

Mn-Ni-Cr-Mo강에 대한 Inconel 690 오버레이 용접부에서의 고온균열의 발생거동

양병일* · 김정태* · 박광식** · 신용범*** · 안용식*** · 박희순***

*두산중공업 기술연구원

**창원기능대학 플랜트설비자동화과

***부경대학교 공과대학 재료공학부

Hot Cracking Behavior in Inconel 690 Overlay Welds on Mn-Ni-Cr-Mo Steel for Pressure Vessels

Byung-Il Yang*, Jeong-Tae Kim*, Kwang-Sik Park**, Yong-Beom Shin***,
Yong-Sik Ahn*** and Hwa-Soon Park***

*Research and Development Center, Doosan Heavy Industries & Construction Co., LTD., Changwon 641-792, Korea

**Dept. of Automation of Plant Fabrication, Changwon Polytechnic College, Changwon 641-772, Korea

***Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Abstract

In order to clarify hot cracking phenomena occurred in Inconel 690 welds and its prevention, in this study, the cracking behavior and the influence of welding variables on cracking in Inconel 690 overlay welds on Mn-Ni-Cr-Mo steel(SA 508 cl.3) for pressure vessel were investigated by using mock-up test. The main results are as follows:

The cracks in Inconel 690 overlay welds were mainly generated near the start and the end part of welding beads adjacent to STS 309L welded outside of Inconel 690 welds. Most of the cracks showed typical solidification crack, and also it was assumed that there was possibility of liquation cracking in HAZ. The existence of Nb constituents or concentration of Nb was recognized on the fracture facets of the solidification cracks in the welds by SMAW. Therefore Nb was considered to be the main factor of the solidification cracking. As the weld heat input was more increased and the weld bead length was longer, the extent of cracking was more increased. Moreover the extent of cracking was considerably decreased by changing of welding sequence to the start and the end part of welds. Hot cracking in welds by GTAW was considerably decreased as compared with that of SMAW. And cracks were well generated in the Inconel 690 overlay welds adjacent to STS 309L welds. This means that the hot cracking susceptibility of Inconel 690 welds was largely varied by chemical components and/or compositions of filler metals, base metals and neighboring welds.

(Received December 1, 2001)

Key Words : Ni-base super alloy, Inconel 690, SA 508 cl.3 steel, STS 309L stainless steel, Overlay welds, SMAW, GTAW, Hot cracking, Solidification cracks, Liquation cracks

1. 서 론

Inconel 690 초내열합금은 주 합금원소가 Ni-Cr-Fe인 γ 계 고용강화형 합금으로 고온에서 안정하고, 성형성, 내부식성 및 고온 기계적 특성이 우수하기 때문

에 화학용기, 열처리장치, 항공기의 엔진 및 구조재료에 사용되며, 특히 우수한 내식성으로 최근에는 원자력 발전소의 증기발생기 전열관 재료로 사용되고 있다^{1~9)}. Inconel 690 합금은 Inconel 600 합금에 비하여 Cr 함유량을 약 2배 정도로 증가시켜 응력부식균열의 저항성을 향상시킨 것으로 용체화 온도 이하에서 열처리를

하게 되는데, 이 열처리에 의하여 고용되어 있던 탄소는 치환형 합금원소와 결합하여 탄화물을 형성하게 된다. 또한 열처리 온도 및 시간을 조절함으로써 입계에 반연속적인 탄화물을 얻을 수 있는데, 이러한 반연속적인 입계 탄화물이 입계를 따라 진전하는 응력부식균열에 대한 저항성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다^{7,10,11)}.

최근, 신규로 건설하는 원자력 발전소의 경우에는 Inconel 600보다 훨씬 우수한 내식성을 가지고 있는 Inconel 690으로의 교체가 진행되면서, 이들에 대한 용접 및 클래딩이 주목을 받고 있다. 그러나 Inconel 690 용접금속은 일반 스테인리스강의 용접금속과는 달리 완전 오스테나이트이므로 고온균열에 민감하고, 기공, 용입불량 등의 결함이 발생하기 쉽다는 단점을 가지고 있으며, 용접재료 등과 관련한 용접법이 정확히 정착되지 않은 관계로 여전히 많은 불건전 용접부가 발생하고 있는 실정이다^{12,13)}.

본 연구에서는 Inconel 690 오버레이용접부의 균열 현상에 대하여, 균열의 종류와 발생거동 및 특징, 그리고 발생기구 등을 물리금속학적인 관점에서 종합적으로 검토하고, 그에 따른 균열발생에 대한 방지대책을 수립하고자 하였다. 따라서 먼저 본 연구에서는, 압력용기용 Mn-Ni-Cr-Mo 강(SA 508 cl.3 강)을 모재로 하고 Inconel 690 용접부가 놓여지는 바깥 부분에는 STS 309L이 오버레이 용접되어 있는 실제 구조물과 유사한 형태의 mock-up 시험편을 사용하여, Inconel 690 용접부에서 발생하는 균열의 종류 및 특징 등을 파악하고, 이들 균열의 발생에 미치는 용접법, 용접재료 및 용접조건 등의 영향에 대하여 기초적인 검토를 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

Inconel 690 용접부가 놓여지는 모재는 원자력 압력

용기용 Mn-Ni-Cr-Mo 강(이하 SA 508 cl.3) 블록을 사용하였다. 그리고 SA508 cl.3 블록 상부의 Inconel 690 용접부가 놓여지는 오목한 창형의 바깥 부분은 STS 309L로 오버레이용접을 하였다. STS 309L 용접부로 둘러싸인 Inconel 690 오버레이 용착부는 SMAW 및 GTAW에 의하여 형성시켰다. 본 연구에서 사용한 모재 및 용접재료의 화학조성을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타내었다.

