

유한요소법을 이용한 용접 잔류응력과 열처리 해석

이봉열[†] · 조종래^{*} · 문영훈^{**}

Analysis of Welding Residual Stresses and Heat Treatment used by Finite Element Method

B.Y.Lee, J.R.Cho, and Y.H.Moon

Key Words: Welding residual stress(용접 잔류응력), Finite element method(유한요소법), Thermal elasto-plastic analysis(열탄소성해석), Heat treatment(열처리)

Abstract

The welding residual stress has on important effect on welding deformation, fatigue fracture, buckling strength, brittle fracture, etc. For the purpose of relaxation of welding residual stress, post welding heat treatment is widely used. In this paper, residual stresses were calculated by two dimensional thermal elasto-plastic analysis using finite element method. Heat transfer analysis are performed by transient analysis. Also structure analysis are carried out by of thermal-mechanical coupled analysis. Numerical analysis are used by ANSYS 5.7.

1 서 론

선박과 같은 철강구조물은 여러 가지 용접이음 형식과 하중조건을 갖는 용접이음부재로서 구성 되어 있다. 용접에 의한 결합 방법은 높은 이음 효율, 재료의 절감, 우수한 밀봉성과 작업 공정의 간편성 등과 같은 장점들이 있어 확대 적용되어져 왔다. 그러나 제작과정에서 나타나는 용입불량, 기공, 불순물 혼입 및 균열등의 결함과 용접 구조물의 용접시에는 접합부를 용융시키기 위해 그 부분에 열을 가하는데 이 경우 용접 접합부는 국부적인 가열과 용융으로 불균일한 온도분포와 그로 인한 열응력이 발생되며, 이로 인하여 용접 후에는 비선형 소성변형 및 잔류 응력이 존재하게 된다.

용접 잔류 응력과 변형은 용접 구조물 제작과정에서 여러 가지의 장애를 유발시키며 구조물의 운전중 파괴를 유발시키거나 파괴에 간접적인 영향을 끼치게 된다. 또한 용접 잔류응력은 용접 구조물의 피로강도를 저하시키거나, 취성 균열 및 피로 균열의 진전을 촉진시키며, 용접 변형은 구조물의 외관을 해치고 국부적으로 스트레인 집중을 초래하여 취성파괴와 피로파괴의 원인으로 작용하여 구조물의 파괴 사고를 유발할 위험성을 내포하고 있으므로 잔류 응력의 예측은 매우 중요한 사항이다.

이러한 용접 잔류 응력을 해결하기 위해서 일반적으로는 용접 후 풀림(annealing)등 열처리 등에 의존해 왔으나 용접 구조물의 잔류 응력 및 잔류 변형에 관한 정확한 해석을 바탕으로 잔류 응력 및 잔류 변형의 예측을 통하여 열처리를 하지 않고도 설계 단계에서부터 잔류 응력을 상쇄시킬 수 있도록 하는 공정을 위한 기술의 개발이 시급한 실정이다.

현재 용접 잔류 응력을 해석하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으며, 해석 방법에는 크게

[†] 한국해양대학교 기계공학과 대학원

E-mail : bumby@hanmail.net

TEL : (051)410-4972 FAX : (051)405-4790

^{*} 한국해양대학교 기계·정보공학부

^{**} 부산대학교 기계공학부

실험적인 방법, 해석적인 방법, 그리고 수치해석적인 방법이 있다. 그런데 실험적인 방법에는 한계가 있고, 해석적인 방법은 간편하기는 하지만 해석 모델이 복잡해지면 해석이 불가능해진다. 최근에는 유한요소법의 발달과 상용 유한요소 프로그램의 출현으로 유한요소법을 이용한 수치해석적인 방법이 용접현상을 규명하고 해석하는데 일 반화 되어가고 있는 추세이다.[3-6]

본 연구에서는 용접 잔류응력을 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 우선 ANSYS를 이용하여 간단한 시편 형상의 모델에 대한 용접 잔류응력을 해석하고 이를 바탕으로 실제 후판 용접구조물을 해석하였다.[7]

2. 단순모델에 대한 용접 잔류응력 해석

2.1 해석절차

실제 용접구조물은 매우 복잡한 형상을 가지고 있어서 해석하기가 매우 어렵기 때문에 용접구조물을 단순화하여 2차원 모델에 대한 해석을 수행하였다.

