

## 細管을 통과하는 絶緣油의 流動帶電에 관한 研究

### A Study on the Streaming Electrification Phenomena of the Insulating Oil Flowing through the Nozzle

이 덕 출\*·박 재 윤\*

(Duck-Chool Lee · Jae-Yun Park)

#### 요 약

본 연구는 절연유가 금속 파이프 중을 통과할 때 흐르는 유동전류 특성에 대하여 실험적으로 규명하였다. 유동전류는 파이프 길이, 절연유의 속도 및 온도에 따라 변하는것이 관측되는데 파이프 길이가 4-6cm 부근에서 피이크치가 나타나고 유속의 증가에 따라서는 선형적으로 증가하며, 그리고 유의 온도가 약 50°C 부근에서 또한 피이크치가 나타나고 있다. 절연유에 전하를 주입시키는 수단으로 코로나 방전을 이용 하였으며 負코로나 대전된 절연유의 유동전류가 코로나 대전 시키지 않은 절연유나 正코로나 대전된 절연유의 것보다 큰 값이 관측 되었다. 이 결과로부터 고체 액체 접촉시 액체중의 음이온이 화학 포텐셜에 의하여 고체 표면에 흡착된다는 사실과 유동전류의 방향 및 발생기구를 해석 할 수 있다.

#### ABSTRACT

The streaming current characteristics were investigated when insulating oil passed through a metal pipe.

It was observed that the streaming current was charged by pipe length, insulating oil velocity and temperature, had a peak value at pipe length, 4-6cm, and was increased linearly according to increasing of oil velocity and also had a peak value at oil temperature, about 50°C.

A charge put into insulation oil by the corona discharge and the streaming current of (-) corona charged oil was higher than those of corona uncharged oil and (+) corona charged oil.

With above results, it was known that (-) ions of liquid were absorbed into the solid surface by a chemical potential, and the direction and production mechanism of the streaming current were interpreted.

\* 인하대학교 전기공학과

1. 서론

절연성이 좋은 액체가 파이프중을 흐를때 발생하는 대전현상에 관한 연구는 19세기 후반 Quinkes, Lipman, Helmholtz, Nernst등에 의해 시작되었고<sup>1)</sup> 20세기에 들어와서 Gouy, Chapman등이 확산 이중층 이론을 제시하였으며 Debye, Hückel 등은 확산 이중층 이론을 도입하여 대전현상을 명확하게 체계화 시켰다.<sup>2)</sup>

액체의 유동대전 현상은 액체가 고체와 접촉하고 있을때 액체중에 존재하는 正負 이온들이 고체의 특성에 따라 화학 포텐셜에 의해서 고체 표면에 선택 흡착되고 이 표면에 對이온이 Coulomb인력에 의해 이끌려 전기 이중층을 형성하게 된다. 이와 같은 상태에서 액체가 유동하게 되면 이중층의 확산층내 對이온들이 액체와 함께 유동함으로써 전기이중층이 균형을 잃게 되어 전하가 분리됨으로서 액체와 고체가 각각 반대의 극성으로 대전되는 현상이다.<sup>3)</sup>

이 유동대전에 의해 발생된 전하에 의한 전계가 국부적으로 절연체의 절연내력을 넘으면 부분방전이나 연면방전이 발생하여 사고의 원인이 된다. 이러한 재해는 1950년부터 발달된 고분자 및 석유관련 공업의 발달과 에너지원이 석탄으로부터 석유, 가스로의 변환등에 따라 증가하고 있다. 따라서 정전기 재해 안전 대책상으로 석유등 가연성 절연액체의 정전기 대전현상 규명에 관한 연구는 가장 중요한 과제로 등장하고 있다. 지금까지 연구된 바로는 액체의 대전량은 액체와 고체 계면에서의 유속과 물체의 절연저항에 비례하며 도전율에 반비례한다고 알려져 있다.<sup>4)5)</sup>

