

선박블록 탑재용 리그구조의 설계합리화를 위한 연구

함 주 혁*

(97년 8월 5일 접수)

A Study for Rationalization of Lifting Lug Design of Ship Block

Juh-Hyeok Ham*

Key Words : Lifting Lug(탑재용 리그), 갭요소(Gap Element), 셔클핀(Shackle Pin), Finite Element Method(유한요소법), Structural Analysis(구조해석), Lug Strength(리그강도), 최적설계(Optimum design)

Abstract

A basic study on the lifting lug design has performed through the rational and systematic process. In order to evaluate the proper design-load distribution around lug eye investigation of contact force between lifting lug and shackle pin is performed using non-linear parametric analysis idealized by gap element models.

Gap element modeling and nonlinear analysis procedures are illustrated and discussed based on MSC/NASTRAN .

Some analysis and design guides are suggested through the consideration of several important effects such as stress distribution pattern, circumferential contact force distribution along the lug eye face, loading share rate between lug main plate and doubler, effect of loading direction, relation between applied force and deflection and size effect of shackle pin radius. Additionally optimum design studies are performed and general trends according to the variation of design parameters are suggested.

1. 서 언

최근 우리나라는 급속한 경제 및 산업 성장과 조선기술의 발달에 힘입어 세계 최상위권의 조선국으로 부상하게 되었다. 따라서 초대형의 선박들이 건조되는 세계굴지의 대형조선소에서 길이 200-300m에 달하는 강선이 빠르면 일주일 간격으

로 1척씩 생산되므로 이들을 건조하기 위해 수십에서 수백톤에 달하는 많은 구조블록이 제작된 후 각종 크레인으로 이동탑재되어 하나의 조립품인 거대한 선박이 완성되어진다. 이 블록의 탑재 때마다 여러개의 탑재용리그가 블록에 설치되어야만 하므로 국내에서만 연간 수십만개에 달하는 엄청난 양의 리그가 제작되며 탑재후에 제거된다.

* 한라공과대학교 조선공학과

그러나 기존 사용되고 있는 러그들이 구조해석기술이 변변치 못한 시절의 공칭응력을 이용한 단순계산식 형태의 설계법에 의해 구축된 낙후된 기술이거나 작용하중을 단순화시킨 상태에서의 유한요소법에 의한 러그자체만을 대상으로 탄성한도내에서 구조해석을 통한 것으로 현 시점에서 보다 향상된 합리적 접근이 요망된다. 그 예로 선박건조시 제작된 대소형 블록을 각종 크레인으로 이동할 때 주로 사용되는 탑재용 러그(lifting lug)의 안전성 및 최적치의 보다 엄밀한 산정을 위해 고전적인 단순 강도계산식을 탈피하고 유한요소해석을 통한 수치해석법으로 그 적합성을 판정하고 있다^{1),2)}.

그러나 러그구멍주위에 강성을 증대키 위한 링형상의 덧판(doubler)이 설치되고 구멍내부에는 셔클핀(shackle pin)과 접촉되어 접촉력에 의해 하중이 전달되므로 셔클핀과 러그구멍의 기하학적, 재료적 특성에 좌우되는 매우 복잡한 상관관계를 보여 일반적인 구조해석시 작용하중 및 모델의 단순화 그리고 덧판의 강성이 무시된 상태에서 강도평가가 이루어지기가 쉬워³⁾ 보다 엄밀한 하중분포 및 덧판의 하중분담정도등을 고려할 필요가 있다. 따라서 탑재용 러그 중에서 특히 연간 사용점유율의 약 80%를 차지하는 특정 D형 러그를 대상으로 범용해석프로그램을 이용하여 러그구멍과 셔클핀간의 접촉상관관계를 갭(gap)요소로 모델링하고 이 갭요소의 비선형성과 더불어 셔클핀과의 국부적인 접촉시 발생할 수 있는 국부적인 재료적 비선형성을 고려한 해석을 수행하여 러그 및 덧판구멍에 작용하는 접촉력의 분포, 덧판의 하중감당정도, 하중증가에 따른 최대처짐간의 관계, 하중방향의 영향, 셔클핀의 처짐 및 규격영향 그리고 덧판의 모델링 방법에 따른 응답의 변화등을 검토하여 보았으며 초기설계의 목적으로 한 러그형태에 대해 간이형 설계식을 사용한 최소중량 설계를 시도하여 보았고 그 결과 최소중량에 따른 각 파라메타의 변화양상을 검토하여 보았다. 이들 최소 중량치는 기존의 러그에 비해 상당한 중량 감소가 얻어졌고 국부적인 응력의 집중을 피하기 위한 보강을 취하더라도 상당한 중량경감이 얻어질 것으로 판단된다.

2. 탑재용 러그 모델개요

조선소의 표준형 탑재용 러그(lifting lug)중에서 사용 점유율이 높은 D형 러그를 대상으로 구조해석을 수행하였다.

각 모델(D-25, D-35 & D-50)별 탑재용 러그의 모델에 대한 구성요소 및 절점수는 Table 2.1과 같으며 고체요소를 사용하였고 덧판의 효과를 보다 정확히 고려키 위해 러그 본체와의 링형 용접부를 실제 크기로 모델에 적용하였으며 모델상세의 한 예를 Fig. 2.1에 제시하였다. 본 러그모델은 현장에서 나름대로 개선하여 표준화된 D-35형의 모델로 보다 정도 높은 거동 및 응력의 파악을 위해 러그 덧판 뿐만 아니라 러그본체와의 용접부도 고체요소로 모델링하였으며 절점 및 요소수는 표를 참조하기 바란다.

탑재용 러그구조 외에도 셔클핀을 모델링하였으며 셔클핀과 러그구멍과의 접촉상관관계를 주는 갭(gap)요소가 15°간격으로 러그구멍 내부의 셔클핀과의 접촉 대상 영역인 180°에 걸쳐 사용되었다.

