

단속 필렛 용접의 변형 특성에 관한 연구

이주성*

*울산대학교 조선해양공학부

Deformation Characteristics of Intermittent Fillet Welding

Joo-Sung Lee*

*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Intermittent welding 단속용접, Fillet welding 필렛용접, Pitch of welding part 용접부의 피치, Thermo elasto-plastic analysis 열탄소성 해석, Weld-induced deformation 용접변형

ABSTRACT: As is well appreciated, welding is the most important fundamental process in manufacturing marine structures. However, weld-induced deformation is inevitable because of the non-uniform distribution of temperature during welding. The deformation caused by welding is one of the principal obstacles in enhancing the productivity in the manufacturing procedure for marine structures. This should be much more seriously considered in the case of the thin blocks found in a ship with multi-deck structures. This paper is concerned with the deformation control of thin panel blocks by applying intermittent welding to fillet welding. In order to investigate the quantitative effect of the intermittent welding, a thermo elasto-plastic analysis was carried out with various welding pitches and plate thicknesses. Welding tests were also carried out to show the validity of the present thermo-elasto-plastic analysis. Numerical analysis results showed good agreement with those of the welding tests. As far as the present numerical results are concerned, it has been seen that a more than 50% reduction in angular distortion can be achieved by applying the intermittent welding because of the low heat input.

1. 서 론

선박이나 해양구조물의 건조에 있어서 접합 방법으로서 용접이 대단히 중요한 작업과정이라는 것은 논의할 필요가 없으나, 급 열과 급냉이라는 열싸이클을 거치면서 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 그 중 중요한 것이 용접으로 발생하는 변형이다. 이러한 용접변형은 선박의 외관상 불량은 물론 구조 강도저하 등의 문제를 발생시킨다. 최근 선박에 있어서 박판의 사용비중이 증가함에 따라 박판 구조에 대한 용접 변형의 제어에 대한 중요성이 널리 인식되어 있다. 이는 갑판 등 선박의 상부구조에서의 박판 사용은 복원성을 좋게 하여 선박의 안정성을 높인다는 큰 장점을 가지고 있으나, 박판은 열전달 특성상 후판에 비해 동일한 양의 열량이 입열되었을 때, 용접시 열영향부가 넓고 판의 강성이 상대적으로 낮아서 불균일한 용접입열에 의해 좌굴변형이 빈번히 발생한다(Masubuchi, 1980). 이러한 용접변형은 구조 강도저하와 외관상의 불량은 물론, 현 조립단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이에 기인하여 발생하는 교정 작업량의 증가 등 생산성 저하의 주원인이 되고 있다(이주성, 2004). 박판 블록의 변형을 감소시키기 위한 여러 가지 방안들이 제안되었는데(신대회 등, 2007; 이주성과 김철호, 2006), 그 중 하나가 단속용접(Intermittent welding)이다. 기밀이나 수밀성이 요구되지 않는 구조에 대해 구조 안전성 측면에서 허용 수준이상의 구조강도를

확보할 수 있다면, 연속용접(Continuous welding) 보다 단속용접법을 적용하면 입열량의 대폭적인 감소로 용접변형을 많이 감소시킬 수 있는 것을 어렵지 않게 예상할 수 있다. 단속용접법을 적용한 이러한 용접변형의 감소에 대해서 최근 (한성우, 2009)이 정량적으로 분석한 연구결과를 발표한 바 있다. 본 논문에서는 박판 평블록 필렛 용접에 단속 용접을 적용할 시 용접부의 피치의 크기에 따라 발생하는 용접변형 특성을 분석하였다. 이를 위해 열탄소성 해석을 수행하였다. 본 논문에서 적용한 열탄소성 해석 과정은 연속 및 단속용접에 대한 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 3가지 판 두께를 갖는 판의 필렛용접시 네 경우의 피치 크기에 대한 열탄소성 해석을 통해 각 피치의 크기에 따른 변형 결과를 비교 검토하여 피치 크기에 따른 용접변형의 감소에 대한 분석을 수행하였다.

본 연구의 수치해석에서는 범용 유한해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 비선형 열전달 문제를 풀어 온도분포의 시간 이력을 계산한 다음, 그 결과를 열하중으로 입력하여 탄소성해석을 수행하는 2단계 해석법을 적용하였다(이주성과 김철호, 2006; 한성우, 2009).

