

X형 개선을 가진 후판 맞대기 용접에 있어서 유한요소법을 이용한 각변형 해석

양영수*, 배강열**,#

*전남대학교 기계공학과, **경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

Analysis of Angular Deformation in Multi-pass Butt Joint Welding of Thick Plates with X-shape Grooves using the Finite Element Method

Young-Soo Yang*, Kang-Yul Bae**,#

*Department of Mechanical Engineering, CN UNIV., **Department of Mechatronics Engineering, GJUST
(Received 27 March 2018; received in revised form 11 May 2018; accepted 17 May 2018)

ABSTRACT

Removal of angular deformation induced during the welding of butt joints in thick steel plates needs expert skill and is costly. To reduce deformation, proper joint designs are studied with a prediction of deformation prior to welding. However, as the thickness of a plate increases, a predictive analysis of the welding process is more difficult, especially if there is an increase in the number of welding passes in the joint.

In this study, a numerical model with the finite element method (FEM) was developed to analyze the angular deformation in the multi-pass welding of butt joints of plates made of AH32 steel that had a thickness of up to 100 mm. A series of numerical simulations were then performed based on the developed model to predict the deformations for thick plates. With the results obtained by the analyses, this study suggested optimal X-shape grooves for the butt joints of thick plates to minimize the angular deformation. As the thickness of the plate increased to 100 mm, the ratio of the depth of the front-side groove to that of the back-side groove should be gradually increased to nearly 1:3.

Key Words : Multi-pass Welding(다층용접), Angular Deformation(각변형), X-shape Groove(X형 개선), Thermo-elasto-plastic Analysis(열탄소성해석), Groove Design(개선설계)

1. 서 론

새롭게 개척되는 극한의 작업 환경에 대처하기 위해 선박과 해양구조물에 요구되는 강판의 두께가 점진적으로 두꺼워지고 있다^[1-3]. 후판은

일반적으로 전후면의 중앙 절단부를 가공하여 X형 개선을 낸 후에 아크 용접으로 결합된다. 한편, 용접 공정 중에 열적 거동으로 인해 발생하는 각변형은 구조물의 허용치수 관점에서 해결하기 어려운 문제로 인식되고 있다.

변형의 크기를 허용할 수 있는 범위 내로 저감하기 위해서는, 개선의 형상을 변화하는 방법 또는 용접 조건을 변경하는 방법 등이 용접에

Corresponding Author : kybae@gntech.ac.kr

Tel: +82-55-751-3384, Fax: +82-55-751-3389

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

앞서 강구될 수 있다. 그렇지 않으면, 가스 토치를 활용한 선상가열 방법 등을 용접 후에 적용해야 된다. 따라서 용접 전에 변형을 축소할 수 있는 방법을 결정하여 적용하는 것이 효율적이다. 앞선 몇 가지 연구에 의하면^[1, 4, 5], 후판 접합에서 전후면 개선으로 구성되는 X형 접합부에서는 개선형상을 적합하게 설계하는 것이 변형 축소의 가능한 방법으로 조사되고 있다.

Mashubushi 등은 X형 개선을 가진 맞대기 용접에서의 각변형에 미치는 개선형상의 효과에 대하여 실험적 결과를 보고한 바 있다^[4]. 그러나, 이는 20 mm 이하의 두께를 가진 환형 시편에서 수행한 결과이다. 일본선박연구조합에서 유사한 연구를 수행하여 50 mm 두께까지의 맞대기 용접에서 각변형을 최소화할 수 있는 개선형상을 제시하였다^[5]. 허 등은 30, 50, 그리고 66 mm 두께의 강판을 대상으로, 수치해석과 실험적 방법으로, 용접 변형에 미치는 개선형상의 효과를 보이고자 하였다^[1].

한편, 변형해석을 위한 열탄소성 유한요소법은, 방대한 계산 시간과 해의 수렴성의 문제 때문에, 주로 일층 용접공정, 또는 편면 다층용접에 적용되고 있다^[6-8]. X형 개선을 가진 다층 원주 용접에 대한 해석이 수행되었으나, 개선의 형상 등의 변화가 변형에 미치는 효과에 대한 검토가 되어 있지 않다^[2].

