2009년 창의적 선박설계 기말고사 Part 1.

일시: Part I. 2009년 6월 18일 목요일 오전 9시 ~ 오후 1시 (4H)
Part II. 2009년 6월 18일 목요일 오후 2시 ~ 오후 5시30분 (3H30M)
Part III. 2009년 6월 18일 목요일 오후 6시30분 ~ 오후 9시30분(3H)

<3,700 TEU Container Ship을 기준선으로 한 4,100TEU Container 설계>

설계 요구사항

주요요목	기준선 (3700TEU)	설계호선
Main Dimensions		
LOA	257.4 m	
LBP	245.24 m	
B mld	32.2 m	32.25 m 이하
D mld	19.3 m	
d(design)	10.1 m	Abt. 11 m
d(scant.)	12.5 m	Abt. 12.5 m
Deadweight		49,000 mt ~ 51,000mt
(design/scant.)	34,300/50,200 MT	at scant. draught
Capacity		
Container on deck/in hold	2,174 TEU / 1,565 TEU	Abt. 4,100TEU
Ballast water	13,800 m3	11,500 m3
Heavy fuel oil	6,200 m3	
Marine diesel oil	400 m3	
Fresh water	360 m3	
Main Engine & Speed		
M/E type	Sulzer 7RTA84C	
MCR (BHP * rpm)	38,570 * 102	
NCR (BHP * rpm)	34,710 * 98.5	
Service speed at NCR	22.5 knots (11.5m)	23.0 knots
(design draught, 15% SM)	30,185 BHP	(design draught, 15% SM)
Daily FOC at NCR	103.2 MT	
Cruising range	20,000 N.M	Abt. 20,000 N.M
Others		
Complement	30 P.	30 P.
Crane 유무	Crane 있음	Crane 없음

시험 시 주어지는 자료:

Part 1.

1) 3700TEU 기준선 자료 중 관련 부분

a) G/A (Part 1 종료와 동시에 걷었다가 Part2 시작할 때 다시 제공)
b) Typical Web section
c) 선속에 따른 모형선 자항 Test 결과
d) 선속에 따른 실선 자항 Test 결과

2) Main Engine Catalog

3) ICLL, 1966 자료 중 관련 부분 (건현 계산) in English version

이외의 자료 및 문제에 기재되지 않은 식에 대해서는 각자 알고 있어야 함.
혹시 위의 자료 중 배포되지 않은 자료가 있으면 시험감독에게 알릴 것.

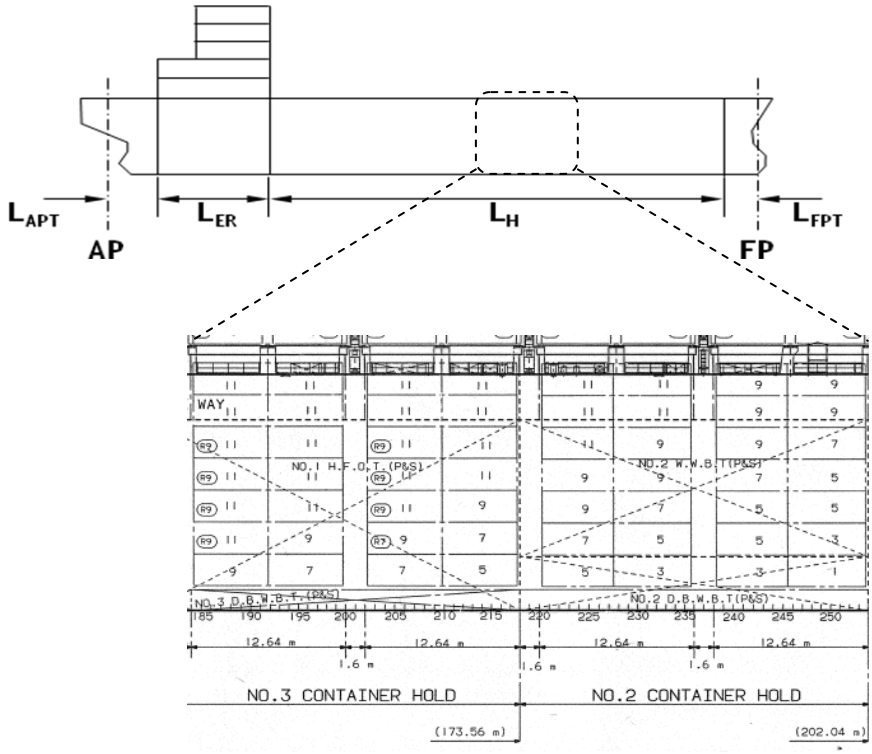
준비물:
자, 계산기(행렬 계산 가능한 것), 필기구

1. Lagrange Multiplier를 이용한 Container선의 최적 주요치수 선정

3,700TEU 컨테이너선을 기준선으로 하여 4,100TEU를 실을 수 있는 컨테이너 선의 주요치수 (L,B,D,Ts,$C_{B.S}$)를 결정 하고자 한다. 기준선의 Deck와 Hold의 컨테이너 비율을 이용하여 설계선의 Hold 내 Container 개수를 만족시키는 배의 주요치수를 결정하면, 전체 컨테이너 개수를 만족 시킬 수 있다고 가정한다. 다음설명을 참고하여 질문에 답하시오.

컨테이너선의 길이(L)와 폭(B), 깊이(D)는 다음과 같이 화물창 내에 배치하는 컨테이너의 개수에 따라 변화된다.

1) 길이



L_H : 화물창의 길이

L_{ER} : 엔진 룸의 길이 =30.4 m

L_{APT} : A.P. tank bulkhead부터 AP 까지의 길이 =11.2m

L_{FPT} : F.P. tank bulkhead부터 FP 까지의 길이 =12.92m

Ln : 화물창 내 길이방향 20ft bay 개수

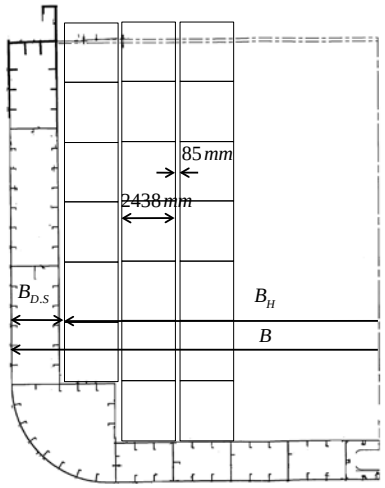
컨테이너 20ft bay 하나가 늘어날 때 마다 추가되어야 길이는, 20ft(6.32m)이고, 20ft bay 두 개 추가 될 때 마다 다른 bay와의 clearance는 1.6m이다. 따라서,

$$L_H = (6.32 + \frac{1.6}{2}) \cdot Ln = 7.12 \cdot Ln$$

L_{APT}, L_{FPT}, L_{ER}은 기준선과 같은 값을 가진다고 가정한다.

$$\therefore L = L_H + L_{APT} + L_{ER} + L_{FPT} = 7.12 \cdot Ln + L_{APT} + L_{ER} + L_{FPT}$$

2) 폭



B_H : 화물창의 폭

$B_{D.S}$: Double side wing tank의 폭 = 2.08m

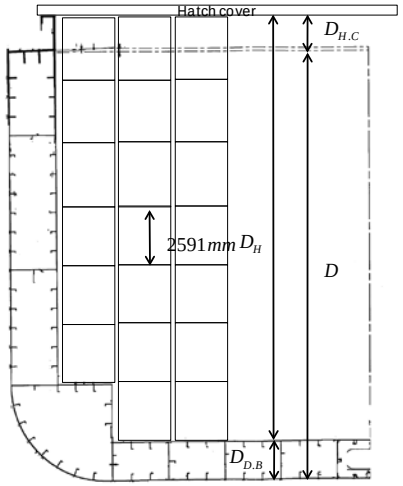
Bn : 화물창 내 폭 방향 20'컨테이너 개수

컨테이너 하나가 늘어날 때 마다 추가되어야 폭은, 8 feet(2.438m)이고, 다른 컨테이너와의 clearance는 0.085m이다.

$$B_H = (2.438 + 0.085) \cdot Bn = 2.523 \cdot Bn$$

$$\boxed{B = B_H + B_{D.S} = 2.523 \cdot Bn + 2 \cdot B_{D.S}}$$

3) 깊이



D_H : 화물창의 깊이

$D_{H.C}$: Hatch coaming의 높이 = 1.147m

$D_{D.B}$: Double bottom의 높이 = 2.310m

Dn : 화물창 내 깊이방향 20feet 컨테이너 개수

컨테이너가 깊이 방향으로 하나 추가될 때 늘어나는 깊이는 8feet 6 inch(=2.591m)이다. 깊이방향 Clearance는 없다고 가정하면, $D_H = (2.591 + 0) \cdot Dn$

$$\boxed{D = D_H + D_{D.B} - D_{H.C} = 2.591 \cdot Dn + D_{D.B} - D_{H.C}}$$

[문제] 3,700TEU 컨테이너선을 기준선으로 하여 4,100TEU를 실을 수 있는 컨테이너 선의 주요치수(L,B,D,Ts,$C_{B.S}$)를 결정 하고자 한다. 선주의 요구조건에 의해 폭(B)과 흘수(Ts)는 정해져 있을 때, 다음 사항을 고려하여 1) 길이방향 20ft 컨테이너 수(Ln)과 2) 깊이 방향 컨테이너 수(Dn), 3) 구조흘수에서의 방형계수($C_{B.S}$)를 결정 하시오. 이를 바탕으로 설계선의 4) 길이(L)과 5) 깊이(D)를 결정 하시오.

※ Given

$B = 32.2\,\mathrm{m}$, $Bn = 11$, $T_S = 12.5\,\mathrm{m}$, ,

$C_S = 8.684\times10^{-1}$, $C_O = 4.031\times10^{-1}$, $C_m = 4.787\times10^{-2}$,

$C_{PS} = 2{,}200$, $C_{PO} = 6{,}300$, $C_{PM} = 14{,}700$,

(선각중량당 건조비) (의장중량당 건조비) (기관부중량당 건조비)

$C_{N.Hold} = 7.817\times10^{-1}$ $\mathrm{DWT}_{\text{설계선}}$=51,000 ton,

① Cargo hold 내에 적재되는 20 ft컨테이너의 개수가 $Ln\cdot Bn\cdot Dn$ 에 비례한다고 가정하였을 때, 다음의 요구 컨테이너 수 조건을 만족해야 한다.

$$N_{Hold.req} = C_{N.Hold}\cdot Ln\cdot Bn\cdot Dn$$

기준선과 동일한 비율로 Cargo hold에 컨테이너를 싣는다면, 설계선의 Hold 내 컨테이너 개수 $N_{Hold.req} = 1{,}600$ 를 만족시켜야 한다. Hold 내 요구 컨테이너 개수를 만족한다면, 전체 요구조건인 4100TEU를 만족시킬 수 있다고 가정한다.

② 이 때, 선박은 '부력(Buoyancy)-중량(weight) 평형조건'을 만족해야 한다.

③ 선박이 비대해지면, 저항성능이 나빠지게 되므로, $C_{B.S} \le 0.65$ 을 추천 한다.

④ 구하고자 하는 변수는 길이방향 컨테이너 bay 수(*Ln*), 높이방향 컨테이너 수 (*Dn*), 그리고 Cb 3개 이며, 조건 식은 요구 컨테이너 수 조건, 부력-중량 평형조건 2개인 등호 조건식과 (3)의 부등호 조건 식을 만족하여야 한다. 이 문제는 미지수의 개수 3개, 등호 조건 식 2개인 부정방정식이다. 따라서 무수히 많은 해가 있을 수 있으므로 그 많은 해 중에서 적정한 해를 선정하는 선정기준 즉, 목적함수가 정의되어야 하고, 목적함수를 최소화 하는 최적화 문제로 볼 수 있다. 여기서는 선박의 건조비를 목적함수로 가정하면 최소 건조비를 갖는 주요치수를 결정하는 최적설계문제가 된다

$$Building\ Cost = C_{PS} \cdot W_S + C_{PO} \cdot W_O + C_{PM} \cdot W_M$$

이때,

선각중량(W_S) ~ $L^{1.6} \cdot (B + D)$

의장중량(W_O) ~ $L \cdot B$

기관부중량(W_m) ~ $NMCR$

※문제가 복잡한 계산을 요하므로 여기서는 수계산이 가능하도록, 다음과 같이 간소화 한다.

