

내열용 오버레이 12%Cr계 스테인레스강의 열피로 특성에 미치는 Cr 함량과 델타-페라이트의 영향

정재영^{1,#}

Effects of Cr Content and Volume Fraction of δ -Ferrite on Thermal Cycling Fatigue Properties of Overlay Welded Heat-Resistant 12%Cr Stainless Steels

J. Y. Jung

(Received September 29, 2017 / Revised November 16, 2017 / Accepted November 22, 2017)

Abstract

In this study, submerged arc cladded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steels containing various Cr contents between 11.2 wt.% and 16.7 wt.% were prepared with fixed C content at about 0.14 wt.%. Using these alloys, changes in microstructure, tensile property, and thermal fatigue property were investigated. Phase fraction of delta-ferrite was increased gradually with increasing Cr content. However, tensile strength, hardness, and thermal fatigue resistance appeared to be decreased. When the microstructure of delta-ferrite was observed, it was revealed that the mesh structure retained up to about 15% Cr content. Although thermal fatigue resistance was almost the same for Cr contents between 11.0 and 14.5 wt.%, it was significantly decreased at higher Cr contents. This was evident from mean value of crack lengths of 10 largest ones. Evaluation of thermal fatigue resistance on alloys with various Cr contents revealed the following important results. First, the reproducibility of ranking test was excellent regardless of the number of cycles. Second, thermal fatigue resistance was increased in proportion to true tensile fracture strength values of overlay materials. Finally, the number of thermal fatigue cracks per unit length was increased with increasing true tensile fracture strength.

Key Words : Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C Stainless Steels, Thermal Fatigue Resistance, Thermal Fatigue Crack Depth, Effect of Delta Ferrite, Martensite Stainless steels

1. 서론

고강도 마르텐사이트계 12%Cr 스테인레스강은 전기 발전소와 화학 및 석유산업설비 그리고 원자력 발전 설비에 이르기까지 널리 이용되고 있다[1~3]. 마르텐사이트계 12%Cr강은 void swelling이나 헬륨취성[4]에 대한 저항성이 우수하고 액체금속 고속증식로 및 용합로에 사용되는 오스테나이트계 스테인레

스강의 대체재로도 각광받고 있다. 일부 마르텐사이트계 12%Cr강의 크립강도는 600°C 온도까지는 오스테나이트계 스테인레스강보다 더 우수하다고 알려져 있어 경제적인 강점에서 적용성이 증가되고 있다[5].

일반 산업용 구조재료는 정도에는 차이가 있지만, 다양한 마모 환경에 노출되어 재료의 수명을 감소시키게 된다. 특히, 마모 환경에 의해 재료의 수명이

1. 경북대학교 자동차부품연구소

Corresponding Author : Automobile Parts & Materials Research Center, Kyungpook National University, E-mail: jaeyjung7@gmail.com

결정되는 경우, 빈번한 부품의 교체로 인한 재료비 증가와 조업 시간의 손실 등과 같은 어려움에 직면하게 된다. 이러한 문제점은 사용부품의 주어진 마모 환경에 적합한 특성(내마모성, 내산화성, 내열성 등)을 갖는 용접재를 모재 표면에 균일하게 용착시키는 육성 용접법을 이용하는 오버레이 기술에 의해 경제성과 성능을 바로 극복할 수 있다[6~8]. 오버레이의 목적은 주어진 마모 환경에 우수 저항성을 갖는 재료를 모재 위에 적층시켜 금속부품의 수명을 연장시키는 것이다. 오버레이 기술의 장점은 값싼 모재를 사용할 수 있어 대체재의 양을 줄일 수 있고, 부품의 수명을 향상시켜 잦은 교체로 인한 비가동 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

대표적인 적용 가능한 산업설비 부품으로 열간 압연재 이송롤과 연주가이드롤이다. 이송롤은 열연 후 판과의 연속적인 접촉으로 높은 하중과 고온에 노출되어 주로 산화와 활주(sliding) 마모에 의해 손상받게 된다. 이송롤의 손상은 열연판 표면에 흠을 발생시켜 제품의 형상과 질에 악영향을 끼친다. 그러므로, 내산화성 및 부식 저항성이 높은 동시에 고강도인 12% Cr계 내열합금 스테인레스강이 열간 압연재 이송롤 재질로 적합할 것이다.

고온의 주편을 안내하고 지지해 주는 연속주조용 가이드 롤은 고온 산화 및 부식과 열피로 균열발생에 대한 저항성이 우수한 재료를 필요로 한다. 연속주조용 가이드 롤은 일반적으로 냉각수의 설치 제약과 냉각능의 한계때문에 부위에 따라 300-500°C의 고온하에 노출된다[9]. 연주롤의 주요 기능중의 하나는 고체와 액상으로 구성된 주편의 철정압(ferrostatic pressure)으로 인한 벌장력(bulging force)을 제어하여 주편 내부의 균열발생을 억제하는 것이다. 주편 내부의 균열은 연주롤의 국부적인 손상으로 발생하는 굽힘변형에 의해 취약한 고체-액체 계면에서 주로 형성되어 제품의 품질에도 나쁜 영향을 미치게 된다. 일반적으로, 고 Cr계 합금강의 산화 및 부식 저항성 등과 같은 물성이 11-12%Cr을 기준으로 크게 증가하는 경향이 있다[10, 11].

