

식물성 절연유의 유속과 BTA에 따른 유동대전 현상 연구

최순호¹, 방정주¹, 허창수^{1,a}

¹ 인하대학교 전기공학과

Research of Flow Velocity and BTA According to the Streaming Electrification of Vegetable Insulating Oils

Sun-Ho Choi¹, Jeong-Ju Bang¹, and Chang-Su Huh^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, INHA University, Incheon 402-751, Korea

(Received September 3, 2012; Revised September 24, 2012; Accepted September 24, 2012)

Abstract: Mineral insulating oils are an important insulating materials in oil-filled transformer. However, the mineral oil is the cause of the environmental problem. The vegetable oils are substitutes for mineral oil because of its biodegradability characteristic. As large size and high rating of the transformer increases, the losses increase at a faster rate. So insulating oil is forced circulation in the oil-filled transformer by using oil pumps. The flow electrification occurs when insulating oil was forced to be circulated. To check the flow electrification, had conducted experiments varying factors. As a result, the streaming electrification could see the changes according to flow velocity, oil temperature and insulation materials.

Keywords: Streaming electrification, Vegetable insulating oils, Benzotriazole (BTA), Reynold's number

1. 서론

현재 전력 분야에서 많은 연구와 개발을 통해 기술이 비약적으로 발전했으며 특히 국제적으로는 환경적인 측면에 관심을 기울이고 있는 추세이다. 변압기 분야에서도 역시 친환경 측면에서 많은 연구가 진행 중인데, 유입변압기 내부에 들어가는 광유에서 친환경물질로 대체하려는 움직임이 활발하다. 광유는 원유에서 추출하여 얻는 물질로 유출시 낮은 생분해성으로 환경오염 문제를 일으킬 수 있다. 하지만 미국, 한국에서 사용 중인 식물성 절연유는 대두유에서 추출한 성분으로 생분해성이 높고, 식물에서 추출하는 특성상 장기적 수급안정성을 확보할 수 있다. 또한

기존 광유에서 보이는 폭발 위험성과 관련하여 발화점, 인화점이 높아 화재 안정성을 보인다. 현재 전 세계적으로 전력사용량이 점차 증가하고 있으며 전력규모에 맞춰 변압기의 용량도 점차 증가하는 추세이다. 유입변압기의 용량이 증가하면서 내부에서 많은 열이 발생하게 되고 이를 효과적으로 제거하기 위해 절연유를 내부에서 외부로 강제순환 과정을 거치게 한다. 절연유가 순환하는 과정에서 고체 절연체 부근에서 유동대전 현상이 발생하게 된다 [1]. 유동대전 현상은 변압기 내부 절연유의 이동 속도에 따라 그 정도가 달라지는데, 특히 유입변압기 내에서 유체와 외부 방열판으로 이어지는 통로 (덕트)에서 유속이 가장 높다 [2]. 유입변압기의 유동대전 현상이 문제되는 변압기의 용량은 500 kV급 이상의 변압기에서 유속이 1 m/s가 초과될 경우에 크게 문제된다고 알려져 있지

a. Corresponding author; cshuh@inha.ac.kr

만 현재 국내에서는 식물성 절연유가 22.9 kV급의 배전용 변압기에 주로 사용되고, 275 kV급 전력변압기에 일부 적용되고 있으며, 아직 500 kV 이상에서는 적용한 예가 없다. 국내 산업계에서는 식물성 절연유의 친환경부분 때문에 사용하는 것이 아닌 식물유 고유의 높은 발화점, 인화점으로 인한 화재안정성 측면을 고려하여 적용한다고 볼 수 있다. 하지만 추후에 환경적인 부분이 더욱 부각되어 식물성 절연유를 대용량 유입변압기에 적용하였을 경우, 이런 유동대전 현상은 단기적으로는 큰 문제를 발생하지 않지만 장기간에 걸쳐 지속될 경우, 변압기 내부의 방전현상과 변압기 폭발로 이어져 장기적인 안정성을 중요시하는 전력시스템에 문제를 일으킬 수 있다. 일반적으로 알려진 유동대전현상의 요인인 유속, 유온, 관로의 형상, 고체절연체의 종류, 수분, 첨가물과 같은 다양한 조건에 따라 대전현상이 변화되고 이러한 인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 그 현상을 규명하는 것은 쉽지 않다.

