

[2008][14-1]



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



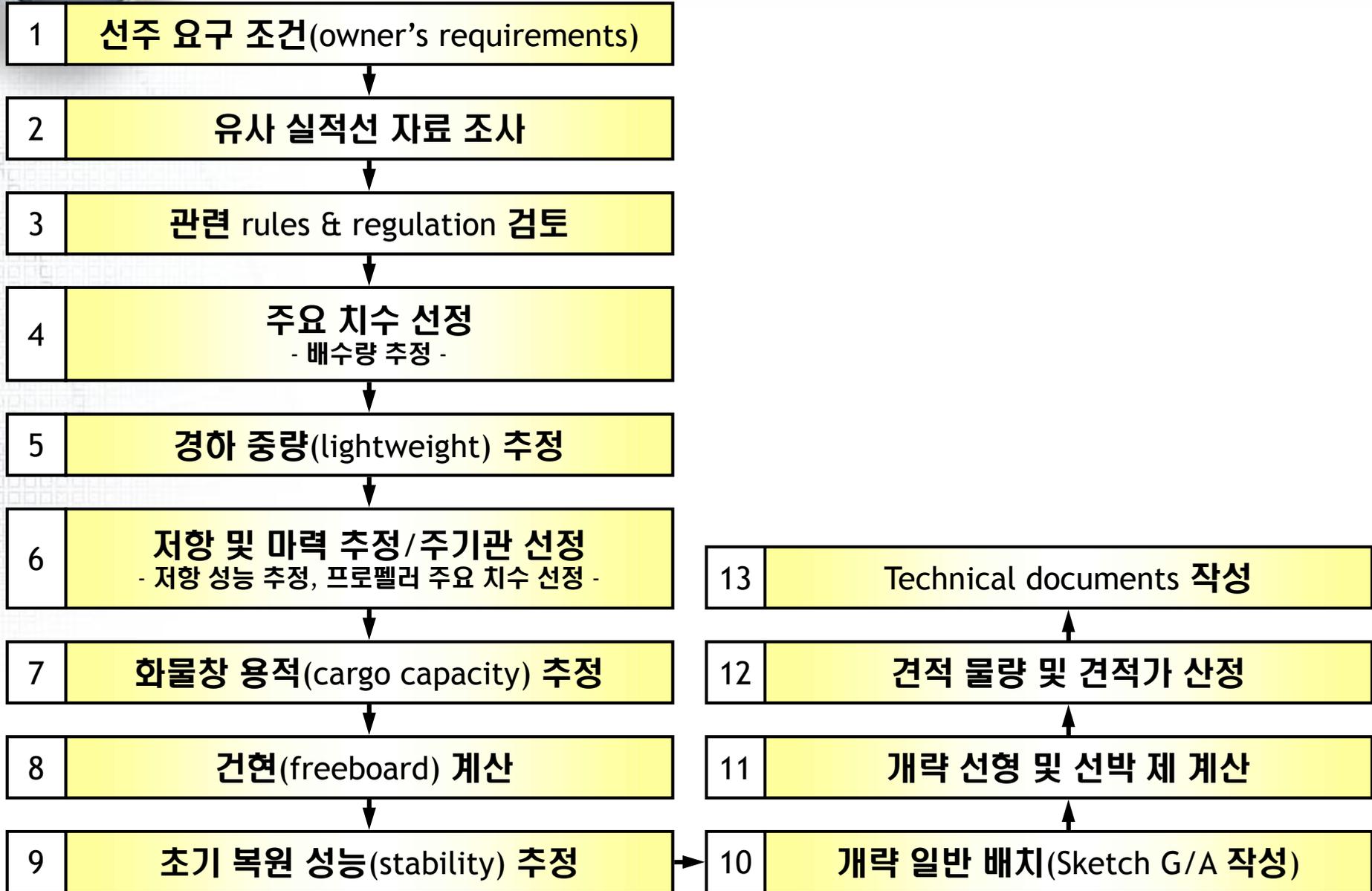
Selection of Main Engine (주기관 선정)