산업설비에 이용되는 내열용 부품들은 고온으로 가열되었다가 다시 저온으로 냉각되는 과정이 반복되는 열피로 사이클을 경험하는 것이 일반적이다. 이러한 반복 열피로는 열피로 균열을 생성시키고 미세조직과 기계적 특성을 열화시킬 수 있다. 또한 열피로는 고온으로 가열과 상온으로 냉각시에 발생하는 압축 및

인장 잔류응력에 의해 미세조직이 보다 쉽게 변화될 수 있는 구동력을 얻을 수 있다. 이들 12%Cr계 합금강의 저주기 고온피로에 의한 변형과 손상기구에 대한 연구도 보고되고 있다[3,12,13]. 그러나 12%Cr강의 반복 열피로에 의한 기계적 특성이나 미세조직 변화에 대한 연구는 고온에서의 유지시간이 열피로 특성에 미치는 영향을 조사한 연구[8]를 제외하고는 거의 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

2. 실험방법

Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C 계 스테인레스강을 일반 탄소강 표면위에 피복하기 위한 오버레이 용접층의 제조조건은 앞서의 연구결과에서 자세히 언급되었다[14~17]. 제조된 오버레이 용접재의 화학성분은 정량적으로 측정되었으며, 3층 오버레이 용접부의 대표적인 화학성분 분석치는 Table 1에 나타내었고 본 실험을 위해서 준비된 합금 중 TF시리즈 합금은 주로 열피로 시험에 사용되었고 MT시리즈 합금은 미세조직과 인장시험에 사용되었다. 또한 MT시리즈 합금중 Cr 함량이 약간 다른 다수 시편이 열피로 시험에 투입되었다.

오버레이 용접부의 미세조직은 주로 Vilellar 용액을 이용하여 관찰되었다. 오버레이 용접 조직에서, 잔류 오스테나이트, 페라이트와 마르텐사이트 조직의 구별은 X-선 회절실험과 주사전자현미경의 BSE (backscattered electron) 모드 관찰을 병행하여 수행하였다. X-선 회절시험은 50kV, 150mA의 조건에서 RIGAKU RINT 1400 회절기를 이용하였고, 주사전자현미경은 JEOL사의 모델 JXA-8600이 사용되었다.

경도는 비커스 경도기로 각 시편마다 5회 이상 실시하여 측정되었다. 그리고 인장시편은 두께 3.0mm, 게이지 길이 20mm의 크기로 가공되었다. 인장시험은 인장방향과 용접비드(bead) 계면이 수직하게 놓이도록 가공한 판상시편을 이용하여 8.33x10⁻⁴/s 속도로 상온, 300, 400, 600°C에서 수행되었다. 또한 인장특성은 각 시편마다 2회씩 실시하여 측정되었다. 모든 기계적 특성평가는 오버레이층 표면을 ~1mm 정도 연마한 후에 3층 오버레이 용접부를 이용하여 측정되었다. 또한 열피로 시험은 선행연구[17]에서와 동일한 시험편과 장치를 이용하여 상온↔700°C의 조건으로 1,000회 반복되었다. 본 열피로 시험에서 온도 편차는 대략 ±30°C이다.

Table 1 The analyzed chemical compositions(wt.%) and Vickers hardness of 3rd layer in the overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steels

	C	Cr	Ni	Mo	Cu	W	Nb	V	Si	Mn	N	S	P	Hv	δ (Cal.)*
TF1	0.12	11.2	1.89	0.85	0.31	0.43	0.23	0.28	0.49	0.79	0.011	0.006	0.018	460.0	0
TF2	0.12	12.0	2.03	1.06	0.40	0.46	0.25	0.29	0.37	0.93	0.013	0.005	0.016	466.0	0.6
TF3	0.16	13.2	1.78	0.93	0.33	0.55	0.23	0.27	0.37	0.88	0.013	0.004	0.012	429.3	11.7
TF4	0.15	15.2	1.88	1.19	0.35	0.53	0.26	0.28	0.41	0.89	0.015	0.006	0.014	379.3	45.9
MT1	0.14	14.6	2.36	1.04	0.50	0.53	0.25	0.31	0.42	0.79	0.030	0.005	0.016	417.4	31.6
MT2	0.15	15.0	1.99	1.04	0.37	0.52	0.22	0.32	0.39	0.74	0.026	0.006	0.018	424.7	38.0
MT3	0.16	16.0	2.44	0.74	0.51	0.72	0.28	0.34	0.46	0.55	0.017	0.006	0.018	382.6	49.3
MT4	0.14	16.7	2.44	0.76	0.48	0.60	0.02	0.35	0.43	0.55	0.017	0.007	0.019	325.9	56.9

