

안전 통계적법에 의한 부유식 해양구조물의 피로강도평가 및 조선소 개발사례

Fully Stochastic Fatigue Analysis for Offshore Floaters and :
Based on Shipyard Development and Practices



정 준 모*



윤 기 영**



정 장 현***



추 명 훈***

* 현대중공업 해양사업본부 기본설계부 차장
** 현대중공업 해양사업본부 기본설계부 부장
*** 현대중공업 해양사업본부 기본설계부 대리

1. 서 론

해저 석유자원 개발은 1990년대 중반까지 주로 수심 300 m이하의 천해를 중심으로 개발되어 왔다. 그러나 육상과 천해에서의 석유 자원은 점점 늘어나는 수요를 더 이상 감당할 수 없게 되어 매장량이 대규모인 심해유전 개발이 가속화되어 가는 추세이다. 중국은 개방화 이후 미국에 이은 석유 소비 대국으로 등장하였으며, 이로 인하여 세계 경제는 2004년 이후 고유가 시대를 맞이하였다. 이러한 고유가 시대의 도래는 심해에서의 유전개발을 가속화시켰으며 심해유전 개발을 위한 Fig. 1과 같은 다양한 부유식 해양구조물(Offshore floaters)의 발주를 증가시키는 주요 원인으로 작용하였다.

FPSO는 현재까지 제작된 부유식 해양구조물의 약 60%를 점유하고 있으며(Fig. 2), 수심 1000m이상의 심해 해상에 부유(Floating)하면서 장기간 석유를 생산(Production) 및 저장(Storage)한 후 유조선(Shuttle tanker) 또는 파이프라인을 통하여 하역(Offloading)할 수 있는 다기능 유전개발 장비이다. FPSO는 설계수명이 통상 20년 정도로, 처음 유전해상에 설치된 후 유전의 경제성이 완전 소모될 때까지 중단없이 가동되어야 하는 특성을 가진다.

현재까지의 FPSO 시장은 주로 6대 오일메이저(ExxonMobil,

Royal Dutch Shell, BP, Chevron, ConocoPhillips, TOTAL)에 의해서 형성되고 있으며, 각 회사마다 고유한 일반사양서(General Specification)를 가지고 발주되고 있다. 이들이 보유한 사양서의 특징은 가혹한 환경조건에서 장기간 중단 없이 가동해야 하는 특성에 비례하여 상당히 보수적이고 또한 비교적 발주처의 입장에서 문서화된 특징을 가진다. 심지어 최신의 학술적 연구까지 사양서에 포함시켜 FPSO 건조사(주로 국내 조선3사 HHI, SHI, DSME)에 사양조건을 만족시킬 것을 요구하기도 한다.

FPSO는 원유/가스 생산 하역을 위한 다양한 설비와 계류장비 등이 선체의 측면(Side shell) 또는 상부(Topside)에 설치되어 상당히 복잡하며 따라서 구조적 관점에서 많은 기하학적 불연속부를 가질 수밖에 없다. 이러한 구조형상은 피로파괴의 원인이 될 수 있고, 실제로 현재 가동중인 FPSO의 경우 다양한 피로손상이 보고되고 있다. 따라서 발주처는 매우 혹독한 환경하에서 피로강도설계를 요구하고 있으며 상당히 높은 피로 안전율을 요구하는 실정이다.

FPSO의 피로손상은 주로 반복적인 파랑하중에 기인하며 파랑의 대표적인 특성은 불규칙하고 예측이 힘들다는 점이다. 따라서 파랑하중에 의한 FPSO의 구조적 응답도 불규칙한 특성을 가진다고 알려져 있다. 이러한 문제로 인하여 고전적인 피로강도이론과 파랑하중에 대한 통계적인 기법을 접목시켜

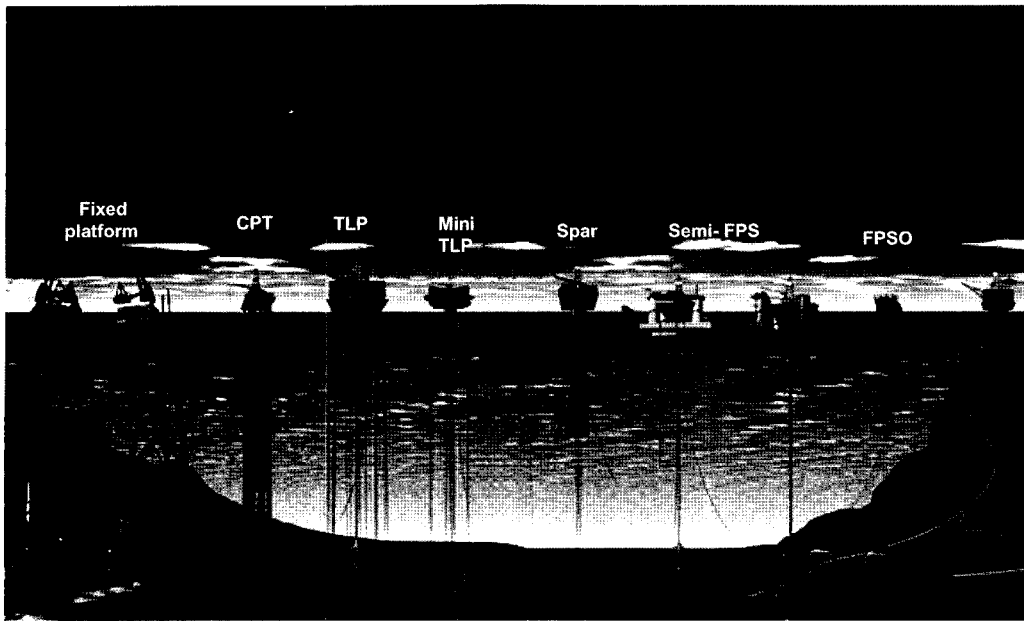


Fig. 1 The types of offshore floaters and fixed platforms

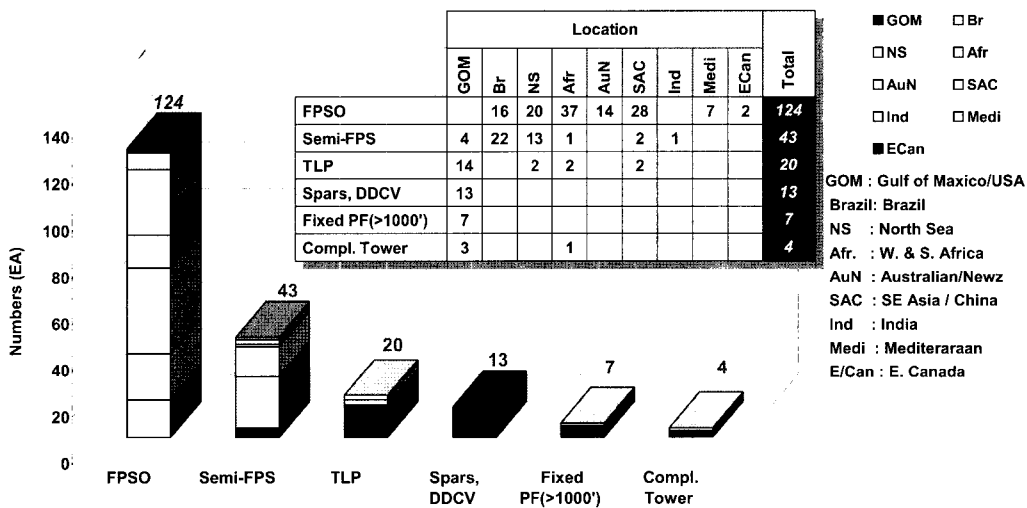


Fig. 2 World wide market shares according to the types of offshore structures

사용되는 방법이 통계적 피로해석법(Stochastic fatigue analysis method)이다.

