

선수 구조부 구조해석 시스템 개발 (3) - 동적 구조해석 -

이상갑*, 박중규**

Development of Structural Analysis System of Bow Flare Structure(3) - Dynamic Structural Analysis -

by

S.G. Lee* and C.K. Park**

요 약

파랑충격하중에 의한 선수 구조부의 손상은 주로 충격압력역적과 파랑충격하중이 가한 면적에 의하여 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 세 번째 단계로서 LS/DYNA3D를 이용하여 파랑충격하중에 대한 DWT 300,000급 VLCC의 선수 구조부의 동적 구조해석을 수행하여 검증을 하고자 한다. 극치 6.5MPa, 후부높이 1.0MPa, 지속시간 5.0msec인 파랑충격압력 곡선을 강성이 작은 보강재로 보강된 선수 구조부에는 면적 1.5s×1.5s, 대체로 강성이 큰 스트링거 등의 부재로 보강된 경우는 면적 2.5s×2.5s에 가한다. 이상의 동적 구조해석을 통하여 넓은 간격의 보강재가 부착된 선수 구조부에는 외판과 보강재에 큰 손상변형이 발생한 것 이외는 고려 중인 유조선의 선수 구조부는 본 연구의 파랑충격하중에 대하여 충분한 강도를 지닌다고 사료된다.

Abstract

The damages due to wave impact loads are largely affected by impact pressure impulse and impact load area. The objective of this study is, as the third step, to perform dynamic structural analysis of bow flare structure of 300,000 DWT VLCC using LS/DYNA3D code, and to verify its dynamic structural behaviors. The impact load areas of stiffener space 1.5s×1.5s and 2.5s×2.5s are applied to bow flare structure part with relatively flexible stiffeners, and with stiff members such as stringers, webs etc., respectively, under the wave impact load with peak height 6.5MPa, tail 1.0MPa, and duration time 5.0msec. Through the dynamic structural analysis in this study, it might be thought that the structural strength of bow flare structure is generally sufficient for these wave impact load and areas, except that large damages were found at bow flare structure area with flexible wide span stiffeners.

접수일자 : 1999년 5월 14일, 재접수일자 : 1999년 10월 5일

* 정회원 한국해양대학교 조선해양공학부

** 학생회원 한국해양대학교 대학원 조선해양공학부

1. 서론

현재 조선업계에서는 설계단계에서 파랑충격하중(wave impact load)에 대한 선수 구조부(bow flare structure)의 구조강도 추정을 위하여 각 부재치수 결정(scantling)에 일본 서부조선학회의 구조분과 위원회에서 제안한 일반식[1, 2], DnV 규정[3] 및 Lloyd 규정[4] 등을 일반적으로 적용하고 있지만 실제 건조·인도된 선박은 여전히 손상을 받고 있는 실정이다. 이러한 파랑충격하중에 대한 구조검증 또한 용이하지 않다. 일반적으로 범용 유한요소 프로그램 ANSYS[5]와 NASTRAN[6] 등을 사용하여 정적 구조해석과 비선형 과도응답해석을 수행하고 있으나, 이와 같은 국부적인 충격응답 구조해석의 정확성과 해의 수렴성이 미흡하고 해석시간이 많이 소요되는 등 비효율적이다. 이러한 점에서 동적 비선형 범용 유한요소 프로그램 LS/DYNA3D[7]과 MSC/DYTRAN[8] 등을 이용하는 것이 보다 적합하다고 사료된다.

파랑충격하중을 받는 선수 구조부의 손상은 주로 크기와 면적에 의하여 크게 영향을 받는다. 이러한 선수 구조부의 동적 구조해석을 통한 구조검증을 위한 첫 단계로서, 파랑충격압력(wave impact pressure) 곡선의 특성을 파악하는 것이다. 앞에서 언급하였듯이 이에 대한 이론적인 해나 실측자료가 부족하므로 충격응답 구조해석에 적합한 수치 시뮬레이션을 이용하여 역으로 여러 가지 형태와 크기의 파랑충격압력 곡선을 선수 구조부에 가하여 동적 거동을 비교 검토하여 추정하는 것도 유용한 방법일 것이다. DWT 300,000급 VLCC의 선수 구조부 모델에 LS/DYNA3D를 이용하여 다음과 같은 파랑충격압력 곡선의 정성적인 특성을 파악하였다[9]: 비교적 짧은 지속시간을 갖는 파랑충격압력 곡선의 일반적인 거동은 충격압력역적(impact pressure impulse)에 크게 영향을 받으며, 구조물의 최대변형 발생시간 후에 가한 충격압력역적은 일반적으로 변형 거동에 큰 기여를 못한다.

현재 선급규정들은 선수 구조부의 간성이 작은

보강재(stiffener)를 비롯하여 강성이 큰 스트링거와 같은 늑골 부재 치수결정 시 파랑충격하중에 의한 손상 허용치를 고려하고 있지 않고 있으며, 조선업계에서도 이러한 규정들에 의하여 부재치수를 결정하고 늑골 부재에도 손상이 발생하지 않는다고 가정하는 것이 일반적인 경향이다. 이것은 선수 구조부의 동적 구조해석을 통한 구조검증의 위한 다음 단계인 파랑충격하중의 면적의 추정에 큰 영향을 미칠 수 있다.

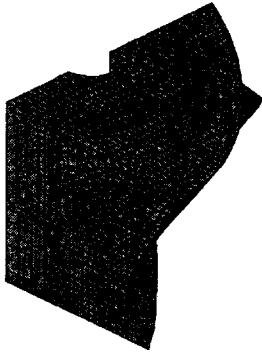
본 연구에서는 선급규정에 의해 이미 건조된 DWT 300,000급 VLCC의 선수 구조부의 동적 구조해석을 통한 검증을 수행하되, 파랑충격하중의 크기 및 면적은 앞에서 언급한 관점에서 추정하여 동적 구조거동을 검증을 하고자 한다. 현재 진행중인 연구에서는 기존의 손상 결과들을 비교 검토하여 파랑충격하중의 크기 및 면적을 추정하고 선수 구조별 및 부위별 상세 구조거동을 검증한 뒤 설계변경을 통한 구조표준을 정립하고자 한다.

