

# ESDD 오손에 따른 송전용자기애자의 누설전류 파형의 분석

## Analysis of Leakage Current Waveforms for Transmission Line Porcelain Insulators due to ESDD Contamination

박 재 준\*  
(Jae-Jun Park)

**Abstract** - This paper reports the contamination performance of transmission line porcelain insulators tested under five different contaminant conditions - clean and ESDD (equivalent salt deposit density) level (A, B, C, and D) through measurement of their leakage current under drop of potential method. To estimate the contamination for transmission line porcelain insulators, leakage current waveform and its maximum value were measured under step-up power test. In the clean insulators test, % distortion factors decreased with increasing step-up power, and as the ESDD level increased, some characteristics such as frequency analysis, harmonics and % distortion factor could be used for contamination diagnosis of the transmission line porcelain insulators.

**Key Words** : Transmission line porcelain insulators, ESDD, Contamination, Leakage current, Surface resistance

### 1. 서 론

송전용 자기애자의 경우 애자련의 길이, 인가전압 극성 등, 이전에 절연이 자연환경에 노출된 경우 오손측정기술 및 오손도 ESDD(Equivalent Salt Deposit Density)와의 관계가 무엇보다 중요하다 할 것이다 [1, 2, 3, 4, 5]. 근본적으로 오손은 건조한 상태에서는 거의 징후가 나타나지 않는다. 그러나 오손물에 가랑비, 겨울철 결빙, 안개 또는 이슬이 존재하여 용해되면, 애자표면에 도전성 층이 형성되어 누설전류를 발생시키고 그리고 부분적인 아크(건조대아크)가 발생하여 결국은 섬락으로 이행되어진다. 건조대 아크의 발생과 진전으로 인하여 세라믹 애자의 젖음성 또는 고분자애자의 친수성에 도움을 주는 역할을 하게 된다 [6,7,8].

애자의 오손에 관계하는 주요한 문제로서 내전압의 저하에 의하여 섬락과 건조대 아크로 인한 열적인 쇼크를 들 수가 있다. 이들의 현상은 이미 보고 되어져왔으며[6,7,8,9] 그리고 세라믹애자의 경우 핀으로부터 아크가 시작되어 갭을 향하여 진행되어 진다[6,10,11,12]. 현수애자는 오손습윤시 누설전류에 의해 전류밀도가 높은 핀 주변의 전계가 높아지기 때문에 오손/습윤 복합으로 핀 주변으로부터 미소방전이 발생 되어지며, 더욱더 습윤한 기체가 가세됨으로 대전류의 아크방전이 발생 하게된다[6,9,13]. 또한 여러 연구자들이 애자의 섬락 발생과 이론적인 모델의 제시 그리고 누설전류모니터링을 통한 예지방법도 보고되어져 왔다[2, 6, 7, 8, 10, 14].

본 연구에서는 이러한 오손과 습윤환경을 모의하기위하여 모의 챔버를 자체 제작하였으며, 정량화된 오손평가를 위하

여 ESDD (Equivalent Salt Deposit Density)을 4개의 오손레벨 A, B, C, D 그리고 Clean 애자 등 5가지의 경우에 대한 누설전류 파형의 계측으로 오손특성의 변화를 살펴보았다. 옥외용 송전용 자기애자의 경우 무엇보다 전력의 원활한 수송을 위해서 오손정도가 가혹하게 되면, 표면 열화가 급격하게 이루어져서 섬락을 맞이할 수 있는 가능성을 지니고 있기 때문에 오손도 진단은 무엇보다 필요한 것이다. 이와 같은 오손도의 진단을 위해서 누설전류 파형의 계측으로 주파수분석 즉, 기본파, 3고조파 그리고 5고조파의 성분분석을 실시하였다. 또한 고조파 성분분석의 결과를 이용하여 기본파에 대한 3고조파의 %왜형을 그리고 기본파에 대한 5고조파의 %왜형을 구하게 된다. 각각의 오손정도인 ESDD 레벨을 설정하여 인가전압 레벨과 상관성을 %왜형율로 구하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험 및 측정

##### (1) 실험장치

송전용 자기애자의 누설전류 측정은 그림 1에서 나타난 송전용 자기애자를 이용하였으며, ESDD A,B,C,D오손레벨을 모의하여 계측하였다.

본 연구에 사용된 송전용 자기애자 (Transmission Line Porcelain Suspension Insulators) 3개를 현수하여 실험에 사용하였다. 자체 제작된 포그 챔버에 애자를 설치하고, 초음파가습장치(Ultra Sonic Humidifier ; 400cc/hr, 연속분무)를 이용하여, 실험 전 챔버 내에 스팀안개로 가습한 후 바닥에 있는 선풍기를 이용하여 안개를 순환시킨 후 애자표면이 충분히 젖도록 (습도:93%, 30℃)하였다. 전압인가방법으로 전압을 단계별 승압시켜 인가하는 전압상승법을 채택하였다.

\* 정 회 원 : 중부대학교 전기전자공학과 교수

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr

접수일자 : 2012년 8월 19일

최종일자 : 2012년 9월 3일

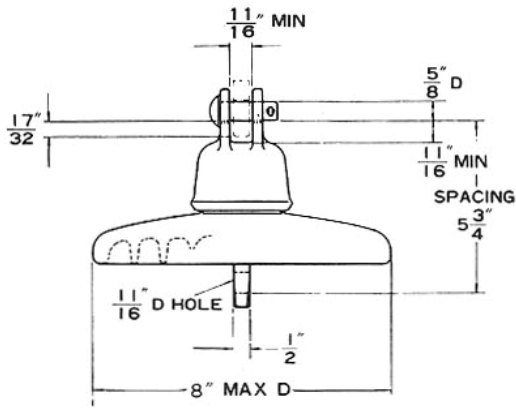


그림 1 송전용 자기애자의 구조  
Fig. 1 Structure of Transmission Line Porcelain Suspension Insulators

이 방법은 비교적 짧은시간 동안 통계자료를 획득할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 단점으로는 오염물질이 애자로부터 쉽게 씻겨어진다는 단점이 있다. 그런 이유로 실험 후 오손을 모의하여 반복실험을 실시하였다. 반복된 실험과 측정결과 최대한 유사한 자료를 본 연구결과에 사용하였다. 인가전압의 승압 속도는 1kV/s로 승압하였으며, 15kV~60kV까지 단계적으로 5kV승압하여, 5분 동안 자료를 계측하였다. 계측된 소요시간은 전체 50분이 되도록 하였으며, 인가전압 레벨은 교류 상용주파 전압으로 애자련 전체가 섬락전압의 75%정도에 도달된 전압으로 하였다[14,15,16]

송전용 고전압자기애자의 오손특성을 연구하기 위하여, 오손처리하는 등가염분부착밀도(Equivalent Salt Deposit Density ; ESDD; 단위는 mg/cm<sup>2</sup>)를 근거로[2,14]하여 오손레벨을 Clean, A, B, C, D, 다섯 등급으로 실시하였다. 그러나 일반적으로 중오손 지역은 실제 거의 발견되지 않는다 [2]. 본 연구에는 적용하지 않지만 카울린과 소금으로 오손시키는 경우가 연구되어지곤 하였다[4,7].

