

필릿과 맞대기 용접부 간의 간격 및 구속도에 따른 잔류응력 재분포 특성에 관한 연구

진형국^{*,†} · 이동주^{*} · 신상범^{*}

^{*}현대중공업 산업기술연구소

Effect of Distance and Restraint Degree between Fillet and Butt Weldment on Residual Stress Redistribution at each Weldment

Hyung-Kook Jin^{*,†}, Dong-Ju Lee and Sang-Beom Shin

^{*}Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries CO., Ltd, Ulsan 682-792, Korea

[†]Corresponding author : hkjin@hhi.co.kr

(Received December 15, 2009 ; Revised February 11, 2010 ; Accepted March 18, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to identify the principal factor controlling transverse residual stress at the weldment for joining unit hull blocks. In order to do it, the comprehensive FE analyses were carried out to evaluate the effect of distance between fillet and butt weldments, stiffener span and in-plane restraint degree on the amount and distribution of transverse residual stress in way of the weldments between unit hull blocks. In accordance with FEA results, principal factor controlling the amount of transverse residual stress at the weldments was identified as in-plane restraint degree of butt weldment for unit blocks. The effect of other variables on the transverse residual stress was very small relatively.

Key Words : Residual stress, Fillet and butt weld, Finite element analysis, In-plane restraint degree

1. 서 론

선박, 해양구조물 등의 철 구조물은 여러 가지 용접 이음형식으로 구성되어 있으며, 이와 같은 용접이음부재의 피로강도는 이음부의 형태, 잔류응력 및 용접결함 등에 영향을 받는다. 용접은 이음구조가 간단하고 작업이 용이한 반면, 국부적으로 집중된 열은 구조 부재에 급속한 열팽창 및 수축을 유발하고, 이러한 과도 변형이 부재의 내·외적 구속인자들에 의하여 제어됨으로써 용접 종료 후에는 부재에 응력이 잔류하게 되고, 동시에 변형이 발생한다¹⁾. 따라서 용접 구조물의 건전성을 확보하기 위해서는 용접부의 잔류응력 및 변형 거동 특성에 대한 이해가 매우 중요하다. 일반적으로 패널 구조로 이루어진 선체는 주판의 판계 용접 및 중 및 횡 보강재의 용접을 통하여 제작된 단위 블록의 조립 및

탑재 과정을 거쳐 제작된다. 이때, 블록간 용접 시 용접부의 특성 즉, 야금학적, 기하학적 불연속성 그리고, 잔류응력의 영향 등을 고려하여 탑재 용접부와 단위 블록의 용접부간에는 일정 간격 이상을 유지하도록 규정하고 있으며, 일반적으로 탑재 용접부와 보강재 간의 용접부 간격을 최소 75mm 이상 유지하고 있다. 그러나 블록간 용접부와 보강재 간의 간격이 증가함에 따라 블록간 용접부에 발생하는 변형량은 간격에 비례하여 증가하게 된다. 따라서, 블록간 용접 시 용접부간의 단차를 제어하기 위해 Fig. 1과 같은 교정 작업이 선행되어 수행되고 있으며, 이를 위한 교정 작업은 생산성 향상에 걸림돌로써 작용하고 있다²⁾. 본 논문에서는 블록간 FCA (flux cored arc, 이하 FCA) 용접 시 맞대기 용접부와 보강재의 필릿 용접부간의 적정 간격을 선정하기 위한 연구의 일환으로써 두 용접부간의 간격, 보강재 간격 및 면내구속도에 따른 잔류응력의 거동 특

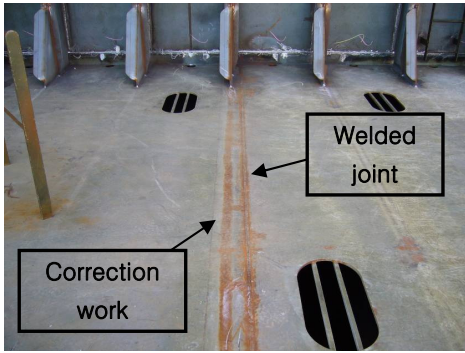


Fig. 1 Welded joint with correction work

성을 유한요소해석을 이용하여 평가하고자 하였다.

