

## BTA를 첨가한 초고압변압기유의 유동시 체적고유저항특성

논문  
12-4-13

### The Volume Resistivity Characteristics on Fluid Flow of Ultra-High Voltage Transformer Oils added BTA

이종필\*, 이용우\*\*, 이수원\*\*\*, 신종열\*\*\*\*, 홍진웅\*

(Jong-Pil Lee\*, Yong-Woo Lee\*\*, Soo-Won Lee\*\*\*, Jong-Yeol Shin\*\*\*\*, Jin-Woong Hong\*)

#### Abstract

Specimens stirred with the several kinds of benzotriazole(hereinafter referred to BTA) addition which is very effective to decrease the streaming electrification, are tested to investigate the change of properties for insulating fluid using in ultra-high voltage transformer, and it will give a guideline to find out a proper quantity of BTA addition for the most effective suppression against the streaming electrification.

At first, gas chromatography is analyzed in order to find out the change of chemical properties of specimen added BTA. The characteristics on volume resistivity is investigated in experimental device built in laboratory to figure out the electrical properties in a flowing transformer oil added BTA.

As a consequence, in GC, we could not find out the change of the physical properties in an insulating fluid by BTA. In a flowing transformer oil, the characteristics on volume resistivity of specimen contained BTA 10[ppm] are superior to the others.

**Key Words(중요용어) :** BTA(벤조트리아졸), streaming electrification(유동대전), gas chromatography(가스 분석), Volume resistivity(체적고유저항)

#### 1. 서 론

초고압 전력용 변압기는 변압기 절연유를 강제 순환시켜 냉각하는데, 순환시 절연유가 고체 표면을 유동할 때 유동대전이 발생하게 되며<sup>[1]</sup>, 초기의 강제 송유식 전력용 유입 변압기에서는 대전 레벨이 낮아 변압기 절연 성능에 문제가 없었으나<sup>[2]</sup> 최근의 전력용 변압기는 대용량·고전압화로 냉각 송유량이 많아져서 이 유동대전 전하량이 커지게 되어 대전전류가 많이 흐르게 되면서<sup>[3]</sup> 변압기 내의 어느

한 부분이 절연과피 되는 사고 사례가 많이 보고되고 있으며<sup>[4]</sup>, 초고압 변압기의 설계시 이 유동대전에 관한 사항은 반드시 고려하여야 할 중요한 요소이다<sup>[5]</sup>.

현재 유동대전을 줄이려는 다각적인 연구가 활발히 진행되고 있으나<sup>[6]</sup> 유동대전 억제제를 투입하여 대전량을 줄이는 연구, 즉 절연유 내의 양이온 농도를 감소시키기 위하여 음이온을 주입시켜 양이온의 농도를 감소시키는 방법에 관한 연구는 미약한 실정이다.

이에, 본 논문에서는 실제 국내 초고압 변압기에서 사용되는 절연유에 유동대전 억제제로서 그 특성이 우수한 벤조트리아졸(이하 BTA)<sup>[7]</sup>을 여러 가지 농도로 섞어 만든 시료를 실험하여 가장 효과적으로 유동대전을 억제하는 BTA 첨가량을 찾아내기 위해 변압기유의 전기적 특성 변화를 연구하였다.

우선 BTA 첨가시료에 대한 화학적 특성 변화를 찾기위해 가스 크로마토그래피(GC)로 분석하였다. 아세톤을 용제로 분석하면 BTA의 화학구조는 단

\* : 광운대학교 전기공학과  
(서울시 노원구 월계1동 447-1, Tel : 02-940-5145,  
Fax : 02-915-4630 E-mail : ealab@daisy.kwang-  
woon.ac.kr)

\*\* : 대덕대학 전기과

\*\*\* : 철도대학 전기제어과

\*\*\*\* : 삼육대학 자동차 정비과

1998년 9월 9일 접수, 1999년 3월 18일 심사완료

순한데 비해 변압기유는 400~500여 가지의 화학물질로 구성되어 있고 피크도 높아 BTA가 섞였을 때 변압기유의 화학적 변화를 정확하게 분석하여 판단하기 어려움을 확인하였다<sup>[6]</sup>. 또한 여러 가지 함유량의 BTA 첨가 변압기유를 유동상태에서 전기적 특성 변화를 알고자 하여 실험실에서 자체 제작한 유동실험장치로 체적고유저항특성과 일부 유전특성을 조사하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

