

이온성 및 양성 계면 활성제가 변압기유의 화학적 특성 및 유동대전에 미치는 영향

10-7-11

Influence of Interface Active substances(Ionic and Amphoteric) on Chemical property and Streaming Electrification of Transformer Oil

김용운* 이덕출**

(Yong-Woon Kim, Duck-Chool Lee)

Abstract

This research was conducted to analyze the change of surface tension, viscosity, streaming current and conductivity of transformer oil when it were injected with the interface active substances.(anionic:S-111, cationic:S-121, amphoteric:S-131) The changes properties of the surface tension and viscosity of the oil which were injected with the interface active substances were divided into the changes area and the minimum reduction area. The surface tension and viscosity of the oil which were injected with three different kinds of interface active substances showed remarkable change at the point where the concentration of the substance in anionic, in cationic and in amphoteric were 100[ppm], 10[ppm] and 1[ppm] respectively. The streaming current and conductivity of the same sample oil were also changed at the same densities of the surface tension and viscosity. For this factor, it was possible for us to interpret the mechanism of the streaming current and conductivity. Therefore the interface active substances of the three kinds were injected into the oil within the limit of optimal volume, prevention effects of electrification were showed more excellence than unmixed insulating oil.

Key words(중요용어) : Additive substance(첨가제), Surfactentension(표면장력), Viscosity(동점도), cmc.(미셀형성 임계농도)

1. 서 론

1964년 국내 총 전력수요는 492[MW]였으나 해마다 급증하여 2000년에는 40,601[MW]로 예상되고, 이에 따라 현재 동해 울진 원자력 발전소를 정점으로 신태백과 신가평 변전소를 거쳐 서해안 화력 발전소까지 765[kV] 초고압 송전선로가 건설중에 있다. 여기에 원활한 전력계통의 운용을 위하여 초고압 유입 변압기의 채용 또한 불가피한 실정이며, 지금까지 기초단계에 머물고 있는 유동대전에 의한 변압기의 각종 장애해에 대한 관심이 집중되고 있다. 일반적으로 절연성 액체가 고체와 접촉하고 있을 때 액체

중에 존재하는 정 부 이온들이 고체의 특성에 따라 화학 포텐셜에 의해 고체 표면에 선택 흡착되고, 이 표면에 상대 이온이 Coulomb인력에 이끌려 전기 이중층을 형성한다. 이 상태에서 액체가 유동하면 전기 이중층에서 전하분리가 일어나고 액체와 고체는 반대 극성으로 대전되는 현상을 유동대전 현상이라 한다. 이와같이 국부적으로 발생한 전계가 절연내력 이상으로 되면 부분방전이나 연면방전의 과정을 거쳐 변압기의 폭발 사고로까지 이어진다.¹⁾ 이러한 사고의 예는 미국의 Berkshire Transformer Consultants INC.의 보고서²⁾에 기술되어 있으며, 또한 Texas Power and Light Company의 1985년도 보고서^{3,4)}에는 사고경위 까지 자세히 언급하고 있다. 유동대전 기구를 알기 위해서는 먼저 대전량이 무엇에 의해 결정 되는가를 알 필요가 있다. 현재까지의 연구 결과를 보면 대전량은 액체의 도전율, 수송 속도, 파이프의 재질 등 주변조건에 의해 지배받는

* : 영월공업전문대학 전기과
** : 인하대학교 공대 전기공학과
접수일자 : 1997년 6월 2일
심사완료 : 1997년 8월 20일

것으로 알려져 있고,⁵⁾ 도전율의 변화와도 밀접한 관계가 있다고 보고되고 있다.⁶⁾ Klinkenberg, Leonard, Hampel 등은 가솔린에 이온성 계면활성제를 첨가하여 액체중에 발생하는 전하량이 시료액체가 갖는 도전율의 임의값에서 피크치를 나타내고 있음을 확인했고, 이 현상을 절연유내의 전하의 발생과 완화의 관계로부터 그 기구를 제시하고 있다.⁷⁾ 그러나 같은 도전율을 갖는 액체라도 대전량의 크기가 다르게 관측되므로 도전율만을 가지고 대전기구 전체를 해석하는 것은 충분치 못하며^{8,9)} 또한 첨가하는 계면활성제의 종류 및 농도에 따라라도 대전량과 도전율의 크기는 다르게 관측될 수 있으므로 이들 사이의 상관 관계를 보다 깊이 분석할 필요가 있다.^{10,11)}

본 연구에서는 Surfion 계열의 정이온, 부이온 및 양성 계면활성제를 각각 첨가하고, 활성제별 첨가 농도변화에 따른 표면장력 및 동점도의 특성, 그리고 유동전류 및 도전율의 특성을 관측하고 상호 연관 관계를 규명 하고자 한다.

