

충격반응 스펙트럼 시험에서 웨이브레트를 이용한 충격파형 합성

윤 을 재*

Shock Waveform Synthesis for Shock Response Spectrum Test by Using Wavelets

Eul-Jae Yoon*

ABSTRACT

A waveform for shock response spectrum test on a shaker is synthesized using wavelets such that a specified shock response spectrum of a test profile is achieved. The parameters of a wavelet are center frequency, amplitude, number of half cycles, delay and polarity. The amplitude of each wavelet component is iteratively adjusted so a specified shock response spectrum is matched. The waveform so synthesized is regarded as a reference acceleration waveform for a shaker shock response spectrum test. The author proposes the use of a long duration and low peak waveform. The usefulness of this approach is illustrated with some examples.

초 록

충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위한 가진기의 파형이 웨이브레트들을 이용하여 시험규격에서 규정한 충격반응 스펙트럼을 만족하도록 합성된다. 웨이브레트의 매개변수는 중간주파수, 진폭, 반파의 개수, 지연시간 그리고 극성이다. 시험규격에서 규정한 충격반응 스펙트럼과 정합이 되도록 각 웨이브레트의 진폭은 반복하여 조절된다. 이렇게 합성된 파형은 가진기를 이용한 충격반응 스펙트럼 시험의 참조 가속도 파형으로 간주된다. 본 연구에서는 충격 지속시간을 길게 하여 침투치가 작은 파형을 제안한다. 몇 가지 사례를 통하여 이 방법의 유용성이 확인되었다.

1. 서 론

가진기(shaker)를 이용한 충격시험의 장점은, 첫째,

자유낙하식 충격시험기(drop shock test machine)를 별도로 구입할 필요가 없으며, 둘째, 진동시험과 충격시험에 동일 치구의 사용으로 시간과 예산을 절

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

감할 수 있으며, 셋째, 가진기를 이용한 충격시험에서는 역방향의 충격이 용이하다^[1]. 가진기를 이용한 충격시험은 반정현파(half sine pulse), 톱니파, 등의 고전적 충격시험(classical shock test)과 충격반응 스펙트럼(SRS : shock response spectrum) 시험으로 구별된다. 고전적 충격시험은 가진기를 이용하는 방법과 자유낙하식 충격시험기를 이용하는 방법이 있으며, 충격반응 스펙트럼 시험은 일반적으로 가진기를 이용한다.

충격시험으로서 반정현파의 시험규격은 실제 환경에서 충격 지속시간이 변화하기 때문에 바람직하지 않고, 톱니파의 시험규격은 반정현파 보다는 바람직하지만, 이상적인 톱니파를 생성하는데 어려움이 있다. 충격반응 스펙트럼 시험은 충격시험에서 보다 균일한 시험결과를 얻을 수 있어 매우 유용하다. 충격반응 스펙트럼은 1930년대에 M.A.Biot가 지진에 대한 건물의 저항력을 결정하기 위한 방법으로 고안하였다. 어떤 입력 펄스에 대하여 각각 다른 고유 진동수를 갖는 일련의 1 자유도 시스템(SDF : single degree of freedom)의 반응을 결정하기 위한 방법이다. 입력 펄스에 대하여 각각의 1 자유도 시스템에 대한 반응을 그린 것이 충격반응 스펙트럼이다^[2]. 충격반응 스펙트럼은 maxi-max, primary positive, primary negative, residual positive, residual negative, 등이 있으나, 시험규격은 일반적으로 maxi-max를 적용하므로 이하 충격반응 스펙트럼은 maxi-max를 나타낸다.

규정된 충격반응 스펙트럼을 만족할 수 있는 파형의 형태는 이론적으로 무수히 많다^{[2][3][4]}. 가진기에서 허용하는 변위, 속도, 힘의 제약으로 인하여 규정된 충격반응 스펙트럼을 만족하기 위하여 충격 지속시간이 짧고 충격가속도의 첨두치가 큰 충격파형을 얻을 수 없지만, 충격 지속시간이 길고 충격가속도의 첨두치가 작은 파형은 얻을 수 있다. 이 파형이 동일한 충격반응 스펙트럼 시험규격을 만족 할 수 있으므로 이 개념이 가진기를 이용한 충격반응 스펙트럼 시험의 바탕이다. 충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위하여 응용 프로그램을 포함한 제어/분석 시스템이 필요하다. 이 응용 프로그램에서 제공하는 합성 충격파형의 질은 규정된 충격반응 스펙트럼을 만족함과 동시에 변위, 속도, 가속도의 첨두치에 의하여

평가된다^[3].

어떤 시험물에 대하여 충격반응 스펙트럼 시험규격이 일단 정해지면, 합성 충격파형의 변위와 속도는 시험물의 질량에는 무관하게 가진기에서 허용하는 변위, 속도 보다 작으면 된다. 그러나, 시험물의 질량이 큰 경우에는 가속도에 따라 가진기의 용량(force rating)을 달리 선택해야 한다. 예컨대, 응용 프로그램에서 제공한 합성 충격파형의 첨두치가 크기 때문에 시판되고 있는 가진기 중에서 가장 큰 용량의 가진기일지라도 시험 수행이 불가능한 경우와 합성 충격파형의 첨두치가 작아서 이 보다 더 작은 용량의 가진기로도 시험이 가능한 경우와 비교하면 첨두치가 작은 합성파형의 유용성을 쉽게 알 수 있다.

문헌[3]에서는 합성파형의 변위와 속도가 최적화되었으며, 문헌[5]에서는 일부의 매개변수를 랜덤하게 지정하여 랜덤한 충격파형을 생성하고 있다. 문헌[5]의 방법을 적용하거나 혹은 사용자가 매개변수를 지정하여 충격파형을 합성하는 응용프로그램이 시판되고 있다. 이 응용 프로그램을 사용하여 시험물의 질량이 크지 않아 충격반응 스펙트럼 시험규격을 만족하면서 합성 충격파형의 변위, 속도, 가속도가 가진기에서 허용하는 그것들을 만족하면 랜덤한 충격파형 중에서 어느 것이든 상관이 없다. 그러나, 시험물의 질량이 커서 보유하고 있는 가진기의 용량을 초과한 경우에는 랜덤한 합성파형 중에서 가속도의 첨두치가 가장 작은 것을 선택하기 위해 반복하여 충격파형의 합성을 시도하거나, 혹은 사용자가 적절한 매개변수를 설정하여 충격파형을 합성해야 한다.

