

# 비접촉식 진동 변위센서의 특성에 관한 연구 Study on characteristics of noncontact vibrating displacement sensor

조철환 · 조성태 · 양경현

C. W. Cho, S. T. Cho, K. H. Yang

(접수일 : 2010년 12월 14일, 수정일 : 2011년 01월 11일, 채택확정 : 2011년 03월 14일)

**Key Words** : Displacement Sensor(변위센서), Noncontact(비접촉), Vibration(진동), Rotational Machine (회전 기계), Eddy Current(와전류), Impedance(임피던스)

**Abstract** : This thesis is about the result of conducting a specific experiment for the development of noncontact vibration displacement sensor for measuring the spindle vibration that is used for conditional monitoring of machinery. One should be careful when using the eddy current type displacement sensor because the sensitivity of it is different according to the quality of the material.

While the probe used for nondestructive inspection adopts the effect of transmitting the material by using the high frequency domain, the eddy current type displacement sensor uses the lower frequency of around 1MHz.

Also, while the nondestructive probe uses the method of enhancing output by using the resonance zone, the vibration displacement sensor utilizes the stable zone by avoiding the resonance zone.

Since the oscillator of the converter uses the "L" element as Probe, its characteristic changes with the variation of a relevant impedance.

In other words, if the length of Probe's Cable gets extended (Impedance increase), the sensitivity declines accordingly.

The effect of surrounding temperature was small, but the influence of the quality of Sensor Coil used was high.

Moreover, following an experimental demonstration of the phenomenon where the sensitivity decreases as the frequency of the tested material increases from a frequency response test, the maximum frequency that could be measured was approximately 1KHz. It was noted that the degree of precision could be maintained by using the gap of the probe in the linear zone at the installation site.

## 1. 서 론

회전기기의 운전 감시를 위한 방법은 진동, 베어링 온도, 윤활유 압력등이 있으며, 그중에서도 기기의 운전상태변화를 실시간으로 감시하고, 사전에 예측이 가능한 요소인 진동은 산업체 회전기기의 가장 중요한 감시요소이다. 진동 감시를 위해서는 과거에는 가속도센서 또는 속도센서를 이용한 베어링 진동을 감시하였으나 최근에는 회전축의 진동을 직접 관리하면서, 과거보다 더욱 안정성 있는 설비 운영

이 가능하게 되었다. 이러한 회전축의 진동을 측정하기 위해서는 진동 센서는 비접촉식이 되어야 하며, 회전체의 기하학적인 축 중심선의 거동을 분석할 수 있도록 90°로 2개의 센서를 설치하여 가하학적 중심선의 움직임을 분석하고 있다<sup>(1)</sup>. 현재 산업체에서 회전축의 진동측정용 비접촉식 변위센서는 센서코일에서 발생하는 고주파 조화자장에 의한 와전류가 측정 도체의 근접 유무에 따라 변함으로써 센서 코일의 임피던스가 변하는 원리를 이용하여 코일이 감긴 센서로부터 측정 도체까지의 변위를 검출하여 사용하게 된다. 본 논문에서는 비접촉식 와전류형 진동센서 국산화 개발과제를 수행하면서 연구한 센서의 원리와 전기적 특성에 대한 연구결과를 소개 하고자 한다.

조철환(책임저자) : 한국전력 전력연구원

E-mail : chcho@kepco.co.kr

조성태, : 한국전력 전력연구원

양경현, : 한국전력 전력연구원

## 2. 와전류 진동 변위센서의 동작원리

와전류 변위센서는 와전류(eddy current)를 응용하는 센서로서 그 원리는 Fig. 1과 같이 센서코일에 고주파수의 자장을 발생시켜, 측정 도체에 근접을 시키면 센서코일의 임피던스가 변하게 되며, 따라서 회전하는 회전축의 도체의 표면이 진동이 있으면 거리에 따른 임피던스 변화를 감지하여 진동으로 변환한다.

