

# 고분자 절연재료의 특성 및 평가 < I >



이 철 호  
화인폴리머(주) 대표이사

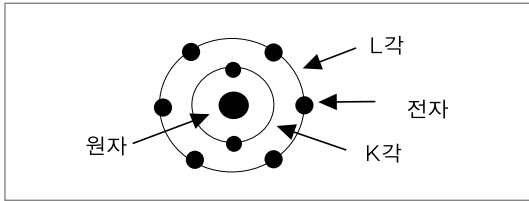
## 1. 전기절연재료의 화학

### 가. 유기분자의 구조

#### ■ 원자구조

절연재료의 연구에는 원자의 핵 외 전자배치가 중요한

의미를 갖는다. 원자는 중성자(neutron)와 양성자(proton)로 구성된 핵(nucleus)과 전자(electron)로 이루어져 있다. 이 중에서 특히 바깥쪽에 위치하는 전자는 원자의 전기적, 기계적, 화학적 및 열적 성질의 대부분을 결정한다.



■ 전자친화력

원자가 음이온이 될 때 방출하는 에너지 즉, 진공 상태에서 무한히 떨어져 있는 중성원자와 전자가 접근하여 결합할 때 방출되는 에너지를 원자의 전자친화력이라 하며, 전자친화력에 의해 중성원자의 전자받기 쉬운 정도를 원자의 전자친화성이라고 한다. 원자가 전자를 받아 음이온이 되는 경향의 크기를 나타낸다.

■ 전기음성도 (Electronegativity)

분자 내에서 한 원자가 전자를 끌어당기는 힘의 상대적 크기로 서로 다른 두 원자로 이루어진 분자 A-B가 있을 때, 이들 A와 B의 전기음성도의 차가 클수록 결합에 관여하는 전자는 한쪽 원자에 이끌리게 되어 결합의 이온성이 커진다. 반면에 전기음성도의 차가 작아 '0'에 가까워질수록 전자는 두 원자에 공유 되는 정도가 커지고 공유결합성이 강해진다.

■ 결합에너지

여러 개의 구성입자가 결합하여 만들어진 분자의 결합을 끊어 구성입자로 분리하는데 필요한 에너지이다.

[표 1] 원소의 전자배치

전 자 각		K	L		M		
전 자		1s	2s	2p	3s	3p	3d
원자번호	원 자						
1	H	1					
2	He	2					
3	Li	2	1				
4	Be	2	2				
5	B	2	2	1			
6	C	2	2	2			
7	N	2	2	3			
8	O	2	2	4			
9	F	2	2	5			
10	Ne	2	2	6			
11	Na	2	2	6	1		
12	Ma	2	2	6	2		
13	Al	2	2	6	2	1	
14	Si	2	2	6	2	2	
15	P	2	2	6	2	3	
16	S	2	2	6	2	4	
17	Cl	2	2	6	2	5	
18	Ar	2	2	6	2	6	

[표 2] 원소의 전자친화력

H	0.75	C	1.27	F	3.34
Li	0.62	O	1.47	Cl	3.61
Na	0.55	P	0.75	Br	3.36
K	0.50	S	2.08	I	3.06

[표 3] Paulling의 전기음성도

H	2.1	C	2.5	F	4.0
Li	1.0	O	3.5	Cl	3.0
Na	0.9	P	2.1	Br	2.8
K	0.8	S	2.5	I	2.5

- 전기음성도 F > O > Cl, N > Br > C, H

분자 내 원자 사이의 결합에너지, 원자핵 속에서 핵자 사이의 결합에너지가 있다.

**나. 유기화합물의 성질**

■ 유기분자, 유기화합물의 성질

- 구조적 성질 : 분자구조 (결합거리, 결합각), 진동·회전

- 전기적 성질 : 쌍극자 모멘트, 분극률, 유전율

- 자기화학적 성질

- 광학적 성질 : 광학활성, 굴절률

- 열역학적 성질 : 생성열, 융점, 비점

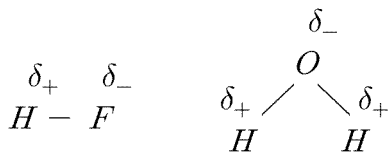
- 복합 성질 : 여기 에너지, 이온화 포텐셜, 전자친화력, 밀도, 용해도

