부트스트랩 기법을 이용한 소음진동 스펙트럼 분석법 소개
A Bootstrap Method for Analysis of Noise & Vibration Spectrum

전영두† · 박종찬* · 정의승**
Young-Doo Chun, Jong-Chan Park and Eui-Seung Chung

Key Words : Bootstrap method(부트스트랩방법), Statistics(통계), Probability(확률), Noise and Vibration Spectrum(소음진동 스펙트럼), Launch vehicle(발사체),

ABSTRACT

This paper introduces the Bootstrap method for statistical analysis of noise and vibration spectrum in aeronautic and space fields. Generally, all components of a launch vehicle and its payloads are subjected to high intensive noise and vibration environment during the lift-off phase and the ascent phase through Mach =1 and Max Q. In order to verify their survivabilities against these severe vibroacoustic environments during qualification tests and acceptance tests, it is most important to estimate the proper upper limits of the environmental condition. Although NASA has typically utilized the Normal Tolerance Limit method in deriving these levels, the reference[1] says that the Bootstrap can be also an alternative method to estimate the maximum expected environments. In this paper, a general procedure of the Bootstrap method is summarized, and it is applied to analyze acceleration power spectral density functions, which were measured during acoustic test on the upper stage of KSLV-I.

1. 서 론

발사체가 이륙하고 비행하는 동안 발사체를 이루는 모든 구성품과 탑재체(위성)는 심각한 음향/진동하중 환경을 겪게 된다. 특히 로켓엔진의 점화 직후부터 이륙초기와 함께 비행중 음속 돌파시(Mach=1) 및 최대동압 구간(Max. Q)을 통과할 때 과도한 음향하중에 노출되며, 이러한 음향하중은 비행체의 탑재물이나 위성구조물에 랜덤진동을 발생시킨다. 이중에서 로켓엔진의 배기유동으로부터 유발되는 소음의 경우, 전체 발생되는 음향하중의 대부분을 기여하며 로켓엔진의 형상, 배기가스 유속, 발사대 형상에 따라 소음수준이 달라지고 짧은 시간동안 집중되는 반면, 비행중 공기와 마찰로 발생되는 소음은 그 작용시간이 조금 더 긴 특성이 있다. 이렇게 발생된 소음은 발사체 외피에 입사되어 발사체 구조물을 진동시키고, 발사체 내부로 투과된 음향에너지는 내부음장을 형성하여 탑재물과 위성에 직접적인 랜덤진동을 유발시키게 된다. 발사체 탑재체에서 발생하는 전형적인 진동특성 경향은 Fig. 1의 예제와 같다[1].

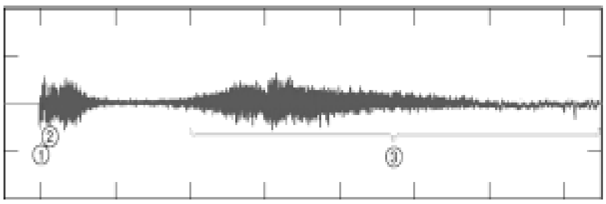

Fig. 1 Typical Vibration Environment of Launch Vehicle at Lift-off and Ascent Phase:(①Ignition, ② Lift-off, ③Transonic & Max Q)

발사체를 구성하는 구성품과 탑재체는 이러한 과도한 음향/진동 환경에서 생존하여 설계임무를 달성할 수 있어야 하며 설계된 고유 기능/성능의 저하가 수명주기(life-cycle) 동안 발생하지 않아야 한다. 선진국에서도 과거 초기 발사체 개발시 이러한 과도한 음향/진동하중에 의해 구성품의 성능이 저하되거나 기능상실으로 인해 발사실패확률이 높았으나, 다수의 발사/비행시험 및 지상시험 등으로 음향/진동하중에 대한 데이터를 충분히 확보함으로 이에 대처하는 설계/시험 기법이 개발되었다. 이러한 제품들은 개발과정이나 인증과정 및 양산/조립과정에서 각각 개발시험(DT: development