통계적 피로해석법은 근본적으로 파랑하중과 구조물의 응답이 완벽한 선형관계를 이룬다는 가정에 근거하고 있다. 구조물의 응답은 보통 응력을 의미하는데, 파랑하중에 따른 응력의 변화(Stress RAO)를 주요 하중 파라미터(DLP, Dominant Load Parameter)의 조합으로 도출 할 경우 하중성분 통계적 피로해석법 또는 하중성분법(Stress component based stochastic fatigue analysis)이라 한다. 종래의 경우 통계적 피로해석법이란 하중성분법을 의미하였지만 근래에는 파랑하중을 구조해석 모델에 직접 적용하여 응력 RAO를 도출하는 완전 통계적 피로해석법 또는 완전통계법(Fully

stochastic fatigue analysis)이 대세로 자리 잡아가고 있다. 완전통계법은 하중성분법에 비하여 비교적 물리적 현상을 현실적으로 반영하는 장점이 있지만, 계산량이 매우 방대하고 하중변경에 신속히 대처할 수 없는 단점을 지닌다.

국내 연구동향을 살펴보면, Yang(1993), Shin(2005)은 하중성분법을 적용한 통계적 피로해석을 연구하였다. 노르웨이 선급(DNV)은 ExxonMobil사와 공동으로 FPSO 피로강도 평가법(FPSO FMS, Fatigue Methodology Specification)을 제시하였고, 이 연구 결과는 당사가 설계/건조한 KIZOMBA-A와 B FPSO공사에 적용된바 있으며, 현재까지 FPSO 피로해석에 관한 최고의 권위를 인정받고 있다. FMS는 DNV-RP-C203(2005), DNV-RP-C206(2006)등의 형태로 재편집되

어 발간되었다. 또한 DNV Classification Notes No.30.7(2001)은 선박 구조의 피로강도를 평가하기 위한 최고의 추천서로 인정받고 있다.

현재까지 완전통계법을 구현할 수 있는 상용화된 프로그램으로서 노르웨이 선급에서 개발한 Sesam/Stofat이 대표적인 예이다. 또한 한국 선급(KR)의 경우에도 완전통계법을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하여 근래 현대중공업으로부터 수주한 MOHO FPU 프로젝트를 성공적으로 수행한바 있다. 영국선급(Lloyd)를 비롯한 각 선급의 경우에도 독자적으로 개발한 내부(In-house) 프로그램을 보유하고 있다.

6대 오일메이저를 비롯한 대부분의 선주가 제공하는 일반 사양서는 통계적 피로해석법을 필수적으로 적용하여 피로강도를 평가할 것을 의무화하고 있으며 선주사의 피로강도에 대한 요구가 점점 가혹해지고 다양해지고 있다. 정기적인 피로 검사가 불가능한 구조에 대해서는 피로 안전율을 설계수명의 10배까지 요구하고 있으며, 파도의 상태(Sea state)를 세분화하여 여러 개의 스펙트럼(Multi-Spectrum)에 대한 피로강도를 평가하고 조합(Spectrum combination)할 것을 요구하고 있다. 선주사의 사양서가 매우 빠른 속도로 발전하고 요구사항이 점점 가혹해지지만 상용화된 프로그램은 이러한 선주의 기술적인 요청을 만족시키기에는 유연하고 신속하지 못하기 때문에 선주 요구에 즉각적으로 대응하기 위해서는 자체적인 프로그램의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 우선 피로 관점에서 일반상선과 FPSO의 차이점과 기술적 쟁점사항을 고찰하므로써 FPSO의 피로강도 평가를 위한 자체적인 피로해석 프로그램이 반드시 필요한 배경을 설명하고자 한다. 또한 통계적 피로해석법의 이론적 배경에 대하여 간단히 기술한 후 본 연구에서 개발된 프로그램의 특징에 대한 소개를 하고자 한다.

2. 피로강도에 대한 기술적 쟁점

부유식 해양구조물의 피로해석의 특징은 일반 상선과 달리 상부 구조물이나 기타 부가물 등의 표준화가 어렵고, 선주에 따라 요구되는 기술적인 수준이 다르며, 설계기술 경험이 많은 선박설계에 비하여 경험이 부족하다는 것에 있다. 이는 설계시간의 증가를 야기하고 설계 후반부에 이루어지는 피로해석의 특성상 이미 제작된 구조의 보강을 통한 방법 이외의 다른 방법을 찾기 힘들기 때문에 설계나 제작의 측면에서 많은 어려움을 야기함을 의미한다.

2.1 해상 상태(Sea State)와 입사각(Heading Angle)

일정 시간 동안의 단기 해상상태는 파의 유의파고(H_s)

와 파주기(T_z 또는 T_p)에 해당하는 파의 빈도수(또는 확률)로서 나타내어지는 Wave Scatter Diagram(WSD)의 하여 정의된다. 선박의 경우 표준화된 WSD를 주로 이용하여 조종성해석(Sea-keeping analysis)과 피로해석을 수행한다. 일반적으로 적용하는 WSD로서는 세계표준(World-Wide), 북해표준(North Atlantic) 또는 IACS 표준 WSD를 이용하고 모든 파 입사각에 대하여 동일한 WSD를 적용한다. 반면에 부유식 해양구조물의 경우 선주로부터 제시되는 설치해역에 대한 WSD를 적용해야 하며 각 입사각에 대하여 다른 WSD가 적용된다. 따라서 실제 입사각의 개수가 작아도 파 스펙트럼의 방향성을 고려하기 위한 방향분포함수(Spreading function)를 적용하기 위해서는 입사각이 존재하지 않는 입사각에 대해서도 구조해석을 수행해야 하고 따라서 하중 경우(Load case)의 수가 상당히 늘어난다는 문제점이 상존한다.

또한 근래에 들어서는 파의 발달상태에 따라서 너울파(Swell)와 풍파(Wind induced wave)로 나누어 WSD가 제공되므로 각각에 대한 피로강도를 모두 계산 후 조합해야 한다. 최근에 발주된 FPSO의 경우 총 3개의 해상상태(Wind induced wave, Primary swell, Secondary swell)를 모두 고려한 피로강도평가를 요구하는 실정이다. 또한 각 해상상태에 대한 입사각의 개수도 수 개 수준에서 평균 10~20개 수준으로 증가하는 추세에 있다.

2.2 스펙트럼 조합 (Spectrum Combination)

선박의 경우 P-M 스펙트럼(Modified Pierson-Moskowitz spectrum)을 사용하는 반면, FPSO의 경우 Jonswap 스펙트럼을 주로 사용한다. Jonswap 스펙트럼의 경우 P-M 스펙트럼과 에너지(Spectral density)의 크기는 같지만 보다 협대역에 가까우며, 따라서 피로강도를 좀더 보수적으로 평가하게 된다. 그러나 스펙트럼이 좀더 광대역(Wide banded)이고 2개의 최대치를 가지게 되면 Ochi-Hubble 스펙트럼을 이용하기도 한다.

FPSO의 피로강도 평가를 위한 스펙트럼의 조합은 보통 파 스펙트럼보다는 응력 스펙트럼 조합을 하며 두가지 측면에서 응력 스펙트럼 조합이 필요하다. 첫째, 서로 다른 주파수대에 존재하는 파에 대한 응력 스펙트럼의 조합이 필요하다. 즉 전술한 바와 같이 여러 개의 단기 해상상태에 대한 스펙트럼의 조합을 의미한다. 응력 스펙트럼의 조합은 물리적 타당성보다는 실용적인 측면에서 적용하기에 간편하지만 여러 개의 단기 해상상태에 대한 스펙트럼의 조합은 해상상태와 입사각에 대한 모든 조합을 계산하기 위해서 엄청난 연산량을 요구한

다. 둘째 부가물(Appurtenance)에 작용하는 인장력(보통 Line loads라 통칭)등이 인장하중의 RAO 형태로 제공되지 않고 해상상태에 대한 평균 인장력과 표준편차의 형태로 제공 될 경우에도 응답 스펙트럼의 조합이 필요하다. 인장하중은 보통 공급업체(Vendor)로부터 제공받는데 정확한 피로강도의 평가차원에서 가급적 인장하중 RAO의 형태로 제공받아 스펙트럼 조합을 하지 않고 직접 피로해석을 수행하는 것이 가장 바람직하다.

