

박판 단속 Fillet 용접부의 변형 특성에 관한 연구

A Study on the Welding Distortion at the FCA Intermittent Fillet Weldment of Thin plate

신대희*, 신상범*, 이주성**

* 현대중공업(주) / 울산대학교

** 울산대학교 조선해양공학과

ABSTRACT The purpose of this study is to establish the predictive equation of angular distortion and longitudinal shrinkage force at the intermittent fillet weldment using FEA and experiment. The angular distortion and shrinkage force of the intermittent fillet weldment linearly increases with an increase in the ratio of weld length (L_w) to weld span (L_s). Based on the results, The predictive equation of distortion at the intermittent fillet weldment was defined as a linear function of L_w/L_s and the predictive equation of the distortion for continuous fillet weldment.

1. 서 론

최근 선체의 경량화를 목적으로 박판(thin plate) 사용량이 점점 증가하고 있다. 이러한 선체의 박판화 특히, upper deck에서 박판 사용의 증가는 구조 안정성(stability) 및 경제성 측면에서 많은 장점을 제공한다. 그러나 생산 관점에서 용접 구조물의 박판화는 과다 변형(excessive distortion)에 의한 상당한 교정 공수를 유발함으로써 생산성 향상에 큰 걸림돌로 작용한다. 미해군의 보고 자료에서는 구축함(destroyer) 제작시 박판 용접부의 변형 교정 비용이 적당 약 3백만불에 이르는 것으로 보고하고 있다. 이에 TWI(The Welding Institute)를 비롯한 많은 연구 기관에서는 박판 용접부의 변형을 보다 효율적으로 제어하기 위한 다양한 생산 기술 개발과 관련된 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 생산 변형 제어 기술의 경우 과다한 설비 투자 및 변형 제어를 위한 추가 공정으로 인한 생산 공수의 증가를 유발한다. 따라서 최근에는 단속이나, 일면 연속 용접 그리고, channel을 이용한 박판 판계 용접등과 같이 설계 초기 단계에서 변형 제어를 위한 다양한 노력이 수행되고 있다[4]. 그러나 이러한 설계적인 관점에서 이러한 접근 방법에 의한 변형 제어 효과에 대한 정량적인 평가는 아직 미미한 수준이다.

일반적으로 박판 fillet 용접시 발생하는 면의 변형은 일반적으로 주판의 두께 방향의 온도 차에 기인한 각 변형과 용접 수축 하중이 용접부의 좌굴 강도를 초과하는 경우 발생하는 좌굴 변형으로 대별되며, 이러한 용접부의 변형 거동 특성은 용접장의 함수로 정의되는 것으로 알려져 있다. 이에 본 고에서는 일차적으로 fillet 용접부의 양면 연속 fillet 용접부의 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고, 용접장에 따른 변형 거동에 대한 실험 결과를 이용하여 단속 fillet 용접부의 변형 예측 기법을 제안하고자 하였다.

2. 실험 및 해석 방법

단속 fillet 용접부에 대한 변형 거동 특성 평가를 위한 연속 fillet 용접부에 대한 변형 거동을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 실험 결과와 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였다. 연속 fillet 용접부의 변형 거동 특성 평가시 용접에 의한 변형이 용접부의 온도 구배에 미치는 영향이 작다는 가정하에서 열 전달 및 열 탄소성 거동 평가를 각각 비연성된 것으로 가정하고 해

석을 수행하였다. 용접부의 온도 구배를 평가하기 위한 열 전달 해석시 용접선 방향으로의 열 손실이 없으며, 열원이 등속으로 이동한다는 가정 즉, 준정상 상태 조건(quasi-steady state condition)을 이용하여 3차원 열 전달 문제를 2차원 열 전달 문제로 단순화 하였다. 그리고 용접부에서의 상 변화 및 용융지 내에서의 stirring 효과 등 용융지내의 물리적 특성은 KWS의 강도위원회(2004)에서 제정한 프로토콜에 준하여 평가하였다. 변형 및 잔류 응력 해석을 위한 열 탄소성 해석시 용접선 방향으로의 구속 효과와 가열시 모재의 팽창에 의한 역 변형을 방지하기 위하여 Fig 1과 같이 "on-die" 조건을 적용하였다. 이때, 사용된 모재는 일반 선급 용 A grade이며, 열적 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 것으로 가정하였으며, 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 적용하였다. 연속 fillet 용접부의 유한 요소 해석시 사용된 해석 및 실험 변수는 표 1과 같이 주판 두께와 용접 입열량이며, 실험 결과와의 비교를 통하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 그리고 단속 용접부의 용접장에 따른 각 변형 및 용접선 방향의 수축 하중 거동 특성은 전술한 바와 같이 용접장(Lw)과 용접부 간의 간격(Ls)에 따른 각 변형 및 굽힘 변형에 대한 실험 결과와 연속 fillet 용접부의 변형 거동에 대한 해석 결과를 이용하여 규명하였다.

