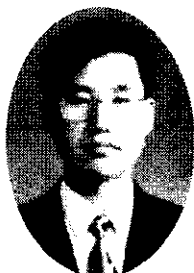


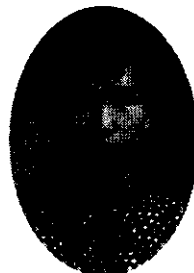
고전압용 저손실 절연재료



강 동 필
(한국전기연구소 전략기술연구단)



박 효 열
(한국전기연구소 전략기술연구단)



한 동 희
(한국전기연구소 전략기술연구단)

1. 개 요

고전압 절연재료는 절연저항, 절연과피강도, 유전특성, 내아크성, 내트래킹성 등의 전기적 특성에 의해 주로 평가되고 있다. 그런가 하면 고전압 전력기구나 케이블 등의 절연재료에 고전계가 걸리면서 발열량이 절연시스템의 장기신뢰성과 관련하여 중요한 의미를 가질 때가 많은데, 이것은 초고압 설비들은 대체로 규모가 크고 도체에서도 열 발생이 많으며 사용되는 절연재료로 열에 약한 고분자 재료를 대부분 사용하고 있기 때문이다.

전기를 통하지 않는 부도체에 전계를 인가하면 재료내부에 에너지를 축적하는 유전체적 특성을 보이며 상업적으로는 캐패시터로 이용되고 있다. 고분자 절연재료에 전계가 걸렸을 때 에너지의 축적은 구성재료인 고분자, 저분자(불순물, 계면 흡착 공기, 물), 이온, dipole, 전자(delocalized π electron, σ electron) 등의 종류나 량에 의존하며 매트릭스를 이루고 있는 고분자 재료의 무정형 영역의 자유공간 등에 의해 영향을 받기도 한다.

상용주파수용의 전통적인 고전압 절연재료에서 유전특성이 문제되는 경우는 별로 많지 않다. 절연재료의 유전손에 의한 발열보다는 고전압 대전류에 의한 도체의 줄열이 훨씬 고전압 설비전체의 열적 환경에 더 큰 영향을 주므로 그러한 열적 환

경에서 장기적으로 절연특성을 잘 유지하느냐가 더욱 중요한 경우가 많다. 다만, dipole이 많은 천연펄프 절연지를 사용하는 기기나 케이블 등에서 유전손실이 중요하기도 하고 복합절연재료에서 보강재료로 사용한 무기물들의 유전상수와 손실값이 큰 경우가 대부분이며 복합재료계면이 흡수되어 있을 가능성이 많기 때문에 유전특성이 다소 문제되기도 한다.

물질을 구성하는 미세한 재료적 측면에서 볼 때 유전특성에 영향을 주는 인자들의 종류나 크기가 다양할 뿐만 아니라 재료의 온도나 주파수에 따라 유전특성이 크게 변하는 특징을 가지고 있으므로 일괄적으로 그 특징을 논하기는 쉽지 않다. 인가된 전계의 방향에 따라 배향이 가능한 것들과 그 배향의 민감도는 다르지만 주파수가 증가함에 따라 유전분산(dielectric dispersion)이 일어나 유전률이 낮아지는 특징을 보인다.

최근에 고주파 또는 마이크로파를 사용하는 무선 통신기기 수요가 급증하고 있는가 하면, 상당한 전기에너지가 요구되는 고주파 전력기구의 수요도 크게 증가하고 있어 이 분야에서의 유전특성은 크게 한계성을 보이고 있다. 마이크로파(GHz 주파수 대역) 통신용 PCB기판은 dipole 분극이나 전자들에 기인한 유전손실이 중요한 요소로 작용하기 때문에 무극성 재료의 사용이 요구된다. 고주파와 고전계가 동시에 인가되는 모타나 변압기 등의 수요도 발생하고 있어 여기에 사용되는 절연재료의 중요성이 부각될 것으로 전망되고 있다.