충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위한 충격파형은 일련의 구성요소 파형(component waveform)을 합하여 합성된다. 이 구성요소 파형에는 감쇄 정현파(damped sine), 웨이브레트, 등이 있다. 본 연구에서는 구성요소 파형으로 웨이브레트를 사용하여 충격파형을 합성한다. 웨이브레트의 매개변수를 지정하는 방법에 의하여 합성파형의 질이 결정되며, 이것들은 중간주파수(center frequency), 반파의 개수(number of half cycles), 진폭, 지연시간 및 첨두치의 극성이다.

본 연구에서는 가속도의 첨두치가 작은 파형을 합성하기 위한 매개변수의 설정 방법을 제안하고 있으며, 이 방법은 몇 가지의 시험규격에 적용한 결과 그

유용성이 입증되었다. 이 시험규격은 일반적으로 널리 사용되고 있는 충격반응 스펙트럼 시험규격이다. 이 시험규격을 적용하여 충격반응 스펙트럼 시험을 수행하고자 한다면 이 연구에서 얻어진 매개변수의 값을 사용하여 가속도의 침투치가 작은 충격파형을 합성하여 직접 충격시험에 적용할 수 있으므로 시간과 노력 및 비용을 절약할 수 있으리라 기대된다.

2. 충격파형을 합성하기 위한 웨이브레트

2.1 웨이브레트

웨이브레트란 식 (1) 혹은 식 (2)로 표현된 변조파형을 말한다. 이 웨이브레트가 충격 가속도(이하 충격파형은 충격가속도를 나타낸다)를 나타낼 때 적분하면 속도가 되고 충격 지속시간 동안 적분하면 0이다. 속도를 다시 적분하면 변위가 되고 충격 지속시간 동안 적분하면 0이다. 따라서 일련의 웨이브레트를 합하여 합성한 충격파형은 충격 지속시간 동안에 가진기의 처음 위치로 돌아와 정지함을 의미한다.

$$g(t) = A_0 \cos \frac{2\pi f_0 t}{N} \cos 2\pi f_0 t \quad (1)$$

단, $-\frac{N}{4f_0} \leq t \leq \frac{N}{4f_0}$ 이다.

$$g(t) = A_0 \sin \frac{2\pi f_0 t}{N} \sin 2\pi f_0 t \quad (2)$$

단, $0 \leq t \leq \frac{N}{2f_0}$ 이다.

여기서, f_0 은 웨이브레트의 스펙트럼의 중간주파수(이하 중간주파수라 한다)이고, N 은 반파의 개수이며 1보다 큰 홀수의 값을 갖는다. A_0 은 진폭이며, 식 (2)에서 A_0 의 부호가 양수일 때 $N=3, 7, 11, \dots$ 이면, 침투치가 음수가 되며, $N=5, 9, 13, \dots$ 이면, 침투치가 양수가 된다. 식 (1)과 식 (2)에서 푸리에 변환의 크기(magnitude)는 동일하다. 식 (1)에서 $A_0=1$ 이면 웨이브레트의 푸리에 변환은 식 (3)이 되고, 웨이브레트의 대역폭은 식 (4)로 근사화된다.

$$G(f) = \frac{N}{2\pi f_0} \left(\frac{\cos(\pi x/2)}{(1-x^2)} + \frac{\cos(\pi y/2)}{(1-y^2)} \right) \quad (3)$$

여기서, $x = N(\frac{f}{f_0} - 1)$ 이고,

$y = N(\frac{f}{f_0} + 1)$ 이다.

$$BW_{6dB} \approx 3.28 \frac{f_0}{N} \quad (4)$$

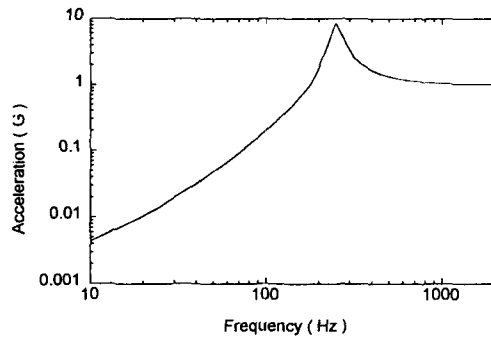
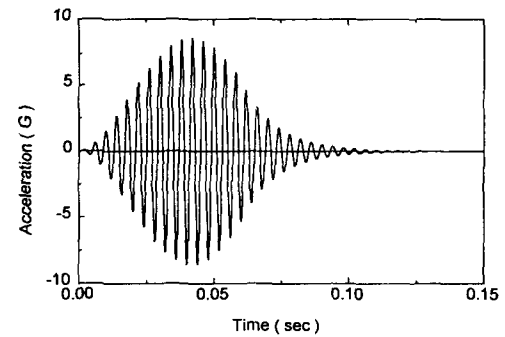
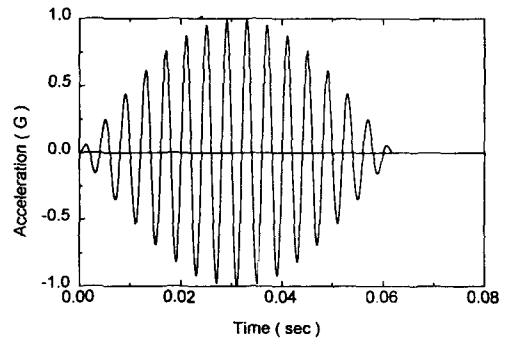


Fig. 1. Wavelet, Response Waveform of SDF and SRS

Fig. 1은 $f_0=250$ Hz, $A_0=1$, $N=31$ 인 웨이브레트와 이 웨이브레트가 250 Hz의 고유 진동수를 갖는 1 자유도 시스템에 인가될때의 반응 및 이 웨이브레트의 충격반응 스펙트럼을 나타내고 있다. 이 웨이브레트에 대하여 각각 다른 고유 진동수를 갖는 일련의 1 자유도 시스템의 반응에서 절대값의 최대치를 그린 것이 충격반응 스펙트럼이다. 여기서, 전달율 $Q=10$ 이고, 해상도는 $\frac{1}{6}$ octave이다. 즉, 1 자유도 시스템은 전달율 $Q=10$ 인 시스템이며, 일련의 시스템은 $\frac{1}{6}$ octave 간격의 고유 진동수를 갖는 시스템을 말한다.

