

NE/NASTRAN과 FEMAP을 이용한 선박과 케이슨의 충돌 응답 해석

주서진*

백영인**

김우진***

본 보고서는 광양항 3단계 1차 컨테이너 터미널 축조공사의 설계 중에 케이슨의 안전검토를 위한 선박과 케이슨의 충돌 해석을 요약한 내용이다.

1. 서론

선박이 물품의 제하 및 적하를 위하여 컨테이너 부두에 접항시 선박의 케이슨과의 충돌에 의한 케이슨의 발생 응력을 파악함으로써 구조 안정성을 검토한다.

선박이 일정 속도로 항만에 접항시 선박은 케이슨에 부착된 방충재와 충돌하게된다. 케이슨에 부착된 방충재는 선박의 운동에너지를 흡수하여 케이슨으로 전달되는 전달 에너지를 최소화하여 케이슨의 구조물에 발생하는 응력을 최소화하도록 설계한다. 또한 선박의 운동량은 케이슨의 방충재와의 접촉 시간이 길어질수록 운동량이 충격량으로 변환되면서 충격 하중은 감소하게 된다. 따라서 실제 케이슨에 가해지는 하중은 선박과 방충재의 충돌 접촉 시간이 길어질 수록 감소하게 되며, 하중 전달 시간이 길어짐에 따라 하중의 동적 특성이 감소하게 되어 케이슨에 가해지는 하중 형태는 정적 하중과 유사하게 된다.

2. 비선형 충돌 해석

선박과 케이슨의 방충재 사이의 에너지 전달은 선박의 케이슨 방충재로의 충돌 접촉으로 발생하며, 이를 FEM으로 해석하기 위해서는 충돌, 즉 방충재와 선박간의 비선형 접촉 조건을 해석하기 위한 비선형 해석이 수행되어야 한다. 또한, 선박이 케이슨에 접근하면서 케이슨의 방충재와 접촉이 되기 시작하면 충돌이 진행되는 시간에 따라 방충재의 변형과 선박의 운동 속도가 변화하므로 이를 구하기 위한 동적 과도 응답 해석이 수행되어야 하며, 동시에 방충재 고무의 재료 비선형 효과도 고려되어야 한다.

이와 같이 충돌 접촉에 의한 비선형과 시간에 따라 그 거동이 달라지므로 선박의 충돌 해석은 접촉과 재료 비선형 및 선박의 접근을 고려할 수 있는 비선형 동적 과도 응답 해석을 수행하여야 한다.

* (주) 인피닉스 대표이사

** 대림산업(주) 기술연구소 부장

*** 대림산업(주) 기술연구소 사원

2.1. 비선형 해석

비선형 거동 중의 대표적인 것 중의 하나는 재료 비선형으로, 하중을 받는 재료의 특성이 하중에 따라 변화하는 것이다. 본 해석에서 사용되는 방충재의 재료 특성이 이에 속하게 된다. 또 다른 비선형 요인으로는 기하 비선형으로 대변형에 의해 나타난다. 이와는 조금 다른 형태의 비선형으로는 접촉에 의한 비선형 거동이 있다. 본 해석에서의 방충재와 선박의 접촉에 의해 해석 대상이 되는 시스템이 변화하는 경우이다.

대부분의 많은 실제적인 문제들이 선형 범위 하에서 동작하고 있으나, 이러한 비선형 거동을 나타내고 있는 경우에는 이러한 문제를 해석하기 위해 Newton-Raphson Method를 사용하는 축차 해석법을 사용한다. 즉 하중 경로를 여러 개의 선형 스텝으로 구분하고 각 스텝에서의 평형 방정식을 만족하는 해를 구하는 것이다. 이러한 증분 형으로 표시된 평형 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K_T]\{\Delta D\} = \{\Delta R\}$$

여기서,

$[K_T]$ 는 글로벌 탄젠트 강성 행렬

$\{\Delta D\}$ 는 글로벌 증분 변위 벡터

$\{\Delta R\}$ 은 글로벌 증분 하중 벡터이다.

글로벌 탄젠트 강성 행렬 $[K_T]$ 은 글로벌 변위 벡터 $\{D\}$ 의 함수로 이것은 시스템이 비선형이기 때문이다. 각 증분에서의 변위 벡터 $\{D\}$ 는 앞서의 모든 증분 변위 벡터 $\{\Delta D\}$ 의 합이 된다.

정적 비선형 문제는 이러한 축차 해석법에 의해 기하 비선형과 재료 비선형 및 접촉 문제의 평형 방정식을 풀게 된다.

2.2. 동적 과도 응답 해석

기본적으로 동적 과도 응답 해석에는 시스템의 응답 형태를 고유 모드의 합성으로 표현하는 모드합성법을 많이 사용한다. 이것은 동적 과도 응답 해석을 할 때 대부분의 경우 필요한 고유 모드가 그다지 많지 않아 최소한의 고유 모드의 조합으로 시스템의 특성을 나타낼 수 있기 때문에, 직접 적분법에 의한 동적 과도 응답 해석보다 훨씬 효율적이다.