2.2 실험방법

Inconel 690 오버레이용접부에서 발생하는 균열에 대한 특징을 검토하기 위한 시험편의 개략적인 형상 및 그에 대한 용접방법을 Fig. 1에 나타내었다. 시험편의 제작방법은, 시험편 블록에 STS 309L을 SAW로 용접하였으며, 그림에 나타난 시험편의 중앙부와 끝단부를 가공하여 가장자리를 STS 309L로 SMAW를 한 후, 여기에 Inconel 690을 SMAW로 용착부를 형성시켰다. 이때 Inconel 690 SMAW는 직경 4.0mm의 용접봉을 사용하였으며, 용접조건은 120A-24V-15cm/min로 하였다. 그리고 예열 및 패스간 온도는 약 120℃가 되도록 하였으며, 용접 후 210~300℃에서 2 시간 후 열 처리를 하였다.

용접법 및 용접조건에 의한 균열발생 거동을 검토하기 위한 시험편의 형상 및 개략적인 용접방법을 Fig. 2에 나타내었으며, 다음과 같이 제작하였다. 시험편 블록은 위의 시험편에서와 마찬가지로 블록의 표면에 STS 309L을 SAW에 의하여 폭이 약 50mm 썩의 전면 오버레이용접을 하였다. 용접 후의 표면에 창형의 오목한 공간을 가지도록 가공을 하였으며, 여기에 SMAW와 GTAW에 의하여 Inconel 690 오버레이용접을 하였다. Inconel 690 용접시의 예열온도, 패스간 온도 및 후열 처리조건은 Fig. 1의 경우와 동일하게 하였다. SMAW에 의한 시험편 A는 상대적으로 낮은 입

Table 1 Chemical compositions of base metal

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Al	Nb	Mo	Co	V	Ta
SA508 cl.3	0.91	0.20	96.35	0.20	0.26	1.37	0.008	0.002	-	-	0.22	-	0.48	-	-	-

Table 2 Chemical compositions of filler metals for SMAW and GTAW

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Al	Nb	Mo	Co	V	Ta
Inconel 690 (SMAW)	55.48	29.90	10.20	0.028	0.21	2.21	0.007	0.005	0.03	0.01	0.02	1.81	0.07	0.01	0.01	-
Inconel 690 (GTAW)	60.38	29.24	8.91	0.029	0.33	0.21	0.004	0.004	0.24	0.10	0.49	-	0.01	0.03	-	0.003
STS309L(SAW)	13.19	23.77	60.94	0.011	0.36	1.60	0.013	0.001	-	-	-	-	0.06	-	0.05	-