2008.12.08

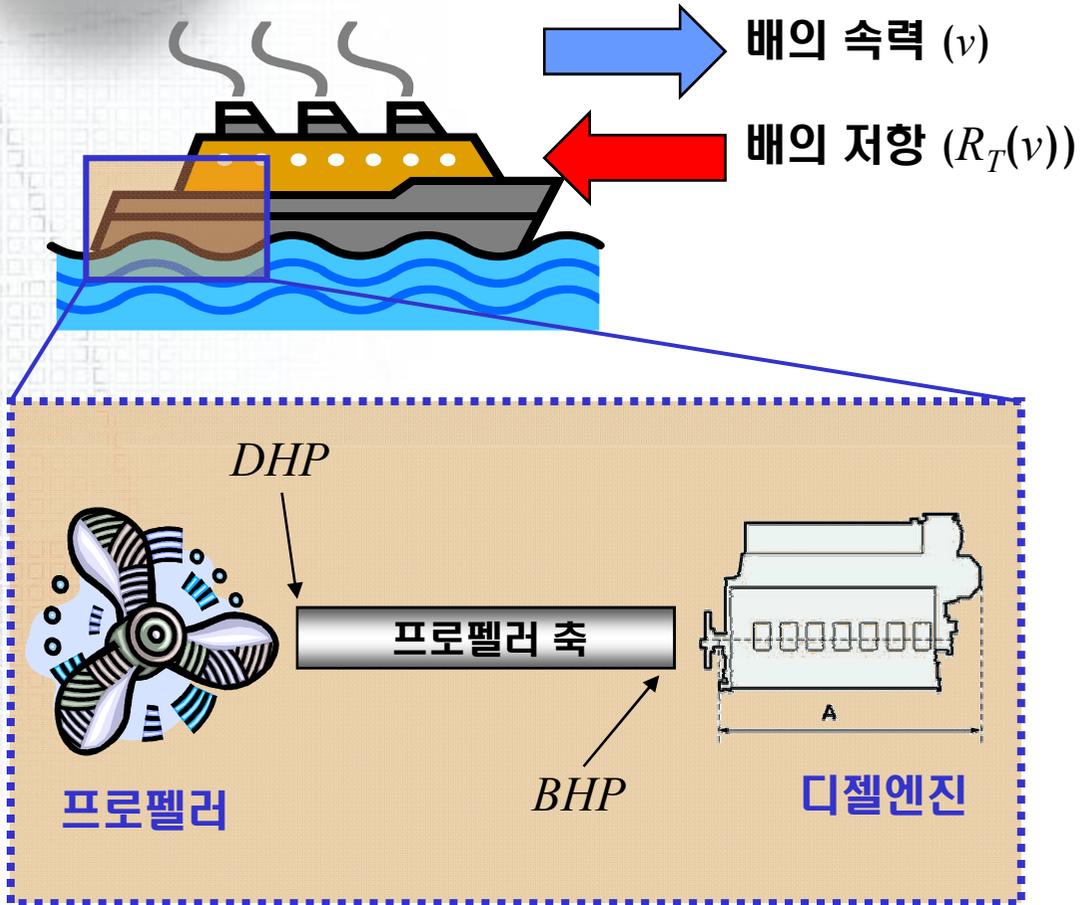
서울대학교 조선해양공학과
이규열

선박 개념 설계의 순서

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



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)

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

프로펠러 주요치수 결정 문제

프로펠러 주요치수 결정 문제의 변수

D_p [m] : 프로펠러 직경, v [m/s] : 배의 속력, P [kW] : 디젤엔진이 프로펠러에 전달하는 마력, n [1/s] : 프로펠러 회전수
 A_E/A_O : 프로펠러 전개 면적비, P_i [m] : 프로펠러 피치, $R_T(v)$ [kN] : 선박의 속력에 따른 저항, z : 프로펠러 날개수

프로펠러 주요치수 결정 문제의 제약 조건 및 목적 함수

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 Torque를 프로펠러가 흡수하는 조건

$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D_p^5 \cdot K_Q$$

- 조건식3 : Cavitation이 발생하지 않는 최소 면적비 조건 (전개면적비가 찾으려는 변수인 경우에 사용)

$$A_E / A_O \geq K + \frac{(1.3 + 0.3z) \cdot T}{D_p^2 \cdot (p_0 + \rho g h^* - p_v)}$$

- 조건식2 : 배가 어떤 속력에서 필요로 하는 추력을 프로펠러가 내야 하는 조건

$$\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_p^4 \cdot K_T$$

목적 함수 : Find Maximum η_o

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

	Case #1	Case #2	Case #3
Given	P [kW], n [1/s], $R_T(v)$ [kN], z	D_p [m], v [m/s], $R_T(v)$ [kN], z , A_E/A_o	n [1/s], v [m/s], $R_T(v)$ [kN], z , A_E/A_o
Find	D_p [m], v [m/s], P_i [m], A_E/A_o	P [kW], n [1/s], P_i [m]	P [kW], D_p [m], P_i [m]

Case #1, 2, 3 모두 조건식보다 미지수의 개수가 많으므로

모두 비선형 최적화 문제로 정식화 될 수 있으며, 최적화 기법을 이용해 해를 구할 수 있다.

