시료를 시험하여 경년 및 성분에 따른 인장하중 값을 측정하였고, 본 시험을 실시한 시료는 일반 과전파괴하중 시험을 진행한 시료로서, sample당 10개씩 3회 반복 시험을 진행하여 총 180개의 시료를 시험하여, 신뢰도 및 오차를 줄이기 위한 연구를 진행하게 되었다. 위와 같은 시료로 alumina 성분의 A-1, A-2 및 A-3의 시료를 시험하였고, 경년 0년(A-1)의 인장하중 측정 값은 167.73 kN로 측정되었으며, 경년 41년(A-2)이 되었을 때 측정 값 151 kN으로 신제품 대비 16.73 kN의 인장하중 값이 급격히 감소되는 것을 알 수 있었다. 경년 43년(A-3)으로 2년이 증가되었을 때 측정 값 경년 41년(A-2) 대비, 4 kN 소폭 감소하여 147 kN의 인장하중 값을 나타내어 경년 0년(A-1) 인장 하중 값 167.73 kN 대비 43년의 경년이 지나면 20.73 kN이 감소되는 걸 알 수 있었다. 경년에 따른 스트레스 누적으로 인해 열화가 발생되어 기계적 하중이 감소되는 현상을 알 수 있었다. Cristobalite 성분도 그림 1과 같이 시험을 진행하였다. C-1은 인장하중 값 156 kV로 alumina 성분의 41, 43년 시료의 인장하중 값보다 약 5~9 kN 높게 측정되었다. 경년이 1~3년 정도 오래되었지만 소폭 높은 하중 값을 나타내었다. 시료 C-2, C-3과 같이 경년 50년이 지나면서 급격히 인장하중 값이 감소하는 추세를 나타내었다. C-1의 높은 인장하중 값에서 C-2의 경년 50년이 지나면서 인장하중 값 139 kN으로 C-1 시료 대비 17 kN의 급격한 감소치를 나타내었으며, C-3의 인장하중 값 또한 대폭 감소하였다. C-3의 인장하중 값은 126 kN으로 C-2 대비 13 kN 감소된 것으로 측정되었으며, C-1의 경년 44년에서 약 10년 증가된 54년의 경년이 발생될 때 약 30 kN의 인장하중 값이 급격히 감소되는 현상이 발생되었다. Alumina 성분은 신제품 대비 경년이 지날수록 감소되는 인장하중 값이 소폭 감소되는 추세를 보였지만, cristobalite 성분은 경년 50년이 지나면서

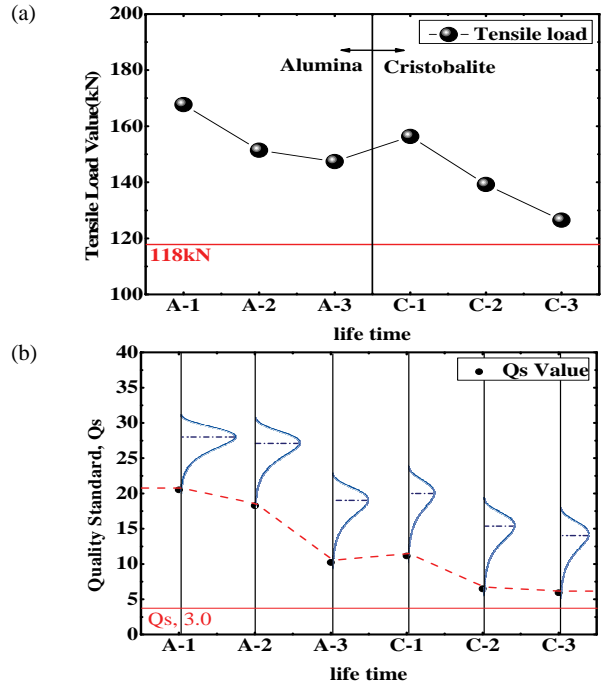


Fig. 2. Electromechanical failing load value. (a) Tensile load value and (b) quality standard, Qs.

