

초대형 해양구조물에 대한 이방성판과 그릴리지 모델링 적용성 연구

조규남
홍익대학교 조선해양공학과

A Study on the Adaptability of Orthotropic Plate and Grillage Modeling for Very Large Floating Structures

Kyu-Nam Cho

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University

KEY WORDS: 직교이방성판요소, 구조해석, 모델링, 그릴리지, 초대형구조물

ABSTRACT: For the development of the practical methods of structural analysis of typical VLFS. Orthotropic plate theory and a grillage beam theory and modeling techniques are studied and relevant numerical analysis are carried out. For the design of pontoon type VLFS, an efficient and reliable structural analysis techniques must be established, and as corresponding methods, two approaches mentioned above were studied in view point of their applicability and efficiency.

For that purpose, structural idealization is performed to make overall structural analysis first, and the structural behaviors of the model in the airplane landing simulation are evaluated. Through this study it is found that the structural idealization using orthotropic plate and grillage modeling are proved to be adequate and the numerical analysis results for real VLFS yields acceptable deformations in the corresponding simulations.

1. 서 론

초대형 부유식 구조물의 구조 형식은 크게 단순 상자형과 반잠수형으로 나눌 수 있는데, 어떠한 구조형식을 취하느냐에 따라 기능성, 안정성, 시공성 및 경제성에 크게 영향을 주게 된다. 부유식 구조물의 동적인 운동 특성은 수선부의 형상에 따라 크게 영향을 받게 되는데, 동적 운동의 측면에서는 구조물의 안정성을 유지하는 범위 내에서 수선 면적이 가능한 한 작은 반잠수형이 유리하다. 그러나 파도가 심하지 않은 정은 해역에서는 단순상자형이 제작비가 싸고, 공간 활용성이 좋으며, 구조 강도면에서 유리하다.^{1~4)} 따라서 부유식 구조물이 대형화되면 될수록 구조물의 형식으로 단순상자형이 더 많이 채택되고 있다. 이러한 단순 상자형 구조 형식에 따른 구조 안전성 문제는 이를 단순화하고 효과적으로 모델링하여 해석하는 기법이 주요 관건이 되고 적용 가능성 여부가 매우 중요하다. 본 논문에서는 직교 이방성 평판 구조 해석 기법과 2차원 그릴리지 해석 기법의 2가지 방법의 이론적 배경^{5~6)}과 VLFS에의 적용 가능성 분석에 대한 연구 내용을 다루었다.

이러한 해석법에 의한 VLFS의 구조 안전성 해석의 타당

성을 확인하기 위하여, VLFS의 수치 모델링과 위에서 언급한 해석 기법에 의한 수치 해석을 수행하였다.

2. 초대형 해양구조물의 모델링 이상화

초대형 부유식 해양 구조물의 경우, 구조 해석을 수행하기 위해서는 방대한 양의 모델링 작업과 지리멸렬하고 비용이 많이 소요되는 구조 해석, 전후 처리 과정 등의 여러 가지 작업이 필수적이다. 하나의 경우에 대해서도 이러한 과정이 비경제적이고 시간 낭비적인 요소가 많아, 어려움이 예상되는데, 많은 경우에 대한 해석 결과를 데이터 축적화하여 최적의 VLFS를 제안하고 그 장단점을 분석하는 데 있어서는 거의 천문학적인 해석 및 모델링 과정이 요구된다고 예상할 수 있다. VLFS의 구조 형식 중 폰툰형이나 반잠수식 형태의 경우, 이상화를 통하여 효과적인 모델링과 실제 구조 해석을 수행할 수 있다. 특히 폰툰형의 경우 직교 이방성판 해석 이론을 적용하여 이러한 과정을 수행한다면 그 효과가 클 것으로 생각된다.⁴⁾ 2-D 그릴리지 해석 기법의 적용 또한 가능하다.

VLFS의 구조 형식이 폰툰형으로 각각 x, y 방향으로

그 성격이 특징지워져 각각 x, y 방향의 탄성계수 E_x, E_y 를 규정할 수 있다면, 직교 이방성 판의 해석 이론이 효과적으로 적용될 수 있다. 이 경우는 직교 이방성으로 보강된 평판의 해석 기법을 쉽게 유도하며 해당되는 강성특성치를 산정하여 관련식에 대입, 비교적 손쉽게, 복잡한 VLFS의 구조 해석을 수행할 수 있겠다.

한편 VLFS의 구조 형식이 반잠수식형인 경우에는 직교 이방성 판 해석 이론의 적용은 불가능하며, 2-D 그릴리지 해석 이론을 적용하여 문제를 해결할 수 있겠다. 이 경우는 특히 거시 이상화 경우로 생각할 경우 1차적으로 반잠수형 컬럼의 윗 부분을 일종의 플랜지화하여 어떤 값의 정량화된 유효폭으로 취하는가에 따라 그 신뢰도가 좌우된다고 생각된다.