Table 2.1 Number of Elements and nodes of lifting lug

항목	탑재용 러그		셔클 핀 및 갭요소	
	절점수	요소수	절점수	요소수
D-25	2,931	1,848	1,089	981
D-35	4,616	3,044	949	863
D-50	5,329	3,584	1,092	863

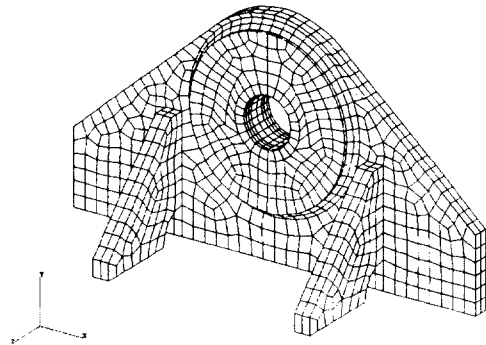


Fig. 2.1 Lifting lug model for one of D-type models

일반적으로 편이상 탑재용 러그의 최적형상 개발을 위해 러그를 모델링할 때 덧판(doubler)과 러그 본체판과는 바깥 둘레만의 용접으로 한 구조를 이루고 있어 서클핀을 통해 전달되는 하중의 집중성을 완화시켜주는 이외의 강성적인 측면은 본체판만으로도 감당할 수 있어야 한다는 전제조건하에서 무시되어 그 결과 덧판의 모델링이 생략되기도 한다³⁾. 그러나 러그 구멍주위의 덧판(doubler)을 고려한 보다 정확한 구조거동을 파악하기 위해서는 용접부를 포함하여 탑재용 러그 및 서클핀등의 상세 고체요소 모델링과 비선형해석을 통한 하중분포 및 구조부분들의 하중 감당능력을 파악함이 필요하다고 생각된다.

한편, 탑재용 러그는 다양한 구조물에 부착되고 크레인으로 이송되어 러그하부에 부착되는 구조물의 배치 및 치수에 큰 영향을 받으므로 러그구조 개발을 위해 다양한 하부구조의 체계적인 변화에 따른 검토를 통해 보다 완벽한 강도 점검이 수반되어야 하나 본 내용의 목적 상 러그구멍 주위의 거동 및 응력은 하부구조에 미치는 영향이 미소하다고 가정하여 단순히 러그하부의 모든 절점의 자유도를 구속하여 즉 강체와 같이 매우 큰 강성의 물체에 매달린 상태로 평가하였다.

또한 실제 구조에서 가장 극한상태에서의 하중 작용 메카니즘은 기하학적으로 매우 복잡하며 통상 가혹한 설계하중 상태는 면내 45° 경사와 면외 10°의 경사를 가지면서 와이어 로우프가 작용하는 것이라 볼 수 있으나 본 내용에서는 면외굽힘에 의한 영향은 고려하지 않고 일차적으로 면내하중이 작용하는 경우로 단순화하였다.

본 구조해석에서 해석프로그램은 MSC/NASTRAN을 사용하였다.

3. 갭 모델링 및 비선형해석

Fig. 3.1은 갭요소에 대한 축응답의 일 예를 제시하였다. 압축에서는 높은 강성의 K_a 와 무시할 정도의 강성인 K_b 인 두 가지 강성을 가진다. 이들 강

성의 판단은 갭요소의 특성치 입력항목 중 U_0 라는 실수로 정의되는 초기 갭열림의 값에 좌우되어 결정된다.

갭요소의 물성치를 부여하는데 근접 갭강성은 인근 자유도에 대한 강성의 1000배를 넘지 않게 부여하였으며 갭요소 자체는 선형을 유지한다.

Penalty값인 K_a 는 풀이의 효율성 즉 numerical ill-condition, 수렴의 지연 그리고 발산등의 방지를 위해서는 가능한 작게 값을 주어야 하나 풀이의 정확성 즉 실제 값에 가까운 풀이를 위해서는 너무 작은 값은 곤란하다. 이들 값은 갭요소 특성치 입력항목에서 준비되며 약한 강성에 의해 큰 변위로 발산하는 비선형해를 야기시키지 않게 갭요소의 사용에 주의가 요구되며 이에따라 본 해석에서는 K_b 의 default값인 K_a 강성의 10^8 배 정도로 다음과 같은 관계를 이용하여 산정하였다⁵⁾.

$$K_a \geq 1 \times 10^3 * \max[K(\text{lug}), K(\text{pin})] \quad (2.1)$$

$$K_b \leq 1 \times 10^3 * \min[K(\text{lug}), K(\text{pin})]$$

여기서,

K_a : $U_a - U_b \geq U_0$ 일 때의 갭 닫힘강성(closed stiffness)

K_b : $U_a - U_b \leq U_0$ 일 때의 갭 열림강성(open stiffness)

$K(\text{lug})$: 러그구멍면의 반경방향 절점 국부강성

$K(\text{pin})$: 서클핀 표면의 반경방향 절점 국부강성

U_a : a점의 갭축방향 이동량

U_b : b점의 갭축방향 이동량

상기의 Penalty 값을 구하기 위하여 탑재용 러그 및 서클핀모델에서 갭요소가 설치되는 위치에 단위하중을 작용시켜 방사선 방향으로 러그 및 서클핀의 강성을 구하였다. 그 한 예로 D-35형 러그의 강성표를 Table 2.2에 나타내었으며 이로부터 러그구멍면의 같은 원주상의 강성이 유사함을 알 수 있었고 사용된 서클핀의 방사선 방향의 강성도 러그부와 큰 차이를 보이지 않음을 알았다. 따라서

러그의 평균강성과 셔클핀의 강성을 비교하면서 각 원주상 절점들을 대표할 수 있는 K_a 값을 (2.1)식에 따라 산정하였다.

Table 2.2 Radial stiffness of D-35 type lifting lug (unit: kgf/mm)

항목	수직	45도	수평	평균	셔클핀
러그중앙	81,298	77,765	78,619	79,227	58,823
러그외면	42,427	41,951	42,641	42,340	55,556
덧판내면	28,977	28,745	29,071	28,931	
덧판1/3	53,428	53,090	54,342	53,620	47,619
덧판2/3	49,208	49,751	51,412	50,124	45,455
덧판외면	25,885	26,301	26,998	26,395	47,619

한편 갭요소의 구축을 위해 전처리 프로세서에 갭요소가 지원되지 않는 경우 보조소등을 사용하여 모델링한 후 MSC/NASTRAN 입력자료를 수정하여 사용할 수 있다.

