

DNV Crane Criteria 대응설계

이강수[†]
대우조선해양(주)

Design Optimization for Vessel's Weight Control Related to DNV Crane Criteria

Kang-Su Lee[†]
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering CO., LTD.

Abstract

DNV crane criteria are specially designated for the vessel equipped with lifting crane to cover the risk during the crane operation. Based on the DNV crane criteria, the crane performance shall be decided. The weight control has great importance in the management of vessel's design for crane vessel. To evaluate limitation of lightship weight and the effect of design changes sufficiently, the lightship allowable VCG curve was used. The optimization process was carried out for generation of the lightship allowable VCG curve due to the difficulty coming from the characteristic of DNV crane criteria. This paper includes the introduction to the DNV Crane criteria and optimization process for evaluation in aspect of lightship weight and VCG.

Keywords : Crane vessel, DNV crane criteria, lightship Allowable VCG curve, Optimization process, weight control.

1. 서론

크레인선(Crane vessel)은 크레인(Crane) 또는 유사 인양 설비(lifting application)를 탑재하고 있는 선박으로 인양 작업(lifting operation)을 수행하는 선박이다. 그 중에서도 무거운 중량을 들기 위해 특별히 고안된 Heavy lifting crane이 설치된 선박은 해양 건설에 주로 이용되며, 해양 건설을 위한 크레인 작업(Crane operation)은 매우 위험한 환경 속에서 이루어지므로 추가적인 복원성(stability) 고려가 이루어져야 한다. 각 선급에서는 크레인 선(Crane vessel)을 위해 특별히 고안된 복원성 기준(stability criteria)을 제공하고 있으며 이 복원성 기준들은 크레인 작업 시 발생할 수 있는 문제점에 대응할 수 있도록 고안되었다. 크레인 작업 시 발생할 수 있는 가장 큰 위험은 크레인 작업 중 들고 있던 중량물을 떨어뜨리는 것으로 중량물의 무게와 선측 밖으로 뻗어 있는 크레인의 최대 작업 길이에 따라 선체에 경사 모멘트(heeling moment)가 가해지므로 그에 대비한 복원성 확보가 필요하다. 특히 크레인이 폭 방향 중심이 아닌 선측에 배치되는 경우, 그 영향이 더욱 크며 복원성이 크레인 성능에 주요 제한 요소가 될 수 있다.

복원성 계산에 있어서 가장 중요한 요소는 중량과 함께 선체의 높이방향 무게중심(Vertical Center of Gravity, 이하 VCG)이다. 특히 해양 건설에 사용되는 크레인선(Crane Vessel)은 상선과 달

리 정형화된 설계를 기반으로 하지 않기 때문에, 선주 협의에 따라 많은 부분들이 변경될 여지가 있다. 이는 선체 중량 변화의 가능성이 크며, 그에 따른 복원성 문제로 크레인 성능이 영향 받을 수 있음을 의미한다. 이러한 위험성을 줄이기 위해서는 적절한 중량관리 방안이 수립되어야 하며, 그에 따른 설계 대비책이 준비되어야 한다. 그리고 모든 설계 변경에 따른 영향을 정량화하여 그에 따른 복원성 영향을 평가, 크레인 성능 제한요소를 철저히 가려내야 한다.

중량관리, 설계 영향 검토 등과 같은 작업은 그 중요성이나 시급성이 매우 높을 뿐만 아니라 그 영향을 평가하기가 매우 어렵다. 매우 생소한 복원성 기준 적용과 더불어 다양한 설계 요소를 검토하기 위해서는 효과적인 방법 모색이 무엇보다 중요하다.

이번 논문에서는 크레인 복원성 기준 중에서 DNV 선급의 크레인 복원성 기준(이하 DNV Crane criteria)에 대해서 알아보고 중량관리 및 설계평가와 관련된 효과적 대응 방안에 대해서 알아보도록 하였다.

2. DNV Crane Criteria 소개

DNV 선급은 크레인선(Crane vessel)을 위한 선급 규약(DNV Rules for Ships, Part 5, Chapter 7, Sec.7)을 제공하고 있으며,

[†] 교신저자 : exitin@dsme.co.kr, 010-2711-4801

크레인선(Crane vessel)의 작업을 위한 복원성 기준(stability criteria)을 제공하고 있다.

