

## Inconel 690 오버레이용접부의 고온균열 발생에 미치는 용접금속의 화학조성 및 용접조건에의 영향

양병일\* · 지병하\* · 김정태\* · 박광식\*\* · 최해수\*\*\* · 박화순\*\*\*

\*두산중공업 기술연구원

\*\*창원기능대학 플랜트설비자동화과

\*\*\*부경대학교 공과대학 재료공학부

### The Influence of Chemical Compositions of Weld Metal and Welding Conditions on Hot Cracking by Hot Cracking Test

Byung-Il Yang\*, Byung-Ha Chi\*, Jeong-Tae Kim\*, Kwang-Sik Park\*\*,  
Hae-Soo Choi\*\*\* 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 Nam 641-772, Korea

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

#### Abstract

In order to investigate the hot cracking phenomena of the Inconel 690 overlay welds, the hot cracking test(modified Varestraint test) was performed by varying augmented strain and welding speed in GTAW. A total of five kinds of specimens was used in the hot cracking test. The specimens used were two kinds of one layer specimens that were composed of just Inconel 690 deposited metal and three kinds of double layer specimens that were composed with as upper part of Inconel 690 weld metal and lower part of SA508 cl.3 or STS 309L. The main results are as follows:

In the welds composed of just Inconel 690, as the augmented strain was more increased and the welding speed was more decreased, the extent of cracking was more increased. And these cracks were mainly solidification cracks, and liquation cracks were also observed partially in HAZ. And hot cracking susceptibility of Inconel 690 welds by using filler metals containing Nb were higher than that of the welds with Nb free. The hot cracking susceptibility of Inconel 690 weld metal was increased with dilution of SA 508 cl.3 and STS 309L, and the influence of SA 508 cl.3 was higher than that of STS 309L. The results of calculation of  $\Delta TSC$  and  $\Delta TLC$  in Inconel 690 weld metal changed by dilution with base metal or neighboring welds were agreed well with the results of hot cracking test in this study. Therefore, it was expected that the hot cracking was considerably decreased or prevented by using proper welding conditions such as lower heat input, filler metals, base metal and neighboring welds

(Received December 1, 2001)

Key Words : Ni-base superalloy, Inconel 690, Overlay welds, Hot cracking, Solidification cracks, Liquation cracks, Hot cracking test

#### 1. 서 론

Inconel 690 초내열합금은 주 합금원소가 Ni-Cr-Fe 인  $\gamma$  계 고용강화형 합금으로 고온에서 안정하고, 성형성, 내부식성 및 고온 기계적 특성이 우수하기 때문에

화학용기, 열처리장치, 항공기의 엔진 및 구조재료에 사용되고 있다. 특히 최근에는 우수한 내식성으로 인하여 지금까지 많이 사용되어 왔던 Inconel 600을 대신하여 원자력발전소의 증기발생기 전열관 재료로 사용되고 있다<sup>1-9)</sup>. 그러나 Inconel 690 용접금속은 고온균열 등의 결함이 잘 발생한다는 문제점을 가지고 있다<sup>9-11)</sup>.

이전의 연구결과<sup>11)</sup>에 의하면, 압력용기용 Mn-Ni-Cr-Mo강에 Inconel 690용 필러메탈을 오버레이 용접한 용접부에서는 또 다른 오버레이 용접부인 STS 309L 층과 인접한 부위에서 고온균열이 잘 발생한다는 것을 알았다. 균열의 종류는 대부분 응고균열이었으며, 일부 액화균열이 발생할 수 있는 것으로 생각되었다. 이러한 고온균열의 발생은 용접조건에 의한 용접부의 응고 및 냉각과정 중에 발생하는 스트레스/스트레인 뿐만 아니라, Inconel 690 필러메탈 자체의 화학조성은 물론 인접 용접금속 또는 모재의 화학조성이 Inconel 690 오버레이 용접부에 영향을 미친다는 것을 의미하고 있다.

따라서 본 연구에서는 모재 및 인접 오버레이용접층의 혼입에 의한 Inconel 690 오버레이용접부의 균열감수성의 변화에 대하여 박판고온균열시험을 통하여 검토하였다. 박판고온균열시험은 GTAW에 의한 제살용접에 의하여 이루어졌으며, 이때 용접속도와 부하 스트레인을 변화시켰다. 그리고 모재와 인접 용접부와의 희석에 의한 균열감수성의 변화를 검토하기 위하여 Mn-Ni-Cr-Mo강 또는 STS 309L과 Inconel 690 오버레이 용접부가 복층을 이루고 있는 시험편을 제작하여 Inconel 690만으로 이루어진 시험편에 의한 결과와 비교, 검토하였으며, 또한 계산에 의한 응고균열 또는 액화균열에 미치는 화학조성의 영향에 대해서도 검토하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

Inconel 690 오버레이 용접부의 고온균열현상을 검토하기 위하여, 박판고온균열시험(modified Vareststraint

test)을 하였다. 박판고온균열시험의 시험편은 총 5 종류를 사용하였으며, 이들 시험편은, 시험편의 단면이 Inconel 690용 용접재료에 의한 용착금속만으로 제작한 2종류와, 압력용기용 Mn-Ni-Cr-Mo강(이하 SA508 cl.3 강) 또는 STS 309L과 Inconel 690 용착부가 복층이 되도록 제작한 3종류로 되어 있다.

여기서 복층으로 제작한 시험편은, SA508 cl.3 강 모재 또는  $\gamma$ 계 스테인리스강인 STS 309L 용접부에 인접하여 Inconel 690 오버레이용접부가 형성되는 것을 고려하여 제작한 것이다. 이들 3종류의 시험편은, 모재 SA508 cl.3 강에 SMAW용 및 GTAW용의 Inconel 690 필러메탈로 오버레이용접을 하여 제작한 2종류와, STS 309L의 전용착부에 GTAW용 Inconel 690 용접재료를 사용하여 제작한 1종류로 되어 있다. 여기서 SMAW와 GTAW의 2종류의 용접재료를 사용한 것은, mock-up 시험에 의한 실제 용접부에서 균열 발생률이 차이를 보였으며<sup>11)</sup>, 또한 이들 용접재료에는 Nb, Mn, Ti 등의 화학조성이 차이가 있기 때문이다. 그리고 모재를 두 종류로 변화시킨 것은, 실제 용접부가 이들 재료와 희석된 용접부를 형성하며, Inconel 690이 이들 재료와 희석될 경우 용접금속의 화학조성의 변화에 따른 균열감수성의 변화를 검토하기 위한 것이다.