2. 유전특성의 기본 개념

유전재료의 특성을 분석하는데 복소유전율이 사용되며 이는 실수부인 유전상수와 허수부인 손실계수로 표시되며, 교류전계에서 분극을 일으키는데 요하는 시간은 충전전류의 위상 지연으로 나타난다. 따라서 전류가 전압보다 90° 앞서지 않고 손실각(loss angle) δ 만큼 지연된 $90-\delta$ 앞서게 된다. 전계와 전속밀도(displacement, flux density)를 복소수로 표기하면 다음과 같다.

$$E = E_0 e^{i\omega t}$$

$$D = D_0 e^{i(\omega t - \delta)}$$

이 관계를 이용하면

$$D = k^* E$$

로 되고 다음식을 얻는다.

$$k^* = k_s e^{-i\delta} = k_s (\cos \delta - i \sin \delta)$$

여기서 정전유전상수(static dielectric constant) k_s 는 D_0/E_0 이다. 유전상수를 복소수로 나타내면

$$k^* = k' - ik'' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (\epsilon' - i\epsilon'')$$

로 되고 위의 식으로부터

$$k' = k_s \cos \delta$$

$$k'' = k_s \sin \delta$$

로 되어 손실률은 다음과 같다.

$$\tan \delta = k''/k' = \epsilon''/\epsilon'$$

인가된 전압과 유도전류 사이의 시간 지연에 해당하는 상의 전이(shift)로 인하여 전류손실과 에너지의 분산을 일으킨다. 단순한 평판 콘덴서에 사인파의 전계를 인가하였을 때 측정되는 전류(charging current)는 $I_c = i\omega \epsilon' E$ 이고 손실전류(loss current)는 $I_l = \omega \epsilon'' E = \sigma E$ 이다. 여기서 σ 는 유전전도도(dielectric conductivity)이다.

$$I = (i\omega \epsilon' + \omega \epsilon'') \frac{C_0}{\epsilon_0} V = i\omega C_0 k^* V$$

1주기당 에너지 손실(energy loss)은

$$W = 2\pi \epsilon'' \frac{V_0^2}{2} \tan \delta$$

이고 1초당 에너지 손실은

$$P = \sigma \frac{V_0^2}{2} = \omega \epsilon'' \frac{V_0^2}{2} = \omega \epsilon' \frac{V_0^2}{2} \tan \delta = 2\pi f \epsilon' \frac{V_0^2}{2} \tan \delta$$

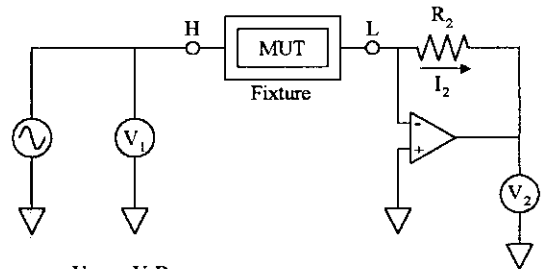
이다. 여기서 V_0 는 최대전압이다. 이 식에서 보면 유전체에서 에너지 손실을 결정하는 인자는 유전상수와 손실각(loss tangent)을 곱한 것이다. 이 값이 손실인자(loss factor)이다. 손실인자는 에너지의 손실을 나타내는 것으로서 그에 수반되는 열을 나타내기 때문에 유전재료를 절연재료로 이용할 경우 평가할 수 있는 기본적인 기준이다. 이러한 목적으로 사용할 경우 유전상수와 손실각이 작아야 한다.

3. 유전특성의 측정장치 및 방법

유전율을 측정하는 장치들로는 LCR meter, Impedance analyzer, Schering bridge, 회로망 분석기, DC high resistance meter 등이 사용되고 있는데 유전율이 높아(세라믹) 약전을 이용하여 측정하는 방법과 유전율이 낮아(고분자) 고전압을 걸어 측정할 수 있는 방법을 간단히 소개하고자 한다.

3.1 LCR Meter/Impedance Analyzer

LCR meter와 impedance 분석기는 물질의 임피던스를 측정하려 할 때 그림 1과 같이 auto-balancing bridge 기법을 사용한다. 그리고 그 물질은 교류 전원이 인가되며 H와 L지점에서의 실제 전압이 화면에 표시된다. 여기서 low단자는 op-앰프의 가상 접지에 의해 OV가 되고 출력 전압은 그 물질을 통과하는 전류와 비례한다. 물질의 측정변수는 물질의 첫수를 알고 그것의 커패시턴스와 전력 손실을 측정함으로써 해서 얻어질 수 있다.