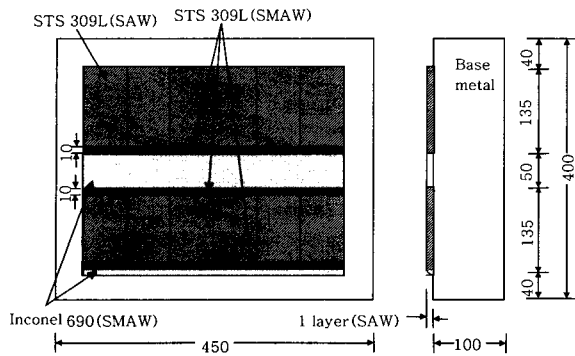


Fig. 1 Configuration of the specimen for cracking occurrence

열량에서의 균열발생 거동을 조사하기 위한 시험편으로, Inconel 690 시험 용접부에 해당하는 오목한 창형 공간의 테두리는 STS 309L을 SMAW로 용접하였으며, 내부는 Inconel 690을 SMAW로 좌에서 우 방향으로 면을 채워가는 형태로 다패스, 다층용접을 하였다. 이때 용접봉은 직경 4.0mm를 사용하였으며, 용접조건은 120A-20V-15cm/min의 입열량 약 8kJ/cm로 하였다. 그리고 동일한 제작과정을 가지며 A에 비하여 입열량이 높은 시험편 B, C 및 D는 동일한 용접재료를 사용하여 160A-20V-15cm/min의 조건으로 용접을 하였으며, 이때 입열량은 약 15kJ/cm이었다. 시험편 C는 용접 순서의 변화에 대한 균열발생을 검토하기 위한 시험편으로, 시험편의 형상 및 제작과정은 위의 시험편 A 및 B와 동일하지만, 실제 구조물의 경우에 Inconel 690 용접부의 시작부와 끝부분에서 균열이 잘 발생한다는 것을 고려하여 시작부와 끝부분에 약 1~2 패스간격을 남기는 형태의 용접을 한 것이 다르며, 여기서 남겨진 좌우의 공간은 동일한 용접조건으로 위에서 아래 방향으로 용접을 하였다. 시험편 D는 용접비드 길이의 변화에 대한 균열발생을 검토하기 위한 시험편으로, Inconel 690 용접부의 길이방향의 길이를 짧게 하여 비드의 길이가 약 100mm가 되도록 만든 것이며, 그 외의 제작과정 및 용접조건은 시험편 C와 동일하다. 또한 본 연구에서는 용접법의 변화와 함께, 용접재료의 화학조성이 SMAW와 다르다는 것에 주목하여, GTAW에 의한 Inconel 690과 STS 309L 경계부의 용접 결함을 조사하기 위하여 시험편 E, F 및 G를 제작하였다. 시험편 E는 SMAW에 의한 시험편 C의 입열량이 낮은 경우에 상당하는 것으로, 시험편의 제작과정은 동일하며, 시험용접부가 GTAW에 의해서 이루어졌다는 것만이 다르다. 이때 GTAW는 직경 2.4mm의 용접와이어를 사용하였으며, 용접조건은 100A-12V-15cm/min로 하였다. 시험편 F와 G는 E에 비하여 입열량이 높은

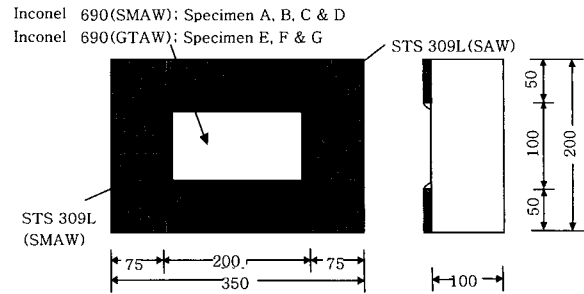


Fig. 2 Configuration of the specimen of A, B, C, E, F and G(the specimen D has shorter length of Inconel 690 welds than the other specimens)

경우에 해당하는 것으로 SMAW의 시험편 B와 C에 상당하며, 용접조건은 200A-17V-15cm/min으로 하였다. 용접부에 발생한 균열 및 용접부 단면의 조직은 경면연마 후, 전해 에칭하여 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 균열의 파면은 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 균열주위 및 파면상의 입자들에 대해서는 EDX, EPMA 및 AES 분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

서론에서 서술한 바와 같이, 응력부식 균열저항성을 개선하기 위하여 원자력발전설비의 증기발생기 전열관 재료로 Inconel 690의 채용이 증가하고 있는데, 이들 Inconel 690 오버레이 용접부에서는 종종 균열을 비롯한 결함이 발생하였으며, 이들 결함의 발생으로 인하여 구조물의 제작에 지장을 초래하고 있다⁷⁾. Inconel 690 용접 구조물에서 나타난 결함은 침투탐상시험이나 자분탐상시험에 의하여 용이하게 판독되었으며, 이때 검출된 결함은 다음과 같은 특징을 가지고 있었다. 결함은 대체로 깊이를 가지고 있었으며, 크기가 큰 것은 약 3~4mm 정도로 나타났다. 또한 결함은 Inconel 690 오버레이용접 패스가 겹치는 부분에서도 발생하였으며, 특히 STS 309L 오버레이 용접층과 Inconel 690 오버레이 용접부를 연결하는 경계 부위에서 가장 많이 발생하는 경향을 보였다. 결함의 발생 영역은 STS 309L 용접부와 연결되는 Inconel 690 용접부의 첫 번째 층과 두 번째 층 또는 그 경계에서 주로 발생하였다. 그리고 이들 결함은 결함의 크기와 형상 등으로 미루어 대부분 균열인 것으로 추정되었으며, 실제 구조물에서 균열로 확인되었다.

3.1 균열의 발생 거동 및 특징

Inconel 690 오버레이용접부에서의 균열의 발생거동

및 특징을 명확하게 하기 위하여 실용접부와 유사한 형태의 mock-up 시험편을 사용하여 검토하였다. Mock-up 시험 후의 침투탐상 또는 자분탐상조사 결과에 의하면, 모든 시험편에서 결함이 많이 발생되었으며, 이들 결함은 실제 구조물에서와 마찬가지로 대부분 균열로 확인 되었다. 그리고 균열은 STS 309L의 SMAW 용접부와 인접한 Inconel 690 용접부에서 주로 발생하였으며, 또한 Inconel 690 용접의 시작부와 종료부 근방에서 비교적 많이 발생하는 경향을 보였다.

Fig. 3은 Inconel 690 용접부에서 발생한 균열의 예를 나타낸 것으로, 용접부의 단면 매크로 조직 사진, 용접부의 모식도 및 균열부위의 매크로 조직 사진을 나타내었다. 균열은 SMAW에 의한 STS 309L 용접부와 인접한 Inconel 690 SMAW 용접부의 첫 번째 비드와 두 번째 비드에 연결된 형태를 보이고 있으며, 이에 대한 균열 근방의 미세조직 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 균열은 셀상수지상정의 경계에서 발생 진전하고 있는

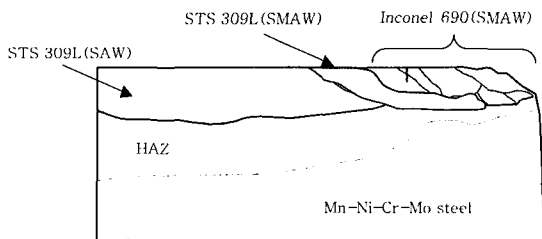
며, 균열의 선단이 날카롭지 않은 형태를 띄고 있어 고온균열의 특징을 보이는 것을 알 수 있다.

