

# 절연유의 유동대전에 미치는 고체재질의 영향에 관한 연구

논문  
7-3-8

## A Study on the Effect of Solid Materials on the Streaming Electrification of Insulating Oil

김 용 운\*\*, 임 현 찬\*\*\*, 김 영 일#, 김 영 봉&, 이 덕 출\*  
(Yong-woon Kim, Heon-chan Lim, Young-il Kim, Young-bong Kim, Duck-chool Lee)

### Abstract

In this paper, the streaming electrification characteristics of insulating oil were examined when the oil is contacted with solid materials in a circulating system. The streaming current( $I_s$ ) increases with increasing oil velocity and temperature, and electrification properties depend on species of metal materials.  $I_s$  in the gauze-contained electrification apparatus increases with increasing oil temperature below the temperature of 43[°C], but decreases above 43[°C]. On the other hand,  $I_s$  is positive electrified for the pipe of Fe, Cu, while it is negative electrified for Sus. When insulating oil flows through a car fuel filter,  $I_s$  increases linearly with increasing oil temperature.

**Key Words(중요용어)** : Streaming Electrification(유동대전), Streaming Current(유동전류), Oil Velocity(유속), Oil Temperature(유온).

### 1. 서 론

유동대전현상은 절연성 액체가 파이프중을 흐를 때 두 물질의 계면에서 화학포텐셜의 차이로 인해 유종의 이온들이 고체 표면에 선택 흡착되고, 이중층의 확산층내 대이온들이 액체와 함께 유동함으로써 전기 이중층이 균형을 잃게되어 전하가 분리되고 액체와 고체가 각각 반대의 극성으로 대전하게 된다.<sup>1)</sup> 이로 인하여 국부적으로 절연유의 전계가 상승하고 연면방전이나 부분방전을 일으켜 변압기 사고등 각종 산업에서 장애 및 재해가 발생한다.<sup>2)</sup>

이러한 예는 미국의 Berkshire Transformer Consultants, Inc. 보고서<sup>3)</sup>와 Texas Power and Light Company의 1985년도 보고서<sup>4)</sup>에서 사고경위

를 자세히 기술하고 있다. 1991년 7월 부로 국내 345kv의 최고 송전전압을 765kv로 승압하기로 결정하였고, 1998년도 까지 동해 및 서해 신규 원자력 전력 수송을 위한 약 300km의 선로 건설을 계획하고 있다. 이와같은 송전전압의 승압화 추세에 따라 대용량의 강제순환식 초고압 변압기의 채용이 불가피하게 되었으며 절연유의 대전현상은 변압기 안전운전면에서 심각한 문제로 대두될 것으로 예상된다.

절연유의 대전현상에는 고체의 재질, 모양 및 액체의 비중, 동점도, 인화성, 연소성, 증발량, 절연 파괴전압, 비유전율, 유중미립자, 수분함유량 등이 변수로 작용되는 것으로 보고되고 있다.<sup>5)</sup> 또한 액체는 밀도가 고체와 기체와의 중간에 존재한다는 관점에서 볼 때 고체나 기체에 비하여 그 성질에 대한 이론적 해명이 쉽지않으며 실험적으로도 기체의 용해불순물의 유입등에 의한 압력의 영향으로 인하여 재현성 있는 결과를 얻기가 곤란하다. 따라서 아직도 정략적인 이론은 확립되어 있지 않은 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 절연유와 접촉하는 고체의 재질을 망목 1[mm]×1[mm] 크기의 변가제, Cu, Fe 및 Sus파이프, 자동차의 연료필터 등으로

\* : 인하대학교 전기공학과  
\*\* : 영월공업전문대학 전기과  
\*\*\* : 대구공업전문대학 전기과  
# : 신구전문대학 방사선과  
& : 인하공업전문대학 전기과  
접수일자 : 1993년 11월 19일  
심사완료 : 1994년 4월 4일

변화시키면서 절연유의 유온 및 유량에 따른 대전 특성을 고찰함으로써, 고체재질의 종류 및 접촉면적의 크기에 따라 대전의 성향을 해명할 목적으로 실험 후 고찰하였다.