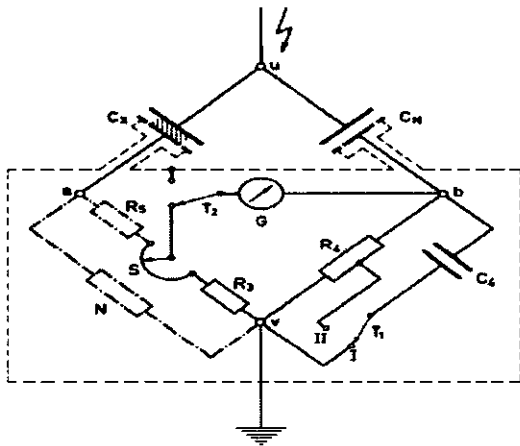
$$Z = \frac{V_1}{I_2} = \frac{V_1 R_2}{V_2}$$

그림 1. 자동 밸런싱 브릿지 기법

3.2 Schering Bridge

60Hz의 측정주파수에 대한 매우 큰 정전용량과 매우 적은 손실율을 측정하기 위해 가장 넓게 사용되는 형태가 고전적인 schering bridge이다. 특히 고전압분야에서는 그 효율성이 대

단히 높다. 또한 Schering bridge는 약간의 회로변경 또는 소자교체로 Maxwell bridge(inductance를 측정), Wien bridge(고주파 측정용), 4-Capacitor bridge(고감도 측정용) 등으로 변경하여 사용 할 수 있다. 그림 2는 고전적인 Schering bridge의 기본 회로이다. 회로가 완전히 평형조정되면 표준 정전용량기와 시료에 인가되는 전압이 같아지고 Null indicator는 영점에 편향된다. $G=0$, 즉 평형조정이 완료된 Schering bridge의 각 arm들 값을 기준으로 시료의 정전용량 및 손실율은 다음과 같이 계산 된다.



- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| C_X : 시험시료 | R_4 : Adjustable resistor |
| C_N : Standard capacitance | R_5 : (= 0) |
| G : Null indicator | C_4 : Adjustable capacitance |
| S : Slide wire | N : Shunt resistor |
| R_3 : Adjustable resistor | |

그림 2. 고전적인 Schering bridge의 기본회로

그림 2의 각 arm의 임피던스를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\text{왼쪽 상부 (시료)} \quad Z_{RL} = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

$$: Z_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \quad \tan \delta = \omega C_X R_X$$

$$\text{오른쪽 상부 (표준용량기)} : Z_N = \frac{1}{j\omega C_N} \quad (R_N = 0)$$

$$\text{왼쪽 하부} : Z_{LL} = R_3 + S, \quad (R_5 = 0, N = \infty)$$

오른쪽 하부 :

평형상태에서는 $Z_X \cdot Z_{RL} = Z_N \cdot Z_{LL}$ 이므로 다음과 같은 수식이 얻어진다.

$$\frac{R_4(1 + j\omega C_X R_X)}{C_X(1 + j\omega C_4 R_4)} = \frac{R_3 + S}{C_N}$$

윗식을 풀어서 복소수항을 분류하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 1 + \omega^2 C_X R_X C_4 R_4 + j\omega(C_X R_X - C_4 R_4) \\ = \frac{(R_3 + S)C_X}{C_N R_4} (1 + \omega^2 C_4^2 R_4^2) \end{aligned}$$

허수부와 실수부는 각각 평형조건을 만족하므로 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\tan \delta = \omega C_X R_X = \omega C_4 R_4 \quad C_X = \frac{R_4 C_N}{R_3 + S}$$

Schering bridge를 사용하면 윗식과 같이 간단한 계산에 의해 측정치를 얻을 수 있으나, 주의할 사항으로는 그림 2의 a와 b 점이 접지전위가 아니며, 두 점사이 및 대지와와의 사이에 나타나는 stray capacitance가 측정결과에 영향을 줄수 있는 점이다. 일반적으로 표준용량기와 시료에 연결되는 연결선과 증폭기와 indicator로 구성되므로 bridge본체와 분리되는 경우가 많은 Null indicator에 의해 발생하는 stray capacitance가 크게 영향을 미친다.

Schering bridge의 주요한 장점으로는 실제의 운전전압 또는 시험전압으로 측정이 가능하다는 점이다. 일반적으로 시판되는 제품들에서는 bridge point의 전압이 50V 정도 이하가 유지되며, 시료나 표준용량기에서 절연과괴 또는 flash over가 나타날 경우 발생하는 고전압에 대비하여 측정인을 보호하기 위하여 neon lamp, air gap arrester등 과전압보호장치를 구비하는 경우가 많다.

