

최적 적재를 위한 컨테이너 시큐어링 시스템 개발에 관한 연구

신상훈*

* 현대중공업 선박해양연구소 구조연구실

A Study on Container Securing System for Optimum Arrangement

Sang-Hoon Shin*

* Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Ulsan 682-792, Korea

요 약 : 컨테이너 시큐어링 시스템은 컨테이너 운반선 상갑판에 적재되는 컨테이너의 배치 설계를 위한 시스템이다. 컨테이너의 배치는 각 선급의 가이드라인에 기초하여 설계되어지며, 주어진 배치에 따른 반력들과 반력의 한계값을 제공하고 있다. 컨테이너 배치 설계를 위해서는 컨테이너 구속 교량(lashing bridge)과 수직 구속 장치(vertical lashing) 등을 고려해야 하며, 최대 수직 중량 중심(vertical center of gravity, VCG)과 최대 화물 중량(stack weight)을 갖는 배치안을 제시할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이를 위한 평형방정식을 정립하였으며, 배치안 계산을 위해 등식 제한조건(equality constraint)을 처리할 수 있는 최적화 알고리즘을 적용하여 새로운 컨테이너 시큐어링 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 컨테이너 배치 설계 시간을 크게 줄여주며, 설계자가 원하는 배치 설계안을 제시해 준다.

핵심용어 : 컨테이너 시큐어링 시스템, 배치 설계, 컨테이너 구속 교량, 수직 구속 장치, 등식 제한조건, 최적화 알고리즘

Abstract : Generally, container arrangement has been carried out based on the Classification guidelines. However, guidelines provide only container securing forces for the given container arrangement and Classification requirements of the forces. In order to design container arrangement additional information is needed such as container securing forces and arrangement that accounts for lashing bridges, vertical lashing, vertical center of gravity (VCG), and maximum stack weight. Trial and error method using the existing guidelines requires excessive amount of calculation time and cannot provide accurate results of the calculations. In order to fulfill this need, a new container securing system has been established based on the equilibrium conditions that include lashing bridges and vertical lashing. An optimization algorithm has been developed for the new system since current optimization methods such as genetic algorithms and evolution strategies are unsuitable for the container securing problems, which involve equality constraint. Design variables are container weights of tier and objective function is either total container weight or VCG of a stack. The newly developed system provides optimum arrangement of containers for both maximum stack weight and maximum VCG. It also greatly reduces time for designing container arrangement.

Key words : container securing system, arrangement design, lashing bridge, vertical lashing, equality constraint, optimization algorithm

1. 서 론

컨테이너 운반선 상갑판에 컨테이너 화물을 적재할 때 실을 수 있는 중량과 그 중량에 대한 분배 방안은 구속 장치 및 관계 구조의 허용하중을 규정하는 각 선급의 가이드라인을 따라야 하며, 적재된 컨테이너 화물 중량에 따라 반력 계산 및 반력의 한계값을 제시하고 있다. 이러한 정보만으로는 컨테이너 배치 설계에 큰 어려움이 따른다. 실제 컨테이너 운반선은 컨테이너 구속 교량(lashing bridge)이 존재하여 상갑판에서 구속할 경우와 구속 교량에 구속할 경우도 있으므로 이를 고려해 주어야 한다. 또한, 선체의 폭 방향 양 끝은 풍력(wind force)에 의해 양력(lifting force)이 증대되어 이를 줄여주기 위해 수직 구속 장치(vertical lashing)를 사용하는데 이러한 경우도 고려해 주어야 한다. 여러 단(tier)의 컨테이너가 쌓여 있는 하나의 단위를 stack이라 하는데, 한 stack에 실을 수 있

는 최대의 중량 및 배치를 계산할 수 있어야 하며, 주어진 중량에 최대 수직 중량 중심(vertical center of gravity, VCG)을 갖는 배치안을 계산할 수 있어야 한다. 그 이유는 각 stack의 VCG는 낮을 수록 안정성(stability) 측면에서 유리하여 VCG가 높으면 선급의 제한조건을 쉽게 위배하게 되어, 처음부터 VCG를 최대한 높여 적재할 수 있도록 하면 컨테이너의 재배치를 수행할 경우 VCG를 낮추는 방향으로 유연하게 수행할 수 있어 선급의 제한조건을 위배하지 않기 때문이며, 선주 역시 각 선급 규정이 허용하는 한 VCG를 최대한 높여 배치시킨 배치안을 요구하고 있기 때문이다.

