

주파수 영역 해석 기법을 이용한 비정규 광대역 과정의 피로해석에 관한 연구

김현진¹·장범산^{2,†}

서울대학교 공과대학 조선해양공학과

서울대학교 공과대학 조선해양공학과, 해양시스템 공학연구소²

A Study on Fatigue Analysis of Non-Gaussian Wide Band Process using Frequency-domain Method

Hyeon-Jin Kim¹·Beom-Seon Jang^{2,†}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, College of Engineering, Seoul National University¹

Research Institute of Marine Systems Engineering, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, College of Engineering, Seoul National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Most frequency domain-based approaches assume that structural response should be a Gaussian random process. But a lot of non-Gaussian processes caused by multi-excitation and non-linearity in structural responses or load itself are observed in many real engineering problems. In this study, the effect of non-Normality on fatigue damages are discussed through case study. The accuracy of four frequency domain methods for non-Gaussian processes are compared in the case study. Power-law and Hermite models which are derived for non-Gaussian narrow-banded process tend to estimate fatigue damages less accurate than time domain results in small kurtosis and in case of large kurtosis they give conservative results. Weibull model seems to give conservative results in all environmental conditions considered. Among the four methods, Benasciutti-Tovo model for non-Gaussian process gives the best results in case study. This study could serve as background material for understanding the effect of non-normality on fatigue damages.

Keywords : Fatigue analysis(피로 해석), Wide-band process(광대역 과정), Non-Gaussian process(비정규 과정)

1. 서론

피로 파괴는 주기적으로 반복되는 하중으로 인해 구조물이 지속적으로 손상을 입게 되어 발생하는 현상이다. 선박과 해양 구조물은 설계 수명 동안에 파랑과 풍력 또는 경우에 따라 계류력에 이르기까지 다양한 하중을 반복적으로 받고 있다. 따라서 구조물의 생애 주기 동안에 피로 파괴가 발생하지 않도록, 설계 단계에서부터 충분한 피로 수명을 확보하는 것이 중요하다.

피로 손상도를 계산하는 방법으로는 시계열 기반 해석과 스펙트럼 기반 해석이 있다. 시계열 기반 해석은 구조물에 작용하는 응력의 시간 이력을 이용하는 기법이다. 응력의 시계열 자료를 응력 사이클 집계법을 통해 분석하면, 해당 응력 사이클의 범위와

작용 횟수를 파악할 수 있다. 그리고 마이너 법칙과 S-N 선도를 통하여 최종적으로 구조물의 피로 수명을 예측할 수 있다. 하지만 응력의 시계열 자료에 존재하는 임의성 때문에 결과의 신뢰도를 높이기 위해 여러 번 반복 해석을 수행해야 하므로 설계 단계에서 이를 적용하기에는 현실적인 어려움이 있다.

스펙트럼 기반 해석은 구조물의 응력 응답스펙트럼을 통해 응력의 확률밀도함수를 추정함으로써, 구조물의 피로 손상도를 계산하는 기법이다. 이 때, 해석의 편의성을 높이기 위해 응력이 가우스 분포를 따르는 협대역 과정이라는 가정을 한다. 응력이 협대역 과정을 따르는 경우 응력 진폭에 대한 확률밀도함수가 레일리 분포(rayleigh distribution)를 따른다고 증명되었으며 (Huston & Skopinski, 1956), 이를 통해 피로 손상도를 유도할 수 있다.

하지만 실제 구조물의 응답은 이와는 다른 양상을 보인다. 실제 해양구조물의 구조 응답이 해양구조물에 가해지는 비정규 하중 혹은 비선형 구조 응답에 의해서 비정규 광대역 과정을 따르는 경우가 많다. 대표적인 사례로는 풍력 발전기 하부 구조물이나 계류삭을 들 수 있다. 응력이 광대역 과정을 따르는 경우 더 이상 응력 진폭에 대한 확률밀도함수가 레일리 분포를 따르지 않으며, 이에 대한 이론적인 모델이 유도되어 있지 않다. 때문에 이를 해석하기 위한 근사적인 기법들이 고안되었다.

정규 광대역 과정을 해석하는 근사 기법들은 크게 3개의 분류로 나뉘볼 수 있다. 수정 계수법은 레일리 분포를 통해 계산된 피로 손상도에 수정 계수를 도입하여 광대역 과정의 영향을 보정한 기법이다 (Wirsching & Light, 1980; Lutes & Larsen, 1990). 이는 단순한 수식을 통해 피로 손상도를 계산할 수 있다는 장점이 있으나 광대역성이 높은 영역에서는 정해를 보수적으로 평가하며, 응력의 확률밀도함수를 제공하지 않는다는 한계가 있다. 다수의 연구자들은 응력 진폭의 확률밀도함수를 근사하는 모델을 제시하였다 (Dirlik, 1985; Zhao & Baker, 1992; Petrucci & Zuccarello, 2004; Park, et al., 2014; Kim, et al., 2015). 응력 진폭의 확률밀도를 근사하는 기법들은 피로 손상도를 예측하는 정확도를 크게 개선하였지만, 응력이 가우스 분포를 따른다는 가정 하에 유도되었으므로 비정규 과정을 해석할 수 없다는 한계가 있다.