2. 실험

2.1 시 료

일본 JIS규격의 2호 A급의 고압 대용량 변압기용 절연유를 사용하였다. 계면 활성제는 크게 이온성과 비이온성으로 분류되나, 본 연구에서는 이온성 중에서도 Surfion 계열의 부이온성 S-111(이하 No.1), 정이온성 S-121(이하 No.2) 및 양성 S-131(이하 No.3) 이상의 3종에 대한 각각의 특성에 관하여 연구 하였다. 계면 활성제 각각의 특성을 표1에 나타내었다.

2.2 장치 및 측정

실험장치의 주요 부분은 절연유를 저장하는 상부 탱크, 유동전류 발생 파이프, 발생한 전하를 측정하는 하부탱크로 구성된다. 실험 장치는 항온 항습조 내에 설치된 후 절연유는 상부탱크에 연결된 질소가스에 의해 유동된다. 실험장치의 개략도를 그림1에 나타내었다. 일정 기압에서 발생된 유동전류는 Picoammeter(일본제 TR-8641형)로 측정하여 Pen recorder(일본제 FBR-252A)로 기록하였다. 시료유의 표면장력과 동점도 측정에는 일본 협화화학(주)의 C.B.V.P-A₁형 전자동 표면장력 측정기와, 일본 JIS K2807규격의 케논 쉘스케, SO형 동점도계(측정범위: 0.5~1000[cst])를 이용하였다.

표 1. 계면 활성제의 제원

Table1. Properties of interface active agents

	S-111 (No.1)	S-121(No.2)	S-131(No.3)
이온성	부이온	정이온	兩性
외관	담황색 투명액체	황색 투명액체	담황색 투명액체
固型分 농도(%)	30	30	30
모체	물/이소프로판올	물/이소프로판올	물/이소프로판올
비중 (25°C)	1.08	1.10	
그라프트점 (°C)	20	< 0	< 0
수용액의 표면장력 (dyne/cm 25°C)	66.2	28.0	31.7
	(0.001%) 10.5	(0.1%) 16.2	(0.1%) 8.8
CaCl ₂ 허용농도 (ppm) (0.1% 수용액)	< 30	-	7000
비고	내열성 250°C	양호한 방청효과 및 대전방지 효과	저농도에서 충분한 표면활성을 나타냄

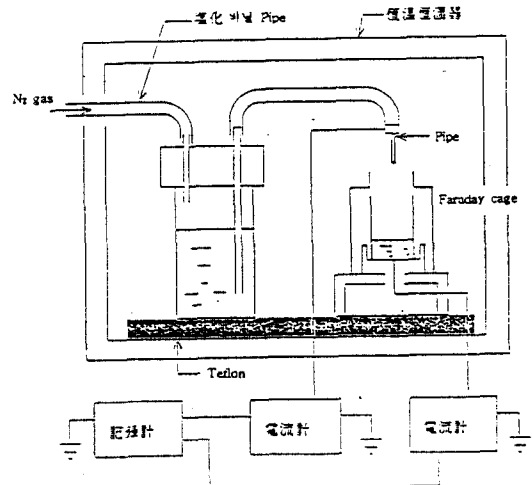


그림 1. 실험장치 구성도

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

3.결과 및 고찰

3.1 표면장력과 동점도

3종의 활성제가 첨가된 시료유의 표면 장력과 동점도를 첨가 농도변화에 따른 특성을 그림2와 그림3에 나타내었다. 표면장력의 특성은 계면 활성제의 농도가 증가함에 따라 0.01(No.3), 0.1(No.2) 및 1[ppm](No.1)농도에서 급격히 감소한 후 각각 1(No.3), 10(No.2) 및 100 [ppm] (No.1)부터 최저치로 포화 되고있다.

