

MS Point 저감 용접재에 적용한 냉각시 용접부 열변형을 분석에 관한 연구

하윤석^{*,†} · 남성길^{*} · 박세진^{*} · 권창길^{*}

^{*}삼성중공업재료접합연구센터

A Study on Analyzing Thermal Strain of Weldment during Cooling used at Low MS Point Weld Consumables

Yunsok Ha^{*,†}, Seongkil Nam^{*}, Sejin Park^{*} and Changgil Kwon^{*}

^{*}F1SAMSUNG HEAVY INDUSTRIES, CO., LTD., Geoje 656-710, Korea

[†]Corresponding author : yunsok.ha@samsung.com

(Received June 28, 2013 ; Revised November 11, 2013 ; Accepted December 19, 2013)

Abstract

This study targets to make clear the connection between MS (Martensite start) point and welding shrinkage. We approved that a Martensite-transformed weldment may not yield state under low MS point, but also admitted the limitation of numerical calculation by inherent strain approach or thermal strain approach. Therefore, new thermal strain formulae during cooling stages were made. As a thermal strain is obtained by integrating thermal extension coefficient, a constant of integration should be decided. In our suggested formulae, the origin was based on totally remained austenite, and added strain from volume changes in Martensite transformation was based on totally transformed ferrite.

Through the suggested methodology, It is verified that an MS point under a critical temperature can let weld shrinkage relax and the critical value can be obtained. For supporting this process, 15 weld-consumables were made, were tested by fillet type and were measured. As a result, a positive correlation between MS point and level of weld-distortion was obtained, but it was rather weak.

Key Words : Martensite, Weld consumable, Transformation, Welding distortion, Fillet

1. 서 론

선박 건조시 선급강재에 의거한 일반 강재 및 그 접합에 필요한 용접재로 이루어진 용접부에 대하여, 그 비드는 모두 외부에 노출되어 고온에서 저온으로 식는 과정은 비록 공냉이지만 큰 분류상으로는 급랭에 해당한다. 이 경우 입열량에 따른 냉각속도의 변화에 따라 용접금속의 미세조직은 변경될 수 있고, 이에 용접변형의 발생량도 다르게 나타날 수 있다.

최근 용접재의 마르텐사이트 변태시작온도(MS)¹⁾를 재료적으로 낮춤으로써, 용접부의 인장잔류응력을 완화시킨 연구가 소개²⁾된 바 있다. 응력완화의 주된 원인은

용접부 냉각시의 인장항복상태를 가능한 상온가까이 식을 때까지 유지시키다가, 마르텐사이트 상변태의 부피팽창효과에 의한 응력 이완 효과를 상온에서 거두려고 하는 것이 핵심이다. 응력 완화 과정의 중간역할로서, BCT 상의 부피팽창효과가 상변태 시작온도 직후에 이루어진다는 점이 활용되고 있는데, 본 연구는 용접변형을 낮추는 측면에서도 이 효과가 긍정적인 점에 주목하였다.

그런데 MS를 낮추려고 하는 과정은 첫째, 용접성의 다른 성질의 보존과 관련하여 이 온도를 과격적으로 낮추기가 어렵다. 둘째, 어느 정도 낮추었다고 하더라도 일반적으로는 결국 상온에서 마르텐사이트 종료온도를 맞게 된다. 현재 주로 사용되는 재료를 대상으로 Ms를

계산식 (1))하면 약 400도 중반에 해당하는데, 이 시점에서 99% 변태된 종료시점은 약 200도가 차이가 난다. 200도 이하로 MS를 만들지 못하면 최종 상온에서는 결국 마르텐사이트의 분율은 큰 차이가 없다. 따라서 용접재료의 마르텐사이트 시작 온도를 낮추었다는 외양만으로는 용접변형과의 연결고리를 쉽게 짐작할 수는 없다.

$$\begin{aligned}
 MS &= 719 - 795C - 23.7Cr - 26.5Ni - 13.25Mn \\
 &\quad - 13.1Cu - 23.7Mo - 11.85Nb - 45.75V \\
 &\quad - 35.55Si - 16W + 39.2Al + 19.31Co \\
 MF &= MS - 215 \text{ (}^\circ\text{C)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

본 연구는 마르텐사이트 시작온도가 변형과의 연관성을 갖는 것과 그 방향성에 대해서 고찰해내는 것을 목표로 한다. 이 과정에서 용접부의 열이력을 분석할 때, 상변태 현상을 분석과정에 도입하는 것이 어떤 결과를 제시하는 지 관찰하였다.

