

## 초고압·대용량 차단부의 노즐용 강화테프론의 특성

신영준, 강동필\*, 박경엽, 송원표\*\*, 이철현\*\*, 홍창배\*\*\*

한국전기연구소 개폐장치연구팀, \*한국전기연구소 절연재료연구팀

\*\*효성중공업(주) 기술연구소 차단기연구팀, \*\*\*한국테프론(주) 기술부

### ABSTRACT

The pure PTFE nozzles may not be used in the GCB with very high interrupting capacity because of their excessive ablation and carbonization. But it is known that the nozzles with filler can show good performances at the extremely high interrupting currents of 50kA or 63kA.

So, the manufacturing process of filled Teflon has been carefully studied. Then several specimens have been prepared for the experiments and analyses of their mechanical and electrical characteristics. Finally the high power arc tests have been conducted to the Teflon nozzle with filler of  $Al_2O_3$ .

The results of experiments and tests show that the filled Teflon nozzle has superior mechanical characteristics, comparable electrical characteristics to a pure Teflon nozzle and a distinguished endurance against high power arcs.

### 1. 서론

초고압급 GCB와 GIS의 차단부에 취부되는 노즐의 재료로는 현재 순수 PTFE(테프론)가 일반적으로 가장 많이 사용되고 있다. 그런데 차단부내에 아크가 발생하면 이 아크의 방사 에너지가 노즐벽면에 흡수되어 용삭(ablation)이 일어난다. 단락용량이 작아 용삭이 적은 경우에는 용삭된 PTFE층기가 차단에 긍정적으로 작용하지만[1], 단락용량이 큰 경우에는 용삭이 심하게 일어나 노즐형상이 바뀌거나 탄화되어 차단에 악영향을 미친다.

그래서 단락전류 차단용량이  $50kA_{rms}$ 를 넘어서면 순수 PTFE로 된 노즐은 용삭이 심하여 사용하기가 어려워 용삭이 적으면서도 차단에 도움을 줄 수 있는 복합재료로 된 노즐을 개발하여 사용하고 있다[2]. 단락전류가 커지면 순수 PTFE로 된 노즐은 내구성 및 열전도도에 문제가 있으므로 이 순수 PTFE에 충전제를 첨가하여 사용하면 내구성과 경도 및 열전도도를 향상시킬 수 있다[3].

일반적인 충전제의 종류로는 Fiberglass, Graphite, Metal Powder(Copper, Steel, Bronze), Coal Powder,  $MoS_2$  등이 있지만, 강화테프론을 위한 충전제로 현재 세계에서 사용되거나 연구중인 무기질 재료의 기본적인 물리적 특성을 살펴보면 다음과 같다.

표 1. 무기질 충전제의 물리적 특성

충진제	밀도 (Density) $kg/m^3$	연소열 (Heat of Combustion) $J/kg \cdot K$	열전도도 (Thermal Conductivity) $W/M \cdot K$	용점 (Melting Point) K	전기적 저항률 (Electrical Resistivity) $\Omega \cdot M$
$Al_2O_3$	(3.95-4.1)	1223(1000K)	28.9(373K)	2323	$10^{-14}$ (293K)
$\alpha-Al_2O_3$	$\approx 10^3$		5.8(1873K)		$3 \times 10^{13}$ (1173K)
$SiO_2$	$2.65 \times 10^3$	1208(1500K)	7(400K) 5(1100K)	1983	$4.5 \times 10^{13}$ (293K) $10^6$ (873K) $10^4$ (1273K)
$TiO_2$	(4.0-5.1) $\times 10^3$	938(1000K)	3.5(837K)	1913	80-180 $10^{11}-10^{12}$ (293K) ( $< 10$ )(1273K)
$CaF_2$	(3.1-3.2) $\times 10^3$	1600(1500K)	11(273K) 1.83(1907K)	1907	5.2
BN	$2.29 \times 10^3$	1480(1500K)	27-29	3273	4.15 -4.5 $1.7 \times 10^{11}$ (293K) 300(1273K) 6(1773K)
$Al_3Si_2O_7$	$3.23 \times 10^3$	1340(1873K)	5.73(373K) 3.64(1473K)	2183	7.0

본 논문에서는 800kV GIS용 차단부의 50kA 단락전류차단 및 362kV 63kA GCB 개발을 위해 연구하고 있는 강화테프론 노즐용 충전제로  $Al_2O_3$ 를 함유한 강화테프론의 제조 및 제작공정에 대해 기술하고, 강화테프론 시편의 물리적 특성에 대한 실험결과를 기술하며, 170kV급으로 제작한 강화테프론 노즐의 대전력 내아크특성시험에 대한 분석결과를 기술한다.

