

다층 양면 개선 맞대기 용접부의 각 변형 예측에 관한 연구

신 상 범* · 윤 중 근**

*현대중공업(주) 산업기술연구소/ 울산대학교 조선공학과

**현대중공업 산업기술연구소

A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-pass Butt Weldment

Sang-Beom Shin* and Joong-Geun Youn**

*Material Research Dept., Hyundai Heavy Industries. Co., Ltd, Ulsan 682-792 / Ulsan Univ., Korea

**Material Research Dept., Hyundai Heavy Industries. Co., Ltd., Ulsan, 682-792, Korea

Abstract

The purpose of this study is to establish the predictive method of angular distortion of the double-sided multi-pass butt weldment. To achieve it, the behavior of angular distortion in the butt weldment were investigated using comprehensive finite element analyses and experiments. The angular distortion in the multi-pass butt weldment strongly depends on the welding heat input (Q) and the effective bending rigidity of the weld throat. The effective bending rigidity of the first welding pass on the backing side was defined as the function of dimensionless parameter(k) and a bending rigidity of bead-on-plate weldment. Based on the results, the predictive equation for angular distortion of multi-pass butt weldment was proposed and verified by experiments.

* Corresponding author : str@hhi.co.kr

(Received September 16, 2006)

Key Words : Double-sided Multi-pass Weldment, Heat Input, Effective Bending Rigidity, Groove Design

1. 서 론

최근 고부가 가치선의 대형화 및 고속화에 대한 시장 요구가 증가함에 따라 후판 사용량이 급격히 증가하고 있다. 특히, 10,000TEU를 초과하는 컨테이너 운반선의 해칭 코밍용 주판 두께는 선체 중 강도를 확보하기 위하여 이미 80mm를 초과하고 있다. 이러한 후판 용접부에서 변형은 박판 용접부에 비하여 상대적으로 매우 작은 것으로 알려져 있으나, 맞대기 용접부의 경우 주판의 두께가 증가함에 따라 총 투입된 용접 입열량과 굽힘 강성의 비가 증가하는 경우 오히려 각 변형량은 증가한다. 또한 후판의 맞대기 용접부에서 발생하는 각 변형은 발생 후 선상 가열(line heating)과 같은 국부 열간 교정 방안을 이용하여 교정하는 것이 어려울 뿐 아니라, 선박의 운항 중 deck에 발생하는 면내 하중의

작용선과 용접부 중립축간의 정렬 불량(misalignment)에 기인한 굽힘 응력과 중첩되어 선체 용접부의 정 동적 강도를 감소시키므로 이에 대한 엄격한 관리가 요구되고 있다. 따라서 맞대기 용접부의 각 변형을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 매우 다양한 연구가 수행되어 왔으며¹⁾, 가장 보편적인 제어 방안은 양면 협개선 용접의 적용 및 적층 용접 순서 변경을 통한 용접 설계 방안과 용접부에 지그를 부착하여 구속하거나 용접선과 수직인 방향으로 인장 하중을 가하여 제어하는 기계적인 제어 방안 등으로 구분된다. 그러나 용접 설계 방안의 적용시 사전에 설계자가 각 용접 패스에서 발생하는 변형량을 정량적으로 예측하지 못하는 경우 용접중 용접부의 턴 오버(turn-over) 횟수를 증가시킬 수 있으며, 기계적인 제어 방안 또한 탄성 복원에 의한 변형 회복 및 지그 설치 및 제거 공수 등을 고려하면 생산성 향상 효과는 매우 미미하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다층 양면 개선 용접부의 각 변형을 제어하기 위한 적정 개선 형상 설계 방안을 정립하고자 다층 양면 개선 용접부의 각 변형 예측 기법을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 유한 요소 해석을 이용한 단순 맞대기 용접부의 변형거동 특성 평가를 통해 각 변형의 주 인자와 용접 적층에 따른 변형 거동 특성을 규명하고, 실험 결과와 비교함으로써 변형 예측 기법의 타당성을 검증하였다.

