리프팅 러그의 구조 강도 평가

허남학¹·이주성^{1,†}
울산대학교 조선해양공학부¹

The Structural Strength Assessment of Lifting Lug

Nam-Hak Heo¹·Joo-Sung Lee¹
School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea¹

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.

Lifting lugs are frequently used in shipyard to transportate and turn over blocks. As the shipbuilding technology develops, blocks has become bigger and bigger, and block management technology takes a more important role in shipbuilding to enhance the productivity. For the sake of economic as well as safe design of lug structure, more rigorous analysis is needed. In this study in order to investigate the strength characteristics of two type of lug, that is, D and T type lugs, non-linear strength analysis has been carried out to compare the ultimate strength characteristics of two types of lug varying in-plane and out-of-plane loading directions. Based on the present numerical analysis results, it can be drawn that T type lug is superior to D type lug from view points of ultimate strength and deformation.

Keywords : D type lug(D 형 러그), Lifting(인양), Non-linear structure analysis(비선형 구조해석), T type lug(T 형 러그), Turn over(반전 작업)

1. 서 론

선박 및 해양 구조물의 건조과정에 있어서 블록의 운반 및 반전(turn-over)등은 필수적인 공정이다(Kim, 2006). 이러한 필수적인 공정을 처리하기 위하여 현장에서 많은 양의 리프팅 러그가 사용되어지고 있으며, 최근에는 부유식 해상풍력 발전기 설치 및 계류 시에도 사용되는 등 여러 분야에 걸쳐 러그가 사용되고 있다. 특히, 선박 및 해양 구조물의 건조 기술이 발전해 감에 따라 블록단위의 구조물이 점점 대형화되고 이에 따라 운반 및 반전시 안전성 확보를 위한 러그 자체의 구조적 안전성 및 러그의 부착 위치의 결정에 대한 중요성이 부각되고 있다. 한편으로는 블록의 이동 등에 사용되는 많은 수의 러그를 제작하는 비용의 감소에 대한 요구 역시 무시할 수 없는 상황이다. 하지만 무리한 부재치수 감소로 리프팅 러그가 파단 되었을 때 안전 및 비용적 문제가 발생하기 때문에 설계에 있어 보다 각별한 주의가 요구된다(Seo, et al., 2011).

이러한 배경에 의거하여 본 연구에서는 우선 해석과정의 타당성을 검증하기 위해 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 이어서 현장에서 주로 사용되고 있는 D 형 러그(D-type lug)와 T 형 러그(T-type lug)를 선정하여 이에 대한 비선형 구조해석결과를 토대로 강도 평가를 수행하였다. 해석을 위하여 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하였다(V-Eng, 2013). 여기에서 선정된 두 가지 형태의 러그에 대해 동일한 하중의 적용에 따른 강도를 평가

비교하고, American Society of Mechanical Engineers (2008)에 제시된 안전계수를 고려하였을 때 러그에 대한 강도 특성을 비교하였다. 본 연구의 비선형 해석 결과에 따르면 동일 하중에 대해 T 형 러그의 하중-변위 특성이 D 형 러그보다 우수함을 확인하였으며, 동일한 안전계수에 대해서도 강도가 보다 높다는 것을 확인하였다.

2. 해석과정의 타당성 검토

2.1 해석의 타당성 검토

먼저 본 연구에서 적용한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 기존에 발표되었던 리프팅 러그 관련 논문과 비교하여 보았다.

본 연구에 적용한 해석방법에 대한 타당성을 검토하기 위함이 목적이므로 기존 논문의 결과 값 중에서 실험을 통해서 얻어진 결과 값과 논문에 명시된 실험 모델에 대한 부재치수 및 물성치를 적용하여 실시한 해석의 결과 값을 비교하여 보았다. 검증을 위하여 실험 및 해석에 적용된 재료의 물성치는 Table 1에 나타난 것과 같이 항복응력(yielding stress)의 경우는 러그는 300MPa, Pin은 10GPa로 설정하고 탄성계수(elastic modulus)와 Poisson 비(poisson's ratio)는 러그와 셔클 핀(shackle pin)에 각각 206GPa와 0.3으로 동일하게 적용하였고, 응력-변형을 관계는 완전 탄소

성으로 가정하였다. 적용된 모델의 형상은 다음의 Fig. 1과 같으며 모델의 부재치수에 대한 정보는 Fig. 2에 상세하게 나타나있다.

