

정상 에르고드성을 가지는 확률과정 스펙트럼에 대한 합리적 시계열 데이터 확보

박준범* · 김경수* · 정준모* · 김재우* · 유창혁* · 하영수*

*인하대학교 조선해양공학과

Data Acquisition of Time Series from Stationary Ergodic Random Process Spectrums

Jun-Bum Park*, Kyung-Su Kim*, Joonmo Choung*, Jae-Woo Kim*, Chang-Hyuk Yoo* and Yeong-Su Ha*

*Dept., of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

KEY WORDS: Stationary ergodic random Process 정상 에르고딕 확률 과정, Spectrum 스펙트럼, Zero-crossing period 영점 교차 주기, Peak period 피크 주기, Irregularity factor 불규칙 계수, Sampling time increment 샘플링 시간 증분, Frequency increment 주파수 증분

ABSTRACT: The fatigue damages in structural details of offshore plants can be accumulated due to various environmental loadings such as swell, wave, wind and current. It is known that load histories acting on mooring and riser systems show stationary and ergodic bimodal wide-banded process. This paper provides refined approach to obtain time signals representing stress range histories from wide-banded bimodal spectrum which consists of ideally narrow-banded and fully separated two spectrums. Variations of the probabilistic characteristics for time signals according to frequency and sampling time increments are compared with the reference data to be the probabilistic characteristics such as zero-crossing period, peak period, and irregularity factor obtained from an assumed ideal spectrum. It is proved that the sampling time increment more affects on the probabilistic characteristics than frequency increment. The fatigue damages according to the frequency and sampling time increments are also compared with the ones with minimum increment condition which are thought to be exact fatigue damage. It is concluded that the maximum sampling time increment to obtain reliable time signals should be determined that ratio of applied maximum sampling time increment and minimum period is less than approximately 0.08.

1. 서 론

FPSO와 같은 해양 플랜트는 바람, 너울, 풍파, 조류 등과 같은 불규칙한 환경 하중으로 인하여 부유체 운동, 선체 응력 등의 응답 특성도 불규칙한 양상을 나타낸다. 이러한 구조 부재의 불연속적인 형상에 환경 하중이 작용하여 피로 손상이 발생할 수 있으며, 운용 기간 동안 피로 손상을 최소화시키기 위해 피로 수명을 예측하는 기법이 중요하다.

시간 영역에서 얻어진 응답의 이력(응력 이력)을 RFC(Rain-flow counting) 방법 등을 이용하여 응력 진폭과 반복수를 얻을 수 있고, 재료의 S-N 선도를 이용하여 누적 피로 손상을 용이하게 예측할 수 있다. 하지만 시간 영역 데이터는 너무 방대하기 때문에 실제 설계 적용 시에는, FFT(Fast fourier transformation)를 이용하여 주파수 영역 데이터로 변환 후 적절한 통계적 처리를 통하여 누적 피로 손상도를 예측한다. 이를 통상적으로 통계적 피로 해석법이라 한다.

시간 영역 데이터로부터 얻어진 평균 영점 교차 주기(Average zero up crossing period, \bar{v}^0), 평균 피크 주기(Average peak period, \bar{v}^+), 불규칙 계수($\alpha = \bar{v}^0 / \bar{v}^+$, irregularity factor) 등은 주

파수 영역에서 스펙트럼 모멘트의 조합에 의하여 얻어진 결과와 일치해야 한다. 시계열 데이터를 추출하는 과정에서 샘플 데이터의 개수가 적으면, 샘플 시계열 데이터의 특성치는 모집단 스펙트럼 특성치와 일치하지 않게 된다. 주파수 영역의 데이터를 시간 영역으로 변환(IFFT, Inverse fast fourier transformation)할 경우, 주파수 증분이 클 경우 스펙트럼의 에너지 손실이 발생할 수 있으며, 위상차의 불규칙성을 충분히 고려하지 않을 경우, 시간 영역 데이터의 불규칙성을 충분히 나타낼 수 없는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 조건을 만족하지 않고 주파수 영역으로부터 시간 영역으로 변환된 데이터는 정상성 및 에르고드성을 가진다고 볼 수 없다. 피로 수명을 도출하기 위해서는 응력 응답의 피크 값을 얻어야 하기 때문에 IFFT 수행 시, 시계열 샘플링 시간 간격도 IFFT의 정확도를 결정짓는 중요한 인자라 할 수 있다.

일반적으로 시계열을 사용하여 구조물의 피로 손상도 예측하는 기법은 도출된 하중 이력에 대한 진폭 및 반복수를 적절히 집계(Counting)하여 Palmgren-Miner(1945)의 선형 누적 법칙을 적용하여 피로 수명을 추정하는 것이다. 하지만 시계열 응답에 기반한 피로 손상도 예측 기법은 전체 작업 시간과 상당한 비

교신저자 박준범: 부산광역시 부산진구 범천1동 862-1, 051-640-5038, jun-bum.park@lr.org

용의 소모가 발생한다. 게다가 정상성 및 에르고드성을 만족하지 못할 정도로 시계열 샘플의 크기가 작다면, 구조물의 설계 수명 동안의 피로 손상도를 정확히 예측하기 어렵다.

