

블록 이동용 리그의 안전사용하중 결정에 관한 구조 평가법

권오현* · 박주신** · 서정관***†

* 부산대학교 조선해양공학과 박사과정, 삼성중공업 조선해양연구소 프로, ** 삼성중공업 조선해양연구소 프로

*** 부산대학교 조선해양공학과·선박해양플랜트기술연구원 교수

Structural Evaluation Method to Determination Safe Working Load of Block Handling Lugs

O-Hyun Kwon* · Joo-Shin Park** · Jung-Kwan Seo***†

* PhD Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering/The Korea ship and Offshore Research Institute, Pusan National University
Busan, 46241, Korea, Pro., Ship and Offshore Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

** Pro., Ship and Offshore Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

*** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering/The Korea ship and Offshore Research Institute, Pusan National University
Busan, 46241, Korea

요 약 : 한 척의 선박을 건조하기 위해서는 다양한 크기의 블록(block)들을 이동 및 탑재해야 한다. 이러한 과정에서 블록의 체결 방법 및 각 조선소 설비 특성에 맞는 다양한 기능에 부합하는 리그를 사용하고 있다. 블록 구조의 중량 및 형태에 따라서 리그의 크기와 형상이 다양하며, 샤클(shackle)이 체결되는 홀 주변에 부족한 강성을 보완하기 위하여 덧판(doubling pad)을 용접하여 구조를 보강한다. 리프팅(lifting) 조건별 리그의 설계를 하는 방법은 보 이론(beam theory)에 의한 수계산 방법과 유한요소해석 모델링을 이용한 구조해석을 수행하고 있다. 해석적 방법의 경우, 요소의 종류와 모델링 방법에 따라서 결과 차이가 발생하여 표준화된 평가법의 정립이 필요한 상황이다. 이러한 모호한 방법론 적용 시 블록의 이동 및 반전(turn-over) 과정 중에서 심각한 안전 문제를 유발할 가능성이 있다. 본 연구에서는 리그의 실제 탑재공정에 따른 구조 응답을 평가할 수 있는 모델링 조건, 평가법을 확정하고자 다양한 변수의 영향을 수치 구조해석을 통하여 비교 및 분석하였다. 리그 홀(hole) 주변 덧판부와 용접 비드(bead)를 표현한 모델링 기법이 가장 실제적인 거동 결과를 주고 있다. 실제 리그와 동일한 조건(용접부 비드만 주재료와 연결)의 모델링에 등가하중을 적용한 결과는 MPC 하중 적용 결과보다 낮은 최종강도를 나타낸다. 더불어 해석 시간 단축을 위해서 2차원 쉘(shell) 요소를 적용한 경우, 덧판 두께를 85% 수준으로 감소시켜서 안전사용하중을 예측할 수 있음을 확인하였다. 논문에서 검토한 다양한 변수의 영향들 결과는 리그 설계 및 안전사용하중 예측에 근거 자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 리그, 블록, 덧판, 유한요소해석, 안전사용하중, 리프팅

Abstract : To construct a ship, blocks of various sizes must be moved and erected. In this process, lugs are used such that they match the block fastening method and various functions suitable for the characteristics of each shipyard facility. The sizes and shapes of the lugs vary depending on the weight and shape of the block structures. The structure is reinforced by welding the doubling pads to compensate for insufficient rigidity around the holes where the shackle is fastened. As for the method of designing lugs according to lifting loading conditions, a simple calculation based on the beam theory and structural analysis using numerical modeling are performed. In the case of the analytical method, a standardized evaluation method must be established because results may differ depending on the type of element and modeling method. The application of this ambiguous methodology may cause serious safety problems during the process of moving and turning-over blocks. In this study, the effects of various parameters are compared and analyzed through numerical structural analysis to determine the modeling conditions and evaluation method that can evaluate the actual structural response of the lug. The modeling technique that represents the plate part and weld bead around the lug hole provides the most realistic behavior results. The modeling results with the same conditions as those of the actual lug where only the weld bead is connected to the main body of the lug, showed a lower ultimate strength compared with the results obtained by applying the MPC load. The two-dimensional shell element is applied to reduce the modeling and analysis time, and a safety working load was verified to be predicted by reducing the thickness of the doubling pad by 85%. The results of the effects of various parameters reviewed in the study are expected to be used as good reference data for the lug design and safe working load prediction.

Key Words : Lug, Block, Doubling pad, Finite element analysis, Safety working load, Lifting

* First Author : ohyun49.kwon@samsung.com, 055-630-2082

† Corresponding Author : seojk@pusan.ac.kr, 051-510-2415

1. 서론

선박을 건조하기 위해서는 수십 개 혹은 수백 개의 블록을 용접 작업을 통하여 조립하는 절차를 거쳐야 한다. 이때 블록들의 이동 혹은 탑재를 위해서는 리프팅(lifting) 및 반전(turn-over)이 수시로 발생하고, 이때 탑재용 리프팅 러그(lifting lug)를 필수적으로 이용하고 있다.

러그는 블록 운용 절차, 중량 및 블록 형상에 따라서 다양하게 존재하며 러그 홀 주변에 부족한 강성을 보완하기 위하여 덧판(doubling pad)을 용접하는 형태로 구성되어 있으며, 리프팅 시 면외 각이 발생하여 전도를 예방하기 위하여 리브(rib) 브래킷을 설치하고 있다.