† 전영두; 한국항공우주연구원
E-mail : ydchun@kari.re.kr
Tel : (042) 860-2906, Fax : (042) 860-2233

* 한국항공우주연구원

** 한국항공우주연구원

test), 인증시험(QT: qualification test), 수락시험(AT: acceptance test)을 통하여 음향/진동환경에 대한 내성 및 설계여유(margin)을 확인하고 품질을 확인하게 된다. 그러나 이때 가장 중요한 것은 제품이 수명주기동안 겪게 될 정확한 음향/진동환경 조건을 측정하거나 예측해야 하며 이를 근거로 정확한 시험규격을 도출해내야 한다. 일반적으로 발사체 개발 초기단계에서는 축소형이나 실물형 추진기관의 연소시 발생하는 소음을 계측하고 이를 발사체 구조모델에 적용하여 랜덤진동환경을 예측하게 되고, 추후 실제 비행시험시 탑재된 계측시스템을 통해 이륙소음과 진동량을 측정하게 된다. 이러한 과정을 통해 획득한 음향하중을 근거하여 발사체 시스템이나 위성체에 대한 음향하중시험규격을 설정하게 된다. Piersol[2]는 비행체 콤포넌트에 대한 진동시험규격을 설정하기 위해 데이터 수집/처리, 데이터 그룹핑, 10단계에 걸친 규격설정절차를 제시함으로써 항공우주 비행체의 음향/진동 시험규격 설정의 기본개념을 상세히 정리하였다. 그리고 참고문헌 [3][4]는 미국의 우주비행체의 음향/진동/충격환경에 대한 시험규격설정방법 및 시험수행방법을 상세히 정의하고 규정하고 있다. 이들은 인증시험규격으로 사용할 극한예측환경(EEE: extreme expected environment)은 신뢰도 90%(C90)를 갖는 확률 99%(P99)의 비행환경조건을 넘지 않는 수준으로 정의하고, 수락시험규격으로 사용할 최대예측환경(MEE: maximum expected environment)은 신뢰도 50%(C50)를 갖는 확률 95%(P95)의 비행환경조건을 넘지 않는 수준으로 정의하며, 이들은 각각 평균 비행환경수준(평균값)에 비해 약 +5dB와 +11dB에 해당된다. 이때의 확률분포는 일반적으로 정규분포를 대상으로 샘플개수에 따라 신뢰도가 달라지는 다음식과 같은 정규허용한계(NTL: normal tolerance limits)를 적용하는 것이 보편적이다[5].

$$\Pr(\Pr(X \le \bar{x} \pm ks) > p) = \gamma \qquad (1)$$

여기서 $\bar{x}$는 샘플평균, s는 샘플표준편차, p는 확률, γ는 신뢰도를 나타낸다.

이에 반해, Hughes[6]는 모집단의 분포특성에 관계없이 샘플에 대한 리샘플링(resampling)방법을 이용하는 부트스트랩 통계기법(Bootstrap method)을 적용하여 진동시험규격을 설정하는 방법을 제시하였으며, Titan-IV발사체에서 계측한 데이터를 근거하여 정규허용한계방법 예측결과와 비교하여 서로 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서는 현재 개발되고 있는 한국형소형위성발사체(KSLV-I)의 상단조립체에 대해 수행된 음향하중시험 데이터를 근거하여 Hughes[6]가 제시한 부트스르랩 통계기법을 적용하여 진동시험규격을 설정하는 방식을 소개하고자 한다.