2. 해석 모델 및 방법

블록간 용접시 보강재의 필릿 용접부와 블록간 맞대기 용접부에서 잔류응력 거동 특성을 평가하기 위하여 선정한 해석 모델의 형상은 Fig. 2와 같으며, 유한요소 해석 모델은 Fig. 3과 같다. 본 논문에서 선정한 해석 변수는 Table 1과 같이 두 용접부 사이의 간격(S), 보강재간 간격(L) 그리고 면내구속도(K_0)이며, 해석시 사용한 강재와 용접재의 기계적 물성과 용접 조건은 Table 2~3과 같다. Fig. 3은 보강재의 필릿 용접과 블록간 맞대기 용접 시 유한요소해석을 이용한 용접부의 온도 분포와 잔류응력 거동 평가를 위한 요소망을 도시한 것이다. 유한요소해석을 위한 요소망은 해석 모델에서의 기하학적 대칭성을 고려하여 4절점 평면 요소를 이용하여 구성하였다.

각 용접부의 온도 분포를 위한 열전달 해석 시 용접 아크의 이동 속도가 일정하고 용접선의 길이 방향으로 열 손실이 없는 준 정상상태 조건을 이용하여 3차원 열전달 문제를 2차원 문제로 가정하고, 대한용접접합학회의 강도위원회에서 제안한 아크 용접부의 온도 분포를 위한 해석 규약에 따라 수행하였다³⁾. 해석 모델에 대한 요소망은 각 용접 패스의 입열에 해당하는 용접부 형상

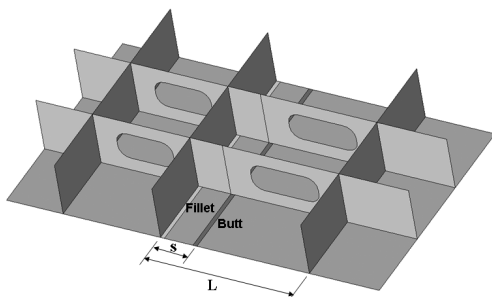


Fig. 2 Schematic configuration of FE analysis model

Table 1 Variables used for FEA

Distance (S, mm)	Span of stiffener (L, mm)	K_0 (MPa/mm)
25, 50, 75	750, 850, 900	50, 125, 200

Table 2 Chemical compositions(wt%) and mechanical properties of mild steel

C	Si	Mn	P	S
Max. 0.23	0.50	Min. 2.5 x C	0.035	0.035
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)
Min. 235		Min. 400		Min. 22

Table 3 Welding conditions

Weldment ID	Parameters			Remark
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	
1	280	30	380	Fillet
2	260	28	180	Butt
3-4	300	32	190	

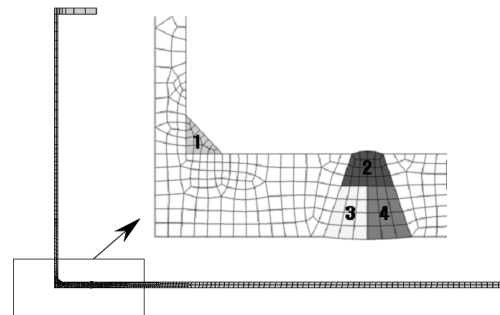


Fig. 3 Mesh design and welding sequences used for FEA

을 토대로 생성하였으며, 단계적인 적층을 수행하기 위하여 용착금속 내의 모든 요소는 생성 후 최초 해석 모델로부터 제거된 후 각 패스에 해당하는 입열이 가해지는 순간에 순차적으로 재생성되는 방식을 이용하였다. 용접 아크에 의한 열속(heat flux)의 분포는 용접부의 용착금속 내에 균일하게 분포하는 체적열원(uniformly distributed volume heat source)으로 가정하였으며 아크의 효율은 0.7로 가정하였다.

용융지 내에서 최고 온도가 용착금속의 기화온도(약 3000℃)를 초과하지 않도록 하기 위하여 유효 열전달 계수를 도입하였으며, 가열된 용접부의 상 변태(phase transformation)와 상 변화(phase change)는 잠열(latent heat)을 이용하여 고려하였다.

