

신 절연재료의 연구 동향

기술해설 2

A Trend of Research for a New Insulating Materials

조 돈찬, 이 용우, 홍 진웅

(Don-Chan Cho, Yong-Woo Lee, Jin-Woong Hong)

Key Words (중요용어) : Insulating materials(절연재료), Dielectric breakdown(절연파괴), Avalanche(전자사태), Degradation of radiation (방사선 열화), Thermal degradation (열열화)

1. 서 론

최근들어 고도의 산업사회 발달과 전력 수요의 급증에 따라 송전 전압의 승압이 요구되고 이에 따라서 각종 전자기기의 절연 성능 역시 향상되어야 하며 따라서 절연에 대한 새로운 관심과 새로운 절연 재료의 연구 개발이 요구되고 있다.

절연재료는 고체를 중심으로 생각해도 유기물, 무기물 및 그것들의 복합체가 있고 이들 절연재료에 대해서 많은 신재료가 개발되어 출현되고 있다.

특히, 유기 절연재료의 주제를 구성하는 합성 고분자 재료에 대해서는 합성기술의 진보에 따라서 속속 새로운 재료가 탄생하고 있으므로 절연재료에 대해 모두 기술한다는 것은 상당히 어려운 일이다.

한편, 현대의 놀랄만큼 훌륭한 기술 진보의 덕택으로 우주공간, 핵융합, 고에너지 이온이나 고출력 레이저등의 산업 응용이 현실로 되어가고 있다. 예를들면, 우주공간은 극고진공(정지위성 궤도, 고도 36,000[km]에서는 10^{-14} Pa 이하), 열 Cycle(정지위성에서 $-150[^\circ\text{C}] \sim 150[^\circ\text{C}]$ 정도), 방사선(Van Allen 대 등의 방사선대), 산소원자 등이 존재하는 공간이다.

따라서, 이러한 확장된 우주공간에서의 절연재료에 대한 재평가와 고찰은 의미있는 일이라고 하겠다. 그리고 대응량·고전압화에 대처하기 위해서는 종래부터의 수행되어 온 절연재료에 대한 주요 평가과제에 첨가해서 위에 기술한 바와 같은 특수한 환경에 견디는 일이나 이러한 특수한 환경에서의 절연재료에 관한 연구가 중요한 과제로 대두되고 있다.

2. 절연재료의 구비 성질

일반적으로 절연재료는 저항률 ρ 가 크고 절연내력 F_b 가 높으며, $\tan\delta$ 가 작고 ϵ_r 도 또한 작은 것이

좋다. 특히 고주파 절연물에 대해서는 손실계수 ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$)도 작은 성질이 바람직하다.

절연재료는 직류, 교류를 불분하고 전류의 통과를 억제하는 목적으로 한 것이므로 도체를 지지하는 목적 이외에는 절연물 위에 전극을 설치하는 일은 없다.

이러한 점에서는 Capacitor용 유전체와 본질적으로 다르다. ρ , F_b , $\tan\delta$, ϵ_r 등의 제정수를 주로 해서 천연상의 절연재료에 의존하고 있었지만, 최근에는 합성무기재료나 합성수지공업의 급속한 발달에 따라 인공의 것이 많이 사용되고 있다. 위의와 형상에 성형가공이 용이해서 적당한 기계적 강도를 얻는 것도 필요조건인 한가지이다. ρ 로써는 작은 경우 $10^{14}[\Omega\text{cm}]$ 이상, ϵ_r 도 10 이하의 것이 많이 사용되고 있다.

3. 절연재료의 종류

절연재료는 상태에 따라 기체, 액체, 고체 절연재료로 분류하며, 제작 방법에 따라 천연 절연재료, 인조 절연재료로 나누어지고 유기물의 포함여부에 따라 유기 절연재료, 무기 절연재료로 구분되며, 여기서는 간단히 설명하기로 한다.

(1) 기체 절연재료

기체 절연재료로써 여러 가지 중에서 가장 많이 이용되고 있는 기체는 공기이다.

그러나, 특별히 전기절연용에 기체를 사용하는 것은 적으며 질소부압 변압기, 동 케이블등은 주로 산화방지용 이다.

Freon gas(CF_2Cl_2)는 절연내력이 공기의 배이상 되고 화학적으로도 안정해서 증기압도 크다. 이것을 4~5 기압으로 가압해서 사용하면 절연내력이 1기압의 공기보다 10~15배에 도달할 가능성이 있으며 절연유보다도 우수한 절연내력을 발휘한다.

기체절연재료는 ϵ_s 도 1에 가깝고 $\tan\delta$ 도 작아서 고주파의 고전압 회로에 절연재료로서도 사용되고 있지만, 실제 사용되고 있지는 않다.

Polyethylene과 같은 유기 절연재료 내부에 일부러 기포를 분산시켜 결보기에 비유전률을 저하시킨 재료를 발포 Polyethylene 이라고 부른다. 이것은 유기재료와 무기재료와의 혼합물을 절연재료로써 이용하는 것이다.