2. 부트스트랩 통계기법 소개[6]

2.1 기본 개념

Efron에 의해 개발된 부트스트랩 기법은 개념적으로는 ‘모집단의 확률분포를 모르는 상태에서, 주어진 랜덤샘플 X(n개)을 근거로 하여 임의의 랜덤변수 R(X)에 대한 분포를 예측하는 기법’이라 서술될 수 있고, 임의의 랜덤변수에 대해 모집단의 확률분포에 대해 상관없이 적은 샘플로부터 예측된 파라미터의 정확성과 불확실성 정도를 평가할 수 있는 기법이라 할 수 있다. 일반적으로 파라미터를 예측함에 있어서는 약 100개 수준의 부트스트랩 샘플을 이용하는 것이 적절하고 신뢰성 구간을 평가하기 위해서는 약 1000개 수준의 부트스트랩 샘플을 이용하는 것이 권장된다. 이러한 각 부트스트랩 샘플의 구성요소는 원 데이터 샘플로부터 랜덤하게 선택되어지는데 어떤 요소는 여러번 중복될 수 있고 또 어떤 요소는 한번도 선택되지 않을 수도 있다. 이렇게 생성된 많은 수의 부트스트랩 샘플군에 대해 구하고자 하는 파라미터를 계산하고 이를 전체 부트스트랩 샘플군에서 통계분포 및 신뢰구간을 예측할 수 있는 것이다.

2.2 부트스트랩 기법 적용절차

부트스트랩 기법을 적용하는 절차를 요약정리하면 다음과 같이 여섯 단계로 구분될 수 있다.

Step 1. 원(original) 샘플을 $X = (x_1, x_2, ..., x_n)$와 같이 정의한다.

Step 2. Step 1의 원 샘플을 리샘플링하여 부트스트랩 샘플을 생성시킨다. 예를 들어, 만일 원 샘플이 $n = 5$인 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$라 하면 $X_b = (x_3, x_5, x_3, x_4, x_1)$가 한 부트스트랩 샘플이 될 수 있다.

Step 3. Step 2의 리샘플링된 부트스트랩 샘플에 대해 구하고자 하는 파라미터 θ를 계산한다. 예를 들어, 만일 구하고자 하는 파라미터가 평균이라면, 즉 $\theta = mean(X)$이면 $\theta_b = mean(X_b) = (x_3 + x_5 + x_3 + x_4 + x_1)/5$이 된다.

Step 4. Step 2와 3 과정을 반복하여 많은 수의 부트스트랩 샘플군(B)을 생성시켜 구하고자 하는 파라미터군(θ_B)을 계산한다. 즉, $\theta_B = \{\theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}, ..., \theta_{bB}\}$을 생성한다.

Step 5. Step 4의 파라미터군(θ_B)으로부터 누적분포함수(CDF: cumulative distribution function)을 구한다.

Step 6. Step 5의 누적분포함수를 이용하여 신뢰도나 신뢰구간을 구한다. 예를 들어, 신뢰수준 $(1-\alpha)\times 100\%$는 누적분포함수의 $(1-\alpha)\times 100\%$ 값으로 예측한다.

3. KSLV-I 상단부 음향하중 시험[7]

한국형소형위성발사체(KSLV-I)의 상단조립체에 대한 음향하중시험의 주목적은 KSLV-I의 이륙초기나 비행중에 발생하는 극심한 음향하중에 노출된 상단부 시스템이 고유의 설계기능 및 성능을 충분히 만족하는지를 검증하는데 있으며, 또한 계측된 랜덤진동수준을 바탕으로 상단부 구성품에 대한 진동환경규격의 타당성을 확인하는데 있다. KSLV-I 상단부의 대부분 전장품들이 위치하는 탑재부에서의 진동시험규격을 예측하기 위해 해석구역(zone)을 탑재부로 한정하다. 탑재부는 다시 전장베이부와 KMS패널부로 구역을 나눌 수 있다. KSLV-I 상단조립체 엔지니어링모델에 대한 음향하중시험 중에 전장베이부와 KMS패널부에서 계측된 랜덤진동환경은 Fig. 2와 3과 같다. 전장베이부에서의 랜덤진동수준은 비교적 낮지만, 특정주파수 대역에서 구조공진으로 인한 과도응답특성이 나타남을 알 수 있다. 이에반해 KMS패널부에서의 랜덤진동환경은 전체적으로 전장베이부에 비해 더 큰 진동이 발생하고 있음을 알 수 있는데 이는 KMS구조물은 스팅거로 보강된 얇은 판재이므로 벌집구조체로 이뤄진 전장베이에 비해 음향하중에 취약하기 때문으로 판단된다.

