

용접 후면 강제냉각조건이 용접각변형에 미치는 영향

박정웅^{1*}

¹조선대학교 토목공학과

Effect of Forced Cooling condition along with Welding on Welding Angular Distortion

Jeong-Ung, Park^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Chosun University

요 약 냉각법은 용접과 동시에 용접토치로 부터 일정한 거리 떨어져 있는 용접부를 냉각기체를 이용하여 냉각시켜 용접변형을 최소화시키는 기술이다. 냉각기체에 의해 용접부의 온도를 감소시키면 용접부에 발생하는 열응력이 감소되고 그 결과 소성변형이 최소화되어 최종적으로 용접좌굴과 각변형을 방지할 수 있는 기술이다. 이 방법은 용접부 표면을 냉각시키는 방법으로 용접부를 직접 냉각시키므로써 현장 적용성 면에서 다른 용접변형 방지법 보다 효율적이다. 본 연구에서는 맞대기용접을 대상으로 용접 후면의 냉각조건(폭, 길이)을 변화시켜 열탄소성해석을 실시하여 해석적방법으로 용접 각변형에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과 용접토치와 냉각 선단과의 거리는 25mm, 냉각 길이는 80mm, 냉각 폭은 30mm의 경우가 각변형 저감에 제일 큰 효과가 있었다. 이때 냉각길이는 길면 길수록 각변형을 감소시킨다.

Abstracts In this study, the effect on the welding angle distortion was reviewed by carrying out a thermal elastic-plastic analysis while changing the cooling condition(width, length, and distance from weld torch to cooling torch) the back of the welding zone for the butt weld joint. The review results revealed that maximum 57% of reduction in the angle distortion was achieved when the distance between weld torch and cooling tip of 25mm, cooling length of 80mm, and cooling width of 30mm were maintained.

Key Words : Angular distortion, Thermal elastic-plastic analysis, Thin plate, Rerforced cooling method

1. 서 론

박판 강구조물은 자체강성이 작아 용접에 의해 종굽힘 변형[1-3]과 각변형 그리고 좌굴변형이 발생되기 쉽다. 이러한 변형은 구조물의 형상과 치수를 변화시키므로 이를 교정하는 별도의 작업이 필요하므로 생산성과 제품의 질을 떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 현장에서는 다각도의 실험[4-7]을 통해 변형을 측정하고 이를 Database화하여 설계에 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이와 같은 실험적 방

법은 구조물의 형상에 따라 민감하게 변화하는 변형을 측정하는데 많은 시간과 비용이 소요되는 문제점을 안고 있다. 그래서 최근에는 고유변형도[8-11]와 증가하중[12]을 이용한 탄성해석으로 대형강구조물의 용접변형을 예측하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 한편, 보다 적극적인 방법으로 용접변형이 발생하는 것 자체를 미리 방지하기 위한 역변형법, 구속법, 냉각/가열법 그리고 인장법[13,14] 등과 같은 연구도 활발히 진행되고 있다. 그 중 강제냉각법은 용접과 동시에 용접토치 후방으로 부터 일정거리 떨어진 부분에 냉각기체를 이용하여 용접

이 논문은 2009년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

*Corresponding Author : Jeong-Ung, Park (Chosun University)

Tel: +82-10-8614-7717 email : jupark@chosun.ac.kr

Received January 30, 2013

Revised March 11, 2013

Accepted April 11, 2013

부를 냉각시키므로서 용접변형을 최소화시키는 기술이다. 냉각기체에 의해 용접부 온도분포가 변화하여 용접부에 발생하는 열응력을 감소시켜 소성변형을 최소화하여 박판용접좌굴과 각변형을 방지할 수 있는 기술이다. 이 방법은 박판좌굴과 각변형을 최소화시키는데 효과적이며, 용접부 표면에서 냉각하므로 현장 적용성에서도 다른 용접변형방지법 보다 효과적이다.

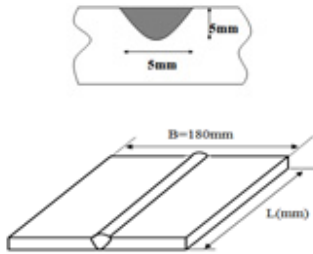
본 연구는 강제냉각법을 현장에서 구현하기 위한 냉각 조건을 해석적 방법으로 토출하는 것을 목적으로하고 있다. 따라서 먼저 실험과 열탄소상해석 결과를 비교하여 열탄소상해석의 타당성을 검토하였다. 그리고 신뢰성이 검증된 열탄소상해석법을 이용하여 박판 맞대기용접을 대상으로 냉각범위(폭, 길이, 용접부로부터 냉각위치)를 변화시켜 용접각변형을 최소화시키는 범위를 도출하였다.

