

# 자기애자 캡의 금구시멘트 계면 건전성 평가를 위한 초음파법 활용에 대한 연구

윤영근 · 최인혁\* · 손주암\* · 오태근†

인천대학교 안전공학과 · \*한국전력공사 전력연구원 차세대송변전연구소  
(2018. 12. 7. 접수 / 2018. 12. 17. 수정 / 2018. 12. 19. 채택)

## A Study on the Application of Ultrasonic Testing for The Interface Integrity Evaluation between Iron and Cement of Porcelain Insulator Cap

Young Geun Yoon · In Hyuk Choi\* · Ju Am Son\* · Tae Keun Oh†

Department of Safety Engineering, Incheon National University

\*KEPCO Research Institute

(Received December 7, 2018 / Revised December 17, 2018 / Accepted December 19, 2018)

**Abstract :** The life span of the porcelain insulator was made to be 30 years, but currently many of the 154kV NGK porcelain insulators using in Korea are found to have passed the production life. Accidents caused by aged mechanical breakdown can lead to disruption of power supply in some areas, large economic losses, and casualties. Therefore, ultrasonic method, which is one of the non - destructive test methods, is applied as a method for evaluating the integrity of porcelain insulators. In this study, the experiment on the interface of cap was conducted and the difference between the energy difference and the attenuation coefficient of the reflected wave was derived according to the interface state of the steel - cement. The results of this study are expected to be used as the basic data of the ultrasonic testing to evaluate the interface condition of the porcelain insulator cap.

**Key Words :** porcelain insulator, ultrasonic testing, interface integrity evaluation, attenuation coefficient, reflected energy

### 1. 서론

오늘날 산업의 발달 및 생활전력 증가로 인해 전력 수요는 꾸준히 증가하는 실정이다. 동시에 안정적인 전력공급이 요구되어 전력설비의 신뢰성이 중요하게 대두되고 있다. 현재 국내에서 운영 중인 대용량, 장거리 에너지 송전에 사용되는 선로는 주로 345 kV, 154 kV있으며, 송전 선로의 구성으로는 철탑, 전선, 애자 등이 있다. 이 중 한국전력공사의 송전설비 고장 분석 및 대책 자료에서는 전선의 고장에 이어 애자의 고장 사례가 높은 것으로 분석되었다<sup>1)</sup>.

애자는 송전탑의 전력선을 전기적으로 절연 및 기계적으로 고정시키기 위해 사용되는 절연 지지체이다. 또한 가공송전선과 전주와의 절연간격을 확보해주는

역할을 하는 등 송전선의 신뢰성을 결정하는 중요한 역할을 담당하고 있다<sup>2)</sup>.

애자는 사용 환경에 따라 많은 스트레스를 받으며 그 종류와 정도에 따라 다른 스트레스를 인가받는다<sup>3)</sup>. 다양한 환경적 요인에 의한 열화 현상 때문에 애자장치의 문제로 발생하는 정전 사고 등은 막대한 피해를 주며 이는 경제적 손실로 이어지는 인적피해, 물적 피해를 동반하기 때문에 사고를 미연에 방지하며 신뢰성 높은 방법으로 안전하게 점검하여 교체하는 것이 아주 중요하다.

현재 국내에는 약 980만개의 송전용 애자가 설치되어 있으며, 국산 애자의 경우 470만개로서 48%의 비율이 설치되어 있고, 수입 애자는 510만개로서 52%를 차지하고 있다. 소재별 사용현황은 자기 애자가 980만개

† Corresponding Author : Tae Keun Oh, Tel : +82-32-835-8294, E-mail : tkoh@inu.ac.kr

Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

중 974만개로서 99.4%를 차지하고 있다. 또한, 30년 이상의 장기사용 자기 애자의 비율은 전체의 50%를 상회하며, 국내 송전선로에서의 자기애자 고장이 송전선로 전체 고장의 약 15%를 차지하고 있다<sup>4)</sup>. 그러나 국내 환경을 고려한 기술적, 정량적 근거 부족으로 교체 여부를 판단하기 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 자기애자의 상태평가를 위한 정량적 및 정성적 분석이 필요하며 해당 분석을 적용하여 교체여부를 판단할 필요성이 높은 실정이다.

이와 관련하여 국내에서는 전력재난 사고를 미연에 방지하기 위해서 방사선법, 초음파법, 동적거동 등의 비파괴 방법을 이용하여 자기 애자의 건전성 평가 및 잔존수명을 예측하는 연구가 지속적으로 진행 중이다<sup>5-8)</sup>. 방사선법의 일종인 X-선 이미징 방법을 통하여 애자 내부의 결함이나 기공의 크기 및 분포를 확인할 수 있다<sup>9)</sup>. 하지만 X-선 이미징 방법은 시험방법이 어렵고, 고가이며, 방사능 피폭 등의 문제를 야기할 수 있다.