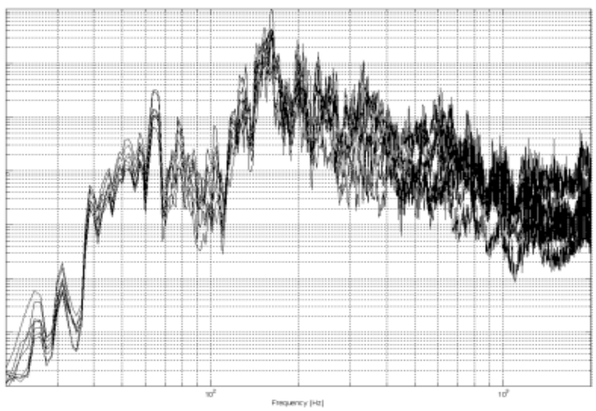
Fig. 2 Measured ASD on the VEB

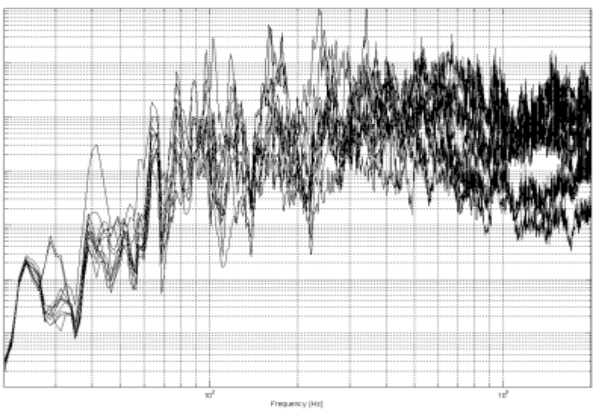
Fig. 3 Measured ASD on the KMS Panels

4. 부트스트랩 기법을 이용한 진동시험규격 예측

일반적으로 진동환경 시험규격을 설정하기 위해서는 많은 수의 비행측정 데이터가 요구되지만, KSLV-I의 경우 비행 데이터가 없는 상태이다. 그러나 3절과 같이 상단부에 대한 음향시험을 수행함으로써 진동환경을 추정할 수 있고, 이를 이용하여 전장베이부와 KMS패널부의 진동환경 시험규격을 도출하고자 한다. 참고로 Fig. 2와 3는 전장베이부 8지점, KMS패널부는 11지점에서 얻은 20Hz~2,000Hz구간으로 1.25Hz간격(1585 line)의 스펙트럼(ASD)자료이다. 그리고 일반적으로 진동데이터는 로그정규분포(log-normal)를 갖는다고 알려져 있기 때문에 통계처리를 위해서는 ASD값을 log10(ASD)로 변환하여 사용해야하며 최종적으로 10^X관계를 이용해서 다시 환원해야 한다[6]. 따라서 부트스트랩 기법을 적용하기 위해서는 먼저 ASD값을 log10변환한 후 이를 원 샘플(original sample)로 하여 각 주파수마다 전장베이부와 KMS패널부는 각각 8개, 11개의 샘플요소를 갖는 1000개의 리샘플군을 갖도록 랜덤하게 선택한다. 이와 함께 각 구역에 대한 모집단의 확률분포를 예측하기 위해 $z_{zone}(f,i)=\left\{x_{zone}(f,i)-\overline{x_{zone}}(f)\right\}/s_{x_{zone}}(f)$를 구하고 전주파수 영역이 비슷한 통계분포를 갖는다고 가정하면 전장베이부와 KMS패널부는 각각 12680(=8×1585)과 17435(=8×1585)의 샘플데이타를 형성할 수 있으며 이를 근거하여 누적분포함수(CDF)를 예측할 수 있다.

