

Al₂O₃ 첨가에 따른 송전용 현수애자의 전기적 성능 평가 연구

A Study on the Electric Performance of Porcelain Insulator with Al₂O₃ Addition in Transmission Line

최인혁^{1,a}, 최장현¹, 이동일¹, 최연규², 조한구³, 한세원³, 박영창³
(In-Hyuk Choi^{1,a}, Jang-Hyun Choi¹, Dong-Il Lee¹, Yeon-Gyu Cho², Han-Goo, Cho²,
Se-Won, Han³, and Young-Chang Park³)

Abstract

To analyze the reason of aging deterioration in transmission line insulators, we performed a various kind of test and investigated mechanical and electrical characteristics of insulators. Test samples consisted of K-1989(36,000lbs), K-1995(36,000lbs) and K-2001(36,000lbs) type insulators which have been used in domestic 154 kV transmission lines. As a result of this test, the facts turned out K-2001 insulator which contain 17 wt.% alumina has better physical characteristics than K-1989 insulator which contain 8 wt.% alumina. Relativity density and fracture toughness of K-1989 porcelain are 94.2 % and 1.4 MPa · m^{1/2} but relativity density and fracture toughness of K-2001 porcelain are 96 % and 1.7 MPa · m^{1/2}. K-2001 insulators show a good performance not only in a physical property test but also in power arc test and steep front of wave flashover test which is performed to evaluate electrical characteristics.

Key Words : Alumina, Power arc test, Porcelain insulator, Steep front of wave flashover test

1. 서 론

국내에 설치되어 운영 중에 있는 송전선로는 주로 154 kV, 345 kV이며, 현재 일부 시험 사용 중인 765 kV 송전 선로가 있다. 송전 선로에 필요한 기자재는 철탑, 전선, 금구류 및 애자 등이 있다. 이 중에서 한국전력공사의 송전설비 고장 분석 및 대책 자료에 따르면 전선 58.4 %, 애자 및 금구 26 %, 고객설비고장 4 %, 철탑도파 및 파손 3.5 %, 기타 8.1 %로 애자의 고장 사례가 상당히 높은 것을 알 수 있다[1]. 송전용 애자의 불량 유형은

대표적으로 절연불량, 자기부 균열, 성능확인 시험 불량 및 애자런탈락 등 대부분 외국의 사고 사례와 유사하다. 이러한 사고의 원인을 분석하고, 대체 방안을 모색하는 것이 매우 필요하다. 전압등급별 송전용 현수애자 설치 현황을 보면 154 kV급이 약 421만개로 약 55.7 %이고, 345 kV급이 34.7 %, 765 kV이 6.1 %를 점유하고 있다[2]. 점유율이 가장 높은 154 kV 송전 선로에 사용 중인 36,000lbs 애자를 제조 년도 및 원료에 따른 변화 형태를 조사하였다. 애자의 제조 기술의 발달과 시험 규격의 강화로 제조 년도 별로 애자에 사용되는 원료의 배합비율이 변화되었다. 1980년대에는 애자 제조에 필요한 장식, 도식, 점토 및 8 wt.% 알루미늄을 배합하였지만, 현재에는 주로 17 wt.%의 알루미늄을 첨가하여 애자를 제조하고 있다. 애자 시험 규격인 IEC 60383-1에 따라 '95년도부터 채택된 72 kA · cycle의 아크전류를 발생시켜 시험하는 내 아크 시험은 애자의 시험 중 가장 가혹한 시험으로 순간

1. 한국전력 전력연구원

(대전시 유성구 문지동 103-16)

2. (주)고려애자

3. 한국전기연구원

a. Corresponding Author : idhyuk@kepri.re.kr

접수일자 : 2004. 7. 12

1차 심사 : 2004. 9. 8

심사완료 : 2004. 11. 8

적으로 수전도의 열 충격에 애자가 견디어야 한다 [3]. 따라서 국내업체는 내 아크에 견딜 수 있는 애자를 제조하기 위하여 알루미나(alumina)의 첨가량을 8 wt.%에서 17 wt.%로 증가시켜서 열 충격에 약한 크리스토팔라이트(cristobalite)의 생성을 억제할 수 있는 방법을 개발하기 시작하였다.

따라서 본 연구에서는 애자에 사용된 주원료중 하나인 알루미나 첨가량 변화에 따른 애자의 물리적 특성 변화를 조사하고, 애자의 전기적 성능 평가에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시료채취

알루미나 첨가량의 변화에 따라 '89년도와 '95년도에 제조한 36000lbs 볼소켓형 국내 K사의 현수애자를 사용 중인 154 kV 송전선로에서 경년품으로 철거하였고, 2001년도 제품은 신품으로, 매우 우수하다고 인정하고 있는 외국 제품인 N사의 2000년도에 생산한 신제품을 같이 분석하였다. 국내 K사의 애자 제조 년도에 함유된 알루미나 첨가량은 표 1과 같다.

