

# 해양플랫폼 탑사이드 모듈의 해상 운송 시 국부 보강을 통한 피로 수명 개선에 관한 연구

장호윤\* · 서광철\*\* · 박주신\*\*\*\*

\* 중소조선연구원 친환경선박연구본부 책임연구원, \*\* 목포해양대학교 조선해양공학과 교수,  
\*\*\* 삼성중공업 중앙연구소 수석연구원

## Improvement of Fatigue Life with Local Reinforcement for Offshore Topside Module during Marine Transportation

Ho-Yun Jang\* · Kwang-Cheol Seo\*\* · Joo-Shin Park\*\*\*\*

\* Senior Researcher, Green-ship Research Division, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Busan 46757, Korea  
\*\* Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea  
\*\*\* Principal Engineer, Central Research Institutes, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 해양플랫폼의 탑사이드 구조에서 주로 채택하고 있는 파이프 연결 구조의 피로 수명 증가를 위한 방안을 찾기 위하여, 유한요소해석을 수행하였다. 상용해석프로그램인 MSC Patran/Nastran을 적용하였으며, 대표적인 중앙부 구조 형상을 해석 모델로 선정하였다. 하중에 따른 응력집중 현상을 구현하기 위하여, 8절점 솔리드 요소를 이용한 모델링을 구현하였다. 주요하중은 횡방향 하중 2가지와 대각선 파이프에 인장 하중을 고려하였다. 주요 위치에서의 Hot spot 응력을 확인하기 위하여, 0.01 mm dummy 셸 요소를 적용하였으며, 0.5 t와 1.5 t 위치에서의 주응력을 계산한 후 외삽법에 따라 용접부에 발생하는 응력을 추정하였다. 일부 구간에서는 만족해야 하는 피로 수명 이하로 평가되어, 보강이 필요하였다. 보강은 기존 설계된 파이프의 두께나 지름을 변경하지 않고, 피로 수명이 부족한 부위에 응력집중계수를 낮출 수 있도록 브래킷을 추가하였다. 인장 하중에 대해서는 bracket toe에서 응력은 23% 증가하였고, 기존에 문제가 된 파이프의 내측, 외측에서의 응력은 약 8% 감소하였다. 휨 하중에 대해서는 bracket toe에서 응력은 3% 증가하였고, 기존에 문제가 된 파이프의 내측, 외측에서의 응력은 약 48% 감소하였다. 신규 브래킷 보강으로 인하여, bracket toe의 응력증가가 발생하였지만, S-N 커브 자체가 파이프 조인트에 비해 좋으므로 큰 문제가 되지는 않는다. 본 연구에서 적용한 국부 보강을 통한 피로 수명 개선 방법은 기존 설계안의 변경을 최소화하면서 피로 수명 증가를 효율적으로 할 수 있다는 점에서 관련 산업에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어 :** 탑사이드, 피로 수명, 브래킷 보강, 용접부, 파이프 조인트

**Abstract :** In this study, finite element analysis was performed to evaluate a method of increasing the fatigue life of the pipe connection structure commonly used in the topside structure of offshore platforms. MSC Patran/Nastran, a commercial analysis program, was used, and the critical structural model was selected from the global analysis. To realize the stress concentration phenomenon according to the load, modeling using 8-node solid elements was implemented. The main loads were considered to be two lateral loads and a tensile load on a diagonal pipe. To check the hotspot stress at the main location, a 0.01 mm dummy shell element was applied. After calculating the main stress at the 0.5-t and 1.5-t locations, the stress generated in the weld was estimated through extrapolation. In some sections, this stress was observed to be below the fatigue life that should be satisfied, and reinforcement was required. For reinforcement, a bracket was added to reduce the stress concentration factor where the fatigue life was insufficient without changing the thickness or diameter of the previously designed pipe. Regarding the tensile load, the stress in the bracket toe increased by 23%, whereas the stress inside and outside of the pipe, which was a problem, decreased by approximately 8%. Regarding the flexural load, the stress at the bracket toe increased by 3%, whereas the stress inside and outside of the pipe, which was also a problem, decreased by approximately 48%. Owing to the new bracket reinforcement, the stress in the bracket toe increased, but the S-N curve itself was better than that of the pipe joint, so it was not a significant problem. The improvement method of fatigue life is expected to be useful; it can efficiently increase the fatigue life while minimizing changes to the initial design.

