

반복과전류에 의한 퓨즈 엘리먼트의 용단특성에 관한 연구

(A Study on the melting Characteristics of Fuse Element by Repeating Overcurrent)

김윤현*

(Youn-Hyun Kim)

요 약

본 논문은 고압용 전류제한 퓨즈의 열화 요인으로 작용되는 반복과전류에 의한 퓨즈 엘리먼트의 용단특성을 시험을 통하여 분석 및 규명하였다. 반복과전류에 의한 열화 진행 속도를 규명하기 위하여 엘리먼트 노칭 형상별 열 해석을 수행하였으며 관형, 환형의 다양한 시험용 엘리먼트의 형상을 설계, 제작하여 이를 기중상태 및 규사충전상태의 소호제 유무에서 부하율을 조정하여 반복과전류 시험을 통한 용단특성을 분석, 수명과의 관계를 예측할 수 있는 자료를 제시하였다. 본 논문의 시험을 통하여 반복과전류에 의한 소호제와의 마찰로 퓨즈 엘리먼트의 변형 및 단면의 감소와 반복응력으로 인한 균열이 발생하여 퓨즈 반복 횟수에 따른 수명을 단축시키는 문제점의 도출과 엘리먼트 노칭 형상에 따라서 용단 특성이 차이가 있음을 알 수 있었다. 본 논문의 결과물은 재료의 마찰과 반복 전류의 부하율에 따른 반복 수명과의 상관관계에 관한 내용으로 고압용 전류제한 퓨즈의 성능 향상 개선을 위한 설계 시 중요한 기초 자료로 활용되리라 기대된다.

Abstract

This paper propose analysis and examination of the melting characteristic of fuse elements by repeating overcurrent as a depletion factor of high pressure current limiting fuse through test following existence and nonexistence of extinction material and various configuration of elements. To examine deterioration progress rate by repeating overcurrent we analyzed heat for various element notching configuration, designed plate type, ring type element and estimated the relationship with life span by analyzing breaking characteristic through repeating overcurrent test with adjusting load factor at Silicon Dioxide(SiO₂) filled state or in air. A Crack by repeat stress, decrease of section and transformation by friction with extinction material by repeating overcurrent causes a problem which shortens life span based on fuse repeating frequency. Since the contents of this paper might be useful to research the correlation between friction of materials and repeating life span based on load factor of repeating current, the quality of product would be improved through solution of the problem.

Key Words : Fuse Element, Melting Characteristics, Repeating overcurrent, Current limiting fuse

* 주저자 : 한밭대학교 전기전자제어공학부 부교수

Tel : 042-821-1099, Fax : , E-mail : yhyunk@hanbat.ac.kr

접수일자 : 2010년 1월 18일, 1차심사 : 2010년 1월 20일, 심사완료 : 2010년 2월 4일

1. 서 론

과워퓨즈는 고압선로에서 일정 값 이상의 전류가 일정시간 이상 통전 될 경우 퓨즈의 가용재, 즉 엘리먼트가 내부에서 발생하는 열에 의하여 용단되어 전력계통을 분리함으로써 전력계통과 기기 및 선로를 보호하는 전기설비로 전류제한 퓨즈라 불리는 한류형과 컷 아웃 스위치와 같은 비한류형으로 구분된다. 고압 전류제한 퓨즈는 다른 과전류 보호기에 비해 속도성, 한류성능, 소형 그리고 저렴하다는 이점을 가지고 있기 때문에 여러 용도에 사용되고 있지만 그 동작원리가 과전류에 의한 주열에 의해 퓨즈 엘리먼트를 용융시켜서 통과전류와 용융시간과의 사이에 계전기와 같은 반한시 특성을 내는 것이므로 정상시의 통과전류에 의해서도 상당한 발열을 수반하여 열화되기 쉽고 이점은 차단불능의 소전류 영역을 발생시키는 중대한 약점도 가지고 있다[1-2]. 특히 최근에는 역률 조정이나 전력손실 저감이 실시되어 고압회로에 있어서도 빈번하게 전원이 개폐되게 되어 열화 되기 쉽다는 퓨즈의 약점이 나타났다.