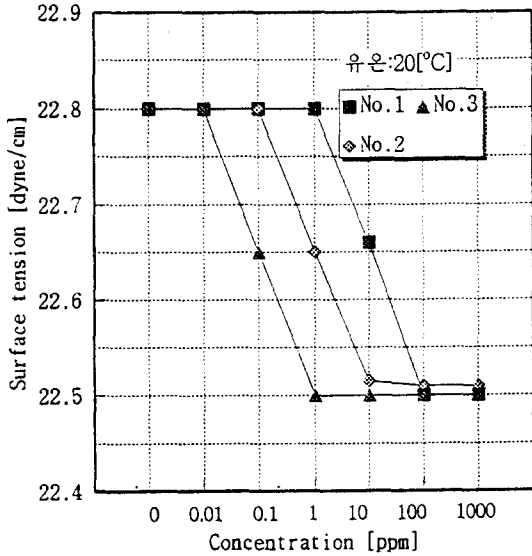


그림 2. 표면장력과 농도의 관계
Fig. 2. The relationship between surface tension and density.

표면장력의 특성이 변화하는 동일한 농도에서 동점도의 특성도 임의의 농도에서 감소된 후 각각 1(No.3), 10(No.2) 및 100[ppm](No.1)부터 최저치로 포화하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 절연유의 물리적 특성이 활성제의 첨가농도에 따라 현저하게 변함을 알게 되므로서 각 첨가제의 임계농도를 추정할 수 있다. 이와같은 표면장력과 동점도 특성변화를 화학적 측면에서 고찰한다.

계면 활성제를 구성하는 분자들은 친유기(소수기)와 소유기(친수기)가 서로 상반되는 성질을 갖는 원자단(기)의 화합물이다. 본 실험에 사용된 부이온, 정이온 및 양성 계면 활성제는 유중에서 이온 해리를 하지 않는 $-OSO_3^-$ 와 $NH_3^+Cl^-$ 그리고 $-CH_2COO^-$ 로 구성된 소유기와 CH_2 의 사슬로 구성된 친유기를

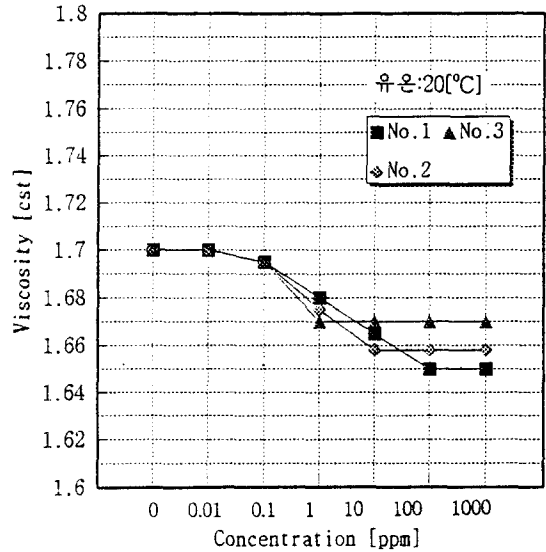


그림 3. 동점도와 농도의 관계
Fig. 3. The relationship between viscosity and density.

갖고있는 계면 활성제이다.¹²⁾ 이와같은 친유기와 소유기가 결합되어 있는 하나의 원자단을 단일 분자라 하며, 유중에 첨가된 활성제를 구성하는 단일분자의 소유기쪽은 액체에 대하여 반발작용을 하고 친유기쪽은 액체를 끌어당기는 역할을 한다. 흡인력이 클 경우는 친유기쪽의 이온해리가 되며, 반발력이 클 경우에는 각각의 단일분자들은 반발력에 의해 유중을 무질서하게 움직이게 된다. 그러나 농도가 희박할 경우 단일분자들은 개별적으로 존재할 뿐 고액 계면간 콜로이드 막이나 유중 미셀은 형성하지 못한 상태로 대전 방지 효과는 크게 기대할 수가 없다. 활성제 농도가 조금 증가 하게되면 유면이나 계면 가까이 존재하던 단일 분자들은 친유기를 유중에 둔채 소유기쪽은 유면이나 계면으로 향하게 하든가, 혹은 소유기끼리 부착하여 소형 미셀을 형성하기 시작한다. 첨가농도가 더욱 증가하여 임계농도에 가까워지면 유면과 계면에는 단일 분자들의 흡착현상으로 인해, 일정한 방향으로 배향된 단 분자막(콜로이드막)이 형성되고, 유중에는 수심에서 수백개의 단일 분자들이 모여 하나의 거대 미셀을 형성 하게된다. 이때의 농도를 미셀형성 임계농도, 즉 cmc(critical micelle concentration)라 한다. 그림2에서 활성제에 따라 표면장력의 최저 포화치가 각각 1(No.3), 10(No.2) 및 100[ppm](No.1)과 같이 다르게 나타나는것은 3종의 활성제의 cmc가 각각 다르다는 사실을 나타내고 있으며, 이는 각각의 활성제를 구성하