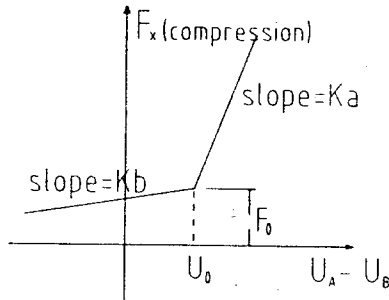


Fig. 3.1 Gap Axial Force vs. Deflection

갭요소의 축강성은 U_a-U_b 의 값이 U_0 와 비교하여 변하는 양상을 Fig. 3.1에 나타내었다. 갭이 열린 상태에서의 미소한 a와 b점에서의 갭축방향 변위의 차로부터 닫힌 상태가 감지되면 큰 강성의 변화를 발생시켜 비선형성을 유발케 하여 수렴성에 장애를 일으키기 쉽다.

이에따라 본 내용에서는 수렴의 효율화를 위해서 적응적 갭요소를 사용하여 평가를 수행하였다. 이는 비선형 환경에서 적절한 penalty강성으로 조

절하여 강성이 과대할 경우 증분을 반으로 줄이는 등의 단계를 통하여 강성을 update하는 기능이 있는 subincremental scheme에 기초하고 있다. 이 이론에 따른 변위의 증분은 다음과 같이 표시된다⁹⁾.

$$\begin{pmatrix} \Delta u^m \\ \Delta v^m \\ \Delta w^m \end{pmatrix} = \frac{1}{m} (1-\alpha)(1-\beta) \begin{pmatrix} u^i - u_n \\ v^i - v_n \\ w^i - w_n \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

여기서,

$$\alpha = \begin{cases} \frac{u_o - u_n}{\Delta u} & \text{if } u_n \leq u_o \leq u^i \text{ (open} \rightarrow \text{closed)} \\ 0 & \text{if } u_n \geq u_o \text{ (closed} \rightarrow \text{closed)} \end{cases}$$

β = 갭의 마찰시작점과 관련된 scale factor

m = 갭의 마찰동안의 분할수

갭요소에서의 힘과 변위는 통상 요소좌표계로 양의 하중이 압축으로 고려되고 있으며 본 모델에서는 러그구멍의 중심과 셔클핀의 중심을 일치시킨 상태에서의 러그구멍과 셔클핀 반지름간의 차를 초기갭 열림으로 주었다. Fig. 3.2의 갭요소는 핀과 셔클구멍에 수직으로 모델링되었으며 이들 핀과 러그구멍 사이의 마찰력은 미소하다고 가정하여 무시하였다.

4. 해석결과 검토

상기 제시한 방법을 바탕으로 D형 러그에 대한 시리즈 해석을 수행하였고 그 결과에 대한 여러가지 분석자료들을 정리하여 보았다.

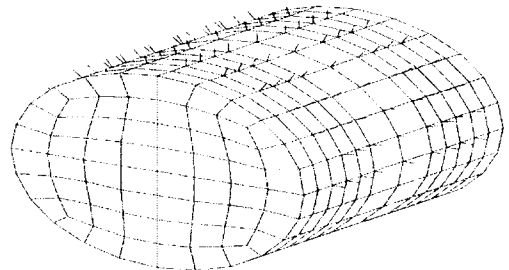
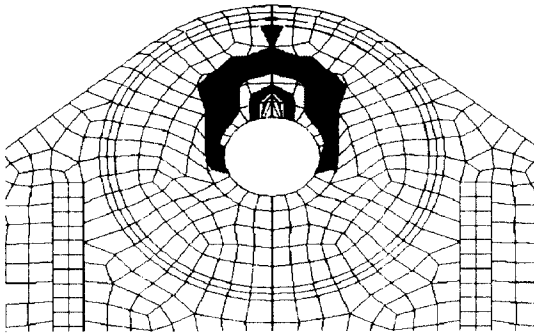
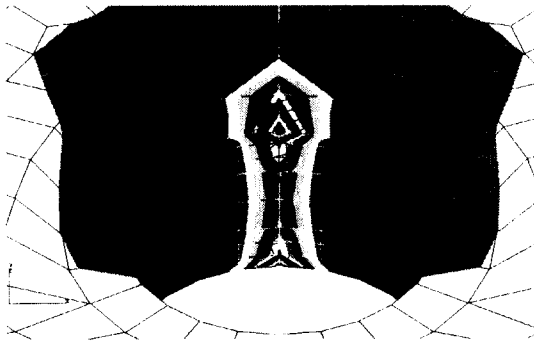


Fig. 3.2 Gap element model between lug-eye and shackle pin



(a) Main plate



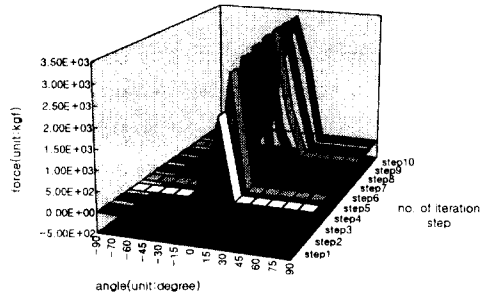
(b) Doubler

Fig. 4.1 One example of stress distribution contour

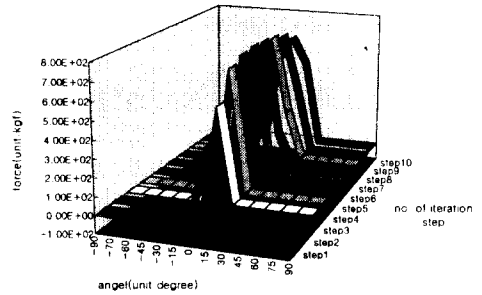
4.1 응력분포 형상

Fig. 4.1에는 최종 하중상태의 약 75%에 달하는 하중상태에서의 등가응력 분포상황을 제시한 것이다. 최종 설계하중에 도달하지 않은 상태인 꺾임 요소에 의한 비선형성 외에도 재료적 비선형성이 발생하였음을 확인하였으며 리그구멍 상부에 생성된 항복응력에 달한 소성영역의 존재로 확인될 수 있다.

이 소성영역은 리그 본체판 뿐만이 아니라 덧판에도 형성되었고 구멍주위의 형성된 소성영역 및 등가응력분포의 양상은 덧판부와 거의 유사하다. 즉 셔클핀과 접촉되는 부위에 리그판의 두께방향으로 덧판 외곽까지 평행한 소성영역과 등가응력 분포가 형성되었다.



