

大韓造船學會論文集  
 第 36 卷 第 4 號 1999年 11月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 36, No. 4, November 1999

## 선수 구조부 구조해석 시스템 개발(1) - 파랑충격하중 특성의 추정 -

이상갑\*, 김만수\*\*

## Development of Structural Analysis System of Bow Flare Structure(1) - Prediction of Wave Impact Load Characteristics -

by

S.G. Lee\* and M.S. Kim\*\*

요 약

대체로 황천 운행 시 선체와 파도의 상대적인 운동에 의하여 발생하는 파랑충격하중을 고려하여 선수 구조부를 설계하고 있다. 선수 구조부의 파랑충격현상은 대단히 복잡한 현상을 나타내고 있고 정확하게 규명하기 어렵기 때문에 경험적인 설계에 의존하고 있다. 본 연구에서는 첫 단계로서 동적 비선형 범용 프로그램 LS/DYNA3D를 이용하여 선수 구조부의 손상 자료로부터 역으로 파랑충격하중을 추정하고, 파랑충격압력 곡선의 극치, 지속시간, 후부높이, 극치발생시간 등과 같은 특징에 대한 파라메트 연구를 수행하고자 한다. 본 연구를 통하여 파랑충격하중에 대한 구조물의 동적 거동은 주로 충격압력역적에 의하여 영향을 받고, 또한 구조물에 최대 변형이 발생하기 이전에 가하여진 충격압력역적이 거동에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

The bow flare structure of a ship is designed considering wave impact loads largely caused by relative motion of the ship and wave at rough sea. Empirical design is still used because impact phenomenon and structural behaviour due to wave impact load can not examined accurately. The objective of this study is, as the first step, to predict wave impact loads giving the structural damages to the bow flare structure from the damage data inversely, using dynamic nonlinear finite element code LS/DYNA3D, and to perform various parametric studies of wave impact pressure curve for its characteristics, such as peak height, duration time, tail height, rise time, etc.. The followings were obtained from this study: Dynamic structural responses against wave impact loads are largely affected by impact pressure impulse whose amount during duration time until peak deformation is very important.

접수일자 : 1999년 5월 14일, 재접수일자 : 1999년 8월 31일

\*정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

\*\*정회원, (주)대우중공업 선체설계기술팀

### 1. 서론

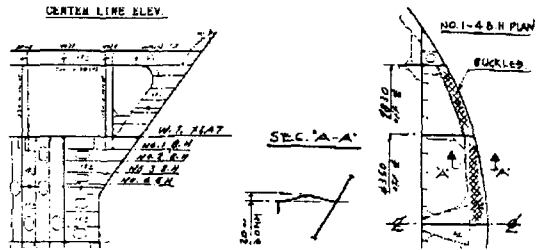
선수 구조부(bow flare structure)의 손상 사례가 다발 하여 건조선박에 대한 손상처리에 따른 비용이 많이 들고 있는 실정이다. 대체로 선수 구조부의 손상은 황천 운항시 파도가 선수 구조부에 충격을 가하면서 발생하지만, 파랑충격현상은 대단히 복잡한 현상을 나타내고 있기 때문에 정식화하여 그 해를 구하는 것은 매우 어렵다. 이것은 해양파의 특성, 선체의 운동, 선수 구조부의 형상 및 선수과의 형태 등 많은 요소가 복잡하게 간섭하여 발생함으로 아직 불명확한 점들이 많고, 파랑충격하중(wave impact loads)을 역학적으로 엄밀히 구하기 곤란하기 때문이다. 실제 해역에서 받는 파랑충격압력(wave impact pressure) 곡선은 극치(peak height)와 지속시간(duration time)에 있어 넓은 통계적 분포를 보이고 있고, 큰 극치에 비하여 지속시간이 매우 짧으므로 손상을 줄 수 있는 파랑충격압력의 결정이 문제가 된다. 파랑충격압력이 선수외판 전면에 동시에 발생하지 않고 비교적 국부적으로 발생함으로 그 영역의 크기를 판단할 수 있는 자료의 수집 또한 어렵다.

파랑충격하중으로 인한 선수 구조부의 손상에 대해서는 과거부터 세계적으로 많은 보고가 있어 왔고, 여러 부위에 대한 손상보고는 Figs. 1, 2 와 같이 주로 15~30mm 정도의 외판의 찌그러짐(dent)과 150~250mm 정도의 보강재(stiffener)의 대변형 및 좌굴과 같은 손상들이다. 설계단계에서 이러한 파랑충격하중에 대한 선수 구조부 강도의 추정을 위하여 각 부재치수의 결정(scantling)에 일본 서부조선학회의 구조분과 위원회에서 제안한 일반식[1,2], DnV 규정[3] 및 Lloyd 규정[4] 등을 적용하고 있지만, 실제 설계에 의하여 건조·인도된 선박은 여전히 손상을 받고 있다. 또한 이러한 파랑충격압력에 대한 구조검증 또한 용이하지 않다. 실제 선수 구조부의 설계에서는 앞의 규정들에 의하여 산출된 설계수두를 이용하여 구조부재의 치수를 결정하고 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS[5]와 NASTRAN[6]

