대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 52, No. 3, pp. 222-235, June 2015
eISSN:2287-7355, http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.3.222

파랑하중에 의한 Steel Catenary Riser 피로손상 평가 방법의 비교검토

이정대† · 이성제 · 장창환 · 전석희 · 오영태
대우조선해양

Comparative Study on Wave Induced Fatigue Analysis Methods for Steel Catenary Riser

Jeong-Dae Lee† · Sung-Je Lee · Chang-Hwan Jang · Seock-Hee Jun · Yeong-Tae Oh
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering(DSME)

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.

The purpose of this study is to suggest guidelines for riser fatigue analysis in terms of selection of reasonable analysis method. Three analysis methods (spectral, regular wave, rain-flow counting) are introduced and compared. As the riser systems give non-linear response, the time-domain analysis method is more preferred than frequency-domain analysis method. The spectral fatigue analysis method, however, is still useful for identifying fatigue prone areas. Once stress RAO is established, fatigue damage can be calculated very quickly. The regular wave method and the rain-flow counting method are more time consuming but give more exact results compare to spectral method. In case of regular wave method, a set of regular waves which represent random sea states is considered for dynamic analysis. The rain-flow counting method is the most intuitive and exact method because it refers time history stresses containing most of non-linear effects of the riser system. However, it is not common for early design stage to use rain-flow counting method because of its high cost. In this study, it was confirmed that the regular wave method is the most cost effective way in specific cases. However, if the system is highly non-linear, it seems that the regular wave method gives less accurate results than rain-flow counting method. Therefore, it is imperative that the engineers select appropriate analysis method based on design stage and given engineering period. This paper also discusses the theoretical background of each calculation method and hydrodynamic aspects of marine riser systems. A steel catenary riser (SCR) line on FPSO was considered and marine dynamic program (OrcaFlex) was used for static and dynamic analysis.

Keywords : SCR(스틸 카테너리 라이저), Regular wave scatter diagram(규칙파 산포도), Rain-flow counting(레인플로우 카운팅), Spectral response analysis(스팩트럴 응답해석)

1. 서 론

라이저(riser)는 설치 후 설계수명 동안 교체되지 않으므로 강도적인 측면뿐만 아니라 적절한 피로성능이 확보되어야 한다. 라이저 피로성능평가와 관련한 국내연구는 해외에 비하여 거의 수행되지 않았으며 시작단계라고 할 수 있다. 반면, 해외의 경우 라이저 설계에 관하여 피로해석뿐만 아니라 강도해석, 위험도평가, 경제성평가 등 활발한 연구가 진행되고 있으며 특정 Field 개발 및 프로젝트와 연관되어 많은 연구 성과가 발표 되고 있다 (Gonzalez, 2005). 관련 규정의 경우, DNV(Det Norske Veritas) 선급 및 API(American Petroleum Institute)등에서 라이저 피로평가에 대한 규정 등을 제시하고 있으나 기능상 요구 조건에 대한 서술이 대부분이므로 실제 라이저 설계 및 평가에는 부족하다. 따라서 실제 라이저 설계는 해석에 기반하여 수행되고 있으며 소수의 해외 엔지니어링 업체가 제작 및 해석기술을 독점하고 있는 상황이다. 국내 조선소의 경우 선박 및 해양 구조물에 대한 피로해석 경험은 많으나 피로해석을 포함한 라이저 엔지니어링에 대한 연구 및 개발성과는 아직 미진한 상황이다.

이러한 국내 및 국외상황에서 본 연구에서는 라이저 피로해석

Received : 16 April 2014 | Revised : 15 October 2014 | Accepted : 23 April 2015
† Corresponding author : Jeong-Dae Lee, 82-2-2129-3732, guzo@dsme.co.kr

방법들을 비교 및 검토하고 점점 짧아지고 있는 해양프로젝트의 엔지니어링 기간 동안 라이저 피로해석 시 어떠한 해석기법을 사용하여야 하는지에 대하여 기준을 제시하고자 한다. 장기간의 해상상태와 많은 양의 해석을 필요로 하는 피로해석의 경우 대상 시스템의 응답특성에 대한 고찰이 필수적이며 그에 따른 적절한 해석기법의 선택이 아주 중요하기 때문이다. 또한, 라이저 피로해석은 라이저 강도평가 기술의 대부분을 포함하고 있을 뿐만 아니라 라이저간의 접촉문제, 설치 및 회수시의 안전성 평가기법과도 매우 유사하며 밀접한 관계를 갖고 있다. 따라서 라이저 피로해석 기술의 확보는 기타 라이저 엔지니어링 기술과의 연계 측면에서도 매우 중요하다고 할 수 있다.

라이저에 작용하는 하중으로는 내부유체에 의한 하중과 환경하중으로 나눌 수 있는데 환경하중에 의한 영향이 지배적이다. 라이저에 작용하는 환경하중으로는 해양파, 해류(current), 부유체의 거동, 해류에 의한 와류 등이 있다. 환경하중에 의하여 발생되는 피로유발현상으로는 비선형적 유체력을 제외한 1st order 하중 및 거동, low frequency 거동, 부유체의 스프링잉(springing) 그리고 와류에 의한 진동 등이 있으며 이러한 현상들을 정확히 예측하고 그에 대한 피로손상을 예측하는 것은 매우 복잡하고 어렵다 (Mike Campbell, 1999)

본 연구에서는 FPSO와 해저를 연결하고 있는 SCR(Steel Catenary Riser)에 대하여 1st order 하중 및 거동을 고려한 피로해석을 수행하였다. 내부유체의 경우 그 영향이 미미 하다고 판단하였으며 와류의 영향은 본 논문에서 제시하는 해석기법들과 상당한 기법적 차이가 있다고 판단되어 추후 연구에 반영할 계획이다. 와류에 의한 피로손상의 경우 라이저 시스템의 고유진동수와 해류의 형태를 고려한 모드중첩법을 통하여 평가하는 방법(Leverette, et al., 2003)이 가장 널리 알려져 있고 본 논문에서 고려하는 해양파에 의한 피로손상 결과에 추가적으로 작용하는 피로손상으로 여겨진다.

1st order하중 및 거동은 유체동역학 해석 시 파고와 선형적으로 대응하는 물리량으로서 외부 동압력, 가속도, motion RAO(Response Amplitude operator)등이 있다. 비선형적 Low frequency 거동과 스프링잉 현상은 파 스펙트럼의 주파수 범위를 벗어나는 하중성분의 영향으로서 이 역시 추후연구에 반영할 예정이다.

본 연구에서는 피로해석을 위하여 스펙트럴법(spectral method), 규칙파법(regular wave method), rain flow counting법 등 세 가지 형태의 계산방법을 활용하였으며 그 결과들을 비교한 후 각 방법의 장/단점을 고찰하였으며 각 해석기법과 관련된 이론을 정리하였다. 피로해석에 필요한 시스템 모델링, 정적 해석, 동적 응력, 및 피로수명 계산은 상용 S/W OrcaFlex를 활용하였다.

1.1 라이저 시스템의 종류와 SCR

라이저는 거동의 형태, 사용의 목적, 기하학적 형상 등에 따라 여러 형태로 분류된다. 라이저는 부유체의 거동을 흡수하는 형태에 따라 크게 Free hanging 라이저와 Top tensioned 라이저로 구분 할 수 있다. Free hanging 라이저의 경우 부유체의 거동을 라이저 자체의 변형을 통하여 흡수하는 방식이며 Top tensioned 라이저는 tensioner라고 하는 특수 장비를 통하여 부유체의 거동을 흡수하는 방식이다.

Free hanging 라이저의 종류로는 SCR, Flexible 라이저, Offset free hanging 라이저 등이 있으며 주로 심해의 자원을 해수면의 부유체에 수송하는 수단으로 활용된다. 한편, 유정에 기체나 액체를 주입하는 역할을 하기도 하는데 이를 Injection 라이저라고 한다.

Top tensioned 라이저의 경우 심해의 자원을 해수면으로 수송하는 역할을 하기도 하지만 주로 드릴 라이저에 적용되는 형태이다. 드릴 파이프를 통하여 유정으로 내려간 드릴링 머드는 드릴 파이프와 드릴 라이저 사이의 공간(annular space)을 통하여 다시 부유체로 돌아오게 된다. 따라서 드릴 라이저는 머드의 순환 경로라고 할 수 있으며 드릴링의 작업 특성상 항상 일직선의 형태를 유지하여야 하므로 인장력을 받도록 설계되며 압축력을 받지 않아야 한다. 따라서, 라이저 상부에 위치한 top tensioner라는 특수장비에 의하여 지지되는 형태를 갖추고 있다.

이 중 본 연구에서 고려한 SCR은 가장 일반적이고 오래된 free hanging 라이저로서 부유체에서 해저까지 자중에 의하여 늘여져 있는 형태를 띄고 있다. SCR은 유정개발 시 가장 최우선적으로 고려되는 방식인데 그 이유는 설치비용이 다른 라이저에 비하여 상대적으로 낮기 때문이다.

2. 해석 모델 및 해상상태

해석에 고려된 부유체는 FPSO이며 길이가 370 m이고 총 배수량은 약 231,800톤이며 11 m 흘수를 가진다. FPSO의 주요 제원은 Table 1과 같다. Table 2와 3은 SCR 및 Lazy wave SCR에 사용된 파이프 정보, 길이 및 해저면의 마찰계수를 정리한 것이다. 본 연구에서 고려한 FPSO 및 라이저의 정보는 수주 및 초기 영업단계에서 고려되었던 제원을 부분적으로 발췌하여 활용하였다.

Table 1 FPSO information

Parameters	Units	Value
Length	m	370
Breadth.	m	50
Depth.	m	30
Displacement	ton	231,800
Draft	m	11

본 연구에서는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 라이저의 기하학적 형태에 따른 결과를 비교하기 위하여 simple SCR과 Lazy wave SCR 모델을 구성하였다. 일반적으로 SCR의 피로손상은 TDP(Touch down point – 라이저와 해저면 간의 접촉 지점)에서 가장 크게 나타나는 것이 일반적이다 (Campos, 2001).