한편 초음파 법의 경우에는 측정이 간단하고 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있으며, 국외에서는 초음파법을 활용하여 폴리머애자의 자기부분에 대한 건전성 평가를 진행한 연구결과가 있다<sup>10)</sup>. 또한, 접착매질의 유무, 수중 물체 탐상 등 2개 이상의 매질에 대한 건전성을 평가하기 위한 다양한 연구가 있다<sup>11-17)</sup>. 본 연구에서는 이와 관련하여 초음파법을 활용해 자기애자 캡의 금구-시멘트 계면의 건전성을 평가하기 위한 이론과의 비교/검증 및 다양한 분석을 통한 결과를 제시하였다. 본 연구결과를 통해 향후 경년 자기애자의 건전성 평가의 정확도 개선 및 결함 진단을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 초음파 신호

### 2.1 초음파 속도

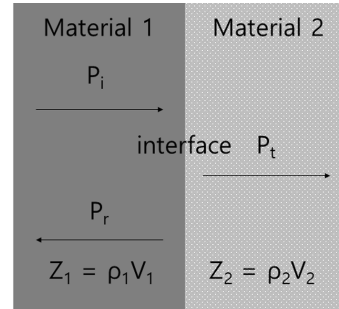
초음파의 속도는 측정 매질의 탄성계수 및 밀도에 따라 결정되며, 이는 다음 식으로 주어진다.<sup>18)</sup>

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1)$$

C : 음속, ρ : 밀도 K : 탄성계수

### 2.2 음향임피던스

음향임피던스는 매질에 의해 음파의 진행이 방해되는 특성을 의미한다. 서로 다른 매질에서는 각 매질의 탄성계수, 밀도가 다르기 때문에 초음파 속도가 변하며,



Z : 음향 임피던스, ρ : 매질의 밀도, V : 초음파의 속도

Fig. 1. Acoustic impedance theory.

이는 음향임피던스의 차이를 발생시킨다. 특정 매질의 음향임피던스는 Fig. 1에서 매질의 밀도와 음속의 곱으로 표현된다<sup>18)</sup>.

일반적으로 초음파가 매질에 수직으로 입사할 때 두 매질의 음향임피던스에 차이에 따라서 계면에서 반사하는 비율과 통과하는 비율이 결정되며, 반사계수, 반사에너지, 음압통과율은 다음과 같이 식 (2), (3), (4)로 정의된다.

$$\gamma = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

$$RE = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (3)$$

$$t = 1 - \gamma = 1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

여기서,  $P_i$ 는 발생된 초음파가 매질 1에서 수직으로 입사되어 전파되는 음압의 크기이며,  $P_r$ 은 매질 1과 매질 2의 계면에서 반사되는 음압이고,  $\gamma$ 은 초음파가 수직으로 입사하여 매질 1에서 전파되는 음압  $P_i$ 와 매질 2의 계면에서 반사되는 음압  $P_r$ 에 대한 반사계수이다. 반사계수는 입사음압과 반사음압을 측정하는 것 외에, 각 매질의 음향임피던스  $Z_1, Z_2$ 를 통해서도 산출할 수 있다.

$Z_1$ 보다  $Z_2$ 가 큰 경우에  $\gamma$ 은 양의 값을 가지며, 이때 초음파는 매질1에서 매질 2로 전파가 용이하고 반사파의 위상(Phase)이 변하지 않기 때문에 자유단의 파동 반사와 같은 양상을 보인다.  $Z_1$ 보다  $Z_2$ 가 작은 경우에는 음압의  $\gamma$ 은 음의 값을 갖게 되며, 초음파는 매질1에서 매질 2로 전파가 어려워 계면에서 초음파의 대부분이 반사되며 고정단에서의 파동 반사와 같이 위상이 반전된다<sup>19-20)</sup>.

### 2.3 초음파 감쇠계수

초음파 펄스-에코 법에서 상대적인 에너지의 감소를 분석하는 방법으로는 식 (5)를 사용하며, 이는 Input 에너지를 분모로 하고 후속되는 반사파를 분자로 하여 계산하는 방법으로, 초기 에너지 대비 감소하는 반사파의 Amplitude의 절대적인 수치를 비교하는 방법이다. 식 (6), (7)은 감쇠계수(Attenuation Coefficient)를 측정하는 방법으로 식 (6)은 감쇠계수를 반사파의 에너지를 초음파의 왕복이동거리(2D)에 대한 감소를 나타내며, 식 (7)은 식 (6)과 동일하나 값을 dB(데시벨) 단위로 표현하여 정량적인 수치로 비교를 할 수 있다는 차이점이 있다.

$$\frac{U_{p-p}}{U_{p-pmax}} = \frac{peak2_{amp}}{peak1_{amp}} \quad (5)$$

$$\bar{\alpha}_{Np/l} = \frac{1}{2D} \ln\left(\frac{A_1}{2A_2}\right) \quad (6)$$

$$\bar{\alpha}_{dB/l} = \frac{20 \log_{10}\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - 6dB}{2D} \quad (7)$$

