

# 2009년 창의적 선박설계 기말고사 Part 2

- 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)

Part1에서 결정한 다음의 설계선의 주요 요목을 이용하여, Part2의 설계를 진행하시오.

주요요목	기준선 (3700TEU)	설계호선
<b><u>Main Dimensions</u></b>		
LOA	257.4 m	261.2 m
LBP	245.24 m	246.2 m
B mld	32.2 m	32.25 m
D mld	19.3 m	19.3 m
d(design)	10.1 m	Abt. 11 m
d(scant.)	12.5 m	Abt. 12.5 m
<b><u>Deadweight</u></b>		
(design/scant.)	34,300/50,200 MT	51,000mt at scant. draught
<b><u>Capacity</u></b>		
Container on deck/in hold	2,174 TEU / 1,565 TEU	Abt. 4,100TEU
Ballast water	13,800 m <sup>3</sup>	11,500 m <sup>3</sup>
Heavy fuel oil	6,200 m <sup>3</sup>	6,700 m <sup>3</sup>
Marine diesel oil	400 m <sup>3</sup>	
Fresh water	360 m <sup>3</sup>	
<b><u>Main Engine &amp; Speed</u></b>		
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
<b><u>Others</u></b>		
Complement	30 P.	30 P.
Crane 유무	Crane 있음	Crane 없음

## 시험 시 추가로 주어지는 자료

-각 Part 종료와 동시에 시험지와 자료 수거

### Part 2.

#### 1) 3700TEU 기준선 자료 중 관련 부분

- a) G/A (Part 1 종료와 동시에 걷었다가 Part2 시작할 때 다시 제공)
- b) Tank Plan
- c) Hydrostatic Table
- d) Trim & Stability (Homogeneous 10Ton Scantling Departure Condition (2,918 TEU))
- e) Light weight summary
- f) tank filling table

#### 2) 4,100TEU G/A (복원성능 계산시 필요)

#### 3) IMO Rule 자료 중 관련 부분 (Intact stability) in English version

# 이외의 자료 및 문제에 기재되지 않은 식에 대해서는 각자 알고 있어야 함.

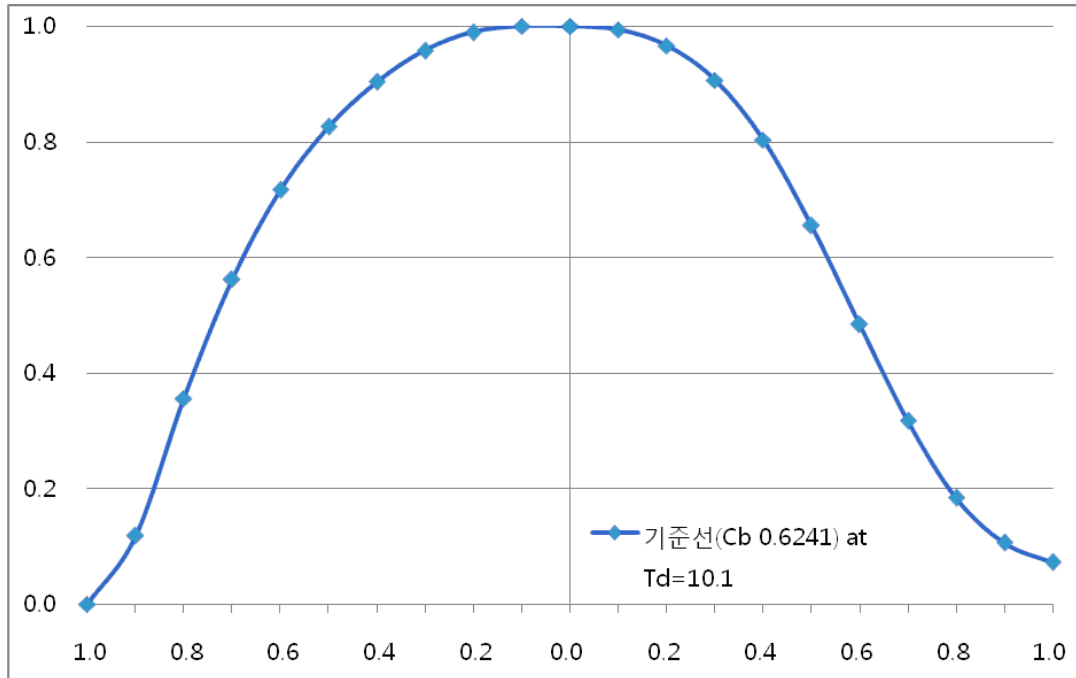
혹시 위의 자료 중 배포되지 않은 자료가 있으면 시험감독에게 알릴 것.

준비물:

자, 계산기(행렬 연산이 가능한 것), 필기구

## 5. '1-Cp' Hull form variation

3700TEU Container선의 CP-curve는 다음과 같다.



기준선의 Cp-curve로부터 구한 parameters	
Cp	0.63
Cp,f	0.59
Cp,a	0.68
LCB (단 L/2로 나누어 Scaling 되었음)	-0.039
$\bar{x}_f$ : 기준선의 Midship으로부터 선미부의 도심까지의 거리	0.34
$\bar{x}_a$ : 기준선의 Midship으로부터 선수부의 도심까지의 거리	0.37

설계선의 Design Draft(에서  $C_B$  값은 Part 1에서 계산 결과 0.6411로 주어졌다.

설계선의  $C_M$  값은 기준선 대비하여 폭과 깊이방향 변화가 없었으므로, 동일한 값을 가지며, 따라서  $\delta C_p$  값은 아래 식을 통해 얻을 수 있다.

$$C_p = C_B / C_M$$

$$\therefore \delta C_p = \delta C_B / C_M$$

위 값을 바탕으로 '1-Cp' 선형 variation 방법에 따라 설계선의 Cp curve를 작성하시오. (단, 설계선의 LCB는 기준선과 동일하다고 가정한다)

1) Midship으로부터  $\delta C_p$ 의 중심까지의 거리,  $h_{f,a}$  를 구하시오.

$$h_{f,a} = \frac{C_{p_{f,a}}(1 - 2\bar{x}_{f,a})}{1 - C_{p_{f,a}}}$$

2) 전반부 Cp 변화량,  $\delta C_{p_f}$  과 후반부 Cp 변화량  $\delta C_{p_a}$  를 구하시오.

$$\delta C_{p_f} = \frac{2[\delta C_p(h_a + LCB) + \delta LCB(C_p + \delta C_p)]}{h_f + h_a}$$

$$\delta C_{p_a} = \frac{2[\delta C_p(h_f - LCB) - \delta LCB(C_p + \delta C_p)]}{h_f + h_a}$$

3) '1-Cp' 선형 variation 식에 따라  $\delta x_{f,a}$  를 구하시오.

$$\delta x_{f,a} = \frac{\delta C_{p_{f,a}}}{1 - C_{p_{f,a}}}(1 - x_{f,a})$$

4) 이로부터 설계선의 Cp-Curve를 개략적으로 작성하시오.

