

페라이트계 스테인리스강의 재현 용접열영향부 열피로 특성

홍 승 갑*† · 조 민 현* · 강 기 봉*

*POSCO 기술연구소 강재솔루션연구그룹

Thermal Fatigue Properties of Synthetic Heat Affected Zone in Ferritic Stainless Steel

S. G. Hong*†, M. H. Cho* and K. B. Kang*

*Steel Solutions Research Group, Technical Research Labs., POSCO, Pohang 790-300, Korea

†Corresponding author : sgab@posco.co.kr

(Received October 31, 2008 ; Revised December 22, 2008 ; Accepted February 11, 2009)

Abstract

Ferritic stainless steel, which has been used as material for decoration parts in automobile, is recently used as material for the exhaust system due to its good performance at high temperature. To improve the fuel efficiency and purify automotive exhaust gas, it is needed to increase the temperature of exhaust gas. However, it is frequently reported that the rising of the temperature of exhaust gas increases thermal stress at exhaust manifold, which results in thermal fatigue failure in welded joints. Therefore, in this study, effects of chemical composition of steel and welding parameters on thermal fatigue properties of synthetic heat affected zone in ferritic stainless steel have been investigated. It has been found that thermal fatigue life in heat affected zone is affected by bead shape of welded joint and amount of soluble Nb in steel. Especially, Nb-Ti added steel has higher thermal fatigue life in comparison to Nb added steel, which is attributed to difference of precipitation behavior in both steels.

Key Words : Thermal fatigue, Ferritic stainless steel, Soluble Nb, Synthetic heat affected zone

1. 서 론

최근 자동차 생산량 증가, 배기부품의 장기보존화, 경량화 및 배기가스 규제강화 등으로 인해 페라이트계 스테인리스강의 수요가 크게 증가하고 있다. 이와 같이 자동차 배기계 부품용으로 사용되는 페라이트계 스테인리스강은 사용온도에 따라 약 600°C이하의 저온용과 600°C이상에서 사용되는 고온용으로 크게 나뉘질 수 있다. 특히, 최고온도가 900°C까지 올라가는 Exhaust manifold의 경우, 제작에 사용되는 강재는 고온강도, 고온산화성과 더불어 고온 열피로 특성이 요구되고 있으며, 이와 같은 물성을 얻기 위해 고Cr 400계 스테인리스강에 Nb, Ti, Mo 등이 첨가된 고온용 400계 스테인리스강이 개발되고 있다.

Fig. 1은 배기계 부품 중 가장 고온 부위에 사용되는

Exhaust manifold 부품의 외관사진을 보여준다. 이와 같은 Exhaust manifold 부품은 주행 중 엔진으로부터 배출되는 배기가스가 최초로 모아지는 부품으로써, 주행패턴에 따라 부품의 표면온도가 상온~ 900°C까지 변화된다. 이와 같은 열 사이클에 수반되는 부품의 수축과 팽창은 부품 전체에 인장 및 압축응력을 부가하게 되며, 특히, 형상 및 조직학적으로 취약한 용접부를 따라 극심한 열피로 손상을 받게 된다 (Fig. 2).