3. 직교 이방성 판 해석 이론 배경

일반적으로 직교 이방성으로 보강된 평판 구조물의 해석에 있어서 직교 이방성 판 이론을 적용하는 경우가 있는데 이럴 경우에는 몇 가지 주요한 기하학적 적합 조건을 생각하게 된다.

직교 이방성 판 이론의 근본적인 개념은 각종 보강재 또는 판의 밑 부분에 부착되어 있는 구조 부재의 강성을 판으로 몰입시켜 이러한 부재의 영향을 충분히 반영한 이상화된 평판을 만드는 개념이다.^{8,10)}

판의 재료는 완전 탄성, 연속, 균등하다고 가정하며, 후크의 법칙에 지배되고 x, y 두 직교 방향에 각각 다른 탄성 특성을 갖는다고 가정한다. Body force는 없다고 생각한다. 이론을 전개하기 위한 주요 가정은 다음과 같으며, VLFS에 적용할 시 이러한 가정의 적용 타당성을 검토하여야 할 것이다.

- (1) 판의 가운데 면은 변형이 없다. 이 면은 굽힘 동안 중립적이며 Kirchhoff 이론에 따른다.
- (2) 판의 가운데 면에 수직인 선형 요소는 굽힘 전후에도 판의 처짐 표면에 똑바로 수직하게 남아 있다.
- (3) 판의 면에 가로로 작용하는 법선 응력은 무시해도 된다.

미소 변형 w , 및 몇 가지 가정에 근거하여 변형 w 는 z 축에 독립적이 되며 여러 단계를 거쳐 굽힘 모멘트와 비틀림 모멘트에 대해서 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_x = -\frac{E_x t^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$M_y = -\frac{E_y t^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$M_{xy} = -\frac{G_{xy} t^3}{6} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

$$D_x = -\frac{E_x t^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}$$

$$D_y = -\frac{E_y t^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}$$

$$D_{xy} = \frac{G_{xy} t^3}{12}$$

위 식으로부터 다음의 간략화 된 식을 얻는다.

$$M_x = -D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$M_y = -D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$M_{xy} = -2 D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

D_x, D_y 는 평판의 x, y 방향의 휨 강성이고, D_{xy} 는 평판의 비틀림 강성이다.

위의 식들을 사용하여 최종적으로 다음 식을 얻는다.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + (D_x \nu_y + D_y \nu_x + 4D_{xy}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = P(x, y)$$

식의 표현 간략화를 위해서 다음과 같은 부호규약을 이용하면,

$$2H = D_x \nu_y + D_y \nu_x + 4D_{xy}$$

다음과 같은 식이 얻어진다.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = P(x, y)$$

이것은 직교 이방성 판의 일반적인 지배방정식이며 위 식의 $2H$ 값은 평판의 "유효 비틀림 강성"이다.

이상과 같이 유도된 직교 이방성 판의 해석 이론을 적용하여 직교 이방성으로 강성이 특성화된 초대형 해양 구조물을 해석할 수 있으며, 여기에는 특성화된 구조물의 각종 구조 특성치들의 정확하고 신뢰성 있는 산출이 필수적이다.

4. VLFS 구조해석에 대한 직교 이방성 판 이론의 적용성

같은 강성 특성을 갖는 일정한 두께의 등가 직교 이방성 판으로 변환된 구조물에서 전체 굽힘과 처짐, 굽힘 응력을 평가하

기 위해 다음과 같은 기본 가정이 제안되었다.^{6,10)}

이 가정의 기초는, 보강된 평판의 굽힘 해석은 등가 균일 이방성 판에 의해 판과 보강재 조합이 단순화 될 수 있다는 것이다.

그러나, 판과 보강재 조합은 직교 이방성 판에 대해 명확하게 모든 점에서 등가 하다고는 말할 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음의 항목에 대한 적합성이 보장된 경우에 만 직교 이방성 판 이론을 실제 구조물에 적용할 수 있다.

- (1) 판의 경계치수와 보강재 사이공간의 비율은 적절한 균일 강성도를 보장할 수 있을 만큼 충분히 작아야 한다.
- (2) 강성은 양쪽방향으로 균일하게 분포되어 있어야 한다.
- (3) 휨과 비틀림 강성은 판의 경계조건이나 수직하중의 분포에 의존하지 않아야 한다.
- (4) 강철보강 판의 경우 판과 보강재는 같은 균방향성 재료로 만들어져야 한다.
- (5) 판과 보강재는 완벽하게 접합된 상태이어야 한다.

공학에 실제로 적용하기 위해서, 직교 이방성 판은 판의 면에서 x, y 두 직교하는 방향으로 다른 굽힘 강성도 D_x, D_y 를 갖는 판으로 정의한다. 이것은 자연적인 직교 이방성 판의 두 방향에서 물질의 다른 탄성계수 E_x, E_y 로부터 생기거나 또는 구조적인 직교 이방성 판의 단위 폭 당 다른 관성 모멘트 I_x, I_y 에 기인한다.

