

상자형 용접 구조물의 응력해석

백점기*, 유인석**, 위창욱***, 정 운***

Stress Analysis of Box Type Welded Structures

- * 정희원, 부산대학교 공과대학 조선공학과 조교수, 공학박사
- ** 삼성중공업(주) 중장비사업부 부장
- *** 삼성중공업(주) 중장비사업부 사원

1. 서 언

건설기계 장비물 비롯한 각종 강구조물은 대부분 용접구조물이며, 특히, 구조물의 대형화 추세와 함께 약조건하에서도 구조물의 충분한 내구성 및 신뢰성 확보는 물론이고 동시에 작업능률 및 경제성의 향상을 위해서는 구조경량화가 필수적으로 요구되고 있다.

그런데, 이같은 용접구조물에 있어 사용중에 구조강도적으로 문제가 발생하여 파손이 일어나는 부위는 대부분 용접접합부이다. 따라서, 충분한 내구성과 구조신뢰성을 가지면서도 경량의 용접구조물을 설계, 건조하기 위해서는 용접 접합부에서의 파손 발생을 방지할수 있는 구조설계 및 용접기술의 개발이 선행되어야 한다. 구체적으로는 용접 접합부에 대한 고도정밀한 응력해석 및 강도평가법의 개발과 용접결합이 발생하지 않는 고정밀 용접시공법의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 굴삭기의 Boom 등에서 보이는 상자형 용접판구조물을 대상으로 용접 접합부의 고도정밀한 응력해석 및 강도평가를 위해 Isoparametric 유한요소 컴퓨터 프로그램을 개발 하였다. 특히, 본 프로그램은 용접부의 용착금속부도 유한요소로 모델링함으로써 모재뿐만아니라 용착금속부에 대해서도 상세한 응력 분포를 계산해낼수 있도록 되어있다. 본 프로그램의 정도를 검증하기 위하여 이론해 및 상자형 용접구조물 모형실험 결과와 본해석결과를 비교하였다. 또한, 실물크기 Boom의 응력해석 문제에 본 프로그램을 적용하여 그 유용성을 확인 하였다.

2. 컴퓨터 프로그램의 개발

2.1 해석 이론의 개요

전술한 바와 같이 상자형 용접구조물의 고도정밀한 유한요소 응력 해석을 위하여 는 모재의 상세한 구조 모델링은 물론이고, 특히 용접부의 용착금속부도 별도의 요소로 모델링할 필요가 있다. 또한, 굴삭기 Boom 과 같은 용접 판 구조물의 경우, 높은 정도의 응력 해석 결과를 얻기 위해서는 기존의 평면응력 판요소 보다는 Solid 요소를 사용하는 것이 바람직하다.

이상의 관점에서 본연구에서는 Fig.1 에 나타내는 바와 같은 Prism Element (6절점 5면체 요소)와 Hexahedron Element (8절점 6면체 요소)의 2종류의 Isoparametric 요소를 정식화하였다[1]. 한편, 요소의 각절점의 자유도는 3축방향의 변위성분인 3개이다. 또한, 실제 구조해석 모델링시에 특히, Fillet 용접 접합부의 용착 금속부는 6절점 5면체요소를 사용하여 모델링 하게 된다.

2.2 프로그램 구성

2.1절의 2종류의 Isoparametric 요소에 대한 정식화 결과를 바탕으로 컴퓨터 프로그램을 개발 하였으며, Fig.2에 프로그램의 구성도를 보여주고 있다.

2.3 프로그램의 정도 검증

개발완료된 프로그램의 정도 검증을 위하여 본해석결과와 이론해 및 구조모형 실험결과를 비교 하였다.

(1) 수직하중을 받는 1/4원보

Fig.3에 나타내는 바와같이 1/4원보(반경 $R=11.5\text{mm}$, 단면적 $A=3.0\text{mm}^2$, 굽힘강성 $EI=47250\text{ kg/mm}^2$)가 수직 하중을 받는 경우에 하중점에서 수직 및 수평방향변위를 본프로그램으로 해석하여 에너지원리에 의해 계산된 이론해[2]와 비교하였다.

요소는 8절점 6면체요소만을 사용하였으며, Fig.4에 나타내는 바와같이 두께방향으로 2층분할을 행하고 축방향으로 모두 19 개의 단면으로 요소분할하였다. 사용된 요소수 및 절점수는 각각 180개 및 336개였다.