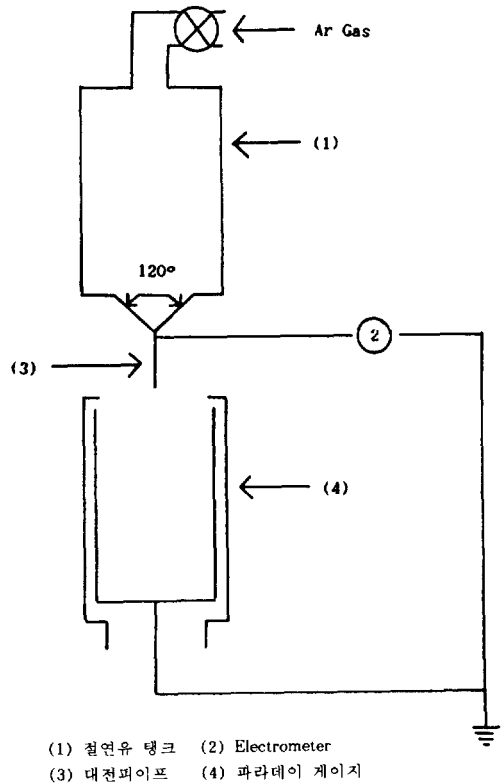
본 실험에서는 파이프중으로 흐르는 액체

의 대전현상을 규명하고 그 방지대책을 수립하기 위한 기초연구로서 등유, 변압기 절연유 및 실리콘유를 시료유로 하고 시료유가 세관의 파이프를 통할때 흐르는 유동전류를 유속, 파이프 길이, 온도의 변화에 따라 측정하고 두 물질의 대전극성 연구 및 유동대전 방지대책으로 이들 시료유를 코로나 대전 시키고 유동대전 전류를 측정 분석 하였다.

2. 실험

2-1. 장치개요

본 연구에 사용된 실험장치는 아르곤 가스에 의한 압송식으로 시료유가 細管을 통과하도록 제작 하였으며 개략도는 그림 1과 같다.



(1) 절연유 탱크 (2) Electrometer  
(3) 대전피이프 (4) 파라데이 계이지

그림1. 실험장치 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of experiment apparatus.

그 구성은 직경이 3cm, 길이 30cm 동파이프로 된 시료유 탱크와 탱크 상부는 실리콘 호스로 고압 아르곤 가스분배에 접속되어 있으며 탱크 하부는 파이프 입구부분에서 액체의 흐름이 원활하게 되도록 하기 위해서 확산각 120°C로 가공하였으며 파이프와 시료유 탱크를 테프론 절연봉으로 절연시켰다. 파이프는 Top(주) 제 스텐레스 주사침으로 내경 0.2mm이며 선단은 직각으로 잘 연마했으며 유동전류를 측정하기 위해서 TAKEDA 8401 전류계를 파이프에 접속 시켰다.

## 2-2. 방법

파이프에 연결된 Electrometer로써 다음과 같은 파라메타로써 유동전류를 측정하며 유동전류 값은 시간에 따라 거의 변하지 않은 값을 취한다.

- 1) 실험장치의 시료유 탱크에 시료유를 약 80ml 채우고 이때 발생한 전하를 완화시키기 위해 절연유 탱크를 약 30분간 접지시킨 다음 탱크에 연결된 아르곤 가스분배에서 나오는 가스 압력으로 시료유를 흐르게 한다. 가스 압력을  $1\sim 4\text{kg}/\text{cm}^2$  범위로 조절하여 유속을 변화시킨다.
- 2) 파이프 길이를  $1\sim 6\text{cm}$ 로 변화 시킨다.
- 3) 동유를 시료유로 하고 온도를  $20\sim 60^\circ\text{C}$ 로 변화 시킨다.
- 4) 정·부 코로나 방전을 이용하여 시료유에 코로나 대전 시킨 다음 위와같은 1), 2)의 방법으로 실험한다.

## 3. 실험결과 및 고찰

시료유가 스텐레스 금속으로 된 細管을 통과할 때 細管에 접속된 진동형 미소 전류계에서 미소전류가 관측되며 이들 유동전류의 특성을 유속, 파이프 길이 및 온도의 변화에 따른

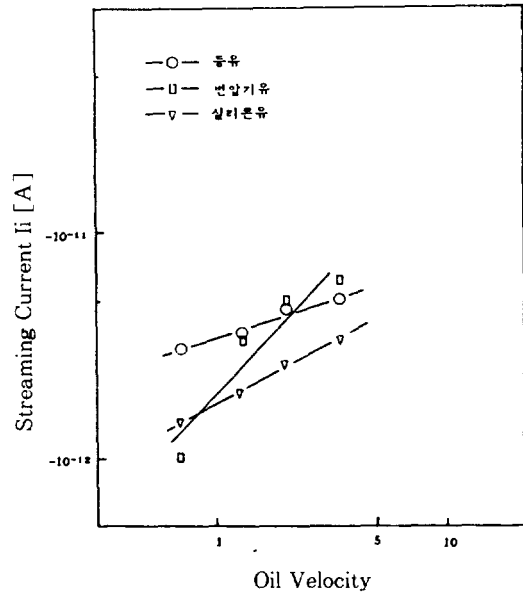


그림2. 유동전류의 유속 의존성

Fig. 2. velocity dependent characteristics of streaming current.