(a) Lug center



(b) Doubler inside

Fig. 4.2 Force distribution I for lug center & doubler inside

한편 구멍주위를 제외한 덧판 외곽에는 리그 본체판에 부착된 덧판의 등근 용접부의 아래쪽 180°에 걸쳐 통상 5 - 7 kgf/mm² 정도의 응력집중이 발생하고 있다.

4.2 원주방향 하중분포

구멍내 하중의 분포를 고려할 때에는 리그구멍이 모델에 표현된 경우에 180°에 걸친 cosine분포를 취하거나 리그 강도 자체가 문제시 되지 않을 때에는 하중점의 표현이 쉽게 구멍의 중심을 절점화시켜 집중하중을 작용시켜 탑재 구조물의 강도를 점검한다^{(6)~(8)}.

본 절에서는 설계하중을 10등분하여 하중증분에 따른 원주방향의 하중분포를 리그 본체와 덧판이 셔클핀과 접촉하는 면의 절점에 붙는 꺾임요소의 축

력으로부터 원주방향의 분포를 살펴보았고 이를 Fig. 4.2에 제시하였다.

Fig. 4.2로부터 설계하중의 30 - 40%의 낮은 하중영역에서 15 ° 위치의 갭이 닫히며 이미 중앙부의 갭에 의한 하중으로 국부 소성영역에 진입하여 더 이상의 하중을 감당해내지 못하고 인근 15 ° 기울어진 위치의 원주방향 하중이 하중증분에 따라 증가하여 최종의 원주방향 분포는 러그본체 및 덧판 공히 60 °에 걸쳐 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 러그 본체 및 덧판에 같은 현상으로 발생된다. 또한 덧판구조는 구멍 최상부층에서 소성화되어 하중이 재분포됨을 확인할 수 있다.

한편 Fig. 4.3에는 소성의 영향을 무시한 갭강성만을 고려한 비선형해석을 수행하여 제시한 결과의 한 예를 나타내어 보았다. Fig. 4.3에서도 갭강성을 고려한 탄성 해석시의 접촉력 분포도 앞의 경우와 큰 차이는 없으나 하중의 초기 증분부터 접촉의 60 °범위 내에서 작용되는 증분하중에 비례하여 하중 분포가 비례적으로 작용됨을 확인할 수 있다.

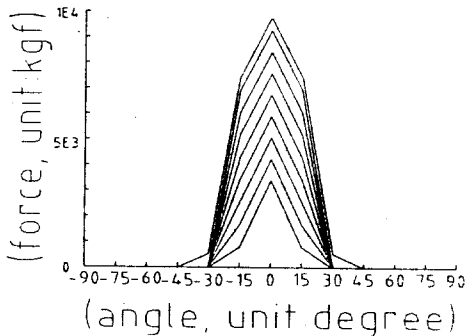


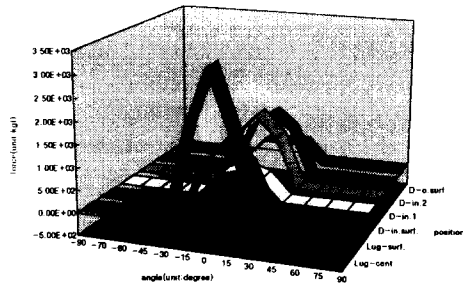
그림 4.3 Force distribution II for lug eye

4.3 덧판(Doubler)과의 하중분담률

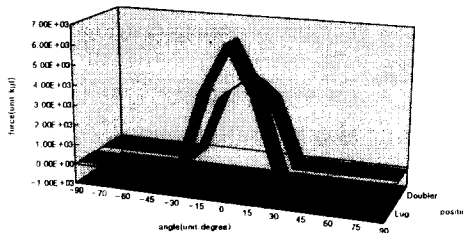
통상 러그 본체에 붙는 덧판은 설계단계에서 없는 것으로 생각하고 설계하중에 견딜 수 있는 구조를 개발함이 안전측의 입장에서 바람직한 방향으로 생각하기 쉬우나 본 선박용 탑재러그의 덧판의 치수는 상당히 크므로 이를 무시한 상태에서 구조 해석을 수행하면 매우 큰 응력이 발생되어 응력을 기준으로 그 강도를 판단하기 어려워 새로운 러그

가 개발되더라도 그 절대적인 판단은 어렵고 기존의 러그와 비교해석하여 강도를 점검하기에 급급하였다²⁾.

이러한 문제들을 보다 구체적으로 살펴보기 위해 본 해석을 수행하여 D형 표준러그의 덧판이 감당하는 하중분담률을 검토하려고 서클핀과 러그구멍모델의 각 점에 연결된 약 900개의 갭요소의 축력분포를 조사하여 보았고 그 상세를 Fig. 4.4에 나타내었다.



(a) For each contact point



(b) For lug & doubler

Fig. 4.4 Contact force distribution along lug & doubler eye

본 그림은 덧판 1개와 러그 본체에 대한 방사선 방향의 하중벡터 성분의 원주방향 분포를 나타낸 것으로 모델의 절점위치에서의 원주방향 분포와 러그본체 및 덧판에 미치는 접촉력을 각각 합쳐 원주방향의 구성부재별 분포를 제시하였다. 이로부터 면내하중에 대한 러그본체의 하중감당능력의 약 70%를 덧판이 감당하고 있으므로 덧판의 하중 감

당능력은 리그 본체의 거의 1.5배에 달한다고 볼 수 있다. 따라서 고체요소를 이용한 형상 그대로의 모델링이 아닌 2차원 판 및 각(shell)요소의 사용에서는 덧판을 무시하는 것보다 두께를 리그본체에 그대로 추가하여도 무리가 없을 것으로 생각된다. 다만 면외하중의 경우는 특별한 고려가 요망된다.

4.4 셔클 지름변화에 따른 하중분포

리그 구멍에 비해 셔클핀의 지름은 약간 작다 예를 들면 D-35형에 대해서는 셔클핀의 지름이 57.2mm인데 반해 리그구멍은 61mm의 지름을 가지게 되므로 하중이 없는 상태에서는 이상적으로 보면 리그 두께방향의 선접촉부를 가진다고 볼 수 있다. 따라서 같은 지름을 가지는 경우의 해석과 실제의 지름 차이에 따른 구멍내의 하중분포상황을 비교하여 Fig. 4.5에 나타내었다.

