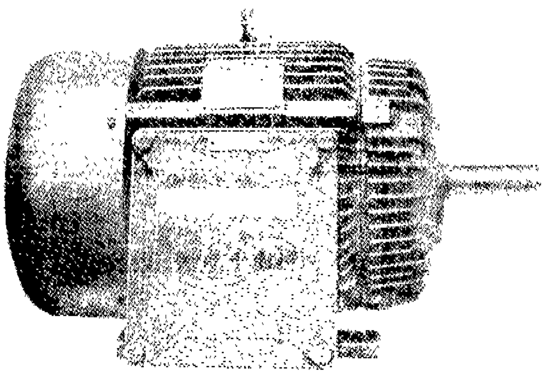
진동측정에 의한 전기기기의 진단 (上)

The Diagnosis of Electric Apparatus by Vibration Measurement



이 근 철

대한전기협회 편수위원 · 공학박사

서 론

진동 또는 소리에 의한 이상진단 기술은 오래전부터 일반적으로 사용되어 왔다.

예를 들면 의사가 인간의 신체를 진단하는 경우, 청진기를 사용하거나 손으로 가슴이나 등을 두들겨서 타진을 하는 것도 진동에 의한 진단이다.

기계에서도 테스트 해머에 의하여 체결부분의 이완을 진단하는 것이 철도차량이나 자동차의 일상점검으로 시행되고 있다.

회전기 등에서는 베어링 부분의 이상을 진단하는 데에 진동측정에 의한 기술이 이미 실용화되고 있다.

인간의 청각이나 촉각 등과 같은 감각은 대단히 작은 진동이나 소리부터 큰 진동 또는 큰 소리까지 감지할 수 있는 넓은 다이내믹 렌지(Dynamic Range)를 가지고 있으며, 의식적으로 잡음에 대하여 필터를 사용할 수가 있고 정상과 이상을 판별하는 데 우수한 성능을 가지고 있다.

이러한 감각에 의하여 진단하는 것은 유효하게 사용되어 왔으나 깊은 경험을 필요로 하는 주관적인 것이며, 동시에 잡음제거나 감도에도 한계가 있다.

이상진단 기술로서는 누구라도 판정할 수 있는 객관성이 높아야 된다는 것은 말할 여지도 없다.

기기에 발생하는 소리는 반드시 진동이 따르고 있으며 소리를 측정하는 것보다 진동을 측정하는 것이 주위에 있는 잡음의 영향을 적게 한다는 것과 전달특성이 좋다는 것, 측정범위를 크게 취할 수 있다는 것으로 보아 유리한 경우가 많다.

여기서는 가스 절연기기 등과 같은 밀폐형의 기기를 외부에서 진단하는 방법의 하나로 기기에 발생하는 진동을 측정하고 이것을 분석하는

방법에 대하여 설명하고자 한다.

1. 진동측정

가. 진동의 기초지식

여기서는 진동에 의하여 외부진단하는 데 필요한 기초적인 사항을 종합해 본다.

진동이란 「어떤 좌표계에 관한 양의 크기가 그의 평균값 또는 기준값보다도 큰 상태와 작은 상태를 서로 반복하는 변화이며 일반적으로 시간에 대한 변화이다」라고 정의할 수 있는데, 여기서는 양으로 기계적인 변위를 대상으로 한다.

진자(振子)가 왕복운동을 하는 진동으로 부터 종을 두들겼을 때의 진동, 자동차의 진동, 지진에 의한 진동 등과 같은 여러가지 상태가 있다.

진동상태를 나타내는 경우에 기준점에 대한 변위 x를 시간의 함수로 하여 $x(t)$라고 표시한다.

진동의 기본이 되는 상태는 사인파 진동이며 최대진폭을 d로 하고 그 주파수(주기의 역수)를 f라고 하면

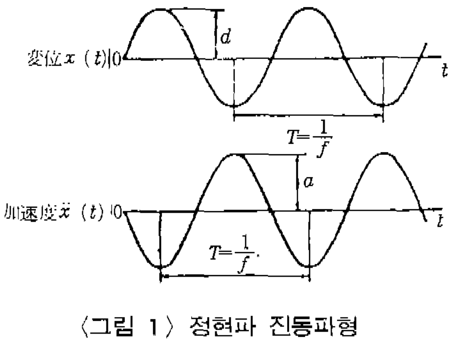
$$x(t)=d\sin(2\pi f\cdot t) \tag{1}$$

가 된다.

(1)식을 두번 미분하면 가속도 $x(t)$를 얻게 된다.

$$\ddot{x}(t)=-(2\pi f)^2\cdot d\sin(2\pi f\cdot t) \tag{2}$$

$$=-a\sin(2\pi f\cdot t) \tag{3}$$



〈그림 1〉 정현파 진동파형

가속도의 최대값 a는

$$a=(2\pi f)^2 d \tag{4}$$

이며 진폭에 대하여 주파수의 제곱에 비례해서 커진다.