* by empirical equation in Fig.6

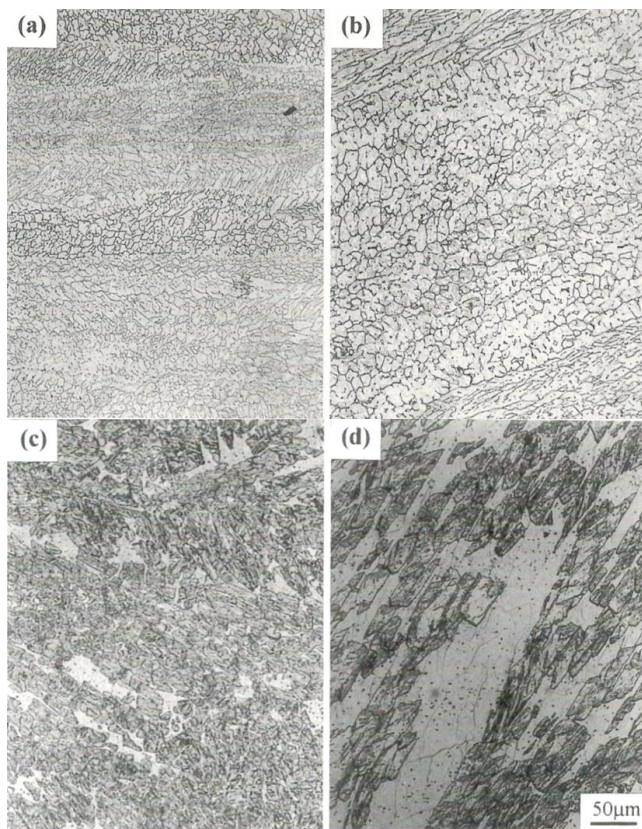


Fig. 1 Optical micrographs showing the variations of as-welded microstructure as a function of Cr content in 3rd layer of overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steels : (a) 14.6% ; (b) 15.0% ; (c) 16.0% ; (d) 16.7%

3. 실험결과

3.1 오버레이층의 용접조직

Fig. 1은 주어진 ~0.14%C 함량에서 Cr 함량을 14.6%,

15.0%, 16.0%, 16.7%로 변화시킨 오버레이 용접된 표층부의 미세조직을 관찰한 광학현미경 조직사진이다. 약 15%Cr 함량까지 그물망 조직의 델타-페라이트가 유지되고 형성됨을 관찰할 수 있다. 그 이상의 Cr 함량에서는 매우 조대하고 들쭉날쭉한 델타-페라이트가 다수 관찰된다. 본 연구에서는 이러한 델타-페라이트 미세조직 변화에 따른 기계적 특성과 열피로 특성을 평가하고자 하였다.

3.2 인장강도 및 경도 변화

Fig. 2는 주어진 ~0.14%C 함량에서 Cr 함량을 11.2%, 14.6%, 16.7%로 변화시킨 오버레이 용접된 표층부의 인장특성을 측정된 결과이다. 항복 및 인장강도는 Cr 함량이 증가함에 따라 계속 감소하는 것으로 측정된다. 그리고 연신률도 Cr 함량이 증가함에 따라 계속 감소하는 것을 보여준다. Fig. 3은 주어진 ~0.14%C 함량에서 Table 1에 나타난 합금의 오버레이 용착금속의 경도를 나타낸 것이다. Cr 함량에 따른 경도는 약 15%Cr 함량까지는 미소하게 감소하다가 그 함량보다 높은 경우에는 크게 감소한다. 이 결과는 일반적인 델타-페라이트 잔류 마르텐사이트 스테인레스강에 비해 매우 높은 Cr 함량까지 그물망 용접조직이 유지되는 사실과 일치한다.

3.3 열피로 균열분포

오버레이 용접된 피복층의 열피로 시험은 선행연구[17]에서 사용된 장치를 이용하여 수행되었다. 열피로 특성은 표면 오버레이층을 상온에서 700°C까지 가열하였다가 다시 상온으로 수냉되는 과정을 1,000회 반복한 시험의 단면상태를 관찰하여 평가하였다.

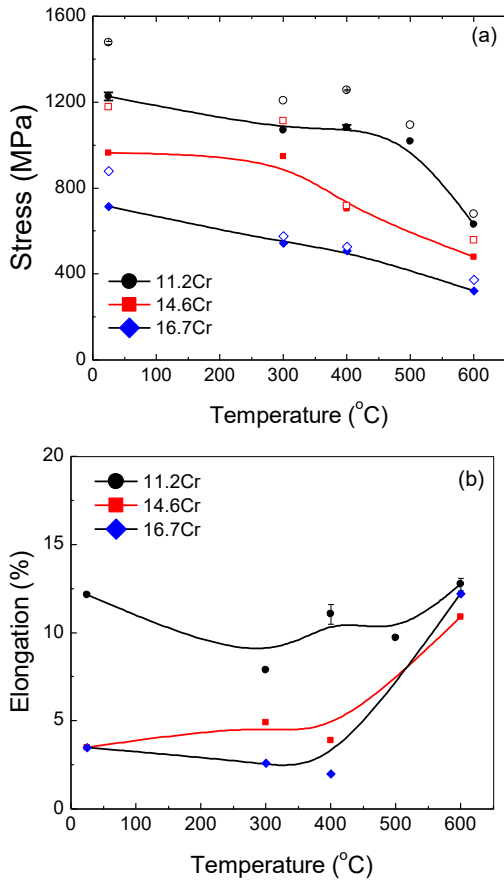


Fig. 2 Variations of the yield and ultimate stress (a) and the elongation (b) of overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steels as a function of test temperature (Closed symbols and open symbols indicate yield stress and ultimate stress, respectively)

