

고정밀도 조립을 위한 용접 변형의 해석에 관한 연구

성기찬*, 장경복**, 정진우***, 강성수**

A Study on the Simulation of Welding Deformation for Accurate Assembling

Ki Chan Sung*, Kyung Bok Jang**, Jin Woo Jung***, and Sung Soo Kang**

ABSTRACT

It is essential to predict the welding deformation at assembly stage, to increase productivity through mechanization and automation effectively. A practical analysis method applied for production engineering was proposed to simulate the deformation of arc welding, with an analytical model using finite element method solving thermal-elastic-plastic behavior. In this research, for accurate assembling, 3-D thermal-elastic-plastic finite element model is used to simulate the out-of-plane deformation caused by arc welding. Efforts have been made to find out the efficient method to improve the reliability and accuracy of the numerical calculation. Each of theories of small and large deformation is applied in solving 3-D thermal-elastic-plastic problem to compare with their efficiency about calculation times and solution accuracy. When solid elements are used in a bending problem of a plate, phenomenon that the predictive deformation is more than that of actual survey is observed. To prevent this phenomenon, reduced integration method for element is employed instead of full integration that is generally used in 3-D thermal-elastic-plastic analysis.

Key Words : Welding deformation(용접변형), thermal-elastic-plastic behavior(열탄소성 거동), full integration(완전적분), reduced integration(저감적분)

1. 서론

용접 공정의 많은 부분은 용접 기능자의 기술에 의존하나, 이러한 용접공과 제작 코스트(cost)의 저감이 요구되기 때문에, 용접·조립 공정에서 작업의 자동화, 스폿(spot)화가 지속적으로 추진되고 있다. 용접공과 자동기기의 차이는 용접공정에서 발생한 가공 오차에 대응하는 허용 범위로써 자동기기의 경우 이러한 가공 오차에 대응하는 속도가

느리기 때문에 가공 정밀도의 확보가 자동화를 위해서는 필수적인 조건이다. 그래서, 근래에는 조립 공정에서 공작 정밀도의 향상을 목적으로 절단 및 용접에 의한 면의 변형과 더불어 가공오차에 대해 유한요소법을 이용한 이론적 분석을 행하고 있다^[1~6]. 본래, 가공 정밀도의 문제는 절단, 소조립, 대조립 등에서 각각의 단계마다 취급되어야 하는 문제가 아니라, 조립 공정 전체를 일괄적인 흐름으로 받아들여 해결해야 하는 문제이다. 또한, 설비와

* 부산대학교 기계공학과 대학원
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

코스트(cost) 측면에서의 제약 조건도 고려되어야 하고, 전체적인 밸런스(balance)로서 정밀도 관리 또는 목표 정밀도의 설정이 필요하다. 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 경우 컴퓨터의 용량 및 계산 시간의 제약으로 인해 주로 2차원 해석이 많이 이용되어 왔다. 그러나, 조립 정도의 향상을 목적으로 용접 변형을 정확하게 예측하기 위해서는 판 길이의 영향을 고려할 수 있는 3차원 해석이 수행되어야 한다^{17~10)}. 그리고, 현재는 컴퓨터 성능의 발달로 해석자가 적절한 모델링과 해석 기법을 적용한다면 3차원 해석에서 계산 시간을 상대적으로 줄일 수 있다. 그러므로, 용접 변형에 대한 정확한 해석 결과를 얻기 위해 3차원 열탄소성 해석을 수행할 경우 가장 효율적인 모델링과 해석 기법의 정립이 반드시 요구되며, 용접 조건 외에도 자중의 효과, 접촉 문제, 구속 조건 등의 다양한 요소가 고려되어야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 고정밀도 조립을 위해 용접에 의한 면외 변형을 이론적으로 예측하고 여기에 영향을 미치는 지배 인자를 도출하기 위해 3차원 열탄소성 수치 모델^{11~13)}로서 다양한 해석 기법을 적용하여 가장 효율적인 해석 기법을 정립하고자 하였다. 즉, 용접 변형 예측을 위한 열탄소성 해석시 미소 변형 이론과 대변형 이론을 요소의 적분법을 달리하여 각각 적용하여 계산시간과 해의 정확성 측면에서 효율적인 해석 기법을 찾고자 하였다. 즉, 계산 시간의 절약을 가져올 수 있는 미소 변형 이론에 요소의 적분법을 완전 적분법과 3차원 모델에서 솔리드 요소를 사용함으로써 인해 모델의 굽힘 강성이 과대 평가되어 예측된 변형량이 실측값 보다 적게되는 현상을 방지하기 위해 저감 적분법(reduced integration)을 각각 적용하였고, 계산 시간이 다소 소요되나 해의 정확성을 위해 대변형 이론에 완전 적분법(full integration)과 저감 적분법(reduced integration)을 적용하여 각각 검토하였다.

