

25.8 kV GIS에서 전자기파 부분방전신호 감쇠특성 측정방법 비교

Comparison of The Attenuation Measurement Methods for Electromagnetic Partial Discharge Signal in 25.8 kV Gas Insulated Switchgear

구 선 근* · 한 기 선* · 곽 주 식* · 주 형 준* · 정 문 규*

(Sun-Geun Goo · Ki-Sun Han · Joo-Sik Kwak · Hyung-Jun Joo · Moon-Gyu Jeong)

Abstract - We report the characteristics and differences of two types of attenuation measurement methods for electromagnetic partial discharge signal in GIS. The pulse method is to measure the attenuated waveforms in time domain and converts them into frequency domain to get the attenuation spectra of given GIS section. This method simulates the real partial discharge signal. The frequency swept continuous wave method can obtain attenuation spectra directly so that it gives attenuation with low noise floor and simplicity. We show that both methods are effective and exchangeable because the attenuation results measured by two methods have similar trends

Key Words : GIS, UHF, sensor, partial discharge, attenuation, pulse, spectrum analyzer

1. 서 론

금속 탱크 내의 전기적 충전부를 절연내력이 공기보다 약 3배 높은 SF₆ 가스로 절연하는 차단기인 GIS(Gas Insulated Switchgear, 가스절연 개폐기)는 작은 크기와 높은 내환경성으로 1980년부터 국내에 도입되어 많은 변전소에서 운전되고 있다[1]. 그러나 GIS 표면은 금속으로 마감되어 있어 내부의 상태를 외부에서 확인하기 어렵기 때문에 고장예방이 쉽지 않다는 단점이 있다.

이를 보완하기 위해 GIS 내부에 전자기파를 감지할 수 있는 센서를 설치한 후, 고장의 전조로서 발생하는 극초단파 부분방전신호를 측정하는 기술이 GIS 고장예방을 위해 폭넓게 사용되고 있다[2, 3]. 전자기파 부분방전신호는 GIS 내부를 진행하면서 감쇠되기 때문에 GIS 전 선로를 진단하려면 다수의 센서를 GIS에 설치해야 한다. 따라서 본 기술을 가장 경제적으로 적용하기 위해 GIS에 극초단파 부분방전센서의 설치위치를 최적화 하여 센서 수량을 최소화할 필요하며, 이를 위해 GIS의 각 구간별 전자기파 신호의 감쇠율(Attenuation Rate)에 대한 정보가 필수적이다. 즉 감쇠율이 큰 부위에는 센서를 촘촘히 설치하고, 낮은 부위에는 센서 간격을 증가시켜야 한다[4].

감쇠율을 측정하는 방법으로 실제 부분방전신호와 유사한 펄스신호를 GIS에 주입하여 감쇠특성을 확인하는 pulse method와

부분방전신호와 유사하지 않지만 간단히 주파수가 변화하는 정현파를 GIS에 주입하는 frequency swept continuous wave method가 있다[4, 5]. 이중 frequency swept continuous wave method는 부분방전신호와 유사한 펄스신호를 사용하지 않기 때문에 이 방법에 의해 측정된 감쇠율이 pulse method에 의해 측정된 감쇠율과 동일하다는 점이 확인되어야 유효한 측정법이 될 수 하지만, 아직은 이런 절차 없이 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문을 통해 25.8 kV GIS에 두 방법을 적용하고 그 결과를 비교 분석함으로써 두 방법에 의한 감쇠율 측정치가 등가적임을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 감쇠율 측정법 개요

Pulse method는 GIS에 펄스 신호를 인가하여 감쇠율을 측정하는 방법이다[2]. 먼저 그림 1과 같이 GIS에 센서 A, B, C를 설치한다. 이때 각 센서들은 유사한 주파수 응답특성을 가져야 한다. 펄스발생기(Pulse Generator)에서 펄스를 생성한 후 센서 A를 통해 GIS로 주입하면 펄스는 GIS를 따라 감쇠하면서 진행하게 된다. 이때 센서 B 및 C에서 측정된 펄스의 파형을 오실로스코프를 통해 측정한 후 이를 푸리에 변환을 하면 측정된 펄스신호의 주파수 분포를 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 주파수분포의 차는 펄스가 센서 B에서 C사이의 GIS 구간을 진행하면서 발생하는 감쇠율이 된다.