시험편의 표면에서 관찰한 Inconel 690 용접부의 균열에 대한 미세조직 사진과 용접부의 개요를 Fig. 5에 나타내었다. 균열은 Inconel 690의 첫 번째 비드 또는 두 번째 비드, 그리고 첫 번째 비드와 두 번째 비드 모두에서 발생하는 형태로 관찰되었으며, 균열은 모두 셀상수지상정의 계면에서 발생 진전하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 (b)에 나타난 균열은 첫 번째 비드과 두 번째비드와의 경계에서 단절되어 있는 형태를 보이고 있는데, 이것은 첫 번째 비드를 용접할 때 발생한 것으로 균열의 일부가 두 번째 비드에 의하여 묻힌 것으로 생각된다. 또한 첫 번째 비드를 용접하였을 때는 발생하지 않았으나, 두 번째 비드를 놓게 되면 이 부분은 용접열영향부(이하 HAZ)에 해당이 되기 때문에, 두 번째 비드의 용접시에 발생한 HAZ의 액화균열일 가능성도 있는 것으로 추정할 수 있다.

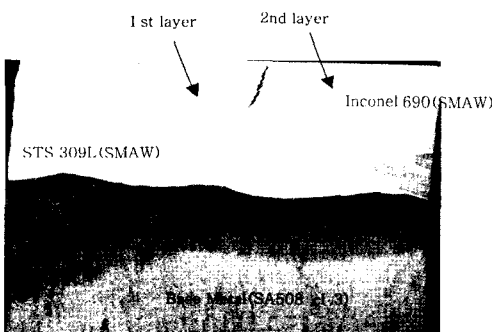
이들 결과에서 알 수 있는 바와 같이, Inconel 690 용접부에서 발생하는 균열은 STS 309L 용접부와 인접한 위치에서 잘 발생하는 경향을 보였으며, 특히 Inconel 690의 첫 번째와 두 번째 비드에서 균열이 잘 발생한다는 것을 알았다. 그리고 이와 같은 경향은 실제 구조물에서의 결함의 발생 경향과 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이들 균열은 용접금속에서 발생한 균열이 주를 이루는 것으로 판단되었으며, 또한 재가열 용접금속의 HAZ에서도 균열이 발생할 가능성이 있는 것으로 추정되었다.



(a) Cross-sectional macro-structures of welds

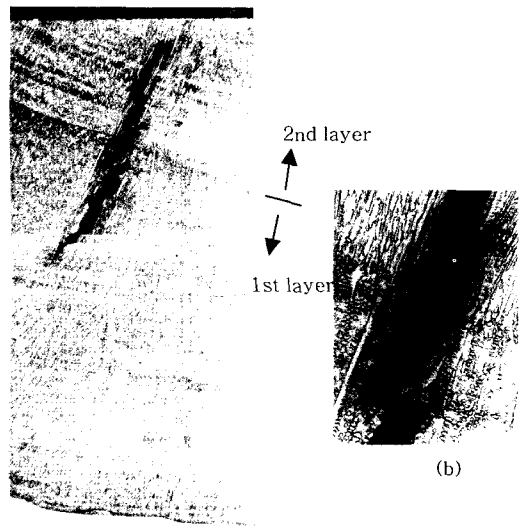


(b) Sketch of welds of (a)



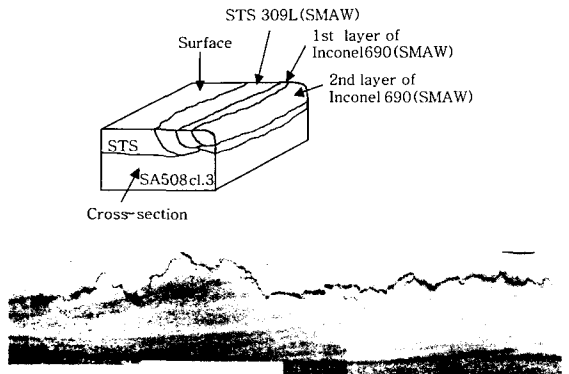
(c) A crack occurred in Inconel 690 welds

Fig. 3 Cross sectional structures showing a crack occurred in 1st and 2nd pass of Inconel 690 welds near STS 309L welds



(a)

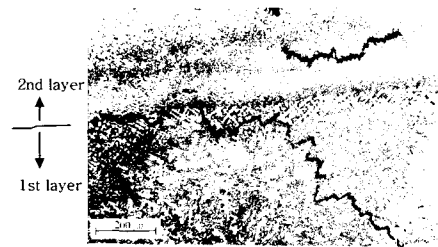
Fig. 4 Cross sectional microstructure near crack occurred in 1st and 2nd pass of Inconel 690 welds