Winterstein (1988)은 비정규 과정을 해석하는 모델을 처음 제안하였다. 4차 모멘트인 첨도 (kurtosis)를 통해 응력의 비정규성을 정량화하였으며 이를 반영한 피로 손상도의 근사식을 제안하였으나, 이는 협대역 과정을 기반으로 하였다는 한계가 있다. 이후 3차 모멘트인 왜도 (skewness)까지 포함한 방법을 Yu et al(2004)이 제안하였으나 이는 정식화 된 형태가 아니며 수치적으로 해를 계산해야 하는 한계가 있다. Benasciutti & Tovo (2005)는 Tovo (2002)가 제안한 모델을 비정규 과정으로 확장하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 광대역성과 비정규성이 피로 손상도에 미치는 영향을 분석하기 위해 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구에서는 반잠수식 해양플랫폼과 계류삭과의 접합부를 핫 스폿으로 선정하였다. 해당 위치는 파랑하중과 조류하중의 영향을 동시에 받으므로 비정규 광대역 과정의 대표적인 사례라 할 수 있다. 대상의 피로 손상도를 레인플로우 집계법과 비정규성을 고려하는 스펙트럴 해석 기법인 Power-law 모델, Hermite 모델, Benasciutti & Tovo 모델 및 DNV 선급 규정을 통해 각각 예측하였으며, 결과 비교를 통해 대상 각 모델의 정확도와 비정규성이 피로 손상도에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2. 정규 과정 스펙트럼 해석 기법

2.1 정규 협대역 과정 스펙트럼 해석 기법

식 (1)에 정의된 스펙트럴 모멘트(spectral moment)는 응력

스펙트럼(stress spectrum)의 특성을 나타내는 파라미터다.

$$\lambda_k = \int_0^\infty s^k S_\sigma^{one-sided}(s) ds \quad (1)$$

여기서, s 는 응력의 진폭, $S_\sigma^{one-sided}(s)$ 는 양수 영역에서만 정의되는 응력 스펙트럼을 의미한다. 스펙트럴 모멘트는 시계열 데이터의 중요한 통계적 특성과 관련되어 있다. 단적인 예로, 0차 모멘트는 시계열 자료의 분산과 같다. 그리고 스펙트럼의 특성을 나타내는 파라미터로서 밴드폭 계수 (bandwidth parameter)가 있다.

$$\alpha_k = \frac{\lambda_k}{\sqrt{\lambda_0 \lambda_{2k}}} \quad (0 < \alpha_1, \alpha_2 \leq 1) \quad (2)$$

식 (2)와 같이 정의된 이 변수는 스펙트럼의 기하학적 형상과 연관되어 있으며, 값이 1에 가까울수록 대상 스펙트럼이 협대역 과정에 가까우며 반대로 광대역 과정이라면 값이 0에 다가가고, k 는 반드시 정수일 필요는 없으나, 가장 많이 사용되는 밴드폭 계수는 1차와 2차 밴드폭 계수다.

스펙트럼 기반 해석은 스펙트럼의 모멘트 및 대역폭 파라미터를 통해 응력 진폭의 확률밀도함수를 정의한다. 그리고 이를 S-N 선도에 대입하여 개별 하중으로 인한 피로 손상도를 계산할 수 있고, 이를 Miner 법칙을 통해 식 (3)과 같이 누적 피로 손상도를 계산할 수 있다.

$$E[D] = \frac{\bar{n}}{K_a} \int_0^\infty s^m p_s(s) ds \quad (3)$$

K_a : 응력 진폭 기준 S-N 선도 재료상수

\bar{n} : 단위 시간 동안 응력 사이클의 발생 횟수

만약 응력이 가우스 분포를 따르는 협대역 과정이라면, 응력 진폭은 레일리 분포를 따른다고 알려져 있다. 따라서 응력이 정규 협대역 과정을 따를 때, 이로 인해 유발되는 피로 손상도의 기댓값은 식 (3)에 레일리 분포를 대입하여 계산할 수 있으며 이는 식 (4)와 같다.

$$\bar{D}_{NB} = \frac{\nu_0}{K_a} (\sqrt{2\lambda_0})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) \quad (4)$$

ν_0 : 평균 영점 교차 횟수의 기댓값 (upcrossing/sec)

m : S-N 선도의 기울기

$\Gamma(\cdot)$: 감마 함수

2.2 정규 광대역 과정 스펙트럼 해석 기법

응력 스펙트럼의 밴드폭 계수가 1에서 멀어지면, 응력은 광

대역 과정을 따른다. 응력이 광대역 과정을 따를 경우, 레일리 분포를 가정한 협대역 과정 기반 해석 기법은 피로 손상도를 과대 평가하는 경향이 있음을 다수의 문헌에서 기술하고 있다 (Park et al., 2011). 현재까지 광대역 과정에서의 응력 진폭의 확률 분포 모델이 이론적으로 유도되지 않았으며, 때문에 광대역 과정을 해석하기 위한 근사 모델들이 제안되었다.

노르웨이 선급 규정에서는 광대역성을 고려하기 위한 방안으로 Wirsching & Light 모델을 제안하고 있다 (DNV, 2010). 이 모델은 수정 계수 기법으로서, 협대역 과정 기반 해석 기법을 통해 피로 손상도를 계산한 후, 광대역성으로 인한 오차를 수정계수를 통해 식 (5)와 같이 보완하는 기법이다. 이때 수정계수는 2차 밴드폭 계수(α_2) 및 S-N 선도의 기울기 (m)에 대한 함수로서 식 (6)-(9)과 같이 유도되었다.