2. 해석방법의 타당성 검토

2.1 용접 및 해석조건

냉각법에 의한 용접변형해석을 수행하기 위해 해석 결과의 타당성을 검토하기 위해 Fig.1과 같은 실험체 및 결과를 사용하였다. 해석대상 모델은 폭이 180mm, 두께 15mm 그리고 길이는 단위길이를 사용하였다.

용접법은 FCAW이고 용접조건은 table 1과 같다. 사용 강재는 연강을 사용하였다.

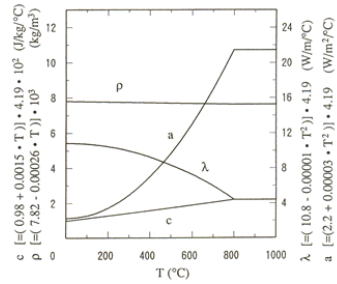


[Fig. 1] Dimension of specimen and weld section

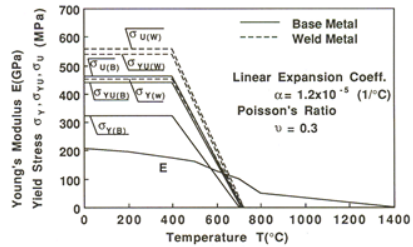
[Table 1] welding conditions

Thick	current(A)	voltage(V)	velocity(mm/sec)
15t	390	31	12.5

해석은 상용프로그램 MSC.marc를 사용하였으며, 열분포해석과 열탄소상해석시에는 Fig.2와 같이 재료의 온도의존성을 고려하여 해석하였다. 해석은 평면변형률 2차원 4절점요소를 사용하였다.



(a) Physical constants



(b) Mechanical properties

[Fig. 2] Thermal material properties for base and weld metal

용접 열원의 모델링을 위해 MARC 옵션인 Weld flux, Weld filler 및 Weld path을 사용하였다. 용접열원은 Fig.3과 같이 부피를 갖는 열원으로 모델링 하였으며, 식 (1),(2)의 열원방정식을 이용하였다.

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right) \quad \text{식 (1)}$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right) \quad \text{식 (2)}$$

q_f : 전방 용융풀 단위 체적 입열량

q_r : 후방 용융풀 단위 체적 입열량

$Q = \eta V$: 총 입열량

a : X 방향 용접 폭

b : Y 방향 용접 깊이

c_f : Z방향 전방 용융풀 길이

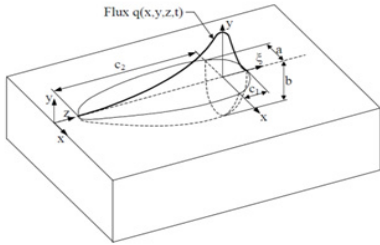
c_r : Z방향 후방 용융풀 길이

η : 효율

f_f, f_r : 무차원 수

$$f_f = \frac{2}{(1+c_f/c_f)} \quad f_r = \frac{2}{(1+c_r/c_r)}$$

총입열량 Q 는 8,928, η (아크 효율)은 0.8, a 2.5mm, b 5mm, c_f 3mm, c_r 5mm, 용접속도는 12.5mm/sec로 설정하였다. 용접 폭, 깊이 등의 자료는 용접시험편 단면을 채취하여 이를 기초로 선정하였다. Weld Path option으로 용접선을 설정하였으며, Weld Filler option으로 용접열원이 이동함에 따라 용접와이어가 생성되도록 모델링하였다.

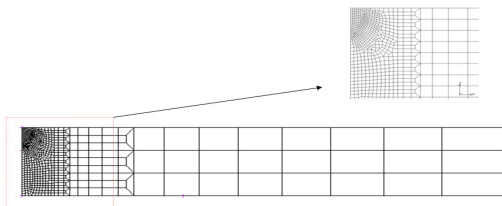


[Fig. 3] Volumetric weld flux

2.2 해석결과 검토

Fig.4는 2차원 해석모델과 용접부를 확대하여 보여주고 있다. Fig. 5는 열탄소성해석시 대칭성을 고려하여 중앙부 경계조건을 보여주고 있다.

