

[2009][02]

Innovative Ship Design -Resistance estimation-

March 2009

Prof. Kyu-Yeul Lee

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

Naval Architecture & Ocean Engineering



Seoul
National
Univ.



SDAL

Advanced Ship Design Automation Lab.
<http://asdal.snu.ac.kr>



(Review)선박 주요 치수(L,B,D,T,CB) 결정 문제의 수학적 모델

☑ 부력(Buoyancy)-중량(Weight) 평형 조건 <물리 법칙>

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + LWT \dots (2)$$

☑ 요구 화물창 용적 V_{H_req} <선주 요구사항>

$$V_{H_req} = f(L, B, D, C_B) \dots (3)$$

Given: DWT, T

(선주 요구조건)

Find : L, B, D, C_B, LWT

미지수 5개, 식 2개의 비선형 부정방정식

⇒ 미지수 5개중 2개를 가정하면 비선형 방정식을 풀 수 있다.

먼저 식 (2)의 우변이 주어져야 방정식을 풀 수 있으므로 LWT부터 가정한다.



LWT는 어떻게 가정할 수 있을까?



(Review) 선박 주요 치수(L,B,D,T,C_B) 결정 문제의 수학적 모델

-LWT추정 방법; (1) DWT와 Displacement 비율로 추정

부력(Buoyancy)-중량(Weight) 평형 조건 <물리 법칙>

요구 화물창 용적 <선주 요구사항>

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + LWT \dots (2)$$

$$V_{H_req} = f(L, B, D, C_B) \dots (3)$$

Given: DWT, T

(선주 요구조건)

Find: L, B, D, C_B, LWT



LWT는 어떻게 가정할 수 있을까?

방법 ① : LWT를 기준선의 배수량으로부터 추정

기준선의 DWT와 Displacement 비율을 설계선에도 같이 적용하여 설계선의 배수량을 추정한다.

$$\frac{DWT_B}{\Delta_B} = \frac{DWT_{given}}{\Delta} \rightarrow \Delta = \frac{DWT_B}{\Delta_B} \times DWT_{given}$$

아래첨자B : 기준선(Basis Ship)

$$\therefore L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = \Delta \dots (2.1)$$

미지수 4개(L,B,D,C_B), 식 2개((2.1),(3)) 의 비선형 부정방정식

⇒ 무수히 많은 해가 있다. 따라서 그 해를 선정하는 기준이 있어야 한다.

⇒ "목적함수"



(Review) 선박 주요 치수 결정 문제의 수학적 모델

-LWT추정 방법; (2) LWT는 L·B·D에 비례한다고 가정

부력(Buoyancy)-중량(Weight) 평형 조건 <물리 법칙>

요구 화물창 용적 <선주 요구사항>

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + LWT \dots (2)$$

$$V_{H_req} = f(L, B, D, C_B) \dots (3)$$

Given: DWT, T

(선주 요구조건)

Find: L, B, D, C_B, LWT



LWT는 어떻게 가정할 수 있을까?

방법 ②: 경하중량(LWT)이 L·B·D(선체의 Volume)에 비례한다고 가정

$$LWT \propto L \cdot B \cdot D$$

$$LWT = C_{LWT} L \cdot B \cdot D, C_{LWT} \text{는 기준선으로부터 구함}$$

$$\therefore L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + C_{LWT} \cdot L \cdot B \cdot D \dots (2.2)$$

따라서 식 (2.2)와 (3)은 미지수 4개 (L, B, D, C_B), 식 2개의 비선형 부정방정식 이다.

⇒ 목적 함수를 최소화하는 (ex. 건조비 최소) 최적화 문제로 풀 수 있다.



(Review) 선박 주요 치수 (L,B,D,T,C_B) 결정 문제의 수학적 모델

-LWT추정 방법; (3) LWT를 선각중량 W_s, 의장중량 W_o, 기관부 중량 W_m으로 세분화

부력(Buoyancy)-중량(Weight) 평형 조건 <물리 법칙>

요구 화물창 용적 <선주 요구사항>

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = DWT_{given} + LWT \dots (2)$$

$$V_{H_req} = f(L, B, D, C_B) \dots (3)$$

Given: DWT, T
(선주 요구조건)

Find : L, B, D, C_B, LWT



LWT는 어떻게 가정할 수 있을까?

방법 ③ 경하중량(LWT)을 선각중량 W_s, 의장중량 W_o, 기관부 중량 W_m으로 세분화

$$W_s = C_s \cdot L^{1.6} (B + D),$$

$$W_o = C_o \cdot L \cdot B,$$

$$W_m = C_m \cdot NMCR$$

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

$$LWT = W_s + W_o + W_m$$

$$L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot C_\alpha = DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6} (B + D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \dots (2.3)$$

따라서 식 (2.3)과 (3) 은 미지수 3개 (L, B, D, C_B), 식 2개 의 비선형 부정방정식 이다.

⇒ 목적 함수를 최소화하는 (ex.건조비 최소) 최적화 문제로 풀 수 있다.



(Review) 선박 주요 치수 (L,B,D,T,C_B) 결정 문제의 수학적 모델

$$W_m = C_m \cdot NMCR$$

NMCR을 추정하기 위해서는 먼저 DHP를 알아야 한다.

DHP는 저항 및 마력 추정을 통해 결정해야 하나

초기 단계에서는 정수중(Calm water)의 DHP를 다음의 가정을 통해 개략적으로 추정할 수 있음

$$DHP_{Calm\ water} \propto \Delta^{2/3} \cdot V^3 \quad \text{라고 가정하면,} \quad DHP_{Calm\ water} = C_{DHP} \Delta^{2/3} \cdot V^3$$

이때, $\frac{1}{C_{DHP}} = C_{ad}$ 라 하고 "Admiralty 계수" 라고 한다.

$$C_{ad} = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V^3}{DHP_{Calm\ water}}$$

- C_{ad}의 분자 $\Delta^{2/3} \times V^3$ 은 마력에 비례하므로 Admiralty계수는 **일종의 추진 계수**에 비례하는 계수임
- 주요치수가 결정 되면, DHP는 저항과 추진계수를 상세히 추정해 결정 해야 한다. (2주차 강의 내용)



(Review) DHP와 NMCR과의 관계

① BHP (Brake Horse Power) (In Calm Water)

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

② NCR (Normal Continuous Rating)

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

③ DMCR (Derated Maximum Continuous Rating)

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

④ NMCR (Nominal Maximum Continuous Rating)

$$NMCR = \frac{MCR}{\text{Derating ratio}}$$

$$\begin{aligned} \therefore NMCR &= \frac{1}{\eta_T} \cdot \left(1 + \frac{\text{Sea Margine}}{100}\right) \cdot \frac{1}{\text{Engine Margin}} \cdot \frac{1}{\text{Derating ratio}} \cdot DHP \\ &= C_1 \cdot DHP \end{aligned}$$



(Review) 선박 주요 치수 (L,B,D,T,C_B) 결정 문제의 수학적 모델

$$W_m = C_m \cdot NMCR$$

$$NMCR = C_1 \cdot DHP$$

$$DHP_{Calm\ water} = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V^3}{C_{ad}}$$

$$NMCR = \frac{C_1}{C_{ad}} \Delta^{2/3} \cdot V^3$$

$$\therefore W_m = C_m \cdot \frac{C_1}{C_{ad}} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3, \quad C_m \cdot \frac{C_1}{C_{ad}} = C_{power} \text{ 라 하면}$$

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

- 기관마력은 주요치수가 일단 선정되면, 좀 더 상세한 기관마력을 추정할 수 있음
- 즉 저항 추정 -> 마력 추정 -> MCR추정 -> 프로펠러 효율 추정 -> 마력 추정
- 이에 따라 기관부 중량이 변하고 다시 경하중량이 변하게 되어 변경된 값으로 다시 추정해야 함



(Review) 선박 주요 치수 (L,B,D,T,C_B) 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)

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

물리적 제한 조건

→ **부력(buoyancy)-중량(Weight) 평형 조건**(등호 제약 조건)

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

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

$$+ C_{power} \cdot (L \cdot B \cdot T \cdot C_B)^{2/3} \cdot V^3 \dots (2.3)$$

선주 요구 조건(인위적 제한 조건)

→ **요구되는 화물창 용적(cargo capacity) 조건**(등호 제약 조건)

$$V_{H_req} = C_H \cdot L \cdot B \cdot D \dots (3.1)$$

- DFOC(Daily Fuel Oil Consumption)
+ 저항 추진과 관련이 있음
- 납기일(Delivery Date)
+ 생산 공정과 관련이 있음

국제 규약 조건

→ **최소 요구 건현 조건(1996ICLL)**(부등호 제약 조건)

$$D \geq T + C_{FB} \cdot D \dots (4)$$

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(L,B,D,C_B), 등호 제약 조건 2개 ((2.3),(3.1)) 부등호 제약 조건 1개((4))인 최적화 문제

Estimation of Resistance (저항 추정)

2009.03.02

서울대학교 조선해양공학과
이규열



Seoul
National
Univ.



