

완충포장의 기초이론(6)

이명훈/한국포장시스템연구소 소장

목 차

5-3. 자유진동	5-6. 자유진동 시험장비
5-4. Fourier 분석	1. 테이프 녹음식 자유진동
5-5. The Power density Spectrum	2. 수동제어 아날로그 시스템에 의한 자유진동
	3. 자동디지털 제어

5-3. 자유진동

실제로 유통중 제품과 포장에 가해지는 진동력(Vibrational forces)은 단일주파수나 싸인파 진동만 일어나지 않는다. 예를 들어 트럭 바닥의 진동은 [그림 5.6]에서처럼 제멋대로의 진동 상태를 보여준다. 이러한 자유진동은 서로 다른 주파수와 진폭을 가진 싸인파 진동이 혼합된 형태라고 볼 수 있다. 어느 한 시점을 놓고 볼 때 제품은 여러 개의 싸인파 진폭에 의해 영향을 받게 되는데 단일 주파수에 의해 계속적으로 영향을 받는 상태와는 확연하게 다른 결과를 나타 내게 된다. 따라서 단일 주파수에 의한 포장제품의 시험으로는 파손 가능성을 예측하는데 충분치 못하다.

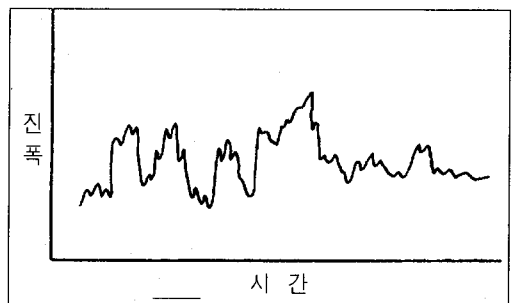
A와 B라는 주요인자를 가진 한 제품을 놓고 볼 때 A는 4Hz, B는 15Hz의 자연 주파수를 가지고 있다고 하자. [그림 5.7]은 4Hz나 15Hz에서 이제품의 싸인 주파수 반응을

나타낸 것이다. A, B 가 서로 멀리 떨어져 있을때는 하나가 진동을 해도 다른 인자에게는 영향을 주지 못한다하지만 [그림 5.8]처럼 가까이 있으면서도 각각 4Hz와 15Hz로 동시에 진동한다면 서로 부딪쳐서 파손을 일으킬 수 있다. 이러한 상태의 파손은 앞서 언급한 단순 주파수 진동 시험에 의해서는 원인 규명을 할 수 없다. 따라서 대부분의 포장제품은 자유진동시험에 의해 파손 가능성을 예측하여야 할 것이다.

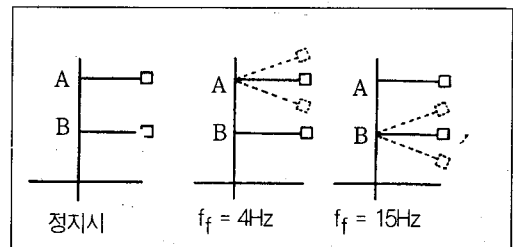
5-4. Fourier 분석

[그림 5.9]의 싸인파 진동을 놓고 볼 때, 앞서 언급한 대로 주파수는 1초당 측정된 주기의 역수로 표

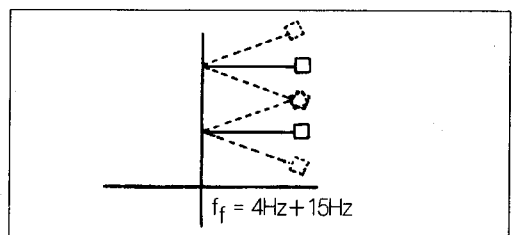
[그림 5.6] 트럭 바닥면의 자유진동



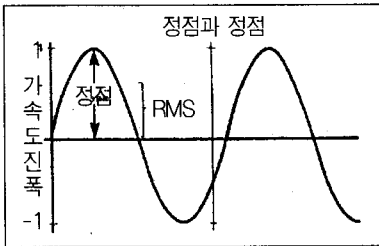
[그림 5.7] 단일 주파수에 대한 반응



[그림 5.8] 복합 주파수에 대한 반응



(그림5.9)싸인파 진동



시할 수 있다. 가속도를 나타내는 데에는 다음의 3가지 방법이 있다.