2.3. 비선형 동적 과도 응답 해석

비선형 동적 과도 응답 해석은 정적 비선형 해석과 동적 과도 응답 해석을 복합적으로 수행하는 것이다. 정적 비선형 해석에서는 하중과 경계 조건이 시간에 따라 변하지 않을 뿐만 아니라 관성력이 해석에 포함되지 않는다. 그러나 비선형 과도응답 해석은 비선형 해석에 관성력과 댐핑 효과가 들어가고 과도 하중이 포함된다.

따라서, 비선형 과도 응답 해석에서는 일반적인 선형 과도 응답 해석에 많이 사용하는 고유모드합성법에 의한 동적 응답 해석법을 사용하지 않고 직접 적분법을 사용한다. 직접 적분법에서는 각 시간 증분시 거동의 평형방정식을 Step-by-Step으로 적분해나가면서 풀게된다.

일반적인 동적 과도 응답의 평형방정식은 다음과 같다.

$$[M] \ddot{U} + [B] \dot{U} + [K]U = R(t)$$

여기서,

[K] 는 글로벌 강성 행렬

[M] 은 글로벌 질량 행렬

[B] 는 글로벌 댐핑 행렬

[R] 은 글로벌 하중 벡터

[\dot{U}] 는 글로벌 가속도 벡터

[\dot{U}] 는 글로벌 속도 벡터

[U] 는 글로벌 변위 벡터이다.

평형 방정식은 직접 수치 적분에 의해 시간 증분 Δt 의 간격에 따라 각 시간에서 만족된다. 평형은 비선형 해석 조건을 수립시키기 위한 촉차 과정을 통해 이루어진다. 직접 시간 적분은 Newmark's Method를 사용하며 Adaptive Time stepping과 Bisection 을 사용하여 솔루션의 효율을 높인다. 선형 과도 응답 해석과 마찬가지로 하중은 시간에 따라 변화할 수 있으며 비선형 조건들인 대변형과 재료비선형 및 접촉 조건 등이 포함될 수 있다.

각 시간 증분에서 비선형 조건의 수립을 위해서는 비선형 정적 해석에서 사용한 것과 같은 Newton-Raphson 촉차 해석법을 사용한다. 즉, 각 시간 증분에 따라 Newmark's Method에 의한 수치 적분에 의해 시간 대역에서의 적분이 이루어지며 각 증분 하에서는 비선형 수립을 위해 Newton-Raphson 촉차에 의해 하중 대역에서의 적분이 이루어짐으로써 이중 적분으로 전체 시스템의 시간 증분에 따른 비선형 거동을 해석해 나가게 된다.

3. 유한 요소 모델링

본 해석의 목적은 방충재 프레임이나 방충재 고무의 변형을 보기 위한 것이 아니고, 선박의 충돌 에너지가 방충재를 통해 케이슨에 전달될 때, 케이슨에 전달되는 전달력의 크기와 케이슨에 발생하는 응력, 모멘트, 하중 등을 확인하기 위한 것이다. 따라서, 방충재의 정확한 변형 거동을 보기 위한 유한 요소 모델이 아닌, 하중 전달 경로로서의 유한 요소 모델링을 수행하였다.

따라서, 실제 방충재의 거동에 대한 상세한 고찰보다는 방충재를 통한 하중의 최대 크기를 얻기 위해 방충재의 케이슨 쪽 연결부를 고정 단으로 놓고 방충재의 프레임에 선박이 충돌하는 것으로 모델링 하여 케이슨에 전달되는 최대하중을 먼저 구해보았다. 이것은 실제 선박의 충돌 에너지가 케이슨의 변형 에너지로 흡수되는 것을 막아 방충재만의 변형 에너지로 흡수되게 하여 선박의 운동량이 충격량으로 변환될 때 케이슨으로의 전달 가능한 최대 전달력을 구할 수 있게 된다.

또한, 방충재가 케이슨에 부착된 경우에 선박이 충돌하는 경우도 모델링 하여 계산하였으며, 이 경우에는 실제 케이슨에 전달되는 하중은 위의 경우보다 보다 실제에 가까운 결과를 보여 줄 것이며, 케이슨에 발생하는 응력 및 모멘트 등의 결과를 바로 확인할 수 있도록 하였다. 케이슨의 경계는 바닥 면을 고정으로 하여 보다 안전측 해석 결과가 나오도록 하였다.

3.1. 방충재의 모델링

방충재는 프레임과 원기둥형 고무 2개로 구성된다. 프레임과 고무는 가능한 단순화하였다. 프레임과 고무 모두 3차원 육면체 요소로 구성하였으며, 프레임과 케이슨간에 연결된 체인은 케이블요소로 구성하였다.

유한요소 모델은 다음 그림과 같이 구성되었다. 사용된 요소는 모두 육면체 솔리드 요소이며, 1,600여 개의

노드와 1,200여 개의 요소가 생성되었다.