장기간의 실험 또는 시뮬레이션을 필요로 하는 문제점을 극복하기 위하여, 선박 또는 해양 플랫폼의 경우 주로 주파수 영역 피로 해석법을 적용하여 피로 손상도를 평가하게 된다. 단기 해상 상태에 근거한 주파수 영역 피로 해석법은 파랑에 의하여 발생한 응력 스펙트럼의 형상이 협대역이며, 응력 진폭은 레일리 분포(Rayleigh distribution)한다는 가정을 전제로 한다. 그러나 응력 진폭의 분포가 레일리 분포를 따르지 않는 경우 또는 응력 스펙트럼이 광대역으로 간주되는 경우, 주파수 영역 피로 해석법에 의한 피로 손상도의 정확도는 시간 영역에서 도출된 피로 손상도와 많은 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.

통상적으로 시간 영역에서 얻어진 피로 손상도를 정해로 간주하는데, 이를 위하여 Matsuishi and Endo(1968)에 의해 처음 제안된 RFC법을 가장 많이 적용한다. Rychlik(1987)은 새로운 RFC를 이용한 누적 피로 손상의 특성치를 연구한 바 있으며, Wirsching and Light(1980), Dirlik(1985), Benasciutti and Tovo (2005) 등은 복합 하중으로 인한 광대역 하중 응답 분포에 대한 피로 손상도 추정 기법에 대한 경험식을 제안하여, 주파수 영역 피로 해석법의 정량성을 확보하고자 노력하였다. Choung et al. (2007)은 완전 통계적 피로 평가기법을 이용하여 불규칙 하중 하에 있는 해양 플랫폼 피로 취약부를 스크리닝하는 방법을 제시하였으며, Lim et al.(2011)은 이봉형 스펙트럼(Bimodal spectrum) 특성을 가지는 FPSO 다점 계류 시스템의 피로 손상에 대한 연구를 수행한 바 있다.

따라서 본 논문에서는 주어진 응력 스펙트럼으로부터 정상성 및 에르고드성을 만족하는 시계열의 데이터의 취득 방법 및 시계열 데이터의 집계법에 대한 연구를 수행하고자 한다. 주파수 영역 응력 진폭 스펙트럼에 IFFT를 적용하여 정상성과 에르고드성을 만족하는 시계열 응답을 확보하는 방법을 제시할 것이다. 그리고 시간 영역에서 얻어진 평균 영점 교차 주기, 평균 피크 주기, 불규칙 계수를 스펙트럼의 특성치(스펙트럼 모멘트)를 이용하여 얻어진 결과와 비교함으로써, 본 연구에서 제시한 방법론의 타당성 및 신뢰성 검증하고자 한다.

2. 동적 응답의 확률 특성

일반적으로 시간에 따른 불규칙한 동적 응답이 확률 법칙을 따를 때 확률 과정(Random process)이라 한다. 이 때의 확률 과정의 변수는 시간의 함수로서 표현이 가능하다. 그러나 시간에 따른 확률 과정의 통계적 성질이 변하지 않을 경우, 이러한 확률과정을 보다 엄밀하게 정상 확률 과정(Stationary random process)이라 한다. 응답의 통계적 특성치인 평균, 분산, 상관 계수 등이 시간에 관하여 변하지 않는 확률 과정을 의미한다. 정상 확률 과정을 만족하면서, 고려된 시계열에 대한 응답의 평균이 특정 시간 구간(Ensemble)에 대한 응답의 평균과 같을 경우, 응답 분포는 에르고드성을 가진다고 하며, 이 때의 특정 시간 구간은 전체 시계열 응답을 대표할 수 있는 것으로 간주

된다. 에르고드성과 정상성을 만족하는 확률 과정 응답 특성치를 나타내기 위하여 파워 스펙트럼 밀도(PSD, Power spectrum density)의 개념이 적용되며, PSD 가 비교적 넓은 범위의 주파수 영역에서 표현될 때 광대역 확률 과정으로 간주될 수 있으며, 특정 주파수 영역에서 밀집하는 경우를 협대역 확률 과정이라 한다.

2.1 정상성 및 에르고드성 Hino(2000)

시간에 따른 응답을 $f(t)$, 특정 시간($t = t_k$)에서 얻어진 응답을 k 번째 앙상블(f_k), 앙상블의 개수를 N 이라 정의할 때 각각의 앙상블 평균($\mu(t_k)$)으로부터 얻어진 응답의 전체 평균($\mu(t)$)을 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

또한 특정 시간($t = t_k$)에서의 응답과, τ 만큼 시간 지연 후 응답의 상관 관계를 자기 상관 함수(Auto-correlation function)라 정의하며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. $\mu(t_k)$ 가 시간의 함수가 아니며(식 (3) 참조), 자기 상관 함수가 지연 시간만의 함수로 표현될 때, 이러한 확률 과정을 약정상 확률 과정(Weakly stationary random process) 또는 광의 정상 확률 과정(Wide sense stationary random process)이라 한다. 통상 식 (1)과 식 (2)를 1차 및 2차 평균으로 정의하며, $f(t)$ 가 n 차 평균에 대하여 시간에 따른 변동성이 없을 때, 식 (3)과 식 (4)와 같이 정상 확률 과정이라 정의한다.

어떠한 시간에서도 응답의 평균값이 앙상블의 1차 및 2차 평균과 일치할 때, 정상 확률 과정은 정상 에르고드 확률 과정(Stationary ergodic random process)으로 간주된다.

