

## 여러 환경조건에 대한 고분자애자의 누설전류 특성변화

### Variation in Leakage Current Characteristics of Polymer Insulator for Various Environmental Condition

박재준<sup>1,a</sup>, 최인혁<sup>2</sup>, 이동일<sup>2</sup>  
(Jae-Jun Park<sup>1,a</sup>, In-Hyuk Choi<sup>2</sup>, and Dong-il Lee<sup>2</sup>)

#### Abstract

This study investigated variation leakage current maximum value and waveform considering applied voltage phase angel by simulating three environmental conditions, such as fog, salt fog, and kaolin contamination .As the result of applied voltage phase angel characteristics, leakage currents presented almost in phases in the early stage regardless of environmental conditions just after applying the voltage, and the phase of leakage currents certain phase lags for the discharge of the applied voltage when surface discharges occurred due to the continuous environmental contamination. In addition, the difference in phase significantly increased according to the intensity of discharges. The change in distortion rates according to the environmental contamination presented a nearly same level just after applying the voltage. The distortion rate of third harmonic for the fundamental wave presented by the order of fog>salt fog>kaolin when surface discharges occurred due to the applied voltage for certain continued periods. In the case of the fog and salt fog, the scale of spectrums decreased according to the increase in frequencies from the results of the analysis of high frequencies. In addition, the even number frequency presented a relatively large level compared to the odd number frequency under the kaolin contamination.

**Key Words** : Leakage current, Applied voltage phase angel, Environmental condition, Distortion rate, Frequency analysis

#### 1. 서 론

오손된 고분자 애자가 고장이 발생하면 송전 및 배전시스템의 전력 품질저하에 주요한 원인이 되어 왔다. 그중 EPDM((Ethylene Propylene Diene Monomer) 고분자애자의 고장원인 및 과정 그리고 섬락메커니즘에 대한 연구가 진행되어 왔다[1]. 오손현상은 지역 환경조건 및 산업화에 따라 수반된 결과로서 필할 수 없는 현상이지만 방지하게 되면

막대한 경제적 손실을 초래하게 된다. 오손이 심한 환경에 습도가 있게 되면 젖은 전도피막이 형성되어 누설전류에 의한 아킹(arc)의 결과로 표면 건조대의 형성을 가져오게 되고, 아킹에 의해 젖은 표면을 가로질러 갑자기 연장되어 전체 섬락의 결과를 가져온다. 교번용력 하에서 오손된 애자의 섬락은 복잡한 메커니즘의 마지막 단계로서, 오손물질이 고분자애자 표면에 묻게 되어 세정되지 않으면 배전계통뿐만 아니라 송.변전 계통에서도 고장 사고의 원인이 되어 고장(failure)이 발생하게 된다.

최근에는 고분자애자의 섬락을 미연에 방지하기 위해 확률통계 분석기법을 이용한 고분자애자의 섬락예지를 통하여 세정기간과 열화 정도와 같은 새로운 기법이 연구되어졌고[1,2], 송전 및 배전용

1. 중부대학교 전기전자공학과  
(충남 금산군 추부면 대학로 101)  
2. 한전전력연구원 송전기술그룹  
a. Corresponding Author : jipak@joongbu.ac.kr  
접수일자 : 2005. 12. 14  
1차 심사 : 2005. 12. 21  
심사완료 : 2005. 12. 30

고분자애자(실리콘, EPDM)의 표면 열화 및 침식 그리고 설계시 왜곡도를 이용하는 기법이 연구되어 지고 있다[3,4].