2. 모델 및 용접조건

본 연구에서는 두께가 4, 5, 6mm인 판과 두께 6mm인 플랫폼

보강재를 사용하여 각 모델의 용접변형 특성을 알아보기 위해 Table 1과 같이 각각의 모델을 정의하고 크기를 나타내었다. 'Model C'는 연속용접(Continuous welding)을 의미하며, 나머지는 단속 용접 모델인데, P 뒤의 숫자는 용접부 사이의 거리로서 용접을 하지 않는 구간 즉, 용접부의 피치를 의미한다. 예를 들어, P120의 경우 용접장이 80mm이고 피치가 120mm인 경우로서, Fig. 1과 같이 용접부 6 곳과 비용접부 5곳으로 모두 11개의 구간으로 나눈 것이다. 단속 용접시 용접장은 80mm로 동일하게 적용하였다. 보강재의 한쪽 측면만 필렛 용접 즉, One side 용접이고, 모든 모델에 대해 Table 2에 보인 용접조건을 동일하게 적용하였다.

Table 1 Size of the present models

Model	Plate L×B×t [mm]	Stiffener L×h×t [mm]
C	880×300×4,5,6	880×60×6
P80	880×300×4,5,6	880×60×6
P100	980×300×4,5,6	980×60×6
P120	1080×300×4,5,6	1080×60×6
P140	1180×300×4,5,6	1180×60×6

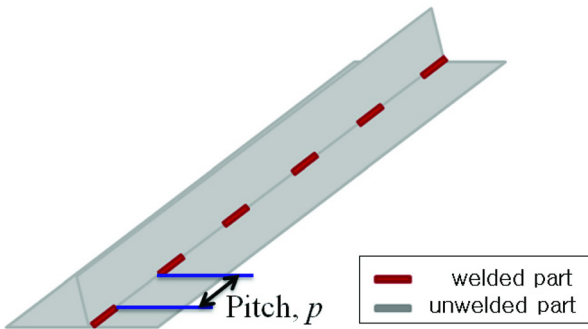


Fig. 1 Intermittent welding model

Table 2 Welding conditions

Current I [A]	150
Voltage V [V]	21
Welding Speed v [mm/min]	200

3. 열탄소성 해석

열탄소성 해석은 이론적으로 열전달 문제와 열변형 문제가 연성된 형태이나 변형량이 판의 다른 치수들에 비해 상대적으로 크지 않은 경우 판의 기하학적 형상 변화가 열전달 문제에 영향을 주지 않는 것으로 가정할 수 있고, 따라서 열전달문제와 열변형 문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다(장창두와 서승일, 1998; 김상일, 2003). 즉, 열전달해석을 통해 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 Time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열 하중으로 입력하여 탄소성해석을 수행함으로써 용접에 의한 변형을 계산한다.

열속 모델(Heat flux model)로는 표면열속(Surface heat flux)을 사용하였으며, 이때 표면열속의 크기 p는 아래의 식 (1)에 의해 계산한다.

$$p = \frac{Q_{eff}}{A} \tag{1}$$

여기에서 p는 표면 열속(Surface heat flux, cal/mm²·sec)이고, Q_{eff}는 유효 용접 입열량(Effective heat input, cal/sec)으로서 Table 2에 보인 용접조건에 따른 Q_{eff}는 529.2cal/sec 이다. A는 입열 면적(Heat input area, mm²)이다.

열전달해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치에 대하여 온도 의존성을 고려하였으며(한성우, 2009), 시편의 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류 경계조건을 부여하였다. 여기서 열 손실 계수 (Heat loss coefficient)는 6.0×10⁻⁶cal/mm²·°C이다. 또한 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(Latent heat)의 효과를 고려하였고, 그 값은 65×10³cal/kg이다. 그리고 대기의 온도는 20°C로 가정하였다.

해석에 사용된 유한요소는 8절점 고체요소이고, 생성되는 용접 비드면이 표면열속을 가하는 방법으로 온도 분포의 시간이력을 구하였다. 열변형 해석은 열전달해석을 통한 각 절점에서의 과도적인 온도분포가 열탄소성해석 시의 하중조건이 되므로 열전달해석 시의 요소분할을 그대로 사용하였다. 탄소성 해석시 모델의 네 모서리의 연직방향으로의 변위를 구속하는 것을 포함해서 강제운동을 방지할 수 있도록 최소한의 경계조건을 부여하였다.