## 2. 본 론

유동대전현상은 전기이중층의 개념으로 설명되고 있다.<sup>6)</sup> 액체가 고체면과 접촉후 정지하게 되면, 액체와 고체사이의 계면에는 전기이중층, 즉 서로 반대부호의 정(+) 혹은 부(-) 이온들이 쌍으로 대전하게 된다. 이 상태에서는 전체적으로는 중성이 되어있고 따라서 대전량은 0 이 된다. 그러나 액체가 유동을 하면 액체내의 정이온은 액체의 유동과 함께 흘러가게 되어 (고체가 부(-), 액체가 정(+)) 으로 대전되었을 경우, 계면의 전기 이중층은 균형을 잃고 분리되어 결국 고체는 부로, 액체는 정으로 대전하게 된다. 액체의 흐름과 함께 운동하는 정 전하들에 의하여 유동전류가 형성된다. 즉 유동대전의 기본적 원인은 흐르는 액체와 관로벽과의 계면에 있어서 이온의 선택흡착으로 고려된다. 따라서 관로내에 생긴 유동전류는 계면을 형성하는 액체와 관로벽과의 상호관계에 의하여 결정된다.

파이프와 액체의 계면사이에서의 유동대전에 관해서는 상당히 많이 연구되어 왔다. 그 중에서도 가장 널리 이용되는 이론은 Schön의 관계식<sup>7)</sup>으로서 파이프 라인에 의한 유동전류는 다음과 같이 나타난다.

$$I_s = \pi D \nu \tau J_a \{1 - \exp(-z/\nu \tau)\} + I_0 \exp(-z/\nu \tau) \quad (1)$$

단, D는 파이프의 직경,  $\nu$ 는 평균유속,  $\tau$ 는 완화시간,  $J_a$ 는 관로벽에서 발생하는 전류밀도, z는 관로의 길이이다.

이때 본 실험에서는 정 혹은 어느쪽으로도 대전되어 있지 않은 중성의 절연유를 파이프에 흘렸으므로 초기전류  $I_0=0$  이 되어서 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

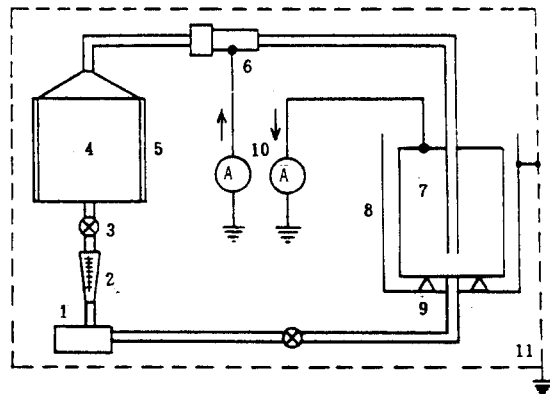
$$I_s = \pi D \nu \tau J_a \{1 - \exp(-z/\nu \tau)\} \quad (2)$$

윗식을 보면 알 수 있듯이  $I_s$ 는  $\tau$ 와  $J_a$ 가 일정할때 단위 면적당, 단위 시간당, 통과 유량이 많아질수록, z가 길수록 증가하고,  $\nu$ 와 z가 일정할 경우  $\tau$ 가 증가할수록  $I_s$ 가 증가한다.