DNV Crane Criteria는 크레인이 작업 중 들고 있는 중량물(crane load)을 우발적으로 떨어지는 경우의 영향을 조사하도록 고안되었으며 다음의 요구조건을 만족하도록 규제하고 있다.

<DNV Pt.5 Ch.7 Sec.7 D200 Accidental load drop>

1. The restoring energy represented by area A2 in Fig.1 is to be at least 40% in excess of the potential energy represented by area A1. ($A2/A1 > 1.4$)
2. The angle of static equilibrium θ_e after loss of crane load shall not be more than 15 degrees from the upright.

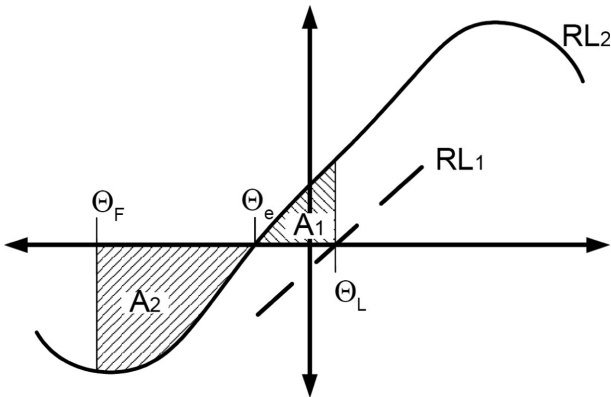


Fig. 1 Stability with loss of crane load

- RL1 = Net righting lever (GZ) curve for the condition before loss of crane load, corrected for crane heeling moment and for the righting moment provided by the counter ballast if applicable.
- RL2 = Net righting lever (GZ) curve for the condition after loss of crane load, corrected for the transverse moment provided by the counter ballast if applicable.
- θ_L = Static angle of equilibrium before loss of crane load.
- θ_e = Static angle of equilibrium after loss of crane load
- θ_F = Angle of down flooding

DNV Crane Criteria는 크레인이 중량물(crane load)을 들고 있는 전후의 GZ 곡선을 비교하여 검토한다. Fig. 1. RL1은 크레인 중량물(crane load)을 들고 있는 상태의 GZ 곡선이며, RL2는 크레인 중량물(crane load)을 떨어뜨린 후 GZ 곡선이다. θ_L 은 크레인 중량물(crane load)을 떨어뜨리기 이전 선박의 평형 경사 각도(static heeling angle of equilibrium)이고, θ_e 은 크레인 중량물(crane load)을 떨어뜨린 이후 선박의 평형 경사 각도(static heeling angle of equilibrium)이다. θ_F 는 해수 유입 각(Down flooding angle)으로써 선내로 물이 유입될 수 있는 개구부

(Opening)까지의 각도로 복원력 계산의 제한 범위가 된다.

Fig. 1 A1 면적은 크레인의 중량물 낙하(Crane load drop)에 따라 배에 가해지는 모멘텀(momentum)으로 배의 전복을 일으키는 에너지량이며, A2 면적은 배가 가지는 복원력 에너지량이다. 'GZ Area Ratio ($A2/A1$) > 1.4'는 선박이 크레인의 중량물 낙하(crane load drop)에 대비하여 최소 40% 이상의 복원력을 가져야 함을 의미한다.

GZ 면적 비율(GZ Area ratio)과 함께 크레인의 중량물 낙하(crane load drop) 이후의 평형 경사 각(static heeling angle of equilibrium)이 15도 이내로 유지되도록 제한하고 있다.

이와 같이 DNV Crane criteria는 크레인이 들고 있는 중량물(crane load)을 갑작스럽게 떨어뜨렸을 경우에도 배가 문제없이 살아남을 최소한의 복원성을 갖도록 하기 위해서 복원력 에너지의 양과 최대 경사각을 제한하고 있다.