폰텐식 VLFS의 경우 규칙적으로 갑판, 선저, 종격벽, 횡격벽 등으로 이루어지고 있다. 이 경우 종격벽과 횡격벽의 경우 그 구성 및 강성도의 배열이 직교 이방성으로 특징 지워지는 것을 알 수 있겠으며, 이러한 강성 특성은 직교 이방성 판 해석 이론의 적용시 x, y 방향으로의 각각의 유연성 특성 계수의 정확한 산정이 이루어지면 효과적으로 VLFS의 휨 문제는 해석할 수가 있음을 알 수 있다. 그러나 비틀림 문제 해석 시에는 등가 휨 특성계수의 정확한 산정에 문제점이 야기되어 매우 주의해서 접근하여야 할 것이다.^{5,6)}

앞 절에서 제시된 직교 이방성 판 해석 이론의 기본 정립과정 중에서 생각되는 근본적인 문제를 해결한다면 이 이론의 VLFS 구조 해석에의 적용은 가능하다.

컴퓨터에 의한 그릴리지 해석방법을 이용하기 전에는, 직교 이방성 판 방법이 그릴리지와 보강 판넬 해석의 주요 방법이였으며, 이 접근법으로 얻어진 정확성은 보강 판넬이 균일 직교 이방성 판과 유사한 정도에 전적으로 의존한다. 정확성은 이중저와 같은 교차 보강된 판넬 이중벽의 경우에 가장 좋게 나타난다. 단일 판 교차 보강 판넬에서 판넬이 각 방향으로 많은 수의 균일 보로 이루어져 있다면 작지만 만족할 만한 정도의 정확성은 얻어진다. 그러나, 정확성은 보의 수가 감소함에 따라 떨어진다. 수직하중을 받는 단일 판 그릴리지는 분배 반응 방법 같은 그릴리지방법 또는, 가장 큰 정확성을 갖는 프레임 해석 같은 불연속 보 접근법으로 더 정확하게 표현된다. 그러므로, 현재는 고도의 컴퓨터 프로그램방법을 쉽게 이용할 수 있

으므로, 단일 판 판넬의 해석에 대한 직교 이방성 판 방법을 사용할 이유가 보다 적어졌다. 그러나 양면 판 판넬의 경우 간단한 직교 이방성 판 방법이 아주 정확함을 보여주며, 컴퓨터에 의한 불연속 보 해석에 대응하여 자주 사용될 것으로 보여진다. 전체적으로 다양한 하중을 받는 보강 판의 해석에 관련한 몇몇 주요 점을 들어보면 다음과 같다.

- (1) 직교 이방성 판 접근법은 모든 형태의 하중과 교차 보강, 양면 판 판넬에 대해서는 그릴리지 해석법에 비해 보다 나은 정확성을 가진다.
- (2) 양면 판 판넬에 대한 탄성 좌굴 응력은 항복 응력보다 매우 크므로, 이중벽 구조의 좌굴 하중을 계산하기 위해 보통의 직교 이방성 판 이론을 사용할 수 없다.
- (3) 수직하중과 면내 하중이 조합된 하중을 받는 판의 해석은 다음과 같은 방법으로 다룰 수 있다.
 - a. 선형 미소 처짐 이론에 근거하여 수직하중과 면내 하중 사이의 어떠한 상호작용을 무시하고, 단순히 이들 두 하중의 응답을 중첩하여 해석한다.
 - b. 수직하중에 대한 응답은 (a)에서처럼 개별적으로 계산되나, 두 허용하중에 대한 응답의 조합은 면내 하중의 비선형 효과를 만드나 수직하중과 면내 하중 사이의 상호작용은 고려되지 않는다.
- (4) 이중벽 판넬의 큰 굽힘 강성 때문에 수직하중이 작용할 때 처짐은 판넬의 두께에 비해 상대적으로 매우 작다. 따라서 이 방법은 수직하중에 대한 이중벽 구조의 응답 계산에 대해 비교적 정확하다고 할 수 있다.
- (5) 이중벽 판넬에 대한 미소 처짐 직교 이방성 판 이론은 굽힘 해석과 하중조합 둘 다 만족한다. 그러므로 굽힘 해석의 결과를 바로 최종강도해석에 적용할 수 있다.

결과적으로 VLFS의 폰텐형과 같은 이중벽 판넬은 미소 처짐 직교 이방성 판 이론을 잘 따를 뿐 아니라 실제 이 이론에 대한 가장 적절한 적용으로 생각된다.

5. 그릴리지 해석 이론의 배경 및 VLFS에의 적용성

직교 이방성 판 이론은 전 절에서 분석된 바와 같이 보강재 방향에 상응하는 직교 방향에서 다른 강도를 가지는 균일 두께의 균일 판 형태로 다룬다. 반면에 2-D 그릴리지 모델링은 판 보강재를 직각으로 연결된 보의 2차원 gridwork로 만들어 다룬다.