는 단일분자들이 계면으로의 흡착력 차이(절연유와
의 반발력 차이)에 따른 것으로 추정된다. 0[ppm]의
순수 절연유에 비해 활성제 첨가에 따라 표면장력이
저하 하는것은 계면에 형성된 콜로이드 막을 구성하
는 단일분자들의 친유기쪽 탄화수소 사슬의 표면장
력이 활성제가 첨가되지 않은 변압기유의 표면장력
보다 훨씬 낮기 때문으로 사료된다.^{13,14)} 동점도는
일정 용량의 시료유가 온도와 압력이 같은 조건에서
동점도계의 모세관을 유출하는 시간[sec.]과 동점도
계의 보상 계수의 곱으로 나타낸다. 시료유가 모세
관을 흐를 때, 시료유와 관 표면과의 마찰 계수는
표면장력에 의해 결정된다. 표면장력이 작을수록 마
찰계수는 작아지고 따라서 유출시간 t는 작게 되어
동점도가 감소되는 것으로 사료된다.

3.2 유동전류(I_s)

(a) I_s와 cmc 관계

항온조내를 일정 온도와 습도로 유지한 상태에서
N₂ gas압을 3[kg/cm²]으로(0.5~3.0 [kg/cm²]까지 변
화 가능)일정히 유지하고 3종의 계면 활성제가 첨가
된 시료유의 활성제 농도변화에 따른 유동전류의 특
성을 그림4에 나타내었다. 첨가 시료유 No.1, No.2,
No.3는 각각 1, 1, 0.1[ppm]까지는 순수 절연유와 비
슷하거나 다소 감소한 값을 보인 후 급격히 감소한
다. 그리고 부이온성(No.1)의 시료유는 100[ppm]에
서, 정이온성(No.2)의 시료유는 10[ppm]에서 그리고

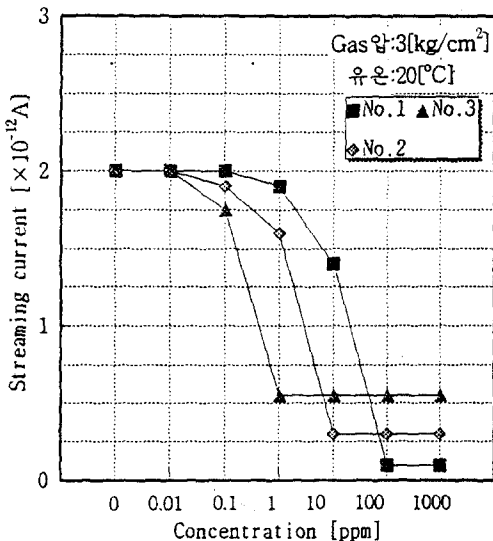


그림 4. 유동전류와 농도의 관계

Fig. 4. The relationship between streaming current and density.

양성의 시료유(No.3)는 1[ppm]에서 최저치로 포화되
고 있다. 이와같이 계면 활성제의 농도 변화에 따른
I_s의 변화가 표면장력 특성변화를 일으키는 동일한
농도에서 일어나고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부
터 유동전류가 급격히 감소하기 시작하는 농도에서
고액 계면간에 콜로이드 막이 형성 되기 시작하여
최저치로 포화되기 시작하는 농도에서는 완전한 콜
로이드막이 형성된 것으로 사료된다. 이러한 막으로
인하여 절연유와 고체표면 사이에서 직접적인 접촉
은 최소화 된다. 따라서 계면에서 전하분리도 급격
히 감소하게 되므로서 I_s가 감소하며 콜로이드 막이
완전하게 형성하게 되면 I_s는 최저치로 된다. 이 사
실로부터 대용량 유입 변압기의 유동대전을 방지하
기 위해서는 Surfion계열 부이온성 활성제의 경우
100[ppm]이상, 정이온성 활성제의 경우 10[ppm]이상
그리고 양성 활성제의 경우 1[ppm]이상 첨가되어야
한다는 사실을 제시할 수 있다.

