

송전선로 애자의 비파괴 검사를 위한 능동형 진동 측정센서

論 文

57P-4-14

Active Vibration Measuring Sensor for Nondestructive Test of Electric Power Transmission Line Insulators

李在慶[†]·朴俊永^{*}·趙炳學^{**}

(Jae-Kyung Lee · Joon-Young Park · Byung-Hak Cho)

Abstract - A new active vibration measurement system in electric power transmission line is presented, using in the nondestructive test. With a permanent magnet and a couple of coils, the system exerts impact force to a test object and in turn picks up the vibration of the object. The natural frequency with the amplitude obtained from the system are used as a basis for the detection of defects in the object. The system is controlled by an electronic device designed to facilitate the fully automated testing process with consistent repeatability and reliability which are essential to the nondestructive test. The system is expected to be applied to the wide area of defect detection including the classification of mechanical parts in production and inspection processes.

Key Words : Active Vibration Measuring System, Nondestructive Test, Crack Detection, Natural Frequency.

1. 서 론

송전선로에 사용되는 애자는 송전선을 기계적으로 지지하는 동시에 전기적으로 절연을 유지시키는 역할을 한다. 애자는 장시간의 사용기간 동안 고전압과 기계적인 스트레스 외에도 열에 의한 팽창·수축과 바람에 의한 진동 등의 각종 환경스트레스에 노출되어 열화가 진행되기 때문에 정기적인 점검이 필수적이다. 특히 애자에 가해지는 이러한 스트레스는 기계적으로는 크랙(Crack)의 형태로 나타나는데, 크랙은 애자가 기본적으로 가져야할 절연기능을 파괴시킬 뿐만 아니라 전선을 지지하는 애자의 기계적인 기능에도 심각한 문제를 유발한다. 이러한 크랙을 검출하는 기법으로는 전통적으로 초음파를 이용한 비파괴 검사가 산업 일반에 광범위하게 응용되어 왔다. 그러나 초음파 비파괴 검사는 검사를 수행할 때 시험 대상물체의 표면 대부분을 스캔하여야 하므로[1] 많은 시간을 필요로 하여, 시험해야 할 대상이 많을 경우 비효율적이다. 이에 대한 대안으로서 레이저 도플러 진동측정 센서를 이용한 비파괴 검사가 시도되었으나[2], 외부에서 강한 음파를 발생하여 애자에 진동을 유발하는 가진장치를 설치하여야 하고, 진동을 원격지에서 측정하므로 감도가 매우 미약한 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 송전선로 애자의 비파괴 검사와 관련된 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개발한 새로운 형태의 능동형 진동측정 센서의 이론적 배경과 실험결과를 다룬다. 능

동형 진동측정 방식은 레이저 도플러 방식과 동일하게 애자의 고유진동수를 분석함으로써 애자의 크랙을 검출한다. 그러나 능동형 진동측정 방식은 레이저 도플러 방식과 비교하여 간결한 구조를 가지고 있어 소형·경량으로 제작이 가능한 장점을 가지고 있다. 능동형 진동측정 센서는 센서 자체가 시험 대상물체에 가진을 위한 충격을 가함과 동시에 가진에 의해 발생하는 물체의 진동을 측정한다. 따라서 시험 대상물체의 가진을 위한 별도의 해머가 필요하지 않으므로, 진동측정 장치의 크기와 무게가 제한되는 시스템의 구성에 매우 적합하다. 능동형 진동측정 센서는 마이크로컴퓨터에 의하여 제어되어 일련의 진동 신호의 측정과 분석 과정을 자동으로 신속하게 처리한다. 능동형 진동측정 시스템은 초고압 송전선로의 활선 애자편을 주행하면서 애자의 결함을 검출하는 소형로봇에 탑재하기 용이한 구조로 설계 및 제작되었으나, 다른 용도로는 일반산업에서 대량으로 생산되는 부품의 크랙을 신속하게 검출하는 공정에는 물론 수박, 참외 등 청과물의 완숙도를 자동으로 판정하는 등의 목적으로 다양하게 응용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 능동형 진동 측정시스템 구성

2.1 능동형 진동측정 센서

그림 1은 능동형 진동측정 센서의 단면을 보이고 있다. 능동형 진동측정 센서는 영구자석과 두개의 코일 및 고무재질의 멤브레인(Membrane) 스프링으로 구성된다. 능동형 진동측정 센서의 동작은 시험대상 물체에 충격을 가하여 진동을 유발하는 가진모드와 그 충격으로 인한 물체의 진동을 측정하는 측정모드로 구분된다. 센서 내부의 전/후부 코일은 영구자석의 외부에 배치되는데, 가진모드에서는 센서가 물체에 충격을 가할 때 필요한 큰 힘을 효과적으로 영구자석에

[†] 교신저자, 正會員 : 韓電電力研究員 戰略技術研究所 一般研究員
E-mail: jklee78@gmail.com

^{*} 正會員 : 韓電電力研究員 戰略技術研究所 先任研究員·工博

^{**} 正會員 : 韓電電力研究員 戰略技術研究所 責任研究員·工博
接受日字 : 2008年 7月 23日

最終完了 : 2008年 9月 30日

전달하고, 측정모드에서는 진동을 측정할 때 미세한 진동에도 코일에 큰 전압이 유기되도록 배치된다. 그림 2는 센서의 모습을 보이고 있다.