2. 맞대기 용접 변형 주 인자

2.1 해석 모델 및 방법

맞대기 용접 변형의 변형 거동 특성을 규명하기 위하여 먼저 용접 입열량과 용접부 두께에 따른 변형 거동 특성을 평가하였다. 맞대기 용접부의 온도 분포는 용접 선을 따라 용접 속도가 일정하고, 용접선 방향으로의 열 손실이 없다는 가정 하에 Fig. 1과 같이 용접선에 수직 한 단면에 대한 2차원 온도 분포 해석을 이용하여 평가 하였다. 해석시 사용된 열원은 균일 분포의 체적 열원이 단위 시간 동안 용착 금속에 작용하는 것으로 가정하였으며, SA 용접 아크의 효율은 0.85로 가정하였다²⁾. 그리고 용접부의 열 손실이 해석 모델의 경계면에서 복사와 자연 대류에 의하여 발생하는 것으로 가정하였으며, 재료의 열적 물성은 온도에 의존하며 용착 금속의 온도가 용점(1450°C)을 초과하는 경우 용융지(molten pool)내의 스테어링(stirring) 효과를 위하여 유효 열전달 계수를 도입하였으며, 상변화에 따른 잠열 효과 (latent heat) 또한 함께 고려하였다^{3,4)}.

용접부의 온도 분포 해석 결과를 이용한 변형 거동 특성 평가를 위한 열 탄소성 해석시 용접선 방향으로의 변형률이 일정하다는 가정 즉, 일반화된 평면 변형률 (generalized plane strain) 조건을 이용하여 8절점 등매개 평면 요소를 이용하여 Fig. 1과 같이 요소망 (mesh design)을 구성하였다. 여기서 일반화된 변형률 조건은 기존의 평면 변형률 조건 즉, 해석 단면에 수직한 방향의 변형률이 없다는 가정과는 달리 해석 단면에 수직한 방향의 변형률을 해석 단면에서 발생하는 변형률의 선형 함수로 가정하는 방법이다. 그리고 용접부의 가열 초기에 발생하는 역 변형에 의한 잔류 각 변형의 감소 효과를 제어하기 위하여 Fig. 1의 해석 모델에서 역 변형을 강제 접촉(rigid contact)요소를 이용

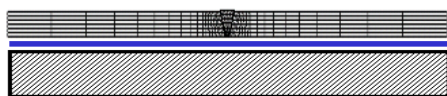


Fig. 1 Mesh design of simple butt weldment used for FE A

하여 구속하는 “on-die” 구속 조건을 적용하였다²⁾. 이 때, 모재 및 용접부의 기계적 물성은 온도에 의존하고 등방성이며 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 이용하였으며, 가열시 소성 변형률(plastic strain)이 누적되는 최대 온도는 용착 금속의 용점(450°C)으로 가정하였다.

2.2 유한요소해석 결과

Fig. 2는 SAW (submerged arc welding)를 이용한 편면 개선 및 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접부의 용접 입열량(Q)과 주판의 굽힘 강성(Db)의 비에 따른 각 변형 거동에 대한 해석 결과를 도시한 것이다. 여기서 용접부의 굽힘 강성(Db)은 용접부 두께의 제곱이다. Fig. 2와 같이 용접 입열량(Q)과 굽힘 강성(Db)의 비가 증가함에 따라 각 변형량은 선형적으로 증가한 후 Q/Db가 일정 수준을 초과하는 경우 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 기존의 여러 연구 결과에서 제안된 각 변형 거동 특성과 거의 동일하다²⁾. 이상의 결과를 토대로 본 연구에서는 단순 맞대기 용접부의 각 변형 거동을 식(1)과 같이 용접 입열량 및 용접부의 굽힘 강성의 비에 대한 함수로 정의하였다

$$\phi = f\left(\frac{Q}{Db}\right) \tag{1}$$

3. 다층 용접부의 각 변형 예측

다층 용접부의 각 변형은 식(2)와 같이 각 용접 pass에서 발생하는 각 변형의 합과 같다²⁾.

