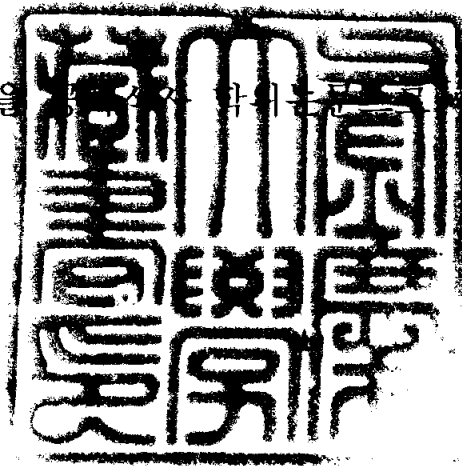


공학석사 학위논문

전역최적화기법과 Nastran을 이용한 대형선박구조물의 진동최적설계의 연구

지도교수 양 보 석

이 논문을 공인 학위논문으로 제출함



2004년 8월

부경대학교 대학원

음향진동공학과

채 상 일

채 상 일의 공학석사 학위논문으로 인준함

2004 년 6 월

주 심 공학박사 배 동 명 (인)

위 원 공학박사 배 성 용 (인)

위 원 공학박사 양 보 석



Abstract	03
제 1장 서론	04
제 2장 NASTRAN 최적화	06
2.1 NASTRAN의 최적화 기법	06
2.1.1 Modified Method of Feasible Directions	07
2.1.2 Sequential Linear Programming	08
2.1.3 Sequential Quadratic Programming	10
2.2 NASTRAN 최적화	10
2.2.1 근사화 개념	12
2.2.2 수렴 조건	15
제 3장 전역 최적화 방법의 제안	17
3.1 배경	17
3.2 R-Tabu 탐색법	18
3.3 유전알고리즘(genetic algorithm)	21
3.3.1 유전알고리즘의 조작연산자	22
3.4 OptShip	25
3.4.1 구성	25
3.4.2 OptShip 절차	26
제 4장 최적설계 적용 예	29
4.1 축소 모델	29
4.1.1 대상모델	29
4.1.2 목적함수	31
4.1.3 설계변수	32
4.1.4 계산결과 및 고찰	35
4.2 전선 모델	40
4.2.1 대상모델	40
4.2.2 1차 최적화 실행	44

4.2.3 2차 최적화 실행.....	64
4.2.4 3차 최적화 실행	76
제 5장 결론.....	86
참고문헌.....	87
부 록.....	89
감사의 글.....	110

Vibration Optimum Design of Large Vessel Using Global Optimization and Nastran

Sang-Il Chae

*Department of Interdisciplinary Program of
Acoustics and Vibration, Graduate School
Pukyong National University*

ABSTRACT

Recently, the importance of ship vibration is emerging due to the large scaling, high speed and lightning of ship. For pleasantness in a cabin, shipbuilders ask for strict vibration criteria and the degree of vibration level at a deckhouse became an important condition for taking order from customers. This study conducted optimum design to attenuate vibration level of a deckhouse to solve above problems. New method was implemented, that is NASTRAN external call type independence optimization method. The merit of this method is global searching after setting various object functions and design variables. The global optimization algorithm used here are R-Tabu search method, which has fast converging time and searching various size domains and Genetic Algorithm which has searching the multi-point and a good search capability of the complex space. By adapting it to the full model, the validity of the suggested method was investigated.

1. 서 론

최근 선박의 대형화, 고속화에 따른 출력 증대 및 경량화로 인하여 여러 진동 문제가 대두되고 있으며, 특히, 선원의 근무 환경 고급화의 요구에 따른 선실의 쾌적성을 보장하기 위해 ISO 등의 국제규격에서 엄격한 진동허용치의 적용을 요구함에 따라, 거주구의 진동 문제가 선박 수주의 중요한 조건이 되고 있다.[12]

이에 따라 본 연구에서는 상기 문제 해결의 일환으로 선박 구조물의 진동을 저감하기 위한 최적설계(optimum design)를 수행할 수 있는 NASTRAN 기반 외부 호출형 독립최적화 기법을 제안하고, 이를 실제 선박에 적용하여 유용성을 확인한다.

최적화(optimization)는 설계 대상물에 유용성과 안전성을 확보하면서 최소의 재료를 사용하여 최대의 효과를 달성할 수 있도록 대상 구조물의 치수와 기하학적 형상 등의 제반 파라미터를 결정하는 것이다. 수학적 관점에서는 각각의 제약조건을 만족하는 설계변수 중에서 목적함수를 최소 또는 최대화 하는 설계변수 값을 찾는 것이다. 위의 개념을 근거로 최적설계를 위한 여러 가지 방법을 검토하였다.[13]

먼저, NASTRAN/Optimization 모듈에서 사용되는 최적화 기법은 감도해석을 기반으로 하는 최적화 기법으로서, 목적함수와 설계변수를 설정하는데 많은 제약조건이 있고, 국부 탐색(local search) 기법으로 전역적인 최적화를 수행하기 어려우며, 또한 복잡한 사용자 정의의 최적화 기법을 결합하여 사용할 수 없는 단점이 있다. 다음으로는 NASTRAN/DMAP을 이용한 최적화 기법이 있다. 이는 해석과정상의 유용한 정보를 추출할 수는 있으나, DMAP은 일반 사용자가 사용하기에는 상당한 전문 지식이 요구되고, NASTRAN 실행 시 외부

프로그램과 상호 정보교환을 반복 수행하는데 많은 어려움이 있다.[7]

따라서 본 연구에서는 일반 최적화 알고리즘의 국부 수렴을 방지하기 위하여, 전역 최적화 알고리즘을 사용할 수 있는 NASTRAN 외부 호출형 최적화 기법을 제안한다. 이 기법은 유전 알고리즘(GA), Simulated Annealing(SA), 인공 생명 알고리즘(ALA) 등과 같은 전역 최적화 기법을 적용할 수 있고, 기본적인 목적함수뿐만 아니라, 사용자가 정의하는 복잡한 형태의 목적함수도 설정할 수 있으며, 다양한 설계변수를 선택할 수 있는 장점이 있다. 다양한 최적화 알고리즘이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 Optimizer로서 Random tabu 탐색법과 Genetic Algorithm을 이용하였다. 그리고 제안된 기법의 유용성을 검토하기 위해, 실제 컨테이너 선박을 대상으로 축소 모델과 전선 모델을 이용하여 최적화를 수행하였고, 최적화 전후의 설계변수의 변화와 거주구의 진동응답을 NASTRAN/Optimization 모듈의 결과와 비교하여 제안된 방법의 유용성을 확인하였다.[14]

2. NASTRAN 최적화

MSC NASTRAN은 개발 초기부터 설계 민감도해석 및 설계 최적화 기능이 도입되어 현재까지 계속적으로 보강되어 왔으며, 근사모델(approximation model), 설계변수 연결(design variable linking), 제약조건의 적격심사(screening) 기능을 이용하고 있으므로, 많은 설계변수를 갖는 대형 모델에 대하여 효과적으로 최적화 과정을 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한, SOL 200의 단일 모듈(module) 내에서 정적 해석(static analysis), 정규모드 해석(normal mode analysis), 좌굴 해석(buckling analysis), 과도응답 해석(transient response analysis), 주파수응답 해석(frequency response analysis), 공력 해석(aeroelastic analysis), 플러터 해석(flutter analysis)을 동시에 고려하여 구조물의 최적화를 수행할 수 있고, NASTRAN V2001에서는 복소 고유치 감도(complex eigenvalue sensitivity), 이산변수 최적화(discrete variable optimization) 및 Fully Stressed Design이 가능하도록 그 영역이 확장 되었다. NASTRAN에서 사용하고 있는 최적화기법인 MMFD, SLP 및 SQP에 대해서 조사하고, NASTRAN 내부에서 수행되는 최적화 과정에 대해서 검토한다.[7]

2.1 NASTRAN의 최적화 기법

NASTRAN에서는 제약조건의 최소화 문제를 풀기 위해서, 3가지의 최적화 기법을 적용하고 있고, 그 내용은 다음과 같다. Modified Method of Feasible Directions (Default), Sequential Linear Programming 및 Sequential Quadratic Programming이 있다.

2.1.1 Modified Method of Feasible Directions (MMFD)

MMFD는 등가 제약조건을 같이 사용할 수 있는 기법으로 push-off 벡터를 '0'으로 하여 부 문제(sub-problem)에서 탐색 방향을 결정하게 된다. 이렇게 함으로써 제약조건에 대하여 접선 방향의 탐색 방향이 결정된다. 탐색 방향은 제약조건을 경계를 따라 탐색을 하게 되고 만약 이 탐색 방향이 목적함수를 현저하게 감소시켜 준다면 제약조건을 위반하는 것을 어느 정도 허용하게 된다. MMFD의 부 문제는 식 (2.1)~(2.3)과 같이 설정된다.

$$\text{Objective function : } \nabla F(X^{q-1})^T \cdot S^q \Rightarrow \text{minimize} \quad (2.1)$$

Constraints:

$$\text{Feasibility condition } \nabla g_j(X^{q-1})^T S^q \leq j \in J \quad (2.2)$$

$$\text{Bounds on } S \quad (S^q)^T S^q \leq 1 \quad (2.3)$$

활성화 되어있는 제약조건의 기울기 방향과 탐색 방향의 내적(inner product)을 통하여 탐색 방향이 현재의 활성화된 제약조건을 경계와 멀어지는 것을 알 수 있다. 만약 정하여진 범위를 벗어나게 되면 활성화된 제약조건에서 제외하여도 될 것이다. 또 다른 가능한 탐색 방향에 대한 해로서 S 가 0 벡터를 갖는다면 가령 모든 $|S_i| < 0.001$ ($i=1, m$) 이라면, 최적화는 Kurn-Tucker 조건을 만족하였다고 할 수 있으므로 종료한다. MMFD는 등가 제약조건에 대하여 완화 변수를 첨가하여 실제적인 설계변수를 늘릴 필요가 없고, 현재 활성화되어 있는 제약조건들에 대하여서만 계산을 수행하므로 계산량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2.1과 같이 목적함수를 최소화 하는 유용 탐색방향(usable direction)과 제약조건을 위배하지 않는 가능 탐색방향(feasible direction)을 모두 만족하는 유용 및 가능 탐색 방향(usable-feasible search direction) S 를 찾는 것이다.

$$\text{Usable direction: } \nabla F(X^0) \cdot S \leq 0 \quad (2.4)$$

$$\text{Feasible direction: } \nabla g_1(X^0) \cdot S \leq 0 \quad (2.5)$$

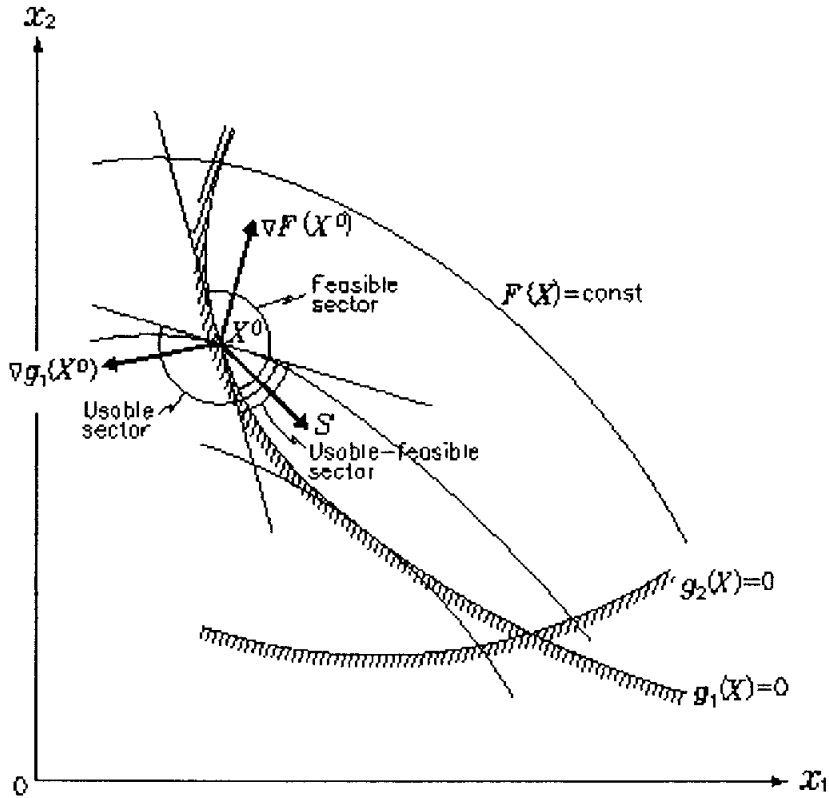


Fig. 2.1 Usable-feasible search directions (Vanderplaats, 1984)

2.1.2 Sequential Linear Programming (SLP)

SLP 기법은 비선형의 문제에 대해 선형 최적화 기법을 이용하여 최적해를 구할 수 있다. 이는 반복적인 단계에서 비선형의 문제를 선형화 하여 근사적으로 각 단계별 최적점을 찾고, 수렴성이 보이면 종료한다. 그러므로 비선형 문제를 선형화 하여 단순화하면서 최적화 수행속도를 향상시킬 수 있다. 비선형의 문제는 Taylor 급수를 이용하여 식 (2.6) ~ (2.10)과 같이 선형의 형태로 재

구성된다.

$$\text{Objective function: } F(X) \cong F(X^0) + \nabla F(X^0) \cdot \delta X \quad (2.6)$$

$$\text{Constraints: } g_j(X) \cong g_j(X^0) + g_j(X^0) \cdot \delta X \leq 0 \quad j=1, m \quad (2.7)$$

$$h_k(X) \cong h_k(X^0) + h_k(X^0) \cdot \delta X = 0 \quad k=1, m \quad (2.8)$$

$$X'_i \leq X_i + \delta X_i \leq X''_i \quad i=1, m \quad (2.9)$$

$$\delta X = X - X^0 \quad (2.10)$$

여기에서, 상첨자 0은 Tayer 급수 전개를 나타낸 것이다.

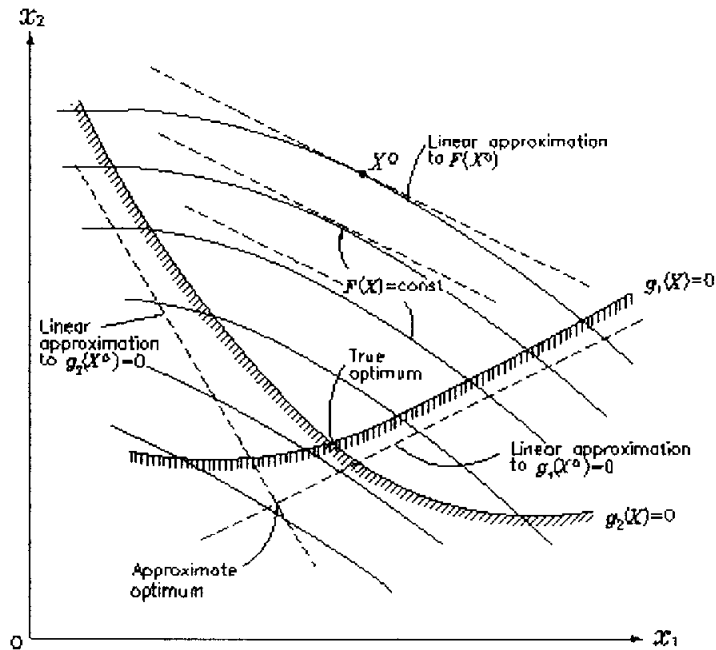


Fig 2.2 Linearization for the nonlinear problems (Vanderplaats, 1984)

SLP에 의한 X^0 의 최적점은 비 유용한 구간에서 발생되지만, 단계를 거치면서 유용한 구간으로 접근하게 된다. SLP 기법은 문제에 따라 효과적인 수행

을 하여 수렴속도가 빠르나 설계변수의 수보다 제약조건의 수가 작은 경우 불리한 경우가 발생한다. 이러한 문제는 각 단계에서 부등호 제약조건을 적용하여 극복될 수 있지만, 상대적으로 부등호 제약조건의 선택이 매우 중요하게 된다. Fig. 2.2는 선형화된 문제에 대하여 SLP 방법을 나타낸 것이다.

2.1.3 Sequential Quadratic Programming (SQP)

SQP는 SLP와 거의 같은 개념이며, SLP에서는 계산하는 점에서 목적함수와 제약조건을 1차식으로 단순화하였지만, SQP에서는 목적함수를 2차식으로 표현하고, 제약식은 SLP와 마찬가지로 1차식으로 나타낸다.

$$\text{Minimize: } Q(S) = F^0 + \nabla F^T S + \frac{1}{2} S^T B S \quad (2.11)$$

$$\text{subject to } (\nabla g_j)^T S + g_j^0 \leq 0 \quad j = 1, M \quad (2.12)$$

여기서 B 행렬은 매 일방향 탐색 후 BFGS식에 의하여 다음과 같이 수정된다

$$B^* = B - \frac{B p p^T B}{p^T B p} + \frac{n n^T}{p^T n} \quad (2.13)$$

SQP는 많은 연구자들에 의하여 매우 뛰어난 방법으로 알려져 있다(DOT, 1995).

2.2 Nastran 최적화

MSC.NASTRAN의 최적화 알고리즘은 Vanderplaats Research and Development사에서 제공하는 DOT 알고리즘을 사용하고 있다. NASTRAN이 수행하는 최적화 과정은 다음과 같다.

- 1) PATRAN과 같은 프로그램으로 최적화를 수행하는 데 필요한 초기모델 생성
- 2) 생성된 모델로 원하는 해석 case에 맞게 유한요소해석
- 3) 구조 해석, 민감도 해석 및 수치 최적화 과정을 반복적으로 수행해야 하는 속성 때문에 아주 많은 소요시간과 메모리가 필요하다, 이런 문제를 해결하기 위해 NASTRAN에서는 근사화 개념이 사용된다. 근사화 개념에는 Design Variable Linking, Constraints Screening, Formal approximation 등의 간단하면서도 효율적인 방법들이 있고, 이를 이용해서 근사모델을 생성한다.
- 4) 생성된 근사모델을 가지고 Optimizer가 최적화를 수행하게 된다. NASTRAN에서 사용하고 있는 최적화 기법은 MMFD, SLP 및 SQP이다. Method of Feasible Directions과 Generalized Reduced Gradient의 장점을 결합한 Modified Method of Feasible Directions이 Default 기법이고, 특징은 최적설계값을 빨리 얻을 수 있고, 부등과 등식 구속조건 둘 다 적용할 수 있으며, 최적값에서 높은 정밀도를 가진 구속조건을 만족한다는 것이다.
- 5) 수렴조건을 가지게 되는데, NASTRAN에서는 1차, 2차로 2번 수렴여부를 판정한다. 1차 수렴조건을 Soft Convergence라고 하고, 이전의 유한요소해석 값과 근사모델의 최적화의 결과와 비교한다. 목적함수의 상대적 또는 절대적 변화는 만족하는지, property변화와 설계변수의 변화 만족을 확인하고 구속조건이 만족하는가를 판정한다. 이 모두를 만족하면, 근사 모델의 최적화를 얻은 설계변수를 초기 모델에 적용하여 갱신하고 갱신된 모델을 다시 유한요소해석을 수행하여, 이전의 유한요소해석 결과와 비교하는 2차 수렴조건인 Hard Convergence를 하게 된다. 여기서도, 목적함수의 상대적 또는 절대적 변화를 판정하고, 그 다음 최대 구속값이 최대 허용치보다 낮은가를 판정해서 만족하면 수렴되었다고 판단한다. 그러나, property의 상대적인 변화와 설계변수의 상대적인 변화를 판정해서 유일한 설계 값인지, 아닌지를 확인한다.

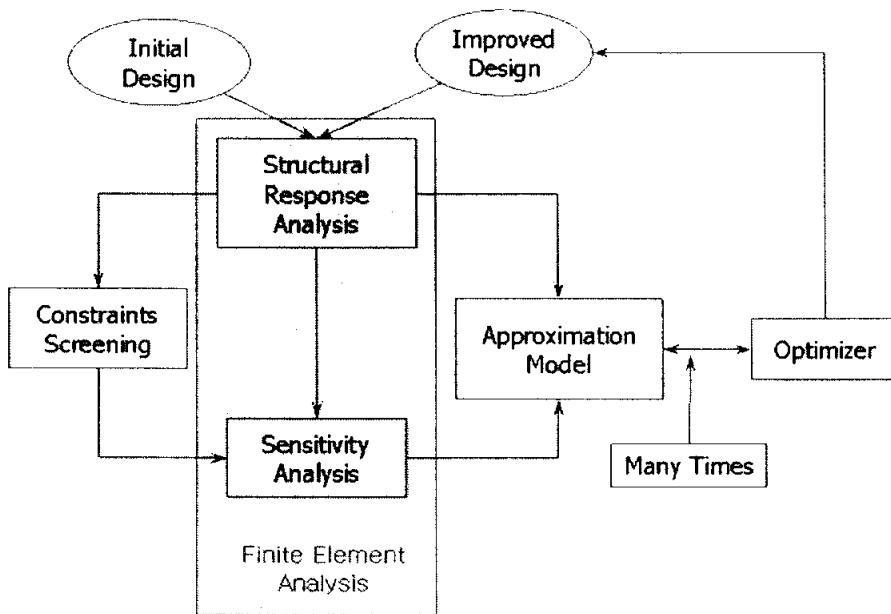


Fig. 2.3 Flowchart of NASTRAN optimization

Fig. 2.3은 유한요소해석, 근사모델, 최적화기법사이의 관계를 설명한다. 유한요소모델의 결과와 근사 개념을 이용하여 근사 모델을 생성시키고, 설계정보를 유한요소해석으로부터 직접 제공하는 것이 아니라, 생성된 근사 모델로부터 최적화 기법에 설계정보가 제공된다. Fig. 2.3에서 근사 모델은 줄어든 설계 변수/ 선별된 구속조건/ 근사화된 구조응답의 영향을 포함한다.

2.2.1 근사화 개념

구조 최적화를 하는데 다음과 같은 어려운 점이 있다.

- 1) 한번의 최적화를 하는데 허용되는 설계 변화를 묘사하는데 필요 이상의 설계변수가 선정되어 있다는 것과, 전형적인 구조 최적화문제는 수백 또는 수 천개의 구속조건을 가지는 데 이것의 대부분이 설계 변경에 있어서 너무 많거나 또는 관련이 적다는 점

2) 구조적인 응답은 설계변수의 함수인데, 작은 설계변화에 대해서 목적함수를 평가하기 위해서, 전체 모델에 대해 유한요소해석을 한다는 것은 많은 시간을 소요하게 되고 비효율적이라는 점.

따라서, 이런 문제를 해결하기 위해서 근사화 개념(approximation concepts)을 사용된다. 근사화 개념에는 사용되는 방법은 3가지가 있고, 다음과 같다.

1) Design Variable Linking

Design Variable Linking은 독립 설계변수의 수를 최소로 유지하고 효과적인 설계모델을 유도한다. 설계 모델링 과정의 한 부분이고, 3가지의 가능한 방법으로 조합된다. 즉, 해석모델의 Properties의 그룹화, DVPREL1과 DVPREL2의 효과적인 사용, 그리고 DLINK를 이용하여 설계변수를 연결하는 방법이 있다.

2) Constraint regionalization and deletion

이 과정은 일시적으로 설계 변경에 있어 불필요하거나 중요하지 않은 구속조건을 제거한다. 이 작업은 NASTRAN에서 자동적으로 수행하는데, 내부적으로 Deletion과 Regionalization 과정이 포함되어 있다. 단 한번의 최적화 과정이 지나면, 제거되었던 구속조건은 다시 고려된다.

3) Formal approximation

프로그램 내에서, 설계 변수들이 명시된 근사화식을 근거로 목적함수와 제거되지 않은 모든 구속조건을 계산한다. Optimizer가 함수를 평가할 때, 비효율적이고 시간 소요가 많은 전체 유한요소해석을 대신해서, 이런 근사화를 참고한다. 이 방법은 응답의 항목에 따라

- Direct Variable Approximation (Weight, Volume, Internal Force, Buckling Load Factor)

- Reciprocal Variable approximation (Displacement, Stress, Strain, Eigenvalue, Composite Failure Criteria)

으로 나누고, NASTRAN에서는 사용하고 있는 근사화 방법은 위의 2가지를 적절히 조합하여 사용하고 있다.

1) Direct approximation

구속조건뿐만 아니라, 목적함수에 대해 사용되고 유도되는 근사 최적화는 선형 근사 설계공간 내에서 수행된다. 설계변수에 대해 구조응답이 선형함수로 근사화가 잘 될 때 사용해야만 한다. 다시 말해서 근사화 하는 과정이 세심하지 못하다. 그래서, 최적화 과정에서 해에 수렴하기 위해서는 많은 수의 근사 최적화가 필요하다.

2) Mixed approximation

응답에 따라 근사화 식을 달리 사용하는 방법으로, Volume, Weight, Element Force와 Buckling Load Responses에 대해서는 Direct approximation을 사용하고 그 외의 응답들은 Reciprocal approximation을 사용한다. 이 방법의 장점은 여러 다양한 문제에 적용할 수 있다는 것이다. 이런 범용성 때문에 NASTRAN에서는 Default로 사용하고 있다.

3) Convex linearization

구속조건을 근사화 할 때, 더 크게 근사화 하는 것에 따라 Direct 또는 Reciprocal Constraint approximation이 선택한다. 다시 말해서, 2 가지 근사 방법이 더 근사적인 것을 채택한다.

2.2.2 수렴조건

NASTRAN에서는 특이하게 2가지의 수렴조건을 가진다. 앞에서 설명하였듯이, Soft Convergence와 Hard Convergence의 2가지 조건이다.

1) Soft Convergence

이전의 유한요소해석 값과 근사 모델의 최적화의 결과와 비교한다. 목적함수의 상대적 또는 절대적 변화는 만족하는지, property변화와 설계변수의 변화 만족을 확인하고 구속조건이 만족하는가를 판정한다.

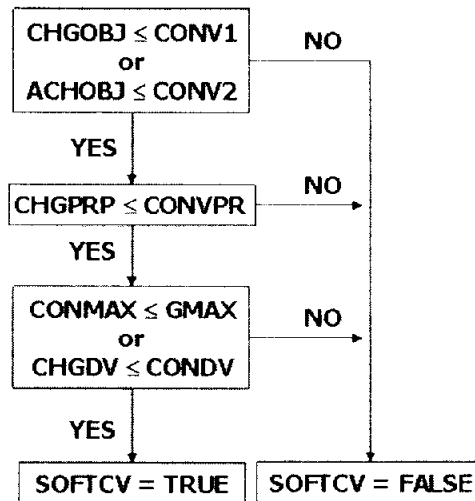


Fig. 2.4 Soft convergence decision logic

2) Hard Convergence

Soft Convergence를 만족하면, 근사모델 최적화에서 얻은 설계변수를 초기 모델에 적용하여 갱신하고 갱신된 모델로 다시 유한요소해석을 수행하여, 이전의 유한요소해석 결과값과 비교한다. Soft Convergence와 마찬가지로, 목적함수의 상대적 또는 절대적 변화를 판정하고, 그 다음 최대 구속값이 최대 허용치

보다 낮은가를 판정해서 만족하면 수렴했다고 한다. 그러나, property의 상대적인 변화와 설계변수의 상대적인 변화를 판정해서 유일한 설계값인지, 아닌지를 확인한다.

