

고속선박의 선수부 상자형 구조물에 작용하는 Green Water 설계 충격하중의 산출

김용직[†]·김인철·신상묵
부경대학교 조선해양시스템공학과

Computation of the Green Water Design Impact Loads Acting on the Box-Type Structure of a High-Speed Ship's Bow

Yong Jig Kim[†]·In Chul Kim·Sangmook Shin

Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In rough seas, green water shipped on board may impose quite large impact loads on the structures on deck and sometimes result in structure damages. One of the essential tasks of the naval fluid engineers is to provide the design impact loads which are needed for proper design of the structure strength against the green water impacts. Computation of the design impact load due to green water needs first a process to find the sea condition and the ship cruising condition which cause maximum green water impacts on structures as well as other succeeding processes to compute ship motion responses, green water flows and impact loads. Also, as a bold and practical process, it is needed that the irregular real seas are to be substituted by design regular waves which are equivalent in view points of green water impacts. In this paper, the whole processes to compute the design green water loads acting on bow structure are set up creatively. And the green water design impact loads acting on the box-type structure of a high-speed ship's bow are computed and discussed.

Keywords : Green water(그린워터), Design impact load(설계 충격하중), Computation process(산출과정), Box-type structure(상자형 구조물), Bow deck(선수갑판)

1. 서론

선박이 황천 중에서 운항할 때 선수부는 수면과의 과도한 상하상대운동으로 큰 충격하중을 받게 된다. 대표적인 선수 충격현상으로 슬래밍 충격현상과 green water 충격현상을 들 수 있다. 선수부가 파면에 돌입할 때 일차적으로 발생하는 슬래밍 과정에서는 white water라 불리는 흰색 물보라가 발생하며, 선수 상대 운동이 매우 커서 선수갑판이 파면 아래로 내려갈 정도가 되면 흰색 물보라 하부에 해수 덩어리(green water라 불림)가 갑판 둘레에서 순간적으로 솟아올라 일시에 수벽을 형성한다. 이 해수 덩어리 즉 green water는 곧 높은 속도로 선수갑판에 무너져 들어오며, 이 과정에서 갑판 위 구조물과 선수갑판 자체에 큰 충격을 가한다. 이러한 현상을 green water 충격현상이라 부른다.

Green water와 관련한 다양한 연구들 (Mizoguchi, 1988; Buchner, 1995, 1996; Kim & Kim, 1996; Pekken, et al., 1999;

Kim & Shin, 2005; Pham & Varyani, 2005; Jeong, et al., 2010; Lee, et al., 2012; Ha, et al., 2012; Jeong, et al., 2013)이 국내외에서 수행되어 왔으며, 이러한 연구들은 주로 가 정된 규칙파 또는 특정 해수유입조건에 의해 유발되는 green water 유동과 하중의 해석에 대한 연구들이다. Green water와 관련하여 유체공학자들이 감당해야 하는 핵심과제 중의 하나는 green water 충격에 대비하여 구조강도 설계를 할 때 필요한 설계하중을 제공하는 것이며, 이 과제는 주어진 파나 조건에 대한 green water 계산법만으로는 해결할 수 없다. 설계용 green water 하중을 산출하기 위해서는 선박이 어떠한 해상상태 및 운항상태에서 최대 green water 충격을 받게 되는지부터 검토해야 하고, 또 대개의 연구들이 구축하고자 하는 규칙파 중 green water 계산법을 실제해상인 불규칙파 중에서의 green water 문제에 어떻게 적용할 것인지도 기술적 측면에서 풀어야 할 중요과제가 된다. 본 연구에서는 구조강도 설계에 필요한 green water 설계 충격하중의 산출과정을 설계규칙파 산정과정을 포함하여 독자적으

로 정립하고, 고속선박의 선수갑판 위 상자형 구조물을 대상으로 그 계산예를 보인다.

2. 대상 선박 및 구조물

대상 선박은 수선장이 54.4 m이고 배수톤수가 500 ton인 선박으로 설계속도는 40 knots이며, 고속으로 운항할 때 선체가 들리는 반환주상태로 운항된다. 이 선박의 주요제원은 Table 1과 같고, Fig. 1에 선수갑판과 갑판위 상자형구조물(외곽선만 표시)의 평면도와 측면도를 보인다. 이 그림의 선수갑판 뒤쪽 끝에 선교(bridge)가 있으며, 좌표 X_{dk} 는 선수갑판 후단(선교 앞면)으로부터 선수방향으로의 거리이고 좌표 Y_{dk} 는 횡방향 위치를 나타낸다.

Green water 현상이 발생하는 황천에서 이 선박은 저항증가와 추력감소로 인해 자연적으로 운항속도가 감소될 뿐 아니라 green water와 슬래밍에 의한 충격을 줄이기 위해 불가피하게 운항속도를 낮추게 되어 설계속도보다는 상당히 낮은 속도로 운항된다. 이러한 황천 중의 낮은 운항속도에서는 반환주상태가 아닌 비환주상태(부상하지 않은 상태)에서의 운항이 예상된다.

Table 1 Principal particulars of the ship

Principal Particulars	Values
Length (Water Line) (L)	54.4 m
Breadth (B)	8.7 m
Depth (D)	4.7 m
Draft (Td)	2.3 m
Displacement (Δ)	500 ton
Design Speed (Vd)	40 Knots