실질적으로 물리 현상이 정상성과 에르고드성을 동시에 만족할 때 응답의 시간적 평균을 이용하여, 주파수 영역에서의 응답의 통계적 특성을 나타낼 수 있다.

$$E[f(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(t) = \mu(t) \tag{1}$$

$$C(t_1, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(t_1) f_k(t_1 + \tau) \tag{2}$$

$$\mu(t_k) = \mu \tag{3}$$

$$C(t_k, \tau) = C(\tau) \tag{4}$$

2.2 확률 특성 및 스펙트럼 밀도 함수

불규칙 응답을 정상 에르고드 확률 과정으로 가정하게 되면 식 (5)와 같이 자기 상관 함수로 표현되는 주파수 영역의 스펙트럼 표현이 가능해진다. 스펙트럼은 각 주파수에서 진폭의 제곱에 비례하는 에너지를 의미하며, 단위 주파수에 대한 평균 에너지를 의미한다. 스펙트럼으로부터 통계적 특성치를 나타내기 위한 m 차 스펙트럼 모멘트를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)~(9)는 각각 스펙트럼 모멘트를 이용하여 계산된 평균 영점 교차 주기, 평균 피크 주기, 불규칙 계수를 의미한다.

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \tag{5}$$

$$\lambda_m = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^m S(\omega) d\omega \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

$$v^0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (7)$$

$$v^+ = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_4}{\lambda_2}} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{v^0}{v^+} \quad (9)$$

α 주파수

이와 같이 주파수 영역에서 스펙트럼 모멘트에 의하여 얻어진 통계적 특성치는 시계열 데이터로부터 계산된 통계적 특성치와 같아야 한다. 특히 불규칙 계수의 경우, 응답 분포가 협대역인지 광대역인지를 구분하는 주요 지표로 사용된다.

2.3 시계열 데이터 추출

통계적 특성을 알고 있는 스펙트럼으로부터, 불규칙한 응답의 시계열 데이터($f(t)$)를 추출하기 위하여, 복소 푸리에 성분을 사용하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 $f(t)$ 를 이산형으로 나타내면 식 (11)과 같이 일정 간격을 가지는 주파수 증분 ($\Delta\omega$)과 증분 간격에서의 평균 주파수($\bar{\omega}_k$)로 표현이 가능하다. 주파수 증분과 평균 주파수는 식 (12) 및 식 (13)에 나타내었다. 식 (11)에서 θ_k 는 해당 주파수에서 시계열 데이터의 위상각을 의미한다.

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)| e^{i\omega t} d\omega \quad (10)$$

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2S(\bar{\omega}_k)} \Delta\omega_k \cos(\bar{\omega}_k t + \theta_k) \quad (11)$$

$$\Delta\omega_k = \omega_k - \omega_{k-1} \quad (12)$$

$$\bar{\omega}_k = \frac{\omega_k + \omega_{k-1}}{2} \quad (13)$$

3. 사례 연구

3.1 스펙트럼 정의

본 논문에서는 시계열 데이터 산출을 위해 이상적인 두 개의 협대역 스펙트럼으로 구성된 이봉 스펙트럼을 적용하였다. 평균 고주파수 및 평균 저주파수를 변경하면서 다양한 스펙트럼을 구현하였다. Benasciutti and Tovo(2005)는 서로 다른 스펙트럼의 효과적인 비교 분석을 위하여, 주파수비(R) 및 면적비(B)를 식 (14) 및 식 (15)와 같이 정의한 바 있다. 또한 주파수 영역 대의 범위는 식 (16)과 같이 하였다. 스펙트럼 폭비(c)도 Benasciutti and Tovo(2005)가 제시한 범위를 적용하였다(식 (16) 참조). 각 스펙트럼의 평균 주파수는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (18)은 양수 주파수 범위에 대한 스펙트럼을 나타낸다.

$$\omega_1 = \frac{\omega_a + \omega_b}{2}, \quad \omega_2 = \frac{\omega_c + \omega_d}{2} \quad (14)$$

$$R = \frac{\omega_c}{\omega_a} = \frac{\omega_d}{\omega_b} \quad (15)$$

$$B = \frac{W_2(\omega_d - \omega_c)}{W_1(\omega_b - \omega_a)} \quad (16)$$

$$c = \frac{\omega_b}{\omega_a} = \frac{\omega_d}{\omega_c} = \frac{1.1}{0.9} \quad (17)$$

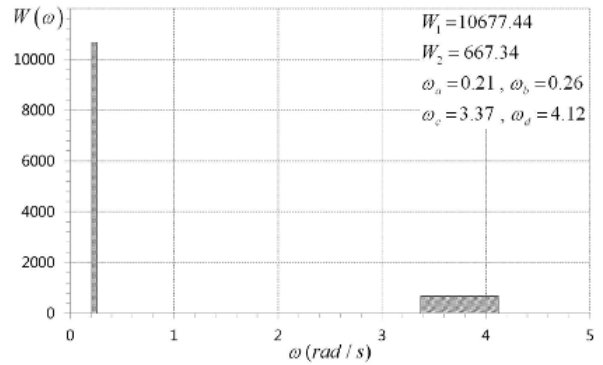
$$W(\omega) = \begin{cases} 2S(\omega), & 0 < \omega < \infty \\ S(\omega), & \omega = 0 \end{cases} \quad (18)$$