### 2. 강화테프론의 제조 및 제작공정

강화테프론의 제조과정은 순수테프론의 제조과정과 유사한 Press Formation, Sample Baking, Mechanical Treatment 로 구성되어 있다. 차단부의 노즐에 사용할 충전제를 선택할 때에는 고진재, 강한 열적 충격, 고온가스유동에 영향을 미치는 용삭과정, 기타 실사용시의 환경적 요소를 고려하여야 한다. 따라서 높은 표면저항률 및 체적저항률을 가지면서 높은 전기적 전인내력을 가져야 하며, 노즐이  $\epsilon=1$ 인 가스속에 위치하므로 점접간격에서 최적의 전계생성을 위해 유전적 상수가 낮은 것이 좋으며, 고온에서 일어나는 노즐용삭을 감소시키기 위해 열적 특성이 좋으면서도 열전도도가 낮은 충전제를 사용하는 것이 좋다. 복합재료의 제조과정은 균일한 혼합, 최소한의 에너지손실, 효과적인 냉각이 되어야 한다.

강화테프론을 제작하기 위한 압축압착과정은 2개의 단계, 즉 1단계는 25~50MPa의 압력에서 분말을 압축하는 단계이고, 2단계는 전기오븐내에서 360~380℃의 온도로 열처리하는 단계이다. 1단계의 문제점은 높이에 따라 밀도경도의 차이가 생길 수 있으며, 50MPa 압력에 의해 분말밀도가 바뀌는 압축압착과정에서 분말입자들과 혼합기법면 사이의 마찰에 의해 발생한다. 따라서 압축과정전에 습기를 제거하고 20℃로 1.5시간동안 건조시켜야 하며, 압축압력을 50MPa 이상으로 할 필요가 있으며, Matrix로부터 공기를 확실히 제거해야 하고, 10cm/min 이하의 속도로 압착하면 된다. 2단계의 문제점은 압축과정후 기계적 스트레스에 의해 쪼개짐이 생길 수 있으므로 기계적 스트레스를 풀이 주어야 한다. 따라서 압착된 샘플을 열처리하기 전에 실내온도와 자유로운 조건하에서 24시간 보관하고, 열처리시의 온도변화는 50℃/시간보다 작게 하여야 하며, 냉각은 천천히 행하고, 370℃~250℃의 온도가 5시간 이상 유지되도록 하여야 한다. 또한 압축 및 열처리과정후 스트레스에 의한 샘플크기의 변화도 고려해야 한다.

### 3. 강화테프론 시편의 물리적 특성

충진제 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 함량비로 5%, 10%, 15% 함유한 강화테프론 시편으로 ASTM에 따라 기계적 물성실험을 행하였으며, 그 결과가 표 2에 나타나 있다.

표 2. 강화테프론의 충진제 함량비에 따른 기계적 물성

시 실험 항목	시험방법	시료 종류		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15%
인장강도(kgf/mm <sup>2</sup> )	D639	2.2	1.7	1.3
신율(%)	D638	320	370	290
경도	D1706	55	56	57
내마모율(NBS %)		57	73	64

강화테프론의 전열저항(R<sub>s</sub>, R<sub>v</sub>)은 10<sup>-16</sup>~10<sup>-17</sup>Ω·cm의 범위 내에 있으며, 절연강도는 그림 1에 나타나 있듯이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15%가 가장 높은 값을 나타내었지만 순수테프론의 18kV/mm보다 약간 낮은 값으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가되어도 절연강도는 증가하지 않았다.

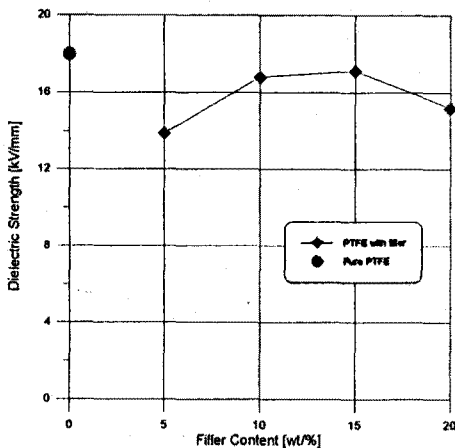


그림 1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량비에 따른 절연강도의 변화

강화테프론의 고전압소전류 내아크실험을 ASTM D495에 따라 수행하였으며, 이 실험에서 전압은 15kV이었고 아크진행단계는 표 3에 나타나 있다. 고전압소전류 내아크실험에서 전압이 15kV, 전류가 수십mA에 불과하여 실제 차단부내에

발생하는 아크환경과 크게 다르지만 방전시간을 270초로 고정하여 아크방전에 의해 시료들이 용삭하여 감소된 무게를 나타내면 그림 2와 같다.