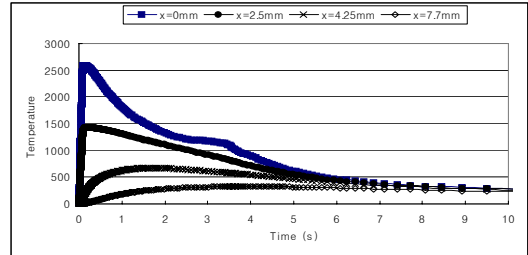
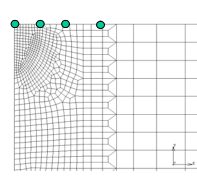
Fig.5는 용접부 중심으로 부터 특정 점에서의 온도이력을 보여주고 있다. 용접종료 직후 용접부의 온도가 점점 시간이 지나감에 따라 열전도에 의해 저온부로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig.6은 용접에 의한 변위이력을 보여주고 있다. 초기 용접열에 의해 아래로 0.55mm 처짐이 발생 후 냉각하면서 각변형이 위로 0.2mm 발생하는 것을 알 수 있다. 이 모델은 2차원해석으로 용접길이방향으로 단위두께를 가지므로 용접길이에 대한 구속 효과는 나타나지 않는다. 이결과는 Fig.7의 실험결과와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.



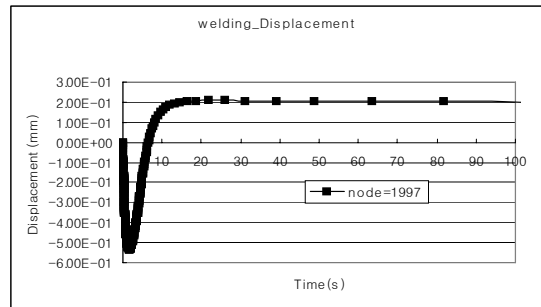
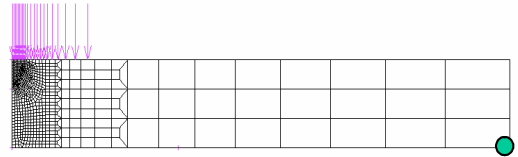
[Fig. 4] Analysis model and Mesh



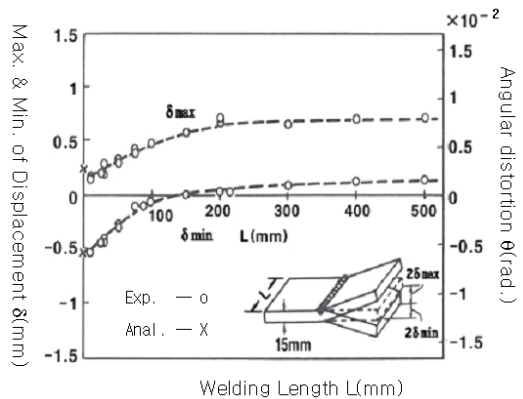
[Fig. 5] Boundary condition



[Fig. 6] Temperature history on surface



[Fig. 7] Displacement history



[Fig. 8] experimental result

3. 냉각조건이 용접변형에 미치는 영향

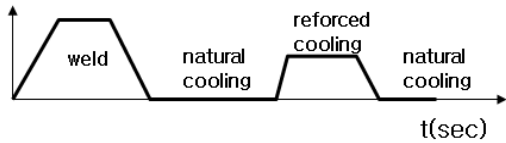
3.1 해석조건

열탄소성해석을 이용하여 용접변형을 최소화시킬 수 있는 최적 냉각면적 및 용접부와 냉각 기체의 최적거리 도출하고자한다. 또한 2차원 요소로 3차원의 길이에 대한 효과를 고려하기 위해 Fig. 9와 같이 모델의 하부에 Contact조건을 고려하여 열탄소성해석을 실시하였다.

Fig.10는 용접 및 냉각해석 패턴을 보여주고 있다. 여기서 강제냉각이란 저온기체를 사용하여 냉각시키는 것을 의미한다. table 2와 Fig.11은 냉각조건과 냉각범위를 변화시킨 해석조건이다. 강제냉각 속도는 용접속도와 같고, 강제냉각 전달계수[15]는 $0.01(W/mm^2/^\circ C)$ 로 하였다.



