

설계 민감도 해석 (DSA : Design Sensitivity Analysis)

- Interactive Computer Aided Design -

이 재 환
〈충남대학교 교수〉

〈목 차〉

1. 서 언
2. 민감도 해석 방법
3. 민감도의 활용
4. 4-STEP Interactive Computer Aided Design
5. 결 언

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, ANSYS등의 유한요소 코드와 CAD를 사용하여 다수의 요소로 된 선체 구조 모델링과 해석을 하고 있으며, 해석 이후 단계로 최적 구조 설계도 시도하고 있는 실정이다. 주로 정적 응답이나 고유치에 대한 최적설계를 수행하며 여기에 민감도가 사용되나 충분히 활용되지 않는 것 같다. 구조해석 결과만 사용해서는 설계 변경에 대한 방향을 예측하기가 어려우며 최적설

계도 엔지니어의 경험이 반영되지 않으면 효과가 적다고 할 수 있다. 이때 민감도 해석과 interactive CAD를 도입함으로써 설계효과를 증진할 수 있겠다.

공학분야에서 설계 민감도란 설계변수(design variable)의 변화에 대한 구조물 응답(structural response)의 변화율을 나타낸다. 민감도의 크기는 구조물의 어떤 설계변수 혹은 파라미터가 요구되는 조건에 어느정도 민감한(sensitive)지 그 정도를 나타내며 부호는 설계변수의 증·감 방향을 지시해 준다. 민감도는 또한 최적 설계 수행시 필요한 값이므로 정확하고 효과적인 민감도 산출이 필요하다.

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 생각된다. 이때 선체구조의 민감도 값이 주어진다면 설계자는 설계변수인 부재의 두께등을 조절하여 과도한 변위나 응력을 감소시키는 정확한 설계변경을 시도할 수 있을 것이다. 또한 축계 진동을 제어하기 위하여 적절한 축계 단면 크기나 지지점의 위치를 찾아낼 수도 있게된다.

2. 민감도 해석 방법

민감도 해석 방법에는 유한차분법(Finite Difference), 연속법(Continuum DSA), Discrete 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 구조물 응답의 변화율이며 구조물의 응답이 설계에서 주로 제한조건식이 된다. 여기에는 정·동적 변위와 응력 및 속도 가속도, 고유치, 고유변위 등이 있으며 설계변수로는 다음과 같다.

(민감도는 대부분 1차 미분을 의미함으로 적절한 범위내에서 설계변수를 변경할 때 제한조건이 어느정도 감소하는지를 예측할 수 있다.)

설계변수의 종류

*Size(치수) : 보의 단면적, 강성도, 단면특성, 판재의 두께, 스프링 상수 등.

*Shape(형상) : 축계 지지점의 위치 변화, 2차원 및 3차원 형상의 변화.

*Material : Young's Modulus, 뎀핑상수, 밀도 등.

*Configuration : 부재의 형상 변화에 회전 등이 포함될 경우.

*Topology : 보, 판재 등의 부재가 첨가, 제거되는 경우

변수의 종류에 따라서 Size DSA, Shape DSA, Configuration DSA 등으로 분류한다. 예로서 Size DSA의 경우 미분(derivative)이나 변분(variation)을 취함에 따라 민감도 산출방법이 다르며 각 방법을 간략히 설명하면 다음과 같다.

** 부호표시

b : 설계변수 벡터

z(b) : 구조물 거동 응답 (예 : 변위)

\bar{z} : Virtual displacement

K(b) : 강성매트릭스

F(b) : 외력

K(b) · z = F(b) : 유한요소법 기본식

$a_u(z, \bar{z}) = l(\bar{z})$: Variational Governing Equation

2. 1 유한차분법

1) 현재 설계변수 b에 대한 구조물 응답 z를 유한요소법 등으로 산출한다.

2) 하나의 설계변수를 미소량 변화시킨다. :

$$\underline{b}_i = b_i + \Delta b_i$$

3) 새로운 변수 \underline{b}_i 에 대한 z(\underline{b}_i)를 구한다.