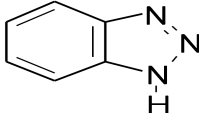

본 연구에서는 변압기의 유온에 따른 점도변화, 유속변화에 따라 유체의 흐름을 판단할 수 있는 레이놀즈 수를 계산함으로써 유체의 흐름이 식물성 절연유 내 유동대전특성에 미치는 영향을 알아보았다. 광유에서 유동대전방지제로 사용된 BTA (benzotriazole)를 식물성 절연유에 적용하여 다양한 인자변화(유온, 유속, 단면적의 변화)에 따른 변화를 실험을 통해 분석하였다.

2. 실험 방법

기존 유입변압기에 사용되어온 절연유인 광유의 유동대전 억제제를 위해서 사용된 물질은 BTA이다. 이 물질은 일본, 호주에서 광유를 사용한 유입변압기의 유동대전 억제제로 사용되어 왔다. BTA는 장기간의 걸친 절연유 신뢰성에 대한 불확실성과 절연파괴전압에 영향을 미친다는 단점이 문제점으로 지적되고 있다 [1]. 본 실험에서는 식물성 절연유는 국내의 'D사'의 제품 'BIOTRAN-35'을 사용하였고, 기존 광유의 유동대전 방지제(BTA)로 사용된 물질을 식물유에 적용하여 실험을 진행하였으며, 그 특성은 표 1과 같다. Benzotriazole의 상태는 표 1의 real image에서와 같이 white needle type (하얀 침형)으로 관찰된다.

실험에서 사용된 절연지는 그림 1과 같이 유입변압기 층간 절연에 일반적으로 사용되는 재료로 다이아몬드패턴 코팅 절연지와 일반절연지를 사용하였다. 변압기 절연물은 화학적 구조를 보았을 때, 셀룰로오

Table 1. The Characteristic of 1,2,3-Benzotriazole.

Name	1,2,3 - Benzotriazole (BTA)
CAS No.	95-14-7
Chemical formula	C ₆ H ₅ N ₃
Specific gravity (water=1)	1.36
Melting point	90~95 °C
Constitutional formula	
Real image	

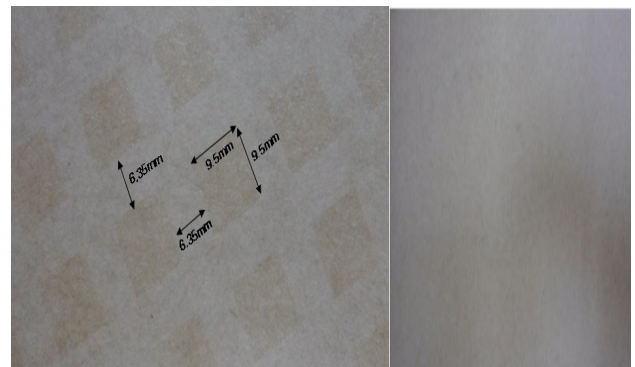


Fig. 1. The Diamond-pattern coating and normal insulating paper.

스 (cellulose)와 리그닌 (lignin)으로 구성되어 있다. 일반적으로 셀룰로오스 (C₆H₁₀O₅)는 히드록시기 (hydroxyl group, -OH)을 가지고 있고, 리그닌은 알데하이드 (aldehyde group, -CHO)와 카복시기 (carboxyl group, -COOH)을 가지고 있다 [2].

