

유한요소법을 이용한 선체구조해석 기법



송 재 영*



이 정 렬**

1. 서 론

선체구조 각 부재의 치수는 일반적으로 선급에서 공표한 규칙 및 지침규정식에 따라 결정하거나 구조해석에 의하여 결정하고 있다. 전자는 이론적인 근거 위에 그 동안 축적되어 온 경험에 의한 계수를 도입함으로써 사용자가 접근하기 쉬우면서도 단기간 내에 구조의 안전성을 검증할 수 있도록 작성되어 있지만, 새로운 구조 형식 또는 선박 크기의 대형화, 고속화의 경우에 구조적인 안전성을 구체적으로 검증하기가 어려운 점이 있다. 반면에 후자는 정적, 동적 하중을 구조부재에 적용하여 정확하게 구조 강도를 평가할 수 있으나 구조 해석에 많은 시간과 노력을 요구하고 있다.

선박은 여러 가지 구조 부재가 연결된 복합구조물로서 구조 부재 모두를 원하는 정도(accuracy)까지 모델링하여 3차원 구조해석을 수행하기에는 비효율적인 면이 있으므로, 해석 목적에

따라 선체 구조를 적절하게 이상화하여 구조해석을 수행하고 있다.

일반적으로 전선 및 Hold 해석은 선체 구조부재의 1차 및 2차응력까지를 판별하기 위하여 수행하며, 상세 해석은 관심 있는 구조 부재의 상세모델과 전선 및 Hold 해석 결과로부터 구한 경계조건을 이용하여 3차 국부응력과 집중응력을 판별하기 위하여 수행한다. 이를 위하여 선급에서는 모델링, 하중 및 허용응력 등 선체 구조해석에 필요한 절차를 정립하여 놓고 있으며, 구조해석의 정도를 높이고 해석 시간을 단축하기 위한 소프트웨어도 개발하고 있다.

본고에서는 파랑하중에 의한 확률 통계 해석을 통하여 최대 극한 하중을 구하고 이러한 하중을 주는 설계파를 결정한 다음 구조해석을 수행하는 준직접구조해석기법과 선박이 조우할 수 있는 모든 규칙파에 대한 응력해석을 수행한 다음 이들로부터 통계적인 최대 극한 응력을 직접 계산하는 직접구조해석기법을 설명하고자 한다.

* (사)한국선급 기술연구소장

** (사)한국선급 기술연구소 선임연구원

2. 3차원 전선 구조해석 기법

선체 구조 부재의 치수는 선박이 그 수명동안 조우할 수 있는 가장 극심한 하중 상태를 기준으로 설계되어야 하는데, 이러한 상태를 정의하기 위해서는 결국 확률론적 통계 처리 기법이 이용된다. 즉, 선박 수명동안 조우할 수 있는 불규칙 해상 상태를 모든 가능성이 있는 정현파(regular wave)의 합성으로 나타낼 수 있다는 가정 하에 규칙파에 대한 구조 응답을 구한 다음 그 응답들을 장기간의 파랑빈도자료(wave data, wave scatter diagram)에 근거를 두고 통계 해석을 수행함으로써 극한치(most probable extreme value)를 구한다. 이러한 확률 통계 해석 기법에 의한 극한치의 산정은 파랑중 선체에 작용되는 동하중에 대하여 적용할 수도 있고, 구조 부재의 응력에 대하여도 적용할 수 있다. 전자는 어느 위치에서의 극한하중은 그 위치에서의 극한응력을 유발한다는 가정 하에 관심이 있는 부재의 위치에서의 모든 정현파에 대한 하중을 계산하고 이들에 대한 확률 통계 해석을 통하여 극한 하중을 구한 다음 그러한 극한하중을 줄 수 있는 하나의 정현파, 즉 설계파(design wave, equivalent wave)를 산정하게 된다. 이러한 설계파에 의한 3차원 구조해석을 수행하면, 결국 선체 구조 부재의 관심이 있는 위치에서 극한하중이 작용될 경우의 응력분포를 구할 수 있게 된다. 따라서 실제 구조해석은 문제가 되는 몇 가지 경우의 하중 조건(load condition)과 각각에 대한 설계파에 대해서만 수행할 수 있어서 구조해석에 소모되는 시간과 노력을 절감할 수 있는 장점이 있는 반면, 최종 결과는 극한응력값에 국한되는 단점이 있다. 통상 이러한 방법을 소위 설계파에 의한 구조해석 또는 준직접구조해석이라고 부른다.

