

이중선체 벌크 캐리어의 선체 구조설계 Structural Design of Double Hull Bulk Carrier

조 규 남* 송 하 철** 천 병 회*** 김 민 원*** 김 민***
Cho, Kyu-nam Song, Ha-Cheol Choun, Byoung-hee Kim, Min Won Kim, Min

ABSTRACT

After many casualties with conventional bulk carriers in recent years, double hull bulk carrier was proposed to enhance the structural safety of side shell and transverse bulkhead. In this paper, two alternative structural designs of double hull bulk carrier were executed based on the Lloyd's rule, and the results were examined in comparison with the existing single hull bulk carrier in the viewpoints of the increase of weight and construction cost. The relative construction concept was used to certify the economical validity of double hull bulk carrier.

1. 서 론

1980년부터 약 15년간의 자료들에 나타난 벌크 캐리어의 사고발생 통계를 살펴보면, 160척의 벌크 캐리어들이 1200명 이상의 인명과 함께 사라졌으며, 선체 구조와 관련된 사고는 주로 선측 외판 및 횡격벽 취약부의 부식에 의한 국부 손상이 선박의 전선 파괴로 이어진 것으로 보고되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 그러나 중요한 사실은 벌크 캐리어의 설계, 건조 및 보수(maintenance)기술이 한층 발전된 1980년대 후반부터 1990년대 초반까지 약 8년이라는 짧은 기간 동안 무려 25척의 벌크 캐리어가 파괴되고 185만 DWT의 화물이 손실되었으며 572명의 인명이 목숨을 잃었다는 것이다. 이에 따라 안전상의 문제에 대한 대책이 시급히 요구되어 그 개선책을 논의하는 가운데 이중선체 벌크 캐리어의 개념이 제안되었다.

본 연구에서는 이중 선체 벌크 캐리어 도입에 대한 필요성에 맞추어, 선급 규정 및 실적선 자료를 토대로 172K DWT급 이중 선체 벌크 캐리어의 종, 횡부재, 횡격벽 및 이중 선측의 구조 설계를 수행하고, 화물창 용적, 중량의 변화 및 건조비 산정을 통해 이중 선체 벌크 캐리어의 구조적, 경제적 관점에서 고찰하였다. 건조비 산정은 선형별 건조비 비교를 용이하게 하기 위해, 공통으로 소요되는 비용은 비교 대상에서 제외한, 상대 건조비의 개념을 도입하였다. 아울러 이중 선측부 구조가 종강도 부재(longitudinal stiffener)와 거어더(girder)로 보강된 두 가지 설계 대안에 대한 중량 및 건조비를 산정함으로써 향후 조선소 등에서 수행될 이중 선체 벌크 캐리어 설계에 대한 기초 연구 자료를 제시하고자 한다.

* 정회원 · 홍익대학교 조선해양공학과

** 정회원 · 서울대학교 해양시스템공학연구소

*** 홍익대학교 조선해양공학과 학부생

2. 연구 현황 및 내용

이중 선체 벌크 캐리어에 대한 그 간의 연구 동향을 살펴보면 주로 단일 선체 구조에 대한 안전성 평가 및 그 대안에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 선체 구조 설계 및 경제적 타당성에 대한 연구는 상대적으로 적은 실정이다.

최근에 발표된 대표적인 해외 연구는 독일 로이드 선급의 Fricke와 Nagel⁽³⁾에 의해 수행된 ‘Technical and Economical Benefits from Double Side Skin Bulk Carriers’ 를 들 수 있다. 이 연구는 75,000 DWT급 벌크 캐리어에 대해 이중 선체 중앙 횡단면 설계를 수행하고 적용 가능한 이중 선측부 설계 대안을 고찰하였으며, 이에 대한 경제적 장단점을 검토하였으나 횡강도 부재 및 횡격벽 부재 설계는 다루지 않았다.