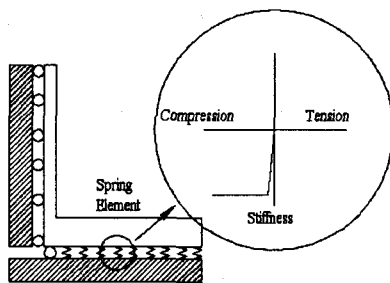


Fig. 1 Displacement boundary condition used for FEA

Table 1 Analysis Variables used for FEA and Experiment

Thickness [mm]	Width [mm]	Electrode Size[mm]	Heat Input [cal/mm]
6~10	800W	1.2Ø	180~400

3. 해석 결과

Fig. 2는 양면 fillet 용접부에서 용접 입열량(Q) 및 주판의 면의 강성(Db)의 비에 따른 각 변형 거동에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과를 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 양면 fillet 용접부의 각 변형은 용접 입열량 및 굽힘 강성의 비(Q/Db)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가한 후, Q/Db가 일정 값을 초과하면 다소 감소하는 거동을 보여 주고 있으며, 실험 및 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 용접 입열량이 290cal/mm, 주판 두께와 판 폭 그리고, 길이가 각각 10, 800 그리고, 1200mm인 경우 용접장(Lw) 및 용접부의 간격(Ls)의 비에 따른 각 변형 거동을 보여주고 있다. Fig. 3과 같이 단속 용접부의 각 변형 거동은 용접 방법 즉, chain 및 zigzag 용접과 관계 없이 Lw/Ls의 비가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과를 토대로 본 고에서는 단속 용접부의 Lw/Ls의 비와 연속 용접부의 용접 입열량(Q) 및 굽힘 강성(Db)에 따른 변형 거동 특성을 이용하여 단속 fillet 용접부의 변형 예측 기법을 식(1)과 같이 제안하였다.

$$\phi_{IF} = f\left(\frac{Lw}{Ls}\right) \cdot \phi_{CF} = f\left(\frac{Lw}{Ls}\right) \cdot f\left(\frac{Q}{Db}\right) \quad (1)$$

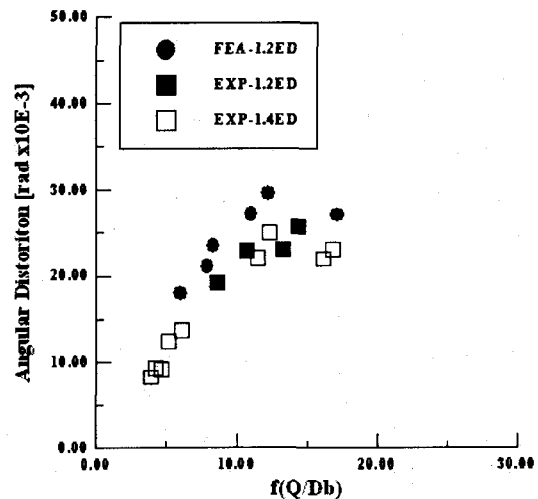


Fig. 2 Changes of angular distortion at the continuous fillet weldment with Q/Db using FEA and Exp.

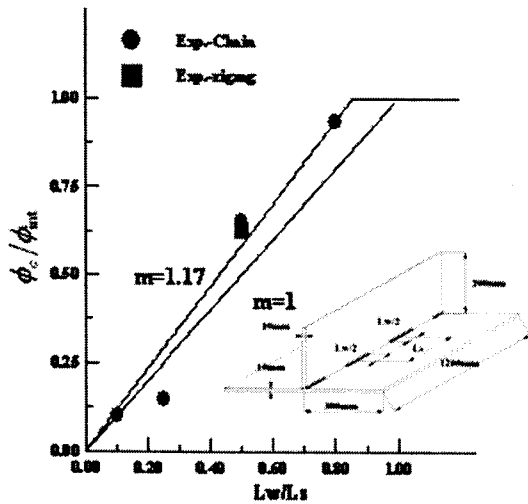


Fig. 3 Variation of dimensionless parameter of angular distortion at the intermittent fillet weldment with Lw/Ls using Exp.