본 연구를 위한 전 단계로서 DWT 300,000급 VLCC의 선수 구조부를 이상화한 패널구조 모델에 극치(peak height) 6.5MPa, 후부높이(tail height) 1.0MPa, 지속시간(duration time) 5.0msec인 파랑충격압력 곡선을 여러 가지 면적에 가하여 다음과 같이 파랑충격하중 면적을 추정하였다[10]: 보강재로 보강된 선수 구조부에는 보강재 간격(s)의 $1.5s \times 1.5s$, 스트링거와 같은 강성 큰 경우에는 $2.5s \times 2.5s$ 정도의 파랑충격하중 면적을 적용한다. 여기서 보강재 및 스트링거에서의 손상변형은 1.0mm 내외에서 발생하는 것으로 가정하였다.

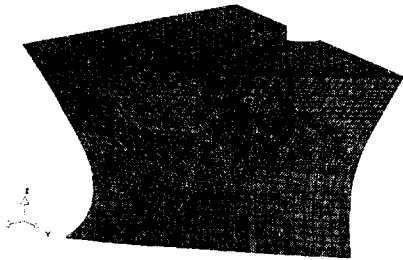
본 연구에서는 DWT 300,000급 VLCC 선수 구조부의 각 부위에 앞에서 언급한 두 연구에서 추정한 파랑충격하중의 크기와 면적을 가하여 동적 거동해석을 수행하여 검증하고자 한다.

2. 선수 구조부의 동적 거동해석

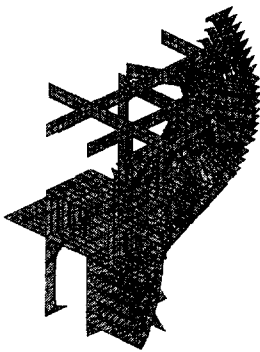
Fig. 1에서와 같이 선수 구조부는 종중심단면에 대하여 대칭임으로 좌현 절반과 FR114 전방부 및 2ND W.T. FLAT 상단부를 고려한다.



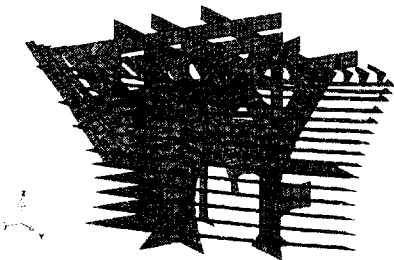
(a) Central view of bow flare structure



(b) Frontal view of bow flare structure



(c) Central view of bow flare frame structure



(d) Frontal view of bow flare frame structure
Fig. 1 Finite element mesh of bow flare structure

Figs. 1(a) 및 1(b)는 선수 구조부 전체, Figs. 1(c) 및 1(d)는 늑골구조(frame structure)에 대한 유한요소 모델을 보여주고 있다. 경계조건으로서 종중심단면은 대칭, FR114와 2ND W.T. FLAT 부분은 고정하였다. 보강재의 플랜지 등도 쉘요소를 사용하였으며 약 15,000개의 요소로 구성되어 있다. 파랑충격하중의 특성 및 면적의 추정에 대한 연구[9, 10]에서와 같은 연강의 재료 물성치를 사용하고 있으며, 소성변형을 경화 및 항복응력의 변형을 속도 의존성을 고려하는 탄소성 재료이다.

각 부위의 파랑충격하중에 의한 동적 거동해석은 각 경우에 대하여 최대 및 잔류변형(residual deformation) 시의 응력, 변형, 소성 변형률(plastic strain) 및 흡수에너지(absorbed energy) 등의 동적 거동을 비교 검토한다. 시뮬레이션 마지막 시간 500.0msec에서의 변형을 잔류변형으로 간주한다. Fig. 2는 파랑충격하중이 가해질 영역에 대한 13가지 경우 및 위치를 보여주고 있다. Case 3의 경우 파랑충격하중을 보강재와 스트링거의 교차점에 가하고 있지만, 보강재의 거동에 관심의 초점을 두고 있으므로 면적을 1.5s×1.5s로 설정하였다. 보강재와 같은 강성이 대체로 작은 부재에서는 수직응력, 스트링거와 같은 강성이 큰 부재는 수직응력 외 전단응력의 크기 및 분포도 중요하다.

각 경우에 대한 최대 및 잔류변형 시의 등가응력(von Mises 응력) 및 전단응력, 변형, 소성 변형률 및 흡수 에너지에 대한 동적 구조해석의 결과를 Table 1에 요약하였다. 이 경우 재료의 소성 판정은 등가응력을 기준으로 하였으며, 정적 항복응력이 235MPa 임으로 정적 항복전단응력은 대략 135.68MPa ($=235/\sqrt{3}$) 정도이다.

$(1 + \dot{\epsilon}/D)^{1/p}$ [11]는 동적 항복응력의 축적계수(scale factor)로서 연강의 경우 상수 D와 p는 각각 40.4 sec⁻¹와 5.0이다. 정적 이외에 동적 항복응력으로써 재료의 소성 판정을 하기 위하여 항복응력의 변형을 속도 의존성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 최대응력들의 차이를 정적 항복응력에 합하여 동적 항복응력을 구하고,

앞의 축적계수로부터 역으로 최대응력이 발생하는 순간에서의 변형률 ($\epsilon = d\epsilon/dt$)도 추정할 수 있다.

보강재 및 스트링거에서의 손상 잔류변형이

1.0mm 내외에서 발생하는 파랑충격하중의 크기 및 면적을 가하여 실선의 동적 구조해석을 수행하였지만, Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 부위에 따라 외판과 늑골 부재에는 예상했던 손상 잔

