

선박 구조 설계에서의 민감도 해석

이 재 환 <충남대학교 선박해양공학과>

1. 서 언

구조물 설계를 하는 엔지니어들은 70년대 이후 대부분 유한요소법을 사용하여 구조해석을 하고 있으며 구조물의 실제 응답치에 근접하는 해석값을 구할 수 있게 되었다. 부분적으로는 계측장비를 사용하여 구조물 변형을 측정하기도 한다. 이러한 CAE분야에 NASTRAN, ANSYS 등의 유한요소 코드와 CAD를 사용하여 다수의 요소로 된 선체 구조 모델링과 해석을 하고 있으며, 해석 이후 단계로 최적 구조설계도 시도하고 있는 실정이다. 주로 정적 응답이나 고유치에 대한 최적설계를 수행하며 여기에 민감도가 사용되거나 충분히 활용되지 않는 것 같다. 구조해석 결과만 사용해서는 설계 변경에 대한 방향을 예측하기가 어려우며 최적설계도 엔지니어의 경험이 반영되지 않으면 효과가 적다고 할 수 있다. 이때 민감도 해석과 interactive CAD를 도입함으로써 설계효과를 증진할 수 있겠다.

예로 선체 구조설계에서 유한요소법등으로 구조해석을 한 후 임의 부분의 정 혹은 동적 거동(변위나 응력)이 과도한 경우 설계자는 적절한 설계변경 방향을 설정해야 한다. 민감도의 개념이 없다면 오로지 설계자의 경험과 인지에 의존하게 되므로 복잡한 3차원 선체구조의 적합한 설계 변경이 쉽지않을 것으로 생각한다. 이때 선체구조의 민감도 값이 주어진다면 설계자는 설계변수인 부재의 두께등을 조절하여 과도한 변위나 응력을 감소시키는 정확한 설계변경을 시도할 수 있을 것이다.

2. 연구 경향

수송체 구조물의 경우는 대부분 보와 판 구조이므로 두께나 관성모멘트 같은 치수설계 변수로 구조성능 변화를 예측할 수가 있다. 최근 민감도해석이 Choi 그룹[1]에 의해 활성화 되기 전에는 주로 최적설계내 한 모듈로 인식되었고, 반해석법이 많이 사용되고 있다. 즉 유한요소법이 사용됨에 따라 in-house 코드에 반해석법을 도입하여 각종 최적화 문제에 적용하므로 민감도해석 연구는 많지 않은 실정이다. 대표적으로 Haftka[2][3] Choi[1][4-6], Aroara[7-9], Mroz[3] 등이 있으며, 특히 Choi 그룹 경우 범용성을 띤 코드 DSO(Design Sensitivity Analysis and Optimization)를 개발하고 있는 중이다. 선형구조해석에서 정적, 자유진동, 조화진동, 강제진동에 관한 치수민감도 해석은 Choi 그룹의 연속법에 의해 거의 정형화 되었으며 실질적인 구조에의 적용문제만 남아있다. Ford의 경우 연속법의 조화진동 민감도를 도입하여 수만 DOF 자동차 문제에 적용하여 좋은 효과를 얻고 있다. 국내에서의 선형민감도해석은 기계분야에서 광병만 등에[10] 의해 연속법에 기초한 형상문제의 선형과 비선형 분야 발표가 있고, 조선분야에는 김극천[11-13], 양영순[14], 이재환[4,6,15-20], 허주호[21], 김외현[22], 박석두[23]등이 있으며 정적, 자유진동과 조화진동에 관한 연구가 발표되어 있다.

선체진동의 경우, 저진동 선체개발을 위해서는 우선 효과적인 진동해석기법이 필요하며 이상화된 해석기법외에 근래에는 유한요소법이 주로 사용되고 있지만, 유한요소해석 결과만으로는 복잡한 선체구조의 설계변경 방향을 찾기가 어렵다. 이때 진동에 영향을 주는 설계변수가 정형화되고 진동변위와 설계변수의 상관관계인 민감도가 계산될 경우 이를 기

