

파이프 재질에 따른 절연유의 대전및제전에 관한 연구

김용운* 조영규* 신용덕** 정혜덕*** 이덕출*
*인하대 전기공학과 **원광대 전기공학과 ***목포대 전기공학과

A Study on the Streaming Electrification and Static Charge Elimination of Insulating Oil on Pipe Materials.

Y. W. KIM* Y. K. CHO* Y. D. SHIN** H. D. JEONG*** D. C. LEE*

*Dept. of Electrical Eng. Inha Univ.

**Dept. of Electrical Eng. Wonkwang Univ.

***Dept. of Electrical Eng. Mokpo Univ.

ABSTRACT

The characteristic of streaming electrification and static charge diminution in Cu, Fe and Sus pipes were investigated. The Cu and Fe pipes are charged positively, whereas the Sus pipes are charged negatively. Electrification rate in Cu and Fe pipes increases with increasing a pipe length for no-charged insulating oil. The electrification rate in Cu and Fe pipes abruptly increase with increasing the temperature and flow rate of insulating oil but decrease in Sus pipes. The current flows as a direction of insulating oil in all pipes.

1. 서론

액체 연료, 절연유, 식용유 및 유기 용제등을 사용하는 공장, 공사 현장에서 이들 액체의 수송 도중에 발생하는 정전기로 인하여 작업능률의 저하를 초래하고, 재해가 발생하는 경우도 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 재해를 방지하기 위해서는 전하의 발생을 억제 하던가, 또는 발생하였어도 조속히 완화 시키는등, 전하가 액체중 에 축적하지 않는방책을 필요로 한다.⁽²⁾ 이와같은 방책으로서 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 액체에 각종 대전 방지제를 적당량 혼입하여 액체의 도전율을 상승시킴으로서 전기적 시정수를 떨어뜨리는 방법이 있다. 이에 관해서는 Klinkenberg⁽³⁾, Lonard⁽⁴⁾, Gibson⁽⁵⁾ 등에 의해 연구된 바 있다.
 - 2) 침전극등을 이용하여 대전된 전하에 역극성의 전하를 주어서 제전시키는 방법이 있다. 이에 관해서는 Ginsburgh⁽⁶⁾에 의해 연구된 바 있으며 본 실험실에서도 이에 관한 실험적 연구를 수행하여 비교적 양호한 결과를 얻은 바 있다.
 - 3) 발생 전하량은 액체의 수송 속도에 의존하므로 직경이 큰관을 이용하여 수송 속도를 떨어뜨리는 방법이 있다. 이에 관해서는 Schon⁽⁷⁾, Klinkenberg⁽³⁾에 의해 연구된 바 있다.
- 본 실험은 3)에 가까운 기초적 실험연구로서 Cu, Fe, Sus를 이용한 관의 재질 및 관의 길이와 유동 전류와의 관계를 고찰하였다. 또한 각각의 관에 무대전(No-Charged)의 절연유와 정, 부로 대전된 절연유를 통과시켰을때 유동 전류의 정상적, 정량적 결과를 고찰하였으며, 아울러 유동 전류의 유온 및 유량 의존성도 함께 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 시료는 광유계의 절연유 1종 2호로서 그 계 윈을 표 1에 나타내었다.

표1. 절연유의 특성

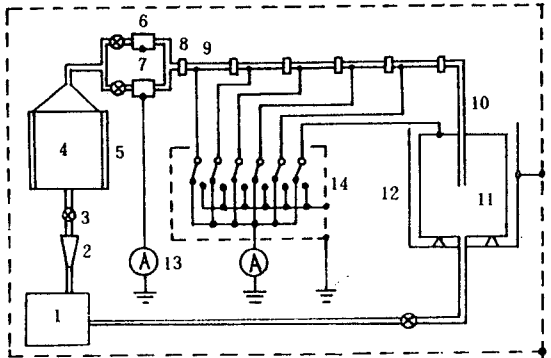
Table 1. Properties of Insulating Oil

특성	규격	실험치	
반응(Reaction)	중성	중성	
점도(Viscosity)	at 40°C cst	13.0 Max	6.49
	at 100°C cst	4.0 Max	1.934
비중(Specific Gravity, 15/4°C)	0.91	0.8748	
인화점(Flash Point, °C)	130 Min	136	
유동점(Pour Point, °C)	-27.5 Max	-40	
전산가(Total Acid, mg KOH/g)	0.02 Max	0.205	
증발 손실(Evaporation Loss, %)	0.4 Max	0.19	
절연파괴전압(Dielectric Strength, KV)	30 Min	56.12	
체적저항(Volume Resistivity, ΩCm, 80°C)	1.0×10 ¹³ Min	4.0×10 ¹⁴	

실험 장치는 본 실험실에서 설계, 제작한 것으로 그 개략도를 그림 2-1에 나타내었다.

