

설계응답스펙트럼에 부합하는 목표 PSD함수의 작성 Generation of Target PSD Function Compatible with Design Response Spectrum

이상훈* 최동호**
Lee, Sang-Hoon Choi, Dong-Ho

ABSTRACT

Acceleration time history used in the seismic analysis of nuclear power plant structure should envelop a target power spectral density (PSD) function in addition to design response spectrum. Current regulation guide defines the target PSD function only for the U.S. NRC RG 1.60 Design Response Spectrum. This paper proposes a technical scheme to obtain the target PSD function compatible with generally defined design response spectrum. The scheme includes the methodology for design-spectrum compatible motion history in order to minimize the variation of the derived target PSD function. The PSD calculation procedure follows simple and practical methods allowed within regulation. Effectiveness of the proposed scheme is identified through an example problem. The design response spectrum in the example is based on U.S. NRC RG 1.60 but amplifies the spectral acceleration amplitudes above 9Hz. The target PSD function with little variation can be constructed with the reduced time history ensemble.

1. 서론

설계응답스펙트럼은 지진해석의 입력운동을 정의하는 중요한 수단 가운데 하나이므로 구조물의 설계기준에서 다양한 형태와 방법으로 정의되고 있다. 동적 응답해석시 입력운동으로서 설계응답스펙트럼 또는 시간이력 등이 일반적으로 사용되지만 PSD (Power Spectral Density) 함수를 입력운동으로 정의하는 경우도 있다[1]. 또한 원자력 분야의 지진해석에서 PSD 함수는 시간이력의 진동수 특성을 파악하기 위한 규제요건으로 활용되고 있다. 이에 따라 미국원자력규제위원회는 시간이력으로부터 PSD 함수를 계산하는 방법, RG 1.60의 설계응답스펙트럼[2]에 부합하는

* 정회원·한양대학교 토목공학과, 박사과정, 한국전력기술(주), 책임기술원

** 정회원·한양대학교 토목공학과, 부교수

구체적인 목표 PSD 함수의 형태 및 계산된 PSD 함수의 목표 PSD 함수를 포괄하는 요건 등을 명시해놓고 있다[3]. 그러나 RG 1.60의 설계응답스펙트럼과 다른 형태의 설계응답스펙트럼을 따라 지진해석을 수행할 경우 설계응답스펙트럼에 부합하는 고유의 목표 PSD 함수를 작성해야 한다. 하지만 현재의 기술로는 설계응답스펙트럼에 부합하는 PSD 함수를 정확히 구하는 방법은 개발되어 있지 않은 실정이므로, 근사적인 방법을 통하여 PSD 함수를 계산하는 방법이 제시되고 있다[1][4][5]. 지금까지 제시된 방법들은 대부분 설계응답특성에 부합하는 시간이력을 통하여 PSD 함수를 계산하고, 통계적 처리과정을 거쳐 목표 PSD 함수를 작성한다. 해석과정에서 사용되는 시간이력은 원칙적으로 대상부지 인근에서 발생했던 지진기록을 사용하는 것이 바람직하지만 이와 같은 조건을 만족하는 지진기록을 확보하는 것이 쉽지 않기 때문에 인공적으로 합성된 시간이력을 사용하는 방안이 연구되었다[6]. 본 연구에서는 현재 설계기준가운데 미국 원자력규제위원회의 SRP 3.7.1에 명시된 절차를 중심으로 고유의 설계응답스펙트럼에 부합하는 목표 PSD 함수를 계산하는 절차를 기술하였다. 또한 RG 1.60의 설계응답스펙트럼을 변형한 설계응답스펙트럼을 사용하여 본 절차에 따라 목표 PSD 함수를 구하고, 기존 SRP 3.7.1의 목표 PSD 함수와 비교함으로써 본 연구에서 기술된 절차에 대한 타당성을 보였으며, 예제해석에서는 실제 원자력발전소의 지진해석에서 사용되는 설계응답스펙트럼을 대상으로 구체적인 목표 PSD 함수를 계산하고, 결과를 분석하였다.

