

전기용품 안전기준

K 60250

초 판
1969

미터 파장, 가청 및 무선 주파수에서의 전기절연재료의
유전체 분해인자와 유전율 측정방법

목 차

1. 목적과 적용범위	1
2. 용어정의	1
3. 전기절연재료의 용도와 특성	2
4. 시편과 전극배열의 형태	3
5. 측정방법의 선택	9
6. 시험절차	9
7. 결과	9
8. 시험성적서	11
 부속서 : 시험용 기구	 12
표 I : 진공 정전용량과 모서리 보정의 계산	19
표 II : 시편 정전용량의 계산 - 마이크로미터 전극 접촉	20
표 III : 상대 유전율과 유전정접의 계산 - 비접촉 전극	21
그림	22

미터 파장, 가청 및 무선 주파수에서의 전기절연재료의 유전체 분해인자와 유전율 측정방법

1. 목적과 적용범위

이 제안은 유전율과 유전정점을 결정하기 위한 과정과 그것들로부터 계산된 거의 15Hz에서 300MHz 주파수 범위내의 손실지수 같은 양을 결정하는데 적용한다. 이 제안에서 설명하는 방법 중의 몇 가지는 특별한 주의와 함께 주어진 제한보다 높거나 낮은 주파수에서 측정하는데 사용할 수 있다.

고체 뿐 아닌 액체나 가용성의 재료도 설명한 방법으로 측정할 수 있다. 측정된 값은 주파수, 온도, 습도 함유량, 특별한 경우 장의 세기 같은 물리적 조건에 영향을 받는다.

몇 가지 경우의 경우, 전압이 1,000V를 넘는 시험은 유전율과 유전체 분해인자와 관계되지 않는 효과를 유도할 수도 있으나, 여기서는 설명하지 않는다.

2. 용어정의

2.1 상대적 유전율(ϵ_r) : 절연재료의 상대적 유전율은 문제에서 전극사이의 공간과 전극 주변에 전체적으로 독점적으로 절연재료를 채우고 있는 캐피시터의 정전용량(C_x)의 진공상태에서 같은 환경에 있는 전극의 정전용량은 C_0 에 대한 비율이다.

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1)$$

대기압에서 이산화탄소가 제거된 건조한 공기의 상대 유전율(ϵ_r)은 1.00053과 같아서 시험에서 공기 중에 있는 전극의 정전용량 C_a 를 충분한 정확도를 가진 상대적 유전율을 결정하기 위해서 보통 C_0 를 대신해서 사용한다.

측정시스템에서 절연재료의 유전율은 그 측정시스템에서의 상대적 유전율 ϵ_r 과 유전상수 또는 진공에서의 유전율(ϵ_0)의 곱이다.

SI 계에서, 절대 유전율은 F/m 으로 표현된다 ; 또한, SI 단위에서 유전상수 ϵ_0 는 다음과 같은 값을 가진다.

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F/m \quad (2)$$

이 제안의 목적을 위해서는, 정전용량을 계산하는데 있어서 pF과 cm이 사용된다.

유전상수는 :

$$\epsilon_0 = 0.08854 \text{ pF/cm}$$

2.2 유전 손실 각(δ) : 절연재료의 유전 손실 각은 캐피시터의 유전체가 오직 유전성 재료로만 구성되어 있을 때, 인가된 전압과 $\pi/2 \text{ rad}$ 로부터 유도된 전류 사이의 상 차이에 의한 각이다.

2.3 유전체 분해인자($\tan \delta$) : 절연재료의 $\tan \delta$ 는 손실 각의 탄젠트 값이다.

2.4 손실지수(ϵ_r'') : 절연재료의 손실지표는 $\tan \delta$ 와 ϵ_r 의 곱과 같다.

2.5 상대 합성 유전율 (ϵ_r^*)(relative complex permittivity)은 상대적 유전율과 손실지수를 조합하여 유도한다 :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (3)$$

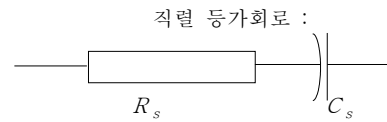
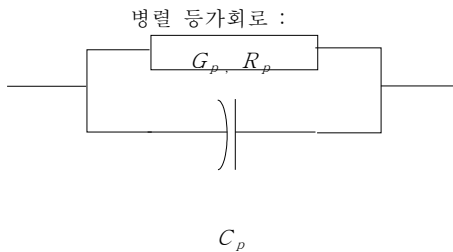
$$\epsilon_r' = \epsilon_r \quad (4)$$

상대적 유전율은 하위-절 2.1에서 설명하였다 :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r \tan \delta \quad (5)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (6)$$

주 - 캐패시터의 손실은 직렬에서의 정전용량 C_s 와 저항 R_s 또는 병렬에서의 정전용량 C_p 와 저항 R_p (또는 전도도 G_p)에 의해 주어진 주파수에서 나타낼 수 있다.



$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{G_p}{\omega C_p} \quad (7)$$

$$\tan \delta = \omega C_s R_s \quad (8)$$

유전손실을 가지고 있는 절연재료의 병렬표현이 더 적절한 표현인 반면에, 단일 주파수에서 저항과 직렬로 연결되어 있는 정전용량에 의해 캐패시터를 표현하는 것이 가능하고 종종 바람직하다. 직렬과 병렬 구성요소 사이에는 다음과 같은 관계가 있다 :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (9)$$

$$R_p = \frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan^2 \delta} R_s \quad (10)$$

$$\omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (11)$$

유전분해 상수는 직렬과 병렬 표현에서 같다.

측정회로가 직렬 구성요소로서 결과를 산출하고, 방정식 (9)에서 $\tan^2 \delta$ 가 너무 커서 무시할 수 없다면, 유전율이 계산되기 전에 병렬 정전용량이 반드시 계산되어야 한다.

이 제안의 계산과 측정은 $\omega = 2\pi f$ 전류의 사인 곡선과 형태에 기초를 둔다.

3. 전기 절연 재료의 용도와 특성

3.1 유전체의 목적

유전체 재료는 대체로 두 가지의 전혀 다른 방법으로 쓰인다 :

- 전기적 조직의 구성 성분을 지원하고 개개의 소자와 접지로부터 분리시킨다.
- 캐패시터의 유전상수로서 기능 한다.

3.2 유전체 성질에 영향을 받는 인자들

아래에 열거된 것처럼, 유전체 특성에 있어서 주파수, 온도, 습도, 장 세기의 영향은 개별적으로 다룬다.

3.2.1 주파수

용융된 실리카, 폴리스티렌, 폴리에틸렌 같은 몇 가지 재료만이 유전체 재료가 기술적인 목적으로 쓰이는 넓은 범위의 주파수에서 실제로 일정한 ϵ_r , $\tan \delta$ 를 가지고 있듯이 유전체 재료가 쓰일 주파수에서 유전정접과 유전율을 측정하는 것이 필요하다.

유전율과 유전정접에서의 변화는 유전분극과 전도도에 의해 생겨난다. 가장 중요한 변화는 극성분자들에 기인한 쌍극자 분극과 재료에서 이종성에서 기인한 계면 분극화가 원인이 된다.

3.2.2 온도

손실지수는 유전체 재료의 온도에 영향을 받는 주파수에서 극대치를 보일 것이다. 유전정접과 유전율의 온도 계수는 측정 온도에 대한 손실지수의 극대치의 위치에 따라서 양이나 음이 될 수 있다.

3.2.3 습도

분극의 정도는 물의 흡수나 유전체 재료의 표면에 물 막의 형성으로 증가하고, 그것으로 인해 유전율, 분해인자, 직류 전도도가 상승한다. 검사결과가 정확하게 해석된다면, 검사 전과 검사하는 동안의 검사시편의 상태에서 해결해주는 중요성과 습도량 제어의 결과는 필수적이다.

주. - 습도의 전체적인 효과는 대체로 대략 1MHz 이하의 주파수와 극초단파 주파수의 범위에서 발생한다.

3.2.4 장 세기

계면분극화가 존재할 때, 자유 이온의 수가 장세기에 따라서 증가하고, 손실지수 최대치의 양과 위치가 대체된다.

더 높은 주파수에서, 유전체에서 부분 방전이 일어나지 않는 한, 유전율과 분해인자는 장세기에 영향을 받지 않는다.

4. 시편과 전극 배열의 형태

4.1 교체 절연 재료

4.1.1 교체 시편의 기하학

재료의 유전율과 분해인자를 결정하기 위해서는, 시트 시편이 바람직하다 ; 그러나, 재료는 관 모양 형태만이 유용할 것이다.

유전율의 측정에서 높은 정확도가 필요할 때, 가장 최고의 불확정의 원인은 시편의 크기와 특히 두께이나, 이 두께는 필요한 정확도를 가진 측정이 필요할 만큼 커야 한다. 두께는 시편을 만드는 방법에 따라서 선택하고, 두께는 점에서 점으로 변화시킨다. 더 높은 정밀도를 위해서는 6mm - 12mm 정도의 더 두꺼운 시편을 사용하는 것이 바람직할 지라도, 1%의 정확도를 가지기 위해서는 1.5mm 정도의 두께면 대체적으로 충분하다. 두께는 전기적인 측정에 사용된 시편의 영역에 대칭적

으로 분포된 측정에 의해 결정해야 하고, 평균 두께의 $\pm 1\%$ 내에서 일정해야 한다. 전극을 시편의 모서리로 확장할 때, 재료의 밀도를 알고 있다면 무게를 재서 두께를 확인할 수 있다. 시편의 선택된 영역은 원하는 정확도로 측정할 수 있는 시편의 정전용량을 제공해야 한다. 잘 보호되고 차폐된 기구들을 가지고, 10pF 정전용량을 측정하는 데는 별 어려움이 없다. 많은 쓰고 있는 기구들은 약 1pF에서 해상도에 한계를 보이고 시편은 얇고 직경이 10cm나 그 이상이어야 한다.

분해인자가 작은 값으로 측정될 때, 납의 직렬저항에 의한 손실율은 가능한 작아야 하는 것이 필수적이다. 즉, 측정된 저항과 정전용량의 곱은 가능한 작아야 한다. 또한, 총 정전용량에 대해서 측정되는 정전용량은 최대한 커야 한다. 첫 번째 요점은 납의 저항을 가능한 한 낮게 유지하는 것이 필요하고, 작은 시편 정전용량을 가지는 것이 바람직하다는 것을 나타낸다. 두 번째 요점은 시편이 연결된 브리지의 가지에서 총 정전용량이 작아야 하고, 큰 시편 정전용량을 가지는 것이 바람직하다는 것을 나타낸다. 종종 최고의 절충안은 시편을 병렬에서 약 5pF 이상 연결하지 않는 측정회로를 사용하여 약 20pF의 정전용량을 가지는 시편이다.