Frequency swept continuous wave method는 시간에 따라 주파수가 변화하는 정현파를 GIS에 인가하여 감쇠율을 측정하는

† Corresponding Author : Korea Electric Power Corporation, Korea

E-mail : freeon@kepco.co.kr

* Korea Electric Power Corporation, Korea

Received : August 11, 2014; Accepted : August 27, 2015

방법이다[4]. 먼저 그림 2와 같이 sweeping type의 주파수분석기(Spectrum Analyzer)에 있는 트래킹 발생기(Tracking Generator)로부터 주파수가 변화하는 정현파를 센서 A에 인가하면 정현파는 GIS 따라 진행하면서 감쇠하게 된다. 이때 주파수분석기로부터 트래킹 발생기의 신호와 동기화 하여 센서 B와 C에서 측정된 신호의 주파수분포를 측정 후 주파수별 차이를 계산하면 센서 B와 C 사이의 GIS 구간에서 감쇠율을 구할 수 있다.

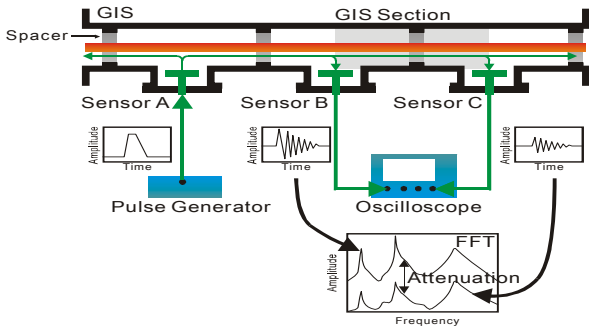


그림 1 Pulse method에 의한 감쇠율 측정법 개념도
 Fig. 1 Conceptual diagram of attenuation measurement using pulse method

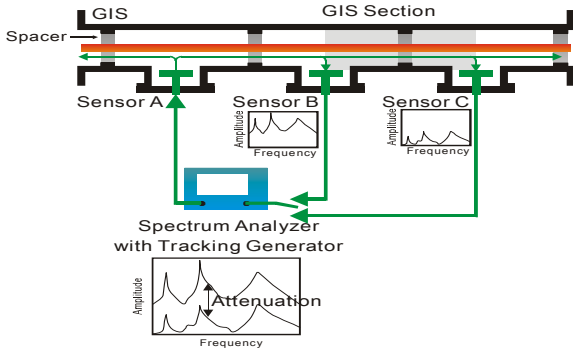


그림 2 Frequency swept continuous wave method에 의한 감쇠율 측정법 개념도
 Fig. 2 Conceptual diagram of attenuation measurement using frequency swept continuous wave method

2.2 25.8 kV GIS에서 감쇠율 측정

2.2.1 측정시험 구성

그림 3 및 4와 같은 구성의 25.8 kV GIS에서 감쇠율을 측정하였다. 부분방전센서는 4F1에서 481베이의 #1 버스 접점감에 설치하였다. 모든 센서는 알루미늄 호일로 마감하여 외부 전자기파 노이즈가 GIS에 유입되지 못하도록 차폐하였다. 4F1 베이에 설치된 센서를 이용해 펄스 또는 주파수