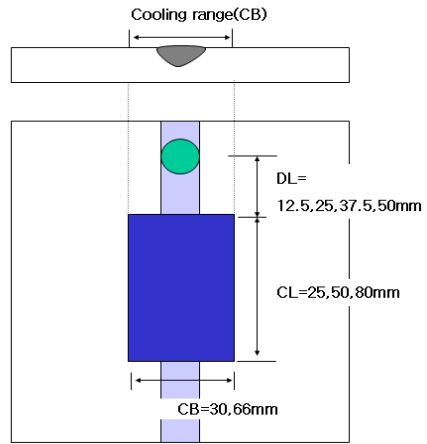
[Fig. 9] Contact condition for analysis



[Fig. 10] Pattern of weld and cooling

[Table 2] Reforced cooling conditions

	DL (distance from weld to cooling)	CL (cooling length)	CB (cooling width)
AS welding	-	-	-
Welding + cooling	12.5	25	30
	25	25	30
	37.5	25	30
	50	25	30
	25	25	66
	25	50	30
	25	80	30



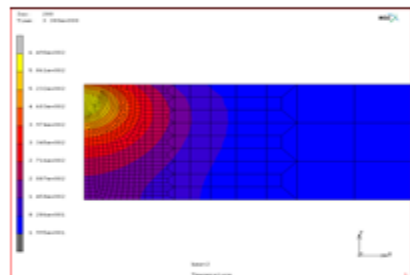
[Fig. 11] Range and position of cooling

3.2 해석고찰

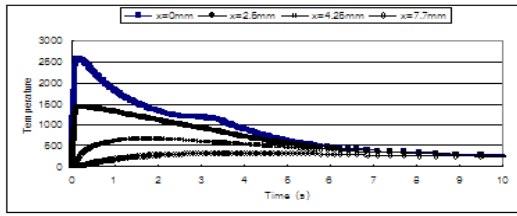
Fig.12은 열전도해석을 실시한 결과로서 용접후 2.38 초 에서의 온도분포를 보여주고 있다. 용접부를 냉각함으로서 상부에 온도분포가 낮아짐을 알 수 있다. Fig.13(a)는 용접만 실시했을 때의 온도분포이고 (b)는 용접후 강제냉각을 실시했을 때의 온도분포이다. 용접후 2초에서 냉각에 의해 온도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig.14은 용접변형이력을 보여주고 있다. 온도이력과 같이 냉각했을 때 용접후 10초 근방에서 용접변형이 감소하는 것을 알 수 있었다.

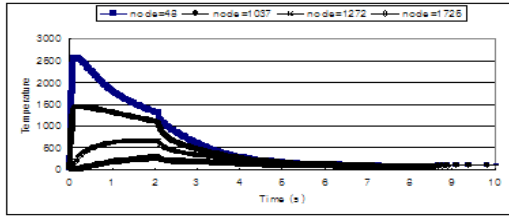
해석결과로부터 Table 3과 같은 결과를 종합할 수있었다. 해석결과에 의하면 용접토치와 냉각 선단과의 거리는 25mm, 냉각길이는 80mm, 냉각폭은 30mm인 경우 42.71%로 각변형이 제일 작게 발생하였다.



[Fig. 12] Temperature distribution of cooling

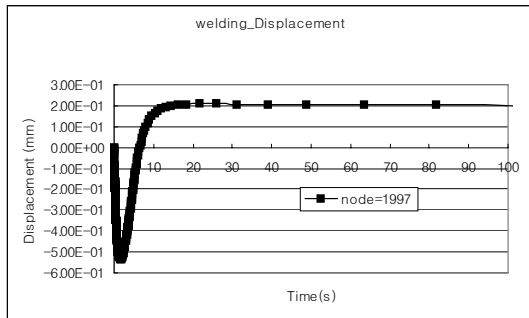


(a)welding

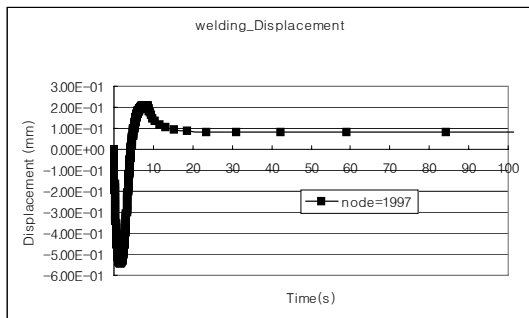


(b) welding+cooling

[Fig. 13] Comparison temp. distribution between welding and welding+cooling



(a) welding



(b) welding+cooling

[Fig. 14] Comparison displacement between welding and welding+cooling

[Table 3] Results of analysis

	DL (distance from weld to cooling)	CL (cooling length)	CB (cooling width)	Weld displacement (mm)	%
AS welding	-	-	-	0.1997	100%
Welding + cooling	12.5	25	30	0.1067	53.43%
	25	25	30	0.0997	49.92%
	37.5	25	30	0.1186	59.39%
	50	25	30	0.1479	74.06%
	25	25	66	0.0895	44.82%
	25	50	30	0.0895	44.82%
	25	80	30	0.0893	42.71%

