

이동 열원을 고려한 전자빔 용접의 유한요소해석

조해용* · 정석영** · 김명한*** · 조창용**** · 이제훈**** · 서정****

Finite element analysis of electron beam welding considering for moving heat source

Haeyong Cho, Sukyoung Jung, Myunghan Kim, Changyong Jo, Jaehoon Lee and Jeong Suh

*정회원, 충북대학교 기계공학부, **LG산전(주)

충북대학교 재료공학과, *한국기계연구원

ABSTRACT

Simulation on the electron beam welding of Al 2219 alloy was carried out by using commercial FEM code MARC, which encounters moving heat sources. Due to axisymmetry of geometry, a half of the cylinder was simulated. A coupled thermo-mechanical analysis was carried out and subroutine for heat flux was substituted in the program. The material properties such as specific heat, heat transfer coefficient and thermal expansion coefficient were given as a function of temperature and the latent heat associated with a given temperature range is considered. As a result, the proper beam power is 60kV×60mA and welding speed is 1~1.5 m/min. The residual stress in the heat-affected zone as well as the fusion zone does not increase. It is necessary to use jigs for preventing distortion of cylinder and improving weld quality.

Key Words :

the electron beam welding, Al 2219 alloy, FEM, moving heat sources, coupled thermo-mechanical problems, heat flux, residual stress, jigs

1. 서 론

전자빔 용접은 우수한 용접특성에도 불구하고, 장비 제작비용의 과다함과 제한적인 작업

환경으로 인하여 우주 항공 산업, 원자력 산업, 반도체 장비 산업 등의 특수한 분야에서만 선호되고 있다.

최근 산업의 다양화와 고도화에 따라 그 중요성이 인지되어 응용범위가 점차 확산되고 있다.

현대 산업이 고부가가치 산업으로의 도약과 아울러 용접에 대한 기능적 요구가 증가됨에 따라 전자빔 용접은 필연적으로 그 적용 범위가 확대 될 것으로 예상된다.

용접에 응용할 수 있는 해석적인 모델은 Rosenthal¹⁾에 의하여 점 열원과 선 열원에 관한 열 유속식이 처음 제시된 이후 Westby²⁾, Friedman³⁾ 등에 의해 용접에 대한 온도분포에 관한 수치 해석적인 모델이 제시되었고, Mazumder⁴⁾ 등은 키흐를 움직이는 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델로 발전시켰다. 또한, Kim⁵⁾ 등은 아연도금 강판의 CO₂ 레이저 용접에서 겹치기 용접의 FEM 시뮬레이션을 시도하였고, Kang⁶⁾ 등은 교량용 후판 다층 용접 시 잔류응력과 변형에 미치는 루트간격의 영향을 해석하였다.

용접은 구조물의 국부적인 가열에 의해 높은 열이 발생되며 이로 인하여 불균일한 온도 분포와 열응력이 발생한다. 생성된 열응력은 항복응력을 초과하여 복잡한 소성변형을 하게 되므로, 냉각 수축한 후 잔류응력이 남게 된다. 그러므로 본 연구에서는 용접 중에 열전도해석과 응력해석이 동시에 수행되는 커플링 해석을 하였다. 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 열원이 실제 구조물의 용접부를 따라 이동하는 방식으로 이동열원을 가정, 용접속도를 고려할 수 있는 해석을 시도하고자 하였다.

즉, 한국형 로켓 추진체 탱크를 제작하기 위하여 알루미늄합금(2219-T851)의 전자빔 용접 조건을 유한요소해석을 통하여 설정하고자 하였다.

2. 유한요소해석

전자빔 용접 시 일어나는 역학적인 현상들을 해석적으로 규명하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 MARC를 이용 전자빔의 열원이 실제 구조물의 용접부를 따라 이동하는 방식으로 컴

퓨터 시뮬레이션을 시도하였고, 용접현상은 대변형과 큰 소성변형을 갖게되므로 LARGE DISP, UPDATE 그리고 plasticity procedure 에서 MEAN NRM-ADDITIVE DECOMP. 를 선택하는 해석 방법을 사용하였다.

2.1 모델링

용접 문제 해석의 특징은 용융부나 열영향부 등을 모델링하기 위하여 매우 작은 시간 증분을 필요로 하기 때문에 막대한 해석시간과 저장용량을 필요로 한다는 것이다.