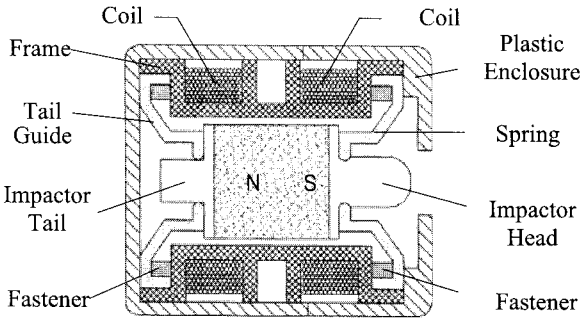


그림 1 능동형 진동측정센서의 개략도(직경 19mm, 길이 21.4mm)
Fig. 1 Schematic of active vibrometer (diameter 19 mm, length 21.4 mm)

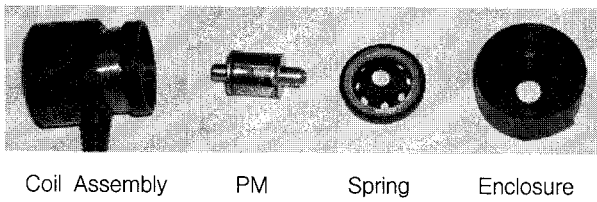


그림 2 능동형 진동측정센서의 구성도
Fig. 2 View of active vibrometer

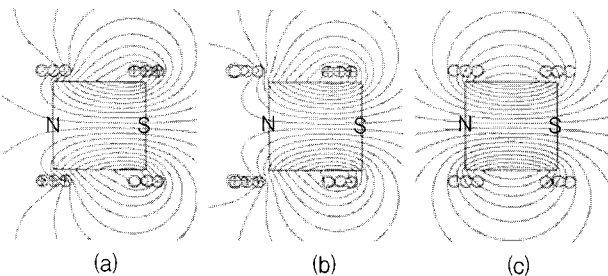


그림 3 능동형 진동측정센서의 마그네틱 플럭스 흐름도
(a) 충돌체가 가진모드의 출발점에 있을때 (b) 충돌체가 가진모드에 있을때 (c) 측정모드에서 정지하고 있을때
Fig. 3 Magnetic flux lines around vibrometer.
(a) Start point in impacting mode. (b) Impact point in impacting mode. (c) Stationary point in sensing mode (coil unenergized)

그림 3은 능동형 진동측정 센서의 두 작동 모드에서 자기장의 분포를 나타내고 있다. 자기장의 분포도는 자장 분포 해석 프로그램 패키지[3]를 이용하여 계산하였다. 가진모드에서는 코일이 충돌체(Impactor)의 영구자석을 구동하도록 두 코일에 전압을 인가하여 전류가 흐르게 한다. 코일에 흐르는 전류는 코일 주위에 자기장을 형성하며, 이 자기장은 영구자석의 자기장과 작용하여 영구자석에 힘을 인가함으로써 영구자석의 위치를 이동시킨다. 멤브레인 스프링은 충돌체(Impactor)가 애자에 충돌하여 힘을 전달한 이후 충돌체를 신속히 원점으로 복귀시키는 기능을 갖는다. 충돌체가

애자에 진동을 유발시키고 원점으로 복귀한 이후 애자의 진동을 측정하는 측정모드가 시작된다. 측정모드에서는 진동 측정 센서가 애자의 표면에 기계적으로 결합되기 때문에 물체의 진동이 센서의 프레임으로 전달된다. 이때 멤브레인 스프링에 의해 센서 프레임과 연결된 충돌체는 관성 때문에 프레임의 진동에 미소하게 감응하게 된다. 따라서 패러데이의 전자기유도 법칙에 의하여 애자의 진동이 센서의 프레임에 설치되어 있는 코일로 전달되어 충돌체의 영구자석과 코일 사이의 상대속도에 비례하는 전압이 코일에 유기되며, 이 유기전압을 측정하여 애자의 진동특성을 분석하면 크랙이 있는 불량애자를 쉽게 검출할 수 있게 된다.

2.2 제어시스템

그림 4는 능동형 진동측정 센서를 제어하고 수집된 진동 신호를 분석하기 위한 제어장치를 보이고 있다.

