

각수 유동도 심하지 않으므로 해석에 고려하지 않았으며, 하중조건으로 용기내부의 최고 압력 180 kPa, 경계조건으로는 용기가 고정되는 부분을 구속조건으로 설정하였다.

2.2 해석목적 및 방향

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

(1) 용기내부에 보강재를 부착하지 않은 최초의 Surge-Tank를 CAEDS로 모형화 하여 Linear Static Analysis를 수행하여 응력분포를 구하고, 실험에 의한 실제 파손위치와 비교한다.

(2) CAEDS의 OPTISEN 모듈을 이용하여 최적해에 가까운 허용범위내의 설계치(Feasible Design Value)를 구하고, 이 값으로부터 용기의 두께 변화에 따른 응력의 설계 민감도를 구한다.

(3) 위의 민감도 및 응력분포, 가공상 제약 조건 등을 고려하여 보강재의 위치와 두께를 결정하여, 개선된(용기 내부에 보강재를 부착한) Surge-Tank를 모형화하고 응력분포를 구한다.

(4) OPTISEN의 민감도를 토대로 보강재의 부착없이 Surge-Tank의 두께 조정만으로 모형화하고 응력분포를 구한다.

2.3 최적화 이론

CAEDS의 OPTISEN 모듈에서는 다음과 같은 2가지의 최적화 Algorithm을 제공한다.

(1) Fully Stressed Redesign 또는 Optimal Criterion 방법이며, 이 방법은 정정(Statically Determinent) 구조문제를 기본으로 전개되었기 때문에 부정정(Statically Indeterminent) 구조문제에는 정확한 해를 기대하기 힘들다. 최근의 구조물 최적화 방법에서는 단지 적절한 초기점의 선정을 위하여 이 방법을 사용한다.

(2) 비선형 연립방정식의 해를 구하는 Modified Newton-Raphson 방법이다. 일반적으로 구조물의 최적화 문제에서는 질량이 설계 변수의 선형 함수이고, 응력, 변위 그리고 진동수 등과 같은 구속조건은 설계변수의 비선형 함수이다. OPTISEN에서는 설계변수의 역수를 최적화 Algorithm의 변수로 취하여 중량을 설계변수의 비선형 함수로, 구속조건을 설계변수의 선형 함수로 치환한 다음, Taylor Series를 이용하여 목적함수는 이차함수 형태로, 구속조건은 선형으로 근사화 시킨다. 이와 같이 변환된 선형 구속 이차함수(Linear Constrained Quadratic Form)를 Kuhn-Tucker의 최적화 조건을 적용하여 비선형 연립방정식을 구성한 후 Newton-Raphson 방법으로 해를 구한다.^{4,5)} 계산의 효율성을 위하여 Active Set 이론을 적용하는데, 원래의 문제를 선형함수로 근사화한 다음 Revised SIMPLEX 방법을 적용하여 Lagrange Multiplier가 0보다 큰 값이 된 구속조건만을 Newton-Raphson 방법에서 Active Set으로 적용한다. 전체적인 Algorithm은 다음과 같다⁶⁾ (그림 1).

아래와 같은 목적함수(Object Function)와 구속조건(Constraint)을

Minimize

$$W(Z+h) = W(Z) + \nabla W(Z)^T h + \frac{1}{2} h^T H(Z) h$$

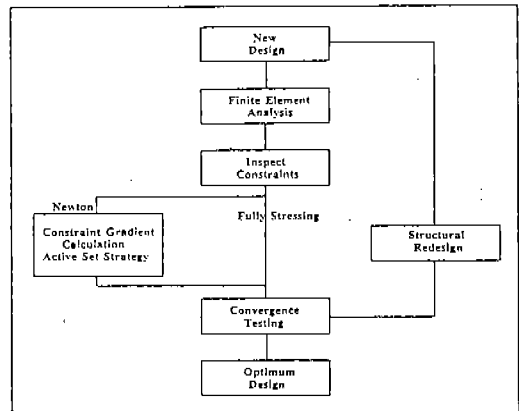


그림 1 OPTISEN의 수행과정 FLOW CHART

Subject to

$$g(Z+h) = g(Z) + Gh \leq b$$

구속조건을 포함하는 Lagrange 함수로 치환하고,

$$L(Z+h, \lambda) = W(Z) + \nabla W^t h + \frac{1}{2} h^t H h - \lambda^t [b - (g + Gh)]$$

Kuhn-Tucker 조건을 적용하여 위 식들을 정리하면,

Primal Lagrange Multiplier λ 는

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

이고, 설계변수 증분 h 는 아래와 같다.