$$\phi_{multi} = \sum_{n=1}^n f\left(\frac{Q}{Db_{eff}}\right)_n \tag{2}$$

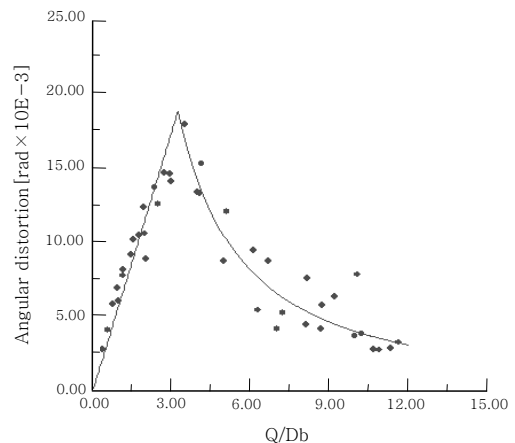


Fig. 2 Variation of the angular distortion at the butt weldment with Q/Db

여기서, n 은 용접 패스(pass)의 수이며, Db_{eff} 는 각 용접 패스에서 용접부 목 두께(throat thickness)에 대한 굽힘 강성이다.¹⁾ 따라서 다층 용접부의 변형 거동 특성을 평가하기 위해서는 용접 조건에 따른 유효 굽힘 강성의 변화 즉, 용접부의 목 두께에 대한 예측이 선행되어야 한다. Fig. 3은 FCA와 SA 용접부에서 용접 입열량에 따라 형성된 용융지의 면적을 도시한 것이며 사용된 FCA와 SA 용접봉의 직경은 각각 1.4와 4.8mm이다. Fig. 3과 같이 용접 입열량이 증가함에 따라 용착 금속의 면적 즉, 용착 금속의 양이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 용접 입열량이 동일한 경우 FCA 용접에 의한 용착 금속의 양이 SA 용접에 비하여 더 크음을 알 수 있다. 이는 용접 입열량이 일정한 경우 용접봉의 직경이 작을수록 용접 전류 밀도 세기가 증가하기 때문이다. 이상의 결과를 토대로 본 연구에서는 다층 용접부의 용접 패스에 따른 용착 금속의 면적을 식 (3)과 같이 입열량(Q)의 선형 함수로 정의하였다. 그리고, 용접부의 유효 굽힘 강성을 계산하기 위한 용접부의 목 두께는 용접 개선 각도와 각 용접 패스당 용착 금속의 면적을 이용하여 결정하였다.

$$A_w = f(Q) \tag{3}$$

식(1) ~ (3)과 같이 제안된 다층 용접부의 변형 예측 기법의 타당성을 평가하기 위하여 Table 1과 같이 주판 두께가 40mm인 다층 양면 개선 용접부에 대하여 Fig. 4와 같이 다이얼 게이지를 이용하여 각 용접 패스별 변형 거동 특성을 조사하였다. 이때 사용된 용접 시편 크기는 용접부의 냉각 후 발생하는 잔류 각 변형에 의하여 유발되는 역 변형 효과를 제어하기 위하여 시편의 길이

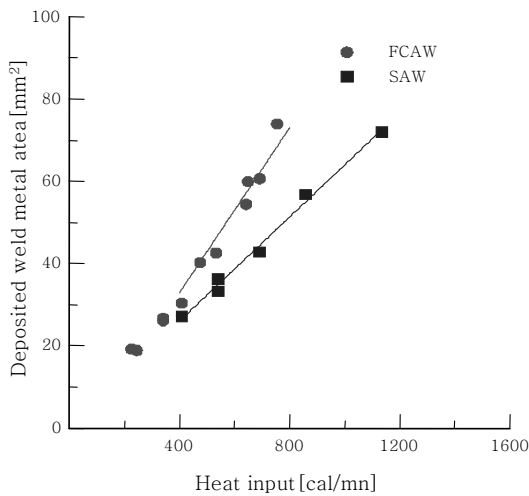


Fig. 3 Variation of the deposited weld metal area with heat input (Q) and welding process

와 폭을 각각 1200mm와 800mm로 하였다.

Fig. 5는 다층 양면 개선 용접부에서 이면(backing

Table 1 Welding conditions of test specimen

Pass	Welding Process	Current [A]	Volt. [V]	Groove Shape
1	FCA	230	26	
2	SA	550	30	
3		610	33	
4		600	32	

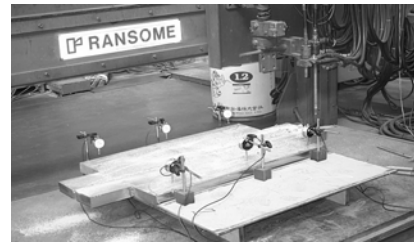
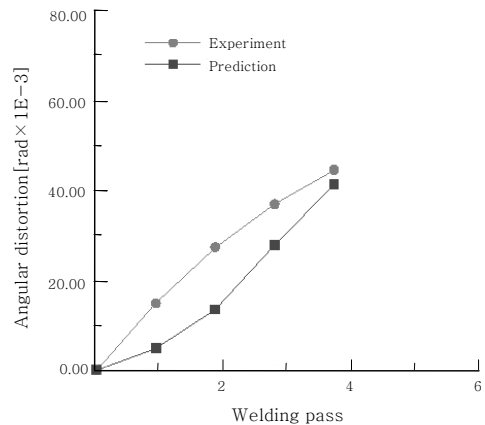
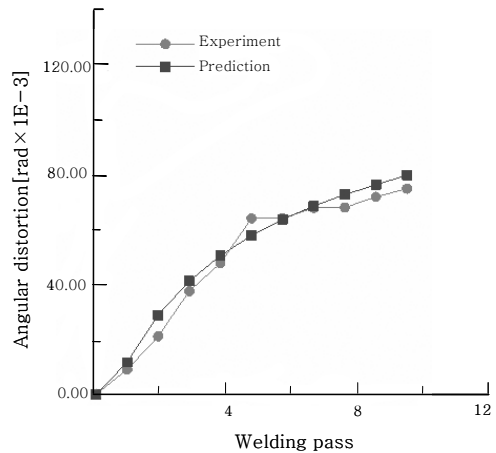