만약에 절연유가 연속적으로 흐를 경우 절연유와 고체절연체 사이에 마찰에 의해서 전자구름 (electron cloud)의 이동이 발생하게 된다 [3]. 그 이후 양전하와 음전하로 분해된 후 절연유가 정체되어 있으면 그림 2와 같이 절연유와 절연체 사이에 전체적으로 전기적 중성조건을 만족하는 전기이중층 (electric double layer)을 만들게 된다. 이러한 조건에서 유체가 다시 흐름 경

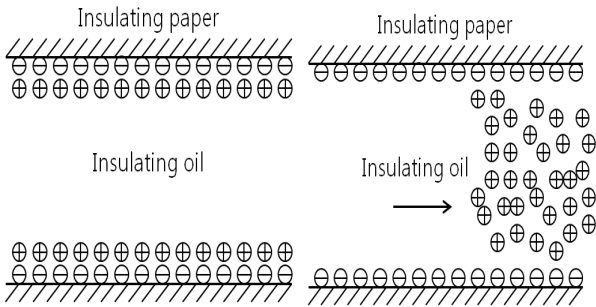


Fig. 2. The mechanism of charge separation.

우 절연유로 양전하가 흐르게 되고 장기적으로 지속될 경우 전하축적으로 이어져 변압기 내부에 문제를 발생시키게 한다.

2.1 유동대전 실험장치 및 인자

직렬식 실험방법과 다르게 유속, 절연체의 종류, 유동대전 방지제의 변화와 같이 연속적으로 변화하는 유동대전현상을 확인하기 위해 강제순환식 유동대전 실험 장치를 구축하여 실험을 진행하였다. 실험 장치는 그림 3과 같이 설계하였다. 식물성절연유의 유온, 유속, 고체물질의 종류를 변화에 따른 변화를 분석하기 위해 인자변화가 가능하도록 실험 장치를 제작하였다. 유온 변화를 주기 위해서 SUS재질로 제작한 절연유 탱크 외부에 절연체 역할을 하는 PP (폴리프로필렌)을 배치하고 열선을 놓아 절연유의 온도를 변화시켰다. 유속의 변화는 사용된 마그네틱 펌프의 회전수를 제어할 수 없기 때문에 관로를 바이패스 구조로 배치하여 유속을 제어하고 유량계를 사용하여 유속을 측정하였다. 절연체의 물질은 일반 절연지, 다이아몬드 패턴 코팅 절연지로 실험을 진행하였고 미소전류는 'K사' Pico Ammeter를 사용하여 측정하였다. 측정시 측정부위의 압력 변화와 외부영향으로 인하여 미소 전류값이 크게 변화할 수 있기 때문에 일본 'M사' Positioner를 사용하여 측정하였다. 변화하는 미소전류값을 적절하게 기록, 분석하기 위해서 미소전류계와 GPIB 케이블을 사용하여 연결하였고 Labview 프로그램으로 저장하여 분석했다. 실험 도중 외부의 영향을 최소화하기 위하여 구리로 제작한 차폐장치를 설치하였다. 다양한 인자의 변화는 유속은 32~55 cm/s, 유온은 20~50°C, 고체절연체는 코팅 유·무 절연지로 변화시켰으며 유동대전방지제인 벤조트리아졸은

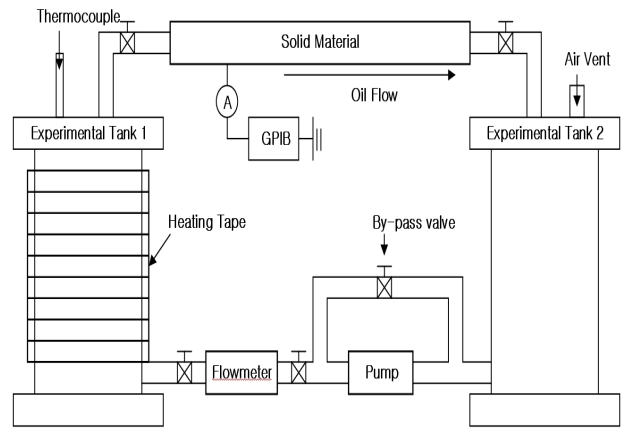


Fig. 3. The forced-circulation flow electrification measuring equipment.