횡강도 부재 및 횡격벽 부재를 모두 고려한 설계는 국내의 C.D. Jang 과 G.J. Yoon⁽⁴⁾에 의해 연구되었다. 이 연구에서는 이중 선체 구조의 종, 횡강도 부재 및 횡격벽 부재를 ES (Evolution Strategy)를 이용한 최적화 문제로 정식화하였으며, 최적화 과정상의 횡강도 해석은 일반화된 경사처짐법 (GSDM, Generalized Slope Deflection Method)을 이용하였다. 목적함수는 중량으로 하여 이중 선체 벌크 캐리어의 최소 중량 설계를 수행한 후 기존의 실적선과 비교 분석하였으나, 이중 선측 외관은 중통 보강재를 갖는 하나의 형식에 대하여 연구되었고 건조비는 고려되지 않았다.

이중 선체 벌크 캐리어에 대한 도입 타당성을 검토하기 위해서는 종, 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 설계는 물론, 이중 선측부의 여러 설계 대안에 대한 화물창 용적, 중량 및 건조비 등의 구조적, 경제적인 종합적 검토가 이루어져야 할 것이다.

이에 따라 본 연구에서 수행된 연구 내용을 순서대로 정리하면 아래와 같다.

- 실적선 자료 분석을 통한 이중 선체 벌크 캐리어의 설계 대안 마련
- 로이드 선급 규정에 의한 선체 구조 설계
- 직접 해석에 의한 이중 선체 벌크 캐리어의 구조 강도 평가
- 선수미 부를 제외한 화물창 부재의 중량을 계산하여 각 선체 구조별로 비교, 분석
- 상대 건조비 개념에 기초한 각 선체 구조별 건조비 계산

3. 이중 선체 벌크 캐리어의 선체 구조 설계

3.1 실적선 자료

본 연구에 사용된 실적선은 1999년 건조된 로이드 선급의 172K급의 전형적인 단일 선체 벌크 캐리어이며, 주요 제원은 다음과 같다.

- Dead weight : 172,000 (ton)
- L_{BP} : 279.0 (m)
- Breadth : 45.0 (m)
- Depth : 24.1 (m)

- Draft (design) : 16.5 (m)
- Draft (scantling) : 17.7 (m)
- C_B : 0.83
- Max. hogging moment : 409,000 (ton-m)
- Max. sagging moment : 378,000 (ton-m)

3.2 이중 선체 벌크 캐리어의 구조 설계

이중 선체 벌크 캐리어의 구조 설계에 있어, 이중 선체를 종통재 (longitudinal stiffener)로 보강한 형식과 거어더 (girder)로 보강한 형식으로 하여 두 가지 설계 대안을 제시하였다. 이후 전자의 형식을 Type A, 후자의 형식을 Type B라 한다. 전술한 바와 같이 모든 구조 설계는 로이드 선급 규정에 따랐으나, 벌크 캐리어에 규정되어 있지 않는 이중 선체부는 이중 선체 유조선의 규정을 원용하였다.

구조 설계시 이중 선체 도입에 따른 화물창 용적 손실을 최소화하기 위하여 이중저 및 호퍼 탱크 등의 주요 종부재의 설계 변수를 적절히 조절한 결과, Table 1에 나타난 바와 같이 화물창 용적을 실적선 수준으로 유지할 수 있었다. Table 2는 각 type 별 설계 결과를 간략히 보여주고 있으며, Fig. 1과 Fig. 2는 설계 결과를 중앙 횡단면 상에 자세히 도시하고 있다. 횡부재 및 횡격벽 설계 결과는 지면 관계상 생략하기로 한다.

Table 1 Comparison of cargo hold

Items	Cross section area (m ²)	1-cargo hold volume (m ³)
Single hull	851.94	21,980.05
Double hull	852.34	21,990.37

Table 2 Design results of longitudinal members of double hull bulk carrier

Item	Required Value	Design Value	
		Type A	Type B
Section modulus at bottom	44.536 m ³	44.56 m ³	44.56 m ³
Section modulus at deck	41.110 m ³	59.33 m ³	59.50 m ³
Min. deck thickness	19.38 mm	32 mm	32 mm