2.3 용접

FPSO의 경우 선체에 대해서는 일반 상선과 마찬가지로 필렛용접을 적용하지만 선급 규칙이나 선주 사양서는 소위 Offshore area로 불리는 상부구조 및 부가물 등의 상당부분에 대해서는 완전용입용접(CJP, Completed Joint Penetration)을 요구하고 있다. 또한 이들 구조물의 경계부(Interface area)에 대해서도 완전용입용접을 요구하는 실정이다. 완전용입용접의 적용은 중단없는 가동을 요구하는 고품질 안전사양이긴 하나 필렛용접과 달리 제작에 상당히 많은 비용과 시간이 소요되며, 비파괴 검사를 수행해야 하기 때문에 루트부 균열(Root crack)이 존재할 경우 조선소의 생산성을 저하시키는 요인이기도 하다.

완전용입용접에 대한 피로강도를 계산하기 위해서는 용접부 및 각장에 대한 자세한 형상을 고체요소로 모델링 하여야 하며, 일반적으로 적용하는 Hot Spot에 근거한 S-N곡선을 적용할 수 없어서 판요소로 구성된 기존의 FE 모델과 별도의 피로강도를 계산해야하는 어려움이 있다.

2.4 스크리닝 (Screening)

스크리닝은 피로취약부를 탐색하기 위한 피로해석의 전처리 단계를 의미한다. 그러나 전체 구조물에 대하여 피로 취약부를 완벽하게 탐색하기는 현실적으로 불가능하여 스크리닝 방법은 기존의 사례를 통한 경험적 방법과 기하학적 형상을 통한 직관적 방법이 주류를 이루어 왔다. 또한 강도해석 결과를 관찰 후 등가응력이 크게 발생한 부분에 대하여 상세한 피로강도해석을 수행하기도 한다. 하중성분 스펙트럼 피로해석법을 스크리닝 방법으로 사용하기도 하며, Weibull 분포 간이해석법(Simplified method)을 이용한 스크리닝 방법도 간헐적으로 이용된다.

일반 상선 또는 FPSO 선체의 경우 스트링거 연결부(Stringer connection), 웨브 연결부(Web connection), 호퍼

코너(Hopper corner)등과 같이 피로강도가 취약한 부분이 전형적이다. 따라서 새로운 선종만 아니라면 별도의 스크리닝이 필요하지 않고 경험에 의존한다.

그러나 FPSO의 경우 소위 해양 영역(Offshore area)라 불리는 부가물(Appurtenance), 상부구조 등의 형상이 각 프로젝트 별로 상이하고 또한 이들 구조와 선체와의 연결방식이 다양하여 스크리닝이 완벽하게 이루어지지 못한다. 예를 들어 여러 개의 케이슨(Caisson)에 대하여 강도해석 결과가 가장 좋지 않은 케이슨에 대하여 상세 피로해석을 수행하여 설계수명을 만족한 경우에도 선주는 나머지 케이슨에 대하여 모두 피로강도를 평가할 것을 요구하는 경우가 빈번하다. 이는 사용된 스크리닝 방법이 선주의 입장에서 합리적이라 느끼지 않기 때문이며 또한 FPSO의 특성상 케이슨에 작용하는 하중도 불확실성을 포함하기 때문이다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 좀더 합리적인 스크리닝 방법이 필요하다고 볼 수 있다.

2.5 제작 공차(Fabrication tolerance)

선박의 경우 피로강도를 평가할 때 제작공차에 대한 별도의 고려를 하지 않는다. 그러나 해양구조물의 경우 최대 발생 가능한 제작공차를 예측하고 이로 인하여 발생하는 부가적인 응력집중을 피로강도 평가에 반영하여야 한다. 즉 제작공차로 인하여 발생하는 부가적인 응력집중을 피로강도 평가에 고려하여야 한다.

DNV RP-C203에서는 맞대기 용접부(Butt joint)에 대하여 응력집중계수를 Fig. 3 및 식 (1)과 같이 제작 공차 및 판재의 두께 함수로서 제시한 바 있다.

DNV RP-C203에서 제시하는 십자 용접부(Cruciform joint)의 경우 경계조건 등의 문제로 실제로 적용하기에는 어려움이 있다.

$$SCF = 1 + \frac{6(\delta_m + \delta_t - \delta_0)}{t \left(1 + \frac{T^{1.5}}{t^{1.5}} \right)} \quad (1)$$

여기서

δ_m = 최대 제작 가능 공차

δ_t = 두께 공차, $1/2(T-t)$

δ_0 = S-N곡선에 이미 포함된 공차, 0.1t

T = 두꺼운 판의 두께

t = 얇은 판의 두께

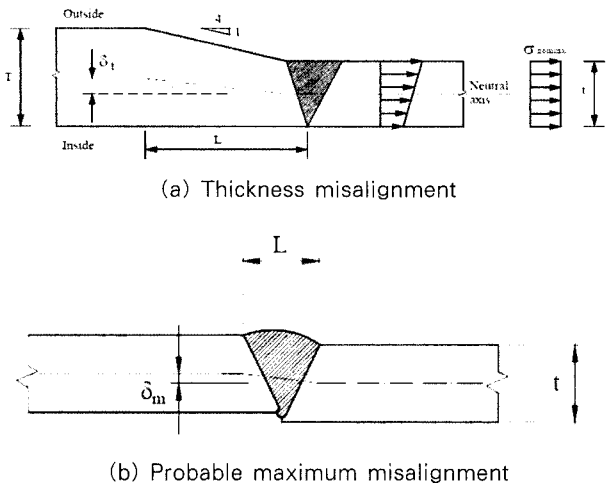


Fig. 3 Definitions of thickness misalignment and probable maximum misalignment (DNV, 2006)

2.6 부식여유(Corrosion margin)

FPSO의 경우 선급 규정에서 제시하는 부식여유(Corrosion margin) 외에 선주의 부식여유가 별도로 존재한다. 가동 수명 동안 부식에 의한 피로강도의 저하(Gradual degradation)를 고려하기 위해서는 미소시간(Infinitesimal life)에 대한 피로 수명을 적분하여 전체 피로수명을 평가해야 한다. 그러나 스펙트럴 피로해석의 방대한 연산량을 감안하면 적절한 크기로 수명을 증분(Finite increment)하여 피로강도를 평가하는 것이 현실적이다. FPSO의 경우 가혹한 부식 여유뿐만 아니라 피로 안전율이 최소 2.0에서 최대 10.0까지 다양하게 요구된다. 따라서 안전율과 부식여유를 모두 고려한 피로강도를 만족시키려면 상당한 설계변경이 요구되며, 따라서 납기 지연, 중량 증가 등의 부차적인 문제가 야기될 수 있다. 부식여유를 고려한 정량적인 피로해석법과는 별도로 실제 구조물에 대한 부식의 크기를 정량적으로 평가하는 작업이 선행되어 선주의 엄격한 요구에 대응하는 연구도 병행되어야 할 것으로 사료된다.

