최종강도에 기초한 리프팅 러그의 설계

이 주 성^{1*}

¹울산대학교 조선해양공학부

On the Design of Lifting Lugs Based on the Ultimate Strength

Joo-Sung Lee^{1*}

¹School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, Korea

Abstract

Lifting lugs are frequently used to transport and to turn over blocks of ship and offshore structures in a shipyard. As the shipbuilding technology has been developed, blocks have become bigger and bigger, and block management technology takes a more important role in shipbuilding to enhance the productivity. For the sake of economy as well as safety in design of lug structure, needed is a more rational design procedure based on the ultimate strength derived through the rigorous non-linear structural analysis considering both the material and geometric non-linearity. This study is aimed at deriving the optimum design of T type lug structure which is frequently used in a shipyard. The optimum thickness of lug's main body is to be determined based on the results of non-linear strength analysis. As far as the present results for T type lugs having various capacity are concerned, it can be said that the present optimum design result can guarantee both safety and economy. From the fact that any regular trend cannot be found in weight reduction to the capacity of lugs, it seems to be necessary to review the current design procedure of lug structure. The present design procedure can be extensively used in design of various types of lug structures used in shipyard.

Keywords : non-linear structural analysis, optimum design, T type lug, ultimate strength, weight reduction

1. 서 론

선박이나 해양구조물의 블록이나 여타 육중한 구조물을 크레인으로 인양(lifting) 또는 이동시키는데 러그(lug) 또는 아이 플레이트(eye plate)라고 하는 부재가 널리 사용되고 있다. 선박이나 해양구조물의 경우, 제작공정의 효율성 향상을 위해 그 블록들이 점차 대형화되어 가고 있는 추세이고, 이에 따라 사용되는 러그의 수가 점차 증가하고 있다. 러그는 소모성 부재이기는 하지만 재료비 절감 측면에서 재활용해야 하며, 블록의 인양과 반전(turn over)에 필요한 최적의 위치와 수량을 결정하는 것이 중요하게 부각되고 있다(Ham, 2000; Kim, 2003; Ku *et al.*, 2012). 한편으로는 블록의 이동 등에 사용되는 많은 수의 러그를 제작, 설치 및 해체 등에 비용이 많이 소요되므로, 충분한 강도를 지니면서 단순화,

경량화를 통해 원가 절감을 꾀하는 것이 중요한 과제 중 하나이다. 또한 러그가 파단되었을 때 안전과 공정상에 있어서 큰 문제가 발생하기 때문에 설계에 있어 각별한 주의가 요구된다(Kim, 2006; Seo *et al.*, 2011). 이와 더불어 러그는 소모성 부재이고 이의 부착과 탈착에 많은 공수가 요구되므로 이의 절감을 위해 충분한 구조적 안전성을 가지면서 중량이 최소가 되는 최적의 러그를 설계하는데 중요한 의미를 부여할 수 있다. 본 연구에서는 러그의 최종강도를 기준으로 하는 최적 구조설계에 관한 연구를 다루고자 한다. 잘 인식되어 있는 바와 같이 구조물 또는 구조부재의 최적 설계 과정(optimum design procedure)은 기본적으로 구조해석 과정과 최적화 과정이 혼합되어 있어서 최적 설계를 위한 제한 조건(constraint condition)은 주로 변위 또는 응력에 대한 것으로서 최적화 과정과 구조해석 과정사이에 구조해석을

* Corresponding author:

Tel: +82-52-259-2162; E-mail: jslee2@ulsan.ac.kr
Received September 14 2015; Revised October 13 2015;
Accepted November 16 2015