## 3. 실험

### 3-1 대전장치 및 설계

본 연구에 사용된 실험장치는 본 실험실에서 설계 제작한 것이며 그 개략도를 그림 1에 나타낸다. 시료로 사용된 절연유는 광유계의 전기 절연유 KSC 2031 1종 4호 이다. 대전장치외의 주변기기로는 절연유 순환 펌프 1WK1(주)(MD-100K-5M형)인 절연펌프를 사용하였고, 유량계로는 용량 5~30[L/min]의 면적형 유량계를 사용하였다. 대전장치로 유입되는 절연유를 최대한 중성으로 해주기 위하여 스테인레스로 완화 탱크를 제작하였고, 용량 2[kW]의 판 히터 4개를 완화탱크의 옆면에 부착하여 절연유의 온도를 조절하였다. 절연유가 순환할 때 대전장치에서 대전된 유층 전하가 기름과 함께 저장탱크에 저장된 후, 접지를 통하여 흐르는 누설전류를 측정하기 위하여 지름 410[mm], 길이 450[mm]인 저장탱크를 스테인레스로 제작하였으며, 그 외부에 지름 510[mm], 길이 600[mm]의 외부 노이즈 차폐용 원통형 실드 챔버를 부착한 후 테프론으로 저장탱크와 절연하였다. 누설 전류 측정 장치로는 TAKEDA 8401의 미소전류계를 대전 장치와 저장탱크에 각각 연결하였으며, 시간 경과에 따른 전류변화량을 측정하기 위해 RITA-DENKI(주)의 Recorder를 연결하였다. 또한, 실험장치 전체를 구리망으로 싸서 외부의 노이즈에 의한 영향을 최소화 하였고, 모든 전선은 3중구조의 실드 케이블을 사용하였다.



1. Pump 2. Flow meter 3. Valve 4. Relaxation Tank 5. Plate Heater 6. Electrification Apparatus(Gauze, Pipes, Filter) 7. Faraday Cage 8. Shielding Bucket 9. Teflon 10. Electrometer 11. Shielding Network

그림 1 실험장치의 개략도

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

(1) 면 가제

길이 120[mm], 내경 30[mm], 외경 38[mm]인 동 파이프 내면에 두께 1.5[mm]의 절연지를 부착시킨 후 절연유가 흐르는 방향과 직각방향으로 망목의 크기 1[mm]/[mm], 원주 118[mm], 망목의 굵기 0.1[mm]인 가제(Gauze)를 삽입하였으며 그 구조도를 그림 2에 나타낸다.

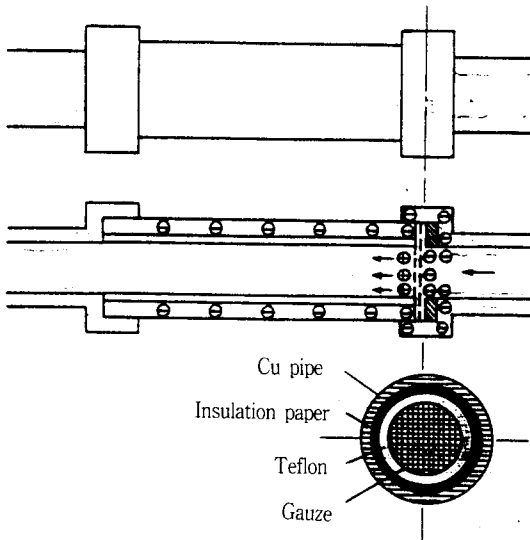


그림 2 가제 대전장치 개략도  
Fig. 2 Diagram of gauze electrification apparatus.

(2) 파이프

파이프 길이 및 재질에 따른 대전 특성을 알아보기 위하여 Cu, Fe, Sus의 3가지 재질의 파이프를 사용하여, 각각 내경 16[mm], 외경 20[mm], 길이 500[mm]의 파이프 5개씩을 직렬로 연결하였다. 파이프와 파이프 사이는 전하의 이동을 최소화하기 위해 테프론으로 절연 하였으며 구조도를 그림 3에 나타낸다.

