

UHV변압기에서 유동대전에 의한 사고 방지에 관한연구

(A Study on the Preventive Method of Accident by
Streaming Electrification in UHV Transformer)

박재윤* · 고희석**
(Jae-Youn Park·Hee-Seog Koh)

요 약

본 연구에서는 고체-액체 계면에서 액체가 유동할 때 유동대전으로 인하여 발생하는 사고를 방지하려는 목적으로 대용량 변압기내에서 절연유가 통과하는 유로를 모델링한 대전 파이프를 제작하고 대전 파이프내의 유로형상에 따른 유동전류를 측정-분석하였다. 유동전류는 유량의 증가에 따라 선형적으로 증가하였으며, 유온의 증가에 따라 약 46[°C] 이하에서는 증가하고 그 이상에서는 감소한다. 절연유의 흐름이 원활하게 되도록 유로형상을 변화시키면 유동전류는 감소한다.

Abstract

In this paper, electrification pipe modeled on the oil path that insulating oil flow in the high power transformer is manufactured in order to prevent the accident cause from streaming electrification generated when insulating off flow at a solid-liquid interface, and the streaming current is measured and analyzed according to the shape of oil path in electrification pipe.

From the result of this study, the streaming current increases linearly with increasing of oil velocity and it increases at lower temperature and decreases at higher temperature than 46[°C]. The smoother the flow of insulating oil is the more the streaming current decreases.

1. 서 론

절연성이 좋은 액체가 유동하는 경우 액체가 대전되고, 이것이 원인이 되어 정전기재해가

발생한다.¹⁾ 즉 석유공업에 있어서 제품의 전송, 저장등의 과정에서 석유가 송유관 및 오일 필터를 통과해서, 저장탱크로 송유된다. 이때 탱크내의 다량의 대전전하가 누적되고 유면전

*正會員:경남대학교 전기공학과 교수·工博
 **正會員:경남대학교 전기공학과 전임강사, 工博
 接受日字:1992年 6月 15日

“이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음”

위 및 전계가 상당히 증가하기 때문에 저장탱크 내의 구조물과 대전유간에 불꽃방전이 발생하고, 폭발성 혼합기체로 착화되어 폭발을 일으키는 일이 있다²⁾. 또 최근에는 전력용 변압기의 대용량화·고전압화를 위하여 냉각효과의 증대 및 절연물의 절연성능 향상을 위해 노력하고 있다. 이 때문에 대용량 변압기내에서 유동대전에 의한 대전전하량이 증대하고, 그것이 원인이 되어 변압기 내에서 절연파괴가 일어난다.³⁾ 따라서 정전기재해에 대한 대책이 없이는 대용량 변압기의 안전운전은 불가능하게 되며 날로 증가하는 전력수요를 충족하기 위한 승압이 불가능하게 된다. 또한 산업이 발달하게 될수록 이와같은 정전기재해는 늘어나게 되고 재해량도 증가되어가고 있다. 따라서 선진국을 중심으로 정전기재해방지에 대한 연구가 새로운 연구과제로 등장하고 있으며, 상당한 연구가 진행되고 있는 것으로 보고되고 있다.^{4),5)}

본 연구는 대용량 변압기에서 유동대전에 의하여 발생하는 대전전하를 감소시키는 방법으로 대용량변압기 내에서 절연유가 통과하는 유로를 모델링한 대전파이프를 제작하고 절연유의 흐름이 원활하게 되도록 절연유가 흐르는 유로의 형상을 기하학적으로 변화시키는 방법을 통하여 유동대전의 감소방법에 대한 연구를 실험적으로 수행하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험

2.1 시료유의 특성

본 실험에 사용된 시료유는 일반시중에 시판되고 있는 광유계의 전기 절연유 ASTM D-3487 규격의 형태 II로 주로 변압기에 사용되고 있다. 변압기 절연유의 성분은 파라핀계 탄화수소 40%, 나프텐계 탄화수소 47%, 방향족 탄화수소 13%이며 시료유의 일반특성은 표 1에 나타낸다.