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

위한 자료와 구조해석 결과를 상호 교환하는 것이 필수적이다. 선형 구조해석의 경우 이러한 상호 교환은 용이하게 이루어질 수 있으나, 구조물 또는 구조부재의 최종강도를 구하기 위해 비선형 구조해석이 수행되는 경우에는 이 두 과정 사이에서 정보의 상호 교환이 용이하지 않고 게다가 최종강도를 기준으로 설계를 하고자 할 때 구조해석 결과로부터 최종강도를 정의하는 것이 용이하지 않다. 본 연구의 경우 하중과 변위사이의 관계에서 최종강도 점이 명확하게 정의되는 문제가 아니기 때문에 더욱이 최적화 과정과 구조해석 과정사이의 상호 교환에는 적지 않은 어려움이 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 러그 구조의 치수들은 여러 가지가 있겠지만 그 중에서 러그 중량에 가장 영향을 많이 주는 러그 본체의 두께를 최적설계 변수로 택하였다. 즉, 본 연구의 문제는 단일 변수를 최적화하는 그리 복잡해 보이지 않는 문제이지만 비선형 구조해석과 혼용되었다는 점에서 의미를 찾을 수 있고, 이러한 접근법은 설계변수가 2개 이상인 경우에도 충분히 적용될 수 있다. 한편 이 연구에서 가장 중요한 점 중 하나는 최종강도점이 분명한 경우가 아니어서 이 논문에서 정의한 최종강도정의에 대한 논의의 여지가 충분히 있을 것으로 사료된다. 이상에서 언급한 본 연구의 러그 구조의 최적설계를 위한 비선형 구조해석 결과를 산출하기 전에 우선은 본 연구에서 적용한 해석과정의 결과를 기 발표된 실험결과와의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다(Heo and Lee, 2014; Lee and Heo, 2013).

전술한 바와 같이 본 연구는 최종강도를 기준으로 한 러그 구조의 최적설계를 목표로 설정하였으며, 대상 러그는 현재 블록의 인양과 반전에 널리 사용하는 T형 러그(T-type lug)로서 1회용이 아닌 재활용이 가능한 모델을 선정하였다. 용량은 200, 300, 400 그리고 500kN으로서 네 가지 모델이다. 최종강도를 추정하기 위한 비선형 구조해석을 수행하기 위하여 범용 유한요소해석 패키지인 Abaqus를 사용하였다(Simulia, 2013). 본 연구를 위한 선행연구 결과(Heo and Lee, 2014; Lee and Heo, 2013; Lee *et al.*, 2014)에 의하면 러그 구조의 하중-변위 곡선 형태가 최종강도를 용이하게 구할 수 있는 형태가 아니므로, 여기에서는 변위가 어느 수준 이상이 되면 최종상태라고 가정하는 정의를 활용하였다. 전술한 바와 같이 최적설계는 러그 본체의 두께를 결정하는 것으로써 ASME BTH-1(ASME, 2008)에 제시된 설계기준의 안전계수 3.0을 최종강도가 만족하도록 T형 러그 본체의 최적두께를 결정하였다. 즉, 러그 용량의 3배에 해당하는 하중을 받을 수 있도록 본체의 두께를 결정하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 최종강도를 기준으로 한 최적설계 결과가 설계 지침에 명시된

구조적 안전성의 수준 이상을 만족하면서 상당한 중량 감소를 얻을 수 있었다. 한편, 중량 감소의 양에 러그의 용량에 따라 어떤 규칙성을 발견할 수 없었다는 점으로 보아 현재 사용하는 러그의 설계 과정에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

2. 해석방법의 타당성 검토

본 연구에서 적용한 해석과정과 방법의 타당성을 검증하기 위하여, Lee 등(2012)은 Fig. 1에 보인 러그 모델을 제작하여 만능재료시험기(universal testing machine : UTM)을 이용하여 Fig. 2와 같은 러그 모델에 대해 수행한 구조실험 결과를 본 연구의 해석결과와 비교해 보았다. Lee 등(2012)의 시험용 러그 모델의 치수는 Fig. 3과 같고, 러그와 셔클 핀의 재료적 특성치는 Table 1과 같다. 실험은 Fig. 2에 보인 바와 같이 UTM에서 러그 시편의 하단을 고정하고 러그 홀에 삽입한 셔클 핀에 인장하중을 작용하여 수행하였다.

