Determination of Propeller Dimension (프로펠러 주요치수 결정)

2008.4

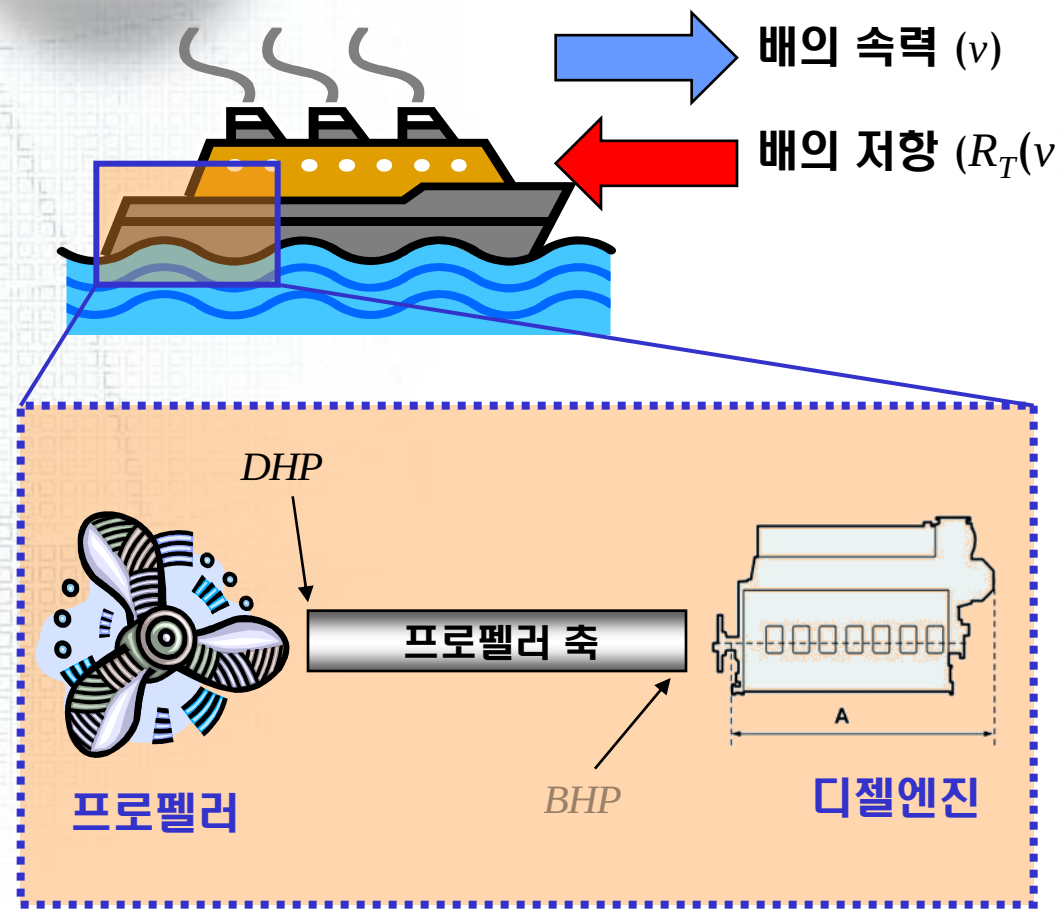
서울대학교 조선해양공학과
이규열

Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

선박 개념 설계의 순서

1. 선주 요구 조건(owner's requirements)
2. 유사 실적선 자료 조사
3. 관련 rules & regulation 검토
4. 주요 치수 선정
   - 배수량 추정 -
5. 경하 중량(lightweight) 추정
6. 저항 및 마력 추정/주기관 선정
   - 저항 성능 추정, 프로펠러 주요 치수 선정 -
7. 화물창 용적(cargo capacity) 추정
8. 건현(freeboard) 계산
9. 초기 복원 성능(stability) 추정
10. 개략 일반 배치(Sketch G/A 작성)
11. 개략 선형 및 선박 제 계산
12. 견적 물량 및 견적가 산정
13. Technical documents 작성

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)

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

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 속력

2) 프로펠러의 주요치수를 결정하는 과정을 수학적으로 정식화하면 비선형 최적화 문제로 정식화되는 것을 보이고, 문제의 해를 구하는 과정을 습득한다.

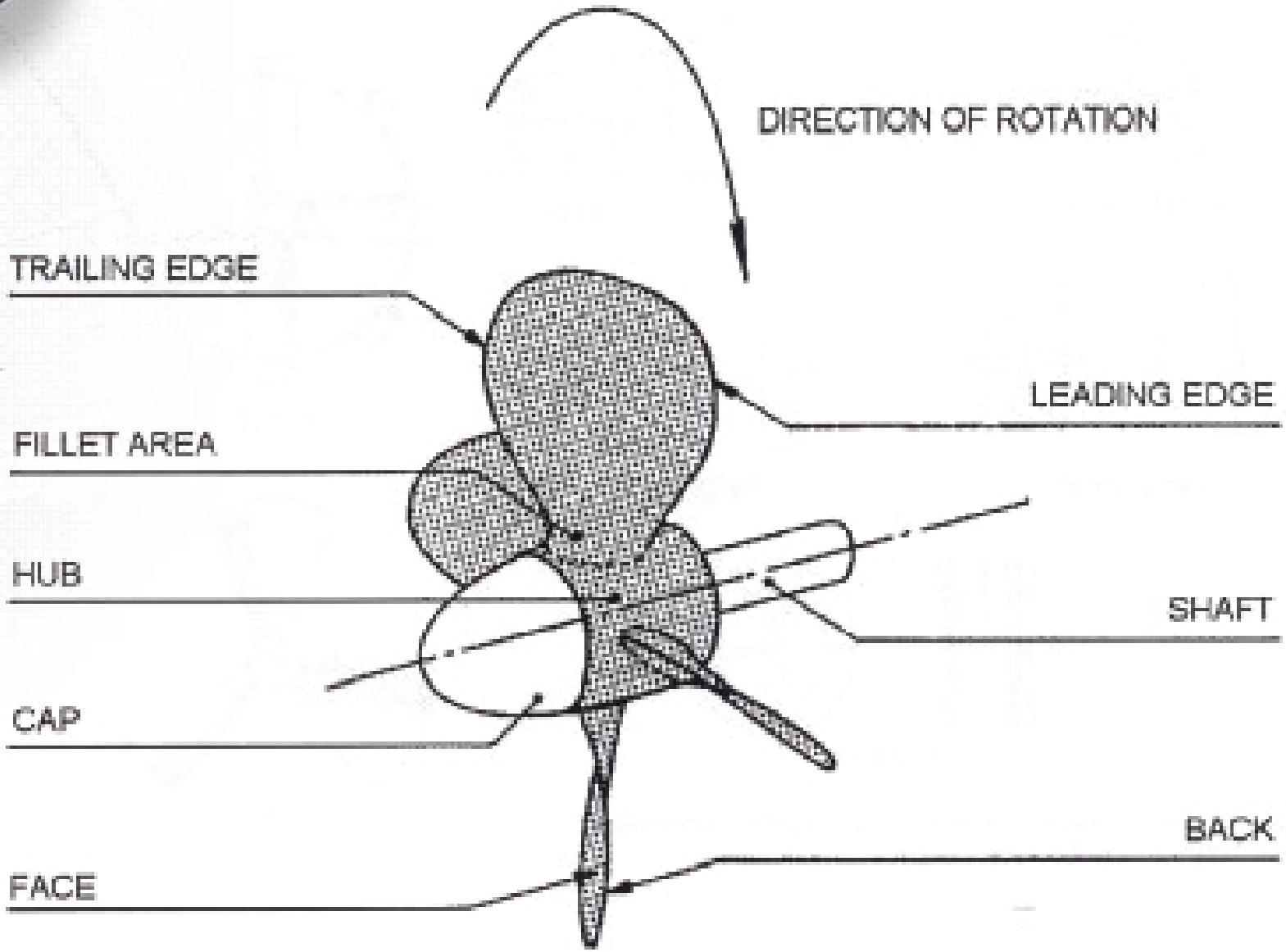
3) 주어진 선속을 내기 위한 프로펠러 회전수 및 그 때의 소요마력 결정 문제를 정식화하고 문제의 해를 구하는 과정을 습득한다.

4) 프로펠러의 회전수와 배의 속력과의 관계를 알아본다.

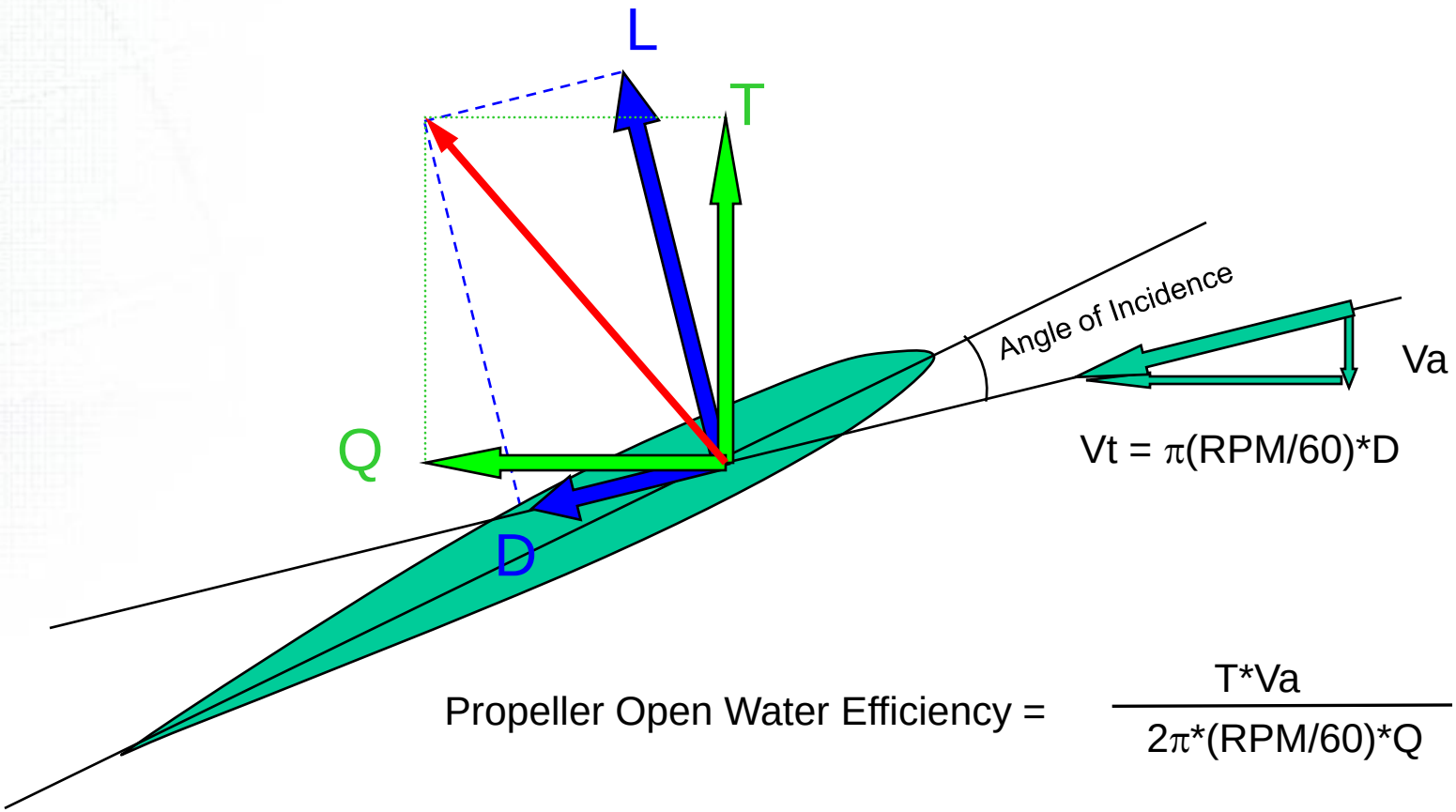
5) 프로펠러의 회전수와 최적 직경 및 효율과의 관계를 알아본다

6) 주요치수 결정 과정을 C++ 프로그래밍하는 방법을 습득한다.