우선, 실험 데이터가 존재하는 소형 모델¹⁴⁾로서 계산 시간과 그 해의 정확성에서 가장 효율적인 수치기법을 정립하고 난 뒤, 대형모델에 적용하여 그 타당성을 검증하고 용접 면외 변형에 영향을 미치는 각종 인자에 대해 검토하고자 하였다. 본 연구는 용접 변형 예측을 위한 3차원 열탄소성 해석

에 있어 효율적인 해석기법의 정립까지를 포함한다.

2. 소형 모델의 재료 및 형상

3차원 수치모델을 정립하기 위한 소형 모델의 재료는 강교량 및 구조물의 제작에 널리 이용되는 일반구조용 탄소강인 SS41 연강판을 이용하였다. 용접법은 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding)이며, 모델의 형상은 폭 180mm, 두께 15mm이며 길이는 다양하게 변화시켜 검토하였다. 시험편의 개선은 깊이 3.5mm, 폭 6mm의 V형 개선이다. Table 1은 용접 조건을 나타낸다.

Table 1 Welding condition

| Current(A) | Voltage (V) | Speed (cm/s) | Heat Input (J/cm) | Arc Efficiency (η) |
|------------|-------------|--------------|-------------------|---------------------------|
| 395 | 30.5 | 1.25 | 7421 | 0.77 |

3. 3차원 해석 모델의 정립

3.1 해석 기법

종래에는 용접에 의한 면외 변형의 예측에 용접선에 대한 수직단면에서 동일한 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위 길이를 지니는 수직단면을 취하여 2차원 문제로 단순화 시켜 해석을 수행하는 경우가 많았다. 그러나, 2차원 문제에서는 판 길이의 영향이 무시되기 때문에, 고정밀도 조립과 면외 변형을 정량적으로 검토하기 위해서는 길이의 영향도 고려되는 3차원 해석이 반드시 필요하다^{17~10)}. 일반적으로 용접 구조물의 변형 해석에서는 구조물 전체를 대상으로 하기 때문에 계산 시간의 단축을 위해 미소 변형 이론(Theory of small deformation)을 적용하는 것이 일반적이다. 미소 변형 이론이란 연속체의 해석에 있어서 변형이 미소한 것으로 가정하고, 근사적으로 변형 전의 형상에 관한 힘의 평형 조건을 적용하며 비틀림 성분을 변위 성분의 1차 미분항까지만 표현하는 것이다. 그러나, 맞대기 용접의 경우 강판의 두께가 다른 치수에 비해 작기 때문에 판의 굽힘 강성이 작아서 굽힘 변형 검토시에 열팽창·수축 등에 의해

발생하는 큰 면내 응력이 굽힘에 미치는 영향을 무시할 수 없다. 이로 인해, 기하학적인 비선형이 발생하기 때문에 입체 요소를 이용한 맞대기 용접의 면의 변형을 예측할 경우에는 대변형 이론(Theory of large deformation)을 적용하는 것이 해의 정확성을 위해 필요하다. 그러므로, 본 연구에서는 동일한 모델에 대해 미소변형 및 대변형 이론의 적용시 계산 시간과 해의 정확성의 차이를 비교하여 어느 이론이 더 효율적인지를 규명하고자 하였다.