본 연구의 구조해석에서는 러그를 8 절점 Solid element로 모델링하였고, 실험의 경우와 마찬가지로 Fig. 4(a)에 보인

Fig. 1 Lug model

Fig. 2 Test of lug model with UTM

Fig. 3 Dimensions of lug model

Table 1 Materials properties of lug model for test

Item	Lug	Pin
Modulus of Elasticity(GPa)	206	206
Yield Stress(MPa)	300	1000
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Strain Hardening	Perfect elasto-plasticity

Fig. 4 Definition of boundary and loading conditions for finite element analysis **Fig. 5** Comparison of results between experiment and finite element analysis

바와 같이 러그의 하단 부분에 고정 경계조건을 부여하였으며, 하중을 조정하기 위해 Fig. 4(b)와 같이 기준점(reference point)과 셔클 핀의 양단을 MPC 보 요소로 연결하여 기준점에 하중을 작용시킬 수 있도록 하였다. 비선형 구조해석에서 재료적 비선형성은 Table 1에 보인 바와 같이 변형을 경화가

없는 완전 탄소성으로 가정하였다. 하중이 점차 증가할 때 셔클 핀과 러그의 홀은 접촉된 상태가 유지되도록 하였다. 하중은 실험의 과정을 그대로 반영하였는데, 핀의 위쪽(y축) 방향으로 기준점에 초기에는 84.4kN을 작용시킨 후 이어서 연속적으로 209kN의 하중을 작용시켰다. 본 연구의 해석결과와 실험 결과의 비교로서 Fig. 5에 보인 바와 같이 하중-변위 곡선을 비교하였다. 여기에서 변위는 하중 방향으로의 변위로서 Fig. 4에 보인 참고점(reference point)의 하중 방향으로 변위계를 사용하여 측정한 것이다. 비교 그래프인 Fig. 5에서 보는 바와 같이 실험과 해석결과와의 비교범위가 소성이 충분히 진행된 범위를 포함하고 있지는 못하지만, 어느 정도 비선형성이 발생하는 범위까지의 실험결과와 비교한 것으로서 본 연구에서 사용한 해석방법이 타당하다고 판단된다.

3. 최종강도 해석과 설계

3.1 개요 및 대상 모델

여기에서의 대상모델은 현재 조선소에서 선박 및 해양구조물 블록의 인양 및 반전 작업 등에 많이 사용되는 T형 러그이며, 그 전형적인 형상은 Fig. 6과 같다(Min and Eum, 2011). 러그 홀에 셔클핀이 접촉되어 높은 하중이 전달되어 변형이 클 것으로 쉽게 예상되므로, 홀 주변의 강도를 보강하기 위해 이중판(double plate)을 부착하였으며, 면외하중(out-of-plane load)에 의한 러그의 전도 방지와 블록과의 접촉력을 증가시키기

Fig. 6 Typical example of T-type lug

위하여 러그 본체 양측면에 브라켓이 부착되어 있다.

Fig. 6에서 보듯이 T형 러그는 본체, 브라켓 그리고 러그 홀 주위의 이중 판(double plate)으로서 3개의 부재로 구성되어 있다. 러그의 형상이 주어졌다면 결국 설계는 이들 3개 부재의 두께를 결정하는 것이 된다. 러그의 주된 부분은 러그 본체이므로, 이중 판과 전도 방지용인 브라켓의 두께에 변화를 주지 않는다면 러그의 설계는 러그 본체의 두께를 결정하는 문제로 귀착된다. 구조해석의 결과로서 선형해석의 결과를 이용한다면 이 문제는 간단히 해결되지만, 비선형 해석을 통한 최종강도를 기준으로 하는 경우에는 여러 수준의 하중에 대한 해석이 필요하게 된다. 본 연구에서는 ASME BTH-1(ASME, 2008)에서 제시한 안전계수 3.0을 러그의 최종강도에 적용하여 이를 만족하는 최적의 본체 두께를 결정하였다. 즉, 최종강도가 러그 용량의 3배에 상당할 때의 본체의 두께를 결정하는 문제로 귀착된다. 여기에서는 용량이 200, 300, 400 그리고 500kN인 4개의 T형 러그를 선정하였다.