4.1.2 전극 시스템

4.1.2.1 전극을 사용하는 시편

전극은 4.1.3절에 열거한 재료들 중의 하나를 사용하여 시편의 표면에 적용할 것이다. 보호 링을 사용하지 않고 시편의 두 면에 전극을 정확하게 반대편에 위치시키는데 어려움이 있다면, 하나의 전극이 다른 전극보다 더 커야 한다. 전극과 함께 시편을 금속지지 전극 사이에 올리고, 이것은 시편전극보다 조금 더 작아야 한다. 원반 형태나 원통형 전극의 다른 배열의 정전용량을 계산하기 위한 방정식뿐만 아니라, 이 상태의 근사 모서리 정전용량을 계산하기 위한 실험에 근거를 둔 방정식도 표 I에 나타내었다. 이러한 방정식들은 시편의 제한된 범위의 형태에서만 사용한다.

이 형태의 전극들은 시편 표면과 금속판이 매우 평평하지 않으면, 높은 주파수에서 분해인자의 측정에 사용하기에 적당하지 않다. 그림 1의 전극 기구는 또한 일정한 두께를 가진 시편이 필요하다.

4.1.2.2 전극을 사용하지 않는 시편

충분하게 낮은 표면 전도도를 가진 시편은 시편의 하나 이상의 면이 공기나 액체로 채워진 의도적 간격이 있는 전극기구에 삽입하여 전극을 사용하지 않고도 검사할 수 있다.

배열한 판형이나 원통형 전극의 정전용량을 계산하기 위한 방정식은 표 III에 주어졌다. 기구의 두 형태는 특히 사용이 편리하다 :

4.1.2.2.1 공기 중에서 마이크로미터로 제어되는 병렬 전극.

정전용량은 삽입된 시편을 사용하거나 사용하지 않거나 같은 값으로 조정할 수 있고 유전율은 측정기구의 전기적 눈금보정과 관계없이 결정된다.

보호전극은 전극기구에 포함할 수 있다.

4.1.2.2.2 유체 치환 방법

유전율이 거의 시편의 것과 같고 분해인자를 무시할 수 있는 액체에서, 측정은 평소보다 덜 정밀하게 시편 두께에 대한 정확한 정보를 요구한다. 두 가지의 유체를 번갈아 사용하여 시편 두께와 전극기구의 크기를 방정식으로부터 제거할 수 있다.

검사시편은 기초조직 전극이나 마이크로미터 전극과 같은 직경을 가진 원반형이어야 하고, 모서리

효과를 무시할 수 있을 정도로 충분히 작아야 한다. 마이크로미터 전극에서 모서리 효과를 무시할 수 있도록 하기 위해서는 시편의 직경은 시편두께가 적어도 두 배가 될 정도로 마이크로미터 전극의 직경보다 작아야 한다.

4.1.2.2.3 모서리 효과

모서리 효과가 원인이 되는 유전율의 오차를 피하기 위해서 전극기구에는 보호전극이 포함되어야 한다. 만약에 그렇다면, 두께가 적어도 시편두께보다 두 배가 되어야 하고, 전극간의 간격이 있어야 하고, 주 전극이 시편두께와 비교해서 작아야 한다. 보호 링을 사용하지 않는다면, 수정은 대체로 모서리 정전용량에 대해서 한다 ; 근사방정식은 표 I 에 보인다. 이러한 방정식들은 실험을 근거로 하여 제한된 범위의 시편형태에서만 적용한다.

선택적으로 모서리 정전용량은 사용하기 쉬운 주파수나 온도에서 보호 링을 사용하거나 사용하지 않는 측정을 통해 찾을 수 있다 ; 모서리 정전용량은 또한 다른 주파수와 온도에서도 수정하여 사용을 함으로써 충분히 정확하게 발견할 수 있다.

4.1.3 전극 구성을 위한 재료

4.1.3.1 금속박편 전극

금속박편 전극은 가능한 가장 적은 양의 규소수지나 다른 적합한 저 손실 접착제를 사용하여 시편에 적용할 수 있다. 금속박편은 두께가 100 μm 에 이르는 순수한 주석이나 납, 이러한 금속의 합금, 두께가 10 μm 보다 적은 알루미늄일 것이다. 알루미늄 박편은 어쨌든 간에, 측정결과에 영향을 미칠 전기절연 산화물 막을 형성하기 쉽다. 금 박편도 또한 쓰인다.

4.1.3.2 구운 금속전극

금속 막은 유리, 운모, 세라믹 위에서 구워지고, 이러한 재료 위에서 검사하는 것이 적합하다. 은은 공통적으로 사용하나, 높은 온도나 습도에서 위치에너지 차에 의해 이동하므로 금이 더 낫다.

4.1.3.3 뿌려진 금속으로 만들어진 전극

아연이나 구리 전극은 시편 위에 뿌려질 것이다. 그들은 거친 표면에 쉽게 순응할 것이다. 침투하지 못하는 매우 작은 구멍들이 있는 천에도 사용할 것이다.

4.1.3.4 고 진공에서 음극 기화나 기화를 적용한 금속전극

합성적인 압력이 절연재료를 변화시키거나 파손시키지 못하거나, 재료가 진공에 노출되었을 때 과도한 기체를 방출하지 못한다면, 이 공정이 사용될 것이다. 이러한 어떠한 전극의 모서리라도 빈틈없이 정의된다.

4.1.3.5 수은이나 다른 액체금속 전극

이러한 것들은 적합한 속이 빈 블럭들 사이에 시편을 고정시키거나 반드시 청결해야 하는 액체금속을 채워놓음으로써 사용할 수 있다. 수은은 높은 온도에서 사용하지 않아야 하고, 수은이 기화되면 독성을 가지기 때문에 실내온도에서 사용할 때일 지라도 예방조치가 필요하다.

목재용의 금속이나 다른 낮은 용융온도를 가지는 합금을 수은대신 사용할 수 있다. 이러한 합금들은 보통 수은 같은 독성원소인 카드뮴을 포함한다. 이러한 합금들은 적합한 환풍기나 통풍이 잘 되는 방이나 후드내에서 일어날 수 있는 건강상의 문제를 알려줄 직원이 있을 때 100 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 온도에서만 사용해야 한다.

4.1.3.6 전도성 페인트

높은 전도도를 가진 은도료, 공기로 말리거나 낮은 온도에서 구운 다양한 종류들의 확실한 형태는 상업적으로 전극재료로서 사용 가능하다. 그들은 충분히 다공성이어서 습기의 확산을 허용하므로 전극의 적용 후에 시험시편이 시험조건 상태로 되게 한다. 이것은 특히 습도효과를 연구하는데 유용하다. 도료는 적용 후에 바로 쓸 수 있게 준비되지 않는 단점을 가지고 있다. 이것은 대체로 밤새 공기로 말리거나 낮은 온도에서 구워 유전율과 분해인자를 증가시킬 수 있는 모든 종류의 용제를 제거하는 것이 필요하다.

이러한 어떠한 전극이라도 빈틈없이 정의된다 ; 이것은 도료가 칠해질 때 매우 어려우나, 이러한 한계는 도료를 뿌리거나 고정 또는 압력에 민감한 마스크를 사용하여 일반적으로 극복할 수 있다. 은도료 전극의 전도도는 높은 주파수에서 문제를 일으키기에 충분할 만큼 낮다.

도료의 용제가 시편에 지속적인 영향을 미치지 못한다는 점은 필수적이다.

4.1.3.7 흑연

흑연은 추천되지는 않으나, 특별히 낮은 주파수에서 가끔 쓰인다. 그것의 저항은 손실각의 상당한 증가에 대한 원인이 될 것이고, 액체에 부유되어 사용한다면 시편에 침투할 수 있다.

4.1.4 전극의 선택

4.1.4.1 시트 형태 시편

두 가지 이유가 중요하다 :

- a) 전극의 사용 없는 작업은 빠르고 편리하며, 전극과 시편간의 접촉의 효율성에 관한 불확실성이 없다.
- b) 상대적 유전율에서의 비례적 오차 :

$$\frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}$$

오차로부터의 결과 :

$$\frac{\Delta h}{h}$$

시편측정 h 의 측정에서 :

$$\frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r} = \frac{\Delta h}{h} \quad (12)$$

시편에 전극을 사용하나, 시편이 고정된 공간 $s \ll h$ 사이에 놓여 있다면 :

$$\frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r} = \left(1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_f}\right) \frac{\Delta h}{h} \quad (13)$$

시편이 액체 속에 담겨져 있는 유체의 상대 유전율 ϵ_f 일 때, 공기 중에서의 측정값은 1이다.

상대 유전율을 약 10을 가지는 불침투성 재료에서는, 증착된 금속전극이 사용된다. 이런 전극에서는, 전극으로 시편의 전체 표면을 덮어야 하고 보호전극이 필요하지 않다.

상대 유전율을 약 3에서 10을 가지는 재료에서 최고의 정확성을 보이는 전극은 박편, 수은이나 증착된 금속이고, 재료의 특성에 적합하게 선택되어야 한다. 그러나, 두께측정에서 충분한 정확도를 얻을 수 있다면, 시편에 전극을 사용하지 않는 방법이 편리하므로 이것이 바람직하다. 적당한 액체가 존재하고 상대적 유전율을 알고 있거나 충분한 정확도를 얻을 수 있다면 액체-함침 방법은 훌륭하다.

4.1.4.2 관 형태 시편

관 시편을 위한 가장 적절한 전극 시스템은 유전율, 벽두께, 직경, 필요한 측정치의 정확성에 의존한다. 일반적으로, 전극 시스템은 각 전극 끝에 보호전극이 있는 내부전극과 약간 좁은 외부전극으로 구성된다. 외부와 보호전극의 간격은 관 벽의 두께와 비교해서 작아야 한다. 작은 중간 직경의 관 시편을 위해서 박편이나 증착된 금속의 세 가지 띠를 관의 외부에 적용할 수 있고, 가운데 띠는 박편이나 증착된 금속의 외부전극으로서 작용하고 각 면의 한 쪽은 보호전극으로서 작용한다. 내부 전극에는 수은, 증착된 박막, 단단한 조립 주축을 사용한다.

높은 유전율의 관 시편에서, 내부와 외부전극은 관과 보호전극의 완전한 길이로 분배하여 확장할 것이다.

큰 직경의 관과 원통에서, 전극 시스템은 원형이나 직교형 부분이 될 수 있고, 관 외면의 부분으로서만이 검사된다. 그런 시편은 면 시편으로서 처리한다. 수은, 증착된 박막, 단단한 조립 주축의 내부전극은 금속 박편이나 증착된 금속의 외부와 보호전극에 쓰인다. 박편전극이 사용된다면, 관 내부에 내부 전극과 시편간에 확실한 접촉을 위해서 유연하고 늘일 수 있는 클램프가 필요할 것이다.