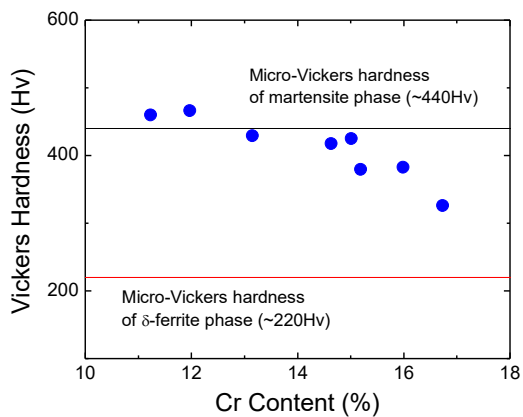


Fig. 3 Variations of the Vickers hardness of Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steel overlays as a function of Cr content

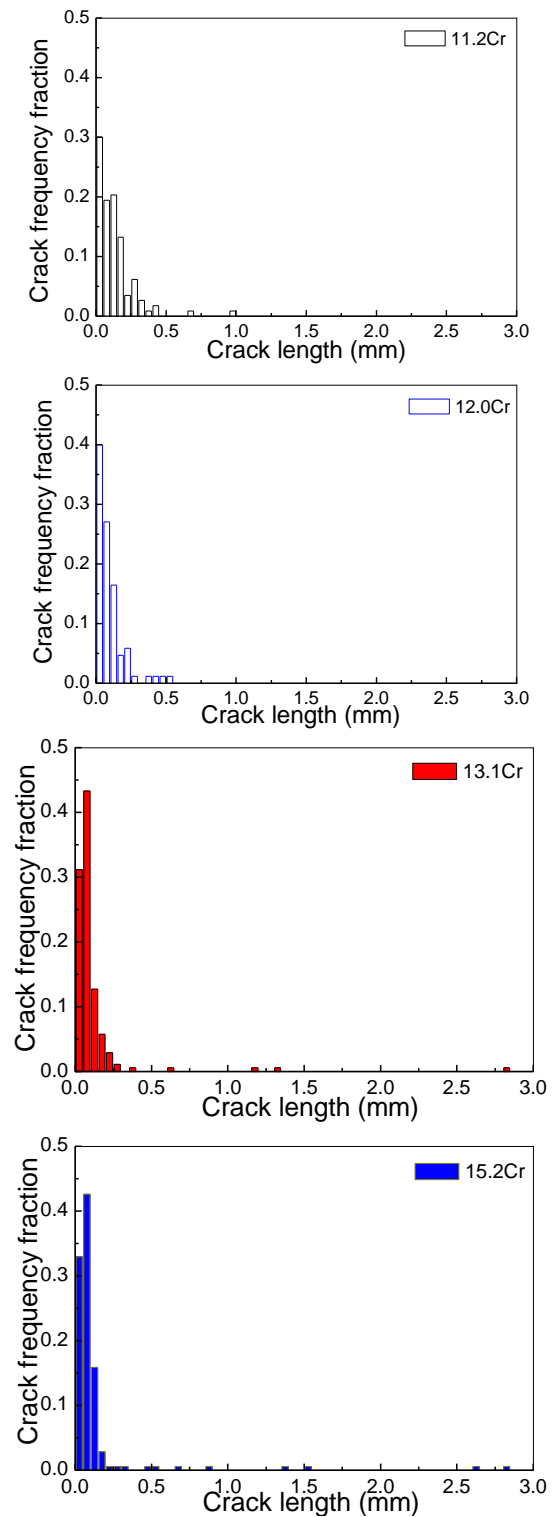


Fig. 4 Diagrams showing the crack depth distribution in the 3rd-layer of weld metal after thermal cycling fatigue test (at RT⇌700°C) with the Cr contents in overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steels

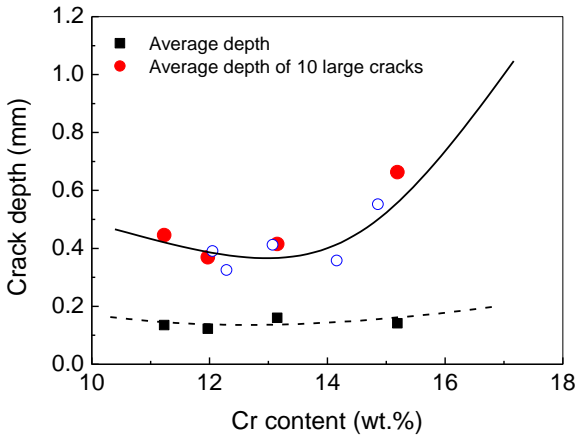


Fig. 5 Variations of average crack depth in the overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNbV-C stainless steels as a function of Cr content (Open circles indicate Specimens deviating from the Cr content given in the TF and MT series specimens)

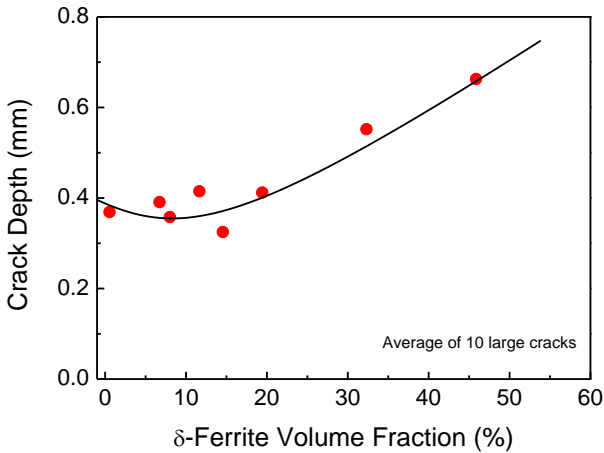


Fig. 6 Variations of average crack depth of 10 large cracks in the overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNbV-C stainless steels as a function of delta-ferrite volume fraction(-ferrite volume percentage (%)) can be calculated by empirical equation, $-180*(\%C-0.1)+15*(\%Cr-12)-10*\%Ni+11*\%Mo-3*\%Cu+8*\%W+22*\%Nb+19*\%V+8*\%Si-1*\%Mn-200*\%N$