반면에 모든 규칙파에 대한 구조해석을 수행하고 이 규칙파들에 의한 응력들을 확률통계 해석하면 위의 설계파 구조해석기법으로 구한 극한응력뿐 아니라 모든 확률에 해당하는 응력들을 구할 수 있게 된다. 이를 직접구조해석 또는 응력

스펙트럼해석기법이라고 부르며 이 경우 위의 준직접구조해석에 비하면 구조해석의 횡수가 엄청나게 많아지는 단점이 있다. 그러나 직접구조해석은 피로 해석, 신뢰도해석 등에 있어서는 원칙적으로 불가피하게 필요하게 된다. 즉, 구조물의 궁극적인 파괴모드에 따라 구조해석의 기법이 결정되어야 함을 알 수 있다.

이상과 같은 두가지 구조해석 기법의 개념도를 그림 1에 수록하였다. 통상적으로 3차원 전선 구조해석은 선체 주구조 부재의 일차 및 이차응력을 설계 기준, 즉 허용응력에 합당한지를 판별하는 목적으로 수행되므로 준직접구조해석을 수행하고 있으나, 이러한 준직접구조해석 기법을 적용함에 있어 하중 조건, 해석의 대상이 되는 주요 하중의 종류, 해석 방법의 유효성 등을 확인하고 피로 해석 및 신뢰성 해석에 이용하기 위하여 직접구조해석을 수행하는 경우도 있다.

3. 3차원 전선 구조해석 과정

3.1 선체 구조 모델링

일반적으로 선체 구조해석을 위한 구조모델링은 해석 목적과 선종에 따라 각각 해석의 정확성 및 구조의 이상화 방법 등이 다르지만, 선체 구조의 거동을 충실하게 표현할 수 있는 구조로 모델링하여야 한다.

전선 구조해석을 위한 선체의 3차원 모델링시에는 선박의 대칭성을 고려하여 좌현만을 모델링하며, 요소의 크기는 선박의 길이 방향으로 특설 늑골(web frame)의 간격, 폭방향으로는 종거더 간격, 높이 방향으로는 갑판 또는 스트링거 등의 부재 간격으로 정하며, 요소의 종횡비(aspect ratio)를 고려하여 요소의 크기를 결정한다. 사용 요소는 구조 부재에 따라서 판요소, 보요소 및 트러스 요소 등을 적절히 택하여 사용하며, 부식에 대한 예비 두께를 포함한 부재 치수를 그대로 사용한다.

