

파워스위칭회로의 수명에 악영향을 미치고, 쇼트파괴의 원인이 되는 코로나방전을 알아본다.

Aphox Corporation 成澤 鴻 (Narusawa Hitosi)

1. 머릿말

코로나방전은 오래 전부터 알려져 있었지만, 최근에 급격히 더욱 문제로 되어 가고 있습니다. 그 이유는, 전자기술의 진화와 에코에너지화의 요구에 따라 인버터회로가 급속히 보급된 것과 관계가 있습니다.

직류전압이나 50/60Hz 에서도 코로나방전은 일어나는데 1 사이클당 數 피코쿠울롱의 작은 에너지이기 때문에 그에 따른 열화(劣化)는 무시할 수 있었습니다.

50Hz 에 비해 스위칭주파수 50kHz 에서는 1000 배의 방전에너지가 소비되고 있는 것이 됩니다.

알기 쉽게 바꿔 말하면, 50Hz 에서 사용하였을 때 100 년의 수명이 있는 부품을 50kHz 에서 사용하였을 경우에는 1 개월의 수명밖에 없다는 계산이 됩니다.

2. 인버터를 이용한 제품에는 코로나방전이 잠재되어있다

「코로나」라고 하는 말은 친숙하고 자주 듣는 말이지만, 코로나방전이라면 전자기술자라도 대부분 관심이 없는 것처럼 생각됩니다.

그러나, 에코에너지를 목표로한 인버터회로의 진보가 바로 코로나방전의 온상이 되고 있습니다.

액정 TV 의 백라이트조명용 인버터트랜스나 고전압 PCB, 커넥터, 접속케이블을 비롯하여 프로젝터의 광원, 디지털카메라의 스트로보회로, 음이온발생기, 고전압의 스위칭전원, 에어컨, 세탁기, 냉장고의 인버터모터 등은 코로나방전에 의한 절연의 열화가 수명을 좌우하고 있습니다.

또한, 300V 이상의 전압이 걸리는 부품, 예를 들면 포토커플러의 입력/출력間, 고전압릴레이의 접점間, 아이솔레이션트랜스, PCB, 커넥터 등은 주의가 요구됩니다.

절연물의 흡습(吸湿)이나 표면의 오염손상 정도에 따라서는 연면방전(沿面放電)이 일어납니다.

사진 1 은 오염손상에 의한 연면방전과 같습니다.



사진 1(a)



사진 1(b)

연면방전이란, 그림 1에 나타난 바와 같이 절연판의 표면상에 양(兩) 전극이 있을 경우, 방전은 공기 중을 직결하지 않고 유전체의 표면을 따라서 방전하는 현상을 말합니다.

즉, 불꽃방전을 일으키는 (= 코로나방전을 개시하는) 전압인 V_s (상세는 후술)보다 낮은 전압에서 방전한 다는 것입니다.

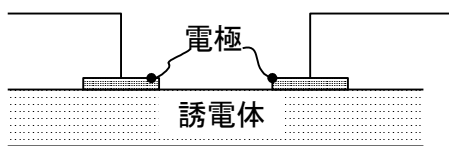
연면방전도 코로나방전의 일종으로 생각할 수 있는데, 트랜스의 보빈 등 절연물의 표면을 훑듯이 방전이 진행되는 것입니다.

트랜스의 고압단자와 저압단자 사이가 15mm 이상인 경우에도 연면방전이 계속되어 트래킹(연면방전)을 일으키는 것을 간혹 볼 수가 있습니다.

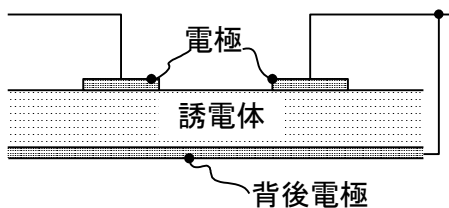
유전율이 높은 절연물일수록 연면방전의 전압은 저하됩니다 (즉, 방전이 빨리 일어납니다).

또한, 배후전극(背後電極)이 있는 경우 [그림 1(b),(c)] 에는 더욱 저하되어, 전극의 간격이 떨어져 있더라도 연면방전이 일어나는 경우가 있습니다.

일반적인 트랜스 보빈 위의 단자나, PCB 위의 패턴(동박)은 그림 1(a)에 상당하는데, PCB 측에 웨라이트코아가 있다거나, 패턴의 뒷면에 다른 패턴이 있거나 하면, 그림 1(b),(c)의 상태로 되어 방전전압이 저하됩니다.

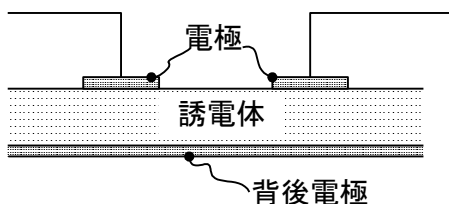


(a) 배후전극이 없는 경우



(b) 배후전극이 있는 경우

그림 1



(c) 배후전극의 전위가 일정하지 않은 경우

3. 코로나방전과 절연파괴

코로나방전 안에서는 전자가 양극에 끌려당겨져 가속되어 초고속으로 되고, 충돌한 공기분자로 부터 계속해서 전자를 때려서 내보내어 이온화가 되고 있습니다. 이 때, 오존 (O₃) 을 발생 시키는 작용을 합니다.