3. 중량 관리와 연계한 Stability 대응 설계

일반 상선이 아닌 해양성 선박은 복잡한 설비와 시스템, 주문 주의 계속된 설계 변경 요구로 많은 어려움을 겪는다. 이로 인해 변경되는 중량은 선박의 복원성에 직각적인 영향을 주게 된다. DNV Crane criteria 역시 다른 복원성 기준(stability criteria)와 마찬가지로 선박의 중량과 무게 중심에 큰 영향을 받는다.

선박의 선형이 결정된 이후에는 복원성 관점에서 관리해 나아갈 수 있는 부분은 중량과 탱크 구획이다. 물론 선체 부가물 등을 부착하여 선박의 부력 성능을 개선함으로써 복원성 성능을 개선할 수도 있으나, 선속 및 기타 운동 성능 등에 미치는 영향과 다른 의장품과의 설치 간섭 등으로 실현되기 어렵다. 따라서 건조 중 중량 관리의 복원성 성능 보증을 위해서 각별히 신경 써야 되는 업무이며, 선박의 경하 중량(Lightship weight) 뿐만 아니라 VCG도 동시에 관리 되어야 한다.

크레인선(Crane vessel)은 크레인 작업을 위해서 선박의 트림(Trim)과 경사(Heeling)를 최소한으로 유지해야 하기 때문에 크레인 인의 인양 성능(Crane capacity)을 위해서는 자세 유지를 위한 밸러스트 탱크(Water Ballast Tank, 이하 Ballast Tank)의 배치와 용량도 매우 중요하다. 다양한 크기의 Ballast Tank를 갖춘 선박의 경우에는 어떤 탱크를 선택하여 얼마만큼의 Ballasting water를 사용하느냐에 따라 GM이 큰 폭의 변화를 가질 수 있다. 따라서 Ballast Tank 구획에 영향을 미치는 설계 변경은 그 영향을 복원성 관점에서 반드시 조사하여야 한다.

Fig. 2와 같이 선박의 중량 및 무게중심, Ballast tank 용량 및 배치, 크레인 작업을 위한 재하 상태>Loading condition, 이하 Loading condition) 등 복잡한 설계 변수들을 크레인의 성능 보증을 위해 각각 관리하는 것은 매우 어려운 일이며 이를 해결하기 위해서는 한계 중량 및 한계 VCG 확인이 무엇보다 중요하다. 그리고 다양한 설계 변경들의 반영여부를 결정하기 위해서는 각 설계변경이 복원성에 미치는 영향을 정량화하는 작업이 필요하다.

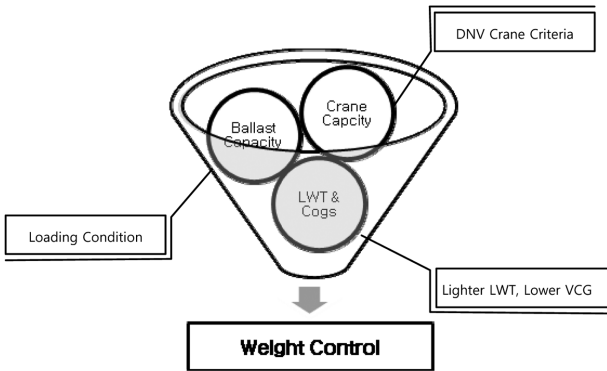


Fig. 2 주요 설계 변수 및 중량 관리

효과적인 중량관리와 설계 검증 및 복원성 성능 검토를 위해서 DNV Crane Criteria 만족에 따른 경하중량 별 VCG 한계 곡선 (Lightship Weight VCG Curve)를 생성 관리하는 것이 중요하다. Lightship Allowable VCG Curve를 이용하면 Ballast tank 배치 및 형상을 변경하는 경우, 현재 경하 중량(lightship weight)에 해당 되는 한계 VCG 값의 변화를 통해서 설계 변경 안의 적용 가능 여부를 수치로 가능할 수 있으며, 현재 중량 상태가 DNV crane criteria를 만족하는지 대해서도 판단이 가능하기 때문이다.