① 선각중량이 $L^{1.6}$ 에 비례 → L 에 비례 한다고 가정 한다.

② 기준선과 설계선의 주기관은 동일하다.

따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

선각중량 $W_s = C_s \cdot L \cdot (B + D)$

의장중량 $W_o = C_o \cdot L \cdot B$

기관부중량 $W_m = C_m \cdot NMCR$

※ 계산시 유의사항

- **유효숫자를 4자리로 계산 할 것.**
- **계산된 *L*의 범위가 260~270 사이가 되도록 *Ln*값을 정수로 결정하시오.**

[문제 1] 풀이

수식 전개의 편의상 $L_{APT}+L_{ER}+L_{FPT}$ 를 L_{misc} 라 하자.

$$H\left(Ln,Dn,C_{B.s},\lambda_1,\lambda_2,u,s\right)=f\left(Ln,Dn,C_{B.s}\right)+\lambda_1\cdot h_1\left(L,D,C_{B.s}\right)+\lambda_2\cdot h_2\left(Ln,Dn\right)+u\cdot g\left(C_{B.s},s\right)\quad ...(e)$$

$$f(Ln,Dn,C_{B.s})=C_{PS}\cdot C_s\cdot\left(Ln\cdot C_L+L_{misc}\right)\cdot(B+Dn\cdot C_D)+C_{PO}\cdot C_o\cdot\left(Ln\cdot C_L+L_{misc}\right)\cdot B$$
$$+C_{PM}\cdot C_m\cdot NMCR$$

$$h_1\left(Ln,Dn,C_{B.s}\right)=L\cdot B\cdot T_s\cdot C_{B.s}\cdot\rho_{sw}\cdot C_\alpha-DWT-C_s\cdot\left(Ln\cdot C_L+L_{misc}\right)\cdot(B+Dn\cdot C_D)$$
$$-C_o\cdot\left(Ln\cdot C_L+L_{misc}\right)\cdot B-C_M\cdot NCMR=0$$

$$h_2\left(Ln,Dn\right)=C_{H_N.req}-C_{H_N}\cdot Ln\cdot Bn\cdot Dn=0$$

$$g\left(C_{B.s},s\right)=C_{B.S}-0.65+s^2=0$$

$$Ln\rightarrow x_1,Dn\rightarrow x_2,C_{B.S}\rightarrow x_3$$

$$H\left(x_1,x_2,x_3,\lambda_1,\lambda_2,u,s\right)$$
$$=C_{PS}\cdot C_s\cdot(C_L\cdot x_1+L_{misc})\cdot(B+C_D\cdot x_2)+C_{PO}\cdot C_o\cdot(C_L\cdot x_1+L_{misc})\cdot B+C_{PM}\cdot C_M\cdot NMCR$$
$$+\lambda_1\cdot[(C_L\cdot x_1+L_{misc})\cdot B\cdot T_s\cdot x_3\cdot\rho_{sw}\cdot C_\alpha-DWT-C_s\cdot(C_L\cdot x_1+L_{misc})\cdot(B+C_D\cdot x_2)-C_o\cdot(C_L\cdot x_1+L_{misc})\cdot B$$
$$-C_M\cdot NMCR]$$
$$+\lambda_2\cdot\left(C_{H_N.req}-C_{H_N}\cdot Ln\cdot Bn\cdot Dn\right)$$
$$+u\cdot(x_3-0.65+s^2)\quad ...(f)$$

4 개 방정식 도출[20 점] 틀리면 감점

(f)식으로부터 Lagrange function H가 상점이 되는 점 x_1,x_2,x_3 를 결정하기 위해

$\nabla H\left(x_1,x_2,x_3,\lambda_1,\lambda_2,u,s\right)=0$ 를 구하면

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = C_{PS} \cdot C_s \cdot C_L \cdot (B + C_D \cdot x_2) + C_{PO} \cdot C_o \cdot C_L \cdot B +$$
$$+\lambda_1 \cdot [C_L \cdot B \cdot T_s \cdot x_3 \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha - C_s \cdot C_L \cdot (B + C_D \cdot x_2) - C_o \cdot C_L \cdot B]$$
$$+\lambda_2 \cdot \left(-C_{H_N} \cdot Bn \cdot x_2\right) = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_2} = C_{PS} \cdot C_s \cdot C_D \cdot (C_L \cdot x_1 + L_{misc})$$
$$+\lambda_1 \cdot [-C_s \cdot C_D \cdot (C_L \cdot x_1 + L_{misc})]$$
$$+\lambda_2 \cdot \left(-C_{H_N} \cdot x_1 \cdot Bn\right) = 0 \quad ...(2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_3} = \lambda_1 \cdot [(C_L \cdot x_1 + L_{misc}) \cdot B \cdot T_s \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha] + u = 0 \quad ...(3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_1} = (C_L \cdot x_1 + L_{misc}) \cdot B \cdot T_s \cdot x_3 \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha - DWT - C_s \cdot (C_L \cdot x_1 + L_{misc}) \cdot (B + C_D \cdot x_2)$$
$$-C_o \cdot (C_L \cdot x_1 + L_{misc}) \cdot B - C_M \cdot NMCR = 0 \cdots (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = C_{H_N.req} - C_{H_N} \cdot x_1 \cdot Bn \cdot x_2 = 0 \quad ...(5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = x_3 - 0.65 + s^2 = 0 \quad ...(6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial s} = 2 \cdot u \cdot s = 0, \quad (u \geq 0) \quad ...(7)$$

미지수 7개, 식 7개 이므로, 비선형 연립방정식이다.

[20 점]각 변수에 대한 7 개 미분방정식 도출

먼저 계수를 대입하여 정리해 보면,

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = 103,430 + 35,999.1 \cdot x_2 + \lambda_1 (3,066.9 \cdot x_3 - 16.021 \cdot x_2 - 291.89) + \lambda_2 (8.599 \cdot x_2) = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_2} = 275,655.8 + 35,999.1 x_1 + \lambda_1 (-16.021 \cdot x_1 - 122.677) + \lambda_2 (8.599 \cdot x_1) = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_3} = \lambda_1 \cdot (3,000.5 \cdot x_1 + 22,911.1) + u = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_1} = -59,078.9 - 292.3 \cdot x_1 - 4.5 \cdot x_2 + 23,483.9 \cdot x_3 + 3,075.5 \cdot x_1 \cdot x_3 = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = 1,857 - 8.5989 \cdot x_1 \cdot x_2 = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = x_3 - 0.65 + s^2 = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial s} = 2 \cdot u \cdot s = 0$$

[20 점]각 계수를 정리

먼저 가장 간단한 형태인 $\frac{\partial H}{\partial s} = 2 \cdot u \cdot s = 0$ 부터 풀어 보자.

1) $u = 0$ 인 경우

$$\frac{\partial H}{\partial x_3} = \lambda_1 \cdot [(C_L \cdot x_1 + L_{misc}) \cdot B \cdot T_s \cdot \rho_{sw} \cdot C_\alpha] = 0$$

괄호 안의 값들이 모두 양수 이므로, $\lambda_1 = 0$ 이다.

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = 103,430 + 35,999.1 \cdot x_2 + \lambda_2 (8.599 \cdot x_2) = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_2} = 275,655.8 + 35,999.1 x_1 + \lambda_2 (8.599 \cdot x_1) = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = 1,857 - 8.5989 \cdot x_1 \cdot x_2 = 0$$

위의 세 식을 연립하여 풀면, $x_1 = 3.7885,\ x_2 = 26.9824,\ \lambda_2 = -900.52$ 이다.

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_1} = -59,078.9 - 292.3 \cdot x_1 - 4.5 \cdot x_2 + 23,483.9 \cdot x_3 + 3,075.5 \cdot x_1 \cdot x_3 = 0$$

따라서 위 식에 $x_1 = 3.7885,\ x_2 = 26.9824$ 를 대입하면, $x_3 = 1.434$

$\frac{\partial H}{\partial u} = x_3 - 0.65 + s^2 = 0$ 에 $x_3 = 1.434$ 를 대입하면, $s^2 = -0.7434$ 이므로, u=0은 해가 될 수 없다.

2) $s = 0$ 인 경우

$\frac{\partial H}{\partial u} = x_3 - 0.65 + s^2 = 0$ 에서 $x_3 = 0.65$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_1} = -59,078.9 - 292.3 \cdot x_1 - 4.5 \cdot x_2 + 23,483.9 \cdot x_3 + 3,075.5 \cdot x_1 \cdot x_3 = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = 1,857 - 8.5989 \cdot x_1 \cdot x_2 = 0$$

위의 두 식에 $x_3 = 0.65$ 을 대입하여 정리하면,

$x_1 = 27.52,\ x_2 = 6.76$

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = 103,430 + 35,999.1 \cdot x_2 + \lambda_1(3,066.9 \cdot x_3 - 16.021 \cdot x_2 - 291.89) + \lambda_2(8.599 \cdot x_2) = 0 \quad ...(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_2} = 275,655.8 + 35,999.1 x_1 + \lambda_1(-16.021 \cdot x_1 - 122.677) + \lambda_2(8.599 \cdot x_1) = 0 \quad ...(1)$$

위 식에 $x_1 = 27.52,\ x_2 = 6.76$ 를 대입하여 정리하면, $\lambda_1 = -492.89,\ \lambda_2 = -717.76$, $u = 40,534$ 이므로, 제약조건의 경계상에 해가 존재한다. (s=0)

[20 점] u=0 또는 s=0 인 경우로 분리하여 풀이

따라서 $Ln = 27.52,\ Dn = 6.76,\ C_B = 0.65$

적절한 정수를 선택하면, $Ln = 27,\ Dn = 7$

$$L = 7.14 \cdot Ln + L_{APT} + L_{ER} + L_{FPT} = 246.76\,\mathrm{m}$$

$$D = 2.591 \cdot Dn + D_{D.B} - D_{H.C} = 19.3\,\mathrm{m}$$

[20 점] 답의 근사, 틀리면 감점

2. 저항성능추정

3,700 TEU Container ship 모형선의 설계 흘수(design draft)에서의 정수(calm water)중의 저항,자항 성능 시험 결과가 아래 "Table10"에 제시되어 있다.

문제 2-1)

Froude Method 에 따라 저항을 분류하고, 모형선 저항시험 결과로부터 실선의 저항을 추정하는 과정을 설명하시오

문제 2-2)

설계선이 기준선의 모형선과 기하학적으로 상사할 때, 설계선의 선속이 23knots 일 때의 전체 저항을 Froude Method 에 따라 추정하시오.

Given :

- 기준선 3,700 TEU Container Carrier의 Design Draft에서의 저항 시험 결과
- ITTC 1957 추정식

  마찰저항계수 $C_F = \dfrac{0.075}{(\log Rn - 2)^2}$

- 동점성계수 $\nu_{sea} = 1.18829 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$, $\nu_{fresh} = 1.11545 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$
- 밀도 $\rho_{sea} = 1025.9\ kg/\mathrm{m^3}$
- 모형선/실선 상관 계수 $C_A = -1.7 \times 10^{-4}$
- 공기저항계수 $C_{AA} = 0.001(A_{VT} / S)$

  A_{VT} : Transverse projected area above waterline

  S : Wetted surface area
- 설계선의 침수 표면적은 기준선 자료로부터 합리적으로 추정 할 것

문제 2-3)

전저항 계수(C_T)가 속도에 따라 크게 변하지 않는다고 가정하자. 설계선의 선속이 23knots일 때의 전저항 계수를 이용하여, 22knots, 24knot에서의 전체 저항을 구하시오.

[2. 저항성능추정 해답]

[풀이] 문제2-1

저항 분류

- Froude에 따르면 전저항은 마찰저항과 잉여저항의 합으로 구성한다..

$$R_T = R_F + R_R$$

R_T: 전저항 R_F: 마찰저항

R_R: 잉여저항

저항 추정 과정

- 마찰저항 계수(C_F)는 추정식으로 계산 가능하다.