Table 1 Properties of materials

	Lug	Pin
Elastic Modulus	206GPa	206GPa
Yield Stress	300MPa	10GPa
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Strain Hardening	Perfect elasto-plasticity

Fig. 1 Lug specimen

Fig. 2 Definition of dimensions of specimen

또한 해석 시 Fig. 3과 같이 UTM(Universal testing machine) 장비를 이용하여 실시한 실험과 같은 조건을 구현하기 위하여 (Lee, et. al, 2012) Fig. 4의 (a)와 같이 경계조건을 러그 하단 일부를 완전고정경계조건을 적용하여 완전하게 고정 시켰으며 또한 Fig. 4의 (b)와 같이 하중을 컨트롤하기 위한 Reference point (RP)에 MPC Beam요소를 핀의 양 끝 단면에 적용하여 해석 시 하중이 점차 증가하도록 하였다. 즉, 완전 고정된 러그의 하단면과 수직인 위쪽(y축) 방향으로 RP에 하중을 적용하였으며, 하중의 크기는 초기 84.4kN이 가해진 후 연속적으로 209kN의 하중이 추가되도록 하였다.

기존 논문에서 실험을 통해 얻은 결과 값과 본 논문의 해석방법을 이용하여 동일한 모델에 대한 해석을 통해 얻어진 결과 값을 비교하여 보았을 때, Fig. 5와 같이 유사함을 알 수 있기에 본 논문에서 사용한 해석방법은 타당하다고 판단된다.

Fig. 3 Test of lifting lug with UTM

(a) Boundary condition

(b) Loading condition

Fig. 4 Definition of boundary and loading conditions for finite element analysis

Fig. 5 Comparison of results between experiment and finite element analysis

3. 해석모델 및 조건

3.1 해석모델

본 연구에서의 해석모델은 앞서 명시한 것과 같이 현재 선박 및 해양구조물 건조과정에서 리프팅 및 반전작업 등에 사용되어 지고 있는 많은 종류의 러그타입 중에서 가장 많이 사용되어지고 있는 D 형과 T 형 러그를 선정하였으며, 해석에 사용된 두 타입의 러그는 20ton중량의 구조물에 대한 작업 시 사용되어지고 있다. 두 타입의 러그를 사용함에 있어 러그 홀 주변의 강도를 보강하기 위해 이중판 (double plate)을 부착하였으며, 면외방향하중 (out of plane load)에 의한 전도방지를 위하여 브라켓이 부착되어져 있다. 이 D 형 러그와 T 형 러그에 대한 형상은 아래 Fig. 6에 나타나 있다 (Min & Eum, 2011).

(a) D type

(b) T type

Fig. 6 Example of D type and T type lug

해석에 적용된 각각의 재료 즉, 러그본체, 이중판(double plate), 브라켓, 핀에 대한 재료 물성치는 Table 2에서와 같이 핀을 제외한 러그본체, 이중판과 브라켓의 재질은 연강으로써 탄성계수, 항복응력 및 Poisson 비는 각각 210GPa, 235MPa 그리고 0.3을 적용하였다. 핀은 연강 보다 항복응력이 높은 1.5GPa의 Grade 8의 강종을 선택하고 해석에 적용하였다. 그리고 해석 시 응력-변형을 관계는 완전 탄소성으로 설정하였다.

Table 2 Material properties

	Pin	Lug & Double plate
Material	Alloy Steel, Grade 8	Mild Steel
Elastic Modulus	210GPa	210Gpa
Yield Stress	1.5GPa	235 MPa
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Strain Hardening	No Strain Hardening (Perfect Elasto-Plastic)	

3.2 해석 Case 정의

해석모델의 경우들은 다음의 표 Table 3에 정리 된 것과 같이, 우선 크게 D 형 러그와 T 형 러그에 대해 각각 20가지의 Case로 총 40개의 Case로 구성하였다.

