Isoparametric Mapping 방법을 사용한 선체 유한요소 모델링

Finite Element Modeling of Ship Structure using Isoparametric Mapping Method

송 의 준* 이 재 환** 김 병 현*** 김 용 대****
Song, Uy-Jun Lee, Jae-Hwan Kim, Byung-Hyun Kim, Yong-Dae

요 지

본 문에서는 선체 중앙부의 유한요소 모델링과 진동해석이 수행되었다. 횡부재와 종통부재가 만나 3차원적으로 연결되어 있는 선체구조는 복잡한 구조적 특성 때문에 모델링에 많은 노력이 필요하다. 선수, 선미부에 비해 비교적 부재간의 접속이 간단한 중앙평행부의 진동해석과 같은 경우에는 모델링 기법을 개발해 사용할 수도 있다. 중앙부 횡부재와 종통부재가 만나는 부분의 접속성과 형상표현을 위해 keypoint, super element (SE) 개념을 도입하였고 형성된 SE 들을 isoparametric mapping 기법을 접속된 3차원 부재용으로 개선하여 유한요소로 분할하였다. 진동해석용으로 형성된 선체중앙부 요소망을 ANSYS로 가시화하였고 자유진동해석을 수행하였다.

핵심용어 : 선체중앙부, 유한요소 모델링, 자유진동해석

Abstract

The automatic mesh generation of a container midship and the vibration analysis are performed. Since the structure of a container midship is three dimensional where transverse frames and longitudinals are connected, the concept of keypoints and super element(SE) could be useful to define the connectivity of structural parts and to provide the basic shape for mapping algorithm. Finite elements are generated from SEs using the developed isoparametric mapping algorithm and are visualized by ANSYS. For the computational efficiency, half model with symmetric and anti-symmetric boundary conditions are applied and reasonable eigenvalues and eigenvectors are computed by subspace iteration method in ANSYS.

Keywords : *finite element modeling, super element, isoparametric mapping, keypoints, vibration analysis*

1. 서 론

선체 구조·진동해석에 범용 유한요소 프로그램이 사용됨에 따라 각종 해석 방법이 놀라울 정도로 발전되었다. 선체의 경우 구조가 거대, 복잡하고 데이터의 양이 방대하므로 범용 유한요소

* 한라중공업(주) 삼호조선소
** 정회원·충남대학교 선박해양공학과, 교수
*** 한국기계연구원 구조시스템 연구부
**** 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

프로그램을 이용하여 유한요소망을 형성할 수 있으나 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 즉, 수치해석 자체에 요구되는 시간과 노력에 비해 해석용 입력데이터의 작성이 애로사항으로 대두되고 있다. 본 문에서는 이에 대한 대책으로 선체 구조·진동해석시 설계도면 데이터로부터 보다 효율적이고 빠르게 유한 요소 망을 생성하는 기법을 개발한 후, ANSYS로 모델링된 형상을 가시화하고 고유진동해석을 수행하였다.

최근 들어 범용 유한요소 meshing 코드 외에도 설계 및 해석의 자동화를 위하여 입력자료 준비를 자동화하는 일 즉, 전처리 과정을 용이하게 하는 연구가 진행되어 요소자동 생성에 관한 논문이 국내외에서 많이 발표되었다[1)~19)]. 초기에는 삼각형 요소망의 자동생성기법이 많았고 근래에는 사각형 요소망 생성이 많이 사용되고 있으며 서로 장단점을 가지고 있다. 삼각형 요소생성은 기하학적 제한이 적은 편이나 요소수가 증가하고 사각형 요소의 경우에는 형상제한 문제로 자유로운 요소생성이 어렵지만 계산효율이 높다. 삼각형 요소의 경우 해석의 신뢰도가 떨어진다.

삼각형 요소생성의 대표적인 방법은 Delaunay 기법을[2)~4)] 들 수 있다. 사각형 요소생성 방법은 Isoparametric mapping, Looping algorithm 등이 있고 이 경우 사각형 요소 내각을 가능한 90에 가깝게 한다. 어떤 방법이든 경제적이어야 하며 해석영역의 어느 부분에서나 요소밀도(density)를 용이하게 조절할 수 있으면 바람직하다.