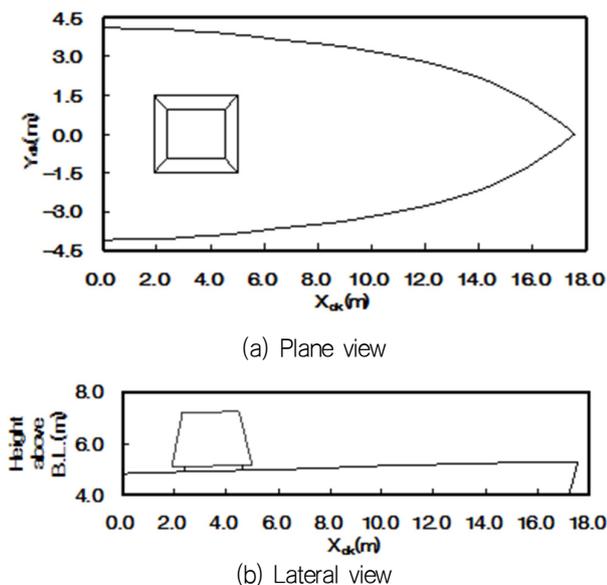


Fig. 1 Projection views of bow deck and box-type bow structure

3. 해상조건별 운항상태 선정

구조물 강도 설계의 기준이 되는 설계 충격하중은 구조물에 위험이 되는 최대 충격하중을 의미한다. 따라서 green water에 의한 설계 충격하중을 산출하기 위해서는 green water 충격이 크게 발생할 수 있는 여러 경우들을 선박의 운항 요구조건 등을 바탕으로 폭 넓게 선정하고 각 경우들에 대한 상세한 검토가 요구된다.

이 선박은 유의파고(significant wave height, $H_{1/3}$) 4.0 m 이하 해상에서 생존가능, 유의파고 3.0 m 이하 해상에서 운용가능, 유의파고 1.25 m 이하 해상에서 정상운항이 요구된다고 가정하기로 한다. 유의파고 3.0 m 이상의 해상에서 이 선박은 생존가능성만 보유하면 되므로 정지상태 또는 매우 작은 선속으로 운항되고, 낮은 선속에서는 구조물에 부딪히는 green water 유속도 작아지므로 green water 충격도 크지 않을 것으로 예상된다. 유의파고 1.25 m 이하 해상에서는 고속 운항이 가능하나 green water 충격이 발생할 정도의 본격적인 갑판침수의 가능성은 없으며, 특히 설계속도 40 knots에 가까운 고속에서는 반환주상태로 운항되므로 선수가 위로 들리게 되어 선저 슬래밍의 가능성은 높지만 green water 충격의 가능성은 희박하다고 할 수 있다.

이 선박에서 큰 green water 충격하중이 발생할 가능성이 있는 운항상태를 추정하기 위해 여러 예비계산들이 수행되었고, green water 충격 관점에서 검토할 필요가 있는 해상상태로 유의파고 1.75~3.0 m 범위에서 6가지 해상조건들을 선정하였다. 편의상, $H_{1/3} = 3.0$ m인 해상을 Case 1, $H_{1/3} = 2.75$ m인 해상을 Case 2, $H_{1/3} = 2.5$ m인 해상을 Case 3, $H_{1/3} = 2.25$ m인 해상을 Case 4, $H_{1/3} = 2.0$ m인 해상을 Case 5, $H_{1/3} = 1.75$ m인 해상을 Case 6으로 지칭하기로 한다. 각 경우의 해상조건에서 이 선박이 운항할 수 있는 최대 선속 또는 green water 충격이 클 것으로 예상되는 선속을 결정하기 위해 선박운동해석에 가장 널리 사용되고 있는 선형 스트립법 (Tasai & Tagaki, 1969; Mitsui Shipbuilding & Engineering Co., 1975)으로 갑판침수 및 슬래밍 발생에 대한 단파정 불규칙파 중 단기예측 계산 (Beck, et al., 1989)을 수행하였고, 그 결과를 Table 2에 보인다(T_1 은 파의 평균주기, ITTC 파 스펙트럼과 코사인 제곱 분산함수를 사용함). 대상 선박과 유사한 선박들의 경우 통상 갑판침수 및 슬래밍에 의한 운항한계를 시간당 발생횟수 20~30회 정도 (Beck, et al., 1989)로 정하므로 본 연구에서는 시간당 25회 발생을 운항한계로 가정하였다. Table 2의 Case 1~4는 이 운항한계에 의해 최대 선속이 결정되었으며, Case 1에서 7.78 knots, Case 2에서 9.78 knots, Case 3에서 13.11 knots, Case 4에서 18.35 knots가 green water 계산용 선속으로 정해졌다. Case 5와 Case 6에서는 슬래밍과 갑판침수에 의한 운항한계는 없으며 고속으로 운항할 수 있으나, green water 충격이 클 것으로 예상되는 Case

5의 20 knots, Case 6의 22 knots를 green water 계산용 선속으로 정하였다. 파의 입사방향은 green water 충격이 가장 큰 선수파($\mu = 180^\circ$)로 정하였다.

4. 해상조건별 설계파 선정

앞에서 green water 충격하중 산출을 위해 선정한 6가지 해상 상태들은 수많은 규칙파들이 복합적으로 중첩되어 있는 불규칙한 해상상태이다. 반면에 green water 충격하중을 정량적으로 직접 산출하기 위한 수치계산 연구들은 대부분 불규칙파가 아닌 규칙파 중에서의 green water 유동 및 하중 계산법 연구에 국한되어 있다. 따라서 실제의 불규칙 해상을 green water 충격 관점에서 등가인 또는 등가에 가까운 규칙파로 대체한 설계계산용 극한파 즉, green water 계산용 설계파(design wave)를 이용한 계산법을 모색할 필요가 있다.

Green water 충격에는 선속 이외에 선수갑판 초과 수면높이가 지배적인 요소라고 할 수 있다. 본 연구에서는 green water 설계파 선정시 선수에서의 상하방향 상대운동의 설계극한값(design extreme value, 초과 확률이 1%인 응답값)을 기준으로 설계파를 선정하였으며, 6가지 해상상태에 대한 설계파 계산 결과를 Table 3에 보인다. 상대운동 해석이론으로 역시 선형 스트립법을 사용하였으며, 설계극한값 계산시 해상상태 (또는 운항상태) 지속시간은 대상 선박이 연안에서 운영됨을 감안하여 2시간으로 가정하였다(통상 대양항해 상선의 경우 3시간을 기준으로 함).

