

## 유한요소법을 이용한 용접 해석(2) - 열유동 해석 예제 -

양영수·김재웅

### Analysis of Weldment by Using Finite Element Method(2)

- Example Program for Heat Flow Analysis -

Young-Soo Yang and Jae-Woong Kim

#### 1. 아크용접의 열유동 해석

상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS S/W을 사용하여 강판의 GTA 비드용접(bead-on-plate) 3차원 해석을 위한 프로그램 작성 예제를 살펴보고자 한다. 해석영역을 그림 1에 나타내었으며, 길이(Z) 방향을 따라 Y축을 중심으로 온도분포가 대칭이기 때문에 시편의 반쪽을 해석영역으로 하였다.

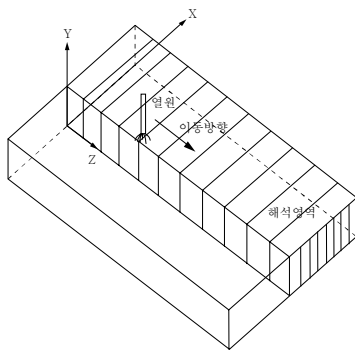


Fig. 1 Solution domain of 3-dimensional analysis in bead-on-plate GTA welding

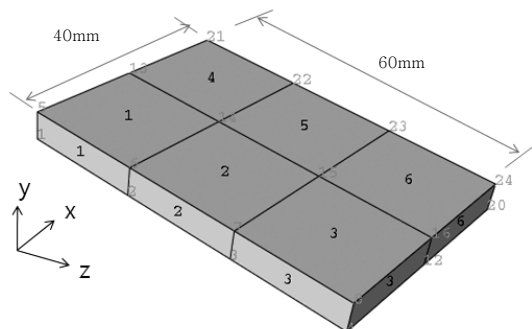


Fig. 2 Mesh generation of solution domain to understand of example program

#### 2. 열유동 해석 예제 프로그램

해석 프로그램 진행 및 작성법을 이해하기 위하여 해석영역을 아주 단순하게 그림 2와 같이 6개의 요소와 24개 절점으로 분할하였으며 각각의 요소는 6면체 8절점 요소이다. ABAQUS S/W를 이용하여 온도분포를 계산하기 위해서는 1단계로 전처리 프로그램(pre-processor)을 사용하여 요소분할, 용접조건, 경계조건 등을 고려하여 다음과 같은 계산용 프로그램을 작성한다. 2단계로는 작성된 프로그램을 Solver를 이용하여 계산하고, 3단계로 후처리 프로그램(post-processor)을 사용하여 계산결과를 그림으로 출력한다. 전처리 프로그램을 사용하지 않고 편집기(editor)를 사용하여 직접 작성하여도 무관하다.

먼저, 각 절점의 절점번호와 X,Y,Z 좌표 값을 정의한 파일이 아래와 같은 node.inp이다.

file : node.inp

```

1, 0, 0, 0
2, 0, 0, 20
3, 0, 0, 40
4, 0, 0, 60
5, 0, 5, 0
6, 0, 5, 20
7, 0, 5, 40
8, 0, 5, 60
9, 20, 0, 0
10, 20, 0, 20
11, 20, 0, 40
12, 20, 0, 60
13, 20, 5, 0
14, 20, 5, 20
15, 20, 5, 40
16, 20, 5, 60
17, 40, 0, 0
18, 40, 0, 20
19, 40, 0, 40
20, 40, 0, 60
    
```

21, 40, 5, 0  
 22, 40, 5, 20  
 23, 40, 5, 40  
 24, 40, 5, 60

요소의 번호와 각 요소를 이루고 있는 절점의 번호를 나타낸 파일이 아래와 같은 ele.inp이며, 6면체 8절점이기 때문에 하나의 요소는 8개의 절점번호로 이루어진다. 번호의 순서는 X-Y 평면, 시계방향으로 반드시 규칙성을 따라 나열해야 한다.

