

船舶과 海上浮漂와의 衝突 數值 시뮬레이션

1997. 5. 10

이 상 갑* , 백 점 기**

* 한국해양대학교 조선해양공학부 교수

** 부산대학교 조선해양공학과 교수

船舶과 海上浮漂와의 衝突 數値 시뮬레이션

이 상갑*, 백 점기**

* 한국해양대학교 조선해양공학부, ** 부산대학교 조선해양공학과

1. 서론

G/T 4,000톤의 살물운반선 ○○호가 ○○항에서 흑연 5,500톤을 선적한 뒤 출항하여 ○○항으로 항해하던 중 황해 근해에서 어떤 원인으로 기관실이 침수하기 시작하여 주갑판(main deck)까지 침수되는 사고가 발생한 바 있다. 사고선박의 승선선원들의 보고에 의하면 사고 전날 도선사가 하선한 직후 사고선박의 우현 선미 부근에 충격이 감지되었다고 하며, 충격이 감지된 시점으로부터 약 2분 후에 해상부표가 좌현 선미 부근에서 발견되었다고 하는 바, 이에 근거하여 사고선박이 부표와 충돌하면서 부표 위를 스쳐 지나간 것이라는 주장과 이같은 상황에서 부표와 사고선박간의 충돌에 의해 우현쪽 선체내부에 위치한 발전기 해수냉각 파이프(stub pipe)가 파열하였을 것이라는 주장이 대두되었다. 한편, 위 부표를 관리하고 있는 ○○항 항만청 부표관리구는 사고 후에 실시한 부표의 관리점검 보고서에서 이 부표의 수선상부에 아무런 손상이 없음을 확인하였다.

본 연구에서는 살물운반선 ○○호 침수사고의 원인을 분석하기 위하여 이 사고의 원인으로 제기된 사고선박과 해상부표간의 충돌사고를 수치적으로 시뮬레이션하여 구조손상거동 특성을 분석하였으며, 선박과 해상부표간의 충돌이 침수사고의 직접적인 원인이 될 수 있었는지를 검토하였다. 이를 위하여 상기의 충돌 상황, 즉 부표와 사고선박의 우현쪽 외관이 처음으로 충돌한 뒤에 계속하여 사고선박이 부표 위를 스쳐 지나간다는 상황을 설정하고, 이 경우에 컴퓨터를 이용한 선박 및 부표간의 충돌과단거동의 수치 시뮬레이션을 수행함으로써 사고선박과 부표가 어떠한 거동을 보이는지를 정량적으로 분석하였다. 한편, 해석 결과의 신뢰성이 입증되어 있으며 현재 전세계적으로 널리 이용되고 있는 자동차 및 선박의 충돌손상거동의 수치 시뮬레이션 전용 컴퓨터 프로그램으로는 MSC/DYTRAN, LS/DYNA3D, PAM-CRASH 등이 있는데, 본 해석에서는 이들 중에서 LS/DYNA3D 프로그램을 이용하여 충돌해석을 수행하였다.

구체적으로는 다음에 열거하는 사항을 수치 시뮬레이션 결과를 바탕으로 분석하였다.

- (1) 충돌시 부표와 선박간의 접촉과정 분석
 - 선체와 해상부표의 접촉과정 및 각 접촉부위
 - 해수냉각 파이프가 위치한 Frame No. 15-16사이의 선체부위와 부표의 수선하 부력물체간의 접촉이 가능한지 여부 분석
 - 부표의 몸통과 접촉이 없이 곧바로 부력물체와의 접촉이 가능한지 여부
- (2) 충돌 후 구조손상크기 및 파열가능성 분석
 - 충돌 후 선체내부에 부착된 해수냉각 파이프의 손상크기와 파열가능성 및 부표 몸통의 손상크기의 분석
 - 부표몸통에 구조손상이 거의 발생하지 않는 경우에도 선체내부의 해수냉각 파이프가 파열할 가능성 여부 분석
 - 잠수부에 의한 사고선박의 선저부에 대한 관찰보고에 의하면 굵힌 흔적이 선체 우현에서 시작되어 선저를 지나 반대편 좌현측에 걸쳐 발견되었는데, 부표와의 충돌로 이러한 결과가 발생할 수 있는지 여부 분석

2. 수치 시뮬레이션을 위한 구조 모델링

2.1 충돌시 상황개요

부표와 사고선박의 우현쪽 외관이 처음으로 충돌한 뒤에 계속하여 사고 선박의 선저부가 부표 위를 스쳐 지나가며, 이때 선박, 부표 및 해상상태를 포함한 구체적인 상황은 아래와 같다.

(1) 선 박

- 주요제원 : 길이 110 m, 폭 16.2 m, 깊이8.2 m, 만재흘수 6.5 m
총톤수 3,996톤, 재화중량 6,188톤
- 화물적재 상태 : 적재화물 5,477톤, 선수흘수 6.18 m, 선미흘수 6.78 m
- 선속 : 도선사 하선 직후로서 5노트 미만

(2) 부표 (그림 1 참조)

- 주요제원 : 높이 약 16 m, 파이프 직경 300 mm
- 부력실 : 해저로부터 약 4 m에 위치하며, 직경 2 m
- 하부 지지부 구조 : 해저에 설치된 지지부와 Universal Joint로 연결되어 360도 회전가능

(3) 해상상태

- 바람 : 남풍(선박의 충돌진행 방향과 반대방향으로 작용), 풍력 3(7~10노트)
- 조류 : 高潮 직후로서 유속은 미미
- 수심 (부표 위치): 약 10 m

(4) 선박과 부표의 충돌각도

사고 선박의 선저부 관찰보고에 의하면 우현측 Frame No. 15-16간 선저상부 3m 위치로부터 좌현측 Frame No. 9-10간 선저상부 4.5m에 걸쳐 손상흔적이 발견되었으며 (Frame 간격은 750 mm), 선저상부 3m 위치를 기준으로 Frame 9-16간의 거리는 약 6m이므로 충돌각도는 $53.13^\circ (= 90^\circ - \arctan 0.75)$ 로 추정

(5) 해수냉각 파이프(stub pipe)

- 위치 : 우현측 Frame No. 15-16사이에서 선저로부터 2.5~3.0 m 상부에 위치
- 상태 : 사고 전의 선박 정기검사 기록에 따르면 사고당시 구조적으로 양호한 상태임

2.2 수치 시뮬레이션 수행시 기본방침

수치 시뮬레이션의 결과에 대한 객관성과 신뢰도를 높이기 위하여 각종 보고 및 분석결과를 바탕으로 제시된 실제 충돌상황을 가능한 한 그대로 전부 고려될 수 있도록 하였다. 또한, 실제로 발생한 선박에 대한 해난사고의 원인을 분석한다는 관점에서 가능한 한 현실적이면서도 비관적인 상황을 설정하였다. 이를테면 선체구조적인 측면에서 부식에 의한 구조약화의 효과를 고려하였으며, 충돌시 가장 심각한 구조손상이 생길 수 있는 최악의 상황을 설정하고자 하였다.