그리고, 입체 요소를 이용하여 맞대기 용접을 대상으로 3차원 해석을 수행할 경우 또 하나의 문제점은, 일반적으로 계산되어진 변형이 실제 변형보다 작게 나타난다는 것이다. 그 이유는 3차원 입체 요소를 이용하면 면의 전단 강성이 판의 굽힘 변형을 구속하여 판의 굽힘 강성이 과대 평가되어지기 때문이다. 이러한 문제를 방지하기 위해서는 해석 수행시, 요소에 대한 적분법을 달리하는 방법이 유효한 것으로 알려져 있다^[12]. 즉, 일반적으로 열탄소성 유한요소 해석에서 실행되는 요소에 대한 적분법은 완전 적분법(full integration)인데, 이 방법은 절점에서의 해석 값의 정확성을 높이기 위해 요소 내에서 절점의 수만큼 적분점을 둔다. 그런데, 이러한 완전 적분법의 경우는 총 변수의 수가 구속 조건의 수보다 적어 변형 해석에 있어서는 변형 모드가 해석자가 구하고자 하는 모드가 아닐 수 있다. 그러므로, 3차원 열탄소성 해석을 통해 용접 변형을 예측할 경우에는 요소의 적분법을 달리하는 것이 유리하다. 즉, 완전 적분법 대신에 체적 일정 조건을 줄임으로서 적분점을 요소의 중앙에서만 행하도록 하는 저감적분법(reduced integration)을 적용하면 계산 시간이 절약되므로 상당히 효과적이다. Fig.1은 3차원 해석에 일반적으로 이용되는 8절점 입체요소에서의 완전적분과 저감적분에서의 적분점을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 실물 크기의 맞대기 용접에 대해서 3차원 해석을 수행하기 전 3차원 열탄소성 유한요소법을 이용한 용접 변형 해석에 있어 가장 효율적인 수치해석법을 정립하기 위해, 동일한 소형 모델을 미소변형 이론 및 대변형 이론에 기초하여 요소에 대해 완전적분법과 저감적분법을 각각 적용하여, 4종류로서 3차원 용접 변형 해석을 수행하였다. 그리고, 3차원 모델을 형성할 경우 중력의 영향을 무시할 수 없으므로, 중력의 효과도 고려하였다.

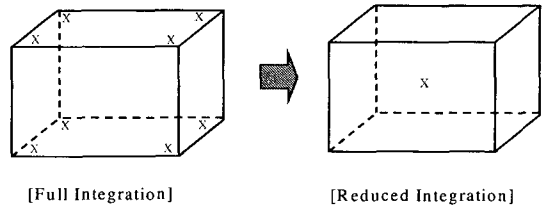


Fig. 1 Comparison between Full Integration and Reduced Integration

3.2 해석 모델 및 경계 조건

Fig.2는 소형 모델의 형상 및 치수를 나타낸다. 여기서, 길이 L은 10mm, 50mm, 100mm, 200mm의 4가지 경우에 대해 해석하였으며, \bar{a} 는 용접 후 최종 면의 변형을 측정할 곳을 나타낸다. Fig.3은 시험편의 길이가 100mm 인 경우의 요소 분할을 나타내는데, 용접선 근방에서는 판 두께 방향의 온도 분포가 충실히 재현될 수 있도록 7분할하였으며, 용접선으로부터 떨어진 영역은 두께 방향으로 최소 1분할하였다.

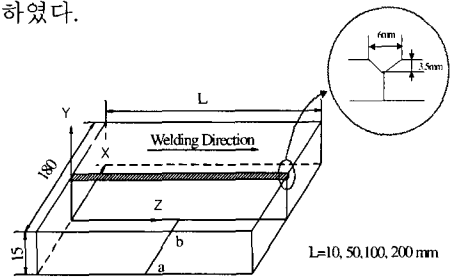


Fig. 2 Model for 3-D welding simulation

입열 모델은 3차원 해석이므로 입열이 시작되는 용착 금속과 끝나는 용착 금속 요소에만 램프 모델(Ramp model)을 적용하였다. 그리고, 변형해석의 정확성을 위해 용착 금속은 전극이 통과한 후에 처음으로 실체를 가지는 요소로 생성되는 활성화 및 비 활성화 요소 기법을 사용하였으며, 변형해석의 정확성을 위해 중력의 영향도 고려하였다.