직교 이방성 판 이론은 보강재의 간격 비율이 판 경계 치수에 비해 충분히 작다면 대체로 적용할 수 있다. 게다가 비슷한 동질일 경우 보강재는 동일한 간격이 된다. 그러나 보강재의 불균일성과 변하기 쉽고, 넓은 간격은 직교 보강판을 동등한 탄성계수를 갖는 직교 이방성 판으로 치환하기 어렵게 만든다.

직교 보강 판 해석에 대한 2-D 유한 요소 그릴리지 접근

방법에서는 시스템이 동등한 2차원 보의 gridwork로 치환된다. 이 방법은 보강재를 판으로 다룬 직교 이방성 판 이론의 반대이다. 그러나, 전체 판 덮개를 나타내는 그릴리지 보 요소의 실제적인 테두리 폭은 대체하는 직교 이방성 판 모델의 상응하는 강도처럼 거의 일정치 않게 나타난다.

그릴리지 모델에서 보강재가 있는 판을 다루는 가장 간단한 방법은 판의 폭을 각각의 보 요소의 테두리가 각각의 보강재의 간격과 동일하다고 가정하는 것이다. 그러나 이 접근 방법은 전단 래그 효과와 면과 법선 변형 평판의 연결과 관계된 비선형성을 무시한 것이다. 이 두 가지 영향은 보강재 사이에서 면내 판 응력을 감소시킨다. 이 비균일 응력의 허용은 판의 보강 테두리를 평가하기 위한 “effective width”와 “effective breadth”의 개념을 필요로 한다. 판 응력의 비균일성을 나타내는 유효 플랜지는 반드시 국부 보강재 간격보다 폭이 더 작아야 한다. 실제로, “effective width”와 “effective breadth” 용어는 “effective” 플랜지를 고려해야 할 때, 두 가지 다른 물리적 구성요건을 구별하곤 했다. “Effective breadth”는 보강재의 굽힘 모멘트 변화와 관계된 전단 래그 효과를 고려한다. 반면에 “effective width”는 법선 변위와의 결합에 기인하는 판의 면내 강성 손실을 고려한다. 이러한 법선 변위는 수직 하중, 구조물의 뒤틀림, 좌굴, 그리고 외부 요인에 의한 판의 변형 때문에 발생된다.

일반적인 구조물에서 또는 VLFS에서와 같은 초대형 구조물에서 3-D 유한 요소 모델링은 가능하다. 그러나, 비록 3-D 해석이 가능하다 하더라도, 단순하게 개선된 모델링 접근법은 3-D 접근법이 가진 고유의 계산적인 복잡성을 고려할 시 효과적이다.

3-D 기본 모델링과 호환성이 있는 2-D 그릴리지 모델링 방법을 개선하여 단순 모델링을 한다면 복잡한 3-D 해석을 피할 수 있겠다.

직교 보강 판 시스템의 2-D 그릴리지 접근법에서 판은 동등한 그릴리지를 이루는 보강재와 일률적으로 다루어진다. 그릴리지는 불연속의 판-보강재 공동체로 나타나는 보로 구성되고, 동등한 단면 특성치 I와 J를 갖는다. 여기에서 I와 J는 각각 굽힘 강성 모멘트와 비틀림 강성 계수를 나타낸다.

일반적인 6자유도 보의 강성행렬의 요소들은 보의 단면 특성치이다. 그러므로, 만약 보강재 요소의 강성행렬이 판 덮개 영향을 포함하여 구해진다면, 2-D 그릴리지 요소의 동등한 단면 특성치는 일반적인 보 요소의 강성 행렬 요소를 비교하여 증명할 수 있다.

2-D 그릴리지 보 요소의 동등한 단면 특성치는 원래의 직교 보강 판 그릴리지 구조의 강성을 나타내도록 치환될 수 있다.

여기서 수직 굽힘의 효과적인 판 폭을 구할 수 있고, 동등한 보에 부합되는 수직 굽힘 관성 모멘트 I를 비교적 정확하게 계산할 수 있다. 그러나 상응하는 보의 비틀림 강성은 그렇지 못하다. 한가지 방법으로 주어진 효과적인 테두리에서 상응하는 보의 정확한 비틀림 강성 측정은 다음과

같이 유도될 수 있다.

L. Prandtl이 소개한 막 유추법으로 균일하게 하중이 부과된 막의 처짐과 비틀림 보의 응력 분포 사이의 관계를 결정한다. 이를 이용하여 폭이 좁은 직사각형 단면 비틀림의 간단한 해석을 할 수 있다.

폭이 좁은 직사각 단면의 비틀림 강성은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{3} h t^3$$

여기서, h는 단면의 깊이이고 t는 단면의 두께이다. 이는 뒤틀림 구속이 없는 단면의 비틀림 강성이다. 그러나, 뒤틀림의 구속은 비틀림 각도와 응력 분포에 상당한 영향을 미친다. 직교 교차하는 판 보강재에서 판의 cover가 보강재 비틀림에 면내 변형이 일어나기 때문에 뒤틀림 구속이 존재한다. I 보의 경우, 비틀림 시 채널과 얇은 벽 부분의 뒤틀림 저지는 플랜지의 면내 굽힘에 의해 동반되고, 비틀림의 각도 감소에 영향을 줄지도 모른다. 회전부의 비틀림 중심 혹은 비틀림 축은 플랜지의 보강 효과를 평가하기 위해 알고 있어야 한다. 이 경우에서 보강재의 비틀림축은 직교로 속박된 동등 보의 중립축과 교차하는 직선이라고 할 수 있다.

