

[2008][12-2]



Computer aided ship design

Part 3. Optimization Methods

December 2008

Prof. Kyu-Yeul Lee

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Seoul National University of College of Engineering

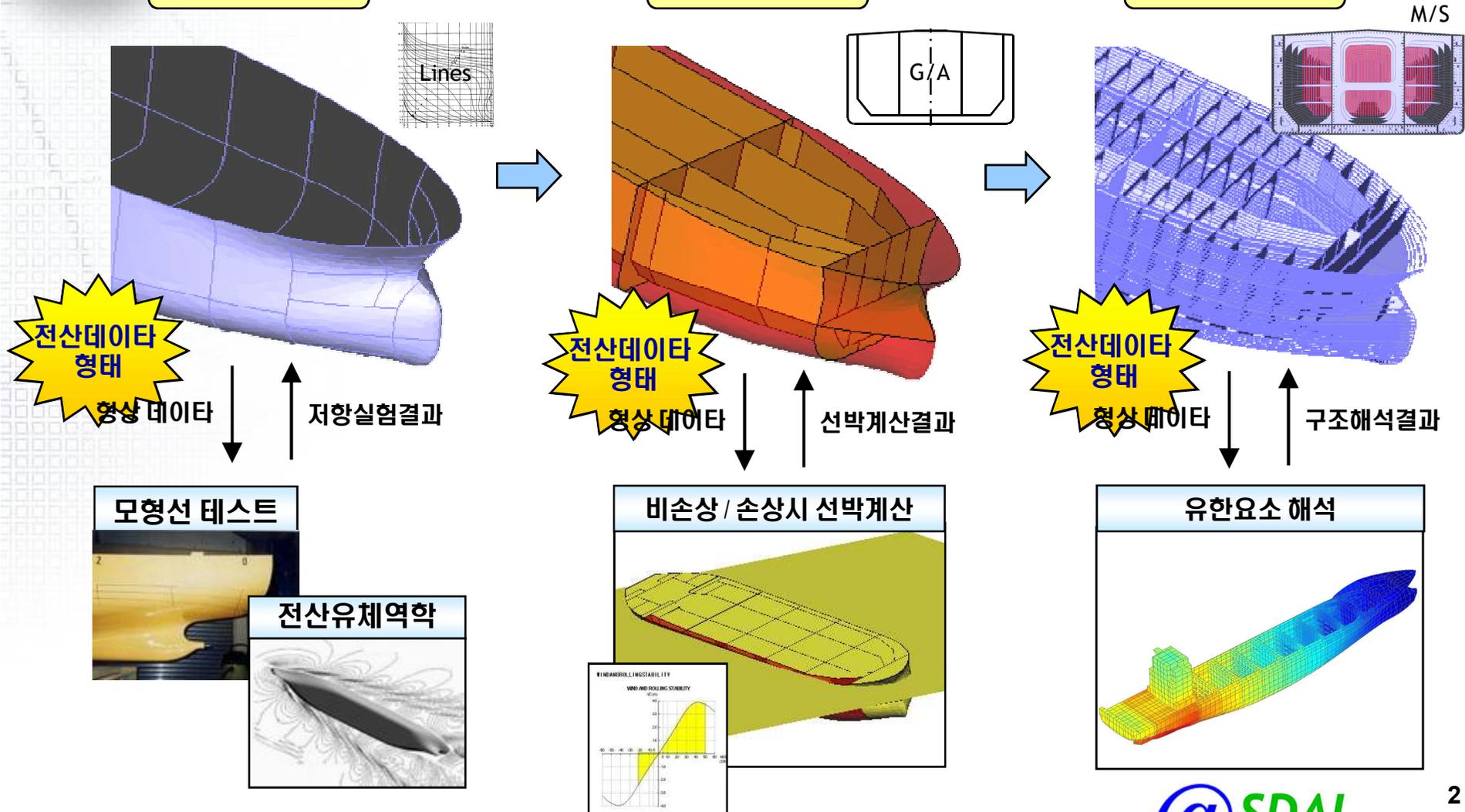
Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

선박의 기본설계 과정

선박형상설계

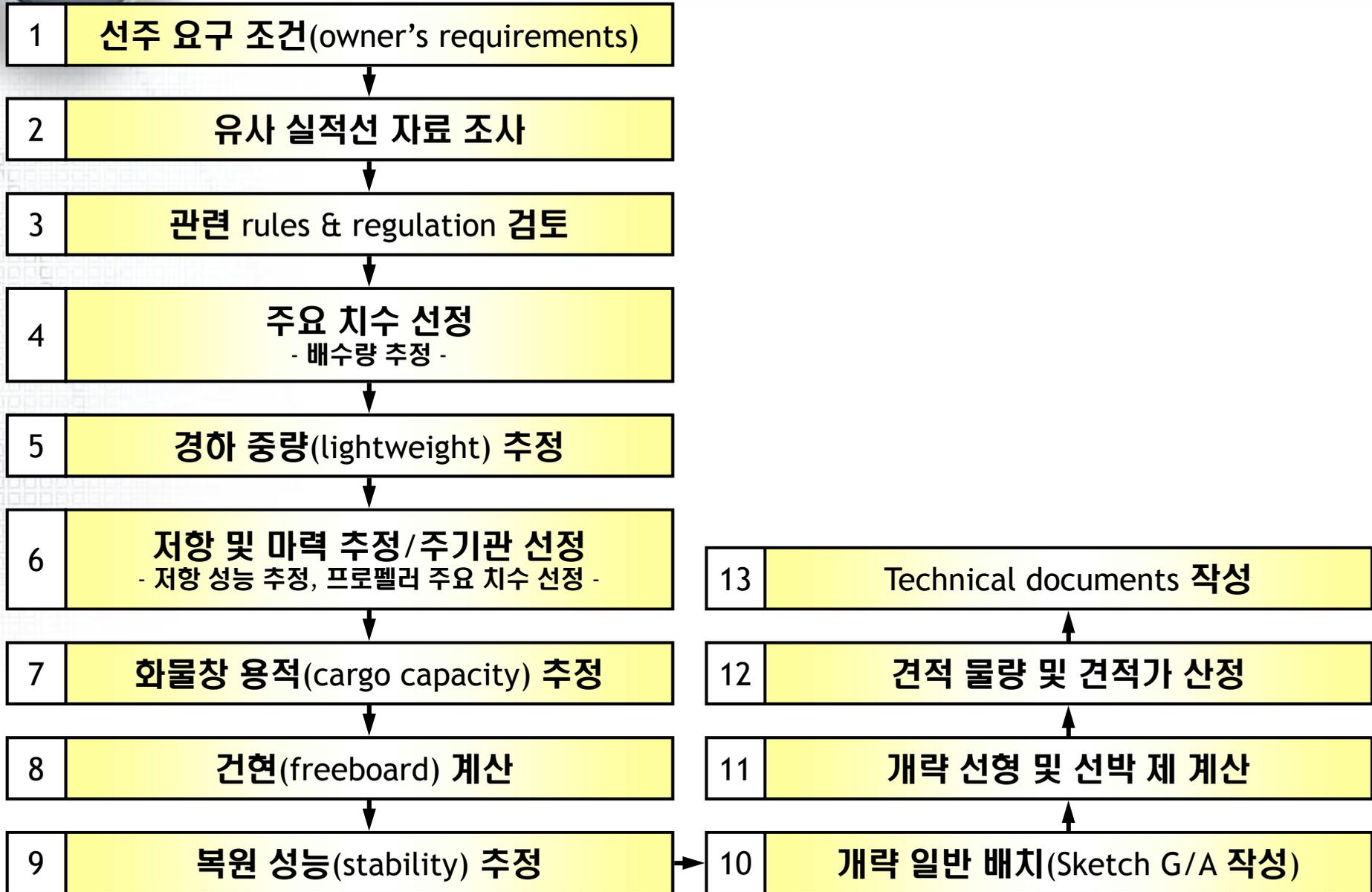
선박구획설계

선박구조설계



선박 주요치수 결정 및 기본 성능 추정(선박의 “개념 설계”)