또한 큰 전단력을 받는 부재들을 판요소로 모델링하는 것이 바람직하며, 사각 판요소의 사용시에는 판요소를 구성하는 절점들이 모두 동일

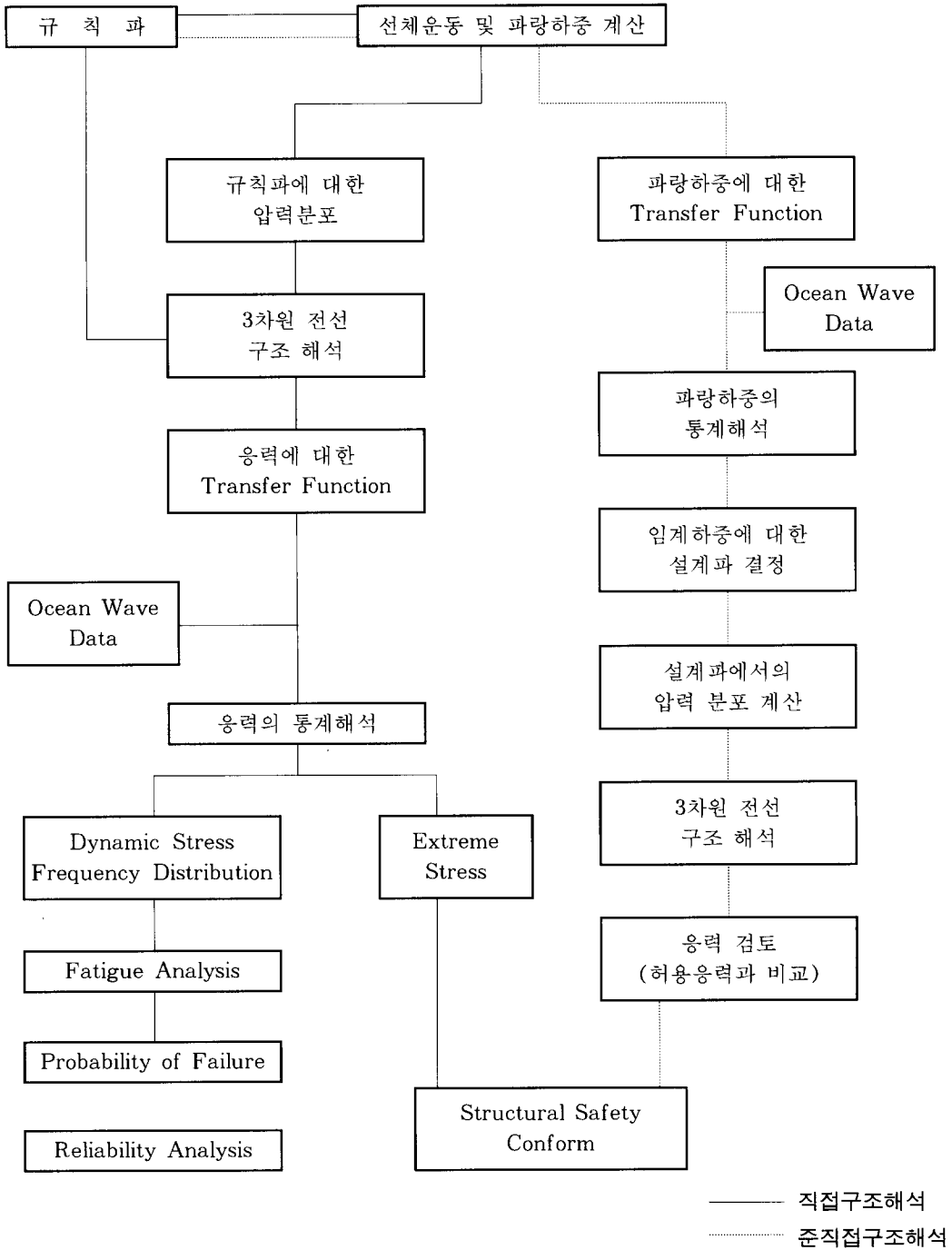


그림 1 3차원 전선 구조 해석 기법

평면 내에 있는지를 반드시 확인하여야 한다.

선박의 모델링 순서를 결정한다는 것은 다소 무리가 있지만 선체 구조를 정확하게 표현하면서 빠르게 모델링을 할 수 있다면, 어떤 방법을 사용해도 문제가 되지 않는다. 하지만 선체 구조가 복잡하고 구조적으로 고려해야 할 부분이 많이 있기 때문에 일반적으로 Section → Deck plan (Elevation) → Elevation(Deck plan) → Shell Expansion → Accommodation → 기타의 순서로 모델링을 행하며, Section에서 전체 구조에 필요한 절점(node)을 모두 정의하여 놓는 것이 바람직하다.

3.2 경계 조건

선체 구조의 좌우현 대칭성을 고려하여 좌현만을 모델링하였기 때문에 하중 상태의 대칭성(symmetry), 반대칭성(antisymmetry)을 고려하면 중앙면(X-Z면)에서의 일반적인 경계 조건은 표 1과 같다.