2.2 실험장치

UHV 변압기에서 유동대전에 의해 정전기대

표 1. 변압기유의 특성

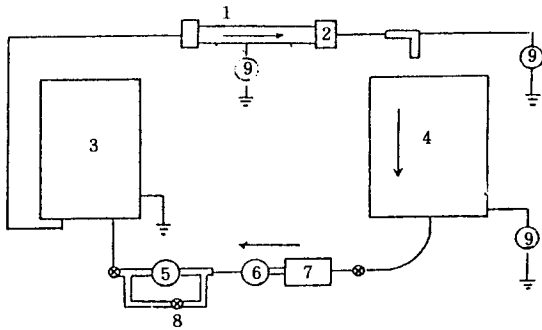
Table 1. Properties of transformer oil

특	성	규	격	실	험	치
반응(reaction)		Neutral		Neutral		
비중(specific gravity) 20°C		0.91 Max.		0.9014		
점도 (viscosity)	at 40°C cst	12.0 Max.		8.90		
	at 100°C cst	3.0 Max.		2.25		
	at 0°C cst	76 Max.		57		
인화점(flash point)°C coc		145Mi.		145		
유동점(pour point)°C		-40 Max.		-45		
전산가(total acid)mg, KOH.gr		0.03 Max.		0.0138		
색상(color) Union saybolt		0.5		1.0		
굴절율 ND 20		—		1.4933		
절연파괴전압 KV (Dielectric strength)		30 Min.		56.3		
수분 P. P. M(water content)		35 Max.		44.8		
유전정접(power factor) 60Hz, 80°C		0.01 Max.		0.01		
아닐린점(aniline point)°C		68~84		64.4		

전이 많이 발생하는 부분을 모델링한 대전파이프를 제작하고 기하학적으로 모델 유로를 여러 가지 형상으로 변화시킬때 유동대전 감소효과를 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 1에 도시하고 그 전경을 사진 1에 나타낸다.

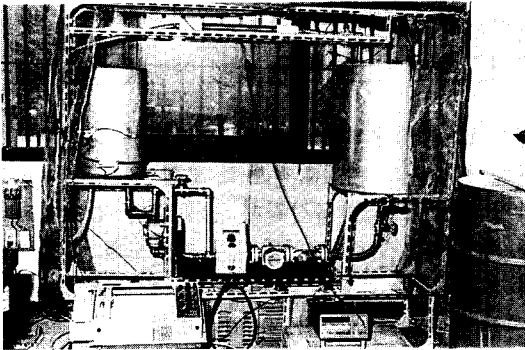
1) 패러데이 케이지 및 완화탱크

절연유가 순환할때 대전파이프에서 유동대전에 의해서 대전된 유중 전하가 유의 흐름과 함께 흘러서 저장되고 접지로 완화될때 발생하는 완화전류를 측정하기 위하여 지름 410[mm], 길이 450[mm]인 패러데이 케이지를 스테인레스로 제작하였으며 그 외부에 지름 510[mm], 길이 600[mm]로 원통형 외부노이즈 차폐용 실드 챔버를 부착하였다. 그리고 대전파이프의 유량계, 펌프, 필터 및 기타 순환계통에서 유동대전에 의해 발생된 유중전하를 완화시켜 대전파이프로 유입되는 절연유를 항상 중성유로 유지시키기 위해서 지름 500[mm], 길이 600[mm]인 완화탱크를 스테인레스로 제작하고 대전파이프 앞 부분에 연결하여 접지 시켰다. 유온은 용량이 2[kW]인 히터 4개를 완화탱크에 부착하여 입력 전압을 조절하여 변화시켰다.