유한요소해석을 통하여 용접 잔류응력과 잔류 변형을 해석하기 위해서는 열전달 해석과 열탄소 성 해석이 필요하다. 유한요소법을 이용한 열전달 해석은 먼저 과도해석(transient analysis)을 수행하여 각 스텝의 온도분포를 얻어내고 이때 얻

어낸 각 스텝의 온도분포를 연성구조해석(thermal-mechanical coupled analysis)의 열응력 하중으로 적용하여 잔류응력 해석을 수행하였다.

요소는 열전달 과도해석에서는 4절점요소인 plane55 요소를 사용하였고, 연성구조해석에서는 등가요소인 plane42 요소를 사용하였다.

과도열전달 해석에서는 용접되는 비드까지만 열전달에 포함시키고 용접될 비드는 열전달이 일어나지 않도록 처리하였다. 연성구조해석에서는 용접되는 비드부분을 생성과 소멸(birth & death) 방법으로 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 재료는 SM400B이며 재료의 물 성치는 Table 1에서 보여준다. 용접부와 베이스부의 항복응력을 다르게 사용하여 해석하였다.

2.2 맞대기 용접 해석

맞대기 용접에서는 여러층의 비드를 적층하는 방법에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 1은 맞대기 용접의 모델링 및 요소망 형상 그리고 Fig.2에서는 용접순서를 자세히 보여준다. 용접 비드는 A11부터 A18까지 순서대로 적층되는 형상으로 모델링하였으며, A11부터 A18까지 차례대로 2초간 900℃의 열을 가한 뒤 3초간 열을 제거한 뒤

Table 1 Mechanical properties of SM400B

Temperature (℃)		20	426	550	800	850	1000
Yield stress (MPa)	Weld	500	239	98.07	49.03	44.52	29.42
	Base	294.2	142.3	98.07	49.03	44.52	29.42
Young's Modulus(GPa)		210.84	184.37	164.75	117.29	99.05	58.84
Poisson's Ratio		0.3					
Expansion (m/m-K)		1.2e-5					
Conductivity (W/K, m ²)		43					
Specific Heat (J/K,kg)		469					
density (kg/ m ³)		7850					
Convection (W/ m ² , ℃)		100					



Fig. 1 Dimension and mesh of butt weld

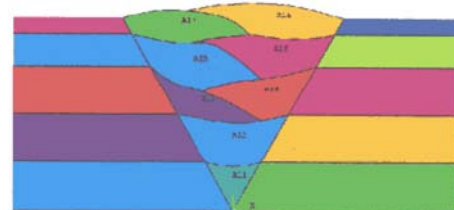


Fig. 2 Welding sequence of butt weld

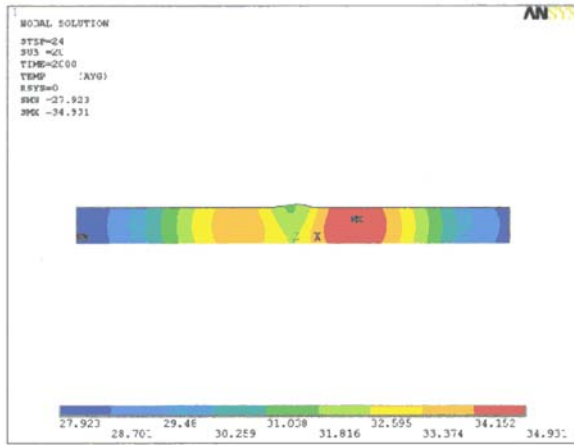


Fig. 3 Temperature distribution of butt weld (before heat treatment)

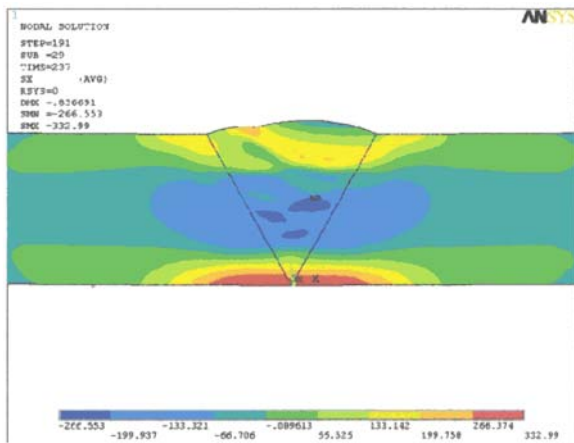


Fig. 4 Residual stresses distribution of butt weld (before heat treatment)

약 190초간 열전달을 시켰다. Fig. 3은 모든 과도해석을 마친 최종 온도분포를 나타내고 있다.