상당히 정확한 측정을 위해서, 시편에 전극을 사용하지 않는 시스템은 두께의 측정에서 충분한 정확도를 얻을 수 있도록 사용할 것이다. 약 10에 이르는 상대 유전율을 가지고 있는 시편에서, 가장 사용이 편리한 전극은 박편, 수은이나 증착된 금속이다. 상대 유전율이 10이상인 큰 시편에서는, 증착된 금속전극을 사용한다 ; 구워진 전극은 세라믹 관에서 사용한다. 전극은 떠나 환경의 부분으로만 관의 완전한 환경에 적용할 것이다.

4.2 액체 절연 재료

4.2.1 셀의 설계

낮은 유전 분해인자를 가진 검사 액체를 위한 전극 시스템의 기초적인 면은 : 쉽게 세척되고, 전극의 상대적인 위치에 방해가 없이 채우는 것이 필요하다면 재조립된다. 원하는 다른 면은 : 적은 양의 액체만 필요하고 , 전극재료와 액체간에 서로 영향이 없고, 온도제어가 쉽고, 중점과 연결을 알맞게 가리고, 전극의 절연을 위해서 액체에 잠기지 않는다. 셀은 측정정확도에 영향을 줄 수 있는 너무 짧은 크립페이지와 날카로운 모서리를 가지면 안된다.

셀의 요구조건은 그림 2-4에서 보인다. 스테인리스강과 붕소규산염 유리나 용해된 수정의 절연의 전극이다. 그림 2와 3의 셀은 또한 IEC 247판, 절연액체의 저항측정과 셀 세척의 방법을 위한 제안된 검사조직들에서 세부적으로 설명된 저항측정에서도 사용한다.

염화물 같은 액체의 전극재료에서 유전 분해인자의 약간의 명확한 영향이 드러난다. 스테인리스강으로 만든 전극이 항상 적합한 것은 아니다. 많은 안정된 결과는 가끔 알루미늄과 듀랄루민으로 만든 전극으로 실험하여 얻을 수 있다.

4.2.2 셀의 준비

셀은 순도를 위한 화학적 검사나 낮은 유전율과 유전 분해인자를 알고 있는 액체 표본에서 올바른 결과를 이끌 것인지 확인하여 미리 불안정한 화합물을 포함하고 있지 않다는 것을 확인한 하나 이상의 적당한 용제나 계속적인 용제의 투입으로 세척해야 한다. 조직이 절연 재료의 몇몇 형태의 검사에 사용될 때, 부드러운 연마 세척제와 오염물질의 제거에서 항상 결과를 보이지 않는

용제로 사용하는 물로 조직의 전극표면을 세척하는 것이 필요하다. 만약 용제를 연속적으로 사용한다면, 최고 끓는점이 100°C 보다 낮은 분석적인 평점의 석유 에테르를 사용하거나, 대신에 낮은 유전율과 유전 분해인자를 알고 있는 액체에서 정확한 값을 주고 화학적으로 검사하려는 액체와 유사한 어떤 용제로 끝을 내야 한다. 이 기술은 아래에서 나타내었다.

셀은 재 유출작용이나 깨끗한 용제에서 교반 작용으로 반복적으로 세척하는 선택된 용제로 완전하게 모든 부분을 세척하여 제거한다. 모든 부분은 용제를 사용하지 않고 흔들고 거의 110°C 에서 30분 동안 오염되지 않은 오븐에 놓는다.

부분은 실내온도 이하의 수 $^{\circ}\text{C}$ 에서 식히고 재배열시킨다. 셀은 액체를 채워서 측정하며, 수분동안 채워두고 비우고 다시 채우는 방법을 쓴다. 절연체는 액체에 의해서 젖어서는 안 된다.

모든 단계에서, 부분은 세척 갈고리나 집게로 조정하여 손으로 내부표면을 만지지 않는다.

주

1. - 같은 품질을 가진 기름으로 일상적인 검사를 하는 동안, 위에서 설명한 세척과정은 찌꺼기가 떨어지지 않는 마른 종이로 각 검사 후에 문지른다.
2. - 각자 불이나 독성물질에 대한 적당한 예방조치는 용제를 사용할 때 반드시 관찰해야 한다 : 벤젠, 탄소 삼염화물, 톨루엔, 크실렌은 특별히 독성이 강하다. 게다가, 염화물 용제는 빛에 의해 분해된다.

4.2.3 셀의 보정

액체 유전체의 상대적 유전율 결정에서 높은 정확도가 필요할 때, “전극 상수”는 벤젠과 같이 상대적 유전율을 알고 있는 액체의 눈금보정으로 사전에 결정할 수 있다.

“전극 상수” C_c 는 다음과 같은 식으로 결정한다 :

$$C_c = \frac{C_n - C_0}{\epsilon_n - 1} \quad (14)$$

이 때 :

C_0 = 공기 중에서 배열한 전극의 정전용량

C_n = 눈금보정 액체로 채워져 배열된 전극의 정전용량

ϵ_n = 눈금보정 액체의 상대 유전율

C_0 와 C_c 의 값의 차이에서 수정 정전용량이 주어진다:

$$C_g = C_0 - C_c \quad (15)$$

모르는 액체의 상대 유전율 ϵ_x 는 다음과 같이 계산한다 :

$$\epsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_c} \quad (16)$$

여기서 :

C_x = 검사할 액체로 채워져 배열된 전극의 정전용량

ϵ_n 을 알고 있는 온도에서 C_0 , C_n , C_x 값이 결정된다면 ϵ_x 의 최고 정확도가 얻어진다.

설명된 방법의 응용은 기생 정전용량이나 전극간의 간격 차에 대한 정밀하지 않은 측정을 통해서 오차를 제거하여 액체 유전체의 상대적 유전율 결정에서 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 증명한다.

5. 측정방법의 선택

유전율과 분해인자를 측정하기 위한 방법은 두 가지로 나눌 수 있다 :
무존재 방법과 공명 방법.

5.1 Null methods. 무존재 방법은 약 50MHz에 이르는 주파수에서 사용된다. 유전 율과 분해인자의 측정을 위해서 대체기술을 사용할 수 있다 ; 브리지가 시편에 연결되거나 연결되어 있거나 망상조직의 한 가지에 부착하여 균형을 이룬다. 망상조직은 일반적으로 이동 브리지를 병렬-T로 연결한 세링 브리지를 사용한다. 이동 브리지는 어떤 부가적인 성분이나 작동 없이 보호전극을 사용하는 이점을 가지고 있다 ; 다른 망상조직과 비교해서 불이익이 없다.

5.2 Resonance methods. 공명방법은 10kHz에서 수백 MHz의 범위에서 사용할 수 있다. 이 방법 에는 예외 없이 대체방법이 있다. 공통적으로 쓰이는 방법은 장방향-변화 방법이다. 이 방법은 보호전극에 사용하는데 있어 쉽게 적응시킬 수 없다.

주 - 전형적인 브리지와 회로의 예는 부록에서 찾을 수 있다. 이 목록은 결코 완전한 것이 아니다. 더 자세한 브리지에 대한 설명과 측정방법은 논문과 그런 기구를 만드는 회사의 팸플렛에서 찾을 수 있다.

6. 시험절차

6.1 시편의 준비

시편은 결정된 초기 상태를 얻기 위해 고체재료에서 자르거나, 적합하게 표준화된 기술에 의해 준비한다.

두께의 측정은 $\pm(0.2\% + 0.005mm)$ 의 허용오차를 가지고 실행한다. 측정 지점은 시편 전역에 일정하게 분포한다. 필요하다면, 효율적인 영역이 또한 결정된다.

6.2 측정 조건

측정 조건은 세부사항과 관계 있게 일치하여 만든다.

6.3 측정

전기적 측정은 뒤에 오는 이 제안과 장비를 사용하는 제작자의 제안에 따른 방법을 사용하여 적합하게 만든다.

1MHz와 그 이상의 주파수에서, 연결 납의 인덕턴스가 결과에 영향을 주지 않도록 주의해야만 한다. 동축 납의 시스템이 유용하다.

7. 결과

7.1 상대 유전율 ϵ_r

자체 전극에 의해 제공된 시편의 상대 유전율은 방정식 (1)에 의해 계산된다. 보호전극을 사용하지 않는 시편에서 작은 양의 모서리 정전용량 C_e 를 포함하고 있는 측정된 정전용량 C'_x 에 따

라 상대적 유전율은 :

$$\varepsilon_r = \frac{C'_x - C_e}{C_0} \quad (17)$$

여기서 :

C_0 와 C_e 는 45페이지에 있는 표 I 에서 계산할 수 있다.

필요하다면, 수정은 시편의 정전용량을 접지 시켜 스위치 접촉간의 정전용량과 등가의 직병렬 정전용량간의 차이를 비슷하게 만들 수 있다.

마이크로미터 전극이나 접촉되지 않은 전극사이에서 측정된 시편의 상대적 유전율은 표 II, III에서 적합한 방정식을 골라 계산한다.

7.2 유전 분해인자 $\tan \delta$

유전 분해인자는 특정한 측정배열의 사용에서 주어지는 방정식과 일치시켜 측정된 값으로부터 계산될 것이다.

7.3 기대되는 정확도

5편에서 개략한 방법들과 부록에서 유전율 $\pm 1\%$ 와 분해인자 $\pm(5\% + 0.005)$ 의 정확도 등급을 보인다. 이러한 정확도는 적어도 세 가지 요인에 영향을 받는다 : 정전용량과 분해 인자에서 관찰의 정확성, 전극배열에서 원인한 양의 조절에 대한 정확성, 직접적인 전극간 진공 정전용량의 계산에서 정확성.

적당한 상태와 낮은 주파수에서, 정전용량은 $\pm(0.1\% + 0.02\text{pF})$ 과 $(2\% + 0.00005)$ 의 정확도로 측정할 수 있다. 높은 주파수에서 이러한 제한은 정전용량에서는 $\pm(0.5\% + 0.1\text{pF})$, 분해인자에서는 $(2\% + 0.0002)$ 으로 증가할 것이다.

보호전극을 가진 유전체 시편은 직접적인 전극간 진공 정전용량의 계산에서만 오차를 가진다. 보호되는 전극과 보호전극간의 너무 넓은 간격에서 기인한 오차는 수십 %일 것이고, 조절은 수 %에서 계산할 것이다. 시편의 두께측정에서 오차는 $\pm 0.005\text{mm}$ 로 가정할 때, 평균두께 1.6mm에서 수십 %의 양이다. 원형시편의 직경은 $\pm 0.1\%$ 의 정확도로 측정할 수 있으나, 정방형으로서 들어간다. 이러한 오차들을 결합하여, 직접적인 전극간 진공 정전 용량은 $\pm 0.5\%$ 의 정확도를 결정할 수 있다.