본 연구에서는 여러 환경조건 즉 청정지역 환경, 해안을 낀 산업공업단지 오손환경 그리고 해안가의 환경을 모의하기 위하여 자체 제작된 챔버 환경을 안개, 염무, 카올린 오손된 표면에 안개를 적용하였다. 환경조건에 의해 표면에 흐르는 누설전류 특성을 이용하여 오손환경에 대한 인가전압위상각을 포함한 누설전류 위상특성을 연구하였고, 스펙트럼분석 (Fast Fourier Transform)을 통하여 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파의 백분율인 왜곡률(%)을 구하여 비교 검토하였다. 정량화된 그 값은 향후 표면오손정도 및 오손조건을 분별할 수 있는 판정자료로 이용이 가능하게 될 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

누설전류의 계측은 그림 1에서 나타낸 실험 장치를 이용하여 여러 가지 환경을 모의 하였다. 그 중 농촌지역의 모의를 위하여 안개(fog)를 챔버에 분무하였고, 해안가를 모의하기 위하여 염무(salt fog: 증류수 1000 ml + 소금20 g)을 실시하였다. 그리고 해안에 접한 공장지역의 환경을 모의하기 위하여 카올린(kaolin)오손실험을 실시하였다. 오손 물은 소금20 g + 카올린30 g + 증류수1000 ml로 혼합한 물질을 고분자애자 표면에 오손 시켜 인공건조 후 실험에 착수하였다. 실험에 사용된 배전용 EPDM고분자 현수애자는 오염지역에서 서비스되어진 재료를 사용하였다. 자체 제작된 챔버 1190×1210×1670 mm를 사용하여 환경오손실험을 실시하였고, 안개와 염무 그리고 카올린 오손실험은 초음파 가습기(Ultra Sonic Humidifier, 400 cc/hr, 연속연무)를 이용하였다.

본 연구에서는 교류 16 kV, 60 Hz의 인가전압이 일정하게 고분자애자에 인가되었고, 각각의 환경모의에 의하여 오손된 표면을 타고 접지로 흐르는 전류가 전기저항 100 Ω의 전압강하 된 누설전류를 측정하게 된다. 누설전류를 측정하기 위하여 차동프로브(ADP305, Lecroy, 100:1)를 걸쳐 디지털 오실로스코프(wave runner LT342L, Lecroy)로 전류파형 신호가 입력되어진다. 입력된 아날로그 신호파형을 디스플레이하고, 인터페이스 랜카드를 통하여 0.1 ms 샘플링주기를 갖는 A/D변환기를 경유하여 원격으로 컴퓨터에서 데이터를 매 200 ms

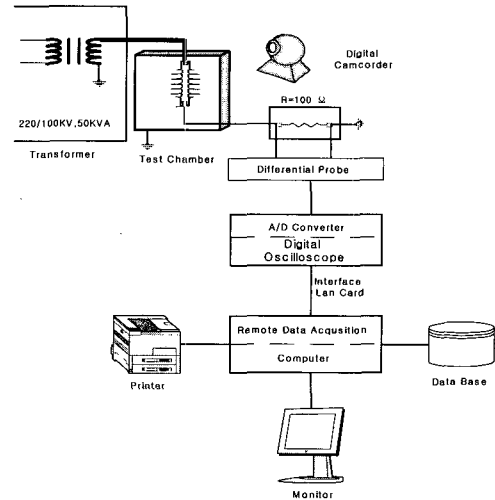


그림 1. 전체 시스템 구성도.

Fig. 1. The whole system diagram.

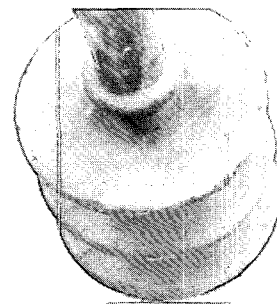


그림 2. 실험에 사용된 EPDM 고분자애자.

Fig. 2. EPDM polymer insulator used in experiment.

동안의 누설전류 파형을 획득하게 된다. 획득된 데이터는 필터링의 과정을 걸친 후 Matlab 6.5을 통하여 FFT 처리하였다.

