

# 서지탱크의 최적설계

## 지 상 현

대우자동차 기술연구소 진동제어연구실



●1964년생  
●자동차어를 전공하였으며, 구조물의 동적해석 및 모델 해석에 관심이 있다.

## 김 민 수

대우자동차 기술연구소 진동제어연구실



●1964년생  
●최적설계를 전공하였으며, 구조물의 진동해석 및 비선형 동적 거동해석에 관심이 있다.

### 1. 머리말

최근들어 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전 및 우수한 범용 소프트웨어의 보급에 힘입어서 자동차 업계에서는 개발 일정 단축 및 설계 능력의 향상을 목적으로, 자동차의 설계 및 해석 분야에 컴퓨터의 적용을 확산시키고 있다. 특히 자동차 및 구조물의 설계는 응력과 처짐등을 초기 설계 단계에서 고려하여 실제 사용 조건에서의 안정성을 미리 예측, 보완하는 것이 중요하며, 컴퓨터를 이용한 설계방법 중 유한요소법에 의한 구조해석이 설계 도구로 많이 이용되고 있다<sup>(1)</sup>. 구조물의 설계 및 기존 부품의 설계 변경시 각 설계 변수의 변화에 따른 시스템이나 부품의 성능을 반복된 실험이나 계산을 통하여, 가장 적당한 설계 변수의 값을 결정하는 것은 많은 시간과 경비를 필요로 한다. 따라서 효율적인 설계를 위하여 설계 변수의 변화에 따른 설계 민감도(design sensitivity)를 구하는 것이 필요하며, 이를 위해 유한요소법에 최적화 이론을 적용하여 최적의 설계 변수를 결정하는 구조물 최적화 방법(structural optimization technique)이 필요하다<sup>(2)</sup>.

설계 또는 실험의 기준으로 수치해석적 최적화 기법을 적용하는데는 다음과 같은 장점들이 있다. 첫째로 설계와 실험에 대한 많은 경험을 요하지 않으며, 둘째로 시행착오적인 실험이나 해석을 줄임으로써 비용과 시간을 절약할 수 있다. 셋째로 구조해석을 위한 유한요소 모델의 타당성을 검토할 수 있으며, 마지막으로 가장 중요한 것은 수치해석적 최적화 방법은 단순히 현상을 해석하는 것이 아니라 설계 자체를 의미하는 것이다.

본 글에서는 자동차의 냉각장치중, 냉각수를 저장하는 기능을 갖는 서지탱크의 내압에 의한 국부적인 균열 발생방지 및 용기의 응력 완화를 목적으로, 범용 구조해석 프로그램인 CAEDS의 여러 모듈(GEOMOD, GFEM, IFES-optimization)을 이용하여 응력 해석을 수행한 후, OPTISEN(최적화 해석 모듈)을 적용하여 용기 두께 및 보강재 위치에 따른 설계 민감도를 구하여 최적 두께 및 보강재의 최적 위치를 구하였다<sup>(3)</sup>.

