

블록 구조물 적치용 지지대의 빔 이론 기반 구조 안전성 평가법

이명수* · 박주신**†

* 조선대학교 선박해양공학과 교수, ** 삼성중공업 조선해양연구소 그룹장

Simplistic Beam Theory-based Structural Safety Evaluation Method for Block Structure on the A-Carrier

Myung-Su Yi* · Joo-Shin Park**†

* Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

** Group manager, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

요 약 : 선박 건조 과정에서 블록이나 장비를 지지하는 A형 캐리어 구조는 하중 변경과 시간이 지남에 따라 점차 변형이 증가하며, 이에 따라 블록과 접촉하는 면적이 감소하고 분산된 하중에서 집중된 하중으로 패턴이 변화한다. 이러한 현상은 실제 사용 하중을 오관할 가능성이 있다. 특히 A형 캐리어는 영세한 제조 업체에서 자주 사용하고 있으며, 별도의 엔지니어링 기능이 없는 상황이 대부분이라서 손쉽게 캐리어의 안전사용하중을 계산하는 방법의 개발이 필요하다. 본 연구는 A형 캐리어가 장기적으로 안전하게 사용할 수 있는 하중을 신속하게 평가하는 방법을 제안함으로써, 하중 분포의 변화에 따른 소성 변형과 그로 인한 안전 문제를 예측하고 대응할 수 있다. 제안된 방법은 캐리어의 중앙 집중하중과 전체 분포하중 조건에 대해서 유한요소해석(빔, 쉘 모델링)을 통한 결과를 기반으로 빔-이론을 수정하여 제안되었다. 빔 모델링에서 집중하중 조건은 보정계수 0.73, 분포하중에서는 0.69를 이론값에 곱해서 안전사용하중이 가능하다. 쉘 모델링의 경우, 집중하중은 0.75와 분포하중은 0.69를 사용할 수 있다. 본 연구는 선박 건조 작업 현장의 안전을 개선하고, 실제 작업 환경에서의 안전 사용 하중 판단에 신속하고 효과적인 결정을 내릴 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있다.

핵심 용어 : A형 캐리어, 집중하중, 분포하중, 빔 이론, 유한요소해석, 안전 사용 하중

Abstract : Type A carrier structures that support blocks or equipment gradually deform over time with load changes, reducing the area in contact with the block and changing the load pattern from distributed to concentrated during construction work in the shipyard. This phenomenon has the potential to misrepresent actual service loads. In particular, A carriers are often used by small manufacturers, who often do not have specialized engineering capabilities, necessitating the development of a method for easy calculation of carrier safe working load. This study proposes a quick evaluation method for the long-term safe working load of Type A carriers, to predict the plastic deformation and safety issues resulting from changes in load distribution. Based on the results of finite element analysis (beam and shell modeling) of the centralized load, beam-theory was modified to propose a method for determining the distributed load conditions of the A-carrier. In beam modeling, the theoretical value was multiplied by a correction factor of 0.73 for concentrated loads and 0.69 for distributed loads to obtain a safe working load. For shell modeling, a correction factor of 0.75 can be used for concentrated loads and 0.69 for distributed loads. This study can serve as a basis for improving the safety of shipbuilding, enabling quick and effective decisions for determining safe working loads in actual working environments.

Key Words : Type A carrier, Centralized load, Distributed load, Beam theory, Finite element analysis, Safety working load

1. 서론

산업직군상 제조업의 대표적인 산업으로 조선소를 들 수 있다. 최근 조선소는 친환경 에너지를 연료의 관점과 수송

의 관점으로 분류하여 다양한 선종 및 미래 적용 기술 개발을 진행하고 있다. 수주량이 많이 증가하면서 선박을 완성하기 위하여 생성되는 메가 블록의 개수도 기하급수적으로 증가한다. 한 개의 메가 블록을 형성하기 위해서는 보통 3~4개의 중/소 블록을 탑재하는 공정을 거친다. 블록 혹은 의장품은 안전한 적치와 편리한 이동을 위하여 A형 캐리어 위