또한 모재 또는 인접 용접부의 화학조성의 영향을 받지 않는 Inconel 690 용착부 자체의 고온균열감수성에 대한 평가와 아울러 다른 시험편에서의 고온균열감수성을 상호 비교, 평가하기 위하여, Inconel 690용 서브머지드아크용접(SAW) 스트립과 GTAW 용접와이어를 사용하여 제작한 두 종류의 시험편을 사용하였다.

본 연구에서 시험편의 제작을 위하여 사용한 모재 및 용접재료의 화학조성을 Table 1 및 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of base metal (wt.%)

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Al	Nb	Mo	Co	V	Ta
STS 309L	13.2	23.8	60.9	0.01	0.36	1.60	0.013	0.001	-	-	-	-	0.06	-	0.05	-
SA508 cl.3	0.9	0.2	96.4	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 (wt.%)

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Al	Nb	Mo	Co	V	Ta
Inconel 690 (SMAW)	55.5	29.9	10.2	0.03	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)	60.4	29.2	8.9	0.03	0.33	0.21	0.004	0.004	0.24	0.10	0.49	0.002	0.01	0.03	-	0.003
Inconel 690 (SAW)	54.2	30.4	10.2	0.02	0.27	2.69	0.005	0.004	0.32	0.02	0.08	1.730	0.01	0.02	-	-

2.2 고온균열시험 방법

고온균열시험에 사용한 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 1에 나타내었다. 모재 SA508 cl.3 또는 STS309L 용접부에 Inconel 690 용접부가 형성되는 것을 고려하여 복층으로 제작한 시험편은 그림 중의 (a)에 나타낸 바와 같이, 총 두께 4mm에서 Inconel 용착부가 3mm 정도가 되도록 하였다. 여기서 고온균열시험에서의 용접은 GTAW 제살용접에 의하여 이루어졌으며, 제살용접은 예비실험을 통하여 아래쪽의 재료가 용융되는 것을 방지하기 위한 용접조건을 사용하였다. 본 연구의 용접조건 범위에 의하면 용입 깊이는 시험편의 표면으로부터 약 2mm 이하가 되도록 하였으며, 고온균열 시험 용접을 실시한 복층 시험편의 단면 매크로 조직사진의 예를 Fig. 1의 (b)에 함께 나타내었다.

위와 같이 제작한 시험편 5 종류에 대한 표면에서 약 1mm 깊이에서의 화학조성은 다음의 Table 3 및 4와 같다.

본 연구에서 사용한 고온균열시험은 외부구속형의 박판고온균열시험장치(이하 영문 표기는 modified Varestraint test로 함)를 사용하였으며, 시험의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 시험방법은, 시험편을 클램프로 고정하고, 미리 설정한 용접조건으로 시험편의 길이방향의 중앙선을 따라 GTA 용접을 하였으며, 용융지의 응고전면(solidification front)이 블록의 중심부에 도달하였을 때, 블록을 작동시켜 응고하는 용접부에 스트레인을 빠른 속도로 부가하였다. 이때 용접 아크는 스트레인을 가한 후 약 20mm를 더 진행시킨 후에 정지시켰다. 본 실험에서 시험편에 부가하는 스트레인은 용접조건 GTAW-100A-15cm/min에서는 0, 0.13, 0.27, 0.53,

1.33 및 2.66%의 5종류를 사용하였으며, 균열발생에 미치는 용접조건 영향을 검토하기 위하여, 부가 스트레인과 용접전류를 각각  $\epsilon$ : 1.33% 및 100A로 일정하게 하고 용접속도를 12, 15, 20, 및 25cm/min의 4종류로 변화시켰다. 이 실험에 의한 균열발생의 정도는 시험편의 표면에서 관찰되는 균열의 총 수, 총 균열

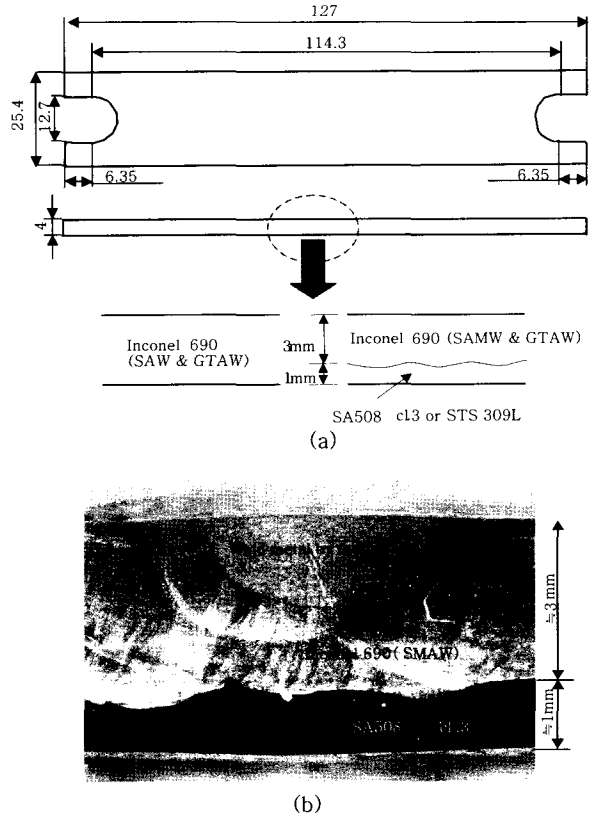


Fig. 1 Configuration and optical macrostructure of the specimen with single or double layers for the modified Varestraint test

Table 3 Chemical compositions at 1mm depth from the surface of the specimen with double layers