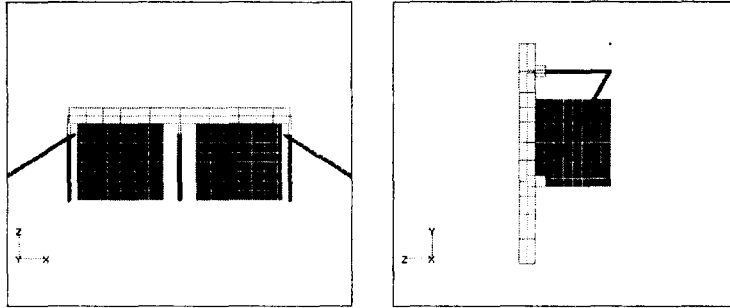


그림 1. 방충재의 모델링

프레임은 고무에 비해 훨씬 큰 강성을 가지므로 고무와 비교할 때는 강제로써의 거동을 보이게 된다. 또한 본 해석은 프레임의 변형을 보기 위한 것이 아니므로 프레임의 재료 물성치는 다음과 같은 일반적인 구조강의 물성치를 사용하였다.

Young's Modulus E	Poisson's Ratio ν	Structural Damping Ratio (2C/C0)
210 GPa	0.3	0.1

고무는 재료적 특성에 의해 일반적으로 변형률 0.2 이하 정도의 범위에서는 선형 거동을 보이지만 비례한도를 넘어가면 비선형 탄성 거동을 한다. 고무는 포아송 비가 0.5에 가까워 비압축성 거동을 보이나 고무의 전단 탄성 계수는 수평 변위에 의존하여 변형률이 작은 경우에는 변형률이 큰 경우보다 약 2/3배의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.

고무는 일반적으로 금속에 비하여 탄성변형과 매우 마찰이 매우 커서 감쇠성이 양호하고 금속과의 접착성이 강하여 금속과 결합하여 제작이 가능하다. 또한 제작 과정에서 여러 가지 변수가 많이 작용하기 때문에 그 특성을 보편화하기는 매우 어렵다. 따라서 고무의 경우 반드시 시험을 거쳐서 그 특성을 파악하는 것이 중요하다.

고무의 변형률이 0.5를 넘어가게 되면 일반적인 탄성론에 근거한 유효요소로는 그 거동을 보편화하기가 어렵기 때문에 과탄성(HyperElastic) 재료로 모델링 한다. 재료의 모델 구성 방정식은 단위 부피당 재료에 저장되는 변형률 에너지를 정의되며 Ogden 모델, Polynomial 모델, Mooney-Rivlin 모델, Neo-Hookean 모델, Hencky 모델 등이 있다. 일반적으로 가장 간단한 형태인 Mooney-Rivlin 함수형을 많이 사용하고 있으나 각 모델간의 큰 차이는 없는 것으로 알려져 있다.

본 해석에서는 고무의 변형률이 0.5 이하일 것으로 가정하고 고무 재질 특성을 비선형 탄성모델로 구성하여 해를 구하였으며, 해석 결과 변형률이 0.5 이하임을 확인할 수 있었다. 해석에 사용된 고무 재질의 탄성 곡선은 시험에 의해 구해진 값을 기준으로 사용하였으며 그 시험치는 다음의 그래프와 같다.

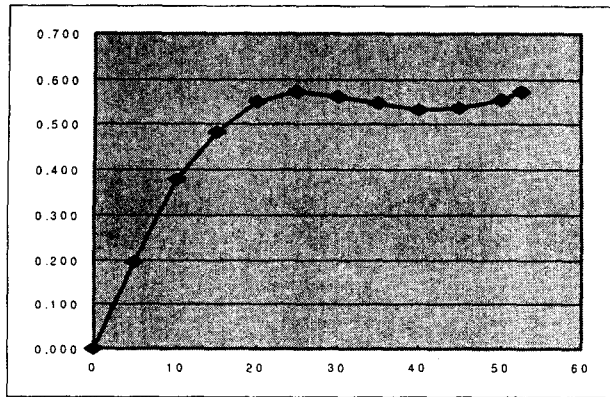


그림 2. 고무의 비선형 물성

이외에 본 해석에 사용한 고무의 재질 특성은 다음과 같다.

질량 밀도 ρ	Poisson's Ratio ν	Elemental Structural damping ($2C/C0$)
1,000 kg/m ³	0.495	1.5

3.2. 선박의 모델링

기준 선박의 제원은 다음과 같으며, 선박의 형태는 일반적인 대형 선박의 외형을 사용하였다.

DWT = 140,000.

선장 = 380 m

선폭 = 55 m

본 해석에서의 선박의 역할은 운동에너지의 전달이며, 기준 속도로 접항을 하므로, 선박의 운동량이 방충재의 충격량으로 변환되기에 충분한 정도로 모델링 하였다. 외형은 기준 각도로 접근할 때 방충재와의 충돌 시에 방충재의 변형 형태에 주요한 요인으로 작용하므로 선박의 외형을 그대로 모사 하였으며 유한 요소는 선박 자체의 변형 거동을 볼 필요가 없으므로 사면체 솔리드 요소로 모델링 하였다. 즉 선박은 방충재에 흡수되는 에너지의 기준으로만 사용되므로 전체 질량을 DWT 를 맞추기 위한 값으로 사면체 요소의 질량 밀도가 조정되었다.