* First Author : true413@chosun.ac.kr, 062-230-7182

† Corresponding Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613

에 쌓아놓는 게 일반적이다. A형 캐리어는 블록의 운반을 위해서 사용되는 치공구로써, 블록 이동장비의 접근이 쉽도록 일정 높이를 지지하는 구조를 포함하고 있다. 육상뿐만 아니라 해상 운송을 할 때도 캐리어는 사용되고 있으며 그 대표적 형상은 Fig. 1과 같다. 이러한 지지대는 안전과 관련된 중요한 역할을 하고 있음에도 불구하고 안전 사용 하중을 결정하기 위한 명확한 절차와 안전을 기준이 부재하여 반드시 위험도 관리가 필요한 상황이다. 평가법이 달라지면 계산되는 안전 사용 하중 결과도 변경되어 사용자는 혼선이 발생하게 되며, 부정확한 설계 변경은 조선소의 불필요한 신규 투자를 일으킨다. 앞서 언급한 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 정밀한 유한요소해석 모델링을 기반으로 작용 하중에 대한 구조해석을 수행하였다. 캐리어를 운영하는 특성상, 복잡한 프로그램을 이용한 결과 도출이 어렵기 때문에, 직관적으로 접근할 수 있는 수계산 평가법과 비교하였다. 이 방법의 단점인 정확성을 바로잡기 위하여 보정계수를 도출하여 계산의 편의성과 정확성 모두를 개선하였다. 본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.



Fig. 1. A example of block supported by A-typed carrier.

Song et al.(2013)은 선박 및 해양플랜트 운용과 관련되어 원유나 천연가스 등과 같은 액체화물 이송에 사용되는 해양 로딩암의 국산화 개발과 관련된 구조설계 안전성을 검토하였다. Oil Companies International Marine Forum(OCIME, 1999)에서 규정된 설계 하중 조건을 고려하여 구조해석을 수행하였다. Nastran(MSC, 2012) 프로그램을 이용하여 영하 40도의 혹한 환경조건을 고려하여 열전달 해석을 수행 후, 구조 강도 해석을 순차적으로 진행하였다. 규정에서 언급된 모든 하중 조건에 대해 개발된 제품은 잔여 이윤이 50% 이상으로 확인

되었고 고강도 강재를 적용한 추가적인 중량 절감이 필요함을 언급하였다.

Liu and Liu(2022)는 유한요소 이론과 단순화된 모델을 기반으로 경주용 자동차 프레임 구조의 정적 강도를 해석으로 접근하였다. 한계하중 조건에서 최대응력을 분석하여 구조 최적화를 수행하였다. 주요 하중 조건은 굽힘, 비틀림, 제동 및 선회이며 국부 영역에서 허용 기준을 넘는 응력집중이 발생하여 재설계가 필요함을 언급하였다.

Lu et al.(2022)는 철골 구조물 작업장에 설치된 크레인의 구조 손상에 대한 원인 분석을 수행하였다. 유한요소해석은 Midas Gen 프로그램이며, 서로 다른 트랙 편심 값에서 9m와 12m 강철 크레인 빔의 최대응력과 처짐 및 응력 진폭을 분석하였다. 브레이크 트러스가 없는 모델에서 편심하중 작용으로 크레인 빔의 최대응력과 처짐이 심하게 증가함을 확인하였다. 철제 크레인 빔이 레도 편심에 민감한 이유는 비틀림 강성이 너무 작기 때문이다. 보강 조치로 크레인 빔 플랜지의 아래쪽 용접 앵글 강판 또는 브래킷을 추가하여 비틀림 강성을 보완하는 보강 안을 제시하였다.

Dong et al.(2023)은 골조 복합 구조물에서 중요한 수직 하중 지지 부재인 철근 콘크리트 기둥 중 고강도 콘크리트로 설계되는 내력기둥에 관한 연구를 수행하였다. 단면 크기가 700mm이고 콘크리트 강도가 다른 개방형 기둥 2개와 다세포형 철근 콘크리트 2개 등, 4개의 스케일 메가 기둥을 대상으로 단방향 반복 압축 시험을 시행하였다. 시험 결과 멀티셀 철근이 균열 확대와 콘크리트 균열을 효과적으로 완화하고 최종강도 이후 잔류 강도를 개선하는 것을 확인하였다.

