

電氣絶緣技術의 現況과 앞으로의 展開

성 영 권
고려대학교 공과대학 교수

1. 서 론

19세기 이래 電氣絶緣技術은 高分子工業의 발달과 物性工學의 확립에 힘입어 고도성장을 지향하는 電力技術에서 전력계통의 고전압화와 전력기기의 대용량화에 수반하여 高電界化와 長壽命化, 耐環境化 등을 축으로 발전해 왔다. 그 결과 오늘날의 전기절연기술은 기계면이나 기술면에서 현저하게 발전하여 그 絶緣組織도 고체, 액체, 기체 등의 천연절연재료에서 그 複合系를 위시한 인공절연재료로 전환되어 고도의 다양한 절연재료가 등장하였다. 아울러 절연파괴이론과 절연수명이론의 성립을 비롯하여 컴퓨터의 등장으로 電界計算法이나 새로운 각종 계측법이 확립되어 전기절연공학 분야의 약진을 도모해 왔다.

한편, 오늘날의 인류 생존과 활동에서 불가결한 에너지 관련 동향을 보면 옛날부터 인류사회는 化石系 에너지를 자원의 중심으로 이용하여 에너지 기술개발과 경제성장과는 비례관계를 유지하면서 발전해 왔다. 그러나, 최근에는 에너지와 경제성장의 상관관계에 환경문제가 부가되어 경제성장은 역비례하는 깊은 관계를 가지게 되었다. 따라서 오늘날에는 이들 경제성장과 에너지 발달 및 환경 중 어느 한쪽만을 성취하게 되면 남은 한쪽

이 성취되지 못하는 소위 Trilemma 現狀이 수반되기 때문에 이 Trilemma를 종합적으로 풀 수 있는 관건을 찾아야 한다. 이는 두 개의 과제에 대한 해결만이 아니라 세 개의 과제를 동시에 해결하여 만족하는 것이어야 한다. 특히 새로운 재료의 혁신과 이용환경의 확대라는 두 흐름으로 인해 발생하는 波를 중심으로 큰 변화가 일어나리라는 예상 가운데, 이 세 개를 해결하는 새로운 문명이라는 의미로 이것을 Trinity文明이라고 이름하여 새로운 문명을 창조할 필요성이 대두되고 있다.

주제인 전력은 각종 活用에너지 중에서 가장 중추적인 것으로서 특히 앞으로의 21세기는 새로운 전기문명시대가 도래하기 때문에 전력의 이용효율, 나아가 電力技術의 발전여부가 21세기 에너지 기술의 방향성과 성과를 규정해 가리라고 본다.

이러한 관점에서 에너지 이용의 새로운 체계를 창조하여 Trinity문명을 창출하기 위한 추진력은 오로지 전기 에너지가 주축이 된 전력분야의 기술에 있다고 생각되는데 그 중에서도 전기절연기술은 전력분야에서는 평범한 기술이지만 전기가 사용되는 한, 電氣絶緣技術은 필수불가결한 것이다.

또한, 전기절연기술면의 발달과정을 보면 폭넓은 실험결과와 集積과 장기간의 실적에 바탕을 둔

경험적 수법이 발전의 주역을 담당해 왔음을 부인할 수 없으나 이와 같은 경험적 수법만으로는 앞으로 요구되는 전기절연기술의 급격한 진보와 발전을 기대할 수 없고 오로지 物性論이나 재료과학에 입각한 合成化學的 방법으로 분자를 목적에 가장 적합하게 配列, 合成하는 절연재료, 절연시스템을 구성하여야 한다.

더욱이 앞으로는 分子 設計法에 의해 極低溫이나 超高溫下, 더 나아가서 放射線場이나 宇宙空間 등 특수한 환경에서의 사용도 확대되어 가리라고 예상되며 아주 큰 역할을 하게 되리라고 본다. 따라서 오늘날의 전력사업은 지금 큰 전기에 접어들고 있으며 그 변화에 대응하는 전기절연기술은 축적된 기초연구에 의해서 일단 그 전기절연의 Technology는 完成域에 들어갈 단서는 잡았으나 아직도 문제점이 산적하고 있으므로 여기서는 그 현황의 문제점과 전망에 대해 살펴보기로 한다.

2. 근대사회에서 電氣關係産業의 位置

최근의 고도산업사회에서 전기관련산업의 규모와 이들이 다 하고 있는 역할은 아주 중요하며, 앞으로 다가올 21세기의 하이테크 및 고도 정보화 사회에서 전기에너지의 의존도는 더욱 높아질 전망이다. 가령, 근대 고도 산업사회에서 에너지원으로서의 전력에 대한 수요는 급격한 증가를 나타내어 그 사용량은 한 나라의 산업활동 및 생활수준의 지표가 되고 있는 것이 오늘날의 현상이라는 사실은 그 좋은 예가 된다. 특히 우리들의 생활 환경에서의 소비에너지 구성이 주로 快適性和 安定性を 추구하기 때문에 그 결과 가스, 가솔린 등의 소비량보다 전력에너지의 소비율이 더욱 증대해 가는 경향을 보여 2000년대에는 전 소비에너지에 대한 전력비가 50%를 넘을 것이라고 예측되고 있다.

또한 전력의 良質化에 대해서도 주파수 변동

이 $\pm 0.2\text{Hz}$ 이하, 순시정전이 0.07초 이하 등 고도의 요구가 확보되도록 되어 있고 아울러 절연과 피사과의 후유증(전기 화재)에 대한 안정도도 더욱 엄격해졌다.