유한요소 모델링의 예로서 Model P80에 대한 것을 Fig. 2에 예시하였다. 약간 어두운 색 부분이 용접부이고 밝은 색 부분이 비용접부이다. 단속용접의 경우 어느 한 구간의 용접이 마무리 되면 그 다음 구간을 곧바로 용접하는 것으로 간주하였다.

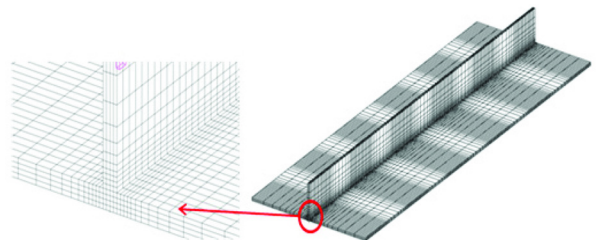


Fig. 2 Finite element modeling : 5t Model P120

4. 해석 결과 및 검토

4.1 수치해석 결과의 예

열탄소성 해석 결과의 예로서 Model P80 중 판 두께가 5mm인 모델에 대해 보강재의 우측 부분이 판재와 필렛 용접되는 것으로서 Fig. 3(a)와 (b)는 각각 두 번째와 네 번째 용접부가 완료되었을 때의 변형 형상이고, Fig. 3(c)는 모든 용접부의 용접이 완료되어 완전히 냉각된 상태에서의 변형 형상이다. Fig. 3에서 보강재의 우측 부분이 판재와 용접되기 때문에 보강재가 용접부 방향인 우측으로 변형되는 것을 볼 수 있다. 또한 용접부에서는

비용접부 보다 많은 각변형이 발생하여 전반적으로 용접선의 길이 방향으로 물결모양의 변형이 발생하는 것을 볼 수 있다.