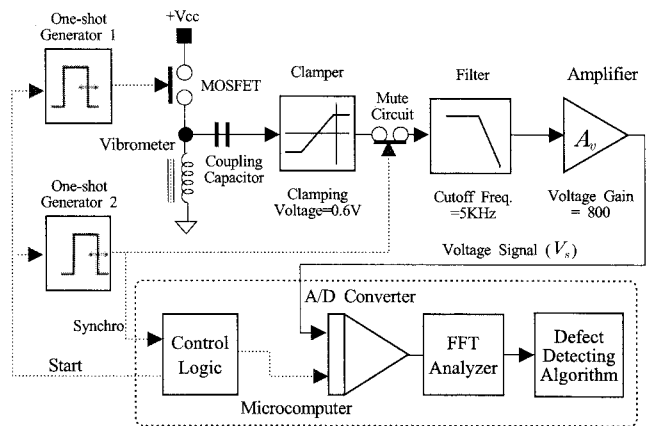


그림 4 능동형 진동측정센서의 전자제어부
Fig. 4 Electronics for active vibrometer

가진모드에서 One-shot Generator 1은 마이크로컴퓨터로부터 Start 신호를 받으면 설정된 시간동안 MOSFET 스위치를 켜다. MOSFET스위치는 능동형 진동측정센서(Vibrometer)와 연결되어, 그림 1의 코일 1과 2에 전류가 흐르게 하여 자기장을 형성하고, 영구자석으로 이루어진 충돌체에 힘을 인가하여 애자표면에 충돌시킨다. 만일 충돌체가 애자에 충격을 가하고 튕겨져 나올 때 MOSFET가 계속 켜져 있으면 충돌체가 다시 애자에 충돌하는 채터링 현상이 발생할 수 있으므로, 이를 방지하기 위해 One-shot Generator 1이 생성하는 신호의 폭이 조절된다. 충돌 직후에는 충돌체의 과도한 움직임으로 인해 발생하는 과도신호의 크기가 애자의 진동신호의 크기보다 크게 나타나므로, 측정모드는 과도신호의 크기가 충분히 감쇠된 이후에 시작된다. 과도신호는 Clamper에 의하여 신호의 크기가 제한되고 One-shot Generator 2에 의하여 구동되는 Mute Circuit에 의하여 차단된다. Mute Circuit를 통과한 신호는 고주파 성분의 노이즈를 제거하기 위하여 5 KHz의 주파수 폭을 가진 저역통과필터를 통과한다. 그 후 마이크로컴퓨터의 ADC(Analog Digital Converter) 입력에 신호의 크기를 맞추기 위하여 약 800배 정도 증폭된다. ADC는 0.1 msec 마

다 진동신호를 측정하며, FFT(Fast Fourier Transform) 해석기는 1024 포인트 주파수 영역 변환을 수행하여 주파수 대역별로 신호의 크기를 계산한다. 불량예자를 검출하는 알고리즘은 주파수 영역의 신호를 사용하여 측정대상 예자의 고유진동수를 정상 예자의 고유진동수와 비교함으로써 불량예자를 찾아낸다.

3. 능동형 진동 측정시스템의 해석

3.1 동역학 모델

능동형 진동측정 시스템에서는 검사가 수행되는 동안 진동측정 센서가 클립에 의해 예자의 표면에 고정되므로 예자-진동센서 시스템은 그림 5와 같이 2개의 질량-스프링-댐퍼 시스템이 직렬로 연결된 진동계로 간략화하여 표현될 수 있다.

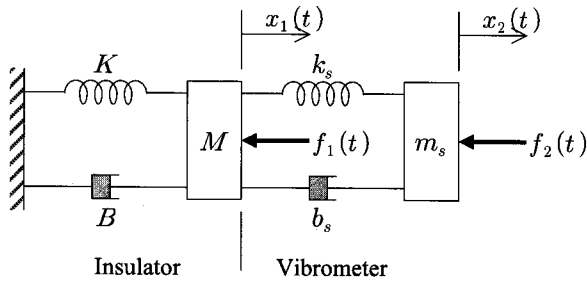


그림 5 능동형 진동센서 시스템의 모델링
Fig. 5 Model of insulator-vibrometer system

예자와 센서를 각각 2차 시스템으로 가정한 이유는, 예자는 크랙이 없는 경우 1개의 공진주파수만을 가지며 센서는 그림 5에서 보는 바와 같이 구조적으로 2차 시스템의 형태를 가지고 있기 때문이다. 그림 5에서 M과 ms, K와 ks, B와 bs는 각각 예자와 진동측정센서의 질량과 스프링 상수 및 감쇠 계수를 나타낸다. 그림 5의 예자-진동센서 시스템은 예자 측 진동계(振動界)와 진동센서 측 진동계(振動界)로 분리하여 각각의 질량요소에 대해 힘 평형 방정식을 유도하여 모델을 얻을 수 있다. 먼저, 진동센서 측 진동계의 힘 평형 방정식은 다음과 같다.

$$m_s \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_s \frac{d(x_2 - x_1)}{dt} + k_s(x_2 - x_1) = -f_2 \quad (1)$$

여기서, f2는 가진모드에서 전류가 흐르는 코일과 영구자석의 작용에 의해 충돌체에 전달되는 힘이다. 또한, 예자측 진동계의 힘-평형 방정식은 (2)와 같이 표현된다.

$$M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + B \frac{dx_1}{dt} + Kx_1 + b_s \frac{d(x_1 - x_2)}{dt} + k_s(x_1 - x_2) = -f_1 \quad (2)$$

여기서, f1은 충돌체가 예자와 충돌할 때의 임펄스 형태의 힘이다. 상기 (1)과 (2)를 조합하면 (3)과 같은 예자-진동센서로 구성된 전체 진동계의 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \dot{x}_2 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K+k_s}{M} & -\frac{B+b_s}{M} & \frac{k_s}{M} & \frac{b_s}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{m_s} & \frac{b_s}{m_s} & -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{b_s}{m_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} f_1 \\ 0 \\ \frac{1}{m_s} f_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 가진모드의 해석

능동형 진동센서는 가진모드에서 코일에 흐르는 전류에 의하여 영구자석을 움직여 시험 대상에 충격을 가한다. 영구자석에 인가되는 힘(F)은 코일에 발생하는 자속밀도(B)와 영구자석의 마그네틱 다이폴 모멘트(m)에 의하여 (4)와 같이 표현된다[4].

$$F = \nabla (m \cdot B) \quad (4)$$

그림 6은 능동형 진동센서에 사용된 자석-코일 시스템을 나타낸다.