2. 유한요소망 생성 기법

유한요소 생성기법은 다음과 같이 분류될 수 있다.

2.1 Mapping Method

이 방법은 해석영역을 매개변수를 사용하여 작은 정사각형으로 변환시켜 매개영역에서 유한 요소 망을 형성한 후 본래의 해석영역으로 재 변환(mapping)시키는 방법이다[5),7)]. 사용되는 mapping 방법은 isoparametric, conformal 등이 있다. 초기에 1단계로 super element(SE)를 만든 후 접속부분의 연결을 고려하여 요소를 생성하는데 매개변수 영역에서의 요소망 구성 기법이 간편하고 해석결과 정도가 대체로 우수한 사각형이나 육면체 요소를 형성하나 국부조밀 요소 망 구성이 어려운 편이다.

Mapping 방법은 Durocher[7)]가 수치적으로 개발하였고 Wu[8)]에 의해 중복절점 등이 많이 개량되었다. 그 후 Liu[9)]에 의해 역시 중복 절점제거, 여러 형태의 삼각형, 사각형요소 생성이 발표되었다. Ghassemi[10)]는 2차, 3차 3각형 곡면에서 사각형 요소를 먼저 형성한 후 대각선으로 삼각형 요소를 생성하였다. Liu등[11)]은 3절점, 6절점 삼각형과 4절점, 8절점 사각형 요소생성, 개선된 중복절점 제거 내용을 발표하였는데 Fig. 1(a)의 부재를 Fig. 1(b)와 같은 SE로 분할 후 Fig. 1

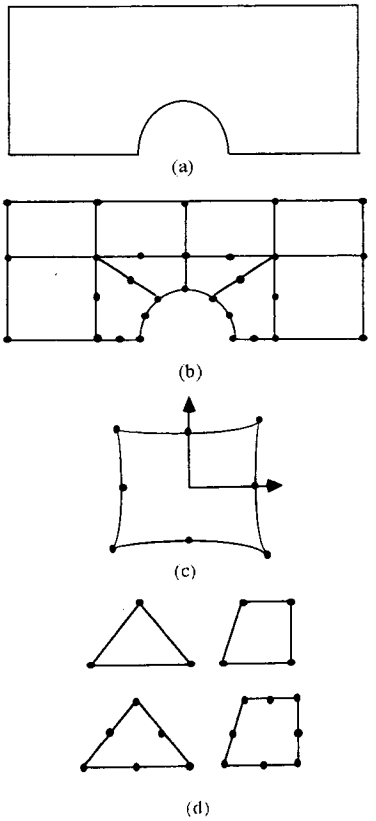


Fig. 1 Isoparametric mapping

(c)의 매개변수 영역을 사용하여 매개 요소생성과 mapping으로 Fig. 1(d)와 같은 variable order 요소를 생성하였다. 그런데 이러한 연구들은 2차원 평면부재에대한 요소망 생성이 주를 이루었고 3차원으로 접속된 부재에는 적용되지 않았으나 본 연구에선 3차원 접속 부재에 대한 알고리즘을 개발 적용하였다.

2.2 Delaunay Method

이 방법은 해석영역 경계 및 내부에 규칙적 혹 불규칙적 방법으로 절점을 생성한 후, 이들 절점을 연결하여 요소를 만드는 방법으로 Delaunay triangulation 등이 있다. Delaunay 삼각분할법은 2차원 평면상에 임의로 설정된 절점군을 위상기하학을 근거로 삼각형 요소로 분할하는 공간분할법이다. 이 방법으로 얻어진 모든 삼각형 요소에 대하여 외접원을 구하면 그 내부에 다른 요소의 절점을 포함하지 않는다. 이와 같이 얻어진 삼각형은 등각조건을 만족하는 즉, 유한요소 해석 정도가 높은 정삼각형에 가까운 요소가 된다.

