

황해형 하역시스템의 구조설계

김경수* · 손충열* · 신현일** · 이만식**

(98년 12월 20일 접수)

Structural Design of Cargo Handling System for the Yellow Sea Area

Kyung-Su Kim* · Choong-Yul Son* · Hyun-Il Shin** · Man-Sik Lee**

Key Words : Cargo Handling System(하역 시스템), Container Pallet System(컨테이너 팔레트 시스템), Platform(플랫폼), Cylinder(실린더), Pallet Transfer Car(팔레트 운송차), Lifting Tower(리프팅 타워)

Abstract

Western coastal ports of Korea experience severe tidal range with up to 9.7 meter between high and low tides. The significant water level variation implicates many operational difficulties during loading and un-loading from cargo ships. To overcome problems due to tide and to secure the continuous loading operation, a new loading system for container cargo called "container pallet system" is developed and introduced in the paper. Three types of structure forms, offshore structural deck, double bottom structural form and the mixed form, are investigated with MSC/NASTRAN software. The results prove that the mixed type structure with truss enforcement is found to be the most appropriate for the region

1. 서 론

조수간만의 차가 큰 지역에서는 대형선박의 접안이 어렵기 때문에 갑문이 설치된 도크내에서 선박을 접안하여 하역 및 선적을 하고 있다. 이러한 조건은 선박이 기항하는데 큰 장애가 되며 갑문을 설치하는데 많은 초기 투자가 요구되고, 설치 공간에도 제약을 받게 된다. 또한 갑문을 설치한다 하여도 사용시설의 제한 때문에 많은 물량을 신속하

게 처리할 수 없으며 갑문의 유지보수비용 또한 적지 않다.

현재 인천과 같이 조수간만의 차가 큰 경우에는 컨테이너의 하역에 많은 제약을 받고 있으며, 갑문의 이용 및 시설의 부족으로 선박들이 기항을 기피하고 있는 실정이다. 컨테이너선 뿐만 아니라 다른 선박의 경우에도 도크의 이용은 커다란 운항상의 장애요인이 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 신속하게 위치가 제어되

* 정회원, 인하대학교 선박해양공학과

** 인하대학교 선박해양공학과

는 Lifting Tower를 이용하여 조수간만의 차를 극복하며 팔레트를 이용하여 한번에 많은 양의 컨테이너를 처리할 수 있는 컨테이너 팔레트 하역시스템¹⁾을 제안하고 이에 대한 구조설계 및 해석을 수행하였다.

2. 황해형 하역시스템

2.1 시스템 개요

새로운 컨테이너 팔레트 하역시스템의 개요는 다음과 같다. 바다와 부두 사이에는 리프트 칼럼과 플랫폼으로 구성된 일종의 유압 엘리베이터가 설치되며 그 곳에 기존의 컨테이너선과는 다른 새로운 구조의 전용 선박이 정박하게 된다. 물류 창고와 리프트 칼럼 사이에는 새로운 하역시스템에 맞는 레일 시스템이 놓여지게 되며 이 레일 시스템을 이용하여 컨테이너 팔레트 운송차가 운행된다. 이 시스템은 기존의 크레인을 이용하여 컨테이너를 1개씩 옮기던 방식이 아니라, 10~20개 가량의 컨테이너를 팔레트 운송차와 레일을 이용하여 부두에서 리프트 칼럼을 거쳐 직접 선박으로 실는 방식이다.

따라서 본 하역 시스템에 사용될 선박에도 부두에 설치된 레일 시스템이 연속적으로 설치가 되어야 하므로, 기존의 선박과는 전혀 다른 형태의 전용 운반선이 설계되어야 한다. 또한, 기존의 하역 시스템처럼 전체의 공정이 인력 중심으로 이루어지는 방식이 아니라, 전 공정이 중앙에서 통제되는 자동화된 시스템이다.

2.2 시스템 구성요소

플랫폼 (Platform)

조수간만의 차에 관계없이 하역 작업을 할 수 있는 새로운 하역시스템의 가장 핵심은 선박의 높이까지 수직으로 이동하는 플랫폼이다. 이 플랫폼은 일종의 유압 엘리베이터로서 리프트 칼럼을 통해 상하 1자유도 운동을 할 수 있도록 고안되었으며, 중앙의 제어 시스템에 의해 피드백 제어가 이루어져 정확한 위치제어를 할 수 있고, 조수간만이나 파도로 인한 선박의 높이 변화에도 상관없이 하역작업을 할 수 있다.