Fig. 4 는 Cr 함량에 따라 상온⇌700°C 의 반복 열피로 시험된 시편의 표면균열 분포를 보여준다. Cr 함량의 증가는 뚜렷한 열피로 균열분포에서 차이를 보이지 않다가 약 12.0%Cr 함량의 합금에서 가장 좋은 열피로 특성을 보였고 다시 Cr 함량이 증가하

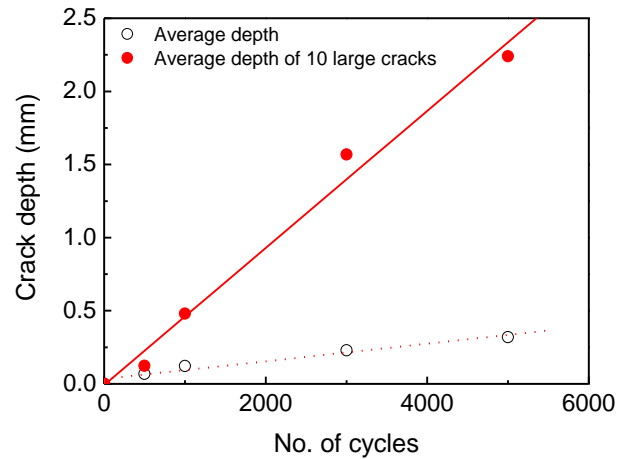


Fig. 7 Variations of average crack depth in the overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNbV-C stainless steel (TF2) as a function of the number of thermal fatigue cycle

면서 다소 큰 열피로 균열이 발생하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 5 는 Cr 함량에 따른 전체 피로균열의 평균과 가장 큰 10 개 균열 평균을 표시한 도표이다. 전체 피로균열의 평균은 대동소이하나 가장 큰 10 개 균열의 평균은 약 12.0-14.5%Cr 에서 최소치를 보이고 이 합금보다 Cr 함량이 낮거나 높으면 균열크기가 증가하는 것으로 관찰되었다.

상기 Cr함량에 따른 열피로 특성의 변화를 보면 명확하게 그 우열을 파악하기 어렵다. 다만 fully 마르텐사이트 조직이나 그물망 구조의 델타-페라이트를 보유한 합금이 가장 높은 열피로 저항성을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 6을 보면 10-15%수준의 잔류 델타-페라이트 함유 구간에서 열피로 저항성이 가장 좋은 것으로 나타난다. 그리고 델타-페라이트가 함유된 마르텐사이트 조직의 합금에서 가장 큰 10개 균열의 평균 크기는 0.325~0.663mm까지 다소 광범위한 열피로 균열크기 분포를 보여준다. 따라서 이를 전체 일원화할 수 있는 지표가 필요할 것으로 파악되었다.

3.4 열사이클수에 따른 균열크기의 변화

오버레이 용접된 피복층의 열피로 시험은 열사이클 수에 따라 열피로 균열 생성 특성이 어떻게 변하는지에 대해서도 수행되었다. 열피로 특성은 표면 오버레이층을 상온에서 700°C 까지 가열하였

다가 다시 상온으로 수냉되는 과정을 500, 1,000, 3,000, 5,000 회 반복한 시편의 단면상태를 관찰하여 평가하였다.

Fig.7은 열 사이클 수에 따른 전체 피로균열의 평균과 가장 큰 10개 균열 평균을 표시한 도표이다. 전체 피로균열의 평균과 가장 큰 10개 균열의 평균이 기울기가 다르고 모두 열사이클 수 증가에 따라 직선적으로 증가한다. 그러므로 열피로 시험은 열사이클 수가 증가하면 측정에서 오는 오차를 줄일 수 있지만, 시험재의 열피로 저항성을 평가하는 것에는 장애로 작용하지 않는 것으로 파악되었다. 따라서 현재 1,000회 정도 열피로 사이클 수에서 충분히 비교평가가 가능한 것으로 판단된다.

4. 고찰

Cr 함량에 따른 열피로 저항성은 주어진 ~0.14%Cr에서 경험식에 의해 예측되는 델타-페라이트 20% 범위내에서는 거의 동등한 열피로 저항성을 보였다. 다시 말해서, 델타-페라이트는 Cr함량 증가로 인해 생기는 현상이므로 내식성이 증가하지만, 강도는 상대적으로 약해진다. 따라서 열피로 저항성이 낮아질 것으로 예측된다. 실제로 약 20% 이상의 델타-페라이트가 예측되는 합금에서는 열피로 저항성이 크게 감소한다는 사실을 알 수 있다.