(b) I_s와 유온의 관계

N₂ gas 압력을 3[kg/cm²]으로 일정히 유지하고, 3
종의 활성제를 cmc로 절연유에 첨가한 시료유의 I_s
에 대한 유온 의존성을 그림5에 나타내었다. 순수
절연유의 유동전류에 비해 3종의 시료유 모두 양호
한 유동대전 방지 효과를 나타냄을 알 수 있고, 고
온에서보다 저온에서 다소 양호한 방지효과를 나타
내는데, 이는 콜로이드 막을 형성하는 단일분자들의

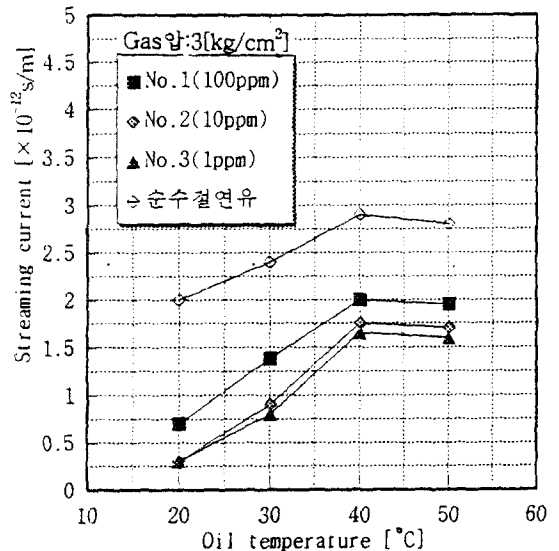


그림 5. 유동전류와 유온의 관계

Fig. 5. The relationship between streaming current and oil tem.

약한 흡착부분이 유온 상승과 함께 부분적으로 파괴 되기 때문에 사료된다. 또한 3종의 시료유 가운데 정 부이온성에 비해 양성의 활성제가 가장 양호한 방지효과를 보이는데, 이는 양성의 경우 계면에서 콜로이드 막을 구성하는 단일분자들의 흡착력이 강한 반면, 정이온과 부이온은 상대적으로 약하게 흡착된 결과 막의 밀집농도의 차이에서 비롯된 것으로 추정된다. 유온 상승에 따라 순수 절연유 및 첨가 시료유의 I_s 모두 증가 경향을 보인 후 40[°C]이후부터 미소하나마 감소 경향을 나타낸다. I_s 가 증가하는 경향은 도전을 상승에 따른 전하 완화시간 τ 가 짧아지는 것이 주된 기구로 볼 수 있으며, 40[°C]이상에서 다소 감소하는 경향은, 이 부근에서 시료유의 도전율이 약 8×10^{-12} [s/m]로 A.Klinkenberg가 발표한 유동전류 최대 발생값인 $10^{-14} \sim 10^{-12}$ [s/m]에 접근하고 있음을 알 수 있다.^{10,11)}

(c) I_s 와 가스 압력의 관계

온도를 20°C로 일정히하고 (b)항에서와 동일한 첨가유에 대한 가스압 변화에 따른 I_s 의 특성을 그림6에 나타내었다. 가스압 증가에 따라 직선적으로 증가하는 순수 절연유의 I_s 에 비해 3종의 첨가유의 I_s 는 2[kg/cm²]까지는 I_s 가 거의 흐르지 않고 그 이후 다소 증가하지만 그 증가율도 순수 절연유에 비해 현저히 낮음을 알 수 있다. 특히 양성의 경우 전 범

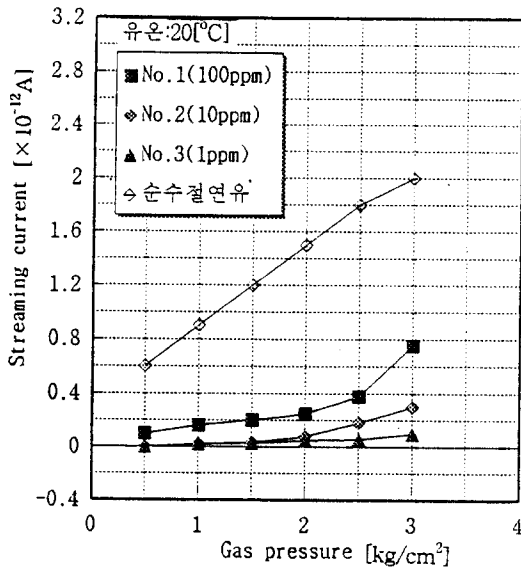


그림 6. 유동전류와 가스압의 관계
Fig. 6. The relationship between streaming current and gas pre.

