특 집

배전용 애자에의 고분자 절연재료 적용

한 재 홍 · 조 성 수

1. 서 론

고분자 절연재료는 전기절연(electrical insulation)을 목적으로 하는 전력분야에서 다양하게 사용되고 있다. 예를 들면, 지중 전력케이블의 절연층 재료로 사용되는 가교폴리에틸렌(crosslinked polyethylene)이나 애자(insulator) 하우징 재료로 쓰이는 EPDM(ethylene propylene diene monomer) 고무, 실리콘 고무 등이 대표적인 고분자 절연재료이다.

발전소에서 생산된 전력을 수송하기 위해서는 철탑이나 장주를 이용한 가공선로(overhead line)나 땅속의 지중선로를 통하게 된다. 현재 국내에서는 송전급 전압으로 154, 345, 765 kV를 공급하고 있으며, 배전급 전압으로는 22.9 kV를 표준으로 사용하고 있다. 가공선로를 통하여 전력수송을 하는 경우, 전선과 지지물 사이의 절연이 필수적이다. 이 때 사용하는 기자재를 애자라고 부르며, **그림 1**과 같이 설치 위치에 따라 현수 애자(suspension insulator), 라인포스트 애자(line post insulator) 등으로 구분된다. 이와 같은 송배전용 애자의 재료로는 전통적으로 내후성, 내열성 등의 특성이 우수한 세라믹 재료를 사용하고 있다. 그러나 **표 1**과 같이 세라믹애자는 중량이 무거워 유지보수가 어렵고, 기계적 충격에 약하며, 표면이 오염된 경우에 전기적 특성이 매우 저하되는 단점을 갖고 있다. 이에 반하여 고분자 절연재료를 사용하는 폴리머애자는 경량이므로 유지보수가 용이하고, 깨지지 않는 성질로 인하여 작업 중 취급하기가 편리하며, 또한 전기적인 면에서도 작은 표면적과 다양한 형상의 제조가 가능하기 때문에 우수한 특성을 나타낸다. 따라서 선진외국에서는 이미 30여년 전부터 폴리머애자를 선로에 적용하고 있으며, 또한 제조기술 및 신재료의 개발로

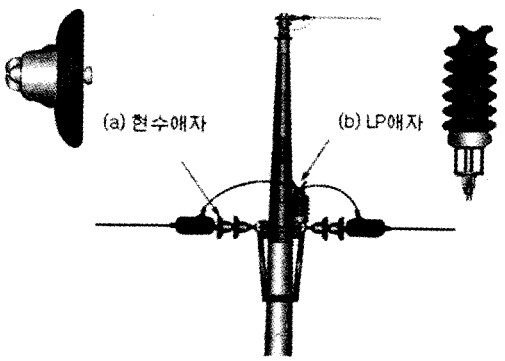
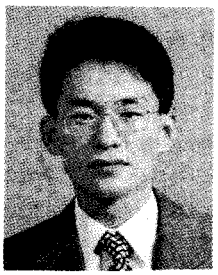
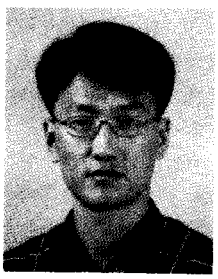


그림 1. Typical examples of (a) suspension insulator and (b) line post insulator.



한재홍

1990 단국대학교 재료공학과(공학사)
1992 단국대학교 재료공학과 (공학석사)
1996 고려대학교 재료공학과 (공학박사)
1996~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원



조성수

1994 건국대학교 전기공학과 (공학사)
1993 한국전력공사 입사
1997~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 일반연구원

Application of Polymeric Insulator to Power Distribution System

한국전력 전력연구원(Jae Hong Han and Seong-soo Cho, Power System Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, 103-16 Munji-Dong, Yusung-Ku, Teajon 305-380, Korea)

표 1. Comparison of Polymer Insulator with Ceramic Insulator

구 분	폴리머애자	세라믹애자
장 점	· 오염지역에서의 우수한 절연성능 · 경량, 취급용이 · 경비절감(구매비용, 설치비용) · 발수성(hydrophobicity) 우수 · 비산(vandalism) 없음	· 불활성 표면, 내후성 우수 · 장기사용에 따른 성능변화 적음 · 난연성 · String별 부분교체 가능
단 점	· 상대적으로 적은 현장 경험 · 경년에 따른 열화 · 코로나(corona) 발생 시 재질약화 우려	· 중량 · 고비용, 다양한 형상 제작 어려움 · 물리적 충격에 약함 · 취급 불편

고분자 재료의 성능이 크게 향상되어 확대 사용되고 있는 추세이다. 특히 북미의 경우, 신규애자 물량 중 폴리머애자의 비중이 배전용은 90%, 송전용은 50% 수준에까지 이르렀다. 한편 국내에서는 1973년부터 철도청에서 전철화 구간에 폴리머애자를 수입하여 일부 적용하여 왔고, 한국전력의 경우에도 90년 초부터 수 만개의 배전용 폴리머애자를 수입하여 시사용하고 있다. 이와 같은 폴리머애자의 적용증가 추세는 분명히 더욱 확대될 것이다. 본고에서는 고분자 절연재료를 사용한 배전용 폴리머애자의 장·단점, 구조 및 역할, 오손(contamination) 열화특성 등에 관하여 기술하고자 한다.

2. 애자용 고분자 절연재료의 장점과 한계

2.1 장점

고분자 절연재료를 사용한 초기 제품은 예상된 운전수명을 제공하지 못하였는데, 주로 자외선 및 수화(hydrolysis)에 대한 낮은 저항성과 찢김현상 때문이었다. 일부 초기 제품의 잦은 사고로 인하여 아직도 많은 전력회사들은 고분자 재료의 장기성능에 대하여 우려하고 있다. 그러나 원재료 및 제조기술의 발전으로 고분자 절연재료의 사용은 꾸준히 증가하였으며, 현재는 옥외용 절연재료로 널리 선택되고 있다. 일반적인 적용은 케이블 termination, 피뢰기 및 애자의 하우징, 붓싱(bushing) 등이다. 심각한 오염지역에서 사용되는 애자는 세라믹 코어(core)와 고분자 갓(weathershed)을 혼용한 혼합형(hybrid) 디자인을 사용하기도 하는데, 여기서는 세라믹 재료가 기계적 강도를 담당하고 고분자 재료는 절연성을 제공한다. 세라믹애자의 갓 위에 설치되는 creepage extender와 같은 절연향상 제품은 오염지역에서의 성능을 향상시키기 위하여 사용되는 고분자 절연재료이다. 친수성 세라믹애자에 발수성을 가진 고분자 재료를 삽입하면 누설전류의 조절이 향상된다.[1] 오염지역에서 애자 표면을 통한 섬락(flashover)을 감소시키기 위하여 기존의 세라믹애자에 표면성질을 향상시키는 고분자 재료를 적용하는 개량 기술을 사용한다.