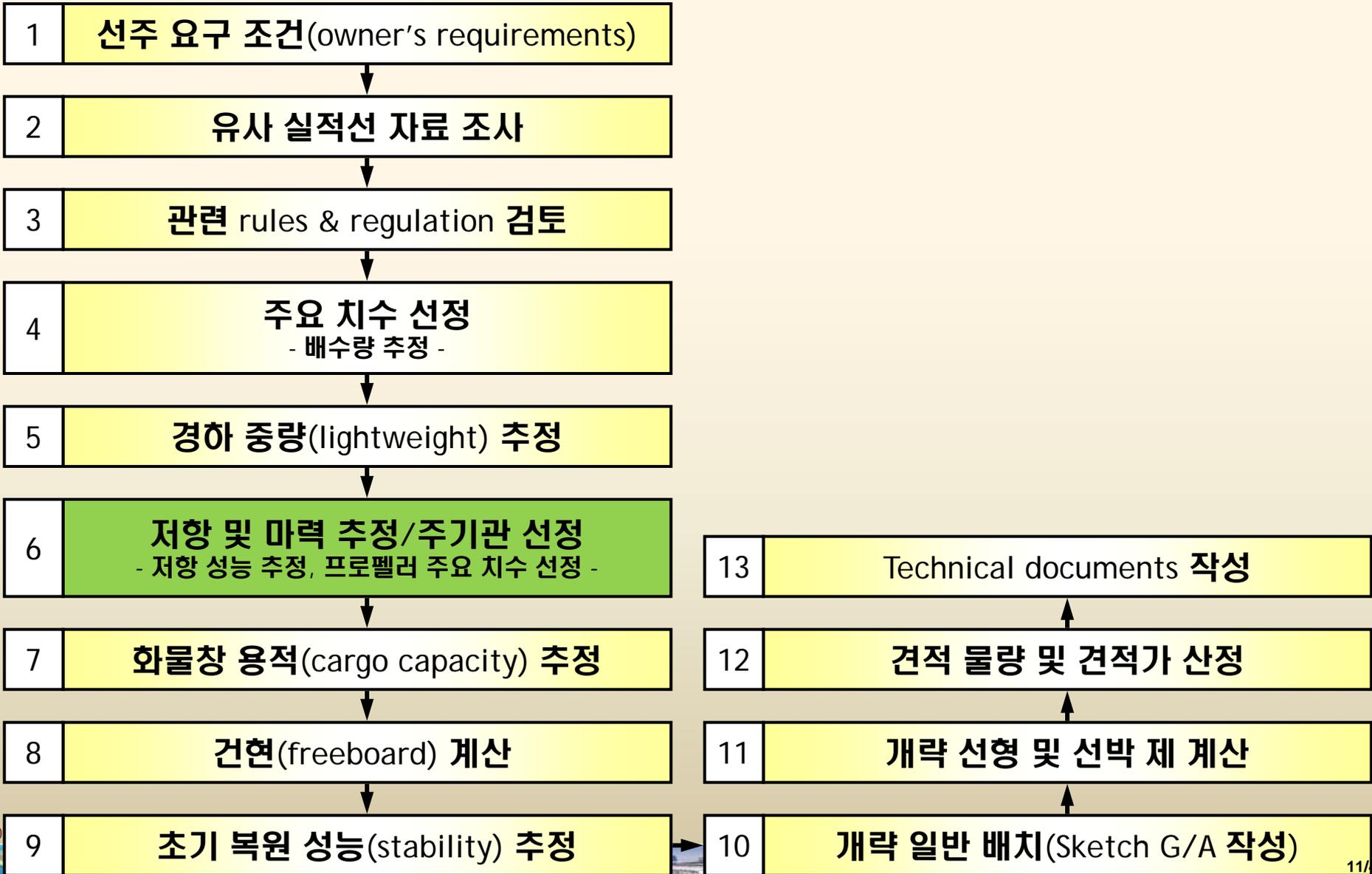
SDAL

Advanced Ship Design Automation Lab.
<http://asdal.snu.ac.kr>



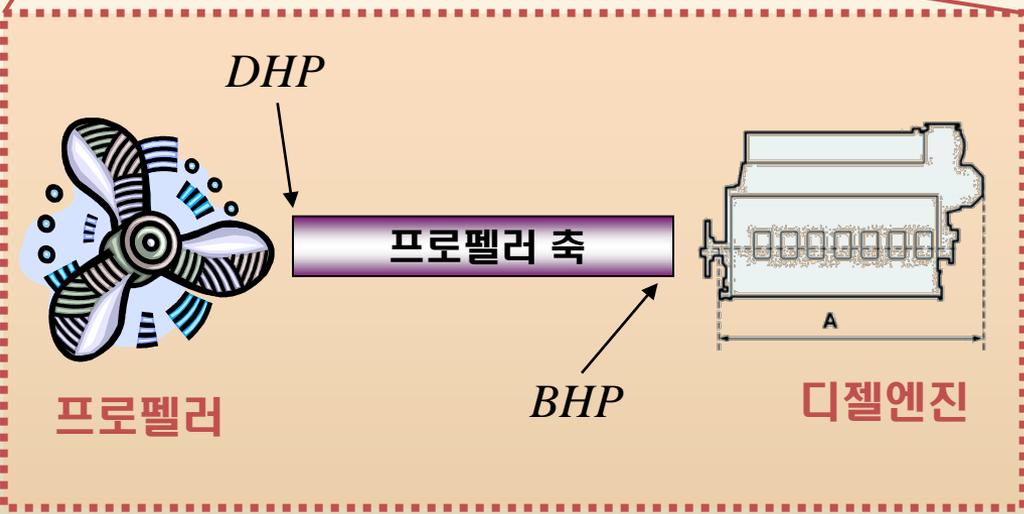
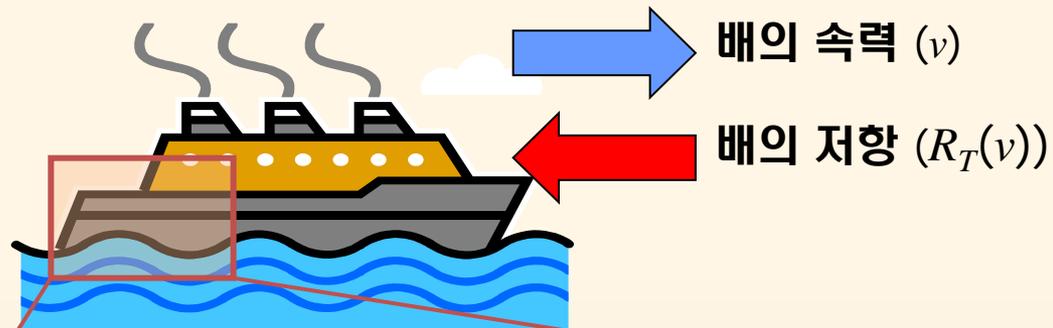
선박 개념 설계의 순서