그림 2에서 나타낸 누설전류의 계측은 자기애자 표면에 일정한 습도가 존재할 때 전압을 인가하였다. 전압이 인가되면 애자의 표면에서 흐르는 표면누설전류를 전압강하법(Voltage Drop Methods)을 이용하여 누설된 전류를 측정하였다[6~10,13,14,17~21, 22, 23]. 즉, 누설전류는 일정한 고전압이 인가되어 애자의 표면을 통하여 접지로 흐르는 전류가 전기저항 100Ω에 전압강하된 전류파형이, 차동프루브(ADP305, Lecroy, 100:1)를 걸쳐 출력된 누설전류를 디지털 오실로스코프(LeCroy;Wave Runner 6050A, 500MHz, 4channel, Quad 5GS/s, Window XP환경)로 입력되어진다. 입력된 아날로그 신호파형이 디스플레이 되어 지고, 164ms 동안 10μs/pt로서 100kS/s을 갖는 누설전류파형이 계측되어졌다. 계측된 데이터는 필터링의 과정을 거쳐 Matlab7.0을 이용하여 스펙트럼을 분석하였다. 누설전류파형의 최대값과 FFT의 분석을 통하여 기본파로부터 13고조파까지 신호를 분류하였다. 인가전압 레벨에 따른 누설전류파형의 홀수 고조파 즉 기본파, 3고조파, 5고조파 그리고 7고조파와 ESDD와의 관계를 정립했으며, 이를 토대로 송전용자기애자의 오손특성을 % 왜형율로 평가 하였다.

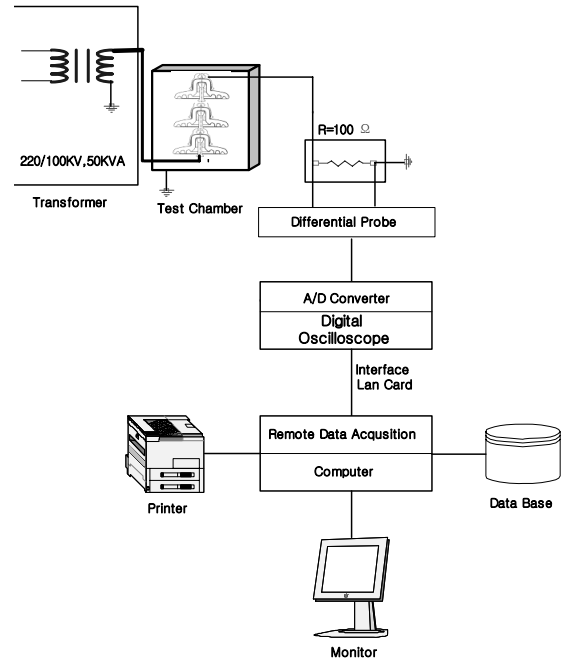


그림 2 누설전류 측정 시스템  
Fig. 2 Measurement system for leakage current

(2) ESDD의 과정

그림 3의 과정을 통하여 ESDD를 계산하여 오손도를 측정하였고, ESDD의 측정 기준표와 적용된 ESDD를 표 1에서 나타내었다.

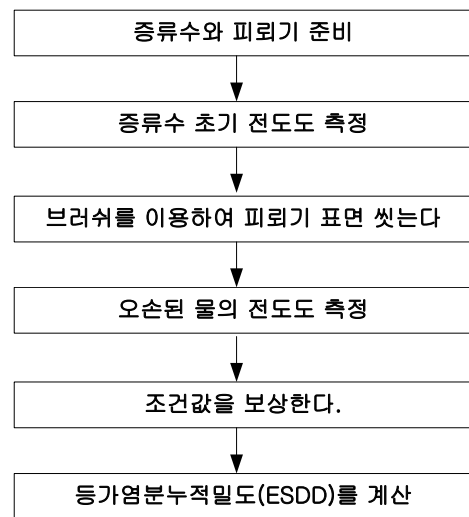


그림 3 오손도 측정과정  
Fig. 3 Measurement Procedure for contamination Level

(3) 오손도 측정방법

정밀한 오손도 측정을 위해서는 화학성분 분석 및 화학등가법을 사용 한다. 가장 일반적으로 많이 사용되는 기법은 전통적인 필세법(brush wiping method)으로서 전해질에 따른 25°C 수용액의 등가 전도도를 이용하였다[14,15,16,24]. 좀더 정확한 전도도를 측정하기위하여 증류수를 이용하였으

며, 전도도 측정장치인 Thermo Orion(Model:105 ,Made in USA) 을 사용하여 측정하였다. 식(1)은 전도도 값을 이용하여 등가염분분착밀도를 계산하는 식을 나타 내었다.

$$ESDD = \frac{0.09 \times A \times V}{200 \times A} [mg/cm^2] \quad (1)$$

여기서, A는 세정용액의 체적전도도  $\mu S/cm$ , V는 세정용 용액의 체적 500cc, A는 세정대상의 송전용 자기애자의 표면적(상부 : 550  $cm^2$ , 하부 : 850  $cm^2$ , 상부+하부 : 1400  $cm^2$ )으로 본 연구의 ESDD 적용은 전체 표면적 1400  $cm^2$ 으로 하였다.

표 1 ESDD 오손도 레벨

Table 1 Contamination Level of ESDD

Contamination Level		
Symbol	Equivalent Salt Deposit Density: ESDD( $mg/cm^2$ )	
	Standard Contamination	Used Contamination
Clean		27.6 $\mu S$
A	0~0.063	0.0459 $mg/cm^2$
B	0.063~0.125	0.1097 $mg/cm^2$
C	0.125~0.25	0.1382 $mg/cm^2$
D	0.25~0.5	0.275 $mg/cm^2$

## 2.2 결과 및 검토

### 1. 오손되지 않은 자기애자의 인가전압에 따른 누설전류파형, 고조파분석 그리고 %왜형율

#### (1) 누설전류 파형 및 주파수분석

송전용 자기애자 3개를 ESDD A,B,C,D레벨에 기준하여 오손을 적용 후, 태양빛으로 자연건조 후 자체 제작된 챔버에 애자를 현수하였다. 일정시간동안 초음파 가습기로 가습 후, 애자가 젖도록 하여 교류 상용 주파 고전압을 인가하였다. 챔버 내의 가습기는 아래에서 위쪽방향으로 적용하였으며, 애자의 하부 및 전체분위기가 고른분포가 되도록 하기 위하여 송풍 및 흡입장치를 통하여 온도는 30 $^{\circ}C$ , 습도는 93%로 일정하게 유지하였다. 적용된 증류수의 전도도는 27.6 $\mu S$ 이었다. 표 2에서는 ESDD 레벨로 오손된 애자에 인가전압 승압에따른 누설전류파형의 최대값 변화를 나타내었다. 계측된 자료는 매 5kV마다 30개 파일의 자료를 평균한 값으로, 나타내었다. 인가전압 및 오손도 증가에따라 비례하여 누설전류파형의 최대값이 증가하는 결과를 나타내었다.