2.3 Looping Algorithm

이 방법[1),6)]은 형상분해법 (Geometry Decomposition) 이라고도 하며 Sluiter등[1)]은 해석영역을 하나의 연속 루프로 구성하고 이를 분할선을 사용하여 부루프(subloop)들로 계속해서 나눠가며 사각형 요소를 생성하였다. Talbert[6)]는 Sluiter의 내용에 기초하여 보다 개선된 일반적인 방법을 제안하였다. Bezier 곡선으로 해석영역 경계를 정의하고, Sluiter가 제안한 6-절점 오퍼레이터를 일반화하여 Looping algorithm이라 하였다. 또한 요소망 밀도가 급변하는 영역에 대해서는 개선계수 (refinement coefficient)를 사용하여 요소망의 찌그러짐을 방지하고 경계에 인접한 요소는 가능한 정사각형이 되도록 옵셋요소(offset element)를 도입하였다.

국내에서는 채수원[12)], 전만수[13)] 등에 의해 소성가공을 위한 요소망 자동생성이 발표되어 채수원의 경우 8-절점 오퍼레이터를 개발하였다. 여기에서는 최적분할선 선정기준이 개선되었고 루프트리 자료구조가 사용되었으며 밴드폭 축소를 위해 Reverse Cuthill-McKe 방법이 도입되어 4절점 또는 8절점 사각형 요소가 생성된다. 해석영역의 경계가 loop로 정의된 후 절취선이 사용되어 연속루프가 된다.

2.4 기타 방법들

기타 방법으로는 주어진 해석영역을 사각형이나 육면체 등과 같은 기본요소들의 집합인 격자를 사용하여 요소망을 구성해 나가는 방법으로 Quadtree, Octree 방법이 있다. 얻어진 사각형, 육면체 등은 삼각형이나 사면체로 재분할되어 사용된다. 이 방법은 해석영역 내부에서는 좋은 형태의 요소들이 얻어지나 경계부분에서는 찌그러진 형태의 요소가 얻어지는 단점이 있다. 또한 절점 및 요소 동시생성법, 위상분해법 등이 있으나 전자는 Delaunay와 비슷한 방식으로 해석영역 경계에서부터 안쪽으로 내부 절점과 요소들이 생성되어 3차원 문제에도 적용되기 시작하였고, 후자는 찌그러진 요소가 생성될 수 있어 실용화되기에는 한계가 있는 방법이다.

3. 선체 유한요소망 생성

재래적인 선체구조 모델링하는 작업은 설계도면을 보고 각 section별로, 혹은 각 deck별로 일일이 node와 element를 정의하여 모델이 기하학적으로 모순이 없도록 선체의 유한요소를 생성하는데 형상 특성에 따라, node를 생성시켜 element를 생성하는 절점 직접 생성법이나, Key point, Line, Area를 이용하여 모델을 생성한 후 요소 size, line 분할, 요소의 개수 등을 사용하여 원하는 mesh 모양을 결정한 후 요소를 생성하는 Solid Modeling 방법을 이용한다. 후자 경우 keypoint에 의해 SE가 형성된 후 요소망 알고리즘에 의해 요소가 생성된다. 그러나 최근 객체지향 기법을 적용한 상용 CAD 코드로 인해 모델링과 유한요소 생성이 자동화되고 있다.

선미부는 deck별로 부재와 일관성 있게 연결되어있지 않으며 main deck 아래 선체 부위도

평행부위가 없어 자동화된 요소망 생성기법을 적용하기에 어려워 절점 생성법이 주로 사용된다. Fig. 2는 선체의 선미 도면으로부터 절점과 요소를 절점 직접 생성법에 의해 모델링한 것이다.

근래 발표된 선체 유한요소망 생성법의 경우 중앙 평행부의 경우에는 자동화된 모델링이 적용되고 있어, 박성환 등은 종통부재의 경우 형상데이타로부터 차례대로 요소를 생성하였고 횡단면 평면요소 자동분할에는 ANSYS의 pre-processor기능을 사용하였다. 횡단면 평면요소 분할에 임의의 형상을 다수의 3각형 혹은 4각형의 내부 부영역으로 분리한 후 각각의 부영역에 대하여 3절점 혹은 4절점의 유한요소로 자동분할 생성해서 중앙 평행부를 모델링하였다[14]. 이 경우 종통재 부재요소 생성은 SE개념이 아니고 알고리즘에 의해 순서대로 요소를 길이방향으로 생성하였다. 엄항섭[15] 등은 상용 유한요소 코드 ANSYS의 파라메터를 사용하여 형상정보와 위상정보로 표현된 macro file들을 이용하여 선체의 각 부분을 모델링하였다.