프로펠러의 부분별 명칭


DIRECTION OF ROTATION
TRAILING EDGE
LEADING EDGE
FILLET AREA
HUB
SHAFT
CAP
BACK
FACE

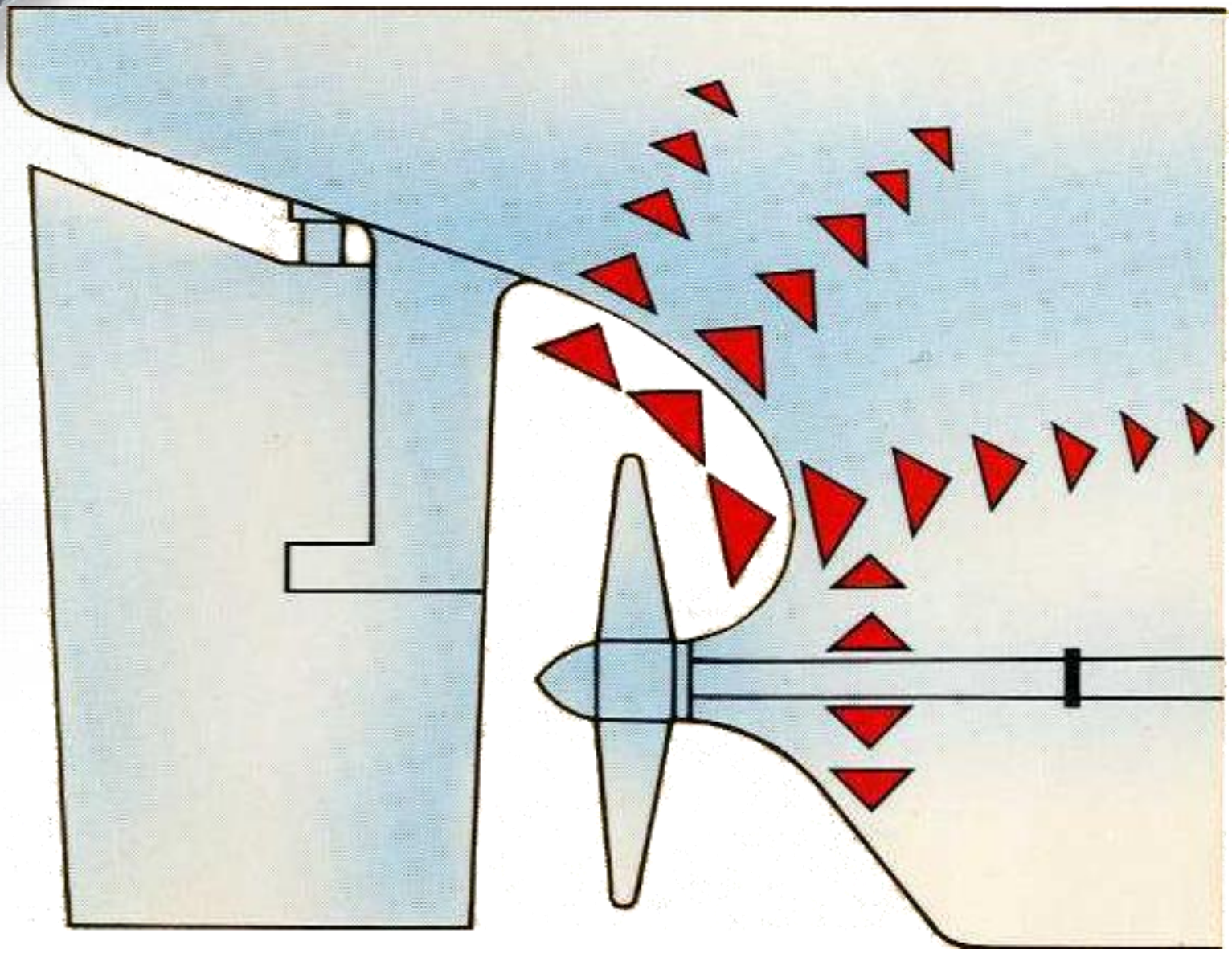
프로펠러가 추력을 생성하는 원리



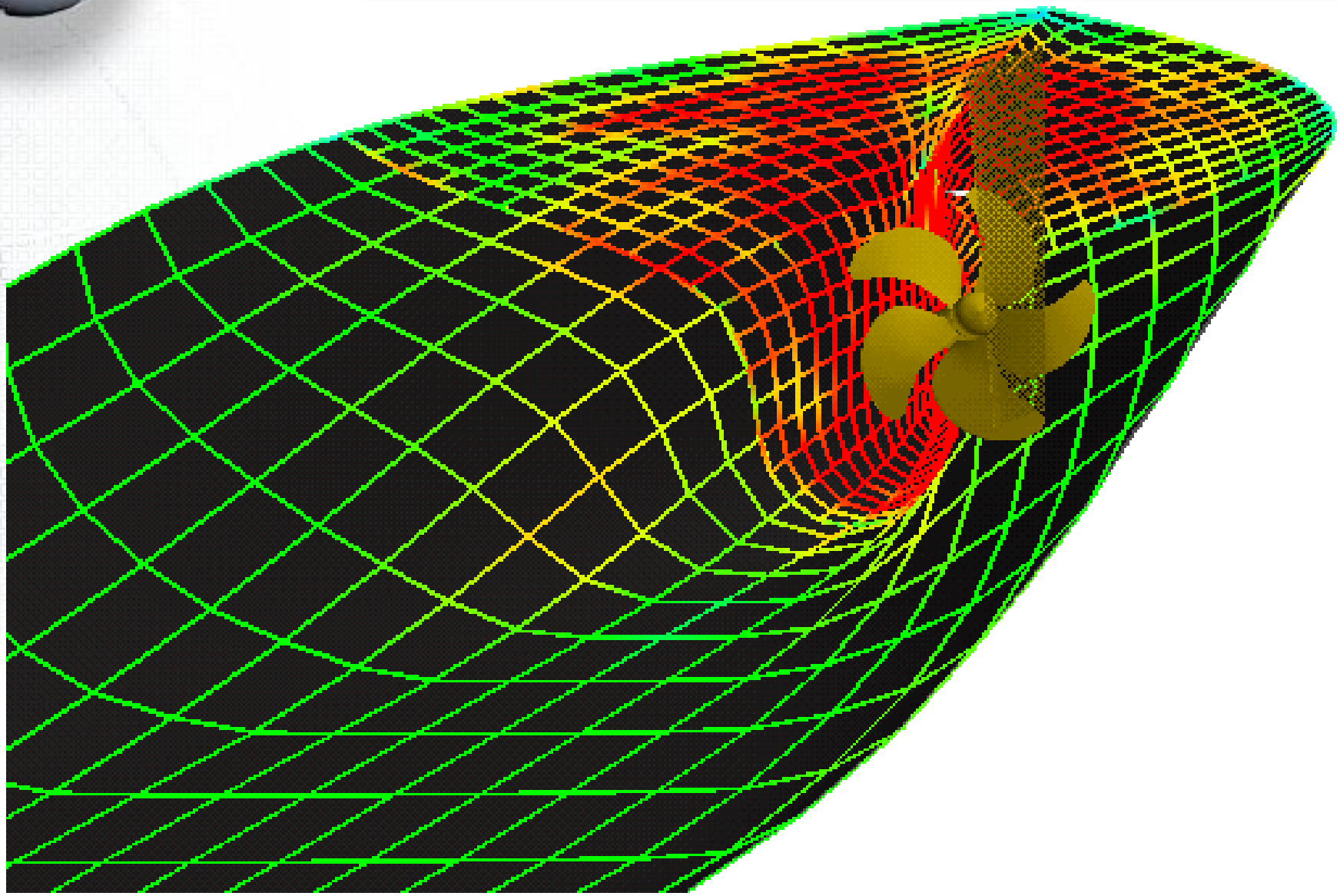
$$Vt = \pi(RPM/60)*D$$

$$\text{Propeller Open Water Efficiency} = \frac{T*Va}{2\pi*(RPM/60)*Q}$$

프로펠러의 작동이 선체 진동에 미치는 영향



프로펠러의 작동이 선체 압력에 미치는 영향



박용 디젤 엔진 및 프로펠러

현대 중공업 프로펠러 공장

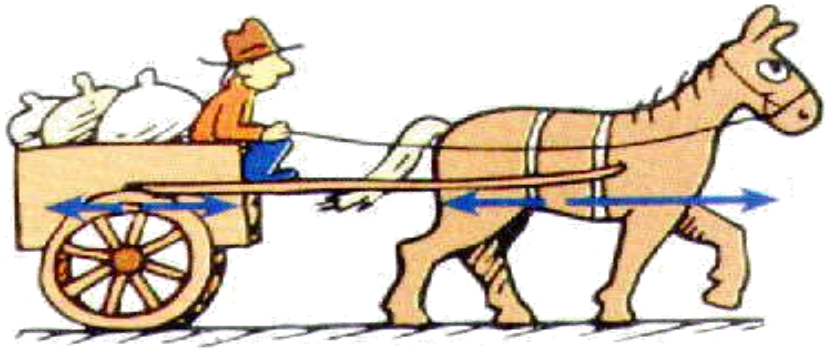
☑ 박용 디젤 엔진 제작사
-현대중공업 엔진사업부:세계 시장 점유율 35%(세계 1위)
- 두산중공업(한국중공업)의 HSD엔진: 세계 시장 점유율 20%(세계 2위)

☑ 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: 약 10m
프로펠러 중량: 약 72톤

프로펠러의 주요 치수 결정 개념
- Given & Find(1)