본 논문의 해석에 사용된 T형 러그의 재료는 연강(mild steel)으로 재료적 특성치는 Table 2에 열거하였다. 탄성계수는 210GPa로 주었고, 항복응력은 연강의 공칭 항복응력인 235 MPa, Poisson 비는 0.3이다. 셔클 핀에 대해서는 항복응력은 연강인 러그 본체에 비해 높은 1500MPa를 인위적으로 부여하였고, 탄성계수와 Poisson비는 연강과 동일하게 210 GPa과 0.3으로 부여하였다. 탄소성 해석에 필요한 변형률 경화 계수(strain hardening coefficient)는 영(zero)로서 응력-변형률의 관계는 완전 탄소성 거동(perfect elasto-plastic behavior)으로 가정하였다.

Table 2 Material properties of the present T-type lugs

Item	Lug	Pin
Elastic Modulus(GPa)	210	210
Yield Stress(MPa)	235	1500
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Strain Hardening	Perfect elasto-plasticity	

3.2 경계조건과 하중조건

T형 러그에 적용된 경계조건과 하중조건은 전절에서 실험 모델과 비교를 위해 적용한 조건과 동일하다. 먼저 경계조건은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 T형 러그의 본체와 브라켓이 블록에 부착되는 면에 있는 모든 절점에서의 모든 변위를 고정시키는 완전 고정 경계조건($U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z=0$)을 부여하였다. 하중조건은 전절에서 언급한 바와 같이 하중을 조절하기 위해 기준점과 셔클 핀의 양 끝단을 MPC (multi point constraint) 보 요소로 연결하여 기준점에

작용시키는 하중이 러그 홀 내측면에 전달되도록 하였고, 셔클 핀과 러그 홀 면 사이에는 일반 접촉조건(general contact condition)을 적용하여 접촉과정을 반영하도록 하였다. 러그 구조해석에 있어 가장 중요한 부분이 접촉면의 정의이다. 접촉면은 주면(master surface)과 종속면(slave surface)으로 구성되어 있으며, 주면은 하중을 전달하는 부분으로 셔클 핀이 그 역할을 한다. 그리고 종속면은 주면과 접촉하는 부분으로 주면에 의한 변형이 발생하는 러그 홀과 이중판 홀의 안쪽 면으로 지정하였다. 접선 방향으로의 마찰력을 고려하기 위해 윤활이 없는 강재 사이의 마찰로 간주하여 마찰계수는 0.5로 부여하였다.

해석 시 T형 러그 각각에 적용된 하중의 방향은 Fig. 8에 나타나있는 것과 같이 면내하중(inplane load) 방향과 면외 하중(out-of-plane load) 방향으로 정의된다. 러그의 최종 강도는 면내 및 면외 하중의 방향에 따라 달라지는데, 현장에서는 면외하중 방향이 20°이내인 경우로 제한하고 있다 (Kim, 2003). 본 연구는 면내 및 면외 하중 방향을 모두 고려하는 최적설계를 꾀하는 것이 아니라 러그의 강도측면에서 가장 불리한 하중 조건에서의 최적설계를 다루는 것이므로 이 조건을 정의해야 한다. 면내 및 면외 하중 방향의 변화에 따른 강도 특성에 대해서는 Heo와 Lee(2014)가 면내하중 방향은 0, 30, 45, 60, 90°와 면외하중방향은 0, 15, 35, 45°에 대한 Parametric study를 수행한 바 있다. 그 결과에 따르면 면내

Fig. 7 Definition of boundary condition and MPC constraint for T-type lugs

Fig. 8 Definition of loading directions for T-type lugs

0°와 면외 45°가 가장 불리한 하중조건이었다. 물론 전술한 바와 같이 Fig. 8에서 면외 하중 방향이 45°인 경우는 실제 현장에서 사용하지 않지만 구조물 강도 측면에서 보수적인 결과를 도출하기 위해 여기에서는 면내와 면외 하중 방향이 각각 0°와 45°인 경우로 부여하였다.

3.3 비선형 강도 해석과 최적설계

러그 본체의 두께 감소에 대한 최종 상태의 변화를 파악하기 위해, 전술한 바와 같이 하중 방향은 면내 0°와 면외 45°로 고정시킨 상태에서 러그 본체의 두께를 변화시키면서 비선형 해석을 수행하였다. 해석결과와 예로서 Fig. 9는 용량이 200 kN인 T형 러그에 작용하는 하중이 각각 용량의 100, 200, 400 그리고 500%인 경우 응력 분포와 변형 형상을 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보듯이 하중의 크기가 점점 증가함에 따라 핀과 접촉되는 러그 홀 및 이중판 부분에 항복응력 수준의 응력이 발생하는 영역이 점차 넓어지고 러그 홀 주변에서의 변형이 심해지는 것을 알 수 있다.