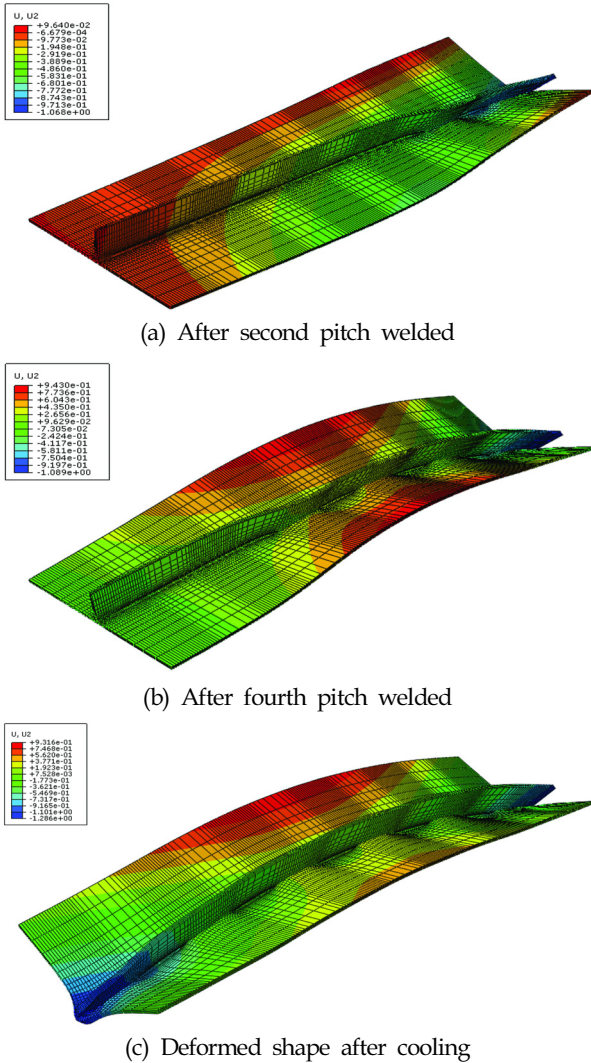


Fig. 3 Simulation result deformation shape of model P80

4.2 용접 실험 및 수치해석 과정의 검증

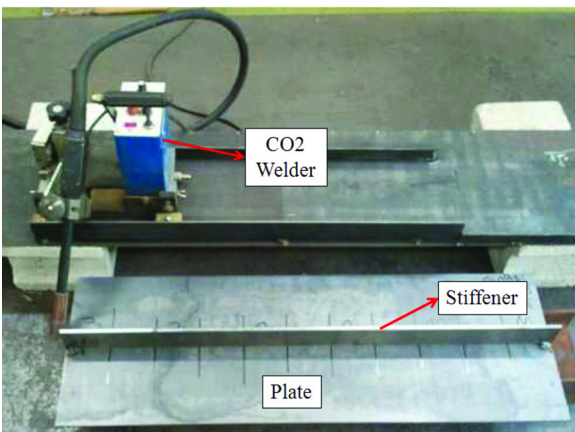
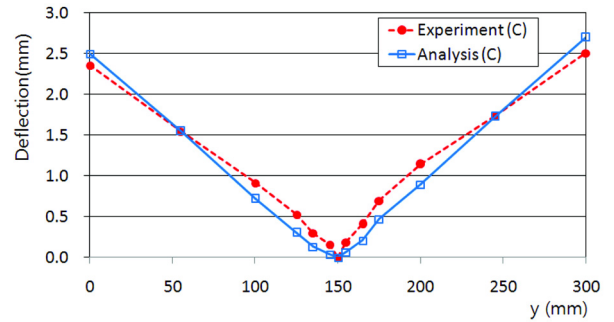


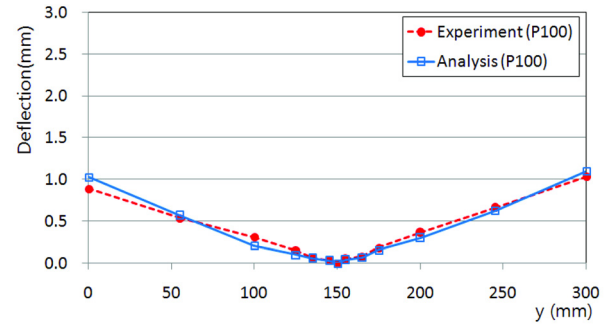
Fig. 4 Specimen and CO₂ welder

본 연구에서 적용한 열탄소성 해석 과정의 타당성을 검증하기 위해 Table 1에 열거한 모델 중 연속용접 모델인 Model-C와 단속용접 모델인 P100과 P140에 대한 용접실험을 수행하였다. 실험 모델의 판 두께는 모두 6mm이다. Fig. 4는 용접실험을 위해 모델과 CO₂ 용접기 등을 설치한 모습이다. 용접 후 변위는 오차 ±0.2mm인 레이저 센서를 이용하여 측정하였다.

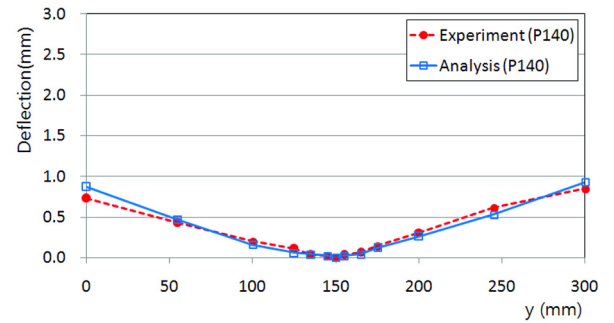
수치해석과 실험결과와의 비교를 위해 용접부 6곳과 비용접부 5곳의 중간 위치 (Fig. 1 과 2 참고)에서의 변위들의 평균을 취한 각변형 형상을 구하여 Fig. 5에 보였다. 두 결과 사이에는 최대 변위 측면에서 약 10% 이내의 오차를 보이고 있어서 본 연구에서 적용한 열탄소성 해석 과정이 타당성이 있다고 판단된다.



(a) Model-C ($t=6\text{mm}$)



(b) Model-P100 ($t=6\text{mm}$)



(c) Model-P140 ($t=6\text{mm}$)

Fig. 5 Comparison of deformation between numerical analysis and experiment

4.3 Case study 및 검토

Table 1에 보인 바와 같이 판 두께가 4, 5와 6mm인 판에 용접부의 피치를 80, 100, 120 그리고 140mm로 변화시킨 필렛 용접에 대해 전절에서 검증한 열탄소해석 과정을 적용하여 수치