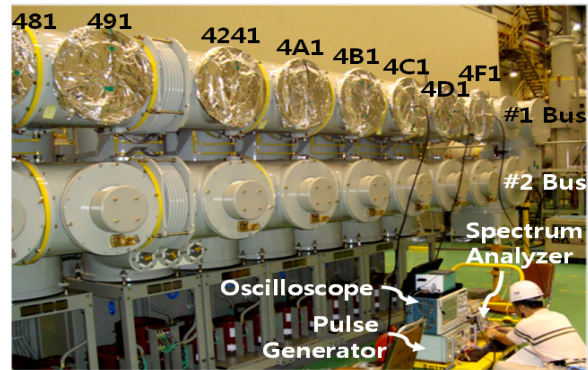


그림 3 감쇠율 측정 대상 25.8 kV GIS
 Fig. 3 25.8 kV GIS for attenuation measurement

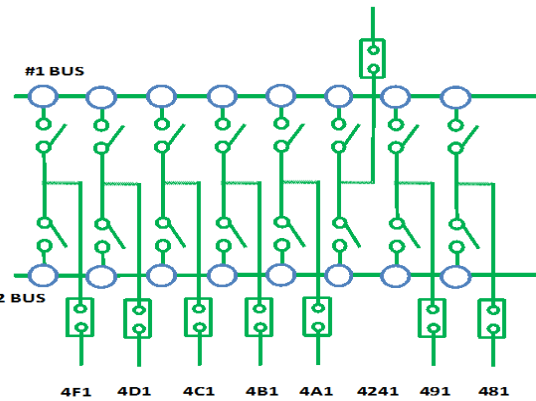


그림 4 25.8 kV GIS의 Layout
 Fig. 4 Layout of 25.8 kV GIS

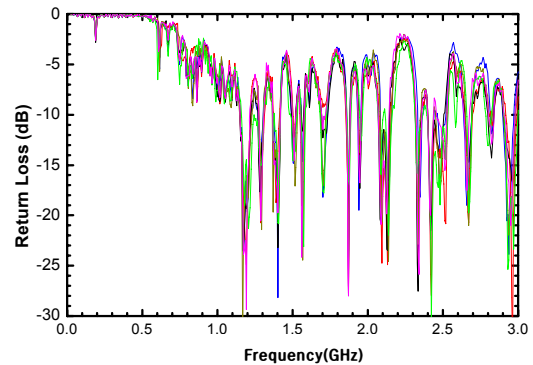


그림 5 4D1에서 481 베이에 설치한 센서의 주파수별 반사계수
 Fig. 5 Return loss of sensors attached from 4D1 to 481 bay

변동 정현파를 GIS 내부로 입사시키고, 4D1에서 481 베이에 설치한 센서로부터 감쇠되어 전파하는 신호를 측정하였다.

4D1에서 481 베이에 설치된 7개 센서의 반사계수(Return Loss)는 그림 5와 같이 서로 비슷한 주파수 분포를 보

이며, 따라서 각 센서들은 비슷한 응답특성을 가지고 있어 각 센서별 측정신호를 상호 비교할 수 있다.

Pulse Method에 의한 감쇠율 측정 실험을 위해 Noise Laboratory사의 INS-410 펄스발생기를 사용하였으며 발생된 펄스의 상승시간은 0.21 ns, 펄스폭은 47.43 ns이다. 각 센서로부터 측정된 감쇠된 전자기파 신호의 파형은 Tektronix사의 DPO7354 오실로스코프를 이용해 기록하였다.

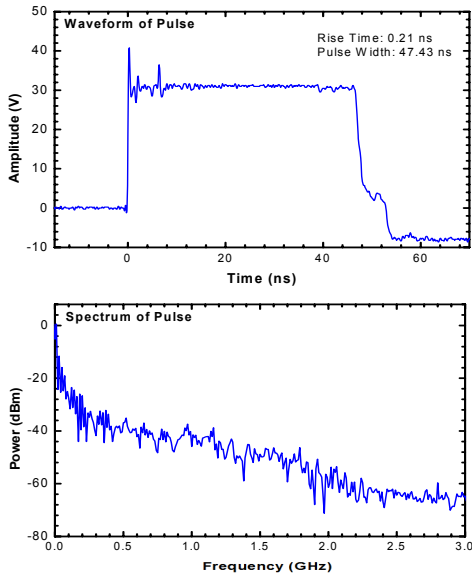


그림 6 Pulse method에서 사용한 펄스의 파형과 주파수분포(50 Ω 임피던스시)

Fig. 6 Waveform and frequency spectra of pulse used in pulse method((50 Ω impedance))

Frequency swept continuous wave method를 이용한 감쇠율 측정실험을 위해 트래킹 신호원이 있는 Rohde & Schwarz사의 FPS-7 주파수분석기를 사용하였다.