현상을 분석 하였다.

### 3-1. 유속 의존성

동유, 변압기 절연유 및 실리콘유의 유속의 변화에 대한 유동전류  $I_s$ 를 그림 2에 나타낸다. 유속이 증가함에 따라 유동전류는 절연유의 종류에 관계없이 증가하는 경향이다. 계면 부근에서 액체측으로부터 고체로의 전하 완화시간을  $\tau$ , 유속을  $v$ 라 할때 계면에서 분리되는 전하량은  $\tau v$ 에 비례하므로 유속의 증가와 함께 분리되는 전하량이 증가한다는 결과를 인용하면  $I_s$ 의 증가경향을 이해할수 있다. 관측되는 전류 방향이 부방향으로 흐르고 있으며 이는 절연유와 파이프의 계면에서 화학적 포텐셜에 의해 시료유 내에 있는 負이온을 파이프 표면에 흡착시켜 고착층을 형성하고 파이프 표면을 負로 대전시키고 Coulomb 인력에 의해 正이온을 잡아당겨 고착층 외부에 확산층을 형성한다. 이러한 2개의 층을 확

산 전기 二重層이라 하며 액체의 유동과 함께 확산층에 있는 正이온이 액체의 유동과 함께 이동하여 전하분리가 일어나서 파이프 표면에 흡착된 고착층의 부이온 내의 전자가 파이프에 완화되어 負方向 유동전류가 형성되는 것으로 사료 된다.

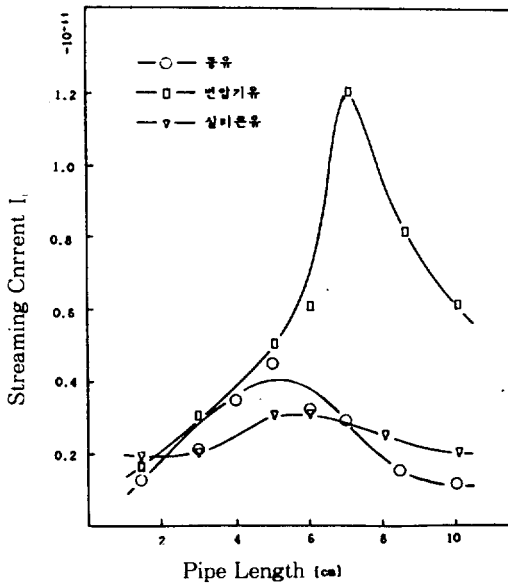


그림3. 유동전류의 파이프 길이 의존성

Fig. 3. pipe length dependent characteristics of streaming current.

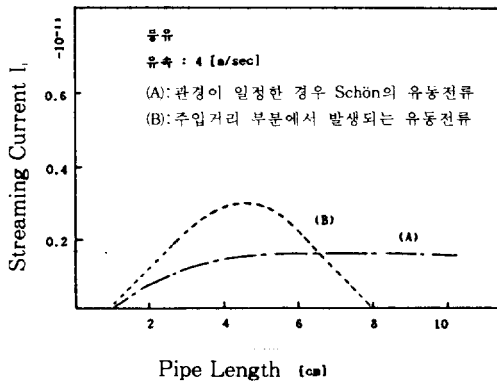


그림4. 유동전류의 파이프 길이 및 직경과의 관계

Fig. 4. Relation between pipe length and pipe diameter in streaming current.