**Key Words :** Topside, Fatigue life, Bracket reinforcement, Welding joint, Pipe joint

\* First Author : [hyjang@rims.re.kr](mailto:hyjang@rims.re.kr), 051-974-5581

† Corresponding Author : [scv7076@nate.com](mailto:scv7076@nate.com), 055-630-9613

## 1. 서론

해양자원의 시추 및 생산을 위하여 발주되는 해양플랜트 프로젝트는 크게 부유식과 고정식으로 분류할 수 있다. 부유식은 FPSO, FLNG, SPAR 등과 같이 선체 위에 탑사이드 설비가 있으며, 고정식은 설치해역에 잭업 구조물이 고정되어 있고 해상 운송 후, 설치하는 방식이다. 고정식 재킷 상단부에 있는 탑사이드 구조물은 일반적으로 제작 후, Fig. 1과 같이 전용 견인설비에 적재한 후 설치해역으로 이동하게 된다. 이동 시, 다양한 동적 하중을 받기 때문에 견인 구조물은 반복적인 중 급힘 변동 하중이 발생한다. 이러한 하중 조건은 플랫폼 구조에서는 예상치 못한 상황이며, 이러한 하중에 노출된 트러스 부재로 구성된 탑사이드 구조에는 높은 응력 발생으로 인하여 심각한 피로 손상이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 연구와 관련된 기존 유사 연구는 아래와 같이 요약하였다.

Yun et al.(1985)은 해양 고정식 구조물의 불규칙 파랑 하중에 대한 해석기법 중, 주파 수영역과 시간 영역을 이용하여 동적 거동 영향에 대하여 비교 평가하였다. 수심이 다른 2개의 고정식 구조물을 모델로 선택하여 여러 가지 파고 조건에 대한 구조물의 응답을 계산하였다. 두 가지 해석방법의 결과 차이는 10% 이내이며, 비선형성이 커지는 큰 파고 조건에서는 약 5% 정도의 차이를 나타냈다. 이 결과를 통하여 비선형 점섬항의 선형화를 통한 주파수 영역해법이 구조물의 구조 거동을 합리적으로 유추할 수 있음을 확인하였다.

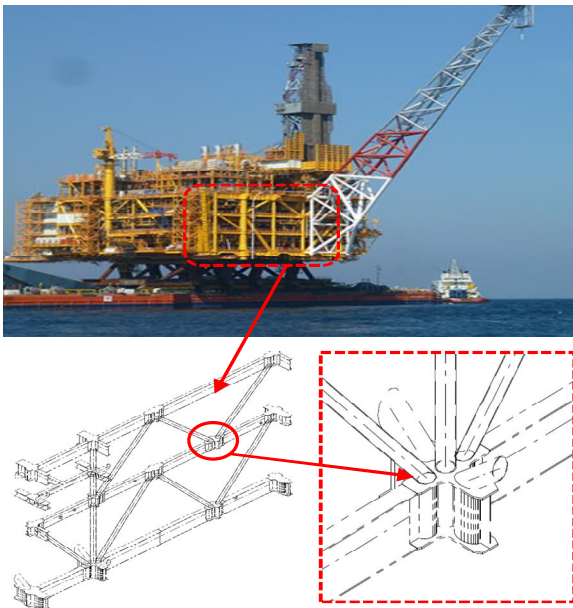


Fig. 1. Typical offshore topside structure and detailed pipe joints.

Kang et al.(2016)은 잭업리프의 해상 운송 시 잭업 장치의 운동 초과에 대한 확률적 운동 분석 및 시스템 확률 추정을 수행하여 병진 및 회전운동 측면에서 구조 안전성을 평가하는 연구를 수행하였다. 시간에 따라 변하는 무작위 변수로 인한 한계 상태 초과 확률을 효율적으로 결정하기 위해 Monte Carlo 기법과 부분 집합 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 결정론적 분석과 확률론적 분석 결과를 분석하였고, 다양한 해상 상태에서 반응 운동 특성치를 극한값 통계 추정을 통하여 추정값을 제안하였다.

Elshafey et al.(2009)은 고정식 재킷 해양구조물의 축적모델의 동적 응답을 이론과 실험 방법을 통하여 연구하였다. 상부 구조물의 무게 변화와 파도 하중의 변화에 따른 특성을 조사하였으며, 실험결과와 이론 계산치는 잘 일치하였다. 이 연구에서는 구조물의 자유 진동 응답을 사용하여 구조물 손상 감지 방법을 개발하는 기초 연구로 수행하였다.