2. PSD 함수 작성방법

고유의 설계응답스펙트럼에 부합하는 목표 PSD 함수를 얻기 위해서는 가장 먼저 설계응답스펙트럼의 응답특성을 가능한 정확히 반영해주는 시간이력이 필요하다. 이때 사용될 수 있는 시간이력은 설계응답스펙트럼에 부합하는 지진기록이 가장 좋지만 통계적으로 처리할 정도의 지진기록들을 확보하는 것은 현실적으로 불가능하므로 설계응답스펙트럼에 부합하는 시간이력을 인공적으로 작성하는 것이 효과적이다. 인공적으로 시간이력을 작성하는 기술은 이미 1970년대 중반부터 개발되어 실무에 적용되어 왔으나[7], 최근 들어 시간이력의 외형에 대한 변형을 최소화하면서 설계응답스펙트럼의 응답 수준을 거의 정확히 맞추는 기술이 개발됨에 따라 설계응답스펙트럼에서 요구하는 응답특성을 거의 완벽하게 반영할 수 있는 인공적인 시간이력의 다량 생성이 가능해졌다[8]. 마찬가지로 지금까지 PSD 함수 작성을 위해 사용되었던 시간이력의 응답특성은 설계응답스펙트럼 기준에 비하여 어느 정도의 편차를 갖고 있었으나, 본 연구에서는 이러한 편차가 대폭 감소된 시간이력을 사용하여 PSD 함수를 작성하였으며, 구체적인 내용은 다음과 같다.

2.1 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공 시간이력 작성

가속도 시간이력 $\ddot{Z}(t)$ 를 임의의 위상각을 포함한 주기함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{Z}(t) = I(t) \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

여기서 A_i , ω_i 및 φ_i 는 각각 i 번째 주기함수의 진폭, 진동수 및 위상각에 해당되며, $I(t)$ 는 정상상태의 임의진동 파형을 비정상상태의 임의진동 파형으로 변환시켜주는 세기함수(deterministic intensity function)이다.

식(1)에서 얻어진 시간이력의 응답스펙트럼 값은 다음의 식(2)와 같은 단자유도계의 해를 통하여 구할 수 있다.

$$\ddot{X}(t) + 2\omega_i \xi \dot{X}(t) + \omega_i^2 X(t) = -\ddot{Z}(t) \quad (2)$$

여기서 $X(t)$ 및 $\dot{X}(t)$ 는 각각 시간이력의 상대변위 응답 및 속도이며, ω_i 는 i 번째 고유진동수, ξ 는 감쇠비이다.

진동수 ω_i 와 감쇠비 ξ 에서 시간이력의 응답스펙트럼값과 설계응답스펙트럼값과의 보정량을 $\delta S(\omega_i, \xi)$ 라 하면 임의의 시간함수 $\delta \ddot{Z}(t)$ 를 사용하여 식(3)과 같이 표현된다.

$$\delta S(\omega_i, \xi) = \int_0^{t_{mi}} \delta \ddot{Z}(\tau) h_i^k(t_{mi} - \tau) d\tau \quad (3)$$

$$h_i(t) = -\frac{1}{\omega_{Di}} \exp(-\xi \omega_{Di} t) \sin \omega_{Di} t \quad (4)$$

여기서 $h_i(t)$ 는 ω_i 와 감쇠비 ξ ($\omega_{Di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi^2}$)에 대한 단자유도계의 가속도 충격 응답함수(acceleration impulse response function)이고, t_{mi} ($t_m(\omega_i)$)의 생략형태는 스펙트럼 응답이 발생하는 시간이며, τ 는 시간변수이다. 임의의 시간함수 $\delta \ddot{Z}(t)$ 는 다시 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \ddot{Z}(t) = b' f'(t) \quad (5)$$

여기서 b' 은 미지의 상수이며, $f'(t)$ 는 또 다른 형태의 가속도 충격 응답함수이며, 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f'(t) = h_i(t_{mi} - t) \quad (6)$$

따라서 시간이력에 대한 보정량 $\delta S(\omega_i, \xi)$ 가운데 최대값 δS^{\max} 는 식(7)과 같이 단순한 형태로 표현될 수 있다.

$$C' = \int_0^{t_{mi}} h_i(t_{mi} - \tau) f'(\tau) d\tau \quad (7)$$

식(7)로부터 미지의 상수 b' 을 결정할 수 있으며, 임의의 시간함수 $\delta\ddot{Z}(t)$ 역시 정의될 수 있다. 이렇게 구해진 $\delta\ddot{Z}(t)$ 를 시간이력에 반복적으로 더해가면서 응답오차를 원하는 수준까지 감소시킨다.