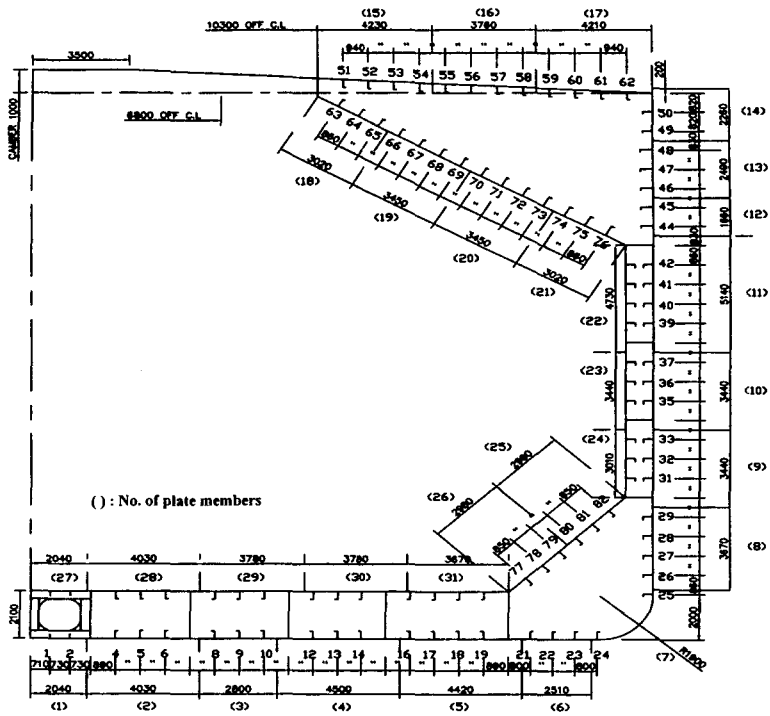


Fig. 1 Longitudinal members of double hull B/C (Type A)

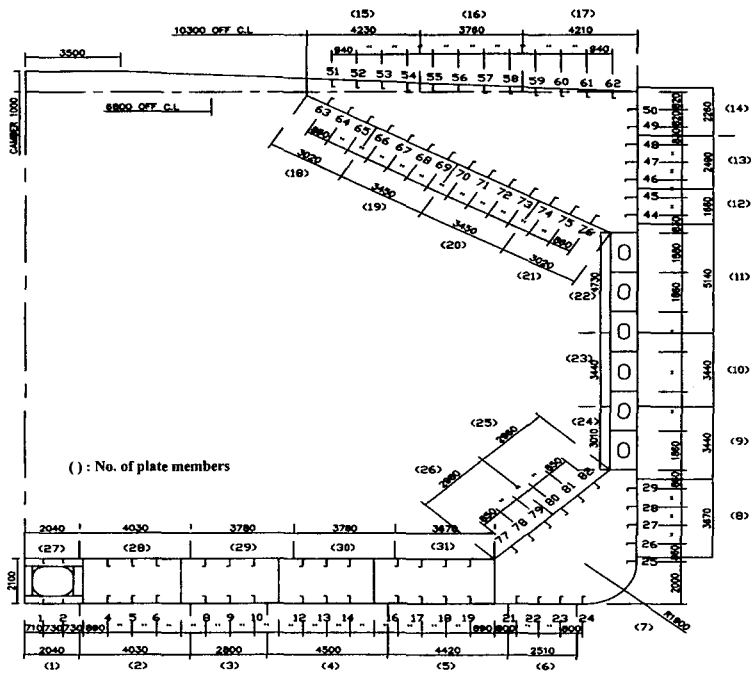


Fig. 2 Longitudinal members of double hull B/C (Type B)

4. 이중 선체 벌크 캐리어의 구조 강도 평가

로이드 선급에서는 190 m 이상의 길이를 갖거나, 변형된 선체 구조를 갖는 벌크 캐리어에 대해서는 구조 해석을 의무화하여 구조 설계 평가 (SDA, Structural Design Assessment) 과정을 규정⁽⁶⁾하고 있으며, 유한 요소 해석 모델링, 경계 조건, 하중 조건 및 각 부재들의 허용 응력 등을 명시하고 있다.