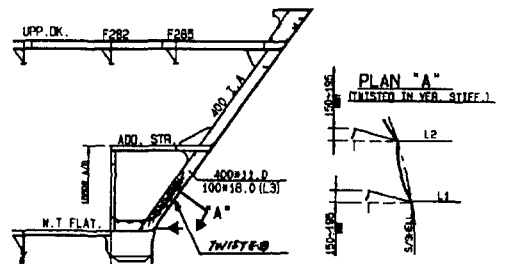
등을 사용하여 정적구조해석과 비선형 과도응답해석을 통하여 구조검증을 수행하고 있다. 이와 같은 국부적인 충격응답 구조해석에는 대변형, 재료의 비선형, 접촉문제 등을 효율적이고 정확하게 해석할 수 있는 동적 비선형 범용 유한요소 프로그램인 LS/DYNA3D[7]와 MSC/DYTRAN[8] 등을 이용하여 수행하는 것이 보다 적합하다고 사료된다.



Fig. 1 Bow flare structure damages



(a) Sketch of damage at plate of Breast Hook



(b) Sketch of damage at Vertical Bow Frames between W.T. FLAT and Additional Stringer

Fig. 2 Reports of bow flare structure damages

본 연구에서는 LS/DYNA3D를 이용하여 선수 구조부에 특징의 파랑충격하중을 가하여 기존의 손상 자료와 비교 검토함으로써 역으로 파랑충격하중에 대한 특징과 성격을 규명하고자 한다. 이를 위하여 파랑충격압력 곡선의 극치, 지속시간, 후부높이(tail height), 극치발생시간(rise time) 등의 기초적 특징에 대한 파라메트 연구(parametric study)를 수행하고, 선수 구조부로서 DWT 300k VLCC를 고려한다.

2. 시뮬레이션 모델

Fig. 3에서와 같이 선수 구조부의 폭 방향으로 는 중 중심단면(Center Line Elevation)에서 L4 Elevation까지, 상하방향으로는 No. 1 Stringer(27,400A/B)와 Bosun Store Deck(24,160A/B) 사이에 있는 Elevation 25,780 A/B에서 상갑판(32,000 A/B)까지의 영역에 대하여 파랑충격압력 곡선의 특성을 규명하고자 한다. 여기서 고려 중인 유조선의 만재흘수선은 22,000A/B이다.

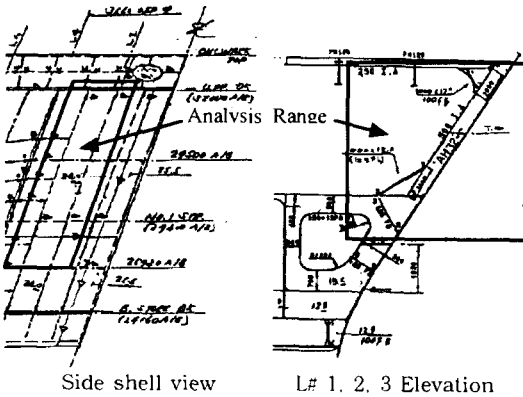


Fig. 3 Analysis range of DWT 300k VLCC

Fig. 4는 이 영역의 선수 구조부의 유한요소 모델을 보여 주고 있으며, 각 부재의 두께(mm)는 각 부재의 명칭 뒤의 괄호 안에 나타나 있다. 파랑충격하중은 외판에 수직으로 작용한다. 외판은 구조물의 전체좌표계 XYZ에 대하여 경사져 있으므로 국부 좌표계 xyz를 설정하여 폭 방향으

로 외판 좌우에, 그리고 웨브와 외판의 하단에 대칭조건을 설정한다. 상단부의 외판과 보강재 및 브래킷(bracket)은 상갑판에 연결되어 있으므로 고정하였고, 스트링거(stringer)의 좌우 및 뒷부분은 전체좌표계에 대하여 대칭조건을 설정한다. 재료의 물성치는 재료의 소성변형을 경화 및 항복응력의 변형을 속도 의존성을 고려하는 탄소성 재료로서 Table 1에 주어지고, 응력 및 변형률의 관계는 Fig. 5와 같다.

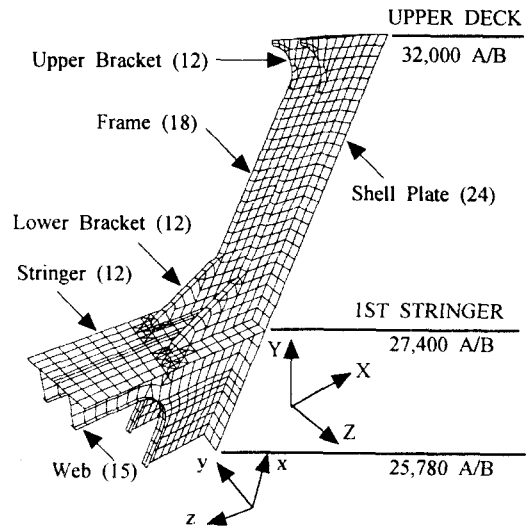


Fig. 4 Finite element mesh of model

Table 1 Material properties

Density ( $\rho$ )	7830 (kg/m <sup>3</sup> )
Modulus of elasticity (E)	2.06 GPa
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.3
Yield stress ( $\sigma_0$ )	235 MPa
Ultimate stress ( $\sigma_u$ )	445 MPa
Failure plastic strain ( $\epsilon_f$ )	0.25
Dynamic yield stress constants	$D = 40.4 \text{ s}^{-1}, p = 5$