2.3 충돌상황의 모델링

수치 시뮬레이션에 실제 충돌상황을 그대로 재현하는 것은 극히 어려우므로 2.2절에서 언급한 기본방침에 따라 충돌상황을 다음과 같이 수학적으로 모델링하였다.

(1) 충돌의 초기위치

선박이 부표와 충돌할 때 선체에 가장 심각한 큰 손상을 일으킬 수 있는 조건으로서 부표의 수면하 부력실과 선체와의 충돌을 생각할 수 있다. 냉각수 파이프는 우현측 Frame No. 15-16의 선체내부에 위치하고 있으므로 부표의 부력실이 이 부분과 접촉하기 위해서는 충돌시에 선박이 앞으로 진행한다는 점을 감안할 때 최초의 충돌은 Frame No. 15-16 위치보다 선수쪽으로 다소 앞쪽에서 발생하게 될 것이다.

충돌과정에서 부표의 부력실이 Frame No. 15-16간을 지나갈 수 있도록 하기 위하여 본 계산을 수행하기 전에 먼저 시행착오(trial and error) 계산을 수행하였으며, 그 결과 부표의 상부와 선체상부가 처음으로 충돌하는 위치가 Frame No. 15-16 위치보다 선수쪽으로 5.75m 앞쪽일 때 부표의 부력실이 냉각수파이프가 위치한 선체부위와 충돌한다는 것을 알았다. 따라서, 본 해석에서는 초기 충돌이 부표의 상부와 Frame No. 15-16 위치보다 선수 쪽으로 5.75m 앞쪽의 선체 갑판부에서 일어나는 것으로 설정하였다.

(2) 충돌속도 및 각도

충돌시 사고선박의 선속은 도선사를 하선시킨 직후이므로 5노트(knots) 이하로 추정되나, 충돌시 바람은 남풍으로서 충돌시 선박의 속도를 저하시키는 방향으로 작용하였으므로 사고선박은 실제로는 5노트보다 더 작은 속도로 항해했을 가능성이 높다. 그러나, 일반적으로 충돌속도가 커지면 충돌에너지가 증가하여 보다 큰 구조손상이 발생하게 되므로 충돌해석을 비관적인 측면에서 수행하기 위하여 본 해석에서는 바람의 영향은 무시하여 충돌시 선속은 5노트로 설정한다.

또한, 사고선박은 2.1절에서 설명한 바와 같이 부표와 약 53도의 각도로 충돌한다고 설정한다.

2.4 구조해석 모델링

충돌 수치해석 전용 컴퓨터 프로그램 LS/DYNA3D를 적용하여 기본적으로 선박과 부표를 모두 유한 shell 요소로 모델링하되, 충돌시 접촉에 의해 구조적으로 손상이 발생할 가능성이 있는 부위는 변형발생이 허용되는 요소로 잘게 요소분할(fine mesh)을 행하고, 그 이외의 부분은 변형이 발생하지 않는 강체요소를 이용하여 크게 요소분할(coarse mesh)한다. 참고로 이같은 요소분할 방법은 일반적으로 행해지고 있는 것으로서 그 유용성과 정도는 검증되어 있다.

구체적으로 선박 및 부표에 대한 요소의 분할방법을 포함한 구조모델링 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 선박의 구조모델링 (그림 2 참조)

- 충돌부위 주변의 Frame No. 6-25 사이의 선체구조는 선저에서부터 상갑판에 걸쳐 Frame 간격(750 mm)의 절반크기, 즉 375 mm×375mm로 잘게 분할하였다.
- 충돌부위의 선체구조는 그림 3에 나타나는 바와 같이 외판뿐 아니라 모든 지지 및 보강부재(side girder, transverse plate, frame, web frame, outer

side shell, inner bottom shell, outer bottom shell, 1st & 2nd deck, transverse watertight wall등)도 shell요소로 잘게 분할하였다.

- 냉각수 파이프가 위치한 외판 근방의 변형량과 응력량을 관찰함으로써 해수냉각 파이프의 파열 가능성을 판단할 수 있기 때문에 선체 내부에 위치한 해수냉각 파이프는 직접 요소분할을 하지 않았다.
- 선체부재의 치수는 기본적으로 중앙횡단면(midship section design)과 외판전개도(shell expansion)를 이용하여 실제치수를 그대로 취하였다.
- 그러나, 사고선박은 선령이 약 23년인 노후선박으로서 부식에 의해 선체부재의 판두께가 상당히 감소되어 있을 가능성이 있고, 이 경우에는 충돌에 의해 발생하는 구조손상량은 부식이 없는 경우에 비해 더욱 크게 될 것이다. 따라서 충돌 해석시에는 부식에 의한 판두께의 감소효과를 고려할 필요가 있다. 일반적으로 선체의 부식은 건조 후 약 10년경에 코팅이 벗겨진 뒤부터 진행하기 시작하며, 부식에 의한 연간 판두께의 감소량, 즉 부식속도(corrosion rate)는 일반적으로 연간 0.1-0.15mm 정도로서 부식환경에 따라 차이가 있다. 따라서, 본 해석에서는 부식에 의한 판두께 감소량을 침수된 선체부위에 대해서는 전체적으로 1.5mm(=0.15mm/년×10년), 그외의 부분은 전체적으로 1.0mm(=0.1mm/년×10년)로 가정하여 설계도면상에 명시되어 있는 선체부재의 판두께에서는 이 값을 감하였다.
- 대상 선체구조는 연강재로 만들어져 있으므로 재료의 항복강도(yield strength)는 24kg/mm², 탄성계수(Young's modulus)는 21,000 kg/mm², 포와송비(Poisson's ratio)는 0.3으로 설정하였다.
- 충돌과정에서 선체부재에 발생하는 변형률값이 임의의 한계값을 초과하여 증가하면 그 선체부재는 파단(rupture: 찢어짐)하여 구멍이 생기게 될 것이다. 본 해석에서는 이 효과를 엄밀히 고려하며, 이때 한계파단변형율(critical rupture strain)로서 실제선박과 같이 대형 구조물에 대해 실용적으로 적용되는 있는 크기, 즉 15-30% 보다 작은 8%를 설정하였다.
- 충돌문제는 시간의존성 동적해석을 통하여 수행하게 되며, 이때 충돌 물체의 질량(mass)의 효과를 고려할 필요가 있다. 본 해석에서는 적재화물의 중량(5,477톤, 제1장 참조)을 포함한 선박전체 중량의 1/3을 기관실 근방의 선미부에 분포시키고, 나머지 중량은 선체의 길이방향에 걸쳐 등분포시켰다.