2. 용접부의 응력상태

Fig. 1을 통하여, 3봉 모델³⁾을 통한 전통적인 용접부의 열이력 사이클을 관찰할 수 있다. 여기서는 냉각 과정을 중심으로 고찰할 것이다. Fig. 1에서 실선은 재료의 항복강도를 나타내며, 내재된 응력인 점선이 이 선을 넘어서지 못하는 것은 재료가 수용할 수 있는 응력의 한계는 항복응력이라는 가정이 내포되어 있기 때문이다. 가열이나 냉각과정 어디에서도 일단 온도변화가 시작되면 강의 특성인 큰 탄성계수에 의하여 재료는 쉽게 항복된다. 즉 싸이클 전과정의 대부분에서 용접부는 항복상태이고, 냉각과정에서는 인장항복상태이다.

주변이 구속된 용접부나 가열부의 최종상태의 수축변형을 언급할 때, 많은 경우에서 고유변형을 이론을 기술한다. 고유변형을 이론을 이용하여 변형을 기술하는 것이 유리할 때는 재료의 최종상태가 항복이라는 것이 보장될 때이다. 이 경우는 식 (2)⁴⁾와 같이 정리된다. 고유변형률은 항복상태에서는 총변형률에서 탄성변형률

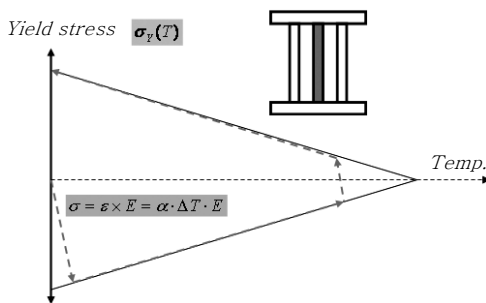


Fig. 1 Thermal cycle at temperature-stress axes based on 3-bar theory

의 차로 정의된다. 이는 응력-변형률 곡선이 Hook의 법칙과 무관하게 움직이는 열변형률에 따라 움직일 때 최종 평형상태에서의 이 곡선의 변형률 축의 절편과 같다. 일반적으로 고유변형률은 최종상태에 대해서만 관심을 갖는데, 그 이유는 이 계산결과가 증가하중법⁵⁾이나 변형률 경계법⁶⁾ 등에 활용되어 대형 구조물의 열변형 해석을 쉽게 할 수 있도록 돕기 때문이다.

$$\epsilon^* = \frac{-\sigma_y + H \cdot (\epsilon^{th} + \epsilon^{ph})}{E + H \cdot \left(\frac{k_1}{k_2} + 1\right)} \left(\frac{k_1}{k_2} + 1\right)
 \tag{2}$$

여기서,

- σ_y : Yield stress of welded region (Pa)
- H : Hardening coefficient of welded region (Pa)
- E : Elastic modulus of welded region (Pa)
- ϵ^{th} : Thermal strain
- ϵ^{ph} : Phase transformation strain
- k_1/k_2 : Ratio of stiffness between welded region and adjacent region

맞대기 시편의 횡방향과 같이 최종상태가 항복이 아닌 용접부의 경우는 열변형률(상변태 변형률 포함)가 고유변형률이 될 수 있는데, 최근에는 구조물 내에서 용접부가 최종 항복상태 여부를 해석자가 미리 모두 확인하는 것이 어렵기 때문에, 변형률 경계법에 고유변형률 대신 열변형률을 사용하여 탄소성 해석을 수행⁷⁾하는 것이 방법도 이루어지고 있다. 다만 이러한 과정으로 열변형을 분석하는 과정도, 최고도달온도를 기준으로 냉각하는 과정에서 상변태를 포함한 최종 열변형률이 냉각 이력 중에서 가장 작은 값이라는 것이 보장되어야만 적용될 수 있다.