그림 3에서 각 파이프 전류  $I_p$ 와 유동전류  $I_s$  및 저장탱크전류  $I_t$ 간에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} I_{s5} &= I_t \\ I_{s4} &= I_{p5} + I_t \\ I_{s3} &= I_{p4} + I_{p5} + I_t \\ I_{s2} &= I_{p3} + I_{p4} + I_{p5} + I_t \\ I_{s1} &= I_{p2} + I_{p3} + I_{p4} + I_{p5} + I_t \\ I_s &= I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4} + I_{p5} + I_t \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 필터

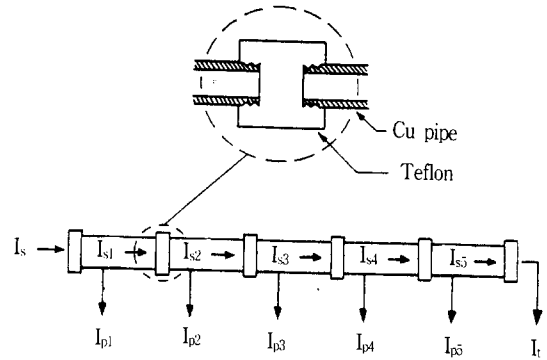


그림 3 파이프 대전장치 개략도  
Fig. 3 Diagram of pipe electrification apparatus.

필터를 통하여 흐르는 절연유의 대전특성을 분석하기 위하여 자동차의 연료 여과시 이용되고 있는 길이 90[mm], 직경 55[mm]의 연료 여과 필터를 사용하였다.

3-2 실험 방법

일정량의 절연유를 절연 펌프를 이용하여, 유량계⇒완화탱크⇒대전장치⇒저장탱크⇒펌프의 순으로 순환시켰다. 펌프의 DC Motor 입력전압을 변화시켜 펌프의 회전수를 조절함으로써 유량을 5~30 [ℓ/min]로 변화시켰고 절연유의 온도는 완화탱크 외벽에 관 히터를 부착하여 입력전압을 조절함으로써 20~50[℃]로 변화시켰다. 절연유가 강제순환에 의해 가제, 파이프, 필터와 같은 고체재질이 있는 대전장치를 통과할 때 대전장치측에 발생된 전하가 접지단자를 통해 대지로 누설되고, 이 때의 누설 전류를 대전장치와 대지 사이에 설치된 전류계로 측정하였다. 한편 절연유측에 발생된 전하는 저장탱크에 축적되며 저장탱크에서 접지단자를 통하여 대지로 흐르는 누설전류를 전류계로 측정하였다. 실험시작 전 후의 저장탱크내 절연유의 온도는 실험기간동안의 온도변화량을 평균한 값으로 그때의 실험온도로 정하였다. 실험장치를 가동한 후 측정전까지 약 10분의 시간을 두어서 절연유의 순환이 안정되도록한 후 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1 면가제 의존성

면 가제수를 4매, 유온 20[℃], 유량 20[ℓ/min]로 일정하게 유지하고 펌프를 가동한 직후부터 경과시간에 따른 대전특성을 그림 4에 도시한다. 유동전류  $I_s$ 값이 펌프를 가동한 직후 약 10분이 경과

하였을때 거의 일정한 값에 도달함을 알 수 있는데, 이는 완화탱크 및 저장탱크에 정지상태로 있던 절연유가 펌프의 가동과 함께 소용돌이친 후 10분 후에 일정 유속에 도달하는 과도기적 상태로 사료된다.

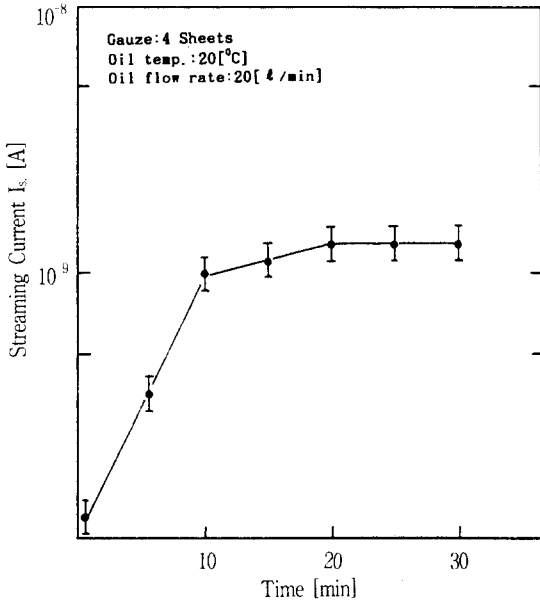


그림 4 유동전류의 시간 의존성

Fig. 4 Dependence of streaming currents on oil temp.