순환 펌프는 WK1(주) MD-100K-5M형 절연 펌프를 사용하였다. 유량계는 용량 5~30[l/min]의 눈금형 유량계를 완화 탱크에 연결하였다. 이온 발생기에 유입하는 절연유를 최대한 중성으로 해 주기 위하여 스테인레스로 완화 탱크를 제작하였고, 유온을 조절 하기 위하여 완화 탱크에 만히터를 부착하였다. 이온 발생기로 는 필터를 이용하였는데 이를 완화 탱크에 병렬로 연결하여 필요에 따라 정, 부 이온을 발생할수있게 하였다. 측정용 파이프는 Cu, Fe, Sus를 이용하였으며, 각각 내경 16[mm], 외경 20 [mm], 길이 500 [mm] 5개씩을 준비하여 직렬로 연결한후 파이프 길이에 따른 대전 현상을 고찰하였다. 파이프와 파이프사이는 전하

의 이동을 최소화 하기 위해 테프론으로 절연하였다. 전하의 중화 및 측정 정도를 알아보기 위하여 스테인레스로 원통형 Faraday Cage 를 제작하여 외부는 원통형 철판으로 차폐하였다.



1. 순환펌프 2. 유량계 3. 밸브 4. 완화탱크 5. 판히터
6. 정이온발생기 7. 부이온발생기 8. 테프론 9. 파이프
10. PVC 파이프 11. 저장탱크 12. 차폐통 13. 전류계
14. 유동전류 전환 제어박스

그림 2-1. 실험장치 개략도

Fig.2-1. Schematic Diagram Of Experiment Apparatus

Faraday Cage 에서의 대칭적이고 고른 정전하 측적을 위하여 Faraday Cage로의 유입구 및 유출구는 Faraday Cage 의 중앙선에 일치시켰다. 전류계로는 최저 10^{12} [A] 까지 측정가능한 Electronic Picoammeter를 사용하였다. 유동전류 전환 제어박스를 별도로 만들어 외부를 구리망으로 차폐하였으며 실험 장치 전체 역시 구리망을 접지하여 차폐하였다. 어느 온도 범위에서 실험을 할때, 실험 시작과 실험 종료시에 약 $2\sim 3$ [$^{\circ}$ C]의 유온차는 그 온도 범위를 평균한 값으로 그 실험의 온도를 설정하였다. 각각의 파이프 및 Faraday Cage 에 차폐된 리드선을 연결하여 유동전류 전환 제어박스의 스위치에 연결함으로써 스위치의 조작만으로 각각의 파이프에 흐르는 유동전류 및 Faraday Cage 에서의 전하 측적을 한눈에 알수 있게 하였다. 이때 각 파이프의 전류 I_p 와 이온 발생기의 전류 I_s 및 Faraday Cage 의 전류 I_c 간에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 I_{S5} &= I_c \\
 I_{S4} &= I_{P5} + I_c \\
 I_{S3} &= I_{P4} + I_{P5} + I_c \\
 I_{S2} &= I_{P3} + I_{P4} + I_{P5} + I_c \\
 I_{S1} &= I_{P2} + I_{P3} + I_{P4} + I_{P5} + I_c \\
 I_s &= I_{P1} + I_{P2} + I_{P3} + I_{P4} + I_{P5} + I_c \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