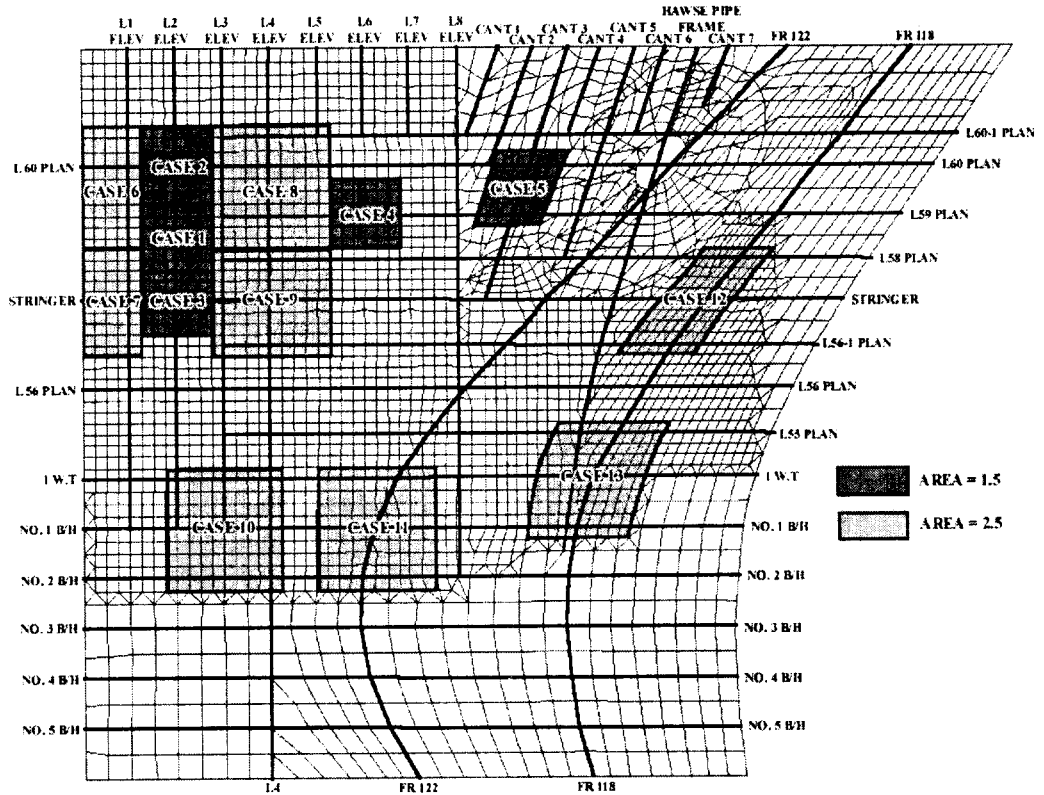


Fig. 2 Position and area of wave impact load

Table 1 Summaries of dynamic structural analysis

| Case | Effective stress (MPa) | | | | Displacement (mm) | | | | | | Shear stress (MPa) | | | | Plastic strain | | Absorbed energy (MN-m) | |
|------|------------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------------------|-------|-------------|-------|----------------|--------|------------------------|-------|
| | Shell | | Frame | | Shell | | Frame | | Center | | Hori. frame | | Vert. frame | | Shell | Frame | Peak | Resi. |
| | Peak | Resi. | Peak | Resi. | Peak | Resi. | Peak | Resi. | Peak | Resi. | Peak | Resi. | Peak | Resi. | | | | |
| 1 | 337.8 | 61.6 | 365.3 | 83.8 | 34.0 | 6.1 | 19.2 | 3.3 | 15.4 | 1.52 | 92.2 | 4.6 | 174.9 | 31.0 | 0.0027 | 0.0079 | 0.050 | 0.017 |
| 2 | 315.1 | 49.2 | 323.3 | 45.5 | 16.9 | 2.3 | 10.5 | 0.9 | 7.5 | 0.54 | 163.2 | 19.6 | 144.0 | 6.1 | 0.0008 | 0.0013 | 0.029 | 0.004 |
| 3 | 330.0 | 32.5 | 174.6 | 14.6 | 13.8 | 0.7 | 6.1 | 0.2 | 2.6 | 0.02 | 30.7 | 0.8 | 76.8 | 1.0 | 0.0004 | 0.0000 | 0.017 | 0.001 |
| 4 | 328.1 | 116.8 | 377.1 | 187.9 | 68.0 | 26.2 | 76.2 | 23.7 | 63.8 | 23.00 | 176.5 | 54.5 | 154.8 | 51.3 | 0.0022 | 0.0109 | 0.091 | 0.059 |
| 5 | 315.3 | 99.8 | 336.8 | 24.4 | 34.4 | 5.81 | 13.3 | 1.3 | 2.7 | 0.03 | 100.5 | 4.2 | 137.1 | 8.6 | 0.0012 | 0.0003 | 0.027 | 0.005 |
| 6 | 358.7 | 100.2 | 340.1 | 41.8 | 37.1 | 8.8 | 19.4 | 3.0 | 7.8 | 0.06 | 101.1 | 5.3 | 156.5 | 12.1 | 0.0044 | 0.0055 | 0.048 | 0.013 |
| 7 | 362.8 | 111.5 | 220.2 | 22.3 | 21.4 | 6.2 | 11.6 | 1.7 | 4.2 | 0.04 | 67.1 | 3.6 | 74.9 | 5.1 | 0.0020 | 0.0000 | 0.029 | 0.008 |
| 8 | 323.6 | 127.4 | 345.2 | 140.0 | 49.9 | 14.8 | 44.1 | 5.3 | 12.8 | 1.34 | 169.3 | 28.2 | 155.7 | 43.6 | 0.0019 | 0.0020 | 0.126 | 0.034 |
| 9 | 365.6 | 107.9 | 363.3 | 106.1 | 26.9 | 7.0 | 24.9 | 1.9 | 6.4 | 0.12 | 152.7 | 48.3 | 117.5 | 9.1 | 0.0023 | 0.0058 | 0.072 | 0.016 |
| 10 | 371.3 | 117.5 | 301.5 | 92.1 | 30.6 | 12.3 | 13.4 | 4.1 | 2.3 | 0.34 | 61.6 | 7.6 | 63.6 | 48.2 | 0.0026 | 0.0056 | 0.068 | 0.029 |
| 11 | 370.2 | 108.5 | 347.9 | 112.2 | 43.6 | 12.3 | 16.0 | 3.7 | 6.3 | 0.29 | 149.1 | 22.4 | 126.8 | 10.3 | 0.0043 | 0.0088 | 0.110 | 0.052 |
| 12 | 354.6 | 123.4 | 351.4 | 117.4 | 37.5 | 8.0 | 29.3 | 3.3 | 12.3 | 0.12 | 161.0 | 47.4 | 150.4 | 10.1 | 0.0016 | 0.0154 | 0.095 | 0.036 |
| 13 | 366.4 | 121.9 | 349.0 | 71.9 | 29.6 | 9.2 | 11.9 | 1.7 | 3.1 | 0.05 | 160.1 | 27.1 | 128.7 | 8.0 | 0.0056 | 0.0016 | 0.073 | 0.020 |

류변형보다 더 크게 발생하였음을 알 수 있다. 파랑충격하중의 2가지 면적 크기 중에서 대표적인 Case 4와 8에 대한 동적 거동을 살펴보고자 한다.