PART 1	선박의 개요
	선박의 종류
	조선 주요 과정
	선박 개념 설계
	VLCC 개념 설계 예



선박의 주요 치수 결정 문제

- **주요 치수 선정 기준(목적 함수)**
 - 최소 건조비 또는 최소 중량 또는 최소 운송비
- **주어진 값(선주 요구 조건)**
 - 재화 중량(Deadweight; DWT)
 - 화물창 용적(Cargo Capacity; CC_{req})
 - 최대 흘수(T_{max})
 - 선속(V)
- **구하는 값(설계 변수)**
 - 선박의 길이(Length; L)
 - 선박의 폭(Breadth; B)
 - 선박의 깊이(Depth; D)
 - 방형 계수(Block Coefficient; C_B)
- **제약 조건**
 - 부력·중량 평형 조건(선박의 경하 중량 추정 필요)
 - 화물창 용적 요구 조건(화물창 용적 계산 필요)
 - 최소 요구 건현 조건(건현 계산 필요)



선박 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(요약)

- “개념설계 방정식”

구하는 값(설계 변수)

L, B, D, C_B
길이 폭 깊이 방형 계수

주어진 값(선주 요구 조건)

$DWT, CC_{req}, T_{max} (= T), V$
재화 중량 요구 화물창 용적 최대 흘수 선속

부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건(등호 제약 조건) → 물리적 법칙

$$\begin{aligned} L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha &= DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B) \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot NMCR \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B \\ &\quad + C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \end{aligned}$$

요구되는 화물창 용적(cargo capacity) 조건(부등호 제약 조건) → 선주 요구 조건

$$CC_{req} \leq C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

- DFOC(Daily Fuel Oil Consumption)
+ 저항 추진과 관련이 있음

최소 요구 견현 조건(부등호 제약 조건) → 국제 규약
(1966 ICLL)

$$D \geq T + C_{FB} \cdot D$$

- 납기일(Delivery Date)
+ 생산 공정과 관련이 있음

목적 함수(주요 치수 선정 기준)

$$Building\ Cost = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR$$

▶ 미지수 4개, 등호 제약 조건 1개, 부등호 제약 조건 2개인 최적화 문제

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 중량 추정

주요치수 결정 (1)

■ 주요 치수 결정 개념

- 재화 중량(DWT; Deadweight), 요구 화물창 용적(Cargo Capacity), 선속(V), 흘수(T)가 주어졌을 때
- 선박 건조비를 최소화 하거나 운항 경제성을 최대(최소 요구 운임, 최소 연료 소모량)로 하는 주요 치수 L, B, D, C_B 의 조합을 찾는 것

Archimedes' Principle

- 유체 중에, 물체에 의해 배제된 유체의 무게만큼 부력을 받는다.
- 부력 = 배수용적 X 유체의 밀도
= 배수량

중량-부력 평형 조건

선박의 전체 중량 = 선박의 부력



배수량 = 선박의 전체 중량

선박의 전체 중량 = 경하중량 + 재화중량

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 총량 추정

주요치수 결정(2)

- 주요치수와 배수량

- 배수량 = 부력 = 중량

$$\begin{aligned}\Delta &= L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) \\ &= W = LWT + DWT\end{aligned}$$

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 중량 추정

주요치수 결정(3)

- 화물 적재량(Deadweight)

- Displacement = DWT + LWT
- Given
 - 주요 요목(Displacement 가정)
 - DWT(계약치)
- Unknown
 - 자체 중량 또는 경하 중량 (LWT): 배치 및 구조 최적화 기술
- 동일 배수량이라도 LWT를 최소화
 - 동급의 선박에 비하여 적재량을 극대화

주요치수 결정(4)

- Speed & 연비

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 총량 추정

- 동일 DWT ➡ LWT최소 ➡ 배수량 최소 ➡ Speed Up ➡ 연비 향상
- 1Knot의 의미
 - 1knot: 1시간에 1해리(nautical mile, 1,852m)를 달리는 속도
 - 1knot = 0.5144m/s
- Grace & Cancel

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 총량 추정

주요치수 결정(5)

- 흘수(T)와 기본 성능과의 관계

■ 흘수(T)와 기본 성능과의 관계

- 흘수는 방형 계수(C_B)와 밀접한 관계가 있음

$$\begin{aligned}\Delta &= L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) \\ &= W = LWT + DWT\end{aligned}$$

- 흘수가 커짐에 따라 일반적으로 깊이(D)가 증가

$$D \geq T + \text{Freeboard}$$

- 대형 전용선의 경우 주어진 설계 조건 내에서 건조비를 감소할 수 있는 최대의 효과적인 수단

➔ 운항상의 제한 내에서 흘수를 가능한 크게 선정

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 지수 선정
	5. 경하 총량 추정

주요치수 결정(6)

- 길이(L)와 기본 성능과의 관계

■ 길이(L)와 기본 성능과의 관계

• 길이와 건조비

- 길이가 증가하면 선각 강재 총량(W_s)은 급격히 증가

$$\text{예, } W_s \propto L^{1.6} \cdot (B + D)$$

• 길이와 종강도

- 길이가 클수록 요구 선체횡단면 계수가 커져 구조 중량 증가

• 길이와 저항 추진 성능

- 같은 배수량에서 길이가 길수록 선형이 보다 날씬(Slender)해지므로 속도 성능이나 조종 성능 등의 유체 동역학적 성능이 향상

• 길이와 요구 건현(Freeboard)

- 길이가 증가하면 ICLL 1966에 따른 요구 건현이 증가

ICLL 1966 요구 건현

$$Freeboard = f(L_f, D, C_B, Superstructure_{Length}, Superstructure_{Height}, Sheer)$$

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 지수 선정
	5. 경하 총량 추정

주요치수 결정(7)

- 폭(B)과 기본 성능과의 관계

■ 폭(B)과 기본 성능과의 관계

• 폭과 복원 성능

■ 폭이 증가하면 초기 복원성(GM)이 증가

$$GM \propto BM \propto B^2 / T, \quad GM = T(0.9 - 0.3C_M - 0.1C_B) + B \left(\frac{0.08}{\sqrt{C_M}} \cdot \frac{B}{T} \right) - D \left(\frac{1.6}{L^{0.2}} \right)$$

• 폭과 횡동요(Roll Period) 주기

■ 폭이 증가하면 횡동요 주기가 증가

$$Tr \propto B / \sqrt{GM}, \quad GM \leq 4\pi^2 (0.4B)^2 / (gTr^2)$$

• 폭과 저항 추진 성능

■ 폭이 과도하면 조파 저항이 커지고, 너무 작으면 복원 성능이 문제가 됨

• 폭과 조종 성능(비만 계수 추천값)

$$C_B / (L/B) \leq 0.15$$

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 총량 추정

주요치수 결정(8)

- 방형 계수(C_B)와 기본 성능과의 관계

- 방형 계수(C_B)와 기본 성능과의 관계
 - C_B 와 저항 성능
 - C_B 가 작을 수록 일반적으로 유체 동역학적 성능은 향상
 - C_B 와 건조비
 - C_B 가 클수록 선체 주요 치수를 작게 할 수 있어 구조부 가격(건조비) 감소
 - C_B 가 과도하면 저항 추진 성능이 나빠져 기관 마력이 커지고 기관부 가격이 상승
 - C_B 가 과도하면 연료 소모량이 증가하여 운항비 증가
 - C_B 에 대한 추천 상한값(현재 많이 사용됨)
 - Watson과 Gilfillan에 의한 추정식

$$C_B \leq 0.70 + 0.125 \tan^{-1} \left((23 - 100Fn) / 4 \right)$$

주요치수 결정(9)

- 초기 복원성, 비만 계수, C_B 추천 값

- 초기 복원성 요구 조건 예

$$0.04B \leq GM \leq 4\pi^2 (0.4B)^2 / (gTr^2)$$

* Tr: 횡동요 주기(Roll Period)

$$GM = T(0.9 - 0.3C_M - 0.1C_B) + B \left(\frac{0.08}{\sqrt{C_M}} \cdot \frac{B}{T} \right) - D \left(\frac{1.6}{L^{0.2}} \right)$$