[표 4] 화학 결합 에너지

결 합	분 자	E (kJ/mol)	결 합	분 자	E (kJ/mol)
H - H	H <sub>2</sub>	432.07±0.04	C - O	CH <sub>3</sub> OH	321±1
H - F	HF	566.6±0.8	C - O	CO <sub>2</sub>	798.9±0.5
H - Cl	HCl	427.8±0.2	C - S	CS <sub>2</sub>	574±1
H - Br	HBr	362.5±0.2	C - N	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	267±3
H - I	HI	294.7±0.8	C - N	HCN	852±3
H - O	H <sub>2</sub> O	458.9±0.4	Si - Si	(CH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> Si <sub>2</sub>	224±6
H - N	NH <sub>3</sub>	386.0±0.5	Si - F	SiF <sub>4</sub>	592±8
H - C	CH <sub>4</sub>	410.5±0.6	Si - O	SiO <sub>2</sub>	622±17
H - Si	SiH <sub>4</sub>	318±3	N - N	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	152±1
Na - Cl	NaCl	407±3	N - N	N <sub>2</sub>	941.6±0.6
Ca - Cl	CaCl <sub>2</sub>	455±3	O - O	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	138±1
C - C	다이아몬드	354.2±0.2	O - O	O <sub>2</sub>	493.6±0.2
C - C	C <sub>2</sub>	590±4	S - F	SF <sub>6</sub>	322±4
C - C	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	804±1	F - F	F <sub>2</sub>	154.6±0.6
C - F	CF <sub>4</sub>	484±21	Cl - Cl	Cl <sub>2</sub>	239.2±0.0
C - Cl	CCl <sub>4</sub>	323±2	Br - Br	Br <sub>2</sub>	190.1±0.3
C - Br	CBr <sub>4</sub>	269±21	I - I	I <sub>2</sub>	148.8±0.2
C - I	CHI <sub>3</sub>	212±3			

■ 결합의 극성

공유결합에 의해 결합되고 있는 두 원자는 전자를 공유하고 있으며, 이들의 원자핵은 동일한 전자구름에 의해 결합되고 있으나 대부분 한 쪽 핵의 전자구름의 밀도가 다른 쪽보다 높다. 따라서 결합의 한 쪽 말단은 비교적 음성을 띠게 되며 다른 쪽 말단은 비교적 양성이 된다. 전기음성도의 차이가 크면 결합의 극성이 커지며 이러한 결합으로 이루어진 최종 절연물의 전기적 특성을 좌우하게 된다.



■ 분자의 쌍극자 모멘트 (dipole moment)

분자를 구성하는 원자의 전기음성도나 전자배치에 따라 분자의 전하에 편재하는 분자가 쌍극자로 된다. 쌍극자 모멘트가 큰 결합물은 극성이 커지게 되어 유전특성에 직접적인 영향을 갖게 되며, 다른 물성에도 영향을 주게 된다.

쌍극자 모멘트 ( $\mu$ ) =  $e \times d$

$\mu$ : debye (D)

$e$ : 전하의 크기

$d$ : 두 전하의 중심 간의 거리

다. 전기절연재료에 요구되는 성능

일반적인 성능으로서 절연파괴전압이 높아야 하는 것 뿐만 아니라 유전특성(유전율 $\epsilon_r$ 과 유전정접  $\tan\delta$ ), 내열성, 내수성, 내후성, 기계적 특성, 내유성 등 종합적인 성질이 고려되어야 한다.

■ 유전특성( $\epsilon_r, \tan\delta$ )

교류전압을 절연하는 경우에는 유전율과  $\tan\delta$ 는 가능한 작은 쪽이 좋다.  $\epsilon_r \cdot \tan\delta$ 가 작은 재료, 쌍극자 모멘트가 작은 재료 즉, 무극성의 재료가 바람직하다. 그러나 콘덴서 재료에서는 콘덴서 용량을 크게 하기 위해 유전율이 커야 한다. 직류절연에서는  $\tan\delta$ 는 그다지 문제가 되지 않고 오히려 공간전하의 축적이 작은 것과 도전을 및

[표 5] 결합 모멘트

결합	결합 모멘트 (debye)	결합	결합 모멘트 (debye)
H - C	0.4	Cl - O	0.7
H - S	0.68	C = C	0
H - Br	0.78	C = N	0.9
H - Cl	1.08	C = O	2.3
H - N	1.31	C = S	2.6
H - O	1.51	N = O	2.0
N - F	0.17	C $\equiv$ C	0
H - F	1.75	-C $\equiv$ N	3.5

그 온도 의존성이 작은 것이 필요하다. 절연체 중의 온도 분포가 균일하지 않은 경우 도전율의 차이에 따라 저항이 불균일해지고 저온부의 저항이 크게 되어 전압분담이 커진다. 따라서 전압 분담이 큰 곳에 전계강도가 커지고 절연파괴를 일으킬 수 있으며 평상시에는 문제가 되지 않는 결함이나 Void에서 열화가 진행될 수 있다.