준으로 손쉽게 설계변경을 시도할 수 있다. 특히, 유한요소법을 사용할 경우 단순화된 구조물이 아닌 복합선체진동 해석을 수행하므로 이에 대한 민감도 해석을 수행할 필요가 있다. 즉, 진동특성에 민감한 설계 요소들의 민감도를 인지하는 과정이 필요하다고 볼 수 있다. 일반적 구조설계에 적용되던 진동특성에 관한 감도해석이 선체설계에 적용되기 시작하여 선체의 보 모델 (beam model) 감도가 해석적 방법으로[11], 해석가능한 구조계에 대해서는 전달 매트릭스법과 유한요소-전달매트릭스 방법에 의한 동특성 감도해석이 발표되었다[12,13]. 초기 설계시 보 모델이나 해석가능한 구조물 진동에 대해서는 이와 같이 해석적 방법이 유효하나, 복합선체진동이나 상부 구조진동의 경우 2~3차원 모델의 유한요소법이 사용됨에 따라 직접미분법, 보조변수법, 유한차분법 등이 적용될 수 있게 되었다[15]. 즉, 해석가능한 구조계에는 해석적 방법이, 설계변수가 매우 많은 경우에는 보조변수법이, 제한 조건식이 많은 경우에는 직접미분법이 유효하며 위의 방법들이 적용 불가능한 경우엔 유한차분법도 사용된다. 일 예로 유한요소법을 사용한 선투구조 고유진동수 해석에서 수백개의 막 요소 사용으로는 부족하여 2천개 정도의 요소를 사용한 내용이 소개되었다. 이와 같은 경우 각 요소 두께가 설계변수인 경우는 1개의 제한조건에 수천 개의 설계변수가 정의되며 이 경우 보조변수법의 사용이 필요하다고 볼 수 있다. 그러나 실제로 선박설계에 진동민감도 해석이 적용된 예는 많지 않고, 차량 등 수송체나 공작기계에 사용된 연구 발표가 있다.

기계분야에서 차량설계의 진동제어 설계는 크게 두가지로 분류되는데, 첫째는 주로 선형 스프링과 댐퍼를 이용한 엔진 마운트계 설계분야로 진동응답을 해석적으로 구한 후, 공진회피나 강제진동 저감을 위한 민감도를 구하고 있다. 스프링의 강성과 질량행렬을 구한 후, 대부분 Taylor 급수 1차 미분항으로 민감도를 계산한다. 둘째는 보와 판 요소로 차체부분을 스프링등으로 현가계(system)를 구성하여 유한요소법으로 공진회피, 진동저감 민감도를 구하는 방법인데 상용 유한요소코드에서 제공하는 민감도를 사용하는 경우가 대부분이다. 즉, 대형구조물에 대한 연구발표는 미비한 편이다. 송척기[24] 등은 자동차 현가계의 2자유도 1/4 선형역학모델을 진동수 영역에서 해석하고, 현가계의 질량과 강성을 설계변수로 하여 외력과 운동학적으로 가진된 계의 2×2 전달행렬(기계적 임피던스의 역수)에 대해 편미분으로 민감도를 산출하였으며, 민감도 함수로부터 얻은 정보로

승차감 향상을 위한 제어 파라미터를 선정하였다. 오재용[25] 등은 3개의 선형 스프링과 감쇠기로 모델링된 엔진마운트에 대해 유한차분법으로 감도해석을 한 후 스프링상수, 각도 등을 설계변수로 구조변경 시뮬레이션을 수행하였다.

진동 차체설계를 위한 민감도 해석적용 예로서 Ford 자동차 회사의 설계방향이 기술되었는데[16], 대형 유한요소 차체 모델에 NASTRAN으로 차체해석을, 현가장치해석은 회사 자체 프로그램으로 전체계의 진동특성을 구하고 이에 대해 민감도를 계산하는 과정이 소개되었다. 엔진 마운트계의 동특성을 규명하고 개선하는 연구가 최근 발표되었다[26]. 이러한 연구는 기존의 방향과는 상이하게 시스템의 동특성으로부터 계의 질량, 관성 제원, 스프링 상수값 등을 Taylor 급수 1차 미분항인 감도해석을 통하여 얻는 방법으로 반복계산을 수행하여 목적하는 동특성에 접근하는 방법이다. 대부분의 연구는 선형 스프링과 댐퍼를 사용하는 마운트계의 비교적 단순화된 모델에 대한 연구로서 복잡한 계에 대한 발표가 없으며, 구조물이 포함된 경우도 범용 코드에서 제공하는 민감도 값이나 유한차분법이 사용되고 있다. 기타 구조물에 대한 민감도 해석으로 프레스에 적용한 연구에서[23] 판 유한요소를 사용하여 강성, 질량 행렬을 구한 후 Taylor 급수의 1차 미분항으로 고유진동수, 고유모우드, 강제진동응답에 대한 민감도가 계산되어 기계의 최적화가 수행되었다. 국내에서 시도된 방법들은 주로 해석적 방법이어서 대부분 소규모 문제에 적용되어 왔다.

비선형문제의 치수민감도 해석에서 Arora등은[7] 선형민감도 해석 방법을 확장하여 이산화된 구조에 적용하기 시작하였고, Haftka와 Mroz[3]에 의해 재료비선형 문제에 시도되었다. 또한 Arora등은 이산화된 모델에 직접미분법을 사용하여 행렬식으로 민감도 공식을 유도하였으나 곱셈이 있는 요소에서 계산과정이 복잡해진다. 이들은 이러한 결과를 ADINA에 적용해 보았다[8]. 연속체 모델로부터 일반적인 비선형 구조물의 민감도를 취급한 것은 Choi등이었다[27,28]. Arora등은[9] 선형 및 비선형, 치수 및 형상 설계 등에 대한 보조계를 구성하여 통합화된 민감도식을 제시하였고, Tortorelli [29]도 이러한 문제의 설계민감도를 구하였다.