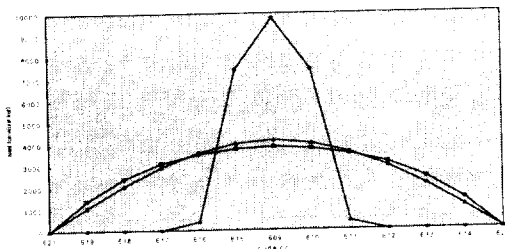


Fig. 4.5 Contact force distribution according to the variation of shackle-pin radius

본 그림으로부터 서로간의 마찰력을 무시한 상태에서 표준형 셔클핀과 리그구멍간에는 약 60°에 걸친 집중적 분포하중이 작용하는 반면 셔클핀의 지름이 리그구멍과 같을 경우 180°에 걸쳐 cosine분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 지름의 증가에 따라 점차 넓은 각도에 걸쳐 cosine분포로 작용됨을 쉽게 판단할 수 있다.

4.5 셔클핀 처짐의 영향

셔클핀은 짧고 비교적 강하므로 거의 처짐이 없다고 볼 수 있으나 미약한 처짐이 발생할 수 있고 그러한 처짐을 가정한다면 리그 덧판의 구멍표면과 제일 먼저 비교적 큰하중으로 접촉하게 되며 하

중 증가에 따른 접촉력의 변화 양상이 흥미롭다. 이에 대해 Fig. 4.6에서 하중증가에 따른 접촉력의 변화양상을 제시하였다.

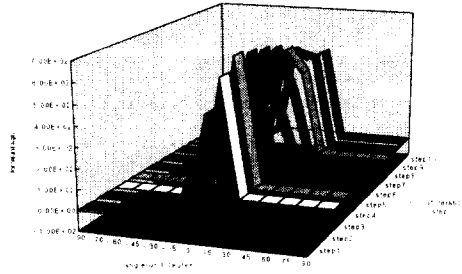


Fig. 4.6 Contact force distribution of doubler outside surface according to the load increment

갭요소로 연결되는 셔클핀의 다른 단면과는 달리 하중의 증가에 따라 어느 정도 접촉력이 상승한 이후에 미세한 감소현상을 보인다. 이는 처음에 셔클핀의 미소한 처짐에 의한 기하학적 하중집중 현상이 처진 리그구멍 상부의 소성화에 의해 소멸되고 접촉강성이 비교적 높은 두께의 중앙부쪽으로 하중의 분담률이 이동되어 하중분포가 평준화되기 때문으로 생각된다.

4.6 하중증가에 따른 최대처짐의 형태

소성화에 따른 비선형성과 하중증가에 따른 처짐 상황을 확인키 위해 10단계의 하중증분에 대한 리그구멍 정상부에 발생하는 수직방향의 최대처짐의 변화 양상을 Fig. 4.7에서 그 전형적인 한 예를 제시하여 살펴보았다.

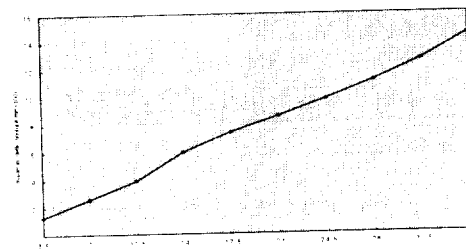


Fig. 4.7 Relation curve between applied force and maximum deflection

상기 그림에서 보는 바와 같이 낮은 하중영역에서는 갭의 열리고 닫히는 상황 변화가 없고 하중 또한 거의 탄성영역을 유지하므로 명확한 선형성을 유지하다가 최대처짐이 0.05mm 부근에서 러그 구멍 최상단 좌우 15° 위치의 갭닫힘이 발생하여 강성의 변화가 급격히 순간적으로 변화한다. 이는 보다 많은 갭요소를 촘촘하게 설치하면 보다 부드러운 비선형적 거동을 보일 수 있겠으나 모델링 상의 한계로 인해 곡선의 부드러움이 부족한 면이 보인다.

한편 갭열림에 뒤이어서는 마지막 설계하중까지 부드러운 비선형성을 유지한다. 이는 갭닫힘에 더 이상의 변화는 없고 러그구멍 상부의 소성화의 진전이 계속되는 재료적 비선형성에 의한 처짐 기동이다.

4.7 하중방향의 영향

러그는 서클이 채워져 러그면내 임의 각도를 가지고 작업이 수행된다. 이에 따라 하중방향이 변할 수 있으며 이러한 접촉력 분포의 영향을 생각해 볼 필요성이 있다.

본 내용에서는 이를 특별히 분리된 하중경우로 취급하지 않고 그 거동 상황을 예측하여 보았다. 이를 가능케 하는 자료는 앞서 제시된 Table 2.2이며 이는 전형적인 러그모델의 탑재 구멍내의 반경 방향의 대표적 절점들의 강성을 정리한 것으로 같은 원주상의 러그 접촉면의 강성은 거의 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 독립적인 해석을 수행치 않고 4.1절에서 4.6절까지 검토된 내용과 거의 유사한 현상이 예측될 수 있다.

5. 설계를 위한 합리적 하중설정 및 해석지침

다양한 검토를 통해 러그구조의 개발 및 다양한 해석모델들이 강도 평가를 위해 평가자 나름대로 수행되고 있으며 본 D형 러그의 접촉력 분포에 관련된 연구내용을 종합하면 다음과 같은 하중설정

과 기타 해석관련 지침을 제시할 수 있다.

러그 구멍주위의 보다 엄밀한 응력분포를 확인하기 위해서는 러그 구멍 상단의 소성영역이 형성되므로 재료적 비선형성을 고려함이 바람직하며 그렇지 않은 경우는 탄성해석으로 러그 전체의 응력분포 양상은 파악될 수 있다. 그러나 국부적 최대 등가응력치는 항복응력의 수배에 달할 수도 있다.

