

SF₆ Gas를 용해시킨 변압기 절연유의 고주파 전기 특성의 향상

전 춘 생

인하대학교 공과대학 전기공학과

Improvement of the Electrical Characteristics of Transformer Oil dissolved with SF₆ Gas

Chun Sang Cheon

Dept. of Engineering, Inha University, Incheon 402-751

초 록 이 논문은 절연유를 정제하여 SF₆ 가스를 용해시켰을 때 절연유의 수십 MHz대의 고주파 절연파괴 전압과 유전특성에 관해서 연구한 것이다.

그 결과는 다음과 같다.

- 1) 절연유에서의 고주파 전류는 전압의 1/2승에 거의 비례하여 증가한다.
- 2) 전원주파수가 증가함에 따라 고주파 절연파괴는 주파수의 제곱에 역비례하여 감소하는 현상을 나타내고 AC 절연파괴의 전압때보다 약 35% 정도가 감소한다.
- 3) 용해된 기체의 압력을 증가시킴에 따라 고주파 절연파괴 전압은 원만하게 증가한다.
- 4) 전원주파수의 증가에 따른 유전정접($\tan \delta$)은 거의 지수 함수적으로 증가하고 유전률(ϵ)은 [0.6% MHz]의 기울기로 감소하는 경향을 나타낸다.
- 5) SF₆가스를 용해시켰을 때 절연파괴 특성은 Air 또는 Ar을 용해시켰을 때 보다 약 25% 정도 향상되는 특성을 나타낸다.

Abstract In this paper the breakdown and dielectric characteristics of purified transformer oil dissolved with SF₆ Gas are investigated with a few decade MHz frequency voltage.

The results are as follows.

- 1) High frequency current is a approximately proportional to the square root of high frequency voltage in purified transformer oil.
- 2) As frequency increase breakdown voltage decrease inversely proportional to the square root of frequency and the high frequency breakdown voltage is lower about 35 percentage than that of AC
- 3) The breakdown voltage of high frequency has a little increase with the pressure increase of dissolved SF₆, Air and Ar Gas.
- 4) As voltage frequency increases the value of the dielectric loss tangent has increased almost exponentially and the dielectric constant (ϵ) has tended to decrease with a slope[0.6% MHz].
- 5) When dissolved with SF₆ Gas, oil electrical characteristics has more increased about 25% than in Air or Ar gas with high voltage frequency.

1. 서 론

최근 초고압 송전방식을 많이 채택하게 됨에 따라 절연체의 耐 corona性 및 절연내력에 대한 활발한 연구가 진행되고 있고 공기중의 耐 corona性에 대해서는 복도체를 사용함에 따라 어느 정도 해결의 실마리를 찾았다. 액체절연유, 즉 변압기유에 있어서도 많은 연구가 진행되어 왔지만 통일된 이론은 찾지 못하

고 있다.

이런 중에서도 교류 직류전압에 대한 절연유의 절연내력과 기체중의 고주파 절연내력에 대해서는 비교적 많은 보고가 되어 있지만 변압기절연유의 고주파 전압에 대한 절연내력에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 특히, 전기적 부성가스인 SF₆를 용해하였을 때의 고주파 전압 절연내력에 관한 연구는 전혀 없다.

일반적으로 절연체의 파괴강도는 주파수의

상승과 더불어 상당히 떨어지는 경향이 있기 때문에 상용주파수보다도 수 MHz의 고주파 전압 경우에 그 파괴강도가 현저하게 감소하는 경향이 있는 것이다.

가령, 공기중에서의 고주파 방전에서 Reukma⁵⁾ (1929)는 6.25cm의 지름을 가진 구에서 전극간 거리를 2.5cm로 했을 때 20KHz까지는 주파수가 높아지면 파괴전압이 점차 낮아진다는 결과를 발표하고 있다³⁾.

더욱 주파수가 높아져서, 즉 425KHz까지는 50Hz보다 파괴전압이 15% 정도 낮은 값이 된다는 것이 보고되고 있다.

독일⁶⁾에서는 180kv 1MHz의 주파수를 사용한 결과, 공기중에서의 파괴전압이 낮아진다는 보고가 있는데 여기서 평등전계에서보다 침전극에서 더욱 심하다는 사실을 밝혀냈다.