Fig. 4 Measuring equipment for angular distortion



(a) Backing side



(b) Finishing side

Fig. 5 Variation of angular distortion obtained from experiment and the predictive equation for double-sided multi-pass weldment

side)과 전면(finishing side)에서 각 용접 패스에 따른 변형 계측 결과와 식(1) ~ (3)을 이용하여 예측한 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 5의 (b)와 같이 전면에서 용접 패스에 따른 각 변형의 예측 및 실험 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5의 (a)와 같이 이면의 각 용접 패스가 완료된 후 각 변형의 해석 및 계측 결과에는 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 대부분 이면의 이면 용접부의 첫 번째 패스에서 발생한 각 변형의 차이에 기인한 것이며, 이를 제외한 나머지 용접 패스에서의 각 변형 증가율에 대한 예측 및 실험 결과는 매우 유사하다. 이는 다층 용접부의 용접 패스에 따른 각 변형 거동을 정량적으로 예측하기 위해서는 이면의 초층 용접부의 유효 굽힘 강성에 대한 재평가가 필요함을 의미한다

이에 본 연구에서는 전면의 초층 용접시 유효 굽힘 강성을 정의하기 위하여 식(4)와 같이 개선 용접부의 각 변형(ϕ_{eff-1})과 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접부의 각 변형량(ϕ_{bop})의 비로 정의되는 무차원 변수 k 를 도입하였으며, 사용된 해석 변수는 Fig. 6과 같이 용접 입열량(Q)과 용접부의 두께(t) 그리고 이면의 초층 용접부의 높이(t_b)다.

$$k = \frac{\phi_{eff-1}}{\phi_{bop}} \tag{4}$$

Fig. 7은 개선 용접부의 두께(t)와 비드 온 플레이트 용접부의 높이(t_b)에 따른 개선 및 비드 온 용접부의 각 변형의 비로 정의된 무차원 변수 k 의 거동을 도시한 것이다. Fig. 7과 같이 초층 용접부의 각 변형량의 비로 정의된 k 는 개선 용접부의 초층 용접부의 높이(t_b) 즉, 비드 온 용접부의 두께가 증가함에 따라 선형적인 비례 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 다층 개선 용접부의 전면의 초층 용접부의 유효 굽힘 강성($D_{b_{eff-1}}$)이 식(5)와

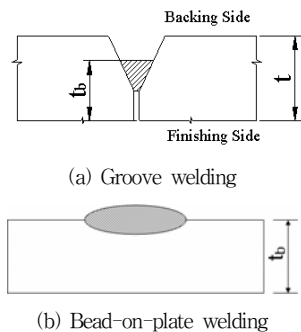


Fig. 6 Variables used for evaluating effective bending rigidity of the first pass on the backing side weldment