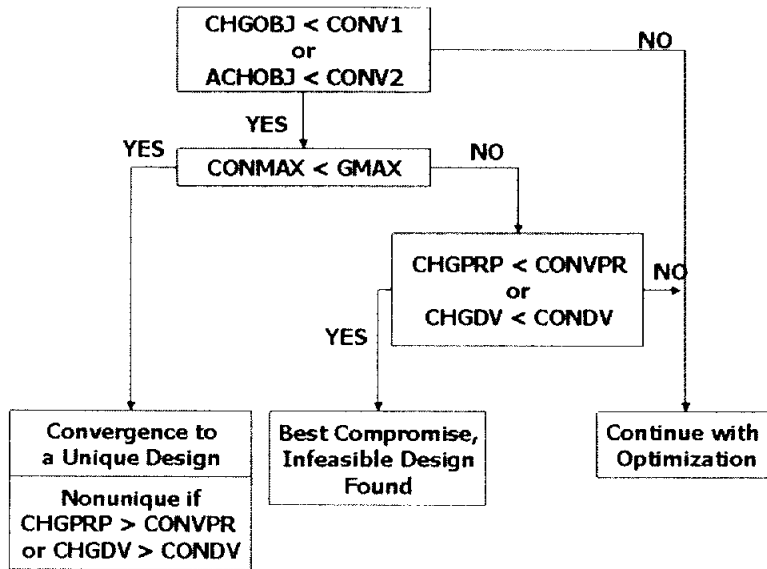


Fig. 2.5 Hard convergence decision logic

Table 2.1 Parameters for convergence criteria

Internal Variable	Definition	Parameters	Default
CHGOBJ	$\left \frac{OBJ(P) - OBJ(P-1)}{OBJ(P-1)} \right $	CONV1	0.001
ACHOBJ	$OBJ(P) - OBJ(P-1)$	CONV2	0.1
CHGPRP	$1 \leq i^{\max} \leq NPROP \left(\left \frac{P_i(P) - P_i(P-1)}{P_i^{(P-1)}} \right \right)$	CONVPR	0.001
CHGDV	$1 \leq i^{\max} \leq NDV \left(\left \frac{X_i(P) - X_i(P-1)}{X_i^{(P-1)}} \right \right)$	CONVDV	0.001
CONMAX	$\max \{g_k(\underline{x})\}$	GMAX	0.005

3. 전역 최적화 방법 제안

대부분의 최적화문제는 비선형 수리계획법을 기반으로 국부 최적해(local optimum)를 효율적으로 탐색하는 전략을 사용하는데, 이러한 방법은 전역 최적해(global optimum)를 보장하기 어렵다. 따라서 전역 최적해를 구하기 위한 방법이 필요하며, 다양한 설계 해의 효율적 탐색을 위해서는 확률적 탐색기법에 근거한 방법들이 효과적이다. 이들 중에 탐색 속도가 대단히 빠른 Random tabu (R-Tabu) 탐색법과 복잡한 해공간에서 탐색능력이 우수한 Genetic Algorithm을 본 연구에 적용하였다. R-Tabu 탐색법은 Glover에 의해 순회 Salesman 문제 등 조합 최적화 문제를 풀기 위해 개발된 방법으로서, 이 알고리즘은 탐색 속도가 대단히 빠른 장점이 있으나, 넓은 해 공간과 다변수 최적화문제에서 최적해 탐색능력이 낮은 단점이 있다. Genetic Algorithm은 생물의 진화의 원리와 유전학에 착상을 얻은 확률적 탐색법으로서 특히 방대한 해공간 속에서도 강인한 탐색능력을 가지고 있으며, 다양화 최적화문제에서 이 알고리즘의 유용성이 입증되고 있다.[13][14][15]

3.1 배경

NASTRAN 최적화는 감도해석을 기반으로 하는 최적화기법으로서, 목적함수와 설계변수를 설정하는데 많은 제약조건이 있고, 국부 탐색 기법으로 전역적인 최적화를 수행하기 어려우며, 또한 복잡한 사용자 정의의 최적화기법을 결합하여 사용할 수 없는 단점이 있다. 또, NASTRAN/DMAP을 이용한 최적화 기법은 해석과정상의 유용한 정보를 추출할 수는 있으나, DMAP은 일반 사용자가 사용하기에는 상당한 전문지식이 요구되고, NASTRAN 실행 시 외부 프로그램과 상호 정보교환을 반복적으로 수행하는데 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 일반 최적화 알고리즘의 국부 수렴을 방지하기 위하여, 전역 최적화 알고리즘을 사용할 수 있는 NASTRAN 외부 호출형 최적화기법을 제안한다. 이 기법은 유전 알고리즘(GA), Simulated Annealing(SA), 인공생명 알고리즘(ALA) 등과 같은 전역 최적화기법을 적용할 수 있고, 기본적인 목적함수뿐만 아니라, 사용자가 정의하는 복잡한 형태의 목적함수도 설정할 수 있으며, 다양한 설계변수를 선택할 수 있도록 하였다.

3.2. Random Tabu 탐색법

Hu는 Glover가 고안한 Tabu 탐색법을 개량한 R-Tabu 탐색법을 제안하고, 그 방법을 일반적인 구속조건이 있는 최적화문제에 적용했다. 어떤 목적함수 $f(\mathbf{x})$ 를 구속조건하에서 최소로 하는 문제를 고려한다. R-Tabu 탐색법에서는 새로운 step수, count수의 2개의 정수를 정의한다. Step수는 탐색을 하고자 하는 근방영역의 개수이고, count수는 하나의 근방영역을 탐색하는 회수의 상한치를 나타낸다. 제약조건을 만족하는 해의 제 1근사해(초기치)를 $\mathbf{x}_0$ 로 하고, $\mathbf{x}_0$ 주위에 근방영역 $N(\mathbf{x}_0, h_i)$ 을 Fig. 3.1과 같이 설정한다.

여기서 $h_i (i=1, \dots, r)$ 는 step폭, r 은 5g step수이다

R-Tabu 탐색법의 아이디어는 각각의 근방영역 중에서 탐색을 시작할 초기치 $\mathbf{x}$ 를 임의로 발생시키고, 그것에 의한 $f(\mathbf{x})$ 가 $f(\mathbf{x}_0)$ 보다 적으면, 그 점을 영역내의 최소점으로서 기억한다. 이 과정을 반복해서 전체 근방영역에서 선택된 최소점들 중에서 가장 작은 $\mathbf{x}$ 를 제 2차 근사해 $\mathbf{x}_1$ 으로 하고, 주위에 다시 근방영역을 설정하여 앞의 탐색과정을 다시 반복하는 것이다. 기본적인 개념은 Hooke-Jeeves이 제안한 직접 탐색법의 패턴 탐색법과 격자 탐색을 조합한 방법에 가깝지만, 개량 step폭 대신에 근방영역을 설정한 것과 그 크기가 다른 것을 복수 개 설정하는 점에서 다르다.

이 방법의 특징은 다음과 같다.

- 탐색영역을 크기가 다른 여러 영역으로 분할해서 탐색을 하기 때문에 맹목적인 탐색을 피할 수 있고 따라서 탐색에 필요한 횟수를 줄일 수 있다.
- Random 탐색을 하기 때문에 국소적 최적해에 빠지는 것을 막을 수 있고, 대국적 최적해를 구하는 것이 가능하다.
- 다른 최적화 방법과 조합하여 사용함으로써 정도가 보다 더 좋고, 최적해에 도달하는 수렴속도가 대단히 빠른 장점이 있다.

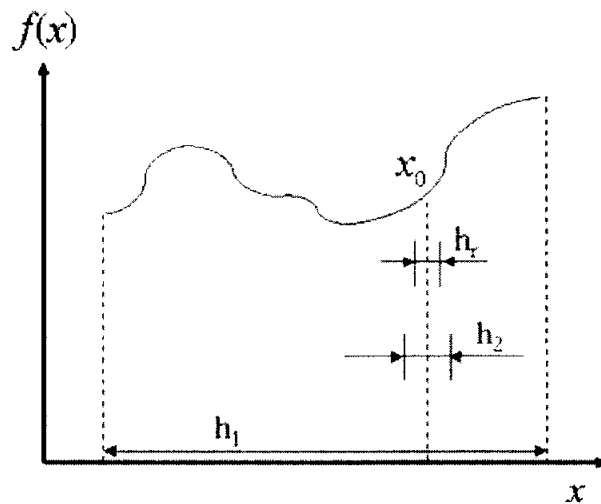
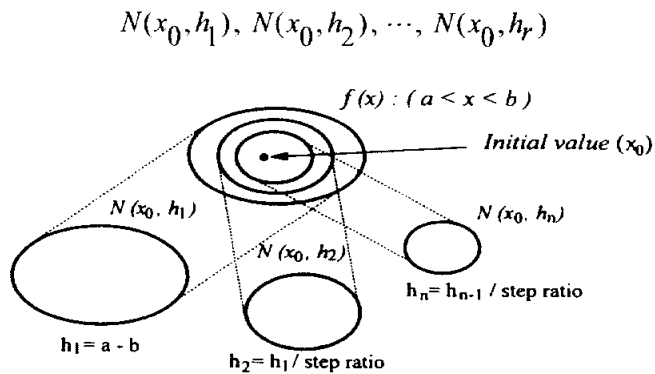
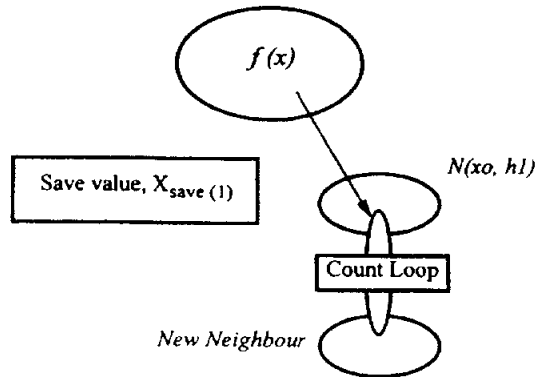


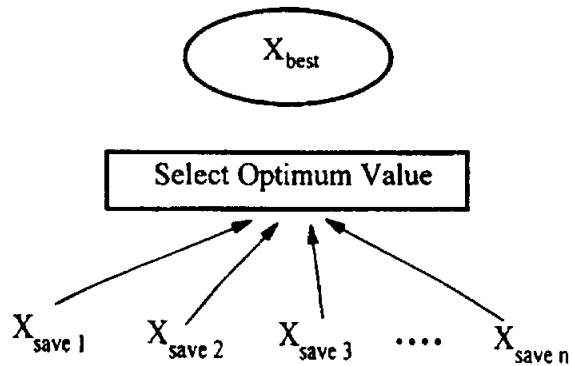
Fig. 3.1 Set of neighbors



(a) Initialize



(b) Compare



(c) Select and Set new value

Fig. 3.2 Flowchart of random tabu search method

3.3 유전알고리즘(genetic algorithm, GA)

유전알고리즘은 우수한 적응도(fitness)를 가진 개체가 주위환경, 즉 최적설계 문제에서 주어진 구속조건하에서 더 큰 생존확률을 가지고 더 많은 교차조작에 참가하여 다음 세대에 우수한 개체를 생성한다는 자연계의 법칙과 번식, 교차, 돌연변이의 과정을 수행하는 유전학에 착상을 얻은 최적화방법이다. 유전알고리즘의 기본적인 개념은 다음과 같다.

- 1) 유전알고리즘은 해를 표현하는 방법으로서 생물의 염색체의 개념을 사용한다. 염색체의 유전자로서 이진수(0 과 1)를 이용하고, 이를 이용하여 개체를 표현한다. 이진수를 이용해서 실수영역으로 사상시키는 것을 코딩(coding)이라고 하고 그 반대의 과정을 디코딩(decoding)이라고 한다.
- 2) 위와 같은 방법으로 초기에 지정된 개수만큼 임의로 개체를 만들어서 초기집단을 만들어 낸다. 그리고 초기집단의 각각의 개체에 대해서 목적함수를 이용하여 적응도를 계산한다. 적응도는 유전알고리즘에서 개체의 우수성을 평가하는 척도이며, 다음 세대에 자손을 남길 개체로 선택될 수 있는 기준이 된다.
- 3) 계산된 적응도에 따라서 적응도가 높은 개체 2 개가 선택되고, 이들을 교차확률에 따라서 일부분을 교차시킨다. 또한 돌연변이확률에 따라서 임의로 한 부분을 바꾸는 돌연변이조작을 수행한다.
- 4) 3)의 조작을 통해서 다시 지정된 개수만큼의 개체를 만들어 내고 다시 적응도를 계산하여 3)의 계산을 반복한다. 이 과정을 가장 우수한 최적해를 찾아낼 때까지 반복한다. 이 과정을 Fig. 3.3 에 나타내었다.

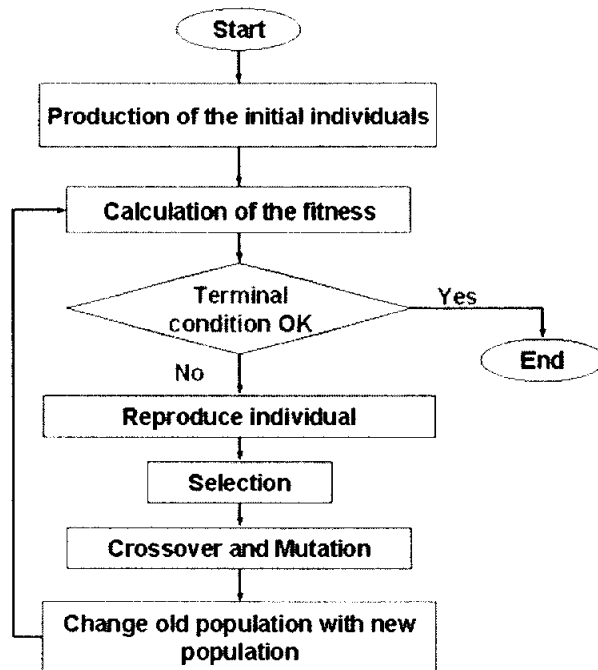


Fig. 3.3 Flowchart of genetic algorithm

3.3.1 유전알고리즘의 조작연산자

1) 선택교배전략(search strategy)

개체가 다음 세대에 자신의 유전자형을 남기는 과정이다. 개체에 선택.도태의 압력을 가할 때에 중요한 것은 어느 개체끼리 교배시키는 가이다. 먼저 개체의 초기집단을 생성하고 집단의 각 개체의 적응도를 목적함수를 이용하여 계산한다. 계산된 적응도에 따라서 다음 세대에 자손을 남길 개체를 선택하게 된다. 선택하는 방법으로는 적응도비례 전략, 엘리트보존전략, 순위전략, 토너먼트전략등이 있다. 본 논문에서는 유전알고리즘에서 널리 사용되는 적응도 비례전략과 엘리트보존 전략을 함께 사용하는 방법을 이용했다. 적응도비례전략이라는 것은 적응도가 우수한 개체일수록 다음 세대에 자손을 남길 확률이 높아지도

록 하는 것이다. 엘리트보존전략은 이전 세대의 엘리트, 즉 적응도가 가장 우수한 개체를 다음 세대에 그대로 보존시키는 것이다. 이 방법의 장점은 세대가 진행되면서 가장 우수한 엘리트의 적응도는 절대로 떨어지지 않는다는 것이다. 그러나 국소최적해에 조기수렴할 가능성이 있으므로 적응도비례전략과 돌연변이조작을 적절하게 사용했다. 본 논문에서는 엘리트보존전략을 약간 변형하여 이전 세대의 개체들과 새로 만들어진 세대의 개체들을 비교해서 현세대보다 더 우수한 개체가 이전세대에 있다면, 모든 우수한 개체들을 보존시키는 방법을 사용하였다.

2) 교차(crossover)

교차는 번식과정에서 선택된 개체들에 대해서 수행된다. 먼저 각 개체의 적응도에 따라서 2 개의 개체가 선택되고 지정된 교차확률에 따라서 개체의 스트링(string)의 일부분을 교환하여 새로운 2 개의 개체를 만들어 낸다. 교차방법으로서 많이 사용되는 것 중에는 1 점교차법(one-point crossover), 다점교차법(multi-point crossover), 일정교차법(uniform crossover)등이 있다. 개체는 교차과정을 통해서 유전적 다양성(genetic diversity)을 얻도록 하고, 해공간을 대역적으로 탐색하도록 하기 때문에 교차과정은 유전알고리즘에서 매우 중요한 역할을 한다.

3) 돌연변이(mutation)

교차의 과정을 거친 개체는 돌연변이확률에 따라서 임의로 변화된다. 유전 알고리즘에서 돌연변이는 교차과정과 함께 집단의 다양성을 높이기 위한 것이다. 하지만 교차과정과의 차이점은 해공간을 국소적으로 탐색하는 것이다. 또한 돌연변이확률이 높으면 대역적인 탐색 효과가 나타나며, 진화의 초기에 뛰어난 성능을 발휘하지만, 진화의 후반부에는 돌연변이확률이 높기 때문에 높은 적응도를 가진 개체를 바꿔버릴

수도 있다. 즉 탐색된 우수한 최적해가 사라질 수도 있다. 돌연변이가 발생하지 않는 경우에는 초기의 유전자조합 이외의 공간을 탐색할 수 없기 때문에 구할 수 있는 해에 한계가 발생하게 된다. 따라서 돌연변이 확률의 적절한 선택은 대단히 중요하다. 일반적으로 돌연변이는 고정된 확률로 유전자가 변화하도록 하는 방법을 사용하지만, 돌연변이 확률을 동적으로 변화시키는 방법도 있다. 교차와 돌연변이의 과정은 Fig.3.4 와 같다.

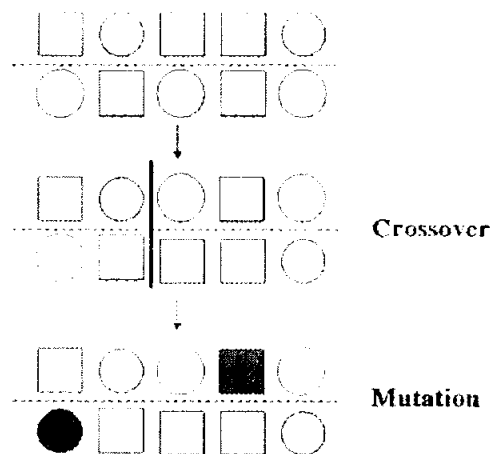


Fig. 3.4 Crossover and Mutation

4) 유전자 균일분포법(genetic uniform distribution method)

유전자 균일분포법은 랜덤초기화의 불균일성을 억제하여 전역탐색을 강화하기 위한 방법이다. 이 방법은 전체 집단개체의 반을 랜덤한 이진값으로 먼저 초기화한 후, 그 집단의 나머지 반을 앞의 이진값들의 보수(complement)로 초기화한다. 이 방법에 의해 집단 내의 각 개체들의 유전자와 0 과 1 의 집단 내 분포는 1:1 로 균일하게 된다. 따라서, 제한된 집단크기의 초기집단이 편향된 분포로 인한 국소최적화점으로 초기 수렴하는 것을 억제하는 효과를 기대할 수 있다.

3.4 OptShip

OptShip은 전역최적화 알고리즘과 NASTRAN의 해석 툴을 결합한 것으로, 사용자가 정의하는 최적화 과정에 그 목적함수의 평가를 위해 NASTRAN을 사용하는 것이다. 선박과 같은 대형구조물의 최적화 문제에 사용될 수 있고, 현재는 선박에만 적용 가능하다. 차후에 가능한 유한 요소들을 추가한다면 다른 대형 구조물의 최적설계를 수행하는데 용이하게 사용될 것이다. 특징은 최적화 기법과 결합이 용이하고, 따라서 전역 최적화 알고리즘과 결합하여 전역 최적설계를 할 수 있다. 그리고 NASTRAN에서 복잡한 사용자 정의의 목적함수와 설계변수 구현이 가능하다.

3.4.1 구성

1) 모델링

최적화를 수행하기 위해 사용자 정의의 설계변수 및 목적함수 정보가 필요하고, NASTRAN 실행을 위해 대상모델 파일이 요구된다.

먼저, 모델 파일은 CAD 프로그램을 이용하여 제작된 형상을 넘겨받는 방법과 유한요소 모델링 프로그램을 이용하여 모델링 하는 방법이 있다. 전자는 형상 제작까지는 쉽게 할 수 있으나, 요소 생성시 타 유한요소 프로그램을 사용해야 하는 단점이 있고, 후자는 형상 제작은 전자보다 어려우나, 요소 생성과 구속, 하중조건을 부과하는데 있어 용이한 장점이 있다. 설계자의 취향에 맞게 사용될 수 있는 부분이다.

2) 설계변수 선정

모델링 후에 설계자가 최적화 하고자 하는 설계변수를 선정한다. 설계변수는 모델의 요소 정보인 판 요소의 두께, 모 요소의 크기나 단면적 등과 같

은 모델에 직접적으로 입력되는 정보나 그러한 정보로 환원될 수 있는 임의의 대상 일 수 있다. 단, 설계변수의 선정과정에서 물리적인 고려와 현실적인 구현가능성 등의 문제는 고려되어야 할 것이다. 현재 OptShip에서 가능한 설계 변수로는 CELAS2의 스프링 강성계수와 감쇠계수, PROD의 면적, PSHELL과 PSHEAR의 두께가 가능하다.

3) 목적함수

대상물이 보다 나은 설계가 되도록 목적함수를 선정한다. 목적함수로는 해석 툴에서 제공하는 무게, 부피, 고유진동수, 소음레벨과 같은 간단한 것에서부터 해석 툴의 결과물(응답, 고유진동수 등)을 독립변수로 그들의 함수로 정의되는 임의의 목적함수까지 다양하게 선정할 수 있다. 일 예로, 강제응답의 최소화에 대한 2개의 형식이 있는데, 응답의 최대값을 낮추는 것을 peak value라 하고, 고려하는 응답 위치, 방향 및 주파수 중에 가장 큰 응답을 목적함수로 취하는 것이다. 또 다른 하나는 응답의 제곱 평균근을 고려하므로 average rms value이라 하고, 고려하는 응답의 위치와 방향에 대해 관심 주파수 범위 내의 응답의 제곱에 가중치를 곱한 값을 평균하고 제곱근을 구한 값들 중 가장 큰 값을 취하여 목적함수로 취한다.

그리고 대상 구조물의 구조적 안정성 등을 고려한 구속조건을 정의해서 비현실적인 설계가 되지 않도록 한다. 구속조건의 선정 역시 목적함수의 선정과 유사하게 다양한 가능성을 제공한다.

3.4.2 OptShip의 절차

PATRAN을 이용하여 최적화 수행에 필요한 설계변수, 목적함수, 구속조건 등 들을 구성하여 입력 파일을 만든다.
프로그램 내부로 들어가게 되면,

- a) Application module 내에 목적함수 및 구속조건 정의하여 초기화 시킨다.
 - b) 선택된 최적화 기법 호출하여 설계변수를 설정한다.
 - c) 선택된 최적화 기법은 목적함수를 평가하기 위해 새로 선정된 설계변수 $\mathbf{x}^*$ 를 제공하면서 Application module을 호출한다.
 - d) Application module은 새로운 설계변수 $\mathbf{x}^*$ 에 근거해서 모델을 갱신한다. 갱신된 모델에 대한 NASTRAN 해석 및 목적함수를 평가한다.
 - e) 선택된 최적화 기법은 Application module로부터 넘겨받은 목적함수에 근거하여 수렴조건을 판정한다.
 - f) 수렴조건을 만족하면 종료하고, 수렴조건을 만족하지 않을 때는 새로운 설계변수를 선정한 후 c) 과정으로 돌아가서 루틴을 반복한다.
- 위의 과정을 Fig3.4에 나타내었다.

1) 종료 조건

R-tabu 탐색법과 유전알고리즘에서 Optship의 종료 조건은 각각 다르게 설정되어 있다.

R-Tabu 탐색법은 3가지로 설정되어 있다.

첫째, 최적화를 수행하는 가운데, 수렴하는 경우이다. 정규화된 설계변수의 변화량이 사용자가 지정한 반복(iteration) 수 이내에, 정해놓은 양만큼 변하지 않을 때, 수렴했다고 판단하고 최적화 과정을 종료한다.

둘째, 반복 수가 최대가 되었을 때.

셋째, 최적화 과정에서의 목적함수의 호출 회수가 사용자가 지정한 회수에 도달했을 때

반면에, 유전알고리즘은 세대수가 완료되었을 때 종료한다.

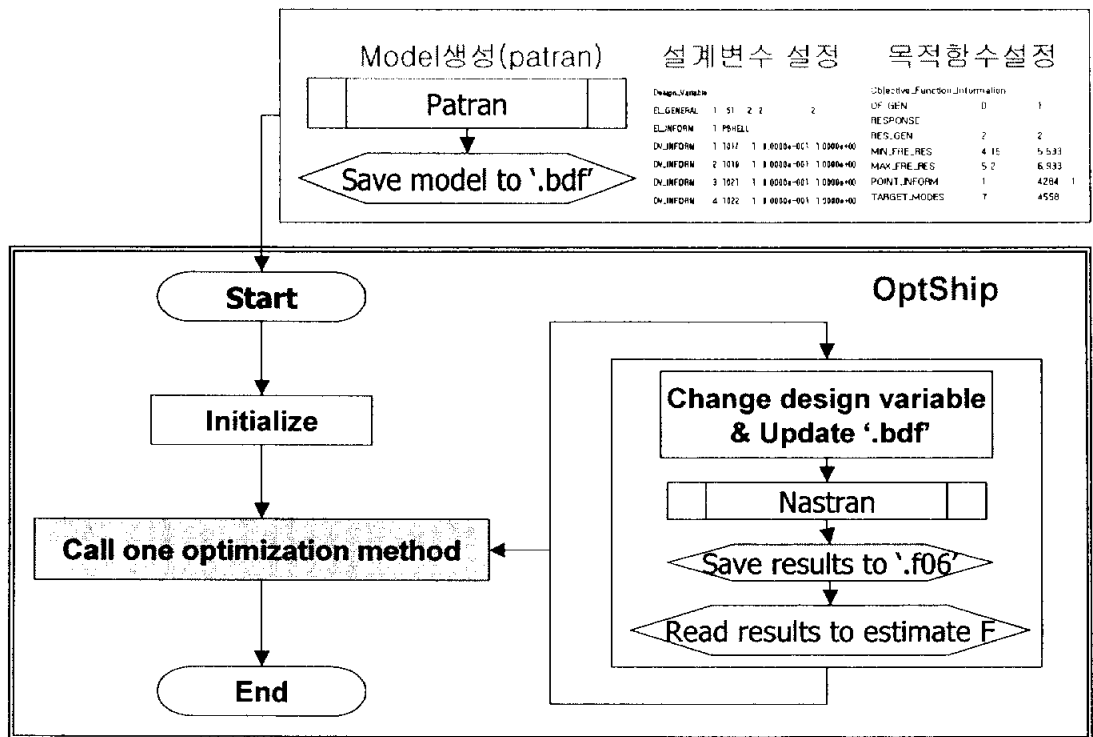


Fig. 3.5 Flowchart of the Optship

4. 최적설계의 적용 예

제안된 최적화 방법으로 선박의 축소 모델과 전체 모델(전선 모델)에 적용하여 최적설계를 수행하였다. 축소모델을 사용하여 프로그램을 검증하였고, 전선 모델의 1차 수행은 NASTRAN 최적화모듈과 OptShip으로 4개의 기진력에 대해 각각의 최적화된 값을 비교, 검토하였고, 2차 수행에서는 OptShip으로 선박에서 발생할 수 있는 4종류의 기진력을 모두 고려한 강제응답해석에 대해 최적화를 수행하였다. 3차 수행은 R-tabu 탐색법과 유전알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였다.