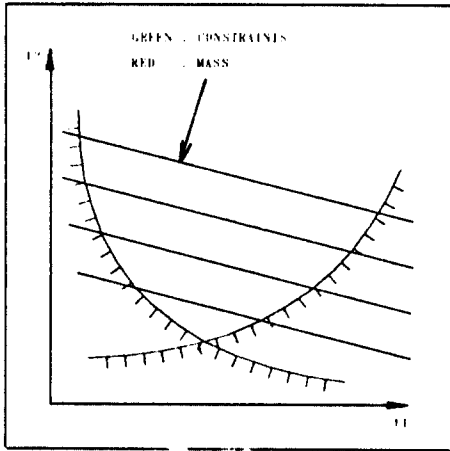
### 2. IFES-Optimization 모듈에 사용된 이론

IFES-Optimization은 최근의 구조물 최적 설계 분야의 일반적인 추세인 근사적인 방법

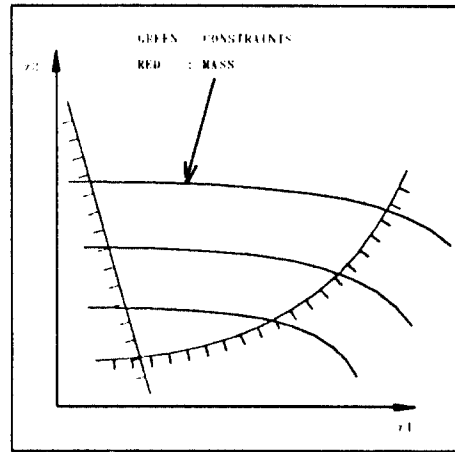
(approximation technique)을 이용하고 있다. 전체적인 알고리즘은 크게 2가지를 사용하고 있는데 첫번째 알고리즘은 설계 자동화의 개념인 FSD(fully stressed design)로서 응력에 대한 구속조건만 있을 때 적용이 가능하다. 두번째 알고리즘은 2차 근사화(quadratic approximation)을 적용한 Newton-Raphson 방법이다. 그림 1(a)와 같은 원래 최적화 문제의 설계 변수를 역수로 치환함으로써, 함수 계

산시간이 많이 소요되는 구속함수(응력, 변위, 고유진동수)는 선형으로, 함수 계산시간이 적은 목적함수(구조물의 질량)는 비선형 형태로 바꾼다(그림 1(b)). 이렇게 변환된 목적함수와 구속함수에 테일러전개를 적용하여 목적함수는 이차식으로, 구속함수는 1차식으로 근사화한다<sup>(4~5)</sup> (그림 1(c)). 근사화된 최적화 문제는 다음과 같다.

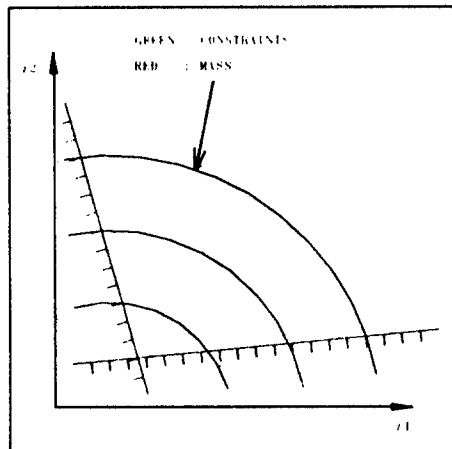
$$\text{Minimize } W(Z+h) = W(Z) + \nabla W(Z)$$



(a) ORIGINAL PROBLEM



(b) TRANSFORMED PROBLEM



(c) APPROXIMATED PROBLEM

그림 1 IFES-Optimization 이론 설명

$$h + 1/2 \quad h^t H(Z) h \quad (1)$$

Subject to  $g(Z+h) = g(Z) + G h \leq b$

식 (1)을 라그랑지 함수로 정의하면,

$$L(Z+h+\lambda) = W(Z) + \nabla W(Z) h + 1/2 h^t H(Z) h + \lambda^t [b - (g(Z) + G h)] \quad (2)$$

식 (2)에 Kuhn-Tucker의 제 1 조건을 적용하면,

$$\nabla L_h = \nabla W + H h + G^t \lambda = 0 \quad (3)$$

Active한 구속조건에 Kuhn-Tucker의 제 2 조건을 적용하면

$$b - g(Z) + G h = 0 \quad (4)$$

$$\text{식 (3)으로부터 } h = -H^{-1} [G \lambda^t + \nabla W] \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하면

$$g - G H^{-1} [G \lambda^t + \nabla W] = b \quad (6)$$

$$G H^{-1} G^t \lambda = -b + g - G H^{-1} \nabla W \quad (7)$$

$$\lambda = [G H^{-1} G^t]^{-1} [-b + g - G H^{-1} \nabla W] \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하면

$$h = -H^{-1} [G^t [G H^{-1} G^t]^{-1} [-b + g - G H^{-1} \nabla W] + \nabla W] \\ Z^{k+1} = Z^k + h^* \quad (10)$$