2.1 L4와 L8 ELEV 사이의 L59 PLAN 중심에서의 동적 거동해석 (Case 4)

상당한 거리(4s)에 떨어져 있는 강성이 큰 두 늑골 L4 ELEV와 L8 ELEV 사이에 대체로 강성이 작은 L59 PLAN 중앙에 충격파랑하중이 면적 $1.5s \times 1.5s$ 에 가해지는 동적 거동해석을 수행한다. 이 경우는 유연한 동적 거동을 하는 보강재의 거동에 관심이 있다. Fig. 3(a) 및 (b)는 최대 및 잔류변형 시 응력 분포를 보여주고 있다. 파랑충격하중이 작용한 L59 PLAN 중심 부위의 외판에 최대 및 잔류응력이 각각 328.1MPa 및 116.8MPa 발생하고 있다. 늑골 부재에서의 응력 분포는 Fig. 4(a) 및 (b)와 같고 최대 및 잔류응력 역시 L59 PLAN 부위에 377.1MPa 및 187.9MPa 정도 발생하고 있고, 각각의 경우 외판보다 약 50MPa 정도 크다는 것을 알 수 있다. 외판 및 늑골 부재에서의 최대응력이 발생하고 있는 부위의 유한요소 #3652 및 #1989의 시간에 대한 응력이력은 Fig. 5(a)와 같고, 늑골 부위는 외판과 달리 응력의 떨림(fluctuation)이 크다는 것을 알 수 있다. 이것으로 보아 이 부위의 구조는 파랑충격하중에 비하여 강성이 상당히 작다는 것을 알 수 있다.

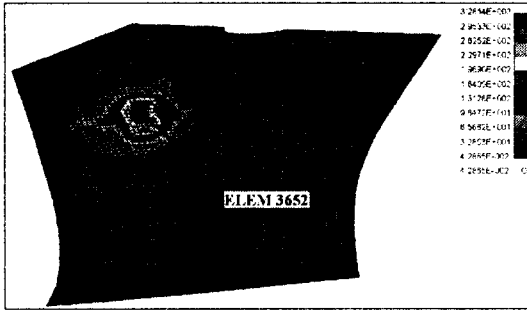
Fig. 6(a) 및 (b)는 외판에서의 최대 및 잔류변형 시의 변형 분포를 나타내고 있다. 최대 및 잔류변형은 L59와 L60 PLAN 사이에 각각 68.0mm 및 26.2mm 정도 발생하고 있다. 늑골 부재에서의 최대 및 잔류변형 시의 변형 분포는 Fig. 7(a) 및 (b)와 같고, L59 PLAN 중앙부에 최대 및 잔류변형은 각각 76.2mm 및 23.7mm 정도의 상당히 큰 변형이 발생하고 있다. 최대변형 시 상당히 크게 뒤틀리고 있고, 잔류변형도 또한 상당히 크게 발생하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 외판 및 늑골 부재에서의 최대변형이 발생하고 있는 부위의 절점 #3733 및 #2247

에서의 변형이력을 보여주고 있다.

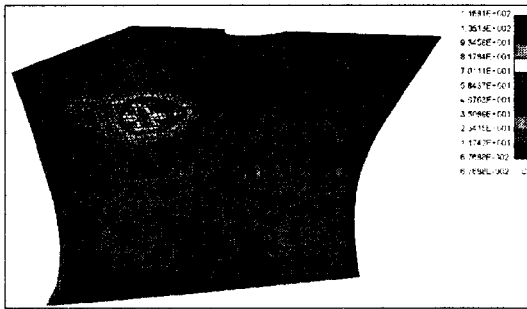
Fig. 8(a) 및 (b)는 잔류변형 시 외판 및 늑골 부재에서의 소성 변형률의 분포를, Fig. 5(c)는 외판 및 늑골 부재에서 최대 소성 변형률이 발생하는 유한요소 #3652 및 #1989에서의 시간에 대한 이력을 보여 주고 있다. 잔류변형 시 각각 0.0022 및 0.0109로서 늑골에서의 소성변형이 외판에 비하여 크게 발생함을 알 수 있다. 소성 변형률의 분포는 최대응력의 분포와 비슷함을 알 수 있고, 잔류응력이 모두 탄성 범위 내에 있지만 손상 잔류변형이 발생하는 것은 이러한 소성 변형률이 발생하기 때문이다. 항복응력의 변형을 속도 의존성을 고려하지 않은 경우의 동적 구조해석에 의한 외판과 늑골에서의 최대응력은 각각 237.2MPa과 247.9MPa이고 동적 항복응력은 각각 328.1MPa 및 377.1MPa이므로, 최대변형 시의 시간에 대한 변형률($\dot{\epsilon}$)은 각각 약 164.2sec⁻¹ 및 288.6sec⁻¹가 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(d)는 외판과 늑골 부재 및 전체 선수 구조부의 충격 흡수에너지의 시간에 대한 이력을 보여 주고 있다. 최대변형은 파랑충격하중의 지속 시간 5.0msec 이후에 발생하였으므로 충격압력 역적 0.0103MN-sec (=0.005375 MPa-sec \times 1.92m²)이 가해졌다고 볼 수 있다. 최대 및 잔류변형시 전체 충격 흡수에너지는 각각 0.091 MN-m 및 0.059MN-m로서 약 65% 정도가 소성변형등에 의하여 선수 구조부가 흡수한다. 최대 및 잔류변형시의 전체 선수 구조부에 대한 외판과 늑골부재의 흡수에너지 비율은 각각 (30%/70%) 및 (16%/84%)로서 늑골 부재가 충격에너지의 대부분을 흡수하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9(a)와 (b) 및 Fig. 10(a)과 (b)는 수평 및 수직 늑골부재에 발생하는 최대 및 잔류변형시의 전단응력(τ_{xy}) 및 전단응력(τ_{zx})의 분포를 보여주고 있다. 수평 최대 전단응력은 L59 PLAN의 중앙부 및 L8 ELEV에 가까운 부위에 176.7MPa, 잔류 전단응력은 L59 PLAN의 양쪽 가장자리에 54.5MPa 정도, 수직 최대 및 잔류 전단응력은 L3 ELEV와 L4 ELEV 부분에