본 연구에서는 100 mm까지의 두께를 가지는 강판의 다층 맞대기 용접공정을 모델링하여 해석하고자 하였고, 특히 용접 중에 발생하는 각변형을 유한요소법^[9, 10]을 적용하여 예측하고자 하였다. 열 이력에 대한 수치해석을 먼저 수행하여 각 층의 용접 동안 시간에 따른 해석영역의 온도분포를 계산하고, 각 단계의 해석 결과에 대응하여, 해석영역의 변위 해석을 열탄소성해석으로 수행하였다.

해석에 의한 변형 예측결과를 상응한 실험과 비교하였고, 이로써 해석모델의 적합성을 검토하고자 하였다. 제안된 해석모델은 개선형상에 따른 각변형의 크기 예측에 활용하였고, 후판의 용접에서 변형을 최소화할 수 있는 개선의 형상을 제시하고자 하였다.

2. 실험

다층 맞대기 용접의 공정 모델과 해석을 검증하기 위하여 40 mm 두께 강판을 대상으로 용접실험을 수행하였다. 이에 필요한 용접 변수와 개선형상은 동일 두께의 실구조물과 동일하게 선정하였다. 실험에 적용된 소재는 AH32강이며, 폭 1000 mm, 길이 1000 mm이었다. 맞대기 접합부의 X형 개선은 전면과 후면의 깊이 비가 2:1로 설정하였고, 개선 각도는 전면과 후면이 각각 60°와 45°가 되게 가공하였다. Fig. 1은 실험에 적용한 개선형상을 보여주고 있다. 개선전면부에 1~5번의 층을 용접한 후, 시편을 뒤집어, 후면에 650 A로 가우징을 행하고, 6~7번의 용접 층을 채웠다. 전면의 1층은 250 A, 32 V, 32 cm/min의 플럭스코어드 용접(FCAW)으로 행하고, 나머지 용접층은 683~728 A, 30~33 V, 38~41 cm/min의 잠호 용접(SAW)으로 수행하였다.

각 층의 용접 후 시편의 온도가 상온 상태로 냉각된 상태에서 강판의 변형을 측정하였다. 강판의 길이 방향 중앙부 폭 끝을 측정 위치로 두고, 0.01 mm 분해능을 가진 다이얼게이지로 강판의 면의 변형을 측정하였다.

3. 다층 용접 공정의 수치해석

개선이 X형인 결합부를 가진 강판의 맞대기 다층용접 공정을 열전달과 열탄소성 방정식으로 모델링하고, 유한요소법을 기반으로 한 수치해석법으로 모델을 해석하였다. 열전달 해석으로 강판의 과도 온도분포를 계산하고, 이를 활용한 탄소성 해석으로 강판의 변형을 예측하였다.

3.1 열전달 해석

용접 중 아크에 의한 분포 열속은 강재의 표면에 국부적으로 가해지고, 이는 강재 내 온도의 불균등한 분포를 야기하게 된다. 용접 공정 중 강재 내의 열전달은 다음과 같은 열전도

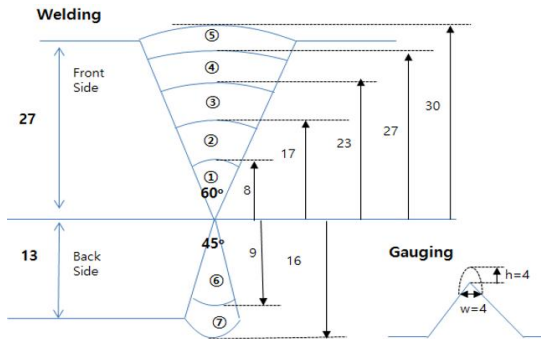


Fig. 1 Groove shape for multi-pass butt-joint welding of 40 mm- thickness plate

방정식에 의해 모델화될 수 있다^[11].

$$CT + KT = Q \quad (1)$$

여기서, C 와 K 는 각각 온도에 따라 변화되는 열용량과 열전도도 행렬을 나타내고, T 는 온도 벡터, \dot{T} 는 온도의 시간 미분 벡터, Q 는 열원에서 얻어지는 열속 벡터를 나타낸다.

본 연구에서는 용접속력이 열전도율보다 충분히 빠르다고 가정하여, 용접 도중 이동 아크 열원 주위에서는 준정상상태가 형성된다고 고려하고, 강판의 길이 방향 중앙 단면에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 해석에서는 모재와 용접재로 사용된 AH32강의 온도 변화에 따른 열적 성질 변화^[12]를 고려하였다.