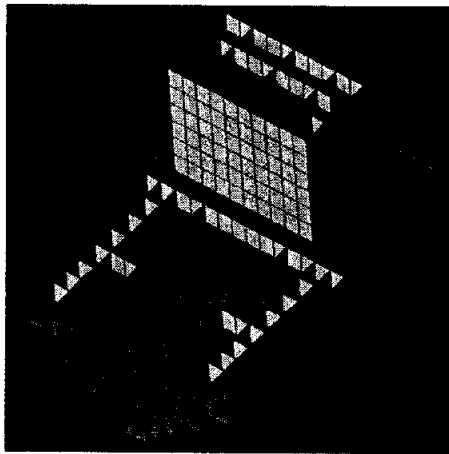
4.1 축소 선박모델

축소 모델은 OptShip 프로그램의 개발 초기단계에서 프로그램의 검증 및 전선 기반 모델의 전 단계로 설계변수 및 목적함수의 설정 등을 시험하기 위한 모델이다. 축소 모델을 대상으로 하여 주 기관(main engine)에서 발생하는 기진력을 부가하여 Deck House 상부 3개의 주요 노드에서의 변위응답을 취하고, 이들 실효치(rms: root mean square)의 최소화를 목적함수로 하였다. 설계변수는 Deck House 및 Main Engine Room 부근의 유한요소들의 두께로 하였으며, 총 38개의 설계변수가 선정되었다.

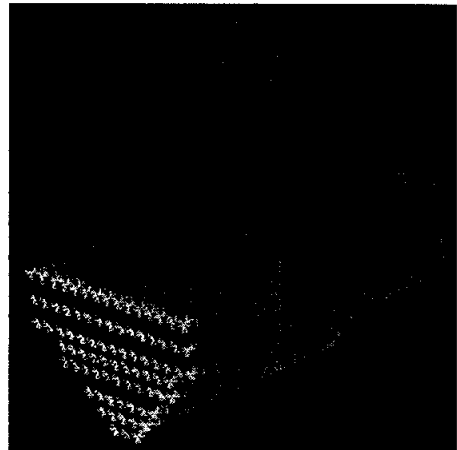
4.1.1 대상 모델

모델의 구성은 전선 모델과 가능한 유사한 구조를 가지도록 Deck House가 선미에 있는 구조로 하였다. 시험용 모델임을 감안하여 계산시간을 단축하기 위해 주요 관심 대상인 Deck House 및 선미부 그리고 Main Engine Room을 포함하고 선수부 및 Cargo Hold 부분을 제외하였다. Fig. 4.1에 대상 모델 및 모델

에 포함되지 않은 부분의 처리를 위하여 추가적인 경계조건을 보이고 있다. 추가적인 경계조건은 단순지지로 하여 고유진동수가 가능한 전선 모델과 유사하도록 하였다. 제작된 유한요소모델은 3,050개의 SHELL 요소로 구성되었다.

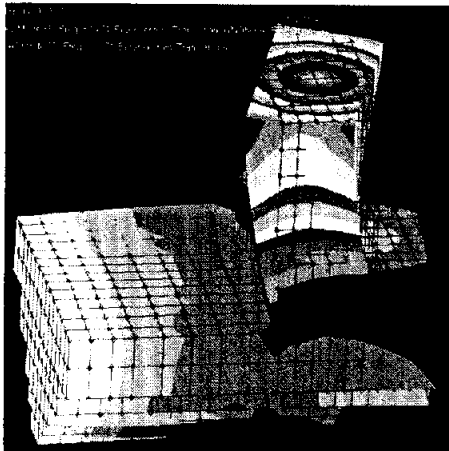


(a) Model

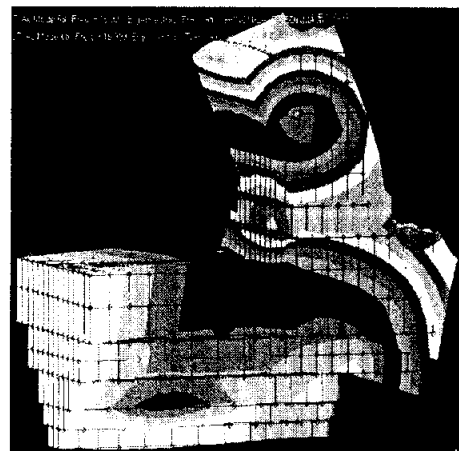


(b) Simple Support

Fig. 4.1 Model and boundary condition



(a) Torsional mode 13.7Hz



(b) Longitudinal bending mode 17Hz

Fig. 4.2 Primary vibration modes

축소 모델의 자유진동해석으로부터 Deck House 상부 진동에 많은 영향을 미칠 것으로 보이는 2개의 모드를 추출하였고, Fig. 4.2에 나타내었다. 전선 모델이 아니므로 Fig. 4.2에 보이는 모드들을 단순히 비틀림 모드(torsional mode, Fig. 4.2-a), 종방향 굽힘모드(longitudinal bending mode, Fig. 4.2-b)라 부르기로 한다. 각각의 주파수는 비틀림 모드가 13.7 Hz, 굽힘 모드가 17 Hz로 계산되었다. 이때, 본 축소 모델은 OptShip 프로그램의 적용 시험용이므로, 이러한 고유진동수가 실제 선박과 얼마나 가까운가는 문제로 할 필요는 없다.

4.1.2 목적함수

최적설계를 위해 채용된 목적함수 f 는 Fig. 4.3에 보이듯이 거주구 상부의 3개 포인트인 A, B 및 C점에서의 진동변위응답의 단순 합으로 식 (4.1)과 같이 정의하였다.

$$\min \left[f = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{q=1}^{N_q} |displacement_{q,d,p}| \right] \quad (4.1)$$

여기서 N_q 는 고려하는 주파수 응답의 수, N_d 는 고려하는 진동응답 방향(3 방향: Longitudinal, Transverse 및 Vertical 방향)의 수, N_p 는 고려하는 노드 수 (3개 노드: A, B 및 C) 그리고 $displacement$ 는 변위응답을 나타낸다.

기진력으로는 기진력의 주파수 범위 내에 주요 모드의 고유진동수가 있는 경우(Case 1)와 그렇지 않은 경우(Case 2)의 최적화 결과를 비교하기 위해 2가지 경우를 설정하였고, Table 4.1에 나타내었다. 표에서 M_0 는 단위 크기의 기진력을 부가하였다. 이는 진동 응답 및 기진력의 절대적인 크기 자체는 현재의 축소 모델에서 관심의 대상이 아니기 때문이다.

Table 4.1 Excitation force in a scale down model ($M_0 = 1$: unit magnitude)

Excitation	Case 1	Case 2
Magnitude	$F_1 = M_0 \sin(2\pi f_1 t)$	$F_2 = M_0 \sin(2\pi f_2 t)$
Frequency	$f_1 = 8.0 \sim 12.0$ Hz	$f_2 = 13.0 \sim 18.0$ Hz

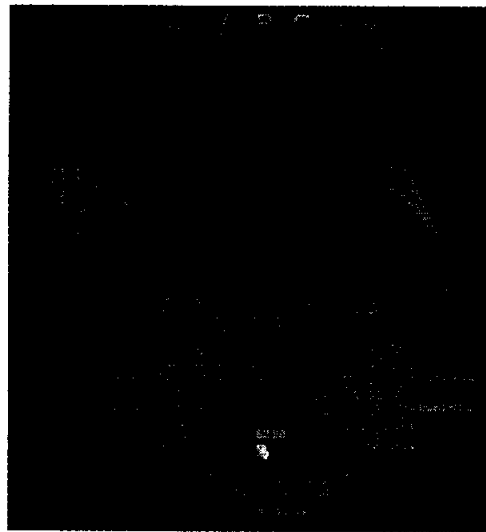


Fig. 4.3 Excitation and response points

4.1.3 설계변수

축소 모델의 설계변수는 모두 SHELL 요소의 두께로 하였으며, 총 38개의 설계변수를 사용하였다. 설계변수에 대한 구속조건(side constraints)으로 상한(upper bound)은 초기 모델의 2배, 하한(lower bound)은 0.01배로 하였다.

$$0.01 \times X_{original} \leq X \leq 2.0 \times X_{original} \quad (4.2)$$

고려하고 있는 설계변수의 범위는 현실적인 측면에서 상당히 큰 값으로, 특히 하한의 값이 실용적으로 의미가 있는가는 문제가 될 수도 있다. 그러나 총

분히 얇은 두께를 가지는 요소에 대해서 NASTRAN 해석결과가 FATAL ERROR를 발생하지 않고 의미 있는 해석 결과를 제공하는지를 확인하는 것은 중요한 문제이다.

OptShip의 목적함수 평가는 NASTRAN 해석 결과에 의존하므로, NASTRAN의 부적절한 해석 결과는 OptShip 최적화의 실패를 유발할 수 있다. 특히 최종적으로 적용할 대상인 2,400 TEU급의 컨테이너 선박(Container ship) 모델에 대해서도 동일한 유형의 설계변수(SHELL 두께)가 채택될 것이므로, 충분한 설계변수 범위에 대한 검토와 확인이 필요하다.

따라서 축소 모델에 대한 설계변수의 선정은 Deck House에서는 수직 격벽 모두를 설계변수로 잡았으며, 층별로 설계변수를 나누지는 않았지만, 각 격벽 사이는 서로 다른 설계변수로 선택하였다. 각 층을 구분하는 수평 부재에 대해서는 설계변수로 선정하지 않았다. Main Engine Room과 선미부는 중요한 Longitudinal BHD 및 Transverse BHD를 설계변수로 선정하였으며, Deck House와 유사하게 각 층별로 설계변수를 달리하지는 않았으나, Hull Girder에서 크게 단을 이루는 부분과 각 격벽 사이는 다른 설계변수로 선정하였다. 대칭성을 고려하여 대칭적 구조에 대해 동일한 설계변수로 취하지는 않았다.

축소 선박모델에 대해 선정된 설계변수를 Fig. 4.4 ~ 4.7에 나타내었다.

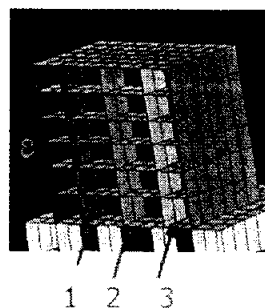


Fig. 4.4 Design variables (No. 1~3, No. 8~9)

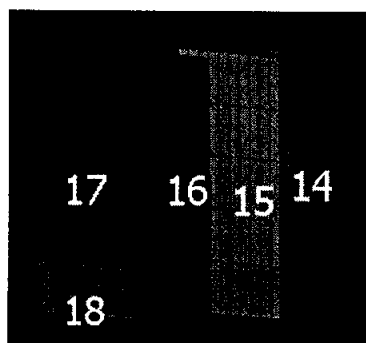
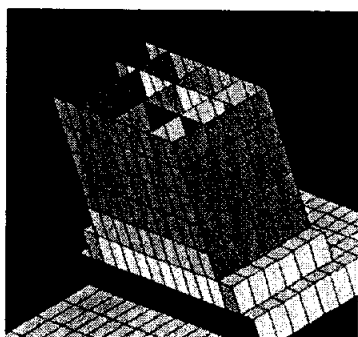


Fig. 4.5 Design variables (No. 14~18)

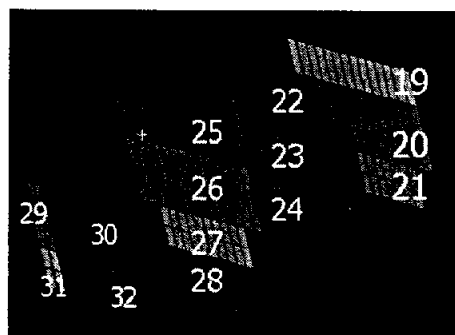
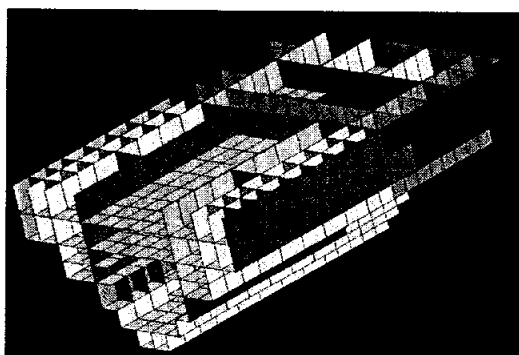


Fig. 4.6 Design variables (No. 4~7, No. 10~13, No. 33~38)

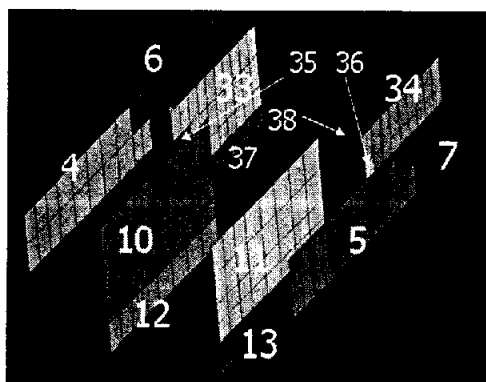
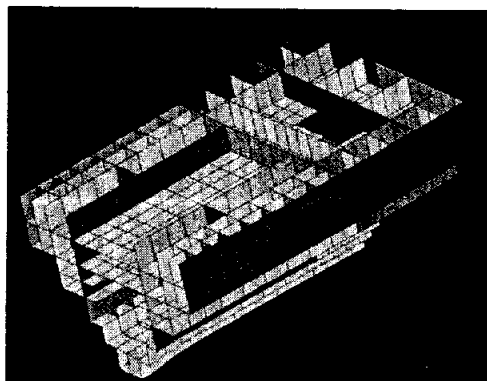


Fig. 4.7 Design variables (No. 19~32)

4.1.4 계산결과 및 고찰

1) 설계변수의 변화

각 설계변수의 초기 두께 및 기진력별로 최적화된 후의 두께와 설계변수의 변동율을 Table 4.2 ~ Table 4.5에 비교하여 나타내었다.

Table 4.2 Optimized results of design variables (No. 1~3, 8~9) (unit: mm)

Design variable No.	Original value	Optimized value			
		Case 1		Case 2	
		Value	Variation(%)	Value	Variation(%)
1	6.030	5.010	-16.9	6.070	0.7
2	6.030	11.750	94.9	1.735	-71.2
3	6.030	10.647	76.6	2.507	-58.4
8	9.849	1.046	-89.4	11.404	15.8
9	9.849	12.059	22.4	6.298	-36.1

Table 4.3 Optimized results of design variables (No. 4-7, 10-3, 33-38) (unit: mm)

Design variables No.	Original value	Optimized value			
		Case 1		Case 2	
		Value	Variation(%)	Value	Variation(%)
4	20.100	32.865	63.5	15.576	-22.5
5	20.100	32.126	-70.3	16.685	-1.1
6	10.955	3.252	59.8	10.836	-17.0
7	10.955	12.223	11.6	17.538	60.1
10	14.070	23.745	68.8	27.907	98.3
11	14.070	20.299	44.3	27.527	95.6
12	18.090	21.248	17.5	35.439	95.9
13	18.090	26.722	47.7	35.108	94.1
33	10.955	9.292	-15.2	18.615	69.9
34	10.955	15.849	44.7	1.156	-89.4
35	18.090	26.324	45.5	8.348	-53.9
36	18.090	9.121	-49.6	9.685	-46.5
37	10.854	6.504	-40.1	10.489	-3.4
38	10.854	13.219	21.8	13.626	25.5

Table 4.4 Optimized results of Design variable No. 14 ~ 18 (unit: mm)

Design variables No.	Original value	Optimized value			
		Case 1		Case 2	
		Value	Variation(%)	Value	Variation(%)
14	9.849	8.955	-9.1	3.276	-66.7
15	6.030	10.210	69.3	5.863	-2.8
16	6.030	11.846	96.5	5.900	-2.2
17	9.849	4.590	-53.4	12.115	23.0
18	9.849	19.048	93.4	17.007	72.7

Table 4.5 Optimized results of Design variable No. 19 ~ 32 (unit: mm)

Design variables No.	Original value	Optimized value			
		Case 1		Case 2	
		Value	Variation(%)	Value	Variation(%)
19	17.487	20.425	16.8	18.016	3.0
20	17.336	17.755	2.4	16.935	-2.3
21	35.175	28.486	-19.0	32.568	-7.4
22	14.321	16.424	14.7	22.350	56.1
23	10.955	5.581	-49.1	5.873	-46.4
24	10.854	20.609	89.9	0.891	-91.8
25	12.311	11.946	-3.0	5.686	-53.8
26	13.065	5.772	-55.8	15.644	19.7
27	14.070	15.454	9.8	15.123	7.5
28	40.200	21.734	-45.9	20.537	-48.9
29	12.060	7.953	-34.1	18.354	52.2
30	12.060	22.658	87.9	5.823	-51.7
31	14.070	11.761	-16.4	11.483	-18.4
32	12.060	4.229	-64.9	3.806	-68.4

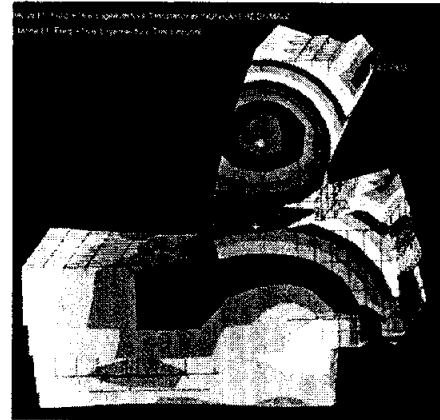
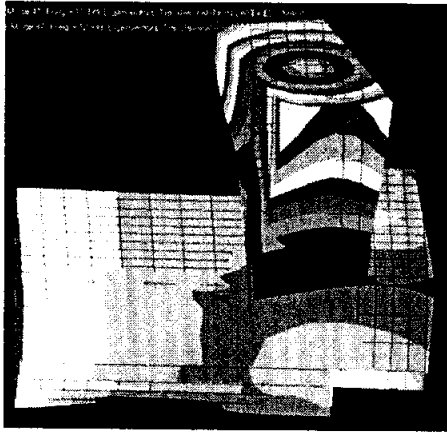
2) 진동 응답

최적화 수행 결과, 초기모델에 비해 목적함수의 값인 진동변위응답이 각각 Case 1은 11.6 %, Case 2는 17.8 %가 감소하는 양호한 결과를 얻었다.

두 종류의 기진력, 즉 기진력의 주파수 범위 내에 주요 모드의 고유진동수가 있는 경우(Case 1)와 그렇지 않은 경우(Case 2)에 대한 결과의 차이로부터, 기진력 주파수가 주요 모드의 고유진동수에 가까울 때가 최적화에 의한 진동 응답의 개선 효과가 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

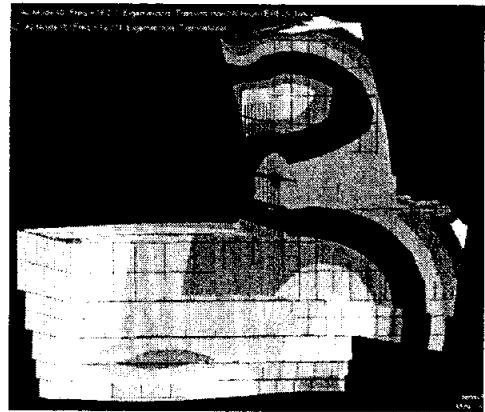
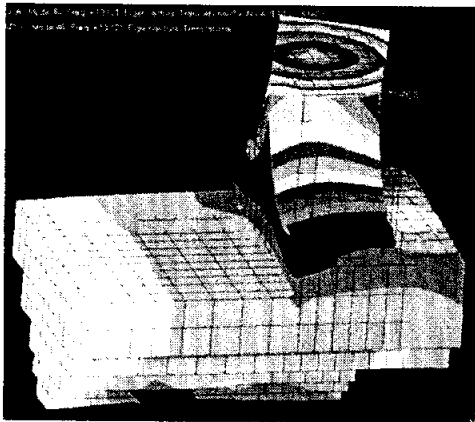
따라서 주요 모드에 대한 고유진동수의 이동에 따른 국부공진의 회피에 의한 응답저감 효과가 다른 모드의 고유진동수 이동에 비해 상대적으로 클 것이

기대된다. Fig. 4.8과 4.9는 두 종류의 기진력에 대한 주요 모드의 이동을 나타내었으며, 위의 추론이 타당함을 나타낸다.



(a) Torsional mode (13.7→12.9 Hz) (b) Longi. bending mode (17.0→16.6 Hz)

Fig. 4.8 Natural frequency shift for Case 1



(a) Torsional mode (13.7→13.1Hz) (b) Longi. bending mode (17.0→16.2Hz)

Fig. 4.9 Natural frequency shift for Case 2

3) 고찰

본 연구에서 개발된 최적화 프로그램인 OptShip의 유용성을 확인하기 위해 1차적으로 축소 선박모델에 적용하여 진동응답의 저감 효과를 얻을 수 있었고, 이에 수반하여 주요 모드에 대한 고유진동수의 이동을 통한 국부공진 회피를 확인할 수 있었다.

구조적인 대칭성이나 구조적 특성 등을 감안한 일반적이고 효율적인 설계변수의 선정방법이 좀더 구체적으로 검토되어야 할 필요가 있다. 또한 목적함수의 평가를 위한 전선기반 해석이 수행될 때, 계산시간의 문제를 고려하는 것이 필요하다. 그리고 기진력의 크기나 관심 주파수 등이 정확하게 고려되고 적용되어야 할 것이며, 대상 모델을 실제와 유사하게 구성하도록 하기 위해서는 감쇠나 부가수 질량 등을 고려하여 모델을 생성하여야 할 것이다.

4.2 전선 모델

대상 모델에 대한 최적화 수행은 모두 3차례 시행되었다. 그 각각을 1차 및 2차 최적화로 구분한다. 1차 최적화의 목적은 대상모델에 대한 최적화 적용성 및 OptShip의 성능 확인을 위한 과정이며, 2차 최적화는 대상 모델에 대한 최종적인 최적설계안의 도출을 위한 것이다. 3차 최적화는 R-tabu 탐색법과 유전 알고리즘을 OptShip의 전역 최적화알고리즘으로 적용하여 수행하였다.

4.2.1 대상 모델

고려하는 대상 모델은 2,400 TEU급 컨테이너 선박으로 거주구가 선미에 위치하여 적재 능력이나 운항 여건은 기존의 컨테이너 선박에 비해 우수하지만, 진동 관점에서 매우 불리한 구조를 가지고 있다.

1) 대상 모델의 주요 제원

대상 모델의 전체 형상을 Fig. 4.10에 나타내었다. Loading case는 Ballast 상태에서 19478 ton이며, Main Engine은 6RTA72U Engine (MCR 97 rpm, 17940 kW)을 채택하고 있고, 프로펠러의 날개(blade) 수는 5개, 주요 기진력으로는 H-moment (6th), X-moment(3rd 및4th), Propeller(1st) 등이다.

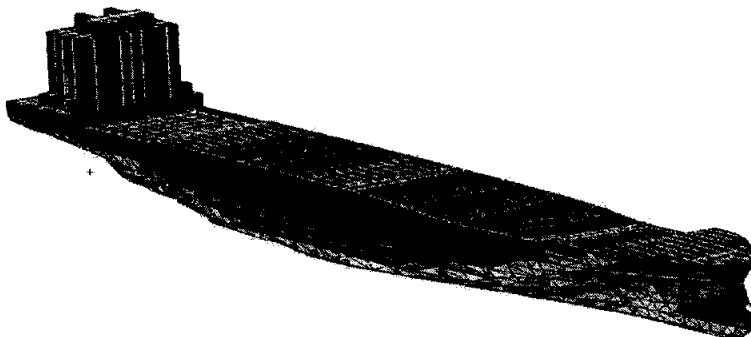


Fig. 4.10 Full model of container ship

2) 기진력

대상 모델의 주요 기진원은 주 기관에서 발생하는 H-moment 6차와 X-moment의 3차 및 4차 그리고 프로펠러에서 발생하는 유체력의 1차로 알려져 있다. 프로펠러 1차의 기진력은 대우조선해양(주) 연구소측에서 제공한 데이터를 사용하였다. 주 기관에서 발생하는 기진력의 크기는 Fig. 4.12로부터

H-moment 6th: $M_{H-moment} = 1193 \text{ kN}\cdot\text{m}$

X-moment 3rd: $M_{X-moment} = 513 \text{ kN}\cdot\text{m}$

X-moment 4th: $M_{X-moment} = 550 \text{ kN}\cdot\text{m}$

로 결정된다.

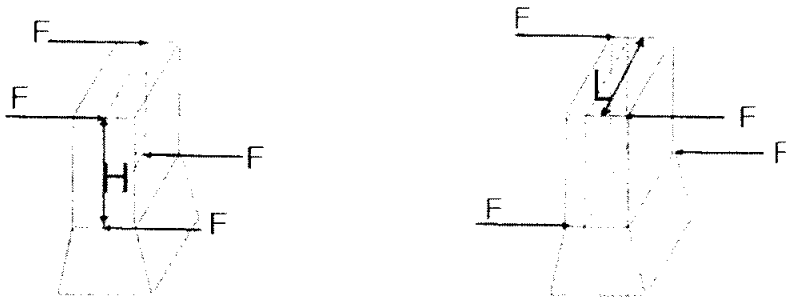


Fig. 4.11 Excitation force of Main Engine

모델에 기진력을 적용하기 위해서는 모멘트로 주어진 값을 힘(force)으로 변환하여야 한다. 주 기관의 H-moment 및 Main Engine X-moment는 각각 식 (4.3), (4.4)에 의해 힘 $F_{H-moment}$ 와 $F_{X-moment}$ 으로 변환되어 모델에 적용된다.

$$F_{H-moment} = \frac{M_{H-moment}}{2H} \quad (4.3)$$

$$F_{X-moment} = \frac{M_{X-moment}}{L} \quad (4.4)$$

참고로, 감쇠는 DnV 에서 사용하고 있는 비례감쇠를 적용한다. (DnV: 노르웨이 인증원)

Wärtsilä NSD Switzerland Ltd.