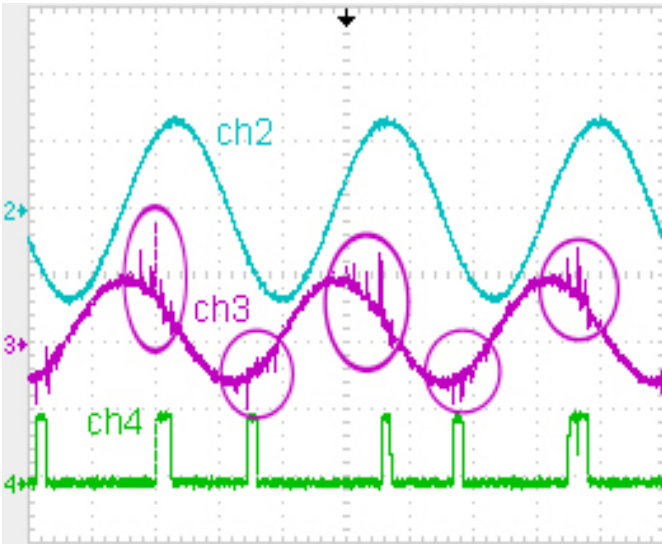
오존은 강한 산화력을 갖는 기체이므로, 절연물을 서서히 산화시켜 열화 되어갑니다.

그리고, 고속의 전자나 이온은 절연물에 충돌하여 절연물의 표면을 갉아먹게 하는 작용도 갖고 있습니다. 또, 코로나방전에 의해서 발열도 있기 때문에 이것들의 복합작용에 의해서 절연도 서서히 열화되어 결국에는 절연이 파괴되고 불꽃방전을 일으킵니다.

그러나, 코로나방전은 매우 미약한 방전입니다. 그리고 대부분의 회로의 동작파형은 정상으로 나타납니다. 따라서, 제품검사에서는 이상을 검출할 수 없고, 검사결과는 합격으로 판정되고 있습니다. 또, 코로나방전의 에너지는 1 사이클당 數 피코쿠울롬 밖에 안되지만, 수개월 동안 축적된 절연의 열화는 무서운 것입니다.

4. 코로나방전의 검출방법

코로나방전과 동반하여 다음과 같은 현상이 일어나기 때문에, 그 어느 것인가를 사용하여 코로나방전의 유무를 검출 합니다.



ch2 ;4kV/div, ch3 ;5mA/div, ch4 ;5V/div, 5μs/div

그림 2 XT-311 의 모니터 파형

ch2: 인가전압 3.7kVrms,60kHz

코로나방전이 발생하고 있지만, 고압 파형은 정상. UL3239, DC20kV 내압의 실리콘고압전선에서도 3.7kVrms 에서 코로나가 발생한다.

ch3: 전류파형

부하가 용량(C)성분이기 때문에, 전류는 90°위상이 앞서가고 있다. ○에 둘러싸인 부분이 코로나방전전류펄스.

ch4: 코로나검출을 나타내는 카운터의 파형
코로나방전이 있을 때마다 카운터 펄스가 발생하고 있다.

(1) 코로나방전펄스가 발생한다

코로나방전펄스는, 펄스폭수(數)ns 、 피크전류가 數 mA 정도인 랜덤의 펄스이며, 주파수 성분은 數百 kHz 부터 數 GHz 까지 매우 광대역에 분산되어 있습니다.

종래의 부분방전시험기도, 그리고 당사의 코로나방전시험기<CORONA-i XT 시리즈>도 이 펄스신호를 검출하고 있습니다.

실례로써, 그림 2 는 코로나시험기 XT-311 에 의한 코로나방전전류의 모니터파형을 나타냅니다. 이 테스트에서는, DC20kV 내압의 실리콘 피복전선이지만, 3.7kVrms 에서 코로나방전이 발생하고 있습니다.

(2) 전파가 발생한다

펄스전류와 동반하여 방파복사(電波輻射)가 있기 때문에 안테나로 전파를 수신하여 코로나의 유무를 검출할 수 있습니다.

비접촉으로 코로나검출을 할 수 있지만, 전파의 복사(輻射)방향과 안테나의 방향을 맞출 필요가 있습니다.

미쯔비시전기製の 안테나가 발표되어 있습니다 (平成 20 年전기학회전국대회 2-012) .

(3) 약한 빛이 발생한다

대단히 약한 빛이지만, 암실에서 볼 수가 있습니다.

코로나의 발생부분을 특정할 수 있는 것은 좋은 점이지만, 내부에서 발생한 코로나는 육안으로 발생한 코로나는 육안으로 볼 수 없는 결점이 있습니다.

(4) 오존 (O₃) 이 발생한다

특유의 오존냄새가 있기 때문에 주의를 기울이고 있으면 코로나의 발생을 느낄 수 있습니다. 측정기가 없을 때에는 코로나검출의 유효한 수단이었습니다.

그러나, 오존은 산화력인 강하고 양의 원인이 되고 있다고 하여 흡입하지 않도록 주의를 할 필요가 있습니다.

(5) 소리가 발생하는 경우가 있다

음향진동으로 코로나를 검출하는 방식도 있지만, 코로나에 따라서는 소리가 나지 않는 경우도 있기 때문에 검출방법으로서는 신뢰성이 떨어집니다.

5. 지금까지의 절연에 대한 상식은 잊자!

5-1:DC 내전압은 신뢰할 수 없다

DC 내전압과 코로나방전의 개시전압과는 일반적으로 크게 다릅니다. 그림 2 에서 알 수 있듯이 DC20 kV 내압의 UL3239 규격전선에서도, 60kHz, 3.7kVrms 에서 코로나가 검출되고 있습니다. DC 내전압은 신뢰할 수 없습니다. 따라서, 코로나시험기로 측정하여 둘 필요가 있습니다.

5-2 : 절연내압시험과 코로나방전시험은 다르다

사진 2 는 마그네트와이어의 트위스트페어 (2 가닥의 선을 서로 꼬아놓은 것) 에 대한 코로나방전시험의 모습을 나타내고 있습니다. 이 마그네트와이어는 50H 로 실시하는 절연내압시험에서는 3kVrms 이상의 내압을 가지고 있었습니다. 그런데 70kHz 로 코로나방전시험을 실시하였더니 700Vrms 에서 코로나방전이 시작되고, 990Vrms 를 인가하자 3 초만에 쇼트되어 버렸습니다.

이로써 직류나 50/60Hz 로 실시하는 절연내압시험만으로는 불충분하며, 코로나방전시험을 필요가 있음을 알 수 있습니다.