이와 같이 전기 에너지가 바탕이 된 전기에 관한 제현상을 능숙하게 활용한 전기전자 관련산업은 대단히 광범위하나 이용하는 전기에너지의 특징에 따라 다음의 세 부분으로 대별할 수 있다.

(1) 電氣 에너지 부분

전기는 열, 빛 등과 같이 에너지의 일종이지만 전기 에너지의 清潔度, 高品質性, 電氣에너지 變還機器(변압기, 모터 등)의 多樣性과 高 효율성 및 취급 용이성, 전기 에너지 轉送의 高 효율성 등에 주목한 분야

(2) 電氣通信, 情報, 制御 部門

전기 에너지의 高速傳播性과 전자회로의 高密度性에 지탱된 Microelectronics, 통신기술, Computer, Sensor 및 자동화 등의 결합에 의한 정보화 및 Robot 분야

(3) 電氣·電子材料부분

전기·전자 관련 기기, 부품 및 소자 등을 구성하는 것으로 小形化, 輕量化, 高性能化, 高信賴化, 長壽命化를 위한 여러 가지 Hard적인 기술진보가 요구되는 분야

상기한 이들 분야는 최근에 급속하게 발전하고 있는 다른 공업분야의 중요한 支援 시스템에 도입되었으며, 특히 에너지 자원이 결핍되어 있는 우리나라의 산업계에서 PC를 비롯한 각종 전자기기를 주체로 한 전자공학은 그 자체에 대한 이해가 이제 전공업인의 상식으로서 요청되기에 이르렀다. 이에 따라 각종 PC, 新素材 등의 적용과 개발에 의한 省에너지화, 省力化, 高性能화에 주력하는 사이에 High-tech화의 전개가 시작되었다.

이와 같이 전기에너지는 국민경제와 밀접한 관계가 있어 우리나라 電力需要의 성장추이를 보면 1961년에 1,189GWh이던 연간 총수요는 1991년에 104,374GWh로 연평균 16.1% 성장하였으며 최대 전력은 '61년 306MW에서 '91년 19,124MW로 연평균 14.8%의 고도성장을 이룩하였다. 제1, 2차 석유위기 이후, 산업수요는 에너지 절약 캠페인의 노력에 따라 총에너지 신장률은 줄어들고 있다. 그러나 사무용 건물의 OA화, 民生用 에어컨 부하, 家電의 부하상승 등에 따라 電力化率은 더욱더 증대하여 현재 전력사업분야는 연간 1500억kWh를 넘어가는 방대한 양의 전력을 항상 無停電으로 공급해야 하는 상태에 놓여 있다.

앞으로도 전력수요는 경제성장과 연계되어 에너지 절약 캠페인 속에서도 전력화율은 상승하여 수요의 급증추세가 예상된다. 여기서 참고로 정책당국의 長期電力需要 전망을 보면 2006년에는 낮게 잡아도 270,000GWh의 전력수요가 예상된다(표 1 참조).

이러한 상황에서 供給發電量 構成比를 보면(표 2 참조) 상술한 Trilemma對策을 고려할 때 가장 기대되는 1차 에너지원은 수력이지만 유효한 水資源은 그다지 남아있지 않아 2006년대에는 1.3%에 불과할 것으로 예상된다. 한편, 원자력은 석유 대체 에너지원으로서는 최적이지만 아직도 연료

〈표 1〉 電力需要 展望

연도	판매전력량 (백만 kWh)	최대전력 (만 kW)	비 고
1991	104,374(10.6)	1,912(10.9)	()안은 전년대비 成長率
1996	161,578(9.1)	2,875(8.5)	
2001	215,917(6.0)	3,841(6.0)	
2006	269,494(4.5)	4,816(4.6)	

Cycle안전성 및 경제성 향상에 주력하기 위한 과학기술의 종합화를 도모해야 한다. 특히 1986년 소련의 체르노빌 원자력 발전소의 사고로 안전성에 대한 불안으로 한때 세계의 원자로 건설분이 주춤하였으나, 최근의 중동사태에 따른 에너지 위기 의식의 고조와 지하에 매장되어 있는 化石燃料 사용에 따른 지구 온난화나 대기오염물질에 의한 酸性비의 생태계에 대한 壞滅의인 악영향 등의 환경문제로 우리나라에서는 원자력발전의 중요성이 재인식되어 CO₂를 발생하지 않는 깨끗한 에너지로서 원자력 발전에의 기대는 증대해 가고 있다. 원자력 발전량은 이미 총 발전 전력량의 47.5%를 공급하고 있으며 2006년에는 52%인 156,868GWh로 될 것이 예측된다.

그 외에 선진국에서는 깨끗한 無公害 再生 에너지로서 太陽光發電이나 風力發電, 海洋에너지(波力, 海洋溫度差, 潮汐, 海流) 등의 자연에너지를

〈표 2〉 長期電力供給展望(發電量 構成比)

(단위 : GWh, %)

연 도	원 자 력	석 탄	석 유	L N G	수 력	계
1991	56,311 (47.5)	20,140 (17.0)	27,182 (22.9)	9,935 (8.4)	5,051 (4.2)	118,619 (100.0)
1996	65,171 (36.0)	55,965 (31.0)	30,281 (16.7)	25,787 (14.3)	3,666 (2.0)	180,870 (100.0)
2001	104,379 (43.3)	84,600 (35.1)	22,311 (9.2)	25,996 (10.8)	3,923 (1.6)	241,209 (100.0)
2006	156,868 (52.1)	97,247 (32.3)	8,946 (3.0)	33,961 (11.3)	4,048 (1.3)	301,070 (100.0)