2.7 모리슨 하중(Morison loads)

통상적으로 선측외판에 부착되는 라이저 또는 케이슨과 같은 세장 구조물(Slender structure)의 경우 선체의 변형(Hull girder deflection)과 라인 하중을 피로수명을 위한 하중으로 적용하고 있다. 그러나 근래들어 선체의 운동으로 인하여 세장체가 경험하는 모리슨 하중(Morison load)을 별도로 적용할 것을 요구받고 있다. 세장체에서 모리슨 하중을 정의하기 위해서는 조류 등의 속도뿐만 아니라 해당 세장체의 평면도(Plan view)상에서 세장체의 위치에 따른 상대 속도장(Relative

velocity field)과 상대 가속도장(Relative acceleration field)을 동유체력 해석으로부터 도출하여야 한다. 현재 상용화된 피로해석 프로그램은 모리슨 하중을 구조해석모델에 정의하기 위한 별도의 인터페이스가 갖추어져 있지 않으며 따라서 모리슨 하중을 피로하중으로 정의하기 위해서는 상당량의 부가적인 시간과 노력을 기울여야 한다. 이때 중요한 사항은 동유체력 프로그램에서 사용하는 파형(Wave profile)과 모리슨 하중을 정의하기 위한 파형이 서로 같은 위상을 갖도록 일치 시켜야 한다는 점이다.

3. 스펙트럴 피로해석의 기본이론

3.1 하중전달함수(LTF, Load Transfer Function)

파랑으로 인하여 발생하는 부유식 해양구조물의 응답(운동, 하중)은 불규칙파(Irregular wave)를 규칙파(Regular wave, 또는 정현파 Sinusoidal wave)들의 선형 중첩으로 표현할 수 있다는 가정으로부터 출발한다. 단위 진폭(Unit amplitude of wave)을 가지는 정현파를 운동해석 모델에 입사시켜 운동해석모델의 응답을 구하고 불규칙 해상상태에 대한 통계자료를 이용하여 수학적으로 정현파에 대한 응답함수를 단기, 장기간의 기대치로 확장하여 불규칙 해상에서의 응답 및 하중을 구하게 된다. 운동방정식으로부터 구한 모든 응답(운동, 하중)은 복소수(Complex) 또는 삼각함수의 형태로 나타낼 수 있다. 복소수 형태로 표시하면 실수부(Real), 허수부(Imaginary) 성분으로 나타낼 수도 있고, 일반 삼각함수 형태로 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$R(\omega) = \begin{cases} A(\text{Real} + i \text{Imag}) \\ A(\text{Real} \cos(\omega t) + \text{Imag} \sin(\omega t)) \end{cases} \quad (2)$$

여기서

$$R(\omega) = \text{응답(운동, 하중)}$$

$$A = \text{단위 파고(Unit wave amplitude, 1.0)}$$

$$\text{Real} = \text{단위 파고에 대한 실수 응답}$$

$$\text{Imag} = \text{단위 파고에 대한 허수 응답}$$

여기서 응답의 RAO와 위상은 식(3) 및 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{RAO}(\omega) = \sqrt{\text{Real}^2 + \text{Imag}^2} \quad (3)$$

$$\phi(\omega) = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{\text{Real}}{\text{Imag}} \right) \quad (4)$$

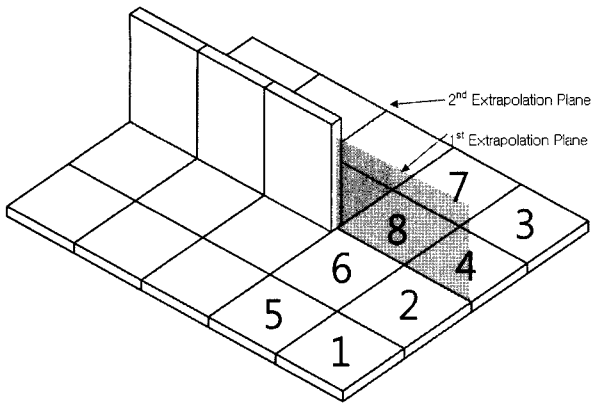


Fig. 5 Example of derivation of hotspot stress when using quadrilateral shell elements with reduced integration scheme

운동방정식으로부터 계산된 모든 응답과 하중은 소위 전달함수(Transfer function) 형태로 나타낼 수 있는데 주파수별 단위 진폭 입력(단위파고)에 대한 출력을 의미한다. 이 전달함수를 파 스펙트럼에 곱하여 응답 스펙트럼을 도출한다. 참고로 하중전달함수(LTF, Load Transfer Function)를 RAO와 위상차로 나타내면 식(5)와 같다.

$$LTF(\omega) = A RAO \cos(\omega t - \phi) \quad (5)$$

완전통계적 스펙트럴 피로해석을 수행할 경우에는 무게 중심에서의 가속도 및 선속외판 압력에 대한 하중전달함수가 필요하고 하중성분 스펙트럴 피로해석을 수행할 경우에는 특정 단면, 외판 압력등의 주요하중(Dominant load)에 대한 하중전달함수가 필요하다.

3.2 응력전달함수(STF, Stress Transfer Function)

운동해석으로부터 도출된 하중전달함수를 구조해석 모델에 적용하여 발생한 응력을 응력전달함수(STF, Stress Transfer Function)라 한다. 스펙트럴 피로해석은 단위진폭의 입사파와 이로 인한 구조물의 응답(응력)이 선형적인 관계를 가진다는 기본적인 가정이 전제되었다. 하중 전달함수를 구하는 방법은 두 가지로 나뉘어진다.

첫째 동유체력 해석을 통하여 구한 하중전달함수(외판 압력, 무게중심 가속도)를 구조해석 모델에 모두 적용시켜서 구조해석을 수행하여 발생한 응력을 응력전달함수로 사용하는 경우이며 이 방법을 완전통계적 방법이라 한다.

둘째 동유체력 해석을 통하여 조우 주파수와 입사각에 따른 종굽힘모멘트, 횡굽힘모멘트, 비틀림모멘트, 외판압력 등의 하중 전달함수를 구한다. 그리고 피로 관심영역이 포

함된 부분 모델에 대하여 조우 주파수와 입사각에 따라서 단위 크기의 종굽힘모멘트, 횡굽힘모멘트, 비틀림모멘트 등을 각각 부여하여 각 하중성분에 따른 응력의 성분을 구한 후 하중전달함수를 곱하여 응력 전달함수로 사용하는 경우이며 이 방법을 하중성분법이라 한다.

피로해석의 관점에서 응력전달함수는 특정 하중조건에서 입사각별-주파수별로 존재하며 위상차 정보는 더 이상 가질 필요가 없다. 식(6)을 이용하여 최대주응력과 최소주응력에 대한 정보만을 취하기 때문이다.

$$STF(\omega) = A RAO \cos(\omega t - \phi) \quad (6)$$

이때 사용될 수 있는 응력은 어떠한 S-N선도를 적용하는가에 따라서 달라지는데, DNV-RP-C203에서 제시하는 D곡선은 Hotspot에 대한 S-N곡선이며 이를 이용할 경우 Hotspot응력을 STF로 정의해야 한다.

Hotspot응력의 도출은 Fig. 4에서와 같이 적분점(Gauss point)에서의 응력을 선형 외삽/평균을 취한 후 0.5t와 1.5t에서 Hotspot에 다시 선형외삽하는 방법을 DNV는 제시하였다.

4적분점을 가지는 4절점 셀요소(Full integration element)의 경우 계산 시간 과다, 전단잠금(Shear locking)과 같은 문제점으로 인하여 1적분점을 가지는 감차적분요소(Reduced integration element)를 사용하는 것이 권장되며 이 경우 중심 1적분점에서의 응력을 이용해야 한다. 4적분점을 가지는 완전적분요소(Full integration element)를 사용하더라도 Nastran, Ansys와 같은 상용 구조해석 프로그램의 경우 적분점에서의 응력을 제시하지 않으므로 Fig. 2에서 제시한 방법을 사용할 수 없다. 이 경우에도 감차적분요소의 경우와 마찬가지로 요소의 중심응력 (Stress at center)을 이용해야 한다.