Park(2013)은 해양탑사이드 구조의 극한한계상태 설계법에 주로 사용되는 빔 전용 해석 도구인 USFOS와 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모델링의 차이점 및 좌굴 강도를 포함한 소성 거동을 비교 평가하였다. 단면의 소성 붕괴 강도를 계산하는 결과값은 이론값과 잘 일치하였다. 그러나, 빔 부재의 웹에서 발생하는 국부좌굴 현상은 USFOS에서는 웹 방향 좌굴변형을 제대로 구현하지 못하여, ANSYS 결과와 차이를 보였으며, ANSYS 계산 결과가 이론식의 결과와 유사하게 도출되었다. 연구를 통하여, 구조물의 한계상태설계 시 부재의 웹 좌굴에 대한 평가를 위해서는 셸 요소 기반의 유한요소 모델링이 보다 정확한 결과를 제공할 수 있음을 제안하였다.

Peng et al.(2015)은 Truss-spa 구조물의 해상 운송 조건과 운영 조건에서 시간 이력 및 스펙트럼 피로 분석 방법에 관한 연구를 수행하였다. 내부 시간 이력 피로 손상 계산의 효율성을 위하여 피로 손상 계산의 폐쇄형 솔루션을 기반으로 해상 상태를 압축하는 방식을 도입하였다. 제안된 방법은 수심이 3,000피트 이상인 멕시코만에서 10년 이상 성공적으로 설치 및 운영된 실제 truss-spar 플랫폼에 제공되었으며, BSEE 요구사항에 따라 수중 검사를 시행하고 여전히 문제 없이 잘 운영되고 있다. 본 연구에서 제시한 평가법은 실질적으로 보수적인 접근이며, 플랫폼의 피로 강도 평가에 적절함을 주장하였다.

본 연구에서는 해양 고정식 플랫폼에 사용되는 탑사이드 모듈의 전체 피로 강도 평가를 수행하고, 설계 수명을 만족하지 못한 부위를 선별하여, 최적 보강을 적용한 상세 검토까지를 다루고 있다. 이러한 상세한 과정들은 기존 선행연구에서는 소개되지 않은 내용이며, 이러한 주요 결과들은 유사 엔지니어링 분야에 최적 피로 수명 증가에 관련한 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 2. 운송 시 피로 검토

### 2.1 운송조건

건조가 완료된 해양 탑사이드 구조물이 설치해역까지 이동 시 발생할 수 있는 피로 강도에 대한 영향을 검토하기 위하여 간이 스펙트럴 피로 계산을 MOSES V.7.1(Multi-Operational Structural Engineering Simulator)을 이용하였다. 이 프로그램은 3차원 해석모델링 기반으로 환경 하중에 의한 동적 운동 효과를 자유롭게 구현할 수 있으며, 부유체 운송, 계류, 설치 시뮬레이션 등 다양한 해양플랫폼의 설계 시 사용되고 있다 (Bentley, 2017). Fig. 2는 전용운반선위에 모듈 3개가 배치된 해석 모델링을 MOSES에서 구현하였다.

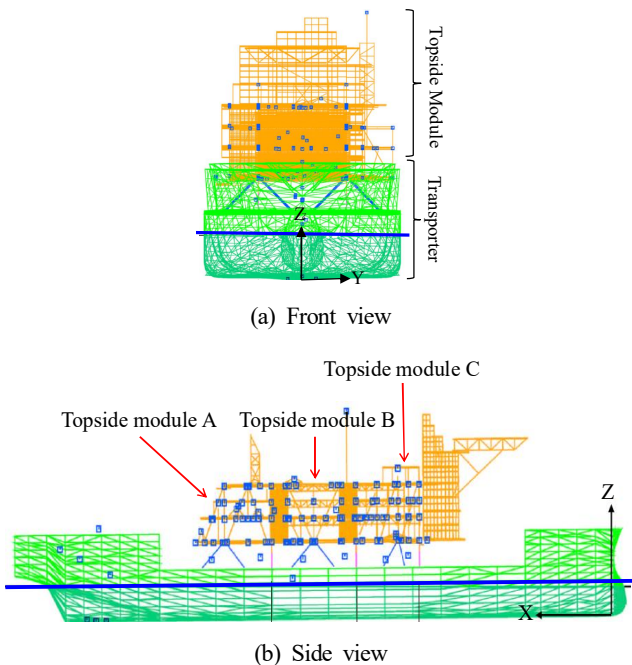


Fig. 2. Transporter and topside module layout in MOSES modeling.

Table 1. Transporter data

Component	Dimension
LOA	216.8 m
LBP	207.6 m
Breath	44.5 m
Depth	14.0 m
Radius of gyration(Rxx)	13.5 m
Radius of gyration(Rxy)	62.7 m
Radius of gyration(Rxz)	63.9 m
Displacement	22,100.0 ton



Fig. 3. Transportation route for offshore topside module.