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Al	Nb	Mo	Co	V	Ta
SA508-Inconel 690 (SMAW)	46.7	25.1	24.0	0.06	0.22	2.08	0.007	0.005	0.03	0.01	0.07	1.520	0.16	0.01	0.01	-
SA508-Inconel 690 (GTAW)	50.9	24.6	22.9	0.06	0.32	0.40	0.005	0.004	0.20	0.08	0.45	0.002	0.12	0.03	-	0.003
STS309L-Inconel 690 (GTAW)	52.8	28.4	17.2	0.03	0.34	0.43	0.005	0.004	0.20	0.08	0.41	0.002	0.02	0.02	0.01	0.003

Table 4 Chemical compositions at 1mm depth from the surface of the specimen with all weld metal of Inconel 690 by using SAW and GTAW

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Al	Nb	Mo	Co	V	Ta
Inconel 690 (SAW)	54.1	28.7	11.9	0.008	0.49	2.65	0.009	0.011	0.12	0.03	0.04	1.90	0.04	0.02	-	-
Inconel 690 (GTAW)	58.7	27.8	12.5	0.019	0.31	0.25	0.010	0.001	0.22	0.03	-	-	0.01	0.03	0.02	-

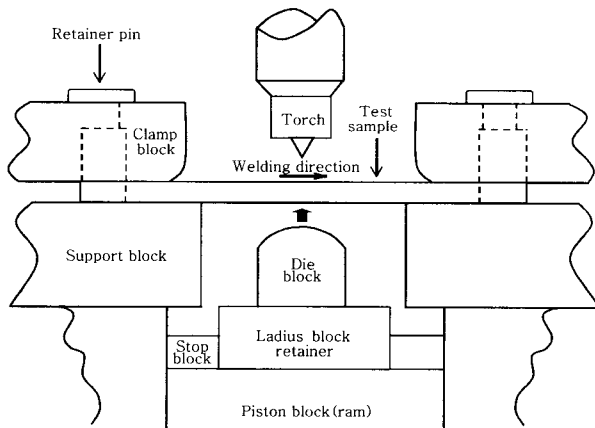


Fig. 2 Modified Vareststraint test apparatus

의 길이, 최장 균열의 길이 및 균열의 평균 길이로 평가하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Inconel 690 용접부의 응고균열현상

3.1.1 Inconel 690 전(全)용착부의 응고균열감수성  
Inconel 690(GTAW)와 Inconel 690(SAW)의 부가 스트레인  $\epsilon$ 의 변화에 따른 균열발생에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 총균열의 길이는 스트레인이 부가될 때의 용융지를 제외한 용접금속에서 발생한 것만을 나타내었다. 이들 용접금속에서의 균열은, 대부분이 수직상정 입계에서 발생한 응고균열이었으며, 열영향부에서는 액화균열도 일부 발생하였다.

균열은 용접재료의 종류에 관계없이, 전체적으로  $\epsilon$ 의 증가에 따라서 균열발생이 증가하는 경향을 보였다.

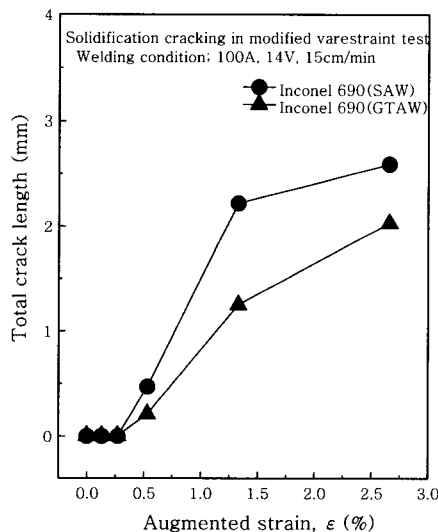


Fig. 3 Effect of augmented strain on solidification cracking in the specimen with all weld metal of Inconel 690(SAW) and Inconel 690(GTAW)

그리고 어느 경우에도  $\epsilon$ : 0.27%까지에서는 균열이 발생하지 않았으며, 0.53%에서 약간의 균열이 발생하여 1.33%에서 균열발생이 비교적 크게 증가하는 경향을 보였다. 그리고  $\epsilon$ : 1.33%와 2.66%에서는 부가 스트레인의 차이가 대단히 크에도 불구하고, 균열발생이 크게 증가하지 않고 대체로 포화하는 경향을 보였다. 그리고 균열이 발생한 스트레인의 범위에서 Inconel 690(SAW)가 Inconel 690(GTAW)에 비하여 높은 값을 나타내었다. 그리고 여기서는 나타내지 않았으나, 균열의 개수, 최대균열의 길이 및 균열의 평균길이에서도 동일한 경향을 보였다. 이것은 Inconel 690(SAW)가 Inconel 690(GTAW)에 비하여 균열감수성이 높다는 것을 의미하고 있다. 일반적으로, 각종 재료에 있어서의 응고취성온도범위로 정의되는 BTR(Brittleness Temperature Range in Solidification)은 응고균열 감수성의 정도를 나타내는 지표라고 할 수 있으며, BTR이 증가하면 균열의 길이도 증가하는 경향을 보인다<sup>8,12)</sup>. 본 연구결과에서도, 최장균열의 길이는 Inconel 690(SAW)의 경우에 약 0.45~0.65mm로 Inconel 690(GTAW)의 약 0.20~0.35mm에 비하여 크게 높은 값을 나타내었다. 이것은 Inconel 690(SAW)의 BTR이 Inconel 690(GTAW)에 비하여 더욱 넓다는 것을 의미하고 있으며, 그 이유는 후술하는 바와 같이 Inconel 690(SAW) 용가재의 경우 Inconel 690(GTAW) 용가재와 비교하여 Nb 등의 용점을 저하시키는 원소가 함유되어 있는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

용접전류와 부가 스트레인  $\epsilon$ 을 각각 100A와 1.33%로 일정하게 하고, 용접속도를 12, 15, 20, 및 25cm/min의 4종류로 변화시켰을 경우의 Inconel 690(GTAW)와 Inconel 690(SAW)의 균열발생 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 총균열의 길이는 어느 경우에도 용접속도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 그 저하의 폭도 매우 크게 나타났다. 이것은 용접속도나 입열량 등의 변화가 균열 발생에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미하고 있으며, 따라서 Inconel 690 용접금속의 응고균열을 감소시키기 위해서는 용접속도의 증가, 즉 입열량을 감소시키는 것이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또한 전 용접속도의 범위에서 Inconel 690(SAW)가 Inconel 690(GTAW)보다 여전히 높은 값을 나타내어, Inconel 690(SAW)가 Inconel 690(GTAW)에 비하여 여전히 균열감수성이 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 Inconel 690(SAW)의 응고전면(solidification front) 근방에서 발생한 균열의 예를 나타내었다.