용접 및 냉각 과정 중 주변의 대기로 발생하는 열 손

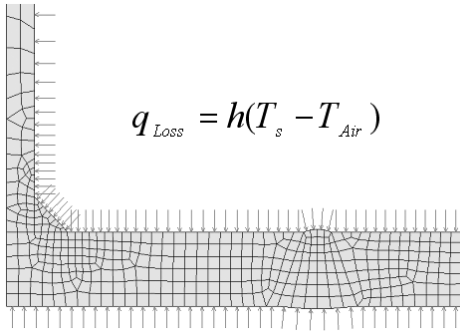


Fig. 4 Convection conditions for temperature distribution analysis

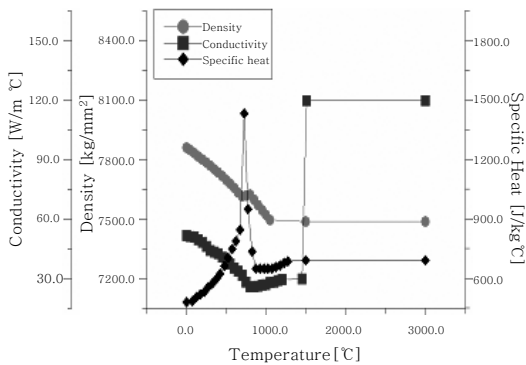


Fig. 5 Thermal properties of weldment⁴⁾

실은 Fig. 4와 같이 대칭축에 위치한 경계면을 제외한 모든 영역에서 상온(20°C)의 공기와 자연 대류에 의한 열손실이 발생하는 것으로 가정하였으며, 용접부 열적 물성은 Fig. 5와 같이 온도에 따른 연강의 열적 특성을 적용하였다^{3,4)}. 용접부의 온도 분포 해석 결과를 이용한 열 탄소성 해석을 이용하여 용접부의 간격, 보강재 간격 및 면내구속도에 따른 잔류응력 거동을 평가하였다.

이때, 블록간 용접부에서의 면내구속도는 용접부에 발생하는 횡 수축에 대한 저항성을 나타내는 지표로써 RRC(Rigid Restraint Cracking) test에 의해 식 (1)과 같이 정의된다.

$$K_o = \frac{E'}{L_R} \tag{1}$$

여기서, K_o 는 면내구속도, E' 는 평면변형률 조건의 탄성계수, L_R 은 블록간 맞대기 용접부와 면내 구속 위치간의 거리이다⁵⁾. 이러한 용접부의 면내구속도를 재현하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 6과 같은 경계 조건을 적용하였다. 즉, 블록간 맞대기 용접부의 다양한 면내구속도를 위해서 Fig. 6과 같이 주판의 끝단에 위치한

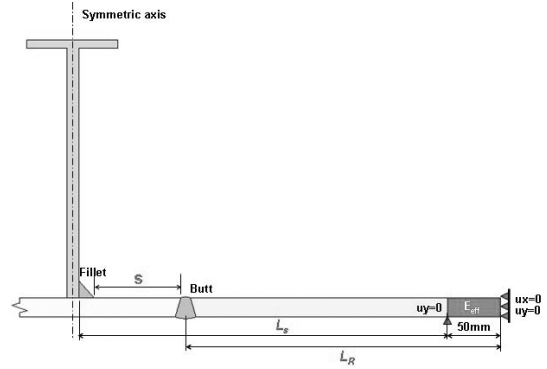


Fig. 6 Schematic diagram of FE analysis model for evaluating residual stress

Table 4 Effective Elastic modulus(E_{eff}) corresponding to in-plane restraint degree(K_o) and stiffener span(L_s)

L_s	K_o (MPa/mm)	E_{eff} (MPa)
750mm	50	3043.5
	125	11290.3
	200	35000.0
850mm	50	3134.3
	125	12650.6
	200	52500.0
900mm	50	3181.8
	125	13461.5
	200	70000.0

요소의 탄성계수를 식(1)을 이용하여 정의하였다. 이때, 블록간 용접부에서 보강재의 간격과 면내구속도에 따른 유효탄성계수(E_{eff})는 Table 4와 같으며, 면내구속도가 50, 125, 200MPa/mm로 증가할수록 유효탄성계수도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

열 탄소성 해석 시 모재 및 용접부의 온도가 용점(1450°C)이상인 경우 용접부에서 발생하는 소성변형률을 리셋팅(resetting)하였으며, 모재 및 용접부의 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 kinematics strain hardening continuum로 가정하였다. 그리고 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 적용하였다.