탑사이드 모듈은 총 3개로 구성되어 있으며, 운송 시 사용된 중량은 10,035톤이다. 이 중량은 구조물, 의장품, 운송 시 사용되는 치공구 장치를 포함하였으며 출항 전 중량보고서를 기준으로 적용하였고, 주요 제원은 Table 1과 같다. 항해 경로는 부산에서 출발하여 수에즈운하를 통과한 후 노르웨이 유전이 위치한 곳까지이며, 평균 12노트의 속도로 이동한다. 항해하는데 제약을 받지 않는 조건에서 약 42일이 소요되며 항해 루트는 Fig. 3과 같다. 해석에 사용된 파랑 스펙트럼은 PM(Pierson-Moskowitz)을 적용하였다. 해상 운송 루트가 대양 항해이기 때문에, 바닥 면에서의 파랑 간섭이 무시될 수 있는 매우 깊은 바다를 가정하였다.

해석에 사용된 파랑 스펙트럼은 스펙트럴 피로 해석에 사용되는 해상조건(파고와 주기 통계수치)은 이동 시점에 해당하는 조사자료를 참고하였으며, 이 자료는 보통 발주처에서 제공하거나, 공개된 해역별 해양데이터를 이용하기도 한다. 이번 연구에서는 발주처(Statoil, 2012)에서 제공한 데이터를 적용하였다. 응력전달함수를 계산하기 위해서, 파랑 입사각을 0도에서 360도 범위에 30도 간격으로 세분화하고, 주파수는 저속 운송에 적합한 0.05~1.2(rad/sec) 범위를 균등하게 나눈 총 41개의 값으로 구성되어 있으며, 이러한 범위의 선정은 선급과의 협의를 통하여 결정하였다. 단위 진폭을 지닌 규칙 파에 대한 응력 응답을 유한요소해석을 통하여 직접 계산하였다.

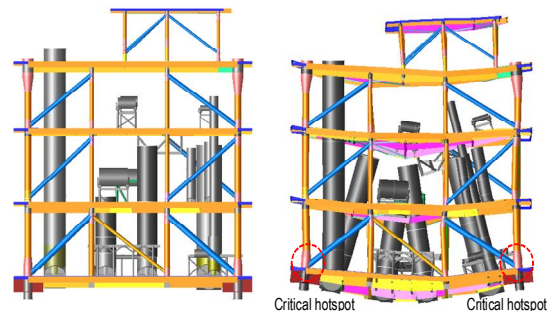


Fig. 4. Screening analysis to find out critical hotspot (module B).

위와 같이 고려된 환경조건을 기반으로 전체 탐사이드 모듈에 대한 피로 해석을 수행하였으며, 운반선의 중앙부에 위치한 모듈 B에서 가장 큰 피로 응력이 발생하였고, 일부 파이프 연결부에서 설계 피로 수명을 만족하지 못하는 연결부를 Fig. 4와 같이 확인하였다. 주요한 원인은 프로세스(Process) 모듈이라서 각종 장비들이 위치하여 중량 자체가 모듈 A와 C에 비해서 크기 때문이다. 피로 수명의 개선이 필요한 부위를 중점적으로 선택하여 상세 피로 해석 모델링을 통한 피로 해석을 진행하였다.

### 3. 상세 피로 강도 검토

#### 3.1 해석 조건

본 논문에서는 상용 유한요소법(Commercial Finite Element Method)을 기반으로 하는 ANSYS(ANSYS, 2016) 프로그램을 이용하여 모델링 및 해석, 결과 출력까지를 활용하였다. 관계는 2차원 쉘 요소 및 3차원 솔리드 요소를 적용하였다. 이 요소는 일반적인 판 구조물의 거동을 표현하는 데 적합하며, 복합재 모델링에도 유용하게 사용될 수 있다.

#### 3.2 핫스팟 응력 평가

핫스팟 응력은 유한요소해석을 통하여 구한 표면 응력 분포를 이용하여 계산한다. Fig. 5는 용접구조에서 핫스팟 응력을 구하는 방법을 나타낸다. 각각의 유한요소 모델에서 용접각장을 고려하고 노치 영향을 배제하기 위하여 용접 끝단부에서 0.5t와 1.5t 떨어진 위치의 주응력을 사용하여 선형의 삼법으로 계산한다.