1. 帶電파이프 2. 테프론 3. 완화탱크 4. Faraday Cage
5. 펌프 6. 유량계 7. 필터 8. by-pass valve
9. 전류계

그림 1. 모델流路에서 流動帶電 實驗裝置 概略圖
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus of streaming current in model oil pass



사 진 1. 모델유로에서 유동대전 실험장치
Photo. 1. Experimental apparatus of streaming current in model oil pass

2) 유량계 및 펌프

유량을 검출하기 위하여 (주) 동화유량계의 (N-20-C)인 모델의 적산형 유량계를 필터를 부착하여 순환계통에 접속하였고, 펌프는 (주) Tuthill pump Co사 제품인 출력 0.5마력 모터-기어펌프 결합형 펌프를 사용하였다. 유량은 모터의 회전속도를 일정하게 유지시키고 펌프와 병렬로 접속된 측로의 밸브를 조절하여 변화시켰다. 기타 순환계통은 일반 시중에 시판되고 있는 비닐호스를 사용하였다.

3) 대전파이프

지름 30[mm], 길이 400[mm]인 스테인레스 파이프를 사용하여 그 내부에 UHV변압기에 사용되고 있는 절연지로 관을 만들었다. 관 내부에 UHV변압기내에서 유동대전에 의해 사고가 다발하는 순환부분을 유로로 모델링하기 위하여 길이 30[mm], 폭 10[mm], 두께 10[mm]로 된 같은 모양인 3개의 절연지로 된 스페이서를 삽입한 대전파이프를 제작하고 테프론 파이프 양쪽을 다른 순환파이프와 절연시켜 접속하였다. 대전파이프의 개략도를 그림 2에 도시한다. 대전파이프의 입구 및 출구부분인 그림 2의 (a)의 a, b부분에서 절연유의 흐름이 갑자기 변화함으로 발생하는 국소부분 유동전류를 측정하기 위하여 그림 2의(b)와 같이 첫째, 셋째 스페이서의 선단내에 가로 2[mm] 세로 2[mm] 두께 0.5[mm]인 구리전극을 삽입하고, I_{pi} , I_{po} 를 측정하였다. 또한 절연유의 흐름이 원활하게 되도록 스페이서의 선단 부분의 형상을 기하학적으로 변화시켜 여러가지 형상의 스페이서를 제작하였으며 그 형상을 그림 3에 도시한다.

2.3 실험 방법

펌프로 약 1시간동안 절연유를 순환시켜 실험장치가 정상상태로 유지된 다음 각 유로형상에서 대전 파이프 전류와 대전 파이프 입구 및 출구부분에 삽입된 국부유동 전류를 측정하기