## 3. 시험편 및 측정방법

### 3.1 시험편

초음파법 의한 계면에서의 공극, 균열을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상 및 치수로 모형 시험편을

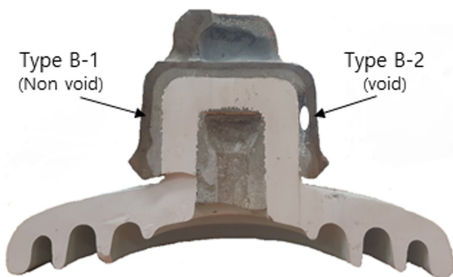
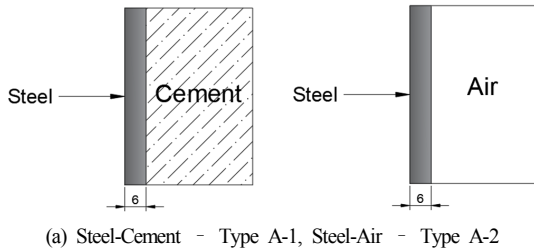


Fig. 2. Similar model specimen & porcelain insulator specimen.

제작하였다. NGK사에서 사용한 재료의 정확한 물성은 확인이 어렵기 때문에 캡(금구)의 재질과 시멘트 페이스트의 정확한 비율을 알 수 가 없다. 따라서 시멘트는 국내 애자 제작 업체에서 사용하는 초속경시멘트를 사용하였으며, steel 1095를 두께 6T로 하여 Fig. 2의 (a)와 같이 초속경시멘트로 채운 부분과 공극을 묘사하여 모형시험편을 제작하였다. 자기애자 시험편은 인공결함 시험편을 제작하기 어렵기 때문에 water jet으로 절삭하여, 우측 금구-시멘트 부분에 대하여 인위적인 공극을 발생시켜 Fig. 2의 (b)와 같이 제작하였다.

### 3.2 측정방법

Fig. 3는 초음파 신호를 얻기 위한 실험의 구성을 나타내었다. 실험장비 구성으로 Pulser/Receiver는 Olympus 5072PR, 탐촉자는 직경 7.7 mm, 주파수 10MHz의 수직 탐촉자를 사용하였다. DAQ는 National instrument의 PXI - 5154를 사용하였으며, NI Signal express를 사용하여 화면에서 신호를 확인하고 디지털 신호로 저장하였다.

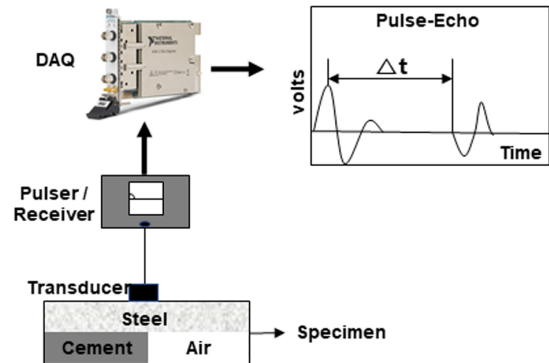


Fig. 3. Configuration of experiment equipment.

5072PR은 input energy를 negative spike 파형으로하여 547 mV의 에너지로 발생시키고, Voltage range ±547 mV로 이상의 에너지에 대해서는 포화된 양상을 보일 수 있다. 탐촉자와 시험편의 신호가 용이하게 전달하기 위하여 커플런트를 사용하여 실험을 진행하였다. 초음파가 이동하는 동안의 전기적 잡음이나, 탐촉자를 누르는 압력에 의해 오차가 발생하기 때문에 동일한 지점에 300번의 파형에 대해 시간평균법을(Time Average)를 적용하고, 10회 이상의 실험을 실시한 후 전체 데이터에 대한 평균값을 적용하였다. 공극 유무에 따른 음압 차는 초음파 탐상에서 초기 Input 에코 이후 발생하는 제1회 반사에코와 제2회 반사에코, 제2회 반사에코와 제3회 반사에코의 비로 계산하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 초음파 신호 분석

#### 4.1.1 모형 시편 Time domain 분석

모형 시편 실험결과는 Table 1 및 Fig. 4와 같으며, steel-cement의 경우 반사파 사이의 시간(dt)은 1.0275 us, 1.0265 us, 1.0775 us, steel-air 1.0285 us, 1.0255 us, 1.0790 us로 분석되었다. steel 1095의 경우 이론적인 초음파 속도는 5,900m/s지만 실험을 통해 초음파 속도를 계산한 결과 steel-cement 5,839 m/s, 5,845 m/s, 5,568 m/s, steel-air 5,833 m/s, 5,850 m/s, 5,560 m/s로 나타났다. 2nd-3rd, 3rd-4th에서 초음파 속도가 이론과 차이를 보이는 이유로 coupling 두께의 차이에 의해 약 0.9%의 미세한 차이가 발생한 것으로 사료된다. 4th-5th의 경우 10%의 오차가 발생하였는데, 이는 5th peak까지 반사가 되던 이론과 달리 에너지의 감쇠가 커 반사파의 주된 peak가 사라져 데이터의 신뢰성이 낮아지는 것으로 판단된다. 따라서 분석의 신뢰성이 있는 반사예코는 2nd, 3rd, 4th로 판단된다.