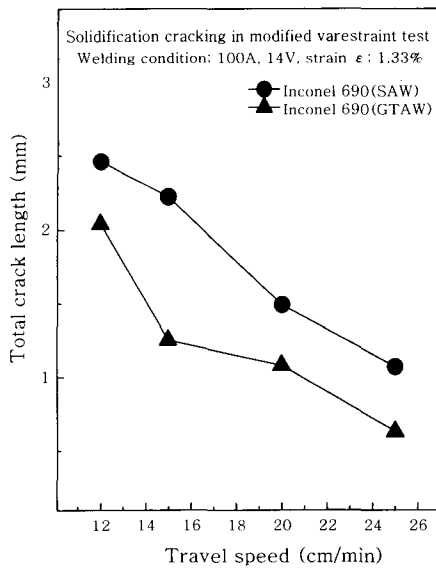


Fig. 4 Effect of welding speed on solidification cracking in the specimen with all weld metal of Inconel 690(SAW) and Inconel 690(GTAW)

용접금속은 셀상수지상정의 조대한 주상정으로 되어있으며, 균열은 응고전면과 약간 떨어진 위치의 수지상정 경계에서 발생하였다는 것을 나타내고 있다. 또한 대부분의 균열은 용접금속내에서 발생하였으며, HAZ에서도 일부의 균열이 관찰되었다. 이들 용접금속의 균열에 대한 파면관찰에 의하면, 어느 경우에도 셀상수지상정의 경계임을 나타내는 덴드라이트의 돌기가 명료하게 관찰되었으며, 응고균열의 영역은 셀상수지상정의 발달 단계, 즉 용액이 존재하는 거의 전 온도영역에서 발생하는 경향을 보였다. 그러나 응고가 시작하는 초기단계의 온도영역인 고온역에 해당하는 파면은 비교적 적게 관찰되었다.

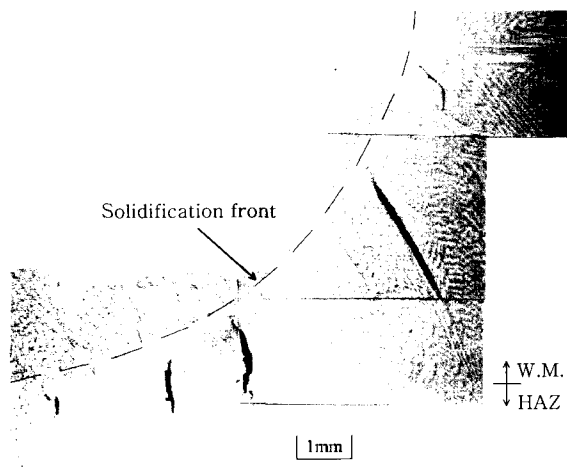


Fig. 5 Typical example of optical microstructure showing hot cracks in Inconel 690(SAW) specimen

### 3.1.2 Inconel 690 용접금속의 화학조성의 변화가 응고균열의 발생에 미치는 영향

Inconel 690 용접부의 고온균열발생에 미치는 용접금속의 조성변화에 대한 영향을 검토하였으며, 여기서 Inconel 690 용접금속의 조성 변화는 모재 SA 508 cl.3 또는 인접 용접부위 STS 309L과의 희석에 의하여 이루어지는 것을 고려하였다.

시험편 SA508-Inconel 690(SMAW)에 대하여, 용접조건을 일정하게 하고 부가 스트레인을 변화시켰을 경우의 고온균열 시험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림 중에는 SA508과의 희석에 의한 균열발생 결과와 비교 검토하기 위하여 용가재의 조성이 대체로 유사하였던 Inconel 690(SAW)의 결과도 함께 나타내었다.

SA508-Inconel 690(SMAW)의 결과에 의하면, 부가 스트레인이 증가할수록 균열발생이 증가하는 Inconel 690(SAW)와 유사한 경향을 보였다. 그러나 SA508-Inconel 690(SMAW)가 Inconel 690(SAW)에 비하여 전체적으로 현저히 높은 균열발생 경향을 보였다. 즉 SA508-Inconel 690(SMAW)가 Inconel 690(SAW)에 비하여 높은 균열감수성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 SAW와 SMAW용의 Inconel 690 용접재료가 거의 유사한 조성을 가지고 있다는 것을 고려하여 볼 때, SA508 성분의 혼입에 의하여 Inconel 690 용접금속의 조성이 변화하며, 이러한 조성의 변화가 균열감수성을 증가시켰다는 것을 의미하고 있다. 이러한 SA508의 혼입에 의한 화학조성 변화가 고온균열감수성에 미치는 영향에 대해서는 후술하는 3.3의 응고온도 또는 액화온도와 화학조성과의 관련식에 의한 계산에 의해서도 확인되었다.

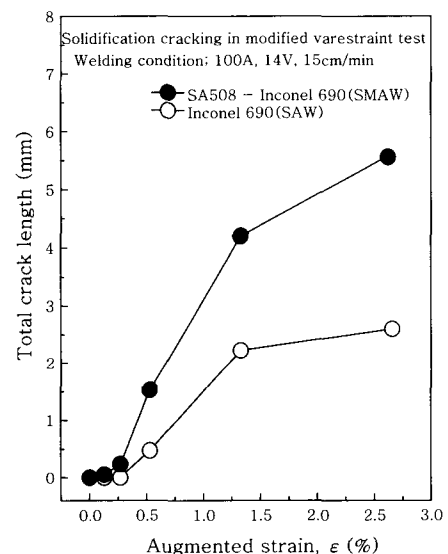


Fig. 6 Effect of augmented strain on solidification cracking in the SA508-Inconel 690(SMAW) specimen with double layers

위와 같은 모재 SA 508 cl.3의 영향은, 부가 스트레인을 일정하게 하고 용접속도를 변화시켰을 경우에서도 동일하게 나타났다. 즉 용접속도가 높아질수록 균열발생이 감소하는 경향은 동일하였으나, 균열발생 정도는 SA508-Inconel 690(SMAW)가 Inconel 690(SAW)에 비하여 전체적으로 현저히 높게 나타났다.