유한요소 모델은 다음 그림과 같이 만들어졌다. 모두 사면체 솔리드 요소로 구성되었으며, 선박의 외형을 충분히 모사하였다.

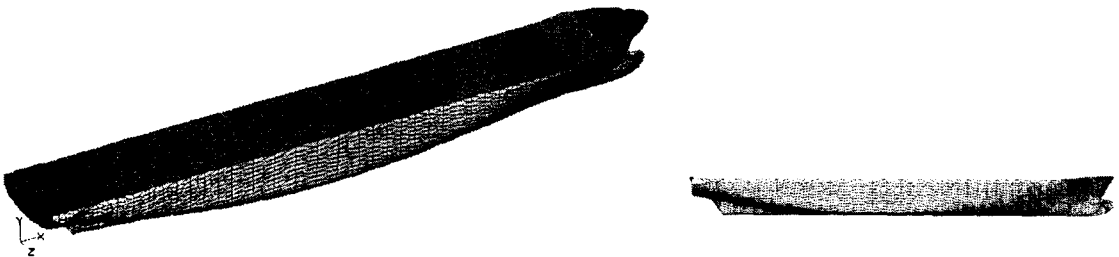


그림 3. 선박의 모델링

3.3. 케이슨의 모델링

케이슨의 상치는 솔리드 사면체 요소와 펜타 요소로 모델링 하였으며, 본체는 모두 평판 요소로 모델링 하였다. 모델은 다음 그림과 같이 구성되었다. 요소는 약 11,000개이다.

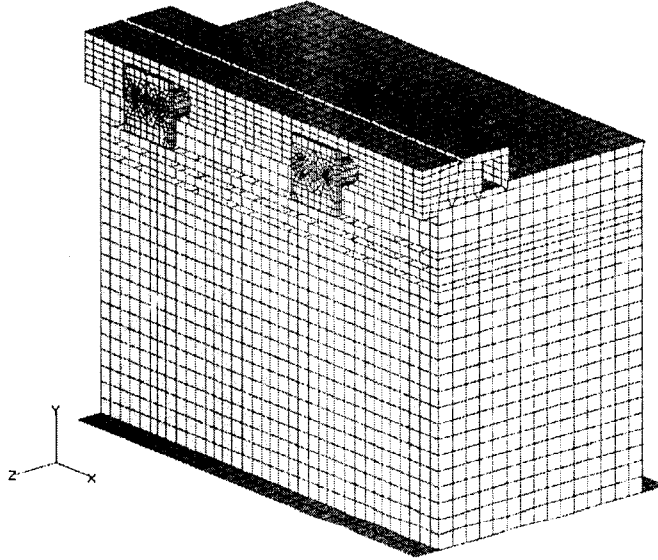


그림 4. 케이슨의 모델링

4. 방충재와 선박의 충돌 해석 조건

해석은 모두 6가지로 수행하였다. 선박이 평행하게 접근하는 경우에 대하여 2가지 나누었으며, 선박이 10도와 20도로 기울어져서 접항하는 경우에 대하여 접근속도가 0.12m/sec 인 경우와 0.15m/sec인 경우로 나누어 계산하였다.

4.1. 평행 접근시

선박이 평행하게 접항하는 경우는 접근 속도를 0.12m/sec로 하였으며, 선박의 길이가 380m로 충분히 길기 때문에, 방충재는 최소 4개 이상이 동시에 충격을 흡수한다고 가정하였다. 실제로는 방충재의 설치 간격이 10m ~ 20m 로 설계되므로, $380/20 = 16$ 개가 동시에 충격을 흡수한다고 볼 수 있으므로, 이 경우의 해석 안전율은 최소 4.0 이상으로 볼 수 있다.

4개의 방충재가 충격을 흡수하는 것을 모사하기 위해 두가지 해석 모델을 사용하였다. 하나는, 4개의 방충재를 해석 모델에 포함한 것이며, 다른 하나는 선박의 운동에너지를 1/4로 줄이기 위해 선박의 질량밀도를 1/4로 조정한 것이다.

시간 축으로의 적분 간격은 약 0.015초 간격으로 하였으며, 수렴조건은 Work와 Force를 각각 1.0E-7, 1.0E-3 으로 사용하였다.