(2) 액체 절연재료

변압기, 차단기, 케이블, 애자 등의 절연용 및 유입지 Capacitor의 절연과 더불어 유전율을 증가시키는 목적으로는 오래된 것으로 천연산의 광유 등 액체 절연재료가 사용되고 있다.

이들은 산화해서 침전물을 생성하면 절연내력 등의 전기적 성질이 열화하므로 산화 방지제의 연구가 성해되고 있다.

또, 절연유에 대한 N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 등 기체의 용해, 혹은 대기중에서 흡수된 수분 등도 전기적 성질에 커다란 영향을 준다. 액체에 대한 기체의 용해도는 액체 및 기체의 종류에 따라 다르며, 또 온도와 압력의 함수에도 있다. 또, 절연유와 수분과는 어느 정도는 용해되지만 어느 한계이상에서는 2 상으로 구분된다. 절연유가 대기중에서 흡수하는 수분은 상대습도나 공기가 접촉한 표적에 의해서도 다르다. 이것들의 현상을 연구하여 밝히는 것은 전기공학에서는 중요한 문제이다.

합성 절연유로는 Pentachlorodiphenyl, Chlorinated Naphthalene, Silicone Oil 등이 있다.

실리콘유는 실리콘 수지의 부산물로서 점도의 온도변화가 작고 화학적으로도 안정하여 내열내한성이 우수하고, 전기적 성질도 뛰어나기 때문에 절연유 이외에 진공 Pump나 내열 윤활유에도 사용되고 있다.

(3) 천연 무기 절연재료

mica는 전기적 성질이 우수하고 얇은 조각을 형성하는 특징이 있으며 화학적으로 안정해서 내열성도 있어서 진공관 절연물, 전열기, 점화 Plug 등의 내열 절연물로써 폭 넓게 이용되고 있다. 전기재료로써 사용되어지는 것은 백운모($H_2KAl_3(SiO_4)_3$)와 금운모($KH(MgF_3)Mg_3Al(SiO_4)_3$)가 있지만 전기적 성질은 백운모 쪽이 좋다. 천연운모 중 크기가 큰 것은 산출량이 적고 고가이므로 운모의 작은 조각을 접착제로 결합시켜 대형판으로 만들어서 사용하며, 이와같은 운모판을 Micanite라고 부르고 있다.

기타 천연 무기재료로써는 Asbestos(내열성과 섬유성을 이용한 것), Slate, Marble등이 있다.

(4) 인조 무기 절연재료

유리는 Alkali의 함유량이 적을수록 절연저항이 좋아지므로 절연재료로써는 알카리 성분을 되도록 작게 한 것이 사용되고 있다.

Boron-silicate glass는 연화온도가 상당히 높아 가공도 다소 곤란하지만 절연내력도 높고 열팽창 계수가 작으므로 온도 급변에 견딘다. 고주파용 애자, 지지대, 진공관 재료 등에 사용되고 있다.

Fused quartz는 수정이나 규석을 약 1800[°C]에서 가열 용융해서 제작된 것으로 고주파 절연물에 이용되고 있지만 고가이다.

Glass fiber는 유리를 직경 5~10[μm]의 섬유상으로 된 것으로 본래 석면의 대용품으로써 생각되어진 것이며, 우수한 내열성을 가지고 있어서 전선이나 전기기계의 권선 등의 절연용으로 이용되고 있다.

Crystallized glass로는 유리의 결정화에 의해서 얻어지는 도자기 상의 재료로써 최근 주목되고 있는 것으로 기계적 강도가 크고 열팽창 계수가 작으며 내열 충격성도 크다. 일용품으로 냄비, 후라이팬 등에서 인기를 집중하고 있는 파이로세람도 그 종류이다. 조성에 있어서는 전기절연성도 우수해서 $\tan\delta$ 가 작은 것도 있으므로 Micromodule 기판이나 프린터 배선 기판등 절연재료로써의 응용이 기대되고 있다.

장석자기는 점토($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), 정장석($K_2OAl_2O_3 \cdot 6SiO_2$) 및 규석(SiO_2)를 주성분으로 한 磁器로써 송전선에 사용된 초고압 애자로부터 실내 배전선 애자, 부싱 등에 폭 넓게 이용되고 있다. 그러나 $\tan\delta$ 가 상당히 크므로 고주파 절연물로써는 적합하지 않아서 대체로 상용주파 이하에 있어서 절연물로써 이용되고 있다.

Steatite 자기는 활석($talc : 3MgO \cdot 4SrO_2 \cdot H_2O$)을 주체로 한 자기로 1920년경부터 독일에서 발달한 대표적인 고주파 절연물로 코일보빈, 바리온 기판, 소켓, Micromodule 기판등으로서 폭 넓게 이용되고 있다. Forstertite 자기는 $2MgO \cdot SiO_2$ 를 주성분으로 한 자기로 고주파 특성이 좋으며 Alumina 자기는 Al_2O_3 를 주성분으로 한 자기로 내열성이 풍부하므로 내연기관의 점화 Plug용 애자, 열전대 보호관, IC 기판등으로써 이용되고 있다. Cordierite 자기는 $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ 를 주성분으로 한 것으로 열팽창 계수가 작음($+1.1 \sim 1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}C$) 자기로써 유명하다.