아크로부터의 열원은 가우스 분포로 모델링하고, 각 적층 용접층에 대하여 활성화되는 요소의 표면에 인가하였다. 한편, 용접 중 용접부 및 모재로부터 대기로의 대류를 고려하였고, 대류열 전달 계수를 $20 \text{ J/m}^2\text{C}$ 로 설정하였다. 모재의 초기 온도는 대기 온도와 같다고 가정하였다. 또한, 강판 상에서 폭 방향 중앙에 놓인 아크 주위의 대칭 상황을 고려하여, 강판의 반쪽만을 해석 영역으로 선정하였고, 대칭면은 단일 조건을 적용하였다. Fig. 2는 유한요소로 나누어진 해석 영역을 보여 주고 있다. 용접부와 용접부 주위의 모재는 작은 요소로 나누었고, 용접부로부터 먼 위치는 점진적으로 요소의 크기를 크게 하였다. 각 용접층

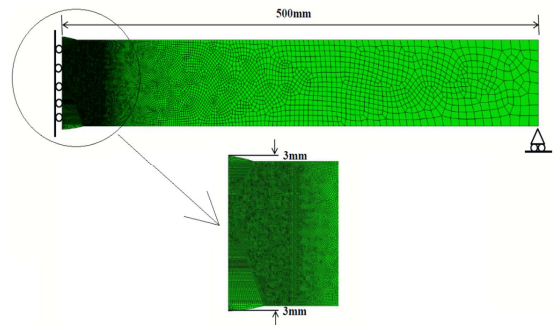


Fig. 2 Mesh division in the solution domain and mechanical boundary condition

에 해당하는 요소는 다른 층과 구분이 되도록 그룹화하여 모델링하였다.

해당 용접층이 시작되기 전까지는 그 층의 용접부 요소들은 비활성화된 상태로 유지되고, 해당 용접이 개시되면 동시에 해당 요소들이 활성화 되게 하였다. 해석 영역은 총 15,000여 개의 4 절점 요소로 분할하였다. 양호한 용접부 형상을 가정하기 위하여, 용접부는 전면과 후면 모두 모재보다 최대 3 mm 더 두껍게 모델링하였다.

3.2 열탄소성 해석

열탄소성 해석은 용접 중 강판의 열 및 기계적 거동에 대한 모델링과 모델에 대한 계산으로 구성된다. 강판 상에서 수행되는 용접과 관련된 열 및 기계적 현상에 대한 모델은 다음과 같은 지배방정식으로 나타낼 수 있다^[12].

$$\sum_v^n \int B^T \{\sigma\} dv = R \quad (2)$$

$$\sigma = C(\epsilon - \epsilon^p - \epsilon^{th}) \quad (3)$$

$$\epsilon = BU \quad (4)$$

여기서, B 는 변형률과 변위의 변환 행렬이고, n 은 유한 요소의 수, v 는 요소의 체적, $\{\sigma\}$ 는 응력 벡터, R 은 절점에서의 외부 하중 벡터, C 는 응력과 변형률 변환 행렬, ϵ , ϵ^p , ϵ^{th} 는 각각 전체 변형률, 소성 변형률, 열 변형률 벡터, U 는 절점의 변위 벡터를 나타낸다. 식 (3)과 (4)를 식

(2)에 대입하면, 다음과 같은 유한요소방정식이 유도된다.

$$KU = R + \int_V B^T C (\epsilon^p + \epsilon^{th}) dV \quad (5)$$

여기서, K 는 강성 행렬, V 는 해석영역의 체적을 나타낸다. 식 (5)에서 ϵ^p 는 전체 변위 U 에 종속적인 반면, ϵ^{th} 는 열전달 해석에서 얻어진 결과로써 매 해석단계에서 주어지게 된다. 따라서, 식 (5)는 한 번의 계산으로 해를 얻을 수 없다. 소성 변형을 증분의 가정에 의해 식 (6)에 의해 ϵ_{i+1}^p 가 결정되면, 변위 U 가 얻어진다.