이에 추가로 강제 변위를 지지하기 위하여 수직압힘상태와 같은 대칭 하중 조건에 대하여 center line상의 A.P. 및 F.P.의 절점에 z축 변위와 A.P.의 절점의 x축 변위를 구속한다. 또한 비틀림 해석과 같은 좌우현 반대칭조건에 대하여는 engine room 전단격벽을 reference plane으로 설정하여 center line상의 bottom 및 upper deck의 y축변위 그리고 upper deck와 side shell의 Intersection의 x축 변위를 구속한다. 구조해석을 하기 위하여 입력한 정하중 및 동하중이 각각 평형 상태를 이루고 있기 때문에 강제 변위를 지지하기 위하여 추가로 경계 조건을 설정한 절점에서의 응력 집중은 발생하지 않는다.

표 1 Boundary conditions along the center plane

Constraints							
Type of loads	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z	
Symmetric condition	Free	Fix	Free	Fix	Free	Fix	
Antisymmetric condition	Fix	Free	Fix	Free	Fix	Free	
*x : longi. axis y : trans. axis z : vertical axis.							

3.3 하중 조건

선종 및 관심 있는 구조 부재의 위치에 따라 구조 설계의 임계치를 주는 하중 조건은 상당히 다양할 수 있으나, 일반적으로 3차원 전선 해석에서는 만재상태(Full Load Condition) 및 밸러스트 상태(Ballast Condition)에 대한 구조해석을 수행한다.

특히 컨테이너선은 Hatch의 크기가 큼으로 인하여 발생하는 비틀림 모멘트에 의한 warping stress의 양이 무시할 수 없을 만큼 크며 hatch opening의 deformation이 반드시 검토되어야 하므로, oblique sea 상태에서의 해석이 필요하다. 한편 bulk carrier 와 oil tanker의 경우는 전선 구조해석보다는 2-3 Hold에 대한 해석이 오히려 효율적이라고 할 수 있는데, 이는 container에 비하여 상대적으로 주선체 거더의 종강도보다는 화물의 적재 경우의 수가 다양함으로 인한 국부 하중에 의한 변형 및 응력을 고려해야 되기 때문으로 생각될 수 있다.

3.4 결과 검토

구조 해석 결과를 검토하기 전에 모델링이 바르게 수행되었는지를 검토해야 한다. 그 방법으로 보이론에 의해 구한 종응력(longitudinal stress)과 유한요소해석으로부터 구한 응력을 비교 검토하는 방법이 있다. 일반적으로 선박은 보와 같은 거동을 하므로, 보이론으로부터 구한 종응력은 유한요소해석으로부터 구한 응력과 동일한 결과를 보여야 한다. 이 때의 유한요소모델의 응력은 전체 응력에서 국부 응력을 뺀 종응력만으로 비교하여야 한다.

구조해석 결과는 관심이 있는 부위의 응력을 선급에서 제시한 허용응력을 이용하여 평가하면 된다.

4. 실선 계산

한국선급에서는 1980년대부터 3차원 선체 구조의 직접 강도 해석 기법을 개발하여 왔으며 실선 적용 계산을 통하여 그 실용성을 입증한 바

있다. 여기에서는 준직접구조해석 및 직접구조해석기법에 따라 5,000 TEU급 컨테이너선의 구조해석을 수행하고 그 결과를 비교 검토하였다.

4.1 구조 모델

그림 2에 전선 모델을 나타내었다. 그러나 실제 구조해석에 사용된 모델은 선박의 대칭성 및 계산의 편의성을 고려하여 좌현만을 모델링하였으며, 길이 방향으로 94개의 횡단면, 폭방향으로 8개의 종단면, 높이 방향으로 10개의 상하단면으로 나누었다. 이 모델에서 절점 수는 약 6,500개, 판요소는 11,500개, 보요소는 6,000개가 사용되었다.

구조해석을 위한 하중 상태로는 만재상태(Full Load Condition)를 선택하였다.

4.2 파랑 하중의 계산

선체에 가해지는 규칙파중에서의 파랑하중을 계산하기 위하여 파장은 하중 상태 및 장기 파랑 데이터를 고려하여 21개를 선택하였으며, 조우각은 0에서 180도까지 30도간격으로 7개를 선택하였다. 그리고 설계속력의 2/3인 17Knots를 고려하였다.