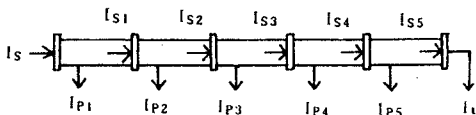


그림 2-2. 파이프 길이 대 파이프 전류

Fig.2-2. Length Of Pipes Vs. Current Of Pipes

3. 결과 및 고찰

3-1. 유동 전류의 유온 의존성

그림 3-1은 절연유의 유량을 15[l/min]로 고정시키고, 각각의 파이프 길이를 2.5[m]로 하였을때, 유온의 변화에 대한 Cu, Fe, Sus에 흐르는 유동 전류 I_p 의 크기를 나타내었다. 유온이 올라감에 따라 Cu와 Fe 파이프를 흐르는 유동 전류는 급격히 증가하고, Sus 또한 완만하나마 부로 증가함을 알수있다. 절연유의 온도가 상승함에 따라 어느 온도 범위까지는 절연유의 점성이 낮아지고, 전하의 이동도가 빨라짐에 따라 유동 전류가 증가한다. 그러나, 본실험에서 확인한 결과로는 유온이 44[$^{\circ}$ C]이상에서는 유동 전류가 급격히 감소하는데, 이는 고체와 액체의 계면 부근에서 액체로부터 고체로의 전하 완화 시간 τ 는 액체의 유전율 ϵ 에 비례하고, 도전율 κ 에 반비례 한다.⁽⁸⁾ 따라서, 어느 온도 범위 이상에서는 액체 도전율의 급격한 증가와 함께 τ 의 감소에 의한 결과라고 사료된다. 또한 Cu, Fe 과는 달리 Sus는 부로 대전되며 그 대전량은 적음을 알수 있다. 이는 액체와 고체의 계면간에 형성되는 전기 이중층내의 흡착층에 전기-화학적 포텐셜에 의해 전하의 선택 흡착이 이루어 지는데 Cu, Fe는 정전하가, Sus는 부전하가 흡착되는데 기인한다고 사료된다.

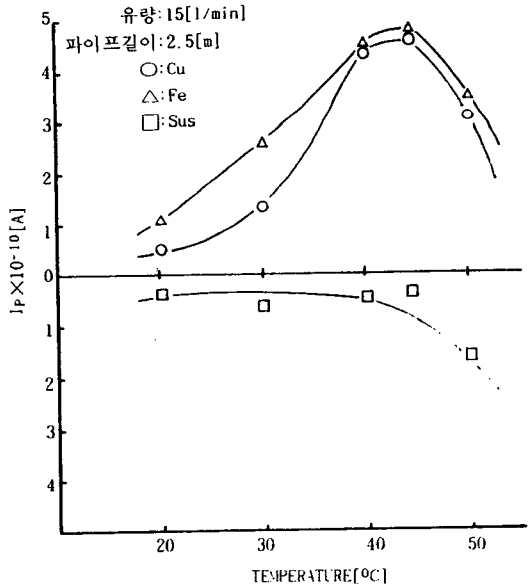


그림 3-1. 유동전류의 온도 의존성

Fig.3-1. Dependence On The Temp. Of Streaming Current

3-2. 유동 전류의 유량 의존성

그림 3-2는 유온을 30[$^{\circ}$ C]로 유지하고, 파이프 길이를 2.5[m]로 하였을때, 유량에 대한 각 파이프들의 유동 전류 I_p 를 나타내었다. 3개의 파이프 모두 유량의 증가에 따라 커짐을 알수 있다. 이는 계면 부근에서 액체측으로부터 고체측으로의 전하 완화 시간을 τ , 유속을 v 라할때 계면에서 분리되는 전하량은 $\tau \cdot v$ 에 비례하므로 단위 시간, 단위 면적당 통과하는 유량의 증가와 함께 분리되는 전하량 또한 증가하는 것에 기인한다고 사료된다.

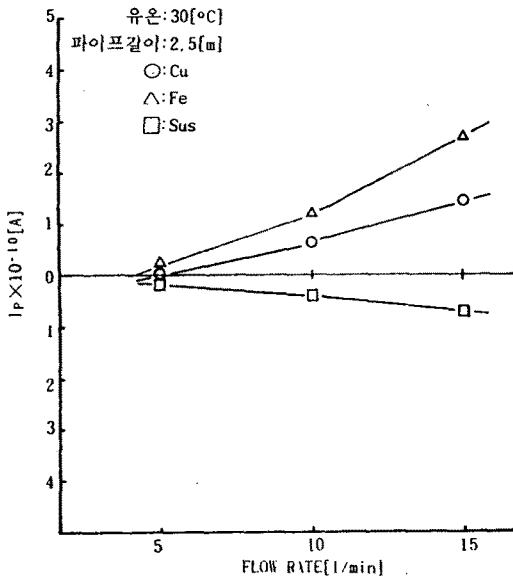


그림 3-2. 유동전류의 유량 의존성
Fig. 3-2. Dependence Of Streaming Current On Oil Flow Rate

3-3. 유동 전류의 파이프 길이 의존성

그림 3-3 은 유온 및 유량을 각각 30[°C], 15[l/min] 로 유지하고 파이프의 길이를 증가시킬 경우, Cu, Fe, Sus 에대한 유동 전류의 값을 나타낸 것이다. 관의 길이가 1.5[m]부터 유동 전류는 포화 상태로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 관경이 일정한 파이프내를 액체가 통과 할때, 파이프로부터 액체로 향하여 흐르는 일정한 전류 밀도를 J_s 라하면 유동 전류 I_P 는 Schon의 이론에 의하여 다음과 같이 표시된다.⁽¹⁹⁾

$$I_P = 2\pi a v r J_s (1 - \exp(-x/rv)) \quad (2.2)$$

여기서, v : 액체의 평균 속도

r : 액체의 전하 완화 경수

x : 파이프 길이

이론식에 의하면 유동 전류값은 어느 길이부터 일정해짐을 알 수 있는데, 본 실험에서는 1.5 - 2[m]에서 포화값을 나타내었다.

