

초음파 측정기법을 사용한 케이블 접속부 예방진단 연구 (A Study on the Predictive Diagnosis of the Cable Joint Using Ultrasonic Technique)

곽희로* · 이동준** · 빅동화***

(Hee-Ro Kwak, Dong-Zoon Lee, Dong-Wha Park)

요 약

본 논문에서는 케이블 접속부 내부 계면에서 발생하는 부분방전에 의한 초음파 신호를 측정, 분석함으로써 예방진단기법을 제시하고자 한다. 초음파 신호의 분석 방법으로는 wavelet transform으로 필터링 하여 얻은 주요 특성 신호만을 Fast Fourier Transform (FFT)로 분석하였다 그 결과 계면에 수분과 금속가루 존재시 그리고 인가 전압이 높아짐에 따라 서로 다른 특성을 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, the diagnosis technique was proposed by measuring and analyzing ultrasonic signals caused by partial discharge on the interface of cable joint. The measured ultrasonic signal was filtered by wavelet transform, and then the dominant signal of filtered signal was analyzed by fast fourier transform(FFT). As a result, it was confirmed that different characteristics were obtained with the moisture and the metal powder on the interface of cable joint and with voltage increment.

1. 서 론

도시지역에서의 지중화 사업으로 인하여 케이블이 송배전망에서 점유하는 비율이 증가하여 그 중요성이 날로 증대되고 있다. 특히 대도시의 도로지반에 분포되어 있는 케이블 시설에 사고가 발생하면 긴 복구시간이 필요할 뿐만 아니라 굴착 및 매설에 따른 교통장애 등 사후조치의 어려움 때문에 수용가에 미치는 시간적, 물적 손실이 막대하게 된다[1].

지중매전선로는 크게 케이블과 이를 연결하는 접속부로 구분되어지고 있으며 이중 케이블은 제조공정에서 품질관리 및 품질검사가 이루어지고 있으나

접속부의 경우 현장에서 시공되어지기 때문에 품질관리 및 품질검사가 쉽지 않을뿐더러, 시공 중에 발생될 수 있는 결함들을 검출하는 방법들도 제한되어 있어 접속재의 열화진단 검출이 필요한 실정이다.

이러한 케이블 접속재 진단기술의 필요성에 따라 일본과 유럽에서는 접속재내 부분방전을 측정하여 상태를 진단하는 기술들에 대해 많은 연구가 수행되어지고 있다. 일본의 경우 전기적 신호측정방식에 의한 부분방전 측정방식과 음향방출신호 측정방식을 이용한 부분방전 측정방식의 연구가 수행되어지고 있고, 유럽에서는 주로 전기적 신호 측정방식에 의한 진단방식이 연구되어지고 있다[2-5].

국내외 접속재 사고원인을 살펴보면 접속재 내부의 도체 접속부에서 발생하는 과열에 의한 사고와 계면에서의 트래킹 현상에 의한 절연파괴 사고 등이

* 정회원 · 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수

** 정회원 · 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

*** 정회원 : 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수

접수일자 : 2000년 9월 14일

있으며 특히 국내의 경우 절연층의 불순물 농도가 외국 전력회사의 전력케이블보다 많이 함유되어 있다. 이렇게 침투되어지는 대표적인 불순물로는 금속성 불순물과 수분이 존재한다[2].

본 논문에서는 케이블 접속재내 계면의 오염에 따라 발생하는 부분방전을 측정하였으며 또한 부분방전시 발생한 초음파 신호를 측정하여 wavelet transform으로 필터링 한 후 FFT 분석을 행하여 계면의 이상정도를 추정하고자 하였다.

2. 실험 및 분석

본 논문에서 구성한 실험장치는 케이블 접속부, 고전압을 인가하기 위한 전원부, 또한 부분방전을 검출하기 위한 검출부로 구성하였다. 그림 1은 실험 구성 및 분석의 개략도를 나타낸 것이다.

