전산 선박 설계
Part 1. 최적 설계 기법 Term Project

"CSD(Constrained Steepest Descent) 방법을 이용한 선박의 최적 주요 치수 결정 프로그램 작성"

2006.9.

서울대학교 조선해양공학과
이규열

Advanced
Ship
Design
Automation
Laboratory

전산 선박 설계 Part 1. 최적 설계 기법 Term Project

- CSD(Constrained Steepest Descent) 방법을 이용한 선박의 최적 주요 치수 결정 프로그램 작성할 것
- 작성된 프로그램을 이용하여 재화 중량 160,000톤 살물선의 최적 주요 치수를 결정할 것

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 자료를 이용한 재화 중량 160,000톤 살물선의 최적 주요 치수 결정 문제(1)

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 주요 요목

항목		실적선	설계선	비고
주요제원	L_{OA}	abt. 274.00 m	max. 284.00 m 이내	
	L_{BP}	264.00 m		
	B_{mld}	45.00 m	45.00 m	
	D_{mld}	23.20 m		
	T_{mld}	16.90 m	17.20 m	
	T_{scant}	16.90 m	17.20 m	
Deadweight		150,960 ton	160,000 ton	at 17.20 m
Speed		13.5 kts	13.5 kts	90 % MCR (with 20 % SM)
M/E	TYPE	B&W 5S70MC		
	NMCR	17,450 HP×88.0 RPM		Derating Ratio = 0.9
	DMCR	15,450 HP×77.9 RPM		E.M = 0.9
	NCR	13,910 HP×75.2 RPM		
FOC	SFOC	126.0 g/HP.H		NCR 기준
	TON/DAY	41.6		
Cruising Range		28,000 N/M	26,000 N/M	
중앙 단면 형상		Single Hull Double Bottom/Hopper /Top Side Wing Tank	Single Hull Double Bottom/Hopper /Top Side Wing Tank	
Capacity	Cargo	abt. 169,380 m^3	abt. 179,000 m^3	Hatch Coaming 포함
	Fuel Oil	abt. 3,960 m^3		Total
	Fuel Oil	abt. 3,850 m^3		Bunker Tank Only
	Ballast	abt. 48,360 m^3		F.P 및 A.P Tank 포함

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 자료를 이용한 재화 중량 160,000톤 살물선의 최적 주요 치수 결정 문제(2)

재화 중량 150,000톤 살물선(기준선)의 추가 자료 및 기타 자료

항목	값
경하 중량(LWT)	18,269 ton
선각 중량(Ws)	15,289 ton
의장부 중량(Wo)	1,694 ton
기관부 중량(Wm)	1,281 ton
건현(Fb)	6.996 m
방형 계수(Cb)	0.8214
Admiralty 계수(Cad)	644.4139
선각 강재비 관련 계수(C_{PS})	972.80
의장부 비용 관련 계수(C_{PO})	20,256
기관부 비용 관련 계수(C_{PM})	7,760

기타 사항

1. 추가 제약 조건으로서 "조종성 관점에서의 비만 계수 요구 조건"과 "Watson & Gilfillan에 의한 Cb 추천 값"을 고려할 것

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)

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

최소 요구 건현 조건(부등호 제약 조건)

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

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**

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(1)

Find L, B, D, C_B

Minimize $Building\ Cost = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6}(B+D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR$

Subject to * 부력(buoyancy)-중량(displacement) 평형 조건

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

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

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

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

* 요구되는 화물창 용적 조건

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

* 최소 요구 건현 조건

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

➡ 미지수 4개, 등호 제약 조건 1개, 부등호 제약 조건 2개인 최적화 문제

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(2) - 목적 함수

- **선박의 건조비**(Building Cost) **최소**

  또는
- **요구 운임**(RFR; **Required Freight Rate, 단위 수송 화물 당 수송 원가) 최소**

  또는
- **연료 소모율**(Fuel Consumption) **최소**

- **위 목적 함수는** L, B, D, C_B**의 함수**(closed form)**로 표현 가능**
  - **선박 건조비의 계산 예**

$$Building\ Cost = C_{PS} \cdot C_s \cdot L^{1.6}(B+D) + C_{PO} \cdot C_o \cdot L \cdot B + C_{PM} \cdot C_{ma} \cdot NMCR$$

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(3) - 제약 조건

- **부력**(Buoyancy)-**중량**(Displacement) **평형 조건**

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

그런데 경하 중량(LWT; lightweight)**은 선각 중량, 의장 중량, 기관부 중량으로 세분화할 수 있음**
따라서 위 식은 아래와 같이 표현할 수 있음