3. 온도 및 잔류응력 해석 결과

3.1 온도 해석

용접부 단면 2차원 해석 모델을 이용하여 필릿 용접부와 맞대기 용접부 사이의 간격에 따른 온도 분포 해

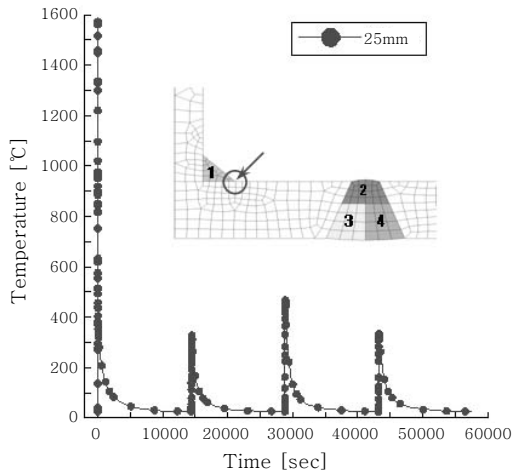


Fig. 7 Temperature histories at fillet weld toe

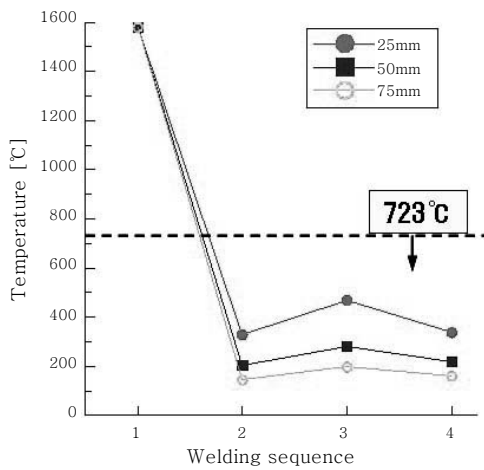


Fig. 8 Max. temperature at fillet weld toe with distance between both weldments

석을 수행하였다. Fig. 7은 용접부 간격 25mm, 보강재 간격 850mm의 경우, 필릿 용접부 토우(toe)에서의 온도이력을 나타낸 것이다. Fig. 7과 같이 보강재 용접부의 토우에서 보강재의 용접시 발생하는 최대 온도는 용접을 약간 상회하는 수준이며, Table 3의 용접 조건하에서 블록간 용접시 필릿 용접부의 토우에서 발생하는 최대 온도는 500°C 미만으로, A₁ 온도인 723°C를 초과하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 보강재 간격 850mm의 경우, 용접부 간격 변화에 따른 필릿 용접부의 토우 위치에서 용접 패스별 최대 온도를 도시한 것이다. Fig. 8과 같이 용접부의 간격이 증가함에 따라 각 용접 패스에서 용접부 토우에 발생하는 최대 온도 수준이 감소함을 알 수 있다.

이상의 온도분포 해석 결과로부터 용접부의 간격이 25mm 수준으로 감소하는 경우 이전 용접부의 야금학

적 특성의 변화에 대한 가능성이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 용접부의 간격이 감소함에 따라 보강재 용접부에서의 온도가 증가하기 때문에 잔류응력이 재분포될 가능성은 배제할 수 없다. 이에 본 논문에서는 용접부의 간격에 따른 최대 온도의 변화가 용접부의 잔류응력 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용접부의 구속도 변화에 따른 변수별 해석을 수행하였다.