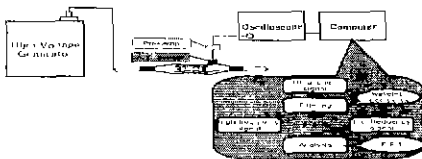


그림 1. 실험장치 및 분석 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of experiment and analysis

케이블 접속부는 도체 단면적 325[mm²]의 23[kV]급 케이블 PCJ-type 직선 접속부를 사용하였고, 접속부 내부 계면에서 발생하는 부분방전을 모의하기 위하여 케이블 도체에 전압을 인가하고 반도체층을 접지 시킴으로써 부분방전을 발생시킬 수 있도록 하였다. 고전압을 인가하기 위한 전원부의 장치는 교류 50[kV]까지 출력할 수 있는 고전압 발생장치를 이용하였다. 검출부는 부분방전에 의해 발생한 음향신호를 측정하기 위하여 주파수 대역이 20[kHz]에서 150[kHz]인 협대역 초음파 센서와 신호를 증폭시키기 위한 60[dB]의 이득을 갖는 전치 증폭기를 사용하였다. 이때 들어온 신호는 오실로스코프를 통해 파형을 분석하고 또한 PC에 저장하여 특성을 분석하였다. 이때 초음파 탐촉자는 측정감도가 좋은 계면 위에 설치하였다.

계면의 거리는 도체에서 케이블 접속부 외부 반도체층까지의 거리로 약 7[cm]로 하였으며 이때 그 사

이에 이물을 삽입하였다. 본 논문에서 사용한 이물로는 실제 접속재 내에 존재 가능한 수분과 금속가루를 이용하였다.

본 논문에서 이용한 초음파 신호의 분석 방법으로는 부분방전에 의해 발생한 초음파신호를 계측하여 파형의 형태를 분석하였고, 또한 wavelet transform을 이용하여 노이즈 대역에서 발생한 신호를 필터링(filtering) 한 후 FFT(Fast Fourier Transform)으로 분석하여 이물에 따른 분류와 인가전압에 따른 특징을 분석하였다.

본 논문에서 사용된 wavelet transform은 시간대역 및 주파수대역에 대한 새로운 해석기법으로서, 이 wavelet transform은 특히 비정현적인 신호를 해석하는데 유리하고, 또한 주파수 성분별로 필터링 하여 신호와 영상을 처리하는데 유용하게 사용되어진다 [6-7]. 그림 2는 본 논문에서 이용한 wavelet transform을 이용한 filtering의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 Details-1은 원 신호의 고주파영역이 되고 details-2는 details-1 다음의 고주파 신호가 됨을 알 수 있다 [6] 이런 filtering을 이용하여 본 논문에서는 N이 6인 경우까지 분석하였다.

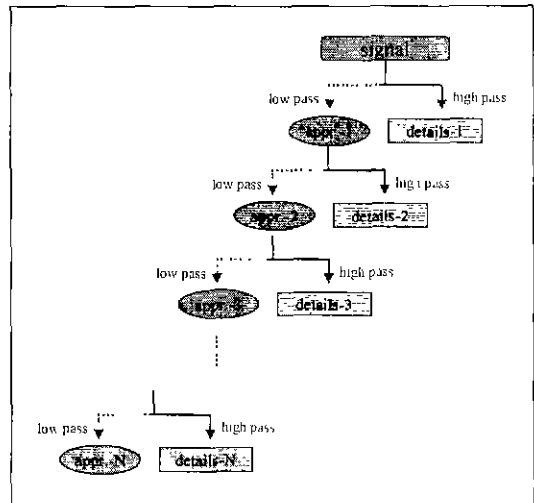


그림 2. Wavelet transform을 이용한 filtering 개략도
Fig. 2. Schematic of filtering by wavelet transform

Wavelet transform은 신호와 wavelet과의 유사성을 나타내는 계수를 구하는 것으로, wavelet은 mother

wavelet $\psi(t)$ 를 scaling과 translation 시킨 함수이다
Wavelet transform 변환식은 식 (1)과 같다.[6]

$$(W_{\psi}f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

여기서 a는 scaling 파라미터, b는 translation 파라미터, f(t)는 분석하고자 하는 신호, $\Psi(t)$ 는 mother wavelet이라 불리는 분석함수이다.