△정점 가속 진폭(Peak Acceleration Amplitude) = 1g

△정점과 정점간 가속진폭(Peak to peak Acceleration Amplitude)=2g

△RMS 가속진폭(Root Mean Square Acceleration Amplitude) = $\frac{1}{\sqrt{2}} \times$ 정점진폭
 = 0.707 × 정점진폭
 = 0.707 g

RMS 는 진동 에너지를 나타낸다.

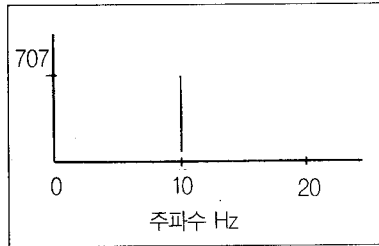
진동을 나타내는 또다른 방법은 (그림 5.10)과 같이 대표 주파수 영역 (the frequency domain representative)으로 표현하는 것으로 진동 주파수에 대한 RMS 진폭을 좌표상으로 나타내는 방법이다.

Baron Fourier 는 100년전에 이미 어떤 복잡한 파형은 (그림 5.11)과 같이 싸인파에 적당한 주파수와 진폭을 더함으로써 발생된다고 설파한 적이 있다.

(그림 5.11)은 시간과 주파수 각각에 대한 여러가지 합의를 예시하고 있다. 이것은 반대로 복잡한 파형을 단순 싸인파로 나누어 분석해 볼 수도 있다는 것을 암시한다.

이 과정을 그림 [5.12]에 나타내었

(그림5.10)진동에 대한 대표 주파수 영역



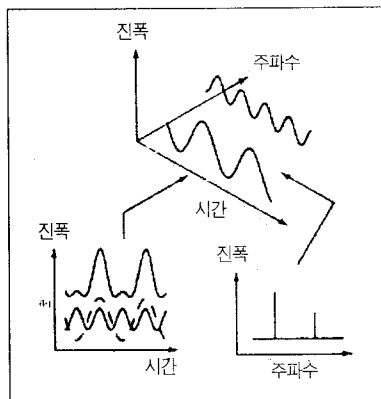
는데 일반적으로 Fourier 분석이라고 불린다.

Fourier 분석 방법에는 여러가지가 있는데 이중 Band Pass Filter (BPF) 를 이용하는 것이 가장 단순 명료한 방법이다. BPF 란 여러가지가 복합된 파형을 분해하여 싸인파로 바꾸어주는 전자장비로서 Fourier 변형과 관련된다.

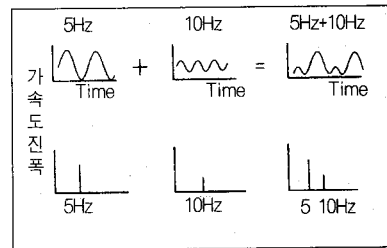
(그림 5.13)에서 보듯이 매우 작은 주파수 범위만을 통과시키고 그외의 주파수는 막는 것이 BPF의 특성이다. BPF의 밴드폭은 필터를 통과하는 가장 높은 주파수와 낮은 주파수의 차이를 한다. 예를 들어, (그림 5.13)에서 첫번째 BPF는 최고 및 최저 주파수가 각각 5.5 Hz 와 4.5 Hz 이며 밴드폭은 1Hz가 된다.

만약 광범위한 주파수대(예를 들

(그림5.12)Fourier 분석



(그림5.11)싸인파의 첨가

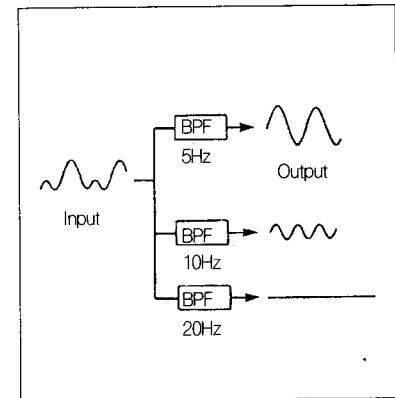


어 트럭진동 측정을 위한 200 Hz 정도)를 커버하기에 충분한 BPF를 사용한다면 외관상 아무리 복잡한 파형도 주파수 및 진폭을 알고 있는 싸인파들로 바꿀 수 있을 것이다.