사용된 시료는 실제로 변압기에서 사용되고 있는 나프텐계 광유에서 얻어낸 순수 국산 변압기유로 국내 초고압 변압기에 사용하는 D사 DNI-4호를 시료로 사용한다. 본래의 변압기유는 아무런 첨가제도 포함되어 있지 않으며 순수하게 탄화수소로 조성된 것을 선택하였으며 특성은 표 1과 같다.

표 1. 변압기유의 물성  
Table 1. Physical properties of Transformer Oils

Transformer Oils	
Specific gravity	0.898
Viscosity [cSt]	40[°C] 11.4
	75[°C] 4.33
Pour point	-35[°C]
Cloud point	-30[°C]
Flash point	150[°C]
Evaporation loss [98°C×5H]	0.18
Corrosive sulfur	None
Dielectric strength [2.5mm]	min. 40[kV]
Oxidation stability	Sludge % 0.24
	Acid No. 0.26
Water constant [ppm]	18
Color (ASTM)	L 0.5

### 2-1. 시료

초고압 변압기에 사용하는 유동대전 억제제인 BTA의 화학구조식과 특성을 각각 그림 1과 표 2<sup>[6]</sup>에 나타낸다.

변압기유 2000[ml]에 BTA의 첨가량을 각각 5 [ppm], 10[ppm], 30[ppm]이 되도록 교반시켜 네 종류의 시료를 제작하였으며, 제작된 시료의 구

분은 표 3과 같다.

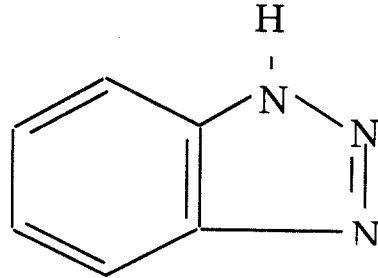


그림 1. BTA의 화학구조식  
Fig. 1. Constitutional formula of BTA

표 2. BTA의 물성  
Table 2. Physical properties of BTA

Classification	Physical properties
Molecular weight	119.12 [g/mole]
Melting point	95~97 [°C]
Solubility	120 [mg/l] at 20 [°C] (Insulating oil)
Vapor pressure	0.04 [mmHg] at 30 [°C] 0.10 [mmHg] at 100 [°C]
Boiling point	205 [°C]

표 3. 시료의 구분  
Table 3. The classification of specimen

Classification	Amount of Insulating Oil [ml]	Content of BTA [mg]	Concentration of BTA [ppm]
Specimen #1	2000	0	0
Specimen #2		10	5
Specimen #3		20	10
Specimen #4		60	30

시료의 교반 시간은 모두 9시간이며, 교반 후에 교반 과

정에서 발생된 기포에 의한 시료의 물성 및 유동대전 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위하여  $10^{-2}$ [Torr]에서 2시간 동안의 진공탈기 과정을 거친 다음 실험을 하였다.

2-2. 체적고유저항 및 유전특성 실험 방법

도전성의 변화를 조사하기 위하여 각 시료의 체적고유저항과 또한 유전특성을 측정하였으며 장치에 대한 개략도는 그림 2와 같다. DC 500[V], 1000[V]를 인가하여 각 시료의 체적고유저항을 측정하는데 장치로는 Highmegohm meter VMG-1000(ANDO Co.)을 이용하고 스텝 인가법에 따라 전압을 인가하고 5분이 경과한 후에 지시된 체적고유저항을 기록하였으며 유전특성 장치는 주파수와 인가전압을 변화시키면서 측정할 수 있는 Videobridge 2150을 사용하였다. 변압기 내부에서와 같은 대전전류를 발생시키기 위하여 프레스 보드를 삽입한 대전장치를 제작하여 장착하고 이 대전장치를 통과한 시료에 대한 체적고유저항을 측정하기 위하여 정전용량 16[pF], 상부전극과 하부 전극간의 간격 1[mm]인 액체전극을 사용한다. 시료를 액체 전극에 주입하는 과정에서 발생되는 기포의 영향을 최소화 하기 위하여 진공 데시게이터 내에 시료를 주입한 전극을 넣고 진공펌프를 이용하여 진공 탈기한 상태에서 2시간 동안 방치하였다.