일단 본 연구에서 주목한 낮은 마르텐사이트 시작온도가 적용된 용접재는 상온에서 항복상태가 되지 않을 가능성이 크다. Fig. 1과 같이 온도와 응력축으로 열이력 사이클을 표시할 때, 저탄소강의 마르텐사이트 상변태는 온도축을 중심으로 항복응력선의 개형이 대칭이 이루어지지 않는다. 마르텐사이트 변태는 역학적인 면에서 두 가지 의미가 있다. 일단 항복응력이 매우 높아진다. 또한 상의 입자 내에 탄소가 침입하여 기본 부피가 증가하고 이는 일시적으로 용접부의 인장응력을 완화시킨다. 그러나 온도 하강에 따른 응력의 증분이 매우 빠르게 일어나기 때문에 일반적으로는 상온에 이르기 전에 결국 항복응력에 도달하게 된다. Fig. 2에서는 높은 MS로부터 분화된 응력을 나타내는 점선이 결국 강도를 나타내는 실선과 상온에서 만나는 것으로 묘사되어 있다.

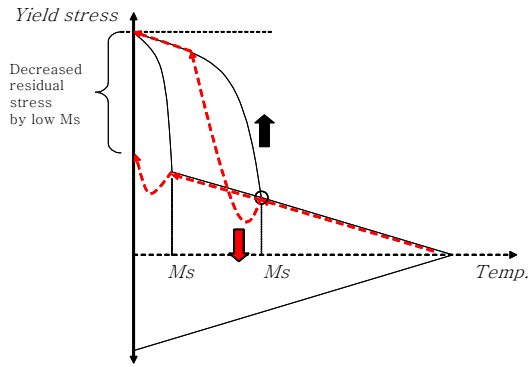


Fig. 2 Thermal cycle of martensite - transformed steel during cooling

그런데 마르텐사이트 변태온도가 매우 낮아지게 되면 상황이 달라진다. 항복강도는 증가하였으나, 상온에 이르는 동안 인장응력의 증분이 항복강도의 상승을 따라 잡지 못하여, 결국 용접부는 항복강도 이하로 잔류응력이 낮아지게 된다. (Fig. 1) 따라서 항복상태를 가정한 고유변형률 (식 (2))⁴로는 현 상황을 분석할 수는 없다.

3. 마르텐사이트 변태가 존재하는 냉각부의 열변형률 분석

2절의 상황을 열변형률로 분석가능한지 확인하기 위하여 마르텐사이트 변태를 포함한 냉각시의 열변형률 분석을 하려고 한다. 용접부의 냉각시 상변태의 부피팽창으로 인하여 항복상태가 다시 탄성구간 내로 들어가는 부분을 확인하기 위하여, 본 연구에서는 열팽창계수를 적분하고 상변태가 없는 경우(오스테나이트 100% 잔류)에 대하여 상온에서 원점이 되도록 적분상수를 조절한 열변형률 곡선을 분석하였다. 이 곡선을 기준으로 다시 페라이트로의 100% 변태를 가정한 선을 도시하면, 열변형률 곡선은 오스테나이트와 페라이트간의 열팽창계수의 차이로 FS (페라이트 변태 시작점)를 기준으로 분기되어 기존 곡선의 상부에 도시된다. 마르텐사이트의 체적팽창률은 페라이트의 BCC 구조를 기준으로 기술되므로, 체적팽창률을 3으로 나누어 선팽창률로 변환한 값을 변태속도지수에 맞추어 기존의 열변형률 곡선에 상변태 변형률을 추가하면 Fig. 3의 A-B-C 곡선(식 (3))을 얻을 수 있다. 식 (3)의 첫 번째 항은 100% 페라이트로의 변태를 가정한 매우 느린 냉각속도 하에서의 계산된 기준선임에 유의한다.

$$\epsilon^{th}(T) = \int_{T_i}^T X_A(T) \cdot \alpha_A + X_F(T) \cdot \alpha_F dT - \frac{\beta_{F \rightarrow M}}{3} \cdot X_M(T_i) \cdot (e^{k_{A \rightarrow M} \cdot \max[(MS-T), 0]} - e^{k_{A \rightarrow M} \cdot MS}) \quad (3)$$

여기서,

T_i : Room Temperature (°C)

$X_{[]}$: Portion of Phase []

A : Austenite

F : Ferrite

M : Martensite

α : Thermal expansion coefficient (1/°C)