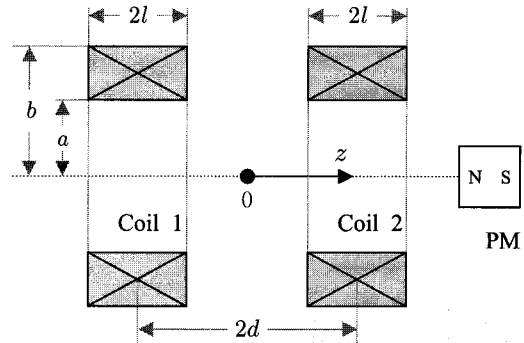


그림 6 동일한 축 위의 충돌체와 두개의 코일
Fig. 6 Two coils and a PM having common axis

자석-코일 시스템에서 영구자석의 마그네틱 다이폴은 코일의 z축 방향으로 나열되어 있고, 코일에 흐르는 전류에 의하여 생성되는 자기장 역시 z축에 대해 대칭으로 분포하므로, (4)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_z = m_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \triangleq f_2 \quad (5)$$

이때, 코일 1, 2가 서로 반대방향으로 N번 감겨져 있으므로, 전류 I에 의하여 유기되는 축방향 자기장의 자속밀도 Bz는 (6)과 같이 구해진다.

$$B_z = B_{z1} - B_{z2} \quad (6)$$

여기서, Bz1과 Bz2는 각각 코일 1과 코일 2에 의하여 생성된 자기장의 z축 방향 자속밀도를 나타내며, 다음과 같이 얻어진다[5].

$$B_{z1} = \frac{\mu_0 NI}{4l(b-a)} \left[(l+(z-d))l \frac{b + \sqrt{b^2 + (l+(z-d))^2}}{a + \sqrt{a^2 + (l+(z-d))^2}} + ((l-(z-d))l \frac{b + \sqrt{b^2 + (l-(z-d))^2}}{a + \sqrt{a^2 + (l-(z-d))^2}} \right] \quad (7)$$

$$B_{z2} = \frac{\mu_0 NI}{4l(b-a)} \left[(l+(z+d))l \frac{b + \sqrt{b^2 + (l+(z+d))^2}}{a + \sqrt{a^2 + (l+(z+d))^2}} + ((l-(z+d))l \frac{b + \sqrt{b^2 + (l-(z+d))^2}}{a + \sqrt{a^2 + (l-(z+d))^2}} \right] \quad (8)$$

여기서, μ0는 진공에서의 투자율을 나타내며, 진동센서 코일의 내경 a는 5.5 mm이고, 외경 b는 7.9 mm이다. 길이 l은 2 mm이고, 두 코일간의 거리 d는 4 mm이며, 각 코일의 턴수 N은 115회 이다. 또한, 진동측정 센서의 충돌체는 실린더 형태의 직경 8 mm, 길이 8 mm의 네오디움 자석을 이용하였고, 네오디움 영구자석의 Coercive 힘은 약 870 kA/m

이다. 그림 7은 코일에 1A의 전류가 흐를 때, 식(5)-(8)을 이용하여 계산된 힘과 실험을 통해 측정된 힘을 함께 비교하여 보이고 있다. 센서 코일의 저항 R 은 2.36 Ω 이고, 인덕턴스 L 은 0.194 mH 이다.

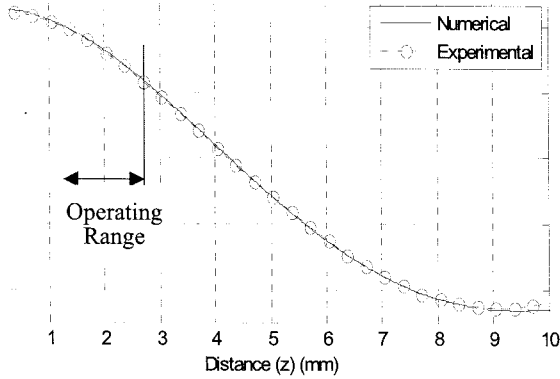


그림 7 충돌체의 이동 거리에 따른 충돌체의 힘
Fig. 7 Distance vs Force of PM impactor

가진모드에서 충돌체의 최대이동거리는 약 1.5 mm 이며, 이 범위에서 충돌체가 이동하는 동안 센서의 코일이 힘을 충돌체에 전달해야 한다.

3.3 측정모드의 해석

측정모드에서는 시험 대상물체에서 발생하는 진동에 의해 진동측정 센서에 유기되는 기전력을 측정한다. 영구자석을 하나의 다이폴 모멘트로 간주하면 z축 방향으로 존재하는 다이폴 모멘트에 의하여 코일에 유기되는 전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_z = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\partial\Phi_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \quad (9)$$

여기서, Φ 는 영구자석의 자속을 나타낸다. 그림 6에서 영구자석의 다이폴 모멘트에 의하여 생성된 자속과, 코일 1과 코일2에 의하여 생성된 자속은 z축상에서 쇄교하게 된다. 이때, 코일 1과 코일 2는 동일한 코일이 서로 반대방향으로 감겨져 있으므로 원점을 기준으로 z축상의 한 부분에서 코일 1과 코일 2에 의하여 생성되는 z 축방향 자속은 다음과 같이 얻어진다.

$$\Phi_z = \Phi_{z1} - \Phi_{z2} \quad (10)$$

Φ_{z1} 과 Φ_{z2} 는 영구자석의 다이폴 모멘트에 의해 생성된 자속을 코일 1과 코일 2가 쇄교하는 z축 성분을 나타내며, 다음과 같이 구해진다[5].

$$\Phi_{z1} = \frac{\mu_0 N \mu_z}{4l(b-a)} \left[(l+(z-d))l \frac{b+\sqrt{b^2+(l+(z-d))^2}}{a+\sqrt{a^2+(l+(z-d))^2}} + ((l-(z-d))l \frac{b+\sqrt{b^2+(l-(z-d))^2}}{a+\sqrt{a^2+(l-(z-d))^2}}) \right] \quad (11)$$

$$\Phi_{z2} = \frac{\mu_0 N \mu_z}{4l(b-a)} \left[(l+(z+d))l \frac{b+\sqrt{b^2+(l+(z+d))^2}}{a+\sqrt{a^2+(l+(z+d))^2}} + ((l-(z+d))l \frac{b+\sqrt{b^2+(l-(z+d))^2}}{a+\sqrt{a^2+(l-(z+d))^2}}) \right] \quad (12)$$

그림 8은 두 개의 코일이 쇄교하는 자속밀도의 z축 방향 분포를 나타낸다.