고분자 절연재료는 세라믹에 비하여 많은 장점을 갖고 있다. 첫째, 고분자의 밀도는 세라믹에 비하여 매우 낮기 때문에 제품 중량을 상당히 감소시킬 수 있다. 중량 차이는 전압등급에 따라 증가한다. 고분자 기자재는 취급이나 설치 시 크레인이나 다른 설비를 필요로 하지 않는다. 감소된 중량은 애자 배열이나 구조물 구성을 저렴하게 하며, 또한 작은 크기와 중량은 동급의 세라믹애자보다 운반비를 경감하게 한다. 폴리머애자는 밀도가 높은 도심지역과 좁은 길에서 유용하며, 높은 강도/중량비를 갖기 때문에 긴 span과 저렴한 구조물, 향상된 심미(visual aesthetics)를 제공한다. 둘째, 고분자 절연재료는 성형하기 쉽기 때문에 세라믹보다 단위길이당 높은 누설거리를 갖도록 제작하는 것이 어렵지 않다. 즉, 갓 형상을 좀 더 복잡하게 만들 수 있음을 의미한다. 셋째, 옥외용 절연재료로 사용하는 고분자 재료는 매우 작은 표면 자유에너지를 갖고 있다.[2] 고분자 재료는 젖음(wetting)에 저항성이 있으며, 본래 발수성이 있다. 애자가 운전되는 환경에서 발수성의 보유는 매우 요구되는 특성이다. 발수성 표면의 물은 방울을 형성하므로 물방울 내의 전도성 오염물은 불연속적으로 된다. 이러한 조건은 낮은 누설전류의 흐름과 건조대(dry band) 형성을 유도하므로, 섬락을 일으키기 위해서는 매우 높은 전압을 필요로 한다. 고분자 재료의 소수성으로 인하여 물은 표면을 따라 수막을 형성하기보다는 방울을 형성하며, 세라믹과 비교하여 일부 고분자 재료는 열화된 상태에서도 훨씬 우수한 섬락 저항성을 보인다. 넷째, 고분자 재료의 전형적인 물리적 성질은 세라믹과 같이 비산되지 않음을 의미한다. 세라믹애자의 사고 시 파편이 인명에 해를 끼칠 수 있지만, 폴리머애자의 경우에는 그러하지 않다. 끝으로 고분자 제품의 제조공정은 세라믹보다 간단하기 때문에 몰딩은 분 단위로 가능하며, 따라서 제품완성시간이 세라믹 제품보다 상당히 짧다.

2.2 한계(limitation)

고분자 재료는 세라믹보다 결합이 약하기 때문에(이온결합 vs. 공유결합) 세라믹보다 쉽게 열화(degradation)될 수 있으며, 운전 중의 복합적인 스트레스에 의해 변할 수 있다는 것을 의미한다.[3] 적당한 재료 및 제품 디자인 개발에 따라 고분자 절연제품은 예상된 수명의 고성능을 제공할 수 있다.[4] 다양한 환경에서 기대성능과 운전수명을 얻기 위하여 복합 조성과 디자인 최적화가 수행되고 있다. 이를 위해서 적절한 혼합방법을 사용하여 고분자 재료에 적정량의 첨가제를 투입해야 하며, 제품 디자인과 응용에서 조성의 특유한 성질을 고려해야 한다. 제조공정 조건은 컴파운드 열화가 생산 중 일어나지 않도록 보장되어야 한다.

성능과 운전수명은 사용자의 관심 대상이다. 고분자 재료의 조성은 복합적 최적화 공정이지만, 광범한 실험과 시험에 의해 얻어질 수 있다. 조성은 재료 중량의 20~80%를 차지하는 기저 고분자에 따라 넓게 변할 수 있다. 첨가제는 재료를 증가시키고, 기계적 성질을 강화시키기 위해 사용한다. 대표적 extending 또는 강화 충전제(filler)는 조성에 따라 산화방지제, 가소제, 안료, 경화제, 촉매, 난연제, 자외선 안정제, 트래킹 및 침식 저항제, 가공조제 등이 있다. 고분자 원재료의 비용은 세라믹보다 훨씬 높다. 충전제와 첨가제는 비용을 낮추기 위해 고분자 재료와 혼합되며, 성능을 향상시키고 가공을 원활하게 한다. 여기에서 주의할 점은 동일한 이름을 가진 제품일지라도 컴파운드의 실제 조성은 다를 수 있으며, 이것은 성능에 직접적인 영향을 미친다. 예전의 운전경험만으로 다른 조성의 성능을 예측할 수는 없다.

유연한 결합과 긴 사슬 유동성 등을 가진 고분자 재료의 구조는 많은 고유한 장점을 제공한다. 그러나 모든 고분자 재료의 조성은 유기적이기 때문에 적절한 첨가제를 충전하거나 혹은 누설전류를 제한할 수 있는 하우징 디자인이 선정되지 않으면, 연속적인 운전 스트레스에서 표면 특성과 내오염 특성의 열화를 유발한다. 이것은 재료 조성과 제품 디자인이 다양한 적용에서 고성능을 보장한다는 사실에 기초한다. 코로나 방전, 자외선 노출, 화학적 공격 같은 운전 스트레스는 고분자 재료 표면에서 화학반응을 일으킨다. 그 중 하나는 친수성기의 형성인데, 이는 표면을 젖게 하고 누설전류의 증가를 허용한다. 이러한 누설전류는 국부적인 가열을 통해 건조대를 형성한다. 건조대가 형성되면 재료는 트래킹과 침식에 저항성이 있어야 한다. 이러한 조건에서 하우징 디자인은 누설전류에 영향을 미친다.

고분자 재료는 제품 기능과 디자인에 따라 다양한 계면을 갖고 있다. 다양한 계면이 존재하면, 운전 중 직면하는 다양한 환경에서의 장기적 안정성을 보장하기 위해 재료의 상용성(compatibility)과 가공성질에 대해 잘 알아야 한다. 고분자 조성이 부적절하면 응력부식(stress corrosion)이나 취성파괴(brittle fracture)에 의해 침해당할 수 있다. 따라서 재료 개발 시에는 이러한 열화 메카니즘이 최소화되도록 해야 한다.

3. 폴리머애자의 구조 및 역할

제품의 성능은 **표 2**에 나와 있는 것처럼 재료 조성, 제품 디자인, 제조 공정간의 상호작용 결과이다. 이러한 상호작용은 독립적으로 고려될 수 없으며, 성능을 한 가지만 기초하여 판단할 수 없다. 기저 고분자 종류는 물론 첨가제 입자크기와 분포는 성능에 영향을 미칠 수 있음이 잘 알려져 있으며, 혹독한 오염지역을 대상으로 한 애자 제품은 표면의 오염에 따른 전기적 고장을 방지하기 위하여 다른 갓 형태를 필요로 한다. 결국 요구되는 성능을 만족하기 위해서는 조성의 선택과 제품 디자인이 제조 공정에서 잘 구현되도록 하는 것이 중요하다.

세라믹애자는 일반적으로 주어진 전압에 대해 필요한 절연간격을 확보하기 위하여 몇 개의 애자를 연결하여 사용하지만, 폴리머애자에서는 일체형으로 제작하여 절연간격을 확보하는 것이 보통이다. 폴리머애자의 기본 구조는 **그림 2**에서 보여지는 것처럼 코어, 갓, 금구(hardware)로 단순하게 구성되어 있으나, 실제로는 주의 깊은 설계가 요구된다. 일부 폴리머애자에서는 코어와 갓을 하나의 재료로 제작하는 경우도 있다. 애자 금구는 요구되는 기계적 성질을 만족시키기 위해 코어에 매우 다양한 방법으로 부착되어 있으며, 금구로 보호되지 않은 코어는 옥외에서 사용되는 고전압용 애자로 적합하지 않다. 왜냐하면 불순물 또는 수분이 표면에서 도전로를 형성하는 트래킹(tracking) 현상을 발생시켜 전기적 파괴를 일으키기 때문이다. 축방향으로 배향된 유리섬유로 구성된 코어는 유기수지를 사용하여 결합되어 있다. 또한 다양한 고분자 재료로 만들어진 갓은 양단의 금구 사이에 최대한의 절연을 제공하는 동시에 코어를 보호하기 위하여 다양한 형태와 간격을 갖도록 설계되어 있다. 폴리머애자에 존재하는 대표적인 계면은 유리섬유와 수지, 충전제 입자와 고분자

표 2. Polymer Material Performance Factors

Performance Factor	Affected By	Improved By
운전수명	재료 성질	적절한 조성, 제품 디자인, 제조공정 조절
섬락	건조대 형성	고분자 재료와 제품 디자인의 상호작용으로 누설전류 조절
침식 저항성	발수성 상실	적절한 침식 저항성을 가진 재료 조성
기계적 강도	재료 성질	적절한 조성, 제품 디자인, 제조공정 조절

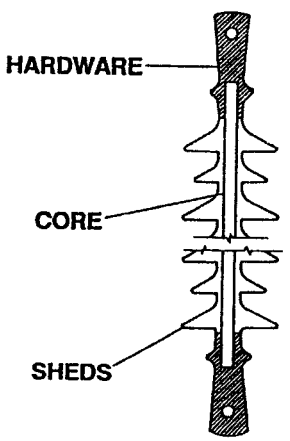


그림 2. Typical structure of polymer insulator.