표면에 전극을 적용한 시편의 정전용량은 직접적인 전극간 진공 정전용량과 같이 조절이 필요 없고, 충분히 작은 직경에서도 시편을 제공하는 마이크로미터전극으로 측정한다. 두 끝점을 가진 시편이 다른 방법으로 측정될 때, 모서리와 바닥 정전용량의 계산은 시편의 정전용량이 2%에서 40%인 동안 심각한 오차를 포함한다. 이러한 정전용량의 현재 지식을 통해서, 모서리 정전용량은 10%의 오차를 가지고 바닥 정전용량은 25%의 오차를 보인다. 총 오차는 수십에서 수 %이다. 어떠한 전극도 접지 되지 않았을 때, 바닥 정전용량은 대단히 줄어든다.

마이크로미터 전극에서, ± 0.0003 의 실제 값 안에서 0.03의 차수로 ± 0.0005 안에서 0.0002의 차수로 분해인자를 측정하는 것이 가능하다. 분해인자의 범위는 일반적으로 0.0001에서 0.1이나, 0.1까

지 늘어날 것이다. 10MHz와 20MHz 사이에서 분해인자 0.0002를 감지할 수 있다. 상대적 유전 율은 1과 5사이에서 $\pm 2\%$ 의 실제 값을 측정할 수 있다. 정확도는 직접적인 전극간 진공 정전용량의 계산에서 필요한 측정의 정확도와 마이크로미터전극 계의 오차에 의해서 제한되어진다.

8. 시험 성적서

결과보고서에서 다음에 오는 정보는 관계가 있을 때, 주어질 것이다 :

- 운반된 형태 뿐 아닌 절연재료의 형태와 구분
검사시편의 크기와 샘플링 방법, 형태, 샘플링 시간
- 시편조절의 방법과 지속
- 시편에 적용한 전극배열과 형태
- 측정 기구
- 검사하는 동안의 온도와 상대적인 습도, 시편의 온도
- 인가된 전압
- 인가된 주파수
- 상대 유전율
- 유전 분해인자
- 시험일

필요하다면, 온도와 주파수에 관계가 있는 상대 유전율과 분해인자의 값과 손실지표에서 계산된 값이 주어질 것이다. 모든 경우에 필요하거나, 적합한 것은 아니다.

부속서 시험용 기구

1. 셰링 브리지 (Schering Bridge)

1.1 일반사항

Schering 브리지는 유전율과 유전손실을 측정하는데 가장 전통적인 소자를 대표한다. 전력주파수에서 100kHz에 이르는 주파수 범위와 50pF에서 1000pF의 정전용량을 사용한다.

이것은 네 개의 팔로 이루어져 있는데, 그 중 두 개의 팔은 주로 용량 성을 채고 (모르는 정전용량 C_X 와 손실이 없는 정전용량 C_N), 다른 두 개의 팔은 반응하지 않는 저항 R_1 과 R_2 를 구성하여, 마침내 모르는 정전용량 C_X 반대쪽에 위치한 저항 (R_1)으로 정전용량 (C_1)을 단락 시킨다. 이것은 최종 정전용량이고 일반적으로 두 저항 R_1 과 R_2 중 적어도 하나를 조정한다.

저항과 정전용량을 직렬로 연결한 등가표현을 정전용량 C_X 를 위해 선택한다면, 그림 5에 묘사된 브리지의 균형은 다음과 같다.

$$C_S = C_N \frac{R_1}{R_2} \quad (18)$$

$$\tan \delta_X = \omega C_S R_S = \omega C_1 R_1 \quad (19)$$

만약에, 저항 R_2 가 정전용량 C_2 에 의해서 단락 된다면, $\tan \delta$ 는 다음과 같이 표현한다.

$$\tan \delta_X = \omega C_1 R_1 - \omega C_2 R_2 \quad (20)$$

브리지의 실험적인 이해는 주파수 범위에 따라서 분명하게 달라질 것이다. 50pF에서 1000pF의 정전용량이 50Hz에서 약 $60\text{M}\Omega \sim 3\text{M}\Omega$ 과 100kHz에서의 약 $30\text{kHz} \sim 1.5\text{kHz}$ 의 임피던스를 나타낸다는 사실의 결과이다.

후자의 경우, 전력주파수의 범위가 아닌 주파수에서 브리지의 네 팔은 쉽게 같은 양의 임피던스를 가질 것이다. 우리는 낮고 높은 주파수에서 두 가지 다른 사용형태를 구별하여 이끌 것이다.

1.2 저주파수 브리지

감도의 이유뿐만 아니라, 낮은 주파수에서 유전손실의 문제에 거의 광범위하게 흥미를 이끄는 높은 전압 기술이기 때문에 이 브리지는 보통은 높은 전압브리지로 사용한다. 용량성과 측정 팔 간의 임피던스 양의 매우 큰 차이는 결과적으로, 정전용량을 가로질러 발견되는 거대한 부분에 의해서 전압의 분포에서 비슷한 불균형의 결과가 된다. 위에서 주어지는 균형조건은 낮은 전압 성분이 높은 전압 성분이 가려질 때만이 유효하다 ; 이 차폐는 균형의 안정성을 확인하기 위해서 반드시 접지 되어야 한다. 54페이지에 있는 그림 6에서 보이는 것과 같이, 차폐는 C_X 와 C_N 의 보호된 정전용량의 사용에 적합하고, C_N 의 보호에 부분적으로 절대 필요하다.

접지공정을 위한 선택은 대체로 브리지의 두 가지 형태를 따른다.

1.2.1 간단한 차폐 셰링 브리지

브리지의 B점은 차폐와 접지를 연결한다.

차폐는 높은 전압 면을 향해서 보호하는 역할을 하나, 감지기 팔의 끝점 M과 N을 유도하는 다양한 도체와 차폐간의 측정 팔을 가로질러 발생하는 전압을 조건으로 정전용량을 증가시킨다. 이것은 특별히 정전용량 C_X 와 C_N 이 다를 때, 오차는 $\tan \delta$ 가 일반적으로 0.1%의 정확도를 가지도록 제한될 것이다.

1.2.2 와그너 접지 회로의 세링 브리지

이것은 그림 6에 나타나는 감지기 팔과 차폐와 같은 위치에너지를 가지는 것에 대한 해결책이다. 이것은 첨가한 외부 팔을 사용하여 증명하고 중간 점 P는 차폐와 접지에 연결한다. 첨가한 팔은 브리지의 용량성과 측정 팔을 가로지르는 전압이 이상적이게 하기 위해서 붙인다. 이것은 주 브리지 AMNB와 보조 브리지 AMPB의 두 브릿지가 동시에 균형을 이루는 해결책이라는 것이 명백하다. 이 곱 균형은 감지기가 이 브리지에서 저 브리지로 이동하는 연속적인 근사에 의해 닿는다. 일차의 허용오차를 얻는 이 방법은 현재에 실험에서 브리지에 사용되는 성분의 정밀도에 의해서만 제한된다.

접지로부터 절연된 공급원의 두 끝단의 필요성이 고려되는 특정한 해결이다. 이것이 불가능하다면, 더 복잡한 배열이 필요할 것이다.

1.3 고주파수를 위한 세링 브리지

이 브리지는 일반적으로 적당한 전압에서 작동하고 더 유연할 것이다 ; 정전용량 C_N 는 매우 자주 조정하고, 대체방법은 더 쉽게 채택할 수 있다.

차폐와 와그너 접지회로는 부적절한 용량성 효과가 주파수에서 증가하는 이득 때문에 여전히 사용한다.

1.4 감지기의 설명

세링 브리지의 B점을 접지 했을 때, 비대칭 입력을 가진 감지기는 반드시 피해야 한다.

그러한 감지기는 접지 되어있는 입력 단이 항상 B점에 연결되어 있는 와그너 접지 회로에 쉽게 사용할 수 있다.

2. 이동브리지

2.1 일반사항

이 브리지는 세링 브리지보다 더 간단한 원리를 기본으로 한다. 기초적인 배열은 그림 7에 보인다.

균형을 이루고 있을 때, Z_X 와 Z_M 간의 비율은 U_1 과 U_2 의 전압 비율과 일치한다. 이 비율을 알고 있다면, Z_X 는 Z_M 에서 쉽게 유도할 수 있다. 이상적인 브리지에서, U_1 / U_2 의 비율은 단일 수 k 이고, $Z_X = kZ_M$; 특별히, Z_M 의 독립변수는 δ_X 에서 직접 산출한다.

세링 브리지를 넘어선 이동 브리지의 중요한 이점은 직접 지급하고, 차폐의 합리적인 접지와 다른 어떤 부가적인 보조 팔이 필요 없이 보호전극을 사용한다는 것이다.

이 브리지는 전력 주파수부터 수십 MHz에 이르는 고 주파수에 이르기까지 사용한다 ; 이 범위는 세링 브리지보다 범위가 넓으나, 적용되는 범위가 다르다.

2.2 저주파수 브리지

이것은 또한 높은 전압 브리지이고, 이 기술은 변압기와 관계가 있다.

두 가지 방법이 사용된다 :

- 1) 공급되는 전압은 직접 권선의 하나에 적용하고, 변압기의 2차 코일로 작용한다.
- 2) 분리된 2차 회로나 하나의 2차 권선이 브리지의 권선을 구성하는 분리된 1차 권선에 사용한다.

변압기를 측정하면, 브리지는 오차를 보일 것이고, 이러한 오차는 부하에 영향을 받는다. 가장 중요한 것은 실제로 $\tan\delta$ 의 측정에 직접적으로 영향을 받는 전압간의 상 오차이다.

브리지를 조정하는 것은 필수적이다. 손실이 없는 C_N 으로 Z_X 를 대체한다. C_N 과 C_X 가 같다면, 방법은 실험적으로 대체하고, 눈금조정이 관련이 있다. C_N 이 적합할 지라도, 눈금조정에서 부하 변화를 평가하는 C_X 는 유효하지 않을 것이다. 일정한 부하에서 작동하는 것이 가능하다면, 그림 8에서 가리키는 것처럼, C_N 이 측정됐을 때 C_X 에 연결한 스위치는 접지하고 역으로 가능하다 ; 높은 전압 권선을 위한 일정한 부하는 이들의 합이다.