진공관 내의 절연물로서는 건조시의 $\tan\delta$ 가 작은 것, 고온에 있어서 ρ 가 높은 것등이 필요하므로 Al_2O_3 , MgO , BeO 등을 주성분으로 한 미세 다공질의 도자기가 이용된다.

(5) 천연 유기 절연재료

천연 유기 절연재료로서는 섬유소, 면계, 천연수지, 천연고무, Paraffin, Asphalt, Pitch등이 있지만, 최근에는 합성수지가 발달하므로 인해 사용되는 경우가 적다.

Amber는 라자식물의 수지가 화석으로 된 것으로 체적고유저항 $5 \times 10^{14}[\Omega cm]$, 표면저항 $10^{15} \sim 10^{16}[\Omega]$ 으로 높은 값을 갖고 내습성도 좋다. 그래서 누설전류를 측정하기 위한 측정장치나 정전적인 측정장치에 사용된다.

Paraffin은 용융점이 $55 \sim 60[^\circ C]$ 이지만 $\rho=10^{17}[\Omega cm]$ 로 흡습성이 전혀 없어 가까이에서 얻어지는 절연물이다.

천연수지는 와니스(절연도료)나 Compounds(절연혼화물)의 원료로서 중요하다.

(6) 인조 유기 고체 절연재료

인조 유기 고체 절연재료는 대부분이 고분자 화합물로 간단히 Plastic으로 불리고 이른바 합성수지, 합성고무등이 그 범위에 포함된다.

Plastic의 전기적 성질은 주로 그 기본단위인 monomer의 성질에 의해서 좌우되는 일이 많다. 탄소와 수소로 간단하게 대칭되어 있는 물질은 비극성이며, OH 기나 Cl 기를 갖는 것은 유극성인 것이 많다. 전기적 성질에 악영향을 미치는 것은 OH 기로써 친수성이 있으므로 좋지 않다.

천연물의 paraffin과 polyethylene, polystyrene은 어느 것도 C와 H로 간단히 되어 있으므로 비극성이고 ϵ 도 $\tan\delta$ 도 작다. 이것에 비해서 페놀수지(석탄산 수지, 베크라이트)는 OH 기를 가지기 때문에 $\tan\delta$ 가 크고 고주파 절연물로서는 적합하지 않지만, 형조품이나 직조품은 기계적으로 강하며 화학적으로도 안정하고 동시에 대량생산에도 적당하므로 라디오 부품, 조명기구 등의 절연재료로 폭 넓게 이용되고 있다.

비닐수지는 비닐기를 중합시켜 얻어진 수지로 열가역성 수지 중에서 현재 가장 광범위하게 사용되고 있으며 단량체를 중합시킨 것으로 보통 백색 분말상의 것이지만, 이것에 TCP, DOP 등과 같은 가역제를 혼합시켜 압연, 사출, 형조 등의 가공을 해서 전선의 절연, 케이블의 피복, 전선의 배관 등에 사용한다.

polyethylene($(C_2H_4)_n$)은 ethylene($CH_2=CH_2$)을 고온·고압을 가하여 반응시켜서 얻어진 투명하고 강인한 고체이다. 직쇄상의 고분자로 산, 알칼리에 대해서 강하고, 흡습성도 작으며, ϵ , $\tan\delta$ 도 작고 화학적으로도 안정한 열가소성 수지이다.

수지 중에 기포를 혼입시킨 발포 폴리에치렌에서는 ϵ 를 한층 더 낮게 $\epsilon=1.3 \sim 2.3$ 의 것을 만들 수도 있고 TV용 코드, 동축 케이블의 절연등 고주파 절연물로서 광범위하게 사용되고 있다.

폴리스티론은 $(C_6H_5CH=CH_2)_n$ 의 구조를 갖는 스테린의 중합체로서 고주파 절연물로서 우수하지만, 연화온도가 $90[^\circ C]$ 로 다소 낮다.

Fluorine resin은 4불화스치렌($CF_2=CF_2$)을 고압하에서 중합해서 얻어진 폴리에치렌과 같은 구조를 갖는 것과 그 유전체를 총칭하는 것으로 ϵ 는 폴리에치렌보다도 한층 더 낮고 ($\epsilon=2.1$), $250[^\circ C]$ 까지 사용에 견디는 우수한 내열 전기절연 재료이다. Du Pont Co.의 Teflon은 상품명이다. 저항률 ρ 는 $10^{16}[\Omega m]$ 에도 달한다. 항공기용 전선이나 전자계산기 배선용의 전선이나 케이블 피복에 사용되고 있다.