$$\bar{D}_{WZ} = \rho_{WZ} \cdot \bar{D}_{NB} \quad (5)$$

$$\rho_{WZ} = a + (1-a)(1-\epsilon)^b \quad (6)$$

$$a = 0.926 - 0.033m \quad (7)$$

$$b = 1.587m - 2.323 \quad (8)$$

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (9)$$

Tovo & Benasciutti (2002)는 정규화 과정에서 레인플로우 집계법 (rainflow counting)을 통해 계산한 피로 손상도가 식 (10)과 같이 레벨 크로스 집계법 (level cross counting)과 응력범위 집계법 (range counting)을 통한 피로 손상도 사이에 항상 존재한다는 것을 증명하였다.

$$\bar{D}_{RC} \leq \bar{D}_{RFC} \leq \bar{D}_{LCC} = \bar{D}_{NB} \quad (10)$$

이들은 레벨 크로스 집계법 및 응력범위 집계법에서의 확률 밀도함수를 선형 보간함으로써 레인플로우 집계법을 통한 응력 진폭의 확률 밀도함수를 근사적으로 식 (11)과 같이 제안하였다.

$$p_s^{RFC}(s) = b_{app} \cdot p_s^{LCC}(s) + (1 - b_{app})p_s^{RC}(s) \quad (11)$$

$$p_s^{LCC}(s) = \alpha_2 \frac{s}{\lambda_0} e^{-\frac{s^2}{2\lambda_0}}$$

$$p_s^{RC}(s) = \frac{s}{\lambda_0 \alpha_2^2} e^{-\frac{s^2}{2\alpha_2^2 \lambda_0}}$$

$$b_{app} = (\alpha_1 - \alpha_2) [1.112(1 + \alpha_1 \alpha_2 - (\alpha_1 + \alpha_2)) e^{2.11\alpha_2} + (\alpha_1 - \alpha_2)] / (\alpha_2 - 1)^2$$

이 때 피로 손상도는 응력 진폭에 대한 확률 밀도 함수 (11)

을 식 (3)에 대입하여 식 (12)와 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{D}_{TB} = (b + (1-b)\alpha_2^{m-1}) \bar{D}_{NB} \quad (12)$$

3. 비정규 과정 스펙트럼 해석 기법

2장에서 소개한 해석 기법들은 응력이 정규 과정일 때를 가정하고 유도되었다. 하지만 실제 문제에서는 정규 과정을 따르는 응답은 드물게 발견되며, 대다수는 비정규 과정을 따른다. 특정 데이터가 정규분포를 따르는지는 그 데이터의 3차, 4차 모멘트인 왜도와 첨도를 보고 판단할 수 있다. 데이터가 정규 분포를 따른다면 왜도와 첨도는 각각 0과 3의 값을 가진다.

비정규 과정을 해석하기 위한 다양한 방법이 있지만, 본 연구에서는 정규 과정으로의 변환 함수($G(\cdot)$)를 사용한 기법들을 적용하였다. $G(\cdot)$ 는 정규 과정 $X(t)$ 와 비정규 과정 $Z(t)$ 사이를 식 (13)과 같이 변환하는 함수다. 이를 통해 비정규 과정 $Z(t)$ 를 동등한 통계적 특성을 갖는 정규 과정 $X(t)$ 로 변환할 수 있으며, $X(t)$ 에서는 2장에서 설명한 근사 기법을 적용할 수 있으므로 이를 통해 비정규 과정을 따르는 응력으로 인한 피로 손상도를 간접적으로 예측할 수 있다.

$$Z(t) = G(X(t)) \leftrightarrow X(t) = G^{-1}(Z(t)) \quad (13)$$

3.1 Power-law 모델

Sarkani et al. (1994)는 첨도를 고려하여 비정규성을 반영한 변환함수 $G(\cdot)$ 를 식 (14)와 같이 제안하였다.

$$Z(t) = G(X(t)) = \frac{X + \beta(\text{sgn}(X))(|X|^n)}{C} \quad (14)$$

$$C = \sqrt{1 + \frac{2^{\frac{n+1}{2}} n! \left(\frac{n}{2}\right) \sigma_x^{n-1}}{\sqrt{\pi}} \beta + \frac{2^n \Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) \sigma_x^{2(n-1)}}{\sqrt{\pi}} \beta^2}$$

n, β : 비정규성을 조절하는 변환 계수

$\text{sgn}(\cdot)$: 부호 함수 (입력 값의 부호 출력)

변환함수 (14)에 따라서, $Z(t)$ 의 왜도(κ_Z)는 식 (15)와 같이 n, β 에 대한 함수로 표현된다. 특정 왜도 값에 대응하는 n, β 는 무수히 많은 조합이 있으며, 그 중 특정 값을 해석에 사용한다.

$$\kappa_Z = \frac{E[Z^4]}{\sigma_Z^4} = \frac{E[(X + \beta(\text{sgn}(X))(|X|^n))^4]}{C^4 \sigma_X^4} \quad (15)$$

측정된 왜도에 대한 변환 계수 n, β 및 C 를 계산하면, 변환

함수 $G(\cdot)$ 를 완성할 수 있다. $X(t)$ 가 협대역 과정을 가정하면, 확률밀도함수와 그 때의 응력 진폭을 각각 레일리 분포와 식(14)로 표현할 수 있으며, 이를 식 (3)에 대입하여 비정규 협대역 과정을 따르는 $Z(t)$ 로 인한 피로 손상도의 기댓값을 식 (16)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{D}_{nG}^{Sarkani} &= \int_0^\infty \frac{Q^m}{K_a} p(S) dS \quad (16) \\ &= \int_0^\infty \frac{S(S + \beta S^m)^m}{C^m K_a \sigma_X^2} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma_X^2}\right) dS \end{aligned}$$