위에 걸쳐 거의 대전이 되지 않음을 알 수 있는데, 이는 계면간에 형성된 콜로이드 막은 유속의 증가에도 거의 파괴되지 않는다는 사실을 증명하는 것이며, 어느 특정 활성제의 정확한 cmc를 알 수 있다면, 그 농도에서 첨가된 변압기유의 유속을 증가시켜도 유동대전으로 인한 재장해를 초래하지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 기존의 변압기유에서 염려되는 유동대전 현상으로 인한 사고방지를 예측할 수 있고 냉각효율 또한 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.3 도전율(σ)

3종의 활성제중 부이온성 활성제(No.1)만을 첨가한 시료유의 유온을 20[°C]로 유지하고 DC 3[kV]를 일정시간 인가 한 경우의 도전전류 특성을 그림7에 나타내었다. 30초간 도전전류는 약 수십 $\times 10^8$ [A]까지 흐른 후 급격히 감소하여 거의 일정한 값을 보이고 있다. 이는 시료유내에 형성된 수많은 거대 미셀들이 30초간 전도성 캐리어로 기여한 후 30초 이후부터 시료유는 고 절연성 액체로 되기 때문으로 생각된다. 농도별 각각의 시료유 마다 이러한 과정을 3회 반복하여 측정된 도전전류의 평균값으로부터 도전율을 구하였다. 첨가유의 활성제 농도를 상대적으

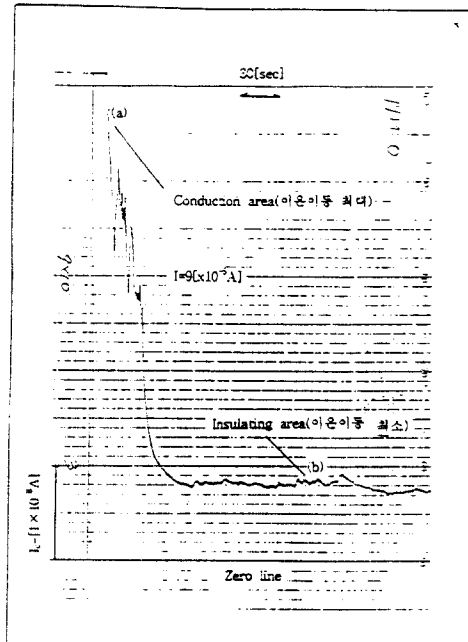


그림 7. 도전전류와 시간의 관계
Fig. 7. The relationship between conduction current and time.

로 증가시킬 경우 전압인가 직후부터 일정시간(본 실험에서는 30초)흐르는 도전전류 평균값의 증가가 관측되고, 도전율의 증가가 대전방지에 바람직하지 않음을 고려할 때 유동대전 방지 측면만을 생각하여 활성제의 과다한 첨가는 효과적이지 못함을 알 수 있다.

(a) σ 와 농도의 관계

3종의 활성제를 농도별로 첨가한 시료유의 도전율을 그림8에 나타내었다. 3종의 시료유의 도전율이 순수 절연유의 도전율에 비하여 No.1의 경우 100[ppm], No.2의 경우 10[ppm] 그리고 No.3의 경우 1[ppm]까지 거의 동일한 값을 보인 후 급격히 증가되고있다. 이 현상 역시 표면장력과 동점도와 동일 농도에서 σ 가 변함을 알 수 있으므로 σ 를 cmc로서 고찰한다.

cmc 이하에 있어서 유중 단일분자의

반경 : r , 이동속도 : μ_1 , 체적 : v_1

cmc 이상에 있어서 거대 미셀의

반경 : R , 이동속도 : μ_2 , 체적 : v_2

라 하면

$$\mu_1 = \frac{e}{fr} \tag{1}$$

$$\mu_2 = \frac{ne}{fR} \tag{2}$$

단, n : Micelle을 형성하는 단일분자의 수

e : 단일분자 1개의 전하량

f : 점성에 의한 마찰계수

$$v_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \tag{3}$$

$$v_2 = \frac{4}{3} \pi R^3 \tag{4}$$

단, $v_2 = n v_1$

따라서

$$R = n^{1/3} r \tag{5}$$

가 되고

$$\mu_2 = \frac{ne}{f \cdot n^{1/3} \cdot r} = \frac{n^{2/3} e}{f \cdot r} = n^{2/3} \mu_1 \tag{6}$$

로 된다.