β : Volume expansion (1/°C)

k : Transformation velocity factor

이제 Fig. 3을 기준으로 하여, 낮은 MS를 갖는 용접재의 용접부 냉각 이력을 Fig. 4와 같이 도시하였다. 이러한 분석은 실험이나 정성적인 분석으로는 이미 관련 연구결과²⁾가 존재한다. MS가 낮아지고 냉각속도도 빠르다면 열변형률은 Fig. 4의 상온으로 향하는 상태에서, 일반적인 MS 온도(A점)를 계속 지나쳐 기울기가 오스테나이트의 열팽창계수인 선을 따라 계속 내려오게 된다. 만일 Fig. 4의 B점과 같이 열변형률이 상온보다 낮은 점에서 마르텐사이트 상변태로 인한 부피 팽창이 일어난다고 가정해 보자. 아직 상온까지는 200도 이상의 냉각할 수 있는 온도가 남아 있으므로, 저탄소강에서는 잔류 오스테나이트없이 변태가 대부분 완료될 것

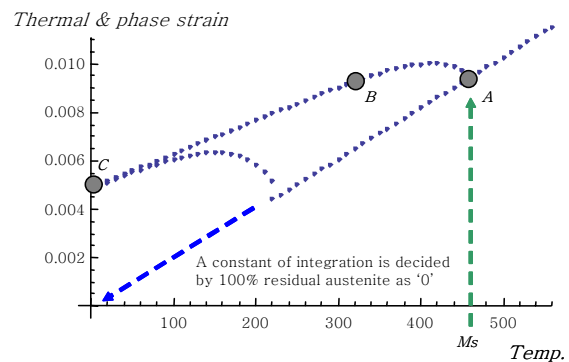


Fig. 3 Thermal strain history of normal MS point during cooling

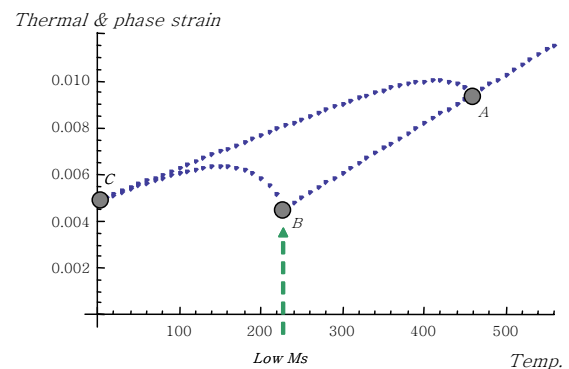


Fig. 4 Thermal strain history of low MS point during cooling

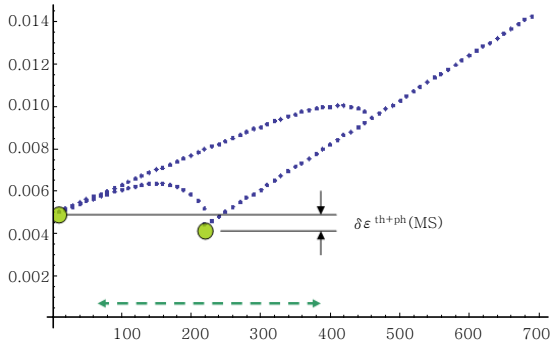


Fig. 5 A shrinkage-releasable region by low MS point

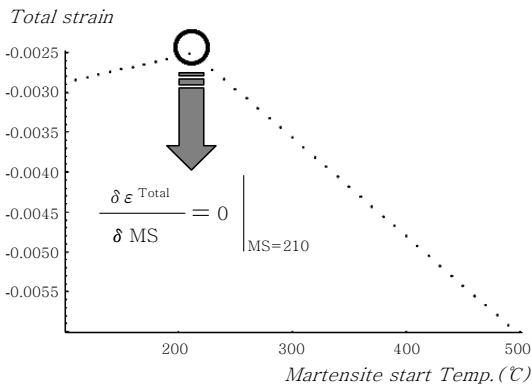


Fig. 6 Optimal MS Point for low weld-distortion by low MS point

이다. 이는 일반적인 MS(점A)에서 변태된 경우의 최종 열변형률과 비슷한 값을 갖는다고 볼 수 있다. 이 경우, 상온에서 변태가 시작되는 순간(점B)의 열변형률에 재차 도달하지 못했다는 것은 용접부가 항복상태가

아니며, 점B-C간의 높이차만큼의 수축변형 이완이 발생하게 된다.