형상설계민감도 해석은 구조형상이 변화할 때 제한함수의 변화량을 구하는 것이 목적이다. 최적화 문제 경우 해석대상인 연속체의 형상이 변화하기 때문에 시스템을 기술 상태방정식에서 경계조건의 영역

이 변하게 된다. 형상민감도 해석방법은 크게 2가지 방법으로 분류될 수 있다. 첫째, 연속체의 형상을 이산화하여 유한요소 절점으로 정의하고 이를 변수화한 후 제한함수에 대한 미분(유한차분사용)으로 부터 민감도를 구하는 방법이 있다. 그러나 유한차분적 접근은 수치적측면과 정확성에 문제점이 있기 때문에 연속체적 관점에서 형상설계민감도 해석을 수행하는 방법이 있다. 즉, 연속체 역학에서 사용되는 각종 함수의 형상변화를 속도장으로 정의한 다음 이를 이용한 전미분 개념을 적용하거나, 영역변수화방법(domain parameterization)을 이용하였다. 국내에서는 광범만 등에 의해 정적 선형문제가 발표되기 시작하여 비선형문제의 연구가 진행되고 있다. 국외 경우, Choi [1,30,31]등에 의해 형상민감도가 발표되고 있다. 형상민감도 해석의 경우 복잡한 형상의 실제문제에 적용할 때 속도장을 정의하는 문제, 형상을 parametric representation 하는 과정을 일반화하는데 어려움이 있다. 형상문제의 기하학적 비선형 경우는 변형전과 변형후 물체의 좌표가 다르게 되므로 기존의 민감도해석 기법보다는 새로운 수식의 기법화가 요구된다고 볼 수 있다.

3. 민감도 해석 방법

민감도 해석 방법에는 유한차분법(Finite Difference), 연속법(Continuum DSA), 반해석법(Semi-analytical DSA)등이 있으며 정·동적 하중, 고유치등의 선형과 비선형 문제에 적용된다. 풀고자 하는 문제가 명확하게 함수 형태로(Explicit form) 주어진 경우는 미분하여 민감도를 계산하나 대부분의 공학문제에서는 변위나 응력등의 Implicit form을 취급하므로 민감도 계산과정이 간단하지 않다. 민감도란 설계변수의 변화에 대한 구조물의 응답의 변화율이며 구조물의 응답이 설계에서 주로 제한 조건식이 된다. 여기에는 정·동적 변위와 응력 및 속도, 가속도, 고유치, 고유변위 등이 있으며 설계변수는 치수, 형상등이 있다. (민감도는 대부분 1차 미분을 의미함으로 적절한 범위내에서 설계변수를 변경할 때 제한조건이 어느정도 감소하는지를 예측할 수 있다.) 해석 방법은 [11-12] [15-20]등이 참조될 수 있다.

4. 민감도 값의 활용

CAD/CAM 이라는 용어는 이제 귀에 익숙해졌고

많이 보급돼 사용되고 있으며 CAD, CAM, CAE, Database를 통합한 CIM (Computer Integrated Manufacturing) 예로 선박해양연구센터의 전산설계생산자동화 시스템 들 수 있다. 구조해석용의 다양한 S/W(Software)와 H/W(Hardware)를 이용하여 모델링, 구조해석, 민감도해석, 최적설계를 하는 과정을 좀 더 효율적으로 수행하기 위하여 다음과 같이 Choi등에 의해 DSO라는 software로 개발되고 있는 과정을 (4단계로된 CAD과정) 소개해 본다. 주목적은 자동화된 과정, 설계자의 경험 반영, 계산 시간 감소, 최적설계에 대한 확신등을 확립하는데 있다.

4.1 Sensitivity Display

전통적으로 최적설계 방법에서 민감도를 계산하되 단지 미분치로써 Black-box식으로 사용하고 있으나 민감도는

- (1) 구조물 응답에 가장 결정적인 영향을 주는 설계변수들이나
- (2) 특정한 변수에 의해 가장 영향을 받는 구조물 응답들에 대한 상관관계 정보를 제공해 주고 있다.

엔지니어에게 이러한 긴요한 내용을 제시해 주는 데는 컬러를 이용한 컴퓨터 표현이 가장 효과적이다. 색상으로 표현되는 민감도 크기와 음·양의 방향을 이용하여 엔지니어는 설계변경을 시도할 수 있다.