해석을 수행하였다. 각 모델별 열탄소성 해석 결과로서, 4.2절의 경우와 마찬가지로 각변형량의 비교를 위해 용접선 방향으로 각 용접부의 중간 위치와 비용접부의 중간 위치로서 총 11개 위치에서의 변위의 평균을 취한 변형 형상을 판 두께 별로 Fig. 6에 보였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 용접부의 피치가 증가함에 따라 각변형량이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 피치의 증가는 단위 길이 당 입열량이 감소하기 때문에 얻어지는 당연한 결과이다. 보다 정량적인 비교를 위해 연속용접과 4가지 단속용접에 대한 평균 각변형량을 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 두 번째 열은 단위길이 당 입열량이고 대괄호 [] 내의 숫자는 연속용접의 입열량을 기준으로 한 상대적인 비율이다. 즉, P80, P100, P120과 P140의 입열량은 연속용접시 입열량의 각각 54.5, 49.0, 44.4와 40.7%이다. 세 번째 열은 Radian 단위로 표시된 각변형량이고, 두 번째 열의 경우와 마찬가지로, 대괄호 [] 내의 숫자는 연속용접의 각변형량을 기준으로 한 상대적인 비율이다. 예로써 판 두께가 4mm인 경우, P80, P100, P120과 P140의 각변형량은 연속용접의 각변형량의 각각 45.3, 38.5, 31.7와 28.0%로서 단속 용접을 적용하면 각변형량이 54.7~72.0% 감소한다는 것을 의미한다.

Table 3에서 보는 바와 같이 단속용접의 경우 각변형량이 대폭 감소했음을 볼 수 있고, 이는 용접부 피치의 증가에 따라 더 뚜렷함을 알 수 있다. 특히 단속용접에 따른 입열량의 감소비율에 비해 각변형량의 감소 비율의 더 크다는 것을 알 수 있으며 이

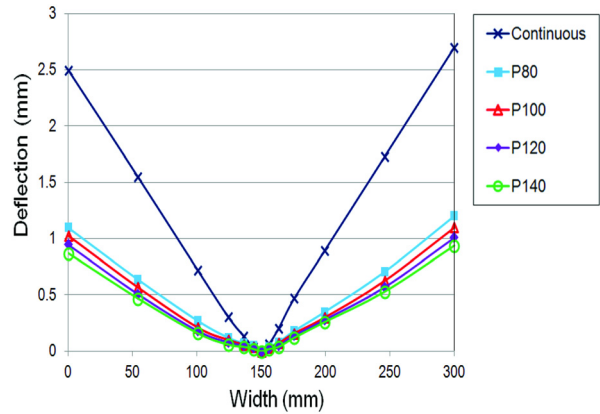
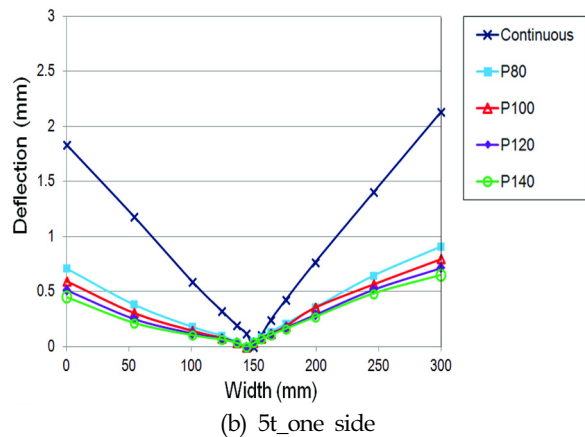
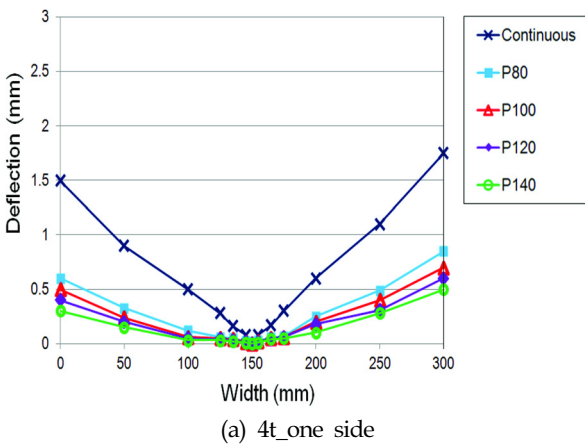


Fig. 6 Comparison of angular deformation

Table 3 Comparison of angular distortion (one side)