0, 30 ppm으로 변화를 주어 실험을 진행하였다. 절연유 유속변화는 유동대전 현상에 중요한 영향을 미치기 때문에 유속을 측정해야 한다. 유속을 측정하는 것은 쉽지 않기 때문에 관로의 직경과 일정한 시간동안 유량계로 측정된 양을 측정하여 유속을 계산하여야 한다. 유량계를 적용할 때에는 식물성 절연유의 온도에 따른 점도변화가 (40°C - 35 cSt, 100°C - 8 cSt) 크고, 높은 점도를 가진다는 점을 고려하여 유량계를 선택해야 한다. 대전관은 코팅 유·무 절연지를 사용하여 700 mm, 직경은 16 mm, 25 mm로 설계, 제작하였다. 절연지로 대전관을 제작할 경우 절연유의 흐름에 의하여 대전관을 기능을 못할 수 있기 때문에 이를 고려하여 두께를 선택하여야 한다. 또한 절연지로 제작한 대전관 외부에 케이블타이로 고정함으로써 대전관의 기능을 잃지 않도록 했다. 실험탱크에 절연유를 채운 뒤 펌프를 이용해 강제순환을 시킬 경우 실험장치 내부에 공기가 있으면 순환에 저해요소가 될 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 실험탱크 2 상부에 에어벤트를 설치하여 공기로 인한 순환저해 문제를 해결하였다.

2.2 유속과 점도에 따른 레이놀즈 수 (Reynoly's number)

식물성 절연유는 온도에 따라서 점도의 변화가 크고 실험의 조건에서 유속을 변화주기 때문에 실험도중 내부의 유체 상태에 대해 알아볼 필요성이 있다. 레이놀즈 수는 아래 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

Table 2. The factor effecter of Reynold's number.

Insulating Oils		Mineral	Vegetable
Viscosity	40°C (cSt)	7.800	35.12
	100°C (cSt)	2.240	8.010
Pipe diameter constant	16, 25 mm		
velocity constant	32, 37, 44, 55 cm/s		

Table 3. The Reynold's number of mineral and vegetable insulating oils.

Oil Type		32 cm/s	37 cm/s	44 cm/s	55 cm/s
40°C / 16 mm	mineral oil	656.41	758.97	902.56	1128.21
	vegetable oil	145.78	168.56	200.46	250.57
40°C / 25 mm	mineral oil	1025.64	1185.90	1410.26	1726.82
	vegetable oil	227.79	263.38	313.21	391.51
100°C / 16 mm	mineral oil	2285.71	2642.86	3142.86	3928.57
	vegetable oil	639.20	739.08	878.90	1098.63
100°C / 25 mm	mineral oil	3571.43	4129.46	4910.71	6138.39
	vegetable oil	998.75	1154.81	1373.28	1716.60

$$Re = \frac{V \times d}{\nu} \quad (1)$$

V : 유체의 평균속도 (cm/s), d : 관의 직경 (cm)

ν : 동점성 계수 (g/cm²·s)

KS M 2014 기준을 통해서 측정된 절연유의 점도는 동점도 (cSt)로 표현되기 때문에 동점성 계수에 대입하면 된다.

(1 St = 1 cm²/s, 1 cSt = 0.01 cm²/s)

식물성절연유의 레이놀즈 수를 계산하기 위한 실험

인자와 절연유의 특성은 표 2와 같고 계산된 레이놀즈 수는 표 3과 같다. 대략적으로 $Re \approx 2300$ 을 기준으로 층류와 난류로 나뉘는데 전이구역을 고려한다면 $Re \approx 2000 \sim 3000$ 사이에서는 흐름을 정확하게 말할 수 없다. $Re \approx 2000$ 미만의 영역은 층류로서 대체적으로 규칙적이고 일정한 흐름을 보인다고 할 수 있고, 전이구역을 넘어선 난류 영역에서는 시간적이나 공간적으로 불규칙한 흐름을 보인다고 말할 수 있다 [4]. 식물성 절연유는 광유에 비해 점도가 높아 (온도에 따라 약 4~5배) 온도에 따른 점도의 변화에 따라서 큰 변화를 보이지 않고, 실험유속 또한 높지 않아 실험의 인자 변화 범위 내에서는 층류 범위 안에 든다는 것을 알 수 있다. 레이놀즈 수가 층류 범위 안에 있는 것을 감안하면, 실험 결과는 유체는 난류의 상황처럼 불규칙적으로 흐르지 않기 때문에 층류 상황에서의 실험 결과는 일정한 일관성을 가지는 결과를 예측할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