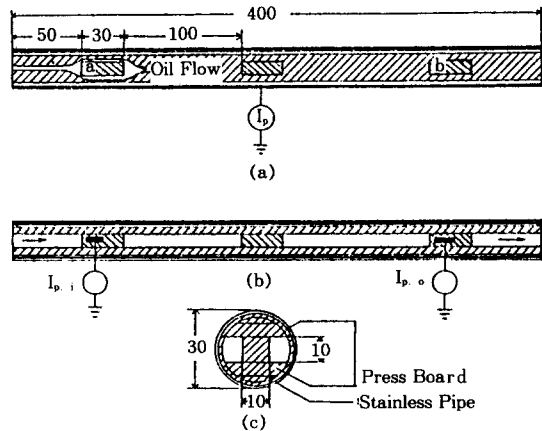


그림 2. 帶電파이프 構造
Fig. 2. Structure of electrification pipe

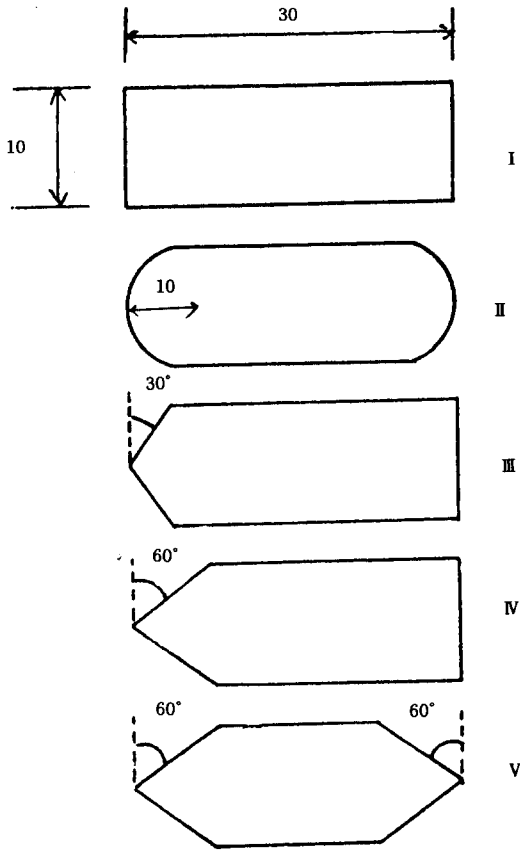


그림 3. 스페이스의 構造
Fig. 3. Structure of spacer

위한 전극으로 극부유동 전류를 측정하였다. 유량조절은 펌프회전 속도는 항상 일정하게 유지시키고 펌프에 병렬로 부착된 측로를 조절하여 유량을 1~7(ℓ/min)로 변화시켰다. 완화탱크에 부착된 히터로 절연유의 온도를 20~50($^{\circ}\text{C}$)로 변화시키면서 위와 같은 실험을 반복한다. 이때 유량은 단위 시간당 유량계에 적산되는 유량으로 환산 하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 유량 의존성

UHV 변압기내 절연유가 통과하는 유로를 모델링한 각 유로형상에서 절연유의 온도를 18($^{\circ}\text{C}$)로 일정하게 유지시키고 유량을 1~7

(ℓ/min)로 변화시킬 때 I_p , I_{pi} 및 I_{po} 의 측정결과를 그림 4, 5, 6에 도시한다.

I_p , I_{pi} 및 I_{po} 는 유량의 증가에 따라 거의 같은 비율로 증가하고 있으며 유로형상이 스페이스(I)에서 스페이스(V)로 될수록 전체적으로 감소한다.

이와같은 현상은 유속 v 로 유동하고 있는 유체속에 놓인 물체의 표면에는 그림 7과 같이 세 영역으로 구분되는 경계층 구조가 발생되고 유체력학적으로 유로형상이 스페이스(I)에서(IV)로 될수록 난유경계층 영역이 감소하여 유동전류는 감소하는 것으로 사료된다. 또한 스페이스(IV)형상보다는 스페이스(V)형상이 유동전류가 감소한다. 이 결과는 그림 7과 같이 후류부분에 생기는 난류성분인 난동이 감소되기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 I_{pi} 의 값보다 I_{po} 값이 작게 나타나며 이와 같은 실험결과는 절연유가 대전 파이프 하류로 진행할수록 유동대전에 의해서 발생된 유중 정전하 밀도가 증가하고 정전하가 절연지로 보다 많이 완화되므로 일반적으로 대전전류와 완화전류의 대수합으로 표시되는 유동전류중 완화전류성분이 점차 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 유온 의존성

본 실험에서는 유동대류를 줄이는 것이 좋으므로 다섯가지 종류의 스페이스중 가장 유동전류를 감소시키는데 특성이 좋은 V의 형을 택하여 온도특성을 실험하였다. 스페이스(V)를 삽입한 대전파이프에서 유량을 6.5(ℓ/min)로 일정하게 유지시키고 유온을 20~50($^{\circ}\text{C}$)로 변화시키면서 I_p , I_{pi} 및 I_{po} 를 측정하고 그 결과를 그림 8, 9에 도시한다.