- 조종성 관점에서의 비만 계수(Obesity Coefficient) 요구 조건 예

$$\frac{C_B}{(L/B)} \leq 0.15$$

비만 계수

- Watson & Gilfillan에 의한 C_B 추천 값

$$C_B \leq 0.70 + 0.125 \tan^{-1}((23 - 100Fn)/4)$$

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 총량 추정

주요치수 결정(10)

- 깊이(D)와 기본 성능과의 관계

- 깊이(D)와 기본 성능과의 관계
 - 깊이와 건현
 - 깊이가 증가하면 건현 증가

$$D \geq T + Freeboard$$

- 깊이와 화물창 용적(CC; Cargo Capacity)
 - 깊이가 증가하면 화물창 용적 증가

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

* L_{APT} : 선미창 길이, L_{ER} : 기관부 길이, L_{FPT} : 선수창 길이, DB_{Height} : 이중저 높이

- 깊이와 종강도(LS; Longitudinal Strength)
 - 깊이가 증가하면 종강도 증가

$$LS = f(L / D)$$

* 일반적으로 $9.0 \leq L/D \leq 13.0$



5. 경하 중량 추정

1. 선주 요구 조건
2. 유사 실적선 조사
3. 주요치수 결정
4. 경하중량 추정
5. 저항, 마력 추정

5. 경하중량 추정(1)

■ 경하 중량(Lightweight)

- 의장품, 기관 부품을 탑재 및 공사 완료 후 선박이 완성된 상태의 자체 중량
- 선각 중량(W_s ; Hull Weight), 의장 중량(W_o ; Outfitting Weight), 기관부 중량(W_m ; Machinery Weight)으로 구성

• 경하중량의 추정식의 예

■ 선각 중량 $W_s = C_s \cdot L^{1.6} (B + D)$, $C_s = (W_s / \{L^{1.6} (B + D)\})_p$

■ 의장부 중량 $W_o = C_o \cdot L \cdot B$, $C_o = (W_o / \{L \cdot B\})_p$

■ 기관부 중량 $W_m = C_m \cdot NMCR$, $C_m = (W_m / NMCR)_p$

기준선의 값

L: 선체의 길이
 B: 선체의 폭
 D: 선체의 깊이
 NMCR: 기관부 최대마력

경하 중량(Lightweight) = 선각 중량(Hull Weight)
 + 의장 중량(Outfitting Weight) + 기관부 중량(Machinery Weight)

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건
	2. 유사 실적선 조사
	3. 관련 규약
	4. 주요 치수 선정
	5. 경하 중량 추정

5. 경하중량 추정(2)

- 선각 중량 추정 예

■ 경하 중량 추정

• 선각 중량 추정 예

■ DnV식

$$W_s = C_s \cdot L^{1.67} \cdot B^{0.67} \cdot D^{0.5} \cdot T^{0.17} \cdot C_B^{0.17}$$

$$C_s = \left(W_s / \{ L^{1.67} \cdot B^{0.67} \cdot D^{0.5} \cdot T^{0.17} \cdot C_B^{0.17} \} \right)_p$$

기준선의 값

■ LR식

$$W_s = C_s \cdot L^{1.13} \cdot B^{0.73} \cdot D^{0.4}$$

$$C_s = \left(W_s / \{ L^{1.13} \cdot B^{0.73} \cdot D^{0.4} \} \right)_p$$

기준선의 값

■ 경험식

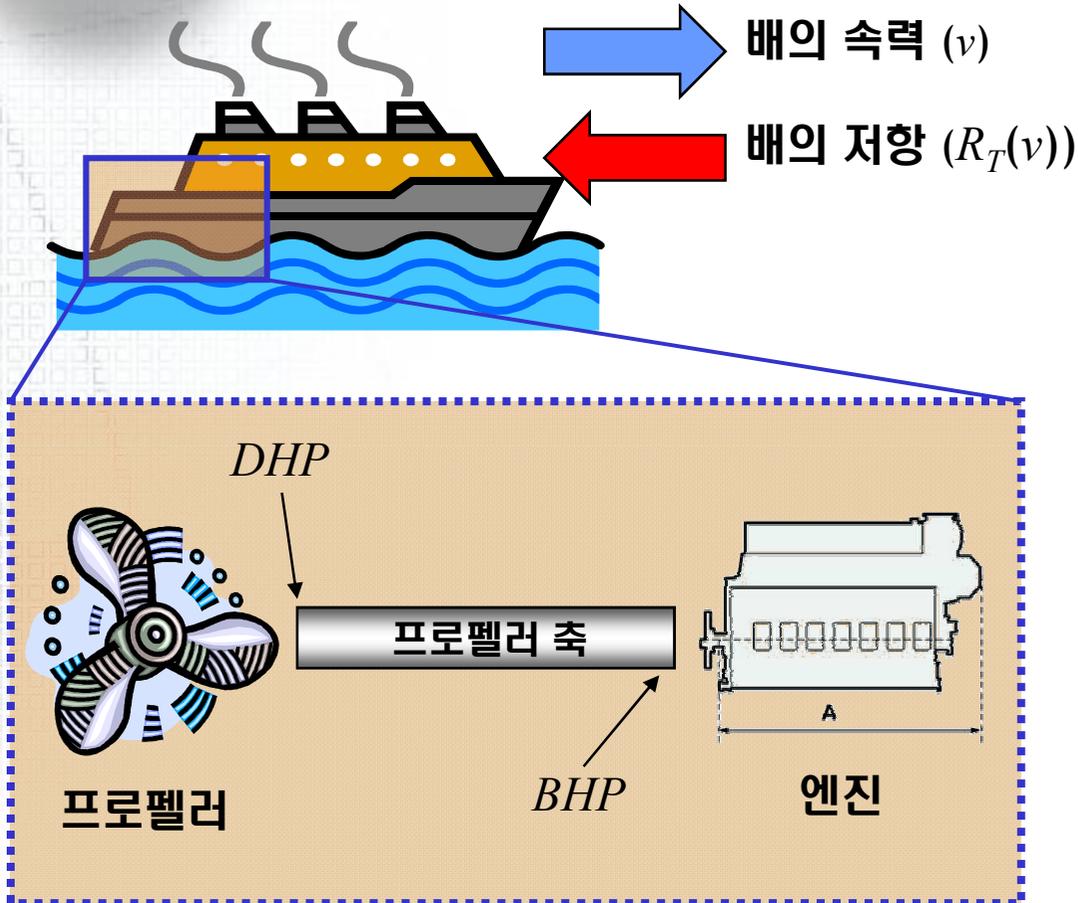
$$W_s = C_s \cdot L^{1.6} (B + D), \quad C_s = \left(W_s / \{ L^{1.6} (B + D) \} \right)_p$$

기준선의 값

경하 중량(Lightweight) = 선각 중량(Hull Weight)
 + 의장 중량(Outfitting Weight) + 기관부 중량(Machinery Weight)

6. 저항, 마력 추정(1)

- 주기관 마력 추정



① EHP (Effective Horse Power)

$$EHP = R_T(v) \cdot v \quad (\text{In Calm Water})$$

② DHP (Delivered Horse Power)

$$DHP = \frac{EHP}{\eta_D} \quad (\eta_D: \text{추진효율})$$

③ BHP (Brake Horse Power)

$$BHP = \frac{DHP}{\eta_T} \quad (\eta_T: \text{축전달 효율})$$

④ NCR (Normal Continuous Rating)

$$NCR = BHP \left(1 + \frac{\text{Sea Margine}}{100} \right)$$

⑤ DMCR (Derated Maximum Continuous Rating)

$$MCR = \frac{NCR}{\text{Engine Margin}}$$

마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

6. 저항, 마력 추정(2)

- 주기관 마력 추정

- Admiralty계수에 의한 주기관 마력 개략 추정

$$Cad = \Delta^{2/3} \cdot V^3 / DHP$$

Δ in ton, V in kts, DHP in PS

Δ : 배수량(ton)
 V : 선속(Knots)
 DHP : 전달마력(PS)
(Delivered Horse Power)

- 기관 마력 추정 과정

- 선박의 주요 치수를 토대로 한 정수 중의 저항(Resistance in calm water) 추정
- 계열 모형 시험 자료, 실험 결과의 통계적 추정식(Holtrop & Mennen의 방법 등)을 이용하여 추정함