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

Given	Find
•말 1마리 = 주어진 주기관 •바퀴의 마찰력 = 선박의 저항	•바퀴의 설계 = 프로펠러의 설계 •최대 속력 = 선박의 최대 속력 •바퀴의 직경 = 프로펠러 주요 치수

프로펠러의 주요 치수 결정 개념
- Given & Find(2)

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

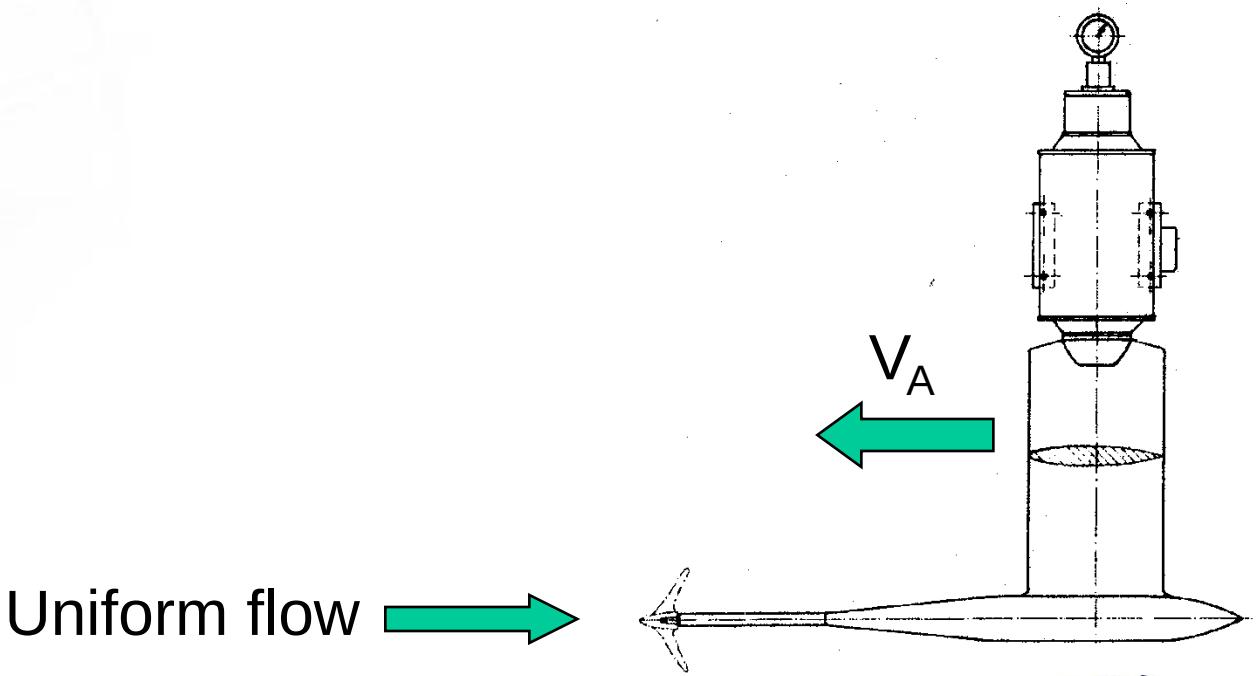
v : 선박의 속력, m/s

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]

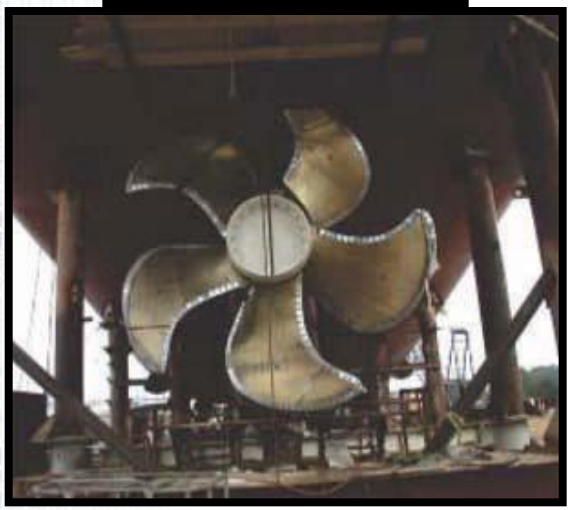
n : 디젤엔진 회전수 [1/s]

D_P : 프로펠러 직경 [m]

P_i : 프로펠러 피치 [m]

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

실선의 프로펠러



기하학적으로 상사

모형의 프로펠러

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

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

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

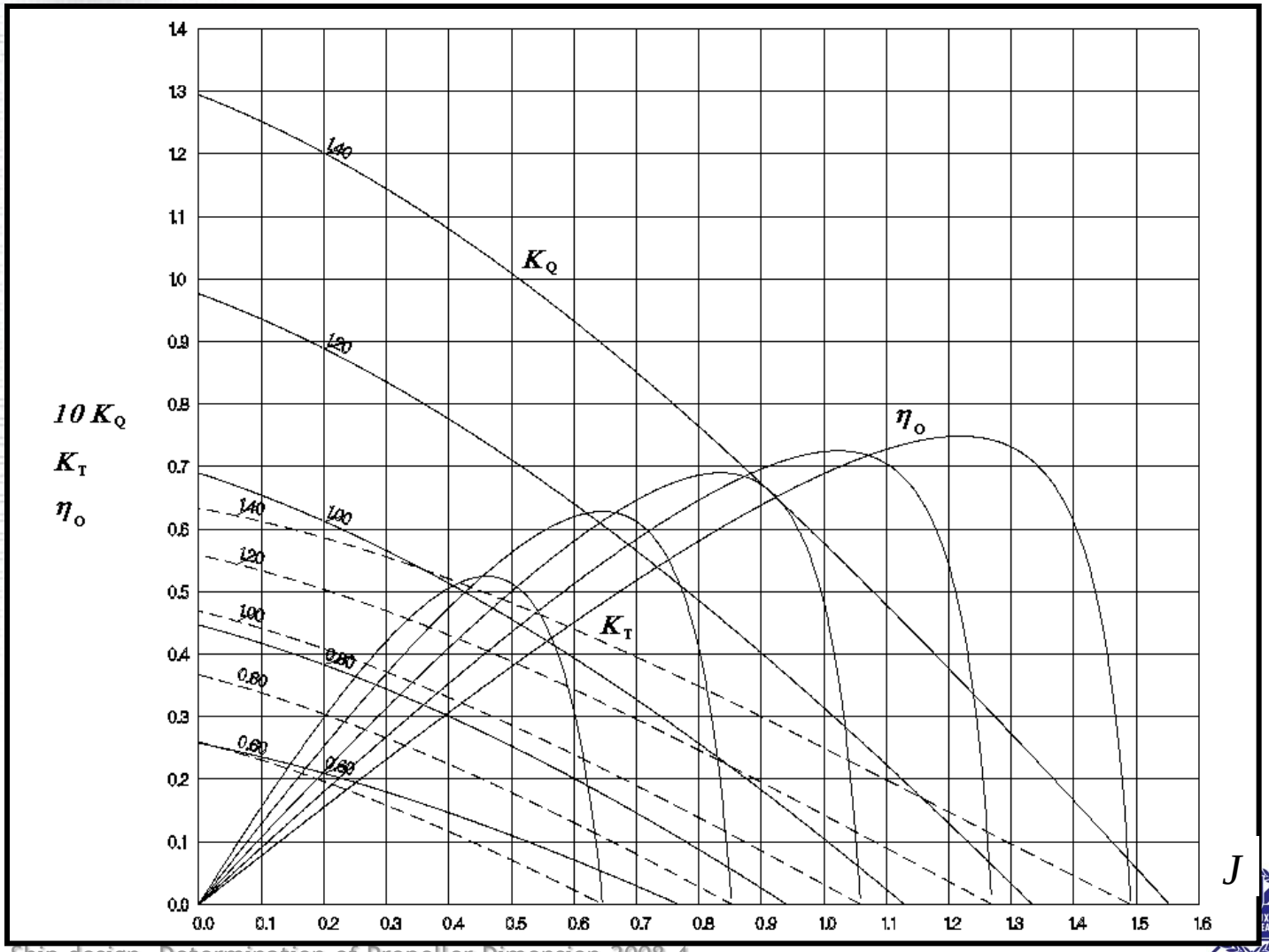
$$v_A = v \cdot (1 - w)$$

동일한 무차원 계수

$$\left(K_T, K_Q, J\right)$$

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

- 모형 프로펠러의 피치비 (Pi/D_P)를 변화시켜가며 측정한 결과



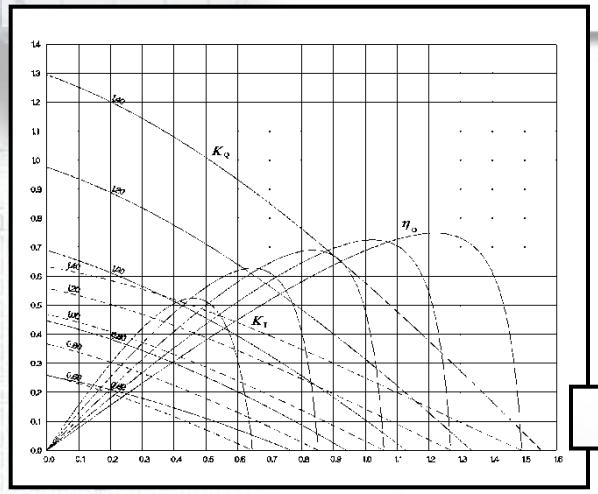
$$\frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D_P^4} = K_T$$

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

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

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

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

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

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**

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

디젤엔진이 전달한 Torque = **프로펠러가 흡수하는 Torque**

프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델

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

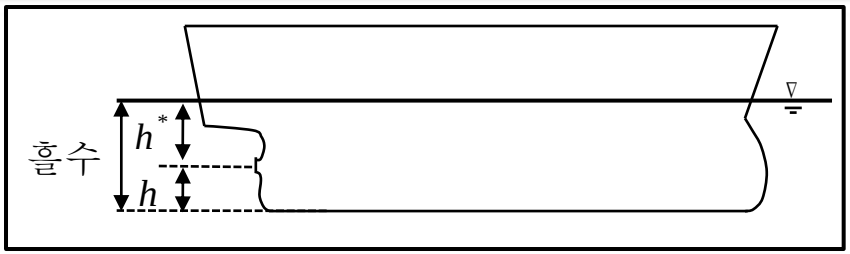
- 조건식2 : 배가 어떤 속력에서 요구하는 추력을 프로펠러가 내야 하는 조건

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

배가 어떤 속력을 내기 위해 필요한 추력 = 프로펠러가 내야 하는 추력

프로펠러 주요치수 결정 수학적 모델

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



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

① Keller**의 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 kN/m2 at 15℃ Sea water

h* : **축 침수 깊이**

h : Shaft Center height (height form base line)

① Burrill**의 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)

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

4개의 미지수

- **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**

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

2개의 등식과
1개의 부등호 제약조건

비선형 최적화 문제

목적 함수 : Find Maximum η_0

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

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

1. 전개 면적비 (A_E / A_o) 가정
2. 속력 v 가정
3. 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$의 형태로 표현
4. 프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 여러 피치비에서 최대 효율(η_0)을 내는 J와 그 때의 K_T를 구함
5. 단계 4에서 구한 J를 이용해 D_P를 구함 $\left(J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \right)$
6. 구한 DP와 K_T 가 조건식2를 만족하는가?
7. 전개 면적비 (A_E / A_o) 가 요구 전개면적비를 만족하는가?