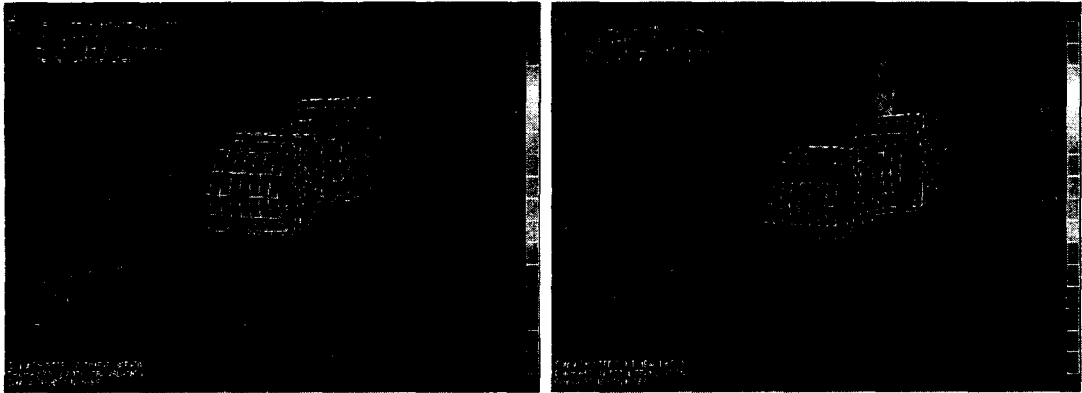
4.2. 경사 접근시

선박의 접근시 기울기와 접근속도는 각각 10도, 20도와 0.12m/sec, 0.15m/sec에 대하여 계산하였다. 선박이 기울기를 가지고 접항하는 경우에는 선박의 선수나 선미가 하나 또는 두개의 방충재가 초기 충격을 흡수하게 되므로, 안전측 해석을 위하여 하나의 방충재가 일차 충격 에너지를 흡수하는 것으로 모사하였다.

해석을 위한 시간 축으로의 적분 간격은 0.02초 간격으로 하였으며, 수렴조건은 Work와 Force를 각각 1.0E-7, 1.0E-3으로 사용하였다.

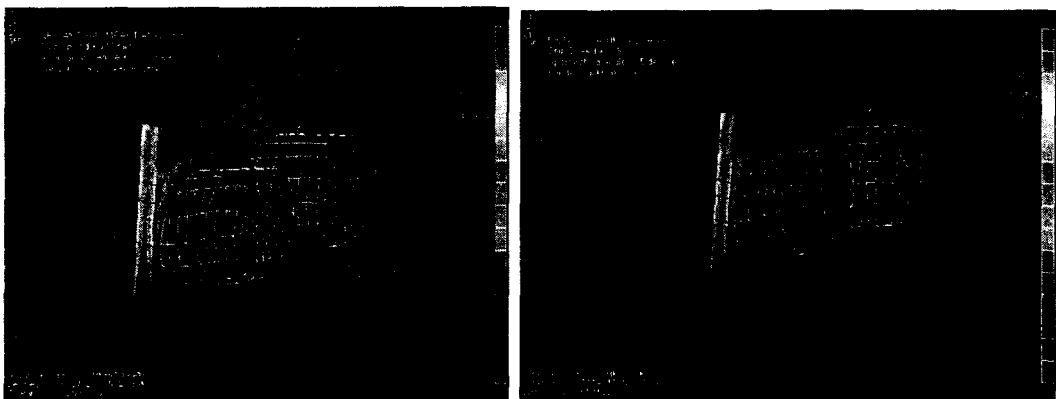
5. 방충재와 선박의 충돌 해석 결과

각 경우에 대한 방충재의 변형 형태와 응력 상태는 다음 그림과 같다.



(a) Angle = 10 degree, Speed = 0.12 m/s

(b) Angle = 10 degree, Speed = 0.15 m/s

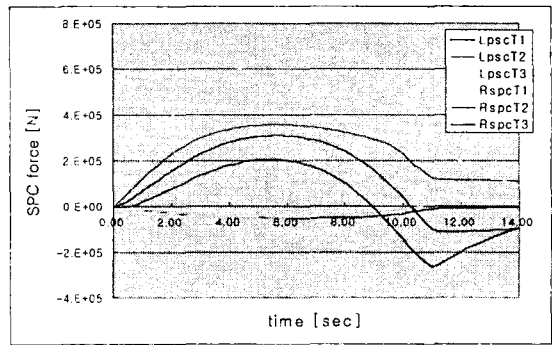
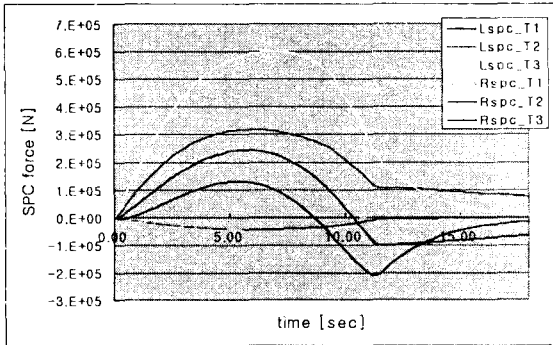