$$\epsilon_{i+1}^p = \epsilon_i^p + d\epsilon^p \quad (6)$$

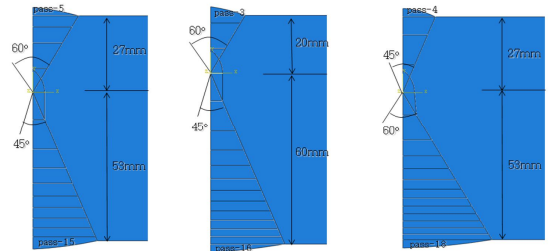
산출된 변위 U 에 의해서, 새로운 소성 변형을 ϵ^p 을 계산하게 된다. 이러한 반복적인 연산은 두 연속적인 변형률이 설정치인 10^{-5} 이하가 될 때까지 지속되고, 최종으로 얻어진 값이 그 단계에서의 소성 변형률이 된다.

길이에 따른 각변형의 변화는 발생하지 않는다고 가정하여, 변형 해석에서는 열전달 해석이 수행된 동일 단면을 2차원 해석 영역으로 설정하고, 길이 방향으로는 평면 변형률 조건으로 가정하였다. 해석영역에서의 요소 분할도 열전달 해석과 동일하게 수행하였다. 각 용접 층에 포함되는 요소들은 해당 용접 층이 적층되면 활성화되게 하였다. 열적 부하는 열전달 해석에서 얻어진 결과를 적용하여, 해당 단계 해석 영역의 온도 분포를 활용하게 된다.

해석에서는 온도에 따른 모재와 용접재의 기계적 성질 변화^[12]를 고려하였다. 대칭면에는 대칭 경계 조건을 적용하였고, 폭 방향 끝에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 강제 운동을 제한하기 위하여 수직 방향 운동을 구속하였다.

3.3 개선 설계 효과에 대한 수치 해석

강판 두께 40, 60, 80, 100 mm를 대상으로 한 수치 해석에서는 X형 개선의 형상에 대한 설계 변



(a) Depth ratio of 1:2 (Angle ratio of 1:0.75)

(b) 1:3 (1:0.75)

(c) 1:2 (0.75:1)

Fig. 3 Groove and weldment designs for an 80 mm- thickness plate with different depth and angle ratios

수를 두 가지로 설정하였다. 하나는 전면 개선부의 깊이와 후면 개선부의 깊이 간의 비(깊이 비)이고, 다른 하나는 전면 개선의 각도와 후면 개선의 각도 간의 비(각도 비)이다. 강판은 폭이 1000 mm이었고, 소재는 AH32강을 대상으로 해석하였다. Fig. 3은 다양한 두께에 대한 개선 설계의 한 사례로서 80 mm 두께에 대한 개선 설계 결과를 보여 주고 있다.

Table 1은 강판의 각 두께에 대한 개선 설계 범위를 나타내고 있다. 깊이 비는 주로 1:2, 1:3, 또는 2:1이고, 각도 비는 1:0.75 또는 0.75:1이다.

Table 2는 해석에서 적용한 각 두께의 각 용접 층에 대한 용접 조건을 보여 주고 있다. 전면에 대한 다층 용접이 종료되면, 강재를 뒤집고, 후면의 용접 전에 650 A의 전류로써 가우징을 수행하게 된다. 실험과 해석을 비교하기 위하여 40 mm 두께 강판에 대한 2:1 두께 비의 개선을 가진 용접 공정을 우선 해석하였다. 한편, Table 1에서와 같이 제안된, 강판 두께에 따른 개선 설계 변화에 대한 해석을 차례로 수행하여, 각 강판 두께에 대한 최적의 개선 형상을 제안하고자 하였다. 용접 공정의 모델에 대한 수치해석은 유한요소기반의 상용 소프트웨어^[13]를 활용하였다.

4. 결과 및 고찰

제안된 열전달 모델 및 해석으로써 후판 다층

용접 공정 중의 해석 영역 각 위치에서의 열이력을 얻을 수 있었다. Fig. 4는 해석 결과에서 얻은 용접부 주위의 전형적 온도 분포로, 40 mm 두께와 1:2의 개선비를 가진 용접 결합부에 2번째 용접층이 적층된 직후의 사례이다. 개선 내의 나머지 용접층에 해당하는 요소들은, 해당 용접층이 아직 적층되기 전이라, 보이지 않고 있는 상태이다.