이렇게 과도해석을 통하여 최종온도분포를 얻고 이를 연성구조해석에서 열응력 하중으로 계산하여 잔류응력을 구한 것을 Fig. 4에서 보여준다. 여기서 관심을 가져야 할 부분은 표면에서의 잔류응력 값이다. Fig. 5은 거리에 따른 표면에서의 잔류응력 값에 대한 실험치와 해석치를 비교한 것이다.

열처리 조건을 고려하기 위하여 Fig. 6의 선도처럼 앞의 과도해석 결과에 연속해서 전 영역에 600℃의 열을 1000초 가한 후 2600초간 과도해석으로 열전달을 시킨다.

위의 최종온도분포를 열응력 하중으로 입력하여 계산한 잔류응력의 결과를 Fig. 7에서 보여준

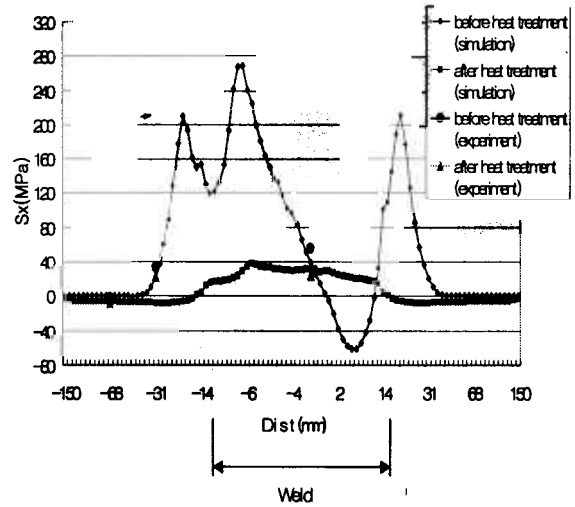


Fig. 5 Comparison of experiment and simulation residual stresses (before and after heat treatment)

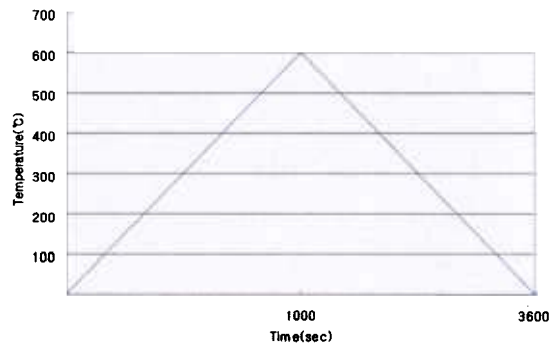


Fig. 6 Heating curves assumed in the FEM-model (butt weld)

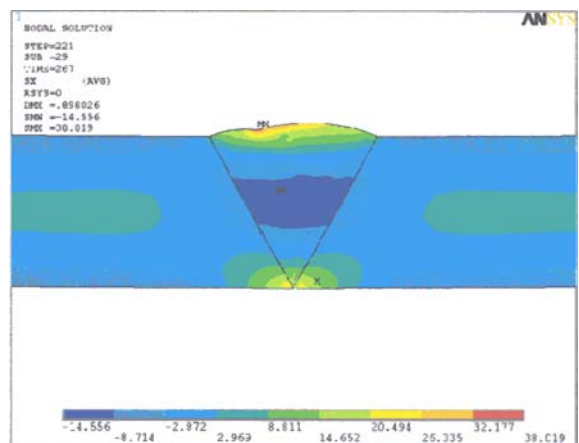


Fig. 7 Residual stresses distribution of butt weld (after heat treatment)

다. 열처리 전에 비해서 88.28%가량 줄어든 것을 알 수 있다. 표면에서 잔류응력의 값이 대부분 8MPa에서 38MPa까지 분포한다.

2.3 열처리 후 잔류응력이 감소하는 기구

Fig. 8과 같이 용접 후에 잔류응력은 상온의 A점에 존재한다. 가열하면 온도가 상승하고 이때 항복응력이 급격히 감소하므로 잔류응력은 B점으로 낮아질 수밖에 없다. 일정시간 온도를 유지한 후 서냉하면 응력상태는 크게 변하지 않고 B점 근처인 C점에 존재한다.

