

기술강좌

유한요소법을 이용한 용접부 해석(4) -잔류응력 및 변형 해석 예제-

양영수·김재웅

Analysis of Weldment by Using Finite Element Method(4)  
-Example Program for Residual Stress and Distortion Analysis-

Young-Soo Yang and Jae-Woong Kim

1. 해석영역 및 요소분할

강판의 GTA 비드용접(bead-on-plate) 3차원 해석을 위한 해석영역 및 요소분할에 관하여 참고문헌<sup>1)</sup>에 자세히 설명되어있다. 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS S/W을 사용하여 해석영역을 Fig. 1에 나타내었으며, 길이(Z) 방향을 따라 Y축을 중심으로 온도분포가 대칭이기 때문에 시편의 반쪽을 해석영역으로 하였다.

용접부 잔류응력 해석을 위해서는 열유동 해석이 선행되어야 한다. 열유동 해석은 참고문헌<sup>1)</sup>의 과정을 따라 Fig. 2와 (200×100×20mm)같이 요소를 분할하여 온도분포를 계산하였다. 요소분할에 의해 node.inp 파일 및 ele.inp 파일을 생성하였으며, 열유동 해석결과 는 tem.odb, tem.res, tem.sta 파일 등에 저장되어 있다.

2. 응력 및 변형해석 예제 프로그램

요소분할은 온도분포 계산에 사용되었던 요소분할과 동일하게 node.inp, ele.inp 파일을 사용하며, 열응력 계산을 위한 주요한 파일은 stress.inp이다. 용접속도,

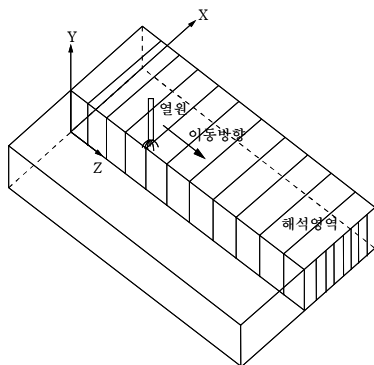


Fig. 1 Solution domain of 3-dimensional analysis in bead-on-plate GTA welding

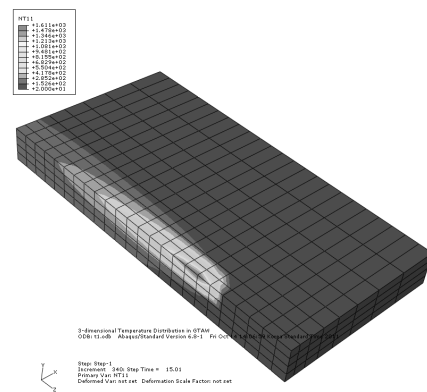


Fig. 2 Mesh generation of solution domain and temperature distribution on welding

입열량 등 용접조건은 온도분포 해석에서 이미 고려되었으며, 열응력 계산에서는 이미 계산된 온도 데이터만을 이용하여 응력을 계산한다.

file : stress.inp

```
*HEADING
3-dimensional Stress Distribution in GTAW
** 프로그램 설명
*NODE, NSET=NALL, INPUT=node.inp
** node.inp 파일에서 절점좌표 읽어옴
** 모든 요소를 NALL로 정의함
*ELEMENT, TYPE=C3D8, INPUT=ele.inp, ELSET=ELALL
** ele.inp 파일에서 요소 절점번호 읽어옴.
** C3D8은 6면체 8절점 응력해석 요소임
*NSET,NSET=CENTER, GENERATE
9, 1125 9
** 9번 절점에서 1125번 절점까지 9간격(9, 18, 27.....1116, 1125)
** 중앙면(x=0)면의 절점을 설정, 양쪽 대칭으로 x-방향
** 변위가 0으로 구속하기 위한 경계조건을 설정하기 위한
*NSET,NSET=BC
1, 217
** y 및 z 방향 구속을 위해 두 개의 절점 (x=100, y=0, z=0) 및
** (x=100, y=0, z=200)을 설정함, 강체운동의 구속을 위한
```

```

*SOLID SECTION, ELSET=ELALL, MATERIAL=Steel
** 모든 요소의 재료를 Steel로 정의
*MATERIAL,NAME=Steel
*ELASTIC
21.0E+3, 0.3, 20
15.0E+3, 0.3, 600
10.0E+3, 0.3, 900
5.0E+3, 0.3, 1600
1.0E+3, 0.3, 2000
1.0E+3, 0.3, 3000
** 온도에 따른 탄성계수, 포아송비
*PLASTIC
24.0, 0, 20
36.0, 0.3, 20
** 온도20°C일 때 항복응력(24.0), 인장강도(36.0),
** 항복에서 인장강도까지 소성변형률(0.3)
18.0, 0, 200
28.0, 0.3, 200
12.0, 0, 400
20.0, 0.3, 400
6.0, 0, 600
12.0, 0.3, 600
1.0, 0, 800
4.0, 0.3, 800
1.0, 0, 1000
2.3, 0.3, 1000
0.1, 0, 1600
0.2, 0.3, 1600
** 온도에 따른 항복응력, 인장강도, 소성변형률
*EXPANSION
12.2E-6
** 열팽창계수
*INITIAL CONDITION, TYPE=TEMPERATURE
NALL, 20.0
** 모든 요소(NALL)의 초기온도를 20°C로 부여
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=1
*STEP,INC=200
*STATIC
0.1, 20
** 초기 시간간격 0.1초로 20초(가열과정)까지 해석
** 시간 간격은 매 단계에서 변화시킴
*BOUNDARY
CENTER, 1, 1
** CENTER 절점(9, 18,....1125) x-방향 변위를 0으로 구속
BC, 2, 3
** BC 절점(1, 217) y-방향 및 z-방향 변위를 0으로 구속

*TEMPERATURE,FILE=tem,BSTEP=1,BINC=1,
ESTEP=1,EINC=443
** 온도분포 해석결과 tem.res 파일에서 온도를 읽어옴
** tem.sta 파일에 step 과 inc가 나타나 있음
** step=1 가열과정(time=0-20sec)
*END STEP
** 가열과정(0-20초) 열응력 계산 끝
*STEP,INC=200
*STATIC
0.1, 3000