4. Lightship Allowable VCG Curve

통상 선박의 복원성 검증을 위해서는 한계 GM 곡선(Minimum GM Curve, 이하 Min. GM 곡선)를 생성하여 선박의 Loading condition이 Min. GM Curve 보다 높은 GM을 갖는지 확인한다. 그러나 DNV Crane criteria는 두 개의 Loading condition의 GZ 곡선이 비교 되어야 하기 때문에 선박의 배수량에 따른 Min. GM curve를 쉽게 구할 수 없다. 따라서 실제 Loading condition을 만들고 복원성을 검증하는 순서로 이루어져야 한다.

DNV Crane criteria 중에서 경사각(Heeling angle)은 크레인 중량물(crane load)의 무게와 크레인의 배치, 특히 최대 작용 반경(Max. out-reached arm)을 통해서 예측이 가능하며 부력 특성에 따라 일정한 경향을 보이므로 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 Fig. 3과 같이 GZ 면적 비율은 Ballasting Tank 사용에 따른 배의 자세 및 GM에 의해서 영향을 받으므로 트림(Trim)과 경사(Heeling)가 최소화 되고 GM이 최대화 되는 최적 Loading

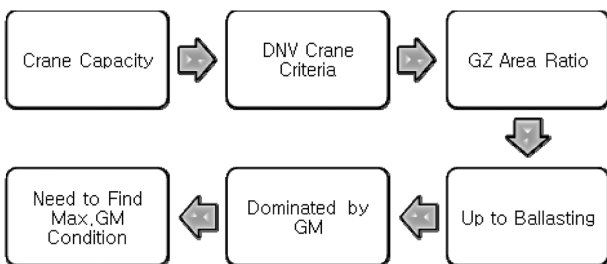


Fig. 3 Optimum Ballasting 필요성

condition이 요구된다. 문제점은 Ballast Tank의 수가 많고 형상이 매우 복잡한 선박은 수작업을 통하여 값을 찾더라도 그 결과의 정확도에 대해서 확신을 갖기 매우 어려웠으며 시간 또한 많이 소요된다는 점이다. 또한 경하 중량(Lightship weight)이 변경될 수 있는 요인이 많기 때문에 하나의 중량을 가정해서 결과를 예측하기 보다는 예상 경하 중량(Lightship weight) 범위를 설정하여 복원성 성능을 검증하는 작업이 필요하다.

따라서 최대 GM을 갖는 최적 Ballasting Condition을 효과적으로 찾는 방법에 대한 고민이 필요했으며, 이를 해결하기 위해서 자동화 & 최적화 방법을 모색하게 되었다.

5. 최적화

최적화 과정은 크게 둘로 나누어 수행하였다. 최대 GM을 갖는 Loading Condition을 찾고(1. Finding Optimum Ballasting), 주어진 Ballasting 조건에서 수용 가능한 경하 중량 (Lightship)의 한계 VCG를 찾는 것이다(2. Searching Max. VCG). 경하 중량 (Lightship weight)의 VCG는 그 값을 변경한다고 하더라도 배의 부유 자세(floating position)가 변하지 않기 때문에 최적 ballasting 조건을 찾는 것과 Lightship의 한계 VCG를 찾는 부분의 분리가 가능하다.

5.1 Finding Optimum Ballasting

GM이 최대가 되는 최적 Ballasting 조건을 찾기 위해서 다음의 목적함수 및 제약조건을 두었다.

- Single objective function
- Find $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{26}]$
- Maximize GM
- Subject to $abs(Heel) < 0.3 \text{ deg}$
 $abs(Trim) < 0.05 \text{ m}$
 $Draft < 11.0 \text{ m (operation draft)}$
 $X_{lower} \leq X_i < X_{upper} \text{ or } X_i = 0 \text{ or } X_i = 100$

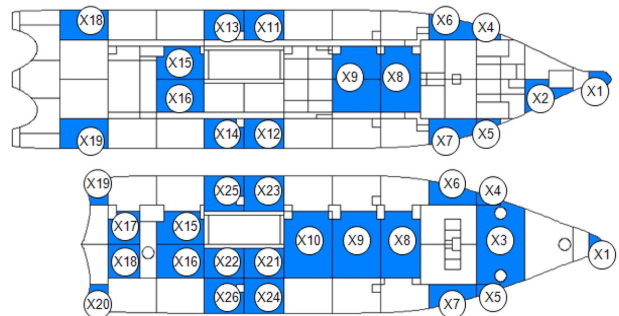


Fig. 4 Design Variable: Ballast water (26)

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 응용하여 최적 Ballasting 을 찾도록 최적화 과정을 구성하였고, 5000회 이상 반복(Iteration) 실행 시 만족스러운 결과를 보이는 것으로 확인되었다.