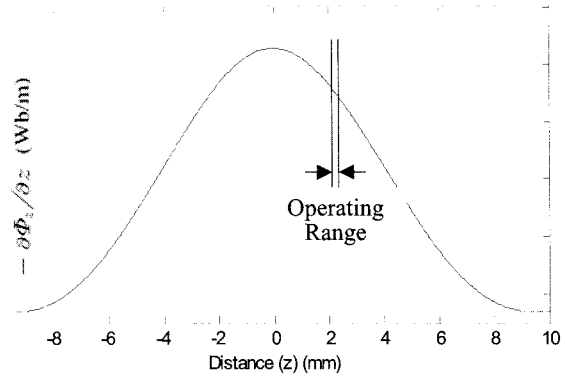


그림 8 z축 방향 $-\partial\Phi_z/\partial z$ 의 분포도
Fig. 8 Distribution of $-\partial\Phi_z/\partial z$ along z-axis

식 (9)에서 보인 바와 같이 진동측정 센서에 유기되는 전압은 코일이 쇄교하는 자속의 밀도와 코일과 영구자석 사이의 상대 속도에 비례한다. 또한, 영구자석의 이동거리는 원점으로부터 수 마이크로미터 정도이므로, 진동측정 센서의 이득은 z축 원점에서의 쇄교자속 밀도인 $-\partial\Phi/\partial z|_{z=0} = 0.6554$ 로 정의할 수 있다. 코일에 유기되는 전압은 미약하므로 ADC의 입력($\pm 5V$)에 적합하도록 800배 정도 증폭된다. 진동측정 센서의 증폭단 최종 출력은 (13)과 같이 표현되는 데, $v_z(t)$ 는 코일에 대한 영구자석의 z축 방향 상대속도이므로, 센서에는 애자의 진동속도가 검출되는 것을 알 수 있다.

$$V_s = 800 \cdot 0.6554, v_z(t) = 524.32 v_z(t) \text{ V/m/sec} \quad (13)$$

3.4 동력학 모델을 이용한 시뮬레이션

본 절에서는 일련의 실험을 통하여 애자-센서 진동계 (3)의 각종 파라미터들을 추정하고, 추정된 파라미터들을 이용하여 진동측정 센서와 애자의 거동을 시뮬레이션한 결과를 기술한다. 파라미터 들은 애자 진동계와 센서 진동계로 나누어서 실험을 통해 얻은 임펄스 응답 정보를 기반으로 시스템 추정기법을 적용하여 얻을 수 있다. 센서 진동계의 경우, 충돌체의 질량 $m=4.45 \times 10^{-3}$ Kg과 그림 9에 보인 영구자석의 진동 신호로부터 얻은 센서의 고유진동수 234.3Hz 및 감쇠곡선 e^{-320t} 로부터 진동센서의 스프링 상수와 감쇠 계수를 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$k_s = 1.01 \times 10^4 \text{ N/m}, b_s = 2.848 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (14)$$

그림 10은 25,000 파운드의 인장 규격을 갖는 초고압 현수애자를 대상으로 얻은 정상 애자의 임펄스 응답을 보이고 있다. 애자의 임펄스 응답을 얻는 과정에서 애자의 진동을 정밀하게 측정하기 위하여 능동형 진동측정 센서의 가진모드를 사용하지 않고 별도의 해머를 이용하여 애자에 충격을 가하였다. 애자의 질량 5.3Kg과 고유진동수 2.158Hz 및 감쇠곡선 e^{-56t} 로부터 애자의 스프링 상수와 댐핑 계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$K = 9.74 \times 10^8 \text{ (N/m)}, B = 593.6 \text{ (N} \cdot \text{s/m)} \quad (15)$$

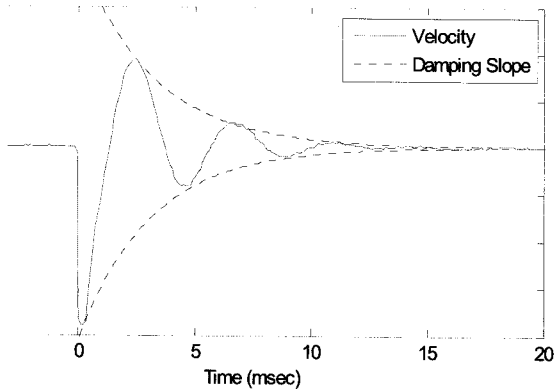


그림 9 측정모드에서 진동센서의 임펄스 응답
Fig. 9 Impulse response of vibrometer in sensing mode

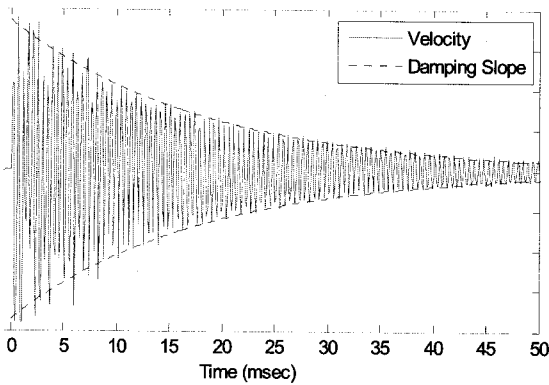


그림 10 시간에 따른 애자의 임펄스 응답
Fig. 10 Impulse response of the insulator system

그림 11과 12는 (14), (15)에서 추정된 파라미터를 (3)에 적용하여 시뮬레이션 한 결과를 보이고 있다. 시뮬레이션에서 애자-센서 진동계의 거동은 Matlab[7]을 이용하여 계산하였다. 실선은 영구자석이 이동한 거리를 시뮬레이션 한 결과이며, 점선은 능동형 진동센서의 출력을 나타낸다.

