


주파수응답함수(FRF)를 이용한 자기 애자의 손상평가

최인혁¹, 손주암¹, 오태근², 윤영근² 

¹ 한국전력공사 전력연구원

² 인천대학교 안전공학과

Damage Evaluation of Porcelain Insulators Using the Frequency Response Function

In-Hyuk Choi¹, Ju-Am Son¹, Tae-Keun Oh², and Young-Geun Yoon²

¹ KEPCO Research Institute, Daejeon 34056, Korea

² Department of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

(Received December 31, 2018; Revised January 22, 2019; Accepted January 31, 2019)

Abstract: Porcelain insulators have been used mainly for power line fixing and electrical insulation in transmission towers. Porcelain insulators have generally a 30 years desired life, but over 50% exceed their life expectancy. Since the damage to porcelain insulators is usually accompanied by enormous loss of human resource material, their efficient maintenance has emerged as an important issue. In this regard, this study applied a frequency response function (FRF) for integrity assessment of the insulator. The characteristics of the FRF according to damage types were identified and analyzed by the change in natural frequencies, curve shape, attenuation, and Nyquist diagram stability. The results showed significant differences in the FRF according to damage types, which can be used as basic data for the effective integrity assessment of porcelain insulators.

Keywords: Porcelain insulator, Frequency response function, Curve shape, Attenuation, Nyquist diagram stability

1. 서론

애자는 활선상태인 송전탑의 전력선을 기계적으로 고정시키고 전기적으로 절연하기 위한 장치이며, 송전선과 전주와의 절연간격을 확보해 주는 역할을 하는 등 송전선의 신뢰성을 결정하는 중요한 역할을 담당하고 있다 [1].

현재 국내에는 약 980만 개의 송전용 애자가 설치되

어 있으며, 이 중 수입 애자는 510만 개로서 52%를 차지하고 있다. 또한, 30년 이상의 장기사용 자기 애자의 비율은 전체의 50%를 상회하며, 한국전력공사의 송전설비 고장 분석 및 대책 자료에서는 전선의 고장에 이어 애자의 고장 사례가 높은 것으로 분석되었다 [2,3].

애자는 사용 환경에 따라 많은 스트레스를 받으며 [4], 다양한 환경적 요인에 의한 현상 때문에 애자의 손상으로 인해 발생하는 정전 사고 등은 막대한 경제적 손실로 이어지는 인적 피해, 물적 피해를 동반하기 때문에 사고를 미연에 방지하며 신뢰성 높은 방법으로 안전하게 점검하여 교체하는 것이 아주 중요하다.

이와 관련하여 국내에서는 전력재난 사고를 미연에 방지하기 위해 한전 자체적으로 건전성평가 로봇, 절연

✉ Young-Geun Yoon; y_young_geun@naver.com

저항 측정기, 활선 애자 점검기 등을 개발 및 연구를 통해 확대 적용하고 있으며, 외산 제품인 절연저항 측정기 등을 사용하여 활선 애자에 대한 건전성평가를 진행하고 있다. 그러나 개발된 로봇 장비의 실용화 문제점이 있으며 [5], 절연저항 측정 및 열화상 카메라의 경우 온도와 습도에 따라 측정 결과에 많은 영향을 받고 [6], 기계적인 손상은 파악할 수 없으므로 애자의 손상을 통해 발생하는 단락과 같은 사고는 방지하기 힘들다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 측정이 간단하고 주변 환경의 영향을 적게 받으며, 기계적 손상을 파악할 수 있는 주파수 응답함수(frequency response function, FRF) 방법을 적용하여 애자의 건전성을 평가하고자 하였다.

자동차의 프레임, 변압기 진단 등 다양한 분야에서 시스템의 건전성 평가를 위해 주파수 응답함수를 활용한 지속적인 연구가 진행되고 있으며 [7,8], 이를 이용하여 on-line 상태 측정 전 기초연구로 off-line 상태의 NGK 154 kV 자기 애자에 초점을 맞추어 손상 유형에 따른 고유주파수 특성, 감쇠, 나이퀴스트 선도 등에 대한 분석을 통해 손상평가를 실시하였다.