- 정수중의 유효 마력(EHP; Effective Horse Power) 계산

$$= R_T \cdot V$$

- 추진계수 추정

$$\eta_D : \text{Propulsive Efficiency(추진 효율)} = \eta_O \times \eta_H \times \eta_R$$



7. 화물창 용적 추정

7. 화물창 용적 추정(1)

- 요구되는 화물창 용적(CC; Cargo Capacity) 조건

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

* L_{APT} : 선미창 길이, L_{ER} : 기관부 길이, L_{FPT} : 선수창 길이, DB_{Height} : 이중저 높이

화물창 용적의 간이 추정 예 1

$$CC = C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

* C_{CH} : 화물창 용적 계수

$$C_{CH} = \left(\frac{CC}{L \cdot B \cdot D} \right)_p$$

기존선의 값

7. 화물창 용적 추정(2)

- 요구되는 화물창 용적(CC; Cargo Capacity) 조건

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

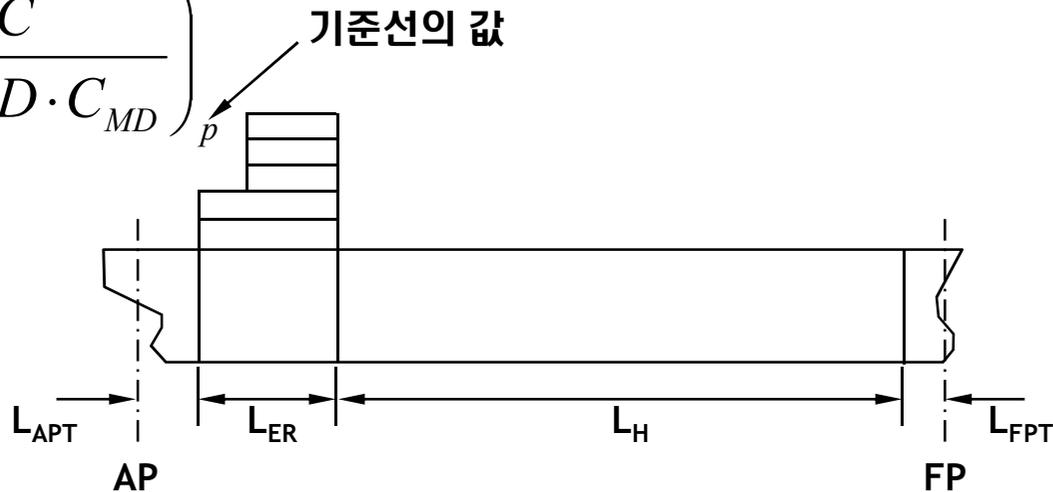
* L_{APT} : 선미창 길이, L_{ER} : 기관부 길이, L_{FPT} : 선수창 길이, DB_{Height} : 이중저 높이

화물창 용적의 간이 추정 예 2

$$CC = C_{CH} \cdot \underbrace{(L_{BP} - L_{APT} - L_{ER} - L_{FPT})}_{\text{화물창 길이 } L_H} \cdot B \cdot D \cdot C_{MD}$$

* C_{CH} : 화물창 용적 계수, C_{MD} : 갑판까지의 중앙횡단면 계수

$$C_{CH} = \left(\frac{CC}{L_H \cdot B \cdot D \cdot C_{MD}} \right)$$



Deadweight Carrier와 Volume Carrier 주요치수 결정 순서

■ Deadweight Carrier :

수송하는 화물의 부피보다는 무게가 주요치수 결정에 더 영향을 미치는 선박으로서 유조선, 산적화물선, 광석운반선 등이 이 범주에 속한다.

- 이 경우에는 먼저 선박의 배수량(경하중량과 재화중량의 합)을 기준으로 선박의 길이, 폭, C_B 를 1차적으로 선정하고,
- 그 다음 요구되는 화물창 용적을 만족하는 깊이 등을 결정한다.

■ Volume Carrier :

수송하는 화물의 무게보다는 화물의 부피가 주요치수 결정에 더 영향을 미치는 선박으로서 컨테이너선, 자동차 운반선, 카-훼리, 여객선 등이 이 범주에 속한다.

- 이 경우에는 먼저 적재화물의 용적을 수용할 수 있는 선박의 길이, 폭, 깊이를 1차적으로 선정하고,
- 그 다음 배수량을 만족하는 C_B 등을 결정한다.



Volume Carrier

주요치수 결정 수학적 모델

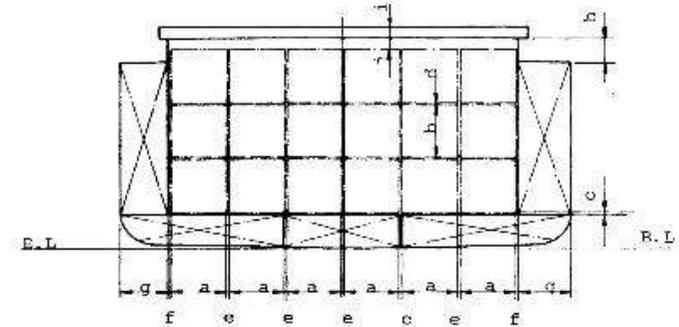
- 400TEU 급 Semi- Container ship

컨테이너 특성을 고려한 화물창 내 컨테이너 배치

- 400TEU 급 세미 컨테이너선 예

■ 폭 방향의 배치

- 화물창 내에 **폭 방향(Row)**으로 적재되는 컨테이너 개수
- 폭 방향의 화물창 개수, 갑판하 center girder의 치수
- 화물창 내의 컨테이너 속박 장치(lashing equipment) twist locking 또는 portable cell guide

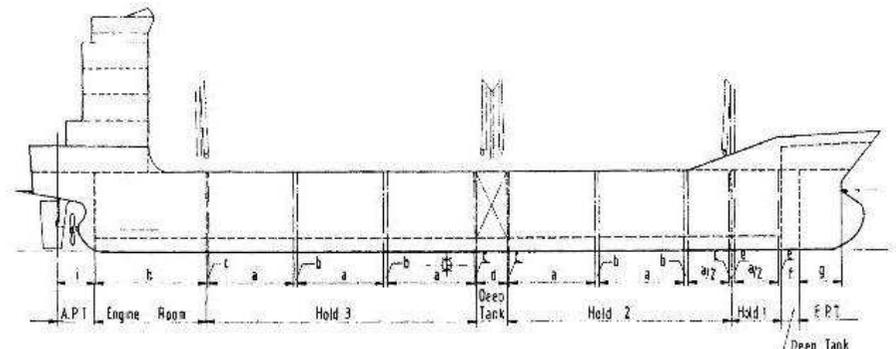


■ 높이 방향의 배치

- 화물창 내에 **높이 방향(Tier)**으로 적재되는 컨테이너 개수
- 적정 hatch coaming 높이
- 이중저 높이

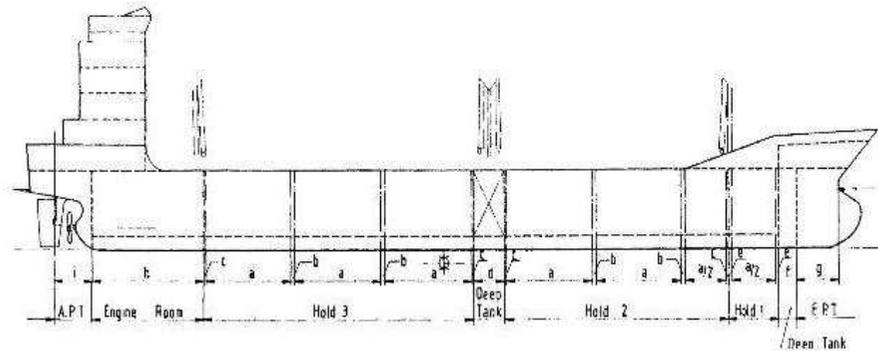
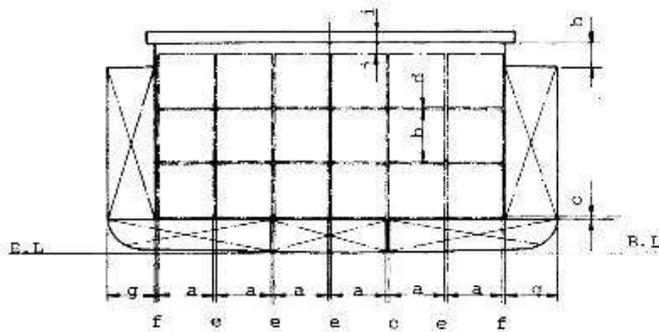
■ 길이 방향의 배치