따라서, 요소 분할(Mesh generation)은 국부적인 입열에 의해 온도구배가 심한 용접부 주변에서 보다 미세하게 분할하였으며 해석시간과 저장용량을 단축하기 위해 용융부와 열영향부에서 멀어질수록 요소의 크기를 증가시켰다. 구조물의 모양은 원통형이고 x축으로 용접되어지는 부분을 기준으로 축대칭 모델로 가정하였다. 요소는 8개의 절점을 가진 육면체요소를 이용하여 3차원으로 구성하였다.

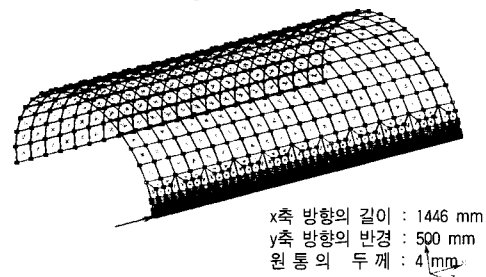


Fig. 1 Finite element Modeling

2.2 해석에 필요한 경계조건 및 물성치

온도분포 해석 시 필요한 경계조건으로 먼저 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기의 온도와 동일하게 20°C로 하였고, 용접부는 가열 및 급냉의 복잡한 열 이력을 겪게 되므로 열팽창계수와 탄성계수 및 항복응력(등방성, von-Mises의 항복조건), 재료의 열적 성질인 비열, 열전달계수 등을 온도에 따른 함수로 입력하였다.

열손실은 대류와 복사에 의해 지배되는데 이중 복사현상은 방열계수(emissivity)로 지정하였으며 열대류계수는 온도에 따른 함수로서 입력하였다. 열전달해석 시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat) 효과도 고려하였다.

그리고 열전달과 응력해석 시 재료는 등방성이며, 재료의 항복거동은 von-Mises의 항복조건을 따른다고 가정하였다.

기계적 해석 시 필요한 경계조건은 축대칭에 의한 부분을 적용하여 구속시켰으며, 용접 시 구조물의 아랫부분은 지면과 수직으로 고정시켰고 용접이 시작되는 점을 용접방향으로 고정시켰다.

또한 모든 부분에서 회전(rotation)은 자유로운 것으로 보고 고려하지 않았다.

해석 시 열원이 이동하므로 열유속(heat flux)에 따른 식을 사용하여 subroutine을 작성하였다.

$$q = \frac{3\eta Q}{\pi r_b^2} e^{-\left(\frac{3r^2}{r_b^2}\right)}$$

여기서, r은 반경, r_b는 빔직경, η는 효율을 나타낸다.

Table 1 The Properties of Al 2219-T851

Properties	Value
Young's modulus	Temperature dependent
Poisson's ratio	0.35
Mass density	2.84 Mg/m ³
Yield stress	Temperature dependent
Thermal Exp. Coef.	Temperature dependent
Thermal conductivity	Temperature dependent
Specific heat	Temperature dependent
Emissivity	3 %
Latent heat	77 kcal/kg

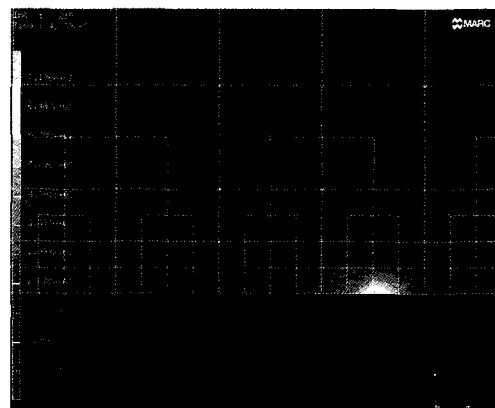
3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포