(c) Angle = 20 degree, Speed = 0.12 m/s

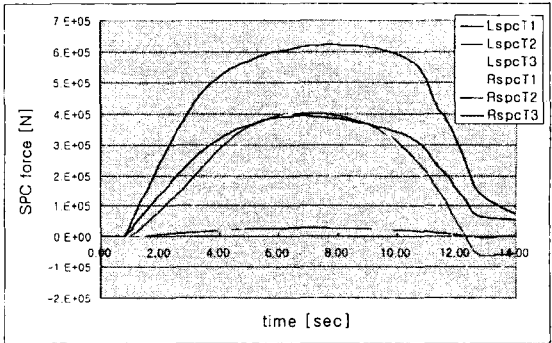
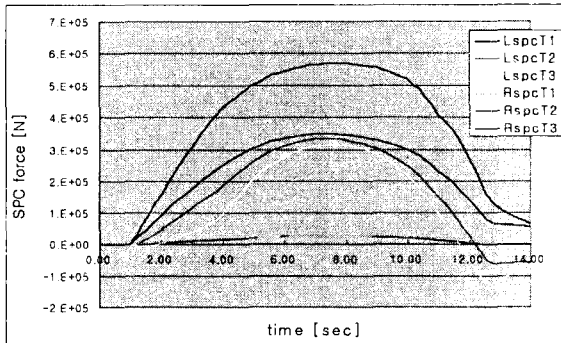
(d) Angle = 20 degree, Speed = 0.15 m/s

그림 5. Case 별 응력

또한 각 경우에 대한 케이스의 반력은 다음과 같다.



Approaching Angle = 10 degree, Speed = 0.12 m/s (Left), 0.15 m/s (Right)



Angle = 20 degree, Speed = 0.12 m/s (Left), 0.15 m/s (Right)

그림 6. 케이스별 반력

6. 방충재와 선박의 충돌 해석 결과 검토

선박의 운동에너지가 방충재로 전달되면서 발생하는 충격량은 선박이 평행하게 접근하는 경우가 가장 큰 하중으로 작용한다. 선박이 각도를 가지면서 충돌하는 경우에는 선박의 접근 속도가 0.15m/s 일 때 약 6.6E+5 [N]의 힘이 작용한다.

방충재 모델의 기본 진동수는 약 1.7 Hz 이며, 선박의 운동에너지가 충격 에너지로 전환되는 시간이 (평행 접근시) 최소 3초이므로, 하중의 최대 가진주파수는 $1/(3*4) = 1/12$ Hz로 볼 수 있다. 1.7Hz는 0.083Hz의 약 20배 높은 주파수이므로, 방충재에 작용하는 하중은 정적 하중으로 볼 수 있다. 즉, 방충재 모델의 기본 진동수와 비교할 때, 선박의 충돌에 의해 방충재로 전달된 에너지는 충돌 시간에 의해 운동량이 충격량으로 변환될 때, 동하중의 효과가 사라지고, 정적 하중의 형태로 전환됨을 알 수 있다.

따라서 평행 접근시 방충재 하나에 가해지는 충격하중은 최대 1.2E+6 [N]으로 작용하는 정적하중으로 볼 수 있으며, 각도를 가지고 접근할 때의 충격 하중은 최대 6.6 E+5 [N]의 정적 하중으로 볼 수 있다.

7. 케이슨과 선박의 충돌 해석 조건

해석은 다음의 3가지로 수행하였다. 해석 조건은 다음과 같다.

Case 1 : 선박의 기울기 = 10도, 접근 속도 = 0.12 m/sec

Case 2 : 선박의 기울기 = 20도, 접근 속도 = 0.15 m/sec

Case 3 : 선박의 기울기 = 0도 (평행접근), 접근 속도 = 0.12 m/sec

7.1. 평행 접근시

선박이 평행하게 접항하는 경우는 접근 속도를 0.12m/sec로 하였으며, 선박의 길이가 380m로 충분히 길기 때문에, 방충재는 최소 4개 이상이 동시에 충격을 흡수한다고 볼 수 있으나, 최악의 경우 하나의 케이슨에서 선박의 운동 에너지를 모두 흡수하는 최악의 경우를 상정하였다. 실제로는 방충재의 설치 간격이 10m ~ 20m 로 설계되므로, $380/20 = 16$ 개가 동시에 충격을 흡수한다고 볼 수 있으므로, 이 경우의 해석 안전율은 최소 8.0 이상으로 볼 수 있다.

시간 축으로의 적분 간격은 약 0.02초 간격으로 하였으며, 수렴조건은 Work와 Force, Displacement 를 각각 $1.0E-7$, $1.0E-3$, $1.E-3$ 으로 사용하였다.

4.2. 경사 접근시

선박의 접근시 기울기와 접근속도는 10도, 0.12m/sec 인 경우와 20도, 0.15m/sec에 대하여 계산하였다. 선박이 기울기를 가지고 접항하는 경우에는 선박의 선수나 선미가 하나 또는 두개의 방충재가 초기 충격을 흡수하게 되므로, 안전측 해석을 위하여 하나의 방충재가 충격 에너지를 흡수하는 것으로 모사하였다.

해석을 위한 시간 축으로의 적분 간격은 0.02초 간격으로 하였으며, 수렴조건은 Work와 Force를 각각 $1.0E-7$, $1.0E-3$ 으로 사용하였다.