ITTC(International Towing Tank Committee) 1957 마찰저항 계수(C_F) 추정식 :

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

$R_n = V \cdot L / \nu$: Reynolds Number

L: Length of waterline

ν: 동점성 계수 = 1.1873× 10^{-6}(m^2/s) at 15°C Sea Water

- "Froude의 상사 법칙": $if\ F_{nS} = F_{nM}\ ,then\ C_{RS} = C_{RM}$

Froude Number : $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$

- 실선과 모형선의 Froude Number가 동일하면 C_{RS}=C_{RM}이므로,

Froude Number가 실선과 동일하도록 모형선을 이용하여 전저항(R_{TM})을 계측하고 C_{RM}을 구한다.

$$R_{TM} = C_{FM} \cdot \frac{1}{2}\rho S_M V_M{}^2 + C_{RM} \cdot \frac{1}{2}\rho S_M V_M{}^2 \quad \left[\underset{\text{계측}}{R_{TM}} = \underset{\text{계산 가능}}{C_{FM}} \cdot \frac{1}{2}\underbrace{\rho S_M V_M{}^2}_{\text{given}} + \underset{\text{Find}}{C_{RM}} \cdot \frac{1}{2}\underbrace{\rho S_M V_M{}^2}_{\text{given}} \right]$$

R_T: 전저항 R_F: 마찰저항 R_R: 잉여저항

C_F: 마찰저항 계수 C_R: 잉여저항 계수 S: 물속에 잠긴 선박의 표면적

V: 선박의 속력 아래첨자$_S$: 실선 아래첨자$_M$: 모형선

- C_{RM}(=C_{RS})를 이용하여 R_{TS}를 추정할 수 있다.

$$R_{TS} = C_{FS} \cdot \frac{1}{2}\rho S_S V_S^{\,2} + C_{RS} \cdot \frac{1}{2}\rho S_S V_S^{\,2}$$

[풀이] 문제 2-1

풀이과정은 실선의 속력 23.0 knots(모형선의 속력 2.132m/s에 상응)를 기준으로 설명한다.

모형선과 기준선의 기하학적 비율(λ_1)은 Table10에서 30.8인 것을 알 수 있다.

기준선과 설계선의 기하학적 비율(λ_2)은 (246.2/245.24=1.0039)이므로,

모형선과 설계선의 비율(λ)는 30.92인 것을 계산 할 수 있다.

그리고 Table 10로부터, 기준선의 속력 22.0, 23.0, 24.0 knots는 모형선의 속력 2.039, 2.132, 2.225 m/s와 동일한 Froude number(Fn)인 것을 알 수 있다.

설계선의 L_{LW}를 기준선과의 기하학적 비율로 구하면 다음과 같다.

$$L_{WL_설계선} = \frac{L_{BP_설계선}}{L_{WL_기준선}} L_{WL_} = \frac{246.2}{245.24} 236.26 = 237.18 \text{ m}$$

(이후 설명과정에서 아래첨자 _s는 설계선을 지칭함)

모형선의 L_{WL}을 구하면 다음과 같다.

$$L_{WL_M} = \frac{L_{WL_M}}{\lambda} = \frac{237.18}{30.92} = 7.7$$

모형선의 F_{n_M} 를 계산하면

$$F_{n_M} = \frac{V_M}{\sqrt{g \cdot L_M}} = \frac{2.132}{\sqrt{9.81 \times 7.7}} = 0.245$$

설계선의 F_{n_S} 을 계산하면

$$F_{n_S} = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot L_{LW_S}}} = \frac{23.0 \times 0.5144}{\sqrt{9.81 \times 237.18}} = 0.245$$

이를 통해 동일한 행의 속력은 동일한 Fn인 것을 알 수 있다.

모형선의 Rn을 계산하면

$$Rn_M = \frac{V_M \cdot L_M}{\nu_{fresh}} = \frac{2.132 \times 7.7}{1.1154 \times 10^{-6}} = 1.472e^{07}$$

모형선의 침수표면적을 계산하면

$$S_M = (S_S \times \lambda_2{}^2) / \lambda^2$$

$$= (9408 \times 1.0039)^2 / 30.92^2 = 9.995\,\mathrm{m}^2$$

Table10 모형선의 전저항으로부터 전저항 계수를 계산하면 다음과 같다.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho_{fresh} S_M V_M{}^2} = \frac{79.25}{\frac{1}{2} \times 9989 \times 9.995 \times 2.132^2} = 3.493e^{-03}$$

ITTC 1957 추정식을 이용하여 모형선의 마찰 저항 계수(C_F)을 계산하면 다음과 같다.

$$C_{FM} = \frac{0.075}{\left(\log Rn_M - 2\right)^2} = \frac{0.075}{\left(\log 1.472 \times 10^7 - 2\right)^2} = 2.808e^{-03}$$

모형선의 잉여저항 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$C_R\left(\mathrm{F}_n\right) = C_T - C_F\left(R_n\right) = 3.493e^{-03} - 2.808e^{-03} = 6.848e^{-04}$$

설계선이 모형선과 기하학적과 동역학적으로 상사하면, 동일한 C_R을 갖는다.

설계선에 대하여 $C_T = C_F\left(R_n\right) + C_R\left(F_n\right)$이다. 여기서 C_R=6.848e^{-04} 로써 모형선의 것과 동일하다.

같은 방법으로, 모형선에 대해 각 속력별로 C_R까지 계산한 결과를 표로 나타내면 아래와 같다.

모형선 속력	속력	Froude 수	잉여저항계수	Renold 수	마찰저항계수	전저항(N)	전저항계수
Vs(knots)	Vm(m/s)	Fn	$C_R(e^{-03})$	Rn(e^{07})	$C_F(e^{-03})$	R_{TM}	C_T (e^{-03})
3.96	2.039	0.235	6.402	1.408	2.829	72.02	3.470
4.14	2.132	0.245	6.848	1.472	2.808	79.25	3.493
4.32	2.225	0.256	7.865	1.536	2.788	88.31	3.575

설계선의 속도 23knots에서 Rn을 계산하면

$$Rn_S = \frac{V_S \cdot L_S}{\nu_{sea}} = \frac{23.0 \times 0.5144 \times 237.18}{1.18829 \times 10^{-6}} = 2.362e^{09}$$

ITTC 1957 추정식을 이용하여 설계선의 마찰 저항 계수(C_F)을 계산하면 다음과 같다.

$$C_{FS} = \frac{0.075}{\left[\log\left(2.362e^{9}\right) - 2\right]^2} = 1.380e^{-03}$$

주어진 식을 이용하여 공기저항계수를 계산하면 다음과 같다. (속력과 관계 없음)

$$C_{AA} = 0.001(A_{VT} / S) = 0.001\ (880 / 9,408) = 9.281e^{-05}$$

모형선-설계선 상관관계 계수를 고려하면 설계선의 전 저항 계수는 다음과 같다.

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA}$$

$$= 1.380e^{-03} + 6.848e^{-04} - 1.700e^{-04} + 9.354e^{-05}$$

$$= 1.988e^{-03}$$

설계선의 전저항 R_T 은 다음과 같다.

$$R_T = C_{TS} \frac{1}{2} \rho_{sea} \cdot S_S \cdot V_S^{\,2} = 1.988e^{-03} \times \frac{1}{2} \times \left(1025.9 / 1000\right) \cdot 9,481 \cdot \left(23.0 \times 0.5144\right)^2 = \underline{1,353\ \text{kN}}$$

설계선의 유효마력 EHP 은 다음과 같다.

$$EHP = R_{TS} \cdot V_S = 1,353 \times \left(23.0 \times 0.5144\right) = \underline{16,012\ (\text{kW})}$$

같은 방법으로, 각 속력별 유효마력을 추정하면 다음 Table과 같다.

설계선속력	Froude 수	잉여저항 계수	Renold 수	마찰저항 계수	전저항 계수	전저항	유효마력
Vs(knots)	Fn	$C_R(e^{-04})$	$Rn(e^{-09})$	$C_{FS}(e^{-03})$	$C_{TS}(e^{-03})$	R_{TS} (N)	EHP(KW)
22.00	0.235	6.402	2.259	1.387	1.951	1,214	13,750
23.00	**0.245**	**6.848**	**2.362**	**1.380**	1.988	1,353	16,012
24.00	0.256	7.865	2.464	1.373	2.083	1,543	19,061

상관계수 C_A : $-1.700e^{-04}$, 공기저항계수 C_{AA} : $9.354e^{-03}$

3. 프로펠러주요치수 선정 및 주기관 선정 문제

문제 2 에서 계산한 속도 별 저항 값과, 3,700 TEU Container ship 의 설계 흘수(10.1m)에서의 정수(calm water) 중의 자항 성능 시험 결과를 이용하여 다음 문제에 답하시오.

Given : Engine Catalog, 속도 별 저항 계산 결과(2번 결과)

문제 3-1) 프로펠러 주요치수 선정 stage.1

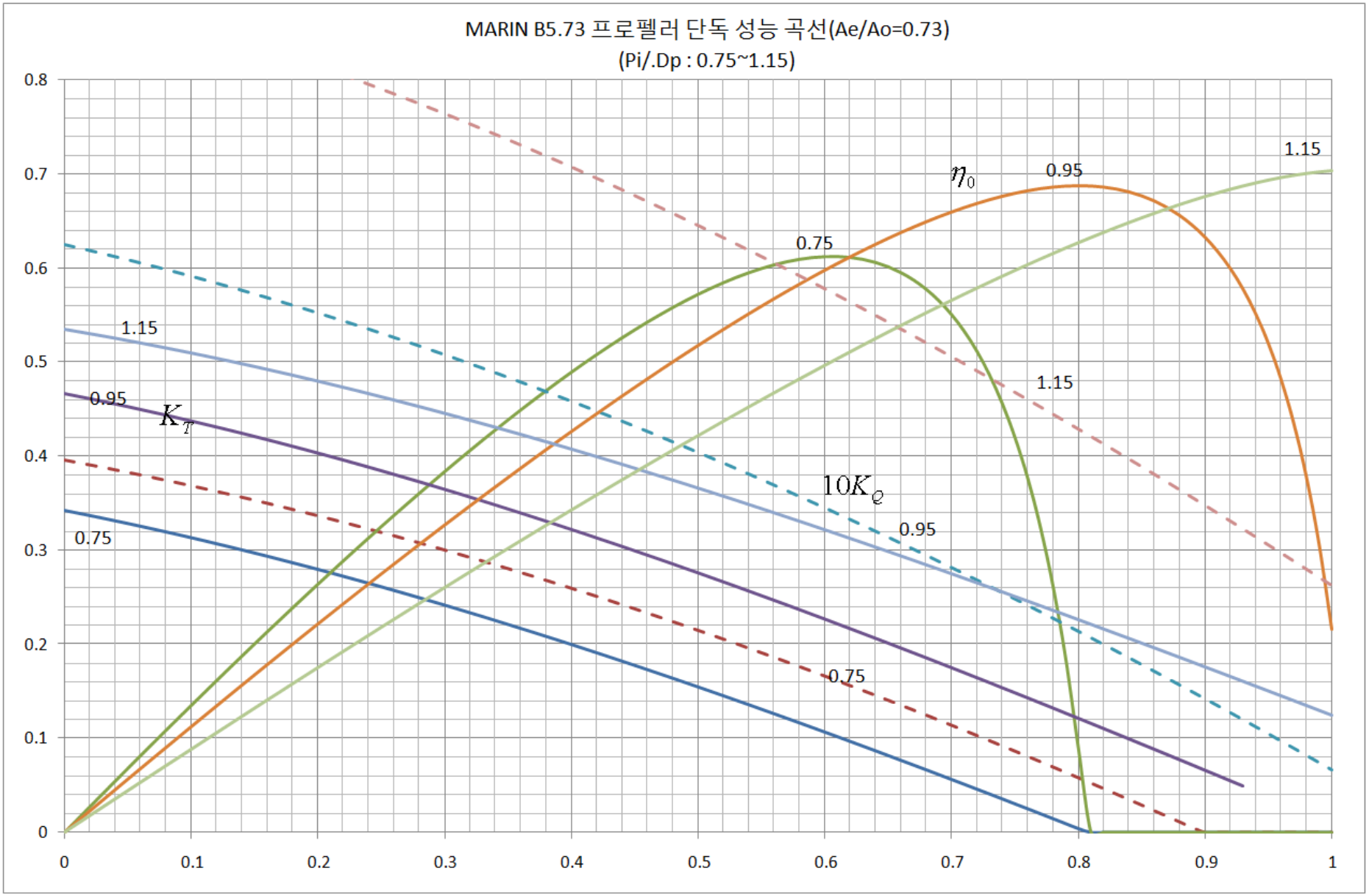
3,700TEU Container ship을 기준선으로 하여 4,100 TEU Container Ship을 설계 하려고 한다.

