

# 태양광 발전설비용 DC 퓨즈 개발

이기연 <전기안전연구원 주임연구원>

## 1 서론

전 세계적으로 환경오염을 줄이고자 점차 규제가 강화되고 있으며, 각국에서 환경오염의 저감을 위한 다양한 방안을 강구하고 있다. 이러한 대책의 일환으로 정부의 국가발전 비전으로 저탄소 녹색성장 구현을 위하여 스마트그리드 발전설비인 태양광, 풍력, 연료전지 발전설비 등이 정부의 지원 정책 등으로 점차 확대되고 있다. 또한 디지털 사회로의 변화로 인하여 전력변환에 의한 손실을 줄이기 위한 직류 배전시스템에 대한 연구와 실용화가 진행되고 있으며, 직류 발전설비 및 직류배전 시스템 실용화에 따라 안전확보를 위한 부하설비 및 선로보호를 위한 보호장치의 개발이 필요한 실정이다.

인입된 전력으로부터 화재사고를 예방하기 위하여 주로 퓨즈를 사용하고 있다. 퓨즈는 이상전류에 의한 발열에 의해 가용체가 용단되어 이상전류를 차단해주는 보호장치로 한류형 퓨즈와 비한류형 퓨즈가 있다. 한류형 퓨즈는 가용체에 이상전류가 흘렀을 때 가용체가 녹아 충전재와 화학반응을 하여 고유의 저항성분이 무한대로 올라가서 전류를 고속으로 차단하고, 차단용량이 매우 높아 시스템 계통의 예상 사고전류를 계산하지 않고도 사용이 가능한 특징이 있다. 또한 한류형 퓨즈는 차단시 소음이나 아크의 발생이 없어 비한류형 퓨즈보다 신뢰성과 안전성이 우수한 특징이

있다.

현재 교류용 퓨즈의 경우 국내 개발은 해외 선진국 수준의 개발 능력을 보유하고 있으며 시험설비를 구비하고 있으나, 직류용 퓨즈의 개발은 아직 미비한 실정이다. 특히 국내에서 저압 대용량의 퓨즈를 시험할 만한 설비를 갖춘 곳은 거의 없는 실정으로 국내에 요구되는 특정분야의 직류용 퓨즈는 전량 수입에 의존하고 있는 현실이다.

본 연구에서는 직류전원시스템 중 동작특성과 국내외 보급현황 및 실용화 측면을 고려하여 태양광 발전용 직류퓨즈를 개발하였다.

## 2. 태양광 발전시스템의 사양 및 실태조사

태양광 발전설비는 하나 또는 여러 개의 어레이를 사용하여 출력을 내는 형태로 되어 있으며, 주로 태양광 발전모듈 어레이에서 DC 300~1,000V 출력 전압을 발전하고 발전된 직류전원을 인버터를 통하여 전력계통에 AC 380V(가정용 또는 3kW 미만의 경우 AC 220V)로 공급하는 시스템으로 구성되어 있다.

국내의 태양광 발전용 직류퓨즈의 사용현황 조사를 위하여 태양광 발전모듈과 접속반 내의 퓨즈사용에 대한 실태조사를 실시하였다. 실태조사 결과 그림 2에 나타난 것과 같이 대부분의 접속반은 유사한 형태로 구성되어 있었으며, 접속반에 사용하고 있는 퓨즈

와 퓨즈 홀더는 PCB 실장형과 일반형 두 종류를 혼용하여 사용하고 있는 것으로 나타났다. 또한 사용하고 있는 퓨즈는 대부분이 태양광 전용 DC 퓨즈를 사용하고 있었으나 일부 접속반에서는 일반 AC용 퓨즈 또는 AC, DC 겸용의 퓨즈를 사용하고 있는 것으로 조사되었다.