따라서, 본 연구에서는 배기계 부품의 용접부 열피로 특성에 미치는 모재성분 및 용접조건의 영향을 고찰하

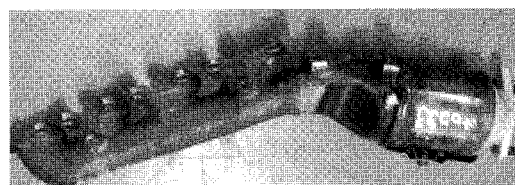


Fig. 1 Appearance of exhaust manifold

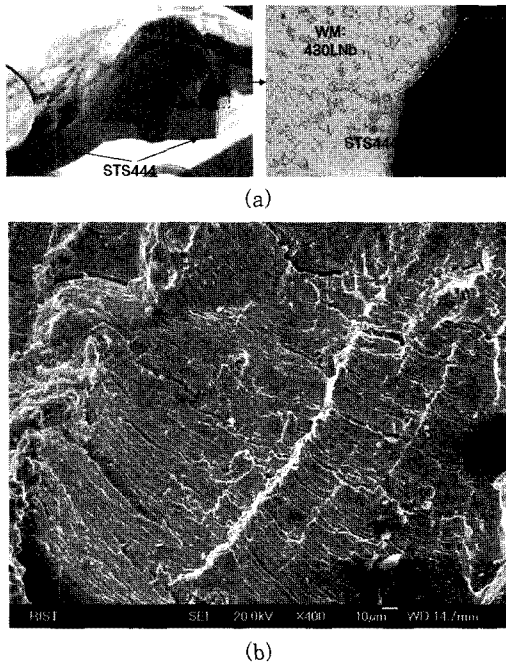


Fig. 2 Fractured weld joint due to thermal fatigue: (a) Cross section and (b) SEM fractograph

고자, 페라이트계 스테인리스강의 용접열영향부를 대상으로 검토한 결과를 소개하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 열피로 시험방법

두께(t) 1.5mm의 판상 시험편에 대한 재현 용접열영향부의 열피로 특성을 평가하는데 있어서, 유도가열에 의한 온도제어 및 열피로 시험 중 발생하는 buckling 현상제어를 위해, Fig. 3(a)와 같은 특수한 지그를 사용하였다. 판상 시험편의 경우 중앙에 노치를 가지는 판상 시험편(Fig. 3(b))을 사용하였으며, 열피로 시험 조건은 Fig. 3(c)와 같이 시험편 구속율은 100%, 시험온도 구간은 200°C~900°C, 900°C에서 유지시간은 30초, 가열 및 냉각속도는 14°C/sec로 설정하였다(1 사이클=130초). 또한, 각 사이클 마다 최대 인장하중을 측정하여, 초기 5번 사이클내의 최대 하중 값의 70%에 해당되는 사이클 수를 열피로 수명으로 정의하였다.

2.2 용접열영향부 재현

자동차 배기계 부품의 열피로 내구시험의 경우, 엔진 배기계 단품 혹은 전 제품(full body)을 엔진에 직접 장착한 후, 특정 열 사이클을 모사하여 내구성을 평가

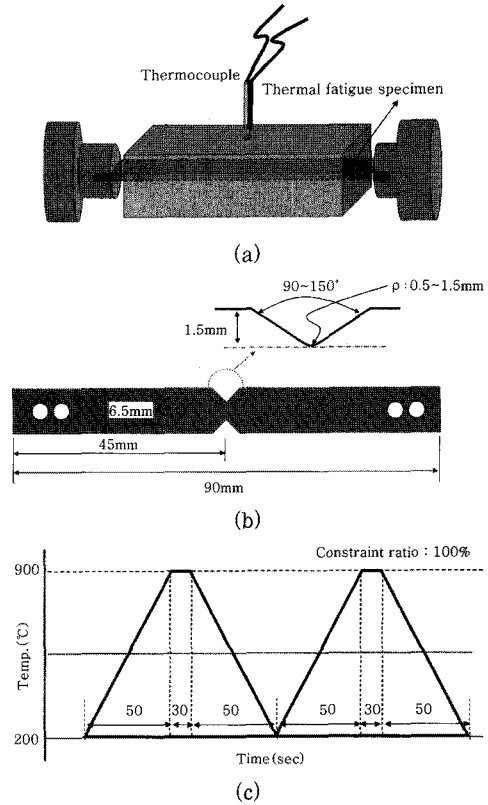


Fig. 3 Specimen and condition of thermal fatigue test: (a) appearance of jig for thermal fatigue test of thin plate specimen, (b) dimension of specimen, and (c) thermal cycle for thermal fatigue test (1 cycle=130s)

하게 된다. 이와 같은 실제품의 내구평가의 경우, 평가 시간 및 비용이 많이 소요되고, 소재의 용접열영향부의 미세조직 및 용접부 비드 형상의 영향도를 정성적으로 구분하여 평가하기가 힘든 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 판상 시험편을 이용하여, 배기계 부품 소재로 사용되는 강재의 용접열영향부 열피로 특성을 정확하게 평가하기 위한 방법을 고안하였다. 우선 Table 1의 steel A를 대상으로 GMA용접(175A, 23V, 77cm/min)을 실시하여, 열피로 시험편의 중앙 노치가 용접이음부의 용접열영향부에 정확하게 위치하도록(Fig. 4) 시험편을 가공하여 열피로 특성을 측정하고자 하였다.

