

고분자애자의 기계적 특성 평가기술

박 완 기*, 김 영 성**

(*LG전선(주) 전력연구소 부소장, **同 연구소 선임연구원)

1. 서 론

최근 국내외에서 고분자애자에 대한 관심과 사용이 날로 높아지고 있다. 국내 고분자애자의 사용은 배전선로용 고분자애자 한전 구매시방서가 1995년에 제정되어 이미 수 개의 업체제품은 2년간의 시범사용이 끝난 상태이며, 지금은 KS규격화 작업이 진행중이다. 또한 전철에 사용되는 장간애자는 금년에 규격이 제정되어 실 선로에 설치되어 사용중이며, 내년 이후부터는 신규선로에도 사용할 계획으로 있다. 송전용의 경우 154kV급은 업체의 개발과 한전의 구매시방서 제정이 완료되어 시범선로 적용을 계획하고 있으며, 345kV급의 개발도 진행중에 있다.

고분자애자의 구조는 인발(Pultrusion)공법으로 유리섬유와 수지를 결합시켜 만들어진 고강도 FRP 절연봉, 표면의 전기적 특성을 만족하도록 고분자 절연물로 된 Sheath층과 Shed를 씌우고 양쪽 끝에 지지를 위한 금구류가 부착된 형태로 되어 있다. 고분자 절연물로는 EPDM(Ethylene propylene diene monomer), Silicone 고무, EPDM과 Silicone의 Alloy 등을 사용하며, 일본에서는 EVA(Ethylene vinyl acetate)를 사용하기도 한다.

지금까지 고분자애자에 대한 연구는 자외선 조사에 따른 열화특성, 염분 부착량에 따른 열화특성 등 고무재질의 외피절연층에 대한 내후성 연구가 대부분을 차지하고 있다. 사용중의 애자는 인장, 굽곡, 비틀림 등의 기계적 하중을 항상 받고 있으며, 이들 하중은 주위의 기후와 통전중의 자체 발열에 의해 복합적으로 장기간 작용하여 금구결합 부분의 기계적 강도를 약화시킬 염려가 있다. 따라서 외피절연층의 내후성 못지 않게 애자의 기계적 강도를 계속 유지하게 하는 FRP rod와 금구의 결합도 매우 중요하다.

본 논문은 고분자애자의 기계적 특성에 가장 지배적인 금구의 접속방법을 기술하고, 금구결합의 신뢰성 평가기술을 소개한다

2. 금구접속 방법

고분자애자의 금구결합 방법은 요구되는 기계적 강도에 따라 다양한 방법으로 Rod와 결합된다. 또한 금구의 재질도 제조방법에 따라 주조 또는 단조 알루미늄이나 가단주철강, 단조강 등이 사용된다. 일반적으로 고분자애자의 Rod와 금구의 접합에는 그림 1에 나타난 것과 같이 압착법, 테이퍼 접착법, 췌기법 등이 가장 많이 사용된다.

2.1 압착법

금구에 Rod를 삽입하여 금구의 외부를 다이스로 눌러서 접속하는 방법으로 가장 보편적으로 사용되는 방법이다. Rod와 금구 사이의 마찰력에 의하여 기계적 하중을 견디는 구조이며, 인장강도는 압착시 가하는 하중과 압착 단면적에 비례한다. 인장강도를 높이기 위해 무리한 압착력을 가할 경우 금구부의 도금층이 벗겨지거나 심하면 금구 또는 Rod가 갈라질 수가 있으므로 금구재질 및 두께, Rod의 직경 그리고 필요한 기계적 강도 등을 고려하여 압착하중을 결정하여야 한다. 일반적으로 접속부의 길이는 테이퍼 접착법이나 췌기법에 비해 약 2 배 길지만 제조방법이 간편하고, 강한 기계적 강도를 유지할 수 있다.