합성파형 $x(t)$ 가 식 (5)에서와 같이 2 개의 웨이브레트로 합성되었다고 하면, 푸리에 변환은 식 (6)으로 표현된다. 스펙트럼 크기의 제곱은 식 (7)이 되고, $g_1(t-\delta_1)$ 와 $g_2(t-\delta_2)$ 의 첨두치의 극성이 같으면, 식 (7)은 식 (8)일 때 최대값, 식 (9)일 때 최소값을 갖게 된다. $g_1(t-\delta_1)$ 와 $g_2(t-\delta_2)$ 의 첨두치의 극성이 서로 다르면 최대값과 최소값은 바뀌게 된다.

$$x(t) = g_1(t - \delta_1) + g_2(t - \delta_2) \quad (5)$$

$$X(f) = G_1(f) e^{-j2\pi f \delta_1} + G_2(f) e^{-j2\pi f \delta_2} \quad (6)$$

$$|X(f)|^2 = |G_1(f)|^2 + |G_2(f)|^2 + 2|G_1(f)||G_2(f)| \cos 2\pi f(\delta_2 - \delta_1) \quad (7)$$

$$2\pi f(\delta_2 - \delta_1) = \pm 2n\pi, \quad n; \text{ 정수} \quad (8)$$

$$2\pi f(\delta_2 - \delta_1) = \pm (2n-1)\pi, \quad n; \text{ 정수} \quad (9)$$

2.2 충격반응 스펙트럼의 증폭

충격반응 스펙트럼의 증폭이 클수록 충격반응 스펙트럼 시험규격을 달성하는데 필요한 웨이브레트의 진폭이 작아지기 때문에 합성파형의 첨두치를 줄일 수 있다. 여기서, 충격반응 스펙트럼의 증폭(amplification)이란 식 (2)에서 $A_0=1$ 인 웨이브레트가 f_0 의 중간주파수와 같은 고유 진동수를 갖는 1 자유도 시스템에 인가될 때 시스템의 반응에서 첨두치를 말한다. 충격반응 스펙트럼의 증폭은 반파의 개수 N 이

클수록 증가하며 아주 크면 전달율 Q 에 접근한다. 반파의 개수 N 을 변화시켜 충격반응 스펙트럼의 증폭을 구하면 식 (10)으로 근사화 된다. 문헌[6]의 충격반응 스펙트럼 시험규격에서 $Q=10$ 으로 고정되어 있으므로, 증폭을 키우기 위해서는 N 이 클수록 좋지만 $Q=10$ 일 때 $N=29$ 에서 증폭은 최대 증폭의 1dB 이내이다^[5].

$$\text{Amplification} \approx Q(1 - 2^{-\frac{N}{Q}}) \quad (10)$$

중간주파수 f_0 가 주어졌을 때 반파의 개수 N 을 증가시키면 충격반응 스펙트럼의 증폭은 증가하지만 식 (4)에서 대역폭은 감소하게 되고 충격지속 시간은 길어진다. 특히 중간주파수 f_0 가 작을 때 반파의 개수 N 을 증가시키기 위하여 충격 지속시간을 가능한 범위에서 길게 설정하는 것이 바람직하다. 식 (10)에서 반파의 개수 N 이 어느 정도 커지면 증폭의 증가율이 둔화되기 때문에 중간주파수 f_0 가 클 때 주어진 충격지속 시간 이내에서 반파의 개수 N 을 아주 크게 할당할 수 있다 할지라도 반파의 개수 N 을 어느 정도보다 크지 않게 설정하는 것이 타당하다. 문헌 [5]에서는 이와 같은 조건에 해당될 경우에 $N=27, 29, 31, 33$ 중에서 랜덤하게 선정하는 방법을 택하고 있고, 본 연구에서는 이와 같은 조건에 해당될 때 $N=31$ 로 제한하였다.

3. 충격파형의 합성

웨이브레트의 매개변수를 지정하는 방법에 따라서 규정된 충격반응 스펙트럼을 만족할 수 있는 파형의 형태는 무수히 많다. 웨이브레트의 매개변수는 중간주파수, 반파의 개수, 지연시간, 극성을 말한다. 문헌 [5]의 매개변수 지정 방법을 적용하여 구현된 응용 프로그램이 시판되고 있다. 합성 충격파형의 질은 규정된 충격반응 스펙트럼을 만족함과 동시에 변위, 속도, 가속도의 첨두치에 의하여 평가된다고 할 때 기존의 매개변수 지정 방법에 의하여 합성된 충격파형의 질이 만족스러운 것은 아니다. 충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위한 충격파형 $x(t)$ 를 식 (11)에서와 같이 일련의 웨이브레트를 합하여 합성할 수 있

다. $g_k(t)$ 는 각각의 웨이브레트를 나타내고 있으며, M 은 웨이브레트의 개수를 나타내고, δ_k 는 각각의 웨이브레트에 대한 지연시간을 나타낸다.

$$x(t) = \sum_{k=1}^M g_k(t - \delta_k) \quad (11)$$

$$\text{단, } 0 \leq (t - \delta_k) \leq \frac{N_k}{2f_k} \text{ 이다.}$$

$$g_k(t - \delta_k) = A_k \sin \frac{2\pi f_k(t - \delta_k)}{N_k} \sin 2\pi f_k(t - \delta_k) \quad (12)$$