Table 3의 Case 4를 예로 들어 설계파 계산과정을 설명하기로 한다. Case 4는 유의파고가 2.25 m이고 파 평균주기가 5.909 sec인 해상이며, 선속 18.35 knots로 선수와 상태에서 2시간 운항할 때 선수수선(FP)에서 계산된 상하방향 상대운동의 설계극한값은 6.054 m로 산출되었다. 선수 규칙파 중에서 동일한 선속으로 운항할 때의 상하방향 상대운동의 RAO(Response Amplitude Operator, 응답진폭과 파진폭의 비)는 Fig. 2와 같으며, 무차원 원주파수 $\omega \sqrt{L/g} = 2.30$ (파장으로 환산하면 파장이 선체길이의 1.188배인 파)에서 RAO 최대값이 3.58임을 알 수 있다. 이 경우 불규칙파 해상에서의 상대운동 설계극한값과 동일한 크기의 상대운동을 유발하는 규칙파인 설계파의 파고(H_w)는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$H_w = 2 \times \frac{\text{Design Extreme Amplitude of VRD}}{\text{Maximum RAO of VRD}} \quad (1)$$

where VRD: Vertical Relative Displacement

즉, Case 4의 경우 상대운동 설계극한값 6.054 m의 2배를 RAO 최대값 3.58로 나누어 설계파의 파고(H_w)는 3.382 m로 계산된다. 파장(λ)은 가장 큰 상대운동을 유발하는 파장 즉, RAO 최대값을 주는 파장인 64.61 m(선체길이의 1.188배)로 정해진다.

Table 2 Voyage conditions for green water calculation

(a) Case 1($H_{1/3}=3.0m, T_1=6.758sec$)							
No. of Slamming(N_{sl}) and No. of Deck Wetness(N_{dw}) per Hour						Voyage Condition for Green Water Cal.	
Ship Speed (knots)	5	6	7	8	9	10	Ship Speed : $V_S=7.78$ knots Heading Angle : $\mu=180^\circ$
N_{sl}	1.8	3.4	5.5	8.5	12.2	16.9	
N_{dw}	14.5	18.1	21.9	25.9	30.1	34.6	
(b) Case 2($H_{1/3}=2.75m, T_1=6.494sec$)							
No. of Slamming(N_{sl}) and No. of Deck Wetness(N_{dw}) per Hour						Voyage Condition for Green Water Cal.	
Ship Speed (knots)	7	8	9	10	11	12	Ship Speed : $V_S=9.78$ knots Heading Angle : $\mu=180^\circ$
N_{sl}	3.9	6.1	9.0	12.6	16.6	21.1	
N_{dw}	15.9	19.0	22.2	25.8	29.2	32.5	
(c) Case 3($H_{1/3}=2.5m, T_1=6.207sec$)							
No. of Slamming(N_{sl}) and No. of Deck Wetness(N_{dw}) per Hour						Voyage Condition for Green Water Cal.	
Ship Speed (knots)	11	12	13	14	15	16	Ship Speed : $V_S=13.11$ knots Heading Angle : $\mu=180^\circ$
N_{sl}	11.7	15.0	18.6	22.5	26.3	30.1	
N_{dw}	20.0	22.4	24.7	27.1	29.1	30.9	
(d) Case 4($H_{1/3}=2.25m, T_1=5.909sec$)							
No. of Slamming(N_{sl}) and No. of Deck Wetness(N_{dw}) per Hour						Voyage Condition for Green Water Cal.	
Ship Speed (knots)	16	17	18	19	20	21	Ship Speed : $V_S=18.35$ knots Heading Angle : $\mu=180^\circ$
N_{sl}	19.4	22.0	24.3	26.4	28.3	30.1	
N_{dw}	18.3	19.2	20.0	20.5	20.9	21.2	
(e) Case 5($H_{1/3}=2.0m, T_1=5.535sec$)							
No. of Slamming(N_{sl}) and No. of Deck Wetness(N_{dw}) per Hour						Voyage Condition for Green Water Cal.	
Ship Speed (knots)	18	19	20	21	22	23	Ship Speed : $V_S=20$ knots Heading Angle : $\mu=180^\circ$
N_{sl}	13.4	14.5	15.5	16.3	16.9	17.4	
N_{dw}	9.08	9.21	9.24	9.18	9.04	8.84	
(f) Case 6($H_{1/3}=1.75m, T_1=5.154sec$)							
No. of Slamming(N_{sl}) and No. of Deck Wetness(N_{dw}) per Hour						Voyage Condition for Green Water Cal.	
Ship Speed (knots)	20	21	22	23	24	25	Ship Speed : $V_S=22$ knots Heading Angle : $\mu=180^\circ$
N_{sl}	5.48	5.67	5.77	5.81	5.78	5.69	
N_{dw}	2.19	2.09	1.98	1.86	1.72	1.57	

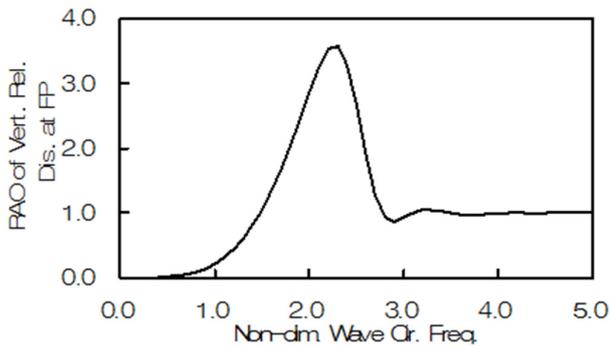


Fig. 2 RAO of vertical relative displacement at FP (Case 4, $V_s=18.35$ knots, $\mu=180^\circ$, Non-dim. wave cir. freq.: $\omega \sqrt{L/g}$)

Table 3 Design wave calculations for 6 cases (VRD* : Vertical Relative Displacement)