안전사용하중 조건별 러그를 설계하기 위해서는 보 이론에 의한 수계산 방법과 유한요소해석 모델링을 이용한 구조해석을 활용하고 있으며, 해석 요소와 표현하고자 하는 방법에 따라서 결과 차이가 발생하여 재검증이 필요한 상황이다. 특히 중/소형 조선소에서는 기존의 경험적인 방법에 의존하다 보니 특수 목적 러그 혹은 치공구에 대한 안전사용하중을 과소/과대평가하는 경우가 자주 발생하고 있다. 이러한 위험 요소들은 블록의 이동 및 반전 과정 중에서 심각한 안전 문제를 유발할 수 있는 상황이다. 본 연구에서는 러그의 실제적인 구조 응답을 평가할 수 있는 모델링 조건, 평가법을 확정하고자 다양한 변수에 대한 구조해석을 수행하였다. 본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

Kim(2003)은 선박 건조에 사용되는 러그 중에서 사용 빈도가 가장 높은 2가지 종류의 러그를 대상으로 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 기하학적, 재료적인 비선형성을 고려한 탄소성 해석을 수행하였다. 이러한 이유는 기존에 고전적인 수 계산에 의한 접근 방식과 보강효과를 두께 증가로 치환하는 2차원 모델링 기법의 단점을 보완하기 위해서이다. 러그를 사용할 때 고려해야 하는 면외 하중은 최대 20도로 고려하였으며, 사용된 강재는 저탄소강(mild steel)의 물성값을 이용하였다. 한 해 동안 수만 개의 러그가 사용되고 있고, 재사용 횟수 증가를 통한 원가 개선이 필요한 상황에서 러그의 구조 강도 측면에서는 전혀 불리하지 않은 조건임을 확인하였다. 모델별로 구조 강도 기여가 미비한 영역은 덧판의 형상을 변경하면서 두께를 줄였으며, 브래킷을 제거하는 것으로 개선하였다.

Ham(2011)은 선박탑재용 러그의 경량 설계를 위하여, 이미 개발한 복합형 구조 설계 시스템을 활용하여 변수 변화에 대한 민감도 설계를 수행하였다. 연구에서는 가장 보편적으로 사용하는 러그를 기준으로 선정하고, 최적화 시스템은 6개의 설계변수와 10개의 제약조건으로 설정되었고, 여

러 가지 변수 변화를 해석한 결과 주판의 길이가 긴 쪽이 러그 중량 최적화에 유리하고, 가능한 러그 길이가 짧고 주판의 두께가 두꺼운 경우가 국부좌굴 강도의 안전도가 증가한 특징을 나타냈다. 러그 경사각은 급격한 비선형적인 경사각의 감소 현상을 보이며 중량감소를 위해서는 최대한 기울기를 증가시키는 방법이 중량을 줄이는 데 효과적임을 확인하였다. 최적 안을 확정하기 위해서는 상세 유한요소해석을 통하여 검증이 필요함에 대해서도 고민하였다.

Seo et al.(2011)는 선박의 건조과정에서 블록의 이동 또는 반전에 사용되는 러그에 관한 안전기준 중 ASME BTH-1(2008)에 근거하여 러그 설계를 수행하였다. 리프팅 러그는 홀을 통해 핀으로부터 하중을 전달받기 때문에 구조 강도 평가를 위해서는 국부적인 응력 집중에 의한 재료의 소성화를 반드시 고려해야 하며, 저자들은 정적 하중 상태에서의 한계상태를 기준으로 연구를 수행하였다. 해석 모델은 안전사용하중 100톤 러그이며, 용접부와 덧판의 접촉 조건을 적용하기 위하여 3차원 솔리드 모델을 이용하였다. ASME 기준과 비교하였을 때 러그가 판 두께에 비해 길이를 크게 산정하고 있으며, 러그 홀 주위 강도 증가를 위해서는 두께 증가가 유리함을 확인하였다. 이러한 근거를 바탕으로 러그의 중량을 감소시킬 수 있었다.

Min and Eum(2011)는 선박 건조에 사용하는 탑재형 러그 중 가장 많이 사용하는 러그(안전사용하중 10톤~60톤)의 재생 빈도를 높여 생산성을 향상하기 위한 목적으로 신형 러그 개발에 관한 연구를 수행하였다. 러그 구조해석에 있어서 면외 하중이 작용하는 경우, 측면 접촉 현상을 정확하게 표현하기 위하여 덧판에 대한 상세 모델링을 3차원 솔리드 요소를 이용하여 구현하였다. 유한요소해석을 통하여 안전율 3.0을 만족하는 러그 치수를 결정하였으며, 면내 경사각 90도 및 면외 경사각 15도와 30도 조건에 대한 구조 강도 실험을 수행하였다. 면외 경사각 35도 조건이 15도에 비하여 홀 변형이 많이 증가하였고, 기준치를 초과하였다. 90도 면내 경사각 및 15도 면외 경사각을 기준으로 10톤, 15톤, 20톤 러그는 3.0 이상의 안전율 그리고 40톤 러그는 1.5 이상의 안전율을 가진 것으로 확인되었다. 저자들은 현장에서 사용하는 면외 경사각을 15도 이내로 제한해야 할 것으로 제안하였다.

Ku et al.(2012)는 조선소에서 블록의 조립에 사용하는 콜릿 크레인을 사용한 리프팅 시 와이어 로프와 선체 블록 간의 동적 접촉력 효과를 고려하기 위한 다물체계 동역학 알고리즘을 개발하였다. 로프와 강체가 만날 경우, 이 부분에 간섭 절점을 추가하고, 이 간섭 절점과 강체 간에 구속 조건을 고려하여 운동 방정식을 구성하는 방식이다. 구조해석 결과, 동적 하중 및 접촉력을 고려했을 때 블록 변형이

정적하중 결과보다 12% 증가하였다. 응력 결과는 약 23% 크게 나타났다. 이러한 현상은 기존 정적해석 기반의 안전을 결정에 참고할 수 있는 참고 연구 결과이다.

Heo and Lee(2014)는 선박 및 해양의 건조과정에 운반 및 회전 시 사용되는 리그에 대한 비선형 구조 강도 검토를 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 ABAQUS이며 다양한 하중 조건(총 40가지)에 대한 하중-변위 응답을 계산하여 ASME(2008)에서 제시하는 안전계수와 비교하였다. 수치해석 결과에 대한 검증은 위하여 실험 결과와 비교하였으며, 결과가 유사함을 확인하였다. 해석 결과로부터 면 외각이 커질수록 잔류강도는 감소하였으며, 계산된 최종강도가 안전계수를 고려한 사용 하중 60톤보다 높아서 부재 치수가 가능함을 확인하였다.