유입변압기 내부의 식물성 절연유가 강제 순환할 경우 절연유 내에서 유동대전현상이 발생한다. 일반적으로 대전현상은 유온, 유속이 변화할 때 내부의 유전율, 도전율이 변화하고 다양한 특성이 직·간접적으로 영향을 미치기 때문에 대전현상이 변화하게 된다. 유동대전 현상이 발생하는 것을 억제하기 위해 유속과 유동대전 방지제를 사용하는 방법이 있다. 대용량 유입변압기 내부의 절연유 유속 제한과 변압기 내부에서 외부 방열판으로 이어지는 지점에서 유속이 급격히 증가하는 문제의 원인인 관로의 개선 방법이 사용되지만, 이와 같은 방법은 많은 열이 발생할 경우를 고려하면 근본적인 문제해결 방안이 아니다. 다른 방안으로 광유에서 사용되어 왔던 유동대전 방지제 (BTA)를 사용하여 대전현상을 억제하는 것을 들 수 있다. 광유의 경우 유동대전방지제를 오랜 시간에 걸쳐 적용하였기 때문에 많은 연구와 안정성이 증명되었지만 반면에 식물성 절연유는 적용 및 연구기간이 짧고 절연유의 장기적 안정성에 미치는 영향이 증명되지 않은 단점을 가지고 있다.

3.1 유속변화에 따른 변화

유체는 앞에서 제시한 것과 같이 유속, 유온, 점도

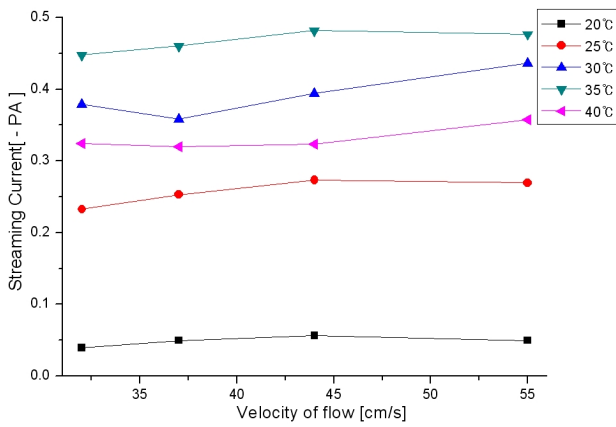


Fig. 4. The flow electrification of coating paper (diameter 16 mm, fluid velocity change).

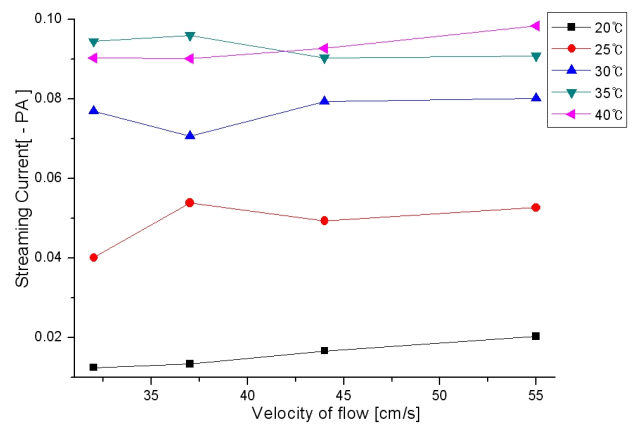


Fig. 6. The flow electrification of normal paper (diameter 16 mm, fluid velocity change).

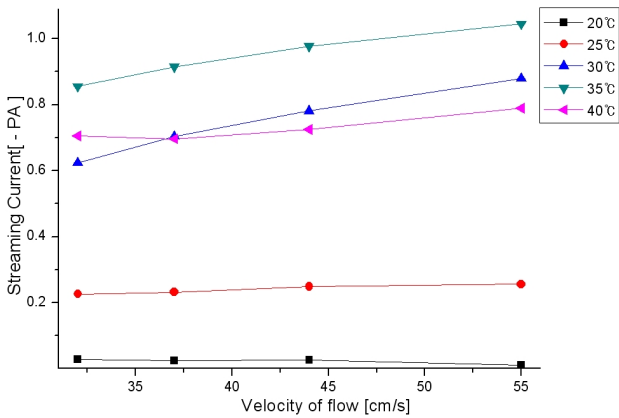


Fig. 5. The flow electrification of coating paper (diameter 25 mm, fluid velocity change).