유온이 상승에 따라 유동전류 I_p , I_{pi} 및 I_{po} 가 증가하고 46($^{\circ}\text{C}$)부근에서 피크값을 나타내고 감소하는 경향이 있다. 이것은 유동대전의 근원인 정전기 발생 및 완화에 관여하는 몇가지의 요인중 온도변화에 따는 도전율의 변화에 기인되는 것으로 사료된다. 일반적으로 유동전류는 대전전류와 완화전류의 대수적 합으로 된다. 온도가 증가하면 도전율이 증가하고 시정

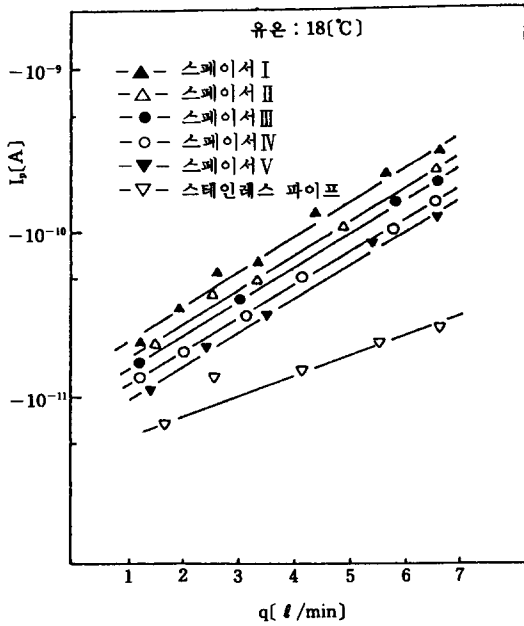


그림 4. 流動電流의 流量 依存性
 Fig. 4. Dependence of streaming current on oil flow rate

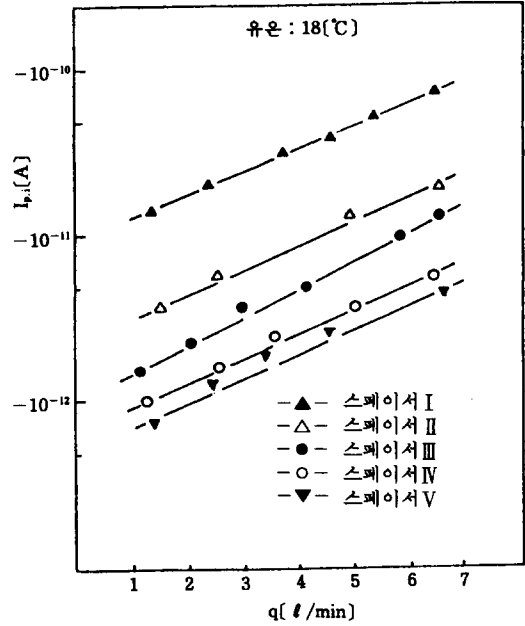


그림 5. 入口部分 流動電流의 流量 依存性
 Fig. 5. Dependence of inlet partial streaming current on oil flow rate

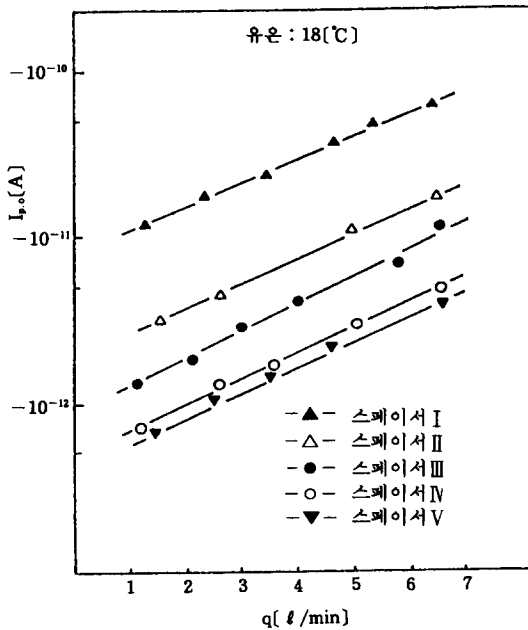


그림 6. 出口部分 流動電流의 流量 依存性
 Fig. 6. Dependence of outlet partial streaming current on oil flow rate