SDA에서 규정하고 있는 하중 조건은 수압의 경우, 수압과 호강을 유발하는 wave crest가 중첩되어 있는 일반적인 경우와 wave trough가 새김을 유발하는 두 가지를 규정하고 있다. 그리고 화물창 국부 하중은 화물의 비중에 따라 무거운 광물 (heavy ore)과 가벼운 광물 (light ore)로 구분하여, 이들의 조합에 의한 총 4가지의 하중 조건을 제시하고 있으며, 추가로 2가지의 발라스트 (ballast) 상태를 규정하고 있다.

하중 조건에 따른 해석 결과를 살펴보면, 비중이 작은 광물을 모델링한 결과가 비중이 큰 광물에 비해 안전한 것으로 나타나며, 파랑 효과는 새김 조건이 더 가혹한 하중 조건을 생성하는 것으로 나타나, 비중이 큰 광물과 새김 조건이 결합된 하중 조건에서 다른 하중 조건보다 더 큰 응력이 발생하였다.

모든 하중 조건에 대해 대부분의 구조 부재가 허용 응력의 약 10~30 % 범위 수준의 응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 최대치는 상기한 가장 가혹한 하중 조건에서 횡격벽의 스톨 (stool) 부위에 발생한 응력이 허용응력의 약 34 % 정도로 나타나 전반적으로 안전한 구조 강도를 가지는 것으로 검토되었다.

Table 3은 새김 및 비중이 큰 화물이 국부 하중으로 작용할 때의 구조 해석 결과를 정리하고 있다.

Table 3 Result of structural analysis (loading condition : heavy ore and sagging)

Structural item	Permissible stresses (N/mm^2) ①			Result ②	Ratio ②/①
Deck and topside tank plating	σ	216/k	323.8	8.59	0.03
Bottom shell, inner bottom and hopper tank plating	σ^*	108/k	144	19.77	0.14
	σ^{**}	147/k	196	10.23	0.05
	σ_e	177/k	236	34.76	0.15
Double bottom longitudinal girder	τ	83/k	110.7	17.10	0.15
	σ_e	177/k	236	29.72	0.13
Double bottom floors and web frames in hopper and topside tanks	τ	83/k	110.7	29.44	0.27
	σ_e	177/k	236	51.34	0.22
Transverse watertight bulkheads and stool	σ	147/k	196	67.46	0.34
	τ	83/k	110.7	23.24	0.21
	σ_e	177/k	236	59.54	0.25

- * Local stress in line with hull girder stress ** Local stress transverse to hull girder stress
 where, k = higher tensile steel factor
 σ = total stress in local bending direction
 τ = mean shear stress
 σ_e = combined equivalent stress or von Mises stress

5. 중량 및 건조비 등 경제성 검토

벌크 캐리어가 이중 선체 구조를 가지게 되면 구조적 안전성 확보는 물론 보수 및 운용비 절감과 같은 많은 장점이 있으나, 이중 선체 건조에 중량 및 건조비 증가가 필연적으로 수반된다는 단점을 가지고 있어, 이에 대한 정량적 평가가 반드시 선행되어야 한다. 전술한 바와 같이 이중 선체 구조에 대해 중량과 건조비 모두를 정량적으로 평가한 논문은 매우 드문 실정인 바, 본 연구에서는 실적선, 단일 선체 및 두 가지 형식의 이중 선체 벌크 캐리어의 중량 및 건조비를 모두 산정, 비교하여 그 경제적 타당성을 검토하고자 한다.

5.1. 중량 및 건조비 산정 과정

선체의 경하 중량은 선체 구성에 필요한 각 강재의 체적을 계산한 후, 강재의 밀도를 적용해 산정하였다.

선박의 총 건조비는 재료비 (material cost), 인건비 (labor cost)와 경상비 (overhead cost)로 크게 구분된다. 이는 다시 강재, 도료 등의 제반 재료비와 작업자의 공수에 따른 용접, 절단, 굽힘 가공, 운반, 도색 작업에 대한 임금과 기타 경상비로 구분 되어진다. 이는 아래의 식 (1), (2)와 같다.