W_1 W_2 : 이봉 스펙트럼 값

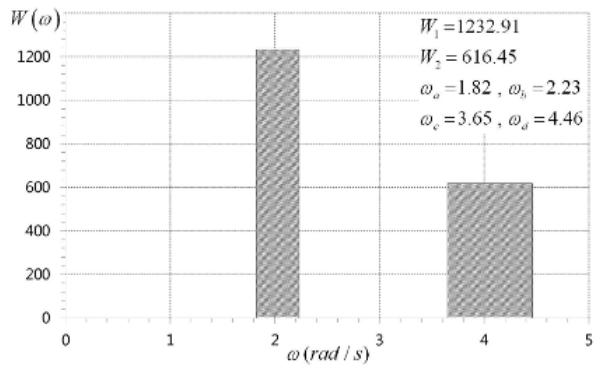
R : 주파수 비(Frequency ratio)

B : 면적 비(Area ratio)

주파수 범위는 1~5rad/sec을 초과하지 않았으며, 이는 초대형 선박의 선체 2절 진동 주파수(Springing frequency)까지 포함하는 범위이다. 본 연구에서는 R 과 B 의 2가지 조합을 대상으로 하였으며, 스펙트럼은 Fig. 1과 같은 형상을 하고 있다 스펙트럼과 관련된 특성치는 Table 1에 나타내었다. 피로 손상에 큰 영향을 미치는 주요 인자인 이봉 스펙트럼의 영차 모멘트(λ_0) 값을 고정시킨 후 R 을 변경하면서 통계적 특성치의 변화를 관찰하였다.



(a) $R = 16$



(b) $R = 2$

Fig. 1 Applied bimodal spectrums

Table 1 Spectrum parameters

| R = 16, B = 1 | | | | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|
| ω_a | ω_b | ω_c | ω_d | W_1 | W_2 | λ_0 |
| 0.21 | 0.26 | 3.37 | 4.12 | 1.1e4 | 6.7e2 | 1.0e3 |
| λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | ν^0 | ν^+ | α |
| 2.0e3 | 7.1e3 | 2.7e4 | 1.0e5 | 0.4 | 0.6 | 0.7 |

| R = 2, B = 1 | | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|
| ω_a | ω_b | ω_c | ω_d | W_1 | W_2 | λ_0 |
| 1.82 | 2.23 | 3.65 | 4.46 | 1.2e3 | 6.2e2 | 1.0e3 |
| λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | ν^0 | ν^+ | α |
| 3.0e3 | 1.0e4 | 3.8e4 | 1.4e5 | 0.5 | 0.6 | 0.9 |

3.2 시계열 데이터 획득

스펙트럼으로부터 신뢰성 있는 시계열 데이터를 얻기 위해 주파수 증분($\Delta\omega$) 및 샘플링 시간 증분(Δt)은 중요한 인자이다. 본 연구에서 적용한 스펙트럼은 Fig. 1과 같이 이상적인 이봉형 사각 스펙트럼으로서, 이를 통해 시간 영역 응답을 산출하였기 때문에 에너지 손실이 없다. 따라서 주파수 증분의 크기는 시계열 데이터에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 실제 스펙트럼의 경우 에너지 손실이 발생하지 않도록 주파수 증분을 충분히 작게 설정할 필요가 있다. 시계열 데이터는 주파수 영역 스펙트럼으로부터 양상블 시간을 20회 반복하여 시계열 응답을 추출하였으며, 이를 1블록으로 정의하였다(Dirlik, 1985). 본 연구에서는 파랑 하중에 대한 양상블 시간을 3시간으로 정의하였다. 또한 1블록을 10번 반복하여 얻어진 시계열 응답의 평균을 최종 시계열 데이터로 사용하였다. 따라서 시계열 응답의 통계적 특성치인 평균 영점 교차 주기, 평균 피크 주기 및 불규칙 계수도 10개 블록의 평균치를 사용하였다. 주파수 증분은 Table 2에 보인 바와 같이 0~5rad/sec을 균등하게 분할하였다. 샘플링 시간 증분은 다음과 같이 5단계로 결정하였다.

Table 2 Definition of frequency increment

| No. | No. of inc. | $\Delta\omega$ (rad/sec) | No. | No. of inc. | $\Delta\omega$ (rad/sec) |
|-----|-------------|--------------------------|-----|-------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 0.50000 | 14 | 2,400 | 0.00208 |
| 2 | 20 | 0.25000 | 15 | 2,800 | 0.00179 |
| 3 | 30 | 0.16667 | 16 | 3,200 | 0.00156 |
| 4 | 40 | 0.12500 | 17 | 3,600 | 0.00139 |
| 5 | 50 | 0.10000 | 18 | 4,000 | 0.00125 |
| 6 | 100 | 0.05000 | 19 | 6,000 | 0.00083 |
| 7 | 200 | 0.02500 | 20 | 8,000 | 0.00063 |
| 8 | 300 | 0.01667 | 21 | 10,000 | 0.00050 |
| 9 | 400 | 0.01250 | 22 | 12,000 | 0.00042 |
| 10 | 800 | 0.00625 | 23 | 14,000 | 0.00036 |
| 11 | 1,200 | 0.00417 | 24 | 16,000 | 0.00031 |
| 12 | 1,600 | 0.00313 | 25 | 18,000 | 0.00028 |
| 13 | 2,000 | 0.00250 | 26 | 20,000 | 0.00025 |

Δt (sec): 0.1(T1), 0.2(T2), 0.3(T3), 0.4(T4), 0.5(T5)