시료의 온도조절은 자동온도 조절장치가 장착된 탱크에서 25[°C]부터 100[°C]까지 1차적으로 가열하고, 전극이 장착된 오븐에서 2차적으로 가열하여 관을 통해 손실된 열을 보상할 수 있도록 하였다.

절연유가 순환하면서 발생된 대전전류를 완화시키기 위하여 기름탱크 내부에 설치한 완화망을 통해 대전전류가 방전될 수 있도록 접지단자에 연결하고, 탱크에 있는 절연유의 순환시키는 동력으로는 Chemical motor를 사용하였다. 또한, 유로(流路)로 사용되는 관은 7[mm] 테프론관을 사용하고 관을 흐르는 절연유의 유량을 측정할 수 있도록 유량계를 설치하며 유량을 조절하기 위하여 탱크로 직접 연결되는 바이패스관을 설치하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. BTA 미첨가시 체적고유저항의 온도 의존성

유량의 변화에 따른 각 시료의 체적고유저항을 측정하므로써 유량의 영향을 조사하였다. BTA를 첨가하지 않은 변압기유를 대전장치를 설치하지 않고 유동시켰을 경우와 설치하고 유동시켰을 경우로 구분하여 인가전압 500[V], 1000[V]에서 유량변화에 따른 유동대전량의 변화를 확인하기 위하여 체적고유저항의 온도 의존성을 각각 그림 3, 그림 4에 나타내었다.

그림 3과 그림 4에서 대전장치가 없을 경우에는 온도가 상승함에 따라 변압기유의 체적고유저항은 점차 감소하고 또한 유량이 10[l/h]에서 30[l/h]로 증가하여 변압기유의 유동성이 향상되어 도전성 캐리어의 확산에 영향을 주기 때문에 변압기유의 체적고유저항이 다소 저하되는 것을 볼 수 있으나 큰 차이는 없는 것을 확인할 수 있다. 이것으로 유동하더라도 대전 전하를 생성하지 않는 경우에는 체적고유저항이 크게 감소하지 않으며 또한 시간당 유량이 증가하여도 체적고유저항이 저하되기는 하지만 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 또한 KS, ASTM, IEC, JIS 등 규정에 의하면 정지된 시료의 경우 온도 80[°C]에서 체적고유저항  $5 \times 10^{13}$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]의 국제 규격에는 유량 변화에 무관하게 적합한 것을 확인할 수 있었다<sup>[10]</sup>.

그러나 대전장치를 설치하고 유동시켰을 경우에는 인가전압이 500[V]인 경우보다 인가전압 1000[V]인 경우가 유량이 10[l/h]에서 30[l/h]로 증가하고 온도가 상승할수록 체적고유저항 차이가 나타나며 대전장치가 없을 경우와 비교하여 체적고

유저항 값이 크게 감소된 것을 확인할 수 있다. 변압기를 구성하고 있는 고체 절연물과 변압기유와의 계면에서 형성되는 전기 이중층이 변압기유 유동에 의해 분리되면서 발생하는 유동대전 전하는 유량이 많아지고 온도가 올라갈수록 증가됨을 확인할 수 있으며 대전전하가 변압기유의 체적고유저항 저하에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

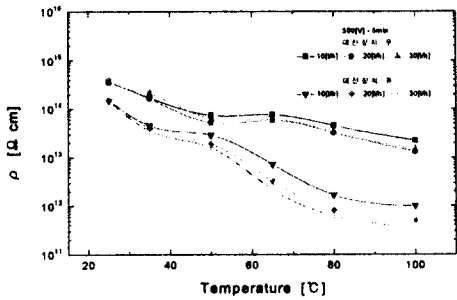


그림 3. 유동시 체적고유저항의 온도 의존성(500 [V])