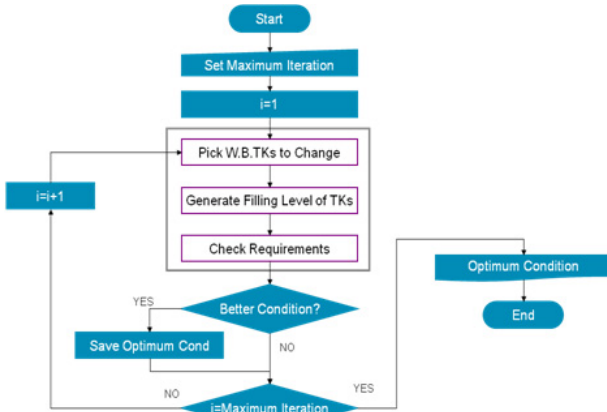


Fig. 5 Optimization Flow Chart



Fig. 6 Optimization Process

5.2 Searching Max. VCG

최적 Ballasting 조건으로부터 Lightship의 한계 VCG값을 구하는 기법은 기초적인 최적화 기법 중 하나인 Bisection method를 사용하여 반복(iteration) 횟수를 줄이고 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. Bisection Method는 유효자리 숫자인 소수점 세 번째 자리까지 최대 VCG를 알아내기 위해서 10회 미만의 계산(iteration)이 소요되므로 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

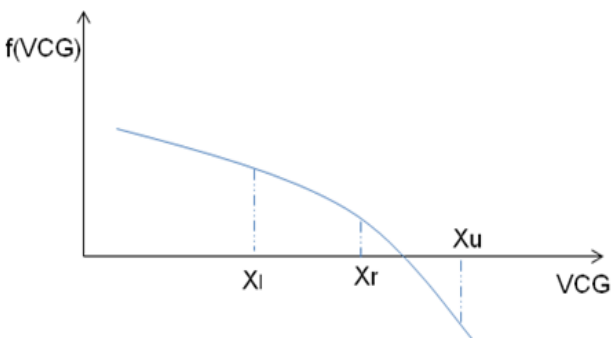


Fig. 7 Bisection Method

i. Step. 1

- Choose lower X_l and upper X_u guesses for the root such that the function changes sign over the interval.
- Checked by $f(X_l)f(X_u) < 0$.

ii. Step. 2

- An estimated of the root X_r is determined by $X_r = (X_l + X_u)/2$

iii. Step. 3

- Following evaluation to determine in which subinterval the root lies:
 - If $f(X_l)f(X_u) < 0$, the root lies on in the lower subinterval. Set $X_u = X_r$, return to Step 2.
 - If $f(X_l)f(X_u) > 0$, the root lies on in the upper subinterval. Set $X_l = X_r$, return to Step 2.
 - If $f(X_l)f(X_u) = 0$ or $(X_u - X_l) < 0.0001$, the root = X_r ; terminate the computation

6. 최적화 결과

최적 Ballasting과 한계 VCG searching을 분할하여 주어진 경하 중량(lightship weight)에 적용 계산하면 주어진 경하 중량(lightship weight) 범위에서 Fig. 8 같은 Lightship allowable VCG curve를 구할 수 있다. A라는 기준 경하 중량(Lightship weight)를 시작으로 500ton 간격으로 VCG값을 구했기 때문에 각 시점 별 중량 집계 결과를 분석하고 그에 따른 대비책(contingency plan)을 세울 수 있다. 현재 중량 집계의 결과와 대비하여 얼마의 VCG 미진을 가지고 있는지 수치적으로 확인할 수 있으므로 설계 불안요인을 해소하는데 도움이 된다. 그리고 Fig. 8에서 보이기