2.2 목표 PSD 함수 작성방법

2.2.1 PSD 함수의 정의

미국원자력규제위원회는 설계자들로 하여금 간편한 방법으로 시간이력의 Fourier 응답 $F(\bar{\omega})$ 를 사용하여 PSD 함수 $S_i(\omega)$ 를 구하는 방법을 식(8)과 같이 제시하였다.

$$S_i(\bar{\omega}) = \frac{2|F(\bar{\omega})|^2}{2\pi T_D^i}, i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

여기서 T_D^i 는 주어진 시간이력의 강진구간이며, N 은 목표 PSD 함수를 구성하기 위해 사용된 총 시간이력 수이며, $\bar{\omega}$ 는 PSD 함수 영역에서 사용된 진동수이다. T_D^i 는 시간이력의 누적에너지에 대한 선형 경사구간으로부터 결정된다[9]. 시간 t_p (p 는 총 누적에너지에 대한 백분율)에서 누적에너지를 $E_i(t_p)$ 라 하면 식(12)를 이용하여 계산된다.

$$E_i(t_p) = \int_0^p a_i^2(t) dt, i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

여기서 $a_i(t)$ 는 각각의 시간이력이며, 누적에너지에 대한 선형 경사구간을 명백히 결정하기 어려운 경우 일반적으로 식(12)로부터 계산된 누적에너지 전체의 5%와 75%에 해당하는 시간 t_p 로부터 강진지속시간을 정의하기도 하며, 수식으로 표현하면 식(13)과 같다.

$$T_D^i = t_{75\%}^i - t_{5\%}^i, i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

2.2.2 평균 PSD 함수

1단계로 제시된 PSD 함수는 진동수 구간에 대하여 진폭의 오르내림이 심하므로 이러한 상태로는 PSD함수의 응답특성을 한눈에 파악하기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 첫 번째 단계로서 식(11)로부터 구한 여러 개의 PSD 함수를 평균화한다. 평균화는 여러 종류의 시간이력에 대한 PSD 함수의 응답특성으로부터 단일 PSD 함수로의 변환과 불규칙한 PSD 함수의 응답특성을 일관된 형태로 바꾸는 의미를 갖는다. 평균화 과정을 거쳐 얻어진 평균 PSD 함수

$S_m(\bar{\omega})$ 는 각 진동수에서 진폭의 불규칙성이 대폭 감소하게 되며, 식(14)와 같이 표현된다.

$$S_m(\bar{\omega}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(\bar{\omega}) \quad (14)$$

각각의 시간이력에 대응되는 강진지속시간 T_D^i 에 대한 평균값을 계산함으로써 등가 강진지속시간인 T_D 를 얻을 수 있다. 즉,

$$T_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_D^i, \quad i=1,2,\dots,N \quad (15)$$

2.2.3 PSD 함수의 평활화 및 로그선형화

미국 원자력규제위원회 SRP 3.7.1의 요건에 따르면 단일 PSD 함수의 불규칙한 응답특성을 완화시키기 위한 방안으로서 각 진동수를 중심으로 $\pm 20\%$ 의 진동수 대역의 진폭에 대해 이동평균한 값을 PSD 함수로 변환하도록 요구하고 있다. 이동평균에 의해 평활화된 PSD 함수(smoothed PDS function) $\tilde{S}_m(\bar{\omega})$ 는 로그좌표계에서 거의 선형화된 형태를 보인다.

$\tilde{S}_m(\bar{\omega})$ 를 설계응답스펙트럼과 대응되는 PSD 함수형태로 변환하기 위하여 $\tilde{S}_m(\bar{\omega})$ 를 몇 개의 진동수 대역으로 분할하고, 각 구간에서 $\tilde{S}_m(\bar{\omega})$ 를 보간한 로그선형 평균 PSD 함수 $\bar{S}_m(\bar{\omega})$ 를 구한다. 이때 구간별로 계산된 로그선형 평균 PSD 함수는 설계응답스펙트럼에서 정의된 진동수 대역과 연계성을 갖고 있어야 하며, $\bar{S}_m(\bar{\omega})$ 의 누적 에너지는 $\tilde{S}_m(\bar{\omega})$ 의 누적 에너지와 일치하거나 그 이상이어야 타당하다.