한편, SF₆가스는 전자가 중성분자에 부착하여 음이온을 만들기 쉬운 기체이기 때문에, 이와같은 전기적 부정기체를 혼합시키면 절연 파괴전압의 특성에 변화를 가져오게 된다.

액체절연체의 유전정접(tan δ)과 유전률(ε)

는 고주파에 대해서 상당히 많은 영향을 받기 때문에 SF₆를 용해시킨 액체 절연체를 조사 대상에서 제외시킬 수 없다.

본 실험에서는 침전극을 가진 용기(cell)에 변압기 절연유를 진공가열정제하여 불순물을 제거한 후에 전기적 부정기체인 SF₆가스와 희유 가스인 Ar을 주입시켜 고주파 전압이 절연파괴 특성에 미치는 영향과 이들의 유전 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치

본 실험을 위한 구성장치로는

- 1) 절연유 정제장치
- 2) 고주파 고압발생 장치
- 3) 고주파 절연파괴 측정장치
- 4) 유전정접 및 유전률 측정장치등이다.

① 절연유 정제장치

Fig.1은 절연유의 정제장치의 개략도(block diagram)이다. 이 장치는 두께 2mm의 Pyrex 유리로 제작되어 있다. 또한 이 실험에서 사용한 절연변압기유는 미제 2호이다.

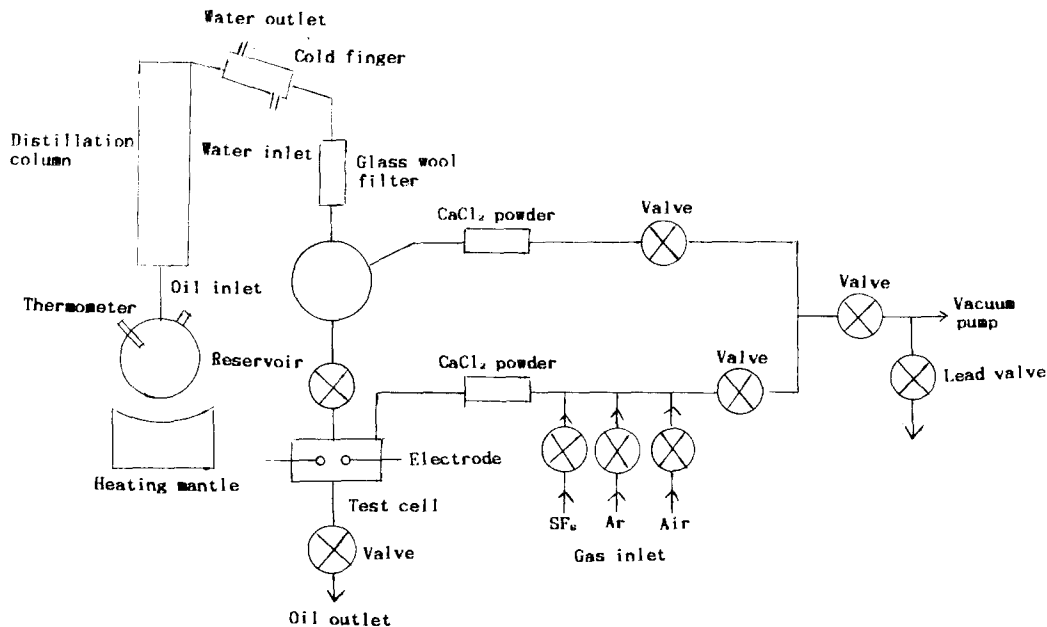


Fig. 1. Block Diagram of Transformer Oil Purification System

본 장치에서는 변압기절연유의 산화 열화를 방지하기 위하여 진공 펌프(yamato scienfic Co. Ltd)를 사용하여 3mm Hg정도의 낮은 기압상태로 유지시킨다. 그리고 가열기(heating

mantle)에 전압조정기(slidac)로 입력 전압을 조정하면서 적당한 온도(80~90℃)를 유지시켜서 변압기절연유를 가열한다. 가열후 후에 증발된 변압기절연유는 냉각기(cold finger)에

의해 다시 냉각시키고 유리성유 여과기(glass wool filter)를 거쳐 변압기유는 정제한다. 그리고 이것을 변압기절연유를 저장조(oil reservoir)에 저장시킨다. 저장조의 아래쪽의 부분에 시험용기(test cell)을 설치하고 실험에 필요한 정제유를 콕크를 통해 시험용기에 담았다.

