옥외용 고분자 절연재료의 성능평가기술

◦ 조한구 ◦
한국전기연구원
책임연구원

1. 서 론

초기에 고분자 재료는 애자, 부싱 및 계기용 변성기의 옥내용으로 이용되어 왔으나 최근 합성화학의 발달에 의해 각종 합성 고분자 재료가 개발되어 자기(porcelain)제의 절연물을 대체할 수 있는 옥외용의 애자류, 부싱, 피뢰기 등의 절연물이 송.배전선로, 변전기기 및 전철선로에 이용되고 있다. 이와 같이 국내외에서 신소재 절연물이 적용되기 시작함에 따라, 이들의 기계적 특성, 내트래킹성 및 신뢰성을 예측하기 위한 열화평가기술에 대한 연구가 진행되고 있으며, 최근 이와 같은 절연물의 용도 확대에 따라 국내에서도 이에 대한 연구도 가속화되고 있는 실정이다. 일반적으로 고분자 재료는 성형가공이 용이하고, 우수한 기계적 · 전기적 특성 등을 가지기 때문에 전력기기, 전선 및 케이블, 전기전자 부품 등 다 방면으로 널리 사용되고 있다. 이러한 고분자 재료는 절연재료의 개질이나 신재료의 개발 등을 도모하여 전력기기의 대용량화, 소형 경량화, 고성능화, 장기 신뢰성 향상 등의 요구에 맞춰 옥내에서의 사용뿐 만 아니라 옥외에서도 적용되고 있다.

그러나, 이와 같은 고분자 절연물의 소재는 내열성, 내후성 및 내트래킹성 측면에서 고려되어야 할 뿐 아니라, 옥외용으로의 절연물은 태양광, 각종 오손물질(염분, 매연, 분진 등)에 노출되어 있으며 전기적 스트레스가 항상 가해지고 있다. 전기적 스트레스는 절연물의 형상설계 등에 영향을 받지만 태양광에 의한 열화로 표면 거칠기(surface roughness)의 변화, 오손 물질의 누적, 강우 및 농무 등의 복합적인 영향에 따라 열화되어 절연성능은 급격하게 저하된다.

따라서, 옥외에서 사용하기 위해서 성능평가기술은 신소재 절연물 개발 및 사용에 있어서 대단히 중요하므로 본 고에서는 특히 옥외용 전력기기로의 적용 관점에서 고분자 절연재료의 적용 상황과 평가기술에 대해서 서술한다. 또한, 열화실험의 근간이 되는 복합열화실험(IEC 61109 Annex C)와 고분자 제품 규격의 하나인 트래킹 휠 실험(CEA LWING-01)을 비교하여 간략하게 논하고자 하였다.

2. 고분자 절연재료

2.1 고분자 절연재료의 구조와 요구 성능

고분자 화합물은 비교적 단순한 저분자 화합물(모노머)가 공유결합에 의해 반복적으로 다수 개로 연결되어진 것으로, 분자량이 1만에서 수백만 정도의 집합체이다. 고분자 화합물을 형태로 보

면, 주로 분자가 직쇄상으로 연결된 쇄상 고분자와 3차원적으로 망목상으로 결합한 망목상 고분자로 구별된다. 또한 그림 1에 나타낸 바와 같이, 석면, 운모 등의 천연고분자 화합물과 합성수지, 고무 등의 합성 고분자 화합물로 구별된다. 이중 합성수지는 열가소성 및 열경화성 등 2가지로 구분된다.

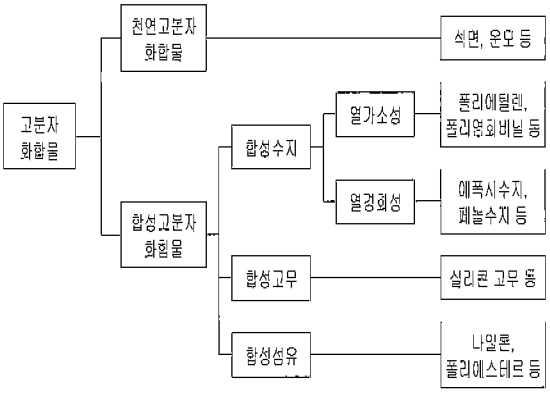


그림 1. 고분자 화합물의 분류.