표 1. 연도별 애자의 알루미나 첨가량.

Table 1. Alumina addition of insulators according to manufacture years.

제작 년도	Alumina 첨가량	제품상태
K-1989	8 wt.%	경년품
K-1995	12 wt.%	경년품
K-2001	17 wt.%	신품
N-2000	17 wt.%	신품

2.2 구조적 특성 시험

자기의 결정상을 분석하기 위하여 각각의 애자를 분쇄하여 philips사의 x-선 회절분석기(XRD)로 scanning speed를 2 °/min 으로 조사하였다. 자기의 미세구조를 분석하기 위하여 표면을 연마하여 주사전자현미경(SEM : R. J. Lee사)으로 기공의 크기와 형태를 관찰하였고, 가로×세로×깊이가 0.5×0.5×5 cm인 시편을 제작하여 열팽창계수 측정기(Dilatometer : tokyo industrial company)로 650 °C에서 열팽창율을 측정하였다.

소결밀도는 ASTM C20에 따라 archimedes 방법을 이용하였고 경도(Hv) 및 파괴인성(K_{IC})을 측정하기 위해 시편을 15, 9, 6, 3, 1 μm 다이아몬드 페이스트에서 차례로 경면 연마한 후 경도(H_v)는

vickers 경도계(Mitutoyo, Japan)를 이용하여 하중 10 kg, 유지시간 10 sec에서 생긴 압흔으로 측정하였고, 파괴인성(K_{IC})은 입자압입법(ICL, Indentation Crack Length : 136 ° Vickers indenter, Mitutoyo, Japan)으로 측정하였다[4]. 절연파괴시험을 측정하기 위하여 두께는 2 mm, 지름은 3.5 cm로 시편을 절단하였다. 최대 측정전압은 60 kV(60 Hz)이고, 상승전압은 3 kV/sec인 유중절연파괴 시험기 AMT-106 (SOUKOU, Japan)을 이용하여 절연파괴전압을 측정하였다.

2.2 전기적 성능 시험

애자의 전기적 성능 시험은 한국전력공사 구매시방서 ES-131에 서술된 방법에 의하여 실시하였다.

2.2.1 과전파괴하중시험

과전파괴하중시험은 캡과 핀 사이에 요구되는 상용주파진조섬락시험치의 75 %이상의 전압을 인가한 상태에서 시험품의 축심방향으로 인장하중을 가한다. 인장하중은 규정의 과전파괴하중치의 75 %까지는 급속히 상승시키고 나머지 25 % 하중은 15~45초 이내에 과피하중치에 도달하게 한다. 기계적인 손상 또는 파괴 없이 규정된 과전파괴하중에 도달하여야 한다.

2.2.2 내 아크시험(power arc test)

시험품의 부착 방법은 시험품 3개를 1 런으로 그림 1을 참조하여 수직으로 부착한 후 각 애자에 규정된 장력(14 kN)을 인가한 후 시험시간 동안 계속 유지시킨다. 시험 전류는 45~65 Hz의 단상 교류 전류로서 초기 비대칭분은 30 %를 초과해서는 안 된다. 아크전류와 지속시간은 12 kA (r.m.s), 0.1초 또는 6 kA(r.m.s), 0.2초로서 아크 지속 전류와 지속 시간과의 곱이 72 kA·Cycle ± 10 %가 되도록 하여야 한다.

2.2.3 급준파시험(steep front of wave flashover test)

급준파 전압이란 거의 일정한 준도를 가지고 상승되는 전압으로 준도는 임펄스파형 최대치의 전면 30 %와 90 % 사이를 잇는 직선의 기울기로 결정된다. 시험품의 부착 방법은 IEC. Pub 60-1의 6 및 7항에 따른다. 현재 개정된 ES 131 540 규정에 따르면 각 시험품은 5회의 양(+)극성 급준파 섬락과 5회의 음(-)극성의 급준파 섬락시험을 행한다. 급준파의 최소 유효 상승율은 2,500 kV/μs로서 사용되는 파형은 IEC. Pub 60-1에서 정의된 선형 전면 절단 임펄스 파형이다. 이 시험이 끝나자마자

곧바로 시험품 각각에 대하여 3회의 상용주파 건조섬락시험을 행하여 각각의 애자에 대한 평균 건조섬락 전압치가 정격 건조섬락전압치의 95 % 이상이어야 한다.