탑재용 러그구멍을 모델링하여 구멍내에 접촉력을 증가의 분포하중으로 작용시킬 때 기존의 해석에서는 180°에 걸친 cosine분포를 취하였지만 약 60°의 cosine 하중분포가 바람직함을 갭요소 및 재료의 비선형해석으로부터 확인하였다. 또한 cosine 접촉각도의 산출은 서클핀의 반경변화에 따른 시리즈 해석의 결과 검토로 서클핀 지름에 대한 러그구멍 지름과 서클핀 지름과의 차에 대한 비의 함수로 나타낼 수 있으나 본 내용에서는 생략한다.

통상, 러그 본체에 붙는 덧판은 설계단계에서 없는 것으로 생각하고 설계하중에 견딜 수 있는 구조를 개발함이 안전측의 입장에서 바람직한 방향으로 생각하기 쉬우나 본 선박용 탑재러그의 덧판의 치수는 상당히 크므로 이를 무시한 상태에서 구조 해석을 수행하면 매우 큰 응력이 발생되어 응력을 기준으로 그 강도를 판단하기 어려우므로 새로운 러그가 개발되더라도 그 절대적인 판단은 어렵고 기존의 러그와 비교해석하여 강도를 점검하기에 급급하였으나 본 해석 결과 면내하중의 경우에 고체요소식의 형상 그대로의 모델링이 아닌 2차원 판 혹은 각(shell)요소의 사용에서는 덧판을 무시하는 것보다 두께를 러그본체에 그대로 추가하여도 무리가 없을 것으로 생각된다.

6. 적정설계

기존의 러그 형상이 실제하중에 비해 크게 설정되어 있기 때문에 이에 대한 적정설계의 개념이 도입될 필요가 있음에 따라 몇가지 해석을 통하여 브래킷의 크기를 증가시키고 하중 작용선에 근접하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있었다.

한편 기존 사용되고 있는 리그의 설계 기준을 살펴보고 이를 기초로 한 최적설계를 수행하였다. 리그 경량화 추구를 위해 리그판 폭 & 높이, 브래킷 높이(등변으로 가정한 상태에서)의 변화에 따른 용접장의 길이, 무게 및 응력치의 변화 관계를 파악하여 본다.

본 내용은 D-35형 리그구조에 대해 최적화를 수행하였다. 기초 연구의 입장에서 비교목적으로 선형해석 상태에서 파라메트릭연구를 수행하며 브래킷 하부의 고정도의 영향은 무시하였다.

6.1 수학적 리그모델 묘사

덧판(doubler)을 주판에 용접하기 위해 두께의 1.5배 만큼 바깥 방향으로 리그주판이 등글게 설치된다고 가정한다.

리그판 하부는 2차 사용을 위해 9cm 만큼 리그판 길이를 유지하면서 올라오며 그 이상은 덧판(doubler)의 반지름 보다 덧판 두께의 1.5배 만큼 큰 반지름을 가지는 동심원의 점선과 만나는 직선으로 리그 외곽이 이루어진다고 가정한다.

브래킷은 양쪽에 나란히 두 개씩 총 4개가 부착되는 것으로하고 덧판도 양쪽에 두 개가 부착되며 용접부는 충분한 연결강도를 가진다고 가정한다.

브래킷의 높이는 리그강도 계산치를 유지하는 높이의 직각 이등변 삼각형으로 하며 덧판(doubler)과 교차되지 않고 리그의 수직 높이보다 클 경우 리그판의 양쪽으로 삼각판 두개가 결합된 판판으로 부착시킨다.

항복응력 2400 kg/cm², 로우프 기울기 면내 45도, 면외10도, 전단허용응력 788kg/cm²으로 잡으며 편구멍 높이를 10-50cm변화시키면서 최적치를 탐색한다.

최소 허용 리그두께 계산은 덧판(doubler) 두께를 입력자료로 고정한 상태에서 식(6.1)을 이용하

여 계산한다.

$$T_{LUG} = \frac{P}{0.9\sigma_y D_H} \quad (6.1)$$

여기서, T_{LUG} : 리그판 두께
 P : 작용하중
 σ_y : 항복응력
 D_H : 리그구멍 직경

리그구멍 주변 구조의 전단강도를 확보하기 위한 최소 허용면적의 계산은 식(6.2)를 이용하였다. 면적계산에는 덧판과 리그판의 면적이 공히 유효한 것으로 산입되었다. 최적화 계산과정에서 덧판의 반경을 5-50cm 범위내에서 탐색하여 최적치를 산정한다.

$$A_s = \frac{P}{1/4\sigma_y} \quad (6.2)$$

여기서, A_s : 리그판 두께
 P : 작용하중

리그길이 계산은 편구멍 높이의 각 변화치에 따른 값과 이를 이용하여 얻어진 리그두께(T_m)를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$L_{LUG} = \sqrt{\frac{6PH}{0.6\sigma_y T_m}} \quad (6.3)$$

여기서, L_{LUG} : 리그길이
 H : 리그구멍의 높이
 P : 작용하중
 T_m : 리그두께
 σ_y : 항복응력

등변 삼각 브래킷의 한번 길이 계산은 브래킷 두께를 입력 자료로 하여 식(6.4)로부터 산정된다. 그러나 이 식은 한 변만이 수직으로 부착되어 있을

때의 식으로 실제의 경우는 양쪽에 나란하게 브라켓이 부착되어 있을 뿐만이 아니라 한쪽이 없어도 러그본체와 T자형의 형상으로 구성되므로 물리적 이치에 어긋나나 오직 한쪽 브라켓 구조만에 의해 지탱된다는 경험적 안전측의 설계지침이라 생각하고 적용하여 본다.

$$h = \sqrt{\frac{6 P_x H}{0.6 \sigma_y T_b}} \quad (6.4)$$

- 여기서, h : 브라켓길이
- H : 러그구멍의 높이
- P : 작용하중
- T_b : 브라켓두께
- σ_y : 항복응력

6.2 러그 최적설계 프로그램의 개요

본 프로그램은 입력자료를 작용하중(P), 핀구멍 지름(D_H), 덧판두께(T_C) 그리고 브라켓 두께(T_b)만을 입력자료로 하여 러그주판의 길이(L) 범위인 10-120cm의 1cm 간격으로 최적 러그구조를 제공해 주어 설계자의 선택권을 충분히 고려함과 동시에 러그길이 변화에 따른 구멍높이, 덧판의 반지름, 러그 두께, 브라켓높이 및 브라켓 경사각등의 최적 결과의 변화 양상을 한 눈에 파악할 수 있어 설계개념의 파악이 쉽고 양호한 최적치수를 얻을 수 있다.