러그 용량별 본체의 두께 변화에 따른 하중-변위 곡선이 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 '0-45'는 하중 방향이 면내 0°와 면외 45°임을 의미하며 괄호 안의 숫자는 러그 본체의 두께의 감소량을 나타낸다. Fig. 10에서 보듯이 하중 증가에 따라

소성이 지속적으로 진행되기 때문에 어느 정도 이상의 하중을 넘어서면 하중-변위 곡선의 기울기 즉, 접선탄성계수가 감소하지만 영(zero) 또는 음이 되지 않고, 완만하긴 하지만 변위의 증가에 따라 하중도 증가하여 최종 상태를 명확하게 정의할 수는 없다. Fig. 11에 전형적인 하중-변위 곡선의 형상 3가지를 도시하였는데, Type A나 B의 경우에는 최종 상태를 정의하는 것이 용이하나 Type C의 경우에는 이를 정의하는 것이 용이하지 않다. 본 연구에서는 구조물이 상당한 수준의 변형을 경험하면 최종상태에 근접하는 것으로 간주하여, 하중 방향으로의 변위가 러그 홀 반지름의 50% 정도로 많은 변형이 발생한 때를 최종 상태로 정의하였다(Lee *et al.*, 2014). 물론 이러한 최종 상태의 정의에는 논의의 여지가 있으나 본 정의를 일관성 있게 작용하는데 의미를 둘 수 있고, 또한 해석에 적용한 면내 0°와 면외 45°의 하중 방향이 실제의 경우 보다는 구조 강도 측면에서 보수적이라는 점에서 이러한 최종 상태의 정의를 이용한 설계 결과는 ASME에서 정한 안전계수 3.0 이상을 충분히 만족하는 수준이고 따라서 구조적 안전성은 충분히 보장된다고 볼 수 있다. 여기에서의 대상 러그 모델들의 러그 홀 반지름은 Table 3과 같다.

이상과 같은 본 연구의 최종 상태 정의에 따라 Fig. 10의 결과로부터 구한 용량 200, 300, 400과 500kN 러그의 본체 두께 감소량에 따른 최종 하중(ultimate load)을 Table 4에

(a) 100% of lug capacity

(b) 200% of lug capacity

(c) 400% of lug capacity

(d) 500% of lug capacity

Fig. 9 Stress distribution and deformed shape to the rate of applied load, 200kN T-type lug

(a) 200kN lug

(b) 300kN lug

(c) 400kN lug

(d) 500kN lug

Fig. 10 Force-displacement curves to change in thickness of main body

Fig. 11 Typical force-displacement curves

정리하였다. Table 4에서 세 번째 열은 단위 두께 당 러그의 중량이다. 전술한 바와 같이 본 연구의 최적화 문제는 결국 최종 하중을 기준으로 안전계수를 만족하는 러그 본체의 두께 감소량을 구하는 문제로 귀착된다. 즉,

$$\text{최종하중(ultimate load)} = \text{러그 용량} \times \text{안전계수} \quad (1)$$

가 되는 러그 본체 두께의 감소량을 구하는 것이다. ASME 설계기준(ASME, 2008)에 따른 안전계수 3.0을 고려한 식 (1)의 좌변인 각 용량별 러그의 최종강도는 각각 600, 900, 1200 그리고 1500kN이다. 각 Table 4에 열거한 용량별 러그

Table 3 Radius of T type lug hole

Lug capacity(kN)	Radius of T type lug hole(mm)
200	31.5
300	37.5
400	37.5
500	37.5