Silicone resin은 유기 규소화합물을 중합해서 얻어진 수지로 유리상태, 수지상태, 고무상태 등 여러 가지 종류가 있다. 어느 것도 내열성이 커서 $250[^\circ C]$ 까지 화학적으로 변화되지 않고 물리적으로도 안정하다. 장식자기나 steatite 자기의 위에 실리콘유를 바르면 발수성(물을 튀기는 성질)의 강한 막이 위에 형성된다.

최근에는 유기재료의 급속한 진보에 따라서 araldite resin(Swiss Ciba Co.의 상품명, 에폭시수지계)와 같은 접착력이 강력한 것도 있다.

5. 새로운 절연재료에 대해 요구되는 성능과 새로운 재료의 개발

(1) 절연파괴 현상

절연파괴 강도가 높은 고분자 재료의 개발을 고려해 보면, 대부분 전자적 파괴기구에 있어서 절연파괴 현상은 재료에서 자유전자(혹은 자유정공) 수의 급격한 증대와 부합되고 있다.

전자 수의 증대를 초래하고 있는 것은 고속 전자의 격자와의 충돌에 의한 전리이며, 전리 비율은 전자 에너지의 증대에 따라서 급속하게 증대한다. 따라서 전자 수의 증대를 억제 함에 주행 중의 전자 산란을 증가시켜 전자가 전계로부터 얻는 에너지를 효율적으로 감소시켜 보내면 좋다.

전자가 전도대(혹은 정공이 가전자대)에서 산란되

는 원인으로서는

- 가. 주기 Potential field의 혼란
- 나. 격자 진동
- 다. 불순물

등이 주요한 것이어서 극성기를 포함시킨 재료나 결정화도가 낮은 재료의 파괴강도는 높아질 것으로 기대된다.

그림 1은 두께 200[nm]의 플라즈마 중합막의 파괴강도를 나타내고 있다. 횡축은 인가된 방형파 pulse의 폭이다. PPE는 ethylene의 플라즈마 중합막이며, PPEF는 ethylene과 3불화 메탄의 플라즈마 공중합 막이다. 이것들의 막 중에서 파괴 과정(Breakdown Process)을 주도하는 캐리어는 정공이지만 정공이 전자산란 작용에 기여하므로 불소를 함유한 PPEF가 PPE 보다 파괴 값이 높다.

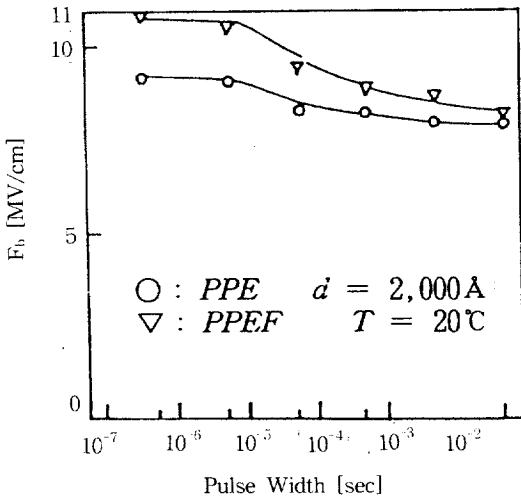


그림 1. Plasma 중합막막의 파괴강도

Fig. 1. Breakdown strength of plasma polymerized film

파괴 직전의 전류 파형을 관찰해 보면 PPE에서는 전자사태(Avalanche : 충돌전리의 반복에 의한 기하급수적인 캐리어 수의 증대 현상)의 발생을 수반한 잡음성 진동이 나타난다. 그러나, PPEF에서는 진동은 나타나지 않는다. 이 사실들은 전자산란이 캐리어 수의 증대를 억제하고 있는 것을 암시하고 있다.

이와 같은 것은 다음 예에서도 볼 수 있다. 그림 2는 ethylene과 pentabromovinylmetaglrade(화학식을 그림 3에 표시)의 공중합체의 임펄스 파괴 값을 나타낸다.