2 실험 방법

2.1 실험 개요

본 실험에서 적용된 방법은 구조 시스템에 가진을 주어 해당 시스템으로부터의 응답 신호에 대해서 신호 처리기법 및 FRF를 활용하여 주파수 영역에서 특징을 파악하는 방법을 말한다. 해당 분석기법은 시스템의 고유 주파수를 측정하는 방법으로 다른 분석기법에 비하여 환경적 요인의 영향이 적으며 비교적 간단한 실험을 통해 강성, 질량, 감쇠 등의 시스템 동적 특성을 파악할 수 있다.

임의의 1자유도 2차 시스템에 대한 힘 평형 운동방정식에 초기조건은 모두 0으로 가정하고, 라플라스(laplace) 변환을 수행하여 주파수 영역으로 변환하면 식 (1)과 같이 표현된다 [9,10].

$$F(s) = (Ms^2 + Cs + K)X(s) \tag{1}$$

식 (1)에 대해 외부에서 가해진 충격[Input, F(s)]에 대해 물체에서 측정된 응답[Output, X(s)]의 관계에 의해 얻어진 H(s)를 충격과 응답 사이의 주파수 응답함수

또는 전달함수라고 말하며, 이는 식 (2)와 같다.

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \tag{2}$$

식 (2)에 대해 고유주파수(natural frequency: ω_n) 및 감쇠 계수(damping ratio: ζ)를 활용하여 일반적인 기계시스템에서 사용되는 주파수 응답함수로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{k/m}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \cdot \frac{1}{k} \tag{3}$$

해당 시험편은 일본의 NGK사에서 제작된 것으로 정확한 물성 확인에 어려움이 있고, 복합구조물이기 때문에 식 (1), (2), (3)에 의한 이론적인 FRF를 구하는 것에 대한 한계가 있어 기존 수식 [11]에 실험 결과를 적용하여 FRF를 산출하였다. 식 (4)는 식 (2)의 H(s), X(s), F(s) 사이의 관계에서 FRF 및 측정된 신호의 값을 사용하여 표현한 식이다. 즉, 임팩트 해머 가진에 의해 측정되는 신호의 power spectral density인 $P_{xx}(f)$ 와 가속도계에 의해 측정되는 신호 cross power spectral density인 $P_{xy}(f)$ 의 실험값을 식 (4)에 적용하여 시험편의 주파수 응답함수를 산출하여 그래프로 도식화하였다.

$$FRF = P_{xy}(f) / P_{xx}(f) \tag{4}$$

2.2 시험편

본 실험에서는 NGK사의 cristobalite 소재의 50년

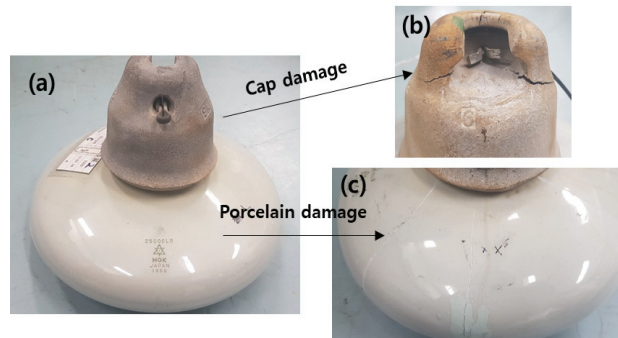


Fig. 1. Type of porcelain insulator damage: (a) normal, (b) cap damage, and (c) porcelain damage.

된 애자 7개를 이용하였다. 정상 애자 3개, 자기 손상 애자 1개, 금구손상애자 3개에 대하여 실험을 수행하였다. 정상 애자 및 대표적인 손상은 그림 1과 같다.