Table 1 Probability values of z_{zone} of each zone

	전장베이부	KMS패널부	정규분포
Median	0.014	0.159	0
Standard deviation	0.936	0.954	1
Skewness	-0.098	-0.301	0
Kurtosis	2.377	2.254	3
z(P95)	1.509	1.346	1.65
z(P99)	1.856	1.776	2.33

표 1은 각 구역별 z_{zone}의 통계특성을 나타내는데, 정규분포에 비해 전장베이부의 경우 첨도는 편평하지만 왜도는 작음을 알 수 있고, KMS패널부의 경우 첨도는 편평하면서 왜도가 있기 때문에, KMS패널부는 정규분포와 다소 차이가 있다고 할 수 있고, 이로 인해 정규분포에 비해 P95와 P99에 해당하는 값이 작게 계산됨을 알 수 있다. 이때의 구역별 z(P95)와 z(P99)을 이용하여 부트스트랩 리샘플링군에 대한 P95/C50과 P99/C99의 값을 다음 식을 이용하여 예측할 수 있다.

$$P95_{C50}(f)=500^{th}\ of\left\langle\overline{x_{BS}}(f)+z(P95)\times\overline{s_{BS}}(f)\right\rangle_{1000}$$

$$P99_{C90}(f)=900^{th}\ of\left\langle\overline{x_{BS}}(f)+z(P99)\times\overline{s_{BS}}(f)\right\rangle_{1000}$$

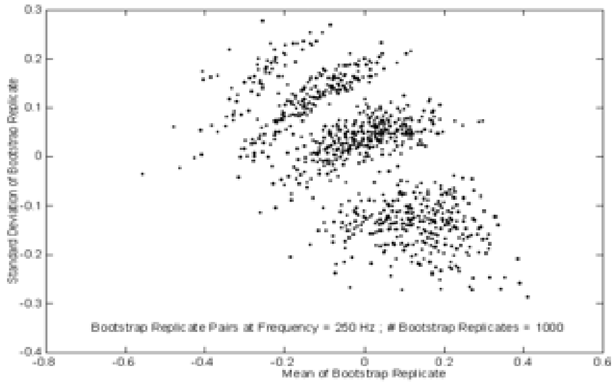

Fig. 4 Example of Mean and Standard deviation of Bootstrap replicate at 250Hz within the VEB zone

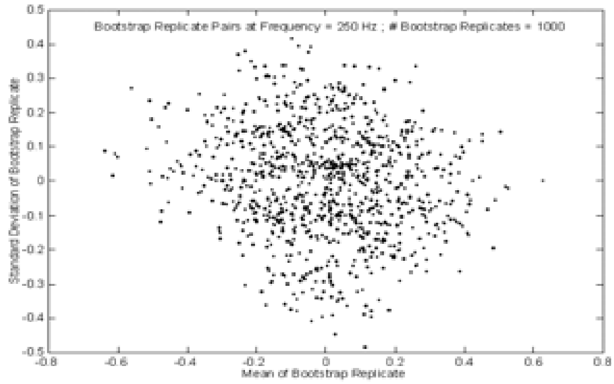

Fig. 6 Example of Mean and Standard deviation of Bootstrap replicate at 250Hz within the KMS zone