3.1 기존의 매개변수 설정

각각의 웨이브레트의 중간주파수는 식 (13)에 의하여 결정된다. 즉, 식 (11)에서 k 번째의 웨이브레트와 $k+1$ 번째의 웨이브레트의 중간주파수는 식 (4)의 대역폭을 이용하여 k 번째의 웨이브레트의 중간주파수에 대역폭의 반을 더한 주파수와 $k+1$ 번째의 웨이브레트의 중간주파수에서 대역폭의 반을 뺀 주파수가 일치하게 설정한다. k 번째의 웨이브레트와 $k+1$ 번째의 웨이브레트의 극성, 지연시간에 따라서 합성 파형의 스펙트럼이 식 (7)에서 볼 수 있듯이 달라진다. 합성파형에서 평활화된(smooth) 스펙트럼을 얻기 위하여 합성파형의 스펙트럼이 증강(reinforcement)되도록 극성과 지연시간을 설정한다. 이 방법은 충격반응 스펙트럼 분석시 주파수 해상도(resolution)에 무관하게 충격파형을 합성하기 때문에 평활화된 스펙트럼이 필요하다. 또한 식 (13)에 의해서 웨이브레트의 중간주파수가 설정되기 때문에 시험규격에서 주파수 범위가 주어지면 웨이브레트의 개수 M 은 고정된다.

$$\left(1 - \frac{1.64}{N_{k+1}}\right) f_{k+1} = \left(1 + \frac{1.64}{N_k}\right) f_k \quad (13)$$

식 (4)로부터 $k+1$ 번째 웨이브레트의 대역폭은 k 번째 웨이브레트의 대역폭 보다 작지 않다는 조건을 사용하여 식 (14)를 만들어 식 (13)과 결합시키면 반파의 개수는 식 (15)의 조건을 만족하는 양의 정수로 $N_{k+1} = N_k + 2$ 이고, $N_{k+1} \geq 27$ 이면, $N_{k+1} = 27, 29, 31, 33$ 중에서 랜덤하게 정한다. 첫 번째 웨이브레트의 반파의 개수를 3 개 혹은 5

개로 놓고 그 다음의 웨이브레트의 반파의 개수는 2 개씩을 더하는 형태이므로 허용하는 범위에서 충격 지속 시간을 길게 활용하지 못하고 있다. 식 (10)에서 충격반응 스펙트럼의 증폭이 반파의 개수에 따라서 증가하기 때문에 각각의 웨이브레트에서 반파의 개수를 증가시키면 동일한 시험규격의 충격파형을 합성하는데 필요한 진폭을 줄일 수 있기 때문에 합성파형의 첨두치를 줄일 수 있음에 비추어 보면 반파의 개수를 증가시켜 충격지속 시간을 길게하는 것이 바람직하다.

$$\frac{f_{k+1}}{N_{k+1}} \geq \frac{f_k}{N_k} \quad (14)$$

$$N_{k+1} \leq N_k + 3.28 \quad (15)$$

지연시간과 극성은 식 (8) 혹은 식 (9)의 조건에 의하여 식 (7)의 스펙트럼이 증강되도록 극성과 지연시간을 설정한다. $k+1$ 번째 웨이브레트의 지연시간 δ_{k+1} 은 식 (16)의 f_{k+1}^{mb} 에서 스펙트럼이 최대로 증강되도록 하면 식 (17)의 조건을 만족하게 된다. 웨이브레트의 대역폭 범위의 주파수에서 스펙트럼이 증강되도록 하기 위하여 식 (17)의 n_{k+1} 은 식 (18)의 범위에 있는 정수로서 랜덤하게 선정한다. 선정된 n_{k+1} 이 짝수이면 $k+1$ 번째 웨이브레트의 극성은 k 번째의 웨이브레트의 극성과 같고, 홀수이면 극성이 바뀐다.

$$f_{k+1}^{mb} = \left(1 - \frac{1.64}{N_{k+1}}\right) f_{k+1} \quad (16)$$

$$\delta_{k+1} = \delta_k \pm \frac{n_{k+1}}{2 f_{k+1}^{mb}}; \quad n_{k+1} = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

$$0 \leq n_{k+1} \leq \frac{N_{k+1} - 1.64}{3.28} \quad (18)$$

3.2 충격파형의 합성 방법 제안

웨이브레트의 중간주파수를 정하는 방법에 따라서 식 (11)의 웨이브레트의 개수 M 이 달라진다. 충격반응 스펙트럼 분석시 일련의 고유 진동수는 시험규격에서 주어진 고유 진동수의 간격에 의하여 얻어진다. 본 연구에서는 식 (11)의 웨이브레트의 중간주파

수를 이 일련의 고유 진동수와 일치하게 정한다. 이 방법은 시험규격에서 주어진 고유 진동수의 충격 반응을 직접 참조하여 식 (12)의 A_k 를 조절할 수 있다. 또한, 웨이브레트의 대역폭, 스펙트럼을 증강하기 위한 조건을 부가할 필요가 없으므로 이들로 인하여 발생하는 반파의 개수, 지연시간, 극성의 조건이 없어진다. 반면에 문헌 [5]의 방법은 웨이브레트의 중간주파수를 시험규격의 고유 진동수로 놓고 그 충격 반응을 참조하여 식 (12)의 A_k 를 조절한다. 이렇게 합성한 파형을 다시 시험규격에서 주어진 고유 진동수에 대하여 충격 반응 스펙트럼을 분석한다.

식 (10)에서 증폭이 클수록 충격반응 스펙트럼 시험규격을 달성하는데 필요한 웨이브레트의 진폭을 줄일 수 있지만, 시험규격에서 전달율 Q 는 고정되어 있으므로 반파의 개수 N 을 증가시켜야 하는데 중간주파수가 낮은 웨이브레트에서 N 이 증가하면 충격지속 시간이 길어진다. 본 연구에서는 충격지속 시간은 시스템에서 제공할 수 있는 가장 긴 충격지속 시간을 할당한다. 이를 위하여 프레임의 크기(frame size)를 가장 크게 선정하고, 표본추출 비율(sampling ratio)을 가장 작게 선택한다. 예컨대 2,000Hz의 주파수 범위에서 표본추출 비율을 6.4, 프레임의 크기를 4,096으로 하면 0.32초의 충격지속 시간이 가능하다. 정해진 충격지속 시간 동안에 할당할 수 있는 가장 큰 반파의 개수를 설정하지만, 식 (10)에서 반파의 개수 N 이 어느 정도 커지면 증폭의 증가율이 둔화되기 때문에 최대 31 개로 제한한다.