2.2 테이퍼 접착법

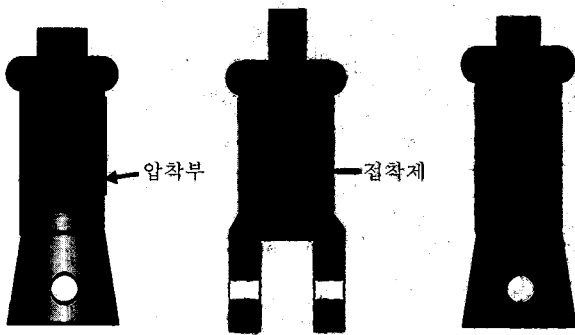
금구의 내면을 입구가 좁고 바닥이 넓도록 경사지게 만든 다음 Rod를 끼우고 접착재를 충전하여 접속하는 방법이다. 금구의 테이퍼 면에 이형제를 도포하여 금구와 접착재가 분리되도록 하여 인장하중이 가해질 경우 Rod에 압축응력이 작용하도록 한 것이다. 충전된 접착재가 금구와 분리되어 있어서 주로 진동이 심한 전철선로용 애자에 사용된다.

금구와 Rod 사이에 충전되는 접착재와 테이퍼 각도 및

접합길이의 선정에 따라 기계적 강도가 크게 달라지게 되며, 접속방법이 까다롭고 복잡한 단점이 있다.

2.3 쉘기법

금구내부의 바닥에 쉘기를 설치하여 Rod 밑면을 축과 수직인 방향으로 벌리면서 경을 확대하여 접속하는 방법이다. 이 방법은 접착길이를 짧게 할 수 있는 장점이 있으나, 비틀림 하중이 가해지거나 장기간 사용함에 따라 Rod 내부가 쉘기의 끝부분에서 크랙이 발생하여 절전할 수 있다. 이 경우 크랙이 금구부 보다 길게 진전하면 전기적 및 기계적 성능이 급격하게 저하된다.



(a) 압착법 (b) 테이퍼 접착법 (c) 쉘기법

그림 1. Rod와 금구의 접속방법

3. 금구결합의 신뢰성 평가

고분자애자의 신뢰성과 관련된 특성평가는 Shed재질에 대한 열화과 금구접속부의 기계적 강도에 주안점을 두고 단기적인 시험과 장기적인 가속열화에 의한 시험으로 평가한다. 이들 평가는 대부분 전기적, 기계적, 화학적인 스트레스를 복합적으로 가하거나 단일시험이 연속적으로 행해져서 시험이 이루어진다. 규격별(IEEE, IEC, ANSI, CEA 등)로 용도와 사용환경에 따라 평가항목과 방법에 조금 차이가 있다.

금구 접속부에 대한 평가는 두가지 관점에서 확인하며, 첫 번째는 기계적 인장강도를 견딜수있는가 하는 것이고, 두 번째는 기계적 시험 후 금구와 FRP rod 계면에 수분침투 여부를 평가하는 것이다. 금구 접속부 시험을 단기시험과 장기시험으로 구분하면 단기시험에는 인장내하중 시험, 인장파괴하중 시험, 급하중해제 시험, 비틀림 내하중시험과 내 아크시험이 있으며, 장기시험으로는 기계적 하중-시간시험, 수분침투 시험 그리고 경년변화 시험 등이 있다. 이들 시험에 대한 내용을 상세하게 기술하면 다음과 같다.

3.1 급 하중해제 시험(Sudden load release test)

고분자애자를 영하20℃에서 영하25℃사이의 온도에서 규정인장하중(SML)의 약 30%에 해당하는 인장하중으로부터

급작스럽게 해제시키는 것을 5회 반복하는 방법이다. 이것은 저온에서 Rod가 정방향으로 수축하여 금구로부터 빠지는 것을 평가하기 위한 시험이다. 적용을 할 경우 사용자와 협의에 의해 더 낮은 온도를 선택 할 수 있다.

3.2 경년변화 시험(Thermal-mechanical test)

이 시험은 고분자애자가 실제 사용중에 급격한 온도변화에 의한 이종 물질(FRP rod와 금구)간의 열팽창계수 차이로 인한 인장강도 특성을 평가하는 시험이다. 세계 여러 나라의 전력회사에서는 IEC 575를 골격으로 하고, 그 나라 기후조건을 고려한 상하온도의 범위, 인장하중, 시험주기, 시험계속시간 등을 정하여 규격화하고 있다. 우리나라의 경우, 최저 -35℃, 최고 +60℃로 규정하고 있다. 이 시험은 온도변화에 의해 FRP rod와 금구의 열팽창계수 차이로 인한 애자의 인장하중에 대한 신뢰성을 평가하는 항목이다. 규정인장하중의 5%에 해당하는 하중을 1분간 인가한 후 전체길이를 측정하여 규정인장하중의 50% 이상으로 하중을 96시간 동안 가한 상태에서 온도변화에 의한 길이변화를 측정하는 시험이다.