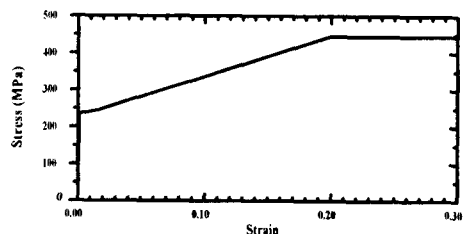


Fig. 5 Stress-strain relationship

전형적인 파랑에 의한 선수 구조부 파랑충격압력 곡선을 Fig. 6과 같이, 기준 파랑충격압력 곡선의 모델과 변수 값을 Fig. 7과 같이 설정한다. 이상의 구조해석 모델에 앞에서 언급한 재료 물성치 및 파랑충격압력 곡선을 사용하여 Fig. 8과 같은 변형된 형상을 얻었는데 일반적인 손상된 구조에서 볼 수 있는 특징을 잘 나타내고 있다.

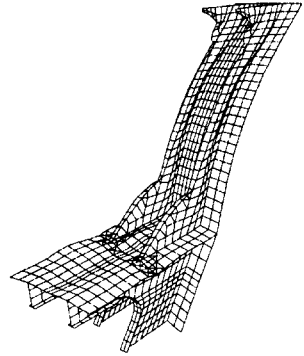


Fig. 8 Deformed structure model

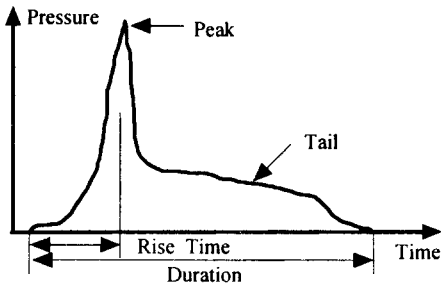


Fig. 6 Typical impact pressure curve[9]

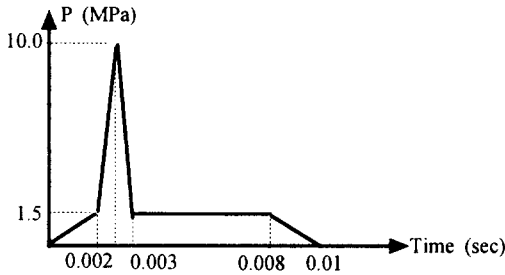


Fig. 7 Model of impact pressure curve

### 3. 충격압력곡선에 대한 파라메트 연구

파랑충격압력 곡선에 대하여 대표적인 6개 변수 값과 충격압력역적(impact pressure impulse, 시간에 대한 파랑충격압력 곡선하의 면적)이 구조물의 거동에 미치는 영향 등에 관한 일반적인 파라메트 연구를 수행한다.

#### 3.1 기초적인 파라메트 연구

Table 2와 같이 파랑충격압력 곡선의 대표적인 6개의 변수 값에 대한 파라메트 연구를 수행한다. 괄호 안의 수치는 기준 파랑충격압력 곡선에 대한 각 변수들의 변화에 대한 충격압력역적의 변화를 나타내고 있다.

Table 2 List of variables of parameters on impact pressure curve model

	Peak Height (MPa)	Peak Width (sec)	Tail Height (MPa)	Initial Tail Height (MPa)	Duration Time (sec)	Rise Time (sec)
Peak Height	8.0(-6.15%)	0.001	1.5	1.5	0.01	0.0025
	10.0( 0.00%)					
	12.0( 6.15%)					
Peak Width	10.0	0.0005(-13.08%)	1.5	1.5	0.01	0.0025
		0.0010( 0.00%)				
		0.0020( 0.00%)				
		0.0020( 26.15%)				
Tail Height	10.0	0.001	1.0(-24.62%)	1.5	0.01	0.0025
			1.5( 0.00%)			
			2.0( 24.62%)			
Initial Tail Height	10.0	0.001	1.5	0.5(-6.15%)	0.01	0.0025
				1.0(-3.08%)		
				1.5(0.00%)		
Duration Time	10.0	0.001	1.5	1.5	0.010( 0.00%)	0.0025
					0.015(46.15%)	
Rise Time	10.0	0.001	1.5	1.5	0.01	0.0015(0.00%)
						0.0025(0.00%)
						0.0035(0.00%)

Fig. 9는 6개 변수 값들에 대한 구조모델의 탄·소성변형, 좌굴 등의 구조손상변형으로 인한 흡수에너지(absorbed energy)의 거동을 보여 주고 있고, Figs. 10~15들은 각 변수 값들에 대한 각 부재들의 변형거동을 보여주고 있다. 여기서 (a) 및 (b)는 각각 스트링거 상부 및 하부 외판에서 최대변형이 발생하는 부위에서의 절대변형, (c) 및 (d)는 스트링거 상부 및 하부 외판에서 최대변형이 발생하는 부위 근처의 보강재 및 웹 부재의 절대변형, (e) 및 (f)는 각각 (a)에 대한 (c) 및 (b)에 대한 (d)의 상대변형을 보여주고 있다. 시뮬레이션 마지막 시간인 0.2초에서의 변형은 손상 잔류변형(residual deformation)을 의미한다.