Fig. 3. The temperature dependence of volume resistivity on fluid flow(500 [V])

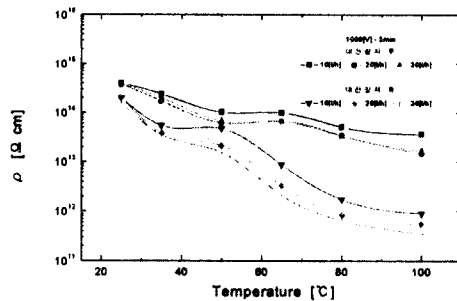


그림 4. 유동시 체적고유저항의 온도 의존성(1000 [V])

Fig. 4. The temperature dependence of volume resistivity on fluid flow(1000 [V])

### 3-2. BTA 첨가시 체적고유저항의 온도 의존성

시간당 유량 10[l/h]의 조건에서 DC 500[V], 1000[V]를 인가하였을 경우의 체적고유저항의 온

도 의존성을 각각 그림 5, 그림 6에 나타내었다.

인가전압 500[V]인 경우의 그림 5에서 원시료는 온도가 증가함에 따라 대전장치에서 대전된 전하는 외부에서 공급되는 열에너지의 영향으로 확산층 내에서의 이동이 자유롭게 되어 온도가 상승할수록 체적고유저항이 급격히 낮아지며, BTA가 첨가된 시료들은 온도 변화에 대해 다소 체적고유저항이 감소되기는 하지만 원시료에 비해 거의 일정하게 유지된다.

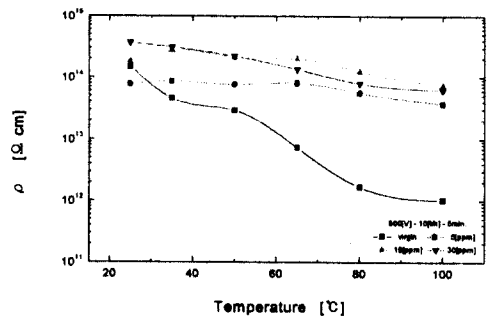


그림 5. 체적고유저항의 온도 의존성(10[l/h], 500[V])

Fig. 5. The temperature dependence of volume resistivity(10[l/h], 500[V])

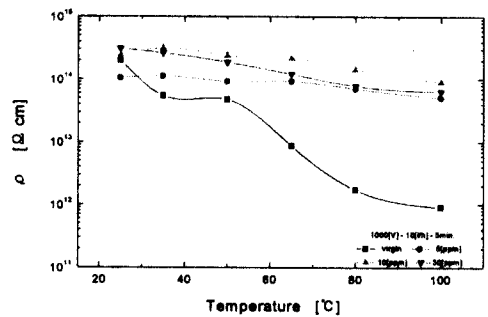


그림 6. 체적고유저항의 온도 의존성(10[l/h], 1000[V])

Fig. 6. The temperature dependence of volume resistivity(10[l/h], 1000[V])

BTA가 첨가되어 대전량이 줄어들고 확산층 내

의 이온의 농도를 감소시킴으로써 온도가 상승하여도 도전성에 기여하는 이온의 증가를 억제시켜 체적고유저항이 안정한 특성을 나타내는 것으로 생각된다. 또한 50[°C] 미만의 온도 영역에서는 BTA 첨가량이 증가함에 따라 체적고유저항이 커지나 온도 50[°C] 이상에서는 BTA 첨가량 10[ppm]인 시료의 체적고유저항이 시료들 중에서 가장 우수하게 나타난다. BTA 첨가량 5[ppm]인 시료는 저온에서는 원시료보다 낮은 체적고유저항 값을 나타내지만 실험 온도가 30[°C] 이상으로 상승하면 안정한 특성을 유지하기 때문에 원시료의 체적고유저항보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 BTA가 활성화되어 대전을 억제하는데 온도조건이 영향을 주기 때문으로 생각된다.