또한 나승수[16] 등은 선체구조 설계정보를 갖는 형상모델을 구축하고 형상 모델러(ACIS)를 통해 부재간의 접합관계를 이용하여 구조해석 정보인 patch 및 keypoint 정보를 추출한 후 ANSYS를 이용해 SE에 해당되는 Area를 생성하고, 자동생성 기능을 이용하여 유한요소 분할을 수행하였다. 이재환[17]의 경우 Delaunay algorithm을 개발하여 삼각형 요소들을 형성하였다.

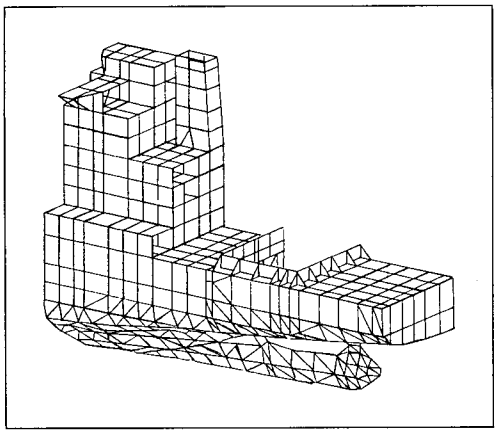


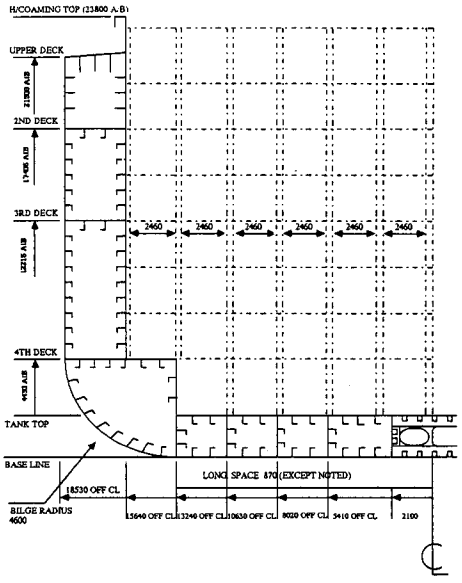
Fig. 2 Mesh generation of ship super structure by Direct Node Generation Method

염재선등[18]에서는 객체지향 선체 모델링을 구현할 때, 객체지향 데이터구조, 선체모델을 위한 객체표현등을 사용하고 hold 에 대해 구조해석모델을 생성하여 ANSYS로 요소를 형성하였다. 신현경등[19]의 경우, 선체중앙단면부 유한요소 생성을 위해 C++로 GUI 를 개발하였는데, 요소망 생성 방법에 대한 구체적인 내용은 발표되어 있지 않다. 이와 같이 상용 유한요소 코드를 사용하여 모델링을 한 후, 코드에서 제공하는 mesh 기능을 이용하여 유한 요소망을 생성시키는 방법들은 대개 중앙 평행부 hold 부분에 관한 것들이다. 즉, 이러한 연구들의 공통점은 대부분 요소를 생성하는 작업에는 ANSYS와 같은 상용 코드를 사용한 점이다.