(2) 부표의 구조모델링 (그림 4 참조)

- 실제의 부표를 그대로 모델링하며, 부표의 구조손상 크기를 정밀하게 해석하기 위하여 요소의 크기는 180mm×200mm로서 선체부 보다 더욱 잘게 분할하였다.

- 부표의 하단부는 Universal Joint로 연결되어 있으므로 이를 구현하기 위하여 보요소를 이용하여 부표의 하단부 절점에서는 3방향의 변위자유도는 구속하되 회전에는 대한 구속이 없이 360도 자유로이 회전할 수 있도록 모델링하였다.
- 부표의 구조는 주어진 부표의 부위별 직경, 길이, 무게 및 재료에 관한 자료로 모델링하였으며, 부표의 부위별 판두께는 부록 1에서와 같이 추정하였다.
- 부표도 연강재로 이루어져 있으며, 재료의 항복강도는 24kg/mm^2 . 포와송비는 0.3으로 가정하였다. 또한, 부표의 변형상태에 따른 선체의 손상상태를 분석하기 위하여 부표의 재료탄성계수는 2가지, 즉 실제값인 $21,000\text{kg/mm}^2$ 인 경우 (파이프가 비어있는 경우)와 가상적으로 이것의 10배인 $210,000\text{kg/mm}^2$ 의 경우 (강체로 속이 차있는 경우)를 해석하였다.
- 부표의 파단을 평가하기 위한 한계파단변형율(critical rupture strain)은 선박에 비해 구조가 상대적으로 작고 박판임을 고려하여 18%를 가정하였다.
- 부표의 부력실과 몸통 파이프를 통하여 부력이 작용하여 해상에서 부표를 쓰러뜨리더라도 오뚜기처럼 직립상태로 되돌아오게 되는데, 이것은 충돌시 구조거동에 영향을 미치게 되므로 이의 효과를 고려할 필요가 있다. 부력의 크기는 기본적으로 수면하의 침수되지 않은 공간의 체적에 해수비중을 곱하여 부록 2에서와 같이 계산할 수 있다. 본 해석에서는 이렇게 하여 얻어진 부표의 부력을 부력실 중앙부 상단에서 수면방향으로 수직으로 힘을 가하여 구현하였다. (그림 5 참조)

3. 수치 시뮬레이션의 결과분석

수치 시뮬레이션을 통하여 얻어진 결과를 분석하면 다음과 같다.

3.1 충돌시 선박과 부표간의 접촉과정 분석

그림 6-11에는 충돌하는 동안에 선박과 부표간의 접촉상황을 보여주고 있다. 그림 6은 충돌직후의 상황을 나타내는 것으로서 2.3절에서 설명한 바와같이 충돌발생 초기에는 부표의 상부 등대부위가 Frame No. 15-16위치 보다 선수쪽으로 5.75m 앞쪽에 위치한 선박의 우현쪽 갑판부와 접촉한다. 그림 7은 약 0.075초 후의 상황을 나타내는 것으로서 선박이 앞으로 전진함에 따라 부표와 접촉하는 선박의 위치는 점차 선미 및 선저방향으로 이동한다.

그림 8과 9는 약 4.25초 후의 상황으로서 부표의 부력실통과 선체가 접촉한 직후를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부표의 부력실은 선박의 길이

방향으로는 Frame No. 15-16간의 선체부와 접촉하지만 선박의 깊이방향으로는 선저에서부터 약 1m 상부에 위치한 선체와 접촉한다. 냉각수 파이프는 Frame No. 15-16간 선저에서부터 약 2.5-3.0m 상부에 위치하고 있으므로 부표와 냉각수 파이프간의 직접 접촉은 일어나지 않고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 10과 11은 약 8.68초 후의 상황을 나타내는 것으로서 부표가 좌현쪽 선체의 판과 접촉하기 전에 부표의 상부 등대부위는 우현쪽 Frame No. 6 부분의 선미부까지 이동하고 있다.

3.2 부표의 구조손상 및 응력분석

그림 12와 13은 충돌하는 동안에 부표에 발생하는 대표적인 응력분포를 나타내고 있다. 이들 결과는 부표의 실제 재료에 대한 탄성계수 값, 즉 $21,000 \text{ kg/mm}^2$ 을 적용하여 계산한 것이다. 그림 12는 충돌직후, 즉 약 0.075초 후의 상황을 나타내며, 그림 13은 약 4.25초 후 부표의 부력실과 우현쪽 Frame No. 15-16간 선저에서 약 1m 상부에 위치한 선체가 접촉한 직후의 응력분포를 나타내고 있다.