8. 케이슨과 선박의 충돌 해석 결과

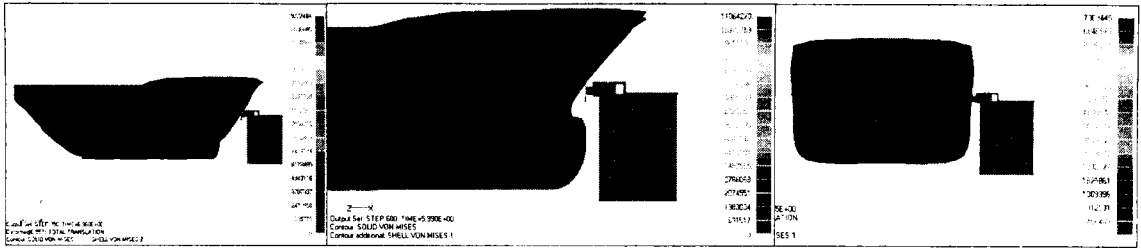
해석 결과는

- 1) 선박의 접근에 따른 선박의 위치 이동과 케이슨 및 팬더의 응력 그림,
- 2) 선박을 제외하고 케이슨과 팬더의 응력 그림,
- 3) 선박과 팬더를 제외한 케이슨만의 응력 그림 및
- 4) 케이슨의 변형 및 내력과 모멘트가 최대인 시간에서의 내력 및 모멘트 그림
- 5) 케이슨에서 발생하는 최대 응력 위치에서의 시간에 따른 응력 변화 그래프 등을 나타내었다.

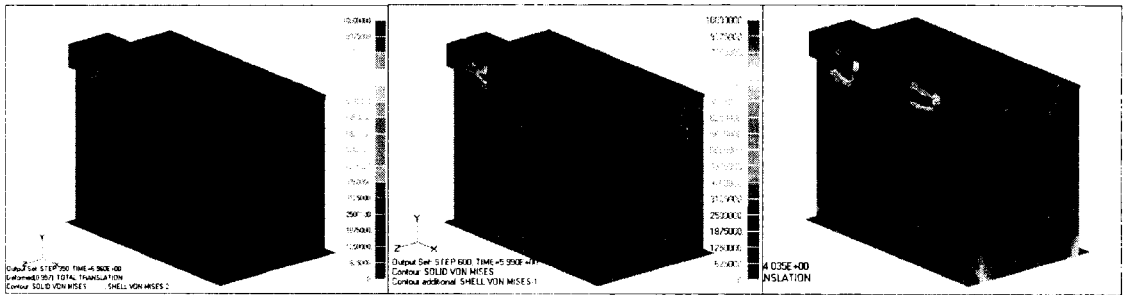
Case 1

Case 2

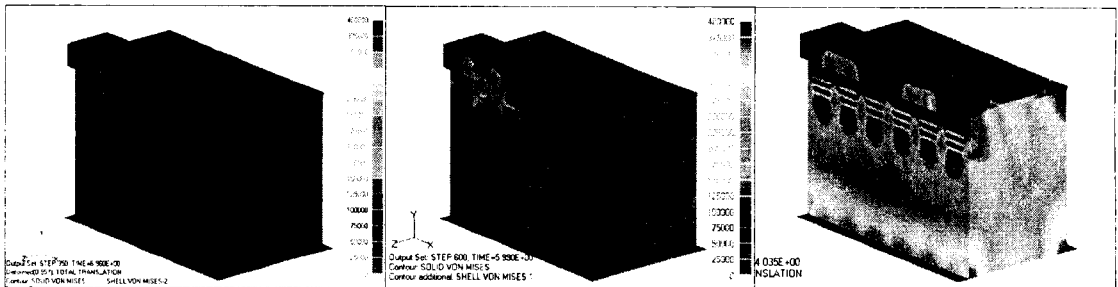
Case 3



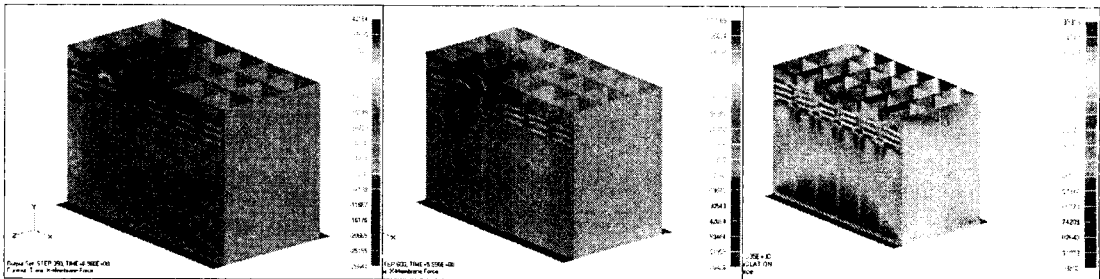
a) 선박의 접근에 따른 선박의 위치 이동과 케이슨 및 펜더의 응력 [Pa]



