

◎ 論 文

## 2상 스테인리스강 용접부의 저온충격인성과 내응력 부식성에 관한 연구

김 효 중\* · 이 성 근\*

(95년 2월 28일 접수)

### Low Temperature Impact Toughness and Stress Corrosion Resistance in Duplex Stainless Steel Welds

Hyo-Jong Kim\* · Sung-Keun Lee\*

**Key Words** : Duplex Stainless Steel(이상 스테인리스강), Weld Metal(용착금속부), Heat-Affected Zone(열영향부), Low Temperature Impact Toughness(저온 충격인성), Stress Corrosion Resistance(내응력 부식성)

#### Abstract

The characteristics of low temperature impact toughness and stress corrosion resistance at boiling  $MgCl_2$  solution of GTA and SMA weld of duplex stainless steels have been investigated. The impact toughness was highest at the GTAW weld metal and lowest at the SMAW weld, which was almost the same as that of the SMAW heat-affected zone.

This was attributable to influence of austenite-ferrite phase balance, and the degree and nature of precipitation that occurred during welding. The SCC resistance of the weldments decreased with decreasing strain rate. And the SCC resistance of the weldments was slightly higher than that of the base metal, whereas no difference in the SCC resistance was found between two different weldments.

#### 1. 서 론

일반적으로 2상 스테인리스강은 페라이트와 오스테나이트가 혼합된 조직의 스테인리스강으로서 기존 페라이트 스테인리스강이 강도는 높지만 연

성이 낮고 galvanic 부식과 일반 부식저항이 낮은 단점이 있고,<sup>1,2)</sup> 기존의 오스테나이트 스테인리스강은 연성이 크지만 강도가 낮고 여러가지 선택부식에 대한 저항성이 낮기때문에<sup>2,3)</sup> 이들 두 강의

\* 동아대학교 공과대학 금속공학과

단점을 보완하기 위하여 개발된 강으로서 국외에서는 1980년대부터 연구가 진행되어 왔으며<sup>4-8)</sup> 현재 열교환기의 튜브, 정유시설의 파이프라인, 화학물질 저장탱크, 선박 등에 사용되고 있다.<sup>2,9)</sup>

2상 스테인리스강을 사용한 구조물 제작시 용접 공정은 필수적이므로 최적의 용접조건을 위하여 용가제조성, 용접방법 및 기술, 후열처리 등에 대한 많은 연구와함께 공식, 경도, 충격강도, 페라이트 함량수준에 대한 제약조건이 확립되고 있으나 국내에서는 2상 스테인리스강에 대한 연구가 그다지 활발하지 않은것 같다.<sup>10,11)</sup>

2상 스테인리스강은 용접시 금속조직학적 변화가 수반되는데 가열에 의해 열영향부는 고온에서 페라이트로 변태하고 결정립성장이 일어나나, 냉각시에는 페라이트입계를 따라 오스테나이트가 석출하며 Cr당량 대 Ni당량비가 높으면, 즉 오스테나이트 형성원소의 함량이 낮게 되면 Widmanstätten 측면판상의 형태로 오스테나이트가 석출하며, 오스테나이트 형성원소의 함량이 높고 냉각속도가 느릴때에는 결정립내로 Widmanstätten 측면판상 외에 결정입계를 따라 오스테나이트가 석출한다.<sup>12)</sup> 또한 다층용접시 용착금속부에는 가열과 냉각의 반복에 따른 다양한 석출물이 생성되므로 열영향부와 용착금속부의 조직변화에 따라 기계적 성질과 내식성에 크게 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 22Cr-5Ni-2Mo 조성의 2상 스테인리스강을 제조하여 GTA용접과 SMA용접의 두가지 용접방법에 따른 모재부, 열영향부 및 용착금속부의 미세조직을 비교, 고찰하고 저온충격 성질과 비등 MgCl<sub>2</sub> 용액에서 내용력 부식성을 조사하여 용접방법이 이들 특성에 미치는 영향을 알고자 하였다.

## 2. 실험방법

진공 고주파유도로를 사용하여 전해철, Fe-Cr, Fe-Mo를 장입하여, 용해한 후 50Kg의 금형잉곳에 주입하고, 단조 및 압연과정을 거쳐 1500×180×13mm의 판재를 만들어 충격시편용(300×45×13mm)과 내용력 부식시편용(250×70×13mm, 250×110×13mm)으로 각각 절단한 다음 1050℃에서 1시간 어닐링하여 Fig. 1과 같이 압연방향을 따라 오스테나이트가 길게 단속적으로 분포된 페라이트 함량 60%인 2상 조직의 시료를 얻었다.