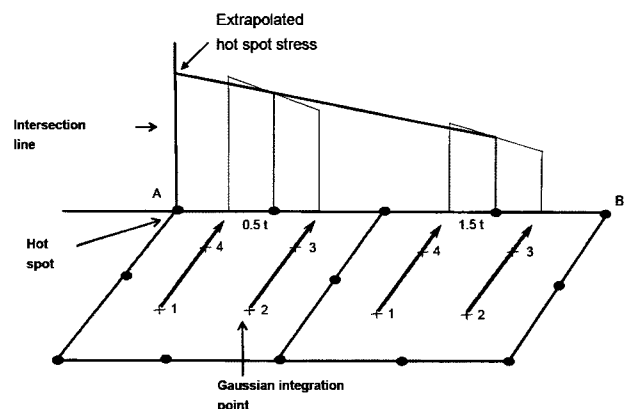


Fig. 4 Example of derivation of hotspot stress when using quadrilateral shell elements with full integration scheme (DNV, 2005)

따라서 Fig. 5에서와 같이 Hotspot 주변의 요소를 이용하여 보라색 평면(1st extrapolation plane)에 외삽 후 평균을 취하고 다시 노란색 평면(2nd extrapolation plane)에 외삽하는 방법이 권장된다.

도출된 Hotspot 응력에 식(7)을 이용하여 평균응력 효과를 고려할 수 있다. 변동하중만 작용할 경우 최대주응력(σ_t)과 최소주응력(σ_c)은 위상의 변화 동안 즉 시간영역에서 완벽한 대칭성을 보여주지만 정적하중이 동시에 작용할 경우 평균응력이 0이 아니므로 이를 고려하는 것이 물리적으로 타당하다. 그러나 평균응력이 피로손상에 미치는 영향이 매우 크므로 신중히 평균응력 효과를 고려해야 한다. 식(7)에서 모재부일 경우에 $\zeta = 0.6$, 용접부일 경우에 $\zeta = 0.7$ 을 통상 적용한다(DNV 2003, DNV 2005).

$$f_m = \frac{\sigma_t + \zeta \sigma_c}{\sigma_t + \sigma_c} \quad (7)$$

축하중을 가할 때와 굽힘응력을 가할 때 발생한 최대응력이 같더라도 최대응력을 경험하는 체적이 축하중을 받을 때 크기 때문에 동일한 시편에 대하여 굽힘시험으로부터 얻어진 피로수명이 축하중을 가하여 얻어진 피로수명보다 큰 것으로 알려져 있으며 약 70% 정도 응력수정을 실시하여 피로강도를 평가한다. 셀요소에 발생한 면내응력은 면내하중에 의하여 유발된 면내응력(Axial stress, $\sigma_{a,hotspot}$)과 굽힘응력(Bending stress, $\sigma_{b,hotspot}$)으로 나누어지며 DNV(2005)는 식(8)에서 보는 바와 같이 굽힘응력의 60%를 보정응력으로 제시하였다.

$$\Delta\sigma_{hotspot} = \Delta\sigma_{a,hotspot} + 0.6\Delta\sigma_{b,hotspot} \quad (8)$$

3.3 파 스펙트럼(Wave spectrum)과 응력 스펙트럼(Stress spectrum)

운동해석에서 구한 응답은 단위 진폭(Unit amplitude), 단순조화파(Regular wave)에 대한 응답이기 때문에 실제 해상 상태인 불규칙파에 대한 응답으로 표현하기 위해서 필요한 단기해석이 필요하다. 단기해석은 특정 지역의 해상상태가 보통 약 30분에서 4시간까지 지속적으로 유지된다는 사실에 근거하여 단기시간 동안 해상상태를 통계적 특성치로 표현함을 의미한다. 불규칙 해상상태를 통계적 특성치로 표현하기 위해서는 불규칙 해양파는 서로 다른 파장과 파고를 갖는 규칙파의 선형 중첩(Linear superposition)으로 표시되고,

파면(Wave elevation)은 협대역(Narrow-banded)이고 평균이 0인 정규 분포(Normal distribution)를 따르고, 파고의 분포는 Rayleigh 분포를 따른다는 가정이 필요하다.

파 스펙트럼(Wave spectrum, S_W)의 물리적인 의미는 파가 가지고 있는 에너지이지만 해상 상태를 시간영역에서 주파수 영역으로 바꾸어 표시해주는 기능을 수행한다. 파 스펙트럼은 특정 해역에 대한 계측 자료를 토대로 만들어지는데, 현재 가장 널리 쓰이고 있는 표준 스펙트럼은 P-M(Modified Pierson-Moskowitz) 스펙트럼으로서 북대서양(North Atlantic)에서 완전히 발달한 해상상태(fully developed sea)를 나타내고 있다. 반면에 Jonswap 스펙트럼은 완전히 발달된 파도가 아니므로 P-M 스펙트럼보다 고점(Peak)이 높고 좁더 협대역이다. 식(9) 및 식(10)는 각각 P-M 스펙트럼 및 Jonswap 스펙트럼을 나타낸다.

$$S_W(\omega | H_S, T_Z) = \frac{4H_S^2 \pi^3}{T_Z^4 \omega^5} \exp\left[\frac{-16\pi^3}{T_Z^4 \omega^4}\right] \quad (9)$$

$$S_W(\omega | H_S, T_P) = \alpha \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_P}\right)^4\right] \exp\left[-0.5\left(\frac{\omega - \omega_P}{\sigma_{\omega_P}}\right)^2\right] \gamma \quad (10)$$

ω = 각주파수(Angular frequency)

ω_P = 피크 각주파수(Peak angular frequency)

H_S = 유의파고(Significant height)

T_Z = 영점교차주기(Zero-crossing frequency)

T_P = 피크주기(Peak period)

α = 필립스 상수(Generalized Philips' constant)

$$\frac{5H_S^2 \omega_P^4}{16} A_\gamma$$

A_γ = 스펙트럼 폭 계수(Width parameter)

$$\begin{cases} 0.07 & \text{for } \omega \leq \omega_P \\ 0.09 & \text{for } \omega > \omega_P \end{cases}$$

γ = 피크계수(Peak parameter)

여기서 피크주기와 영점교차주기는 피크계수에 따라서 아래와 같은 관계를 가진다.

$$T_Z = T_P \left(\frac{5+\gamma}{11+\gamma} \right)^{0.5} \quad (11)$$

불규칙 해양파를 파 스펙트럼으로 나타내었다면 불규칙 해양파에 대한 응답(응력)도 역시 스펙트럼(Stress spectrum, S_σ)으로 나타낼 수가 있다. 이를 수식으로 식 (12)와 같이 표현된다.

$$S_\sigma(\omega | H_S, T_Z) = \frac{|STF(\omega | H_S, T_Z)|^2}{S_W(\omega | H_S, T_Z)} \quad (12)$$

스펙트럼으로 나타내어진 파는 주파수의 함수이므로 방향성에 대한 고려는 하지 않는다. 그런데 실제 해상에서의 파 스펙트럼은 1차원 장파장(Long crest)이라기 보다는 입사각을 중심으로 여러 방향의 파가 중첩되어 나타나는 2차원적인 분포를 보인다. 따라서 위에서 주어진 식 (9) 또는 식 (10)에 스펙트럼의 방향성을 고려한 방향분포함수 (Wave spreading function)를 이용하여 단파정(Short crest)을 반영한 스펙트럼을 최종적으로 적용하게 된다. 그러나 스펙트럼 피로해석을 위한 파의 방향성($f(\varphi)$)은 파스펙트럼 보다는 보통 응력 스펙트럼의 차 모멘트(m_k)에 대하여 고려한다.

$$m_k = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(\varphi) d\varphi \int_0^\infty \omega^k S_\sigma(\omega | H_S, T_Z, \theta) d\omega \quad (13)$$

여기서 방향분포함수는 식 (14)와 같으며, 승수 n 이 클수록 방향분포는 원래의 입사각(θ)에 집중된다.

$$f(\varphi) = K \cos^2(\theta) \quad (14)$$

계수 K 는 식 (15)를 가지고 주변 입사각에 대한 적분을 미리 수행하여 구할 수 있다.