3.2 Hermite 모델

Winterstein (1985)는 변환함수로서 Hermite 함수를 사용하였다. Hermite 함수는 $Z(t)$ 의 첨도에 따라 다른 형태의 변환 함수를 사용한다. 첨도가 3보다 큰 경우 ($\gamma_4 > 3$), 이를 연화 과정 (softening process) 라고 하며 이 때 Hermite 함수의 2차 항을 고려한 변환함수 G 는 식 (17)과 같다.

$$Z(t) = G(X) = \mu_Z + \sigma_Z K \left[X_0 + \tilde{h}_3(X_0^2 - 1) + \tilde{h}_4(X_0^3 - 3X_0) \right] \quad (17)$$

$$X_0 = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X}, \quad \gamma_3 \text{은 첨도, } \gamma_4 \text{은 왜도}$$

$$\tilde{h}_3 = \frac{\gamma_3}{6(1 + 6\tilde{h}_4)}; \quad \tilde{h}_4 = \frac{\sqrt{1 + 1.5(\gamma_4 - 3)} - 1}{18}$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\tilde{h}_3^2 + 6\tilde{h}_4^2}}$$

그리고 첨도가 3보다 작은 경우 ($\gamma_4 < 3$)에는 경화 과정 (hardening process)이라 하며, 그 때 G 의 역함수 g 는 식 (18)와 같다.

$$X_0 = Z_0 - h_3(Z_0^2 - 1) - h_4(Z_0^3 - 3Z_0) \quad (18)$$

$$Z_0 = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}; \quad h_3 = \frac{\gamma_3}{6}; \quad h_4 = \frac{\gamma_4 - 3}{24}$$

$X(t)$ 가 협대역 과정을 따른다고 가정할 때, 연화 과정 $Z(t)$ 로 인한 피로 손상도를 식 (3)에 식 (17)을 대입하여, 식 (19)와 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{D}_{nG}^{Hermite} = \bar{D}_{NB} \eta_{Hermite} \quad (19)$$

$$\eta_{Hermite} = \left(\frac{\sqrt{\pi} K}{I(1 + V_r)} \right)^m \cdot \frac{I(1 + m V_r)}{I\left(1 + \frac{m}{2}\right)}$$

$$V_r^2 = \frac{4}{\pi} (1 + h_4 + \tilde{h}_4) - 1$$

3.3 Benasciutti & Tovo 모델

앞서 제안된 Power-law 모델 및 Hermite 모델은 비정규 협대역 과정을 해석하는 기법이다. 비정규 광대역 과정을 해석하기 위해 Benasciutti & Tovo (2005)는 Hermite 함수를 이용하여 정규 광대역 과정에서 그들이 제안한 식 (11)의 확률밀도 함수를 비정규 과정으로 확장하는 것을 제안하였다.

정규 과정 $X(t)$ 에서 유도된 피크와 밸리에 대한 결합 누적분포함수 $H_{X,RFC}^G(u, v)$ 를 Hermite 역변환 함수를 이용해 식 (20)과 같이 비정규 과정 $Z(t)$ 에서의 결합 누적분포함수 $H_{Z,RFC}^n(u, v)$ 로 변환할 수 있다. 응력 진폭의 확률 밀도 함수는 피크와 밸리의 결합밀도함수와 식 (21)-(23)과 같은 관계를 가지므로, 이를 이용하여 비정규 광대역 과정인 $Z(t)$ 로 인한 피로 손상도를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{Z,RFC}^n(z_u, z_v) &= H_{X,RFC}^G(g(z_u), g(z_v)) \quad (20) \\ &= H_{X,RFC}^G(x_u, x_v) \end{aligned}$$

$$H_{u,v}(u, v) = \int_{-\infty}^u \int_{-\infty}^v h_{u,v}(x, y) dx dy \quad (21)$$

$h_{u,v}(u, v)$: 피크와 밸리에 대한 결합 밀도함수

$$p_{s,m}(s, m) = 2 \cdot h(m + s, m - s) \quad (22)$$

$p_{s,m}(s, m)$: 응력의 진폭과 평균에 대한 결합 밀도함수

$$p_s(s) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{s,m}(s, m) dm \quad (23)$$

3.4 와이블(Weibull) 모델

노르웨이 선급에서는 비정규 협대역 과정이 피로 손상도에 미치는 영향을 고려하기 위한 방법을 기술하고 있다 (DNV, (2010)). 이들은 응력 진폭의 확률 밀도 함수를 2-모수 와이블 분포를 따른다고 가정하였다. $Z(t)$ 의 시계열자료로부터 응력 진폭의 평균($\hat{\mu}$) 및 표준편차($\hat{\sigma}$)를 추정할 수 있으며, 이는 와이블 분포를 정의하는 2개의 모수와 식 (24)-(25)와 같은 관계를 가진다.

$$\hat{\mu} = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (24)$$

α : 와이블 척도 모수

β : 와이블 형상 모수

$$\hat{\sigma} = \alpha \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2} \quad (25)$$

가정한 2-모수 와이블 분포를 식 (3)에 대입함으로써 비정규 협대역 과정에서의 피로 손상도를 계산할 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 문제 정의 및 시뮬레이션

본 연구에서는 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템에서 계류삭과 플랫폼의 접합부의 피로 수명을 앞서 설명한 4개의 모델을 적용하여 비정규성이 피로 손상도에 미치는 영향을 파악해 보았다. 이 시스템은 상부 각 모서리에 풍력 발전기가 설치되며, 한 면당 6개의 파력 발전기를 수용하는 발전설비이다. 이 시스템은 총 8개의 계류삭으로 고정되며 한 모서리에 2개의 계류삭이 설치된다. 계류삭과 플랫폼이 만나는 접합부인 fairlead는 Fig. 1과 같이 개념적으로 설계되었으며, 이를 반영하여 구조 모델링을 수행하였다.