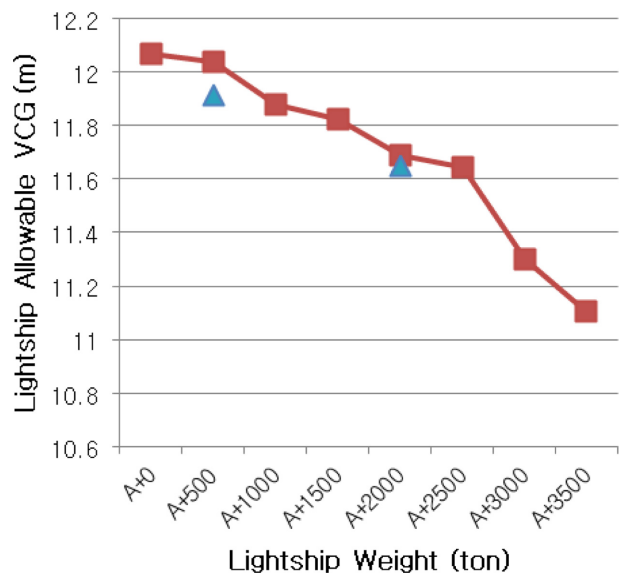


Fig. 8 Allowable Lightship VCG Curve for DNV Crane Criteria

는 것과 같이 최적화 수행에 따라 수작업으로 검토했던 결과보다 높은 VCG까지 수용 할 수 있다는 결과도 얻었다. 또한 검토 경하 중량의 범위가 더 넓어졌으며 한계 VCG가 급격하게 줄어드는 주요 지점을 그래프 상으로 파악할 수 있으므로 한계 중량의 관리 지점에 대해서도 파악이 가능하다.

Lightship Allowable VCG Curve 생성 과정을 자동화 및 최적화하였으므로 Ballast Tank 및 Loading condition에 영향을 미치는 설계 변경에 대하여 빠르고 쉽게 검토가 가능하다.

7. 결론

지금까지 크레인선 (Crane vessel)에 적용하는 DNV crane criteria에 대해서 알아보고 최적화 기법을 적용하여 복원성 대응 설계 능력 향상과 중량관리 참조 정보를 확보하는 내용에 대해서 소개하였다.

유전자 알고리즘과 Bisection method를 이용한 최적화 기법은 DNV Crane Criteria의 특성으로 인해 구하기 어려웠던 Lightship Allowable VCG를 구하기 위한 방편으로 사용되었으며 수작업 검토 결과보다 나은 결과를 찾을 수 있었다. 또한 최적화를 위해 모든 과정을 자동화하여야 했기 때문에 여러 설계 변경 검토를 동시에 수행할 수 있었고 결과가 수치적으로 제시되기 때문에 복원성 성능 측면에서 빠른 판단이 가능했다. 이는 다양한 설계 대책들(Contingency plan)에 대해서 최적화 기법을 적용해 봄으로써 한계 VCG를 얼마나 개선시킬 수 있는지를 판단하여 최적의 해법을 찾는 방편으로 사용될 수 있었다.

본 최적화 방법을 통해서 DNV Crane criteria로 인해서 설계 초기부터 발생할 수 있는 설계 불안요소를 정량화된 결과로 관리할 수 있었다는 점이 가장 큰 소득이었으며 신속성과 정확성을 갖춘 결과 검토를 통해서 낯선 선박의 대해서도 신뢰도 높은 설계를 진행할 수 있는 초석이 되었다. 앞으로 다양한 설계 분야에 최적화 기법 도입으로 설계 불확실 해소 및 설계 개선에 따른 경쟁력 확보를 이루어야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- Holland, J. H. (1975), Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Steven Chapra, Raymond Canale, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill Science.
- DNV Rules for Ships, Part 5, Chapter 7, Sec.7 – Crane Vessels.
- Sunmin Yook and Deokhoon Jang, Introduction to DSME optimal container loading manager, DSME.



이 강 수