Wavelet transform에는 연속신호에 대해서 연속시간 wavelet transform, 이산 wavelet transform이 있고, 이산신호에 대해서 이산시간 wavelet transform, 이산 wavelet transform의 네 종류가 있다[8-9]. 본 논문에서는 연속신호에 대한 이산 wavelet transform을 이용하여 분석하였다.

Mother wavelet 함수는 morlet family, mexican hat family, haar family, daubechies family 등이 있으며 본 논문에서는 daubechies family를 mother wavelet으로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

외부 반도체층을 접지하고 도체에 전압을 인가시키면서 초음파와 파형을 측정하였다. 이때 11[kV]까지는 초음파 파형이 측정되지 않았으나 13[kV]가 넘어서자 부분방전에 의한 초음파 파형이 측정되었다.

그림 3은 11[kV]와 13[kV]일 때의 초음파 파형과 FFT 분석을 나타낸 것이다

그림 3에서 보듯이 인가전압이 11[kV]에서는 초음파 신호가 측정되지 않고 있으나 13[kV]에서는 초음파 신호가 측정되었다. 또한 12[kV]에서는 초음파 신호가 불규칙적으로 측정되어 본 논문에서는 수분이나 금속이물 혼입시 발생하는 부분방전에 의한 초음파 신호만을 검출하기 위하여 측정전압을 11[kV]까지만 인가하여 측정, 분석하였다. 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 본 실험실의 노이즈는 25[kHz] 대역, 40[kHz] 대역, 50[kHz] 대역 그리고 120[kHz] 대역에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 13[kV] 이상에서는 그림 3(d)에서 보듯이 50~70[kHz]대역의 신호가 두드러지게 발생하고 있음을 알 수 있다.

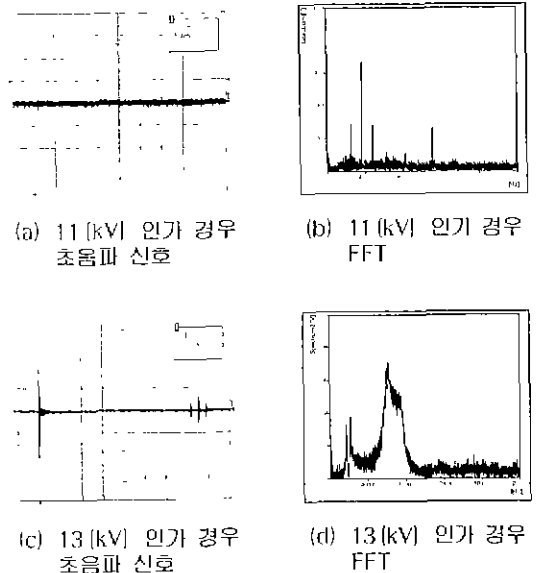


그림 3. 계면에 이물질이 없을 때의 초음파신호와 FFT

Fig. 3. Ultrasonic signal and FFT on clean interface

그림 4는 계면에 수분 및 금속가루 존재시 나타나는 초음파 신호를 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)~(e)는 계면에 수분존재시 인가전압 7[kV]~11[kV]에서 측정된 초음파 파형을 나타낸 것이고, (f)~(h)는 계면에 금속가루 존재시 인가전압 9[kV]~11[kV]에서 측정된 초음파 신호를 나타낸 것이다.