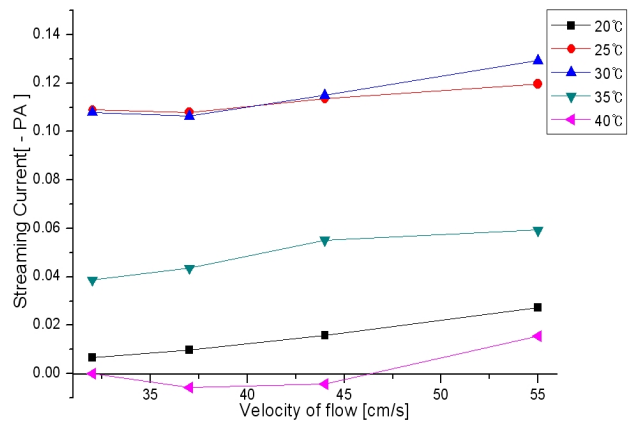


Fig. 7. The flow electrification of normal paper (diameter 25 mm, fluid velocity change).

와 같은 다양한 조건에 의해서 내부의 흐름상태의 변화를 나타내는 레이놀즈 수가 변화하게 된다. 식물성 절연유를 조건에 맞춰 실험을 진행한 결과 그림 4~7 와 같은 결과가 나타났다. 표 3과 같이 식물성 절연유를 사용하고 실험 조건과 같을 때 레이놀즈 수는 낮은 층류조건에만 든다는 것을 알 수 있다. 또한, 실험을 통해서 각각의 절연지의 온도, 유속이 변화되는 상태에서 유동대전 정도가 급격히 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 일반적인 광유의 연구에서 유속이 변화함에 따라 대전전류가 변화되는 결과를 지난 연구를 통해 제시되었기 때문에 유속인자가 큰 영향인자라고 알려졌다.

하지만 식물성 절연유에서의 계산된 값과 실험결과와 같이 레이놀즈 수 계산값과 비교하였을 때 층류의 경우에는 대전현상이 유속에 따라서 크게 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 실제 유입변압기의 내부 부하를 100% 가동하지 않은 상황에서, 내부 유온의 온도와 변압기의 열화를 판단할 때 사용되는 핫스팟 온도를 고려하여도 약 100°C 이상의 온도범위로 상승하지 않는다. 따라서 내부 온도에 따른 점도를 고려했을 때, 식물성 절연유를 적용한 변압기의 유속에 따른 변화를 관찰하려면, 내부와 외부 방열판으로 이어지는 관로와 같이 직경의 변화로 유속이 크게 변화하는 곳의 레이놀즈 수를 계산하여 적용하면 그 대전현상을 예상할 수 있다.

3.2 코팅된 절연지 (직경, BTA 변화)

코팅된 절연지를 사용하여 직경 16 mm으로 제작하여 0, 30 ppm으로 BTA를 넣었을 때 결과는 그림 8, 9와 같이 나타난다. 현재 실험 조건에서는 레이놀즈 수의 층류조건이기 때문에 유속이 변화함에 따라 유동전류가 경향성 있는 결과를 보임을 알 수 있으며, BTA를 사용하지 않았을 때, 50°C 부근에서 최소가 됨을 알 수 있다. 또한 유동전류의 상승과 하강이 이어져 유동대전의 최대점을 찾을 수 있다. 하지만 BTA를 사용하였을 때, 32~35°C 부근에서 유동대전이 반전됨을 알 수 있다.

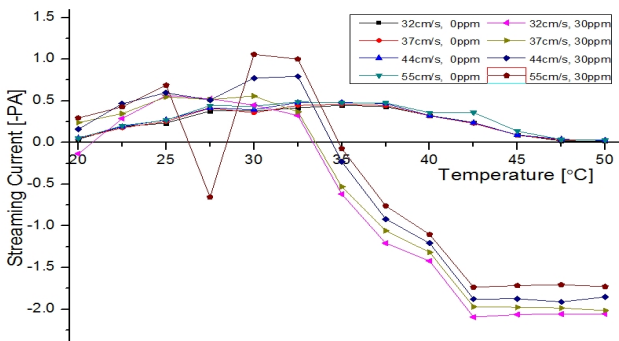


Fig. 8. The flow electrification of coating paper (diameter 16 mm, anti-static agents 0 vs 30 ppm).