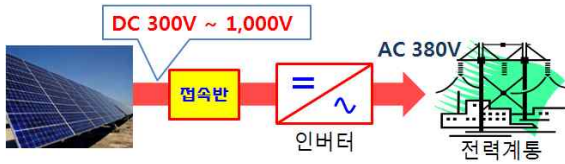


그림 1. 태양광 발전시스템 구성도



(a) PCB 실장형 (b) 퓨즈 홀더형

그림 2. 태양광 발전시스템의 분전반 현장조사

### 3. 태양광 발전용 직류 퓨즈의 시험방법 분석

직류 퓨즈의 관련 규격은 IEC 60269-1에 저전압 퓨즈에 대한 일반 요구사항이 나타나 있다. IEC 60269-1에 명시한 내용은 공칭전압 1,000V 이하의 상용 주파수 교류 회로나 1,500V 이하의 직류 회로를 보호하기 위한 정격 차단 용량 6kA 이상의 외함이 있는 한류형 퓨즈 링크를 포함한 퓨즈에 대하여 나타내고 있으며, 소형 퓨즈를 제외한 퓨즈의 정격, 절연 특성, 온도상승, 전력 손실 및 허용전력 손실, 시간-전류 특성, 차단용량 등 퓨즈의 특성과 퓨즈의 특성을

검증하기 위한 형식시험에 대한 내용을 언급하고 있다. 하지만 태양광 발전의 경우 단락시 흐르는 전류가 일반 전기설비와 다르기 때문에 태양광 발전용 직류 퓨즈의 특성은 IEC 60269-1에 나타난 특성을 적용할 경우 선로 및 시스템 보호가 되지 않아 태양광 발전 시스템 보호용 퓨즈의 경우 IEC 60269-6에 제시한 요구사항을 추가로 따라야 한다.

IEC 60269-6에 나타난 태양광 발전 시스템 보호용 퓨즈는 다음의 요구사항을 만족해야 한다.

- 정격전압 : 태양광 스트링 개방상태 최대값 이상
- 정격전류 : 대기온도 및 주기적 부하에서의 표준상태 전류를 고려해서 선정
- gPV 퓨즈용 규약 시간 전류

정격전류 (A)	규약 시간 (h)	규약 전류(Type "gPV")	
		Inf	If
$I_n \leq 63$	1	1.13I <sub>n</sub>	1.45I <sub>n</sub>
$63 < I_n \leq 160$	2		
$160 < I_n \leq 400$	3		
$I_n > 400$	4		

- "g" : Full-range 차단용량 퓨즈 링크
- 최소 정격차단용량 : 10kA DC
- Inf(협약 불용단 전류) : 정격전류의 1.13배 이내에서 1시간 내에 차단되면 안됨
- If(협약 용단 전류) : 정격전류의 1.45배 이상에서 1시간 이내에 차단되어야 함
- 일반시험 : 치수, 저항, 온도상승과 전력손실, 정격전류 검증, 규약 불용단 전류, 규약 용단 전류, 차단용량 및 운전특성 등
- 시간-전류 특성 시험 : 임의의 제작사 사양에 대한 성능 검증
- 게이트 검증 시험 : 퓨즈 링크의 규정된 용단 시간에 대한 게이트 검증으로, 정격전류에 대한 특정 시간에 해당하는 용단 전류 검증 시험
- 퓨즈링크 전력손실 측정 : 최소 정격전류의 70%~100%에서 수행

- 동작시험
- 정격전류 검증 : IEC 60269-1에 나타난 방법(그림 3 참조)으로 검증, 3000번 반복, 외관상 이상 없어야 함. 시험 후 저항값 10% 이내 변경

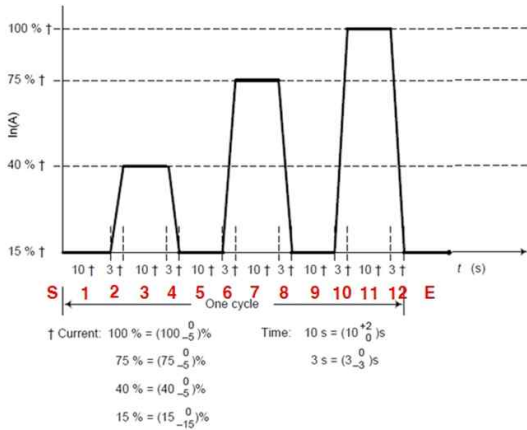


그림 3. 시험주기 전류

- 차단용량시험 및 검증 : 태양광 퓨즈는 No. 1, No. 2, No. 5 시험을 실시
  - No. 1 : 임의의 제작사에서 제시하는 전류(본 연구에서는 33kA)
  - No. 2 : 최대 아크 에너지를 발생시키는 조건과 근접한 조건에서 시험을 실시하기위해 선택해야 하는 전류
  - No. 5 : 과부하시험을 의미하며 정격전류의 2배에 해당하는 전류
- gPV 퓨즈링크 차단용량 시험값