컨테이너 팔레트 운송차 (Container Pallet Transfer Car : 대차)

본 하역시스템에서는 부두에 물류 창고를 설치하고, 컨테이너를 10~20개 정도 실은 대차의 개념을 도입하여 물류 창고에서 다량의 컨테이너를 실은 대차가 레일 시스템을 통해 직접 선박으로 실린다.

레일 시스템 (Rail System)

컨테이너를 10~20개 정도 실은 대차를 중앙에서 자동화된 방식으로 운영하기 위해서는 레일 시스템의 도입이 필수적인데, 대차에서 상당히 큰 집중하중이 발생하므로 기존 철도에 사용되는 것보다 높은 강도를 갖도록 특별히 설계된 레일 시스템이어야 한다. 그리고 그 배치 또한 최적화가 이루어져서 하역 작업에 필요한 시간을 최소한으로 하여야 한다.

리프트 칼럼 (Lift Column)

플랫폼이 상하 1자유도 운동을 원활히 하도록 하기 위해서 리프트 칼럼이라는 장치가 필요하며, 플랫폼 위에 놓인 대차의 무게 때문에 구조적인 해석을 통해서 설계되어야만 한다.

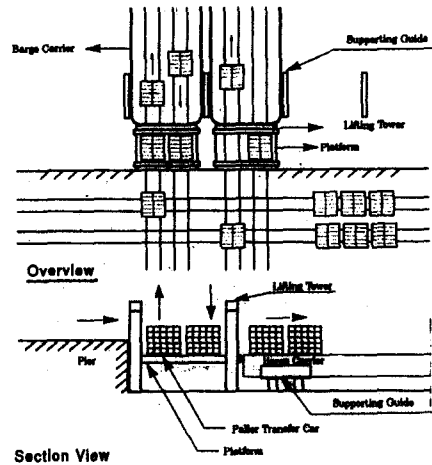


Fig. 1 The container pallet cargo handling system¹⁾

실린더 (Cylinder)

초기 모델에서는 4개의 실린더로 구동되는 플랫폼

폼이 상하 1자유도 운동을 하는 시스템으로 설계되었는데, 4개의 실린더가 정확한 1자유도 운동을 하기 위해서는 동조가 정확히 맞아야 한다. 따라서, 실린더에 연결된 플랫폼은 리프트 칼럼이 가이드 역할을 해주어야만 원활한 상하 1자유도 운동을 할 수 있다.

지지대 (Supporting Guide)

선박이 리프팅 타워에 적합하게 접지되도록 부두안벽의 수직방향으로 선박의 크기를 고려한 지지대를 설치하여 하역작업시 발생할 수 있는 선박의 움직임을 최소화하는 장치가 필요함에 따라 이에 대한 검토가 필요하다.

3. 구조설계

3.1 설계 검토사항

하역속도 (플랫폼 작동속도)

기존의 하역설비와 비교하여 경쟁력 우위를 점할 수 있도록 플랫폼의 작동속도가 결정되어야 하며, 여기서는 최대 300 mm/sec로 가정하였다.

하역하중

플랫폼 위에 작용하는 하역하중에는 컨테이너 적재수에 따른 Mega Pallet의 무게와 대차무게 등이 포함되어 고려되어야 한다.

20' 컨테이너 1개의 Max. Weight는 20ton으로, 대차무게는 초기설계시 정확한 값을 알기 어려우므로 컨테이너 적재량에 따라서 각각 30, 40, 50ton으로 가정한다. 총 하역하중은 하역하중에 초기 플랫폼자중을 20ton으로 가정하여 포함시킨다.

Table 1 The total cargo handling load

The number of container per a pallet	Weight of a pallet (ton)	Weight of pallet transfer car (ton)	Total cargo handling load (ton)
12	240	30	290
16	320	40	380
20	400	50	470

컨테이너 적재방식

리프트 전장과 높이와의 관계, 컨테이너 안전성, 운전문제 등이 고려되어지며, 본 연구에서는 20' 컨테이너 20개를 다음과 같이 적재한다.

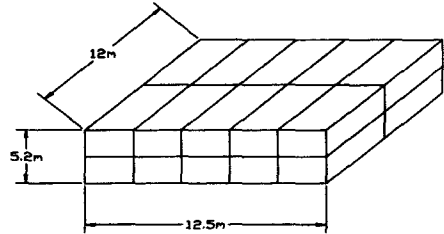


Fig. 2 Pallet configuration of 20 TEU containers

Lift 길이 및 Lifting 방식

Lift 길이는 간단한 차를 고려하여 결정하는데 여기서는 10m로 가정하고, Lifting 방식은 유압 실린더(Hydraulic Cylinder) 방식을 채택한다.