Table 2 Length of riser configurations

Unit (m)	Simple SCR	Lazy wave SCR
Total length	2450	2480
Upper section	-	1640
Buoyancy section	-	320
Lower section	-	520
Horizontal dist.	1400	1400

Table 3 SCR data

Parameters	Units	value
Internal diameter	mm	158
Outer diameter	mm	203
Riser wall thickness	mm	22.5
Young's modulus	GPa	204
Bending stiffness(EI)	kN-m^2	10.81+E3
Axial stiffness(EA/L)	kN/m	2.60+E6
Torsional stiffness(GJ)	kN-m^2	8314
Sea bed friction (Normal)	-	0.4
Sea bed friction (Axial)	-	0.3

Note) E : Elastic modulus, G : Shear modulus
I : Moment of inertia, J : Polar moment of inertia

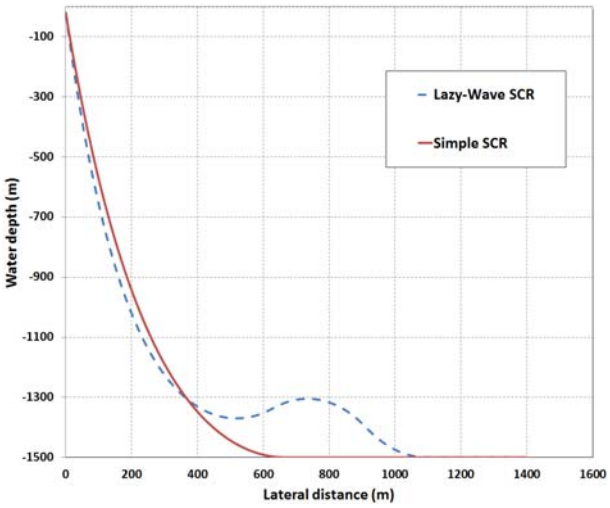

Fig. 1 Riser configuration

Lazy wave SCR은 라이저의 일정 구간에 부력재를 부착하여 라이저의 전체적인 형상을 피로수명 측면에서 유리한 형상으로 유지시켜주는 형태의 SCR이며 TDP 영역의 동적 응력이 simple SCR에 비하여 낮게 나타난다. 두 라이저 타입 모두 Marine growth 방지용 라이저가 해수면으로부터 38m 구간 동안 배치되어 있으며 나머지의 경우 bare 라이저이다. Lazy wave 타입의 경우 320 m 구간에(1640 m ~ 1960 m) 걸쳐 부력재가 부착되어 있다. 라이저의 Anchored point는 두 라이저 타입 모두 FPSO의 선수방향으로 1400 m이며 해저면까지의 수심은 1500 m 이다. 해저면의 경우 구체적인 실제 해저정보를 얻기 어려웠기 때문에 평평하다고 가정하였다.

피로해석에 필요한 해상상태의 경우 DNV 선급에서 제시하는 North Atlantic과 World-wide wave scatter diagram을 고려하였다 (Det Norsk Veritas, 2010).

해석 시 고려한 해류의 경우 임의로 설정하였으나 해수면 근방에서의 속도가 크다고 가정하여 Fig. 2와 같은 속도 분포를 고려하였다.

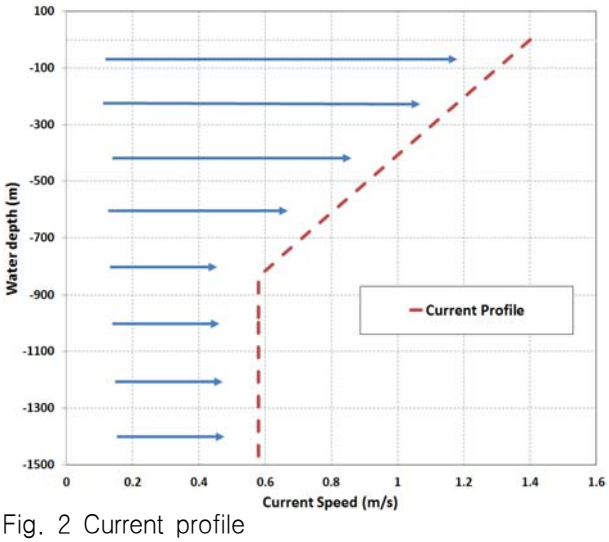

Fig. 2 Current profile

파랑하중에 대한 부유체의 거동을 고려하기 위하여 단위 파고에 대응하는 부유체의 거동 특성을 나타내는 motion RAO를 활용하였다.유체동역학 해석(frequency domain hydrodynamic analysis)에서 얻어진 6자유도 motion RAO를 알고 있으면 파랑 중 부유체의 선형적인 거동을 계산할 수 있으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$X = R \cdot a \cdot \cos(\omega t - \phi) \quad (1)$$

여기서,
X는 부유체의거동
a는 파고(wave amplitude)
ω는 파주파수(rad/sec)
t는 시간(초)
R, ϕ는 RAO amplitude 및 phase

파랑하중에 의한 피로손상을 예측하기 위해서는 라이저 가동기간 동안 파 방향의 확률을 고려하여야 한다. 하지만 본 논문의 주 목적은 피로해석기법의 비교검토이므로 주로 단일 파 방향(선수파 100%)을 고려하였다. 추가적으로, 전 방향에서 파가 오는 경우는 비교검토를 위하여 Simple SCR에 대하여 45도 간격으로

360도 전 방향에 대하여 동일한 확률분포로 가정하여 피로해석을 수행하였다.

3. 정적 및 동적 해석

3.1 라이저 시스템의 정적 해석

피로평가에 필요한 동적 해석을 수행하기 앞서 정적 해석이 수행되어야 한다. 자중, 부력 및 해류에 의한 항력(drag force)을 받을 때의 평형형상을 비선형 정적 해석(nonlinear static analysis)을 통하여 계산한다. 항력의 경우 해류의 속도변화가 있을 경우 비선형적으로 작용하지만 해류가 일정하다고 가정할 경우 정적으로 작용한다. 라이저는 정적 해석의 결과에 따라 초기형상이 결정되며 결정된 라이저의 정적 평형위치는 피로해석 및 강도해석에 필요한 동적 해석의 시작점이 된다.

3.2 라이저 시스템의 동적 해석

라이저 시스템의 동적 해석은 해양파에 의하여 가해진 기진력에 의한 부유체와 라이저 라인의 거동을 평가 하기 위하여 수행한다. 일반적으로, 해양파로 인하여 발생하는 부유체의 6자유도 거동은 주파수영역에서의 유체동역학 해석으로 인하여 결정된 부유체의 motion RAO, QTF(Quadratic Transfer Function) 및 유체력 계수(added mass and wave damping) 등을 통하여 결정한다. 대부분의 라이저 해석의 경우 비선형성 고려를 위하여 시간영역해석이 필요하므로 상기 주파수영역의 물리 량을 시간영역에서 활용 가능하도록 변환하여야 한다.

한편, 동적 해석을 통하여 부유체 움직임을 표현할 때 라이저 및 계류계의 영향을 포함하는 경우를 coupled 해석이라고 하며 라이저의 영향을 제외한 경우를 de-coupled 해석이라고 한다(DNV, 2010). Coupled 해석을 수행할 경우 부유체를 포함한 라이저 및 계류라인의 영향을 해석에 포함하므로 시스템의 고유진동수와 연관되어 있는 low frequency 및 high frequency 하중의 영향을 관찰할 수 있다. 하지만, de-coupled 해석의 경우 불규칙 해상상태의 파고와 대응하는 부유체의 거동만을 선형적으로 표현한다.

부유체 이외의 라인에 작용하는 유체동역학적 하중의 경우 유체 입자 속도 및 가속도에 각각 대응하는 항력과 관성력(inertia force)이 고려된다. 관성력의 경우 Froude-Krylov force와 부가질량력(added mass force)으로 나뉘어진다. 라인에 작용하는 이러한 하중의 영향은 coupled 해석 시 부유체의 거동에 영향을 준다.

부유체의 거동과 라인의 거동이 복합적으로 작용하여 라이저 시스템의 동적 해석이 수행되고 나면 라이저 특정위치의 시간영역에서의 동적 응력응답을 얻을 수 있다. 얻어진 동적 응력응답과 고려하고 있는 해상상태 그리고 적절한 피로해석법을 통하여 피로수명을 예측한다.

3.2.1 De-coupled 해석

De-coupled 해석은 부유체의 거동 예측에 라이저의 영향을 고려하지 않고 부유체의 운동특성만을 고려하여 거동을 예측하는 기법으로서 OrcaFlex의 경우 motion RAO를 사용한다. 유체동역학 해석에서 얻어진 주파수 별 motion RAO는 단위 파고에 따른 부유체의 거동 응답이다. Motion RAO와 사용자가 시간이력에 따라 정의한 파 정보에 선형적으로 대응시켜 부유체의 거동을 구한다. 해류의 경우 정적 하중으로 처리한다.

계류계를 포함하지 않을 경우 라이저 피로해석 계산결과의 오차가 발생할 수 있다. 이를 보정해주기 위하여 계류계 해석에서 얻어진 mean drift offset을 motion RAO와 함께 적용하는 방법이 널리 활용된다. 동적 해석 수행 이전에 mean drift offset을 미리 정의하여 계류계의 영향을 포함시킨 후 동적 해석을 수행하는 방식이다. 이러한 방식의 해석 법을 활용하더라도 해석 결과에 대한 오차는 여전히 존재하며 해석의 정확도에 영향을 줄 수 있다. 정확도의 오차가 우려가 된다고 판단될 경우에는 계류계를 포함하여 해석을 수행하는 coupled 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 피로해석기법 비교를 위한 해석의 단순화를 위하여 계류라인 및 mean drift offset을 고려하지 않고 부유체만의 motion RAO를 통하여 부유체의 거동을 표현하였다. 이 경우 부유체에 연결되어 있는 라인들의 영향을 배제하였으므로 부유체의 거동을 표현함에 있어 line dynamics를 포함하지 않는다고 볼 수 있다.