Park et al.(2019)은 실험에 사용된 주재료는 E36 조선용 강재이며, 리그는 STS 316L을 적용하였다. 리프팅 리그를 제거했을 때의 금속 및 재료 역학적 효과를 조사하기 위하여, 실험적 연구를 수행하였다. EH36 주재료의 경우, 리그를 제거하더라도 같은 재료 특성을 유지하고 있었다. 리그 제거 후 경도값 변화 특성을 비교하기 위하여 4개의 시편 값을 분석하였다. 실험적 연구를 통하여 리그 제거 후, 금속 미세구조, 경도, 화학 성분의 변화가 주재료에 영향을 미치지 않는 결과를 나타내었다.

기존의 선행연구에서는 하중조건 및 면내외 각을 종속변수로 선정하고 비선형 해석 결과를 도출하였으며, 리그의 접촉면을 고려한 리그의 거동 비교 분석에 관한 내용으로 리그의 최적화를 진행하였다. 선형 해석의 한계점을 보완하기 위해 비선형 해석으로 진행하고, 리그의 최종강도 기준의 결과를 도출한 것은 매우 바람직한 접근법이다. 다만, 실제 엔지니어 기준에서 모델링/해석 시간 관점에서 리그 설계를 위한 합리적인 기준이 필요하다. 이에 본 연구에서는 모델링 및 하중 전달 방법에 따른 안전사용하중 제안을 통해 합리적인 평가 기준을 제시할 수 있다고 기대해본다.

2. 리그 설계 및 방법

2.1 주요 제원 및 배치

연구에서 사용된 대표 리그의 형상과 부재명은 Fig. 1에 상세 제원은 Table 1에 표기하였다. LA99 리그는 안전사용하중이 99톤을 전달할 수 있도록 설계되었으며, 조선소에서 많이 사용되는 표준 리그다. LA99는 주요 본체와 홀 주변 보강을 위한 덧판(Doubleing pad) 그리고 총 4개의 리브 브라켓(Rib bracket)으로 구성된다.

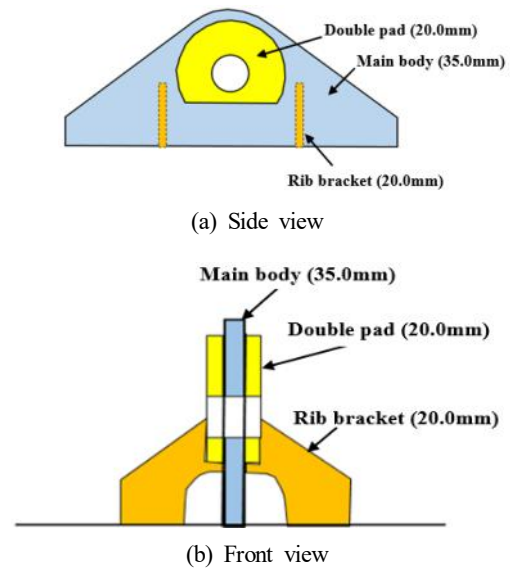


Fig. 1. Drawing of the lifting lug (LA99).

리프팅을 위해서는 샤프트가 체결되는 공간이 필요하여 주재료에 구멍이 위치하고 주변부 보강을 위하여 덧판을 가장 자리에 용접하여 만들어진다. 리프팅 후크와 연결 시 면 외각이 발생하게 되고, 리그의 힘을 방지하기 위하여 리브 브라켓을 추가로 보강하여 구성되어 있다.

Table 1. Principal dimensions of the lug (LA99)

Component	Value
Main body	35.0mm
D.plate	20.0mm
Rib bracket	20.0mm
Welding leg length (Main body)	8.0mm
Welding leg length (D.plate)	18.0mm
Welding leg length (Rib bracket)	10.0mm
weight	83.6kg

2.2 안전사용하중 평가 (이론식)

리그의 안전사용하중을 평가하는 방법 중 수 계산에 의한 방법이 가장 널리 사용되어왔으며, Timoskenko 보 이론에 따른 식(1)~(4)와 같이 4가지 응력을 계산하고 허용응력과 비교한다. 식(1)은 압축에 의한 응력, 식(2)는 축방향의 응력, 식(3)은 압력 단면적에 대한 전단응력, 식(4)는 리그 본체의 수직 응력을 나타낸다. 또한, 응력 계산에 필요한 LA99 리그의 치수는 Fig. 2와 Table 2에 표기하였다.

$$\sigma_{comp} = \frac{load(P)}{A_c} \quad (1)$$

$$\sigma_{axial} = \frac{load(P)}{A_{axial-f}} \quad (2)$$

$$\sigma_{shear} = \frac{load(P)}{2A_s} \quad (3)$$

$$\sigma_{normal} = \frac{load(P)}{A_{axial-b}} \quad (4)$$

$$A_c = \Phi \times (t_1 + (2 \times t_2))$$

$$A_{axial-f} = 2 \times [(R_1 - R_2) \times \{t_1 + (2 \times t_2)\} + \{(B - R_1) \times t_1\}]$$

$$A_s = [(R_1 - R_2) \times \{t_1 + (2 \times t_2)\}] + (h \times t_1)$$

$$A_{axial-b} = L_w \times t_1$$

A_c : 압축력에 대한 단면적, Φ : 샤키의 지름,
 $A_{axial-f}$: 압괴단면의 축방향 유효면적,
 A_s : 전단면적, $A_{axial-b}$: 바닥면에서의 축방향 유효면적