3-4. 대전 전류 대 흡착 전류 (Cu)

그림 3-4, 3-5, 3-6은 유량을 5[l/min]로 유지하면서, 이온 발생기로부터 정 또는 부로 강제 대전시킨 절연유를 새가지 파이프로 보냈을때 파이프 길이와 유온 변화에 따른 절연량에 대한 흡착량의 값을 나타내었다. 유량을 일정하게 놓고, 유온에 따라 일정하게 정으로 대전된 절연유를 흘렸을때 전체적으로 Cu와 Fe 이 Sus보다 흡착량이 큼을 알 수 있다. 똑같은 방법으로 부로 대전된 절연유를 흘렸을 때에는 Sus가 Cu와 Fe보다 전체적으로 흡착량이 큼을 알 수 있다. 이는 앞에서 증성유를 흘렸을때 Cu와 Fe은 정으로, Sus는 부로 대전되는 것에서 알 수 있듯이 고체-액체간 계면에서 전기-화학적 포텐셜에 의해 전하들이 선택 흡착되는데 이와 같은 선택 흡착은 재질에도 의존하는 것으로 사료된다. 또한 파이프 길이가 1.5 - 2[m]에서 유동전류는 포화치를 이루는 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 식(2.2)에서 고

찰한 바 있고 그것의 물리적 의미는 대전된 절연유가 파이프를 지나감에 따라 대전율은 감소하고, 이에 따라 흡착을 또한 감소하는 것으로 사료된다. 그림 3-7은 앞의 그림 3-4, 3-5, 3-6을 일기쉽게 [흡착율/대전율x100]의 백분율로 표시하였다.

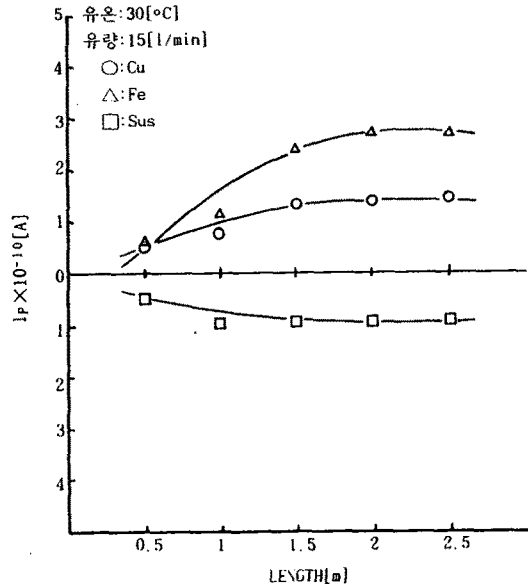


그림 3-3. 유동전류의 파이프 길이 의존성
Fig. 3-3. Dependence Of Streaming Current On Pipe Length

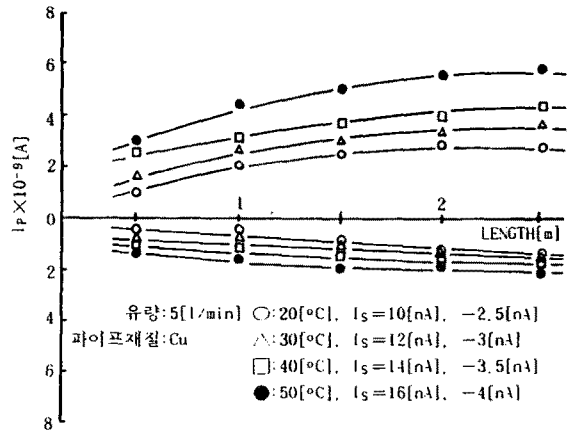


그림 3-4. 대전전류의 파이프 길이 의존성(Cu)
Fig. 3-4. Dependence Of Electrification Current On Pipe Length

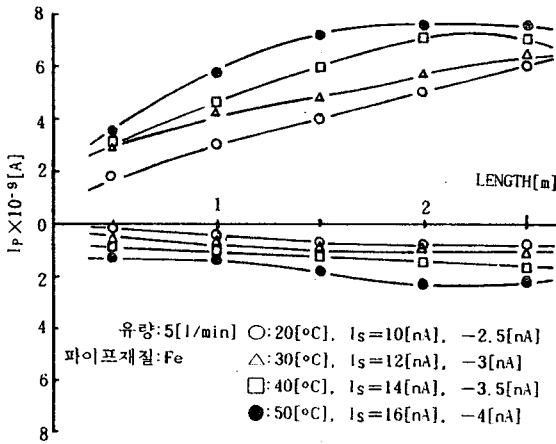


그림 3-5. 대전전류의 파이프 길이 의존성(Fe)
 Fig. 3-5. Dependence Of Electrification Current On Pipe Length