- 화물창 내의 **길이 방향(Bay)**의 컨테이너 적재개수
- 하역장치 시스템의 유무 및 배치(center or side)
- 컨테이너 block 간의 길이방향의 간격
- 기관실 길이
- deck house 길이
- 선수, 선미창의 길이
- hatch cover의 격납장소



400TEU 급 세미 컨테이너선의 개략 배치 예

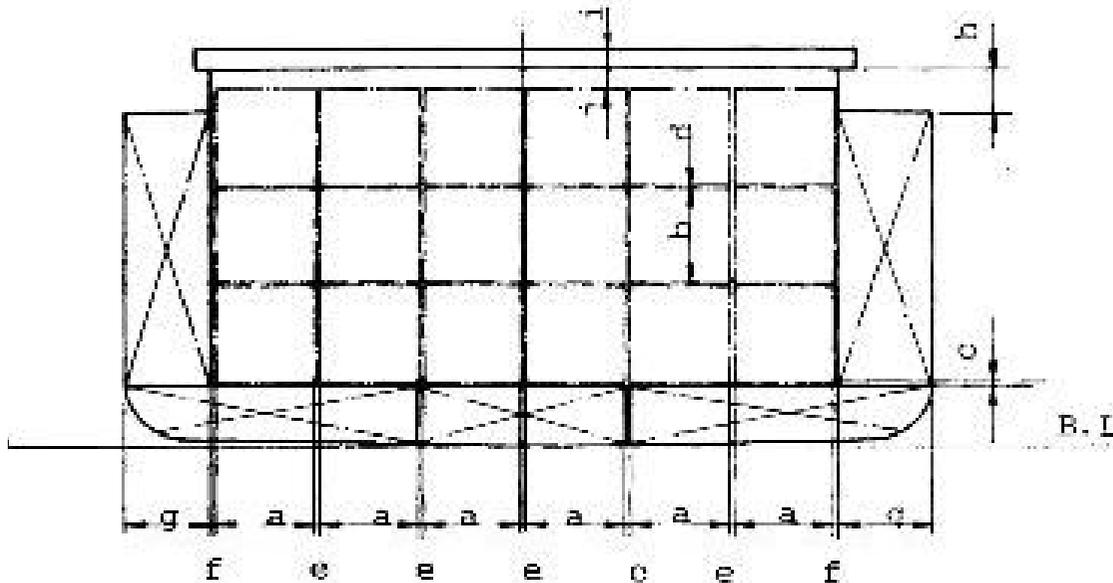
- 화물창 내의 컨테이너 적재수(TEU 기준)는 폭 방향으로 6 Row, 높이 방향으로 3 Tier, 길이 방향으로 12 Bay로 배치하는 것으로 가정한다.



- FEU(평균무게 30t기준)를 적재할 수 있는 하역용량 36t의 crane 2 대를 좌현에 배치한다.
- 해치 커버
hold 2, 3의 앞, 뒷쪽은 folding type으로 하고, 중간부분 및 hold 1은 pontoon type으로 한다. 컨테이너 전용선인 경우 pontoon cover를 육상에 적재하나 다목적 화물선인 경우 그렇지 못한 때도 있으므로 folding type cover에 연결하여 전후방향으로 이동하게 하고 따로 격납하지 않는다.
- 선체 중앙부와 선수부에 각각 디프 탱크(deep tank)를 배치한다. 중앙부 deep tank는 heeling tank와 연료유 탱크로 사용한다.

400TEU 급 세미 컨테이너선의 개략 배치 예

-컨테이너 규격 및 간격 예



400TEU 급 세미 컨테이너선의 화물창 단면도

- a : 컨테이너 폭, 8' (=2438 mm)
- b : 컨테이너 높이, 8'6" (=2,590.8 mm)
- c : 이중저 상부와 제 1 단 컨테이너 하부 사이의 간격 (13 mm)
- d : 높이방향의 컨테이너 간의 간격 (13 mm)
- e : portable cell guide의 폭 (100 mm)
- f : side tank 벽과 컨테이너와의 간격 (116 mm)
- g : side tank 폭 (1,920 mm)
- h : hatch coaming 높이 (1,400 mm)
- j : 최상단 컨테이너와 해치 커버와의 간격 (688 mm)

c~j : 컨테이너선의 종류 및 크기, 컨테이너 속박장치 크기에 따라 달라질 수 있음.

폭(B)의 결정

폭 방향으로 6 Row의 TEU를 적재할 경우 :

$$\text{폭} = 6 \times 2,438(a) + 5 \times 100(e) + 2 \times 116(f) + 2 \times 1,920(g) = \underline{19.2 (m)}$$

깊이(D)의 결정

깊이 방향으로 3 Tier를 적재할 경우 :

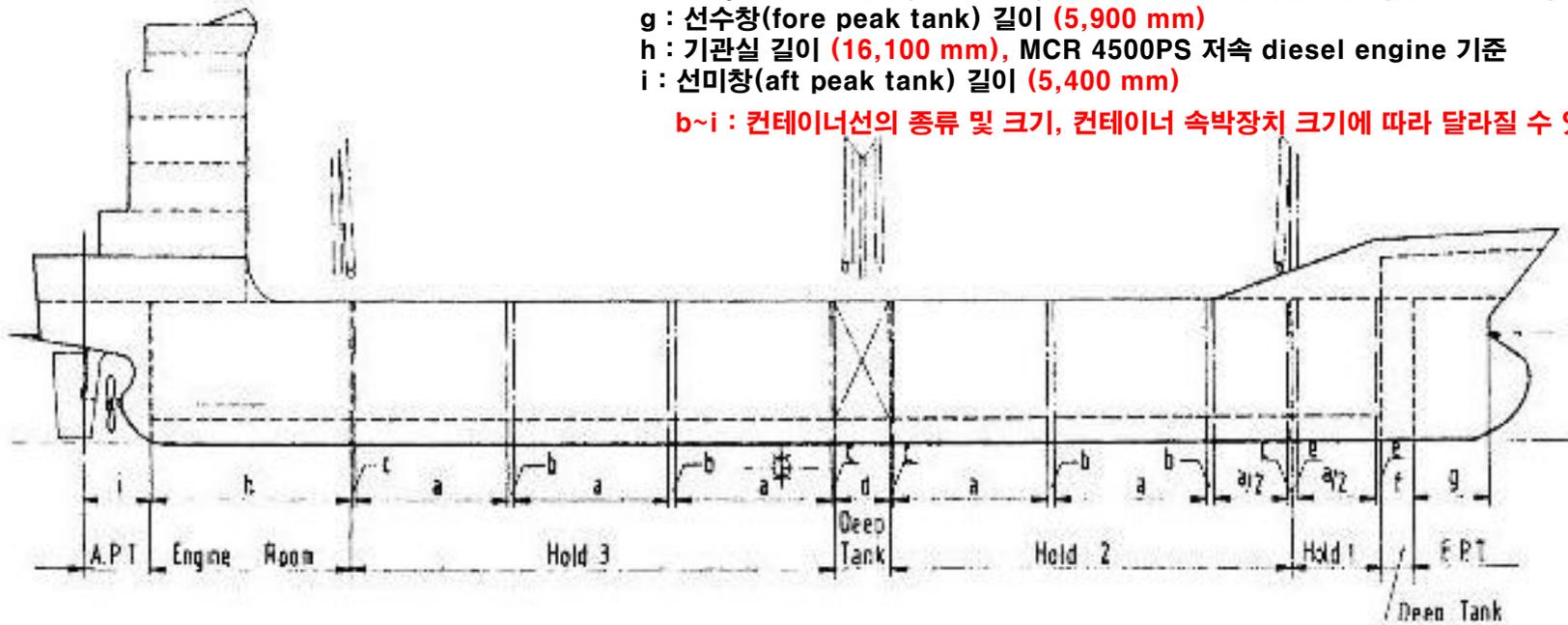
$$\text{깊이} = 1500(\text{이중저 높이:먼저 결정}) + 3 \times 13(d) + 3 \times 2590.8(b) + 688(j) - 1400(h) = \underline{8.6 (m)}$$