대상 구조물이 받는 환경하중 조건은 풍력 터빈의 rotor부에 작용하는 풍하중, 플랫폼에 작용하는 파랑하중과 계류삭에 작용하는 조류하중이 있다. 이 중, 핫 스팟인 계류삭과 플랫폼의 접합부는 파랑하중과 조류하중의 영향을 크게 받는 구조이다. 파랑 하중의 경우, 설계 수역인 차귀도 부근의 파랑 빈도분포 (sea scatter diagram)에 존재하는 50개의 해상상태를 고려하였다. 해석의 편의성을 위해, 파가 들어오는 방향은 관측된 빈도가 가장 높은 북북서 (NNW)와 남남서 (SSW)만을 고려하였고, 사용한 파 스펙트럼 (wave spectrum)은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다.

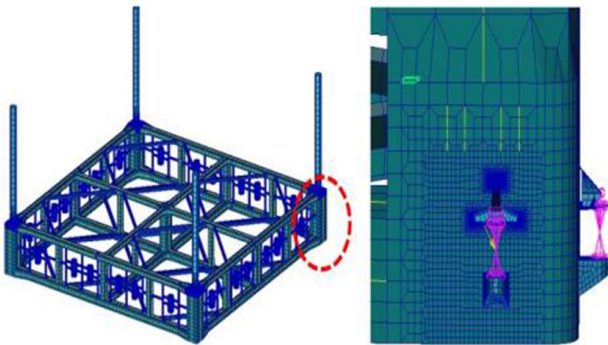


Fig. 1 Structural modeling of wave and offshore wind hybrid power generation system and fairlead

Table 1 Environmental load conditions

Wave condition	
Heading	NNW, SSW
Hs [m]	0.125 ~ 4
Tp [s]	3 ~ 17
Wind condition	
Thrust force [kN]	302
Current condition	
Speed [m/s]	0.5

Rotor에 작용하는 풍 하중의 경우 상대적으로 핫 스팟의 피로 손상도에 미치는 영향이 작다. 따라서 해석의 편의를 위해 정격 속도 (rated-wind speed)인 11.7 m/s일 때, 작용하는 추력을 rotor에 고정된 하중 값으로 입력하였다. 또한, 조류하중의 경우 1년 평균값인 고정 값으로 사용하였다. 최종적으로 적용한 환경 하중 조건은 Table 1과 같다.

상용 코드인 WAMIT을 이용하여 각 조건 당 1시간 동안 해석을 수행하였으며, 0.2초 간격으로 구조물에 작용하는 하중의 시계열 자료를 추출하였으며, 구조 해석을 통해 핫 스팟 응력의 시계열 자료를 계산하였다. Fig. 2는 유의 파고와 피크 주기가 각각 4m, 9초 일 때, 핫 스팟에 작용하는 응력의 시계열 자료를 보여주고 있다. 파랑 하중과 계류 하중의 영향이 동시에 작용하여 진폭의 크기가 작은 응력 사이클이 다수 관측된다.

응력 스펙트럼의 경우, 응력의 시계열 자료를 푸리에 변환을 통해 변환하여 얻었다. Fig. 3은 응력 스펙트럼의 한 사례를 보여준다. 핫 스팟 응력 스펙트럼은 저주파수에 집중되어 있는데, 이는 핫 스팟 응력에 고주파수 및 저주파수 성분을 포함하고 있는 계류하중이 미치는 영향이 고주파수 성분인 파랑하중보다 크기 때문이라고 판단된다.

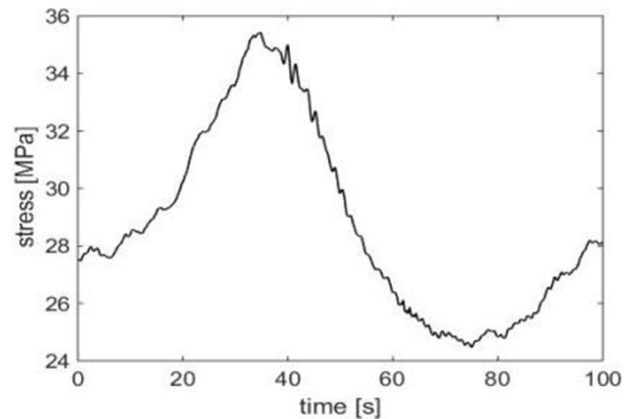


Fig. 2 An example of stress time history at (Hs, Tp) = (4m, 9s)

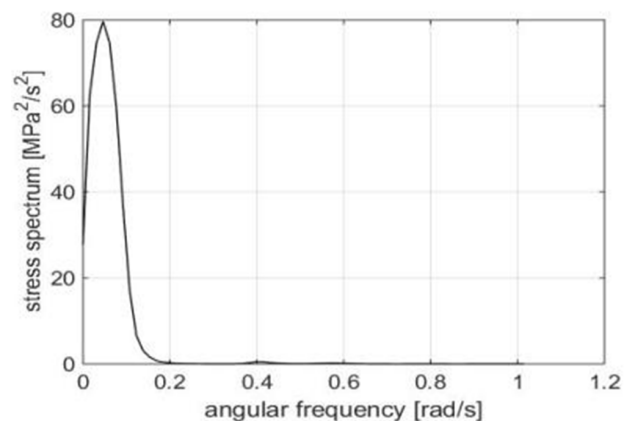


Fig. 3 An example of hot spot stress spectrum (Hs, Tp) = (4m, 9s)

4.2 피로 손상도 계산

대상의 피로 손상도는 핫 스폿 응력의 시계열 기반과 스펙트럼 기반으로 계산되었다. 시계열 기반 해석은 시계열 자료로부터 직접 레인플로우 집계법을 수행하여 응력 사이클의 정보를 추출하고, 각 사이클로 인한 손상도를 Miner 법칙을 통해 합산하는 방법이다. 시뮬레이션을 1시간 동안 수행하였으므로, 사례 연구에서는 1시간 동안의 누적 피로 손상도를 계산하였으며 이를 정해로 가정하였다.

