

박판 패널 용접부의 용접 기법에 따른 좌굴 변형에 관한 연구

신 상 범* · 이 동 주* · 이 주 성**

*현대중공업 산업기술연구소

**울산대학교 조선해양공학부

Evaluation of Buckling Distortion for the Thin Panel Welded Structure According to Welding Processes

Sang-Beom Shin*, Dong-Ju Lee* and Joo-sung Lee**

*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd

**School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Univ., of Ulsan

*Corresponding author : str@hhi.co.kr

(Received November 16, 2007 ; Revised January 29, 2008 ; Accepted March 24, 2008)

Abstract

The purpose of this study is to propose the proper fillet welding process for preventing the buckling distortion in thin panel welded structure. In order to do it, a heat input model for laser hybrid welding process was developed using FEA and experiment. The principal factors controlling the angular distortion and longitudinal shrinkage force caused by FCA and laser hybrid welding were identified as the welding heat input and weld rigidity using FEA. The predictive equations of angular distortion and longitudinal shrinkage force for each welding process were formulated as a function of the principal factors proposed. With the predictive equations, the buckling distortion at the thin panel welded structure with welding process was evaluated and compared using nonlinear buckling analysis and STEM(simplified thermo elastic method). Based on the results, the best way to prevent the buckling distortion at the given welded panel structures was identified as an intermittent FCA welding.

Key Words : Laser hybrid welding, FCAW, Angular distortion, Longitudinal shrinkage force, Buckling distortion

1. 서 론

최근 선체의 대형화 및 고속화와 함께 선체 구조적 안전성을 확보하고, 재료비 절감 및 운항시 경제성을 확보하기 위한 일환으로 선체 상 갑판(upper deck)의 두께 감소 및 고강도강(high strength steel)의 사용량이 점차 증가하고 있다. 그러나 이러한 박판 사용량의 증가는 생산 현장에서 과다 변형(excessive distortion)에 의한 교정 공수를 유발하고, 공기를 지연시킴으로써 생산성 향상의 저해 요소로 작용하고 있다¹⁾. 특히, 박판 용접부에 발생하는 좌굴 변형(buckling distortion)

의 경우 변형량이 매우 클 뿐 아니라, 변형 모드(distortion mode)가 매우 복잡하여 선상 가열과 같은 일반적인 교정 작업을 이용하여 교정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 여러 연구기관을 중심으로 설계 및 생산 초기 단계에서 박판 용접부의 좌굴 변형을 효과적으로 제어하기 위한 방안에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다. TWI(The Welding Institute)의 Guan등은 가열 및 냉각 기법을 이용하여 용접시 용접부의 균일한 온도 구배를 야기함으로써 좌굴 변형의 주 인자인 용접 수축 하중(shrinkage force)을 감소시키기 위하여 LSDN(Low Stress No Distortion)법을 제안하였으며²⁾, 가와사키 중공업에서는 열 및 기계적 하중을 이용하여 용

접 수축 하중을 이완시킴으로써 좌굴 변형을 제어하는 방안을 등을 제안한 바 있다³⁾. 그러나 이러한 제어 방안을 실 작업 현장에 적용하기 위해서는 과도한 설비 투자가 필연적으로 수반된다. 따라서 대량 생산 체제가 요구되는 조선 업체에서는 이의 대안으로 고밀도 에너지 즉, 레이저나 플라즈마를 이용한 용접 기법의 적용을 적극적으로 검토하고 있다. 고밀도 에너지를 이용한 용접의 경우 용접 변형 제어는 물론 용접의 고속화를 통하여 생산성을 증가시킬 수 있으며, 고밀도 에너지 용접 기법의 단점으로 제시된 용접 깊이의 대응력에 관한 문제 또한 고밀도 에너지와 아크 용접을 동시에 적용하는 하이브리드(hybrid) 용접기법이 최근 개발됨으로써 이의 적용 영역은 점차 증가할 것으로 기대된다. 그러나 이러한 하이브리드 용접의 경우 과도한 초기 설비 투자비가 소요되므로 생산 설비의 경제성 및 합리화를 위해서는 무엇보다도 하이브리드 용접 적용시 변형 제어 효과가 규명되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 FCA와 레이저 하이브리드 용접 기법에 따른 박판 용접부의 좌굴 변형 거동 특성을 평가하고 이 결과를 토대로 좌굴 변형 제어를 위한 적정 용접 기법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 레이저 하이브리드 용접 입열 모델을 유한 요소 해석과 실험을 이용하여 개발하고자 하였다. 그리고 개발된 입열 모델과 유한 요소 해석을 이용하여 용접 기법별 변형 거동 특성을 평가하고 이 결과를 토대로 용접 기법별 용접 변형과 용접 수축 하중에 대한 예측 기법을 제안하고 좌굴 변형 거동 특성을 비교 평가하였다.