발생응력의 최대값은 부표의 상부 등대부위에서 충돌 직후 약 36.18 kg/mm^2 였으며, 부표의 부력실 상부근방의 파이프에서 부력실과 우현쪽 선체가 접촉하는 순간에 약 34.9 kg/mm^2 , 부력실에서는 약 31.0 kg/mm^2 이 발생하였다. 이처럼 하중이 정적으로 작용할 때의 재료 항복강도인 24 kg/mm^2 보다 큰 응력이 발생할 수 있는 것은 충돌시에는 하중속도가 빠르고, 그 결과 재료의 변형속도 (strain rate)가 증가하여 동적 재료항복강도(dynamic yield strength)가 커지기 때문이다.

그러나, 재료의 정적 항복강도가 24.0 kg/mm^2 임을 감안할 때 부력실 근방은 탄성범위를 벗어나서 충돌후 가해진 힘을 제거하더라도, 변형이 남게되는 소성거동(plastic behavior)을 하고 있으며, 그 크기는 부표의 상부 등대부위에서 약 14.4mm, 부력실 부근에서 약 26.0mm였다. 이것은 부록 1에서 나타내는 바와같이 각각 부표의 파이프 판두께가 2.82mm이므로 이것의 약 5배, 부력실의 판두께가 13.39mm이므로 이것의 약 2배의 큰 처짐 변형량이다. 특히, 부표 상부에서의 변형량은 아주 크다. 한편, 부표의 탄성계수를 실제값보다 10배 크게하여 계산한 경우에는 부표에는 변형이 거의 발생하지 않는다.

3.3 선체의 구조손상 및 응력분포

먼저, 그림 14에서 18은 부표의 재료 탄성계수를 실제 값인 $21,000 \text{ kg/mm}^2$ 으로 설정하여 실제상황에서와 같이 부표도 변형이 일어난다고 생각하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 그림 14와 15는 충돌하는 동안의 선체 충돌부위에 대한 응력분포를 나타내고 있다.

그림 14는 충돌직후의 응력분포로서 부표의 상부 등대부위와 상갑판이 충돌한 후 상갑판에는 최대 약 3.3kg/mm^2 의 응력이 발생하였다. 그림 15는 약 4.25초 후 부력실과 선체가 접촉한 후의 응력분포로서 Frame No. 15-16사이 선저에서 약 1m 상부의 부표부력실과 직접 접촉하는 선체부에 최대 약 4.8kg/mm^2 의 응력이 발생하였다. 이때 부표 부력실과 직접 접촉하는 부위에서 선체 갑판쪽으로 약 1.5m 윗쪽에 위치한 해수냉각 파이프 위치에 발생하는 최대응력값은 약 2.26kg/mm^2 였다. 선체 재료의 항복강도는 24 kg/mm^2 이므로 이들 응력값은 파손을 일으키기에는 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 크기이다.

또한, 그림 16에서 18에는 선체의 변형해석 결과를 보여주고 있다. 그림 16.a는 약 4.25초 후 부표의 부력실과 선체가 접촉한 후의 전체이동량을 포함한 선체 처짐변형분포를 나타내고 있으며, 그림 16.b는 이때 우현 선체 Frame No. 15-16사이에 있는 선체의외판의 처짐분포를 보여주고 있다. 이들 그림으로부터 처짐의 최대값은 부표의 부력실과 직접 접촉하는 선체부위에서 23.63mm, 해수냉각 파이프가 위치한 곳에서 19.6mm 임을 알 수 있다. 이 처짐량은 선체 판두께의 약 2배 정도를 나타내는 것이다.

부표와 같은 원통 파이프구조에서는 판두께의 2배정도의 처짐변형이 발생하면 구조강도적으로 큰 문제가 생기게 되지만, 인장막력(membrane tension) 효과가 큰 판구조에서는 판두께의 2배정도의 처짐량은 상대적으로 미미한 크기이다. 이것은 그림 17에 나타나는 바와 같이 영구잔류 변형의 척도가 되는 이때의 소성변형율값이 부표의 부력실과 직접 접촉하는 부위에서 3.037×10^{-4} 에 불과한 극히 작은 값이라는 사실로 부터도 확인할 수 있다.

2.4절에서 설명한 바와 같이 파공이 생기기 위한 재료의 한계파단변형률은 0.08 이므로 충돌후 선체와 부력실의 접촉부위가 파단할 가능성은 거의 없다. 더욱이 해수냉각 파이프는 부력실과의 접촉위치에서 상갑판쪽으로 상부 1.5-2.0m에 위치하여 변형량은 이 보다 더욱 작으므로 충돌후에 해수냉각 파이프의 파손 가능성은 더 더욱 없다고 판단된다.

그림 18은 충돌하는 동안의 시간변화에 따른 부표와 선체간의 전체적인 수평방향 이동량을 나타내고 있다. 변형은 약 4.25초 후 부력실과 선체가 접촉한 후부터 크게 증가함을 알 수 있다.

한편, 부표에 변형이 발생하지 않도록 가상적으로 실제 부표재료 탄성계수의 10배 (부표 파이프를 속이 찬 강재로 가정한 경우), 즉 $210,000\text{ kg/mm}^2$ 을 취하여 계산한 경우에 선체구조에 발생하는 응력값은 부력실과 선체가 접촉하는 부위에서 최대 약 9.5kg/mm^2 으로서 부표에 대해 실제 탄성계수값 (부표 파이프를 속이 비어 있다고 가정한 경우), 즉 $21,000\text{ kg/mm}^2$ 을 적용했을 때에 비하여 약 2배정도 더 큰 값

을 보였으며, 해수냉각 파이프가 위치한 선체부위는 이보다 작은 응력이 발생하였다. 따라서, 선체재료의 항복강도가 24kg/mm^2 임을 감안할 때 여전히 이로 인해 해수냉각 파이프가 파열할 가능성은 없다고 판단되었다.