열전달 해석의 결과는 강판의 각변형을 예측하기 위한 열탄소성 해석에 활용되었다. 먼저, 깊이 비 2:1, 각도 비 1:0.75의 개선을 가진 두께 40 mm 강판에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 동일한 조건으로써 용접 실험을 실시하고, 각 층의 용접 후에 각변형을 측정하였다. 본 연구에서는, 해석 영역의 폭 끝에서 두께 방향으로 발생한 면외 변위를 각변형으로 정의하였고, 용접부에 비해 상대적으로 폭 끝이 위로 솟는 크기를 양의 값으로 설정하였다. Fig. 5는 해석과 실험에서 얻은 결과를 비교하여 보여주고 있다.

Table 1 Depth and angle ratios of the X shape groove for plate of each thickness used in the analysis

Thickness, mm	No. of passes on front side vs. that on back side	Front-side depth vs. Back-side depth, mm	Front-side angle vs. Back-side angle, deg	Depth ratio	Angle ratio
40	5 : 2	27 : 13	60 : 45	2 : 1	1 : 0.75
	3 : 3	20 : 20	60 : 45	1 : 1	1 : 0.75
	2 : 4	13 : 27	60 : 45	1 : 2	1 : 0.75
	2 : 5	13 : 27	45 : 60	1 : 2	0.75 : 1
60	3 : 6	20 : 40	60 : 45	1 : 2	1 : 0.75
	3 : 7	15 : 45	60 : 45	1 : 3	1 : 0.75
	3 : 8	20 : 40	45 : 60	1 : 2	0.75 : 1
80	5 : 10	27 : 53	60 : 45	1 : 2	1 : 0.75
	3 : 13	20 : 60	60 : 45	1 : 3	1 : 0.75
	4 : 14	27 : 53	45 : 60	1 : 2	0.75 : 1
100	6 : 16	33 : 67	60 : 45	1 : 2	1 : 0.75
	4 : 19	25 : 75	60 : 45	1 : 3	1 : 0.75
	5 : 21	33 : 67	45 : 60	1 : 2	0.75 : 1

Table 2 Welding parameters for each thickness of thick plate in the analysis

Thickness, mm	Position	Process	Current, A	Voltage, V	Speed, cm/min
40	1st pass on front side	FCAW	250	32	32
	1st pass on back side	SAW	728	30	41
	Fill pass	SAW	723	31	38
	Cap pass	SAW	683	33	40
60 ~ 100	1st pass on front side	FCAW	235	29	36
	1st pass on back side	SAW	760	32	40
	Fill pass	SAW	723	32	40
	Cap pass	SAW	700	32	37

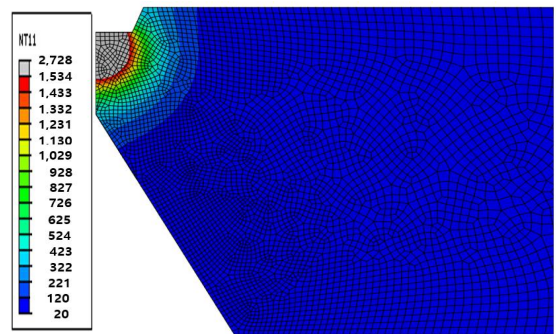


Fig. 4 Temperature contours on the solution domain during welding on the groove with the depth ratio of 1 : 2 in a 40 mm-thickness plate

해석 결과에 따르면, 개선의 깊이 비가 2:1로 설계될 경우, 최종 적층 후에는 강판이 오목하게 변형되고 약 23 mm의 각변형이 발생되었다. 초기 적층을 제외하고는 해석에서 예측한 용접 층의 증가에 따른 각변형의 변화가 실험의 결과와 대체로 잘 일치하고 있다. 가우징 공정에 따른 효과는 5번째 적층 이후에 보여 지고 있으나, 각변형 형태를 변화하기에는 미미한 크기임을 알 수 있다. 오목한 형태의 각변형을 줄이기 위해서는 개선의 설계가 변경되어야 할 필요가 있었다. Fig. 6은 깊이 비를 1:1로 변경한 경우, 최종 변형의 크기는 다소 줄었으나 오목한 형태의 큰 각변형이 여전히 발생하고 있다.