② 고주파 고압 발생장치

Fig. 2는 고주파 고압 발생장치의 회로도이다.

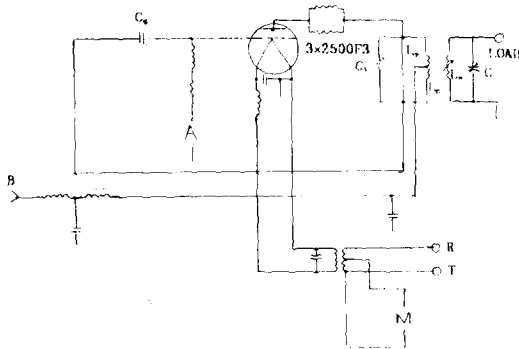


Fig. 2. Main Electric Circuit of High Frequency Generator

주파수 발전기는 송신관 3×2500 F3[양극 전압 D.C 6000(V), 필라멘트 전류 48(A), 양극전류 25(A), 출력 5kw]를 사용한 하트레이(Hartley) 양극동조회로 방식의 C급으로 동작시켰다. 발전을 위한 병렬공진회로는 가변진공 콘덴서(10kv, 20~1500pf)와 코일로 1차 동조회로를 만들고 L_s, C 및 고주파 유전 가열 전극 C로 2차 동조회로를 이루게 한 복동조 출력방식을 채택하였다.

이때 발생 주파수는 3~20MHz의 영역이며 연속적으로 가변 되게끔 하였다. 또, 출력 측의 전압가변은 고주파 양극전원(3상 전파 정류기)에 공급되는 교류전압을 3상 전압조정기로 조절하였다.

③ 고주파전압-전류특성 측정장치

고주파 전압 및 전류 측정을 Fig. 2에서의 2차 동조코일 L_s가 1 turn되는 부분에 오실로스코프(30MHz 일본제 Hitach제품)를 접속한 후에 동조코일 turn수의 비로 전압을 측정하였으며, 전류의 측정은 출력단자에 Al을 양극 산화 시킨 박막저항 (100MΩ)을 이용하여 오실로스코프로 측정하였다.

④ 고주파 절연파괴 측정장치

고주파 절연파괴 전압의 측정은 전술한 2.3절의 전압 측정방법과 같은 방법을 선택하고, 절연파괴 측정장치에는 동(Cu) 침전극을 사용하여 간격을 조절할 수 있게 하였다. 주파수 측정에는 5236 L Electronic counter(미국 HEWLETT PACKARD)를 이용하였다.

⑤ 유전정접(tan δ) 및 유전을 측정장치

이 측정을 위하여 Q-meter(일본 model MQ-160B 주파수범위는 50KHz~50MHz를 사용하였다. 유전체 측정장치(model MF-2500, 전극직경 38mm, 최대전극간격 10mm, 마이크로메타의 눈금 0.01mm)를 Q-meter의 본체에 연결하여 test cell에 넣고 진공이 되게끔 밀봉한 후에 마이크로메타로 외부에서 전극간격을 조절할 수 있게 하였다.(Fig. 3)

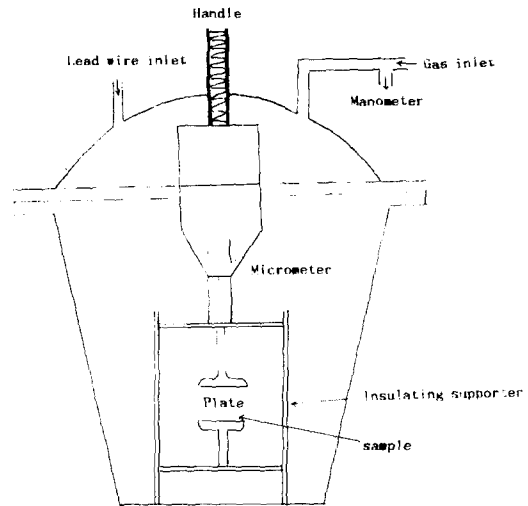


Fig. 3. Layout of Test cell

3. 실험 방법

진공중에서 가열정제된 변압기 절연유를 시험용기에 넣었다. 모든 실험은 습기와 불순물의 용해를 막기 위하여 시험용기 내를 진공상태(3mmHg)로 하고 SF₆, Air, Ar 가스 분위기에서 전원전압 주파수를 변화시키면서 조사하였다. 이때 주파수 범위는 6~18MHz이다.