4.3 통계 해석

준직접구조해석에서는 파랑하중, 직접구조해석에서는 응력에 대하여 통계해석을 수행하여야 한다. 통계 해석은 먼저 불규칙 해상 상태에서의 파 스펙트럼과 규칙파에 대한 응답을 이용하여 응답 스펙트럼을 얻은 다음 그 응답 스펙트럼으로부터 불규칙 해상상태에서의 응답의 통계적 특

성치를 구하는 단기 예측을 수행하고, 그 다음에 선박의 수명동안 겪게되는 행상상태에 대하여 파랑 빈도 자료(wave data)를 사용하여 장기예측을 수행하였다.

단기예측을 위하여 ISSC-1964형인 Modified Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 사용하였고, 장기예측을 위한 파랑 빈도 자료로는 Walden의 북대서양 자료중 전지역의 모든 계절을 고려한 자료를 사용하였다.

4.4 구조 해석 결과

준직접구조해석기법 및 직접구조해석기법에 따라 구조해석을 수행하였다. 직접구조해석은 조우각 7개, 파장 21개의 경우에 대하여 준직접구조해석에서 설계파에 대하여 수행하였던 구조해석을 반복하여 수행하여야 하고, 이들로부터 구한 응력에 대한 통계해석을 수행해야 하므로 전선 모델의 경우 HP720에서 컴퓨터의 실행시간만 60시간이 넘게 소요되었다.

그림 3에는 Head sea상태에서 선체 전체 길이에 걸친 deck element의 dynamic axial stress (σ_x)에 대하여 준직접구조해석과 직접구조해석의 비교를 보였다.

이를 보면 후자에 의한 방법이 전자의 방법보다 전 길이에 걸쳐 약간 크지만 중앙부에서는 정확하게 일치함을 알 수 있다. 이는 설계파가 중

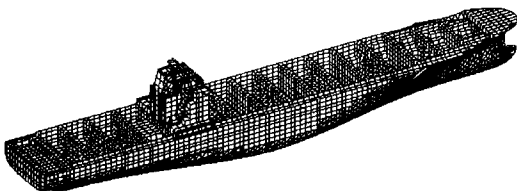


그림 2 선체 구조 모델

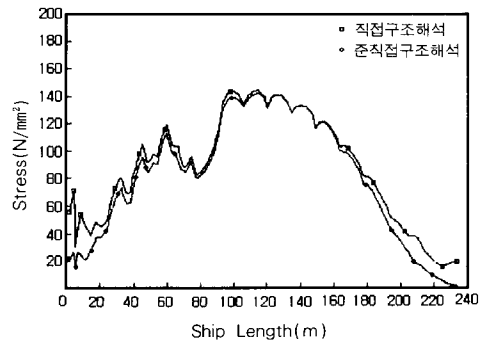


그림 3 Head Sea에서의 중응력 비교

양 단면에서의 수직 굽힘 모멘트에 기준을 두어 결정되었다는 사실에 기초하며, 두 기법 상호간의 정확성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

3차원 전선 구조 해석에 사용하는 직접구조해석기법 및 준직접구조해석기법에 대하여 설명하고 실선 계산을 통하여 두 기법의 차이를 비교하였다. 직접구조해석은 준직접구조해석에 비하여 방대한 시간 및 노력이 요구되기 때문에 전선 구조 해석의 목적으로 사용하기에는 추천할 기법은 아니나 준직접구조해석의 검증, 피로해석 및 신뢰도 해석 등 응력의 확률 기준이 필요한 경우에는 필수적으로 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. (사)한국선급, "과량하중에 의한 선체구조의 직접강도해석 기법 개발 연구", 한국선급 보고서, 1995.12
2. (사)한국선급, "컨테이너선의 3차원 구조 해석", 한국선급 보고서, 1991.12
3. (사)한국선급, "선체 구조의 응력 및 신뢰도 해석", 한국선급 보고서, 1990.9 