**file : ele.inp**

1, 1, 9, 13, 5, 2, 10, 14, 6  
 2, 2, 10, 14, 6, 3, 11, 15, 7  
 3, 3, 11, 15, 7, 4, 12, 16, 8  
 4, 9, 17, 21, 13, 10, 18, 22, 14  
 5, 10, 18, 22, 14, 11, 19, 23, 15  
 6, 11, 19, 23, 15, 12, 20, 24, 16

계산을 위한 주요한 파일은 tem.inp이며 파일내에 \* 표시는 명령어로서 실행을 하는 것이며 다음 줄에 적절한 데이터를 입력한다. \*\* 표시는 실행이 없으며 단순한 설명문이다.

**file : tem.inp**

\*HEADING  
 3-dimensional Temperature Distribution in GTAW  
 \*\* 프로그램 설명  
 \*NODE, NSET=NALL, INPUT=node.inp  
 \*\* node.inp 파일에서 절점좌표 읽어옴.  
 \*\* 모든 요소를 NALL로 정의함  
 \*ELEMENT, TYPE=DC3D8, INPUT=ele.inp, ELSET=ELALL  
 \*\* ele.inp 파일에서 요소절점번호 읽어옴.  
 \*\* DC3D8은 6면체 8절점 열전달 해석요소  
 \*ELSET,ELSET=LEFT  
 4, 5, 6  
 \*\* 대기로 대류를 고려하기 위하여 왼쪽면 요소번호 설정  
 \*ELSET,ELSET=FRONT  
 1, 4  
 \*\* 대기로 대류를 고려하기 위하여 앞쪽면 요소번호 설정  
 \*ELSET,ELSET=BACK  
 3, 6  
 \*\* 대기로 대류를 고려하기 위하여 뒤쪽면 요소번호 설정  
 \*ELSET,ELSET=TOP, GENERATE  
 1, 6, 1  
 \*\* 대기로 대류를 고려하기 위하여 위쪽면 요소번호 설정  
 \*\* GENERATE : 1부터 6까지 1씩 증가  
 \*ELSET,ELSET=BOTTOM, GENERATE  
 1, 6, 1  
 \*\* 대기로 대류를 고려하기 위하여 아래쪽면 요소번호 설정  
 \*SOLID SECTION, ELSET=ELALL, MATERIAL=Mildsteel  
 \*\* 모든 요소의 재료를 Mildsteel로 정의  
 \*MATERIAL,NAME=Mildsteel  
 \*DENSITY  
 7.860E-6  
 \*\* 밀도

\*CONDUCTIVITY  
 51.9E-03, 0  
 51.0E-03, 100  
 48.5E-03, 200  
 42.6E-03, 400  
 35.5E-03, 600  
 26.3E-03, 900  
 29.7E-03, 1200  
 29.7E-03, 3000  
 \*\* 온도에 따른 열전달 계수  
 \*SPECIFIC HEAT  
 480.0, 0  
 506.5, 125  
 531.6, 225  
 573.4, 325  
 623.7, 425  
 703.2, 525  
 786.9, 625  
 845.5, 675  
 1431.6, 725  
 950.2, 775  
 736.7, 825  
 648.8, 875  
 657.2, 1125  
 686.5, 3000  
 \*\* 온도에 따른 비열  
 \*LATENT HEAT  
 273790, 1452, 1550  
 \*\* 잠열 및 잠열발생 온도 범위  
 \*INITIAL CONDITION, TYPE=TEMPERATURE  
 NALL, 20.0  
 \*\* 모든요소(NALL)의 초기온도 20°C부여  
 \*RESTART, WRITE, FREQUENCY=1  
 \*STEP, INC=100  
 \*HEAT TRANSFER, DELTMX=50  
 0.1, 12.0  
 \*\* 초기 시간간격 0.1초로 12초(가열과정)까지 해석  
 \*\* 전 시간(before step) 계산결과와 최대온도차이가 50이하  
 \*\* 되도록 시간 간격을 변화시킴  
 \*DFLUX  
 TOP, S2NU  
 \*\* TOP으로 정의된 요소 2면에 heat flux 입력  
 \*\* 열량의 크기는 user subroutine에서 정함  
 \*FILM  
 BOTTOM, F1NU  
 TOP, F2NU  
 FRONT, F3NU  
 LEFT, F4NU  
 BACK, F5NU  
 \*\* BOTTOM으로 정의된 요소 1면에 대류경계조건  
 \*\* 대류열전달 계수는 user subroutine에서 정함  
 \*\* TOP으로 정의된 요소 2면에 대류경계조건  
 \*\* FRONT로 정의된 요소 3면에 대류경계조건  
 \*\* LEFT로 정의된 요소 4면에 대류경계조건  
 \*\* BACK으로 정의된 요소 5면에 대류경계조건  
 \*END STEP  
 \*\* 가열과정(0-12초) 계산 끝

```
*STEP, INC=100
*HEAT TRANSFER, DELTMX=50
0.1, 3000.0
** 12초에서 3000초(냉각과정) 계산
*FILM
BOTTOM, F1NU
TOP, F2NU
FRONT, F3NU
LEFT, F4NU
BACK, F5NU
** 대류경계조건
*END STEP
** 냉각과정(12-3000초) 계산 끝
```