사진 2(a) 테스트모양



사진 2(b) 3.8 초 후에 마그네트와이어는 쇼트 되었다

5-3 : 절연판은 방전대책이 되지 않는다

UL 대응에서 일반적으로 이루어지고 있는 방전대책은 코로나방전에 대해서 유효한 것일까? 사진 3(a)는 간격 1.2mm의 구(球) Gap 에 70kHz, 6kVrms 를 인가하고 불꽃방전을 일으키고 있는 모양입니다.

사진 3(b)는 방전방지를 위하여, 갭에 1.0mm 두께의 페놀적층판을 넣었습니다.

페놀적층판의 내전압은 16kV/mm 이므로 UL 등의 방전대책은 이것으로 안전할 것입니다.

확실히 불꽃방전은 멈췄습니다. 그러나, 잘 보면 전극의 끝부분에 맹렬한 코로나가 나오고 있습니다. 이 코로나방전은 매우 강력하기 때문에 단 10 초 후에 페놀적층판은 사진 3(c)과 같이 타버렸습니다.

즉, 방전대책으로서 절연판은 도움이 되지 않는 것을 나타내고 있습니다.

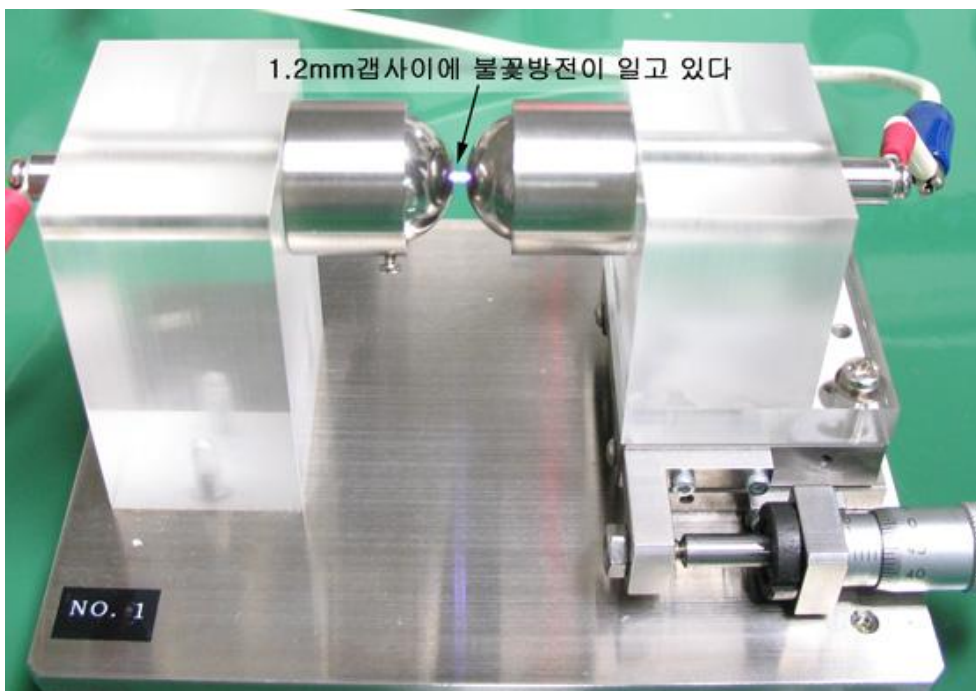


사진 3(a)
실험모양

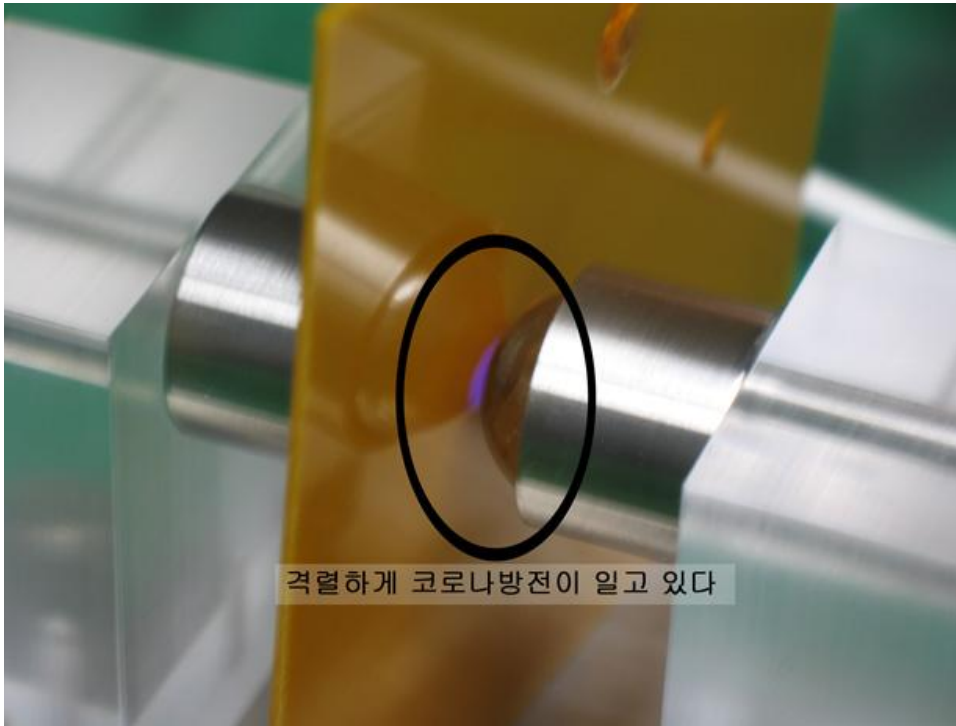


사진 3(b) 갭에 두께 1.0mm 의 페놀적층판을 끼워서 불꽃방전을 방지하였지만...



사진 3(c)
단 10 초 후에 페놀적층판은
변형되어 버렸다

5-4 : 절연물은 유전체(誘電體)이다

구(球)사이의 갭을 3.2 mm로 넓히고 70kHz, 5kVrms 를 인가하고 있습니다. 사진 4(a).