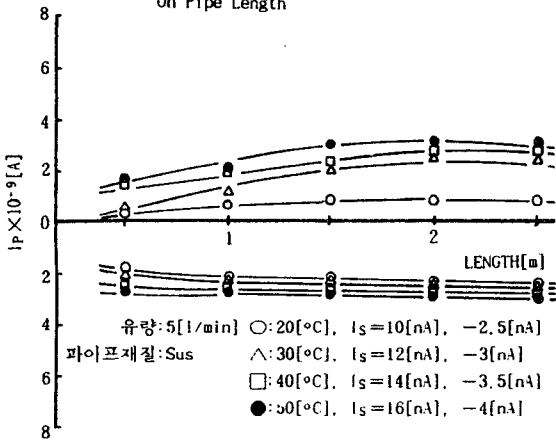


그림 3-6. 대전전류의 파이프 길이 의존성(Sus)
 Fig. 3-6. Dependence Of Electrification Current On Pipe Length

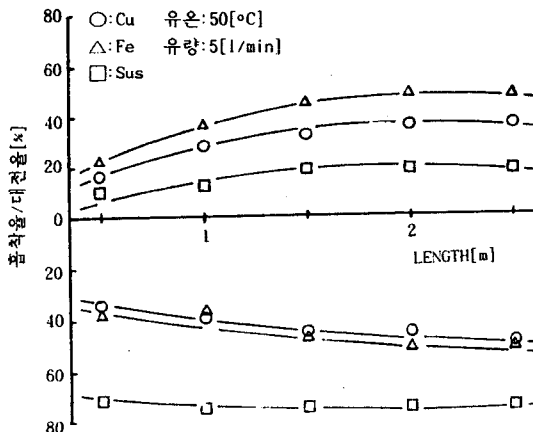


그림 3-7. 전하의 대전율 대 흡착율
 Fig. 3-7. Electrification Rate Vs. Absorption Rate On Charges

4. 결론

Cu, Fe, Sus 파이프에 중성(No-Charged) 및 대전된(Charged) 절연유를 통과시킴으로써 유동 대전에 관한 기초 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 중성의 절연유를 3가지 재료의 파이프에 통과시켰을 때 Cu와 Fe은 정으로, Sus는 부로 대전되었다.
- 2) 각각의 파이프에 대전하는 유동전류값은 파이프 길이가 1.5~2[m]에서 포화된 후 일정한 값을 나타내었다.
- 3) 파이프에서의 유동 전류는 유속이 증가함에 따라 증가하고, 유온의 변화에 따라서는 44[°C] 이하에서는 증가하고, 그 이상의 온도에서는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 4) 각각의 파이프에 대전된(Charged) 절연유를 통과시켰을 때 파이프에 흐르는 유동 전류의 극성은 대전된 절연유의 극성과 동일하며, 파이프에서의 전하의 흡착율 또한 대전율에 비례하는 경향을 나타내었다.

본 연구는 1992년도 기초전력공학 공동연구소의 지원에 의하여 이루어진 연구임을 밝히며, 연구의 지원에 감사드립니다.

<참고문헌>

- (1) 渡辺茂男外1人: 파이프中の液體流速と電荷分布 について(1), 日本靜電氣學會誌, 4, 5(1980).
- (2) 有本匡男外2人: 파이프라인을 흐르는 石油中に生ずる電荷의 除電法, 日本電氣學會論文, 60-A73, 105卷 12虎.
- (3) A. Klinkenbeg: Electrostatics in The Petroleum Industry, (1958).
- (4) J. T. Lonard: U.S. Naval Research Laboratory Report 6952, (1969).
- (5) N. Gibson: J. Phys. D(Appl. Phys) 563, (1970).
- (6) I. Ginsburgh: J. Colloid And Interface Science, vol132, NO. 3, 424(1970).
- (7) G. Schon: Static Electrification Cor, 11, 138(1971)
- (8) 有本匡男: 이온吸着モデルによる流動帶電現象의 解析, P9.
- (9) D. W. Crofts: "Static Electrification Phenomena in Power Transformer", 1985 Doble Client Conf. Minutes, 1985 Doble Client Conf. Boston, MA, Apr, 1985.