3.3 통계적 특성치 변동성 평가

주파수의 증분의 크기와 샘플링 시간 증분의 크기는 피크값을 포함하는 불규칙 응답의 파형을 적절히 표현하기 위한 중요한 인자이며, 이 변수의 변화를 통해 신뢰성 있는 시계열 데이터를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 Table 1에 나타난 경우에 대해 평균 피크 주기, 평균 영점 교차 주기, 불규칙 계수는 주파수 영역에서 얻어지는 값을 기준으로 시계열 응답으로부터 얻어지는 값과 비교하였다. 이봉형 스펙트럼에서 결정되는 피로 손상도는 기준값이 되기에는 방법론마다 편차가 크기 때문에 본 연구에서는 주파수 증분이 20000, 샘플링 시간 증분이 0.1sec일 때의 피로 손상도를 기준으로 사용하였다. 이봉형 스펙트럼의 피로 손상도를 예측하는 방법론은 API(2005)에 나타난 단순 합산법 (Simple summation method), 조합 스펙트럼 법(Combined spectrum method), Jiao-Moan 방법 등을 의미한다.

3.3.1 샘플링 시간 증분에 따른 결과 비교

Fig. 2는 주파수 증분을 0.00025rad/sec 로 고정하고, 샘플링 시간 증분을 각각 0.1, 0.3, 0.5sec로 했을 때 시계열 데이터의 변화를 나타낸다. 샘플링 시간 간격 커지면, 시계열 응답의 피크 값은 정확도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

샘플링 시간 간격에 따른 시계열 데이터의 유효성 분석을 위하여, 시계열 응답에서 도출된 특성치와 주파수 스펙트럼을 통해 얻어진 특성치의 비를 식 (19)~(21)과 같이 정의하여 비교 분석하였다. 여기서 각각을 영점 교차 주기 비율(Ratio of zero crossing period), 피크 주기 비율(Ratio of peak period), 불규칙 계수 비율(Ratio of irregular factor)로 정의한다.

스펙트럼 특성치에 대한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었으며 (주파수 증분 크기 0.00025, 0.00031, 0.00042, 0.00063, 0.00125rad/sec 도식화), 기준값 대비 3% 이상의 오차선을 동시에 나타내었다. 전반적으로 대부분의 통계적 특성치가 샘플링 시간 증분이 클수록 세가지 비율은 감소하는 방향으로 오차를 나타내지만, 주파수비가 작을 경우(R=2), 불규칙 계수의 비가 오히려 커지는 방향으로 오차를 보이고 있다.

주파수 증분에 따른 세가지 비율의 차이는 크지 않으며, 따라서 이에 대한 영향도는 크지 않을 것으로 사료된다.

각 주파수 증분에 대한 피로 손상도 비율(Fatigue damage ratio)는 식 (22)와 같이 정의할 수 있다. 여기서 기준 피로 손상도(D_b)는 본 논문에서 적용한 최소 샘플링 시간 증분(0.1sec)과 최소 주파수 증분(0.00025rad/sec)을 적용 시 피로 손상도로 결정하였다. Fig. 5는 피로 손상도 비율을 나타내고 있으며, 주파수 증분보다는 샘플링 시간 증분에 따른 영향이 지배적임을 확인할 수 있다. 또한 피로 손상도 비율의 감소는 세가지 스펙트럼 특성치 비율의 증감보다 현저히 크다는 사실을 확인할 수 있다. 피로 손상도 비율로부터 최대 샘플링 시간 증분을 결정하기 위하여, Fig. 5에 샘플링 시간 증분이 0.1보다 작은 2가지 경우(0.03, 0.05sec)를 추가하여 나타내었다. 샘플링 시간 증분이

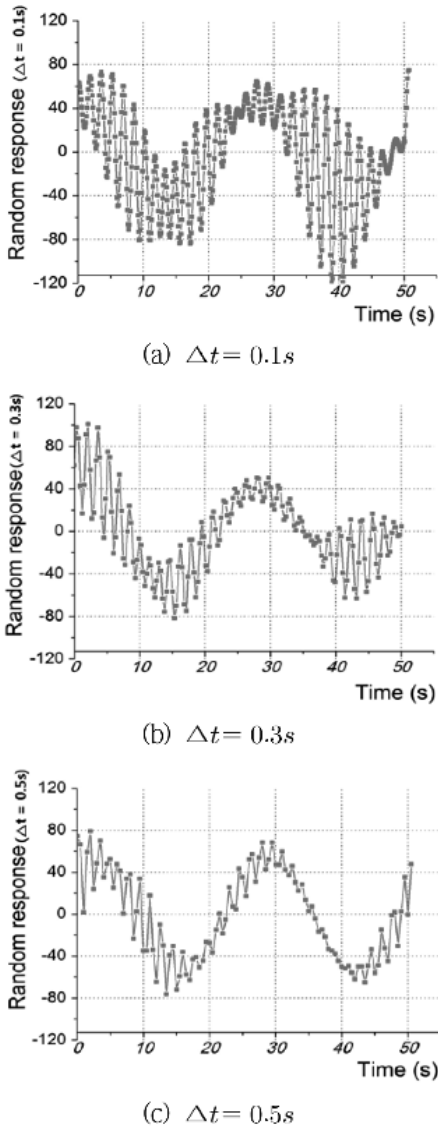


Fig. 2 Obtained time signals

0.1 이하일 경우 피로 손상도 비율의 오차는 무시할 만한 수준으로 나타났다. 본 연구에서 적용한 최대 샘플링 시간 증분(0.1sec)과 스펙트럼의 최소 주기($1/(5/2\pi) \approx 1.25sec$)의 비는 0.08 (=0.1/1.25)로서, 이보다 작은 비율을 유지할 수 있도록 최대 샘플링 시간 증분을 설정할 필요가 있다.