선박 건조비 산정에서의 재료비는 강재비가 가장 큰 비중을 차지하므로 본 연구에서 재료비라 함은 강재비를 의미하며, 기타 페인트, 가스, 용접봉등의 재료비는 인건비에 포함하여 산정기로 한다. 선박 건조에 필요한 강재비는 식 (3)과 같이 각 부재에 사용되는 강재의 종류와 등급에 따라 강재비를 차등 계산하였다.

$$F_{cost} = F_{material} + F_{labor} + F_{overhead} \quad (1)$$

$$F_{labor} = F_{welding} + F_{cutting} + F_{press} + F_{transport} + F_{paint} \quad (2)$$

여기서, F_{cost} : 선박의 총 건조비 $F_{material}$: 재료비 (강재비)

F_{labor} : 인건비(노무비) $F_{overhead}$: 경상비

$F_{welding}$: 용접비 $F_{cutting}$: 절단비

F_{press} : 굽힘가공비 $F_{transport}$: 운반비

F_{paint} : 도색비

$$F_{material} = \sum[\text{구조중량(ton)} \times \text{재료단가}(\$/\text{ton})] \quad (3)$$

경제성 있는 선체 구조를 선정하기 위한 건조비 산정 시 중요한 것은 절대 건조비가 아닌 상대 건조비라 할 수 있다. 건조비를 산정하는 주 목적은 선박 구조물의 구조 설계에 건조비가 미치는 영향을 고려하기 위한 것이므로, 건조비 비교에 직접적으로 관여하지 않는 경상비는 어느 정도 무시해도 설계에 미치는 영향은 적다. 여러 조선소의 경우 경상비를 인건비에 근거하여 산출하며, 이는 고정 경상비와 가변 경상비로 분류 되어진다. 이 중 고정 경상비는 시설 투자, 감가상각, 수리 및 보수 유지, 부동산 임대 등에 관련된 비용으로 투자자본과 관련되며, 명백한 원인 요소가 없는 항목으로 시간이 주변수가 된다. 고정 경상비는 조선소마다 상이하게 산정이 되지만, 동일한 조선소에서는 시설과 장비 등이 항상 고정되어 있어 건조비 비교 평가에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있다. 그러나 가변 경상비는 작업 내용, 직접 노동력과 관계되며, 작업의 종류에 따라 소요되는 공수와 설비에 대한 보수비용 등이 증감되므로 인건비 산정에 이를 포함시켜야 할 것이

다.

상대 건조비란 건조비 비교를 보다 용이하게 하기 위해, 공통으로 소요되는 비용인 고정 경상비를 건조비에서 제외시킨다는 개념이다. 따라서 상대 건조비는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고, 여기서 인건비는 가변경상비가 포함된 인건비를 의미한다. 인건비 구성은 신⁽⁶⁾이 이중 선체 유조선의 최적 설계 연구에 적용한 상대 건조비 개념에 따라 산정하였다.

$$\text{상대 건조비} = \text{재료비} + \text{인건비} \quad (4)$$

5. 2 결과 검토

단일 선체 벌크 캐리어의 구조 설계 결과에 따른 중량은 실적선에 비하여 약 3 % 작게 나타났다. 화물창 용적을 동일하게 유지하며 설계된, Type A와 Type B는 각각 2.7 %, 0.4 %의 중량이 증가하는 것으로 산정되었다 (Table 4). 이는 선박 건조시 경하중량이 추정치와 비교하여 통상 1~2 % 정도는 증감함을 볼 때, 매우 적은 중량 증가로도 선박의 구조 안전성을 제고할 수 있다고 결론지을 수 있다. 특히 Type B의 경우는 최적화기법을 이용한 부재치수 결정 과정을 통해 2~3 % 수준에서 중량 증가를 억제한 기존의 논문⁽⁷⁾과 비교할 때 매우 경제적인 구조 설계가 이루어진 것으로 판단된다.

건조비는 전체 화물창에 대하여 재료비 및 인건비 항목으로 나누어 상대 건조비를 계산하였으며, 이를 정리하면 Table 5와 같다.