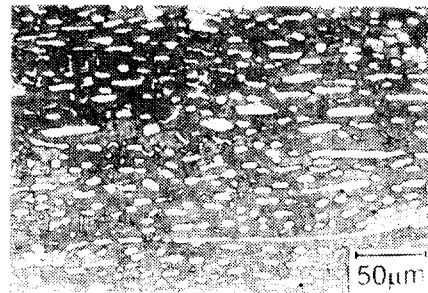


Fig. 1 Optical micrograph of 22Cr-5Ni-2Mo duplex stainless steel.

용접을 위하여 용접부위를 60° 각도의 single V groove로 기계가공한 후 다층용접하였는데 급냉시 오스테나이트의 감소를 방지하고 내식성을 향상시키기 위해 모재보다 Ni함량이 높고 N이 함유된 용접봉을 사용하였으며 용접시 결함이 집중되는 용접시작점과 종료점으로 부터 각각 50mm를 제거하고 시료를 채취하였다.

Table 1과 2에 용접조건과 모재와 용가제의 화

Table 1. Welding conditions of GTAW and SMAW

Welding method	Heat Input (kJ/mm)	Backing	Interpass Temperature	Filler Metal
GTAW	1.62	99.9% Ar gas	90	22.8.3L
SMAW	0.93	-	136	22.93LR

Table 2. Chemical composition of the base metal and welding consumables.

(wt.%)

classification \ element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N
base metal	0.017	0.56	0.24	5.16	21.57	2.10	0.019
GTAW	0.017	0.47	1.53	8.59	22.42	3.12	0.142
SMAW	0.029	0.79	0.68	8.94	22.51	3.25	0.11

학조성을 각각 나타내었다.

충격 시편은 용접재의 경우 용착금속부 및 열영향부의 중심부분에 노치가 각각 위치하도록 하여 압연방향과 수직인 TS 방위로 가공하였다. 용접방법에 따른 저온 충격인성을 측정하기 위해 상온과  $-196^{\circ}\text{C}$  사이에서 적당한 온도간격으로 시험하였으며 비커스 경도기를 사용하여 용접중심부에서 모재방향으로  $0.25\text{mm}$  간격으로 경도를 측정하였다. 내응력 부식성을 조사하기 위한 응력부식시험은 Fig. 2와 같이 방전가공으로 점하중 인장시편을 제작하여 slow strain rate technique(SSRT)를 사용하였는데 변형속도범위는  $10^{-5} \sim 10^{-7}/\text{sec}$ 이었다. 이 때의 부식환경으로는 비등 40%  $\text{MgCl}_2$  용액을 사용하였으며 가열판으로 부터의 입열량과 증발로 인한 발열량이 균형을 이루도록 슬라이더스로 조절하고 증기는 응축기로 포집하여 용액의 농도변화를 최대한 억제하였다.

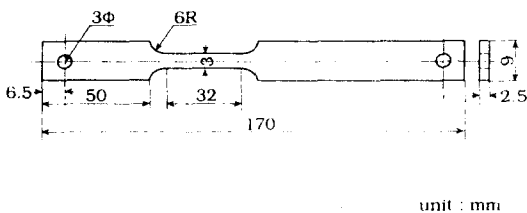


Fig. 2 Geometry of slow strain rate testing specimen.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 용접방법에 따른 현미경조직

Fig. 3은 GTA용접과 SMA용접에서 열영향부와 용착금속부의 조직을 나타낸 것으로 흰부분이 오스테나이트이다.

열영향부를 비교해보면 SMA용접보다 GTA용접시 페라이트 결정입크기와 열영향부의 폭이 작게 나타나고 있는데 용접시 냉각속도가 SMA용접시보다 GTA용접에서 빠르고 특히 페라이트 결정립성장이 일어나는 고온에서 GTA용접에서 더 짧은 시간 유지되었기 때문인데 이는 입열량이 클수록 오스테나이트 석출량이 증가한다는 결과와는<sup>12)</sup> 상반되지만 용접방법의 차이, 즉 GTA용접에서는 분위기 가스에 의해 상대적으로 냉각속도가 빨랐지만 SMA용접에서는 차폐성 슬래그때문에 냉각이 지연된데 기인한 것으로 보인다.

다층용접에 의한 서냉효과와 용가재에 다량 첨가된 오스테나이트 형성원소인 Ni, N으로 인해 용착금속부에서는 모재보다 훨씬 많은 오스테나이트가 침상 또는 판상으로 페라이트기지에서 석출하고 있다. 즉 GTA용접시 용착금속부는 페라이트입계에서 입내로 오스테나이트가 Widmanstätten 측면판상으로 발달되고 있는 반면 SMA용접에서는 두꺼운 판상의 오스테나이트로 석출되고 있다.