4) 설계민감도를 계산한다. :

$$(z(\underline{b}_i) - z(b_i)) / \Delta b_i$$

5) 각 설계 변수에 대해 2)~4) 과정을 반복한다.

- 특징

• 초보적인 민감도 산출 방법

• 각 설계변수에 대해 반복되므로 비효율적

• 민감도는 Δb 의 크기에 따라 달라지므로 정확하지 않다.

2. 2 반해석법

유한요소법으로 주로 구조해석을 함으로 이에 대한 기본식에서 보면

1) 설계변수에 대한 미분방정식 :

$$K(b) \frac{dz}{db} = \frac{\partial F(b)}{\partial b} - \frac{\partial}{\partial b} (K(b)\bar{z}) \quad (A)$$

2) 우변의 $\frac{\partial}{\partial b} (K(b)\bar{z})$ 를 유한차분법이나 해석적 방법으로 구한다.

3) 식 (A)를 풀어 민감도를 구한다.

- 특징

• 유한차분법에 비해 다소 경제적이다.

• 각 설계변수에 대한 유한차분을 실행하면 변수의 증분치 선택에 대한 기준이 없어 민감도는 역시 정확하지 않다.

• 직접미분법과 보조변수법이 사용된다.

• 계산량의 정도는 설계변수의 수에 비례한다. (직접미분의 경우)

2. 3 연속법

1) 기본 구조물의 Variational Equation(변분

방정식)을 이용한다: $a_u(z, \bar{z}) = l(\bar{z})$

2) 구조해석이 완료된 후 설계변수에 대한 1차 변분(first variation)을 하여 민감도를 산출한다.

$$a_u(z', \bar{z}) = l'_{\delta u}(\bar{z}) - a'_{\delta u}(z, \bar{z})$$

-특징

- 보조변수법에 의한 보조변위를 사용하거나 직접미분법을 사용한다.
- 민감도는 정확하며 계산량 정도는 제한함수의 수에 비례한다. (보조변수법의 경우)

반해석법의 경우는 설계변수 변경시마다 유한요소 재해석을 수행하므로 계산량이 과다하나, 연속 민감도 해석법은 정확하고 재해석 없이도 설계변수를 변경하며 계산량은 제한조건식수에 비례함으로 경제적이다. 형상 DSA에서도 연속법에 의한 민감도가 반해석법에 비해 더 정확하다.

3. 민감도의 활용

엔진등 주기적 동력원에 의해 발생하는 기계 구조물 및 수송체의 진동은 재질의 파괴, 소음, 탑승원의 불편감을 유발함으로 이에 대해 적합한 설계기법 확립이 필요하다. 진동에 관한 민감도해석이란 시스템의 설계변수가 변위, 속도, 가속도, 응력등 진동특성에 어느정도 영향을 주는가를 보여주게 된다. 그러나 이러한 설계기법 확립은 초기단계에서 주로 설계자의 경험과 인지 그리고 실험모델 테스트에 의존하고 있는 실정이다.

설계민감도 활용의 한 예로 수송체 진동 문제에 관한 민감도를 제시해 보았다. 필자의 연구에 의하여 보조변수법을 이용한 연속법 DSA로 템핑이 있는 구조물의 진동에 관한 민감도가 산출되었다. 연속법의 장점은 해석후