[풀이] 5. 선형설계

1)

(아래첨자 의미 : mother - 기준선, design - 설계선)

$$C_{M\_mother} = \frac{C_{B\_mother}}{C_{P\_mother}} = \frac{0.6241}{0.63} = 0.9906$$

$$C_{M\_mother} = C_{M\_design}$$

$$\therefore \delta C_p = \frac{C_{B.design} - C_{B.mother}}{C_M} = \frac{0.6411 - 0.6241}{0.9901} = 0.0171$$

$$h_f = \frac{C_{P_f}(1 - 2\bar{x}_f)}{1 - C_{P_f}} = \frac{0.59(1 - 2 \cdot 0.34)}{1 - 0.59} = 0.46$$

$$h_a = \frac{C_{P_a}(1 - 2\bar{x}_a)}{1 - C_{P_a}} = \frac{0.68(1 - 2 \cdot 0.37)}{1 - 0.68} = 0.56$$

2)

$$\delta C_{P_f} = \frac{2[\delta C_p(h_a + LCB) + \delta LCB(C_p + \delta C_p)]}{h_f + h_a} = \frac{2[0.0171(0.56 - 0.039)]}{0.46 + 0.56} = 0.0175$$

$$\delta C_{P_a} = \frac{2[\delta C_p(h_f - LCB) - \delta LCB(C_p + \delta C_p)]}{h_f + h_a} = \frac{2[0.0544(0.46 - 0.039)]}{0.46 + 0.56} = 0.0168$$

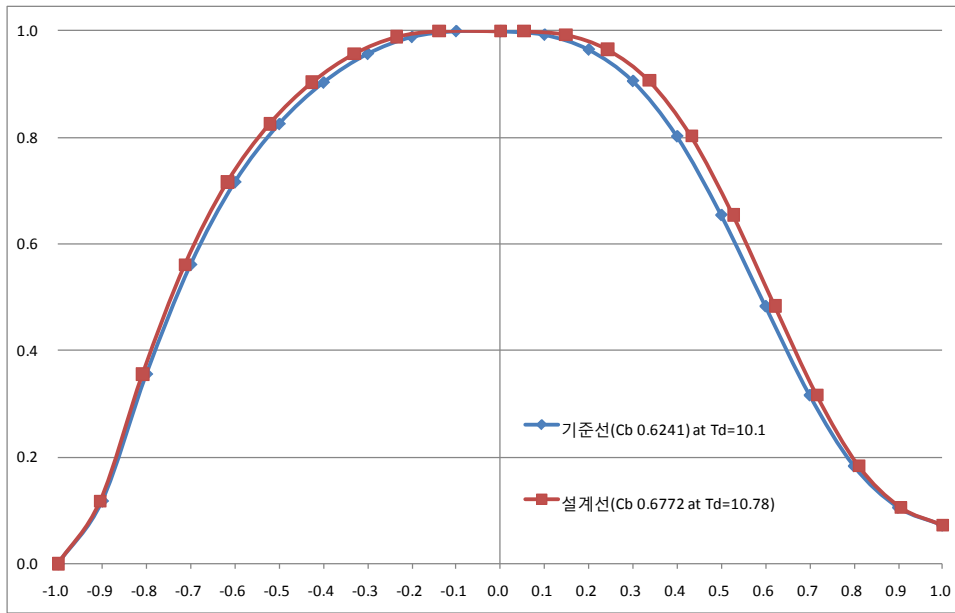
3)

$L_{P_{f,a}} = \delta L_{P_{f,a}} = 0$ 이므로 Lackenby 선형 variation 식은 다음과 같이 간단히 정리 된다.

$$\begin{aligned} \delta x_f &= \frac{\delta C_{P_f}}{1 - C_{P_f}}(1 - x_f) \\ &= \frac{0.0175}{1 - 0.59}(1 - x_f) \\ &= 0.0428 - 0.0428x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta x_a &= \frac{\delta C_{p_a}}{1 - C_{p_a}}(1 - x_a) \\ &= \frac{0.0168}{1 - 0.68}(1 - x_a) \\ &= 0.0533 - 0.0533x \end{aligned}$$

4)



## 6. 복원성능 추정 문제

Given :

- i. 기준선 G/A
- ii. 설계선 G/A
- iii. 기준선 Tank plan
- iv. 기준선 Hydrostatic table
- v. 기준선 Trim & Stability (Homogeneous 10 Ton Scantling Departure Loading Condition (2,918 TEU))
- vi. IMO Rule 자료 중 관련 부분 (Intact stability) in English version

문제6-1) 설계선의 Homogeneous 10Ton Departure Condition에서의 복원성능을 계산 하고자 한다.

주어진 기준선의 Homogeneous 10Ton Departure 상태의 Container 배치를 확장하여 설계선의 Container 적재 수량을 계산하고, Ballasting을 하지 않았을 때 선박의 KG를 추정하시오.

설계선의 Weight와 VCG값

COMPARTMENT	VCG [m]	WEIGHT [Ton]	비고
HOLD (container ____ TEU)			
DECK (container ____ TEU)			이때, Container 하나의 VCG 는 45% Container 높이로 가정한다.
FRESH WATER	17.750	250	
HEAVY FUEL OIL	4.856	5,680	
DIESEL OIL	13.988	320	
LUBRICATING OIL	11.217	400	
MISCELL	4.705	180	
STORE & PROVISION	17.507	75	
DEADWEIGHT CONSTANT	21.146	240	
LIGHTWEIGHT	13.2	16,500	

문제6-2). 위의 문제6-1)에서 추정된 KG를 사용하여 선박의 GM 값을 계산 하시오.

Part1에서 결정한 주요치수로 ‘1-Cp’ 선형 Variation 하여 선형 설계를 하면, 다음과 같은 설계선 Hydrostatic Table을 계산할 수 있다.

DRAFT (m)	Displacement (ton)	VCB(m)	BM(m)	비고
10	52884.5	5.821	8.707	선형보간을 하여 KB, BM값을 추정
10.2	54124	5.933	8.654	
10.4	55363.9	6.046	8.602	
10.6	56669.9	6.161	8.504	
10.8	57975.9	6.276	8.411	
11.0	59,282	6.392	8.322	
11.2	60,588	6.507	8.237	
11.4	61,894	6.622	8.155	
11.6	63,245	6.738	8.052	
11.8	64,597	6.854	7.953	
12.0	65,948	6.970	7.858	

문제 6-3) GM값이 0.15가 안 되는 경우, KG를 낮추기 위해 Ballasting을 해야 한다. 각 Ballasting Tank 에 채워야 할 Ballasting water의 양을 계산하시오.

(설계선의 Wing Tank는 기준선과 동일하게 배치 되었다고 가정)

탱크의 Filling ratio에 따른 VCG는 다음 Table을 이용하여 계산 하시오.