으로 설계 변수값을 계산한다. 이때 중요한 것은 식 (9)의  $h$ 가 2차 근사화를 통하여 구한 값이므로, 변화가 크면 수렴에 문제가 있을 수 있기 때문에 IFES-Optimization에서는 위와 같은 과정을 수렴한계까지 설계변수의 상, 하한치(side constraint)를 이용하여 적절히 설계변수의 변화량(step length)을 조절한다.

또한 매 반복시, 설계 민감도를 구해야 할 경계영역 근처의(active) 또는 경계영역을 벗어난(violate) 구속 조건이 바뀌게 된다. IFES-Optimization에서 구속함수가 경계영역의 근처에 있는지, 아닌지를 선택하는 방법은 다음과 같다. 그림 1(b)의 최적화 문제를 라그랑지 함수로 만들어서 라그랑지 멀티플라이어에 대한 Dual Problem을 Revised-SIMPLEX 방법을 이용하여 푼다. 이때 라그랑지 멀티플라이어 값이 0.0이 아닌 구속함수를 경계영역의 근처, 또는 밖에 있는 것으로

간주한다. 이때 중요한 것은 Dual Problem의 라그랑지 멀티플라이어를 Newton-Raphson 방법을 이용한 Primal Problem의 라그랑지 멀티플라이어로 사용하지 않는다는 점이다. Dual Problem의 라그랑지 멀티플라이어는 단순히 구속함수의 선택에만 사용된다. IFES-Optimization에서는 상태 변수(state variable)에 관한 설계민감도를 크게 해석적 방법(direct method, analytical method)과 가상 하중법(unit-load method, adjoint method)를 이용하여 계산한다<sup>(6)</sup>.

### 3. 문제설정

본 서지 탱크는 최고 섭씨 12도까지 온도가 상승하며, 최대 180 kPa의 압력을 받게 된다. 용기의 재질은 비금속 프로펠렌이므로 온도와 방향에 따라서 물리적 성질이 변하는 비선형, 이방성 재질(non-linear, anisotropic material)이다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 온도와 방향에 따른 물리적 성질을 고려한 비선형 해석을 수행해야 한다. 해석의 단순화를 위하여 물성치가 온도 및 방향에 따라서 일정한 선형 재질로 가정하였으며, 엔진실 온도와 서지 탱크의 온도 차이가 10~20°C로 심하지 않으므로 열응력은 고려하지 않았다. 또한 용기 내부의 냉각수 유동도 심하지 않으므로 해석에 고려하지 않았으며, 하중 조건으로 용기 내부의 최고 압력 180 kPa, 경계 조건으로는 용기가 고정되는 부분을 구속 조건으로 설정하였다.

### 4. 해석 목적 방향

실험에 의존하여 설계되었던 서지탱크를 CAEDS의 유한요소법 및 최적화 기법을 이용하여 용기의 최적 두께와 보강재(RIB)의 위치를 구함과 동시에, 신속하고 신뢰성있는 새로운 설계 방법 및 방향을 제시하는 것이며, 아래와 같은 순서로 해석을 수행하였다.

(1) 복잡한 모양의 서지탱크를 CAEDS의 솔

리드 모델러를 이용하여 모델링한 후 설계 용적을 검사하고, 구조해석을 위한 곡면데이터를 얻는다.

(2) 솔리드 모델러로부터 얻은 곡면데이터를 이용하여 용기 내부의 리브까지 CAEDS의 GFEM으로 모델링한 후 IEES로 응력해석을 수행하여 응력 분포를 구한다.

(3) CAEDS의 최적화 모듈을 이용하여 최적해에 가까운 허용범위 내의 설계치(feasible design value)를 구하고, 이 값으로부터 용기의 두께 변화에 따른 응력의 설계 민감도를 구한다.