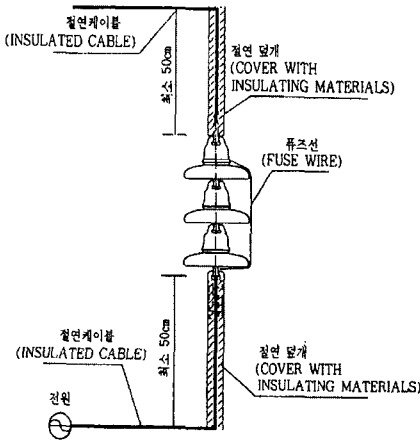
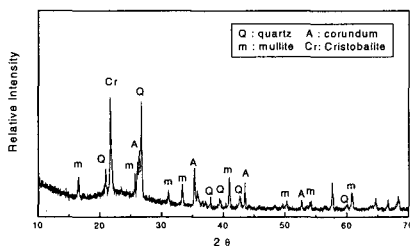


그림 1. 내아크 시험을 위한 시험품 부착 방법.
Fig. 1. Sample adhesion process for power arc test.

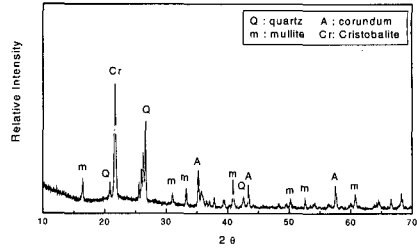
3. 실험결과 및 고찰

3.1 자기의 구조적 특성 분석 결과

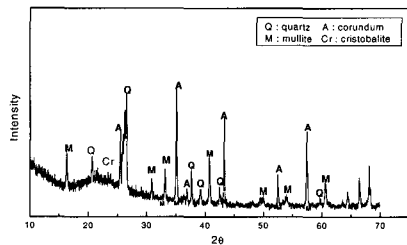
표 1에서 서술한 것처럼 각각의 제조 년도에 따른 알루미나의 첨가량 및 여러 가지 결정상들의 함유량을 정성분석 하고자 x-선 회절분석기로 자기의 시편을 분석하였다. 측정된 결과를 그림 2와 표 2에 나타내었다. 1989년도에 제조한 애자보다 2001년도에 제조한 K사의 애자에 포함되어 있는 알루미나의 양이 증가하여 결정상인 corundum 양의 증가로 내아크성 및 내충격성이 증가한 반면 열충격성에 취약한 크리스토팔라이트양은 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 K사에서 2001년도에 제



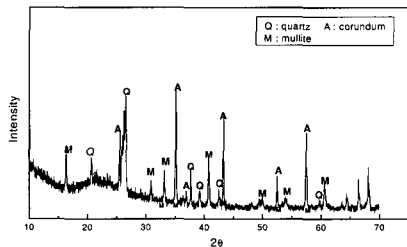
(a) K-1989



(b) K-1995



(c) K-2001



(d) N-2000

그림 2. 1320 °C에서 소결한 자기의 x-선 회절분석 결과.

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of insulator sintered at 1320 °C.

표 2. XRD로 정량 분석한 결정 양.

Table 2. Crystalline phase of x-ray diffraction.

제조년도 결정	K-1989	K-1995	K-2001	N-2000
Mullite(%)	12.7	17.11	11.89	10.65
Quartz(%)	5.46	3.72	3.3	3.43
Cristobalite(%)	4.0	5.74	0.5	-
Corundum(%)	8.10	9.08	16.4	16.06

표 3. Dilatometer를 이용하여 650 °C에서 측정 한 열팽창율.

Table 3. Thermal expansion coefficient of insulators measured at 650 °C by dilatometer.

제조년도	K-1989	K-1995	K-2001	N-2000
열팽창계수 ($\times 10^{-6}/K$)	5.540	5.683	5.143	5.046
열팽창율(%)	0.349	0.358	0.324	0.314

조한 애자의 결정 양 분포가 수입품인 N사에서 제조한 2000년도 산 애자의 결정 양의 분포와 유사하여 자기의 전기적, 기계적 특성이 거의 유사할 것이라고 예상할 수 있다. 1995년도에 K사에서 제조한 애자의 경우 알루미늄의 함유량은 8 wt%에서 12 wt%로 증가하였으나 최적의 소결조건으로 소결이 이루어지지 않아 SiO₂ 일부가 알루미늄과 반응하여 몰라이트(mullite)를 형성하였고, 일부는 크리스토팔라이트화 되어 크리스토팔라이트양이 증가한 것을 알 수 있다[5]. 열팽창율이 높은 크리스토팔라이트 양이 감소함으로써 자기의 열팽창율이 감소하는 것을 조사하기 위해 열팽창계수 측정기(dilatometer)를 이용하여 650 °C에서 열팽창계수를 측정하였고 그 결과를 표 3에 나타내었다.

