

[2008][13-2]



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

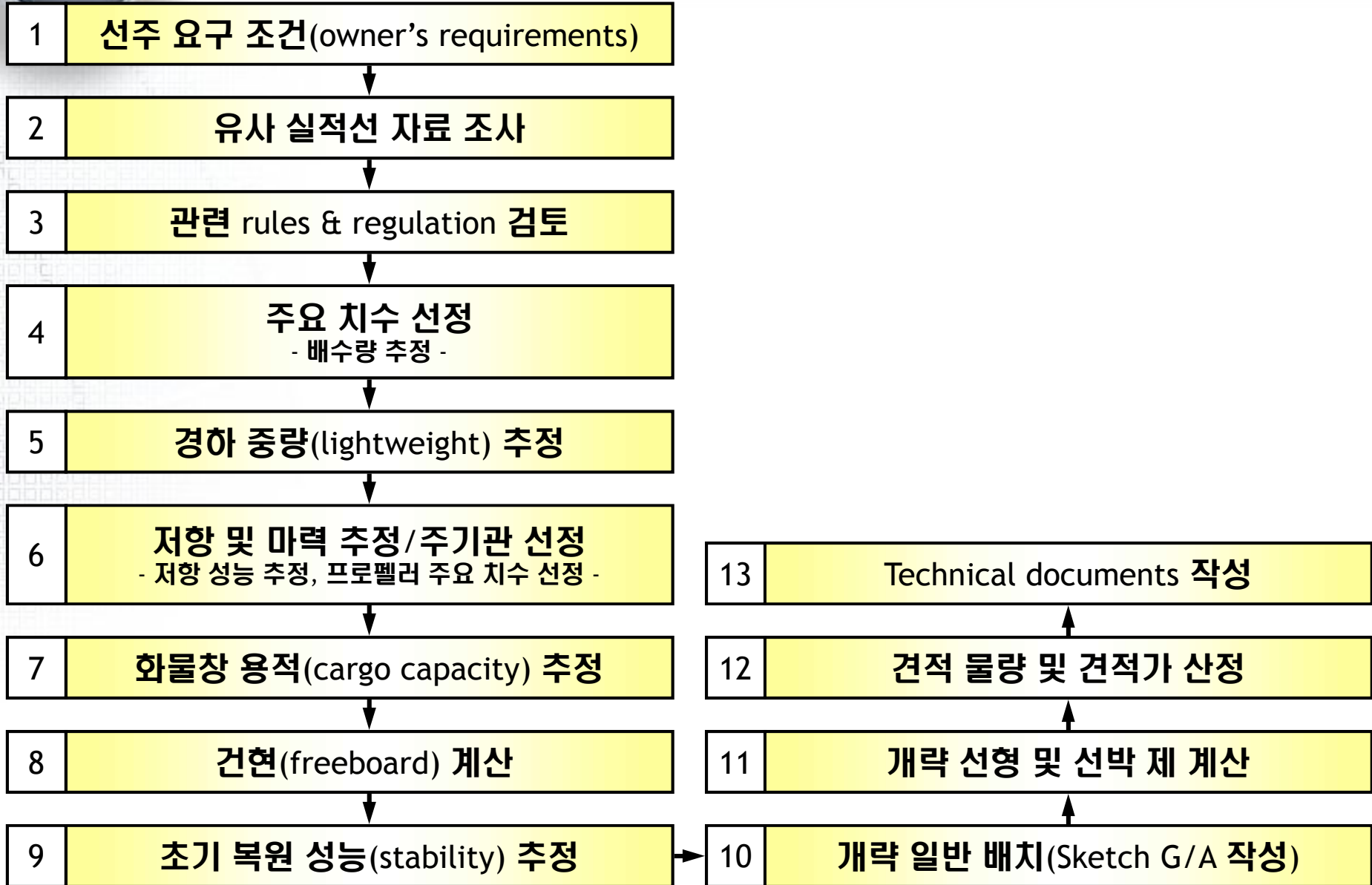


Determination of Propeller Dimension (프로펠러 주요치수 결정)

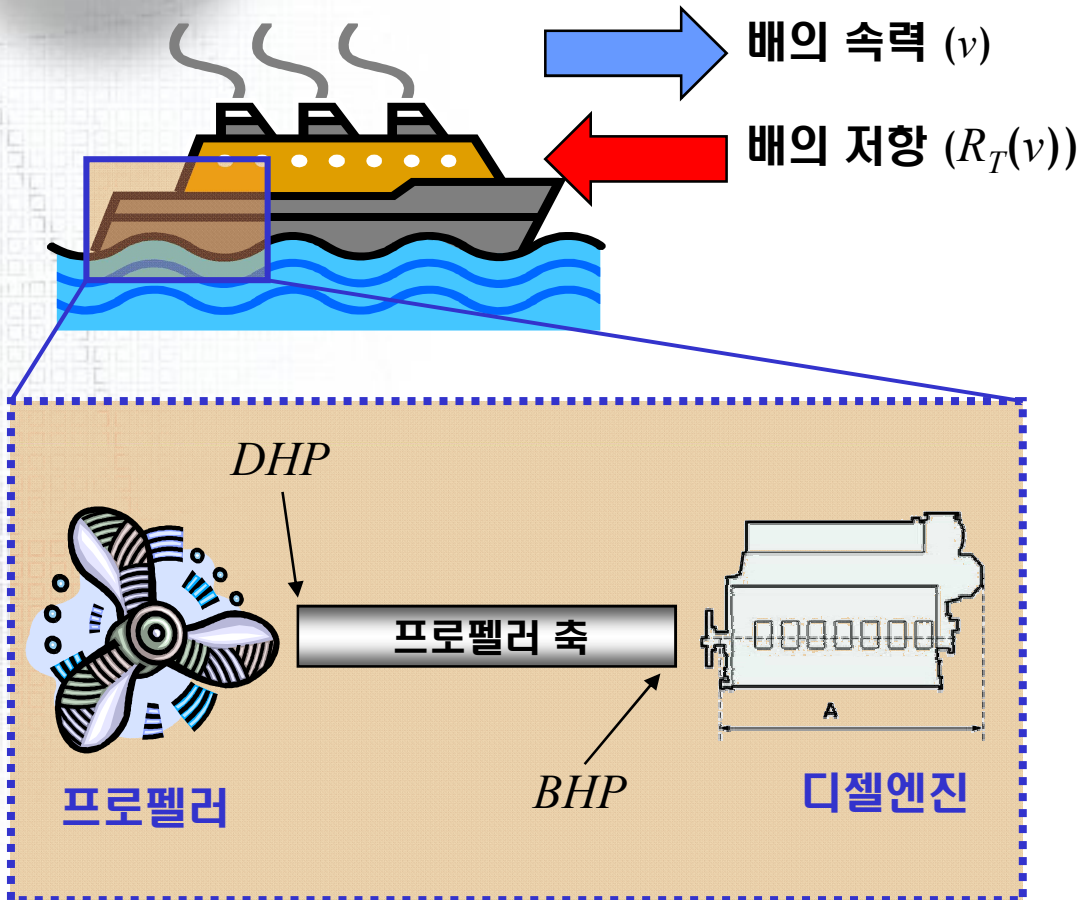
서울대학교 조선해양공학과
이규열

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)

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



프로펠러 주요 치수 결정

Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

목차

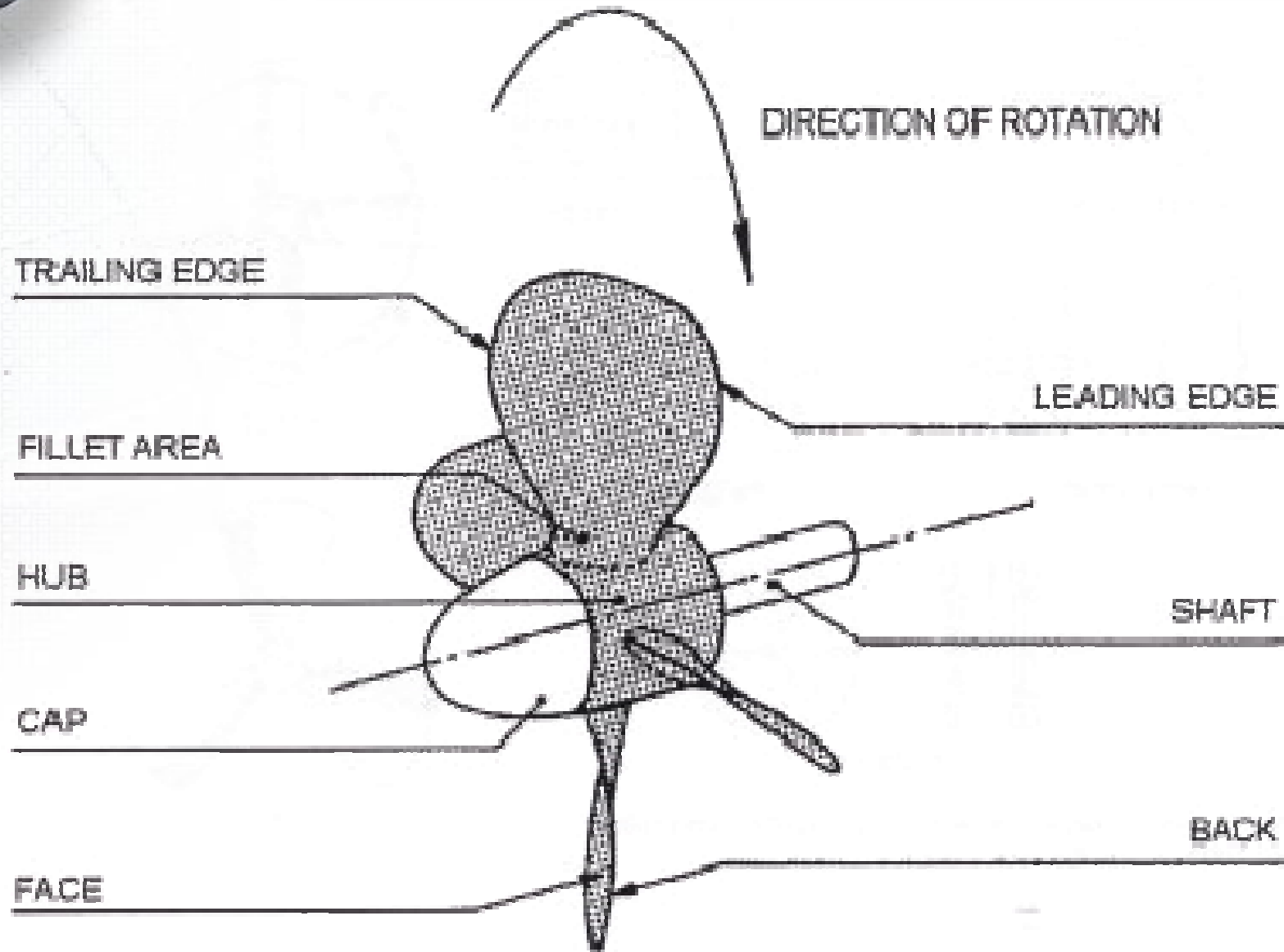
- 학습 목표
- 프로펠러 의 형상, 작동 원리
- 프로펠러의 주요 치수 결정 개념
- 프로펠러 단독 성능 곡선
- 프로펠러 주요 치수 결정을 위한 수학적 모델
- 프로펠러 최적 주요치수 결정 방법(프로펠러 마력과 회전수가 주어진 경우)
- 프로펠러 최적 주요치수 결정 예제
- 주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정
- 프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

학습 목표

- 1) 초기설계 단계에서 프로펠러의 주요치수를 결정하는 과정을 습득한다.
 - Given : 주기관의 연속 최대 마력(MCR)과 상용 출력(NCR), 각각 그 출력에서의 프로펠러 회전수, 저항값, 반류 계수 등
 - Find : 최대의 프로펠러 효율을 갖는 프로펠러의 주요치수(직경, 피치, 면적비), 배의 속도
- 2) 프로펠러의 주요치수를 결정하는 과정을 수학적으로 정식화하면 비선형 최적화 문제로 정식화되는 것을 보이고, 문제의 해를 구하는 과정을 습득한다.
- 3) 주어진 선속을 내기 위한 프로펠러 회전수 및 그 때의 소요마력 결정 문제를 정식화하고 문제의 해를 구하는 과정을 습득한다.
- 4) 프로펠러의 회전수와 배의 속력과의 관계를 알아본다.
- 5) 프로펠러의 회전수와 최적 직경 및 효율과의 관계를 알아본다
- 6) 주요치수 결정 과정을 C++ 프로그래밍하는 방법을 습득한다.

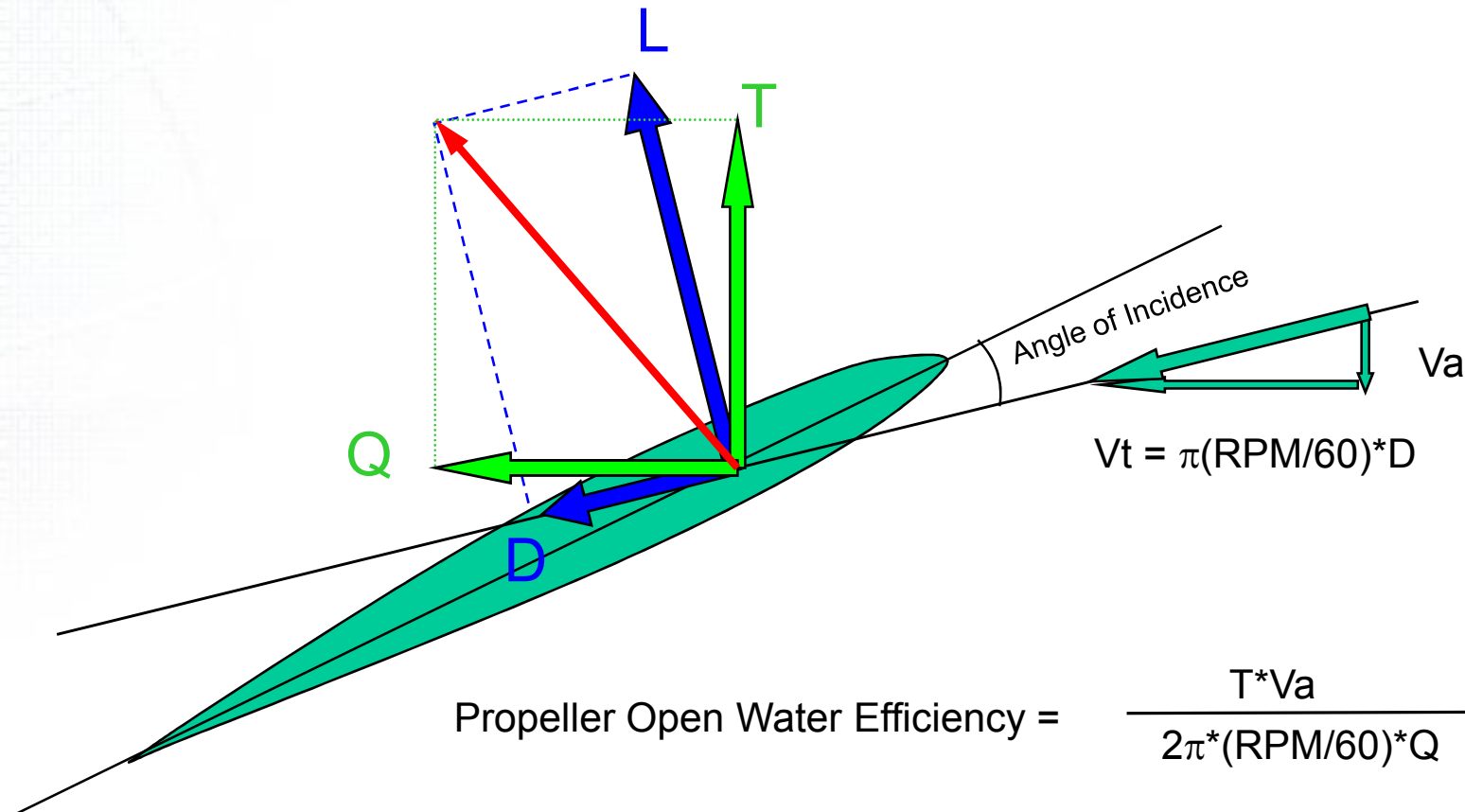
마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

프로펠러의 부분별 명칭

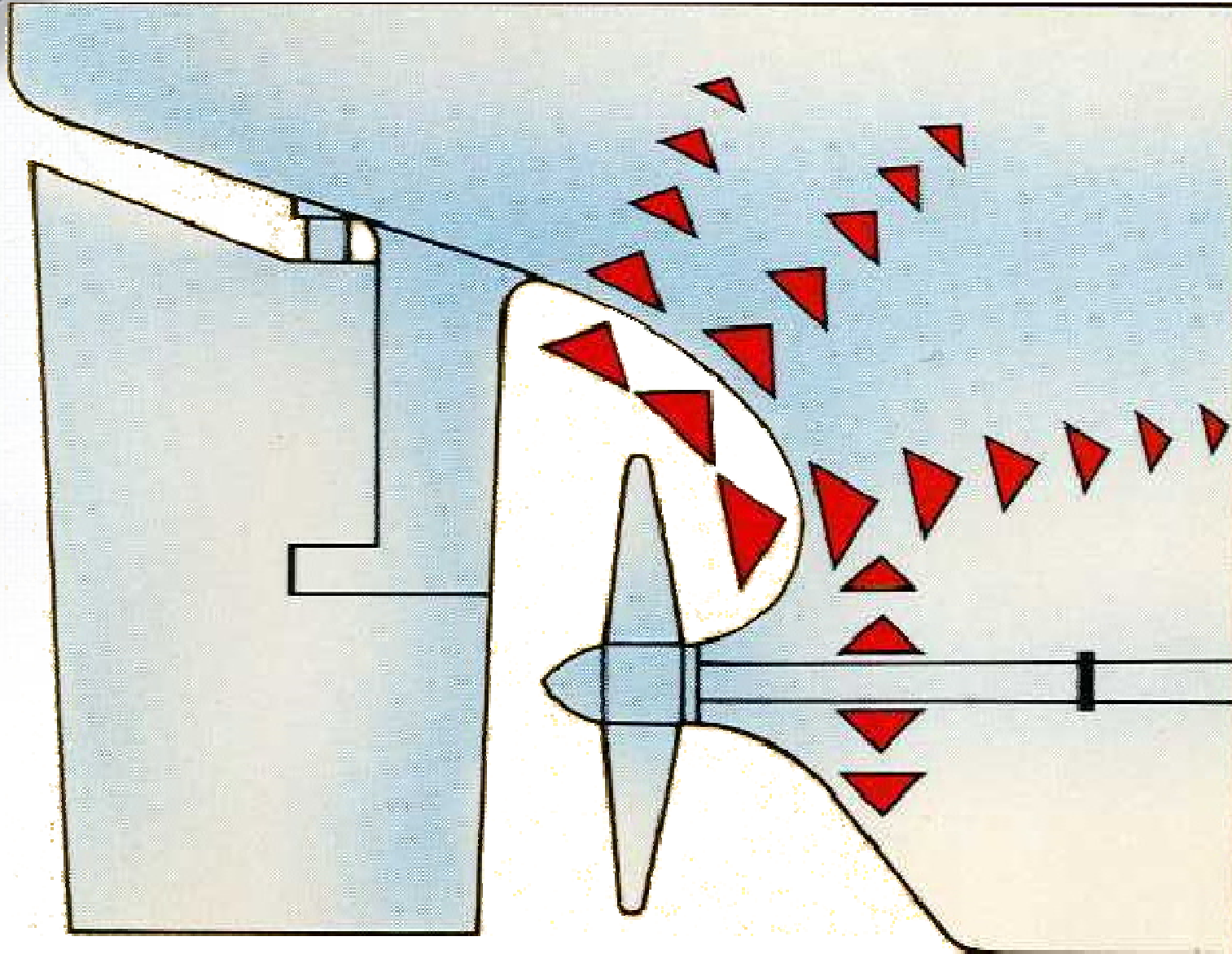


마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

프로펠러가 추력을 생성하는 원리 (“저항추진론”연계하여)

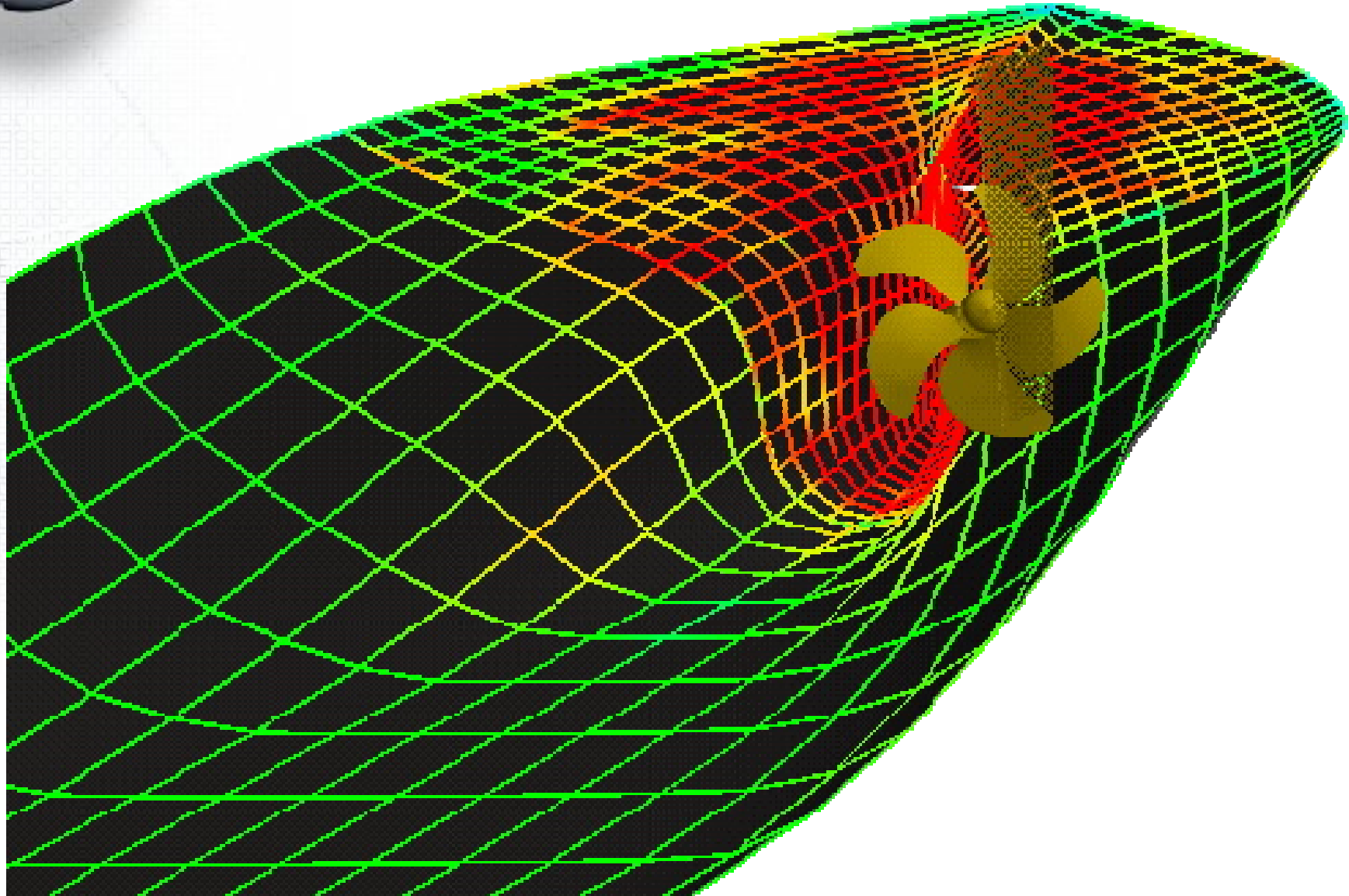


프로펠러의 작동이 선체 진동에 미치는 영향



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

프로펠러의 작동이 선체 압력에 미치는 영향



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

박용 디젤 엔진 및 프로펠러 (최근 자료로 수정 요, STX엔진 포함)



