

바이모달 스펙트럼 특성을 가지는 정상확률과정에 대한 다점계류라인의 피로손상도 조합기법 연구

임유창^{1,2,†} · 김경수¹ · 정준모¹
인하대학교 조선해양공학과¹
대우조선해양(주)²

Fatigue Damage Combination for Spread Mooring System under Stationary Random Process with Bimodal Spectrum Characteristics

Yu-Chang Lim^{1,2,†} · Kyung-Su Kim¹ · Joon-mo Choung¹
Dept., of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea¹
Daewoo shipbuilding & Ocean Engineering, Co, Ltd.²

Abstract

The spread mooring system for FPSO is developed to explore deep sea area, in which swell is dominant. It is known that the tension response of mooring lines in this sea area shows bimodal spectrum. Assuming normal distribution of tension profile and Rayleigh distribution of tension amplitude, the power spectral density function (PSD) of the mooring tension under the bimodal stationary random process is applied for the calculation of spectrum fatigue. Three popular methods, which are simple summation method, combined spectrum method and Jioa-Moan method, are used to combine fatigue damages from bimodal spectrum characteristics. Each damage value is compared with damage using Rainflow Cycle Counting (RCC) method which is believed to be close to exact solution. Vanmarcke's parameter and RMS(Root Mean Square) ratio are employed to assess relative damage variations between from RCC method and from three combination methods. Finally the most reliable fatigue damage combining method for spread mooring system is suggested.

Keywords : Spread mooring system(다점계류시스템), Spectrum fatigue assessment(스펙트럼 피로 평가), Power spectral density(파워 스펙트럼 밀도), Bimodal stationary random process (바이모달 정상확률과정), Rainflow Cycle Counting(레인플로우 집계)

1. 서론

일반적으로 대부분의 해양플랜트는 선박과 달리 운영 기간 동안 한 장소에 위치하여 극한 하중에 노출될 가능성이 크며, 구조물의 복잡한 형상 및 연결부로 인하여 피로 강도에 있어 상대적으로 취약하다. 이로 인해 불규칙 하중 하에 있는 해양플랜트의 피로 취약부를 예측하기 위하여 많은 노력과 방법을 필요로 하며, Chung, et al.(2007)은 완전 통계적 피로 평가를 통한 스크리닝 방법을 제시하였다.

부유식 해양플랜트에 설치되는 계류 시스템은 해양플랜트의 운용 목적상 위치 유지를 위한 중요한 장비이다. 계류 시스템은 장치의 복잡성으로 인하여 구조 강도 설계는 물론 피로 강도 설계에 주의해야 한다. 위치 유지 시스템은 기능상 DP(Dynamic positioning)와 같은 능동형과 계류라인과 같은 수동형으로 나뉘며, 수동형 유지 시스템의 경우 피로 하중에 직접적으로 노출되어 있다.

여러 가지 수동형 계류 시스템 중에서, 다점계류 방식은 비교

적 파고가 낮으며 파주기가 긴 해상에 적합하며, 서아프리카 해역에 설치되는 FPSO에 주로 적용된다. 관련 해역의 환경 하중은 주너울(Main swell), 2차 너울(Secondary swell), 풍파(Wind driven sea), 조류 그리고 바람으로 구분된다.

조합된 환경 하중으로 인하여 해양플랜트의 응답은 고주파수 운동 응답(High frequency motion response)과 저주파수 운동 응답(Low frequency motion response)을 보인다. 환경 하중에 대해 고주파수 운동 응답은 6자유도 성분의 1차항 파강제력 의해 유발되며, 저주파수 응답은 2차항 파강제력 및 정상표류력에 의해 생성된다. 특히 수평 방향의 저주파수 운동 응답은 해양플랜트 자체 운동 응답에 미치는 영향은 비교적 작으나 계류 시스템의 인장력 및 해양플랜트의 옴셋범위에 미치는 영향은 크며, 일반적으로 계류 시스템의 공진 주기와 유사함을 보인다.

이와 같이 계류 시스템의 인장 응답은 고주파수와 저주파수 영역, 즉 두 개의 봉우리를 형성하는 스펙트럼 분포를 보이며, 각각의 봉우리는 협대역 분포를 따른다고 가정할 수 있다. 봉우리가 하나인 응답일 경우, 피로 손상도는 스펙트럼 해석법을 통해 비교

적 정확하게 예측할 수 있으나, 두 개 이상일 경우 전체적인 응답은 정규분포를 따르지 않기 때문에 계류 라인의 피로 예측에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 계류 라인에 작용하는 환경 하중의 비선형성을 고려하기 위하여 시간 영역 해석을 통해 계류 라인의 인장 하중을 도출하였다.

불규칙한 시계열 하중 데이터를 분석하는 방법으로는 Rainflow Cycle Counting(RCC), Peak-Vally Cycle Counting(PVC), 그리고 Peak Cycle Counting(PCC)가 있다. 이중 RCC방법은 최초 Matsuishi and Endo(1968)에 의해 제기 되었으며, 현재 ASTM E1049-85(2005)에 규정한 표준 방법이 산업체에 널리 사용되고 있다. 또한 Dowling(1972)은 RCC의 하중 집계 방법을 Palmgren-Miner Rule에 적용하여 피로 손상도를 연구하였으며, RCC 방법이 실제 피로 수명 예측에 가장 효과적인 방법임을 제시하였다. 이 방법은 하중 응답 데이터가 현대역 정규 분포일 경우 피로 손상도를 가장 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있으나, 광대역 하중 스펙트럼일 경우 하중순서효과(Load sequence effect)로 인하여, 보수적인 피로 손상도가 도출되는 경향이 있다.

해양플랜트 전선에 대하여 시간영역 해석을 수행하고 RCC방법을 적용하여 피로 손상을 계산하는 방법은 현실적으로 방대한 해석 시간을 요구하므로, 현대역 불규칙 파형의 하중 응답을 주파수 분석을 통해 인장력에 대한 파워 스펙트럼 밀도(Power spectral density, PSD) 함수를 도출 한 후 통계 처리한 피로 손상 예측방법이 스펙트럼 피로 해석법이다. 바이모달(Bimodal) 스펙트럼의 경우, 미국석유협회(American Petroleum Institution, API, 2005) 또는 노르웨이 선급 협회(Det Norske Veritas, DNV, 2008)에서 제시하는 대표적 방법은 다음과 같다.

- Simple summation method(단순 합산법)
- Combined spectrum method(조합 스펙트럼법)
- Jioa-Moan method(수정계수 조합 스펙트럼법)

본 논문에서는 현대역 정규분포를 따르는 바이모달 정상확률 과정에 대한 스펙트럼 분석 후, 각 스펙트럼 조합 방법에 따른 피로 손상도를 도출하여 RCC를 이용한 시간 영역 피로 손상도와 비교하였다.

2. 확률 특성 및 PSD

일정한 미소 시간 간격 δt 마다 표본을 취한 계류 라인 인장력의 높낮이 $X(\omega)$ 의 히스토그램은 정규분포를 따른다고 가정한다. 이러한 불규칙 신호의 스펙트럼 형상은 현대역이 된다. 따라서 파 진폭의 확률밀도함수는 레일리 분포를 따르며, 에너지 스펙트럼은 현대역 스펙트럼 형태가 된다.

시간에 따른 에너지 스펙트럼의 통계적 특성치가 불변이라면, 파랑으로 인하여 발생한 인장력의 시간 이력은 정상 정규 확률 과정(Stationary Gaussian random process)으로 간주되며, Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 특정 시간 영역 동안 샘플링된 동적 하중의 스펙트럼은 식 (1)과 같다.

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi T} E[|X(\omega)|^2] \tag{1}$$

T : 전체 시간

E : 기대 값

$X(\omega)$: 각주파수에 따른 인장 응답 진폭

파워 스펙트럼 밀도 함수 $S(\omega)$ 는 각각의 각주파수 ω 에 따른 진폭의 제곱의 기대치에 비례하는 에너지로써, 단위 주파수당 평균 에너지를 의미하여, 인장력 이력을 푸리에 변화(Fast Fourier transformation, FFT)하여 통해 얻을 수 있다. 본 연구에서는, 수치해석을 통해 Fig. 1과 같이 3시간의 인장 데이터를 0.5초 단위로 추출하였으며, FFT를 통해 PSD함수를 도출하였다. 본 연구에 적용된 피로 유발 환경 하중에 대한 인장 응답 Fig. 1과 같으며, 저주파수 응답에 해당되는 시계열 데이터는 Fig. 2와 같다.

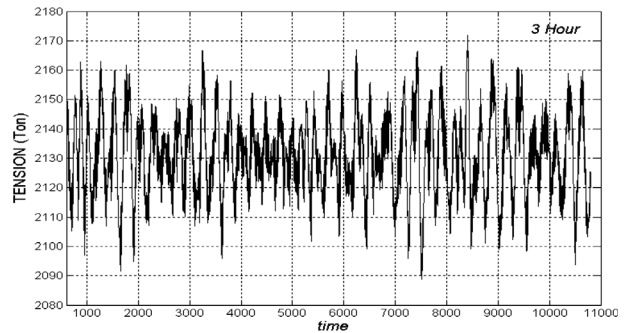


Fig. 1 Sampling of tension time series (Low + High frequency time series)

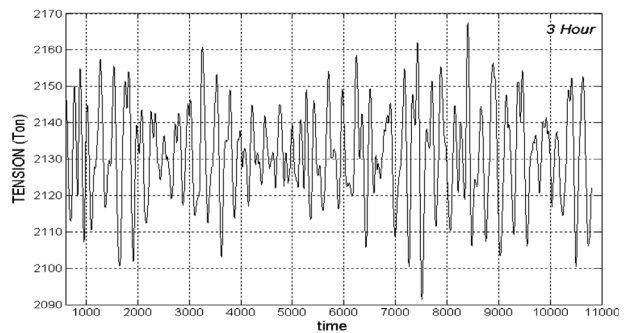


Fig. 2 Sampling of tension time series (Low frequency time series)

i 번째 해상상태에 대한 인장 응답의 $S(\omega)$ 에 대한 n 차 스펙트럼 모멘트는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$m_{n,i} = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \tag{2}$$

0차 스펙트럼 모멘트는 각 주파수 영역의 스펙트럼의 면적으로서, 총 에너지를 의미한다. 식 (3)은 시간 영역의 표준 편차(σ_i) 또는 RMS(Root mean square)와의 관계를 나타낸다.

$$RMS(\sigma_i) = \sqrt{m_{0,i}} \quad (3)$$

영점 교차 주기(T_z) 및 피크 교차 주기(T_p)도 스펙트럼 모멘트를 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}, \quad T_p = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (4)$$

식 (2)에 정의된 스펙트럼모멘트를 이용하여 식 (5)와 같이 스펙트럼의 밴드폭을 결정할 수 있으며, 일반적으로 식 (6)과 같은 Vanmarcke's parameter를 많이 사용한다.

$$\alpha_1 = \frac{m_1}{\sqrt{m_0 m_2}}, \quad \alpha_2 = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}} \quad (5)$$

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{m_1^2}{m_0 m_2}} \quad (6)$$

일반적으로 $T_z/T_p = 1$ 을 만족할 경우 완벽한 협대역 파형을 이룬다고 정의할 수 있으며, 위 식 (5)에서 정의한 밴드 폭 변수는 협대역 파형을 이룰 경우 α_1, α_2 는 1에 수렴하며 식 (6)의 δ 는 0에 점차 수렴해 간다. 반면 α_1, α_2 가 0, δ 가 1에 근접해 갈 경우 광대역 파형으로 정의할 수 있다.

PSD가 충분히 독립적인 주파수대를 유지한다면, 정상확률과정 하에서의 $X(t)$ 와 스펙트럼 모멘트는 각각 식 (7) 및 식 (8)과 같이 선형함수로 표현 될 수 있다.

$$X(t) = X_L(t) + X_H(t) \quad (7)$$

$$m_{total,n} = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega = m_{L,n} + m_{H,n} \quad (8)$$

3. 스펙트럼 조합 기법

Bendat(1964)의 연구는 불규칙 파형에 대한 스펙트럴 기법을 처음으로 적용한 사례로 알려져 있다. 이후 Lutes and Larsen (1990), Larsen and Lutes(1991)는 바이모달 스펙트럼 분석에 대해 단순 합산법 및 조합 스펙트럼법을 제안하였다. 이 방법은 각 스펙트럼을 협대역 파형을 가정하여 두 스펙트럼의 하중 범위를 선형적으로 합산하는 방법이다. 이후 Jioa and Moan(1991)은 선형적 합산 방법의 취약성을 연구하여 무차원 수정계수를 이용한 수정 조합 스펙트럼법을 제시하였다.

하지만, Fu and Cebon(2000), 그리고 Benasciutti and Tovo (2005)는 선형적 합산 방법의 한계점을 분석하여, 바이모달 응답에 적합한 새로운 분석법을 제시하기도 하였지만, 산업적 적용 사례를 찾아보기는 어렵다.

이 연구에서는 시간 영역의 수치해석을 통해 도출한 3시간의

계류 라인 인장 응답은 고주파수는 물론 저주파수 영역도 협대역 레일리 분포를 형성한다는 가정으로, API 및 DNV에서 제시한 대표적 3가지의 단기 스펙트럼 피로 평가 방법을 이용하여 계산 및 분석하였다.

3.1 단순 합산법(Simple summation)

단순 합산법은 고전적 방법으로써, PSD 함수가 완전히 독립된 바이모달 응답을 보일 경우, 각 모드에 대한 피로 손상도를 도출한 후 단순히 더하는 방법이다. 현재 산업 현장에서 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나이다.

$$D_i = \frac{n_{wi}}{K} (\sqrt{2} R_{w\sigma i})^M \cdot \Gamma\left(1 + \frac{M}{2}\right) + \frac{n_{Li}}{K} (\sqrt{2} R_{L\sigma i})^M \cdot \Gamma\left(1 + \frac{M}{2}\right) \quad (9)$$

D_i : i 번째 해상 조건에 대한 연간 누적 피로 손상도

n_{wi} : i 번째 해상 조건에 대한 고주파수 인장력의 연간 하중 사이클 수

n_{Li} : i 번째 해상 조건에 대한 저주파수 인장력의 연간 하중 사이클 수

$R_{\sigma i}$: 최종 파단 강도에 대한 인장 응답 범위 RMS의 비율

$\Gamma(\)$: 감마 함수

M, K : T-N 선도의 재료 상수

3.2 조합 스펙트럼법(Combined spectrum)

이 방법은 고주파수와 저주파수 영역에 해당하는 인장 응답의 표준 편차를 조합하여 계산하는 방법으로 식 (10)과 같이 표현되며, 총 인장 응답에 대한 표준 편차 비율은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$D_i = \frac{n_i}{K} (\sqrt{2} R_{\sigma i})^M \cdot \Gamma\left(1 + \frac{M}{2}\right) \quad (10)$$

$$R_{\sigma i} = \sqrt{R_{w\sigma i}^2 + R_{L\sigma i}^2} \quad (11)$$

n_i : i 번째 해상 조건에 대한 총 인장력의 연간 하중 사이클 수

두 주파수 영역 스펙트럼 조합에 따른 영점 교차 주파수(hertz)는 식 (12)과 같다.

$$\nu_{\sigma i} = \sqrt{\lambda_{wi} \nu_{wi}^2 + \lambda_{Li} \nu_{Li}^2} \quad (12)$$

ν_{wi} : i 번째 해상 조건에 대한 고주파수 인장 응답의 영점 교차 주파수(hertz).

ν_{Li} : i 번째 해상 조건에 대한 저주파수 인장 응답의 영점 교차 주파수(hertz).

여기서 식 (12)의 각 λ 는 식 (13)과 같다.

$$\lambda_{wi} = \frac{R_{W\sigma i}^2}{R_{L\sigma i}^2 + R_{W\sigma i}^2}, \quad \lambda_{Li} = \frac{R_{L\sigma i}^2}{R_{L\sigma i}^2 + R_{W\sigma i}^2} \quad (13)$$

3.3 Jiao-Moan method

스펙트럼 조합 시, 두 스펙트럼 간의 상관관계를 보정한 수정 계수 ρ_i 를 이용하는 방법으로 피로 손상도는 식 (14)와 같다.

$$D_i = \rho_i \cdot \frac{n_i}{K} (\sqrt{2} R_{\sigma i})^M \cdot I \left(1 + \frac{M}{2} \right) \quad (14)$$

여기서 수정 계수 ρ_i 는 식 (15)와 같이 표현된다.

$$\rho_i = \frac{\nu_{ei}}{\nu_{Ci}} \left[(\lambda_{Li})^{\frac{M}{2}+2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda_{wi}}{\lambda_{Li}}} \right) + \frac{\nu_{wi}}{\nu_{Ci}} (\lambda_{wi})^{\frac{M}{2}} \right. \\ \left. \sqrt{\pi \lambda_{Li} \lambda_{wi}} \cdot \frac{MI \left(\frac{1+M}{2} \right)}{I \left(\frac{2+M}{2} \right)} \right] \quad (15)$$

위 식에서 $\lambda_{wi} = 1$ 또는 $\lambda_{Li} = 1$ 일 경우 완벽한 현대역 스펙트럼 분포를 따르며, 수정계수는 1을 취한다. 하지만 λ_{Li} 가 상대적으로 크다면, $\rho_i > 1$ 되므로 피로 손상도가 부정확해 질 수 있다.

식 (15)에서 적용된 영점 교차 주파수(hertz), ν_e 는 식 (16)과 같다.

$$\nu_{ei} = \sqrt{\lambda_{Li} \lambda_{wi} \nu_w^2 \delta_w^2 + \lambda_{Li}^2 \nu_{Li}^2} \quad (16)$$

δ_w 는 고주파수 영역의 밴드 폭 계수이며, 일반적으로 0.1을 취한다.

4. 계류 라인의 수명 계산

최근 방사형 계류 라인의 구성은 일반적으로 하부 체인, 중간 와이어, 상부 체인으로 구성된다. 이 구성 요소 중 부유체와 연결된 상부 체인에서 최대 인장 응답을 보인다. 이 부분의 피로 평가 시 계류 라인의 인장 하중과 더불어, 체인간의 마찰 및 소성 변형으로 인한 면외 굽힘(Out of Plane Bending, OPB)를 고려하여야 하지만(Lim, et al., 2010), 본 연구에서는 축 인장에 의한 피로 수명이 지배적이라고 가정하고, 상부 체인의 축 인장 응답에 대한 피로 수명 평가를 실시하였다.

계류 라인의 피로 수명 평가는 Palmgren-Miner의 선형 누적 법칙과, 식 (17)에 나타낸 T-N (Tension-Cycle) 선도를 사용하였다. 이때 T-N선도의 계수로서 API(2008)에서 제시한 값을 적용하였다(Fig. 3 참조).

$$N \cdot R^M = K \quad (17)$$

여기서,

N : 사이클 수

R : 최소 파단 하중에 대한 인장 범위의 비율

M, K : 피로 재료 상수

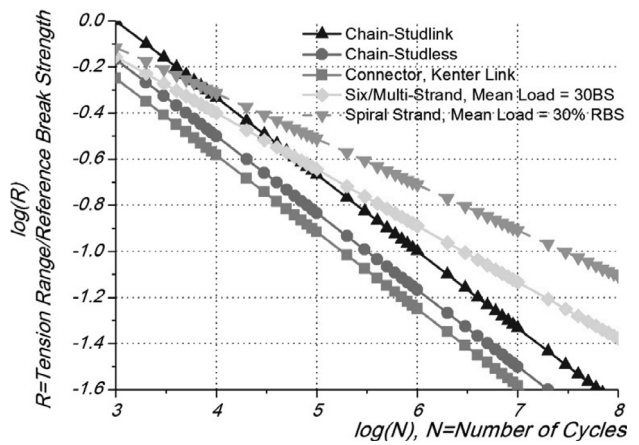


Fig. 3 Mooring fatigue design curve (API RP 2SK, 2008)

5. 사례 연구

다점계류 라인의 인장 응답에 대한 피로 수명 평가를 위해 본 연구에서는 해양파와 너울이 충분히 발달된 서아프리카 해역의 환경 데이터를 고려하였으며, 수치 해석에 적용된 피로 유발 하중의 개략적 특성은 Table 1과 같다. 수치 해석 모델에 적용된 계류 시스템은 체인과 와이어가 복합적으로 구성된 4x4 방사형 다점 계류 시스템이다(Fig. 4 및 Fig. 5).

Table 1 Characteristic value of sea states for fatigue analysis

	Hs (m)	Tp (sec.)	Direction (deg.)
Main Swell	0.25~3.25	4.5~22.5	157.5~217.5
Sec. Swell	0.25~2.25	6.5~22.5	157.5~202.5
Wind	V = 2~10 m/s ^{*)}		
Current	V = 0.9 m/s ^{**)}		

*) Wind speed is measured at 10m above water surface and heading is same with main swell

**) It is the surface current speed for all direction

본 연구에 적용된 FPSO의 기본 제원은 Table 2와 같으며, FPSO 본선과 연결된 상부 체인을 피로 평가 대상으로 결정하였다.

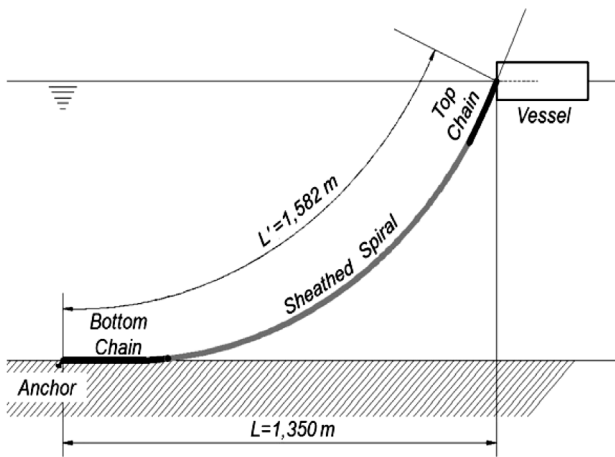


Fig. 4 Configuration of mooring line

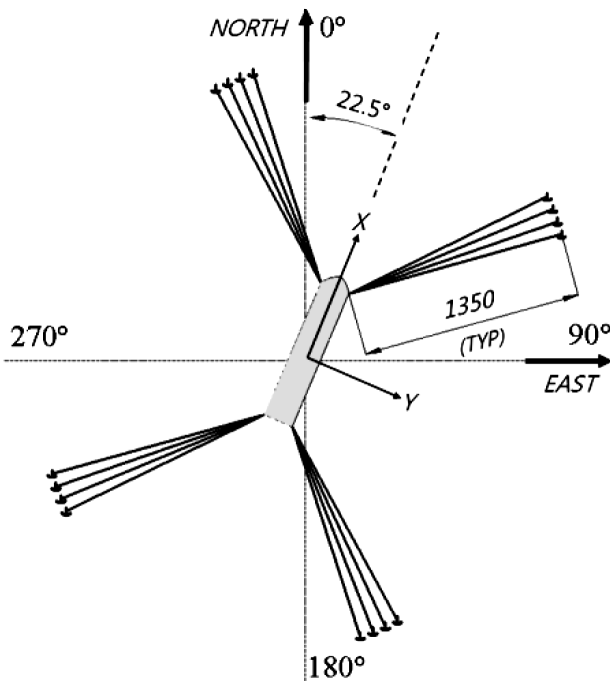


Fig. 5 Plan view of spread mooring system

Table 2 Principal particulars of FPSO

L.O.A	325.0	[m]
Breadth	61.0	[m]
Depth	32.0	[m]
Draft	24.5	[m]
LCG	170.7	[m]
VCG	19.1	[m]
G.M	5.8	[m]
Water depth	785	[m]
Design life	20	[years]

FPSO 선체 하중 조건을 만재(Full load)와 밸러스트(Ballasted)로 분류하여, 이 하중 조건의 종속조건으로서 계류라인의 하중 조건을 적용하였다. 이때 계류 라인에 피로 하중 조건은 Table1의

데이터를 이용해 86개의 조합 조건을 고려하였다. 따라서 총 172개의 피로 유발 하중 조건을 적용하였으며, 시간 영역 계류 라인 해석은 프랑스 선급(Bureau veritas, BV)의 계류 해석 전용 프로그램인 ARINE7(v7.0 r1845)을 사용하였다.

6. 해석 결과

서아프리카 해역에 설치되는 FPSO의 계류 라인의 인장 응답 스펙트럼은 바이모달 구조를 형성한다. 본 연구에서는 RCC를 정해에 가장 근접하다고 가정 후, 3가지 스펙트럼 조합법으로부터 계산된 피로 손상을 비교하였다. 이를 위해 각 조합 방법에 대해 스펙트럼의 밴드폭의 변화에 따른 피로 손상도와 인장 응답 RMS비의 변화에 따른 피로 손상비를 식 (18)-(20)을 이용하여 계산하였다.

$$FDR_S = D_{\text{Simple summation}} / D_{\text{Rainflow count}} \quad (18)$$

$$FDR_C = D_{\text{Combined spectrum}} / D_{\text{Rainflow count}} \quad (19)$$

$$FDR_{JM} = D_{\text{Jiao-Moan}} / D_{\text{Rainflow count}} \quad (20)$$

6.1 스펙트럼 밴드폭의 영향

정상정규확률과정 하에서 불규칙 해양파에 의한 계류 라인 응답 스펙트럼의 처리 결과, 밴드 폭(식 6), 즉 Vanmarcke's 스펙트럼 파라미터 δ 에 따른 피로 손상비를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6 (a)와 (b)는 각각 $M=3.0$ 과 5.0 에 대한 결과이며, 세 방법에 따른 피로 손상비는 δ 가 0에 접근 할수록 수렴하는 양상을 보인다.

Fig. 6으로부터, 피로 손상비가 1.0에 수렴하는 구간은 δ 가 0.30 미만이며, 이 구간은 통계적으로 97.5%의 생존 확률을 보인다. 따라서 본 연구에 고려한 사용한 서아프리카 해역에 설치된 FPSO의 계류시스템 인장 응답에서 협대역과 광대역의 가시적 구분은 $\delta=0.3$ 으로 판단된다.

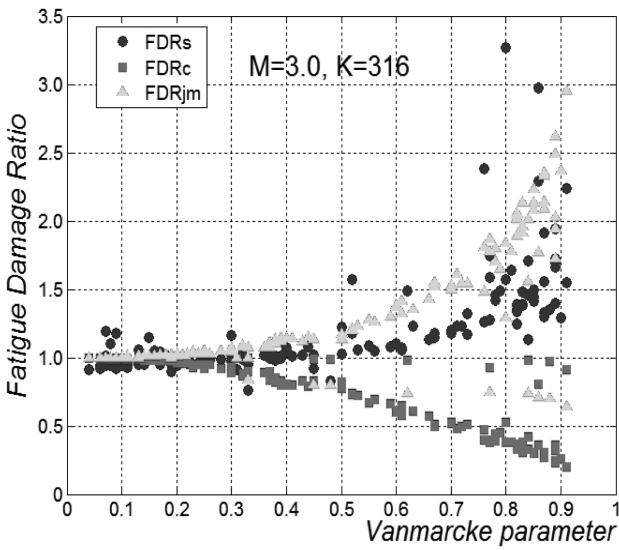
6.2 RMS 비의 영향

계류 라인의 인장 응답은 하나의 완벽한 협대역 분포를 따르지 않기 때문에, 특정한 스펙트럼 조합을 적용하여 피로를 평가하는 것은 과도한 계류 라인의 강성 증가를 유발 할 수 있다.

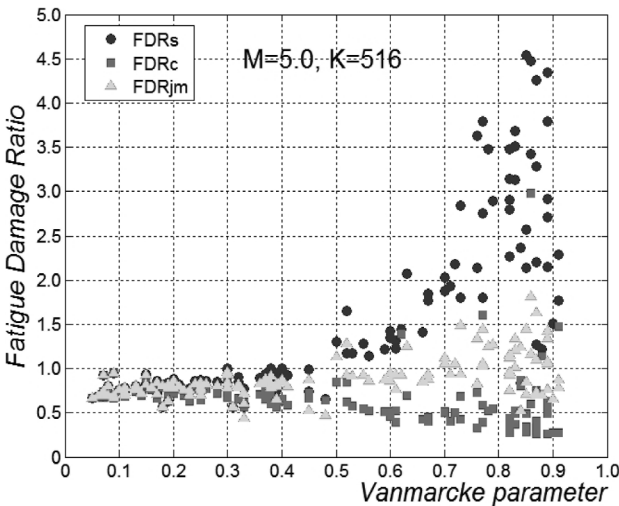
따라서 고주파 영역의 RMS와 저주파 영역의 RMS비는 협대역과 광대역을 구분할 수 있는 유용한 지표이다.

식 (21)은 RMS의 비를 나타내며, R에 따른 피로 손상비 FDR 들을 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다.

$$R = \frac{RMS_{\text{high freq.}}}{RMS_{\text{low freq.}}} \quad (21)$$



(a) M=3.0 (chain)



(b) M=5.0 (Wire)

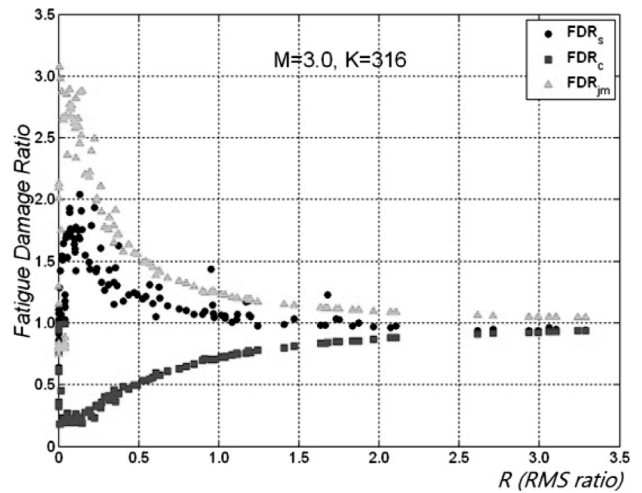
Fig. 6 Comparison of fatigue damage according to Vanmarcke's parameter

단순 합산법, 조합 스펙트럼법 그리고 Jiao-Moan 방법에서 R 의 값이 0에 근접할수록 저주파수 영역대가 지배적이며, R 의 값이 특정 값 이상일 경우 고주파수 영역에 가까운 협대역 파형을 이룬다.

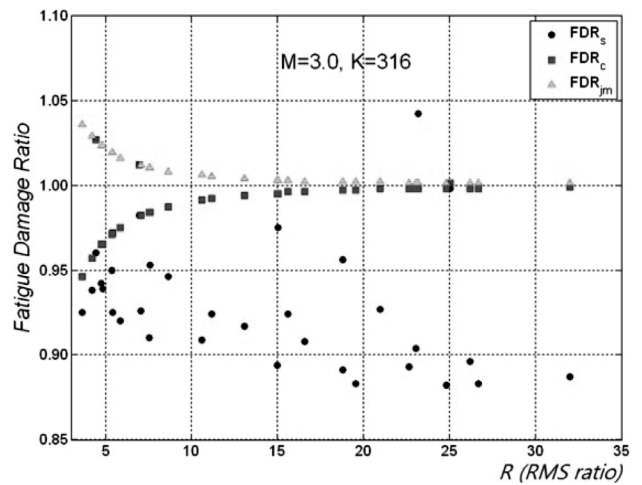
Fig. 7에서 $M=3.0$ 인 경우, 전반적으로 Jiao-Moan 방법이 보수적인 결과를 보이며, 따라서 설계 적용 시 적절한 판단이 필요하다. 반면 조합 스펙트럼 방법에 의한 피로 손상비는 전 영역에서 1.0보다 낮은 결과를 보이므로 신중한 판단이 요구된다. 특히 단순 합산법은 R 이 11 이상일 경우(고주파수 영역이 지배적인 경우)에 피로 손상비가 전반적으로 1.0에 근접한다.

반면 조합 스펙트럼법과 Jiao-Moan 방법은 R 이 3.0 이상은 되어야 피로 손상비가 1.0에 근접함을 볼 수 있다.

해양플랜트 계류라인 설계 시, 저주파수 영역이 지배적인($R < 1.1$) 경우, 단순 합산법이 가장 적합할 것으로 판단된다. 특히



(a) $R < 3.5$



(b) $R > 3.5$

Fig. 7 Comparison of fatigue damage according to spectrum moment ratio for $M=3.0$, chain

$R < 0.05$ 또는 $0.35 < R < 1.1$ 일 경우, 단순 합산법은 좋은 상관관계를 나타낸다.

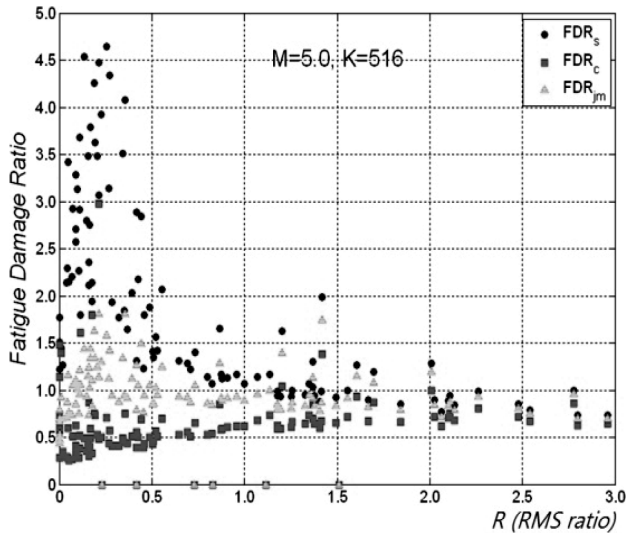
따라서 본 연구의 경우, 적용된 두 영역대의 RMS의 비율이 아래 식 (22)을 만족할 경우, 단순 합산법을 설계에 적용하는 것이 타당하다.

$$R < 0.05 \text{ or } 0.35 < R < 1.1 \quad (22)$$

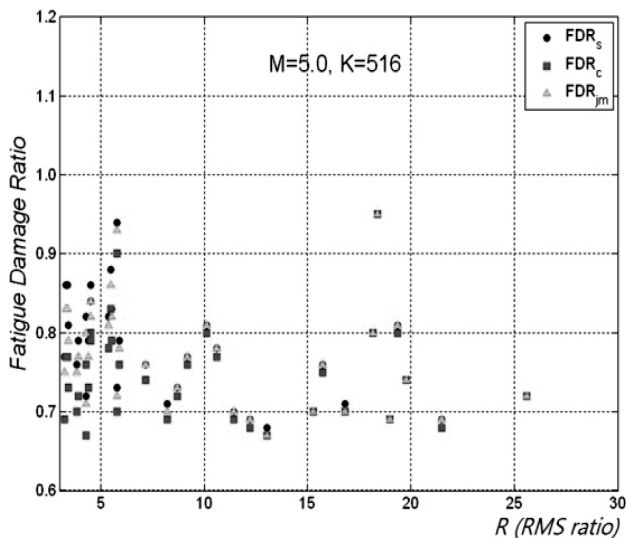
반면 RMS 비율이 식 (23)을 만족할 경우, 단순 합산법의 피로 평가 결과는, 계류 라인의 강성 증가를 야기시켜 해양플랜트의 오프셋 범위(offset range)를 과도하게 감소시킬 수 있다. 또한 계류 라인의 인장력 응답을 증가 시켜, 해양플랜트 및 계류라인의 안전성 문제를 유발 할 수 있다. 이에 따라 설계에 적절한 감소 계수를 적용 할 것을 제시한다.

$$0.05 < R < 0.35 \quad (23)$$

재질이 와이어일 경우 T-N선도의 기울기M은 5.0이며, Fig. 8에서 제시하는 결과와 같이, R가 1.1 미만일 경우 단순 합산법이 가장 보수적 결과를 제시함을 볼 수 있다. 조합 스펙트럼법 및 Jiao-Moan 방법은 피로 손상비가 1.0보다 작게 예측하는 경우도 상당히 볼 수 있다. 따라서 설계 적용 시 적절한 기술적 판단이 요구된다.



(a) R<3.5

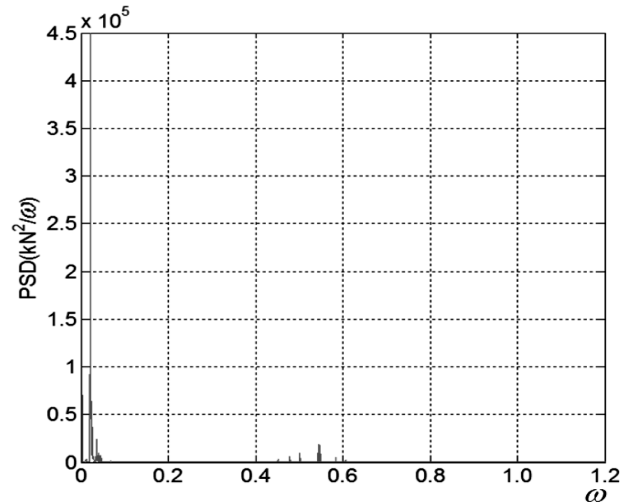


(b) R>3.5

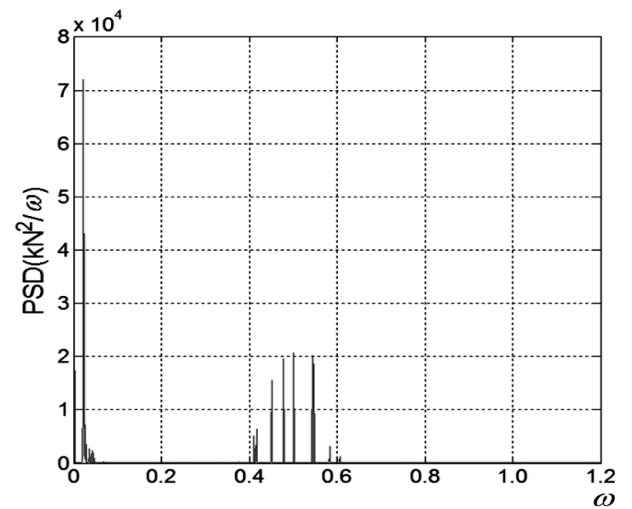
Fig. 8 Comparison of fatigue damage according to spectrum moment ratio for M=5.0, wire

반면 $R > 1.1$ 일 경우, 세 가지 방법은 비슷한 피로 손상비를 나타내지만, 1.0보다 작은 값을 나타낸다는 사실에 주목할 필요가 있다. 이러한 문제로 인하여 와이어의 경우, API에서는 최소 피로 안전 계수 3.0을 권장하고 있다.

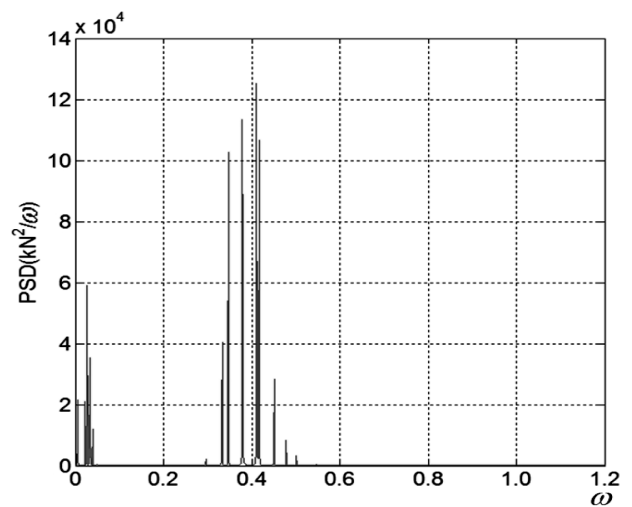
참고로 Fig. 9는 식 (22) 및 식 (23)에서 제시한 R의 경계값에 상응하는 PSD 함수를 보여준다.



(a) R=0.05



(b) R=0.35



(c) R=1.1

Fig. 9 Comparison of PSD (power spectral density) function according to RMS ratio

7. 결론

본 연구에서는 바이모달 스펙트럼을 가지는 정상확률과정에 대한 계류라인의 시간영역 수치해석을 수행한 후, 계류라인의 인장력 이력을 도출하고, RCC를 통하여 피로 손상도를 계산하였다.

또한 시계열 인장력 데이터를 FFT를 이용하여 주파수영역으로 변환한 후, 다양한 스펙트럼 조합법을 통하여 피로 손상도를 제시하였다.

Vanmarcke 파라미터에 따른 피로 손상도를 비교하여 스펙트럼 밴드폭에 따른 산포도를 분석한 결과 임계 파라미터를 정식화하였다.

스펙트럼 모멘트 비에 따른 피로 손상도를 비교하여 스펙트럼 모멘트에 따른 임계 모멘트 비를 정식화하였다.

본 연구에서 제시한 임계 파라미터 및 모멘트 비는 서아프리카 특정 해역을 대상으로 제시된 결과이며, 최근 동 해역에서의 부유식 해양플랜트 공사 발주가 잦아짐에 따라 국내 조선소의 계류시스템에 대한 피로설계 최적화에 많은 도움이 되리라 예상된다.

각 해역 별 파랑 특성 및 계류 시스템 종류에 따른 계류 라인 의 응답 분석하여, 적절한 피로 손상 조합기법에 대한 연구가 병행될 필요가 있다.

참고 문헌

ASTM E1049-85, 2005. *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, ASTM.

API, 2008. *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. 3rd Ed. RP-2SK.

Bendat, J.S., 1964. *Probability function for random responses*. NASA report on contract NAS-5-4590.

Benasciutti, D. & Tovo, R., 2005. Spectral methods for lifetime prediction under wide-band stationary random processes. *International Journal of Fatigue*, 27(8), pp.867-877.

Choung, J.M. Joung, J.H. Choo, M.H. & Yoon, K.Y., 2007. Development of Fully Stochastic Fatigue Analysis Program for Offshore Floaters. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(4), pp.425-438.

DNV, 2008. *Position mooring*. DNV-OS-E301.

Dowling, N.E., 1972. Fatigue Failure Prediction for Complicated Stress-Strain Histories. *Journal Materials*, 7(1), pp.71-87.

Fu, T.T. & Cebon, D., 2000. Predicting fatigue lives for bi-modal stress spectral densities. *International Journal of Fatigue*, 22(1), pp.11-21.

Jiao, G. & Moan, T., 1990. Probabilistic analysis of fatigue due to Gaussian load processes. *Probabilistic analysis of fatigue due to Gaussian load processes*, 5(2), pp.76-83.

Larsen, C.E. & Lutes, L.D., 1991. Predicting the fatigue life of offshore structures by the single-moment spectral method. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 6(2), pp.96-108.

Lim, Y.C. Kim, K.S. Choung, J.M. & Kang, C.H., 2010. A Study on Out-of-Plane Bending Mechanism of Mooring Chains for Floating Offshore Plants. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.580-588.

Lutes, L.D. & Larsen, C.E., 1990. Improved spectral method for variable amplitude fatigue prediction. *Journal of Structural Engineering*, 116(4), pp.1149-1164.

Matsuishi, M. & Endo, T., 1968. *Fatigue of metals subjected to varying stress*. *Japan Society of Mechanical Engineers*, Fukuoka, Japan.