재료, 코어와 하우징, 갓과 하우징, 코어·하우징과 금구 등이 있다. 그러므로 폴리머애자의 성능은 주로 재료의 선정이나 설계, 구성 등에 의존한다.

3.1 갓 재료

애자에서 갓을 사용하는 이유로는 첫째, 애자 표면을 통한 섬락전압(flashover voltage)을 증가시키기 위해서이다. 둘째는 애자 표면이 젖게 되는 기간동안 누설전류를 감소시켜 수명을 증가시키기 위함이다. 두 번째 이유는 맞을 수도 있고 틀릴 수도 있다. 갓은 누설전류를 감소시켜 전체적인 침식(erosion)을 줄이지만, 또한 같은 위치에서 누설전류가 연속적으로 흐르게 되므로 그 위치에서의 열화가 증가한다. 그러므로 오히려 갓있는 애자가 갓없는 애자보다 훨씬 수명이 단축될 수 있다. 셋째로는 갓없는 애자보다 긴 누설거리를 가질 수 있으므로 애자 길이를 줄이고, 매우 오염된 상황에서도 섬락이 일어나지 않도록 하기 위함이다.

애자의 전기절연성에 중요한 역할을 하는 갓이 갖추어야 하는 중요 성질은 자외선, 트래킹, 침식에 대한 저항성이 높아야 하며, 발수성이 우수해야 한다. 갓에서 발생할 수 있는 사고는 갈라짐(crack), 수화, 자외선 손상, 트래킹 또는 침식 등이 있다. 갓 재료는 원래 1,000 kV 이상의 송전급에서 사용하기 위하여 개발되기 시작했으므로 여러 종류의 고분자 재료가 사용되어 왔다. 여기에는 PTFE(polytetrafluoroethylene), 에폭시(epoxy), 폴리에틸렌, 우레탄 고분자에 기초한 순간접착 고분자, 폴리머 콘크리트, 다양한 공중합체, EPR(ethylene propylene rubber) 탄성체와 실온·고온경화 실리콘 탄성체 등이 있으며, 각각의 재료는 독특한 특성을 제공한다. 하지만 장기적인 성능에 대한 연구결과 송전급에 사용되는 고분자 재료로는 실리콘 수지가 가장 적합한 것으로 밝혀졌으며, 전압이 상대적으로 낮은 배전급의 경우에는 실리콘 수지외에도 가격과 성능의 면에서 우수한 EPR, 에폭시 수지, 에틸렌계 수지 등이 사용되고 있다. 그 중에서 배전용 폴리머애자의 재료로 가장 많이 사용되는 3가지 재료는 다음과 같다.

3.1.1 에폭시 수지

옥외용 절연을 목적으로 처음 사용된 초기의 에폭시 수지는 석영이 높게 충전된 bisphenol A형으로 캐스팅(casting) 방법에 의하여 제조되었고, 매우 단단하며 취성을 갖고 있었다. 그러므로 현수 및 라인포스트형의 애자가 운전되는 동안 크랙이 발생하여 문제를 야기하기 시작하였으며, 재료에 유연성을 주기 위해서 다양한 가소제(plasticizer)를 사용하였다. 이러한 가소제의 사용은 또 다른 문제를 야기하였는데, 소위 캐스팅 수지를 분해시키는 현상인 수화(hydrolysis)의 발생이다. 결국 bisphenol A형 에폭시 수지는 트래킹과 자외선 저항성이 열악하여 삼수화알루미늄(alumina trihydrate)을 충전한 cycloaliphatic형의 에폭시 수지로 대체되었다. 현재 약 69 kV까지 적합한 다양한 cycloaliphatic 에폭시 수지가 있다. 이러한 에폭시 수지는 정상적인 환경에서 장기적인 특성이 매우 좋지만, 오염된 조건에서는 성능이 다소 떨어진다.

3.1.2 에틸렌-프로필렌 고무(EPR)

에틸렌-프로필렌 고무는 우수한 전기적 성질과 넓은 온도범위에서의 유연성, 수분 및 기후에 대한 높은 저항성 때문에 전기절연 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 에틸렌-프로필렌 디엔 모노머(EPDM)는 황과 과산화물로 가교가 가능하지만, 에틸렌-프로필렌 모노머(EPM)는 과산화물로만 가교를 할 수 있다. 황으로 가교한 제품은 주로 저전압용 절연에 사용되는데, 이는 젖음조건이나 고온에서 쉽게 열화되기 때문이다. 반면 과산화물로 가교한 제품은 비용이 많이 들기는 하지만, **표 3**과 같이 전기적·열적으로 안정하다. **표 4**는 EPM/EPDM 고분자의 가공성 및 특성에 미치는 변수의 영향을 나타낸 것이다.

애자용 절연재료로는 3가지 형태의 EPR이 흔히 사용된다. 즉, 에틸렌-프로필렌 디엔 모노머, 에틸렌-프로필렌 모노머, 에틸렌-프로필렌과 실리콘의 블렌드(ESP)이다. 3가지 모두 삼수화알루미늄 같은 충전제로 높게 충전되어 있다. 초기 EPR들은 트래킹과 자외선 저항성이 낮아서 문제를 유발하였다. 트래킹은 절연체 표면에 도

표 3. Characteristics of Peroxide and Sulfur-Cured EPR

가교 형태	장 점	단 점
과산화물	전기적 안정성 열적 안정성	황 가교에 비해 고온·고압 필요 가교조제 필요 산소나 산성 성분에 의해 금지됨
황	높은 인장, 찢김 강도 낮은 압력·온도에서 가능	전기적 저항성(특히 습한 경우) 열적 안정성 악취

표 4. Effect of Variables on Processing and Properties of EPM/EPDM Polymer[5]

변 수	장 점	단 점
분자량 증가	인장 및 찢김강도 증가 높은 충전율 가교중 변형 저항성 증가	혼합 및 분산 어려움 압출 곤란 높은 충전율로 전기적 성질 저하
에틸렌 함량 증가	인장강도 증가 높은 충전율 쉬운 pelletizing	높은 경도 탄성회복성 불량 저온 유연성 나쁨
디엔 함량 증가	효과적인 과산화물 가교 가교도 증가	낮은 열 저항성 신장율 감소 컴파운드 비용 증가
좁은 MWD	낮은 die swell 가교특성 향상 물리적 성질 증가 높은 충전율	혼합 곤란
넓은 MWD	가공 용이 사출성형에 적합	높은 die swell 낮은 MW 성분으로 가교성능 저하

전로가 형성되어 비가역적인 고분자 재료의 열화가 생기는 것을 말하며, 표면이 오염되고 젖었을 때 전기적 아크(arc)에 의해 재료의 국부적인 열화가 일어나 발생한다. 트래킹은 모든 절연이 연결될 때까지 나무모양으로 진행되며 결국 파괴를 일으킨다. 현재의 EPR은 트래킹에 저항성이 있고 자외선에 우수한 저항성을 나타내며 단지 표면이 조금 패인다.