$$Z_r = \frac{v_T^0}{v_F^0} k \tag{19}$$

$$P_r = \frac{v_T^+}{v_F^+} k \tag{20}$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_T}{\alpha_F} \tag{21}$$

$$D_r = \frac{D}{D_b} \tag{22}$$

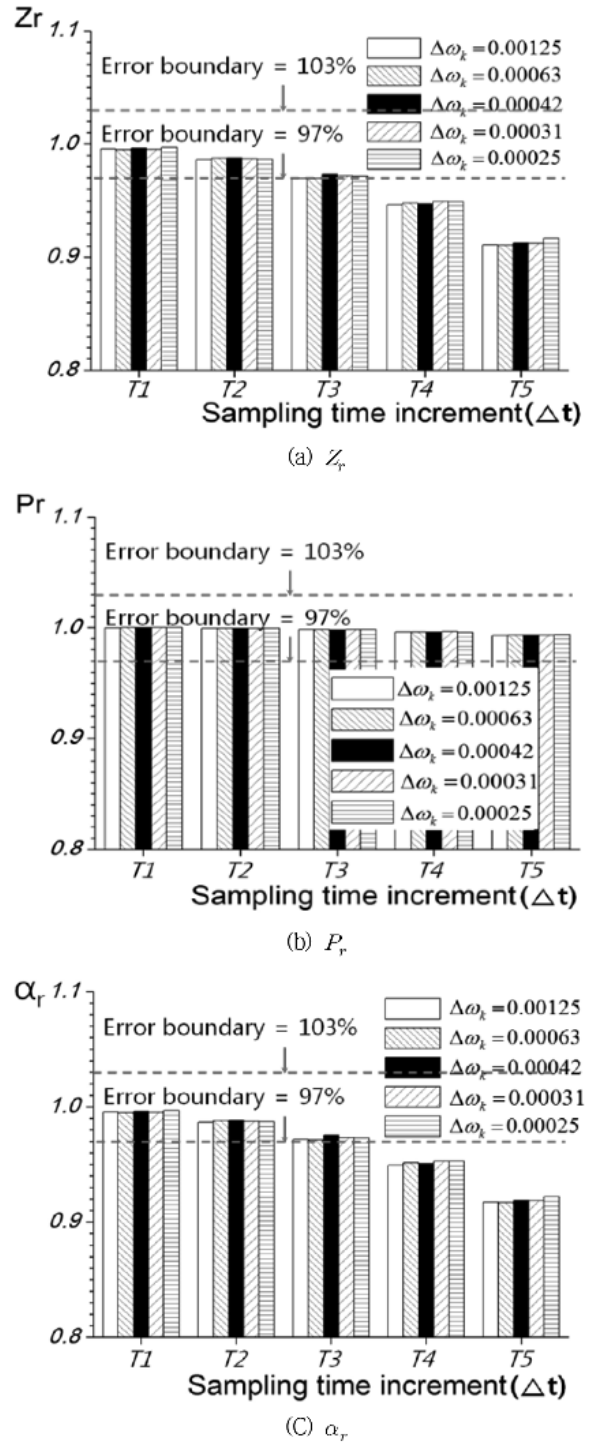


Fig. 3 Comparison of spectrum parameter ratios for $R=16$

Subscript T: 시간 영역

Subscript F: 주파수 영역

D_b : 기준 피로 손상도

D: 샘플링 시간 및 주파수 증분 변화에 따른 피로 손상도

3.3.2 주파수 증분에 따른 결과 비교

이상화된 이봉형 스펙트럼을 사용하였기 때문에 정상성 및

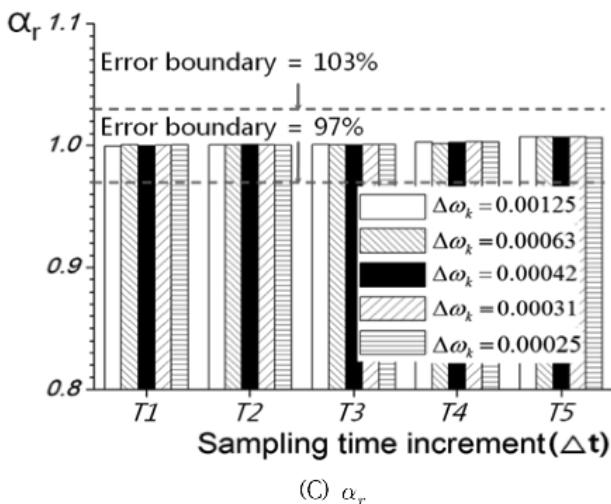
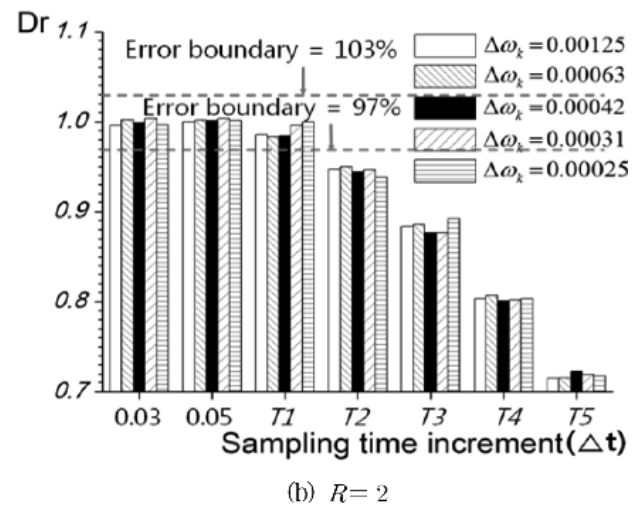