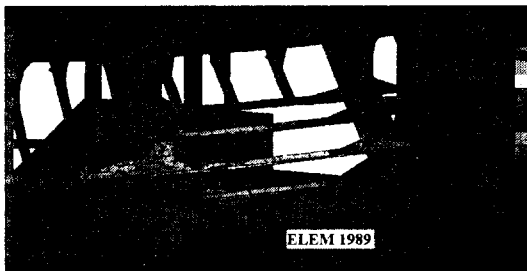


(a) peak deformation (5.0msec)



(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 3 Stress distribution at shell plate of Case 4

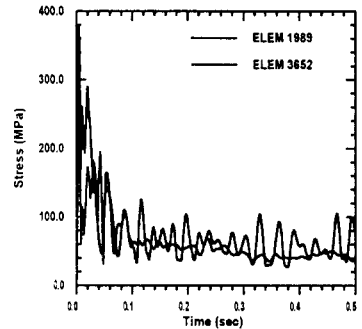


(a) peak deformation (2.5msec)

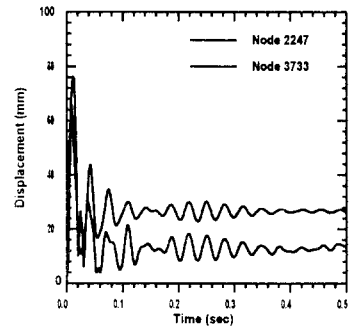


(b) residual deformation (500.0msec)

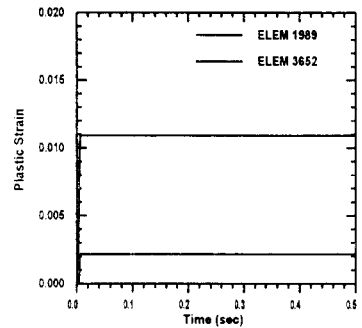
Fig. 4 Stress distribution at frame of Case 4



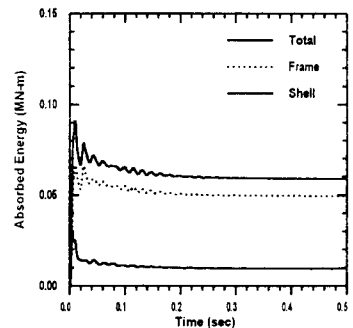
(a) Stress



(b) Displacement

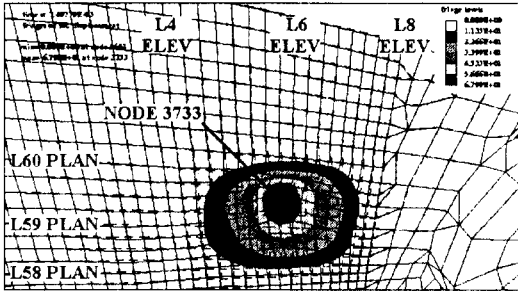


(c) Plastic strain

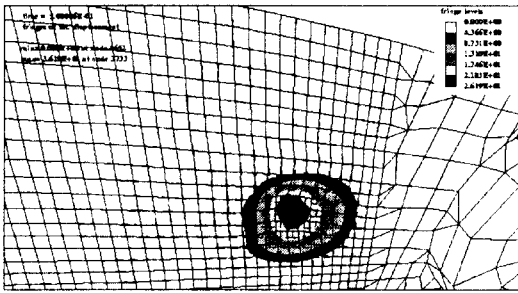


(d) Absorbed energy

Fig. 5 Time history of Case 4

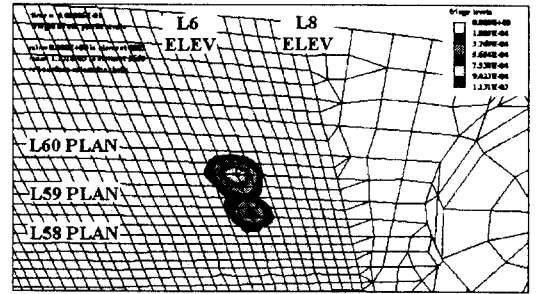


(a) peak deformation (7.5msec)

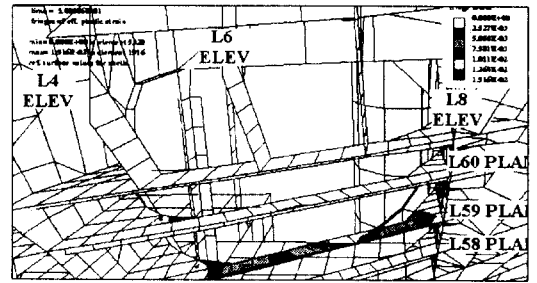


(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 6 Displacement distribution at shell plate of Case 4

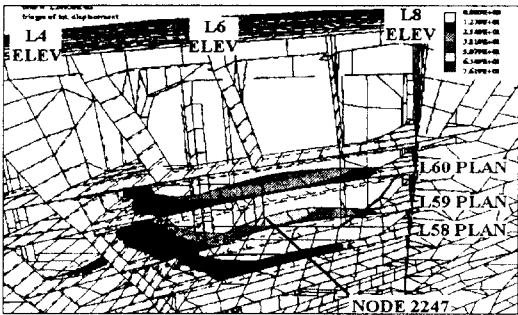


(a) shell plate

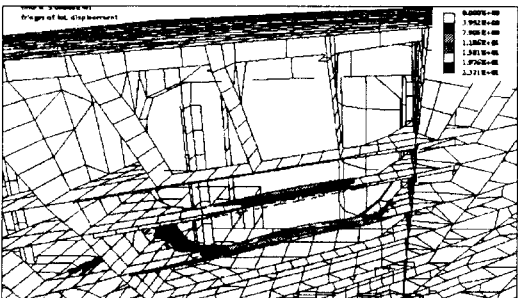


(b) frame

Fig. 8 Plastic strain distribution at residual deformation of Case 4



(a) peak deformation (12.5msec)



(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 7 Displacement distribution at frame of Case 4



(a) peak deformation (5.0msec)

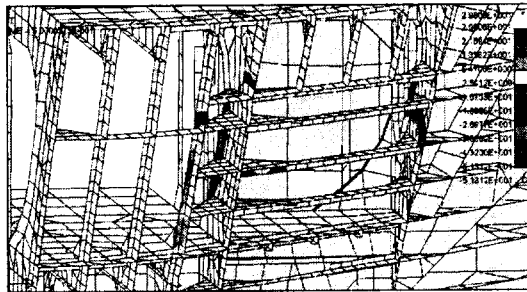


(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 9 Shear stress (τ_{xy}) distribution at frame of Case 4



(a) at peak deformation (7.5msec)



(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 10 Shear stress(τ_{zx}) distribution at frame of Case 4

각각 154.8MPa 및 51.3MPa 정도 발생하고 있다. 수평 및 수직 늑골의 최대 전단응력은 정적 항복전단응력을 약간 초과하지만 잔류 전단응력은 탄성 범위내에 있다.