지금까지 밝혀진 퓨즈의 열화 요인으로는 과전류 누적시간에 의한 열화와 반복과전류에 의한 열화로 밝혀지고 있다. 이중 과전류 누적시간에 의한 열화는 과전류에 의한 온도상승으로 엘리먼트 재료의 증발 및 결정의 약화에 의한 열화의 가능성이 제기되었으나, 은 엘리먼트의 경우 고온에서 산화은이 은과 산소로 분해하므로 문제가 되지 않는다. 이에 비해 반복과전류는 엘리먼트에 변형, 피로, 소호제와의 마모손상을 일으키며, 특히 소호제와의 마찰로 변형 및 단면적의 감소와 반복응력으로 인한 균열이 발생하여 열화하는 특성을 나타내고 있다[3].

이렇듯 반복과전류는 퓨즈 열화의 주요 원인으로서 제품 수명 향상을 위해서는 엘리먼트와 소호제에 대한 재료, 구조, 설치 및 충전방식에 대한 연구가 요구되고 있으며 이에 관련하여 전 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 국내의 경우 최근 KS C 4612에서는 최소한의 개폐 수명을 명시하였으며, RS C 0090을 신설하여 부하율에 따른 최소 개폐 수명에 대한 신뢰성평가 시험을 도입하여 적용하는 연구가

진행 되고 있다[4-5]. 그러나 아직 구체적인 모델링을 통한 시험 등 기초 시험 결과와 자료의 제시가 없어 고압 퓨즈의 개발 및 성능개선에 많은 어려운 점이 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 신뢰성 있는 제품 개발 시 적용을 위하여 노칭 형상의 엘리먼트를 모델링하고 각각의 노칭 형상에 따른 엘리먼트 내부의 열 전달 특성을 시뮬레이션하여 얻은 결과를 기반으로 엘리먼트 시제품을 설계, 제작하여 이 시제품을 기준 상태 및 규사충전상태에서의 반복과전류시험을 통한 용단특성을 분석하여 반복횟수와 부하율 관계, 열화 요인 등을 규명하여 고압 전류제한 퓨즈의 반복과전류에 의한 수명관계를 예측하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시험방법

본 시험 대상시료는 반복과전류에 의한 열화 진행 속도를 규명하기 위하여 엘리먼트 노칭 형상에 따른 열해석을 진행하여 이를 기반으로 설계하였으며 엘리먼트는 판형과 환형 두 종류를 제작하였다. 시험은 기준상태 및 규사충전상태에서 용단시험과 반복과전류 시험을 수행하고 용단특성을 분석하여 퓨즈의 열화 요인을 규명하였으며 과단부하율을 계산함으로써 고압 전류제한 퓨즈의 반복과전류에 의한 수명 관계를 예측하고자 하였다.

2.1.1 엘리먼트 노칭 형상에 따른 열해석

가) 시뮬레이션 모델링

퓨즈 엘리먼트에 흐르는 전류에 의해 발생된 열은 전류의 흐름과 같이 엘리먼트에 전도 되게 되는데 이때 노칭 부위에서 면적의 감소로 인하여 전류 밀도가 높아지고 그로인해 노칭 부분에서 열이 발생하여 온도가 상승하게 된다. 이 때 열은 엘리먼트 노칭 형상에 따라 온도변화에 상당한 영향을 받게 된다. 따라서 엘리먼트 노칭 형상이 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위하여 그림 1과 같은 3가지 형태의 엘리먼트 노칭 형상을 모델링 하였고 프로그램 Fluent Ver 6.x를 사용한 수치해석적 방법을 이용하여 온도 분포 특성

을 파악하였다.

여기서 엘리먼트는 전체길이가 8.5[mm]로 노칭 부분의 두께는 0.7[mm]이고 노칭의 폭은 2[mm]의 형상으로 설계하였다.