갭이 충분히 넓기 때문에 코로나방전도 불꽃방전도 일으키지 않습니다. 따라서, 그 대로 불꽃방전에 대해서도 코로나방전에 대해서도 충분했던 것이지만, 더욱 확실하게 절연하고 싶다고 생각하여 이 갭에 두께 3 mm의 절연판 (페놀적층판) 을 넣었습니다. 그런데 사진 4 (b)과 같이 격렬하게 코로나방전을 일으켜 버렸습니다.

절연판으로 넣은 것이지만 코로나의 유전판(誘電板)이 되어버렸습니다. 30 분 후에 페놀판은 사진 4(c)와 같이 타버렸습니다.

절연물이라 생각하기보다 유전체로서 생각할 필요가 있습니다. 트랜스의 보빈으로 생각 할 때 대단히 곤란한 문제가 되고 있습니다.

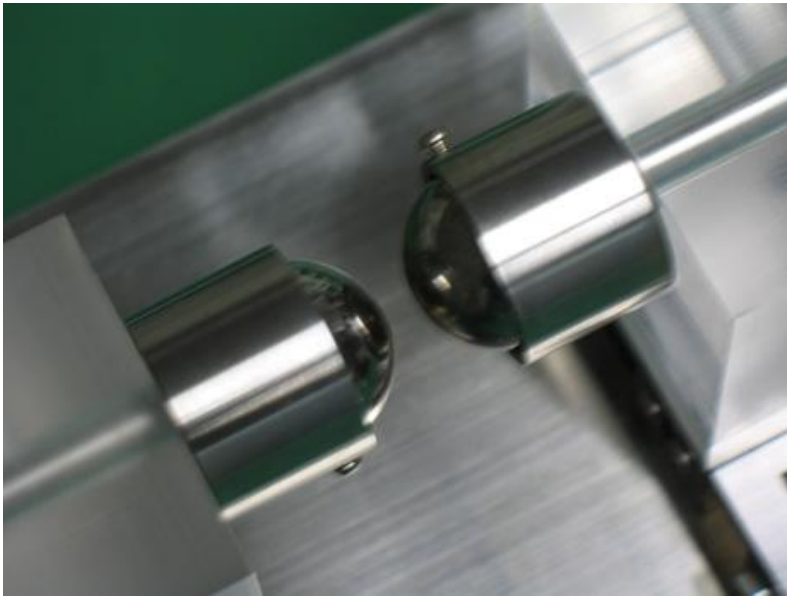


사진 4(a)
 갭이 3.2mm 인 경우 5kVrms 을
 인가하더라도 방전이 일어나지
 않는다

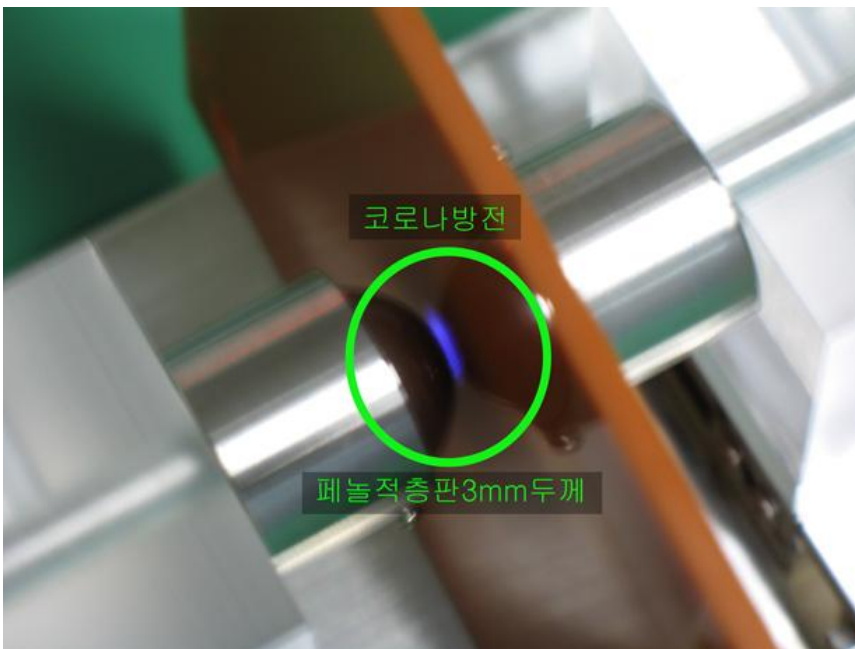


사진 4(b)
 방전이 일어나고 있지 않은
 갭에 두께 3.0mm 의 절연판을
 넣자 코로나방전이 시작 되었
 다



사진 4(c)
 두께가 3.0mm 인 페놀적층판이
 타 버렸다

6. 코로나방전이란 무엇인가?

6-1 : 정체는 기체의 전해

이와 같이 정체를 알 수 없는 코로나방전이지만, 그 정체는 불꽃방전과 같은 기체의 전해(이온化)입니다. 기체에 일정 이상의 전계를 가하면 이온化가 됩니다.

평행판전극에 전압을 가했을 때, 불꽃방전을 일으키는 전압 V_s 는 진공 중인 경우, 다음의 식으로 나타냅니다. (大木正路 : 高電圧工学 P.57 [ISBN4-8375-0506-6])

$$V_s = 126pl \div (\log_{10}(pl) + 0.22) \dots\dots (1)$$

V_s : 불꽃방전전압[V_{DC}]

p : 기압 [mm Hg]

l : 전극간 거리 [cm]

식(1)을 1 기압의 공기에 대하여 그래프化한 것이 **그림 3**입니다. 전극 사이가 이온化한 공기로 차있을 때, 전로방전(全路放電, 즉 불꽃방전) 이 일어납니다.