이 경우와 같이 강성이 작은 보강재가 수평으로 보강된 경우 외판과 늑골에 손상 잔류변형이 상당히 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

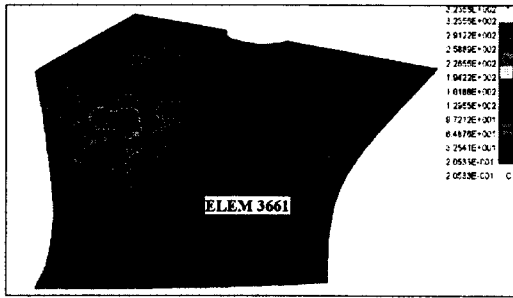
2.2 상갑판과 스트링거 사이의 L4 ELEV 중심에서의 동적 구조해석 (Case 8)

상갑판과 스트링거 사이의 강성이 큰 L4 ELEV의 중간지점에 충격파랑하중이 면적 2.5s × 2.5s에 가해지는 동적 거동해석을 수행한다. 이 경우는 강성이 큰 늑골의 동적 거동에 관심이 있다. Fig. 11(a) 및 (b)에서와 같이 파랑충격하중이 작용한 부위의 외판에 응력이 크게 나타나고, 특히 Case 1~5의 경우와 달리 최대변형 시 외판의 전면과 상갑판 까지 상당히 넓은 부위에 발생하고 있음을 알 수 있다. 최대 및 잔류응력은

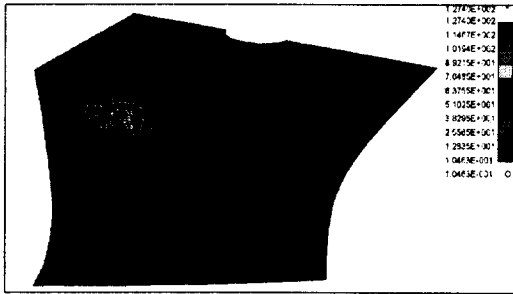
L4와 L5 ELEV 사이에서 각각 323.6MPa, 127.4MPa 정도 발생하고 있다. 늑골 부재에서의 최대 및 잔류변형 시의 응력 분포는 Fig. 12(a) 및 (b)와 같고 L4 ELEV와 L60 PLAN에 크게 나타나고 있다. 최대 및 잔류응력은 L60 PLAN와 교차되는 L4 ELEV의 뒤쪽 부위에 345.2MPa, 140.0MPa 정도 발생하고 있다. 외판에서의 최대 및 잔류응력은 Case 4와 비슷하지만 늑골에서는 약 30.0~40.0MPa 정도 작게 나타나고 있다. 최대응력이 발생하는 외판 및 늑골 부재에서의 유한요소 #3661 및 #3055에서의 시간에 대한 응력이력은 Fig. 13(a)와 같고, 후자의 경우 Case 4 보다는 응력의 떨림이 작다는 것을 볼 수 있는데, 이 부위의 강성이 파랑충격하중에 비하여 어느 정도 작지 않음을 알 수 있다.

Fig. 14(a) 와 (b)는 외판에서의 최대 및 잔류변형 시의 변형 분포를 보여 주고 있다. 최대 및 잔류변형은 L4와 L5 ELEV 및 L60 및 L59 PLAN 사이에 약 49.9mm 및 14.8mm 정도 발생하고 있다. 늑골 부재에서의 최대 및 잔류변형 시의 변형 분포는 Fig. 15(a)와 (b)와 같고, 최대변형은 L4 ELEV에서 보다는 우측의 L60과 L59 PLAN에서 약 44.1mm, 잔류변형은 L4 ELEV에 가까운 L60 PLAN의 브래킷 주위에 5.3mm 정도 발생하고 있다. Fig. 13(b)는 외판과 늑골 부재에서 최대변형이 발생하는 절점 #3714 및 #2173에서의 변형이력을 보여주고 있으며, Case 4 보다는 작은 주기로 떨리고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Table 1에서 볼 수 있듯이 파랑충격하중이 작용하는 중심에서는 1.30mm 정도의 잔류변형이 발생하고 있다. Case 4를 제외하고는 파랑충격하중이 작용하는 늑골 중심에서의 손상 잔류변형은 대체로 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13(c)는 외판 및 늑골 부재에서 최대 소성 변형률이 발생하는 유한요소 #3661 및 #3055에서의 시간에 대한 이력을 보여 주고 있다. 잔류변형 시 각각 0.0019 및 0.0020으로서 외판과 늑골에서의 소성변형이 비슷하게 발생함을 알 수 있다. 항복응력의 변형을 속도 의존성을 고

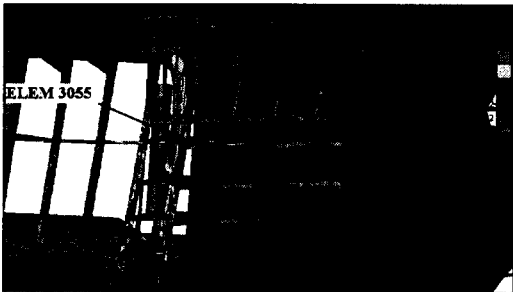


(a) peak deformation (5.0msec)

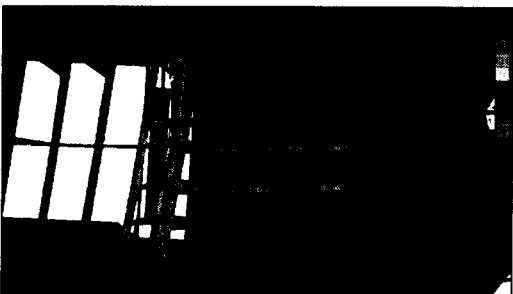


(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 11 Stress distribution at shell plate of Case 8