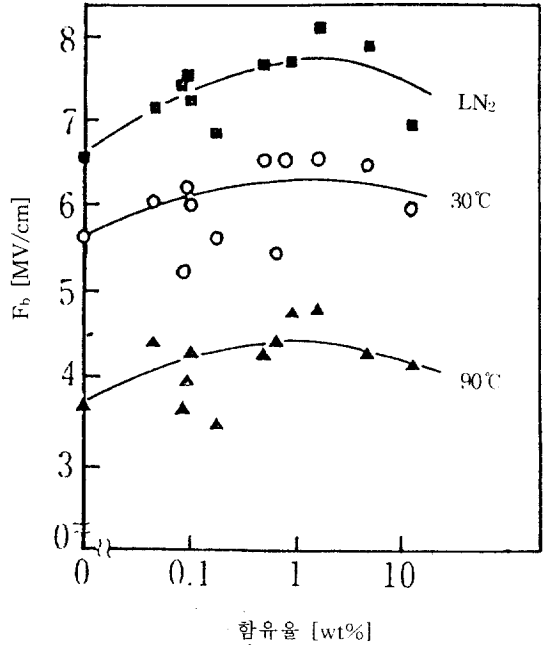


그림 2. Ethylene-pentabromovinylmetaglrade 공중합체의 Impulse 파괴강도

Fig. 2. Impulse breakdown of ethylene-pentabromovinylmetaglrade copolymer

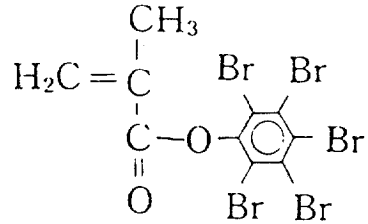


그림 3. Pentabromovinylmetaglrade의 화학구조

Fig. 3. Chemical structure of pentabromovinylmetaglrade

각 온도로도 1[wt%]에서 파괴 값은 최대로 된다. 유사한 특성은 할로젠을 함유한 다른 Comonomer와의 공중합체에서도 나타난다. 할로젠이 산란 기로써 작용하고 있는 효과가 1[wt%] 이하의 영역에서 표시되는 것으로 생각된다.

결정화도가 파괴 강도에 주는 영향의 실례로써 액체 질소 온도에 대해서 저밀도 폴리에치렌의 파괴 값은 같은 포화 탄화수소 화합물인 Hexatriacontane(C₃₆H₇₄) 단결정보다 월등히 높다.

이 사실들은 확실히 유극성에서 비정질 고분자

재료의 파괴값이 높은 것을 나타내고 있다. 그것에는 현실적인 예로 500[kV]용 케이블의 절연재료로서 재료가 최적이라고 말한다면 반드시 그런 것은 아니다.

결정화도 하나만 보아도 결정화도가 높은 재료의 파괴 값이 높다고 말해 주는 실험결과는 많이 볼 수 있다. 이 모순의 증명은 많은 경우 실험조건의 차이에서 구해지고 유극성에서 비정질 재료만큼 파괴 값이 높게 생각되는 것은 어디까지나 전자(또는 정공)이 파괴의 주역을 담당하는 경우이다. 이 전형적인 예는 앞에서 전술된 전자사태 파괴이지만, 이 전자사태가 물리적으로 실현되기 위해서는 전자나 정공이 금지대폭 1.5배 정도의 에너지를 갖는 것이 필요하다. 따라서 금지대폭이 0.7 [eV](Ge)나 1.1[eV](Si) 정도로 좁은 반도체에 대해서는 전자사태 현상은 "전자사태 항복"으로서 많이 나타나지만 금지대폭이 넓은 절연체에서는 전자사태에 의한 파괴는 오히려 좀처럼 없으며 박막, 저온, pulse 폭이 짧은 인가전압과 같은 조건 하에서만 발생한다. 실용적으로 중요한 고분자 절연재료의 설계상 중요한 조건 하(예를들면 전력 케이블에서는 90[°C], 수 [mm] 이상의 두께, 상용주파 교류)에서의 파괴는 열파괴등 기타 기구로 일어나는 경우가 많고 동시에 trap, 자유체적과 같은 고분자 재료에 있어서 불가역한 제인자가 현상을 매우 복잡하게 하고 있다.

Pulse 폭이 길게 되면 PPEF와 PPE 사이의 파괴강도 차이가 없어지게 되는 사실이나 할로젠 함유율이 1[w%]를 넘으면 오히려 파괴강도가 저하되는 사실은 모두 파괴과정이 열적인 것에 변화되고 있다고 설명된다.

전력 케이블용 재료로서는 일종의 계면 활성제에 의한 lamella 배향 제어, ethylene-styrene 공중합체, 직류 케이블용으로서의 고밀도 폴리에치렌, TiO₂ 등을 첨가한 저밀도 폴리에치렌 등을 예로 들 수 있다.

(2) 방사선 열화와 열열화

유기 고분자의 내방사선성에 대해서는 1950년대 이후 활발히 조사되어 왔다.

분자구조와 내방사선성과의 관계는 다음과 같다.

- 가. 분자 중에 $-CH_2 - CRR' - CH_2 -$ (R, R' : 탄화수소, F, Cl 등)인 구조를 갖는 고분자에서는 붕괴가 일어나기 쉽다.
- 나. 중합열이 작은 고분자에서는 열분해 되기 쉽고 방사선에 의해서도 붕괴되기 쉽다.

다. 가지를 갖는 쇠상 탄화수소는 붕괴되기 쉽다.

라. 주쇄에 $-C-O-$ 의 반복을 갖는 고분자는 붕괴되기 쉽다.

마. 분자 중에 벤젠환을 갖는 고분자, 특히 주쇄를 구성하고 있고 주쇄에 두부분 벤젠환을 갖는 고분자는 내방사선성이 강하다.

바. Carbonblack이나 유리섬유(Glass fiber) 등의 첨가제를 넣으면 내방사선성이 향상 된다.

내방사선성 향상에 대해서 위의 '마' 항에서 서술한 벤젠환의 효과는 크다.