① 고주파 전압-전류 특성 측정

정제된 변압기유를 Fig. 4에 넣어 진공(3mmHg)을 유지하고 주파수를 6과 12MHz로 하여 고주파 전압을 변화시켜 가면서 전류

의 변화를 관찰하였다. 이때 전극의 간격은 4.5mm로 하였으며 시험용기와 직렬로 전술한 Al₂O₃ 박막저항(100MHz)을 이용하여, 여기서 고주파 전압과 전류를 오실로스코프로 측정하였다.

② 주파수-절연과피 전압측정

Fig. 4에 정제된 절연유를 넣고 내부 주변을 진공을 시킨 다음에 SF₆, Air, Ar가스를 각각 60mmHg의 압력으로 봉입한 후에 가스가 절연유에 용해되는 시간을 고려하여 10분 후에 주파수를 변화시키면서 절연과피전압을 관찰하였다. 조사된 주파수 범위는 6~18MHz의 범위였고, 또한 절연과피 후에는 많은 그을음이 발생했기 때문에 실험에 사용된 절연유는 제거하고 전극을 깨끗이 닦은 후에 위와 같은 실험을 반복하여 실행하였다.

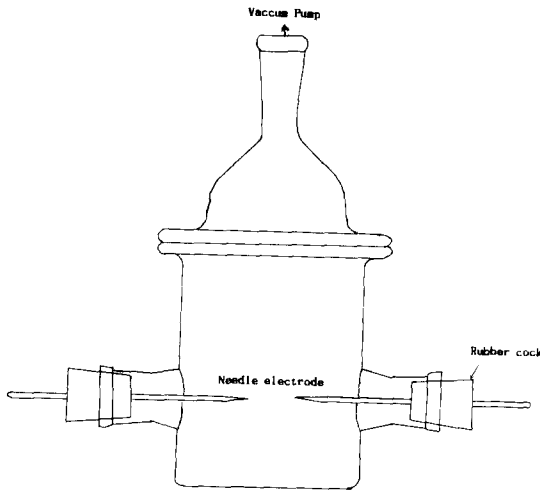


Fig. 4. Test cell

③ 가스압력-절연과피전압 측정

3.2절의 실험과 같은 방법을 사용했으며 SF₆, Air, Ar 가스의 압력변화 범위는 200mmHg~760mmHg로 각각 유지시켰고, 이때의 압력 측정에는 manometer를 사용하였으며 주파수 12MHz인 전압으로 조사하였다.

④ 유전정접(tan δ) 및 유전률 측정

정제된 변압기유를 Fig. 3의 시험용기 내에 넣고 Q-meter로 유전정접 및 유전률을 측정하였다. 이때 주파수의 범위는 6~18MHz로 하고 가스압력은 600mmHg로 하였다.

Q-meter에 의한 유전정접은 다음과 같다.

시료의 용량

$$C_x = C_1 - C_2 + 1$$

$$\therefore \tan\delta = \frac{C' (Q_1 - Q_2)}{C_x Q_1 Q_2}$$

여기서 C'는 유전체측정기(MF-2500)를 연결하지 않고 보조표준 코일을 연결한 후 동조시켰을 때의 정전용량이다. C₁과 Q₁은 C'의 상태에서 유전체 측정기를 측정기단자에 연결하여 전극간 거리를 10mm로 유지하고 시료를 주입하였을 때의 C 및 Q의 측정값을 표시하며, C₂, Q₂는 시료의 정전용량과 Q의 측정값을 나타낸다.