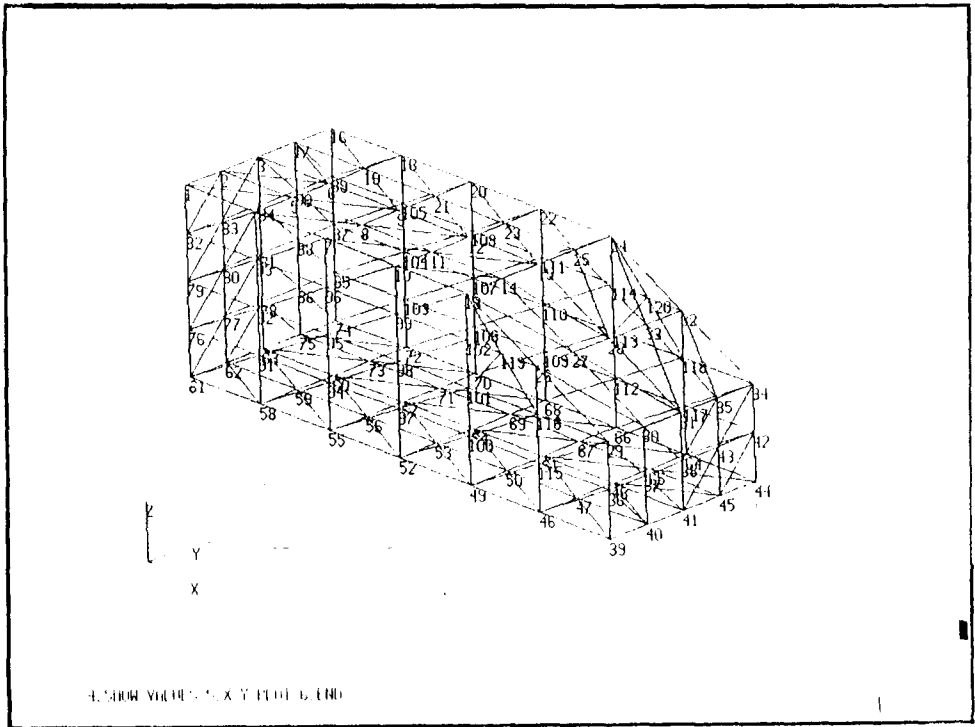


Fig. 1. 수송체 유한요소 모델

결과 (post processing data)를 이용함으로써 어느 유한요소 코드를 사용하여도 민감도 선출이 가능한 점이며 설계변수 변경시 유한요소 재해석이 필요없다는 점이다. 또한 고유치 근처의 과도한 진동문제에도 설계민감도가 정확히 계산된다.

Figure 1에 NASTRAN을 이용한 수송체의 유한요소 모델이 있다. 앞 부분에 위치한 엔진 기진력에 의해 엔진부근에서 최대진동(변위)이 발생하였다.

설계변수는 각 유한요소의 두께가 되며 제한 조건은 엔진 부근 절점의 Z방향 최대 변위이다. Figure 2에는 설계민감도가 나타나있다. PATRAN을 사용하여 민감도가 유한요소별로 표현되었으며 Color printer film을 흑백으로 복사하여서 그림상에서는 색상 구별이 안되고 있다. 이 Sensitivity Display에서 인식할 수 있는 것은 구조물의 진동감소를 위해서는 엔진 밀

부분 부재의 두께를 늘려 보강하거나 보강재를 첨가시키는 방안이다. 왜냐하면 엔진 밀 부분의 민감도는 음수이며 절댓값이 제일 크기 때문이다. 이런경우 설계변수인 부재두께를 증가시키면 최대진동변위가 감소한다.

4. 4-STEP Interactive Computer Aided Design

CAD/CAM이라는 용어는 이제 귀에 익숙해졌고 많이 보급돼 사용되고 있으며 최근 CIM (Computer Integrated Manufacturing)이라하여 CAD, CAM, CAE, Database를 통합한 새로운 컴퓨터 통합생산 시스템이 소개되고 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 4단계로