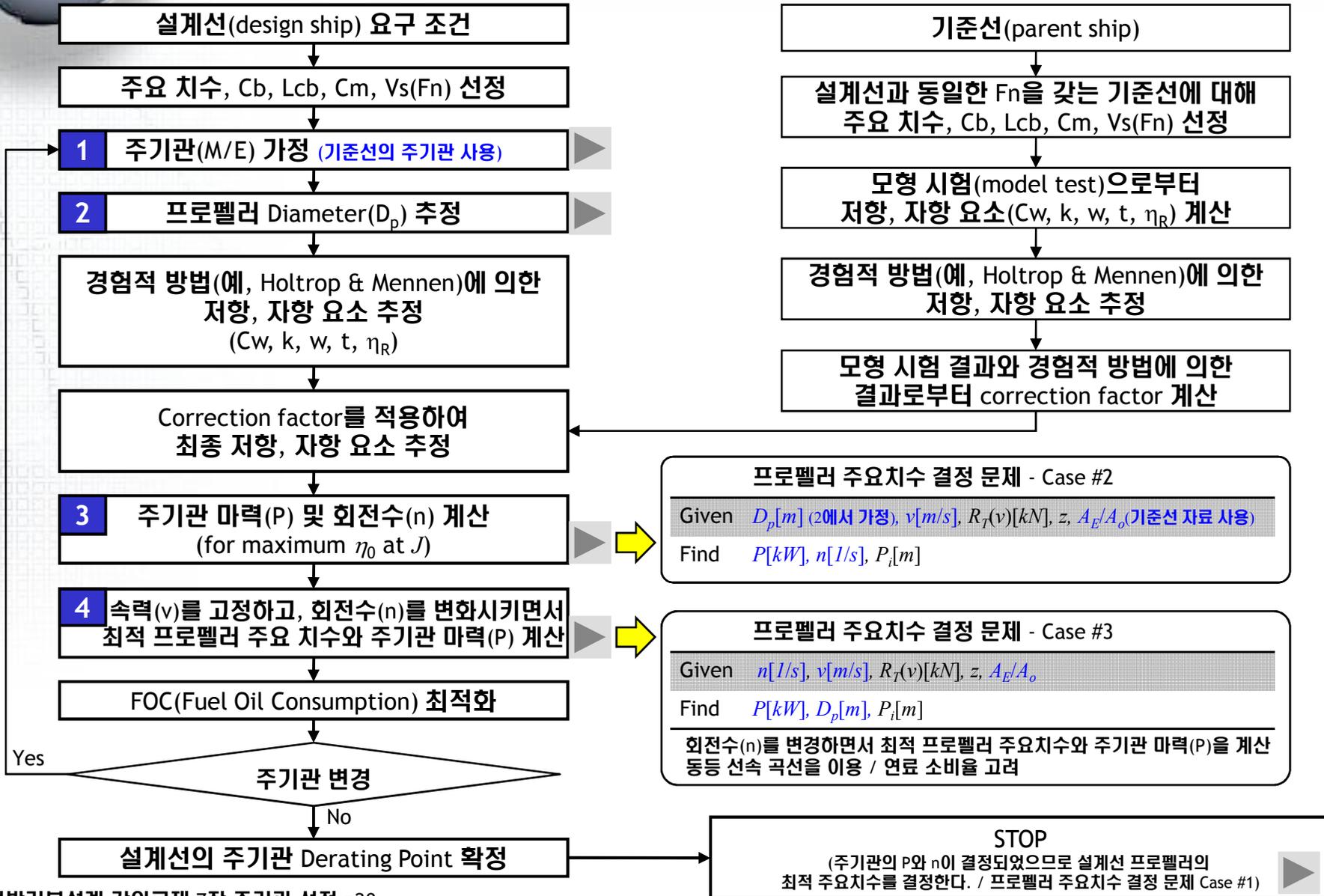


저항추진 성능, 프로펠러 주요치수 결정, 주기관 선정 과정 요약

Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

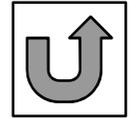
저항추진 성능, 프로펠러 주요치수 결정, 주기관 선정 과정 요약¹⁾

- 목적: 설계선 주기관의 마력(BHP)과 회전수를 결정



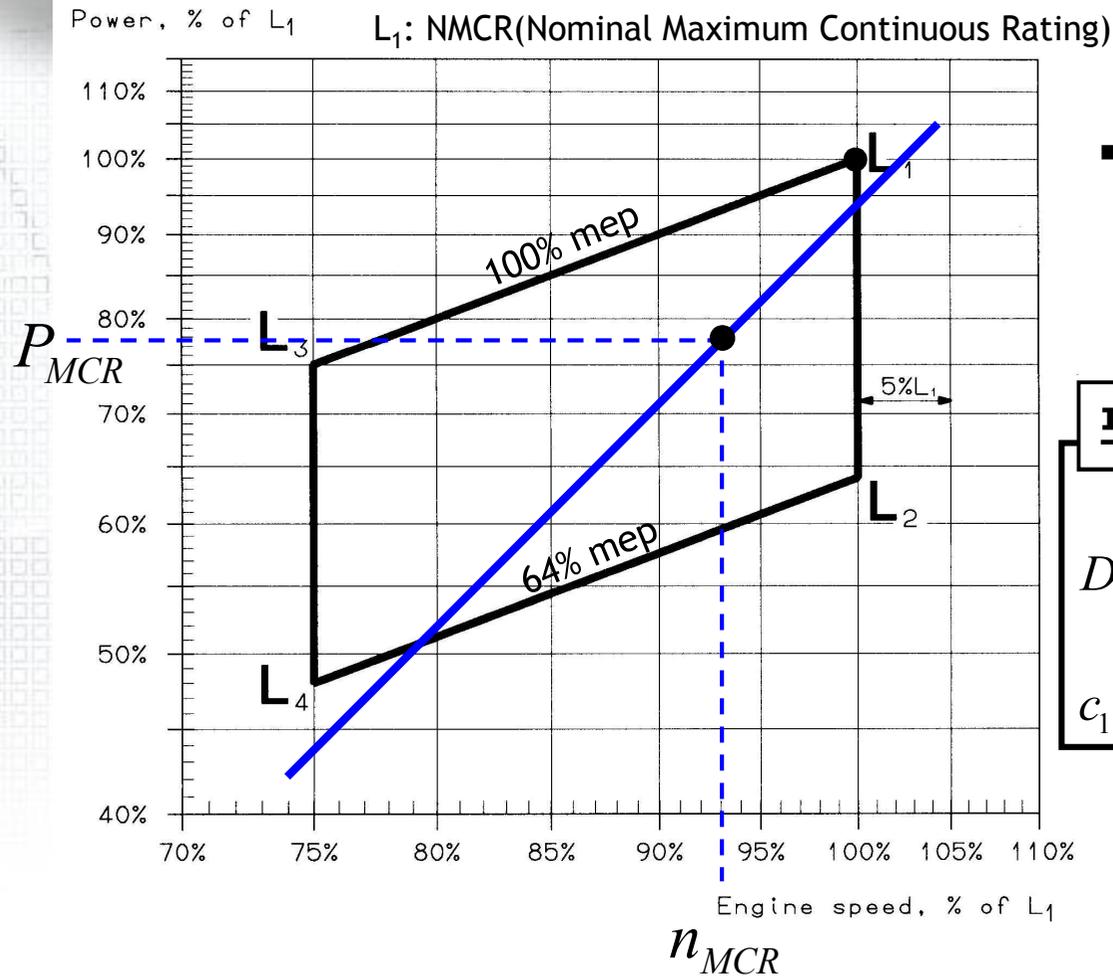
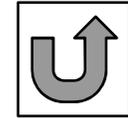
1) 선박기본설계 강의교재 7장 주기관 선정 p20