급격한 열화 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 그림 2(b)는 각 시료의 인장하중 값의 품질관리 지수이다. A-1 시료의 품질관리지수는 기준 값 3.0의 약 7배로 20.51의 우수한 품질관리지수 값을 나타내었으며, A-2: 18.26, A-3: 10.22, C-1: 11.14, C-2: 7.42, C-3: 5.92로 측정되었다. C-3 시료는 A-1의 1/4정도 값으로 급격한 열화가 진행되었다. 오랜 기간 활선상태에서 열화가 진행된 자기 애자의 열화원인 분석은 다음과 같다. 오랜 인장하중의 스트레스로 본연의 모습에서 변형이 생겨 pin과 시멘트 부분의 틈새에 습윤한 습기가 침투되어 애자 시멘트 내부에 존재하는 알칼리와 침투된 습기가 반응되어 실리카 겔을 생성하여 팽창으로 인한 열화가 진행된 것으로 사료된다 [5-8]. 즉, 알칼리 실리카 반응(alkali silica reaction)에 의하여 열화가 진행된 것을 알 수 있었다.

#### 3.2 파손부위 측정 및 분석

과전파괴하중 시험을 통한 인장하중 값 측정 후 시험이 완료된 자기 애자를 검사하여 파손된 부위에 대한 분석을 실시하였다. 그림 3과 같이 과전파괴하중 시험을 실시한 자기 애자에 대하여 파손된 cap, pin 및 자

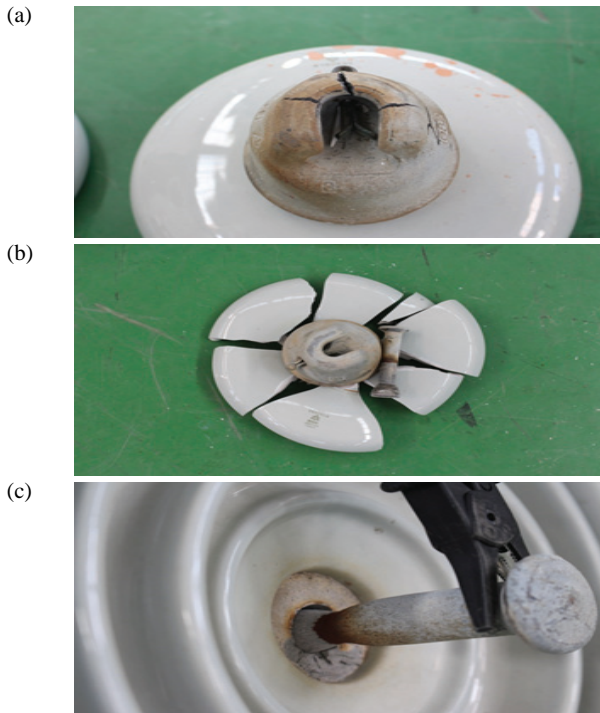


Fig. 3. Insulators partial damaged. (a) Cap break (sample A-1), (b) porcelain break (sample C-3), and (c) pin break (sample A-3).

기부에 대한 파손 형상을 제시하였으며, 그림 4, 5를 통해 alumina 및 cristobalite 성분의 파손부분에 대한 분석을 진행하였다. 그림 3과 같이 시험이 끝난 자기 애자는 3가지 유형으로 파손되었으며, 그림 4(b)와 같이 cap, pin 및 자기부의 파손부위를 백분율로 계산하여 그림 4, 5로 제시하였다. 일반 과전파괴하중 시험의 alumina 성분 파손에서 자기부 파손은 0%로 전무하였다. Pin의 파손이 27%로 다소 낮은 파손율을 나타내었지만, 그림 3(c)와 같이 alumina 성분에서 pin의 변형뿐만 아니라 pin의 절단 및 시멘트 파손 등 여러 현상으로 파손되었다. 모든 시료에서 cap의 파손이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, cap의 파손은 73%로 pin의 파손에 약 3배 많이 파손되었다. Alumina 성분의 파손 현황을 보았을 때, 자기 애자 전체의 응력이 집중되는 cap부의 파손이 가장 많이 발생되었다.

동일 조건의 자기 애자를 발취하여 일반 과전파괴하중 시험, 경년 변화 후 과전파괴하중 시험 및 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험을 진행하였으며, 해당 시험 후 파손된 부위에 대한 결과를 제시하였다. 위에서 진행한 경년 변화 시험 및 내아크 시험에 대한 조건은 한전 ES-5970-0010 규격에 의거하여 진행하였으며, 자세한 조건은 아래와 같이 서술하였다. 경년 변화 시