(a) Case 1		
Wave Condition	Significant Wave Height($H_{1/3}$) 3.0 m Average Wave Period(T_1) 6.758 sec	
Voyage Condition	Ship Speed(V_s) 7.78 knots Heading Angle(μ) 180°	
VRD* at FP in Short-Crest Irregular Sea	RMS	1.29 m
	Average Period	4.33 sec
	Design Extreme Amplitude (Duration Time : 2 hr)	6.325 m
VRD* at FP in Regular Waves	Maximum RAO	3.04
	Wave Length(λ) / Ship Length(L) for Max. RAO	1.005
Design Wave Height(H_w)		4.161 m (6.325m \times 2/3.04)
Design Wave Length(λ)		54.69 m (1.005L)
(b) Case 2		
Wave Condition	Significant Wave Height($H_{1/3}$) 2.75 m Average Wave Period(T_1) 6.494 sec	
Voyage Condition	Ship Speed(V_s) 9.78 knots Heading Angle(μ) 180°	
VRD* at FP in Short-Crest Irregular Sea	RMS	1.28 m
	Average Period	4.05 sec
	Design Extreme Amplitude (Duration Time : 2 hr)	6.294 m
VRD* at FP in Regular Waves	Maximum RAO	3.19
	Wave Length(λ) / Ship Length(L) for Max. RAO	1.091
Design Wave Height(H_w)		3.946 m (6.294m \times 2/3.19)
Design Wave Length(λ)		59.34 m (1.091L)

(c) Case 3		
Wave Condition	Significant Wave Height($H_{1/3}$) 2.5 m Average Wave Period(T_1) 6.207 sec	
Voyage Condition	Ship Speed(V_s) 13.11 knots Heading Angle(μ) 180°	
VRD* at FP in Short-Crest Irregular Sea	RMS	1.27 m
	Average Period	3.69 sec
	Design Extreme Amplitude (Duration Time : 2 hr)	6.269 m
VRD* at FP in Regular Waves	Maximum RAO	3.4
	Wave Length(λ) / Ship Length(L) for Max. RAO	1.091
Design Wave Height(H_w)		3.687 m (6.269m \times 2/3.4)
Design Wave Length(λ)		59.34 m (1.091L)

(d) Case 4		
Wave Condition	Significant Wave Height($H_{1/3}$) 2.25 m Average Wave Period(T_1) 5.909 sec	
Voyage Condition	Ship Speed(V_s) 18.35 knots Heading Angle(μ) 180°	
VRD* at FP in Short-Crest Irregular Sea	RMS	1.22 m
	Average Period	3.24 sec
	Design Extreme Amplitude (Duration Time : 2 hr)	6.054 m
VRD* at FP in Regular Waves	Maximum RAO	3.58
	Wave Length(λ) / Ship Length(L) for Max. RAO	1.188
Design Wave Height(H_w)		3.382 m (6.054m \times 2/3.58)
Design Wave Length(λ)		64.61 m (1.188L)

(e) Case 5		
Wave Condition	Significant Wave Height($H_{1/3}$) 2.0 m Average Wave Period(T_1) 5.535 sec	
Voyage Condition	Ship Speed(V_s) 20 knots Heading Angle(μ) 180°	
VRD* at FP in Short-Crest Irregular Sea	RMS	1.11 m
	Average Period	3.04 sec
	Design Extreme Amplitude (Duration Time : 2 hr)	5.522 m
VRD* at FP in Regular Waves	Maximum RAO	3.6
	Wave Length(λ) / Ship Length(L) for Max. RAO	1.298
Design Wave Height(H_w)		3.068 m (5.522m \times 2/3.6)
Design Wave Length(λ)		70.62 m (1.298L)

Table 3 (Continued)

(f) Case 6		
Wave Condition	Significant Wave Height($H_{1/3}$) 1.75 m Average Wave Period(T_1) 5.154 sec	
Voyage Condition	Ship Speed(V_S) 22 knots Heading Angle(μ) 180°	
VRD* at FP in Short-Crest Irregular Sea	RMS	0.958 m
	Average Period	2.78 sec
VRD* at FP in Regular Waves	Design Extreme Amplitude (Duration Time : 2 hr)	4.783 m
	Maximum RAO	3.64
	Wave Length(λ) / Ship Length(L) for Max. RAO	1.298
Design Wave Height(H_w)		2.628 m (4.783 m × 2/3.64)
Design Wave Length(λ)		70.62 m (1.298L)

나머지 5가지 경우에 대한 설계파의 파고와 파장도 동일한 과정을 거쳐 계산되며, 6가지 각 경우에 대한 설계파고와 파장을 정리하면 각각 Case 1에서 4.161 m와 54.69 m이고, Case 2에서 3.946 m와 59.34 m, Case 3에서 3.687 m와 59.34 m, Case 4에서 3.382와 64.61 m, Case 5에서 3.068 m와 70.62 m, Case 6에서 2.628 m와 70.62 m이다. 이후 green water 해석을 위한 비선형 시뮬레이션들은 규칙파로 대체된 이 설계파들에 대해 계산된다.