① MARIN B5.73 프로펠러 단독 성능 곡선이 다음과 같이 주어졌을 때, 설계선의 정수중 속력(23.0 knots)에서 최대 효율을 갖는 프로펠러의 주요치수(Pi)를 구하고, 그때의 주기관이 프로펠러에 전달하는 마력(DHP)과 그때의 회전수(n)을 구하시오.

② Sea Margin(15%)과 Engine Margin(90%)을 고려하여, 프로펠러의 설계점을 결정하시오.

③ 기준선의 주기관(7RTA84C)을 설계선에 그대로 사용할 수 있는지를 Engine Layout Diagram을 작성하여 판단하시오. 만일 사용할 수 없다면, 새로운 엔진을 아래 표를 참조하여 선정하시오.

※설계선의 침수 표면적은 기준선 자료를 토대로 합리적으로 가정하시오.


MARIN B5.73 프로펠러 단독 성능 곡선(Ae/Ao=0.73)
(Pi/.Dp : 0.75~1.15)
η_0
K_T
$10K_Q$
0.75
0.95
1.15
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1

Main data RTA84C

Cylinder bore	840 mm
Piston stroke	2 400 mm
Speed	82 - 102 rpm
Mean effective pressure at R1	17.9 bar
Piston speed	8.2 m/s
Fuel specification:	
Fuel oil	730 cSt/50°C 7 200 sR1/100°F ISO 8217, category ISO-F-RMK 55

Rated power: Propulsion Engines

Cyl.	Output in kW/bhp at							
	102 rpm				82 rpm			
	R1		R2		R3		R4	
	kW	bhp	kW	bhp	kW	bhp	kW	bhp
6	24 300	33 060	17 040	23 160	19 500	26 520	17 040	23 160
7	28 350	38 570	19 880	27 020	22 750	30 940	19 880	27 020
8	32 400	44 080	22 720	30 880	26 000	35 360	22 720	30 880
9	36 450	49 590	25 560	34 740	29 250	39 780	25 560	34 740
10	40 500	55 100	28 400	38 600	32 500	44 200	28 400	38 600
11	44 550	60 610	31 240	42 460	35 750	48 620	31 240	42 460
12	48 600	66 120	34 080	46 320	39 000	53 040	34 080	46 320

<그림1> Wartsila Engine Catalog (__RTA84C Series)

ENGINE DATA K90MC-C

Download **installation Drawings for K90MC-C** engine in DXF and PDF formats.
(Updated : 2003-09-01)
Select **turbochargers** for this engine type
Bore: 900 mm, Stroke: 2300 mm

Layout points		L_1	L_2	L_3	L_4
Speed	r/min	104	104	89	89
mep	bar	18.0	14.4	18.0	14.4
		kW	kW	kW	kW
6K90MC-C		**27420**	21900	23460	18780
7K90MC-C		**31990**	25550	27370	21910
8K90MC-C		**36560**	29200	31280	25040
9K90MC-C		**41130**	32850	35190	28170
10K90MC-C		**45700**	36500	39100	31300
11K90MC-C		**50270**	40150	43010	34430
12K90MC-C		**54840**	43800	46920	37560
Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)					
g/kWh		**171**	164	171	164
Lubricating and Cylinder Oil Consumption					
Lubricating oil		7.0 - 10 kg/cyl. 24 h			
Cylinder oil		0.7 - 1.2 g/kWh			

Cyl. No	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
L_{min} mm	12447	14049	15651	18403	20005	21607	23209
H_1 mm	12800	12800	12800	12800	12800	12800	12800
H_2 mm	12600	12600	12600	12600	12600	12600	12600
H_3 mm	12375	12375	12375	12375	12375	12375	12375
A mm	1699	1699	1699	1699	1699	1699	1699
B mm	4286	4286	4286	4286	4286	4286	4286
E mm	1602	1602	1602	1602	1602	1602	1602
Dry Mass t*	986	1106	1253	1415	1561	1686	1826

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

<그림 2> MAN B&W Engine Catalog (__K90MC-C Series)

문제 3-2 프로펠러 주요치수 선정 stage. 2

설계선의 프로펠러가 기준선의 프로펠러와 같은 날개 개수와 전개 면적비를 갖는다고 가정할 때, 최대 효율을 갖는 프로펠러의 주요치수(직경, 피치)와 그때의 속력을 구하시오. 프로펠러가 내는 추력과 선박이 요구하는 추력이 일치하지 않을 시, 속력을 0.5 knot 단위로 변경하여 iteration 하시오.
(iteration 1회만 할 것)

Given : 프로펠러 날개 수(z), 주기관 마력(P), 회전수(n),속도별 저항 (Rt)
Find: 설계선 Propeller 직경(D_p), Pitch(P_i) 속력(v)

문제 3-3) 프로펠러 주요치수 선정 stage. 3

문제 (3-1)~(3-2)을 통해 결정된 프로펠러 주요치수와 문제2의 속도 별 저항 결과를 이용하여, 아래의 각각의 속력을 내기 위한 프로펠러 회전수 및 소요마력을 결정하고, Speed-Power Curve를 작성 하시오.

Given : 프로펠러 주요치수 (Dp, Pi, A_E/A_O), 속력(V), 정수중 저항(Rt)
Find : 22.0, 23.0, 24.0 Knots에서의 n(프로펠러 회전수), P(소요마력)

[풀이]3- 1-①

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

3개의 미지수

2개의 등식

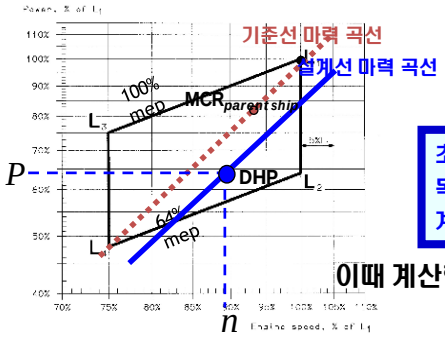
비선형 부정방정식

- 조건식1 : 디젤엔진이 전달한 토오크를 프로펠러가 흡수하는 조건

$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot {D_P}^5 \cdot K_Q \cdots (1)$$

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

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



목적 함수 : **Find** Maximum η_0

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

초기값을 가정한 뒤, 반복계산을 통해 조건을 만족하고 목적함수를 최소로 하는 주기관 마력(P) 및 회전수(n)를 계산할 수 있다.

이때 계산한 마력은 프로펠러에 전달된 마력, 즉 DHP이다.

Step1) 속력 v 가 주어짐: 23.0 Knots

Step2) 조건식2를 $K_T=C_2J^2$의 형태로 표현

설계선 침수표면적 = 9,481 m^2

설계선 저항 $R_T = C_T \cdot \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V^2 = 1.998\times10^{-3} \times \frac{1}{2} \times 1.025 \times 9,481 \times (23\times0.5144)^2 = 1,353\,\text{kN}$

조건식2 : 선박이 필요로 하는 추력을 프로펠러가 내야 하는 추력

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

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

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

조건식을 $K_T=C_2J^2$의 형태로 표현하면, 미지수 n을 소거할 수 있다.

$$R_T = 1,353(kN)$$

$$T = \frac{R_T}{(1-t)} = \frac{1,353}{1-0.201} = 1,693\ (\mathrm{kN})$$

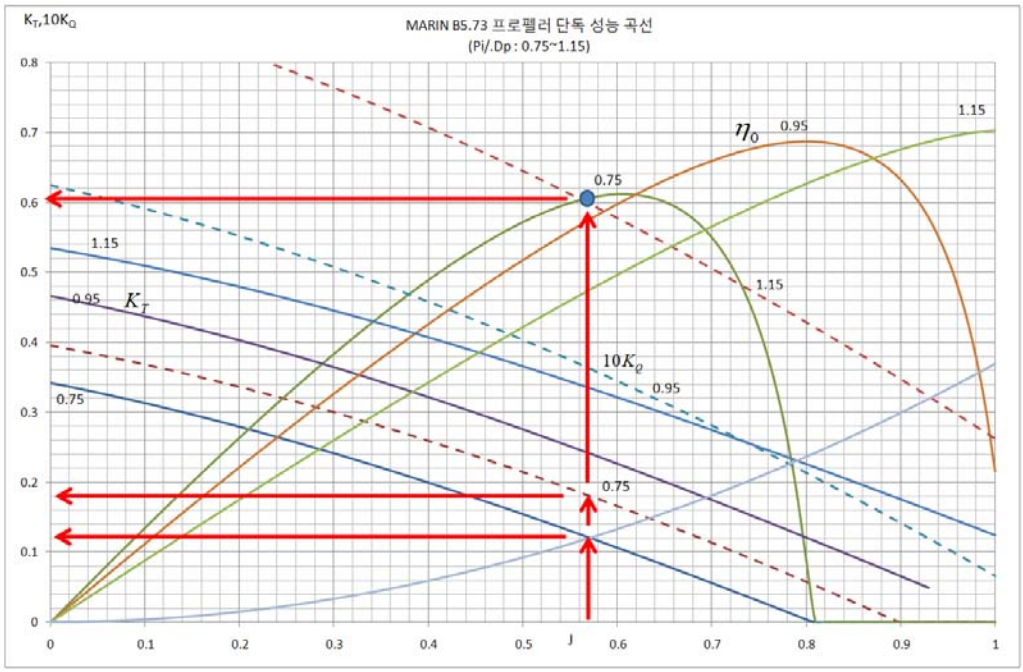
$$v_A = V_S \times (1-w) = 23.0 \times 0.5144 \times (1-0.27) = 8.64(\mathrm{m/s})$$

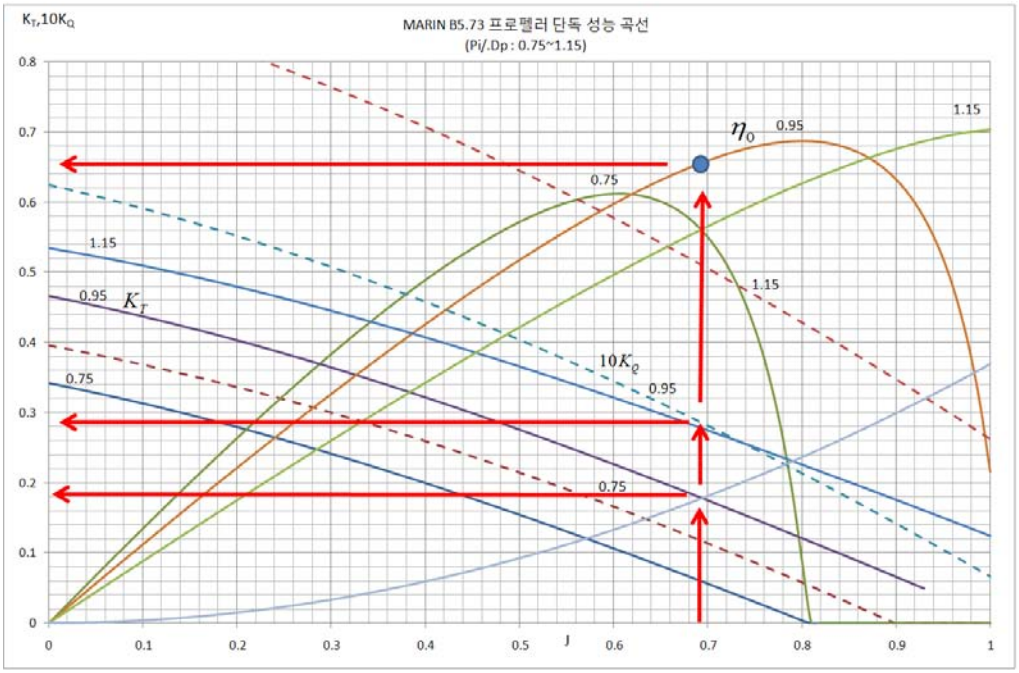
$$C_2 = \frac{R_T}{(1-t)\rho D_P{}^2 v_A{}^2} = \frac{1,353}{(1-0.201)\times 1.025 \times 7.7^2 \times 8.64^2} = 0.3698$$