(a) Cracks observed in the 2nd layer of Inconel 690 welds



(b) Cracks observed in the 1st layer of Inconel 690 weld



(c) Cracks observed in the 1st and 2nd pass of Inconel 690 welds

Fig. 5 Examples of the cracks observed in 1st and /or 2nd layer of Inconel 690 welds

Fig. 6은 균열의 파면사진을 나타낸 것이다. 파면은 덴드라이트의 돌기가 관찰되는 전형적인 응고균열의 형태를 보여주고 있으며, 대부분의 균열에서도 이와 유사한 파면 형태를 보이는 것으로 보아, Inconel 690 용접부에서 발생한 균열은 대부분이 응고균열인 것으로 판단되었다. 그리고 이들 파면상에서는 수직상 계면에서 여러 가지 형태의 크고 작은 입자들이 관찰되었는데, 이들에 대한 EDX 분석에 의하면, Nb, Al, Si, S 등의 원소가 주로 검출되었다. 그러나 이들의 상대적 조성은 Nb이 Al이나 Si 등에 비해서는 현저히 크게 나타났으며, 그 빈도 또한 많이 관찰되었다. 또한 그 중에는 Nb의 대단히 강한 피크를 이루는 것도 다수 관찰되었는데, 그 예를 Fig. 7에 나타내었으며, 이처럼 Nb의 피크가 강하게 나타나는 것은 후술하는 EPMA 분석결과에서 나타내는 바와 같이, 대체로 NbC 탄화물인 것으로 추정되었다.

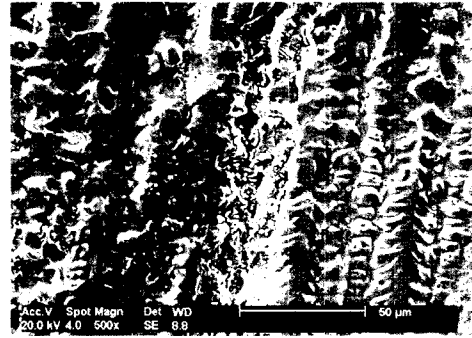
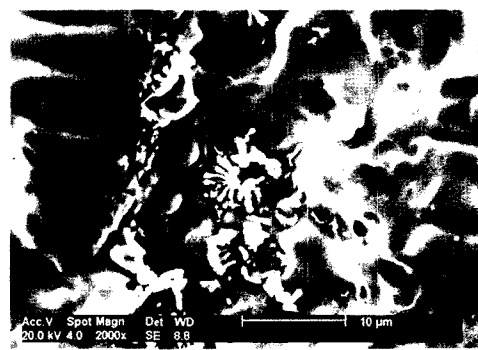
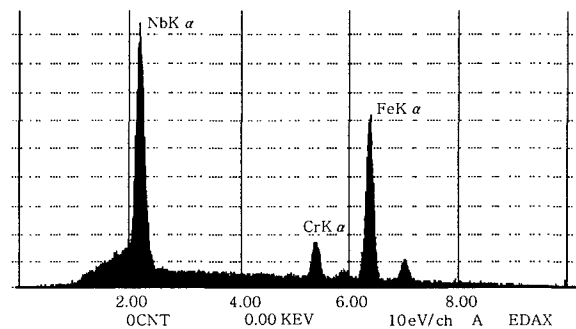


Fig. 6 SEM microfractograph of typical fracture surface of solidification crack



(a)



(b)

Fig. 7 SEM microfractograph of fracture surface of solidification crack (a) and EDX analysis (b) of constituents on (a)

이와 같은 Nb rich 입자를 확인하기 위하여, Inconel 690 용접부의 균열 근방에 대한 EPMA 분석을 하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 균열부위에 Nb와 C의 농화가 인정되었으며, 이들 중 일부는 Nb와 C가 동시에 검출되는 것으로 보아 NbC 탄화물인 것을 알 수 있었다. 즉 Inconel 690 용접부의 균열에는 Nb이 악영향을 미치고 있는 주요 인자의 하나라는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 후속 연구인 고온균열시험결과에서도 확인되었다. 그리고 Inconel 690 용접금속의 단면 미세조직에 대한 SEM 관찰 및 EDX 분석에 의해서도, Fig. 9에 나타내는 바와 같이, 수직

상 계면에서 Nb의 피크가 강하게 검출되는 미세한 입자들이 많이 관찰되었다.

이상과 같은 결과는 수지상 계면에 Nb이 농화 또는 Nb 화합물이 많이 존재한다는 것을 나타내고 있으며, Nb이 Inconel 690 용접금속의 응고균열에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미하고 있다. 일반적으로, Nb을 비교적 다량으로 포함하고 있는 Ni기 초내열합금에서는 응고균열이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있으며, Nb은 NbC, γ -상(Ni₃Nb), Laves 상을 형성하는 원소로서, 이들 합금의 최종 응고부에 γ /NbC나 γ /Laves 등의 공정이 정출하기 쉽고, 또한 이들은 저용점화합물이기 때문에 응고균열 감수성을 높이는 것으로 보고되고 있다¹⁴⁻¹⁷⁾. 따라서 본 연구에서도 Inconel 690 용접부의 응고균열의 발생에는 NbC/ γ -상 또는 γ /NbC의 공정 등이 크게 영향을 미치고 있다는 것을 시사하고 있다.