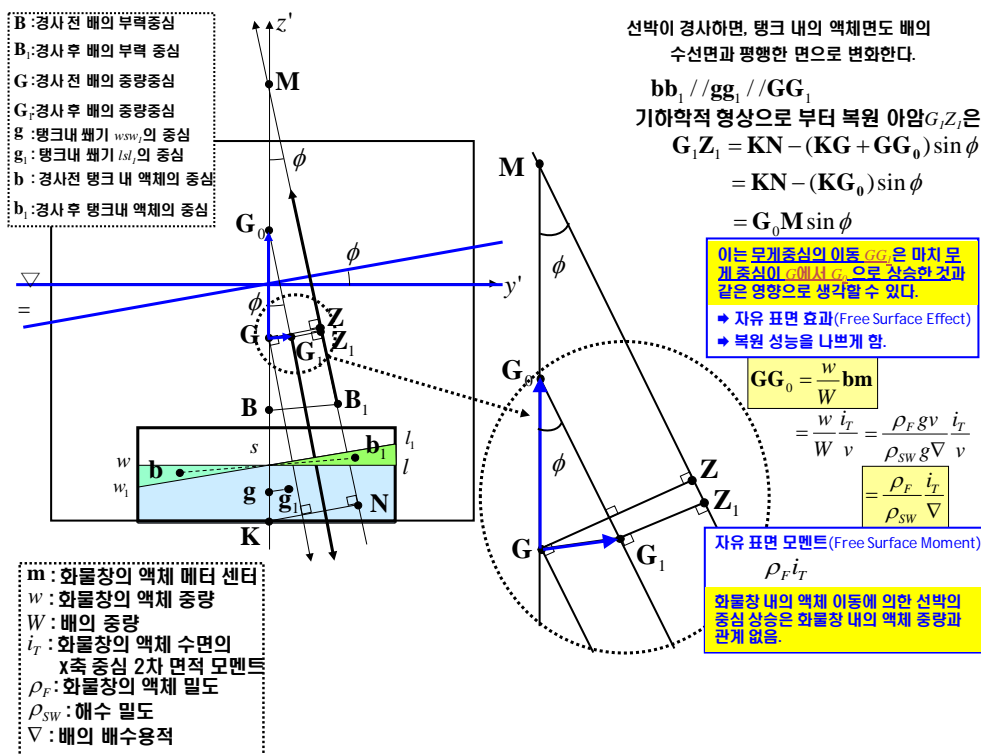
설계선 Tank Filling Table

RATIO (%)	20		40		60		80		100	
	Weight [ton]	VCG [m]	Weight [ton]	VCG [m]	Weight [ton]	VCG [m]	Weight [ton]	VCG [m]	Weight [ton]	VCG [m]
F.PTK	76.5	2.551	152.9	3.643	229.3	4.625	305.8	5.541	382.2	6.538
NO. 1 W.W.B.TK(P)	104.2	3.009	208.4	4.507	312.5	5.998	416.7	7.439	520.9	8.640
NO. 1 W.W.B.TK(S)	104.2	3.009	208.4	4.507	312.5	5.998	416.7	7.439	520.9	8.640
NO. 2 D.B.W.B.TK(P)	30.1	0.246	60.1	0.488	90.2	0.676	120.3	0.834	150.3	0.991
NO. 2 D.B.W.B.TK(S)	30.1	0.246	60.1	0.488	90.2	0.676	120.3	0.834	150.3	0.991
NO. 2 W.W.B.TK(P)	192.9	2.891	385.7	4.043	578.6	5.243	771.5	6.492	964.3	7.738
NO. 2 W.W.B.TK(S)	192.9	2.891	385.7	4.043	578.6	5.243	771.5	6.492	964.3	7.738
NO. 3 D.B.W.B.TK(P)	64.4	0.189	129.0	0.375	193.4	0.558	257.9	0.723	322.4	0.889



NO. 3 D.B.W.B.TK(S)	64.4	0.189	129.0	0.375	193.4	0.558	257.9	0.723	322.4	0.889
NO. 4 D.B.W.B.TK(P)	69.9	0.171	139.7	0.341	209.6	0.510	279.4	0.680	349.3	0.850
NO. 4 D.B.W.B.TK(S)	69.9	0.171	139.7	0.341	209.6	0.510	279.4	0.680	349.3	0.850
NO. 4 W.W.B.TK(P)	187.7	1.059	375.3	2.055	563.0	3.245	750.6	4.692	938.3	6.215
NO. 4 W.W.B.TK(S)	187.7	1.059	375.3	2.055	563.0	3.245	750.6	4.692	938.3	6.215
NO. 5 D.B.W.B.TK(P)	69.9	0.171	139.7	0.341	209.6	0.510	279.4	0.680	349.3	0.850
NO. 5 D.B.W.B.TK(S)	69.9	0.171	139.7	0.341	209.6	0.510	279.4	0.680	349.3	0.850
NO. 5 W.W.B.TK(P)	218.7	0.807	437.3	1.673	655.9	2.662	874.6	4.051	1093.2	5.649
NO. 5 W.W.B.TK(S)	218.7	0.807	437.3	1.673	655.9	2.662	874.6	4.051	1093.2	5.649
NO. 6 D.B.W.B.TK(P)	69.9	0.171	139.7	0.341	209.6	0.510	279.5	0.680	349.3	0.850
NO. 6 D.B.W.B.TK(S)	69.9	0.171	139.7	0.341	209.6	0.510	279.5	0.680	349.3	0.850
NO. 7 D.B.W.B.TK(P)	203.3	0.982	406.7	1.928	610.0	3.003	813.3	4.409	1016.7	5.962
NO. 7 D.B.W.B.TK(S)	203.3	0.982	406.7	1.928	610.0	3.003	813.3	4.409	1016.7	5.962
A.PTK	66.9	0.182	133.7	0.364	200.6	0.542	267.5	0.709	334.4	0.875

(단, Ballasting 할 때는 탱크의 Free surface effect(자유 표면에 의한 중심 상승 효과)를 고려하여  $G_0M$  값을 계산해야 함.)



문제6-4) 설계선의 GZ Curve를 계산하고, IMO Rule의 요구 조건 중 Heel angle 30° 까지의 조건을 만족하는지 확인하시오.

이때, 선박의 측벽이 수직 측벽이라 가정하였을 때의 대 경사각에서의 복원 압 GZ는 다음과 같다.

$$GZ = (G_0M + \frac{1}{2} \cdot BM \cdot \tan^2 \phi) \cdot \sin \phi$$

이 식은 Deck가 물에 잠기는 Heel angle까지만 사용할 수 있다. 30도 경사 까지는 Deck가 물에 잠기지 않는다고 가정한다.

**[표 6.1] 6. 복원성능 추정**

**[표 6.1-1]**

주어진 “설계선의 Weight와 VCG값” Table을 이용하여, Container를 싣기 전 VCG를 구한다.  
무게중심의 정의를 이용하여 구하면 다음과 같다.

	VCG	WEIGHT	V-MOM.
FRESH WATER	17.75	360	6,390
FUEL OIL	4.86	5,680	27,582
DIESEL OIL	13.99	320	4,476
LUBRICATING OIL	11.22	400	4,487
MISCELL	4.70	180	847
STORE & PROVISION	17.51	75	1,313
DEADWEIGHT CONSTANT	21.15	240	5,075
LIGHTWEIGHT	13.20	16,500	217,800
<b>TOTAL WEIGHT</b>	<b>11.28</b>	<b>23,755</b>	<b>267,970</b>

KG (Container적재전) = 11.28 m

설계선의 배치는 GA는 통해 알 수 있으며, 기준선에서 No.5 Hold 구획의 Container가 증가한 형태임을 알 수 있다.

No.5 Hold 구획의 Hold내 Container수량 및 무게중심과 Deck 상부 Container수량 및 무게중심은 주어진 “기준선 Trim & Stability (Homogeneous 10 Ton Scantling Departure Loading Condition (2,918 TEU))”를 통해 확인할 수 있다.

다음과 같은 계산을 통해 No.5 Hold 증가에 따른 Hold와 Deck의 무게와 무게중심의 변화를 계산할 수 있다.