본체 두께 감소에 따른 최종강도에 관한 자료를 이용하고, 최적화 과정으로서 유전자 알고리즘(Gen and Feng, 2000)을 사용하여 식 (1)을 만족하도록 최적화 과정을 거쳐서 구한 최적 설계의 결과로서 최적의 두께 감소량이 Table 5와 같다. 강판은 0.5mm 단위로 생산되므로 Table 5에 보인 두께의 감소량은 이론적인 값이며, 실제로는 0.5mm 단위로 감소시켜서 구조 안전성 제고를 위해 Table 5에 보인 두께 감소량 보다 작은 0.5mm 간격의 값을 택해야 한다. 예를 들어서 200kN 러그의 경우, 최적설계 과정에 의하면 두께 감소량은 20.24 mm이나 이러한 두께 감소는 실제로는 이를 수 없으므로 0.5mm 간격으로 작은 값인 20.0mm로 결정해야 한다. 러그 본체의 최종적인 두께 감소량과 그에 따른 러그의 중량의 감소량이 Table 6과 같다. 중량 감소량 우측에 괄호 안의 숫자는 최적설계 전 러그 중량을 기준으로 한 중량의 감소율이다. Table 6에서 보는 바와 같이, 최종 강도를 기준으로 구한 최적

Table 4 Ultimate load to thickness reduction

(a) 200kN lug

Thickness reduction (mm)	Ultimate load (kN)	Lug weight per unit thickness of main body(kg)
0	863	1.465
2	829	
4	794	
6	762	
8	725	
10	688	
12	652	
14	614	

(b) 300kN lug

Thickness reduction (mm)	Ultimate load(kN)	Lug weight per unit thickness of main body(kg)
0	938	1.805
2	901	
4	854	
6	812	
8	769	

(c) 400kN lug

Thickness reduction (mm)	Ultimate load(kN)	Lug weight per unit thickness of main body(kg)
0	1401	2.085
2	1353	
4	1310	
6	1265	
8	1219	

(d) 500kN lug

Thickness reduction (mm)	Ultimate load(kN)	Lug weight per unit thickness of main body(kg)
0	1605	2.385
2	1558	
4	1514	
6	1440	
8	1355	

Table 5 Optimum thickness reduction of the present lug models

Lug capacity (kN)	Optimum thickness reduction of main body of lug(mm)
200	14.73
300	1.90
400	8.87
500	4.12

Table 6 Optimum thickness reduction and weight saving of the present T type lugs

Lug capacity (kN)	Recommended thickness reduction of main body of lug (mm)	Weight reduction (kg)
200	14.5	21.24(-32.8%)
300	1.5	2.71(-2.4%)
400	8.5	17.72(-11.6%)
500	4.0	9.54(-5.2%)

설계결과에 의하면, 최종강도를 기준으로 설정해도 충분한 구조적 안전성을 보장하면서 기존의 설계 보다 상당한 중량을 절감할 수 있는 설계결과를 구할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 선정한 리그 모델들에 대해 용량 200kN의 경우에는 32.8%의 중량 감소를 이룰 수 있지만 300kN과 500kN 용량의 경우 5% 이하의 중량 감소를 이룰 수 있는 등 최적설계에 해당되는 리그의 중량 감소의 정도에 어떤 규칙성을 발견할 수 없다. 이는 리그 설계에 대한 현재의 기준이나 설계과정에 대한 합리적인 검토가 필요하다는 점을 의미하는데, 이 점에 대해서는 좀 더 많은 경우에 대한 해석 결과를 토대로 검토되어야 할 것이다.

이상의 결과로부터 리그 구조 측면에서는 불리한 하중조건을 기준으로 수행한 본 연구의 최적화 과정에 의하면 충분한 구조적 안전성을 가지면서 보다 경량의 리그 설계 결과를 구할 수 있고, 이러한 과정을 적용하면 리그의 설계 및 제작에 효율성을 제고할 수 있을 것이다.