### 3-2. 파이프 길이 의존성

관경이 좁은 파이프를 액체가 통과하는 경우 파이프 길이 변화에 따른 유동전류 특성을 그림 3에 도시한다. 관경이 일정한 파이프에 액체가 통과할때 파이프로부터 액체로 향하여 흐르는 전류밀도를  $Ja$ 라 하면 유동전류  $I_s$ 는 Schön의 이론에 의하여 다음식과 같이 표시된다.<sup>6)</sup>

$$I_s = 2\pi R \nu \tau j_a \{1 - \exp(-L/\tau\nu)\}$$

여기서  $R$ ; 파이프 반경,

$\nu$ ; 액체의 평균 유속,

$\tau$ ; 액체의 전하 완화 정수

$L$ ; 파이프 길이

이론식에 의하면 유동전류 값은 그림 4(A)와 같이 어느 길이 부터는 일정하게 된다. 그러나 본 실험장치로 부터 관측된 유동전류는 파이프 길이가 4~6cm 부근에서 유동전류가 최대치를 나타내며 그 이상으로 파이프 길이가 증가하면 유동전류는 감소한다. 이러한 현상은 Schön 이론식으로 plot한 그림 4 중의 A 특성과 일치하지 않는다.

이러한 현상은 유체역학에서 알수 있듯이 그림 5와 같이 관경이 넓은 곳으로 흐르던 액체가 관경이 좁은 곳으로 통과하게 될때 액체의 흐름의 상태는 관경이 좁은 파이프 입구부근인  $X_1$  지점에서는 액체의 단면적이  $X_0$ 와  $X_2$ 에서보다 단면적이 적게 되므로 평균유속이 가장 크게 됨을 알수 있다. 따라서 주입거리 ( $L$ ) 영역내에서 가장 많은 전하가 발생하게 된다. 따라서 파이프 길이에 대한 유동전류 특성은(그림 3) 파이프 관경이 일정한 경우의 Schön 이론에 의한 유동전류 성분인

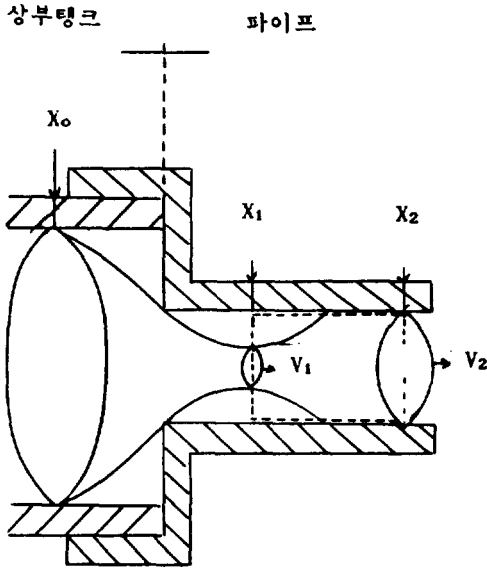


그림5. 관경이 다른 파이프에서의 유속  
Fig. 5. distribution of oil velocity in different pipe diameter.

그림 4(A) 성분과 주입거리 영역내 (즉 관경이 큰 시료유 탱크에서 관경이 작은 파이프로의 액체가 흐르는 지점부터 유속이 일정하게 되는 지점까지) 발생하는 유동전류 성분인 그림 4(B) 성분의 대수함에 의하여 나타난다고 추정 할수 있다.

3-3 온도 의존성

파이프 길이 특성에서 중간특성을 나타내는 등유를 시료유로 하고 파이프를 통과하는 시료유의 온도를 변화시킬때 관측되는 유동전류 특성을 그림 6에 나타낸다. 온도가 상승함에 따라 유동전류는 50°C 이하의 온도영역에서는 증가하나 그 이상의 온도에서는 저하하는 특성을 보인다. 유동전류 증가는 온도의 증가에 따라 액체의 도전율이 증가하여 액체 측으로부터 파이프로의 전하 완화시간  $\tau$ 가 짧아지며 또한 시료유내의 이온이 계면에 흡착하기 쉬워지므로 대전전하량이 증가하기

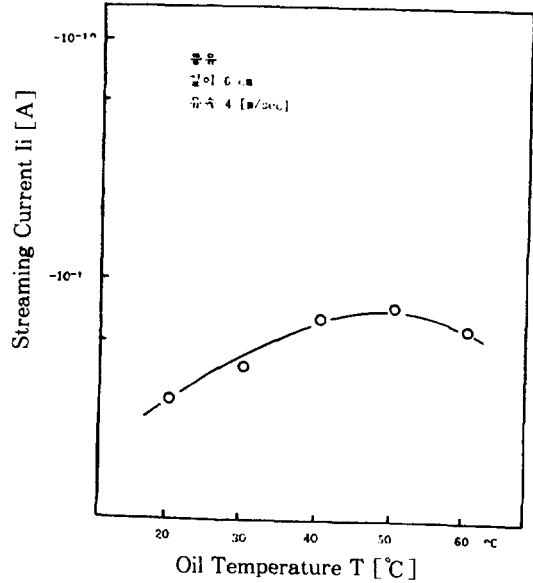


그림6. 등유의 유동전류의 온도 의존성  
Fig. 6. Temperature dependent characteristics of streaming current in lamp-oil.