Park et al.(2023)은 LNG 추진 15K 컨테이너선의 블록 탑재 공정에 따른 축계 주변 변형량 계산에 대한 통합화된 구조 강도 평가 절차를 제안하였다. 주요 공정은 선행탑재, 탑재 순서별 용접 변형, 도크 내 블록의 리프팅과 재설치 그리고 진수로 분류하였다. 단계별 처짐 양 변화를 연속적으로 확인하였으며, 탑재 시 용접 작업에 의한 처짐 변화보다 블록을 지탱하는 서포트 배치에 따른 처짐 변화가 지배적이었다. 마지막 단계인 진수 조건에서는 부력 작용에 따라 변형 재분포가 발생하고 선행탑재 조건과 유사한 변형 패턴으로 변화한다. 저자들은 일련의 생산 공정을 순차적으로 구조해석을 해야 하는 중요성을 강조하였고, 열 해석과 구조 강도 해석을 통합화하였다.

Nawar et al.(2023)은 육상 건물 건설에 주로 사용하는 천공 강철 부재(PSM)의 폭발 하중에 대한 저항 능력을 검증하기 위하여 폭발 시나리오를 산정한 후 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 프로그램은 시간 이력을 고려한 동적 거동 효과의 구현이 가능한 LS-Dyna를 적용하였다. 해석을 통하여 검증된 수치 모델은 8 노드 솔리드 요소로 구성되며 다양한

매개변수를 사용하였다. 도출된 해석 결과와 실험 데이터는 동적 거동을 예측하는 데 잘 일치하였고, 셸 요소에 비해 솔리드 요소가 거동 예측의 정확성이 높게 나타났다.

선행연구 분석을 통해서 본 연구와의 직접적인 유사성을 찾을 수는 없었으나 유한요소해석 적용을 통한 결과의 정확성을 높이고자 하는 목적은 동일하였다. 하지만 기존 연구의 경우, 평가법의 비교를 통하여 개선된 방법의 제안에 대해서는 특별한 언급이 없었다는 것이다. 본 연구를 통한 주요 결과는 조선용 블록 적치대의 구조 안전성 평가 분야에 관여한 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

2. 블록 적치용 캐리어

2.1 주요 구성 및 제원

조선소 및 제조 현장에서 블록 적치 용도로 주로 사용하는 A형 캐리어의 정면도와 주요 치수를 Fig. 2에 나타내고 있다. 수평 빔의 전체 거리는 10,500mm이고 두 개의 수직 서포트 사이는 9,200mm이다. 수직 서포트 사이의 빔에 총 4개의 브래킷이 등 간격으로 위치한다. 전체 높이는 2,438mm이며 제조사에서 보유하고 있는 이동용 트랜스포터 장비 사양과 관련이 있지만 대부분 유사한 치수를 갖고 있다. 캐리어를 측면에서 보면 A와 유사한 레그 구조가 위치하며, 수평 빔을 통해 전달된 하중이 지면에 효과적으로 분산되고, 자체적으로도 전도가 발생하지 않도록 하는 기능을 한다.

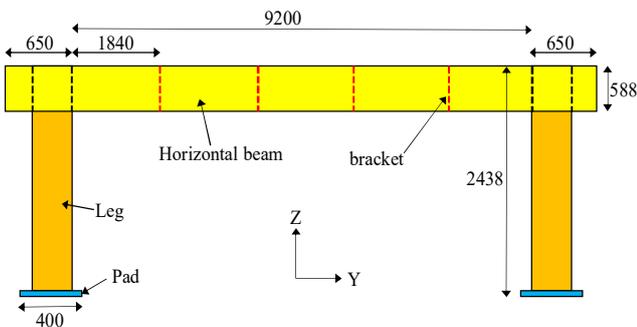


Fig. 2. Dimension of the A-typed carrier.