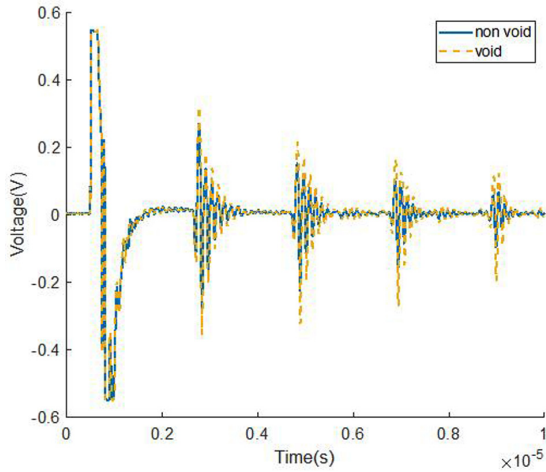


Fig. 4. Similar model specimen time domain.

Table 1. Similar model specimen analysis

Peak	Non void		Void	
	dt( $\mu$ s)	Vp(m/s)	dt( $\mu$ s)	Vp(m/s)
2nd-3rd	1.0275	5,839	1.0285	5,833
3rd-4th	1.0265	5,845	1.0255	5,850
4th-5th	1.0775	5,568	1.0790	5,560

#### 4.1.2 자기애자 Time domain 분석

자기애자의 경우 모형시편의 실험 세팅과 같이 실험하였을 경우 표면의 거칠음, 캡의 곡률로 인해 3rd의 반사파가 수신되지 않는 문제점이 발생하여, 증폭비를 20 dB에서 30 dB로 변경하고 실험을 진행하였다. NGK

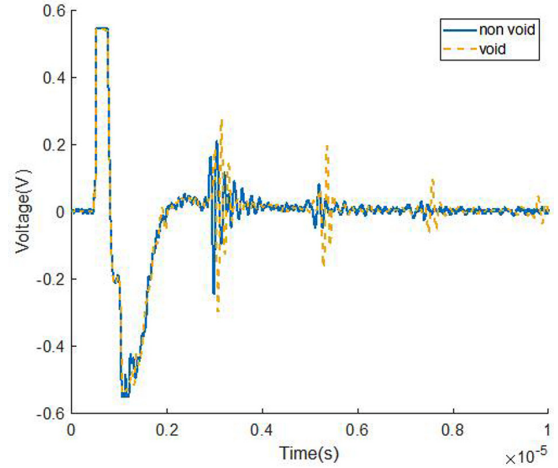


Fig. 5. Porcelain insulator specimen time domain.

Table 2. Porcelain insulator specimen analysis

Peak	Non void		Void	
	dt( $\mu$ )	Vp	dt( $\mu$ )	Vp
2nd-3rd	1.0715	5,412	1.1090	5,410
3rd-4th	1.0680	5,430	1.1055	5,427

사 자기애자는 소재 성분을 공개하지 않기 때문에 캡의 정확한 재질을 알 수 없지만, 초음파속도를 분석한 결과 주철(cast iron)의 범위에 근접하였다.

Fig. 5 및 Table 2와 같이 자기애자 실험결과 cast iron-cement의 반사파 사이의 시간(dt)은 1.0715 us, 1.0680 us, cast iron-air의 경우 1.1090 us, 1.1055 us로 분석되었다. 절삭면에 대해 Vernire calipers로 측정결과 5.8 mm(좌측/non void), 6.0 mm(우측/void)을 통해 초음파 속도를 계산한 결과, cast iron-cement 5,412 m/s, 5,430 m/s, cast iron-air 5,410 m/s, 5,427 m/s로 분석되었다. Sampling rate에 비해 Record length의 수가 부족하여 분해능 간격에 의해 0.31%의 속도 차이가 발생하였다. 또한 Fig. 5에서 time delay가 발생하였는데, 그 이유로는 자기애자 캡의 주물 제작 시 오차가 발생하여 캡의 두께가 위치에 따라 다른 것으로 사료된다.

자기애자의 기계적인 특성은 캡 하단부의 입사각에 영향을 받고 있고, 금구 옆면의 두께는 하중을 크게 받지 않기 때문에 금구의 두께 차이는 건전성에 중요한 요소가 아닐 것으로 사료된다<sup>21)</sup>.