Cristobalite 양이 4~5 %에서 약 0.5 %로 감소함에 따라 열팽창율이 0.358 %에서 0.324로 감소하였다. Cristobalite가 전혀 없는 N-사의 자기 열팽창율은 더 낮은 0.314 %를 나타내고 있다. 따라서 첨가하는 알루미늄의 양이 증가함으로써 소결 후 cristobalite의 생성을 억제하는 효과를 얻을 수 있다. Archi-medes 원리를 이용하여 자기의 치밀화 즉 상대밀도를 조사하였고 결과를 표 4에 나타내었다. 일반적으로 애자의 기공율은 약 5~6 % 정도로 상대밀도는 약 94~95 % 정도이다. 표 4로 통해서 볼 수 있듯이 K사에서 1995년도에 제조한 자기의 상대밀도는 다른 년도에 제조한 상대밀도 보다는 약 2 % 정도 낮은 것을 볼 수 있다. 이것은 알루미늄의 양이 기존의 8 wt%에서 12 wt%로 증가하여 기존의 소성 조건으로는 치밀한 조직을 가질 수 없다는 것을 보여주고 있다. 따라서 알루미늄을 17 wt% 첨가하여 최적의 소결 조건에 맞추어 소결한 자기의 상대밀도는 96 %로 매우 높게 나타내었다. 반면에 알루미늄을 17 wt%첨가한 외국 N사의 자기 상대밀도는 93.9 %로 K사의 자기 밀도보다 약 2 % 낮은 밀도를 나타내고 있다. 상대밀도가 낮다는 것은 기공율이 높다는 것을 의미하며 따라서 자기의 기계적 및 전기적 성질이 우수하지 못하다는 것을 의미한다[6]. 각각의 자기의 물리적 특성을 조사하기 위하여 경도, 탄성율,

파괴인성 및 절연파괴전압을 측정하였고 결과를 표 4에 제시하였다.

표 4. 경도, 탄성율, 파괴인성, 절연파괴전압 측정결과.

Table 4. Results of vickers hardness, young's modulus, fracture toughness, and dielectric strength.

제조년도	Al ₂ O ₃ 첨가량 [%]	절대밀도 [g/cm ³]	상대밀도 [%]	탄성율 [GPa]	표면경도 (H _v) [GPa]	파괴인성 (K _{1c}) [MPa·m ^{1/2}]	절연파괴전압 [kV/mm]
K-1989	8	2.27	94.2	81.6	5.8	1.4	18.6
K-1995	12	2.38	92	73.9	6.9	1.3	16.3
K-2001	17	2.54	96	96.2	6.9	1.7	18.8
N-2000	17	2.48	93.9	88.2	6.9	1.6	17.2

표 4에서 알 수 있듯이 알루미늄 첨가량이 8⇒12⇒17 wt% 증가함으로써 기계적 성질인 표면경도와 파괴인성이 증가하고 있다. 그러나 K사에서 1989년도와 2001년도에 생산한 애자의 경우 절연파괴전압은 18 kV/mm 이상이지만, 1995년도에 제조된 애자는 상대밀도가 약 92 %로 낮기 때문에 절연 내력을 나타내는 절연파괴전압이 16.3 kV/mm로 감소한 것을 알 수 있다. 알루미늄을 동일하게 17 wt% 첨가한 K-2001과 N-2000 자기의 절연파괴전압을 비교하여 볼 때 상대밀도 차이에 의하여 K-2001 자기의 절연파괴전압이 N-2000 자기의 절연파괴전압보다 약 9 % 높다. 즉 절연파괴전압은 세라믹의 기계적 특성을 좌우하는 기공율 즉 상대밀도와 매우 밀접한 관계가 있다. 치밀한 조직으로 이루어진 제품일수록 기계적 특성 뿐 아니라 전기적 특성도 우수하다는 것을 알 수 있다. 시편 K-2001의 상대밀도가 다른 시편에 비해 높은 상대밀도를 보여주었기 때문에 전반적으로 높은 물리적 특성을 나타내었다.