No.5 In Hold 구획

- Hold내 증가된 Container 수량 :  $75 \times 2 = 150$
- Hold에 증가된 Container 무게 및 무게중심 :  $150 \times 10 = 1,500 \text{ ton}$ , V.C.G : 10.946m (from table)
- Hold 증가 전 무게 및 무게중심 : 15,650 ton, 11.6 m
- Hold 증가 후 전체 무게 :  $15,650 + 1,500 = 17,150 \text{ ton}$
- Hold 증가 후 전체 무게중심 :  $\frac{11.6 \times 15,650 + 10.946 \times 1,500}{15,650 + 1,500} = 11.543 \text{ (m)}$

No.5 On Deck 구획

- Hold내 증가된 Container 수량 :  $78 \times 2 = 156$
- Hold에 증가된 Container 무게 및 무게중심 :  $156 \times 10 = 1,560 \text{ ton}$ , V.C.G : 29.497m (from table)
- Hold 증가 전 무게 및 무게중심 : 13,530 ton, 27.251 m
- Hold 증가 후 전체 무게 :  $13,530 + 1,560 = 15,090 \text{ ton}$
- Hold 증가 후 전체 무게중심 :  $\frac{27.251 \times 13,530 + 29.497 \times 1,560}{13,530 + 1,560} = 27.483 \text{ (m)}$

	VCG	WEIGHT	V-MOM.
Container 적재 전	11.28	23,755	267,970
DEADWEIGHT (DECK)	27.48	15,090	414,717
DEADWEIGHT (HOLD)	11.54	17,150	197,958
<b>TOTAL WEIGHT</b>	<b>15.73</b>	<b>55,995</b>	<b>880,645</b>

컨테이너 적재후 KG = 15.73 m, Weight : 55,995 ton

**[풀이] 6-2)**

Container 적재후 Weight는 55,995 ton이며, 무게중심은 15.73m이다.  
선형 보간을 하여 KB, BM을 구하면 KB = 6.103m, BM = 6.103m이다.

DRAFT (m)	Displacement (ton)	VCB(m)	BM(m)
10.5	56016.9	6.103	8.553

$$GM = KB + BM - KG = 6.103 + 8.553 - 15.73 = -1.069m$$

Heavy fuel oil tank에 의해 Free surface effect가 발생한다.

$$i_T: 383.8 + 383.8 + 756.9 + 756.9 = 2,281.4$$

GM = -1.069m < 0.15m 이므로, 요구조건을 만족하지 못한다.

**[풀이] 6-3)**

위 문제6-2 계산결과,  $GM = -1.069m < 0.15m$  이므로, 요구조건을 만족하지 못한다.

따라서 ballast water를 실어서 GM을 0.15m보다 크게(KG를 작게) 해야 한다.

학생들이 적절하게 ballast water를 싣고, free surface effect도 고려하고, GM을 0.15m보다 약간 크게 되도록 함

예) 모든 D.B.W.B.T와 A.P.TK 그리고 F.P.TK를 채웠을 경우

	COMPARTMENT	V-MOM.	VCG	FILL RATIO	DR UNIT WE	WEIGHT	WEIGHT	V-MOM.
BALLAST WATER	F.P.TK	2,499	6.538	100	1.025	382	5,791	17,567
	NO. 1 W.W.B.TK(P)	-	8.640	100	1.025	0		
	NO. 1 W.W.B.TK(S)	-	8.640	100	1.025	0		
	NO. 2 D.B.W.B.TK(P)	149	0.991	100	1.025	150		
	NO. 2 D.B.W.B.TK(S)	149	0.991	100	1.025	150		
	NO. 2 W.W.B.TK(P)	-	7.738	100	1.025	0		
	NO. 2 W.W.B.TK(S)	-	7.738	100	1.025	0		
	NO. 3 D.B.W.B.TK(P)	287	0.889	100	1.025	322		
	NO. 3 D.B.W.B.TK(S)	287	0.889	100	1.025	322		
	NO. 4 D.B.W.B.TK(P)	297	0.850	100	1.025	349		
	NO. 4 D.B.W.B.TK(S)	297	0.850	100	1.025	349		
	NO. 4 W.W.B.TK(P)	-	6.215	100	1.025	0		
	NO. 4 W.W.B.TK(S)	-	6.215	100	1.025	0		
	NO. 5 D.B.W.B.TK(P)	297	0.850	100	1.025	349		
	NO. 5 D.B.W.B.TK(S)	297	0.850	100	1.025	349		
	NO. 5 W.W.B.TK(P)	-	5.649	100	1.025	0		
	NO. 5 W.W.B.TK(S)	-	5.649	100	1.025	0		
	NO. 6 D.B.W.B.TK(P)	297	0.850	100	1.025	349		
	NO. 6 D.B.W.B.TK(S)	297	0.850	100	1.025	349		
NO. 7 D.B.W.B.TK(P)	6,062	5.962	100	1.025	1,017			
NO. 7 D.B.W.B.TK(S)	6,062	5.962	100	1.025	1,017			
A.P.TK	293	0.875	100	1.025	334			
DEADWEIGHT (DECK)		414,717	27.483			15090		
DEADWEIGHT (HOLD)		197,958	11.543			17150		
Container 적재 전		267,970	11.281			23755		
TOTAL WEIGHT	0	898,212	14.537			61,786		

KG: 14.537m

Total weight: 61,768 ton

흘후 11.4m에서 배수량이 거의 일치함을 알 수 있다.

DRAFT (m)	Displacement (ton)	VCB(m)	BM(m)
11.4	61894.1	6.622	8.155

이때 GM을 계산하면 다음과 같다.

$$GM = KB + BM - KG = 6.662 + 8.155 - 14.537 = 0.238 \text{ m}$$

GoM = 0.238m > 0.15m 이므로, 요구조건을 만족한다.

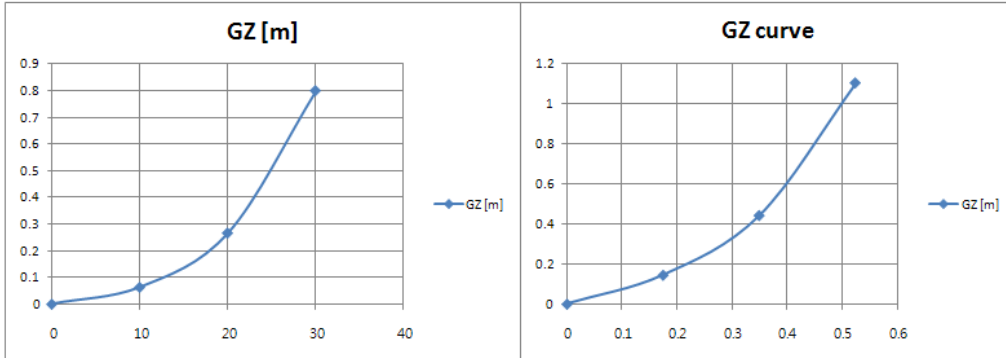
**[풀이] 6-4)**

위 공식을 이용해서 heel angle에 따른 GZ를 구하면 다음과 같다.

$\Phi$ [degree]	0	10	20	30
GZ [m]	0	0.063268	0.2660012	0.798369

요구조건 구하기 (C= 0.08597로 주어짐)

0도~ 30도 사이의 GZ curve의 면적이  $0.009/C = 0.009 / 0.08597 = 0.1047$  [rad - m]보다 커야 한다.