(4) 위의 민감도 및 응력 분포, 가공상 제약 조건 등을 고려하여 보강 위치와 두께를 결정하여, 개선된 서지탱크를 모형화하고 응력 분

포를 구한다.

### 5. 해석 과정

(1) 서지 탱크의 전체적인 형상을 만들어야 하며, 곡면이 많고 복잡하기 때문에 CAEDS의 GEOMOD(3차원 형상을 표현하는 솔리드 모델러)에서 작업한다. 용기의 각 단면(profile)을 작성하고 단면을 모아서 전체 용기의 골격(skin group)을 만든후, 전체 형상을 완성한다. 뚜껑, 모서리, 지지부등을 처리하여 최종 솔리드를 작성한다<sup>(7)</sup>. GEOMOD의 기능을 이용하여 부피 및 관성치들을 구하고 설계 부피를 검사한다(그림 2).

(2) GEOMOD에서 완성된 서지 탱크의 3차원

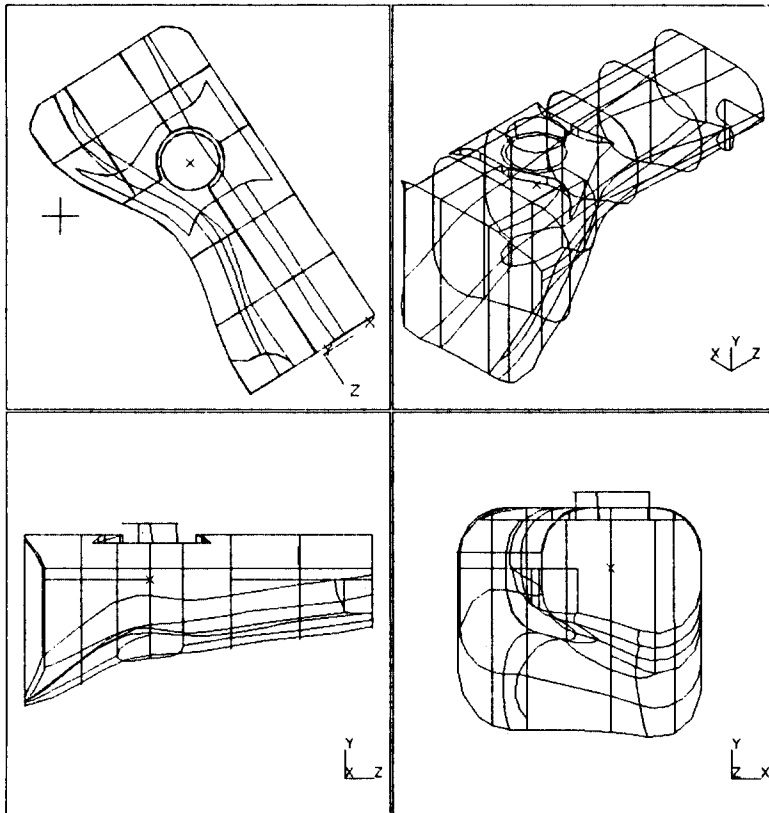


그림 2 서지 탱크의 솔리드 모델

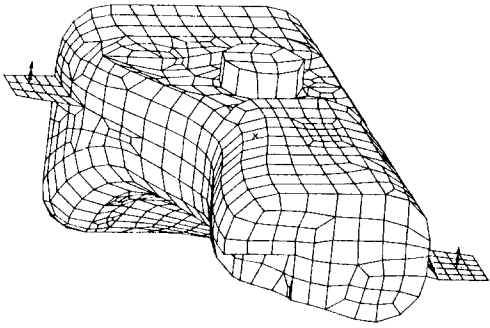


그림 3 서지 탱크의 완성된 유한요소 모델