본 프로그램에서는 항복 응력값을 2400kg/cm²으로 그리고 허용 전단응력은 788kg/cm²으로 삼았다.

핀의 구멍은 핀크기와 서클간의 관계에 있어서 설계변수에서 제외하고 일정한 입력치로 고정시켰다. 대신에 러그본체의 밑단에서의 핀구멍까지의 높이는 10-50cm범위에서 1cm씩 변화시켜가면서 상기에 소개한 설계식들을 모두 고려하면서 41개의 설계치 중에서 중량이 최소인 설계값을 기억하여 출력한다.

덧판의 반경은 5-50cm 범위에서 1cm간격으로 탐색하여 러그 본체판과의 합이 작용하중에 대한

허용 전단면적이 될 수 있게 증가시켜 준다.

핀구멍의 높이는 덧판 반지름과 6cm의 합보다 작지 못하게 제한하여 덧판을 재사용할 수 있고 하부의 러그본체에서의 절단 간격을 유지시켰으며 러그의 길이를 러그단부경사가 90도 이상되지 못하게 하였다.

브라켓은 10도 경사에 대한 횡방향 하중성분에 대해 브라켓만으로 충분히 견딜 수 있는 평균강도를 유지할 수 있게 설계하였다.

덧판 바깥 주판의 돌출 높이는 덧판 두께의 1.5 배로 잡아 설계를 하고 전단강도 평가에 사용되나 현장의 실제적용에서는 무시된 상태로 1.5cm로 적용하고 있어 설계프로그램에서는 같은 값(1.5cm)으로 사용하였다.

6.3 러그최적화 및 파라메타 분석

이상의 수학적 모델과 가정을 사용하여 러그의 최적화를 수행하고 각 러그길이별 최적화 결과를 Table 6.1에 제시하였다. 이들을 하나씩 도표를 이용하여 분석하여 본다.

Table 6.1 Optimum design results of lug structure

L	ARMH	R	TM	H	THIETA	WLUG	WBK	WDE	WTOTAL
20	13	7	4.75	9.1	73.91	10.03	5.84	2.74	18.61
30	15	8	2.45	9.8	57.82	9.12	6.5	3.78	19.39
40	16	10	1.5	10.1	52.16	8.2	6.79	6.26	21.25
50	16	10	1.2	10.1	41.94	8.29	6.79	6.26	21.34
60	17	11	1	10.4	38.67	8.81	7.08	7.71	23.61
70	17	11	0.85	10.4	33.25	8.78	7.08	7.71	23.58
80	17	11	0.75	10.4	29.15	8.88	7.08	7.71	23.68
90	18	12	0.65	10.7	28.42	9.14	7.39	9.3	25.83
100	18	12	0.6	10.7	25.61	9.39	7.39	9.3	26.08
110	18	12	0.55	10.7	23.31	9.48	7.39	9.3	26.17
120	118	12	0.5	10.7	21.39	9.42	7.39	9.3	26.1

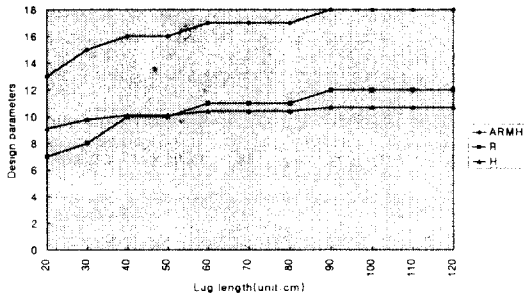


Fig. 6.1 Parametric study of lug design according to the change of lug length

Fig. 6.1에서는 리그 길이변화에 따른 핀구멍의 높이, 덧판반경 그리고 브래킷 높이의 변화를 살펴 보았다. 세가지 파라메타 공히 리그길이 증가와 더불어 점차 증가하는 경향을 보이거나 브래킷의 높이의 변화는 미진하다. 리그길이의 변화에 따라 덧판반경과 핀구멍의 높이의 증가 경향은 일정한 간격을 두고 거의 유사하다.

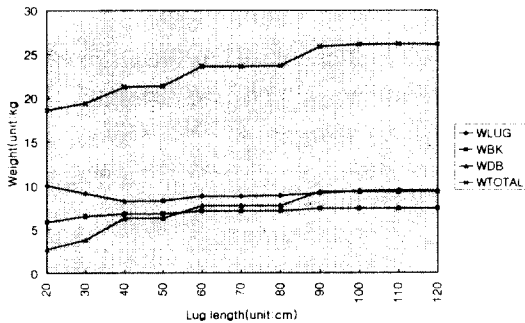


Fig. 6.2 Weight variation according to the change of lug length

Fig. 6.2에서는 리그길이의 변화에 따른 리그자체, 브래킷, 덧판 및 총중량의 변화를 제시하였다. 리그길이의 증가에 따라 덧판의 중량증가 현상이 매우 뚜렷하나 리그본체는 매우 짧은 리그길이 범위인 20-40cm범위에서 급격한 중량의 감소를 보이며 그외의 범위에서는 서서히 증가함을 알 수 있다. 브래킷 중량은 리그길이의 증가에 따라 전구간에 걸쳐 서서히 증가함을 볼 수 있으나 그 증가량은 미소하다. 총 중량은 각 리그길이 별로 19-26kgf 로 추정되며 기존 설계 중량은 32.5kgf 정도로 구

조해석을 통한 국부적 보강이 되지 않은 초기 추정치이지만 평균 약 30%의 중량 감소가 예상된다.

Fig. 6.3에서는 리그길이의 증가에 따른 리그주판의 경계역 기울기의 변화를 나타내었다. 리그길이의 변화에 따라 비선형적으로 각도의 감소현상을 보이고 있다. 즉 짧은 리그길이에서는 거의 90도에 가까운 수직 리그형상이 바람직함을 본 연구에서 알 수 있다.

