

# 적층 셸 요소를 이용한 용접 열탄소성 해석 The Thermal Elasto-plastic Analysis Using Layered Shell Element

송하철 · 엄재선 · 장창두  
H. C. Song, J. S. Yum and C. D. Jang

**Key Words** : Thermal Elasto plastic Analysis(열탄소성해석), Welding Distortion(용접변형), Layered Shell Element(적층 셸요소), Nonlinear Analysis(비선형해석), Ship Hull Block(선체블록), bead on plate welding(비드온 용접)

**Abstract** : The thermal elasto-plastic analysis for the prediction of welding distortion of a 3 dimensional large-scaled ship structure is a very time-consuming work since the analysis is a nonlinear problem, and a lot of finite elements are needed to simulate the large ship hull block. Generally, 3-D finite elements have been used in the 3-D welding distortion problem to assess precisely the temperature gradient through the thickness direction of the welding plate. As a result of the adoption of 3-D element, degrees of freedom are rapidly increased in the problem to be solved. In this study, to improve the time efficiency of welding thermal elasto-plastic analysis, a layered shell element was proposed to simulate 3-D temperature gradient, and the results were compared with the experiment. The experiments were carried out for the type of bead-on-plate welding, and we found the measured data have a good agreement with the FEA results.

## 1. 서 론

용접 열탄소성해석 기법은 열전도해석 및 이와 연성된 탄소성해석의 load step이 많고, 용접 비드부의 섬세한 요소 분할을 전제로 하기 때문에, 요소수가 기하급수적으로 증가됨에 따라 적정 크기 이상의 선체 블록의 경우는 실시간 해석이 어렵다는 한계를 가지고 있으나, 건조 공정에서 하중조건과 경계조건의 변화에 따른 용접 변형 형상을 추적할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

용접 열탄소성해석에 의한 용접변형 예측에 쓰이는 유한요소는 주로, 3차원 변형 문제의 경우 모재 두께 방향의 온도 구배 특성을 구현할 수 있는 3차원 요소를 사용하며, 2차원 변형 문제로 가정되는 경우에 한해서는 2차원 요소를 사용하게 된다<sup>1),2)</sup>.

용접 변형 예측을 위한 열탄소성해석의 궁극적인 목적은 단순한 시편의 용접 변형이 아닌 3차원 블

록의 용접 변형 예측인 바, 2차원 요소의 적용성은 그 한계를 가지게 되며, 3차원 요소의 경우는 용접 체결부 등에 매우 주의를 요하는 요소 분할 모델링과 아울러 자유도의 증가에 따른 해석 시간의 증가가 그 적용상의 어려움으로 대두된다.

조선분야 가공공정의 많은 부분을 차지하는 선상 가열에 의한 변형해석 역시 3차원 변형을 가지는 문제의 특성상 상기한 용접변형해석과 동일한 문제점을 가지고 있어, 선상가열 연구 분야에서도 해석 시간을 줄이기 위한 연구들이 그동안 꾸준히 진행되어 왔다<sup>3),4)</sup>.

이러한 열탄소성해석상의 시간 효율성을 제고하기 위하여, 본 연구에서는 적층 셸 요소를 이용하여 3차원적인 온도구배를 구현함과 동시에 해석 시간을 대폭 단축시킬 수 있는 열탄소성해석 모델을 개발하였고, 이를 기반으로 용접해석에 적용하였다.

해석상의 효율성 검토를 위해 해석시간은 물론 적절한 온도분포를 표현하기 위한 최소 적층 개수 등을 검토하였고, 판 부재에 대한 비드온 용접 변형 실험을 수행하여 그 결과를 적층 셸요소를 이용한 열탄소성해석 결과와 비교하여 본 연구에서 제안한 해석 기법의 타당성을 검증하였다.

접수일 : 2005년 10월 31일  
송하철(책임저자) : 목포대학교 기계선박해양공학부 교수  
E-mail : hcsong@mokpo.ac.kr Tel. 061-450-2767  
엄재선 : 목포대학교 기계선박해양공학부 교수  
장창두 : 서울대학교 조선해양공학과 교수

## 2. 적층 셸 요소를 이용한 열탄소성 해석

### 2.1 적층 셸 요소

본 연구의 열전달 해석에 사용된 셸 요소는 적층 셸 요소로서 4개의 절점을 가지며, 각 절점 당 최대 32개의 온도 자유도를 갖는다.

