고정도 조립을 위한 용접 변형의 해석에 관한 연구
Study on the Simulation of Welding Deformation for Accurate Assembling

장경복*, 정진우**, 강성수*
* 부산대학교 기계기술 연구소
** 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

1.서론

용접 공정의 많은 부분이 용접 기능자의 기술에 의존하나, 이러한 용접공과 제작 코스트의 저감이 요구되기 때문에, 용접·조립 공정에서 작업의 자동화, 스포트화가 지속적으로 추진되고 있다. 용접공과 자동기기의 차이는 용접 전공정에서 발생한 가공 오차에 대응하는 허용 범위이고, 자동기기의 경우 이러한 가공 오차에 대응하는 속도가 느리기 때문에 가공 정도의 확보가 자동화를 위해서는 필수적인 조건이다. 그래서, 근래에는 조립 공정에서 공작 정도의 향상을 목적으로 절단 및 용접에 의한 면외 변형에 덧붙어 가공오차에 대해 유한요소법을 이용한 이론적 분석을 행하고 있다. 본래, 가공 정도의 문제는 절단, 소조립, 대조립등에서 각각의 단계마다 취급되어야 하는 문제가 아니라, 조립 공정 전체를 일괄적인 흐름으로 받아들여 해결해야 하는 문제이다. 또한, 설비와 코스트 측면에서의 제약 조건도 고려되어야 한다. 한편, 입체구조를 지니고 있는 선박·강교의 제작 등에서는 용접에 의한 면내 변형과 동시에 각변형 등의 면외 변형에 대해서도 정량적인 검토가 이루어져야 한다.

이러한 면외 변형을 예측하는 경우에, 컴퓨터의 용량 및 계산 시간의 제약으로 인해 주로 2차원 해석이 많이 이용되어 왔다. 그러나, 조립 정도의 향상을 목적으로 용접 변형을 정확하게 예측하기 위해서는 근본적으로 3차원 해석이 수행되어야 하며, 용접 조건 외에도 자중의 효과, 접촉 문제, 구속 조건 등의 다양한 요소가 고려되어야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 고정도 조립을 위해 용접 변형을 3차원 열탄소성 수치 모델을 통하여 이론적으로 예측하기 위해 가장 효율적인 기법을 찾고자 하였으며, 또한 여기에 영향을 미치는 지배인자를 도출하고자 하였다. 우선, 실험 데이터가 존재하는 소형 모델로서 계산 시간과 그 해의 정확성에서 가장 효율적인 수치기법을 정립하고자 하고 난 뒤, 대형 모델에 적용하여 그 타당성을 검증하고자 하였다.

2.소형 모델의 재료 및 형상

3차원 수치모델을 정립하기 위한 소형 모델의 재료는 강교 및 구조물의 제작에 널리 이용되는 일반구조용 탄소강인 SS41 연강판을 이용하였다. 용접법은 서브머지드 아크 용접이며, 모델의 형상은 폭 180mm, 두께 15mm이며 길이는 다양하게 변화시켜 검토하였다. 시험편 의 개선은 깊이 3.5mm, 폭 6mm의 V형 개선이다. Table 1은 용접 조건을 나타낸다.

Table 1 Welding conditions

Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/s)	Heat input(J/cm)
395	30.5	1.25	7421

3. 3차원 유한요소 모델

종래에는 용접에 의한 면외 변형의 예측에 용접선에 대한 수직한 단면상의 2차원 문제로 단순화시켜 해석을 수행하는 경우가 많았다. 그러나, 2차원 문제에서는 판의 길이의 영향이 무시되기 때문에, 면외 변형을 정량적으로 검토하기 위해서는 길이의 영향도 고려되는 3차원 해석이 반드시 필요하다. 그러나, 입체 요소를 이용하여 맞대기 용접을 대상으로 3차원 해석을 수행하면, 계산되어진 변형이 실제보다 작게 나타나는 현상이 발생한다고 알려져 있다. 그 이유는 3차원 입체 요소를 이용하

면 판의 굽힘 강성이 과대 평가 되어지기 때문인 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해 사용되는 유효한 수단으로 선택적 저감 적분법이 유효하다고 알려져 있다. 그래서, 본 연구에서는 실물 크기의 맞대기 용접의 3차원 해석을 수행하기 전 최적의 수치모델을 정립하기 위해. 동일한 소형 모델을 미소변형 이론 및 대변형 이론에 기초하여 유한요소법으로 저감적분법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 4 종류로서 3차원 용접 변형 해석을 수행하였다. 그리고, 3차원 모델을 형성할 경우 중력의 영향을 무시할 수 없으므로, 중력의 효과도 고려하였다.

Fig.1은 소형 모델의 형상 및 치수를 나타낸다. 여기서, 길이 L은 10mm, 50mm, 100mm, 200mm의 4가지 경우에 대해 해석하였으며, ab는 용접 후 최종 면외 변형을 측정한 곳을 나타낸다. Fig.2는 시험편의 길이가 100mm 인 경우의 요소 분할을 나타내는데, 용접선 근방에서는 판 두께 방향의 온도분포가 충실히 재현될 수 있도록, 용접선 부근은 7분할하였으며, 용접선으로부터 떨어진 영역은 두께 방향으로 최소 1분할하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