4. 결론

열탄소성해석을 실시하여 냉각조건에 따른 용접각변형의 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 해석에 사용한 용접변형해석을 기존의 실험결과와 잘 일치하여 냉각법을 적용한 수치해석에 적용할 수 있었다. 또한, 냉각조건에 따른 각변형 감소효과를 알아보기 위해 냉각조건을 다양하게 해석한 결과 용접토치와 냉각 선단과의 거리는 25mm, 냉각길이는 80mm, 냉각폭은 30mm가 각변형 저감에 제일 큰 효과가 있었다. 이때 냉각길이는 길수록 효과가 좋다. 추후 실험을 실시하여 현장에 적용을 위한 냉각방법 및 조건을 도출하고자 한다.

References

- [1] Masubuchi K. Analysis of welded structures. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- [2] Kim JH, Barlat F, Kim CM, Chung KS. Thermo-mechanical and microstructural modeling of friction stir welding of 6111-T4 aluminum alloys. Met Mater Int, 15, pp125-132, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-009-0125-5>
- [3] Bang KS, Park C, Jung HC, Lee JB. Effects of flux composition on the element transfer and mechanical properties of weld metal in submerged arc welding. Met Mater Int 2009, 15, pp471-477, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-009-0471-3>
- [4] Sasayama Y, Masubuchi K, Moriguchi S. Longitudinal deformation of a long beam due to fillet welding, Weld J, 34, 12, pp581s-582s, 1955
- [5] Okerblom N. The calculations of deformations of welded metal structures. Her Majesty's Stationery Office, 1958.

- [6] Lee JS, Kim CH. On the fillet weld-induced deformation control by applying the tensioning method. J Kor Weld & Join Soc, 27, 4, pp38-42, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.4.038>
- [7] Kang SK, Yang JS, Lim RS, Kim HG, Park JU. A study on simulation for weld distortion reduction in fillet weld of thin plate using tension method. J Kor Weld & Join Soc, 26, pp1-112, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2008.26.5.022>
- [8] Murakawa H, Luo Y, Ueda Y. Prediction of welding deformation and residual stress by elastic FEM based on inherent strain(first report)-mechanism of inherent strain production-.Trans Soc Naval Arch Jpn, 180, pp739-51 (in Japanese), 1996.
- [9] Wang R, Zhang J, Serizawa H, Murakawa H. S tudy of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method. Mater Des ,30, pp3474-3481, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.015>
- [10] Wang J, Ma N, Murakawa H, Teng B, Yuan S. Prediction and measurement of welding distortion of a spherical structure assembled from muti thin plates. Mater Des, 32, pp4728-4737, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.047>
- [11] Jang CD, Seo SI. On the Prediction of Deformation of Welded Built-Up Beams. J Soc Naval Arch Kor, 31, pp145-53, 1994.
- [12] Jang CD, Lee CH. A study to predict and control the welding deformations of ship hull blocks. J Soc Naval Arch Kor, 37(2), pp1-10, 2000.
- [13] Park JU, Lee HW, Bang HS. Effects of mechanical constraints on angular distortion of welding joints. SciTechnol weld Join, 7pp 232-239, 2002.
- [14] Kim YC, Chang KH, Horikawa K. Production mechanism for out-of-plane deformation in fillet welding
- [15] Yukio Ueda, Keiji Nakacho, Tsubasa Shimizu and Katsumi Ohkubo, Residual stresses and their mechanisums of production at circumferential weld by heat-sink welding, Journal of Japanese Welding Society, 52(2), pp.22-28, 1983.

박 정 응(Jeong-Ung Park)

[정회원]



- 1994년 3월 : 오사카대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 12월 : 오사카대학교 공과대학 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 1월 ~ 2001년 8월 : 삼성중공업 책임연구원
- 2001년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

용접부 변형, 잔류응력, 피로 및 파괴