

V-groove 박판의 FCAW와 EGW 공정에 따른 변형에 미치는 공정인자 영향

한주호* · 전재승* · 박철성* · 오종인* · 윤진오* · 이정수**,†

*한진중공업(TMS) 산업기술연구팀

Process Parameter Effect on Deformation of a V-groove Thin Plate for FCAW and EGW

Juho Han*, Jaeseung Jeon*, Chulsung Park*, Chongin Oh*, Jinoh Yun* and Jeongsoo Lee**,*†

*Industrial R&D Team Hanjin Heavy Industries & Construction CO., LTD, Busan 600-796, Korea

†Corresponding author : leejszz@hanjinsc.com

(Received December 28, 2012 ; Revised February 18, 2013 ; Accepted February 22, 2013)

Abstract

Finite element analysis and welding experiments were performed to evaluate deformation aspect for Flux Cored Arc Welding(FCAW) and Electro Gas Welding(EGW). Numerical researches of FCAW and EGW were performed considering the difference of number of welding pass and welding direction to arc flow.

To perform the numerical study of FCAW and EGW, number of welding pass and welding direction to arc flow were considered in the finite element model. FCAW process requires multi pass and its welding direction is vertical to welding torch. On the other hand, EGW process requires single pass and its welding direction is parallel to welding torch. The difference of welding direction and heat input was considered in the finite element analysis.

In FCAW process, Goldak's double ellipsoidal heat input model was adopted. In the EGW process, Hemi-spherical power density distribution was adopted.

In the results of experiment and finite element analysis, angular deformation of FCAW process is larger than that of EGW process.

Key Words : FCAW, EGW, Deformation, Finite element analysis, Goldak

1. 서 론

선박의 대형화에 의한 구조부재의 후판화로 생산성 향상을 목적으로 기존 FCAW 공정을 대체하여 EGW 공정의 적용 및 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁶⁾. 이러한 EGW 공정은 대입열 특성에 의해 지금까지 후판에 대해서만 적용 및 연구가 진행되었다⁵⁻⁶⁾. 반면 최근 여객선, 군함, PCTC(Pure Car and Truck Carrier) 등과 같은 특수선박들의 고속화, 경량화의 요구로 박판의 사용 비율이 증가하고 있고, 이로 인해 박판에 대한 변형 제어 및 생산성 향상을 위한 대입열 용접 공정의 효율성 파악을 위한 연구가 진행되고 있다⁷⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 EGW 공정의 박판에 대한 적용을 위해 각변형에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 특히 용접실험 및 유한요소법을 이용한 열탄소성 해석을 통해 기존 FCAW와 EGW 공정의 박판 적용 시 발생하는 각변형 특성을 비교 분석하였다.

2. 용접실험

2.1 용접 시험편 제작

FCAW 및 EGW 용접 전후 변형량을 측정하기 위해 조선용 AH32 10t 강재에 대하여 용접 시험편을 제작하였다. 시험편의 크기는 각 용접법의 변형 특성을 잘 살펴볼 수 있는 폭 450mm, 길이 750mm로 동일하게

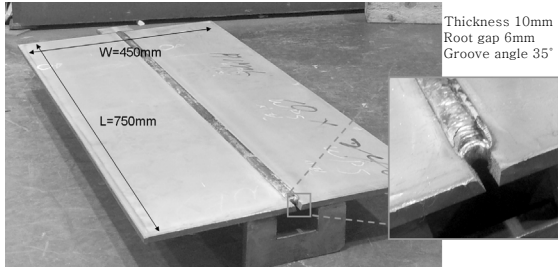


Fig. 1 Specimen shape

Table 1 Welding conditions

Process	A	V	speed	Heat Input	
FCAW	1pass	175 A	21.5V	0.14 cm/s	26KJ/cm
	2pass	190 A	21.3V	0.22 cm/s	18KJ/cm
EGW	1pass	270 A	23.4V	0.17 cm/s	37KJ/cm

Table 2 Characteristics of welding processes

Process	Weld Pass	Weld Orientation
FCAW	Multi Pass	Perpendicular
EGW	Single Pass	Parallel