시편 중앙부위(X=0) 면에서는 양쪽 대칭이기 때문에 단열조건이며, 프로그램에서는 경계조건 없이 고려하지 않으면 단열조건으로 처리된다.

열유속(heat flux) 형태의 아크열원인 정규분포 입열과 온도에 따른 대류열전달 계수의 정의를 위한 USER SUBROUTINE 프로그램은 포트란 언어를 사용하며 tem.for 파일과 같다.

**file : tem.for**

```
SUBROUTINE DFLUX(FLUX,SOL,KSTEP,KINC,
& TIME1,NOEL,NPT,COORDS,JLTYP,TEMP,
& PRESS, SNAME )
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
CHARACTER*80 CMNAME
DIMENSION FLUX(2), TIME1(2), COORDS(3)
CURRENT=200.
c 용접전류
VOLTAGE=20.
c 용접전압
EFF=0.5
c 아크효율
POWER=EFF*VOLTAGE*CURRENT
RBAR=5.0
c 아크 유효반경(아크열원 정규분포를 위한)
VEL=5.0
c 용접속도
X=COORDS(1)
c 계산되고 있는 요소의 적분점 X축 좌표 값
HC=VEL*TIME1(2)
Z=COORDS(3)-HC
c 계산되고 있는 요소의 적분점 Z축 좌표 값
DIS=SQRT(X**2+Z**2)
```

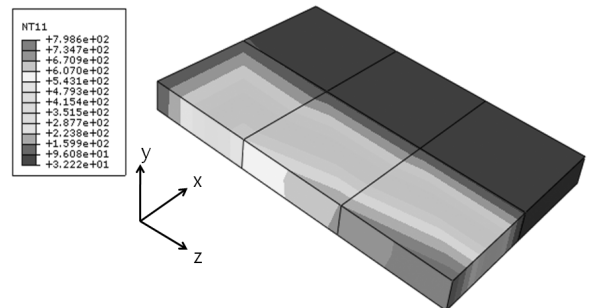
```
c 아크중심에서 요소 적분점까지 거리
FL1=3.0*POWER*EXP(-3.0*(DIS/RBAR)**2)
FL2=3.14*(RBAR**2)
FLUX(1)=FL1/FL2

c 각 시간의 아크위치를 중심으로 아크열원의 정규분포 값
RETURN
END

SUBROUTINE FILM(H,SINK,TEMP,KSTEP,KINC,
& TIME1,NOEL,NPT,COORDS,JLTYP,FIELD,NFIELD,
& SNAME, NODE,AREA)
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
DIMENSION H(2),TIME1(2),COORDS(3)
CHARACTER*80 CMNAME
H(1)=((TEMP+273.1)**1.62)*21.69E-10
c 온도(TEMP) 변화에 따른 대류열전달 계수
SINK=20.
c 대기온도
RETURN
END
```

**3. 예제 프로그램의 실행 결과**

예제로 작성된 프로그램을 이용하여 실제 계산한 온도분포 결과를 그림 3에 나타내었다. 아크열원이 시편의 끝단을 지난 직후 온도분포이다. 요소의 분할을 너무 크게 하였기 때문에 신뢰할 수는 값이 아니며 프로그램 작성 예제를 보여주기 위함이다. 실제 요소분할에서는 온도변화가 급격한 용접부 주위에서는 미세하게 요소를 분할하고, 용접부에서 먼 부분은 온도차이가 크지 않기 때문에 요소의 크기가 큰 것을 사용한다.



**Fig. 3** Temperature distribution in solution domain (time=12 sec)



- 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