결과적으로 직교 이방성 판 해석 이론의 적용을 VLFS에 적용할 때 특별히 각 하부 구조물의 판 부재로의 집중화가 어려워 불가능할 것으로 생각되는 경우에는 2-D 그릴리지 해석 이론 또는 3-D 그릴리지 해석 기법의 적용이 필요하다. 이 경우 판과 하부 구조물의 등가 강성의 구조 특성치인 I, J, A 값의 결정이 중요한 변수가 되겠다.

신뢰성 있는 I, J, A 값의 산정에 따라 2-D 그릴리지 부재의 등가 특성치가 정해지면, 유한요소해석을 통하여 전체 구조물의 해석을 용이하게 수행할 수 있겠다.

이 경우 분포 하중을 등가 질점 하중으로 치환하는 문제가 또한 발생되므로 이에 대한 주의가 필요하다.

6. 그릴리지 구조 모델링의 주요 기법

2-D 그릴리지 모델링이나 3-D 그릴리지 모델링 시 주의해야 할 주요 모델링 기법은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 3-D 모델링 경우 프레임 구조물을 보 부재로 치환하며, 각 부재는 각각의 중성축을 기준으로 하여 서로 만나며, 만나는 점에서의 부재는 Fig. 1과 같이 강성이 매우 큰 부재를 강체 부분으로 취급한다.^{15,16)}
- (2) 각 구조부재의 단면계수는 부재의 축 방향을 x축으로 하고 수직방향을 z축으로 취하였을 때 단면적 A_x , y축 전단면적 A_y , z축 전단면적 A_z 로 나타내 주고 비틀림

관성모멘트 J , y 축 및 z 축 방향 관성모멘트 I_y , I_z 로 나타내어 계산한다. 이들 단면 특성 계산시 판부재 유효나비 산정은 선급 및 강선 규칙의 규정에 따르며 이러한 부재의 각 단면계수는 보의 플랜지로서 유효나비를 취한 단면을 기준으로 하여 계산한다.

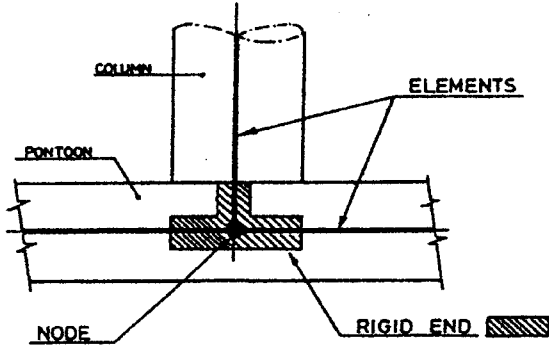


Fig. 1 각 부재의 연결부의 강체 부위

(3) 강체 부재를 가정하여 그릴리지 모델링을 수행하고 강체 운동 모드를 제거하기 위한 경계 조건의 부가가 필요하다.

7. 수치해석을 통한 두 방법의 적용성 검토

VLFS의 효과적이고 정확한 구조 안전성 해석을 위하여 전 절에서 분석 제시한 각 방법의 적용성 지침에 따라, 수치 해석적으로 VLFS 모델에 대해서 구조 해석을 수행하였다.

일차적으로 직교 이방성 판 모델을 선정하였고 2차적으로는 그릴리지 보 모델을 선정하여, 항공기 착륙시의 하중에 대한 변형 형태와 최대 변위 등을 산정 하였다. 항공기 착륙에 의한 하중은 Boeing 747의 착륙시의 하중값을 적용하여 보았으며, 이 하중에 의한 변형치를 기존의 참고문헌에서 산출한 값과 비교하였고,^{11,12)} 판 모델에 의한 변형값과 그릴리지 보 모델에 의한 변형값을 함께 비교 분석하였다.

해석에 사용된 Software는 FEMAP(Finite Element Modelling And Postprocessing) Version 45와 mTAB*STRESS 프로그램이다.^{7,13,14)}

7.1 VLFS에 대한 판 요소 적용 해석

전 절에서 정립된 기법에 따라 직교 이방성 판 모델을 생성시켜 전형적인 VLFS의 구조해석을 수행하였으며, 여기에서 사용된 특성치 등은 Table 1과 같이 요약될 수 있다.