	No. 1	No.2	No.3
평균 회복전압	정격전압의b 100 +5%		
예상시험전류	I1	I2	I5 = 2In
전류 허용	10%	-	20%
시정수c	1ms~3ms		인덕턴스 ≥ 100uH

- I1 : 정격 차단용량을 지정하는데 사용되는 전류

## 4. 태양광 발전용 직류 퓨즈 개발

### 4.1 엘리먼트 설계

엘리먼트는 크게 재료, 형상에 따라 그 특성이 달라진다. 일반적으로 퓨즈 엘리먼트의 재료는 은(Ag)이 가장 많이 사용되고 있다. 은(Ag)은 다른 재료에 비해 전기적 저항이 적고, 용융점이 낮아 본 연구에서도 순도 99.9%의 은을 사용하여 설계하였다.

엘리먼트의 형상은 퓨즈의 차단성능과 가장 밀접한 관련이 있다. 퓨즈에 사용되는 가장 일반적인 엘리먼트의 형상은 환형의 형태를 사용하고 있다. 그러나 단순한 환형 엘리먼트를 퓨즈에 사용하게 되면 차단시 높은 과전압을 유도하게 되고, 최소 차단전류가 매우 높아지는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 엘리먼트의 표면에 등간격으로 일정한 깊이의 홈(노칭)을 내어 준다. 엘리먼트 표면에 가한 홈의 깊이에 따라 차단 용량이 달라지게 되고, 홈의 간격에 따라 전류-시간 그래프의 기울기가 달라지는 특성을 가지고 있다.

이러한 노칭설계를 위한 팩터를 고려하여 표 1과 같은 각각의 퓨즈에 대한 엘리먼트를 설계하였다.

표 1. 퓨즈 정격에 따른 엘리먼트 특성

퓨즈 정격	재료	사이즈 mm	가닥수
10A	Ag	∅0.2	1
15A	Ag	∅0.28	1
20A	Ag	∅0.37	1

엘리먼트의 설계를 위하여 설계한 엘리먼트에 대하여 열 해석을 실시하였다. 열 해석은 설계한 엘리먼트에 정격전류가 통전되었을 경우 엘리먼트와 애관 내부의 온도상태를 예측하기 위한 것으로 표 2에 나타난 열 해석 조건에 대하여 분석하였다. 분석결과

그림 4에 나타난 것과 같이 모든 엘리먼트 내의 열 집중은 임피던스의 중간지점인 엘리먼트의 중앙을 중심으로 열이 발생하는 것을 볼 수 있었으며, 기존 판매되고 있는 제품과 개발품의 열 해석에 대한 비교, 분석 결과 유사한 패턴으로 분석되어 엘리먼트의 설계가 적절하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

표 2. 열 해석 조건

용량	재료	형상	정격전류 A	엘리먼트 체적 mm <sup>3</sup>	내부공간 (L×D)mm	대류열전달계수 W/m <sup>2</sup> ·K
10A	Ag	환형	10	1.02	36 × 4.9	15
15A	Ag	환형	15	2.02	36 × 4.9	15
20A	Ag	환형	20	3.43	36 × 4.9	15

## 4.2 애관 및 부속품 설계

직류퓨즈에 있어서 애관은 엘리먼트를 외부로부터 전기적 및 구조적으로 분리시켜주는 역할을 하면서, 엘리먼트에 과전류가 흘러 엘리먼트가 용단이 되는 과정에 발생하는 아크에너지 및 열에너지로부터 파괴되지 않는 구조이어야 한다. 그래서 애관의 설계에 있어서 충분한 내부 공간을 확보해야 하고 열적 충격에도 강할 수 있는 강도를 가져야 하며 전기적 절연성능 또한 우수해야 한다. 본 과제에서 설계한 퓨즈는 표 3

에 나타난 것과 같이 애관의 강도 및 열적 성능을 고려하여 알루미늄 성분을 많이 포함한 재료를 이용하여 애관을 설계 하였다.

애관의 주요 성분 중 차지하는 비율이 가장 큰 것은 알루미늄( $Al_2O_3$ )로서 이 성분이 얼마만큼 포함되느냐에 따라 전기적 절연성능, 구조적 강도가 달라진다. 알루미늄은 내열성, 강도, 경도, 절연내력이 가장 크고, 또 열전도성이 상당히 크기 때문에 세라믹 절연재료로 주로 사용하고 있다.