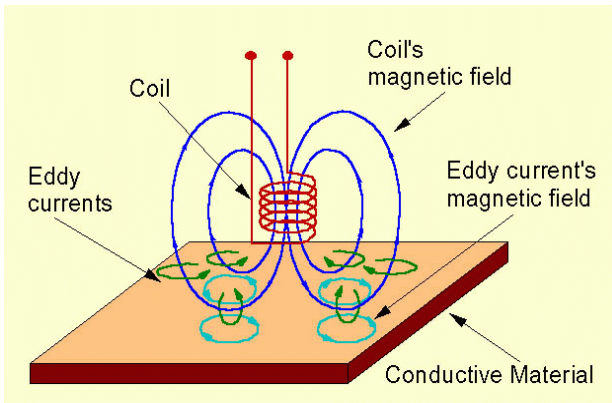


Fig. 1 Principle of displacement sensor

측정대상 도체 안에 발생하는 와전류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과(skin effect)라고 한다<sup>(13)</sup>. 또한 표피 효과의 정도를 나타내는 기준을 침투깊이로 정의 할 수 있으며 다음 식 (1) 과 같다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

침투 깊이는 투자율, 도전율, 주파수에 관계된다. 따라서 측정 도체의 도전율과 상대 투자율이 센서의 측정 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 사용되는 측정 도체의 도전율과 상대투자율을 Table 1 및 Table 2 에 각각 제시하였다.

측정 대상체의 특성에 따른 임피던스 변화는 Fig. 2와 같으며, 임피던스에 영향을 주는 인자는 전기전도도, 투자율, 관련 회로의 인덕턴스등이다.

전기전도도(electrical conductivity)는 와전류 크기와 임피던스 변화량에 비례하고, 투자율(permeability)은 와전류의 크기와 임피던스 변화량에 비례하며, 센서의 lift-off는 와전류의 크기 및 임피던스 변화량에 반비례한다. 이러한 특성을 측정하려는 회전축의 재질(통상 steel)에 맞추기 위하여 발진(oscillation)

회로를 사용하여 RF(Radio Frequency)신호를 발생시키고, 복조기 회로를 사용하여 RF 신호에서 이용 가능한 데이터를 추출한다. 와전류 변위센서를 구동하는 Amplifier(Proximitator)는 발진기에 전원이 공급되면 정한 주파수의 RF신호를 발생하며 이 발생 주파수는 센서 코일의 인덕턴스(L)와 연장선 및 센서 케이블의 정전용량(capacitance)값에 좌우된다.

Table 1 Electric conduction ratio of measurement conductor

Conductor	Conduction ratio(S/m)
Aluminum	$3.82 \times 10^7$
Tungsten	$1.82 \times 10^7$
Zinc	$1.67 \times 10^7$
Brass	$1.50 \times 10^7$
Iron	$1.03 \times 10^7$
Steel (silicon)	$2.00 \times 10^6$
Steel (stainless)	$1.10 \times 10^6$
Silicon	$1.20 \times 10^3$

Table 2 Relative magnetic permeability of measurement conductor

Material	Relative permeability	Material	Relative permeability
Vacuum	1.0	Ni	180
Air	1.0	Co	270
Cu	1.0	Mn	4,000
Al	1.0	Fe	120~2,000

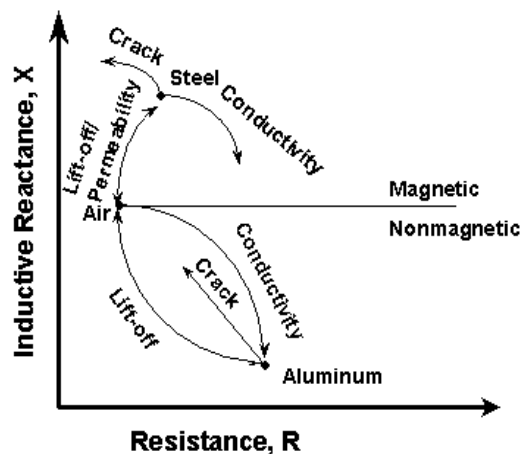


Fig. 2 Coil impedance change

RF 신호 주파수는 진동측정에는 500 kHz에서 2 MHz의 범위를 사용하며, 금속 비파괴탐상의 경우가 보다 높은 주파수를 이용한다. 와전류가 얼마나 깊이 침투하는가는 그 물질의 전도성(conductivity)과 투과성(permeability)에 좌우되며, 일반적으로 4140 steel의 경우 투과 깊이는 0.0762 mm정도이다.