식 (12)에서 모든 웨이브레트에 대한 지연시간 δ_k 를 $\delta_k = 0$ 으로 놓고, 각각의 웨이브레트에 대한 초기 진폭 A_k 를 식 (19)로 놓고 파형을 합성하여 충격반응 스펙트럼을 구한다. 시험규격에서 요구한 k 번째 고유 진동수에 대한 충격반응을 R_k 라 하고, i 번째 합성한 충격파형에서 k 번째 고유 진동수에 대한 충격반응을 S_k^i 라 하면 식 (20)을 반복하여 시험규격의 충격반응 스펙트럼을 만족하는 충격파형을 합성하여 첨두치를 구한다. 첫 번째 웨이브레트의 초기 진폭에 대한 극성을 바꾸어서 위의 과정을 반복하여 충격파형을 합성한 후 첨두치가 앞에서 구한 첨두치 보다 작으면 첫 번째 웨이브레트의 초기 진폭의 극성을 대체한다. 다음 웨이브레트의 초기 진폭에

대한 극성을 바꾸어서 같은 방법으로 반복한다. 본 연구에서는 웨이브레트의 중간주파수가 작은 순서대로 15 개의 웨이브레트에 대한 극성을 바꾸어서 충격파형의 첨두치가 작은 파형을 합성하였다. 여기서, 충격파형의 첨두치 대신에 충격파형의 속도, 혹은 변위의 첨두치로 대체하면 속도 혹은 변위의 첨두치가 작은 파형을 합성할 수 있다.

$$A_k = \begin{cases} 1, & N_k = 4m + 3 \text{ 일 때 } (m; \text{정수}) \\ -1, & N_k = 4m + 1 \text{ 일 때 } (m; \text{정수}) \end{cases} \quad (19)$$

$$A_k^{i+1} = \frac{R_k}{S_k^i} A_k^i \quad (20)$$

4. 충격파형의 합성 결과

4.1 충격반응 스펙트럼 시험규격

Fig. 2는 문헌 [6]에서 규정한 지상장비의 성능시험 및 항공장비의 충돌위험 시험규격과 지상장비의 충돌위험 시험규격이다. 이 시험규격은 충격반응 스펙트럼 시험에서 널리 사용되고 있는 시험규격으로 충격반응 스펙트럼 분석시 전달율 $Q = 10$ 그리고 고유 진동수의 간격이 적어도 $\frac{1}{6}$ octave 만큼은 촘촘해야 하는 것으로 규정하고 있다. 또한 충격반응 스펙트럼은 충격반응 파형에서 절대값이 큰 것(maxi-max)으로 규정하고 있다. 따라서, 본 연구에서 분석한 충격반응 스펙트럼은 전달율, $Q = 10$ 그리고 $\frac{1}{6}$ octave 간격의 고유 진동수를 적용하였다.

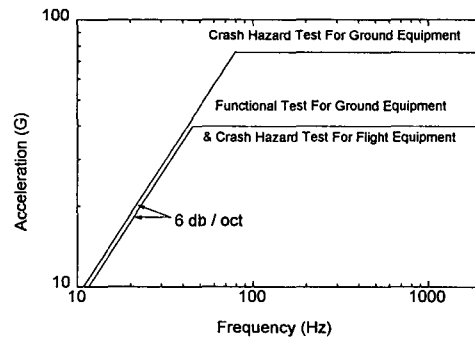


Fig. 2. SRS Test Profile

문헌[6]에서 유효 충격 지속시간을 규정하고 있지만, 이는 충격반응 스펙트럼 시험을 수행할 수 없어 충격파형으로 톱니파를 인가할 때 적용되고, Fig. 2의 충격반응 스펙트럼보다 작지 않은 임의의 충격파형은 적합한 것으로 규정하고 있다.

4.2 기존의 방법에 의한 충격파형의 합성 결과

Fig. 3은 Fig. 2의 지상장비의 성능시험 및 항공장비의 충돌위험 시험규격 그리고 지상장비의 충돌위험 시험규격에 대하여 문헌[5]를 적용한 제어/분석 시스템에서 합성한 충격파형과 충격반응 스펙트럼을 나타내고 있다. 지상장비의 성능시험 및 항공장비의 충돌위험 시험규격에서 충격 가속도의 첨두치는 29.6 G이며 이 충격파형을 적분하여 속도의 첨두치는 38.72 인치/초이며, 다시 적분하여 변위의 첨두치는 0.368 인치이다. 지상장비의 충돌위험 시험규격에서 충격 가속도의 첨두치는 59.57G이며, 속도의 첨두치는 38.37 인치/초, 변위의 첨두치는 0.375인치이다

충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위한 가진기에서 허용하는 속도는 70인치/초이고, 변위가 0.5인치라 할 때 문헌[5]를 적용하여 합성한 충격파형의 속도와 변위는 가진기에서 허용하는 한계를 넘지 않는다. 그리고 합성한 충격파형의 충격반응 스펙트럼은 시험규격에서 요구하는 충격반응 스펙트럼을 대략 만족하고 있다. 그러나, 충격 가속도의 첨두치는 가진기에서 허용하는 힘과 관련되기 때문에 충격 가속도의 첨두치가 크면 클수록 시험물의 질량에 제한을 받게 된다. 따라서 이 합성파형보다 더 작은 충격 가속도의 첨두치를 갖는 충격파형을 합성할 수 있다면 이 합성파형의 품질이 우수하다고 말할 수 있다.

4.3 제안한 방법에 의한 충격파형의 합성 결과

문헌[5]의 방법에 의하여 합성된 충격파형의 첨두치가 비교적 크며, 이 파형의 특징은 충격 지속시간을 충분히 활용하지 못하고 있으며, 웨이브레트의 지연시간, 극성이 랜덤하게 선정되므로 동일한 시험규격에 대하여 항상 일정한 충격파형을 합성하는 것은 아니다. 가진기를 이용한 충격반응 스펙트럼 시험은 기본적으로 충격 지속시간을 키워서 가속도의 첨두치를 줄이는 개념임에 착안하여 충격파형을 합성하는 프로그램을 구현하게 되었다. 즉, 문헌[5]의 방법