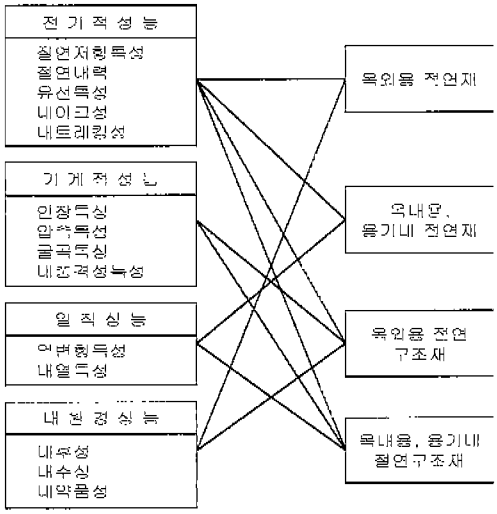


그림 2. 고분자 절연재료의 주요 소요성능.

고분자 절연재료에 요구되는 성능으로서 주로 전기적, 기계적, 열적 및 내환경 성능이 있다. 이러한 성능을 얻기 위해서 일반적으로 ① 충진제의 첨가 ② 첨가제의 사용 ③ 타 고분자의 혼합 ④ 표면처리 등의 개질 방법이 이용된다.

고분자 절연재료의 주요 용도별 소요성능을 그림 2에 나타낸다. 옥외용 절연재료로서는 특히 전기적 성능 중 내트래킹성, 내환경성능 중 내후성(특히, 내자외선성)이 중요하다.

2.2 고분자 절연재료의 변천

합성 고분자 재료는 1939년에 에폭시 수지가 1940년에 실리콘 고무가 각각 미국에서 개발되었으며, 1940년 이후 고분자 합성기술의 급속한 발달에 따라 각종의 합성 고분자 재료가 개발되었다. 에폭시 수지에 대해서는 각종의 개량이 이루어져 현재 회전기, 몰드 절연기기, 가스 절연기기용 스페이서, 애자 등 주로 옥내 절연용으로 적용되고 있다. 실리콘 고무 및 EPDM에 대해서는 최근 첨가제 등에 따른 개량이 진행되어 애자, 피뢰기 등으로 적용이 확대되었다.

3. 옥외용 고분자 절연재료의 성능평가법

3.1 성능평가법의 개요

옥외용 고분자 절연재료의 주요성능으로서 앞에서 서술한 내트래킹성 및 내후성이 있다. 내후성의 평가에 대해서는 Weather-ometer 등에 의한 방법이 거의 확립되었다. 내트래킹성 실험은 IEC 60587, RWDT(Rotating wheel dip test) 등 수분이 개입된 오손, 습윤하에서의 습식실험 방법과 고전압 소전류 내아크 실험 등 수분을 개입하지 않는 건식 실험방법으로 크게 구분된다.

또한, 옥외의 고분자 절연물의 열화 및 수명은 여러 가지 요인에 의존하므로 위에 언급되어 있는 단일열화 보다는 복합열화에 의해 발생하기 때문에 복합열화실험 및 트래킹 휠 실험 등이 요구된다.

표 1. 규정된 트래킹 실험방법의 오손액 특성.

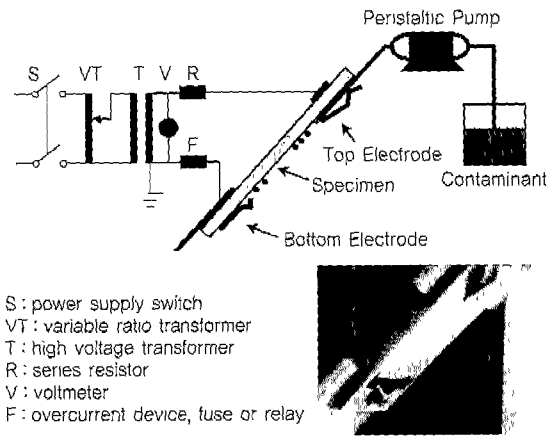
Standard	Contaminants	
	Electrolyte	Surfactant of nonionic and anionic
IEC 60112	0.1% NH4Cl	
	0.1% NH4Cl	0.5% alkylnaphthalene sulfonate
IEC 60587	0.1% NH4Cl	0.02% isooctylphenoxy polyethoxy ethanol