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

$$= C_s \cdot L^{1.6}(B+D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot NMCR + DWT$$

한편, NMCR**은 저항 및 마력 추정을 통해 주기관을 선정하여 결정해야 하나**
초기 단계에서는 기준선의 admiralty **계수**(C_{ad})**로부터 개략적으로 추정할 수 있음**

$$C_{ad} = \frac{\Delta^{2/3} \times V^3}{DHP}$$ **로부터** $$DHP = \frac{\Delta^{2/3} \times V^3}{C_{ad}}$$ **이며, 따라서**

$$NMCR = C_1 \cdot DHP = C_1 \cdot \frac{\Delta^{2/3} \times V^3}{C_{ad}} = C_2 \cdot \Delta^{2/3} \times V^3$$ **이며, 최종적으로**

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

$$= DWT_{given} + C_s \cdot L^{1.6}(B+D) + C_o \cdot L \cdot B + C_{ma} \cdot C_2 \cdot \Delta^{2/3} \cdot V^3$$

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

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

$$\rightarrow C_{power} = C_{ma} \cdot C_2$$

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(4) - 제약 조건

- **요구되는 화물창 용적**(CC; Cargo Capacity) **조건**

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

* L_{APT}: **선미창 길이**, L_{ER}: **기관부 길이**, L_{FPT}: **선수창 길이**, DB_{Height}: **이중저 높이**

화물창 용적의 간이 추정 예 1

$$CC = C_{CH} \cdot L \cdot B \cdot D$$

* C_{CH}: **화물창 용적 계수**

$$C_{CH} = \left(\frac{CC}{L \cdot B \cdot D} \right)_p$$

기준선의 값

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(5) - 제약 조건

- **요구되는 화물창 용적**(CC; Cargo Capacity) **조건**

$$CC = f(L, B, D, C_B, L_{APT}, L_{ER}, L_{FPT}, DB_{Height})$$

* L_{APT}: **선미창 길이**, L_{ER}: **기관부 길이**, L_{FPT}: **선수창 길이**, DB_{Height}: **이중저 높이**

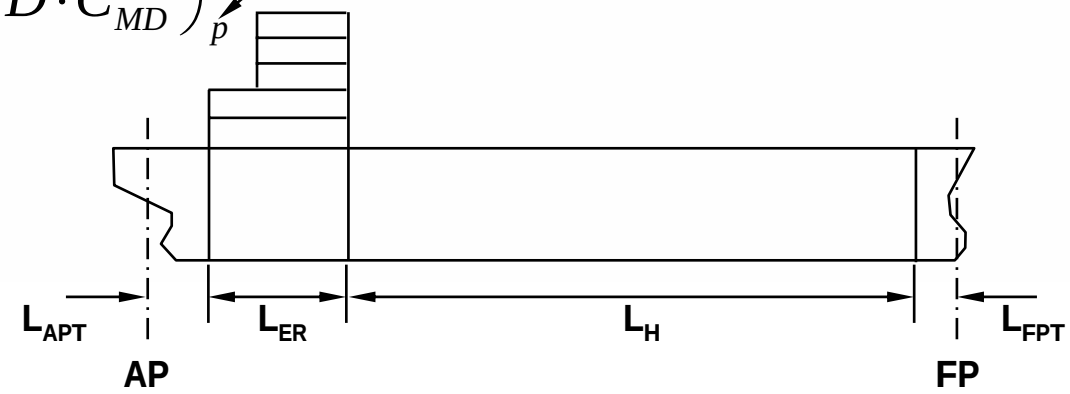
화물창 용적의 간이 추정 예 2

$$CC = C_{CH} \cdot \underbrace{(L_{BP} - L_{APT} - L_{ER} - L_{FPT})}_{\text{화물창 길이 } L_H} \cdot B \cdot D \cdot C_{MD}$$

* C_{CH}: **화물창 용적 계수**, C_{MD}: **갑판까지의 중앙횡단면 계수**

$$C_{CH} = \left(\frac{CC}{L_H \cdot B \cdot D \cdot C_{MD}} \right)$$

기준선의 값



상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(6) - 제약 조건

- **최소 요구 건현 조건**

$$D \geq T + Freeboard(L, B, D, C_B)$$

최소 요구 건현은 초기 단계에서 아래와 같이 개략적으로 계산할 수 있음

$$D \geq T + C_{FB} \cdot D \qquad C_{FB} = \left(\frac{Freeboard}{D} \right)_p$$