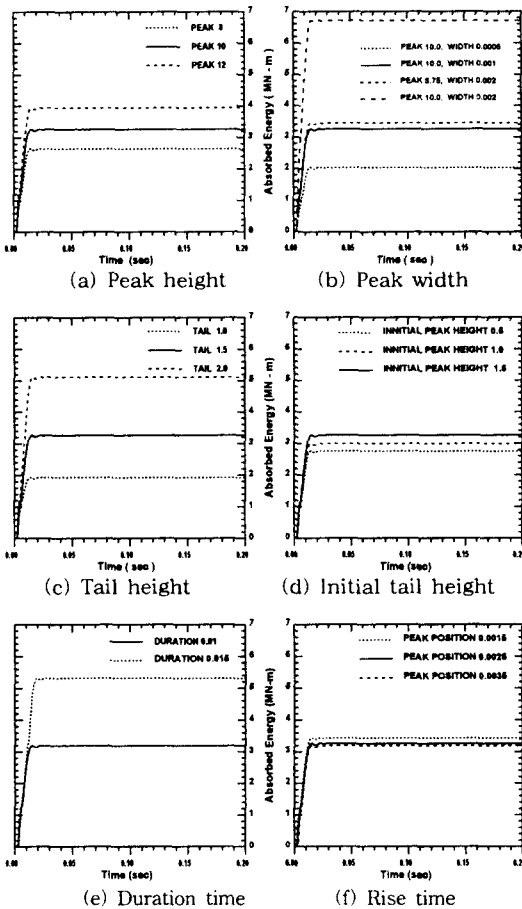


Fig. 9 Absorbed energy of parameters

극치, 극치 폭(peak width), 후부높이, 지속 시간 등이 중요한 변수들임을 알 수 있고, 다음과 같은 결과들을 요약할 수 있다.

- 극치 : 비교적 작은 거동 변화
- 극치 폭 : 비교적 큰 거동 변화, 같은 충격압력역적에서는 거동 변화 거의 없음
- 후부높이 : 극치 폭의 경우와 비교하여 충격압력역적의 증가에 비하여 훨씬 작은 거동 변화
- 초기 후부높이(initial tail height) : 매우 작은 거동 변화
- 지속시간 : 극치, 극치 폭 등의 경우와 비교하여 충격압력역적의 증가에 비하여 작은 거동 변화

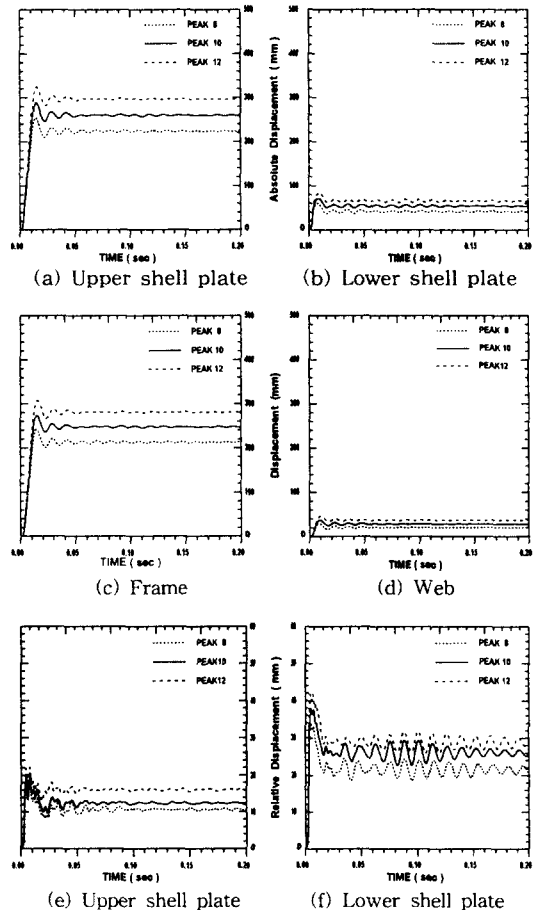


Fig. 10 Effect of peak height on deformation response of members

· 극치발생시간 : 별로 차이 없는 거동 변화

이를 미루어 충격압력역적은 중요한 요소이라는 것을 알 수 있고, 파랑충격압력 곡선 중 초기 충격압력역적 증가는 후반에 비하여 변형 거동에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Figs. 10~15 (e), (f)에서 알 수 있듯이 스트링거 상부 및 하부의 보강재 및 웨브에 대한 외판의 상대적인 영구변형은 각각 약 12mm 및 26mm 전후의 찌그러짐(Dent)이 발생함을 알 수 있다. 보강재의 대변형은 Figs. 10~15 (c)에서 알 수 있듯이 약 250mm 전후로 나타나 있고, 좌굴량은 본 연구에서 언급되지 않지만 대략 220mm 전후가 된다. 이러한 손상들은 실제손상

자료들과 비교하여 대체로 상한치에 해당된다. 본 연구는 파랑충격하중을 받는 선수 구조부의 구조 해석의 첫 단계로서 파랑충격하중의 특성에 대하여 관심의 초점을 두고 있으므로 파랑충격하중의 크기 및 면적은 다음에 다루기로 한다.