컨테이너 운반선에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 컨테이너 운반선에 적재되는 컨테이너 적재 관련 연구는 미진하다고 할 수 있다. 현재 각 선급에서 제공한 적재 관련 하중 계산 프로그램에 의하면, 전술한 정보를 계산하는데 미흡하여, 신상훈 등(2002)은 컨테이너 시큐어링 시스템 개발을 위한 평

* 대표저자 : 신상훈(정회원), sshoon@hhi.co.kr 052)230-3067

형방정식을 정립하였으나, 수직 구속 장치 및 컨테이너 구속 교량은 고려하지 못하였다. 컨테이너 운반선은 점점 대형화(김철년, 2001)되어 적재 층 수도 과거 4, 5단에서 7, 8단으로 증가하는 추세이며 시행착오(trial and error) 방법에 의존하기에는 너무 많은 시간을 소요하게 된다. 따라서, 본 연구는 배치안 계산을 위해 등식 제한조건(equality constraint)을 처리할 수 있는 최적화 알고리즘을 고안하여 새로운 컨테이너 시큐어링 시스템을 개발하였다. 전체 최적점을 탐색하는데 탁월한 유전자 알고리즘(genetic algorithms)(양영순 등, 1994)이나 진화 전략(evolution strategies)(신상훈 등, 2002)과 같은 기존의 최적화 기법은 설계변수의 무작위 발생으로 설계변수들로 구성된 등식 제한조건에 적합하지 않기 때문이다.

개발된 시스템은 컨테이너 배치 설계 시간을 크게 줄여주며, 설계자가 원하는 배치 설계안을 제시해 준다. 개발된 시스템은 ABS, DNV, GL, LR 선급을 대상으로 하며, 사용자의 편의를 도모하기 위하여 GUI(graphic user interface) 시스템을 도입하였다.

2. 평형방정식의 정립

Fig. 1에 나타낸 관성력(F_i)과 풍력(F_w)에 의해 수평 방향 컨테이너 하중(F_{Hi})을 각 선급별로 구할 수 있으며, 구속(lashing) 효과를 무시한 racking force(f_i)는 F_{Hi} 로 나타낼 수 있다. 수평 방향 지지력(H_i)과 구속 효과를 고려한 racking force(R_i)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 = f_1 - H_1 - H_2 \quad (1)$$

$$R_2 = f_2 - H_2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 더하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 + R_2 = f_1 + f_2 - H_1 - 2H_2 \quad (3)$$

또한 각 선급 규정을 살펴보면 1층 컨테이너의 상단의 처짐을 식 (4)와 같이 정의하고 있다.

$$\Delta_1 = \frac{R_1}{K_C} \quad (4)$$

여기서, K_C 는 컨테이너의 racking 스프링 계수를 의미하며, racking force에 의한 처짐은 수평 방향 지지력에 의한 처짐과 같으므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_1 = \frac{R_1}{K_C} = \frac{H_1}{K_1} \quad (5)$$

여기서, K_i 는 구속 강선(lashing rod)의 수평 방향 스프링 계수를 의미한다. 또한, 2층 컨테이너의 상단의 처짐은 $R_1 + R_2$

에 의해 발생되어 지므로 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta_2 = \frac{R_1 + R_2}{K_C} = \frac{H_2}{K_2} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에 의하여 식 (1)과 (3)은 식 (7)과 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{H_1 K_C}{K_1} = f_1 - H_1 - H_2 \quad (7)$$

$$\frac{H_2 K_C}{K_2} = f_1 + f_2 - H_1 - 2H_2 \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 행렬식으로 표현하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있고, 수평 방향 지지력의 행렬은 식 (9)의 양변에 역행렬을 곱하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (\frac{K_C}{K_1} + 1) & 1 \\ 1 & (\frac{K_C}{K_2} + 2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_1 + f_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\frac{K_C}{K_1} + 1) & 1 \\ 1 & (\frac{K_C}{K_2} + 2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_1 + f_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