그림 4 (a)에서 보듯이 계면에 수분존재시 전압을 인가하며 초음파 신호를 측정해본 결과 약 7[kV]이하에서는 초음파 신호가 나타나고 있지 않았으며 또한 그림 4(f)에서 보듯이 금속가루 존재시에는 9[kV]이하에서는 초음파 신호가 나타나고 있지 않았다. 따라서 본 논문에서는 수분 존재시에는 인가전압 8[kV]에서부터 11[kV]까지의 초음파 신호를 측정 분석하였고 계면에 금속가루 존재시에는 인가전압 10[kV]와 11[kV]일 경우의 파형을 측정 분석하였다.

계면에 수분 존재시 나타난 파형을 살펴보면 그림 4 (b)~(d)에서 보는 것처럼 8[kV]에서 10[kV]까지의 초음파 신호의 크기는 약 100[mV]미만의 크기로 나타나다가 11[kV]에서는 약 1,100[mV]의 크기로 매우 크게 나타나고 있다. 그래서 수분 존재시 11[kV]의

초음파 신호는 다른 경우의 값보다 약 10배정도 크기 때문에 초음파 신호와 주파수 스펙트럼을 나타낼 때 Y축의 범위를 다른 경우보다 크게 나타내었다. 한편, 계면에 금속가루 존재시 나타난 초음파 파형은 약 100[mV]이하의 크기로 나타나고 있다.

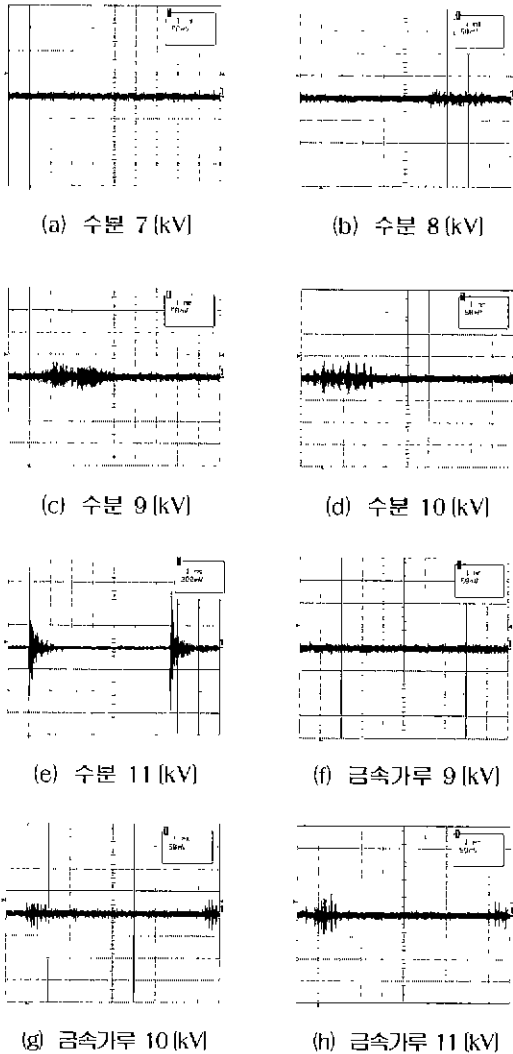


그림 4. 계면에 수분 및 금속가루 포함시 초음파 파형
 Fig. 4. Ultrasonic wave in case of the interface with moisture or metal powder