400TEU 급 세미 컨테이너선의 주요치수 결정

- 길이의 결정

- a : FEU 컨테이너 길이 (12,190 mm)
- b : FEU 컨테이너 블록간의 간격 (600 mm)
- c : 컨테이너와 화물창 격벽 사이의 간격 (265 mm)
- d : deep tank 길이 (4,200 mm), deep tank는 ballast water tank 혹은 연료유 탱크(fuel oil tank)로 사용.
- e : hold 1내의 TEU 컨테이너와 격벽사이의 간격 (450 mm), hold 1내의 컨테이너는 twist locking장치로 속박.
- f : deep tank 길이 (2,400 mm), bow thruster설치를 위한 공간으로도 사용.
- g : 선수창(fore peak tank) 길이 (5,900 mm)
- h : 기관실 길이 (16,100 mm), MCR 4500PS 저속 diesel engine 기준
- i : 선미창(aft peak tank) 길이 (5,400 mm)

b~i : 컨테이너선의 종류 및 크기, 컨테이너 속박장치 크기에 따라 달라질 수 있음.



길이 방향으로 TEU 12 Bay를 배치할 경우,

배의 길이= 화물창 길이 + 기관실 길이 + deep tank 길이 + fore & aft peak tank 길이 + 여유

$$\begin{aligned}
 &= (\text{'Hold3'}) 12,190(a) \times 3 + 600(b) \times 2 + 265(c) \times 2 + (\text{'Hold2'}) 12,190(a) \times 2 + 6,100(a/2) + \\
 &600(b) \times 2 + 2 \times 265(c) + (\text{'Hold1'}) 6,100 + 450(e) \times 2 + (\text{'ER'}) 16,100(h) + (\text{'Deep TK'}) 4,200(d) + \\
 &(\text{'Deep TK'}) 2,400(f) + (\text{'FPT'}) 5,900(g) + (\text{'APT'}) 5,400(i) + 190 \text{ (mm)} = \underline{\underline{111.70 \text{ (m)}}}
 \end{aligned}$$

400TEU 급 세미 컨테이너선의 주요치수 결정 예

- **계획 흘수(Design Draft)와 Block Coefficient의 결정**
경하중량 추정은 주요치수를 이용하여 유사선으로부터 비례비법에 의해 약 3,050 ton 으로 추정되었다.
 - 이에 따라 **계획 흘수를 6.45m로 할 경우,**
 - **Block coefficient**
= $(3,050 + 7,400) / (111.7 \times 19.2 \times 6.45 \times 1.025 \times 1.003)$
= 0.735로 추정됨.
- **경하중량 추정, 기관마력 추정, 건현 계산**
그 이후의 과정은
 - **Deadweight Carrier와 동일한 과정을 거쳐 점차적으로 최적의 주요치수를 결정.**



Deadweight Carrier 주요치수 결정 수학적 모델 “Design Equation (설계 방정식)”

선박 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(1)

Find L, B, D, C_B

Minimize $Building\ Cost = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR$

Subject to * 부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건

$$\begin{aligned} L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha &= DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B) \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot NMCR \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B \\ &\quad + C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \end{aligned}$$

* 요구되는 화물창 용적 조건

$$CC_{req} \leq C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

* 최소 요구 건현 조건

$$D \geq T + C_{FB} \cdot D$$

➔ 미지수 4개, 등호 제약 조건 1개, 부등호 제약 조건 2개인 최적화 문제

선박 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(2)

- 목적 함수

- 선박의 건조비(Building Cost) 최소화

또는

- 요구 운임(RFR; Required Freight Rate, 단위 수송 화물 당 수송 원가) 최소화

또는

- 연료 소모율(Fuel Consumption) 최소화

- 위 목적 함수는 L, B, D, C_B 의 함수(closed form)로 표현 가능

- 선박 건조비의 계산 예

$$Building\ Cost = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR$$

선박 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(3)

- 제약 조건

■ 부력(Buoyancy)-중량(Displacement) 평형 조건

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + LWT$$

그런데 경하 중량(LWT; lightweight)은 선각 중량, 의장 중량, 기관부 중량으로 세분화할 수 있음
따라서 위 식은 아래와 같이 표현할 수 있음

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + LWT$$

$$= C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot NMCR + DWT$$

한편, NMCR은 저항 및 마력 추정을 통해 주기관을 선정하여 결정해야 하나
초기 단계에서는 기준선의 admiralty 계수(C_{ad})로부터 개략적으로 추정할 수 있음

$$C_{ad} = \frac{\Delta^{2/3} \times V^3}{DHP} \quad \text{로부터} \quad DHP = \frac{\Delta^{2/3} \times V^3}{C_{ad}} \quad \text{이며, 따라서}$$

$$NMCR = C_1 \cdot DHP = C_1 \cdot \frac{\Delta^{2/3} \times V^3}{C_{ad}} = C_2 \cdot \Delta^{2/3} \times V^3 \quad \text{이며, 최종적으로}$$

$$\begin{aligned} L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) &= DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B) \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot C_2 \cdot \Delta^{2/3} \cdot V^3 \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B \\ &\quad + \underbrace{C_{power}}_{C_{ma} \cdot C_2} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \end{aligned} \quad \rightarrow C_{power} = C_{ma} \cdot C_2$$

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(4)

- 제약 조건

- 요구되는 화물창 용적(CC; Cargo Capacity) 조건

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

* L_{APT} : 선미창 길이, L_{ER} : 기관부 길이, L_{FPT} : 선수창 길이, DB_{Height} : 이중저 높이

화물창 용적의 간이 추정 예 1

$$CC = C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

* C_{CH} : 화물창 용적 계수

$$C_{CH} = \left(\frac{CC}{L \cdot B \cdot D} \right)_p$$

기존선의 값

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(5)

- 제약 조건

- 요구되는 화물창 용적(CC; Cargo Capacity) 조건

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

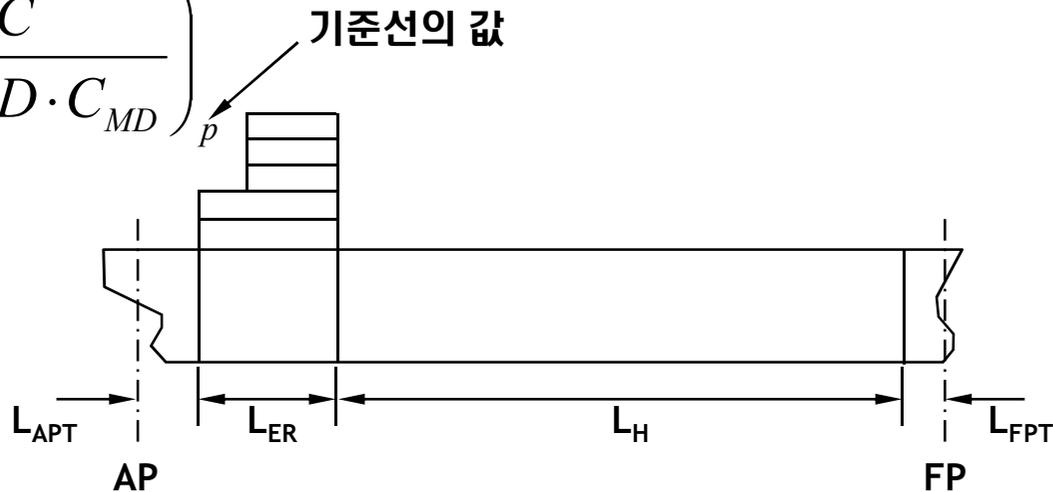
* L_{APT} : 선미창 길이, L_{ER} : 기관부 길이, L_{FPT} : 선수창 길이, DB_{Height} : 이중저 높이