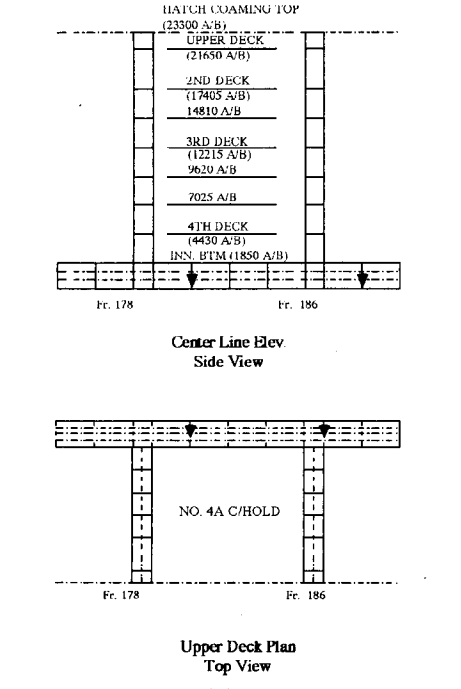
선체의 경우에는 임의 부재의 요소망 형성보다도 복잡한 것이 각 부재의 접속관계이다. 따라서 본 연구에서는 선체의 중앙 단면도를 입력 데이타로 하여 종, 횡부재 전체에 걸쳐 적은 단위부재인 SE를 생성한 후에 2차원 isoparametric mapping 방법을 3차원으로 확장하여 선체의 유한 요소망을 생성하였으며 상용코드인 ANSYS를 사용하여 요소망을 가시화하였다.

3.1 Super Element의 생성

선체 유한 요소망을 생성하기 위한 전 단계로 대상물을 여러 개의 작은 단위부재 (SE)로 분할하여 mesh program의 입력 데이터로 사용한다. Container 선체의 중앙단면도(Fig. 3(a)와(b))로 부터 형성된 Fig. 4(a)의 keypoints K1~K25는 종통부재 SE 생성용이고 Fig. 4(b)에서의 keypoints 들은 횡부재 SE 생성용이다. 이러한 keypoint들은 3각형 혹은 4각형 SE 들을 구성하게 된다. 부재접속이 고려된 3차원 SE를 생성하기 위해, 각 section 형상 데이터를 본 프로그램의 입력 데이터로 사용한다. Fortran으로 프로그래밍되어 자료구조에 대한 특별한 기법은 개발되지 않았다. 입력 데이터의 예는 Table 1이며 설명은 다음과 같다.

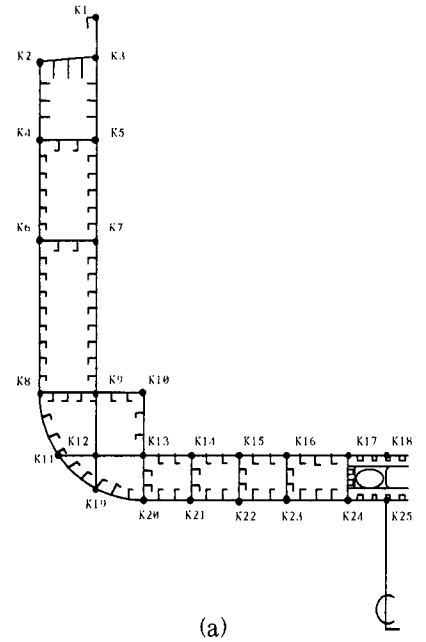


(a)

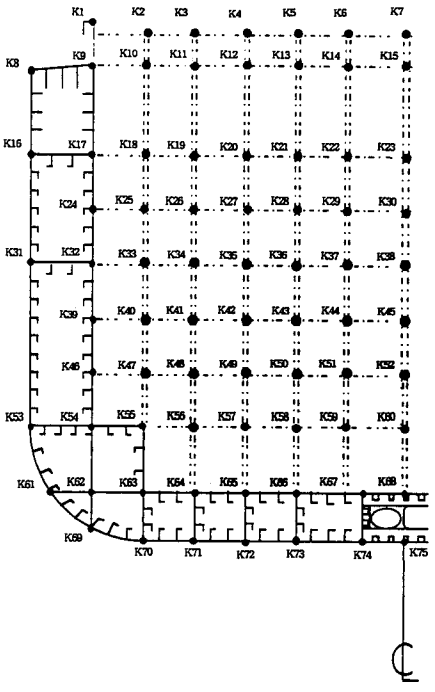


(b)

Fig. 3 Midship section and deck plans of container ship



(a)