단점으로는 허용전류용량이 적다는 점이 있다. 시료의 정전용량과 시험전압에 의해 결정되는 시험전류는 반드시 그림 2의 R_3 와 S 에 흐르게 되고 이 소자들의 전류용량은 수 ampere 정도로 매우 적은 경우가 많다. 따라서 전류용량을 증가시키고자 shunt resistor N 을 병렬로 사용하고 20A이상의 대전류에 대해서는 외부에 별도의 변류기를 사용하는 경우가 많다.

4. 초고압 절연재료의 용도별 유전특성

4.1 옥외용 고전압 절연재료

대개의 절연재료에서 체적저항이 표면저항에 비하여 100배 정도 높는데 이것은 재료표면이 공기중에 노출되어 공기, 수분, 먼지 등에 의해 영향을 많이 받아 저항이 낮아 지기 때문이다. 실제 애자와 같이 표면이 먼지, 염분 등에 의해 오염된

상태에서 물에 젖을 때에는 표면절연저항이 더욱 크게 떨어지기 때문에 옥외절연물에서 절연성능을 장기간 유지하기 위해서는 절연물의 크기를 상당히 크게 할 수 밖에 없다. 그러므로 옥외절연물에서 절연재료의 유전특성에 기인한 손실은 상대적으로 별 다른 의미를 갖지 못 한다. 지금까지도 옥외용 절연물로 유전상수가 아주 큰 세라믹 애자가 사용되고 있는데 최근 유전특성 면에서 유리한 고분자 애자들이 사용되기 시작하고 있어 앞으로는 더욱 문제가 되지 않을 것이다.

4.2 전력기기용 고전압 절연재료

전력기기용 고전압 절연재료로서는 에폭시수지가 주로 사용이 된다. 에폭시 수지 자체는 유전손실이 작지만, 강도와 열전도율을 높이고 열팽창률과 경화수축률을 내리기 위하여서는 무기물 필러를 다양으로 첨가하여서 사용한다. 이때 사용하는 초고압용의 대표적인 필러는 실리카와 알루미늄을 들 수 있다.

전력기기 물드용 절연재료나 차단기나 붓싱의 스페이스에 사용하는 에폭시수지에도 실리카와 알루미늄이 사용되는데, 실리카는 알루미늄에 비하여 열전도특성을 제외하고는 모든 특성이 우수하여 주로 사용되고 있다. 하지만 SF₆ 절연용 기기의 스페이스에서는 SF₆의 분해에 의하여 불산이 생성되어 실리카가 침식되므로 알루미늄이 주로 사용되고 있다. 이 때 에폭시수지와 경화제는 전기적 특성이 우수한 bisphenol-A type과 anhydride가 가장 적절하며 에폭시 수지와 전기절연용 무기물 필러들의 물성을 표 1.2에 나타내었다.

몰드변압기나 몰드 CT/PT 등의 절연재료의 경우 유전손실에 의한 발열도 기기전체의 열발생에 상당히 기여하여 문제가 될 수 있기 때문에 복합재료를 처방할 때 표의 재료들을 잘 고려하여 선택해야 할 것이다.

Table 1 Properties of Epoxy

dielectric constant	3~4
dissipation factor	<0.1
resistivity(Ωcm)	10 ¹⁵
dielectric strength(kV/mm)	20~30
density(g/cm ³)	1.1~1.40
coefficient of thermal expansion x10 ⁻⁶ (cm/cm/°C)	40~100
thermal conductivity x10 ⁻⁴ (cal/sec/cm ² /°C/cm)	4~5
tensile strength (psi)	4,000 - 13,000
elongation (%)	3.6 - 6.0
compressive strength (psi)	15 - 25,000
heat distortion temperature (°C)	25 - 290

Table 2 Properties of filler materials

Properties	Silica	Alumina	Mica	BN
dielectric constant	3.8~5.4	8.2~10.2	5.4~8.7	4.2
dissipation factor	0.0003	0.0003~0.002	0.0002	0.001
resistivity(Ωcm)	10 ¹⁴ ~10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁴
dielectric strength(kV/mm)	15~25	10~16	40~80	35~55
density(g/cm ³)	2.2	3.6	2.6~3.8	2.1
thermal expansion coefficient x10 ⁻⁶ (cm/cm/°C)	0.3	6.8~8.0	18~27	4.3
thermal conductivity x10 ⁴ (cal/sec/cm ² /°C/cm)	30	600~700	8~20	690
melting point(°C)	1700	2020°C		2800