3.2 균열발생에 미치는 용접변수의 영향

실제 구조물의 Inconel 690 오버레이용접부에서는

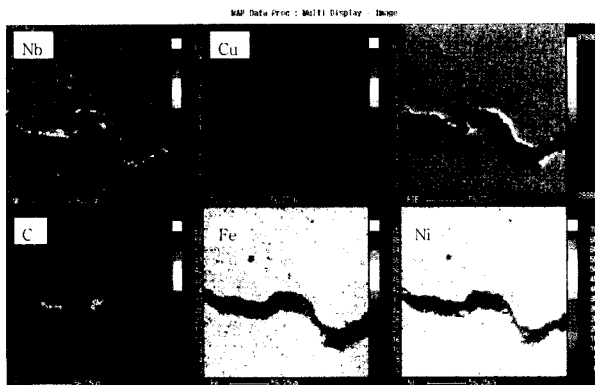


Fig. 8 EPMA mapping of Ni, Fe, Cu, C and Nb near crack on cross-section in welds

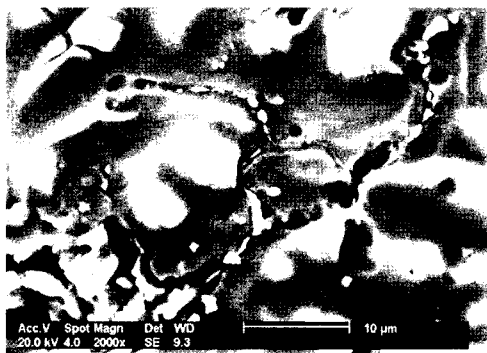


Fig. 9 SEM microstructure of Inconel 690 weld metal showing constituents with strong peak of Nb in EDX analysis

용접 시작부와 종료부 부근에서 잘 발생하였으며, 이러한 경향은 3.1에서 서술한 mock-up 시험 결과에서도 확인되었다. 그리고 Inconel 690 용접부가 놓여지는 외곽부에 해당하는 STS 309L과 인접한 Inconel 690 용접부의 첫 번째 패스와 두 번째 패스에서 잘 발생하는 경향을 보였다. 그리고 이들 균열은 대부분 응고균열인 것으로 확인되었으며, HAZ에서의 액화균열이 발생할 가능성도 큰 것으로 추정되었다. 이러한 균열 발생 거동은 Inconel 690 자체의 고유한 성질, 즉 응고 취성온도범위에 기인하는 고온균열감수성과 함께, 용접부의 자체변형 및 외부변형의 정도, 용접재료와 모재 또는 인접부위와의 희석에 의한 용접금속의 화학조성의 변화 등의 영향이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용접변수로서 용접 입열량, 용접부의 크기, 용접법/재료의 변화에 의한 균열발생의 변화에 대하여 검토를 하였다.

용접변수를 변화시킨 시험편에서 발생한 결함은 먼저 침투탐상시험에 의하여 조사하였으며, 이들 결함은 대부분 균열로 확인되었다. 그리고 이들 균열은 시험편의 종류에 관계없이, 대체로 Inconel 690 용접 종료부에서 주로 나타났으며, 용접 시작부에서도 일부 관찰되었다. 이들 균열의 발생 위치는 Inconel 690 용접부가 형성되는 외곽 용접부인 STS 309L와의 경계부에 인접한 곳으로, 이러한 균열발생 경향은 3.1에서 언급한 결과와 잘 일치하였다.

SMAW 및 GTAW에 의한 시험편에서 발생한 총 균열의 길이를 Fig. 10에 나타내었다. 먼저 SMAW에 의한 결과에 의하면, 시험편 B에서 가장 많은 균열이 발생하였으며, 동일한 용접부의 크기 및 용접순서에서 입열량을 낮게 한 시험편 A에서는 균열 발생량이 상대적으로 적게 나타났으나, 그 차이는 비교적 작았다. 이것은 Inconel 690 용접부에서 입열량의 증가는 상대적으로 균열발생을 증가시킨다는 것을 의미하고 있으나, 뚜렷하지는 않다고 할 수 있다. 그리고 Inconel 690 용접부가 STS 309L과 인접한 위치에서 균열이 잘 발생한다는 것을 고려하여, 시험편의 용접 시작부와 용접 종료부에 일정한 공간을 남기고, 나중에 그 공간을 채우는 방법으로 용접한 시험편 C에서는, 시험편 A 및 B와는 다르게, 용접 시작부와 종료부에서는 거의 균열이 발생하지 않았으며, 발생한 균열의 총 길이도 현저히 감소하였다. 여기서 균열은 시험편의 왼쪽과 오른쪽의 남겨졌던 공간(나중에 위에서 아래쪽으로 용접하여 매워짐)의 안쪽 위치에서 약간 검출되었다. 이것은 동일한 용접재료와 용접입열 조건이라고 하더라도 용접 순서를 적절하게 변경함으로써 Inconel 690 용접부의