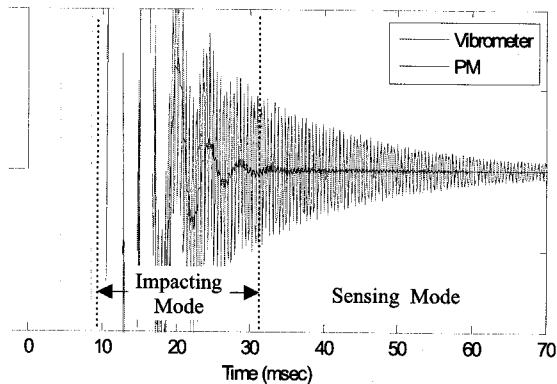


그림 11 진동측정센서와 애자의 진동시뮬레이션 결과
Fig. 11 Simulated vibration of vibrometer and insulator

그림 11과 그림 12에서 MOSFET 스위치는 시간 0 msec에 센서코일에 전류를 흐르게 하기 위하여 켜진다. 코일에 전류가 공급되기 시작하면 충돌체는 (5)에 의하여 코일로부터 힘을 얻게 되고 이로 인해 애자 쪽으로 움직이게 된다 (그림 12(c) 참조). 만약 충돌체가 애자와 충돌한 이후에도

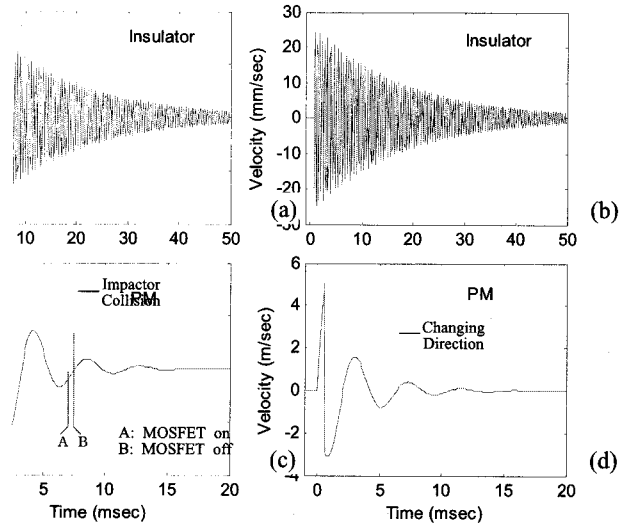


그림 12 애자와 충돌체의 시간에 따른 속도 및 변위
Fig. 12 Displacement and velocity of insulator and PM

계속 MOSFET 스위치가 켜져 있는 상태라면 충돌체는 다시 코일에 의하여 힘을 받게 되어 애자와 충돌하게 될 것이므로, 코일에 흐르는 전류는 충돌체가 애자와 충돌하기 이전에 차단된다. 이와 같이 가진모드에서 코일이 충돌체에 힘을 가하는 시간은 0.3~1.0 msec정도이므로, One-shot Generator 1은 이 시간동안 코일에 전류를 여자할 수 있도록 설정된다. 또한 One-shot Generator 1의 펄스폭을 길게 한다는 것은 충돌체를 오랫동안 가속시키는 것이므로, 이는 시험 대상물체에 더 강한 힘을 인가하는 것을 의미한다. 충돌체는 애자와 접촉한 후에는 속도의 방향이 반전되는데(그림 12(d), 이것은 $dx_2(t)/dt$ 가 $-c dx_2(t)/dt$ 로 바뀐다는 것을 의미하며 c 는 약 0.55로서 충돌체와 애자 사이의 반발계수(restitution coefficient)이다. 영구자석은 가진모드 동안 잠시 과도기에 있기 때문에 영구자석의 진동은 애자의 진동과 비교하여 신호의 크기가 매우 강하다. 그러나 영구자석의 진동은 충돌 이후 빠른 속도로 감소하여 약 20 msec 후에는 애자의 진동에 비해 무시할 정도로 작아진다. 이것은 (14)와 (15)에서 보는 바와 같이 영구자석의 진동 댐핑 계수가 애자의 진동 댐핑 계수보다 크기 때문이다. 따라서 One-shot Generator 2는 충돌 후 20~30 msec의 시간이 지나면 측정모드의 시작을 알리는 신호를 발생하여 진동신호를 증폭기로 연결시켜 주며, ADC는 이때부터 신호를 수집하기 시작한다.

4. 실험 결과 및 토의

실험을 위하여 그림 13과 같이 애자편을 따라서 움직이는 로봇에 진동측정 시스템을 장착하였다. 로봇은 자체에 내장된 클립 구동부를 이용하여 진동측정 센서를 애자의 표면에 고정시키고 검사 작업을 수행한다. 마이크로컴퓨터 기반의 로봇 제어시스템은 진동측정 센서를 제어하고 진동 신호를 수집 및 분석한다. 실험을 위한 시료로는 그림 14에 보인 서로 다른 크랙크기를 갖는 2개의 불량애자와 1개의 정상애자를 활용하였다.