현대 중공업 프로펠러 공장

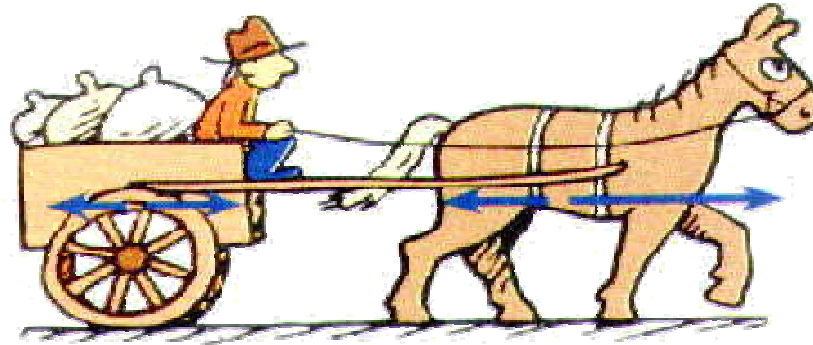
- ☑ 2007년도 박용 디젤 엔진 생산량 (‘해사프레스’ 자료)
 - 한국(3개사) 380기/1,600만 마력
 - 일본 527기/800만 마력
 - 중국 5개사 310만 마력
 - 현대 중공업: 860만 마력, 세계 1위(35%)
 - 두산엔진: 650만 마력, 세계 2위
 - STX엔진: 100만 마력

- ☑ 박용 디젤 엔진의 크기(예)
 - 6,700TEU급 컨테이너선 경우 : 93,000PS, 중량 2,200톤, 높이 14.8m, 폭 10.1m,
 - 가격: 선가의 약 1/10(110~120\$/PS)
 - 12,500TEU급 컨테이너선 경우: 14만 마력 생산 계획
 - 300,000톤 DWT 유조선의 경우: 프로펠러 직경/중량: 약 10m/약 72톤

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

프로펠러의 주요 치수 결정 개념

- Given & Find(1)



말 1마리로 짐을 실은 마차를 최대 속력으로 이끌기 위한 마차 바퀴의 설계

Given

- 말 1마리 = 주어진 주기관
- 바퀴의 마찰력 = 선박의 저항

Find

- 바퀴의 설계 = 프로펠러의 설계
- 최대 속력 = 선박의 최대 속력
- 바퀴의 직경 = 프로펠러 주요 치수

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

프로펠러의 주요 치수 결정 개념

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

Given

$P_{D.E.}$: 주기관이 프로펠러에 전달하는 마력, KW

유의 사항 : $P = DHP \cdot \eta_R$

n : 프로펠러 회전수, 1/sec

$R_T(v)$: 선박의 속력에 따른 저항, KN

Z : 프로펠러 날개 수

Find

D_P : 프로펠러 직경, m

P_i : 프로펠러 피치, m

A_E / A_O : 프로펠러 전개 면적비

v : 선박의 속력, m/s

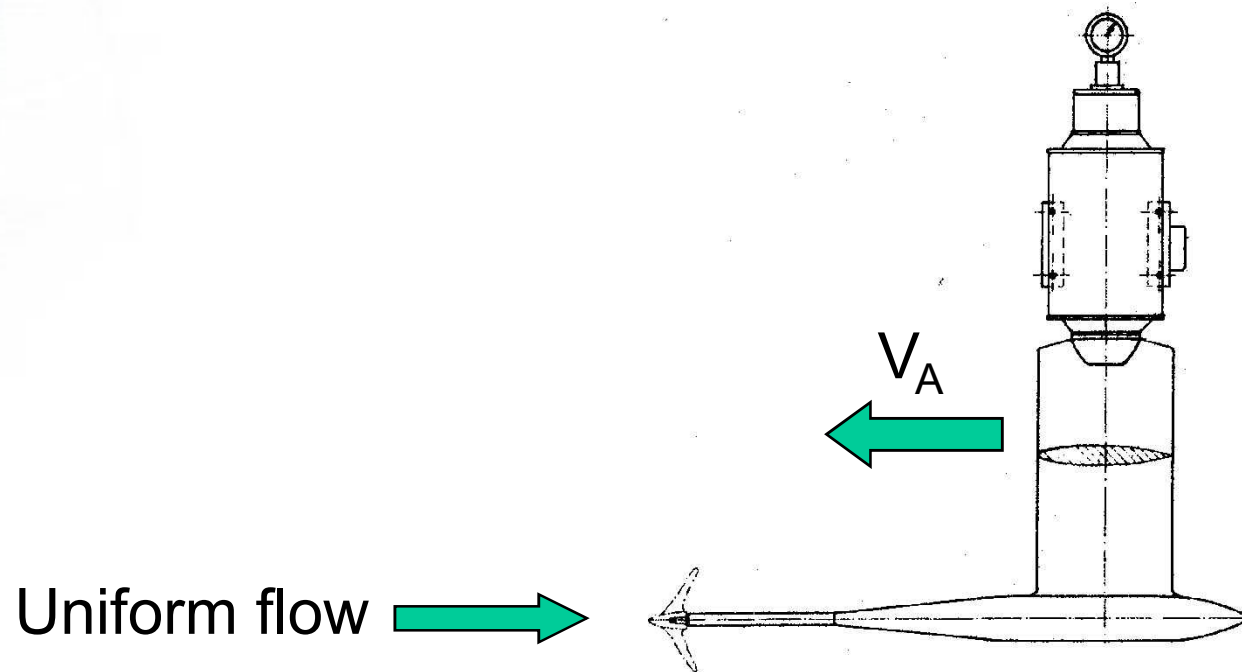
프로펠러의 설계점: $P_{D.E} = P_{NCR}$

$n = n_{MCR}$

프로펠러 단독 성능 곡선

(Propeller Open Water Curve - POW curve)

- 모형 프로펠러가 선체의 영향 없이 단독적으로 작동됨
- 프로펠러 작동 시 추력(Thrust), 토크(Torque), 회전수 및 속도를 측정함



프로펠러 단독 성능 곡선(Propeller Open Water Curve - POW curve)

프로펠러 주요 무차원 계수

① 추력 계수 :
$$\frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D_P^4} = K_T$$

② 토오크 계수 :
$$\frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D_P^5} = K_Q$$

③ 프로펠러 전진비 :
$$J = \frac{v_A}{n \cdot D_P}$$

$$v_A = v \cdot (1 - w)$$

④ 프로펠러 단독 효율 :
$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

v : 배의 속력 [m/s]

w : 반류 계수

T : 프로펠러가 내는 Thrust[kN]

Q : 프로펠러가 엔진으로부터 흡수한 Torque [kN·m]

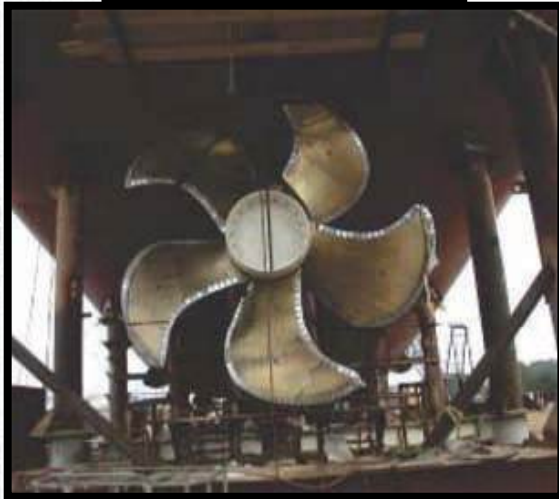
n : 디젤엔진 회전수 [1/s]

D_P : 프로펠러 직경 [m]

P_i : 프로펠러 피치 [m]

프로펠러 단독 성능 곡선 (Propeller Open Water Curve - POW curve)

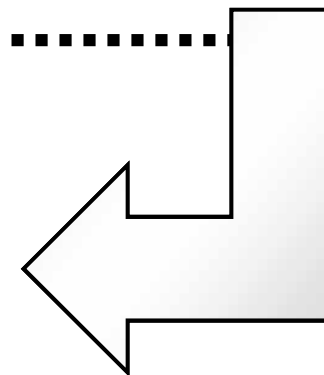
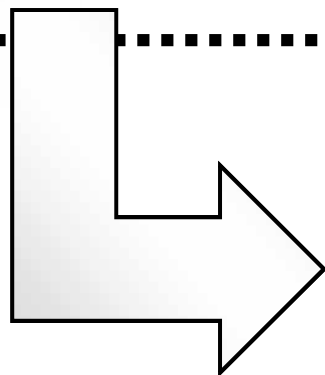
실선의 프로펠러



모형의 프로펠러



기하학적으로 상사



동일한 무차원 계수
(K_T, K_Q, J)

$$\frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4} = K_T$$

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

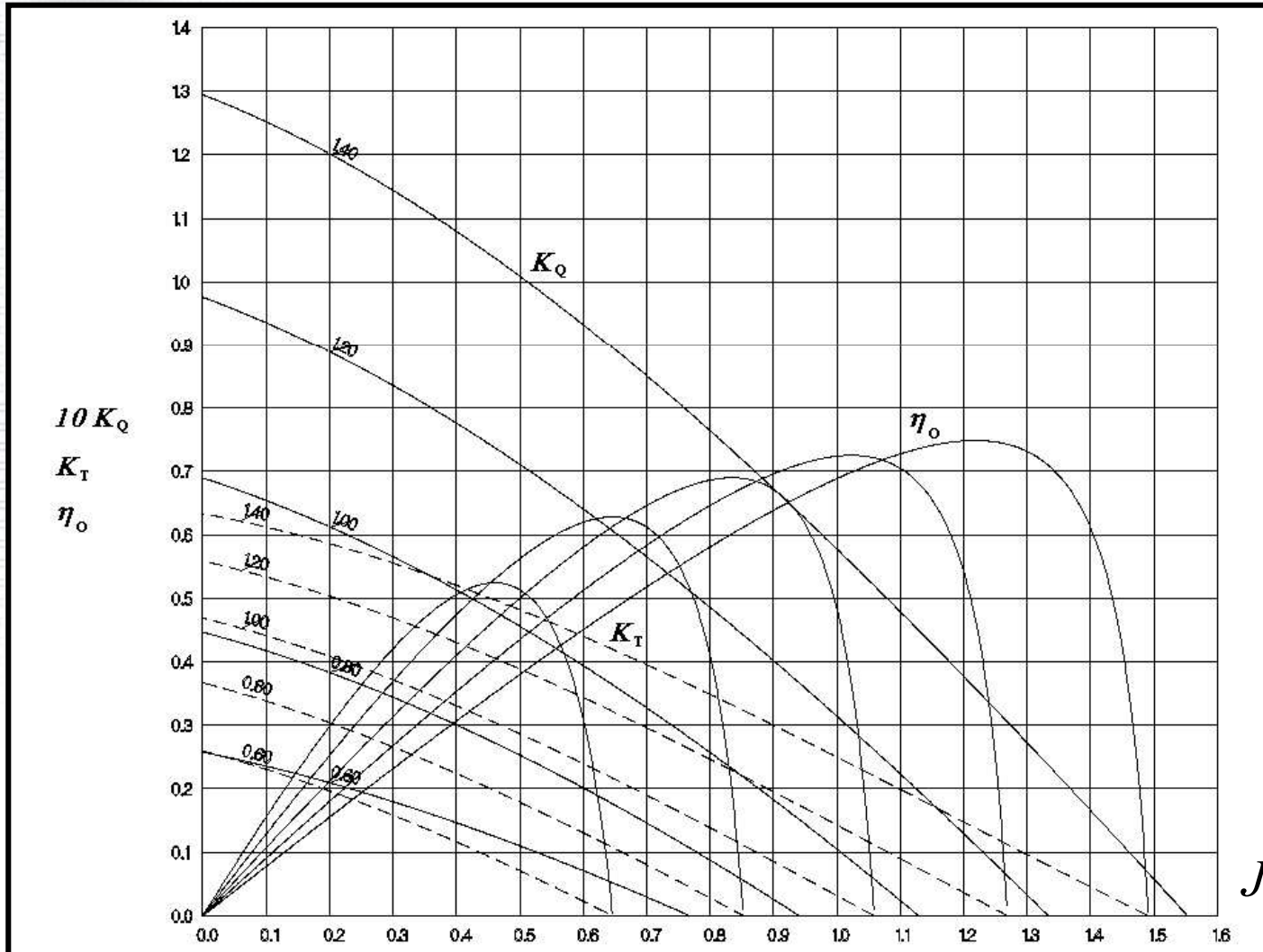
$$J = \frac{v_A}{n \cdot D_p}$$

$$v_A = v \cdot (1 - w)$$

프로펠러 단독 성능 곡선

(Propeller Open Water Curve - POW curve)

- 모형 프로펠러의 피치비 (P_i/D_p)를 변화시켜가며 측정한 결과



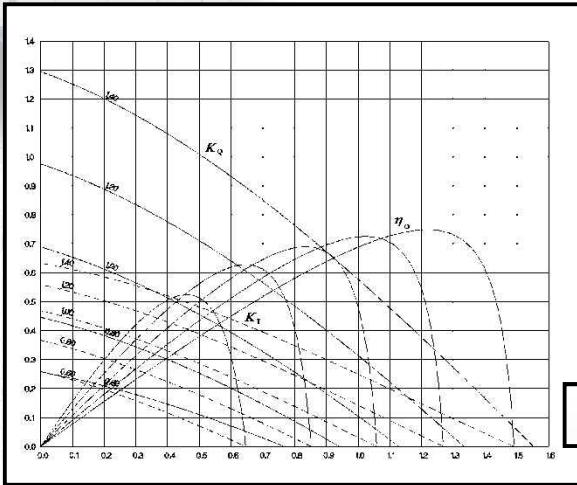
$$\frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4} = K_T$$

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

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D_p}$$

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

프로펠러 단독 성능 곡선의 회귀해석식



- 해석 결과를 수식으로 표현
(전진비, 피치비, 전개 면적비, 날개수의 함수)

$$K_T \text{ and } K_Q = \sum C_{s,t,u,v} (J)^s (P_i / D_P)^t (A_E / A_O)^u z^v$$

K_T					K_Q				
$C_{s,t,u,v}$	s (J)	t (P/D_P)	u (A_E / A_O)	v (z)	$C_{s,t,u,v}$	s (J)	t (P/D_P)	u (A_E / A_O)	v (z)
+0.00880496	0	0	0	0	+0.00379368	0	0	0	0
-0.204554	1	0	0	0	+0.00886523	2	0	0	0
+0.166351	0	1	0	0	-0.032241	1	1	0	0
+0.158114	0	2	0	0	+0.00344778	0	2	0	0
-0.147581	2	0	1	0	-0.0408811	0	1	1	0
-0.481497	0	1	1	0	-0.108009	1	1	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

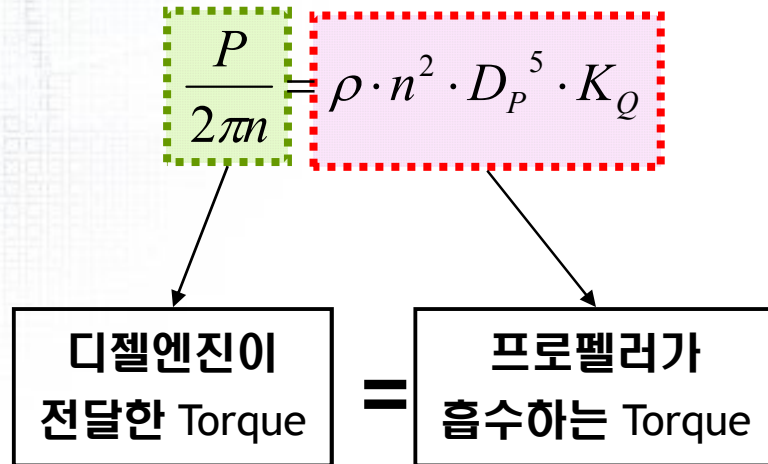
Given	P [kW] : 디젤엔진이 프로펠러에 전달하는 마력 n [1/s] : 프로펠러 회전수 $R_T(v)$ [kN] : 선박의 속력에 따른 저항 z : 프로펠러 날개수
Find	D_p [m] : 프로펠러 직경 P_i [m] : 프로펠러 피치 A_E/A_O : 프로펠러 전개 면적비 v [m/s] : 배의 속력

프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

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

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 Torque를 프로펠러가 흡수하는 조건



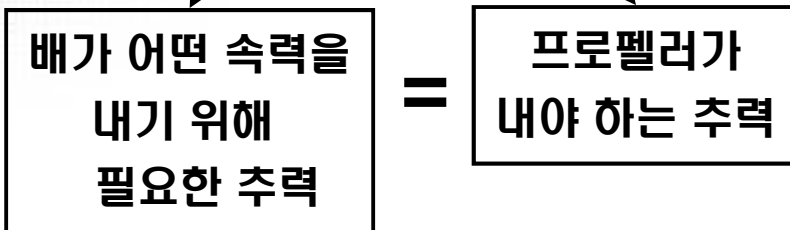
프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

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

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

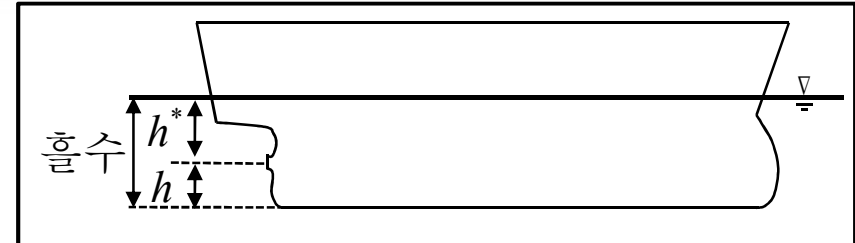
$$\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T$$



프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

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



▪ 조건식3 : Cavitation (공동현상)이 발생하지 않는 최소 면적비 조건

① Keller의 최소면적비 경험식

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

K : 단추진 = 0.2, 쌍추진 = 0~0.1
 $P_0 - P_v = 99.047 \text{ kN/m}^2$ at 15°C Sea water
 h^* : 축 침수 깊이
 h : Shaft Center height (height form base line)

① Burrill의 최소면적비 경험식

$$A_E / A_O \geq F \cdot (\eta_0 / (1/J)^2) / [\{1 + 4.826(1/J)^2\} \cdot (1.067 - 0.229 \cdot P_i / D)]$$

$$F = \frac{\eta_R \cdot B_P^2 \cdot v_A^{1.25}}{287.4(10.18 + h)^{0.625}}$$

$$B_P = n \cdot P^{0.5} / v_A^{2.5}$$

$$v_A = v \cdot (1 - w)$$

프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델 (요약)

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

프로펠러 주요치수 결정 문제를 비선형 최적화 문제로 정의하여 해결함

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

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 Torque를 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

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

- 조건식3 : Cavitation (공동현상)이 발생하지 않는 최소 면적비 조건

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

4개의 미지수

2개의 등식과
1개의 부등호 제약조건

비선형 최적화 문제

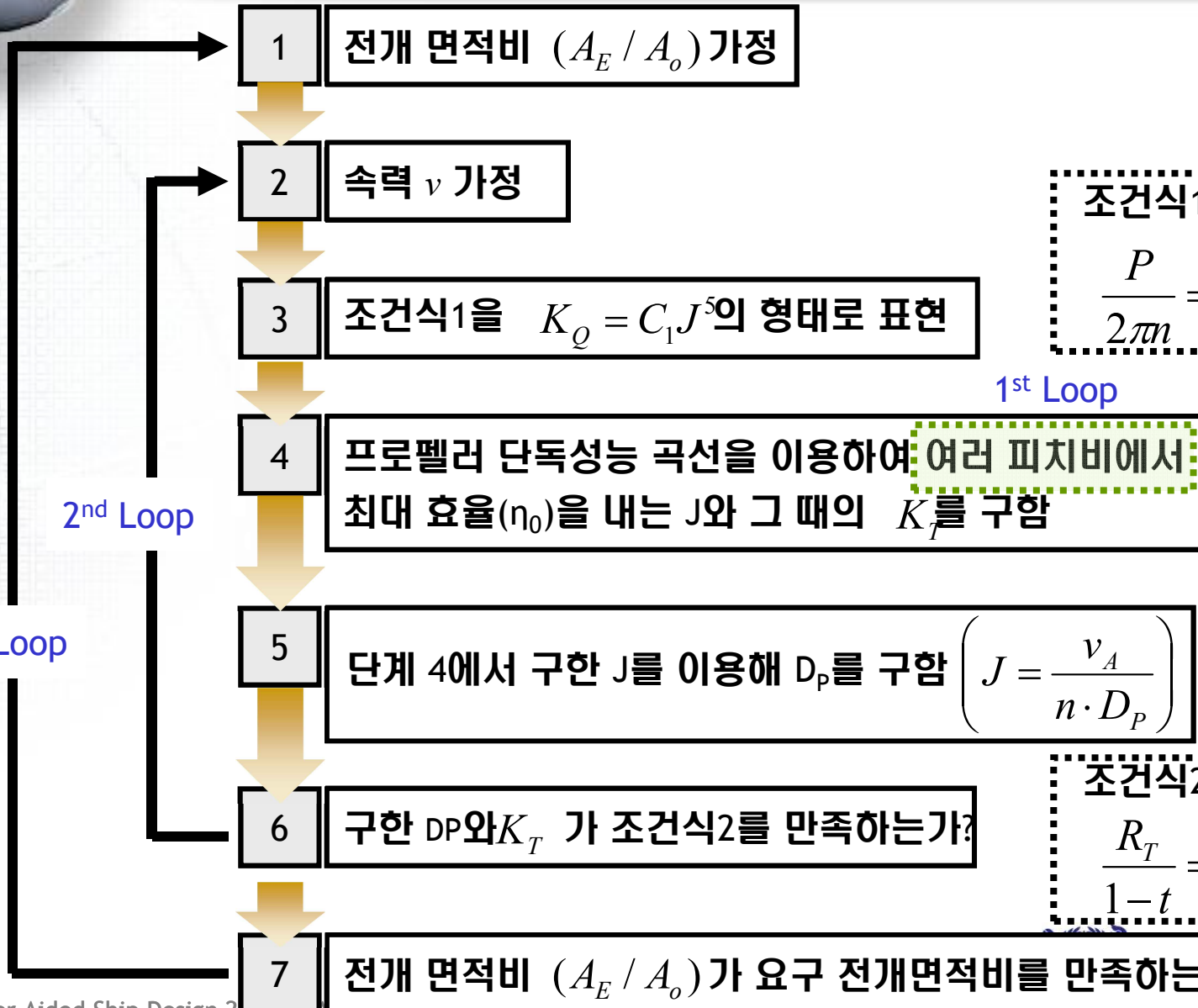
목적 함수 : Find Maximum η_o

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

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

수계산을 이용하여 프로펠러 주요치수를 결정할 때 사용하는 방법(주요치수 계산 절차를 이해하기 쉬움)