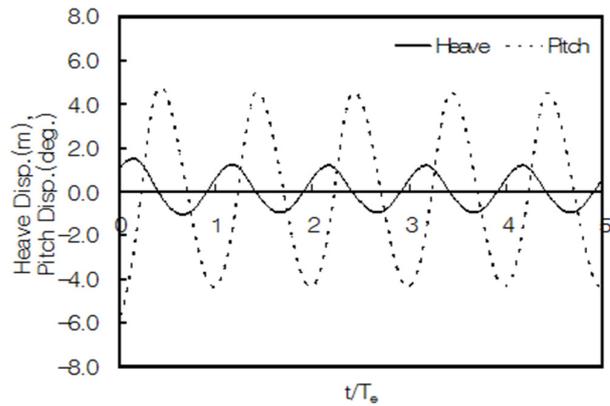
5. 운동 · 유동 · 하중의 시뮬레이션

5.1 선체 종운동 및 선수 상대운동 시뮬레이션

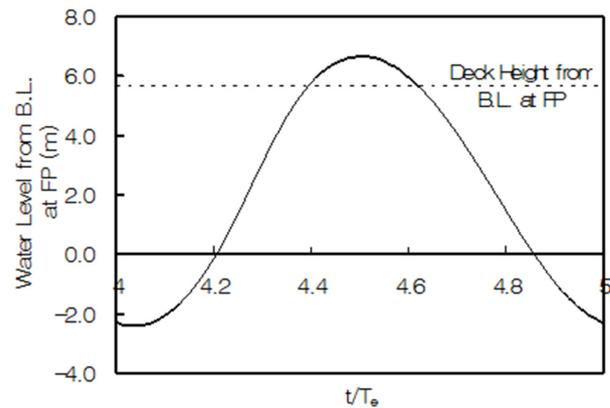
각 경우의 설계파 및 선속에 대한 선체 종운동(longitudinal motion) 및 선수 상대운동의 계산에는 과대운동에 따른 비선형 효과를 고려할 필요가 있으므로 비선형 스트립법(nonlinear strip method, Hwang, et al., 1985)을 이용하여 상하동요(heave) 및 종동요(pitch), 선수 상대운동을 시간영역에서 시뮬레이션 하였다. Fig. 3에 Case 4에 대한 상하동요와 종동요, 수면높이의 시간영역 계산예를 보인다(T_e 는 encounter period, 조우주기).

Fig. 3의 (a)에는 상하동요와 종동요의 시간에 따른 변화를 전체 계산시간인 5주기에 대해 보였고, (b)에는 FP에서의 수면높이 변화를 5번째 1주기 동안 보였고(수면높이 계산시 dynamic swell-up은 고려하지 않았음). 이들 비선형 계산에서는 계산시작 초기의 과도적 변화가 소멸되고 준 정상상태(주기적인 반복상태)가 되었을 때의 1주기 해를 비선형 해로 한다. 계산된 선수 상대운동에서 선수 갑판높이를 제함으로써 green water의 유동 시뮬레이션에 필요한 선수갑판 들레의 초과 수면높이가 계산시간 스

텨별로 산출된다. Green water의 유동 시뮬레이션을 위해서는 선수갑판 들레의 모든 지점에서 각 순간 초과 수면높이가 계산되어 유동 시뮬레이션을 위한 경계조건으로 사용된다. 참고로 FP에서의 갑판 초과 수면높이의 최대값은 Case 1에서 1.625 m, Case 2에서 1.663 m, Case 3에서 1.293 m, Case 4에서 1.006 m, Case 5에서 0.847 m, Case 6에서 0.282 m이었다.



(a) Heave and Pitch



(b) Water Level at FP

Fig. 3 Time history of heave, pitch and water level at FP for Case 4 ($H_w=3.382$ m, $V_S=18.35$ knots, $\mu=180^\circ$, $T_e=3.312$ sec)

5.2 Green water 유동 시뮬레이션

Green water 충격압력 산출에 필요한 유동정보(유속 및 수위)를 얻기 위해 선수갑판에서의 green water 유동 시뮬레이션이 수행되었고, 이를 위한 CFD 기법으로는 천수파방정식에 기초하여 자체 개발한 predictor-corrector 2중 상류차분법 (Kim & Kim, 1996; Kim & Shin, 2005)을 적용하였다. 비선형 과대운동 시뮬레이션에서 얻어진 갑판들레 초과 수면높이와 선속이 green water 유입시 경계조건으로 사용되었으며, 상하동요와 종동요에 의한 갑판의 움직임도 유동 시뮬레이션에 고려되었다. Green water 유동 시뮬레이션시 좌우현을 전통하거나 이에 준하는 구조물은 적절한 경계조건을 부여하여 그 영향을 고려할 필요가 있

나, 여유를 갖는 안전한 하중의 산출을 위해 갑판 위 장비 및 중소형 구조물들의 영향은 고려하지 않았다. 본 연구의 유동 시뮬레이션에서는 선교전면(선수갑판 후단)에서만 파가 완전반사 되는 것으로 가정하였다.

Case 4에 대한 green water 유동 계산결과와 한 예를 Fig. 4에 보인다(Z_{dk} 는 각 위치에서 선수갑판으로부터의 높이임). 각 그림에서의 변화하는 격자면은 green water의 수면 모양을 나타내며, 각 격자점에서의 작은 화살표는 유속벡터이다. 각 그림에는 하중산출 대상인 상자형 구조물의 외곽선 모양을 참고로 표시하였다. 그림 (a)와 (b)의 시간 사이에 green water 전면이 상자형 구조물에 충돌하고 이 과정에서 구조물에 최대 충격이 유발된다. 수위와 유속이 클수록 구조물에 가해지는 충격은 커지며, 해상조건 6가지 경우에 대한 상자형 구조물 전면 중앙($X_{dk}=5.0$ m, $Y_{dk}=0.0$ m)에서의 green water 최대수위와 전후방향 최대유속은 각각 Case 1에서 1.08 m와 10.6 m/sec, Case 2에서 1.17 m와 11.3 m/sec, Case 3에서 1.14 m와 11.4 m/sec, Case 4에서 1.01 m와 13.0 m/sec, Case 5에서 0.87 m와 13.5 m/sec, Case 6에서 0.5 m와 13.2 m/sec이다.