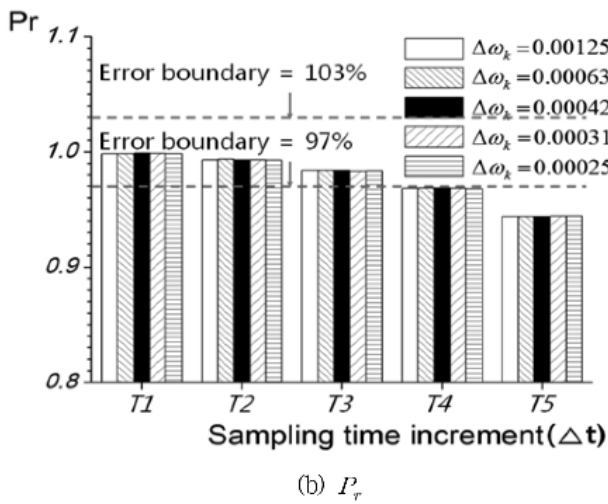
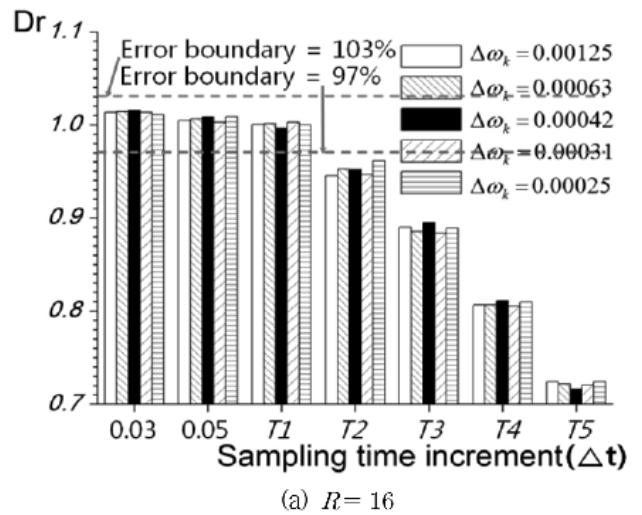
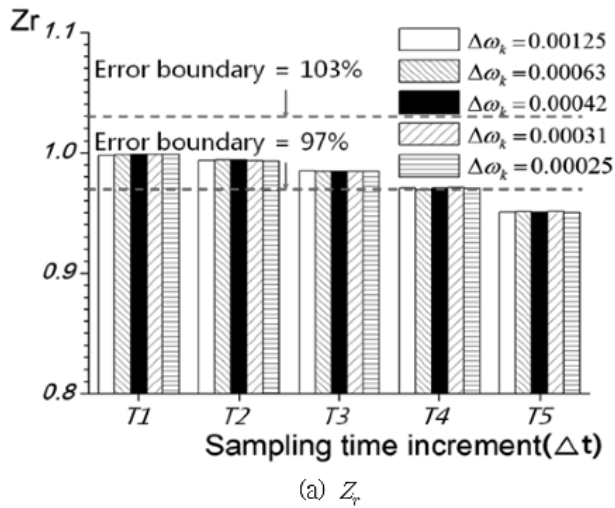


Fig. 4 Comparison of spectrum parameter ratios for $R=2$

에르고드성 확보를 위한 시계열 추출에 대한 주파수 증분의 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 그러나 곡선의 형태를 띠게 되는 실제 응답 스펙트럼을 적용할 경우, 주파수 증분 간격이 크면 스펙트럼의 형상을 정확히 구현하지 못하고 따라서 스펙트

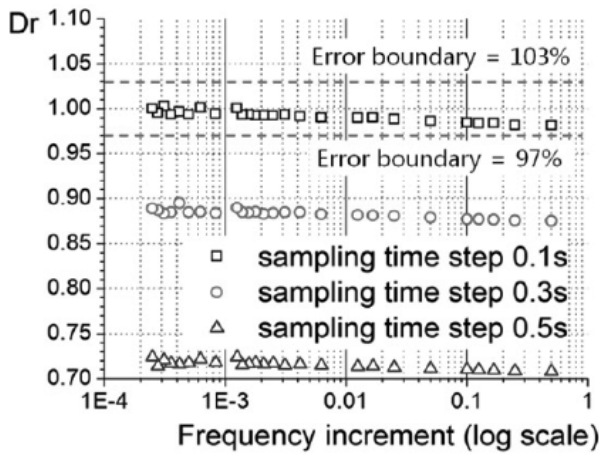
Fig. 5 Comparison of fatigue damage ratios according to sampling time increments

럼 에너지를 정확히 추정하지 못하므로, 충분히 작은 주파수 증분을 선택할 필요가 있다.