### 3. 와전류 진동 변위센서의 구성 및 설치도

#### 3.1 와전류 변위센서의 구성

와전류 변위센서는 진동을 측정하는 센서와 신호를 증폭하고 변환을 시키는 변환기(proximiter) 그리고 센서와 변환기를 연결하는 Cable로 구성된다.(Fig. 6)

센서는 내부에 0.1 mm 정도의 소선을 이용한 Coil을 코아에 감아 원통형으로 구성하여 sensor로 사용되며, 이를 연결하는 Cable은 일정한 임피던스를 가지는 Cable이 사용되며, 변환기는 내부에 RLC 발진회로, 검파회로, 신호출력회로로 구성된다.

그 구체적인 모양은 Fig. 3~Fig. 5에 보여준다.



Fig. 5 Displacement sensor & extension cable

#### 3.2 와전류 변위센서의 설치도

실제 산업체의 회전기계에 설치되어 사용되는 경우는 변위 센서는 기계의 베어링에 설치되며, 회전하는 축에 근접하여 통상 90° 각도로 2개씩 설치하며, 변환기(proximiter)는 베어링 가까운 곳에 단자함에 부착되며, 변환기의 출력은 Vibration Monitoring System(VMS)로 전송되며, 각종 분석 프로그램에서 사용된다.



Fig. 3 Displacement Probe(sensor)

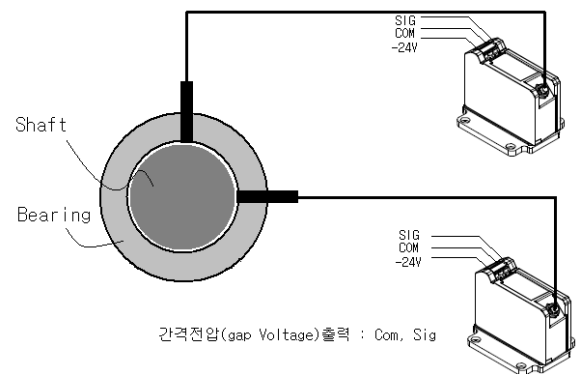


Fig. 6 Establishment of displacement sensor

### 4. 와전류 진동 변위센서의 특성

4.1 비접촉식 와전류(eddy current) sensor 의 특성  
본 논문에서는 센서 내부 Coil 외경 5 mm, Extension Cable 5m의 상용화 개발품 기준 특성이다

Table 3 Electric quality of displacement sensor

Extension Cable(m)	Resistance (Ω)	Inductance (μH)	Capacitance (μF)
5	5.55	2.677	8.542

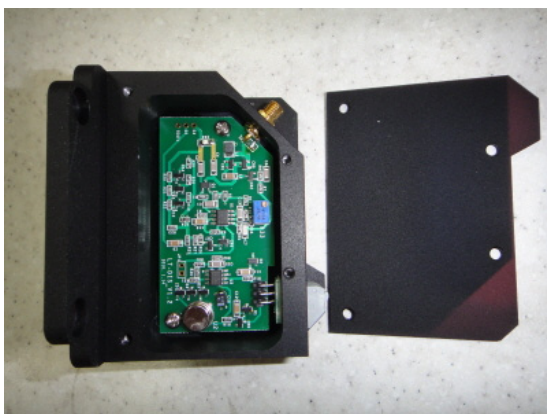


Fig. 4 Proximiter

센서의 전기적인 특성은 변환기내부의 발진회로에서 발진주파수를 결정하기 위한 중요한 변수이며, 이 발진주파수는 센서의 공진주파수와 밀접한 관계가 있다. 즉 센서가 가지고 있는 공진주파수와 발진주파수가 근접하면 정확한 진동값을 측정하기 곤란하다.

4.2 Sensor Cable 길이에 대한 영향의 이론적 고찰  
 와전류형 센서는 아래 Fig. 7과 같이 등가 저항, 인덕턴스 그리고 정전용량으로 모델링할 수 있다. 센서 코일은 매우 가늘고, 길이가 5m 정도이므로 저항 값은 약 3~4Ω 정도로 나타나고, 등가 정전용량의 경우 수 pF이며, 인덕턴스는 일반적으로 수 uH 정도가 된다. 대부분의 와전류 센서가 LC공진을 이용하기 때문에 중요한 값은 인덕턴스와 정전용량의 변화이다.