2.2.4 PSD 함수의 크기 조정

지금까지 계산된 로그선형 평균 PSD 함수는 설계응답스펙트럼의 평균값에 표준편차를 더한 수준, 즉 $(m+\sigma)$ 에 대응되는 목표 PSD 함수에 해당한다. 규정에 의하면 설계응답스펙트럼에 부합하고 이를 포괄하는 응답특성을 보이는 시간이력의 PSD 함수는 일반적으로 최소요구 목표 PSD 함수(minimum-required target PSD function)를 포괄해야 한다. 최소요구 목표 PSD 함수의 크기는 $(m+\sigma)$ 수준의 목표 PSD 함수를 80%내외의 일정한 크기로 낮추어 정의하는 것이 일반적이며, 여기서는 미국 원자력규제위원회에서 제시한 80%를 적용하여 최소요구 목표 PSD 함수 $\hat{S}_m(\bar{\omega})$ 를 정의하였으며, 이를 수식으로 표시하면 식(16)과 같다.

$$\hat{S}_m(\bar{\omega}) = 0.8\bar{S}_m(\bar{\omega}) \quad (16)$$

3. 예제해석

RG 1.60 이외의 다른 설계응답스펙트럼을 적용하여 원자력발전소 구조물의 지진해석을 수행하는 경우 시간이력의 PSD 함수에 대한 목표 PSD 함수의 포괄요건을 위하여 SRP3.7.1의 목표 PSD 함수를 사용할 수 없고 설계응답스펙트럼에 대응하는 목표 PSD 함수를 별도로 작성하여야 한다. 예제해석에서 사용된 설계응답스펙트럼은 RG 1.60의 설계응답스펙트럼과 유사하지만 9Hz이상부터 고진동수 영역부분의 응답이 증가된 형태를 보인다. 이와 같이 RG 1.60과 CMS1+로 명명한 예제해석용 설계응답스펙트럼의 감쇠비 2%에 대한 응답특성을 그림1에 나타내었다.

먼저 CMS1+에 부합하는 목표 PSD 함수 작성에 필요한 시간이력을 얻기 위해 CMS1+의 감쇠비 2% 설계응답스펙트럼을 만족하는 인공 시간이력을 2.1항에 기술된 내용에 따라 작성하였다. 일차적으로 감쇠비 2% 설계응답스펙트럼에 대하여 임의로 작성된 50개의 인공 시간이력을 생성시켰으며 이들의 감쇠비 2%에 대한 응답특성은 그림2와 같다. 그러나 그림2와 같이 설계응답스펙트럼과 많은 응답 차이를 보이는 시간이력을 사용하여 목표 PSD 함수를 작성할 경우 신뢰성이 낮아지므로 후속작업으로 시간이력의 응답을 설계응답스펙트럼에 가능한 정확히 맞추는 변환작업을 수행하였다. 변환작업을 거친 시간이력의 감쇠비 2%에 대한 응답특성을 그림3에 나타내었다. 또한 해석에 사용하는 시간이력을 10개부터 10개 단위씩 증가시켜 50개까지 확장한 앙상블에 대하여 별도로 목표 PSD 함수를 구함으로써 통계처리에 충분한 시간이력의 수를 조사하였다.

다음 단계는 식(11)을 이용하여 각각의 시간이력에 대한 PSD 함수를 계산하였다. 그림4에서는 50개의 시간이력에 대해 계산된 PSD 함수를 보인 것이다. 여러 PSD 함수들의 평균 응답특성을 얻기 위하여 식(14)를 적용하여 평균 PSD 함수를 구하였다. 이때 10, 20, 30, 40, 50개의 다섯 종류 앙상블을 사용하여 평균 PSD 함수를 각각 구하였다. 평균화 작업만 거쳐도 PSD 함수의 불규칙 정도가 낮아졌으며, 또한 샘플링 수가 증가할수록 평균 PSD 함수의 불규칙성이 낮아짐을 확인할 수 있다. 그림5는 대표적으로 10개와 50개의 평균 PSD 함수를 보인 것이다.