조건식1:

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

조건식2:

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

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

· 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

1 전개 면적비 (A_E / A_o) 가정 $\left(\begin{array}{l} A_o : \text{원판의 면적} (\pi D_p^2 / 4) \\ A_E : \text{프로펠러의 전개 면적} \end{array} \right)$

2 속도 v 가정

3 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$ 의 형태로 표현

$$\text{조건식1} \left(\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D_p^5 \cdot K_Q \right), \quad J = \frac{v_A}{n \cdot D_p} \left(\Rightarrow \frac{nJ}{v_A} = \frac{1}{D_p} \right)$$

$$K_Q = \frac{P}{2\pi n^3 \rho} \cdot \frac{1}{D_p^5} = \frac{P}{2\pi n^3 \rho} \cdot \left(\frac{nJ}{v_A} \right)^5 = \frac{P \cdot n^2}{2\pi \rho v_A^5} J^5 = C_1 J^5 \quad \left(C_1 = \frac{P \cdot n^2}{2\pi \rho v_A^5} \right)$$

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

- A_E/A_O , Z , P_i/D 가 주어졌을 때, J^5 에 관한 비선형 방정식

디젤엔진이 전달한 Torque

$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \cdot K_Q, \quad J = \frac{v_A}{n \cdot D}$$

$$\therefore \frac{K_Q}{J^5} = \frac{P \cdot n^2}{2\pi \rho \cdot v_A^5} = C$$

$$K_Q = C \cdot J^5$$

계열 프로펠러가 흡수하는 Torque 및
그 때 내는 Thrust 에 관한 회귀 해석식

$$K_Q = \sum C_{s,t,u,v} \cdot J^s \cdot (P_i/D)^t \cdot (A_E/A_O)^u \cdot z^v$$

K_T				
$C_{s,t,u,v}$	s (J)	t (P/D)	u (A_E/A_O)	v (z)
+0.00880496	0	0	0	0
-0.204554	1	0	0	0
+0.166351	0	1	0	0
+0.158114	0	2	0	0
-0.147581	2	0	1	0

두 식을 연립함

$$\therefore C \cdot J^5 = \sum C_{s,t,u,v} \cdot J^s \cdot (P_i/D)^t \cdot (A_E/A_O)^u \cdot z^v$$

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

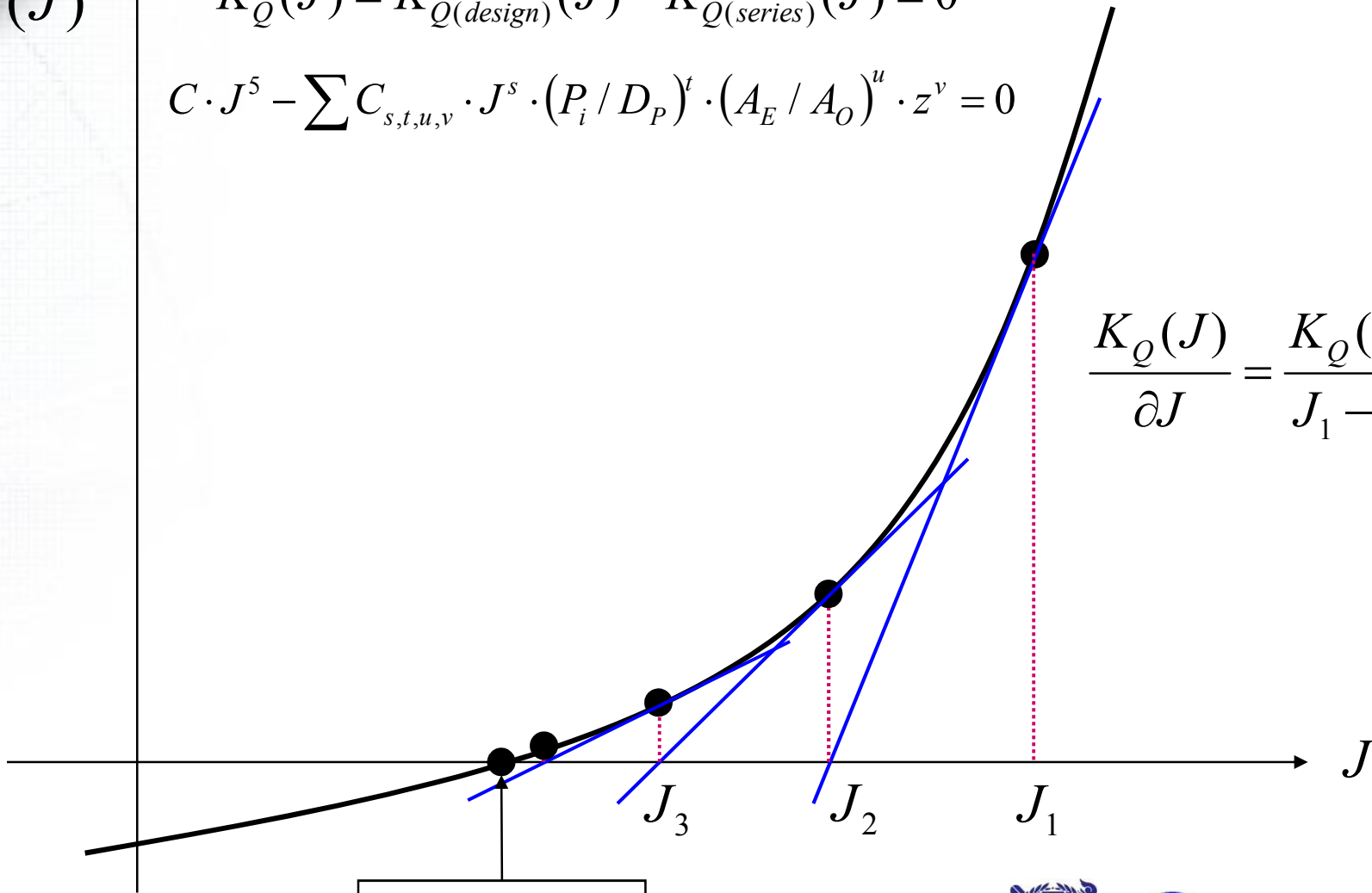
- 비선형 방정식의 해를 구하는 방법: Newton & Raphson 방법

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

$K_Q(J)$

$$K_Q(J) = K_{Q(\text{design})}(J) - K_{Q(\text{series})}(J) = 0$$

$$C \cdot J^5 - \sum C_{s,t,u,v} \cdot J^s \cdot (P_i / D_P)^t \cdot (A_E / A_O)^u \cdot z^v = 0$$



$$\frac{K_Q(J)}{\partial J} = \frac{K_Q(J_1)}{J_1 - J_2}$$

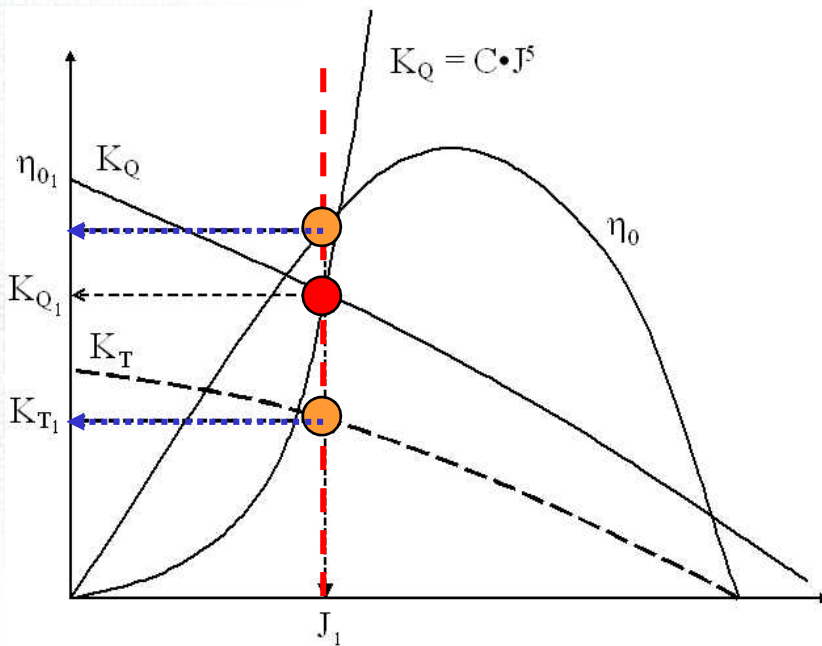
Solution

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

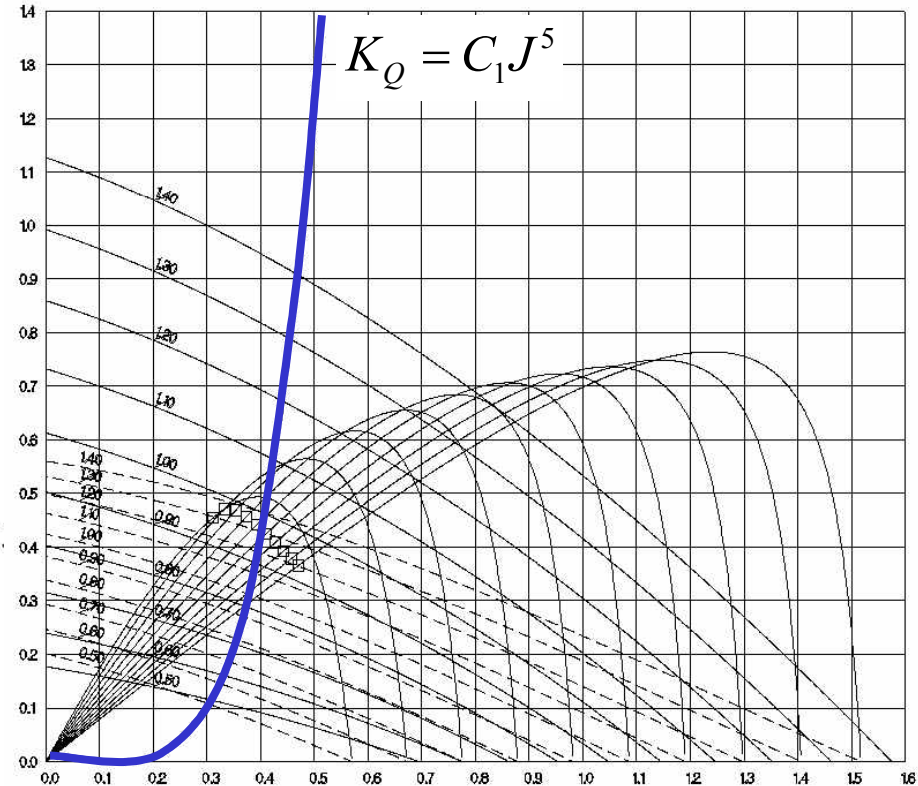
- A_E/A_O , Z , P_i/D 가 주어졌을 때, J^5 에 관한 비선형 방정식의 해를 그래프로 구하는 개념

4

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



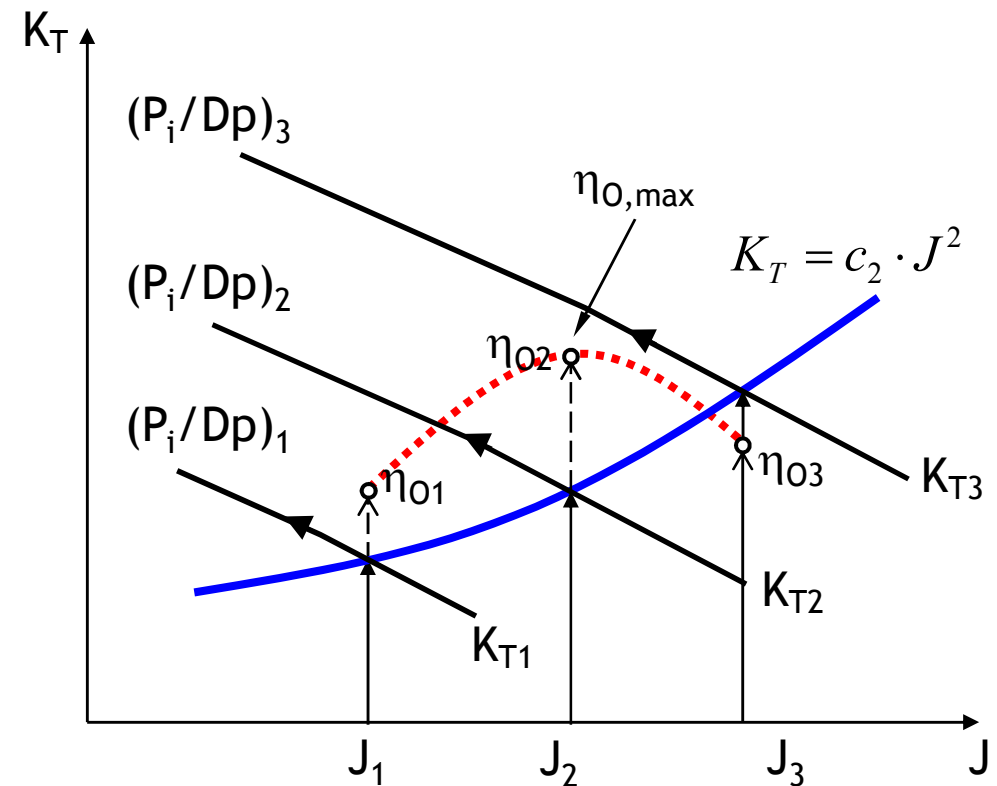
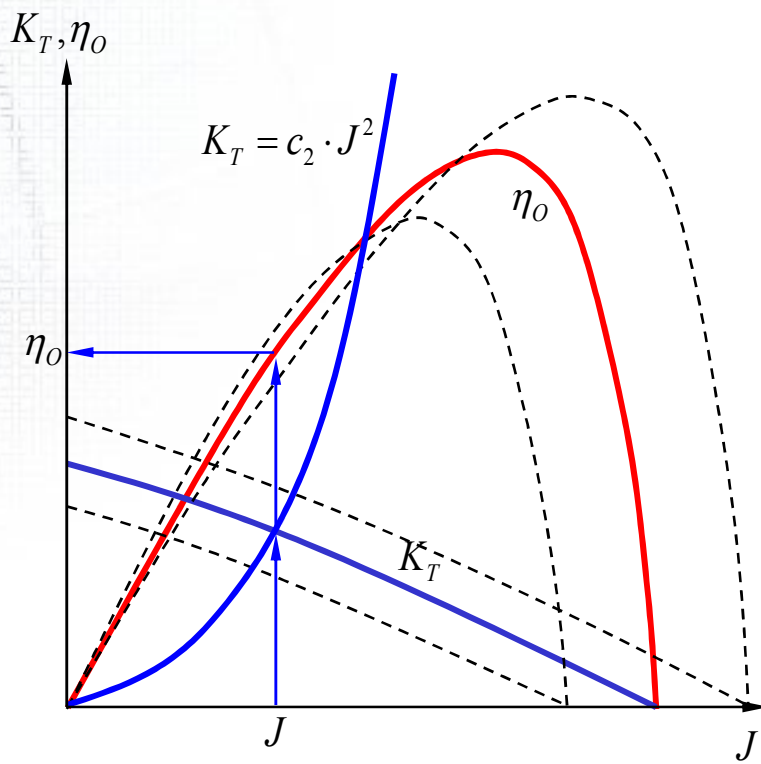
Power = 2758.000 (kW) Rpm = 220.000 Va = 4.313 (m/s)
 $A_e/A_o = 0.5500$ z = 4



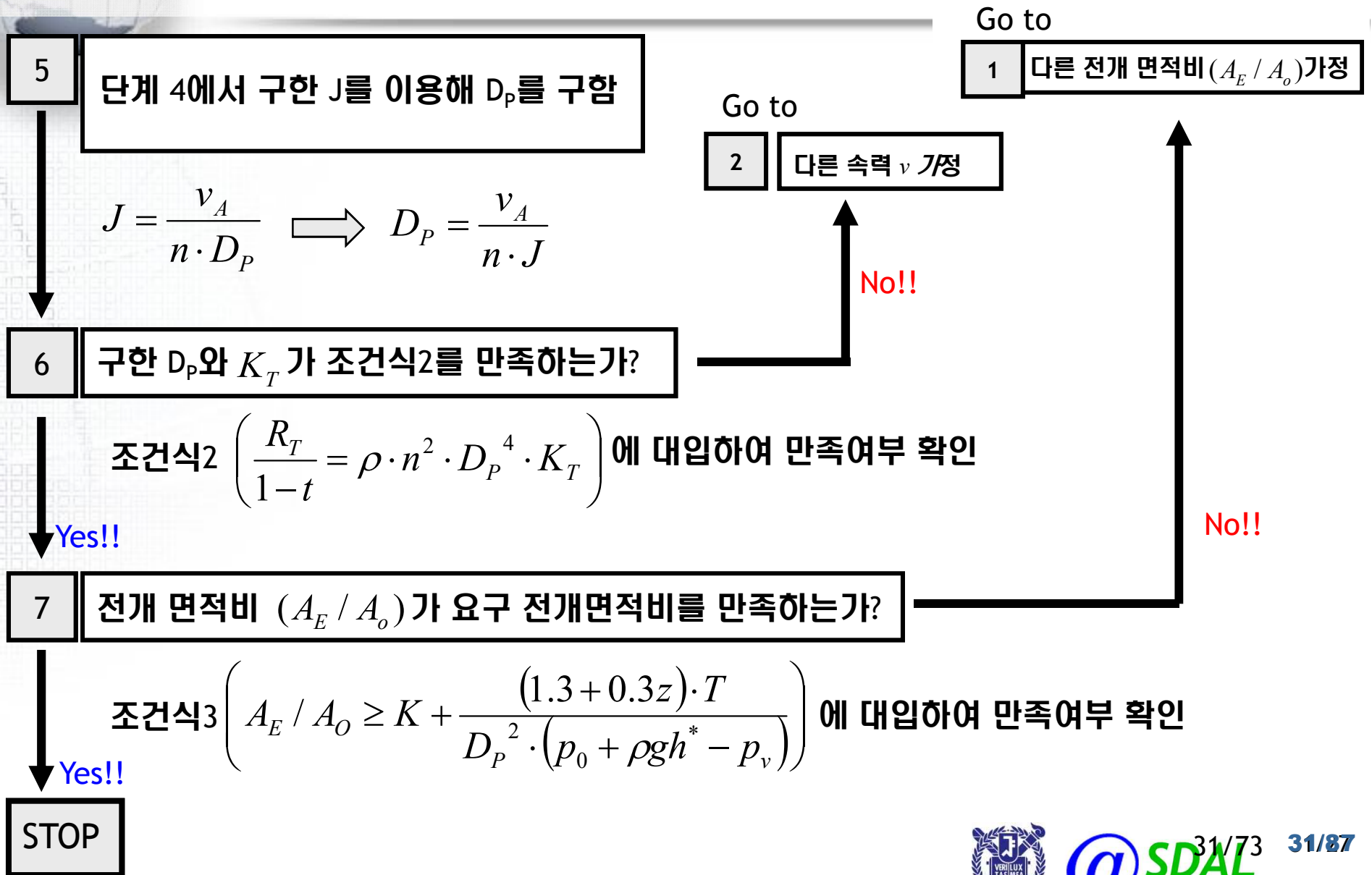
[3] 프로펠러 효율(η_0) 및 전진비(J) 추정

3

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

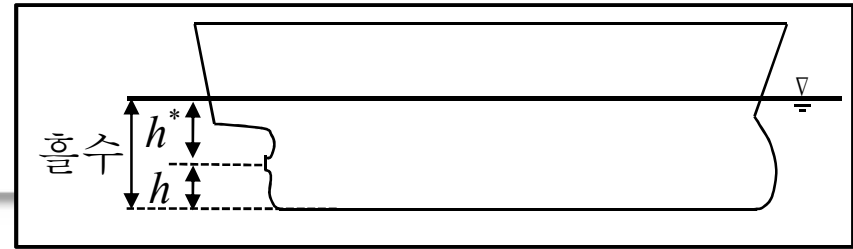


프로펠러 최적 주요치수 결정 방법



프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우



(Question) DWT 7,400 ton/400TEU 급 세미 컨테이너선의 프로펠러 주요 치수를 결정하시오.