탐사이드 모듈 구조를 구성하고 있는 파이프 조인트 중에서 가장 많이 사용되는 용접 비드 형식 두 가지(A, B)의 주응력을 계산하기 위하여 조밀한 요소분할(1 mm) 후 파이프에 단위 압축 하중(1N)을 적용했을 때의 결과를 Fig. 6에서 비교하고 있다. 용접 비드 형상에 따라서 A 형식이 B에 비교 [7.0/5.4 × 100(%)]하여 핫스팟 응력이 30 % 크게 발생함을 확인할 수 있다.

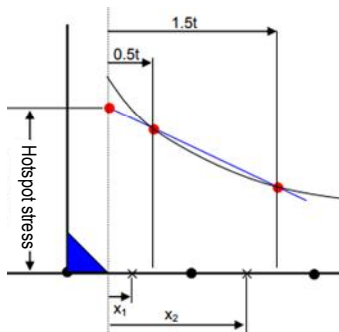
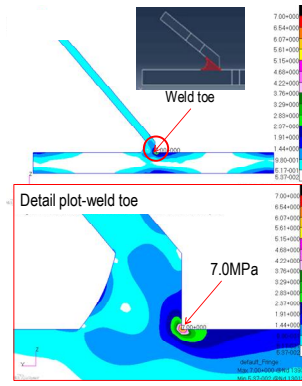
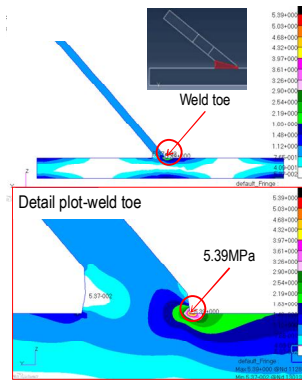


Fig. 5. Hotspot stress calculation.



(a) welding type A



(b) welding type B

Fig. 6. A comparison of principal stress according to bead shape under unit axial load.

#### 3.3 피로선도

구조설계에 사용된 S-N 선도는 공기 중에서 결정된 선도의 평균값에서 2배의 표준편차를 감한 선도, 즉 97.6%의 생존확률을 갖는 선도로 정의하였으며, Heibach 효과를 고려하기 위하여  $N=10^7$ 에서 기울기를 수정한 노르웨이선급(DNV, 2011) 피로 선도에서 T, F3, W3 정보를 부재별로 적용하였으며, Fig. 7과 같다.

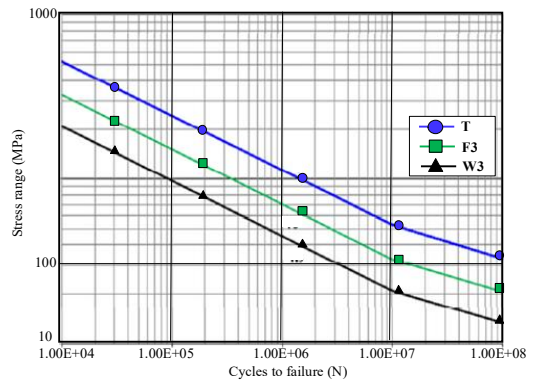


Fig. 7. S-N curve in air condition.

### 3.4 해석 모델링 및 하중, 경계조건

탑사이드와 같은 대형 구조물에서 용접 끝단 부에 대한 응력 계산을 위하여 상세요소 분할을 적용하는 것은 계산시간이 증가하여 제어하기가 어려워진다. 따라서, 현실적인 적용 방법은 핫스팟 위치를 두께 크기로 요소를 나누는 것이다. 용접부 끝단을 노치로 모델링할 경우, 해의 특이성 영향에 의하여 노치 선단 첫 번째 요소의 응력이 과장되어 계산되고, 이는 상대적으로 떨어진 외삽 위치의 오차값을 이용하여 상쇄된다. 피로 수명이 만족하지 못하는 부위의 상세 피로 모델링의 일례를 Fig. 8에 나타내고 있으며, 솔리드요소를 사용하였고, 각 두께에 해당하는 요소 크기로 구성되어 있다. 모델링 범위를 한정하였기 때문에, 모델 전체가 피로 요소분할이 적용되어 있다. 모델링에 사용된 요소의 개수는 약 65,000개이다.