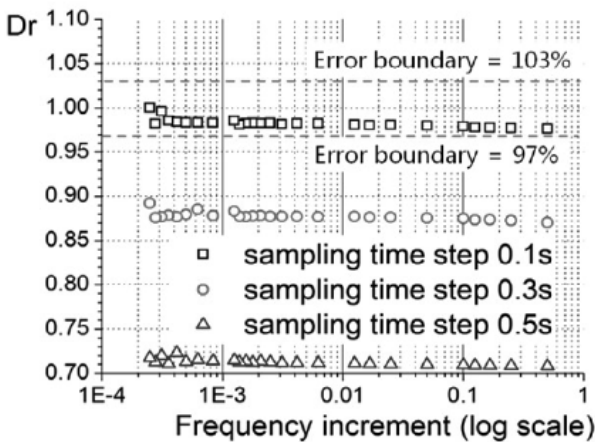
주파수 증분에 따른 피로 손상도를 확인하기 위하여 식 (22)에 나타난 피로 손상도 비율을 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 이때 기준 피로 손상도는 주파수 증분 0.00025rad/sec 및 샘플링 시간 증분 0.1sec에 해당하는 값을 적용하였다. 전반적으로 주파수 증분에 대한 영향보다는 샘플링 시간 증분의 영향이 지배적인 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 해양 플랜트의 계류 장비, 양강기 장비, 하역 장비 (Offloading facilities) 등과 같이 저주기 광대역 하중을 경험하거나, 선박의 스프링잉 응답 또는 휘핑 (Whipping) 응답과 같은 고주기 광대역 하중을 경험하는 구조물의 피로 손상도를 예측하기 위한 기초 연구이다. 즉 이봉 또는 다봉형 스펙트럼 특성을 가지는 불규칙 응답으로부터 스펙트럼의 조합에 의한 피로



(a) $R = 16$



(b) $R = 2$

Fig. 6 Comparison of fatigue damage ratios according to frequency increments

의 합산법의 정확도를 검증하기 위해서는 시계열 데이터를 정확하게 확보할 필요가 있다.

정상성 및 에르고드성 확률 과정 특성을 가지는 이상화된 이봉형 스펙트럼을 가정한 후, 이로부터 시계열 데이터 확보하고, 주파수 영역 및 시간 영역에서의 통계적 특성치의 비교를 통해 시계열 데이터 확보 방법의 정확도를 검증하였다.

매우 작은 샘플링 시간 증분으로부터 결정된 피로 손상도를 기준으로, 샘플링 시간 증분 및 주파수 증분에 따른 피로 손상도의 변화를 관찰한 결과 피로 손상도는 주파수 증분 보다는 샘플링 시간 증분에 큰 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 그러나 파랑 스펙트럼과 같은 곡선형 스펙트럼의 경우 주파수 증분의 영향을 무시할 수는 없을 것으로 사료된다.

본 논문에서는 통계적으로 의미 있는 시계열 데이터의 확보를 위한 샘플링 시간 증분을 결정하기 위한 기준을 제시하였다. 즉 시계열 데이터를 얻기 위한 최대 샘플링 시간 간격이 샘플

링 시간 증분과 스펙트럼의 최소 주기의 비보다 작게 설정되어야 함을 제시하였다.

Dirlik(1985)이 제시한 시계열 추출 방법은 많은 반복을 요구하고 있으며, 따라서 합리적인 시계열 추출에 대한 연구가 필요할 것으로 요구된다.

본 연구로부터 얻어진 결과는 광대역 프로세스 스펙트럼 피로 해석법 개발의 기반 연구가 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

API - American Petroleum Institute (2005). Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, RP-2SK, 3rd Edition.

Benasciutti, D. and Tovo, R. (2005). "Spectral Methods for Lifetime Prediction under Wide-Band Stationary Random Processes", International Journal of Fatigue, Vol 27, No 8, pp 867-877.

Choung, J.M., Joung, J.H., Choo, M.H. and Yoon, K.Y. (2007). "Development of Fully Stochastic Fatigue Analysis Program for Offshore Floaters", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol 44, No 4, pp 425-438.

Dirlik, T. (1985). Application of Computers in Fatigue Analysis, PhD thesis, University of Warwick.

Hino, M. (2000). Spectrum Analysis, Translated by Kim, N.H. and Shim, K.S., Sciencebook Press: Seoul.

Lim, Y.C., Kim, K.S. and Choung, J.M. (2011). "Fatigue Damage Combination for Spread Mooring System under Stationary Random Process with Bimodal Spectrum Characteristics", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol 47, No 6, pp 813-820.

Matsuishi, M. and Endo, T. (1968). Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, Japan Society of Mechanical Engineers.

Miner, M.A. (1945). "Cumulative Damage in Fatigue", Trans. ASME, J. Applied Mechanics, Vol 67, pp A159-A164.

Rychlik, I. (1987). "A New Definition of the Rainflow Cycle Counting Method", International Journal of Fatigue, Vol 9, No 2, pp 119-121.

Wirsching, P.H. and Light, C.L. (1980). "Fatigue under Wide Band Random Stresses", Journal of the Structural Division, Vol 106, No 7, pp 1593-1607.

2011년 3월 10일 원고 접수

2011년 4월 21일 심사 완료

2011년 4월 22일 게재 확정