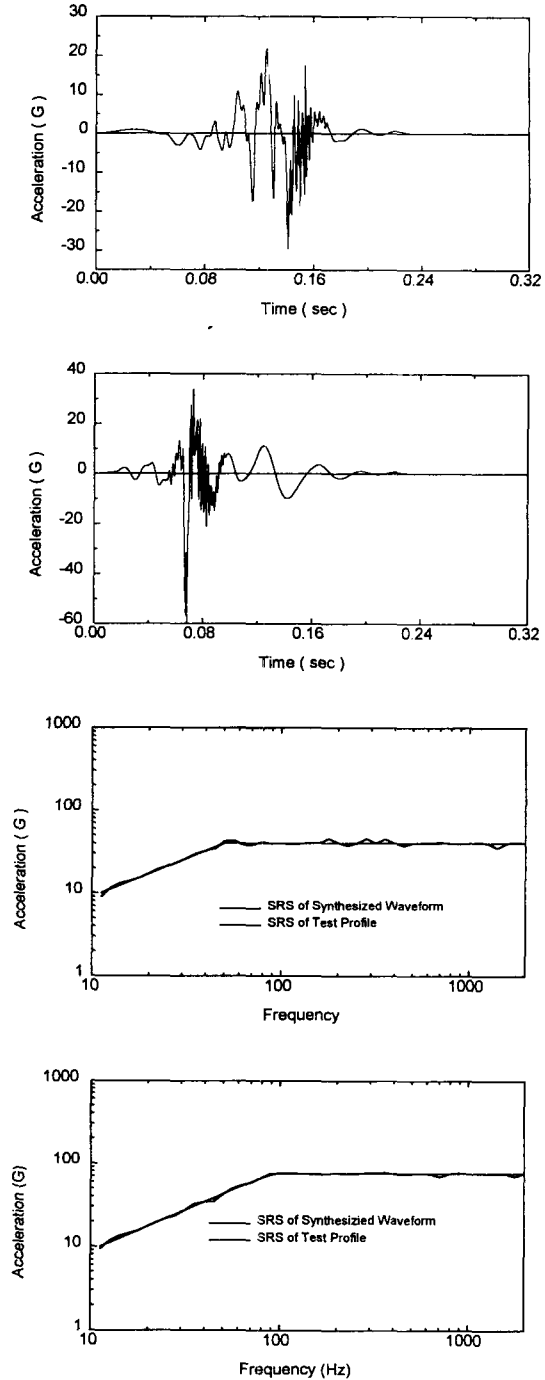


Fig. 3 Synthesized Waveform and SRS - Nelson's Algorithm

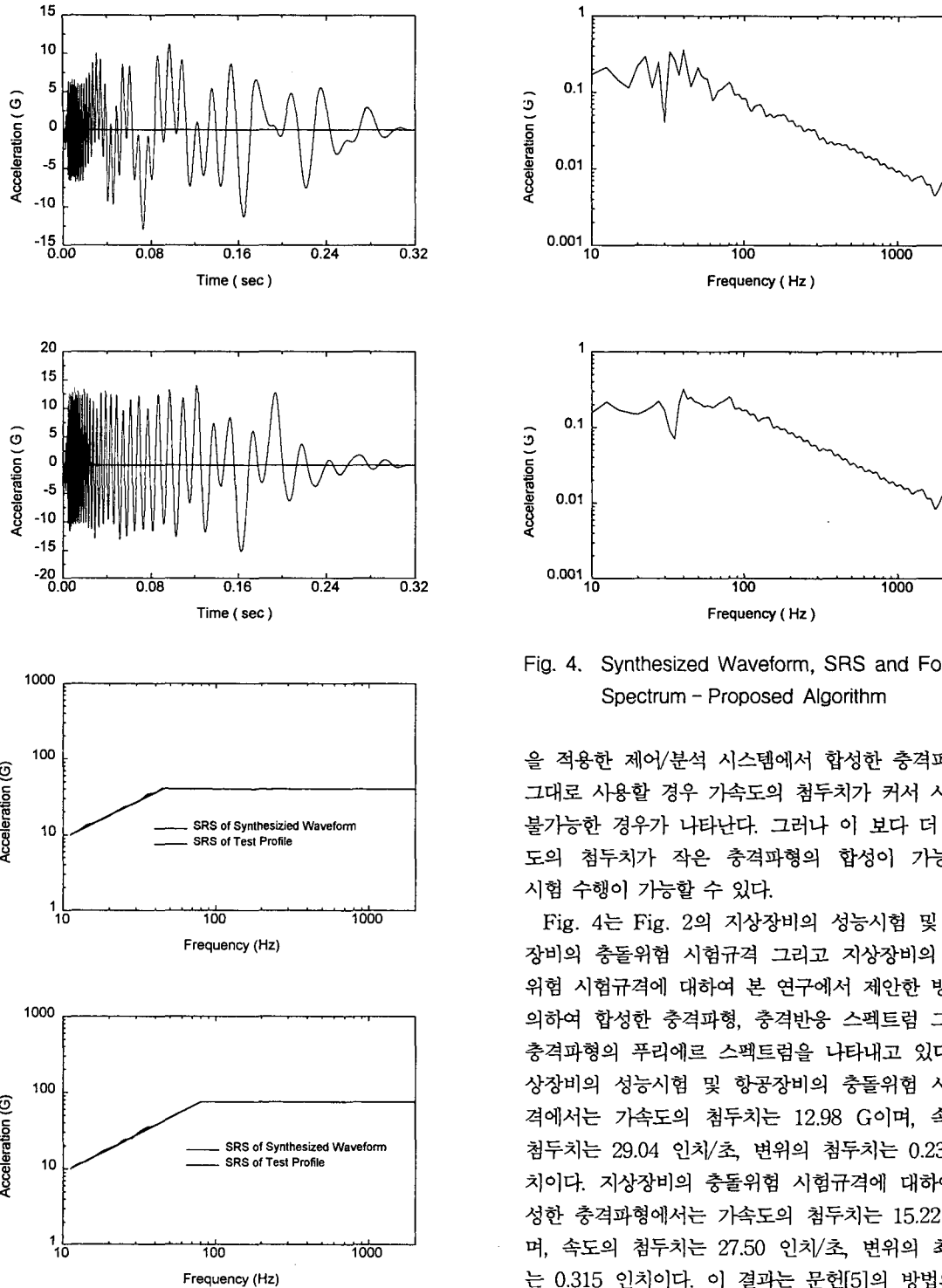


Fig. 4. Synthesized Waveform, SRS and Fourier Spectrum - Proposed Algorithm

을 적용한 제어/분석 시스템에서 합성한 충격파형을 그대로 사용할 경우 가속도의 첨두치가 커서 시험이 불가능한 경우가 나타난다. 그러나 이 보다 더 가속도의 첨두치가 작은 충격파형의 합성이 가능하여 시험 수행이 가능할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2의 지상장비의 성능시험 및 항공장비의 충돌위험 시험규격 그리고 지상장비의 충돌위험 시험규격에 대하여 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 합성한 충격파형, 충격반응 스펙트럼 그리고 충격파형의 푸리에 스펙트럼을 나타내고 있다. 지상장비의 성능시험 및 항공장비의 충돌위험 시험규격에서는 가속도의 첨두치는 12.98 G이며, 속도의 첨두치는 29.04 인치/초, 변위의 첨두치는 0.233 인치이다. 지상장비의 충돌위험 시험규격에 대하여 합성한 충격파형에서는 가속도의 첨두치는 15.22 G이며, 속도의 첨두치는 27.50 인치/초, 변위의 최대치는 0.315 인치이다. 이 결과는 문헌[5]의 방법의 결

과와 비교하면 가속도의 침두치가 현저하게 작고 속도 및 변위의 침두치도 작음을 알 수 있다. 또한 파형들의 충격반응 스펙트럼은 시험규격을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

푸리에 스펙트럼에서 대략 70Hz 이상에서는 스펙트럼이 증강되는 것을 볼 수 있다. 즉, 평활화된 스펙트럼으로 볼 수 있다. 이는 식 (19)에서 웨이브레트의 초기 극성을 푸리에 스펙트럼이 증강되도록 하였기 때문이다. 그러나 70Hz 이하에서는 이런 성질을 말 할 수 없는 이유가 침두치가 작은 충격파형을 합성하기 위하여 웨이브레트의 중간주파수가 낮은 15 개의 웨이브레트에 대하여 적합한 극성을 선택하여 합성한 파형이기 때문에 식 (19)의 초기 극성과 달라진 웨이브레트가 존재하기 때문이다. 시험규격에서 주어진 고유 진동수에 대하여 충격반응 스펙트럼을 만족하고 있으므로 70Hz 이하에서 스펙트럼이 약간 매끄럽지 못한 것은 상관 없는 것으로 판단된다.

Table 1은 기존의 방법에 의하여 합성한 충격파형의 성질과 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 합성한 파형의 성질을 문헌[6]의 2 종류의 시험규격에 대하여 비교한 것이다. 제안한 방법에 의하여 합성한 파형의 가속도의 침두치는 월등히 작고, 속도와 변위의 침두치는 약간 작다. 이 결과는 본 연구에서 합성한 파형의 유용성을 입증하는 것으로 활용 가치가 매우 높다.

Table 1. A comparison of time waveform properties

구 분		Nelson의 방법	제안한 방법
지상장비의 성능시험 및 항공장비의 충돌위험 시험규격	가속도(G)	■	■
	속도 (inch/sec)	38.72	29.04
	변위 (inch)	0.368	0.233
지상장비의 충돌 위험 시험규격	가속도(G)	■	■
	속도 (inch/sec)	38.37	27.50
	변위 (inch)	0.375	0.315