Table 2. Basic dimension of the lifting lug for hand calculation

L_w [mm]	L [mm]	h [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	H [mm]	R_1 [mm]	R_2 [mm]	B [mm]
920	200	28	35	20	378	150	86.6	300

Φ : Shackle pin dia. 82.6mm

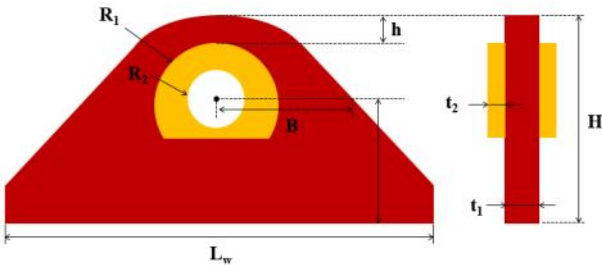


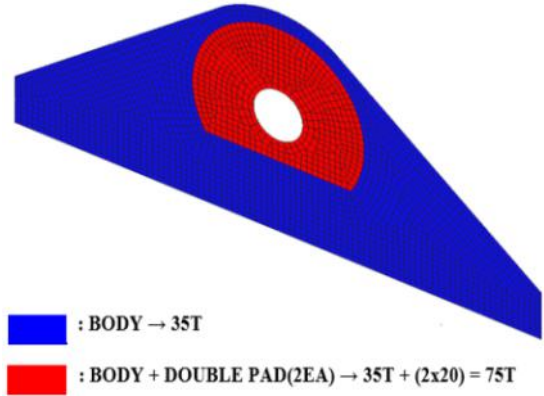
Fig. 2. Dimension of the lifting lug (LA99).

2.3 안전사용하중 평가 (수치해석)

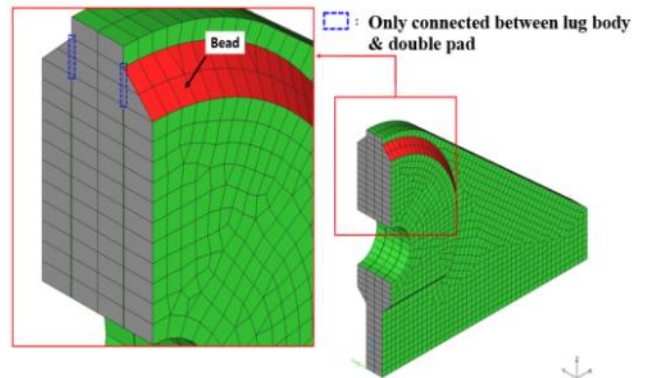
유한요소법을 근간으로 하여 공학용 구조해석이 가능한 상용프로그램인 MSC Nastran(MSC Software, 2012)을 사용하였다. 판 부재의 모델링은 2차원 쉘 요소와 3차원 솔리드 요소를 이용하였고, 한 개의 요소의 크기는 10mm로 모델링하였다(Fig. 3). 사용된 유한요소 모델은 국부적인 응력 집중 현상 및 항복 이후 응력 변화의 관측이 가능하다. 2차원 모델은 2,344개의 노드와 2,250개의 요소로 구성되고, 3차원은 166,664개의 노드와 109,712개의 요소로 만들어졌다.

2차원 모델에서 러그 본체 영역(Fig. 3-(a), 파란색)은 두께

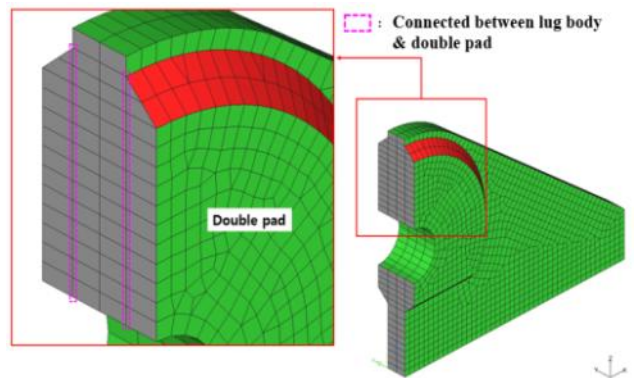
(35mm)를 적용하고, 덧판 영역(Fig. 3-(b), 붉은색)은 본체 두께에 덧판 두께를 더해서 표현하였다. 이는 2차원 쉘 모델링은 주재료와 덧판 두께를 합산하여 표현하기 때문에, 실제 용접 조건과는 다르다. 3차원 모델링은 용접 비드와 주재료만 연결하는 방법(Fig. 3-(b))과 덧판과 주재료가 모두 연결되는 방법(Fig. 3-(c))으로 구분하였다.



(a) Modeling using shell element



(b) Modeling using solid element (bead contact)



(c) Modeling using solid element (full contact)

Fig. 3. Modeling of the structural strength analysis.

블록 이동용 리그의 안전사용하중 결정에 관한 구조 평가법

리그는 탄성계수 206GPa, 항복 응력 235MPa, 푸아송비 0.3을 적용하였으며, 용접 비드는 항복 응력 490MPa이 사용되었다. 안전사용하중을 평가하기 위해서 비선형 구조해석을 수행하여, 초기항복점(first yielding point)에서 안전계수 1.15를 적용하여 탄성한도 내에서 결정하였다. 최근에는 원가절감을 위해서 리그를 2회 혹은 3회까지 재사용을 하고 있으나, 아주 짧은 시간 동안 정적 하중만을 받는 조건을 안전계수에 고려하였다.