게다가, 눈금조정이 전압 U_1 을 가로질러 순수한 정전용량 C_N 을 연결하여 눈금조정을 했을 때, 전압 U_2 을 따르는 측정된 정전용량 Z_M 은 아래의 것으로 구성할 것이다 :

- 1) U_1 과 U_2 가 같은 상을 가질 때, 순수한 정전용량 C_M ;
- 2) 전압 U_2 가 전압 U_1 보다 빠를 때, 정전용량 C_M 과 저항 R_M ;
- 3) 전압 U_2 가 U_1 보다 느릴 때, 저항 R_M 은 음수이다. 이것은 균형을 회복하기 위해서 전류의 저항성 성분이 U_1 면에서 유도된다. 그러나, 높은 전압을 위한 매우 높고 적합한 저항은 실험에서 존재하지 않고, 이 저항성분은 대체로 보조 권선을 통해서 얻어진다.

주 - C_N 을 가진 직렬 저항의 첨가는 다음과 같은 이유로 불가능하다 : 캐패시터 아래에 삽입했다면, 측정 전압의 위치에너지와 C_N 의 보호는 더 이상 같지 않다 ; 높은 전압 도체에 C_N 전에 삽입했다면, 저항에서의 전류는 또한 보호 회로 전류를 포함하고 눈금조정이 가능하지 않을 것이다.

이러한 견해는 또한 두 번째 경우를 위한 위에 설명한 R_M 에 적용할 수 있다. 그러나, 낮은 전압 면에서, 캐패시터가 단락된 높고 가변하는 값을 가진 저항은 그림 9의 아래쪽에 점을 찍은 선에서 설명한 R_1, R_2, R' 의 별형 연결을 사용하여 쉽게 얻을 수 있다.

$$R_M = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R'} \quad (21)$$

측정에서 조정 가능한 정전용량 C_M 은 순수하거나 낮고 잘 알려진 손실이어야 한다.

2.3 고주파수 브리지

앞에서 말한 고려들의 몇 가지를 다시 적용할 것이나, 브리지는 더 이상 높은 전압에서 일반적으로 사용하지 않을 것이고, 전압을 가로지르는 팔은 쉽게 조정할 수 있는 성분에 허용될 것이다 ; 대체방법을 쉽게 사용한다.

이것은 더욱이 분리된 1차 권선을 가진 브리지가 소스를 따르고 감지기가 상호 변화한다. 균형은 2차 권선 에서 상대방의 전류의 보상에 관련이 있다.

2.4 감지기의 설명

감지기 팔의 한 쪽 끝이 항상 접지 되어 있는 동안, 비대칭 입력을 가진 감지기를 사용하는 것은 불필요하다.

3. 병렬 T 망상조직

병렬 T 망상조직은 진동자에서 두 개의 T 망상조직이 같고 반대쪽에 감지기 입력이 있는 감지기 까지 흐르는 전류가 있는 브리지 회로이다. 이러한 회로에서, 진동자와 감지기는 각각 한 단을 접지에 연결한다 ; 가능한 몇 가지의 회로에서, 시편과 균형을 맞추는데 사용하는 다양한 성분도 또한 각각의 한쪽 끝을 접지 해야 한다.

그림10은 저항과 캐패시터 만을 사용하여 제작한 가장 간단한 병렬 T 망상조직을 보여준다. 그림 11은 유전체 측정에서 가장 공통적으로 사용하는 회로이다 :

$$\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_N} + \frac{1}{C_B} = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N R_F} \quad (22)$$

$$R_T \left(1 + \frac{C_H}{C_B}\right) = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N R_F} \quad (23)$$

실험에서, 가변 캐패시터는 끝단 X에 연결하고, X, C_V , 전기 전도도는 확실한 값 L과 R_F 로 수정한다. 이 조건에서 회로는 균형을 이룬다 ; 시편은 X에 연결하고, X와 균형은 정전용량 C_V , C_H 의 변화에 의해서 다시 얻어진다.

- 1) 시편의 정전용량은 ΔC_V 의 감소분과 같다 ;
- 2) 시편의 전기 전도도는 :

$$G = \frac{\omega^2 C_A C_N R_T}{C_B} \square \Delta C_H \quad (24)$$

- 3) 시편의 분해인자는 :

$$\tan \delta = \frac{\omega C_A C_N R_T}{C_B} \square \frac{\Delta C_H}{\Delta C_V} \quad (25)$$

여기서 : ΔC_H 는 C_H 의 증가분.

이러한 망상조직은 편리하게 50kHz와 50MHz의 주파수 범위에서 제작할 수 있고, 쉽고 편리하게 차폐할 수 있다. 심각한 피해는 균형이 주파수에 너무 민감해서 공급한 주파수의 고주파가 균형을 잃는 것이다. 넓은 범위의 주파수를 다루기 위해서, 성분은 변화하거나 교환되어야 한다. 가장 높은 주파수에서 연결선의 임피던스와 스위치는 확실한 오차가 유도 될 것이다.

4. 공명발생법

공명발생방법은 10kHz에서 260MHz의 범위에서 사용한다. 작고 알고있는 전압이 유도될 때, 공명회로를 가로질러 나타나는 전압의 측정을 기본으로 한다. 56페이지에 있는 그림 12는 공통 전압으로 공명회로를 진동자에 결합한 일반적인 회로를 보여준다. 결합의 다른 방법은 동등하게 사용할 수 있다.

공정은 필요한 주파수에서 알고있는 값의 입력 전압이나 전류에 맞추고 ; 최대 반응을 일으키도록 회로를 조정하고, 나타나는 전압 U_0 를 관찰한다. 시편을 적절한 끝점에 연결하고, 가변 캐패시터를 맞추고 관찰된 전압의 새로운 값에 의해 회로는 최대 반응을 다시 얻는다.

시편을 연결하여 다시 조정한 후에, $R_L G \ll 1$ 에 의해서 총 캐패시터는 거의 일정하다. 시편의 정전용량은 거의 ΔC 이고, 가변 캐패시터 정전용량 변화이다.

시편의 분해인자는 :

$$\tan \delta \approx \frac{C_t}{\Delta C} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (26)$$

이 때, C_t 는 전압계와 인덕터의 자기 정전용량을 포함한 회로의 총 정전용량이고, Q_1 , Q_0 는 시편에 연결했을 때와 연결하지 않았을 때의 Q 값이다.

이 방법에서 오차의 중요한 원인은 두 측정기구의 눈금조정과 특히 가변 캐패시터와 시편 사이의 권선에서 유도되는 원하지 않는 임피던스이다. 높은 값을 가지는 분해인자에서, 조건 $R_L G \ll 1$ 를 적용하지 않고, 위에서 인용한 근사방정식은 잘 되지 않는다.

5. 허용변화법

그림 1에서 보인 마이크로미터 전극 계는 연결선의 저항과 전도도의 직렬연결과 캐패시터의 측정에 의해서 높은 주파수에서 원인이 되는 오차를 제거하기 위해서 Hartshorn이 개발하였다. 시편에 오가는 동축을 사용하여 목적을 달성하였고, 검사 시편이 안에 있거나 밖에 있거나 상관없이 전도도와 저항을 일정하게 유지한다. 전극과 같은 크기이거나 작은 시편은 전극 사이에 끼워둔다. 시편과 전극의 표면이 부분적으로 겹치거나 바닥이 매우 평평하지 않으면, 금속 박편이나 동등한 재료는 전극 계를 사용하기전에 시편에 적용해야 한다. 시편을 제거하고 전극 계는 마이크로미터 전극들을 더 가깝게 움직여서 같은 정전용량을 가지도록 만들 수 있다.

마이크로 전극 계를 정전용량의 변화에 대해서 조심스럽게 조정할 때, 모서리 정전용량, 접지 정

전용량과 연결 정전용량을 제거한다. 불이익은 캐패시터 조정이 가변 다 판 캐패시터만큼 정밀하지 않고, 직접 읽을 수 없다.

선에서 직렬 연결된 전도 도와 저항의 효과가 무시되는 1MHz보다 낮은 주파수에서, 마이크로미터 전극의 캐패시터 조정은 병렬 연결된 표준 캐패시터로 교환한다.

시편 안팎의 캐패시터의 변화는 이 캐패시터의 범위에서 측정된다.

마이크로미터 전극 계의 부수적인 오차의 원인은 전극의 조정을 포함하는 모서리 정전용량이고, 전극과 같은 직경을 가지는 유전체의 존재로 미세하게 변화한다. 이 오차는 전극의 두께보다 두 배정도 작은 직경을 가지는 시편을 제작하여 제거한다.

이 시편은 우선 마이크로미터 전극사이에 끼우고, 측정을 맞추기 위해서 조직을 사용한다. 시편을 제거하고 시편의 총 정전용량을 마이크로미터 전극을 더 가깝게 이동하거나 표준 캐패시터를 재 조정하여 원래의 값으로 되돌린다.

시편의 정전용량 C_p 은 표 II에 따라 계산한다.

분해인자는 :

$$\tan \delta_1 = \frac{(\Delta C_1 - \Delta C_0)}{2C_p} \quad (27)$$

이 때 : ΔC_1 는 감지기 입력 전압이 공명 전압의 $\sqrt{2}/2$ 과 같도록 주어지는 가변 캐패시터 M_2 의 각 면에서 읽혀지는 두 캐패시터 간의 차이이다.

ΔC_0 는 시편을 제거한 후의 같은 차이이다.

이 공정을 진행하는 동안 검사 주파수가 변하지 않도록 주의한다.

주 - 시편에 적용한 전극의 저항은 높은 주파수에서 쉽게 확인되고, 시편이 평평하지 않거나 일정한 두께를 가지지 않았다면, 분해인자의 가짜 증가의 원인이 된다. 시편의 표면 평평도에 따라서 주파수를 확인할 수 있으나, 10MHz보다 낮다. 정전용량과 분해인자의 부가적인 측정에서 반드시 주파수는 10MHz이어야 하고, 전극이 없는 시편을 위로 움직여야 한다. 실제 분해인자는 :

$$\tan \delta = \frac{C_p}{C_w} \tan \delta_w \quad (28)$$

이 때, C_p 는 전극이 있는 시편의 정전용량이다.

6. 차폐 기구

기구의 두 점 사이에 접지 되어있는 차폐는 둘 간의 어떤 정전용량이라도 제거하고, 둘로부터 정전용량을 접지에 대체한다. 선의 차폐와 성분은 중요하지 않은 어떤 지점의 정전용량이 접지 되어 있는 회로에 자유롭게 사용할 수 있다 ; 왜냐하면 접지가 있는 세링 브리지와 이동브리지 같은 종류의 회로.

다르게 말해서, 시편이 안에 있건 밖에 있건 간에 교환되지 않는 회로의 부분이 있는 대체 브리지에서 필요하지 않다.

실험에서, 이러한 두 가지 고려는 차폐할 수 있는 시편, 진동자, 감지기에 적용한다. 가능한 기구의 많은 부분을 금속 차폐 안에 둘러싸서 관찰자의 몸과 회로 사이에서 정전용량의 변화를 막아야 한다

100kHz보다 큰 주파수를 위해서, 오가는 선은 가까워서 자기와 상호 전기 전도도를 최소화해야 한다 ; 몇 개의 선들이 서로 연결되려고 한다면, 짧은 선의 전도도를 확인할 수 있는 동안 점에서 가능한 가깝게 만나야 한다.