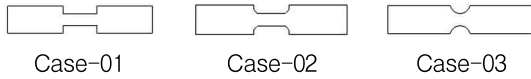


그림 1. 퓨즈 엘리먼트 노칭 형상
Fig. 1. The shapes of fuse element notching

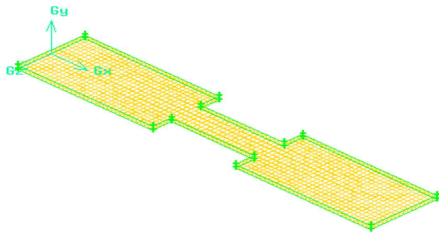


그림 2. Case-01 Mesh 형상
Fig. 2. The Case-01 Mesh shape

그림 2는 모델 중 Case-01의 시뮬레이션 mesh 형상을 보여주고 있으며 Mesh 개수는 약 2,700개로 분할하였다.

해석영역의 경계조건은 퓨즈 엘리먼트 노칭 형상에서 왼쪽을 inlet 오른쪽을 outlet으로 설정하고 각각 온도를 783.15[K], 773.15[K] 그리고 발열량을 2.5 ([W/m³])으로 설정하였으며 또한 엘리먼트의 재질을 각각 Silver(Ag)로 설정하였다.

나) 시뮬레이션 결과분석

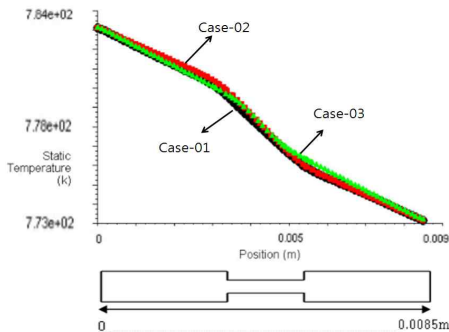


그림 3. 엘리먼트의 가로방향 온도분포
Fig. 3. The temperature distribution of element

그림 3는 엘리먼트의 형상에서 세로방향의 길이 1.6[mm] 중 0.8[mm]의 위치에서 가로방향의 온도를 그래프로 나타낸 것이다. 세 형상 모두 노칭이 시작되는 부분에서 그래프의 기울기가 변화되는 것을 확인할 수 있다.

세 가지의 그래프 중에서 미세하지만 기울기 변화가 가장 큰 것은 Case-02이고 기울기의 변화가 가장 적은 그래프는 Case-01로 나타났다.

그림 4의 그래프는 엘리먼트의 가로방향 8.5[mm]의 중심, 즉 노칭부분에서 세로방향의 세 가지 형상의 온도를 나타낸 그래프이다. 세 그래프에서는 세로 위치에 따라 온도 변화는 차이가 없고 온도그래프를 비교하면 기울기에서 비교한 것과 같이 Case-02, Case-03, Case-01 순으로 온도가 높게 나타나는걸 알 수 있다.

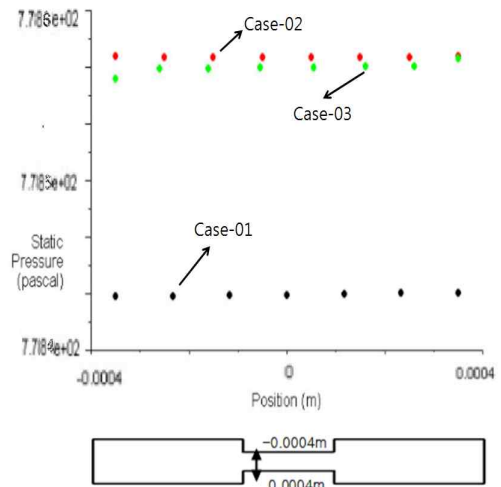


그림 4. 노칭 중심의 세로방향 온도그래프
Fig. 4. The temperature distribution of element

이는 순간적 과전압으로 인한 열이 발생하였을때 Case-02, Case-03, Case-01 순으로 열의 전도가 빠르게 이루어지고 과전압에서 퓨즈 엘리먼트의 용단 시간도 위의 순서와 일치할 것으로 예상할 수 있다.