4.2 What-if

설계 과정에서 "What-if"는 항상 존재하고 있다. 이러한 부분을 변경하면 고유치가(eigenvalue) 어떻게 바뀔까? 임의 부분의 과도한 진동이 감소될런지? 등등 설계자는 항상 의문점을 갖고 설계를 하거나 설계변경을 시도할 때 마다 새로운 구조응답을 유한요소법 등을 사용해 계산해야 하므로 낭비라 할 수 있다. 신속한 구조응답 예측을 위해서는 효과적인 재해석 기술이 필요하며 이에 Taylor series expansion을 고려할 수 있다. 여기에 민감도가 사용되어 설계변수 변경에 대한 새로운 구조응답치가 산출된다. 즉, 민감도값에 설계변수 변화량을 곱하면 구조거동 변화량이 계산되므로 유한요소 재해석이 필요 없는 것이다.

4.3 Trade-off

일 예로 변위는 제한조건 근처에 있어 만족한 상태이나 임의 부분의 응력이 과다하여 설계변경을 도모

하고자 한다. 이때 엔지니어는 현상태의 변위를 유지하고 응력을 감소시키기 위하여 어느만큼 설계변수를 변경해야 할지를 계산할 수 있다(계산량이 과다한 재해석 없이도). 이 경우에도 What-if 처럼 이미 계산돼 있는 민감도 값을 사용한다. 다음과 같이 분류될 수 있다.

- (1) cost reduction with a feasible direction
- (2) constraint correction neglecting cost
- (3) constraint correction at constant cost
- (4) constraint correction with specified cost increment

4.4 Interactive Computer Aided Optimal Design

지난 20여년간 최적구조설계에 있어 상당한 발전이 있었으나 충분히 활용되지 못하고 있다. 대부분 최적설계에서 민감도 해석을 수행하여 자동적인 반복 계산을 수행함으로써 최적화 과정에 사람의 판단 즉 설계자의 간섭이 있을 수가 없었다. 이러한 과정에는 2가지 큰 문제점이 있게 된다. 첫째, 최적설계 형식화에서 설계자는 모든 중요한 제한조건, 목적함수와 그리고 설계변수등을 정의하나 실구조물의 사용에는 수많은 trade-off가 존재하며 어느 경우엔 문제 형식화 초기에 예측치 못했던 제한조건이 최적화 과정중에 중요한 장애가 될 수도 있다. 또한, 아무리 문제가 잘 정의돼도 대부분의 반복계산 최적화 방법에서는 알고리즘의 파라미터 선정에 상당한 주의를 요하고 있다. 대부분의 구조최적 설계는 비선형 문제나, 발산하거나 쓸모 없는 국부적 최소치에 도달하기도 한다. 새로 개발되는 방법들은 더욱 안정된 방법이라 더욱더 다수의 반복계산을 요구하므로 컴퓨터 계산낭비가 발생한다. 따라서 이러한 문제점들은 상기한 Sensitivity Display, What-if, Trade-off등을 이용하여 해결할 수가 있다. 이러한 interactive CAD 시스템에 의하여 엔지니어는 경험과 인지를 활용하여 대체 방법을 찾고 초기 설계과정에서 새롭게 문제를 재정의 할 수도 있다.(근래 외국에서의 설계 방향은 초기설계에 비중을 크게하고 있다.)

이렇게하여 점진적으로 개선되는 과정을 통하여 반복 계산되는 최적화 알고리즘에 대하여 확신을 갖게 되고 계산량을 감소시킬 수 있다. 이와같이 효과적인 구조설계를 위해서는 민감도 계산, 최적화 계산과 더불어 CAD 시스템 생성이 필요하며 사용목적에 적합하게 User-Interface개발도 시도되어야겠다.

대부분의 H/W와 S/W가 외국 제품이라 고가이고 program을 용도에 맞게 적절히 변경못하는 문제점이 있어 국산화가 요구되며 CSDP 개발은 이 분야의 선도적 역할을 하고있다.

5. 선박구조 민감도 계산 예제

구조해석에서 해석 여건에 따라 봉과 막으로 간략화된 구조나 굽힘 변형이 고려된 보와 판구조로 해석을 한다. 일례로 선체구조에서 거어더를 막이나 판으로 혹은 보로 간주하여 해석을 한다. 봉/막 구조해석은 계산시간이 저렴하고 전체적 거동 예측에 도움이 되나 국부적 응력 설계에는 판부재 사용이 요구된다. 복합 구조물은 봉, 보, 막, 판 요소로 구성되므로 이러한 각 부재에 대한 민감도 계산과 검증이 필요하며 다음 단계로 3차원 선체 복합 구조물에 대한 민감도 계산이 필요하다. 연속법에 의해 단순화된 선박해양 구조물에 대해 수행된 민감도 예제는 다음과 같다. Truss, beam, plate/membrane과 선박구조물에 대하여 ANSYS와 NASTRAN으로 구조해석을 한 후, 민감도 해석이 수행되었으나 해결해야할 과제는 실제 선박설계에 적용, 실용화 하는데 있다.