이 요소는 면내 방향 및 두께 방향의 열전달을 해석할 수 있는데, 온도분포에 대한 형상함수는 각각 식(1)과 식(2)에 나타내었다. Fig. 1과 Fig. 2는 각각 적층 셸 요소의 기하학적 정의와 부호규약을 보여 주고 있다. 이 때 두께 방향의 2차 온도 분포의 경우, 요소의 최대 적층 수는 15개이다.

열전도해석에 이은 탄소성해석 역시 구조해석용 셸 요소를 이용하였으며, 열전도해석에 따른 온도분포 결과를 가지게 된다.

본 연구의 해석은 범용유한요소해석 코드인 ANSYS를 이용하였다.

$$T = \frac{1}{4} [T_I(1-s)(1-\theta) + T_J(1+s)(1-\theta) + T_K(1+s)(1+\theta) + T_L(1-s)(1+\theta)] \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} [T_H(-r+r^2) + T_I(r+r^2)] + T(1-r^2) \quad (2)$$

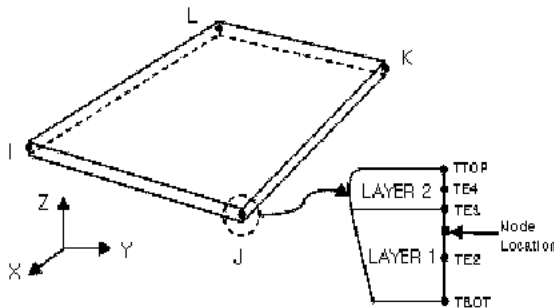


Fig. 1 Geometry of a layered shell element

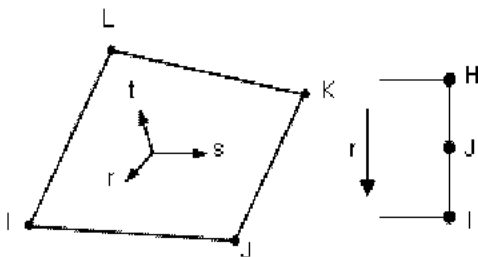


Fig. 2 Notation for shape functions of element

상기한 적층 셸 요소를 이용하여 열탄소성 해석을 수행하여 두께 방향의 온도분포를 적절히 표현

할 수 있는 최소 적층 수를 결정하였고, 대형구조물 해석에 대한 적용성을 검토하기 위해 만 개 정도의 많은 요소 수를 갖는 이상화된 용접 모델에서의 해석시간을 확인하였다.

### 2.2 해석 조건 및 방법

이상화된 해석 모델은 길이 및 너비가 1,000mm, 두께가 15mm인 강판이며, 유한요소는 가로와 세로를 각 100개씩으로 분할하여 총 10,000개의 요소로 모델링하였고, 해석 대상에 대해 적층 수에 따른 해석시간을 확인하였다.

기존 문헌<sup>5)</sup>을 참고하여 열전도해석에 필요한 온도의존성 물성치 및 탄소성해석에 필요한 재료 모델을 결정하였고, 열전도해석은 입열 10단계, 냉각 10단계, 총 20단계로 나누어 해석을 수행하였다.

또한 입열 모델은 Table 3에 제시된 용접조건에 식(3)을 이용하여 단위 시간당 유효입열량,  $Q_{eff}$ 를 계산하고 이를 해석단계 및 입열이 이루어지는 요소의 면적을 고려하여 식(4)와 같은 heat flux rated 인  $Q_{flux}$ 를 산출하여 해당 요소에 균일하게 투입하였다.

Table 1 Welding conditions for the idealized model

Voltage (V)	Current (A)	Velocity (mm/sec)
31	280	6.2

$$Q_{eff} = \eta \cdot V \cdot I \quad (3)$$

$$Q_{flux} = \frac{Q_{eff}}{bL} \quad (4)$$

여기서,  $\eta$ 는 아크효율로서 기존 논문<sup>5)</sup>을 참고하여 0.7의 값을 사용하였다. 위의 식에서  $V$ 는 용접 전압,  $I$ 는 용접전류이며,  $b$ 와  $L$ 은 각각 입열을 받는 요소의 총 폭과 길이로서  $bL$ 은 입열 요소의 총 넓이다.