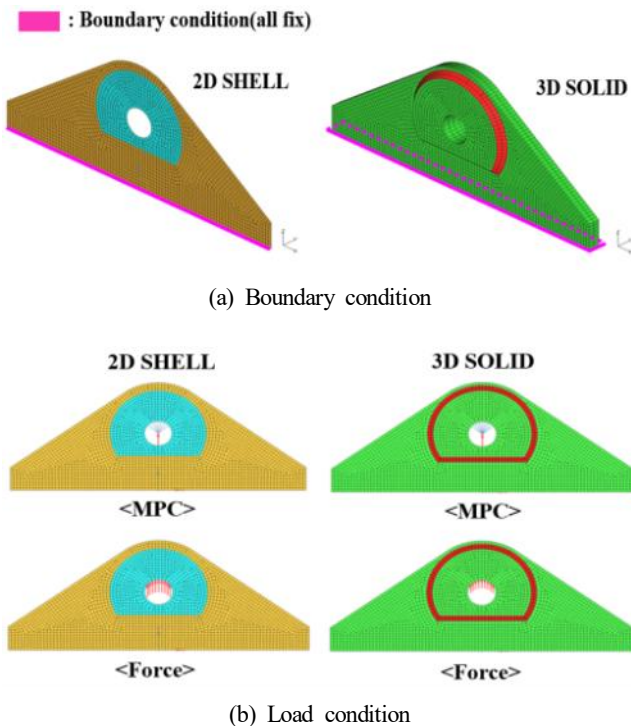


Fig. 4. Boundary and load condition.

해석에 사용된 경계조건은 선체에 용접되는 하부 주재료부를 고정했으며, 하중은 90도 방향으로 샤클이 닿는 면적에 분포하중과 MPC(multi point constraint) 요소를 적용하였으며, Fig. 4와 같다. 기하학적, 재료의 비선형성을 동시에 고려한 비선형 해석을 수행하였으며, 비선형 거동 수학모델은 탄성-완전-소성을 Fig. 5와 같이 적용하였다. 시편 모델의 인장테스트 결과(True Stress-Strain)를 사용할 경우, Fig. 5와 같이 초기 항복 이후에도 면내 하중이 증가하면서 변위가 성장하는 거동을 나타내지만, 보수적인 구조 안전성 평가 관점에서는 탄성-완전-소성 모델이 적합하다.

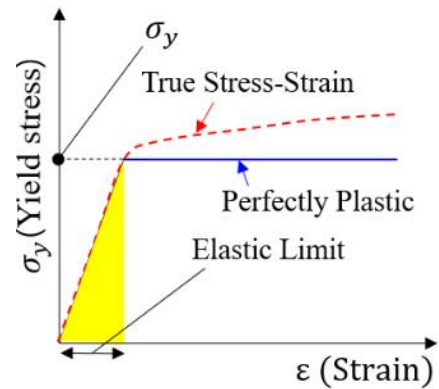


Fig. 5. A comparison of between elastic-perfectly-plastic and true stress-strain material model.

3. 유한요소해석 및 고찰

3.1 하중 적용 방법에 따른 거동 차이 (shell)

샤클이 접촉되는 면적에 하중을 적용하는 방법을 MPC와 노드에 등가 하중을 적용하고 해당 방법에 대한 하중-변위 거동 차이점은 Fig. 6에서 나타내고 있다. MPC를 적용한 경우가 최종강도를 높게 평가하며, 이후 거동의 차이도 극명하게 달라지고 있다.

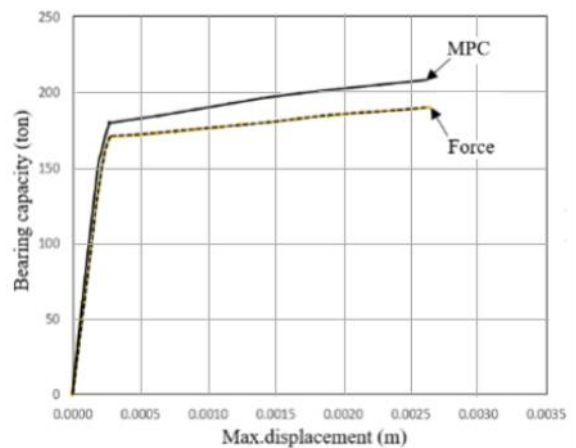


Fig. 6. A relationships of between bearing capacity and maximum displacement curve according to load type of shell model.

홀 주변 노드에 등가하중을 적용한 경우, MPC 적용보다 낮은 최종강도를 발생하는 이유를 확인하기 위하여, 홀 주변부 응력 분포를 Fig. 7에 비교하고 있으며, 노드에 하중을 적용하는 방법이 자연스러운 응력 변화를 나타내면서 주변 요소로 전파되는 항복 영역이 크게 나타난다.

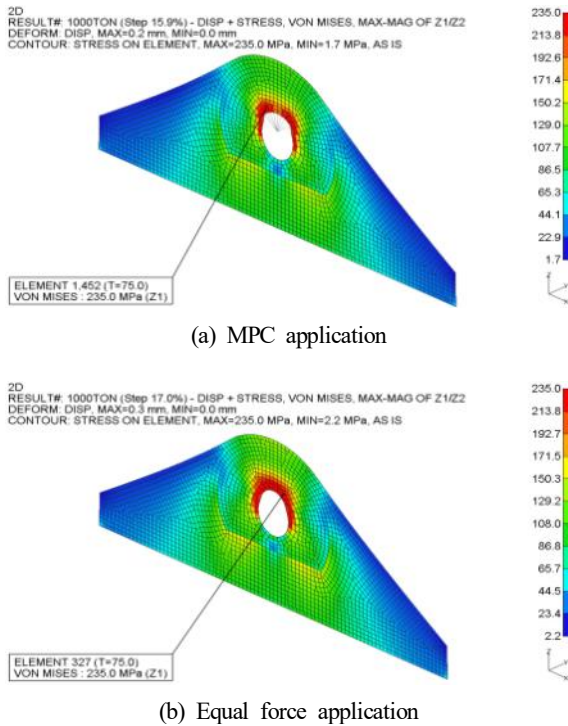


Fig. 7. A comparison of stress contour according to load type of shell model (unit : MPa).