2.1.2 엘리먼트 설계 및 제작

엘리먼트 노칭 형상에 따른 열해석 결과, 순간적인 열이 발생하였을때 열의 전도가 빠르게 이루어져 과전압에서 퓨즈 엘리먼트의 용단 시간이 빠를 것으로

예상되는 노칭 형상인 그림 1의 Case-2, Case-3 형상으로 0.1[t] 판형, 0.28[Φ] 환형 엘리먼트를 설계하였다. 0.1[t] 판형 엘리먼트는 0.1[t]의 판형 은선에 그림 1의 Case-2 노칭 형상 1개에 Case-3 노칭 형상 3개를 이어서 설계, 제작하였다. 0.28[Φ] 환형 엘리먼트는 은선 자체가 0.28[Φ] 환형으로 그림 1의 Case-3 노칭 형상으로만 설계하였다.

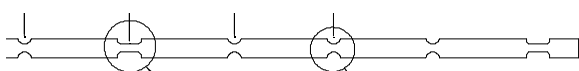


그림 5. 0.1[t] 판형 엘리먼트 설계
Fig. 5. The design of 0.1[t] plate shape element

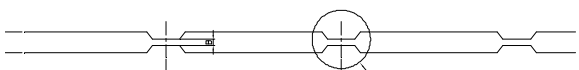


그림 6. 0.28[Φ] 환형 엘리먼트 설계
Fig. 6. The design of 0.28[Φ] ring shape element

2.1.3 용단 및 반복과전류 시험

본 시험 대상시료는 99.9[%]의 은 성분으로 설계된 0.1[t] 판형과 0.28[Φ] 환형 엘리먼트를 100[mm] 크기로 사용하였으며, 소호제로는 80 mesh 규사를 사용하였다. 기중상태는 실험측정지그에 엘리먼트를 설치하여 공기중에서 측정하였으며, 규사충전상태는 실험측정지그에 엘리먼트를 설치한 후 강화 유리관에 넣고 80 mesh 규사를 엘리먼트가 설치된 강화 유리관에 넣고 고무망치로 가볍게 두드려서 완전히 충전시켰다.

설치된 기중상태, 규사충전상태의 엘리먼트는 저항 측정기로 저항을 측정하였다. 기중상태와 규사충전상태에서의 저항은 유사하였고, 0.28[Φ] 환형 엘리먼트의 저항은 26[mΩ]에서 27[mΩ] 이었으며 0.1[t] 판형 엘리먼트는 13[mΩ]에서 14[mΩ] 이었다. 용단전류는 실부하 상태의 전류발생기를 이용하여 기중상태와 규사충전상태에서의 용단전류값을 측정하였으며, 오실로스코프를 사용하여 값을 기록하였다.

반복과전류 측정도 실부하 상태의 전류발생기를 이용하여 기중상태와 규사충전상태를 측정하였으며 통전조건은 측정된 용단전류값을 이용하여 설정하였다. 시험조건은 표 1와 같으며 그림 7은 시험 지그를 보여주고 있다.

표 1. 반복과전류 시험조건
Table 1. The test condition of repeating overcurrent

엘리먼트 조건	· 0.28[Φ] 환형 · 0.1[t] 판형
외부조건	· 기중상태 · 규사충전상태
반복과전류 조건	· 용단전류의 95[%] · 용단전류의 90[%] · 용단전류의 85[%]

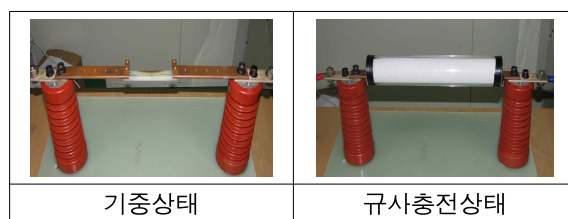


그림 7. 용단, 반복과전류 측정 지그
Fig. 7. The test jig

2.2 용단시험 결과

용단시험은 퓨즈에 전류가 흘러서 엘리먼트가 용단되기까지의 전류와 시간과의 관계를 나타내는 시험으로 여러번 측정된 실험결과를 용단시간-전류 특성그래프로 그려서 용단전류를 결정하였으며 그림 8은 용단시간-전류 특성 그래프 시험 결과를 보여주고 있다.