비롯하여 燃料電池, 原動機發電 등 신형의 分散型 電源도 활발하게 개발되고 있다. 이들 분산형 전원들은 변동부하에 대해 아주 유효할 뿐만 아니라 수요지에 가깝기 때문에 송전효율이 아주 높다. 특히 태양광발전 등은 환경문제를 생각할 때 이상적인 전원이라고 할 수 있기 때문에 더욱더 작은 에너지 밀도를 고효율화하는 변환재료의 개발과 경제성이 높은 태양광 발전의 실용화를 진전시켜 나가야 할 것으로 본다. 그러나, 아직도 단가가 대단히 높고 개발도 지체되어 우리나라에는 표1에 나타낸 바와 같이 당국의 전체전력수요에조차 포함되지 않아 결국 화력 및 원자발전에 의존할 수 밖에 없는 실정이다.

아울러, 대형 화력발전소나, 원자력발전소를 실제로 계획하려면 협소한 우리나라에서는 공해 및 환경문제로 수요지에서 멀리 떨어진 僻地밖에 건설할 수 없기 때문에 대전력의 장거리 수송이 더욱더 중요해진다. 따라서 1000kV 송전기술이나 500kV 지중송전 등, 새로운 昇壓化 기술개발의 필요성이 크게 대두되고 있다.

3. 電氣絶緣材料的 역할

앞서 전기 관련산업으로서 電氣 現象을 활용한 많은 전기, 전자기기 및 디바이스들이 개발되어 전기 에너지 분야와 통신, 정보, 제어 분야로 나누어져 전산업에 침투하고 있음을 언급하였으나, 전기에너지의 안정성있고 신뢰성 높은 공급 체제와 전기, 전자기기의 小形, 輕量, 高性能, 高信賴, 長壽命化는 오로지 확고한 전기절연 기술에 의해 지탱되고 있다고 하여도 과언이 아니다. 따라서 전기현상을 그 기능의 대상으로 삼는 한, 電位差(電壓)가 있는 도체간을 전기적으로 절연하여 전기가 목적 이외의 부분에 누설되지 않도록 하는 전기절연기술은 필수불가결한 것이다.

이와 같은 기술을 지탱하는 재료가 전기절연재료이며 전기절연을 필요로 하지 않는 전기, 전자기기는 존재하지 않을 뿐만 아니라 앞으로의 전기절연재료는 종래의 전기 절연성능만을 이용하는 Passive재료에 그치지 않고 전기에 의해 작동하는 Active재료와 그 기능의 고도화를 도모한 요소의 誘電體, 絶緣體의 발전이라는 새로운 전개도 가능하게 하는 것이다.

이러한 전기절연재료 분야의 최근의 주된 방향은

- ① 대용량 송전기술의 개발 : 송전전압의 초고압화, 管爐氣中송전, 직류송전
- ② 절연의 신뢰성 향상 : 절연열화 및 加速열화 시험법, 수명예측 등의 절연진단법 확립
- ③ 환경문제 : 無公害재료개발과 不燃·難燃性 절연시스템의 개발
- ④ 전자절연 : 각종 반도체소자를 위시한 전자기기 絶緣薄膜의 高電界化와 劣化現象 해결책 등을 들 수 있다.

특히 오늘날에는 전력기기에 대한 재래기종의 Innovation과 동시에 極低溫 및 300°C 이상의 고온 등 각종 특수 환경하에서 운전되는 기종이 요망되어 개발중에 있다. 따라서 이에 수반하여 표3에 나타낸 바와 같이 전력기기용 절연재료에 요구되는 최근의 동향과 다양화에 대한 대응이라는 측면에서 오늘날에는 高電界性 絶緣을 비롯하여 難

〈표 3〉 電力機器用 絶緣材料的 最近的 위치

전력기기에 요구되는 기능	대응하기 위한 요소기술	절연재료에 요구되는 특성
소형화 및 경량화	피복의 薄膜化	耐高電界性, 低誘電率 ϵ · $\tan\delta$
안전성의 강화	難燃化	耐火, 耐難燃性, 低毒理化, 低煙化, 非 할로겐材
특수 사용환경 對應化	耐熱化, 耐低溫化, 耐放射線化	耐熱性, 超耐熱性, 耐寒性, 極低溫材, 耐放射線性材
환경조화·미화	지중화, 外裝	耐水性, 耐藥品性, 耐侯性, 耐水tree材, 耐振材

燃性, 耐熱性 등 각각의 사용조건에 적합한 절연 기술 개발에 집중되고 있다. 예컨대, 재래 기종에는 소형화와 경량화를 비롯한 합리성과 생산성의 추구, 성능향상, 노동위생, 환경대책 등을 도모한 절연이 개발중에 있다.

상기한 환경대책 또는 노동위생대책의 하나로 대국적으로 Freon가스나 PCB 등에 의한 오존층의 파괴, 지구 온난화 등의 공해방지를 위해 세계적인 규모로 Freon가스의 규제가 강화되고 있으므로 이를 대체할 우수한 성능을 지닌 재료의 급속한 개발이 사회적으로 요청되고 있다.

이와 같은 전기절연기술은 아래에 열거하는 바와 같이 기기를 구성하는 다른 기술이나, 재료에 비하여 대단히 이질적인 특성을 지니고 있다.