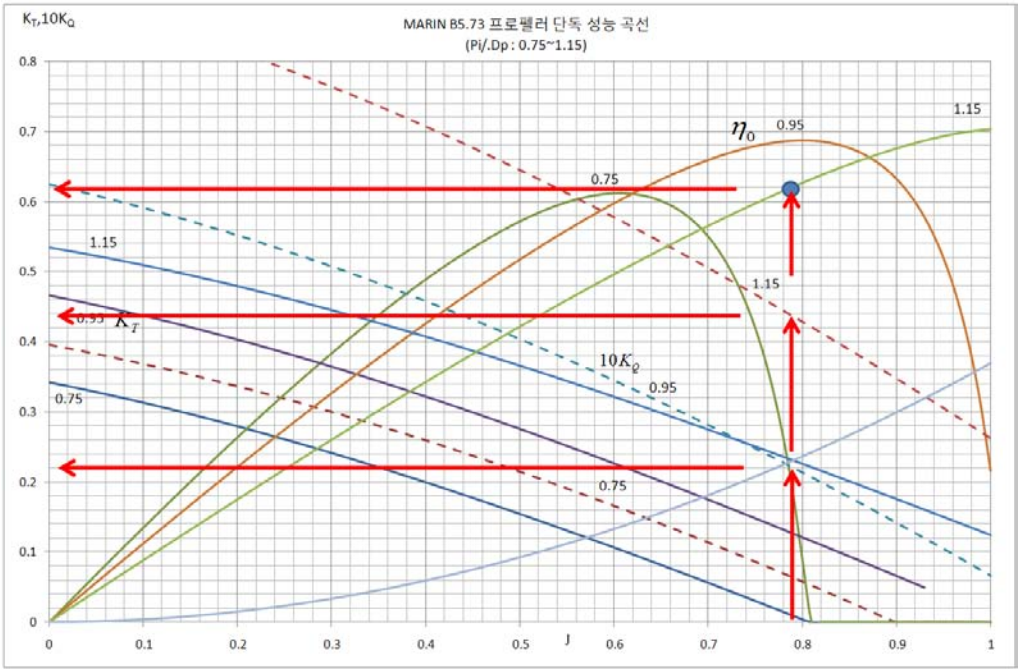
Step3) 프로펠러 단독성능 곡선을 이용하여 어떤 피치비 $(P_i/D_p)_1$ 에서

K_T 곡선의 교점(J_1,K_{T1})을 구하고, 그때의 J_1에 대하여 K_{Q1}와 η_{01} 을 구한다.

피치비를 바꿔 가면서 위의 과정을 반복한다



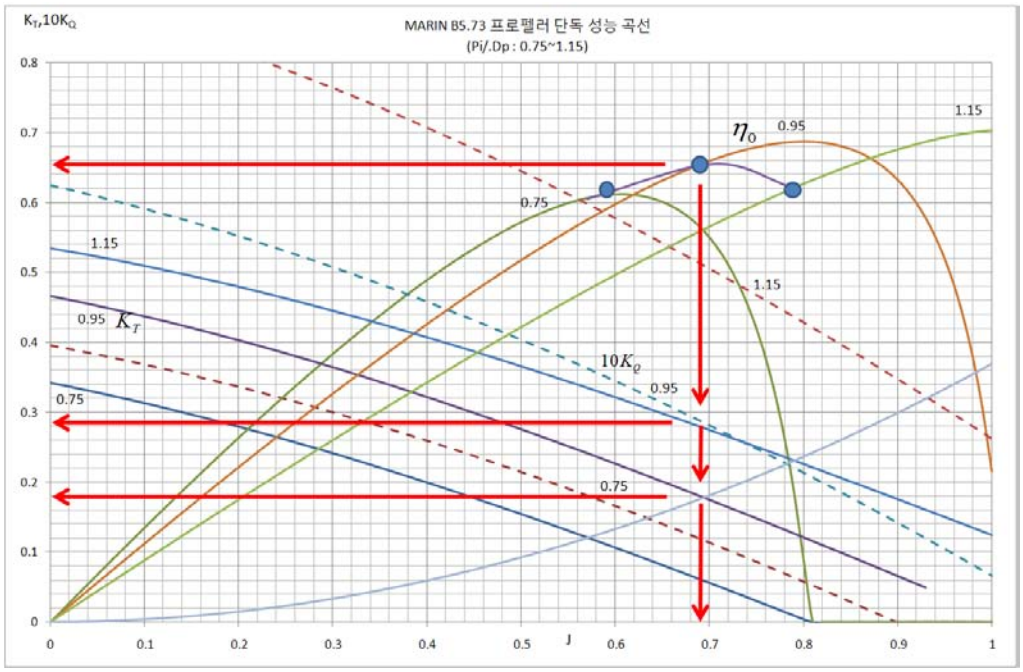




$K_T = 0.4329J^2$ 의 그래프를 작도하고, 교점들을 계산해 보면 다음과 같다.

Pi/Dp	J	KT	K_Q	η_0
0.75	0.571	0.122	0.0181	0.605
0.95	0.704	0.194	0.0284	0.655
1.15	0.791	0.233	0.0443	0.623

J와 η_0를 2차 다항식 보간을 이용하여, 최대 η_0값을 찾는다.



J=0.704와 Pi/Dp=0.95의 교점에서 η_0가 최대값(η_0=0.655)을 가진다.

J_x=0.704

$K_{T.x}$=0.192

$\eta_{0.x}$=0.655

$K_{Q.x}$=0.0285

Step4) 단계 3에서 구한 J_x를 이용해 n_x을 구함

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

$$n_x = \frac{v_A}{D_P \cdot J_x} = \frac{8.64}{7.7 \times 0.704} = 1.5933 \text{ [rps]} = \underline{95.6\text{[rpm]}}$$

Step 6) 조건식 1과 단계3에서 구한 $K_{Q.x}$를 이용해 P_x를 구함

$$P_x (= DHP) = 2\pi\rho \cdot n_x^{\,3} \cdot D_P^5 \cdot K_{Q.x} = 2\pi (1.025)(1.5933)^3 (7.7)^5 (0.0285) = \underline{20{,}094 \text{ [kW]}}$$

$$P_x = c \cdot n_x^3 \rightarrow c = P_x / n_x^3$$

$$c = P_x / n_x^3 = 20{,}094 / 1.5933^3 = \underline{4{,}968}$$

$$BHP = DHP / \eta_T = 20{,}094/0.985 = \underline{20{,}400 \text{ [kW]}} \text{ (at calm water)}$$

[풀이] 3-1-②

$$NCR = BHP \cdot \left(1 + \frac{15}{100}\right) = 20{,}400 \text{ x } 1.15 = \underline{23{,}460 \text{ [kW]}}$$

$$n_{NCR} = \sqrt[3]{23{,}460 / 4{,}968} = \underline{96.08 \text{ [rpm]}}$$

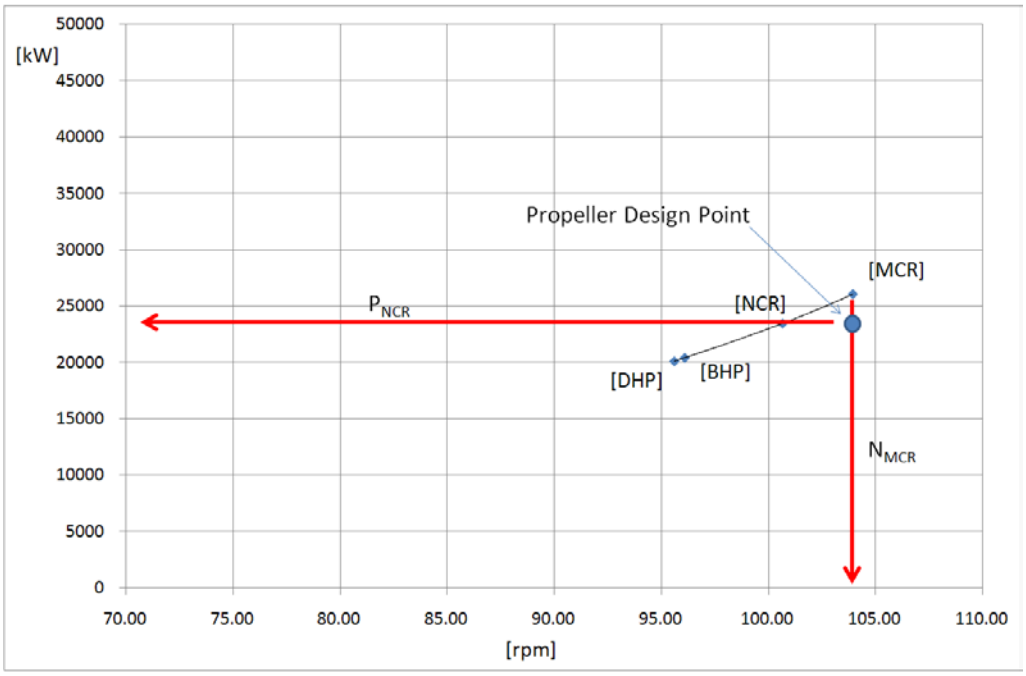
$$NCR[kW \times rpm] = \text{ 23,460 kW x 96.08 rpm}$$

$$MCR = NCR / 0.9 \text{ = 23,460/0.9= } \underline{26{,}067 \text{ [kW]}}$$

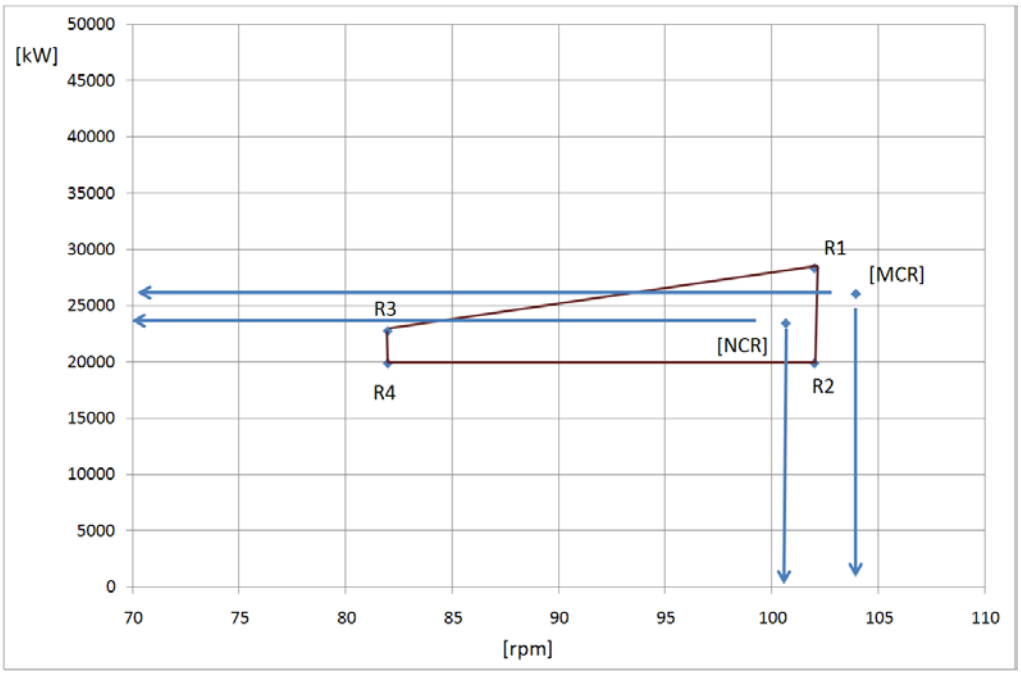
$$n_{MCR} = \sqrt[3]{26{,}067 / 4{,}968} = \underline{103.90 \text{ [rpm]}}$$

$$MCR[kW \times rpm] = \text{ 26,460 kW x 103.90 rpm}$$

따라서 아래 그림에 표기된 것과 같이 Propeller Design Point는,
[N_{MCR},P_{NCR}]을 기준으로 설계를 한다.
Propeller Design Point = <u>23,460kW x 103.9 rpm</u> (1.725rps)