평균 PSD 함수를 보다 완만한 형태로 변환하기 위하여 2.2.3항에 기술된 이동평균을 적용하여 평활화된 PSD 함수를 계산하여 그림6과 같은 결과를 얻었다. 평활화된 PSD 함수는 응답의 불규칙성이 거의 배제되고 설계응답스펙트럼과 연계된 특성을 시각적으로 확인할 수 있는 정도로 근접한 상태로 변환되었다. 평활화된 PSD 함수를 설계기준과 연계시키기 위하여 구간별로 로그선형화 하였다. 이때 각 구간의 설정은 설계응답스펙트럼의 통제진동수와 일치해야 하며, 실제로 그림을 통해서 거의 일치함을 확인할 수 있다. 본 해석에서 각 구간 설정을 위하여 사용된 통제진동수는 0.3Hz, 2.5Hz, 9.0Hz, 16Hz, 및 24Hz이다. 로그선형화를 통해 계산된 평균 PSD 함수는 그림7과 같다. 최종적으로 식(16)을 이용하여 0.3Hz에서 24Hz의 PSD 함수의 80%를 적용한 값을 계산하여 시간이력의 최소요구 목표 PSD 함수를 구하였다. 한편, 그림7에서 각 앙상블에 대해 계산된 로그선형 평균 PSD 함수는 20개 이상일 경우 거의 차이를 보이지 않은 것으로 나타나 최소 20개 이상의 시간이력만 있으면 설계응답스펙트럼에 부합하는 충분한 정도의 목표 PSD 함수를 얻을 수 있다. 한편, 그림8은 SRP 3.7.1에 명시된 RG 1.60에 대응하는 PSD 함수와

해석결과로부터 구한 PSD 함수를 비교한 그림으로서 진동수 9Hz까지의 응답은 거의 일치함을 보였으며, 그 이상 구간에 대해서는 CMS1+의 보강된 가속도 진폭의 영향에 따라 SRP 3.7.1의 PSD 함수보다 높은 진폭을 보임으로써 해석결과로부터 얻은 목표 PSD 함수는 적절한 진폭을 갖는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 설계응답스펙트럼에 부합하는 목표 PSD 함수를 작성하기 위하여 각 단계별로 미국 원자력규제위원회 SRP 3.7.1의 요건 또는 관련 참고자료의 내용을 적용하였다. 특히 PSD 함수작성을 위해 필수적으로 요구되는 시간이력을 설계응답스펙트럼의 응답특성에 최적으로 부합하는 인공 시간이력을 사용함으로써 설계응답스펙트럼으로부터 계산된 목표 PSD 함수의 신뢰성을 높일 수 있었다. 또한, 일관된 응답특성을 제공하는 인공 시간이력의 사용으로 통계처리에 필요한 시간이력의 샘플링 수를 대폭 줄일 수 있어 보다 효율적으로 목표 PSD 함수 작성이 가능하다.

참고문헌

1. Pfaffinger, D.D., "Calculation of Power Spectra from Response Spectra", J. of Engrg. Mech. Div., ASCE, 109(1), 1983, pp. 357-372.
2. U.S. NRC, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.60, Rev. 1, December 1973.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan" Section 3.7.1, Revision 2, August 1989.
4. Park, Y. J., "Nonlinear 3-D Piping Analysis under Stochastic Dynamic Loads: Response Spectrum Approach", ASME/PVP Conf., ASME, New York, N.Y., Vol. 237-1, 1992, pp. 217-222.
5. Park, Y. J., "New Conversion Method from Response Spectrum to PSD Functions." Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121, No. 12, December, 1995.
6. M. Shinozuka, T. Mochio, and E.F. Samaras, "Power Spectral Density Functions Compatible with NRC Regulatory Guide 1.60 Response Spectra", NUREG/CR-3509, June 1988.
7. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Evaluation of Seismic Safety of Buildings Report No. 2, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, Massachusetts, Publication No. R76-4, 1976.
8. Choi, Dong-Ho and Lee, Sang-Hoon, "Multi-damping earthquake design spectra-compatible motion histories. Nuclear Engineering and Design", 226, 2003, pp. 221-230.
9. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5347, "Recommendations for Resolution of Public Comments on USI A-40, Seismic Design Criteria", Brookhaven National Laboratory, June 1989.

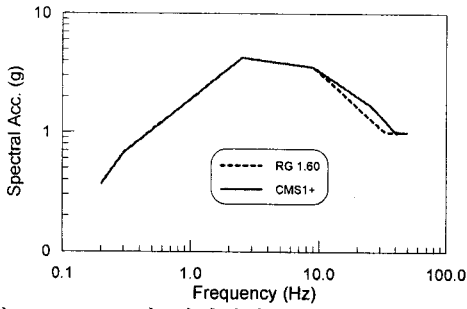


그림1. RG 1.60과 예제해석에 사용된 설계응답스펙트럼 (감쇠비:2%)

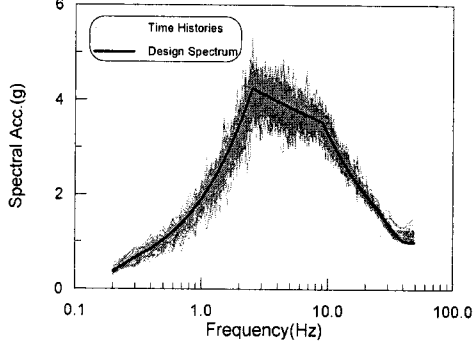


그림2. 설계응답스펙트럼에 맞추는 변환작업이전 임의로 작성된 50개의 인공 시간이력의 응답 (감쇠비 2%)