- (1) 電位差를 유지하기 위한 모든 전기·전자기기 응용에 적용된다.
- (2) 전기·전자 기기의 작동기능의 원리에 직접 관계하는 것이 거의 없다(예: 변압기는 전자 유도의 법칙을 이용하고 있어 전기절연은 그 원리에 직접 관계하지 않는다).
- (3) 전기절연기능은 필요로 하는 단위차에 걸린다는 수동적인 작용만을 다하고 있다.
- (4) 절연기능에는 전기를 절연하는 기능 이외에 많은 복합적인 요구가 가해지고 있다(예: 構造材로서의 기계적인 성능이나 냉각매체로서의 냉각성능 등).
- (5) 기기설계나 기기수명, 신뢰성, 고장을 지배하는 주요한 요인이 되는 경우가 많다.

전기절연기술은 이상과 같은 이질적인 특성을 지니고 있으나 앞으로는 전기 절연에 대한 여러 요구가 더욱 복잡해지고 가혹해지며 아울러 절연 설계기술에 不確定性 要素가 많이 포함되어 가므로 전기절연 물성에 대한 이해가 더욱 요구되고 있다. 이상의 특징을 가지는 전기절연기술을 지탱하고 있는 절연재료에 대해서도 많은 성능이 요구된다. 즉, 전기적 성능 이외에도 기계적, 열적, 화학적

등등의 여러 요구점이 많으나 절연재료에 요구되는 성능에 대해 예시하면, 다음과 같은 종합적인 성능이 요구된다.

- ① 전기절연성능(高 耐電壓性)
- ② 열적성능(고·저압성능, 내열성)
- ③ 기계적 성능(기계적 강도)
- ④ 그 외의 물리, 화학적 성능
- ⑤ 절연 열화 성능(내열, 내전압, 내기계, 내환경성)

①~④까지는 기기설계와 제조시에 충분히 고려해야 할 사항이며 ⑤는 운전시에 변화상황을 정확하게 진단해야 할 기기보안관리상의 중요한 과제이다.

일반적으로 전력사업은 자연에 의존하는 1차 에너지를 전기에너지로 변환하는 발전, 전기에너지를 목적지에 전송하는 송전, 수요가에 나누어주는 배전이 필요하나 변전은 전기에너지의 효율적인 전송을 실현하기 위한 필수 불가결한 기술로서 전력수요의 증가와 傳送 신뢰성의 향상 및 설비에 대한 환경조화의 관점에서 급속한 發送變電技術의 다양화와 향상이 요구되고 있다.

이들 발송변전기술을 지탱하는 기기는 그 용도, 목적에 따라 많은 것이 개발되어 왔으나 고전압송전부의 전기절연기술은 가장 어려운 것 중에 하나이며 이 기술의 성패여부에 따라 그 기기의 실용화가 좌우된다고 해도 과언이 아니다.

4. 基礎的 電氣絕緣性能

電氣絕緣 시스템에 적용되는 전기절연재료는 전술한 바와 같이 다각적인 여러 성능이 그 목적, 사용 환경에 따라 요구되나, 최소한의 필요조건으로서 전기절연물성에서 본 기초적 전기절연성능은 다음과 같이 요구된다. 즉

- (1) 誘電特性…比誘電率 ϵ' ,

誘電損失 $\tan\delta$ (비유전손실율)
 $\epsilon''_r = \epsilon'_r \cdot \tan\delta$

(2) 電氣絶緣特性...전기전도(저항률 ρ)

絶緣 파괴(絶緣 파괴강도 E_B)

각종 전기재료중 電界下에서 전기를 띤 Carrier(전자, 이온)가 이동하는 소위 전기 전도 현상에 있어서, 정의되는 抵抗率의 값이 비교적 크고 전류의 통과를 실용상 저지할 수 있다고 판단되는 물질이 절연재료이다. 이와 같은 절연재료의 저항률 ρ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{1}{q} \cdot n \cdot \mu$$

여기서 j 를 전류밀도[A/m²], E 를 전계[V/m], q 를 Carrier가 지니는 전하량[C], n 을 Carrier밀도[1/m³], μ 를 Carrier이동도라 하면 저항률(체적) ρ 는 [$\Omega \cdot m$]로 주어진다. 절연체는 보통 室溫부근에 $10^{10} < \rho < 10^{18}$ [$\Omega \cdot m$] 정도의 값을 지니고 있거나 금속도체는 $\sim 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$] 정도이다.

誘電分極에 관계한 誘電特性은 靜電容量을 지배하는 比誘電率과 交流電界下의 損失成分, $\tan\delta$ 에 관계하여 高周波 電界下에서의 절연체로서 특성상 대단히 중요한 因子이다.

저전계에서는 전기를 통하지 않는 절연체도 인가 電界를 증가시키면 어느 전계에서 급격히 Carrier밀도가 증가하여 전류가 급증하여 절연성을 상실한다. 이 현상을 절연 파괴라고 한다. 따라서 절연체는 모든 상태를 상정하여 반드시 절연 파괴전계 이하에서 사용할 필요가 있다는 것이다.

5. 絶緣技術에 관한 최근의 요구

앞서 기술한 바와 같이 오늘날 우리들의 문명사회는 전력수요의 증가, 고도정보화의 진전, 도시 과밀화의 진전, 노동시간의 단축(노동력 부족), 도시경관의 정비 등 급속하게 변모해 가고 있다. 이와 같은 사회상황의 움직임에 맞추어 기술한 바

와 같이 기기부품이 적용되는 장소의 환경조건의 複雜化와 苛酷化 상태가 더욱 조장되는 전력사업 분야에서의 발전량의 확보, 신뢰성 향상, 안전성 향상, 省空間, 유지보수성의 향상(省力化), 환경 조화 등의 요구가 새로이 대두되어 材料物性的의 극한까지 활용하고자 하는 노력이 강하게 요구되고 있다. 이들에 대응하는 주요재료에는 다음과 같다.

