

PTA를 이용한 Ni계 표면개질층의 희석률에 따른 응고균열의 거동

Behavior of solidification cracking with dilution in PTAW Ni-base superalloys overlay

안용수*, 윤병현**, 이창희*

* 한양대학교 재료공학과

** 한양대학교 재료공학과, RIST

1. 서 론

Ni계 합금의 경우 용접 시 가장 큰 문제는 용접부에서 형성되는 응고균열이며 이들은 대부분 응고 시 발생하는 특정한 원소들이 결정립계에 편석하여 저용점상을 형성하는 것이 주요 원인이다. 특히 Nb를 함유하는 Inconel 625 및 718 등의 Ni계 합금의 경우 Nb, Mo, Ti, C 등이 응고의 마지막 단계에서 제 2상을 형성하려는 경향이 강하고 이 제 2상들은 합금의 응고온도구간을 증가시킨다.¹⁾ 즉, 응고 마지막 단계에서 용점이 낮은 공정상(γ /NbC, γ /Laves)의 액상필름이 수지상 경계에 형성된다. 결정립계에 형성된 이러한 저용점의 액상필름에 인장변형/응력이 작용하면 균열이 발생한다.²⁾ 따라서 Nb, Mo, Ti, C의 성분변화는 응고온도구간, 공정상의 양과 형태에 영향을 미치므로 응고균열 감수성을 결정하는 요인이 되며 이런 합금원소의 양이 증가할수록 용접성은 나빠지게 된다.^{3), 4)} 특히 γ /Laves 공정상의 경우 용점이 낮아 응고온도구간을 넓히기 때문에 고온균열의 관점에서 아주 유해하다.

2. 실 험

본 연구에서 사용한 재료는 선박용 valve seat에 이용되는 Ni계 합금인 Nimonic 80A에 PTA를 이용하여 Inconel 625 및 718 분말을 육성 용접하였다. 그리고 Inconel 625 및 718 육성층의 희석률에 따른 조성변화와 그에 따른 응고균열 양상을 관찰하기 위하여 용접조건을 조절하여 모재인 Nimonic 80A와 각각 10, 20, 30%의 희석률을 가지는 PTA 육성층을 형성시켰다. 이러한 육성층의 화학조성은 Table 1과 같다. 여기서 D는 희석률(dilution)을 나타낸다. 또 희석률에 따른 육성층의 균열 감수성을 평가하기 위하여 Varestraint test⁵⁾를 실시하였고 변형량은 1%, 4%로 하였다. 균열시험 후 용착금속에서의 최고균열길이(maximum crack length, MCL) 및 총균열길이(total crack length, TCL)를 측정하여 주어진 변형량에서의 희석률 변화에 따른 응고균열의 특성을 비교하였다.

3. 결 과 및 고 칠

Varestraint test 시 Ni계 합금 육성층의 응고균열은 변형을 가할 때 존재하던 이동 용융지의 뒤쪽 고액계면과 수직방향으로 결정립을 따라 형성되었다. Fig. 1은 희석률에 따른 Inconel 625 및 718의 응고균열 감수성을 TCL과 MCL로 나타낸 것이다. 두 합금계 모두 희석률이 증가함에 따라 TCL, MCL이 감소하는 경향을 보인다. 이것은 희석률이 증가함에 따라 두 합금의 응고균열 감수성이 감소한다는 것을 의미하는데, 이러한 결과는 합금의 응고과정, 조직특성 및 응고온도범위와 밀접한 관계가 있다. Inconel 625 및 718의 응고과정은 일반적으로 $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + NbC \rightarrow \gamma + Laves$ 의 과정으로 이루어진다. Ni계 합금의 용융부 응고조직은 오스테나이트 기지조직에 수지상 입계를 따라 응고의 마지막 단계에 편석 혹은 조성적 반응에 의하여 형성되는 상들로 구성되어 있다. 이러한 응고 마지막 단계에서 형성된 상(저용점 γ /NbC, γ /Laves 공정상)은 용접부의 균열을 유발시키는데 결정적인 역할을 한다. Fig. 2는 전형적인 응고균열을 보여주는 조직으로 연속적으로 형성된 γ /Laves 공정상을 따라 균열이 전파한 것을 알 수 있다. 이 공정 조직은 용질원소인 Nb, Mo, Ti 등의 편석에 의하여 형성되고 용질 원소의 양이 증가할수록 공정 조직의 양도 많아지게 된다. 응고 조직 변화에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 C/Nb ratio이다. Fig. 3에서 희석률에 따른 C/Nb ratio와 carbide/Laves phase ratio를 나타내었다. 희석률이 증가할수록 C/Nb ratio가 증가하고 이에 의하여 carbide/Laves phase ratio가 증가한다. 따라서 응고 균열에 직접적인 영향을 주는 γ /Laves

공정상의 양은 줄어든다. 그러므로 Inconel 625 및 718의 균열 감수성이 감소한다는 것을 예측할 수 있다. 합금의 용고온도범위도 균열 감수성에 큰 영향을 미친다. 용고온도범위가 넓을수록 즉, mushy zone의 길이가 길수록 합금의 최대균열길이(MCL)이 길어진다. DTA(Differential Thermal Analysis) 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Inconel 625 및 718 합금은 γ 수지상 형성 후 γ /NbC 공정상이 형성되고 마지막으로 γ /Laves 공정상이 형성된다. Inconel 718 합금이 625 합금에 비해 더 큰 용고온도범위를 보이고, 이에 따라 Inconel 718 합금이 더 큰 용고균열 감수성을 보인다.