■ 내열성

전기기기의 소형화, 경량화, 고성능화에 따라 가혹한 조건에서 사용될 수 있도록 내열성이 요구된다. 단시간 내열성은 유리전이온도(Tg) 및 용점(Tm)으로 예측할 수 있으며, 장시간 내열성은 온도지수(thermal index) 또는 아레니우스식 등으로 절연수명을 예측할 수 있다. 절연재료는 열전도성이 좋고 전기절연성이 좋은 모순된 2개의 성질을 갖추어야 내열수명이 향상되며, 옥외용 애자 등의 절연재료 표면은 아크방전 등에 견디는 내열성이 요구된다.

■ 내수성

수분이 침투하지 않는 고분자 재료에도 내부에 전계 집중 부분이 있으면 외부의 수분이 확산, 침투되어 전계 집중 부분에 응집될 수 있다. XLPE 케이블, 모터보트 등의 권선 및 코드, 옥외절연 애자 및 부싱 등에 특히 요구되는 특성이다.

■ 내후성

절연재료가 옥외에서 사용될 때 바람, 습기, 자외선, 공기 중 오존, 각종 오손물 등에 산화, 열화가 촉진되어 표면에 균열이 발생되어 요철이 형성되어 절연 기능을 상실할 수 있다.

■ 기계적 특성

XLPE Cable에서 압출제조 조건에 따라 절연체의 비틀림이 남아있거나, 포설 시 또는 포설 후 굴곡되기도 하고 케이블 온도 상승에 따라 신장되기도 하여 내수성, 내부분방전성 등이 저하된다. 또한 인접해 있는 금속과 고분자 사이의 선팅창 계수의 차이로 온도변화에 따라 뒤틀림이 있을 수 있다.

■ 내유성

유기고분자 재료를 절연유 중에 담가 사용하는 경우, 특히 콘덴서, OF Cable, 변압기 등의 온도 상승에 따라 절연재료가 팽윤된다. 직매 케이블 등에서는 외부에서 유입되는 기름에 영향을 받는다.

■ 내방사선성

원자력 발전소에서 사용되는 전기기기, 제어장치 및 Cable 등이 발전소의 사고 시 방사선 유출로 절연재료가 열화되어 절연성능이 저하된다. 원자력용 재료는 원자로 냉각재 유출사고를 모의하는 LOCA(Loss of coolant accident) 시험에 합격해야 한다.

[표 6] 각종 재료의 선팅창 계수

Copper	$17 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Aluminum	$25 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Polyethylene	$25 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
EPDM rubber	$18 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
Epoxy	$55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Silicone rubber	$20 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

■ 환경문제

가공송전선, 배전선 등과 같은 경우의 도시미관도 중요한 요소이며 최근에는 지구온난화의 원인 물질 중 하나인 SF<sub>6</sub> 가스 사용 억제, PCB와 같은 유독성 절연유 사용억제, 기존의 광유 대신 식물성 절연유를 사용하는 등의 환경 문제가 점점 더 중요해지고 있다.