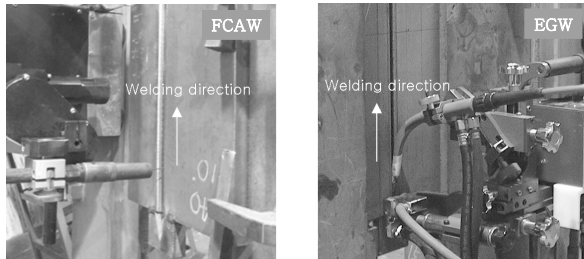


Fig. 2 Weld orientation

하였고 홈각도 및 루트형상(Gap 6mm, V-Groove Angle 35°), 구속조건, 냉각시간은 모두 동일하게 용접을 수행하였으며 그 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 용접 시 사용된 각 용접법에 대한 용접조건은 Table 1에 나타내었으며 각 용접법의 차이점을 Table 2에 나타내었다. FCAW 공정은 Multi Pass로 용접이 진행되고 Fig. 2와 같이 용접진행 방향과 토치가 이루는 각(Weld Orientation)이 수직인 반면에 EGW 공정은 Single Pass로 용접이 되고 Weld Orientation은 용접진행 방향과 평행하게 되는 차이점이 있다.

2.2 각변형 측정 및 결과

FCAW 및 EGW에 대한 각 변형량을 측정하기 위해

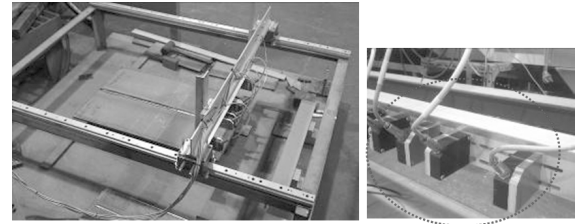


Fig. 3 Measuring system of deformation

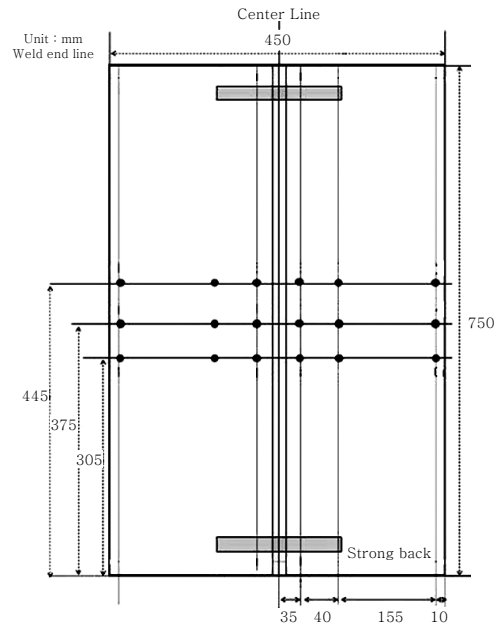


Fig. 4 Measuring points

$$\text{각 변형량} = \frac{\delta}{W} \text{ (radian)}$$

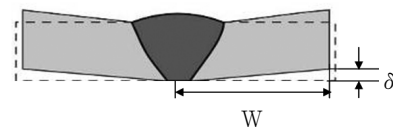


Fig. 5 Definition of angular deformation

Fig. 3에서 보여주는 레이저 센서를 사용하여 시험편 각 18개 Point에서 용접 전후 변형량을 측정하였으며, 그 위치는 Fig. 4에 나타내었다. 측정치에 대한 변형량의 대소를 판단하기 위해 Fig. 5에 나타낸 기준에 따라 delta값의 대소로 변형량을 비교하였다⁹⁾(W는 FCAW와 EGW 두 용접시험편 모두 동일).

두 가지 공정에 의해 각각 용접된 시험편의 각변형량 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 결과를 살펴보면 EGW에 비해서 FCAW가 변형량이 큰 것을 확인할 수 있으며 모든 조건에서 동일하게 용접하였음에도 불구하고 EGW의 변형량이 작게 나타난 이유는 두 공정의 차이

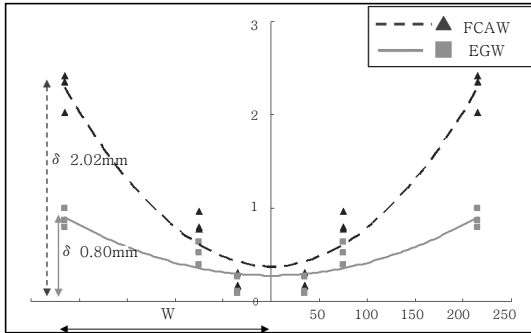


Fig. 6 Experiment of angular deformation

인 Weld Pass와 Weld Orientation의 영향으로 두께 방향의 온도 구배에 차이가 발생한 것으로 판단할 수 있다.