좀 더 정밀한 해석을 위하여 실제 계류라인 및 라이저를 모델에 포함한 후 유체동역학 해석을 수행하여 motion RAO를 얻고, 이후 동적 해석을 수행하는 경우도 있을 수 있으나, 이 역시 de-coupled 범주에 속한다고 할 수 있다.

3.2.2 Time domain simulation

동적 해석은 주어진 시간 동안 해석대상에 대한 시간영역 해석이며 해상상태의 경우 해석목적에 따라 규칙 파와 불규칙 파로 정의할 수 있다.

만일 불규칙 해상상태를 고려하여야 하는 경우 파 스펙트럼을 역퓨리에변환(inverse fast fourier transform)하여 시간영역에 대한 불규칙 파로 정의한다. 불규칙 파의 경우 rain flow counting법 및 스펙트럴법에 적합하다. 규칙 파의 경우 파 스펙트럼을 규칙 파로 변환하여 동적 해석에 활용하는 방법으로서 규칙파법에 적합하다.

본 연구에서는 규칙 파 해석의 경우 가해진 파 주기의 5배에 해당하는 시간 동안 동적 해석을 수행하였고 불규칙 파의 경우 1200초 동안 해석을 수행하였다. 실제 피로해석 시 고려되는 응력은 규칙 파 해석의 경우 마지막 사이클의 응력 폭(stress range)을 사용하는데 그 이유는 규칙 파의 주기와 파고가 일정하므로 응력 폭 역시 거의 일정할 뿐만 아니라 규칙 파를 활용한 피로해석 시 각 파는 하나의 응력 폭만 필요하기 때문이다. 불규칙 파 해석의 경우 불규칙 파에 대응하는 불규칙 응력이력을 사용하게 된다.

동적 해석으로 계산된 동적 응력은 S-N 선도에 대응하는 hotspot stress가 되고 피로해석에 활용된다.

라이저 피로평가 시 모든 동적 응답해석을 시간이력에 따라 계산하는 이유는 라이저의 거동이 비선형적이기 때문이다. 일반적으로 파 스펙트럼은 파면(wave elevation)의 확률분포가 Gaussian 분포의 확률을 갖는 것으로 알려져 있다. 만일 시스템이 선형적이라면 해석 시 발생하는 응력 확률분포 역시 Gaussian 분포를 가져야 한다. 하지만 라이저의 경우 기하학적 비선형, 비선형 동 유체력 등에 의하여 라이저의 거동 및 발생 응력이 비 선형적으로 나타나게 되므로 non-Gaussian 응답을 보이게 된다. 이러한 현상은 시스템이 선형적이라고 가정하여 해석을 하는 주파수영역 해법에서는 나타나지 않으므로 라이저 해석 시 시간영역 해석이 가장 우선적으로 고려되어야 한다 (DNV, 2010).

따라서, 선박 및 해양구조물의 피로해석에 주로 활용되는 주파수영역법을 라이저에 적용하는 것은 부정확한 결과를 줄 수 있으므로 제한적으로 사용되어야 한다.

4. 라이저 피로손상 평가 방법

라이저의 피로손상을 평가하는 방법으로는 스펙트럴법, 규칙파법 그리고 rain flow counting법이 있다.

이 세가지 방법 모두 라이저에 작용하는 동적 응력의 장기분포를 예측하는 방법으로서 스펙트럴법과 Rain-flow counting법의 경우 해양 구조물과 선박 피로손상 예측에 많이 사용되는 방법이다. 하중 대비 응답이 비 선형적인 라이저의 경우 rain flow counting 방법이 가장 정확한 방법으로 알려져 있고 이를 기준으로 한 스펙트럴법의 정확도 평가를 위한 연구 등이 이루어 지고 있는 실정이다 (Powe, et al., 2008).

규칙파법의 경우 불규칙 임의 해상상태를 피로해석을 위하여 규칙 파와 관련된 발생 빈도로 정의하는 방법으로서 Longuet-Higgins는 이와 관련한 이론적 내용을 소개하였으며 North-Atlantic 해역에 적용하여 그 유효성을 확인하였다. (Longuet-Higgins, 1983). Yi (2012) 는 최근 이와 같은 이론을 적용하여 Marine growth가 라이저의 피로수명에 얼마나 영향을 주는가에 대한 비교검토 연구를 수행하였다.

본 논문에서 소개하는 해석기법 이외에도 간이식을 활용한 간이해석기법(simplified method)이 있으나 낮은 정확도와 신뢰도로 인하여 실제 라이저 피로해석에서는 거의 활용되지 않는 것으로 파악된다.

스펙트럴법의 경우 해상상태, S-N 선도 및 응력응답 스펙트럼(stress response spectrum)을 조합한 Semi-empirical 방법을 통하여 누적피로손상을 계산한다 (DNV-Classification Notes.30.7, 2010). 한편 규칙파법 및 Rain-flow counting법은 계산법의 특성상 응력 히스토그램(응력 폭과 발현 횟수)을 얻을 수 있으므로 Miner's rule을 통하여 누적손상을 예측한다.

4.1 스펙트럴법

스펙트럴 해석은 시간영역에서 가한 하중과 대응하는 시계열 응답을 통한 해석을 대체하기 위하여 시스템을 선형적이라고 가정하고, 선형적 응답특성(RAO)을 파악한 후 시간영역에서의 해상상태와 동일한 파 스펙트럼과 조합하여 시스템의 시계열 응답을 스펙트럼 형태(응답 스펙트럼)로 얻는 방법이다. 라이저 피로해석의 경우, 응력응답 스펙트럼(stress response spectrum)의 분산(0차 모멘트)을 각 단기 해상상태 별로 계산한 후 이를 활용하여 해당기간 동안 응력 폭의 확률분포를 Rayleigh 분포 혹은 Dirlik 분포로 가정하여 피로손상을 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 Dirlik 분포를 적용하였다.

Dirlik 분포를 사용한 이유는 라이저의 응력응답이 광 대역(broad-band)이라고 가정하였기 때문이다. 일반적으로 단기 해상상태의 파고의 확률분포는 협대역(narrow-band)으로 가정하며 Rayleigh 확률분포를 따르는 것으로 알려져 있다 (Chakrabati, 1987). 이때, 만일 시스템이 선형적일 경우 응력 응답의 확률분포 역시 Rayleigh 분포를 가진다고 가정하여 해석하는 것이 일반적이다. 하지만 본 논문에서는 라이저 시스템의 비선형성에 의하여 응력응답의 대역폭이 광대역으로 변경된다고 가정하였고 이 경우 Dirlik 분포가 Rayleigh에 비하여 좀더 신뢰도 높은 결과를 주는 것으로 알려져 있다 (Braccesi, et al., 2005).

본 연구에서 소개하는 스펙트럴 해석법을 위해서는 라이저의 응력응답특성 즉, 응력 RAO가 필요하다. 일반적으로 응력 RAO는 주파수영역 해석에서 바로 얻어지는 물리 량이다. 하지만 라이저 해석에서는 RAO계산시 시간영역 해석의 결과를 통하여 응력 RAO를 구한다. 그 이유는 라이저 거동의 비선형성을 시간영역 해석을 통하여 부분적으로나마 포함시키기 위해서다. 특정 해상상태의 분산 특성을 포함하고 있는 white noise spectrum을 활용한 동적 해석 결과를 응답 스펙트럼으로 간주하고 white noise spectrum을 입력 스펙트럼이라고 한다면 응답 스펙트럼과 입력 스펙트럼의 관계를 통하여 응력 RAO를 결정한다. 이후 RAO를 단기 해상상태와 조합하여 응답 스펙트럼을 얻을 경우 구조물의 응답특성과 해상상태의 특성을 모두 포함하는 응답인 응답 스펙트럼을 주파수 영역에 대하여 얻을 수 있다.

RAO 생성을 위하여 White noise spectrum을 활용하는 이유는, 시간영역 해석을 통하여 응력 RAO를 얻어야 하기 때문에 불규칙 해상상태가 필요한데 특정주파수에서 에너지가 높을 경우 단위입력에 대한 RAO를 얻을 수 없기 때문이다. White noise spectrum은 파 에너지가 모든 주파수 영역에 걸쳐 균일하므로 RAO를 구하기에 적합하다. RAO는 파 주파수의 함수로서 물리적인 의미는 특정 주파수에서의 단위입력에 대응하는 응답특성이다. 따라서 입력 스펙트럼이 단위입력이 되기 위해서는 Fig. 3과 같이 에너지가 동일하게 분포되어 있는 white noise spectrum이 되어야 한다. 이러한 계산방식은 유체동역학 해석 시 단위진폭파를 활용하여 RAO를 얻은 후 단기 해상상태와 조합하여 응답 스펙트럼을 얻는 것과 동일한 맥락이다.

OrcaFlex의 동적 해석은 시간영역에서의 결과만을 주기 때문

에 특정 해상상태의 유의파고(significant wave height, Hs)에 대응하는 truncated white noise spectrum을 역퓨리에변환을 통하여 시간영역 불규칙 파로 만든 후 동적 해석을 한다. 이때, noise spectrum의 PSD(Power Spectral Density)는 유의파고에 의하여 결정한다. White noise spectrum의 PSD를 유의파고를 통하여 결정하는 이유는 white noise spectrum의 분산 값을 특정 해상상태의 파 스펙트럼의 분산과 동일하게 맞추어 주기 위해서 이며 이를 통해 특정 해상상태의 파고에 대한 분산특성을 응력 RAO 생성시 고려할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 noise spectrum의 주파수영역 범위는 파 스펙트럼의 주파수 범위와 대응이 되도록 0.02 Hz(lower bound) ~ 1.0 Hz(upper bound)로 설정하였다. 분산 및 유의파고와의 관계를 나타내는 식 (2)을 통하여 특정 유의파고의 PSD는 식 (3)와 같이 표현된다. 예로서, Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 유의파고가 7.5 m인 경우의 PSD는 3.5874 m^2/Hz이다.