Table 1 Chemical composition of steel A, B and C

	C	N	Cr	Mo	Nb	Ti
Steel A	0.0057	0.0071	18.65	1.94	0.343	0.018
Steel B	0.005	0.0140	18.30	1.82	0.48	0.104
Steel C	0.007	0.0110	18.55	1.72	0.45	0.115

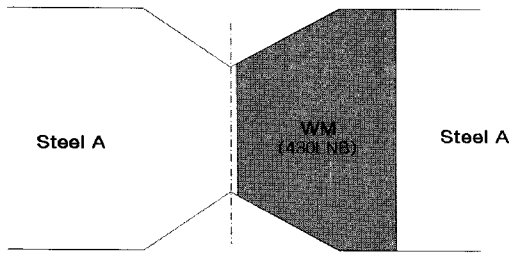


Fig. 4 Specimen for thermal fatigue test of GMA welded butt joint in steel A

그러나, 열피로 시험결과, 이런 형상의 시험편 경우, 대부분의 열피로 균열은 열피로 특성이 열악한 용접금속에서 발생 혹은, 전파되어, 실제 배기계 부품의 용접 열영향부 열피로 균열을 모사하기가 힘들었다. 따라서, 용접열영향부의 열피로 특성만을 모사하기 위해, MTCS (Metal Thermal Cycle Simulator)를 사용하여, Fig. 5와 같은 열 사이클 조건으로 용접열영향부 조직을 재현하였다.

2.3 재현 용접열영향부 열피로 시험 변수

본 연구에서는 GMA 실 용접부의 열피로 수명에 영향을 줄 수 있는 인자로, 강재 조성, 용접입열량, 용접비드 형상 등을 선택하였다. 이 중에서 용접입열량은 GMA 실 용접부 CGHAZ 조직(G.S.: ~103 μ m)과 유사한 미세조직을 얻을 수 있는 재현 열 사이클 조건 (Fig. 5에서 1350 $^{\circ}$ C/10초)을 기준으로 유지시간을 5초(G.S.: ~58 μ m) 및 20초(G.S.: ~157 μ m)로 변화시켜 입열량에 따른 결정립 크기의 영향을 고찰하였다. Fig. 6은 GMA 실 용접열영향부 미세조직 (Fig. 6(a)) 과 1350 $^{\circ}$ C/10초의 조건으로 재현한 용접열영향부의 미세조직 (Fig. 6(b)) 을 보여준다.

또한, 용접비드 형상의 영향은 판상 열피로 시험편의

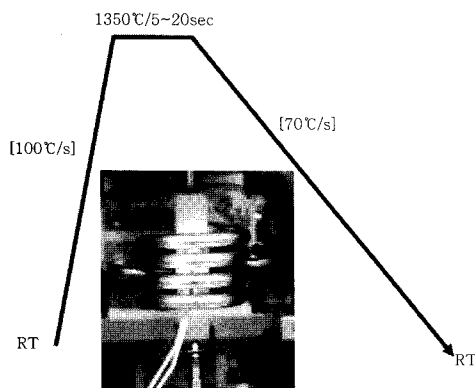
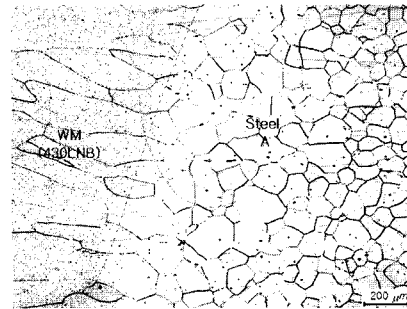
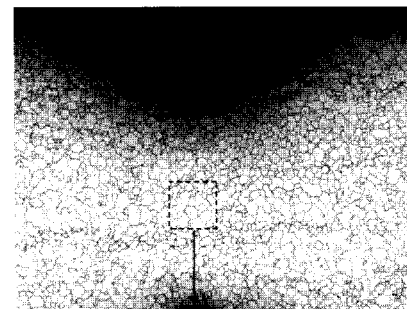


Fig. 5 HAZ thermal cycle simulated by MTCS (Metal Thermal Cycle Simulator)