그림 4에서는 Clean Insulator로서 오손특성의 기준으로 평가하기위하여 사용된 송전용 자기애자를 깨끗이 세척하여 안개를 적용 후 50kV전압을 인가후 측정된 누설전류파형 및 주파수 분석결과를 나타내었다. 인가 전압레벨 증가(20,30,40,50,60kV)에따라 누설전류파형의 주파수 분석 결과 기본파(60Hz) 스펙트럼( 0.1, 0.16, 0.23, 0.28, 0.34)이 비례하여 증가되었다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 누설전류파형의 주파수 분석결과를 의미한 것으로, 전체 고조파에 대해서 일정한 크기의 스펙트럼을 나타내었다. 그러나 짝수 고조파보다

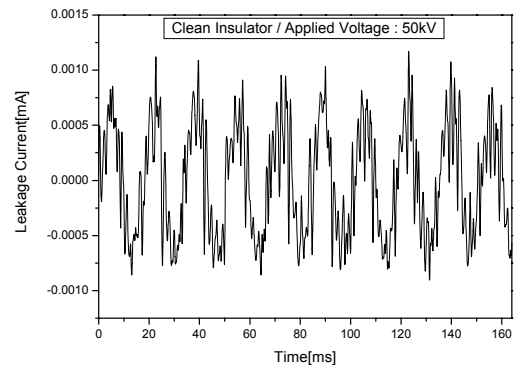
홀수 고조파가 상대적으로 스펙트럼이 크게 나타났으며, 저주파 고조파보다 고주파 고조파가 상대적으로 높게 나타났다.

표 2 인가전압 및 ESDD 레벨에따른 누설전류 파형 최대값의 변화 [단위 A]

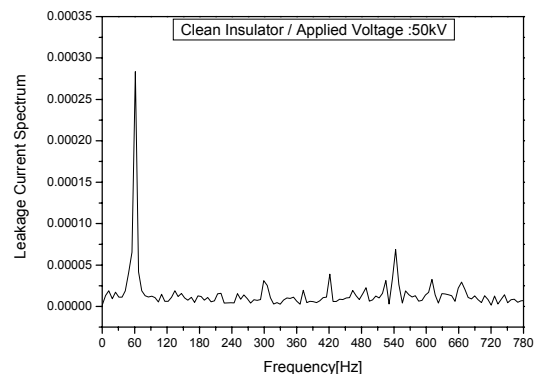
Table 2 Maximum Variation of Leakage Current Waveform according to Applied Voltage and ESDD Level

[Unit : A]

ESDD level Voltage	Clean Insulator	ESDD: A	ESDD: B	ESDD: C	ESDD: D
15kV	3.30E-05	5.10E-05	5.17E-05	7.77E-05	1.54E-04
20kV	1.30E-04	1.43E-04	1.46E-04	1.51E-04	2.63E-04
25kV	1.68E-04	2.33E-04	2.90E-04	3.47E-04	4.31E-04
30kV	2.44E-04	3.36E-04	5.42E-04	6.14E-04	8.32E-04
35kV	3.92E-04	4.69E-04	6.85E-04	7.94E-04	9.69E-04
40kV	5.35E-04	6.35E-04	8.10E-04	8.26E-04	1.12E-03
45kV	7.18E-04	8.24E-04	1.00E-03	0.001046	1.39E-03
50kV	0.001006	0.001013	0.001137	0.001349	0.001805
55kV (52kV)	0.001247	0.001372	0.001562	0.0019	0.002934
60kV	0.001761	0.001952	0.002007	0.002194	0.016132



(a) Leakage Current Waveform



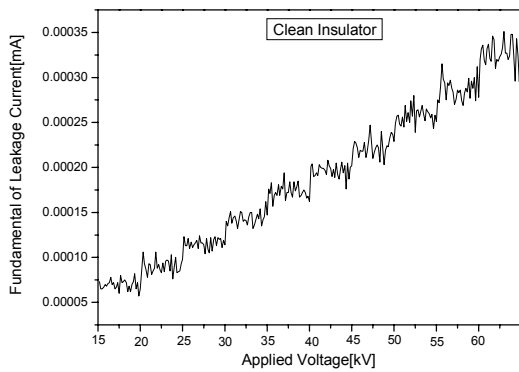
(b) Frequency Analysis

그림 4 누설전류파형의 최대값 및 주파수 분석 (clean insulator)

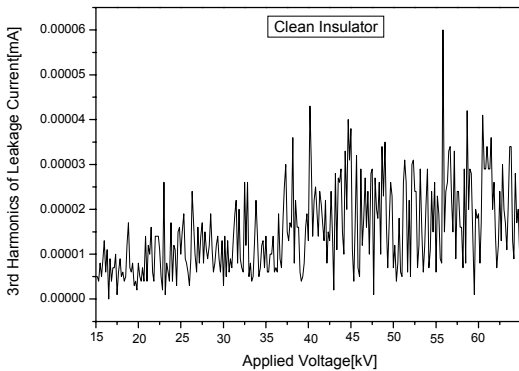
Fig. 4 Maximum Value and Frequency Analysis for Leakage Current Waveform (clean insulator)

**(2) 고조파 분석**

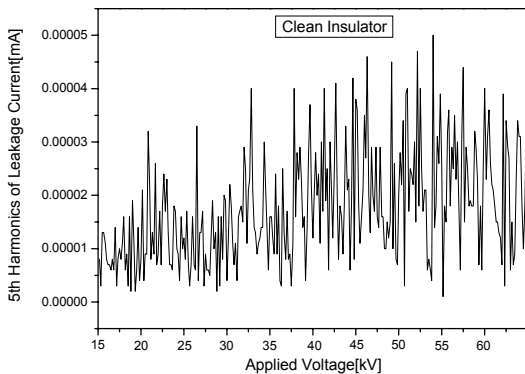
그림 5에서는 인가전압 레벨 증가에 따라 누설전류 파형의 기본파, 3고조파, 5고조파의 스펙트럼 변화를 나타내었다. 그림 5(a)는 기본파 스펙트럼 진폭변화로서 인가전압에 따라 정비례하여 증가하는 결과를 가져왔으며, 증가율은 3.9μA/kV을 나타낸 것이다. 그림 5(b)는 3고조파에 대한 스펙트럼의 변화를 그리고 그림 5(c)에서는 5고조파에 대한 스펙트럼 변화를 나타내었다. clean insulator에서는 인가전압 증가에 따라 3고조파 성분과 5고조파성분이 유사한 경향을 갖고 있으며, 인가전압이 증가할수록 고조파스펙트럼이 증가되는 경향을 나타내었다.