2.3 실험 장비

실험적으로 FRF를 산출하기 위해서는 가진 에너지와 응답 에너지에 대한 실험값의 측정이 필요하다. 이에 따라 실험장비의 구성은 그림 2에 나타내었다. 시험편에 가진 시 에너지가 측정되는 a) 임팩트 해머(PCB 086C03)를 사용하였으며, 가진에 따른 응답을 측정하기 위한 b) 가속도계(PCB 208C05)를 사용하였다. 실험장비에 의한 데이터 수집을 위해 c) signal conditioner (PCB 482C16), and d) DAQ (NI PXIe - 6366)를 사용하였다.

측정 프로그램으로는 e) NI Labview signal express를 이용하여 sampling rate 500 ks/s로 데이터를 저장하고, 저장된 데이터는 시간 영역의 값이기 때문에 MATLAB signal process 툴박스를 활용하여 주파수 영역으로 변환하고 식 (4)를 적용하여 산출된 FRF를 통해 자기 애자의 손상유형에 따른 고유모드의 주파수, FRF 파형, 감쇠를 분석하였다. 또한, MATLAB system identification 툴박스를 활용하여 나이퀴스트 선도를

도식하고 시스템의 안전성을 분석하였다.

최적의 실험조건 도출 및 데이터 신뢰성 확보를 위해 동일 조건에서 5회 결과와 평균값 확인을 하였고 다양한 위치에서의 타격하여 측정 데이터를 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 데이터 신뢰성 확인

우선 데이터 신뢰성을 확인하기 위하여 자기 부분에 가속도 센서를 설치하고 임팩트 해머를 이용하여 자기의 측면을 타격하였다. 동일위치에서 5번의 실험 결과와 평균값에 대한 주파수응답을 도식한 그래프를 그림 3에 나타내었다.

5 kHz 이하에서는 1~5번 실험 결과 및 평균값이 일치하는 결과를 보였으며, 5 kHz 이상에서는 고유모드의 주파수는 일치했고 고유모드 사이의 파형에는 미세한 차이가 발생하였는데, 이는 해머 접촉시간, 타격각도, 센서 민감도 등에 의해 발생하는 미미한 변화로 판단된다.

이후 실험에서는 관심 주파수 영역을 0~5 kHz로 설정하였고, 4개의 고유모드에 대한 분석을 진행하였다.

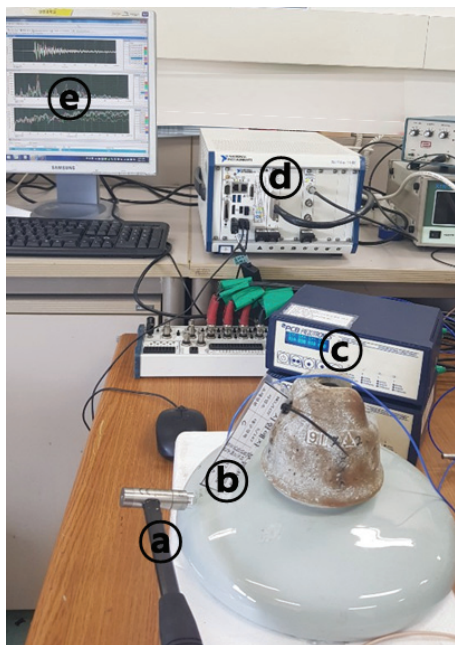


Fig. 2. Experimental set-up for frequency response function measurement of porcelain insulator.

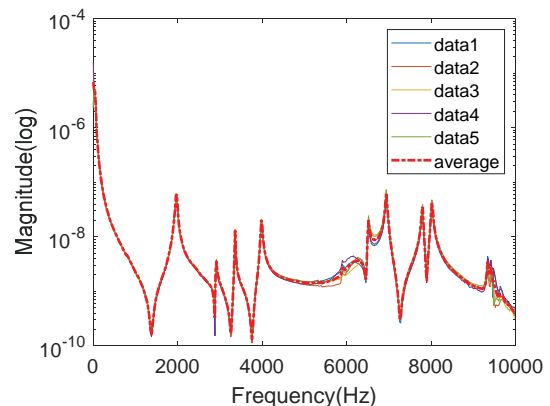


Fig. 3. FRF results by five experimental values and average value.