4. 결 론

이상의 수치 시뮬레이션 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 충돌해석결과를 바탕으로 부표와 선체간의 접촉과정을 분석해 볼 때 충돌초기에 부표의 상부 등대부위는 선체의 우현쪽 갑판부와 접촉하며, 충돌이 진행됨에 따라 부표와 선체는 연속적으로 접촉한다. 이 과정에서 부표에는 큰 변형과 응력이 발생한다. 특히, 부표의 상부 등대부, 상부 등대부와 부력실간의 몸통 (파이프) 및 부력실에 큰 소성변형과 함께 큰 응력이 발생한다.
- (2) 충돌하는 동안에 부표의 부력실과 접촉하는 선체부위는 Frame No. 15-16 사이에서 선저 기선 (base line)으로부터 갑판쪽으로 약 1m 윗쪽 위치이며, 해수냉각 파이프가 위치한 선체부위와 부표의 부력실간에는 직접적인 접촉이 일어나지 않는다.
- (3) 충돌직전에 부표가 거의 직립된 상태에 있는 한, 부표의 몸통과 선체의 접촉이 없이 곧 바로 선체와 부력실과의 접촉은 일어나지 않는다.
- (4) 충돌하는 동안에 부표와 선체에는 각각 변형이 발생하였다. 부표에는 상부 등대부위에서 최대 약 14.4mm 정도의 변형이 발생하였으며, 부력실 근방에서는 최대 약 26.0mm 정도의 변형이 발생하였다. 특히, 부표의 상부뿐 아니라 부력실에는 재료의 정적 항복강도를 초과하는 크기의 최대 응력값이 발생하여 재료가 소성화 (충돌후에도 영구히 처짐변형이 잔류함) 하였으며, 이것은 부표의 상부와 부력실이 완전히 파괴될 정도는 아니지만 상당량의 구조변형이 발생하였음을 보여주고 있다. 이와 같은 분석결과는 당시상황, 즉 부표의 수선상부에 아무런 손상이 없었다는 사실과는 반하므로 사고선박과 위 부표간에 충돌이 실제로 일어나지 않았을 가능성이 높다. 반면, 이때 부표와 접촉하는 선체부의 변형량과 응력값은 미소하며, 충돌에 의해 해수 냉각파이프가 파열될 가능성은 희박하다고 판단되었다. 이처럼 부표에 비해 선체의 충돌손상량이 상대적으로 극히 작은 것은 선체의 구조강성이 부표에 비해 극히 클 뿐만 아니라 부표는 부력에 의해서만 직립상태를 유지하고 있으며, 해저와 Universal Joint로 연결되어 회전구속이 없이 360도 방향으로 자유로이 회전할 수 있기 때문이다.

- (5) 부표 몸통에 구조손상이 거의 발생하지 않으면서 선체구조가 파손할 가능성이 있는지를 분석하기 위하여 부표의 재료 탄성계수를 실제보다 10배정도 크게 가상적으로 설정하여 부표를 속이 차 있는 물체, 즉 일종의 강체(rigid body)로 모델링하여 해석을 수행하였으나, 이 경우에도 선체에 발생하는 변형 및 응력량은 전반적으로 미소하였으며, 해수 냉각 파이프가 파열될 가능성은 희박하다고 판단되었다.
- (6) 선박의 우현쪽에 부표와 접촉한 뒤 계속하여 선저부가 부표 위를 스쳐 지나가는 경우에 우현쪽 외판에는 굽힌 흔적이 남을 가능성이 있다. (수치 시뮬레이션으로는 구체적으로 이같은 굽힌 자국의 흔적을 평가하기가 어려움). 그러나, 굽힌 자국이 생긴다면 부표의 상부와 접촉하는 우현쪽 상갑판부근에서부터 자국이 시작될 가능성이 높다. (그림 16.b 참조). 또한, 좌현쪽에는 충돌해석에 의한 접촉과정을 분석해 볼 때 굽힌 자국이 생기더라도 선저 근방에만 생길 가능성이 높다고 판단된다. 왜냐하면, 사고선박의 선저가 부표위를 스쳐 지나가는 동안에 선박은 계속하여 전진하기 때문에 부표와 좌현쪽의 선저부가 접촉한 후에 좌현쪽 상부 외판과의 접촉은 불가능하기 때문이다.

부록 1 : 부표의 판두께 추정

그림 1에서 나타낸 부표의 부위별 판두께는 다음과 같이 추정할 수 있다. 여기서, 부표는 연강으로 만들어져 있으므로 강재의 비중은 $\rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 이다.

$$\textcircled{4} \text{ pipe : } 2\pi r \times h \times t_4 \times \rho = 216.6 \text{ kg}$$

$$2\pi \times 150 \times (8500 + 1900) \times t_4 \times 7.85 \times 10^{-6} = 216.6$$

$$\therefore t_4 = 2.82 \text{ mm}$$

$$\textcircled{5} \text{ 부력실} = \text{원통} + \text{상·하 원뿔} :$$

$$[2\pi rh + \pi(r_1 + r_2)(\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + h_1^2} + \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + h_2^2})] \times t_5 \times \rho = 1630.2 \text{ kg}$$

$$[2\pi \times 1000 \times 1400 + \pi \times (1000 + 150)(\sqrt{(1000 - 150)^2 + 200^2} + \sqrt{(1000 - 150)^2 + 500^2})] \times t_5 \times 7.85 \times 10^{-6} = 1630.2$$

$$\therefore t_5 = 13.39 \text{ mm}$$

$$\textcircled{6} \text{ 등대하부} = \textcircled{9} \text{ 등대상부} :$$

$$[\pi(r_1 + r_2)(\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + h^2})] \times t_6 \times \rho = 282.8 \text{ kg}$$

$$[\pi \times (600 + 150)(\sqrt{(600 - 150)^2 + 1000^2})] \times t_6 \times 7.85 \times 10^{-6} = 282.8$$

$$\therefore t_6 = 13.94 \text{ mm}$$

$$\textcircled{7} \text{ 부표의 상부 등대 몸통} : 2\pi r \times h \times t_7 \times \rho = 147.9 \text{ kg}$$

$$2\pi \times 600 \times 600 \times t_7 \times 7.85 \times 10^{-6} = 147.9$$

$$\therefore t_7 = 8.33 \text{ mm}$$

부록 2 : 부표의 부력 추정

해수 밀도를 $\rho_s = 1.025 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 라 할 때, 부표의 전체 부력은 수면하의 모든 비침수공간(즉, 부력실과 파이프)의 체적에 해수비중을 곱하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\cdot \text{부력실 부력} = [\pi r^2 h + \frac{1}{3}\pi(r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)(h_1 + h_2)] \times \rho_s$$