### 3.2 극치 및 지속시간의 영향

충격압력역적 중 극치 및 후부 부분은 각각 0.00524 및 0.012MPa-sec로서 항상 같은 크기를 유지하고 지속시간이 0.01초에서 0.10초까지 변화할 때, 파랑충격압력 곡선의 극치 및 지속시간 등이 변형거동에 미치는 영향을 고려하고자 한다.

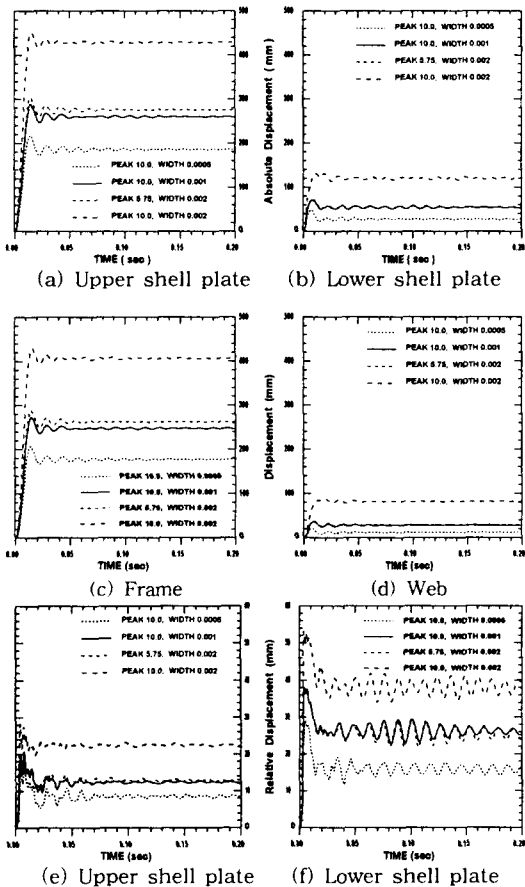


Fig. 11 Effect of peak width on deformation response of members

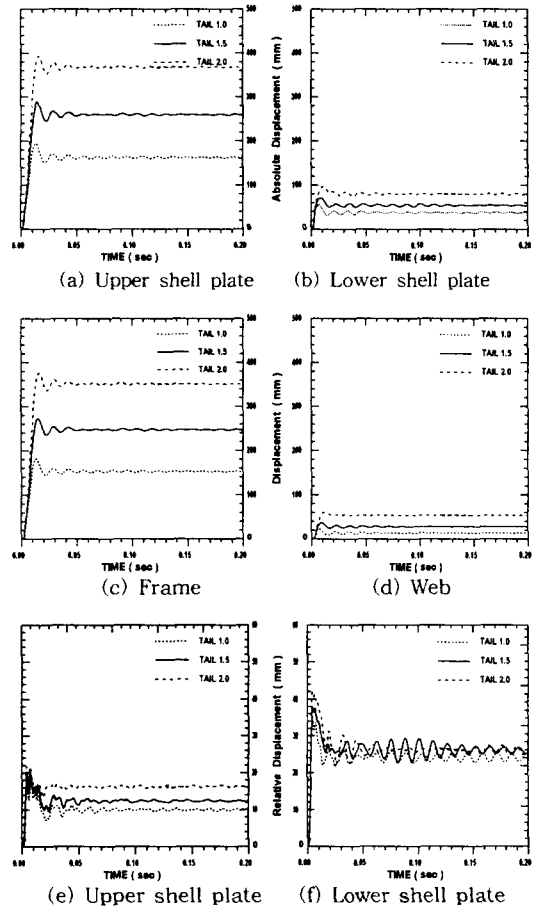


Fig. 12 Effect of tail height on deformation response of members

Fig. 16은 지속시간에 따른 각 부재의 최대변형 발생시간(occurrence time of peak deformation) 및 절대변형, 스트링거 상부 및 하부 외판에서의 최대변형이 발생하는 부위와 부근 보강재 및 웨브의 상대변형, 그리고 흡수에너지 등의 결과들의 경향을 보여주고 있다.