4.1 오스테나이트 역변태 온도의 영향

먼저 오스테나이트로의 역변태에 의한 우열의 가능성을 조사하기 위하여 합금강의 A_{c1} 온도 변화를 평가하였다. 12%Cr-0.1%Cr 합금의 A_{c1} 온도는 ~810°C이며 소량의 Cr과 C 함량의 변화는 A_{c1} 온도를 거의 변화시키지 않는 것으로 알려져 있다 [18]. 그러나 Ni은 A_{c1} 온도를 wt.%당 ~30°C씩 낮추는 역할을 한다[18]. 이 결과는 DSC를 이용한 A_{c1} 온도 측정 결과와도 잘 일치한다[19]. 그러나 경험식에 따른 계산결과의 A_{c1} 온도가 상온⇔700°C의 열피로 과정에서도 온도편차 범위보다 모두 높기 때문에 오스테나이트 역변태와는 무관한 것으로 판단된다.

4.2 열피로 저항성 상수의 영향

일반적으로 재료의 열피로 저항성은 다음과 같은 상수 R에 의해 우열이 결정될 수 있다[20~22].

$$R = \frac{k\sigma_y}{E\alpha} \quad (1)$$

단 k는 열전도도, σ_y 는 반복피로시의 항복강도, E는 영률이고 α 는 열팽창계수이다. 식(1)에서 R값이 크면 클수록 열피로 균열발생에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있다. 그러므로 열피로 저항성은 재료의 열전도도와 반복피로시의 항복강도가 높을수록, 그리고 탄성계수와 열팽창계수가 낮을수록 우수해진다. 그러나 유사한 합금의 경우에는 열전도도, 영률, 그리고 열팽창계수는 거의 비슷한 값을 갖는다고 볼 수 있다.

그러므로 본 합금에서 열피로 저항성을 결정하는 가장 중요한 인자는 반복 열피로시에 재료의 항복강도가 재료의 수명을 결정한다고 판단할 수 있다. 따라서 그러나 열피로 시편의 표면으로부터 경도변화는 선행연구[14]의 Fig.14에서 보여주는 바와 같이 템퍼링 온도 등에 따라 거의 차이가 없다는 것을 이미 알고 있다. 이 결과는 템퍼링처리 온도보다 높은 고온(700°C)으로 반복 노출되어 합금의 템퍼링처리 효과가 사라지고 기지 특성만을 보여준다는 사실을 알 수 있다. 현재 Cr 함량에 따른 열피로 저항성에 대한 변화는 인장강도, 경도 등을 고려하면 Cr 함량이 증가하면 계속적으로 열피로 저항성이 감소해야 한다. 그러나 Cr함량이 증가해도 특정 함량까지는 오히려 좋아지거나 동등한 열피로 저항성을 보여주었다.

4.3 진 파괴강도의 영향

Cr 함량이 다소 높은 경우에 열피로 저항성이 양호한 이유는 식(1)에서 고려하지 않는 합금의 인장연성의 차이등과 같은 항복강도외에 다른 인자에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 피로에서 재료의 파괴가 일어나는 사이클의 수는 다음과 같은 식에 의해 결정되는 것으로 잘 알려져 있다[23].

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^{-m} + \varepsilon_f' (2N_f)^{-n} \quad (2)$$

단 N_f 는 파괴가 일어나는 사이클의 수, $\Delta\varepsilon$ 는 총 변형률범위, σ_f' 는 파괴시의 진응력, ε_f' 는 파괴시의 진변형률, m와 n은 재료상수이다. 열피로 현상은 온도차이에 의한 탄성 및 소성변형량의 축적에 의해 균열발생을 유발하므로 같은 논리를 적용할 수 있다.