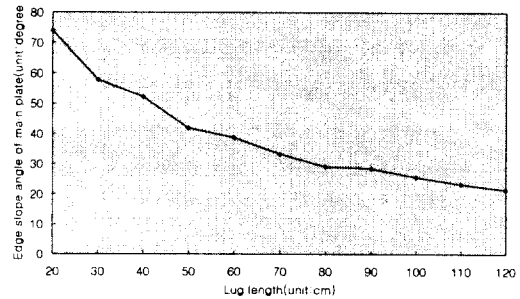


Fig. 6.3 Variation of edge slope angle according to the variation of lug length

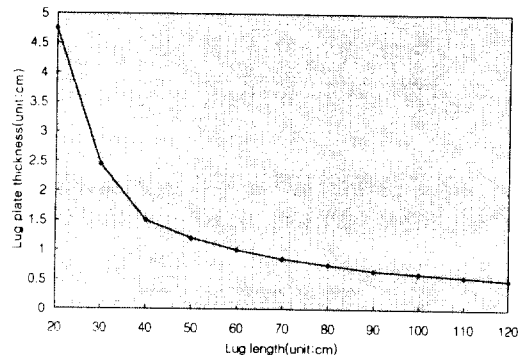


Fig. 6.4 Variation of lug thickness according to the change of lug length

Fig. 6.4에서는 리그길이 변화에 따른 리그주판의 두께 변화양상을 살펴보았다. 리그길이가 짧은 구간(20-50cm)에서는 급격한 두께의 감소를 보이며 그 외의 구간에서는 리그길이의 증가에 따라 서서히 감소한다. 단 이러한 상당한 두께 감소구간에서는 큰 전단이나 압축영역에서 특별히 국부적 좌굴강도에 신경을 써야할 것 같다.

7. 결 론

선박블록 탑재용 러그(lifting lug)에서 사용 점유율이 높은 D형 러그를 대상으로 러그구멍과 서클핀 간의 접촉 상관관계를 갭(gap)요소로 모델링하고 이의 비선형성과 더불어 서클핀과의 국부적인 접촉시 발생할 수 있는 국부적 재료 비선형성을 고려한 해석을 수행하였다.

이로부터 러그 및 덧판구멍에 작용하는 접촉력의 분포, 등가응력의 분포상황, 덧판의 하중감당 정도, 서클핀의 중심접촉면 이동에 따른 접촉력 분포의 변화, 서클핀의 규격 영향, 덧판과 러그 본체와의 하중분담률, 하중증가에 따른 처짐간의 상관관계 그리고 서클핀 처짐의 영향등을 검토하여 탑재용 러그의 강도해석 시 보다 정확한 하중작용을 위한 보다 실제적 방법을 검토하여 보았다.

이들 검토 결과를 종합하여 탑재용 러그의 하중설정과 해석에 관련된 지침을 제시하였으며 특히 서클 구멍내에 접촉력을 등가의 분포하중으로 작용시킬 때 기존의 해석에서는 180°에 걸친 cosine 분포를 취하였지만 실제 해석결과 약 60°의 cosine 하중분포가 바람직함을 갭요소를 사용한 재료의 비선형 해석으로부터 확인하였다.

러그구조 개발과 해석을 위해 이들 결과들을 이용하면 기존의 방법보다 효율적이고 타당성 있는 평가가 예상되며 본 연구는 면내하중의 경우만을 검토한 것으로 추후에 이들 기초 연구를 근간으로 하여 면외하중의 효과, 서클핀과 러그구멍의 마찰력의 효과, 탑재블록의 효과등을 추가하여 보다 세밀한 접촉력 분포 및 적정설계법을 적용하면 양호한 설계를 도출해 낼 수 있을 것으로 사료된다.

또한 초기설계의 목적으로 한 러그형태에 대해 간이형 설계식을 사용한 최소중량 설계를 시도하여 보았고 그 결과 최소중량에 따른 각 파라메타의 변화양상을 검토하여 보았다. 이들 최소 중량치는 기존의 러그에 비해 평균 약 30%의 중량 감소가 얻어졌고 국부적인 응력의 집중을 피하기 위한 보

강을 취하더라도 상당한 중량경감이 얻어질 것으로 판단된다. 향후 이를 기초로 개인용컴퓨터에 GUI(graphic user interface)를 구축하여 현장에서 설계자라면 누구나 러그설계를 손쉽게 수행할 수 있는 러그구조설계 시스템을 개발할 예정이다.

후 기

이 논문은 1996년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었기에 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 함주혁, 정관용, "탑재용 러그구조의 형상별 강도 검토", 현대선박해양연구소 기술보고서 HMRI-94- 01-R017, 1994년 1월
- 2) 김판영, 김수현, 함주혁, "탑재용 러그 구조의 강도 검토", 현대선박해양연구소 기술보고서 HMRI- 95- 05 - R078, 1995년 5월
- 3) Edwin P. Russo and A. Hall, "Systemetic Approach to Lifting Eye Design", Ocean Resources Engineering, Nov., 1977
- 4) P3/PATRAN User Manual, PDA Engineering, PATRAN Division
- 5) Sang H. Lee, "MSC/NASTRAN Handbook for Nonlinear Analysis", Version 67(Draft)
- 6) 함주혁, 정관용, "125,000 m³ LNG운반선의 탱크 탑재를 위한 탑재시스템 강도검토", 현대선박해양연구소 기술보고서 HMRI-92-03-R036, 1992년 3월
- 7) 함주혁, 정관용, "125,000 m³ LNG운반선의 탱크카바 탑재 강도해석", 현대선박해양연구소 기술보고서 HMRI-92- 11-R155, 1992년 11월
- 8) 김재현, 김병주, 함주혁, "Ro/Ro선 중앙부 대형블록에 대한 탑재 강도 검토", 현대선박해양연구소 기술보고서 HMRI-94- 04- R053, 1994년 4월
- 9) 신상범, "Lifting Lug의 형상개선 및 적정설계", 현대중공업 산업기계연구소 기술보고서, BC42065, Apr., 1994

- 10) Federation Europeene De La Manutention, "Rules for the Design of Hoisting Appliances", 2nd Edition, Dec., 1970
- 11) 井口信洋, "용접구조설계입문", 산업도서(주), 1980
- 12) 佐藤邦彦, "용접구조요람", 흑목출판사, 1988. 3
- 13) Andrew O. Currie, "Example Problem Manual", MSC/NASTRAN Version 67