Table 3 Analysis cases of D and T type lugs

In-plane	Out-of-plane
0	0
	15
	35
	45
30	0
	15
	35
	45
45	0
	15
	35
	45
60	0
	15
	35
	45
90	0
	15
	35
	45

해석 시 하중조건은 면내하중(in plane load) 방향과 면외하중(out-of-plane load) 방향 즉, 면내 0, 30, 45, 90도 방향에 면외 0, 15, 35, 45도 방향이 각각 적용되며 각각의 경우에 대하여 하중(1000 kN)이 가해지는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 각각의 경우들에 적용된 면내하중 방향과 면외하중 방향에 대한 자세한 내용은 다음의 Fig. 7과 Fig. 8에 자세히 나타내고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 하중의 방향을 나타내고 있는 것으로 두 타입의 러그 모두 면내하중방향은 핀의 중심축을 기준으로 x축 방향을 0도 핀의 중심축과 수직인 방향인 z축을 90도로 정하였으며, 면외하중 방향은 핀의 중심축과 수직인 z축을 0도로 하고 z축을 기준으로 음의 y축 방향으로 벌어질수록 각이 커지도록 설정하였다.

(a) In-plane

(b) Out-of-plane

Fig. 7 Definition of loading directions of D type lug

(a) In-plane

(b) Out-of-plane

Fig. 8 Definition of loading directions of T type lug

3.3 경계조건

해석 시 적용된 경계조건은 D 형 러그와 T 형 러그의 두 경우 모두 구조물에 부착되어지는 하단부에는 완전고정경계조건을 적용하여 모든 자유도를 구속시켰으며, 핀의 끝 단부에는 MPC beam 요소를 사용하여 Reference point에 Control point로 지정하여 그 점에 대하여 하중을 적용하는 방식을 사용하였다. 러그 구조해석에 있어 가장 중요한 부분이 접촉면의 정의이다. 접촉면은 Master와 Slave면으로 구성되어 있으며, Master면은 하중을 전달하는 부분으로 핀이 그 역할을 한다. 그리고 Slave면은 Master 면과 접촉하는 부분으로 Master 면에 의한 변형이 발생하는 러그 홀과 Double plate 홀의 안쪽 면으로 지정하였다. 또한, General contact를 적용하였고, Tangential방향 조건을 고려하여 마찰계수(friction coefficient)를 0.2를 적용하여 해석을 수행하였다. 아래의 Fig. 9에서는 D 형 러그와 T 형 러그 각각에 적용된 경계조건들을 나타내고 있다.

(a) D-type lug

(b) T-type lug

Fig. 9 Definition of boundary and loading conditions for D and T type lugs

4. 해석결과

두 형태의 러그 해석모델에 대한 다양한 하중 조건인 Table 3의 Case들에 대한 결과이다.

4.1 D 형 러그의 해석결과

(a) 20% (200kN)

(b) 40% (400kN)

(c) 80% (800kN)

(d) 100% (1000kN)

Fig. 10 Stress distribution and deformed shape to the rate of applied load for D type lug

(a) Direction of out-of-plane loading = 0°

(b) Direction of out-of-plane loading = 15°

(c) Direction of out-of-plane loading = 35°

(d) Direction of out-of-plane loading = 45°

Fig. 11 Stress distribution and deformed shape to loading direction for D type lug

(a) in-plane 0° and out-of-plane 0,15,35,45°

(b) in-plane 30° and out-of-plane 0,15,35,45°

(c) in-plane 45° and out-of-plane 0,15,35,45°

(d) in-plane 0° and out-of-plane 0,15,35,45°

(e) in-plane 90° and out-of-plane 0,15,35,45°

Fig. 12 Result of force-displacement curves to loading direction for D type lugs

먼저 면내 45도 방향에 면외 0도 방향으로 하중(1000kN)을 가하였을 때 하중 단계에 따른 D type 러그 모델에 나타나는 응력 분포와 변형형상은 Fig. 10과 같다. 각 그림별 캡션의 숫자는 계획한 작용하중에 대한 비율로서, 예를 들어서 20%는 1000kN의 20%인 200kN을 작용시킨 경우이다. Fig. 10의 그림들에서 알 수 있듯이 하중이 점점 크게 가해짐에 따라 핀과 접촉되는 러그 홀 및 이중판부분에 항복응력 이상의 응력이 발생하는 영역이 넓어지고 그에 따라 변형이 일어나는 현상을 알 수 있었다.