이들 두 용접부의 오스테나이트 함량을 측정할

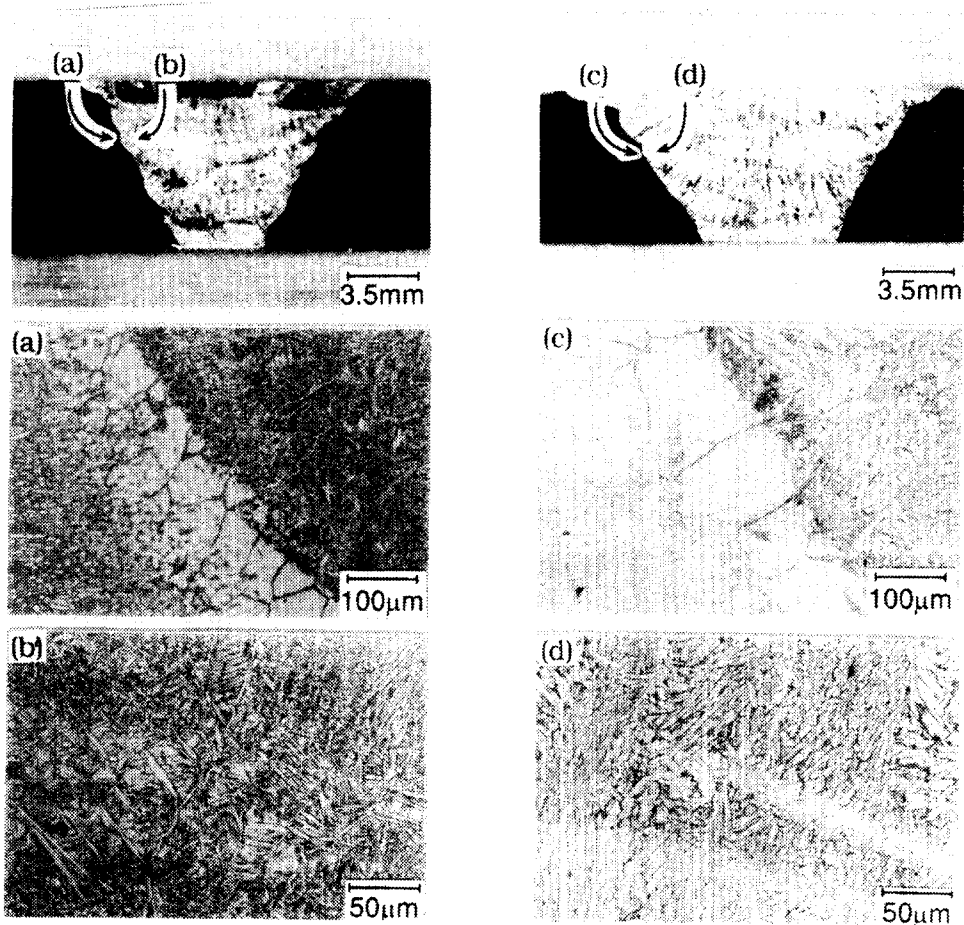


Fig. 3 Optical micrographs of weld metal and heat-affected zone. Left : GTAW, Right : SMAW

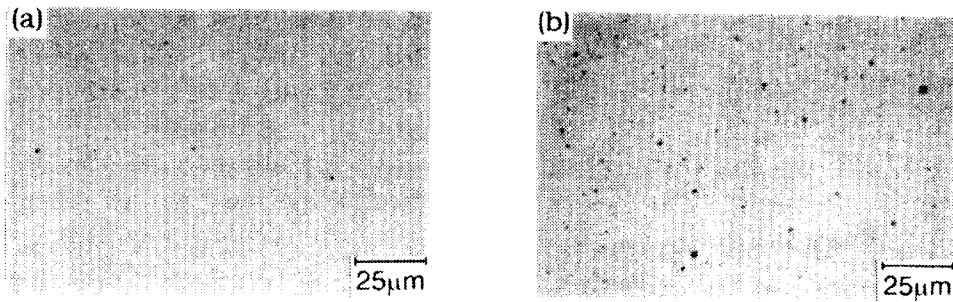


Fig. 4 Optical micrographs showing distribution of inclusions in the weld metal close to the weld interface. (a) GTA weld metal (b) SMA weld metal

결과 GTA용접에서는 약 82%, SMA용접에서는 약 94%로 더높게 나타났는데 두 용가재의 Cr당량/Ni당량 비가 각각 2.38, 2.52 로 거의 비슷한 것으로 보아 용접방법에 따른 냉각속도의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다.

또한 용접후 냉각속도가 느릴수록 용접부에 질화물과 금속간화합물이 다량 석출되어 충격인성과 내식성이 저하될 수 있는데<sup>13)</sup> Fig. 4에서 보는 바와 같이 GTA용접보다는 SMA용접시 용착금속부에 다량의 개재물이 분포되어 있다.