포항에서 실제실험에 사용된 배전용고분자애자는 상당히 오손된 상태였으며 이를 그림 2에 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 여러 환경오손에 따른 누설전류를 특성

배전전압은 13.2 kV이지만 본 연구는 16 kV (112 %)에서 일정하게 전압을 인가하였다. 건조

상태에서 안개를 적용한 후 신호의 계측은 시작된다. 먼저 순수하게 오손 없이 고분자에자의 표면에 증류수를 안개로 적용 후 위상과 누설전류파형을 관찰하였고, 또 다른 경우는 소금 20 g 증류수에 혼합한 오손물을 안개와 같은 염무를 적용하여 위상각을 포함한 누설전류 파형과 주파수 분석을 실시하였다. 마지막으로 카올린 오손효과를 알기 위하여 Kaolin 30 g+Salt 20 g 혼합하여 표면에 강제 오손시켜 안개를 적용하여 인가전압 위상각을 포함한 누설전류 파형과 주파수분석을 실시하였다.

### 3.1.1 안개(Clean fog)

그림 3에서는 순수 한 증류수를 초음파 가슴기를 이용하여 일정 공간에 안개를 적용한 후 전압을 인가하였다. 잠시 후 안개의 입자가 고분자에자의 표면에 내려앉을 때 계측이 시작되었다. 전압인가 시간에 대한 누설전류 파형의 최대값 변화를 관찰한 결과를 그림 3에서 나타내었다. 10분정도까지는 10 mA로서 표면에 오손된 먼지나 표면이 열화에 의해서 누설전류가 발생되게 된다. 초음파 가슴기에서 지속적인 안개를 적용하여 밀폐된 공간 내 증류수의 입자밀도가 높아지게 되므로, 표면 수분 함량이 증가됨으로 시간에 따라 점차로 누설전류 파형에 대한 진폭의 최대값 크기가 커져가는 경향을 볼 수가 있다. 그림 4(a)의 경우는 안개 적용 10초 후 인가전압 위상각에 대한 누설전류펄스 파형을 나타내었다. 수 mA 정도의 누설전류로서 약간의 찌그러진 누설전류파형을 볼 수 있으며, 위상의 경우는 전압에 대한 전류는 표면저항의 성분만으로 나타난 동상의 결과이며, 수분의 양이 도전로의 전류량으로 나타나게 된다. 그림 4(b)의 경우는 주파수 분석의 결과로서 주파수 증가에 따른 스펙트럼의 크기가 감소된 경우로서 기본파의 경우가 크고 3고조파 및 5고조파의 순으로 감소되는 경향을 보이고 있다. 전압인가 직후 주파수 분석으로서 기본파에 대한 3고조파의 비율은 26 %, 5고조파의 비율은 10 %이었다.

그림 5(a)의 경우는 17분이 경과된 후 인가전압 위상각에 따른 누설전류 파형으로서 약한 표면방전의 결과로서 약 17 mA의 누설전류를 나타내고 있다. 방전으로 인해 인가전압에 비하여 누설전류가 갑작스럽게 증가된 결과로서, 전압이 누설전류에 비하여 방전시간 만큼의 위상이 늦어지는 결과를 초래 한 것이다. 그림 5(b)의 경우는 주파수 분석 결과로서 누설전류 크기 증가와 표면 미소방전의 의해서 주파수 스펙트럼의 크기는 초기상태에 비