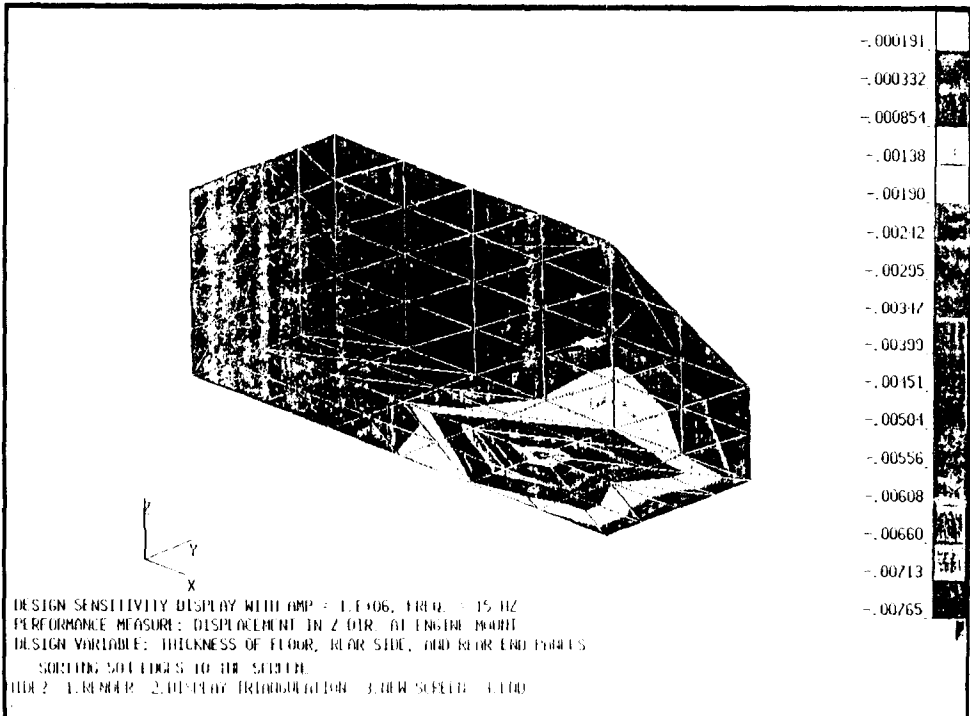


Fig. 2. 진동변위에 대한 민감도 해석 (설계변수는 부재의 두께)

된 CAD과정을 소개해 본다. 주목적은 자동화된 과정, 설계자의 경험 반영, 계산시간 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 제시해주는 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 감소될려는지? 등등 설계자는 항상 의문점을 갖고 설계를 하나 설계변경을 시도할 때마다 새로운 구조응답을 유한요소법을 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.

4. 3 Trade-off

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

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 최적화과정중에 중요한 장애가 될 수도 있다.

또한, 아무리 문제가 잘 정의되도 대부분의 반복계산 최적화 방법에서는 알고리즘의 파라미터 선정에 상당한 주의를 요하고 있다. 대부분의 구조최적 설계는 비선형 문제라, 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 설계방향은 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 다음과 같은 CAD 시스템 생성이 필요하며 사용목적에 적합하게 User-Interface 개발도 시도되어야겠다. 대부분의 H/W와 S/W가 외국 제품이라

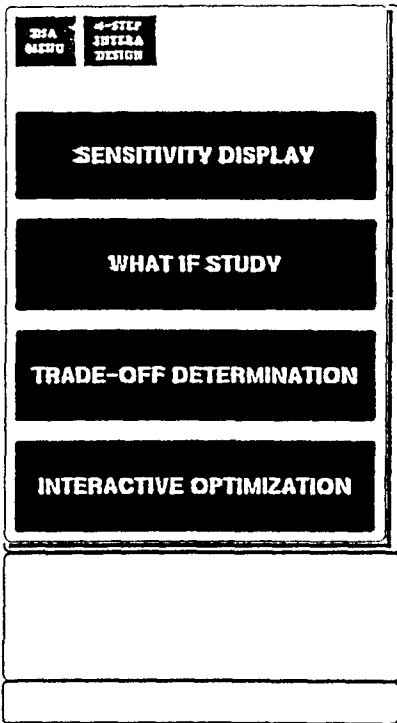


Fig. 3. 4-STEP Interactive Design Icon (User-Interface)

고가이고 program을 용도에 맞게 적절히 변경 못하는 문제점이 있어 국산화가 요구되나 현재로는 해결방안이 없는것 같다.

Figure 3에는 미국 Iowa대학 CAD센터에서 개발한 프로그램의 4-STEP Icon부분이 보여지고 있다. (최근에는 H/W에 독립적인 프로그램으로 수정, 보완하여 다시 개발하고 있음) Figure 4에는 구조물 고유치에 관한 민감도 해석치 분포도가 나타나 있다. 이렇게 User-Interface를 통하여 interactive하게 설계자와 프로그램의 연결이 대화식으로 형성되어 있다. 이러한 Interactive CAD시스템 형성을 위해서는 다음과 같은 H/W, S/W, Engineering Database등이 필요하며 자동화하는 것이 바람직하다.