### 2.3 해석 결과

Fig. 3부터 Fig. 5까지는 열전달 해석의 온도분포 결과로서, Fig. 3은 입열이 시작되는 시점(step1), Fig. 4는 입열이 끝났을 때(step10) 그리고 Fig. 5는 입열 및 냉각이 완료되었을 때(step20)의 온도분포 결과이다.

열전달 해석에 있어 요소의 적층 수 및 자유도에

따른 해석시간은 Table 2와 같다. Fig. 6과 7은 각각 두께 방향의 온도 분포 결과와 적층 수에 따른 온도 분포 비교 결과이다. Fig. 8는 열전도 해석결과를 이용한 탄소성해석 즉, 초기 용접 변형 해석결과이고, 적층 수에 따른 변형량 비교는 Table 3에 나타내었다.

열전도 해석 시 사용되는 셀 요소는 1개의 적층에 대해 3개의 온도분포 결과를 갖고 있으나, 탄소성 해석용 셀요소는 1개의 적층에 대해 2개의 온도분포를 이용하게 되므로 열전도 해석에서의 적층 수보다 2배 많은 적층 수를 갖게 된다. 그러나, 구조 해석 시에는 적층 수보다는 절점의 자유도가 해석 시간에 큰 영향을 미치고, 비록 적층 수가 많아지더라도 절점의 자유도는 변하지 않기 때문에 적층 수에 따른 탄소성 해석 시간은 20분 내외로 큰 차이가 없었다.

Table 3를 검토해 보면, 탄소성해석에 따른 최대 변형량은 탄소성해석에 사용된 셀 요소의 적층수가 4 이상인 경우 큰 차이를 보이지 않고 있어, 이상화된 모델과 비슷한 용접변형해석에서는 열전도 해석 시 2개의 적층, 탄소성해석 시 4개의 적층으로 모델링해도 큰 오차가 발생하지 않음을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of the result of heat transfer analysis according to the number of layers

No. of layer	Degree of freedom	Analysis time(min.)
1	30,603	10
2	51,005	33
3	71,407	126

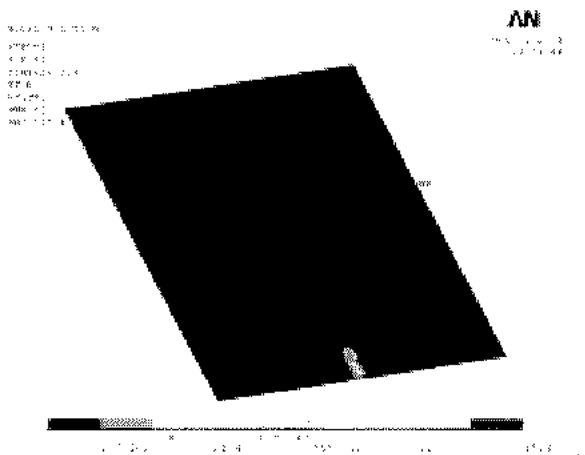


Fig. 3 Temperature distribution of heat transfer analysis (step 1)

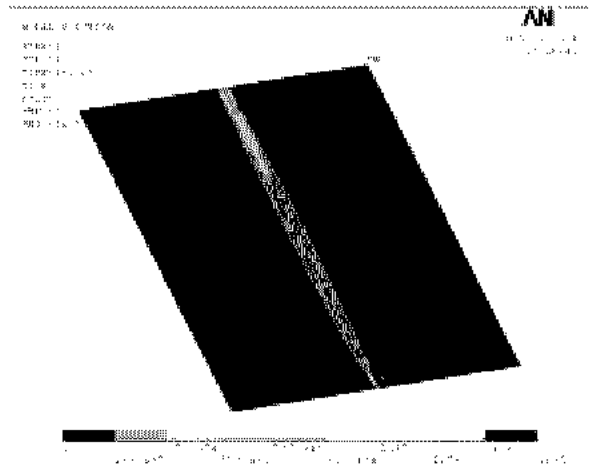


Fig. 4 Temperature distribution of heat transfer analysis (step 10)