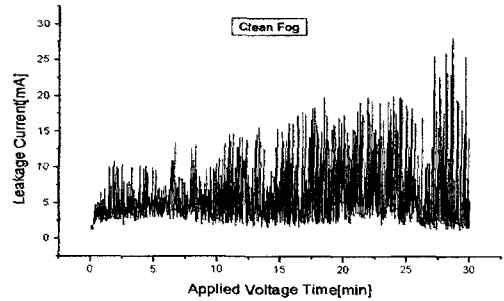
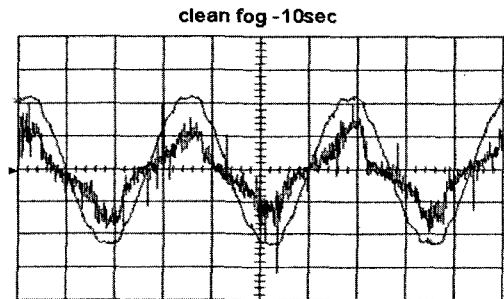
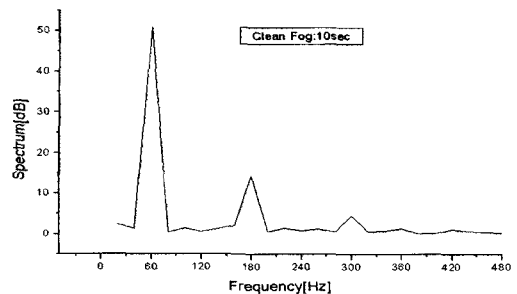


그림 3. 안개적용 시 누설전류파형의 최대값 변화.  
Fig. 3. Maximum value of leakage current waveform as result in fog application.



(a) Leakage current waveform included applied voltage phase ange

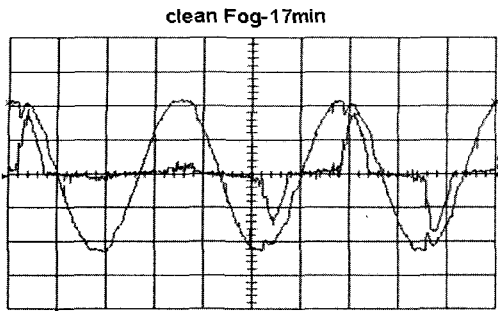


(b) Frequency analysis

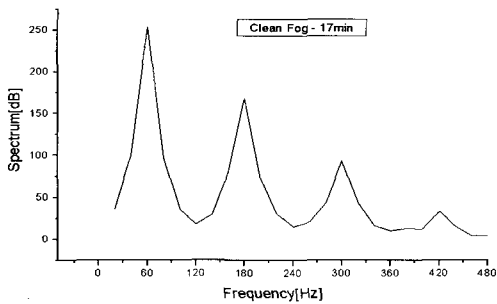
그림 4. 안개적용 시 누설전류파형 및 주파수분석 (전압인가 직후).

Fig. 4. Leakage current waveform and frequency analysis as result in fog application (Immediately after of applied voltage).

하여 현격하게 큰 차이를 나타내고 있다. 그림 4(b)와 그림 5(b)를 비교하여 볼 때, 기본파 성분이



(a) Leakage current waveform included applied voltage phase angel



(b) Frequency analysis

그림 5. 안개적용시 누설전류파형 및 주파수 분석 (전압인가 17분 후).

Fig. 5. Leakage current waveform and frequency analysis as result in fog application(17 minute after of applied voltage).

5배만큼 크고, 기본파에 대한 3고조파 64 %, 5고조파는 30 %로 나타났다. 이와 같이 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파에 대한 왜곡률이 전압인가 직후에 비하여 17분후 증가된 결과의 원인은 방전이 점차증가 되는 현상으로 설명될 수 있다.

### 3.1.2 염무(Salt fog)

그림 6에서 염무 농도는 salt: 20 g/1000 ml: 증류수로 오손된 용액을 고분자애자가 설치된 환경에 적용한 경우이다. 안개의 적용과 동일한 방법으로 실험을 실시하였다. 그림 6에서는 염무에 따른 누설전류파형의 최대값 변화를 나타내었다. 인가후 27분정도까지는 20 mA이하의 크기로 완만하게 증가되는 경향을 보였고, 그 이후 급격하게 큰 폭으로 증가되는 경향을 나타내고 있다.