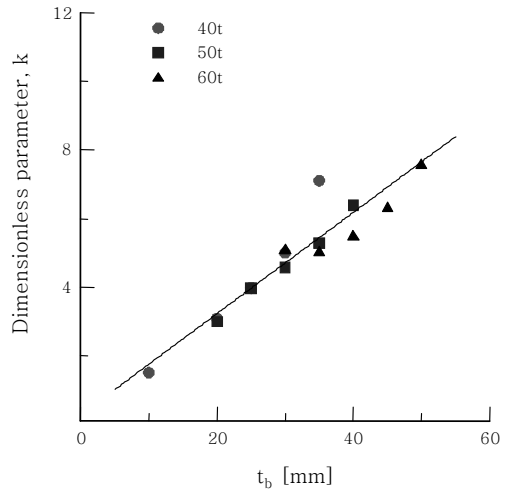
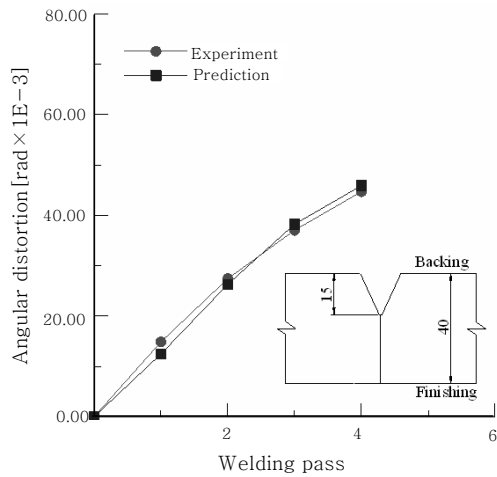
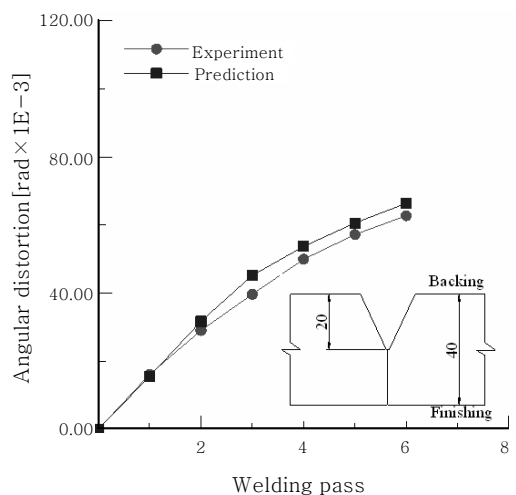


Fig. 7 Variation of dimensionless parameter (k) with t_b



(a) Backing pass of specimen 1



(b) Backing pass of specimen 2

Fig. 8 Comparison results of angular distortion obtained by experiment and prediction in the multi-pass butt weldment

같이 무차원 변수 k 와 비드 온 플레이트 용접부의 굽힘 강성(Db_{top})의 비로 정의할 수 있음을 의미한다

$$Db_{eff-1} = \frac{1}{k} Db_{top} \quad (5)$$

식(4)의 무차원 변수(k)를 이용한 다층 용접부의 유효 굽힘 강성을 이용한 변형 예측 기법의 타당성을 평가하기 위하여 주판의 두께가 40mm이고, 개선 높이가 다른 두 맞대기 용접부의 이면 용접부의 각 변형을 평가하고 이를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8과 같이 식(5)의 k 를 이용한 이면(backing side) 용접부에서 각 변형에 대한 예측 결과는 개선 높이와 관계없이 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 초층 용접부의 유효 굽힘 강성을 이용한 다층 맞대기 용접부의 각 변형 예측 기법이 타당함을 의미한다

4. 결 론

다층 양면 개선 용접부의 각 변형 예측 기법을 개발하기 위하여 각 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 맞대기 용접부의 각 변형은 용접 입열량(Q)과 굽힘 강성의 비(Db)가 증가함에 따라 증가하한 후 Q/Db 가 일정 값을 초과하는 경우 용접부의 두께 방향의 수축량 차이의 감소에 기인하여 감소한다.

2) 다층 양면 개선 용접부의 이면(backing side)의 초층 용접 pass를 제외한 모든 용접 pass에서 발생하는 각 변형은 용접 입열량과 용접부의 목 두께로 정의된 유효 굽힘 강성의 비의 함수로 정의할 수 있다

3) 개선 용접부의 각 변형과 초층 용접부의 높이(t_b)를 두께로 하는 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접부의 각 변형간의 비로 정의된 무차원 변수(k)를 이용하여 이면(backing side) 용접부의 초층 용접시 각 변형 예측을 위한 유효 굽힘 강성을 정의하였다. 그리고 이 결과를 토대로 다층 맞대기 용접부의 변형 예측 기법을 제안하였으며, 실험 결과와의 비교를 통하여 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

1. K. Masubuchi: Analysis of Welded Structures, Pergamon Press Ltd., 1980
2. Shin, Park: A study on the Welding Deformation of Ship Structures using Simplified Thermo-Elastic Method, Proceedings of the KWS, 38 (2001), 274-276 (in Korean)
3. Strength Commission of Welded Structure, Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA. Journal of KWS, 23-6 (2005), 497-503 (in Korean)
4. E. Friedman: Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 97-3 (1975), 206-213