3.2 타격, 센서 위치 및 개수의 최적화

자기 애자(porcelain)의 동적 거동을 잘 파악할 수 있는 센서(sensor) 및 타격(impact) 위치를 선정하기 위해 해머(hammer)의 타격 위치와 센서 위치를 표 1

Table 1. Type by impact hammer and sensor position.

Type	Impact	Sensor
Type 1	Porcelain	Cap
Type 2	Porcelain	Porcelain
Type 3	Cap	Cap
Type 4	Cap	Porcelain

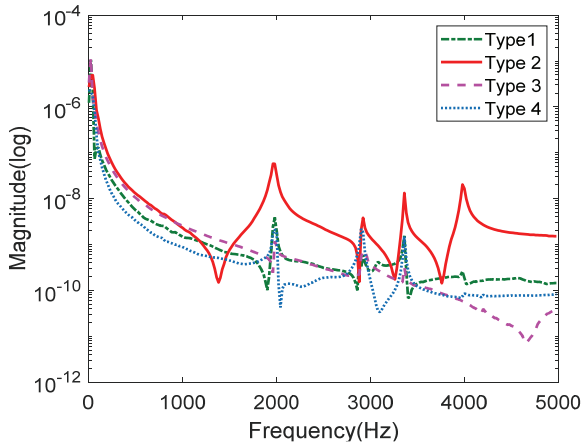


Fig. 4. FRF results according to impact and sensor position.

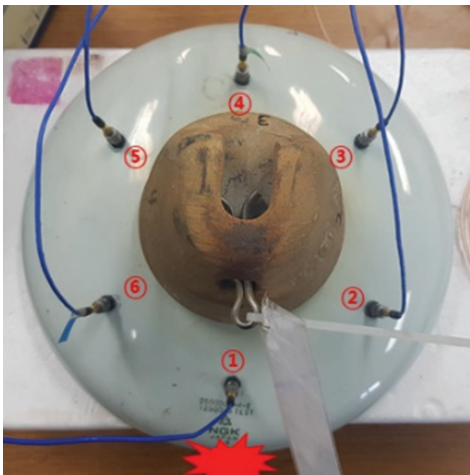


Fig. 5. Accelerometer placement at various positions for FRF measurement.

과 같이 4가지 실험조건을 설정하였으며, 이를 통한 주파수응답함수를 그림 4에 나타내었다. 분석 결과 자기 부분에 센서를 부착하고 자기를 타격하여 얻어진 주파수응답에서 4개의 고유모드가 가장 뚜렷하게 나타

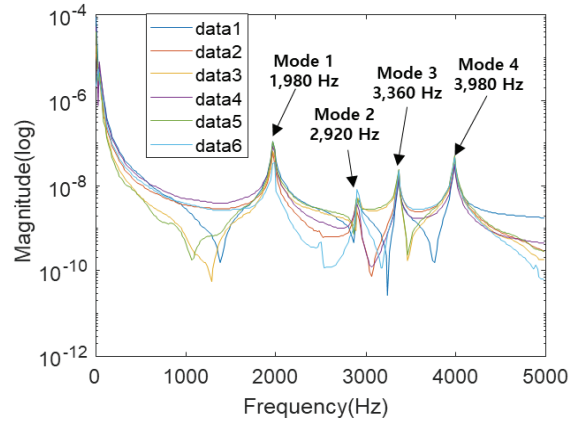


Fig. 6. FRF results according to position of sensors.

났으며, 5번 타격한 평균값들을 비교하였을 때 가장 일관적인 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.

추가적으로 고유모드 특성이 가장 뚜렷하게 나타나는 자기 부분에 초점을 맞추어 그림 5와 같이 가속도계 6개를 사용하여 정상 애자에 대한 측정을 진행하였다. 그림 6의 FRF 결과로부터 센서의 위치와 무관하게 고유모드의 peak 주파수가 1,980 Hz, 2,920 Hz, 3,360 Hz, 3,980 Hz로 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이후 실험의 간편성을 위해 1개의 가속도계를 적용하였다.