가속도의 단위로는, $1\,\text{gal}=1\,\text{cm/sec}^2$ 또는 $1\,\text{G}\simeq 980\,\text{gal}$(중력 가속도)이 사용되나 중력 가속도에 의하여 교정할 수 있는 G의 단위를 사용하는 일이 많다.

주파수가 높아지면 진폭은 현저하게 적어진다

예를 들면 가속도 0.0001G, 주파수 5 kHz인 진동의 진폭은 약 1×10^{-9}cm이다.

이 때문에 진동의 크기는 가속도에 의하여 표시되는 일이 많으며 일반적인 주기진동은 많은 사인파 진동의 집합으로서 나타낼 수 있다.

이것을 푸리에 급수전개라고 하는데, 푸리에 적분의 형태에서 삼각함수를 복소수 j를 사용한 지수함수 표시 $e^{-iwt}=\cos wt-j\sin wt$를 사용하여 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$x(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} X(jw)\,e^{iwt}dw \tag{5}$$

$$X(jw)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\,e^{-iwt}dt \tag{6}$$

여기서 $w=2\pi f$이며 $X(Jw)$를 푸리에 적분이라 하고 (6)식을 푸리에 변환, (5)식을 역푸리에 변환이라고 한다.

즉, 시간영역의 정보를 주파수 영역으로 변환하는 것이 푸리에 변환이다.

푸리에 변환의 계산을 실제로 하는 경우, 측정된 파형의 디지틀 데이터를 기초로 (6)의 식을 계산하면 대단히 시간이 걸리므로 FFT (Fast Fourier Transform)라는 방법이 사용된다.

이것에 따르는 2^n개의 샘플링 시간간격 Δt의 데이터에서 최대 주파수 $F_{max}=1/2\Delta t$, 주파수 분해능 $F_{max}/2^{N-1}$의 푸리에 변환을 할 수 있다.

(5)식의 $X(Jw)$는 백터인데, 이의 절대값을 취하면 각 주파수 성분의 크기를 나타내므로 주파수를 분석하는 데 사용된다.

불규칙한 진동에서는 주파수 성분을 구하는

방법으로 파워 스펙트럼을 사용한다.

이것은 진동파형의 단위진동수폭에 대한 진동 성분의 제곱평균을 계산하는 것이며 그 적분값은 $x(t)$의 파워 평균값이 된다.

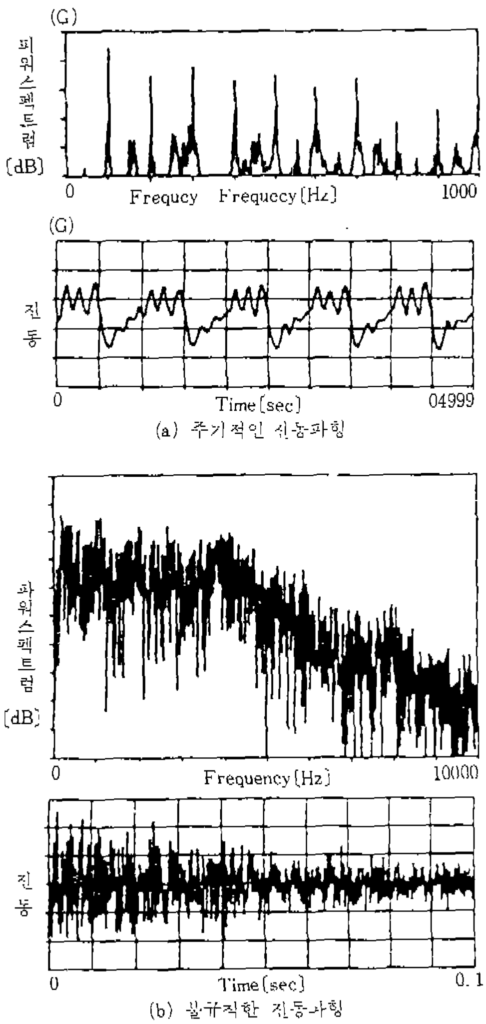
$$\overline{x^2} = \int_0^\infty W_x(w)\,dw \tag{7}$$

$$W_x(w) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{\pi T} \,|\, X(Jw) \,|^2 \tag{8}$$

즉, 이 파워 스펙트럼은 푸리에 변환된 값의 제곱값에서 구할 수 있다.

그림 2는 진동파형과 파워 스펙트럼의 예를 나타내고 있다.

(a)는 고조파진동을 포함하는 진동파형의 예이며, (b)는 불규칙한 진동의 예이다.

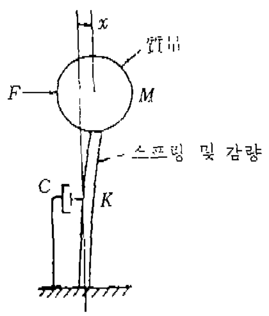


〈그림 2〉 진동파형과 파워 스펙트럼의 예

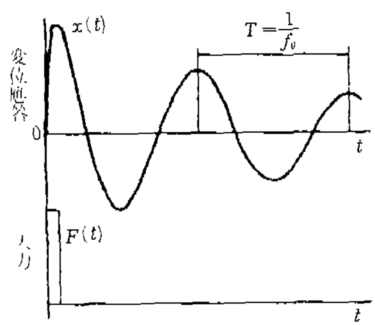
나. 기기의 진동

기기에 진동이 발생하는 것은 어떠한 외력이 기기에 작용하기 때문이며 그 외력의 파형에 의하여 진동의 특성이 결정된다.