3.2 하중 적용 방법에 따른 거동 차이 (solid)

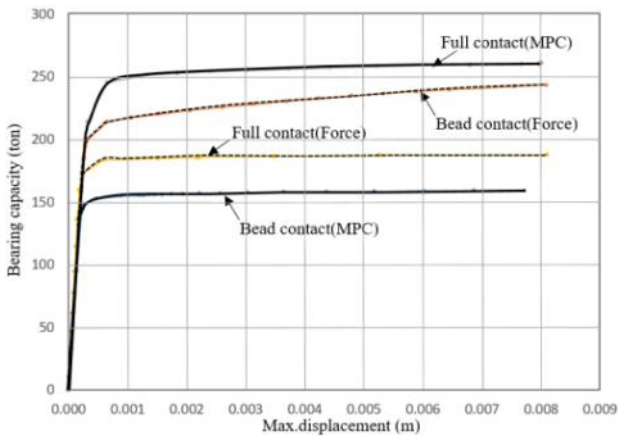


Fig. 8. A relationships of between bearing capacity and maximum displacement curve according to load type and modeling type of solid model.

두께를 갖는 3차원 솔리드 요소를 적용한 모델링 방법의 경우, 하중 적용 방식에 따라 용접 비드만 주재료와 연결 그리고 전체 덧판이 주재료와 힘 전달이 되는 경우로 분류하였다. 덧판 전체가 주재료와 접촉되어 있는 조건에서는 용접 비드만 연결된 조건과 비교하여 높은 최종강도 분포를

Fig. 8에서 확인할 수 있다. 이러한 이유는 덧판의 전면적인 인장 하중 분담에 관여하여 최대응력을 보다 과소평가하기 때문이다. 해석 결과에 대한 응력 분포는 Fig. 9-(a)와 Fig. 9-(b) 나타내고 있다.

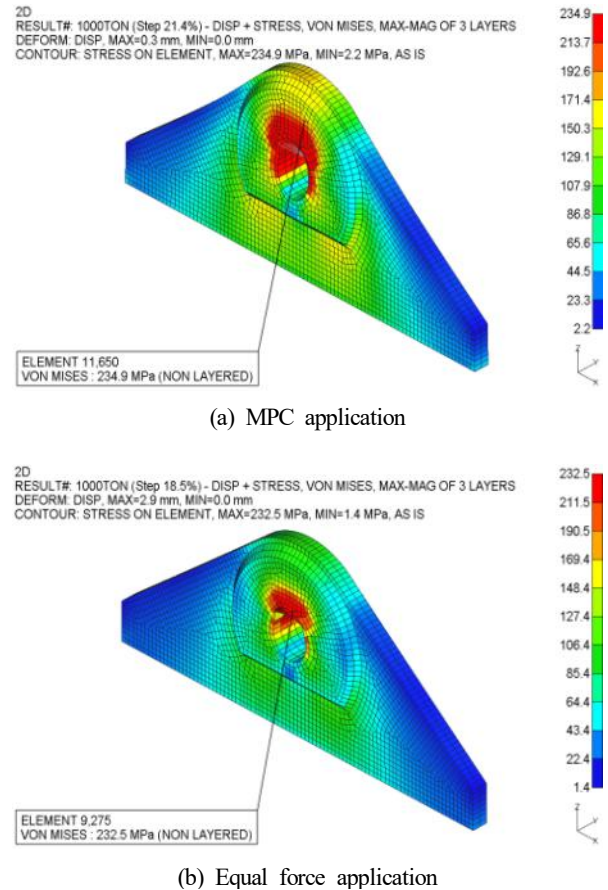


Fig. 9. A comparison of stress contour according to load type of solid model (bead contact, unit : MPa).

요소와 모델링 그리고 하중 작용을 변수로 한 안전사용하중 결과를 Table 3에서 비교하고 있다. 동일한 비드 모델링이라 하더라도 MPC 강체 요소를 적용한 결과가 등가하중 결과보다 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 MPC 강체 요소를 적용할 경우, 주변 요소들까지 강체 거동을 하면서 넓은 영역에서 하중 분산 효과가 Fig. 10과 같이 발생하기 때문이다. MPC 적용의 경우(Fig. 10-(a)) 하중 방향의 중심의 요소는 항복이 발생하지 않지만, 등가하중 적용은 중앙부부터 항복이 발생하여 상대적으로 낮은 최종강도(Fig. 10-(b))를 나타내고 있다. 일반적으로 샤프의 구조 강성이 러그보다 크기 때문에 러그 홀 주변에 국부적인 변형이 발생하는 현상을 제대로 구현하지 못하고 있다. 따라서 비드 모델링을 할 경우, 하중은 샤프가 접촉되는 부위에 등가하중으로 적용하는 것이 바람직하다.

블록 이동용 리그의 안전사용하중 결정에 관한 구조 평가법

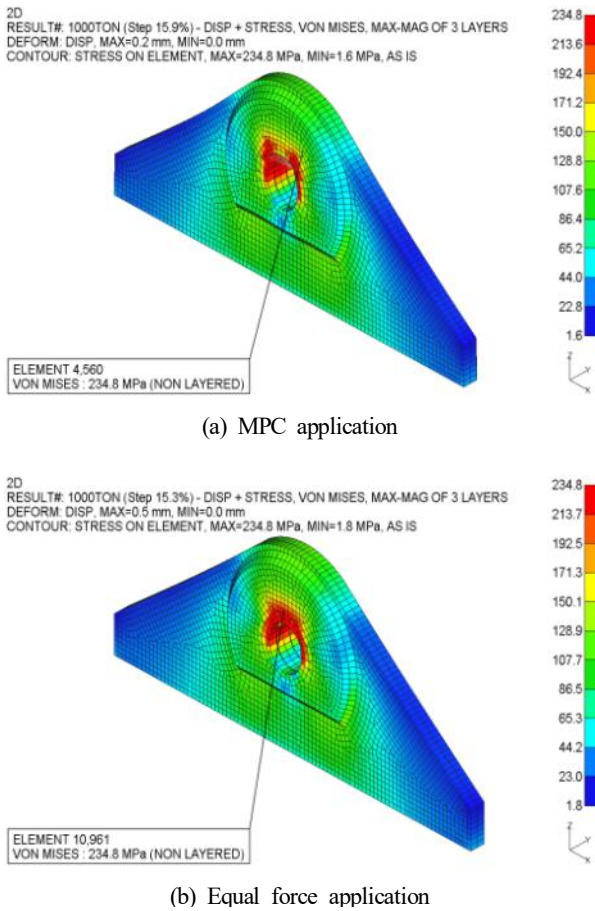


Fig. 10. A comparison of stress contour according to load type of solid model (full contact, unit : MPa).