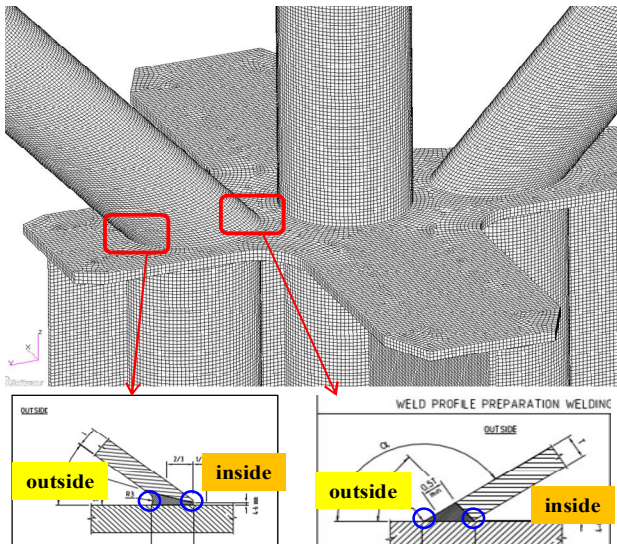


Fig. 8. Detailed FE-modeling.

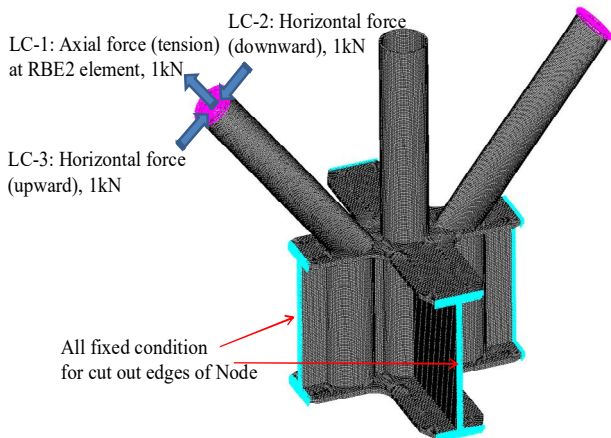


Fig. 9. Load and boundary condition.

주요 프레임을 구성하는 H-beam의 네 개의 끝단 부에는 고정지지 조건을 구현하고, 하중은 인장 하중과 2개의 방향을 갖는 횡 방향 하중으로 구성하였고, Fig. 9와 같다. 주요 파이프 조인트에서의 응력이 주요 관심 사항이기 때문에 모델링 영역은 해석의 결과를 도출하는 데 적합하다.

### 3.5 피로 평가 결과

해상 운송조건에 대한 검토는 초기 구조 강도 검토가 완료되어 강제 발주가 끝난 시점에 수행하고, 그 이후 변화된 중량과 구조변경 그리고 운송범위, 노선 변경에 따라서 추가 검토된다. 선행에서 변경사항이 많을수록 운송해석에서 구조 및 피로 강도 불만족 상황이 발생할 경우, 고려할 수 있는 구조변경 및 보강의 범위가 제한적이다. 초기설계안의 최저 피로 수명은 설계허용치인 50년과 같게 평가되었으며, 해상 운송 시 발생하게 되는 변동 하중의 불확실성에 대한 추가 안전도를 고려하기 위하여 파이프 조인트에 브래킷 보강을 추가하였다. 브래킷 보강의 핵심은 핫스팟을 육안관측이 가능한 외측으로 이동시키고, 브래킷 toe를 최대한 응력 집중이 완화될 수 있도록 설계하는 것이다. 시행 착오법을 통하여 최소중량에 핫스팟 응력이 적정수준에 도달하도록 하는 최종 모델을 적용하여, 모듈2에 총 4개소에 적용하였으며, 상세 치수 및 형상은 Fig. 10과 같다.

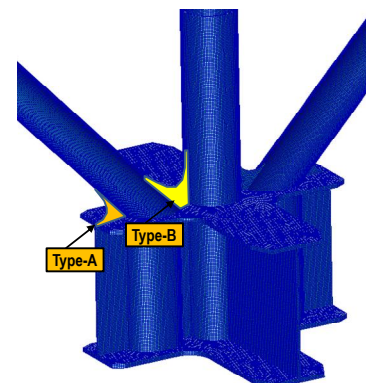
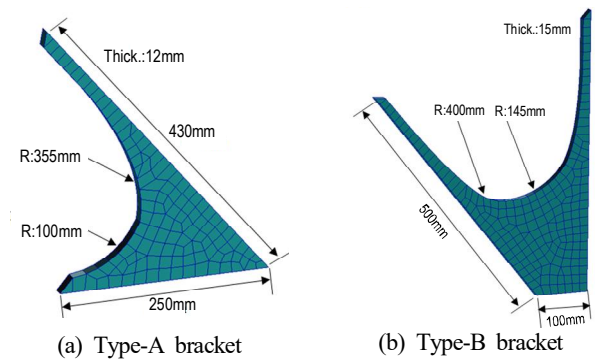


Fig. 10. Bracket reinforcement types.