중량 면에서 가장 우수한 선체 구조로 나타난 Type B는 실적선에 비해 용접 공수가 오히려 감소하는 것으로 나타났으나, 화물창 내부 쪽의 외판 (inner side shell) 및 선측 보강 거어더에 의한 단면적의 증가로, 중량 증가율을 상당히 상회하는 도색비 증가를 수반해 전체적으로는 실적선 대비 0.9 % 정도의 건조비 증가가 이루어졌다. 재료비를 제외한 인건비 항목 중 가장 큰 부분을 차지하는 부분은 역시 용접비로서, 당연한 결과이겠으나, 선측부의 보강 부재수가 많은 구조 형식일수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 이중 선체 벌크 캐리어의 건조비 증가를 억제할 수 있는 설계 방안은 건조비의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 재료비를 줄이기 위한 중량 절감과 선측 보강재의 개수를 줄여 용접비를 줄이는 것이 가장 효과적인 것일 것으로 판단된다.

Table 3과 Table 4는 선수미부를 제외한 9개 화물창에 대한 산정 결과이다.

Table 4 Comparison of hull weight

Items		Hull weight (ton)	Ratio
Single hull	Existing	13,617.0	1.000
Double hull	Type A	13,982.4	1.027
	Type B	13,674.6	1.004

Table 5 Comparison of construction cost (US \$)

Items		Material cost	Welding cost	Painting cost	Transport cost	Total cost	Ratio
Single hull	Existing	7,816,230	2,426,890	1,082,509	40,851	11,366,480	1.000
Double hull	Type A	8,083,549	2,468,396	1,160,206	41,948	11,754,099	1.034
	Type B	7,883,316	2,418,565	1,128,254	41,023	11,471,157	1.009

6. 결 론

본 연구에서의 세부적인 결론은 다음과 같다.

- 구조 안전성 강화 및 이를 통한 보수, 운용비 절감이라는 주된 도입 배경을 갖는 이중 선체 벌크 캐리어의 특성상, 유조선에 비해 이중 선체의 판 부재 간격이 작게 설계될 수 있어, 화물창 용적의 확보 및 부재 배치가 원활하여 유조선보다 효율적으로 중량 증가를 억제할 수 있었다.
- 화물창의 용적을 단일 선체 실적선과 동일하게 유지하더라도 이중 선체의 도입이 가능한 것으로 나타났으며, 충분한 구조 강도를 가지게 됨을, 선급 규정과 횡강도 해석에 의한 직접 평가를 통해 확인하였다.
- 거어더 보강 이중 선체부를 갖는 화물창에 대해 구조 해석을 수행한 결과 모든 구조 부재가 충분한 구조 강도를 갖는 것으로 나타났다.
- 이중 선체부 형식에 있어, 거어더 보강 형식이 종통 보강재 보강 형식보다 중량과 건조비 측면에서 더 유리한 것으로 나타났다.
- 이중 선체 벌크 캐리어의 설계 대안들을 검토한 결과, 중량 및 건조비 증가를 실적선 대비 1 % 이하로 제어하는 설계가 가능한 것으로 나타나, 구조 안전성이 향상됨에 따른 운용상의 비용, 보수비용 절감 및 하역 작업의 편의성을 감안할 때 충분한 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Lloyd's Register, "Bulk carriers-an update," *Lloyd's Register*, London, 1996
2. S.N. Kim, D.D. Lee and D.B. Lee, "Investigation of Hull Strength for Bulk Carrier Under Damaged Condition," *Proceedings of the 10th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures*, 1996
3. Wolfgang Fricke and Rolf Nagel, "Technical and Economical Benefits from Double Side Skin Bulk Carriers," *Proceeding of International Conference on Design and Operation of Bulk Carriers*, RINA, 1998
4. C.D. Jang and G.J. Yoon, "Optimum Structural Design of Double Hull Bulk Carriers in Comparison with Conventional Single Hull Types," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 28, No. 4, 2002
5. *Lloyd's Register*, "ShipRight - Structural Design Assessment Procedure," Version 2.0, April 1996
6. 신상훈, "다목적함수 최적화 기법을 이용한 유조선의 최적 구조설계," 서울대학교 공학박사 학위논문, 2000
7. 윤균중, "이중 선체 Bulk Carrier 의 최적 구조 설계," 서울대학교 공학석사 학위논문, 1997