습식 실험의 경우에는 비교실험법(comparative test method, IEC 60112)과 오손액 경사평판법(liquid-inclined plane method, IEC 60587), 회전윤법(rotating wheel dip test, IEC 60170)이 있다. 습윤조건에서 내트래킹성을 평가하는 실험인 비교실험에서는 0.1% NH4Cl을 오손액으로 사용하며, 가혹한 오손조건에는 음이온계 계면활성제를 전해액에 첨가한 오손액을 사용하며 주로 옥내용 절연재료의 평가에 이용된다. 일반적으로 음이온계의 계면활성제를 첨가하면 첨가하지 않은 오손액에 비하여 내트래킹성을 저하시키는 경향을 나타낸다. 그리고, 오손액 경사평면실험에서는 비이온계 계면활성제를 첨가하여 오손액으로 사용한다. 표 1에 오손액에 계면활성제를 첨가한 습윤조건에서의 트래킹실험에 대한 각각의 규정과 오손액을 나타내었다.

비교실험과 경사평판실험에서의 평균 전계는 각각 25~150V/mm, 20~120V/mm로 거의 같지만 건조대에서 전압의 분담이 커지므로 인가전압이 높은 오손액 경사평판실험이 더욱 가혹한 조건이다. 오손액으로는 표준액보다는 오손액 경사평판실험의 비이온계 계면활성제를 첨가한 오손액이 시료와의 젖음성이 좋기 때문에 가혹한 오손 조건이라고 볼 수 있다. 한편 비교실험의 음이온계 계면활성제는 젖음성을 좋게할 뿐만 아니라 저항률을 낮게하므로 오손액 경사평판실험보다 더 가혹한 조건이다.

3.2 오손액 경사평면 실험

IEC 60587은 오손액 경사평면 실험법으로 상부 및 하부전극을 시편에 부착하고 상부전극과 시편 사이에 오손액이 흐르도록 여과지를 겹쳐 상부전극과 시편 사이에 끼워서 정량펌프로 오손액을 공급한다. 상부전극과 하부전극의 거리는 50±0.5mm이며, 수평으로부터 45°로 유지하여 실험한다. 트래킹 파괴에 대한 기준은 두가지로서 첫째는 고압회로에 60mA 이상의 전류가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간이며, 두 번째는 도전로가 하부전극으로부터 상부로 25mm 지점까지 형성되는 시간으로 나타낸다. 일반적으로는 전자를 내트래킹성 평가기준으로 이용한다. 그림 3은 내트래킹성 실험 구성도와 실험장면을 나타낸다.



(a) 측정 시스템 (b) 실험장면

그림 3. 내트래킹성 실험 구성도와 실험장면.

3.3 RWDT 실험

IEC 60170으로 규격화되어 있는 실험방법으로 그림 4는 실험장치를 나타내었다. 실험조건으로는 인가전압, 전극간 거리, 원판(wheel)의 회전속도 및 오손액의 저항률 등을 고려할 수 있지만, 표 2와 같은 최근 IEC에서 검토되고 있는 실험조건의 표준화에 일치시키기 위한 조건을 나타내었다. 실험은 봉(rod) 형상의 재료를 오손액에 의한 염수오손과 고전압 과전을 반복하므로서 인공적으로 가혹한 조건하에서 표면방전 등에 의해 재료 표면의 트래킹에 의한 경시적인 변화를 평가하는 것이다. 직경 약 1m의 원판(wheel)의 바깥부분에 여러개의 재료를 설치하고, 수직에 대해 15° 기울인 상태에서 원판을 1 rpm의 속도로 회전시킨다. 재료를 1/3 회전만큼 오손액에 잠기게(dipping)한 후, 1/2 회전하는 동안 상용주파수의 10kV 전압이 인가된다. 이 실험에 있어서 오손액의 저항률은 일정하게 되도록 100~200시간마다 750Ω cm로 보정하고, 전극과 오손액은 500시간마다 교환해야 한다. 이 실험은 재료가 오손액속을 이동함에 따른 세정효과(cleaning effect)와 30초마다 과전과 습윤을 주기적으로 반복함에 따른 옥외의 강우 상황을 모의할 수 있다.