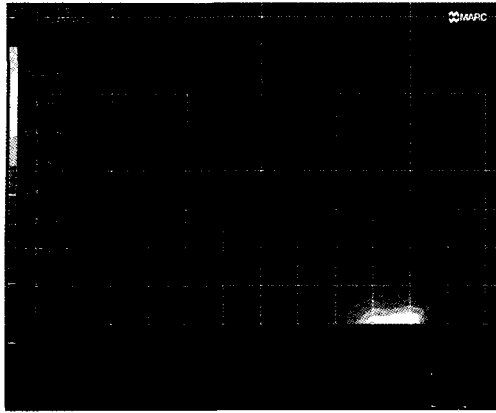
용접시 열영향부의 범위와 온도분포는 같은 재료의 경우 빔출력과 빔속도에 영향을 받는다. 빔출력을 60kV×30mA로하고 용접속도를 분당 0.7~2m 까지 수행한 결과 용융범위(Al 2219, 543.3~643.3°C)가 미소하거나 나타나지 않았다. 반면에 빔출력을 60kV×60mA로 하여 속도를 변화 시켰을 경우는 아래 Table 2에서 볼 수 있는 것처럼 용융부의 반경은 속도가 느릴 경우 커지고 속도가 빨라질수록 반경만 줄어들었다. 이 경우 최고 온도값의 차이가 크지 않았는데 이는 응고 잠열의 영향으로 생각된다.

즉 빔출력 60kV×60mA, 용접속도 1m/mim 인 경우는 최고 온도가 700~980°C, 용융반경이 2.2~3.0mm 이다. 용접 속도가 빨라질수록 최고 온도의 범위와 용융 반경이 줄어들어 최고 온도가 430~720°C, 용융반경이 0~1.8mm로 국부적으로 용접이 일어나거나 용접이 되지 않는 경우가 발생할 수 있어 용접조건으로는 적당하지 못하다. Fig. 3 은 빔출력 60kV×60mA, 용접속도 1m/mim 인 경우에서의 깊이 방향 온도 분포이다.

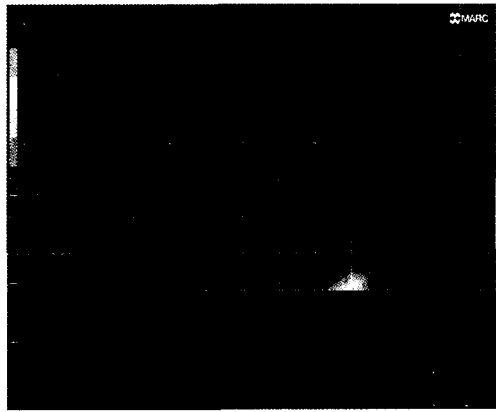
두께가 4mm인 모재에 3mm 이상으로 용입되어짐을 확인할 수 있다.



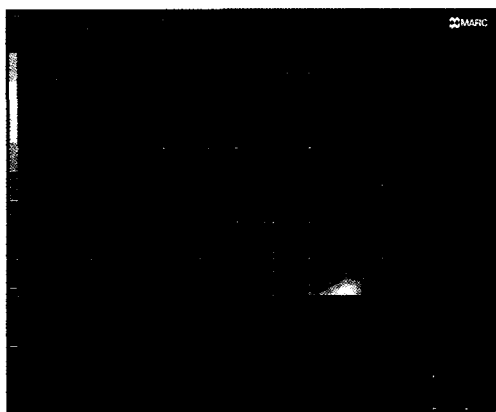
(a) 1446×1/4 step



(b) 1446 × (2/4) step



(c) 1446 × (3/4) step



(d) 1446 × (4/4) step

Fig. 2 Temperature distribution for 60kv × 60mA, 1m/min



Fig. 3 Temperature distribution of depth for 60kv × 60mA, 1m/min

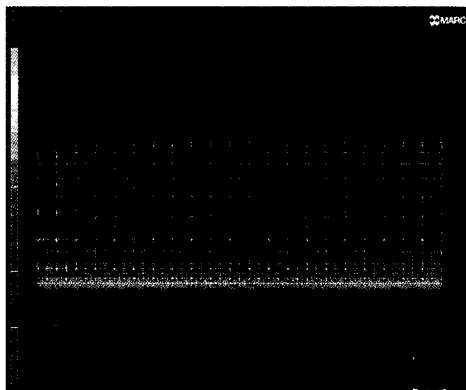
Table 2 Temperature distribution and fusion radials for each weld condition

Beam power	Speed (m/min)	Maximum temperature range(°C)	Fusion radials (mm)
60kV*60mA	1.0	700~980	2.2~3.0
	1.5	600~870	1.2~2.5
	2.0	430~720	0.0~1.8
60kV*30mA	0.7	below 670	0.0~1.0
	1.5	below 460	0.0