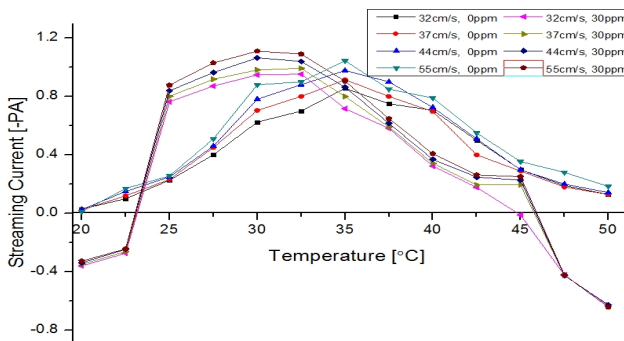


Fig. 9. The flow electrification of coating paper (diameter 25 mm, anti-static agents 0 vs 30 ppm).

그림 9과 같이 직경이 증가 (대전 면적 증가)하면, 온도에 따라 대전현상이 그림 8과 비교하여 같은 온도범위에서 약 2배 정도 증가한다. BTA를 사용했을 때의 변화를 관찰하였을 때, 그림 9와 같은 범위에서

반전현상이 일어나지 않지만 약 45°C 이상에서 같은 반전현상을 관찰할 수 있다. 또한 그래프의 진행하는 경향성을 고려하였을 때, 온도가 계속 증가한다면 일반적으로 발생하는 유동전류보다 많이 발생 할 것이라 예상할 수 있다.

3.3 일반 절연지 (직경, BTA 변화)

일반절연지를 사용하여, 온도, 직경, BTA 사용 유무에 따른 변화결과는 그림 10, 11와 같다.

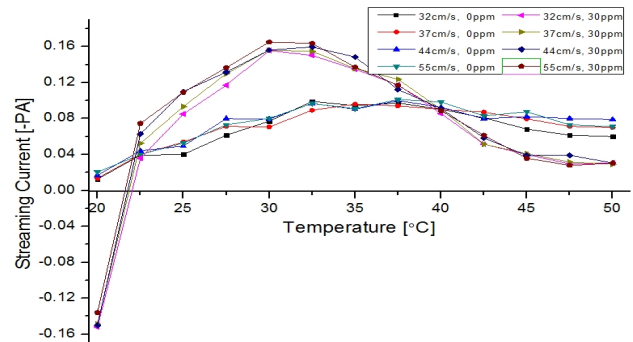


Fig. 10. The flow electrification of normal paper (diameter 16 mm, anti-static agents 0 vs 30 ppm).

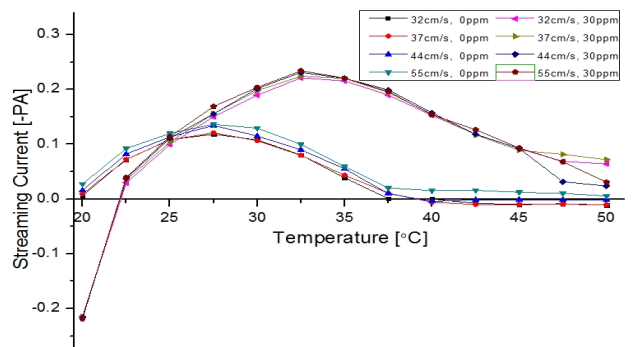


Fig. 11. The flow electrification of normal paper (diameter 25 mm, anti-static agents 0 vs 30 ppm).