[풀이] 3-1-③

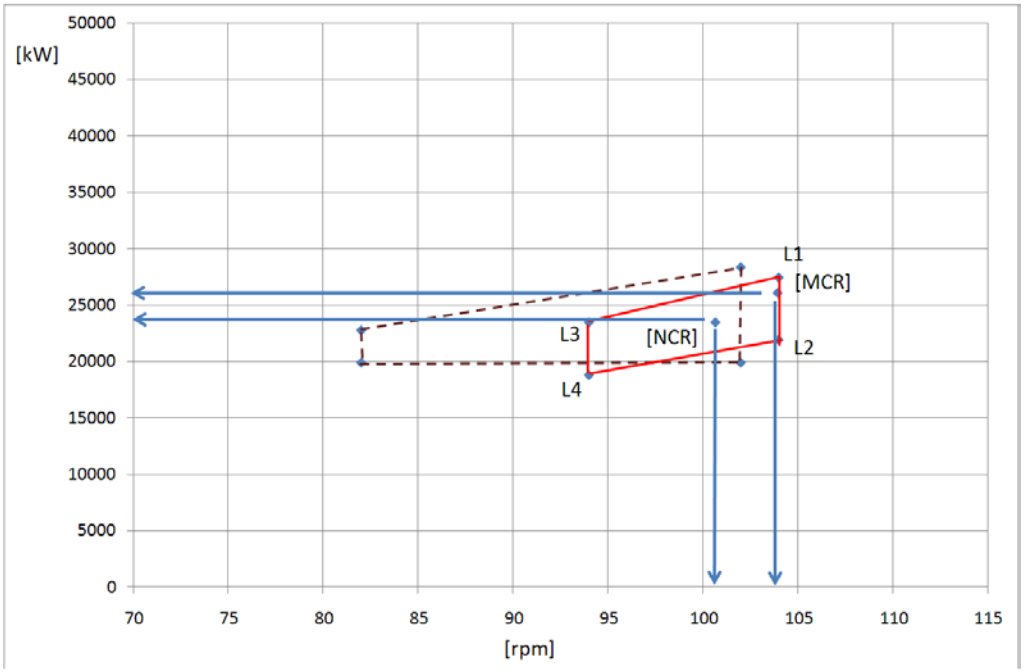


<기준선 7RTA84C Main Engine Layout Diagram 과 설계선의 NCR,MCR Design Point>

기준선의 Engine의 회전수가 부족하므로, 기준선의 Engine을 사용할 수 없음

따라서 새로운 Engine을 선정함.

같은 Fn에서 기준선보다 설계선의, 속력이 약 2.2%증가 하였음



회전수를 고려하여, MAN B&W의 6S90MC을 선정하였음.

[풀이]3-2

Step 1) 전개면적비(A_E / A_O) 가정

설계선의 프로펠러 전개면적비는 기준선의 전개면적비와 같다고 가정.

$$A_E / A_O = 0.73$$

Step 2) 속력 v_1 가정

설계선의 속력은, 문제 1에서 기준으로 가정하였던 속력 23.0 knots로 1차 가정.
이때 설계선의 Sea margin을 고려한 DHP는 다음과 같이 계산된다.

$$P = DHP = \frac{NCR_{at\ sea\ water}}{1.025} \times \eta_T \times \eta_R = \frac{23,460}{1.025} \times 0.98 \times 1.022 = 23,401\,[kW]$$

Step 3) 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$ 의 형태로 표현

(주기관이 전달한 토크를 프로펠러가 흡수하는 조건)

조건식 1 : $\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot D_P{}^5 \cdot K_Q$

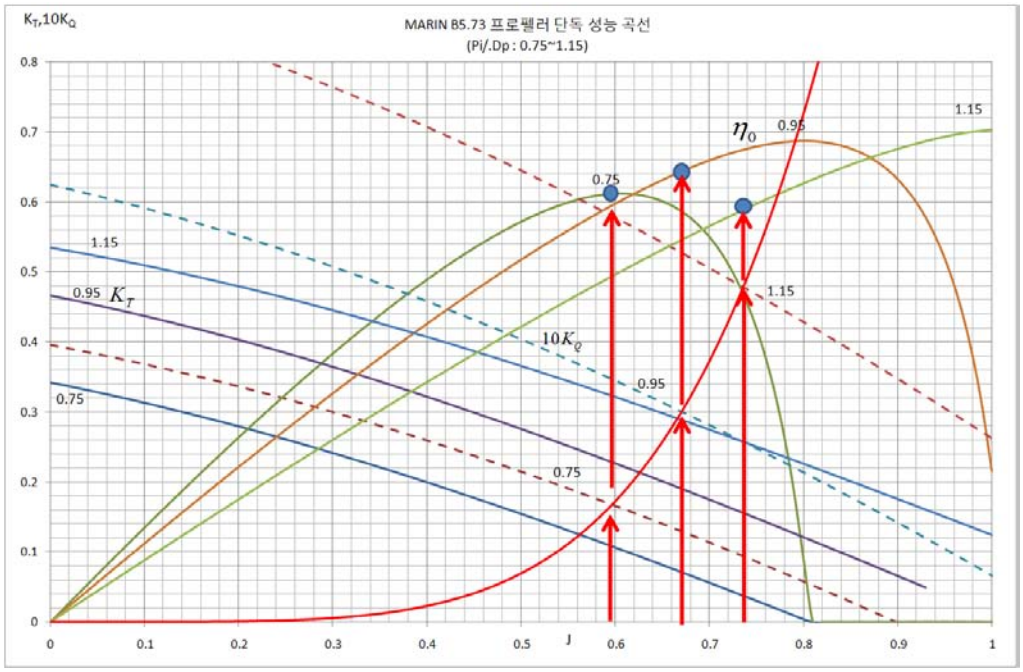
$$V_A = V(1-w) = (23.0 \times 0.5144) \times (1-0.27) = 8.64\,[m/s]$$

$$K_Q = C_1 J^5$$

$n_{RPS} = n_{RPM} / 60$ =103.9 / 60 = 1.732 [rps]

$$C_1 = \frac{P \cdot n^2}{2\pi\rho V_A{}^5} = \frac{23,401 \times 1.732^2}{2\pi \times 1.025 \times 8.64^5} = 0.2215$$

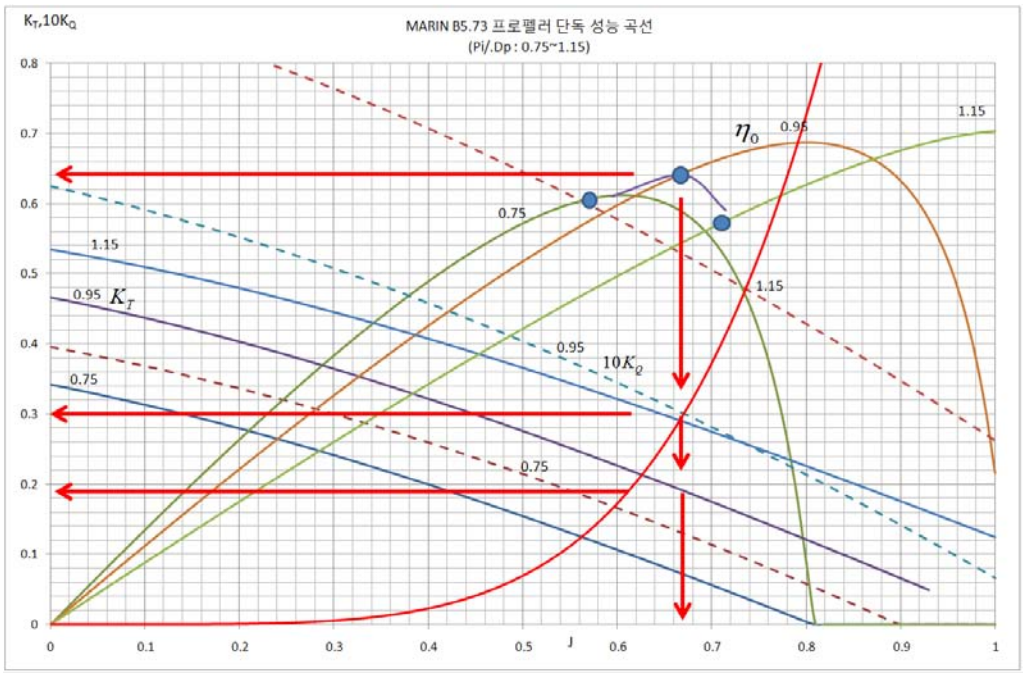
$$\therefore K_Q = 0.2215 \times J^5$$



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

P_i / D_P	J	η_0
0.75	0.595	0.612
0.95	0.670	0.642
1.15	0.715	0.592

J와 η_0를 2차 다항식으로 보간하여, 최대 η_0를 결정함



J_x =0.670에서 최대효율 $\eta_{0.x}$=0.642가 된다. 그때 $K_{T.x}$ =0.191, $K_{Q.x}$=0.030

Step 5) Step 4)에서 구한 J를 이용해 D_P 를 구함.

$$J_x = \frac{V_A}{n \cdot D_{P_x}}$$

$$D_{P_x} = \frac{V_A}{n \cdot J_x} = \frac{8.64}{1.732 \times 0.67} = 7.44\ [m]$$

Step 6) 구한 D_P 와 K_T 가 조건식2(배가 어떤 속력에서 요구하는 추력을 프로펠러가 내야하는 조건)을 만족하는지 확인.

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

$$T_S = \frac{R_T}{1-t} = \frac{1,353}{1-0.201} = 1,693\ [kN]$$

$$T_P = \rho \cdot n^2 \cdot {D_P}^4 \cdot K_T = 1.025 \times 1.725^2 \times 7.44^4 \times 0.19 = 1,789\ [\mathrm{kN}]$$

$T_S < T_P$(차이:96.5) 이므로 23.0 knot 보다 더 큰 속력으로 가정할 수 있다.

속력을 2.0Knot증가하여 계산하면 (iteration 1)

Step 2) 속력 v_1 가정, 25.0 knot

Step 3) 조건식1을 $K_Q = C_1 J^5$ 의 형태로 표현

(주기관이 전달한 토크를 프로펠러가 흡수하는 조건)

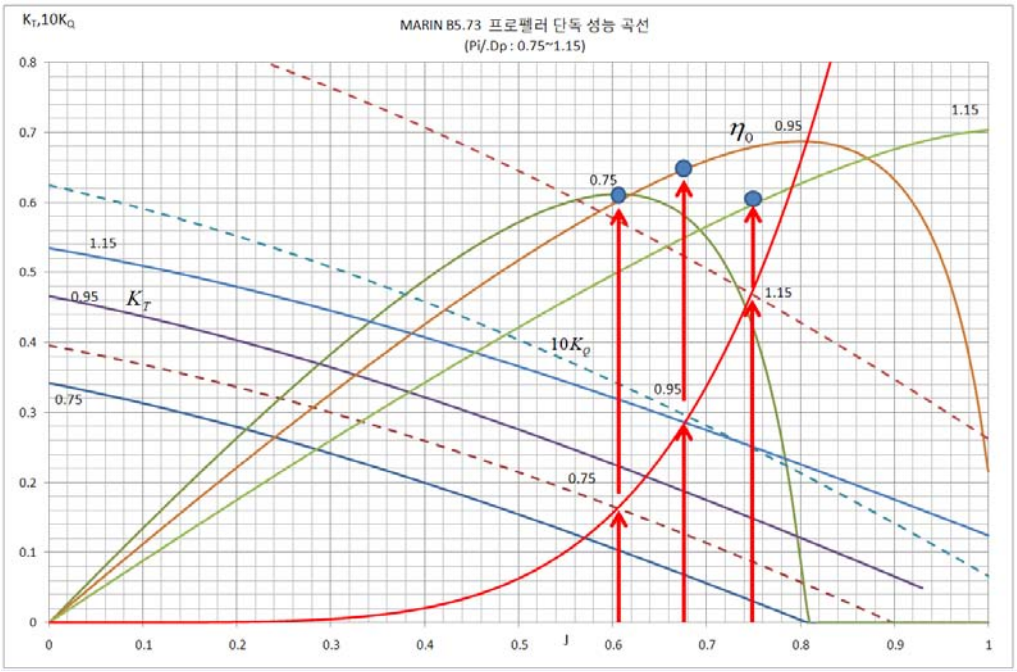
$$\frac{P}{2\pi n} = \rho \cdot n^2 \cdot {D_P}^5 \cdot K_Q$$