화물창 용적의 간이 추정 예 2

$$CC = C_{CH} \cdot \underbrace{(L_{BP} - L_{APT} - L_{ER} - L_{FPT})}_{\text{화물창 길이 } L_H} \cdot B \cdot D \cdot C_{MD}$$

* C_{CH} : 화물창 용적 계수, C_{MD} : 갑판까지의 중앙횡단면 계수

$$C_{CH} = \left(\frac{CC}{L_H \cdot B \cdot D \cdot C_{MD}} \right)$$



상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(6)

- 제약 조건

- 최소 요구 건현 조건

$$D \geq T + \text{Freeboard}(L, B, D, C_B)$$

최소 요구 건현은 초기 단계에서 아래와 같이 개략적으로 계산할 수 있음

$$D \geq T + C_{FB} \cdot D \quad C_{FB} = \left(\frac{\text{Freeboard}}{D} \right)_p \quad \text{기준선의 값}$$

실제로는 다음과 같은 식으로부터 계산을 해야 함

ICLL 1966 요구 건현

$$\text{Freeboard} = f(L_f, D, C_B, \text{Superstructure}_{\text{Length}}, \text{Superstructure}_{\text{Height}}, \text{Sheer})$$

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(7)

- 제약 조건

- 초기 복원성 요구 조건

$$0.04B \leq GM \leq 4\pi^2(0.4B)^2 / (gTr^2)$$

* Tr: 횡동요 주기(Roll Period)

$$GM = T(0.9 - 0.3C_M - 0.1C_B) + B \left(\frac{0.08}{\sqrt{C_M}} \cdot \frac{B}{T} \right) - D \left(\frac{1.6}{L^{0.2}} \right)$$

- 조종성 관점에서의 비만 계수(Obesity Coefficient) 요구 조건

$$C_B / (L/B) \leq 0.15$$

비만 계수

- Watson & Gilfillan에 의한 C_B 추천 값

$$C_B \leq 0.70 + 0.125 \tan^{-1}((23 - 100Fn)/4)$$

선박 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델(요약)

- “개념설계 방정식”

구하는 값(설계 변수)

L, B, D, C_B
길이 폭 깊이 방형 계수

주어진 값(선주 요구 조건)

$DWT, CC_{req}, T_{max} (= T), V$
재화 중량 요구 화물창 용적 최대 흘수 선속

부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건(등호 제약 조건) → 물리적 법칙

$$\begin{aligned} L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha &= DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B) \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot NMCR \\ &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B \\ &\quad + C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \end{aligned}$$

요구되는 화물창 용적(cargo capacity) 조건(부등호 제약 조건) → 선주 요구 조건

$$CC_{req} \leq C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

- DFOC(Daily Fuel Oil Consumption)
+ 저항 추진과 관련이 있음

최소 요구 견현 조건(부등호 제약 조건) → 국제 규약
(1966 ICLL)

$$D \geq T + C_{FB} \cdot D$$

- 납기일(Delivery Date)
+ 생산 공정과 관련이 있음

목적 함수(주요 치수 선정 기준)

$$Building\ Cost = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR$$

▶ 미지수 4개, 등호 제약 조건 1개, 부등호 제약 조건 2개인 최적화 문제

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 자료를 이용한 재화 중량 160,000톤 살물선의 최적 주요 치수 결정 문제(1)

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 주요 요목

항목		실적선	설계선	비고
주 요 제 원	L _{OA}	abt. 274.00 m	max. 284.00 m 이내	
	L _{BP}	264.00 m		
	B _{mld}	45.00 m	45.00 m	
	D _{mld}	23.20 m		
	T _{mld}	16.90 m	17.20 m	
	T _{scant}	16.90 m	17.20 m	
Deadweight		150,960 ton	160,000 ton	at 17.20 m
Speed		13.5 kts	13.5 kts	90 % MCR (with 20 % SM)
M / E	TYPE	B&W 5S70MC		
	NMCR	17,450 HP × 88.0 RPM		Derating Ratio = 0.9
	DMCR	15,450 HP × 77.9 RPM		E.M = 0.9
	NCR	13,910 HP × 75.2 RPM		
F O C	SFOC	126.0 g/HP. H		NCR 기준
	TON/DAY	41.6		
Cruising Range		28,000 N/M	26,000 N/M	
중양 단면 형상		Single Hull Double Bottom/Hopper /Top Side Wing Tank	Single Hull Double Bottom/Hopper /Top Side Wing Tank	
Capacity	Cargo	abt. 169,380 m ³	abt. 179,000 m ³	Hatch Coaming 포함
	Fuel Oil	abt. 3,960 m ³		Total
	Fuel Oil	abt. 3,850 m ³		Bunker Tank Only
	Ballast	abt. 48,360 m ³		F.P 및 A.P Tank 포함

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 자료를 이용한 재화 중량 160,000톤 살물선의 최적 주요 치수 결정 문제(2)

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 추가 자료 및 기타 자료

항목	값
경하 중량(LWT)	18,269 ton
선각 중량(W_s)	15,289 ton
의장부 중량(W_o)	1,694 ton
기관부 중량(W_m)	1,281 ton
건현(F_b)	6.996 m
방형 계수(C_b)	0.8214
Admiralty 계수(C_{ad})	644.4139
선각 강재비 관련 계수(C_{PS})	972.80
의장부 비용 관련 계수(C_{PO})	20,256
기관부 비용 관련 계수(C_{PM})	7,760

기타 사항

1. 추가 제약 조건으로서 “조종성 관점에서의 비만 계수 요구 조건” 과 “Watson & Gilfillan에 의한 C_b 추천 값” 을 고려할 것

재화 중량 160,000톤 살물선의 최적 주요 치수 결정 문제에 대한 최적화 결과

Minimize ship building cost		Unit	MFD	MS	GA	HYBRID w/o Refine	HYBRID with Refine	
G I V E N	DWT	ton	160,000					
	Cargo Capacity	m ³	179,000					
	T _{max}	m	17.2					
	V	knots	13.5					
L	m	265.54	265.18	264.71	264.01	263.69		
B	m	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00		
D	m	24.39	24.54	24.68	24.71	24.84		
C _B	-	0.8476	0.8469	0.8463	0.8427	0.8420		
D _p	m	8.3260	8.3928	8.4305	8.4075	8.3999		
P _i	m	5.8129	5.8221	5.7448	5.7491	5.7365		
A _E /A _O	-	0.3890	0.3724	0.3606	0.3618	0.3690		
Building Cost	\$	59,889,135	59,888,510	59,863,587	59,837,336	59,831,834		
Iteration No	-	10	483	96	63	67		
CPU Time	sec	4.39	209.58	198.60	184.08	187.22		

* MFD: Method of feasible directions, MS: Multi-start local optimization method, GA: Genetic algorithm, HYBRID: Global-local hybrid optimization method

* 테스트 시스템: Pentium 3 866MHz, 512MB RAM

Ship Class의 구현 예(1)

```
class Ship
{
public:
    Ship();
    virtual ~Ship();

    // 선주 요구 조건(Given)
    double m_fDWT;
    double m_fCCrequirement;
    double m_fTmax;
    double m_fVs;

    // 선박 주요 치수(Find)
    double m_fL;
    double m_fB;
    double m_fD;
    double m_fCb;

    double m_fCC;
    double m_fFB;
    double m_fDisplacement;
    double m_fLWT;

    // 기준선 정보로부터 계산되는 변수
    double m_fAppendageFactor;
    double m_fCs;
    double m_fCo;
    double m_fCma;
    double m_fCch;
    double m_fCfb;
    double m_fCps;
    double m_fCpo;
    double m_fCpm;

    // 계속
};
```

```
// 재화 중량
// 요구 화물창 용적
// 흘수
// 선속 in Knots

// 수선간 길이(LBP)
// 형 폭(Bmld)
// 형 깊이(Dmld)
// 방형 계수(Block Coefficient)

// 화물창 용적
// 건현
// 배수량
// 경하 중량(Light Weight)

// Appendage Factor(1 + alpha)
// 선각 중량 계수
// 의장부 중량 계수
// 기관부 중량 계수
// 화물창 용적 계수
// 건현 계수
// 건조비 추정을 위한 선각 중량 관련 계수
// 건조비 추정을 위한 의장부 중량 관련 계수
// 건조비 추정을 위한 기관부 중량 관련 계수
```