4.3 케이블 절연재료

케이블의 용도는 주로 도심의 지중으로 대용량의 전기에너지를 수송하기 위한 목적으로 주로 사용되어 왔는데 이 경우 주파수는 낮지만 얇은 절연층에 고전압이 인가된다. 천연펄프 절연지를 이용한 케이블에서 절연지의 유전상승값이 높고 흡습 및 산화를 통한 열화가 잘 됨으로 인하여 유전손실이 문제가 되어 왔다. 케이블의 절연체가 흡습하거나 수트리로 인한 열화가 진행되면 유전손실은 증가하는 것으로 알려져 있는데 케이블의 열화진단방법으로 유전특성을 추적하는 수단들이 널리 이용되고 있다. 최근에는 유전율과 손실에서 절연지에 비하여 아주 유리한 XLPE가 절연체로 사용되고 있다.

고전압 대전류를 흘리기 위한 목적은 아니지만 고주파 통신기기용 케이블 등에서 유전특성이 아주 중요하게 부각되고 있는데 이 때는 유전상수나 손실면에서 교체절연체로서 가장 유리한 불소계 수지를 피복체로 사용하고 있는가 하면 이들 수지들의 microcell 발포체를 적용하려는 연구가 진행되고 있다.

4.4 저유전율 기판재료

전자통신기기의 소형, 고성능, 대용량, 고신뢰, 저가격 등의 요구 추세에 따라 반도체 칩이나 각종 부품은 고집적화, 고속도화의 방향으로 발달하고 있다. 특히 방대한 량의 정보처리가 필수적인 위성통신 및 방송용 부품소자 등의 기술은 급속히 발전하고 있는데 기판에서의 신호전송지연이 크게 문제가 되고 있다. 기판에서의 신호지연은 기판재료의 비유전율에 비례하므로 유전율을 낮추어야 할 필요성이 매우 커졌다.

유전율이 비교적 낮고 재료가 용이한 유기고분자 재료들이 기판재료로 많이 사용되어 왔다. 현재 대부분의 복합재료기판은 유리섬유와 에폭시 수지를 사용하고 있는데 필러 및 수지의 유전율이 낮은 것을 사용하는 것이 가장 일반적이다. 프리프레

므로 사용되고 있는 수지는 에폭시, 페놀, 폴리이미드, PPO, PPE 등으로 여러 가지 개선과 진보가 이루어지고 있다. 컴퓨터와 같은 범용회로분야에서는 에폭시수지 복합재료가 고밀도 실장, 고밀도 배선다층 PCB기판으로 사용되고 있다.

최근 신호 전송의 고속화가 요구되면서 저유전 재료화 하기 위하여 비유전율이 3.6인 PPE, 3.5 정도인 polyimide가 기판재료로 연구되어 왔는데, PPE는 종래의 고주파기판으로서 대표적인 글라스-PTFE 기판을 대체할 수 있는 기판으로 등장하였다.

현재 프리프레그로 사용되고 있는 것은 일반적으로 글라스 크로스를 수지에 함침시켜 반경화시킨 뒤 접착시킨 것이다. 그러나 이러한 형태는 다음과 같은 결점이 있다.

- 글라스의 유전율이 높음(E-글라스 \approx 6.5)
- 글라스 크로스의 평탄성이 나쁨(글라스가 겹치는 부근에서 요철이 생기는 현상)
- 박형 글라스 크로스의 제조가 난해
- 글라스 크로스로부터 오염 발생 용이

이것과는 완전히 다른 방법으로서 재료내부에 독립기공을 발생시켜서 유전율을 떨어뜨리는 방법이 있다. 이것은 공기의 유전율이 약 1인데 비하여 유리섬유의 유전율이 약 5-7, 에폭시 수지가 약 3-4이므로 재료내부에 기공이 있으면 그 유전율이 떨어지는 원리를 이용하는 것이다. 이러한 경우에도 반드시 독립기공이어야 한다.