2. 레이저 하이브리드 용접 입열 모델

용접부의 잔류 응력 해석 프로토콜의 제정을 위하여 수행된 기존의 라운드 로빈 평가 결과에 의하면 각 참여 기관별 잔류 응력 해석 결과의 차이로 부 적절한 용접 입열 모델의 이해 및 적용을 주요인으로 제기하였다^{4,5)}. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 GMA와 Nd:YAG 레이저 하이브리드 용접부의 역학 특성을 보다 정량적으로 평가하기 위하여 용접부의 온도 구배 및 용융지의 형상에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과를 토대로 레이저 하이브리드 용접 입열 모델을 개발하였다. 여기서, 용접부의 온도 구배를 평가하기 위하여 부착된 K type의 열전대 위치는 Fig. 2와 같다. GMA와 레이저 하이브리드 용접부의 온도 분포 및 용융지 크기 평가를 위한 해석시 GMA와 Nd:YAG 레이저 열원은 각각 가우시안(Gaussian) 분포의 표면 열속과 원통형



Fig. 1 GMAW and laser hybrid welding

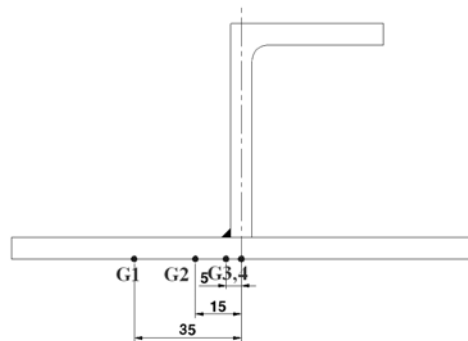


Fig. 2 Locations of K type thermo-couples attached

(cylinder type)의 체적 열원으로 가정하였다. 이때, GMA 용접이 레이저 열원을 선행하면서, 1개의 용융지를 형성하므로 본 연구에서는 실 용접 열원간의 거리를 고려하여 순차적으로 피 가열재에 각 열원이 작용하는 것으로 가정하였다. 이때, GMA와 레이저 용접 조건은 각각 Table 1, 2에 나타내었으며, 사용된 보강재와 모재의 두께는 각각 8mm와 6mm이다.

Fig. 3은 GMA와 레이저 하이브리드 용접부의 용융지에 대한 계측 및 유한요소해석 결과를 비교하여 도시한 것이다. 여기서 하이브리드 용접시 GMA 용접 효율은 기존의 연구 결과를 토대로 0.7로 일정한 것으로 가정하였다⁵⁾. Fig. 3과 같이 하이브리드 용접시 레이저 용

Table 1 Laser welding conditions

Power [kW]	Welding Speed [mm/min]	Shielding Gas
3	2000	80%Ar +CO ₂

Table 2 Pulsed GMA Welding conditions

Voltage [V]	Current [A]	Pulse per Second	Pulse Width [ms]
30*	466*	158	2.9*

* Peak value

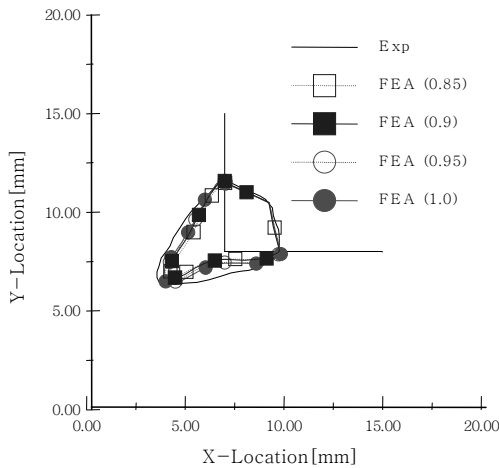


Fig. 3 Comparison of shapes of molten pool obtained by both FEA and experiment (efficiency of GMAW = 0.7)

접 효율이 증가함에 따라 예측된 용융지의 형상에 근접하지만, 레이저 용접 효율이 1.0 인 경우에도 해석 결과는 예측 결과를 다소 과소 평가하고 있음을 알 수 있다.