용고균열의 과면을 관찰해보면 Fig. 5에서 보는 것처럼 매끄러운 수지상 조직을 발견할 수 있어 균열이 발생될 때 액상이 존재하고 있었다는 증거를 나타낸다. 따라서 용고균열의 발생은 균열이 발생되는 온도구간에서 결정립 내부에는 용고가 완료되었으나 결정립계를 따라 액상이 존재하고 있어야 하고, 이러한 부위에 균열이 발생하기 위해서는 액화된 결정립계가 견딜 수 있는 용력이상이 가져져야 한다.

4. 결 론

1. Inconel 625 및 718의 용고과정은 (1) γ 수지상의 생성 및 성장, (2) 합금원소의 편석에 의한 γ /NbC 형성, (3) 남은 액상에서의 γ /Laves 공정상 형성의 순서로 이루어진다.
2. Inconel 625 및 718 육성층의 용고균열은 용고시 Nb, Mo, Ti 등이 결정립계 및 수지상입계에 편석하여 저용점 γ /NbC, γ /Laves 공정상을 형성하여 결정립계에 균열을 유발시킨다.
3. 용고균열의 정도는 저용점 공정상의 형태와 이들의 양 그리고 합금의 용고온도범위에 따라 결정된다. 희석률이 증가할수록 C/Nb ratio가 증가하고 합금의 균열 감수성이 낮아진다.
4. 전체적으로 Inconel 718은 625에 비해 저용점 공정상의 양이 많고 용고온도구간이 넓기 때문에 용고균열 감수성이 높게 나타난다.

5. 참고문헌

- 1) 김희봉, 이창희 : Ni-Cr-Fe 및 Ni-Fe-Cr-Mo계 합금의 용접부 균열특성에 관한 연구 - Part I 용착금속의 용고균열, 대한용접학회지, No. 15, Vol. 4(1996), pp. 304-315
- 2) K. Easterling : Introduction to the physical metallurgy of welding, Butterworths, pp. 164-170
- 3) 안용수, 윤병현, 이창희 : Ni계 초내열합금의 용고균열, 대한용접학회지, No. 17, Vol. 5(1999), pp. 20-28
- 4) J.N. Dupont, C.V. Robino, and A.R. Marder : Solidification and weldability of Nb-bearing superalloys, Welding. J., 8(1998), pp. 417s-431s
- 5) C.D. Lundin, C.H. Lee : New concepts in Varestraint testing for hot cracking, Preceedings of the JDC university research symposium, 1985, pp. 33-42

Table 1 Chemical composition of the material tested (wt%)

	Ni	Cr	Fe	Ti	Nb	Mo	C	Si
Inconel 625 D10	64.60	19.91	2.70	0.13	3.59	8.53	0.0592	0.475
Inconel 625 D20	66.79	20.52	2.31	0.55	2.82	6.59	0.0604	0.409
Inconel 625 D30	67.38	20.62	2.26	0.74	2.75	6.34	0.0670	0.351
Inconel 718 D10	58.71	17.43	16.38	1.09	4.47	2.61	0.0492	0.203
Inconel 718 D20	59.09	18.09	14.88	1.33	3.99	2.51	0.0531	0.179
Inconel 718 D30	63.84	18.18	11.87	1.55	3.47	1.89	0.0579	0.130