전극간에 절연판을 넣을 경우, 전류는 절연판으로 저지되므로 불꽃방전은 일어나지 않지만, 전계는 저지되지 않기 때문에 기체부분은 전리됩니다. 이것은 부분방전이라고 하며, 대표적인 코로나방전입니다.

여기에서 주의해야 할 것은 절연판으로 전류는 저지할 수 있지만, 전계는 저지할 수 없다는 것입니다. 오히려 절연판(유전체)를 넣음으로써(유전체의 유전율은 공기보다도 크기 때문에)공기 중의 전계는 강해지는 것입니다. 이것이 **5-4** 에서 코로나방전이 일어난 이유입니다.

식(1)의 V_s 는, 불꽃방전이 일어나는 전압입니다. 그것은 공기가 전리(電離)되는 전계를 가하는 전압입니다. 전리된 공기가 전로방전(불꽃방전)으로 될지, 부분방전 (코로나방전) 이 될지는 전극간의 형상에 달려있습니다. 즉, V_s 는 코로나방전개시전압과 같습니다.

上記는 평행판전극의 경우입니다. 침전극(針電極)인 경우는, 끝부분에만 전계가 집중하여 그곳에서 코로나방전이 일어나기 쉬워집니다. 실제로 트랜스의 단자 등의 뾰족한 부분에서 방전이 일어납니다.

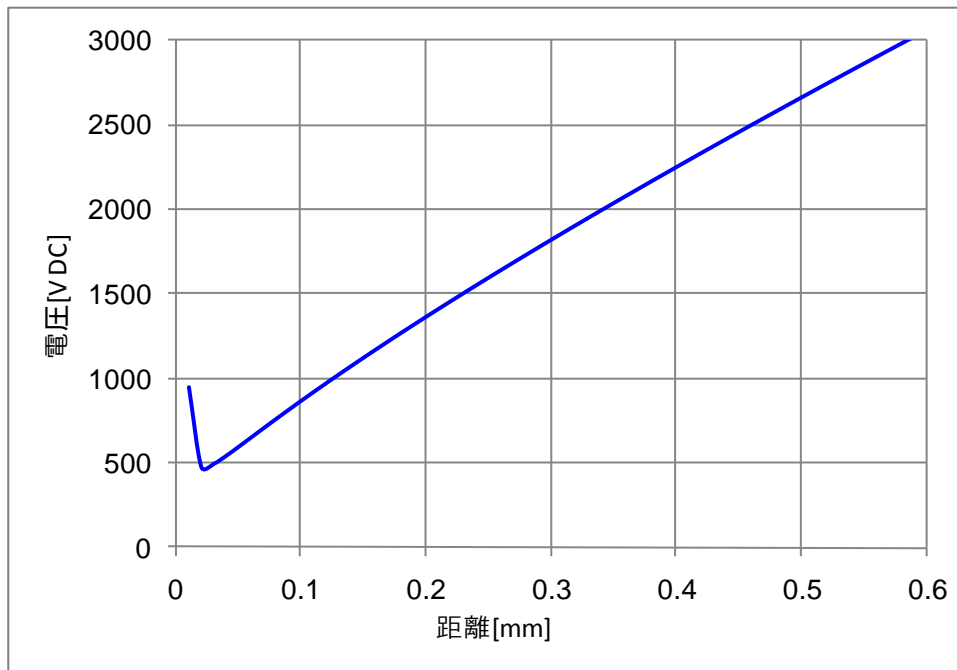


그림 3 1 기압공기중의 불꽃방전전압

6-2 : 발생원리

코로나방전의 발생원리를 **그림 4**에 따라서 설명하겠습니다. 공기 중에는 자외선이나 우주선(宇宙線) 등에 의해서 미약하긴 하지만 이온이나 유리전자(遊離電子)가 있습니다.

그래서, **그림 4 (a)** 처럼 전극에 전압을 가하면 전자는 양극으로, 양이온은 음극을 향하여 이동합니다. 전계를 강하게 하면 전자는 고속으로 이동하고, 공기의 분자에 충돌할 때마다 전자를 때려서 내보내어 분자를 이온화 합니다. 양극에는 전자가 흘러 들고, 음극에는 양이온이 흘러들어 갑니다. 이것이 코로나방전입니다.

그러나, **그림 4 (b)** 처럼 절연판 위에는 차츰 대전(帶電)이 일어나고, 그에 따라서 공간전계(空間電界)는 약해지기 때문에 방전은 멈춥니다.

직류전압을 전극에 가한 경우는 스위치를 ON 한 직후의 한 순간만 **그림 4 (a)**의 상태에서 코로나방전이 일어나지만, 그 다음 **그림 4 (b)** 처럼 코로나 프리의 상태로 되기 때문에 코로나에 의한 열화는 거의 없다고 말할 수 있습니다.

또 직류전류를 ON/OFF 한 상태를 생각해 보겠습니다. 인가전압을 **그림 4 (c)** 처럼 OFF 하더라도 절연판에 대전된 전하는 좀처럼 방전이 되지 않기 때문에, 다시 ON 하였을 때 **그림 4 (a)** 처럼은 되지 않고, **그림 4 (c) → (b) → (c) → (b)** 를 반복하기 때문에 코로나방전으로는 되기가 어렵습니다.

또한, 이러한 것들 때문에 동일극성전압의 반복인가는 코로나방전검사에는 적합하지 않은 것을 알 수가 있습니다.

교류전압을 전극에 인가한 경우는, **그림 4 (a) → (b) → (c) → (d) → (e) → (f)**의 반복이 됩니다. 주의해야 할 것은 **그림 4 (c)**로부터 **그림 4 (d)**로 절환된 순간, 절연판에 대전된 전자나 양이온은 일제히 전압이 역전된 전극을 겨냥하여 쇄도합니다.

그리고, 전자는 충돌한 공기의 분자를 양이온화하고 (α 효과라고 한다), 또 양이온은 전극에 충돌하여 2 차전자를 방출합니다 (γ 효과라고 한다)。

그림 4 (f)에서 **그림 4 (a)**로 절환 하였을 때에도 큰 코로나방전이 일어나는 것을 이해할 수 있을 것으로 생각합니다.