2. 절연재료의 유전특성

가. 유전분극

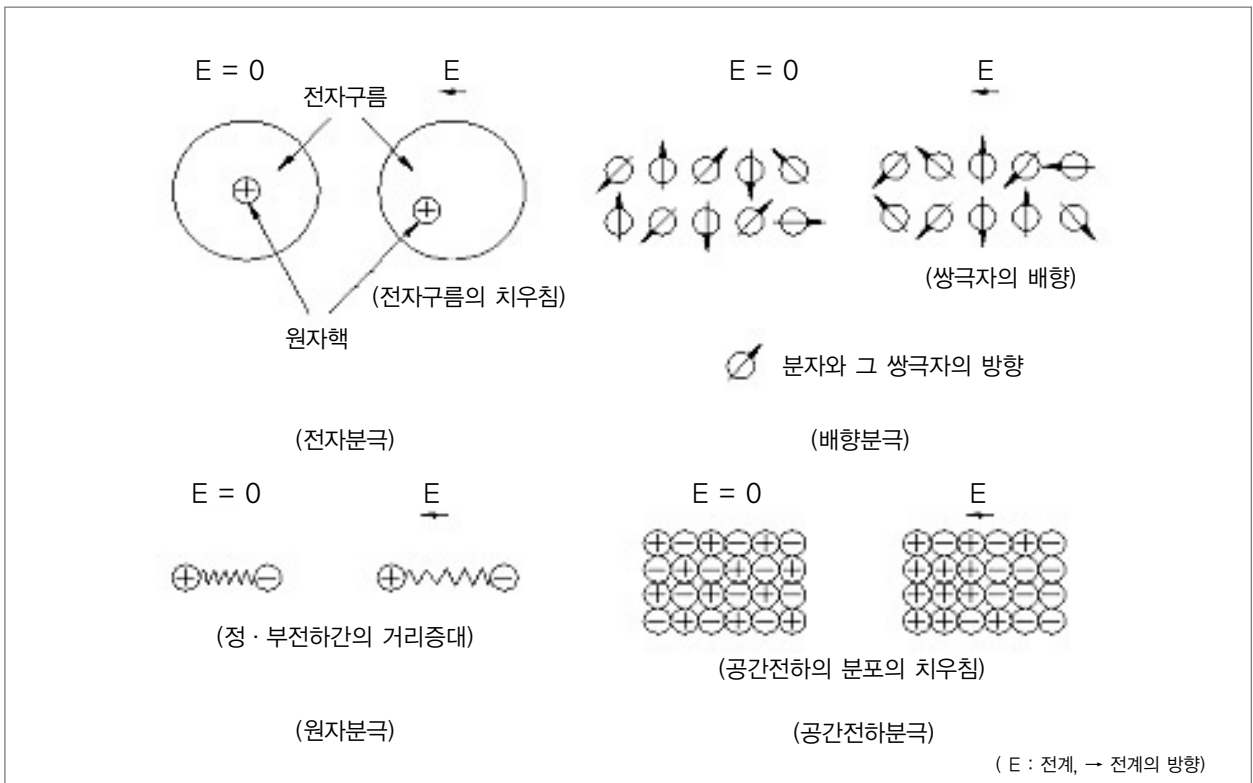
절연재료(유전체)가 전계 중에 위치하면 정·부 전하가 서로 반대방향으로 미소하게 움직이는 현상이 발생하는데, 분자가 전계에 대응하여 쌍극자 모멘트를 갖기 때문에 발생하는 유전분극으로 유전특성이 결정된다.

■ 유전분극의 종류

- ① 전자분극 : 전계에 의해 전자구름이 치우침
- ② 원자분극 : 전계에 의해 분자내 또는 이온내의 정·부 전하간 거리가 크게됨
- ③ 배향분극 : 분자의 쌍극자의 방향이 전계 방향으로 향함
- ④ 공간전하분극 : 전계에 의해 공간전하의 분포가 치우침

■ 유전분극의 성질

유전분극에 의해 생긴 쌍극자 모멘트는 원래 가지고 있는 영구 쌍극자 모멘트와 구별되고, 분극의 크기는 인가 전계의 주파수에 의존한다.



유전분극의 개념도

나. 비유전율 (dielectric constant)

■ 유전율

단위 체적 중에 축적하는 정전 에너지의 크기를 표시하는 양이다.

■ 비유전율 :  $\epsilon_r$

유전율의 크기는 아주 작아서 사용하기 불편하므로 진공의 유전율을 1로 하여 비교하는 수치를 사용하며 단위가 없다.

- $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0 = Q/Q_0 = C/C_0$
- $\epsilon$  = 재료의 유전율
- $\epsilon_0$  = 진공중의 유전율 ( $8.854 \times 10^{-8}$  F/m)
- $Q$  = 축적되는 전하 (C)
- $C$  = 정전용량 (F)

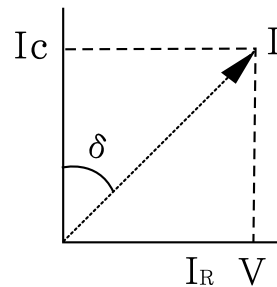
다. 유전손

유전분극에 의해 생기는 쌍극자가 전계의 변화에 따라 진동하기 때문에 발생한다. 유전손의 손실 에너지는  $\epsilon_r \cdot \tan\delta$ 에 비례하며 유전손이 발생하면 절연재료에 가해진 에너지가 열로 되어 손실되므로 전력손실을 초래하고 발생한 열은 절연재료를 열화 시키기 때문에 유전손을 낮추어야 한다.