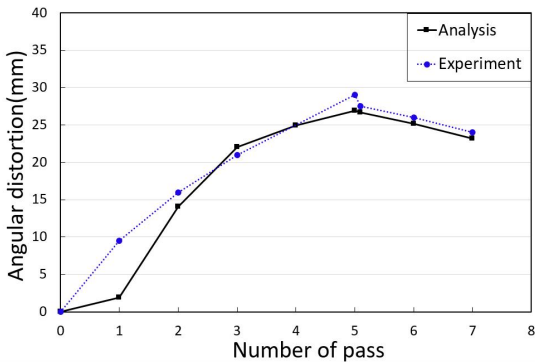


Fig. 5 Changes of angular deformations obtained by experiment and numerical analysis with number of pass in the welding of a 40 mm-thickness plate

전후면 동일한 개선 깊이의 설정에도 불구하고 오목한 형태의 변형이 크게 발생한 현상은, 전면의 용접에서는 비어 있는 후면 개선부가 강성에 기여하는 바가 없으나, 후면의 용접에서 전면의 용접부는 강성으로 작용하여 역 방향 변형의 발생을 방해한 결과로 판단된다.

한편, 깊이 비를 1:2로 설정한 경우, 후면 용접부가 적층됨에 따라 각변형이 크게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 선행된 전면 용접부가 비교적 작은 강성 효과를 나타낸 결과이다. 또한, 각도 비를 0.75:1로 증가한 경우, 즉 후면 개선부의 각도를 더 크게 한 경우, 최종 각변형은 약 -10 mm로 나타나고 있고, 이는 강판이 불룩하게 휘어진 형상을 의미한다. 이러한 결과에 따르면, 40 mm 강판의 경우, 각변형을 최소화하는 개선 형상은 새롭게 제안된 두 형상 사이에서 결정될 수 있다.

변형 해석 결과에 의하면, 초기 개선부는 빈 공간으로 강성의 역할이 없으므로, 1 번째 적층에 의한 각변형이 변형 형태에 지배적인 것을 알 수 있다. 후면 용접 전에 행하는 가우징 공정은 각변형을 다소 줄이고 있으나, 그 크기는 약 1.5~2 mm 정도로 상대적으로 작게 나타났다.

Fig. 7은 60 mm 두께의 강판에서 개선의 깊이 비가 1:2로 설계된 경우, 최종 각변형은 거의 0 mm에 근접하고 있음을 보이고 있다.

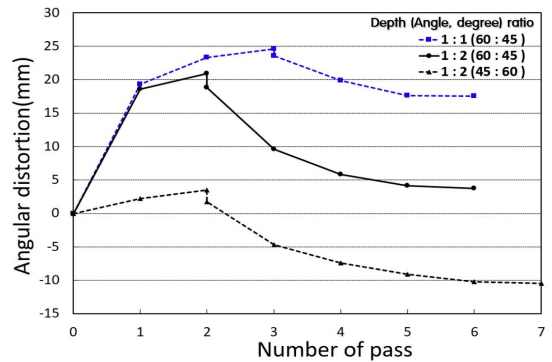


Fig. 6 Predicted angular deformation with increment of welding pass on various shapes of groove of a 40 mm- thickness plate

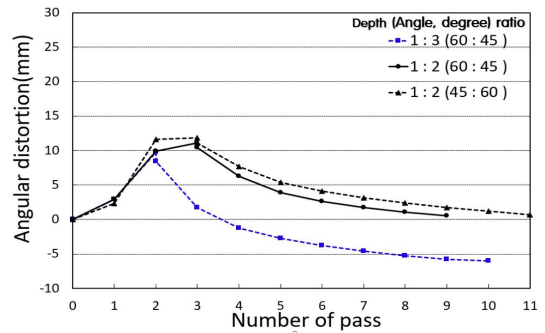


Fig. 7 Predicted angular deformation with increment of welding pass on various shapes of groove of a 60 mm- thickness plate

각도 비를 0.75:1(45°:60°)로 증가한 경우, 초기 각변형은 다소 증가하나, 변형은 점진적으로 감소하여 최종적으로 0 mm로 나타났다. 깊이 비를 1:3으로 설계한 경우, 전면부 용접에서 형성된 초기의 각변형은 빠르게 감소하여 0 mm에 이르고, 반대 방향으로 증가하여 결국은 -6 mm가 되고 있다.