$$= [\pi \times 1000^2 \times 1400 + \frac{1}{3}\pi(1000^2 + 150^2 + 1000 \times 150)(200 + 500)] \times 1.025 \times 10^{-6}$$

$$= 5389.16 \text{ kg}$$

$$\cdot \text{수면하 파이프 부력} = \pi R^2 H_1 \times \rho_s = \pi \times 150^2 \times 7900 \times 1.025 \times 10^{-6}$$

$$= 572.38 \text{ kg}$$

$$\text{따라서, 전체 부력} = \text{부력실 부력} + \text{수면하 파이프 부력}$$

$$= 5389.16 + 572.38$$

$$= 5961.54 \text{ kg}$$

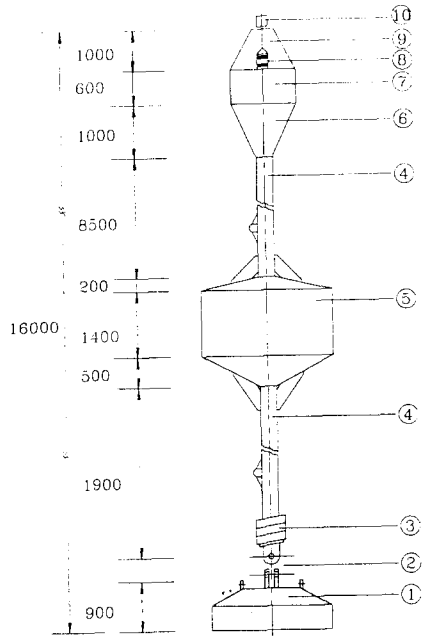
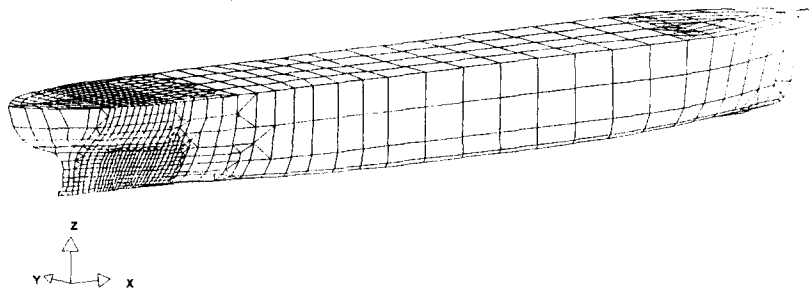


그림 1 부표의 구조 (단위 : mm)

TIME = 5.8179088E-003



* MAX. DISPL. 1.49826E-02 AT NODE 18

SCALE FACTOR = 1.0000E+00

그림 2 선박의 구조 모델링

TIME = 5.6179088E-003

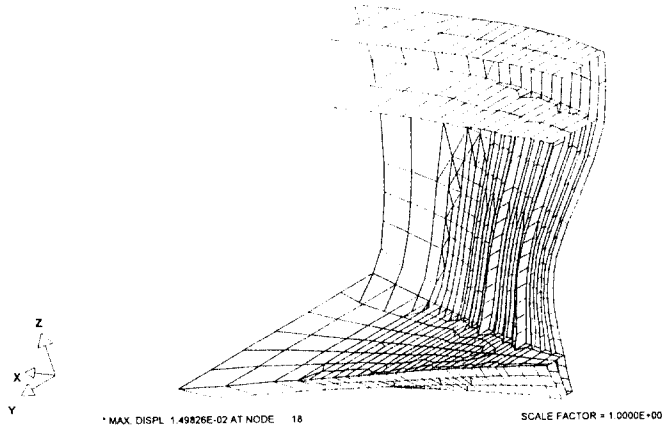


그림 3 충돌 부위의 선체내부 구조 모델링



그림 4 부표의 구조 모델링

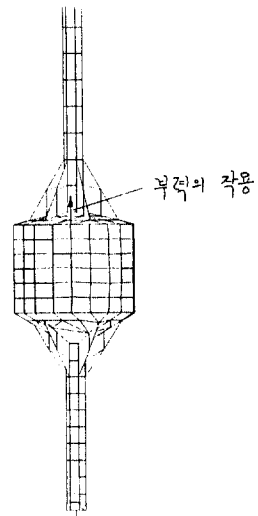


그림 5 부력의 작용

TIME = 5.8179088E-003

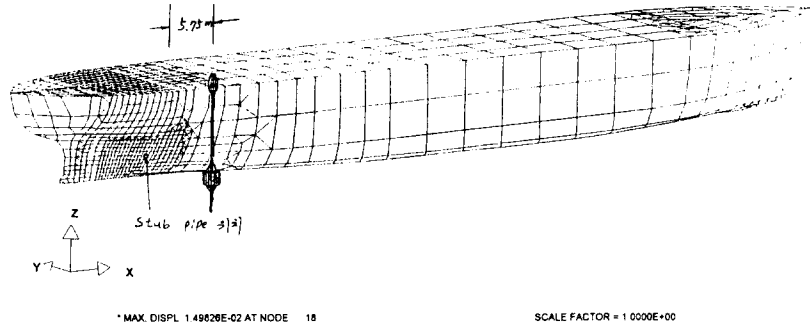


그림 6 충돌시 선박과 부표와의 접촉과정 (충돌 직후)

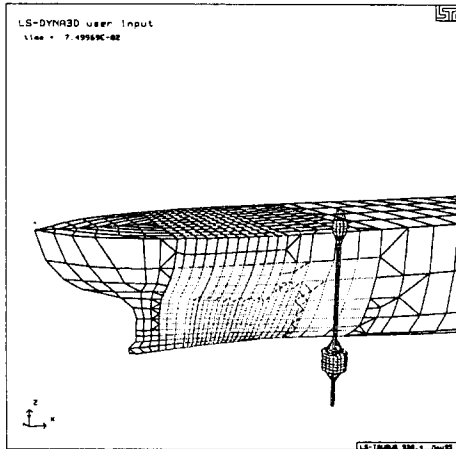


그림 7 충돌시 선박과 부표와의
접촉과정 (약 0.075초 후)