5-5. The Power Density Spectrum

앞에서는 트럭 바닥면의 자유진동을 나타내는 복잡한 파형을 BPF를 이용, 단순한 싸인파로 분해하는 Fourier 분석에 대하여 논하였다. 이것은 실제 파형과 매우 유사함을 보이나 중대한 한가지 결점을 지니고 있다. Fourier 식에서 어떤 싸인주파수의 피크 진폭은 일정한 반면 나타내고자 하는 자유진동의 특성은 일정 주파수대에 있어서의 진폭이 끊임없

(그림5.13)BPF를 이용한 Fourier 분석

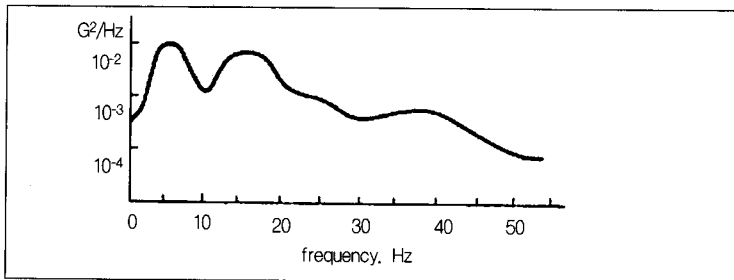


이 변화하는 변량이라는 사실이다. 예를 들어, 5 Hz 와 관련된 최대 가속 진폭은 한순간에는 0.5 g 이며 그 다음 순간에는 0.7g이 되기도 한다. 이 자유 변화를 복합 운동으로 통합하려면 통계학을 이용하여야 한다.

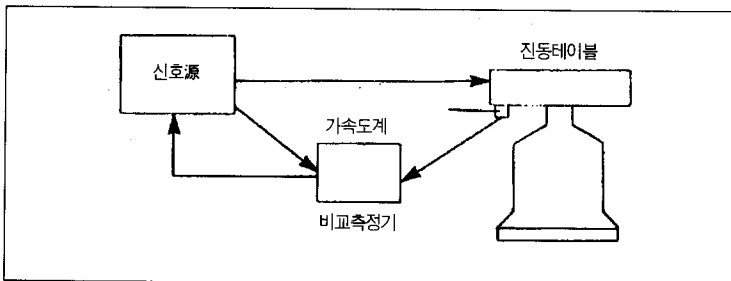
정상 분포 혹은 Gaussian 분포를 이용하여 특정 자유진동 주파수대의 순간 최대 가속 진폭을 나타낸다. 특정 주파수대의 진폭을 Power Density 로 나타낼 수 있다.

$$P.D = \frac{\sum (RMS)_i^{2N}}{BW} \frac{g^2}{Hz} \quad (5.5)$$

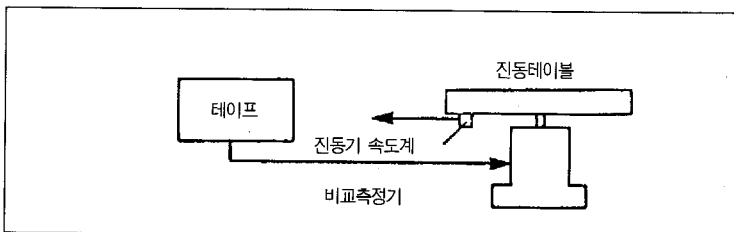
(그림5. 14)Power Density Spectrum



(그림5. 15)단주파수 싸인파진동 생성메카니즘



(그림5. 16)테이프 녹음식 자유진동



RMS_i는 어떤 순간 i 에서 g 단위로 측정된 Root Mean Square 가속도 값이다.

N은 샘플링한 순간들의 수이며 BW 는 특정주파수 (보통 Hz)를 얻기 위해 사용된 BPF의 밴드폭이다.

트럭 바닥면에 대해서 주파수 대비 Power Density 의 전형적인 도식(Power Density Spectrum 이라고 함)을 그림 (5.14)에 나타내었다.

통계학적인 관점에서는 특정 주파수에서의 Power Density 는 0 g 의 평균치에 대한 편차를 말한다. 그러므로 정상분포와 관련한 확률에 근거하여 복잡한 파형의 특정 주파수대에

서 일어나는 가속도 수준을 예측할수 있다.

±1PD:68.3% 의 시간내에 발생
±2PD:95.4% 의 시간내에 발생
±3PD:99.7% 의 시간내에 발생

간단한 예를 들어 Power Density Spectrum 을 설명하자면 그림 (5.14)에서 주파수 5Hz 에서의 Power density 는 10⁻² g²/Hz이며 밴드폭은 1Hz로 규정되어 있다. 따라서

$$PD = \sqrt{10^{-2}} g^2 = 0.1g(\text{RMS 치})$$

여기에서 RMS 가속진폭 = 0.707 피크 진폭이므로

$$\text{피크가속진폭} = \frac{0.01g}{0.707} = 0.14g \text{가 된다.}$$

[그림 5.14]와 같은 트럭의 가속도치들을 가상해 보면 피크 가속도치들은

+0.14g 와 - 0.14 g 사이에 68.3%가 있고

+0.28g 와 - 0.28 g 사이에 95.4%가 있으며

+0.42 g와 - 0.42 g 사이에 99.7%가 있다.