가. 高耐電界用 재료

過密化와 省空間을 달성하기 위한 기기, 부품의 고전압화, 소형화의 경향은 절연조직의 設計電界強度의 증대를 재촉하고 있어 이것은 고전압화에 향하는 전기 에너지기기, 超薄膜化에 향하는 전자 부품(IC, ULSI부품 등)에 대해 공통적인 高電界 設計의 諸問題를 야기하고 있다. 예를 들면 UHV 送電에 관련하여 발송배전기기의 초고전압절연기술, 초고전압 케이블, 그 접속부품 등에 있어서 고온영역에서의 高電界 향상을 위한 化學構造(分子設計, 架橋共重合, Brend 등에 의한 變性), 固體構造(結晶分布 등)의 추구가 물성면에서 정력적으로 행해지고 있다. 이와 병행하여 제조, 가공면에서도 缺陷, 不純物의 제거, 界面處理法의 개선 등 요구가 더 한층 엄해지고 있다.

나. 直流高耐電界材料

새로운 전력 에너지원으로서 太陽發電, 燃料電池, 火力 및 風力發電 등의 연구가 진행되고 있으나, 이들의 새로운 分散電源(태양발전이나 연료전지) 등도 출력은 적류이고 상용전원과 접속하기 위해 交直變換機가 필요하여 적류고전압용 절연재료개발이 시급한 중요과제가 되고 있다.

종래 저압직류회로용을 제외하고는 商用 주파교류전압에 의해 운전해 왔지만 앞으로는 송전용량의 한계성 타파를 비롯하여 사회경제적인 면에서

유리한 대용량직류전압으로 작동시키는 전기기기가 속출할 전망이어서, 직류고전계 절연에 관한 새로운 제문제가 야기될 것으로 보이며, 이것은 주로 Trap Carrier에 의한 空間電荷를 중심으로 한 電界變歪를 비롯하여 內部有效電界의 평가 등의 절연설계에 크게 영향을 미친다. 따라서, 이들의 대책방안모색이 시급한 과제로 등장하고 있다.

다. 屋外 環境用 재료

옥외에서 사용되는 耐環境性 전기 절연재료로서 耐紫外線 등을 위시한 비, 눈 등 耐候性이 우수하고 신뢰성이 대단히 높은 磁器類가 주로 사용되고 있다. 그러나, 중량이 아주 크고 충격으로 인한 파손이 발생한 경우의 2차재해가 크고 아울러 표면장력이 크기 때문에 鹽害汚染이 되기 쉬운 등의 결점들이 있다. 특히 水分과 絶緣表面과의 界面相互作用 등이 재질과 Tracking의 성능을 좌우한다. 따라서 일반적으로 礫子커버 옥외 고압 배전선에는 礫子커버나 架橋 폴리에틸렌을 위주로 한 有機 플라스틱이 사용되고 있으나 현재는 에틸렌 프로필렌 러버(Ethylene Propylene Rubber, EPR)에 클레이 타르 카본(Clay Tar Carbon) 등을 첨가한 것이 널리 사용되고 있다. 구미에서는 폴리머 애자(強度 Member로서 FPR을 사용, 耐候性, 耐트래킹(Tracking)性을 지닌 고무로 외피)의 실적상의 유용성이 주목받기 시작하여 국내에서도 송전선용 피뢰기에 일부 실용화되기 시작하고 있다.

라. 가스 絶緣關聯 재료

공기보다 우수한 절연특성을 지닌 가스로서는 수~30氣壓의 壓縮空氣室素, SF₆ 가스 등이 있으나 이들 중에서 실용적으로 크게 성공한 것이 SF₆이다. 제2차대전후에 개발된 전기적 負性氣體로서의 SF₆가스의 출현은 종래의 공기를 대상으로 한

가스절연의 성능을 비약적으로 향상시켜 기기설계의 고전제화를 실현시켰다. 이와 같은 SF₆가스는 침단기에서의 전류침단매체로서의 뛰어난 성능을 지니고 있으므로 GCB를 중심으로 한 GIS화가 수변전설비의 대부분을 차지하게 되었다. 이로인해 기기의 소형화에 수반하여 점유 부지면적의 저감화에 이바지하게 되었다.

이와 같은 SF₆가스의 뛰어난 절연성능은 종래의 油浸 및 固體絶緣電力 케이블에 필적하는 충분한 능력과 많은 특징을 지닌 超高電壓 管路 氣中 송전로의 구상까지 높이고 있다. 이들 설비의 주절연은 물론 SF₆가스이지만 도체를 지지하고 SF₆가스를 밀봉하는 고체절연물로서는 耐 SF₆分解가스성에 뛰어난 Alumina배합의 예폭시수지 주형품이 Spacer, Post Insulator 또는 케이블과의 接續部 品으로 사용되고 있다. 이들의 注型品에는 높은 전계가 인가됨과 동시에 SF₆가스에 걸리는 전계분포에도 영향을 끼치기 때문에 그 비유전율의 조절과 형상에는 가스 가압하의 절연특성과 더불어 충분한 배려가 필요하다.