(a) Fundamental



(b) 3rd Harmonics



(c) 5th Harmonics

**그림 5** 누설전류파형의 고조파 분석  
**Fig. 5** Harmonics Analysis of Leakage Current Waveform

**(3) 왜형율**

저주파 고조파(기본파, 3rd, 5th)를 이용한 열화정도를 판정하기 위한 도구로서 고조파의 왜형율을 적용하였다. 사용된 왜형율은 식(2)에서 나타내었다[17,18,19].

$$3rd\ Harmonics\ \%Distortion\ Factor = \frac{3rd\ Harmonics\ (mA)}{Fundamental\ (mA)} \times 100[\%]$$

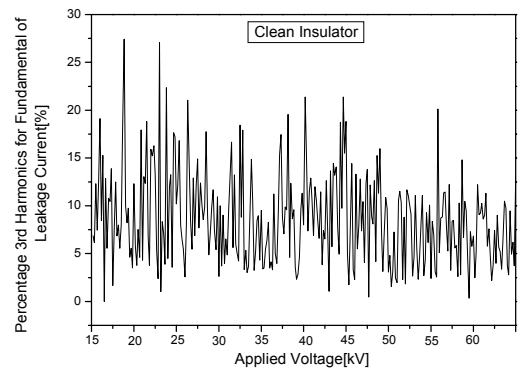
$$5th\ Harmonics\ \%Distortion\ Factor = \frac{5th\ Harmonics\ (mA)}{Fundamental\ (mA)} \times 100[\%]$$

(2)

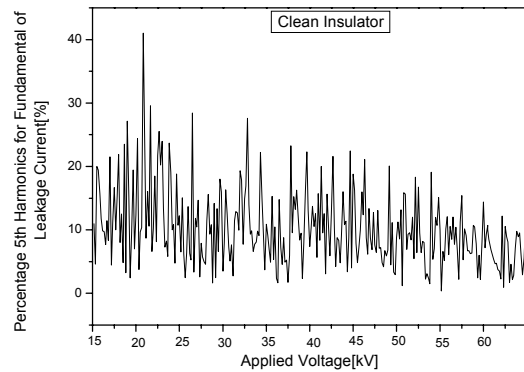
그림 6(a)는 기본파에 대한 3고조파의 % 왜형율, 그림 6(b)는 기본파에 대한 5고조파의 % 왜형율을 나타낸 결과이다. 그림 6(a)에서는 인가전압 레벨이 낮을수록 % 왜형율이 큰 결과를 나타내었고, 역으로 인가전압 레벨이 높을수록 % 왜형율이 작은 결과를 나타내었다. 15kV~50kV까지는 왜형율이 약 5~20%범위, 50kV~60kV까지는 2.5%~12.5% 범위의 왜형율을 보이고 있다.

그림 6(b)의 경우는 기본파에 대한 5고조파의 %왜형율로서, 3고조파의 %왜형율에 비하여 5고조파의 %왜형율 경향이 좀더 뚜렷하게 나타내고 있다. 인가전압 레벨이 15kV~50kV까지 % 왜형율 크기는 약2~25%로서 증가되었고, 50~60kV까지 % 왜형율은 약2.5~15%로 감소되어졌다.

3고조파와 5고조파의 %왜형율의 경향은 거의 유사한 경



(a) % distortion factor for 3rd harmonics



(b) % distortion factor for 5th harmonics

**그림 6** % 왜형율의 변화  
**Fig. 6** Variation of % Distortion factor

향을 나타내고 있지만 clean insulator에서는 3고조파의 성분보다 5고조파 성분의 크기가 더욱 크게 나타내었다. 왜형율은 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파에 대한 비율로서 누설전류파형의 찌그러진 정도를 나타내는 정량화된 값이다.

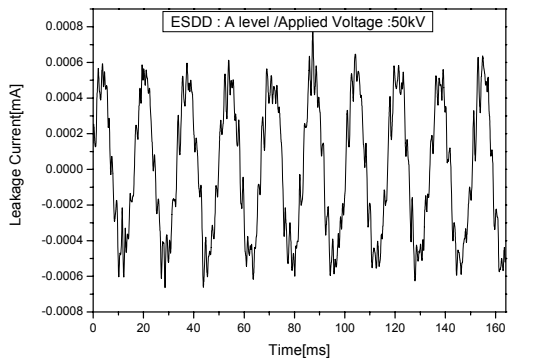
전압인가초기(저전압)에 상대적으로 송전용자기에자의 절연저항이 인가전압레벨에 비하여 크게 나타낸 결과를 의미한 것이며, 인가전압이 더욱 고전압부분으로 갈수록 왜형율이 작게 나타난 이유는 누설전류크기의 증가 폭이 커지고 파형이 기본파에 가까운 형상을 가지기 때문에 작은 값을 나타낸 것이다.

**2. ESDD: A level로 오손된 애자의 누설전류 파형, 고조파 분석 그리고 왜형율**

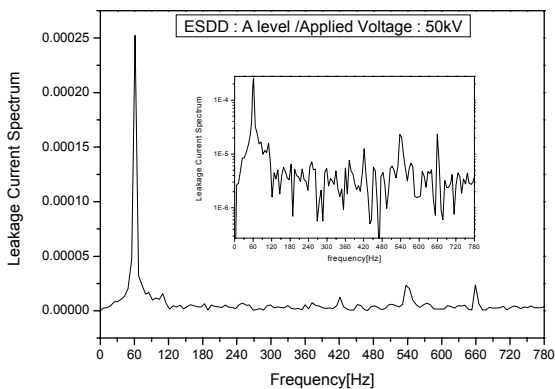
**(1) 누설전류 파형 및 주파수분석**

ESDD A 레벨 오손특성의 기준으로서 0.0459 mg/cm<sup>2</sup>의 오손도를 갖는 송전용 자기애자 3개를 현수하여 챔버 내의 환경조건을 증류수로 가습한 후, 전압을 인가 후 누설전류파형을 계측한 것이다. 그림에서는 나타내지 않았지만, 인가전압레벨 증가(20, 30, 40, 50, 60kV)에 따라 누설전류파형의 최대값의 변화로서 0.09, 0.133, 0.189, 0.259, 0.735μA로 비례하여 증가하는 결과를 얻었다.

그림 7(a), (b)의 경우는 인가전압 50kV를 인가 할 때 누



(a) Leakage Current Waveform



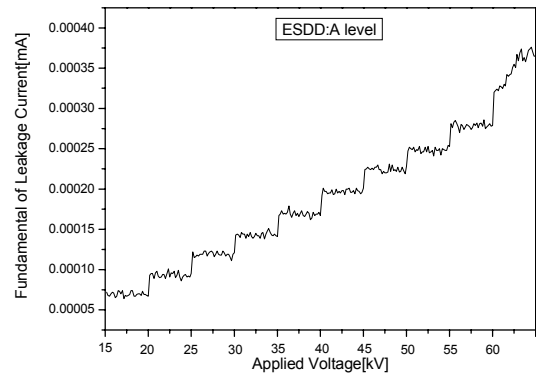
(b) Frequency Analysis

**그림 7** ESDD A레벨에 대한 최대값 및 주파수 분석  
**Fig. 7** Maximum and Frequency Analysis for ESDD A Level

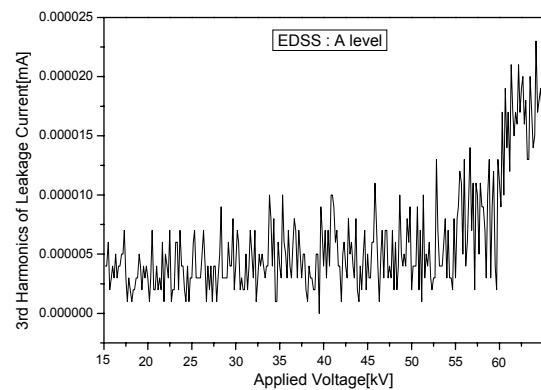
설전류 파형 및 주파수 분석된 결과를 나타내었다. 누설전류파형의 주파수 분석된 결과는 기본파(60Hz)의 스펙트럼 경우 0.093, 0.14, 0.20, 0.25, 0.37μA로서 일정한 증가를 나타내었고, 저주파의 고조파인 3,5,7고조파에서는 거의 같은 크기를 갖고 있지만, 오히려 고주파의 고조파인 9, 11고조파에서 오히려 증가되는 경향을 보이고 있다.