그림 5는 수분 존재시 8[kV]에서 측정된 초음파 파형(그림 4(b))을 wavelet transform으로 필터링 한

결과를 나타낸 것이다. wavelet transform으로 필터링 하는 경우 임의의 신호에 대해 주어진 mother wavelet을 기준으로 고주파 대역에서 필터링 된 신호는 Details 1이 되고 Details 1 대역 다음의 저주파 대역에서 필터링 된 신호는 Details 2가 되며 그 다음 저주파 대역에서 필터링 된 신호는 Details 3가 된다.[6] 이렇게 그 다음 단계의 저주파로 내려가면 Details number가 증가하게 되는 것이다. 본 실험결과에서는 그림 5에서 보듯이 세 번째 고주파 대역인 Details 3 대역과 다섯 번째 고주파 대역인 Detail 5 대역에서 초음파 신호가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 여섯 번째 고주파 대역인 Details 6대역도 신호는 미약하지만 초음파 신호가 나타나고 있다. 따라서 본 논문에서는 Details 3 (D3)와 Details 5 (D5) 대역의 신호를 특징주파수로 하여 FFT 분석하였고 또한 초음파 신호가 미약한 Details 4 대역도 인가전압에 따라 변화가 적은 것을 보여주기 위하여 FFT 분석하여 그 특성을 알아보았다.

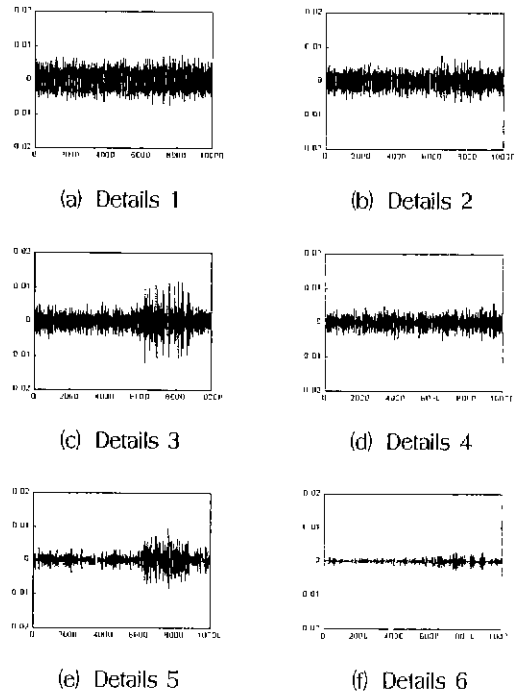


그림 5. Wavelet transform으로 필터링한 파형(수분, 8 [kV])
 Fig. 5. Waveform filtered with wavelet transform (moisture, 8 [kV])

초음파 측정기법을 사용한 케이블 접속부 예방진단 연구

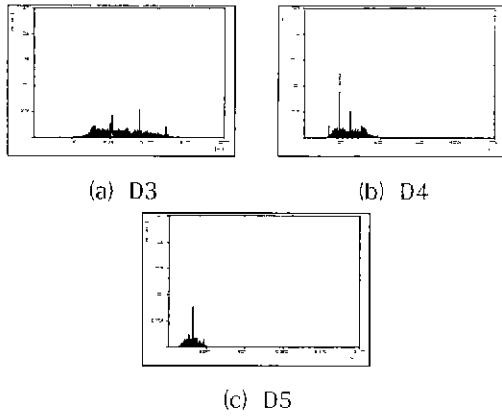


그림 6. 필터링 된 파형의 FFT (수분, 7 (kV))
Fig. 6. FFT of filtered wave (moisture, 7 (kV))

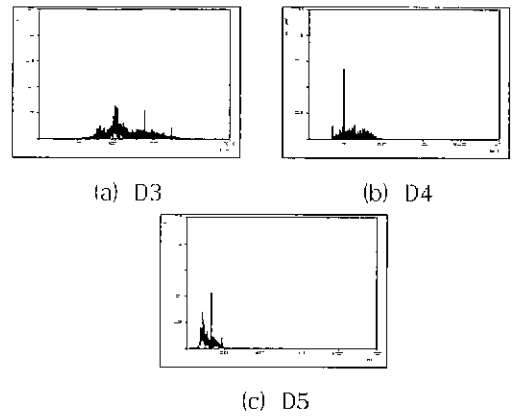


그림 7. 필터링 된 파형의 FFT (수분, 8 (kV))
Fig. 7. FFT of filtered wave (moisture, 8 (kV))