$$\epsilon_x = t_x / t_0$$

여기서 t_x: 시료의 두께

t₀: 시료를 제거한 후 전극간격을 줄여가면서 다시 동조시켰을 때의 전극간격

4. 실험결과 및 고찰

① 고주파 전압-전류특성

고주파의 전압-전류 특성곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 이것은 저전계 영역에서(7회 반복)실험한 평균치의 결과인데 전압이 커짐에 따라 전류가 증가하는 Ohm의 법칙이 성립하는 영역으로써 니쿠라아제에 의해 연구된 전압-전류특성과 일치한다고 생각된다. 또 주파수를 6MHz와 12MHz로 변화시키고 여기에 SF₆, Air, Ar가스를 600mmHg를 주입하였을 때 고주파 V-I 특성은 6MHz일 때 보다 12MHz인 경우의 전류가 같은 전압에서 감소하였다. 고주파 절연과피 이론에 의하면 이것은 전극간격을 4.5mm를 유지하였기 때문에 $1 > 2\mu$, E/ω가 되어 이온이 주파수가 증가함에 따라 양쪽극의 전극에 도달하는 이온의 수가 적어졌기 때문이라고 생각된다. 윗식에서 μ는 이온의 이동도, E는 전계의 세기, ω=2πf는 각주파수이다.

그리고 각 가스에 있어서의 고주파 전류는 전압이 증가함에 따라 SF₆, Air, Ar 가스의 순서로 증가하고 있다. 이것은 SF₆와 같은 전기적 부성 가스가 전자와의 부착작용이 크기 때문에 SF₆가 전자사태에 의한 전류성장을 감소시켰기 때문이고, Ar가스는 희유기체이므로

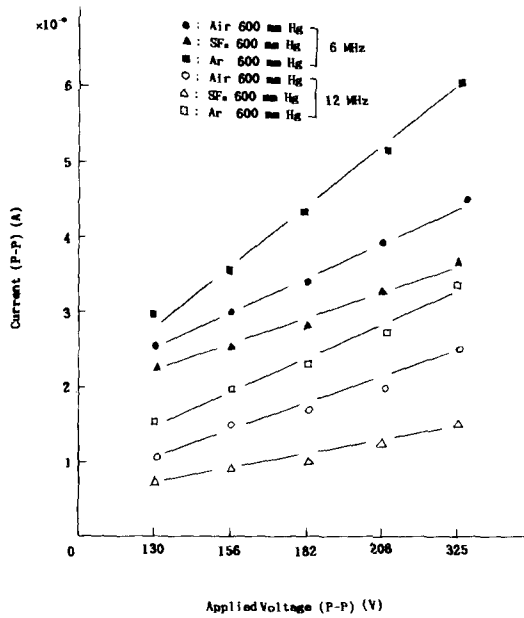


Fig. 5. Characteristics of Applied Voltage Vs. Current

SF₆기체와 같은 전자부착력이 없는데 그 원인이 있다고 생각된다.

② 주파수-절연파괴 전압특성

일반적으로 유전체의 절연파괴는 열파괴, 열열화 그리고 corona 열화로 나누어 생각할 수 있다. 그러나, 보통 주파수에 의한 절연파괴는 열파괴로 설명하는 경우가 많다. 고주파수 전압을 인가하면 유전체 손실에 의해 온도가 상승하고 대류작용이 일어나며 파괴시에는

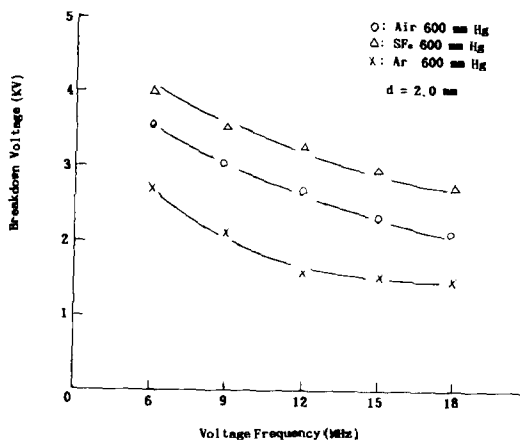


Fig. 6. Voltage Frequency Vs. Breakdown Voltage

많은 그을음이 발생한다. 이러한 것은 전극재료나 모양, 냉각조건등에 의해 크게 좌우된다. Fig. 6은 7회 반복 실험 결과의 평균치인데 주파수를 증가시키면 전극간에 포착되는 이온의 수가 증가하므로, 전계가 왜곡 강화되어 파괴전압이 $1/\sqrt{f}$ 에 비례하여 감소한다고 볼 수 있다.