그림 3과 같이 질량 M, 스프링 상수 K, 감쇠상수 C로 되는 진동계 (1자유도계라고 한다. 실제의 기기는 질량과 스프링 성분 및 감쇠기구가 혼합되어서 분포하는 상수계나 질량, 스프링, 감쇠를 각각 분리하여 한점에 집중시키는 집중상수계로 바꾸어서 근사시킬 수 있다)에 충격적인 입력 F를 준 경우에 이의 운동 방정식은



〈그림 3〉 자유도계의 진동 모델



〈그림 4〉 자유도계의 감쇠진동

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=F(t) \qquad (9)$$

가 되고 이것을 풀면 질점의 응답은 **그림 4**와 같은 감쇠파형이 된다.

이 파형이 진동수를 고유진동수라 하며

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}\cdot\sqrt{1-\frac{C^2K}{4M}}\simeq\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}} \qquad (10)$$

가 된다.

$C^2K/4M$의 항은 일반적으로 적고 고유진동수는 K/M의 1/2 제곱에 비례한다.

기기에 이상이 발생하여 질량이 변화하거나 (부품이 어긋나는 것 등) 스프링 상수가 변화하면(체결부분이 이완되는 것 등) 고유진동수에 변화가 생긴다.

한편 입력으로서 전자력과 같은 사인과 진동이 가해지면 **그림 5**와 같이 기기의 고유 진동수 f_0과 입력의 진동수 f_1의 비에 의하여 응답이 바뀐다.

식으로 나타내면

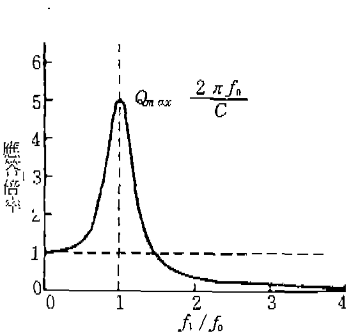
$$Q=1\Big/\sqrt{\left(1-\frac{f_1^2}{f_0^2}\right)^2+\frac{e^2}{(2\pi f_0)^2}\cdot\frac{f_1^2}{f_0^2}} \qquad (11)$$

가 된다.

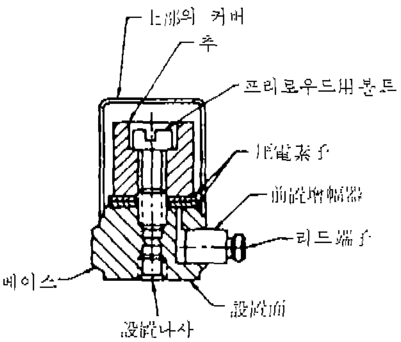
f_0과 f_1이 일치하는 근처에서 Q는 최대가 되고 C가 작은 경우에는 현저하게 커진다.

또한 $f_1 \gg f_2$에서는 $Q \ll 1$이 되고 진동이 전달되지 않는다.

많은 주파수를 함유하는 입력에 대해서는 각



〈그림 5〉 자유도계의 정현파입력에 대한 응답



〈그림 6〉 압전형 가속도형의 구조 예

각의 주파수에 대응한 응답이 생기는데 그 응답이 주파수는 입력의 주파수 성분과 일치한다.

따라서 파형의 주파수를 분석함으로써 이상한 입력이 있는가 또는 기기의 고유진동수의 변화에 의하여 응답에 변화가 생기고 있는가를 추정할 수 있다.

다. 가속도의 측정

진동을 측정하는 방법으로는 진폭, 속도, 가속도의 각각에 대하여 여러가지 측정기가 있는데, 고주파영역의 진동에서 대단히 작은 진동을 측정하는 데는 압전형의 검출기를 사용한다.

압전형 가속도의 구조는 **그림 6**과 같이 질량과 스프링으로 되는 1질점계이며 질량 M과 가속도 a의 곱으로서 작용하는 힘 F를 압전소자(스프링을 겸한다)로 검출한다.

따라서 가속도계 자체에 고유진동수가 있으며 감도를 높여 가면 고유진동수가 내려가고 측정되는 주파수 범위가 낮아진다.

최근에는 전지증폭기(Preamplifier)를 내장한 고감도, 저 노이즈(Low Noise)의 검출기를 쉽게 구할 수 있다.

또한 가속도계의 노이즈보다도 증폭기의 노이즈에 의하여 측정되는 가속도의 한계가 결정되므로 증폭기에 대해서도 저 노이즈로 된 것을 선정할 필요가 있다.

〈다음호에 계속〉