

**압력용기용 Mn-Ni-Cr-Mo강에 대한 γ 계 스테인레스강/Inconel 690
오버레이 용접부의 균열현상 및 그 방지에 대한 연구**
Cracking and Its Prevention in Overlay Welds of Austenitic Stainless steels
/Inconel 690 on Mn-Ni-Cr-Mo Steel for Reactor Pressure Vessel

신 용범*, 양 병일**, 고 경백***, 박 광식****, 박 화순*****

* 부경대학교 대학원 재료공학과, 부산

** 한국중공업(주) 기술연구원, 경남 창원

*** 한국중공업(주) 제관생산기술부, 경남 창원

**** 창원기능대학 산업설비과, 경남 창원

***** 부경대학교 재료공학과, 부산

1. 서 론

원자력 발전소의 경우 부분적으로 Inconel 690에 대한 용접 및 cladding에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 Inconel 690 clad weld metal은 일반 stainless steel clad weld metal과는 달리 fully austenite structure이므로 고온균열에 민감하고, 또한 기공, 용입불량 등의 결함 발생 빈도가 높아 제작에 막대한 지장을 초래하고 있다^{1),2)}. 또한 Inconel 690은 최근에 solid wire가 개발되어 선진 발전 중공업업체에서 일부 적용하고 있다. 그러나, 이에 대한 용접 기법이 정확히 정착되지 않아 여전히 많은 불건전 용접부가 발생하고 있기 때문에, 저입열 기법인 GTAW, GMAW에 국한되어 사용하고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 Mn-Ni-Cr-Mo강에 대한 Inconel 690의 오버레이 용접 과정 중에 자주 발생하는 균열현상을 검토하여 그 원인을 분석하고, 그에 따른 균열발생 방지대책을 수립하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 먼저 결함의 발생 거동에 대하여 다양한 용접법과 용접재료 및 용접조건 등을 적용하여 물리야금학적 현상과 그 기구에 대하여 상세히 검토하며, 나아가서 고온균열시험 등을 통하여 이에 따른 균열발생 억제에 대한 대책을 확립하는 것을 그 목적으로 하였다.

2. 실험방법

Inconel 690의 clad 부에 PT 결함을 검출하기 위하여 Inconel 690의 clad 용접은 SMAW 및 GTAW(hot wire TIG 포함) 방법을 채택하여 mock-up 시험편을 준비하였다. 적용모재는 원자력 압력용기용 Mn-Ni-Cr-Mo강을 사용하였으며 용접중 수분간 121℃에서 예열하였고 210~300℃에서 2 시간 후열처리하였다. 사용재료의 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition for base metal and welding material(wt.%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Remarks
Mn-Ni-Cr-Mo	max 0.25	0.15~0.40	1.2~1.5	max 0.025	max 0.025	0.40~1.0	max 0.25	0.45~0.60	max 0.05	Base Metal
STS 309L	0.011	0.36	1.60	0.013	<0.001	13.19	23.77	0.06	0.052	Welding Material
Inconel 690	0.027	0.23	2.26	0.007	0.005	55.461	29.7	0.07	0.03	Welding Material

mock-up시험 후 결함 발생을 파악하기 위하여 작은 크기로 절단하였으며, 각종 경도 시험 및 현미경에 의한 분석을 실시하였다. 또한 용착 금속의 용착 부위의 화학성분을 조사하였으며, 표면부와 단면부를 각각 나누어서 분석하였다.

고온균열 시험은 Mn-Ni-Cr-Mo강에 대하여 Inconel 690을 SMAW와 GTAW 방법으로 각각 cladding 한 시험편을 제작하여 사용하였다. 또한 고온균열시험 장치는 외부구속형의 modified

varestraint 시험장치를 사용하였으며, 이 때 사용한 용접조건은 GTAW-(DCSP), 용접전류는 100A, 실드가스는 He(20 l/min), 전극은 pure W(2.4mm dia.), arc distance는 2mm, 용접속도는 12, 15, 20, 25cm/min이었다., 각 용접조건과 부가 스트레인에 따른 균열양상을 광학현미경과 SEM으로 관찰하였으며, 석출물의 분포를 확인하기 위하여 일부 시편은 SEM-EDAX를 통하여 각 용접 방법에 따른 용접금속 및 열영향부의 주요 원소들을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Inconel 690의 clad부에는 작은 PT 결함이 검출되었고, 결함은 STS 309L clad 층과 Inconel 690의 Clad층을 연결하는 경계 부위에서 가장 심하게 발생되었으며, 특히 결함 발생 위치는 Fig.1 (a), (b)와 같이 대체로 초층과 두번째층 사이에서 발생되었다.