중앙 노치 형상을 변화시켜 살펴보았다. 즉, Fig. 7의 용접비드와 모재가 이루는 각도(θ)와 용접비드 토크우부 곡률반경(ρ)의 영향은 각각 판상 시험편 중앙노치 각도 및

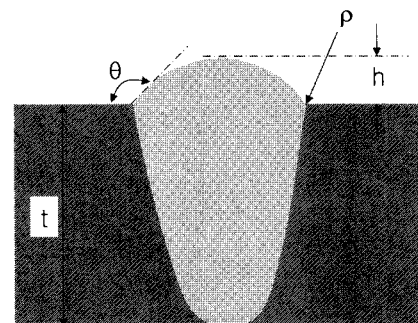


(a)



(b)

Fig. 6 Microstructures of (a) HAZ in GMA welded butt joint and (b) synthetic HAZ simulated by MTCS (1350 $^{\circ}$ C/10sec)



θ : Angle between weld bead and base metal
 ρ : Radius of curvature at weld toe
 h : Height of weld bead from base metal
 t : Thickness of base metal

Fig. 7 Geometrical parameters measured on welds

Table 2 Variables used in thermal fatigue test

	Low	High
Steel	Steel A	Steel B
Holding time at 1350°C	5 sec.	20 sec.
Notch angle	90°	150°
Radius of curvature at notch	0.5mm	1.5mm

곡률반경을 변화시킴으로써, 그 영향도를 고찰하였다.

Table 2는 앞서 언급한 강제조성, 용접입열량, 용접비드 형상에 따른 용접열영향부 열피로 특성을 고찰하기 위한 변수 값 범위를 나타내고 있다.

2.4 미세조직 분석

재현 용접열영향부 및 모재의 미세조직은 Viller 용액(피크린산 3g+염산 3ml+에탄올 100ml)을 사용하여 약 3분간 부식시켜 관찰하였다. 또한, TEM replica 시험편을 이용하여, 모재 및 재현 용접열영향부의 석출물 분포 및 종류를 확인하였으며, 전자추출법을 이용하여 Nb 및 Ti 석출물의 석출량(고용량)을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재현 용접열영향부 열피로 수명에 미치는 용접조건 영향

페라이트계 스테인리스강의 용접열영향부 열피로 특성에 미치는 강제 및 용접조건의 영향을 규명하기 위해, Table 2와 같은 4가지의 영향인자를 2수준으로 변화시키고, 반복을 2번 실시하는 Full factorial design의 실험계획법(DOE)에 의한 통계실험을 실시하였다. 용접 입열량 변화는 1350°C에서의 유지시간 변화(5초 & 20초)로 제어하였으며, 이때 결정립 크기는 각각 58 μ m 및 157 μ m이었다.(Fig. 8)

Table 3은 실험계획법에 의해 진행된 열피로 시험결과를 보여주고 있다. 앞서 언급한 4가지 인자 중 강제, 용접비드 각도(θ), 용접비드 노치부 곡률반경(R)값은 통계적으로 유의한 인자로 검증되었으나, 용접 입열량은 유의하지 않은 것으로 나타났다. 즉, 용접열영향부 열피로 수명은 강제 조성과 용접비드 형상에만 영향을 받을 뿐, 용접 입열량과는 무관한 것으로 확인되었다. Fig. 9은 이와 같은 주인자(강제, 용접비드 형상)의 영향도를 나타낸다.

용접비드 형상의 영향에 해당하는 노치부 각도 및 곡률반경 효과의 경우, 노치부 각도가 클수록, 곡률반경

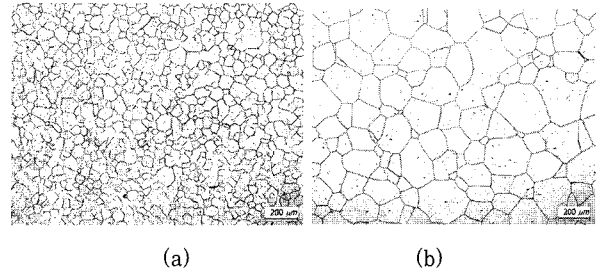


Fig. 8 Microstructures of Synthetic HAZ simulated at (a) 1350°C/5sec and (b) 1350°C/20sec (steel A)