Fig. 16(a)에서 알 수 있듯이 상부 부재에서의 최대변형은 대체로 0.015~0.030초, 하부 부재에서는 0.008~0.027초 사이에서 발생하고 있다. 지속시간이 작은 경우 최대변형은 지속시간이 지난 다음에 발생하지만 지속시간이 증가함에 따라 최대변형은 점점 지속시간 이내에서 극치발생 시간 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 그러나

본 연구의 경우 0.10초의 가장 긴 지속시간에서도 최대변형은 극치발생시간(0.025초) 이후에 발생하고 있음을 알 수 있다. Figs. 16(b), (c) 및 (d)에서 알 수 있듯이 상부 부재의 절대변형과 흡수에너지는 지속시간 0.03초 이내에서는 급격히 감소하고 있고, 하부 부재의 절대변형 및 상·하부 외판의 상대변형은 전체 지속시간에서 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다

본 연구에서와 같이 같은 양의 충격압력역적이 구조물에 가하였지만 각 부재에 발생하는 변형과 흡수에너지의 거동이 같지 않다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향으로 보아 충격압력역적의 분포, 즉 최대변형 발생시간과 관련된 파랑충격압력 곡

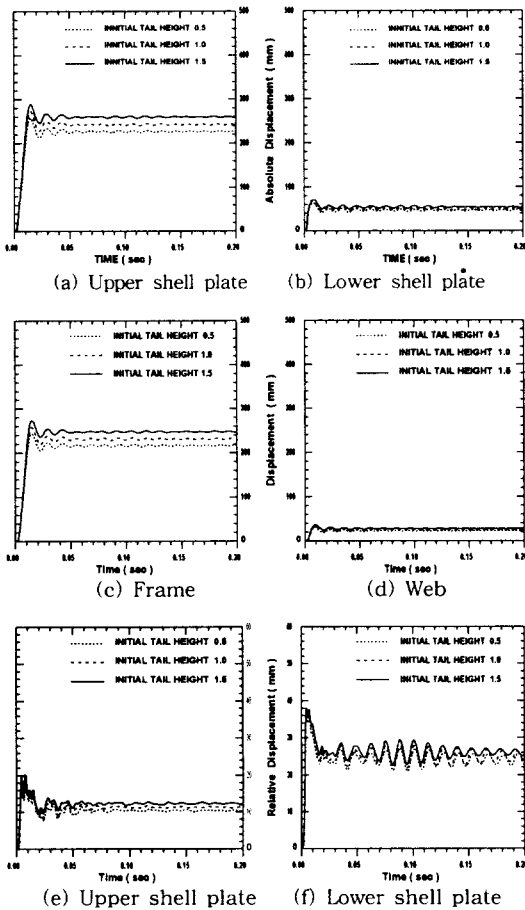


Fig. 13 Effect of initial tail height on deformation response of members

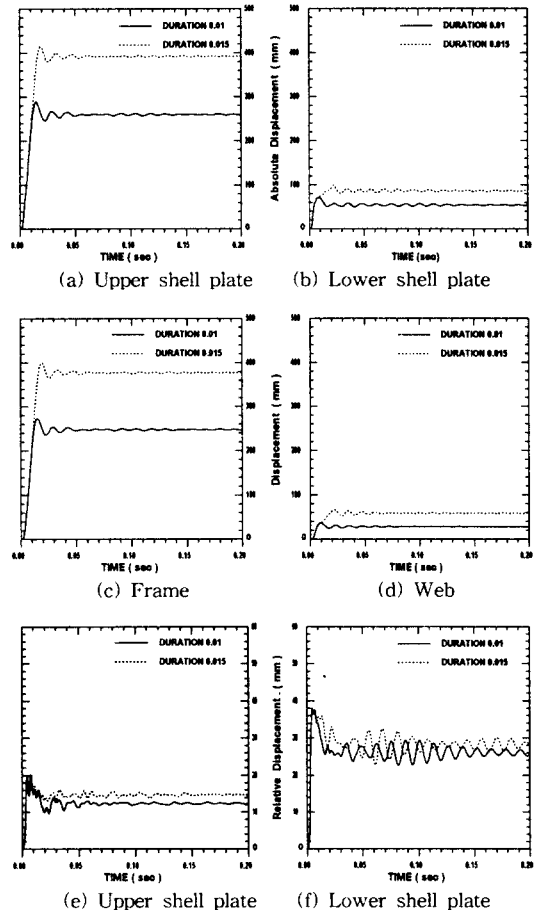
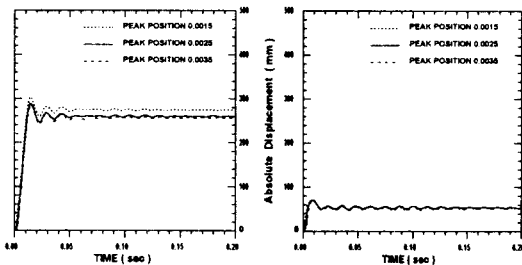


Fig. 14 Effect of duration time on deformation response of members

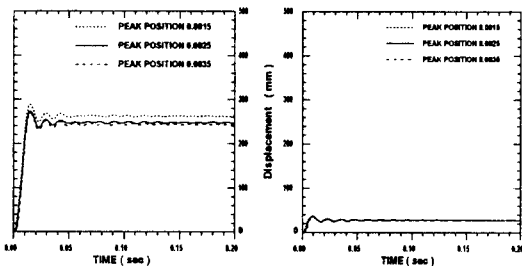
선의 형상이 중요하다는 것을 추정할 수 있다. 최대변형 발생시간 후에 가한 충격압력역적의 구조물 변형 및 흡수에너지 거동에 대한 기여도에 관한 경향을 살펴 볼 필요가 있다고 사료된다.