또 SF₆, Air, Ar 가스에 있어서의 절연내력은 4.1절에서 설명한 것과 같이 SF₆, Air, Ar 가스의 순서로 감소되고 있다.

③ 압력-고주파 절연파괴 전압특성

4.2절과 같은 방법으로 주파수를 12MHz로 일정하게 하고 기체압력을 변화시켰을 때의 절연특성을 Fig. 7에 나타내었는데 7회 반복 실험 결과 data의 골분산은 발생하지 않았다. 그림에서 보는 바와 같이 압력에 따라 완만하게 절연파괴전압이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 본 실험에서 절연유에 대한 기체용해시간(10분)이 너무 짧아서 절연유에 대한 용해량이 적다는 점에 기인한다고 생각할 수 있다. 또한 액체가 파괴되기 직전의 고전계에서는 음극에서 다량의 전자가 액체중에 유입되어 이로 인한 발열작용으로 액체가 기화하여 작은 기포가 발생하게 된다. 이 기포가 원인이 되어 액체 전체가 절연파괴 된다고 생각할 수 있다.

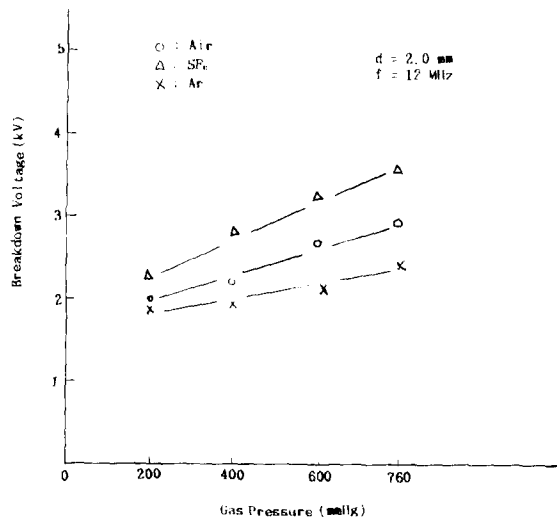


Fig. 7. Gas Pressure Vs. Breakdown Voltage

④ 주파수-유전정점(tan δ) 및 유전체(ε)특성

유전체에 교류전압을 인가하면 유전체에서의 에너지 손실이 생기게 되는데, 이러한 손

실은 $\tan \delta$ 에 비례함을 알 수가 있다.

$\tan \delta$ 는 온도, 주파수, 습도에 따라 변하는 양이고, 유전체에 흐르는 전류 I 는 $I = I'' + jI'$ 와 같은 복소수로 나타낼 수 있다.

I'' 는 전계 E 와 동상이고 유전체 내에서 손실을 구성하는 성분이므로 주파수에 따라서 증가하게 된다. 따라서 $\tan \delta = I''/I'$ 에서 주파수가 증가함에 따라 I'' 가 증가하게 되고 $\tan \delta$ 도 증가한다는 것을 알 수 있다. 이 관계를 fig. 8에 표시하였다.

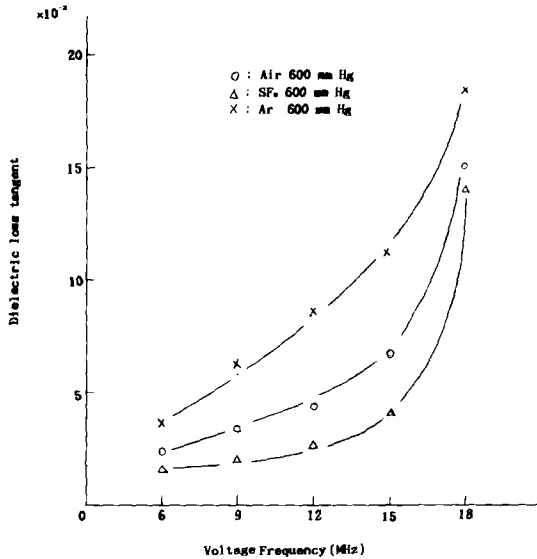


Fig. 8. Voltage Frequency Vs. Dielectric loss tangent value

또 Fig. 9에 주파수와 유전체의 관계를 표시하였는데 주파수가 증가함에 따라 유전률이 감소하는 것을 알 수 있다.