Given Data

▪ 디젤엔진 마력과 회전수

- MCR = 4,500PS , at 220rpm : **연속최대출력**
- NCR = 85%MCR , at 208rpm : **상용출력**
- **프로펠러 회전수** : 220rpm
- **날개 수(z)** : 4

▪ 기타

- h (Shaft Center Height) : 2.35 [m]
- h^* (**축 침수 깊이**) : 4.15 [m]
- **흘수** : 6.5 [m]
- Sea Margin = 15%

▪ Model Test

Ship Speed V [kts]	정수중 EHP [PS]	T [kN]	R [kN]	w	t	η_R	$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
12.5	1686	248	192.5	0.381	0.224	1.018	1.254
13.0	1965	278	216.0	0.380	0.223	1.022	1.253
13.5	2240	304	236.8	0.379	0.221	1.024	1.254
14.0	2536	331	258.5	0.377	0.219	1.026	1.253

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

▪ Propeller 설계점 : NCR의 마력, MCR의 회전수

$$NCR = 3825 \text{ [PS]}$$

$$N_{MCR} = 220/60 \text{ [1/s]}$$

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

1 전개 면적비 (A_E / A_o) 가정

$(A_E / A_o) = 0.55$ 로 가정

2 속도 v 가정

$v = 13.5 [kts]$ 로 가정

$v = 13.5 [kts] = 13.5 \times 0.5144 = 6.945 [m / s]$

Ship Speed V [kts]	정수중 EHP [PS]	T [kN]	R [kN]	w	t	η_R	$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
13.5	2240	304	236.8	0.379	0.221	1.024	1.254

※ 속력이 바뀔 경우 나머지 계수는 선형 보간으로 구함

$$P = DHP = \frac{NCR(S.W.)}{1.025} \times 0.736 \times \eta_T \times \eta_R = \frac{3,825}{1.025} \times 0.736 \times 0.98 \times 1.024 = 2.758 \text{ [kW]}$$

※ 단독 프로펠러를 기준으로 만든 곡선이므로 선미에서 전달되는 마력을 단독적으로 작동하는 마력으로 변환하기 위하여 η_R 을 고려해야 함

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

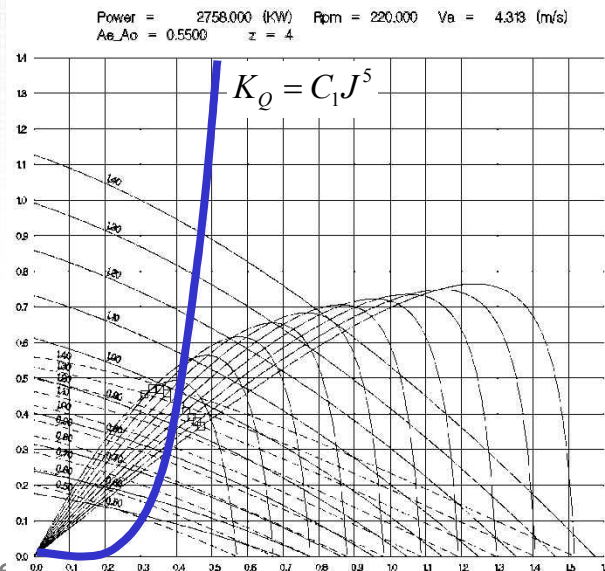
3 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$ 의 형태로 표현

$$v_A = v(1-w) = 6.945 \times (1-0.379) = 4.313$$

$$C_1 = \frac{P \cdot n^2}{2\pi \rho v_A^5} = \frac{2,758 \times (220/60)^2}{2\pi \times 1.0 \times 4.313^5} = 3.9551$$

$$\therefore K_Q = C_1 J^5 = 3.9551 J^5$$

4 프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 여러 피치비에서 최대 효율(η_0)을 내는 J와 그 때의 K_T 를 구함



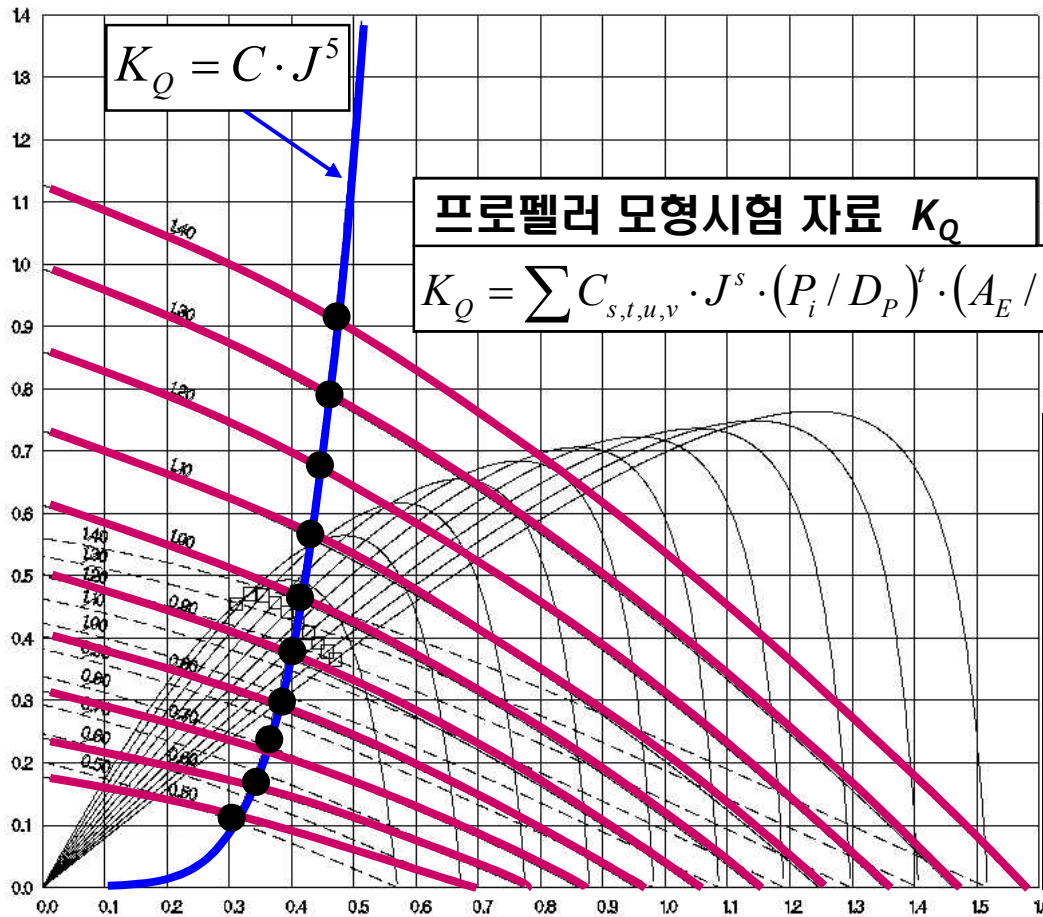
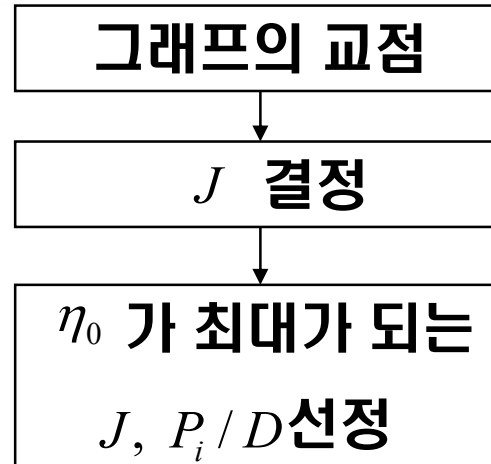
Compute on Methods

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

$$P = 2758(KW), n = 220, v_A = 4.313(m/s),$$

$$A_E / A_O = 0.55, z = 4$$

Power = 2758.000 (KW) Rpm = 220.000 Va = 4.313 (m/s)
Ae_Ao = 0.5500 z = 4



P_i/D_P	J	η_0	K_T
0.50	0.3105	0.4542	0.1049
0.60	0.3323	0.4711	0.1428
0.70	0.3535	0.4684	0.1818
0.80	0.3737	0.4570	0.2215
0.90	0.3927	0.4418	0.2610
1.00	0.4105	0.4252	0.2999
1.10	0.4271	0.4086	0.3378

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

5

단계 4에서 구한 J 를 이용해 D_p 를 구함

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \Rightarrow D_P = \frac{v_A}{n \cdot J} = \frac{4.313}{(220/60) \times 0.3323} = 3.5396[m]$$

6

구한 D_p 와 K_T 가 조건식2를 만족하는가?

$$\text{선박이 요구하는 추력}(T_S) = \frac{R_T}{1-t} = \frac{236.8}{1-0.221} = 304[kN]$$

프로펠러가 낼 수 있는 추력(T_p)

$$= \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T = 1.025 \times (220/60)^2 \times 3.5396^4 \times 0.1428 = 308.8956[kN]$$

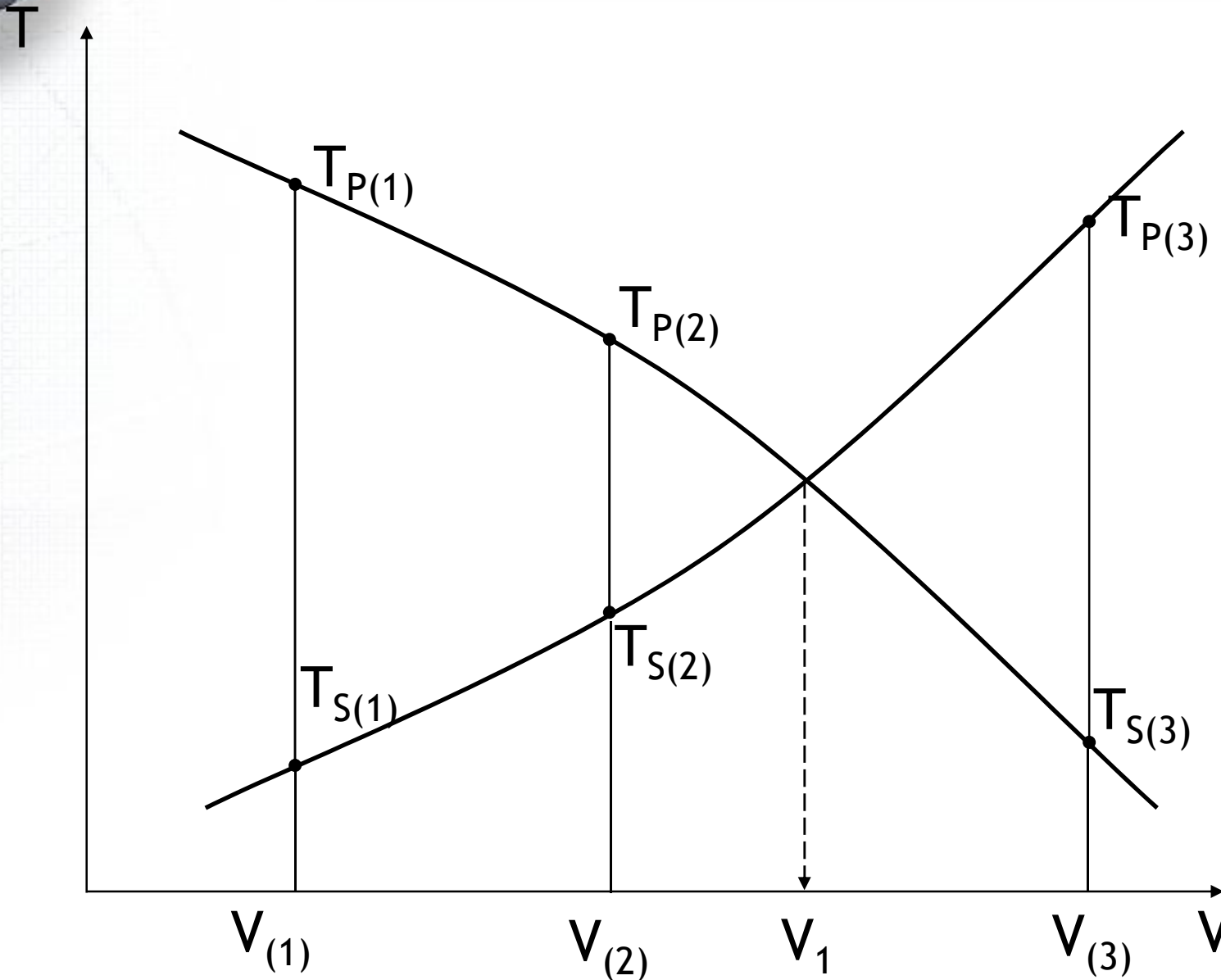
(선박이 요구하는 추력) < (프로펠러가 낼 수 있는 추력)

즉, 더 큰 속력을 낼 수 있음 -> 가정한 것 보다 더 큰 속력으로 가정하고 3~6의 과정 반복함

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

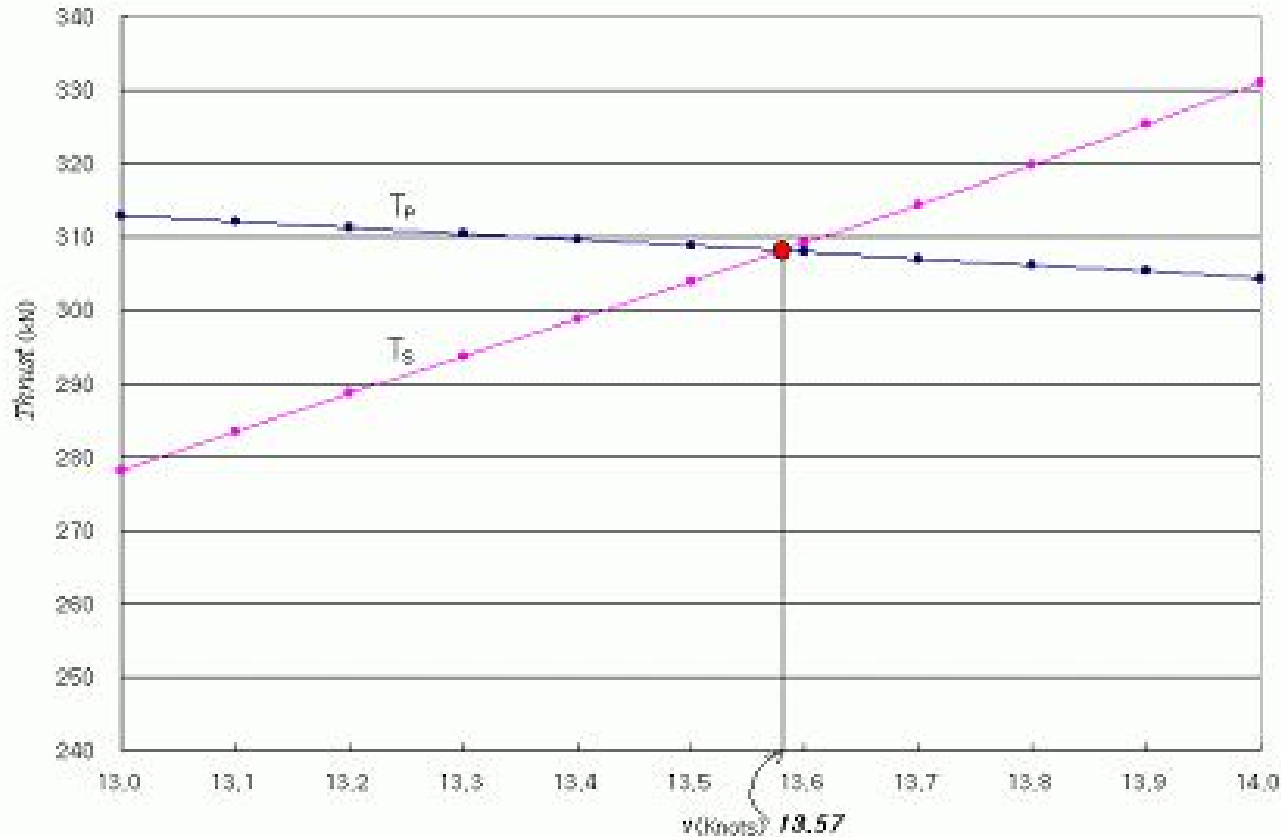
- 속력 v 결정을 위한 “추력 동일” 비선형 방정식($T_S = T_P$)의 해를 그래프를 이용
구하는 개념

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



프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

- 전개 면적비 (A_E / A_O) 가 0.55일 때, 프로펠러 주요 요목



A_E/A_O	0.55
v (Knots)	13.57
w	0.3788
v_A (Knots)	8.4289
J	0.3339
η_O	0.4727
D_P (m)	3.5416
Pi/D_P	0.60
T_P (kN)	308.1892
T_S (kN)	307.6054
$(T_P - T_S)$	오차 = 0.5838

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

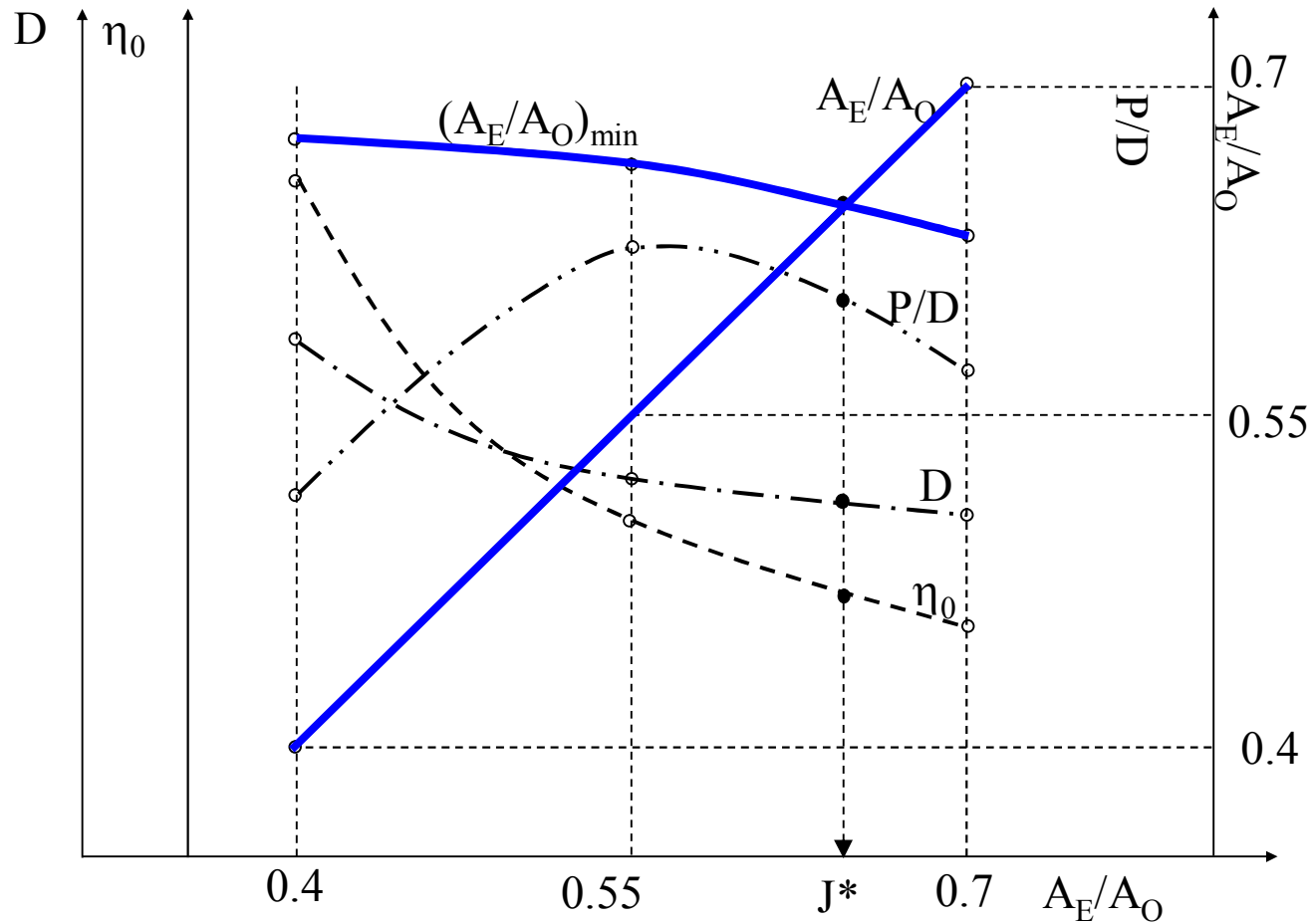
7 전개 면적비 (A_E / A_o)가 요구 전개면적비를 만족하는가?

$$\begin{aligned} A_E / A_o &\geq K + \frac{(1.3 + 0.3z) \cdot T}{D_P^2 \cdot (p_0 + \rho g h^* - p_v)} \\ &= 0.2 + \frac{(1.3 + 0.3 \times 4) \cdot 308.1892}{3.5416^2 \times (99.047 + 1.025 \times 9.81 \times 4.15)} = 0.6363 \end{aligned}$$

새로운 전개 면적비를 가정하여 2~7의 과정을 반복함

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

- 최소 전개 면적비(A_E/A_O)의 검토



Result

A_E/A_O	0.65
v (Knots)	13.48
w	0.3791
v_A (Knots)	8.3696
J	0.3329
η_0	0.4650
D_p (m)	3.5278
P_i/D_p	0.65
K_T	0.1411
K_Q	0.0161
T_p (kN)	301.1685
T_s (kN)	302.9741
$(T_p - T_s)$	-1.8056
A_E/A_O (Keller)	0.6401



주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정

Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정(1)

- 프로펠러 주요치수가 결정된 후, 주어진 속력을 내기 위한 프로펠러 회전수 및 그 때의 소요 마력 결정 문제

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

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 토크를 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

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

2개의 미지수

2개의 등식



비선형 방정식 문제

주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정(2)

1 조건식2를 $K_T = C_2 J^2$ 의 형태로 표현

$$\text{조건식2} \left(\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T \right), \quad J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \left(\Rightarrow n = \frac{v_A}{J \cdot D_P} \right)$$

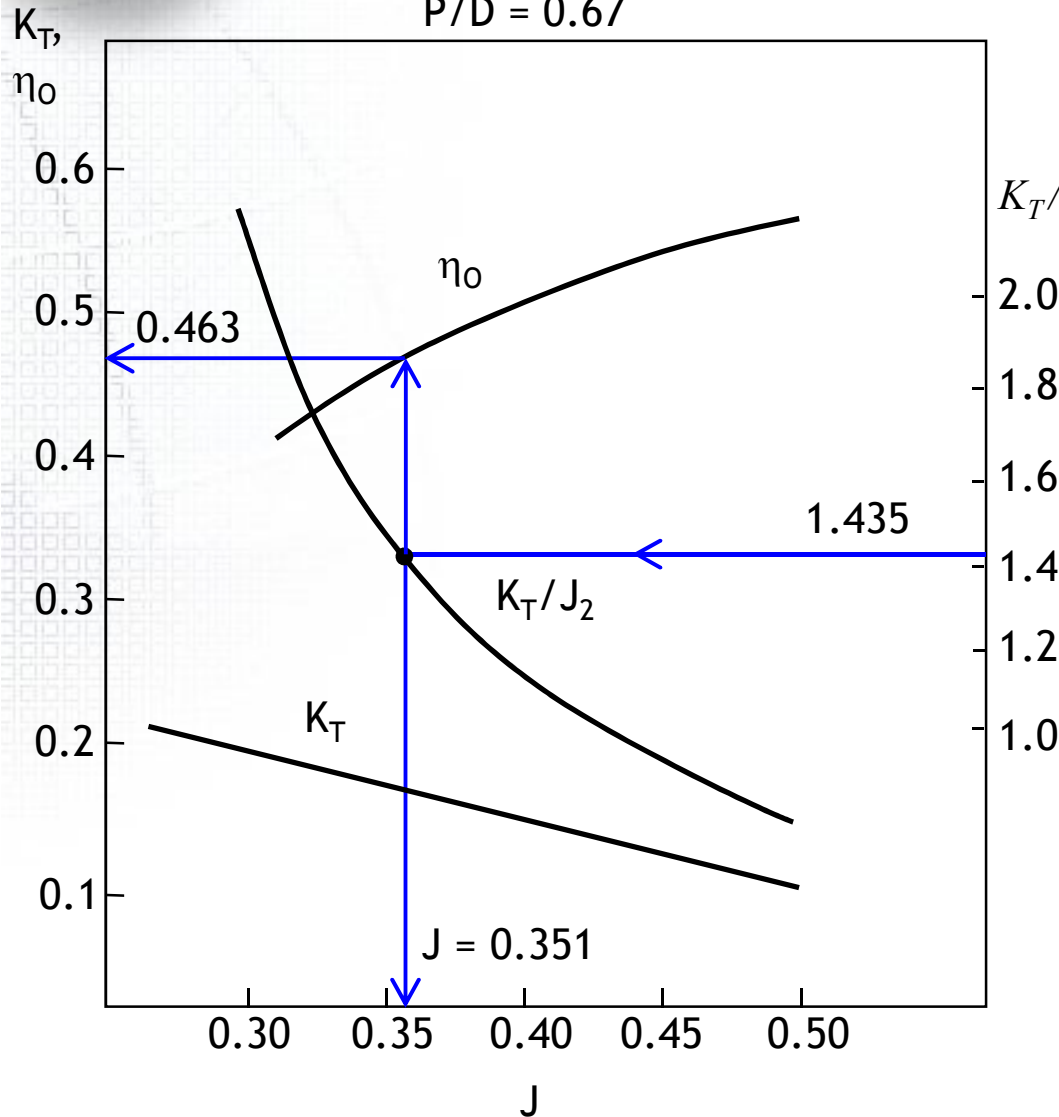
$$K_T = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^4} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^4} \cdot \left(\frac{J \cdot D_P}{v_A} \right)^2 = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P^2 v_A^2} J^2 = C_2 J^2$$

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

주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정(3)

프로펠러 단독 성능 곡선

P/D = 0.67



프로펠러 주요치수가 결정된 후,
주어진 속력을 내기 위한
프로펠러 전달 마력 및 회전수 구하기

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

V_S [Kts]	EHP in calm water [PS] (1)	w	t	K_T/J^2	J (2)	N[RPM] (3)	η_o (4)	BHP in calm water (5)
12.5	1686	0,381	0,224	1,374	0,355	202	0,470	2867
13.0	1965	0,380	0,223	1,418	0,352	212	0,465	3367
13.5	2240	0,379	0,221	1,435	0,351	221	0,463	3844
14.0	2536	0,377	0,219	1,443	0,348	232	0,460	4376
14.5	2898	0,375	0,216	1,470	0,345	243	0,457	5020