유온을 20[°C]로 일정하게 유지하고 절연유의 통로에 면가제를 삽입한후 유량만을 변화 시켰을 때의 대전특성을 그림 5에 도시한다. 면가제수가 많아지고 유량이 증가함에 따라  $I_s$ 는 증가함을 알 수 있다. 일반적으로, 면가제와 같은 필터류는 내부구조가 매우 복잡한 형상을 갖으므로 발생하는 유동전류에 영향을 주는 변수를 측정하기가 매우 힘들지만, 주로 유량과 전하밀도의 함수로 나타내고 있다. 그밖에, 접촉물체 기공율, 투과율, 굴곡계수, 굴곡도 등이 변수로 알려져 있다.<sup>6)</sup> 그러므로 가제의 장수가 증가할수록 유동전류가 증가하는 것은 가제의 삽입 장수가 많아짐에 따라 면 방목이 조밀해지고 결국 절연유와의 접촉면적이 커져서, 이에따른 가제-절연유와의 계면에서 분리되는 전하량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

유량을 20[l/min]로 일정하게 유지하고 유온을 변화시킬때의 대전특성을 그림 6에 도시한다.  $I_s$ 는 20~43[°C]까지는 유온증가에 따라 증가하나 43[°C] 이상에서는 감소함을 알 수 있다. 이같이 유

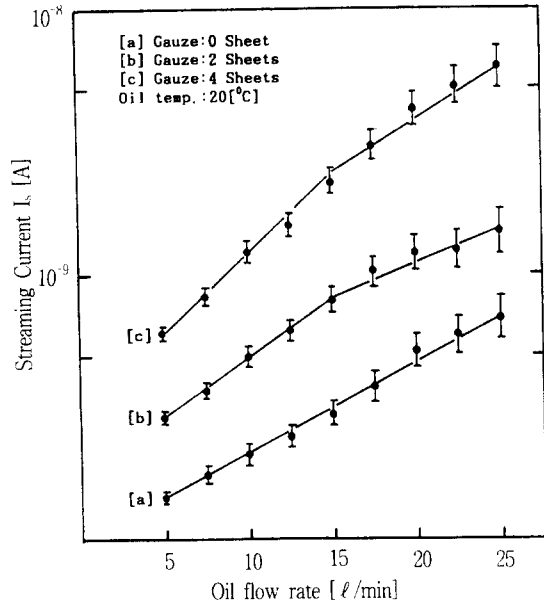


그림 5 유동전류의 유량 의존성

Fig. 5 Dependence of streaming currents on flow rate.

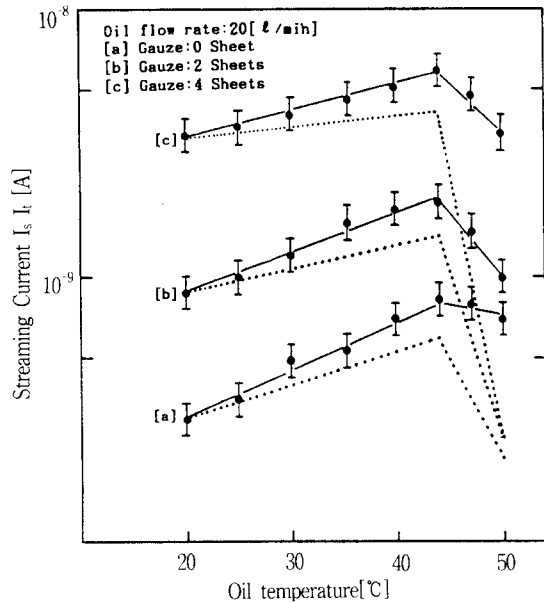


그림 6 유동전류의 유온 의존성

Fig. 6 Dependence of streaming currents on oil temp.