물론 MS가 계속적으로 낮아지는 것이 좋은 것은 아니다. MS는 상온에 가까워 질수록 변태종료온도로 복귀할 여지가 없게 되므로, Fig. 5와 같은 효과는 어딘가에서 최적의 MS를 가질 것이다. 본 연구에서는 식 (3)을 제시하였고, 이에 Fig. 6과 같이 용접수축변형을 줄일 수 있는 최적의 MS를 도출하였으며, 이 결과는 약 210도 수준으로 도출되었다. Fig. 6은 일반적인 용접부의 총변형률이 0.6% 수축이라는 가정 하에 도시되었으나, 주변부의 강성에 따라 이 값에 약간의 차이가 발생하여도, 최적 MS의 값이 바뀌지는 않는다.

그러나 이 수준의 MS는 고가의 텅스텐 등 특수 원소의 함량(식 (1))을 지나치게 많이 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 Cr, Ni 등으로 조절 가능한 수준에서 여러 가지 용접재를 만든 후, 그 결과로서 도출된 MS를 기준으로 하여, 각 시편들의 각변형률을 비교하는 방법으로 실험 및 분석을 전개할 것이다. 물론 이 과정에서 최종 상태의 상이 냉각속도보다는 스테인리스 조성에 의해 결정될 수도 있으므로, 이에 대한 고찰도 함께 진행하였다.

4. 용접변형 실험

낮은 MS를 갖는 용접재를 통한 용접변형실험을 계획함에 있어서, 개별 시편당 주변부 구속이 갖는 영향을 최소화하는 데에는 동일 각장 및 동일 두께에서의 필릿 용접 후 각변형을 관찰하는 것이 가장 좋다. 이에 15개의 용접재 샘플(Table 1)을 제작한 뒤, 조선소 야드 내

Table 1 Chemical compositions & MS points of weld material for experiments

	c	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	Co	Ms
E70-T1	0.040	0.550	1.580	0.020	0.010	0.03	0.020		0.010			644.5
1	0.040	0.640	0.940		2.820	4.07	0.030	0.020	0.030			478.5
2	0.055	0.250	0.240		3.150	12.24	0.019					289.2
3	0.056	0.490	0.910	0.017	0.020	2.11	0.950	0.017		0.011		572.0
4	0.043	0.460	1.310	0.010	2.620	5.58	0.001		0.020			448.4
5	0.049	0.303	0.683	0.007	0.701	2.43	0.017	0.007	0.011	0.004		583.6
6	0.055	0.200	1.150		3.220	11.91	0.019					284.9
7	0.022	0.550	1.510	0.028	3.200	12.24	0.011	0.035				286.0
8	0.040	0.336	0.488	0.045	4.496	10.76	0.437		0.051			281.4
9	0.048	0.536	1.386		2.604	4.16	0.037	0.022	0.035	0.017	0.011	473.9
10	0.098	0.706	1.699		2.954	5.02	0.034	0.023	0.036	0.024	0.012	394.7
11	0.071	0.490	0.420	0.019	0.019	4.57	0.420	0.013				520.4
12	0.050	0.570	0.430	0.027	4.310	11.48	0.480	0.035				254.9
13	0.055	0.240	0.230		2.090	6.05	0.013					464.6
14	0.053	0.240	0.250		4.120	12.13	0.019					267.9
15	0.055	0.500	0.500	0.016	5.510	6.75	0.006		0.020			343.6

자동용접기 용으로 주로 사용되는 일반 FCAW 용접재 (AWS A5.20 E71-T1)를 적용한 경우 발생하는 용접부 각변형량과 비교하였다. 실험은 용접재 샘플당 10개씩 동일한 실험을 수행하였고, 각 시편은 8곳에서 변형을 계측하였다. 계측시 변형된 주판의 양측 중 한 곳을 밀착하여 한쪽에서만 큰 값이 나오도록 계측하여, 계측 오차의 비중이 가능한 줄어들도록 하였다. 또한 초기변형을 계측하여 최종변형량에서 뺀 순 변형량을 기준으로 기록하였다. 변형량은 모두 각변형으로 환산하여 라디안으로 기록하였다. 또한 시편을 제작함에 있어서 종굽힘이 일어나지 않도록 비드의 중앙부에 단면 전체의 무게중심이 오도록 시편의 중앙부 웹 부재의 높이를 설계(Fig. 7)하였다. 초기변형률 최소화되도록 웹과 주판과의 가접은 측면에서 수행(Fig. 7)하였다.