- 설계변수, 제한조건식, 목적함수등의 정의
- Database확립
- CAD 사용 : Geometry Modeling
- Analysis code : ANSYS, NASTRAN, etc.
- 설계민감도 해석 (DSA) code.
- What-if

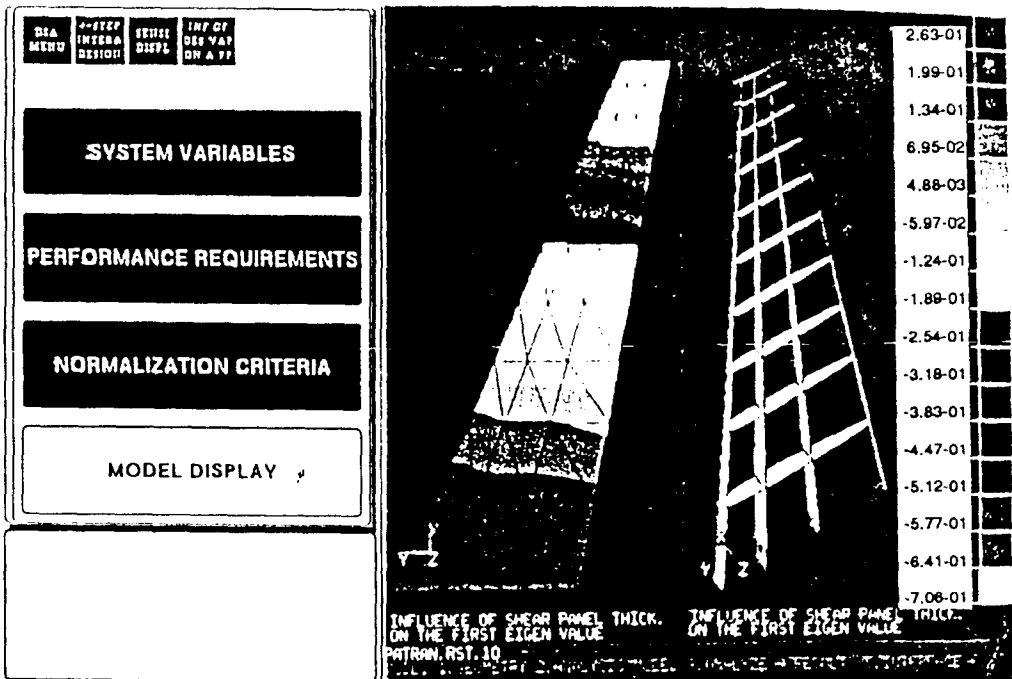


Fig. 4. 첫째 고유치에 대한 민감도 분포

• 최적설계

5. 결론

간략히 설계민감도해석, 구조최적설계 그리고 interactive CAD 시스템의 필요성에 대하여 살펴보았다. 근래에 조선소나 연구소에서 구조해석등에 User-Interface(사용자 대화식)개발이 활성화 되고있어 고무적이다. 한걸음 더 나아가 설계민감도해석 기법의 확립과 활용이 선체 구조설계에도 구현되었으면 한다. 여기에는 seam line등 생산과 관련되어 일정한 판재의 두께 설정같은 설계변수에 관한 정의가 필요하

다. 즉 manufacturing에 직접 관계되는 설계변수와 민감도 산출 기준이 먼저 정립되어야 한다. 대부분 정적변위 문제보다 진동, 소음이 심각하므로 극심한 진동제어를 위해서는 유한요소해석과 민감도해석을 통하여 필요한 부분을 보강하거나 축계진동 제어를 위하여 지지점의 뎀핑특성 변경을 시도하는 것도 설계의 한 방법이겠다.

컴퓨터의 발달에 힘입어 외국에서는 구조설계분야에 이와같이 새로운 개념들이 개발되고 있는 실정이다. 우리도 컴퓨터를 사용한 자동화분야에 더욱 관심을 갖고 일진해야 하리라고 생각된다.