마. 高溫用 및 難燃性 絶緣재료

근래에 와서 300°C 이상에 걸친 고온 환경하에서의 기기운용의 요망도 높아지고 있어 經時變化가 없고 안정성이 높은 고온용 재료의 개발이 시급히 요망되고 있다. 300°C 이상의 온도에서 장시간 사용하여 견딜 수 있는 재료의 주종은 표 4에 나타낸 바와 같이 MgO나 무기 고분자, 유리 등이 사용되고 있으나, 다행히도 1960년대 이래 가볍고 柔軟性이 뛰어나면서도 300°C 이상의 고온에 견딜 수 있는 PEEK(Poly Ether Ether Ketone)를 위시한 각종 고분자 재료가 잇따라 개발되어 우주 항공분야를 비롯하여 전기전자, 자동차 및 정밀기계 등에 널리 활발하게 활용되기 시작하고 있다. 그러나 전기전자 기기의 소형화, 고성능화, 고밀

〈표 4〉 高温用 絶縁의 사례

구	성	비 고
MgO充填 銅시즈 케이블		상표 : MI케이블 250°C 연속, 400°C 5년
無機化 실리콘(Borosiloxane)被覆 無機 폴리머 線 세라믹 纖維 無機폴리머線		상표 : MK 또는 MP 와이어
無機化 실리콘(Siloxane)被覆線		세라믹 절연전선 상표 : Fuji 서모
세라믹 纖維 無機塗料塗布電線사용 (軟質 마이커테이프+프리프레그 세라믹 테이프) 無機化 실리콘 塗布		600°C
7wt% 실리콘樹脂 함유 유리 集成마이커 테이프		300°C (고전압 회전기)
유리전선, 썬기(無機접착 마이커 없이)+슬로트 절연 또는 상간 절연(특수 실리콘 樹脂接着劑함유 集成 마이커 시트), 含浸劑 또는 코일 엔드몰드재(合成 불소 마이커 充填特殊 실리콘 樹脂)		350°C (초고속 모터)
二重 유리 실리콘 處理線, 유리 纖維 실리콘 含浸集成 마이커 시트(슬로트 라이너) 및 마이커 테이프(端子 絶緣), 마이커 充填 실리콘 樹脂含浸		400°C (Thermidur)
無機絶緣(E4 세라믹 테이프 Ceramidip 538첨적)		370~425°C (항공기 발전기 로터)
石棉 테이프, 실리콘 마이커 유리 테이프, 高純度 알루미늄나 콘크리트 含浸絶緣, MgO 充填 절연, 알루미늄 나 噴射絶緣, 알루미늄나 兩極 酸化絶緣		加速器 코일용

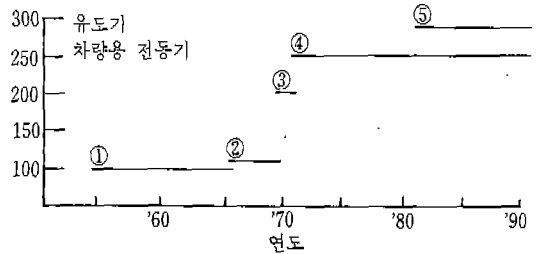
도화 및 이들 기기의 사용환경의 다양화에 수반하여 플라스틱재료에 대한 耐熱性과 耐藥品性 향상 등의 요구도 더한층 엄격해져가는 추세이다.

가령, 耐熱性的의 경우 모터 등의 전기기기가 장 기운전에 견딜 수 있는 상한온도는 그림 1에 나타낸 바와 같이 155°C (F종), 180°C (H종), 180°C 이상(C종) 등으로 상승하고 있다. 이에 상응하기 위해서는 일반적으로 分子間 結合이 크고 안전한 SiO結合을 주체로 한 것, 또는 각종 金屬酸化物 등의 무기재료계는 뛰어난 내열성을 지니고 있으나 복잡한 기계적 요구를 만족하면서 내열성을 지니게 하기 위해서는 炭素를 주체로 한 合成 高分子가 적용되어 그 분자 구조내에는 전기적 負性原子를 포함시키거나 또는 Polyamide 등의 芳香族系의 分子團을 주입시켜 고도로 가공시킨 것 등이 개발되고 있다.

대표적인 耐熱性 고분자 재료로서는 연속사용온도 150°C 이상인 경우 그림 2에 나타낸 소위 超高機能樹脂인 슈퍼 엔지니어링 플라스틱스(Super

誘導機, 車輛用 電動機 코일 絶緣方式

No.	절연기재	Varnish	내 열 성
①	프레익 마이커	溶劑系(Varnish 塗布)	B
②			
③	Polyamide Film Polyamide Paper	Epoxy수지 (진공함침)	F
④			
⑤		ISOX수지 (상동)	H



〈그림 1〉 電動機, 코일 절연의 내열성 및 設計電界의 變遷

Engineering Plastics)가 있다.

이것은 플라스틱으로서의 輕量性과 加工性이라는 특성을 지니면서 강도나 耐摩耗性, 耐熱性 등에 있어서 금속류에 뒤떨어지지 않는 고성능, 고기능의 소자로 범용적 엔지니어링 플라스틱과는 내열성(150°C 이상)에 의해 구별되고 있다. 현재, 10종류 정도 실용화되고 있으나, 수요량이 적어 고가(범용 플라스틱의 10~50배)이기 때문에 앞으로의 시장확대에는 경제성과 신기능에 초점이 맞춰져 발전해 가리라고 본다.