하중 성분(축하 중, 횡하중)에 따른 보강 전과 후의 주응력 변화를 Table 2에 비교하고 있다. Forward 방향에서는 축하중에 대해서 브래킷 보강 시, 안쪽은 191% [0.067/0.035 × 100(%)], 바깥쪽은 192% [0.075/0.039 × 100(%)]의 응력감소 효과가 발생하였다. 브래킷 추가로 인하여 toe에서는 신규 핫스팟 발생이 되었으나, S-N 선도를 F 선도를 사용하면서 DFF 개선 효과가 있으므로, 큰 문제가 되지 않는다. AFT 방향에서는 축하중 작용 시 보강 효과에 의해 안쪽은 200% [0.054/0.027 × 100(%)], 바깥 면은 208% [0.077/0.037 × 100(%)] 응력감소가 발생하였다. 횡 방향 하중에 대해서는 브래킷 보강에 따른 Forward와 AFT 결과는 inside는 242% [0.729/0.301 × 100(%)] 응력감소가 발생하였고, outside는 AFT에서 응력이 8% [0.947/1.031 × 100(%)] 증가하는 경향을 나타냈다. 전체적으로 국부 보강 때문에 핫스팟 위치 변화와 응력감소 효과를 달성하였다.

브래킷 보강을 한 상태에서의 toe에서의 주응력 결과를 Fig. 11~13에서 나타내고 있으며 보강 효과로 인하여 핫스팟 위치가 확연하게 변경된 것을 알 수가 있다.

Table 2. Summary of principal stress with/without bracket according to load

Load	Model	Forward (MPa)		
		inside	outside	ratio (Org./W.B)×100
Axial	Org.	0.067	0.075	191%
	W.B	0.035	0.039	192%
Horiz.	Org.	1.073	1.403	147%
	W.B	0.729	0.947	148%
Aft side (MPa)				
Axial	Org.	0.054	0.077	200%
	W.B	0.027	0.037	208%
Horiz.	Org.	0.709	2.617	236%
	W.B	0.301	1.031	254%

\* Org. is original, W.B is with bracket and Horiz. is horizontal load condition

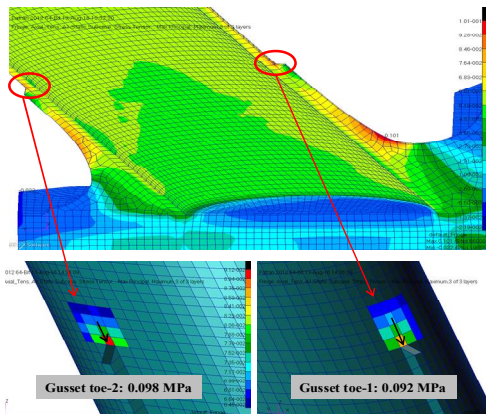


Fig. 11. Principal stress under unit axial load.

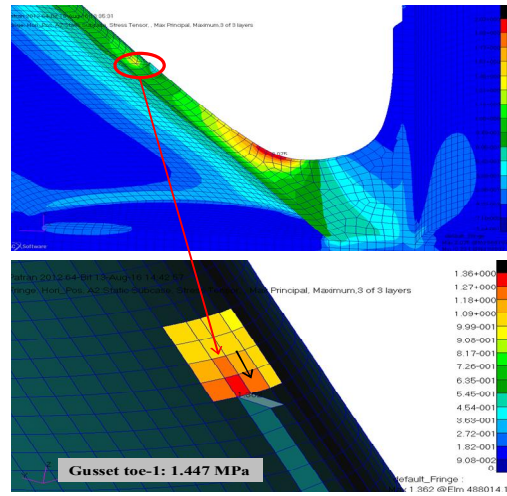


Fig. 12. Principal stress under unit downward bending.

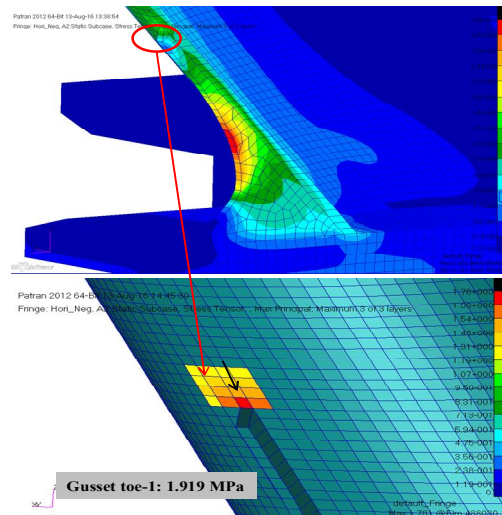


Fig. 13. Principal stress under unit upward bending.