수직하중의 크기를 100kg가한 결과, 하중작용점의 수직 및 수평변위는 이론해의 경우 각각 2.528mm 및 1.6003mm였고, 본해석의 경우는 각각 2.5mm 및 1.5958mm로서 본해석치는 이론치와 비교하여 보다 수직 및 수평변위에 대해 1.1% 및 0.28%의 오차를 나타내었으며, 본프로그램의 정도를 확인할수 있다.

(2) 굽힘모멘트를 받는 곡선보

Fig.5에 나타내는 바와 같이 호깁굽힘모멘트를 받는 곡선보(단위두께, 내경 $a=10\text{mm}$, 외경 $b=13\text{mm}$, 곡률 반경 $r_0=11.5\text{mm}$)의 굽힘응력을 계산하여 이론해[2]와 비교하였다.

본해석에서는 6절점5면체요소만을 사용하여 모델링하였으며, Fig.6에 나타내는 바와같이 보의 중앙부를 기준으로 대칭거동을 한다는 점을 고려하여 1/2만을 해석대상으로 하였다. 또한, 보의 길이방향으로 2층분할을 행하여 합계 48개의 요소가 사용되었고, 이때 절점수는 모두 60개였다. 굽힘모멘트가 작용하는 위치의 경계조건은 자유이며, 보의 중앙위치에 대칭경계조건을 설정하였다. 또한, 강체변위를 구속하기위해 보의 중앙부 밑부분의 길이방향 변위를 구속하였다. 하중은 보의 상하에서 축방향으로 축력을 가하여 $M=100 \text{ kg}\cdot\text{mm}$ 의 호깅굽힘모멘트를 발생시켰다.

해석결과로서 보의 상측에는 $83.07 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 의 인장응력, 하측에는 $65.956 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 의 압축응력이 얻어졌으며, 이경우의 이론치는 각각 $73.05 \text{ kg}/\text{mm}^2$ (인장응력) 및 $61.35 \text{ kg}/\text{mm}^2$ (압축응력)로서 각각 약 13.7% 및 7.5%의 오차를 나타내었다. 본해석의 경우, 요소수가 비교적 적은데도 불구하고 본해석결과와 이론치와 잘 일치하고 있다고 생각된다.

(3) 굽힘모멘트를 받는 상자형 용접 판구조물

Fig.7에 나타내는 바와같이 상자형 용접 판구조물에 대해 수행한 4점굽힘 실험결과[3]와 본해석 결과를 비교하였다. 실험모형은 4장의 판부재를 Fillet용접에 의해 조립하였으며, 용접후 Shorting처리 만을 하고 용접부는 Grinding등의 처리는 하지 않은 채로 실험을 수행하였다.

해석모델링은 Fig.8에 나타내는 바와같이 구조거동의 대칭성을 고려하여 1/4만을 대상으로 하였으며, 요소는 6절점 5면체요소와 8절점 6면체요소의 2종류를 동시에 사용하였다. 특히, 용접부의 용착금속부는 6절점5면체요소로 분할하였다. 요소분할은 축 및 길이방향에서 높은 굽힘응력의 발생이 예상되는 부위에서 잘게 행하였으며, 사용된 요소수는 6절점 5면체요소가 192개, 8절점 6면체요소가 444개였으며, 이때의 전체 절점수는 1020개였다.

절점외력은 실험시에서 가한 선하중(Line Load)을 절점력으로 환산하여 작용시켰으며, 구조대칭선을 따라 대칭경계조건을 설정하였다. 한편, 모재 및 용착금속부의 재료 물성치는 인장시험결과 얻어진 값의 평균치를 사용하였다. 인장시험 결과에 의하면 용착 금속부는 모재부에 비해 탄성계수는 작으나 인장강도는 오히려 크게 나타났다.

Fig.9에는 각 위치에서의 응력값을 실험치와 비교하였으며, 본 해석치는 실험치와 잘 일치하고 있다. 그런데, 전술한바와 같이 실험으로는 용착금속부에서의 응력치를 추정할수 없으나, 본 해석프로그램으로는 용착금속부의 응력치도 계산할수 있다. 본해석결과에 의하면 용착금속부의 응력이 모재의 응력보다 작으며, 본 실험모형의 경우, 그 차이는 대략 $3 - 5 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ 이었다. 이것은 모재와 용착금속부간의 접합부에서 변형률이 동일할때 탄성계수가 상대적으로 작은 용착금속부의 응력이 작게 나타났기 때문이다. 실제로 피로 균열은 대부분 모재와 용착금속부간의 접합부에서 발생하며, 그 원인중의 하나는 이들 응력균배의 갑작스런 변화에 기인된 것이 아닌가 추정된다. 이 문제는 앞으로 보다 상세한 고찰이 필요하다고 사료된다.