이는 하이브리드 용접 특성 즉, 두 용접 프로세스가 단일 용융 풀의 형성시 발생하는 아크 플라즈마와 레이저의 상호 작용에 기인한 것으로 레이저 용접 효율이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 기존의 단일 용접 효율에 대한 효율 평가를 위한 방안 즉, 용융지 형상 및 크기만을 이용한 효율 평가 방안이 하이브리드 용접에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 하이브리드 용접부의 효율을 정의하고자 용접부의 온도 분포를 평가하고 이를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4는 Table 1과 2의 용접 조건하에서 GMA와

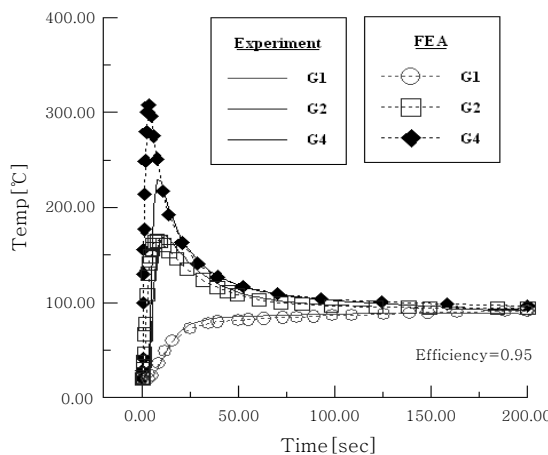


Fig. 4 Changes of temperature distribution of laser hybrid fillet weld (efficiency: 0.75 for GMA, 0.95 for Laser)

Nd:YAG 레이저 하이브리드 용접시 GMA와 레이저 용접 입열 효율이 각각 0.75와 0.95인 경우 Fig. 2에 도시한 용접부의 각 위치에서 가열 및 냉각 시간에 따른 온도 거동에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 4 와 같이 효율이 0.95 인 경우 용접부에 인접한 G1에서 두 결과 간에 약 70°C의 오차가 발생하고 있다, 그러나, 시간에 따른 각 위치에서의 온도 구배 그리고, 일정 시간이 경과한 후 각 용접부의 평균 온도 측면에서 해석 및 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 해석 및 실험 결과를 토대로 본고에서 사용한 레이저 하이브리드 용접시 GMA와 레이저 용접 입열 효율을 각각 0.75와 0.95로 정의하였다. 참고로 기존의 아크 용접 즉, FCA (Flux Cored Arc) 용접과 GMA (Gas Metal Arc) 용접 입열 모델은 대한 용접 학회 용접 강도위원회에서 제안한 입열 모델중 0.7의 효율을 가진 균일 체적 열원을 적용하였다⁵⁾.

3. 단위 용접부 변형 특성

3.1 해석 모델 및 방법

GMAW와 Nd:YAG 레이저 하이브리드 필렛 용접부의 변형 및 잔류 응력 특성을 평가하기 위하여 비선형 과도 열전달 해석 및 열 탄소성 해석을 수행하였다. 개발된 입열 모델을 이용한 용접부의 온도 구배를 평가하기 위한 열전달 해석시 준 정상 상태 조건(quasi-steady state condition)을 이용하여 3차원 열전달 문제를 2차원 열전달 문제로 단순화하였다. 그리고 용접부에서의 상변화 및 용융지 내에서의 stirring 효과 등 용융지내의 물리적 특성은 용접 학회 강도 위원회가 제안한 아크 용접부 온도분포 해석 규정에 준하여 평가하였다⁵⁾. 변형 및 잔류 응력 해석을 위한 열 탄소성 해석시 용접선 방향의 구속 효과와 가열시 모재의 팽창에 의한 역변형을 방지하기 위하여 Fig. 5와 같이 “on-die” 조건

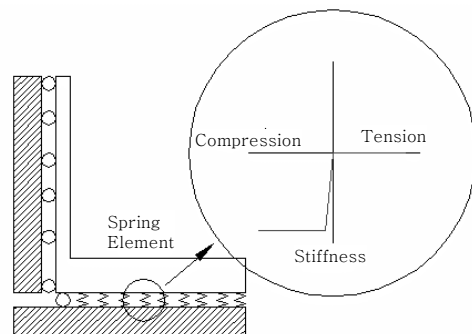


Fig. 5 Analysis model and boundary condition

을 적용 하였다. 이때, 용접부 하부의 스프링 요소의 강성(stiffness)은 수렴성과 가열 중 발생하는 역 변형량이 0.01mm를 초과하지 않도록 가정하였다. 그리고 사용된 모재는 두께가 6mm ~ 10mm인 일반 선급용 A grade 강재로 열적 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 것으로 가정하였다. 여기서 사용된 항복 개시 조건은 von-Mises 조건이다.