Table 3 Thermal fatigue life depending on variables

steel	Angle (°)	Radius (mm)	Time (sec)	Fatigue life (cycle)
A	90	0.5	5	236
	90	0.5	5	187
	90	0.5	20	295
	90	0.5	20	323
	90	1.5	5	280
	90	1.5	5	332
	90	1.5	20	438
	90	1.5	20	418
	150	0.5	5	384
	150	0.5	5	300
	150	0.5	20	342
	150	0.5	20	325
	150	1.5	5	321
	150	1.5	5	430
150	1.5	20	335	
150	1.5	20	374	
B	90	0.5	5	458
	90	0.5	5	496
	90	0.5	20	443
	90	0.5	20	453
	90	1.5	5	537
	90	1.5	5	542
	90	1.5	20	575
	90	1.5	20	470
	150	0.5	5	540
	150	0.5	5	540
	150	0.5	20	503
	150	0.5	20	458
	150	1.5	5	564
	150	1.5	5	545
150	1.5	20	548	
150	1.5	20	599	

이 클수록 노치부에서 응력집중계수가 작기 때문이다. Fig. 7과 같은 용접비드 형상을 가지는 용접 토우부의 응력집중계수는 아래의 Lawrence 식(1) 및 Anthes 식(2)과 같이 모재와 이루는 용접 비드각도(θ) 및 토우부 곡률반경(r)과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다¹⁻³⁾.

$$Lawrence : K_t = 1 + 0.27 [\tan(180 - \theta)]^{1/4} [t/\theta]^{1/2} \tag{1}$$

$$Anthes : K_t = 1 + 0.728 [\sin(180 - \theta)]^{0.932} [t/\theta]^{0.382} \tag{2}$$

위 식 중에서 Lawrence 식(1)을 가지고, 두께(t) 2mm 소재의 용접부 비드각도 및 토우부 곡률반경 값에 따른 응력집중계수를 계산해보면, Table 4과 같이, 비드 형상에 따라, 약 2배까지 차이를 보임을 알 수 있다.

따라서, Fig. 9에서 보여지는 비드각도 및 토우부 곡률반경의 증가에 따른 열피로 수명 증가는 용접 토우부에 작용하는 응력집중계수 값의 감소 때문으로 판단된다.

3.2 재현 용접열영향부 열피로 수명에 미치는 강재 조성의 영향

Fig. 10은 steel A, B, C의 열피로 수명을 나타낸다. 용접열영향부 재현 조건은 1350°C/10초로 하였으며, 시험편 노치각도(θ) 및 곡률반경(R)은 각각 120°, 1mm로 하였다. Fig. 10에서 보듯이, steel A에 비해 Nb 합금 첨가량이 많고, Ti이 복합 첨가된 steel B가 열피로 수명이 증가하였다.

일반적으로 페라이트계 스테인리스강에 있어서 고온 항복강도에 미치는 Nb, Ta, Ti, Mo 등과 같은 미량 합금원소 효과를 보면, Nb가 첨가량 대비 가장 우수한 고온물성을 나타내는 것으로 보고된다⁴⁾.

그러나, 이와 같은 Nb라도 고온에서 고용상태로 존

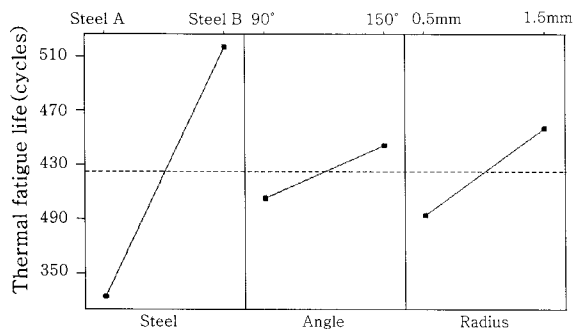


Fig. 9 Effects of variables used on thermal fatigue life

Table 4 Stress concentration factor depending on weld bead shape

	Kt (Lawrence)
$\theta = 90^\circ / \rho = 0.5$	2.49
$\theta = 150^\circ / \rho = 1.5$	1.27