식(6)으로부터 미셀의 이동 속도는 단일분자 이동 속도의 $n^{2/3}$ 배가 됨에 따라 미셀을 형성하기 시작하는 농도에서 도전율이 증가됨을 알 수 있다.¹⁵⁾ cmc 이상으로 활성제가 첨가되면 단일 분자들의 농도 증가로 유중 거대 미셀수가 증가되어 급격한 도전율의 증가는 초래하지만, 유동전류 특성은 cmc에서 고액 계면간 콜로이드막 형성이 이미 완료되어

있으므로 그 이상의 농도가 되어도 I_s 는 최저치의 일정한 값으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 고전압 대용량 변압기의 사고원인은 여러 가지가 있으나 절연유의 도전율 증가는 절연 파괴와 관련이 있으므로 유동대전만을 방지하기 위해 계면 활성제를 최적량 이상 첨가하는 것은 바람직하지 못함을 알 수 있다. 그러므로 계면 활성제를 첨가하는 경우, 대전 방지 효과는 최대로 되고, 도전율의 증가는 최소로 되어야 하는 농도의 최적량을 제시하는 것은 변압기 운전에서 중요한 자료로 이용될 수 있다.

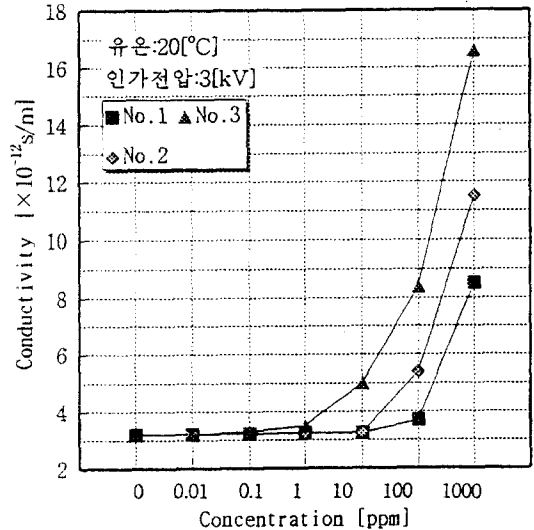


그림 8. 도전율과 농도의 관계

Fig. 8. The relationship between conductivity and density.

(b) σ 와 유온의 관계

3종의 활성제를 각각의 cmc로 맞춘 후 DC 3[kV]를 일정하게 인가할때 유온에 따른 도전율의 특성을 그림9에 나타내었다. 유온 상승과 함께 순수 절연유 및 첨가 시료유 모두 선형적으로 도전율이 증가하고 있다. 이는 온도 상승과 함께 시료유의 점도가 낮아지고 유동성이 커져 시료내부의 단일 이온들의 열여기나 배향이 용이하게 되어 전도성 이온농도가 증가하기 때문에 도전율이 높아지는 것으로 추정된다.^{16,17)} 전 온도 영역에 걸쳐 첨가유가 순수 절연유에 비해 크게 높지 않음을 알 수 있는데 이는 cmc에서는 미셀들이 도전율 증가에 크게 기여하지 않음을 추정할 수 있다. 그림5와 비교할 때 도전율이 최대로 되는 유온 50[°C]에서 유동전류는 다소 감소하고 있는데, 이는 도전율의 증가가 전하 완화시간 τ (

$=\epsilon/\kappa$, ϵ :유전율, κ :도전율)의 감소에 영향을 주는 것으로 사료된다. 이상 표면장력과 동점도 그리고 유동전류와 도전율간의 관계가 계면 활성제 첨가량의 임계치에서 동일한 특성변화를 나타내는 흥미로운 현상을 관찰할 수 있었다.

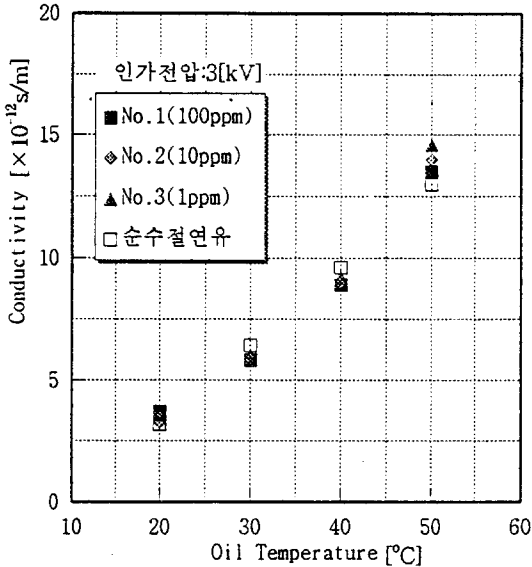


그림 9. 도전율과 유온의 관계
Fig. 9. The relationship between conductivity and oil tem.