1st Loop

2nd Loop

3rd Loop

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

1 전개 면적비 (A_E / A_o) 가정

A_O : 원판의 면적($\pi D_P^2/4$)

A_E : 프로펠러의 전개 면적

2 속력 v 가정

3 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$ 의 형태로 표현

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

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

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

- A_E/A_O, Z, P_i/D 가 주어졌을 때, J^5에 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

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

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

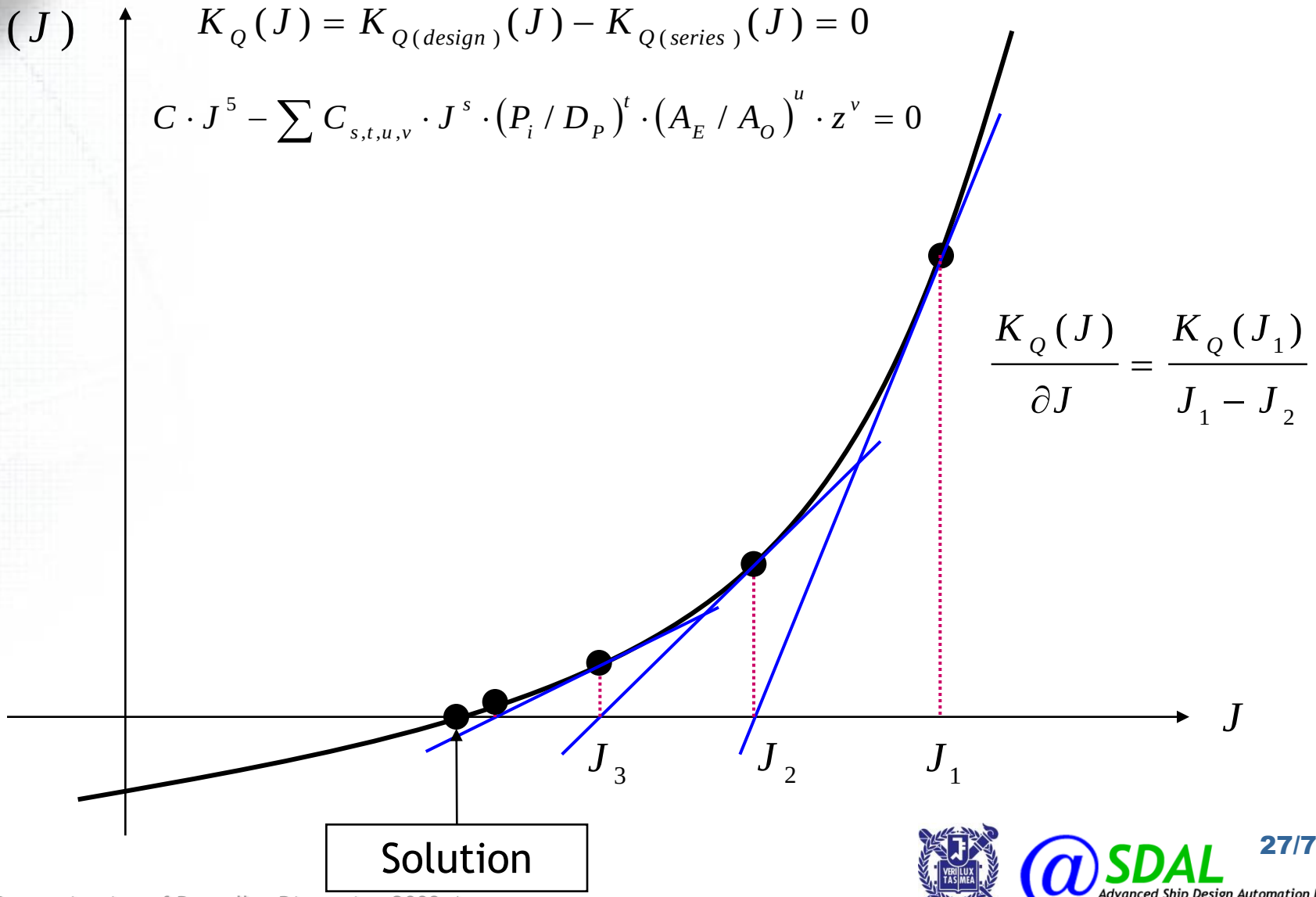
두 식을 연립함

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

프로펠러 최적 주요치수 결정 방법
- 비선형 방정식의 해를 구하는 방법: Newton & Raphson 방법

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

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



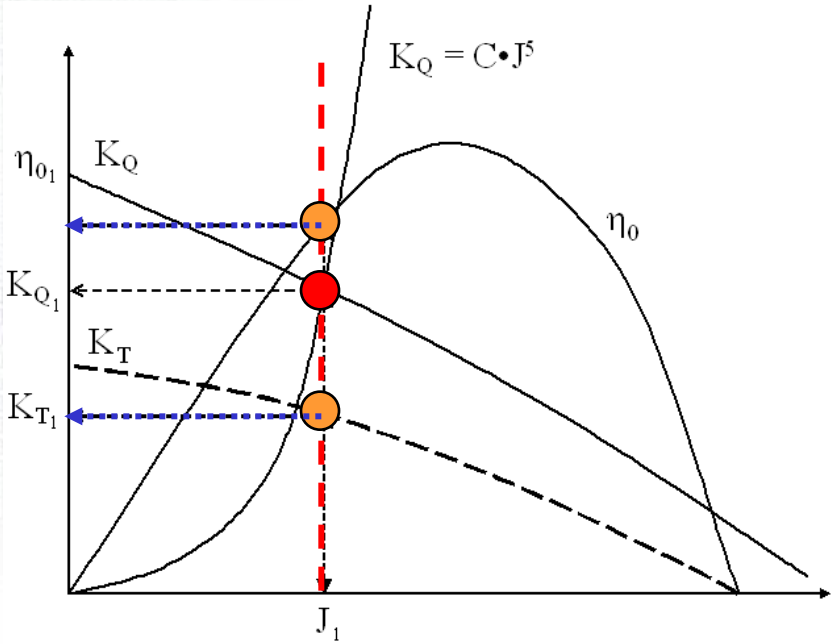
$$\frac{K_Q(J)}{\partial J} = \frac{K_Q(J_1)}{J_1 - J_2}$$

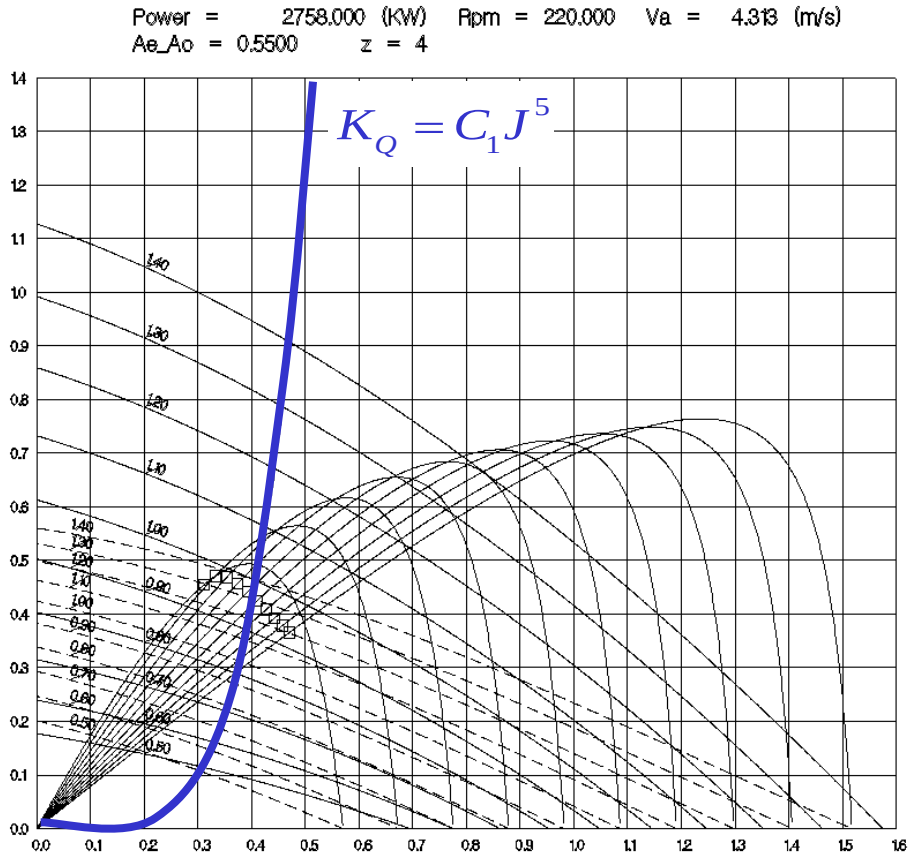
프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

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

4

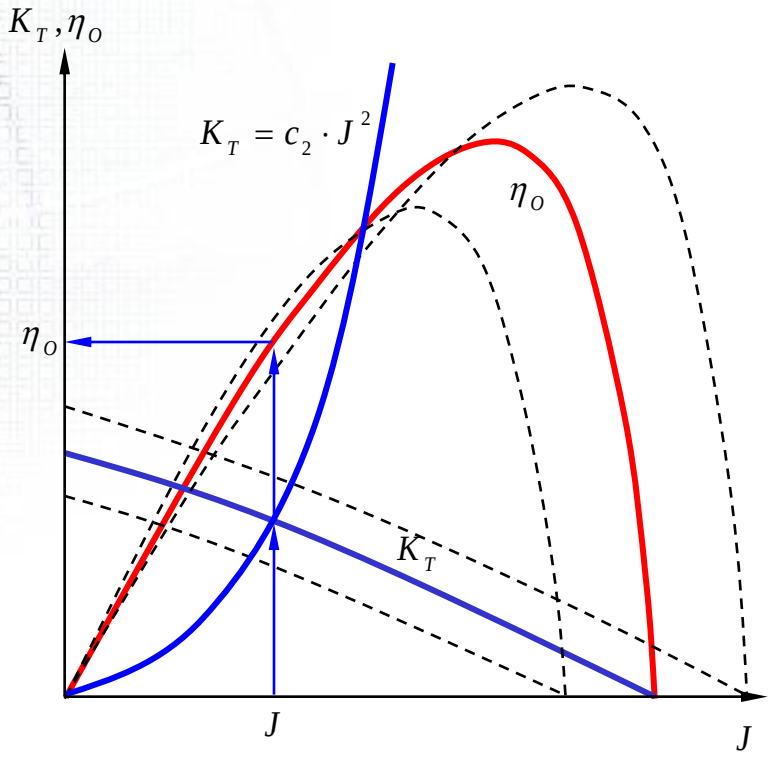
프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 여러 피치비에서 최대 효율(η_0)을 내는 J와 그 때의 K_T를 구함