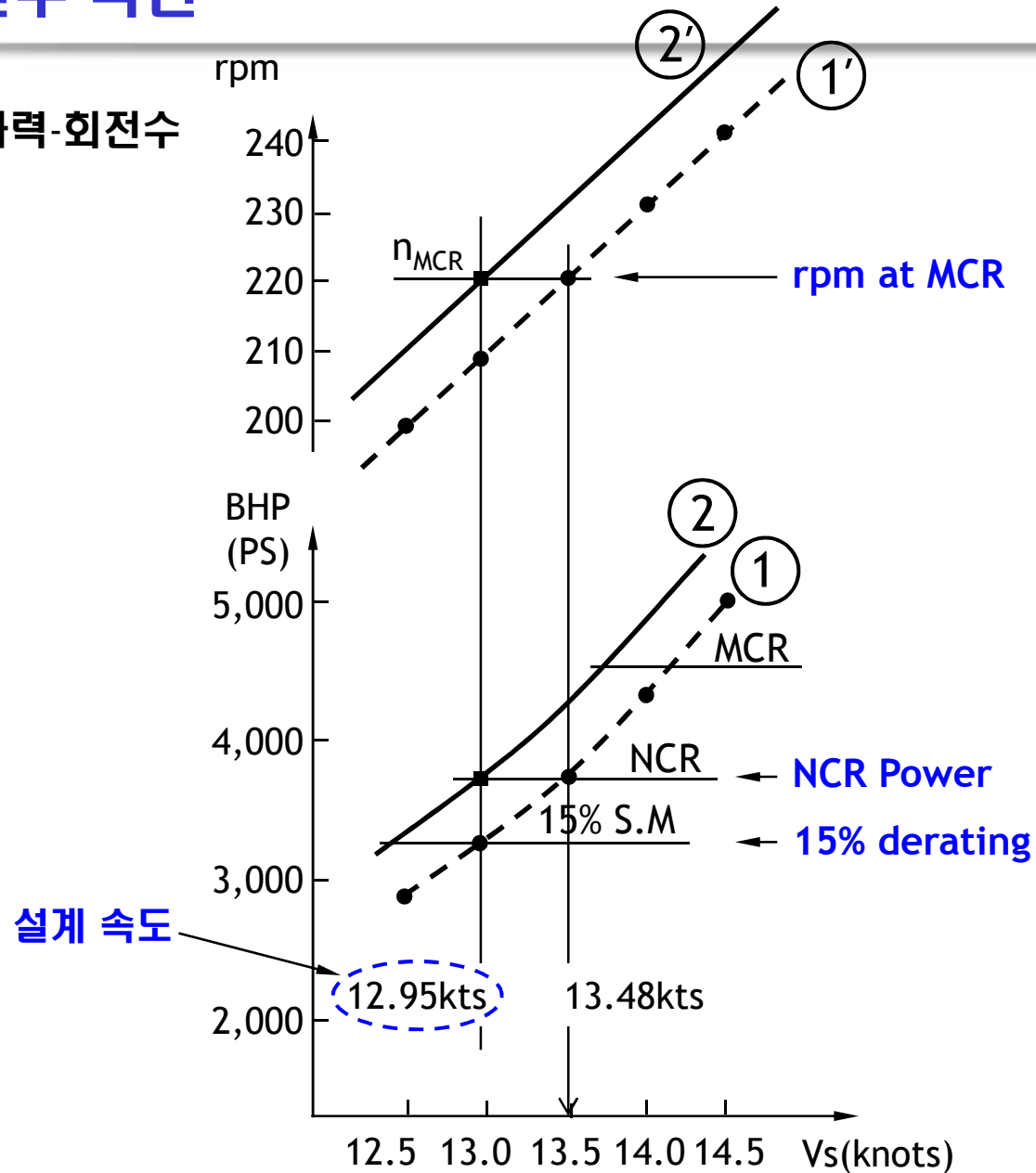
마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

주어진 프로펠러에서 속도-마력-회전수 결정(4)

- 속도-마력-회전수 곡선

실제 프로펠러의 속도-마력-회전수

- ① 정수 중
- ② Sea margin 고려





Term Project #10
calculation of principle dimensions
of a propeller and ship
by using optimization methods



프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성

Guide(I)

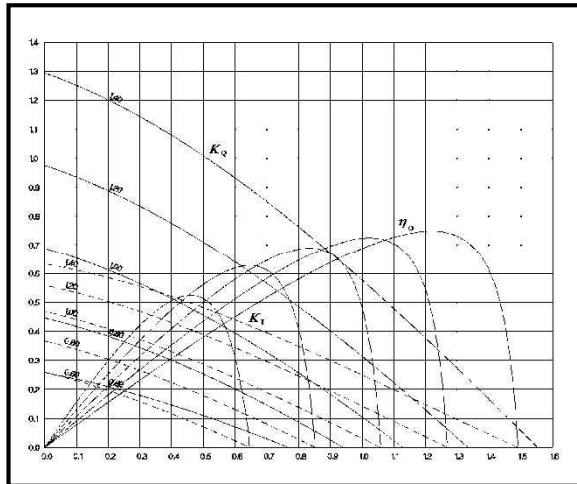
- 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

· 주기관 마력과 프로펠러 회전수가 주어진 경우

CPropellerDB Class

· 프로펠러 단독 성능 곡선의 회귀분석식



$C_{s,t,u,v}$	K_T					K_Q				
	s (J)	t (P/D _P)	u (A _E / A ₀)	v (z)		$C_{s,t,u,v}$	s (J)	t (P/D _P)	u (A _E / A ₀)	v (z)
+0.00880496	0	0	0	0		+0.00379368	0	0	0	0
-0.204554	1	0	0	0		+0.00886523	2	0	0	0
10.166351	0	1	0	0		-0.032241	1	1	0	0
+0.158114	0	2	0	0		+0.00344778	0	2	0	0
-0.147581	2	0	1	0		-0.0408811	0	1	1	0
-0.481497	0	1	1	0		-0.108009	1	1	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

· 모형선의 저항 실험 데이터

Ship Speed V [kts]	정수중 EHP [PS]	T [kN]	R [kN]	w	t	η_R	$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
12.5	1686	248	192.5	0.381	0.224	1.018	1.254
13.0	1965	278	216.0	0.380	0.223	1.022	1.253
13.5	2240	304	236.8	0.379	0.221	1.024	1.254
14.0	2536	331	258.5	0.377	0.219	1.026	1.253

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

- 회귀 분석식의 지수를 저장할 클래스

```
class CKPolyNomial
{
    ...
    double C,s,t,u,v;
};
```

- 모형선 실험 데이터를 저장할 클래스

```
class CResistanceResult
{
    ...
    double v,EHP,T,R,w,t,etaR,etaH;
};
```


프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
class CPropellerDB
```

```
{
```

```
public:
```

```
    CPropellerDB();
```

```
    virtual ~CPropellerDB();
```

```
    //member variables
```

```
    CKPolyNomial m_KTPoly[39];
```

회귀분석식의 지수 저장 변수

```
    CKPolyNomial m_KQPoly[46];
```

```
    std::vector<CResistanceResult> m_ResistanceResult;
```

모형선의 저항 실험 데이터 저장 변수

```
    //member function
```

```
    void AddResistanceResult(double _v,double _EHP,double _T,double _R,double _w,double _t,double _etaR,...);
```

모형선의 저항 실험 데이터 저장 함수

```
    CKPolyNomial SetPolynomial(double _C,double _s,double _t,double _u,double _v);
```

```
    double CalcKQ(double C1,double J,double PiD,double AEAO,double Z);
```

```
    double CalcKQ_Diff(double C1,double J,double PiD,double AEAO,double Z);
```

```
    double CalcKT(double J,double PiD,double AEAO,double Z);
```

```
};
```

회귀분석식을 이용해 KQ, KT 계산

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
double CPropellerDB::CalcKQ(double C1,double J,double PiD,double AEAO,double Z)
{
    double result=0;
    for(int i=0;i<47;i++)
    {
        result+=m_KQPoly[i].C*pow(J,m_KQPoly[i].s)*pow(PiD,m_KQPoly[i].t)*pow(AEAO,m_KQPoly[i].u)
            *pow(Z,m_KQPoly[i].v);
    }
    return result;
}
```

$$K_Q = \sum C_{s,t,u,v} (J)^s (P_i / D_P)^t (A_E / A_O)^u z^v$$

```
double CPropellerDB::CalcKT(double J,double PiD,double AEAO,double Z)
{
    double result=0;
    for(int i=0;i<39;i++)
    {
        result+=m_KTPoly[i].C*pow(J,m_KTPoly[i].s)*pow(PiD,m_KTPoly[i].t)*pow(AEAO,m_KTPoly[i].u)
            *pow(Z,m_KTPoly[i].v);
    }
    return result;
}
```

$$K_T = \sum C_{s,t,u,v} (J)^s (P_i / D_P)^t (A_E / A_O)^u z^v$$

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```

class CPropeller
{
    ...
    //member variables
    CPropellerDB m_PropellerDB;

    double m_V;           // 배의 속력
    double m_Va;          // 배의 반류계수를 고려한 속력

    //Database로부터 계산을 통해 얻는 값
    double m_T;           // 배의 추력 [kN]
    double m_R;           // 배의 저항 [kN]
    double m_w;           // 반류 계수
    double m_t;           // 추력 감소 계수
    double m_etaR;        // (?)
    double m_etaH;        // (1-t)/(1-w)

    double m_etaT;        // 축전달시 손실되는 마력의 비율
    double m_eta0;        // 프로펠러 효율

    double m_KQ;          // 토오크 계수
    double m_KT;          // 추력 계수
    double m_J;           // 전진비
    double m_AEAO;        // 전개 면적비
    double m_PiD;         // 피치비
    double m_Pi;          // 피치 [m]
    double m_D;           // 프로펠러 지름 [m]
    double m_rpm;         // 분당 회전수
    double m_n;           // 회전수 [1/s]
    double m_Tp;          // 프로펠러 추력 [kN]
    double m_Ts;          // 선박이 속력 v를 내기 위해
                        // 요구하는 추력 [kN]

    double m_NCR;         // NCR [PS]
    double m_P;           // 전달 마력 [kW]
    double m_z;           // 프로펠러 날개수 [개]
    double m_Draft;       // 흘수 [m]
    double m_Shaft;       // 프로펠러 축의 높이 [m]
    double dense;         // 밀도
    double m_C1;          // KQ/J^5 의 비율
}
    
```

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
class CPropeller
```

```
{
```

```
public:
```

```
//member functions
```

```
void Calc_Propeller();
```

```
void Calc_VariableUsingDB();
```

```
void Calc_InitialValue();
```

```
double Calc_J();
```

```
void Calc_eta0();
```

```
void Calc_Diameter();
```

```
CheckEnum Check_Result();
```

```
};
```

//프로펠러 주요치수를 결정하는 모든 과정을 담고 있다.

//DB에 저장된 값을 사용하여 계산할 수 있는 변수의 값을 결정.

//입력정보를 가지고 단순한 초기화 계산을 수행함

//단위변환, 주어진 값으로 계산 가능한 상수를 계산함.

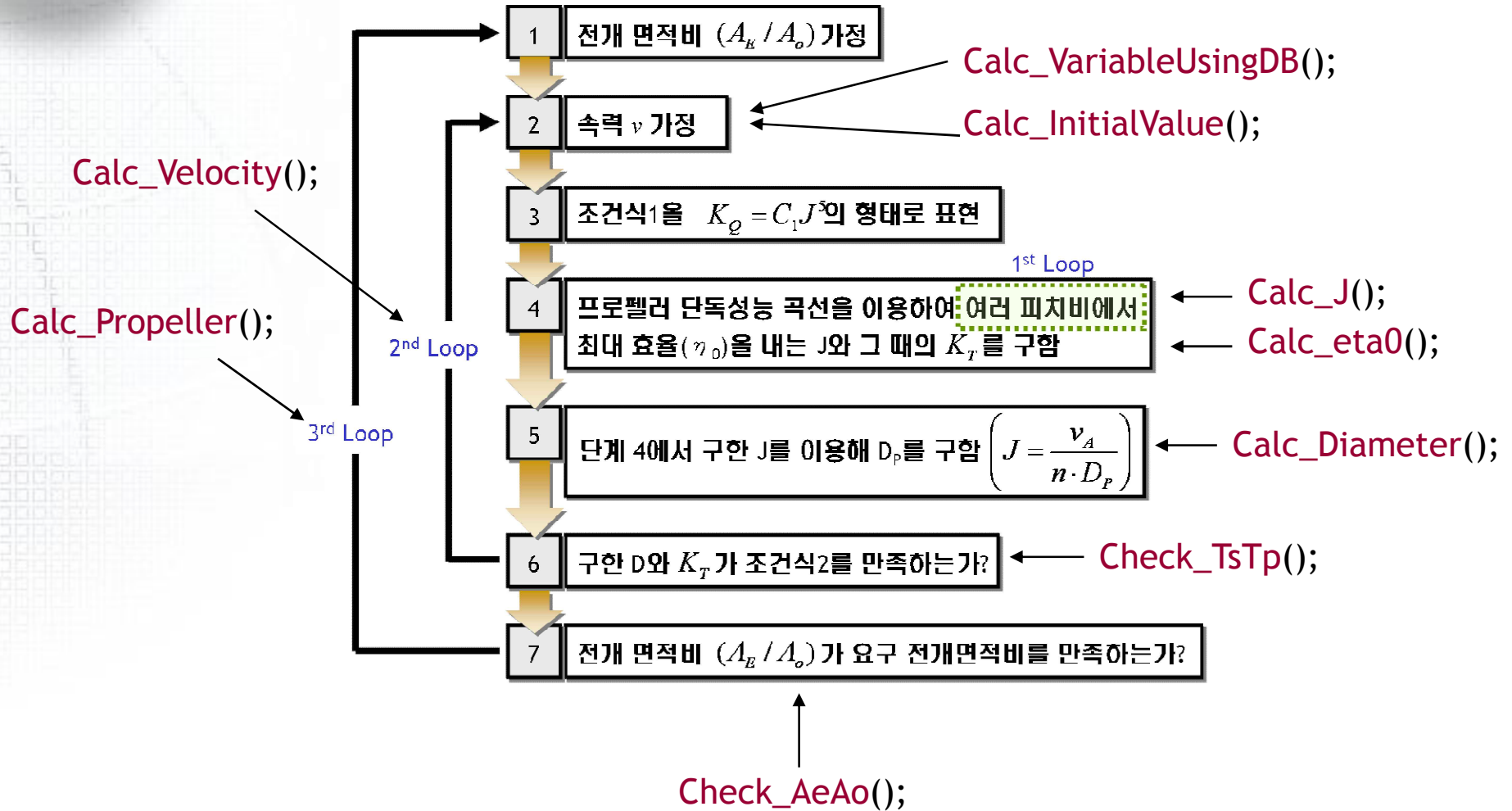
//Newton-Rapson 방법을 이용하여 J를 구한다.

//피치비를 변경시키면서 주어진 전개 면적비에서 가장 큰 효율을 구한다.

//전진비에 따른 프로펠러의 직경(D)를 구한다.

//계산 결과가 Cavitation이 발생하지 않는 최소 전개면적비 보다 큰지 판단한다.

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide



프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
void CPropeller::Calc_Propeller()
{
    while (1) 3rd Loop
    {
        Calc_Velocity();
        if(Check_AeAo()){
            //프로그램 종료
            break;
        }
        else{
            m_AEAO+=0.01;
        }
    }
}
```


프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
void CPropeller::Calc_Velocity()
```

```
{
  while (1) 2nd Loop
  {
```

```
    Calc_VariableUsingDB();
```

```
    Calc_InitialValue();
```

```
    Calc_eta0();
```

```
    Calc_Diameter();
```

```
    if (Check_TsTp() == FASTER){
```

```
        m_V += 0.01;
```

```
    }
```

```
    else if (Check_TsTp() == SLOWER){
```

```
        m_V -= 0.01;
```

```
    }
```

```
    else{
```

```
        break;
```

```
    }
```

```
}
```

```
}
```

속도가 주어졌을 때, DB에 저장된 값을 사용하여 $T, R, w, t, \eta_R, \eta_H$ 를 구함

C_1, v_A, n 을 구함

최대 효율을 구함

프로펠러 직경(D_p)를 구함

$T_s = T_p$ 인지 판단하여 아닐 경우 속도를 변경시킴

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
void CPropeller::Calc_eta0()
```

```
{
```

```
    double delta=0.01;
```

```
    double tmp_eta0=0;
```

```
    while(1)
```

1st Loop

Newton-Rapson 방법으로 사용하여 J를 계산

```
{
```

```
    m_J=Calc_J();
```

```
    m_KQ=m_C1*pow(m_J,5);
```

```
    m_KT=m_PropellerDB.CalcKT(m_J,m_PiD,m_AEAO,m_z);
```

```
    tmp_eta0=m_J/2/PI*m_KT/m_KQ;
```

```
    if (tmp_eta0>m_eta0){
```

```
        m_eta0=tmp_eta0;
```

```
        m_PiD+=delta;
```

```
    }
```

```
    else{
```

```
        break;
```

```
    }
```

```
}
```

```
}
```



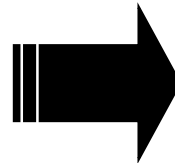
프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide(II)

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 입력과 출력

입력 값

- MCR = 4,500 PS X 220 rpm
- NCR = 85% MCR
- $n = 220$ rpm
- $z = 4$
- 선박의 속도 변화에 따른 저항, η_R, t, w
- Shaft Center Height = 2.35 m
- Sea Margin = 15 %
- 15°C 해수 상태 $p_0 - p_v = 99.047 \text{ KN} / \text{m}^2$
- 선박의 흘수 $T_{mld} = 6.5 \text{ m}$



출력 값

- 전개 면적비 (A_E/A_O)
- 배의 속도 (V)
- 프로펠러 전진비 (J)
- 프로펠러 효율 (η_0)
- 프로펠러 직경 (D_p)
- 프로펠러 피치비 (P_i/D)
- K_T
- K_Q
- T_p
- T_s
- $T_p - T_s$

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 클래스의 생성 및 선언(1)

- 클래스의 생성

Ship.h

```
class Ship
{
public:
    Ship(); // 기본 생성자
    ~Ship(); // 기본 소멸자
};
```

Ship.cpp

```
#include "Ship.h"

Ship::Ship()
{ }

Ship::~~Ship()
{ }
```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 클래스의 생성 및 선언(2)

■ 멤버 변수의 선언

Ship.h

// 멤버 변수의 선언

// 입력

```
double in_MCR, in_NCR, in_n, in_Z;
double in_V[4], in_EHP[4], in_T[4];
double in_w[4], in_t[4], in_etaR[4];
double in_SHC; // Shaft Height Center
double in_SM; // Sea Margin
double in_Tmld; // Moulded Trim
```

입력값을 저장할 변수의 선언

// Constant 변수

```
const double PI;
const double rho;
```

상수값을 저장할 변수의 선언

// 출력

```
double out_AeAo, out_V, out_w, out_VA;
double out_J, out_eta0, out_D, out_PiD;
double out_Kt, out_Kq, out_Tp, out_Ts;
```

출력값을 저장할 변수의 선언

// 생략

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 클래스의 생성 및 선언(3)

■ 계산 과정의 모듈화

프로펠러 주요 치수 결정을
위해 필요한 항목

함수의 선언



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

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 클래스의 생성 및 선언(4)

■ 함수의 선언

Ship.h

```

// 계산 함수의 선언
void OnCalculate();
double Calculate_KT(double J, double Pi_D, double AeAo, double Z);
double Calculate_KQ(double J, double Pi_D, double AE_AD, double Z);
double Calculate_TP(double J, double Pi_D, double AeAo, double v, double w);
double Calculate_AeAo_Keller();

void Curve_Evaluation(double v, double* EHP, double* T, double* w, double* t, double*
double Get_EHP(double v);
double Get_T(double v);
double Get_w(double v);
double Get_t(double v);
double Get_etaR(double v);
double Get_etaH(double v);

double Newton_Rapson(double v1, double Pi_D, double AeAo, double w, double etaR);

void Print_Result();
// 생략

```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 상수 C의 계산

$$K_Q = C \cdot J^5$$

$$v_A = v \cdot (1 - w)$$

$$\frac{K_Q}{J^5} = \frac{P \cdot n^2}{2\pi\rho \cdot v_A^5} = C$$

```
void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    double v = 13.5;
    double v1 = v * 0.5144;
    double Pi_D = 0.65;
```

```
    v_A = v1 * (1 - w);
    double C = Calculate_C(P, n, v_A);
```

```
}
```

```
double Ship::Calculate_C(double P, double n, double v_A)
```

```
{
    double rtn_C = 0.0;
```

```
    rtn_C = (P * pow(n, 2.0)) / (2 * PI * rho * v_A);
```

```
    return rtn_C;
```

```
}
```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- Newton-Raphson 방법의 구현

초기값의 설정



$$f'(x_n) \approx \frac{f(x_n + \Delta x) - f(x_n)}{\Delta x}$$

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$



Iteration