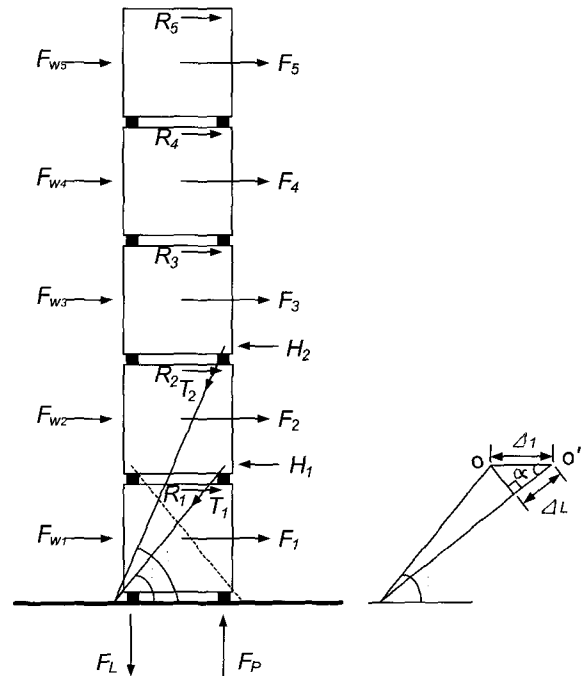


Fig. 1 Forces acting on the containers and lashing rods

GL 선급에서는 컨테이너 바닥 부분의 벗어남(dislocations)을 고려하므로 식 (10)의 우변 오른쪽 항에 벗어남을 유발하는 힘의 성분을 고려해 주어야 한다. 이는 문이 설치된 면이

밀폐된 면에 비해 상대적으로 약해 어느 정도 밀린다는 관점이다.

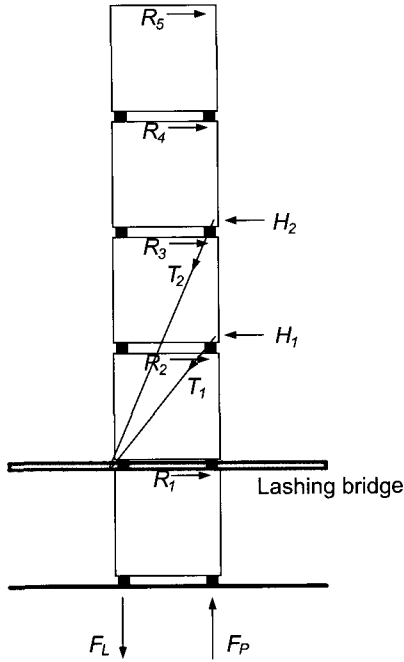


Fig. 2 Case of being lashing bridge

Fig. 2는 컨테이너 구속 교량에 구속할 경우를 나타내고 있으며, 전술한 방법에 의해 평형방정식을 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\frac{K_C}{K_1} + 2) & 2 \\ 2 & (\frac{K_C}{K_2} + 3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1 + f_2 \\ f_1 + f_2 + f_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. 최적 적재 방안

3.1 목적함수

상갑판 위에 적재되는 컨테이너 화물은 선급규정이 허용하는 한 컨테이너 stack의 VCG를 최대한 높게 배치시킬 수 있는 설계가 요구되어지며, 이를 위한 목적함수는 다음과 같다.
Objective :

$$\text{Maximize } f(x) = \left(\sum_{i=1}^{ntier} x_i h_i \right) / W_t \quad (12)$$

Find : x_i

- 여기서, x_i : i 층 컨테이너의 중량
- h_i : i 층 컨테이너의 VCG 높이
- W_t : 주어진 stack 중량

3.2 제한조건

최대의 VCG를 갖는 최적 배치안의 제한조건은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^{ntier} x_i - W_t = 0. \quad (13)$$

$$1.0 - x_i / x_{\min} \leq 0. \quad (14)$$

$$x_i / x_{\max} - 1.0 \leq 0. \quad (15)$$

$$R_i / (R)_{rule} - 1.0 \leq 0. \quad (16)$$

$$T_j / (T)_{rule} - 1.0 \leq 0. \quad (17)$$

$$F_L / (F_L)_{rule} - 1.0 \leq 0. \quad (18)$$

$$F_P / (F_P)_{rule} - 1.0 \leq 0. \quad (19)$$

$$F_C / (F_C)_{rule} - 1.0 \leq 0. \quad (20)$$

여기서, x_{\min} : 컨테이너의 최소 중량,

(20' 컨테이너 : 2.5 ton, 40' 컨테이너 : 3.5 ton)

x_{\max} : 컨테이너의 최대 중량,

(20' 컨테이너 : 24 ton, 40' 컨테이너 : 30.5 ton)