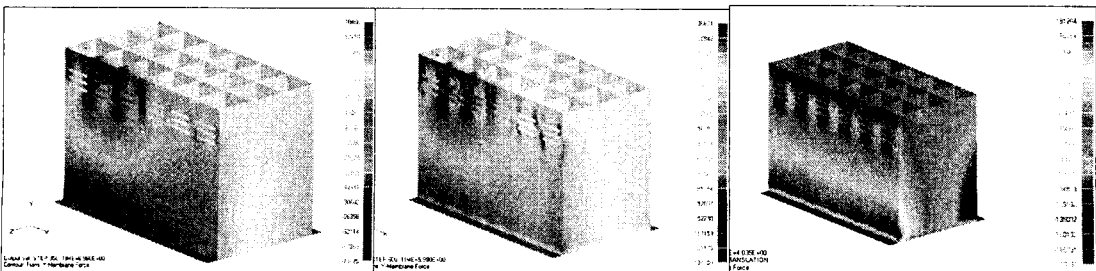
b) 선박을 제외한 케이슨과 펜더의 응력 [Pa]



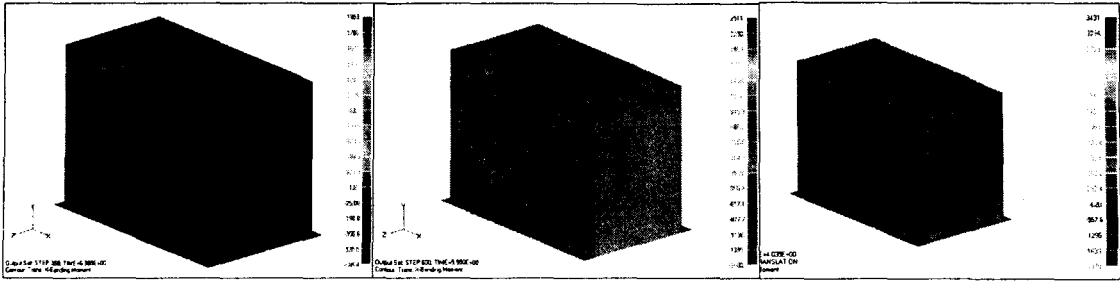
c) 선박과 방충재를 제외한 케이슨의 응력



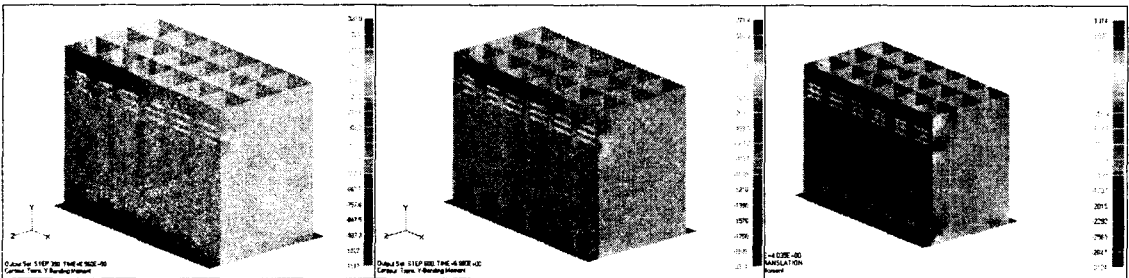
(d) Membrane Force [N] in X- and Z-direction at Shell Elements for Caisson



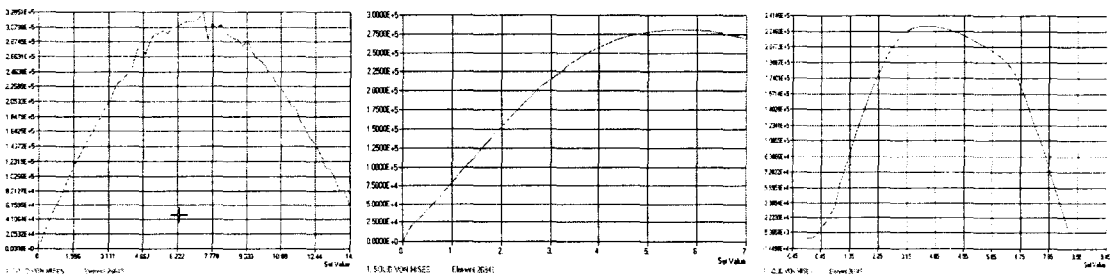
(e) Force [N] in Y-direction at Shell Elements for Caisson



(f) Moment [N-m] Contour in X- and Z-direction at Shell Elements for Caisson



(g) Moment [N-m] Contour in Y-direction at Shell Elements for Caisson



(h) 케이슨에서 발생하는 최대 응력 위치에서의 시간에 따른 응력 변화 그래프

그림 7. 선박충돌 해석결과

9. 케이슨과 선박의 충돌 해석 결과 검토

선박의 운동에너지가 방충재로 전달되면서 발생하는 충격량은 방충재에 의해 선수나 선미가 10도의 각도를 가지고 충돌하는 경우에는 충돌 후 약 7초 후에 최대 하중이 발생하고, 평행하게 접근하는 경우에는 약 6초 후에 최대 하중이 발생한다. 따라서, 운동량이 충격량으로 변환되는 시간이 최소 5초 이상이 소요됨에 의해 충격 하중은 상당히 감소하게 된다.

이 때문에, 실제 케이슨에 발생하는 응력의 범위는 거의 무시할 수 있을 만한 크기인 $2.3E+5$ Pa 정도로 나온다. 또한 케이슨에 발생하는 인장력 또한 200kN 이하로 나오고 있다.