3. 유한요소해석

용접실험에 의한 각변형양상에 대한 원인분석을 위해 FCAW와 EGW 공정의 특성(pass number, weld orientation) 및 실제 용접조건을 해석에 반영하여 MSC. Marc를 사용하여 수치해석을 수행하였으며 나머지 변수는 동일하게 하여 변수를 최소화 하였다.

3.1 FCAW 및 EGW 용접특성 반영

FCAW는 본 논문에서 선정한 공정의 특징인 용접진행방향과 토치가 수직이므로 일반적으로 많이 사용되는 Goldak's double ellipsoidal power density distribution을 사용하였다¹⁰⁾.

반면에 EGW는 비교적 얇은 판인 10mm에 적용되어 위빙이 적용되지 않았고, FCAW와는 달리 용접진행방향과 토치가 평행하여 Hemi-spherical power density distribution으로 선정하여 열탄소성 해석을 수행하였다¹¹⁾.

Fig. 7에는 본 연구에서 사용된 두 가지 입열 모델의 특징에 대해 간략히 나타내었다.

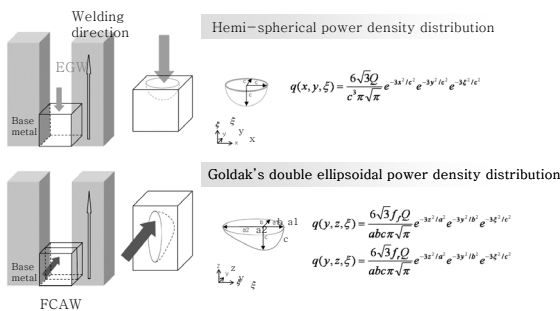


Fig. 7 Characteristics of heat input models

3.2 입열모델 Calibration

신뢰성 있는 해석결과를 얻기 위해서는 입열 모델 (Heat Input Model)을 제대로 정립하여 Molten Zone을 정확하게 반영하는 것이 가장 중요하다. 하지만 용접부에서 일어나는 물리적 현상은 너무나 복잡하기 때문에 이를 완벽하게 반영하기란 불가능하다. 따라서 용접부 전체를 하나의 열원으로 보고 해석하는 경우가 대부분이다. 이러한 방법의 일환으로 용접시험편의 용접부 단면을 기준으로 열영향부의 크기를 정립 한다¹²⁻¹³⁾. 본 연구에서는 Macro 시험편을 채취하여 실제 용접부 단면의 HAZ 크기를 확인하였고, 이를 기준으로 해석을 수행하였다.

3.3 요소모델 및 경계조건

수치해석을 위한 모델링은 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 시험편 형상이 용접선을 중심으로 좌우대칭이므로 해석시간의 단축을 위해 실제 시험편의 1/2만 모델링 하였다. 8절점 육면체로 요소 분할하였으며 요소 수는 35625개, 질점 수는 51477개이다.

또한 열원에 의해 온도 변화가 크게 나타나는 용착금속부는 상대적으로 모재부에 비해 요소 크기를 작게 나누어 해석의 정도를 높였다. 본 모델에 적용된 경계조건은 Fig. 9에 나타내었으며 대칭 경계 조건을 적용하였다. 특히 실제 변형과 최대한 비슷한 양상을 나타낼 수 있게끔 y, z 방향에 대해 최소한으로 구속조건을 설정하였고, 용착금속부를 제외한 모든 단면에 경계 조건을 주어 공냉의 영향을 반영하였다.