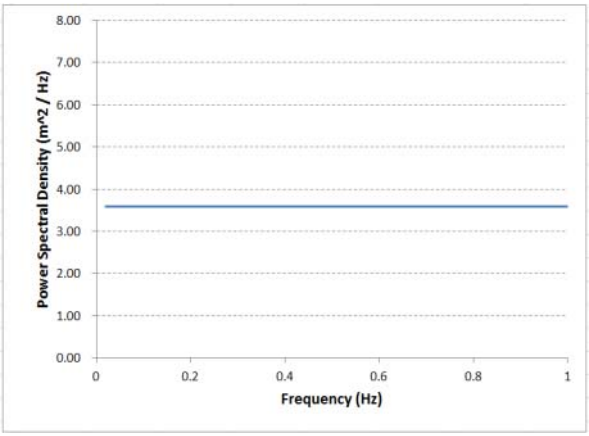

Fig. 3 Example of truncated white noise spectrum (Hs = 7.5 m)

$$H_S = 4\sqrt{m_0} \tag{2}$$

$$PSD = Hs^2/(16 \times (upper\,bound - lower\,bound)) \tag{3}$$

여기서,

Hs는 유의파고(significant wave height)

m_0는 white noise spectrum의 0 차 모멘트, 파고의 분산

PSD는 power spectral density

$Upper - lower\,bound$는 white noise spectrum의 주파수 범위

주어진 WSD(Wave Scatter Diagram)의 모든 유의파고에 대하여 각각 white noise spectrum을 생성한 후 이에 대응하는 시간영역에서의 동적 응력을 계산한다. 얻어진 동적 응력이력을 다시 퓨리에변환을 통하여 응력 응답 스펙트럼으로 변환하고 입력하였던 white noise spectrum과의 관계를 통하여 응력 $RAO(Hs, f, \beta)$를 얻는다. 이 응력 RAO는 라이저의 응력 응답을 나타내는 연산자이며 주파수(f), 유의파고 및, 파 방향(β)에 대한 함수이다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 white noise spectrum과 응답 스펙트럼의 관계에 따라 응력 RAO는 식 (4)로 구할 수 있다. 한편, 여기서 나타낸 응력 응답 스펙트럼은 RAO 계산을 위한 스펙트럼이므로 실제 피로수명 계산시에는 white noise가 아닌 파 스펙트럼과 RAO를 통해 얻어진 응답 스펙트럼을 사용한다.

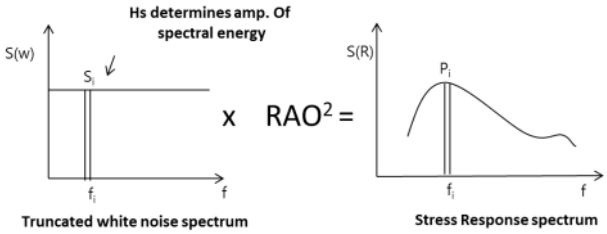

Fig. 4 The relation among stress RAO, Noise spectrum and response spectrum

$$RAO_i(Hs, \beta) = \sqrt{\frac{P_i}{S_i}} \tag{4}$$

여기서,

$RAO_i(Hs, \beta)$는 Hs, β, 일 때, 주파수 f_i에서의 RAO

B는 파 방향(wave heading direction)

P_i는 응력 응답 spectrum의 주파수 f_i에서의 PSD

S_i는 white noise spectrum의 주파수 f_i에서의 PSD

Fig. 5는 Simple SCR, Hs =7.5일때 Arc length =1200 m 지점에서의 응력 RAO를 보여주고 있다.

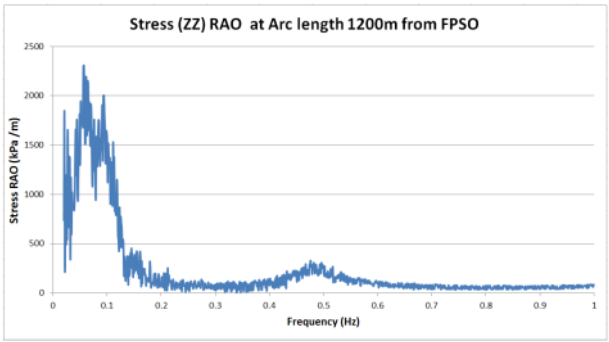

Fig. 5 Example of stress RAO for spectral method

이와 같은 스펙트럴법은 해석시간이 짧고 비교적 적은 데이터 처리를 필요로 하는 장점이 있지만 Fig. 5와 같이 응력 RAO에 noise가 발생한다. 이처럼 RAO에 noise가 발생할 경우 응력 응답 스펙트럼 생성 시 오차가 발생할 수 있는 단점이 있다. Noise의 발생원인은 시스템이 불규칙 해상상태에 노출된 시간과 샘플링 데이터 개수와 연관이 있다. 시간이력의 데이터를 주파수 영역의 물리량으로 변환(퓨리에변환)하기 위해서는 신뢰도를 높이기 위하여 충분한 시간이력 데이터가 필요하다. 이 경우 고속 퓨리에변환 시 응답 스펙트럼의 frequency increment(resolution)

은 값은 데이터의 개수가 증가할수록 작아지게 되므로 RAO는 거의 모든 주파수 성분을 포함하게 된다. 따라서 RAO는 주파수 영역에서 noise를 갖게 된다. 이를 극복하기 위하여 샘플링 데이터 개수를 줄이거나 시간영역해석 시간을 줄이는 방법을 통하여 RAO를 보정하는 RAO smoothing 기법이 있으나 명확한 기준이 없으므로 실제 피로 현상과 다소 차이를 나타낼 수 있다 (Orcina, 2014).

따라서, 스펙트럴법은 초기설계, 초기피로 평가 및 피로해석 대상지점 선정 시 유용하게 활용될 수 있는 방법이다. Fig .6은 라이저에 대한 스펙트럴 피로해석의 흐름을 나타내고 있으며 다음과 같은 단계를 통해 피로손상을 계산한다.

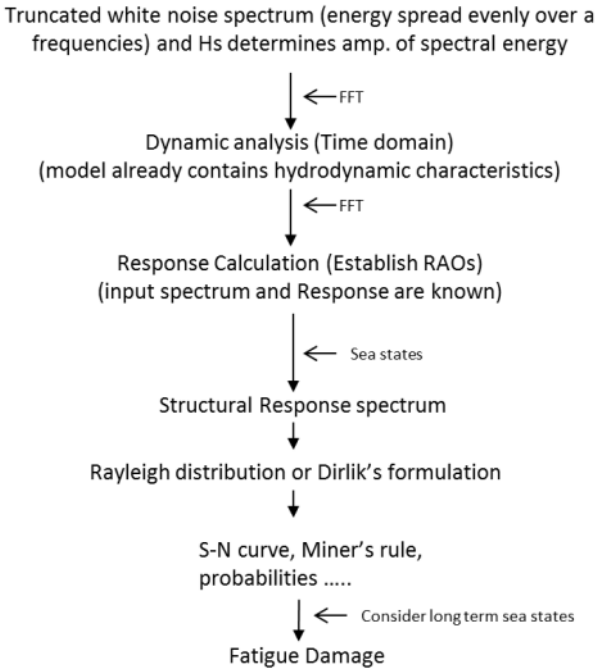

Fig. 6 Flow chart of spectral method

Step1: WSD의 각 해상상태의 Hs와 대응하는 white noise spectrum을 구한다.

Step2: White noise spectrum을 역퓨리에변환을 통하여 시간영역에 대한 해상상태로 변환한 후 동적 해석을 수행하여 대응하는 응력 이력을 계산한다.

Step3: 시계열 응력이력을 다시 퓨리에변환을 통하여 응력 응답 스펙트럼으로 변환한다.

Step4: White noise spectrum과 응력 응답 스펙트럼을 통하여 응력 RAO를 계산한다.

Step5: WSD의 파 스펙트럼과 응력 RAO를 통하여 응력응답 스펙트럼을 계산한다. (Step 4의 응답 스펙트럼은 입력 값이 white noise spectrum이며 Step 5의 응답 스펙트럼은 Step 4에서 얻어진 RAO와 단기 해상 상태를 통하여 구한 것이므로 혼돈하지 말아야 한다. WSD 파 스펙트럼의 유의파고와 대응되는 RAO를 사용한다)

Step6: 응답 스펙트럼의 분산, S-N 선도 등을 통하여 피로손상을 계산한다.

Step7: Step1~Step6의 계산 방법을 통하여 모든 단기 해상상태의 피로수명을 계산한 후 누적하여 최종적인 피로손상을 계산한다.

4.2 규칙파법

파 스펙트럼은 임의 해상상태를 표현하기 위하여 주파수영역상에서 여러 다른 주파수를 가진 규칙 파들의 합이라고 할 수 있으며 각 주파수 성분의 기여도에 따라서 스펙트럼의 형상이 결정된다. 이처럼 규칙 파로 구성된 파 스펙트럼을 규칙 파로 다시 변환하여 사용할 경우 긴 시간의 시계열 해석을 하지 않고서도 불규칙 파의 특성을 표현할 수 있다는 것이 규칙파법의 핵심이다.