그림 7(a)에서는 염무를 인가한 경우로서 전압인가 30초 후 인가전압 위상각을 고려한 누설전류

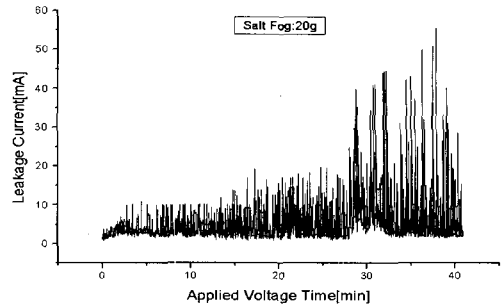
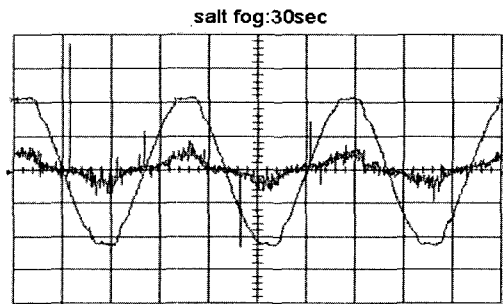
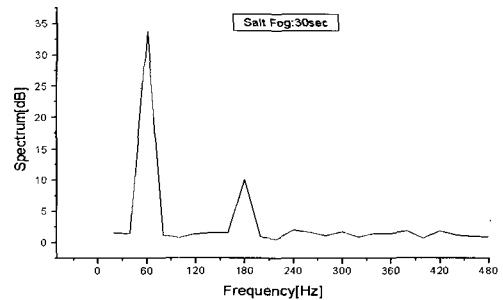


그림 6. 염무 인가시 누설전류파형의 최대값 변화 (소금20 g/1000 ml).

Fig. 6. Variation maximum value of leakage current waveform by salt fog application (Salt 20 g/1000 ml).



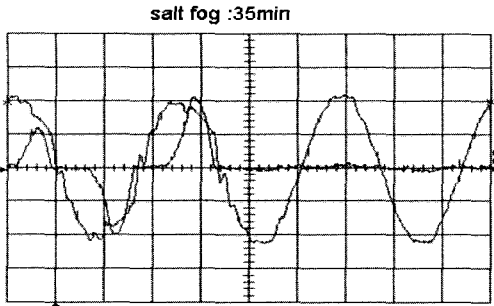
(a) Leakage current waveform included applied voltage phase angel



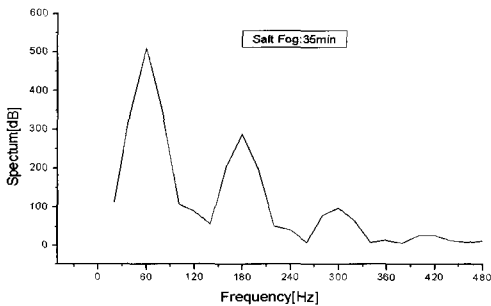
(b) Frequency analysis

그림 7. 염무 인가시 누설전류파형 및 주파수 분석(인가 후 30초).

Fig. 7. Leakage current waveform and frequency analysis as result in salt fog application (30 second after of applied voltage).



(a) Leakage current waveform included applied voltage phase angle



(b) Frequency analysis

그림 8. 염무 인가시 누설전류파형 및 주파수 분석(인가 후 35분 후).

Fig. 8. Leakage current waveform and frequency analysis as result in salt fog application (35 minute after of applied voltage).

파형을 나타내고 있다. 인가 직후에서는 누설전류 파형은 찌그러짐이 존재하지만 인가전압의 위상에 벗어난 전류는 아니다. 수mA 정도로서 충분히 염무가 인가되어 고분자애자의 표면에 수분이 존재하지 않을 경우이다. 결국 인가전압 위상에 따른 전류와 위상차는 환경조건의 오손물질에 의해서 나타난 것이 아니고, 오손에 의하여 표면방전의 일종인 아크방전에 의해서 급격한 누설전류가 발생되고 전류가 전압보다 뒤지는 위상차를 갖게 된다. 그림 7(b)의 경우는 전압인가 30초 후 전류파형에 대한 주파수 분석으로서 기본파에 대한 3고조파의 비율은 29 %, 기본파에 대한 5고조파는 5.9 %을 나타내었다.