각 시료의 누설전류가 300mA에 도달하면 트래킹 파괴한 것으로 마무리 한다. 시료의 평가는 파괴까지의 시간, 누설전류, 중량변화, 표면상태(침식깊이), 절연파괴전압, 절연저항 회복특성 등의 측정에 의해 이루어진다.

3.4 내아크 실험

내아크 실험은 아크에 의해 전극간에 도전성 탄화물이 생겨 단락상태가 되어 아크가 소멸되기까지 걸리는 시간으로 평가한다.

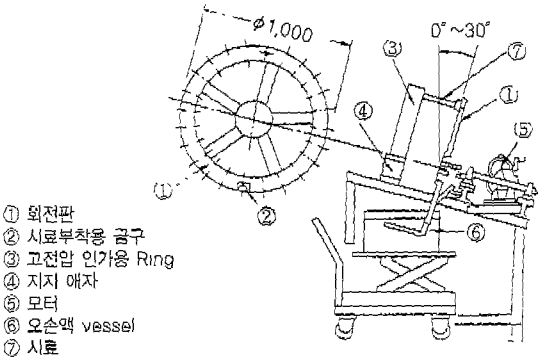


그림 4. RWDT 실험장치.

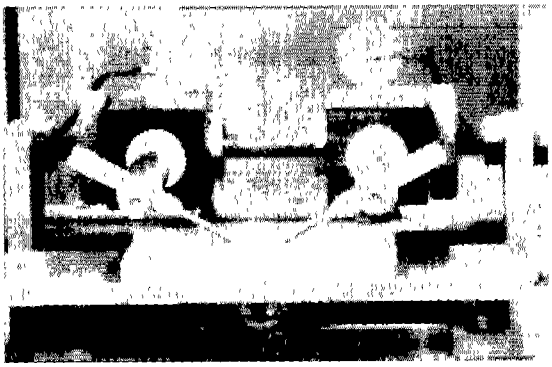


그림 5. 내아크 실험장면.

ASTM D 495에 의하면 2차회로 개방시의 전극전압은 12,500V를 표준으로 하고 있다. 한 단계를 1분으로 하며, 흐르는 전류의 on-off에 따라 7단계(420초)로 이루어진다.

전극의 재료는 텅스텐과 청동이 있는데 고분자 절연물일 경우 텅스텐을 사용한다. 직경이 2.4mm, 전극사이의 거리가 6.35mm로서 두 전극 사이에 직선으로 아크방전을 유기하기 위하여 30°를 유지한다. 그림 5는 내아크 실험장면을 나타낸다.

3.5. 복합열화시험

전기절연 · 환경에 대한 복합열화실험으로서는 표 2에서와 같이 각종 열화요소를 조합하여 가속배율로서 10~20배 정도가 상정되는 실험방법이 제안되고 있다.

표 2. 폴리머 절연물의 복합열화 실험방법.

실험법	인가전압	복합 스트레스	실험시간	휴지시간 (유, 무)
IEC 61109	14~20 kV (34.6 mm/kV)	염무	1000 h	무
IEC 61109 Annex C	50 V/mm (20.8 mm/kV)	염무, 강우, 습도, 온도, 자외선	5000 h	무
CEA 트레킹 휠 실험	35 V/mm	염수	30000 cycle (192초/cycle)	무→유

복합열화실험은 열화조건이 실사용 환경에서의 조건과 유사하여야 한다. 그러나, 실험 효율 향상을 목적으로 열화조건 설정을 과도하게 부여하게 되면 실험의 타당성을 잃게 된다. 폴리머 애자의 복합열화실험 후에 열화정도를 평가하는 것이 중요한데, 현재 열화평가실험은 시료의 외관상태, 중량, 표면 오손물질의 조사, 표면분석, 오손내전압실험, 상용주파주수섬락실험, 뇌임펄스섬락실험, 인장파괴하중실험, 굴곡내하중실험등이 있다. 각각의 실험에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