4. 결 론

이 논문에서는 선박 및 해양구조물 블록의 인양과 반전 과정에서 널리 사용하는 T형 리그를 최종강도를 기준으로 한 최적설계에 대해 다루었다. 리그의 형상이 주어져 있다면, 리그의 설계는 본체, 브라켓 및 리그 홀의 이중판의 두께를 결정하는 것이 되는데, 여기에서는 브라켓과 이중판의 두께에는 변함이 없다고 가정하였으므로 결국은 리그 본체의 두께를 결정하는 문제로 귀착된다. 최종 강도를 기준으로 한 최적설계 결과를 도출하기 위해 본 연구에서는 우선 리그의 비선형 해석 결과로부터 최종상태를 정의하는 부분을 언급하였고 그 결과를 이용하여 주어진 안전계수를 만족하는 최적설계 결과로서 리그 본체의 두께를 결정하였고 그에 따른 리그 중량의 감소량을 산출하였다. 본 연구 결과에 따르면 대상으로 선정한 리그 모델에 대해 최종상태를 기준으로 한 설계결과가 상당한 중량 감소를 꾀할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 중량 감소량에서 어떤 규칙성이 없다는 점으로 보아 기존 설계와 그 과정에 대한

보다 합리적인 검토가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구의 최적설계 과정은 러그 홀의 이중판 및 브라켓의 두께도 설계 인자로 선정된 최적설계에 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원사업(2013R1A2A2A01017021)으로 지원된 결과물의 일부임.

References

American Society of Mechanical Engineers (ASME)
(2008) *ASME-BTH-1: Design of Below-the-Hook Lifting Devices*, ASME, USA.

Gen, M., Cheng, R. (2000) *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, A Wiley-Interscience Pub. Co.

Ham, J.K. (2000) Development of the Design System for the Lifting Lug Structure, *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 38, pp.86~98.

Heo, N.H., Lee, J.S. (2014) The Structural Strength Assessment of Lifting Lug, *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 51, pp.42~50.

Kim, S.I. (2003) Design for Raising the Rate of Recovering Use of Lifting Lug, *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 40, pp.59~65.

Kim, S.I. (2006) Block Lifting Analysis to Examine the Cause of Cracking in the Hopper Top Plate, *J. Ocean Eng. & Technol.*, 20, pp.16~19.

Ku, N.K., Roh, M.I., Cha, J.H. (2012) Calculation of the Dynamic Contact Force between a Shipbuilding Block and Wire Ropes of a Goliath Crane for the Optimal Lug Arrangement, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25, pp.375~380.

Lee, J.S., Kim, M.S., Heo, N.H. (2014) The Strength Assessment and Design of T-type Lifting Lug, *Proceedings of the Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS)*, pp.814~819.

Lee, J.S., Heo, N.H. (2013) The Evaluation of the Structural Stress for the T-type Lifting Lug, *Proceedings of the Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS)*, p.2306.

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, *Proceedings of the Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS)*, EXCO, Daegu, pp.597~606.

Min, D.K., Eum, S.M. (2011) A Study on the Optimization of Lifting Lug for Block Erection, *Speci. Issue Soc. Nav. Arch. Korea*, pp.82~89.

Seo, S.K. Kim, K.R. Eum, S.S., Seo, Y.S. (2011) Design and Strength Analysis of Lifting Lugs, *Speci. Issue Soc. Nav. Arch. Korea*, pp.51~54.

Simulia (2013) *Introduction to Abaqus*, BB-Media, Korea.

요 지

러그는 선박 및 해양구조물의 블록을 이동하거나 반전에 많이 사용되는 부품이다. 선박이나 해양구조물의 제작기술이 발전함에 따라 블록이 점차 대형화되고 있어, 생산성 향상을 위해 블록을 보다 효율적으로 다루는 기술에 대한 중요성이 대두되고 있다. 러그 구조의 안전하고 경제적인 설계를 위하여 비선형 구조해석 결과를 토대로 도출한 최종강도를 기준으로 한 보다 합리적인 설계과정이 필요하다. 본 연구는 조선소에서 자주 사용하는 T형 러그의 최적 구조설계를 다루고 있다. 본 연구에서의 T형 러그에 대한 최적 구조설계 결과는 충분한 구조적 안전성이 보장될 것으로 판단되고, 러그 용량별 최적 구조설계 결과의 중량 감소량에 어떤 규칙성을 발견할 수 없었는데, 이는, 현재의 설계과정에 대한 검토가 필요한 것으로 생각된다. 여기에서 제시한 비선형 구조해석에 기초한 최적 구조설계 과정은 향후 보다 다양한 경우의 러그 설계에 적용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 비선형 구조해석, 최적설계, T형 러그, 최종강도, 중량 감소