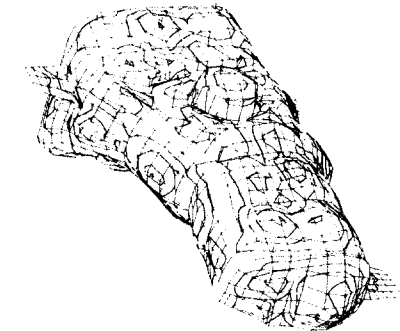
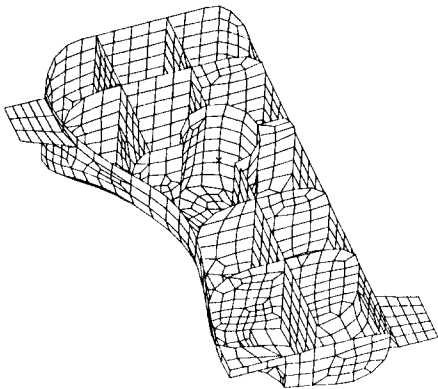


그림 4 최초의 모델 응력분포

모델에서 유한요소를 만들기 위한 곡면 데이터만을 GFEM으로 읽어 들인다.

(3) GFEM(CAEDS의 전처리기: PREPROCESSOR)에서 위의 작업에서 만든 곡선과 곡

TOILED MODEL OF SHIP'S TANK  
 LINE=1  
 FRAME OF REFERENCE  
 UNIT=1  
 TIME=1.0E+02  
 SHELL THICKNESS

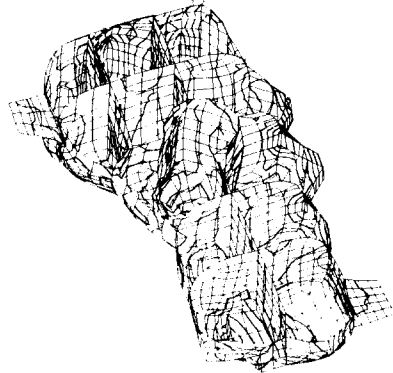


그림 5 최초의 모델 응력분포(내부)

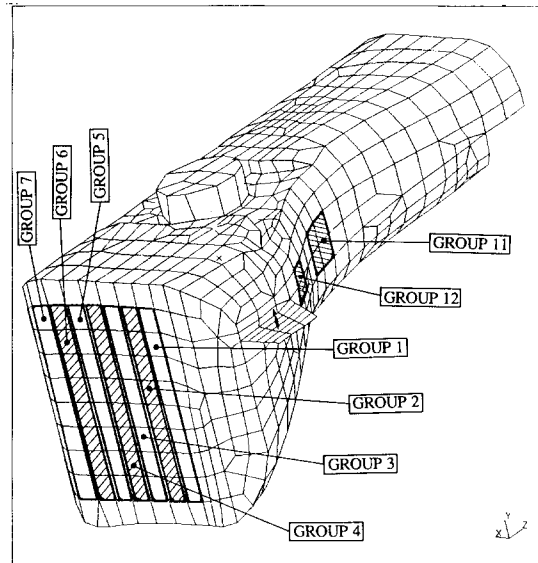


그림 6 최적화를 위한 그룹 I.

면 데이터를 이용하여 유한요소 해석에 필요한 절점(node)과 요소(element)를 만든다. 본 모델에 사용된 유한요소는 삼각형 및 사각형 셀 요소이며, 접합부는 빔 요소를 사용하였다<sup>(8)</sup>(그림 3).