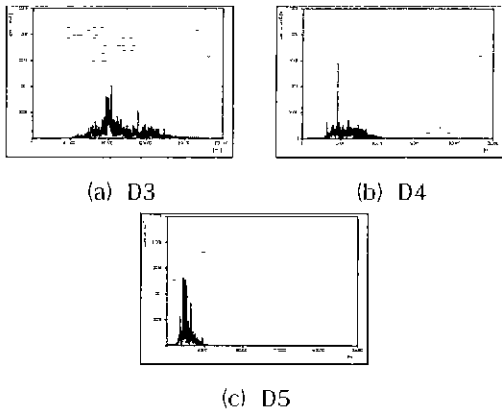


그림 8. 필터링 된 파형의 FFT (수분, 9 (kV))
Fig. 8. FFT of filtered wave (moisture, 9 (kV))

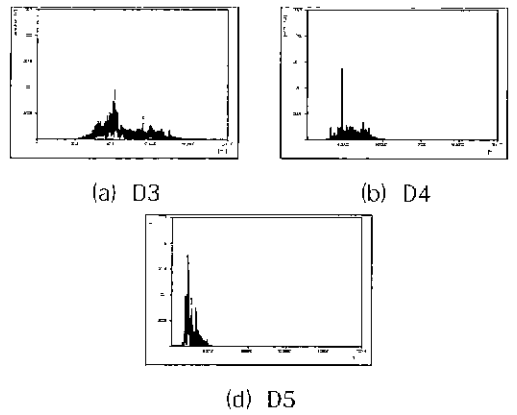


그림 9. 필터링 된 파형의 FFT (수분, 10 (kV))
Fig. 9. FFT of filtered wave (moisture, 10 (kV))

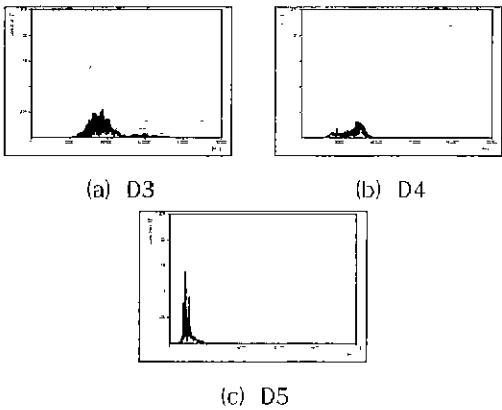


그림 10. 필터링 된 파형의 FFT (수분, 11 (kV))
Fig. 10. FFT of filtered wave (moisture, 11 (kV))

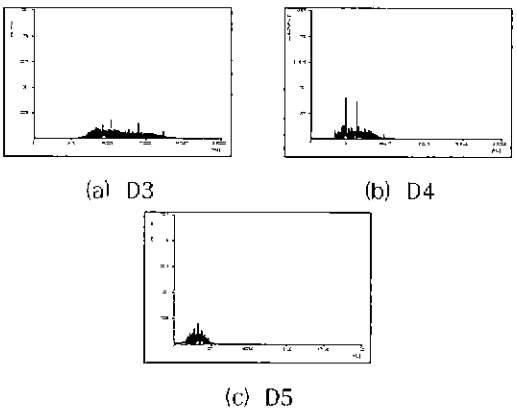
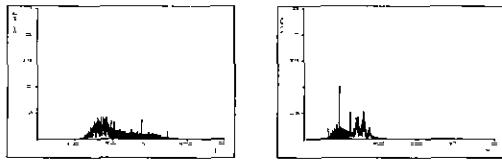
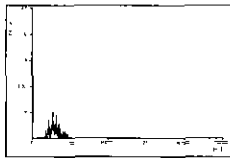


그림 11. 필터링 된 파형의 FFT (금속가루, 9 (kV))
Fig. 11. FFT of filtered wave (metal powder, 9 (kV))