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) d\theta = 1.0 \quad (15)$$

3.4 단기 손상율(Short-term fatigue damage)

단기 피로 손상(d)은 Palmgren-Miner의 선형누적원리, S-N곡선 그리고 응력범위(Stress range, $\Delta\sigma$)의 연속 확률밀도함수($f(\Delta\sigma)$)를 이용하여 식 (16)과 같이 나타낼

수 있다.

$$d = \frac{n_0}{a} \int_0^\infty f(\Delta\sigma) \Delta\sigma^m d\Delta\sigma \quad (16)$$

여기서

m = S-N 선도의 기울기

$\log \bar{a}$ = 축의 절편

n_0 = 응력 진폭의 빈도수

전술한 바와 같이 파고는 Rayleigh 분포를 따르므로 파랑에 의하여 발생한 응력의 범위도 역시 Rayleigh 분포를 따른다면 연속확률밀도함수는 식 (17)과 같이 표현된다.

$$f(\Delta\sigma) = \frac{\Delta\sigma}{4(m_0)} \exp\left(-\frac{\Delta\sigma^2}{8(m_0)}\right) \quad (17)$$

i 번째 입사각에서 파 빈도분포의 j 번째 해상상태에 대한 피로 손상(d_{ij})은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{ij} = \frac{v_{ij} T_d P_{ij}}{\bar{a}} \int_0^\infty f(\Delta\sigma)_{ij} \Delta\sigma^m d\Delta\sigma \quad (18)$$

v_{ij} = i 번째 입사각 및 j 번째 해상상태에서의 영점교차 주파수 (Zero-crossing frequency)

$$= v_{ij} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2ij}}{m_{0ij}}}$$

T_d = 설계수명 [sec]

P_{ij} = i 번째 입사각, j 번째 해상상태에서의 확률

보통 두 개의 기울기를 가지는 S-N곡선을 사용하는 경우 식 (18)의 적분은 식 (19)와 같이 수치적분을 수행하는 것이 편리하다.

$$\int_0^\infty f(\Delta\sigma)_{ij} \Delta\sigma^m d\Delta\sigma = \sum_{k=0}^\infty f(\Delta\sigma_k)_{ij} \Delta\sigma_k^m (\Delta\sigma_k - \Delta\sigma_{k-1}) \quad (19)$$

여기에 판두께효과(Thickness effect)를 고려하게 되면

식 (20)과 같이 쓰여질 수 있다.

$$d_{ij} = \frac{v_{ij} T_d P_{ij}}{\bar{a}} \int_0^{\infty} f(\Delta\sigma)_{ij} \beta^m \Delta\sigma^m d\Delta\sigma \quad (20)$$

$$\beta = \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^\xi \quad (21)$$

여기서

t_{ref} = 기준두께 (통상 25mm 기준)

ξ = 두께지수 (Thickness exponent)

Wirsching(1987)에 의하면 해양파의 파면이 협대역 분포를 한다는 가정으로 인하여 피로손상이 과대평가되는 경향이 있음을 밝혔다. 이를 보정하기 위한 계수를 Wirsching 보정계수(λ)라 하며 아래의 식으로 나타낼 수 있다. 그러나 식 (22)는 1개의 고점을 가지는 파스펙트럼에 주로 적용 가능하며, 다중고점을 가지는 Ochi-Hubble 스펙트럼의 경우 적용성이 결여되는 것으로 알려져 있다.

$$d'_{ij} = \lambda_{ij} d_{ij} \quad (22)$$

$$\lambda_{ij} = a + (1-a)(1 - \varepsilon_{ij})^b \quad (23)$$

$$a = 0.926 - 0.0333m$$

$$b = 1.587m - 2.323$$

$$\varepsilon_{ij} = \sqrt{1 - \frac{m_{2ij}^2}{m_{0ij}m_{4ij}}}$$

3.5 장기 손상률 (Long-term fatigue damage)

단기해석에서 구한 통계 특성치는 주어진 입사각과 파 스펙트럼이 일정한 단기 해상상태에서의 값만을 표시하고 있다. 하지만 실제로 FPSO는 가동 수명동안 다양한 해상상태를 만나기 때문에 이를 반영할 수 있는 장기해석이 필요하다. 응답의 장기해석을 위해서 우선적으로 필요한 것이 해상상태 계측 자료(WSD)이다. 특정 지역에 대해 장기간의 실측을 통해 축적된 자료를 바탕으로 특정 지역에서 가동되고 있는 FPSO의 장기 응답을 구한다. 여러 개의 하중조건(Loading condition)을 고려한 장기 손상률

은 식 (24)와 같이 단기손상률을 합산하여 장기손상률을 산출한다.

$$D = \sum_k \sum_i \sum_j P_k P_{ij} d_{kij} \quad (24)$$

여기서 k는 하중조건을 의미한다.

4. 부유식 해양구조물 스펙트럴 피로해석 프로그램 개발

4.1 개발 동기

전술한 바와 같이 부유식 해양구조물에 대한 스펙트럴 피로해석을 수행하기 위한 프로그램은 각 선급마다 필요에 의하여 개발하여 사용하고 있지만 상용화 단계에 이른 프로그램은 DNV에서 판매하는 Sesam/Stofat이 거의 유일하다. 건조사의 입장에서 Sesam을 구조강도/피로강도 평가를 위한 통합 시스템으로 운영하기는 몇가지 측면에서 문제점이 발생한다. 첫째 해양구조물 산업의 특성상 많은 협력업체(Outsourcing) 인력이 동원되어야 한다. 그러나 Sesam은 범용 소프트웨어도 아니고 매우 고가이기 때문에 협력업체로부터 숙련도를 보유한 엔지니어를 수배하기 어렵다. 둘째 Sesam 시스템은 범용 소프트웨어에 비하여 사용자 친화성이 많이 결여되어 구조 모델링에 많은 애로점이 발견된다. 물론 Sesam/Patran연동 프로그램도 제공되고 있지만 2004년 이후로 업그레이드가 거의 중단된 실정이고 또한 추가적인 비용을 지불해야 한다.

일부 건조사의 경우 하중성분법 스펙트럴 피로강도 프로그램을 개발하여 일원화된 시스템을 운영하기도 하지만 대부분의 건조사의 경우 구조강도는 Nastran/Patran등의 범용 소프트웨어를, 피로강도는 Sesam을 이용하는 이원화된 구조 엔지니어링을 수행하고 있다. 이 경우 솔버간의 데이터 포맷 호환성 문제로 많은 시간을 소모하는 부가적인 문제점이 발생하는 것이 사실이다.

검증된 범용 구조해석 솔버를 이용한 완전통계적 스펙트럴 피로해석 프로그램이 개발될 경우 구조강도와 피로강도가 통합되어 운영될 수 있는 장점이 있다. 또한 전술한 바와 같이 선주의 요구는 갈수록 기술적으로 심화되고 있으며 심지어 최신의 학술적인 내용까지 요구하는 경우도 있다. 예를 들어 스펙트럼의 조합이라던가 또는 모리슨 하중의 조합 등을 상용 프로그램을 이용하여 해결하려면 상당히 많은 후처리

작업이 필요하고 따라서 설계 공기의 지연을 초래할 가능성이 높다. 건조사가 자체개발 피로해석 프로그램을 보유할 경우 기술적으로 완전히 정립되지 않은 부분에서 기술적 주도권 (Technical initiative)을 건조사가 가져갈 수 있다. 따라서 당사는 이러한 선주의 요구에 유연하고 신속하게 대응하기 위해서 자체적인 피로강도 평가프로그램을 개발하였다.