온이 43[°C]를 임계치로 하여  $I_s$ 가 감소하는 것은 절연유중의 전하 완화시간

$$\tau = \varepsilon/k^{10} \quad (4)$$

의 관계식에서 유온이 43[°C]를 기준으로 도전을 k의 증가에 따른 완화 시간  $\tau$ 의 감소에 기인된다고 사료된다.

#### 4-2 파이프 재질 의존성

Cu, Fe 및 Sus 재질로 제작된 파이프에 대전되지 않은 중성의 절연유를, 온도를 변화시키면서 통과시켰을 때의  $I_s$ 를 그림 7에 도시한다. 이때 파이프 길이는 각각 2.5[m]로 하였고, 유량을 15[ℓ/min]로 일정하게 유지시켰다. Cu와 Fe의 파이프에서는 유동전류  $I_s$ 가 같은 정의 방향으로 흐르다가 온도 43[°C]부근에서 감소하는 경향이 나타나지만, Sus 파이프에서는 Cu와 Fe의 파이프에서와는 달리 부 방향의 전류가 흐르는 특성을 보인다. 그리고 43[°C] 부근까지 온도의 상승에 따라  $I_s$ 가 증가하는 이유는 절연유의 온도가 상승함에 따라 점도가 낮아져 파이프와 절연유의 계면에서 대전된 절연유가 쉽게 교반되기 때문으로 사료된다.

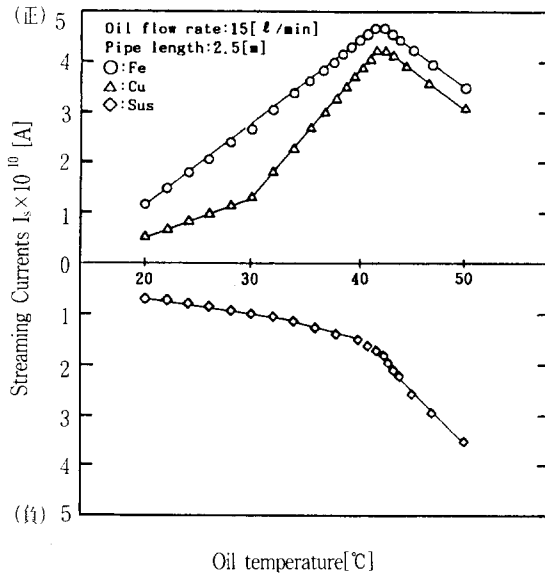


그림 7 유동전류의 유온 의존성  
Fig. 7 Dependence of streaming currents on oil temp.

유온 30[°C], 파이프 길이 2.5[m]로 일정하게 유지하고 유량을 변화시켰을 때의 대전특성을 그림 8에 도시한다. 유량변화에도 그림 7과 같이 Cu와 Fe의 파이프에서는 정의 방향으로, Sus 파이프에서는 부의 방향으로 유량증가와 더불어 비례적으

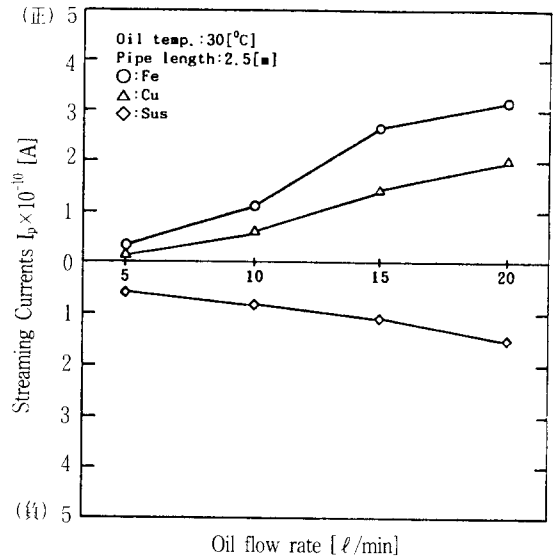


그림 8 유동전류의 유량 의존성  
Fig. 8 Dependence of streaming currents on oil flow rate.