3.4 수치해석 결과

FCAW와 EGW의 열적 특성을 규명하기 위해 Fig. 10에 FCAW 공정으로 용접된 시험편의 용접부 단면과 이 단면의 HAZ 크기를 기준으로 하여 해석을 수행한 결과를 나타내었고, Fig. 11에는 용접부 중심에서 40mm,

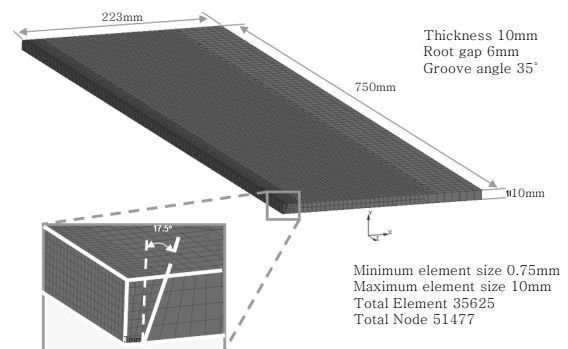


Fig. 8 Specimen modeling

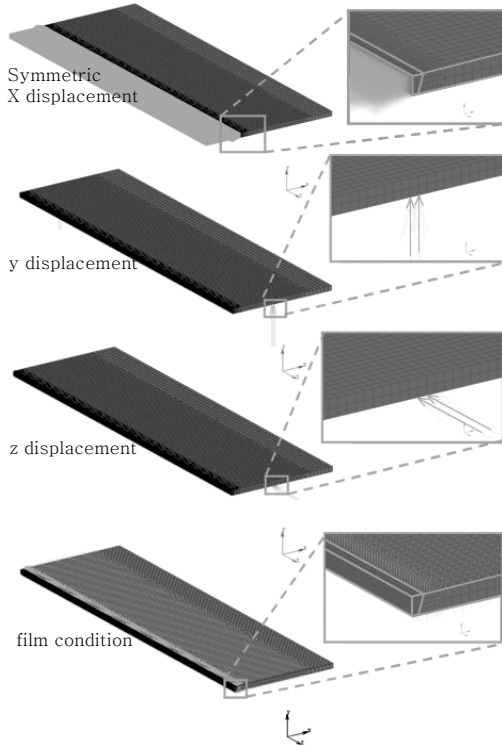


Fig. 9 Boundary condition

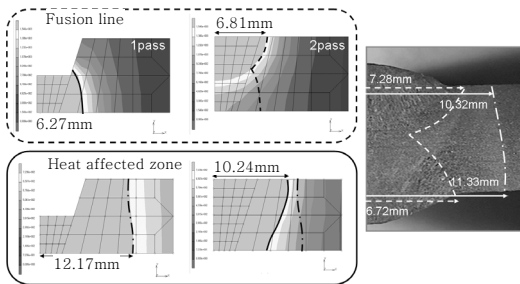


Fig. 10 Fusion line & HAZ by FEM

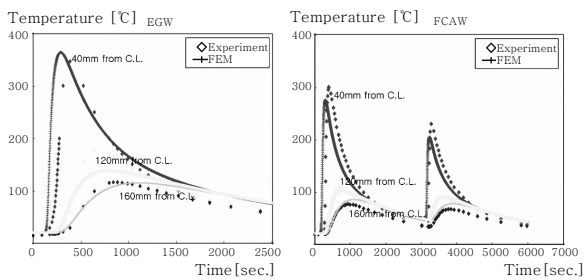


Fig. 11 Temperature history

120mm, 160mm 떨어진 위치에서의 측정된 온도분포를 나타내었다. FCAW 공정의 경우 1Pass 용접 후 일정 시간의 자연대류 상태를 유지한 후 2Pass 용접이 되도록 해석하였다. Fig. 10을 살펴보면 Macro 시험편의 용접부 단면과 해석에 의해 형성된 온도분포 영역

이 Fusion Line과 HAZ 모두 동일한 경향을 나타내고 있으며, 그 크기 또한 상당히 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있는데, 이로 미루어 볼 때 본 연구에 사용된 입열 모델이 타당한 것을 확인할 수 있다. 또한 용접 완료 후 최종적으로 형성된 열영향부의 크기는 해석결과와 용접실험 결과 모두에서 초층 용접에 의해 형성된 것임을 확인할 수 있었다.

열 전달 해석의 온도분포 양상과 용접 실험 시 측정된 온도분포를 비교해 보면 EGW, FCAW 1Pass, FCAW 2Pass의 입열량이 높은 순으로 온도가 높게 나타났으며 해석 결과와 실험 결과 모두 정성적으로 동일한 경향을 보여주고 있고 최고 도달 온도 또한 실험 측정치와 해석결과 값이 정량적으로 거의 유사한 값을 나타내었다.