4.4 합성파형의 적용

본 연구에서 합성한 파형은 PC에서 구현되었지만 실제 충격반응 스펙트럼 시험에 적용할 수 있다. GR2550A Vibration Control System의 응용 프로그램과 가진기를 사용하여 실제의 시험에 적용되었다. Table 2는 Fig. 4의 충격파형을 합성한 웨이브레트의 매개변수 중에서 일부의 웨이브레트에 대한 매개변수 값을 나타내고 있다. 이 웨이브레트들로 응용 프로그램의 웨이브레트들을 대체하면 본 연구에서 합성한 파형으로 대체할 수 있다.

따라서 시험규격이 정해지면 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 합성한 파형을 토대로 가속도, 속도, 변위의 침두치가 가진기에서 허용하는 힘, 속도, 변위의 범위를 만족하는 지의 여부를 결정할 수 있다. 여기서, 힘은 질량과 가속도만을 고려하여 계산한다. Fig. 4에서 합성한 파형은 가진기에서 허용하는 속도, 변위의 범위를 만족하고 있지만, 시험 대상 품목에 따라서 질량은 각각 다르기 때문에 합성파형의 침두치가 작으면 작을수록 동일한 가진기를 사용할 때 보다 큰 질량의 시험물에 대하여 시험이 가능하다. 즉, 어느 시험 대상 품목의 질량이 커서 합성파형의 침두치가 작지 않으면 시험이 불가능한 경우도 존재할 수 있다. Fig. 2의 시험규격은 비교적 널리 사용되고 있는 시험규격으로 Fig. 4에서 합성한 파형은 침두치가 작기 때문에 매우 유용한 것으로 판단된다.

Fig. 4의 합성파형은 실제 충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위하여 시스템의 응용 프로그램에서 참조파형으로 사용된다. 여기서 참조파형이란 시험물에 인가될 충격파형의 목표를 말한다. 가진기와 시험물 사이에 치구(fixture)가 있으며 시험물이 치구와 결합된 지점(mounting point)에 가속도계(accelerometer)를 부착하여 충격파형을 측정한다. 측정된 충격파형이 원하는 충격파형이 되도록 구동신호(drive signal)를 시스템에서 생성하기 위하여 참조파형의 가속도를 축소하여 예비시험(pretest)을 거친다. 이때 가능하면 시험물에 영향을 덜 주기 위하여 예비시험의 충격 가속도 수준은 참조파형에 비하여 약간 낮게 설정하며 참조파형의 -12db 정도로 정하는 것이 보통이다. 초기의 구동신호로 낮은 수준의 랜덤 신호를 가진기에 인가하여 가속도계의 가속도

Table 2. Wavelets for shock waveform synthesis

순번	중간 주파수 (Hz)	반파의 개 수	진폭(G) 및 극성	지연시간 (msec)
1	11.04854	7	1.48650	0.0
2	12.40157	7	1.35969	0.0
3	13.92029	7	0.42658	0.0
4	15.62500	9	-0.65080	0.0
5	17.53847	11	-1.39872	0.0
6	19.68627	11	-1.95514	0.0
7	22.09709	13	1.46032	0.0
8	24.80314	15	-1.81898	0.0
9	27.84059	17	-4.43660	0.0
10	31.25000	19	-3.90247	0.0
11	35.07694	21	1.15591	0.0
12	39.37253	25	3.66418	0.0
13	44.19418	27	-1.33456	0.0
14	49.60628	31	-2.21211	0.0
15	55.68117	31	-1.98478	0.0
46	2000.00000	31	-2.88867	0.0