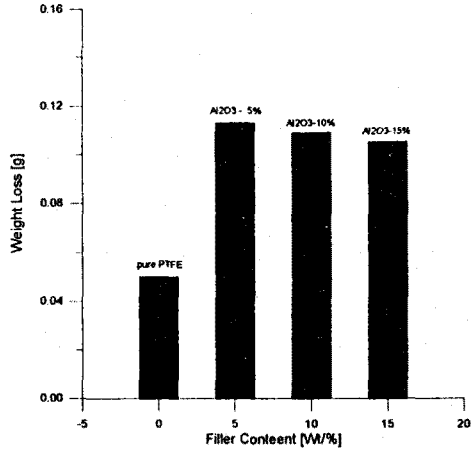


그림 2. 고전압소전류 아크에 의한 무게 감소

표 3. 고전압소전류 내아크실험의 아크진행단계

단계	전류(mA)	Time Cycle	총시간(초)
①	10	0.25초 ON, 1.75초 OFF	60
②	10	0.25초 ON, 0.75초 OFF	120
③	10	0.25초 ON, 0.25초 OFF	180
④	10	연속	240
⑤	20	연속	300
⑥	30	연속	360
⑦	40	연속	400

### 4. 강화테프론 노즐의 대전력 내아크 특성

충진제 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15%인 강화테프론으로 170kV 50kA GCB용 노즐 및 진원카바를 제작하여 대전력 내아크실험을 실시하였다. 이 대전력 내아크실험을 위해 같이형성실험비중 그림 3에 나타나 있는 전류원설비만을 이용하였다.

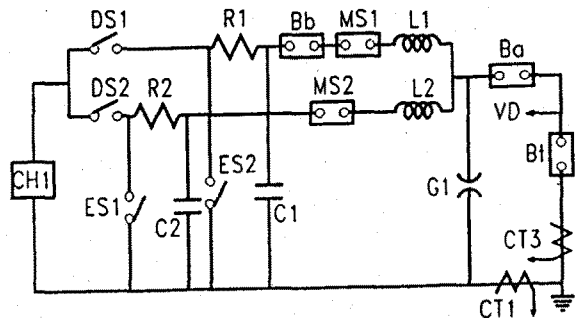


그림 3. 대전력 내아크실험 회로도

실험은 부위스위치 MS<sub>1</sub> 및 MS<sub>2</sub>는 열려 있고, 강화테프론 노즐 또는 순수테프론 노즐이 취부된 실험용 차단기와 보조 차단기는 단회전 상태에서, 전류원 콘덴서를 1.95kV~6.6kV로 충전한 후 부위스위치를 닫고 실험용 차단기로 전류를 차단하는 순서로 진행되었다. 실험용 차단기가 개극할 때 아크를 인장시키기 위하여 아크전류의 초기부분은 작은 전류를 흘리고 차단기가 전류를 차단하는 부분에서는 큰 전류를 흘려주는 방법을 택하였으며, 전형적인 오실로그래프이 그림 4에

나타나 있다. 이 실험에서 실험용 차단기에 흐르는 아크전류, 실험용 차단기의 유동에 발생한 아크전압을 기록하였으며, 평균아크전압 및 아크에너지는 계산한 값으로 모든 실험데이터는 표 4에 정리되어 있다.

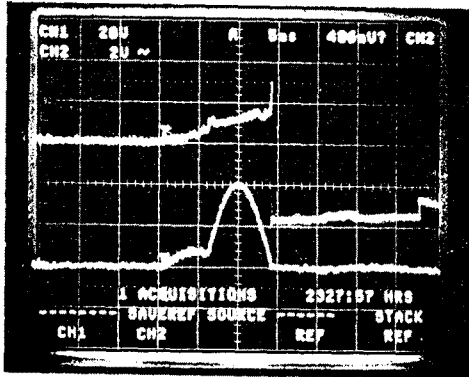


그림 4. 전형적인 대전력 내아크실험 오실로그래프

표 4. 대전력 내아크 실험데이터

총전전압(kV)		아크전류(kA)		평균아크전압(V)		아크에너지(kJ)	
강화	순수	강화	순수	강화	순수	강화	순수
테프론	테프론	테프론	테프론	테프론	테프론	테프론	테프론
4.4	2.74	21.87	10.41	530	760	88.2	60.3
4.4	2.65	19.88	11.00	530	800	80.2	66.5
4.4	2.69	20.68	11.13	510	1040	80.4	87.7
4.3	1.95	21.27	-	540	-	85.8	-
4.4	2.73	20.48	11.80	600	840	91.7	75.5
2.2	2.56	7.75	9.19	740	860	43.8	60.1
2.2	4.04	8.85	21.67	620	730	41.2	120.2
2.2	3.88	7.25	22.27	750	760	41.8	127.7
2.2	3.65	7.55	24.06	690	730	39.9	135.5
2.2	3.42	7.00	-	680	780	47.1	-
6.6	-	30.02	-	590	-	131.0	-
합 계						771.1	733.5