6-3 : 외란(外亂)노이즈파형과의 구별

이상의 설명에서 이해할 수 있듯이, 코로나방전은 교류전압의 극성이 역전된 순간, **그림 4 (a)** 및 **그림 4 (d)**에서 전압이 증가하고 있는 사이에만 발생 합니다.

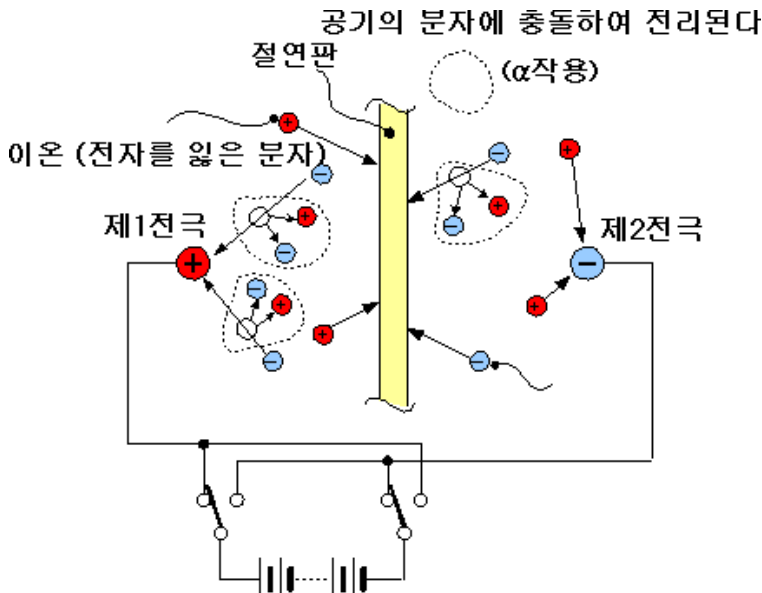
전압이 일정전압을 지키고 있는 동안의 **그림 4 (b)** 및 **그림 4 (e)**나, 하강 중인 **그림 4 (c)** 및 **그림 4 (f)**에는 일어나지 않습니다.

그림 2를 보아 주십시오. 전압파형이 증대하고 있을 때에만 코로나방전전류펄스가 나오고 있습니다. (코로나펄스는 전류파형의 하강부에 나오고 있는데, 그것은 부하가 용량성이기 때문에 전압에 대하여 전류의 위상이 90°앞서기 때문임)。

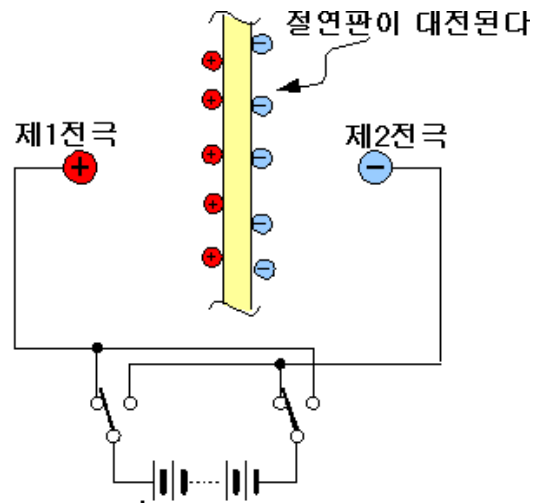
코로나방전전류펄스는 **그림 2**에서 보이는 것처럼 외란(外亂)노이즈와 구별하기 어려운 파형을 이루고 있는데, 전압파형과 비교하여 봄으로써 진짜 코로나방전전류펄스를 검출하고 있는지 확인할 수가 있습니다.

또, 코로나방전의 전류는 전극에 가하였을 때의 전압방향으로 흐릅니다.

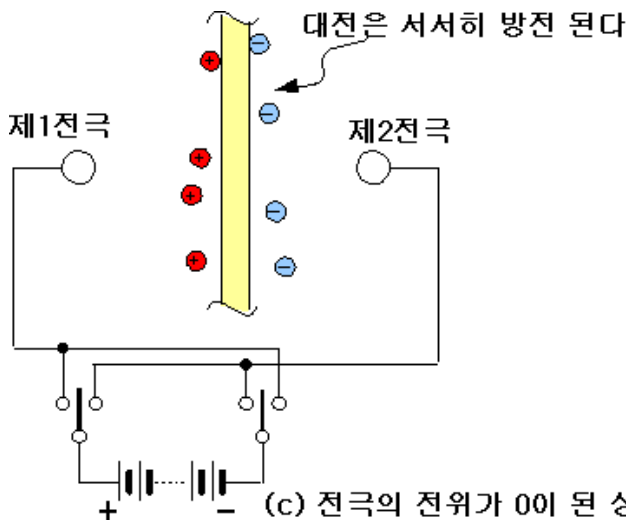
전압의 극성이 반전되면, 전류방향도 당연히 반전됩니다. 그러나, 외란(外亂)노이즈는 인가 전압과는 관계없고, 방향도 정부(正負)가 거의 대칭으로 발행하므로 코로나방전펄스를 분리할 수가 있습니다.