를 측정한다. 이 과정을 몇 번 반복한 후에 전달함수를 계산하고 구동신호를 보정하여 가진기에 인가하고 가속도를 측정하여 참조파형의 축소된 가속도와 비교하여 제어오차를 구한다. 제어오차가 정의된 오차보다 크면 구동신호를 다시 계산하여 가진기에 인가하여 제어오차가 정의된 오차보다 작을 때까지 반복하여 예비시험이 수행된다. 예비시험에서 참조파형의 축소된 가속도를 정의된 오차범위에서 만족할 수 있는 구동신호를 달고 있기 때문에 이 신호를 증폭하여 가진기에 인가하면 참조파형과 거의 일치한 충격파형을 가속도계에서 얻을 수 있다. 여기서 구동신호를 역변환하여 가진기에 인가하면 역방향의 충격을 얻을 수 있다. 따라서 가진기를 이용한 충격시험은 역방향의 충격이 매우 용이하다.

Fig. 5는 Fig. 4의 합성파형을 바탕으로 충격반응 스펙트럼 시험을 수행하고 가속도계에서 얻은 충격파형을 나타내고 있다. 이 파형은 Fig. 4의 파형과 거의 일치하고 있다. 이 결과는 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 합성된 충격파형을 실제의 시험에 적용할 수 있음을 보여준다. 또한 Fig. 5의 시험결과는

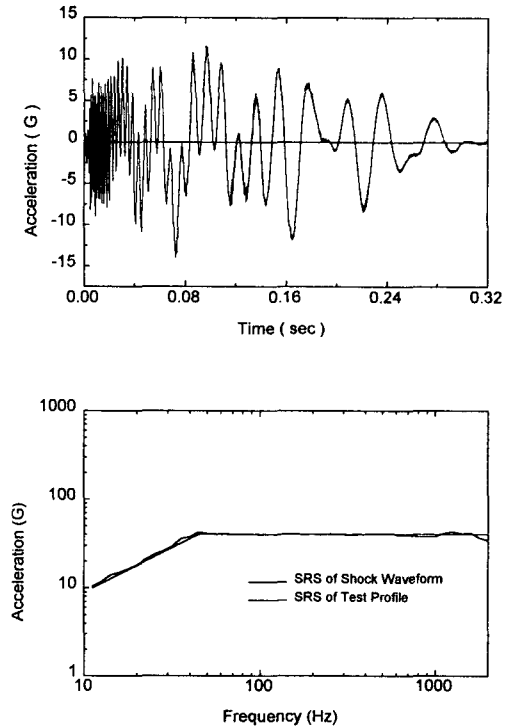


Fig. 5. Shock Waveform and SRS - Test Result

시험물에 대한 진동시험을 실시하고 그리고 충격반응 스펙트럼 시험을 실시하여 얻은 것으로 기존의 자유낙하식 충격시험기를 이용하여 튼니파 충격시험을 실시한 것과 비교하여 충격시험에 필요한 치구를 별도로 제작할 필요가 없고 그리고 시험시간의 단축 및 역방향의 충격이 용이함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

환경시험에서 충격시험으로서 가진기를 이용하여 수행하는 충격반응 스펙트럼 시험의 요구가 점점 증가하고 있다. 시험규격의 충격반응 스펙트럼을 만족하는 충격파형은 무수히 많으나 가진기에서 허용하는 힘, 속도, 변위에 의한 제약때문에 충격파형의 가속도, 속도, 변위의 침투치가 작으면 작을수록 그 충격파형의 품질이 우수하다고 말할 수 있다. 충격반응 스펙트럼 시험을 수행하기 위한 충격파형은 일련의

구성요소 파형을 합하여 합성되며, 본 연구에서는 구성요소 파형으로 웨이브레트를 사용하여 충격파형을 합성한다. 웨이브레트의 매개변수인 반파의 개수를 증가시키면 충격반응 스펙트럼의 증폭이 증가하여 웨이브레트의 진폭을 줄일 수 있지만, 중간주파수가 작을 때 반파의 개수를 증가시키면 충격 지속시간이 길어진다.

본 연구에서는 웨이브레트를 이용하여 충격 지속시간이 길고 충격가속도의 첨두치가 작은 파형을 합성하는 방법을 제안하고 있다. 이 방법으로 몇 가지의 시험규격에 적용한 결과 합성된 파형의 우수성이 입증되었다. 이 시험규격은 일반적으로 널리 사용되고 있는 충격반응 스펙트럼 시험규격이다. 이 시험규격에 따라서 충격반응 스펙트럼 시험을 수행해야 하는 경우에 이 연구에서 얻어진 매개변수 값을 사용하여 가속도의 첨두치가 작은 충격파형을 합성하여 직접 시험에 적용할 수 있으므로 시간과 노력 및 비용을 절약할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. Wayne Tustine, "Shock Testing" pp.34-1~pp.34-5, 1979
2. Wayne Tustine, George M. Hieber, "Understanding and Measuring the Shock Response Spectrum," Scientific - Atlanta Spectral Dynamics Division Technical Publication NO.SSA-34-73
3. J.Leuridan, P.D'Hondt, J.Debille, J.Lipkens, H.Vold, "A New Optimization Technique to Incorporate Multiple Time Waveform Constraints in SRS Synthesis," Proceedings Institute of Environmental Sciences, Chicago, USA, 1994
4. Kenneth J. Metzgar, "A Test Oriented Appraisal of Shock Spectrum Synthesis and Analysis," Proceedings Institute of Environmental Sciences, 1967
5. Dennis B. Nelson, "Parameter Specification for Shaker Shock Waveform Synthesis-Damped Sines and Wavelets," Proceedings Shock & Vibration Symposium, 1986
6. MIL-STD-810E Military Standard Environmental Test Methods and Engineering Guidelines, pp.516.4-1~516.4-30, 1989