3.2 애자의 전기적 성능 시험 결과

송전용 자기 애자는 일반적으로 자기, 금구류인 캡, 핀과 자기와 금구류를 조립시켜주는 시멘트로 구성되어 있다(그림 3). 실 선로에서 장시간 사용하다 보면 경년 열화로 인하여 애자의 전기적 성능이 초기 제품에 비해 현저히 감소하는 경향이 있다. 따라서 장시간 경년 열화된 제품과 최근에

제조된 제품을 비교함으로써 사용기간에 따르는 애자의 열화 원인을 분석하고자 한다. 애자의 성능 시험에는 한전구매시방서 ES 131-543에 열거한 것 중에서 과전과과하중, 내 아크 및 급준파시험을 실시하였다.

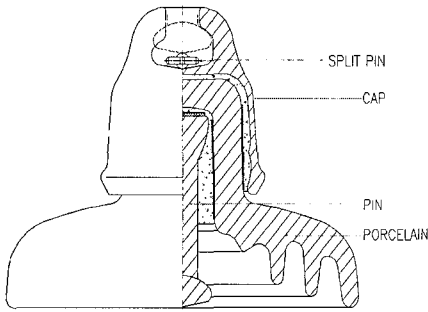


그림 3. 154 kV 선로에 사용되는 36,000lbs 애자.
Fig. 3. 36,000lbs insulator diagram used 154 kV power line.

3.2.1 과전과과하중시험(electro-mechanical failing load test)

154 kV에 선로에 사용하는 애자의 과전과과하중치는 한전구매시방서에 제시된 16,500 kgf 이상이어야 한다. 각각의 시편에 대한 시험 결과를 표 5에 나타내었다.

154 kV 송전선로에서 약 10 여년 동안 사용했던 애자의 과전과과하중과 신제품인 K-2001과 N-2000 애자의 과전과과하중치는 거의 유사하다. 모든 시편은 한전구매시방서에서 제시하였던 기준

표 5. 과전과과하중시험 결과.

Table 5. Results of electro-mechanical failing load test.

시험 횟수	기준치	Sample			
		K-1989	K-1995	K-2001	N-2000
1	16,500 kgf	25,600 kgf	21,500 kgf	22,100 kgf	25,500 kgf
2	16,500 kgf	21,700 kgf	21,800 kgf	21,900 kgf	23,400 kgf
3	16,500 kgf	23,500 kgf	21,600 kgf	18,500 kgf	22,700 kgf
4	16,500 kgf	22,300 kgf	19,700 kgf	23,400 kgf	19,900 kgf
5	16,500 kgf	19,700 kgf	22,400 kgf	21,800 kgf	22,300 kgf

치를 상회하여 애자의 기계적 성능은 우수하다고 할 수 있다. 따라서 약 10 여년 동안 사용한 애자의 기계적 성능이 감소하지 않았다는 것은 예상했던 경년열화가 진행되지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 같은 신제품인 K-2001 애자와 N-2000 애자의 과전과과하중치의 평균값은 각각 21,540 kgf와 22,760 kgf으로 외국 제품인 N-2000 애자가 약 6.4 % 높은 과전과과하중치를 나타내었다. 표 4에서 분석한 자료에 의하면 오히려 상대적으로는 K-2001 애자가 N-2000 애자 보다는 약 2 % 높아 일반적으로 K-2001의 과전과과하중치가 높으리라 예상할 수 있었다. 그러나 애자는 단순하게 세라믹 재료로만 구성되어진 것이 아니고 자기와 캡과 핀을 조립시켜주는 시멘트로 구성되어 있어 종합적인 판단이 요구되고 있다. 또한 애자의 두부(캡과 핀이 자기와 조립된 부분)에 해당하는 부분의 설계가 미치는 영향도 고려하여야 한다.

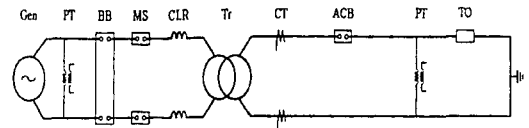
3.2.2 내 아크 시험(power arc test)

내 아크 시험은 한국전기연구원의 고전압 설비를 이용하여 시험을 실시하였다. 내 아크 시험 조건과 회로도를 표 6과 그림 4에 나타내었다.

표 6. 내 아크 시험 조건.

Table 6. Standard condition of power arc test.

시험 조건		
ES-131	내 아크 시험	
시험전압	-	
시험 전류	통전시간	0.1초 또는 0.2초
	Ampere · Time	72 kA · Cycles
아크발생	Fuse Wire (단면적 1 mm ² 이하)	
시료수	1 개련 (련당 애자 3개 연결, No. 1~3)	
인 장	14 kN	



- GEN : Generator
- P/T : Potential transformer
- BCB : Back-up circuit breaker
- M/S : Making switch
- CLR : Current limiting reactor
- TR : Transformer bank
- C/T : Current transformer
- ACB : Auxiliary circuit breaker
- T/O : Apparatus under test

그림 4. 내 아크 시험용 회로도.