3.2 잔류응력 해석

3.2.1 용접패스에 따른 잔류응력 분포

용접패스에 따른 잔류응력 분포 형태를 파악하기 위하여 용접부 간격 25mm, 보강재 간격 850mm, 면내 구속도 125MPa/mm인 경우에 대하여 잔류응력 해석을 수행하였다. Fig. 9에 필릿 용접부 토우에서 수직인 위치에서의 용접패스에 따라 변화하는 잔류응력 분포 형태를 나타내었다. 첫 번째 용접인 필릿 용접 후, 일반적인 용접부의 잔류응력 분포 형태를 나타내지만 Fig. 10의 (1)과 같은 변형으로 인하여 상부에 압축이 발생하면서 상부 근처의 잔류응력 수준은 약간 감소한다. 블록간 맞대기 용접인 두 번째 용접 후, Fig. 10의 (2)와 같이 +y 방향인 부정정보 형태의 변형으로 인하여 상부에 인장이 발생하고 잔류응력 수준은 증가하게 된다. 세 번째 용접 후, 맞대기 용접부 우측에서 +y 방향으로 좀 더 많은 변형이 발생하지만 맞대기 용접부가 힌지로 작용하여 필릿 용접부 토우의 잔류응력 수준에는 큰 영향을 끼치지 못한다. 마지막 용접패스인 네 번째 용접 후, 용접변형 방향이 -y 방향으로 변화되면서 이전과는 반대로 상부에는 압축, 하부에는 인장이 발생하여 상부의 잔류응력 수준은 감소하고 하부의 잔류응력 수준은 증가하여 최종적으로 Fig. 9의 ④와 같

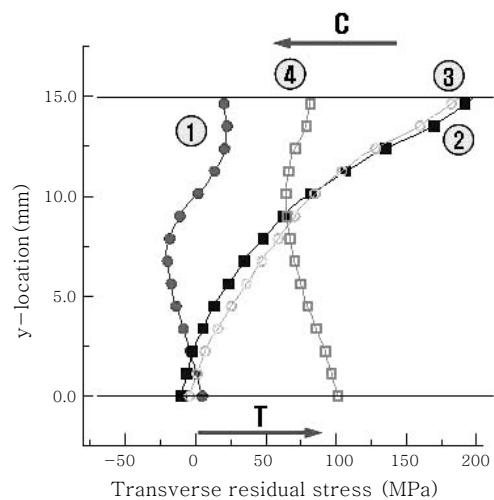


Fig. 9 Distribution of transverse residual stress according to welding sequences

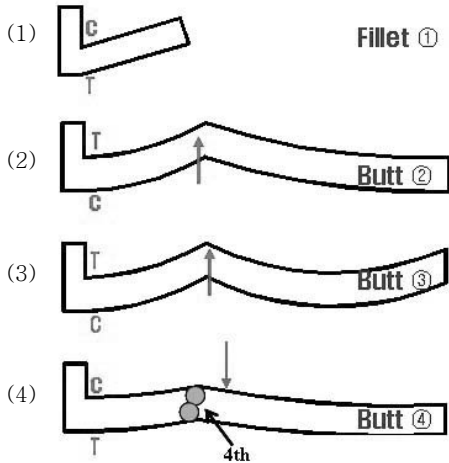


Fig. 10 Schematic of deformation shapes according to welding sequences

은 잔류응력 분포를 나타내게 된다.

3.2.2 용접부 간격에 따른 잔류응력 분포

맞대기 용접부의 면내구속도가 125MPa/mm인 경우, 용접부 간격에 따른 잔류응력 분포 형태를 파악하기 위해 보강재 간격 850mm 모델에 대해 용접부 간격 별로 잔류응력 해석을 수행하였다. Fig. 11은 전술한 해석 조건하에서 필릿 용접부와 맞대기 용접부의 토우에서 두께 방향으로 수직한 위치에 작용하는 횡방향 잔류응력의 평균을 나타내며, Fig. 12는 동일 위치에서의 최대 잔류응력 수준을 나타낸 것이다. Fig. 11과 같이 필릿 및 맞대기 용접부 토우에서의 평균 잔류응력 수준은 용접부 간격 변화와 무관하게 거의 동일하였고, 최대 잔류응력 수준은 Fig. 12와 같이 용접부 간격이 증가함에 따라 약간 증가하지만, 그 차이는 미미하였다.