로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 식(4)로부터 알 수 있듯이  $I_s$ 는 유속  $v$ 에 비례하므로 단위 시간과 단위 면적당 통과하는 유량이 증가함에 따라 유동전류 또한 증가하는 것으로 사료된다.

또한, 유온 30[°C], 유량 15[ℓ/min]로 일정하게 유지하고 파이프 길이를 변화시켰을 때의 대전특

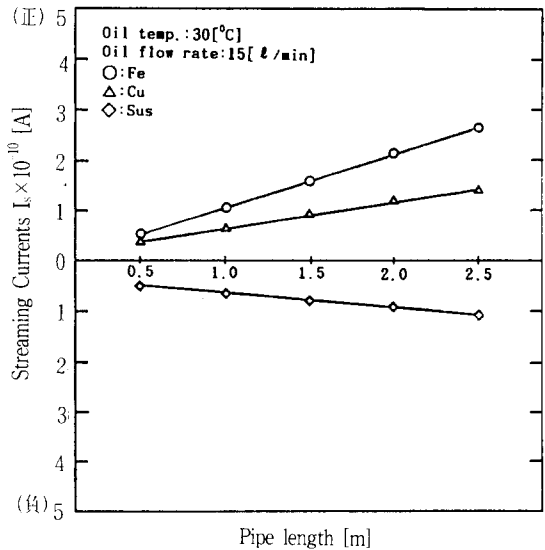


그림 9 유동전류의 파이프길이 의존성  
Fig. 9 Dependence of streaming currents on pipe length.

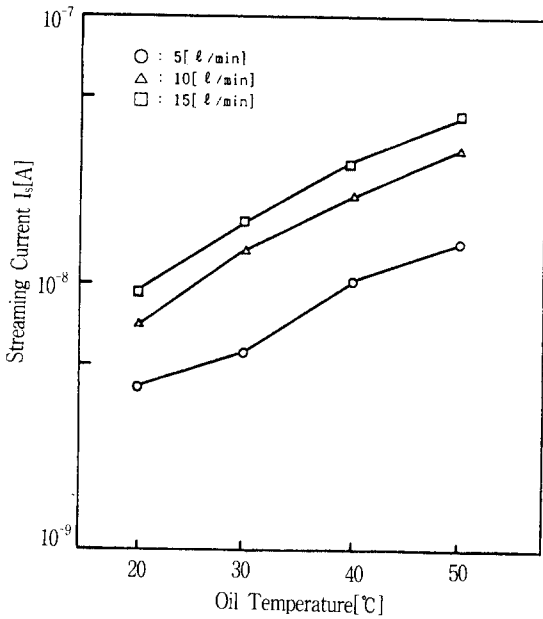


그림 10 유동전류의 유온 의존성  
Fig. 10 Dependence of Streaming Currents on Oil Temperature.

성을 그림 9에 도시한다. 파이프 길이에 따라 대전량이 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 액체-고체간 계면에서 전기-화학적 포텐셜에 의해 재질의 대전 정도 및 대전서열에 따라 전하들이 선택 흡착 되는데, 결국 Cu와 Fe는 전기이중층내의 흡착층에 정전하를, 반대로 Sus는 흡착층에 부전하를, 그리고 확산층에는 각각 부전하와 정전하를 선택 흡착한 결과로 사료된다.

#### 4-3 필터 의존성

대전장치로 사용된 자동차 연료필터를 통하여 흐르는 절연유의 대전특성을 알기위해 유량을 5, 10, 15 [l/min], 유온을 20~50[°C]로 변화시키면서  $I_s$  값을 측정하였으며, 그것을 그림 10에 도시한다. 필터의 경우는 파이프라인의 경우와는 달리 내부구조가 복잡하여 정확한 분석은 이루어지고 있지 않으나 파이프에 비해 훨씬 많이 대전하는 특성을 갖는다. 그림에서  $I_s$ 는 유온의 증가에 따라 비례하여 증가하나 유량에 따라서는 비선형적으로 증가한다. 이 밖에 필터의 대전특성에 관한 자세한 분석은 향후의 연구과제로서 계속 연구되어야 할 것이다.