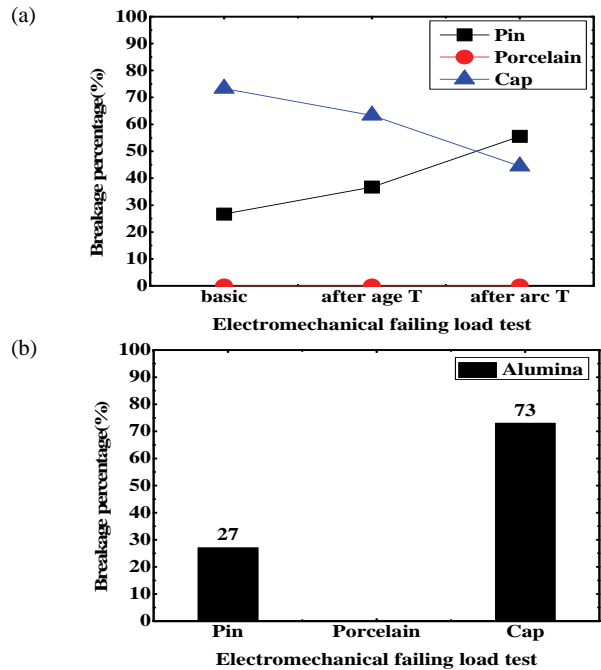


Fig. 4. Damage value of alumina component. (a) Damage after each test and (b) percentage of breakage.

험에서는 규정과전파괴 하중치인 118 kN의 60%에 인장하중을 인가하여 -30°C에서 +40°C로 각 4시간 이상의 열주기로 96시간의 경년 변화를 실시하는 시험이고, 내아크 시험은 3개의 시료를 1련으로 하여 규정된 장력을 인가한 후 단상 교류전류로서 Arc 전류와 지속 시간의 곱으로 72kA·Cycle의 Arc 전류를 인가하여 파손 유무를 판단하는 시험이다. 위와 같은 시험이 끝난 후 자기 애자의 파손 현황을 파악하여 그림 4(a)와 같이 그래프를 제시하였다. 제시된 alumina 성분 그래프에 사용된 시료는 일반 과전파괴하중 시료 30개씩 90개, 경년 변화 시료 또한 30개씩 90개 및 내아크 시료 27개씩 81개를 시험하여 아래와 같은 그래프를 제시하였다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 일반 과전파괴하중 시험에서 제시된 파손율과 마찬가지로 경년 변화 후 과전파괴하중 시험 및 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험에서도 자기부 파손 현황은 0%로 전무하였다. 위의 결과와 같이 alumina 성분의 자기 애자는 cristobalite의 약 2배의 열팽창 계수 차이로 인해 자기부 내, 외부적으로 견고하고 높은 내구성을 지니고 있는 걸 알 수 있었으며 [9-13], alumina 성분에 corundum의 결정상이 많이 첨가되어 열적, 충격 등 기계적 우수성이 향상된 것을 알 수 있었다 [14-17].

반면, 일반 과전파괴하중 시험에서 가장 많은 파손

을 보였던 cap부의 파손 부위에서 경년 변화 후 과전 파괴하중 시험을 거친 자기 애자의 파손 부위가 일반 과전파괴하중 시험의 파손율 73.3%에서 63.3%로 약 10% 감소되었다. 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험을 실시하여 파손된 파손율을 계산하였을 때, 44.4%의 파손율을 나타내었으며, 일반 과전파괴하중 시험에서 나타난 파손현황보다 28.9%로 감소하는 경향을 나타내었다. 반대로 pin의 파손율 26.7%에서 낮은 파손율을 나타내었다. 이후 경년 변화 시험 후 과전파괴하중 시험을 진행하였을 때, 파손율은 36.7%로 10% 증가하였다. 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험에서 파손율 55.6%로 일반 과전파괴하중 시험의 파손율 대비 28.9% 증가하여 내아크 시험으로 인한 열적 스트레스로 pin의 응력이 집중되는 현상이 발생되었다. 그림 5도 그림 4와 같이 동일 시험을 진행하였으며, 자세한 측정 파손현황은 다음과 같다.