RTA72U

External forces and moments

Crankshaft type: Forged

Rating R1 : 2990 kW/Cyl./97 rpm

Engine Type		4RTA72U	5RTA72U	6RTA72U	7RTA72U	8RTA72U
Speed		97 rpm	97 rpm	97 rpm	97 rpm	97 rpm
Power		1156 kW	1490 kW	1740 kW	2030 kW	2320 kW
Mass moments / Forces						
Free Forces						
F1v	[+kN]	0	0	0	0	0
F1h	[+kN]	0	0	0	0	0
F2v	[+kN]	0	0	0	0	0
F4v	[+kN]	111	0	0	0	0
External Moments						
M1v	[+xNm]	847.1	274	0	166	562
M1h	[+xNm]	1711.1	316	0	150	617
M2v with balancer	[+xNm]	2527	3146	2190	565	0
M2v with balancer	[+xNm]	620	1158	451		
M4v	[+xNm]	0	16	124	252	143
Lateral H-Moments M_{LH}						
Ord. 1	[+xNm]	0	0	0	0	0
Ord. 2	[+xNm]	0	0	0	0	0
Ord. 3	[+xNm]	0	0	0	0	0
Ord. 4	[+xNm]	1619	0	0	0	0
Ord. 5	[+xNm]	0	1674	0	0	0
Ord. 6	[+xNm]	0	0	1153	0	0
Ord. 7	[+xNm]	0	0	0	398	0
Ord. 8	[+xNm]	269	0	0	0	177
Ord. 9	[+xNm]	0	0	0	0	0
Ord. 10	[+xNm]	0	78	0	0	0
Ord. 11	[+xNm]	0	0	0	0	0
Ord. 12	[+xNm]	44	0	66	0	0
Lateral X-Moments M_{LX}						
Ord. 1	[+xNm]	672	215	0	127	426
Ord. 2	[+xNm]	149	186	126	37	0
Ord. 3	[+xNm]	81	284	513	561	719
Ord. 4	[+xNm]	0	21	656	1673	635
Ord. 5	[+xNm]	161	0	0	115	1437
Ord. 6	[+xNm]	239	27	0	16	0
Ord. 7	[+xNm]	58	205	0	0	17
Ord. 8	[+xNm]	0	112	78	6	0
Ord. 9	[+xNm]	13	4	33	0	3
Ord. 10	[+xNm]	20	0	19	50	0
Ord. 11	[+xNm]	5	2	0	76	47
Ord. 12	[+xNm]	0	19	0	4	13
Torque variation						
	[+xNm]	1742	1948	1240	940	611

* with special counterweights M1v150 / M1h2010 kNm
The values for other engine ratings are available on request
The resulting lateral guide force can be calculated as follows: $F_L = M_{LH} \cdot r = 249$ [kN]

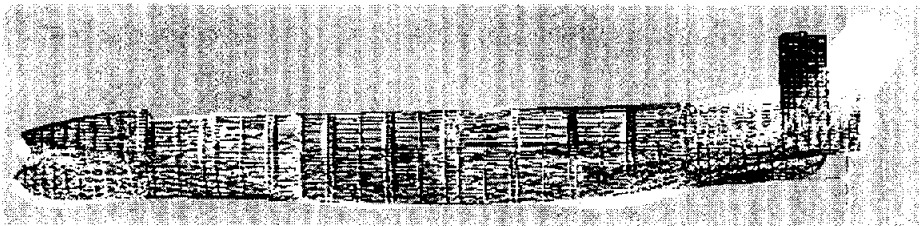
Wärtsilä Power Systems Ltd. 00101 SP

00101 SP 00101 SP

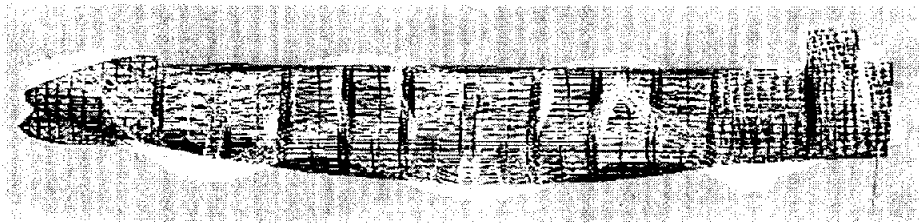
Fig. 4.12 Main Engine Forces and Moments (Wärtsilä NSD Switzerland Ltd.)

3) 대상 모델의 Deck House 및 선미부 주요 연성 모드

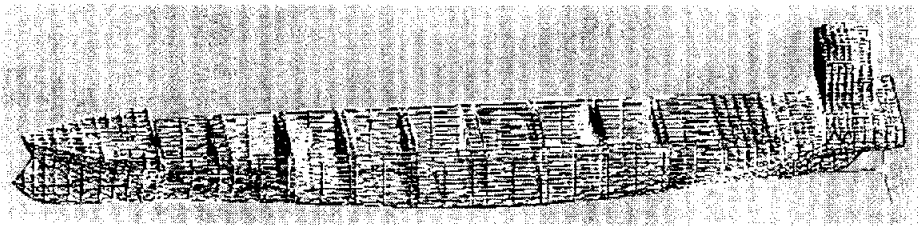
대상 모델의 Deck House 및 선미부 주요 연성모드를 추출하였다. NASTRAN을 이용한 자유진동 해석결과, 다음의 7개 모드가 주요 관심 모드인 것으로 추정된다.



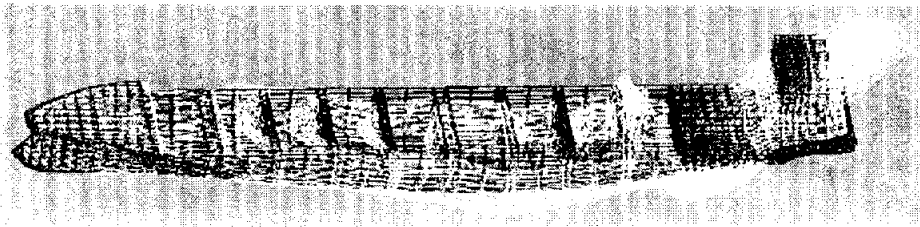
(a) D/H longitudinal mode coupled with H/G mode and double bottom, 4.59Hz



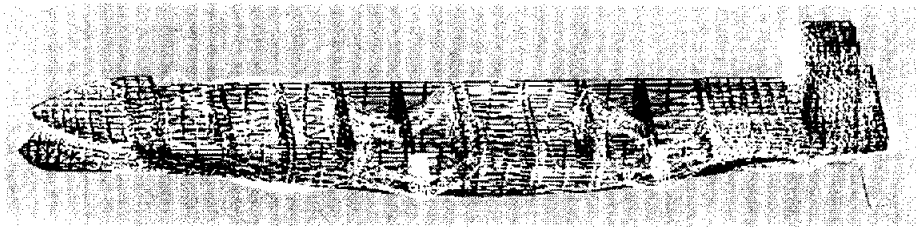
(b) D/H torsional mode coupled with H/G, 6.44 Hz



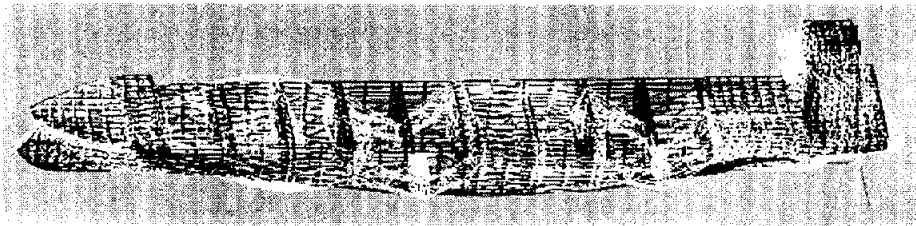
(c) D/H torsional mode coupled with H/G, 7.00 Hz



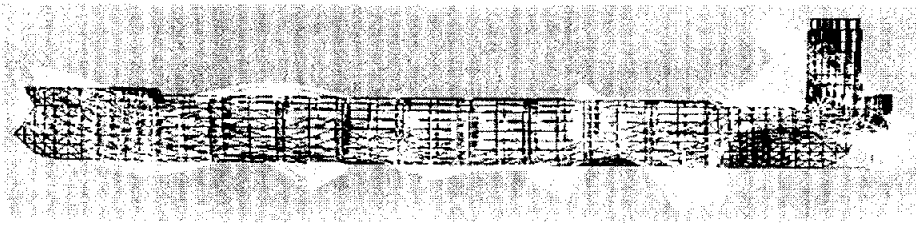
(d) D/H longitudinal mode coupled with after body and double bottom, 8.36 Hz



(e) D/H torsional mode coupled with after body, 8.41 Hz



(f) D/H torsional mode coupled with H/G, 9.24 Hz



(g) D/H longitudinal mode coupled with after body and double bottom, 10.62 Hz

Fig. 4.13 Deckhouse primary modes coupled with after body and hull girder
(D/H: Deckhouse, H/G: Hull Girder)

4.2.2 1차 최적화실행

1차 최적화 수행의 목적은 전선 모델에 대한 OptShip의 적용 가능성과 NASTRAN에서 제공하는 최적화 모듈과의 비교를 통해 OptShip의 성능 확인을 위한 최적화 수행이다. 대상 모델에 대한 1차 최적화 수행은 8가지 Case에 대해 모두 수행되었으며, 전선 모델 대상의 첫 번째 최적화 수행이다.

1) 설계변수

최적화에 사용될 최종적인 설계변수는 2 단계를 거쳐 선정된다. 용어에 대

한 혼란을 제거하기 위해, “단계 1” 과정을 거쳐 얻어진 설계변수를 “후보설계변수”라 하고, “단계 2”과정을 끝낸 설계변수를 “최종설계변수”라 명한다. 최적화에는 “최종설계변수”가 사용된다.

단계 1: 최초 “후보설계변수”의 선정

- 대상 : SHELL 요소 두께
- 범위 : Aft. Body ~ Half of No. 5 Cargo Hold
(거주구 진동에 직접적인 영향을 미치는 범위)
- 기준 : 구조적인 치수가 상이한 부분은 다른 설계변수
 총별로 다른 설계변수
 대칭성을 가지는 구조는 동일한 설계변수

위의 대상, 범위 및 기준으로 최초 후보설계변수를 선정하였고, 모두 319개의 설계변수가 후보설계변수로 선정되었다. 이러한 선정과정은 선박 일반 및 대상 모델에 대한 깊이 있는 이해보다는 상식적으로 취할 수 있는 기준들이며, 설계변수의 선정에 고도의 전문성을 배제하기 위한 것이다. 최적화에 채택될 최종설계변수의 결정을 위해 2차 작업이 이루어진다.

단계 2: “최종설계변수”의 선정

- 목적함수에 대한 후보설계변수의 감도해석 수행 (NASTRAN 이용)
- 감도 값이 높은 변수를 최종 설계변수로 선정 (평균 감도의 1.5배 이상)

2 단계의 작업과정을 통해 얻어진 설계변수를 사용함으로써, 선박 및 대상 모델에 대한 최적화 경험이 없이도 합리적인 설계변수의 선정 작업이 이루어지도록 하였다.

2) 목적함수

대상 모델에 대해 수행한 최적설계 내용을 기진력 및 목적함수 등으로 분류해 보면 Table 4.6과 같이 분류되며, 모두 8 가지 경우에 대해서 고려할 수 있다.

Table 4.6 Definition for first optimization

Objective function	Minimization of forced response			
	Excitation force			
	H-moment 6th	Propeller 1st	X-moment 4th	X-moment 3rd
peak value	Case 1	Case 3	Case 5	Case 7
rms value	Case 2	Case 4	Case 6	Case 8

강제진동응답의 최소화는 두 종류의 목적함수 형태를 고려하고 있다. 첫 번째 목적함수는 식 (4.5)로 주어지며 편의상 peak value라 한다. 두 번째 형태는 식 (4.6)으로 결정되고, 이는 average rms value 혹은 rms value라 부른다.

목적함수 1 (peak value):

$$f = \max[Velocity(frequency, direction)] \quad (4.5)$$

목적함수 2 (average rms value):

$$f = \max \left[\sqrt{\frac{1}{N_Q} \sum_q^{N_Q} w_q \cdot Velocity_{q,Longi}^2}, \sqrt{\frac{1}{N_Q} \sum_q^{N_Q} w_q \cdot Velocity_{q,Trans}^2}, \sqrt{\frac{1}{N_Q} \sum_q^{N_Q} w_q \cdot Velocity_{q,Yerni}^2} \right]$$

w : weighting factor (ISO 6954: 2000 edition) (4.6)

peak value는 고려하는 응답 위치에서 고려하는 방향과 주파수 중에서 가장

큰 응답을 목적함수 값으로 취한다. rms value는 고려하는 응답 위치에서 고려하는 각 방향에 대해 관심 주파수 범위내의 속도응답의 제곱에 가중치(ISO 6954: 2000 edition)를 곱한 값을 평균하고 제곱근을 구한 값들 중 가장 큰 값을 가지는 방향의 값을 목적함수로 취한다.

강제응답의 관심주파수는 주 기관의 R 차 주파수 성분의 기진력에 대하여 식 (4.7)와 같이 상한 및 하한 주파수가 결정된다.

$$\begin{aligned} \text{상한: } \omega_{\max} &= R \times [\text{MCR} \times 1.07] \\ \text{하한: } \omega_{\max} &= R \times \left[\frac{\text{MCR} \times 1.07}{2} \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

따라서 고려하는 4 종류의 기진력 성분에 대한 관심주파수는 각각 다음과 같이 결정된다.

- H-moment 6th: 5.19 ~ 10.38 Hz
- Propeller 1st: 4.32 ~ 8.65 Hz
- X-moment 4th: 3.46 ~ 6.92 Hz
- X-moment 3rd: 2.60 ~ 5.19 Hz

NASTRAN의 최적화 모듈에 의한 최적화 과정에서 목적함수로 rms value 는 식 (4.6)을 적용하였으나, peak value는 식 (4.5)를 적용할 수 없다. 이는 식 (4.5)를 적용하기 위해서는 강제진동해석의 결과로부터 응답의 최고 peak를 찾고, 그에 대응하는 주파수를 파악하는 알고리즘을 구현해야 하기 때문이다.

OptShip은 이러한 알고리즘을 구현할 수 있지만, NASTRAN의 최적화 모듈은 이를 구현하기에는 한계가 있었다. 따라서 미리 설정해둔 주파수에서의 응답만을 최소화 하였다.

NASTRAN의 최적화 모듈에 의한 peak value에 적용된 목적함수의 구성과정을 단계별로 설명하면, 다음과 같다.

- ① 초기 모델의 강제응답해석을 수행한다.
- ② 강제응답(진동속도)에 나타나는 주요 peak들을 선정한다.
- ③ 선정된 peak들의 주파수를 구한다.
- ④ 3방향 (Longitudinal, Transverse 및 Vertical)에 대해 ②, ③과정을 수행한다.
- ⑤ 선정된 주파수에서의 응답의 평균을 구하고, 3방향 중 그 평균이 가장 큰 값을 목적함수 값으로 한다.

이를 식으로 표현하면,

$$f = \max \left[\frac{\sum_{q=1}^{NL_Q} Velocity_{q, Longi.}}{NL_Q}, \frac{\sum_{q=1}^{NT_Q} Velocity_{q, Trans.}}{NT_Q}, \frac{\sum_{q=1}^{NV_Q} Velocity_{q, Verti.}}{NV_Q} \right] \quad (4.8)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 NL_Q , NT_Q , NV_Q 는 각각 Longitudinal, Transverse 및 Vertical 방향에 대해 각각 선정된 peak의 수가 된다. 예를 들어 $Velocity_{q, Verti.}$ 는 Vertical 방향에서 q 번째 주파수의 진동속도응답을 나타낸다. 또한 강제응답은 기진력에 의존하기 때문에 기진력에 따라 다른 주파수가 선정된다. 각 방향에 대해 선정된 주파수는 Table 4.7에 NL_Q , NT_Q 및 NV_Q 과 함께 나타내었다.

Table 4.7 Evaluated frequency in NASTRAN/Optimization module (peak value)

		Longitudinal	Transverse	Vertical
H-m 6th	Frequency [Hz]	5.0, 6.5, 7.5, 8.1, 9.4, 10.6	5.4, 6.5, 7.6, 8.2, 9.3, 10.5	5.0, 5.5, 6.4, 7.7, 8.2, 9.1, 10.0
	NL_Q, NT_Q, NV_Q	6	6	7
Prop. 1st	Frequency [Hz]	4.6, 6.9, 8.5, 8.6	4.2, 4.6, 5.0, 5.5, 6.5, 6.9, 7.6, 8.2	4.6, 5.0, 5.7, 6.4, 6.9, 7.6
	NL_Q, NT_Q, NV_Q	4	8	6
X-m 4th	Frequency [Hz]	3.8, 4.6, 4.9, 6.5	4.2, 5.0, 5.5, 6.4	4.2, 4.6, 5.0, 5.4, 6.4
	NL_Q, NT_Q, NV_Q	4	4	5
X-m 3rd	Frequency [Hz]	3.2, 3.8, 4.6, 5.0	2.8, 2.9, 3.2, 4.2, 5.0, 5.5	2.8, 3.2, 4.2, 4.6, 5.0 5.5
	NL_Q, NT_Q, NV_Q	4	6	6

3) 계산결과 및 고찰

Table 4.8에 각 Case 별 최적화된 목적함수 값을 비교하고 있으며, 계산결과 는 Fig. 4.14 ~ 4.21과 Table 4.9 ~ 4.16에 나타내었다.

모든 결과에는

- 초기모델에 대한 최종설계변수/강제응답
- NASTRAN/Optimization module에 의해 최적화된 최종설계변수/강제응답
- OptShip에 의해 최적화된 최종설계변수/강제응답

을 동시에 제시하였다.

NASTRAN/Optimization module에 의한 최종설계변수의 변화 경향과 OptShip에 의한 최종설계변수의 변화 경향은 크게 다음과 같이 대별할 수 있다.

- NASTRAN/Optimization module: 설계변수의 상한 혹은 하한에 수렴
- OptShip: 상한 혹은 하한의 경향 이외의 다양한 분포를 보임

또한 Case 4를 제외하고 OptShip에 의한 최적화가 우수한 결과를 도출하고 있다. 이러한 결과로부터 NASTRAN/Optimization 모듈에 의한 최적화 결과가 전역 최적해가 아닌 국부 최적해에 빠지고 있는 것으로 추정할 수 있다.

기진력이 주 기관 X-moment 4th 목적함수가 peak value인 경우, NASTRAN/Optimization module에 의해 수행된 목적함수의 값이 초기모델에 대한 목적함수 값보다 커지는 결과가 얻어졌다. 이는 앞서 “목적함수”에서 설명한 바와 같이 목적함수가 peak value인 경우, OptShip과 NASTRAN/Optimization 모듈이 서로 다른 목적함수 형태를 사용하기 때문이다. Table 4.8의 Original(value)에 제시되어 있는 값은 식 (4.5)에서 제시하는 방법으로 평가된 것이며, 이는 OptShip에 사용되는 것이다. NASTRAN/Optimization 모듈은 식 (4.7)를 사용하여 목적함수 값을 평가한다. 따라서 목적함수가 peak value인 경우, Original보다 높게 나오는 것이 가능하다.

1차 최적화 수행을 통해

- OptShip을 사용하여 대상 모델 (여타의 전선 모델)에 대한 최적화에 적용이 가능하다.
 - NASTRAN/Optimization 모듈보다 우수한 해를 제공할 수 있다.
 - NASTRAN/Optimization 모듈에서 제공되지 않는 목적함수 구현이 가능하다.
- 등을 확인하였다.

Table 4.8 Original and optimized value of object function on each case

Excitation	Objective function	Original value	NASTRAN/Opt.		OptShip	
			Value	Variation (%)	Value	Variation (%)
X-moment 3rd	Case 7 (peak)	1.77E-04	2.16E-04	22.0	5.16E-05	-70.8
	Case 8 (rms)	7.83E-05	2.04E-05	-73.9	1.59E-05	-79.8
X-moment 4th	Case 5 (peak)	7.16E-05	7.34E-05	2.5	6.05E-05	-15.5
	Case 6 (rms)	2.32E-05	2.18E-05	-6.3	2.12E-05	-8.9
Propeller 1st	Case 3 (peak)	2.21E-03	2.18E-03	-1.4	1.96E-03	-11.2
	Case 4 (rms)	7.40E-04	4.81E-04	-35.0	5.10E-04	-31.1
H-moment 6th	Case 1 (peak)	1.24E-02	1.15E-02	-7.7	9.80E-03	-21.0
	Case 2 (rms)	5.51E-03	5.28E-03	-4.3	4.28E-03	-22.3