3. 굴삭기 Boom의 응력해석

다음으로, 실물 크기의 굴삭기 Boom의 응력해석 문제에 본 해석 프로그램을 적용 하였다. Fig.10에는 굴삭기의 전체 개략도를 보여주고 있다. 응력해석은 버켓과 암을 통하여 전달된 굽힘모우멘트가 Boom의 단부에 작용 될때를 대상으로 수행하였다.

Fig.11에는 해석 모델링예를 보여주고 있으며, Boom은 중심선을 기준으로 좌우 대칭이므로 1/2 만을 대상으로 모델링하였다. 요소는 2,3(3)절에서와같이 6절점 5면체요소와 8절점 6면체요소를 모두 사용하였고, 특히 용착금속부는 6절점 5면체요소로 모델링하였다. 또한, 본 해석에서는 Boom의 전체적인 응력분포 해석에 중점을 두어 Boom 실린더가 연결 파이프를 통해 지지되는 Boom보스부는 무시하여 모델링하지 않았다. 그러나, 실제로는 보스부에서도 응력집중 현상이 일어나므로 여기서와 같은 해석을 수행한후 상세응력해석을 할때는 보스부도 모델링할 필요가 있다.

Fig.12 및 13에는 각각 Boom의 윗판/아랫판과 측판의 축방향 응력해석치를 나타내고 있으며, 이들 그림에는 삼성중공업에서 직접 수행한 실물 크기의 굴삭기 Boom에 대한 실험 결과[4]도 비교하고 있다. 최대 응력은 Boom 실린더에 의해 지지되는 Boom의 중앙부에서 발생하고 있으며, 본 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있다는 것을 알수있다. 또한, 실험으로는 측정하기 까다로운 용착 금속부의 응력치를 본 해석 프로그램으로 계산하였으며, 2,3(3)의 용접 판구조 모형실험 결과와의 비교에서와 같이 이 경우도 용착 금속부의 응력은 모재에 비해 대략 $2 - 5 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ 정도의 차이가 있었다.

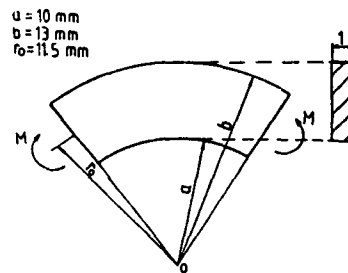
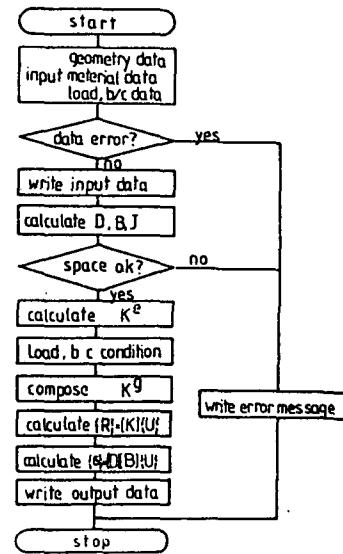
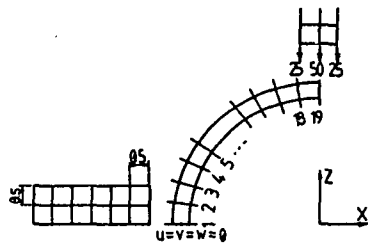
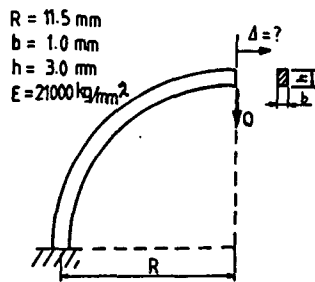
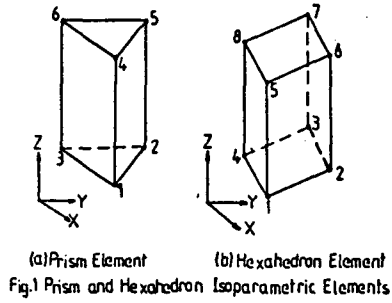
4. 결 언