고온균열을 상당히 저감화 할 수 있다는 것을 의미하고 있다. 한편 시험편 B와 용접입열 및 용접순서는 동일 하지만, 용접비드의 길이를 짧게 하여 용접을 한 시험편 D의 경우는, 시험편 B의 경우와 비교하여 균열이 용접비드의 끝부분에 집중하여 발생하는 것은 유사하였으나, 균열의 총길이가 현저하게 감소하는 결과를 나타내었다. 즉, 용접비드의 길이가 감소함으로써 균열발생이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 균열이 가장 작게 발생하였던 시험편 C보다는 많은 균열 발생량을 보였다. 이러한 결과는, 모재 또는 인접 용접부와의 회석에 의한 영향과 함께, 용접부에서 발생하는 총변형량 또는 구속의 정도가 복합적으로 작용하여 균열발생에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미하고 있다.

한편 GTAW에 의한 결과에 의하면, SMAW에 의한 결과와 마찬가지로 시험편 E와 F에서는 용접 시작부와 종료부 부근에서 균열이 주로 발생하였으며, 용접입열이 큰 시험편 F의 경우가 시험편 E에 비하여 균열이 더욱 많이 발생하였다. 또한 시험편 G에서는 시험편 F에 비하여 균열발생이 적었으며, 이와 같은 경향은 SMAW 법에 의한 결과와 동일한 것으로, 용접순서를 적절히 변경함으로써 균열발생을 감소시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 용접법이 다르기 때문에 동일한 조건에서 직접 균열발생의 정도를 비교할 수는 없지만, 시험편 A와 E 및 B와 F에서의 균열발생량을 각각 단순 비교하여 보았을 경우, GTAW에 의한 Inconel 690 용접부가 SMAW의 경우에 비하여 균열이 적게 발생한다는 것을 알 수 있다.

균열의 발생거동 및 특징은, 앞서 서술한 바와 유사하였으며, 전형적인 응고균열의 형태를 띠는 것이 대부분이었다. 그리고 SMAW에 의한 균열의 표면에서는 불특정한 미세입자들이 많이 관찰되었으며, 이들 입자에서는 Nb를 주로하여 Al, Si, S, P 등의 원소도 검

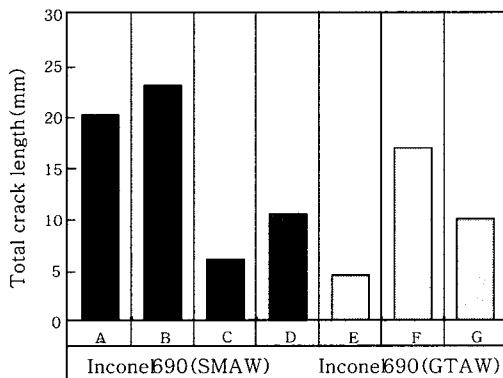


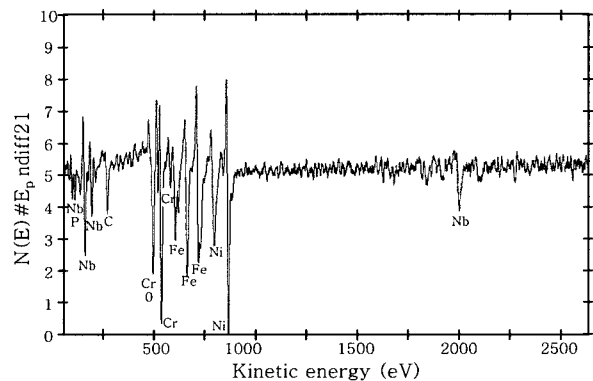
Fig. 10 Influence of heat input, welding sequence and bead length on hot cracking of Inconel 690 welds by using SMAW and GTAW

출되었다. 이들 균열의 파면에 대하여 AES 분석에 의한 Auger 전자분광스펙트럼의 예를 SEM 상과 함께 Fig. 11에 나타내었다. 표면상에서 Nb의 피크가 강하게 검출되었으며, P와 C의 존재도 일부 인정되었다. 즉, 응고균열의 표면상에는 Nb이 농화되어 있는 것을 알 수 있으며, 3.1에서 서술한 바와 같이, Nb이 본 연구에서의 응고균열의 발생에 크게 영향을 미치고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 GTAW에 의한 균열의 표면에서는 Nb은 전혀 검출되지 않았으며, Ti, Si, Al, S 등의 피크가 검출되었다. 따라서 SMAW에 의한 용접부가 GTAW에 비하여 균열발생의 정도가 컸다는 것은 Table 2의 용가재의 화학조성에서 나타낸 바와 같이 SMAW의 용접봉에 포함되어 있는 Nb이 고온균열감수성을 높이는데 주체적인 역할을 하고 있다는 것을 의미하고 있다.