위 그림 중 좌측 그림은 heel angle이 0도에서 30도까지의 GZ curve이고 오른 쪽 그림은 heel angle을 radian 단위로 바꿔서 다시 그린 것이다. (이는 GZ curve 아래의 면적을 rad-m로 구해야 하기 때문이다.)

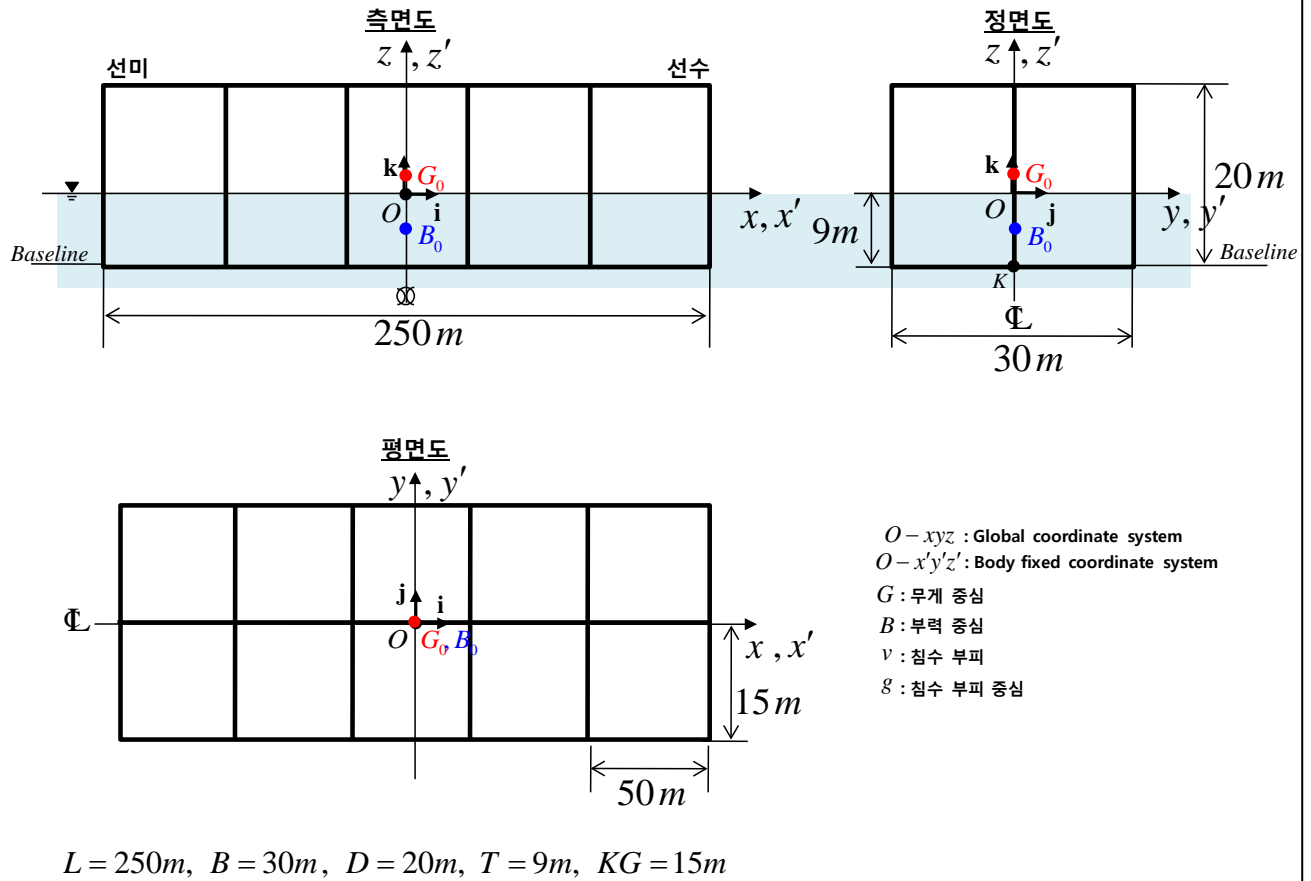
GZ curve 아래의 면적을 구하면 0.1163 [rad-m]이다.  $0.1163 > 0.1047$ 이므로 요구조건을 만족한다.

## 7. 침수시 선박의 자세 계산

설계선의 침수에 따른 자세변화를 예측하기 위해, 아래와 같이 10개의 구획을 갖는 길이 250m, 폭30m, 깊이20m인 일정한 직사각형 단면 Barge선(해수에서 흘수9m)으로 가정하였다.

이때 아래의 문제에 답하시오.

**k=0 Step (초기상태) : 선박이 평형상태로 물에 떠 있음**



문제7-1)  $k=0$  Step (침수 전 초기상태) 에서, 수선면 고정 좌표계(Global coordinate)를 기준으로 부력중심의 위치를 구하시오.

**[문제 7-1 풀이]**

수선면 고정 좌표계에 대한 부력 중심을 구하면 다음과 같다.

$$(x_B^{(0)}, y_B^{(0)}, z_B^{(0)}) = (0, 0, -4.5),$$

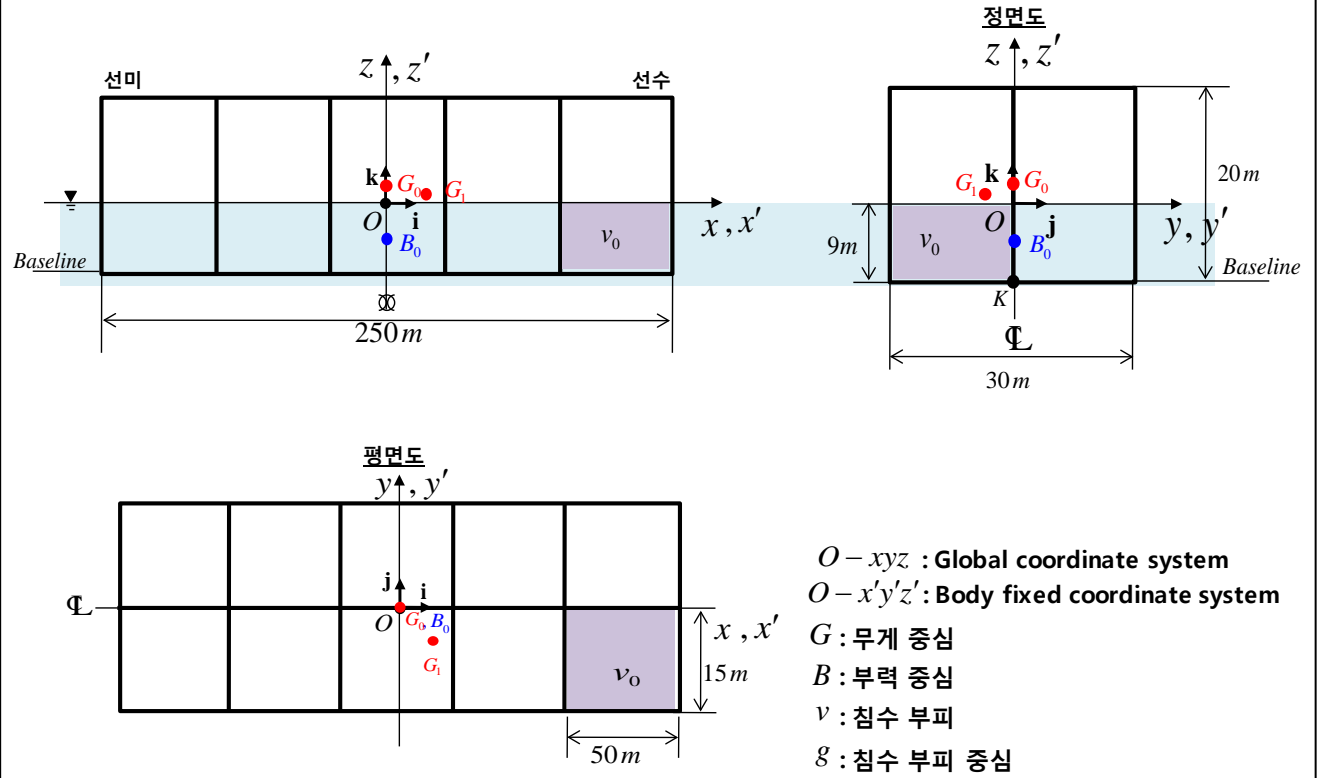
중량중심은 다음과 같이 주어져 있다.