[1] 주기관 가정



- 1차적으로 기준선의 주기관(M/E)을 설계선의 주기관이라고 가정

[2] 프로펠러 Diameter 추정



- 기준선 디젤엔진의 MCR(P_{MCR}) 및 이 때의 rpm(n_{MCR})을 프로펠러 D_p 추정을 위한 입력값으로 사용

프로펠러 D_p 추정식

$$D_p = 15.4 \times \left(\frac{P_{MCR}}{n_{MCR}^3} \right)_{parent\ ship}^{0.2} \times c_1$$

$c_1 = 1$ for 5 blades, 1.05 for 4 blades

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산

- for maximum η_0 at J

Given	D_p [m] : 프로펠러 직경 v [m/s] : 배의 속력 $R_T(v)$ [kN] : 선박의 속력에 따른 저항 z : 프로펠러 날개수 A_E/A_O : 프로펠러 전개 면적비
Find	P [kW] : 디젤엔진이 프로펠러에 전달하는 마력 n [1/s] : 프로펠러 회전수 P_i [m] : 프로펠러 피치

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산

- for maximum η_0 at J

Given	D_P [m], v [m/s], $R_T(v)$ [kN], z , A_E/A_O
Find	P [kW], n [1/s], P_i [m]

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 토오크를 프로펠러가 흡수하는 조건

$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^5 \cdot K_Q$$

- 조건식2 : 배가 어떤 속력에서 필요로 하는 추력을 프로펠러가 내야 하는 조건

$$\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T$$

3개의 미지수

2개의 등식

비선형 최적화 문제

목적 함수 : Find Maximum η_0

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

수계산 이용한 프로펠러 주요치수 결정문제의 해법 

비선형 최적화 문제를 풀어

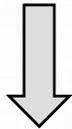
주기관 마력(P) 및 회전수(n)를 계산할 수 있다. 11/22

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산

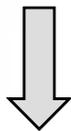
- for maximum η_0 at J

- 조건식1 (디젤엔진이 전달한 토오크를 프로펠러가 흡수하는 조건)으로부터 마력 계산

$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^5 \cdot K_Q$$



$$\left(\begin{array}{l} P = DHP = 2\pi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_P^5 \cdot K_Q \\ P = DHP = \frac{R_T \cdot V_S}{\eta_{O,\max} \cdot \eta_H \cdot \eta_R} \end{array} \right)$$