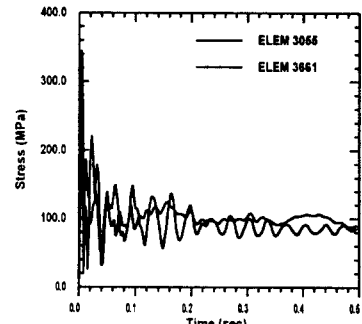


(a) peak deformation (5.0msec)

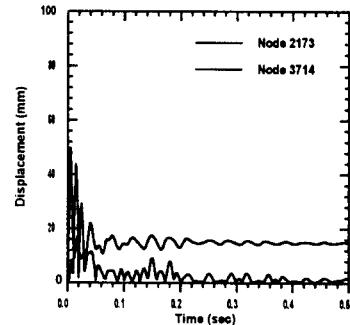


(b) residual deformation (500.0msec)

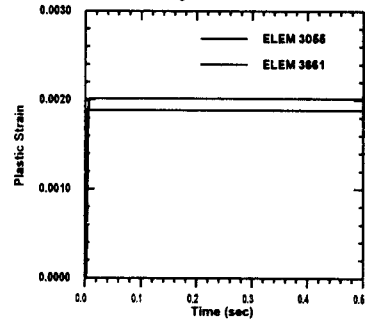
Fig. 12 Stress distribution at frame of Case 8



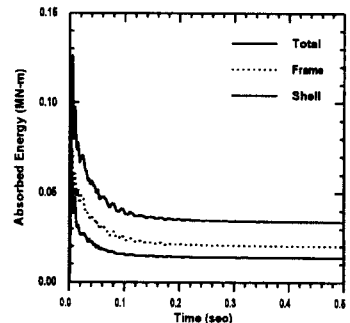
(a) Stress



(b) Displacement

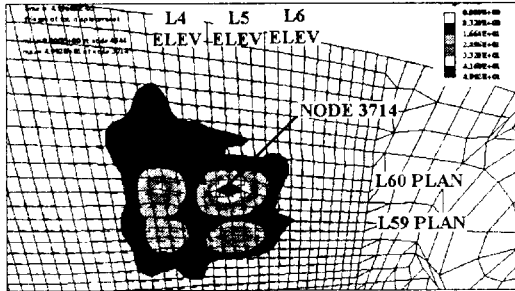


(c) Plastic strain

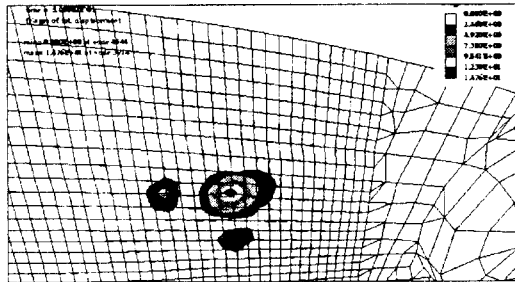


(d) Absorbed energy

Fig. 13 Time history of Case 8

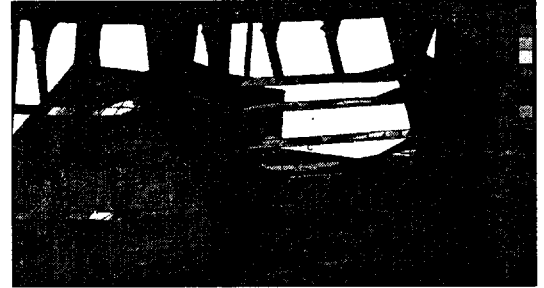


(a) peak deformation (5.0msec)

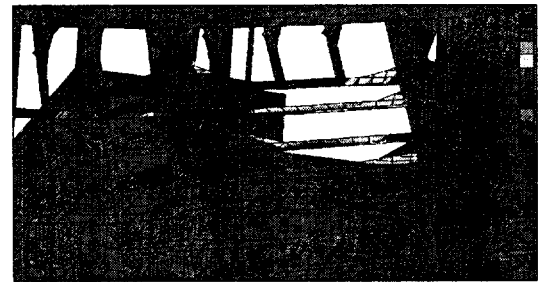


(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 14 Displacement distribution at shell plate of Case 8

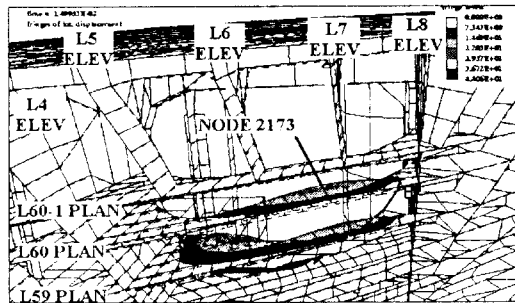


(a) peak deformation (10.0msec)

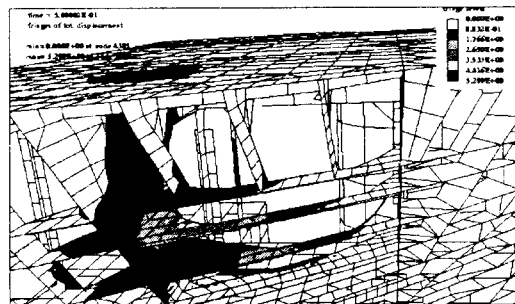


(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 16 Shear stress(τ_{xy}) distribution at frame of Case 8

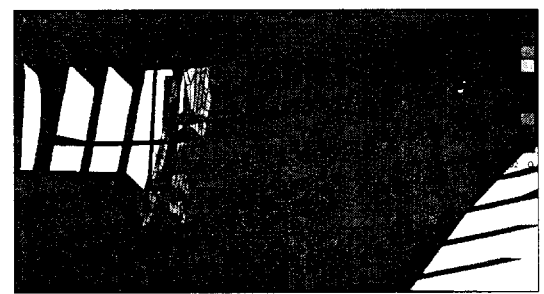


(a) peak deformation (15.0msec)

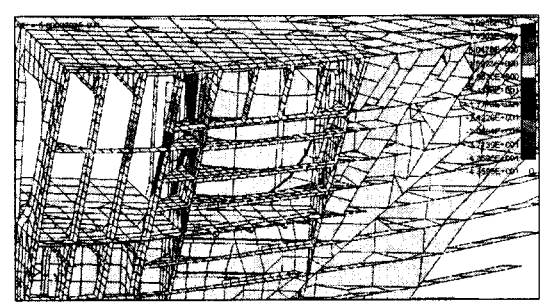


(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 15 Displacement distribution at frame of Case 8



(a) peak deformation (2.5msec)



(b) residual deformation (500.0msec)

Fig. 17 Shear stress(τ_{zx}) distribution at frame of Case 8

려하지 않은 경우의 동적 거동해석에 의하면 외판과 늑골에서의 최대응력은 각각 238.8MPa와 238.3MPa이 되고, 동적 항복응력은 각각 323.6MPa 및 345.2MPa이므로, 최대변형 시의 시간에 대한 변형률($\dot{\epsilon}$)은 각각 약 144.2sec⁻¹ 및 217.3sec⁻¹가 됨을 추정할 수 있다.