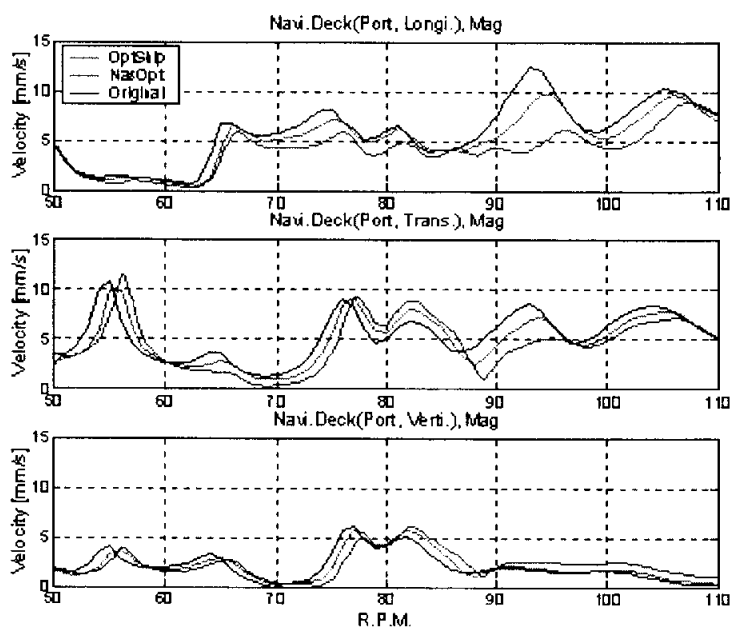


Fig. 4.14 Case 1: H-moment 6th, peak value

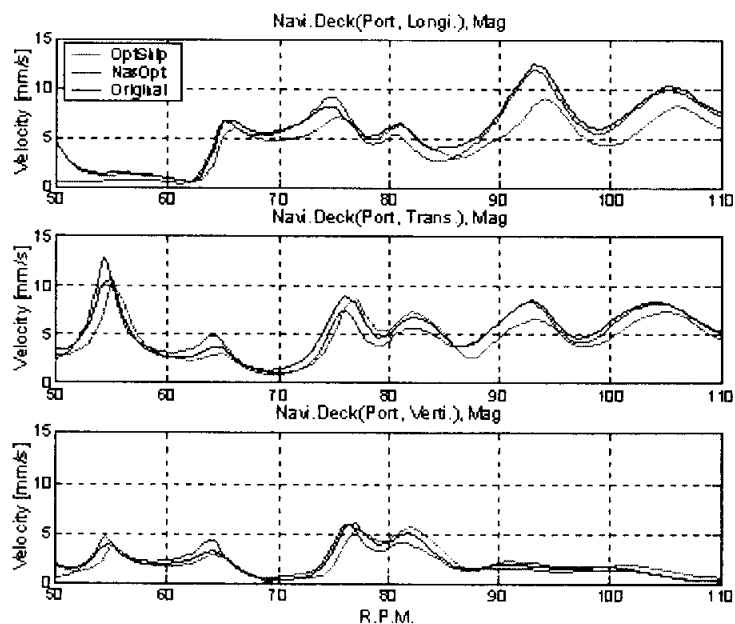


Fig. 4.15 Case 2: H-moment 6th, rms value

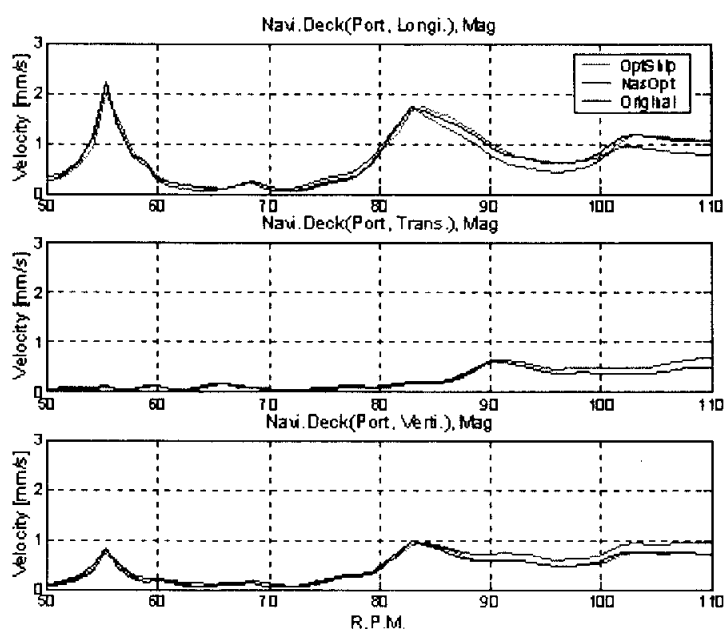


Fig. 4.16 Case 3: Propeller 1st, peak value

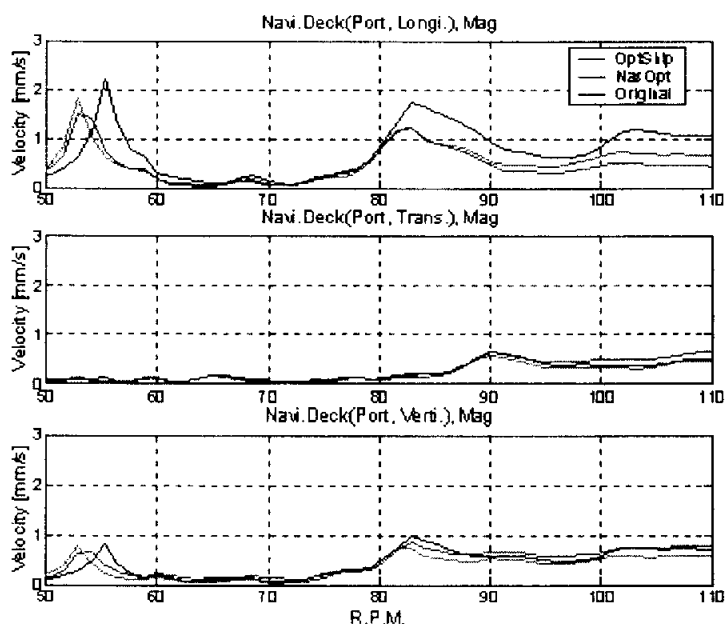


Fig. 4.17 Case 4: Propeller 1st, rms value

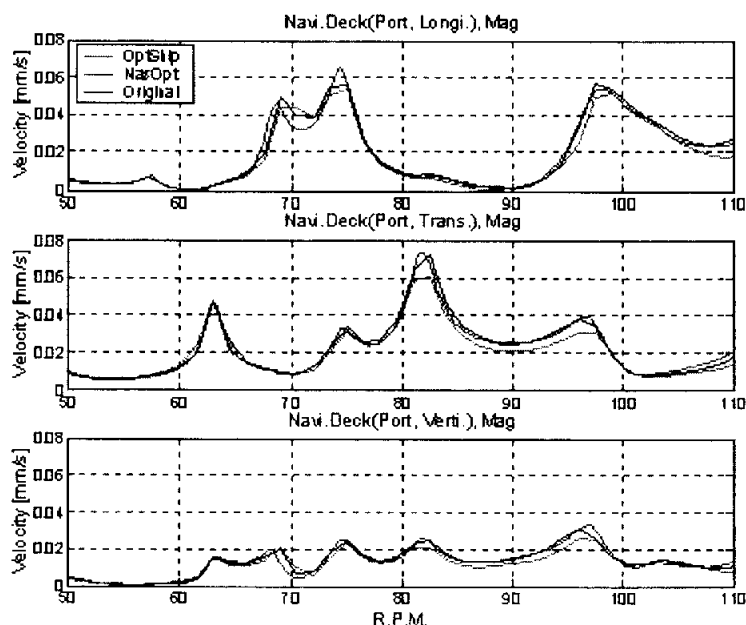


Fig. 4.18 Case 5: X-moment 4th, peak value

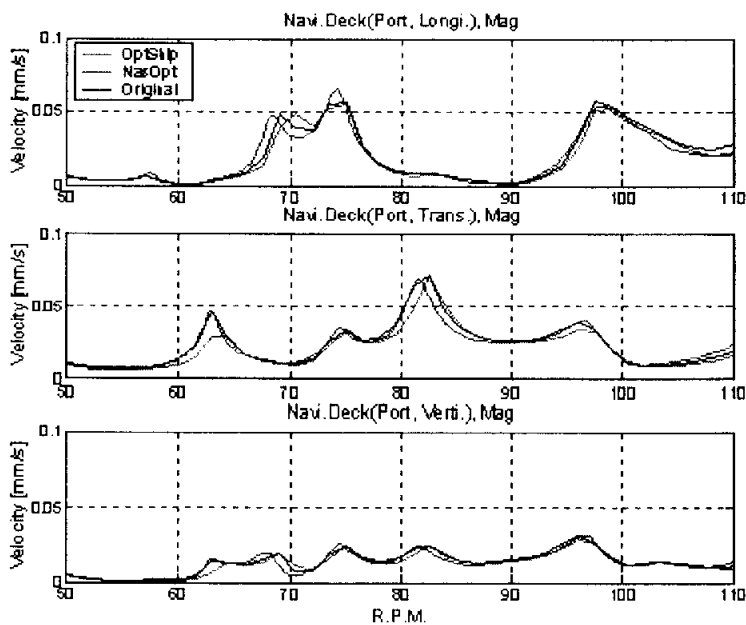


Fig. 4.19 Case 6: X-moment 4th, rms value

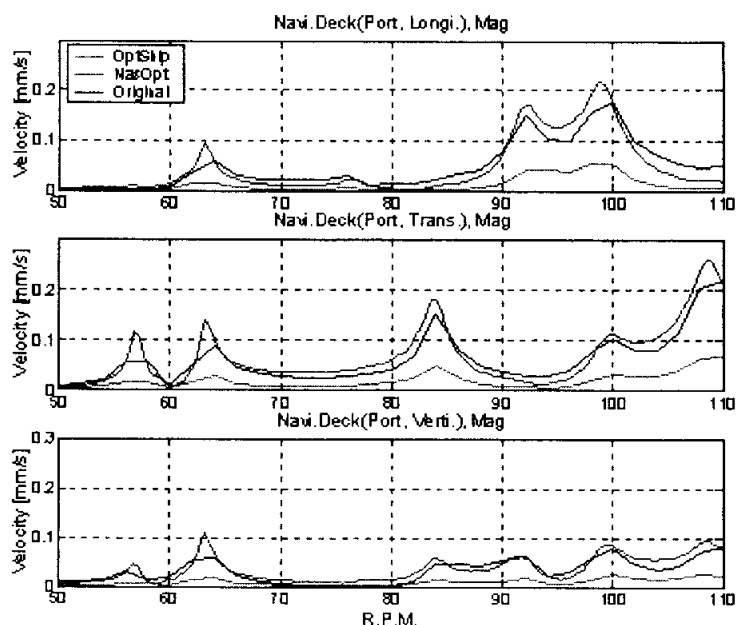


Fig. 4.20 Case 7: X-moment 3rd, peak value

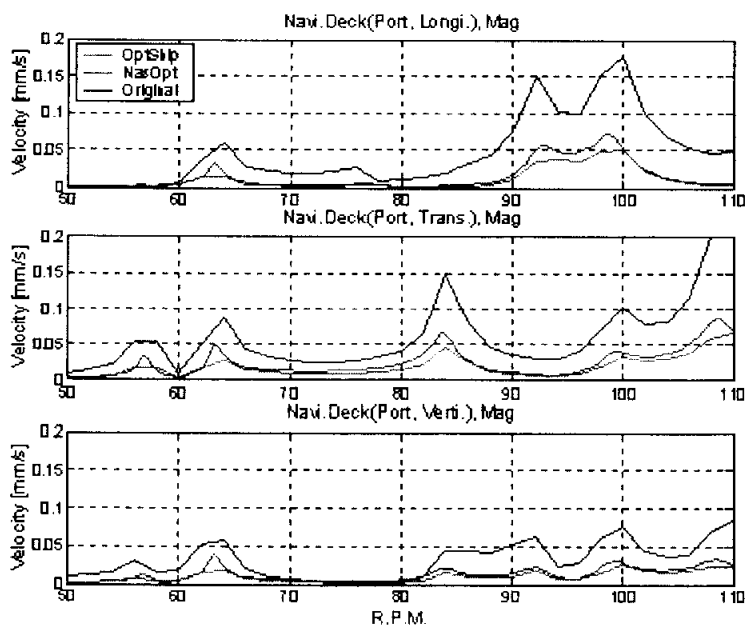


Fig. 4.21 Case 8: X-moment 3rd, rms value

Table 4.9 Optimized result for case 1 (H-m 6th, peak value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1019	8.00	140%	97%	1195	34.00	140%	120%
1021	8.10	140%	139%	1197	25.00	140%	117%
1024	8.10	90%	109%	1198	17.78	140%	127%
1025	8.10	90%	108%	1199	19.00	140%	110%
1059	8.10	140%	129%	1200	17.00	140%	127%
1060	8.10	140%	93%	1203	30.00	140%	116%
1095	9.80	140%	122%	1204	22.33	140%	100%
1096	8.10	140%	128%	1205	15.78	140%	128%
1101	12.22	90%	131%	1206	10.80	131%	130%
1102	9.80	90%	98%	1208	10.90	140%	106%
1103	9.10	90%	120%	1214	10.80	140%	105%
1104	9.80	90%	102%	1222	14.00	140%	138%
1105	9.10	90%	130%	1248	13.00	140%	126%
1106	9.10	90%	96%	1261	48.00	90%	114%
1108	9.10	140%	120%	1278	13.67	90%	94%
1128	25.00	140%	109%	1284	15.78	140%	136%
1130	20.00	140%	123%	1287	12.00	140%	128%
1131	20.00	140%	134%	1289	13.00	140%	127%
1133	7.00	140%	123%	1290	15.78	140%	137%
1135	14.56	90%	91%	1291	23.56	140%	125%
1136	14.56	90%	114%	1295	12.00	140%	113%
1138	7.00	140%	110%	1297	14.00	140%	123%
1143	7.00	140%	107%	1305	11.67	141%	133%
1145	12.56	90%	109%	1318	19.00	140%	115%
1146	12.56	90%	91%	1321	16.56	140%	116%
1148	14.56	139%	94%	1322	16.56	140%	113%
1149	13.56	139%	130%	1325	17.78	140%	122%
1151	13.56	139%	120%	1326	16.56	120%	108%
1154	32.00	90%	93%	1327	16.56	140%	132%
1156	28.00	90%	139%	1333	18.00	140%	119%
1160	12.56	139%	139%	1334	18.00	140%	98%
1165	11.67	141%	116%	1342	17.78	140%	133%
1188	17.33	140%	130%	1343	11.22	140%	137%
1189	11.67	141%	124%				

Table 4.10 Optimized result for case 2 (H-m 6th, rms value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1019	8.00	138%	127%	1201	17.00	140%	112%
1020	12.22	118%	130%	1203	30.00	140%	130%
1021	8.10	140%	137%	1204	22.33	90%	137%
1022	8.10	140%	125%	1205	15.78	90%	94%
1024	8.10	119%	94%	1206	10.80	90%	106%
1025	8.10	90%	95%	1208	10.90	114%	139%
1058	9.80	140%	131%	1220	30.00	90%	116%
1059	8.10	109%	138%	1222	14.00	90%	112%
1060	8.10	97%	138%	1248	13.00	90%	133%
1063	8.10	104%	123%	1262	62.00	90%	121%
1093	12.22	90%	140%	1266	77.00	90%	93%
1094	12.22	94%	138%	1272	62.00	90%	105%
1095	9.80	92%	128%	1280	62.00	90%	99%
1096	8.10	95%	135%	1284	15.78	90%	126%
1097	8.10	90%	134%	1287	12.00	90%	100%
1101	12.22	101%	136%	1289	13.00	90%	135%
1102	9.80	124%	130%	1290	15.78	90%	123%
1103	9.10	104%	108%	1291	23.56	140%	120%
1104	9.80	90%	99%	1295	12.00	98%	125%
1105	9.10	90%	114%	1297	14.00	90%	137%
1106	9.10	90%	100%	1305	11.67	139%	125%
1107	9.10	90%	90%	1318	19.00	90%	127%
1151	13.56	126%	120%	1321	16.56	90%	126%
1156	28.00	134%	97%	1322	16.56	90%	136%
1160	12.56	139%	138%	1324	22.00	90%	129%
1165	11.67	101%	108%	1325	17.78	90%	102%
1188	17.33	90%	99%	1333	18.00	90%	107%
1189	11.67	90%	106%	1334	18.00	90%	112%
1191	11.22	90%	111%	1335	19.00	90%	107%
1198	17.78	140%	131%	1336	21.00	90%	110%
1199	19.00	90%	104%	1342	17.78	90%	134%
1200	17.00	90%	140%	1343	11.22	93%	111%

Table 4.11 Optimized result for case 3 (Propeller 1st, peak value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1018	8.00	140%	102%	1189	11.67	141%	102%
1019	8.00	140%	135%	1191	11.22	140%	125%
1020	12.22	141%	139%	1197	25.00	140%	140%
1021	8.10	140%	90%	1198	17.78	140%	136%
1022	8.10	140%	105%	1199	19.00	140%	104%
1023	8.10	140%	106%	1200	17.00	140%	104%
1026	8.00	100%	138%	1201	17.00	140%	140%
1052	6.00	90%	140%	1203	30.00	140%	106%
1058	9.80	140%	135%	1205	15.78	140%	140%
1093	12.22	141%	134%	1206	10.80	140%	94%
1094	12.22	141%	140%	1214	10.80	140%	104%
1095	9.80	140%	140%	1222	14.00	140%	140%
1096	8.10	100%	129%	1248	13.00	140%	97%
1101	12.22	90%	87%	1254	55.00	90%	121%
1102	9.80	90%	140%	1290	15.78	140%	140%
1103	9.10	90%	140%	1295	12.00	140%	129%
1104	9.80	90%	140%	1297	14.00	140%	130%
1105	9.10	90%	140%	1305	11.67	141%	140%
1106	9.10	90%	137%	1321	16.56	140%	98%
1107	9.10	96%	137%	1322	16.56	140%	140%
1108	9.10	118%	91%	1325	17.78	140%	140%
1130	20.00	140%	139%	1326	16.56	140%	118%
1138	7.00	140%	108%	1327	16.56	140%	117%
1149	13.56	139%	140%	1328	16.56	140%	112%
1151	13.56	139%	103%	1333	18.00	100%	140%
1160	12.56	139%	95%	1334	18.00	140%	140%
1165	11.67	141%	128%	1335	19.00	140%	140%
1173	15.78	140%	132%	1336	21.00	140%	107%
1176	13.56	139%	114%	1343	11.22	140%	113%

Table 4.12 Optimized result for case 4 (Propeller 1st, rms value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1017	8.10	90%	90%	1071	6.00	140%	140%
1019	8.00	90%	90%	1072	6.00	140%	140%
1021	8.10	118%	90%	1073	6.00	140%	140%
1022	8.10	90%	90%	1076	6.00	140%	140%
1023	8.10	90%	90%	1077	8.10	140%	139%
1024	8.10	140%	139%	1092	6.00	140%	140%
1025	8.10	140%	140%	1096	8.10	90%	139%
1031	6.00	90%	90%	1097	8.10	140%	139%
1035	6.00	140%	140%	1098	8.10	140%	140%
1036	8.10	140%	139%	1099	8.10	140%	140%
1037	7.00	90%	90%	1103	9.10	140%	140%
1038	6.00	90%	90%	1104	9.80	140%	140%
1039	6.00	90%	90%	1105	9.10	140%	140%
1041	6.00	140%	140%	1106	9.10	140%	140%
1042	6.00	140%	140%	1107	9.10	140%	140%
1043	6.00	140%	140%	1108	9.10	140%	140%
1044	6.00	140%	140%	1151	13.56	139%	90%
1051	6.00	140%	140%	1199	19.00	90%	90%
1052	6.00	140%	140%	1201	17.00	140%	90%
1057	14.56	90%	90%	1206	10.80	90%	90%
1058	9.80	90%	90%	1254	55.00	104%	97%
1059	8.10	90%	90%	1287	12.00	140%	90%
1061	8.10	140%	139%	1327	16.56	132%	90%
1062	8.10	140%	140%	1331	18.00	95%	111%
1063	8.10	140%	139%	1334	18.00	140%	90%
1067	6.00	90%	90%				

Table 4.13 Optimized result for case 5 (X-m 4th, peak value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1050	6.00	140%	118%	1168	10.00	100%	131 %
1051	6.00	140%	94%	1179	10.00	115%	127 %
1060	8.10	140%	90%	1190	10.50	140%	124 %
1061	8.10	140%	96%	1216	10.80	140%	94%
1062	8.10	140%	90%	1218	10.50	90%	113%
1072	6.00	140%	122%	1245	17.56	90%	140%
1073	6.00	140%	118%	1246	12.56	90%	133%
1081	6.00	140%	132%	1247	10.80	90%	107 %
1082	6.00	140%	95%	1253	13.67	140%	90%
1083	6.00	140%	100%	1267	12.00	90%	111%
1084	6.00	140%	110%	1272	62.00	90%	128%
1085	6.00	125%	126%	1284	15.78	140%	132%
1099	8.10	140%	130%	1286	48.00	90%	90%
1107	9.10	140%	90%	1287	12.00	140%	130%
1112	10.00	90%	95%	1295	12.00	93%	96%
1114	10.00	140%	92%	1299	10.80	90%	91%
1118	14.56	139%	124%	1300	12.00	90%	124%
1125	7.00	90%	102%	1302	12.00	90%	97%
1126	7.00	140%	138%	1303	10.80	120%	96%
1133	7.00	140%	140%	1304	7.00	90%	98%
1134	7.00	140%	110%	1305	11.67	90%	119%
1135	14.56	90%	128%	1309	10.80	140%	140%
1136	14.56	90%	106%	1312	18.00	90%	134%
1137	12.56	90%	140%	1313	18.00	90%	138%
1142	11.67	141%	139%	1315	38.00	90%	124%
1143	7.00	114%	90%	1317	16.00	90%	114%
1144	7.00	140%	136%	1322	16.56	105%	135%
1145	12.56	90%	140%	1325	17.78	92%	137%
1146	12.56	90%	140%	1330	28.00	90%	90%
1147	17.33	90%	129%	1331	18.00	90%	140%
1148	14.56	90%	134%	1332	21.00	90%	119%
1149	13.56	139%	90%	1333	18.00	90%	110%
1167	10.00	140%	115%				

Table 4.14 Optimized result for case 6 (X-m 4th, rms value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1064	8.10	140%	132%	1234	17.56	140%	110%
1068	8.10	115%	94%	1245	17.56	140%	117%
1072	6.00	140%	124%	1246	12.56	139%	128%
1078	6.00	96%	120%	1247	10.80	131%	122%
1090	6.00	140%	96%	1253	13.67	96%	90%
1091	6.00	90%	108%	1257	48.00	140%	103%
1092	6.00	140%	109%	1263	13.00	140%	106%
1093	12.22	90%	97%	1264	13.67	140%	121%
1102	9.80	140%	99%	1267	12.00	140%	97%
1103	9.10	140%	118%	1269	12.00	140%	106%
1105	9.10	140%	103%	1284	15.78	140%	108%
1107	9.10	140%	98%	1286	48.00	140%	128%
1114	10.00	140%	109%	1287	12.00	140%	128%
1118	14.56	139%	114%	1289	13.00	140%	117%
1125	7.00	140%	99%	1290	15.78	90%	105%
1126	7.00	139%	132%	1292	15.78	103%	106%
1134	7.00	140%	109%	1295	12.00	90%	95%
1135	14.56	139%	119%	1299	10.80	139%	95%
1136	14.56	139%	126%	1300	12.00	140%	112%
1137	12.56	139%	129%	1302	12.00	140%	140%
1146	12.56	139%	129%	1303	10.80	139%	106%
1147	17.33	91%	136%	1304	7.00	140%	128%
1148	14.56	139%	139%	1309	10.80	140%	112%
1149	13.56	139%	104%	1312	18.00	129%	117%
1217	10.80	140%	130%	1315	38.00	131%	110%
1219	10.50	140%	94%	1325	17.78	90%	125%
1233	17.56	140%	107%				

Table 4.15 Optimized result for case 7 (X-m 3rd, peak value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1016	14.56	90%	92%	1197	25.00	90%	110%
1019	8.00	90%	100%	1198	17.78	90%	100%
1020	12.22	90%	103%	1200	17.00	113%	113%
1021	8.10	90%	99%	1201	17.00	118%	96%
1022	8.10	90%	91%	1202	10.80	90%	117%
1055	17.44	90%	104%	1205	15.78	90%	127%
1058	9.80	90%	93%	1206	10.80	90%	93%
1059	8.10	90%	100%	1208	10.90	90%	102%
1093	12.22	90%	105%	1211	10.90	90%	98%
1094	12.22	90%	100%	1220	30.00	90%	119%
1095	9.80	90%	101%	1222	14.00	90%	99%
1096	8.10	90%	109%	1223	17.56	90%	95%
1101	12.22	90%	97%	1248	13.00	90%	100%
1102	9.80	90%	92%	1284	15.78	90%	113%
1106	9.10	90%	137%	1287	12.00	120%	137%
1107	9.10	99%	113%	1290	15.78	120%	117%
1108	9.10	90%	112%	1295	12.00	90%	93%
1138	7.00	90%	128%	1297	14.00	90%	97%
1151	13.56	97%	104%	1302	12.00	90%	117%
1152	22.33	90%	115%	1305	11.67	90%	91%
1153	32.00	90%	129%	1317	16.00	90%	93%
1154	32.00	90%	109%	1318	19.00	95%	116%
1155	28.00	119%	95%	1321	16.56	90%	99%
1156	28.00	103%	124%	1322	16.56	140%	116%
1187	10.50	140%	94%	1326	16.56	90%	104%
1188	17.33	119%	104%	1327	16.56	90%	105%
1190	10.50	140%	106%	1328	16.56	90%	119%
1192	10.50	139%	96%	1331	18.00	90%	118%
1193	15.56	90%	92%	1333	18.00	90%	105%
1194	20.56	90%	128%	1335	19.00	90%	117%
1195	34.00	90%	97%	1342	17.78	120%	116%

Table 4.16 Optimized result for case 8 (X-m 3rd, rms value)

SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables		SHELL ID No.	Original value (mm)	Variation of design variables	
		Nastran	OptShip			Nastran	OptShip
1019	8.00	90%	140%	1108	9.10	90%	122%
1021	8.10	90%	140%	1172	11.67	141%	91%
1022	8.10	90%	114%	1187	10.50	140%	129%
1023	8.10	90%	126%	1198	17.78	90%	90%
1024	8.10	90%	134%	1199	19.00	140%	140%
1026	8.00	90%	128%	1200	17.00	140%	103%
1031	6.00	90%	140%	1201	17.00	140%	115%
1038	6.00	90%	140%	1205	15.78	90%	140%
1039	6.00	90%	119%	1206	10.80	90%	140%
1040	6.00	90%	125%	1208	10.90	90%	140%
1052	6.00	90%	90%	1214	10.80	90%	105%
1055	17.44	139%	140%	1222	14.00	90%	94%
1057	14.56	139%	91%	1248	13.00	90%	93%
1058	9.80	90%	90%	1287	12.00	90%	136%
1059	8.10	90%	94%	1290	15.78	90%	129%
1060	8.10	90%	129%	1295	12.00	100%	90%
1061	8.10	90%	92%	1297	14.00	100%	138%
1067	6.00	100%	90%	1305	11.67	90%	140%
1074	8.10	90%	134%	1321	16.56	90%	107%
1092	6.00	90%	129%	1322	16.56	90%	90%
1093	12.22	90%	90%	1325	17.78	90%	91%
1099	8.10	90%	105%	1326	16.56	90%	90%
1101	12.22	90%	104%	1327	16.56	90%	96%
1102	9.80	90%	122%	1328	16.56	90%	131%
1105	9.10	90%	140%	1333	18.00	90%	140%
1106	9.10	90%	140%	1334	18.00	90%	125%
1107	9.10	90%	140%	1335	19.00	90%	90%

Table 4.17 Comparison of Optship and NASTRAN/Optimization module

	장 점	단 점
OptShip	• 전역해(global optimum) 제공 (가장 좋은 해를 제공) • 목적함수, 설계변수의 설정 용이 (사용자가 원하는 형태 가능) • 여러 최적화 알고리즘 적용 가능	• 계산시간이 길다
NASTRAN Optimization module	• 계산시간이 짧다 • 모듈화되어 있어 사용 편리	• 국부해(local optimum) 제공 • 목적함수와 설계변수 설정 제한 (모듈에서 제공하는 범위)

4.2.3 2차 최적화 실행

2차 최적화의 목적은 대상모델의 모든 기진력에 의한 응답값을 고려하며, 이는 실제적으로 적용할 수 있는 정도의 계산 결과를 얻고, 본 연구의 최종 결과 중의 하나로서 실제 대상 모델에 대한 최종적인 최적설계안을 도출하기 위한 것이다.

현실적으로 검증이 가능한 방법으로서 1차 최적화 실행에서 OptShip과 NASTRAN/ Optimization module을 비교함으로써 그 성능을 확인하였다. 이에 따라 OptShip을 최적설계안 도출을 위한 도구로서 확정하였다.

또한 설계변수의 선정에 있어서 고려해야 할 사항으로

- 선택된 설계변수가 최적설계를 통해 얻으려는 결과에 영향을 끼칠 것인가?
- 현실적인 문제로써 최적화에 소요되는 시간은 어느 정도인가?

첫 번째 의문에 대한 답은 공학적인 판단으로 이루어져야 하며, 대상 모델에 대한 상당한 이해가 요구된다. 그러나 대상모델에 대한 1차 최적화의 설계

변수 선정과정에서 설명된 바와 같이 전문적 지식이 깊지 않아도 설계변수 선정이 이루어지는 방법이 요구되었고, 이에 따라 1차 최적화에서 사용되었던 감도해석을 이용한 2단계과정의 설계변수 선정 작업이 채택되었다. 두 번째 의문에 대해서도 2단계과정의 설계변수 선정 작업은 효과적으로 설계변수를 줄일 수 있는 방법을 제공하였고, 이로 최적화에 소모되는 시간을 줄일 수 있음을 확인 하였다.

대상모델은 1차 최적화에서와 동일한 모델을 사용하였고, 목적함수는 1차 최적화에서 사용한 peak value를 일부 수정하여 사용하였다. 수정은 두 가지 측면에서 이루어졌다. 첫 번째는 강제응답의 관심주파수영역에 가중치를 부여하여 목적함수를 평가하는 것이다. 두 번째는 단일 모델의 도출에 관한 것이다. 즉, 최종 모델은 모든 가능한 상황을 고려한 하나의 모델이어야 하기 때문에, 각각의 기진력 별로 최적화를 독립적으로 수행하는 것이 아니라 모든 주요한 기진력을 동시에 고려하여 평가하는 방법을 채택하였다.

1) 설계변수

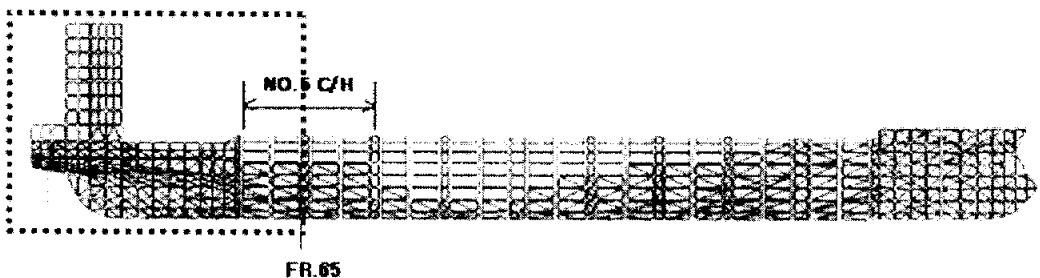


Fig. 4.22 Full model of container ship

대상 모델은 1차 최적화에서 사용된 모델과 동일하나, 설계변수에 대한 영역을 명확히 하기 위해 Fig.4.22에 다시 나타내었다.

“후보설계변수” 선정의 기준은 1차 최적화에서와 동일하나 편의상 다시 설

명한다. Fig. 4.22에서 박스된 곳이 최초 단계 1의 “후보설계변수”로 선정되었다. 주요 선정 근거는 거주구 진동에 직접적인 영향을 고려하였으며, 이는 공학적인 개념 및 실선 경험에 의존한다. 아래에 단계 1 및 단계 2의 “후보설계변수” 및 “최종설계변수”의 선정 기준을 구체적으로 제시하였다.

단계 1 : 최초 “후보설계변수”의 선정

- 대상 : SHELL 요소 두께
- 범위 : 선미 ~ Half of No. 5 Cargo Hold
- 기준 : 구조적인 치수가 상이한 부분은 다른 설계변수
 층별로 다른 설계변수
 대칭성을 가지는 구조는 동일한 설계변수

단계 2 : “최종설계변수”의 선정

- 목적함수에 대한 후보설계변수의 감도해석 수행
(Nastran/Optimization module 이용)
- 감도값이 높은 변수를 최종 설계변수로 선정
(평균 감도의 1.5배 이상)

“후보설계변수”는 단계 2에서 감도평가를 통해 “최종설계변수”로 선정되는데, 이 때 “후보설계변수”로 채택된 특정 SHELL에 대응하는 요소들이 차지하는 면적이 상대적으로 넓다면, 감도가 크게 나타날 가능성이 크다. 따라서 이러한 부분을 가능한 제거하기 위해 물리적인 모델은 동일하지만, 각 SHELL에 할당되는 요소의 면적을 가능한 유사하도록 유한요소모델의 조정을 하였고, 이에 따라 1차 최적화에서 319개였던 “후보설계변수”는 2차 최적화에서는 279개로 변경되었다.

감도해석에 사용한 목적함수는 OptShip의 목적함수와 동일하게 구현할 수

없었기 때문에, 1차 최적화에서의 감도해석을 위한 목적함수와 동일하게 적용하였다.

단계 1을 통해 총 279개의 “후보설계변수”가 선정되었고, 단계 2를 통해 56개의 “최종설계변수”가 선정되었다. OptShip에 의한 최적화는 56개의 “최종설계변수”에 대해 수행되었다. 설계변수의 상한 및 하한은 1차 최적화에서와 동일한 초기모델의 90%~140%로 하였다.

선정된 “최종설계변수”는 부록 1에 2차원으로 도면화 하여 제시하였다.

2) 목적함수

목적함수는 1차 최적화의 peak value와 유사하나, 관심주파수에 대한 부분과 기진력의 통합이 고려되었다.

관심주파수의 하한은 NCR-10 (rpm)으로 하였고, 상한은 $MCR \times 1.07$ 로 하였다. 대상 모델의 주요 기진력 발생은 주 기관에 의해 주로 일어나고, 그 기진력의 주파수는 주 기관의 회전속도의 동기성분들이다. 고려한 기진력은 1차 최적화와 같다.