2.2.2 Pulse Method에 의한 감쇠율 측정

4F1 베이에 설치한 센서를 통해 펄스신호를 GIS 내부로 입사시킨 후, 그림 7과 같이 4D1 및 4C1 베이에 설치한 센서로부터 GIS 내부에서 감쇠하면서 전달되는 펄스신호의 파형을 측정하였다. 4F1에서 더 멀리 떨어져 있는 4C1에서 측정된 파형이 4D1에서 측정된 파형보다 감쇠로 인해 신호의 크기가 작아지고 파두부가 무더짐을 알 수 있다.

4D1 및 4C1 베이에서 측정된 펄스의 파형을 푸리에변환을 통하여 그림 8과 같이 주파수영역으로 변환하였다. 펄스를 인가하지 않은 상태에서 4D1 및 4C1 센서로부터 노이즈 파형을 측정 후 푸리에변환을 함으로써 노이즈 플로어(noise floor)를 계산하였다. 펄스신호의 주파수 분포에서도 4D1에서 측정된 값이 4C1에서 측정된 값보다 큼을 알 수 있다.

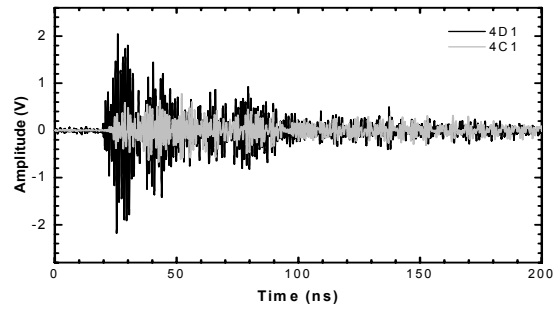


그림 7 4D1 및 4C1 베이에서 측정된 펄스의 파형
Fig. 7 Pulse waveform detected at 4D1 and 4C1 bay

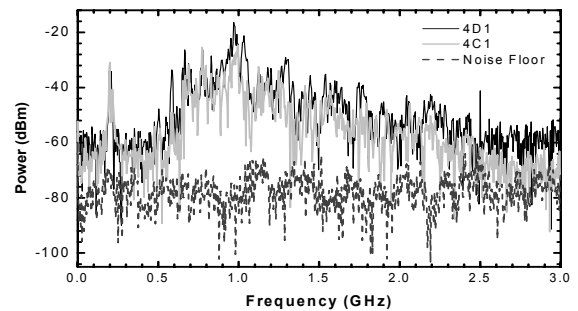


그림 8 4D1 및 4C1 베이에서 측정된 펄스의 주파수 분포
Fig. 8 Frequency spectrum of pulse detected at 4D1 and 4C1 bay

4D1에서의 펄스 주파수분포를 4C1에서의 주파수분포를 빼면 그림 9와 같이 펄스신호가 1개의 베이 사이를 진행하면서 발생하는 주파수별 감쇠율을 구할 수 있다. 주파수별 감쇠율이 매우 복잡한 양상을 보이기 때문에 주파수분포의 경향을 알기 위해 200MHz 폭의 가우스창을 이용해 smoothing 하였다.

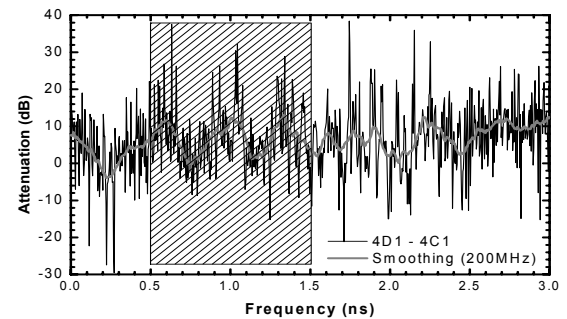


그림 9 Pulse method에 의해 산출한 4D1와 4C1 베이 사이의 감쇠율
Fig. 9 Attenuation rate between 4D1 and 4C1 bay calculated by pulse method

한국전력공사에서 사용하고 있는 전자기파 부분방전 진단

시스템의 사용 주파수대역이 0.5 GHz에서 1.50 GHz 사이이며, 이 대역에서 펄스가 4D1에서 4C1로 한 베이를 진행하면서 발생하는 평균 감쇠율은 6.8 dB로 계산되었다. 이때 일부주파수에서 노이즈플로어보다 낮은 신호가 측정된 주파수는 평균 감쇠율 계산에서 제외하였다.