5.결 론

변압기유에 Surfion계열의 부이온성, 정이온성 및 양성의 계면 활성제 3종류를 첨가하고 농도 변화에 따라 물리적 특성으로 표면장력과 동점도를, 그리고 전기적 특성으로 유동전류와 도전율을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 3종의 활성제를 첨가한 절연유에 대한 각각의 표면장력과 동점도의 특성은 현저하게 변화하는 영역과 최저치로 포화하는 영역으로 나누어지고 이는 미셀형성 임계농도(cmc)와 밀접한 관계가 있었다. 이러한 현상으로부터 첨가 절연유의 cmc를 전기적 특성을 분석하므로써 제시할 수 있었다.
- (2) 첨가 절연유의 유동전류와 도전율 특성은 표면장력과 동점도 특성이 변하는 동일한 농도에서 동일한 변화현상을 보였다.
- (3) 절연유에 3종의 계면 활성제를 cmc로 첨가 할 경우 우수한 유동대전 방지효과가 있다. 활성제 첨가에 따른 대전 방지효과는 양성, 정이온, 부이온 순

으로 양호함을 나타내었고, 각각의 활성제의 최적 첨가량(cmc)은 양성이 1[ppm], 정이온이 10[ppm], 그리고 부이온이 100[ppm]이다.

(4) 첨가 절연유의 도전율은 cmc이내 범위에서는 순수 절연유의 도전율과 거의 같은 값을 가진다. 이로써 cmc내에서는 변압기 사고의 주 원인인 절연과파에 영향이 없었다.

※ 본 연구는 한국전력 중장기 연구 과제 연구비 지원으로 수행 되었음

참 고 문 헌

1. 大久保仁外1人：“油中絶縁における破壊と空間電荷” 静電氣學會誌, 14. p.1 pp.16-24(1990)
2. J William：“Statics Charge Separation in Power Transformer” Berkshire Transformer Consultants. Inc(United States)(1988)
3. D.W.Crofts：“Statics Electrification Phenomena in Power Transformer” Texas Power and Light Company,(1985)
4. B.Hocatart and J.P.Grandjeon：“Oil Charging Tendency Effect on Large Power Transformer”. Paper presented at the 1987 Dopuble Engineering Company Client Conference, Boston, Massachusetts, April, (1987)
- [5] A.Klinkenberg & J. L.Van der Minne：“Electrostatics in the Petroleum Industry”. Elsevier Publishing Co. (1985)
6. J. L. Leonard & W.H.Carhart：“Colloid and Interface Science”, 32, No.3 (1970)
7. B.Hampel & H.Luther：“Chemie-Ing. Techn. 29.Jahrg. No.5(1958)
8. 北原.早野.原：“界面活性劑の分析 と 試験法”. p.51 講談社(昭和57)
9. 桜井：“石油製品 添加劑”. p.174 幸書房(昭和54)
10. 藤本 武彦：“新 界面活性劑 入門”(株)三洋化成工業 pp.12-18, 89-90 (昭和 56)
11. A.Klinkenberg, J.L.Van der Minne：“Electrostatics in the Petroleum Industry” p.51, Elsevir(1958)
12. 渡辺 茂男：“Pipe中の 液体流速と 電荷分布について(1)”. 日本静電氣學會誌 Vol. 4, No.5 (1980)
13. 李廷拔外：“Collide와 界面活性劑”. p.150, 大光書林.

14. 後藤武彦 : "新 界面活性劑 入門", (株)三洋化成工業, pp.12-18, 89-90, (昭和 56)
15. 藤本 武彦 : "新 界面活性劑 入門" (株)三洋化成工業 pp.15-22, 89-90 (昭和 56)
16. 李延玟 외 : 콜로이드와 界面 活性劑. pp.37-47, 大光書林.
17. 大橋朝夫, 渡辺茂男 : 流動帶電における界面活性劑の効果. 愛知工業大學 研究論文集(平成 6年)

시시 : 개



김용운

1988년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업.
1991년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업 (석사). 1995년 2월 인하대학교 전기공학과 박사과정 수료. 1996년 일본 愛知공업대학 전기공학과 객원연구원. 1997년 현재 영월공업전문대학 전기과 조교수.



이덕출

1939년 1월 22일생. 1963년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1966년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년 9월 일본 나고야대학 전기공학과 졸업(공학). 1981년 8월-82년 7월 일본 나고야대학 전기공학과 방문교수. 1995년 1월-12월 대한전기학회 부회장. 1994년 1월-현재 한국센서학회 이사. 1994년 1월-95년 12월 한국전기전자재료학회 감사. 현재 인하대학교 공대 전기공학과 교수(학장).