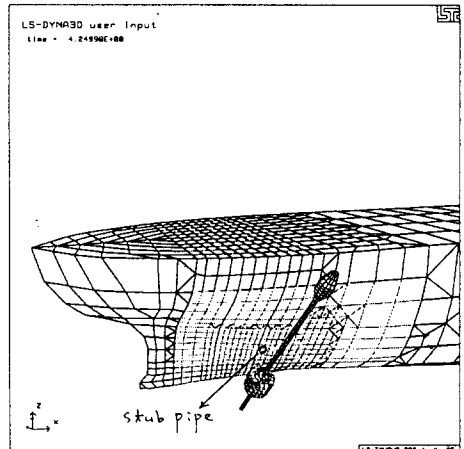


그림 8 충돌시 선박과 부표와의
접촉과정 (약 4.25초 후)

TIME = 5.8179088E-003

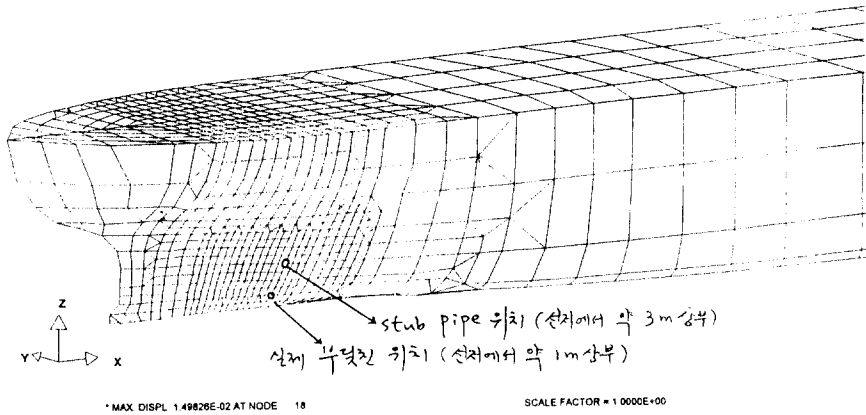


그림 9 선박과 부표의 부력실간의 접촉위치

TIME = 8.6824617E+000

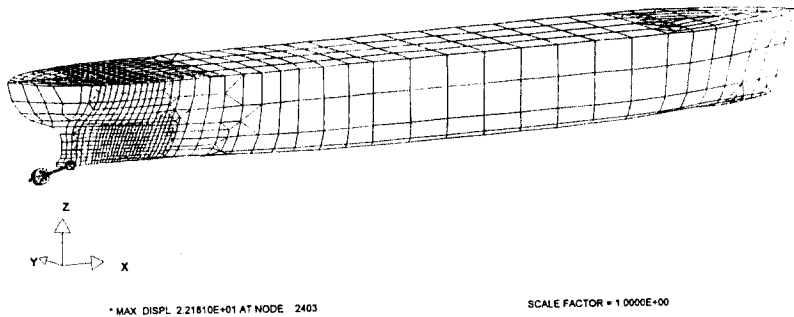


그림 10 충돌시 선박과 부표와의 접촉과정 (약 8.68초 후)

TIME = 8.6824617E+000

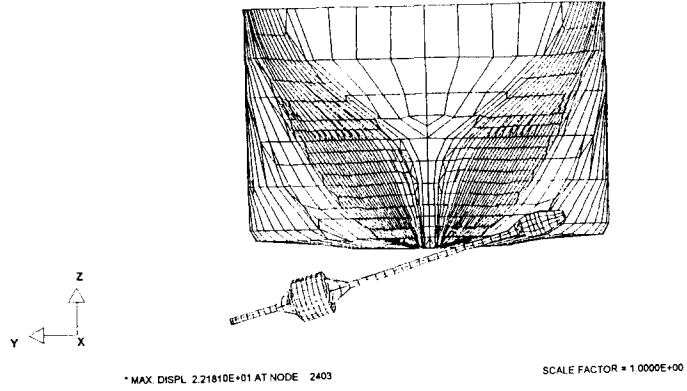


그림 11 총돌시 선박과 부표와의 접촉과정 (선체횡단면) (약 8.68초 후)

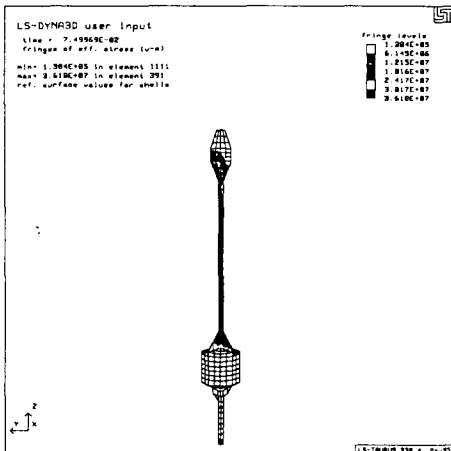


그림 12 부표의 응력분포
(약 0.075초 후)