```

```

** 20초에서 3000초(냉각과정) 계산
*BOUNDARY
CENTER, 1, 1
BC, 2, 3
*TEMPERATURE,FILE=t1,BSTEP=2,BINC=1,
ESTEP=2,EINC=66
** 온도분포 해석결과 tem.res 파일에서 온도를 읽어옴
** tem.sta 파일에 step 과 inc가 나타나 있음
** step=2 냉각과정(time=20-3000sec)
*END STEP
** 냉각과정(20-3000초) 계산 끝

```

### 3. 예제 프로그램의 실행 결과

예제로 작성된 프로그램을 이용하여 실제 계산한 잔류응력 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타난 잔류응력은 z-방향(길이방향) 응력으로 용접선 주위에서는 인장잔류응력이, 용접부에서 멀리 떨어진(x 증가) 부분에서는 압축잔류응력이 나타남을 볼 수 있다. 아울러 용접선의 초기 및 끝단 부위에서의 응력은 거의 형성되지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 y방향(높이방향) 변위를 나타내고 있다. 용접선으로부터 좌우 가장자리인(x=100mm) 노드에 대해 높이방향으로 구속을 하였기 때문에 높이방향 변위는 발생하지 않았으며(y=0mm), 용접부의 수축에 의해 용접선 부근에서 하단으로 변형하는 결과가 나타났다. 이러한 변형은 평판 맞대기 용접에서 흔히 발생할 수 있는 각변형(angular distortion)의 형태로 나타나는 것이다.

프로그램 실행과정을 통해 볼 수 있듯, 잔류응력과 변형은 용접 열사이클에 의한 온도분포에 따라 발생하는 열팽창/수축의 결과에 기인하는 것이므로 온도분포 해석을 전제로 해야 한다. 아울러 열응력과 변형은 구

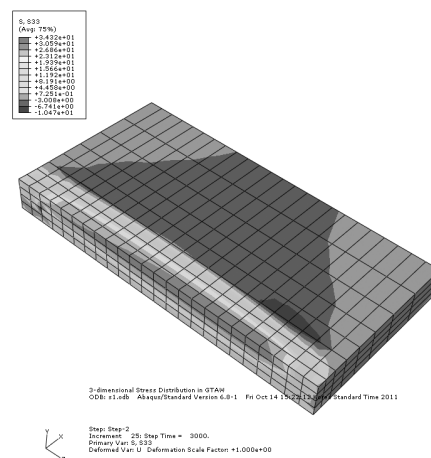


Fig. 3 z-dir residual stress( $\sigma_{zz}$ ) distribution in solution domain

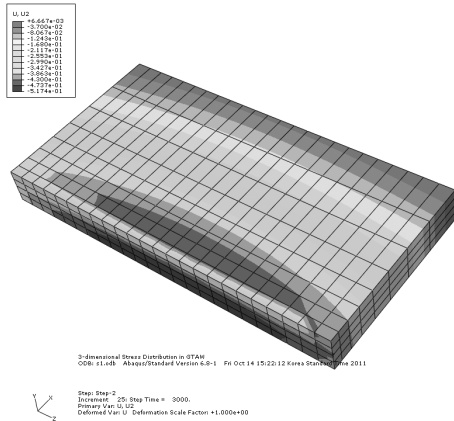


Fig. 4 y-dir deformation ( $U_y$ ) in solution domain

성방정식에 의해 상호 관련이 있으므로 동시에 해석이 수행된다. 즉, 용접변형은 열변형에 따른 소성변형과 잔류응력에 의한 탄성변형을 모두 포함한 형태로 나타내어진다.

### 참 고 문 헌

1. 양영수, 김재웅, 유한요소법을 이용한 용접해석(2) -열유동 해석 예제-, 대한용접접합학회지, **29-3** (2011), 1-3



- 양영수
- 1963년생
- 전남대학교 기계시스템공학부
- 용접변형 및 잔류응력 해석
- e-mail : ysyang@chonnam.ac.kr



- 김재웅
- 1959년생
- 영남대학교 기계공학부
- 용접공정 및 구조물 해석
- e-mail : jaekim@ynu.ac.kr