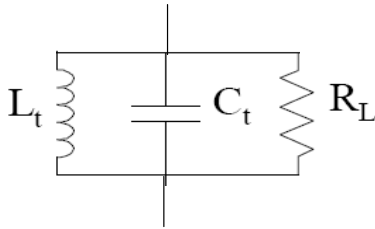


Fig. 7 Equivalent Sensor tip model

센서 코일 부분의 자기공진주파수(self resonance frequency)는 아래 식 (2)와 같이 소자에 의한 정전용량과 케이블에 의한 정전용량의 합으로 계산된다.

$$SRF = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{cable} + C_{rwc})}} \quad (2)$$

위 식에서 센서 케이블의 길이가 증가하게 되면 정전용량이 증가하여 자기공진주파수는 저하되는 것을 알 수 있다.

4.3 진동 변위센서의 Impedance 및 공진주파수

진동 변위센서와 연장선에 대한 전기적 임피던스와 공진점을 정확히 파악하여야만 발진회로에 의해 발생하는 전기적 공진 현상으로 신호의 효율이 떨어지게 되는 현상을 피할 수 있게 된다. 다음 Table 4.는 임피던스 측정기를 사용하여 센서와 연장선의 임피던스 및 공진점에 대한 분석을 실시한 결과이며, Fig. 8은 측정 Chart이다.

Table 4 Resonance frequency and impedance

Resonance Frequency (kHz)	Impedance (kΩ)	Phase (deg)
1,780	9.16	1.21

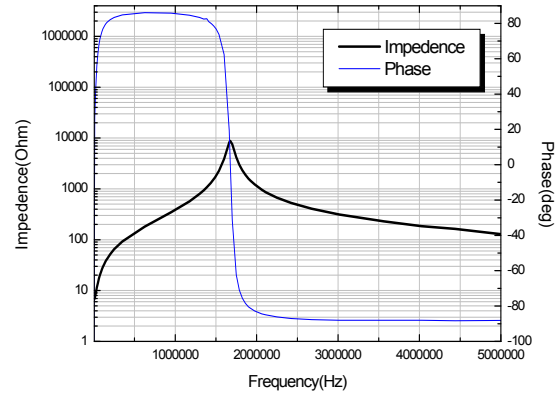


Fig. 8 Resonance frequency and impedance

4.4 진동 변위센서의 Extension cable 길이에 따른 출력 특성

변위센서의 연장선의 길이에 따라 센서의 선형성에 미치는 영향을 알아보기 위해 시제품센서에 연장선을 5.32 m에서 10 m까지 길이가 증가하도록 하면서 출력전압을 측정하였다. 실험결과는 아래 그림과 같이 5.3m 부근에서 선형성이 가장 우수하였으며, 길이가 증가할 수 선형성이 점차적으로 떨어지며 감도가 떨어지는 현상을 확인할 수 있다.

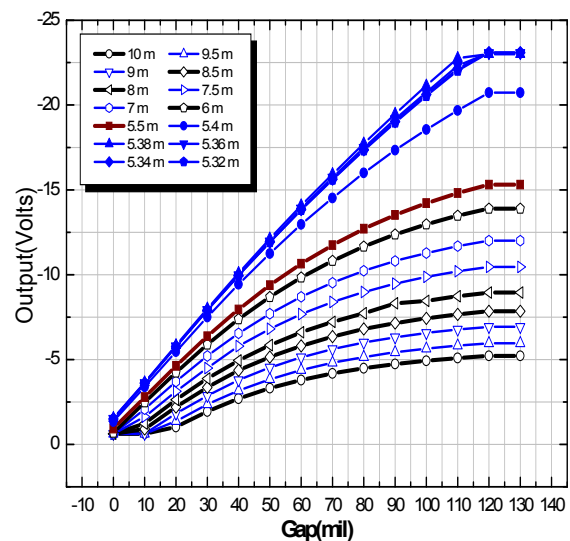


Fig. 9 Out voltage which follows for extension cable length

4.5 진동 변위센서의 온도에 따른 출력 특성

변위센서는 외부에서 사용되는 경우 계절변화에 따른 온도변화가 작용할 수 있고, 터빈베어링과 같이 상온보다 다소 높은 온도에서 사용될 경우 센서에 잡음요소가 될 수도 있다. 따라서 변위센서에 대하여 주변의 온도변화가 선형성에 미치는 영향 시험을 수행한 결과 약간의 영향은 있으나 사용에는 문제가 없는 상태였다.