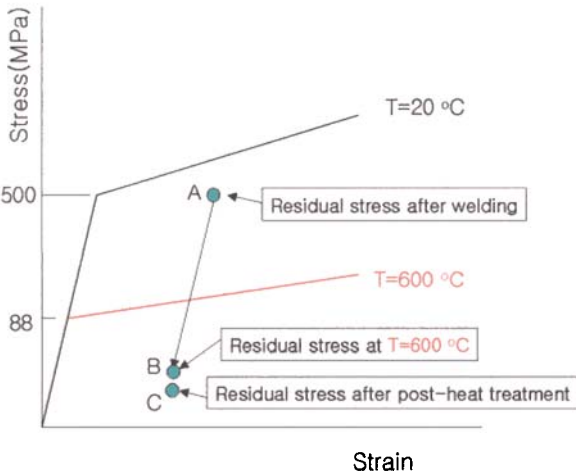


Fig. 8 Residual stresses reduce mechanism

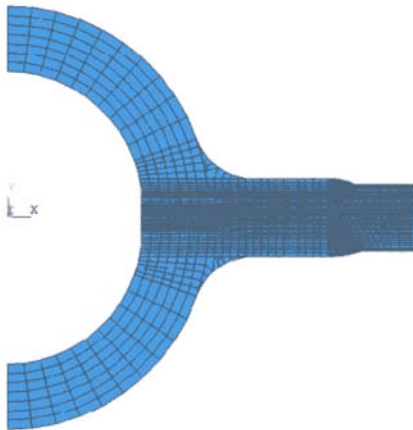
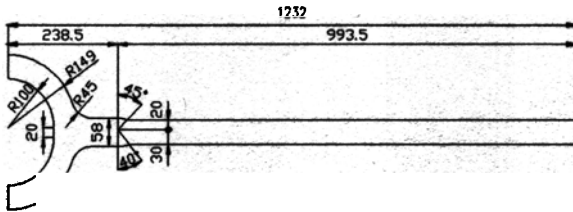


Fig. 9 Dimension and mesh of K-type model

3. 후판 구조물의 용접 해석 적용

지금까지의 해석절차와 결과를 바탕으로 후판 용접부의 잔류응력을 해석하였다. 재료의 물성치는 SM400B로 앞의 맞대기 용접에 사용한 것과 같다.

3.1 K-type 맞대기 용접부 해석

Fig. 9는 K-type의 맞대기 용접부의 치수와 요소형상을 나타낸 것이다.

Fig. 10에 K-type 용접 비드형상이 잘 나타나있다. 실제 용접의 순서는 A79와 A80을 용접한 뒤에 아래면인 A81부터 A84까지 용접을 하고 다시 윗면에 A85부터 A87까지 용접을 하고 아래면의 A88부터 A90까지 차례로 용접을 실시한다.

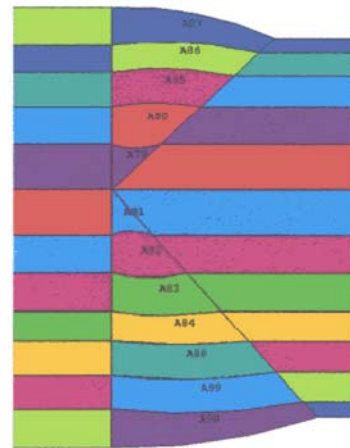


Fig. 10 Welding sequence of K-type model

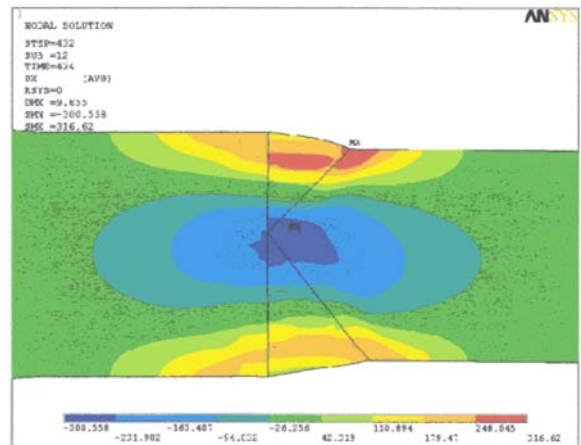


Fig. 11 Residual stresses distribution of K-type model (before heat treatment)