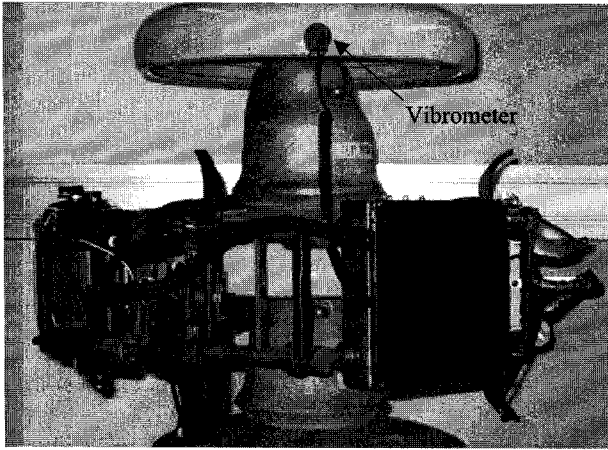
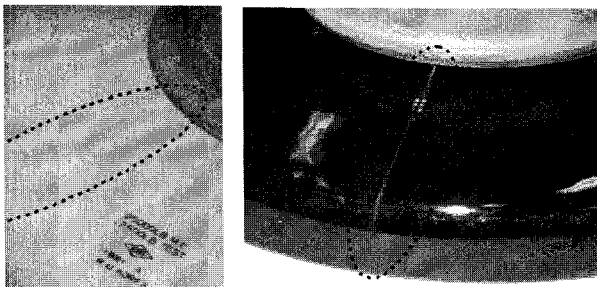


그림 13 능동형 진동센서와 현수애자점검로봇
Fig. 13 Insulator inspection robot with active vibrometer



(a) 크랙 애자 1 (b) 크랙 애자 2
그림 14 크랙이 존재하는 애자 샘플
Fig. 14 Cracked insulator samples

그림 15는 건전한 애자와 크랙이 존재하는 애자에서 능동형 진동센서를 이용하여 크랙을 검출하는 실험의 결과를 보여준다. 수행한 실험결과를 보여준다. 그림 15의 (a),(c),(e)는 크랙이 존재하는 애자와 건전한 애자의 진동신호를 시간축에서 표시한 것이고, 그림 15의 (b),(d),(f)는 진동신호를 주파수 영역에서 표시한 것이다. 그림 15(a)는 건전한 애자의 진동신호를 시간축에서 표시한 것이고, 그림 15(b)는 그림 15(a)에서 측정된 신호를 이용하여 FFT 변환을 한 결과를 도시한 것이다. 건전한 애자의 고유진동수는 약 2155Hz 부근에서 매우 큰 값으로 나타났다. 그림 15(c)는 크랙이 존재하는 애자 중 고유진동수가 2개로 분리된 형태로 나타나는 애자의 신호를 표시한 것이다. 그림 15(d)는 그림 15(c)에서 획득한 신호를 바탕으로 FFT를 수행한 결과를 보여준다. 2개의 고유진동수가 1955, 2045Hz에서 나타났으며, 그 크기 또한 건전애자보다 작았다. 그림 15(e),(f)는 크랙이 존재하는 애자의 고유진동수가 건전애자의 고유진동수보다 낮은 영역인 1475Hz에서 나타나는 것을 보여주는 시간/주파수 영역 그래프이다. 실험결과 크랙이 발생한 애자에서 측정된 고유진동수가 정상애자의 고유진동수보다 더 낮은 대역에서 발생되거나, 2개의 분리된 형태로 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 이 진동측정 센서를 이용하면 눈에 보이지 않는 매우 미세한 크랙이라도 고유진동수를 측정 및 비교함으로써 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 NGK[2]사에서 수행한 실험결과와 같이 크랙이 존재하는 애자는 정상

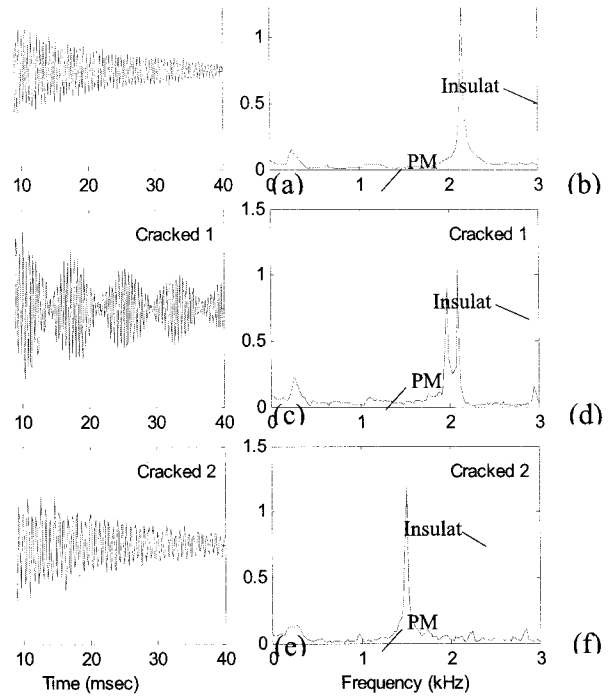


그림 15 크랙 애자의 진동 측정 실험 결과
Fig. 15 Experimental results - vibrations of sound and cracked insulators