스펙트럼 기반 해석은 Power-law 모델, Hermite 모델, BT 모델 및 DNV 공식을 적용하여 피로 손상도를 추정하는 것이다. 각 환경 조건에서 계산된 응력 스펙트럼의 밴드폭 계수의 분포는 Fig. 4에 도시하였다. 밴드폭 계수가 1에 가까울수록 협대역 과정에 가깝다는 것을 감안할 때, 해당 예제에서 응력은 광대역 과정에 가깝다는 것을 확인할 수 있다.

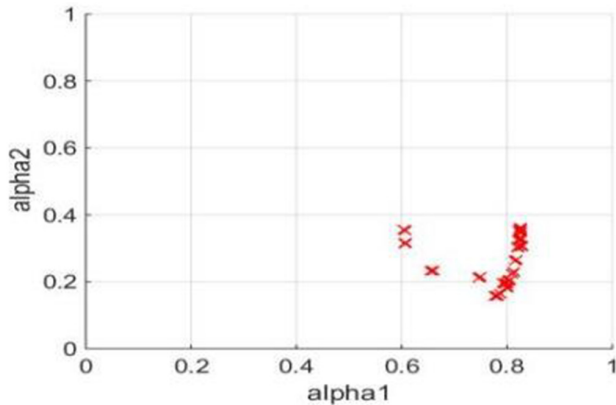


Fig. 4 Distribution of 1st and 2nd bandwidth parameters in all fatigue bins

다음으로 응력의 비정규성을 확인하기 위하여, 50개의 모든 환경 조건에서 계산된 응력의 시계열 자료들의 첨도와 왜도를 Fig. 5에 도시하였다. Power-law 모델 및 와이블 모델에서는 첨도 및 왜도의 값에 상관없이 안정적으로 계산을 수행할 수 있으나, Hermite 함수의 경우 식 (26)으로 표현되는 영역에서만 해를 계산할 수 있다. 50개의 환경 조건 중 6개의 조건이 해당 영역을 벗어났으며, 이 경우 Hermite 함수를 정의할 수 없으므로 Hermite 모델 및 BT 모델을 적용할 수 없다.

$$3 < \gamma_3 < 15, 0 \leq \gamma_2 < \frac{2(\gamma_4 - 3)}{3} \tag{26}$$

먼저, 비정규성이 피로 해석 결과에 미치는 영향을 비교하였다. 비정규성을 고려한 피로 손상도와 이를 고려하지 않았을 때의 피로 손상도의 비율을 Fig. 6에 도시하였다. Power-law 및 Hermite 모델은 비정규 협대역 과정 기반 방법이므로, 응력 진폭이 레일리 분포를 따를 때 피로 손상도와 비교하였다. BT 모델은 비정규성을 고려하기 식 (12)와 (20)에서 유도된 피로

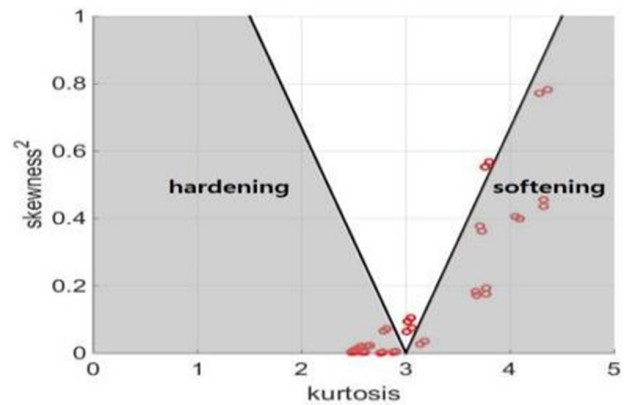


Fig. 5 Skewness and kurtosis of stress time histories in all fatigue bins

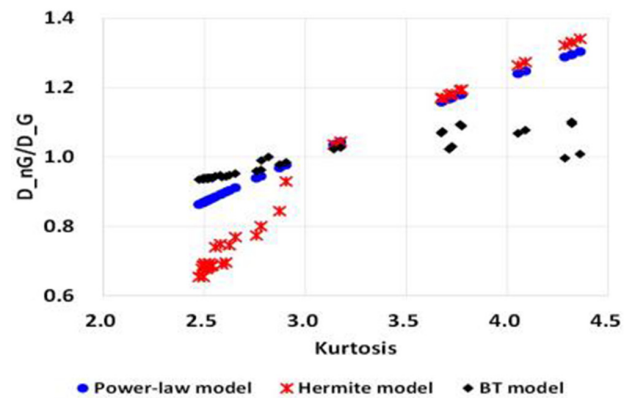


Fig. 6 Ratios between fatigue damages induced by non-Gaussian and Gaussian processes in each model

손상도의 비율을 도시하였다. 비정규 과정이 3일 때를 기준으로 이보다 작은 경화 과정일 때는 응력 진폭이 큰 꼬리 부분에 확률 밀도가 감소하며, 이로 인해 비정규성으로 인해 피로 손상도가 더 낮아지는 현상을 확인할 수 있다. 반면에 첨도가 3보다 큰 연화 과정에서는 응력 진폭이 높은 영역에서 정규 과정보다 확률 밀도가 높기 때문에, 비정규성을 고려하였을 때 피로 손상도가 더 커짐을 확인할 수 있다.