파 스펙트럼을 여러 개의 규칙 파로 분해하여 평가하기 위하여 0~3차 스펙트럴 모멘트 값들을 통해 특정 파고와 주기를 가지는 규칙 파의 발생 확률을 계산한다. WSD의 모든 단기 해상상태에 대하여 순차적으로 상기 연산을 수행하여 주기와 파고의 범위가 정해진 RWSD(Regular Wave Scatter Diagram)의 누적 확률을 계산하면 주어진 해상상태를 다수의 규칙 파로 변환할 수 있을 뿐만 아니라 발생빈도 역시 알 수 있다. 따라서, 동적 해석 시 각 규칙 파는 하나의 응력 폭과 이에 대응하는 사이클 횟수(number of cycle)를 가진다. 이후 모든 규칙 파들에 의한 응력 폭과 발생빈도를 고려하면 라이저의 피로수명을 얻을 수 있다.

Longuet-Higgins (1983)는 RWSD의 각 규칙 파의 결합확률밀도(joint probability density) 계산방법에 대하여 제안하였으며 OrcaFlex에서는 식 (5)와 같이 계산한다. 식 (5)는 임의 해상상태 즉 파 스펙트럼을 여러 개의 규칙 파로 분해하기 위하여 특정 파고(H)와 주기(T)를 가지는 규칙 파의 발생 빈도를 계산하는 식이다.

$$p(R,S,Z) = L(v)\exp\left(-R^2\left\{1+\frac{\left[1-\frac{1}{s}\right]^2}{v^2}\right\}\right)0.2R^2/(S^2 v\sqrt{\pi}) \quad (5)$$

여기서, Z는 파 스펙트럼, m_i는 Z의 i번째 스펙트럴 모멘트 이며 나머지 변수는 다음과 같다.

$$T_m = m_0/m_1,\ T_Z = \sqrt{\left(\frac{m_0}{m_2}\right)} \quad (6)$$

$$S = T/T_m \quad (7)$$

$$H_{rms} = H_S / \sqrt{2} \tag{8}$$

$$R = H / H_{rms} \tag{9}$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{T_m^2}{T_z^2} - 1 \right)} \tag{10}$$

$$L(v) = 2/(1 + \sqrt{1 + v^2}) \tag{11}$$

만일 WSD로 주어지는 장기 해상상태를 RWSD로 변환한다면 각각의 단기해상상태에 대하여 식 (5)에 의하여 특정 규칙 파에 대한 확률을 계산할 수 있고 이러한 연산을 모든 단기 해상상태에 대하여 수행 한 후 특정 파고와 주기에 해당되는 규칙 파의 누적 확률을 구할 수 있다. 이 누적 확률을 빈도수로 환산하면 특정 규칙 파의 발현 횟수를 알 수 있게 된다. 이후 각 규칙 파에 대응하는 응력이력과 관련 발현 횟수를 고려하여 피로손상을 예측한다.

한편, 이와 같이 장기 해상상태를 여러 개의 규칙 파로 변환하기 위해서는 해석자가 파고와 주기의 범위를 설정해 주어야 하며 설정한 범위에 따라 각 규칙 파의 개수가 결정된다.

그림 Fig. 7는 North Atlantic 해상상태를 regular wave scatter diagram으로 변환한 것이다. 총 147개의 규칙파를 생성하였으며 각 cell은 해당 규칙파의 발생 빈도를 포함하고 있다. 발생빈도 결정에 필요한 해상상태의 기준기간은 20년이며 총 규칙 파의 수는 72,235,947개다. 이는 20년 동안 FPSO가 받는 파의 평균 주기는 약 8.73초 임을 의미한다.

하나의 파 방향(wave heading direction)만을 고려한다면 총 147개의 규칙 파에 대하여 동적 해석을 수행하여 얻은 응력과 각 규칙 파의 발생빈도 및 S-N 선도 데이터를 통하여 피로수명을 결정한다. 만일, n개의 파 방향을 고려할 경우 동적 해석 개수는 n x 147개가 된다. Fig .8은 규칙파법의 계산 흐름을 나타내며 다음과 같은 단계를 통하여 피로손상을 계산한다.

Step1: 해상상태를 Wave scatter diagram conversion(식 (5))을 통하여 RWSD로 변환한다.

Step2: RWSD의 각 규칙파를 고려한 동적 해석을 수행하여 대응하는 응력 폭을 확보한다. 각 규칙파는 파고(H)와 주기(T)로 정의되며 동적 해석의 총 개수는 RWSD cell의 개수와 같다.

Step3: 각 응력 폭의 발생횟수를 고려하여 응력 히스토그램(stress histogram)을 생성한다. 이때, 응력 폭의 발생횟수는 규칙파의 발생 빈도와 연관이 있다.

Step4: 응력 히스토그램, S-N 선도 등을 활용하여 피로손상을 계산한다.

4.3 Rain flow counting 법

Rain-flow counting법은 현재까지 알려진 피로해석 방법 중 가장 직관적이고 정확한 피로수명을 주는 방법이다 (Power & Maniar, 2008).

Number of Occurrences

Height (m)														
31.0			4.89E-01	1.04E+00	4.31E-01									
29.0			1.62E+00	3.13E+00	1.26E+00	2.18E-01								
27.0		1.62E-01	5.27E+00	9.29E+00	3.63E+00	6.47E-01								
25.0		6.55E-01	1.70E+01	2.72E+01	1.03E+01	1.89E+00	2.55E-01							
23.0		2.62E+00	5.49E+01	7.91E+01	2.87E+01	5.44E+00	8.13E-01	1.21E-01						
21.0		1.05E+01	1.77E+02	2.29E+02	7.99E+01	1.56E+01	2.56E+00	4.39E-01						
19.0		4.24E+01	5.73E+02	6.60E+02	2.22E+02	4.47E+01	8.05E+00	1.57E+00	3.56E-01					
17.0		1.75E+02	1.87E+03	1.90E+03	6.15E+02	1.29E+02	2.54E+01	5.57E+00	1.44E+00	4.40E-01	1.56E-01			
15.0	2.61E-01	7.37E+02	6.14E+03	5.50E+03	1.71E+03	3.74E+02	8.09E+01	2.00E+01	5.83E+00	1.99E+00	7.83E-01	3.45E-01	1.67E-01	
13.0	2.53E+00	3.20E+03	2.03E+04	1.59E+04	4.80E+03	1.10E+03	2.64E+02	7.31E+01	2.39E+01	9.08E+00	3.92E+00	1.87E+00	9.78E-01	5.48E-01
11.0	2.50E+01	1.44E+04	6.77E+04	4.57E+04	1.35E+04	3.32E+03	8.84E+02	2.75E+02	1.01E+02	4.23E+01	1.99E+01	1.03E+01	5.74E+00	3.41E+00
9.0	2.69E+02	6.68E+04	2.26E+05	1.31E+05	3.85E+04	1.03E+04	3.07E+03	1.08E+03	4.41E+02	2.04E+02	1.04E+02	5.81E+01	3.45E+01	2.17E+01
7.0	3.35E+03	3.23E+05	7.45E+05	3.68E+05	1.10E+05	3.25E+04	1.11E+04	4.41E+03	2.02E+03	1.03E+03	5.72E+02	3.41E+02	2.16E+02	1.43E+02
5.0	5.06E+04	1.61E+06	2.36E+06	9.94E+05	3.10E+05	1.05E+05	4.12E+04	1.88E+04	9.61E+03	5.40E+03	3.26E+03	2.09E+03	1.40E+03	9.81E+02
3.0	1.50E+07	2.53E+07	1.47E+07	5.32E+06	2.01E+06	8.96E+05	4.61E+05	2.65E+05	1.65E+05	1.10E+05	7.62E+04	5.51E+04	4.11E+04	3.14E+04
Period (s)	4.0	7.0	10.0	13.0	16.0	19.0	22.0	25.0	28.0	31.0	34.0	37.0	40.0	43.0