5.1 정적 구조의 민감도

본 문에 사용된 구조물들은 실제적 구조변경을 위한 것이 아니고 민감도해석이 선형구조해석 범위에서 수행됨을 보이기 위한 것이라 하중과 구조물치수는 임의의 값이 부여되었다. 사용된 물성치는 탄성계수 $E=2.1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, $\nu=0.3$, 밀도= 7850 kg/m^3 이며, 구조해석 후 최대변위에 대해 각 요소의 치수인 설계변수와의 상관관계(미분치)인 민감도가 계산된 후 민감도의 정확성과 변위 감소, 증가에 어느정도 영향을 주는 가를 인지하는데 연구목적이 있다.

예제에서 민감도는 Ψ' 로 표시되고 정확도는 유한차분법에 의한 결과 $\Delta \Psi$ 와 비교함으로써 입증되었다. Ψ' 는 각 변수의 민감도에 변분치 δu 를 곱하여 합산된 값이고 $\Delta \Psi = [\Psi(u + \delta u) - \Psi(u - \delta u)] / 2$ 로서 유한차분법으로 계산된 민감도 값이며 $\Psi(u + \delta u)$ 는 모든 변수가 1% 증가된, $\Psi(u - \delta u)$ 는 1% 감소된 구조해석 결과이다. $\Psi' / \Delta \Psi$ 가 100% 임은 연속법에 의한 민감도가 유한차분법 결과가 일치함을 의미한다.

Fig. 1의 봉 구조물은 해양구조물, helicopter tail boom, tower등으로 사용되는데, 구조 한말변의 길이는 높이의 0.14이며 단면적은 높이의 0.005

이다. 상부와 중간에 임의의 하중, F_x 는 +1.4703과 -1.4703, F_y 는 1.6918과 -1.3658, F_z 는 -0.14 N이 작용할 때 최대변위 $U_y=0.258E-03$ 는 상단에서 발생한다. 이 때 설계변수는 구조물을 구성하는 108개 봉요소의 단면적이어서 이에 대한 민감도 값이 계산되었다. 전혀 민감하지 않은 부위도 있어 전체 설계변수의 민감도 보다는 4개의 기둥 중 1개를 선택하여 기둥을 구성하는 봉요소 6개의 민감도가 Table 1에 나타나 있다. 예상할 수 있는 것처럼 경계조건인 하부쪽 요소의 민감도가 제일 큰것을 알 수 있다.

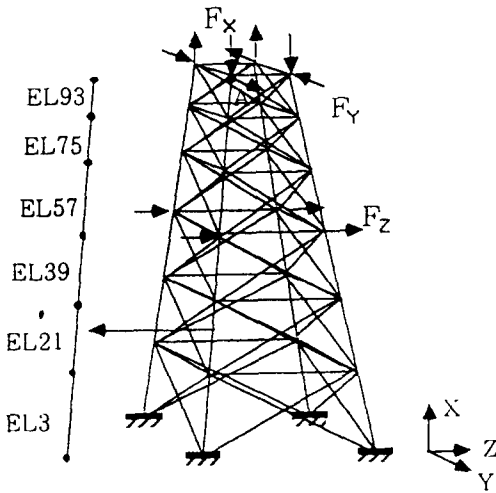


Fig. 1 Truss structure

Table 1 Design sensitivity of column of truss structure

Element number	Sensitivity of element
3	-0.4793E-05
21	-0.4695E-05
39	-0.3991E-05
57	-0.2881E-05
75	-0.1522E-05
93	-0.4126E-06

Fig. 2의 판부재 경우 설계변수는 각 판요소 두께로 총 100개가 된다. 정사각형 부재의 두께와 길이의 비는 0.01이며, X 방향 외력에서 membrane 해석, Z 방향 외력으로 plate 해석 후, A점에서 X,Z 방향 최대변위 $U_x=-0.0486E-04$, $U_z=0.988$ 를 확인하고 이에 대한 민감도 값을 계산하였다. Table 2에 최대변위 U_z 에 대해 판의 가장자리 요소 1~10

번과 중심부분 요소 41~50 번의 민감도가 있으며 전체요소의 민감도를 Fig. 3과 같이 표시하였다. 지지점으로 갈수록 민감도는 음수이고 값이 커지며, 끝 자유단에서는 값이 작음을 알수있다.