3.3 주파수응답함수 그래프 분석

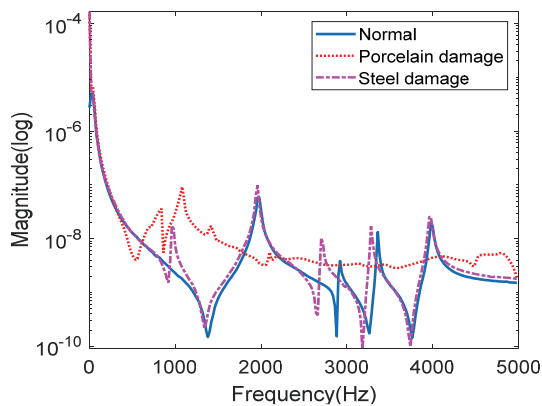
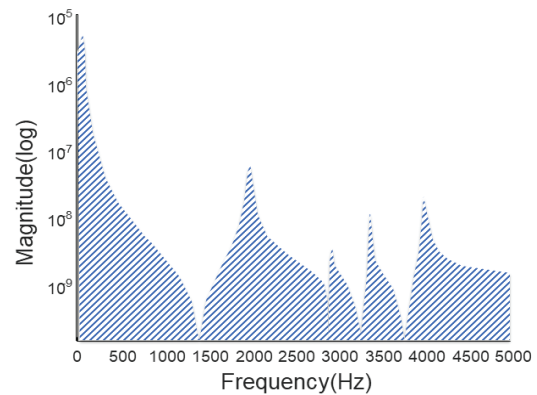
데이터 신뢰성, 타격 및 센서 위치, 센서 개수 등에 대한 기초실험 결과를 바탕으로 최종적으로 모든 시험편에 대해 가속도 센서 1개를 자기 부분에 부착하고 자기 부분을 타격하는 실험을 진행하였다. 표 2는 주파수응답함수를 통해서 7개 애자에 대한 고유모드의 주파수와 진폭을 분석하였고, 정상, 자기 손상, 금구손상에 대한 주파수응답함수를 그림 7에 도식하였다.

3개의 정상 애자의 경우 고유주파수가 20~120 Hz의 범위로 작은 오차가 발생하였다. 이는 애자 제작 시 수작업이 다수 포함되어 있고 시멘트, 자기 등 재료의 불확실성으로 인해 고유주파수가 작은 범위에서 변화할 수 있기 때문이다.

손상된 애자의 경우에는 공극, 비부착, 균열 등으로 인한 강성 변화로 인해 고유모드의 주파수가 변화할 수 있으며, 또한 감쇠의 변화로 인해 응답 에너지의 크기가 변화할 수 있다. 이에 따라 시험편의 손상 유형별로 분석을 진행하였다.

Table 2. Experimental values of natural frequency by frequency response function.

Sample	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude
Normal (1)	1,980	5.74e-8	2,920	3.83e-9	3,360	1.33e-8	3,980	2.03e-8
Normal (2)	1,960	7.48e-8	2,840	3.81e-9	3,260	2.32e-8	4,000	3.07e-8
Normal (3)	2,000	8.94e-8	2,800	1.36e-8	3,260	1.85e-8	4,080	4.54e-8
Porcelain damage	840	3.59e-8	1,080	9.16e-8	-	-	-	-
Steel damage (1)	1,980	8.48e-8	2,780	9.01e-9	3,280	1.76e-8	4,020	2.59e-8
Steel damage (2)	1,960	9.85e-8	2,700	1.03e-8	3,280	1.70e-8	3,960	2.58e-8
Steel damage (3)	1,960	7.59e-8	2,680	9.85e-9	3,240	1.82e-8	4,000	3.48e-8

**Fig. 7.** FRF results by damage type of porcelain insulator.**Fig. 8.** Damping ratio of FRF curve shape by damage type.