<p>三光造船工業(株)</p> <p>仁川市 東區 萬石洞 2-167</p> <p>電話. (032)763-1521~5 FAX. (032)763-3478</p> <p>鋼船 3,000吨 以下</p>	<p>京仁造船公社</p> <p>仁川市 中區 中山洞 29-1</p> <p>電話. (032)886-0123 FAX. (032)886-9342</p> <p>鋼船 3,000吨 以下</p>
<p>西海島嶼開發(株)</p> <p>仁川市 東區 萬石洞 2-122</p> <p>電話. (032)762-7701~5 FAX. (032)763-4551</p> <p>鋼船 3,000吨 以下</p>	<p>中央造船</p> <p>仁川市 東區 松岷3洞 1-657</p> <p>電話. (032)763-2331~4 FAX. (032)763-5630</p> <p>鋼船 300吨 以下</p>
<p>(株) 興 海</p> <p>仁川市 東區 花水洞 7</p> <p>電話. (032)72-3671</p> <p>鋼船 300吨 以下</p>	<p>三洋造船所</p> <p>仁川市 東區 松岷洞 2-53</p> <p>電話. (032)73-1191</p> <p>鋼船 300吨 以下</p>

用 語 解 說

선박구조용 복합재료

복합재료라 함은 기계적 또는 화학적 성질이 서로 다른 형태의 재료를 조합하여 합성한 것으로서 각 구성재료 보다도 우수한 성질을 갖는 완전히 새로운 성질을 주는 재료이다.

이는 합금을 포함하는 광범위한 의미도 갖고 있으나 구조용 복합재료에 한정한다.

구조용 복합재료는 섬유강화계가 일반적으로 역학적 특성이 우수하기 때문에 지금까지의 개발은 이러한 형태의 것이 주류를 이루고 있다.

탄소섬유나 Aramid 섬유와 같이 신소재 강화섬유가 개발되어 앞으로 새로 개발된 재료가 선박구조용으로 응용될 가능성이 높다.

이는 미래의 선박으로 추구되는 Maintenance free 선과 Energy Saving 선박으로서의 도장공사가 필요 없다는 경량화선에서 각광을 받을 것이다.

이러한 복합재료의 구조설계, 성형방법의 자동화 비파괴시험의 확립을 위한 연구가 진행되고 있다.

Matrix(기재)로서 고무, 플라스틱, 금속, 세라믹중 어느것을 사용하는가에 따라 섬유강화 복합재료를 다음과 같이 분류한다.

섬유강화고무 (FRR)

섬유강화 플라스틱 (FRP)

섬유강화메탈 (FRM)

섬유강화세라믹 (FRC)

이들 복합 재료에 관한 주요연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- 복합재료의 결점극복

FRP의 결점으로서는 내열강도의 부족 (에폭시 수지는 150°C 폴리아미드계에서는 350°C 이상에서 강도저하) 충전 전단강도의 부족, 수지를 경화시키기 위한 공정이 필요하다.

FRM의 경우는 내열강도 및 전단강도 면에서는 유리하나 기계가공성이 나쁜것이 결점이다.

이러한 결점의 극복이 현재 연구과제로 진행 중이다.

- 성형가공의 자동화

현재, 복잡한 형상의 성형의 경우에는 수작업이 많은 부분을 점하고 있으나 시간이 걸려 자동화된 성형이 이루어지고 있다.

- 비파괴 검사의 확립

- 최적설계 기술의 개발

구조물의 응력해석을 행하고 그 결과로부터 각부의 강도, 강성분포를 결정하는 최적 설계 기술이 연구되고 있다.

- 신재료의 개발 등 (작성자: 이재욱)

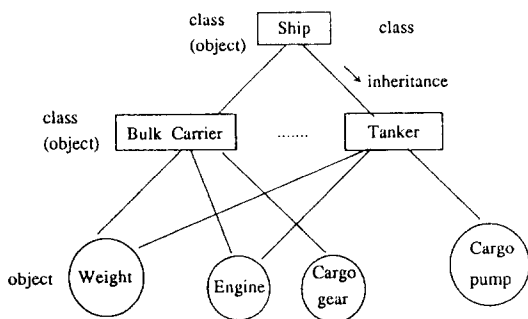
객체지향 프로그래밍 (Object-Oriented Programming)