① 외관상태 : 부식 · 트레킹의 유무, 쵸킹 · 크랙의 유무, 갓관통의 유무 등의 특이현상
② 중량 : 중량의 변화
③ 표면 오손물질의 조사 : 부착물의 조성 및 부착량
④ 표면분석 : 발수성 및 표면거칠기의 변화, 표면의 화학 구조 변화, 원소분석에 따른 표면층의 열화 상태(표면의 Si/Al비)
⑤ 오손내전압 : 오손내전압의 변화
⑥ 상용주파주수섬락전압 : 섬락전압의 변화
⑦ 뇌임펄스섬락전압 : 섬락전압의 변화
⑧ 인장파괴하중 : 파괴하중의 변화
⑨ 굴곡내하중 : 계면의 변형, 내하중의 저하

표 3에 IEC 61109와 IEC 61109 Annex C의 차이점을 비교하여 나타내었다. 열화실험으로서의 트래킹과 침식실험의 목적은 주로 트래킹, 침식, 관통 그리고, 또 다른 형태의 손상에 대한 절연물의 저항성을 평가하기 위한 것이다. 그러나, IEC 61109에서는 최대 섬락 횟수를 손상의 평가보다 더욱 더 중요한 요소로 다루고 있다. 이 실험은 실제로 열화를 다루는 것이 아니라 규정된 조건에서의 오손 섬락으로 다루어지는 것이다. 섬락 횟수는 열화실험에서는 보다 가변적이고 부적절하다고 생각된다. 따라서, 트래킹, 침식, 관통 및 또 다른 형태의 손상에 대해서 절연물의 소재가 아닌 형상 설계를 평가하기 위해서는 트래킹과 침식실험 자체만 가지고 판단하는 것이 적절하다고 판단된다. 또한 섬락 특성은 실험

표 3. IEC 61109와 IEC 61109 Annex C와의 비교.

규격	IEC 61109	IEC 61109 Annex C
약칭	염수분무실험법	복합열화실험법
샘플	모델애자	모델애자
실험 방법	염수분무 챔버(용적 10m³ 이내, 높이 2.5m이하)내에 시료를 수직 및 수평으로 배치하고, 항상 전압을 인가한다. 이 챔버내에 염수를 발생시킴. 염수유량:(0.4±0.1)l/(m³×h) 염무입자크기 : 5~10㎛ 온 도 : 20±5°C	모의 태양광 인공강우 건조가열 : 50°C 습윤가열 : 50°C : 98% rh 고습윤 : 95% rh 24h을 1사이클로 함
오손액 성분	NaCl(10±0.5)kg/m³	NaCl 7kg/m³
오손액 도전율	1.6S/m	1.15S/m
전계	34.6mm/kV	20.8mm/kV
규정기준	3회 이상 트립되지 않고, 트래킹, 갓의 관통, FRP가 노출할 정도의 침식 여부	없음

결과에서 평가된 한정된 발생 횟수만으로 제한되어서는 안된다.

표 4는 IEC 61109 Annex C와 CEA LWIWG-01에 대한 실험을 비교하였으며, 실험 결과는 트랙(track)이 없으며 코아(core)까지 이르는 침식(erosion)이 없고 갓(shed)과 하우징(housing)에 구멍

표 4. IEC 61109 Annex C와 CEA LWIWG-01 시험 비교.

규격	IEC 61109 Annex C	CEA LWIWG-01
약칭	복합열화시험법	트래킹 휠 시험
샘플	모델애자	모델애자
방법	모의 태양광 인공강우 건조가열 50°C 습윤가열 50°C 98% rh 고습윤 95% rh 24h을 1사이클로 함	전기적 스트레스(최소) 35V/mm(누설거리) 염수의 NaCl 함량 1.40±0.06g/l 30,000cycle 시험시간(최소)
오손액 성분	NaCl 7kg/m³	NaCl 1.40±0.06g/l
오손액 도전율	1.15S/m	2.87ms/cm
전계	50V/mm	35V/mm

(puncture)이 없어야 한다. 또한, 트레킹 휠 시험이 끝난 시료는 48시간 이내에 급준파 및 상용주파전압시험을 끝내야 한다.