플랫폼 하강(상승) Time

플랫폼이 대차를 싣고 선박의 높이까지 수직 하강하거나 또는 다시 대차가 있는 부두까지 상승하는데 걸리는 시간으로 플랫폼 작동속도 및 Lift 길이에 따라 좌우된다.

대차 및 플랫폼 크기

대차의 크기는 컨테이너 적재수에 따라 차이가 있지만, Fig. 2와 같이 20개 적재시 각 방향으로 0.5m의 여유공간을 고려하여 13.5m × 13m 로 하였으며, 플랫폼의 크기는 대차가 플랫폼의중앙을 통과 할 때 좌우 각각 1.5m, 앞뒤로 1m의 여유공간을 두어 16.5m × 15m 로 결정하였다. 또한 플랫폼은 이중저 구조를 사용하여 I-beam과 floor가 배치되는데 높이를 변화시키며 구조해석을 수행한 결과 0.5m 가 선택되었다.

실린더 위치

외팔보에 작용하는 응력은 주요 기둥에 작용하는 응력보다 더 커서는 안되기 때문에 외팔보의 길이와 기둥과 기둥사이의 거리비가 1/3을 넘어서는

안된다.⁴⁾ 따라서 대차출입방향으로는 외팔보 길이를 3m로 실린더사이의 거리는 9m를 택하였으며 대차진행방향에 횡 방향으로는 하중이 통과하는 방향이 아니기 때문에 대차바퀴가 실린더 위를 통과하도록 실린더 위치를 결정하였다(Fig. 3).

3.2 설계 방법

해양구조물 갑판 (Deck)방식의 구조설계

해양구조물의 Deck²⁾⁻¹⁰⁾는 Deck Plating System, Deck Beam system, Deck Truss System, Deck Leg System의 4개의 구조계로 이루어진다. 초기부재 선택은 설계자의 경험이 밀바탕이 되며 주어지는 Design Spec. 및 여러 Codes(API, DnV, AISC)들에 맞도록 해야한다.. Deck Loads는 먼저 Plate로 이루어진 Deck Plating System을 지나 Standard I-Beam으로 짜여진 Deck Beam System을 거쳐 Truss(or Girder) System과 Deck Leg System으로 전달된다.

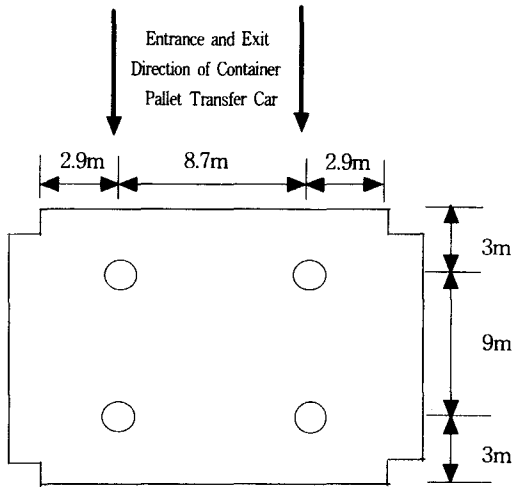


Fig. 3 The position of cylinder

이중저 (Double Bottom) 방식의 구조설계

이중저(Double Bottom) 구조^{2),3),11)}에 바탕을 두고 설계하는데, 이중저 내부는 횡방향으로 Floor Plate를, 종방향으로는 Girder를 설치하여 격자구조로 형성한다. 모델의 단순화를 위해 다른 보강재(Stiffener)는 고려하지 않는다. 또한 대차가 지나

가는 레일부분과 지지컬럼 주위는 다른 부분과 구분하여 설계한다. Floor Plate는 횡방향 1m 간격으로 배치하고, Girder는 종방향으로 레일이 지나가는 부분에는 3개의 Girder를 가깝게, 그 밖에는 어느 정도 일정한 간격을 두고 배치한다.

혼합방식의 구조설계

전체적인 구조는 이중저 방식으로 설계하고, 갑판방식의 Truss System을 도입하여 실린더 주위를 Truss구조로 보강한다.

4. 구조해석

4.1 모델개요

3가지 방식으로 설계된 Lifting Tower의 모델은 다음과 같다.