3.2 해석 결과 및 고찰

Fig. 6은 GMA와 Nd:YAG 레이저의 하이브리드 필렛 용접부에서 유효 용접 입열량 (Qe) 과 용접부 주판의 굽힘 강성(Db)의 비에 따른 각 변형 거동을 도시한 것이다. 여기서, "Weld"는 용접부가 위치한 주판에서 각 변형을 "No Weld"는 용접부가 없는 주판의 각 변형을 나타내며, 용접부의 굽힘 강성(Db)은 $t^{1.5}$ 이다. Fig. 6과 같이 하이브리드 필렛 용접부의 각 변형은 본 고의 용접 입열 조건하에서 모두 용접 입열량과 효율로 정의되는 유효 입열량 (Qe)에 대한 굽힘 강성(Db)의 비에 따라 거의 선형적으로 증가하며, 용접부가 위치한 주판의 각 변형이 더 크게 발생함을 알 수 있다. Fig. 7은 일면 FCA 용접과 레이저 하이브리드 용접부의 각 변형량을 비교하여 도시한 것이다. Fig. 7과 같이 용접부가 위치한 영역에서 레이저 하이브리드 용접부의 각 변형은 일면 FCA 필렛 용접부와 유사한 각 변형 거동을 보이는 반면에 용접부가 위치하지 않은 영역에서의 각 변형은 다소 상이하다. 이는 용접부가 인접하지 않은 주판에서의 각 변형은 보강재의 각 변형과 중첩되어 나타나는데 일면 FCA 용접시 용접 입열량이 증가함에 따라 보강재에서 두께 방향의 온도차가 감소함으로써

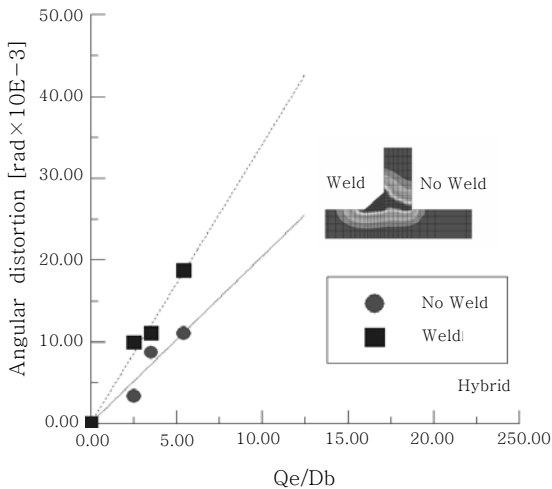


Fig. 6 Variation of the angular distortion with Qe/Db in the laser hybrid fillet weldment

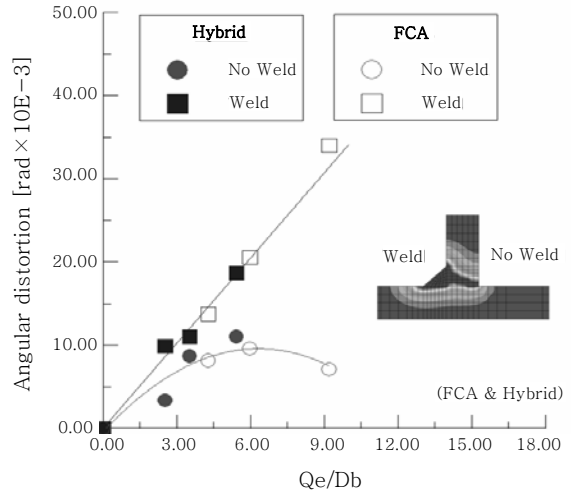


Fig. 7 Comparison of angular distortion of one side fillet weld caused by laser hybrid welding and FCAW