표 3. 애관의 성분 분석 결과

주요 성분	성분 비율 %
$Al_2O_3$	96
SiO <sub>2</sub>	2.6
TiO <sub>2</sub>	0.3
MgO	0.5
CaO	0.2

애관의 사이즈는 IEC 60269-2, IEC 60269-6에 따라 애관의 사이즈를 결정하여 설계하였다. 애관의 외부 사이즈는 상기 규격에 따라 설계를 하였지만, 애관의 외벽 두께에 따른 내경 사이즈는 제작사의 사양에 따라 달라 질 수 있기 때문에 과전류에 의해 엘리먼트가 용단될 때 발생하는 아크에너지를 고려하여 내부공간을 충분히 확보하고 열적충격을 견딜 수 있

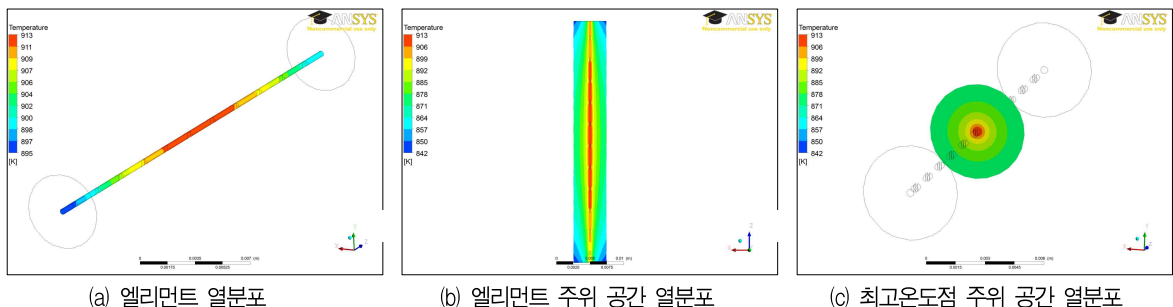


그림 4. 20A 엘리먼트의 열해석 결과

을 정도로 애관 두께를 고려하여 설계하였다.

각각의 퓨즈는 애관에 삽입된 엘리먼트가 회로 계통과 연결되기 위해서는 엘리먼트 양 끝에 터미널, 캡과 같은 부속품이 있어야 한다. 터미널은 엘리먼트가 애관 내에 고정이 되도록 하기 위해 애관 양 끝에 부착되며, 엘리먼트는 터미널에 용접 형태로 고정된다. 캡은 애관 내의 엘리먼트가 회로계통과 연계되기 위한 부품으로서 애관 양 끝에 위치하며 터미널을 포함하는 구조이다. 그리고 사이즈는 각각의 퓨즈에 적용되는 규격 내의 범위에 있어야 한다. 부속품의 재료는 회로계통과 접속하는 부분이기 때문에 전기적 저항이 작아야 하고, 외부의 충격에 쉽게 파손이 되지 않는 재료이어야 한다.

설계한 퓨즈의 크기는 그림 5에 나타내었으며, 자세한 크기는 표 4에 나타내었다.

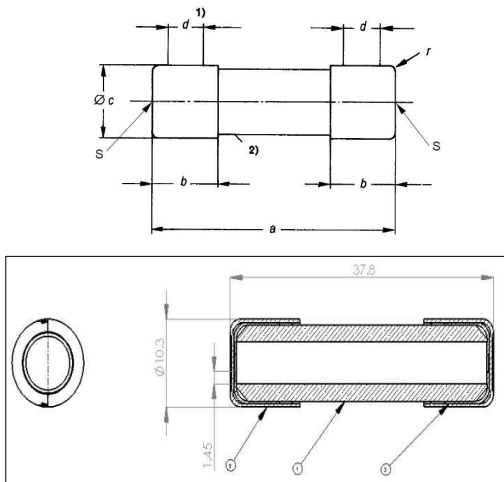


그림 5. 태양광발전용 퓨즈 사이즈

표 4. 태양광 발전용 퓨즈 개발품의 사이즈

Size	a	b Max.	c	d Min.	r
10 × 38	38 ± 0.6	10.5	10.3 ± 0.1	6	1.5 ± 0.5
14 × 51	51 <sup>+0.6</sup> <sub>-1</sub>	13.8	14.3 ± 0.1	7.5	2 ± 1
10 × 85	85 ± 1.2	10.5	10.3 ± 0.1	6	1.5 ± 0.5