대전력 내아크 실험결과 순수테프론으로 된 노즐 및 절연 카바는 용삭이 매우 심하여 표 5에 나타나 있듯이 시험전후의 무게차이가 매우 컸으며, 강화테프론으로 된 것은 용삭이 조금 일어나 무게차이가 매우 작았다. 또한 그림 5에서 볼 수 있듯이 순수테프론으로 된 것은 노즐표면, 특히 노즐 및 절연 카바의 목부분 및 목주위가 심하게 뜯겨져 나갔고 탄화되었으며 형상이 변형되었으나, 강화테프론으로 된 것은 약간의 탄화흔적이 보이고 목부분 및 목주위가 약간 부풀어 오르는 정도로 형상이 전혀 변하지 않았다.

표 5. 대전력 내아크 실험전후의 무게비교

내아크 실험전 무게(gram)		내아크 실험후 무게(gram)	
순수테프론	강화테프론	순수테프론	강화테프론
노즐	카바	노즐	카바
1534.4	157.4	1658.3	173.5
1526.7	149.8	1656.3	172.7

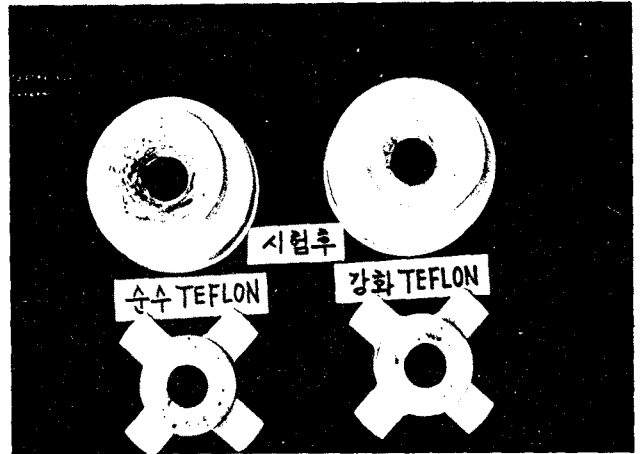


그림 5. 대전력 내아크 실험전후의 노즐과 절연카바 실험비교

## 5. 결론

단락전류 차단용량이 50kA 이상인 초고압급 GCB의 노즐 재료로 순수테프론을 사용하면 아크에 의한 용삭이 심하여 노즐형상이 변하고 결국 차단에 악영향을 미치게 된다. 본 연구를 통해서 이 문제를 해결하기 위하여  $Al_2O_3$ 가 첨가된 강화테프론의 제조공법에 대해 연구하였으며, 시편을 제작하여 물리적 특성을 분석하였으며, 실제 노즐을 제작하여 대전력 내아크 특성실험을 수행하고 순수테프론의 실험결과와 비교함으로써 강화테프론의 우수성을 입증하였으며, 현재 연구 개발중인 800kV 50kA 2절전 차단부와 362kV 63kA GIS 차단부에 사용될 수 있는 가능성을 검증하였다. 향후 초고압 대용량 차단부에 본 강화테프론으로 제작한 노즐을 취부하여 각종 차단시험을 수행함으로써 강화테프론이 차단특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

본 연구는 한국전력공사가 지원하는 생기관과제 "800kV GIS용 차단부 개발"(94IP30)과 "362kV 63kA GIS 개발"(94IP32)을 통해 수행한 연구내용중의 일부입니다.

## 참고문헌

- H.O. Noeske, "Investigation of dynamic nozzle parameters for various nozzle geometries and test conditions of an experimental half-size SF<sub>6</sub> puffer breaker", IEEE Trans., PAS-96, 1977, pp. 896-906
- K. Nakanishi, M. Ishikawa, Y. Abe, K. Andoh, S. Yanabu, A. Ohnuma and Y. Kurosawa, "Small current interruption phenomena and recent progress of gas circuit-breaker", CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 13-06, 1988 Session, pp. 45-52
- K. Ibusaki, T. Yonezawa, T. Yoshizumi and H. Kuwahara, "Key technologies for developing a 420kV 50kA GCB interrupter unit", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1738-1744