Fig. 8은 80 mm 두께 강판에서 개선의 깊이 비를 1:2로 설정했을 때, 최종 각변형은 약 2.5 mm로 예측되었고, 강판은 오목하게 변형되었다. 각도 비를 0.75:1로 변화하면, 최종 각변형은 각도 비가 1:0.75의 경우에 비하여 차이가 크지 않아, 변형을 줄이는 방안으로 효과적이지 않았다. 한편,

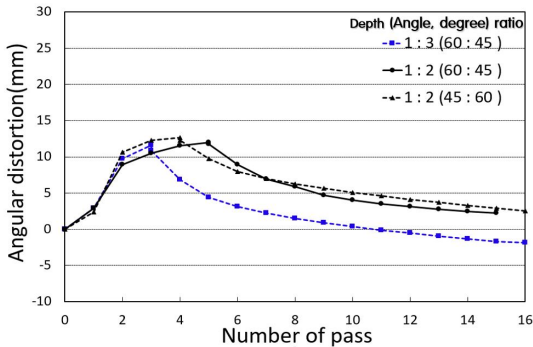


Fig. 8 Predicted angular deformation with increment of welding pass on various shapes of groove of an 80 mm- thickness plate

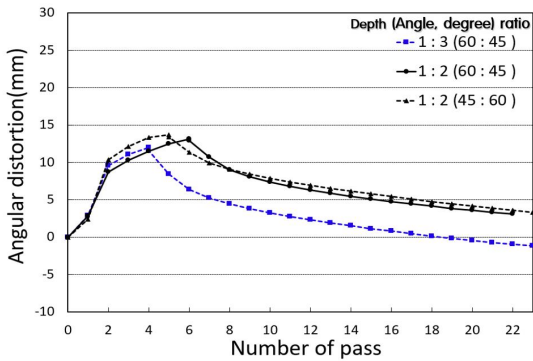


Fig. 9 Predicted angular deformation with increment of welding pass on various shapes of groove of a 100 mm- thickness plate

깊이 비를 1:3으로 설계한 경우, 최종 각변형은 -2 mm로 나타나고 있다. 따라서, 80 mm 두께의 경우는 각변형을 최소화하기 위해서는 최적의 각도 비로서 1:2와 1:3 사이의 값을 취할 수 있다.

Fig. 9는 100 mm 두께의 경우에 강판의 각변형에 대한 예측 결과를 보여 주고 있다. 개선의 깊이 비가 1:2이면, 최종 각변형은 거의 3 mm 크기로 나타나고, 각도 비를 0.75:1로 변경하면, 80 mm 두께와 경우와 유사하게, 변형이 크게 축소되지는 않았다. 깊이 비가 1:3으로 설계되면, 각변형은 약 -1.5 mm로 예측되었다. 이러한 결과에서, 100 mm 강판의 경우, 각변형을 제거하기 위해서는 개선 깊이비를

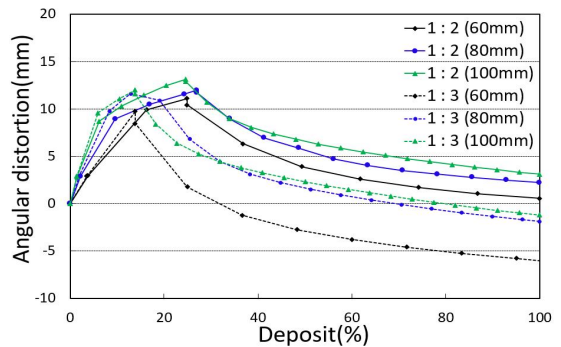


Fig. 10 Angular deformation with increment of welding deposit for two depth ratios of the joint in thick plate welding

1:3에 근접하여 설계하는 것이 필요하였다.