Fig. 4은 주판 두께가 6mm인 경우 용접 입열량(Q)에 따른 양면 연속 용접부의 주판에 작용하는 용접선 방향의 수축 하중의 결과를 도시한 것이다. Fig. 4 같이 용접선 방향의 수축하중은 용접 입열량이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 5는 200x13+75x13mm의 4000mm의 BLT에 대한 용접장(Lw)과 용접부의 간격(Ls)의 비에 따른 최대 굽힘 변형량을 도시한 것이다. Fig. 5와 같이 Lw/Ls의 비가 증가함에 따라 굽힘 변형량이 거의 비례하여 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

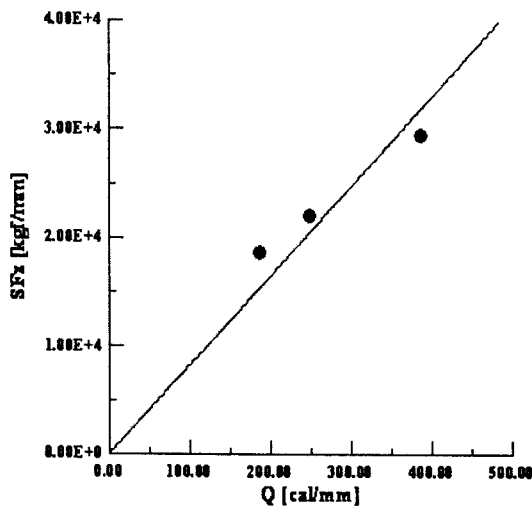


Fig. 4 Variation of longitudinal shrinkage force at the both sides continuous fillet weldment with Q

일정 크기를 갖는 BLT의 굽힘 변형이 용접 수축 하중에 선형적으로 비례하는 것으로 고려하면, 단속 fillet 용접부의 수축 하중은 Lw/Ls의 비에 식(2)와 같이 선형적인 함수로 정의할 수 있음을 알 수 있다.

$$F_{IF} = f\left(\frac{Lw}{Ls}\right) \cdot F_{CF} = f\left(\frac{Lw}{Ls}\right) \cdot f(Q) \quad (2)$$

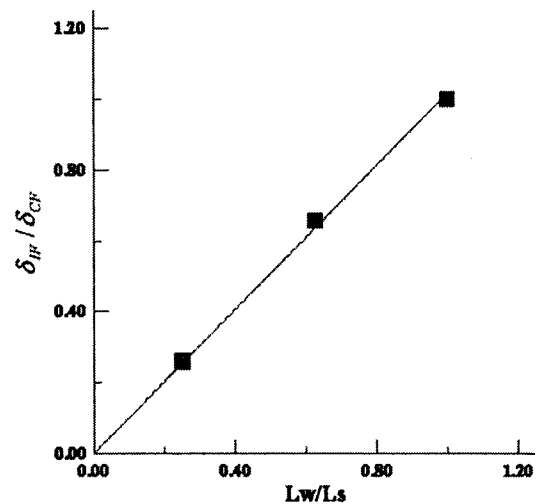


Fig. 5 Variation of dimensionless parameter of shrinkage force at the intermittent fillet weldment with Lw/Ls using Exp.

4. 결 론

단속 fillet 용접부의 각 변형 및 용접선 방향의 수축 하중에 대한 예측 기법을 개발하기 위하여 변형 거동 특성을 유한요소해석 및 실험을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단속 fillet 용접부의 각 변형은 용접장 및 용접부 간격의 비(Lw/Ls)의 비가 증가함에 따라 증가하며, 각 변형의 증가율은 Lw/Ls의 증가율 보다 크다. 그러나 용접선 방향의 수축 하중은 Lw/Ls의 비가 증가함에 따라 거의 동일한 비율로 증가한다.
2. 연속 fillet 용접부의 변형 및 수축 하중의 거동 특성과 단속 용접부의 Lw/Ls에 따른 시험 결과를 토대로 각 변형 및 수축 하중의 예측 기법을 제안하였다.