5.3 Green water 충격하중 시뮬레이션

Green water 시뮬레이션에서 얻어진 유동정보를 이용하고, 제트류의 운동량 보존법칙을 적용하여 상자형 구조물에 가해지는 충격압력을 산출하였다. 구조물 전면의 횡방향 각 지점에서 제트류 운동량 보존법칙으로부터 각 순간 수위높이까지의 평균 충격압력이 계산되며 (Buchner, 1996), 이 평균 충격압력에 의한 힘과 모멘트를 동일하게 유지하면서 상하방향 압력분포를 실제분포에 가깝도록 수정하는 상하방향 변화계수를 도입하여 이 평균압력을 수정함으로써 최종 충격압력은 다음과 같이 계산하였다.

$$P(Y_{dk}, Z_{dk}, t) = \rho u^2 (Y_{dk}, t) \cdot (1 - \cos\theta) \cdot [CP_1(Z_{dk}) + CP_2(Z_{dk})] \quad (2)$$

where,

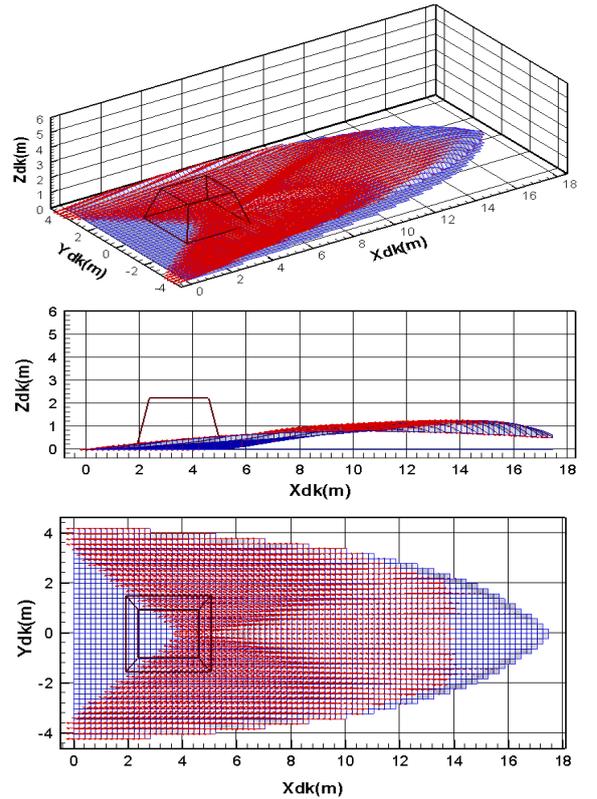
$$CP_1(Z_{dk}) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{Z_{dk}}{1.38 \cdot h}\right), \quad 0 \leq Z_{dk} \leq 1.38 \cdot h$$

$$= 0, \quad \text{otherwise}$$

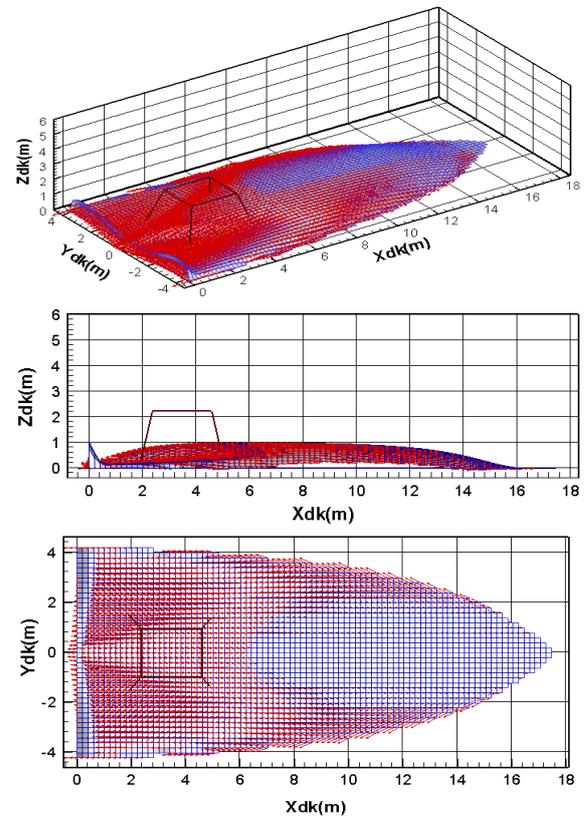
$$CP_2(Z_{dk}) = 0.195 \cdot \cos\left[\pi \cdot \left(\frac{Z_{dk}}{h} - 0.5\right)\right], \quad 0 \leq Z_{dk} \leq h$$

$$= 0, \quad \text{otherwise}$$

여기에서, ρ 는 유체밀도이고 u 는 전후방향 유속이며 h 는 각 순간의 green water 수위, θ 는 전후방향에 대한 구조물 표면의 경사각(예: 수직면 $\theta = 90^\circ$)이다. 구조해석에 필요한 상자형 구조물 표면에서의 충격압력 분포 계산결과 중 Case 3과 Case 4, Case 5의 예들을 Fig. 5와 Fig. 6, Fig. 7에 각각 보인다. 이들 계산에는 상자형 구조물 각 면들의 경사각 등 구조물의 세부치수가



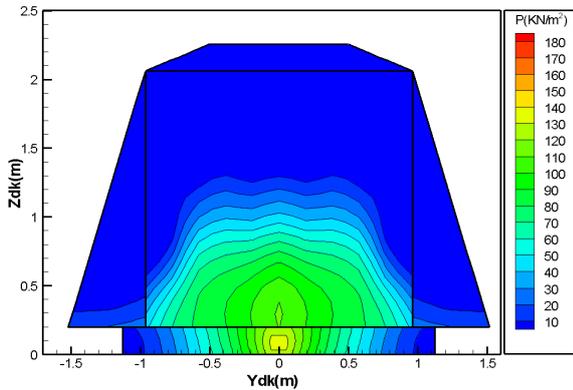
(a) $t/T_e = 4.60$



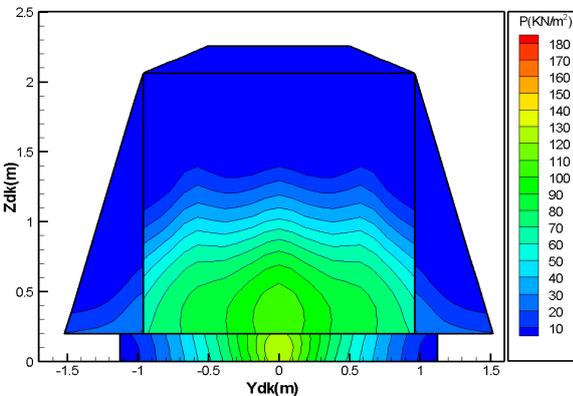
(b) $t/T_e = 4.70$

Fig. 4 Simulation of green water on bow deck for case 4 ($H_w=3.382$ m, $V_5=18.35$ knots, $\mu=180^\circ$, $T_e=3.312$ sec)