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

W : 질량, Z : 치환된 설계변수, G : 구속조건 1차 미분, b : 구속조건 1차 미분, H : 목적함수의 2차 미분 (Hessian)

2.4 해석과정

(1) Surge-Tank의 전체적인 형상을 만들어야 하며, 곡면이 많고 복잡하기 때문에 CAEDS의 GEOMOD(3차원 형상을 표현하는 Solid Modeler)에서 작업한다. 용기의 각 단면(Profile)을 작성하고 단면을 모아서 전체 용기의 골격(Skin Group)을 만든 후, Main Solid를 완성한다. 뚜껑, 모서리, Bracket 등을 처리하여 최종 Solid를 작성한다⁷⁾(그림 2).

(2) GEOMOD에서 완성된 Surge-Tank의 3차원 모델에서 유한요소를 만들기 위한 Surface만을 읽어 들인다.

(3) GFEM(CAEDS의 전처리기: Pre-Processor)에서 위의 작업에서 만든 Curve와 Surface를 이용하여 유한요소 해석에 필요한 절점(Node)과 요소(Element)를 만든다. 본 모델에 사용된 유한요소는 삼각형 및 사각형 요소이며, 보강재는 Beam요소를 사용하였다⁸⁾(그림 3).

(4) 경계조건(Constraint Set), 하중조건(Face Pressure)을 설정하고, 각 경우(RIB

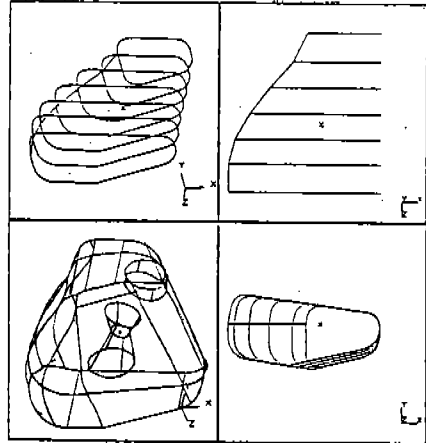


그림 2 GEOMOD에서 SKIN GROUP를 이용하여 만든 SOLID

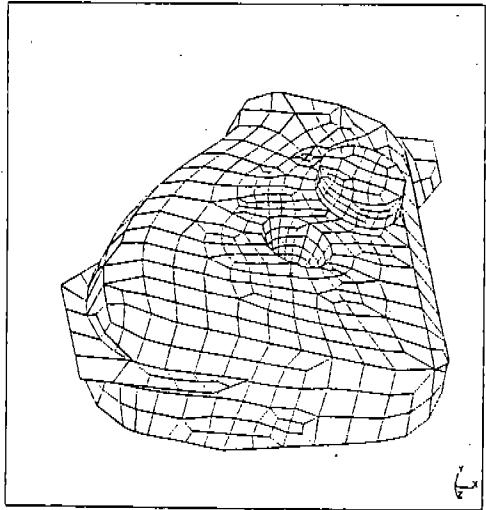


그림 3 완성된 SURGE-TANK의 유한요소

의 유무, 개선된 Surge-Tank)마다 Linear Static Analysis, Normal Mode Dynamics, OPTISEN의 해석을 수행한다.

(5) 후처리기(Post-Processor)에서 해석된 결과의 비교가 용이하도록 Graph 및 Plot의 제반 변수를 통일하여, Stress Contour, 처짐, 설계 민감도에 관한 결과를 비교 검토한다.

2.5 결 과

(1) RIB를 전혀 보강하지 않았을 때의 최대응력은 $1.92E7$ Pa이며, Surge-Tank의 윗판 왼쪽(A), 구멍 주위 및 중앙부분(B), 뚜껑과 구멍사이(C)에 응력이 집중된다(그림 4). 실험결과, 실제 파손위치가 본 모델의 응력이 집중되는 부분과 거의 일치하였다.

(2) 실험실에서 결정한 보강재의 위치대로 모델링한 Surge-Tank의 응력해석을 한 결과 최대응력은 $1.49E7$ Pa이며, 뚜껑주위와 구멍사이(C)의 응력은 현저하게 줄었으나, 중앙부위(B)와 구멍 주위의 응력은 그대로 존재하며 하단부의 RIB(3,4)에는 오히려 응력 집중되는 현상을 나타냈다(그림 5).