**(2) 고조파 분석**

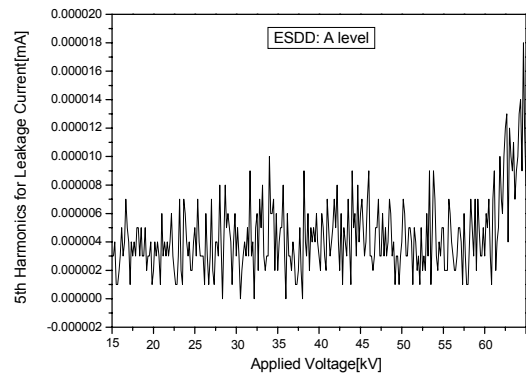
그림 8는 ESDD A 레벨 오손 시 누설전류파형의 고조파 분석결과를 나타내고 있다. 그림 8(a)는 인가전압 승압에 따



(a) Fundamental



(b) 3rd Harmonics



(b) 5th Harmonics

**그림 8** 고조파 분석 (ESDD : A level)  
**Fig. 8** Harmonics Analysis(ESDD :A level)

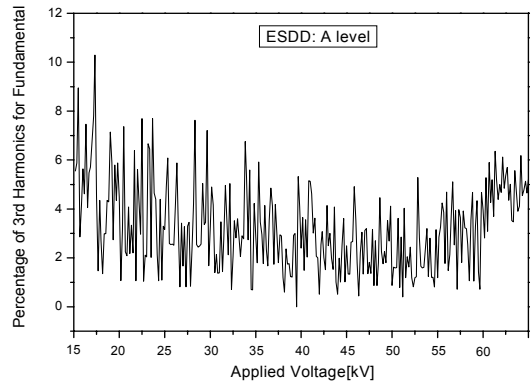
른 기본파의 변화, 그림 8(b)는 3고조파의 변화, 그림 8(c)는 5고조파의 변화를 나타내고 있다. 그림 8(a)의 경우 인가전압 증가에 따라 기본파의 변화는 정비례하여 증가하는 결과를 나타내었고, 그림 8(b)의 경우 3고조파 변화로서 15kV~55kV까지는 전반적으로 점진적 증가를 나타낸 반면 60kV인가 후 5분 동안 급격한 증가를 보이고 말기에 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 그림 8(c)의 경우 5고조파 변화로서 같은 인가전압 범위인 15~55kV까지는 증가와 감소를 반복하는 변화를 나타낸 반면 60kV인가 후 5분 동안 가파르게 상승하는 변화를 보이고 있다.

ESDD A레벨에서의 경우 인가전압에 대한 기본파, 3고조파 그리고 5고조파의 고조파 분석결과로서 그림 7(a)와 그림 4(a)의 누설전류 파형을 비교한 결과 오손된 애자의 경우가 clean insulator에 비하여 전반적으로 매끈한 주기적 파형을 나타내었다. 이에 대한 주파수 분석결과에서 나타내었듯이, clean insulator 고조파의 경우 3,5,7,9고조파 순으로 스펙트럼의 크기가 증가되었고, ESDD A오손레벨 애자에서는 3,5,7고조파의 경우 미약한 반면 9,11고조파가 상대적으로 증가되는 결과를 얻었다. 이에 대한 특징으로 그림 7(a)에서 보듯이 주기적 누설전류 파형의 피크부분에서 왜곡된 파형이 이의 결과를 의미하는 것이다. 또한 60kV전압을 인가후 5분동안 측정한 결과, 3고조파 및 5고조파 모두 크게 55kV에 비하여 2배정도 증가한 결과는 도전성전류에 의한 누설전류발생에서 ESDD A레벨 오손된 애자표면의 아크성 방전이 발생된 것으로 사료된다[6,7,8]. 본 연구자들 [17,18,19,]이 고분자애자의 연구에서 아크성 전류의 고조파 분석시 기본파, 3고조파, 5고조파 순으로 스펙트럼의 크기가 감소되고 있음을 알 수 있었다. 이는 clean insulator에서 나타나지 않았던 아크성 방전의 진전은 소금이온의 전도성과 과도한 전류의 발생으로 누설전류밀도가 높게 되어 국부적인 표면가열로인하여 수분증발 즉, 건조대가 형성되어진 결과이다. 전도성과 저항성 그리고 전도성이 연결상태에서 저항성을 뛰어넘은 방전의 결과에 기인 한 것이다. 여러 연구자의 경우 애자핀 근처의 표면상 건조대에서 발생하고 있음을 보고하였다[6,7,8].

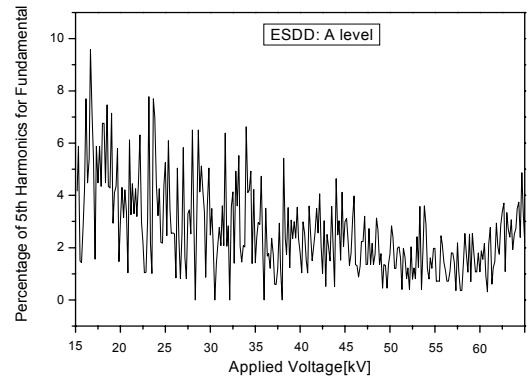
**(3) 왜형율**

그림 9의 경우는 ESDD A level의 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파 % 왜형율을 나타내고 있다. 그림 9(a)의 경우는 기본파에 대한 3고조파의 % 왜형율로 15~55kV까지는 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었고, 인가전압 60kV이후 5분 동안 측정된 결과 증가와 약간의 감소되는 정량화된 결과를 얻었다. 이는 clean insulator와 ESDD A레벨과 왜형율을 비교분석하여 볼때, clean insulator의 경우 15~60kV까지 정량화된 왜형율의 변화는 2.5~20를 나타낸 반면, ESDD A레벨의 경우 15~55kV까지 1~9를 나타내었다. 그러나 60kV에서 5분동안 왜형율의 변화는 3.8~5.3의 결과를 얻었다. 그리고 그림 9(b)의 경우는 기본파에 대한 5고조파의 % 왜형율로 15~55kV까지는 3고조파와 유사하게 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 전반적으로 3고조파스펙트럼의 진폭크기가 5고조파의 경우보다 큰 결과를 나타내었다. 이는 여러 연구자의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있었다 [6,7,16,17,18]. 전도성에 기인한 누설전류파형은 인가전압이

낮은 경우 주로 발생하게 된다. 이 경우는 왜형율이 크게 나타나고 반면 아크성 방전에 의한 왜형율의 경우 왜형율이 낮게 나타난다. 또한 아크성의 경우 왜형율은 5고조파에 비하여 3고조파가 낮게 나타나는 결과를 알 수 있었다.