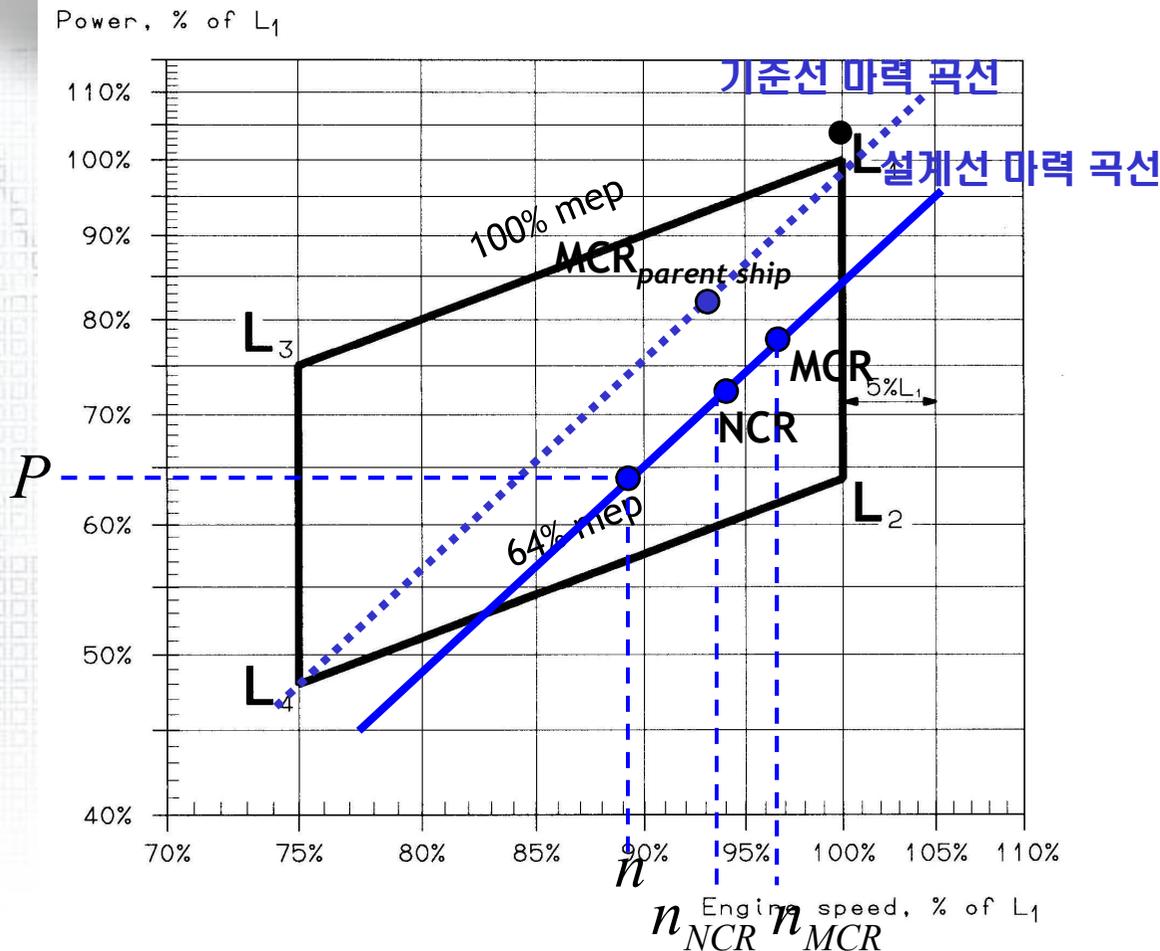
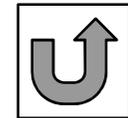


$$P = \frac{R_T \cdot V_S}{\eta_{O,\max} \cdot \eta_H \cdot \eta_R} = 2\pi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_P^5 \cdot K_Q = c_3 \cdot n^3$$

즉, 프로펠러의 마력은
회전수의 3승에 비례

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산

- for maximum η_0 at J



$$BHP = \frac{DHP}{\eta_T}$$

η_T : 프로펠러축효율

$$NCR = BHP(1 + S.M / 100)$$

$$MCR = NCR / E.M$$

Engine Margine
보통 10%

$$n_{NCR} = \sqrt[3]{\frac{NCR}{c_3}}$$

$$n_{MCR} = \sqrt[3]{\frac{MCR}{c_3}}$$

$$P = c_3 \cdot n^3$$

프로펠러 측면에서 요구하는 P, n을 이용하여 설계선의 NCR, MCR을 계산하고 NCR과 MCR이 디젤 엔진의 작동범위 내에 있는지 판단할 수 있다.