반영되었다. 각 그림에서 (a)과 (b)는 각각 최대압력 발생시간과 최대 충격력 발생에 가까운 시간에 대한 결과이다. 산출된 충격 압력은 시간영역에서 계산되어 시간이력까지를 알 수 있으므로 정적 구조해석은 물론 동적 구조해석에도 이용될 수 있다. 각 경우에서 압력이 최대치에 이르는 시간(rise time)은 대략 0.13~0.18sec 정도이었으므로 고유주기가 매우 짧은 부재들에는 거의 정적하중으로 작용하고, 고유주기가 대략 0.1sec 이상인 구조부재들이 있을 경우 어느 정도의 동적효과도 나타날 수 있다고 생각된다. 정적 구조해석을 통해 강도평가를 할 경우, 전체 구조물의 관점에서는 전체 충격력이 클 것으로 예상되는 Case 4와 Case 3, Case 5의 압력들을 적용할 필요가 있다고 판단되었으며, 국부구조의 관점에서는 유속이 커서 국부적으로 높은 최대압력이 발생하는 Case 4와 Case 5를 고려할 필요가 있다고 판단되었다. 나머지 Case 1과 Case 2, Case 6의 충격하중들은 Case 3과 Case 4, Case 5와 비교하여 상대적으로 작아서 구조강도 설계시 고려할 필요는 없다고 판단되었다. Case 1과 Case 2의 경우 전면 평면부 최대 압력은 각각 96 kN/m^2 와 108 kN/m^2 정도로 작았고, Case 6의 경우 전면 평면부 최대 압력은 143 kN/m^2 정도이지만 압력분포 높이가 약 0.7 m 이하여서 전체 충격하중은 크지 않다고 할 수 있다.

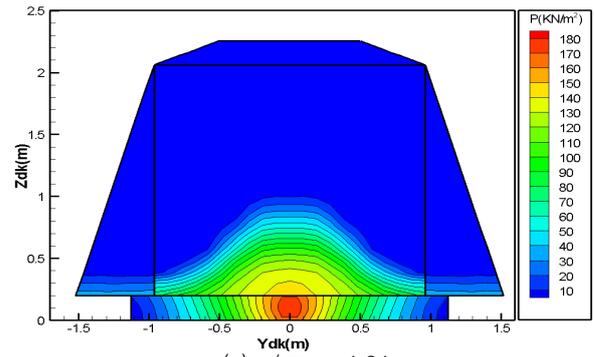


(a) $t/T_e = 4.62$

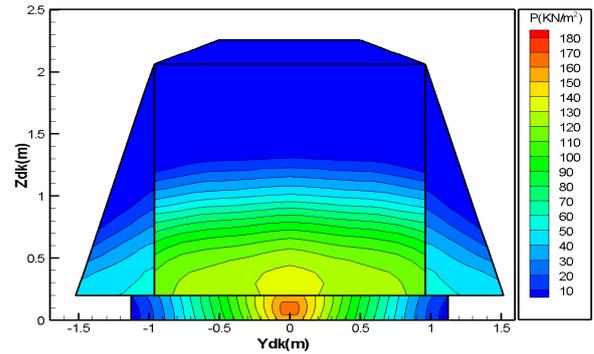


(b) $t/T_e = 4.63$

Fig. 5 Distribution of impact pressure for Case 3 ($H_w=3.687\text{ m}$, $V_S=13.11\text{ knots}$, $\mu=180^\circ$, $T_e=3.626\text{ sec}$)

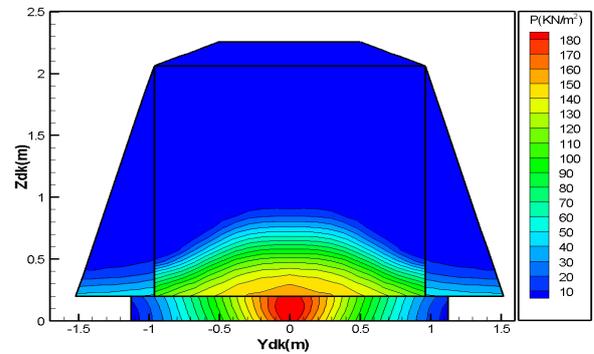


(a) $t/T_e = 4.64$

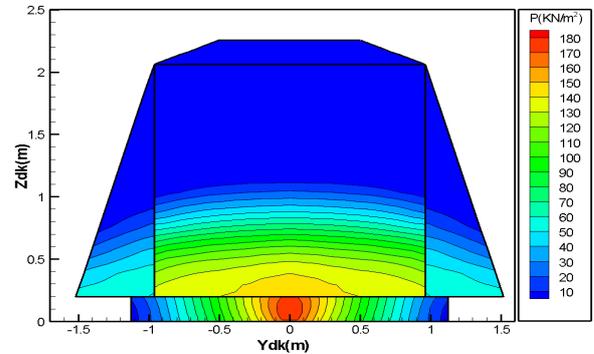


(b) $t/T_e = 4.68$

Fig. 6 Distribution of impact pressure for Case 4 ($H_w=3.382\text{ m}$, $V_S=18.35\text{ knots}$, $\mu=180^\circ$, $T_e=3.312\text{ sec}$)



(a) $t/T_e = 4.65$



(b) $t/T_e = 4.68$

Fig. 7 Distribution of impact pressure for Case 5 ($H_w=3.068\text{ m}$, $V_S=20.0\text{ knots}$, $\mu=180^\circ$, $T_e=3.399\text{ sec}$)

6. 결론

본 연구에서는 구조강도 설계에 필요한 green water 설계 충격하중의 산출과정을 독자적으로 정립하고, 고속선박의 선수갑판 위 상자형 구조물을 대상으로 그 계산예를 보였다. 주요 사항들은 다음과 같다.