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



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)

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



6. 저항, 마력 추정(2)

- 주기관 마력 추정

- Admiralty계수에 의한 주기관 마력 개략 추정

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

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

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



저항(Resistance)의 의미 및 분류

☑ 저항

- 선박이 일정한 속력으로 움직이기 위해서 이겨내야 하는 힘
- 여러 가지 성분으로 구성되어 있음

☑ Froude에 의한 저항의 분류

- 전저항(R_T) = 마찰 저항(R_F) + 잉여 저항(R_R) + 실선 상관 수정량(ΔR_F)

☑ Hughes에 의한 저항의 분류

- 전저항(R_T) = 점성 저항(R_V) + 조파 저항(R_W)
- 점성 저항: 선체 표면을 흐르는 물의 점성 때문에 생기는 저항
- 조파 저항: 선박의 전진으로 인해 선체 주위의 물결의 발생에 소요되는 에너지에 상당하는 저항



점성 저항 및 마찰 저항의 계산 방법(1)

1) 점성 저항 (R_V)

$$R_V = (1 + k)R_F + \Delta R_F$$

2) 마찰 저항 (R_F)

(R_F) : 선체 부분의 침수 면적과 같은 면적을 갖는 평판의 마찰 저항

$$R_F [kN] = 1/2 \rho C_F \cdot V_2 \cdot S$$

여기서,

ρ : 해수의 밀도 = 1.025(Mg/m³)

C_F : 평판 마찰 저항 계수

$V[m/s]$: 선박의 속력

$S[m^2]$: 침수 표면적



점성 저항 및 마찰 저항의 계산 방법(2)

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건	7. 화물창 용적 추정
	2. 유사 실적선 조사	8. 견현 계산
	3. 관련 Rule	9. 복원 성능 추정
	4. 주요 치수 선정	10. 개략 일반배치
	5. 경하 중량 추정	11. 개략 선형 및 선박 재 계산
	6. 저항 및 마력 추정 /주기관 선정	12. 견적 물량 및 견적가 산정
		13. Technical documents 작성

3) 평판 마찰 저항 계수(C_F)

- ITTC(International Towing Tank Committee) 1957 추정식 :

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2}$$

여기서,

$$R_n = V \cdot L / \nu \quad : \text{Reynolds Number}$$

$$\nu \quad : \text{동점성 계수} = 1.1883 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) \text{ at } 15^\circ \text{ C Sea Water}$$

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



점성 저항 및 마찰 저항의 계산 방법(3)

- Schoenherr 의 마찰 저항 계수 추정식 :

$$0.242 / \sqrt{C_F} = \log_{10}(R_n \cdot C_F)$$

근사적으로 $C_F = 0.463 \cdot \log_{10} R_n^{-2.6}$

개 념 설 계	1. 선주 요구 조건	7. 화물창 용적 추정
	2. 유사 실적선 조사	8. 견현 계산
	3. 관련 Rule	9. 복원 성능 추정
	4. 주요 치수 선정	10. 개략 일반배치
	5. 경하 중량 추정	11. 개략 선형 및 선박 재 계산
	6. 저항 및 마력 추정 / 주기관 선정	12. 견적 물량 및 견적가 산정
		13. Technical documents 작성

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

4) 표면 조도에 의한 마찰 저항의 증가 (ΔR_F)

- 완전히 매끄러운 표면과 비교해서 표면 조도에 기인하는 마찰 저항의 증가분을 의미
- 모형선-실선 상관 수정량(Model-Ship Correlation Allowance)에 포함되는 것으로 간주
- 모형선-실선 상관 수정량이란 수조 모형 시험으로부터 추정된 실선의 저항값을 실선 시운전 계측 결과로부터 결정된 실선 저항과 일치하도록 보정하는 데 필요한 양

5) 조파 저항 $R_W = f(L/B, B/T, C_b, F_n, LCB)$

조파 저항은 선박의 형상에 따라 변함



Froude와 Hughes에 의한 저항 계산 방법

2-D (Froude) method $C_{RS}=C_{RM}$

3-D (Hughes) method $C_{WS}=C_{WM}$

Measured Values [V_M, RT_M]

$$CT_M = RT_M / (0.5 r_M S_M V_M^2)$$

$$CF_M = 0.075 / (\log Rn_M - 2)^2$$

$$CR_M = CT_M - CF_M$$

$$CW_M = CT_M - CF_M (1+k)$$

$$CF_S = 0.075 / (\log Rn_S - 2)^2$$

$$CT_S = CR_S + CF_S + C_A + C_{AA}$$

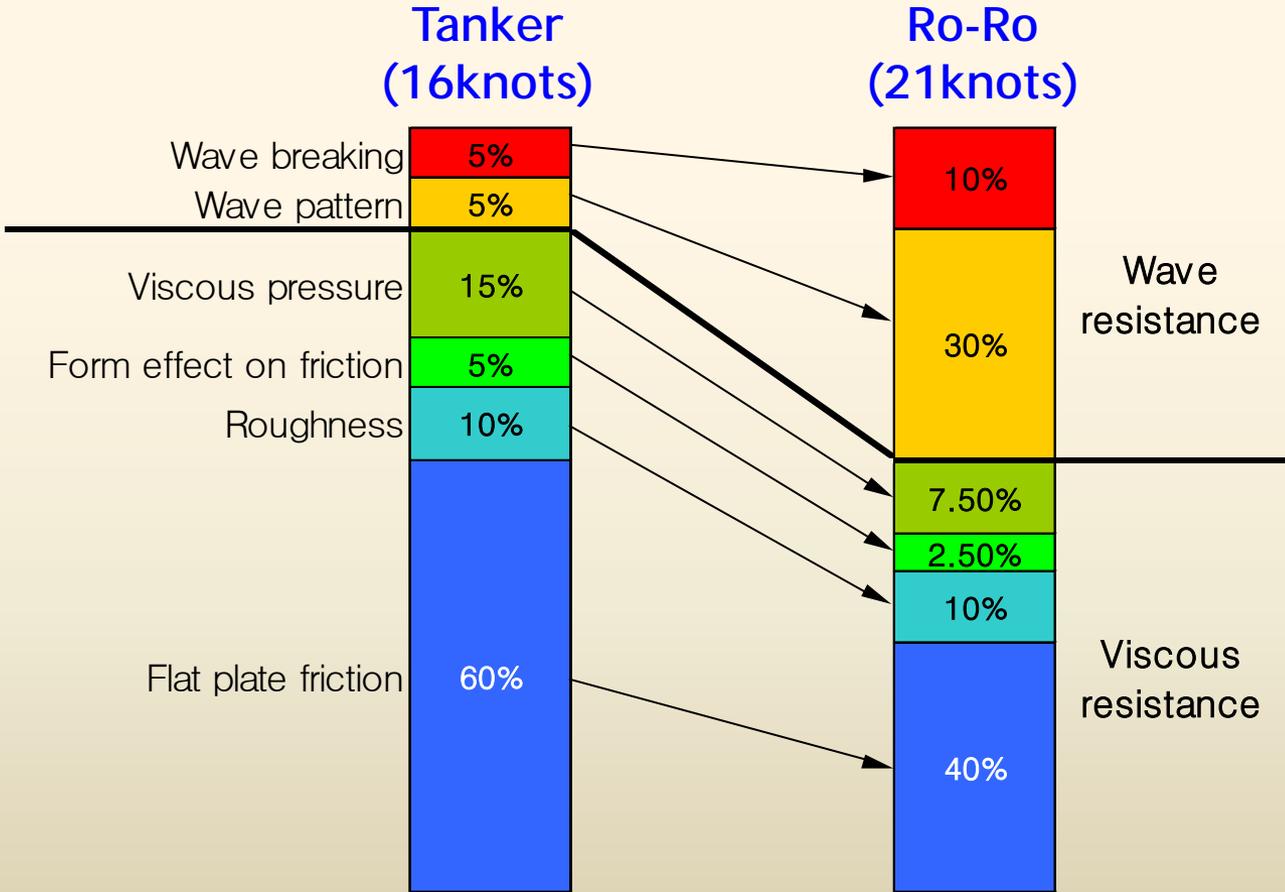
$$CT_S = CW_S + CF_S (1+k) + \Delta CF + C_{AA}$$