자기 손상 시험편의 경우 손상이 되지 않은 시험편에서의 4개의 고유모드 특성이 사라지고 5 kHz 내에서 대부분의 에너지가 소멸되었다. 캡 손상의 경우에는 1 kHz 근방에서 새로운 모드가 발생하였고, 이는 3개의 파손 시험편에서 모두 나타났다. 또한, 두 번째 및 세 번째의 고유주파수가 왼쪽으로 이동되는 특성이 확인되었다.

주로 주파수응답함수의 고유모드의 파형 및 주파수 범위 분석을 진행하였으며, 손상 유형에 따라 고유모드의 소멸, 생성, 이동 등의 특성이 변화하는 것을 확인하였다.

3.4 주파수응답함수의 감쇠

손상 유형별로 고유모드 피크점에서의 감쇠를 계산한 결과 자기 손상의 경우 고유모드 특성이 사라져 분석이 어렵다는 문제점이 있고, 캡 손상의 경우에는 정상과 거의 동일한 감쇠를 나타내는 것으로 분석되었다.

이에 따라 그림 8과 같이 손상 유형별 주파수응답곡선의 면적 계산을 통해 특성분석을 진행하였다.

정상 애자는 FRF 곡선 면적이 0.00035, 자기 손상의 경우 0.0019, 캡 손상의 경우 0.002로 정상 애자와 손상 애자 사이에 큰 차이가 발생하는 것이 확인되었다. 즉 자기 손상의 경우 대부분의 에너지가 5 kHz 미만에서 감쇠 및 소산되는 것으로 판단된다.

3.5 나이퀴스트 선도

시스템의 안정성을 판별하기 위해 MATLAB의 system identification 툴박스를 통해 실험데이터에 대한 주파수응답함수를 추정하고 이를 통해 그림 9 및 10에 나이퀴스트 선도를 도식하였다.

나이퀴스트 선도는 (-1,0)을 둘러싸는 경로의 수를 분석해서 쉽게 안정도를 판별할 수 있으며, 또한 특성방정식의 해를 구함으로써 증명할 수 있다.

그림 9와 10에서 나이퀴스트 경로가 (-1,0)을 감싸

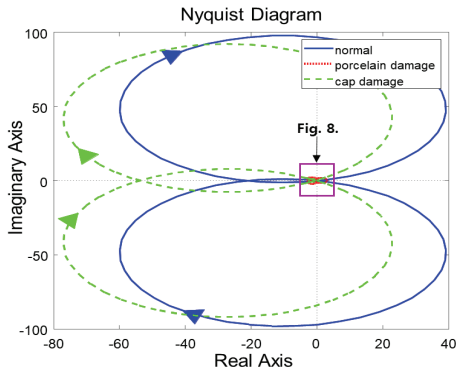


Fig. 9. Nyquist diagram by porcelain insulator damage type.

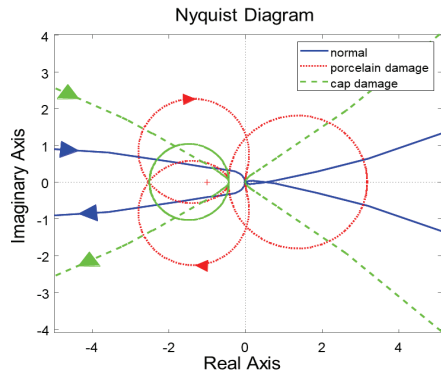


Fig. 10. Nyquist diagram by porcelain insulator damage type.

는 경로의 수는 정상 애자는 $N=2$, 자기 손상은 $N=2$, 캡 손상은 $N=3$ 으로 경로가 시계 방향으로 이동하고 있어, 각각 2개, 2개, 3개의 극점(Pole)을 가지며 시스템이 불안정한 것으로 분석되었다. 특정방정식의 해를 구한 것과 비교하면, 정상 애자의 해는 $-3.6085+0.0000i$, $0.4415\pm 3.2652i$, 자기 손상의 해는 $0.5465\pm 1.9967i$, $-0.0244+0.0000i$ 로 우반 평면에 2개의 극점이 존재하며, 캡 손상의 해는 $0.5778\pm 3.2341i$, $0.0032+0.0000i$ 로 3개의 극점이 존재하여 시스템이 불안정한 것으로 분석되었다.