$$(x_G^{(0)}, y_G^{(0)}, z_G^{(0)}) = (0, 0, 6)$$

이 때, 아래 그림과 같이 해상에 떠있는 직육면체 Barge의 -y 방향, +x 방향 구획이 침수 되었다.

**$k=1/2$  Step(선수, -y 방향 구획 침수) :**

**선박의 -y 방향, +x 방향 구획이 침수 되어 추가적인 힘과 모멘트가 발생 (아직 자세의 변화는 없음)**



문제7-2)  $k=1/2$  Step에서 위의 그림과 같이 선박의 -y방향, +x방향 구획이 침수 되어 추가적인 힘과 모멘트가 발생하고, 아직 자세의 변화는 없다고 할 때, 침수로 인한 부력중심 좌표와 중량중심 좌표를 구하시오. (중량 중심 좌표 계산시 Free surface moment에 의한 중심 상승을 고려하시오)

**[문제 7-2 풀이]**

자세의 변화는 없으므로, 부력중심의 좌표 변화는 없다.

$$(x_B^{(1/2)}, y_B^{(1/2)}, z_B^{(1/2)}) = (x_B^{(0)}, y_B^{(0)}, z_B^{(0)}) = (0, 0, -4.5),$$

$$\begin{aligned}
 x_G^{(1/2)} &= \frac{x_G^{(0)} \times F_w^{(0)} + x_w \times w}{F_w^{(0)} + w} \\
 &= \frac{0 \times 6.75 \times 10^5 + 100 \times 6.75 \times 10^4}{6.75 \times 10^5 + 6.75 \times 10^4} \\
 &= 9.091
 \end{aligned}$$



$$y_G^{(1/2)} = \frac{y_G^{(0)} \times F_W^{(0)} + y_w \times w}{F_W^{(0)} + w}$$

$$= \frac{0 \times 6.75 \times 10^5 + (-7.5) \times 6.75 \times 10^4}{6.75 \times 10^5 + 6.75 \times 10^4}$$

$$= -0.6818$$

$$z_G^{(1/2)} = \frac{z_G^{(0)} \times F_W^{(0)} + z_w \times w}{F_W^{(0)} + w}$$

$$= \frac{6 \times 6.75 \times 10^5 + (-4.5) \times 6.75 \times 10^4}{6.75 \times 10^5 + 6.75 \times 10^4}$$

$$= 5.045$$

자유수면에 의한 중심수정을 하면,

$$\frac{\rho_F}{\rho_{sw}} \frac{i_T}{\nabla}$$

$i_T$ : 탱크 내의 자유표면의 중심을 통과하는  
 세로축(x축)에 관한 자유 표면의 면적 2차 모멘트  
 $\rho_{sw}$ : 해수의 밀도,  $\rho_f$ : 액체의 밀도,  $\nabla^{(1/2)}$ : 배의 배수용적

$$i_T = \frac{b^3 \cdot l}{12} = \frac{15^3 \cdot 50}{12} = 14,062 \text{ m}^4$$

$$\frac{\rho_F}{\rho_{sw}} \cdot \frac{i_T}{\nabla} = \frac{1.025}{1.025} \cdot \frac{14,062}{6.75 \times 10^4} = 0.2083 \text{ m}$$

$$\therefore z_G^{(1/2)} = 5.045 + 0.2083 = 5.258$$

$$\underline{x_G^{(1/2)} = 9.091, \quad y_G^{(1/2)} = -0.6818, \quad z_G^{(1/2)} = 5.258}$$

문제 7-3)  $k=1/2$  Step에서, 횡방향 Total Moment와 종방향 Total Moment를 구하시오.

[문제 7-3 풀이]

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{TW}^{(1/2)} &= \mathbf{r}_G^{(1/2)} \times \mathbf{F}_W^{(1/2)} \\ &= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 9.091 & -0.6818 & 5.258 \\ 0 & 0 & -6.750 \times 10^5 \end{vmatrix} = 5.063 \times 10^5 \mathbf{i} \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

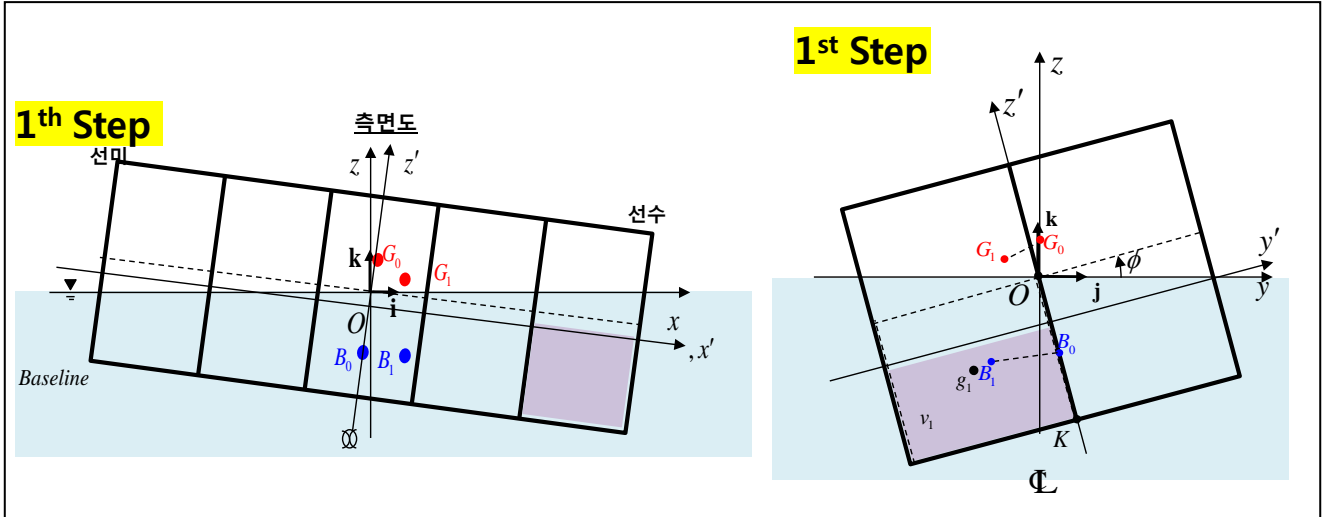
$$\mathbf{M}_{TB}^{(1/2)} = \mathbf{r}_B^{(1/2)} \times \mathbf{F}_B^{(1/2)} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & -4.5 \\ 0 & 0 & 6.75 \times 10^5 \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_T^{(1/2)} &= \mathbf{M}_{TB}^{(1/2)} + \mathbf{M}_{TW}^{(1/2)} \\ &= 5.063 \times 10^5 \mathbf{i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_L^{(1/2)} &= \mathbf{M}_{LB}^{(1/2)} + \mathbf{M}_{LW}^{(1/2)} \\ &= 0\mathbf{j} + (x_G^{(1/2)}\mathbf{i}) \times (\mathbf{F}_W^{(0)} + \mathbf{w}_{1/2}) \\ &= 0\mathbf{j} + (9.091\mathbf{i}) \times (-6.750 \times 10^5 \mathbf{k} - 6.750 \times 10^4 \mathbf{k}) \\ &= (-6.750 \times 10^6) \mathbf{i} \times \mathbf{k} \\ &= 6.750 \times 10^6 \mathbf{j} \end{aligned}$$