이것은 주파수에 대한 유전률(ϵ)이 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ 의 복소수에서 ϵ'' 는 주파수가 증가에 따라 증가하므로 유전률은 감소하게 된다.

그리고, 유전특성 측정중에 조사된 각 가스에 대한 영향을 보면, $\tan \delta$ 의 값은 공기일 때보다 SF₆ 기체를 흡수하였을 때가 낮은 값을 나타내고, Ar 기체를 용해하였을 때에는 높은 값이 된다는 사실을 알 수 있다.

이것은 Ar 기체는 평등전계하에서 전자부착작용이 없으므로 전자의 이동속도를 저하시키지 않는데 원인이 있고, 이에 대하여 SF₆는 전자친화력이 강한 가스이기 때문이라고 생각된다.

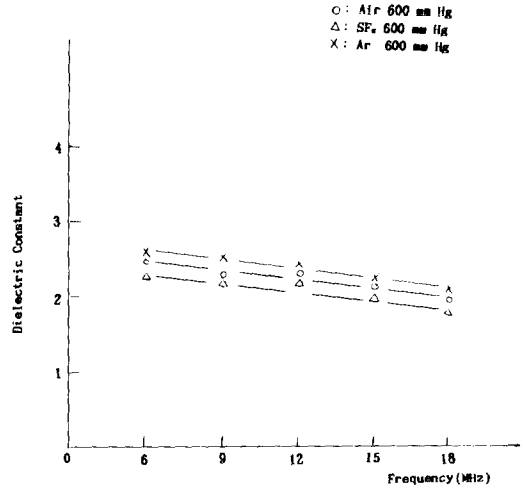


Fig. 9. Frequency Vs. Dielectric Constant

5. 결 론

이 논문은 절연유를 정제하여 SF₆를 용해시켰을 경우에 절연유의 절연파괴전압을 조사하고 아울러 $\tan \delta$ 와 ϵ 의 변화로 관찰한 것이다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 절연유에 대한 고주파 전류는 전압의 1/2승에 거의 비례하여 증가한다.
- 2) 35% 정도의 전압의 감소가 있다.
- 3) 주입가스의 압력을 증가시키에 따라 고주파 절연파괴전압은 완만하게 증가한다.
- 4) 전원전압의 주파수 증가에 따른 유전점접($\tan \delta$)은 거의 지수 함수적으로 증가하고 유전률(ϵ)은 (0.6%/MHz)의 기울기로 다소 감소하는 경향을 나타낸다.
- 5) SF₆ 가스를 주입했을 때 절연파괴 특성과 유전특성은 air, Ar보다 약 25% 정도 향상되는 결과를 나타낸다.

참 고 문 헌

1. 條原, 日本電氣學會誌, Vol.82. No.880. (1962)
2. 日本電氣學會 放電 Handbook, pp.233-245. 551-605(1975)
3. Brown S.C "Introduction to Electric Discharge in Gases" John Wiley New York (1966)
4. 柿元, 日本電氣學會誌, Vol.100. pp.264.

- (1980)
5. J.M.Meek and J.D Craggs : Electrical Breakdown of Gases pp.689-716
 6. Alston, "Alston High voltage Technology, Oxford University Press, pp. 34-53.(1968)
 7. 電氣工學 Handbook, 大光書林, pp.467-473.(1977)
 8. A kakimoto M sugiura IEEE Trans Instrum Meas IM-22 177.(1973)
 9. Fucks etal Z phys vol 145 NoI.(1956)
 10. A kakimoto etal Rev Sci Instrum, 46. pp. 1338.(1975)
 11. ASTM Methods D 1531-62
 12. 大石 日本電氣學會誌, Vol.74. pp.1362
 13. 柿元 日本電氣學會誌, Vol.100. No.54. pp. 264.(1980)
 14. German standard DIN 53-483 sheet 2.