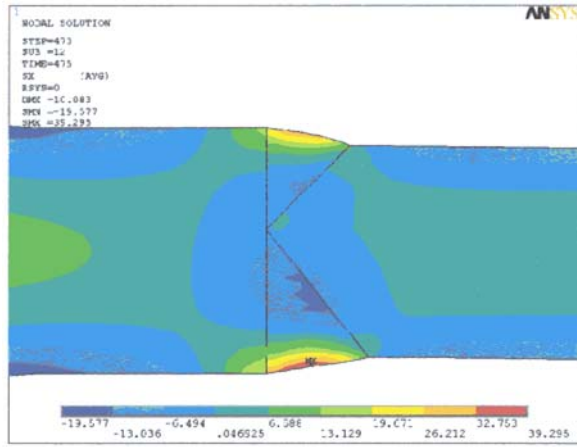


Fig. 12 Residual stresses distribution of K-type model (after heat treatment)

해석에서도 이를 고려하여 120℃ 예열한 상태에서 순서대로 각각의 비드에 온도를 900℃까지 2초간 열을 가한 후 열을 제거하여 900초간 열전달을 시켰다. 열전달의 시간은 용접이 이루어질 전체길이(2900mm)에 용접속도(20cm/min)를 나눈 시간이다.

열전달 과도해석으로 얻어낸 최종온도분포를 연성구조해석에서 열응력 하중으로 계산하여 잔류응력을 구하면 Fig. 11처럼 나타난다. 여기서 표면에서의 잔류응력 σ_x 는 대부분 140MPa에서 316MPa 범위로 나타난다.

후열처리 온도는 600℃이며 서냉 후 잔류응력은 Fig. 12에서 보여준다.

이 용접부의 경우 열처리 전의 잔류응력 σ_x 는 비드부분에서 최대 316MPa에서 최소 -300MPa까지의 범위를 가지며 표면에서는 최대 316MPa에서 최소 145MPa까지의 범위를 가진다. 이를 열처리를 하게 되면 잔류응력 σ_x 는 비드부분에서는 최대 39MPa에서 최소 -19MPa까지의 범위를 가지며 표면에서는 최대 39.3MPa에서 최소 10MPa까지의 범위를 가진다. 이는 열처리 전에 비해서 잔류응력 σ_x 값이 87.6%정도 감소하는 것으로 나타난다.

3.2 V-type 맞대기 용접부의 해석

V-type 용접부의 치수와 요소형상은 Fig. 13에 나타내고 있다.

Fig. 14에 V-type 용접 비드형상이 잘 나타나있다. 실제 용접의 순서는 A99와 A105까지 용접한

뒤에 아래면인 A106부터 A107까지 용접을 실시한다.

해석에서도 이를 고려하여 120℃ 예열한 상태에서 순서대로 각각의 비드에 온도를 900℃까지 2초간 열을 가한 후 3초간 열을 제거하여 600초간 열전달을 시켰다. 열전달 시간은 용접이 이루어질 전체길이(2000mm)에 용접속도(20cm/min)를 나눈 시간이다.

과도해석으로 얻어낸 최종온도분포를 열응력 하중으로 계산하여 잔류응력을 구하면 Fig. 15에서처럼 나타난다. 여기서 표면에서의 잔류응력 σ_x 는 대부분 97MPa에서 209MPa 범위로 나타난다

600℃에서 열처리 후 잔류응력은 Fig. 16에 나타나 있다.

이 용접부의 경우는 열처리 전에 비드부분의 잔류응력 σ_x 는 최대 265MPa에서 최소 -239MPa까지의 범위를 가지며 표면의 경우 최대 209MPa에서 최소 97MPa까지의 범위를 가진다. 열처리를 하게 되면 잔류응력 σ_x 는 최대 30.7MPa에서 최소 -34.2MPa까지의 범위를 가지며 표면에서는 최대 30.7MPa에서 최소 -1.7MPa까지의 범위를 가진다. 이는 열처리 전과 비교해서 잔류응력 값이 88.4% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다.