기준선의 값

실제로는 다음과 같은 식으로부터 계산을 해야 함

ICLL 1966 **요구 건현**

$$Freeboard = f(L_f, D, C_B, Superstructure_{Length}, Superstructure_{Height}, Sheer)$$

상선의 최적 주요 치수 결정 문제의 수학적 정식화(7) - 제약 조건

- **초기 복원성 요구 조건**

$$0.04B \le GM \le 4\pi^2 (0.4B)^2 / (gTr^2)$$

* Tr: **횡동요 주기**(Roll Period)

$$GM = T(0.9 - 0.3C_M - 0.1C_B) + B\left(\frac{0.08}{\sqrt{C_M}} \cdot \frac{B}{T}\right) - D\left(\frac{1.6}{L^{0.2}}\right)$$

- **조종성 관점에서의 비만 계수**(Obesity Coefficient) **요구 조건**

$$C_B / (L/B) \le 0.15$$

비만 계수

- Watson & Gilfillan**에 의한** C_B **추천 값**

$$C_B \le 0.70 + 0.125 \tan^{-1}((23 - 100Fn)/4)$$

Ship Class의 구현 예(1)

```
class Ship
{
public:
        Ship();
        virtual ~Ship();

        // 선주 요구 조건(Given)
        double m_fDWT;                          // 재화 중량
        double m_fCCrequirement;                // 요구 화물창 용적
        double m_fTmax;                         // 흘수
        double m_fVs;                           // 선속 in Knots

        // 선박 주요 치수(Find)
        double m_fL;                            // 수선간 길이(LBP)
        double m_fB;                            // 형 폭(Bmld)
        double m_fD;                            // 형 깊이(Dmld)
        double m_fCb;                           // 방형 계수(Block Coefficient)

        double m_fCC;                           // 화물창 용적
        double m_fFB;                           // 건현
        double m_fDisplacement;                 // 배수량
        double m_fLWT;                          // 경하 중량(Light Weight)

        // 기준선 정보로부터 계산되는 변수
        double m_fAppendageFactor;              // Appendage Factor(1 + alpha)
        double m_fCs;                           // 선각 중량 계수
        double m_fCo;                           // 의장부 중량 계수
        double m_fCma;                          // 기관부 중량 계수
        double m_fCch;                          // 화물창 용적 계수
        double m_fCfb;                          // 건현 계수
        double m_fCps;                          // 건조비 추정을 위한 선각 중량 관련 계수
        double m_fCpo;                          // 건조비 추정을 위한 의장부 중량 관련 계수
        double m_fCpm;                          // 건조비 추정을 위한 기관부 중량 관련 계수

        // 계속
};
```

Ship Class의 구현 예(2)

```
class Ship
{
public:
    // 선박 주요 치수에 대한 상하한값
    double m_fLlower, m_fLupper;                          // 수선간 길이에 대한 하/상한값
    double m_fBlower, m_fLupper;                          // 형 폭에 대한 하/상한값
    double m_fDlower, m_fDupper;                          // 형 깊이에 대한 하/상한값
    double m_fCblower, m_fCbupper;                        // 방형 계수에 대한 하/상한값

    void CalculateParentShipData();                       // 기준선 정보로부터 관련 계수를 계산하는 함수
    double CalculateBuildingCost();                       // 건조비를 계산하는 함수
    double CalculateWS();                                 // 선각 중량을 계산하는 함수
    double CalculateWO();                                 // 의장부 중량을 계산하는 함수
    double CalculateWM();                                 // 기관부 중량을 계산하는 함수
    double CalculateCC();                                 // 화물창 용적을 계산하는 함수
    double CalculateFB();                                 // 건현을 계산하는 함수

    double BuoyancyDisplacementCondition();               // 부력-중량 평형 조건을 계산하는 함수
    double CCRequirementCondition();                      // 화물창 요구 조건을 계산하는 함수
    double FBRequirementCondition();                      // 건현 요구 조건을 계산하는 함수
    double ObesityCoefficientCBCondition();               // 조종성 관점에서의 비만 계수 요구 조건
    double WGCBCondition();                               // Watson & Gilfillan에 의한 Cb 추천값
    void DVUpperLowerCondition(int DVNo, double* CF);     // 설계 변수의 상하한값에 대한 조건을 계산하는 함수
};
```