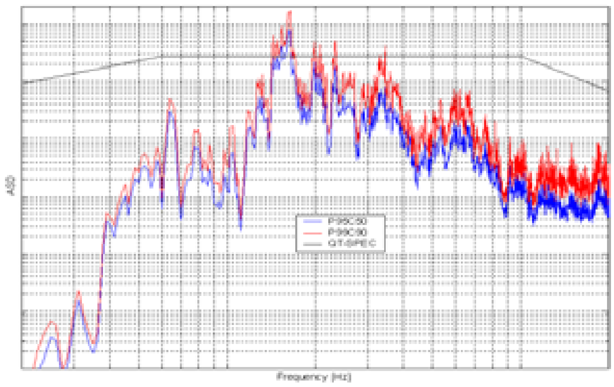

Fig. 5 Random vibration specification within the VEB zone. (P95/C50, P99/C90, QT-Spec)

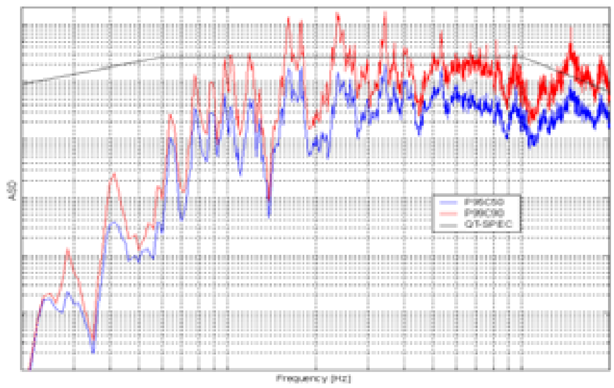

Fig. 7 Random vibration specification within the KMS zone. (P95/C50, P99/C90, QT-Spec)

먼저 전장베이부 해석결과를 살펴보면, Fig. 4에서 부트스트랩 리샘플군이 비교적 고르게 잘 퍼져있음을 알 수 있고 이를 이용하여 Fig. 5와 같이 P95/C50수준과 P99/90수준을 예측하고 기존 진동규격과 비교해보면, 특정주파수 영역(약 140~170대역)에서 기준을 초과하나 타 구간에서는 상당히 보수적(conservative)으로 설정되었다고 평가할 수 있다. 그리고 KMS패널부 해석결과를 살펴보면, Fig. 6에서 마찬가지로 부트스트랩 리샘플군이 비교적 고르게 잘 퍼져있음을 알 수 있고 이를 이용하여 Fig. 7와 같이 P95/C50수준과 P99/90수준을 예측하고 기존 진동규격과 비교해보면, 저주파수 대역(80Hz이하)을 제외하곤 타당하게 설정되어 있다고 평가할 수 있다.

5. 결 론

부트스트랩 통계적 기법 적용절차를 간단히 소개하고, 이를 이용하여, KSLV-I 상단부 음향하중시험시 계측한 진동 스펙트럼에 대한 P95/C50수준과 P99/C90수준의 값을 예측하여 기존의 진동시험규격과 비교를 통해 그 타당성을 평가할 수 있었고, 부트스트랩 통계적 기법의 유용성 및 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Perl, E., Do, Do., Peterson, A., and Welch, J., 2005, “Environmental Testing for Launch and Space Vehicles”, Crosslink, Vol6 No3

(2) Piersol, A. G., 1966, “The development of vibration test specifications for flight vehicle components”, J. Sound. Vib. 4(I), pp. 88~115.

(3) MIL-STD-1540C, "Test Requirements for Launch, Upper-stage, and Space Vehicles," 1994

(4) Himelblau, H., Manning, J. E., Piersol, A. G., and Rubin, S., 2001, “Dynamic Environmental Criteria”,NASA-HDBK-7005.

(5) Wheeler, J. T., 1993, “Statistical Computation of Tolerance Limits”, NASA/TM-108424

(6) Hughes, W. O. and Paez, T. L., 2006, “Application of the Bootstrap Statistical Method in Deriving Vibroacoustic Specifications”, NASA/TM-2006-214446

(7) 전영두, 박종찬, 정의승, 박정주, 조광래, 2007 "소형위성발사체 상단부의 음향하중시험", 한국소음진동공학회 춘계학술대회