만약에 스위치를 시편의 연결을 끊는데 사용한다면, 개방이 측정에서 오차를 발생하지 않을 때, 접촉간의 정전용량이다. 세 개의 끝단을 가진 측정시스템에서 접지 되어있는 접촉이 개방되어 있을 때, 접촉들 사이에 접지 되어있는 차폐를 삽입하거나 직렬 연결된 두 스위치를 사용하거나 연결되어 있지 않은 전극을 접지 하여 얻을 수 있다.

7. 브리지를 위한 진동자와 감지기

7.1 교류전압원

발전기는 필요한 전압과 전류를 공급 가능한 전원으로 사용한다.

7.2 감지기

뒤에 열거한 감지기의 형태가 유용하다. 증폭기를 사용하는 모든 감지기는 감도를 증가시킨다 :

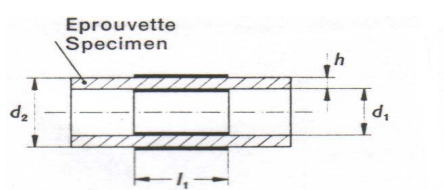
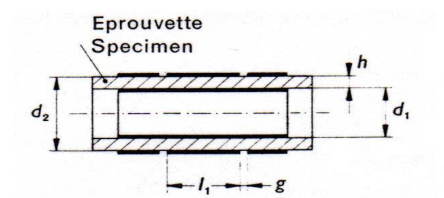
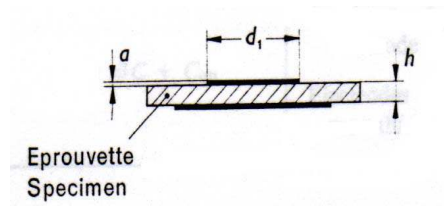
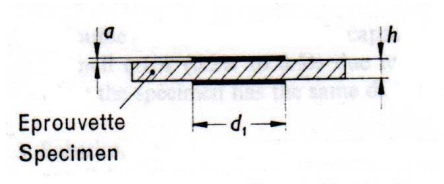
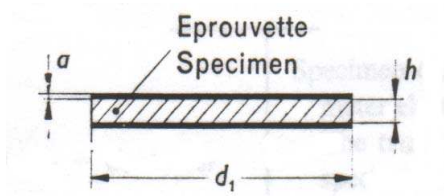
- 1) 전화 (필요하다면, 주파수 변환기가 있는).
- 2) 전자 전압계나 파동 분석기.
- 3) 음극선 진동기록기.
- 4) "Magic Eye" 조정 지시기.
- 5) 진동 갈바노미터 (낮은 주파수에서만 사용하는).

변압기가 임피던스를 일치하거나 브리지 출력의 각 면을 접지하기 위해서 감지기와 브리지 조직 사이에서 필요할 것이다.

고조파는 균형지점에서 애매하거나 변할 것이다. 이 문제점은 증폭기를 조정하거나 낮은 주파수를 통과하는 여과기를 사용하여 피할 수 있다. 측정된 주파수의 2차 고조파에 반하여 40dB의 구별이 적합하다.

8. 주파수 범위

방법	원하는 주파수 범위	시편의 형태	비고
1. Schering 브리지	0.10MHz 까지	판이나 관형	
2. 이동 브리지	15 Hz - 50 MHz	판이나 관형	
3. 병렬 T 망상조직	50 kHz - 30 MHz	판이나 관형	
4. 공명발생방법	10 kHz - 260 MHz	판이나 관형	
5. 자화변화방법	10 kHz - 100 MHz	판이나 관형	



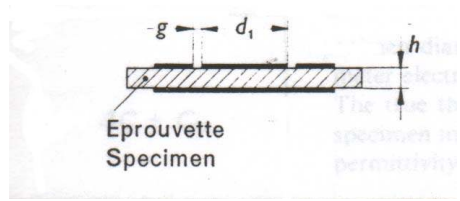


표 I
진공 정전용량과 모서리 보정의 계산

(1)	직류 상호전극 정전용량 (단위 : pF 과 cm) (2)	모서리 정전용량의 보정 (단위 : pF 과 cm) (3)
1. 보호전극을 가진 판형 전극		
	$C_0 = \varepsilon_0 \square \frac{A}{h}$ $= 0.08854 \frac{A}{h}$ $A = \frac{\pi}{4} (d_1 \div g)^2$	$C_e = 0$
2. 보호전극이 없는 판형 전극		
a) 전극의 직경 = 시편의 직경		$a \ll h \text{ 일때,}$ $\frac{C_e}{P} = 0.029 - 0.058 \log h$ $P = \pi d_1$
b) 시편보다 작고 같은 전극		$\frac{C_e}{P} = 0.019\varepsilon_1 - 0.058 \log h$ $+ 0.010$ $P = \pi d_1$
c) 같지 않은 전극		$\frac{C_e}{P} = 0.041\varepsilon_1 - 0.077 \log h$ $+ 0.045$ $P = \pi d_1$
3. 보호전극을 가진 원통형 전극		
	$C_0 = \varepsilon_0 \square \frac{2\pi(l_1 \div g)}{\ln d_2 / d_1}$ $= 0.2416 \frac{(l_1 \div g)}{\ln d_2 / d_1}$	$C_e = 0$
4. 보호전극이 없는 원통형 전극		
	$C_0 = \varepsilon_0 \square \frac{2\pi l_n}{\ln d_2 / d_1}$ $= 0.2416 \frac{l_1}{\ln d_2 / d_1}$	$C_0 = \varepsilon_0 \square \frac{\pi}{4} \square \frac{d_1^2}{h}$ $= 0.06954 \frac{d_1^2}{h}$

표 II

시편 정전용량의 계산 - 마이크로미터 전극 접촉

시편 정전용량	언급	기호의 정의
1. 병렬로 연결된 기준 캐패시터에 의한 시편 정전용량의 치환		
$C_p = \Delta C + C_{or}$	시편 직경은 전극 직경의 2r보다 작아야 한다. 시편의 실제 두께 h와 면적 A는 유전율을 계산하는데 사용한다.	C_p = 시편의 병렬 정전용량 ΔC = 기준 콘덴서의 정전용량 증가 C_r = 공간 r에서의 마이크로미터 전극의 보정 정전용량
2. 시편의 제거 후에 전극의 공간을 줄여 시편 정전용량의 치환		C_s = 공간 s에서의 마이크로미터 전극의 보정 정전용량
$C_p = C_s - C_r + C_{or}$	시편 직경은 전극 직경의 2r보다 작아야 한다. 시편의 실제 두께 h와 면적 A는 유전율을 계산하는데 사용한다.	C_{or}, C_{oh} = 공기 정전용량 (표1의 1)식으로 계산) r = 시편과 전극의 두께 h = 시편의 두께
3. 병렬로 연결된 기준 캐패시터에 의한 시편 정전용량의 치환		상대 유전율 = $\epsilon_r = \frac{C_p}{C_{oh}}$
$C_p = \Delta C + C_{oh}$	시편 직경은 전극 직경과 같다. 시편에 적용한 전극의 두께는 0이다.	

표 III

상대 유전율과 유전정점의 계산-비접촉 전극

상대적 유전 율 (1)	분해인자 (2)	기호의 정의 (3)
1. 공기 중의 마이크로미터 전극		
$\varepsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\Delta C}{C_1} \square \frac{h_0}{h}}$ $\varepsilon_r = \frac{h}{h - (h_0 - h_0')}$	$\tan \delta_X = \tan \delta_c + M \square \varepsilon_r \square \Delta \tan \delta$	ΔC = 시편이 삽입됐을 때의 정전용량의 변화 C_1 = 시편의 정전용량 C_f = 유체의 정전용량 C_0 = 진공 정전용량 A = 시편의 단면적 ε_f = 시험온도에서 유체의 상대 유전율 ε_0 = 전기적 상수 $\Delta \tan \delta$ = 시편분해인자의 증가 $\tan \delta_c$ = 시편의 요인 $\tan \delta_X$ = 시편의 계산된 분해 인자
2. 판형 전극 - 유체 변형		
$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_f}{1 + \tan \delta_X} \square$ $\left\{ \frac{(C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)]} \right\}$	$\tan \delta_X = \tan \delta_c + M \square \Delta \tan$ $\left\{ \frac{(C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)]} \right\}$	
시편의 분해인자가 0.1보다 작으면 아래의 식이 쓰인다.		
$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_f}{1 - \frac{\Delta C}{\varepsilon_f \square C_0 + \Delta C} \square \frac{h_0}{h}}$	$\tan \delta_X = \tan \delta_c + M \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \square \Delta \tan \delta$	
3. 원통형 전극		
$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_f}{1 - \frac{\Delta C}{C_1} \square \frac{\log d_3/d_0}{\log d_2/d_1}}$	$\tan \delta_X = \tan \delta_c + \Delta \tan \delta$ $\square \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \left[\frac{\log d_3/d_0}{\log d_2/d_1} - 1 \right]$	d_0 = 내부 전극 외경 d_1 = 시편의 내경 d_2 = 시편의 내경 d_3 = 외부 전극의 내부 직경
4. 두 유체 방법 - 판형 전극		
$\varepsilon_r = \varepsilon_A + \frac{\Delta C_1 \square C_2 (\varepsilon_{A2} - \varepsilon_A)}{\Delta C_1 \square C_2 - \Delta C_2 \square C_1}$	$\tan \delta_X = \tan \delta_{c1} + \frac{\varepsilon_r C_0 - C_1}{\Delta C_2} \square \Delta \tan$	h_0 = 판형 공간 h = 시편의 평균두께 $M = h_0/h - 1$ $\log$ = 일반적인 지수 함수