Table 3. Summary of fatigue damage ratio and lives

Model	DFF	S-N curve	SCF curve	SCF toe
Original	3.0	F3	1.27	1.00
Reinforcement	2.0	F	1.61	1.27
Model	Design life (years)	Total SCF	Damage ratio	Fatigue life (years)
Original	50	1.000	0.999	50.1
Reinforcement	50	1.002	0.670	74.7

\* DFF is design fatigue factor, SCF curve is value obtained by S-N curve, SCF toe is calculated by FE-analysis

앞서 검토된 주요 결과들을 요약하여 Table 3에 정리하였다. 브래킷 보강을 통하여 핫스팟을 검사가 가능한 toe로 변

경시킴으로써 S-N 선도를 한 단계 좋은 성능으로 변경하여 최종적인 피로 수명을 50년에서 74년으로 향상했다. 주목할만한 점은 최소중량(0.5톤)의 브래킷 외부 보강 6개소 적용을 통하여 피로 수명을 효과적으로 개선할 수 있었고, 보강 시 작업성도 좋았던 사례이다.

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

초기설계된 일부 파이프 조인트에서 설계 피로 수명을 만족하지 않는 결과를 확인하였으며, 브래킷 보강을 통한 피로 수명을 개선시킬 수 있었다. 인장 하중에 대해서는 브래킷 toe에서 응력은 123% 증가하였고, 기준에 문제가 된 파이프의 내측, 외측에서의 응력은 약 92% 감소하였다. 휨 하중에 대해서는 브래킷 toe에서 응력은 103% 증가하였고, 기준에 문제가 된 파이프의 내측, 외측에서의 응력은 약 48% 감소하였다. 신규 브래킷 보강으로 인하여, 브래킷 toe의 응력 증가가 발생하였지만, S-N 선도 자체가 파이프 조인트에 비해 좋으므로 큰 문제가 되지는 않는다.

향후 연구과제로서는 다양한 조인트 형식별로 피로 수명을 개선시킬 수 있는 최소중량 보강 안에 대한 검토가 필요하며, 이러한 연구를 위하여 본 연구에서는 파이프 조인트에 대해서 기본적인 피로 응력 특성을 검토하였다.

#### Acknowledgement

본 논문은 산업통상자원부 해양융합소재산업화사업(No. 10053841) ‘조선해양 규정을 만족하는 섬유기반 복합소재의 그린십 상부구조 표준화 부품 개발’ 과제의 지원을 받아 수행된 과제이며, 지원에 대해 감사드립니다.

#### References

[1] ANSYS Multiphysics User's Manual(2016), Introduction of Linear and Nonlinear Analysis and It's Application of Shell Modeling, Vol. 2, pp. 50-65.  
[2] Bentley Reference Manual for MOSES(2017), Hydrodynamics, Chapter 5, pp. 333-385.  
[3] DNV(2011), Fatigue Design of Offshore Steel Structures, Recommended Practice C203, Chapter 2-5, pp. 25-95.  
[4] Elshafey, A. A., M. R. Haddara, and H. Marzouk(2009), Dynamic Response of Offshore Jacket Structures under Random Loads, Marine Structures, Vol. 22, Issue 3, pp. 504-521.

[5] Kang, W. H., C. Zhang, and J. X. Yu(2016), Stochastic Extreme Motion Analysis of Jack-up Responses during Wet Towing, Ocean Engineering, Vol. 111, No. 1, pp. 56-66.  
[6] Park, S. I.(2013), A Study on Structural Strength Assessment Methods of Topside Structure on Offshore Plant, Master Thesis in Pusan National University, pp. 14-61.  
[7] Peng, B. F., C. Y. Chen, and C. Llorrente(2015), Time History and Spectral Fatigue Analysis of Deep Water Offshore Truss-spar Platform under In-service and Trans-ocean Tow Conditions, The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, pp. 509-515.  
[8] Statoil Hydro T/F(2012), Hs-Tp Scatter for Transport of the Offshore Topside, Metocean ME 2012-088, Rev. 02, pp. 15-72.  
[9] Yun, C. B., J. H. Choi, and J. S. Ryu(1985), Dynamic Analysis of Fixed Offshore Structures subjected to Random Waves, Spring Conference of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 5, No. 2, pp. 1-9.

---

Received : 2021. 02. 19.

Revised : 2021. 03. 29. (1st)

: 2021. 04. 09. (2nd)

Accepted : 2021. 04. 27.