Fig. 7 Regular wave scatter diagram

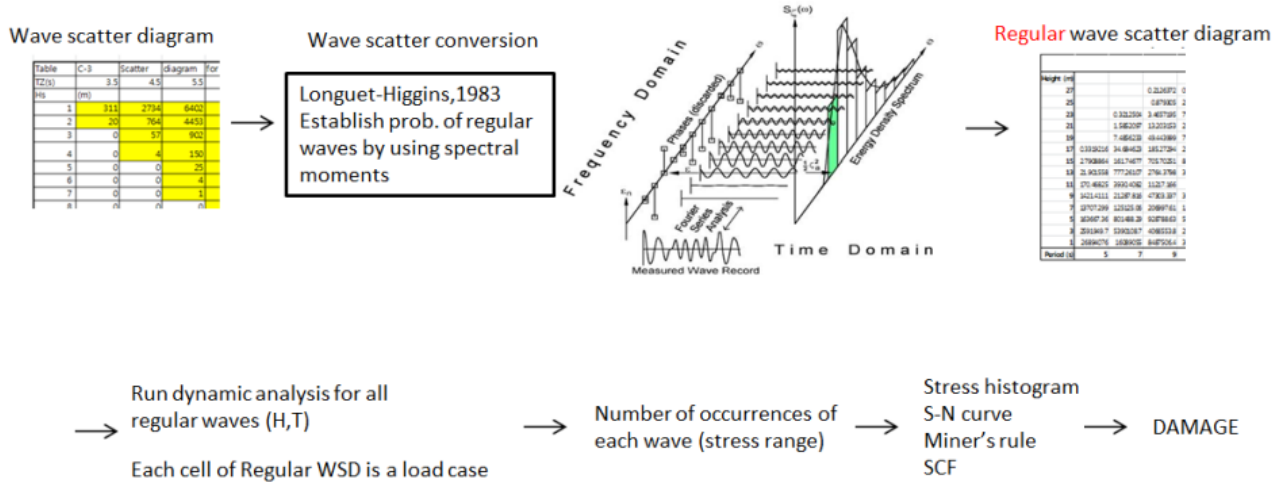

Fig. 8 Flow chart of regular wave method

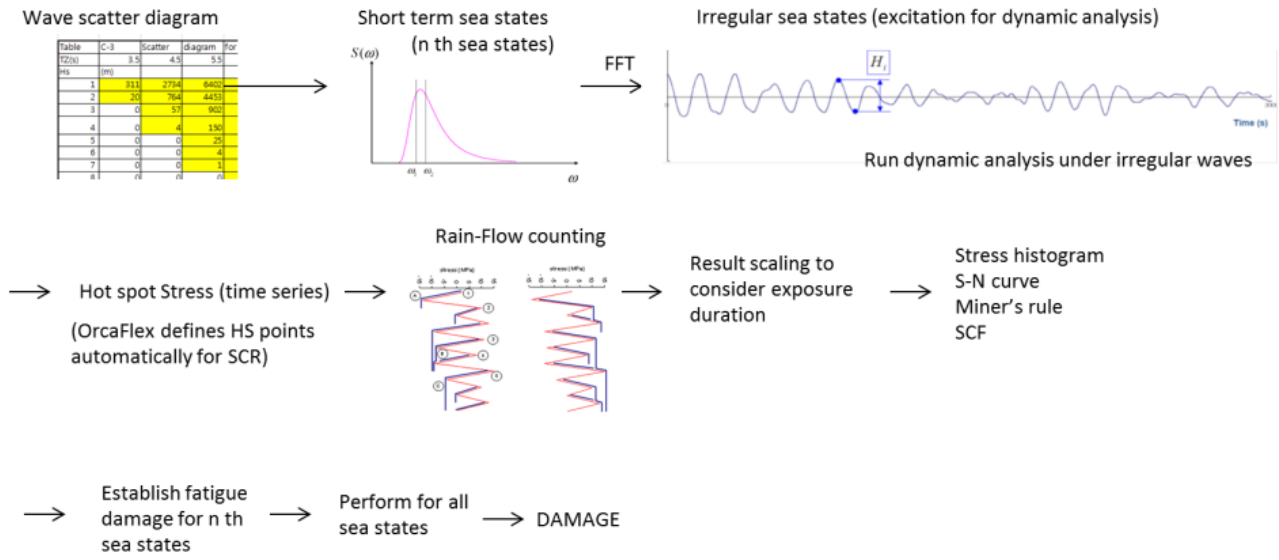

Fig. 9 Flow chart of Rainflow counting method

불규칙 해상상태에 대응하는 동적 응력을 시간이력에 따라 계산한 후 발생한 응력 폭을 rain flow counting법을 통하여 응력 히스토그램으로 변환한 후 S-N 선도와 대응하여 피로수명을 계산하는 방법이다.

피로해석 시 rain flow counting이란, 응력응답의 응력 폭과 발현 횟수를 세는 방식으로서 시간이력에 따라 변화하는 모든 응력변화를 추적하는 방식이다. 이 방법은 정확한 결과를 주지만, 시간이력에 대한 모든 응력 폭을 파악하여야 하므로 피로손상 계산에 많은 시간이 걸리는 단점이 있다.

Rain flow counting법을 통한 피로해석을 위해서는 일단, WSD의 각 해상상태를 역퓨리에변환을 통하여 불규칙 파로 변환하여 동적 해석을 수행한다. 결과의 안정성을 위하여 충분한 simulation time이 필요 하며 본 연구에서는 각 해상상태 별 1200초(20분)를 고려하였다. 계산된 각 응력 폭의 발생횟수를 실제 해상상태 노출시간과 simulation time의 비율만큼 증가시켜 준다. 이후 S-N 선도와 대응 시켜 피로수명을 계산한다.

Fig. 9은 Rain flow counting법의 계산 흐름을 보여주고 있으며 다음과 같은 단계를 통해 피로손상을 계산한다.

Step1: Wave scatter diagram의 각 단기 해상상태를 역퓨리에변환을 통하여 불규칙 해상상태로 변환한다.

Step2: 불규칙 해상상태를 고려하여 동적 해석을 수행하고 대응하는 응력이력을 얻는다.

Step3: Rain flow counting법을 통하여 응력 폭들을 추출한 후 응력 히스토그램을 생성한다. (이 단계에서, 실제 simulation time(1200 sec)를 실제 해상상태 노출시간만큼 확장 시켜

주게 되고 각 응력 폭의 발생횟수 역시 해당 비율만큼 증가하게 된다.)

Step4: 응력 히스토그램, S-N 선도 등을 활용하여 피로손상을 계산한다.

Step5: Step1~Step4의 계산 방법을 통하여 모든 단기 해상상태의 피로수명을 계산한 후 누적하여 최종적인 피로손상을 계산한다.

Rain-flow counting법은 상대적으로 다른 기법에 비하여 정확한 결과를 주지만 오랜 해석시간과 많은 데이터 처리를 필요로 하므로 초기해석 단계에서는 사용하지 않는 것이 일반적이다. Table 4는 각 피로해석 방법에 따라 가해준 파랑하중 정보를 정리한 것이다.

Table 4 Dynamic analysis methods for each method

Fatigue analysis method	Waves for dynamic analysis
Spectral	White noise spectrum
Regular	Regular wave scatter diagram(Regular waves)
Rain-flow counting	Wave scatter diagram (irregular random waves)

5. 등가 해상상태 정의

본 연구에서는 해류 및 파랑하중에 의한 라이저 피로해석기법 검토가 주 목적이므로 해석을 위하여 선수 파를 100%로 가정하였다. 그럼에도 불구하고 규칙 파법 및 Rain-flow counting법의 경우 많은 해석 시간과 데이터 처리가 요구되었다. 만일 모든 파 방향에 대하여 해석을 수행 한다면 엄청난 해석 시간과 데이터 저장 용량이 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 경우를 방지 하기 위하여 해석 시나리오의 개수를 적절한 방법으로 감소 시킬 필요가 있다.

일반적으로 방법은 WSD의 단기해상상태 즉 cell의 개수를 줄이는 것이다. 본 연구에서는 전체 해상상태를 모두 고려하여 계산한 피로수명과 해상상태의 개수를 약 25% 정도로 감소시킨 해상상태(reduced sea states)를 고려한 피로수명을 비교하였으며 그 결과가 유사함을 확인하였다. 해상상태의 개수를 위하여 Hs와 Tz의 범위를 늘려주고 해당 범위의 발생빈도를 단순히 합하였다. 이러한 등가의 해상상태를 통하여 해석 시간을 약 70% 이상 감소시킬 수 있었으며 실제 해석 수행 시 매우 유용할 것이다. Table 5는 North Atlantic 해상상태의 개수를 줄인 등가해상상태를 보여주고 있다.

Table 5 Reduced wave scatter diagram (North Atlantic)

Hs(m) \ Tz(S)	4	6	8	10	12	14	16	18
1	164.3	8013.6	14128.2	3121.7	192	5.9	0.1	0
3	2.2	3086.7	22581	14863	2256.5	142.5	5.4	0.1
5	0	254.1	6744.1	10924	3319.9	354.7	20	0.7
7	0	15.8	1179.5	3824	2014.3	331.4	26.1	1.3
9	0	0.9	150.8	868	722.9	172.3	18.4	1.1
11	0	0	15.5	145	179.3	59.3	8.3	0.7
13	0	0	1.4	19.2	33.4	14.8	2.6	0.2
15.5	0	0	0.1	2.2	5.3	3.1	0.7	0

6. 해석 결과

상대적인 피로손상의 비교를 통하여 해석기법과 해상상태에 따른 결과를 평가하였다.

S-N 선도는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 기울기가 “3”인 1 slope curve를 사용하였으며 fatigue limit stress는 18,000 kPa 이다.

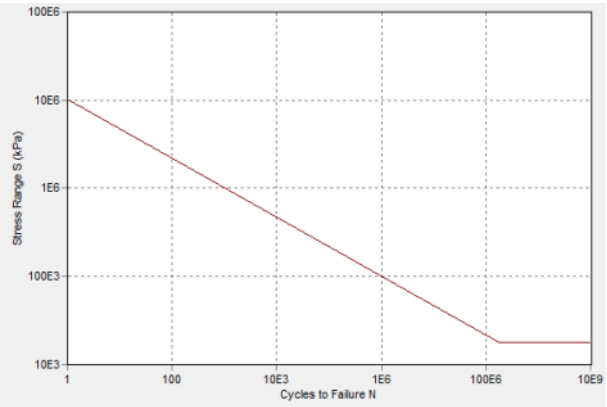

Fig. 10 S-N curve

본 연구에서 정리한 피로해석 결과는 1년당 발생하는 피로손상이며 손상 값의 크기는 중요하지 않으며 상대적인 손상의 차이만 의미가 있다. 그 이유는 비교검토를 위한 임의 모델이며 피로 측면에서 최적화 된 설계가 아닌 모델이기 때문이다. 따라서 S-N 선도 역시 임의의 선도이다.

비교검토를 위하여 rain flow counting법의 결과가 가장 정확한 결과라고 가정하였고 이를 기준으로 스펙트럴법 및 규칙파법의 결과를 고찰하였다.

6.1 라이저 타입 및 해석기법에 따른 피로해석 결과 비교검토

피로해석 결과, Lazy wave, Simple SCR 두 경우 모두 TDP부

근(라이저 길이 1500m 이상)에서 가장 큰 피로손상을 나타냈다. 해석 방법에 따라 피로손상 결과가 다소 차이를 보이기는 하였으나 라이저 길이에 따른 전체적인 손상형태는 유사하였다.