### 4.3 개발품의 외형

그림 6은 본 연구를 통하여 개발한 태양광 발전설비용 직류 퓨즈 시제품의 외형을 나타낸 것이다. (a)는 전체 외형을 나타낸 것이며, (b)는 캡, (c)는 애관, (d)는 터미널, (e)는 엘리먼트를 나타낸 것이다. 엘리먼트는 애관 내부에 위치하며, 엘리먼트 양 끝에 터미널이 부착된다. 애관 내부는 충전재로 충전되며 마지막으로 캡을 부착하여 퓨즈를 완성한다.



그림 6. 태양광발전용 직류퓨즈 시제품

## 5. 태양광 발전용 퓨즈 개발품의 성능 시험

### 5.1 규약전류 시험

열해석을 통해 설계한 엘리먼트를 제작하여 IEC 60269-1, 6에 명시한 규약전류 시험을 통하여 각각의 정격퓨즈가 가지는 용단, 불용단 특성 시험을 수행하였다. 규약전류 시험은 태양광 발전용 10A, 15A, 20A 퓨즈에 대하여 협약 용단시험과 협약 불용단시험을 실시하였으며, 10A 태양광 발전용 퓨즈의 규약전류 시험 결과를 그림 7에 나타내었다. 규약전류 시



험을 통하여 각각 퓨즈의 정격전류에 대한 퓨즈의 용단-불용단 특성을 1차적으로 검증을 하였다.

표 5. 태양광 퓨즈의 규약전류 시험 조건

Rated current A	Conventional time h	Conventional current Type "gPV"	
		Inf	If
		$I_n \leq 63$	3

In : 정격전류 / Inf : 불용단 전류 / If : 용단 전류

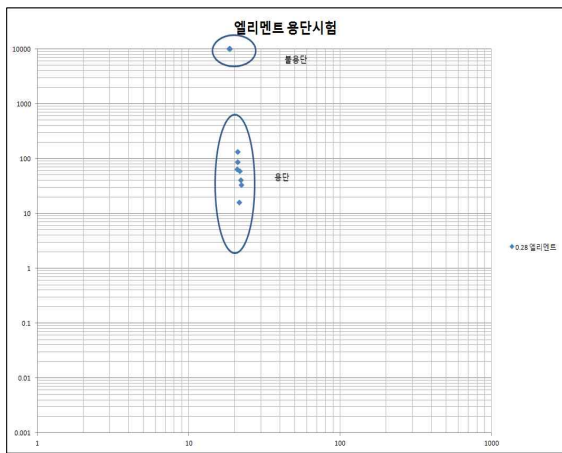


그림 7. 10A 퓨즈 규약전류 시험 결과

## 5.2 온도상승 시험

온도상승 시험은 해외 퓨즈 제품과 비교를 위해 A사 퓨즈와 같이 시험을 수행하였다. 온도상승 시험 결과는 표 6에 나타내었으며, 본 과제를 통해 개발한 퓨즈의 온도 상승이 경쟁사보다 작게는 1°C~13°C보다 높게 나타나지만 규격에서 규정하는 범위 내로 측정되어 큰 문제는 발생하지 않았다.

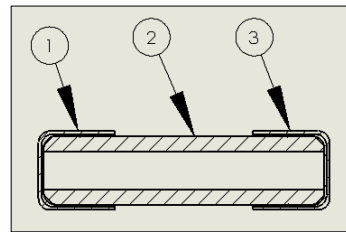


그림 8. 온도상승 시험을 위한 측정 부위

## 5.3 정격전류 시험

정격전류 시험은 퓨즈의 정격 전류를 검증하기 위한 것으로 IEC 60269-6 8.4.3.2에 따라 정격전류 시험을 수행하였다. 그림 3에 나타난 것과 같이 퓨즈의 정격전류에 대하여 15%, 40%, 75%, 100%까지 전류를