그림 8(a)에서는 염무를 인가한 경우로서 35분 후의 위상각에 대한 누설전류 펄스 파형을 나타내고 있다. 40 mA 정도의 누설전류 펄스 크기를 갖는 경우로서 표면 아크방전의 결과로서 상당히 왜곡도가 크고 방전발생 후 급증하여 사라지는 누설전

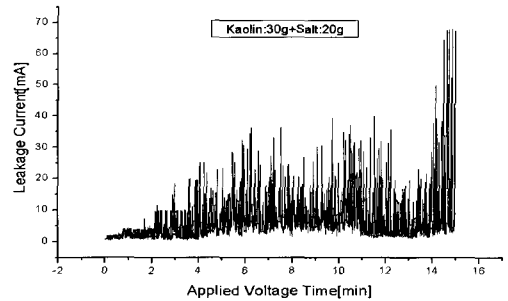


그림 9. Kaolin 30 g+Salt 20 g/누설전류파형의 최대값 변화.

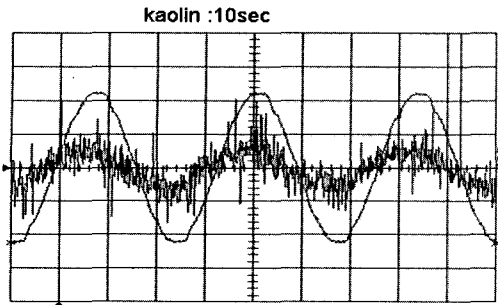
Fig. 9. Kaolin 30 g+Salt 20 g/maximum value variation of leakage current waveform.

류 파형을 나타내고 있다. 그림 8(b)의 경우는 35분 후 주파수 분석을 나타내고 있다. 기본파의 초기 30초에서 스펙트럼 크기는 34이었고, 염무 35분 후의 경우는 500이었다. 기본파에 대한 3고조파의 비율은 54 %, 5고조파의 비율은 36 %이었다.

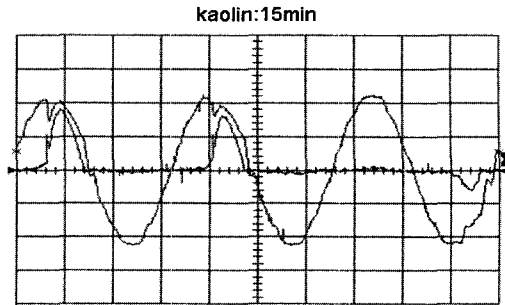
### 3.1.3 카올린 오손(Kaolin contamination)

그림 9에서는 증량비로 카올린 물질 30 g과 소금 20 g를 증류수에 혼합하여 오손물질을 만들었다. 만들어진 오손물질을 고분자애자 표면에 충분히 담그어 다시 꺼내 자연 건조시켰다. 자연 건조된 고분자애자를 안개를 적용 후 누설전류를 계속 하였다. 안개의 경우 5분정도 누설전류 크기는 10 mA이었지만 카올린 오손의 경우는 35 mA이었다. 카올린의 실험조건은 염무 나 안개의 적용 시 장시간동안의 실험의 실시는 부적절하다. 왜냐하면 염분으로 오손된 카올린 물질이 증류수에 젖게 되어 흘러내리기 때문에 10~15정도의 특성을 보곤 한다. 그 결과 약 15분정도에 이르러 급격히 전류 크기가 증가된 경우로서 70 mA에 이르고 있다. 카올린 오손의 일반적인 경향으로는 오손된 상태가 건조하여 증류수인 수분이 스며들게 되면 누설전류 통로가 형성되어 전류 흐름이 원활하게 되고 표면의 방전이 발생하게 됨으로서 전류의 크기가 크게 된다.