그림 5(b)와 같이 cap, pin 및 자기부의 파손부분을 백분율로 계산하여 그래프로 제시하였다. 일반 과전파괴하중 시험의 파손에서 자기부 파손은 54%로 측정되었으며, alumina 성분과 반대로 가장 높은 파손율은 자기부인 것을 알 수 있었다. Pin의 파손은 13%로 다소 낮은 파손율을 보였지만, cristobalite 성분에서도 pin의 변형뿐만 아니라 pin의 절단 및 시멘트 파손 등 여러 현상으로 파손되었다. 모든 시료에서 자기부의 파손이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 자기부의 파손은 54%로 pin의 파손에 약 4배 많은 파손현상을 나타내었다. Cristobalite 성분의 파손 현황을 보았을 때, 자기 애자 전체의 집중되는 응력에서 자기부의 파손이 가장 많이 발생되었다. 동일 조건의 자기 애자를 발취하여 일반 과전파괴하중 시험, 경년 변화 시험 후 과전파괴하중 시험 및 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험을 진행하였으며, 해당 시험이 끝난 후 자기 애자의 파손 현황을 파악하여 그림 5(a)와 같이 각 시험 후 파손되는 부분의 그래프를 제시하였으며, 제시된 cristobalite 성분 그래프에 사용된 시료는 일반 과전파괴하중 시료 30개씩 90개, 경년 변화 시료도 30개씩 90개 및 내아크 시료는 27개씩 81개를 시험하여 아래와 같은 그래프를 제시하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 일반 과전파괴하중 시험에서 제시된 파손 현황 그림 5(b)와 마찬가지로 경년 후 과전파괴하중 시험 및 내아크 후 과전파괴하중 시험에서도 자기부 파손 현황이 가장 높은 54%로 파손되었다. 일반 과전파괴하중 시험에서 가장 많은 파손을 보였던 자기부의 파손 현황에서 경년 후 과전파괴하중 시험을 진행한 자기 애자의 파손 부위가

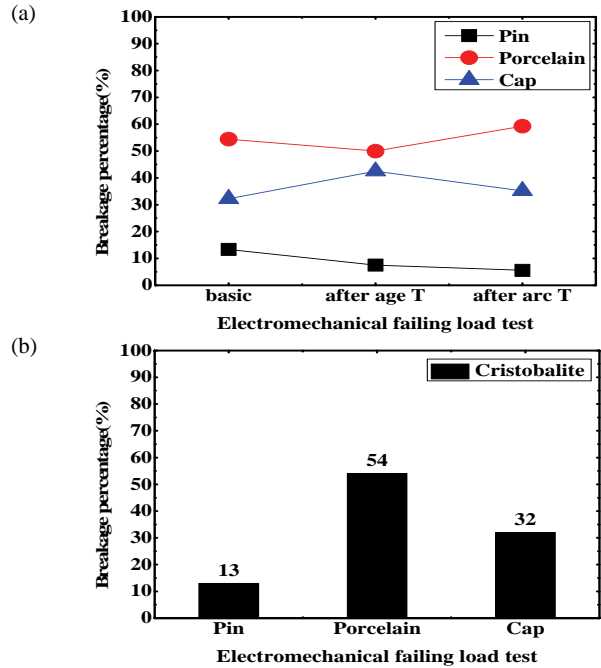


Fig. 5. Damage value of cristobalite component. (a) Damage after each test and (b) percentage of breakage.

일반 과전파괴하중 시험의 파손율 54.4%에서 50.0%로 약 4.4% 소폭 감소하였다. 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험을 진행하여 파손된 파손율을 분석하였을 때, 59.3%의 파손율을 나타내었으며, 이는 일반 과전파괴하중 시험에서 나타난 파손현황보다 약 4.9%로 증가하였다. Cristobalite 성분의 SiO<sub>2</sub> 물질이 많이 첨가되어 자기 애자가 제작되어 자기부 내부 응력이 감소한 것을 알 수 있었다 [9-13].

#### 4. 결론

본 논문은 과전파괴하중 시험을 실시하여 성분 및 경년별 인장하중값 측정 및 파손부위의 파손율 파악의 연구를 진행하였으며, 자기 애자의 기계적 하중의 다양한 접근방식으로 건전성 분석을 실시하였다. 본 시험을 실시한 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. Alumina 성분의 자기 애자의 과전파괴하중 시험을 실시한 결과 표 1과 같이 A-1, A-2 및 A-3으로 구성하였으며, A-1의 인장하중값 167.73 kN에서 동일 성분의 경년이 약 43년 지났을 때, 20.73 kN 감소되었으며, 품질관리지수(Qs)값 20.51에서 10.22로 약 절반 정도 감소되었다. Cristobalite 성분의 자기 애자의 과