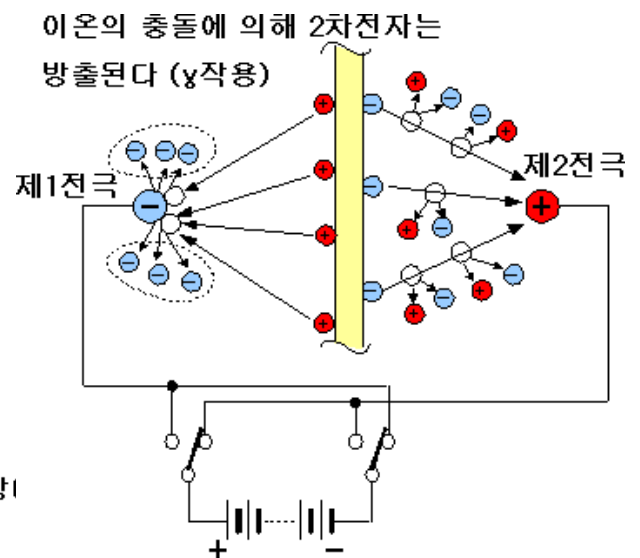
(a) 전자·이온이 이동하여 공기의 분자를 전리시켜 방전이 일어난다



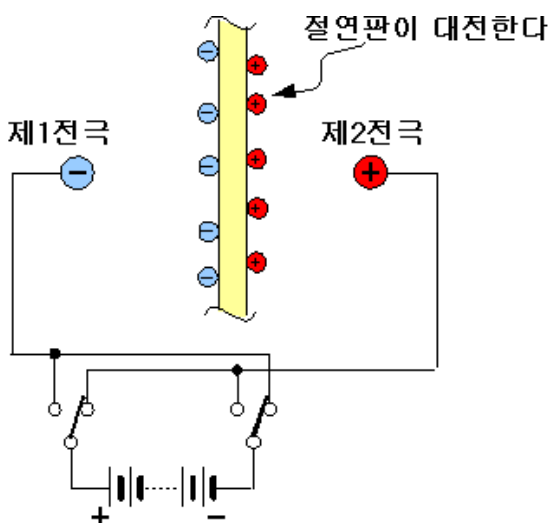
(b) a공간의 전계는 약해져서 전리가 일어나지 않게 되고, 코로나방전이 멈춘다



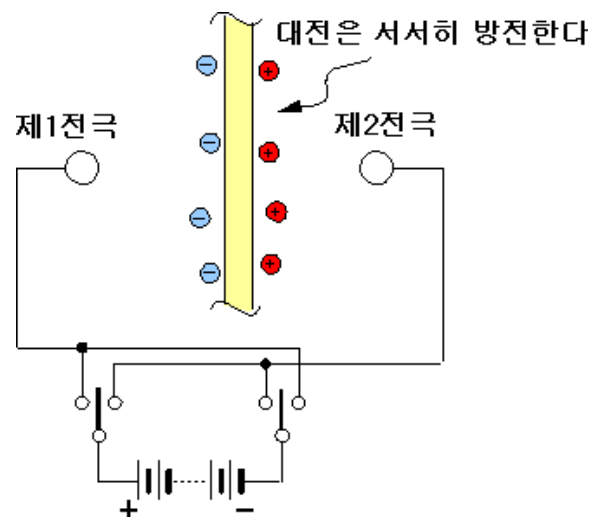
(c) 전극의 전위가 0이 된 상태



(d) 절연판에 대전된 전자나 이온이 일제히 전극으로 이동한다



(e) 공간의 전계는 약해져서 전리가 없어진다



(f) 전극의 전위가 0이 된 상태

그림 4 코로나방전의 발생원리

6-4 : 코로나방전에너지는 주파수에 비례한다

교류전압의 인가에서는, 그림 4 (a) ~ 그림 4 (f) 를 1 사이클로 하고, 이것을 반복하게 된다.

1 사이클마다 발생하는 코로나방전에너지는 같기 때문에 50Hz 에서는 每秒 50 회의 코로나방전사이클이 있으며, 50kHz 에서는 每秒 50,000 회의 방전사이클이 됩니다.

만약 코로나방전에 의한 절연체의 열화가 방전에너지와 비례한다면, 50Hz 에서 사용하여 100 년의 수명이 되는 것을 50kHz 로 사용한 경우, 수명은 1 개월 밖에 없는 것이 됩니다.

따라서, 고주파로 될수록 코로나방전에 주의를 하지 않으면 안됩니다

7. 마그네트와이어의 내(耐)코로나수명테스트

마그네트와이어의 내코로나수명테스트는 사진 3 에 나타난 트위스트페어로 실시하였습니다.

표 1 은, 코로나방전개시전압보다도 약 20%높은 전압으로 테스트를 하였습니다.

코로나개시전압은, 주파수와는 거의 무관한 것 같은데, 수명은 주파수가 높은 수록 짧은 결과가 나왔습니다.

표 1 마그네트와이어의 내코로나수명

사용 마그네트와이어 2UEW ϕ 0.26

테스트주파수	코로나개시전압	수명 (테스트전압 550Vrms)
17kHz	470Vrms	638 초
35kHz	480Vrms	342 초
70kHz	480Vrms	156 초

8. 코로나방전의 대책

코로나방전은 강전계에 의한 기체의 이온화입니다. 따라서 강한 전계를 일으키지 않는 설계가 중요합니다.

식(1)이 기본이지만, 이 식은 평행평판전극에 대한 식입니다. 실제의 전극의 형상은 곡선적이고, 발생하는 전계도 한결같지 않기 때문에 식(1)을 기본으로 하여 확장해서 이해할 필요가 있습니다.

우선 코로나방전시험기로 코로나방전이 발생하는 부분을 확인하는 것부터 시작합니다.

그리고, 그 이유를 추측하고, 각각의 대응을 합니다. 주요 대책방법을 다음에 기술합니다.

대책 1

전극간의 거리는 최저이더라도 식(1)을 만족할 필요가 있습니다. 전극간에 유전체가 있을 경우는 유전율의 효과에 의해 주위의 전계강도가 상승하므로 주의하여 주십시오.

또, 코아가 유전성인 경우, 코아를 경유해서 코로나방전이 일어나는 경우를 종종 볼 수 있습니다.

EE 코아의 경우, 고전압부의 코아와 저전압부의 코아를 분리해서 절연하거나, 고전압부의 코일과 코아간의 거리를 크게 하는 것이 유효합니다.

대책 2

전극의 끝부분이 뾰족하면, 그 끝부분에 전계가 집중하여 코로나방전이 일어납니다. 단자와 새시사이에서 코로나방전이 일어날 때는, 절연판을 새시와 사이에 놓더라도 대책이 되지 않으므로 (이유는 전술참조) , 새시와 취부간격을 넓힐 필요가 있습니다.