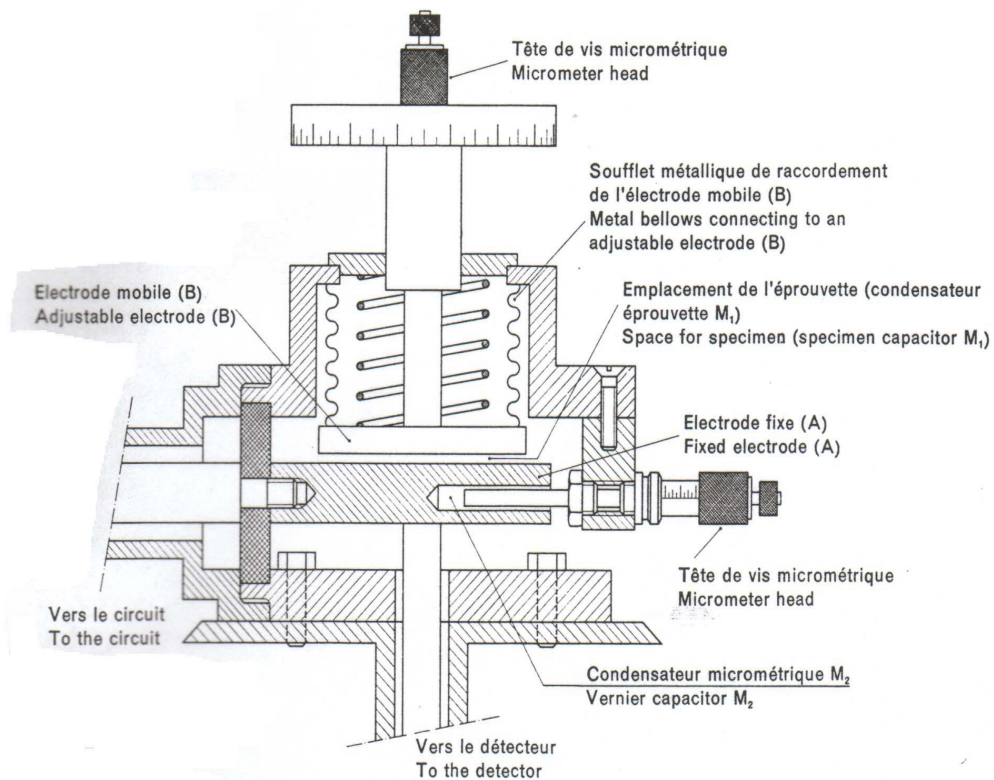
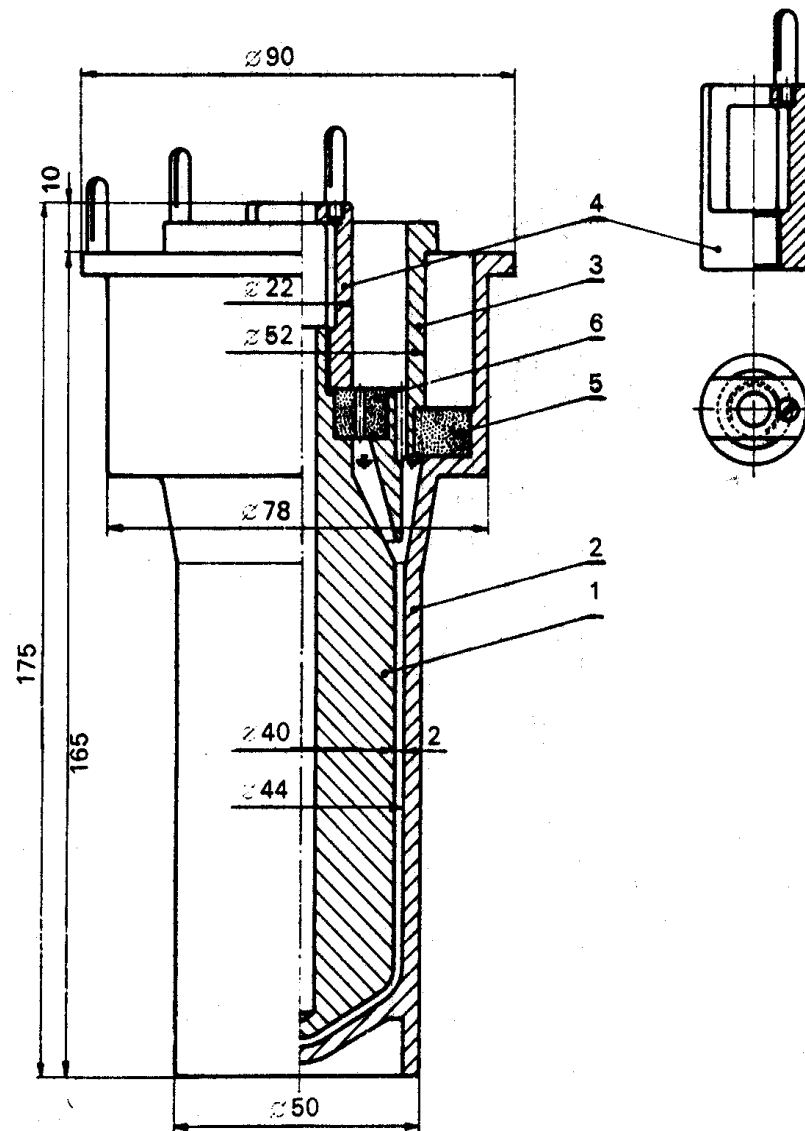


그림 1. - 고체 유전체를 위한 마이크로미터 케패시터 조립부품



- 1 = 내부 전극
- 2 = 외부 전극
- 3 = 보호 전극
- 4 = 시프팅 핸들
- 5 = 보로실리케이트나 수정 세척기
- 6 = 보로실리케이트나 수정 세척기