### 4.2 음향임피던스에 의한 반사율 및 통과율

Table 3은 음향임피던스를 계산하기 위한 재료의 특성이며, 자기애자의 경우 time domain 분석을 통해 예측된 cast iron에 대해 분석을 진행하였다. 이를 통해 음향임피던스 차이에 의한 초음파 신호의 음압반사율

Table 3. Material properties of specimen

Material properties Specimen materials	Density $\rho$ ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Velocity (m/s) $V_p$	Young Modulus (GPa)	Poisson's ratio $\nu$	Impedance $Z$ ( $10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )
	steel 1095	7.86	5,900	200	0.27~0.30
cast iron	7.25	5,300	92.4	0.21~0.26	38.42
cement	1.606	2,551	-	-	4.096
air(25°C, 1atm)	0.00118	340	-	-	0.0004

Table 4. Reflection coefficient ratio

Interface	Reflected ratio	Transmitted ratio
(a) Type A-1	83.654%	16.346%
(a) Type A-2	99.998%	0.002%
(b) Type B-1	80.734%	19.266%
(b) Type B-2	99.998%	0.002%

및 음압통과율을 분석하여 Table 4에 제시하였다. Fig. 2(a)의 Type A-1 경우 이론적으로 초음파 에너지의 반사율은 83.654%로 계산되었으며, Fig. 2(a)의 Type A-2의 경우 반사율은 99.998%로 계산되었다. (a) 시험편의 경우 반사율은 약 17%정도 차이가 발생하며, (b) 시험편의 경우 20%정도 차이가 발생할 것으로 분석되었다.

식 (3)를 활용하여 반사에너지를 계산한 결과는 Table 5와 같으며, Type A-1 69.980%, Type A-2 99.997% 약 30%정도 수신 에너지의 차이가 발생할 것으로 예상된다. 이와 유사하게 Fig. 2(b)자기애자의 경우 공극 유무에 따라 약 30%~35%정도 차이가 발생할 것으로 분석되었다.

### 4.3 초음파 감쇠계수

#### 4.3.1 계면 결함 유무와 초음파 에코의 비

각각의 Type에 대한 amplitude를 기반으로 식 (5)를 적용하여 반사파 에코 감쇠를 계산하였으며, 이론적인 값

Table 5. Reflection energy ratio

Interface	Reflected Energy	Transmitted Energy
(a) Type A-1	69.980%	30.020%
(a) Type A-2	99.997%	0.003%
(b) Type B-1	65.180%	34.820%
(b) Type B-2	99.996%	0.004%

의 경우 Table 5에서 산출된 비율을 통해 각각의 Type에 대한 초기 amplitude를 대입하여 이론적인 amplitude 값을 구한 이후 식(5)를 통해 계산한 결과를 Table 6과 Fig. 6에 제시하였다. non void의 경우 반사에너지가 곡선적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이론값과 비교 시 초기에 크게 감소하는 것으로 나타났다. void의 경우 이론적으로 반사율이 99.99%로 에너지의 감쇠가 미비하게 나타나야 하지만, 모형시편과 자기애자를 측정된 결과, 감소가 발생하는 것으로 확인되었다. 그 이유로는 대상체 표면의 불균질, 곡률, 제조 시 불순물이 첨가되거나, 접촉매질의 영향을 통해 산란이 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 이론상 공극유무에 따라 초기 30%정도의 차이가 발생하고 후속 반사에너지의 차이가 커지는 경향을 보였지만, 실제 측정결과 9~12%정도의 에너지 차이가 발생하는 것으로 확인되었다.

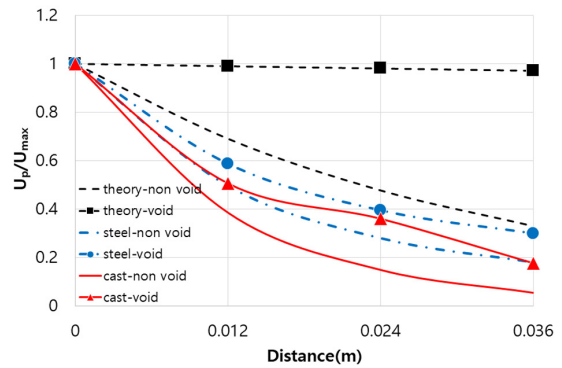


Fig. 6. Comparison of  $U_p/U_{max}$  about two specimen.