설계 충격하중을 산출하기 위해서는 green water 충격이 크게 발생할 수 있는 후보 해상상태들을 적절히 선정하고 각 해상조건별 green water 계산용 선속을 정하여야 한다. 해상조건별 선속의 결정에 갑판침수나 슬래밍 발생횟수 등에 기초한 운항한계 조건을 이용할 수 있으며, 이들의 계산에는 선형 스트립법이 효율적으로 사용될 수 있다.

통상 연구자들이 구축하고 있는 규칙파 중에서의 green water 계산법을 선정된 불규칙 해상상태들에 적용하기 위해서는 불규칙파를 green water 충격 관점에서 등기라고 할 수 있는 설계규칙파로 대체할 필요가 있다. 본 연구에서는 불규칙파 중 선수 상하방향 상대운동의 설계극한값과 같은 크기의 상대운동을 유발하는 규칙파를 green water 계산용 설계파로 정하였으며, 이 설계파의 효율적인 산출에도 선형 스트립법을 사용하였다.

각 해상상태별 규칙파로 대체된 설계파에 대해 선체 중운동 및 green water 유동, green water 충격하중을 보유한 전산코드들을 이용하여 시간영역에서 시뮬레이션 할 수 있으며, 얻어진 결과들 중 충격압력이나 충격력이 최대가 되는 하중분포를 설계 충격하중으로 제공하면 된다. 본 연구에서는 이 계산들을 위해서 자체 개발한 시간영역 비선형 시뮬레이션 기법들을 이용하였으며, 산출된 충격하중은 시간영역에서 계산되어 시간이력까지 알 수 있으므로 정적 구조해석은 물론 동적 구조해석에도 이용될 수 있다.

정립된 green water 설계하중 산출법의 계산예로 500ton급 고속선박의 선수부 상자형 구조물에 작용하는 설계충격하중의 계산예를 보였다. 이 예에서 전체 구조물 관점에서는 전체 충격력이 클 것으로 예상되는 Case 3($H_{1/3}=2.5\text{m}$, $V_S=13.11\text{knots}$)와 Case 4($H_{1/3}=2.25\text{m}$, $V_S=18.35\text{knots}$), Case 5($H_{1/3}=2.0\text{m}$, $V_S=20.0\text{knots}$)의 압력들이 최대 응력을 발생시킬 가능성이 높다고 판단되었으며, 국부구조의 관점에서는 유속이 커서 높은 최대압력이 발생하는 Case 4와 Case 5에서의 국부적인 초기 압력 분포도 검토할 필요가 있다고 판단되었다.

향후 구조강도 설계에 실제 적용한 결과를 피드백 받아 개선할 점을 찾고 실용성을 높이는 연구가 필요하며, 전체 산출과정에서 다양한 요소기술들이 이용되는 만큼 각 요소기술들의 지속적인 검증과 개선도 당연히 필요하다고 생각한다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 게재되었습니다.

References

- Beck, R.F. Cummins, W.E. Dalzell, J.F. Mandel P. & Webster, W.C., 1989. *Principles of naval architecture - 2nd revision, Chapter 8 Motions in waves*. SNAME: Jersey City.
- Buchner, B., 1995. On the impact of green water loading on ship and offshore unit design. *PRADS '95*, Seoul, pp.430-443.
- Buchner, B., 1996. The influence of the bow shape of FPSOs on drift forces and green water. *OTC paper no. 8073, Offshore Technology Conference 96*, Houston, pp.389-400.
- Ha, Y.J. Lee, Y.G. & Jeong K.Y., 2012. An experimental study on the effects of bow flare angle about green water in regular waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1), pp. 79-86.
- Hwang, J.H. Kim, Y.J. & Kim, S.Y., 1985. On the nonlinear hydrodynamic forces due to large amplitude forced oscillations. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 22(3), pp.1-8.
- Jeong, K.L. Lee, Y.G. & Ha, Y.J. 2013. Experimental and numerical study on the effects of bow deck shape on the green water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(5), pp.273-281.
- Jeong, K.L. Lee, Y.G. & Kim, N.C., 2010. A fundamental study for the numerical simulation method of green water occurrence on bow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.188-195.
- Kim, Y.J. & Kim, I.C., 1996. Numerical simulation of Two-dimensional shipping water by using a simplified model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(2), pp.1-12.
- Kim, Y.J. & Shin, K.S., 2005. Numerical calculation and experiment of green water on the bow deck in regular waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(4), pp.350-356.
- Lee, C.S. Heo, H.S. Kim, Y.N. Kim, M.H. Kim, S.H. & Lee, J.M., 2012. Investigation of structural responses of breakwaters for green water based on fluid-structure interaction analysis. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4, pp.83-95.
- Mitsui Shipbuilding & Engineering Co., Ltd., 1975. A computer program for theoretical calculation of

sea-keeping quality of ships. *Japan Shipbuilding & Marine Engineering*, 9(3).

Mizoguchi, S., 1988. Analysis of shipping water with the experiments and the numerical calculations. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 163, pp.150-159.

Pekken, G. Veldman, A.E.P. & Buchner, B., 1999. Simulation of green water loading using the Navier-Stokes equations. *7th International Conferences on Numerical Ship Hydrodynamics*, Nantes.

Pham, X.P. & Varyani, K.S., 2005. Evaluation of green water loads on high-speed containership

using CFD. *Ocean Engineering*, 32, pp.571-585.

Tasai, F. & Tagaki, M., 1969. Theory and calculation of ship responses in regular wave. *Symposium on Seaworthiness of Ships*, SNAJ, Tokyo.