Ship Class의 구현 예(2)

```
class Ship
{
public:
    // 선박 주요 치수에 대한 상하한값
    double m_fLower, m_fUpper;
    double m_fBlower, m_fLupper;
    double m_fDlower, m_fDupper;
    double m_fCblower, m_fCbupper;

    void CalculateParentShipData();
    double CalculateBuildingCost();
    double CalculateWS();
    double CalculateWO();
    double CalculateWM();
    double CalculateCC();
    double CalculateFB();

    double BuoyancyDisplacementCondition();
    double CCRequirementCondition();
    double FBRequirementCondition();
    double ObesityCoefficientCBCCondition();
    double WGCBCCondition();
    void DVUpperLowerCondition(int DVNo, double* CF);
};

// 수선간 길이에 대한 하/상한값
// 형 폭에 대한 하/상한값
// 형 깊이에 대한 하/상한값
// 방형 계수에 대한 하/상한값

// 기준선 정보로부터 관련 계수를 계산하는 함수
// 건조비를 계산하는 함수
// 선각 중량을 계산하는 함수
// 의장부 중량을 계산하는 함수
// 기관부 중량을 계산하는 함수
// 화물창 용적을 계산하는 함수
// 견현을 계산하는 함수

// 부력-중량 평형 조건을 계산하는 함수
// 화물창 요구 조건을 계산하는 함수
// 견현 요구 조건을 계산하는 함수
// 조종성 관점에서의 비만 계수 요구 조건
// Watson & Gilfillan에 의한 Cb 추천값
// 설계 변수의 상하한값에 대한 조건을 계산하는 함수
```

중량 부력 평형 조건(등호 제약 조건)

C_s : 선박 중량 계수
 C_o : 의장부 중량 계수
 C_{ma} : 기관부 중량 계수

부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건 (등호 제약 조건)

$$\begin{aligned}
 L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha &= DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B) \\
 &= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot NMCR \\
 &= DWT_{given} + \underline{C_s \cdot L^{1.6} (B + D)} + \underline{C_o \cdot L \cdot B} \\
 &\quad + \underline{C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3}
 \end{aligned}$$

C_s, C_o, C_{power} 는 기준선의 자료로부터 계산되는 값

ex) $C_s = \frac{W_s}{L^{1.6} (B + D)}$

$C_o = \frac{W_o}{L \cdot B}$

$C_{power} = \frac{W_m}{(L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3}$

W_s : 선박 중량
 W_o : 의장부 중량
 W_{ma} : 기관부 중량

중량 부력 평형 조건(등호 제약 조건)

- 선박 저항을 계산할 수 있는 경우

C_S : 선박 중량 계수
 C_O : 의장부 중량 계수
 C_{ma} : 기관부 중량 계수

부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건 (등호 제약 조건)

$$\begin{aligned}
 L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha &= DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B) \\
 &= R_T(L, B, D, C_B) \\
 &= DWT_{given} + C_S \cdot L^{1.6} (B + D) + C_O \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot \mathbf{NMCR}
 \end{aligned}$$

→ L, B, D, C_B가 주어졌을 때 추정할 저항으로부터 NMCR 추정 가능

C_S, C_O, C_{power} 는 기준선의 자료로부터 계산되는 값

ex)
$$C_S = \frac{W_S}{L^{1.6} (B + D)}$$

$$C_O = \frac{W_O}{L \cdot B}$$

$$C_{ma} = \frac{W_m}{NMCR}$$

W_S : 선박 중량
 W_O : 의장부 중량
 W_m : 기관부 중량

→추정한 저항 값

$$EHP = \mathbf{R_T} \cdot V$$

$$DHP = EHP / \eta_D$$

$$BHP = DHP / \eta_T$$

$$NCR = BHP \cdot (1 + Sea\ Margin) / 100$$

$$MCR = NCR / Engine\ Margin$$

$$NMCR = MCR / Engine\ Margin$$

목적 함수

목적 함수(주요 치수 선정 기준)

$$\begin{aligned} \text{Building Cost} &= C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR \\ &= C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B \\ &\quad + C_{PM} \cdot C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \end{aligned}$$

- C_{PS} : 선박 강재비 관련 계수
- C_{PO} : 의장부 비용 관련 계수 ← Given value
- C_{PM} : 기관부 비용 관련 계수

기타 제약 조건식

요구되는 화물창 용적(cargo capacity) 조건 (부등호 제약 조건)

$$CC_{req} \leq C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

(CC_{req} : 화물창 용적) (C_{CH} : 화물창 용적 계수)

최소 요구 건현 조건 (부등호 제약 조건)

$$D \geq T + \underline{\text{Freeboard}}$$

→ 건현 계산 프로그램을 이용하여 계산 가능

given

From 기준선

조종성 관점에서의 비만 계수(Obesity Coefficient) 요구 조건

$$C_B / (L/B) \leq 0.15$$

Watson & Gilfillan에 의한 CB 추천 값

$$C_B \leq 0.70 + 0.125 \tan^{-1} \left((23 - 100Fn) / 4 \right)$$

$$\left(\text{Froude Number : } Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \right)$$

상선의 최적 주요 치수 결정 문제 (정리)

구하는 값 (설계 변수)

L, B, D, C_B
길이 폭 깊이 방형 계수

주어진 값 (선주 요구 조건)

$DWT, CC_{req}, T_{max} (= T), V$
재화 중량 요구 화물창 용적 최대 흘수 선속

부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건 (등호 제약 조건)

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha = DWT_{given} + LWT(L, B, D, C_B)$$

$$= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot \boxed{NMCR}$$

$= f_1(L, B, D, C_B)$

요구되는 화물창 용적(cargo capacity) 조건 (부등호 제약 조건)

$$CC_{req} \leq C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

최소 요구 건현 조건 (부등호 제약 조건)

$$D \geq T + \boxed{\text{Freeboard}} = f_2(L, B, D, C_B)$$

건현 계산 프로그램 사용

목적 함수(주요 치수 선정 기준)

$$\text{Building Cost} = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot \boxed{NMCR}$$

저항 추정 프로그램 사용

➔ 미지수 4개, 등호 제약 조건 1개, 부등호 제약 조건 2개인 최적화 문제

주의 사항

- **기준선 자료를 잘 분석하여 필요한 계수를 구한다.**
 - 길이 비율을 이용하여 견현 계산, 저항 및 마력 추정 시 필요한 값을 기준선 자료로부터 얻는다.
 - 길이 or 넓이 or 부피 등의 차원에 유의한다.
- **교재에 나와 있는 Ship Class를 참고하여 필요한 계수를 class 내부에 선언하고, 계수를 구하는 함수를 구현한다.**
- **앞서 설명한 제약 및 부등호 제약 조건식을 사용하여 건조비를 최소로 하는 선박의 주요 치수를 결정한다.**

최적 주요 치수 결정을 위한 실적선 데이터

302K DWT Class VLCC

항 목		실 적 선	설 계 선	비 고
주요제원	Loa	abt. 330.30 m	21.00 m	최적의 제원 선정할 것
	Lbp	314.00 m		
	B,mld	58.00 m		
	Depth,mld	31.00 m		
	d(design)	20.90 m		
	d(scant.)	22.20 m		
Deadweight		301,000 Ton	320,000 Ton	
Speed		15.0 Knots	16.0 Knots	at design draft, 90% MCR(with 15% Sea Margin)
M/E	TYPE	B&W 7S80MC		
	MCR	32,000 PS x 74.0 RPM		
	NCR	28,800 PS x 71.4 RPM		
FOC	SFOC	122.1 Gr/BHP.h		NCR 기준
	TON/DAY	84.4 (HFO)		
Cruising range		26,000 N/M	26,500 N/M	
중앙단면형상		Double side / Double bottom	Double side / Double bottom	
Capacity	Cargo Hold	abt. 345,500 m ³	abt. 360,000 m ³	
	H.F.O.	abt. 7,350 m ³		
	D.O.	abt. 490 m ³		
	Fresh Water	abt. 460 m ³		
	Ballast	abt. 103,000 m ³		Peak Tanks 포함