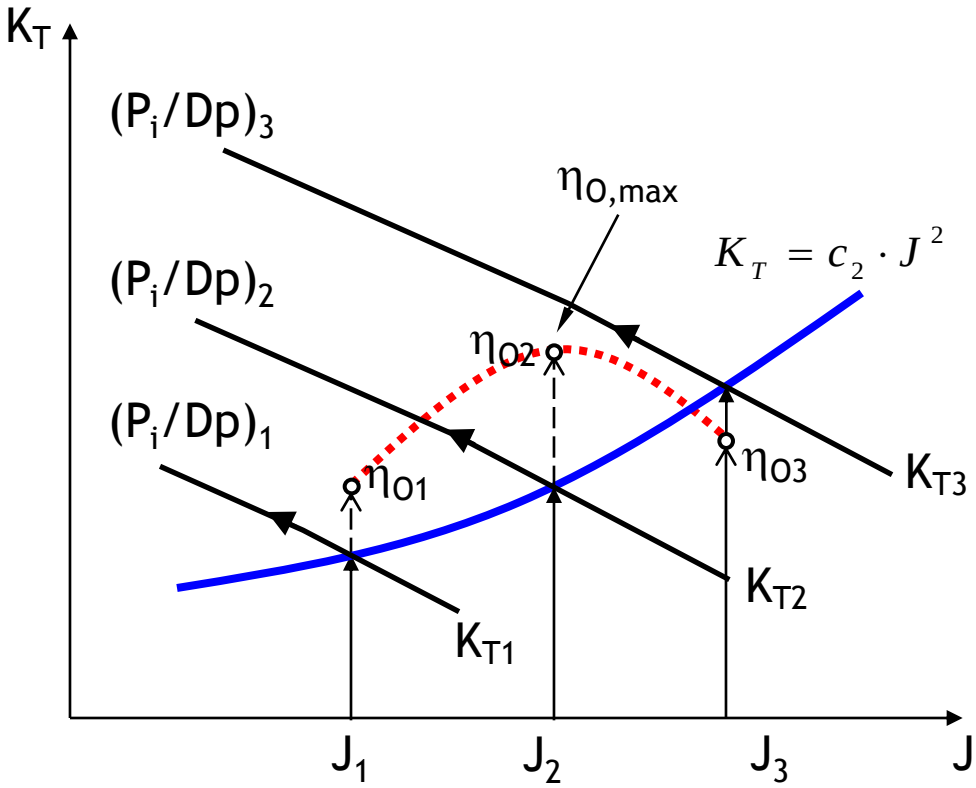




[3] 프로펠러 효율(η_0) 및 전진비(J) 추정

3 프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 여러 피치비에서 최대 효율(η_0)을 내는 J와 그 때의 K_Q를 구함





프로펠러 최적 주요치수 결정 방법

5 단계 4에서 구한 J를 이용해 D_P를 구함

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

6 구한 D_P와 K_T 가 조건식2를 만족하는가?

No!! → Go to 2 다른 속력 v 가정

조건식2 $\left(\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P{}^4 \cdot K_T \right)$ 에 대입하여 만족여부 확인

Yes!!

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

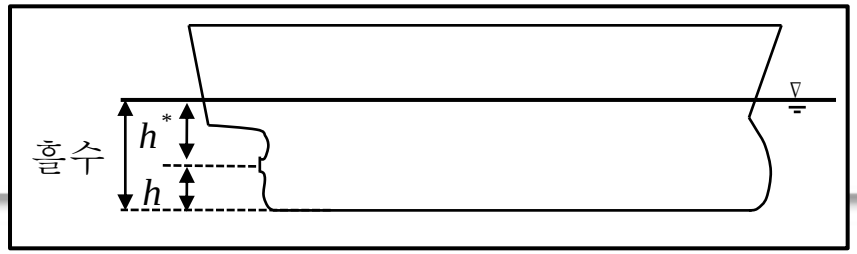
No!! → Go to 1 다른 전개 면적비 (A_E / A_o) 가정

조건식3 $\left(A_E / A_O \geq K + \frac{(1.3 + 0.3z) \cdot T}{D_P{}^2 \cdot (p_0 + \rho g h^* - p_v)} \right)$ 에 대입하여 만족여부 확인

Yes!!

STOP

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제



(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** : NCR**의 마력**, MCR**의 회전수**

  NCR = 3825 [PS]

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

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

1 전개 면적비 (A_E / A_o) 가정

$(A_E / A_o) = 0.55$ 로 가정

2 속력 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_R을 고려해야 함

프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

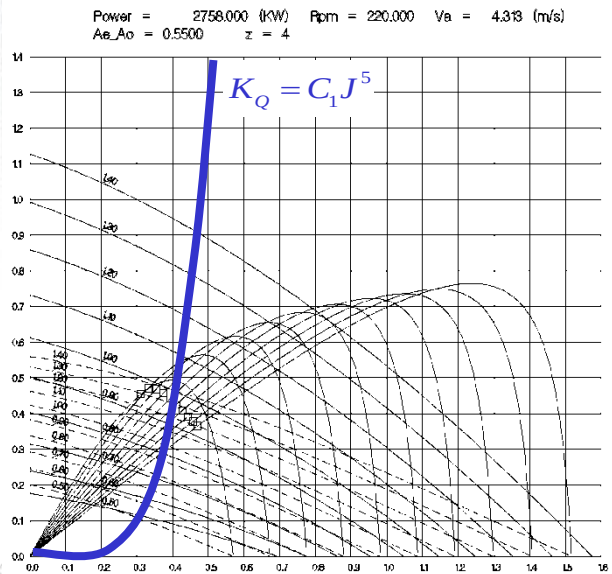
3 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$ 의 형태로 표현

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

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

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

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



프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

-

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

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

그래프의 교점

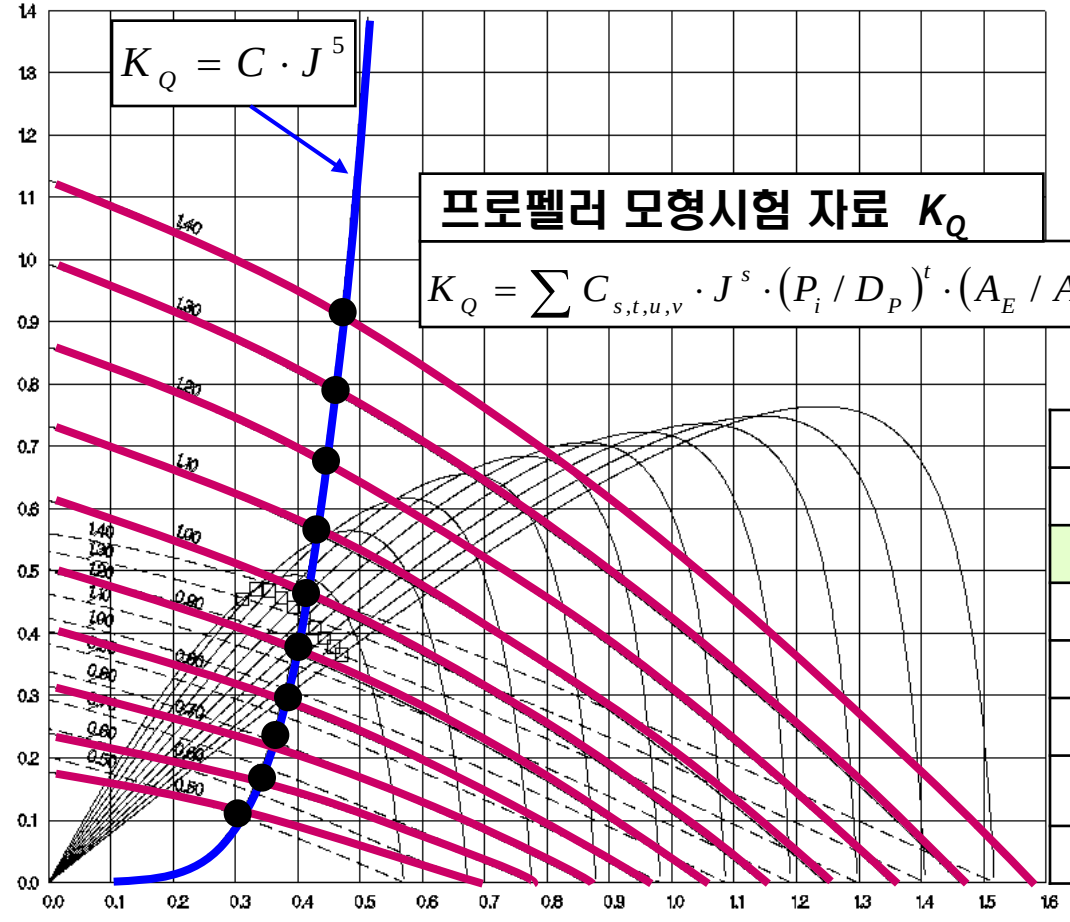
↓

J 결정

↓

η_0 가 최대가 되는 $J,\ P_i / D$ 선정

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



프로펠러 모형시험 자료 K_Q

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

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 J를 이용해 D_P를 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_P와 K_T가 조건식2를 만족하는가?