(3) OPTISEN을 수행한 결과 목적함수가 Feasible Region(수렴영역)안에 포함되었으며(그림 6), 반복회수에 따른 설계변수의 변화, 응력의 변화를 그림 7, 8에서 볼 수 있다. (OPTISEN에 사용된 설계변수 Group은 23개이며, 그중 기존의 RIB 위치인 Group(2, 7, 9, 12)만 도시하였다.) 이 결과를 토대로 RIB(1, 2)는 아래로 이동시키고, RIB(3, 6, 7)은 왼쪽, RIB(4)는 오른쪽으로 각각 이동시켰으며, RIB(5)는 제거하고 중앙부(B)와

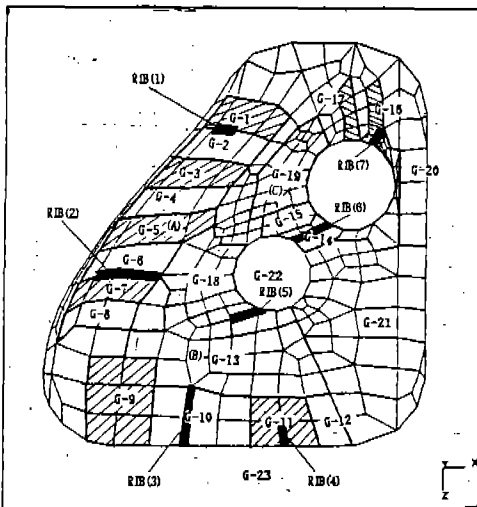


그림 4 OPTISEN 수행용 GROUP 및 RIB의 위치

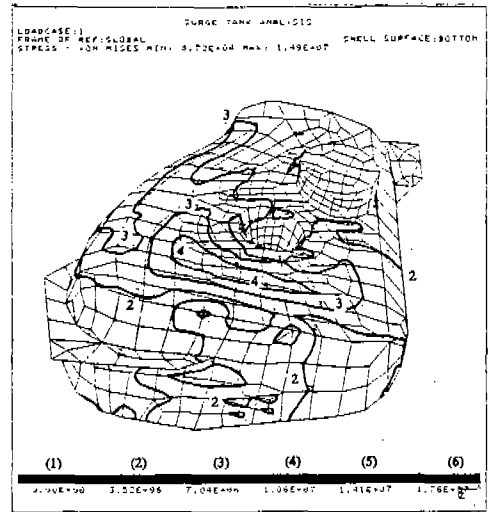
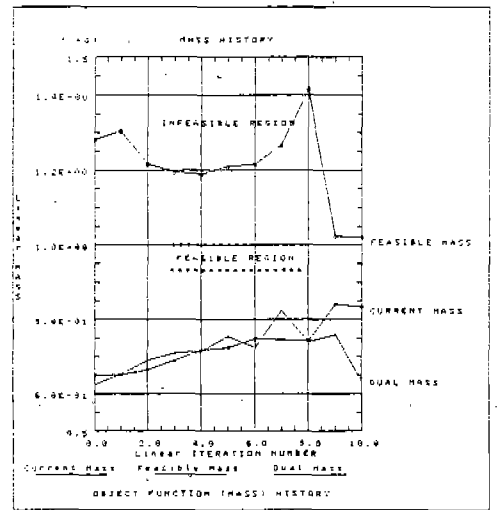


그림 5 실제 SURGE-TANK의 Von-Mises 응력분포



[Feasible Mass = Current Mass × (반복중계산된 응력 / Upper Limit 응력)]

Dual Mass = Dual Problem에서의 목적함수]

그림 6 OPTISEN 수행중 질량의 변화

응력이 집중되는 국소부의 두께를 조금 늘린 수정 용기를 설계하였으며, 이 모델을 해석한 결과 전체적으로 응력 집중현상이 현저히 감소하였으며, 최대응력도 $1.14E7$ Pa로 낮아졌다.

(4) RIB를 전부 제거하고 OPTISEN의 결과에 따라 두께만 조정하여 만든 모델을 해석한 결과 응력집중 부분이 거의 제거되었고, 최대응력도 $7.1 \text{ E}6 \text{ Pa}$ 로 크게 낮아졌다(그림 9).