STS 309L-Inconel 690(GTAW)에 대한 고온균열 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림 중에는 Inconel 690(GTAW)의 결과도 함께 나타내었다. 위의 SA508-Inconel 690(SMAW)의 결과와 마찬가지로, 전 부가 스트레인의 범위에서 Inconel 690(GTAW)에 비하여 균열이 더욱 많이 발생하였다. 즉, Inconel 690(GTAW)의 균열감수성이 Inconel 690(SMAW)에 비하여 현저히 낮았음에도 불구하고, STS 309L과의 희석에 의해서 Inconel 690 용접금속의 균열감수성이 현저히 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 균열발생의 정도는 SA508-Inconel 690(GTAW)의 경우(Fig. 6)가 STS 309L-Inconel 690(GTAW)에 비하여 약간 높게 나타났으며, 이것은 SA508의 경우가 STS 309L에 비하여 Inconel 690 용접금속의 고온균열감수성의 증가에 미치는 영향이 더욱 크다는 것을 시사하고 있다. 이러한 균열발생 결과는 용접속도를 변화시킨 경우에도 동일하게 나타났다.

이들 용접부에서 발생한 균열은 응고전면에 인접한 용접금속에서 발생하였으며, 그에 대한 파면의 예를 SA508-Inconel 690(GTAW)에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 오목하게 들어간 부분이 균열전체에 해당하며, (b), (c) 및 (d)는 각각 (a)에서의

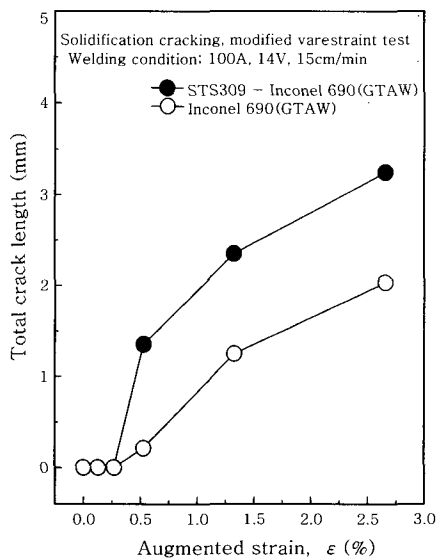


Fig. 7 Effect of augmented strain on solidification cracking in the STS 309L-Inconel 690(GTAW) specimen with double layers

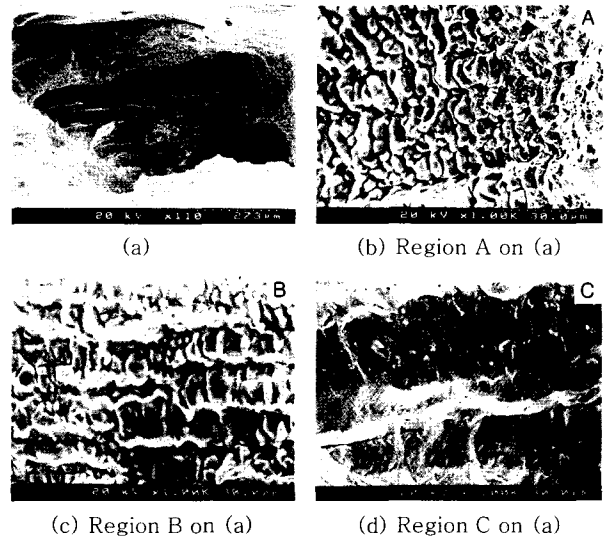


Fig. 8 SEM microfractographs of solidification cracking surface occurred in the SA508-Inconel 690(GTAW) specimen

고온부, 중간온도부 및 저온부의 확대사진을 나타낸 것이다. (b), (c) 및 (d)는 응고가 진행되고 있는 각 온도영역의 특징을 아주 잘 나타내고 있으며, 전형적인 응고균열의 파면 형태를 띄고 있다. 즉 Inconel 690 용접금속에서의 응고균열은 응고가 시작되는 고온역에서 시작하여 응고가 거의 종료하는 저온역까지에 걸쳐서 발생한다는 것을 알 수 있다. 그리고 Nb이 함유된 Inconel 690(SAW) 및 Inconel 690(SMAW)의 응고균열 파면상에서는 크고 작은 입자들이 다수 관찰되었는데, 이들에 대한 EDX 분석에 의하면, Nb, Al, Si, S 등의 피크가 관찰되었으며, 이들 중에는 Fig. 9에 나타내는 바와 같이, Nb의 피크가 주를 이루는 것이 대부분이었다. 따라서 전보<sup>11)</sup>에서도 서술한 바와 같이, 본 연구의 응고균열에는 주로 Nb이 악영향을 미치고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Inconel 690 용접부의 고온균열발생에 미치는 용접재료의 영향을 검토하기 위하여, 모재 SA508에 GTAW 및 SMAW용의 Inconel 690 용접재료로 오버레이용접하여 제작한 시험편인 SA508-Inconel 690(SMAW)와 SA508-Inconel 690(GTAW)의 고온균열시험결과를 Fig. 10에 나타내었다. 어느 경우에도 부가 스트레인이 증가할수록 균열발생의 정도가 증가하였으며, 전체적으로 SA508-Inconel 690(SMAW)의 경우가 SA508-Inconel(GTAW)에 비하여 높은 값을 보였다. 즉 SA508 모재와의 희석에 의하여 Inconel 690 용접금속의 고온균열감수성이 증가하는 경우에 있어서도, Inconel 690용의 SMAW 용접재료에 의한 용접금속의 경우가 GTAW의 경우에 비하여 여전히 높은 균열감수

성을 나타내었으며, 이러한 결과는 용접속도를 변화시킨 경우에도 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 앞서의 연구결과<sup>11)</sup>인 mock-up 시험에 의한 실용접부에서도 동일하게 나타났으며, 또한 균열의 파면에서는 Nb 화합물의 존재 또는 Nb이 농화되어 있는 것으로 분석되었다. Nb은 NbC,  $\gamma$  상(Ni3Nb), Laves상을 형성하는 원소로서 이들 합금의 최종 응고부에  $\gamma$ /NbC나