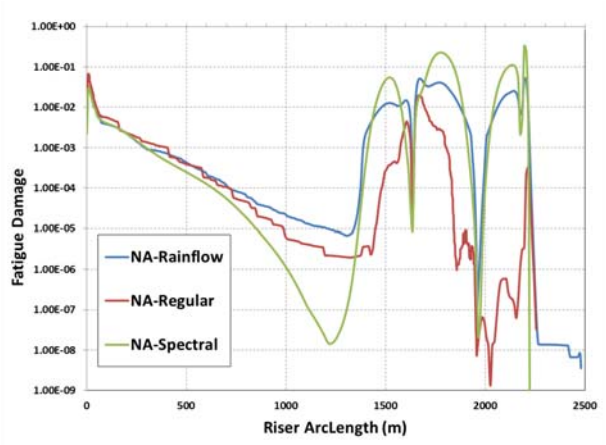

Fig. 11 Fatigue damages (Lazy wave)

Fig. 11은 North Atlantic 해상상태를 고려하였을 때 lazy wave 라이저의 수심 별 피로손상을 나타내고 있다. Lazy wave의 경우 TDP 부근의 굴곡 형상으로 인하여 simple SCR에 비하여 복잡한 피로손상의 형태를 나타냈으며 낮은 피로손상을 보였다. 일반적으로 스펙트럴 피로해석법은 가장 보수적인 해석으로 알려져 있다 (Power & Maniar, 2008). 본 연구에서도 이와 같은 경향을 확인할 수 있었으며 TDP영역에서 스펙트럴법으로 계산한 경우가 가장 큰 피로손상을 나타났다. 한편, rain flow counting과 가장 유사한 결과를 줄 것으로 예상했던 규칙파법의 경우 손상의 형태는 유사하나 라이저 기준 길이 2000 m 근처에서 다른 기법에 비하여 현저히 낮은 피로손상을 보였다. 환경 하중 및 모델이 동일함에도 불구하고 이러한 차이를 보이는 것은 피로손상을 계산할 때 고려되는 동적 응력의 차이 때문이라고 할 수 있다. 이러한 동적 응력이 차이가 나는 이유는 규칙파법이 rain flow counting 방법에 비하여 라이저 시스템의 비선형성을 충분히 고려하지 못하였기 때문이라고 판단된다. 비록 규칙파법이 환경하중인 파 스펙트럼의 성질을 모두 고려하여 계산을 한다고 할지라도 동적 응력 계산시 규칙파를 가하여 계산을 하므로 불규칙 파를 직접 가하여 응력을 얻는 rain flow counting법에 비하여 라이저 거동의 비선형 효과를 모두 고려하지는 못하는 것으로 판단된다. 이러한 추론의 근거는 비선형 영향이 상대적으로 낮은 simple SCR의 결과인 Fig. 12와 비교 함으로서 확인할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12의 결과에서 나타나듯이 비선형적 거동이 상대적으로 적은 simple SCR의 경우 규칙파법과 rain flow counting법의 결과가 유사하게 나타나는 반면 lazy wave의 경우에는 규칙파법의 피로손상이 rain flow counting법보다 낮게 나타났다.

스펙트럴법의 경우, 두 라이저 타입에서 rain flow counting법과의 결과 차이가 있었으며 TDP 구역 이외의 구간(라이저 길이 약 1300 m 지점) 결과에서도 차이를 나타냈다.

Rain flow counting법의 결과를 기준으로 할 경우 비록 규칙파법은 lazy wave 타입에서는 오차를 보였으나 simple SCR에서는 만족할만한 결과를 주었다. 하지만 스펙트럴법의 경우 simple SCR 타입의 결과에서도 rain flow counting법의 결과와 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 스펙트럴법은 본 연구에서 고려한 해석기법 중 가장 정확도가 낮다고 할 수 있다.

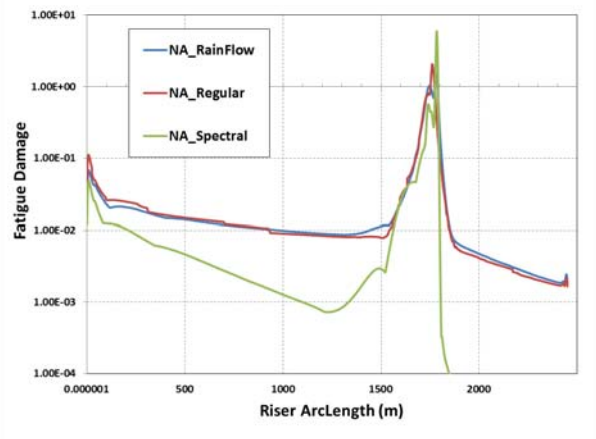

Fig. 12 Fatigue damages (Simple SCR)

6.2 등가 해상상태 고려 시 피로손상 비교

해석 load case를 줄이기 위하여 감소된 해상상태를 활용한 해석 결과, 모든 해상상태를 고려한 결과와 매우 유사한 결과를 주었다. 이러한 경향은 해석기법을 변경하더라도 변함이 없었다.

따라서, 해석 case를 줄이기 위하여 유사한 범위의 Hs와 Tz의 해상상태들을 하나의 해상상태로 간주하여 해석하여도 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었으며 실제 여러 단기 해상상태를 고려하여야 하는 경우 매우 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

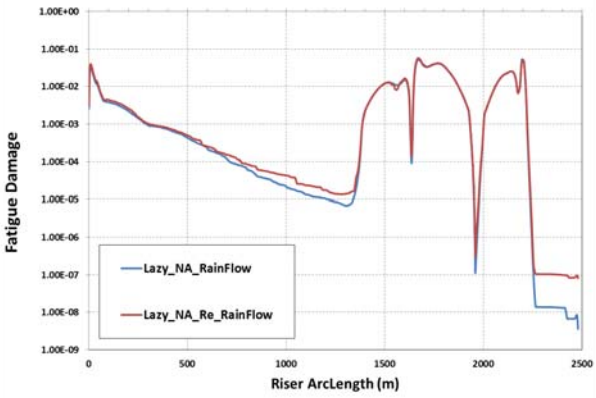

Fig. 13 Full sea states and reduced sea states (Lazy wave, Rain-flow counting method)

Fig. 13는 lazy wave 타입, rain flow counting법으로 계산하였을 경우 모든 해상상태와 등가해상상태의 결과를 비교한 그래프로서 나타난 바와 같이 두 결과는 매우 유사한 결과를 주었다.

그래프의 legend에서 Re는 감소된 등가 해상상태를 의미한다. 규칙파법으로 계산한 결과인 Fig. 14의 경우 역시 두 결과가 잘 일치하였으며 rain flow counting법을 사용한 경우 보다 더 좋은 결과를 주었다. Fig. 15와 Fig. 16에서 나타나듯이, 라이저 타입을 simple SCR로 변경한 경우에도 이러한 경향은 유지되었다.

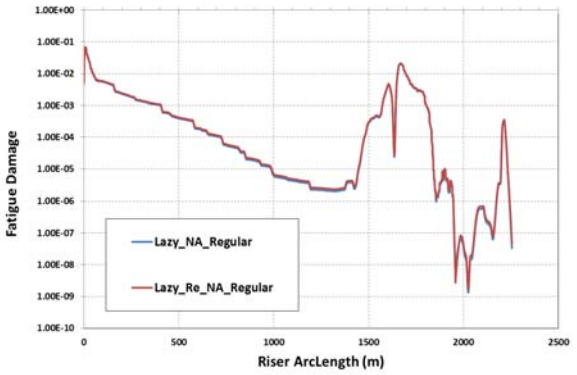

Fig. 14 Full sea states and reduced sea states (Lazy wave, Regular wave method)

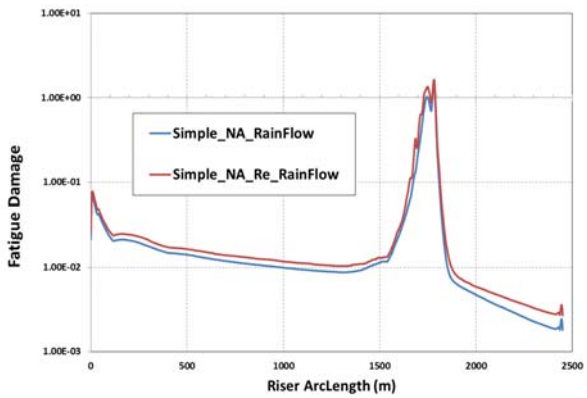

Fig. 15 Full sea states and reduced sea states (Simple SCR, Rain flow counting method)

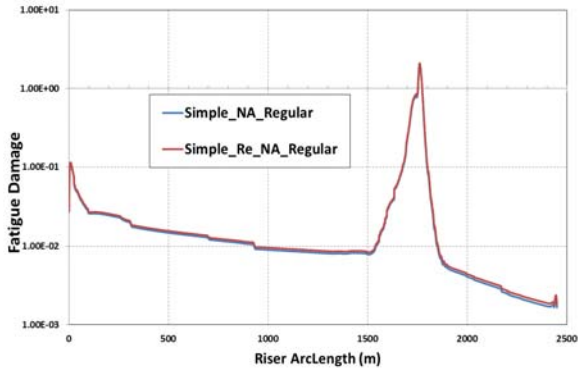

Fig. 16 Full sea states and reduced sea states (Simple SCR, Regular wave method)

6.3 단일 방향파 및 다 방향파에 의한 결과 고찰

파 방향(wave heading direction)의 변화에 따른 수명 변화를 비교하기 위하여 추가적으로 선수 파 만을 고려한 경우와 45도 간격으로 동일한 확률의 파 방향을 고려한 경우에 대하여 비교하였다. Simple SCR을 대상으로 하였으며 해석 방법은 규칙파법을 사용하였다.

해석 결과, 두 경우의 결과가 큰 차이를 나타냈다. 여러 방향의 파를 고려한 경우가 선수 파 만을 고려한 경우에 비하여 큰 피로손상을 나타냈다 (Fig. 17참조).