Fig. 4. Circuit on power arc test.

표 7은 내 아크 시험 결과를 요약한 것이다. 그림 5는 내 아크 시험 후 시편의 상태를 보여주고 있고 그림을 통해서 알 수 있듯이 K-1989년 애자의 하단부에서 심각한 절연 갓의 파손이 발생하였다. 내 아크 시험 중 발생하는 열-기계적 충격은 자기부에 강한 충격 내구성을 요구하게 된다. 그러나 1989년도에 제작한 K-1989 애자는 열 충격에 강한 알루미늄이 8 wt.%만 포함되어 있고 XRD 결과에서 알 수 있듯이 열 충격에 취약한 크리스토팔라이트 결정이 약 4 % 나타났다. 따라서 내 아크 시험 후 발생된 열 쇼크(약 2,000 ~ 3,000 °C 예상)를 견디지 못하여 열 충격이 집중된 하단의 애

표 7. 내 아크 시험 결과.

Table 7. Results of power arc test.

시 편	시료번호	결 과
K-1989	1	fail(런 하단부 1개 파손)
	2	fail(런 하단부 1개 파손)
	3	pass
K-1995	1	pass
	2	pass
	3	pass
K-2001	1	pass
	2	pass
	3	pass
N-2000	1	pass
	2	pass
	3	pass

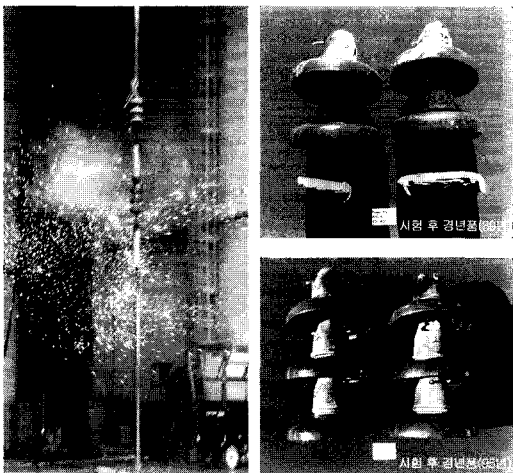


그림 5. 내 아크 시험과 시험 후 시편 상태.
Fig. 5. Power arc test and sample condition after its test.

자의 절연 갓이 파손되었다. 따라서 과거 크리스토팔라이트 재질의 자기 애자에서 고강도 알루미늄질 자기 애자로 전환하게 된 가장 중요한 이유 중 하나가 이러한 열-기계적 충격에 대한 내구성을 확보하기 위한 것이다[7]. 고강도의 특성을 나타내는 알루미늄 첨가량을 8 wt.%에서 17 wt.%로 증가시킨 애자에서는 내 아크 시험 후 파손된 애자가 없었다.

3.2.3 급준파 시험(steep front of wave flashover test)

송전용 현수애자는 자기부의 두께가 공기 중의 절연거리에 비해 짧기 때문에 높고 준도가 빠른 전압이 인가되면 자기가 관통 파괴될 우려가 있다. 급준파 시험은 대기 중에서 현수애자에 뇌 임펄스 파전압이 인가될 때 자기부의 절연파괴(내부의 절연파괴 또는 관통파괴)의 유무를 확인하는 방법이다[8].

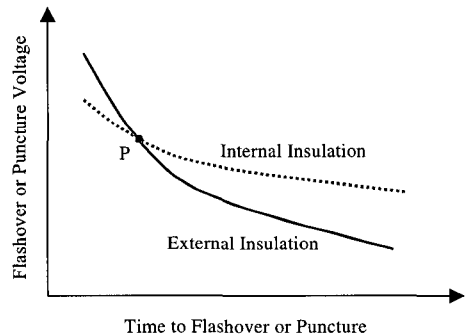


그림 6. 현수 애자의 절연 파괴 V-t 특성 곡선.
Fig. 6. Flashover V-t characteristic curve of suspension insulators.

급준파에 의한 현수 애자의 절연 파괴는 그림 6과 같은 V-t 특성 곡선으로 설명된다. 현수 애자의 뇌 임펄스 섬락 전압은 준도가 높을수록 상승한다. 한편 자기 두부를 관통하는 내부 절연의 파괴 특성도 그림 6과 같은 V-t 특성 곡선을 갖는다. 개념적으로 두 V-t 특성 곡선이 교차하는 점 P를 기준으로 좌측의 급준 영역에서는 관통 파괴가 발생하게 된다. 또한 급준파 전압에 의한 현수 애자의 내부 절연 파괴는 전압 스트레스가 반복되면서 애자의 두부에 피로가 누적되어 파괴되는 현상이라고 알려져 있다. 그림 7은 급준파 시험에 인가된 시험 파형의 한 예를 나타낸 것이다.