2.2 캐리어 수평 빔의 형상 정보

블록 적치용으로 사용하고 있는 A형 캐리어의 수평 빔은 박스의 중앙에 보강재가 관통하며, 빔 모델링과 이론 계산의 편의성을 위하여 Table 1과 같은 H-beam으로 이상화하였다. 해석 결과에 영향을 줄 수 있는 관성모멘트($1,544,255,072\text{mm}^4$)와 단면 계수($5,252,568\text{mm}^3$)는 같다.

Table 1. Actual dimension and equivalent inputs

ID	sec.	height (mm)	width (mm)	thickness(mm)		
				flange	web	side
actual		588	300	20	12	15
equivalent		588	300	29.8	12	15

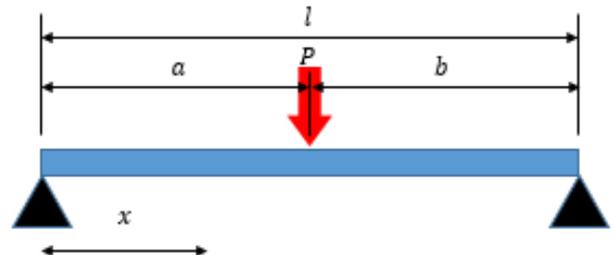
여기서, height는 수평 빔의 높이, width는 수평 빔의 폭, flange는 H-beam 상/하단부, web에는 H-beam 중앙부, side는 수평 빔의 최외곽 부를 나타낸다.

3. 유한요소해석 및 변수 영향 검토

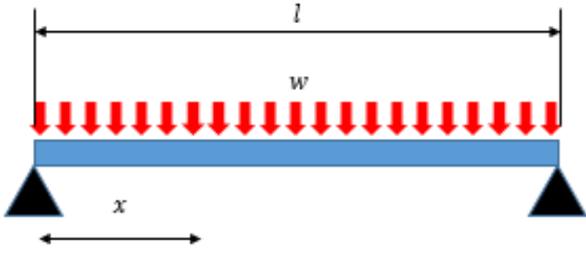
3.1 모델링 및 경계, 하중 조건

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 근간으로 하여 공학용 해석이 가능한 상용프로그램인 MSC Nastran과 Patran을 사용하였다(MSC, 2012). 모델링은 2개의 Joint를 갖는 1차원 빔(Beam) 요소와 4개의 절점을 갖는 셸(Shell) 요소를 사용하였다. 빔 해석에 사용된 메쉬수는 240개이고, 셸은 5,600개의 요소로 분할되어 있다. 해석의 경계 조건은 수평 빔의 양 끝단과 레그가 지면과 접촉된 핀 고정 지지(x, y and z : fix) 조건을 Fig. 3과 같이 적용하였다. 재료의 물성값은 SS400을 적용하였으며 탄성계수는 206,000MPa, 항복응력은 최솟값인 235MPa, 그리고 푸아송비는 0.3을 적용하였다. 해석에 사용된 하중은 100톤으로 일관성을 유지하였다.

3.2 빔 이론 계산 및 유한요소해석과 비교



(a) centralized load



(b) distributed load

Fig. 3. A comparison of load types on the beam model.

$$M_{\max} = \frac{P \times a \times b}{l} \quad (1)$$

$$M_{\max} = \frac{w \times l^2}{8} \quad (2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{Z} \quad (3)$$

여기서, P 는 집중하중, a, b 는 하중 위치로부터 거리, w 는 분포하중을, x 는 하중 작용 위치로부터 모멘트 거리, l 은 모델의 수평길이를, Z 는 단면 계수를 나타낸다.

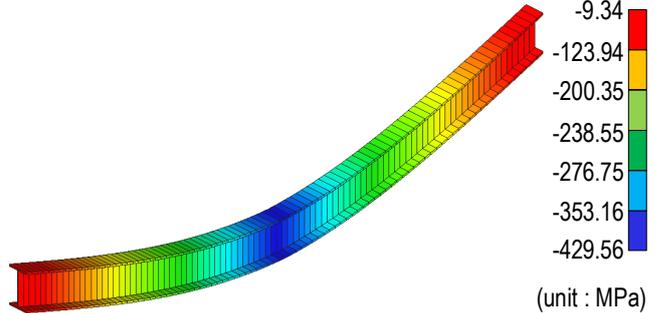
빔 이론을 이용하여 단순 지지가 된 빔에 집중 및 분포 하중에 대한 휨 응력을 평가하는 방법은 식(1)과 (2)를 이용하여 모멘트를 계산하고 빔이 갖고 있는 단면 계수(Z)를 나눠줌으로서 계산한다. Table 2와 3에서 언급된 정보를 이용하여 중앙집중 하중을 받는 수평 빔의 최대 휨 응력은 429.5MPa이고 분포하중 조건의 경우 214.7MPa로 계산이 된다.