현재 EPR은 765 kV까지의 송전급과 배전급에 적당하다. 청정한 환경에서 EPR은 장기적인 특성이 우수하지만, 다른 고분자 재료와 마찬가지로 경년에 따라 절연성능이 다소 저하된다. 에틸렌-프로필렌 고무와 실리콘 고무의 블렌드로 알려진 실리콘 알로이(alloy) 조성은 얼마되지 않은 새로운 것이어서 그들의 절연성능을 평가하는데는 다소 시간이 필요할 것으로 생각된다.

3.1.3 실리콘 탄성체

옥외 절연용 실리콘 탄성체에는 3가지 형태가 있으며, 실온경화 실리콘(RTV), 액체 실리콘 고무(LSR)와 고온경화 실리콘(HTV)이다. 두 RTV와 HTV형은 삼수화알루미늄과 fumed silica로 높게 충진되어 있으며, 두 형태 모두 옥외 전기절연에 적합한 고분자 재료로 입증되었다. 한편 LSR은 초기단계이며 용도가 빨리 증가하고 있다. 약 1960년 중반 고전압 전기절연에 실리콘 탄성체의 첫번째 응용은 현수애자였다. 처음 재료는 석영 충전제를 넣은 RTV였다. 응용은 성공적이었지만, 오염된 환경에서 장기성능에 관한 우려는 삼수화알루미늄을 도입하게 하였고 후에 1979년경 HTV를 도입하게 하였다. RTV는 변전소 절연에 흔히 적용되었고 오염된 환경에서의 성능도 매우 우수하였다.[6] 대부분의 고분자 절연재료와는 달리 실리콘 탄성체는 작은 표면에너지를 유지할 수 있어 발수성이 매우 뛰어나다. 이러한 성질은 물이 애자 표면에서 수막을 형성하기보다는 구슬형태를 갖도록 하며, 이것이 누설전류의 거동을 억제하고 섬락과 전력계통의 고장을 억제한다. 또한 옥외의 환경 열화인자인 자외선과 열에도 우수한 안정성을 나타내며, 미가교 컴파운드를 장기간 보관할 수 있으며(long pot life), 경화반응이 신속히 일어나는 장점을 갖고 있다.

문헌에서 많은 generic한 설명은 실리콘의 화학이나 미세구조에 대한 진정한 이해없이 이루어지고 있다. "실리콘"은 무기의 siloxane backbone(Si-O, silicone-oxygen link)으로 구성된 것을 말한다. 가장 일반적인 실리콘은 **그림 3**과 같이 polydimethylsiloxane(PDMS)이며, 실리콘과 산소 backbone을 갖고 동시에 각 실리콘마다 두 개의 메틸기(CH_3)를 갖는다. 메틸기가 아닌 탄화수소 측쇄기(side chain)로는 에틸(ethyl), 페닐(phenyl), 비닐(vinyl)기 등이 흔히 보여진다. 다른 형태의 측쇄기를 가진 것도 있지만, Si-O가 실리콘이라고 불리우는 핵심이다. 따라서 탄소함유 기의 존재와 더불어 실리콘을 완전한 무기질이라고 부르는 것은 사실이 아니다. 이러한 화학적 조성과 siloxane 사슬에서의 배치는 특별한 grade "실리콘"의 많은 재료성질을 좌우한다. 길이와 siloxane 고분자 길이의 분포는 변할 수 있으며, 선택한 실리콘의 모든 성질에 기여한다. 실리콘 탄성체를 형성하려면 고무성질을 갖는 network를 만들기 위해 사슬을 가교해야 하는데, 측쇄기나 말단기인 비닐기 혹은 다른 반응성 기가 가교에 참여한다. 가교의 성질이나 종류는 활성기, 가교제, 금지제(inhibitor), 촉매에 의존하며, **그림 4**는 가교의 한 종류를 나타낸다.[7] 가교 전의 재료는 "silicone gum"이라고 불리지만, 가교 후에는 "silicone elastomer" 혹은 "silicone rubber"라고 불린다.

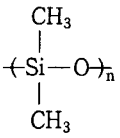


그림 3. Chemical structure of PDMS(polydimethylsiloxane).

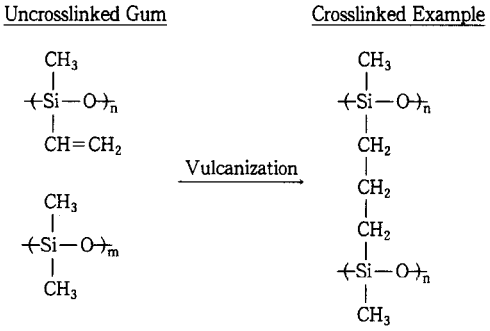


그림 4. Typical vinyl-type crosslink(polydimethylsiloxane) in silicones.

실리콘 탄성체는 보통 고분자를 강화하기 위한 실리카(glass 또는 석영)를 포함하고 있는데, 이는 실리콘 탄성체가 다른 고분자와 비교하여 기계적 강도에서 약하기 때문이다. 실리카는 활성기를 갖고 있어 실리콘 고분자에 결합하며, 강도, 경도, 인성 등의 물성에 영향을 미친다. 거친 grade의 실리카 같은 다른 충전제는 가격을 낮추기 위해 첨가된다. 이러한 형태의 충전제를 "non-reinforcing" 충전제라고 부른다. 다른 충전제도 가공특성, 성형수축, 열팽창, 노화성능, 색상, 트래킹 및 침식 저항성 같은 성질에 영향을 준다. 이러한 형태의 충전제는 2개의 중요한 기준을 반드시 만족해야 한다. 1) 예상 운전환경에서 장기 안정성, 2) 조성에서 다른 성분에 대한 화학적 불활성이다.

실리콘은 다양한 성질을 얻을 수 있는 넓은 의미의 재료라는 것을 고려해야 한다. 일부 실리콘은 옥외 절연재

료로 적합하지만, 다른 것은 그렇지 않다. 그러나 일단 기저 실리콘 고분자가 선택되면 성능을 최적화하기 위하여 첨가제를 사용하여 적절하게 조성을 구성해야 한다. Silicone-base 조성은 장점과 단점이 있다. 옥외절연 적용에서의 장점은 발수성, 발수성 회복, 노화 저항성(적절한 조성의 경우), 가공성, 탄성의 기계적 성질이다. 실리콘은 다른 고분자와 비교하여 매우 우수한 hot tear strength를 갖기 때문에 복잡한 형상과 몰드 디자인에서 이점을 제공하며, 충전제에 따라 변하기는 하지만 넓은 온도범위에서 크게 변하지 않는 기계적 성질이 있어 유용한 운전온도 범위가 -55~230 ℃이다. 한편 단점으로는 높은 원재료 비용, 높은 수증기 투과율, 연약함, 상대적으로 낮은 기계적 강도이다. 표면 발수성이 매우 크더라도 실리콘은 폴리올레핀(polyolefin)과 같은 다른 재료보다 높은 수증기(water vapor) 투과율을 갖는다. 이것은 주로 비정질(amorphous) 고분자와 관련된 매우 높은 자유체적과 siloxane backbone의 산소기 존재 때문이다. 전기적, 기계적, 노화 성질을 향상하기 위한 충전제는 silicone-base 조성에서 발수성과 수증기 투과에 영향을 미친다. 일부 충전제는 수증기 투과를 낮출 수 있으나, 제거할 수는 없다. 낮은 자유체적을 가진 반결정 폴리올레핀은 훨씬 낮은 수증기 투과율을 갖는다.