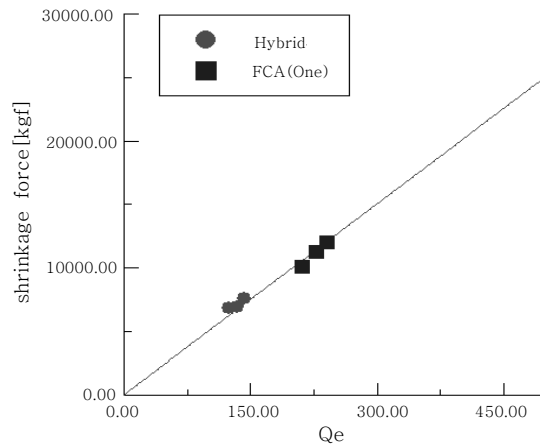


Fig. 8 Comparison of longitudinal shrinkage force of one side fillet weld caused by laser hybrid welding and FCAW

각 변형이 감소하기 때문이다. 이상의 결과를 토대로 용접 기법에 따른 필렛 용접부의 각 변형을 식(1)과 같이 용접 유효 입열량 (Qe) 및 굽힘 강성(Db)의 비로 정의하였다.

$$\Phi = f\left(\frac{Qe}{Db}\right) \tag{1}$$

Fig. 8은 일면 FCA 와 레이저 하이브리드 필렛 용접부에서 용접선 방향의 수축 하중 거동을 비교하여 도시한 것이다. Fig. 8과 같이 용접선 방향의 수축 하중 (SF)은 용접 기법에 관계없이 모두 용접 유효 입열량이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있으므로 식(2)와 같이 정의하였다.

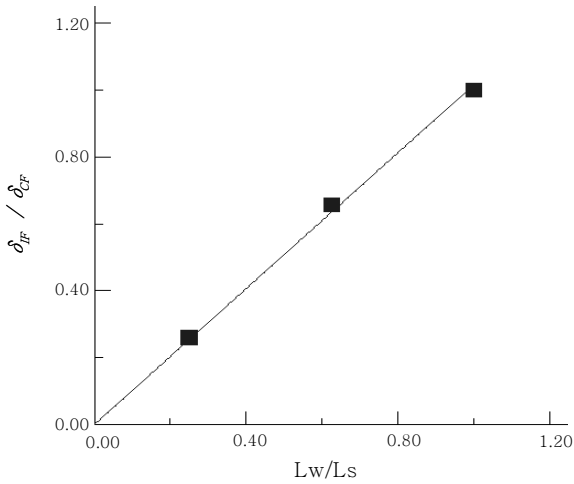


Fig. 9 Variation of dimensionless parameter of shrinkage force at the intermittent fillet weldment with Lw/Ls using experiment

$$SF = f(Qe) \tag{2}$$

Fig. 9는 웨브(web)와 플랜지(flange)가 각각 200×13mm, 75×13mm이고, 길이가 4000mm의 BLT(Built-up T bar)에 FCA 단속 용접을 적용한 경우 용접선의 길이(Lw)와 용접부의 간격(Ls)의 비에 따른 최대 굽힘 변형량의 비 (δ_{IF}/δ_{CF})를 도시한 것이다. 여기서, δ_{IF} 는 BLT에 단속 용접시 최대 굽힘 변형량이며, δ_{CF} 는 연속 용접을 적용한 경우 최대 굽힘 변형량이다.

Fig. 9와 같이 Lw/Ls가 증가함에 따라 단속 및 연속 용접에 의한 굽힘 변형량의 비는 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. BLT의 굽힘 변형이 용접 수축 하중에 선형적으로 비례하므로 단속 필렛 용접부의 수축 하중(SF_{IF})은 식(3)과 같이 용접선 길이와 용접부 간격의 비(Lw/Ls)와 연속 용접부의 수축 하중(SF_{CF})의 선형적인 비례 함수로 정의할 수 있음을 알 수 있다.

$$SF_{IF} = f\left(\frac{Lw}{Ls}, SF_{CF}\right) = f\left(\frac{Lw}{Ls}, Qe\right) \tag{3}$$

4. 박판 패널 용접 변형 특성 비교

용접 기법에 따른 좌굴 변형 거동 특성을 평가하기 위하여 사용한 해석 모델은 Fig. 10과 같이 주판 두께가 6mm이고 보강재의 간격이 840mm인 panel 용접부이며, 사용된 용접 조건은 Table 3과 같다. Panel 용접부의 용접 기법에 따른 좌굴 변형 거동은 먼저 용접 기법에 따른 각 변형 거동을 평가하고 이를 비선형 좌굴 해석을 위한 모델의 초기 부정(initial imper-