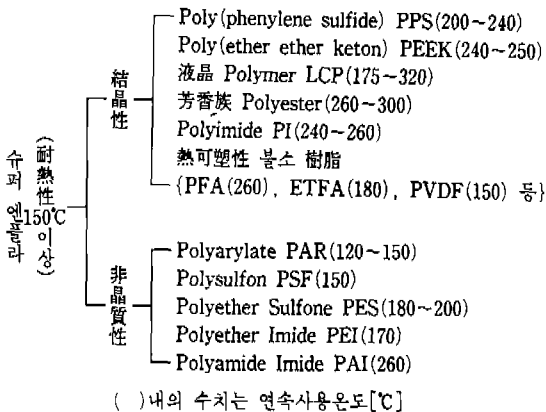
한편, 절연재료의 難燃性은 재료의 안정성과 시스템의 안정성의 일환으로 취급해야 하기 때문에 난연화 재료는 더욱 고분자화되어 갈 것이고 가교中合體나 耐熱性 중합체가 중시될 것으로 본다. 한편, 고온도에서도 쉽게 연소하지 않는 난연성은 안전성, 특히 방재상의 입장에서 전력용기기를 위시하여 가전제품, 통신기기 등 모든 분야의 절연재료에 난연화의 요구가 높아져 전력용 변압기에서는 유입변압기에서 건식화, 몰드(Mold)화로, 또 SF₆가스 절연변압기 등의 高電壓化, 大容量化가 급속히 진행되고 있다.

이와 같은 절연재료의 難燃化에는 고분자 절연

재료의 난연화 할로젠계, 포스퍼러스(Phosphorus)계 화합물 및 할로겐(Halogen)계 화합물의 難燃劑로서의 안티모니(Antimony)화합물 등의 원자치환에 의한 共重合化에 의해 사용되고 있으나 분해가스의 독성이 문제가 되어 안전한 난연화기술개발이 앞으로의 중요한 검토과제의 하나가 되고 있다.

바. 極低溫用 재료

증증하는 전기에너지 수요와 화석연료의 고갈 등에 대비하여 1970년대부터 超傳導發電機, 超傳導變壓器 등의 超傳導機器 및 케이블 개발에 박차를 가하여 장래의 대전력시스템의 일익을 담당케 하기 위하여 극 저온에서의 전기절연 연구가 정력적으로 행해져 왔다. 표 5는 초전도전력기기와 전기절연에의 요구에 대한 구체적인 표기한 것이다. 이들 超傳導機器, 宇宙用 部品, LNG용 機器, 寒冷地用 機器類의 절연은 -60~-270°C 정도에 이르는 저온 절연특성이 요구되고 나아가 이들과 상온과의 사이의 Heat Cycle Stress 등 기계적 요구가 엄해짐과 동시에 이들에 수반되는 微小龜裂이나 갭 生成은 耐電壓하의 절연 열하진행에 중대



<그림 2> 대표적인 Super Engineering Plastics

<표 5> 超傳導電力機器와 電氣絶緣에의 응용

초전도의 응용분야	전기절연에의 요구
Magnet응용	電磁力의 지지 기계적 응력 Quenching시의 異常電壓絶緣
Cable(AC 또는 DC)	고전압絶緣 저온수축 Flexibility(유연성)
변압기	고전압絶緣 電磁力의 지지
에너지 貯藏	電磁力의 지지 충방전시의 전압絶緣
Bushing	고전압絶緣 溫度勾配

한 영향을 미친다. 따라서 耐熱衝擊性, 치수安全性 등이 중요하게 된다. 이들의 해결책으로서 FRP 등의 複合材料구성에 대한 검토가 행해지고 있다.

사. 耐放射線用 재료

원자력기기, 우주기기 등 高能너지放射線(X선, γ 선, 전자선, 중성자선 등의 電離性放射線)照射 환경하에서의 절연성능은 각종 전력기기, 케이블 및 신호, 제어기기 등의 전선을 대상으로 만족스러운 성능을 장기간 확보하고 만일의 원자로 사고에도 어느 정도의 耐性을 지니게 하고 여러 재해를 전파시키지 않는 方針을 강구하고 있다.

특히, 冷却材 喪失事故(LOCA)발생시에는 방사선외에 열이나 수증기 등이 복합적으로 영향을 끼치기 때문에 耐放射線과 難燃性을 동시에 지니는 재료개발에 주력하고 있다. 현재 Polyamide (Kapton), 불소수지(Teflon) 등이 활용되고 있다. 한편, 우주환경은 極高眞空(靜止衛星의 궤도, 고도 36,000km에서 10^{-12} Pa이하) 熱Cycle(靜止衛星에서 $-150^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 정도) 放射線(Van Allen帶 등의 放射線帶), 酸素原子 등의 요인이 복합되어 복합열화의 양상이 나타남이 확인되어 이들에 대한 절연 및 유전재료의 耐放射線性이 잇따라 검토되고 있다.

아. 기타(省資料, 省力化)

전선용 에나멜 바니시(Enamel Varnish), 코일 합침용 바니시들은 아직 다량의 有機溶劑를 사용하고 있어 高濃度化, 無溶劑化의 方針이 顯연적이다. 또 硬化爐 등이나 電熱爐 등에 의한 에너지소비의 많은 시스템으로 행해지고 있으나 UV경화나 EB경화 등 효율의 좋은 방식의 검토도 행해지고 있다. 배선공사 관련에서는 수요가에의 전기를 정

지하지 않고 배선작업이 輻射공구나 로봇(Robot)으로 행해지고 있다. 이들의 작업에 적당한 One Touch 水密絶緣 Cover 등이 채용되기 시작하고 있다.