$$RT_S = CT_S \cdot 0.5 r_S S_S V_S^2$$

$$EHP = RT_S V_S$$

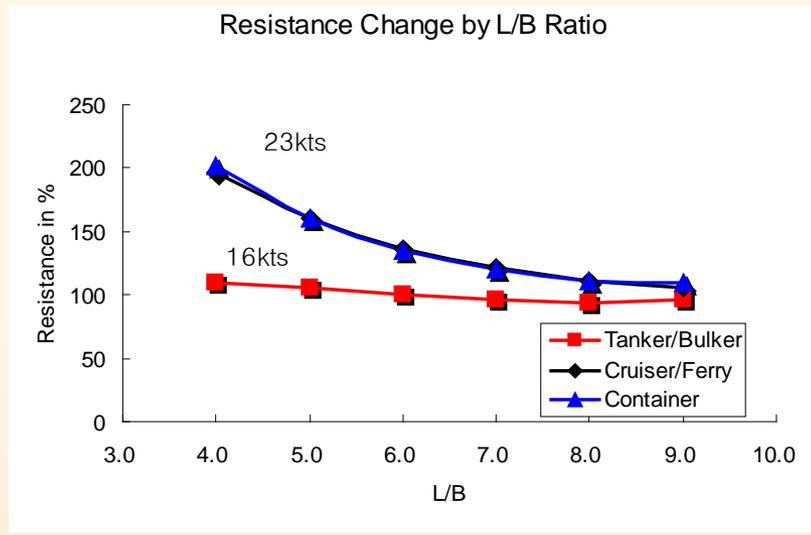


선종에 따른 저항의 성분별 분포도

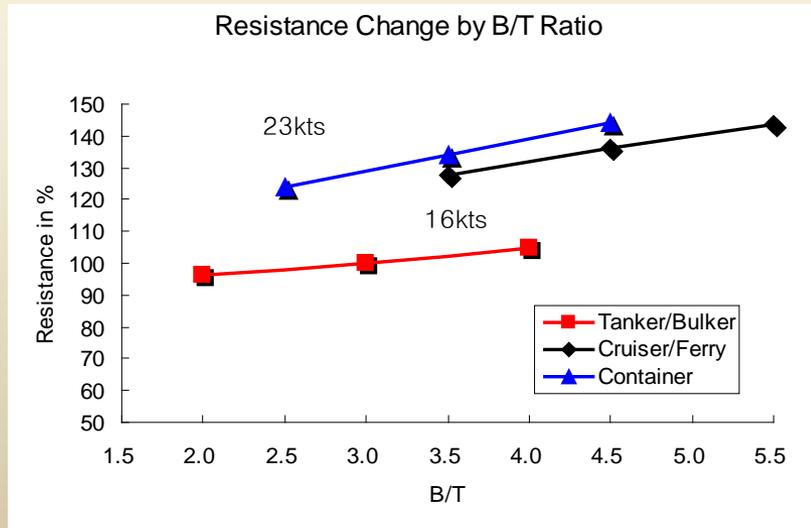


주요 치수에 따른 저항의 변화

☑ L/B의 값이 증가할 수록
(선형이 날씬할 수록) 저항
이 감소함



☑ B/T의 값이 증가할 수록
(선형이 뚱뚱할 수록) 저항
이 증가함



초기 단계에서의 저항 추정

주요 치수의 결정

부력 - 중량 일치 조건

$$\Delta = L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \cdot (1 + \alpha) = LWT + DWT$$

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

$$W_O = C_O \cdot L \cdot B$$

$$W_M = C_M \cdot NMCR$$

선체의 저항



기관 출력

* 초기 단계에서는 모형선 실험을 할 수 없으므로 추정 식을 이용하여 저항을 추정해야 한다.

* W_S : 선각 중량

* W_O : 의장 중량

* W_M : 기관 중량



선체 저항과 기관 출력의 관계

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

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

$$BHP = DHP / \eta_T$$

$$DHP = EHP / \eta_D$$

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_O, \quad \eta_H = \frac{1-t}{1-w}$$

$$EHP = R_T \cdot V$$

$$R_T = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_T$$

$$C_T = C_F + C_R + C_A \quad \rightarrow \text{Froude 방법, 1957 ITTC 방법}$$

$$C_T = (1+k)C_F + C_W + \Delta C_F + \Delta C_A \quad \rightarrow \text{Hughes 방법, 1978 ITTC 방법}$$

MCR: 최대 연속 마력 (Maximum Continuous Rating)
 NCR: 연속 상용 마력 (Normal Continuous Rating)
 BHP: 제동 마력 (Brake Horse Power)
 DHP: 전달 마력 (Delivered Horse Power)
 EHP: 유효 마력 (Effective Horse Power)
 R_T : 전저항 (Total Resistance)
 S: 침수 표면적
 V: 속력
 C_T : 전저항 계수
 $1+k$: 형상 계수 (Form Factor)
 η_T : 프로펠러 전달 계수 (Transmission Efficiency)
 η_D : 추진 계수 (Propulsive Efficiency)
 η_O : 프로펠러 효율 (Propeller Efficiency)
 η_H : 선각 효율 (Hull Efficiency)
 η_R : 상대 회전 효율 (Relative Rotative Efficiency)
 t: 추력 감소 계수 (Thrust Deduction Fraction)
 w: 반력 계수 (Wake Fraction)



통계적 방법에 의한 저항 및 마력의 추정

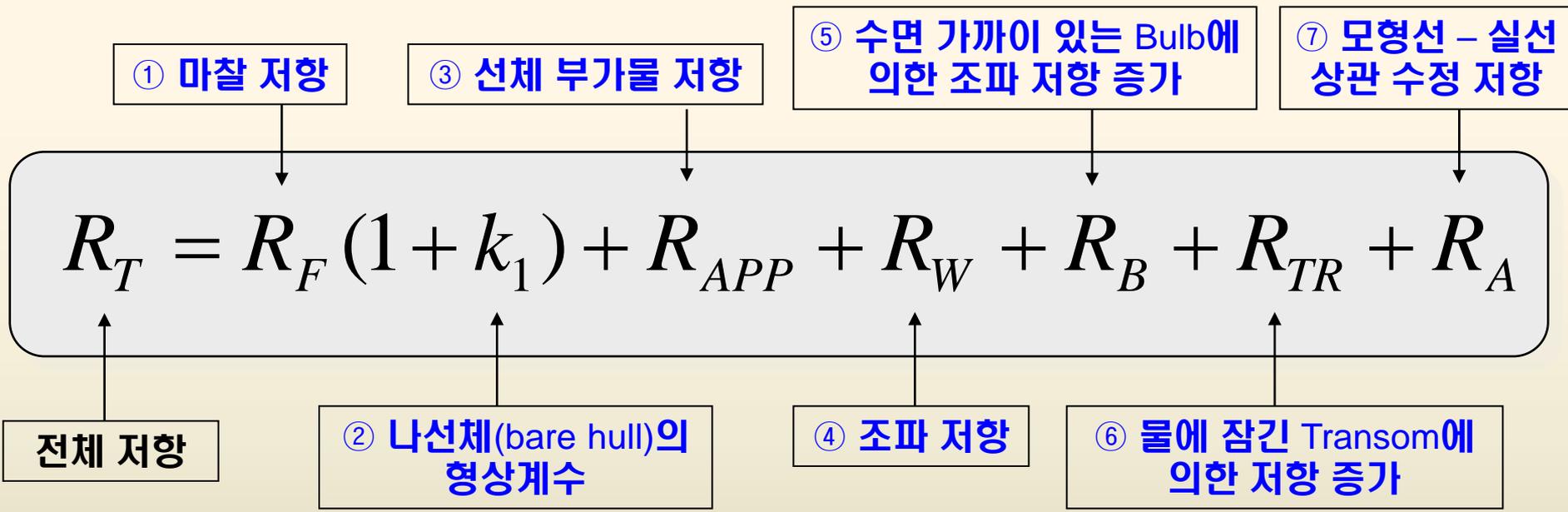
- ☑ 초기 설계 단계에서는 통계적인 방법을 이용하여 저항 및 마력을 개략적으로 추정함

- ☑ 저항 및 마력 추정을 위한 통계적 방법
 - Holtrop & Mennen 방법
 - 기준선 자료에 의한 저항 성능 추정



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

☑ Holtrop & Mennen이 제안한 추정식



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ① 마찰 저항

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

$$R_F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_F S_{bh}$$

C_F : 마찰계수 (ITTC 1957 추정식)

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2}$$

$$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

R_n 를 구할 때는 LWL (Length at Waterline)을 사용한다.