실리콘 고무와 에틸렌-프로필렌 고무를 화학적인 면에서 고려해보면 Si-O 결합강도가 C-C 결합강도보다 상당히 크기 때문에 자외선 또는 산소에 대하여 안정한 성질을 나타낸다. **그림 5**는 실리콘 고무와 에틸렌-프로필렌 고무의 화학구조를 나타내며, **표 5**는 고분자의 결합에너지를 보여준다. 실리콘 고무에 대한 실험실 시험과 현장 경험을 통해 오염물 침적은 세라믹이나 유리절연과 비슷하지만, 발수성은 절연체 표면에 오염된 수막형성을 억제한다. 발수성을 일시적으로 잃게되는 강우 시 또는 장시간 젖게되는 동안에는 삼산화알루미늄이 실리콘의 열화를 막는 반면 누설전류와 아크는 절연체 표면에서 발생한다. 상대적으로 짧은 건조기간 후 실리콘은 발수성을 회복한다. 이러한 발수성 회복은 실리콘 고무의 최대 장점으로 알려져 있으며, 실험적 연구에서 심한 오염과 젖음이 동시에 존재하는 경우 표면 arcing이 발생하는데, 이는 표면 발수성을 파괴하고 누설전류를 증가시킨다. 그러나 표면 발수성은 건조하고 아크가 없으면 10~12시간 내에 회복된다. 표면 발수성의 회복은 벌크로부터 표면으로 저분자량(LMW) 고분자사슬의 확산과[8] 표면으로부터 떨어진 발수성 그룹의 회전 때문이다.[9]

일반적으로 애자 표면에 오염물이 침적되면 전기적 절연성능이 저하되기 때문에 전력회사에서는 사고를 예방하기 위하여 주기적으로 세정(washing) 작업을 한다. 경험상 실리콘 고무의 세정은 세라믹이나 다른 폴리머애자만큼 많이 필요하지는 않다. 현재 많은 형태의 폴리머

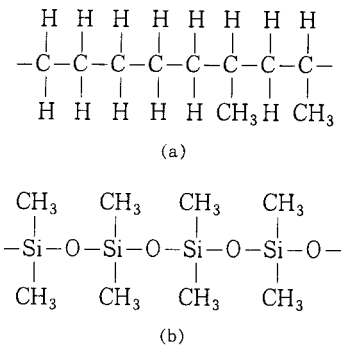


그림 5. Chemical structure of (a) ethylene-propylene rubber and (b) silicone rubber.

표 5. Bonding Energy

결합(bond)	결합에너지(kJ/mol)
Si-O(silicone rubber)	445
C-H	414
C-O	360
C-C(EPDM rubber)	348
Si-C	318
Si-H	275
C-S	222
S-S	205
Sunlight(300 nm wavelength)	398

애자에서 갓 재료로 실리콘 고무를 사용하는 추세이나 가격의 면에서 다소 비싼 것은 사실이다. 그러나 폴리머애자의 적용이 더욱 확대되면 실리콘 고무가 낮은 가격으로 공급될 것이다.

3.1.4 충전제 및 첨가제

운전 시 절연재료는 수많은 복합 스트레스에 놓이게 된다. 장기 성능에 영향을 미치는 요인에는 습기, 산화, 화학적 공격, 생물학적 공격, 옥외 기후, 오염, 전기적 스트레스, 기계적 스트레스, 열적 스트레스 등이 있다. 표면 열화과정은 트래킹, 침식, 노화, 수분과 열, 코로나 방전, 곰팡이 등이다. 벌크는 de-polymerization, 피로, 화학적 공격, 트리 성장을 겪는다. 어떤 고분자 재료도 단독으로는 옥외용 절연재료로서의 요구성능을 만족시킬 수는 없다. 더욱이 세라믹과 비교하여 고분자는 원재료비가 매우 높다. 원재료비를 절감하기 위한 extending filler와 수많은 첨가제는 제조 뿐만 아니라 전기적, 기계적 성능을 강화하기 위하여 사용된다. 비용을 절감하기 위하여 저가의 extending filler들은 고가의 기저 고분자와 블렌드된다. 특정한 조성에 따라 충전제와 첨가제는 조성 중량의 20~80%까지 차지할 수 있다. 심한 경우에는 80%가 충전제와 첨가제이고, 20%만 기저 고분자이다. 재료 개발시에는 충전제의 종류 및 함량에 특별한 관심을 기울여야 한다. 실리콘 고무에서 일반적인 충전제는 계면결합제와 결합된 실리카이다. 실리카 블렌딩의 효과 중 하나는

stifness의 증가이다. 탄성이 필요하다면 높은 충전제 함량을 가진 조성은 장점을 갖지 못한다.

Extending filler 외에 산화방지제, 가소제, 난연제, UV 안정제, 안료, 가교제, 촉매, 트래킹 및 침식 방지제, 가공조제 등이 첨가된다.[5] 첨가제와 충전제의 혼합은 개별적이 아니라 한 시스템으로 사용된다. 모든 요소들은 상용성이 있어야 하며, 재료 성능을 열화시키지 않아야 한다.[10,11]

3.1.5 갓의 형태

초기의 갓 형상은 누설거리를 증가시키기 위해 세라믹 현수애자를 모방하였으며, 다른 디자인들도 큰 보호누설경로를 제공하기 위해 Modular의 형상으로 제조되었다. 이러한 형태는 개별적으로 성형(molding)할 때 쉽게 금형으로부터 분리되는 장점이 있었지만, 갓의 디자인이 modular에서 완전한 molded 개념으로 변경됨에 따라 몰드로부터 손상없이 애자를 손쉽게 분리하기 위해 모양은 다소 원뿔이거나 또는 원판형태로 되었다. 시험이 일정한 오염환경에서 이루어지면 갓 모양에 따른 성능에서의 차이점은 거의 발견되지 않는다. 또한 동일한 직경의 갓을 가진 애자와 교대로 된 직경의 갓을 가진 애자에서의 성능 차이는 크지 않으며, 단지 누설거리와 재료자체가 성능에서 중요한 역할을 한다.

한편 애자의 오손성능(contamination performance)은 실험실 시험에서는 유효하지만 애자 표면에서 불순물의 균등한 분포를 보장하기 위해서는 많은 노력이 필요하며, 실제 운전환경에서는 유효하지 않다. 애자가 자연적으로 오염되고 깨끗해질 때 성능은 갓의 디자인에 의존할 것은 분명하다. 즉, 디자인에 따라 불순물이 많이 침적되거나 혹은 자연적인 세척으로 침적이 적게 될 것이다. 현장에서의 관찰 결과 부드러운 형태의 갓이 바람이나 자연적인 비로 쉽게 세척되는 현상을 보이며, 하부방향으로 원뿔인 형태는 바닥면에 좀 더 불순물이 모이기 쉬우므로 부드러운 형태의 원판형 갓보다 세척되기가 어렵다.