Table 6. Comparison of  $U_p/U_{max}$  by formula (5) about two specimen

Type of specimen	Peak	Non void			Void		
		Amplitude	Formula(5)	Theoretical	Amplitude	Formula(5)	Theoretical
Similar model specimen	1st	0.5450	1	1	0.5450	1	1
	2nd	0.2700	0.4954	0.6998	0.3200	0.5872	0.99997
	3rd	0.1520	0.2789	0.4897	0.2150	0.3945	0.99994
	4th	0.0975	0.1789	0.3427	0.1630	0.2991	0.99991
	5th	0.0670	0.1229	0.2398	0.1220	0.2239	0.99988
Porcelain insulator specimen	1st	0.5457	1	1	0.5432	1	1
	2nd	0.2105	0.3858	0.6518	0.2753	0.5068	0.99996
	3rd	0.0816	0.1496	0.4248	0.1960	0.3608	0.99992
	4th	0.0301	0.0551	0.2769	0.0963	0.1773	0.99988

4.3.2 계면 결함 유무와 초음파 감쇠계수

계면결함 유무에 따른 반사파 에너지에 대해 식 (6) 과 식 (7)을 통해 감쇠계수를 분석한 결과, 단위 차이에 의한 결과 값은 다르지만 그래프의 양상은 동일하게 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 무차원단위인 식 (6)보다 dB 단위인 식 (7)을 사용하여 정량적인 분석을 실시하였다.

0 dB을 기준으로 50%감쇠가 발생한 것으로 분석되며, 감쇠가 50%보다 작은 경우 음의 값, 감쇠가50%보다 큰 경우 양의 값으로 나타난다. 초음파 감쇠계수가 증가한다는 것은 반사어로 에너지가 상대적으로 감소함을 의미한다.

초음파 이론에 의한 반사파의 감쇠는 Fig. 7과 Table 7, Table 8에서 분석된 것과 같이 동일 매질 내에서 이동 시 같은 비율로 감쇠되어야 하지만 시험편의 측정 결과는 차이가 발생하였다.

Type A-1의 경우 이동거리에 따라 8.38 dB ~ -178.60 dB로 감소하는 경향을 보였으며, Type B-1의 경우 189.35~222.76 dB의 범위로 확인되었다. 이론식의 경우 -231.42 dB로 동일하게 분석되었다.

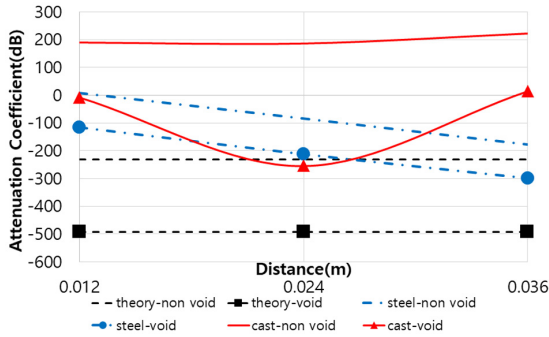


Fig. 7. Comparison of attenuation coefficient by formula (6), about two specimen.

Table 7. Comparison of attenuation coefficient by formula (6) about two specimen – non void

Dist(mm)	Formula(6)	Type A-1	Type B-1
12	-231.42	8.38	189.35
24	-231.42	-84.13	185.73
36	-231.42	-178.60	222.76

Table 8. Comparison of attenuation coefficient by formula (6) about two specimen – void

Dist(mm)	Formula(6)	Type A-2	Type B-2
12	-492.72	-114.58	-8.02
24	-492.72	-212.14	-254.01
36	-492.72	-299.58	14.15

\* Dist = Distance

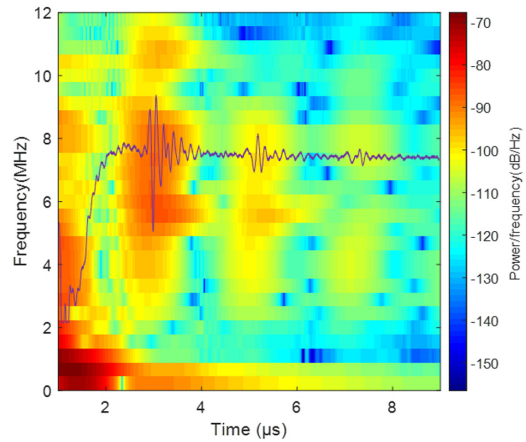
Type A-2의 경우 -114.58 dB ~ -299.58 dB로 감소하는 경향을 보였으며, Type B-2의 경우 -8.02 ~ 14.15 dB의 범위로 확인되었고, 이론식의 경우 -492.73 dB로 동일하게 분석되었다.

이론식에 의해 non void 부분과 void 부분을 비교한 결과 초음파 이동거리에 따라 261 dB로 일관적인 차이가 발생하는 것으로 분석되었고, Type A의 경우 공극 유무에 따라 120 dB~128 dB의 차이가 발생했다. Type B의 경우 초음파 이동거리에 따라 197 dB, 439 dB, 208 dB로 2nd-3rd에서 큰 차이가 발생하였다.