때문인 것으로 사료된다. A.Klinkeberg는 여러가지 액체의 도전율 변화에 따라 유동전류를 측정하였던바 도전율이 약 10<sup>-12</sup>(1/Ωcm)에서 최대치가 되고 도전율 증가에 따라 감소된다는 결과를 발표하였다. 본 실험에서 유동전류가 최대치를 나타내는 50°C 부근에서의 시료유의 도전율이 약 1.2\*10<sup>-12</sup>(1/Ωcm)이었음으로 A. Klinkeberg의 결과와 잘 일치함을 알수 있다.<sup>4)</sup>

3-4. 전하주입 의존성

등유, 변압기유 및 실리콘유에 코로나 방전으로 발생한 캐리어를 주입시킨 시료유를 유속 변화에 따른 유동전류 특성을 그림 7, 8, 9에 도시한다.

유동전류에 극성효과가 있음을 알 수 있다. 등유 및 변압기 절연유의 경우 부코로나 대전된 시료유의 유동전류는 정코로나 대전된 시료유의 것보다 매우 크고 유속에 따라 증

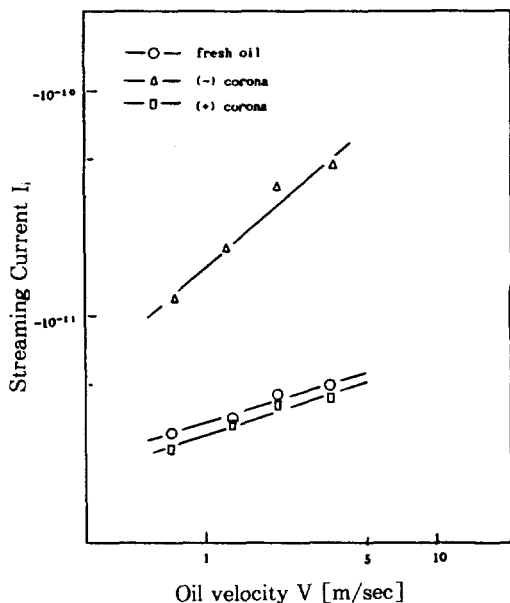


그림7. 코로나 대전된 등유의 유속 의존성  
Fig. 7. Velocity dependent characteristics of streaming current in corona charged lamp-oil.

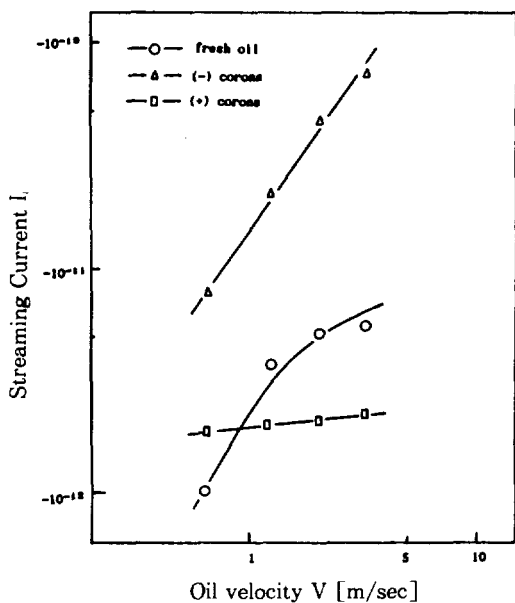


그림8. 코로나 대전된 변압기유의 유속 의존성  
Fig. 8. Velocity dependent characteristics of streaming current in corona charged insulating oil.