ES 131-540 규정에 따라 4개의 시편 애자에 대한 급준파 시험을 실시하였으며 그 결과를 표 8에

나타내었다. K-1989를 제외한 모든 애자 K-1995, K-2001, N-2000이 규정에 제시된 조건을 만족하였다. 그러나 K-1989 애자만 양(+)극성 5회를 통과한 후 부(-)극성 2회째 관통되었다. 여러 가지 이유가 있겠으나 여기에서는 두 가지로 원인을 분석하였다. 첫 번째로는 다른 생산년도에 비해 높은 절연내력을 가진 알루미늄의 첨가량이 8 wt.%로 적고, 두 번째로는 1989년도에 제조할 당시에는 급준파 시험 항목이 규격에 삽입되지 않아 애자의 두부를 설계할 때 전혀 고려하지 않은 점이 급준파 시험을 통과하지 못한 이유라고 생각한다[9]. 애자의 두부는 외부의 전기적 또는 기계적 충격을 견딜 수 있도록 설계가 이루어져야 된다. 따라서 규격이 강화됨으로써 애자의 설계는 개정된 ES-131에 입각하여 알루미늄의 첨가량을 8 wt.%에서 17 wt.%로 증가시켰고 두부의 설계, 즉 두부의 두께 및 두부의 강도를 높이기 위하여 저팽창 유약을 사용하였고, 기계적 응력 및 전계 해석을 통한 최적의 설계를 도입하여 제작한 1995년도 이후

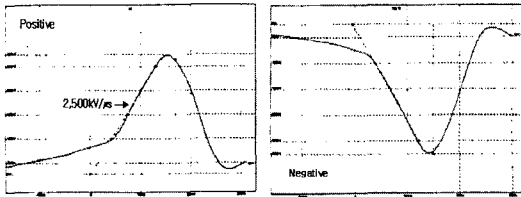


그림 7. 급준파 시험의 파형.
Fig. 7. Wave of steep front of wave flashover test.

표 8. 급준파 시험 결과.
Table 8. Results of steep front of wave flashover test.

시 편	시료번호	평가기준	시험 결과
K-1989	1	ES 131 540에 따라 2,500 kV/μs의 급준파 충격전압을 정, 부 각 5회씩 인가하였을 때 관통 파괴가 발생하지 말 것.	pass
	2		fail(부극성 2회째)
	3		pass
K-1995	1		pass
	2		pass
	3		pass
K-2001	1		pass
	2		pass
	3		pass
N-2000	1	pass	
	2	pass	
	3	pass	

제품부터는 급준파 시험에서 절연 관통된 애자가 발생하지 않았다[9,10]. 외국 제품인 N-2000 애자도 급준파 시험을 통과하였다. 표 8과 9에 시험 결과를 요약하였다.

표 9. 급준파 시험 후 상용주파 섬락 전압 측정 결과.

Table 9. Measurement results of commercial frequency flashover voltage after steep front of wave flashover test.

시 편	시료번호	평가기준	시험 결과
K-1989	1	급준파 시험 후 상용주파 섬락전압을 실시하여 평균 섬락전압이 정격 섬락전압치(80 kV)의 95 % (76 kV)이상 일 것.	83.3 kV
	2		fail, 내부관통
	3		85.0 kV
K-1995	1		82.3 kV
	2		81.3 kV
	3		83.0 kV
K-2001	1		86.0 kV
	2		83.3 kV
	3		87.7 kV
K-2000	1	78.3 kV	
	2	80.3 kV	
	3	80.6 kV	

급준파 특성을 개선하기 위해서는 앞에서도 언급한 것처럼 자기 두부에 사용하는 저팽창유약에 대한 심층적인 연구가 필요하다. 미국특허에 따르면 유약의 열팽창계수와 자기의 열팽창계수의 차이가 1.0×10^{-6} 보다는 적지 않아야 한다고 주장되어 있으며 특히 애자의 두부에 $5 \mu\text{m}$ 이하의 기공의 수가 $100 / \text{mm}^2$ 넘지 않아야 한다고 주장되어 있다[11]. 이러한 관점에 대한 연구를 통해서 보다 더 우수한 급준파 특성을 갖춘 애자를 개발하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄의 첨가량에 따라 애자에 미치는 기본적인 물리적 특성 및 한전 구매시 방서에 명시된 전기적 성능시험을 비교하기 위하여 154 kV 송전 선로에 사용하는 36,000lbs 애자의 국산 경년품 및 신품과 외산의 신품을 분석하였다. 고강도 및 절연능력이 우수한 알루미늄의 첨가량이 $8 \Rightarrow 12 \Rightarrow 17 \text{ wt}\%$ 로 증가함으로써 애자의 기계적 성질인 vickers 경도와 파괴인성이 각각 5.8 GPa, $1.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에서 6.9 GPa $1.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