대책 3

코로나방전은, 기체의 이온화에 의해서 일어납니다. 따라서 기체가 없으면 방전은 일어나지 않습니다.

실리콘이나 에폭시를 진공함침하면 매우 효과가 있습니다. 그러나 내부에 기포 (void) 가 조금이라도 남으면, 그 부분에 코로나방전이 일어나므로, 공기가 빠지기 쉬운 구조를 생각하는 것이 중요합니다.

그림 5 에서는 이해하기 쉽도록 진공도를 1/10 기압으로 하였지만 1/100 기압, 1/1000 기압으로 하더라도 나쁜 구조에서는 void 는 없어지지 않습니다. 코아와 보빈의 형상에 공기덩어리가 생기지 않도록 공리를 하여 주십시오.

또, 코일의 권선 start, 권선 finish 와 단자 사이를 길게 하면 인출선의 부부만이 고전계가 되어 코로나방전을 일으키는 경우가 있습니다. 그와 같은 국부적인 경우에는 그 부분만 실리콘을 도포하면 됩니다.

대책 4

연면방전(沿面放電)도 코로나방전의 일종으로서 생각되고 있고, 또한 코로나시험기로 검출할 수가 있지만, 대책에 대해서는 유감스럽게도 도움이 될만한 해설서를 본적이 없습니다.

보빈 (유전체) 로 세운 병사이가, 20 mm이상 되는데도 불구하고, 2kVrms 정도로 연면방전을 일으킬 수가 있으므로, 시험기로 반드시 테스트를 거칠 필요가 있습니다.

UL 의 대책에는, 페놀적층판 (베이크라이트) 를 흔히 사용하는데, 연면방전에는 약한듯하게 느끼고 있으므로, 측정지그 등에는 테프론이나 폴리아세탈을 권장합니다.

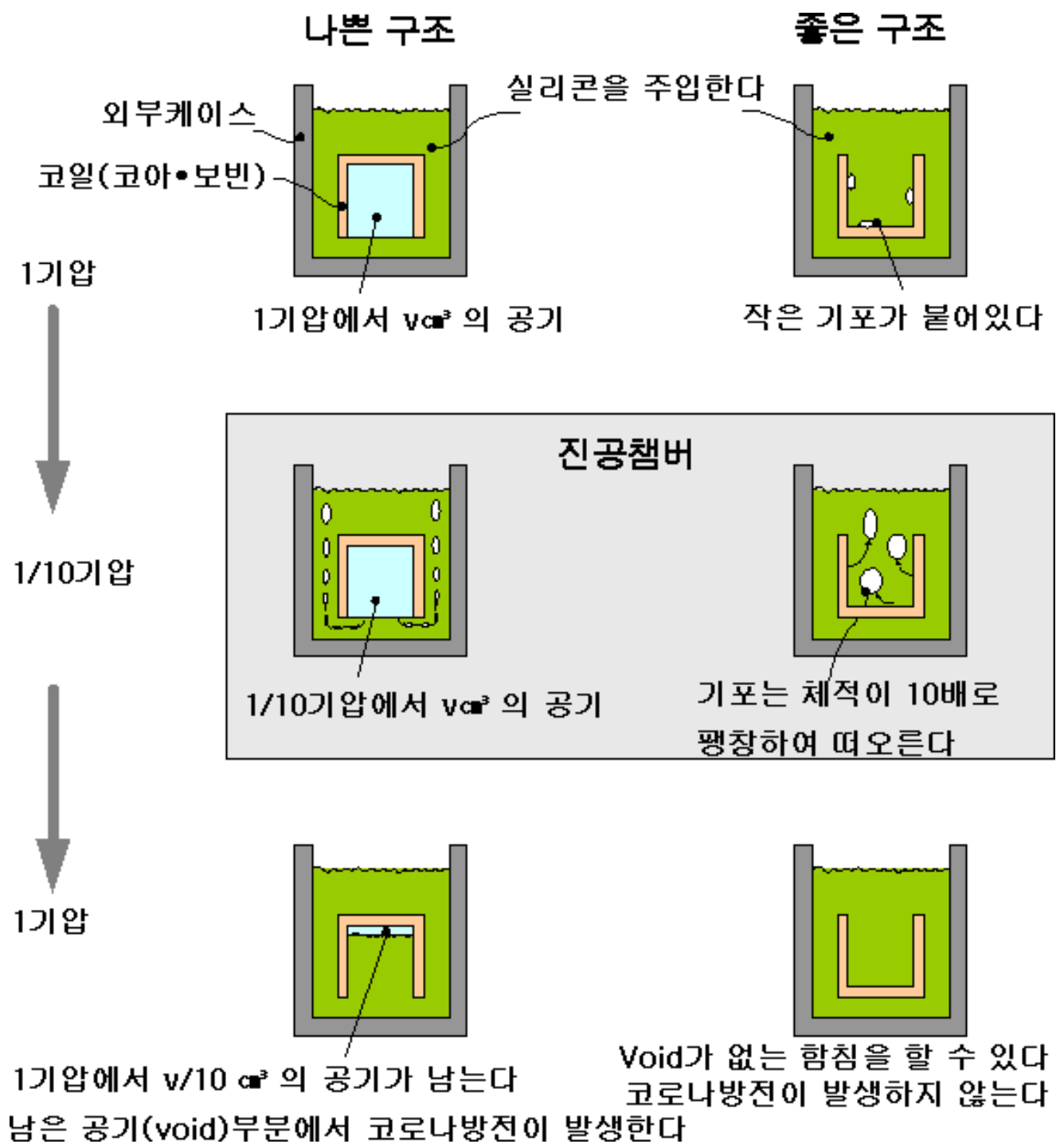


그림 5 진공함침을 할 때는 공기가 빠지지 어려운 구조를 생각할 것