Table 2. Bending stress result under centralized load

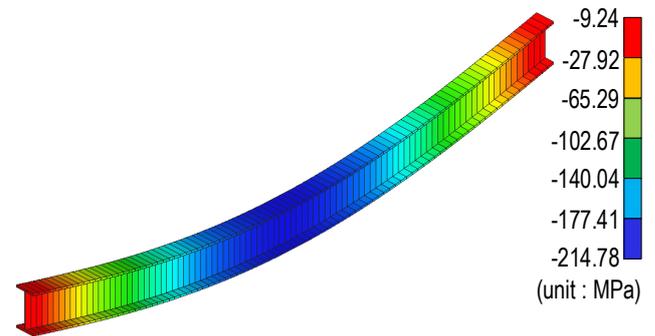
load	length (mm)			M_{\max} (N·mm)
	l	a	b	
C.L	9,200	4,600	4,600	2,256,300,000

Table 3. Bending stress result under distributed load

load	l (mm)	w (N/mm)	M_{\max} (N·mm)
D.L	9,200	106.63	1,128,150,000



(a) centralized load



(b) distributed load

Fig. 4. A comparison of beam stress result according to load types

캐리어의 수평 빔의 양끝단에 단순지지 경계조건을 부여 하고 빔 모델링 후 유한요소해석 결과를 Fig. 4에 나타내고 있다. 최대응력 결과는 이론값(Table 2, 3)과 정확하게 일치 한다.

3.3 레그를 포함한 유한요소해석 결과

현장에서 사용하고 있는 A형 캐리어는 수평 빔의 양끝단에 레그를 포함하고 있으며, 레그가 하중 분담을 어떻게 하는지 확인이 필요하다. 수평 빔 중앙에 집중하중을 받는 경우의 응력과 변형 결과를 Fig. 5(a)에 나타내고 있다. 레그 끝단 경계조건이 부여된 위치와 수평 빔과 레그가 만나는 위치에서 최대응력 323MPa이 발생하고 레그쪽으로 근접할 수록 응력 값이 많이 감소한다. 이 패턴은 중심점 하중을 받는 빔의 일반적인 경향으로 굽힘 모멘트가 중심에서 최대가 되고 레그 쪽으로 갈수록 감소하는 특징을 보여준다. 수평 빔 전체 분포하중 조건의 결과는 Fig. 5(b)에 나타내고 있다. 수평 빔의 처짐 양이 줄어들면서 최대응력이 198MPa로 감소 하였다. 빔 모델링의 경우, 응력 보정계수는 집중하중에서는 0.75를 이론값에 곱하고, 분포하중에서는 0.92를 곱해서 신속 하게 안전사용하중을 계산할 수 있다.

셸 요소를 적용하고 같은 하중 조건의 결과를 Fig. 6(a)와 (b)에 비교하고 있다. 집중하중을 적용 시, 수평 빔의 상단

면에서 최대응력이 발생하며, 314MPa이 계산되었다. 분포하중을 받는 경우 수평 빔과 서포트가 만나는 위치에서 응력 집중 현상이 발생하며, 최대응력 149MPa이다. 빔 모델링의 경우, 응력 보정계수는 집중하중에서는 0.73을 이론값에 곱하고, 분포하중에서는 0.69를 곱해서 신속히 안전사용하중을 계산할 수 있다. 빔 모델링과 셸 모델링의 가장 큰 차이점은 수평 빔과 레그의 연결부에서 발생하는 국부 휨 성분에 의한 응력집중 표현 여부이다.