다양한 구성이 가능해짐에 따라 특히 고전압에서 폴리머애자는 긴 수명을 얻기 위하여 일체성형이며 완전히 경화된 갓 구조를 필요로 한다. 만약 결합되지 않은 갓을 사용하면 갓 사이의 빈 공간에서 방전(discharge)이 일어나며, 방전에 의한 침식현상으로 갓 사이에서 채널화된 "worm holes"이 만들어지므로 갓을 효과적이지 못하게 한다. 이러한 빈 공간을 채우기 위하여 실리콘 그리스나 실리콘 겔같은 컴파운드를 사용하는 modular 설계에서는 오일이 흐르게 되어 조인트 근처에 모인다. 이러한 오일은 계면에 불순물을 모으는 역할을 하므로 계면에서의 전기적 스트레스를 더욱 악화시킨다. 에폭시 수지같은 접착제는 탄성체 재료와 영구적인 결합을 형성하지 못하며, 수분의 영향으로 짧은 시간안에 결합은 분리된다. 말할 것도 없이 modular로 된 갓을 가진 폴리머애자는 고압력의 물세정을 할 수 없으며, 주기적인 세정이 요구되는 극심한 오염지역에서는 사용할 수 없다.

3.1.6 누설거리

폴리머애자는 성형이 용이하기 때문에 세라믹애자와 같거나 더 긴 누설거리로 적용된다. 어떤 경우에는 폴리머애자가 같은 누설거리를 갖는 세라믹애자보다 우수하며, 세라믹애자와 동등한 오손성능은 짧은 누설거리를 갖는 폴리머애자를 통하여 얻을 수 있다고 생각하는 것은 논리적이다. 실험실 시험에서는 이와 같은 사실이 증명되지만, 아직 현장에서의 장기적인 데이터는 없다. 극도로 오염된 지역에서 누설거리를 감소시킨 폴리머애자를 사용하는데는 우려가 있다.

3.2 제조 공정

조성 최적화를 위해서는 제조 공정을 반드시 고려해야 한다. 컴파운딩(compounding)은 균일한 혼합체를 보장해야 하며, 과도한 컴파운딩은 batch에 열 이력을 주어 설치 전 열화의 시작을 유발한다. 더욱이 고분자 재료의 공정은 결정적이다. 조성은 안정하게 유지되어야 하며, 가공 중 가속된 열 산화를 경험하지 않아야 한다. 성형은 고분자 원재료를 최종 제품형태로 변환시키는 일반적인 과정이다. 트래킹 저항에 일반적으로 사용되는 첨가제의 하나는 삼수화알루미늄인데, 이 첨가제는 열 분해를 억제하고 표면에서의 전기적 작용에 의해 소비된다. 성형온도가 ATH의 활성화 온도에 접근하면, 첨가제의 농도는 감소되며 효과도 줄게 된다. 그러한 경우에 성능은 현저하게 감소된다.[12]

3.3 코어

폴리머애자에서 코어의 역할은 절연과 부하유지의 두 가지 책임이 있다. 코어는 E-type 유리섬유를 70-75% 함유한 유리섬유강화수지(fiber reinforced resin)로 되어 있으며, 축방향으로 배향되어 있다. E 유리의 이름은 전기모터나 다른 전기기기에서 winding을 위해 사용된 것에서 유래한다. 대부분의 유리는 저알칼리 lime-alumina borosilicate 유리이며, 조성은 제조자에 따라 크게 다르지 않다.[6] 섬유직경은 5-20 μm이고, 수지로는 폴리에스터 또는 에폭시를 사용하며 rod 형태로 인발성형(pultrusion)하여 제조한다. 에폭시 수지는 낮은 가격으로 인해 선호되었으나 최근에는 폴리에스터를 주로 사용한다. 유리섬유 rod의 인발성형에서 2개의 결정적인 요소는 pulling 속도와 forming 다이의 온도이다. 축방향 크랙은 rod의 외측이 중심보다 먼저 경화될 때 생기며, 이것은 pulling 속도에서 다이 온도가 너무 높거나 또는 다이 온도에서 pulling 속도가 너무 느릴 때 발생한다. Rod의 경화 중 수축은 rod의 중심에서 축방향으로 크랙을 일으킨다. 폴리에스터 수지는 에폭시 수지에 비해 높은 수축성을 가지므로 폴리에스터 rod는 에폭시 rod보다 훨씬 forming crack에 민감하다. 이러한 결함은 rod를 얇은 wafer로 만들어 형광염료 시험을 하면 쉽게 발

견할 수 있지만, 전체 길이의 rod가 이러한 결함이 없다고는 보장할 수 없다.

폴리머애자의 기계적 파괴는 유리섬유 코어의 취성으로 인하여 설계강도의 10-15% 정도에서도 일어날 수 있다. 원인으로서는 E 유리섬유의 응력부식이며, 환경에서 어떤 산(acid)에 코어가 노출되었을 때 일어난다. 부식저항 E 유리(ECR 유리)로 만들어진 코어는 E 유리보다 취성파괴에 저항성이 있지만, 이런 종류의 코어는 비싸기 때문에 사용하지 않는다.

3.4 하드웨어

말단 접합부(end fitting)는 필요한 기계적 강도와 애자와의 연결방법을 제공하기 위해 다양한 방법으로 코어에 부착된다. 말단 접합부는 캐스트, 단조 또는 기계화 알루미늄, 전성있는 철 또는 단조강으로 만들어진다. 수년간에 걸쳐 말단 접합부와 코어를 연결하는 방법이 개발되었으며, swaging, gluing 또는 metal wedge의 사용 등이 있다. 현재 swaging과 gluing이 중요한 부착방법이다. **그림 6**은 swaging, gluing, metal wedge의 방법을 사용한 애자의 말단을 나타낸 것이다.

3.5 End Seal

말단접합부는 폴리머애자의 설계에서 가장 중요한 요소이다. 현장사고는 말단접합부의 파괴로 rod가 주변 오염물과 수분에 접촉되어 유리섬유 rod가 취성파괴를 일으켜 발생한다. 유리섬유 rod의 트래킹은 폴리머애자의 한 사고유형이다. 말단접합부의 형태는 접착, 마찰, 결합형태의 3가지 개념이 개발되었다. 접착식 seal은 슬리브 형태의 코어와 하드웨어 사이에 RTV 실리콘 고무같은 sealant를 사용한 것으로 나쁜 접착력 때문에 영구적이지 못하다. 슬리브 형태의 코어가 하드웨어로 끼워지는 마찰식 seal은 치수 오차허용도가 유지되면 매우 효과적이다. 말단 접합부위에 슬리브 형태의 코어 재료를 몰딩한 seal은 몰딩과정중 얻어지는 물리적 결합 때문에 가장 좋다.

3.6 거시적 고찰

옥외에서 사용되는 고분자 절연재료에 대한 산업계의 오판으로 인해 사용자의 인식과 제품 선정에 부적절하게 영향을 미친다. 이것은 특정 기저 고분자의 화학적 성질에 대해서는 타당하지만, 전체 제품 시스템에 대해서는 고려하지 않은 것이다. 모든 제품을 거시적인 관점에서 보면, 미시적인 관점은 실제 제품성능에 관하여 잘못된 인식을 초래한다. 많은 수의 산업계 신화가 존재한다. 대부분의 신화와 같이 단정과 가정에 따라 잘못되었거나 논쟁의 여지가 있을 수 있다. 분명한 것은 이러한 신화가 보편적으로 진실이 아니라는 것이다. 만약 재료가 적절한 조성으로 만들어져 한계가 최소화되고, 제품 설계자가 최종 제품 디자인에서 재료의 한계를 고려하며, 제조 공정이 재료를 열화시키지 않는다면 모든 고분자 재료는 어떠한 환경에서도 성능이 좋을 수 있다. 재료 조성과 제품

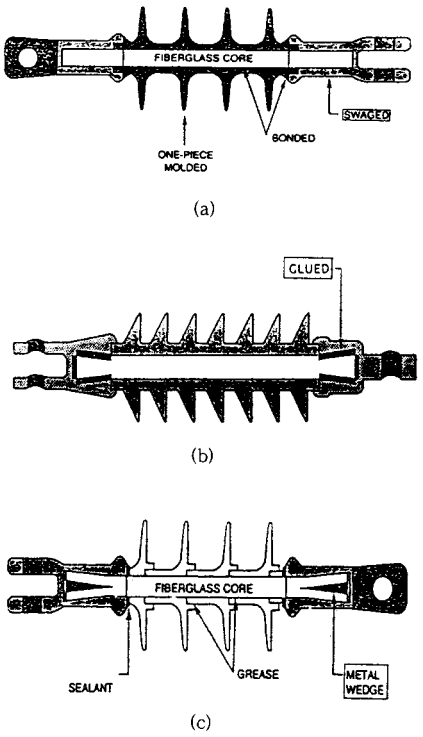


그림 6. Attachment of hardwares; (a) swaging, (b) gluing, and (c) metal wedge.