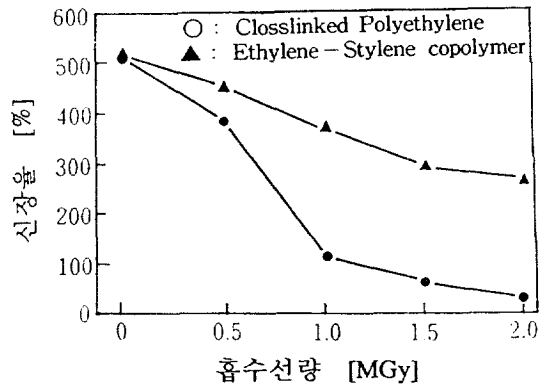


그림 4. 첨가제 배합 시료 신장률의 흡수선량의 의존성

Fig. 4. Absorbed dose dependence of elongation percentage of samples mixed additive

그림 4는 가교 폴리에치렌과 13[w%]의 styrene을 갖는 ethylene과 styrene의 공중합체에 γ선을 조사한 경우의 과당시 신장률을 나타내고 있지만 13[w%]의 styrene을 함유에도 내방사선성이 두드러지게 향상되고 있다. 또, 이미 시판되고 있는 내방사선성이 우수한 새로운 고분자 반박으로는 방향족 폴리이미드(Du Pont Co.의 Kapton), 폴리에테르에테르케톤(ICI Co.의 PEEK)등이 있지만, 이것들은 모두 벤젠환을 갖고 있다. Kapton은 산화반응이 수반되지 않는 경우에는 γ선, 전자선, 중성자선과도, 100[MGy]의 큰 선량에 견디므로 일종의 극한 재료로 생각된다.

방향족 폴리이미드는 내열성으로 불리는 절에서도 우수하다. 내열성을 위해서는 지방족 부분이 작고 벤젠환이나 복소환, 이미드 결합을 갖고 있으면 좋다. 평판에서 대칭성이 높은 벤젠환등이 주쇄에 있으면 입체 배좌의 자유도가 낮으며 강직, 고풍점, 고강도로 된다. Polysulfur, Polyestersulfur,

Polycarbide, Polyvinylenesulfide 등의 engineering plastic으로 불리는 고분자 대부분은 이러한 구조를 갖고 있다.

최근 매우 높은 열변형 온도를 갖는 열가소성 고분자로서 주목을 집중시키고 있는 것은 액정 Polymer(Amoco/일본 석유화학의 Xydar 등)이 있다. 일반적으로 열가소성 고분자는 비정질 고분자와 결정성 고분자로 분류되지만, 어느 것이나 용융 상태에서는 분자쇄가 불규칙한(random) 형상으로 뒤얽혀 있다.

온도를 낮추고 고체화 시키면 비정질 고분자는 그 형상이 그상태로 고체화 되고, 결정성 고분자는 겹쳐서 갠 것처럼 분자쇄가 규칙적으로 바르게 배열하여 고체화 된다. 그런데 액정 고분자에 있어서는 그림 5에 나타낸 바와 같이 용융상태에서 분자쇄는 있는 정도 배향되고, 소위 액정 상태로 되며 온도를 낮추면 배향한 부분을 포함하여 고체화 된다.

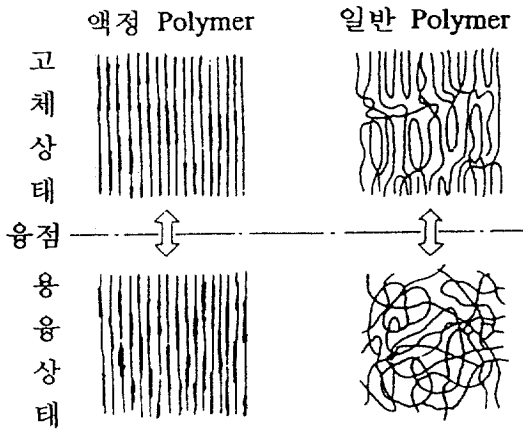


그림 5. 액정 Polymer와 일반 Polymer의 비교
Fig. 5. comparison between liquid crystal polymer and general polymer

용융상태에서 전단력을 가하면 배향은 다시 진행되어 높은 정도로 배향된 고체화물로 된다. 실용화 되고 있는 액정 고분자 기초 구조의 한 예를 그림 6에 나타내었는데, 주쇄 중에 액정성을 발견할 수 있는 기로 벤젠환이나 비스페놀을 포함한 강직한 분자쇄를 갖고 있다. 이와 같은 구조 및 분자배열이 고내열성, 높은 기계적 강도, 치수 안정성, 유통성 등을 부여하고 있다.