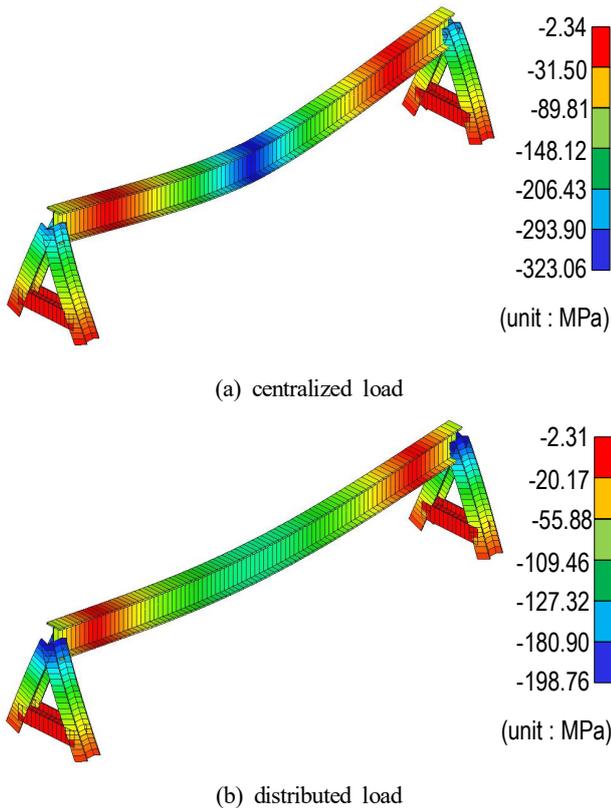
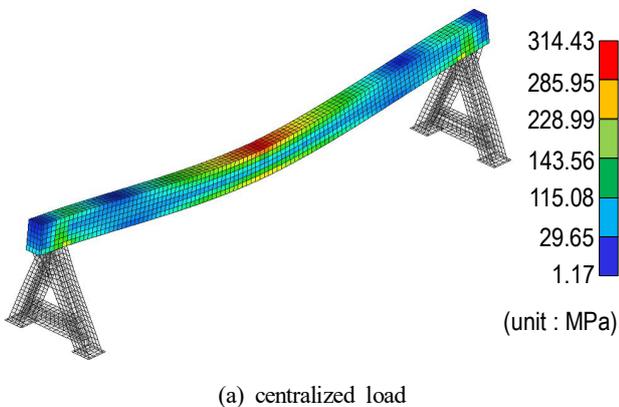
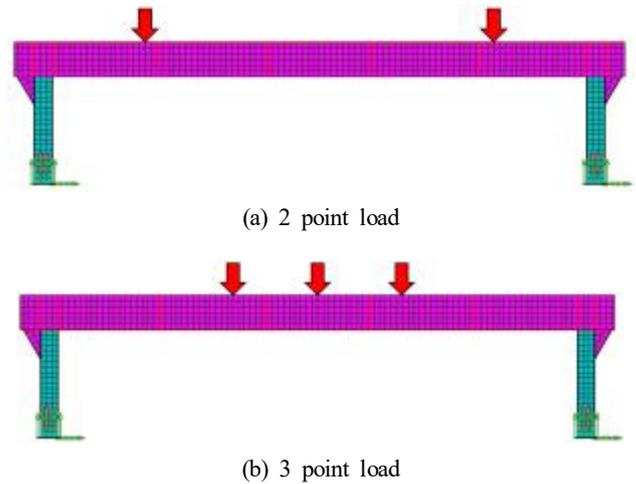


Fig. 5. A comparison of beam stress result according to load types.



(b) distributed load

Fig. 6. A comparison of maximum shell stress result according to load types.



(b) 3 point load

Fig. 7. Load definition according to position of load.