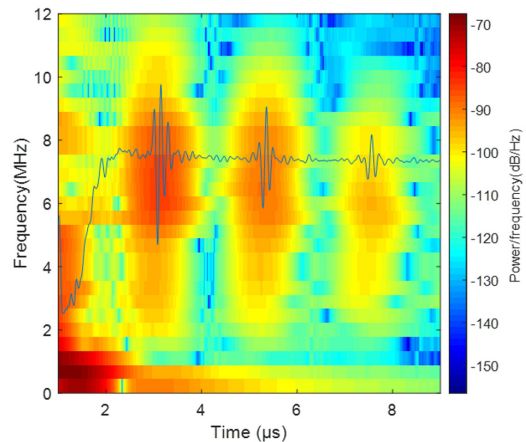
이론식에 의한 결과와 동일하게 일관적인 차이를 나타내는 것은 아니지만, 공극 유무에 따라 dB의 차이가 명확하게 구분이 되는 것을 통해 감쇠비를 활용하여 계면의 공극, 균열 유무에 따라 구분이 가능하다고 판단된다.

4.4 계면 결함 유무와 주파수 영역

탐촉자 및 pulse/receiver에서 얻은 신호는 일반적으로 시간 영역에서 분석된다. 전압 임펄스에 의해 능동



(a) STFT image of Cast iron-Cement - Type B-1



(b) STFT image of Cast iron-Air - Type B-2

Fig. 8. Short-time Fourier transform & Time domain graph,

소자에서 유도된 진동은 초음파의 유한 스펙트럼을 발생시킨다. 즉, 변환기에 의해 생성된 초음파 펄스는 많은 단일 주파수 파의 합이다. 이 스펙트럼은 중심 주파수라고 하는 지배적인 주파수가 있는 가우스 모양을 가지고 있고, 이 중심 주파수는 탐촉자를 특성화하는 주파수이다<sup>22)</sup>. 신호는 여러 개의 단일 주파수 파의 합계이므로 시간 영역에서 관찰된 동작은 합계의 동작이지만 전체의 동작은 아니기 때문에 반사파의 에코가 발생하는 시간영역에서 주파수영역에 대한 분석을 진행하였다.

MATLAB R2018a를 사용하여 자기애자의 time domain에 대한 Short-time Fourier transform(STFT)을 통해 도출된 시간-주파수영역의 이미지를 Fig. 8에 도식하였다. type 2-1와 type 2-2에서 2nd peak에 대한 주파수는 유사하게 나타났으나, type 2-1은 3rd, 4th의 반사파에서 주된 주파수 성분이 약해지는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

이중 접합부재의 계면균열의 초음파 탐상에 대한 이론적 특성을 검토한 후, 이중접합체의 공극 유무에 따른 초음파 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 2개의 매질의 계면에서 초음파법 측정 및 특성에 영향을 미치는 요소로는 표면의 상태, 음향 임피던스 등이 있고, 이와 관련하여 음향 임피던스 비의 변화에 따른 반사에너지, 감쇠계수의 상호관계를 파악하였다.
- 반사파 에코 비는 이론식에서 초기 30%가 발생하고 이어지는 반사파에서 차이가 더욱 커지는 것으로 분석되었으나, 모형시편과 자기애자 실험 결과 9-12%의 차이가 발생하는 것으로 확인되었다.
- 감쇠계수는 이론적으로는 반사파의 동일한 에너지 손실을 가정하여 일정하게 나타나지만, 실제로 재료감쇠 및 에너지 소산(material damping and dissipation)으로 선형으로 감소해야 한다. 하지만 비정형적으로 나타났으며 이는 표면의 거칠음, 곡률 때문으로 판단된다.
- 하지만 공극 유무에 따라 감쇠계수의 차이가 명확하게 구분이 되며, 이를 통해 자기애자 캡의 금구-시멘트 계면의 공극, 균열에 대한 검출이 가능하다고 판단된다.
- 추가적으로 자기애자의 신호에 대해 STFT 기법의 분석 결과 Fig. 8(a)의 2nd, 3rd에서 주된 주파수가 현저히 약해지는 것을 확인하였다.

본 연구에서 분석된 초음파법 실험결과를 기초자료로 하여 자기애자 캡의 금구-시멘트 계면상태 평가를

위한 근거로 활용하고, 추후 X-ray 등 다른 비파괴검사 기법 또는 절삭을 통해 비교하여 향후 경년 자기애자의 건전성 평가의 정확도 개선 및 결함평가를 위한 초기자료로 활용될 수 있기를 기대한다. 추가적으로 캡의 금구-시멘트 계면에 국한되지 않고 더 나아가 자기애자의 전반적인 건전성을 측정할 수 있는 Impact-echo 법 등<sup>23-24)</sup>의 다양한 비파괴검사 기법을 적용할 필요가 있다고 사료된다.