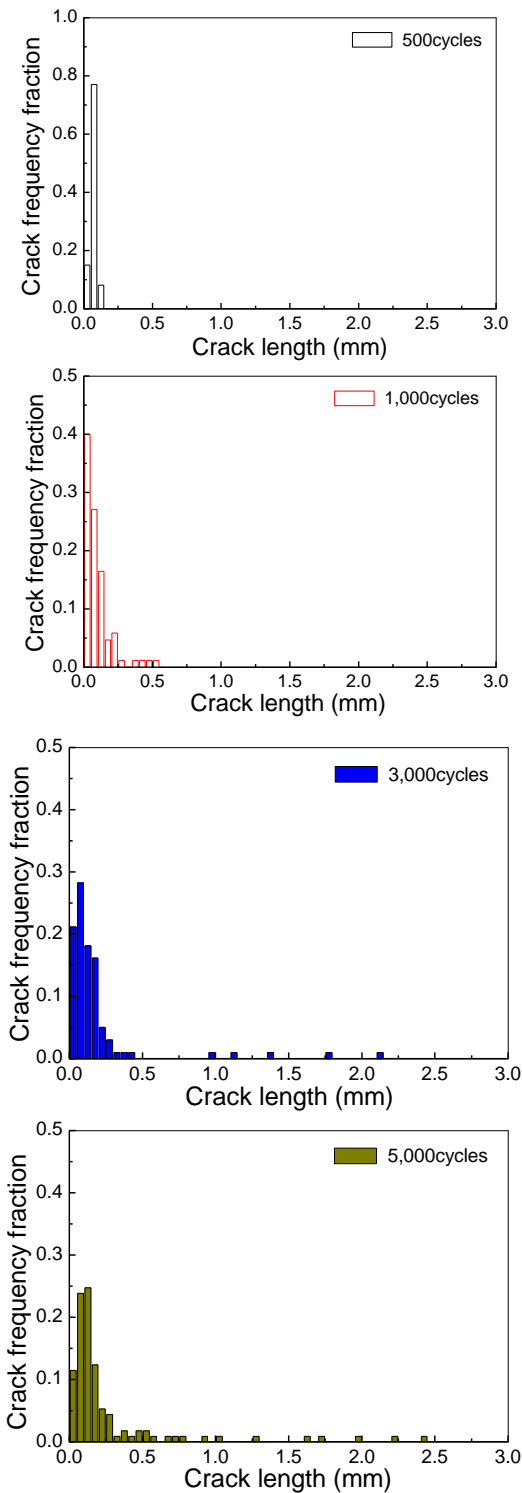


Fig. 8 Diagrams showing the crack depth distribution in the 3rd-layer of weld metal after thermal cycling fatigue test (at RT⇌700oC) with the number of thermal fatigue cycle in a overlay welded 12%Cr stainless steel(TF2)

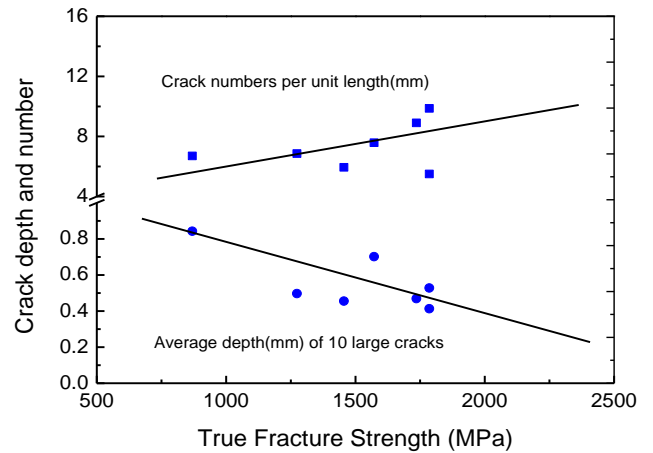


Fig. 9 Variations of average crack depth (mm) and crack numbers per unit length (mm) in the overlay welded Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNBV-C stainless steels as a function of true fracture strength

그러나 유한요소법에 의한 계산결과에서, 열피로 조건이 고주기 피로에 속하는 것을 보여준다[14]. 탄성변형에 의한 고주기 피로수명은 일반적으로 식(2)의 전반부에 의해 표현된다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^{-m} \quad (3)$$

다시 말해서 진 파괴강도가 높은 합금일수록 균열발생까지의 열피로 사이클 수를 증가시키는 역할을 하여 보다 열피로 저항성이 우수한 것으로 판단된다.

종합적으로 델타-페라이트의 변화에도 불구하고 Fig. 5, 6, 9를 비교해보면 약 15%Cr 함량 이하의 합금에 존재하는 델타-페라이트가 그물망 형태로 잔류하는 경우에는 열피로 저항성이 거의 저하되지 않는 것으로 보인다. 이는 그물망 모양의 잔류 델타 페라이트 분산에 의한 열피로 저항성이 개선되기 때문으로 추정된다. 이 의미는 내열용 스테인레스강이 높은 Cr함량을 함유시킬 수 있어서 고온 내식재료로 보다 우수한 내부식 성능을 발휘할 수 있다는 것이다. 다시 말해서 기존 12%Cr 합금 대비 기계적 특성은 동등하거나 우수하면서 내식성을 크게 향상된 신재질을 제공할 수 있다는 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 주어진 ~0.14%C 함량에서 11.2-

16.7%Cr 범위로 Cr 함량이 조절된 Fe-Cr-Ni-Mo-CuWNbV-C 계 스테인레스강 서브머지드 아크 클래딩재를 준비하였다. 이를 이용하여 미세조직, 인장 특성 그리고 열피로 특성 변화를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 델타-페라이트 함량은 Cr 함량이 증가함에 따라 점차 증가하였고 반면에 인장강도와 경도 그리고 열피로 저항성이 감소하였다. 그리고 델타-페라이트의 미세조직은 약 15%Cr 함량까지 그물망 형태를 유지하는 것으로 관찰되었다.

(2) 반복 열피로 저항성은 약 11.0-14.5%Cr 함량에서는 거의 동등한 열피로 특성을 보였고 그 이상의 Cr 함량에서는 크게 감소하였다. 이러한 특징은 가장 큰 10 개 균열의 평균을 도식화한 결과에서 잘 보여준다.

(3) 주어진 하나의 Cr 함량의 합금을 이용한 열사이클 수에 따른 열피로 저항성 평가에서 사이클 수에 무관하게 본 시험의 랭킹 테스트의 재현성이 매우 우수하다는 사실을 보여주었다.