### 3.3 최대변형 발생시간의 영향

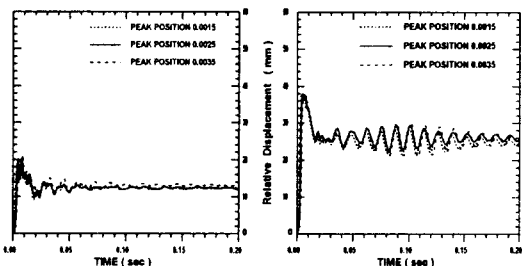
Table 3은 최대변형 발생시간이 지난 후에 가한 충격압력역적의 변형거동에 미치는 영향을 보여주고 있다. 앞 절의 0.03, 0.05 및 0.10초의 지속시간의 경우에 대하여 각각 0.02, 0.02 및 0.035초까지의 파랑충격압력 곡선만을 고려했을 때와의 차이를 부재의 최대변형 발생시간, 절대변형, 상대 변형 및 흡수에너지 등의 결과들을 통해



(a) Upper shell plate (b) Lower shell plate



(c) Frame (d) Web



(e) Upper shell plate (f) Lower shell plate

Fig. 15 Effect of rise time on deformation response of members

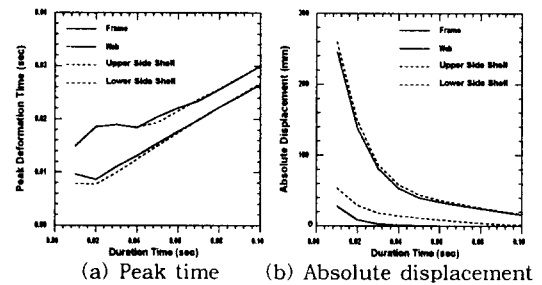
서 파악할 수 있을 것이다. 여기서 각 지속시간 아래 괄호 안의 수치는 기준 지속시간에 대한 각각의 감소된 지속시간의 충격압력역적 감소비를 나타내고 있다.

충격압력역적의 감소에도 불구하고 감소 전의 변형거동과 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이것은 최대변형 발생시간 이전에 작용한 충격압력역적의 양이 중요한 요소라는 것을 확인할 수 있다.

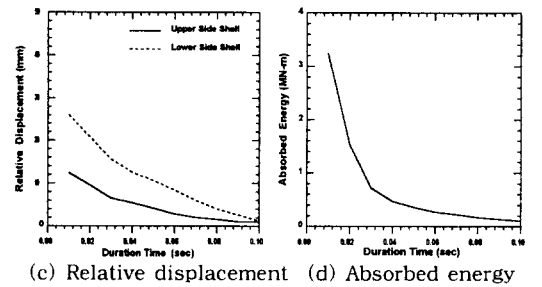
### 3.4 지속시간 0.01초 이내 충격압력곡선 거동

기준 파랑충격압력 곡선의 충격압력역적과 크기가 같고 지속시간이 0.01초 보다 작은 경우의 파랑충격압력 곡선이 구조물의 변형거동에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 각 지속시간에 대한 이들의 경향은 Fig. 17에 나타나 있다.

최대변형은 상부 및 하부부재일 경우 각각 0.012~0.015초 및 0.0075~0.01초 사이에서 발생하고 있고, 변형 및 흡수에너지는 부분적으로 비현실적인 파랑충격압력 곡선임에도 불구하고 지속시간 0.01~0.10초 사이에서는 거동에 비하여 큰 변화가 없음을 알 수 있다.



(a) Peak time (b) Absolute displacement



(c) Relative displacement (d) Absorbed energy

Fig. 16 Variation of general responses at duration time between 0.01~0.1sec



Table 3 Responses with impact pressure impulse with partial duration time

Duration (Impulse%)	0.02 (-13.23)	0.03 (0.00)	0.02 (-46.15)	0.05 (0.00)	0.035 (-50.77)	0.1 (0.00)
Occurrence Time of Peak Deformation (sec)						
Frame	0.019	0.019	0.020	0.020	0.030	0.030
Web	0.011	0.011	0.015	0.015	0.027	0.027
U.S. Shell	0.019	0.019	0.019	0.019	0.030	0.030
L.S. Shell	0.010	0.010	0.015	0.015	0.027	0.027
Displacement (mm)						
Frame	76.0	81.0	37.0	40.0	16.0	15.5
Web	3.0	2.6	0.8	0.6	0.0	0.0
U.S. Shell	82.0	87.0	41.0	44.0	16.5	16.4
L.S. Shell	18.7	18.0	11.0	11.2	1.3	1.2
Relative Displacement (mm)						
U.S. Shell	5.8	6.5	4.2	4.1	0.9	0.9
L.S. Shell	15.8	15.6	10.3	10.6	1.3	1.2
Absorbed Energy (MN-m)						
Absorbed Energy	0.75	0.72	0.35	0.36	0.097	0.10