Main Engine H-moment 6th : $M_{H-moment} = 1193 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Main Engine X-moment 3rd : $M_{X-moment} = 513 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Main Engine X-moment 4th : $M_{X-moment} = 550 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Propeller 1st

각각의 기진력 주파수는 주 기관에 대한 기진력의 차수를 R 이라 하면,

$$\begin{aligned}\omega_{\max} &= R \times [\text{MCR} \times 1.07] \\ \omega_{\max} &= R \times (\text{NCR} - 10)\end{aligned}\tag{4.8}$$

Main Engine H-moment 6th: 8.30 ~ 10.38 Hz

Main Engine X-moment 3rd: 4.15 ~ 5.19 Hz

Main Engine X-moment 4th: 5.53 ~ 6.92 Hz

Propeller 1st: 6.92 ~ 8.65 Hz

로 결정할 수 있다. 또 관심주파수 내에 포함되는 주파수 성분의 응답은 가중치를 1.0으로 하고, 주파수 범위를 벗어나는 주파수 성분의 응답은 가중치를 0.5로 하였다.

고려하는 방향은 병진 3 방향이고, 응답은 Navigation Deck의 Port side에서 평가하였다. 이를 식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$f = \max \left[Weight(RS) \times \hat{V}(dr, RS) \right] \quad (4.9)$$
$$\hat{V}(dr, RS) = \max \left[V_{f1}(dr, RS), V_{f2}(dr, RS), V_{f3}(dr, RS), V_{f4}(dr, RS) \right]$$

여기서 dr , RS 는 각각 응답 방향(direction)과 주 기관의 운전속도(rotating speed)를 의미하며, f_1, f_2, f_3 및 f_4 는 각각 4개의 기진력에 대한 강제응답해석의 진동속도응답을 의미한다. 또한 $Weight(RS)$ 는 식 (4.10)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Weight(RS) &= 1.0 : \text{if } 83 < RS < 103.8 \text{ (RPM)} \\ &= 0.5 : \text{else} \end{aligned} \quad (4.10)$$

3) 계산 결과 및 고찰

설계변수의 변화량이 큰 순으로 상위 20개의 설계변수 만을 Table 4.20에 나타내었다. Table 4.20의 PSHELL ID는 설계변수로 선정된 Shell의 NASTRAN 입력파일에서 사용되는 PSHELL ID를 의미하며, Sensitivity는 설계변수 선정의 단계 1의 결과로 얻어진 목적함수에 대한 감도 값이다. 또 Original 및

Optimization은 초기 모델의 설계변수 값과 최적화된 후의 설계변수 값을 각각 표현하고 있으며, Variation은 설계변수의 초기값에 대한 최적화 된 값의 변화율을 보여주며 식 (4.11)와 같이 정의된다.

$$Variation = 100 \times \frac{X_{Optimized} - X_{Original}}{X_{Original}} (\%) \quad (4.11)$$

다음 항목으로 Figure는 부록 1의 Fig. A.2~A.22에서 해당 설계변수가 제공되는 2차원 도면의 Fig. 번호이다. 마지막으로 Location은 해당 설계변수들의 도면상에서의 위치를 설명하고 있다.

초기모델 및 최적화된 모델에 의한 강제해석 결과를 Fig. 4.23에 보이고 있다. 기진력 4가지가 고려되고 있고 이들 각각에 대해 응답 주파수를 운전속도 (RPM)로 환산하여 표시하고 있다. 주 기관 X-moment 3rd, X-moment 4th에 의한 응답은 주 기관 H-moment에 의한 응답에 비해 미소하여 그래프에서 아래쪽에 깔려 있는 것으로 나타나고 있다. Propeller 1st 기진력에 의한 응답도 주 기관 H-moment 6th에 의한 응답에 비해 상당히 낮게 나타나고 있다. 결론적으로 대상 모델의 관심 응답에 대한 주요 기진원은 주 기관 H-moment 6th에 의한 것임을 알 수 있다. Fig. 4.23에 보이고 있는 응답은 목적함수 평가 시에 사용된 가중치가 고려된 것으로 주 기관 운전속도 83 ~ 103.8 RPM 영역에서는 가중치가 1.0이, 그리고 그 외의 영역에서는 가중치가 0.5로 고려된 것으로 그 경계를 굵은 수직선으로 표시하였다.

목적함수 값은 초기모델은 0.01195였고, 최적화 된 후의 값은 0.009036으로 24.4% 감소하였다. 목적함수가 평가된 부분의 가중치가 1.0이므로 목적함수 값이 곧 최대 응답을 의미한다. 즉, 초기모델의 11.95 mm/s에서 최적화된 모델의 최대응답은 9.036 mm/s로 낮아졌다. 최대응답을 보이는 운전속도는 초기모델의 경우 94 RPM에서 최적화된 후에는 95 RPM으로 약간 상승하였다. 이는

관련 모드의 강성 증가로 인한 고유진동수의 증가가 그 원인으로 추정된다. 추정되는 관련 모드는 Fig. 4.13(f)에 제시되어 있는 Deck House torsional mode coupled with Hull Girder(편의상 D/H torsional mode라 함)로 고유진동수가 9.24 Hz에서 9.32 Hz로 증가하였다.

통상 Deck House의 진동에서 가장 주요하게 고려되는 모드는 Deck House Longitudinal 모드로 본 모델에서는 Fig. 4.13(a)에 제시한 4.59 Hz의 Deck House Longitudinal mode coupled with hull Girder mode and double bottom (편의상 D/H Longi. mode라 함)이다. 보통의 경우, 이 모드는 주 기관 X-moment 기진력에 의해 기진되어 운전영역(본 모델에서는 83 ~ 103 RPM)에서 높은 응답을 보이는 것으로 알려져 있다.

그러나 강제응답 해석 결과, 주 기관 X-moment에 의한 D/H Longi. 모드의 응답은 크게 나타나지 않았다. 본 모델의 경우 앞에서 언급했듯이 D/H Longi. 모드보다는 Fig. 4.13(f)에 제시된 9.24 Hz의 D/H torsional 모드가 H-moment에 의해 기진되어 운전영역에서 지배적인 응답으로 나타나고 있다.

Deck House만의 비틀림을 고려할 때, D/H torsional 모드에 있어서 Deck House Front Wall의 A Deck, B Deck 그리고 C Deck 등은 중요한 역할을 수행하는 위치에 있다. 저차 모드를 고려할 때, 외팔 보에서 고정단에 가까운 부분의 강성이 외팔 보의 진동에 중요한 역할을 수행하는 것과 유사하다. Deck House Front Wall에 있는 “최종설계변수”들은 Fig. A.4에 도시되어 있으며, PSHELL ID 1078, 1079, 1080, 1081들이 이 부분에서의 “최종설계변수”들이다. 이러한 설계변수들은 모두 감도에서도 상위 20개 안에 들어오며, 최적화된 설계변수의 변화에서도 상위 20개 안에 들어오고 있다. 최적화된 설계변수들은 모두 증가했고, 감도평가에서의 예측된 바와 일치하고 있다.

“최종설계변수” 감도해석을 통해 선정되었고, 감도해석에 사용된 목적함수는 여러 주파수에서의 응답을 고려하고 있기 때문에, 특정 모드에 지배되는

경향을 나타내지는 않고 있다. 그러나 Deck House Front Wall의 “최종설계변수”의 최적화 결과를 관찰함으로써 “최종설계변수”의 변화가 D/H torsional 모드에 의존하고 있음을 확인할 수 있다.

선박의 진동에서 중요한 부분은 Shell의 부재들이다. Shell의 설계변수는 Fig. A.2에 제시하였다. 감도에 있어서 Deck House 아래에 있는 PSHELL ID 1266, 1263은 높은 값을 보이고 있다. 또한 PSHELL ID 1262, 1264, 1265 등도 설계변수에 대한 부재의 면적을 고려할 때, 예측하는 바와 같이 감도가 높음을 알 수 있다. 그러나 PSHELL ID 1278, 1259등은 Shell의 부재이나 선미부로 Deck House의 진동에 큰 기여를 하지 않을 것임을 예상할 수 있고, 감도 또한 낮게 평가 되었다. 설계변수의 변화량에 있어서도 PSHELL ID 1266, 1262, 1265, 1263 등이 상당히 많은 변화량을 보이고 있다.

한 가지 주의할 것은 설계변수 감도의 절대값이 높다는 것이 직접적으로 설계변수의 변화량이 많을 것임을 암시하지는 않는다는 것이다. 감도가 높은 설계변수들이 그 변화량은 크지 않은 경우를 Table 4.20과 Table. 4.21를 비교함으로써 쉽게 확인할 수 있다.

또한 일부 설계변수의 감도가 예측한 방향과 반대로 최적화가 이루어졌다. 이에 대한 한 가지 원인으로 먼저 감도해석과정에서 사용한 목적함수와 실제 OptShip에 의해 수행된 목적함수와의 차이가 하나의 원인이 될 것으로 예측된다. 강제해석의 결과로부터 Fig. 4.23에서 보는 바와 같이 94 ~ 95 RPM 부근에서의 Longitudinal 방향의 응답이 목적함수의 평가에 주로 사용되었음을 알 수 있다. 따라서 감도해석에서의 목적함수도 하나 혹은 최소한의 주파수에서의 응답을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

전반적으로 설계변수의 변화 경향은 Shell 요소의 두께가 증가하면서 강성을 증가시키는 방향으로 최적화가 이루어졌다.

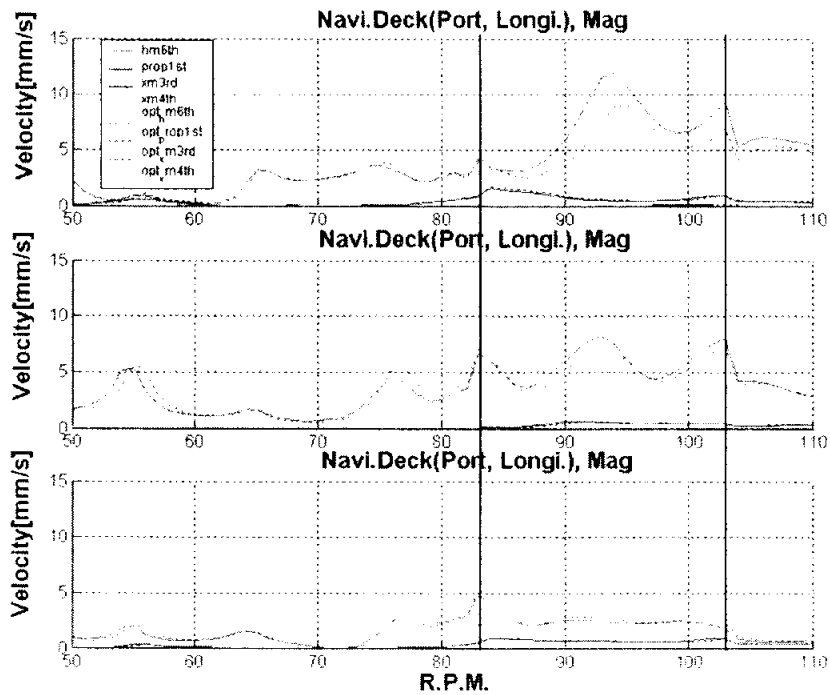


Fig. 4.23 Comparison of response between original and optimized models

Table 4.18~4.19 은 “최종설계변수” 전체에 대한 정보를 제공하고 있고, Table 4.20 는 그 중 변화율이 큰 상위 20 개의 “최종설계변수”를 다시 제시하고 있다. 또한 Table A.21 에 감도의 절대값이 높은 상위 20 개의 “최종설계변수”를 제시하였다.

Table 4.18 Final design variables

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1009	2.51E-05	8.1	8.81	8.71
1010	3.06E-05	8.1	10.97	35.42
1078	-2.32E-05	12.25	15.45	26.16
1079	-2.68E-05	12.25	15.12	23.44
1080	-4.50E-05	9.8	12.25	25.02
1081	-4.24E-05	8.1	10.13	25.03
1084	1.85E-05	8.1	7.35	-9.27
1086	3.97E-05	12.25	12.91	5.39
1087	5.59E-05	9.8	11.35	15.82
1088	5.23E-05	9.1	11.41	25.42
1089	6.10E-05	9.8	9.78	-0.25
1090	7.08E-05	9.1	8.47	-6.94
1091	6.72E-05	9.1	9.12	0.17
1092	4.89E-05	9.1	8.21	-9.82
1112	-1.76E-05	25	24.07	-3.74
1113	-5.12E-05	25	31.05	24.22
1115	-5.32E-05	20	25.54	27.69
1116	-3.92E-05	20	18.66	-6.68
1117	-2.28E-05	20	27.82	39.09
1118	-7.71E-05	7	8.04	14.90
1120	3.91E-05	14.5	16.35	12.75
1121	6.04E-05	14.5	13.25	-8.64
1123	-5.12E-05	13.5	17.82	32.03
1124	-2.45E-05	22.2999	27.34	22.61
1126	2.15E-05	28	35.89	28.17
1128	-3.67E-05	12.5	13.54	8.35
1129	-3.30E-05	11.7	13.79	17.84
1136	-4.41E-05	11.7	11.70	0.04

Table 4.19 Final design variables (continued)

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1138	-2.72E-05	11.2	12.46	11.24
1145	-2.96E-05	19	20.21	6.37
1146	-8.38E-05	17	17.80	4.68
1148	-2.02E-05	30	40.26	34.20
1149	-2.24E-05	22.2999	21.17	-5.07
1150	-6.33E-05	15.8	20.48	29.60
1151	-1.60E-04	10.8	14.68	35.94
1153	-8.83E-05	10.9	12.09	10.89
1156	-1.64E-05	10.9	10.29	-5.64
1165	1.81E-05	30	35.79	19.30
1167	7.91E-05	14	12.65	-9.66
1211	2.00E-05	77	74.66	-3.04
1225	-1.68E-05	15.8	18.99	20.16
1228	-1.89E-05	12	11.30	-5.80
1231	-3.64E-05	15.8	17.76	12.43
1236	-2.14E-05	12	12.24	1.97
1238	-2.39E-05	14	18.25	30.38
1259	-2.01E-05	19	21.45	12.90
1262	-3.33E-05	16.5	20.39	23.58
1263	-5.06E-05	16.5	19.79	19.95
1264	-3.00E-05	24	26.07	8.63
1265	-2.01E-05	22	26.84	21.98
1266	-6.39E-05	17.7999	23.74	33.37
1274	1.86E-05	18	19.64	9.11
1275	-3.08E-05	18	18.33	1.81
1276	3.34E-05	19	19.94	4.93
1278	-2.06E-05	17.7999	18.67	4.91
1279	-4.07E-05	11.2	14.04	25.33

Table 4.20 Top 20 design variables ranked in variation

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)	Figure	Location
1117	-2.28E-05	20	27.82	39.09	A-22	FR.65 SEC. Cargo Hold
1151	-1.60E-04	10.8	14.68	35.94	A-14	Main Deck Plan
1010	3.06E-05	8.1	10.97	35.42	A-3	10400/11200 OFF C.L Elev.
1148	-2.02E-05	30	40.26	34.20	A-14	Main Deck Plan
1266	-6.39E-05	17.8	23.74	33.37	A-2	Shell Expansion
1123	-5.12E-05	13.5	17.82	32.03	A-12	12700 OFF C.L Elev.
1238	-2.39E-05	14	18.25	30.38	A-3	10400/11200 OFF C.L Elev.
1150	-6.33E-05	15.8	20.48	29.60	A-14	Main Deck Plan
1126	2.15E-05	28	35.89	28.17	A-12	12700 OFF C.L Elev.
1115	-5.32E-05	20	25.54	27.69	A-22	FR.65 SEC. Cargo Hold
1078	-2.32E-05	12.25	15.45	26.16	A-4	Fr.19 SEC. (Front Wall)
1088	5.23E-05	9.1	11.41	25.42	A-7	C Deck
1279	-4.07E-05	11.2	14.04	25.33	A-16	2nd P/F Deck Plan
1081	-4.24E-05	8.1	10.13	25.03	A-4	Fr.19 SEC. (Front Wall)
1080	-4.50E-05	9.8	12.25	25.02	A-4	Fr.19 SEC. (Front Wall)
1113	-5.12E-05	25	31.05	24.22	A-22	FR.65 SEC. Cargo Hold
1262	-3.33E-05	16.5	20.39	23.58	A-2	Shell Expansion
1079	-2.68E-05	12.25	15.12	23.44	A-4	Fr.19 SEC. (Front Wall)
1124	-2.45E-05	22.3	27.34	22.61	A-12	12700 OFF C.L Elev.
1265	-2.01E-05	22	26.84	21.98	A-2	Shell Expansion

Table 4.21 Top 20 design variables ranked in sensitivity

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)	Figure	Location
1151	-1.60E-04	10.8	14.68	35.94	A-14	Main Deck Plan
1153	-8.83E-05	10.9	12.09	10.89	A-15	1st P/F Deck Plan
1146	-8.38E-05	17	17.80	4.68	A-14	Main Deck Plan
1167	7.91E-05	14	12.65	-9.66	A-19	Inn. Bottom
1118	-7.71E-05	7	8.04	14.90	A-22	Cargo Hold
1090	7.08E-05	9.1	8.47	-6.94	A-9	E Deck
1091	6.72E-05	9.1	9.12	0.17	A-10	F Deck
1266	-6.39E-05	17.8	23.74	33.37	A-2	Shell Expansion
1150	-6.33E-05	15.8	20.48	29.60	A-14	Main Deck Plan
1089	6.10E-05	9.8	9.78	-0.25	A-8	D Deck
1121	6.04E-05	14.5	13.25	-8.64	A-22	FR.65 SEC. Cargo Hold
1087	5.59E-05	9.8	11.35	15.82	A-6	B Deck
1115	-5.32E-05	20	25.54	27.69	A-22	FR.65 SEC. Cargo Hold
1088	5.23E-05	9.1	11.41	25.42	A-7	A Deck
1113	-5.12E-05	25	31.05	24.22	A-22	FR.65 SEC. Cargo Hold
1123	-5.12E-05	13.5	17.82	32.03	A-12	12700 OFF C.L Elev.
1263	-5.06E-05	16.5	19.79	19.95	A-2	Shell Expansion
1092	4.89E-05	9.1	8.21	-9.82	A-11	Navigation Deck
1080	-4.50E-05	9.8	12.25	25.02	A-4	Fr.19 SEC. (Front Wall)
1136	-4.41E-05	11.7	11.70	0.04	A-18	NO.4 STR

4.2.4. 3차 최적화 실행

3차 최적설계의 목적은 R-Tabu 탐색법뿐만 아니라, 다른 전역 최적알고리즘 적용과 유용성을 확인하기 위한 것이다. 그리고 H-moment에 의한 응답값들이 너무 커서 상대적으로 작은 X-moment 3차와 관련된 모드들의 영향력을 확인하기 위해서 기진력을 X-moment 3차만을 고려하였다. 대상모델은 앞의 예들과 같다.

1) 설계변수

설계변수를 선정하는 방법은 앞의 적용예들과 같고, 여기서는 후보설계변수 279개중 X-moment 3차 기진력에 의한 감도값의 1.5배인 것들을 설계변수로 선정하였다. 총 설계변수의 개수는 51개이다.

2) 목적함수

목적함수는 2차 최적설계의 목적함수와 같으며, 기진력을 X-moment 3차만을 고려했다.

3) 계산결과 및 고찰

선정된 설계변수에 대한 정보는 Table 4.22에 나타내었고, 설계변수의 변화량이 큰 순으로 상위 20개의 설계변수 만을 R-tabu와 GA 각각에 대해 Table 4.23 ~ 4.24에 나타내었다. 그리고 설계변수중 감도가 높은 상위 20개를 Table 4.25에 나타내었다. Table 4.20의 PSHELL ID는 설계변수로 선정된 Shell의 NASTRAN 입력파일에서 사용되는 PSHELL ID를 의미하며, Original은 초기모델의 설계변수 값이며, R-Tabu 와 GA는 각각의 의해 최적화된 설계변수의 값이다. 그리고 R-Tabu(%)와 GA(%)는 설계변수의 초기값에 대한 각각의 최적화된 값의 변화율을 보여주고 있다. 감도는 설계변수 선정의 단계 1의 결과로 얻어진 목적함수에 대한 감도 값이다. 초기모델 및 R-Tabu와 GA에 의해 최적화된 모델의 강제해석 결과를 Fig. 4.24에 보이고 있다. 기진력은 X-moment 3차만 고려되고 있고 이들 각각에 대해 응답 주파수를 운전속도(RPM)로 환산하여 표시하고 있다. Fig. 4.24에 보이고 있는 응답은 목적함수 평가 시에 사용된 가중치가 고려된 것으로 주 기관 운전속도 83 ~ 103.8 RPM 영역에서는 가중치가 1.0이, 그리고 그 외의 영역에서는 가중치가 0.5로 고려된 것으로 그 경계를 사각형으로 표시하였다. Fig. 4. 25는 운전되는 영역만을 표시하였다.

목적함수 값은 초기모델은 0.0001214였고, 최적화 된 후의 값은 R-Tabu는 0.0001133으로 6.7% 감소하였고, GA는 0.0001109로 8.65%로 감소하여 GA가 보다 나은 최적값을 얻었다. 초기모델의 0.1214 mm/s에서 최적화된 모델의 최대

응답은 각각 0.1133 mm/s(R-Tabu)와 0.1109 mm/s(GA)로 낮아졌다. 최대응답을 보이는 운전속도는 초기모델의 경우 99 RPM에서 거의 변화가 없었다. 이에 해당하는 주파수가 4.95 Hz이며, Deck House Torisional모드이다. 응답값을 줄이는 과정에서 그와 관련한 4.59 Hz의 Deck House Longitudinal 모드의 응답값이 0.095 mm/s 에서 0.08 mm/s 줄어들고, 주파수 또한 4.59 Hz에서 4.55 Hz로 이동하였다. 거주구의 양 Section부분과 Deck의 설계변수가 변화량이 컸다. R-Tabu와 GA의 최적설계변수로 보았을 때, 상위 20개중 7개가 같았고, 어느 정도 동일한 설계변수의 변화로 최적화가 이루어졌음을 알 수 있다. GA는 감도가 높은 설계변수가 변화량 또한 많이 변했으나, R-Tabu는 20개중 5개뿐이었다. 감도가 높은 설계변수가 많이 변한 GA가 결과도 좋았다. 2차 최적설계의 경우에서처럼, 설계변수 감도의 절대값이 높다는 것이 직접적으로 설계변수의 변화량이 많을 것임을 암시하지는 않는다는 것이다. 감도가 높은 설계변수들중 그 변화량이 크지 않은 경우를 Table 4.23과 Table. 4.24를 통해 확인 할 수 있다.

또한 일부 설계변수의 감도가 예측한 방향과 반대로 최적화가 이루어졌다. 이에 대한 한 가지 원인으로 먼저 감도해석과정에서 사용한 목적함수와 실제 OptShip 에 의해 수행된 목적함수와의 차이가 하나의 원인이 될 것으로 예측된다. 전반적으로 2 차 최적설계와 유사하게 설계변수의 변화 경향은 Shell 요소의 두께가 증가하면서 강성을 증가시키는 방향으로 최적화가 이루어졌다.

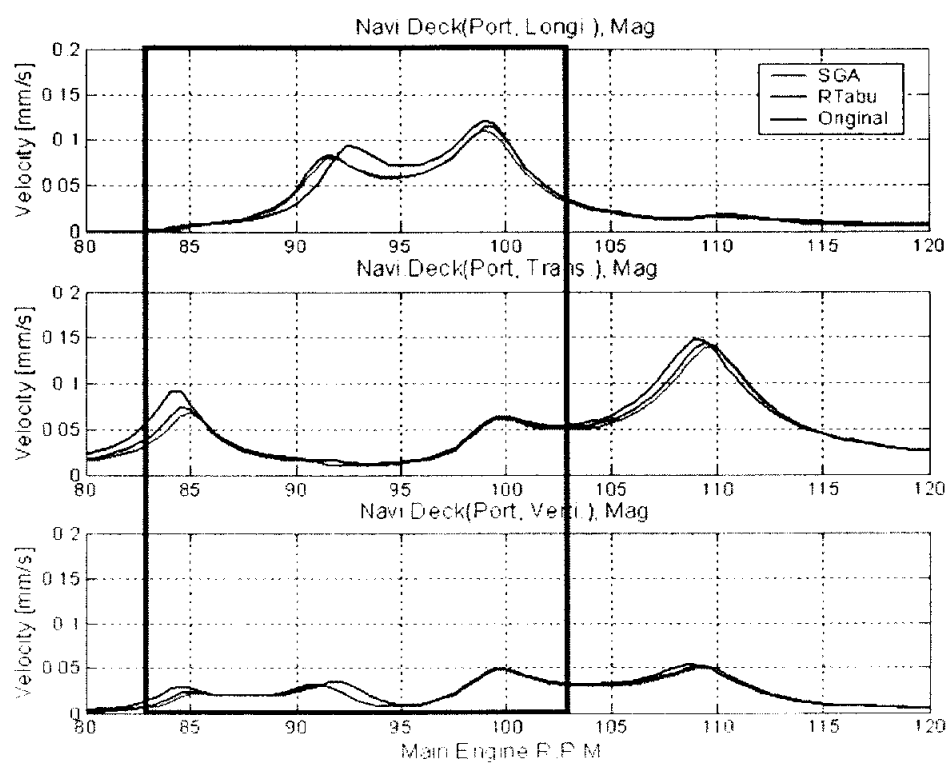


Fig. 4.24 Comparison of response between R-Tabu and GA

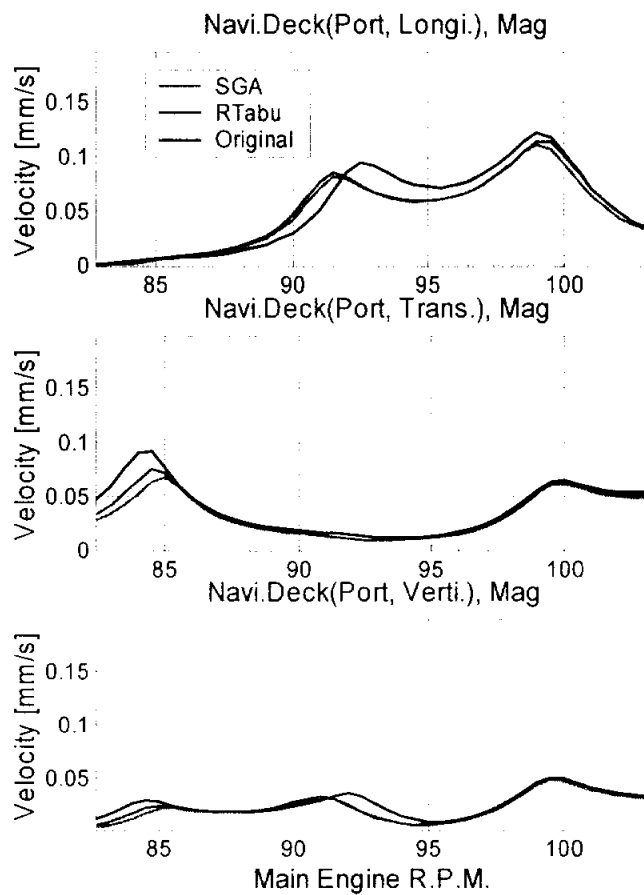


Fig. 4.25 Comparison of response between R-Tabu and GA in operating range

Table 4.22 Final design variables

Pshell NO.	Original	R-Tabu	GA	R-Tabu(%)	GA(%)	감도
1003	8.00	10.6049	7.3140	32.6%	-8.6%	0.3256
1004	8.00	7.8202	11.1720	-2.2%	39.7%	-0.0225
1006	8.10	8.3353	9.5570	2.9%	18.0%	0.0290
1007	8.10	10.8805	11.0990	34.3%	37.0%	0.3433
1010	8.10	7.9212	7.4650	-2.2%	-7.8%	-0.0221
1011	8.00	7.2042	7.2160	-9.9%	-9.8%	-0.0995
1021	8.10	10.1571	9.6650	25.4%	19.3%	0.2540
1022	7.00	9.0034	6.7910	28.6%	-3.0%	0.2862
1027	6.00	7.4496	7.7000	24.2%	28.3%	0.2416
1028	6.00	7.9424	8.1440	32.4%	35.7%	0.3237
1031	8.10	8.0592	10.5350	-0.5%	30.1%	-0.0050
1036	6.00	6.6328	8.2440	10.5%	37.4%	0.1055
1037	6.00	5.8405	8.0620	-2.7%	34.4%	-0.0266
1043	9.80	10.5098	13.5620	7.2%	38.4%	0.0724
1046	8.10	9.8198	11.1320	21.2%	37.4%	0.2123
1047	8.10	7.6331	8.4640	-5.8%	4.5%	-0.0576
1048	8.10	7.6473	7.3190	-5.6%	-9.6%	-0.0559
1057	6.00	7.5449	5.7910	25.7%	-3.5%	0.2575
1058	6.00	5.9901	8.2670	-0.2%	37.8%	-0.0016
1059	8.10	11.2177	10.8040	38.5%	33.4%	0.3849
1061	6.00	8.0273	6.7290	33.8%	12.2%	0.3379
1062	8.10	9.9978	9.6620	23.4%	19.3%	0.2343
1077	6.00	6.4294	7.5480	7.2%	25.8%	0.0716
1078	12.25	16.0530	11.0730	31.0%	-9.6%	0.3104
1082	8.10	10.0182	11.1500	23.7%	37.7%	0.2368
1083	8.10	8.4168	11.3000	3.9%	39.5%	0.0391
1084	8.10	9.2907	11.3000	14.7%	39.5%	0.1470
1087	9.80	11.9619	13.7000	22.1%	39.8%	0.2206