## References

- 1) I. H. Choi, T. K. Kim, Y. B. Yoon, J. Yi and S. W. Kim, "Lifetime Assessments on 154 kV Transmission Porcelain Insulators with a Bayesian Approach", J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., Vol. 30, No. 9, pp. 551-557, 2017.
- 2) J. S. T. Looms, "Insulators for High Voltages", IEE Series, 1988.
- 3) S. C. Kim and T. Y. Kim, "Application Trends and Technology Trends of Domestic and Foreign Suspension Insulators", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 48, No. 12, pp. 22-26, 1999.
- 4) I. H. Choi, J. Y. Park and D. H. Kang, "Technology Status of Transmission Insulator", KEPCO Journal on Electric Power and Energy, Vol. 2, No. 3, pp. 365-375, 2016.
- 5) W. K. Lee, I. H. Choi, K. C. Hwang and H. Y. Choi, "A Study on Life Expectancy Forecast for Porcelain Insulators", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2008, No. 7, pp. 16-18, 2008.
- 6) H. G. Jo, D. H. Han and I. H. Choi, "Degradation and Diagnosis Technology of Ultra High Voltage Insulator "Transfer Insulator", Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 32-39, 2004.
- 7) I. H. Choi, J. H. Choi, Y. H. Jung, D. I. Lee and T. Y. Kim, "Characteristic Test on the Leakage Current of Transmission Insulators", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2003, No. 7, pp. 479-481, 2003.
- 8) J. J. Park, "Analysis of Leakage Current Waveforms for Transmission Line Porcelain Insulators due to ESDD Contamination", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 10, pp. 1461-1470, 2012.
- 9) J. Y. Cho, S. G. Ji, J. W. Han, H. S. Ahn, T. W. Kim, I. H. Choi and C. Park, "Microstructure based Evaluation of Degradation of Aged Porcelain Suspension Insulators used in Transmission Line", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2017, No.7, pp.

- 1165-1166, 2017.
- 10) L. Chen and J. Q. Wang, "Related Problems in Ultrasonic Detection of Porcelain Insulator", 17th World Conference on Nondestructive Testing, No. 23, pp. 25-28, 2008.
  - 11) S. I. Park and N. Y. Chung, "Measurement of Crack Length by Ultrasonic Attenuation Coefficients on Interfaces of Al/Epoxy Bonded Dissimilar Materials", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 2003, No. 11, pp. 1109-1114, 2003.
  - 12) N. Y. Chung, "Measurement of Interfacial Crack Length by Ultrasonic Scattering Compensation Depending on Thickness Variations of Bonded Dissimilar Components", Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 2, pp. 67-75, 2006.
  - 13) R. S. Dwyer-Joyce, B. W. Drinkwater and A. M. Quinn, "The Use of Ultrasound in the Investigation of Rough Surface Interfaces", Transactions of the ASME, Vol. 123, pp. 8-16, 2001.
  - 14) P. B. Nagy "Ultrasonic Classification of Imperfect Interfaces", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 11, No. 3/4, pp. 127-139, 1992.
  - 15) W. Chen, R. Mills and R. S. Dwyer-Joyce "Direct Load Monitoring of Rolling Bearing Contacts using Ultrasonic Time of Flight", Proc. R. Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering, Vol. 471, pp. 1-21, 2015.
  - 16) B. Mojskerc and T. Kek, J. Grum "Pulse-Echo Ultrasonic Testing of Adhesively Bonded Joints in Glass Façades", Journal of Mechanical Engineering, Vol. 62, No. 3, pp. 147-153, 2016.
  - 17) L. W. Schmerr, "Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation", Plenum Press, 1998.
  - 18) "Ultrasonic Testing of Materials at Level 2," A Technical Document Issued by the International Atomic Energy Agency, Vienna, Iaea-Tecdoc-462, 1988.
  - 19) D. R. Kim, S. Y. Lim and S. G. Chung, "A Debonding Detection Technique for FRP/Rubber Interface by Ultrasonic Phase Reversal", The Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 9-16, 2009.
  - 20) J. M. Baik and R. B. Thompson, "Ultrasonic Scattering from Imperfect Interfaces : A Quasi-Static Model", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 4, No. 3/4, pp. 177-196, 1984.
  - 21) B. C. Woo, S. W. Han and H. G. Cho, "Stress Response of Cement Interface on Manufacturing Process of a Suspension Insulator", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1448-1450, 2003.
  - 22) M. A. GOÑI RODRIGO, "The Ultrasonic Pulse-Echo Immersion Technique And Attenuation Coefficient Of Particulate Composites", University of Rhode Island Press, London, pp. 65-69, 2013.
  - 23) Y. G. Young, I. B. Lee, M. H. Sa and T.K. Oh, "A Study on the Statistical Distribution of Ultrasonic Velocities for the Condition Evaluation of Concrete Wide Beam", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 2, pp. 98-104, 2017.
  - 24) M. H. Sa, Y. G. Young, I. B. Lee and T. K. Oh, "A Study on the Statistical Distribution of Rebound Number and Ultrasonic Pulse Velocity in RC and PSC Concrete Structures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 4, pp. 53-58, 2017.