예를 들어 응력 스펙트럼의 분산(m_0)을 적분할 때 이미 결정된 주파수 구간에서 초기치(또는 최종치)를 설정하는 방법에 따라서 분산의 값이 비교적 변동적이다. DNV(2005)에 의하면 평균응력의 효과를 모재부 외에 용접부에서도 적용할 것인가에 대하여도 별도의 언급은 없기 때문에 기술적인 결정은 개발자의 권한으로 남겨져 있다. 또한 Hotspot응력을 추출할 때 외삽/평균/외삽을 취할 것인가 또는 외삽/최대/외삽을 취할 것인가에 따라서 피로손상이 미치는 영향이 매우 크다. 이러한 이유로 인하여 건조사가 독자적인 스펙트럴 피로해석 프로그램을 보유함으로써 가져갈 수 있는 기술적 주도권은 상당히 크다고 볼 수 있다.

본 연구에서 개발된 프로그램은 기본적으로 Sesam/Wadam을 이용하여 계산된 동유체력 하중전달함수를 MSC/Nastran의 외력(선축외판 압력 및 가속도 성분)으로 변환하는 Load RAO Mapping Module, MSC/Nastran의 입력파일인 BDF 파일을 스펙트럴 피로해석이 가능하도록 편집해주는 BDF Manager Module, 셸요소에 대한 구조해석 결과파일을 이용하여 스크리닝 스펙트럴 피로해석을 수행할 수 있는 Screening Analysis Module 그리고 Hotspot에 대하여 스펙트럴 피로강도를 평가하는 Refined Analysis Module의 4개로 나뉘어진다. 개발프로그램을 MSC/Patran에 탑재하므로써 사용자 친화도를 극대화 하도록 하였다.

4.2 Load RAO Mapping Module

4.2.1 Inertia Mapping

Sesam/Wadam으로부터 생성되는 이동가속도 성분과 회전가속도 성분을 구조모델에 매핑하기 위해서 가속도의 중심을 나타내는 국부좌표계 및 가속도 성분별 보정계수를 사용자가 지정할 수 있도록 하였으며 별도의 가속도 하중 파일로 생성된다. 이때 이동가속도의 경우 MSC/Nastran의 GRAV 카드를 이용하여 관성력을, 회전가속도의 경우 RFORCE 카드를 이용하여 원심력을 표현하였다.

4.2.2 Pressure Mapping

선박과 같이 선수미부의 곡률 변화가 심한 경우 패널에서 발생한 압력을 유한요소에 직접 매핑하면 내외력간에 불평형력이 발생할 수 있다. 이러한 문제로 인하여 패널압력을 절점

력으로 치환하여 불평형력이 발생하지 않도록 보정하여 매핑하는 방법이 널리 이용된다. 그러나 대부분 FPSO의 경우 곡률이 없는 선형이므로 패널 압력을 요소압력으로 매핑하여도 불평형의 문제는 거의 발생하지 않는다. 그러나 본 프로그램에서는 별도의 보정계수를 지정하도록 하여 불평형이 발생 시 보정이 가능하도록 하였다. 저자의 경험에 의하면 압력을 절점력(MSC/Nastran FORCE 카드)으로 구현할 경우 하중 파일이 적게는 수 백 MB에서 많게는 수 십 GB까지 용량이 커지므로 구조해석 시간이 상당히 증가하고 또한 파일관리의 문제가 많이 발생함을 확인할 수 있었다. 패널 압력을 직접 압력(MSC/Nastran PLOAD4 카드)으로 매핑할 경우 최대 크기가 수 십 MB 정도로 효율적인 구조해석이 가능하다.

4.2.3 Line Load Mapping

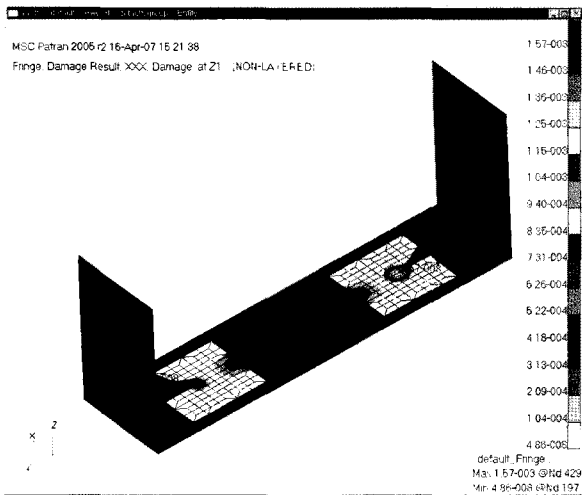
선하중의 경우 별도의 절점력으로 하중변환이 필요하다. 이 경우에도 각 절점에서의 하중전달함수를 FORCE 카드로 변환하여 별도의 하중파일로 생성할 수 있도록 하였다. 동유체력해석으로부터 계산된 상대속도 및 상대가속도 RAO를 모리슨 하중으로 자동으로 계산하여 보요소에 절점에 매핑하는 모듈이 개발되었다. 공간상에서 수직 세장체가 아니라도 입사각의 변화에 따른 모리슨 하중의 변화를 3차원적으로 고려할 수 있다.

4.2.4 Deflection Mapping

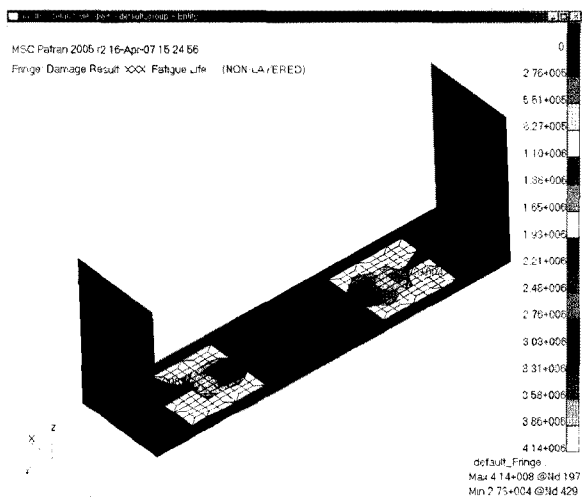
변위의 매핑 모듈은 전체-국부 해석(Global-local analysis)을 위하여 개발되었다. 가속도, 압력, 선하중 등과 달리 전체모델(Global coarse model)에 대한 구조해석을 일차적으로 수행한 후 국부모델(Local fine model)의 경계절점에 변위를 매핑하여 구조해석의 효율성을 상당히 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 개발된 변위 매핑 모듈은 전체모델의 출력 절점과 국부모델의 경계 절점을 공간상의 위치로 탐색하므로써 절점 번호가 서로 상이한 경우에도 변위 매핑이 가능하도록 하였다. 또한 두 모델간 절점의 위치가 일치하지 않는 경우에도 주변 절점을 이용한 보간을 통하여 모든 경계절점에서의 변위 매핑이 가능하도록 하였다. 보통 셸요소의 경우 절점의 회전변위는 사용하지 않는다. 그러나 보요소로 모델링된 상부구조 피로해석을 수행할 경우에는 절점의 이동변위 뿐만 아니라 회전변위도 반드시 고려되어야 하기 때문에 회전변위를 선택적으로 고려할 수 있도록 개발되었다.