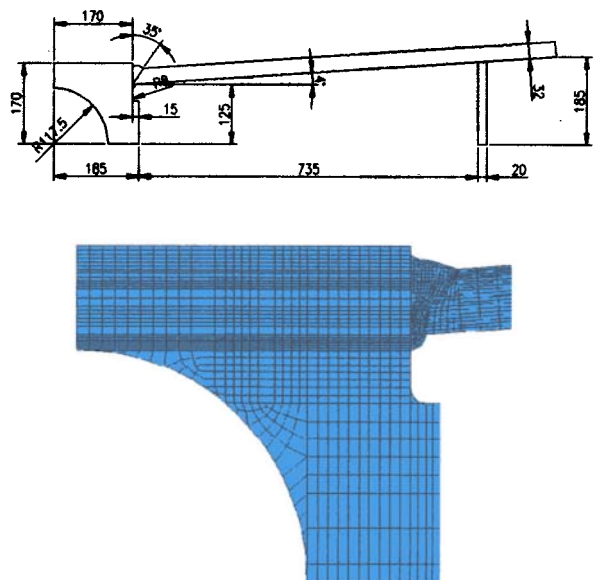


Fig. 13 Dimension and mesh of V-type model



Fig. 14 Welding sequence of V-type model

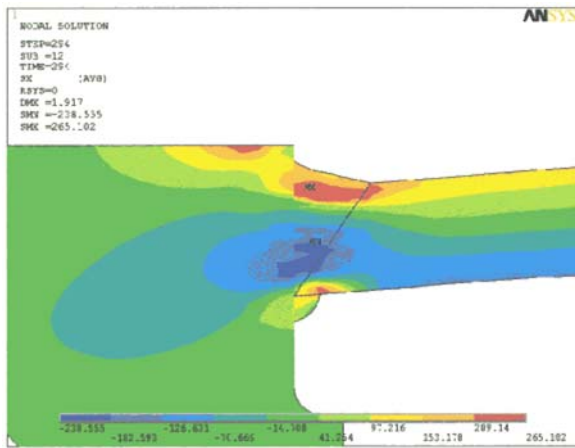


Fig. 15 Residual stresses distribution of V-type model (before heat treatment)

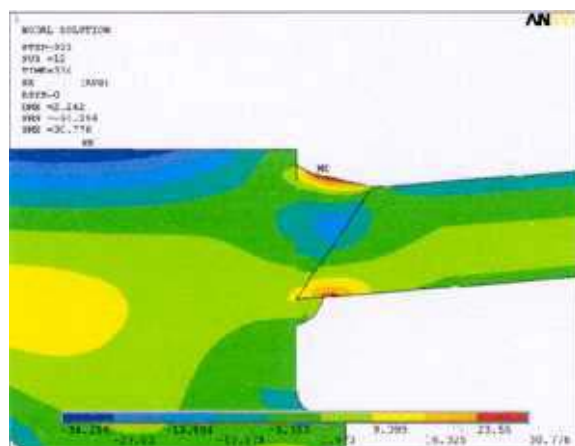


Fig. 16 Residual stresses distribution of V-type model (after heat treatment)

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 맞대기 용접에 대해 실제 용접공정과 같은 여러층의 비드에 대한 용접해석과 열처리에 대한 해석을 실시하여 용접 해석절차를 수립하고, 이를 두가지 맞대기 용접해석부에 적용하여 해석을 수행하였다. 해석수행 결과 잔류응력이 열처리 전에는 최대값이 각각 316MPa, 265MPa이며 열처리 후에는 최대값이 각각 39.3MPa, 30.7MPa이다. 유한요소 해석에 의해 후판 용접구조물의 잔류응력을 분석한 결과 열처리 전에 비해 열처리 후가 그 값이 각각 87.6%, 88.4% 감소한다.

참고문헌

- (1) Tso-Liang Teng, Chin-Ping fung, Peng-Hsiang Chang, Wei-Chun Yang, 2001, "Analysis of residual stresses and distortion in T-joint fillet welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping 78, pp523-538
- (2) H.S.Bang, J.M.Kim, 1999, "A study on the mechanical mechanism according to the groove shape of T-welded joint", Journal of the Korean Welding Society Vol.17 No.6, pp 53-61
- (3) C.D.Jang, S.I.Seo, 1988, "Colculation of residual stresses by thermal elasto-plastic analysis", Journal of the Korean Welding Society Vol.6 No.4, pp 35-43
- (4) I.S.Kim, I.K.Kim, C.J.Moon, Y.J.Jeong, Y.H.An, 2000, "A study on analysis of heat transfer and residual stress on the weld zone using FEM", Journal of the Korean Sociaty of Machine Tool Engineers Vol.9 No.5, pp96-104
- (5) B.J.Yoo, S.U.Cho, J.D.Yoo, , "Estimation of welding residual stresses using Finite element method", , pp 1-16
- (6) B.H.Ham, J.H.Jeong, J.Y.Park, , "Residual stresses analysis of weldment in Cr-Mo steel for life assessment", , pp1-8
- (7) ANSYS Ver. 5.6 Theory Manual, 1999