문제 7-4)  $k=1$  Step에서 추가적인 힘과 모멘트에 의해 자세변화를 일으키게 될 때, Pressure Integration Technique의 Immersion, Trim, Heel이 연성된 미소자세와 미소 힘/모멘트 관계식을 이용하여, 선박의 자세 변화(Immersion, Trim, Heel)를 계산하시오.

$$\begin{pmatrix} \Delta F^{(k)} \\ \Delta M_T^{(k)} \\ \Delta M_L^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho g A_{WP}(d^{(k)}) & -\rho g T_{WP}(d^{(k)}) & \rho g L_{WP}(d^{(k)}) \\ -\rho g T_{WP}(\phi^{(k)}) & -\rho g I_T(\phi^{(k)}) - \rho g V(\phi^{(k)}) z_B^{(k)} + m g \cdot z_G^{(k)} & \rho g I_P(\phi^{(k)}) \\ \rho g L_{WP}(\theta^{(k)}) & \rho g I_P(\theta^{(k)}) & -\rho g I_L(\theta^{(k)}) - \rho g V(\theta^{(k)}) z_B^{(k)} + m g \cdot z_G^{(k)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta d^{(k)} \\ \Delta \phi^{(k)} \\ \Delta \theta^{(k)} \end{pmatrix}$$



**[문제 7-4 풀이]**

선박의 자세를 계산하기 위하여, 먼저 Matrix의 각 성분을 현재 선박의 자세에 대하여 계산한다.

$$A_{WP}^{(1/2)} = LB = 250 \times 30 = 7,500$$

$$L_{WP}^{(1/2)} = 0 \quad \because \text{LCF에 } y\text{-축이 존재}$$

$$T_{WP}^{(1/2)} = 0 \quad \because \text{Centerline에 } x\text{-축이 존재}$$

$$I_L^{(1/2)} = \frac{L^3 B}{12} = \frac{250^3 \times 30}{12} = 3.906 \times 10^7$$

$$I_T^{(1/2)} = \frac{LB^3}{12} = \frac{250 \times 30^3}{12} = 5.625 \times 10^5$$

$$I_P^{(1/2)} = 0 \quad \because x\text{-축 or } y\text{-축 대칭}$$

즉 Matrix의 대각성분만 남게 된다.

$$\begin{pmatrix} 3.6 \times 10^4 \\ 3.6 \times 10^5 \\ -1.44 \times 10^6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.0 \times 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & -1.733 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & -2.973 \times 10^7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta d^{(\frac{1}{2})} \\ \Delta \phi^{(\frac{1}{2})} \\ \Delta \theta^{(\frac{1}{2})} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta d^{(\frac{1}{2})} \\ \Delta \phi^{(\frac{1}{2})} \\ \Delta \theta^{(\frac{1}{2})} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.0 \times 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & -1.733 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & -2.973 \times 10^7 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 3.6 \times 10^4 \\ 3.6 \times 10^5 \\ -1.44 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -0.9 \\ -0.20773 \\ 0.048436 \end{pmatrix}$$

## 8. Hydrodynamics

Direct Calculation을 통한 vertical acceleration 및 VWBM는 다음의 과정을 통해 구해 진다.

---

<설명 시작>

### a) 선박의 운동방정식 풀이

유체력 계수(Added mass, Damping coefficient), Wave Exciting force, Wave amplitude,  $A_{wp}$ (수선면적),  $T_{wp}$ (수선면적의 횡방향 1차 모멘트),  $L_{wp}$ (수선면적의 종방향 1차 모멘트)이 주어지면, 선박의 운동방정식을 구성하고, 이로부터 운동 변위, 속도, 가속도를 구할 수 있다.

예) heave motion의 운동방정식

파도에 의한 외력이 harmonic force 라고 한다면, 시간이 충분히 흘러, steady state에서 선박도 harmonic motion을 한다고 가정할 때, 다음과 같이 Heave 운동 방정식을 구성할 수 있다.

$$(m + A_{33}(\omega)) \cdot \ddot{\xi}_3 + B_{33}(\omega) \cdot \dot{\xi}_3 + C_{33} \cdot \xi_3 = F_{ext,3}(\omega) \cdot e^{i\omega t}$$

Vertical acceleration은 Heave 운동뿐만 아니라, Pitch운동에 의해서도 나타난다. 이는 서로의 운동이 연성되어 있기 때문이다.

### b) 선박의 RAO (Response Amplitude Operator) 작성

여러 개의 wave frequency에 대해 Added mass, Damping coefficient를 구하고, Wave amplitude를 1로 가정하였을 때의 Wave Exciting force를 구한다. 다음 위에서 구성한 선박의 운동방정식으로부터 wave frequency 별 운동 변위, 속도, 가속도를 구할 수 있다. 이를 선박의 RAO (Response Amplitude Operator)라 한다. (단, 각 축은 무차원화 하여 표현함)

### c) 선박이 운항하는 해역에서의 Wave Spectrum 작성

선박이 운항하는 해역에서의 Irregular Wave를 관측하여, 이를 Fourier Series로 분리하면, wave frequency에 따라 서로 다른 Amplitude를 갖는 sine, cosine곡선들의 합으로 나타낼 수 있다. 이 때, wave frequency별 Energy density(Amplitude의 제곱에 비례)값을 표시한 것을 Wave Spectrum이라 한다. Wave Spectrum으로는 ISSC(International Ship and Offshore Structure Congress)에서 제안한 ‘변형된 Pierson Moskowitz 스펙트럼’이나 ITTC(International Towing Tank Conference)에서 추천한 ‘JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼’이 사용된다.

### d) 선박의 Motion Spectrum 작성

선박이 운항하는 해역의 wave spectrum로부터 frequency 별 wave amplitude 곡선 (wave

amplitude :  $\eta_A = 2\sqrt{S(\omega) \cdot \Delta\omega}$  )을 구하고, 이를 선박의 RAO와 곱하면, 운항해역의 frequency 별 wave amplitude를 갖는 wave exciting force에 대한 선박의 운동변위를 구할 수 있다. 이를 Motion Spectrum 이라 한다.