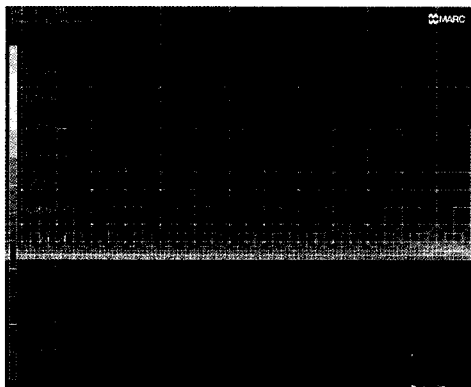
3.2 잔류 응력 분포

Fig. 4 에서 볼 수 있는 것처럼 용접이 진행중인 부분에서 열응력이 크게 나타났다. 용접 후 잔류 응력 분포는 그림에서 보듯이 용접되어진 부분에서만 나타나고 있다. Fig. 4의 (b), (d)의 비교를 통해서 알 수 있듯이 용접이 진행되면서 이전에 나타난 응력의 영향으로 값이 상승하는 현상은 일어나지 않았다. 또한 용접이 일어나지 않는 용접 조건에서는 용접 후 잔류응력의 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 다음 Table 3는 용접 조건에 따른 잔류응력 값을 나타내고 있는데

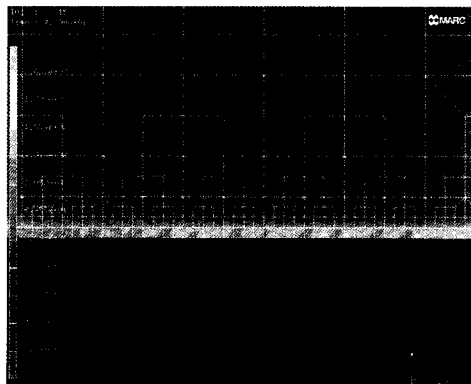
값은 Table 4의 모재의 항복강도 대비 51.6~78.8%으로 나타나고 있다. 따라서 잔류응력으로 인한 파괴는 일어나지 않을 것으로 생각된다.



(a) 1446 x (2/4) step

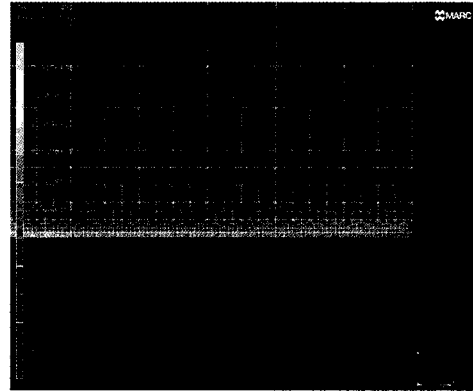


(b) Magnified distribution for 1446 x (2/4) step---(1)



(c) Magnified distribution for 1446 x (2/4)

step---(2)



(d) 1446 x (4/4) step

Fig. 4 Residual stress distribution for 60kv x 60mA, 1m/min

Table 3 Maximum residual stress range for each welding condition

Beam power	Speed (m/min)	Maximum residual stress range(kg/mm ²)
60kV*60mA	1.0	17.78~20.30
	1.5	16.24~18.76
	2.0	23.66~27.10
60kV*30mA	0.7	18.32~20.43
	1.5	None

Table 4 Mechanical properties of Al 2219-T851

No. of specimen	Strength (kg/mm ²)		Elongation (%)
	Ultimate	Yield	
(#1)	45.9	33.9	12
(#2)	45.9	34.9	12
(#3)	45.8	34.4	12
Average	45.87	34.4	12

3.3 구조물의 변형

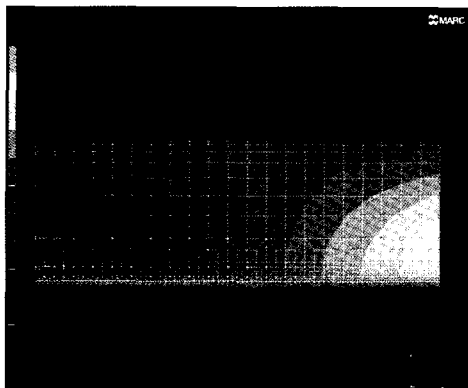
용접 시 열영향으로 인하여 원통 구조물의 용접길이 방향으로 2mm 이하의 간극으로 맞대어진 부분의 변형을 가져와 용접성을 저하시키거나 y축과 z축 변형이 커 간극이 크게 벌어질 경우 용접이 어긋나게 된다.