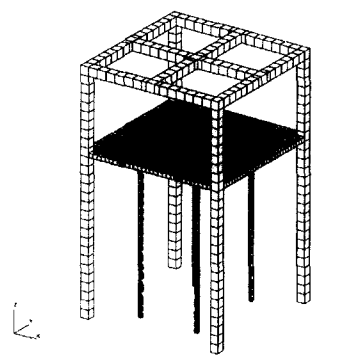


Fig. 4 The full model(double bottom system)

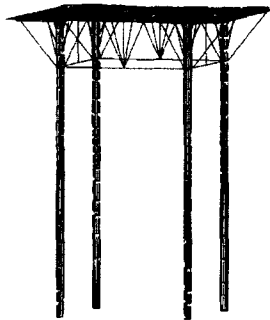


Fig. 5 The deck system

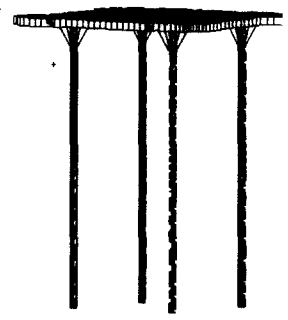


Fig. 6 The combined system

4.2 해석모델

구조해석 모델은 대칭조건(Symmetric Condition)을 이용하여 다음과 같은 Half Model을 사용하였다.

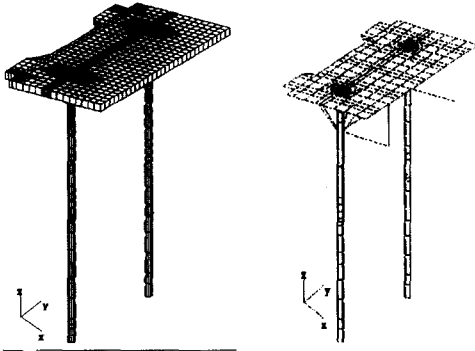


Fig. 7 The analysis model (double bottom system) Fig. 8 The analysis model (deck system)

재료는 7850 kg/m³ 밀도를 갖는 Mild Steel을 사용하였고, 안전계수는 2를, 허용응력은 12 × 10⁷ N/m²을 적용하였다.

구성부재별 치수와 중량은 해양구조물 갑판방식과 이중저 방식의 경우 각각 Table 2, Table 3과 같으며 모든 방식에서 두께 30mm, 지름 500 mm의 실린더를 사용하였다.

Table 2 The dimension and weight of each structural element(deck system)

Structural element	Details	Size of structural element	Weight
Deck Plate	Stiffened plate around rail	Thickness : 16mm	11.214 ton
	Plate around supported column	Thickness : 10mm	
	The rest of plate	Thickness : 5mm	
Deck Beam	W16×26 (18개)	15m	10.418 ton
Top Chord	W24×76 (4개)	15m, 16.5m	7.091 ton
Bottom Chord	W24×76 (2개)	9m	2.697 ton
	W16×26 (2개)	8.7m	
Truss	Area: 0.004955m ² (60개)	0.7m ~ 4m	5.243 ton
Total			36.663 ton

Table 3 The dimension and weight of each structural element(double bottom system)

			Weight
Stiffened plate around rail	16	20	23.464 ton
Plate around supported column	10	8	
The rest of plate	8	5	
Girder around rail	7	20	9.359 ton
The rest of girder	5	5	
	5	4	3.864 ton
			36.687 ton

혼합방식의 경우 총중량은 이중저 방식의 중량 36.687 ton에 실린더 주위에 보강되는 0.004955m²의 Area를 가진 1.85m Truss 부재 16개 중량 1.151 ton을 합하여 37.838 ton이 된다.

4.3 하중조건과 경계조건

가장 하중을 많이 받는 경우를 고려하여 구조해석을 수행하였으며, 총중량 (플랫폼 자체중량 제외)은 450 ton으로 플랫폼 작동속도는 300 [mm/sec], 순간 최대 가속도는 0.3 [m/sec²]으로 가정하였다.

최대로 걸리는 힘은 2개의 대차 레일위에 분포하게 되고 대차 레일에 13개씩(1m 간격)의 바퀴가 달려 있다고 가정하면 각 바퀴 접촉부분에 174980 N의 집중하중이 작용하게 된다.

경계조건은 Half 모델 중앙부분에 T_x, R_y, R_z를 구속시켜 Symmetric 상태로 만들고 지지칼럼에 접하는 모서리 부분에는 T_x, T_y를, 실린더의 밑부분은 6자유도 모두 구속시킨다.