그림 6에서와 같이 인가전압이 1000[V]로 높아지면 온도 30[°C] 이상의 영역에서 BTA가 첨가된 시료들의 체적고유저항이 원시료의 체적고유저항에 비해 크게 나타나며, 이 온도 영역에서 BTA 첨가량 10[ppm]인 시료의 체적고유저항이 가장 우수하게 나타남을 확인할 수 있다. BTA 첨가량 30[ppm]인 시료의 경우는 확산층 내의 부극성 이온의 농도가 높아져 온도 증가에 따라 체적고유저항 값이 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 인가전압에 무관하게 온도 100[°C] 부근에서 BTA의 용융 온도에 접근하므로 BTA를 첨가한 시료들의 체적고유저항이 유사한 값으로 나타난다.

시간당 유량 20[l/h]의 조건에서 DC 500[V], 1000[V]를 인가하였을 경우의 체적고유저항의 온도 의존성을 각각 그림 7, 그림 8에 나타내었다.

인가전압 500[V]인 그림 7의 경우 시간당 유량

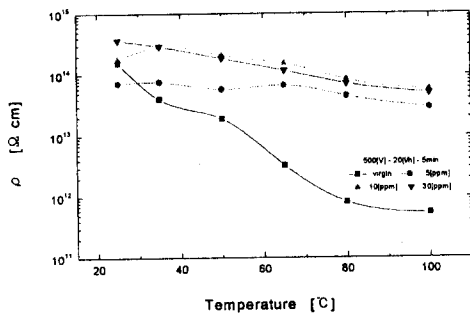


그림 7. 체적고유저항의 온도 의존성(20[l/h], 500[V])

Fig. 7. The temperature dependence of volume resistivity(20[l/h], 500[V])

10[l/h]인 조건에서와 유사한 경향으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 원시료의 경우는 시간당 유량이 많아지면서 체적고유저항의 저하가 더 급격히 나타나는 것을 확인할 수 있으며, BTA가 첨가된 시료들의 경우는 BTA의 대전억제 작용으로 인해 온도 변화에 대해 영향을 거의 받지 않는 것으로 보이며 온도 35[°C] 이하에서는 BTA 첨가량이 증가함에 따라 체적고유저항은 커지지만 그 이상의 온도에서는 BTA 첨가량 10[ppm]인 시료의 체적고유저항이 가장 우수하다.

인가전압이 1000[V]로 높아지면 그림 8에서와 같이 온도 28[°C] 이상의 영역에서 BTA가 첨가된 시료들의 체적고유저항이 원시료의 체적고유저항에 비해 크게 나타나며, 온도 32[°C] 이상의 영역에서 BTA 첨가량 10[ppm]인 시료의 체적고유저항이 우수하게 나타나고, 시간당 유량이 많아짐에 따라 BTA 첨가량 30[ppm]는 시료의 확산층 내에 부극성 이온의 농도의 영향이 나타나기 때문에 BTA 첨가량 10[ppm]인 시료에 비해 낮은 체적고유저항을 나타내는 온도 영역이 점차로 낮은 온도 영역으로 이동되는 것으로 생각된다.

시간당 유량 30[l/h]의 조건에서 DC 500[V], 1000[V]를 인가하였을 경우의 체적고유저항의 온도 의존성을 각각 그림 9, 그림 10에 나타내었다.

유량이 많아지면서 모든 인가전압에서 체적고유저항이 유량의 영향을 받아 조금 감소한 것을 볼 수 있으며 BTA 첨가량 10[ppm], 30[ppm]인 시료의 체적고유저항은 온도 증가에 따라 선형적으로 서서히 감소하여 온도 100[°C]에서는 BTA가 첨가된 시료들은 거의 비슷한 체적고유저항 값을 나타