5-6. 자유 진동 시험 장비

유통중의 자유진동은 각 주파수대에서의 가속도가 통계적으로 계량가능하기 때문에 엄밀하게 말하자면 임의적이라고 할 수 없으나 복잡한 진동을 실험적으로 재현하기는 그리 쉽지 않다.

단 주파수의 싸인과 진동이나 자유진동을 재현하는 데는 유압식 혹은 전자기기식 진동 테이블이 사용된다.

하지만 자유진동을 제어하는 장치는 단순진동에 비해 상당히 비싸고 복잡하다. [그림 5.15]에서와 같이 싸인파 진동에 대한 제어 메커니즘을 생각해 보자.

주어진 진폭을 가진 단 주파수 진동 테이블에 걸쳐 있고 진동 측정을 위해 진동 테이블 모서리에 가속도 측정계가 붙어 있다.

만약 테이블 진동이 원하는 진동과 다를 경우 비교 측정기에 나타나게 되고 테이블의 입력신호를 바꿔줌으로써 교정한다. 입력된 데이터대로 테이블 진동이 항상 완벽하게 진행되지 않으므로 제어 메커니즘과 비교 측정기는 원하는 파형을 가진 주파수와 진폭으로 테이블이 진동되도록 만드는데 필요하다.

계속적인 피드백과 수정과정을 거쳐 진동이 요구되는 진동과 최대한 가깝게 만들어 준다. 하지만 테이블이 진동하는 순간 순간에 제어 메커니즘은 단지 한 주파수에만 작용한다.

자유진동에서는 제어 메커니즘이

어떤 순간에서 주파수들의 스펙트럼을 분석하는 역할을 하여야 한다.

실험적으로 자유진동을 재현하는 방법에는 다음의 3가지가 있다.

1. 테이프 녹음식 자유진동

[그림 5.16]에서와 같이 미리 녹음된 시그널이 진동 시스템에 입력되어 테이블에 진동 반응이 생긴다. 입력 시그널에 대해 테이블의 진동이 만족스럽지 못할 경우 테이블에 일정 하중을 부하함으로써 조정하게 된다.

2. 수동제어 아날로그 시스템에 의한 자유진동

[그림 5.17]에서와 같이 소음 발생기가 실제와 유사한 상황을 만들어 낸다.

다밴드 이퀄라이저는 소음 발생기에서 나오는 신호들로부터 원하는 주파수와 진폭을 골라내고 이것을 진동 테이블의 제어 메커니즘으로 보낸다.

테이블의 진동은 Power Density Spectrum을 나타내주는 스펙트럼 분석기를 이용하여 시각적으로 볼 수 있다. 다밴드 이퀄라이저는 스펙트럼 분석기에서 요구되는 PSD 출력을 얻기 위해서 수동적으로 조정 가능하다.

3. 자동 디지털 제어

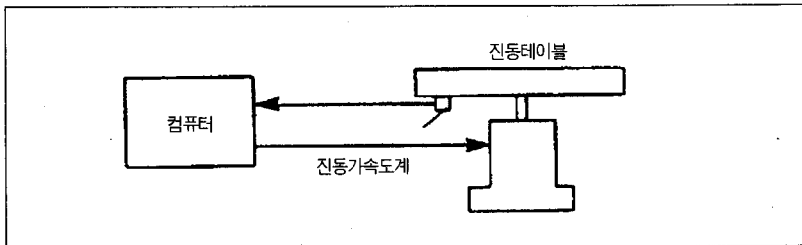
[그림 5.18]에서와 같이 앞서의 수동식 제어 방법과는 다른 방법이나 접근방식은 같다.

디지털식 컴퓨터가 입력 시그널을 발생시키면 진동테이블로부터 출력 시그널이 표시되고 테이블 진동은 미리 선정된 PSD를 검색하면서 자동적으로 입력을 수정해 나가는 방식이다.

포장 설계와 시험에 자유진동을 적용하는 것은 아직 개발의 여지가 많으므로 앞으로 빠른 시간 내에 진전이 이루어지리라 기대된다.

(계속)

[그림 5.18] 자동제어식 자유진동



[그림 5.17] 자유진동 수동제어식 아날로그 시스템