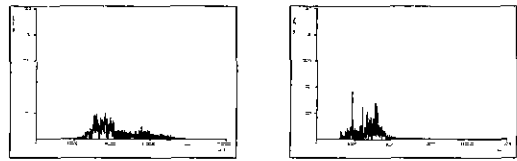


(a) D3 (b) D4

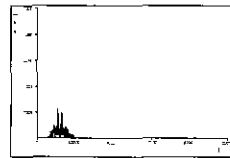


(c) D5

그림 12. 필터링 된 파형의 FFT (금속가루, 10 [kV])
Fig. 12. FFT of filtered wave (metal powder, 10 [kV])

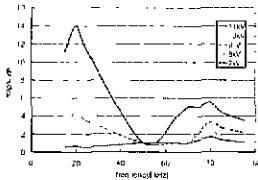


(a) D3 (b) D4

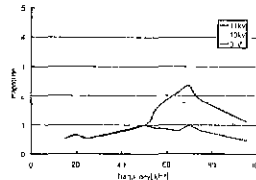


(c) D5

그림 13. 필터링 된 파형의 FFT (금속가루, 11 [kV])
Fig. 13. FFT of filtered wave (metal powder, 11 [kV])



(a) 수분



(b) 금속가루

그림 14. 인가전압에 따른 주파수 비교
Fig. 14. Frequency comparison with applied voltage

그림 6~그림 13은 그림 4에 나타난 초음파 신호에 대해 wavelet transform으로 필터링 한 후 FFT한 분석을 나타낸 것이다.

그림 6은 수분 존재시 노이즈에 의한 초음파 신호의 주파수 스펙트럼으로 D3 대역과 D5 대역에서는 큰 특징주파수가 나타나고 있지 않으나 D4 대역의 35[kHz] 대역에서 약 0.15[mV]의 특징 주파수가 나타나고 있다. 그러나 D4 대역의 35[kHz]의 신호는 그림 7~그림 10에서 보듯이 인가전압이 증가함에 따라 크게 변화하고 있지 않으며 그 값은 약 0.2[mV] 이하의 값으로 나타나고 있다. 따라서 이 대역의 신호는 노이즈에 의한 신호로 간주하였다.

계면에 수분존재시 나타난 초음파의 주파수 스펙트럼은 D3 대역에서 나타난 80[kHz] 대역과 D5 대역에서 나타난 20[kHz] 대역에서 특징 주파수가 나타나고 있다. D3 대역을 살펴보면 80[kHz] 대역은 인가전압이 증가함에 따라 증가하고 있으나 D3대역의 110[kHz] 대역의 경우 인가전압에 따라 크게 변하지 않고 있다. 또한, D5 대역의 경우 인가전압이

8[kV]에서는 약 30[kHz] 대역의 신호가 20[kHz] 대역의 신호보다 크게 나타나고 있다. 인가전압이 증가함에 따라 30[kHz] 대역의 신호는 거의 변화하지 않으나 20[kHz] 대역의 신호는 점점 커지고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 금속가루 존재시 노이즈에 의한 초음파 신호의 주파수 스펙트럼으로 D4 대역의 35[kHz]와 50[kHz] 대역에서 특징주파수가 나타나고 있으나 이 신호도 인가전압이 증가함에 따라 그림 12와 그림 13에서 보듯이 크게 증가하고 있지는 않다 한편 그림 12와 그림 13에서 보듯이 계면에 금속가루 존재시에는 D3 대역의 60[kHz]~70[kHz] 대역과 D4 대역의 70[kHz] 대역에서 특징적인 주파수가 나타나고 있다.

그림 14는 계면에 이물질 존재시 인가전압 증가에 따른 주파수 스펙트럼의 상대적 비교 나타낸 것이다. 그림 14 (a)는 계면에 수분존재시 나타난 특징주파수인 D3의 80[kHz] 대역, 그리고 D5의 20[kHz] 대역을 변화가 적은 D4의 50[kHz] 대역을 기준으로 하여

envelop 하여 나타낸 것이고 그림 14 (b)는 계면에 금속가루 존재시 나타난 특징주파수인 D4의 70[kHz] 대역을 변화가 적은 D4의 50[kHz] 대역을 기준으로 하여 envelop 하여 나타낸 것이다.