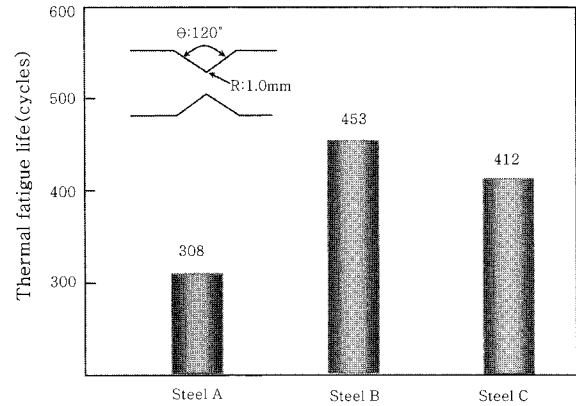


Fig. 10 Thermal fatigue life of steel A, B and C

재하지 않고 석출이 되면, 열피로 수명은 감소하는 것으로 알려져 있다[5]. 특히, Fig. 11의 TEM 사진에서 보듯이 steel A의 경우, 상당량의 NbC가 석출되어 있는 반면, steel B의 경우, 조대한 (Ti, Nb)(C, N)를 제외하고는 NbC 탄화물은 거의 존재하지 않았다. 또한, 잔사추출 결과에서도 적은 양(0.343wt.%)의 Nb가 첨가된 steel A는 0.08wt.%의 Nb가 석출물로 존재함에 반해, 더 많은 양(0.48wt.%)의 Nb가 첨가된 steel B의 경우, 0.05wt.%의 Nb만이 (Ti, Nb)(C, N) 형태로 석출됨을 확인할 수 있었다.

이것은 steel B의 경우, Ti이 Nb와 함께 복합적으로 첨가됨에 따라, 고온에서 안정한 조대한 (Ti, Nb)(C, N)가 먼저 석출되면서 모재에 고용되어 있는 C, N의 농도를 저하시키고, 이것은 결국 Ti계 석출물에 비해 낮은 온도에서 석출되는 NbC의 석출을 억제하는 효과를 가져옴으로써, 모재의 고온 Nb량을 증가시킨 것으로 판단된다. 따라서, steel A에 비해 steel B의 열피로 수명이 증가한 것은, Nb 합금첨가량 증가 및 Ti 복

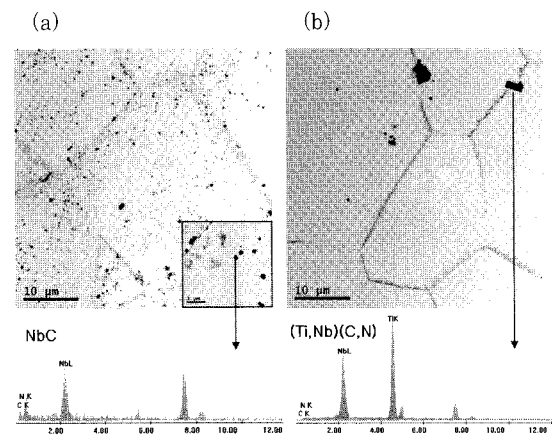


Fig. 11 Transmission electron micrographs showing distribution of (a) NbC in steel A and (b) (Ti, Nb)(C, N) in steel B

합첨가로 인한 고용 Nb량의 증가 때문으로 사료된다.

그러나, 강재 합금조성이 유사한 steel B와 steel C의 열피로 수명을 비교해보면, steel C의 열피로 수명이 낮은 것을 알 수 있다. 두 강재의 미세조직을 조사한 결과, Fig. 12에서 보듯이, steel B와 steel C의 합금성분이 유사하더라도, steel C의 경우, steel B에 비해 미세한 NbC 탄화물이 매우 많이 석출되어 있음을 확인할 수 있다.