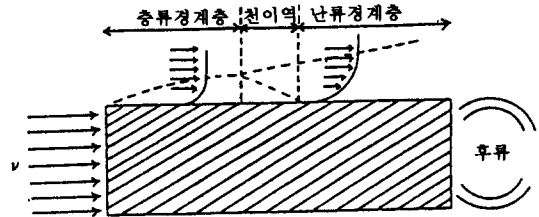


그림 7. 境界層 構造
 Fig. 7. Structure of a boundary layer

수 $\tau(\epsilon/\sigma)$ 는 감소한다. 따라서 접지로 완화되는 대전전하량이 증가하여 완화전류도 증가하며 유동전류는 상대적으로 감소하므로 어떤 도전을 범위에서 최대치를 나타내고 감소하는 것으로 생각된다. 일반적으로 유동전류는 도전율이 $10^{-10}[\text{Sm}^{-1}]$ 때 최고값을 나타내고 그 이상에서 감소하며 대전이 발견되는 도전율 범위는 $10^{-13} \sim 10^{-7}[\text{Sm}^{-1}]$ 이고 전하밀도는 $10^{-2} \sim 10^{-6}[\text{Cm}^{-3}]$ 범위라고 보고되고 있다⁵⁾. 그러나 Klinkenberg는 도전율이 $10^{-12} \sim 10^{-10}[\text{Sm}^{-1}]$ 에서 유동전류가 최대치를 나타낸다고 보고하였

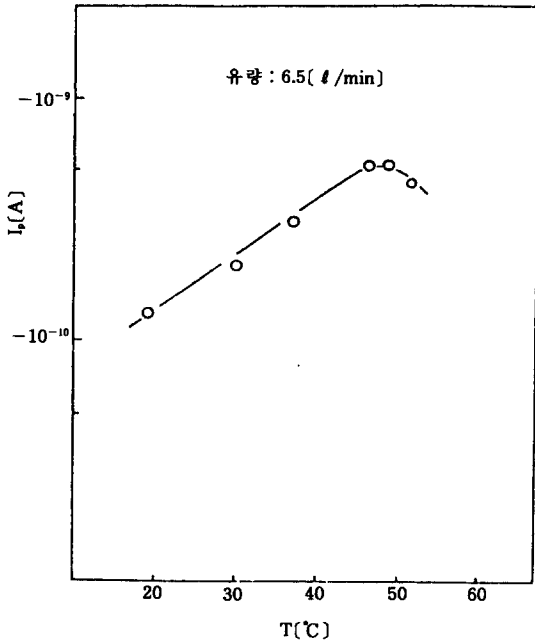


그림 8. 流動電流의 流溫 依存性(스페이스 V형)
 Fig. 8. Dependence of streaming current on oil temperature (Spacer type V)

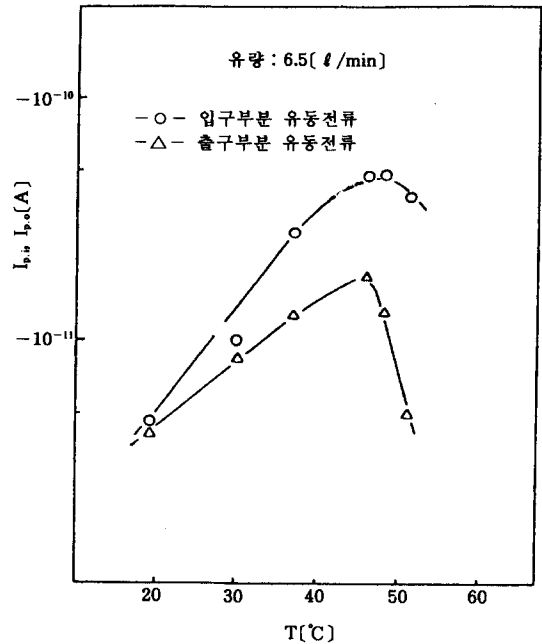


그림 9. 入口部分 流動電流 및 出口部分 流動電流의 流溫 依存性(스페이스 V형)
 Fig. 9. Dependence of inlet and outlet partial streaming current on oil temperature (Spacer Type V)