S_{bh} : 나선체 (Bare Hull)의 침수 표면적

$$S_{bh} = L(2T + B) \sqrt{C_M} (0.4530 + 0.4425C_B - 0.2862C_M - 0.003467B/T + 0.3696C_{WP}) + 2.38A_{BT} / C_B$$

이들 형상계수들은 모두가 수선 길이 L_{WL} 을 기준으로 한다.



Reynolds Number(Rn)의 의미

$$Rn = \frac{VL}{\nu}$$

Rn (Reynolds Number) : 유동의 관성력과 점성력의 비를 나타내는 무차원 수. 점성 유동의 특성을 나타냄

V : 유동 또는 물체의 특성 속도

L : 유동 또는 물체의 특성 길이

ν : 유체의 동점성 계수

$\nu =$ 10도 해수: 1.35×10^{-6}

15도 해수: 1.19×10^{-6}



Froude Number(Fn)의 의미

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Fn (Froude Number) : 유동의 관성력과 중력의 비를 나타내는 무차원 수. 표면파에 의한 물리적 특성을 잘 나타냄

V : 유동 또는 물체의 특성 속도

L : 유동 또는 물체의 특성 길이

g : 중력 가속도

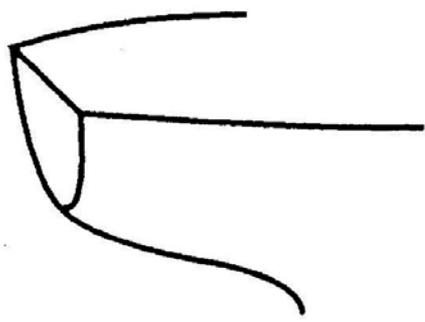


선미부의 형상

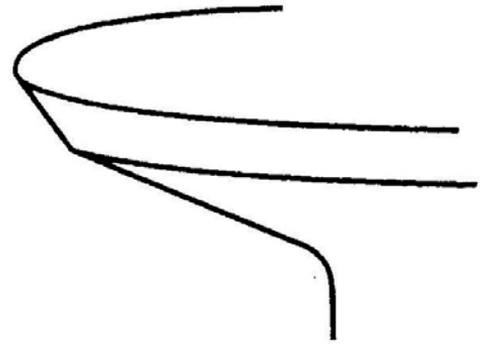
선미부의 형상



(A) 순양함형 선미



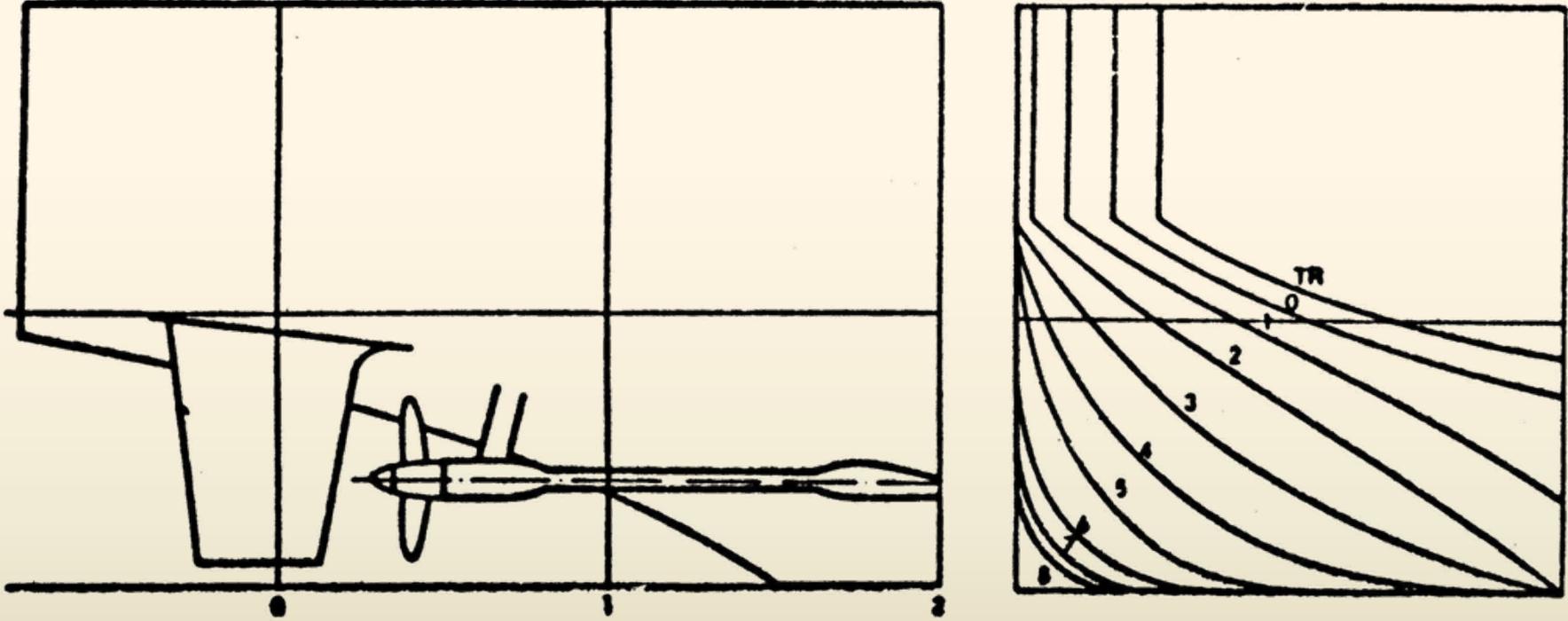
(B) 트랜섬 선미



(C) 카운터 선미



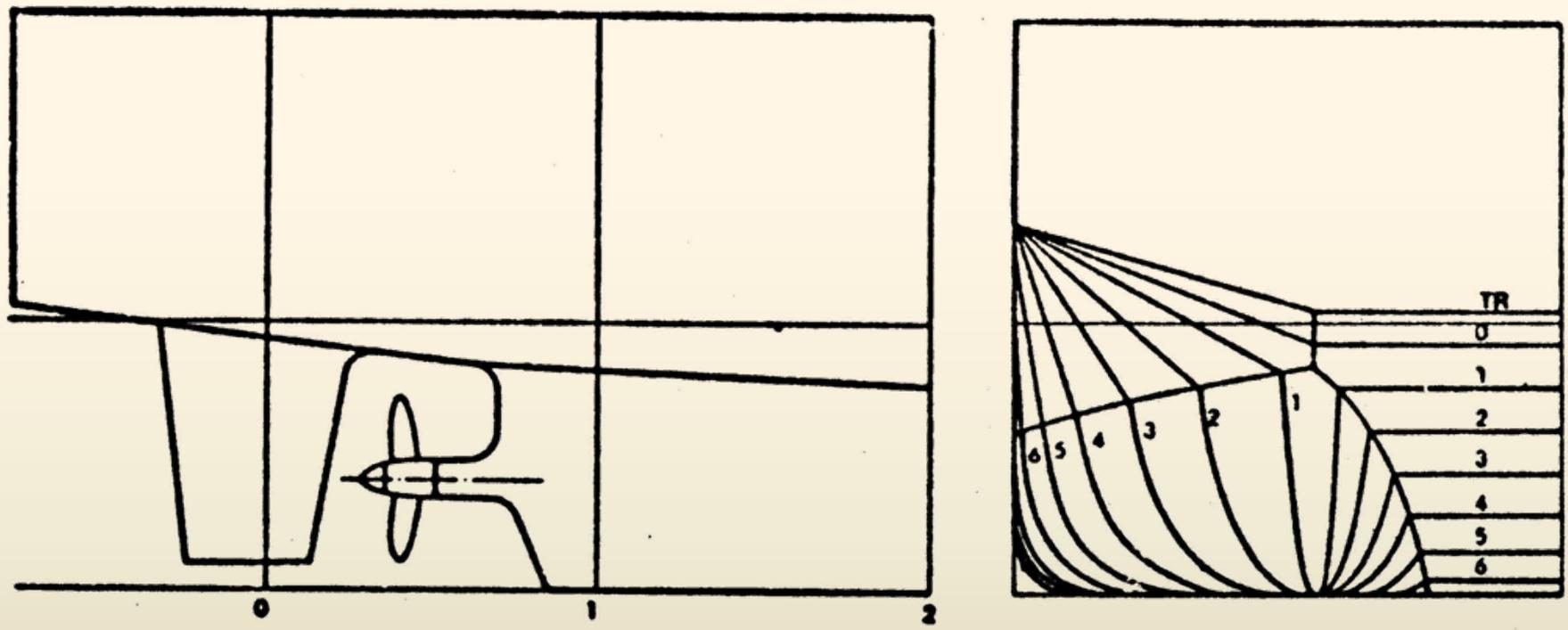
선체 부가물



Conventional twin-screw after body hull form



선체 부가물



Twin-screw twin-skeg after body hull form



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ② 나선체(bare hull)의 형상 계수 $R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$

$$1 + k_1 = 0.93 + 0.487118 \cdot C_{14} (B / L)^{1.06806} (T / L)^{0.46106} (L / L_R)^{0.121563} \\ \times (L^3 / \nabla)^{0.36486} \cdot (1 - C_P)^{-0.60247}$$

C_F : 선미 단면 형상을 정의하는 계수

$$C_{14} = 1 + 0.011 C_{stern}$$

C_{stern} = -25 Pram with gondola
 = -10 V형 단면
 = 0 보통형 단면
 = 10 U형 단면

L_R : Length of run

L_R 이 알려져 있지 않은 경우에는 다음의 경험식으로 추정할 수 있다.

$$L_R / L = 1 - C_P + 0.06 C_P \cdot L_{CB} / (4 C_P - 1)$$

L_{CB} : 선체중앙부로부터 선박의 길이 방향의 부력중심 위치까지의 거리를 선박의 길이에 대한 백분율(%)로 나타낸 값.
 앞쪽을 (+) 뒤쪽을 (-)로 나타낸다.



형상 계수(k1, k2)의 의미

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

- ☑ 마찰 저항은 같은 침수 표면적을 갖는 평판의 저항으로 측정하지만 선체는 평판이 아닌 3차원 곡면 형상임