```

void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    double v = 13.5;
    double v1 = v * 0.5144;
    double Pi_D = 0.65;

    v_A = v1 * (1 - w);
}

void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    double v = 13.5;
    double v1 = v * 0.5144;
    double Pi_D = 0.65;

    v_A = v1 * (1 - w);
    double C = Calculate_C(P, n, v_A);

    double delta = 0.001; // delta_x
    double J = 10.0;
    double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값의 차이

    while(delta_KQ < 0.001 && delta_KQ > -0.001)
    {
        double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_KQ(J - delta, Pi_D, AeAo1, in_Z);
        double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1, in_Z);
        J = J - fx / Gradient;
        delta_KQ = C;
    }
}

```

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

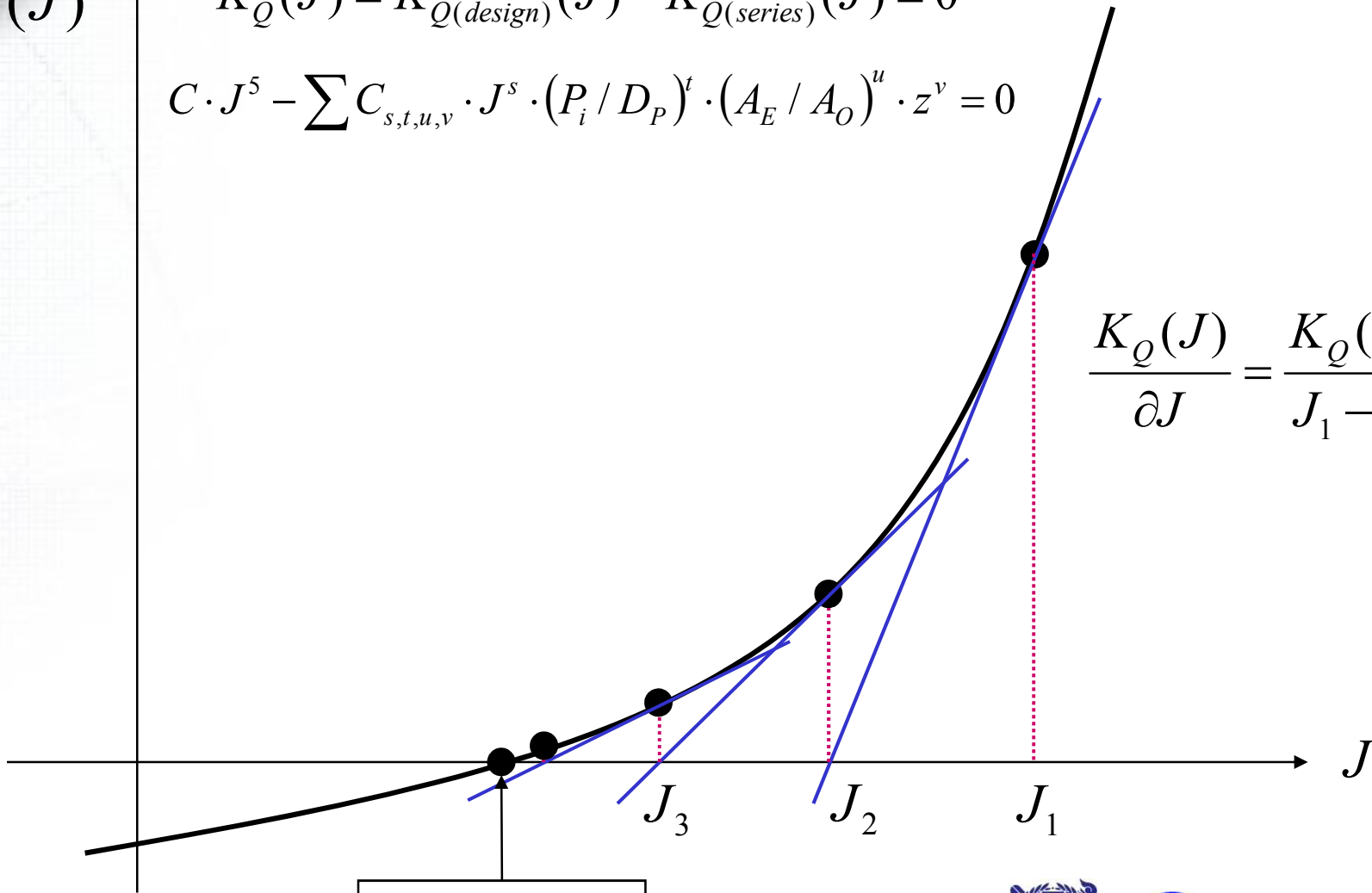
프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- Newton & Raphson 방법

$K_Q(J)$

$$K_Q(J) = K_{Q(\text{design})}(J) - K_{Q(\text{series})}(J) = 0$$

$$C \cdot J^5 - \sum C_{s,t,u,v} \cdot J^s \cdot (P_i / D_P)^t \cdot (A_E / A_O)^u \cdot z^v = 0$$



$$\frac{K_Q(J)}{\partial J} = \frac{K_Q(J_1)}{J_1 - J_2}$$

Solution

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 피치비(Pi/D)의 변경

```
void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    double v = 13.5;
    double v1 = v * 0.5144;
    double Pi_D = 0.65;

    v_A = v1 * (1 - w);
    double C = Calculate_C(P, n, v_A);

    double delta = 0.001; // delta_x
    double J = 10.0;
    double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값

    while(delta_KQ < 0.001 && delta_KQ > -0.001)
    {
        double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1);
        double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1);
        J = J - fx / Gradient;
        delta_KQ = C;
    }
}
```

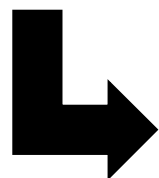
```
void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    double v = 13.5;
    double v1 = v * 0.5144;

    for (double Pi_D=0.4; Pi_D<1.2; Pi_D = Pi_D + 0.01)
    {
        v_A = v1 * (1 - w);
        double C = Calculate_C(P, n, v_A);

        double delta = 0.001; // delta_x
        double J = 10.0;
        double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값의 차이

        while(delta_KQ < 0.001 && delta_KQ > -0.001)
        {
            double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1);
            double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1);
            J = J - fx / Gradient;
            delta_KQ = C;
        }
    }
}
```

피치비(Pi/D)를
변경시키면서
 η_0 가 최대가 되는
피치비를 검색



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

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 속도(v)의 변경

```

void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    double v = 13.5;
    double v1 = v * 0.5144;

    for (double Pi_D=0.4; Pi_D<1.2; Pi_D = Pi_D + 0.01)
    {
        v_A = v1 * (1 - w);
        double C = Calculate_C(P, n, v_A);

        double delta = 0.001; // delta_x
        double J = 10.0;
        double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값의 차이

        while(delta_KQ < 0.001 && delta_KQ > 0.001)
        {
            double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1, v_A);
            double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1, v_A);
            J = J - fx / Gradient;
            delta_KQ = C;
        }
    }
}

```

```

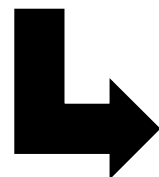
void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo1 = 0.55;
    for (double v = 12.0; v<14.0; v=v+0.1)
    {
        double v1 = v * 0.5144;

        for (double Pi_D=0.4; Pi_D<1.2; Pi_D = Pi_D + 0.01)
        {
            v_A = v1 * (1 - w);
            double C = Calculate_C(P, n, v_A);

            double delta = 0.001; // delta_x
            double J = 10.0;
            double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값의 차이

            while(delta_KQ < 0.001 && delta_KQ > -0.001)
            {
                double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1, v_A);
                double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1, v_A);
                J = J - fx / Gradient;
                delta_KQ = C;
            }
        }
    }
}

```



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

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 최소 전개 면적비(A_E/A_0)의 검토

```
void Ship::OnCalculate()
```

```
{
```

```
    double AeAo1 = 0.55;
```

```
    for (double v = 12.0; v<14.0; v=v+0.1)
```

```
    {
```

```
        double v1 = v * 0.5144;
```

```
        for (double Pi_D=0.4; Pi_D<1.2; Pi_D
```

```
        {
```

```
            v_A = v1 * (1 - w);
```

```
            double C = Calculate_C(P, n, v_A);
```

```
            double delta = 0.001; // delta_x
```

```
            double J = 10.0;
```

```
            double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ
```

```
            while(delta_KQ < 0.001 && delta_K
```

```
            {
```

```
                double Gradient = C * pow(J+de
```

```
                double fx = C * pow(J, 5.0) - Cal
```

```
                J = J - fx / Gradient;
```

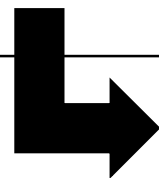
```
                delta_KQ = C;
```

```
            }
```

```
        }
```

```
    }
```

```
}
```



```
void Ship::OnCalculate()
```

```
{
```

```
    for (double AeAo1 = 0.40; AeAo<1.00; AeAo = AeAo+0.01);
```

```
    {
```

```
        for (double v = 12.0; v<14.0; v=v+0.1)
```

```
        {
```

```
            double v1 = v * 0.5144;
```

```
            for (double Pi_D=0.4; Pi_D<1.2; Pi_D = Pi_D + 0.01)
```

```
            {
```

```
                v_A = v1 * (1 - w);
```

```
                double C = Calculate_C(P, n, v_A);
```

```
                double delta = 0.001; // delta_x
```

```
                double J = 10.0;
```

```
                double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값의 차이
```

```
                while(delta_KQ < 0.001 && delta_KQ > -0.001)
```

```
                {
```

```
                    double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_K
```

```
                    double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, A
```

```
                    J = J - fx / Gradient;
```

```
                    delta_KQ = C;
```

```
                }
```

```
            }
```

```
        }
```

```
    }
```


프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 프로펠러의 최적 주요 치수 계산 함수

```

void Ship::OnCalculate()
{
    double AeAo = 0.0;
    double v = 0.0;
    double Pi_D = 0.0;
    double J = 0.0;

    //////////////////////////////////////
    // 전개 면적비의 가정
    // Minimum: AeAo_min
    // Maximum: AeAo_max
    for (AeAo = AeAo_min; AeAo < AeAo_max; AeAo = AeAo + 0.01);
    {
        // Curve Evaluation 한 값을 저장할 장소 선언;
        double EHP, T, w, t, etaR, etaH;

        //////////////////////////////////////
        // 속력의 가정
        // Minimum: v_min knots
        // Maximum: v_max knots
        for (v = v_min; v < v_max; v = v + 0.1)
        {
            double v1 = v * 0.5144;

            // 주어진 데이터로부터 속력(v)에 따른 값들을 Evaluation한다.
            Curve_Evaluation(v, &EHP, &T, &w, &t, &etaR, &etaH);

            //////////////////////////////////////
            // 피치비(Pi/D)의 가정
            // Minimum: Pi_D_min
            // Maximum: Pi_D_max
    
```

```

        for (Pi_D = Pi_D_min; Pi_D < Pi_D_max; Pi_D = Pi_D + 0.01)
        {
            // Newton & Rapson 방법을 이용해서 J를 구한다.
            J = Newton_Rapson(v1, Pi_D, AeAo, w, etaR);

            // eta0가 최대가 되는 값을 선택;
            // 생략
        }

        //////////////////////////////////////
        // T_S = T_P의 조건식 검토;
        double T_S = T;
        double T_P = Calculate_TP(J, Pi_D, AeAo, v, w);
        if (T_S < T_P)
        {
            // 값을 저장한다;
            break;
        }
    }

    //////////////////////////////////////
    // Keller의 경험식 검토
    double AeAo_Keller = 0.0;
    AeAo_Keller = Calculate_AeAo_Keller();

    if (AeAo > AeAo_Keller)
    {
        // 결과값을 출력한다.
        Print_Result();
    }
}
    
```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- Curve Evaluation 함수

```
void Ship::Curve_Evaluation(double v, double* EHP, double* T, double* w, double* t, double* etaR, double* etaH)
{
    (*EHP) = Get_EHP(v);
    (*T) = Get_T(v);
    (*w) = Get_w(v);
    (*t) = Get_t(v);
    (*etaR) = Get_etaR(v);
    (*etaH) = Get_etaH(v);
}
```

V(kts)	EHP(PS)	T(KN)	w	t	η_R	η_H
12.5	1686	248	0.381	0.224	1.018	1.254
13.0	1965	278	0.380	0.223	1.022	1.253
13.5	2240	304	0.379	0.221	1.024	1.254
14.0	2536	331	0.377	0.219	1.026	1.253

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

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- Newton & Raphson 방법의 구현

```

double Ship::Newton_Rapson(double v1, double Pi_D, double AeAo, double w, double eta
{
    double v_A = v1 * (1 - w);
    double C = ( P * pow(in_n, 2.0) ) / ( 2 * PI * rho, pow(v_A, 5.0) );

    double delta = 0.001; // delta_x
    double J = 10.0;
    double delta_KQ = 10.0; // 두 KQ 값의 차이

    while(delta_KQ > 0.001 || delta_KQ < -0.001)
    {
        double Gradient = C * pow(J+delta, 5.0) - Calculate_KQ(J - delta, Pi_D, AeAo, in_Z);
        double fx = C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo, in_Z);
        J = J - fx / Gradient;
        delta_KQ = C;
    }

    return J;
}

```

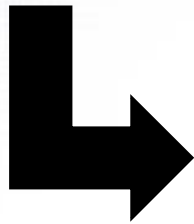

마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- K_Q 계산 함수의 구현

- Wageningen B-series K_Q 계산 함수

$$K_Q = \sum C_{s,t,u,v} \cdot J^s \cdot (P_i / D)^t \cdot (A_E / A_O)^u \cdot Z^v$$



```
double Ship::Calculate_KQ(double J, double Pi_D, double AE_AO, double Z)
{
    double K_Q = 0;

    // MARIN의 B-series K_Q Polynomials
    double C[47]={0.00379368, 0.00886523, -0.032241, 0.00344778, -0.0408811, -0.108
    -0.0885381, 0.188561, -0.00370871, 0.00513696, 0.0209449, 0.00474319, -0.0072
    0.00438388, -0.0269403, 0.0558082, 0.0161886, 0.00318086, 0.015896, 0.047172
    -0.0502782, -0.030055, 0.0417122, -0.0397722, -0.00350024, -0.0106854, 0.00110
    0.0035985, -0.00142121, -0.00383637, 0.0126803, -0.00318278, 0.00334268, -0
    -0.0000297228, 0.000269551, 0.00083265, 0.00155334, 0.000302683, -0.0001843
    int S[47]={0,2,1,0,0,1,2,0,1,0,1,2,2,1,0,3,0,1,0,1,3,0,3,2,0,0,3,3,0,3,0,1,0,2,0,1,3,3,1,2
    int T[47]={0,0,1,2,1,1,1,2,0,1,1,1,0,1,2,0,3,3,0,0,0,1,1,2,3,6,0,3,6,0,6,0,2,3,6,1,2,6,0,0
    int U[47]={0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,2,2,2,2,2,2,2,0,0,0,1,1,2,2,2,2,0,0,0,1,1
    int V[47]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,2,2,2,2,2

    // K_Q계산
    for (int i=0; i<47; i++)
    {
        K_Q = K_Q + C[i] * pow(J, S[i]) * pow(Pi_D, T[i]) * pow(AE_AO, U[i]) * pow(Z, V[i]);
    }

    return K_Q;
}
```


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

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램

- 프로펠러가 내는 추력(T_P)을 계산하는 함수

```
double Ship::Calculate_TP(double J, double Pi_D, double AeAo, double v, double w)
{
    double rho = 1.025;
    double n = in_n / 60;
    double D = (v * (1 - w) * 0.51444) / (n * J);
    double Z = in_Z;

    double T_P = rho * pow(n, 2) * pow(D, 4) * Calculate_KT(J, Pi_D, AeAo, Z);