이 실험을 통해 일반절연지는 비교적 안정적인 결과를 보이며, 코팅된 절연지와 비교하여 20~25°C 온도범위 외에서는 유동전류가 급격하게 반전되지 않는다는 것을 알 수 있다. BTA를 사용하지 않을 경우

일반적으로 나타내는 유동대전 최대점을 나타내고, 점차 안정화된다. 일반절연지가 층류상태에서는 유속에 많은 변화가 없었지만 유온에 민감하게 반응하였고, 일관된 결과를 보였다. 유온 상승조건에서 유동대전 전류가 상승과 감소에 따라 최대점이 나타나는 것은 온도가 상승함에 따라 식물성 절연유의 도전율이 증가하면서 유동대전 전류의 완화시간이 감소하기 때문에 이와 같은 결과가 관찰된다. 또한 일반절연지가 코팅 절연지에 비해 상대적으로 낮은 대전현상을 보이고, 안정화되는 50℃ 이상 온도 범위에서 추가적으로 실험할 필요가 있다.

4. 결론

1. 유동대전 현상을 변화시키는 유속인자를 분석한 결과 레이놀즈 수의 변화에 따라서 대전현상이 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 식물성 절연유는 높은 점도를 가지고 관로의 제한이 있었기 때문에 낮은 유속범위에서 계산되는 층류 정도에서는 비교적 일정한 결과를 나타낸다. 하지만 실제적으로 사용되는 유입변압기에서 예상되는 높은 유속 (100 cm/s)과 관로두께를 고려하여 난류 조건으로 추가적 실험을 할 필요가 있다.
2. 코팅된 절연지의 경우에는 BTA 사용 유·무에 따라서 유동 대전현상의 경향성이 달라짐을 알 수 있다. BTA를 사용할 경우 경향성을 예측하기가 어려워짐을 알 수 있다. 또한 BTA를 사용하지 않을 경우 50℃ 부근에서 안정화가 되는 것을 관찰할 수 있다. 실제 사용되는 유입변압기의 내부 절연유의 온도가 50℃를 넘어갈 상황이 대부분이므로 추가적 높은 온도범위에서 대전전류의 변화를 관찰하여야 한다.
3. 일반절연지의 BTA 사용 유·무의 따라 코팅된 절연지와는 다르게 유동대전의 반전이 나타나지 않고 안정적으로 변화한다.

대용량 유입변압기에 식물성 절연유를 사용하였을 때, 유동대전현상은 절연지의 종류, 온도, 유속, BTA의 첨가 유·무에 따라서 복합적으로 작용한다는 것을 실험을 통해 나타냈다. 다만 식물성 절연유에 유동대전을 억제할 용도로 BTA를 사용할 경우, 대전전류의 변화됨을 예상하기 어려우므로 사용에 신중을 기해야 한다.

감사의 글

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT 연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2012-H0301-12-1010).

REFERENCES

- [1] P. Aksamit and D. Amarzky, *J. Electrostat.*, **69**, 195 (2011).
- [2] H. Hanmei, Z. Conhai, L. Guang, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1 (2011).
- [3] X. Xie, P. Zou, H. Wang, T. Xiao, and Q. Fu, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1 (2011).
- [4] S. H. Choi and C. S. Huh, *KIEE*, **61**, 580 (2012).
- [5] K. Kato, T. Nara, H. Okubo, F. Endo, A. Yamazaki, H. Koide, Y. Hatta, and T. Hikosaka, *IEEE TDEI*, **16**, 1566 (2009).
- [6] T. Ishikawa, K. Yasuda, T. Igarashi, S. Yanabu, G. Ueta, and S. Okabe, *IEEE TDEI*, **16**, 273 (2009).
- [7] H. Wu and S. Jayaram, *IEEE TDEI*, **3**, 499 (1996).
- [8] K. Hiroyoshi, T. Kosei, and I. Keiichi, *J. Electrostat.*, **63**, 735 (2005).
- [9] C. P. McShane and J. Luksich, *Dielectric Liquids (ICDL)*, 393 (2005).
- [10] E. Moreau, T. Paillat, and G. Touchard, *IEEE TDEI*, **10**, 15, (2003).
- [11] C. S. Huh and J. I. Jung, *J. KIEEME*, **10**, 334, (1997).
- [12] Y. W. Kim, H. C. Lim, Y. I. Kim, Y. B. Kim, and D. C. Lee, *J. KIEEME*, **7**, 236 (1994).