Table 3. Summary of the safety working load (SWL) varying modeling and load type

Element	Load type	Y.P (ton)	S.F	SWL (ton)
Shell	MPC	182	1.15	158
	Force	171		149
Solid	MPC_bead	199		173
	Force_bead	149		130
	MPC_full	214		186
	Force_full	172		150

Y.P : 초기 항복점, S.F : 안전율, SWL : 안전사용하중

Timoskenko 보 이론에 의해 식(1)~(4)을 이용하여 식(5)~(8)과 같이 각각의 응력이 계산되며, 그 값들은 Table 4와 같이 정리한다. 그때, 리그의 안전사용하중 Capacity의 값은 압축에 의한 항복 값이 가장 작기 때문에 안전사용하중(SWL)으로 129.0ton의 값을 적용하였다.

$$C.S : \frac{load(P)}{A_c} \leq \sigma_{allowable}, load(P) \leq \sigma_{allowable} \times A_c \quad (5)$$

$$= \frac{204.3MPa}{9.81 \times 1000} \times (82.6mm \times (35mm + (2 \times 20mm))) = 129.0$$

$$A.S : \frac{load(P)}{A_{axial-f}} \leq \sigma_{allowable}, load(P) \leq \sigma_{allowable} \times A_{axial-f} \quad (6)$$

$$= \frac{204.3MPa}{9.81 \times 1000} \times 2 \times ((150mm - 86.6mm) \times (35mm + (2 \times 20mm)) + (320mm - 150mm) \times 35mm) = 416.7$$

$$S.S : \frac{load(P)}{2A_s} \leq \sigma_{allowable}, load(P) \leq \sigma_{allowable} \times 2A_s \quad (7)$$

$$= \frac{118MPa}{9.81 \times 1000} \times 2 \times ((150mm - 86.6mm) \times (35mm + (2 \times 20mm))) + (28mm \times 35mm) = 137.9$$

$$N.S : \frac{load(P)}{A_{axial-b}} \leq \sigma_{allowable}, load(P) \leq \sigma_{allowable} \times A_{axial-b} \quad (8)$$

$$= \frac{204.3MPa}{9.81 \times 1000} \times (920mm \times 35mm) = 670.6$$

Table 4. Summary of the safety working load obtained by theoretical calculation

A.S. (ton)	A.S.S. (ton)	Capacity (ton)				SWL (ton)
		C.S	A.S	S.S	N.S	
204.3	118.0	129.0	416.7	137.9	670.6	129.0

A.S. : 허용항복응력, A.S.S. : 전단허용응력, C.S : 압축응력, A.S : 축응력, S.S : 전단응력, N.S : 수직응력, SWL : 안전사용하중

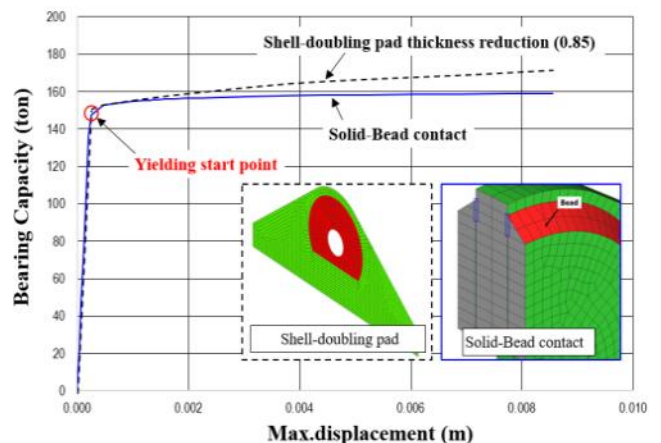


Fig. 11. A comparison of bearing capacity behavior according to modeling type (shell with reduced pad thickness and solid with bead contact model).

러그의 제작 시, 주재료와 연결되어 있는 부위는 용접 비드가 만나는 곳이며, 대부분의 덧판 영역은 주재료와 분리가 되어 있는 상태이다. 효율적인 구조 공학 관점에서 보자면, 결과의 정확도는 높일 수 있지만 엔지니어가 모델링과 해석을 수행하는데 많은 애로사항이 발생하게 된다. 따라서 가장 쉽게 모델링 할 수 있는 쉘 요소를 적용하고, 동일한 초기 항복지점이 발생하는 덧판의 두께를 해석적으로 찾았다. 기존 덧판의 두께에서 85% 수준으로 줄이면 Fig. 11과 같은 유사한 초기 항복을 나타내는 거동을 확인할 수가 있다. 초기 항복 이후 거동은 일부 다르지만, 연구에서 목표로 하는 안전사용하중은 초기 항복이 발생하는 시점이 기준이기 때문에 적용에는 문제가 없다. 여러 가지 모델링 차이 및 평가 방법에 따른 안전사용하중 계산 결과를 Fig. 12에 정리하였다. 이론식 (2.1)에 의한 결과 값이 가장 작게 평가되었으며, 솔리드 모델링에 MPC하중을 적용한 전체 용접 비드가 접촉되는 경우가 가장 큰 값을 보여주고 있다. 실제와 가장 유사한 모델링을 채택하고 있는 솔리드 모델에서 샤프이 닿는 부위에 등가하중 적용과 용접비드에 하중 전달하는 방법을 정해라고 가정한다면, 엔지니어가 간단하게 모델링을 하고 해석 시간을 단축할 수 있는 모델링 방법과 하중 적용 방식에 따른 차이를 보정할 수 있는 대안이 필요하다. 실제 2D 쉘요소 모델링 대비 솔리드 모델링 시간이 약 3배 정도, 해석 시간에서 약 10배 정도 더 많이 소요되기 때문에 보다 손쉬운 2D 쉘요소 모델링을 기반으로 앞서 언급한 덧판 두께의 85%를 적용 및 보정 하는 대안을 제시하고자 한다. 이때, 전체의 용접 비드가 접촉되는 조건은 현실적으로 만족하지 않기 때문에 결과 값이 매우 크게 평가되어 비교에서 제외하였다.