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)

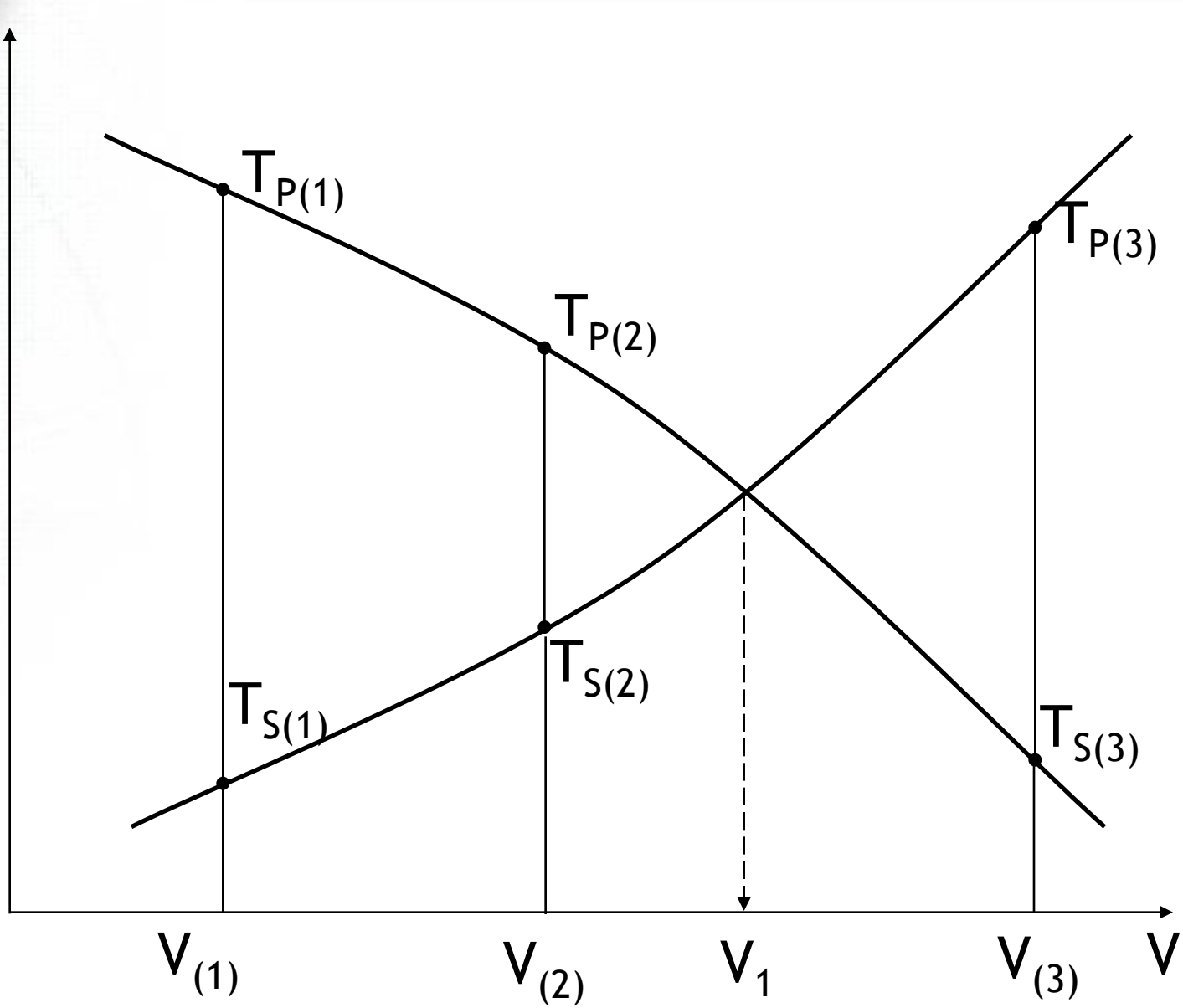
$$= \rho \cdot n^2 \cdot D_P{}^4 \cdot K_T = 1.025 \times (220/60)^2 \times 3.5396^4 \times 0.1428 = 308.8956\ [kN]$$

(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

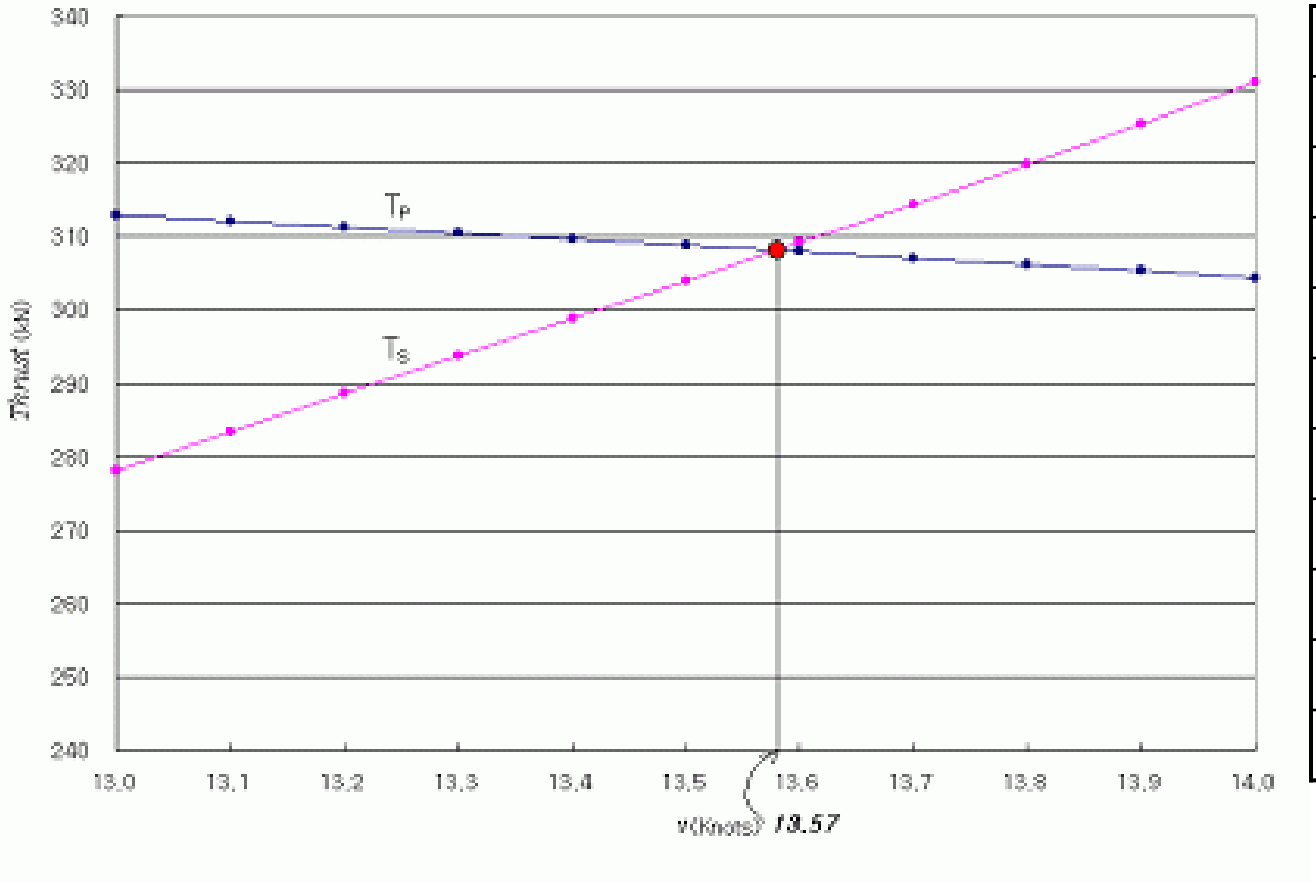
프로펠러 최적 주요치수 결정 예제

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



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

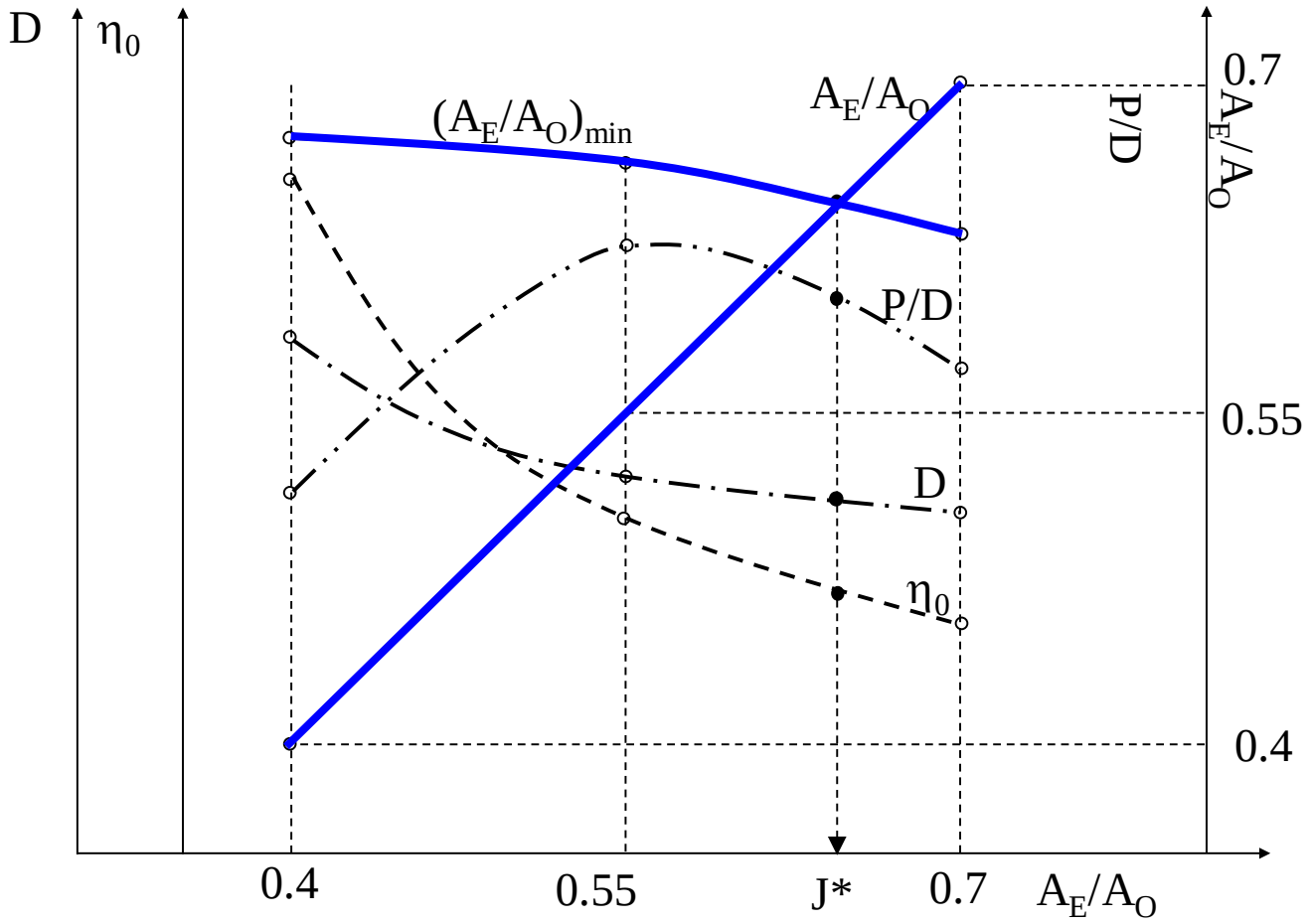
7 전개 면적비 (A_E / A_o) 가 요구 전개면적비를 만족하는가?