2.2.3 Frequency swept continuous wave method에 의한 감쇠율 측정

Frequency swept continuous wave method를 사용한 감쇠율 측정을 위해 4F1 베이에 설치한 센서에 주파수가 변화하는 트래킹 신호를 입사시키고 주파수 분석기로부터 통해 4D1 및 4C1 베이에서 전파되는 신호의 주파수분포를 그림 10과 같이 측정하였다. 노이즈 플로어는 트래킹 신호를 off 시킨 후 주파수분포를 측정하여 얻을 수 있는데 pulse method에서의 노이즈 플로어보다 낮음을 알 수 있다. Pulse method와 마찬가지로 감쇠로 인해 4C1에서 측정된 신호가 4D1에서의 신호보다 작음을 알 수 있다.

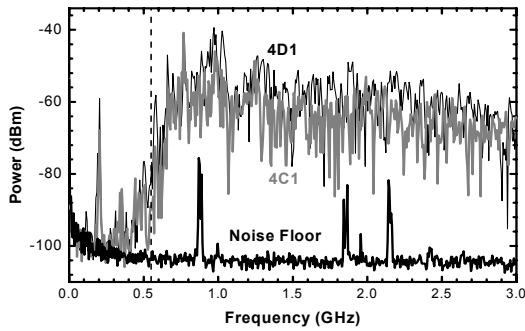


그림 10 4D1 및 4C1에서 측정된 트래킹 신호의 주파수분포
Fig. 10 Frequency spectrum of tracking signals detected at 4D1 and 4C1 bay

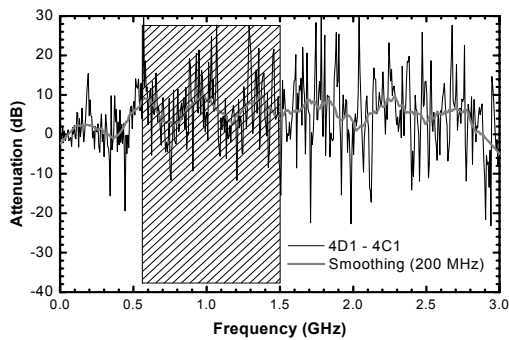


그림 11 Frequency swept continuous wave method에 의해 산출한 4D1와 4C1 베이 사이의 감쇠율
Fig. 11 Attenuation rate between 4D1 and 4C1 bay calculated by frequency swept continuous wave method

4D1에서의 주파수분포에서 4C1의 주파수분포를 빼주면 그림

11과 같이 전자기파신호가 4D1에서 4C1 베이를 진행하면서 발생하는 감쇠율을 계산할 수 있다. Pulse method와 동일하게 주파수분포의 경향을 알기 위해 200MHz 폭의 가우스창을 이용해 smoothing 하였다. 그림 10에서 0.55 GHz 이하의 주파수에서 4C1에서 측정된 신호가 노이즈 플로어보다 크지 않기 때문에 0.5 GHz가 아니라 0.55 GHz부터 1.5 GHz까지의 평균 감쇠율을 계산해보면 6.2 dB가 나오며 이는 pulse method에 의한 값 6.8dB와 유사한 수치이다.

2.2.4 감쇠율 측정방법별 측정결과 비교

두 가지 방법에 의해 측정된 4D1와 4C1 베이사이의 주파수별 smoothing한 감쇠율을 그림 12와 같이 비교하였다. 노이즈 플로어 이상의 영역에서 두가지 방법에 의해 측정된 감쇠율은 비슷한 모양을 보였으나, pulse method에 의해 측정된 감쇠율이 좀더 주파수별 진폭이 크다.

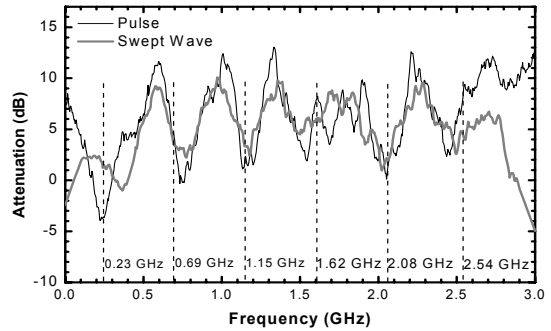


그림 12 두 가지 감쇠율 측정방법에 의해 측정된 4D1 and 4C1 베이 사이의 감쇠율 주파수분포(200 MHz Smoothing, 점선은 식 (1)에 의해 계산된 주파수)