$\gamma$ /Laves 등의 공정이 정출하기 쉽고, 또한 이들은 저용점화합물이기 때문에 응고균열 감수성을 높이는 것으로 보고되고 있다<sup>13-16)</sup>. 따라서 본 연구에서도 Inconel 690 용접부의 응고균열의 발생에는 NbC/ $\gamma$  상 또는  $\gamma$ /NbC의 공정 등이 크게 영향을 미치고 있다는 것을 의미하고 있다. 그러므로 본 연구결과에서 SMAW 용접재료에 의한 용접금속의 경우가 GTAW의 경우에 비하여 높은 균열감수성을 나타내는 것은 저용점액상을 형성하는 Nb이 함유되어 있는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

### 3.2 Inconel 690 용접부의 액화균열 현상

3.1에서 언급한 바와 같이, Inconel 690 용접부의 고온균열시험에 의하면 용접금속에서의 응고균열 뿐만 아니라, HAZ에서도 일부 균열이 발생하였으며, 이들 균열은 후술하는 바와 같이 액화균열인 것으로 확인되었다.

Inconel 690(SAW)의 부가 스트레인  $\epsilon$ 의 변화에 따른 HAZ에서의 균열발생에 대한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 먼저 용접조건을 100A, 15cm/min로 일정하게 하고, 부가스트레인을 변화시킨 결과에 의하면,  $\epsilon$ ; 0.53%까지는 균열이 발생하지 않거나 아주 작은 양의 발생하였으나,  $\epsilon$ 이 1.33 및 2.66%에서는 균열의 발생정도가 증가하였으며, 그리고 용접속도가 증가할수록 균열발생이 감소하는 경향을 보였다. 이들 경향은 용접금속에서 발생한 응고균열과 유사한 경향을 보이는 것으로, HAZ에서의 액화균열이 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 부가 스트레인을 일정하게 하고

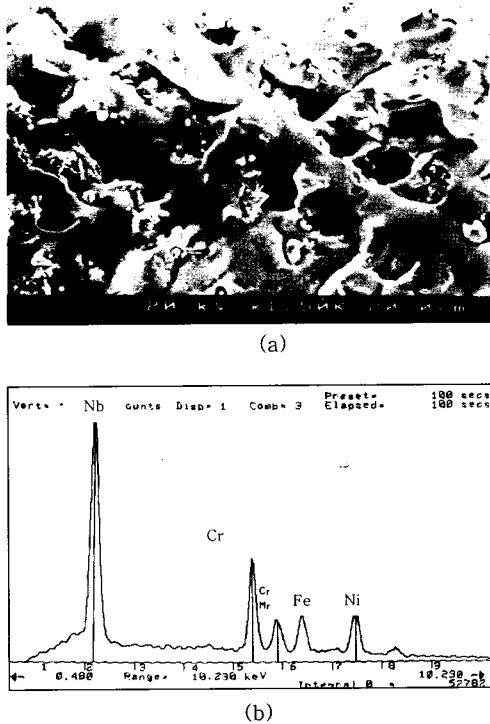


Fig. 9 SEM microfractograph of solidification cracking surface (a) and EDX analysis (b) of constituents on (a)

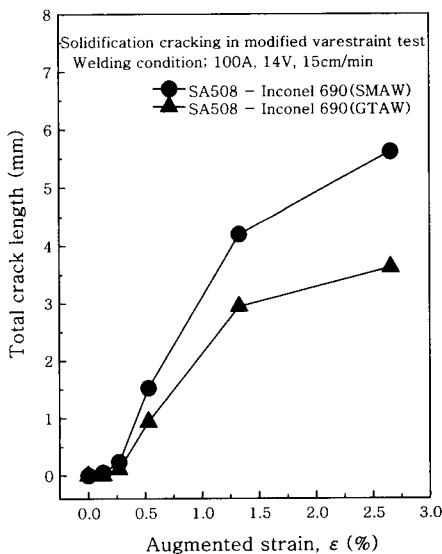


Fig. 10 Effect of welding process/filler metal on solidification cracking

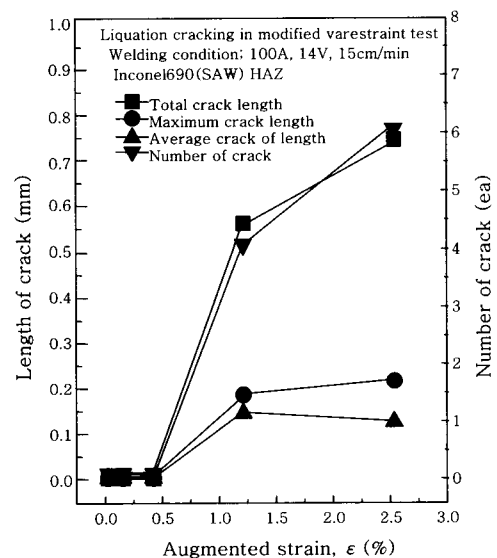


Fig. 11 Effect of augmented strain and welding speed on liquation cracking in Inconel 690 (SAW) specimen

용접속도를 변화시킨 경우에 있어서도, 응고균열에서와 마찬가지로 용접속도가 증가할수록 액화균열이 감소하는 동일한 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 Inconel 690(GTAW)의 HAZ에서도 유사하게 나타났으며, 균열발생의 정도는 Inconel 690(SAW)이 Inconel 690(GTAW)에 비하여 전체적으로 높은 값을 나타내어 용접금속에서의 응고균열과 마찬가지로 HAZ에서의 액화균열도 더욱 높은 균열감수성을 나타내었다. Fig. 12에는 Inconel 690(SAW) 용접부의 HAZ에서 발생한 균열 근방의 미세조직 사진을 나타내었다.