Table 1 판요소 사용시의 특성치

재료 물성치	탄성계수, E_x	$2.9 \times 10^7 \text{ lbf/in}^2$
	탄성계수, E_y	$2.9 \times 10^7 \text{ lbf/in}^2$
	밀도	$7.33 \times 10^{-4} \text{ lbf} \cdot \text{sec}^2/\text{in}^4$
	프와송 수	0.3
요소 물성치	등가 판 두께	30.71 inch
	전체 Length	11811 inch
	전체 Breadth	2362 inch

가. 항공기 착륙에 대한 판 요소 이용 구조해석

1차적인 VLFS 모델은, 참고문헌에서 수행된 해석과의 비교 검토를 위하여 일본에서 구조해석 등이 활발히 진행되었던 Mega-Float와 같은 크기의 모델을 선정하였으며, 길이는 300m, 폭 60m, 깊이 2m의 것이다. 돌핀 계류를 적용하였다고 가정하여 계류 위치를 선정하여 이에 따른 경계조건을 구조해석 시에 부과하였으며 판요소는 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 200개를 사용하였다. 판요소를 사용하여 VLFS를 모델링한 후 계류와 구조해석 기법상의 경계요건을 적용하였고, 항공기의 착륙 하중을 Boeing 747의 착륙시의 발생하중인 675 tonf를 부과시켜 구조해석을 수행하였다. 이에 대한 변형 형태와 응력 발생에 대한 결과가 Fig. 2에 나타나고 있다.

Fig. 2을 보면 착륙지점의 변위와 응력이 최대로 나타나며 변위는 0.38944 in, 즉 0.989 cm로 산출되었다. Eiichi Watanabe와 Tomoaki Utsunomiya가 수행한 수치해석 결과는 접근 방법이 다르고 code가 다르지만 최대변위가 1.1 cm가 나왔고 NASTRAN에 의한 값은 1.01 cm인 것으로 나타난 것과 비교하면 그 경향과 값이 유사한 것을 알 수 있겠다.^{11,12)} 여기서, 실제 VLFS를 판 요소로 모델링하고 등가 하중을 부가하여 그 영향을 분석하는 방법이 적절한 것이라는 점을 찾아낼 수 있겠다.

Fig. 3은 같은 변형 상태이지만 투시 방향을 다르게 잡아 hot spots의 응력상태를 잘 보여주는 그림이다. 요소 크기를 더욱 조밀하게 하여 해석을 수행할 수 있으나, 변형의 경향과 최대 변형량이 비교할 만한 수준만큼 얻어졌으므로 이 결과에 따른 분석을 수행하였다. Fig. 4은 이 모델링에서 채택한 요소 배열과 돌핀 계류를 고려하여 부가한 경계조건 등을 보여주고 있다. 한편, 7.2절에서 상세히 기술하겠지만, 일단 판 요소를 이용한 VLFS의 항공기 착륙상황을 비교 검토하기 위하여, 그릴리지로 모델링한 VLFS에 대한 구조해석을 수행한 대표적인 변형 형태를 Fig. 5에서 보여주고 있다.



Fig. 2 Modeling of VLFS by Plate Elements and Boeing 747 Landing Simulation



Fig. 3 Stress Distributions around the Boeing 747 Landing Point in VLFS

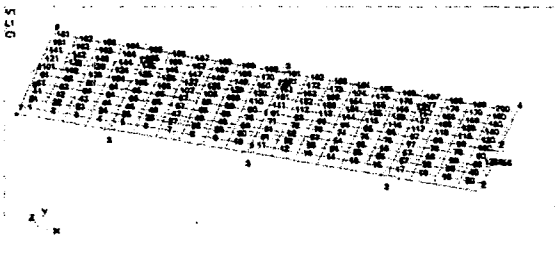


Fig. 4 VLFS modeling by Plate Elements and Boundary Conditions

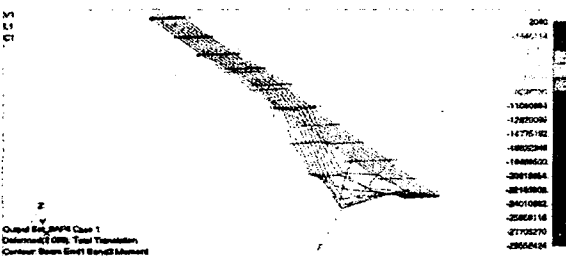


Fig. 5 Grillage Model of VLFS by Equivalent Beam Elements and Deformations

앞에서 설명한 것과 같이 판 요소에 의한 VLFS의 모델링과 그릴리지 보 요소에 의한 VLFS의 모델링 비교 검토는 중요한 사항이고, 구조 안전성 해석 관점에서 두 경우에 대한 타당성을 결정해야 한다.

두 경우 모두 구조해석 관점에서 VLFS 설계에 사용할 수 있으며, fully 3-D 모델링에 따르는 경제적, 시간적 손실을 줄일 수 있고 또한 초기 설계 시에 매우 많은 설계 정보를 쉽게 얻을 수 있어서 이 두 가지 방법의 적합성은 인정된다고 할 수 있겠다. 다음 Table 2는 각각의 경우에 대한 최대 처짐량을 보여준다. 그릴리지 모델링에 대한 자세한 사항은 7.2절에서 설명하였다.