$$V_A = V(1-w) = (23.5 \times 0.5144) \times (1-0.27) = 8.82\ [m/s]$$

$$K_Q = C_1 J^5$$

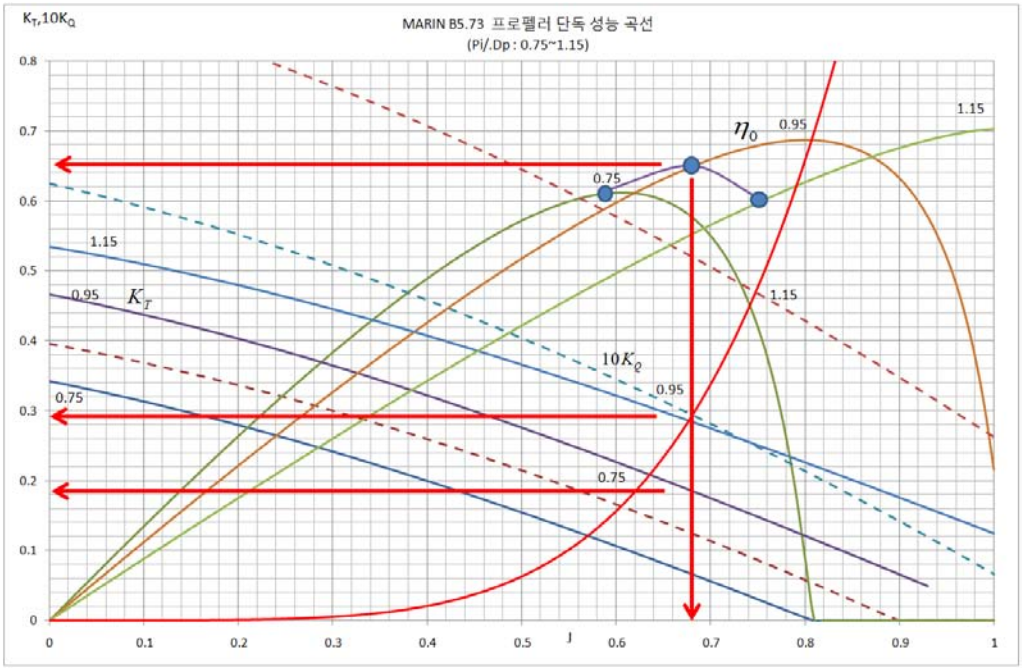
$$C_1 = \frac{P \cdot n^2}{2\pi\rho {V_A}^5} = \frac{23,401 \times 1.732^2}{2\pi \times 1.025 \times 8.64^5} = 0.2008$$

$$\therefore K_Q = 0.2008 \times J^5$$



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

P_i / D_P	J	η_0
0.75	0.608	0.612
0.95	0.675	0.645
1.15	0.748	0.601



3점을 이용하여 2차 다항식 보간하여 최대 η_0 를 구함,

J_x =0.675 , $K_{T.x}$ =0.191, $K_{Q.x}$ =0.029, $\eta_{0.x} = 0.65$

Step 5) Step 4)에서 구한 J를 이용해 D_P 를 구함.

$$J_x = \frac{V_A}{n \cdot D_{P_x}}$$

$$D_{P_x} = \frac{V_A}{n \cdot J_x} = \frac{8.82}{1.731 \cdot 0.680} = 7.49 \ [m]$$

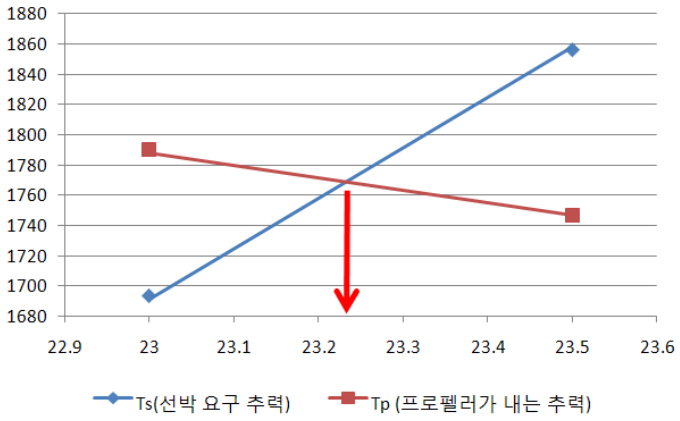
Step 6) 구한 D_P 와 K_T 가 조건식2(배가 어떤 속력에서 요구하는 추력을 프로펠러가 내야하는 조건)을 만족하는지 확인.

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

$$R_T = C_T \cdot \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V^2 = 1.998 \cdot 10^{-3} \times \frac{1}{2} \times 1.025 \times 9,408 \times \left(23.5 \times 0.5144\right)^2 = 1,412[\text{kN}]$$

$$T_S = \frac{R_T}{1-t} = \frac{1,412}{1-0.201} = 1,856\ [kN]$$

$$T_P = \rho \cdot n^2 \cdot {D_P}^4 \cdot K_T = 1.025 \times (1.731)^2 \times 7.7^4 \times 0.191 = 1,746\ [\text{kN}]$$



Iteration 결과 : 프로펠러 직경(D_p) : 7.49m, 속력(V) : 23.2 Knot 피치(P_i) : 7.11 m

[풀이] 3-3

Stage 2 에서 구한 D_p = 7.49 m

$P_i / D_p = 0.95$

Step 1) 조건식을 $K_T = C_2 J^2$ 의 형태로 표현.

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

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

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

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

$R_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_T \cdot S \cdot v^2$ 이므로 다시 쓰면,

$$C_2 = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot C_T \cdot S \cdot v^2}{(1-t) \cdot \rho \cdot {D_P}^2 \cdot v^2 \cdot (1-w)^2} = \frac{1}{2} \frac{C_T \cdot S}{(1-t) \cdot {D_P}^2 \cdot (1-w)^2}$$

C_T가 속력에 따라 변하지 않는다고 하면 C_2는 일정한 값을 가진다.

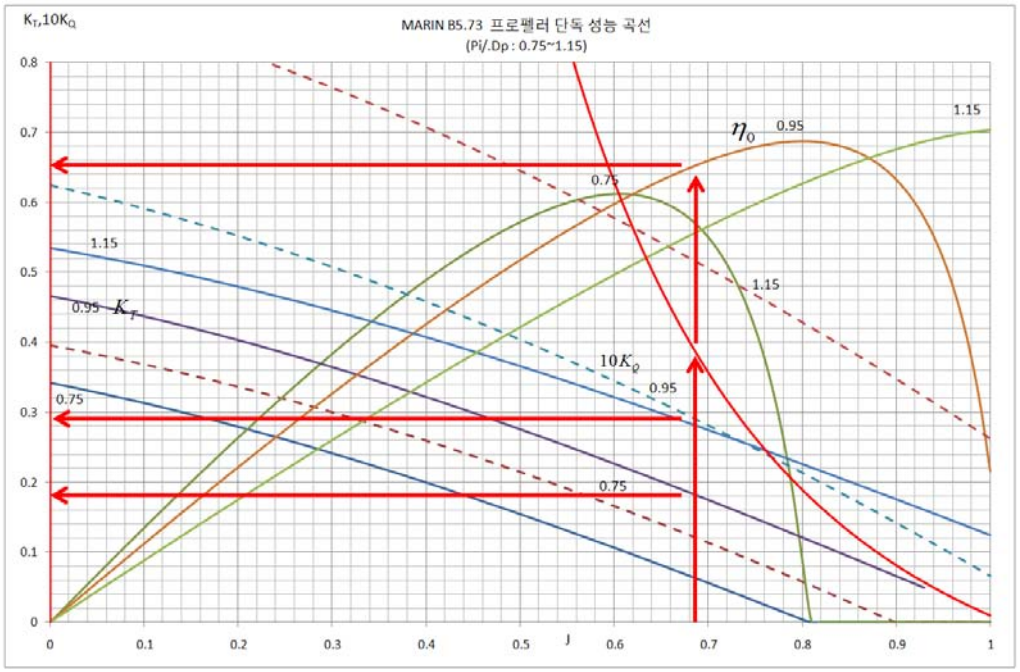
따라서

$$C_2 = \frac{1}{2} \frac{C_T \cdot S}{(1-t) \cdot {D_P}^2 \cdot (1-w)^2} = \frac{1}{2} \frac{1.988 \times 10^{-3} \times 9,408}{(1-0.201) \times 7.49^2 \times (1-0.27)^2} = 0.389$$

$$\frac{K_T}{J^2} = C_2 = 0.389$$

Step 2) $K_T = C_2 \cdot J^2$ 의 교점에 해당하는 J 값과 그때의 η_0 값을 구한다

속력에 따라서 C_2값이 변할 때는 다음과 같이 K_T / J^2 그래프를 그려서 C_2값에서의 J 값과 그때의 η_0 값을 계산 하는 것이 편리하다.



따라서 J=0.698, η_0=0.652 이고, 그때의 K_T=0.185, K_Q=0.0295 이다.

V=22 knots를 내기 위해 필요한 회전수와 마력을 구해 보자.

$$n = \frac{v_A}{J \cdot D_p} = \frac{8.67}{0.698 \times 7.83} = 1.59 \text{ rps } (95.2 \text{ rpm})$$

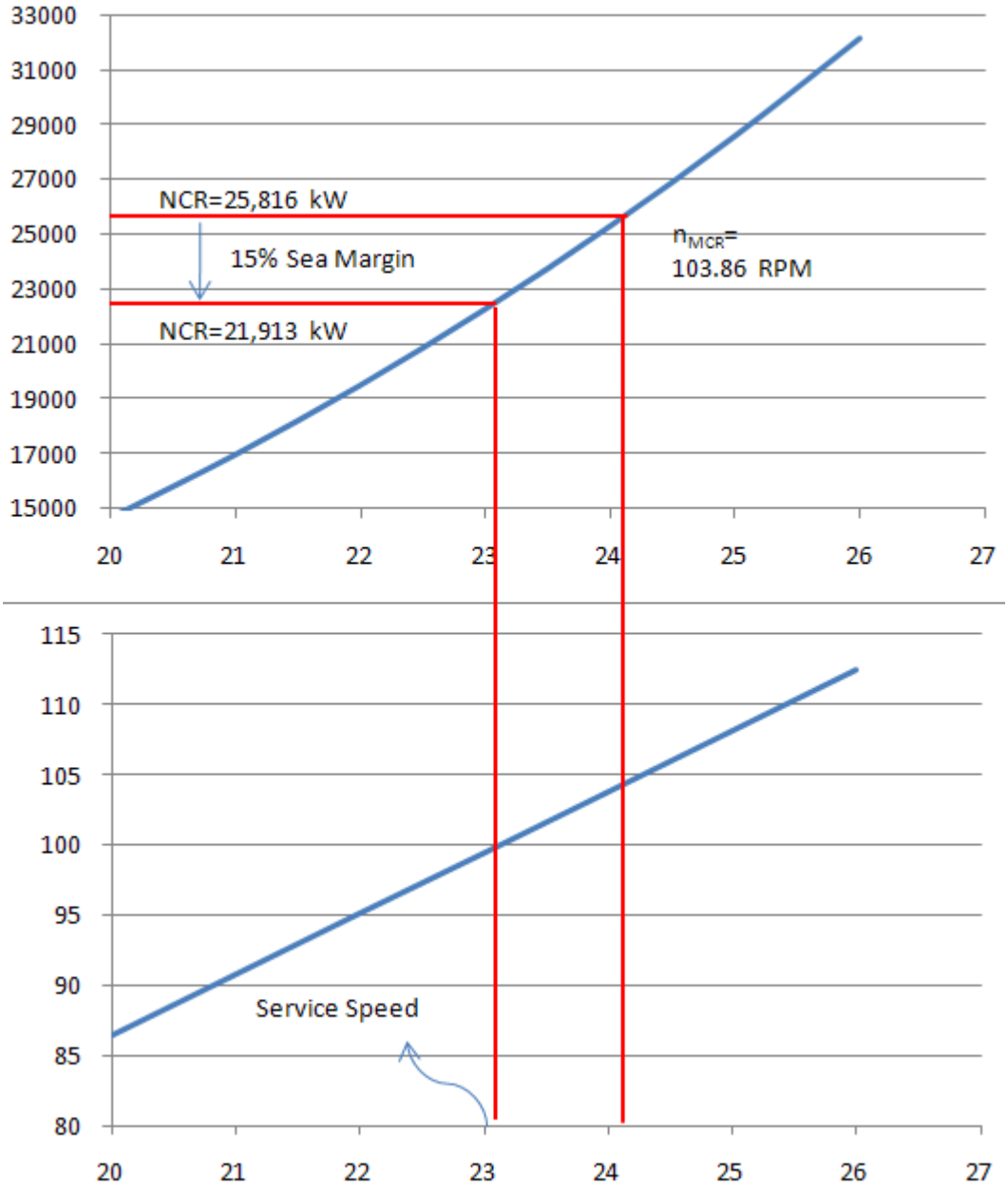
$$DHP = \frac{R_t \cdot v_S}{\eta_O \cdot \eta_H \cdot \eta_R} = \frac{1,353 \times 23.2 \times 0.5144}{0.65 \times \frac{(1-0.201)}{(1-0.270)} \times 1.022} = 22,112 \text{ kw (In calm water)}$$

$$BHP = \frac{DHP}{\eta_T} = \frac{22,112}{0.985} = 22,448\ kW$$

다른 속력에서도 마찬가지 방법으로 구해보면 다음과 같다.