변형에 대한 값은 빔출력과 용접속도에 따른 입열량에 비례하여 차이는 있지만 거동은 비슷하게 나타난다.

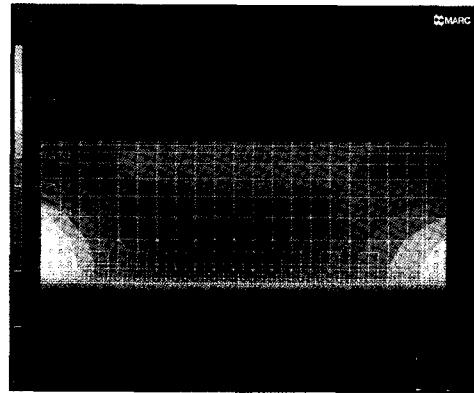
결과에서 용접 방향의 x축 변형은 y축과 z축 변형에 비해 용접성 저하에 그리 크게 영향을 끼치지 않는다.

y축과 z축의 변형의 크기는 용접이 진행되면서 증가하게 되어 용접되어지는 부분은 음의 변형이 양쪽 측면에서는 양의 변형이 발생하여 어느 용접거리에도 도달하면 두 값의 합이 2mm를 넘어 용접의 진행에 지장을 줄 수 있을 것이다.

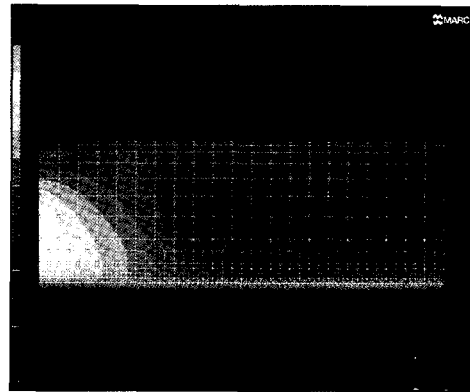
또한 용접이 진행됨에 따라 변형량의 변동이 나타나는 것을 볼 수 있으며 이는 형상 혹은 치수에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 다시 용접이 진행되면 값이 약간 줄어들게 된다.