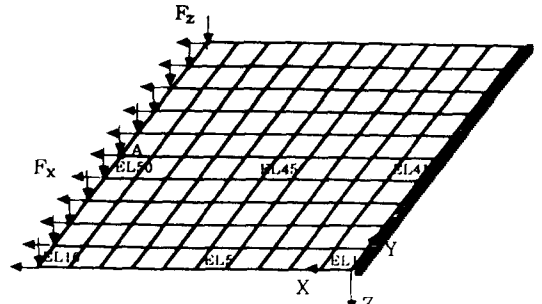


Fig. 2 Plate structure

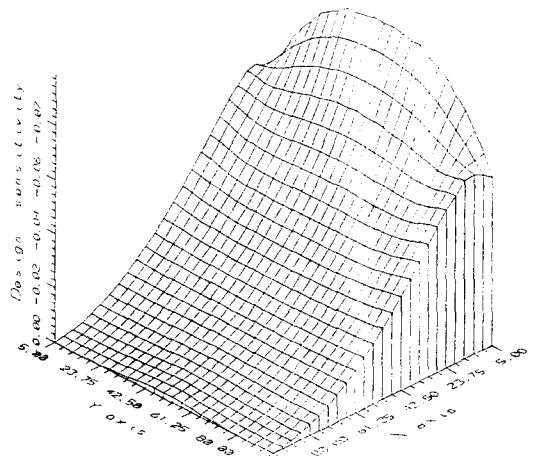


Fig.3 Design sensitivity plot of plate structure

Fig. 4에 56개의 ANSYS 판요소(STIF63)와 36개의 보요소(STIF4)로 구성된 3차원 선체구조가 있다. 단순하지만 이와같은 모델에 대한 민감도해석은 요소수가 매우 많은 실제 구조물에서의 준비과정이라 할 수 있다. 선체하부의 중앙선과 bilge 부의 외측선을 따라 단순지지된 경계조건이 주어졌고 사용된 물성치는 탄성계수 $E=2.1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, $\nu=0.3$, 밀도 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ 이다. 하중은 그림에 표시된 바와 같이 상갑판 네곳에 200 N이 가해졌고, 구조치수는 m 단위로, 높이 50, 길이 50, 반폭 40, 굽힘관성 모멘트 10.26이며, 단위 두께가 사용되었다. A점에 발생하는 최대변위 $\Psi(u)$ 에 대해 각 판요소 두께와 보요소 굽힘강성도가 설계변수 u 로 민감도가 계산되었다. 각 설계변수의 민감도가 Ψ_i' 일때, 이를 바탕으로

Table 2 Design sensitivity of plate structure

Element number	Sensitivity of element	Element number	Sensitivity of element
1	-0.0570	41	-0.0912
2	-0.0616	42	-0.0673
3	-0.0524	43	-0.0496
4	-0.0405	44	-0.0363
5	-0.0291	45	-0.0259
6	-0.0193	46	-0.0177
7	-0.0114	47	-0.0113
8	-0.0056	48	-0.0066
9	-0.0018	49	-0.0034
10	-0.87E-05	50	-0.0018

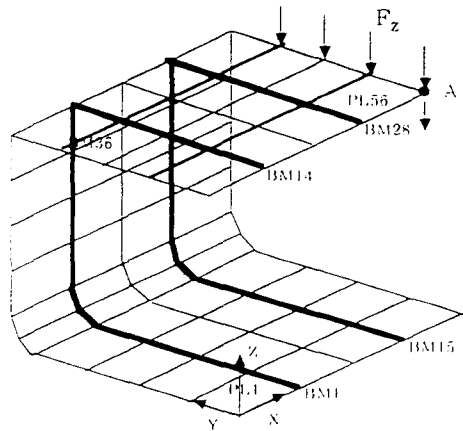


Fig.4 Ship structure with plate and beam elements

로 설계변수 변위 변화를 예측할 수가 있다. 즉, 각 변수의 민감도 Ψ'_i 에 변수 변화량 δu_i 를 곱하여 합하면 (즉, $\Psi' = \sum_{i=1}^{92} \Psi'_i * \delta u_i$) 변위 변화량 $\delta \Psi$ 가 계산된다.

Table 3에는 구조별 최대변위에 대한 민감도가 계산되어 유한차분 결과에 의해 정확도가 검증되었다. A점의 최대처짐 $\Psi(u) = -0.2798$ 에 대해 각 판요소 두께와 보요소 굽힘 강성도가 설계변수(u)로 민감도 Ψ' 가 계산되어 Table 6에 있으며 정확도는 유한차분 결과 $\Delta \Psi$ 와 비교되었다. 이 Table 3에서 다음 내용을 알 수가 있다.