용접 후, 목표각장에 미치지 못했거나, 목표각장을 넘긴 경우, 변형량을 목표각장대로 이뤄진 기준에 맞추기 위하여 상각장 및 하각장이 각변형에 공헌하는 정도를 계산하여야 한다. 이 과정에서 가상온도를 사용하는 변형률 경계법⁶⁾의 굽힘인자 항의 차이(Fig. 8, 식 (4))

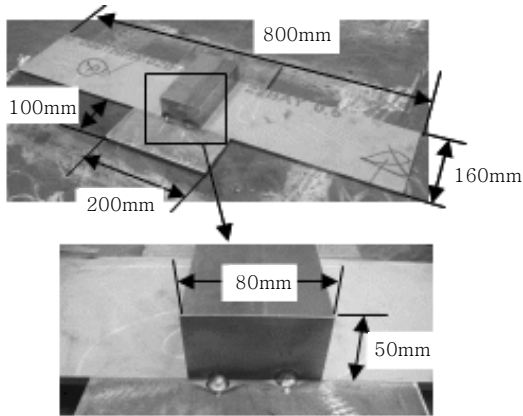


Fig. 7 Specimen for weld-distortion experiments

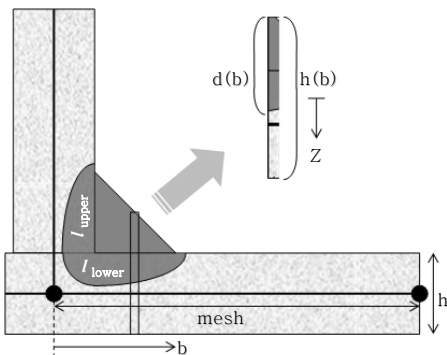


Fig. 8 Index design for angular distortion prediction under leg length variation

만 고려하여 폭방향으로 특정 위치의 단위 폭에 해당하는 영역에서의 각변형 인자를 도출하였다. 이를 동일한 폭의 크기(식 (4)에서는 Mesh) 내에서 적분하면 각변형을 목표각장에 따라 환산할 수 있는 지표가 만들어진다.

$$INDEX_{Strip} = \frac{-2}{1 \cdot h(b)} \int_{-h(b)/2}^{-h(b)/2+d(b)} 2 \cdot \frac{z}{h/2} dz$$

$$= 4 \left(\frac{d(b)}{h(b)} - \frac{d(b)^2}{h(b)^2} \right)$$

$$INDEX_{Mesh} = \frac{2}{MS} \int_0^{Mesh} 4 \left(\frac{d(b)}{h(b)} - \frac{d(b)^2}{h(b)^2} \right) \cdot \frac{h_{plate}}{h(b)} db$$

$$d(b) = f_1(l_{upper}, l_{lower})$$

$$h(b) = f_2(l_{upper}, l_{lower}) \tag{4}$$

$$\therefore INDEX_{Mesh} = f(l_{upper}, l_{lower})$$

지표의 정성적 검증을 위하여 비드 단면의 동일한 면적 하에서 상/하각장의 변화에 따른 지표값을 계산하였다. 이 경우 하각장이 클수록 변형량이 증가한다는 것이 잘 알려져 있다. 본 연구에서도 7mm 각장을 기준으로 하여, 상각장을 15.3% 증가시키고 하각장을 13.3% 감소시켜서 면적을 일치시킨 'WIDE'의 경우와, 그 반대인 'NARROW'에 대하여 각변형의 비는 1 : 1.17 : 0.85로서, 알려진 방향성과 일치하게 도출되었다.

용접변형 실험은 Table 2와 같이, 3.5mm의 목표각장

Table 2 Experimental results of weld distortion

	based on 3.5mm leg length		based on 5.0mm leg length			Average
	6t	8t	6t	8t	10t	
E70-T1						1
1	0.897	0.506	0.832	0.700		0.733
2	0.829	0.673	0.967	0.722		0.798
3	0.927	0.767	0.943	0.737		0.844
4	0.827	0.805	1.073	0.758		0.866
5	0.803	0.669		0.882	0.648	0.751
6	0.963	0.772		0.951	0.692	0.845
7	1.110	0.862		0.973	0.650	0.899
8	1.017	0.845		0.798	0.699	0.840
9	0.940	0.889	0.867	0.815		0.878
10	0.984	0.948	0.875	0.822		0.907
11	0.808	1.002	0.662	0.685		0.790
12	0.767	0.797	0.877	0.682		0.781
13	0.948	0.996	0.850	0.825		0.905
14	0.886	0.789	0.815	0.696		0.797
15	0.789	0.784	0.821	0.648		0.761