Fig. 12 Frequency spectrum of attenuation rate between 4D1 and 4C1 measured by two methods(200 MHz Smoothing, dash lines are frequencies calculated by equation (1))

두 가지 방법으로 측정된 감쇠율은 모두 약 0.23 GHz의 홀수 배가 되는 주파수에서 낮은 값을 나타낸다. 이는 GIS의 구조에 의해서 발생하는 것으로 그림 13과 같이 GIS 내부는 베이간 60 cm 주기로 금속 스테르브에 5 cm 두께의 스페이스(Spacer)가 설치되어있는 구조이며 스페이스는 유전율이 6으로 전자기파는 SF₆ 가스에 비해 √6배 늦게 전파된다. 따라서 전자기파가 느끼는 베이간 간격은 약 65 cm이며 이 간격사이로 전자기파가 금속 스테르브 등에 의해 반사하면서 식 (1)의 주파수에서 정상파가 발생하고 이 주파수에서 에너지 전달이 쉬워 감쇠율이 낮아지는 것으로 생각된다. 따라서 만약 단일 주파수로 부분방전을 측정할 경우 식 (1)에 의해 제시된 주파수가 감쇠율이 낮으므로 이 주파수를 측정주파수로 채택하는 것이 센서의 숫자를 줄이는 경제적인 방법이다.

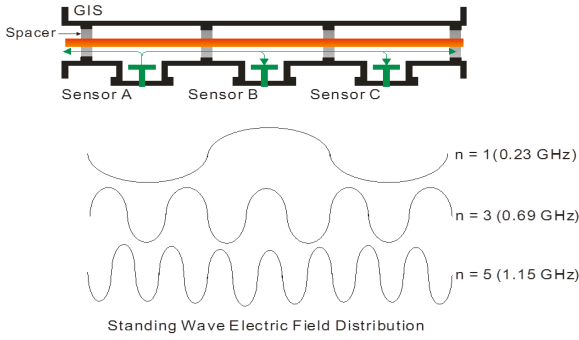


그림 13 GIS 구조에 의해 발생하는 정상파의 모습
 Fig. 13 Standing waves caused by GIS structure

$$f(\text{GHz}) = \frac{30}{d} \left(\frac{n}{2} \right) \quad (1)$$

f: Center frequency of pass band
 d: Effective length between spacers = 65 cm
 n = 1, 3, 5, 7, ...

GIS의 각 베이간 pulse method에 의한 0.5 ~ 1.5 GHz에서의 평균 감쇠율과 frequency swept continuous wave method에 의한 0.55 ~ 1.5 GHz에서의 평균 감쇠율을 구해보면 그림 14와 같다. Pulse method에 의해 측정된 값들의 편차가 좀 더 크나 두 가지 방법에 의해 구해진 감쇠율은 서로 비슷한 경향을 보이며 따라서 두 방법은 서로 교환하여 사용 가능한 방법이다.

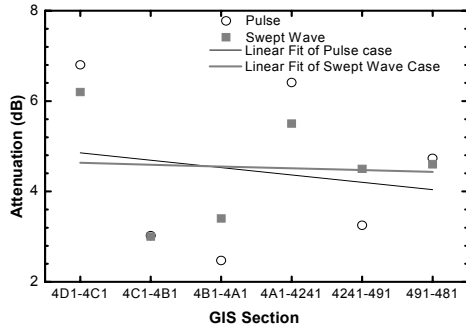


그림 14 GIS의 베이별 평균 감쇠율
 Fig. 14 Average attenuation rate of GIS bays)

그러나 각 방법에 대해 선형근사(linear fit)을 해보면 frequency swept continuous wave method에 의한 감쇠율은 거의 일정하나 pulse method에 의한 감쇠율은 펄스가 인가되는 4F1 인근에서 소폭 증가함을 알 수 있다. 그 원인을 확인하기 위해 그림 15 및 16에서와 같이 4F1에 가까운 4D1과, 멀리 떨어진 481 베이에서 측정된 펄스파형 $s(\tau)$ 를 단구간 푸리에 변환 $S(t,f)$ 를 식 (2)를 통해 계산하였다. 이때 window function h 는 6.4 ns 폭을 가진 가우스 함수를 사용하였으며, $S(t,f)$ 의 최대 크기를 0 dBm으로 정규화 하였다.