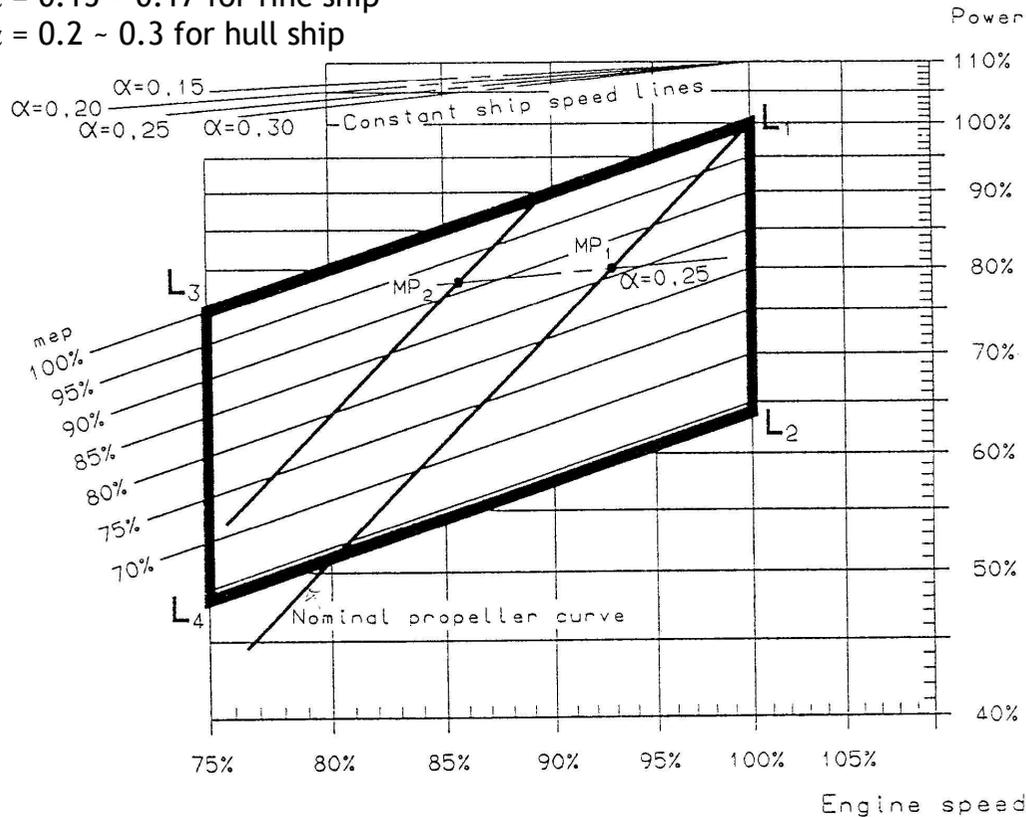
[4] 최적 프로펠러 주요 치수와 주기관 마력(P) 계산

- 속력(v) 고정, 회전수(n) 변경

동등 선속 직선을 이용한 MCR 대안 비교

$\alpha = 0.15 \sim 0.17$ for fine ship

$\alpha = 0.2 \sim 0.3$ for hull ship



단계[4]의 목적

단계[3]에서 계산한 P와 n이외에 다른 프로펠러 설계 대안이 있는지 파악하기 위함

같은 선속(v)을 유지하기 위해서는

회전수(n) 증가

프로펠러 직경 감소

점 MP1에서 MP2로 이동

프로펠러 효율 감소

연료 소비율 감소
(92% → 86%)

서로 상충되는 결과를 가져오므로 목적에 맞는 프로펠러 설계 대안을 도출해야 함

MCR 선정 시 고려 사항 :

- 작은 기관 마력과 낮은 기관 회전수
- 마력과 회전수의 Derating 값(DMCR과 NMCR과의 마력과 회전수의 차이)
- 연료 소비율
- 프로펠러 작동 범위

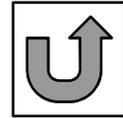
[4] 최적 프로펠러 주요 치수와 주기관 마력(P) 계산

- 속도(v) 고정, 회전수(n) 변경

Given	<p>n [1/s] : 프로펠러 회전수</p> <p>v [m/s] : 배의 속도</p> <p>$R_T(v)$ [kN] : 선박의 속력에 따른 저항</p> <p>z : 프로펠러 날개수</p> <p>A_E/A_O : 프로펠러 전개 면적비</p>
Find	<p>P [kW] : 디젤엔진이 프로펠러에 전달하는 마력</p> <p>D_P [m] : 프로펠러 직경</p> <p>P_i [m] : 프로펠러 피치</p>

[4] 최적 프로펠러 주요 치수와 주기관 마력(P) 계산

- 속도(v) 고정, 회전수(n) 변경



Given	n [1/s], v [m/s], $R_T(v)$ [kN], z , A_E/A_O
Find	P [kW], D_P [m], P_i [m]