- ☑ 따라서 형상 계수는 곡면으로 된 선체라는 것에 의해 평판보다 증가하게 되는 점성 저항 성분을 보정해 주기 위한 계수임

$k_1 R_F$: 평판과 비교해 선체가 곡면이기 때문에 증가하는 점성 저항 성분



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ③ 선체 부가물 저항

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

$$R_{APP} = 1/2 \rho V^2 S_{APP} (1 + k_2)_{eq} C_F$$

S_{APP} : 부가물의 침수 표면적

$(1 + k_2)$: 부가물의 형상 계수

- Rudder behind skeg: 1.5~2.0
- Rudder of single screw ship: 1.3~1.5
- Twin-screw balance rudders: 2.8
- Shaft brackets: 3.0
- Skeg: 1.5~2.0
- Strut bossings: 3.0
- Hull bossings: 2.0
- Shafts: 2.0~4.0
- Stabilizer fins: 2.8
- Dome: 2.7
- Bilge keels: 1.4

$(1 + k_2)_{eq}$: 부가물의 유효 형상 계수 - 한 개 또는 그 이상의 부가물일 경우

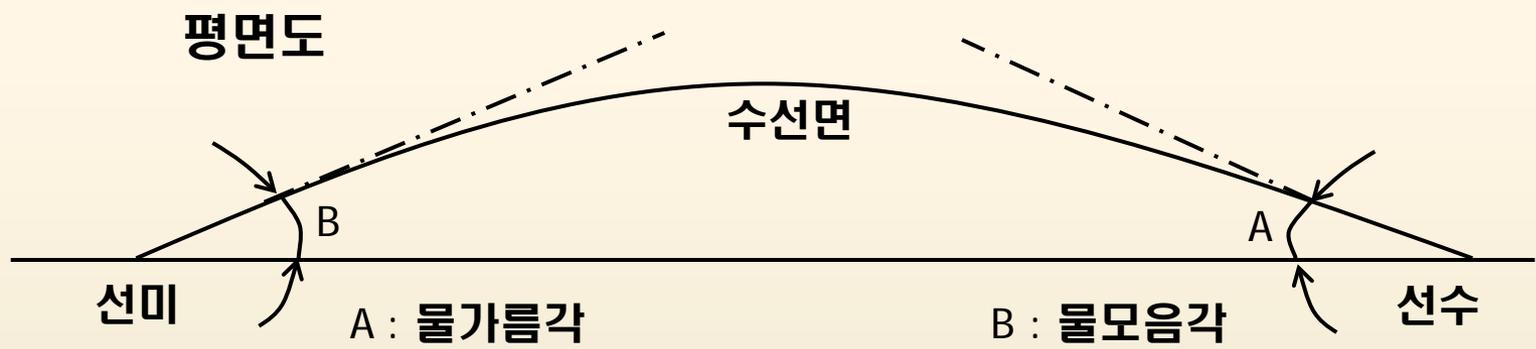
$$(1 + k_2)_{eq} = \frac{\sum S_i (1 + k_2)_i}{\sum S_i}$$

S_i 와 $(1+k_2)_i$ 는 i 번째 부가물의 침수표면적과 부가물 계수



물가름각(entrance angle)

물가름각(entrance angle)의 의미



물가름각: 물가름부의 수선의 접선이 선체 중심선과 이루는 각
 물모음각: 물모음부의 수선의 접선이 선체 중심선과 이루는 각



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ④ 조파 저항(낮은 속도 범위)

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_{\dots}$$

- 낮은 속도 범위: $F_n \leq 0.4$

$$R_W = \rho g \nabla C_1 C_2 C_5 \exp\{m_1 F_n^d + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2})\}$$

$$C_1 = 2223105 C_7^{3.78613} (T/B)^{1.07961} (90 - i_E)^{-1.37565}$$

- $C_7 = 0.229577(B/L)^{0.33333}$: $B/L \leq 0.11$ 일 때
- $C_7 = B/L$: $0.11 \leq B/L \leq 0.25$ 일 때
- $C_7 = 0.5 - 0.0625B/L$: $0.25 \leq B/L$ 일 때

i_E : 만재흘수선상에서 entrance angle의 1/2
 초기설계 단계에서 만재흘수선 위치에서의 i_E 를 알 수 없는 경우 추정식

$$i_E = 1 + 89e^{\left\{ \begin{array}{l} -(L/B)^{0.80856} (1 - C_{WP})^{0.30484} (1 - C_P - 0.0225 L_{CB})^{0.6367} \\ \times (L_R/B)^{0.34574} (100 \nabla / L^3)^{0.16302} \end{array} \right\}}$$