이상의 결과에 의하면, Inconel 690 용접부의 균열은 용접 시작부와 종료부에서 주로 발생하였으며, 대부분 응고균열이라는 것을 알았다. 그리고 이들 균열은 용접 입열량이 증가할수록 균열의 발생이 증가하였으며, SMAW에 비하여 GTAW에 의한 경우가 균열이 적게 발생하는 경향을 보였다. 또한 용접 비드의 길이가 길어질수록, 즉 총변형의 크기가 커질수록 균열이



(a)



(b)

Fig. 11 AES microfractograph of solidification cracking surface occurred in Specimen B (a) and Auger spectrum of facet (a) (b)

많이 발생하는 경향을 보였다. 또한 용접순서를 변경하여 용접 시작부와 종료부를 변화시켰을 경우에 균열발생이 현저히 저하한다는 것은 주목할만한 결과이며, 이후 상세한 검토가 필요한 것으로 생각된다. 그러므로 Inconel 690 용접부의 고온균열을 방지 또는 저감화하기 위해서는 용접조건에 대한 검토와 함께, 용접재료의 화학조성, 모재 또는 인접 용접부의 종류와 그에 따른 희석, 용접순서 등을 종합적으로 고려하여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

압력용기용 Mn-Ni-Cr-Mn 강(SA508 cl.3 강)에 대한 Inconel 690 오버레이 용접부에서 발생하는 균열 현상 및 그 방지대책에 대하여 검토하기 위하여, 먼저 균열의 발생거동과 균열발생에 미치는 용접변수의 영향에 대하여 mock-up 시험편을 사용하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Inconel 690 오버레이 용접부의 균열은 용접 시작부와 종료부 부근에서 주로 발생하였으며, Inconel 690 오버레이 용접부가 놓여지는 부분의 외곽부에 용접되어 있는 STS 309L과 인접한 Inconel 690 용접의 첫 번째 패스와 두 번째 패스에서 주로 발생하는 경향을 보였다.

2) 용접부의 균열에 대한 파면관찰에 의하면, 균열의 대부분은 전형적인 응고균열이었으며, 용접금속의 재가열 HAZ에서의 액화균열도 발생하였을 가능성이 있는 것으로 생각되었다.

3) SMAW에 의한 용접부에서 발생한 균열의 파면상에서는 Nb 화합물의 존재 또는 Nb이 농화되어 있는 것을 알 수 있었으며, 균열발생이 상대적으로 적었던 GTAW 용접부에서 발생한 균열의 파면에서는 Nb이 전혀 검출되지 않는 것으로 보아 Nb은 Inconel 690 용접부에서의 고온균열 발생의 주 요인의 하나인 것으로 생각되었다.

4) 균열은 용접 입열량이 증가할수록, 또한 용접비드가 길수록 발생량이 증가하는 경향을 보였으며, 용접시작부와 종료부의 용접순서를 적절히 조합하면 균열발생이 현저히 감소한다는 것을 알았다.

5) GTAW에 의한 용접부가 SMAW에 의한 용접부에 비하여 균열발생이 크게 감소하였으며, STS 309L

과 인접한 위치에서 균열이 잘 발생한다는 것은 Nb과 같은 특정 성분 뿐만 아니라, 용접재료, 모재 또는 인접용접부의 화학조성에 따라서 Inconel 690 용접부의 고온균열감수성이 크게 변화한다는 것을 알았다.

후 기

이 논문은 2000학년도 부경대학교 기성회 학술연구 조성비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. W.F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill, U.S.A., (1981), 466
2. ASM International: Corrosion of Nickel Base Alloys, Metals Handbook, 9th Ed., U.S.A., (1987), 641
3. G.P. Airey et al.: Nuc. Tech., **55**(1981), 436
4. R.A. Page and A. Mcminn: Metall. Trans. A, **17A**(1986), 877
5. M.A. Cordovi: Proceedings of Materials Workshops for the Power Industry, NiDi, (1983), 93
6. J.J. Kai et al.: Metallurgical Transactions A, **20A**(1989), 2057
7. I.H. Kuk et al.: Advanced Nuclear Materials Development, -Nickel-base Alloys(Steam Generator Tube Material)-, Research Report (K.A.E.R.I.), 1997.09., 1-5 (in Korean)
8. K. Shinozaki: Journal of the Japan Welding Society, **69-5**(2000), 447-464 (in Japanese)
9. W. Wu and C.H. Tsai: Metallurgical and Materials Transactions A, **30A-2**(1999), 417-426
10. Fabrication & Welding of Inconel Alloys 625 & 690, Corronel Alloys B-2 & C-4
11. D. Choi and G.S. Was: Corrosion, **46**(1990), 100
12. B.Z. Hyatt and M.G. Burke: Conference of Image Analysis and Metallography, Toronto, Ontario, Canada, July 1988, 491-503 (Published by ASM Int., 1989)
13. K. Lee et al.: Preprints of the National Meeting of Spring (the Korean Welding Society), **Vol. 33** (1999), 270-273 (in Korean)
14. M.J. Cieslak et al.: Welding Journal, **69-12**(1989), 473-482s
15. M.J. Cieslak: Welding Journal, **70-2**(1991), 49-56s
16. M. Konishi et al.: Preprints of the National Meeting of J.W.S., **No. 37**(Autumn 1985), 184-185 (in Japanese)
17. S.C. Ernst et al.: Welding Journal, **68-10**(1989), 418-430s