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 토오크를 프로펠러가 흡수하는 조건

$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^5 \cdot K_Q$$

- 조건식2 : 배가 어떤 속도에서 필요로 하는 추력을 프로펠러가 내야 하는 조건

$$\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T$$

3개의 미지수

2개의 등식

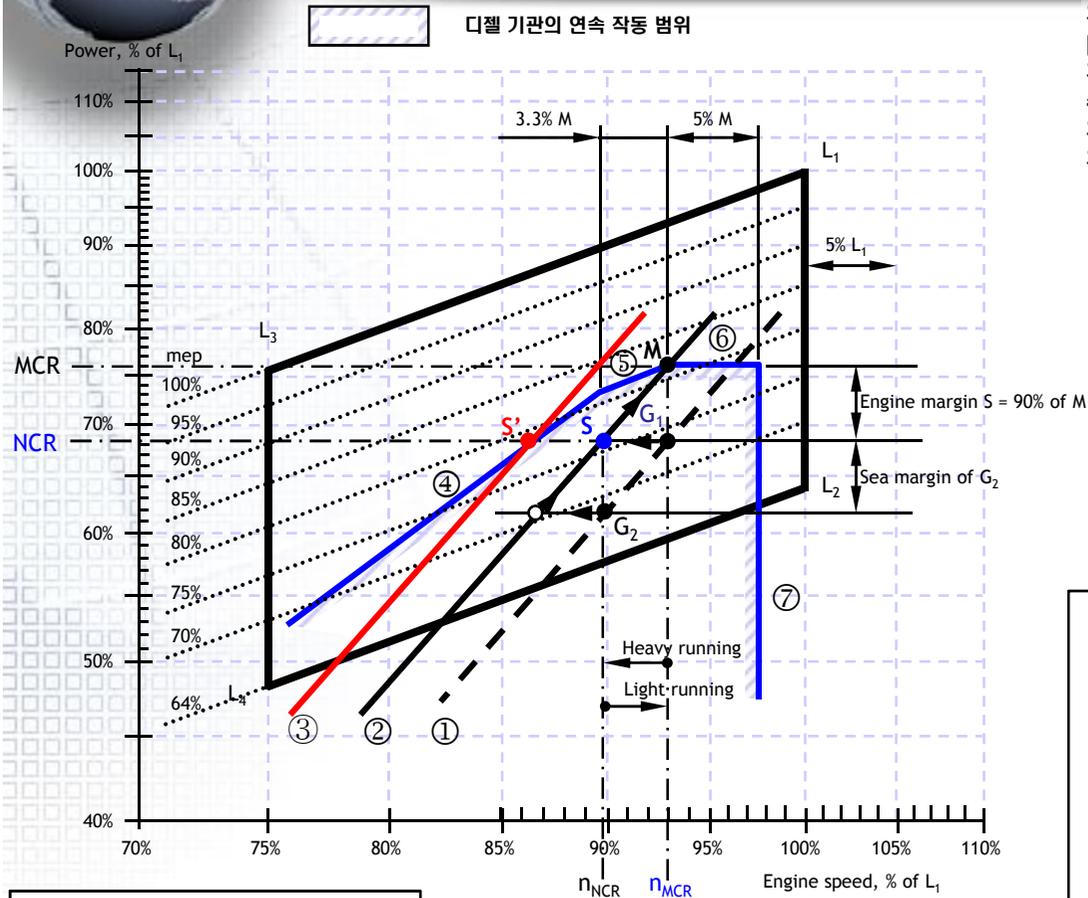
비선형 최적화 문제

목적 함수 : Find Maximum η_o

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

속도(v)을 고정하고 회전수(n)를 변경하면서 최적 프로펠러 주요치수와 주기관 마력(P)을 계산한다. 단계[3]에서 결정한 P와 n 이외에 더 좋은 설계 대안이 있는지 검증할 수 있다.

디젤엔진의 부하범위와 프로펠러와의 Matching



디젤 기관의 연속 작동 범위

M : Maximum continuous rating (DMCR 또는 MCR)

S : Normal continuous rating (NCR)

G_1, G_2 : Propeller design point

곡선 ① : 신조시 선박의 저항을 기준으로 한 프로펠러의 마력-회전수 곡선(light running)

곡선 ② : Sea margin을 고려한 선박 저항 증가시 프로펠러의 마력-회전수 곡선(heavy running), 회전수의 3승에 비례

직선 ④ : 연소시 풍부한 공기 공급이 가능하고 최대 토크/회전수에 대한 한계를 나타내는 직선, 회전수의 2승에 비례

직선 ⑤ : 연속 작동이 허용되는 최대 평균 유효 압력 직선, 회전수의 1승에 비례

직선 ⑥ : 연속 작동에 대한 최대 마력 직선

직선 ⑦ : 연속 작동에 대한 최대 회전수 직선



프로펠러의 설계점(G1)

$$P_{D.E} = P_{NCR}$$

$$n = n_{MCR}$$

프로펠러의 설계점이 G1이 되어야 하는 이유

만일 점 S에서 프로펠러를 설계하면, 신조시 직선 ② 위에서 프로펠러가 동작 한다.

그러나 시간이 지나 선박의 저항이 증가하면 직선 ③ 위에서 프로펠러가 동작하며, 이는 NCR에 해당하는 마력을 프로펠러가 흡수하는 점 S'이 디젤기관의 연속 동작 범위에서 벗어남을 의미한다.

점 G1에서 프로펠러를 설계하면, 신조시 직선 ① 위에서 프로펠러가 동작 한다.

시간이 지나 선박의 저항이 증가하면 직선 ② 위에서 프로펠러가 동작하며, 이는 NCR에 해당하는 마력을 프로펠러가 흡수하는 점 S가 디젤기관의 연속 동작 범위 내에 있음을 의미한다.

✓ 프로펠러가 흡수하는 마력 :

$$P_{prop.} \propto n^3$$

✓ 디젤엔진이 내는 마력 :

$$P_{D.E.} \propto n$$

$$P = \frac{R_T \cdot V_S}{\eta_{O,max} \cdot \eta_H \cdot \eta_R} = 2\pi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_P^5 \cdot K_Q = c_3 \cdot n^3$$



참고 자료

Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산 - 수계산 방법

- for maximum η_0 at J

1 속력 v 가정

2 조건식2을 $K_T = C_2 J^2$ 의 형태로 표현

3 프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 여러 피치비에서 최대 효율(η_0)을 내는 J 와 그 때의 K_Q 를 구함

4 단계 3에서 구한 J 를 이용해 n 을 구함 $\left(J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \right)$

조건식2:

$$\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T$$

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산 - 수계산 방법

- for maximum η_0 at J

1 | 속도 v 가정



2 | 조건식1을 $K_T = C_1 J^2$ 의 형태로 표현



$$\text{조건식1} \left(\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T \right), \quad J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \left(\Rightarrow n = \frac{v_A}{J \cdot D_P} \right)$$

$$K_T = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^4} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^4} \cdot \left(\frac{J \cdot D_P}{v_A} \right)^2 = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^2 v_A^2} J^2 = C_2 J^2$$