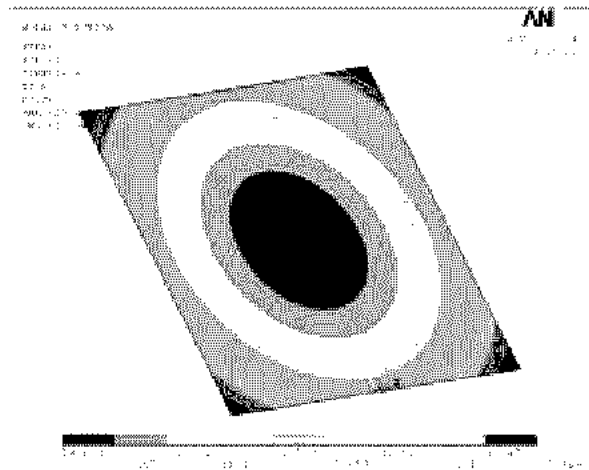


Fig. 5 Temperature distribution of heat transfer analysis (step 20)

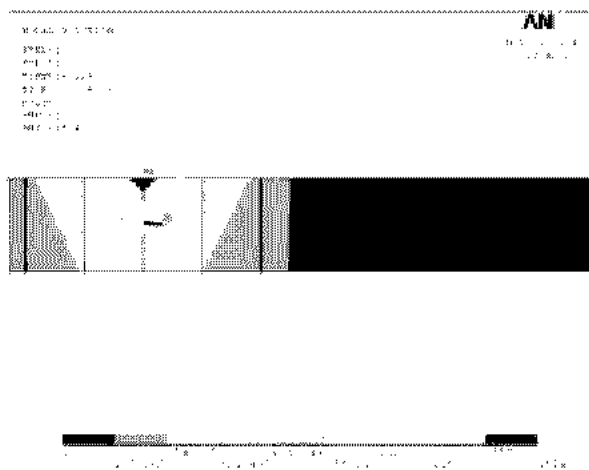


Fig. 6 Temperature distribution of plate thickness direction

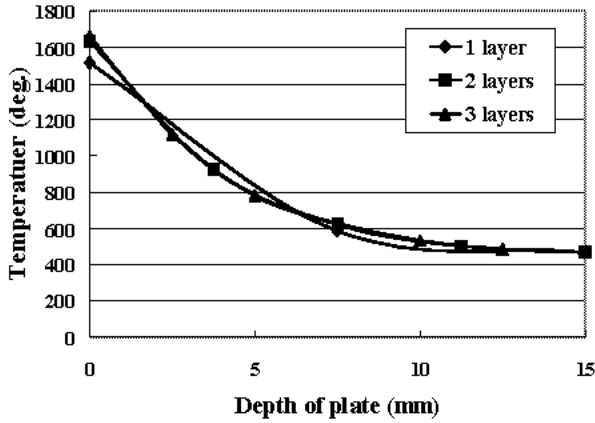


Fig. 7 Temperature distributions according to the number of layers

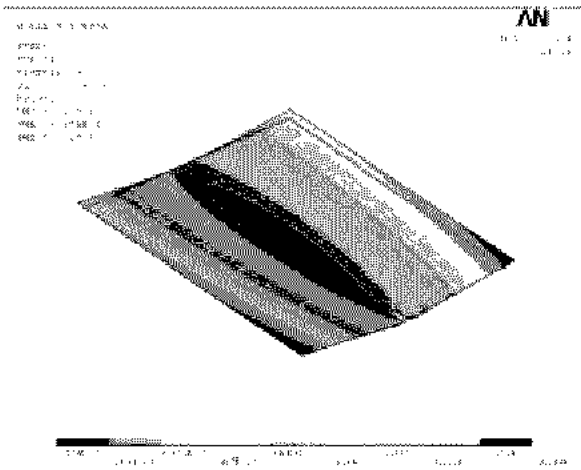


Fig. 8 Result of the elasto-plastic analysis

Table 3 Comparison of the maximum displacement according to the number of layers

No. of layer	2	4	6
Max. displacement [mm]	2.958	1.402	1.409

### 3. 용접 판부재의 용접 변형해석 및 실험

적층 셀 요소를 이용한 용접변형해석법의 검증을 위해 비드온 용접(bead-on welding) 모델에 대한 실험을 수행하였고, 동일한 용접조건으로 열탄소성 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

용접 변형해석의 검증을 위한 실험은 각각 1m, 2m의 폭에 두께 12mm인 평판을 이용하였으며, 이 모재에 비드 온 용접을 수행하여 용접변형을 계측하였다.