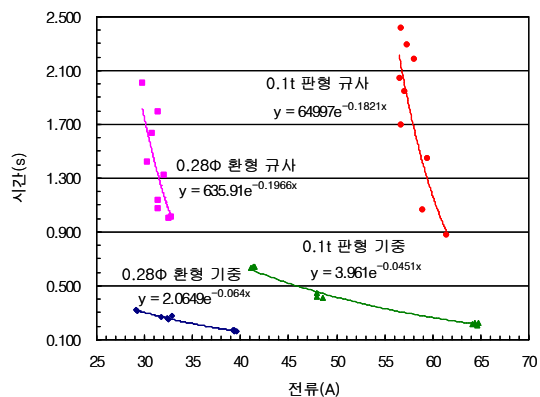


그림 8. 용단시간-전류 특성 그래프
Fig. 8. The melting time-current characteristics

표 2. 용단시간-전류 값
Table 2. The test results of melting time-current

엘리먼트 형상	소호제	용단 시간	용단 전류	용단전류/ 시간비교
0.28[Φ] 환형	기준	0.16초	39.5[A]	30[A]/ 0.3초
0.28[Φ] 환형	규사	1.3초	32[A]	30[A]/ 2.1초
0.1[t] 판형	기준	0.21초	64.7[A]	60[A]/ 0.3초
0.1[t] 판형	규사	2초	57.2[A]	60[A]/ 0.9초

표 2에 용단시간과 용단전류 시험결과를 정리하여 제시하였으며 표에서 알 수 있듯이 같은 용단전류에서 용단시간이 기준상태보다 규사충전상태가 더 길었으며, 0.28[Φ] 환형보다 0.1[t] 판형이 더 길게 나타났다. 이는 단시간 엘리먼트 용단시 규사충전상태에서는 규사에 의한 열저항이 감소하여 기준상태보다 높은 전류가 필요함을 알 수 있었다.

2.3 반복과전류 시험 결과

반복과전류 시험은 반복과전류에 의한 퓨즈의 수명을 예측하기 위한 시험으로 표 3은 표 2의 용단시간-전류 값으로 선정된 반복과전류 실험조건이다.

표 3. 반복과전류 조건
Table 3. The test condition of repeating overcurrent

엘리먼트 형상	소호제	용단전류 (시간/ 전류)	반복과전류 조건([%])	통전/ 휴지 조건
0.28[Φ] 환형	기준	0.16초/ 39.5[A]	용단전류 95, 90, 85	0.16초/ 10초
0.28[Φ] 환형	규사	1.3초/ 32[A]	용단전류 95, 90, 85	1.3초/ 10초
0.1[t] 판형	기준	0.21초/ 64.7[A]	용단전류 95, 90, 85	0.21초/ 10초
0.1[t] 판형	규사	2초/ 57.2[A]	용단전류 95, 90, 85	2초/ 10초

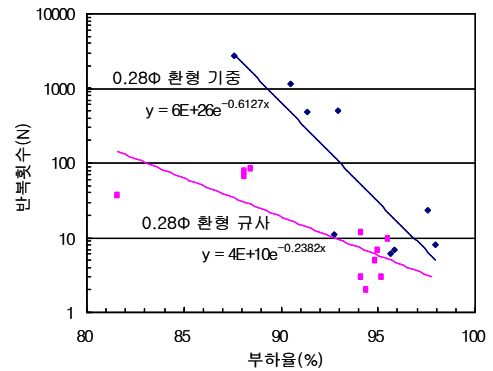


그림 9. 0.28[Φ] 환형 반복과전류 특성 그래프
Fig. 9. The repeating current characteristics of 0.28[Φ] ring shape

그림 9는 0.28[Φ] 환형 엘리먼트의 반복과전류 특성 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 열적인 영향을 받는 반복횟수 1회, 부하율 100[%] 지점에서는 100[%] 보다 위를 지남을 알 수 있었다. 이는 열적 용단에는 여유가 있음을 증명한다. 또한 이 지점 외에서는 규사충전상태가 기준상태보다 반복횟수 증가에 따른 부하율 감소가 큰 것을 알 수 있었다.