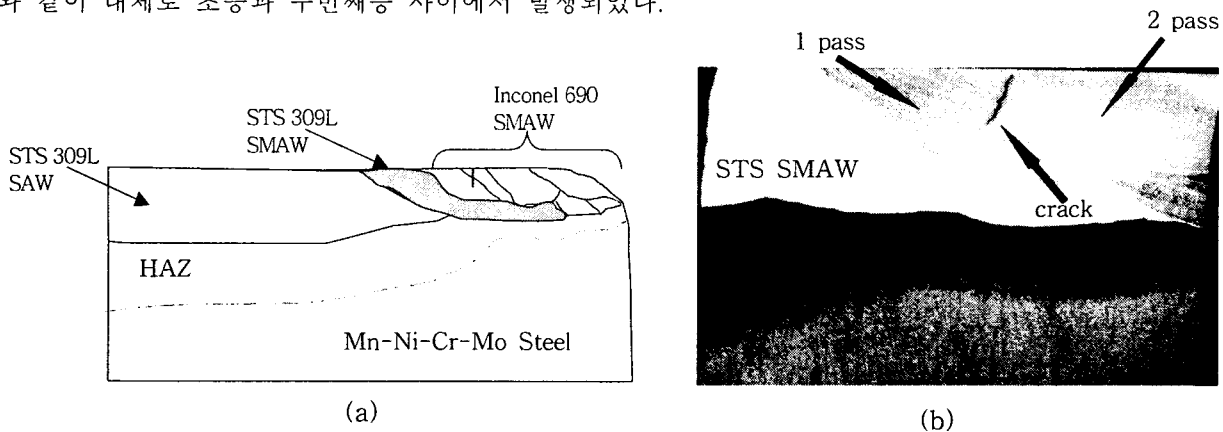


Fig.1 Cross-section macrostructures of clad zone

Inconel 690 clad부에서 발생하는 결함은 크게 두 가지의 용접시 고온균열 현상이 나타났다. 첫째는 비드의 중심부에서 용접 방향에 평행으로 관찰되는 응고균열(Fig.2)이다. 이는 결정립계를 따라 균열이 진행되었고 저융점 개재물이나 입계 편석 등의 원인으로 최종 응고과정에서 발생되어진 것으로 사료된다. 두번째 결함은 2차 cladding 동안에 NbC와 γ' 상이 공정 반응에 의하여 용융되어 결정립계에 필름상으로 존재하는 동안 용접 수축에 따른 응력을 받아 일어난 액화 균열이다. 이는 균열이 거의 초층 HAZ부에서 일어났고, 균열 tip의 형상이 예리하지 않으며, 입계에 다량의 Nb가 관찰되는 것으로 판단할 수 있었다.

고온균열 시험에서 Mn-Ni-Cr-Mo강에 대하여 Inconel 690을 SMAW과 GTAW 방법으로 cladding 한 시험편의 SEM-EDAX 분석(Fig.5)과 부가 스트레인과 용접속도의 변화에 따른 최대균열 길이에 대한 비교(Fig.3, 4)에서 알 수 있듯이 Nb가 상대적으로 많이 함유된 SMAW 방법이 GTAW 방법보다 균열감수성이 민감하다는 것을 알 수 있었다.



Fig.2 SEM microfractographs of solidification crack

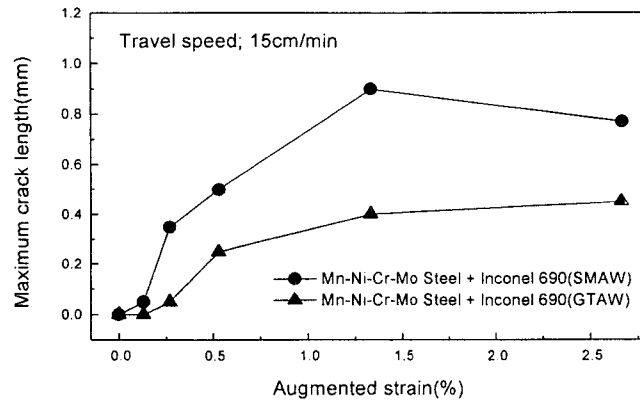


Fig.3 Relation between augmented strain and maximum crack length

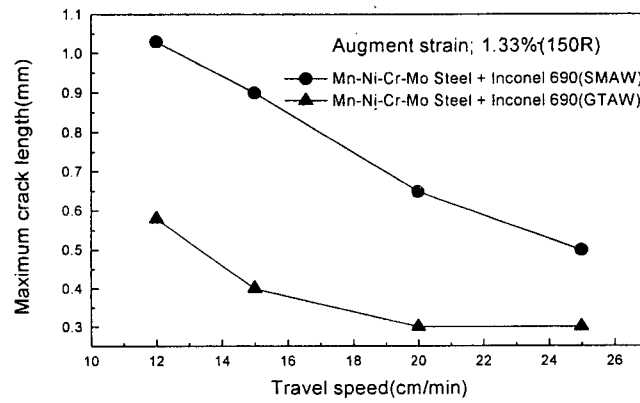


Fig.4 Relation between travel speed and maximum crack length

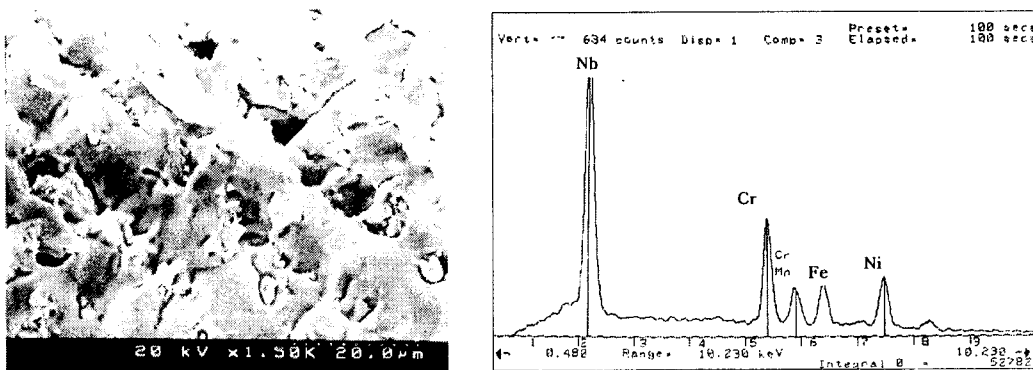


Fig.5 SEM microfractographs and EDX analysis in the modified varestaint test

참고문헌

- 1) W.F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", p.466, McGraw-Hill, U.S.A 1981.
- 2) "Corrosion of Nickel Base Alloy", Metals Handbook, 9th Ed., p.641, ASM International, U.S.A 1987.