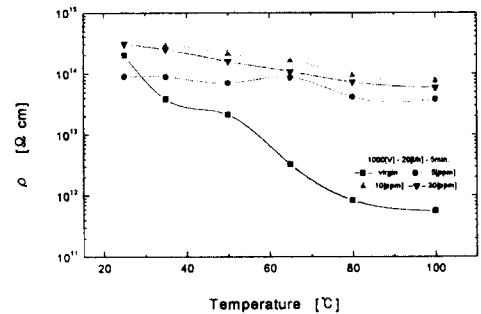


그림 8. 체적고유저항의 온도 의존성(20[l/h], 1000[V])

Fig. 8. The temperature dependence of volume resistivity(20[l/h], 1000[V])

내는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 BTA가 용융됨으로 인해 대전 억제 능력이 고온에서 점차 약해지기 때문으로 생각된다. 원시료는 모두 유량의 증가와 인가전압 상승의 영향으로 체적고유저항이 선형적으로 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다.

유량 30[l/h]의 조건에서도 인가전압이 올라갈수록 10[ppm]의 BTA첨가 시료가 가장 대전을 잘 억제하여 체적고유저항이 가장 높음을 알 수 있었다.

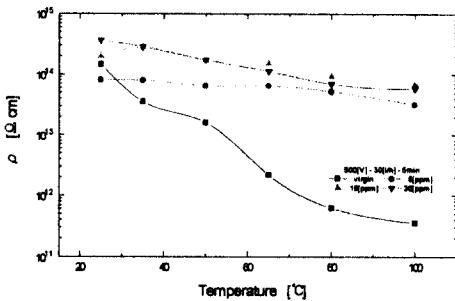


그림 9. 체적고유저항의 온도 의존성 (30[l/h], 500[V])

Fig. 9. The temperature dependence of volume resistivity (30[l/h], 500[V])

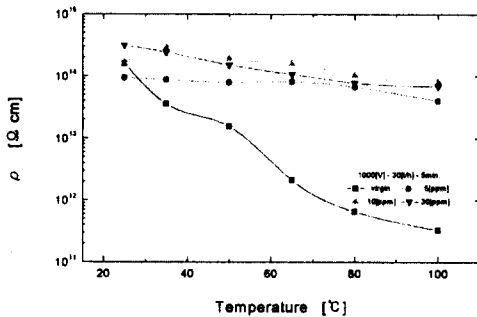


그림 10. 체적고유저항의 온도 의존성 (30[l/h], 1000[V])

Fig. 10. The temperature dependence of volume resistivity (30[l/h], 1000[V])

### 3-3. BTA 첨가시 유전특성의 주파수 의존성

온도 80[°C], 인가전압 750[mV]에서는 그림 11에서 보는 것처럼 원시료의 경우 저주파수 영역에서 유전정점의 크기가 선형적으로 감소되고, BTA 첨가량 5[ppm]인 시료는 약 300[Hz] 영역에서, 그리고 BTA 첨가량 30[ppm]인 시료는 약 100[Hz] 영역에서 피크가 나타난다. 특히 BTA 첨가량 10[ppm]시료는 저주파수 영역에서 유전정점이 가장 낮음을 알 수 있다. 이것은 온도가 올라가면서 시료의 유동성이 증가하나 BTA의 작용이 효과적이므로 유전손실이 적음을 확인할 수 있다. 또한 BTA 첨가량 5[ppm]인 시료는 대전장치로부터 공급되는 대전전하에 대한 BTA의 영향이 미약하게 나타나기 때문에 약한 피크가 나타나며 BTA 첨가량 30[ppm]인 시료의 경우는 부극성 이온의 농도가 유전손실에 기여하기 때문에 낮은 주파수 영역에서 피크가 나타나는 것으로 생각된다.