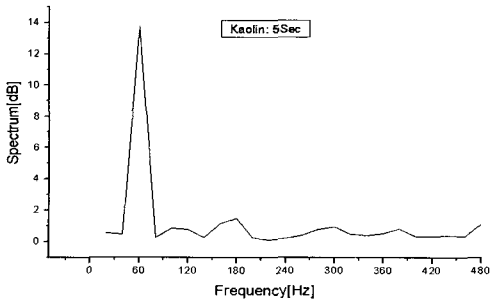
그림 10(a)는 카올린 오손의 경우 전압인가 10초 후 위상각을 포함한 누설전류 파형을 나타내고 있다. 그림 10(b)의 경우는 주파수분석을 나타내고 있다. 기본파에 대한 3고조파는 21 %, 기본파에 대한 5고조파는 7.1 %을 나타내었다.



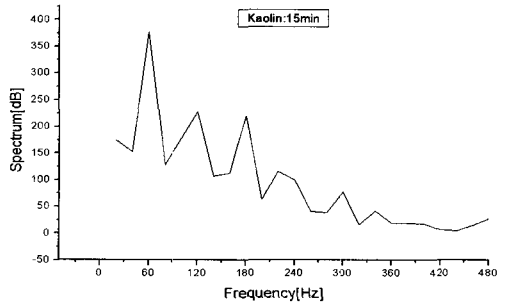
(a) Leakage current waveform included applied voltage phase angel



(a) Leakage current waveform included applied voltage phase angel



(b) Frequency analysis



(b) Frequency analysis

그림 10. Kaolin 30 g+Salt 20 g/누설전류파형 및 주파수분석(10초 후).

Fig. 10. Kaolin 30 g+Salt 20 g/leakage current waveform and spectrum analysis(After 10 second).

그림 11. Kaolin 30 g+Salt 20 g/누설전류파형 및 주파수분석(15분 후).

Fig. 11. Kaolin 30 g+Salt 20 g/Leakage current waveform and spectrum analysis(After 15 minute).

그림 11에서 카올린 30 g+소금 20 g으로 오손물을 오손시킨 경우로서 전압인가 14분에 계측된 인가전압위상과 전류펄스파형을 나타내고 있다. 표면방전시 인가전압이 표면방전에 의해 발생된 누설전류보다 위상이 앞서고 있다. 그림 11(b)에서는 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 안개 및 염무 경우와는 다르게 홀수고조파(기본파, 3고조파, 5고조파)와 더불어 짝수고조파(2고조파, 4고조파, 6고조파) 성분이 두드러지게 나타내고 있으며, 홀수고조파가 짝수고조파에 비하여 전체적으로 우세한 경우로 나타내고 있다. 고조파의 증가와 더불어 스펙트럼의 크기는 감소되고 있다. 기본파에 대한 3고조파의 비는 50%, 5고조파의 비는 20%로 나타났다.

이상의 결과를 통하여[4-7], 전압인가초기에서는 환경조건에 관계없이 전압인가직후에는 거의 동상에 가깝고, 환경오손이 지속적용되어 적용되어 표면방

전이 발생할 때면 인가전압에 대해 방전시 누설전류파형의 위상이 늦어짐을 알 수 있었다. 또한 방전의 격렬도에 따라 위상차는 더욱 크게 나타내었다.

환경오손에 대한 왜곡률의 변화는 전압인가직후에서는 거의 유사한 값을 기록하였고, 인가 후 어느 일정시간이 지속되어 표면방전이 발생될 때 기본파에 대한 3고조파의 왜곡률의 경우 안개>염무>카올린의 순으로 왜곡도가 크게 나타내었다. 특징적인 점은 카올린 오손시의 경우 안개나 염무시의 경우에 비하여 홀수고조파보다 짝수고조파가 상대적으로 크게 나타나는 현상을 볼 수 있었다. 결국, 왜곡도가 크다는 것은 파형의 찌그러짐이 크다는 것이며, 이는 방전초기에 나타나는 경우가 대부분이며, 왜곡도가 작아지는 이유는 방전의 격렬도가 커서 기본파와 유사한 주기의 파형이 발생됨을 의미한 것이다. 이러한 왜곡률을 통하여 오손정도

표 1. 환경조건에 따른 왜곡도의 변화.