(4) 경계조건(restraint set), 하중조건(face pressure)을 설정하고, 선형 응력 해석, 동

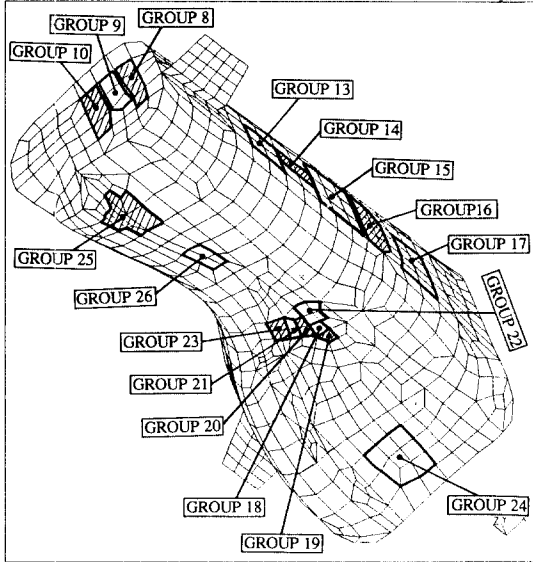


그림 7 최적화를 위한 그룹 II.

적 해석(normal mode dynamics), IFES-Optimization의 해석을 수행한다.

(5) 후처리기(post-processor)에서 해석된 결과의 비교가 용이하도록 그림 및 도표의 제반 변수를 통일하여, 응력 분포, 처짐, 설계 민감도에 관한 결과를 비교 검토한다.

### 6. 결 과

(1) 서지 탱크의 부피는 GEOMOD에서 전체 형상의 부피를 구한 후, GFEM에서 내부의 리브 부피를 제거하여 구한다.

$$\begin{aligned} \text{전체 체적} &= (\text{솔리드 부피} : 3.5846 \text{ l}) \\ &\quad - \text{리브부피} : 1.266 \text{ l}) = 2.3186 \text{ l} \end{aligned}$$

(2) 서지 탱크의 재질 특성은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{탄성계수 } E &= 1.032 \times 10^6 \text{ mN/mm}^2 \\ \text{밀도 } \rho &= 0.9 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3 \end{aligned}$$