(b)

Fig. 4 Definition of keypoint and super element (SE) in midhsip section

Table 1 Example of Input Data

S	1	28	19						
-5.6		18.55		21.65	up	side	0	0	0
-5.6		15.64		21.65	up	lon7	0	0	0
-5.6		13.01		21.65	up	lon6	0	0	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1	9	10	2						
2	10	11	3						
3	11	12	4						
.	.	.	.						
-4.9		18.55		21.65	up	side	0	0	0
-4.9		15.64		21.65	up	lon7	0	0	0
-4.9		13.01		21.65	up	lon6	1	0	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
18	19	24	24						
19	24	25	20						
20	25	26	21						
.	.	.	.						

S N1 N2 N3

- N1 : section number
- N2 : keypoint 개수
- N3 : super element 개수

x y z ATTRI1 ATTRI2 ATTRI3 ATTRI4 ATTRI5

- x, y, z : coordinate
- ATTRI1 : 해당 keypoint의 deck 속성
- ATTRI2 : 해당 keypoint의 side, wall의 속성
- ATTRI3, ATTRI4, ATTRI5 : 해당 keypoint와 다음 section의 keypoint가 x, y, z 방향으로 연결되었는지의 여부(0 : 연결, 1 : 연결 안됨)

각 section이 연결되었는지의 데이타를 기초로 하여 keypoint의 속성을 deck, sideshell과 wall 별로 구분한 후 그 정보를 이용하여 deck, sideshell과 wall 부분의 SE를 생성하였고 Fig. 5는 중앙단면 부분의 각 section데이터를 기초로 하여 90개의 SE를 생성한 것이다.

3. 2 Isoparametric Mapping에 의한 진동해석용 선체 유한 요소망 생성

앞에서 기술한 바와 같이 단위 부재에 isoparametric mapping방법을 사용하여 종횡 3차원

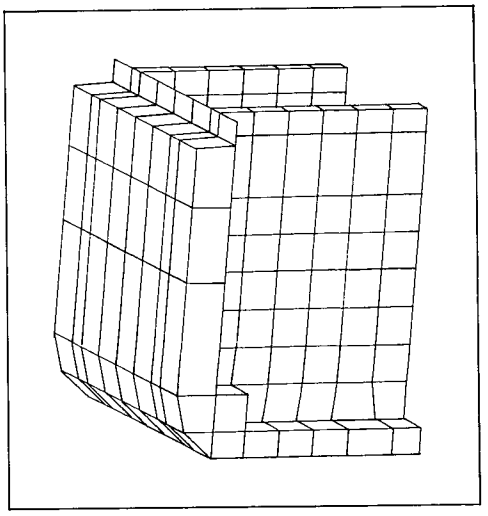


Fig. 5 Generated super elements of container midship

부재가 접속된 선체 구조의 유한 요소망의 자동생성을 하였다. 한 section의 SE에서 유한요소가 생성되고 다음 section의 경우는 접속정보가 사용되어 자동으로 SE와 요소망이 생성되는 방식으로 전개된다. Wall부분을 만나면 그곳에 정의된 keypoint로 SE와 요소를 형성한다. 이렇게 각 부재의 vertex 정보만으로 이웃한 부재들의 접속성을 인식하며 meshing을 한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 3402개의 유한요소가 생성되었다.

4. 선체 진동 해석

진동 해석의 경우 구조해석보다 요소를 크게 자르는 이유는 다음과 같다. 일반적으로 구조해석에서는 응력 레벨이 중요한 관심사이고 진동해석에서는 구조물 거동 즉, 진동 모우드가 주요 관심사이다. 구조물 응력은 변위의 1차, 혹은 2차미분의 함수로 나타나고 일반적으로 함수는 미분을 할수록 오차가 커진다. 그러므로 FEM 구조 해석 시에는 이 오차를 줄이기 위해 세밀한 mesh를 해야 하지만 진동 해석 시에는 진동 모우드와 고유치를 구하기 때문에 mesh를 크게 해도 오차가 그리 크지 않고 많은 D.O.F.의 수를 줄이기 위해 구조해석보다 요소의 크기를 크게 한다. 그러