**e) 선박의 Acceleration Spectrum 작성**

선박의 운동 변위가  $Ae^{i\omega t}$  일 때, 가속도는 변위를 시간에 대해 두 번 미분하여 구한다. 즉, 운동 변위의 amplitude, A에  $-\omega^2$ 을 곱하여 Acceleration spectrum을 구할 수 있다.

**f) 선박의 Acceleration에 대한 Rayleigh Distribution 구하기**

Acceleration Spectrum을 적분하여 면적,  $m_0$  를 구하고 이로부터 분산을 구하여 Rayleigh Distribution을 얻는다. Rayleigh Distribution은 물리량(가속도, x축)에 대한 그 가속도가 발생할 확률(y축)을 나타낸다.

**g) Rayleigh Distribution으로부터 초과확률(Probability of Exceedence)분포 구하기**

Rayleigh Distribution에서 어느 가속도 이상이 될 확률을 나타낸 것을 초과확률(Probability of Exceedence)라고 한다. 즉, Rayleigh Distribution에서 임의의 x에 대해 x보다 큰 영역의 면적을 의미한다. 초과확률 분포에서는 물리량(가속도, x축)에 대한 그 가속도 이상이 발생할 확률(y축)을 나타낸다.

**h) DNV Rule에 따라, 초과 확률이  $10^{-8}$ 일 때의 가속도를 구조 설계에 사용하는 Vertical 방향의 가속도 성분,  $a_v$ 로 간주한다. (Pt.3 Ch.1 Sec.4 A)**

<설명 끝>

---

**<문제>**

Rule Scantling시 사용하는 acceleration값은 실제로는 위의 과정( a~h )을 통해 구해지나, 본 문제에서는 위의 과정을 통해 구해진 acceleration값이 아래의 wave frequency에서의 added mass, damping coefficient, wave exciting force에 의한 acceleration값과 같다고 가정하자.

wave frequency:  $\omega = 1.00$  [rad/s]

$$F_{ext,3} = 1.06 \cdot 10^8 + 1.97 \cdot 10^8 i \text{ [kN]}$$

$$F_{ext,5} = 1.05 \cdot 10^9 - 4.92 \cdot 10^8 i \text{ [kN}\cdot\text{m]}$$

y축을 중심으로한 질량관성 모멘트 :  $I_{yy} = (0.25 \cdot L)^2 \cdot \rho \cdot \nabla$  (추정식)

(displacement는 설계선의 Scantling draft에서의 값을 사용 할 것)

이때, 각 단면에 대한 added mass 및 damping coefficient 분포가 다음과 같다.

Station No.	$b_n$ [m] 수선면폭	$T_n$ [m] 수선면 홀수	$a_{33}$ [Mg/m] station의 added mass	$b_{33}$ [Mg/s·m] station의 damping coeff.
0	0	12.5	0	0
5	32.26	12.5	289	135
10	32.26	12.5	289	135
15	30.37	12.5	223	109
20	0	12.5	0	0

위 값을 길이방향으로 아래와 같이 적분하면 전체 선박에 대한 Added mass, Damping coefficient를 구할 수 있다.

$$A_{33} = \int_L a_{33} dx = 6.1 \times 10^4$$

$$A_{35} = -\int_L x a_{33} dx = 4.4 \times 10^5$$

$$A_{55} = \int_L x^2 a_{33} dx = 2.4 \times 10^8$$

$$B_{33} = \int_L b_{33} dx = 2.9 \times 10^4$$

$$B_{35} = -\int_L x b_{33} dx = 1.7 \times 10^5$$

$$B_{55} = \int_L x^2 b_{33} dx = 1.1 \times 10^8$$

$$C_{33} = \rho g \int_L b_n dx = 7.4 \times 10^4$$

$$C_{35} = -\rho g \int_L x b_n dx = 1.3 \times 10^5$$

$$C_{55} = \rho g \int_L x^2 b_n dx = 2.9 \times 10^8$$

위 계수들로부터 해상에서 운동중인 선박의 Heave-pitch 연성 운동방정식을 유도하고, Heave & Pitch에 의한 vertical acceleration을 구하시오.

## [8. Hydrodynamics 해답]

1)

Heave-Pitch 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & A_{55} + I_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_3 \\ \ddot{\xi}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_3 \\ \dot{\xi}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3 \\ \xi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 e^{i\omega t} \\ F_5 e^{i\omega t} \end{bmatrix}$$

$\xi_3(t) = \xi_3^A e^{i\omega t}$ ,  $\xi_5(t) = \xi_5^A e^{i\omega t}$  로 가정 (Harmonic motion)

$$\dot{\xi}_3(t) = i\omega \xi_3^A e^{i\omega t}, \quad \dot{\xi}_5(t) = i\omega \xi_5^A e^{i\omega t}$$

$$\ddot{\xi}_3(t) = -\omega^2 \xi_3^A e^{i\omega t}, \quad \ddot{\xi}_5(t) = -\omega^2 \xi_5^A e^{i\omega t}$$

이를 Heave-Pitch 운동방정식에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & A_{55} + I_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega^2 \xi_3^A e^{i\omega t} \\ -\omega^2 \xi_5^A e^{i\omega t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\omega \xi_3^A e^{i\omega t} \\ i\omega \xi_5^A e^{i\omega t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A e^{i\omega t} \\ \xi_5^A e^{i\omega t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 e^{i\omega t} \\ F_5 e^{i\omega t} \end{bmatrix} \quad \text{양변을 } e^{i\omega t}$$

로 나누고, 정리하면 다음과 같다.

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & A_{55} + I_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2(m + A_{33}) & -\omega^2 A_{35} \\ -\omega^2 A_{53} & -\omega^2(A_{55} + I_{yy}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i\omega B_{33} & i\omega B_{35} \\ i\omega B_{53} & i\omega B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2(m + A_{33}) + i\omega B_{33} + C_{33} & -\omega^2 A_{35} + i\omega B_{35} + C_{35} \\ -\omega^2 A_{53} + i\omega B_{53} + C_{53} & -\omega^2(A_{55} + I_{yy}) + i\omega B_{55} + C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P & Q \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3^A \\ \xi_5^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \end{bmatrix}$$

$$P = -\omega^2(m + A_{33}) + i\omega B_{33} + C_{33}$$

$$Q = -\omega^2 A_{35} + i\omega B_{35} + C_{35}$$

$$R = -\omega^2 A_{53} + i\omega B_{53} + C_{53}$$

$$S = -\omega^2(A_{55} + I_{yy}) + i\omega B_{55} + C_{55}$$



$$\zeta_3^A = \frac{F_5 Q - F_3 S}{QR - PS}$$

$$\zeta_5^A = \frac{F_3 R - F_5 P}{QR - PS}$$

$$\dot{\zeta}_3^A = i\omega \frac{F_5 Q - F_3 S}{QR - PS}$$

$$\dot{\zeta}_5^A = i\omega \frac{F_3 R - F_5 P}{QR - PS}$$

$$\ddot{\zeta}_3^A = -\omega^2 \frac{F_5 Q - F_3 S}{QR - PS} = 3.8911 - 0.9285i$$

$$\ddot{\zeta}_5^A = -\omega^2 \frac{F_3 R - F_5 P}{QR - PS} = -8.0669 + 633.12i$$

$$|\ddot{\zeta}_3^A| = 4 \text{ m/s}^2$$

$$|\ddot{\zeta}_5^A| = 633 \text{ m}^2/\text{s}^2$$