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

$$= 0.2 + \frac{(1.3 + 0.3 \times 4) \cdot 308.1892}{3.5416^2 \times (99.047 + 1.025 \times 9.81 \times 4.15} = 0.6363$$

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_O	0.4650
D_P (m)	3.5278
Pi/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 , Pi, v [m/s], $R_T(v)$ [kN], z, A_E/A_O
Find	P [kW] , n [1/s]

- 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

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

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

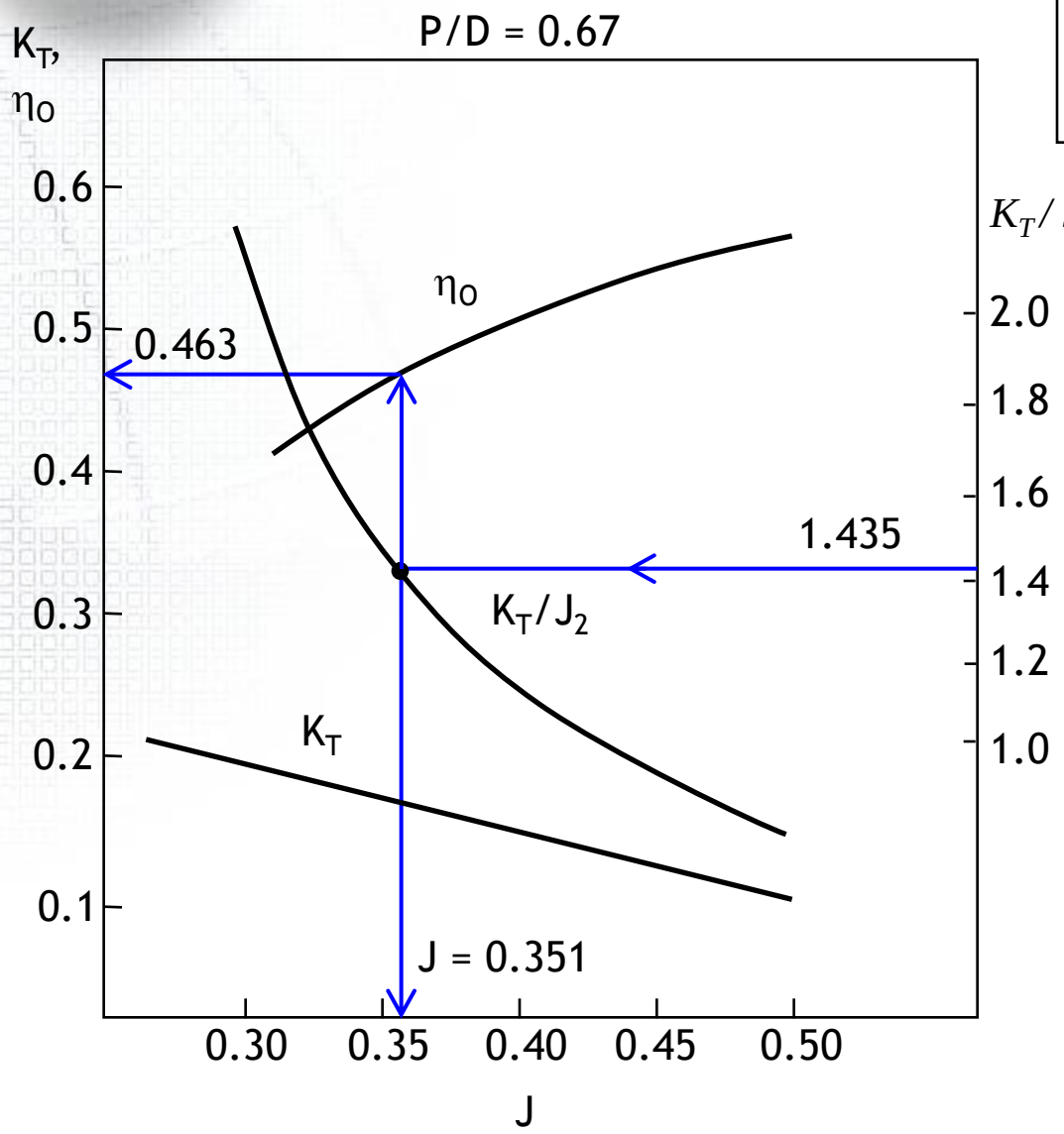
조건식2 $\left(\frac{R_T}{1-t} = \rho \cdot n^2 \cdot {D_P}^4 \cdot K_T \right)$, $J = \frac{v_A}{n \cdot D_P} \left(\Rightarrow n = \frac{v_A}{J \cdot D_P} \right)$

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

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

주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정(3)

프로펠러 단독 성능 곡선



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

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

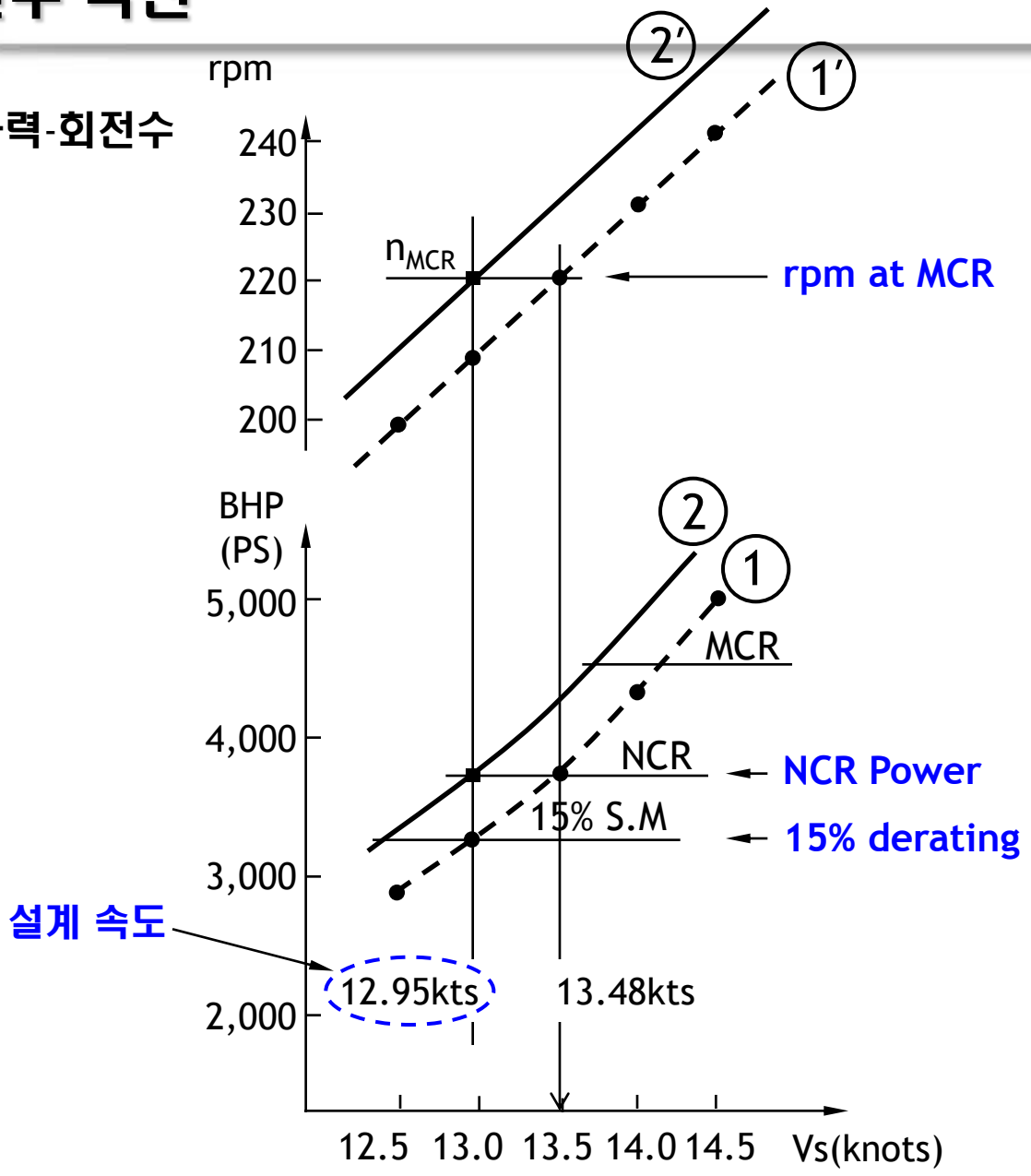
V_S [Kts]	EHP in **calm water** [PS] (1)	w	t	K_T/J^2	J (2)	N[RPM (3)	η_O (4)	BHP in calm water (5)
12,5	1686	0,381	0,224	1,374	0,355	202	0,470	2867
13,0	1965	0,380	0,223	1,418	0,352	212	0,465	3367
13,5	2240	0,379	0,221	1,435	0,351	221	0,463	3844
14,0	2536	0,377	0,219	1,443	0,348	232	0,460	4376
14,5	2898	0,375	0,216	1,470	0,345	243	0,457	5020

주어진 프로펠러에서 속력-마력-회전수 결정(4)
- 속력-마력-회전수 곡선

설계 프로펠러의 속력-마력-회전수

① **정수 중**

② Sea margin **고려**



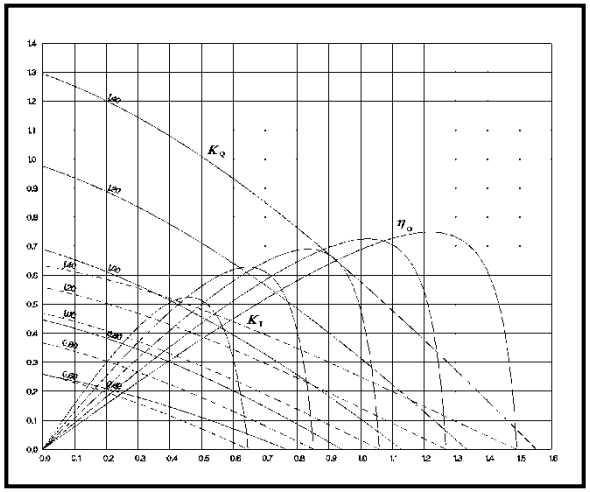
프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성

Guide(I)

프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

CPropellerDB Class

- **프로펠러 단독 성능 곡선의 회귀분석식**



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
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- **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];
   CKPolyNomial m_KQPoly[46];
   std::vector<CResistanceResult> m_ResistanceResult;