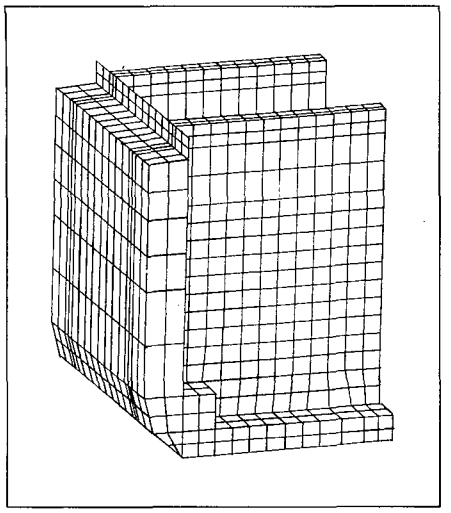


Fig. 6 Generated finite elements of container midship

나 강제진동 변위나 응력 계산시에는 정적응력 해석과 같이 조밀한 요소 망을 구성한다.

유한요소 생성의 적합성을 검증하기 위하여 생성된 요소망은 ANSYS에 의해 가시화 되었는데 요소는 plate, 탄성계수 E=2.1e11 (N/m^2), 밀도는 7850 (kg/m^3)이고 각 deck와 wall의 두께는 설계도면의 데이터로부터 얻었다. 형성된 요소망의 적용성을 검토하기 위해 자유진동해석을 수행하였다. Half-model의 경계조건으로 대칭과 (UY, ROTX, ROTZ =constrained)와 비대칭 (UX, UZ, ROTY=constrained)을 적용하였고 선체 중앙부의 진동해석은 ANSYS의 Subspace method를 사용하여 수행하였다. 고유진동수는 Table 2와 같으며 진동모드(1차)는 Fig. 7과 같다. 합리적인 진동결과(고유진동수, 진동형상)가 구해졌는데 1차 모우드는 격벽구조가 굽힘 현상을 나타내고 있다. 요소생성 기법이 연구의 주목적이라 진동해석 결과는 간결히 발췌하였고 2차 이상은 [17]에 수록되어 있다.

5. 결 론

선체 구조·진동해석에 있어서 범용 유한요소 프로그램의 사용은 각종 해석 방법에 다양한 발전을 가져왔다. 각 부재의 접속관계가 복잡한 선

Table 2 Natural Frequency of Midship

Mode	Frequency (Hertz)
1	15.106195
2	15.637097
3	34.765471
4	35.396397
5	36.592070
6	37.849224

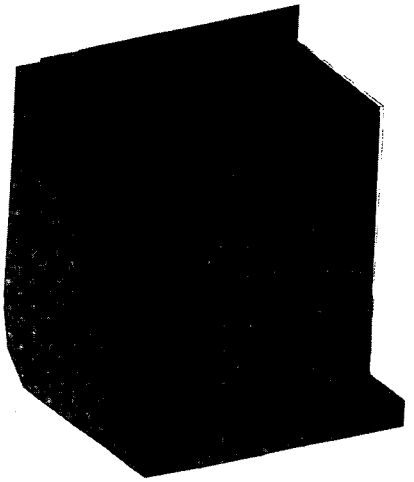


Fig. 7 First mode of container midship

체의 경우에는 그 동안 연구된 유한요소 생성 알고리즘들이 주로 단순 2차원 평판에 대한 것들이다. 혹은 3차원 형상모델을 구현해 상용코드로 요소망을 생성하였다.

이 문제를 해결하기 위한 하나의 방안으로 선체의 설계도면으로부터 선체중앙 부분의 각 section을 keypoint와 deck, wall과 sideshell의 연결속성 정보를 이용하여 3차원적으로 super element를 생성하고, 2차원 isoparametric mapping 기법을 개선하여 선체중앙 부분의 유한요소망을 생성하였고 진동해석을 수행하였다.