$$\begin{aligned}
 P &= IR^2 R \\
 &= V IR \\
 &= \omega V^2 C_0 \epsilon_r \tan\delta
 \end{aligned}$$

■ 유전정접(power factor, dissipation factor,  $\tan\delta$ )

교류전압  $V$ 를 인가했을 때 전류  $I$ 는  $V$ 보다 위상이  $\frac{\pi}{2}$ 만큼 빠르게 흐르나 절연재료의 손실로 인해 실제 위상차는  $90^\circ - \delta$ 로 된다. 이 때  $\delta$ 를 유전손각이라 하고, C 성분에 의한 전류  $I_c$ 와 R 성분에 의한 전류  $I_R$ 의 비인  $I_R/I_c$ 를  $\tan\delta$ 라 하며, 이  $\tan\delta$ 는 절연재료의 특성을 나타내는 중요한 수치이다. 유전손에 영향을 미치는 것은  $\tan\delta$ 와 비유전율의 곱이지만,  $\tan\delta$  값의 변화가 훨씬 커서 더 많은 영향을 미친다.

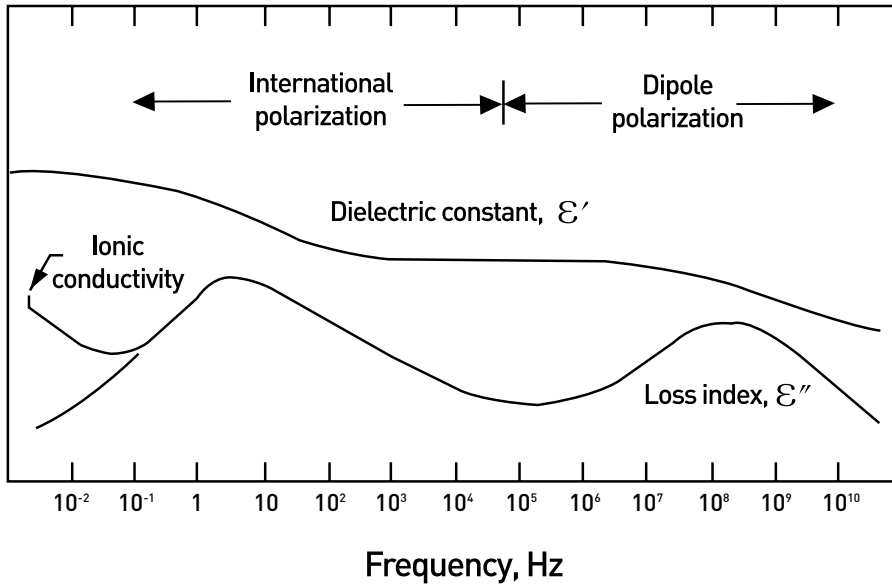


유전체의 전압, 전류의 위상차

라. 측정방법

■ 표준규격

- 세계 표준으로 IEC와 ASTM에 정해진 방법이 있다.
- IEC 250 : Recommended Methods for the Determination of the Permittivity and Dielectric Dissipation Factor of Electrical Insulating Materials at Power, Audio and Radio Frequencies Including Metre Wavelengths
- ASTM D 150 : AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials



극성재료의 주파수 의존성

■ 측정방법의 종류

다음의 세 가지 방법이 있다.

- Schering Bridge : 상용주파 측정에 많이 사용하고 시료에 높은 전압인가가 용이하며 정밀한 측정 방법이다.
- Tanδ계 : 정도는 높지 않으나 사용이 간단하고 운반 및 취급이 용이하다.
- 리액턴스 변화법 : 104~108 Hz 범위의 측정에 사용한다.

■ 측정온도 및 주파수의 영향

비극성재료(PE, PTFE 등)는 주파수 및 온도(연화점 이하)에 관계없이 거의 일정하며, 극성재료 (PVC 등)는 주파수 (온도)가 증가하면 비유전율이 감소하고 tanδ는 증가 후 감소하는 사이클 형태를 갖는다. KEA

[편집자 註]

8월호에는 '전기절연성' 과 '방전열화' 에 대한 내용이 연이어 게재됩니다.