(a) % distortion factor for 3rd harmonics



(b) % distortion factor for 5th harmonics

**그림 9** % 왜형율의 변화 (ESDD :A level)  
**Fig. 9** Variation of % Distortion factor(ESDD :A level)

**3. ESDD: D level로 오손된 애자의 누설전류 파형, 고조파 분석 그리고 왜형율**

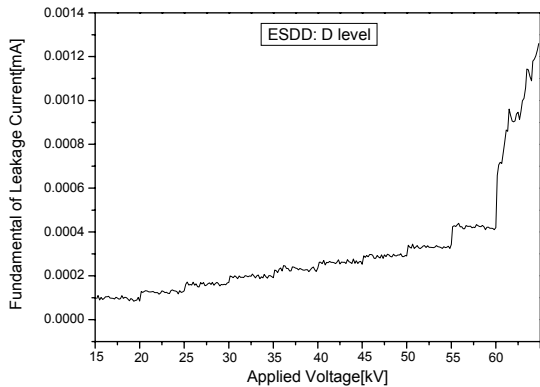
**(1) 누설전류 파형 및 주파수분석**

ESDD D 오손레벨의 경우 송전용 자기애자 3개를 평균한 값으로 0.275 mg/cm<sup>2</sup>의 오손도를 갖는 자기애자를 실험으로 사용하였다. 그림 11에서는 ESDD D level로 오손된 자기 애자에 인가전압을 승압하여 누설전류 파형 및 주파수 분석된 결과를 나타내었다. 인가전압 레벨증가(20, 30, 40, 50, 60kV)에 따른 누설전류파형의 최대값(0.168 ,0.237 ,0.262 ,1.129 ,12.859 μA)으로 선형적으로 증가되었다. 누설전류파형의 주파수 분석결과 기본파(60Hz)의 스펙트럼진폭의 경우 인가전압에 따라 0.13, 0.19, 0.26, 0.34, 1.3μA로서 일정한 증가를 나타내었다. 이는 ESDD A오손레벨에 비하여 인가전압 20~50kV까지 약 1.35배(135%)의 증가를 나타내었으며, 60kV에서는 3.5배(350%)의 큰 증가를 기록하였다. 이는 ESDD의 오손농도가 증가됨에 따라 자기애자의 표면방전 즉, 아크성의 방전이 격렬하게 발생됨을 의미한 것이다.

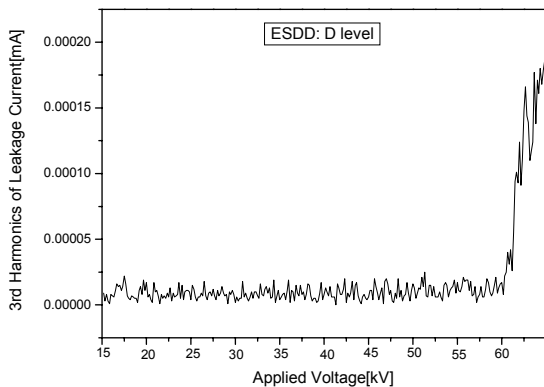
**(2) 고조파 분석**

그림 10에서는 인가전압에 따른 ESDD D level의 누설전류 파형에 대한 고조파분석결과를 나타내고 있다. 그림 10(a)는 기본파에 대한 스펙트럼 진폭변화, 그림 10(b) 3고조파에 대한 스펙트럼 변화 그리고 그림 10(c)는 5고조파에 대한 스펙트럼변화를 나타내고 있다.

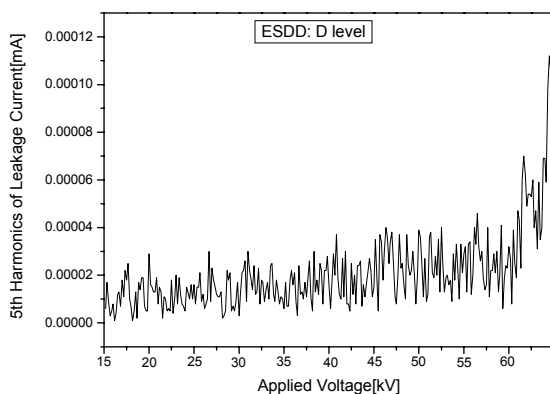
기본파의 경우 15~55kV까지 단계별 승압에따라 일정한 증가를 나타내고 있으며, 60kV에서 5분동안 측정결과 급격한 증가 즉, 스펙트럼의 진폭이 0.445 $\mu$ A에서 1.2 $\mu$ A로 약 3



(a) Fundamental



(b) 3rd Harmonics



(c) 5th Harmonics

**그림 10** 누설전류파형의 고조파 분석 (ESDD: D level)

**Fig. 10** Harmonics Analysis for Leakage Current waveform (ESDD : D level)

배의 스펙트럼 진폭증가를 나타내었다.

그림 10(b)는 3고조파에 대한 스펙트럼 진폭변화로서, 15~55kV까지 3고조파성분의 변화는 0.00946 $\mu$ A 정도로 일정한 크기를 유지하였다. 그러나 이전의 기본파의 경우처럼 60kV 인가 후 5분 동안 스펙트럼 진폭크기가 0.17 $\mu$ A 크기로 급증한 결과를 나타내었다. 55kV에서 60kV증가시 증가되는 비율이 18배 증가된 결과를 얻었다. 또한 그림 10(c)는 5고조파 변화양상을 나타내고 있으며, 55kV까지는 인가전압 승압에 따라 점진적인 증가를 가져오지만 60kV 인가후 5분 동안 3고조파 성분 변화와 같이 증가폭이 큰 폭으로 증가되었다.

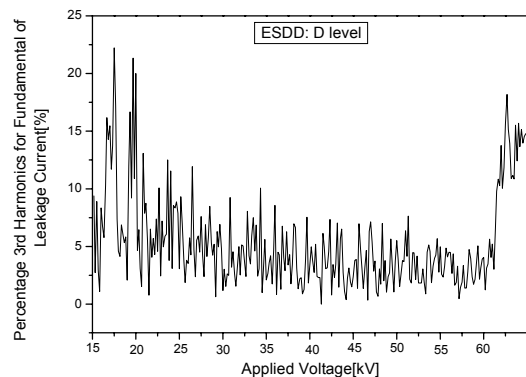
첫째, 오손레벨이 A에서 D로 증가됨에따라 인가전압 15~55kV까지 3고조파에대한 스펙트럼의 변화는 5배의 증가를 가져왔으며, 60kV에서 5분 동안의 분석결과 7.7배로 대단히 큰 증가를 가져왔다.