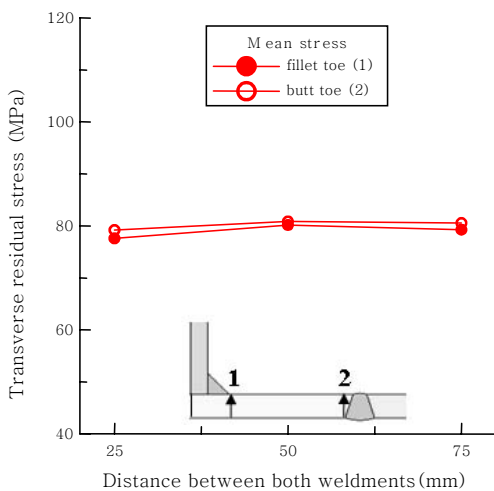


Fig. 11 Variation of the mean transverse residual stress with distance between both weldments

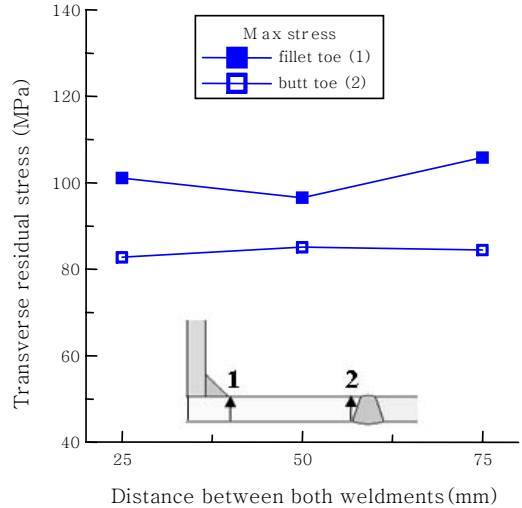


Fig. 12 Variation of the maximum transverse residual stress with distance between both weldments

이는 두 용접부 간의 간격 변화에 따라 후행 용접 열에 의한 잔류응력의 재 분포 효과 정도가 다르기 때문으로 판단된다.

3.2.3 보강재 간격에 따른 잔류응력 분포

보강재의 필릿 용접부와 블록간 맞대기 용접부의 간격이 50mm, 면내구속도가 200MPa/mm인 경우, 보강재 간의 간격이 750mm, 850mm, 900mm로 변화할 때 각 용접부의 토우에서 두께 방향으로의 위치에서 횡 방향 잔류응력의 평균 및 최대 잔류응력수준을 Fig. 13~14에 나타내었다.

Fig. 13~14와 같이 각 위치에서 잔류응력의 전반적인 분포는 보강재간의 간격 변화에 따라 잔류 응력의

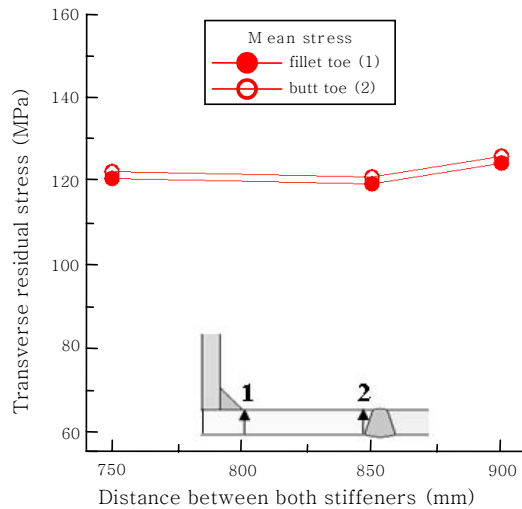


Fig. 13 Variation of the mean transverse residual stress with distance between both stiffeners

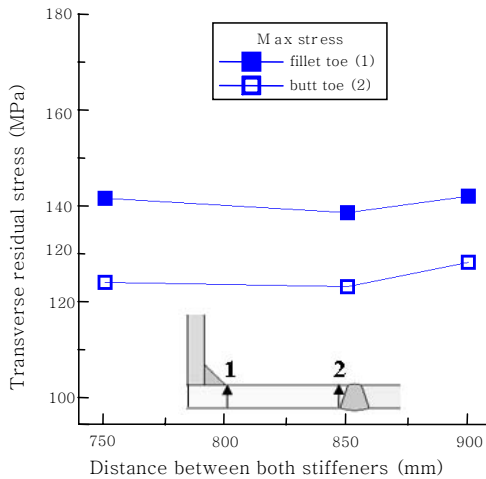


Fig. 14 Variation of the maximum transverse residual stress with distance between both stiffeners

수준이 미미하게 증가하고 있으며, 이는 맞대기 용접시 보강재간의 간격이 증가함에 따라 용접부에 발생하는 변형량이 증가하였기 때문으로 판단된다.