(3) 우주 환경에서의 열화

앞서 기술한 바와 같은 우주공간은 열이나 방사선의 가혹한 복합 환경이다. 스페이스 셔틀 이전에

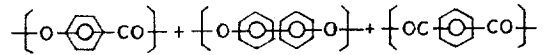


그림 6. 액정 Polymer의 기본구조
Fig. 6. fundamental structure of liquid crystal polymer

는 우주선으로 불려지는 높은 궤도의 것이 대부분인 정지위성으로 대표된다면 스페이스 셔틀 성공 이후, 우주기지나 무인 우주 실험기 등의 낮은 지구궤도(고도 약 200~700[km])의 우주선 개발이 이루어지게 되었다. 이들 우주선에는 engineering plastic 등의 신소재를 최초로 해서 많은 유기 고분자 재료가 사용되고 있다. 예를들면 우주선의 표면재료의 한가지인 열제어 재료에는 폴리이미드(Kapton)이나 불소수지(Teflon FET)가 사용되고 있다. 그런데 스페이스 셔틀의 비행에 의해 이것들 표면재료가 예상 이상으로 열화됨이 확인되었다.

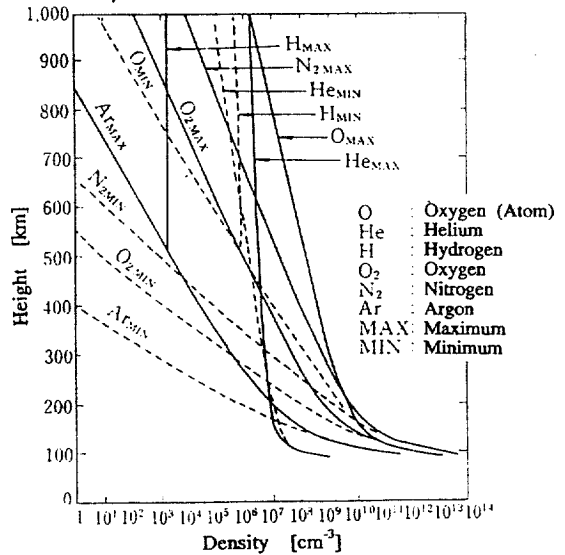


그림 7. 저지구궤도에서의 대기 조성
Fig. 7. atmosphere composition in the low orbit of earth

그림 7에 낮은 지구궤도의 대기 조성을 나타내었다. 태양활동이 격심 해짐에 따라 밀도가 다르지만 산소원자를 주성분으로 한 대기가 상당량 존재하고 있다. 따라서 우주기기가 제 1 우주속도 약 8[km/sec]에서 비행하면 상대속도 8[km/sec](약 5 eV)의 에너지를 얻어 산소원자에 의해 충돌을 수반하게 된다. 스페이스 셔틀의 실제 비행 결과에 따르면 Kapton 박막의 감소보다 Teflon 박막의 감소 부류가 적다. 산소의 고주파 방전 플라즈마에

대한 실험 결과, 산소 존재 하에서는 입자의 층들에 따른 물리적인 스퍼터링 이외에 표면 산화 반응이 생겨 이미드 환이나 에테르 결합의 분해, 벤젠환의 분해에 의해 공명구조 상실이 생기는 것이 확인된다. 이것이 Kapton에서의 넓은 범위에 막 두께 저하의 원인으로 생각된다. 그런데 앞서 기술한 바와 같이 방사선 열화에 있어서도 결합절단(분해) 및 산소 존재 하에서는 그것에 따른 산화반응이 열화의 주원인이다. 즉, 표면적으로는 방사선 열화도 산소원자에 의한 열화도 유사한 기구로 생각된다.

그럼에도 불구하고, 재료의 실제 내방사선성과 내산소원자성은 크게 다르다. 참된 열화기구의 이해에 입각한 재료의 선택 필요성을 나타내는 한 가지 예일 것이다.

(4) 복합재료

일반적으로 유기재료는 무기재료와 비교할 경우, 성형성, 가공성등이 우수한 반면에 내열성, 난연성, 내방사선성, 내후성, 기계적 특성 등에 있어서는 약하다. 그래서 유기 재료에서 원하는 특성이 얻어지지 않는 경우에는 무기재료나 유기재료와 무기재료와의 복합재료가 이용된다. 두말할 필요도 없이 유기 고분자의 합성기술이 발달하기 이전에는 마, 목면, 셀룰로오즈, 종이등의 천연 유기재료와 더불어서 mica, glass, ceramics 등의 무기재료가 사용되었다. 현재까지도 고전압 회전기의 권선 절연에 있어서 mica나 애자에 있어서 ceramics등은 폭넓게 사용되고 있다.

최근에는 Al_2O_3 , BeO, SiC, BN, Si_3N_4 , AlN 등의 Ceramics가 IC 기판등 전자회로 절연재료로서 이용되고 있다. 그중에서도 BeO를 미량 함유한 SiC 나 표 1에 나타낸 특성을 갖는 AlN등은 260 [W/m·K]로 Alumina(Al_2O_3)의 10배 이상 열전도율을 갖는 유망한 신재료 이다.