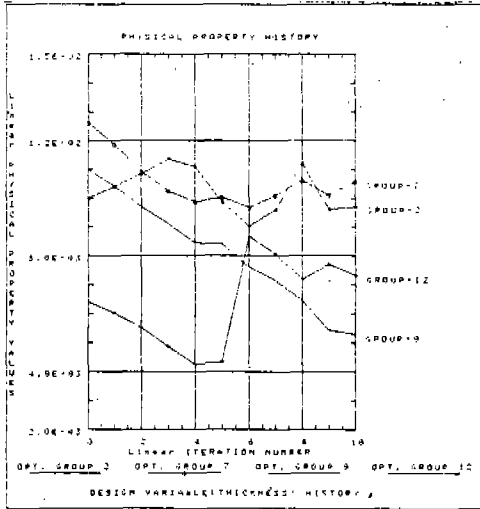


그림 7 OPTISEN 수행중 설계변수(두께)의 변화

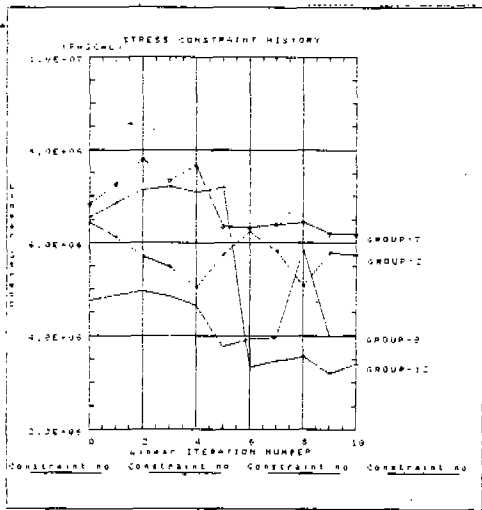


그림 8. OPTISEN 수행중 응력의 변화

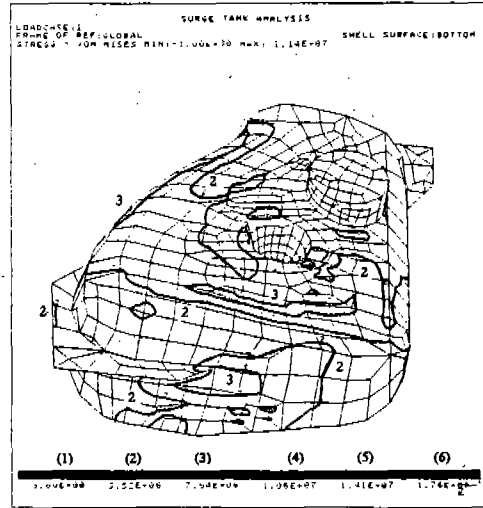


그림 9 개선된 SURGE-TANK의 Von-Mises 응력분포

3. 결 론

복잡한 형상의 Surge-Tank를 CAEDS의 GEOMOD를 이용하여 3차원 형상을 얻었으며, 이 표면위에 유한요소를 만들어 응력을 해석한 결과, 실험에서 발생한 파손 부위와 일치하였다.

유한요소법에 최적화 이론을 적용하여 Surge-Tank의 두께 변화에 따른 응력의 설계 민감도를 구하였으며, 민감도를 근거로 보강할 RIB의 최적 위치 및 RIB를 보강하지 않았을 경우의 용기두께를 결정하였다.

유한요소법 프로그램(IFES, GFEM)과 솔리드 모델러(GEOMOD), 그리고 최적화 기법(OPTISEN)을 모두 통합하여, 최적 설계를 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, 제 29권 제 3호, pp. 306-309.

2. Vanderplaats, Garret N, "Trends in Structural Optimization: Some Considerations in Using Standard Finite Element Software", 1986, SAE860801.
3. 지상현, 김민수, "Surge-Tank의 최적 설계", 1990. CAE Technical Report, VC 90003. DWMC.
4. Vanderplaats, Garret N, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Application", 1984, McGraw-Hill.
5. Peter Ward, Andrew Wakeling, Richard Weeks, Richard Russel, "Design of an Excavator Arm Using Optimization Techniques", 1987, SAE870814.
6. CAEDS, "Integrated Finite Element Solver", User's Guide.
7. CAEDS, GEOMOD, "Solid Modeling and Design", User's Guide.
8. CAEDS, "Graphics Finite Element Modeler", User's Guide.