이러한 반복횟수 증가에 따른 부하율 감소가 큰 것은 규사충전상태가 기준상태보다 빨리 열화됨을 나타낸다.

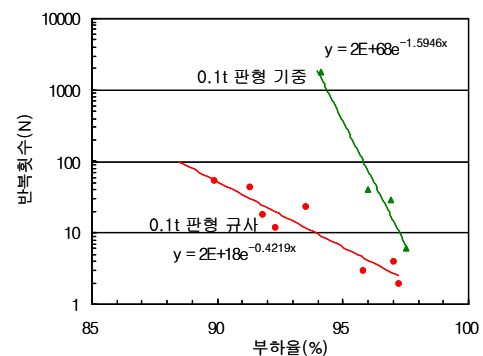


그림 10. 0.1[t] 판형 반복과전류 특성 그래프
Fig. 10. The repeating current characteristics of 0.1[t] plate shape

그림 10은 0.1[t] 판형 엘리먼트의 반복과전류 특성 그래프이다. 그래프에서 보듯이 열적인 영향을 받는 반복횟수 1회, 부하율 100[%] 지점에서는 100[%] 보

다 아래를 지남을 알 수 있었다. 이는 열적 용단에는 여유가 없음을 증명한다. 또한 이 지점 외에서는 규사 충전상태가 기중상태보다 반복횟수 증가에 따른 부하율 감소가 큰 것을 알 수 있었다.

이러한 반복횟수 증가에 따른 부하율 감소가 큰 것은 규사충전상태가 기중상태보다 빨리 열화됨을 나타낸다.

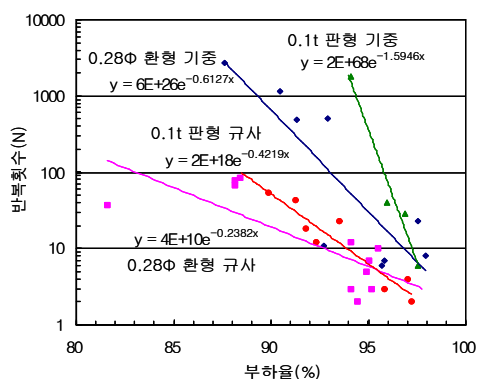


그림 11. 반복과전류 특성 그래프
Fig. 11. The repeating current characteristics

그림 11 그래프에서 보듯이 0.1[t] 판형 엘리먼트가 0.28[Φ] 환형 엘리먼트 보다 열적인 영향을 받는 반복 횟수 1회 지점에서 부하율이 낮음을 볼 수 있다. 이는 엘리먼트 노칭 형상별 열해석 결과를 증명하는 것으로 그림 1의 Case-2 노칭 형상이 포함되어 설계된 0.1[t] 판형 엘리먼트가 순간적 과전압으로 인해 열이 많이 발생하여 열적 용단에 여유가 없음을 알 수 있었다. 또한 반복횟수 1회 지점 외에서는 0.1[t] 판형 엘리먼트가 0.28[Φ] 환형 엘리먼트 보다 반복횟수 증가에 따른 부하율 감소가 적은 것을 알 수 있었다. 이러한 반복횟수 증가에 따른 부하율 감소가 적은 것은 0.1[t] 판형 엘리먼트가 0.28[Φ] 환형 엘리먼트 보다 느리게 열화 됨을 나타낸다.