이상의 Inconel 690 용접부의 HAZ에서 발생하는 액화균열의 발생결과는, Inconel 690 용접부는 용접금속에서의 응고균열 뿐만 아니라 HAZ에서 액화균열도 발생하기 쉽다는 것을 나타내고 있다. 이들 액화균열의 발생경향은 용접금속에서의 응고균열과 유사한 발생경향, 즉 부가스트레인이 증가할수록, 또는 용접속도가 감소할수록 균열발생이 증가하는 경향을 보였다. 그리고, 응고균열의 경우에서와 마찬가지로 Inconel 690(SAW)가 Inconel 690(GTAW)에 비하여 액화균열감수성도 높게 나타났다. Fig. 13은 SA508-Inconel 690(SMAW) 용접 HAZ에서 발생한 균열의 파면사진을 나타낸 것인데, 균열의 전영역과 강제파단부를 나타

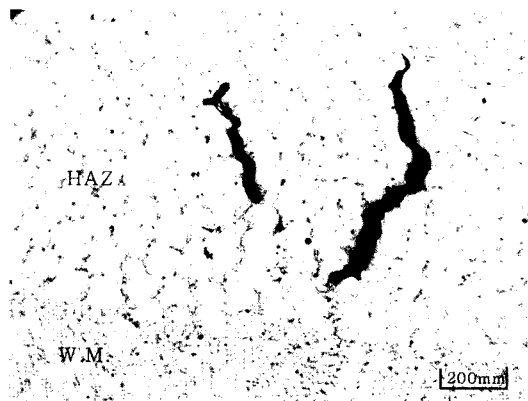


Fig. 12 Typical example of optical microstructure near liquation crack occurred in HAZ of Inconel 690 welds

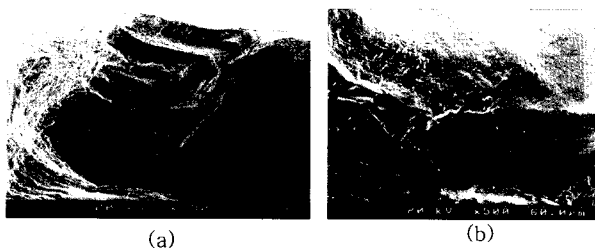


Fig. 13 SEM microfractographs of liquation cracking surface occurred in HAZ of SA508-Inconel 690 welds

낸 (a)와 균열의 확대사진 (b)에서 나타난 바와 같이, 균열은 입계파면을 나타내고 있으며, 입계면상에서는 액화의 흔적이 관찰되어 액화균열이라는 것을 알 수 있었다. 이들 HAZ에서 발생한 입계면상의 액화흔적의 형태는 시험편의 종류 및 위치에 따라 약간 다르게 나타나기도 하였는데, 이것은 입계에서의 액화의 정도에 기인하는 것으로 생각되었다. 또한 입계면상에 존재하는 미세입자들을 EDX에 의하여 분석하여 본 결과에 의하면, Nb를 주로하여 Ti, Si, Al 등의 피크가 나타났다. 이러한 원소들은 Ni기 초내열합금에서 저용점을 형성하는 원소로 알려져 있으며<sup>9)</sup>, 따라서 Nb를 주로 한 이들 원소가 본 연구의 액화균열의 발생에도 크게 영향을 미친 것으로 생각된다.

### 3.3 계산식에 의한 Inconel 690 용접부의 고온 균열감수성에 미치는 화학조성의 영향

3.1과 3.2에서 서술한 내용에 따르면, 모재 및 인접 용접금속부에 해당하는 SA508과 STS 309L에 Inconel 690을 오버레이용접을 하였을 경우, 고온균열감수성이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이것은 모재 또는 인접 용접금속부와 Inconel 690의 회석에 의하여, 용접금속의 화학조성이 변화하며, 이러한 화학조성의 변화가 고온균열감수성을 증가시킨 것이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는, Ni기 초내열합금에서 용접금속의 화학조성의 변화와 관련한 계산식을 사용하여 고온균열감수성의 변화에 대하여 검토하였다.

Ni기 초내열합금에서의 응고균열은 시험편에 부하되는 스트레인  $\epsilon$ 의 증가에 따라 최장균열의 길이는 증가하는 경향을 보이며, 이러한 결과는 본 연구에서도 동일하게 나타났다. 그리고 각 재료에서, 응고취성온도범위로 정의되는 BTR이 증가하면 최장균열의 길이도 증가하며, 따라서 응고균열감수성을 BTR<sup>17)</sup>로 평가할 수 있다. 또한 이들 균열에 대한 파면관찰에 의하면, 파면상의 덴드라이트상 계면에서는 Nb와 C 이외에 Ti, Mo, Si 등의 원소로 구성된 미세입자들이 관찰되며<sup>18)</sup>, 이것은 이들 원소들이 응고계면에 편석하였다는 것을 또한 의미한다. 그러므로 이들 원소들은 어떤 형태로든 Ni기 초내열합금의 응고균열에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 합금원소들이 합금의 용점에 미치는 영향과 관련하여, 응고온도범위를 추정하는 식이 연구되어 있으며, 이 식은 Ni-X 2원계 합금에서 합금원소의 분배계수  $k$ 와 액상선의 기울기로 부터 Scheil의 식 등<sup>19,20)</sup>을 응용한 것으로 다음과 같다<sup>18)</sup>.



$$\Delta T_{SC} = \sum_{i=1}^n m_i C_{O_i} [(1-g)^{k_i-1} - 1]$$

여기서,  $\Delta T_{SC}$ : 응고온도범위,  $m_i$ : 액상선 기울기,  $C_{O_i}$ : 용질농도,  $g$ : 고체분율,  $k_i$ : 분배계수를 나타낸다.

$Ni$ 기 초내열합금에서의 액화균열은, 응고균열에서의 BTR과의 연관성과 마찬가지로, 액화온도영역  $\Delta T_{LC}$ 와의 관련성으로 나타낼 수 있으며, 이에 대한 다음과 같은 결과식(18)이 보고되어 있다.

$$\Delta T_{LC} = \sum_{i=1}^n m_i C_{O_i} [(1/k_i) - 1]$$

여기서,  $\Delta T_{LC}$ 는 액화온도범위를 나타내며, 그 외의 기호는 위와 동일하다.