디자인의 상호작용을 고려하면, 원하는 성능을 얻을 수 있다. 예를 들면, 실리콘 고무는 문헌 등에서 우수한(superior) 절연재료로 알려져 있다. 적당한 운전환경에서 적절한 조성, 디자인을 가졌고, 제조 공정 중 열화되지 않은 실리콘 고무는 좋은 성능을 보이지만, 그렇지 않은 경우에는 성능이 우수하지 못하다. 예를 들면, 실리콘 고무는 다른 고분자 재료에 비교하여 열악한 찢김(tear) 및 마모 저항성을 가졌으며, 고속전철과 같이 기계적 성질이 중요한 곳에서는 최선의 선택은 아니다. 이러한 신화는 기저 고분자의 화학적 성질에 대한 좁고 미시적인 관찰로부터 유래되었다. 따라서 제품성능에 대한 평가는 전체 시스템을 평가하거나 혹은 좀 더 거시적인 관찰을 해야 한다.

가장 일반적인 신화는 고분자 재료가 총괄적이라는 것이다. EPDM과 실리콘 고무에 대한 비교를 통해 실리콘이 EPDM보다 우수하다는 결론을 내린 문헌들이 많이 있다. 간단히 말해서 고분자 재료는 총괄적이지 않다. 같은 기저 고분자로 불리우는 재료는 동일하지 않을 수 있다. 고분자 재료의 조성, 제품 디자인, 제조 공정이 다르기 때문에 최종 제품은 다르다. 같은 기저 고분자라고 하는 재료를 공급자가 다르게 입수하여 화학분석을 실시하면 조성에서 큰 차이가 보인다. 하우징 디자인이 다르며, 제조조건이 다르다. 상대적으로 표준화된 제조 공정과 시

험기술을 가진 세라믹 재료와는 달리 고분자 재료는 제조와 시험이 공급자마다 다르다. 현재 데이터를 그룹핑하고 분류하는 적당한 방법이 없기 때문에 generic하게 사용된다. 상업적으로 입수가능한 고분자 재료와 제품 중에서 높은 변화율을 고려한다면 generic한 분류는 의미가 없으며, 사용자는 기저 고분자의 면으로만 제품성능을 평가하는데 유의해야 한다. 또 다른 "신화"중의 하나는 실리콘이 다른 고분자보다 우월하다는 것이다. 그러나 폴리올레핀과 같은 다른 재료는 매우 성공적인 운전역사를 갖고 있다.[4] 독립적인 시험에서 이러한 공중합체는 실리콘 고무를 포함한 다른 고분자보다 성능이 우월하다.[13,14] 성능은 재료개발의 복잡한 최적화 공정과 재료를 열화시키지 않는 공정을 가진 제품 디자인의 결과이다. 중량비 20~80%까지 변하는 고분자조성에서 어떤 조성의 기저 고분자가 다른 재료 type이나 조성에 대해 고유한 장점을 제공한다고 가정하는 것은 논리적이지 못하다.

발수성과 침식저항 성질에 관련된 신화로는 실리콘 고무가 주도하는 발수성, 특히 회복현상은 문헌에서 자주 논의되고 있다. 발수성이 매우 중요하지만, 그러한 논의는 동등하게 중요한 특성인 침식 저항성을 무시하고 있다. 고분자 재료는 일정 시간 후 발수성을 상실하는 조건에 놓이게 된다. 만약 고분자 재료의 표면이 손상되고 열악한 침식성능을 가진 상태로 유지된다면, 조기고장은 발생할 것이다. 다양한 고분자 재료에 대한 가속시험에서는 실리콘 고무보다 폴리올레핀과 EPDM이 성능이 우수한 것으로 나타나는 경우도 많다.[13] 따라서 발수성 자체만으로는 성능을 보편적으로 나타낼 수 없으며, 트래킹 저항제의 함량이 적절한 성능을 제공하지도 않는다. 발수성 회복현상은 오염물에 의해 방해받을 수 있으며, 발수성 표면은 좋은 애자 성능을 보장하지는 않는다. 이것은 침식 저항성이 발수성 특성만큼 중요하다는 것을 의미한다.[10] UV 안정성에 관련된 것 중 자주 언급되는 것은 실리콘 Si-O backbone이 UV 노출에 의해 열화되지 않는다는 것으로, 이는 태양광에 의해 열화되지 않음을 의미한다. Si-O 결합을 파괴하기 위해서는 UV 광자만의 에너지로는 어렵지만, 화학공격과 같은 다른 요인이 부가되면 손상이 일어난다. 실리콘 고무는 순수한 실리콘이 아니며, 메틸 분자와 비닐 그룹은 UV 노출에 영향받을 수 있다. 가격과 성능으로 인하여 순수한 실리콘은 사용되지 않으며, 충전제와 첨가제가 20~80% 정도로 기저 고분자에 혼합되어 있다. 순수한 실리콘은 UV 노출에 손상을 입지 않을 수 있으나, 실리콘 고무 제품은 개별적이거나 복합적인 운전 스트레스에서 손상될 수 있다. Thornly는 25년간 실제 환경에서 실리콘 탄성체를 함유한 재료의 분석에서 UV가 가장 우세한 손상 메카니즘이라고 발표한 바 있다.[2] 이것은 실리콘을 함유한 제품이 UV에 의해 손상된다는 경험적인 데이터를 제시한다. 다른 옥외용 고분자 절연재료와 마찬가지로 실리콘 고무는 적당한 UV 안정제를 필요로 한다.

4. 오손섬락 메카니즘과 대책

일반적으로 폴리머애자의 표면에 오염물이 침적되면 발수성이 저하하고, 누설전류가 증가하게 된다. 이러한 누설전류의 증가는 결국 애자 표면을 따라 섬락을 일으키며, 이를 오손섬락(contamination flashover)이라 한다. 오손섬락은 다단계 과정이며, 많은 조건에서 일어난다.[3,8] 좀 더 일반적인 폴리머애자 하우징의 섬락 메카니즘은 다음과 같다.

① 오염물 형성 : 바람이 애자 표면에 먼지 and/or 다른 전도성 오염물을 운반한다.

② 표면 젖음 : 높은 습도, 안개, 이슬, 가랑비 등은 고분자의 발수성으로 인하여 방울을 형성한다. 방울은 중력에 의해 경사진 면을 구르게 된다. 중력이 방울의 운동을 촉진하지 못하면 뚜렷한 물방울이 남게 된다. Salt and/or 전도성 오염물은 물방울 내에서 용해되어 용액의 전도도를 증가시킨다.