둘째, 3고조파는 5고조파에 비하여 60kV에서 5분 동안 스펙트럼 분석한 결과 3고조파가 5고조파에 비하여 1.6배 큰 스펙트럼의 크기를 나타내었다. 전형적인 아크방전에 의한 누설전류파형의 스펙트럼 분석으로 나타난 결과와 일치하고 있다.

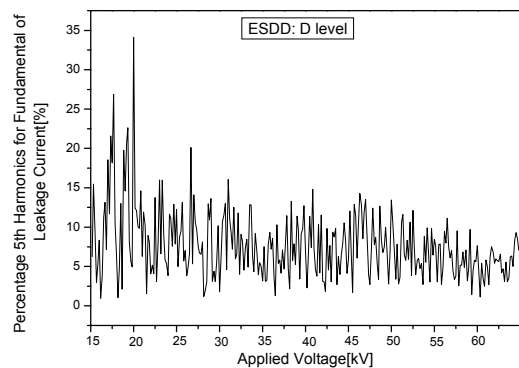
셋째, 이처럼 오손도가 심한 경우 일정 전압이상이 되면 전도성보다는 아크성 방전에 의해 3고조파의 증가를 가져오게된다 [6,7,8,18,19,22,23].

**(3) 왜형율**

그림 11는 인가전압에 따른 기본파에 대한 3고조파 및 5



(a) % distortion factor for 3rd harmonics



(b) % distortion factor for 5th harmonics

**그림 11** % 왜형율의 변화(ESDD : D level)

**Fig. 11** Variation of % Distortion factor (ESDD : D level)

고조파의 %왜형율을 나타내고 있다. 그림 11(a)는 기본파에 대한 3고조파 % 왜형율로서 15kV~55kV까지는 지수함수적으로 감쇄되는 경향을 나타내었고, 60kV에서 5분동안 측정된 %왜형율이 급격하게 증가된 결과를 가져왔다. 또한 그림 11(b)는 기본파에 대한 5고조파의 % 왜형율을 나타내고 있다. 그리고 기본파에 대한 5고조파의 %왜형율은 15kV~55kV까지의 결과에서 인가전압이 증가할수록 감소되는 결과를 가져왔으며, 60kV에서 5분동안 측정결과 %왜형율은 오히려 더욱 작아진 결과를 가져왔다. ESDD D오손레벨에서 인가전압 증가에 따라 3고조파 및 5고조파 % 왜형율의 변화결과 60kV에서 5분동안 누설전류의 파형은 전도성일 때와 아크성일 때 큰 차이를 나타내고 있다. 이처럼 오손도가 높을 때 아크성 전류파형이 크게 나타날수록 기본파의 진폭이 대단히 크고 그다음 3고조파 성분, 5고조파의 성분순서로 큰 차이를 나타내었다. 이런 애자 표면에서 발생된 전기적 활동인 아크방전 발생 시 누설전류크기가 크면, 상대적으로 왜형률이 작은 결과를 가져오게 된다. 이런 이유로 왜곡도를 적용하여 송전용애자의 오손특성의 평가기법으로 적용할 때 신뢰성평가에 합당할 것으로 보여진다 (18,19,22,23).

**(4) 아크방전시 누설전류파형과 스펙트럼 분석**

이상의 결과를 분석 검토한 결과, Obenaus[25]가 처음으로 세라믹 애자의 오손섬락을 위한 모델을 제안하였다. 저항이 직렬로 연결된 방전으로서 섬락과정을 모델화 하였다. 이 방전은 아크가 건조대라는 다리를 넘은 것을 말하고 그리고 오손저항은 애자의 다리가 없는 부분의 방전을 말한다. 저항을 가로지르는 전압강하는 전류의 함수로 표현된다. 즉, 오손층의 전계강도는 아크전계강도보다 더욱더 크다 [6,25]. 섬락은 아크가 진전되어 궁극적으로 애자라는 다리를 넘을 때 발생한 것이다. 이는 애자의 젖음 비율과 안개타입은 NCI의 표면저항에 영향을 준다 [1, 15, 16]. 또한 누설전류로부터 발생된 얇은 막의 전해질 용액이 증발되어 좁은 건조대의 갭을 형성하게 된다. 대부분의 인가전압은 좁은 건조대 갭에 할당되어져서 그리하여 건조대 아크로 드러나게 된다. Zafer[6]는 자기애자의 한점에서 시작하여 방전이 연장될 때, 건조대는 같은 시간에 누설전류가 다른 영역에까지 일어나는 아크의 원인이 될 수 있음을 보고하였다. 그래서 전체 아크 발생 시 전압강하는

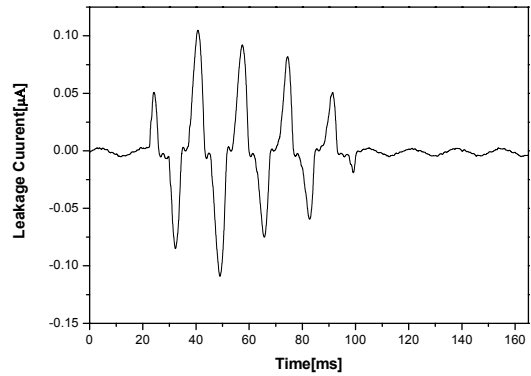
$$V_{arc} = V_{arc1} + V_{arc2} + V_{arc3} \tag{3}$$

만일 R이 아크와 직렬로 연결된 전체 오손저항이라면

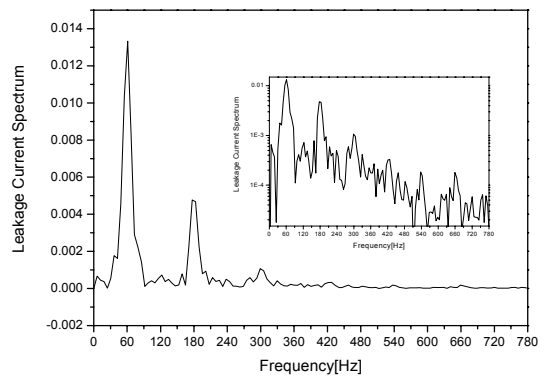
$$R = R(x_p) = R(x_{p1}) + R(x_{p2}) + \tag{4}$$

가된다. 그리고 아크가 없는 지역을 따라 오손저항의 전압강하는  $V_p = iR$  로 된다. 아크의 발생 역시 열에너지를 유발하여, 저항 R에서 발생한 열에너지는 절연표면의 오손층으로 인하여 전류흐름에 기인되고, 그것은 얇게 젖은 필름층에서 일어나게 된다. 그 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$w = \int_0^t R i^2 dt \tag{5}$$



(a) Leakage Current Waveforms ; ESDD D level



(b) Frequency Analysis : ESDD : D level

**그림 12** 누설전류 파형 및 스펙트럼 분석 (ESDD : D level)  
**Fig. 12** Leakage Current Waveform and Spectrum Analysis (ESDD : D level)

**3. 결 론**

이상의 결과를 인가전압 레벨증가에 따라 송전용 자기에 5가지 오손조건(clean insulator, ESDD A,B,C,D)을 모의하여 누설전류파형, 고조파분석 그리고 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파 %왜형율의 정량적인 오손평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, clean insulator의 경우 오손평가의 기준모델로 하기위하여 실험을 실시하였다. 낮은주파수 고조파보다 높은 주파수 고조파의 스펙트럼 진폭이 상대적으로 증가된 결과를 얻었다. 이는 애자표면의 저항성이 크기 때문에 찌그러진 파형이 발생된 결과로 판단된다. %왜형율의 결과 인가전압이 증가할수록 감소되는 정량적인 값을 얻을 수 있었다.