C_2 : bulb에 의한 조파저항 감소효과를 나타내는 계수

$$C_2 = e^{-1.89\sqrt{C_3}} \quad \text{만일 bulb가 없으면 } C_2 = 1$$

- $C_3 = 0.56 A_{BT}^{1.5} / \{B \cdot T (0.31 \sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)\}$ A_{BT} : 선수수선 위치에서의 bulb의 횡단면적
- h_B : 기선으로부터 면적 A_{BT} 의 중심위치까지의 높이
- T_F : 선수수선 위치에서의 형흘수

계속 →



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ④ 조파 저항(낮은 속도 범위)

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

C_5 : transom stern에 의한 조파 저항 감소 효과를 나타내는 계수

$$C_5 = 1 - 0.8A_T / (B \cdot T \cdot C_M)$$

A_T : 속도가 0일 때의 transom 부분의 물속에 잠긴 면적

$$m_1 = 0.0140407L/T - 1.75254\nabla^{1/3} / L - 4.79323B/L - C_{16}$$

$$d = -0.9$$

$$C_{16} = 8.07981C_p - 13.8673C_p^2 + 6.984388C_p^3 : C_p \leq 0.8 \text{ 일 때}$$

$$C_{16} = 1.73014 - 0.7067C_p : 0.8 \leq C_p \text{ 일 때}$$

$$m_4 = C_{15} 0.4e^{-0.034F_n^{-3.29}}$$

$$C_{15} = -1.69385 : L^3 / \nabla \leq 512 \text{ 일 때}$$

$$C_{15} = -1.69385 + (L / \nabla^{1/3} - 8.0) / 2.36 : 512 \leq L^3 / \nabla < 1726.91 \text{ 일 때}$$

$$C_{15} = 0.0 : 1726.91 \leq L^3 / \nabla \text{ 일 때}$$

- L : Waterline length
- T : 평균 형흘수 (m)
- B : 형폭 (m)
- ∇ : 배수용적 (m³)

$$\lambda = 1.446C_p - 0.03L/B : L/B \leq 12 \text{ 일 때}$$

$$\lambda = 1.446C_p - 0.36 : 12 \leq L/B \text{ 일 때}$$



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ④ 조파 저항(높은 속도 범위)

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

- 높은 속도 범위: $0.55 \leq F_n$

$$R_W = \rho g \nabla C_1 C_2 C_5 \exp \{ m_1 F_n^d + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2}) \}$$

낮은 속도 범위에서 다음 두 계수가 달라짐

$$C_1 = 6919.3 C_M^{-1.3346} (\nabla / L^3)^{2.00977} (L / B - 2)^{1.40692}$$

$$m_1 = -7.2035 (B / L)^{0.326869} (T / B)^{0.605375}$$



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ④ 조파 저항(중간 속도 범위)

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

- 중간 속도 범위: $0.4 \leq F_n \leq 0.55$

$$R_W = (R_W)_{at F_n=0.4} + (10F_n - 4) \cdot \{ (R_W)_{at F_n=0.55} - (R_W)_{at F_n=0.4} \} / 1.5$$

$(R_W)_{at F_n=0.4}$: 낮은 속도 범위의 식에 $F_n=0.4$ 를 대입하여 나온 결과

$(R_W)_{at F_n=0.55}$: 높은 속도 범위의 식에 $F_n=0.55$ 를 대입하여 나온 결과



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ⑤ 수면 가까이 있는 Bulb에 의한 조파 저항 증가

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

$$R_B = 0.11e^{(-3P_B^{-2})} \cdot F_{ni}^3 A_{BT}^{1.5} \rho g / (1 + F_{ni}^2)$$

P_B : bulbous bow의 수면 가까이 있는 정도를 나타내는 계수

$$P_B = 0.56\sqrt{A_{BT}} / (T_F - 1.5h_B)$$

F_{ni} : bulbous bow의 잠김율을 기준으로 한 Froude number

$$F_{ni} = V / \sqrt{g(T_F - h_B - 0.25\sqrt{A_{BT}}) + 0.15V^2}$$

실제 최근의 모형-시운전 시험결과를 분석한 결과에 의하면, Holtrop & Mennen이 제안한 R_B 는 무시하여도 영향이 없음

즉, $R_B=0$ 로 둔다



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ⑥ 물에 잠긴 transom에 의한 저항

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

$$R_{TR} = 1/2 \rho V^2 A_T C_6$$

$$C_6 = 0.2(1 - 0.2F_{nT}) : F_{nT} \leq 5 \text{ 일 때}$$

$$C_6 = 0 : 5 \leq F_{nT} \text{ 일 때}$$

$$F_{nT} = V / \sqrt{2gA_T / (B + B \cdot C_{WP})}$$



Holtrop & Mennen의 저항 추정 방법

- ⑦ 모형선-실선 상관 수정 저항

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

$$R_A = 1/2 \rho V^2 S_{total} C_A$$

선체표면조도(hull roughness)와 공기 저항 등의 영향을 고려한 모형선과 실선 저항 값과의 차이를 나타내는 저항

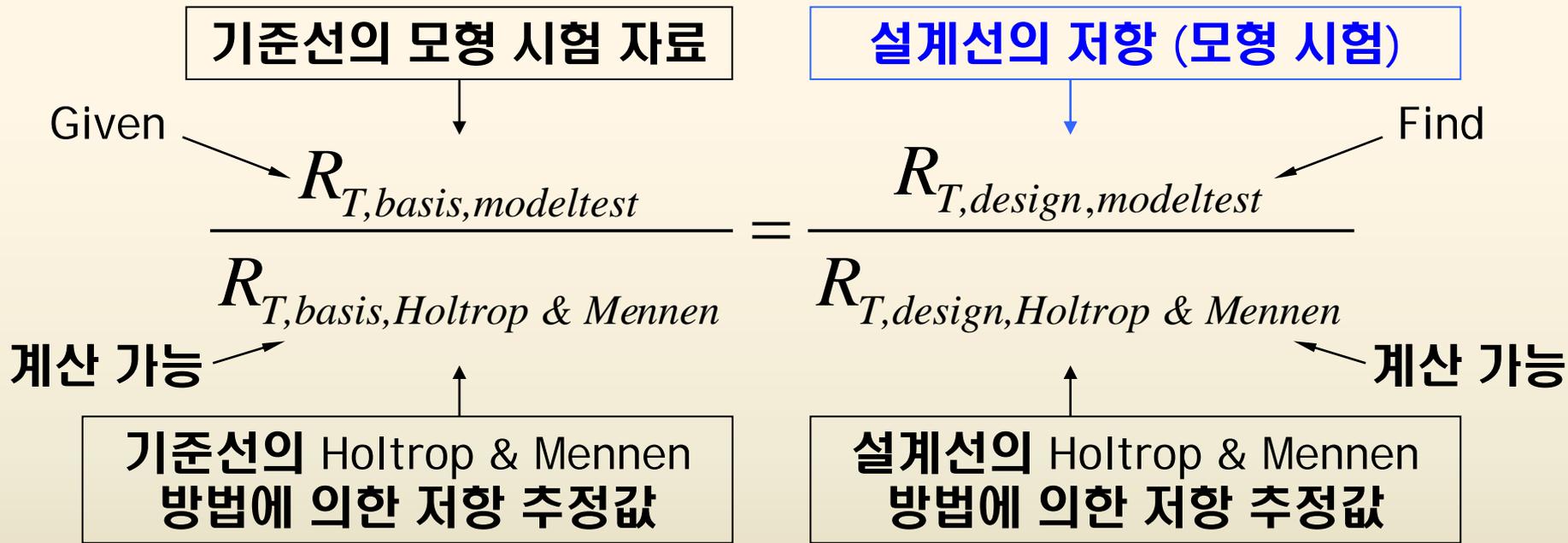
$$C_A = 0.006(L + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003\sqrt{L/7.5}C_B^4 C_2(0.04 - C_4)$$

$$C_4 = T_F / L \quad : T_F / L \leq 0.04 \text{ 일 때}$$

$$C_4 = 0.04 \quad : 0.04 < T_F / L \text{ 일 때}$$



기준선 자료에 의한 저항 성능 추정



저항으로부터 마력의 추정

$$EHP = R_T \cdot V$$

$$DHP = EHP / \eta_D$$

$$BHP = DHP / \eta_T$$

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

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

where,

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_O, \quad \eta_H = \frac{1-t}{1-w}$$

*계수들은 기준선의 값을 이용한다.