표 4는 반복과전류 실험을 통해 나타난 그림 10의 지수식을 이용하여 계산한 엘리먼트 형상별 수명 값이다. 엘리먼트의 수명은 바로 퓨즈의 수명을 결정하여 표 4로 퓨즈의 수명도 결정할 수 있다. 엘리먼트의 수명은 0.1[t] 판형 기중상태, 0.28[Φ] 환형 기중상태, 0.1[t] 판형 규사충전상태, 0.28[Φ] 환형 규사충전상태

순으로 나타났다. 반복과전류 실험 결과 표 7과 같이 반복횟수 1회를 제외하고는 규사충전상태가 기중상태보다 반복횟수 증가에 따른 부하율이 급격히 감소하여 반복횟수에 의한 큰 저항을 갖는 것을 알 수 있었다.

표 4. 반복과전류 수명값
Table 4. The fuse aging by repeating overcurrent

엘리먼트 형상	소호제	통전/휴지 조건	과단 부하율 (1회)	과단 부하율 (100회)	과단 부하율 (1000회)
0.28[Φ] 환형	기중	0.16초/ 10초	100.6[%]	93.1[%]	89.4[%]
0.28[Φ] 환형	규사	1.3초/ 10초	102[%]	83.2[%]	73.5[%]
0.1[t] 판형	기중	0.21초/ 10초	99.9[%]	95.7[%]	94.3[%]
0.1[t] 판형	규사	2초/ 10초	98.6[%]	89[%]	83.5[%]

이에 퓨즈의 열화 원인이 반복과전류에 의한 엘리먼트와 소호제와의 마찰에 의한 영향으로 판단할 수 있었으며 엘리먼트 형상별 퓨즈의 수명 예측도 가능할 수 있었다.

3. 결 론

고압 전류제한 퓨즈의 반복과전류에 의한 열화 요인을 규명하기 위해서 엘리먼트 노칭 형상별 열 해석을 진행하여 엘리먼트를 설계하고 용단전류와 반복과전류 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며 본 논문의 결과들이 퓨즈 설계의 기반이 되는 정보로 활용되고자 한다.

첫째, 엘리먼트 노칭 형상은 각형보다 원형이 순간적 열이 발생하였을때 온도 변화가 크게 나타나 열의 전도가 빠르게 이루어짐을 알 수 있었다. 이로 인해 과전압에서 퓨즈 엘리먼트의 용단 시간이 짧을 것으로 예상되는 노칭 형상을 찾을 수 있었다.

둘째, 용단전류 실험결과 규사충전상태가 기중상태

보다 용단시간이 길었으며, 이는 단시간 용단시 규사에 의한 열저항이 감소하여 기중상태보다 높은 전류가 필요함을 알 수 있었다.

셋째, 반복과전류 실험결과 반복횟수 1회를 제외하고는 규사충전상태가 기중상태보다 반복횟수 증가에 따른 부하율이 급격히 감소하여 반복횟수에 의한 큰 저항을 갖는 것을 알 수 있었다.

넷째, 퓨즈의 열화 원인이 반복과전류에 의한 엘리먼트와 소호제와의 마찰에 의한 것임을 알 수 있었으며, 엘리먼트 형상별 퓨즈의 수명 예측도 가능할 수 있었다.

References

- [1] 김호용, 고윤석, 손수국, 남기영, “22.9kV 배전설계 보호 협조를 위한 전문가 시스템”, 대한전기학회 논문지 제39권 제2호 pp. 119~132, 1990.
- [2] V. N. Narancic and G. fecteau., “Arc Energy and Critical Tests for HV Current Limiting Fuses”, Int. Conf. on Electric Fuse and Their Applications, pp. 236-251, 1884.
- [3] “한류 퓨즈의 현황과 신뢰성”, 일본 전기학회 기술보고(II부) 제155호 6.2.2.
- [4] “고압 전류제한 퓨즈”, KS C 4612, 2006.
- [5] “고압 전류제한 퓨즈”, RS C 0090. 2006.

◇ 저자소개 ◇

김윤현(金倫賢)

1964년 3월 13일 생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989~1999년 LG산전연구소 책임연구원. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~현재 한밭대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 042-821-1099

E-mail : yhyunk@hanbat.ac.kr