충분한 내구성과 구조신뢰성을 가지면서도 경제적인 용접구조물의 설계 및 건조를 위하여는 특히 용접접합부에 대한 고도정밀한 응력해석 및 강도평가법의 개발과 용접결함이 발생하지 않는 고정밀 용접시공법의 확립이 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 굴삭기의 Boom등에서 보이는 상자형 용접판구조물을 대상으로 용접 접합부의 고도정밀한 응력해석 및 강도평가를 위해 Isoparametric 유한요소 컴퓨터 프로그램을 개발 하였다. 특히, 본 프로그램에서는 모재뿐만아니라 용착금속부도 모델링할수 있도록 고안함으로써 용접접합부에 대한 고도정밀한 응력해석이 가능하도록 시도하였다. 본 프로그램의 정도와 유용성을 검증하기 위하여 이론해 및 상자형 용접구조 모형실험 결과와 본해석결과를 비교하였다. 또한, 실물크기 Boom의 응력해석 문제에 본 프로그램을 적용하여 그 유용성을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] 유한요소법 핸드북, 배풍관, 1981(일본어).
 [2] S.P.Timoshenko and J.N.Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 3rd Edition, 1970.



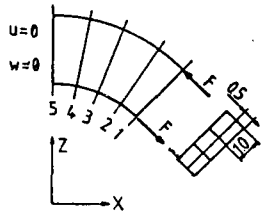


Fig.6 Mesh of Curved Beam

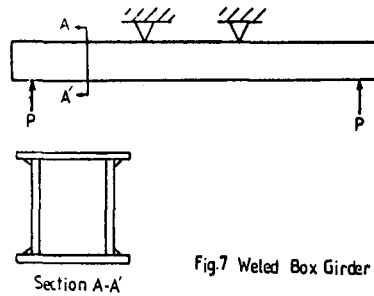
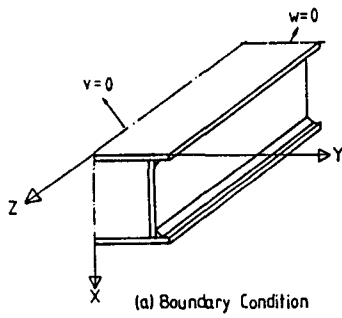
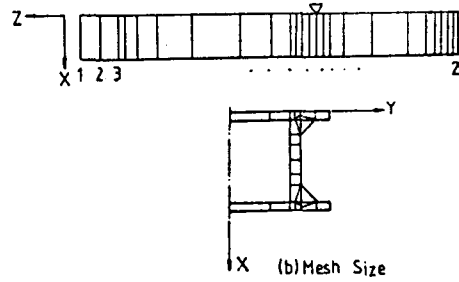


Fig.7 Welded Box Girder



(a) Boundary Condition



(b) Mesh Size

Fig.8 1/4 Welded Box Girder

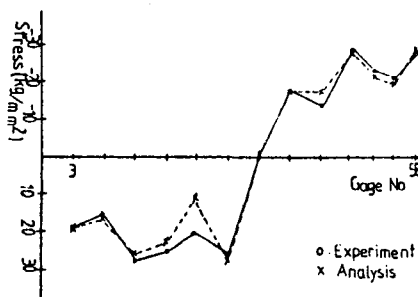


Fig.9 Welded Box Girder Analysis

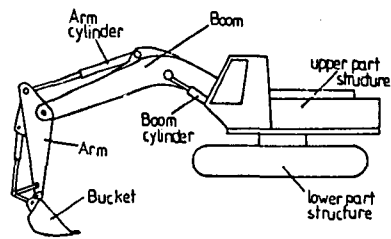


Fig.10 Excavator

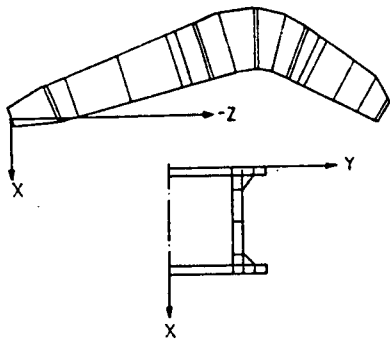


Fig. 11 Boom Mesh Size

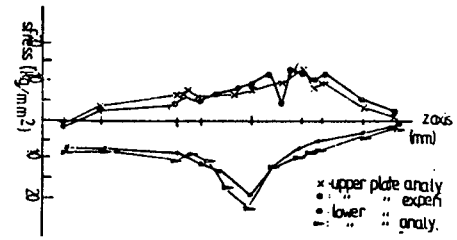


Fig. 12 U_1 plate analysis

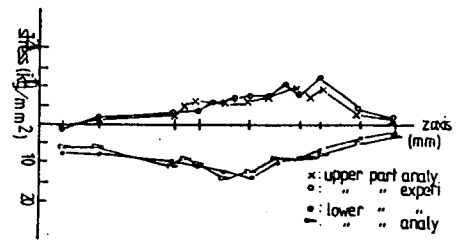


Fig. 13 side plate analysis