③ 건조한 표면에 남은 오염물은 물방울 이동에 따라 천천히 젖게 된다. 이는 높은 저항성의 전도성층을 형성하며, 누설전류를 충전성에서 저항성으로 변하게 한다.

④ Ohmic heating : 전해질을 따라 흐르는 누설전류는 저항의 감소와 전류의 증가를 초래하는데, 이는 저항의 negative temperature coefficient 때문이다. 물을 증발하게 하는 축적된 에너지 손실(I^2Rt)에 의한 가열은 결국 건조속도에서 급속한 증가를 유발한다.

⑤ 발수성 표면에서의 전계 효과 : 인가한 전계는 가깝게 위치한 물방울을 보다 큰 방울로 합쳐지도록 하는데, 이를 filament라 한다. 발수성 표면에서는 전도성 경로를 형성하는데 많은 시간이 소요되므로 섬락이 일어나려면 장시간이 걸린다. 뿐만 아니라 filament를 형성할 만큼 국부적인 전계가 충분히 높아야 한다.

⑥ 발수성 표면에서 spot discharge : filament는 하우징 말단간의 거리를 줄여서 인접한 filament 사이의 전계를 증가시킨다. 스트레스가 충분하면 표면방전 활동이 일어날 수 있다.

⑦ 발수성 감소 : 방전은 물방울 주위의 얇은 고분자층을 소비하고, 고분자 사슬의 회전이나 파괴를 일으켜 발수성을 감소시킨다. 표면 발수성의 손실 또는 감소는 물방울 분산과 고전계 영역에서 연속적인 전도성 층을 형성하여 누설전류 흐름을 증가시킨다.

⑧ 건조대 형성 : 단위면적당 전력손실은 전계와 전류밀도의 결과이다. 가장 높은 손실을 갖는 표면이 가장 먼저 건조된다. Geometry가 중요한 역할을 하는데, 전류

밀도는 가장 적은 단면적에 집중하는 경향이 있으며, 그 곳에서는 건조가 가속된다. 건조는 저항을 증가시켜 손실을 증가시키며, 건조대가 형성된 곳을 불안정하게 한다. 건조대가 절연이 되면, band가 인가전압을 견딜만큼 충분한 거리로 성장할 때까지 표면작용은 band 내에서 지속된다. 이것은 표면침식과 열화를 유발하며, 침식속도는 재료조성에 의존한다.

⑨ 만약 방전이 충분한 시간동안 없다면, 발수성의 완전한 또는 부분적인 회복이 가능하다. 회복능력은 특정재료, 조성, 하우징 디자인, 운전환경에 의존한다.

⑩ 열화 cycle의 반복은 표면의 젖음과 침식을 더욱 초래하는데, 이는 화학반응과 국부적인 온도상승 때문이다. 국부적인 hot spot은 매우 심한 방전활동 동안에 400 ℃까지 상승할 수 있다. 자외선 손상 등 다른 열화는 표면 crazing을 일으키는데, 젖음 시 누설전류 흐름을 증가시키는 오염물을 트랩하는 역할을 하게 된다.

⑪ 세라믹애자와 마찬가지로 표면이 친수성이 되면 젖음이 일어나고 건조대가 형성되며, 방전이 하우징 말단을 연결하기 위해 증가하는 과정을 거쳐 섬락이 일어난다.

발수성 표면은 친수성 표면보다 누설전류 흐름에 대하여 큰 저항성을 나타내며, 섬락을 개시하기 위해서는 높은 누설전류와 에너지 손실이 요구된다. 이것이 폴리머애자가 기존의 세라믹애자보다 높은 섬락전압을 갖는 이유이며, 모든 단계는 순차적으로 일어난다. 만약 표면이 비에 의하여 변하게 되면, 전해질 전도도가 감소한다. 또한 이슬에 의한 표면 젖음은 오전의 태양광에 의해 젖음 상태가 감소할 것이다. 이러한 경우에는 섬락 메카니즘의 중단으로 섬락이 일어나지 않는다.

세라믹애자의 섬락을 완화하기 위한 대책으로는 고분자 재료로 된 creepage extender를 세라믹애자 갓에 직접 설치하여 누설거리를 증가시키는 방법, 고압력의 물로 세척하는 방법, 그리스나 고분자 재료를 코팅하는 방법, 저항성 또는 반도전성 glaze를 사용하여 자연 젖음동안에 표면을 건조하게 하는 방법 등을 사용하고 있다. 반면 폴리머애자의 경우에는 섬락대책을 거의 사용되지 않는다. 폴리머애자가 오손섬락을 억제하기 위해서는 누설전류 조절이 가능해야 하는데, 누설전류가 전해질 건조나 건조대 형성에 충분하지 못하면 섬락 메카니즘은 진전되지 못한다. 또한 발수성 감소나 손실이 일어나는 표면작용(surface activity) 기간에 심각한 침식이 일어나지 말아야 한다. 발수성을 회복하는 경향을 가진 재료일지라도 심각한 침식없이 표면작용을 견뎌낼 수 있어야 한다. 우수한 침식 저항성을 갖고 있지 않은 재료는 침식이 조기파괴를 유발하므로 오염환경에서 견뎌낼 수 없다. 침식 저항성이 있지만 발수성을 잃을 수 있는 재료가 열악한 침식 저항성을 가지면서 발수성이 회복되는 재료보다 성능이 우수하다.

5. 결 론

본 고에서는 배전용 폴리머애자에 적용되는 고분자 절연재료를 중심으로 고분자 절연재료의 장단점, 폴리머애자 구조, 섬락 열화메카니즘 등에 대하여 기술하였다. 전술한 바와 같이 전기절연 적용에서 한 종류의 고분자 재료가 보편적으로 우월하지는 않으며, 고분자 재료의 성능은 조성, 제품 디자인, 제조 공정 등의 상호작용과 최적화 결과이다. 고분자 재료의 성능은 기저 고분자에만 전적으로 의존하지 않고, 첨가제 및 제조공정, 성형 등에 의해 달라진다. 따라서 사용자는 미시적인 관점보다는 거시적 관점에서 제품을 평가해야 한다. 고분자 재료의 적용은 전기절연 분야에서 더욱 확대될 것으로 생각되며, 신뢰성 향상을 위한 많은 연구가 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. G. Pack, *Transmission & Distribution International*, **3**(3), 22 (1992).
2. D. Thornely and A. Shockett, IEEE Transmission and Distribution Conference, 1994.
3. IEEE Std. 957, "Guide for Cleaning Insulators", 1995.
4. J. S. T. Looms, "Insulators for High Voltage", Johns, Peter Peregrinus Ltd., London, 1990.
5. M. Brown, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **10**(1), 16 (1994).
6. E. A. Cherney, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **12**(3), 7 (1996).
7. W. J. Bobear, "Rubber Technology", Van Nostrand Reinhold Co., 1973.
8. G. Karady, M. Shah, and R. Brown, *IEEE Trans. on Power Delivery*, **10**(1), 1965 (1995).
9. M. J. Owen, T. M. Gentle, T. Obeck, and D. E. Williams, "Polymer Surface Dynamics", Plenum Publishing Corp., 1988.
10. R. Gorur, Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology Worldwide Experience & Applications, 1996.
11. S. Kim, E. Cherney, and R. Hackam, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, **10**(2), 1065 (1992).
12. V. Chaudry, R. Gorur, M. Dyer, and R. Thallam, *IEEE Trans. on Power Delivery*, **6**(2), 1012 (1991).
13. R. Gorur, E. Cherney, and R. Hackam, *IEEE Trans. on Power Delivery*, **4**(2), 842 (1989).
14. V. Jaakkola and O. Jarvinen, Nordic Insulation Symposium Nord-IS-90, 1990.