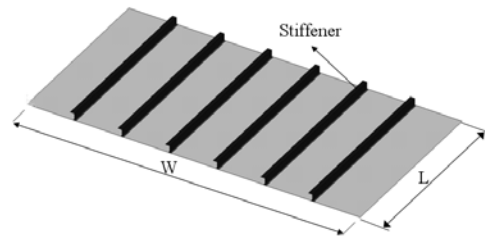


Plate [mm]	Stiffener [mm]
3000(L) x 5880(W) x 6t	125 x 75 x 7t UA

Fig. 10 Schematic diagram and dimension of analysis model used for buckling distortion analysis

Table 3 Welding conditions for buckling analysis

Leg Length [mm]	Heat Input [cal/mm]	
	Laser Hybrid	FCA
4.5	84.2	193.2

fection)으로 가정하였다. 이러한 가정은 각 변형이 용접부의 가열 후 수 초 내에 최대가 되는 반면에 좌굴 변형을 유발하는 수축 하중은 용접부가 상온으로 냉각된 후 최대가 된다는 점에서 충분한 타당성을 가진다. 이때, 용접부에서 발생하는 각 변형은 식(1)과 STEM (simplified thermal elastic method)을 이용하여 평가하였으며⁶⁾, 용접선 방향의 종 수축 하중은 용접선의 길이를 고려하여 식(2)와 (3)을 이용하여 정의하였다.

Fig. 11은 Fig. 10의 패널(panel) 제작시 필렛 용접 각장이 4.5mm인 경우 일면 레이저 하이브리드에 의한 필렛 용접과 FCAW 을 이용하여 일면 및 양면 연속 그리고 단속 (intermittent) 용접이 적용된 경우 각 변형 분포를 비교하여 도시한 것이다.

여기서 단속 용접부의 용접선의 길이(Lw)와 간격(Ls)의 비는 0.25이다. Fig. 11과 같이 용접시 주판의 각 변형은 FCA 에 의한 단속 필렛 용접, 하이브리드 편면 용접, FCA 편면 그리고, 양면 용접의 순으로 증가한다. 이는 Table 4와 같이 동일 용접 각장을 위하여 주판에 유입된 유효 입열량의 차이에 기인한 것이다. Fig. 12는 Fig. 11의 각 변형이 초기 변형으로 panel 용접부에 존재하는 경우 용접선 방향으로 작용하는 용접 수축 하중에 의하여 추가적으로 주판의 두께 방향으로 유발되는 변형 거동을 도시한 것이다. 여기서, 단위 길이당 용접 수축 하중은 각 필렛 용접부에 작용하는 용접선 방향 수축 하중의 합을 panel 용접부의 폭으로 나눈 값이다.

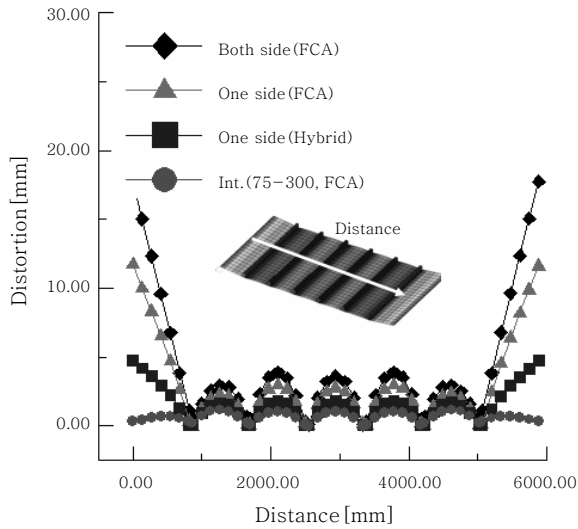


Fig. 11 Deformation profiles of the welded thin panel as a function of welding processes

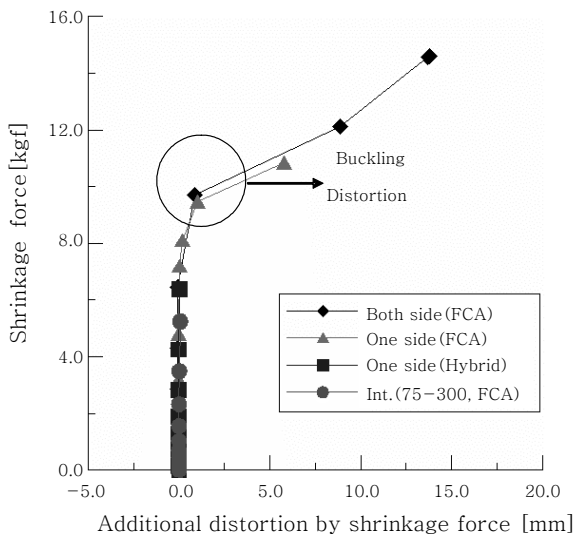


Fig. 12 Variation of the additional distortion in the welded thin panel as a function of welding processes