(4) 열피로 저항성은 오버레이재의 진 인장 파괴강도 값과 비례하여 증가하였다. 그리고 진 인장 파괴강도가 증가에 따라 단위 길이당 존재하는 열피로 균열의 수도 증가하였다

후 기

본 연구과제는 포스코 및 산업통상자원부의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] J. Z. Briggs, T. D. Parker, 1965, The Super 12% Cr Steels, Climax Molybdenum Co., New York, NY, pp. 1~220.
- [2] S. N. Rosenwasser, P. Miller, J. A. Dalessandro, J. M. Rawls, W. E. Toffolo, W. Chen, 1979, The Application of Martensitic Stainless Steels in Long Lifetime Fusion First Wall/Blankets, J. Nucl. Mater., Vol.85-86, pp. 177~182.
- [3] S. Matsuoka, S. Kim, J. R. Weertman, 1984, Mechanical and Microstructural Behavior of a Ferritic Stainless Steel under High Temperature Cycling, Topical Conference on Ferritic Alloys for Use in Nuclear Energy Technology, Proceedings of the Topical Conference on Ferritic Alloys for use in Nuclear Energy Technologies(editor: J. W. Davis, D. J. Michel), TMS-AIME, Warrendale, PA, pp. 507~516.
- [4] R. L. Klueh, J. M. Vitek, 1983, The Resistance of 9Cr-1MoVNb and 12Cr-1MoVW Steels to Helium Embrittlement, J. Nucl. Mater., Vol.117, pp. 295~302.
- [5] V. K. Sikka, C. T. Ward, K. C. Thomas, 1983, Modified 9Cr-1Mo Steel - An Improved Alloy for Steam Generator Application, Ferritic Steels for High Temperature Applications, Metals Park, OH, pp. 65~84.
- [6] R. J. Dawson, S. Shewchuk, J. E. Pritchard, 1982, Selection and use of Hardfacing Alloys, Welding J. Vol.61, No.11, pp.15~23.
- [7] Yu. M. Kuskov, I. I. Frumin, G. V. Ksendzyk, 1980, The Wear Resistance and Thermal Durability of Deposited Chromium Iron, Welding Research Abroad, Vol. 26, No. 3, pp. 42~45.
- [8] D. Kotecki, 1992, Hardfacing Benefits Maintenance and Repair Welding, Welding J. Vol.71, No.11, pp. 51~53.
- [9] K. J. Handerhan, A. V. Hinkel, 1990, 31st Mechanical Working and Steel Processing Proceedings, Iron & Steel Soc. Inc., Warrendale, PA, p. 247.
- [10] L. P. Myers, 1977, Effect of Chromium on the Structure and Properties of Stainless Steels, Handbook of Stainless Steels, McGraw-Hill, New York, Chap.11, pp. 1~19.
- [11] P. V. Scheers, M. V. Kincer, T. Rumpf, J. J. Mcewan, 1992, Corrosion Resistance of Intermediate Chromium-alloy Steels in Mine Waters, Proceedings of the 1st Chromium Steel and Alloys Congress(editor: H. W. Glen), INFACON 6, Vol. 2, pp. 173~178.
- [12] K. Kanazawa, K. Yamaguchi, K. Kobayashi, 1979, The Temperature Dependence of Low Cycle Fatigue Behaviour of Martensitic Stainless Steels, Mater. Sci. Eng., Vol.40, No. 1, pp. 89~96.
- [13] J. C. Earthman, G. Eggeler, B. Ilschner, 1989, Deformation and Damage Processes in a 12%Cr-Mo-V Steel under High Temperature Low Cycle Fatigue Conditions in Air and Vacuum, Mater. Sci. Eng. A,

- Vol.110, pp. 103~114.
- [14] J. Y. Jung, H. J. Sung, S. H. Ahn, 1998, Thermal Cycling Fatigue Behavior of Hardfacing Heat-Resistant Stainless Steel for Continuous Caster Rolls, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 36, No. 1, pp. 33~43.
- [15] J. Y. Jung, E. R. Baek, S. H. Ahn, S. H. Choo, S. H. Lee, N. J. Kim, 1996, Effects of C and Cr on the As-Welded Structures and Mechanical Properties of Fe-(12-17)%Cr-(0.19-0.32)%C Hardfacing Stainless Steels, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 34, No. 10, pp. 1321~1332.
- [16] J. Y. Jung, E. R. Baek, S. H. Ahn, 1998, Microstructural Change of Hardfacing Fe-Cr-Ni-C Stainless Steels during Thermal Cycling Fatigue, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 36, No. 3, pp. 320~328.
- [17] J. Y. Jung, 2017, The Effects of Nitrogen Content and Cold Rolling Reduction on the Mechanical Properties of New 420-series Stainless Steel Strip having a Mesh As-Welded Structure by the Electroslag Cladding, *J. Welding and Joining*, Vol. 35, No. 6, pp. 1~9.
- [18] F. B. Pickering, 1978, *Physical Metallurgy and the Design of Steels*, Applied Sci. Pub., London, p. 169.
- [19] J. Y. Jung, E. R. Baek, S. H. Ahn, 1998, Microstructural Change of Hardfacing Fe-Cr-Ni-C Stainless Steels during Thermal Cycling Fatigue, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 36, No. 3, pp. 320~328.
- [20] R. P. Skelton, K. J. Nix, 1987, Crack Growth Behaviour in Austenitic and Ferritic Steels during Thermal Quenching from 550°C, *High Temp. Technol.*, Vol. 5, pp. 3~12.
- [21] W. R. Buessem, 1956, Thermal Shock, Part4, High Temperature Technology, J. Campbell, ed., John Wiley and Sons, New York, N.Y., pp. 460~483.
- [22] S. S. Manson, 1966, *Thermal Stress and Low Cycle Fatigue*, McGraw-Hill Book Co., New York, NY, p. 285.
- [23] M. H. Hirschberg, S. S. Manson, 1964, Fatigue Behavior in Strain Cycling in the Low and Intermediate Cycle Range, *Fatigue-An Interdisciplinary Approach*, Syracuse Univ. Press, Syracuse, NY, pp. 133~173.