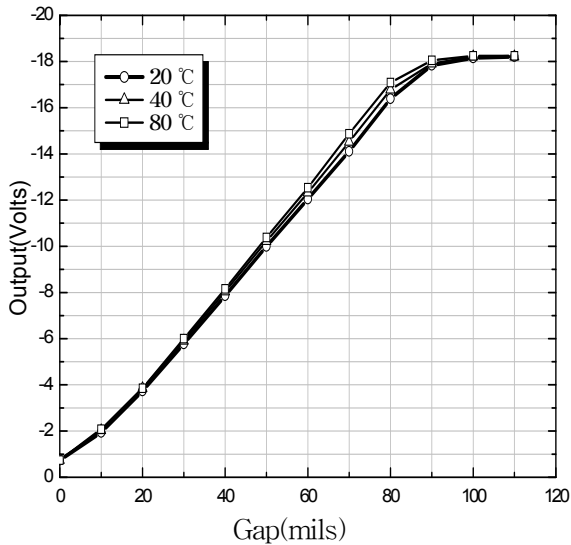


Fig. 10 The output quality which follows in change of temperature

4.6 진동 변위센서의 주파수 응답감도 특성

주파수변화에 따른 응답감도 측정시험은 펄스파를 발생할 수 있는 톱니형 회전체에 측정 변위센서를 설치하고, 회전속도를 3,000 rpm까지 증가시켜

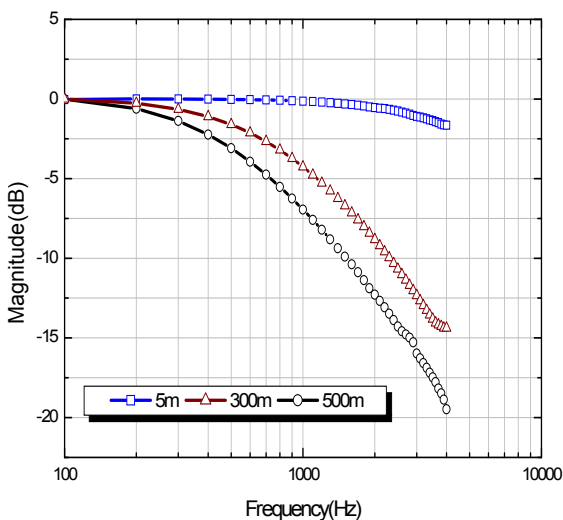


Fig. 11 Frequency response test

가면서 센서로부터 측정되는 펄스 응답을 주파수 차트를 통해 얻을 수 있었으며, 측정주파수는 4,000 Hz까지 실시하였으며, 이 실험을 통해 측정 주파수가 높거나 측정장소와 모니터링 설비간의 길이가 길어질 때 데이터 손실에 대한 보상을 고려해야 함을 알 수 있다.

4.5 진동 변위센서의 감도 특성

진동변위센서의 측정물체에서 Sensor까지의 설치 거리에 따른 전압출력을 보면 아래의 Fig.12와 같이 선형적으로 출력이 되어야 하며, 이 값을 감도로 표시하면 Voltage/mm 로 표시하게 되며, 본 논문에서 시험한 5mm sensor의 경우 7.87 V/mm가 된다.

감도 곡선에서 보는 바와 같이 Gap이 너무 적거나 커면 선형구간을 벗어나므로 중간위치의 Gap이 유지되도록 센서가 설치되어야 함을 알 수 있다.