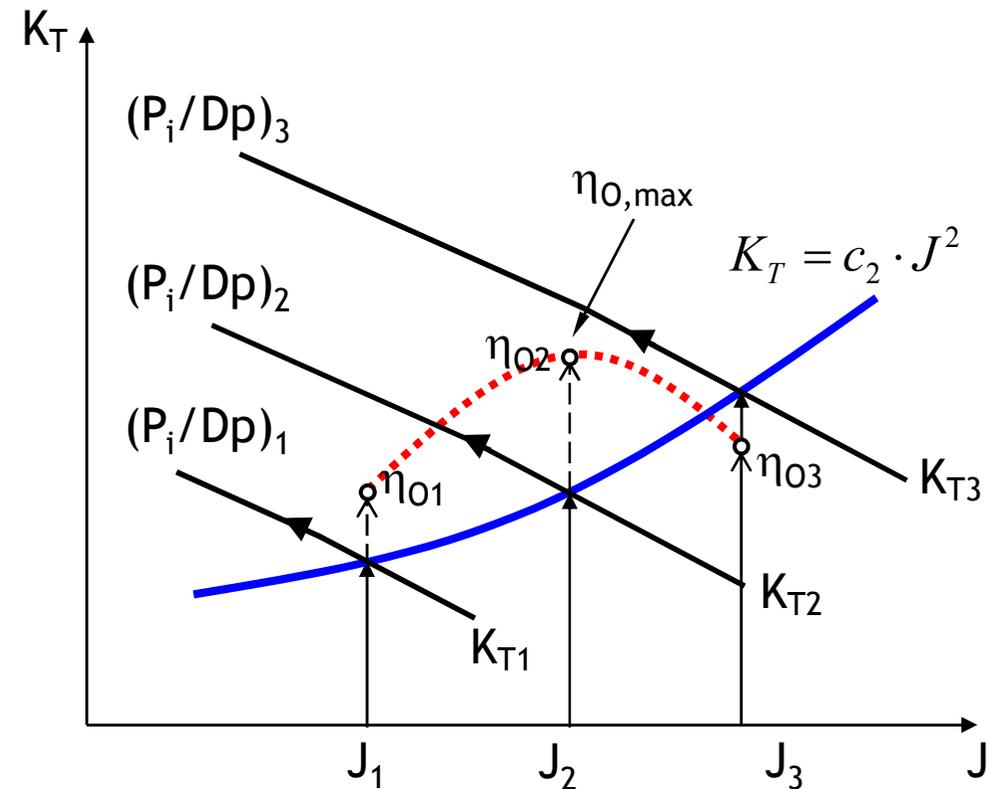
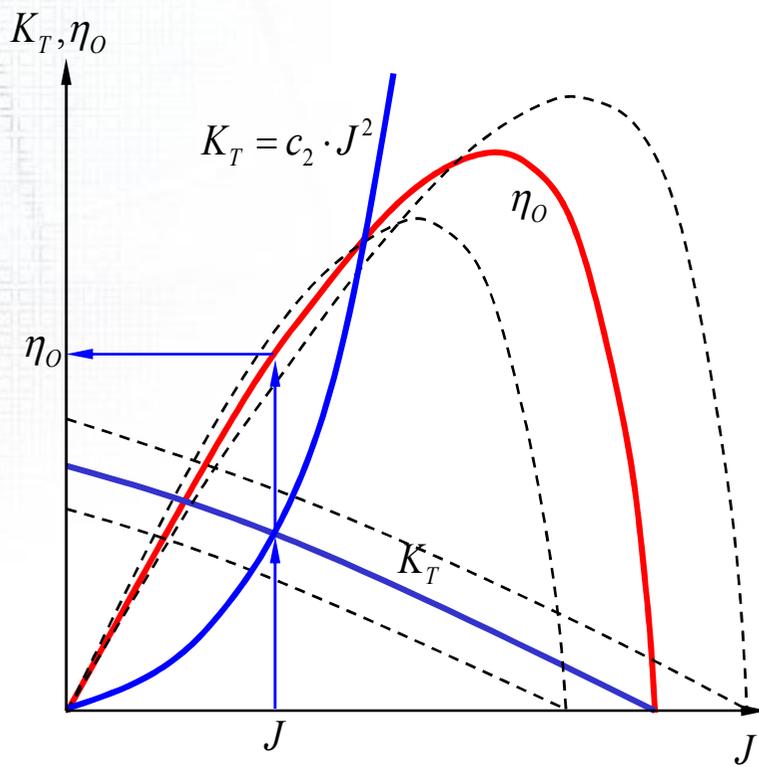
$$\left(C_2 = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^2 v_A^2} \right)$$

[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산 - 수계산 방법

- for maximum η_0 at J

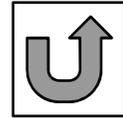
3

프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 여러 피치비에서 최대 효율(η_0)을 내는 J 와 그 때의 K_Q 를 구함



[3] 주기관 마력(P) 및 회전수(n) 계산 - 수계산 방법

- for maximum η_0 at J



4

단계 4에서 구한 J 를 이용해 n 을 구함

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{v_A}{D_P \cdot J}$$