또한, 정확한 변형해석은 정확한 온도 해석에 의존하므로 재료의 물성치를 온도의 함수로서 입력하였고, 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat)의 효과도 고려하였으며, 해석상의 정확성을 위해 수렴의 기준을 한번의 증분에 대하여 허용하

는 최대 온도 변화를 20℃로 하였다. 또한, x=y=0인 지점으로부터 용접선방향으로 x, y, z방향을 구속시켜 해석을 수행하였다.

| L(mm) | Node | Element |
|-------|------|---------|
| 10 | 134 | 52 |
| 50 | 402 | 260 |
| 100 | 737 | 520 |
| 200 | 1407 | 1040 |

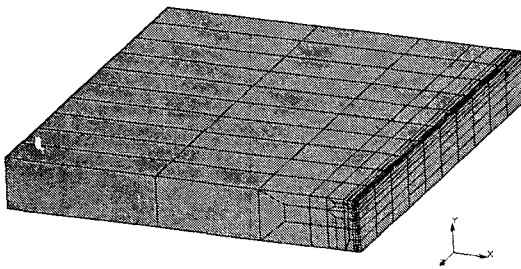


Fig. 3 Number of node and element in finite element model

4. 해석 결과 및 고찰

Table 2~4는 용접 길이가 각각 10, 50, 100, 200mm에 대해 4종류의 해석법에 대한 해석상의 총 증분수, CPU 계산 시간, 최고 온도, 과도 변형(δ_T , 하향변위), 잔류 변형(δ_R , 상향변위)을 나타낸 것이다. 그리고, Fig. 4는 각 용접 길이에 대해 적용된 해석법으로 구해진 잔류변형과 실측되어진 변형을 비교해서 나타내었다. 우선, 적용 해석 이론의 관점에서 보면 대변형 이론이 미소 변형이론 보다 계산 시간은 다소 많이 소요되나, Fig.4에 나타난 변형량 실측치에 보다 근접하는 계산치를 보여주고 있다. 그 이유는 미소 변형 이론의 경우 용접시 고입열로 인한 고온 영역에서 발생하는 3차원 모델의 기하학적 비선형을 고려하지 않기 때문이다. 그러므로, 고 정도의 용접 변형 예측을 위해서는 기본적으로 대 변형 이론이 적용되어야 함을 알 수 있다. 그래서, 계산 시간이 많이 소요되는 용접 길이 200mm의 경우는 대변형 이론에 요소의 적분법만을 달리하여 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 2 Analysis results for L=10mm Model

| | Increment | CPU time (sec) | Peak Temp. (°C) | δ_R (mm) | δ_T (mm) |
|-----------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L.D R.I.M | 154 | 76.8 | 2291 | 0.214 | -0.467 |
| L.D F.I.M | 143 | 174.1 | 2340 | 0.158 | -0.5213 |
| S.D R.I.M | 158 | 69.3 | 2337 | 0.2 | -0.4692 |
| S.D F.I.M | 147 | 102.8 | 2368 | 0.113 | -0.5258 |

Table 3 Analysis results for L=50mm Model

| | Increment | CPU time (sec) | Peak Temp. (°C) | δ_R (mm) | δ_T (mm) |
|-----------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L.D R.I.M | 309 | 610.4 | 2200 | 0.243 | -0.298 |
| L.D F.I.M | 288 | 1445.9 | 2409 | 0.198 | -0.3276 |
| S.D R.I.M | 309 | 511.8 | 2200 | 0.211 | -0.3050 |
| S.D F.I.M | 290 | 846.6 | 2431 | 0.173 | -0.3401 |

Table 4 Analysis results for L=100mm Model

| | Increment | CPU time (sec) | Peak Temp. (°C) | δ_R (mm) | δ_T (mm) |
|-----------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L.D R.I.M | 580 | 2950.8 | 2199 | 0.348 | -0.155 |
| L.D F.I.M | 545 | 5838.0 | 2409 | 0.303 | -0.2299 |
| S.D R.I.M | 586 | 2580.0 | 2218 | 0.319 | -0.1963 |
| S.D F.I.M | 553 | 3817.7 | 2431 | 0.298 | -0.2183 |