앞에서 언급했듯이 각 용접법의 2가지 특성을 반영하여 열탄소성 해석이 진행되는 현황을 Fig. 12에 나타내었다. 각 공정의 열 전달 양상에 차이가 있음을 잘 보여주고 있으며, 이 현상을 볼 때 본 연구에서 제시한 두 공정의 차이, 즉 용접 Pass 수와 Weld Orientation의 영향으로 두께 방향의 온도 구배의 크기가 다르게 형성 되어 두 공정간의 각변형량에 차이가 발생하는 것으로 보인다. 따라서 EGW 공정이 FCAW 공정보다 적은 용접 Pass 수와 Parallel Weld Orientation의 영향으로 두께 방향의 온도 구배가 FCAW에 비해 크게 발생 하지 않아 각 변형이 작게 발생하는 것으로 사료된다.

두 공정의 각 변형을 살펴보기 위해 열탄소성 해석결과와 두께 방향인 Y방향의 변형량을 Fig. 13에 나타내었다. 결과를 살펴보면 폭 방향으로 FCAW의 Y방향 변위 Contour가 EGW에 비해 상대적으로 간격이 좁게 나타났다. 등고선과 마찬가지로 간격이 좁다는 것은 기울기가 급해 FCAW가 EGW 보다 각 변형이 큰 것을 한눈에 알 수 있다.

각변형 계산에 사용되는 변수인 δ 값의 대소를 비교하기 위해 Fig. 14에 표시한 1번, 2번 위치에서의 displacement history of Y direction 값을 나타내었다. 결과를 살펴보면 FCAW가 EGW에 비해 δ 값이 크