전파괴하중 시험을 실시한 결과 표 1과 같이 C-1, C-2 및 C-3로 구성하였으며, C-1의 인장하중값 156 kN에서 동일 성분의 경년이 약 10년 지났을 때, 약 30 kN 감소하였고, 신품대비 경년 50년의 열화가 진행되었을 때 급격히 기계적 열화가 진행되었으며, 품질 관리지수(Qs)값 또한 11.14에서 5.92로 5.22가 감소되었다. 장기간 인장하중의 스트레스로 본연의 모습에 변형이 생겨 pin과 시멘트 부분의 틈새에 습윤한 습기가 침투되어 애자 시멘트 내부에 존재하는 알칼리와 침투된 습기가 반응되어 실리카 겔을 생성하여, 팽창으로 인한 열화가 진행되었으며, 알칼리 실리카 반응(alkali silica reaction)에 의하여 열화가 진행된 것을 알 수 있었다. 다음 alumina 성분의 파손부위를 분석한 결과 일반 과전파괴하중 시험 시 cap 부분의 파손이 73%로 가장 높았으며, 내아크 시험 후 과전파괴하중 시험을 진행하여 파손부위를 조사한 결과 기존 cap의 파손보다 28.9% 증가되었다. 이는 cristobalite의 약 2배의 열팽창 계수 차이로 인해 자기부의 내, 외부적으로 견고하고 높은 내구성을 지니고 있는걸 알 수 있었으며, corundum의 결정상이 많이 첨가되어 열적 충격 등 기계적 우수성이 향상된 것을 알 수 있었다. Cristobalite 성분의 파손 부위를 분석한 결과 SiO<sub>2</sub>의 성분이 많이 첨가되어 자기재 내외부의 기계적 강도가 감소하여 자기부의 파손이 54%로 가장 높은 것으로 측정되었다. 기계적 하중에 의한 파손 및 변형은 애자련의 단락사고로 이어져 큰 인명 사고 및 경제적 손실이 발생될 것으로 사료된다. 해당 자기 애자에 대한 성분별 인장하중 시 응력이 집중되는 부위를 파악하여 사고를 미연에 방지할 수 있는 자료로 사용되길 바란다.

## ORCID

Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

## REFERENCES

- [1] Korea Institute for International Economic Policy, MOEF OECD Economic Surveys: Korea (2012).
- [2] History of Korea Electric Power Corporation (K.E.P.C.O), <http://home.kepco.co.kr/kepco/KE/B/htmlView/KEBAHP00307.do?menuCd=FN01010103> (2019).
- [3] A. Rawat and R. S. Gorur, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16**, 107 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784557>]
- [4] Z. Guan, X. Wang, X. Bian, L. Wang, and Z. Jia, *Proc. 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* (IEEE, Philadelphia, USA, 2014) p. 227-230. [DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2014.6869381>]
- [5] S. Multon and F. Toutlemonde, *Cem. Concr. Res.*, **36**, 912 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.012>]
- [6] H. Olafsson, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. On Alkali Aggregate Reaction in Concrete* (1986) p. 461-465.
- [7] C. Larive, Paris Tech. Institut Des Sciences Et Technologies Paris Institute of Technology (1997). [Tel-00520676] <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00520676/>
- [8] S. Multon and F. Toutlemonde, *Cem. Concr. Res.*, **40**, 924 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.011>]
- [9] I. P. Swainson and M. T. Dove, *Phys. Chem. Miner.*, **22**, 61 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00202681>]
- [10] F. Aumento, *Am. Mineral.*, **51**, 1167 (1966).
- [11] C. E. Brackbill, H. A. Mckinstry, and F. A. Hummel, *Am. Ceram. Soc.*, **34**, 107 (1951). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1951.tb11616.x>]
- [12] E. Demirkesen, Z. E. Erkmen, and N. Yildiz, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**, 3619 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb02289.x>]
- [13] I. A. Aksay, J. A. Pask, and R. F. Davis, *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**, 332 (1979). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1979.tb19071.x>]
- [14] P. Ramaswamy, S. Vynatheya, and S. Seetharamu, *Proc. the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004* (IEEE, Toulouse, France, 2004) p. 423. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSD.2004.1350381>]
- [15] J. M. Amigó, F. J. Serrano, M. A. Kojdecki, J. Bastida, V. Esteve, M. M. Reventós, and F. Martí, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **25**, 1479 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.05.019>]
- [16] N. S. Mehta, P. K. Sahu, P. Tripathi, R. Pyare, and M. R. Majhi, *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio*, **57**, 151 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.11.002>]
- [17] P. Krupa and S. Malinarič, *Ceram. Int.*, **41**, 3254 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.015>]