Table 5 Analysis results for L=200mm Model

| | Increment | CPU time (sec) | Peak Temp. (°C) | δ_R (mm) | δ_T (mm) |
|-----------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L.D R.I.M | 1128 | 11696.2 | 2199 | 0.524 | -0.092 |
| L.D F.I.M | 1059 | 22763.5 | 2409 | 0.498 | -0.1583 |

L.D : Large Deformation

S.D : Small Deformation

R.I.M : Reduced Integration Method

F.I.M : Full Integration

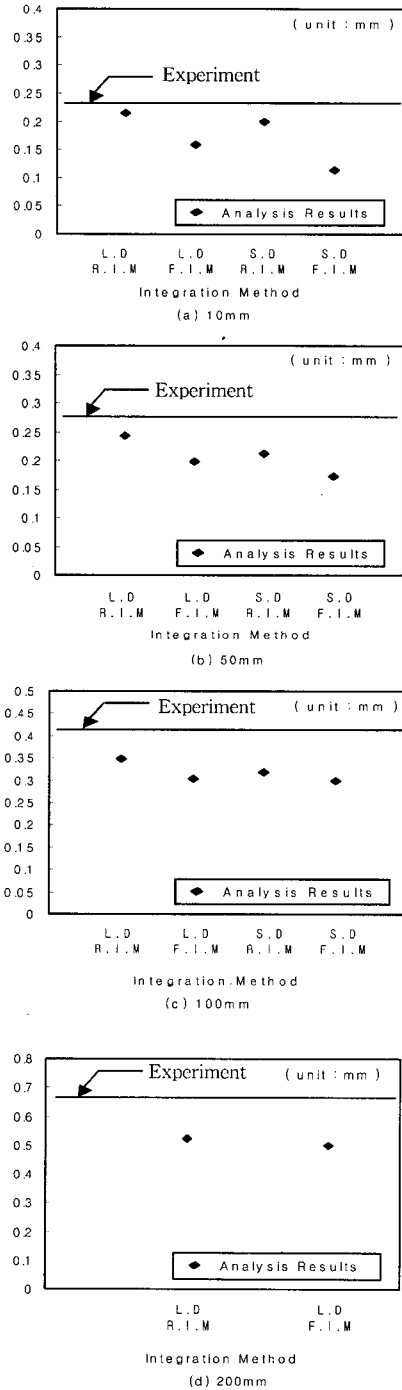


Fig. 4 Comparison of residual deflection among four kinds of analysis

Table 2~5에서 요소 적분법의 관점에서 보면, 저감 적분법의 경우가 완전 적분법 보다 계산 소요 시간의 경우 약 50% 밖에 소모되지 않으며, 변형량 계산 결과도 Fig.4에 나타나듯이 실측치에 보다 근접함을 알 수 있다. 즉, 정확한 용접 변형을 예측하기 위해 솔리드 요소를 이용하여 3차원 모델을 적용할 경우 모델의 굽힘 강성이 과대 평가되어지는 문제점은 요소 적분법을 저감 적분법으로 수행함으로써 해결할 수 있다. 그러므로, 정밀한 용접 변형을 예측하기 위해서는 기본적으로 3차원 모델을 이용하고, 해석이론은 대변형 이론을 적용하며 요소의 적분법은 저감 적분법을 이용하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

Fig.5는 각각의 용접 길이에 대해 과도 변형과 잔류 변형을 측정된 결과와 가장 효율적인 해석법으로 판명된 대변형 이론에 저감 적분법을 적용한 해석의 결과를 같이 나타낸 것이다. 여기서, δ_T 는 아크가 판의 중앙부를 통과한 후 중앙 단면상의 점 a에 발생된 최소 과도 굽힘 변형(-y 방향으로의 변형)이고, δ_R 은 냉각 후 최종적으로 잔류하는 각 변형을 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 좋은 일치성을 보여주고 있다.