글라스 크로스를 대체하여 다공질 PTFE 필름을 사용하는 방법이 있다. 종전에는 글라스 크로스를 심재로 사용할 경우 수지에 비하여 글라스가 유전율이 높기 때문에 복합재료로 되면서 유전율이 높아지는 현상이 나타났다. 다공질 PTFE는 특수한 연신법에 의하여 연속 다공질구조를 만듦으로서 매우 낮은 유전율을 실현한 것이다. PTFE 자체의 매우 낮은 유전율 외에 다공질 구조로 됨으로서 그 유전율이 1.2 정도로 나타났다. 매우 우수한 전기적 특성 외에도 PTFE와 거의 같은 내열성, 내약품성 등을 갖추고 있다. 그리고 부직포이기 때문에 오염의 발생도 거의 없다.

5. 결 론

고전압의 전력기기에서 유전손실이 크게 문제되지는 않지만 고전계가 걸리는 절연재료에서는 저유전재료의 사용이나 개발 필요성이 증가할 것으로 예상된다. dipole이 많은 천연펄프 절연지를 사용한 기기나 케이블 절연 등에서 유전손실이 중요하므로 무극성의 고분자 합성절연지가 대체 재료가 될 것이며, 불소수지, 올레핀계 발포체를 이용한 저압의 특수 통신용 케이블의 수요가 증가할 것으로 기대된다. 그런가 하면 상당한 에너지가 필요로 하는 고주파 전력기기(모터, 변압기)나 전력

용 반도체 등의 몰딩절연체의 저유전 재료화도 필요할 것으로 본다.

최근에 고주파를 사용하는 무선 통신기기 수요와 함께 관련 부품의 소형경량화 추세에 따라 고전압은 아니지만 아주 얇은 재료에 수 volt가 걸려도 절연재료의 단위 두께당 상당히 높은 전계가 걸리면서 절연재료의 저손실화가 중요한 요소로 등장하고 있다. 또한, 고주파 통신용 PCB원판이 기판으로 회로화 공정 중에 고온의 기계적 특성을 요구하므로 복합재료 기판을 만들 수 밖에 없는데 대체로 저유전재료들이 접착강도가 낮은 특징을 가지고 있어 제조에 많은 어려움을 가지고 있다.

고전계가 인가되는 강전절연체는 여러 가지 이유로 복합재료화 할 수 밖에 없다. 보강재료의 종류는 고강도 섬유이거나 미세분말들이 사용되고 있는데 섬유로는 유리섬유 또는 고분자 섬유이며 분말로는 무기물 분말들이 사용되고 있다. 본 고에서 언급한 분야에서 새롭게 저유전재료들의 사용이 증가하고 있는데 이들 분야에 사용할 수 있는 재료에서 이종재료계면이 유전특성 및 유전열화에 결정적으로 중요한 인자로 부각되고 있다. 나노분말의 특성은 물질자체의 고유특성 못 지 않게 표면의 상태에 따라서 영향을 많이 받는다. 실제 이들 재료에서 표면의 분률이 상당히 크고 분자차원의 micro surface의 제어가 기술적으로 어렵기 때문이다. 따라서 표면화학, 표면물리, 미세표면개질기술을 기초로 하여 계면결점이 없는 고도정밀 복합재료를 제조하는 기술이 중요하게 부각될 것으로 본다.

서 사 영 역

성명 : 강 동 필

◆학력

1973.3~1980.2 경상대 사범대학 학사
 1980.3~1982.8 부산대 화학과 석사
 1983.3~1989.8 부산대 고분자공학과 박사

◆경력

1982.3~1985.8 경남대 화학과 조교 및 시간강사
 1985.9~1986.1 부산대 구분자공학과 조교
 1986.2~현재 한국전기연구소
 신소재응용연구그룹 책임연구원
 1998.3~2000.2 창원대 화학과 겸임교수

성명 : 박 효 열

❖ 학 력

1986년 : 부산대학교 무기재료공학과 학사

1988년 : 부산대학교 무기재료공학과 박사:

❖ 경 력

1988년 : 전기연구소 선임연구원

✽ E-mail: hypark@keri.re.kr

성명 : 한 동 희

❖ 학 력

1985.3~1989.2 경북대 고분자공학과 학사

1989.3~1991.2 경북대학원 고분자공학과 석사

1997.3~2000.2 경북대학원 고분자공학과 박사

❖ 경 력

1991.2~1996.8 한국전기연구소 전기재료연구부 연구원

1996.9~현재 한국전기연구소 전략기술연구단 선임연구
구원