로 증가하였으며 전기적 성질인 절연파괴전압도 16.3 kV/mm에서 18.8 kV/mm로 증가하였다. 자기 소지에 8 wt% 알루미늄을 첨가한 K-1989 시편은 전기적 성능시험인 power arc 및 급준파 시험에서 기준치를 통과하지 못했으나 12 wt% 및 17 wt% 알루미늄을 첨가한 K-1995 및 K-2001 시편들은 통과하였다. 그 이유는 K-1989 시편에서는 약 5 %인 cristobalite 결정상을 나타내었고 이 cristobalite는 열충격에 취약하여 power arc 시험 중에 발생하는 고온을 견디지 못하여 자기의 절연 부분에서 파손이 발생하였다. 또한 자기의 소결밀도가 낮아 즉 자기 두부의 기공율이 높아 급준파 시험을 통과하지 못했다. 그러나 알루미늄 첨가량이 17 wt%인 K-2001인 시편에서는 알루미늄 고유의 고강도 및 높은 절연능력 뿐 아니라 소결 중에 발생하는 열충격에 취약한 cristobalite 결정이 5 wt%에서 0.5 wt%로 감소하였고 높은 소결 밀도(상대밀도 96 %)로 인하여 한전 구매시방서에 제시한 power arc 및 급준파 시험을 통과하였다[12].

그러나 단순히 알루미늄의 첨가량만 높인다고 해서 power arc 및 급준파 시험을 통과할 수 있다고 단언할 수는 없다. 즉 애자는 제조하는데 사용하는 원료의 배합도 중요하지만 두부의 설계 및 조립할 때 사용하는 시멘트의 조성도 매우 중요한 인자이다. 따라서 앞으로는 애자 두부의 두께 및 두부 유약이 미치는 영향과 시멘트의 조성들이 미치는 영향에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] “2000년 송전설비 고장분석 및 대책자료”, 1999년-2000년 통계자료, 한국전력공사, 2000.
 [2] “송전용 현수애자의 성능확인 및 특성시험 분석”, 연구기획조사사업, 한국전력공사, 전력연구원, 1999.
 [3] “250 mm 볼소켓형 현수애자”, ES 131-540~543, 한전 구매시방서, 1995.
 [4] K. Niihara, R. Morena, and D. P. H. Hasselman, “Evaluation of K_{IC} of brittle solids by the indentation method with low cracks-to-indent ratio”, J. Mater. Sci. Lett., 1. 13-16, 1982.
 [5] “초고압(400kN)용 내장애자 국산화 개발”, 한국전력공사, 고려애자공업(주), 최종보고서, 2002.

[6] 최인혁, 최장현, 이동일, 최연규, “송전용 자기재 현수애자의 원료변화에 따른 특성 연구”, 한국전기전자재료학회논문지, 17권, 4호, p. 390, 2004.
 [7] “고신뢰성 자기재 배전용 현수애자 개발”, 한국전력공사 한국전기연구소, 최종보고서, 1996.
 [8] “송전용 애자의 신뢰성 평가 연구”, 한국전력공사 전력연구원, 2002.
 [9] T. Iwama, K. Kito, K. Naito, and T. Irie “Ultra-high strength suspension insulators and insulator string assemblies for UHV transmission line”, IEEE Transactions on Power Apparatus and System., Vol. PAS-101. No. 10, 1982.
 [10] K. Naito, R. Matsuoka, T. Irie, and K. Kondo “Test method and results for recent outdoor insulation in Japan”, IEEE Transactions on Dielectrics and electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, 1999.
 [11] S. Seike, T. Totoki, and T. Mima “Insulators having improved steep wave front characteristics”, U.S. Patent, No. 4,782,199, 1988.
 [12] R. Harada, N. Sugiyama, and H. Ishida “Al₂O₃-strengthened feldspathic porcelain bodies ; effect of the amount and particle size of alumina”, ceram. Eng. Sci. Proc., Vol. 17, No. 11, p. 88, 1996.