경년변화 시험방법은 표 1과 같으며, 그림 2는 경년변화 시험장면을 나타낸 것이다.

표 1. 경년변화 시험방법

시험조건	시험방법 및 규격치
인장하중	SML의 5% 하중을 1분간 인가하여 길이측정
열기계 시험	- SML의 50% 하중인가 - 온도변화 -35℃~+60℃, 최저,최고온도에서 8시간유지 - 시험시간 96시간
길이변화	길이변화 2mm이하
검색시험	- 염색용액에 15분간 침수 - 양쪽금구부의 염료침투 없을 것

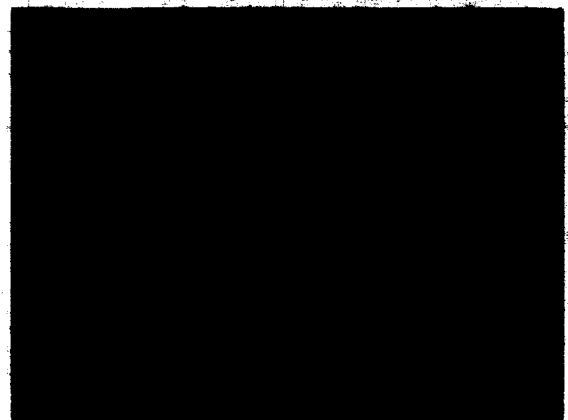


그림 2. 경년변화 시험

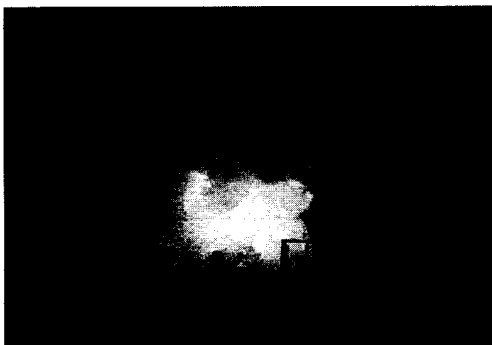
3.3 내 아크 시험(Power Arc test)

내 아크 시험은 실선로에서 뇌해, 염전해, 조류접촉 등으

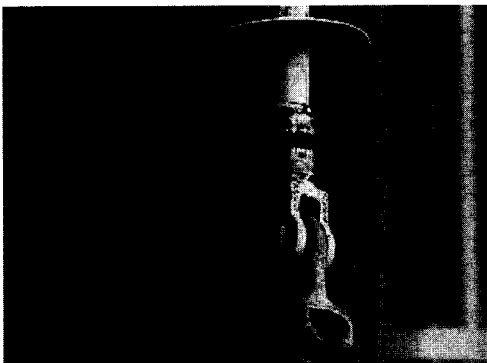
로 애자표면에 섬락이 발생하면 속류아-크에 의해서 애자의 외피절연부와 금구부의 손상여부와 이때의 Rod와 금구의 결합을 검증하는 시험으로 열적 내구성을 확인하기 위한 시험이다. 특히 22.9kV 중성점 다중접지 배전시스템의 고장전류는 10kA를 초과할 수 있으므로 애자의 표면이나 금구접속부가 손상을 입을 위험이 크다고 볼 수 있다. 내열특성이 약한 외피재나 금구는 아-크열에 의해 그림 3의 (b)와 같이 녹거나 심하면 금구가 빠져 하중을 견디지 못하고 지락사고의 원인이 되기도 한다. 그림 4는 내 아-크 시험후의 자기재와 고분자애자를 비교한 것이다. 자기재의 경우 자기부가 열에 견디지 못하고 깨어지지만 고분자는 그을린 자국만 남는다. 표 2는 내 아-크 시험조건을 나타내었다.