4.3 BDF Manager Module

BDF파일은 MSC/Nastran의 입력파일을 의미하는데, 입사각, 주파수 및 위상에 따른 수백개(또는 수천개)의 로



(a) Fringe of damage at top surface



(b) Fringe of fatigue life

Fig. 6 Example of damage visualization

드케이스를 수동적으로 작성하기에는 사용자의 오류의 소지가 많고 또한 많은 시간을 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 BDF를 손쉽게 핸들링할 수 있는 BDF Manager Module이 개발되었다. 본 모듈을 이용하면 하중 조건별로 BDF 파일이 생성되기 때문에 따라서 각 로드케이스별로 BDF를 작성할 때 보다 해석시간이 매우 단축될 수 있다. 그러나 한 개의 하중조건에 대한 결과가 한 개의 결과파일(PCH 파일)에 저장되므로 출력절점 및 출력요소에 대한 각별한 관리가 필요하다.

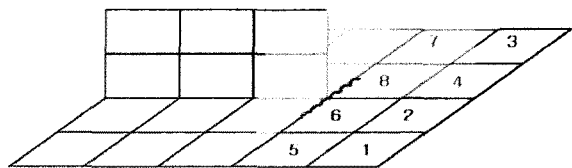
4.4 Screening Analysis Module

부유식 해양 구조물의 경우 스크리닝이 매우 중요한 과정이다. 그러나 스크리닝은 경험과 직관에 많이 의존하고 있으며 간이해석법 또는 하중성분법 스펙트럴 피로해석을 이용하여 스크리닝을 수행할 수도 있다. 그러나 대부분의 건조사, 선급

또는 엔지니어링사 등도 경험과 직관에 주로 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 개별적 요소에 대한 완전통계적 스펙트럴 피로해석을 자동적으로 수행할 수 있도록 하였다. 즉 Hotspot을 미리 경험 및 직관적으로 미리 정의하는 것이 아니라 피로 강도가 의심스러운 모든 부분에 대하여 개별적 요소별로 피로손상율을 계산하여 피로에 취약한 지점 즉 Hotspot을 선별하도록 하였다. 이 방법의 장점은 피로취약부를 간과하는 경우가 절대로 발생하지 않는다는 점이다. 그러나 계산시간이 매우 방대하므로 피로강도가 의심되는 부분에 대해서만 계산을 수행해야한다. 본 프로그램에서는 피로 손상을 수치값으로만 확인하는 대신에 피로손상율과 피로수명을 가시화(Visualization)시켜 실제로 손상에 취약한 부분을 그래픽하게 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 6은 피로 손상율과 피로수명을 가시화한 예를 나타내고 있다.

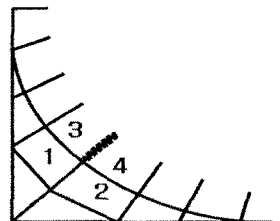
4.5 Refined Analysis Module

본 모듈은 hotspot에서의 피로손상을 계산하기 위한 모듈이다. 비연속적인 입사각을 가지는 구조해석결과에 대해서도 방향분포함수를 고려할 수 있도록 프로그램이 개발되었다. 용접부의 경우 제작공차로 인한 응력집중계수를 자동으로 계산 후 응력전달함수에 직접 고려하도록 프



- Type 1 : Main Plate - 8 Element Symmetry
 (1) Extrapolation On To Purple Plane ($\sigma_1 \rightarrow \sigma_2 = \sigma_a, \sigma_3 \rightarrow \sigma_4 = \sigma_b, \sigma_5 \rightarrow \sigma_6 = \sigma_c, \sigma_7 \rightarrow \sigma_8 = \sigma_d$)
 (2) Averaging (σ_a, σ_b) = $\sigma_A, (\sigma_c, \sigma_d)$ = σ_B
 (3) Extrapolation On To Yellow Plane ($\sigma_A \rightarrow \sigma_B = \sigma_{hot}$)

(a) Type 01



- Type 12 : Parent - 4 Element Symmetry
 (1) Averaging (σ_1, σ_2) = $\sigma_A, (\sigma_3, \sigma_4)$ = σ_B
 (2) Extrapolation On To Yellow Plane ($\sigma_A \rightarrow \sigma_B = \sigma_{hot}$)

(b) Type 12

Fig. 7 Example of hotspot types

로그그램을 개발하였다.

또한 스크리닝을 통하여 피로취약부가 탐색된다 하더라도 브라켓 토우와 같이 전형적인 피로 취약부가 아니라면 설계자가 잠재적 균열(Potential crack)의 방향을 예측하여 Hotspot응력을 정확히 작성하기는 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 프로그램에서는 Hotspot의 유형을 12개로 정형화하여 설계자가 용이하게 Hotspot응력을 추출할 때 발생하는 오류를 최소화 하였다. Hotspot의 정형화는 용접부와 모재부를 구분하므로써 평균응력의 효과가 별도로 고려될 수 있는 장점이 있다. Fig. 7은 정형화된 유형의 일부(Type 1, Type 12)를 나타내고 있다.

참고문헌(DNV 2005)에 의하면 ± 60 도이내의 모든 응력을 투영없이 적용할 것을 권장하지만 이는 물리적으로 타당하지 않다. 왜냐하면 각 입사각 또는 하중조건별로 최대주응력의 방향이 변동적이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 ± 60 에 대하여 10도 간격으로 피로손상을 계산하여 임계각도(Critical angle)를 자동적으로 탐색하도록 하였다.

5. 결 론

부유식 해양구조물의 피로해석 관련한 기술적 쟁점 즉 해상 상태, 스펙트럼 조합, 용접, 스크리닝, 제작공차, 세장체 하중 등에 대한 쟁점을 건조사의 경험 및 실적을 바탕으로 선박과 비교하여 고찰하였다. 또한 스펙트럴 피로해석을 위하여 필요한 기본이론을 단계적으로 기술하고 기술의 타당성 등에 대하여 논의하였다. 본 연구에서는 위에서 언급한 대부분의 기술적 쟁점을 포괄적으로 해결할 수 있는 완전통계적 스펙트럴 피로 해석 프로그램을 개발하였다.

참 고 문 헌

Bannatine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L. (1990), "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall

Dean, R.G., and Dalrymple, R.A. (1991), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", Prentice Hall

Bergan, P.G. and Lotsberg, I. (2004), "Advances in Fatigue Assessment of FPSOs", Proc. OMAE-FPSO'04-0012.

DNV, 1999, "ExxonMobil Development Company-FPSO Fatigue Methodology Specification", Report No. 99-3503.

DNV, 2003, Fatigue Assessment of Ship Structures, Classification Notes No. 30.7.

DNV, 2005, Fatigue Design of Offshore Steel Structures, DNV-RP-C203.

DNV, 2006, Fatigue Methodology of Offshore Ships, DNV-RP-C206.

Fricke, W. (2002). "Recommended Hot-Spot Analysis Procedure for Structural Details of Ships and FPSOs Based on Round-Robin FE Analyses", Int J Offshore Polar Eng, Vol.12, No.1, pp 40-47.

Lotsberg, I. (2006), "Fatigue design of plated structures using finite element analysis", J. Ships and Offshore Structures, Vol. 1, pp 45-54.

Ochi, M.K. and Hubble, E.N. (1976). On six-parameters wave Spectra, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., Vol 1, pp 301-328

Wang, X., Cheng, Z., Wirsching, P.H. and Sun, H., "Fatigue design factors and Safety Level Implied in Fatigue Design of Offshore Structures", Proc. OMAE, pp 35-40.

Wirsching, P.H., Ortiz, K., and Chen, Y.N.(1987), "Fracture Mechanics Fatigue Model in a Reliability Format", Proc. of OMAE, Vol.3, pp 331-337. 