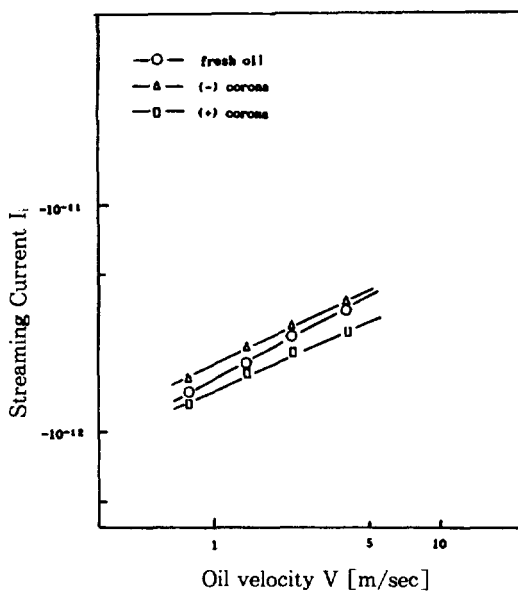


그림9. 코로나 대전된 실리콘유의 유속 의존성  
Fig. 9. Velocity dependent characteristics of streaming current in corona charged silicon oil.

가율이 큰 편이다. 그리고 정코로나 대전된 시료유의 유동전류는 코로나 방전을 처리하지 않은 시료유와 거의 근사하리 만큼 차이가 없고 미소하나마 오히려 적은 경향이 있으며 실리콘유는 큰 값의 차이는 나타나지 않지만 위와같은 극성효과가 있음을 알 수 있다. 부코로나 방전으로 負캐리어가 발생하게 되고 시료유에 주입됨으로서 시료유중에 負캐리어 량이 증가하게 된다. 파이프-액체 계면에서 고체인 파이프 쪽에 흡착될수 있는 負전하량이 증가됨으로써 유동전류가 크게 되리라고 추정할수 있고, 유동전류가 정·부코로나 대전의 경우 부코로나 대전시의 극성효과가 크게 나타난 사실로 부터 파이프-액체 계면에서의 화학포텐셜에 의하여 액체중의 음이온이 파이프 표면에 흡착되어 파이프 쪽을 負로 대전시키고 고착층을 형성하며 액

체인 시료유는 正으로 되어 확산층을 형성하는 二重層임을 확인할 수 있고, 이것이 시료유의 유동으로 액체쪽의 확산층내의 正이온이 이동함으로써 전하분리가 일어나고 파이프쪽 고착층의 負이온내의 전자가 파이프로 완화되면서 負의 유동전류가 흐른다는 기구를 지지할 수 있다.

#### 4. 결론

세관을 통과하는 시료유의 유속, 온도 및 파이프 길이에 따라 관측되는 유동전류 특성은 다음과 같다.

- 1) 유속이 증가함에 따라 유동전류는 증가하며 이것은 유속의 증가와 함께 분리되는 전하량이 증가하기 때문이라고 사료된다.
- 2) 파이프 길이가 4~6cm 부근에서 유동전류의 피크가 나타났으며 이는 Schön의 이론식과 주입거리 효과로 해석된다.
- 3) 온도가 50℃ 부근에서 유동전류가 피크를 나타내며 이는 온도가 증가함에 따라 절연액체의 도전률이 증가하기 때문이라고 사료된다.
- 4) 부코로나 대전된 시료유의 유동전류는 정코로나 대전 및 대전하지 않은 시료유의 유동전류보다 큰 값을 보인다. 이러한 결과는 액체중의 음이온이 파이프쪽에 화학포텐셜에 의하여 흡착되고 액체쪽에 對인 양전하로 이중층을 구성한다는 사실

과 유동전류는 액체내의 부이온의 양에 크게 좌우된다는 사실을 제시할 수 있다.

끝으로 본 연구 수행에 있어서 장치제작 및 실험측정에 많은 협조를 하여준 석사과정 윤승진군에게 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

- 1) 比原文雄, 渡辯昌; 界面電氣現象, 共立出版(1986)
- 2) P. debye, E. Hückel; *physik Z.* **24**, (184) 305, (1923)
- 3) 日本靜電氣學會; “靜電氣 Handbook” Ohm社, 101~107(1983)
- 4) A. Klinkenbelg, L. L. Vander Mine; *Electrostatics in the petroleum Industry*, (1958)
- 5) J. T. Leonard, H. W. Carhart; *J. Colloid Interface Sci.* **32**(3), 383(1970)
- 6) 渡邊茂男; “液體의流動帶電現象에關する基礎研究” 博士學位論文(1979)
- 7) J. Gavis, J. P. Wagner; *Chem. Eng. Sci.* **23**, 381(1968)
- 8) H. D. Goodfellow, W. F. Graydon; *Con. J. Chem. Eng.* **46**, 342, (1968)

(1990년 7월 10일 접수)