그림 2. 액체 측정을 위한 세 단자 셀의 예

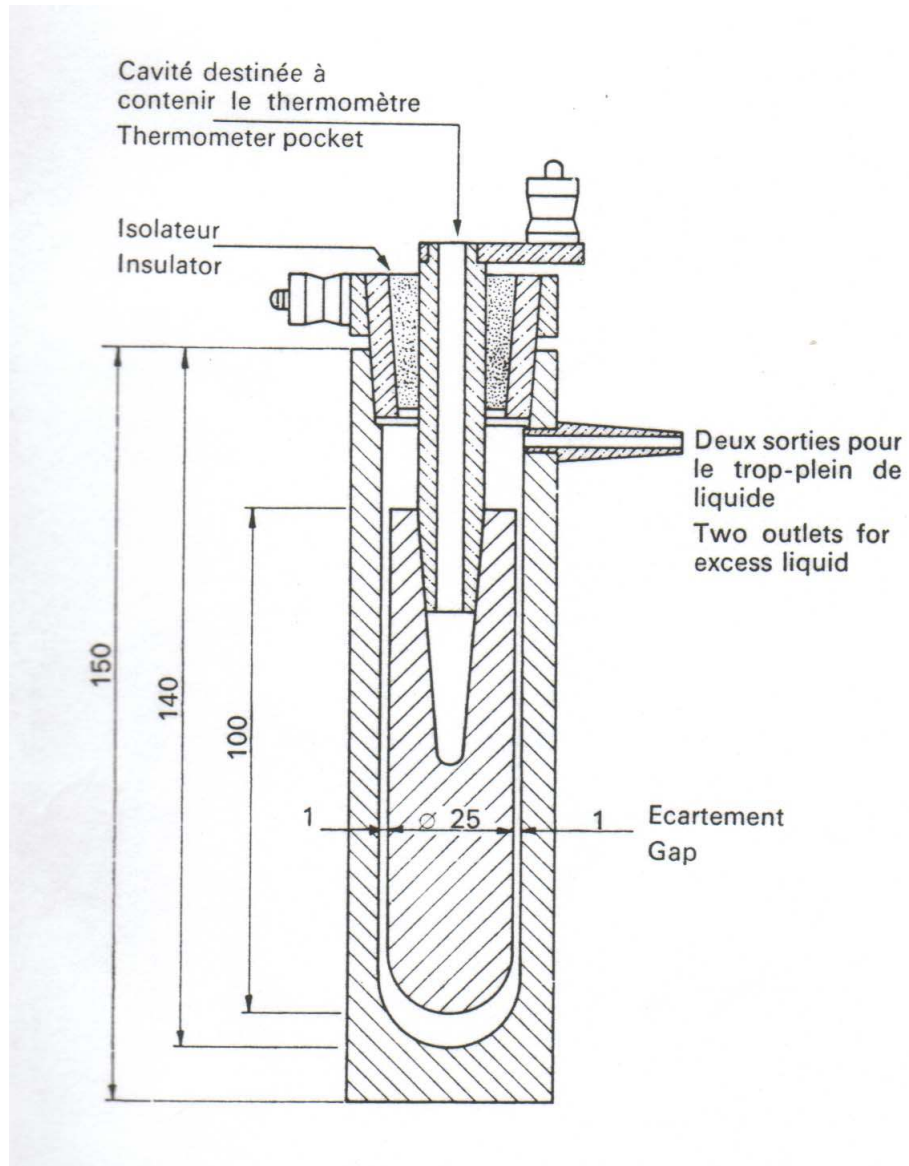


그림 3. 액체 측정을 위한 두 단자 셀의 예

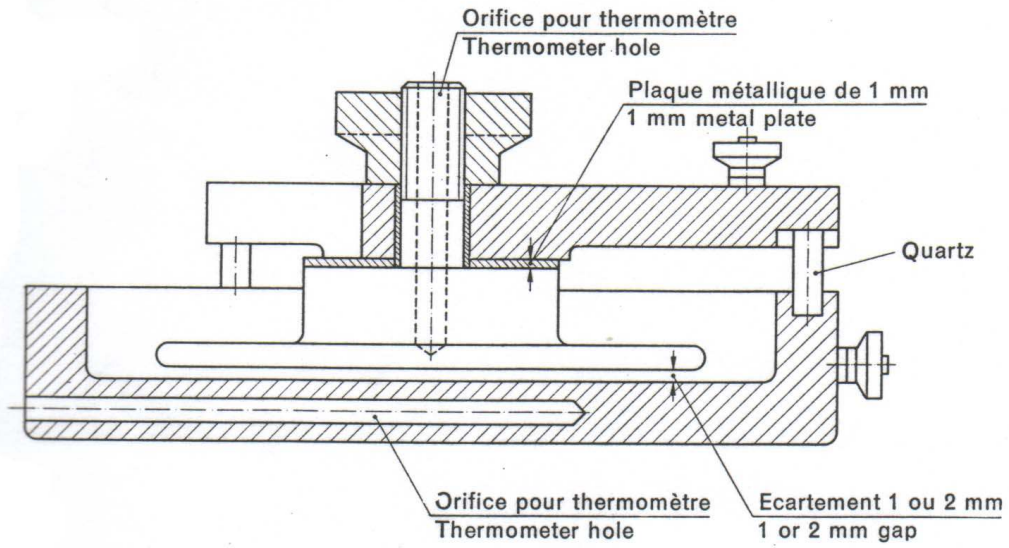


그림 4. 액체 측정을 위한 판형 전극을 가진 두 단자 셀

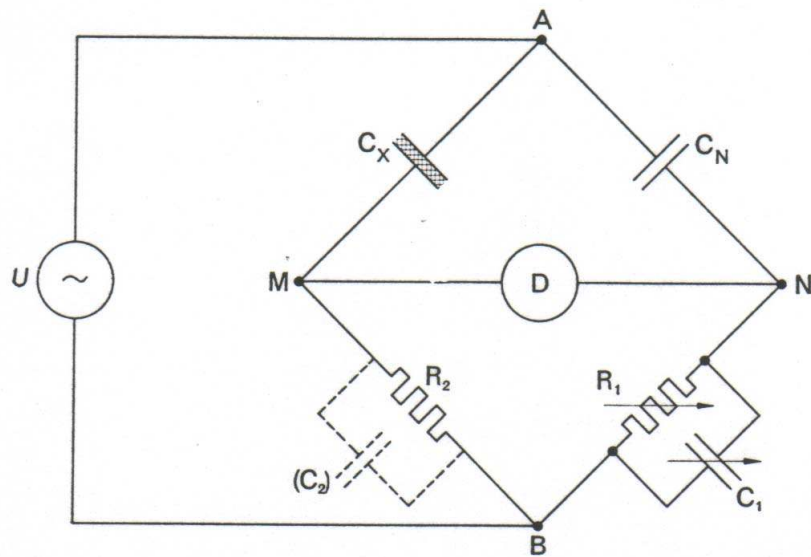


그림 5. Schering 브리지, 회로도

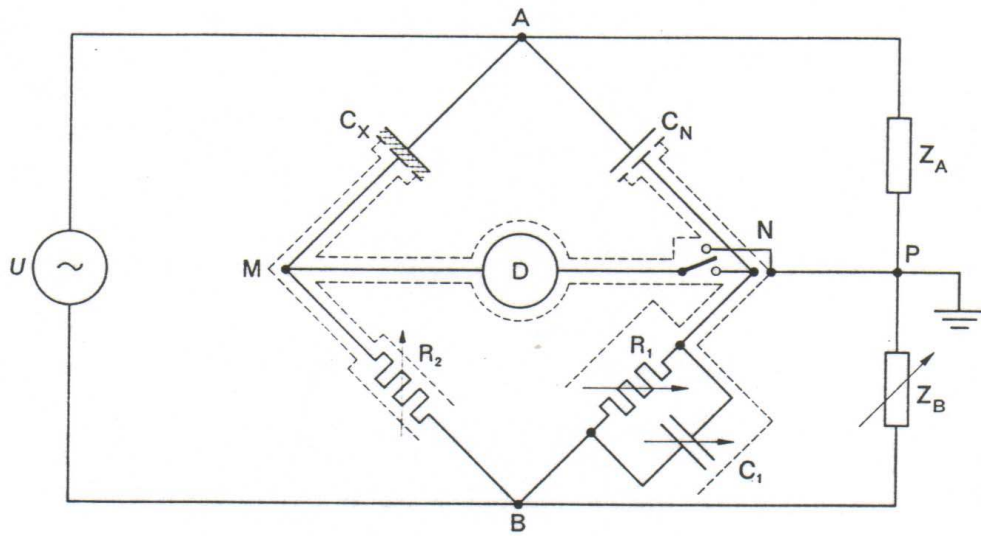


그림 6. Wagner 접지 회로를 가진 Schering 브리지

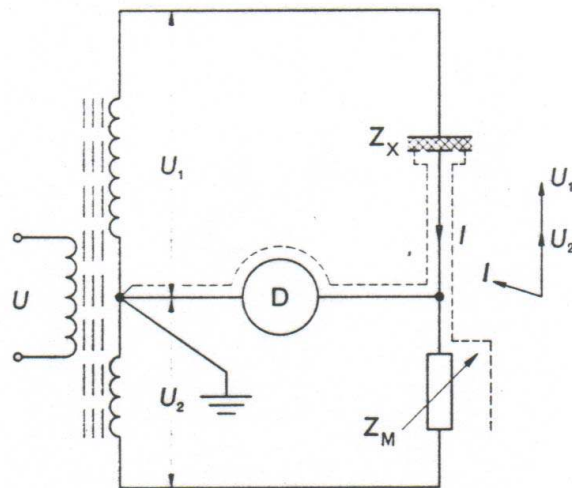


그림 7. 이동 브리지, 회로도

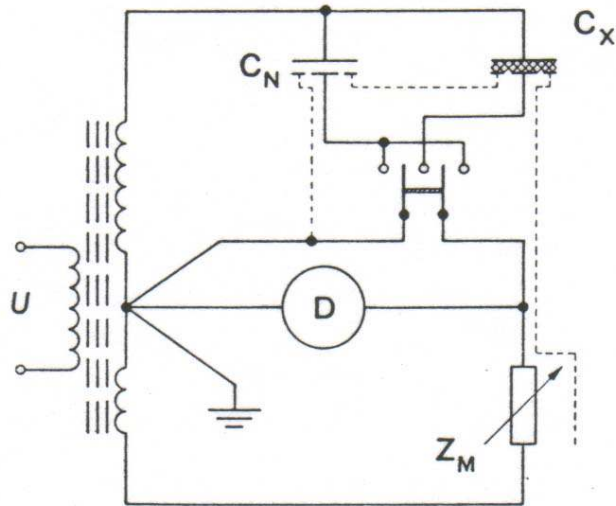


그림 8. 일정한 부하 눈금조정, 이동브리지

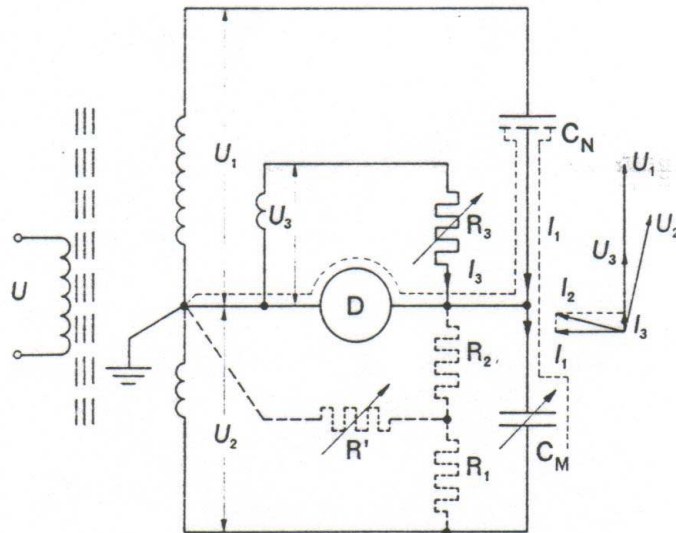


그림 9. 이동브리지

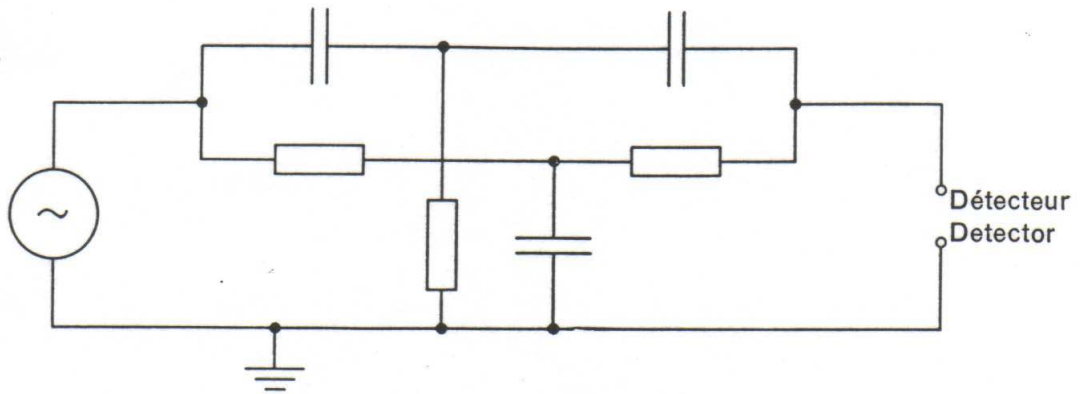


그림 10. 병렬 T 망상조직, 이론적인 회로도

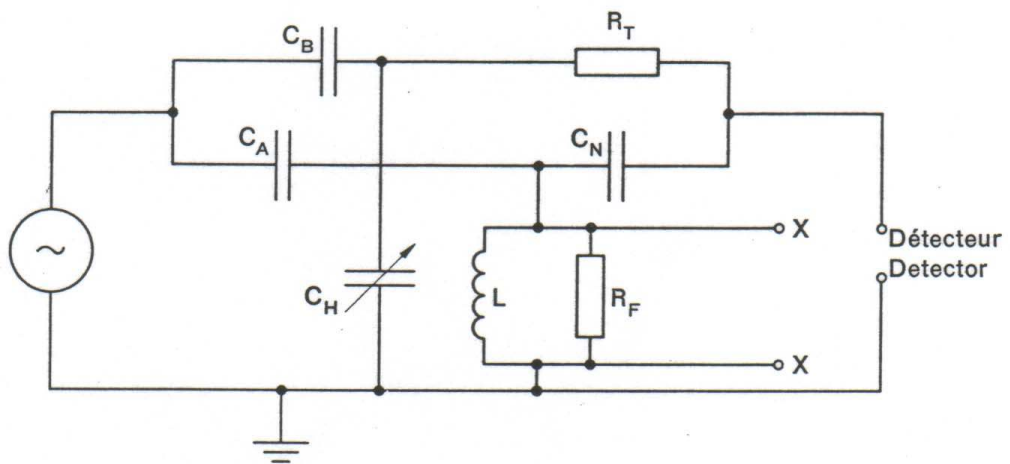


그림 11. 병렬 T 망상조직, 실험적인 회로도

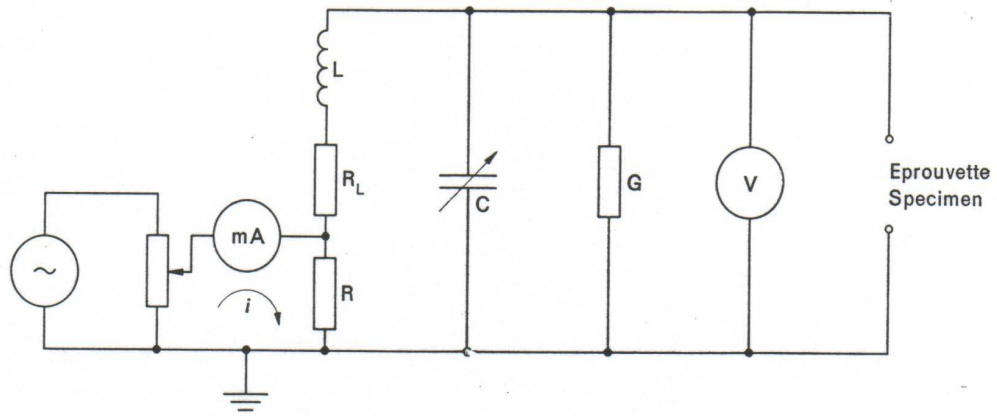


그림 12. 공명발생 방법, 회로도