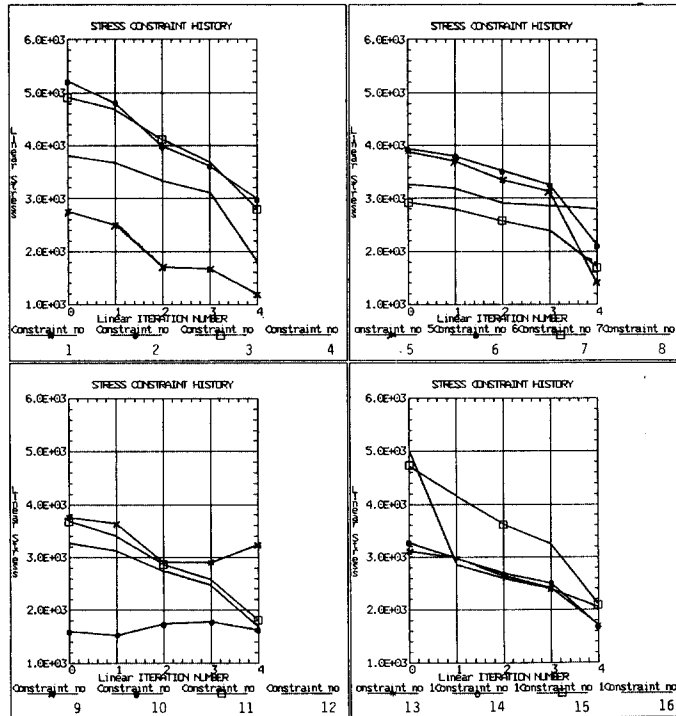


그림 8(a) 최적화 수행중 응력의 변화 I

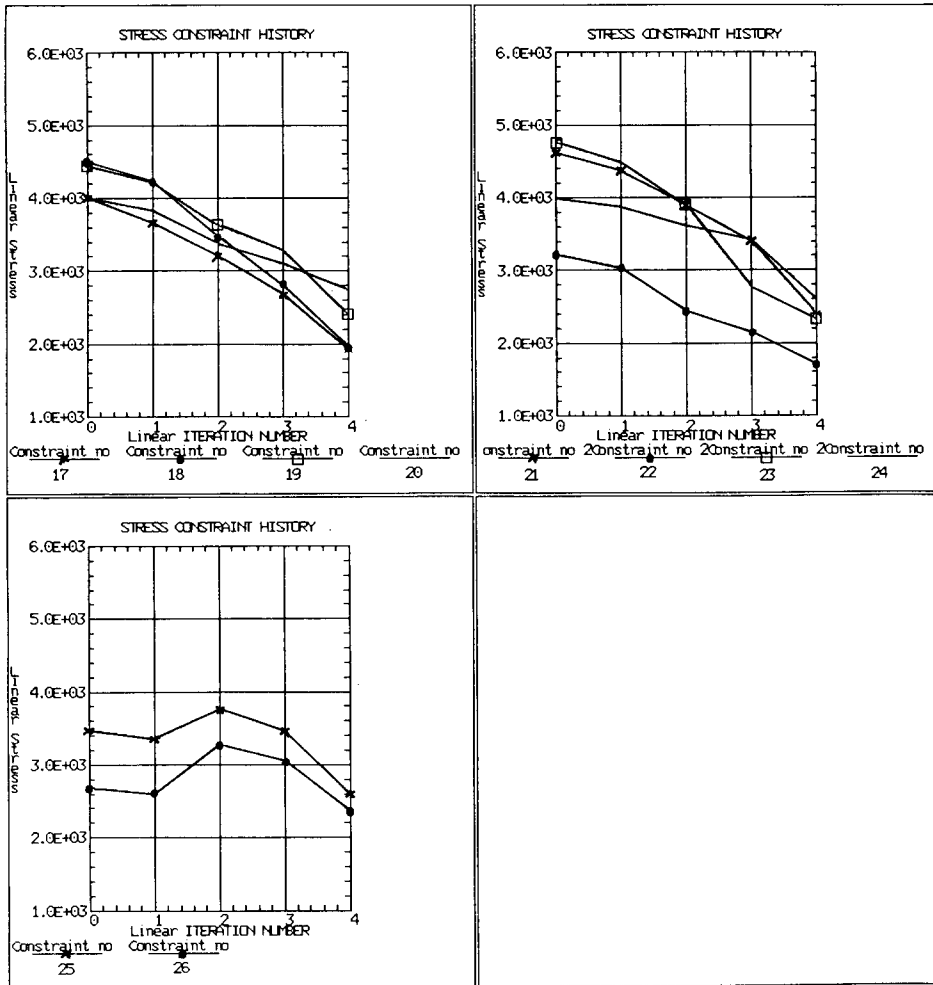


그림 8(b) 최적화 수행중 응력의 변화 II

프와송 비  $\nu=0.38$

서지 탱크의 모델은 1589개의 절점과 1726개의 셀 요소로써 표면과 리브가 모델링 되어 있고, 중간부의 접합부는 64개의 빔 요소로 모델링 되어 있다. 180 kPa의 압력을 가하고 해석한 응력 분포는 그림 4~5와 같으며, 표면의 von-Mises 응력은 최고치가  $6.76 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$  이다.

전반적으로 리브 자체에는 응력 집중 현상이 보이지 않으며, 리브 사이의 거리가 넓은 밀판

의 중심부, 양쪽 끝판, 옆면등에 응력이 집중 되는 것을 볼 수 있다.

(3) IFES-Optimization을 수행하기 위하여 응력이 집중되는 부위를 중심으로 26개의 설계 변수 묶음(group)을 설정하였다. (그림 6과 그림 7) 구속 조건으로  $6.0 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$ 의 최대 응력과 3 mm에서 12 mm의 두께 범위를 정하였다.