Fig. 10은, 해석결과를 다시 나타내어, 용착률과 각변형 사이의 관계를 보여 주고 있다. 용착률은 누적 적층수를 총 적층수에 대하여 0~100%로 정규화한 것이고, 결과에는 깊이 비의 변화만을 나타내었다. 깊이 비를 1:2로 설계했을 때, 1:3의 경우보다, 전면부 용접 동안에 각변형의 증가가 더 크게 나타나 더 큰 변형의 발생이 예측되었다. 깊이 비가 1:3으로 설계되는 경우, 최종 변형은 반대 방향으로 나타나고 있다. 최종 변형의 크기에서, 60~100 mm 강판의 경우, 깊이 비를 1:2~1:3 사이에서 설계하면 각변형을 최소화 할 수 있을 것으로 예측된다. 특히, 60 mm 두께는 1:2에 근접해야 하고, 반면에 100 mm의 경우에는 1:3에 근접하도록 설계하는 것이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

강판 두께 100 mm까지의 후판 맞대기 용접에서 각변형에 미치는 개선 형상의 효과를 유한요소법에 기반한 수치해석을 통하여 연구하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제안된 다층 용접 모델에 의한 각변형 해석 결과는 용접 실험에 의한 결과와 양호하게 일치하였다.

2. 전면 개선부에 적층되는 초기의 용접층에 의해 각변형이 지배적으로 발생하였다.
3. 40 mm 두께의 강판에서 각변형의 크기를 축소하기 위해서는 후면 개선부를 전면보다 더 크게 설계해야 한다.
4. 강판의 두께가 60 mm이면, 개선의 깊이 비를 1:2에 가깝게 설계해야 최소 변형이 발생하고, 두께가 100 mm로 증가할수록, 깊이 비는 1:3에 근접하도록 해야 변형의 발생을 최소화할 수 있다.
5. 개선 전후부의 각도 비가, 가능한 설계 범위 내에서, 변화되어도 강판의 각변형은 크게 차이가 나타나지 않았다.
6. 가우징 공정은 전면 용접부와 반대 방향의 변형을 유발하였으나, 각변형에 뚜렷한 영향을 미치지 않았다.

후 기

“이 논문은 2017년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Heo, J. H., Kim, S. I., "A Study on the Prediction and Control of Angular Distortion in Thick Weldments", Journal of the Korean Welding Society, Vol. 21, No. 5, pp. 40-46, 2003.
2. Yaghi, A. H., Tanner, D. W. J., Hyde, T. H., Becker, A. A. and Sun, W., "Finite Element Thermal Analysis of the Fusion Welding of a P92 Steel Pipe", Mechanical Sciences, Vol. 3, pp. 33-42, 2012.
3. Park, J. U., An, G. B., Woo, W. C., Choi, J. H. and Ma, N., "Residual Stress Measurement in an Extra Thick Multi-pass Weld using Initial Stress Integrated Inherent Strain Method", Marine Structures, Vol. 39, pp. 424-437, 2014.
4. Mashubuchi, K., "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, Ch. 7, pp. 275-276, 1980.
5. "Researches on Welding Procedures of Thick Steel Plates Used in the Construction of Large Size Ships", Report of Shipbuilding Research Association of Japan, 26 (Sept. 1959 (in Japanese)).
6. Abid, M. and Qarni, M. J., "3D Thermal Finite Element Analysis of Single Pass Girth Welded Low Carbon Pipe-Flange Joints", TURKISH JOURNAL OF ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL SCIENCES, Vol. 33, pp. 281-294, 2009.
7. Yang, Y. S., Kim, D. Y. and Bae, K. Y., "Analysis of Welding Distortion during the Production of Fuel Tanks for Excavators", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 24-34, 2016.
8. Kala, S. R., Prasad, N. S. and Phanikumar, G., "Studies on Multipass Welding with Trailing Heat Sink Considering Phase Transformation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, pp. 1228-1235, 2014.
9. Yang, Y. S. and Bae, K. Y., "Stress Analysis of Pipe Connection Process Using Clamping Ring", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 81-87, 2017.
10. Lee, D. Y., Park, K. D. and Kang, D. M., "A Study of the Finite Element Analysis in Friction Stir Welding of Al Alloy", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 81-87, 2015.
11. Bae, K. Y., Yang, Y. S., Yi, M. S. and Hyun, C. M., "A Study on Prediction of the Size of Heat Affected Zone in Oxy-ethylene Flame Cutting of Steel Plates", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vo. 17, No. 6, pp. 733-740, 2016.
12. Bae, K. Y., Yang, Y. S. and Hyun, C. M., "Analysis for the Angular Deformation of Steel Plates in a High-Frequency Induction Forming Process with a Triangle Heating", Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 227, No. 3, pp. 423-429, 2013.
13. ABAQUS User's Manual, Version 5.5, Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Pawtucket, Rhode Island, 1995.