VS	RT	BHP	NCR
22	1,232	19,470	95.15
23	1,347	22,248	99.47
24	1,466	25,277	103.80

세 점을 이용하여 2차 곡선으로 보간하면 다음과 같은 Speed Power Curve를 얻을 수 있다.



위의 곡선은 정수 중에서의 저항을 기준으로 구한 마력-회전수 곡선으로 NCR에서의 마력과 MCR에서의 회전수에서 24.2 knots의 속력을 낸다. 실제 선박은 바다에서 운항하므로, Sea margin 15%를 고려하면, 23.2 knots가 운항 속력이 된다.

4. 건현 계산 문제

ICLL기준에 따라 요구 건현과 최소 선수 높이를 계산하고, 설계선이 이를 만족하는지 검토하시오.

Given : ICLL 1966 자료 중 관련 부분 (건현 계산) in English version
3,700TEU Container ship의 건현계산 Table
3,700TEU Container ship의 G/A

[건현용 길이(L_f)의 경험식]

초기 설계 단계에서 건현 길이(L_f)가 확정되지 않은 경우, 다음 경험식을 이용하여 추정할 수 있다.

$$L_f = [0.85 \cdot D_{mld} - (T_s + 1)] \cdot 0.6248 + L_{bp}$$

[$0.85 \cdot D_{mld}$ 에서의 C_b 추정식(Kanda의 식)]

$$C_b = C_{bo} \cdot (0.85 \cdot D / T)^{(C_{wo} / C_{bo} - 1)}$$

where, $C_{wo} = (1 + 2 \cdot C_{bo}) / 3$

C_{bo} : 계획 만재 흘수에서의 C_b

C_{wo} : 계획 만재 흘수에서의 C_w

[4. 건현 계산 해답]

Step 1. 표정 건현(F_t)구하기

초기 설계 단계에서 건현 길이(L_f)가 확정되지 않은 경우, 문제에서 주어진 경험식을 이용하여 추정할 수 있다.

$$L_f = [0.85 \cdot D_{mld} - (T_s + 1)] \cdot 0.6248 + L_{bp}$$
$$= [0.85 \cdot 15.588 - (11.0 + 1)] \cdot 0.6248 + 246.20$$
$$= 246.98\,m$$

건현 계산시, D_{mld}는 Base line에서 건현 갑판까지의 수직 거리이다.

건현 길이에 해당하는 표정 건현을 ***표정 건현표(ICLL Reg. 28)***에서 찾는다.
(Table B참조. 컨테이너 선은 B-type에 속한다.)

Length of ship(metres)	Freeboard (millimetres)
241	3893
242	3906
243	3920
244	3934
245	3949
246	3965
247	3978
248	3992
249	4005
250	4018

$\therefore F_t = 3{,}965\ mm$

Step 2. C_b에 대한 수정 (Reg. 30)

설계선의 $C_{bo} = 0.6131$로 주요치수 결정과정에서 추정 하였음.
(이하 건현 계산 에서의 C_b는 $0.85 \cdot D_{mld}$ 에서의 C_b를 의미하며, 설계 흘수(10.78m)에서의 C_b는 C_{bo}로 표기한다.)

[$0.85 \cdot D_{mld}$ 에서의 C_b 추정식(Kanda의 식)]

$$C_{wo} = (1 + 2 \cdot C_{bo}) / 3$$
$$= (1 + 2 \cdot 0.6600) / 3$$
$$= 0.7733$$

C_{bo}: 계획 만재 흘수에서의 C_b
C_{wo}: 계획 만재 흘수에서의 C_w

$$C_b = C_{bo} \cdot (0.85 \cdot D / T)^{(C_{wo}/C_{bo}-1)}$$
$$= 0.66 \cdot (0.85 \cdot 19.3 / 12.5)^{(0.7733/0.66-1)}$$
$$= 0.6915 \ (at \ 0.85 \cdot D_{mld})$$

[C_b에 대한 수정량 계산식]

C_b가 0.68보다 큰 경우	$Ft(\text{표정건현}) \times \frac{(C_b + 0.68)}{1.36}$ 으로 건현값 계산
C_b가 0.68보다 작은 경우	수정없음
여기서 C_b는 $0.85 D_{mld}$에서의 값	

설계선의 경우, C_b가 0.68보다 큰 경우이다.

C_b에 대한수정량 $= Ft($표정건현$) \times \frac{(C_b + 0.68)}{1.36}$

$$= 3,965 \times \frac{(0.6915 + 0.68)}{1.36}$$
$$= 3,998 \ mm$$

Step3. 깊이에 의한 수정

건현 갑판 stringer의 두께를 0.015로 가정한다.

$$D_f = D_{mld} + t_{stringer}$$
$$= 15.588 + 0.015$$
$$= 15.6$$

여기서 D_{mld}는 건현 갑판까지의 거리이다.

[선박 깊이에 대한 수정량 계산식]

$D_f > L_f/15$	$(D_f - L_f/15) \times R$ 만큼 수정량 증가시킴 $R = L_f / 0.48 \ \ (L_f < 120m)$ $R = 250 \qquad (L_f > 120m)$
$D_f < L_f/15$	$(L_f/15 - D_f) \times R$ 만큼 수정량 감소시킴

$$L_f/15 = 246.2/15$$
$$= 16.47$$

Df < Lf/15 이므로, $(L_f/15 - D_f) \times R$ 만큼 수정량을 감소시킨다.

이때, $R = 250$ 이다.

선박깊이에대한수정량감소 $= (L_f / 15 - D_f) \times R$

$= (246.98 / 15 - 15.6) \times 250$

$= -215.6$

Step 4. 선루에 의한 수정

가) 선루의 길이(L_s)라 함은 L_f의 범위 내에 있는 선루 부분의 평균길이를 말한다.
설계선의 경우 $L_a = L_f$ 이다.

$L_a = L_f = 246.98m$

다)선루의 표준 높이를 다음과 같다.

L_f [m]	저선미루 [m]	그 밖의 선루 [m]
30이하	0.9	1.80
75	1.20	1.80
125이상	1.80	2.30

설계선의 경우, 저 선미루의 표준 높이는 1.8m, 그 밖의 선루의 표준높이는 2.3이다.

설계선의 경우, 유효길이(Le)는 둘러막혀 있는 선루의 실제높이(Ha)가 표준높이(Hs)보다 크므로,유효길이(Le) = 선루의 길이(L_S)가 된다.
따라서,

$L_e = 246.98m$

라) 설계선의 유효길이(Le)가 122m 이상이므로 건현을 1,070mm 감소 시킨다.

Step5. 현호에 의한 수정

가) 다음 표의 계산식을 통해 현호의 표준 높이 S_0 를 계산한다.

$L_f = 281.05m$

위 치		Standard				Actual		
		Height	Ordinate	S.M	Product	Ordinate	S.M	Product
후반부	A.P	25×(L_f/3+ 10)	2,308	1	2,308	0	1	0
	L/6	11.1×(L_f/3+ 10)	1,025	3	3,074	0	3	0
	L/3	2.8×(L_f/3+ 10)	258	3	775	0	3	0
	Amidship	0	0	1		0	1	0
	평균 높이 As=8.34(L_f/3+ 10)				6,158	Aa :		0
전반부	Amidship	0	0	1	0	0	1	0
	L/3	5.6×(L/3+ 10)	581	3	1,551	0	3	0
	L/6	22.2×(L/3+ 10)	2,302	3	6,419	0	3	0
	F.P	50.0×(L/3+ 10)	5,184	1	4,616	0	1	0
	평균 높이 Fs=16.68(L_f/3+ 10)				12,316	Fa :		0

Deficiency of Aft sheer : $\frac{(Aa-As)}{8} = -770\ mm$

Deficiency of FWD sheer $\frac{(Fa-Fs)}{8} = -1,540\ mm$

현호의표준높이 $(St) = \frac{-770-1,540}{2} = -1,155\ mm$

나) 선루의 높이에 따른 현호의 수정(실제 현호의 평균높이)

Forecastle deck (Sof) : $\frac{y}{3} \times \frac{L_1}{L_f} = \frac{5,248}{3} \times \frac{25.8}{246.98} = 31mm$

y : FP 또는 AP에서 선루의 실제높이(3,200mm)와 표준높이(2,300mm)의 차 따라서 900mm가 된다.

L_1= 둘러막힌 선미루 또는 선수루의 평균길이(0.5L_f이하)×2
= 25.8 m

Poop deck (Sop) : $\frac{y}{3} \times \frac{L_1}{L_f} = 0$

y : FP 또는 AP에서 선루의 실제높이(0.0mm)와 표준높이(0.0mm)의 차 따라서, 0.0mm가 된다.

따라서 실제 현호의 평균 높이 So=Sof + Sop = 240 mm이 된다.

다) 현호에 의한 수정

현호에 의한 수정은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&(St + So) \times (0.75 - 0.5r_1)mm \\
&= (St + So) \times (0.75 - (Le / (2 \times Lf)) \\
&= (-1{,}154 + 31) \times (0.75 - (246.2 / (2 \times 246.2)) \\
&= -280\,mm
\end{aligned}
$$

$S_0(mm) =$ 현호의표준높이

$S(mm) =$ 실제현호의평균높이

$r_1 = Le / Lf$

따라서, 설계선(4,100TEU 컨테이너선)의 현호에 의한 수정은 -280mm이다.

Step 6. 하기 만재 흘수

C_b 에 따른 표정건현	3,998	mm
깊이에 따른 수정	-215	mm
선루에 따른 수정	-1,070	mm
현호에 따른 수정	280	mm
형상 건현	2,993	mm
건현용 깊이	15.59	m
허용 하기 만재 흘수	12.59	m
계획 만재 흘수	12.50	m
여유	0.09	m

Step 7. 최소 선수 높이

[Minimum bow height의 계산식]

L_f < 250	B_m = 56L_f(1-L_f/500)×1.36/(C_b+ 0.68)(mm)
L_f > 250	B_m = 7000×1.36/(C_b+ 0.68)(mm)
C_b <0.68 경우에는 C_b =0.68	

Lf > 250, Cb<0.68 => Cb = 0.68

$$B_m = 56 \times L_f \left(1 - L_f / 500\right) \times 1.36 / \left(C_B + 0.68\right)$$
$$= 56 \times 246.98 \left(1 - 246.98 / 500\right) \times 1.36 / \left(0.69 + 0.68\right)$$
$$= 7,000\, mm$$

실제 선수 높이(Ba)

Ba=형상건현+ F.P에서의 현호+ 선수루 높이+ 선루 높이+ $t_{stringer}$

= 2,993 + 0 + 3,200 + (19,300 - 15,588) + 0.015

= 9,920 mm

$$Actual\ Bow\ Height\ (H_a) \quad > \quad Minimum\ Bow\ Height (H_m)$$
$$9,920\ mm \qquad\qquad 6,940\ mm$$