표 2. 내 아-크 시험조건

항 목	시 험 조 건
인장하중	14kN
아-크주기	15~30 cycle
예상단락	150kA.cycle/min
평 가	- 외관검사 : 외피재와 접속금구 검사하여 심재의 노출이 없어야 하며, 기계적 분리가 없어야 하고, 외피재에 크랙이 없을 것 - 염색용액침투시험: 양쪽 금구를 염료에 15분 담근후 금구를 세로로 잘라 외피재를 벗겨내고 내부에 염료의 침투가 없을 것

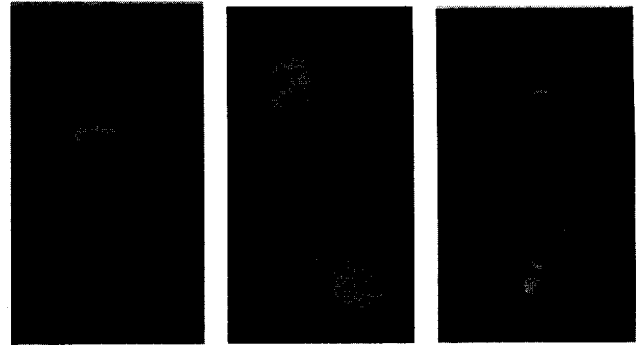


(a) 아-크 발생



(b) 시험후 금구형상

그림 3. 내아-크 시험장면



(a) 자기재 현수애자 (b) 자기재 장간애자 (c) 고분자애자

그림 4. 내 아-크 시험후의 애자 형상

3.4 수분침투시험(Water Penetration Test)

고분자애자는 구조적으로 물 또는 수증기의 침투에 의한 가수분해현상을 일으켜 전기적 또는 기계적 열화를 야기할 수 있다. 따라서 이를 검증하기 위한 시험으로 수분침투시험을 실시한다. 특히 이 시험중의 급준파 뇌 임펄스 섬락전압 시험은 대기중에서 고분자애자에 뇌 임펄스 과전압이 인가 되었을 때 절연부의 절연파괴(내부절연파괴, 관통파괴)의 유무를 검증하는데 유효한 시험방법으로 채택 되고있다. 또한 급준파 임펄스 섬락전압 시험후의 상용주파 시험을 섬락시험과 내전압시험을 실시하여 최종적으로 제품의 이상 유무를 확인한다. 수분침투시험의 절차와 방법은 표 3과 같다.

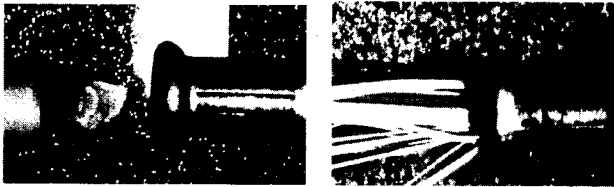
표 3. 수분침투시험 방법

시험절차	시험방법 및 평가
경도 측정	Shore A
상용주파 건조 섬락전압	5회 섬락치의 평균치
가 열	0.1% NaCl을 섞은 탈이온수에 넣고 100시간 가열
평 가	
육안검사	외피재에 크랙이 없을 것
경도측정	가열전 경도의 20% 이내 변화
급준파 섬락 시험	최소 1000kV/s의 급준임펄스를 정,부 각10회 인가하여 시료에 구멍이 없을 것
가	
상용주파 건조섬락	가열전 시험치의 90% 이상 일 것
상용주파 내전압	- 가열전 섬락전압의 80%를 30분간 인가 - 시험직후 표면온도 상승이 20C 이하 일 것

3.5 기계적 동특성 시험

실제 사용중의 애자가 받는 기계적 응력은 풍압, 온도, 빙설 등의 영향으로 동적인 상태가 된다. 따라서 몇몇 연구소 또는 업체에서는 실제의 환경을 모의하여 동적인 하중 조건하에서 장기적 인장하중 시험을 실시한다. 인가되는 하중은 일정한 진폭을 갖는 진동시험으로 실시하며, 일반적인 정적상태의 인장파괴는 금구와 Rod의 연결부위에서 Rod의 취성적 파괴현상을 나타내지만 동적인 인장파괴는 Rod의

주성분인 레진과 유리섬유 사이의 피로하중이 누적되면서 계면이 갈라지는 양상을 보인다. 이러한 동적인 상태에서의 시험결과는 Weibull 분포에 적용하여 실선로에서의 FRP rod 또는 Rod와 금구결합의 수명을 예측하는데 사용한다. 그림 5는 정적인 상태와 동적인 상태에서의 인장파괴하중 시험후의 파괴양상을 보인 것이다.