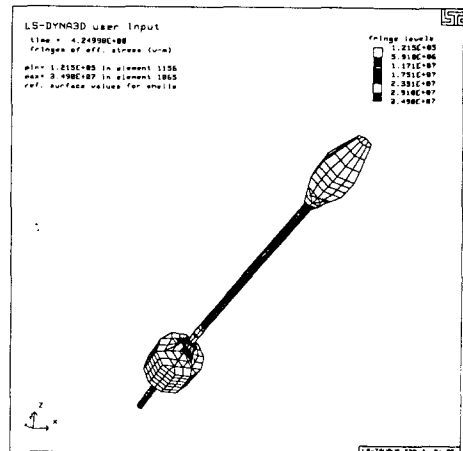
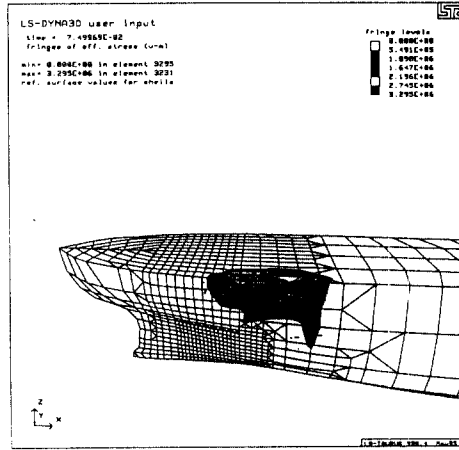
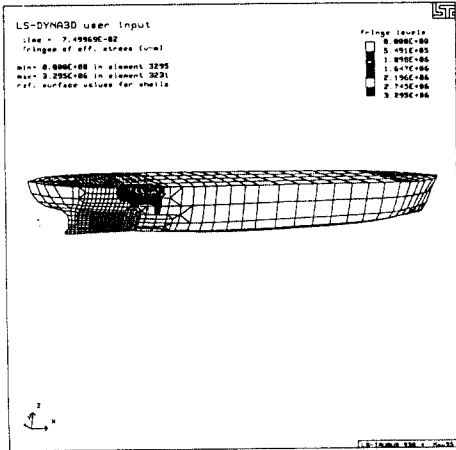
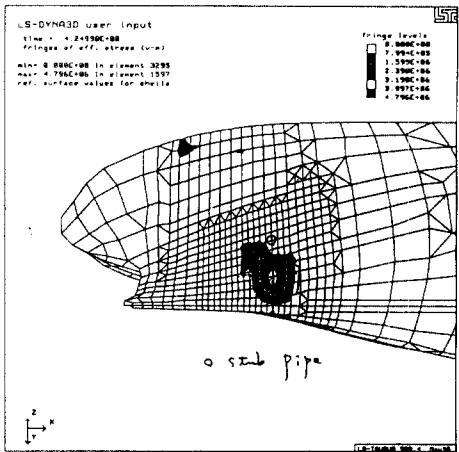
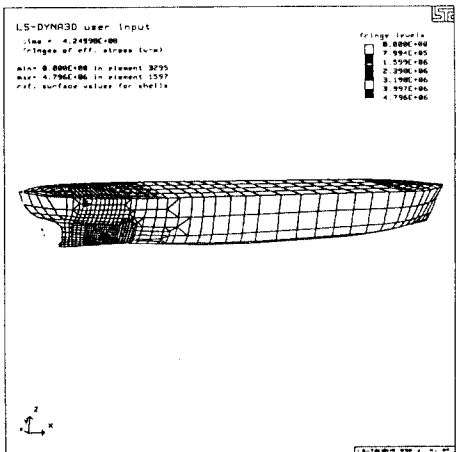


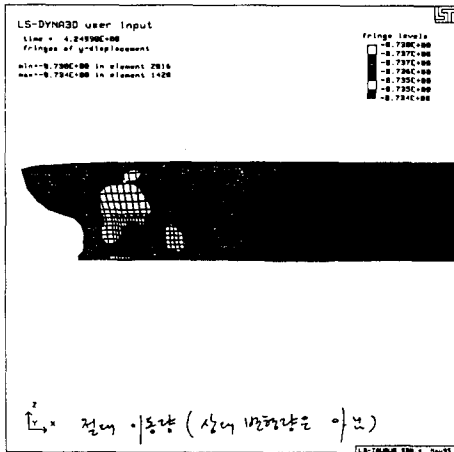
그림 13 부표의 응력분포
(약 4.25초 후)
(부력실과 선체가 접촉한 직후)



(a) 전체도면 (b) 확대도면
 그림 14 선체의 응력분포 (약 0.075초 후)



(a) 전체도면 (b) 확대도면
 그림 15 선체의 응력분포 (약 4.25초 후, 부력실과 선체가 접촉한 직후)



위치	높이 (mm)	처짐량 (mm)
1	100	21.1
2	500	23.36
3	929	23.63
4	1450	20.0
5	1903	19.5
6	2416	19.4
7	2934	19.0
8	3454	18.5
9	3978	17.2
10	4494	16.5
11	5000	13.2
12	5458	12.0
13	5916	9.0
14	6821	8.6
15	7753	7.0
16	8965	2.0
17	9861	0.9

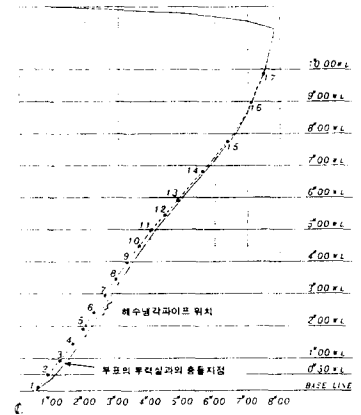


그림 16.a 선체구조의 변형분포
(부표와의 충돌에 의한 전체 이동량 포함)

그림 16.b 선체외판의 절대처짐량 분포 (약 4.25초 후)
(Frame No. 15-16사이, 부표실의 접촉 순간)

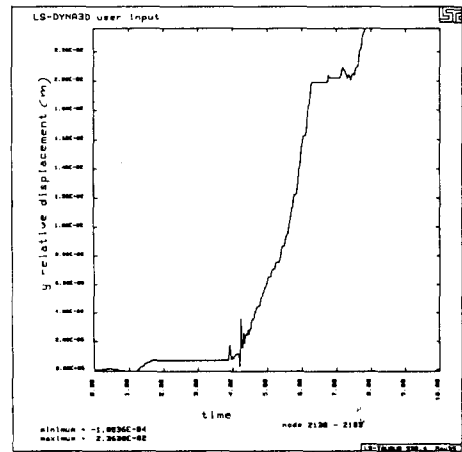
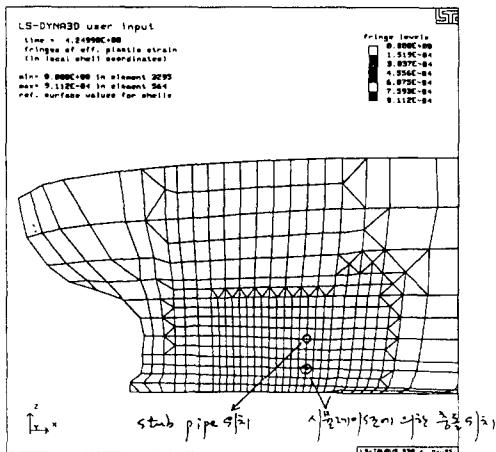


그림 17 선체구조의 소성변형을 분포
(약 4.25초 후)

그림 18 충돌시간의 변화에 따른 선박의 수평 방향 변형량
(전체 이동량 포함)