$$S(t,f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-2\pi f\tau_s(\tau)} h(\tau-t) d\tau \quad (2)$$

$s(\tau)$: Amplitude of waveform at time τ
 $h(\tau-t)$: Window function
 $S(t,f)$: Amplitude of frequency f at time t

그림 15의 4D1에서 측정된 단구간 푸리에변환 결과를 보면 파두 부분에서 0.5 GHz에서 1.5 GHz 사이의 펄스에너지가 집중되어 있고 파미로 갈수록 에너지가 급감함을 알 수 있다. 이는 4D1 센서가 펄스발생위치(4F1)에서 60cm 떨어져 있어 아주 가깝기 때문에 자유공간처럼 전자기파가 바로 센서에 도착하여 에너지가 파두에 집중된 것으로 여겨진다. 그러나 전자기파가 일단 GIS를 따라 진행하면 전자기파는 다양한 전파경로를 통해 서로 간섭을 일으키며 특정 분포를 가지고 진행하게 되는데 이를 모드(mode)라고 부른다. 다양한 모드 중 TEM 모드는 모든 주파수 대역에서 광속으로 전파하나, 그 외 모드는 모드별로 고유한 차단주파수 이상에서 광속보다 낮은 다양한 군속도를 가지고 진행하게 된다[6, 7]. 따라서 그림 16과 같이 저주파에서도 전파 가능한 TEM 모드가 먼저 도착하고 차단주파수 이상에서 느린 속도로 전파하는 모드는 늦게 도착하기 때문에 파두는 작아지고 파미의 지속시간은 늘어나게 되어 펄스 에너지 밀도가 낮아지는 분산(dispersion)이 발생한다. 따라서 주입한 펄스가 모드의 특성을 가지는 초기 전파구간에서 감쇠율이 소폭 상승하는 것으로 생각된다.

그러나 frequency swept continuous wave method는 트래킹 원으로 부터 연속파를 공급하기 때문에 파두라 부를 수 있는 영역이 없어 분산현상에 관계없는 비교적 일정한 감쇠율을 측정할 수 있는 것으로 생각된다. 여기서 실제 부분방전신호는 pulse method에서 사용한 펄스형태이므로 pulse method가 좀더 현실에 가까운 방법이라 할 수 있다.

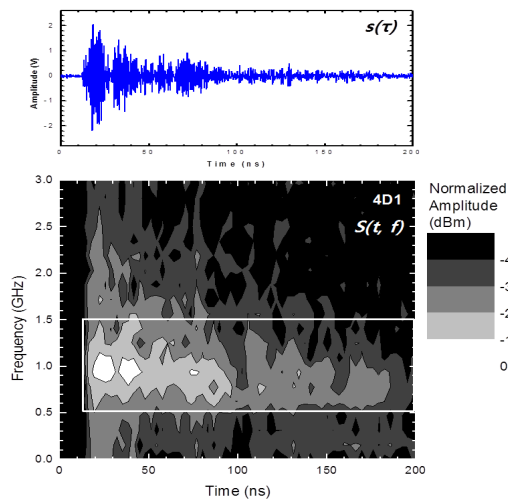


그림 15 4D1 베이에서 측정된 펄스신호의 단구간 푸리에변환결과
 Fig. 15 Result of short term Fourier transform of pulse detected at 4D1 bay