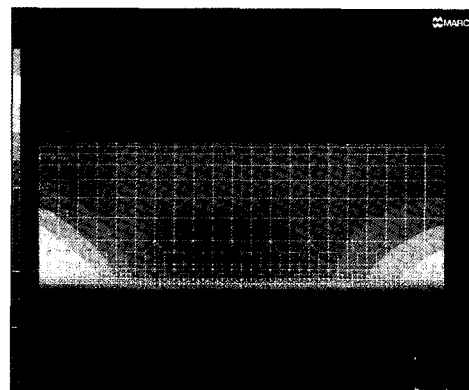
(a) 1446×(1/4) step



(b) 1446×(2/4) step

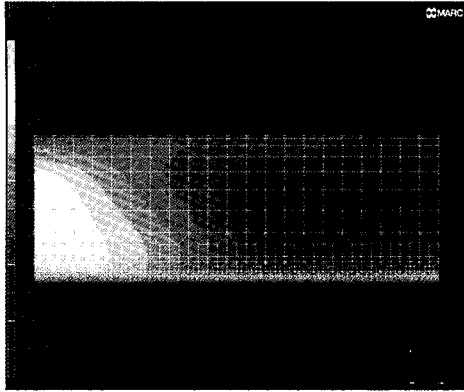


(c) 1446×(3/4) step

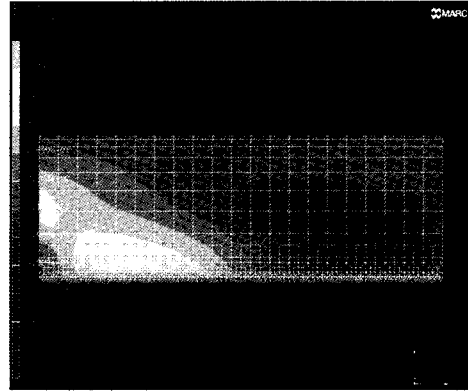


(d) 1446×(4/4) step

Fig. 5 Distribution of y-deformation for 60kv×60mA, 1m/min

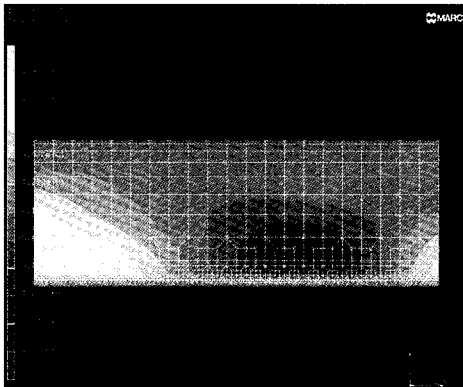


(a) 1446 × (1/4) step

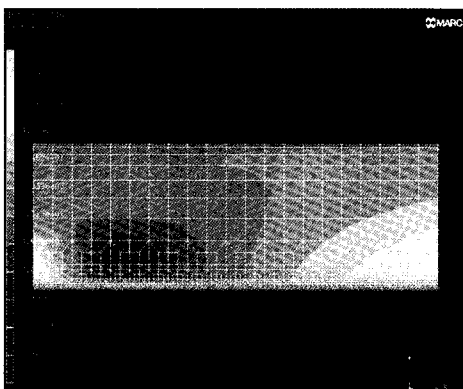


(d) 1446 × (4/4) step

Fig. 6 Distribution of z-deformation for 60kV × 60mA, 1m/min



(b) 1446 × (2/4) step



(c) 1446 × (3/4) step

4. 결 론

알루미늄합금(AI 2219)의 전자빔 용접에 대하여 상용 유한 요소프로그램인 MARC를 이용하고 이동 열원으로 온도분포, 잔류 응력분포, 변형량을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 빔 출력 60kV × 60mA에서 용접속도를 1 ~ 1.5m/min로 용접하면 양호한 용접 조건을 얻을 수 있을 것이다. 유한요소해석 결과와 Fig.7의 실제 용접실험결과를 비교하여보면 용접속도가 1m/min의 경우 용접반경이 약 3mm 정도로 해석결과와 73.3 ~ 100%로 대략 일치함을 알 수 있다.
- (2) 용접 후 잔류응력 분포는 용접되어진 부분에서만 나타나고 있으며 용접이 진행되면서 이전에 나타난 응력의 영향으로 값이 상승하는 현상은 일어나지 않았다.
- (3) 용접으로 인한 변형량이 용접성을 저하시키므로 이를 방지하기 위한 JIG를 설치해야 할 것으로 생각된다.

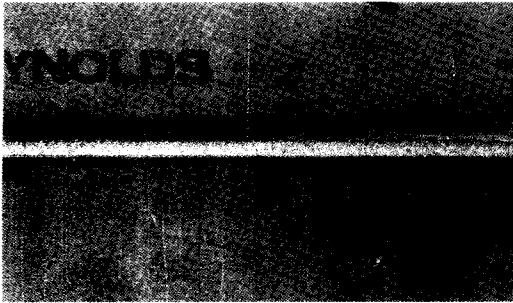


Fig. 7 Experiment of electron beam welding at 60kV, 60mA, 1m/min

Plates for steel Bridge” , Journal of KWS, Vol. 17, No. 1, pp.88-96

참고문헌

- (1) Rosenthal, D. , 1941, “Mathematical Theory Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting” , Welding J. , Vol. 20, No.5, pp.220-234
- (2) Westby, O. , 1968, “Temperature Distribution in the Workpiece by Welding” , Dept. of Metallurgy and Metals Working, The Technical Univ. of Norway, Ph.D Dissertation
- (3) Friedman, E. , 1975, “Thermo-mechanical Analysis of the Welding Process using the Finite Element Method” , Trans. ASME, J. Vessel Techno, pp.206-213.
- (4) Mazumder, J. and Steen, W. M. , 1980, “Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing” , J. Appl. Phys. , Vol. 51, No. 2, pp.941-947.
- (5) Jae-Do Kim and Chi-Yong Cho, 1998, “FEM Simulation of Lap joint in CO₂ Laser Welding of Zn-coated Steel” , Journal of KWS, Vol. 16, No. 1, pp.52-62.
- (6) S.S. Kang, G.B. Jang and H.K. Kim, 1999, “Effect of Root Gap on Residual Stresses and Deformation in the Multi-pass Weld of Thick