Table 4 The maximum loading condition in platform

Total weight (inclusion of roller transfer car)	Weight (T ₁ =mg)	Gravitational force(F ₁ =mg)	Maximum force (F = T ₁ × F ₂)
450 [ton]	135000 [N]	4414500 [N]	4549500 [N]

(T : 변위, R : 회전, 각 첨자는 각각의 방향을 나타냄)

4.4 해석방법 및 결과

대차의 이동위치에 따라 즉 대차의 첫 바퀴가 플랫폼 끝단에 들어왔을 때부터 대차가 모두 들어와 대칭적 상태가 되었을 때까지 각 경우에 대하여 범용 유한요소 프로그램인 MSC / NASTRAN을 사용하여 구조해석을 수행하였다.

해석결과 대차가 두 번째 실린더 위에까지 들어왔을 경우가 응력과 변위의 값이 가장 크게 나타났으며 그 결과는 다음과 같다.

Table 5 The stress distribution for different structural systems <Unit : 10⁷ N/m²>

Double bottom system		Deck system		Combined system	
Mean stress	Maximum stress	Mean stress	Maximum stress	Mean stress	Maximum stress
33~38	6.9	65~7.4	14	2.4~2.7	5.0

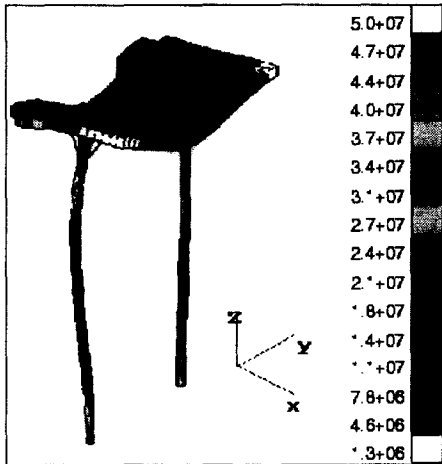


Fig. 9 The stress distribution of combined system

Table 6 The displacement distribution for different structural systems <Unit : 10⁻³m>

Double bottom system		Deck system		Combined system	
Mean displacement	Maximum displacement	Mean displacement	Maximum displacement	Mean displacement	Maximum displacement
4.0~4.6	8.5	12.3~14	26.3	3.8~4.3	8.1

전체하중을 지탱하는 실린더 끝단에서 최대응력을 나타내고 있고, Platform 중앙에서 최대변위를 나타내고 있다.

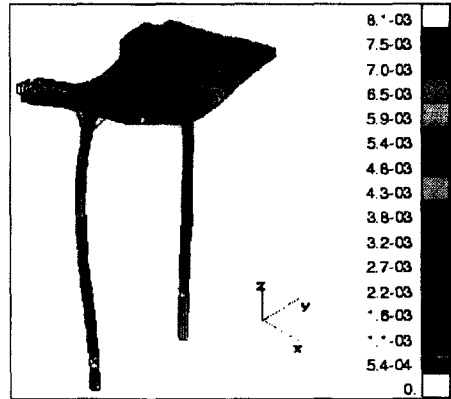


Fig. 10 The displacement distribution of combined system

대차의 이동에 따른 각 구조방식의 응력분포를 보면 해양구조물 갑판방식의 경우 높은 응력값을 보이고 있으며 전반적으로 이중저방식의 구조물에 비해 약 2배 정도에 해당하는 최대응력이 나타났지만, 두 방식을 채택한 혼합방식의 경우엔 이중저방식보다도 더 낮은 안정적인 응력분포를 보였다.

변위분포에서도 갑판방식 구조물이 이중저방식 구조물에 비해 최고 3배정도의 변위차를 보이고 있는 반면 혼합방식의 변위분포는 세가지 방식 중 가장 안정적인 수치를 나타내었다.

4.5 실린더 좌굴 설계하중 검토

실린더 전체길이는 18m이고, 컨테이너를 적재한 대차가 플랫폼 중앙부분에 위치하였을 때의 실린더 거동은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 타단고정, 타단힌지의 양단조건을 가진것처럼 거동하게 된다.^{2),3)}

설계하중은 실린더 한 개가 컨테이너를 적재한 운송차가 플랫폼에 실렸을 때의 전체하중 503ton의 반인 251ton (=2,462,728 N)을 견딜 수 있도록 고려하였다. 실린더의 두께와 직경은 각각 3cm, 50cm로 결정되고, 세장비는 75로 구해진다.