3.2.4 면내구속도에 따른 잔류응력 분포

면내구속도 변화가 잔류응력 분포에 끼치는 영향을 평가하기 위하여 보강재의 간격(Ls)이 850mm, 보강재 필릿 용접부와 블록간 맞대기 용접부의 간격이 25mm인 모델에 대해 면내구속도의 변화에 따른 잔류응력 거동 특성을 평가하고 그 결과를 Fig. 15에 도시하였다. 면내구속도가 50, 125, 200 MPa/mm로 증

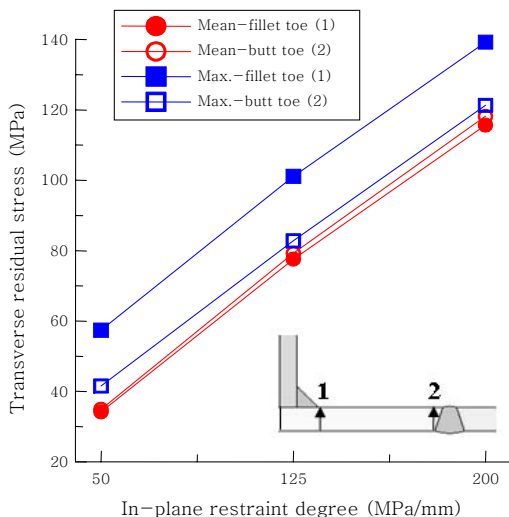


Fig. 15 Variation of the mean and maximum transverse residual stress with in-plane restraint degree

가함에 따라 각 용접부의 토우에서 평균 및 최대 잔류응력은 거의 선형적으로 비례하여 증가한다. 이상의 결과로부터 블록간 용접시 용접부의 역학 특성을 확보하기 위해서는 잔류응력 재분포에 큰 영향을 끼치는 후행 용접부의 면내구속도 수준에 대한 평가가 선행되어야 한다.

4. 결 론

블록간 용접시, 야금학적 특성 및 잔류응력 관점에서 블록간 용접부와 보강재 용접부의 적정 간격을 선정하기 위한 주인자를 제안하기 위하여 두 용접부의 간격, 보강재의 간격 및 면내구속도에 따른 용접부의 잔류응력 거동 특성을 유한요소해석을 이용하여 평가한 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 블록간 용접시 보강재의 FCA 필릿 용접부와 FCA 맞대기 용접부간의 간격과 보강재 간격이 두 용접부의 잔류응력에 미치는 영향은 매우 미미하다.
- 2) 블록간 용접을 위한 FCA 맞대기 용접시 용접부의 구속도가 증가함에 따라 두 용접부의 잔류응력 수준은 용접부의 면내구속도의 수준에 비례하여 증가한다.
- 3) 보강재의 FCA 필릿 용접부와 FCA 맞대기 용접부의 간격이 25mm인 경우에도 보강재 필릿 용접부 토우에서의 온도는 이 영역에서 용접부의 야금학적 물성 변화를 야기할 만큼 높지 않다.

참 고 문 헌

1. S.W.Kang, Y.W.Kim, W.S.Kim and D.H.Kim : Re-distribution of welding residual stress due to tensile pre-load and its effect on fatigue strength in padding plate weldment, Journal of the society of naval architects of Korea, **38-4**, 75-82 (2001), (in Korean)
2. S.B. Shin, J.G. Yoon : Analysis of angular distortion of the fillet weldment caused by FCAW at the stiffened panel structure, Proceedings of the 1998 Autumn Annual Meeting of KWJS, **2**, 274-277 (in Korean)
3. Commission of design analyses and structural strength of welded structures : Standardization for temperature distribution prediction of the arc weld using FEA, Journal of KWS, **23-6**, 497-503 (2008), (in Korean)
4. D.J. Lee, S.B. Shin, K.K. Kim : A study on the distortion of the I butt SA weldment, Proceedings of the 2003 Autumn Annual Meeting of KWJS, **41**, 213-215 (in Korean)
5. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon press, 1980, 562-563