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

회귀분석식의 지수 저장 변수

모형선의 저항 실험 데이터 저장 변수

모형선의 저항 실험 데이터 저장 함수

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;
}
```

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

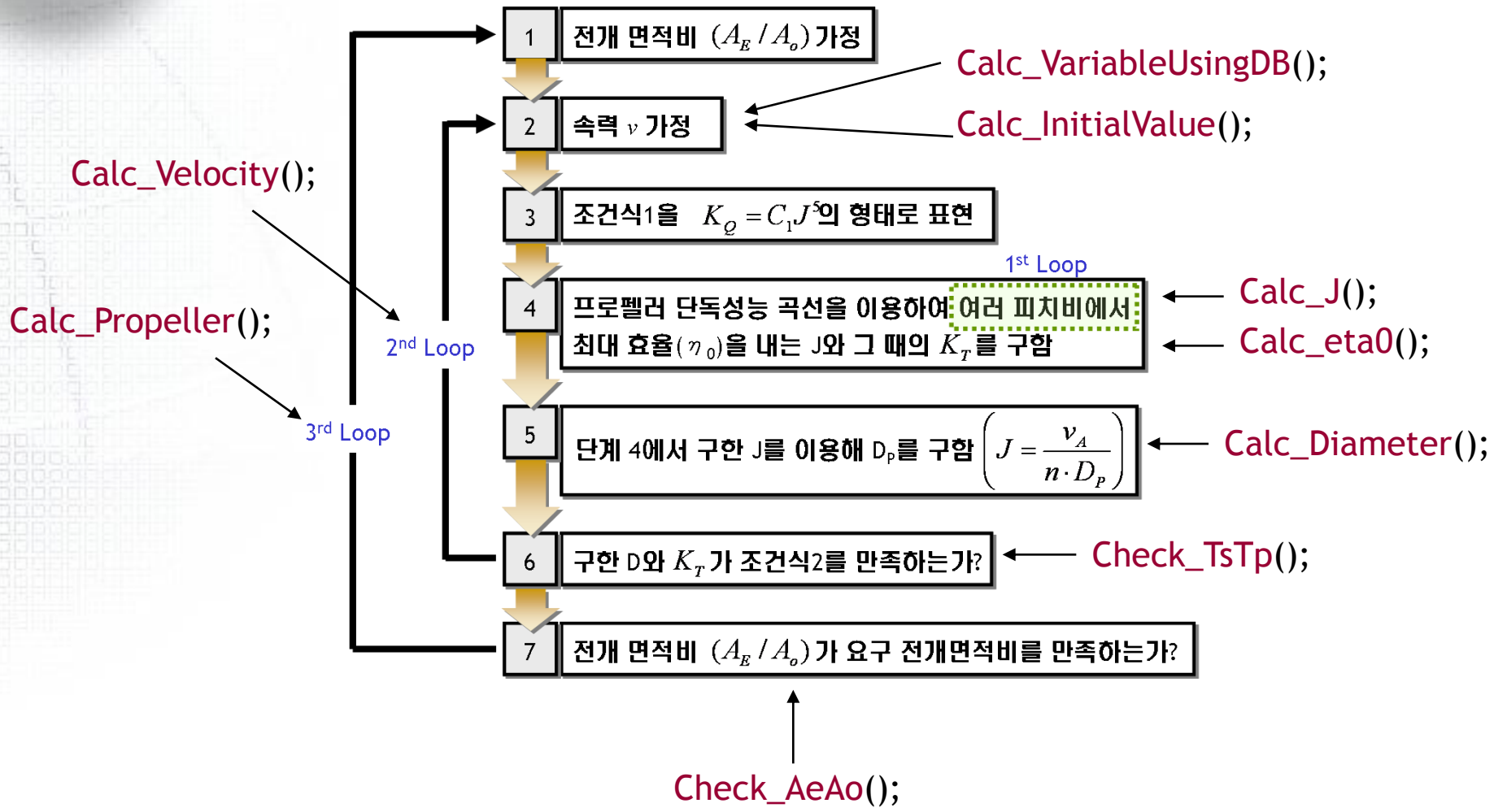
프로펠러 최적 주요치수 결정 프로그램 작성 Guide

```
class CPropeller
{
   …
//member variables
   CPropellerDB m_PropellerDB;

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

   //Datebase로 부터 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();          //프로펠러 주요치수를 결정하는 모든 과정을 담고 있다.
   void Calc_VariableUsingDB();    //DB에 저장된 값을 사용하여 계산할 수 있는 변수의 값을 결정.
   void Calc_InitialValue();       //입력정보를 가지고 단순한 초기화 계산을 수행함
                                   //단위변환, 주어진 값으로 계산 가능한 상수를 계산함.

   double Calc_J();                //Newton-Rapson 방법을 이용하여 J를 구한다.
   void Calc_eta0();               //피치비를 변경시키면서 주어진 전개 면적비에서 가장 큰 효율을 구한다.
   void Calc_Diameter();           //전진비에 따른 프로펠러의 직경(D)를 구한다.
   CheckEnum Check_Result();       //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,η_R, η_H를 구함

C1,vA,n을 구함

최대 효율을 구함

프로펠러 직경(D_P)를 구함

Ts=Tp인지 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)
   {
            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;
            }
   }
}
```

1st Loop

Newton-Rapson 방법으로 사용하여 J를 계산

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 속력 변화에 따른 저항**, η_R, t, w
- Shaft Center Height = 2.35 m
- Sea Margin = 15 %
- 15℃ **해수 상태** $p_0 - p_v = 99.047\ KN/m^2$
- **선박의 흘수** $T_{mld} = 6.5\ m$

출력 값

- **전개 면적비** (A_E/A_O)
- **배의 속력**(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

// Constant 변수
const double PI;
const double rho;

// 출력
double out_AeAo, out_V, out_w, out_VA;
double out_J, out_etaO, out_D, out_PiD;
double out_Kt, out_Kq, out_Tp, out_Ts;
// 생략
```

입력값을 저장할 변수의 선언

상수값을 저장할 변수의 선언

출력값을 저장할 변수의 선언

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램 - 클래스의 생성 및 선언(3)

- 계산 과정의 모듈화

프로펠러 주요 치수 결정을 위해 필요한 항목	함수의 선언
프로펠러 주요 치수 결정	OnCalculate()
Wageningen B-series **회귀해석식** (K_T)	Calculate_KT()
Wageningen B-series **회귀해석식** (K_Q)	Calculate_KQ()
T_P **계산**	Calculate_TP()
Newton & Rapson **방법**	Newton_Rapson()
⋮	⋮

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_AO, 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

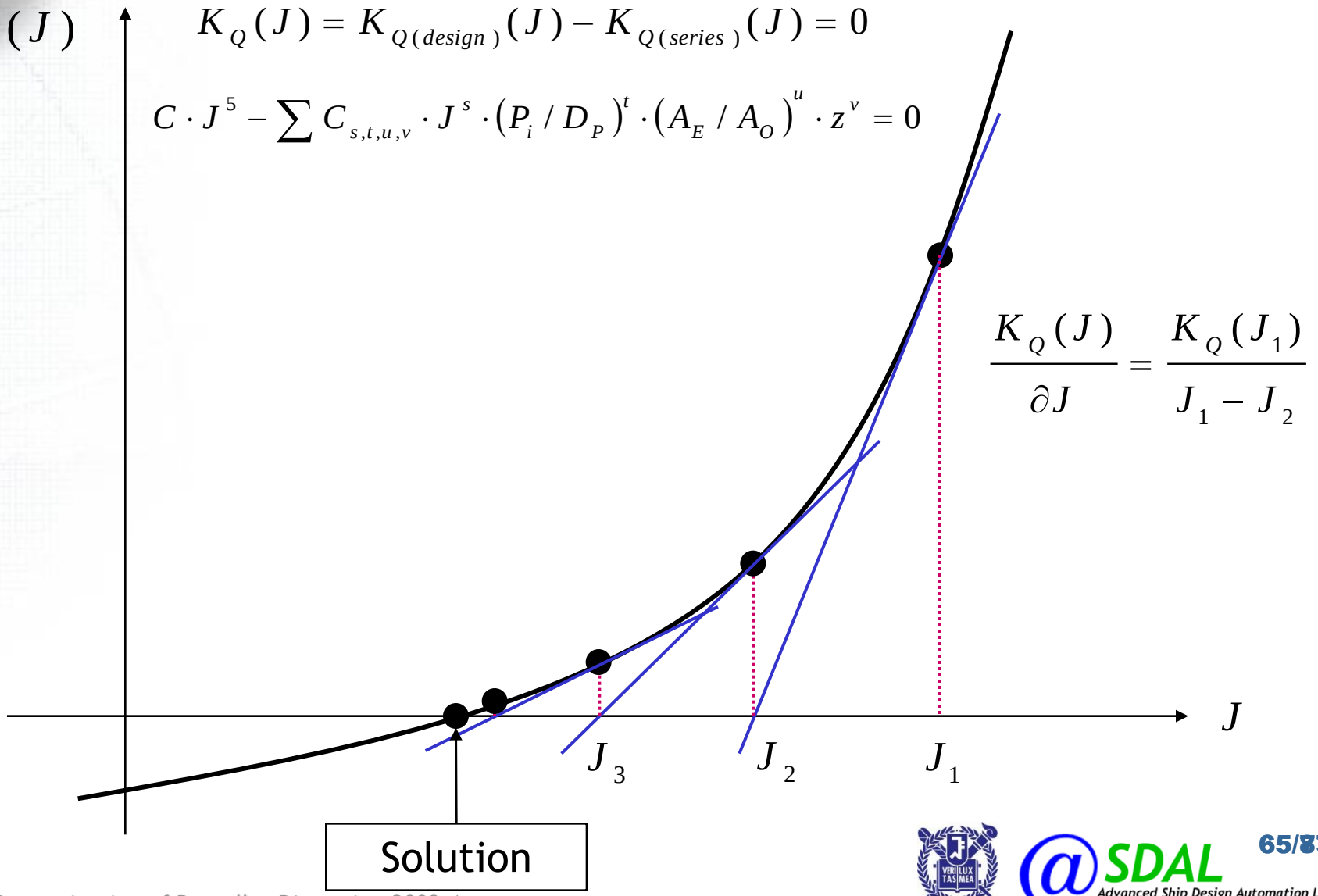
```
void Ship::OnCalculate()
{
   double AeAo1 = 0.55;
   double v = 13.5;
   double v1 = v * 0.5144;
   double Pi_D = 0.65;

   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;
   }
}
```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램
- Newton & Raphson 방법

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

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



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

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
   {
      double Gradient = C * pow(J+delta
      double fx =  C * pow(J, 5.0) - Calcu
      J = J - fx / Gradient;
      delta_KQ = C;
   }
}
```

피치비(Pi/D)를 변경시키면서 η_0가 최대가 되는 피치비를 검색

```
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 -
         double fx =  C * pow(J, 5.0) - Calculate_KQ(J, Pi_D, AeAo1
         J = J - fx / Gradient;
         delta_KQ = C;
      }
   }
}
```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램 - 속력(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 = P
   {
      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

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

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램 - 최소 전개 면적비(A_E/A_O)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+del
            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);

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

         ////////////////////////////////////////////////
         // T_S = T_P 의 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, d
{
   (*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

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;
}
```

프로펠러의 주요 치수 결정 프로그램 - K_Q 계산 함수의 구현

- Wageningen B-series K_Q 계산 함수

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

```
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, 0.0011(
      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,(
   int U[47]={0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,2,2,2,2,2,2,2,2,0,0,0,1,1,2,2,2,2,0,0,0,1,1
   int V[47]={0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,2,2,2,2

   // 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;
}
```

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;
}
```