Table 1. Distortion degree variation according to environment condition.

환경오손 종류	측정시간	기본파에 대한 3및 5고조파	왜곡률(%)
안개	전압인가 직후	3고조파	26
		5고조파	10
	17분 후	3고조파	64
		5고조파	30
염무	전압인가 직후	3고조파	29
		5고조파	5.9
	35분 후	3고조파	54
		5고조파	36
카울린	전압인가 직후	3고조파	21
		5고조파	7.1
	15분 후	3고조파	50
		5고조파	20

및 환경요인을 판단하는 자료로서 유용하리라 생각 된다.

#### 4. 결론

본 연구는 3가지 환경조건 즉, 안개, 염무, 카울린 오손을 모의하여 인가전압위상각을 고려한 누설 전류파형과 누설전류 최대값의 변화 그리고 주파수특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전압인가초기에서는 환경조건에 관계없이 전압 인가직후에는 거의 동상에 가깝고, 환경오손이 지속적으로 적용되어 표면방전이 발생할 때면 인가전압에 대해 방전시 누설전류파형의 위상이 늦어짐을 알 수 있었다. 또한 방전의 격렬도에 따라 위상차는 더욱 크게 나타내었다.
2. 환경오손에 대한 왜곡률 변화는 전압인가직후에서는 거의 유사한 값을 기록하였고, 인가 후 어느 일정시간이 지속되어 표면방전이 발생될 때 기본파에 대한 3고조파의 왜곡율의 경우 안개>염무>카울린의 순으로 왜곡도가 크게 나타내었다.
3. 고조파분석의 결과 주파수가 증가함에 따라 안개 및 염무의 경우 스펙트럼 크기는 작아지고 있으며, 카울린 오손시의 경우 홀수고조파보다 짝수고조파가 상대적으로 크게 나타나는 현상을 볼 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(02524)주관으로 수행된 과제임.

#### 참고 문헌

- [1] F. Amarh, G. G. Karady, and R. Sundrarajan, "Linear stochastic analysis of polluted insulator leakage current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, p. 1063, 2002.
- [2] J.-J. park, I.-H. Choi, and J.-B. Kim, "Diagnosis technique of surface contaminant degree for EPDM insulator according to variation of environment condition", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 17, No. 10, p. 1132, 2004.
- [3] A. H. El-Hag, S. H. Jayaram, and E. A. Cherney, "Influence of shed parameters on the aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, p. 655, 2003.
- [4] A. H. El-Hag, S. Jayaram, and E. A. Cherney, "Fundamental and low frequency harmonic of leakage current as a diagnostic tool to study aging of RTV and HTV silicon rubber in salt fog", IEEE Trans. DEL, Vol. 10, p. 128, 2003.
- [5] C. S. Richards, C. L. Benner, K. L. Butler-purry, and B. Don Russell, "Electrical behavior of contaminated distribution insulators exposed to natural wetting", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, p. 551, 2003.
- [6] J.-J. park and T.-K. Yang, "Harmonics analysis of leakage current waveform and surface discharge for EPDM polymer insulator", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 17, No. 9, p. 1013, 2004.
- [7] M. Hikita, M. Miyata, S. Kurihara, S. Ohtsuka, Y. Hashimoto, and S. Higashi, "Discussion on discharge mechanism based on leakage current measurements of outdoor polymeric insulating materials in salt-fog test", IEEE(2002 Annual Report conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena), p. 375, 2002.