(a) 정적인 상태 (b) 동적인 상태

그림 5. 인장시험후의 시료 파괴형상

3.6 기타 기계적 시험

실 선로 운전 중에 고분자애자의 금구탈락 현상을 방지하기 위한 금구의 결합상태 확인시험에는 앞에서 설명한 시험 외에도 여러 가지가 있다.

- 인장파괴하중 시험(SML; specified mechanical load) : 제조자가 규정한 하중으로서 애자의 기계적 강도에 대한 설계기준을 확인하는 시험이며, 이 하중값에 의해 애자의 기계적 강도가 결정된다.
- 인장내하중 시험(RTL; routine test load) : SML의 50%에 해당되는 하중으로 전수검사로 실시하며, 모든 애자에 대한 최소한의 기계적 강도를 확인하는 시험이다.
- 기계적 하중-시간 시험 : SML의 70%에 해당하는 인장하중을 96시간 동안 인가하는 것으로 강한 하중이 지속적으로 작용할 때의 기계적 특성을 평가하는 시험이다.
- 비틀림 내하중 시험 : 가공선로의 거동에 따라 인장하중 외에 발생할 수 있는 비틀림 하중이 금구와 Rod의 결합부에 영향을 끼쳤을 때의 특성을 평가하는 시험이다.

4. 결 론

이종재질로 구성된 고분자애자의 금구 결합부가 기계적, 열적 환경의 변화로 일어나는 기계적 응력을 실선로와 동일하게 확인하는 것은 간단한 단기간 평가로는 불가능하다. 그러나 개별적 기계적 스트레스를 단기 및 장기시험을 통해 평가하는 고분자 애자의 신뢰성 시험법이 개발되었다.

1950년대 고분자애자 개발초기에 외피재가 내트랙킹성과 UV에 약하고, 기계적 장기신뢰성이 떨어져 실용화가 늦어지기도 하였다. 그러나 지금은 고분자 배합기술의 발달로 전기적 특성과 내후성이 우수한 외피재가 개발되었으며, 이에 따라 재료평가, 구조에 대한 전기적, 기계적 특성평가를 위한 기술이 개발 되었다. 국내에서도 배전급에서 국내의 제품의 시험사용이 완료되었고, 전철용 고분자애자가 실선

로에 운용중이며, 송전애자의 규격제정과 시범사용을 계획중에 있다. 이러한 국내외의 추세에 따라 국내에서의 고분자애자 제조 및 평가기술의 비약적 발전과 함께 사용확대가 필요한 시점이라고 생각된다.

참고문헌

- [1] 배전용 애자류 품질확보를 위한 경년 시험방법에 관한 연구, 한국전력공사, 1996.
- [2] Composite insulators for A.C. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V Definitions, test methods and acceptance criteria, IEC 1109, 1992
- [3] Dead-end/Suspension composite insulator for overhead distribution lines, CEA, 1996
- [4] Composite suspension insulators for overhead transmission lines-tests, ANSI, 1989.
- [5] C.De Turreil, et al., "Long-term mechanical properties of high voltage composite insulators", IEEE transmission on power apparatus and system, Vol PAS-104, No.10, Oct, 1985.
- [6] C.H. de Turreils, "Response of composite insulators to dynamic mechanical loads", IEEE Transactions on power delivery, Vol.5, Jan. 1990, pp. 379~383
- [7] E.A. Cherney, "A simple design that requires careful analysis", Symposium on non-ceramic insulator technology, Singapore, June, 1996

저 자 소 개



박완기(朴完基)

1957년 8월 21일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 독일 Achen대 졸업(석사). 1994년 독일 Darmstadt대 졸업(공학박). 1999년 현재 LG전선(주) 전력연구소 부소장



김영성(金榮性)

1964년 7월 21일생. 1991년 중앙대 전기공학 졸업. 1998년 금오공대 재료공학과 졸업(석사). 1999년 현재 LG전선(주) 전력연구소 선임연구원.