Fig. 11은 면내 45도 방향에 면외 0, 15, 35, 45도 각각의 방향으로 하중(1000kN)이 작용하였을 때 D 형 러그 모델에 나타나는 응력분포와 변형형상을 나타낸 것이다. 해석 결과들을 통해 알 수 있듯이 고정된 면내방향에 면외방향 하중의 각도가 커질수록 면외 방향의 변형이 크게 나타났으며, 또한 그 힘을 지지하는 브라켓에는 항복응력 이상의 응력분포 영역이 점점 커지는 것을 알 수 있다.

다음으로는 D type 러그에 면내 방향 0, 30, 45, 60, 90도 각각에 대해 면외하중 0, 15, 35, 45도가 적용되었을 때의 결과를 나타낸 것으로 면내하중방향을 기준으로 면외하중에 따른 강도특성을 Fig. 12에 작용하중과 하중방향으로의 변위 관계로 나타내었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 5가지 경우들 모두에서 동일한 면내하중 방향에 면외하중 방향이 커질수록 강도가 낮아지는 경향이 나타났다.

4.2 T 형 러그의 해석결과

면내 45도 방향에 면외 0도 방향으로 하중(1000kN)을 가하였을 때 하중의 정도에 따른 T type 러그 모델에 나타나는 응력 분포와 변형형상은 Fig. 13과 같다. 아래 Fig. 13의 그림들에서 알 수 있듯이 하중이 점점 크게 가해짐에 따라 Pin과 접촉되는 러그 홀 및 이중판 부분에 항복응력 이상의 응력이 발생하는 영역이 넓어지고 그에 따라 변형이 일어나는 현상을 알 수 있다.

면내 45도 방향에 면외 0, 15, 35, 45도 각각의 방향으로 하중(1000kN)이 작용하였을 때 T type 러그 모델에 나타나는 응력 분포와 변형형상을 아래의 Fig. 14에 나타낸 것으로 D type 러그와 마찬가지로 고정된 면내방향에 면외방향 하중의 각도가 커질수록 면외 방향의 변형이 크게 나타났으며, 또한 그 힘을 지지하는 브라켓에는 항복응력 이상의 응력분포 영역이 점점 커지는 것을 알 수 있다.

T type 러그에 면내 0, 30, 45, 60, 90도 방향에 면외 0, 15, 35, 45도방향으로 하중(1000kN)이 작용하였을 때 나타나는 강도특성을 나타내는 그래프로 각각의 면내방향에 대하여 구분하여 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에 나타낸 5가지 Case에 대한 그래프 모두 동일한 면내방향에 면외방향의 하중 각도가 커질수록 강도가 낮아지는 경향이 나타났다.

(a) 20% (200kN)

(b) 40% (400kN)

(c) 80% (800kN)

(d) 100% (1000kN)

Fig. 13 Stress distribution and deformed shape to the rate of applied load for T type lug

(a) Direction of out-of-plane loading = 0°

(b) Direction of out-of-plane loading = 15°

(c) Direction of out-of-plane loading = 35°

(d) Direction of out-of-plane loading = 45°

Fig. 14 Stress distribution and deformed shape to loading direction for T type lug

(a) in-plane 0° and out-of-plane 0,15,35,45°

(b) in-plane 30° and out-of-plane 0,15,35,45°

(c) in-plane 45° and out-of-plane 0,15,35,45°

(d) in-plane 60° and out-of-plane 0,15,35,45°

(e) in-plane 90° and out-of-plane 0,15,35,45°

Fig. 15 Result of force-displacement curves to loading direction for T type lugs

4.3 D와 T 형 러그의 해석결과 비교

면내 45도 방향에 면외 0, 15, 35, 45도 방향 하중(1000kN)이 작용할 때 나타나는 D type 러그와 T type 러그의 강도특성을 비교해 보기 위해 작용하중-변위 관계를 Fig. 16에 나타내었다.