1088	9.10	9.1746	9.8350	0.8%	8.1%	0.0082
1089	9.80	11.1274	13.0900	13.5%	33.6%	0.1354
1090	9.10	9.2839	12.7000	2.0%	39.6%	0.0202
1091	9.10	12.3778	11.3610	36.0%	24.8%	0.3602
1092	9.10	12.5843	8.6570	38.3%	-4.9%	0.3829
1093	9.10	11.3930	12.5450	25.2%	37.9%	0.2520
1144	17.80	18.1386	16.0470	1.9%	-9.8%	0.0190
1146	17.00	15.3085	15.3080	-10.0%	-10.0%	-0.0995
1147	10.80	9.7482	11.1560	-9.7%	3.3%	-0.0974
1150	15.80	16.2849	21.8310	3.1%	38.2%	0.0307
1151	10.80	12.8412	14.7960	18.9%	37.0%	0.1890
1179	17.50	15.8931	15.8990	-9.2%	-9.1%	-0.0918
1193	13.00	11.7160	12.0620	-9.9%	-7.2%	-0.0988
1231	15.80	22.1179	22.0100	40.0%	39.3%	0.3999
1236	12.00	14.0054	16.3640	16.7%	36.4%	0.1671
1237	12.00	15.1227	11.4780	26.0%	-4.4%	0.2602
1238	14.00	19.5846	19.3870	39.9%	38.5%	0.3989
1243	12.00	10.8108	12.0540	-9.9%	0.5%	-0.0991
1246	11.70	15.7780	16.2100	34.9%	38.5%	0.3485
1262	16.50	22.2344	21.6040	34.8%	30.9%	0.3475
1269	16.50	23.0248	23.0220	39.5%	39.5%	0.3954
1273	21.00	23.8271	19.4720	13.5%	-7.3%	0.1346
1275	18.00	16.2111	16.2120	-9.9%	-9.9%	-0.0994

Table 4.23 Top 20 design variables ranked in variation (R-Tabu)

Pshell NO.	Original	R-Tabu	GA	R-Tabu(%)	GA(%)	감도
1231	15.80	22.12	22.01	40.0%	39.3%	3.44E-07
1238	14.00	19.58	19.39	39.9%	38.5%	4.65E-07
1269	16.50	23.02	23.02	39.5%	39.5%	3.77E-07
1059	8.10	11.22	10.80	38.5%	33.4%	-3.77E-07
1092	9.10	12.58	8.66	38.3%	-4.9%	-3.24E-06
1091	9.10	12.38	11.36	36.0%	24.8%	-2.76E-06
1246	11.70	15.78	16.21	34.9%	38.5%	5.52E-07
1262	16.50	22.23	21.60	34.8%	30.9%	3.69E-07
1007	8.10	10.88	11.10	34.3%	37.0%	6.04E-07
1061	6.00	8.03	6.73	33.8%	12.2%	-4.62E-07
1003	8.00	10.60	7.31	32.6%	-8.6%	3.87E-07
1028	6.00	7.94	8.14	32.4%	35.7%	-4.38E-07
1078	12.25	16.05	11.07	31.0%	-9.6%	4.27E-07
1022	7.00	9.00	6.79	28.6%	-3.0%	2.64E-07
1237	12.00	15.12	11.48	26.0%	-4.4%	4.23E-07
1057	6.00	7.54	5.79	25.7%	-3.5%	-3.17E-07
1021	8.10	10.16	9.67	25.4%	19.3%	-4.94E-07
1093	9.10	11.39	12.55	25.2%	37.9%	-1.77E-06
1027	6.00	7.45	7.70	24.2%	28.3%	-5.63E-07
1082	8.10	10.02	11.15	23.7%	37.7%	-4.66E-07

Table 4.24 Top 20 design variables ranked in variation (GA)

Pshell NO.	Original	R-Tabu	GA	R-Tabu(%)	GA(%)	감도
1087	9.80	11.96	13.70	22.1%	39.8%	-3.53E-07
1004	8.00	7.82	11.17	-2.2%	39.7%	8.36E-07
1090	9.10	9.28	12.70	2.0%	39.6%	-2.09E-06
1269	16.50	23.02	23.02	39.5%	39.5%	3.77E-07
1083	8.10	8.42	11.30	3.9%	39.5%	-7.12E-07
1084	8.10	9.29	11.30	14.7%	39.5%	-9.68E-07
1231	15.80	22.12	22.01	40.0%	39.3%	3.44E-07
1246	11.70	15.78	16.21	34.9%	38.5%	5.52E-07
1238	14.00	19.58	19.39	39.9%	38.5%	4.65E-07
1043	9.80	10.51	13.56	7.2%	38.4%	3.06E-07
1150	15.80	16.28	21.83	3.1%	38.2%	1.08E-06
1093	9.10	11.39	12.55	25.2%	37.9%	-1.77E-06
1058	6.00	5.99	8.27	-0.2%	37.8%	-4.34E-07
1082	8.10	10.02	11.15	23.7%	37.7%	-4.66E-07
1046	8.10	9.82	11.13	21.2%	37.4%	-3.80E-07
1036	6.00	6.63	8.24	10.5%	37.4%	-2.64E-07
1007	8.10	10.88	11.10	34.3%	37.0%	6.04E-07
1151	10.80	12.84	14.80	18.9%	37.0%	8.06E-07
1236	12.00	14.01	16.36	16.7%	36.4%	6.89E-07
1028	6.00	7.94	8.14	32.4%	35.7%	-4.38E-07

Table 4.25 Top 20 design variables ranked in sensitivity

Pshell NO.	Original	R-Tabu	GA	R-Tabu(%)	GA(%)	감도
1092	9.10	12.58	8.66	38.3%	-4.9%	-3.24E-06
1091	9.10	12.38	11.43	36.0%	25.6%	-2.76E-06
1090	9.10	9.28	12.70	2.0%	39.6%	-2.09E-06
1093	9.10	11.39	12.10	25.2%	33.0%	-1.77E-06
1089	9.80	11.13	13.70	13.5%	39.8%	-1.40E-06
1150	15.80	16.28	21.71	3.1%	37.4%	1.08E-06
1006	8.10	8.34	9.59	2.9%	18.4%	1.01E-06
1084	8.10	9.29	11.30	14.7%	39.5%	-9.68E-07
1004	8.00	7.82	11.09	-2.2%	38.7%	8.36E-07
1275	18.00	16.21	16.25	-9.9%	-9.7%	8.24E-07
1151	10.80	12.84	14.80	18.9%	37.0%	8.06E-07
1088	9.10	9.17	9.84	0.8%	8.1%	-7.85E-07
1144	17.80	18.14	16.01	1.9%	-10.0%	7.63E-07
1077	6.00	6.43	7.55	7.2%	25.8%	-7.20E-07
1083	8.10	8.42	11.30	3.9%	39.5%	-7.12E-07
1236	12.00	14.01	16.22	16.7%	35.1%	6.89E-07
1011	8.00	7.20	7.20	-9.9%	-10.0%	6.57E-07
1007	8.10	10.88	11.29	34.3%	39.3%	6.04E-07
1037	6.00	5.84	8.16	-2.7%	35.9%	-5.73E-07
1027	6.00	7.45	7.75	24.2%	29.1%	-5.63E-07
1010	8.10	7.92	7.72	-2.2%	-4.7%	-5.53E-07

5. 결 론

본 연구에서는 선박진동의 응답을 최소화하기 위해서 다양한 최적화방법을 도입하여 수행하였다. 대형구조물의 계산에 편리한 상용 해석 프로그램 (NASTRAN)의 최적화 모듈과 전역최적화기법과 NASTRAN 해석 툴을 결합한 OptShip을 제안하였다.

그리고 제안한 전역최적화 방법론으로 축소선박모델과 실제 컨테이너 선박에 적용하여 최적화를 수행하여 만족스러운 결과를 도출하였다. 국부 최적해를 찾는 NASTRAN Optimization 모듈보다 나은 결과를 보이고 있음 확인하였다. 모든 기진력을 하나의 모델에 적용하여 최적설계안을 도출해냈다. R-tabu 탐색법과 GA를 이용한 최적설계에서도 만족스런 결과를 얻었다. 여러 전역최적화 기법을 적용할 수 있음을 확인하였다.

따라서 선박의 진동문제를 해결하는데 있어, NASTRAN Optimization 모듈보다 높은 정도의 해가 요구되거나, User-define의 선박구조 최적화문제에 있어, 전역 최적화 알고리즘과 결합하는 OptShip이 효율적으로 문제를 해결하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) Hu N., “Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design”, International Journal Numerical Methods in Engineering, Vol.35, pp. 1055-1070, 1992.
- (2) Goldberg, D. E., Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning Addison-wesley Pub. Co., 1989.
- (3) Vanderplaats, G. N., “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications”, McGraw Hill, 1984.
- (4) MSC.PATRAN User’s Guide Ver.8, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1998.
- (5) MSC.NASTRAN User’s Guide Ver.8, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1998.
- (6) Grant Sitton, MSC.NASTRAN Basic Dynamic Analysis User’s Guide, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1993.
- (7) Moore, Greg, MSC.NASTRAN Design Sensitivity and Optimization, User’s Guide, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1994.
- (8) Robert S. Lahey, Mark P. Miller, Michael Reymond, MSC.NASTRAN Reference Manual Vol.3, Ver. 68, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1994.
- (9) Masaru Tateishi, Handy MSC.NASTRAN Example Problem Manual, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1992.
- (10) 최적화기법을 이용한 Containership 선미부 및 거주구의 지진동 구조 개발에 관한 연구(최종보고서), 대우조선해양(주), 2004
- (11) 권진화, “MSC.NASTRAN으로 배우는 전산구조해석”, 2001
- (12) 신찬호외5, “선박진동/소음 제어 지침”, 한국선급, 1997

- (13) 류연선, 임오강, 박경진, “최적설계입문”, 인터비전, 2001
- (14) 전상범, 1998, 유전알고리즘과 Random Tabu 탐색법에 의한 최적설계 알고리즘의 개발, 부경대학교 대학원 기계공학 석사학위 논문
- (15) 김여근, 윤복식, 이상복, “메타휴라스틱”, 영지문화사, 1999.

부록 1: 2차 최적화 설계변수

Fig. A.1 에 대상모델을 다시 한번 제시하고 있다. 그리고 Table A.1 에서 대상 모델의 제원, 모델링 정보 및 설계변수 등을 나타내고 있다.

Fig. A.2 와 Table A.2 부터 “최종설계변수” 56 개를 모두 2 차원으로 도면화 하여 보여주고 있으며, 푸른색 박스로 “최종설계변수”를 표시하였고, 붉은 색으로 SHELL ID 번호를 표기하였다. PSHELL ID 가 같은 번호인 것은 같은 설계 변수를 의미한다.

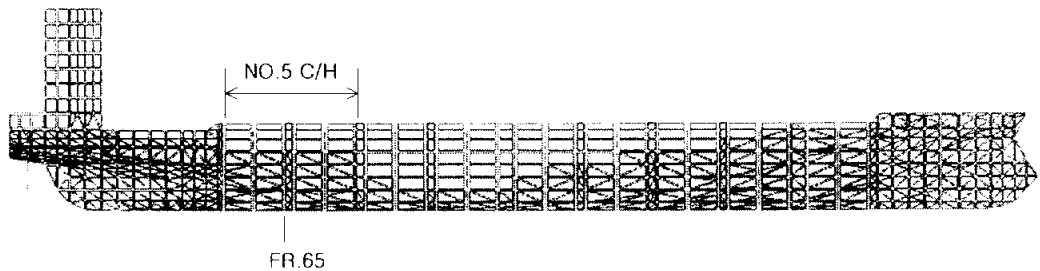


Fig. A.1 Model and design variables

Table A.1 Model and design variables

Item	Total element
Number of candidate design variables	279
Number of final design variables	56
Number of total nodes	4558
Number of used elements	11781

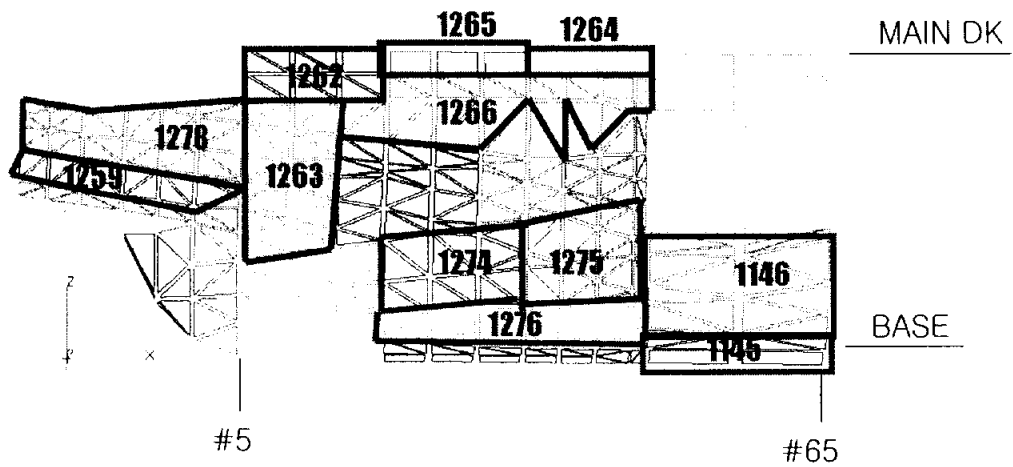


Fig. A.2 SHELL EXPANSION

Table A.2 SHELL EXPANSION

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation(%)
1145	-2.96E-05	19.00	20.21	6.37
1146	-8.38E-05	17.00	17.80	4.68
1259	-2.01E-05	19.00	21.45	12.90
1262	-3.33E-05	16.50	20.39	23.58
1263	-5.06E-05	16.50	19.79	19.95
1264	-3.00E-05	24.00	26.07	8.63
1265	-2.01E-05	22.00	26.84	21.98
1266	-6.39E-05	17.80	23.74	33.37
1274	1.86E-05	18.00	19.64	9.11
1275	-3.08E-05	18.00	18.33	1.81
1276	3.34E-05	19.00	19.94	4.93
1278	-2.06E-05	17.80	18.67	4.91

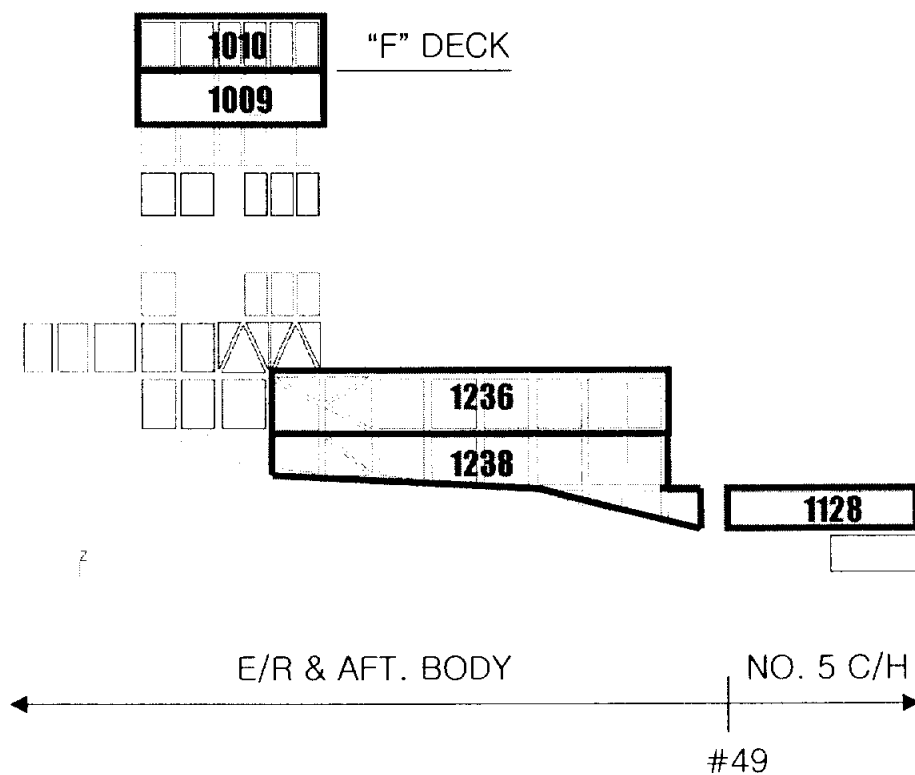


Fig. A.3 10400/11200 OFF C.L ELEV.

Table A.3 10400/11200 OFF C.L ELEV.

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1009	2.51E-05	8.10	8.81	8.71
1010	3.06E-05	8.10	10.97	35.42
1128	-3.67E-05	12.50	13.54	8.35
1236	-2.14E-05	12.00	12.24	1.97
1238	-2.39E-05	14.00	18.25	30.38

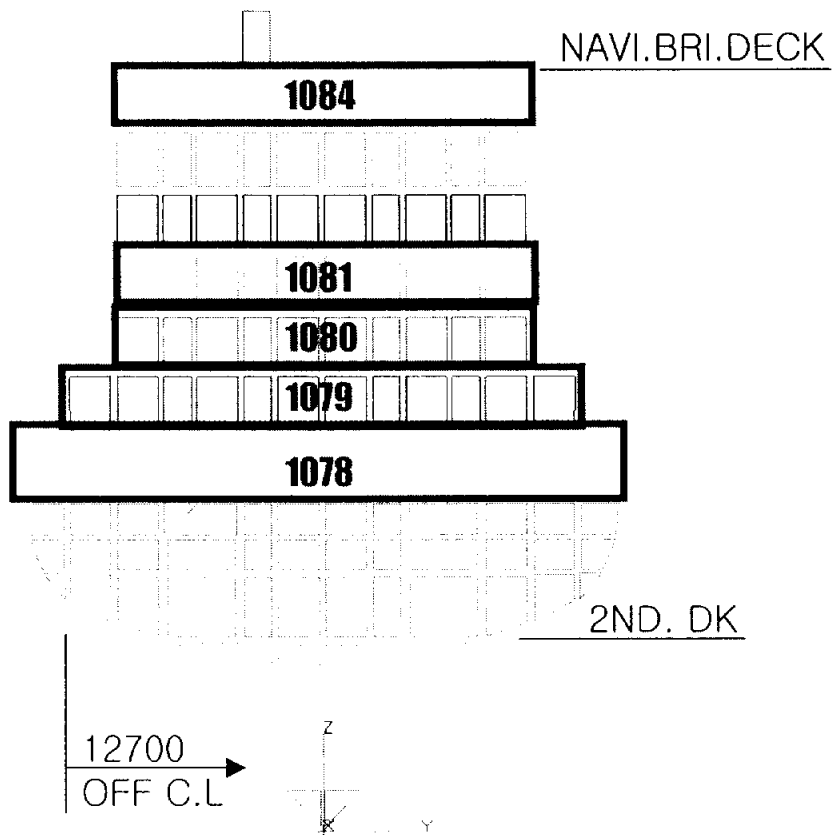


Fig. A.4 FR.19 SEC.(FRONT WALL)

Table A.4 FR.19 SEC.(FRONT WALL)

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1078	-2.32E-05	12.25	15.45	26.16
1079	-2.68E-05	12.25	15.12	23.44
1080	-4.50E-05	9.80	12.25	25.02
1081	-4.24E-05	8.10	10.13	25.03
1084	1.85E-05	8.10	7.35	-9.27

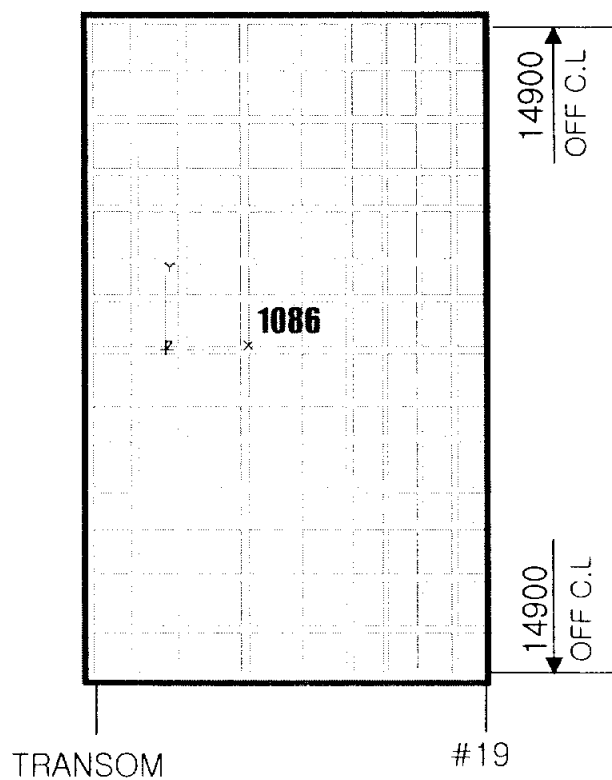


Fig. A.5 “A” DECK

Table A.5 “A” DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1086	3.97E-05	12.25	12.91	5.39

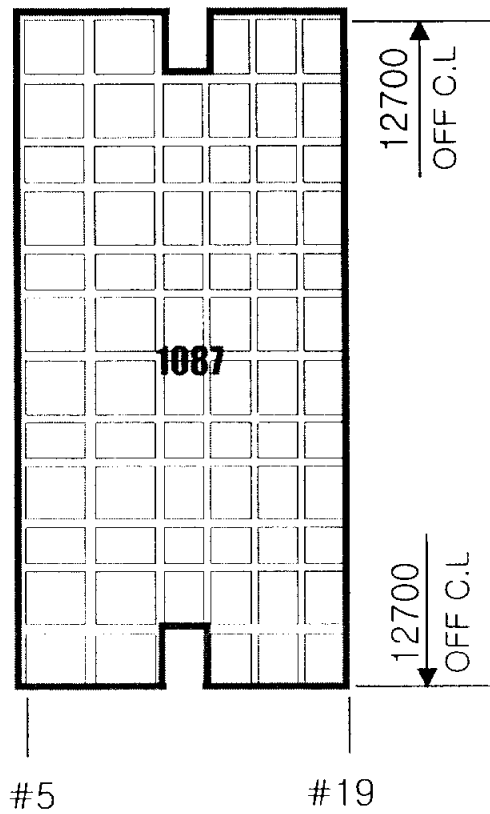


Fig. A.6 "B" DECK

Table A.6 "B" DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1087	5.59E-05	9.80	11.35	15.82

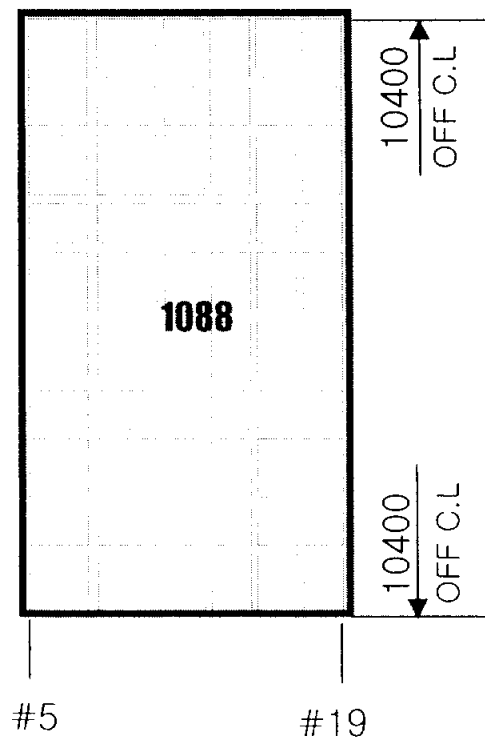


Fig. A.7 "C" DECK

Table A.7 "C" DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1088	5.23E-05	9.10	11.41	25.42

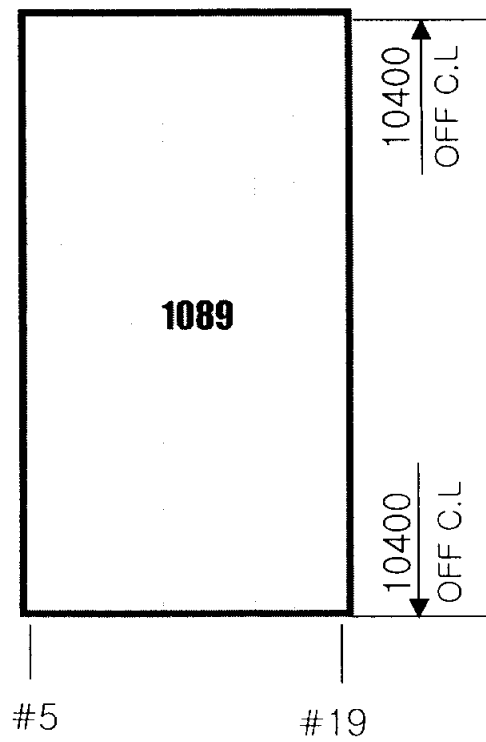


Fig. A.8 "D" DECK

Table A.8 "D" DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1089	6.10E-05	9.80	9.78	-0.25