표 6. 태양광 퓨즈 온도상승 시험 결과

온도상승 시험 시료						온도 측정(주위온도 : 1.9 °C)								
						1번		2번		3번		4번	5번	6번
No.	정격 전류	측정 전류	엘리먼트	길이	저항값 (mΩ)	°C	K	°C	K	°C	K	절연유 °C		
1	10	8.7	판형 10A 엘리먼트	34.9	19	17	15	21	19	21	19	5	3	2
2	10	9.2	0.2 환형 엘리먼트	37	26	18	16	27	25	20	18	4	4	6
3	15	14.6	판형 15A 엘리먼트	34.9	12	23	21	27	25	20	18	5	6	4
4	15	11.8	0.28 환형 엘리먼트	37	16	30	28	38	36	22	20	4	6	5
5	15	12.3	0.28 환형 엘리먼트	37	16	27	25	31	29	22	20	4	5	4
6	20	15.2	판형 20A 엘리먼트	34.9	9	18	16	24	22	22	20	4	4	4
7	20	18.4	0.32 환형 엘리먼트	37	14	40	38	57	55	35	33	3	6	3
8	20	18.3	0.32 환형 엘리먼트	37	14	47	45	56	54	35	33	3	6	2

가변 시키는 것을 1사이클로 하여 3,000사이클 반복하는 것이다. 그리고 시험 후 퓨즈의 외형에는 변형이 없어야 한다고 규정되어 있다. 정격전류 시험은 그림 9에 나타난 시험 전류 제어를 통하여 시험을 실시하였으며, 시험 결과 특이사항은 나타나지 않았다.

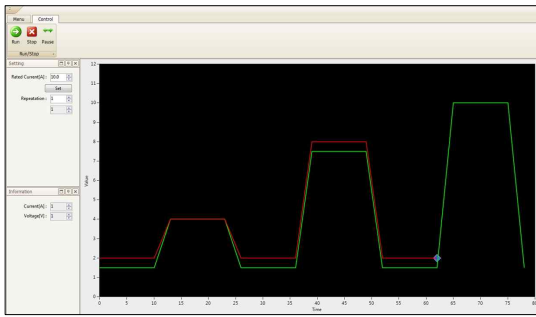


그림 9. 정격전류 시험 화면

#### 5.4 차단용량 검증 시험

차단용량 검증 시험은 10A, 15A, 20A 태양광퓨즈에 대하여 IEC 60269-6에 명시된 방법으로 No.1 No.2, No.5 시험을 실시하였다. 시험시 Time constant는 1ms에서 3ms로 하였으며, 시험전압은 1000Vdc로 실시하였다. 참고로 차단용량 검증 시험은 국내에 대전력 직류전원공급 시험설비가 없기 때문에 중국의 STIEE(Shanghai Testing & Inspection Institute for

Electrical Equipment)에서 실시하였다. 시험설비는 그림 10에 나타내었다.



그림 10. 차단용량 시험설비

No.1 시험은 정격차단용량을 검증하기 위한 시험으로 DC 1,000V 33kA 단락전류로 시험하였으며, No.2 시험은 최대 아크에너지를 발생시키는 조건과 근접한 조건에서 시험하기 위한 전류로 No.1 시험후 결정된다. No.5 시험은 과부하시험을 의미하며 정격전류의 2배에 해당하는 전류로 시험하였다. 그림 11은 10A 퓨즈의 No. 1 시험으로 33kA의 시험전류를 인가하였을 때 퓨즈의 용단 특성을 분석한 것이다. 시험인가 전압 및 전류에 대하여 적절하게 차단되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 16A 이상의 퓨즈에서 적용되는