애자에 비하여 낮은 대역에서 고유진동수가 발견되었으며, 두 개의 분리된 형태의 고유진동수가 존재함을 알 수 있었다. 전절에서 기술한 시뮬레이션 결과와 비교하여 보면, 그림 11에 보인 측정모드에서 진동측정 센서의 출력을 시뮬레이션한 것과 진동측정 센서를 이용하여 직접 측정된 애자의 진동 특성은 많은 유사성을 보여준다. 특히 감쇠율의 경우 시뮬레이션 결과와 실제 측정 결과가 거의 일치하며, 그림 11에 보인 영구자석의 움직임 또한 그림 15에서도 유사하게 나타난다. 이러한 실험결과로부터 진동측정 센서와 애자를 2차 시스템으로 가정한 것은 타당하였고, (3)의 진동-애자 시스템의 파라미터 (14)와 (15)도 적절히 구해진 것을 확인할 수 있다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 유일한 차이점은 측정모드의 시작 시간이 다르다는 것이다. 실제 측정에서는 가진모드가 시작된 후 25 msec 이후에 측정모드가 시작되도록 One-shot Generator 2를 설정하였다. 그러나 시뮬레이션에서는 가진모드가 시작된 후 22 msec 이후에 측정모드를 시작하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 이것은 그림 16에 보인 바와 같이 멤브레인 스프링이 갖는 강한 히스테리시스(Hysteresis)와 비선형적 특성 때문이다. 즉 (14)에서 얻은 스프링 상수는 수 마이크로미터 단위의 범위에서 구한 것이고, 충돌체는 가진모드에서 약 1.5 mm 이동하기 때문에 이 영역에서 스프링 상수의 평균값은 수 마이크로미터 범위에서 측정된 스프링 상수값보다 작은 3.46 N/mm이기 때문이다. 이러한 이유로, 실제 충돌체가 원래위치로 돌아오는데 걸리는 시간이 다소 길어진다.

스프링의 비선형 특성은 충돌체가 애자로 접근해감에 따라 스프링 상수를 줄여서 강한 힘을 애자에 인가하는데 도움을 준다. 또한, 원점에 근접한 범위에서는 큰 스프링 상수

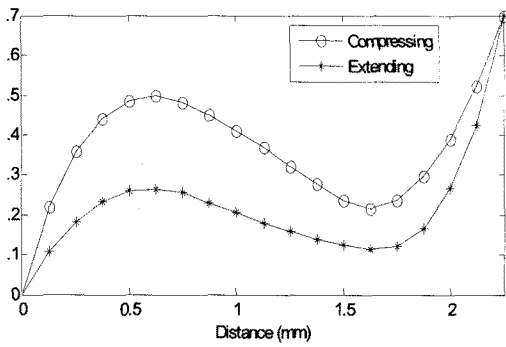


그림 16 멤브레인 스프링의 비선형 특성

Fig. 16 Nonlinear characteristic of membrane spring

를 가지게 되어 측정모드 시작 이전에 충돌체의 움직임을 빠르게 감소시키는 장점이 갖는다.

5. 결 론

본 논문에서는 송전선로 활선애자의 결함을 검출하기 위한 능동형 진동측정 센서의 개발 및 실험결과에 대하여 기술하였다. 일련의 실험결과로부터 능동형 진동측정 센서와 애자는 2차 미분방정식 형태의 질량과 스프링, 댐핑 계수를 갖는 시스템으로 모델링이 가능함을 입증하였다. 또한 실험을 통해 시스템 거동을 분석하여 스프링 상수와 댐핑 계수를 추정하였다. 측정된 애자-진동센서의 동역학 모델은 실제 시스템의 거동을 정확하게 모의하였으며, 이로써 진동측정 센서의 동작원리를 이론적으로 증명하였다. 개발된 진동측정 센서를 이용하여 시험대상 애자의 고유진동수를 측정할 결과, 불량애자의 경우 측정된 고유진동수가 분리되거나 낮아지는 현상을 이용하여 애자의 결함을 검출할 수 있었다. 따라서 결함이 존재하는 애자는 고유진동수를 측정하여 건전애자의 고유진동수와 비교함으로써 쉽게 찾을 수 있음을 입증하였다. 이 진동측정 센서는 송전선로 활선애자편을 따라 이동하는 로봇에 장착하여 사용 가능하며, 기존의 진동센서와 비교하여 작고 가벼운 동시에, 측정과 분석이 자동으로 이루어지므로 그 활용분야가 광범위한 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, 4th Edition, Springer-Verlag, 1990.
- [2] T. Kikuchi, H. Nakauchi, R. Matsuoka, and M. Akizuki, "Remote Sensing System for Faulty Suspension Insulator Units," Proc. 5th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 1997, pp. 766-769.
- [3] J. S. Beeteson, Visualizing Magnetic Fields Numerical equation solvers in action, Academic Press, Harcourt Place, 32 Jamestown Road, London NW17BY, UK, pp. 43-51.
- [4] Ronald K. Wangsness, Electromagnetic Fields 2nd Edition, Johnwiley & Sons, 1986, PP. 305-310
- [5] K. S. Jung and Y. S. Back, "Contact-Free Moving-Magnet Type of Micropositioner with Optimized Specification,"

IEEE Trans. on Magnetics, vol. 38, No. 3, May 2002, pp. 1539-1548.

[6] K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1970, pp. 225-247.

[7] MathWorks, MATLAB Online Catalogue, <http://www.mathworks.com>

저 자 소 개



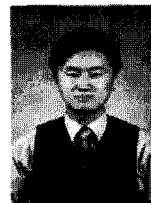
이 재 경 (李在慶)

1978년 1월 21일생. 2004년 경북대학교 전자전기공학과 졸업. 2006년 KAIST 전자전산학과 졸업(석사). 2006년~현재 한전전력연구원 재직

Tel : 042-865-7688

Fax : 042-865-7804

E-mail : jklee78@gmail.com



박 준 영 (朴竣永)

1971년 10월 29일생. 1995년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 1997년 KAIST 기계공학과 공학석사. 2004년 동대학원 공학박사. 2004년~현재 한전전력연구원 재직

Tel : 042-865-7687

Fax : 042-865-7804

E-mail : asura@kepri.re.kr



조 병 학 (趙炳學)

1956년 8월 27일생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1986년 KAIST 원자력공학과 공학석사 1996년 동대학원 공학박사. 1991년~현재 한전전력연구원 재직

Tel : 042-865-7680

E-mail : chobh@kepri.re.kr