U.S. shell:Upper side shell, L.S. shell:Lower side shell

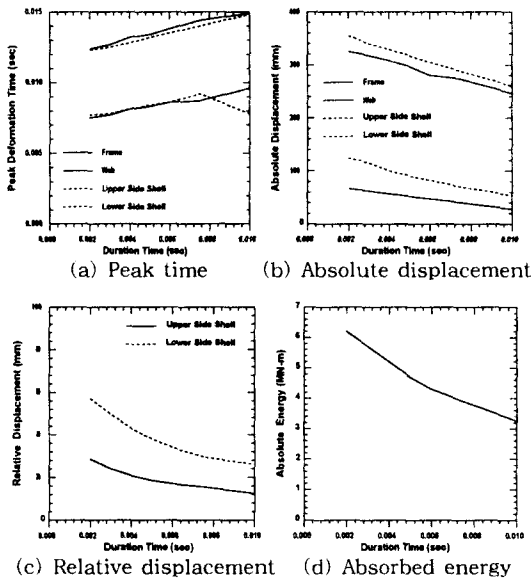


Fig 17 Variation of general responses at duration time under 0.01 sec

4. 결론

파랑충격하중을 받는 선수 구조부의 설계를 위한 첫 단계로서, 동적 비선형 범용 프로그램 LS/DYNA3D를 이용하여 DWT 300,000급 VLCC의 선수 구조부 모델에 여러 가지 크기 및

형태의 파랑충격압력 곡선의 하중을 가하여 시물레이션 한 거동 특성을 비교 검토하여 아래와 같은 파랑충격압력 곡선의 정성적인 특성을 파악하였다.

1. 파랑충격압력 곡선의 일반적인 거동은 비교적 짧은 지속시간에서는 충격압력역적에 크게 영향을 받고, 같은 충격압력역적에서는 파랑충격압력 곡선의 초기 충격압력역적이 후반 보다 더 크게 거동 변화에 영향을 준다.
2. 같은 충격압력역적에서 지속시간이 작은 경우 최대변형은 지속시간이 지난 후에 발생하지만 지속시간이 증가함에 따라 점점 지속시간 이내에서 극치발생시간 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 대체로 긴 지속시간에서도 최대변형은 극치발생시간 이후에 발생하고 있음을 알 수 있다. 이것으로 보아 파랑충격압력 곡선의 지속시간은 충격압력역적과 같이 중요한 요소이다.
3. 최대변형 발생시간 후에 가한 충격압력역적은 일반적으로 구조물의 변형거동에 큰 기여를 못하고 있다. 이것으로 보아 충격압력역적은 최대변형 발생시간과 깊은 관계가 있고, 최대변형 발생시간 후에 가한 충격압력역적은 일반적으로 구조물의 변형 거동에 기여를 하지 않는다는 것을 알 수 있다.
4. 본 연구에서 사용한 DnV의 전형적인 파랑충격압력 곡선을 이용한 여러 가지 파라미터 연구를 통하여, 일반적으로 알려져 있는 파랑충격압력 곡선의 극치와 지속시간 등의 형상보다는 구조물의 최대변형 발생시간 이내에 가한 충격압력역적과 지속시간이 보다 중요한 요소임으로 특정한 파랑충격압력 곡선에는 크게 좌우될 필요가 없다고 사료된다.

5. 본 연구와 같은 방법으로 주어진 구조물에 대하여 동적 비선형 범용 유한요소 프로그램인 LS/DYNA3D와 MSC/DYTRAN 등을 사용하여 손상자료로부터 역으로 파랑충격압력 곡선을 추정하는 것은 유용하고, 본 연구에서 사용한 파랑충격압력 곡선을 정성적인 기준 형상으로 취하고 고려 중인 선수 구조 부위에 따라 파랑충격압력 곡

선의 크기 및 면적을 결정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 (주)대우중공업의 지원에 의하여 수행되었으며 심심한 감사를 드린다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Society of Naval Architects of West Japan, "Investigations on the damages of ship structure (IV)", Report of the Structure Committee of the Society of Naval Architects of West Japan, No. 16, 1974.
- [2] Society of Naval Architects of West Japan, "Investigations on the damages of ship structure (V)", Report of the Structure Committee of the Society of Naval Architects of West Japan, No. 18, 1990.
- [3] Det Norske Veritas, "Rules for Classification of Steel Ship", Pt.3, Ch.1, Sec.7, E300, 1998.
- [4] Lloyd's Register, "Lloyd's Register's Plan Approval Systems For Ships, Direct Calculation Procedural Document - Appendix C Load Distribution For Input to Double Bottom Grillage Analysis", Pt.3, Ch.3, Sec.1, 1.6, 1978.
- [5] ANSYS User's Manual, Version 5.5, Swanson Analysis Systems, Inc., 1998.
- [6] MSC/NASTRAN Reference Manual, Version 70, The MacNeal Shwendler Corp. U.S.A., 1998.
- [7] LS/DYNA3D User's Manual, Version 9.40, Livermore Software Technology Corp., 1998.
- [8] MSC/DYTRAN User's Manual, Version 4.5, The MacNeal Shwendler Corp. U.S.A., 1998.
- [9] Det Norske Veritas, "Ship's Load and Strength Manual", 1978.