Table 2 Boeing 747 착륙시의 VLFS 최대 처짐량

모델링 방법 / 코드	최대처짐량 단위 (cm)
Watanabe	1.10
NASTRAN	1.01
판 모델링	0.989
Grillage 모델링	1.151

7.2 VLFS에 대한 그릴리지 요소 적용 해석

전절에서 수행된 VLFS 모델에 대하여 동등한 보의 특성치를 갖는 그릴리지를 생성시켜 이에 대한 구조 해석을 수행하였다. 여기에서 사용된 특성치 등은 Table 3과 같이 요약될 수 있겠다.

Table 3 그릴리지 보 요소 사용시의 특성치

재료 물성치	탄성계수 Ex	$2.9 \times 10^7 \text{ lbf/in}^2$
	탄성계수 Ey	$2.9 \times 10^7 \text{ lbf/in}^2$
	밀도	$7.33 \times 10^{-4} \text{ lbf} \cdot \text{sec}^2/\text{in}^4$
	프와송수	0.3
요소 물성치	Ixx	$5.9832 \times 10^5 \text{ in}^4$
	Ax	432.76 in^2
	Jxx	89.6 in^4
	Iyy	$58.0134 \times 10^5 \text{ in}^4$
	Ay	3964.0 in^2
	Jyy	400.0 in^4

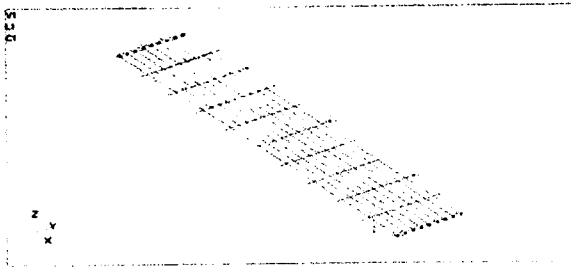


Fig. 6 Typical Grillage Modeling of the VLFS

가. 항공기 착륙에 대한 그릴리지 이용 구조해석

그릴리지 보 모델로 표현된 VLFS의 대표적인 경우가 Fig. 6에 보여지고 있다. 구조해석상의 경계 요건을 부가하여, 판 요소로 모델링하여 수행했던 경우와 같은 항공기 착륙에 대한 구조해석을 수행하였다. 사용된 요소의 특성치는 Table 3과 같으며 실질적인 보의 형상은 직교이방성으로 보 요소가 배열된 것으로 생각하고 높이는 2m인 것으로 정하여 각각의 요소 특성치를 결정하였다. 길이 방향으로 등가 보 요소 100개와 폭 방향으로 등가 보 90개를 생성시켜 모델링을 하였으며 돌핀 계류 상태와 항공기 착륙시의 상황을 고려한 경계조건을 주고, 즉 항공기 착륙하중 675 tonf와 적절한 경계조건, 구조해석을 수행하였다. 몇 가지 경우에 대해서 해석을 수행한 결과에 대한 구조물의 변형 상태를 나타낸 그림이 Fig. 7, Fig. 8에 잘 나타나 있다. Fig. 8의 경우, 측면에서 바라본 VLFS의 구조 변형모습을 잘 보여 주고 있으며 판 요소를 사용해서 얻은 Fig. 2와 잘 일치함을 보여주고 있다.

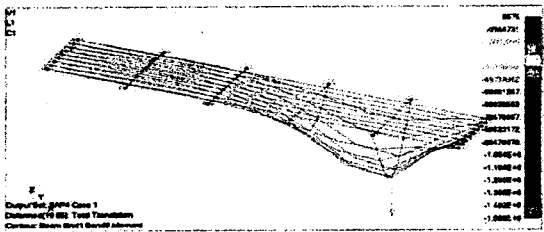


Fig. 7 Grillage Modeling of VLFS and Boeing 747 Landing Simulations

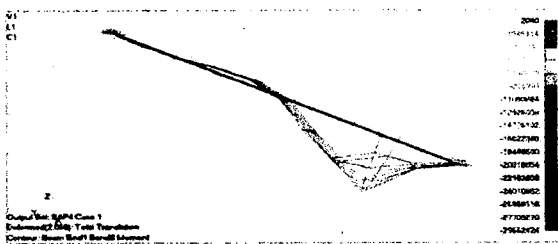


Fig. 8 Maximum Deflection due to the Boeing 747 Landing and Its Configurations

7.3 판 및 그릴리지 모델링에 대한 비교 분석

VLFS에 대한, 판 요소를 이용한 모델링과 등가 보 요소를 이용한 그릴리지를 생성하여 모델링한 구조물에 대해서 각각 항공기 착륙시의 구조안전성 해석을 수행하였다. 그 결과 기존의 3-D 모델링에 의한 매우 복잡하고 비경제적인 해석 절차를 따라 수행된 결과와 유사한 변형 형태와 처짐량을 각각 얻을 수 있었다. 이는 전 절에서도 언급된 바와 같이 수많은 시행착오를 통하여 얻어지는 VLFS의 설계과정을, 신속하고 경제적이며 신뢰성 있는, 등가 판 요소를 이용하거나 등가 보 요소를 이용한, 해석을 통하여 효과적으로 수행할 수 있음을 보여주고 있다.