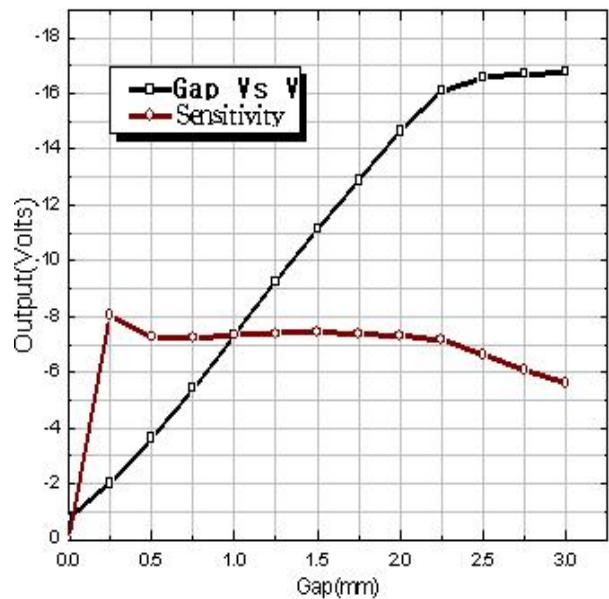


Fig. 12 Output voltage and sensitivity curve

5. 결 론

본 논문에서는 산업현장에서 기기의 상태감시에 사용되는 축진동 측정용 비접촉식 진동 변위 센서의 개발을 위한 특성시험을 실시한 결과로서 와전류식 변위센서는 피 측정물의 재질에 따라 감도가 다르므로 사용시 유의해야 하며, 비과과 검사시 사용되는 탐촉자는 고주파수 영역을 사용하여 측정물질을 투과하는 효과를 이용하나, 와전류식 변위센서는 그 보다 낮은 주파수인 1 MHz 부근의 낮은 주



파수를 사용한다. 또한 비파괴 탐측자는 센서의 공진영역을 이용하여 출력을 높이는 방법을 사용하나, 진동 변위센서는 공진 영역을 회피하여 안정된 구역을 사용한다. 또 변환기 발진부의 “L” 성분을 센서로 사용하므로 관련 임피던스의 변화에 민감하게 특성이 변한다. 즉 Sensor의 Cable 길이가 늘어나면 (Impedance 증가) 감도가 저하된다. 또 주위온도에 따른 영향은 거의 없으나, 사용되는 Sensor Coil 재질에 따른 영향은 높았으며, 진동변위센서의 주파수 응답시험 결과 측정물의 주파수가 높아지면 감도가 저하되는 현상을 실험적으로 증명한 결과 최고 측정 가능 주파수는 약 1 KHz 정도였으며, 현장 설치시에는 센서의 Gap은 선형구간에서 사용해야 측정구간의 정밀도를 유지할 수 있는 것을 알 수 있었다.

- 정 방법 - 제1부 : 기본개념”, KS B ISO 16063 - 1
10. 기술표준원장, 2003, “진동 및 충격 변환기의 교정 방법 - 제11부 : 레이저 간섭 측정법에 의한 주 진동의 교정”, KS B ISO 16063 - 11
  11. 기술표준원장, 2004, “진동 및 충격 변환기의 보정 방법 - 제12부 : 상반 방법에 의한 주 진동의 보정”, KS B ISO 16063 - 12
  12. 기술표준원장, 2003, “진동 및 충격 변환기의 교정 방법 - 제13부 : 레이저 간섭 측정법에 의한 주 충격의 교정”, KS B ISO 16063 - 13
  13. 안연식, 길두송, 박상기, 2010, 한국동력기계공학회지 “가스터빈 로터 재질에 따른 표면결함 와전류 특성연구”, v.14, no 4, pp. 63-67

### 참고문헌

1. 이병준, 1999, “현장 기술자를 위한 회전기계 진동 및 정비 핸드북 (I)”, 한국전력공사
2. 이병준, 1999, “현장 기술자를 위한 회전기계 진동 및 정비 핸드북 (III)”, 한국전력공사
3. Jon Wilson, 1999, “A Practical Approach to Vibration Detection and Measurement,” Sensors
4. R. Sill. “Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers,” Endevco, TP 299.
5. 구조조정처 경영평가팀, 2007, “2007년도 12월 전력통계속보 (제350호)”, 한국전력공사
6. Steven D. Roach, 1990, “Designing and Building an Eddy Current Position Sensor,” Hewlett-Packard, Electronic Measurements Division
7. Scott D, Welsby and Tim Hitz, Nov, 1997, “True Position Measurement with Eddy Current Technology,” Sensors, Vol. 14, No. 11:30-40
8. J. H. Smith and C. V. Dodd. 1-5 Oct 1973, “Optimization of eddy-current Measurements of coil-to-conductor spacing,” Proc Annual Fall Conference of the American Society for Nondestructive Testing, Chicago, IL:1-15
9. 기술표준원장, 2003, “진동 및 충격 변환기의 교