T : lashing tension

F_L : lifting force

F_P : compression force

F_C : conner post load

$(R)_{rule}$: racking force의 선급 허용 한계치

$(T)_{rule}$: lashing tension의 선급 허용 한계치

$(F_L)_{rule}$: lifting force의 선급 허용 한계치

$(F_P)_{rule}$: compression force의 선급 허용 한계치

$(F_C)_{rule}$: conner post load의 선급 허용 한계치

3.3 최적화 알고리즘

이 문제는 목적함수와 제한조건이 비교적 간단하지만 식 (13)에 나타난 등식 제한조건(equality constraint)를 포함하는 문제로서 설계변수의 무작위 발생에 큰 제약을 준다. 이러한 문제는 기존의 최적화 기법을 이용하면 비효율적 탐색을 수행할 뿐만 아니라 해를 찾기 어려워 다음과 같은 효율적인 탐색 알고리즘을 구성하였다.

(1단계)

컨테이너 중량 분포는 $x_1 \geq x_2 \geq x_3 \dots \geq x_{ntier}$ 순으로 배치되어야한다. 그 이유는 위로부터 내림차순 배열로 적재할 경우 모든 선급 규정에 의해 실을 수 있는 stack 중량이 급감하게 되어 위의 식을 만족하지 않는 배치는 탐색할 필

요가 없다. 따라서, 초기 탐색점은 VCG가 가장 높은 배열인 균등배열에서 출발한다.

(2단계)

제한조건을 위배하면 VCG를 낮추기 위해 제일 윗단의 중량을 1 unit(0.5ton) 줄이고, 나머지 배열은 가장 안정적인 배열 (가장 많이 실을 수 있는 배열) 즉, 최상단 컨테이너 중량을 제외하고 가장 VCG가 낮은 배열로 정리한다.

(3단계)

계속해서 제한조건을 위배하면 최상단 컨테이너 중량을 반복하여 1 unit씩 감소시키고 내림차순 배열로 배치하되 나머지 중량을 최하단에 누적시키는 작업을 제한조건이 만족될 때까지 반복한다.

(4단계)

최초 제한조건을 만족하면 맨 윗단 중량을 고정시키고 나머지 아랫부분에 대하여 1단계에서 3단계과정을 반복한다.

(5단계)

제한조건을 만족할 때마다 고정시키는 단의 수가 증가하여 최하단까지 고정되면 모든 최적화 과정을 마치게 된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 검증용 위한 비교

개발된 시스템의 계산 결과를 검증하기 위해 GL에서 제공한 계산 사례에 대해 GL에서 제공한 하중계산 프로그램에 의한 결과와 비교해 보았다. 설계 조건은 다음과 같다.

$$L_{BP} : 187.00 \text{ m}$$

각 컨테이너의 VCG :

0.45×8.5' (1166 mm), GL에서 제공한 하중계산 프로그램은 0.45가 입력 값이 아닌 고정 값이다.

stack의 위치 : 128.90 m from AP

lashing rod의 단면적 : 26 mm

컨테이너 길이 : 20' (6058 mm)

사용한 가속도 형태 : standard acceleration (kb_qg)

$$k = 0.55 + 0.75 \frac{128.9}{187} = 1.067$$

$$b_q = 0.67 \quad (L_{BP} > 170 \text{ m})$$

$$kb_qg = 1.067 \times 0.67 \times 9.81 = 7.013 \text{ m/sec}^2$$

컨테이너 높이 : 8.5' (2591 mm)

컨테이너 너비 : 8' (2438 mm)

컨테이너 stack : 5단

lashing의 위치 : 컨테이너의 1층 상단, 2층 하단, 3층 하단

위와 같은 조건에서 바람의 영향을 받는 stack과 영향이 없는 stack으로 나누어 계산하였으며, 각 층의 컨테이너 중량이 각각 20, 20, 20, 10, 2 ton일 경우이다.

Table 1은 바람의 영향을 받는 stack에 문이 설치된 면

(door end)의 계산 결과를 보여주고 있다. 계산 결과에서 알 수 있듯이 두 결과가 서로 일치하고 있다.