*기준선의 값이 주어지지 않은 경우 다음 slide 의 식을 이용하여 추정한다.

- MCR: 최대 연속 마력(Maximum Continuous Rating)
- NCR: 연속 상용 마력(Normal Continuous Rating)
- BHP: 제동 마력(Brake Horse Power)
- DHP: 전달 마력(Delivered Horse Power)
- EHP: 유효 마력(Effective Horse Power)
- R_T : 전저항(Total Resistance)
- η_T : 축 전달 효율(Transmission Efficiency)
- η_D : 추진 계수(Propulsive Efficiency)
- η_O : 프로펠러 효율(Propeller Efficiency)
- η_H : 선각 효율(Hull Efficiency)
- η_R : 상대 회전 효율(Relative Rotative Efficiency)
- t: 추력 감소 계수(Thrust Deduction Fraction)
- w: 반력 계수(Wake Fraction)



계수들의 추정식

$$\eta_D = \overset{\textcircled{1}}{\eta_O} \cdot \overset{\textcircled{2}}{\eta_H} \cdot \overset{\textcircled{3}}{\eta_R}$$

$$\textcircled{1} \eta_O = [1 / (0.97 + 0.14\sqrt{B_P})] \cdot k$$

$$k = [1.11 - 0.11((A_E / A_O) / 0.6)]$$

$$B_P = \frac{n(NCR\eta_T\eta_R)^{0.5}}{V(1-w)}$$

$$w = 0.3095 \cdot C_B + 10 \cdot C_V \cdot C_B - 0.23 \cdot \frac{D_P}{\sqrt{B \cdot T}}, \quad D_P = 15.4 \cdot \left(\frac{MCR}{n_{MCR}^3} \right)^{0.2} \cdot C_1, \quad \begin{array}{l} \text{프로펠러 날개가 5개일 경우 } C_1=1, \\ \text{날개가 4개일 경우 } C_1=1.05 \end{array}$$

$$C_V = C_F \cdot (1+k) + C_A$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2}, \quad R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

$$\textcircled{2} \eta_H = \frac{1-t}{1-w}, \quad t = \frac{2}{3}w + 0.01$$

$$\textcircled{3} \eta_R = 0.98 \sim 1.03$$

Cb>0.8 이상인 비대선의 경우에는

$$\eta_R = 0.88 + 0.02 \cdot (L / B)$$

MCR: 최대 연속 마력 (Maximum Continuous Rating)
 NCR: 연속 상용 마력 (Normal Continuous Rating)
 BHP: 제동 마력 (Brake Horse Power)
 DHP: 전달 마력 (Delivered Horse Power)
 EHP: 유효 마력 (Effective Horse Power)
 R_T: 전저항 (Total Resistance)
 η_T: 축 전달 효율 (Transmission Efficiency)
 η_D: 추진 효율 (Propulsive Efficiency)
 η_O: 프로펠러 효율 (Propeller Efficiency)
 η_H: 선각 효율 (Hull Efficiency)
 η_R: 상대 회전 효율 (Relative Rotative Efficiency)
 t: 추력 감소 계수 (Thrust Deduction Fraction)
 w: 반력 계수 (Wake Fraction)



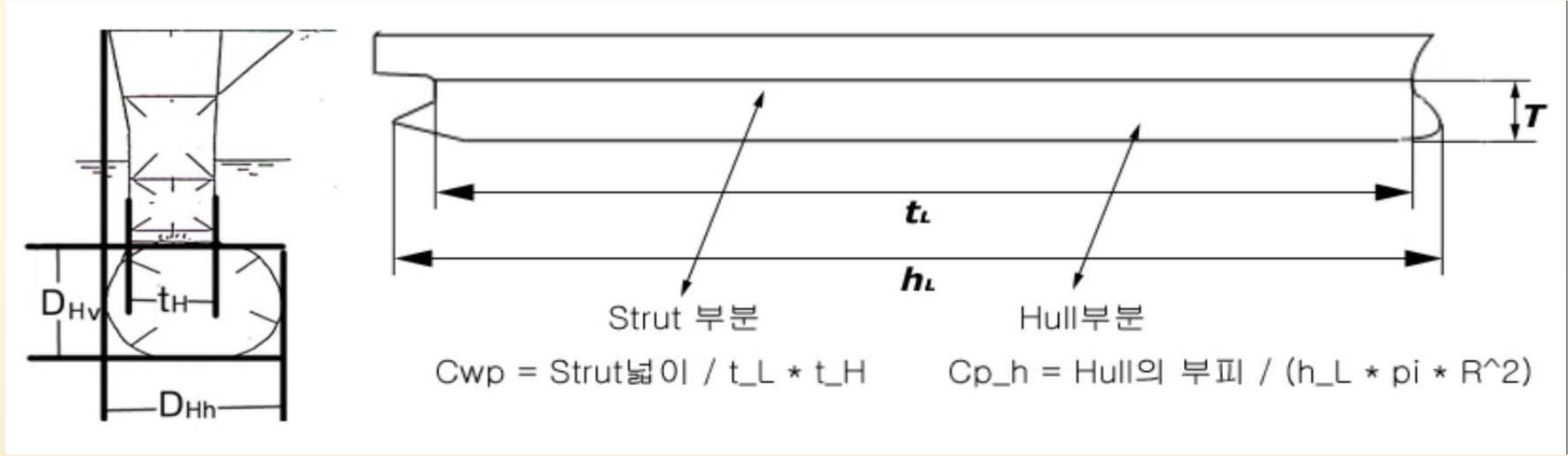
잠수함의 저항 및 마력 추정 방법

$$EHP = 0.00872 \cdot V^3 \left[WS \cdot (C_f + C_a + C_r) + (S_s \cdot C_{ds}) + (S_a \cdot C_{dA}) \right]$$

- WS : Wetted surface area of the bare hull
- S_a : Wetted surface of appendage
- S_s : Wetted surface of sail
- C_f : Coefficient of frictional resistance
- C_a : Correlation Allowance
- C_r : Coefficient of form resistance
- C_{ds} : Drag coefficient for sail
- C_{dA} : Drag coefficient of appendages



SWATH의 저항 및 마력 추정 방법



일반 상선과의 차이점
 $\therefore \text{Hull} = \text{lowerhull} + \text{strut}$

침수 표면적 계산에 많은 차이가 있음

- Bulb가 존재하지 않음
 $\therefore R_B = 0$
- Transom이 존재하지 않음
 $\therefore R_{TR} = 0$



(참고) Taylor & Gertler의 저항 추정 방법

(Taylor 수조의 도표)

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

$$R_T = R_F + \Delta R_F + R_R + R_{A1}$$

무차원화 하면 다음과 같다.

$$C_T = C_F + \Delta C_F + C_R + C_{A1}$$

C_F : Schoenherr **마찰저항계수**

ΔC_F : **가정**

C_R : **가정**

C_{A1} : Residual resistance coefficient

$$= (\nabla L^3, C_P, B/T, F_N), L = LWL$$

$B/T = 2.25, 3.00, 3.75$ 의 경우에 대해서

$$C_P = 0.48 \sim 0.86 \text{ 및 } \nabla / L^3 = (1.0 \sim 7.0)$$

침수표면적 약산식 : $S = C_S \cdot \sqrt{\nabla \cdot L}$

특기 사항

- 모형선의 $C_M = 0.925$ -> constant
- $LCB = 0.5 \cdot LWL$ -> constant
- Bulbous bow **영향 고려하지 않음**
- **고속선 적용에 적당**