에서는 각기 6t 및 8t의 판에 실험을 수행하였고, 5mm의 목표각장에서는 6t, 8t, 10t의 판으로 실험이 수행되었다. 사용된 재료 중 기존 재료의 MS Point는 600도 이상이며, 최저로 조절된 12번 재료의 경우 250도 수준까지 만들어졌다.

5. 실험결과 분석

Table 2를 통하여 기존에 사용중인 E70-T1의 변형량을 기준('1')으로 각 15개의 용접재 샘플들은 상대적으로 얼마만큼의 변형을 나타내었는지를 기록하였다. 저변형을 목적으로 만들어진 용접재 샘플들이므로 1~4 열에 의한 기존재료 대비 변형량은 대부분 '1'보다 작게 도출되었다.

Table 2의 결과를 바탕으로 Table 1의 마르텐사이트 변태 시작온도와 연결하여 Fig. 9와 같이 도시하였다. 이를 통하여 관찰되는 바는 MS를 낮춘 모든 용접재들이 대조군(E70-T1)보다 변형을 낮추는 데에 있어서 좋은 효과를 주곤 있지만, 선형성은 매우 약하다(상관계수 $R^2 \rightarrow 0.15$)는 것이다. 이에 실험결과에 대한 몇 가지 고찰을 정리하였다.

첫째, 제시된 식 (3) 및 3절의 분석방법을 통한 경우, 저탄소강의 조성에서는 260도 이상에서는 논리적으로 변형 저감 효과를 볼 수 없는 것으로 계산된다. 실제로 Fig. 9의 300도 이하에서는 MS와 용접변형이 강한 양의 상관관계를 보인다. 그러나, 이 것만으로는 300도 이상의 MS에서 기존 실험대비 낮은 변형을 보이는 대부분의 다른 용접재의 결과를 설명할 수 없고, 한계 온도 역시 조성이 달라지면 변하게 된다.

다음으로는 다량의 각종 합금원소에 의하여, 최종 상

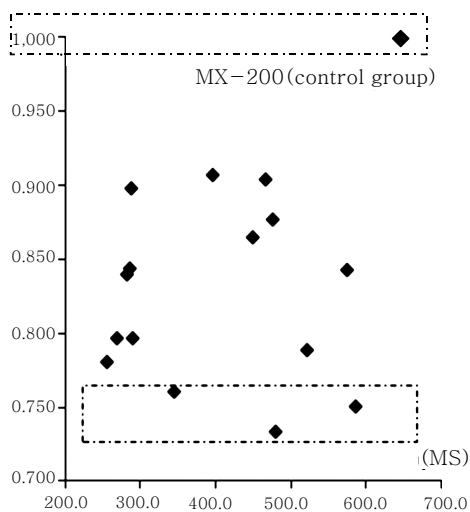


Fig. 9 Relative average distortion value

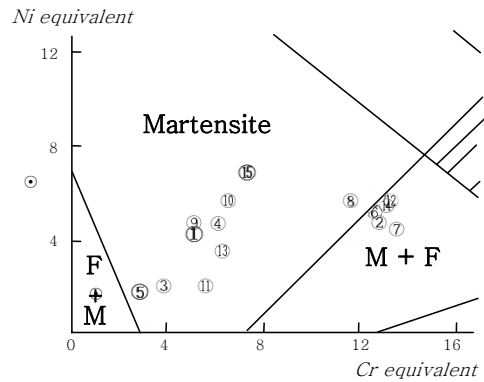


Fig. 10 Low distorted consumables on shaeffler diagram

이 냉각속도로 결정되는 영역을 벗어나서 합금 원소량으로 결정되는 영역(스테인리스)에 들어가면 마르텐사이트 상 자체가 덜 생길 수 있다. Fig. 10에서는 Fig. 9에 제시된 가장 변형 저감 성능이 좋은 3개(1,5,15)의 자료에 대하여, Schaeffler diagram으로 부터 그 영역이 마르텐사이트 영역임을 보이고 있다. 또한 냉각 중 소성에 이르기 전까지의 합금원소의 특성에 의하여 열팽창계수가 작아졌다면 총변형이 줄어들 수 있다. 그 다음으로 변형 저감효과가 좋은 3개(2,12,14)의 용접재는 열팽창계수가 매우 작은 크롬의 함량이 매우 높음을 확인할 수 있다. 그러나 합금원소만으로도 충분한 설명은 되지 않는다.