대상 환경 조건에서 계산된 응력 스펙트럼은 광대역 과정에 가깝다. 때문에 BT 모델을 제외한 비정규 협대역 과정 기반의 Power-law 모델, Hermite 모델 및 와이블 모델은 광대역성으로 인해 오차가 발생할 수 있다. 비정규성이 미치는 영향을 비교하기 위해 Wirsching-Light 모델에서 추정된 수정계수를 이용하여 광대역성으로 인한 오차를 보정하였다. Fig. 7-10은 비정규 광대역 과정을 각 모델에서 추정된 피로 손상도와 응력의 시계열 자료에서 레인플로우 집계법으로 계산한 피로 손상도 결과 사이의 오차율을 보여주고 있다.

사례 연구에서 Power-law 모델은 정해를 최대 오차 32% 내외로 예측하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에 도시된 바와 같이 첨도가 작은 경화 과정에서는 정해를 작게 평가하지만, 연화 과정에서는 반대로 피로 손상도를 높게 평가하는 경

향이 있다. Hermite 모델은 Power-law 모델과 비슷한 경향을 보여준다. 최대 오차는 37%다. Hermite 모델의 경우 경화 과정에서 피로 손상도를 낮게 평가하는 경향이 더 크다.

BT 모델은 앞선 두 모델과는 달리 레인플로우 집계법을 통한 결과를 비교적 고른 오차로 평가함을 확인할 수 있다. 특히 경화과정에서는 10% 내외로 고르게 오차가 계산되었으며, 연화 과정에서는 침도가 커짐에 따라 오차율이 조금 상승하였다. BT모델의 최대 오차율은 25%로 모든 모델 중 가장 정확한 결과를 제공하였다. 와이블 모델의 경우, 모든 해석 조건에서

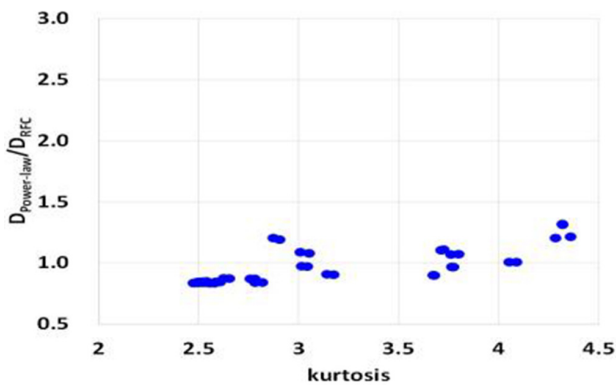


Fig. 7 Comparison of fatigue damages estimated by power-law model and RFC method

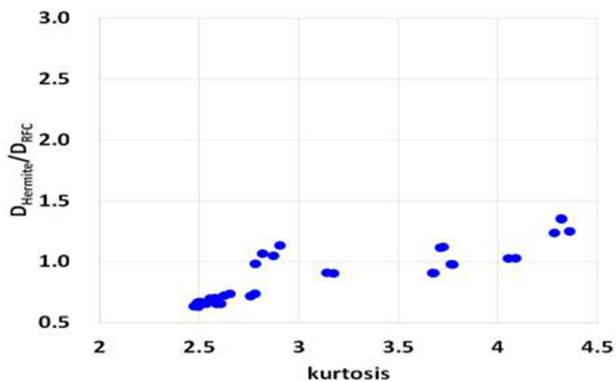


Fig. 8 Comparison of fatigue damages estimated by Hermite model and RFC method

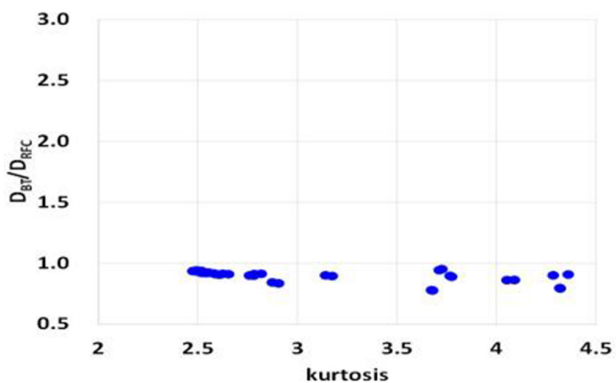


Fig. 9 Comparison of fatigue damages estimated by BT model and RFC method

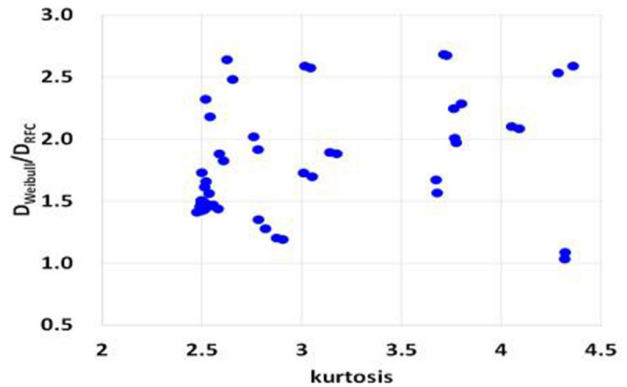


Fig. 10 Comparison of fatigue damages estimated by Weibull model and RFC method

정해보다 피로 손상도를 높게 평가하였다. 이는 설계 관점에서 피로 수명을 보수적으로 평가한다는 장점이 있으나, 평균적으로 오차율이 정해의 2배를 넘는 정확도 문제가 있음을 확인할 수 있다. 와이블 모델은 다른 모델들과는 달리 침도에 따른 별 다른 경향이 관측되지 않았다.