Table 3 Design sensitivity information ship structure

Ship structure	$\Psi(u)$	$\Psi(u+\delta u)$	$\Delta \Psi$	Ψ'	$\Psi'/\Delta \Psi$ (100%)
Beam part	-0.2798	-0.2782	0.161E-02	0.161E-02	100
Plate part	-0.2798	-0.2765	0.336E-02	0.335E-02	100

- 전체 보요소 강성도를 1% 증가시킬 경우 최대변위는 $\Psi' = 0.161E-2$ 만큼 변화하여 -0.278로 감소됨을 알 수 있다.(이 경우 변위는 0.57% 감소)
- 전체 판요소 두께를 1% 증가시킬 경우 최대변위는 $\Psi' = 0.335E-2$ 만큼 변화하여 -0.2765로 감소한다.(이 경우 변위는 1.2% 감소)
- 이 결과를 얻기 위한 재해석은 제한함수 (최대변위) 수인 1회이나 유한차분법에 의해서는 이론상으로 92번의 재해석이 필요하다. 보의 강성도 변수 36개, 판두께 변수 56개에 대해 각각의 재해

석이 필요하기 때문이다. 본 문 의 연속법에 의해서는 제한함수 갯수, 유한차분법 경우엔 설계변수 만큼의 재해석이 필요하기 때문이다[1].

동적문제의 민감도 해석에서 해석적 방법은 허영철[11], 조대승[12], 허주호[21]에 의해, 연속법은 이재환[16-18][20]에 의한 논문등이 있다.

6. 결론

본문에 소개된 민감도해석 결과로서 다음과 같은 내용을 인지할 수 있다.

구조해석에 범용 유한요소코드 ANSYS와 NAS-TRAN을 사용하고, 민감도 계산이 수행되므로 복잡한 모델에도 민감도 해석을 적용할 수 있다. 그리고 정확한 유한요소의 민감도가 산출되므로 적은 계산량으로 구조재해석을 수행할 수 있고 범용 유한요소 코드에 의한 대형 구조물의 유한요소해석과 연결된, 체계적인 민감도 해석의 기초가 될 수 있다. 3차원 구조물에서 요소에 정의된 각 설계변수가 변형감소에 기여하는 정도가 수치적으로 나타남으로써 설계방향 결정에 사용될 수 있다. 그러나 간과할 수 없는 점은 거대규모 선체구조설계에 적용시 정확하고 효과적인 값을 얻을 수 있는지? 변위, 응력등 제한조건이 많을 때, 민감도를 이용한 구조재해석이 용이하게 수행될 수 있는지? 아니면 설계방향을 결정하는데 도움을 주는 guide로 단지 생각할 것인지? 그러나 일단 설계민감도해석 기법의 확립과 활용이 선체구조설계에도 구현되어 외국처럼 설계자의 궁극증을 풀어주고 고객(선주)의 구조설계에 대한 신뢰감을 확보하는 역할을 하였으면 한다. 한걸음 더 나아가 대

부분 정적 변위 문제보다 진동, 소음이 심각하므로 극심한 진동제어를 위해서는 유한요소해석과 민감도 해석을 통하여 필요한 부분을 보강하거나 수정하고, 축계진동 제어를 위하여 지지점의 댐핑특성 변경을 시도하는 것도 설계의 한 방법이겠다.

한편 구조설계민감도해석, 최적설계 그리고 interactive CAD 시스템의 필요성에 대하여 살펴보았다. 근래에 조선소나 연구소(CSDP)에서 구조해석, 설계등에 User-Interface 개발이 활성화 되고있고 고무적이다. 컴퓨터와 software의 발달에 힘입어 외국에서는 구조설계분야에 이와같이 새로운 개념들이 개발되고 있는 실정이다. 우리도 컴퓨터를 사용한 설계 자동화분야에 더욱 관심을 갖고 일진해야 하리라고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Haug, E. J., Choi, K. K., and Komkov, V., Design Sensitivity Analysis of Structural Systems, Academic press, New York, 1986.
- [2] Adelman, H. M. and Haftka, R. T., "Sensitivity Analysis for Discrete Structural Systems," AIAA Journal, Vol. 24, No. 5, pp.814-831, May 1986.
- [3] Haftka, R.T. and Mroz, Z., "First and Second-order Sensitivity Analysis of Linear and Nonlinear Structures, AIAA J., Vol. 24, No. 7, 1187-1192, 1986
- [4] Dopker, B., Choi, K.K., Lee, J.H., "Design Sensitivity Analysis using EAL: Part1. Conventional Design Parameters," Technical Report 86-2, CAD U.of Iowa, 1986
- [5] Choi, K.K. and Seong, H.G. "Design Component Method for Sensitivity Analysis of Built-up Structures", J. of Structural Mechanics, Vol. 14, No.3, PP.379-399, 1986
- [6] Choi, K.K. and Lee, J.H., "Siring Design sensitivity Analysis of Dynamic Frequency Response of Vibrating Structures", ASME Design Automation, 1989.
- [7] Wu, C.C. and Arora, J.S., "Design Sensitivity Analysis and Optimization of Nonlinear Structural Response using Incremental Procedure", Computer & Structure, Vol. 32, 123-133, 1987.
- [8] Arora, J.S., and Cardoso, J.B., and Arora, J.S., "A Design Sensitivity Analysis Principle and its Implementation into ADINA", Computer & Structure, Vol. 32, 691-705, 1987.
- [9] Cardoso, J.B. and Arora, J.S., "Variational Method for Design Sensitivity Analysis in Nonlinear Structural Mechanics", AIAA J., Vol. 26, No. 5, 595-603, 1988
- [10] Choi, J.H. amd Kwak, B.M., "Boundary Integral Equation Method for Shape Optimization of Elastic Structure", Int. J. for Numerical Methods in Engr., Vol. 26, 1759-1595, 1988.
- [11] 허영철, 정태영, 김극천, "선체 저차 고유진동수의 감도", 대한조선학회 논문집, 제 28권 제 1호, 1991, 4.
- [12] 조대승, 김극천, "전단 매트릭스법 및 유한요소-전달 매트릭스 결합방법에 의한 구조계의 동특성 감도해석", 대한조선학회 논문집, 제29권 제1호, 1992, 3.
- [13] 조대승, 전달 매트릭스법 및 유한요소-전달 매트릭스 결합방법에 의한 구조계의 동특성 감도해석", 서울대학교 공대 박사학위논문, 1991.
- [14] Yang, Y.S and Kim, J.H., "Design Sensitivity and Reliability Analysis of a Transverse Ring Structure in an Oil Tanker", 임상전교수, 정년퇴임기념 논문집, 1992.
- [15] 이재환, "설계 민감도 해석", 대한조선학회지, 제28권 제3호, 1991, 9.
- [16] 이재환, "저 진동 자동차 설계를 위한 민감도 해석 활용", 한국자동차공학회, 차체 차량 동력학 부문 학술 강연 초록집,