Fig. 12와 같이 용접 수축 하중에 의하여 발생하는 최대 추가 변형량은 FCA를 이용한 단속 필렛 용접, 레이저 하이브리드 일면 필렛 용접 그리고, FCA를 이용한 일면 및 양면 연속 용접의 순으로 증가한다, 그리고, 단속 FCA 용접 및 하이브리드 용접부의 경우 용접 수축 하중이 증가함에 따라 변형량이 거의 선형적으로 증가하지만, 일면 및 양면 FCA 용접부에서는 용접 수축 하중에 도달하기 전에 판 두께 방향으로 변형량이 급격히 증가하는 영역이 존재하고, 최종 단계에서 추가 변

형량이 주판 두께를 초과함을 알 수 있다. 이는 일면 및 양면 FCA연속 용접에서 좌굴 변형이 발생하였음을 의미하는 것이다.

이상의 해석 결과로부터 Fig. 10의 박판 panel 제작 시 FCA를 이용한 일면 단속 용접 및 레이저 하이브리드 용접을 적용하는 경우 효과적으로 좌굴 변형을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

박판 패널의 용접부에서 발생하는 좌굴 변형을 제어하기 위하여 용접 기법별 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) GMA와 Nd:YAG 레이저의 하이브리드 용접부에서 계측된 온도 구배와 용융지 형상을 이용하여 평가한 GMA와 레이저 용접 기법의 입열 효율은 각각 0.75와 0.95이며, 이는 개별 용접 기법의 용접 효율에 비하여 높은 수준이다.

2) 단순 필렛 용접부의 각 변형은 용접시 모재로 유입되는 유효 입열량(Qe) 및 용접부의 굽힘 강성(Db)에 의존하며 용접선 방향의 수축 하중(SF)은 용접시 용접부로 유입되는 유효 입열량(Qe)에 비례하여 증가한다. 그리고, 단속 용접부의 수축 하중은 유효 용접 입열량과 용접장(Lw)과 용접부의 간격(Ls)의 비에 비례하였다. 이상의 용접부의 변형 거동 특성을 고려하여 레이저 하이브리드와 FCA 필렛 용접부의 각 변형 및 용접선 방향의 수축 하중 예측 기법을 제안하였다.

3) 개발된 변형 예측 기법과 비선형 좌굴 해석을 이용하여 박판 panel 용접 구조물의 용접 기법 및 시공 방향에 따른 좌굴 변형 거동 특성을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 박판 용접부에 대하여 하이브리드 용접 기법을 적용하는 경우 FCA를 이용한 일면 연속 필렛 용접 기법에 비하여 용접 입열량이 1/2 수준으로 감소하므로 용접 수축 하중의 제어를 통한 좌굴 변형 제어 효과를 기대할 수 있다. 또한 용접 수축 하중은 단속 용접시 용접장(Lw)과 용접부 간격(Ls)의 비에 선형적으로 비례하여 감소하므로 단속 용접이 적용 가능한 영역에서는 이를 이용한 좌굴 변형 제어 또한 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S.B Shin, J. G. Yoon: A Study on the Distortion Caused by Spot Heating with Air Cooling, Int. Journal of KWS, 5-1, 35-43, 2004

2. Guan Q, Brown K. W. and Guo D: Method of apparatus for low stress non distortion welding of thin welded of thin-walled structural elements, International Patent Application No. PCT/GB88/00136, 1989
3. K. Masubuchi: Analysis of Welded Structure, Pergamon Press, 1980
4. P. Dong and Janosch: Residual Stress Compendium Compilation: Draft Protocol and Call for Participation, IIW Doc. IIW-X-XII-XV-RSDP-43-02, 2002.01
5. 용접강도연구위원회: FEA를 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준, **23-6**, 497-508, 2005
6. S. B. Shin, J. G. Yoon: Effects of internal and external restraint on welding distortion, Proceeding of KWS, 165-168, 2001