마지막으로 제시할 수 있는 고찰은 용접부에서 변형을 일으키는 구동 영역이 용접재가 주로 존재하는 비드만은 아니라는 것이다. 본 실험은 선실이나 여객선 등 건조에 사용되는 강재 중에서 상대적으로 얇은 판을 대상으로 하여 이루어졌으므로, 모재의 가열영역이 변형에 끼치는 영향이 일반적인 경우보다 클 수 있다. 이를 식 (4)의 d(b) 함수를 만드는 과정에서, 변형에 영향을 주는 임계온도선을 모재 내에서 없애는 방법으로 하여, 본 실험의 시편 위주로 분석하면 각 영역의 변형에 대한 공헌도는 Table 3(수축은 d/h만을 적분하여 식

Table 3 Contribution of each region about distortion mode

	Contribution	3.5mm leg length		5.0mm leg length		
		6t	8t	6t	8t	10t
Bending	bead	43.2	41.2	57.3	44.8	43.4
	base	56.8	58.8	42.7	55.2	56.6
Shrinkage	bead	32.2	34.4	27.7	34.0	36.0
	base	67.8	65.6	72.3	66.0	64.0

(4)의 INDEX 도출)과 같다. 이 결과에서 굽힘변형의 비드 공헌도가 가장 큰 6t-5mm의 경우도 그 값이 58%에 지나지 않는다. 다만, 이 경우의 변형량과 MS의 상관관계는 0.3 수준으로 그 값은 여전히 낮다고 볼 수 있지만, 이는 전체 실험결과와 MS간의 상관관계 분석결과 대비 2배 가량 증가한 것이다.

6. 결 론

본 연구를 통하여

- 1) 탄성해석에 대하여 고유변형률 측면에서의 정성적 접근이 어려운 경우와, 탄소성 해석에 대하여 열변형률 측면에서의 정성적 접근이 어려운 경우를 서술하였다.
- 2) 마르텐사이트 변태에 의한 상변태 변형률을 용접부 냉각시 열변형률에 부가하여 온도대역별로 분석하였다.
- 3) 이 과정에서 마르텐사이트 변태 시작온도가 낮으면 용접수축이 완결될 수 있는 구간을 찾았고, 그 최적 값에 대한 계산이 수행될 수 있음을 보였다.
- 4) 일반 FCAW 용접재 대비 낮은 마르텐사이트 시작온도를 갖는 15개의 용접재 샘플을 사용하여 필릿 용접에 대한 각변형 도출 실험을 수행하였다.
- 5) MS와 변형과의 관계에 대하여 양의 상관성을 얻었으나 이는 매우 미약하였고, 이에 한계 온도, 스테인리스 조성 및 용접비드의 변형 공헌도를 같이 고찰하였다.

Reference

1. Yunsok Ha and Changdoo Jang : An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, **17-2** (2007), 139-144
2. M. C. Payares-Asprino, H. Katsumoto, and S. Liu : Effect of Martensite Start and Finish Temperature on Residual Stress Development in Structural Steel Welds, *Welding Research*, **87** (2008), 279-289
3. Itsuo O and Takao, A : *Fusion and Solidification/Removal Processing*, (1987)
4. Yunsok Ha, Changdoo Jang, Jongtae Kim, and Hyungsuk Mun : Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on the Inherent Strain, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **8-4** (2007) 56-62
5. Changdoo Jang, Seungil Seo, and Daeun Ko : A Study on the Prediction of Deformation of Plates due to Line Heating Using Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis, *Journal of Ship Research*, **13-1** (1997), 22-27
5. Yunsok Ha, Sihoon Cho, and Taewon Jang : Development of Welding Distortion Analysis Method Using Residual Strain as Boundary Condition, *Materials Science Forum*, **580~582** (2008), 649-654
6. Yunsok Ha : A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis on Large Welded Structures, *Journal of the Korean Welding & Joining Society*, **29-4** (2011), 48-53 (in Korean)