표 1. AlN 특성

Table 1. Characteristics of AlN

열전도율	260 [W/mK]
열팽창률	$4.4 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ (실온 400 $^{\circ}C$)
체적고유저항	$10^{11}[\Omega cm]$
비유전율	8.9(1[MHz]), 8.0(10[GHz])
유전손율	8×10^{-4} (1[MHz])
강도	5000[kg/cm 2]
경도	1200[kg/mm 2]

또, 300 $^{\circ}C$ 를 넘는 온도에서 장시간 사용해도 견디는 재료는 현상에서는 무기재료로 알려져 있어서 그와 같은 고온 하에서 사용되는 것을 목적으로 해서 MgO나 무기 고분자(polybolsiloxane 등), 유리 등을 절연재료로서 사용한 케이블, 전선, 도료, 테이프등이 제작되고 있다.

전기가기의 절연재료로는 유기/무기 복합재료가 많이 사용되고 있다. 예를 들면 에폭시 수지, 또는 불포화 폴리에스테르 수지에 있어서도 열팽창률, 기계적 강도나 난연성의 개선, 보통은 주위 풍경과 조화를 이루기 위해 착색등, 다양한 목적을 위해서 무기재료 충전제, 첨가제가 사용되고 있다. 이것들과 더불어 최근 많은 분야에 사용되는 것으로 보이는 것이 무기 섬유 강화 플라스틱이다. 섬유로서 통상의 E Glass에 가해서 T glass, S glass, U glass, 탄소, SiC, Al_2O_3 , BC등 강한 섬유가 계속 등장하고 있다. 예를들면 유리섬유의 종류와 그 섬유 부류, 함유량, 수지의 종류, 성형방법 등을 연구하는 것에 의해 초전도, 극적인 기기용 고강도 저열 수축 고체 절연재료가 개발 될 것이다.

6. 결 론

지금까지 절연재료에 대한 개괄적인 성질과 종류에 대해 간단히 설명하고 현재까지 개발되어 실용화 된 신절연재료들을 소개 하였다.

재료에 대한 연구는 절연재료 뿐만 아니라 초전도 재료, 극저온 재료등 특수한 성질을 갖거나 특수한 환경에서 특성을 유지할 수 있는 재료의 개발과 연구에 관심을 기울여야 할 시기라고 판단된다. 또한 기존의 재료에 대한 면밀한 재검토와 연구·고찰을 통해 보다 향상된 특성을 갖는 재료를 개발하는 것은 근본적으로 새로운 재료의 개발과 연구 만큼이나 가치있는 일이라는 사실을 항상 명심해야 할 것이다.

References

1. 岡崎 清 : 電氣材料工學演習, 學獻社, pp.38-113 (1988)
2. K. Yoshino, S. Harada, J. Kyokane, & Y. Inuishi : "Temperature Dependence of Dielectric Breakdown of Hexatriacontane ($C_{36}H_{74}$) Single Crystal" *Jpn. J. Appl. Phys.* 18, 3, p. 679 (1979)
3. D. H. Damon, P. O. Henk, & M. Henriksen :

"DC Conductivity of Low Density Poly-ethylene Containing TiO_2 ", *ibid*, p.294 (1989)

4. 日馬 : "絶縁材料の放射線効果", 昭60電気情報関連學會連大, pp. 2-116 (1985)
5. F. J. Campbell : "Radiation Effects on Electrical Insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine* 4, 6, 30 (1988)
6. 松本, 池田, 大木, 日馬, 原重, 矢崎 : "エチレン-スチレン共重合体耐放射線性", 電學論 A108, p. 335 (1978)
7. N. Ichinose : "Advances in Electronic Ceramic Materials in Japan", *IEEE Electrical Insulation Magazine* 4, 6, 24 (1988)
8. T. Suzuki, S. Katakai, M. Kanaoka, & Y. Sekii : "DC Characteristics of Cable Insulating Materials", *Proc. 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, p.66 (1989)
9. 田附 重夫 外 : "高分子のビーム加工", CMC, pp.187-298 (1986)

저자소개



조돈찬
1970년 4월 15일생. 1995년 광운대학교 전기공학과 졸업. 1996년 현재 광운대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



홍진웅
1955년 2월 23일생. 1982년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1984년 광운대학교 대학원 전기공학과(석사). 1987년 광운대학교 대학원 전기공학과(박사). 1992-1993년名古屋大學 객원 연구원. 1996년 현재 광운대학교 전기공학과 부교수(신기술연구소), 당학회 재무이사.



이용우
1957년 8월 24일생. 1982년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 한양대학교 산업대학원 전기공학과(석사). 1982-1994년 선진엔지니어링 이사대우. 1995년 광운대학교 대학원 전기공학과(박사과정). 현재 충남전문대학 전기과 전임강사. 전기 기술사.

■ 1996년도 11월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으나 많은 참고 바랍니다.

題	目	著者 및 所屬
Wide Band-gap 반도체의 물성 및 고주파 전력소자의 응용		신무환 (명지대학교 무기재료공학과)
FED의 최근의 기술동향		조재철(초당대학교), 김종욱, 김주승, 구할본(전남대학교)