Fig. 13(d)는 외판과 늑골 부재 및 전체 선수 구조부의 충격 흡수에너지의 시간에 대한 이력을 보여주고 있고 충격압력역적 0.0287MN·sec이 가해졌고, 최대 및 잔류변형 시 전체 충격 흡수에너지는 각각 0.126 및 0.034MN·m로서 약 27% 정도가 소성변형 등에 의하여 선수 구조부에 흡수되었다. 최대 및 잔류변형 시의 전체 선수 구조부에 대한 외판과 늑골 부재의 흡수에너지 비율은 각각 (44%/56%) 및 (41%/59%)으로서 늑골 부재가 외판에 비하여 조금 더 크게 흡수하고 있음을 알 수 있다. Case 4와는 달리 외판과 늑골의 소성변형에 차이가 그리 크지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig. 16(a)와 (b) 및 Fig. 17(a)과 (b)는 수평 및 수직 늑골부재에 발생하는 최대 및 잔류변형시의 전단응력(τ_{xy}) 및 전단응력(τ_{zx})의 분포를 보여주고 있다. 수평 최대 전단응력은 L2~L3 ELEV 사이의 L60 PLAN과 L4~L8 ELEV 사이의 L60 PLAN에서 각각 약 169.3MPa 및 28.2MPa 정도 발생하고 있다. 수직 최대 및 잔류 전단응력은 L3와 L4 ELEV 부분에 각각 155.7MPa 및 43.63MPa 정도 발생하고 있다. 최대 전단응력은 정적 항복전단응력을 조금 초과하지만 잔류 전단응력은 탄성 범위내에 있다.

3. 고찰 및 결론

선급규정들과 조선업체에서 선수 구조부의 강성이 작은 보강재를 비롯하여 강성이 큰 스트링거와 같은 늑골 부재 치수결정 시 파랑충격하중에 의한 손상 허용치를 고려하고 있지 않고 있는 현실을 고려하여, DWT 300,000급 VLCC의 선수 구조부의 여러 부위에 극치 6.5MPa, 후부높이

1.0MPa, 지속시간 5.0msec인 파랑충격하중을 보강재로 보강된 부위에는 1.5s×1.5s, 스트링거와 같은 강성 큰 부위에는 2.5s×2.5s의 면적이 가하여 동적 구조해석을 수행한 구조검증의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 외판과 늑골에 발생한 응력은 최대변형 시 정적 항복응력을 초과하지만 잔류변형 시는 충분히 탄성 범위 내에 있다. 늑골 부재에서 발생하는 전단응력도 최대변형 시 충격 파랑하중이 직접 가해지는 부재나 주변 부재 등에 일부 Case의 경우 정적 항복전단응력을 초과하여 나타나지만 잔류변형 시는 역시 탄성 범위 내에 있다.
2. 외판과 늑골에 발생하는 손상 잔류변형은 L4~L8 ELEV 사이의 외판과 수평 보강재에서 대체적으로 크게 나타나고 있다. 강성이 큰 늑골 부재에 파랑충격하중이 가해졌을 때에도 이 부근의 수평 보강재와 외판에 큰 손상 변형이 발생하는 것을 미루어 보아 곡면의 경사가 급한 부위에는 수평보다는 수직 보강재로 보강하는 것이 내충격에 효율적이라고 생각된다. 특히 Case 4의 영역에는 대체로 작은 면적에 파랑충격하중이 가해졌지만 외판에 약 26.0mm, 보강재에 약 23.0mm 정도의 손상 변형이 발생하였다.
3. Case 4를 제외하고는 파랑충격하중이 가해지는 늑골의 중심에서의 손상 변형은 본 연구에서 가정하였던 미소한 손상 허용치와 비슷하게 대체적으로 작았다.
4. 외판과 늑골에서의 잔류응력이 충분히 탄성 내에 있지만 손상 변형이 발생한 것은 소성 변형률의 분포를 파악함으로써 충분히 규명할 수 있었고, 외판과 늑골 및 선수 구조부 전체에 대한 충격 흡수에너지의 시간 이력을 비교함으로써 각 부재에 대한 손상변형의 정도를 규명할 수 있었다. 이러한 정보들은 파랑충격하중에 대한 구조물의 내충격의 효율적인 설계에 도움이 될 것으로 사료된다.

5. 2항에서 언급한 부위의 손상 변형을 제외하고는 고려 중인 유조선의 선수 구조부는 선급규정 등의 손상 허용치를 고려하지 않는다는 가정 하에서 충격파랑하중에 대체적으로 충분한 구조강도를 지닌다고 사료된다.
6. 보강재 등의 부재치수와 배치가 중요한 요소임으로 고려중인 선수 구조부의 부재치수의 검증과 내충격에 효율적인 배치를 검토하고, 기존의 손상자료에 의거한 파랑충격하중의 크기와 면적을 추정하여 상세 구조검증을 수행한 후 설계변경을 통한 구조표준을 정립하고 직접 구조해석 시스템을 구축하여 현장의 실무 설계에 쉽게 적용할 수 있는 시스템을 정립하고자 한다.

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] 이상갑, 김만수, "선수 구조부 구조해석 시스템 개발(1) - 파랑충격하중 특성의 추정", 대한조선학회논문집, 제 36권 제 4호, pp. 77~86, 1999.
- [10] 이상갑, 박종우, "선수 구조부 구조해석 시스템 개발(2) - 파랑충격하중 면적의 추정", 대한조선학회논문집, 제 36권 제 4호, pp. 87~94, 1999.
- [11] G.R. Cowper and P.S. Symonds, "Strain rate hardening and strain-rate effects in impact loading of cantilever beams", T Report No. 28, Beams University, Rhode Island, 1957.