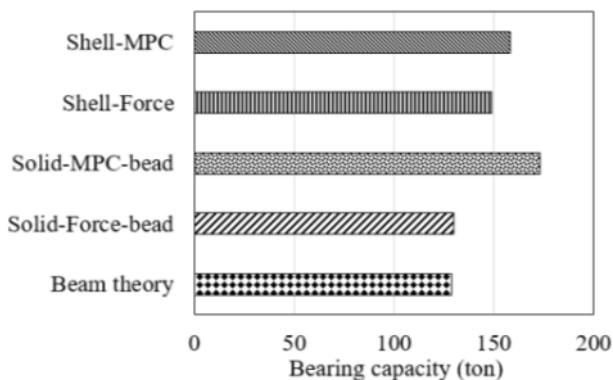


Fig. 12. A comparison of bearing capacity according to modeling types and theoretical calculation based on beam theory.

4. 결론 및 향후 연구과제

선박을 건조하는 과정 중에서 블록의 리프팅 및 반전을 위해서 필수적으로 사용하는 러그의 안전사용하중을 정확하게 평가하기 위하여 여러 가지 방법론을 사용하여 비선형 구조 강도 평가를 수행하였다. 논문에서 검토한 다양한 구조 해석 모델링에 따른 결과는 러그 설계 및 안전사용하중 예측에 좋은 근거 자료로 활용될 것으로 기대된다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

[1] 실제 제작과 가장 유사한 모델링 기법(솔리드-용접 비드 접촉)의 결과를 쉽게 계산할 수 있도록, 덧판의 최초 두께의 85%만 반영하여 안전사용하중 평가를 할 경우에 유사한 값을 확인할 수 있다.

[2] 솔리드 요소를 사용하고 용접 비드까지 표현할 경우, 덧판의 전체가 주재료와 접촉하는 조건은 해석 결과를 신뢰하지 못하는 거동을 나타내고 있다. 따라서 러그 해석을 위한 모델링 작업 시 주의가 필요하다.

[3] 하중 전달 방법의 경우, 노드 등가하중보다 MPC 하중 전달 방법이 높은 최종강도를 나타내고 있지만, 항복 영역은 새클의 상단부가 아닌 대각방향으로 나타낸다. 이는 실제의 거동과는 다른 패턴이다.

[4] 용접부 비드만 주재료와 연결하고, 덧판은 주재료와 분리된 모델링은 실제와 가장 유사한 조건이며, 홀 주변 노드에 등가하중을 적용한 경우, 항복 전과 영역이 넓게 분포하여 MPC를 적용한 경우에 비해 낮은 최종강도를 나타낸다.

[5] 2차원 쉘 모델링은 하중 전달 방법에 따른 최종강도 편차가 크지 않고 항복 영역 패턴이 유사한 반면, 3차원 솔리드 모델링은 하중 전달 방법에 따른 최종강도 편차가 크고 항복 영역의 분포가 다름을 확인하였다.

이후에는 다양한 부재의 형상, 위치 그리고 하중 패턴 등 데이터베이스 기반의 해석을 통해 엔지니어가 쉽고 빠르게 판단할 수 있는 평가식을 도출하고 이 평가식을 기반으로 평가 시스템 개발에 관한 연구가 필요하다.

References

[1] American Society of Mechanical Engineers(2022), ASME-BTH-1-2020; Design of Below-the-Hook Lifting Devices, ASME, USA.

- [2] Ham, J. H.(2011), Parametric Design Considerations for Lifting Lug Structure on Ship Block, Journal of Ocean Engineering and Technology ,Vol. 25, No. 2, pp. 101-107.
- [3] Heo, N. H. and J. S. Lee(2014), The Structural Strength Assessment of Lifting Lug, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 51, No. 1, pp. 42-50.
- [4] Kim, S. I.(2003), Design for Raising the Rate of Recovering use of Lifting Lug, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 4, pp. 59-65.
- [5] Ku, N. K., M. I. Roh, and J. H. Cha(2012), Calculation of the Dynamic Contact Force between a Shipbuilding Block and Wire Ropes of a Goliath for the Optimal Lug Arrangement, Journal of the Computational Structural Engineering, Vol. 25, pp. 375-380.
- [6] Min, D. K. and S. M. Eum(2011), A Study on the Optimization of Lifting Lug for Block Erection, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 82-89.
- [7] Park, J. U., G. B. An, and H. W. Lee(2019), Influence on Properties of Base Metal after Elimination of Lifting-Lug Member in a Dissimilar Welding between Steel base and Steel Lifting Lug, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 11, pp. 858-864.
- [8] Seo, S. K., K. R. Kim, S. S. Eom, and Y. S. Seo(2011), Design and Strength Analysis of Lifting Lugs, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 51-54.
- [9] MSC Software(2012), Patran 2012 User's Guide, Chapter 6, Material modeling, pp. 125-136.

Received : 2023. 04. 05.

Revised : 2023. 05. 30.

Accepted : 2023. 06. 27.