그림 14에서 보는 것처럼 수분 존재시에는 인가전압이 증가함에 따라 20[kHz] 대역과 80[kHz] 대역의 값이 점점 커지는 것을 알 수 있으며 특히 20[kHz] 대역은 상대적으로 크게 증가하였다. 또한 금속가루 존재시에는 인가전압이 증가함에 따라 70[kHz] 대역이 점점 커지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

케이블 접속부 내부 계면에 수분과 금속가루 혼입시 발생하는 부분방전에 의한 초음파 신호를 측정하여 wavelet transform으로 필터링 한 후 FFT 분석한 결과, 수분 존재시 초음파 신호의 특징 주파수 대역은 20[kHz] 와 80[kHz] 이었으며 금속가루 존재시에는 70[kHz] 이었다. 또한 수분 존재시에는 인가전압의 증가에 따라 20[kHz]대역이 50[kHz]대역에 비해 점점 커지다가 최고 14배정도 크게 나타나고 있으며, 80[kHz]대역은 50[kHz]대역에 비해 점점 커지다가 최고 6배정도 크게 나타나고 있다. 도체가루 존재시에는 인가전압의 증가에 따라 70[kHz]대역이 50[kHz]대역에 비해 점점 커지다가 최고 2배정도 크게 나타나고 있다.

이상의 결과로부터 케이블 접속재 내의 계면에서 발생하는 부분방전에 의한 초음파 신호를 측정, 분석하여 그 원인 추정의 가능성을 제시하였으므로 추후 각종 이물질에 대한 정량적 분석을 하면 이상원인과 이상정도의 추정도 가능하리라고 본다.

※ 본 연구는 한국 학술진흥재단의 학술연구 조성에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] 김상준 외, "배전케이블 수명예측 기준설정 및 열화신단 시스템 구축", 전력연구원 (1차년도 중간보고서, 1996 4
 [2] 송일근 외, "배전용 케이블 접속재의 완전진단기술 개발 및 신기술 동향", 한국조명·전기설비 협회지, Vol 14, No 4, pp 31-37, 2000 8.
 [3] 곽희로 외, "초음파 기법에 의한 케이블 접속재 내부파

티를 영학 연구", 내한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1853-1855, 1997.
 [4] K Fukunaga, M Tan and H. Takehana, "New partial discharge detection methode for live UHF/EHF cable joint" IEEE Trans on Electrical Insulation, Vol 27, No. 3, June 1992.
 [5] D Pommerenke, I Krage, W. Kalkner E Lemke and P. Schnigl, "On-site PD measurement on high voltage cable accessories using integrated sensors", 9th ISH, Austria, August 1995
 [6] C. Sidney, Ramesh A. Gopinath, and Haitao Guo, "Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms" Prentice Hall, 1998
 [7] S Qian and D Chen, "Joint Time-Frequency Analysis Methode and Application" Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 1996
 [8] 손신만 외, "Wavelet 변환을 이용한 어지돌입현상 해석" 내한전기학회 하계학술대회 논문집, pp920-922, 1997
 [9] 곽희로 외, "Wavelet transform을 이용한 GIS내 초음파 신호 분석", 내한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1918-1920, 2000.

◇ 저자 소개 ◇

곽 희 로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생 1967년 서울공대 전기공학과 졸업, 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1986년 M.I.T Visting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수 당 학회 부회장

이 동 준 (李東俊)

1971년 12월 27일생 1995년 숭실대 공대전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

박 동 화 (朴東化)

1946년 4월 28일생 1974년 숭실대 공대 전기공학과 졸업 1988년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 1980년~현재 시립인천대학교 신기 공학과 교수.