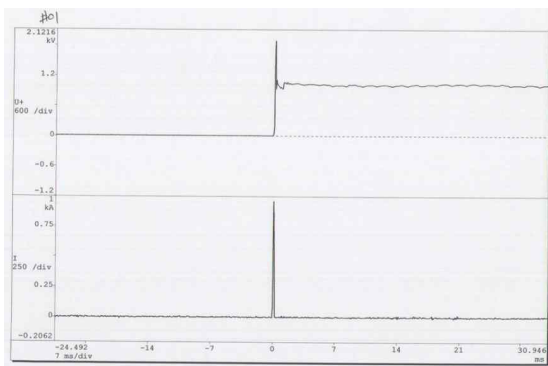


그림 12. 10A 퓨즈 No. 1 시험 전압, 전류 특성 그래프

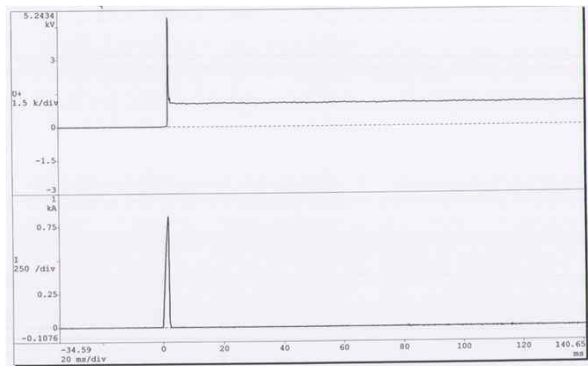


그림 13. 10A 퓨즈 No. 2 시험시 전압, 전류 특성 그래프

과도회복전압(TRV)도 3500V 이하로 측정되었다.

그림 12는 10A 퓨즈의 No.2 시험으로 No.1 시험에 따라 측정된 최대아크에너지를 발생시키는 조건인 약 850A를 인가하였을 때 퓨즈의 용단 특성을 분석한 것이다. 시험인가 전압 및 전류에 대하여 적절하게 차단 되는 것을 확인할 수 있었다.

차단용량 시험 검증결과 No.1 No.2, No.5 시험 시 Pass된 시제품도 있었으며, Fail된 시제품도 있었다. 태양광 발전용 퓨즈 시험결과 10x38사이즈 애관을 사용했을 경우 정격전류 용량이 커지고 엘리먼트에 공급되는 에너지가 커질수록 Fail되는 현상이 나타났다. 20A 퓨즈의 No.1 차단시간 분석 결과로부터 차단시간이 너무 짧아서 잉여 에너지로 인해 엘리먼트 노칭구간에만 섬전압이 생성되는 것이 아니라 그 외의 구간에서 섬전압이 생성되어 절연거리 좁아져서 누설되어 Fail 된 것으로 분석되었다. 시험 후 차단된 퓨즈의 엘리먼트 경로에 생성된 섬전압이 뭉쳐진 것으로 조사된 결과 설계된 엘리먼트 노칭 피치간격이 좁은 것으로 판단되며, Fail된 퓨즈의 그래프와 퓨즈 내부를 조사한 결과 엘리먼트에 차단전류가 흘러 엘리먼트의 처짐이 발생하여 엘리먼트가 애관 내벽에 접촉하고, 섬전압이 뭉쳐지면서 전기적 연면거리가 좁아지는 현상이 발생하여 누설로 인한 Fail로 분석되었다.

## 6. 결 론

이상과 같이 태양광 발전설비 시스템 보호용 직류 퓨즈의 개발을 위하여 관련 규격 분석을 통한 시험방법을 정립하였으며, 규격에 적합한 퓨즈를 설계하여 시제품을 제작하였다.

개발품에 대하여 규약전류 시험 및 온도상승 시험, 정격전류 시험, 차단용량 검증 시험을 통하여 퓨즈의 과전류 및 단락 보호 특성을 분석하였다. 차단용량 검증 시험을 통하여 도출된 몇 가지 문제점에 대한 개선

을 위하여 엘리먼트 노칭시 피치간격을 넓혀서 섬전압이 뭉치는 것을 방지하는 방법과 기존 환형의 엘리먼트 대신에 관형의 엘리먼트로 설계 변경하는 방법 등 엘리먼트에 대한 설계 변경을 진행 중에 있다. 또한 퓨즈의 애관 지름을 키워 큰 사이즈 퓨즈를 개발하는 방법과 퓨즈 애관 내에 엘리먼트를 고정시키기 위한 터미널 접속 방법과 애관 내에 규사 충전도를 높여주는 방법 등 불량율을 줄이기 위한 제조상의 개선사항을 연구 중에 있다.

향후 개선사항이 적용된 개발된 퓨즈의 성능 검증을 통하여 선로보호 및 부하시스템 보호를 위한 퓨즈의 신뢰성이 확보된 직류전원용 퓨즈를 개발하고 국산화를 통한 가격 경쟁력 및 국가 경쟁력 확보에 기여하고자 한다.

### ◇ 저 자 소 개 ◇



이기연(李璣燕)

1975년 5월 12일생. 2004년 시립인천대학교전기공학과 졸업(석사). 2004년 ~ 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 안전기술연구부 주임연구원.

Tel : (031)580-3039

E-mail : lkycj@kesco.or.kr