6. 電氣絶緣技術에 대한 과제와 展望

가. 앞으로 기대되는 要望 課題

앞서 기술한 사회환경의 변화에 수반하여 전력 관련산업의 Needs(요구)는 근래에 와서 더욱 다양해지고 고도화되어 가고 있으나 이들의 전기 절연기술의 측면에서 정리하면

- ① 전기에너지의 수요확대에 수반하는 전력계통 및 관련기기의 대응량화, 고전압화, 소형화 및 고밀도 集積化
- ② 巨大電力 시스템에 대응한 합리적인 高電界 운용과 신뢰성의 향상
- ③ 省資源, 省에너지를 포함한 가격 절감에 대응하는 설계, 제조수법의 합리화의 추구
- ④ 사용환경의 複雑, 苛酸化에 수반한 기기 적용 분야의 확대 대응책
- ⑤ 고전압 직류절연 대책의 확립
- ⑥ 중요 설비의 유지보수 관리 수법의 합리화 등으로 집약할 수 있다.

나. 要望課題에 대한 해결책

전항에서 제기된 과제들의 해결책을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고전계 설계에 견딜 수 있는 재료개발
절연구성의 高電界化에 대처하기 위해서는 우선 고전계하의 전기절연특성을 더욱 미시적인 관점에서 본 物性論的인 해명이 필수적이며, 이것은 기

존재료의 재질 및 새로운 재료의 개발에 대한 기본개념을 얻는데 유용할 것이다. 따라서, 아래 사항들의 기본적인 절연기능 물성을 파악한 다음에 분자설계 및 구조설계를 시도해야 한다.

- ① 高電界物性的 해명
- ② V-t특성(전계강도와 수명)의 물성의 뒷받침
- ③ 界面電氣物性
 - 매크로(macro) : 다른 재료와의 界面,
 - 마이크로(micro) : FRP에서의 유리纖維와 樹脂, 注型品에서의 充填材와 樹脂와의 界面 등
- ④ 異物의 영향(도전율, 크기, 형상 등)
- ⑤ 마이크로 解析技術의 활용

(2) 高信賴性 설계

아래 사항들을 통해 품질관리의 고도화와 더불어 신뢰성공학의 적극적인 도입에 의한 요구신뢰도에 대해 확실한 보증을 도모해야 한다.

- ① 송전선용 피뢰기 채용에 의한 雷害방지
- ② 非破壞試驗(코로나 시험, X선, 초음파탐상 등)의 感度 및 程度 향상
- ③ 活線 絶緣 진단기술의 확립

(3) 합리적 설계

절연설계의 합리화에 대해서는 우선 외래 設計 因子로서의 각종 서지전압의 평가를 통계전반에 걸친 절연협조상에서 아래 사항을 통해 파악하여야 한다.

- ① 컴퓨터의 활용(전계해석법의 정도향상, 열전도해석, 응력해석 등)
 - ② 피뢰기의 도입에 의한 절연협조
 - ③ 폴리머 애자 채용에 의한 소형화, 경량화
- 아울러 전기절연기술에 과해지는 책무 해결에는 더욱 어려움이 수반되리라고 보나 재료과학에 의거한 기본적인 이해만이 유일한 실마리가 되기 때문에 더한층의 노력이 강하게 요망된다.

7. 결론

이상, 電氣絶緣技術은 평범한 기술이지만 기간산업인 전기관련산업의 전개를 좌우하는 기술이라는 것을 피력하였다.

요컨대 종래의 절연재료의 Needs는 중전기였고 현재는 전자부품이며 앞으로는 핵융합, 초전도 및 우주기기일 것이다. 따라서 앞으로의 절연재료는 전기기기나 Electronics에서는 작업상의 향상이 중요시되는 반면 극저온 우주환경 등의 가혹한 사용조건에 매치되는 것 등이 요구되고 있다.

종래, 특히 전력관계의 전기절연재료는 사용 실적을 위주로 하여 그 신뢰성을 가장 중요시 해왔기 때문에 새로운 재료의 출현에 따르는 그 재료의 채용에는 아주 신중하였다. 그러나, 고전압화, 소형화를 위해서는 절연재료의 사용전계강도를 상승시킬 필요성이 높아져 그러한 전계 강도에 견디는 有機, 無機物이 지니고 있는 각 장점을 갖춘 새로운 절연재료개발의 검토에 들어가야 하고 아울러 이들 재료개발 수법의 과학화가 당연한 긴급과제이다. 이를 위해 반도체관련의 평가기술중에 현저하게 발전한 마이크로 解釋技術과 컴퓨터 시뮬레이션技術을 최대한 활용하여 最適分子設計 및 構造設計를 진행시켜 V-t특성을 위시한 諸物性을 해명하고 부분방전검출감도 향상을 통해 신뢰성 보증의 이론적 구축 등이 절실하게 필요하다.

또 전기절연재료의 품질관리와 제조 공정에 반도체산업에서 확립된 수법을 채택하여 이물이나 불순물의 혼입과 포텐셜(Potential)을 극력 저감시키는 제조기술혁신을 앞으로의 큰 과제로 본다. 따라서, 이들의 활용을 통하여 기기구조 및 계통에서의 취약점인 전기절연구성의 고성능화를 기하게 되어 유한한 에너지의 합리적 운용과 효율적인 활용 및 효율향상에 기여하게 되어 Trinity 문명창조의 기틀에 조금이라도 공헌할 수 있으리라고 본다.