(a) in-plane 45° and out-of-plane 0°

(b) in-plane 45° and out-of-plane 15°

(c) in-plane 45° and out-of-plane 35°

(d) in-plane 45° and out-of-plane 45°

Fig. 16 Comparison of load-displacement curves between D and T type lugs

본 연구에서는 ASME BTH-1에 의하여 설계기준의 안전계수를 3.0으로 설정하고 이를 해석 시 적용한 20ton 용량의 D 형 러

그와 T 형 러그 모델 각각에 고려하였을 때, 각 러그는 60ton정도의 하중을 지지할 수 있어야 한다. Fig. 16의 그래프들에서 볼 수 있듯이 D 형과 T 형 러그 모두 최종강도 측면에서 안전계수 3.0을 고려한 60ton(약 600kN)보다 높은 경향을 나타내고 있으므로 부재치수 감소의 경제성 측면의 이득을 생각할 수 있을 것이다. 그리고 면내 45도 방향에 각각의 면외 0, 15, 35, 45도 방향으로의 하중(1000kN)이 작용하였을 때 D 형과 T 형 러그 각각의 핀과 러그 홀이 접촉하는 부분의 최고 변형량을 비교해 본 결과를 아래의 Table 4에 나타내었다. 결과 값을 통해 동일한 하중 조건에서 D type 러그에 비해 T type 러그의 변형량이 작게 나타났다.

Table 4 Comparison of maximum displacement between D and T type lugs (Unit : mm)

In-plane load	out-of-plane load	D type lug	T type lug
45°	0°	2.78	2.48
	15°	2.93	2.78
	35°	5.75	5.43
	45°	8.39	6.70

5. 결 론

본 연구에서는 D 형 러그와 T 형 러그의 적용하중에 따른 강도특성을 알아보는 목적으로 상용프로그램 ABAQUS를 이용하여 면내 방향(in plane load)과 면외 방향(out of plane load)으로 하중(1000kN)을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 알 수 있듯이 동일한 면내방향에 대해 면외방향의 각도가 증가 시 강도측면에서 감소되어짐을 알 수 있었다. 그리고 동일한 하중조건에서 D 형 러그와 T 형 러그 중 T 형 러그의 변형량이 작게 나옴을 알 수 있었다. 또한 해석한 경우들 중 극한상황에서 안전계수를 고려하였을 경우에도 최종강도가 안전계수를 고려한 60ton보다 높으므로 부재치수 감소의 가능성을 가짐을 알 수 있었다. 향후 연구방향으로는 다양한 종류의 러그에 대한 Case study를 수행하며 경제성을 고려하여 치수를 결정하는 연구를 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원사업(2013R1A2A2A01017021)과 세계수준의 연구중심대학육성사업 (WCU) (R33-10150)임.

References

- American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2008. *ASME-BTH-1; Design of Below-the-Hook Lifting Devices*, ASME, USA
- Kim, S.I., 2006. Block Lifting Analysis to Examine the Cause of Cracking in the Hopper Top Plate. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(1), pp.16–19.
- Lee, S.J. Hwang, O.J. Oh, Y.T. Ha, S.H. Kim, Y.H. Lee, S.B. & Kim, S.H., 2012. Strength assessment of padeye hole and lug structure assessment of block lifting lug through experiments. *Proceeding of the Korea Association of Ocean and Technology Societies*, EXCO, Daegu, May 2012, pp.597– 606.
- Min, D.K. & Eum, S.M., 2011. A Study on the Optimization of Lifting Lug for Block Erection. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.88–89.
- Seo, S.K. Kim, K.R. Eum, S.S. & Seo, Y.S., 2011. Design and Strength Analysis of Lifting Lugs. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.51–54.
- V-Eng, 2013. *Introduction to Abaqus*. BB-Media: Korea.

허 남 학

이 주 성