정상 애자 시험편이 불안정한 시스템으로 분석된 이유는 본 실험에 사용된 애자의 사용기한은 30년으로 제작되었으나, 애자의 경년이 50년으로 외관의 손상은 발생하지 않았지만 환경에 의해 육안으로 식별되지 않는 손상이 존재하는 것으로 판단된다. 그러나 나이퀴스트 선도 자체 비교를 통해 상태에 따라 차이가 확연히 발생하기 때문에, 이를 활용해서 정상 및 손상을 구분하는 것이 가능하다고 판단된다.

이 결과는 가장 근사한 주파수응답함수를 추정하는 것

으로 사용되지 않은 애자의 시스템 결과와의 오차 발생 가능성이 있다.

4. 결론

송전선로의 신뢰성에 중요한 역할을 담당하는 자기 애자의 건전성을 판별하는 것은 국가적 측면에서 중요한 문제이며, 이에 따라 본 연구에서는 자기 애자의 손상 유형에 따른 상태평가를 위해 기존의 평가 방법보다 비교적 환경의 영향을 적게 받고 측정이 편리한 주파수응답분석을 적용하여 일련의 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 4가지 시험조건 중 자기 부분에 센싱 및 타격을 하는 방법에서 FRF가 가장 일관성 있게 산출되는 것으로 확인되었다.
- 2) FRF 상에서 고유 주파수의 변화, 곡선 형상, 에너지 감쇠 등을 이용하여 자기 애자의 금구 손상 및 탈락, 자기부 방사형 크랙 등을 검출할 수 있다.
- 3) 정상 및 캡 손상 애자의 경우 고유모드 피크의 감쇠 차이는 크게 발생하지 않았으며, 정상 및 손상 애자에 대한 FRF 곡선 면적에서 큰 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.
- 4) 나이퀴스트 선도에서 정상 애자, 자기 손상 애자, 캡 손상 애자 모두 불안정한 것으로 확인되었으며, 추후 절연저항 측정, 인장강도 측정 등과 비교하여 정량적인 분석이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 통해 향후 on-line 상태의 활선 애자의 적용 및 건전성 평가 정확도 개선 및 결함 진단 장비 개발에 대한 기초자료로 쓰일 수 있을 것으로 기대한다.

ORCID

Young-Geun Yoon

<https://orcid.org/0000-0002-2846-9332>

REFERENCES

[1] J.S.T. Looms, *Insulators for High Voltages* (IET, United Kingdom, 1988) p. 1.
 [2] I. H. Choi, T. K. Kim, Y. B. Yoon, J. Yi, and S. W. Kim,

- J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 551 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.9.551>]
- [3] I. H. Choi, J. Y. Park, and D. H. Gang, *J. Electric Power and Energy*, **2**, 365 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.18770/KEPCO.2016.02.03.365>]
- [4] S. D. Jeon, J. M. Oh, F. I. Kim, K. W. Jeong, H. Y. Ryu, and B. H. Lee, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **58**, 336 (2009).
- [5] J. Y. Park, J. K. Lee, and K. Y. Oh, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **60**, 1239 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2011.60.6.1239>]
- [6] J. M. Joung, D. M. Kim, and M. H. Choi, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **60**, 267 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2011.60.4.267>]
- [7] C. D. Lee and D. H. Yeo, *Trans. Korean Soc. Auto. Eng.*, **19**, 139 (2011).
- [8] M. G. Jeong, K. S. Kim, and K. J. Kim, *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, **16**, 619 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2006.16.6.619>]
- [9] J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random Data Analysis and Measurement Procedures* (John Wiley & Sons, Inc, Canada, 2010) p. 25.
- [10] W. J. Bottega, *Engineering Vibrations* (Taylor & Francis, New York, 2006) p. 109.
- [11] P. Stoica, *Introduction to Spectral Analysis* (Prentice Hall, Michigan, 1997) p. 52.