5. 결론

본 논문에서는 하중의 비정규성이 피로 손상도에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 비정규성을 고려하는 스펙트럼 기반 해석인 4가지 모델에 대한 정확도를 사례 연구를 통해 분석하였다.

비정규 과정은 침도에 따라 연화 과정과 경화 과정으로 분류된다. 연화 과정은 응력 진폭이 클 때, 확률 밀도가 정규 과정일 때보다 크므로 비정규성을 고려할 경우 피로 손상도가 높아진다. 반대로 경화 과정은 꼬리 부분의 확률 밀도가 정규 과정보다 낮은 과정으로서, 이 경우 피로 손상도는 정규 과정에 비해 작아지는 경향을 보인다.

Power-law 모델, Hermite 모델 및 BT 모델은 침도에 따른 피로 손상도의 변화를 반영하였음을 확인할 수 있었다. 하지만 와이블 모델의 경우, 침도와 관계없이 정해를 항상 과대 평가하는 경향이 있음을 확인하였다. Power-law 및 Hermite 모델은 경화 과정에서는 피로 손상도를 작게 평가하고, 연화 과정에서는 피로 손상도를 정해보다 높게 평가하였다. BT 모델의 경우 최대 오차가 25%로 4개의 모델 중 가장 높은 정확도를 보였으며, 피로 손상도를 정해보다 작게 평가하는 경향이 있었다.

스펙트럼 기반 해석 기법으로 비정규 과정을 예측하기 위해서는 응력 시계열의 고차 모멘트가 필요하므로, 이를 추정하기 위한 방법이 필요하다. 특정 스펙트럼에서는 고차 모멘트를 추정하는 근사기법이 있으나, 다수의 경우 응력의 시계열 자료로부터 이를 계산한다. 때문에 비정규 과정에서 스펙트럼 기반 해석 기법의 효용이 부족해 보일 수 있다. 하지만, 스펙트럼 기반 해석 기법은 불확실성으로 인해 반복 해석이 필요한 시간

영역 기반 해석 기반과 달리 피로 손상도의 기댓값을 계산하므로, 요구되는 시간 해석 수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 따라서 비정규 과정에서 안정적으로 정확도가 높은 스펙트럴 기반 해석 기법을 개발하는 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 수심 1500m용 내경 7인치 이상급의 Flexible Riser 개발을 위한 구조안전성 평가 기술 개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (10062271) 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사드립니다.

References

- Benasciutti, D. & Tovo, R., 2005. Cycle distribution and fatigue damage assessment in broad-band non-Gaussian random processes. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 20, pp.115-127.
- Dirlík, T., 1985. *Application of computers in fatigue*. Ph.D.: University of Warwick.
- Det Norske Veritas (DNV), 2010. DNV-RP-F204 : Riser fatigue. DNV: Oslo, Norway.
- Huston, W.B. & Skopinski, T.H., 1956. *Probability and frequency characteristics of some flight buffet loads*. NACA Technical Note 3733.
- Kim, H.S., Ahn, I.G. & Kim, Y.I., 2015. Development of a fatigue damage model of wideband process using an artificial neural network. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(1), pp.88-95.
- Lutes, L.D. & Larsen, C.E., 1990. Improved spectral method for variable amplitude fatigue prediction. *Journal of Structural Engineering*, 116(4), pp.1149-1164.
- Park, J.B., Choung, J.M. & Kim, K.S., 2014. A new fatigue prediction model for marine structures subject to wide band stress process. *Ocean Engineering*, 76, pp.144-151.
- Park, J.B., Kang, C.H., Kim, K.S. Choung, J.C. & Yoo, C.H., 2011. A study on frequency domain fatigue damage prediction models for wide-banded bimodal stress range spectra. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), pp.299-307.
- Petrucci, G. & Zuccarello, B., 2004. Fatigue life prediction under wide-band random loading. *Fatigue Fracture of Engineering Materials & Structures*, 27(12), pp.1183-1195.
- Sarkani, S., Kihl, D.P. & Beach, J.E., 1994. Fatigue of welded joints under narrowband non-Gaussian loadings. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 9, pp.179-190.
- Tovo, R., 2002. Cycle distribution and fatigue damage under broad-band random loading. *International journal of fatigue*, 24(11), pp.1137-1147.
- Winterstein, S.R., 1985. Non-normal responses and fatigue damage. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 111(10), pp.1291-1295.
- Winterstein, S.R., 1988. Nonlinear vibration models for extremes and fatigue. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 114(10), pp.1772-1790.
- Wirsching, P.H. & Light, C.L., 1980. Fatigue under wide band random stresses. *Journal of the Structural Division. Proceeding of the ASCE*, 106(7). pp.1593-1607.
- Yu, L., Das, P.K. & Barltrop, D.P., 2004. A new look at the effect of bandwidth and non-normality on fatigue damage. *Fatigue Fracture of Engineering Materials & Structures*, 27(1), pp.51-58.
- Zhao, W. & Baker, M.J., 1992. On the probability density function of rainflow stress range for stationary gaussian processes. *International Journal of Fatigue*, 14(2), pp.121-135.



김 현 진

장 범 선