둘째, ESDD A,D로 오손된 애자를 연구한 결과 고조파 분석: 오손레벨 B,C의 경우는 지면 관계상 나타낼 수 없었다. 그러나 오손이 A에서 D로 가혹하게 됨으로서 저전압에서는 전도성의 누설전류파형을 그리고 고전압으로 갈수록 즉, 60kV에서 5분동안 측정시 누설전류파형의 급격한 증가를 가져왔다. 이에대한 고조파분석 결과 아크성 전류파형으로 증가를 가져왔으며, 고조파 분석결과 기본파, 3고



조파 그리고 5고조파 순으로 스펙트럼 진폭크기를 얻을 수 있었다. 여러 연구자의 결과와 일치하였다. 또한 아크성이 클수록 3고조파의 성분이 크고 반면 5고조파의 성분이 상대적으로 작은 결과를 가져왔다.

셋째, 이런 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파 %왜형율의 경우 왜형율이 큰 경우는 애자표면이 저항성이 클수록 큰 결과를 가져왔다. 그리고 오손된 결과 오손도가 클수록 %왜형율이 작은 결과를 나타내었다. 또한 기본파에 대한 고조파의 상대적인 크기에 따라 정량화된 값으로 표현되어 송전용 자기애자의 오손진단에 유용할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] N. Hylten-Cavallius, S. Annestrand, H. Witt, and V. Madzarevic, "Insulation Requirement, Corona Losses, and Corona Radio Interference for High-Voltage D-C Lines", IEEE Transaction in Power Appartus and systems, Vol. 83, No., pp. 500-5075, May 1964
- [2] F. S. Young, "Basic Principles for Switching Surge and Lighting Protection", Presented at the Symposium on A.C Transmission Systems, American-Soviet Committee on Scientic and Technical Corporation in the Field of Research, Design, and Operation of UHV Transmission, Fe bruary 1975
- [3] L. J. Williams, J. H. Kim, Y. B. Kim, N. Aral, O. Shimoda, K. C. Holte, "Contaminated Insulator Chemical Dependence of Flash Voltage and Salt Migration," IEEE Transactions, PAS-03, No. 5, Sept/Oct 1974
- [4] I. Kimoto, T. Fujimura, K. Naito, "Performance of Insulators for Direct Current Transmission Line Under Polluted Conditions", IEEE Transactions, PAS-92, No. 3, May/June 1973
- [5] Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to be Used on AC Systems, IEC 60507
- [6] Zafer Aydogmus, and Mehmet Cebeci, "A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 4; pp. 577-584, August 2004
- [7] S. Kumagai, and N. Yoshimura, "Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Ceramic and Polymeric Insulating Surfaces", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 4; pp. 681-690, August 2004
- [8] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of Flashover Voltage of Non-ceramic Insulators Under Contaminated Conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 4; pp. 862-869, August 2006
- [9] W. A. Chisholm, P. G. Buchan and T. Jary, "Accurate measurement of Low Insulator Contamination Levels", IEEE Transactions Power Delivery, Vol. 9, pp. 1552-1557, 1994
- [10] E. Nasser, "Contamination Flashover of Outdoor Insulation", ETZ-A, Vol. 93, pp. 321-325, 1972.
- [11] A. Rumeli, "Homojen Kirle Kapı Yuksek Gerilim Izolat'orlerinin Dayanım Gerilimlerinin Hesaplanması", METU Engineering Faculty, p. 53, 1979.
- [12] A. Rumeli, M. Hizal and Y. Demir, "Analytical Estimation of Flashover Performances of Polluted Insulators", MADRAS, Vol. 1.02, pp. 0106, 1981.
- [13] D. F. Kawa, M. J. Chavez, T. Orbeck and C. Lumb, "Practical PCA-DA System for measurement of Leakage Current Pulses on Polymer Insulators under Wet Contaminated Conditions", IEEE. Electr. Insul. Mag, Vol. 8, No. 2, pp. 5-13, 1992
- [14] 河村達雄 外, "がいし", 電氣學會, pp. 161-227, 昭和 58年 5月
- [15] EPRI TR -102764 Project 2472-03 Final Report, pp. 0000-0000, September 1993
- [16] Harold L. Hill, A. Stanley Capon Otto Ratz Philip, E. Renner William D. Schmidt, "Transmission Line Reference Book HVDC to  $\pm 600kV$ ", Electric Power Research Institure, pp. 101-136, 1993
- [17] Jae-Jun Park, "Classification Technique of Kaolin Contaminations Degree for Polymer Insulator using Electromagnetic Wave", Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 2, p. 162, February 2006
- [18] Jae-Jun Park, In-Hyuk Choi and Dong-il Lee "Variation in Leakage Current Characteristics of Polymer Insulator for Various Environmental Condition", Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 2, p. 169, February 2006
- [19] Jae-Jun Park and Tae-Kyu Yang, "Harmonics Analysis of Leakage Current Waveforms and Surface Discharge for EPDM Polymer Insulator", Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 17, No. 9, p. 162, September 2004
- [20] Gyung-Suk Kil, Dae-Won Park, Kwang-Seok Jung, "Monitoring Technique and Device of Surface Contamination for Line-Post Insulator", J. KIEEME, Vol. 23, No. 5, pp. 413-417, May 2010
- [21] Chung-Seok Oh, Young-jo Lee, Cheol-Hwi Ryu, Bang-Wook Lee, Gwang-Beom Choi, and Ja-Yoon Koo "Leakage cerrent characteristics of 154kV porcelain insulators with various ambient humidity", Proceeding of the KIEE Summer Annual Conference 2009, pp. 1461-1462, 2009
- [22] Chris S. Richards, Carl L. Benner, Karen L. Butler-purry, and B. Don Russell, "Electrical Behavior of Contaminated Distribution Insulators

Exposed to natural wetting", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, pp. 551, 2003

[23] Ayman H. El-Hag, Shesh a H. Jayaram, and Edward A. Cherney, "Infulence of shed parameters on the aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog "IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, pp. 6655, 2003

[24] Nam-Ho Choi,"Analysis on the Distribution Characteristics of Salt Contamination with Statistical Treatment",Department of Electrical Engineering, Graduate School Chungnam National Univeristy, A Thesis for Degree of Doctor ,February 2002. 2

[25] F. Obenaus, "Contamination flashover and creepage path length", Dtsch. Elektrochnik, Vol. 12, pp. 135-136, 1958.

---

## 저 자 소 개



### 박재준 (朴材俊)

1985년 광운대학교 전기공학과 학사,  
1987년 광운대학교 전기공학과 석사,  
1993년 광운대학교 전기공학과 박사, 현  
중부대학교 전기전자공학과 교수  
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr