

광대역 정규 프로세스에 대한 주파수 영역 기반 피로해석법의 적용성에 관한 연구 II : 광대역 피로예측 모델

정준모^{1,†} · 김경수¹ · 남지명¹ · 구정본² · 김민수³ · 심용래⁴ · 엄항섭⁵
인하대학교 조선해양공학과¹
삼성중공업 조선플랜트연구소²
영국선급협회³
미국선급협회⁴
노르웨이선급협회⁵

Study on Applicability of Frequency Domain-Based Fatigue Analysis for Wide Band Gaussian Process II : Wide Band Prediction Models

Joonmo Choung^{1,†} · Kyung Su Kim¹ · Ji-Myung Nam¹ · Jeong-Bon Koo² · Min-Soo Kim³ · Yong Lae Shim⁴ · Hang-Sub Urm⁵
Dep't of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University¹
Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.²
Lloyd's Register Asia³
American Bureau of Shipping⁴
Det Norske Veritas⁵

Abstract

This is the final one of the two companion papers dealing with accuracy of accumulated fatigue damage estimation under wide band process. It is stated that four kinds of wide band models exist: typed of equivalent stress, combined PDF, correction factor, and damage combination. For the idealized ESDs from full scale measurement data on an 8100TEU container vessel, fatigue damages are compared for a narrow band prediction model based on Rayleigh PDF and five wide band fatigue prediction models of Dirlik, Wirsching-Light, Jiao-Moan, Benasciutti and DNV. DNV model consistently overestimates fatigue damages regardless of variation of ESDs. Predictions by Jiao-Moan model, which is understood as standard method for design of offshore platforms, are also in conservative side. Best accuracy is found from the results by Dirlik and Benasciutti models, but Benasciutti model is preferred since it can easily combined with narrow band fatigue damage based on Rayleigh PDF.

Keywords : Wide band process(광대역 프로세스), Narrow band process(협대역 프로세스), Dirlik model(Dirlik 모델), Wirsching-Light model(Wirsching-Light 모델), Jiao-Moan model(Jiao-Moan 모델), Benasciutti model(Benasciutti 모델), DNV model(DNV 모델), Rainflow cycle counting(RFC, 레인플로우 집계법), Wave process(파랑 프로세스), Vibration process(진동 프로세스), Combined process(조합 프로세스)

1. 서론

본 논문의 1편에서는 광대역 특성을 가지는 응력이력에 레일리 PDF(probability density function)를 적용하였을 경우에 발생할 수 있는 문제점과 원인을 정량적으로 분석하였다. 즉 컨테이너선의 2절 진동 프로세스를 가정하여, 레일리 PDF기반 통계적 피로해석법의 한계점 및 레일리 PDF의 적용 한계에 대한 제안을

하였다.

8100TEU급 실선에 대한 장기 계측 데이터로부터 파랑 및 진동으로 인한 0차 ESD(energy spectral density) 모멘트(0th order ESD moment)의 분포가 와이블 분포(Weibull distribution)를 따름을 규명하였으며, 와이블 분포의 99% 확률수준에 상응하는 파랑 및 진동 응력 ESD의 크기와 형상을 결정하고, ESD의 비율을 5가지로 가정하였다. 선체의 길이 방향 강성에 따른 고유진동수의 변화를 고려하여 16가지의 진동 ESD 주파수 위치를 가정하여,

총 80개의 수치 시뮬레이션이 수행되었다. 80개의 시뮬레이션에 대하여 ESD의 역푸리에 변환 및 레인플로우 집계법(rainflow cycle counting)을 이용하여 레인플로우 누적 피로(rainflow fatigue damage)를 정해로 가정하였다. 또한 레일리 PDF에 따른 누적 피로도를 산정한 결과, 광대역 프로세스에 레일리 PDF를 적용할 경우, 누적 피로도를 매우 보수적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 레일리 PDF의 보수성은 다음의 두 가지 측면에서 검증할 수 있었다.

- 조합 ESD에 대한 영점교차 주파수 ≪ 피크 주파수
- 조합 ESD에 대한 레인플로우 응력범위 ≠ 분포 레일리 PDF

결론적으로 조합 ESD에 대한 0차 ESD 모멘트와 역푸리에 변환 및 RFC를 이용하여 얻어진 레일리 PDF의 0차 ESD 모멘트를 비교한 결과 20% 이내의 차이를 보일 경우에 한하여 레일리 PDF가 광대역 프로세스에 적용 가능함을 제안하였다.

2번째 논문에서는 광대역 프로세스에 적용이 가능한 피로 예측 모델에 대한 비교 연구를 수행하고자 한다. 통상 광대역 모델은 다음의 4가지 유형으로 나누어진다.

- 등가응력형
- PDF조합형
- 수정계수형
- 손상조합형

Choudhury and Dover (1985)는 선형피로누적법칙에 사용될 등가응력범위(equivalent stress range)를 제안한바 있다. 또한 Dirlik (1985), Zhao and Baker (1992), Park (2011)은 레일리 PDF에 대신에 광대역 레인플로우 응력범위 분포를 묘사할 수 있는 새로운 조합 PDF제시한바 있다. Wirsching and Light (1980), Jiao-Moan (1990), Benasciutti (2004)는 기존의 레일리 PDF에 근거한 누적피로에 수정계수를 곱하여 광대역 피로손상도를 예측하는 방법을 제시하였다. DNV (2010a), Guédé, et al. (2010)가 제시한 광대역 피로예측 모델은 파랑 및 진동으로 인한 피로도를 예측하고 각각의 피로도에 수정계수를 곱하고 두개의 피로도를 합한 형태이다.

Lim, et al. (2010)은 API (2008)에 제시된 광대역 모델 (단순 합산법, 조합 스펙트럼법, Jiao-Moan 수정계수법)을 FPSO 계류 라인에 적용하여 Vanmarcke 밴드폭 계수가 0.3미만일 경우에 합대역으로 간주될 수 있다고 제시하였다. 이 연구는 API (2008)에 제시된 단순한 형태의 광대역 모델을 다루었기 때문에, 좀더 다양한 모델에 대한 피로도를 평가할 필요가 있으며, 이중선형 (bilinear) T-N선도(tension-life diagram)에서의 피로도에 대한 논의가 없었다. 또한 Park, et al. (2011)은 가정된 광대역 ESD에 대한 다양한 광대역 모델을 벤치마킹하였지만, ESD의 설정부분에서 이론적인 근거가 부족하며, 이중선형 S-N선도(stress-life diagram)에 대한 고려가 되지 않았다. Benasciutti and Tovo (2006)는 가정된 다양한 ESD의 형상에 대하여 Wirsching-Light

수정계수, Dirlik PDF, Zhao-Baker PDF, Benasciutti 수정계수 등의 광대역 모델을 이용하여 피로도 비교를 수행한바 있다. 이 연구에서도 단선형(single linear) S-N선도만을 가정하였고, ESD의 가정 근거가 희박하고, 실제 ESD를 구현했다고 간주되기는 어렵다.

본 연구에서는 현재 조선해양산업계에서 널리 사용되고 있거나, 정확도가 높은 것으로 알려진 5가지 광대역 모델, 즉 Wirsching-Light, Dirlik, Benasciutti, Jiao-Moan, DNV모델을 대상으로 광대역 피로예측의 정확도를 검증하고자 한다.

2. 광대역 응력이력 피로예측 모델

주파수 영역 누적 피로도 일반식

누적 피로도의 일반식은 식 (1)에 보인 바와 같이 응력범위의 PDF ($f(\Delta\sigma)$)를 적분한 형태이다. 이때 응력범위의 분포는 피크치의 분포와 동일하다고 간주될 수 있기 때문에 식 (1)은 식 (2)처럼 피크 주파수와 가진 기간 (또는 설계 수명)의 곱으로 표현이 가능하다.

$$D = \frac{n}{a} \int_0^\infty f(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m \cdot d\Delta\sigma \quad (1)$$

$$D = \frac{f_p T_d}{a} \int_0^\infty f(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m \cdot d\Delta\sigma \quad (2)$$

* 설명되지 않은 기호는 본 논문의 제1편을 참조.

Dirlik 모델

Dirlik (1985)은 새로운 PDF를 이용한 피로 손상도를 식 (3)과 정의하였다. 식 (3)에서 새로운 독립 변수 Z 는 응력 범위를 $2\sqrt{m_0}$ 로 나눈 변수이며, 식 (4)처럼 표현되며, 식 (5)는 식 1개의 지수 PDF와 2개의 레일리 PDF를 조합한 새로운 PDF를 의미한다. 식 (5)에 적용된 변수를 식 (6)-(12)에 나타내었다.

$$D_{Dir} = \frac{f_p T_d}{a} \int_0^\infty f(Z) \cdot Z^m \cdot dZ \quad (3)$$

$$Z = \frac{\Delta\sigma}{2\sqrt{m_0}} \quad (4)$$

$$f(Z) = \frac{\left[\frac{D_1}{Q} \exp\left(-\frac{Z}{Q}\right) + \frac{D_2 Z}{R^2} \right] \left[\exp\left(-\frac{Z^2}{2R^2}\right) + D_3 Z \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) \right]}{2\sqrt{m_0}} \quad (5)$$

$$x_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (6)$$

$$D_1 = \frac{2(x_m - \alpha_2)}{1 + \alpha_2^2} \quad (7)$$

$$R = \frac{\alpha_2 - x_m - D_1^2}{1 - \alpha_2 - D_1 + D_1^2} \quad (8)$$

$$D_2 = \frac{1 - \alpha_2 - D_1 + D_1^2}{1 - R} \quad (9)$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad (10)$$

$$Q = \frac{1.25(\alpha_2 - D_3 - D_2 R)}{D_1} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}} \quad (12)$$

Wirsching-Light 모델

레이리 PDF는 식 (13)과 같으며 식 (13)을 식 (2)에 대입한 후 협대역을 가정하여 피크 주파수를 영점 교차주 파수로 바꾸고, 식 (14)와 같은 협대역 피로 손상도를 도출할 수 있다. 협대역에 기반한 레이리 PDF를 광대역에 적용할 경우, 피로 손상의 크기를 과대평가하는 경향이 있으며, Wirsching and Light (1980)는 협대역 피로 손상도에 계수를 곱하여(식 (15) 참조), 피로 손상도를 완화시키는 계수를 식 (16)과 같이 제안하였다. 식 (16)에 사용된 변수를 식 (17)-(18)에 나타내었다. 따라서 Wirsching-Light 광대역 피로 손상도를 추정하기 위해서는 협대역 피로 손상도의 추정이 선행되어야 한다.

$$f(\Delta\sigma) = \frac{\Delta\sigma}{4m_0} \exp\left(-\frac{\Delta\sigma^2}{8m_0}\right) \quad (13)$$

$$D_{Ray} = \frac{f_z T_d}{a} \int_0^\infty f(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m \cdot d\Delta\sigma \quad (14)$$

$$D_{WL} = \rho_{WL} D_{Ray} \quad (15)$$

$$\rho_{WL} = a_{WL} + (1 - a_{WL}) \left(1 - \sqrt{1 - \alpha_2^2}\right)^{b_{WL}} \quad (16)$$

$$a_{WL} = 0.926 - 0.033m \quad (17)$$

$$b_{WL} = 1.587m - 2.323 \quad (18)$$

Jiao-Moan 모델

Wirsching-Light과 유사한 형태의 광대역 모델이 Jiao and Moan (1990)에 의하여 제시되었다. 본 모델은 현재 노르웨이 선급(Det Norske Veritas)에서 발간되는 대부분의 산업규격(DNV, 2010a; DNV, 2010b)에 채택되어 설계에 활용되고 있으며, 또한 미국석유공업협회(American Petroleum Institute)에서 발간하는 산업규격(API, 2008)에도 명시되어 있다. Jiao and Moan 모델은 완벽하게 분리된 두 개의 ESD를 가지는 광대역 프로세스에 적합하도록 개발이 되었으며, 식 (19)-(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{JM} = \rho_{JM} D_{Ray} \quad (19)$$

$$\rho_{JM} = \frac{f_{z,m}}{f_{z,c}} \left[(m'_{0,w})^{\frac{m}{2}+2} \left(1 - \sqrt{\frac{m'_{0,v}}{m'_{0,w}}}\right) + \sqrt{\pi \cdot m'_{0,w} \cdot m'_{0,v}} \frac{m \Gamma\left(\frac{m}{2} + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)} \right] + \frac{f_{z,v}}{f_{z,c}} (m'_{0,v})^{\frac{m}{2}} \quad (20)$$

$$m_{0,c} = m_{0,w} + m_{0,v} \quad (21)$$

$$m'_{0,w} = \frac{m_{0,w}}{m_{0,c}} \quad (22)$$

$$m'_{0,v} = \frac{m_{0,v}}{m_{0,c}} \quad (23)$$

$$f_{z,c} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2,c}}{m_{0,c}}} \quad (24)$$

$$f_{z,m} = m'_{0,w} v_{z,w} \sqrt{1 + \frac{m'_{0,v}}{m'_{0,w}} \left(\frac{f_{z,v}}{f_{z,w}} q_v\right)^2} \quad (25)$$

Benasciutti 모델

수식의 형태만으로 보자면 Benasciutti 모델은 Jiao-Moan 또는 Wirsching-Light 모델과 유사하지만, 물리적인 의미가 비교적 다르다.

레인플로우 피로 손상도(시간 영역에 대한 레인플로우 사이클 집계법을 통한 피로 손상도이며, 통상 정해로 간주됨)는 상한과 하한 사이에 존재한다고 가정하였다. 즉 레벨 크로스 집계법(level cross counting)에 의한 피로 손상도를 상한으로 하고, 응력범위 집계법(range counting)에 의한 피로 손상도를 하한으로 가정하였다(식 (26) 참조). 식 (27)과 같이 피로 손상도의 상한은 협대역 가정에 의한 피로 손상도와 같다고 가정(Rychlik, 1993)하고, 피로 손상의 하한은 식 (28)과 같은 Madsen, et al. (1986)의 결과를 이용하였다. 이들 관계식을 이용하여 유도된 광대역 피로

손상도는 식 (29)와 같다. 식 (29)에서 수정계수는 식 (30)과 같으며, 식 (30)에 사용된 변수를 (31)에 나타내었다.

$$D_{RC} \leq D_{RFC} \leq D_{LCC} \quad (26)$$

$$D_{LCC} \approx D_{Ray} \quad (27)$$

$$D_{RC} \approx \alpha_2^{m-1} D_{Ray} \quad (28)$$

$$D_{Ben} = b_{Ben} D_{Ray} + (1 - b_{Ben}) D_{RC} = \rho_{Ben} D_{Ray} \quad (29)$$

$$\rho_{Ben} = b_{Ben} + (1 - b_{Ben}) \alpha_2^{m-1} \quad (30)$$

$$b_{Ben} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{[1.112\{1 + \alpha_1\alpha_2 - (\alpha_1 + \alpha_2)\} \exp(2.11\alpha_2) + (\alpha_1 - \alpha_2)]}{(\alpha_2 - 1)^2} \quad (31)$$

DNV 모델

이 모델은 계류사 또는 양강기에 작용하는 저주파수 프로세스 및 파랑 프로세스의 조합 프로세스에 적용이 가능하도록 개발되었다. 본 모델을 이용한 피로 손상도는 비교적 보수적인 결과를 제시하는 것으로 알려져 있다.

$$D_{DNV} = D_v \left(1 - \frac{f_{z,w}}{f_{z,v}}\right) + f_{z,w} \left[\left(\frac{D_v}{f_{z,v}}\right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{D_w}{f_{z,w}}\right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \quad (32)$$

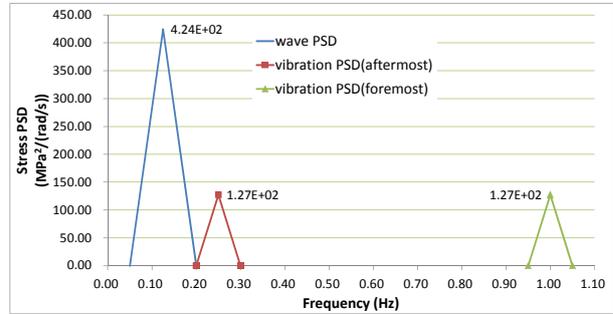
3. 광대역 응력이력 피로도 비교

3.1 ESD의 형상 및 크기

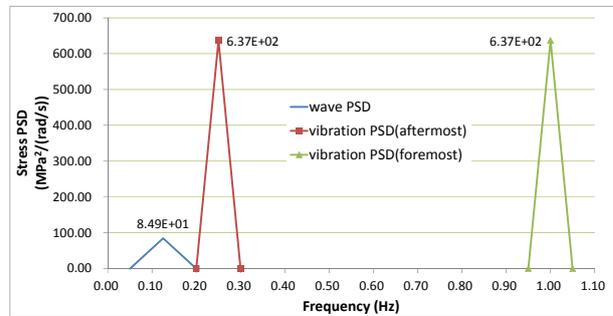
본 논문에서 적용된 ESD는 본 논문의 제1편에서 제시된 ESD와 동일하며, 독자의 이해를 돕기 위하여 다시 한번 요약 설명하고자 한다.

컨테이너선 실선 계측 데이터로부터 결정된 ESD의 형상 및 크기를 그대로 적용하였다. 즉 이상화된 ESD로부터 0차 ESD모멘트를 파랑 및 진동에 대하여 각각 200MPa^2 및 40MPa^2 로 결정한 후, 이들의 비를 R_{m_0} 라고 정의하고, R_{m_0} 를 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0의 다섯개 케이스를 고려하였다. 이등변 삼각형 ESD 적분을 통하여 ESD의 최대치를 결정하였다. Figure 1에는 R_{m_0} 가 각각 최소(0.2) 및 최대(5.0)일 때를 스케치하여 나타낸다. 각각의 R_{m_0} 에 대하여 진동 ESD의 위치에 대한 경우의 수는

$f_{v,2}$ 를 기준으로 0.25Hz(aftermost)에서 1.00Hz(foremost)를 까지 0.05Hz 간격으로 16개로 결정하였다. 따라서 총 80개의 시물레이션 케이스에 대한 피로 해석을 실시하였다. 해석 케이스에 대한 상세한 내용은 본 논문의 1편 Table 3을 참조하기 바란다.



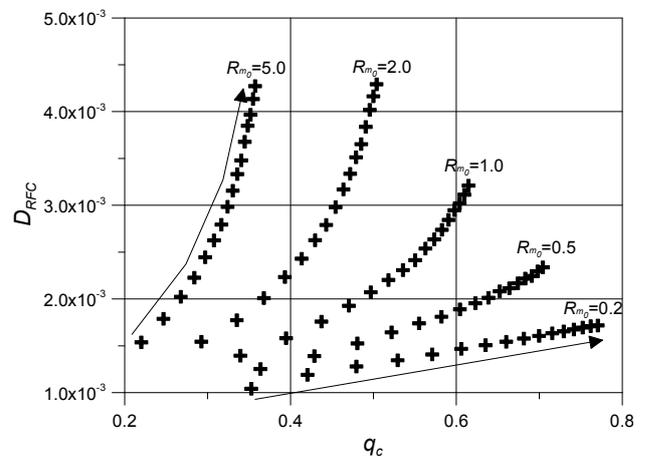
(a) $R_{m_0} = 0.2$



(b) $R_{m_0} = 5.0$

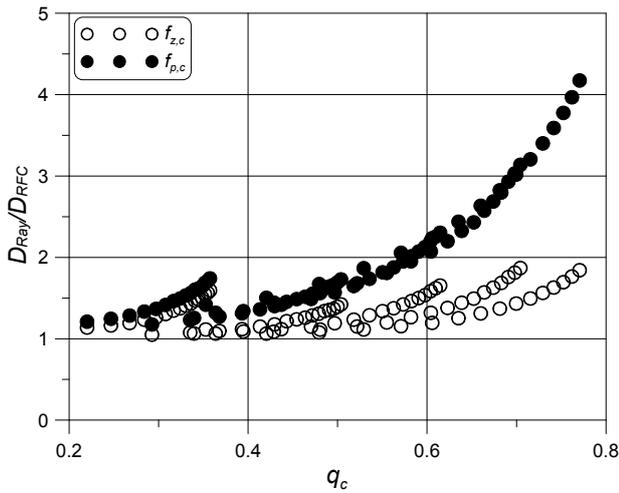
Fig. 1 Idealized ESDs for wave and vibration processes

본 논문의 제1편에서는 이와 같은 ESD에 대한 역 푸리에 변환 → 레인플로우 집계법 → S-N선도 대입 → 선형누적을 통하여 도출한 레인플로우 피로 손상도를 나타낸바 있다 (Figure 2 참조).

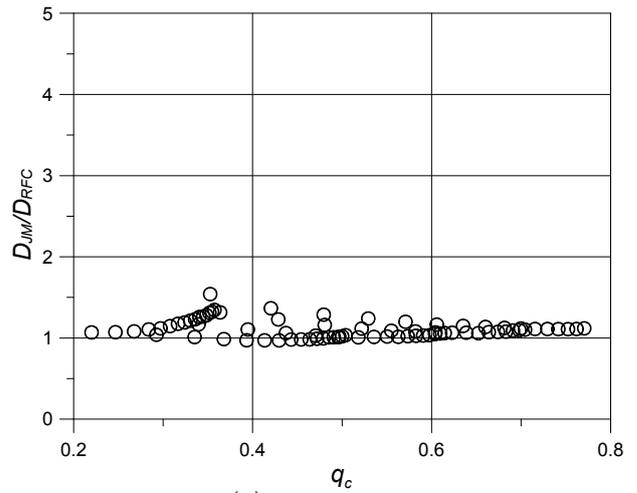


(a) Rainflow fatigue damages

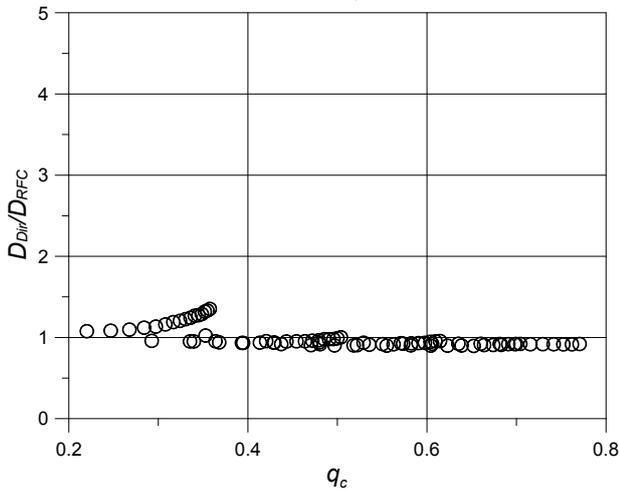
Fig. 2 Fatigue damage distributions



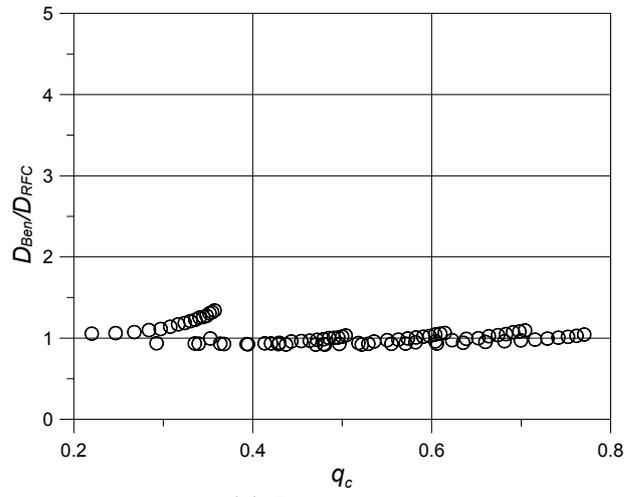
(a) Rayleigh



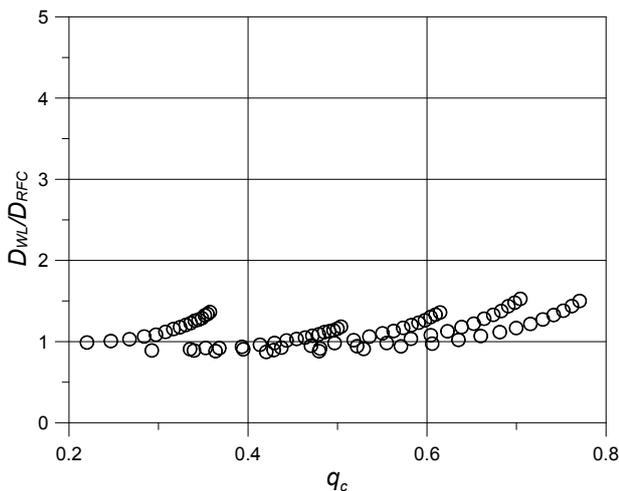
(d) Jiao-Moan



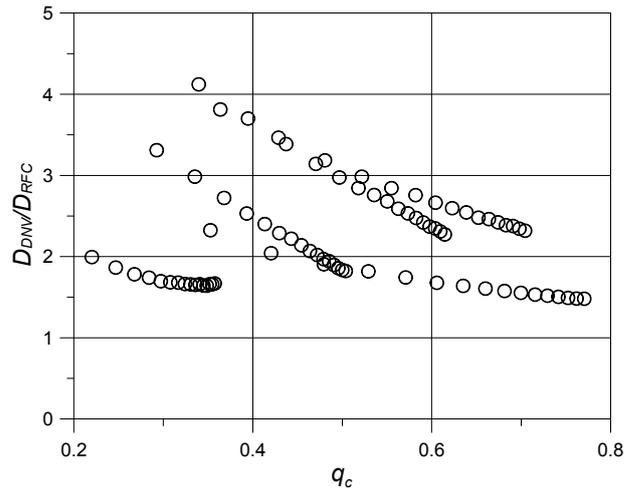
(b) Dirlik



(e) Benasciutti



(c) Wirsching-Light



(f) DNV fatigue

3.2 피로도 비교 분석

위에서 제시된 협대역 모델과 5가지 광대역 모델을 이용하여 예측된 피로 손상도를 Figure 2의 레인플로우 피로 손상도로 무차원화하여 Figure 3에 나타내었다. 협대역 모델의 경우 조합 프로세스의 밴드폭 계수 (Vanmarcke parameter for combined

Fig. 3 Comparison of wide band models

process, q_c)가 증가함에 따라 피로 손상도를 현저하게 보수적으로 평가하는 경향을 보인다. 이에 대한 원인과 설명은 본 논문의 제1편을 참조하기 바란다. Dirlik 모델은 전반적으로 약간 비보수적인 피로도를 제시하고 있음을 볼 수 있다. 반면

Wirsching-Light 모델은 낙관적인 결과와 보수적인 결과를 동시에 제시하지만, 광대역성이 증가할수록 보수적인 평가 경향을 제시한다. Jiao-Moan 모델은 광대역에서 매우 우수한 예측도를 보여준다. 그러나 ESD가 인접할 경우 (즉 협대역에 근접할 경우) 그 정확도가 떨어지는 경향을 보인다. Benasciutti 모델은 Dirlik 모델에서 보이던 비보수적인 경향을 개선시킨 것으로 보여지지만 크게 큰 차이를 보인다고 간주하기에는 어렵다. 이 때문에 자동차 산업계에서는 Dirlik 모델을 널리 사용하는 편이다. 그러나 Dirlik 모델은 레일리 PDF를 사용하지 않기 때문에 조선해양 산업계에서 사용하려면 새로운 프로그램의 개발이 필요한 단점이 있으며, 현존하는 조선해양 피로해석법에의 이식성 측면에서 Benasciutti 모델이 권장된다. DNV 모델의 경우, 조선소에서 그 사용의 용이성으로 인하여 이봉형 ESD를 가지는 구조물, 예를 들어 크레인 하부 (pedestal) 또는 플레어 타워(flare tower) 구조물 설계에 적용되고 있지만, 결과의 보수성을 감안하여 설계에 적용할 필요가 있다고 판단된다.

3.3 응력범위의 피로 기여도 평가

Figure 4는 증가된 응력범위가 피로에 미치는 영향도를 나타내고 있다. 또한 응력범위의 발현 확률을 히스토그램으로 같이 나타내었다. Figure 4의 관찰에 있어서 중요한 점은 누적 피로도가 아니라, 응력범위의 증가가 피로에 미치는 영향도와 실제 응력범위의 발현확률을 동시에 나타냈다는 점이다. 대부분의 광대역 모델에서, 대략 20MPa이상은 되어야 피로에 기여도가 있음을 확인할 수 있다. 또한 대략 60MPa이상의 높은 응력의 발현빈도는 낮아도, 피로에 미치는 기여도가 50%정도로 보여진다. 예를 들어 동일한 m_0 를 가지며, 다른 최대치를 가지는 두개의 ESD를 고려해보자. 응력범위는 최대치가 큰 ESD는 높은 응력범위를 많이 제공할 것이고, 따라서 피로도는 급격하게 증가하는 양상을 보일 것이다. 본 연구에서 고려한 응력 ESD로부터 추정된 레인플로우 응력 범위의 최대치가 약 140MPa내외임을 감안하면, 피로에 기여도가 높은 응력범위는 대략 60MPa-140MPa로 추정할 수 있다.

Figure 5는 응력범위의 증가에 따른 레인플로우 누적피로도도 광대역 모델을 이용한 누적피로도를 비교하여 나타낸다. 레일리 모델은 두개의 ESD가 서로 멀리 떨어진 경우에 피로를 과대 산정하고 있음을 알 수 있다. 반면 Jiao-Moan 모델은 두 개의 ESD가 서로 인접한 경우에 피로를 과대 산정하고 있음을 알 수 있다. 반면, DNV 모델은 ESD의 위치($f_{v,2}$)나 R_{m_0} 에 관계없이 낮은 응력 범위에서 과도한 피로 기여도를 산정하고 있음을 알 수 있다. Benasciutti 및 Dirlik 모델은 서로 유사한 피로 기여도 분포를 보여준다.

DNV 모델은 다양한 광대역 프로세스에 대한 누적 피로도를 과대 평가하고 있음을 Figure 4 또는 Figure 5로부터 알 수 있다. 저자의 경험에 의하면, 실제 해양플랫폼의 설계시 DNV 모델을 종종 사용하는 경우가 있었다. 그러나 서아프리카 해안처럼 풍파와 너울의 주파수대역이 상당히 겹치는 경우, DNV 모델을 사용하여 광대역 효과를 고려한다면, 아주 보수적인 결과를 초래하게 될 것이다. 이러한 현상은 Jiao-Moan 모델을 적용하여도 유사하

게 나타날 것이다. 그러나 DNV (2010a)는 Jiao-Moan 모델 또는 DNV 모델을 이용하여 광대역 효과를 고려할 것을 명시하고 있는데, 두 모델의 보수성에 대한 정량적 평가 후에 이를 이용하여 설계 결과를 도출해야 할 것이다.

Figure 5 (d)의 경우, 레인플로우 누적 피로도는 다른 모델들에 의하여 예측된 누적 피로도에 비하여 현저히 작다. 많은 광대역 모델은 본 연구에서 제시된 시뮬레이션 과정을 거쳐 정식화되었는데, 본 논문에서 고려한 ESD의 비율 또는 분포를 포함하지 않는 수준에서 정식화 되었을 가능성이 매우 높다. 즉 $R_{m_0} = 5.0$ 은 비교적 비현실적인 조건일 가능성이 크다. Figure 3 (b) 및 (e)에서도 $R_{m_0} = 5.0$ 일 경우 (특히 $f_{v,2}$ 가 큰 경우, 즉 $R_{m_0} = 5.0$ & $f_{v,2} = 1.0$ Hz일 경우), Dirlik 또는 Benasciutti 광대역 모델은 비교적 부정확한 누적 피로도를 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 실제로 스프링잉 문제에서 $m_{0,w}$ 는 $m_{0,v}$ 에 비하여 현저히 크기 때문에 이러한 조합 프로세스는 매우 비현실적인 가정이다. 일반적인 해양플랜트의 계류식 또는 양강기 인장력 프로세스도 저주기에 해당하는 표류-복원력 프로세스 m_0 가 파랑 프로세스 m_0 와 동등한 수준이다.

이러한 점을 종합적으로 감안한다면, Dirlik과 Benasciutti 모델은 광대역 모델중에서 가장 정확한 결과를 제공한다고 결론 내릴 수 있다. Dirlik 모델의 경우, 현재 조선해양산업계에서 표준으로 적용하고 있는 협대역 기반 레일리 PDF를 사용하지 않기 때문에 새로운 상용 소프트웨어 또는 인하우스 프로그램에 별도의 정식화가 필요하다. 또한 Dirlik 모델이 약간 비보수적인 예측을 하는 경향도 설계 측면에서는 바람직하다고 볼 수 없다. 반면 Benasciutti 모델의 경우, Dirlik 모델보다는 비교적 보수적이며, 레일리 PDF를 이용한 협대역 피로도에 단순히 계수를 곱하는 형태를 가지므로, 설계 용도로 적합한 모델로 간주될 수 있다. 현재 조선해양산업계에서 표준처럼 사용하고 있는 Jiao-Moan 모델보다 훨씬 이식성이 우수하고 정확도가 매우 우수한 장점이 있다.

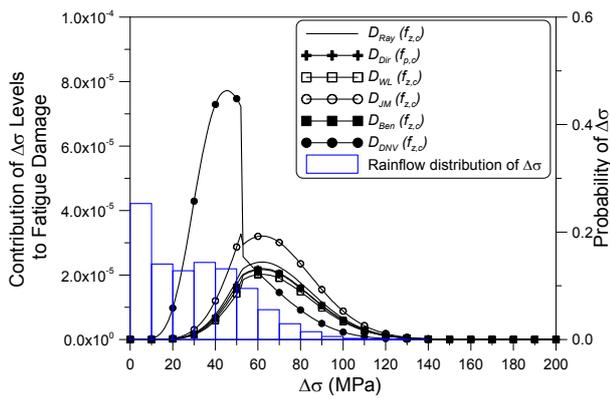
4. 결론

컨테이너선의 스프링잉 및 휘핑 프로세스는 파랑으로 인하여 유기된 응력이 광대역 정규 프로세스의 형태로 나타나는 대표적인 경우이며, 본 논문은 이와 같은 프로세스의 광대역화로 인한 피로 예측 모델의 정확도 및 한계점에 대한 연구 내용을 담고 있다.

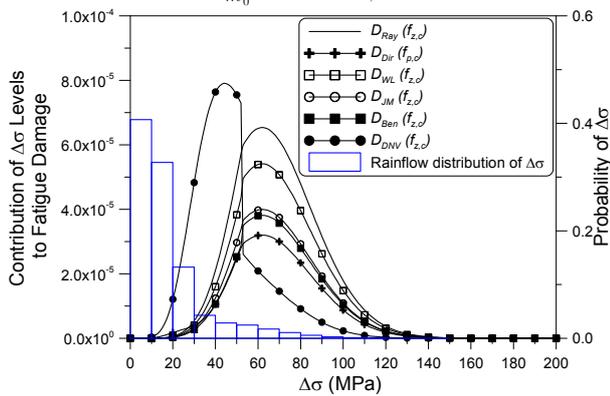
이를 위하여, 본 논문의 제1편에서 적용한 실선계측 0차 ESD 모멘트로부터 예측된 80개의 이상화 ESD를 이용하여, 시간영역 레인플로우 누적 피로도를 산출하였다.

공학적으로 유효한 4가지 유형(등가응력형, PDF조합형, 수정계수형, 손상조합형)의 주파수 영역 광대역 피로예측 모델의 특징에 대하여 기술하였으며, 본 논문에서는 등가응력형을 제외한 PDF조합형 (Dirlik 모델), 수정계수형(Wirsching-Light 모델, Jiao-Moan 모델, Benasciutti 모델), 손상조합형(DNV 모델)의 수식적 및 물리적 의미를 고찰하였다.

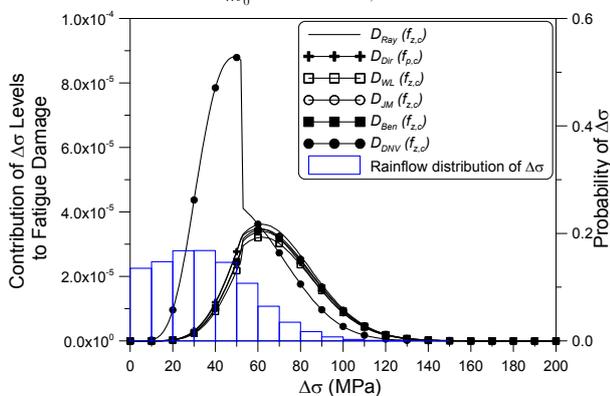
누적 피로도 분석 결과로부터 Dirlik 모델과 Benasciutti 모델의 정확도가 가장 우수함을 확인하였으며, Jiao-Moan 모델,



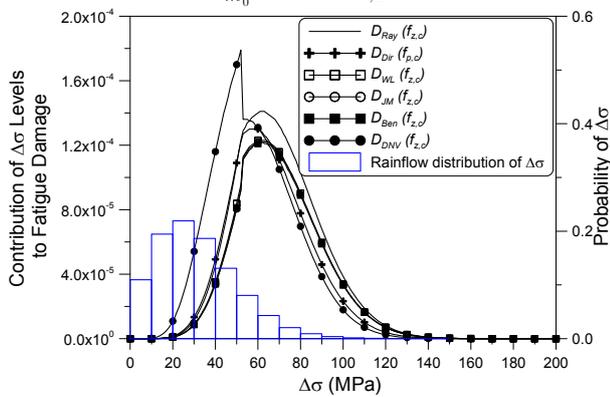
(a) $R_{m_0}=0.2$ & $f_{v,2}=0.2\text{Hz}$



(b) $R_{m_0}=0.2$ & $f_{v,2}=1.0\text{Hz}$

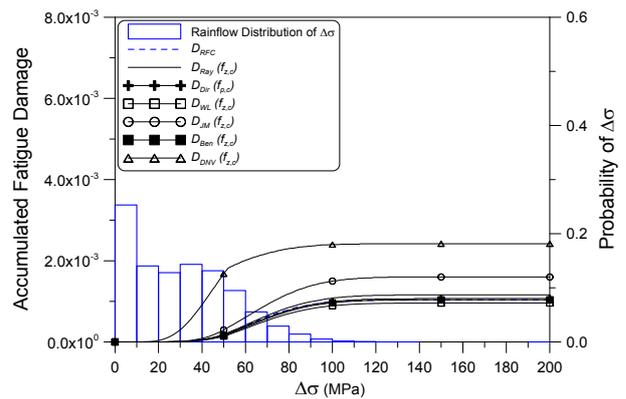


(c) $R_{m_0}=5.0$ & $f_{v,2}=0.2\text{Hz}$

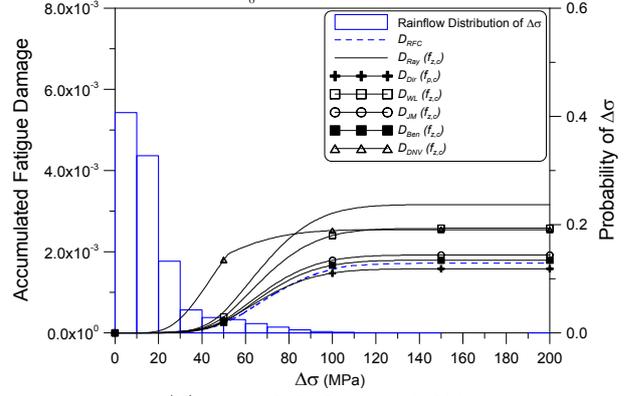


(d) $R_{m_0}=5.0$ & $f_{v,2}=1.0\text{Hz}$

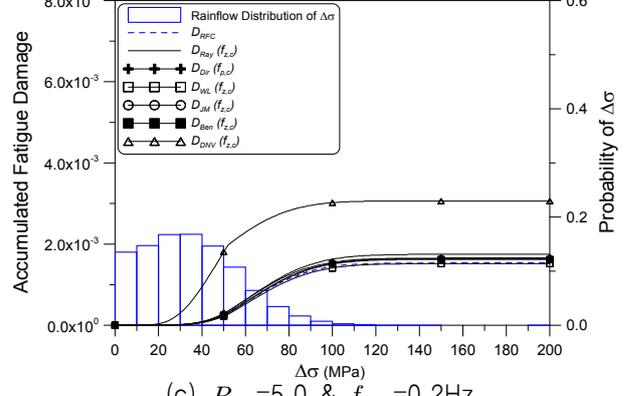
Fig. 4 Diagram of fatigue damage and rainflow stress range distributions along the stress range



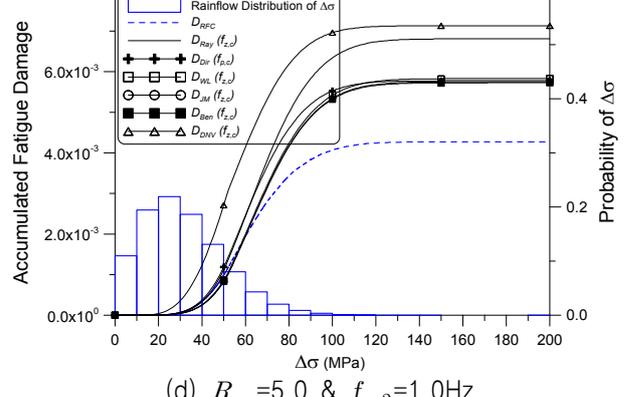
(a) $R_{m_0}=0.2$ & $f_{v,2}=0.2\text{Hz}$



(b) $R_{m_0}=0.2$ & $f_{v,2}=1.0\text{Hz}$



(c) $R_{m_0}=5.0$ & $f_{v,2}=0.2\text{Hz}$



(d) $R_{m_0}=5.0$ & $f_{v,2}=1.0\text{Hz}$

Fig. 5 Diagram of accumulated fatigue damage and rainflow stress range distributions along the stress range

Wirsching-Light 모델은 주로 보수적 측면에서 누적 피로도를 예측하였다. 사용상의 편리성으로 인하여 널리 사용되는 DNV 모델은 가장 정확도가 결여되는 것으로 나타났다.

DNV 모델이 가장 보수적으로 누적 피로도를 제시하는 원인을 분석하기 위하여, 응력범위가 누적 피로도에 미치는 기여도를 분석하였다. 그 결과 DNV 모델은 낮은 응력범위가 피로도에 미치는 영향을 과대평가하기 때문으로 조사되었다. 또한 Jiao-Moan 모델은 ESD가 완벽하게 분리되지 않은 비교적 협대역에 가까운 광대역 프로세스에 대하여 상당히 보수적인 누적 피로도를 예측함을 알 수 있었다.

해양 환경 ESD가 중첩된 다봉형 양상을 보이는 해역에 설치되는 해양 플랫폼에 Jiao-Moan 모델 또는 DNV 모델을 적용할 경우, 설계가 상당히 보수적인 경향에 치우칠 수 있다는 점을 지적하였다. Dirlik 모델과 Benasciutti 모델은 전반적인 광대역 영역에서 상당히 정확한 결과를 제시하였고, Dirlik 모델 보다는 Benasciutti 모델이 조선소의 설계 관점에서 그 적용성이 우수함을 증명하였다. 따라서 향후 조선해양산업계에서 적용 검토할만한 가치가 있다고 판단된다.

향후 연구로서는 장기간 실선 계측데이터로부터 스프링링 및 휘핑으로 인한 ESD (또는 ESD 모멘트 분포)를 정량적으로 예측하는 연구가 필요하다고 사료된다. 이러한 ESD 모멘트의 장기분포를 정확히 예측할 수만 있다면, 충분한 시뮬레이션을 통하여 설계수명 동안 경험하는 누적 피로도를 설계단계에서 예측하고 이를 설계에 반영할 수 있으리라 예측한다.

후 기

본 연구는 노르웨이선급, 미국선급, 삼성중공업, 영국선급(가나다 순)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 위 기관의 지원에 감사드립니다. 또한 인하대학교 연구비 지원에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

API, 2008. *API Recommended practice 2SK Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*, American Petroleum Institute.

Benasciutti, D. 2004. *Fatigue Analysis of Random Loadings*. Ph.D. University of Ferrara.

Benasciutti, D. & Tovo, R., 2006. Comparison of spectral methods for fatigue analysis of broad-band Gaussian random processes. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21(4), pp.287-299.

Chaudhury, G.K. & Dover, W.D., 1985. Fatigue Analysis of Offshore Platforms Subject to Sea Wave Loading. *International Journal of Fatigue*, 7(1), pp.13-19.

Dirlik, T., 1985. *Application of computers in fatigue*. Ph.D. University of Warwick.

DNV, 2010a. *Recommended practice DNV-RP-C206 Fatigue Methodology of Offshore Ships*, Det Norske Veritas(DNV).

DNV, 2010b. *Offshore Standard DNV-OS-E301 Position Mooring*, Det Norske Veritas(DNV).

Guédé, Z. et al., 2010. Fast Spectral Rainflow Fatigue Damage Assessment Under Wideband Multipeak Loading. *11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures Rio de Janeiro*, RJ, Brazil.

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

Lim, Y.C. Kim, K.S. & Choung, J., 2010. Fatigue Damage Combination for Spread Mooring System under Stationary Random Process with Bimodal Spectrum Characteristics. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(6), pp.813-820.

Madsen, H.O. Krenk, S. & Lind, N.C., 1986. *Methods of structural safety*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Park, J.B., 2011. *The Development of a Fatigue Damage Model for the Wide Band Random Loading*. Ph.D. Inha University.

Park, J.B. et al., 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.

Rychlik, I., 1993. On the "narrow-band" approximation for expected fatigue damage. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 8(1), pp.1-4.

Wirsching, P.H. & Light, M.C., 1980. Fatigue under wide band random stresses. *Journal of the Structural Division, ASCE(Americal Socoety of Civil Engineers)*, 106(7), pp.1593-1607.

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.