    return T_P;
}
```



선박의 주요치수 결정 프로그램의 목적함수 및 제약 조건식

상선의 주요 치수 결정을 위한 최적화 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)



상선의 최적 주요 치수 결정 문제

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)

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

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

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

최소 요구 건현 조건 (부등호 제약 조건)

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

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

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 추정된 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

→ 추정된 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



Characteristics of Diesel Engine (디젤 엔진의 특성)

서울대학교 조선해양공학과
이규열

디젤엔진의 특성

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

■ 디젤엔진의 출력

$$BHP = P_{me} \cdot L \cdot A \cdot n \cdot Z$$

여기서, BHP: Brake Horse Power(kW)

P_{me} : 평균유효압력 (kN / m^2)

L : 피스톤 행정 (Stroke)(m)

A : 실린더 단면적 (m^2)

n : 매초 회전수 ($1/s$)

Z : 실린더 수

A와 Z가 일정하다고 하면

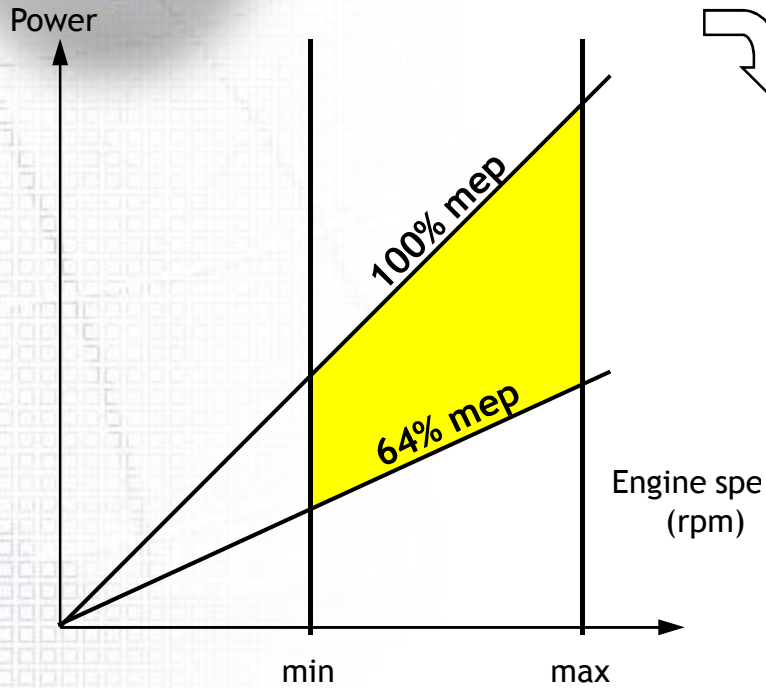
$$BHP = C_{DE} \cdot P_{me} \cdot n$$

이므로 디젤엔진의 출력은 디젤엔진의 회전수와 평균 유효 압력에 비례함

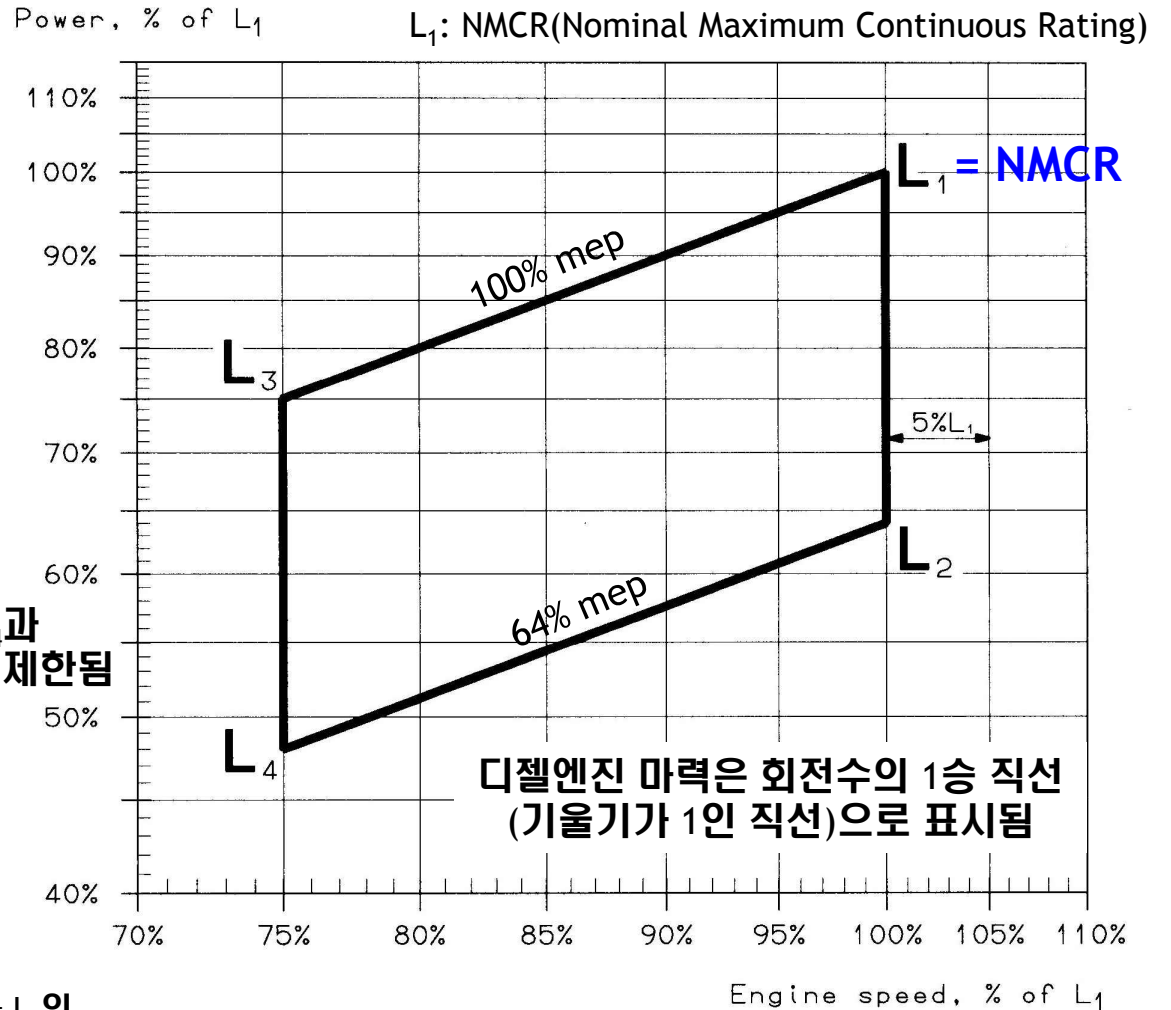
마력 주기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

디젤엔진의 특성(2)

-디젤엔진의 작동 범위(layout diagram)



대수 함수(logarithm)로 표현



두 개의 일정 평균 유효 압력 직선 L_1-L_3 , L_2-L_4 과
두 개의 일정 회전수 직선 L_1-L_2 , L_3-L_4 에 의해 제한됨

Sulzer 엔진의 경우, R_1, R_2, R_3, R_4 로 표현하며,
 R_1 은 NMCR에 해당하고, $R_1 = L_1, R_2 = L_3, R_3 = L_2, R_4 = L_4$ 임

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

마력 정의(1)

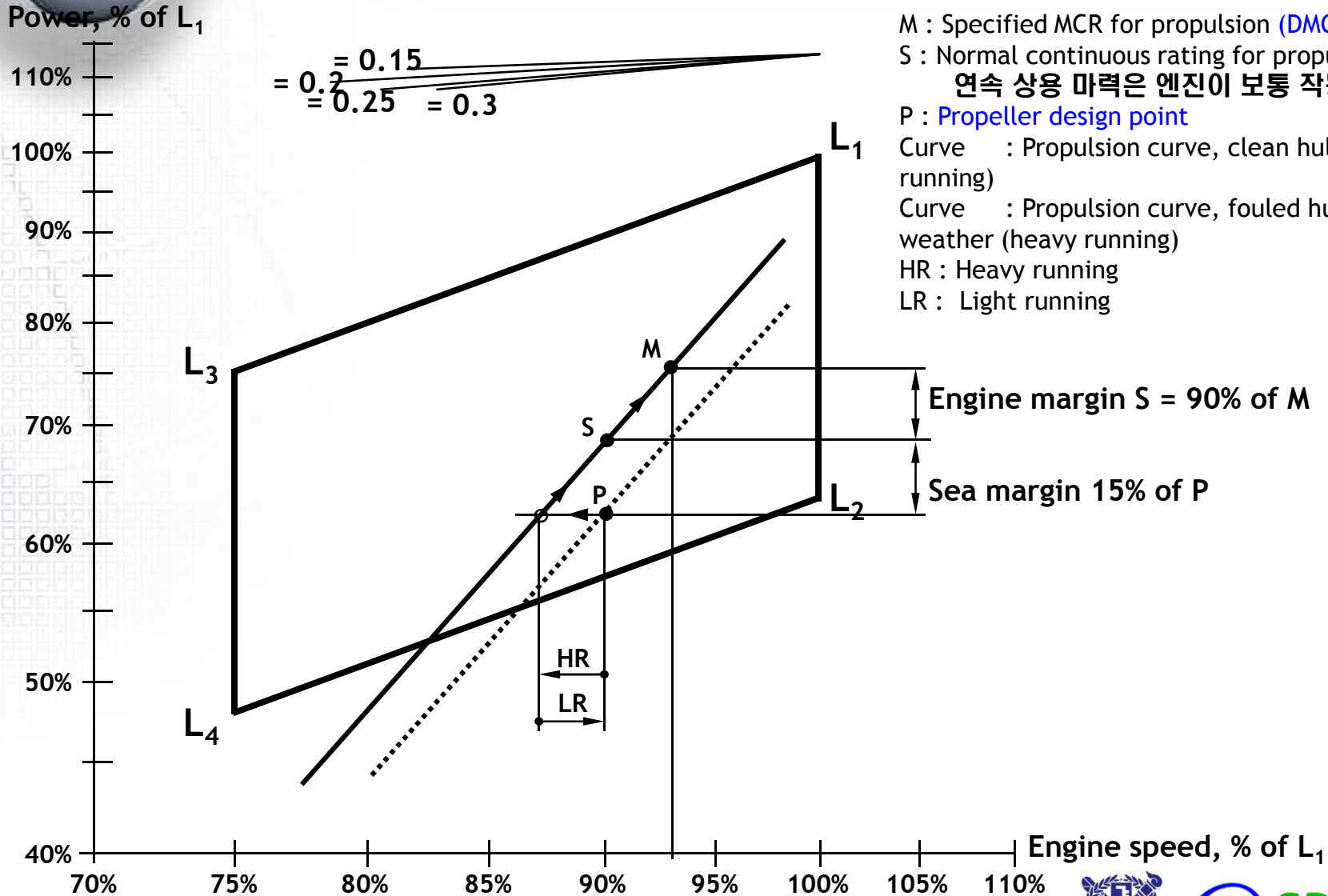
-공칭 연속 최대 마력(NMCR; Nominal Maximum Continuous Rating)

- 해당 엔진이 낼 수 있는 최대 마력으로서 엔진의 크기, 무게, 용적 및 가격의 기준됨
- 작동 범위의 제일 오른쪽 위 부분에 있는 점임. MAN/B&W 엔진의 경우 L1으로 표시하며, Waertsilae(Sulzer) 엔진의 경우 R1으로 표시함

마력정의(2)

-디젤엔진의 작동 범위와 프로펠러 곡선

마력주기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정



M : Specified MCR for propulsion (DMCR 또는 MCR)
 S : Normal continuous rating for propulsion (NCR)
 연속 상용 마력은 엔진이 보통 작동되는 마력임
 P : Propeller design point
 Curve : Propulsion curve, clean hull (light running)
 Curve : Propulsion curve, fouled hull and heavy weather (heavy running)
 HR : Heavy running
 LR : Light running

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

마력 정의(3)

-연속 최대 마력(MCR; Maximum Continuous Rating)

- 해당 엔진이 연속적으로 작동되는 최대 마력임
- 작동 범위 내에서의 어떠한 점도 MCR이 될 수 있으나, MCR을 선정할 때는 마력과 회전수의 Derating 값(MCR, NMCR에서 마력과 회전수의 차이), 프로펠러 회전수, 연료 소비율, 그리고 프로펠러 작동 범위 등을 다 함께 고려해야 함
- 일단 MCR이 여러 가지 기준을 고려하여 작동범위 내에서 선정되면, 이에 따라 축계(shaft line)와 보조 기기(auxiliary equipment)의 치수가 결정되며, 이제부터는 NMCR이 아니라, MCR이 연속 최대 마력의 기준이 됨. 즉 **모든 마력과 회전수의 기준은 MCR이 됨**
- 한편, 일반적으로 110% 과부하는 12시간 당 1시간 동안 허용됨

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

마력 정의(4)

-연속 상용 마력(NCR; Nominal Continuous Rating)

- 정상 시 선박을 운항할 때 작동되는 엔진마력임
- 많은 선주는 필요 시(바람 및 바다의 상태, 선체의 상황 등) 여분의 속도 margin을 갖기 위해서 최대 90% 부하에서 기관이 연속적으로 작동하도록 엔진을 선정하기를 선호함. 이 경우, $NCR = 90\% MCR$ 임
- 여기서 margin(NCR과 MCR 사이의 차이)을 엔진 margin이라고 부르며 보통 10%임

마력 주기 기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기권 선정

마력 정의(5) -Sea Margin

- **Sea margin**은 바람과 해상의 영향을 고려하여 마력의 여유분을 표현한 것임. 즉, 잔잔한 기상과 거친 기상에서 요구되는 마력 사이의 차이를 말함
- 이것은 명확히 정의된 값이 아니라 조선소나 선주에 의해 선정된 여분의 margin으로 표현됨. 약 15% 마력에 대한 margin을 포함하는 것이 보통임
- 참고로, **Light/Heavy running**은 선체와 프로펠러의 거칠어짐에 대한 프로펠러 회전수의 여유분으로 표현한 것임
 - Light running margin(RPM margin)의 기준
 - MAN/B&W 엔진 : 2.5 ~ 5.0%
 - Sulzer 엔진: 3.5 ~ 5.3%

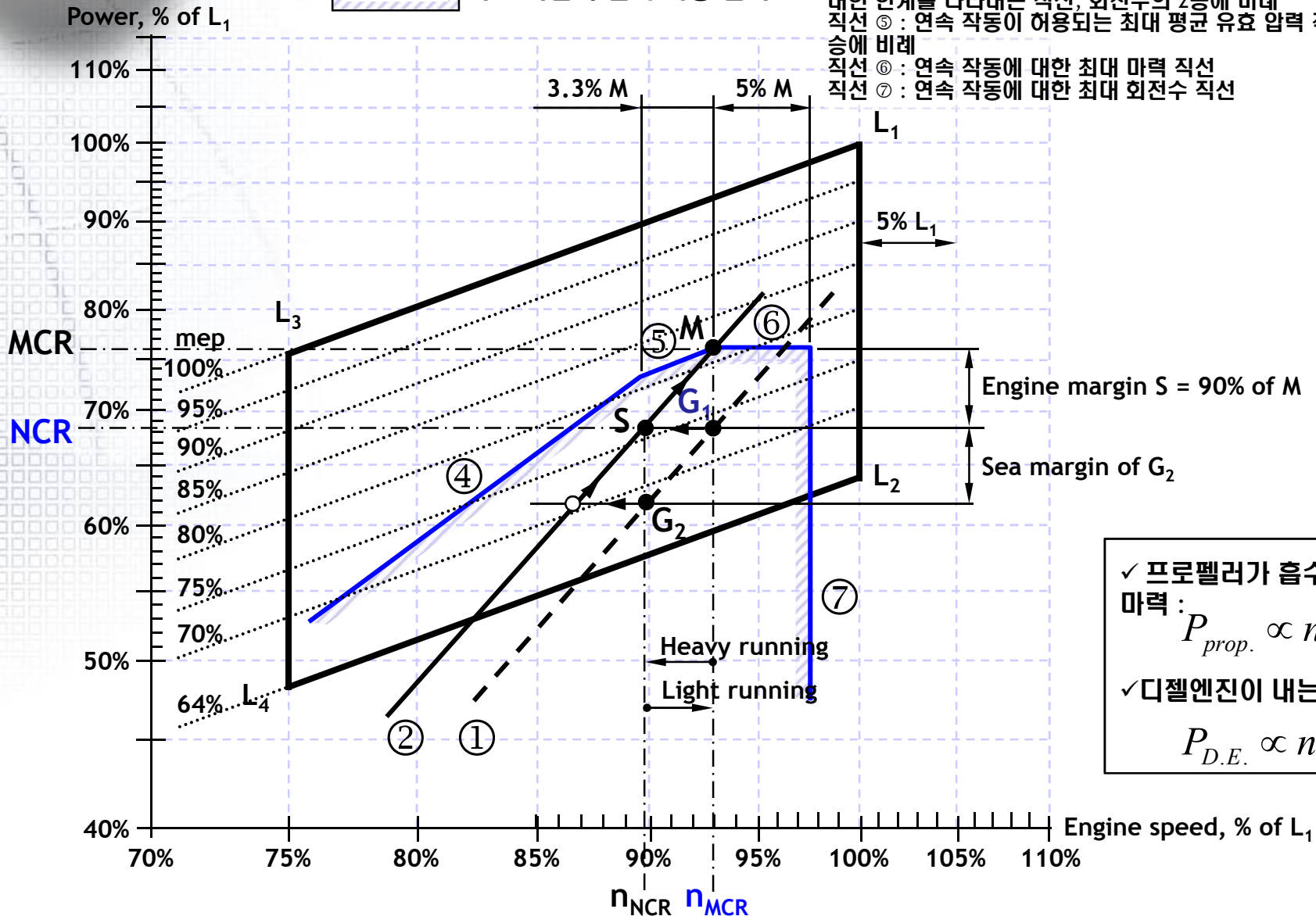
마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

디젤엔진의 부하 범위(Load Diagram)

- MCR이 정해지면, 이 MCR를 기준으로 그 디젤엔진이 연속적으로 작동(continuous operating)할 수 있는 마력과 회전수의 범위가 정해짐
- 이러한 디젤엔진의 마력과 회전수의 실제 연속적인 작동 범위를 “부하 범위(Load Diagram)”이라고 함
- 즉, 부하 범위는 엔진의 연속적인 작동에 대한 마력/회전수의 한계를 정의함

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

✓ 프로펠러가 흡수하는

마력 : $P_{prop.} \propto n^3$

✓ 디젤엔진이 내는 마력 :

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

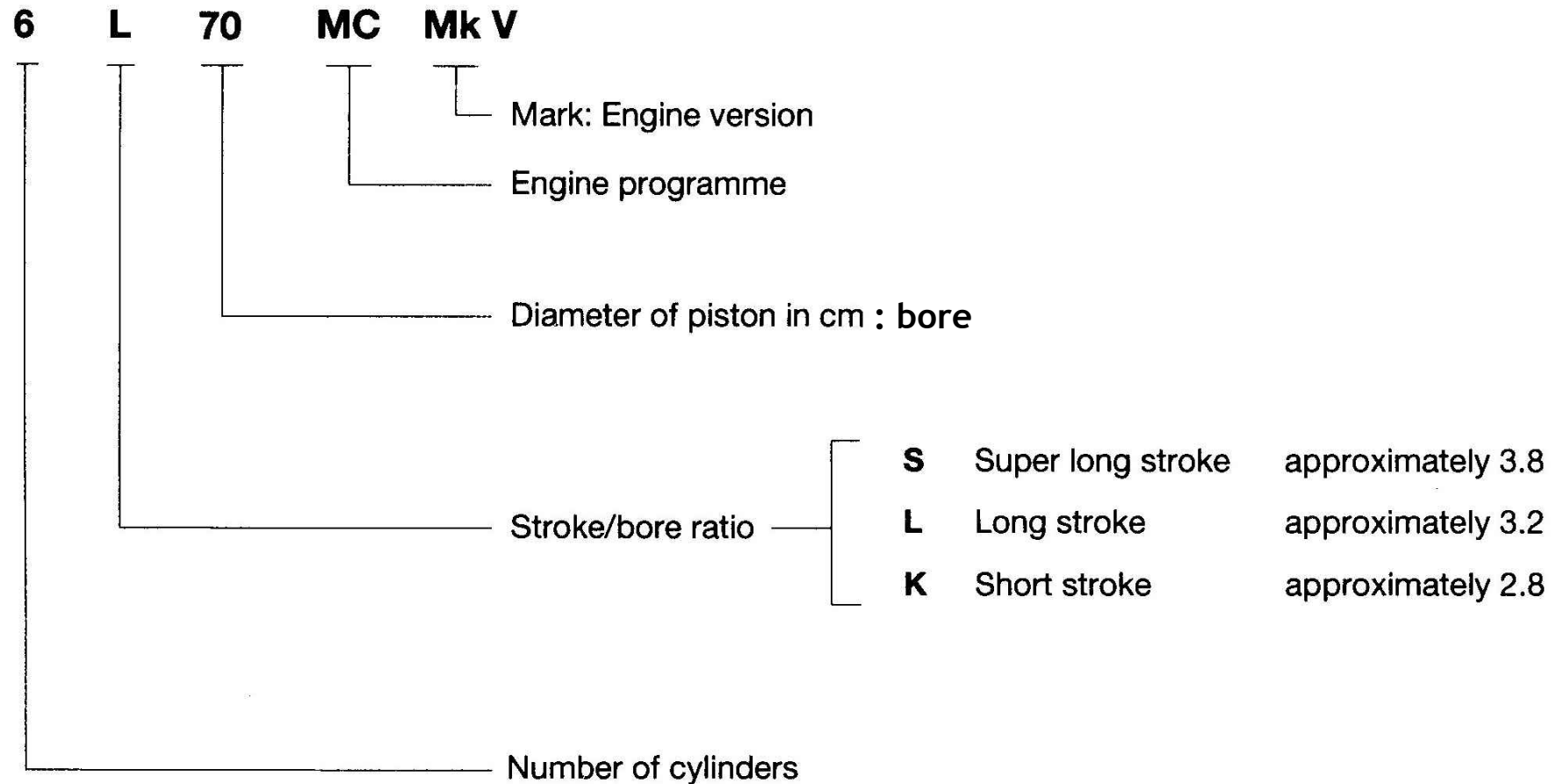
마 력 주 기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

디젤엔진의 종류

- 선박용 대형 디젤엔진 제작회사는 독일의 MAN/B&W회사와 Finland의 Waersila 회사(스위스의 Sulzer 회사를 인수) 가 대표적인 세계적인 대형 박용디젤엔진 제작사(대부분 개발 업무)이며, 그 이외의 대부분의 회사는 이 두 회사와 기술 협력에 의해 엔진을 생산하고 있음

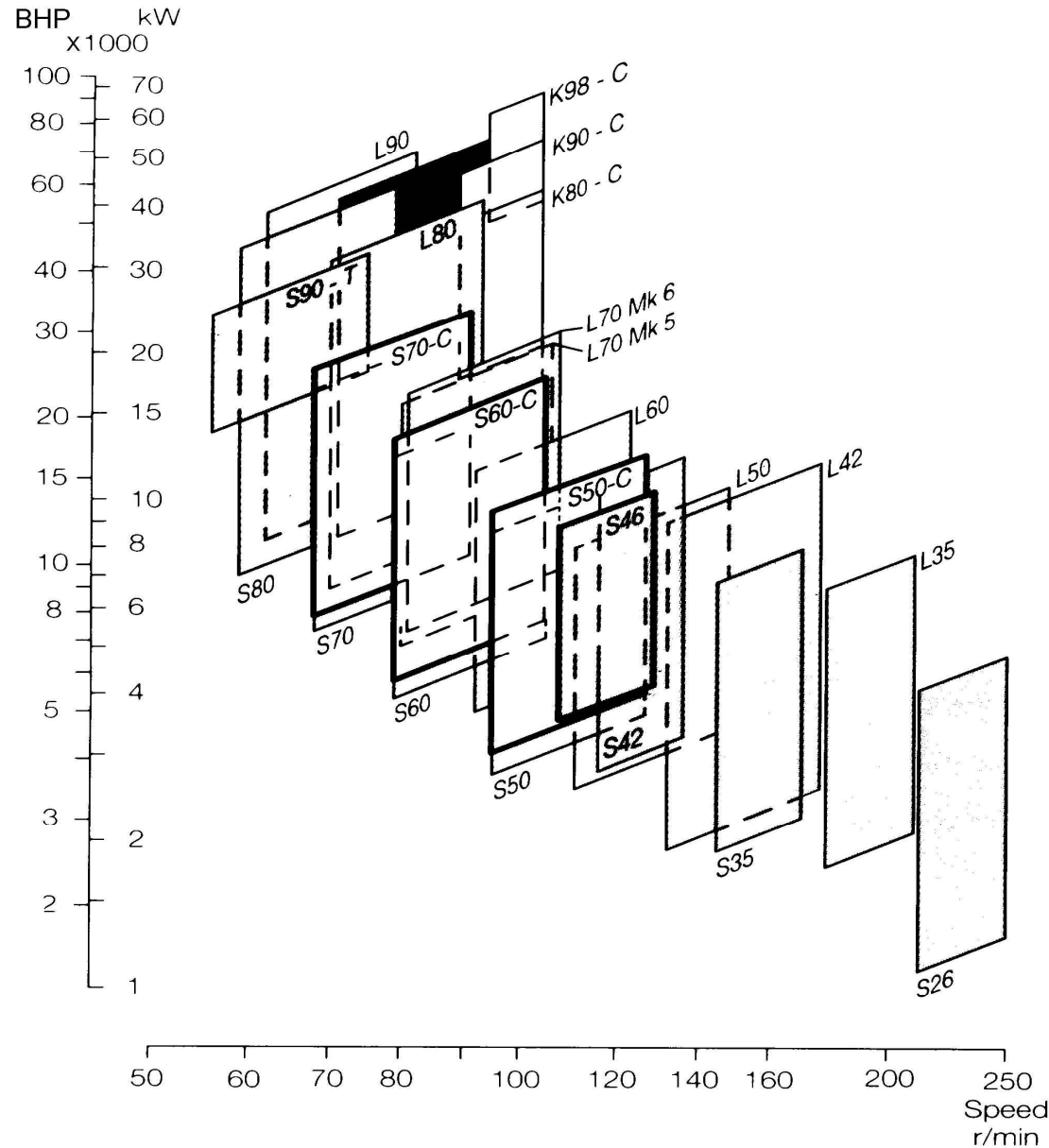
MAN/B&W 대형 디젤엔진의 종류(1)

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



MAN/B&W 대형 디젤엔진의 종류(2)

마력 주기 관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정



출처: Two-stroke Engines MC programme 1996, MAN/B&W

MAN/B&W 대형 디젤엔진의 종류(3)

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

Engine power range

0 - 10000

Search

Click on engine type for details

r/min	12500	25000	37500	50000	62500	75000	87500	100000	kW
97									K98MC7
94									K98MC6
104									K98MC-C7
104									K98MC-C6
78									S90MC-C8
76									S90MC-C7
104									K90MC-C6
79									S80MC6