이러한 결과의 이유는 각 방향의 파마다 피로손상에 영향을 주는 고유의 응력 응답을 갖고 있는데 그 응답들이 선수 파만의 응력 응답에 비하여 크기 때문인 것으로 판단되며 두 결과가 차이를 보이는 것은 당연한 결과이다. 즉, 파의 입사 각도가 변경됨에 따라서 라이저가 받는 응력의 크기가 다르다는 것을 의미하며 선수파의 응력 응답보다 다른 각도에서 파가 올 경우, 라이저의 응력 응답이 더 클 수 있음을 의미한다. 하지만 본 결과를 통하여 어떠한 파 방향이 더 큰 응력 응답을 나타내는지는 알 수 없으며 이를 분석하기 위해서는 각 파 방향 별로 계산하여 비교하여야 한다.

결론적으로, 실제 피로수명 계산시 해당 지역의 해상상태뿐만 아니라 파의 입사각도에 대한 확률분포 정보 역시 고려하여야 한다.

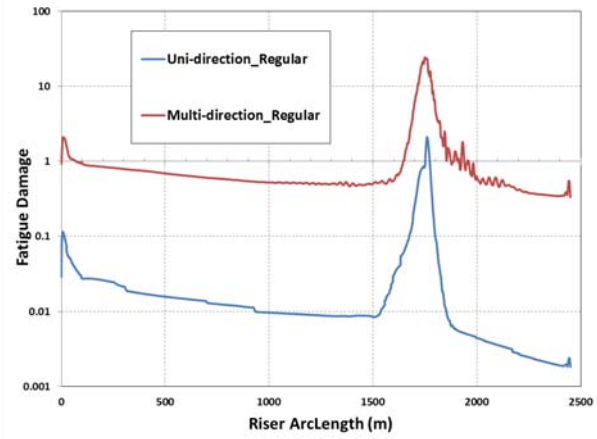

Fig. 17 Reduced sea states (N/A), all wave headings, Simple SCR, Regular wave method

7. 결 론

해석의 결과를 비교검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- Rain flow counting법이 가장 정확한 결과라고 가정하여 나머지 두 기법의 결과를 비교하였다. 비교 결과, 스펙트럴법은 가장 정확도가 낮았으며 규칙파법경우 라이저 형태에 따라 정확도의 차이를 보였다.

- 스펙트럴법, 규칙파법, rain flow counting법들의 피로손상 경향은 유사하였으나 비선형 영향이 큰 lazy wave의 경우 기법에 따른 결과의 오차가 simple SCR에 비하여 크다.

- Simple SCR의 경우 lazy wave에 비하여 기법에 따른 결과의 오차가 적었으며 규칙파법과 rain flow counting법의 결과가 유사하였다.

- North Atlantic과 World-wide 해상상태를 고려하여 해석 후 비교한 결과, 모든 해석기법에서 World-wide 해상상태를 고려한 결과에서 낮은 피로손상을 나타냈다.

- 해석 case를 줄이기 위하여 활용한 등가 해상상태는 모든 해상상태를 고려한 경우와 매우 유사한 경향을 보였다. 따라서 유사한 범위의 Hs와 Tz의 해상상태들을 하나의 해상상태로 간주하여 해석하여도 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

- 라이저 피로해석 시 다 방향파에 대한 고려는 반드시 필요하며 라이저 설치 지역의 파 방향에 대한 확률분포를 고려하여야 한다.

규칙파법은 실제 피로해석 시 계산시간 및 정확성 측면에서 가장 효율적인 방법이다. 스펙트럴법의 경우 비선형성을 충분히 고려하지 못하고 rain-flow counting법의 경우 많은 계산 시간과 데이터 처리를 요구하는 반면 규칙파법은 효율성과 정확성 측면에서 상기 두 방법의 단점을 극복할 수 있다.

하지만 규칙파법은 비선형성이 매우 큰 lazy wave 타입에서는 적용하기가 어렵다고 판단된다. 비록 이론적으로는 규칙파법이 해석 시 라이저 거동의 비선형성을 포함하지만 라이저 시스템에 따라 정확성도가 떨어지는 경우도 있는 것으로 것으로 판단된다. 이 경우 다양한 라이저 타입이 존재하고 각 프로젝트 별 라이저의 응답특성이 제 각각일 것이므로 어떠한 상황에서 규칙파법을 사용하여야 하는지에 대한 판단을 하기가 쉽지 않을 것이다. 이 경우, 본격적인 해석에 앞서 라이저의 응답특성을 파악하는 단계가 필요하다고 판단된다. 예를 들어, 시간 문제로 인하여 WSD의 모든 해상상태를 고려하지는 못하더라도 대표적인 해상상태들을 선정하여 라이저의 응력응답특성이나 피로수명 등을 비교할 필요가 있다. 따라서 규칙파법이 가장 권장할 만한 방법이지만, 시스템의 응답특성에 따라 엔지니어가 해석법을 적절히 선택할 필요가 있다.

WSD의 해상상태 수를 평균값을 통하여 낮춘 등가해상상태 활용의 경우 모든 해상상태를 고려한 결과와 유사한 결과를 보여주었다. 라이저 피로해석에 소요되는 시간과 데이터 처리 양을 감안하였을 때, 이러한 등가해상상태를 활용하는 것이 필수적이라고 판단된다.

본 연구는 FPSO에 연결되어 있는 하나의 라이저에 대하여 해양파로 인한 1st order 하중 및 거동만을 고려하여 수행한 피로해석으로서 와류 및 2nd order 하중 등에 대한 영향은 고려되지 않았다. 따라서 본 연구의 결과를 통하여 종합적인 라이저 피로수명의 전반적인 경향은 파악하기 어려우며 추가 검토 및 연구가 필요하다. 하지만 해양파로 인한 1st order 하중 및 거동을 고려하여 피로해석을 수행할 경우 본 연구를 통하여 다음과 같은 해석 기준을 제시할 수 있다.

- 스펙트럴법을 통한 피로해석의 경우 간이 해석이나 취약 지점을 찾는 screening 단계에서 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

- 규칙파법의 경우 rain flow counting법과의 비교결과 유사성이 확인 될 경우 피로해석 결과 도출을 위한 해석기법으로 사용하여도 무방할 것으로 판단된다.

- Rain flow counting법의 경우 가장 권장되는 해석기법 이지만 많은 해석 시간을 필요로 하므로 디자인이 진행되고 있는 단계에서는 사용을 지양하고, 최종 검토 단계에서 수행할 필요가 있다. 한편 프로젝트나 라이저의 특징에 따라 규칙파법으로 대체 가능할 경우 생략해도 될 것으로 판단된다.

한편, 종합적인 라이저 피로수명 예측 및 국내 라이저 기술 자립을 위해서는 많은 자료 검토와 해외의 설치 사례 분석이 필요하며 본 연구에서 고려하지 못한 환경하중에 대한 처리 방식에 대한 연구가 필요하다. 그리고 FPSO와 뿐만 아니라 TLP(tension leg platform), 반 잠수식 구조물 등과 같은 다양한 부유체에 연결되어 있는 라이저의 응답특성에 대한 연구 및 검토가 필요하며 유체동역학적 측면의 부유체 거동 처리 방법에 따른 결과, 드릴라이저 등과 같은 tensioned 타입에 대한 피로손상 특성 등의 연구가 추가적으로 더 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가 관리원의 미래산업선도 기술개발 사업의 일환으로 수행하였음. (10042430, 심해유전 개발을 위한 500MPa급 URF 및 SIL 3 Manifold 개발과 Subsea 시스템 엔지니어링 기술 개발)

References

Almar-Naess, 1985. *Fatigue Handbook Offshore Steel Structure*. Tapir Publishers: Flatasen.

API, Recommended Practice 2RD, 2006. *Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platform(TLPS)*. API: Washington, D.C.

Braccesi, C. Cianetti, F. Lori, G. & Pioli, D., 2005. Fatigue Behavior Analysis of Mechanical Components Subject to Random Bimodal Stress Process. *International Journal of Fatigue*, 27, pp.335-345.

Campbell, M., 1999. *The complexities of fatigue*

analysis for deepwater risers. [Online] Available at : http://www.digitalorganics.com.au424.2hoffshore.com/documents/papers/1999-Deepwater-Pipeline-Technology-Conference-The-Complexities-of-Fatigue-Analysis-for-Deepwater-Risers.pdf [Accessed 26 May 2015]

Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications Southhampton: Boston.

DNV-Offshore Standard-F201, 2010. Dynamic Risers. DNV: Norway.

DNV-Recommended Practice - C205, 2010. *Environmental Conditions and Environmental Loads*. DNV: Norway.

Gonzalez, E.C., 2005. Steel catenary riser design and analysis for petrobras roncador field dvelopment. *Offshore Technology Conference*, Houston, 5 February 2005.

Leverette, S. Rijken, O. Dooley, W. & Thompson, H., 2003. Analysis of TLP VIV response to eddy currents. *Offshore Technology Conference,* Houston, 5 May 2003.

LI, Y., 2012. Sensitivity of SCR fatigue at touch Down point : effect of marine growth. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 17-22 June 2012, pp.281-286.

Longuet-Higgins, M.S., 1983. On the Joint Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field. *Proceedings Royal Society London, Series A, Mathematical and Physical Sciences,* 389(1797).

Luciano de A. Campos, 2001. Nonlinear dynamic response of a steel catenary riser at the touch-down point. *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineers Conference*, Norway, 17 June 2001, pp.234-238.

Orcina, 2014. *OrcaFlex Manual, Version 9.6a*. Orcina: Cumbria, UK.

Power, T.L. & Maniar, D.R., 2008. Spectral and cycle-counting damage estimation methods for steel catenary risers. *Offshore Technology Conference*, Houston, 8 May 2008.

Ye, W. Shanks, J. & Fang, J., 2003. Effects of fully coupled and quasi-static semi-submersible vessel motions on steel catenary riser's wave loading fatigue. *Offshore Technology Conference*, Houstion, 5 May 2003

이 정 대

이 성 제

장 창 환

전 석 희

오 영 태