- 1992, 5.
- [17] 이재환, 이광한, "설계민감도를 이용한 선체구조물의 조화진동저감", 대한조선학회, 춘계논문발표회, 1993, 4.
- [18] 이재환, 장강석, 이광한, "단순구조물의 고유진동수에 대한 민감도해석", 대한조선학회, 추계논문발표회, 1993, 11.
- [19] 이재환, 박근형, "연속법을 이용한 정적구조변위응답의 설계민감도 해석", 충남대학교 산업기술연구소 논문집, 8권 2호, 1993.
- [20] 이재환 "수송체 구조물의 진동특성에 관한 설계민감도해석", 한국전산구조공학회, 논문집 7권 1호, 1994.
- [21] 허주호, "동특성 민감도 합성법과 그 응용", 대한조선학회 논문집, 제29권 제2호, 1992, 5.
- [22] 김외현, 박종우, 조상래, 선체구조의 정적재설계 기법, 대한조선학회 논문집, 29권 2호, 1992, 5.
- [23] 박석주, 오재응, Nagamatsa Akio, "감도해석 기법에 의한 구조물의 진동 특성의 최적화에 관한 연구", 한국소음진동공학회, '91추계학술대회논문집, 1991, 11.
- [24] 송척기, 박호, 오재응, 염성하, "민감도 해석에 의한 자동차 현가 장치의 성능 개선에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, PP. 1464-1473, 1990
- [25] 오재응, 이정윤, 강희종, 최상렬, "엔진 마운트계의 동특성 개선을 위한 공유모드 감도해석 및 구조변경", 대한기계학회, 추계학술대회논문집, 1991, 11.
- [26] 오재응, 최상렬, 조준호, 이정환, 박호, "감도해석법을 이용한 엔진 마운트계의 동특성 규명 및 개선", 한국소음진동공학회, '92추계학술대회논문집, 1992, 11.
- [27] Choi, K.K. and Santos, J.L.T., "Design Sensitivity Analysis of Nonlinear Structural Systems Part 1: Theory", Int. J. for Numerical Method in Engineering, Vol. 24, 2039-2055, 1987
- [28] Santos, J.L.T. and Choi, K.K., "Sizing Design Sensitivity Analysis of Nonlinear Structural Systems Part 2: Numerical Method", Int. J. for Numerical Method in Engineering, Vol. 26, 2097-2114, 1988
- [29] Tortorelli, D.A., "Sensitivity Analysis for Nonlinear Constraint Elastostatic Systems", in S. Saigal and S. Mukherjee (eds.), Sensitivity Analysis and Optimization with Numerical Methods, ASME, NY, 115-126, 1990
- [30] Choi, K.K. and Haug, E.J., "Shape Design Sensitivity of Elastic Structures", J. of Struct. Mechanics, Vol. 11, No. 2 231-269, 1983.
- [31] Yao, T.M. and Choi, K.K., "3-D Shape Optimal Design and Automatic Regridding in Shape Design Sensitivity Analysis", Sensitivity Analysis in Engr., NASA Conference Publication, 329-345, 1987.
- [32] Chang, K.H. and Choi, K.K., "A Geometry Based Shape Design Parameterization Method for Elastic Solids", Mechanics of Structures and Mechanics, Vol. 20, No. 2, 215-252, 1992.