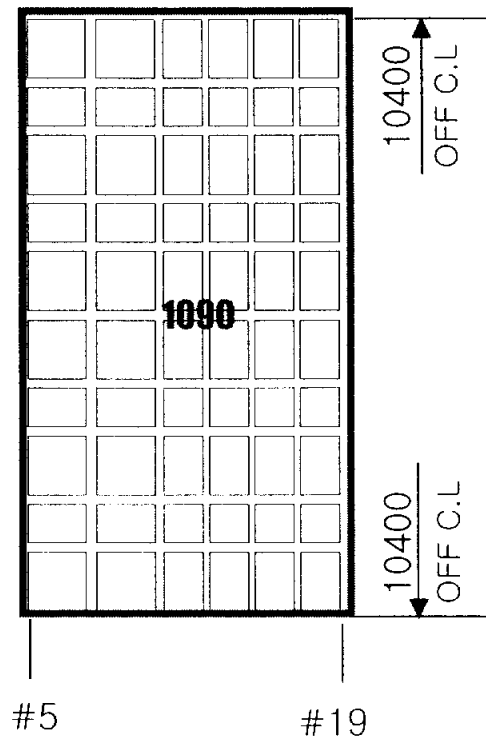


Fig. A.9 "E" DECK

Table A.9 "E" DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1090	7.08E-05	9.10	8.47	-6.94

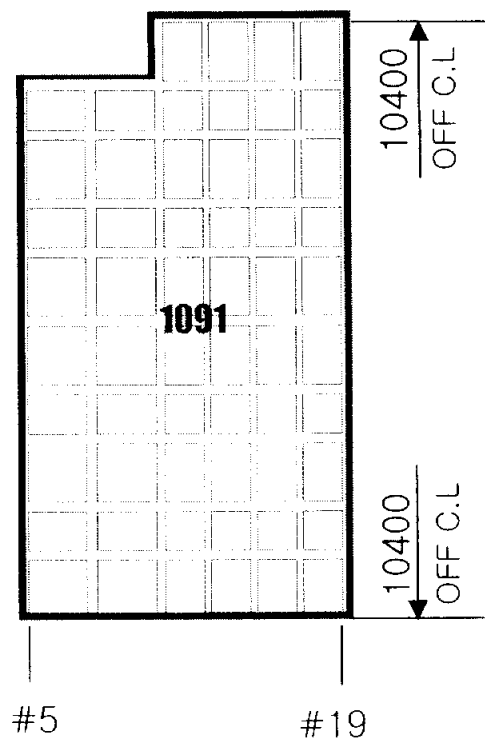


Fig. A.10 "F" DECK

Table A.10 "F" DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1091	6.72E-05	9.10	9.12	0.17

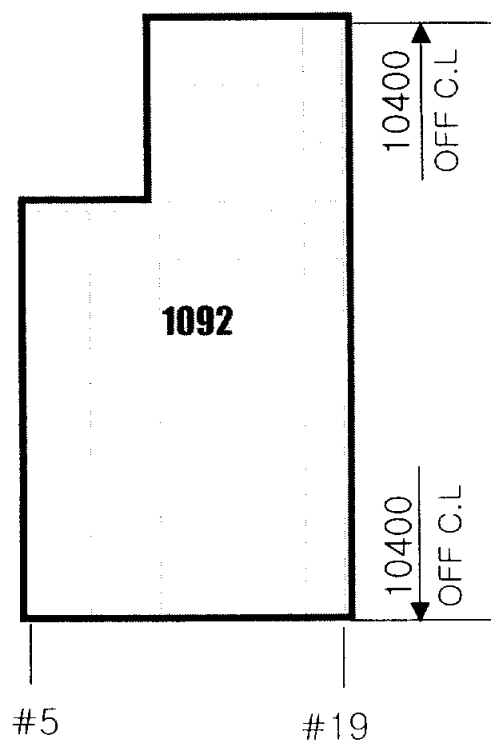


Fig. A.11 NAVI.DECK

Table A.11 NAVI.DECK

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1092	4.89E-05	9.10	8.21	-9.82

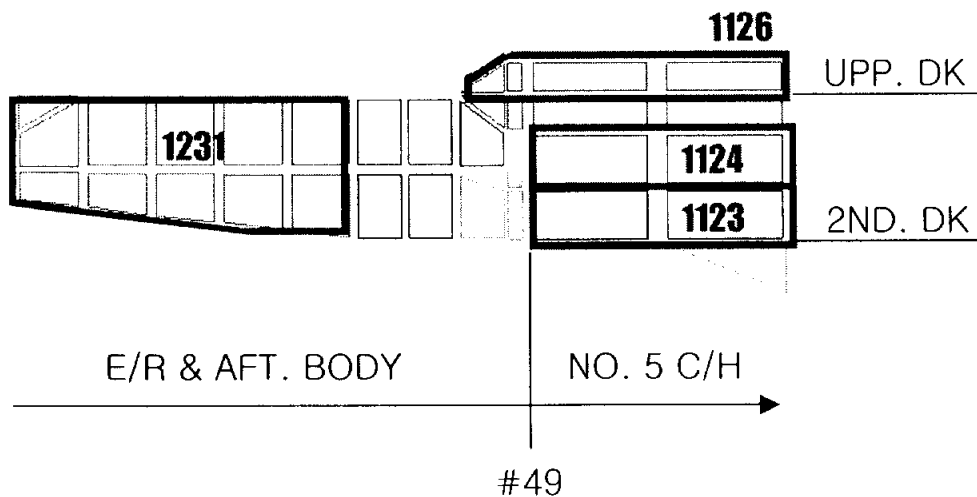


Fig. A.12 12700 OFF C.L ELEV.

Table A.12 12700 OFF C.L ELEV.

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1123	-5.12E-05	13.50	17.82	32.03
1124	-2.45E-05	22.30	27.34	22.61
1126	2.15E-05	28.00	35.89	28.17
1231	-3.64E-05	15.80	17.76	12.43

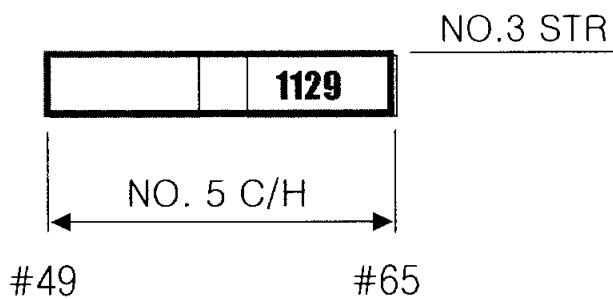


Fig. A.13 7200 OFF C.L ELEV.

Table A.13 7200 OFF C.L ELEV.

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1129	-3.30E-05	11.70	13.79	17.84

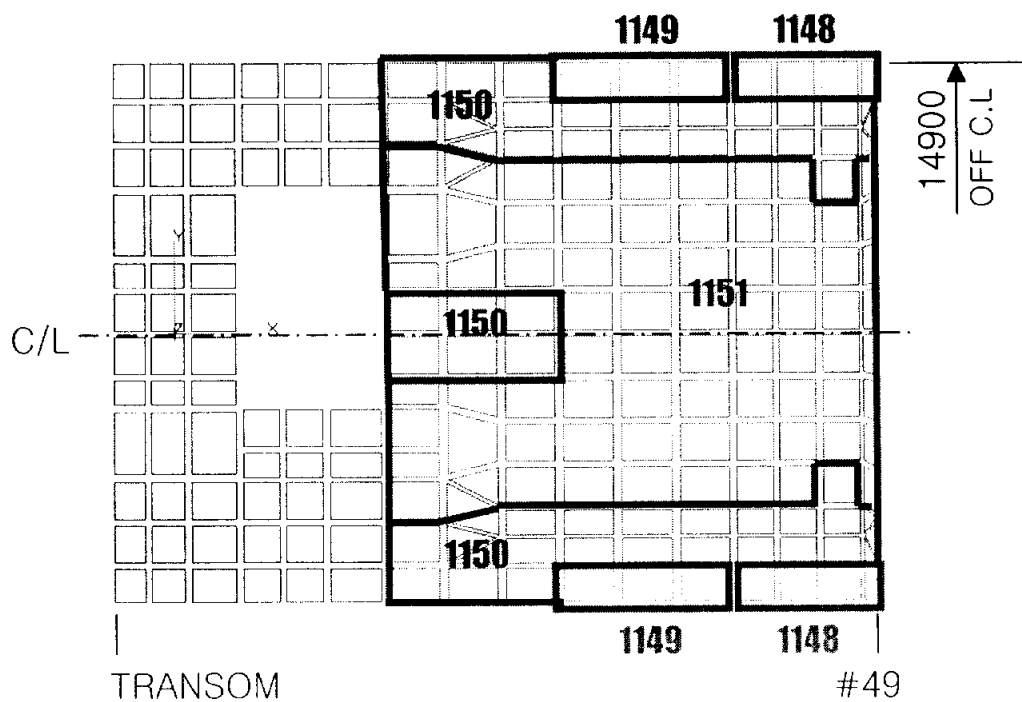


Fig. A.14 MAIN DECK PLAN

Table A.14 MAIN DECK PLAN

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1148	-2.02E-05	30.00	40.26	34.20
1149	-2.24E-05	22.30	21.17	-5.07
1150	-6.33E-05	15.80	20.48	29.60
1151	-1.60E-04	10.80	14.68	35.94

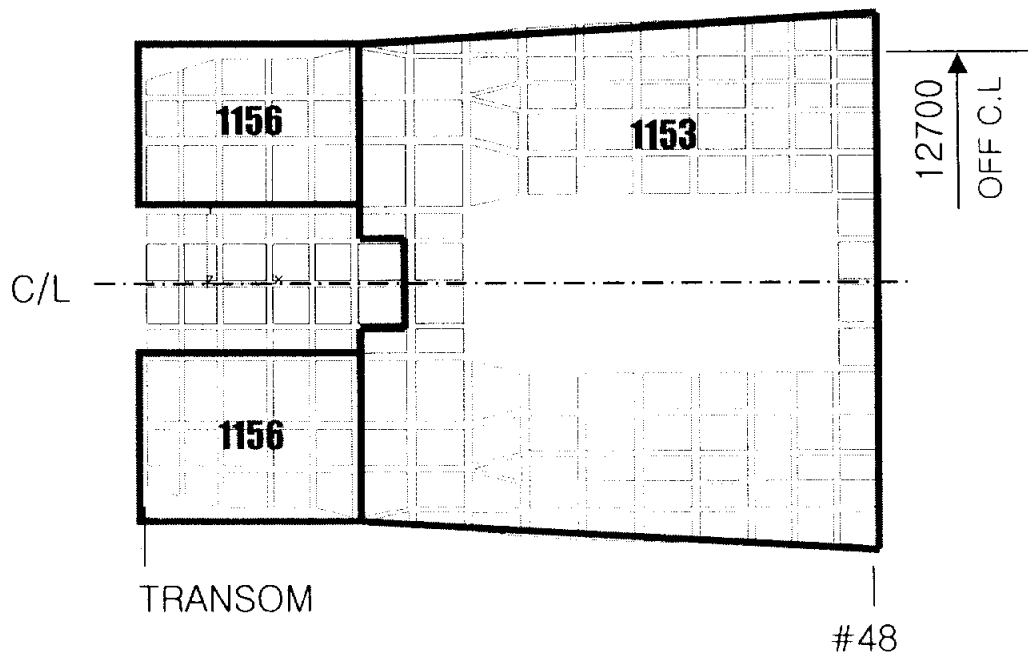


Fig. A.15 1ST P/F DECK PLAN

Table A.15 1ST P/F DECK PLAN

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1153	-8.83E-05	10.90	12.09	10.89
1156	-1.64E-05	10.90	10.29	-5.64

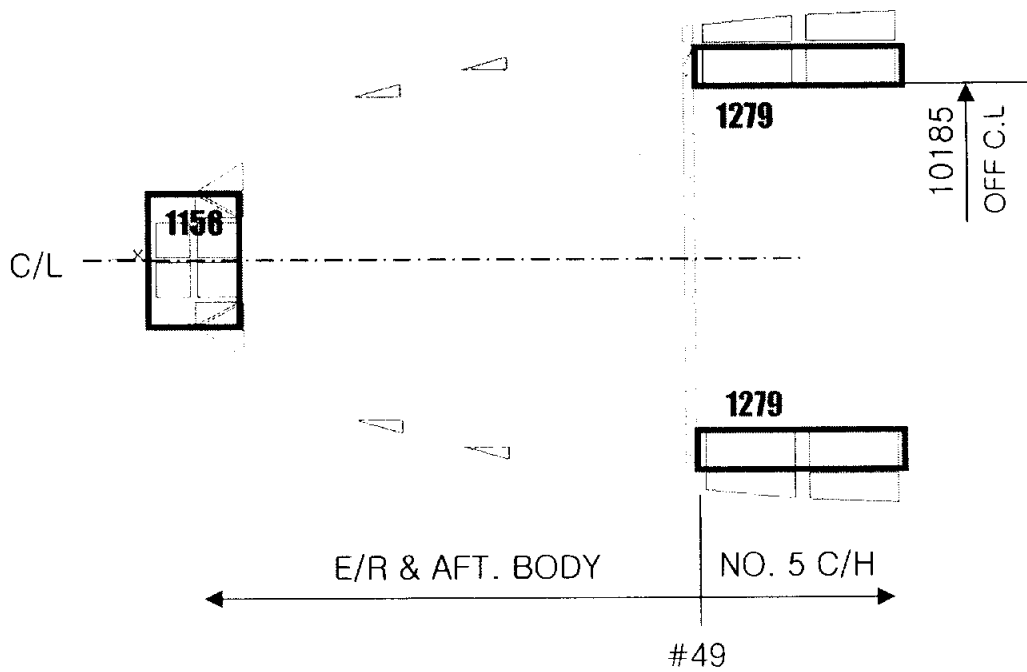


Fig. A.16 2ND P/F DECK PLAN

Table A.16 2ND P/F DECK PLAN

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1156	-1.64E-05	10.90	10.29	-5.64
1279	-4.07E-05	11.20	14.04	25.33

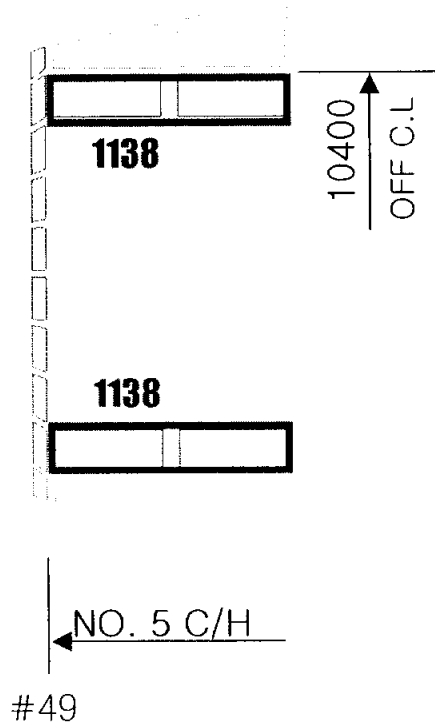


Fig. A.17 NO.3 STRINGER PLAN

Table A.17 NO.3 STRINGER PLAN

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1138	-2.72E-05	11.20	12.46	11.24

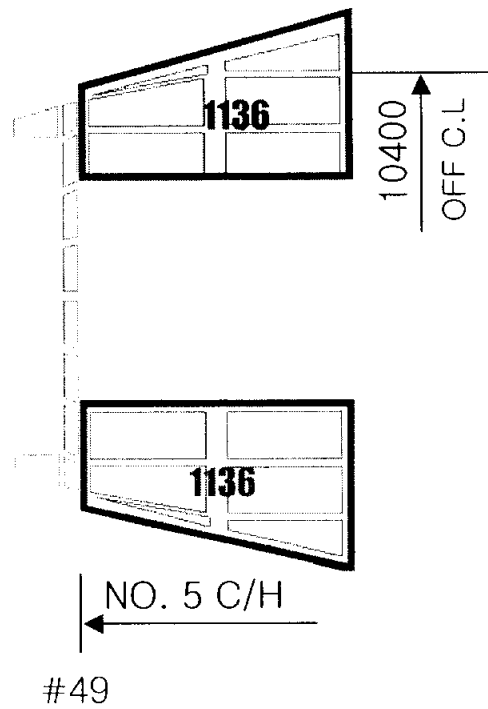


Fig. A.18 NO. 4 STRINGER PLAN

Table A.18 NO4. STRINGER PLAN

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1136	-4.41E-05	11.70	11.70	0.04

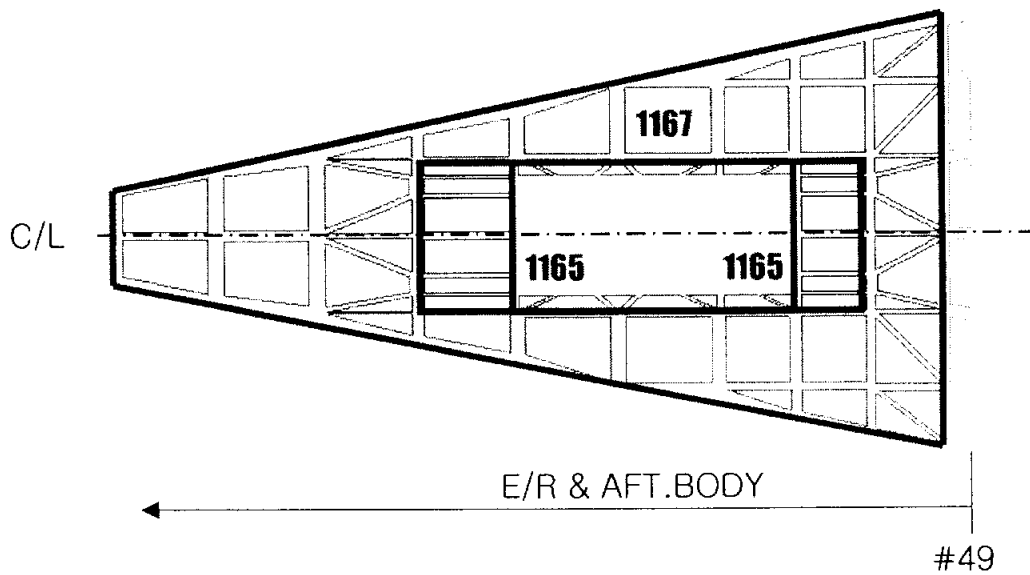


Fig. A.19 INN.BOTTOM

Table A.19 INN.BOTTOM

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1165	1.81E-05	30.00	35.79	19.30
1167	7.91E-05	14.00	12.65	-9.66

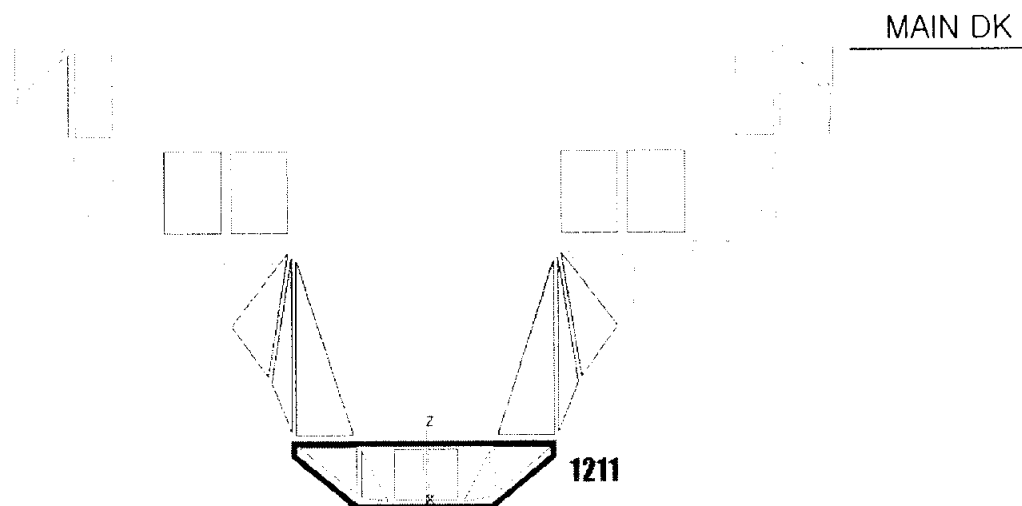


Fig. A.20 FR.35 SEC.

Table A.20 FR.35 SEC.

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1211	2.00E-05	77.00	74.66	-3.01

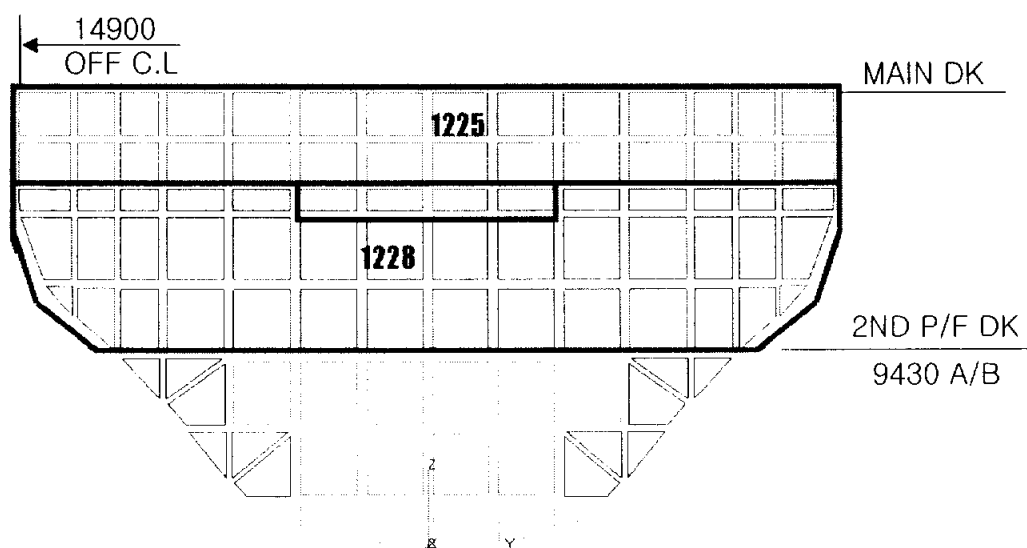


Fig. A.21 FR.48 SEC.

Table A.21 FR.48 SEC.

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1225	-1.68E-05	15.80	18.99	20.16
1228	-1.89E-05	12.00	11.30	-5.80

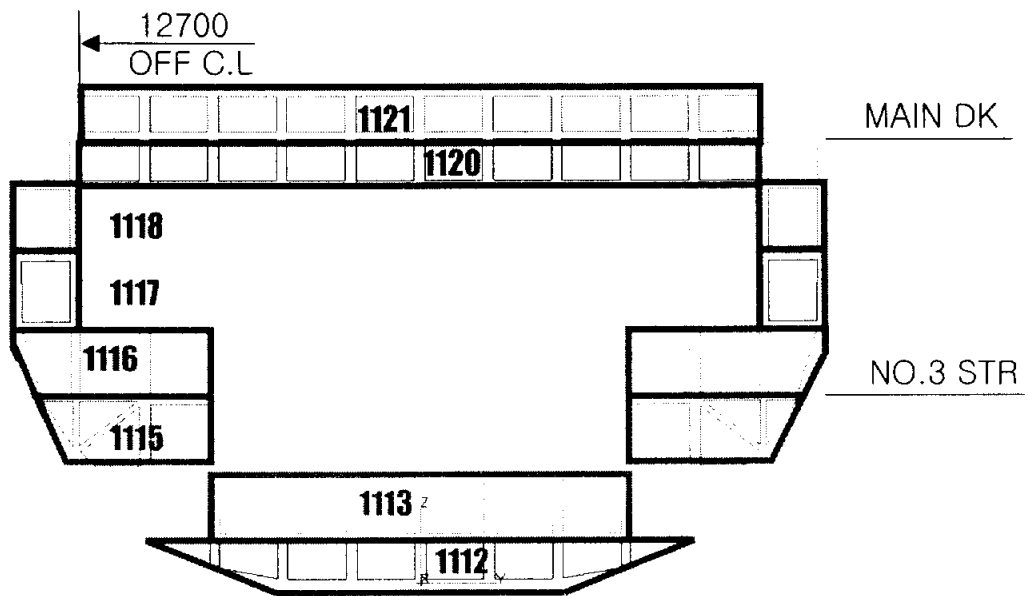


Fig. A.22 FR.65 SEC.

Table A.22 FR.65 SEC.

PSHELL ID	Sensitivity	Original value	Optimized value	Variation (%)
1112	-1.76E-05	25.00	24.07	-3.74
1113	-5.12E-05	25.00	31.05	24.22
1115	-5.32E-05	20.00	25.54	27.69
1116	-3.92E-05	20.00	18.66	-6.68
1117	-2.28E-05	20.00	27.82	39.09
1118	-7.71E-05	7.00	8.04	14.90
1120	3.91E-05	14.50	16.35	12.75
1121	6.04E-05	14.50	13.25	-8.64

감사의 글

먼저 부족한 저에게 많은 지도와 격려로 이 논문이 완성이 될 수 있도록 이끌어 주신 양보석 교수님의 은혜에 진심으로 감사 드립니다. 또한 본 논문의 완성도를 높이기 위해 많은 조언을 해 주신 배동명 교수님, 배성룡 교수님께 깊이 감사 드립니다.

전역 후 많은 꿈을 가지고 연구실에 들어와서 졸업하는 지금의 순간까지 저에게 관심과 도움을 주신 많은 분들께 감사 드립니다. 초콜릿과 김밥, 그리고 사랑을 항상 주시는 사모님, 열심히 하시는 안영공 교수님과 학부시절부터 많은 도움을 주시고 이끌어 주신 OB선배님들께 감사드립니다.

논문 연구에 많은 도움을 주신 대우조선 영모형, 준호형, 병욱형, 항상 실험실 일에 최선을 다하시는 영찬형, 저와 같이 졸업하시는 박사 용한형, 농구부 선배 영천형, 저에게 너무도 많은 도움을 주신 진대형, 포스콘 용민형, 색깔이 완전 다른 호일형, 용수형, 석사과정을 같이 생활해온 광진형, 종룡, 형은, 원우, 머나먼 타향에서 열심히 하는 한천부부, 현재 유일 석사 종덕, 매사 적극적인 3총사 민찬, 재감, 선화, 막내들 애희, 지옥에게 따뜻한 감사의 말을 전합니다.

대학생활에 있어 많은 것을 느끼게 해준 농구부 선·후배님들께 감사드리며, 농구와 인간관계 향상에 많은 도움을 준 우리두리 농구부 선·후배님, 고등학교졸업이후 항상 같이 하고 있는 Forever의 금천, 현철, 상문, 성훈, 우영, 근영, 남혁, 항상 도움만 받고 있는 성균, 같이하는 재희, 일본에 있는 경은, 짱게이 영길에게 고맙다는 말을 전합니다.

저를 알고 있는 모든 분들께 감사드리며, 언제나 희로애락을 같이 하며, 큰 힘이 되어준 그 분께 고마움을 전하고 싶습니다.

마지막으로 지금까지 맹목적인 사랑을 주시며, 항상 아들을 걱정하시는 아버지, 어머니 그리고 이제는 조금 어른스러운 동생 상현이에게 사랑한다는 말과 함께 이 논문을 바칩니다.

다시 한번 교수님과 사모님 그리고 실험실 가족들에게 감사드리며, 이 논문을 바칩니다.