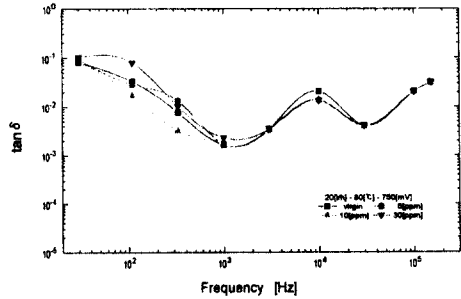


그림 11. 유전특성의 주파수 의존성 (20[l/h], 750[mV], 80[°C])

Fig. 11. The frequency dependence of dielectric characteristics (20[l/h], 750[mV], 80[°C])

## 4. 결 론

초고압 대용량 전력용 변압기의 절연 및 냉각 재료로 사용되고 있는 변압기유에 대해 유동대전 억제제인 BTA를 첨가하여 첨가량 및 유량에 따른 변압기유의 체적고유저항 특성 변화와 일부 유전특성에 대해 연구한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

### 1) BTA 미첨가시

대전장치가 없을 경우 온도 및 유량의 증가에 따

라 도전성 캐리어의 증가함으로 체적고유저항이 다소 저하하지만 KS 등 각종 규격에는 적합하였다.

실제 변압기 내부에 사용하는 프레스보드를 이용한 대전장치를 설치하면 대전장치가 없이 실험한 체적고유저항값보다 온도 증가에 따라 크게 감소하였다. 또한 유량이 많아지면 대전량은 증가하여 체적고유저항이 감소하였다.

2) BTA 첨가시

BTA를 첨가한 시료는 대전량이 줄어 들고 확산층 내의 이온의 농도를 감소시킴으로써 온도가 상승하여도 도전성에 기여하는 이온의 증가를 억제시켜 체적고유저항이 안정한 특성을 나타냄을 알 수 있었다. BTA 5[ppm] 첨가 시료는 온도에 따라 안정한 특성을 나타내며 30[ppm] 시료는 확산층 내의 부극성 이온의 농도가 높아져 체적고유저항이 점차 감소하였다. 유량과 인가전압이 커지면서 10 [ppm]첨가 시료가 가장 대전을 잘 억제하여 체적고유저항이 가장 높음을 알 수 있었다.

또한 유전특성실험에서도 10[ppm]첨가 시료가 저주파수 영역에서 유전손실이 가장 적음을 확인할 수 있었다.

이상에서와 같이 초고압 대용량 변압기유에 BTA를 첨가하고 대전장치를 설치하여 유동시킨 후 체적고유저항과 유전특성을 실험한 바, 10[ppm]으로 첨가시 유동대전 억제에 가장 효과적임을 확인하였다.

**참 고 문 헌**

1. T. V. Oommen, "Static Electrification Properties of Transformer Oils", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, pp. 123-1 28, 1988.
2. S. Yasufuku, J. Ise and S. Kobayashi, "Radiation-Induced Degradation Phenomena in Electrical Insulation Oils", IEEE

- Transactions Electrical Insulation, EI-13, 1, pp. 45-50, 1978.
3. T. V. Oommen, "Electrostatic Charging Tendency of Transformer Oils", IEEE Power Apparatus and Systems, pp. 1923-1930, 1984.
4. A Sierota and J. Rungis, "Electrical Insulating Oils, Part I, Characterization and Pre-treatment of New Transformer Oils", IEEE Electrical Insulation Magazine, 11, 1, pp. 8-20, 1995.
5. J. K. Nelson, "Dielectric Fluids in Motion", IEEE Electrical Insulation Magazine, 10, 3, pp. 16-28, 1994.
6. Shigeo Watanabe et al, "New Methods of Reducing Streaming Current", IEE 6th International Conference on Dielectric Materials Measurements and Application, pp. 370-373, Sep. 1992.
7. 安田正行 外, "大容量變壓器における流動帯電の一抑制方法について", 電氣學會論文誌, pp. 265-272, 昭60.
8. Yong-Woo Lee, Soo-Won Lee, Jin-Woong Hong et al, "The Effect of Electrification Suppressant due to Characteristics on Fluid Flow of Transformer Oils", Proceeding of the International Conference on Electrical Engineering, July, Vol. 2, pp. 99-102, 1998.
9. M. Windholz, The Merck Index, Tenth Edition, Merck & Co., Inc., p. 1108, 1983.
10. Yong-Woo Lee, Wang-Kon Kim, Jin-Woong Hong, "A Study on the Electrical Properties of Transformer oils for Large Power", Journal of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 11, No. 3, pp. 81-88, 1996.