Fig.3은 소형 모델의 면외 변형 측정 결과와 각 수치 모델을 이용한 3차원 해석의 결과를 나타낸 것이다. 여기서, δ_T 는 아크가 판의 중앙부를 통과한 후 중앙 단면상의 점 a가 경험한 최소 과도 굽힘 변형(-y 방향으로의 변형)이고, δ_R 은 냉각 후 최종적으로 잔류하는 각변형을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 최소 과도 변형 δ_T 는 판의 길이가 증가함에 따라 감소하지만, 최종적으로 잔류하는 변형 δ_R 은 증가하고 있고, 판의 길이가 약 200mm를 초과하면 δ_T , δ_R 모두 일정한 값에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 계산 결과와 실험 결과는, 경향이나 값이 모두 잘 일치하고 있으며, 그 중에서도 대변형 이론에 기초하여 저감 적분법을 적용한 경우가 가장 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

용접 변형, 특히 각변형 등의 면외 변형을 적극적으로 제어하여, 가공 정도를 향상시키기 위해서는 이론 해석에 의한 정량적 예측과, 이에 기초한 지배적 영향 인자의 도출이 필요하다. 그래서, 본 연구에서는 고정도 조립을 위해 용접 변형을 3차원 열탄소성 수치 모델을 통하여 이론적으로 예측하기 위해 가장 효율적인 기법을 찾고자, 소형 모델로서 해석을 수행한 결과, 대변형 이론에 바탕을 두고 저감 적분을 수행하는 경우가 계산 시간과 그 해의 정확성에서 가장 효율적인 수치기법임을 알 수 있었다. 이렇게 정립되어진 수치 모델로서, 실제 대형의 맞대기 용법 모델에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

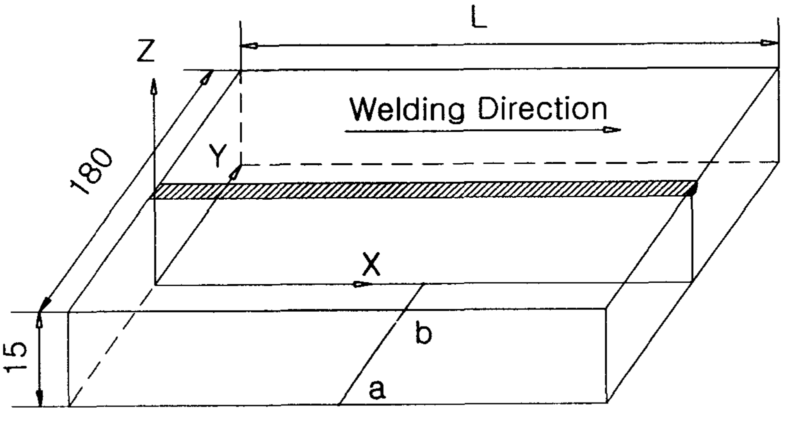

Fig.1 Model for 3-D welding simulation.

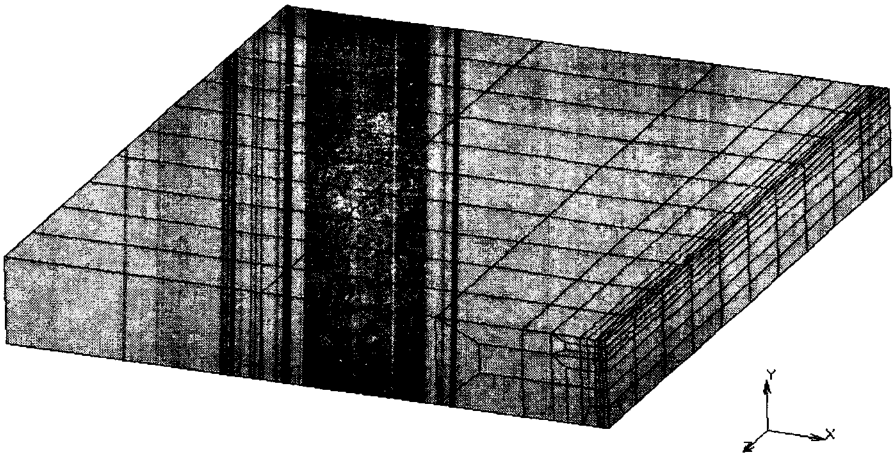

Fig. 2 Mesh generation for simulation

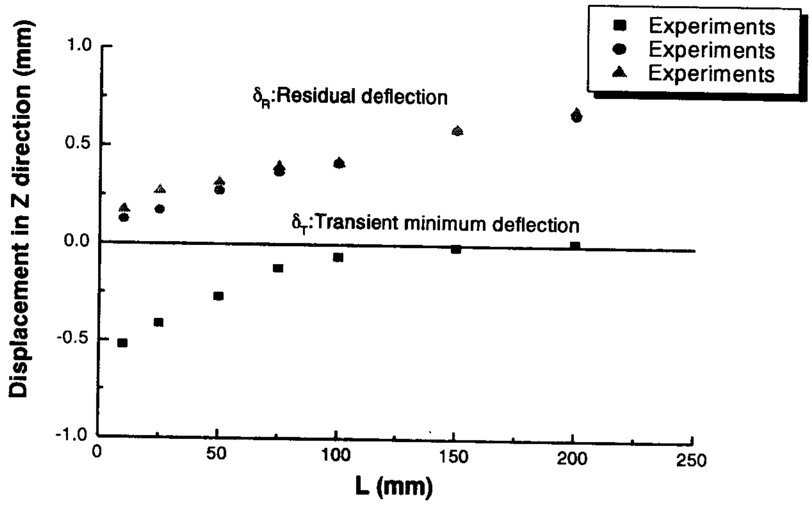

Fig. 3 Comparison between experimental and computed angular distortions