최적화 모델을 수행후 각 그룹 별 응력의 변화는 그림 8과 같으며, 두께의 변화는 그림 9

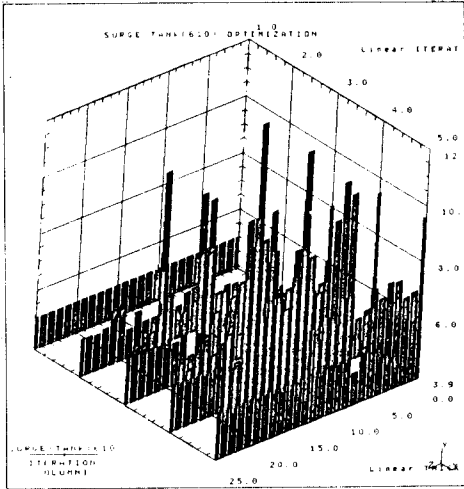


그림 9 최적화 수행중 두께의 변화

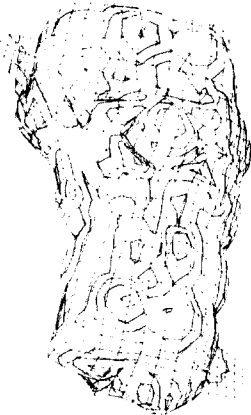


그림 10 최적화 수행후 응력분포

에 Pearl DB를 이용하여 3차원 그래프로 도시되어 있으며, 매 반복시 최대 응력은 다음과 같다.

- 최초 모델  $6.76 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$
- 1차 반복  $6.21 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$
- 2차 반복  $5.57 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$
- 3차 반복  $5.26 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$
- 4차 반복  $4.75 \times 10^3 \text{ mN/mm}^2$

위의 결과를 종합하여 응력을 완화시키기 위한 추가 리브의 위치는 아래와 같다.

- (1) 그룹 1~7의 끝면 : 그룹 1에 보강
- (2) 그룹 8~10의 끝면 : 그룹 10에 보강
- (3) 그룹 18~23의 밑면 : 그룹 18, 19, 22, 23에 보강
- (4) 그룹 12~17의 옆면 : 그룹 11, 12, 16에 보강

## 7. 맺음말

복잡한 형상의 서지 탱크를 CAEDS의 GEOMOD를 이용하여 내부의 리브까지 포함한 용기를 모델링 하였으며, 설계 부피를 검사하고 GEOMOD와 GFEM 사이의 직접 데이터 교환을 통하여 구조 해석에 필요한 유한요소를 만들었다.

유한요소법에 최적화 이론을 적용하여 서지 탱크의 두께 변화에 따른 응력의 설계 민감도를 구하였으며, 민감도를 근거로 보강 위치 및 국부적인 용기의 두께를 결정하였다.

유한요소법 프로그램 (IFES, GFEM) 과 솔리드 모델러 (GEOMOD), 그리고 최적화 기법 (IFES-Optimization) 을 모두 통합하여, 최적설계를 수행함으로써 반복되는 실험에 의한 시간과 경비를 줄임과 동시에 신뢰성 있는 설계 방법 및 방향을 제시하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) 김민수, 이재원, "자동차에 CAE 적용", 1989, 대한기계학회지, 제29권, 제 3 호, pp. 306~309.
- (2) Vanderplaats, Garret, N, 1986, "Trends in Structural Optimization: Some Considerations in Using Standard Finite Element Software," SAE860801.
- (3) 지상현, 김민수, "Surge-Tank의 최적설계", 1990, CAE Technical Report, VC90003, DWMC.
- (4) Vanderplaats, Garret, N, 1984, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Application", McGraw-Hill.



- (5) Peter Ward, Andrew Wakeling, Richard Weeks, Richard russel, 1987, "Design of an Excavator Arm Using Optimization Techniques", SAE870814.
- (6) CAEDS, "Integrated Finite Element Solver", User's Guide.
- (7) CAEDS, GEOMOD, "Solide Modeling and Design", User's Guide.
- (8) CAEDS, "Graphics Finite element Modeler", User's Guide.