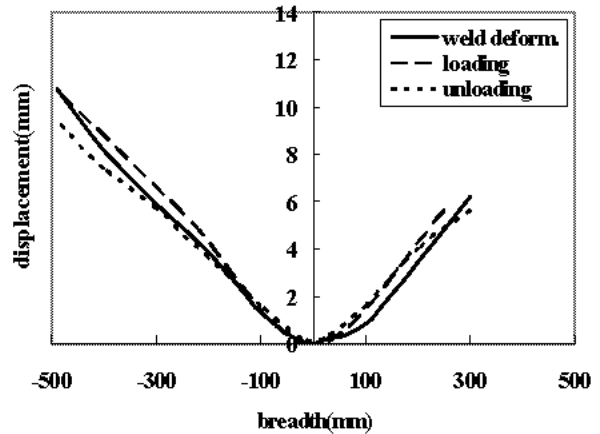
실험에 사용된 용접 조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Welding conditions of bead-on welding

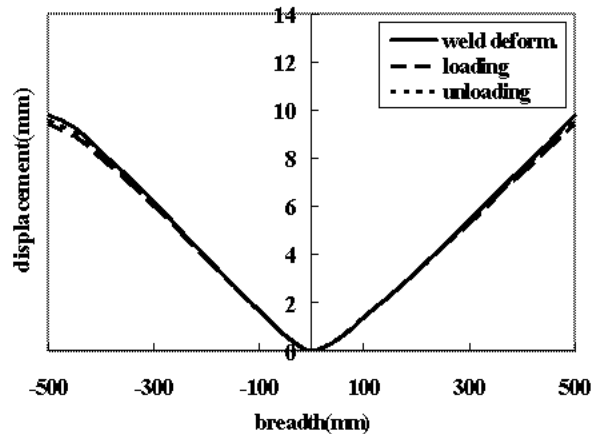
Voltage (V)	Current (A)	Velocity [mm/sec]
30	300	6

전술한 방법과 마찬가지로 열전달 해석에는 2개의 적층, 탄소성 해석에는 4개의 적층을 사용하였으며, 요소 분할은 길이방향 40개, 폭 방향 20개씩 총 800개로 하였다.

Fig. 9는 초기 용접 변형 형상에 대한 실험과 해석의 결과를 비교하고 있는 바, 정성적으로나 정량적으로 매우 근사한 값을 주고 있어, 적층 셀 요소를 이용한 열탄소성 해석 결과의 유용성을 검증할 수 있다.



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig. 9 Angular distortion of the welding plate along the direction of the end line

#### 4. 결 론

본 연구에서는 3차원 용접 구조물의 용접 변형해석을 위한 선결 과제인, 모델링의 용이성과 해석 시간의 단축을 목표로, 적층 셀 요소를 이용한 용접 열탄소성해석 모델링에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 적층 셀 요소를 이용하여 용접 모재의 두께방향의 온도 구배를 구현할 수 있었으며, 이상화된 해석 모델을 통해 열전도해석의 경우 2개의 적층, 열전도해석에 이은 탄소성해석에 있어서는 4개의 적층이 적정함을 밝혔다.
- 2) 적층 셀의 경우, 1만개 정도의 많은 요소수를 갖는 용접구조물에 대해서도 실시간에 열탄소성해석 수행이 가능함을 보여 시간 효율성을 제고하였다.
- 3) 비드온 용접 시편의 용접 변형 실험결과와, 제안된 해석 결과와의 비교를 통해 적층 셀 요소를 이용한 용접 변형 해석의 유용성을 검증하였다.

#### 참고문헌

1. 방한서, 김성환, 김영표, 이창우, 2002, “루트갭이 있는 양면 필릿용접 이음부의 용접잔류응력 분포”, 대한조선학회 논문집, 제39권, 제3호, pp. 81~88.
2. 김상일, 2004, “V 개선 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델 개발”, 대한조선학회 논문집, 제41권, 제2호, pp. 106~113.
3. 고대은, 1998, “열탄소성해석 모델을 이용한 선상 가열시의 판의 변형 예측에 관한 연구”, 서울대학교 박사학위논문.
4. 이장현, 1999, “유한요소법과 다변수해석을 이용한 선상가열 가공조건과 변형량과의 관계”, 서울대학교 박사학위논문.
5. 송하철, 2001, “국부가열을 이용한 관통균열을 가진 강판의 피로수명 연장에 관한 연구”, 서울대학교 박사학위논문.