#### 5. 결 론

절연성 액체가 고체와 유동접촉할 때의 재질에 따른 대전특성을 실험 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가제를 내장한 대전장치에서는 가제(면망)의 장수가 증가함에 따라 (+) 대전전류가 선형적으로 증가함을 보였으며, 통과하는 유량이 증가함에 따라 대전전류 또한 비례하여 증가하였고, 유온에 따라서는 43[°C]이하에서는 선형적으로 증가하였으나, 그 이상의 범위에서는 급격한 감소를 나타내었다. 또한 대전전류의 안정치는 절연유를 순환시킨 직후부터 약 10분이 지난 후부터 얻을 수 있었다.
2. 파이프 재질에 따라서는 Fe와 Cu는 정극성으로, Sus는 부극성으로 대전되고, 파이프를 통과하는 유량이 증가함에 따라 정도의 차이는 있으나 세가지 재질의 파이프 모두 대전전류가 증가함을 보이며, 또한 파이프의 연결길이가 길어질수록 대전전류가 증가하였다.
3. 절연유를 필터에 의해 대전시킨 경우에 대전전류는 유온에 비례하여 선형적으로 증가하나, 유량에는 비선형적으로 증가하였다.

■본 논문은 1992년 8월~1993년 8월 까지 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] 渡邊昌外 1人: “界面電氣現象” 供立出版(株) (1986)
- [2] H.L. Walmsley: J. Phys. D. 16, 553 (1983)
- [3] William. J. “Static Charge Separation in Power Transformer” Berkshire Transformer Consultants. Inc.(United States) (1988)
- [4] D.W. cROFTS, “Static Electrification Phenomena in Power Transformer” Texas Power and Light Company, (1985)
- [5] 淺野和後外 1人: 靜電氣工學演習, 朝倉書店(株) (1985)
- [6] 靜電氣學會: 靜電氣ハンドブック(1981)p.107.
- [7] 有本國男: イオン吸着モデルによる流動帶電現象の解析 pp.9-33.
- [8] 北村上田: 電氣學會論文誌 98-B, 7, 571(昭和53-7)

[9] W.M. Bustin : 37th Annual Meeting of A.P.I. (1957)  
 [10] B. Hampel and H. Luther : Chem. Eng. Tech., 29(1957) p. 5.  
 [11] 大橋朝夫 外 1人: 液體の靜電氣現象と應用(第

3講 液體の帶電と界面現象) 日本靜電氣學會誌,13, 3(1989)pp.239-245.  
 [12] 渡邊茂男外 1人: パイプ中の液體流速과 電荷分布に ついて(1) 日本靜電氣學會誌,4,5 (19-80).

저자소개

김용운



1960년 8월 20일생. 1988년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업. 1991년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업(석사). 1994년 현재 인하대학교 전기공학과 박사과정. 현재 영월공업전문대학 전기과 전임강사.

김영봉



1945년 1월 27일생. 1969년 2월 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 2월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1969년-1973년 2월 인하공업고등전문학교 강사. 1973년-1977년 2월 대한공업전문대학 전임강사. 1977년-현재 인하

공업전문대학 교수.

임현찬



1960년 3월 26일생. 1984년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1986년 2월 인하대학교 대학원 전기공학과 석사. 1991년-현재 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

이덕출



1939년 1월 22일생. 1963년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1966년 2월 인하대학교 전기공학과 석사. 1976년 9월 일본 나고야대학 전기공학과 전기공학과(공박). 1981년 8월 일본 나고야대학 전기공학과 방문교수. 199년 현재 인하대

학교 전기공학과 교수.

김영일



1945년 12월 26일생. 1977년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(공박). 1994년 현재 신구전문대학 방사선과 교수.