블록 형상에 따라서 캐리어에 하중이 전달되는 위치가 변경될 가능성이 있으며, Fig. 7과 같이 분류할 수 있다. 곡 블록의 경우 Fig. 7-(b)의 하중 전달 패턴이 발생하고 좌/우 평 블록 형상을 갖는 경우에는 Fig. 7-(a) 유형과 같이 수직 하중이 전달된다. 2점 하중을 받는 빔의 응력 분포는 하중이 적용되는 지점에서 최대응력을 나타낸다. 일반적인 굽힘 응력 분포와 마찬가지로 하중 바로 아래 영역이 가장 높은 응력이 발생하며, 하중 사이와 레그쪽으로 갈수록 응력이 감소한다. 3점 하중의 최대응력은 266.7MPa로서 중앙부 하중 증가가 굽힘 모멘트 증가에 미치는 영향을 나타내고 있다. 블록 하부 형상에 따라서 두 가지 하중 조건에서 수평 빔의 응력 분석을 통해서 집중하중에 구조 응력이 어떻게 반응하는지를 확인하였으며, 이러한 결과를 이용하여 캐리어 배치 시 충분한 안전성을 확보해야 함을 알 수 있었다..

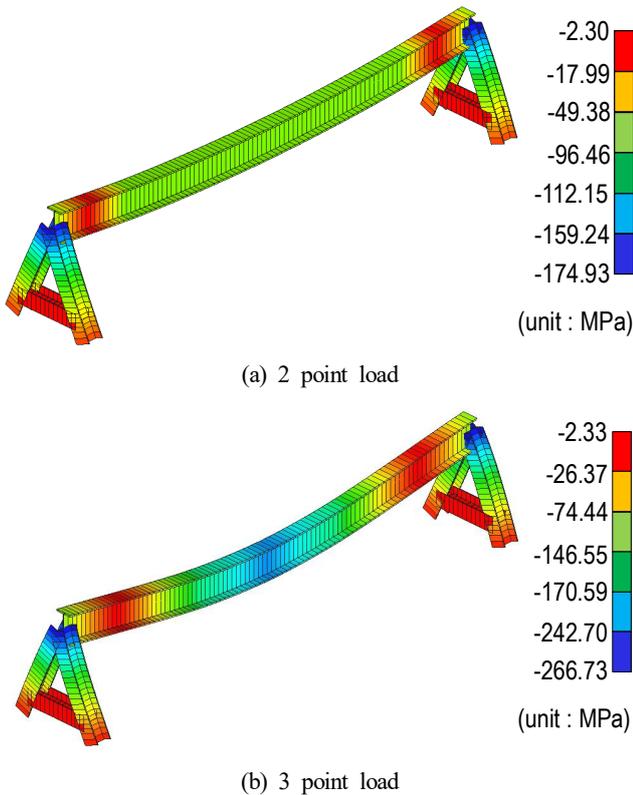


Fig. 8. A comparison of beam stress and deformed shape according to point loads.

위 하중 조건에 따른 구조해석 결과를 Fig. 8에 나타내고 있으며, 응력 값은 음수로 모두 압축응력이 발생하고 있다. 변형된 형상은 캐리어가 하중 적용 지점에서 크게 나타나고 있고, 하중 작용 지점 근처에서 응력집중이 높고 레그 쪽으로 분산되고 있음을 알 수 있다. 3점 하중 조건에서 최대응력이 크게 나타나며, 이는 수평 빔의 중앙부에 하중 추가로 인한 변형량 증가와 연관되어 있다.

응력집중이 크게 발생하는 수평 빔과 레그의 연결 부위는 잠재적인 영구 변형이나 파손을 방지하기 위해 단면 보강 혹은 설계 수정이 필요한 위치이다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 블록 및 의장품의 적치에 사용하는 A형 캐리어의 안전 사용 하중을 계산하는 방법을 소개하고, 계산 결과를 분석하였다. 구조 강도 및 구조해석에 대한 전문성이 없더라도 구조해석에서 판단한 결과를 유추하는 방법을 제시하였다. 캐리어는 하중 지지부인 수평 빔과 양쪽 레그를 포함한 구조해석 경향을 분석하여 기존 빔 이론에 추가적인 응력 보정계수를 도입하여 표현하였다. 연구를 통하여

도출된 결론은 다음과 같다.