Table 1 Comparison of calculated results

Force components		계산 결과 (kN)	
		GL 제공 프로그램	개발된 프로그램
Racking forces	R_1	15.89	15.89
	R_2	87.93	87.93
	R_3	92.01	92.01
	R_4	33.67	33.67
	R_5	6.53	6.53
Lashing forces	T_1	118.72	118.27
	T_2	110.76	110.34
	T_3	218.11	218.11
Lifting force		66.04	66.78
Compression force		853.90	854.00
Conner post load		780.09	779.61

4.2 최적 배치안 계산

최적 배치안을 계산하기 위해서는 문이 설치된 면(door end)과 밀폐된 면(closed end)의 제한조건을 모두 만족하여야 한다. 제한조건을 모두 만족하는 최적 배치안의 결과를 GL 제공 계산 사례와 비교해 보았고, Table 2에 나타내었다.

Table 2 Optimum arrangement of various case (unit: ton)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	총중량	VCG (m)
GL 배치안 (no wind force)	20.0	20.0	20.0	10.0	2.0	72.0	4.78
Max. VCG (no wind force)	22.5	12.5	12.5	12.5	12.0	72.0	5.68
Max. VCG (wind force)	23.5	21.0	10.0	9.0	8.5	72.0	4.92
균일 화물적재 (no wind force)	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	55.0	6.45
균일 화물적재 (wind force)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	37.5	6.45

네 가지 경우의 최적 배치안을 계산하였다. 첫째는 GL 배치안과 같이 풍력을 고려하지 않은 경우의 최대 VCG를 갖는 배치안이며, 둘째는 풍력을 고려한 경우의 최대 VCG를 갖는 배치안이고, 셋째와 넷째는 풍력의 유무에 따른 균일 분포 최대

화물을 실을 수 있는 배치안이다. 풍력이 고려되면 실을 수 있는 총중량이 작아지거나, VCG가 낮아짐을 알 수 있으며, 개발된 프로그램 결과가 GL 배치안보다 우수한 설계점을 제공하고 있으므로 그 유용성을 검증할 수 있다. Table 3는 풍력을 고려한 최대 VCG 배치안의 힘의 성분들을 나타내고 있다.

Table 3 Force components with max. VCG considering wind force

Force components		계산 결과 (kN)	
		Door end	Closed end
Racking forces	R_1	15.67	100.95
	R_2	79.21	124.73
	R_3	95.52	95.52
	R_4	54.88	54.88
	R_5	16.79	16.79
Lashing forces	T_1	117.45	86.73
	T_2	109.58	80.92
	T_3	203.50	81.97
Lifting force		97.03	249.84
Compression force		869.52	865.55
Conner post load		785.02	681.90