그리고 모재 SA508 또는 STS 309L에 Inconel 690을 오버레이 용접하였을 경우의  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 를 평가하기 위한 오버레이용접부의 화학조성은 다음과 같은 희석률에 대한 계산식(21)을 이용하여 구하였다.

$$\text{희석률 (\%)} = -110 + 0.0229I + 17.2v - 0.837v^2 + 0.0124v^3 + 0.0153I \times v$$

여기서,  $I$ : 용접전류(A),  $v$ : 용접속도(cm/min)

따라서 본 연구에서는 모재 또는 인접용접부와의 희석에 의해서 형성되는 Inconel 690 용접금속의 화학조성의 변화에 따른 응고균열과 액화균열의 감수성을  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 의 값으로 평가하여, 본 실험결과와 비교 검토하였다. 위와 같은 식들을 이용하여  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 를 계산한 결과를 다음의 Table 5에 나타내었으며, 비교를 위하여, Inconel 690 전용착금속의  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 의 값도 나타내었다.

먼저 본 연구에서 사용한 Inconel 690의  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 는 Inconel 690(SMAW)가 Inconel 690(GTAW)에 비하여  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 의 값 모두가 높은 값을 나타내고 있어 Inconel 690(SMAW)가 Inconel 690(GTAW)에 비하여 응고균열 및 액화균열 모두 균열감수성이 높다는 것을 의미하고 있으며, 본 연구에서의 고온균열시험 결과와도 일치하는 것을 알 수 있다.

그리고, SA508 또는 STS 309L에 Inconel 690을 오버레이용접하였을 경우, Inconel 690(SMAW)와 Inconel 690(GTAW)만으로 이루어진 용접부에 비하여  $\Delta T_{SC}$  및  $\Delta T_{LC}$ 가 모두 높은 값을 나타내고 있어 이들 재료와의 희석에 의하여 Inconel 690 용접부의

고온균열감수성이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 SA 508과 희석된 경우가 STS 309L의 경우에 비하여 더욱 큰 값을 나타내고 있으며, 이것은 SA 508과 희석된 경우의 Inconel 690 용접금속의 고온균열감수성이 더욱 커진다는 것을 의미하고 있다. 이러한 결과는 본 연구에서의 고온균열실험결과와 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 그리고 이들 결과는 실제 용접부에서도 SA508보다는 STS 309L을 대상으로 하여 Inconel 690 오버레이용접부를 형성시키는 것이 고온균열의 발생을 더욱 경감시킬 수 있다는 것을 의미하고 있다.

#### 4. 결 론

Inconel 690 오버레이 용접부의 고온균열현상을 검토하기 위하여, Inconel 690 전용착부 시험편 2종류와 SA508 cl.3 또는 STS 309L을 아래 층으로 하고 위 층을 Inconel 690으로 한 복층 시험편 3 종류의 총 5 종류를 제작하여, 용접중의 부하 스트레인 및 용접속도를 변화시켜 박판고온균열시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Inconel 690 용착금속만으로 이루어진 용접부에서는, 부하 스트레인의 증가 및 용접속도가 감소할수록 균열발생의 정도가 증가하였다. 이들 용접부에서의 균열은 용접금속에서의 응고균열이 대부분이었으며, 열영향부에서의 액화균열도 일부 발생하였다.

2) 응고균열은 응고전면과 접하거나 거의 인접한 위치에서 발생하였으며, HAZ에서의 액화균열도 용융경계부 근방에서 발생하였다. 또한 이들 균열의 파면관찰에 의하면, 응고균열의 경우는 응고 중의 전 온도영역에서 발생하는 특징을 나타내었으며, 이러한 균열발생 경향은 전 시험편에서 거의 동일하였다.

3) Nb이 첨가된 용접금속에서 더욱 높은 균열감수성을 나타내었으며, 균열의 파면상에서는 Nb 화합물 입자의 존재 또는 Nb의 농화가 인정되어 Nb이 고온균열의 발생에 크게 악영향을 미치는 것으로 생각되었다.

4) 모재 또는 인접용접부위에 해당되는 SA508 cl.3와 STS 309L의 희석은 Inconel 690 용접금속의 균열감수성을 크게 증대시켰으며, 그 영향은 SA508의 경우가 STS309L에 비하여 더욱 크게 나타났다.

5) 응고취성온도범위  $\Delta T_{SC}$  와 액화온도범위  $\Delta T_{LC}$  에 대한 계산식을 이용하여 검토하여 본 결과에 의하면, SA508 cl.3와 STS309L의 혼입에 의하여 Inconel 690 용접금속의  $\Delta T_{SC}$ 와  $\Delta T_{LC}$ 의 값이 증가하였으며, SA508 cl.3의 경우가 STS309L에 비하여 더욱 크게 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서의 고온균열 시험결과와도 잘 일치하였다.

## 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: Metallurgical Transactions 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.), Sep. 1997, 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. K. Lee et al.: Preprints of the National Meeting of Spring (the Korean Welding Society), **Vol. 33** (1999), 270-273 (in Korean)
11. B.I. Yang et al: Journal of the Korean Welding Society, **20-1**(2002), 페이지 미정 (in Korean)
12. K. Satoh: Handbook on the Strength of Weld Joint, Rikougakushya, 1988, 3-7~3-12 (in Japanese)
13. M.J. Cieslak et al.: Welding Journal, **69-12**(1989), 473-482s
14. M.J. Cieslak: Welding Journal, 70-2(1991), 49-56s
15. M. Konishi et al.: Preprints of the National Meeting of J.W.S., **No. 37**(Autumn 1985), 184-185 (in Japanese)
16. S.C. Ernst et al.: Welding Journal, **68-10**(1989), 418-430s
17. Y. Arata et al.: Transaction JWRI, **6(1)**(1977), 105-116
18. Y. Nakao and K. Shinozaki: Conference of High Temperature Materials for Power Engineering 1990. II, Liege, Belgium, Sept. 1990, 1461-1470
19. E. Scheil: Bemerkungen zur Schichtkristallbildung, Z. Metallk., **34**(1942), 70-72
20. T. Matsumiya et al.: Transaction ISIJ, **24**(1984), 873-882
21. M. Fukugawa et al: Ishikawajima-Harima Eng. Rev. **22-4**(July 1982), 234-238 (in Japanese)