Model	Heat input per unit length, q_0 (cal/mm)	Angular distortion (10^3 rad)	Angular distortion/ q_0 (10^5 rad.mm/cal)	
4t	C	158.76 [1.000]	11.499 [1.000]	7.243 [1.000]
	P80	86.60 [0.545]	5.214 [0.453]	6.021 [0.831]
	P100	77.76 [0.490]	4.428 [0.385]	5.694 [0.786]
	P120	70.56 [0.444]	3.642 [0.317]	5.162 [0.687]
	P140	64.58 [0.407]	3.214 [0.280]	4.978 [0.287]
5t	C	158.76 [1.000]	14.228 [1.000]	8.962 [1.000]
	P80	86.60 [0.545]	5.783 [0.406]	6.678 [0.745]
	P100	77.76 [0.490]	5.053 [0.355]	6.498 [0.725]
	P120	70.56 [0.444]	4.514 [0.317]	6.397 [0.714]
	P140	64.58 [0.407]	4.082 [0.287]	6.321 [0.705]
6t	C	158.76 [1.000]	18.011 [1.000]	11.345 [1.000]
	P80	86.60 [0.545]	5.995 [0.333]	6.923 [0.610]
	P100	77.76 [0.490]	5.275 [0.293]	6.784 [0.598]
	P120	70.56 [0.444]	4.756 [0.264]	6.740 [0.594]
	P140	64.58 [0.407]	4.346 [0.241]	6.730 [0.593]

러한 각변형량의 감소효과는 피치가 증가함에 따라 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 예를 들어서 판 두께가 4mm인 P80과 P140 모델의 경우 단위 길이 당 입열량은 각각 45.5와 59.3% 감

소하였는데, 각변형량은 각각 54.7와 72.0% 감소하였다. 이러한 변형량의 감소 현상은 판 두께 4mm 인 경우 보다 판 두께 5, 6mm 인 경우에 더 두드러짐을 볼 수 있다. 네 번째 열인 'Angular distortion/q0'는 단위 입열량 당 각변형량의 변화를 보여 주는 것으로서, 앞서 기술한 바와 같이 피치가 증가할수록 그리고 판 두께가 클수록 단속용접에 의한 변형량 감소 효과가 증대됨을 다른 측면에서 보여주는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 두께가 4, 5와 6mm 인 판의 필렛용접에 단속 용접법을 적용하는 열탄소성 해석을 수행하였다. 용접부의 피치의 변화가 각변형량의 감소에 주는 정량적인 효과를 분석하기 위하여 피치가 각각 80, 100, 120 그리고 140mm인 네 가지 경우를 선택하였다. 본 연구에서 적용한 열탄소성 해석 과정의 타당성을 보이기 위해 연속 및 단속용접에 대한 실험을 수행하여 수치해석 결과와 비교한 결과 수치해석 결과가 실험결과에 상당히 근접하는 좋은 일치를 보였다.

3가지 판 두께 모델에 대해 피치를 4 경우로 변화시킨 모델들에 대한 열탄소성 해석 결과로부터 피치가 증가함에 따라 각변형량의 감소효과가 두드러짐을 확인하였는데, 이는 단속용접의 경우 단위길이당 입열량이 연속용접의 경우의 약 50% 이하로 적기 때문에 나타나는 당연한 결과이다. 또한, 단속용접법 적용에 따른 입열량의 감소 정도에 비해 변형량의 감소효과가 더 크다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구의 열탄소성 해석을 통해 얻은 결과들은 단속용접을 적용한 경우에 대한 강도평가를 수행하여 구조 안전성 측면에서 검토하여야 하며, 그 결과를 토대로 최적의 단속용접 Pitch를 결정해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 울산대학교 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부임 (과제번호 = 2010-0513).

참 고 문 헌

- Masubuchi K. (1980). Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford.
- 김상일 (2003). "필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델 개발", 대한조선학회논문집, 제40권 제2호, pp 49-56.
- 신대회, 신상범, 이주성 (2007). "유한요소해석을 이용한 채널 I 형 잠호 맞대기 용접부의 변형 및 잔류 응력 예측에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제44권 제6호, pp 598-604.
- 이주성 (2004). "평블록의 용접변형제어에 관한 연구", 한국해양 공학회지, 제18권 제1호, pp 35-40.
- 이주성, 김철호 (2006). "장력법을 적용한 선체 박판블록의 변형 감소방안에 관한 실험연구", 한국해양공학회지, 제20권 제3호, pp 103-108.
- 장창두, 서승일 (1998). "열탄소성해석에 의한 잔류 응력 계산" 대한조선학회논문집, 제6권 제4호, pp 49-56.
- 한성우 (2009). 보강재 형태에 따른 박판 패널블록의 열변형 특성연구, 울산대학교 공학석사 학위 논문.

2011년 10월 25일 원고 접수

2011년 11월 30일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정