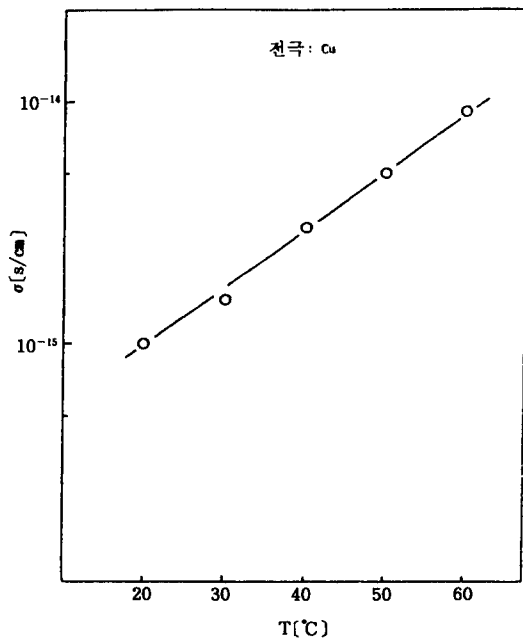


그림 10. 導電率의 溫度 依存性
 Fig. 10. Dependence of conductivity on oil temperature

다.⁷⁾ 이와같이 연구자에 따라 편차가 크게 나타나고 있으며 본 연구에서는 도전율이 그림 9, 10과 같이 약 $5 \times 10^{-13} [\text{Sm}^{-1}]$ 에서 최대치를 나타내고 감소했다.

또한 그림 9에서 I_{po} 가 I_{pi} 값보다 작고, 유온의 증가에 따라 그 차가 더욱 크게 된다. 절연유가 대전파이프의 길이가 증가하는 방향으로 진행할수록 유중 대전전하 밀도가 증가하여 절연유로부터 파립으로 완화되는 완화전류 성분이 증가하게 되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 유온이 상승함에 따라 도전율이 증가하게 되어 이러한 현상이 더욱 현저하게 일어나기 때문이다.

4. 결 론

고체-절연유 계면에서 절연유가 유동할 때 발생하는 유동대전 특성을 조사 및 유동대전의

감소방법으로 대용량 변압기 내에서 절연유가 통과하는 유로를 모델링한 대전 파이프에서 유로형상의 변화 등에 따라 절연유의 유동대전 특성을 관측한 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유동전류는 유량이 증가함에 따라 증가하고 유온의 변화에 따라서는 46[°C] 이하에서는 증가하고 그 이상의 온도에서는 감소하는 경향이 있다. 이들은 유량에 따라 계면에서 분리되는 전하가 증가하고 온도의 증가에 따라 도전율이 증가하는 것으로 해석된다.

2) 대용량 변압기에서 절연유의 유동대전을 감소시킬 목적으로 절연유의 흐름이 원활하게 되도록 유로형상을 기하학적으로 변화시키면 유동전류는 감소하는것이 관측되었다.

5. 참고 문헌

- 1) 靜電氣學會編：靜電氣ハソツツク, p. 888, 1981.
- 2) ツェル石油株式會社, “21万トントタンカー連續爆發事故原因調査狀況中間報告”, 1970年2月18日 シェルインターナショナル マリソ發表.
- 3) 大久保仁, 外1, “油中絶縁における破壊と空間電荷”, 靜電氣學會誌, 14.1, pp. 16-24 1990.
- 4) B. Hochart And J. P. Grandjeon : “Oil Charging Tendency Effect On Large Power Transformer”, Paper Printed at the 1987 Double Eng. Co. Client Conf. Boston, Massachusetts, Apr. 1987.
- 5) Electrostatics, J. A. Cross, pp. 64-70, 1987.
- 6) 有本匡男, “イオン吸着 モデルによる 流動帯電現象の解析”, 1982.
- 7) A. Klinkenberg, J. L. Van der Minne, Electrostatics in the Petroleum Industry, p. 61. 1958, Elsevier Publishing Co.