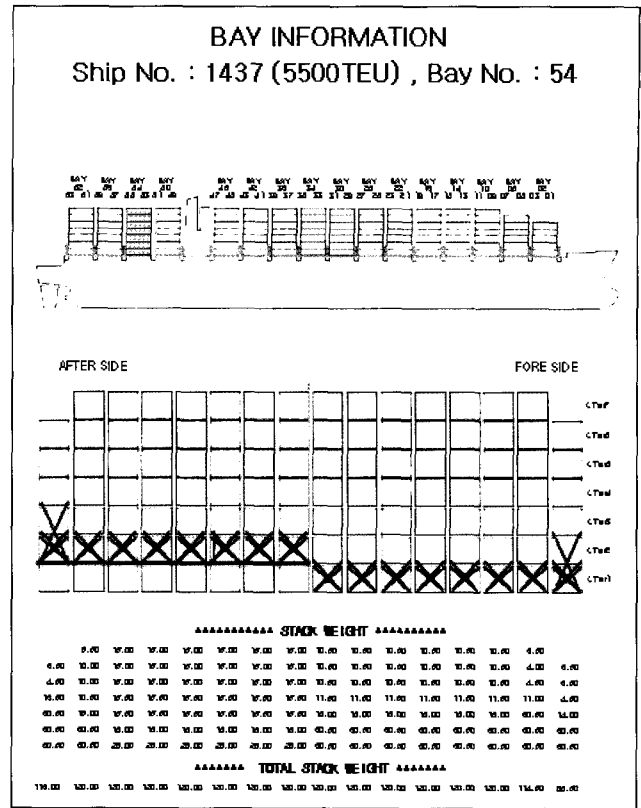


Fig. 4 Screen for showing the results calculated

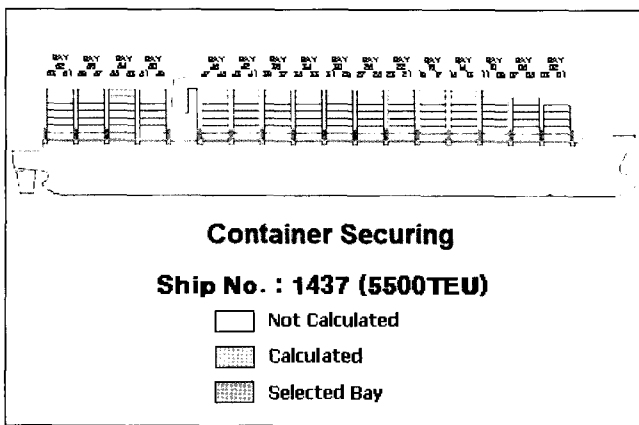


Fig. 3 Screen for selecting bay to calculate

GL 규정의 양력의 허용 한계값이 250 kN이며, 이 예제에서는 양력(lifting force)이 주된 제한조건으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 양력을 줄여주기 위해 수직 구속 장치(vertical lashing)를 적용하면 VCG를 더욱 높일 수 있으나, 같은 조건의 비교를 위해 여기서는 다루지 않았다.

개발된 시스템은 ABS, DNV, GL, LR 선급을 대상으로 하며, 사용자의 편의를 도모하기 위하여 GUI(graphic user interface) 시스템을 도입하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 GUI를 이용하는 과정의 일부를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구는 컨테이너 운반선 상갑판에 적재되는 컨테이너 화물에 대해 설계자가 원하는 배치안을 계산하기 위하여 작용하중 계산 과정을 정립하고, 적합한 최적화 알고리즘을 구성하여 컨테이너 시큐어링 시스템을 개발한 바 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

선급에서 제공한 프로그램으로 검증할 수 있는 부분을 수행한 결과 거의 일치함을 확인하였다.

기존 프로그램이 고려하지 않는 컨테이너 구속 교량(lashing bridge)에 구속하는 경우와 수직 구속 장치(vertical lashing)를 사용하는 경우도 고려하여 여러 경우의 최적 배치안을 계산할 수 있도록 하였으며, 우수한 설계점을 제공함을 확인하였다.

시행착오(trial and error) 방법에 의존하던 배치안 설계를 최적화 알고리즘의 도입으로 배치 설계 시간이 크게 줄었다.

개발된 시스템은 ABS, DNV, GL, LR 선급을 대상으로 하며, 점차 대상 선급을 확대해 나갈 계획이다.

참고문헌

[1] 김철년(2001), 특집 2 : 초대형 컨테이너선의 출현 전망, 대한조선학회 논문집, 제38권 제2호, pp. 42-46

- [2] 신상훈, 최익홍(2002), Container 화물 최적 적재에 관한 연구, 선박해양구조연구회 논문집, 제16권 제1호, pp. 111-116
- [3] 신상훈, 장창두, 송하철(2002), 다목적함수 최적화 기법을 이용한 유조선의 최적구조설계, 한국조선구조공학회 논문집, 제15권, 제4호, pp. 591-598
- [4] 양영순, 김기화, 유원선(1994), 유전적 알고리즘에 의한 선체 구조물의 이산적 최적설계, 대한조선학회 논문집, 제31권 제4호
- [5] American Bureau of Shipping(1988), Guide for Certification of Container Securing Systems
- [6] Det Norske Veritas(1983), Strength Analysis of Container Securing Arrangements, Classification Notes, Note No. 32.2
- [7] Germanischer Lloyd(1998), Classification of Ships, Part 3, Chapter 9, 11 and 14
- [8] Lloyd's Register(1998), Provision Rules for the Classifications of Naval Ships
- [9] Shin, S. H., Won, S. I. and Choe, I. H.(2003), A Study on Container Securing System for Optimum Arrangement, ISOPE2003, Offshore and Polar Engineering Conference

원고접수일 : 2003년 5월 29일

원고채택일 : 2003년 7월 11일