78									S80MC-C8
76									S80MC-C7
104									K80MC-C6
91									S70MC6
91									S70MC-C8
91									S70MC-C7
108									L70MC-C8
108									L70MC-C7
105									S60MC6
105									S60MC-C8
105									S60MC-C7
123									L60MC-C8
123									L60MC-C7
127									S50MC6
127									S50MC-C8
127									S50MC-C7
129									S46MC-C8
129									S46MC-C7
136									S42MC7
173									S35MC7
210									L35MC6
250									S26MC6
r/min	12500	25000	37500	50000	62500	75000	87500	100000	kW

Compute

출처: Two-stroke Engines MC Programme 2007, (MAN/B&W
<http://www.manbw.com/engines/TwoStrokeLowSpeedPr opEnginesProgram.asp>)



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

MAN/B&W사의 2행정 저속 박용 디젤엔진의 마력과 회전수 및 연료 소모율의 예

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

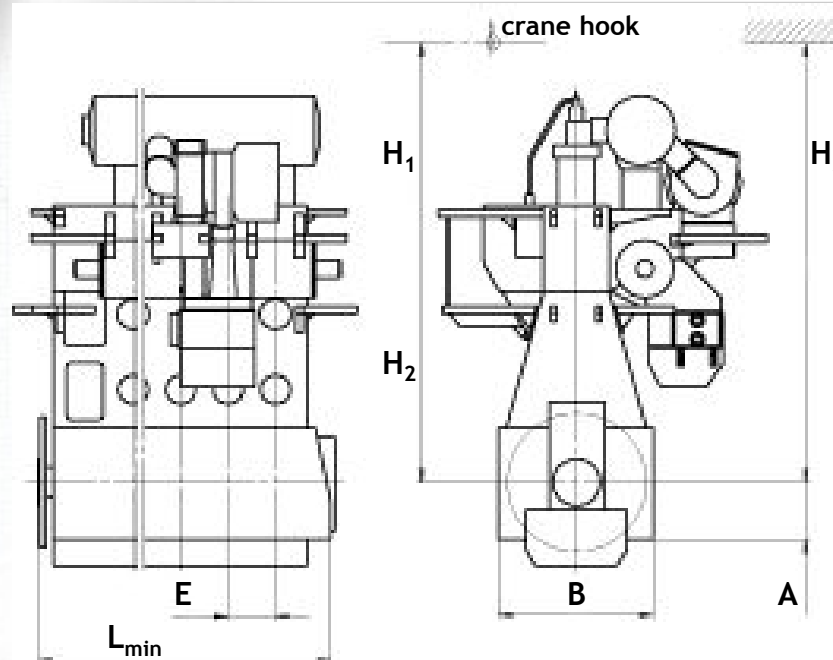
S80MC6 엔진

Bore: 800 mm, Stroke: 3056 mm

Main Data					
Layout points		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄
Speed	r/min	79	79	59	59
mep	bar	18.0	11.5	18.0	11.5
		kW	kW	kW	kW
5S80MC6		18200	11650	13600	8700
6S80MC6		21840	13980	16320	10440
7S80MC6		25480	16310	19040	12180
8S80MC6		29120	18640	21760	13920
9S80MC6		32760	20970	24480	15660
10S80MC6		36400	23300	27200	17400
11S80MC6		40040	25630	29920	19140
12S80MC6		43680	27960	32640	20880
Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)					
g/kWh		167	155	167	155
Lubricating and Cylinder Oil Consumption					
Lubricating oil		0.15 g/kWh			
Cylinder oil		0.7 g/kWh			

MAN/B&W사의 2행정 저속 박용 디젤엔진의 주요 치수와 엔진 중량의 예

마력 주기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정



S80MC6 엔진 -
Bore: 800mm, Stroke: 3,056mm

H₁: Normal lifting procedure
 H₂: Reduced height lifting procedure
 H₃: With electrical double jib crane

Main dimensions & weights								
Cyl. No	5	6	7	8	9	10	11	12
L _{min} mm	9953	11377	12581	14005	16719	18143	19567	20991
H ₁ mm	14125	14125	14125	14125	14125	14125	14125	14125
H ₂ mm	13250	13250	13250	13250	13250	13250	13250	13250
H ₃ mm	12925	12925	12925	12925	12925	12925	12925	12925
A mm	1736	1736	1736	1736	1736	1736	1736	1736
B mm	4824	4824	4824	4824	4824	4824	4824	4824
E mm	1424	1424	1424	1424	1424	1424	1424	1424
Dry Mass t*	777	885	996	1105	1223	1343	1458	1564

*The mass can vary up to 10% depending on the design and options chosen.

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

프로펠러와 디젤엔진의 관계

- 프로펠러 회전수, 프로펠러 효율, 디젤엔진의 크기
 - 프로펠러 회전수가 증가하면 최적의 프로펠러 직경은 작아지고, 프로펠러 효율은 감소함
 - 프로펠러 회전수를 증가시키면 작은 엔진을 선정할 수 있음

- 디젤엔진 선정 시 고려 사항
 - 프로펠러의 효율
 - 기관실의 중량
 - 기관실의 공간 배치
 - 초기 투자비(대형 저속 디젤엔진의 가격: 약 180\$/PS(1998년도 기준))
 - 작동 비용

디젤 엔진과 프로펠러의 마력과 회전수 “Matching”

마력 주기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

디젤엔진이 내는 마력

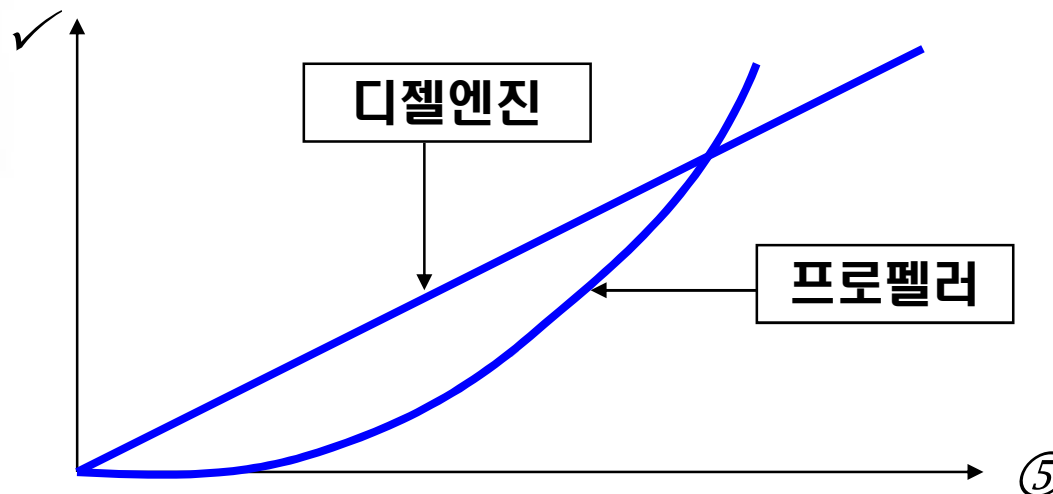
$$P_{D.E.} = P_{me} \cdot A \cdot L \cdot n \cdot Z$$

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

프로펠러가 내는 마력

$$P_{prop.} = 2\pi\rho \cdot n^3 \cdot D_P^5 \cdot K_Q$$

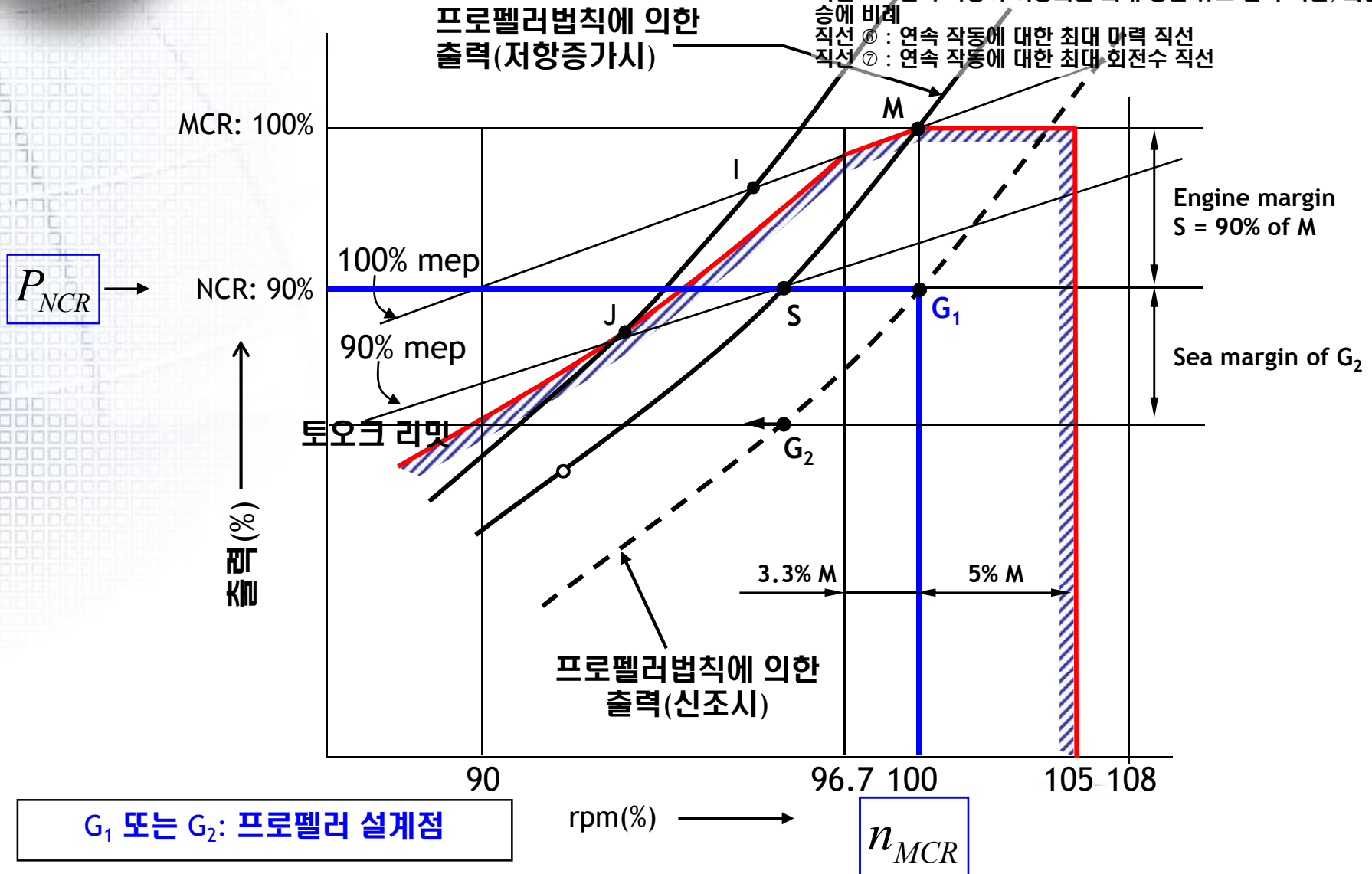
$$P_{prop.} \propto n^3$$



디젤엔진과 프로펠러의 Matching

디젤엔진의 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

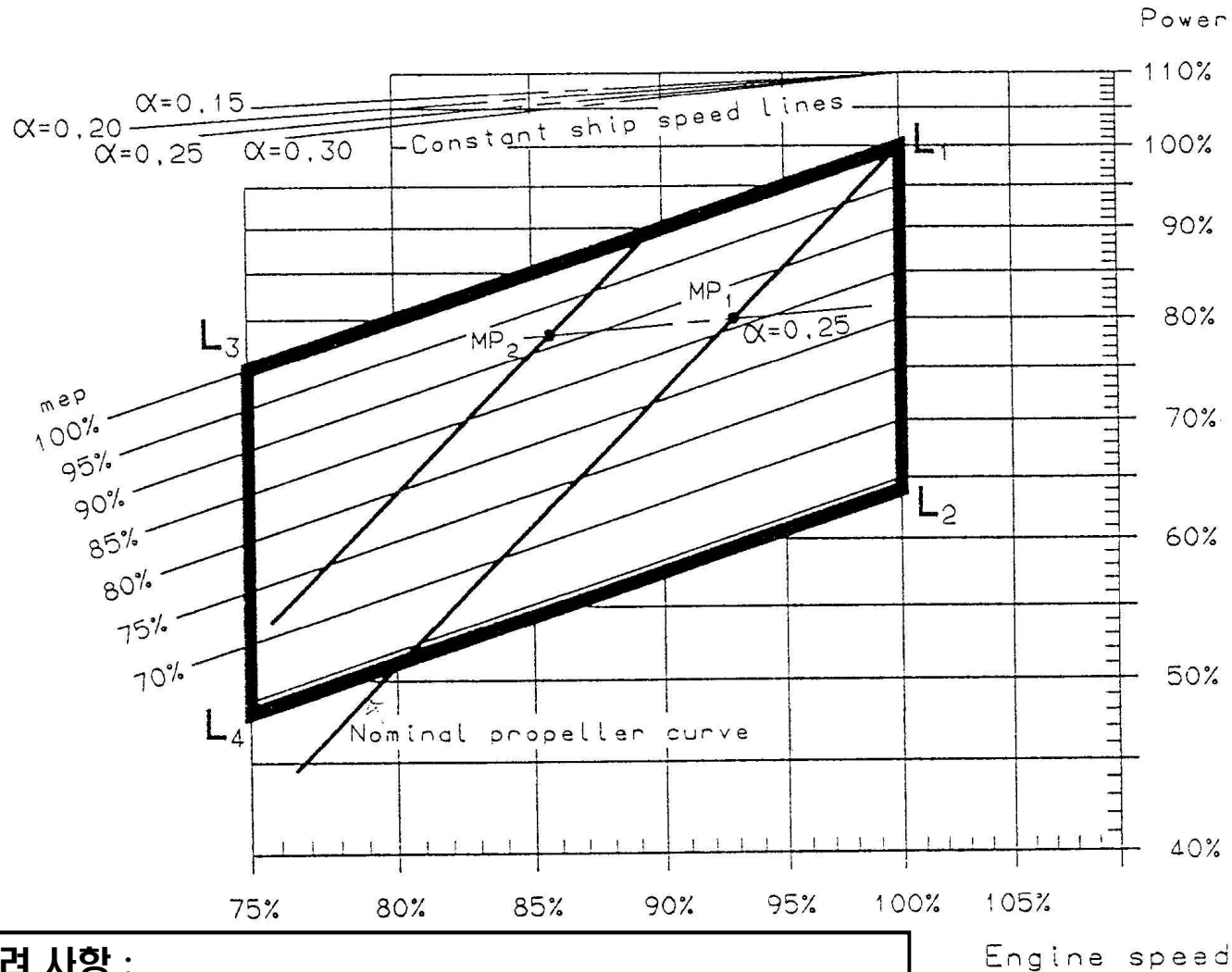


G_1 또는 G_2 : 프로펠러 설계점

n_{MCR}

마력 주기 기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기권 선정

동등 선속 직선을 이용한 MCR 대안 비교



MCR 선정 시 고려 사항 :

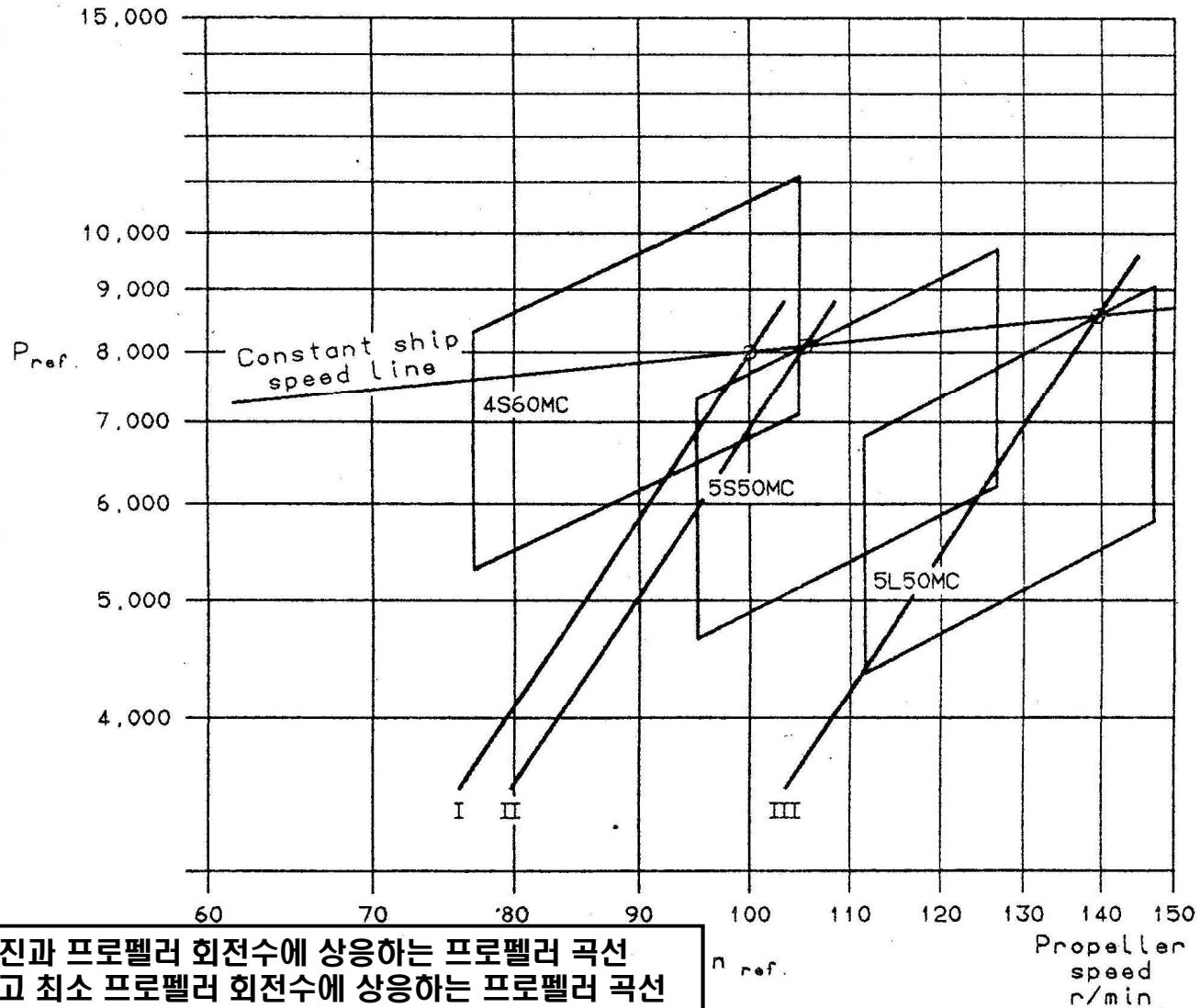
- 작은 기관 마력과 낮은 기관 회전수
- 마력과 회전수의 Derating 값(DMCR과 NMCR과의 마력과 회전수의 차이)
- 연료 소비율
- 프로펠러 작동 범위

동등 선속 직선을 이용한 엔진 종류 선정 대안 비교

마력 주기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

Installed power BHP

재화 중량 30,000톤급 선박의 기준 마력(8,000BHP 100rpm)에 대한 다른 엔진 선정 대안을 100~150 rpm사이에서 찾는 예



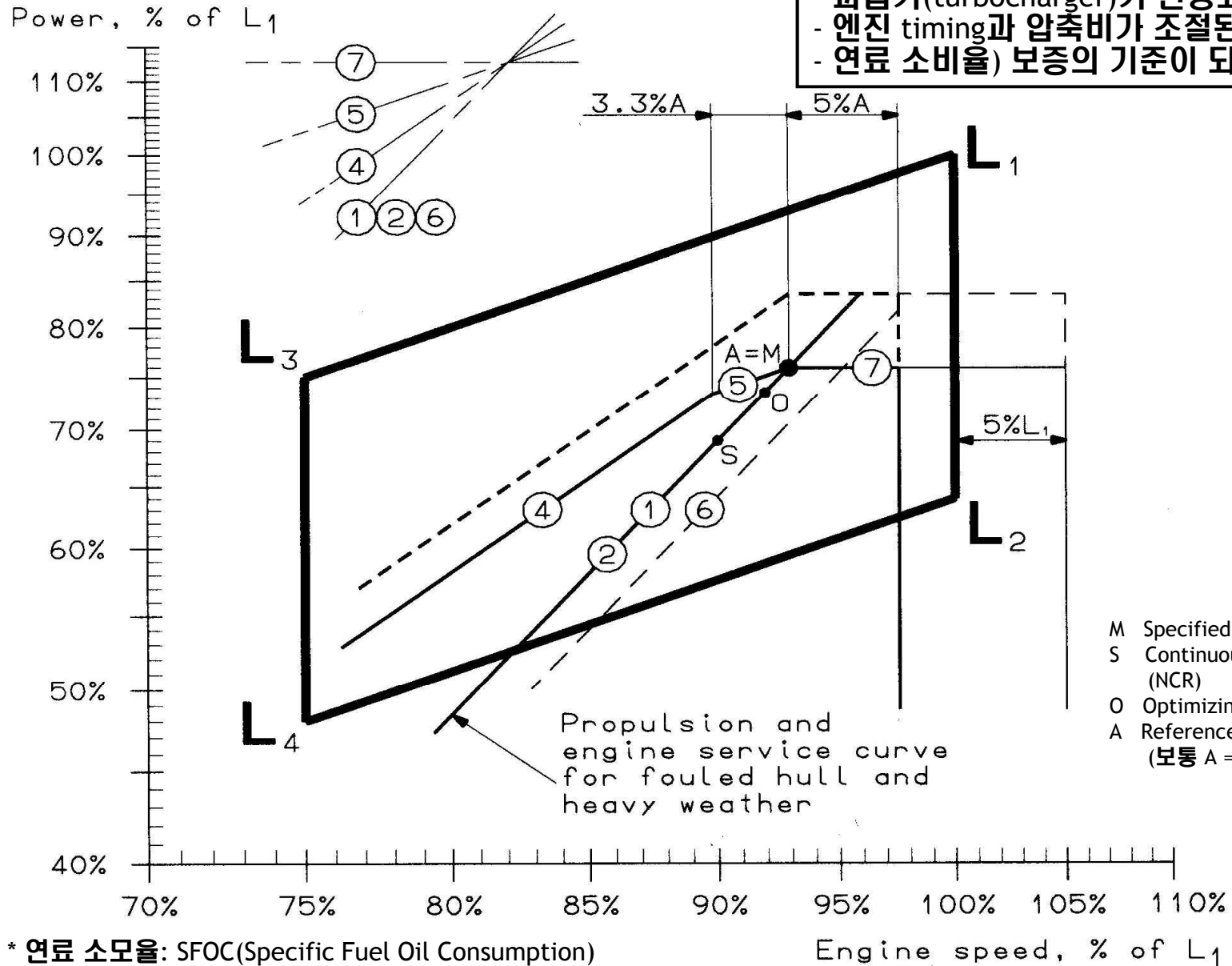
- I: 기준 4S60MC 엔진과 프로펠러 회전수에 상응하는 프로펠러 곡선
- II: 5S50MC를 가지고 최소 프로펠러 회전수에 상응하는 프로펠러 곡선
- III: 5L50MC를 가지고 최소 프로펠러 회전수에 상응하는 프로펠러 곡선

마력 주기 과	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수

연료 소비율을 고려한 최적의 엔진 작동점

연료 소비율을 고려한 엔진의 작동점("최적점 0")은

- 과급기(turbocharger)가 선정되고(matched),
- 엔진 timing과 압축비가 조절된 후의
- 연료 소비율) 보증의 기준이 되는 마력



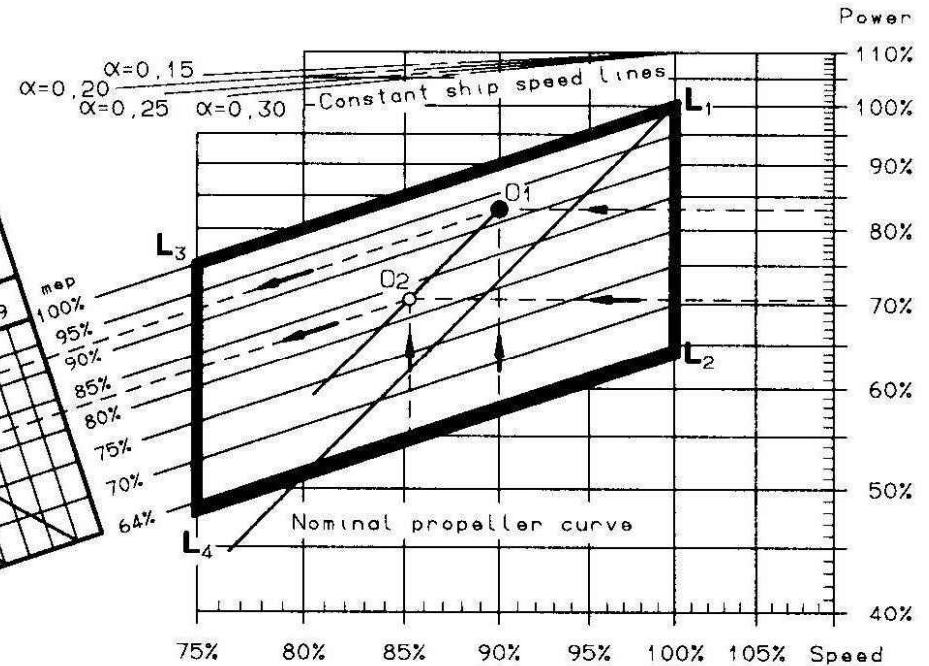
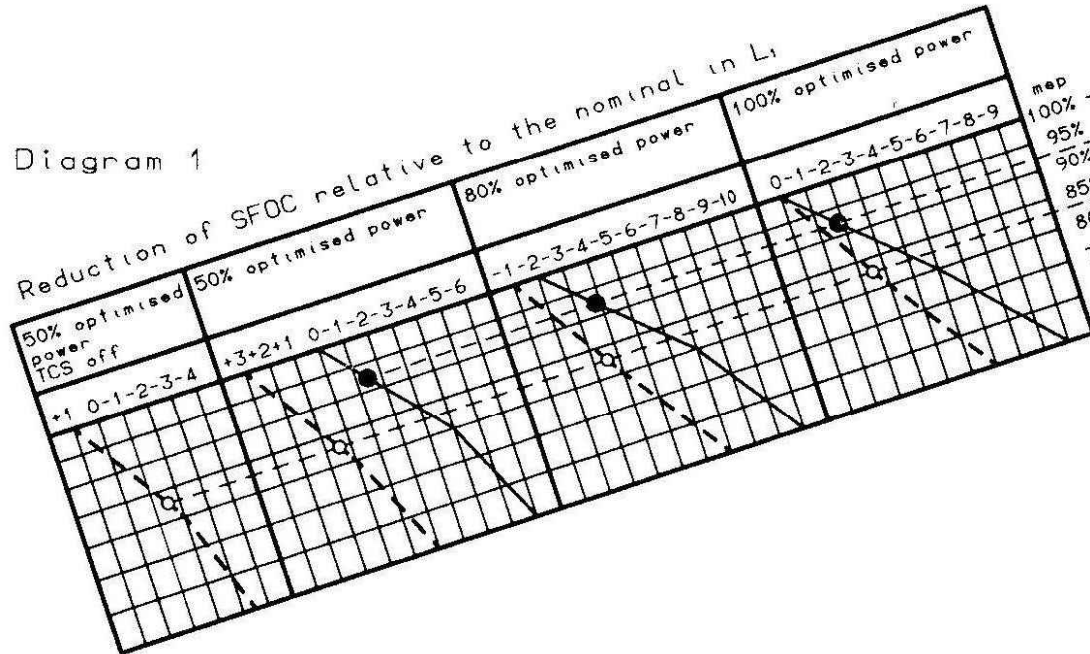
* 연료 소모율: SFOC(Specific Fuel Oil Consumption)

연료 소비율을 고려한 최적의 엔진 작동점

-("최적점 0") 선정 예(1)

마력 주기 기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기권 선정

Diagram 1



연료 소비율을 고려한 최적의 엔진 작동점 ("최적점 O") 선정 예(2)

마력 주기관	저항 및 마력 추정
	프로펠러 주요 치수
	주기관 선정

Data at nominal MCR (L ₁):	
Power: 100% (L ₁)	21,360 BHP
Speed: 100% (L ₁)	106 r/min
Nominal SFOC	127 g/BHP

Data of optimising point (O):	O ₁	O ₂
Power: 100% of (O)	17,730 BHP	15,100 BHP
Speed: 100% of (O)	95.4 r/min	90.1 r/min
SFOC found:	125 g/BHP	122.6 g/BHP

L70MC	Nominal SFOC in g/BHP at nominal MCR (L ₁)
Conventional turbochargers	127
High efficiency turbochargers	125
High efficiency turbochargers and TCS	min. 122

O₁: Optimised in M

O₂: Optimised at 85% of power in M

Point 3: is 80% of O₂ = 0.80 x 0.85 of M = 68% M

Point 4: is 50% of O₂ = 0.50 x 0.85 of M = 42.5% M