컴퓨터의 구성요소 중에서 H/W기술은 급속도로 발전하고 있으나 S/W의 경우에는 그렇지 못하다. S/W의 발전속도가 이처럼 늦은 이유는 어떤 목적에 맞도록 개발된 S/W를 다른 목적을 위하여서는 거의 사용이 불가능하기 때

GUI (Graphic User Interface)

문이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 모듈화(modularity)가 제시되었으나, 모듈화 역시 기존의 프로그래밍 언어와 방법으로는 한계성이 있기 때문에 범용성이 떨어진다. 객체지향 프로그래밍은 이러한 점을 극복하기 위하여, 기존의 절차적(procedural)프로그래밍 방식에서 탈피하여 프로그램이 처리하여야 할 데이터를 가장 먼저 생각하여 프로그램을 개발함으로써 프로그램의 재사용성(reusability)을 높이는 개념이다. 객체지향 프로그래밍의 중요한 개념으로는 객체(object)에 의한 추상화 개념과 메세지(message) 개념이다. 객체는 현실세계(real world)의 구성단위를 나타내는 것으로서 객체지향 프로그래밍에서는 모든 것을 객체로 표현한다. 예를들어 선체의 중량, 주기관, 선속 등과 같은 것이 객체로 표현될 수 있다. 객체를 일정한 데이터와 그 데이터에 대한 연산으로 정의되고 메세지는 정의된 객체에 대하여 필요한 작업을 수행하기 위하여 사용되며, 객체는 메세지의 수신과 송신에 의하여만 작업을 수행하게 된다. 이외에 객체지향 프로그래밍의 중요한 개념으로는 유사한(공통된)객체들을 하나의 그룹으로 묶는 클래스(class)개념과 어떤 클래스가 다른 클래스의 성질과 특성을 그대로 이어받는 전승(inheritance)개념이 있다.

객체 지향 프로그래밍을 하기위한 언어로서는 Smalltalk, C++, LISP, Eiffel등이 있으며, 최근에는 데이터베이스에 객체지향 개념을 이용한 객체지향 데이터베이스(OODB)가 제안, 구현되고 있다. (작성자 : 이동곤, 이경호)



컴퓨터 사용자는 컴퓨터에 자신이 원하는 작업의 수행에 필요한 명령을 내리고(Input), 컴퓨터에서 수행한 작업의 결과를 출력받아(Output)이용한다. 컴퓨터의 사용 초기에는 Card reader와 Line printer를 이용하여 Interface를 하였고, 그후 기술이 발전되면서 CRT와 Key board를 이용하게 되었는데, 입출력의 대상이 주로 숫자나 문자에 국한됨에 따라 사용상에 불편한 점이 많이 있었다. 최근에는 성능이 우수한 Graphic terminal, Mouse, Digitizer 및 Graphic tablet등과 같은 장비의 사용이 가능하여짐에 따라 사용자가 컴퓨터를 보다 편리하게 이용할 수 있도록, 컴퓨터와의 정보교환을 주로 문자가 아닌 그래픽으로 이루어지도록하는 그래픽 유저 인터페이스 (GUI, Graphic User Interface)가 각광을 받고 있다. GUI는 사용자가 명령을 타이핑하는 것이 아니라, 그래픽 화면상에 표현된 메뉴(Menu)나 아이콘(Icon)을 키보드나 마우스를 이용하여 지정함으로써 명령을 내리고, 컴퓨터의 출력도 주로 그림이나 도표로 표시하게 하는 것이다. GUI는 Smalltalk-80시스템에서 시도된 후 매킨토시 컴퓨터가 GUI를 본격 채택하여 인기를 얻음으로써 급속도로 확산되어 최근에는 워크 스테이션(Work station)은 물론 PC에서도 널리 이용되고 있다.

응용 프로그램에서의 사용자 인터페이스가 차지하는 비중이 점점 높아지고 있고, UNIX를 중심으로 한 표준화에 힘입어 앞으로 H/W Independent한 사용자 인터페이스 도구가 나오므로써 그래픽 사용자 인터페이스의 개발은 더 확산될 전망이다. (작성자 : 이동곤, 이경호)