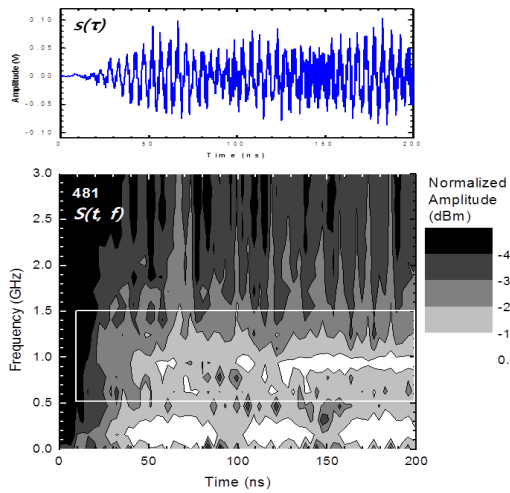


그림 16 481 베이에서 측정된 펄스신호의 단구간 푸리에 변환 결과

Fig. 16 Result of short term Fourier transform of pulse detected at 481 bay

3. 결 론

Pulse method와 frequency swept continuous wave method를 이용해 25.8 kV GIS에서 전자기와 신호의 감쇠율 측정하고 그 결과를 비교분석하였다. 두 방법에 의해 측정된 감쇠율은 서로 비슷한 값을 보였으며, 따라서 두 방법 모두 감쇠율 측정에 유효한 방법이다. Frequency swept continuous wave method는 낮은 노이즈플로어와 넓은 dynamic range를 가진 네트워크분석기나 트래킹 발생기가 포함된 주파수분석기 등 단일 장비로 감쇠율을 측정할 수 있어 측정이 편리하고 정확도가 높다. 그러나 부분방전신호는 펄스형태이므로 파두의 분산을 고려한다면 Pulse method에 의한 감쇠율이 실제 부분방전신호의 감쇠율과 유사하다 할 수 있다. 따라서 측정이 편리한 frequency swept continuous wave method로 GIS 구간별 감쇠율을 측정된 후 펄스 파두의 분산을 고려해 1~2 dB를 더하여 최종 GIS 구간별 감쇠율을 확정한 다음 이를 바탕으로 부분방전센서를 최적 배치하는 방법이 간편하면서도 안전한 접근이라 하겠다.

References

[1] "Sulphur Hexafluoride", Solvay special Chemicals, Technical Brochure, pp. 6 ~ 12, pp. 18 ~ 19, 2012
 [2] B. F. Hampton & R. J. Meat, "Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substations", IEE Proc., Vol. 135, No.2, p141, 1988.
 [3] Nicholas De Kock, Branko Corick and Ralf Piertsch, "UHF PD Detection in Gas Insulated Switchgear- Suitability and Sensitivity of the UHF Method in Comparison with the IEC270 Method", IEEE Electrical

Insulation Magazine, vol. 12, no. 6, pp.20-26, Nov./Dec., 1996.

[4] Sun-geun Goo, Kijun Park and Jin-yul Yoon, "A Novel Sensitivity Verification Method for the UHF Partial Discharge Detection System in Gas Insulated Switchgear", Trans. KIEE, vol. 50C, no. 9, pp.450-451, Sep. 2001.
 [5] Sun-geun Goo, et al., "Site Test of UHF Partial Discharge Monitoring System", in Proceedings of ICEE , Busan, Korea, 2010.
 [6] R. Kurrer, K. Feser and I. Herbst, "Calculation of Resonant Frequencies in GIS for UHF Partial Discharge Detection", Proc. of the ISH, Paper 5599, Gras, 1995.
 [7] M. C. Zhang and H. Li, "TEM and TE Mode Waves Excited by Partial Discharges in GIS", Proc. of ISH, Paper5.144, p5, London, 1999.

저 자 소 개



구 선 근 (Sun-Geun Goo)

1967년 10월 16일생. 1990년 연세대학교 물리학과 졸업. 1992년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1995년 한국전력공사 입사. 현재 한전 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-5841

E-mail : freeon@kepco.co.kr



한 기 선 (Ki-Sun Han)

1966년 06월 20일생. 1991년 한양대학교 전기학과 졸업. 2007년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국전력공사 입사. 한전 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-5880

E-mail : hankison@kepco.co.kr



곽 주 식 (Joo-Sik Kwak)

1972년 01월 10일생. 1994년 충북대학교 전기학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한국전력공사 입사, 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5881

E-mail : joosiki@kepco.co.kr



주 형 준 (Hyung-Jun Joo)

1972년 2월 20일생. 1996년 충남대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5882

E-mail : juhjun@kepco.co.kr



정 문 규 (Moon-Gyu Jeong)

1971년 11월 16일생. 1998년 동아대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 한국전력공사 입사.

현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5883

E-mail : mgjeong@kepco.co.kr