Steel A, B, C의 고용 Nb량을 측정한 Fig. 13의 결과에서도 확인할 수 있듯이, steel C의 경우, steel B에 비해 고용 Nb량이 약 0.09wt.% 정도 적음을 알 수 있다. 결국, Fig. 10의 열피로 수명과 강재의 고용 Nb량 비교에서도 알 수 있듯이, 페라이트계 스테인리스강의 열피로 수명은 강재의 고용 Nb량과 매우 밀접한 관계가 있으며, 또한 모재 합금성분이 동일하다 하더라도, 강재 제조과정상에서 석출물 제어를 잘못하게

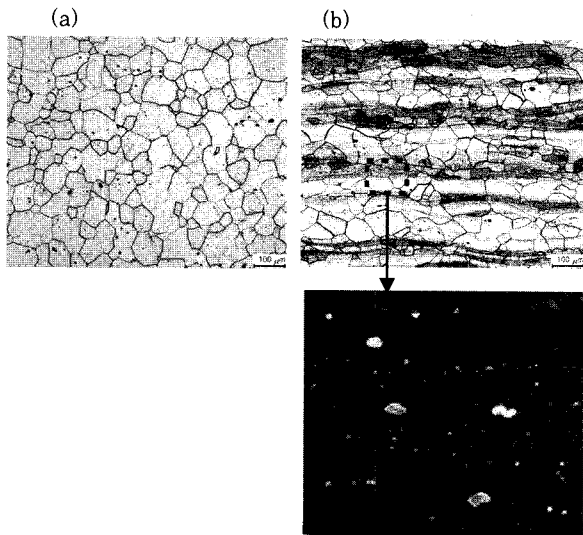


Fig. 12 Optical and SEM micrographs of (a) steel B and (b) steel C

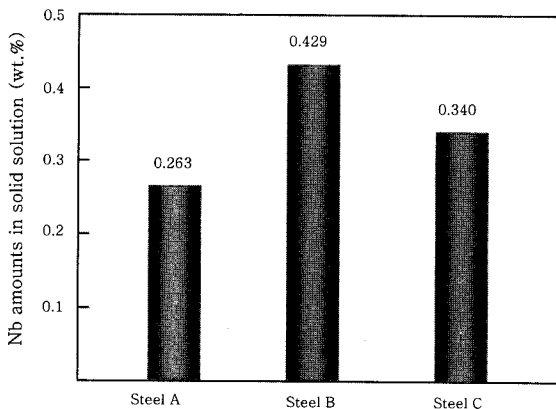


Fig. 13 Amount of soluble Nb in Steel A, B and C

되어, 고용 Nb량을 확보하지 못하게 되면 열피로 수명 증가는 기대하기 어려울 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 정립한 판상 시험편의 용접열영향부 열피로 시험방법을 이용하여, 용접열영향부 열피로 수명에 미치는 강재 및 용접조건의 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 용접열영향부 열피로 수명에 강재 합금성분, 용접부 비드 각도 및 토우부 곡률반경 등이 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 용접 입열량 차이에 따른 미세조직 변화는 열피로 수명에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

2) 용접부 비드 각도 및 토우부 곡률반경 변화는 비드 토우부의 작용하는 응력집중계수의 차이를 유발하여, 열피로 수명에 영향을 주는 것으로 사료된다.

3) 용접열영향부 열피로 수명은 모재 Nb 첨가량보다는 고용 Nb량 증가에 의해 향상되는 것으로 확인되었다.

4) Nb 단독첨가보다, Nb-Ti 복합첨가의 경우, 고용 Nb량이 증가하는 것으로 확인되었으며, 이는 Ti 첨가에 의해 고온 영역에서 (Ti, Nb)(C, N)이 우선적으로 석출되면서 고용 C, N을 낮춰줘서 낮은 온도에서의 NbC 석출을 억제시켰기 때문으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Radaj D., Sonsino C.M.: "Fatigue assessment of welded joints by local approaches", Abington Publishing, Cambridge, 1998
2. Lawrence F.V., Mattos R.J., Higashida Y., Burk J.D.: "Estimating the fatigue crack initiation life of welds", Fatigue testing of weldments, ASTM STP 648, (1978), 134-158
3. Yung J.Y., Lawrence F.V.: "Analytical and graphical aids or the fatigue design of weldments", Fatigue fracture engineering Material Structure, 8-3, (1985), 223-241
4. N. Fujita, K. Ohmura, M. Kikuchi, T. Suzuki, S. Funaki and I. Hiroshige: "Effect of Nb on high-temperature properties for ferritic stainless steel", Scripta Materialia, 35-6, (1996), 705-710
5. N. Fujita, K. Ohmura and A. Yamamoto: "Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of Niobium added ferritic stainless steels", Materials Science and Engineering A351, (2003), 272-281