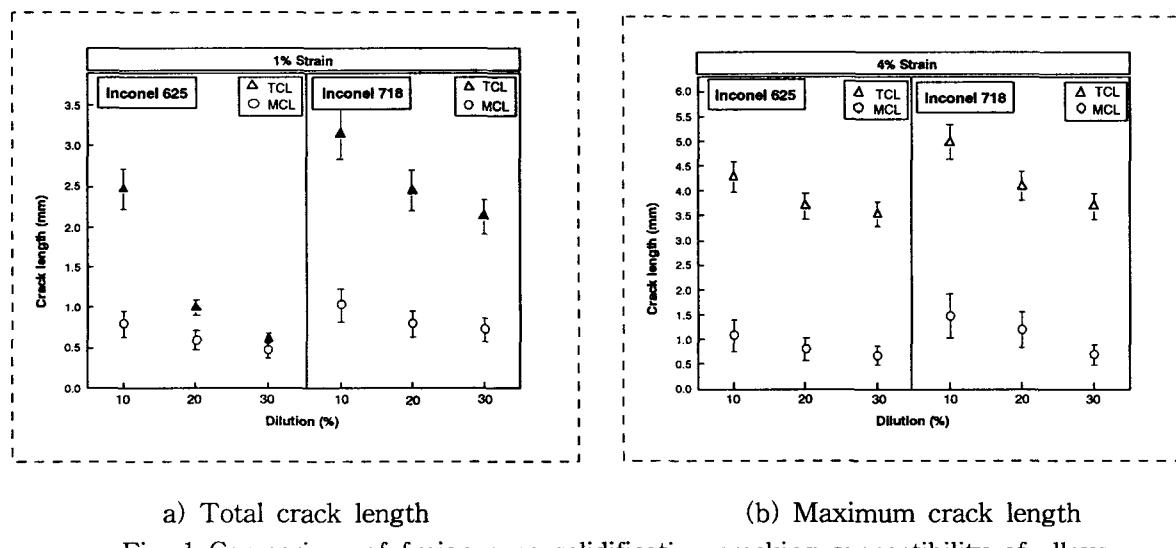


Fig. 1 Comparison of fusion zone solidification cracking susceptibility of alloys

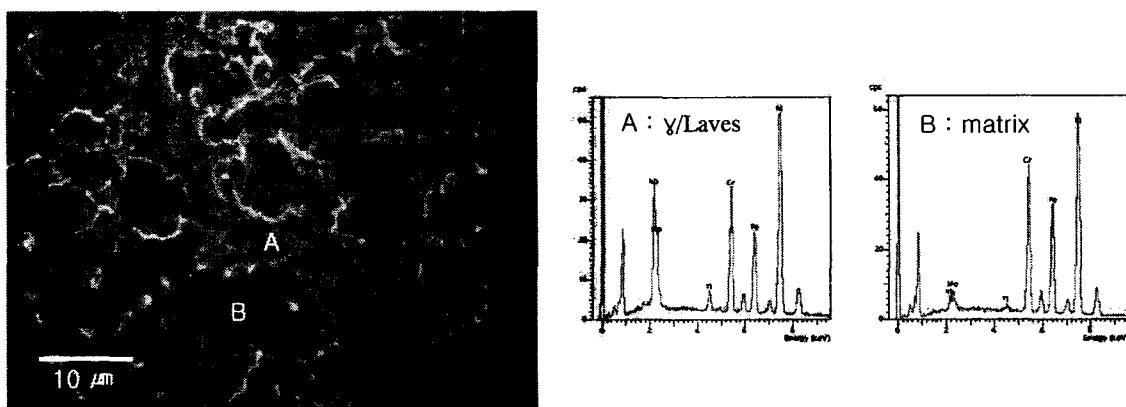


Fig. 2 Typical fusion zone solidification crack in Inconel 718 and SEM phase analysis

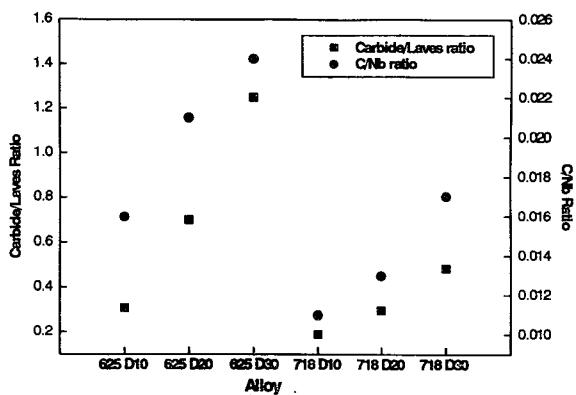


Fig. 3 Variation of C/Nb ratio and carbide/Laves ratio in Inconel 625 and 718

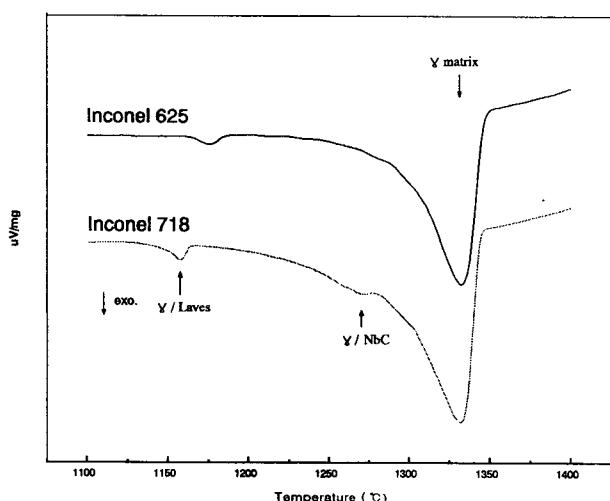


Fig. 4 DTA solidification scans for Inconel 625 and 718



Fig. 5 Typical solidification surface in Inconel 718