본 문에서 채택한 방법은 기존의 절점 직접 생성법에 비해 진동해석의 입력 데이터 작성 즉, 유한요소망 생성에 소요되는 시간과 노력을 감소시켰다. 선체중앙부 진동해석을 위해 개발된 내용이라 요소망 밀도 조절에 관한 내용까진 포함되지 않았다. 또 매우 복잡한 선수선미부에는 3절에 언급된 바와 같이 절점생성법이 적합해 개

발된 프로그램을 적용하지 못하였는데 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원의 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Sluiter, M.L.C. and Hansen, D.C., "A General Purpose Automatic Mesh Generator for Shell and Solid Finite Element", L.E. Hulbert(ed), *Computers in Engineering*, Vol. 3, Book No. G00217, ASME, 1982, pp.29~34
2. Cavendish, J.C., "Automatic Triangulation of Arbitary Planar Domains for the Finite Element Method", *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 12, 1974, pp.679~696
3. Lo, S.H., "A New Method Generation Scheme for Arbitary Planar Domains", *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 21, 1985, pp.1403~1426
4. Cavendish, J.C., Field, D.A. and Frey, W. H., "An Approach to Automatic Three-Dimemsional Finite Element Mesh Generator", *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 21, 1985, pp.329~347
5. Zienkiewicz, O.C. and Phillips, D.V., "An Automatic Mesh Genertion Scheme for Plane and Curved Surfaces by Isoparametric Coodinates", *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 3, 1971, pp.519~528
6. Talbert, J.A. and Parkinson, A.R. "Development of an Automatic, Two-Dimensional Finite Element Mesh Generator using Quadrilateral Element and Bezier Curve Boundary Definition", *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 29, 1990, pp.1551~1567
7. Durocher, L.L. and Gasper, A. "A Versatile Two-Dimensional Mesh Generator with Automatic Bandwidth Reduction", *Computers & Structures*, Vol. 10, 1979, pp.561~575
8. Wu, E-R "Techniques to avoid Duplicate Nodes and Relax Restrictions on the Superelement Numbering in a Mesh Generator", *Computers & Structures*, Vol. 15, 1982, pp. 419~422
9. Liu, Y.and Chen, K. "A Two-Dimensional Mesh Generator for Variable Order Triangular and Rectangular Element", *Computers & Structures*, Vol. 29, No. 6, 1988
10. Ghassemi, F. "Automatic Mesh Generation Scheme for Two-and Three-Dimensional Curved Surfaces", *Computers & Structures*, Vol 15, 1982, pp.613~622
11. Liu, Y. and Chen, K., "A Versatile Two-Dimensional Mesh Generator with Automatic Bandwidth Reduction", *Computers & Structures*, Vol. 32, No. 1, 1989
12. 채수원, 신보성, 민중기, "사각형 유한요소망의 자동생성", 대한기계학회지, 제17권 제12호, 1993, pp.2995~3006
13. 전만수, "사각형 유한요소 해석모델의 자동생성 프로그램의 개발", 대한기계학회논문집(I), 1993, pp.861~864
14. 박성환, 신종계, "선체중앙부 유한요소 구조해석을 위한 입력자동화", 대한조선학회 논문집, 제31권 제4호, 1994, pp.99~108
15. 엄항섭, 이순택, 양영순, 이명기, "Parametric Design Language를 이용한 선체구조해석모델 자동생성 Pre-processor개발", ANSYS User's Conference, 1993, pp.205~220
16. 나승수, 이순섭, 염재선, "선체 모델에 근거한 선체의 구조해석 모델링 방법", 대한조선학회 추계 연구발표회, 1994, pp.407~412
17. 이재환, 선체구조해석용 모델링기법 개발, 연구보고서, 1994
18. 염재선, 장창두, "객체지향 선체모델링과 구조해석모델 자동생성에의 응용", 대한조선학회 논문집, 제33권 제4호, 1996, pp.66~74
19. 신현경, 손호철, 권명중, 송재영, 김종현, 이정렬, 연규진, 강호승, "이중선각유조선 중앙단면부의 요소생성에 관한 연구", 대한조선학회 추계연구발표회, 1997, pp.448~452

(접수일자 : 1998. 10. 14)