두 가지 방법에 의한 같은 해석 사항에 대한 결과를 비교해 보면 판 요소를 이용한 해석의 경우는 변형량을 기존의 것과 비교했을 시 과소 평가된 값이 나왔고, 그릴리지 보 요소를 이용한 경우는 과대 평가된 값이 나왔다. 즉 최대 변형량의 경우, 판 요소 이용한 경우 0.989 cm이고, 그릴리지 모델링인 경우 1.151 cm로 나와 비교적 큰 값을 주고 있다. 이는 그릴리지 모델링의 경우 비틈에 대한 추가적인 비틈 강성도를 적절히 주지 않은 것과, 실제 구조물의 경우 거더의 변형으로 인한 보 요소의 면내 저항 요소가 적절히 나타나지 못한 것으로 인하여 발생된 것으로 생각된다. 그릴리지 보 요소를 이용하여 해석을 수행할 시의 주의점은 바로 이러한 점들이며, 이러한 상황 등이 자세히 반영된다면 훌륭한 결과를 줄 것으로 생각된다.

판 요소를 이용한 구조해석 방법은, 실제 구조물보다 강력한 한 개의 특성치로 주어진 판 요소의 역할로 강성도의 추가적인 증가가 포함되었다고 생각된다. 실제 구조물은 판과 거더 등이 혼합된 직교이방성으로 보강된 판 구조물인데 비하여 이러한 판 요소를 이용한 등가 구조물은 비틈이 없는 등가 두께의 판 요소로 이루어졌기 때문에 이러한 결과가 얻어졌다고 생각된다.

8. 결 론

이제까지 VLFS에 대해서 구조 역학적으로 설계에 필요한 해석 기법에 대한 이론적 접근 근거와 실질적인 응용 방법 등을 검토하였다.

판 요소를 이용한 구조해석을 수행하기 위해서는 이에 대한 이론적 배경과 그 적용성 등을 정립하였으며, 처음 장에 이러한 과정을 재정리하고 이론적 근거를 제시하였다. 또한 그릴리지 보 요소의 적용과 관련, 구조해석을 수행하기 위한 이론적 배경과 모델링 방법, 실질적 구조 해석 수행을 위한 테크닉 등을 정리하였고 유사한 구조해석을 예시하였다.

2가지 접근 방법에 대한 비교 분석과 실제 VLFS에 대한 구조해석을 통하여 적용 타당성을 분석하였고, 기존의 3-D 접근법과의 비교를 통하여 본 방법의 적용 가능성을 확인시켰다.

결론적으로 등가 판 요소와 그릴리지 보 요소를 이용한

방법은 모두 효율적으로 VLFS 구조 안전성 해석에 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) 이재신, “해양구조물 설계 개요”, 광문출판사, 1989
- 2) 한국선급, “선급 및 강선규칙”, 1999
- 3) 한국선급, “이동식 해상구조물 규칙”, 1994
- 4) 해양수산부, 초대형 부유식 해상 구조물 기획 연구, 조규남 외, 1999
- 5) 조규남, “A New Grillage Method for Analyzing Orthogonally Stiffened Plated Structures”, 전산구조공학회지, Vol.2, No.2, 1989
- 6) KN.Cho, William S. Vorus, “An Equivalent 3-D Method for Analyzing Orthogonally Stiffened Plate Structures”, Journal of Ship Research, Vol.31, No.2, 1987
- 7) mTAB*STRESS, users' Manual, Structural Analysis, Inc., 1996
- 8) O.F.Hughes, Ship Structural Design, John Wiley & Sons, 1983
- 9) Timoshenko & Young, Strength of Material, McGraw-Hill, 1995
- 10) Timoshenko & Woinowsky, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1968
- 11) H. Endo, K. Yago, “On the Extreme Load for VLFS”, Proceeding of Very Large Floating Structures, SRI, 1996
- 12) E. Watanabe, T. Utsunomiya, “Transient Response Analysis of a VLFS at Airplane Landing”, Proceeding of Very Large Floating Structures”, SRI, 1996
- 13) FEMAP, Users' Manual, Enterprise Software Products, Inc., 1996
- 14) Bathe & Wilson, Numerical Methods in FEM Analysis, Prentice-Hall, 1976
- 15) DnV, “Classification Notes No. 31.4 - Strength Analysis of Main Structures of Column Stabilized Units”, 1987
- 16) DnV, “Mobile Offshore Units”, 1987