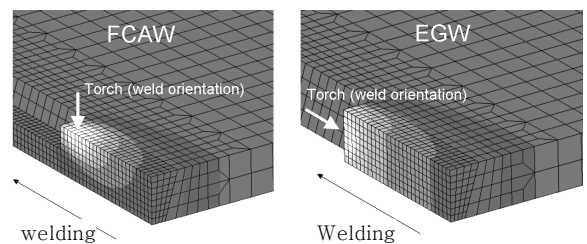


Fig. 12 FCAW & EGW

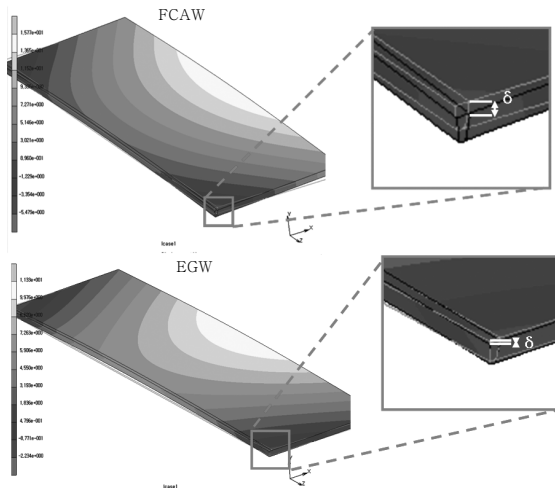


Fig. 13 Y displacement contour

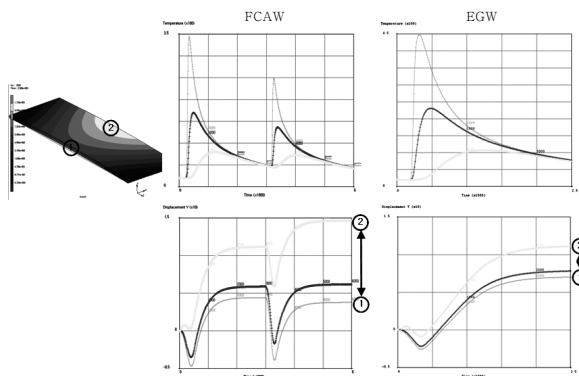


Fig. 14 Node History with Respect to Angular Distortion

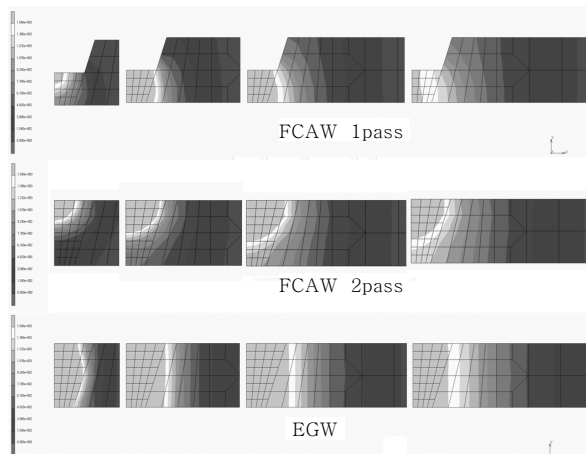


Fig. 15 Heat transfer characteristic

게 나타났는데, 이는 각 공정의 2가지 특성의 영향으로 열 전달 양상에 차이를 나타내기 때문으로 판단 된다. 그 차이를 명확히 보기 위해서 Fig. 15에 열 전달 특성을 나타내었다. 그림을 살펴보면 두 공정의 열 전달

양상의 차이가 확연히 나타나며 FCAW의 온도구배가 EGW에 비해서 크게 형성되는 것 또한 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 이론적으로 적용된 적이 없는 박판에 대해 EGW 공정의 적용을 수행하였으며, 박판에 대한 EGW 공정의 각변형에 대해 FCAW 공정과 비교하여 고찰하였다.

FCAW와 EGW 공정의 특징을 제외한 나머지 조건들을 동일하게 적용하여 두 공정에 따른 각변형 결과를 비교하였다.

1) 용접실험 결과 EGW 공정에 비해서 FCAW 공정의 각 변형이 큰 것으로 나타났다. 공정에 따른 특성을 제외한 영향 인자들은 모두 동일하게 적용했으므로 용접실험에 의한 변형량의 차이는 공정의 특성에서 기인한 것으로 판단할 수 있다.

2) 각 공정의 특성을 반영한 유한요소해석 결과 역시 FCAW의 각 변형이 크게 나타났다.

3) 각 변형에 대한 유한요소해석 분석을 통해 Weld Orientation의 차이에 따라 다르게 적용된 입열 모델에 의해 열 전달 양상이 달랐고 이로 인해 각 변형의 주 발생기인 두께방향의 온도 구배가 FCAW가 더 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김희진, 유희수 : 대입열용접 특성, 대한용접 접합학회 춘계학술발표대회 초록집, (2010), 13-17
2. 박주용, 최우현 : 조선 탑재용접용 대입열 수직자동용접법의 개발에 관한 연구, 대한용접접합 학회지, **26-5** (2008), 66-73
3. 이정수, 윤진오, 정상훈, 박철규, 안영호 : EGW 용접재료 및 용접부 특성에 관한 연구, 대한용접접합 학회지, **28-2** (2010), 79-83
4. 김남인, 정상훈, 이정수, 강성원, 김명현 : 일렉트로가스 용접부의 기계적 성질에 미치는 Mn 및 입열량의 영향, 대한금속재료 학회지, **47-3** (2009), 195-201
5. K. SASAKI, K. SUDA, R. MOTOMATSU, Y. HASHIBA, S. OHKITA, and S. IMAI : Development of Two-electrode Electro Gas Arc Welding Process, Nippon Steel Technical Report, **90** (2004), 67-74
6. S. Deshimaru, I., Hirai, K., Amano, S., Ueda, T., Uemura, K., Tsubota : Production of heavy-gauge steel plates suitable for high-heat input welding in the arctic region, Kawasaki Steel Technical Report, **17** (1987), 34
7. 추환수, 조상명 : 박판 필릿용접구조물의 좌굴변형에 관한 연구, 대한용접접합 학회지, **27-3** (2009), 60-66
8. 오종인, 윤진오, 임동용, 정상훈, 이정수 : 선체외판부 3.2T 박판에 대한 SAW 용접 적용에 관한 연구, 대한용접접합학회 춘계학술발표대회 초록집, (2010), 51-51

9. 용접접합 편람, II (2008), 26-49
10. John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi : Computational welding mechanics, (2005)
11. Goldak J., Chakravarti A., and Bibby M. : A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, Metallurgical Transactions, **15B** (1983), 299-305
12. Cao Z., Yang Z., and Chen X., L. : Three-Dimensional Simulation of Transient GMA Weld Pool with Free Surface, Welding Research, (2004), 169-176
13. 장경복, 박중구, 조시훈, 장태원 : 박관 점 곡직 시 변형 특성에 관한 연구, 대한용접접합학회 춘계학술발표대회 초록집, (2005), 285-287