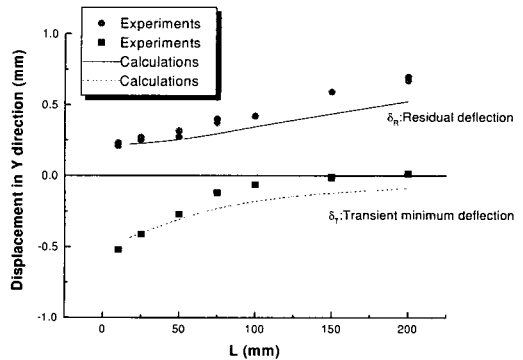


Fig. 5 Comparison between experimental and computed deflection

5. 결론

본 연구에서는 고정밀도의 조립을 위해, 3차원 열탄소성 수치 모델을 통하여 수치적으로 예측되어 지는 용접 변형이 가장 효율적이면서도 효과적으로 구해질 수 있는 해석적 기법을 찾고자 하였다. 따라서, 해석에 적용되는 이론과 요소의 적분법을 달리하여 소형의 모델에 각각의 해석법을 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1)용접시 고입열로 인한 고온 영역에서 발생하는 모델의 기하학적 비선형을 고려하여 정확한 변형해석을 하기 위해서는 용접 공정 해석시 기본적으로 대변형 이론을 적용해야 하는데, 이 경우 일반적으로 적용되는 미소 변형 이론 보다 계산 소요 시간은 다소 증가한다.

(2)용접 길이의 영향을 고려하고 정밀 열변형을 예측하기 위해서는 기본적으로 3차원 요소를 이용해야 하는데, 이 경우에 모델의 굽힘 강성이 과대 평가되어져 예측 변형량이 실제 변형량 보다 적게 나타나게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 요소 적분법에 저감적분법의 적용이 효과적이었으며, 계산 소요 시간도 상당히 절약할 수 있었다.

(3)정밀 열변형 예측을 위한 3차원 열탄소성 해석에서 계산시간과 정밀도를 고려하여 가장 효율적인 방법은 대변형 이론의 적용에 요소의 적분을 저감 적분법으로 하는 것임을 알 수 있다.

참고문헌

1. Kunihiro Satoh, Toshio Terasaki. "Effect of Transformation Expansion on Welded Residual Stresses Distributions and Welding Deformations," JWS, Vol. 45, No. 7, pp. 560-566, 1976.
2. Shigetomo Matsui : Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structures, JWS, No. 5, pp. 58-66, 1983.
3. Akira Sakaguchi, Takahiro Tanaka : Estimate and Counterplan for Welding Deformation-Thin Plates Steel Structure, JWS, No. 6, pp. 14-19, 1991.
4. K. Satoh, T. Terasaki : Effect of Weld Conditions on Welding Deformation in Welded Structure Materials, JWS, No. 1, pp. 302-308, 1976.
5. Y. Ueda, H. Murakawa, S. Gu, "FEM Simulation of gas and Plasma Cutting Emphasis on Prediction of Cutting," 일본조선학회논문집, 제 175호, pp. 307-315, 1994.
6. 송민철, 박상철, 윤중근, "FEM을 이용한 가스 절단 변형 예측에 관한 연구," 대한용접학회춘계 학술대회, pp. 264-266, 1999.
7. Koichi Masubuchi, "Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures," AWS, Dec., pp. 41-47, 1991.
8. P. Tekriwal, and J. Mazumder, "Finite Element Analysis of Three Dimensional Transient Heat Transfer in GMA welding," AWS, July, pp. 150-156, 1988.
9. V. Kamala, J.A. Goldak, "Error Due to Two Dimensional Approximation in Heat Transfer Analysis of Welds," AWS, Sep., pp. 440-446, 1993.
10. K.W. Mahin, W. Winter, and T.M. Holden, "Prediction and Measurement of Residual Elastic Strain Distribution in Gas Tungsten Arc Welds.", AWS, September, pp. 245-260, 1991.
11. S.Z., Newman, "FEM model of 3D transient temperature and stress fields in welded plates," Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, 1986.
12. J. Wang, Y. Ueda, "Improvement in Numerical Accuracy and Stability of 3-D FEM Analysis in Welding," AWS, Aprile, pp. 129-134, 1996.
13. S. B. Brown, H. Song, "Implication of Three-Dimensional Numerical Simulations of Welding of Large Structures," AWS, Feb., pp. 55-62, 1992.
14. I. Tsuji, K. Ogawa, "An Analysis on Transient Stress and Deformation of a Steel Strip Subjected to Local Heating," JWS, Vol. 45, pp. 36-41, 1976.