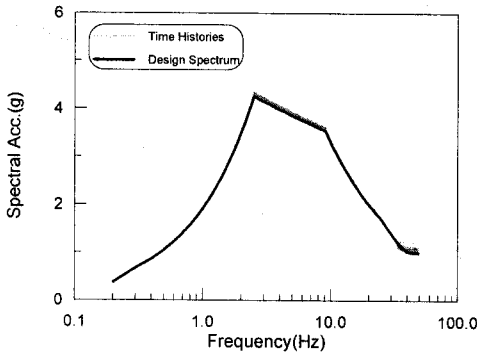


그림3. 설계응답스펙트럼에 맞추는 변환작업이후 50개의 인공 시간이력의 응답 (감쇠비 2%)

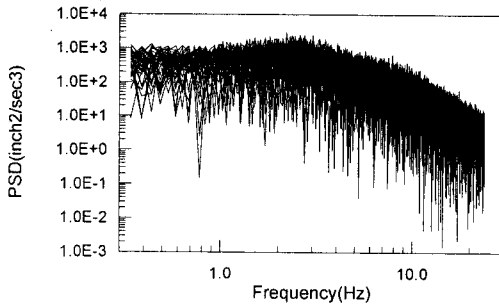


그림4. 50개의 시간이력에 대한 PSD 함수

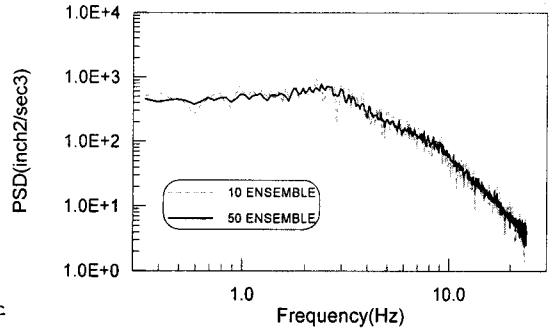


그림5. 다섯 종류의 앙상블로부터 구한 평균 PSD 함수

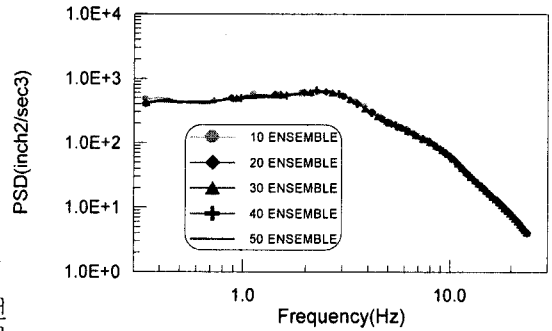


그림6. 이동평균을 적용하여 계산된 PSD 함수

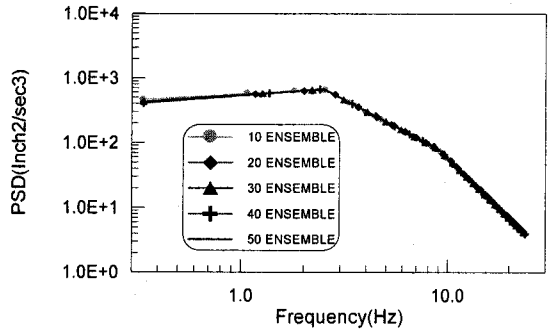


그림7. 로그 선형화를 통해 계산된 평균 PSD 함수

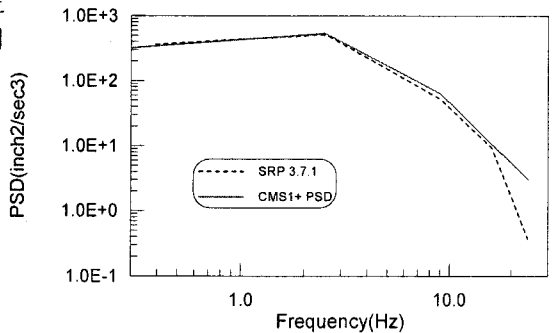


그림8. SRP 3.7.1의 PSD함수와 CMS1+에 부합하는 PSD 함수의 비교