$$\text{Euler식 } P_{cr} = 2.041\pi^2 \frac{EI}{L^2}, \quad \sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

Gorden-Rankine 실험식

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\sigma_u}{1 + a(K\ell/\gamma)^2}$$

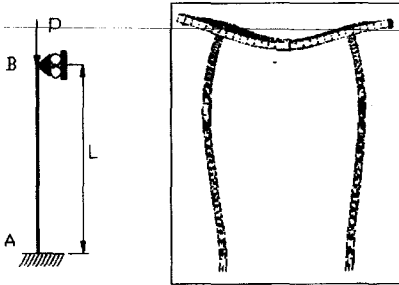


Fig. 11 The behaviour of cylinder

한 차이를 나타내므로 이를 보정한 Gorden-Rankine 실험식 및, Tetmayer 실험식을 사용하여 좌굴 및 허용하중을 검토하였다.

Table 9 The comparison of buckling stresses

	38.37×107	19×107	18.3×107
	1779	851	825.7
	889.5	283.6	330.7

Table 7 The constants of Rankine formula

Empirical constants/Material	Cast iron	Wrought iron	Mild steel (average steel)	Hard steel
$\sigma_u (kg/cm^2)$	5600	2500	3000	4900
a	1/1600	1/1900	1/1700	1/5000
Range of slenderness ratio	< 80	< 110	< 90	< 85

Tetmayer 실험식

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \sigma_u \left\{ 1 - a\left(\frac{\ell}{\gamma}\right) + b\left(\frac{\ell}{\gamma}\right)^2 \right\}$$

Table 8 The constants of Tetmayer formula

Empirical constants/Material	Cast iron	Wrought iron	Mild steel (average steel)	Hard steel
$\sigma_u (kg/cm^2)$	7760	3030	3000	3350
a	0.01546	0.00426	0.0055	0.00185
b	0.00007	0	0	0
Range of slenderness ratio	< 88	< 112	< 115	< 90

구조물의 변형형태에서 세장비 75를 구했다. 3 가지 경우의 좌굴응력, 좌굴하중, 허용하중을 구하면 Table 9와 같다.

세장비가 중간주 (Medium column) 영역이하 (약 130이하) 에서는 Euler 이론이 실험치와 현저

5. 결론

본 논문에서는 조수간만의 차가 큰 항구에서 간 조 때와 만조 때의 큰 수면 높이 차이로 인해 발생 되는 문제점을 극복하며 신속하고 정확하게 선적 및 하역 작업을 수행할 수 있는 새로운 하역시스템을 제안하고 이에 대한 구조설계 및 해석을 수행하였다.

구조해석결과 이중저 방식으로 플랫폼을 설계하고 실린더 연결부분의 응력집중을 막기위해 Truss를 사용하여 보강한 혼합방식이 본 하역시스템에 가장 적합한 설계방식임을 알 수 있었다.

앞으로 해운업계와 연계하여 이 하역시스템을 실용화함으로써 황해권 영역의 하역체계를 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 인하대학교 황해권 수송시스템 연구센터의 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 1) 이재욱, "미래의 황해권 운송시스템 연구", 대한조선학회지, pp.11-15, 1997
- 2) 이재신, "해양구조물 설계개요", 광문출판사, 1989
- 3) 이재신, "선박 및 해양구조물-좌굴강도학", 세종

출판사, 1990

- 4) 한국과학기술원, “해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계기술개발 (제2권 Deck 구조설계)”, 과학기술처
- 5) 한국과학기술원, “해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계기술개발 (제7권 Design Guide의 요약)”, 과학기술처
- 6) 클라우스, G. · E. 레만 · C. 외스터가드 공저, 손충열 역, “해양구조물 공학”, 미래내, 1995
- 7) Hsu, Teng H., “Applied Offshore Structural Engineering Practical Design Methods, Formulas, and Data”, Gulf Pub. , 1984
- 8) Herbich, John B., “Handbook of Coastal and Ocean Engineering-Volumn 2 Offshore Structures Marine Foundations Sediment Processes and Modeling”, 1996
- 9) Wilson, James F., “Dynamics of Offshore Structures”, Duke University, 1984
- 10) Hansen, B., “CPT-Container Pallet Transfer -an Automatic High Capacity Ship/Shore RoRo System”, RoRo96 Exhibition, 1996
- 11) 대한조선학회 편, “해양공학개론”, 동명사, 1996
- 12) 한국선급협회, “선급 및 강선 규칙 (제3편 선체 구조)”, 1998