4. 결 론

산업의 발달과 전력 사용은 급격히 증가하고 있고 이에 수반하여 대전력, 고전압화가 전력기기와 이에 따르는 절연물의 고기능화가 필연적으로 요구되는 현실에서 신소재 절연물의 용도 확대는 지속적인 발달이 기대되는 분야의 하나이다. 그 중 옥외용으로 고분자재료 적용은 계속적으로 증가하고 있으며, 이러한 전력기기의 소형, 경량화, 비용 절감 등의 요구 이외에 전계강도, 기계적 강도의 증가, 고온영역에서의 적용 등을 포함하여 복합기능화 면에서의 요구도 강화되고 있다. 이러한 요구에 대처하기 위해 고분자 절연재료의 개발과 적용이 기대된다. 또한 적용된 전력기기의 고신뢰성을 검증하기 위해 기기의 열화현상의 해명과 그에 따른 기기 설계기술의 확립, 가속열화 실험방법을 포함한 신뢰성 평가 실험법의 개발 등이 중요한 연구과제로 되고 있다.

따라서 이러한 고분자 재료를 적용한 기기의 상품화를 가속시키기 위해서는 자체적인 설계 및 공정기술의 확립과 더불어 열화평가기술이 제품의 선진화에 기여할 것이라고 본다.

참고 문헌

[1] Kunikazu Izumi, "Application of polymeric insulating materials for outdoor electric power apparatus", Trans. IEE Japan, Vol. 113-B, No. 3, 1993.

[2] IEC publ. 60587, "Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials Used Under Severe Ambient Conditions", 1984.

[3] ASTM D 495, "Standard Test Methods for High Voltage, Low Current, Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation", 1984.

[4] 산화아연소자의 선로보호 적용조사 전문위원회, "송전용 피뢰장치의 개발상황과 적용 효과", 일본 전기학회기술보고(II부), 제 367호, 1991.

[5] 일본 전기협동연구회, "가공 송전용 유기애자의 현 상황과 앞으로의 전망", 전기협동연구, 제 56권 1호, 2000.

[6] Takashi Higashihara, "Integrated type cast resin transformers, named "mold pole", for outdoor use", Takaoka Review, Vol. 34-2, No. 112, p. 119, 1987.

[7] 조한구 "신소재 절연물의 장기 열화진단을 위한 복합열화 실험기술", 대한전기학회지, Vol. 48, No. 12, p. 12, 2000.

[8] 조한구, 이운용, "몰드 해석기술" 한국전기전자재료학회지, 제15권 6호, 2002.

[9] 김정호, 조한구, "경사평면법에 의한 실리콘 고무 침식의 진전과정과 누설전류 변화와의 상관성 연구" 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 12, No. 1, p. 1052, 2000.

저 자 약 력

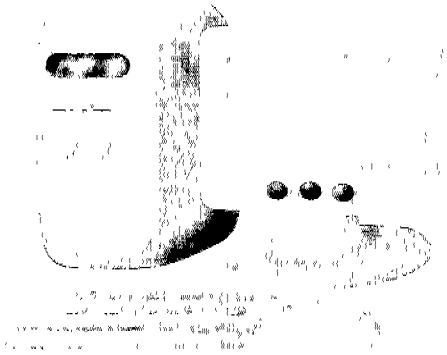
성 명 : 조한구

❖ 학 력

- 1984년 성균관대 공대 전기공학과 공학사
- 1987년 성균관대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1996년 성균관대 대학원 전기공학과 공학박사

❖ 경 력

- 1993년 전기기기 기술사
- 1999년 – 2000년 동서대 전자기계공학부 겸임교수
- 1987년 – 현재 한국전기연구원 책임연구원

❖ 주관심분야

- 고분자 애자 및 피뢰기 설계와 열화평가기술
- 몰드 절연물 절연설계 및 열해석기술