- [1] 캐리어 빔의 중앙에 집중하중 조건에서는 유한요소해석 빔과 셸 모델링에 의한 차이는 3%로 빔 모델링의 결과가 크게 나타났다. 빔 이론과 빔 모델과의 결과 차이는 25%로 이론치가 높게 평가하였다.
- [2] 캐리어 빔에 분포하중 조건에서는 빔과 셸의 차이는 12%가 빔 결과에서 크게 나타났으며, 이론치와 빔 비교에서는 이론값이 33% 크게 나타났다.
- [3] 셸 모델링의 경우 최대응력이 발생하는 라인에서 요소의 평균값이 빔 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 이는 메쉬 크기와 요소 특성 차이에 기인한 것으로 셸 모델링의 경우 평균값으로 환산하는 것을 제안한다.
- [4] 구조해석에 대한 접근이 어렵고 빔 집중하중을 받는 경우 이론치에 0.73을 곱하여 안전사용하중 계산이 가능하다. 분포하중 조건에서는 0.69를 사용할 수 있다.
- [5] 레그를 고려한 경우, 중앙 집중하중에서는 이론치에 0.75와 전체 분포하중에는 0.92라는 보정계수를 곱해서 안전사용하중을 결정할 수 있다.
- [6] 캐리어 빔 상단에 2개 및 3개 위치에 집중하중이 작용하면 빔 결과와 셸 결과는 응력 보정계수는 필요하지 않다.
- [7] 집중하중 위치에 따른 레그의 응력 차이는 발생하며, 빔 결과에 1.05를 곱하면 셸 결과와 같아진다. 빔 모델링에서는 국부적인 응력집중이 정확하게 반영되지 않기 때문에, 이런 방법을 통하여 이론 시일 안에 결과의 정확도를 높일 수 있다.

향후 연구과제로서는 캐리어의 수평 빔의 구조 단면을 변화하고, 스패를 줄여주기 위하여 설치되는 브래킷의 기여도까지를 계산 결과에 반영하는 연구가 필요하다. 또한, 사용연한이 오래되어 이미 소성변형을 갖고 있는 캐리어의 안전사용하중에 대한 재평가 및 폐기 기준을 수립하는 연구가 필요하다. 소성변형을 고려하기 위해서는 재료의 비선형과 대변형을 고려해야 해서, 셸 모델링을 통한 비선형 해석이 필요하다. 이러한 복잡한 해석을 통해서 도출된 특징들은 엔지니어가 쉽게 적용할 수 있는 경험식으로 변환할 필요성이 있다.

사 사

This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE) (2021RIS-002).

References

- [1] Dong, H., J. Zhu, W. Cao, and Y. Rao(2023), Axial Compressive Behaviour of Mega Steel-Reinforced High-Strength Concrete Columns with Different Steel Sections, Structures, Vol. 48, pp. 1158-1174.
- [2] Liu, M. and J. Liu(2022), Strength Analysis and Research of one Touring Car Frame, Journal of Physics, pp. 1-5.
- [3] Lu, C., Z. Yang, P. Li, X. Zhang, J. Huang, and L. Wang (2022), Finite Element Analysis and Reinforcement of Steel Crane Beam under Eccentric Track Loading, MDPI-machins, Vol. 10, pp. 1-15.
- [4] MSC Software(2012), Patran 2012 User's Guide, Chapter 6, Material modeling, pp. 125-136.
- [5] Nawar, M. T., A. El-Zohairy, and I. T. Arafa(2023), Finite Element Modeling and Analysis of Perforated Steel Members under Blast Loading, MDPI-modelling, Vol. 4, pp. 628-649.
- [6] OCIMF(1999), <http://www.ocimf.org>
- [7] Park, J. -S., J. -S. Park, and J. -K. Seo(2023), A Study on the Characteristics about Shaft Deflection According to the Chang in Manufacturing Sequences, Journal of Welding and Joining, Vol. 41, pp. 396-402.
- [8] Song, C. Y., H. Y. Choi, and S. H. Shin(2013), Structural Safety Evaluation of Marine Loading Arm Using Finite Element Analysis, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, pp. 43-50.

Received : 2024. 04. 16.

Revised : 2024. 05. 23. (1st)

: 2024. 05. 28. (2nd)

Accepted : 2024. 06. 27.