3-2. 경도분포 및 저온충격인성

Fig. 5는 용접중심선에서 모재방향으로 0.25mm 간격으로 측정된 마이크로 비커스 경도분포를 보여주고 있는데 페라이트함량이 가장 낮은 용착금속부의 경도는 약 Hv 265으로 가장 높게 나타났다. 2상 스테인리스강에서 어닐링 온도에 따른 경도는 페라이트함량이 증가함에 따라 증가하며 제2상이 석출하는 1000℃이하에서는 석출상의 종류와 양의 변화가 심한데 특히 750℃~850℃범위에서의 현저한 경도증가는 질화물 및 σ상, χ상 등의 석출 효과 때문인 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 그러나 본 실

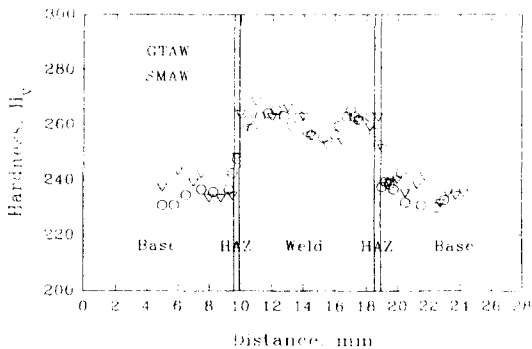


Fig. 5 Microvickers hardness variation across the weld interface under different welding process.

험에서 페라이트 함량이 가장 낮은 용착금속부에서 경도가 가장 높게 나타난 것은 응고시 잔류응력의 발생과 반복된 가열냉각 과정으로 질화물 등

의 석출과 모재에 비해 많은 양의 합금성분이 첨가된데 기인한 고용경화 효과 때문인 것으로 볼 수 있으며 용접방법에 관계없이 용착금속부의 경도가 비슷한 것은 오스테나이트 조직의 차이와 냉각속도의 차이에 의한 개재물의 분포 및 양 때문인 것으로 볼 수 있다.

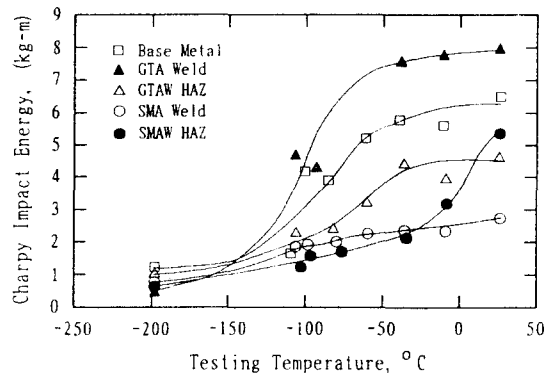


Fig. 6 Charpy impact energy as a function of temperature in the base metal and weldments.

용접부의 충격인성은 오스테나이트의 양이 많을수록 증가하고 탄화물, 질화물 및 개재물의 존재 유무와 크기 및 양에 따라 좌우된다. Fig. 6은 모재와 용접방법에 따른 용착금속부와 열영향부에 대해 상온과 -196℃사이에서 적당한 온도간격으로 충격시험한 결과를 나타내고 있다. 충격인성은 GTA용접시 용착금속부에서 가장 높았으며 SMA용접시 용착금속부와 열영향부는 거의 비슷하면서 가장 낮게 나타났다. 그리고 모재부와 용접부의 연성-취성 천이온도를 비교해 보면 모재부와 GTA용접시 용착금속부에서는 약 -100℃이고, GTA용접시 열영향부는 약 -70℃를 나타냈으나 SMA용접에서 열영향부는 약 -30℃로서 매우 취성적이거나 이보다 높은 온도에서는 오히려 용착금속부보다 충격인성이 약간 높았다. 한편 SMA용접에서 용착금속부의 온도에 따른 충격인성 변화는 전혀 다른 거동을 보여 주고 있는데, 시험온도의 감소에 따라 충격인성은 매우 완만히 직선적으로 감소만 하고 천이온도가 전혀 나타나지 않았으며

전 시험온도범위에서 매우 낮은 파괴인성을 나타내었다. 이러한 결과는 용접시 미세조직의 변화가 직접적인 원인으로서  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 충격시험한 시편들을 취하여 관찰한 파단면 사진을 Fig. 7에 나타내었는데 용접방법 및 부위에 따라 큰 차이를 보여주고 있다. 압연방향을 따라 오스테나이트가 길게 단속적으로 분포된 페라이트 조직과 수직으로 노치를 가공한 모재부의 경우 균열이 2상 조직을 교대로 전진한 흔적과 각 조직내에서는 미세한 강물무늬가 발달하고 상간경계에서는 2차균열이 많

이 발생하였음을 보여 주고 있다. GTA용접에서 용착금속부는 부분적인 입계파괴는 있으나 전체적으로는 강물무늬의 입내파괴를 보여주고 있으며 열영향부는 그 폭이 작고 비교적 미세한 페라이트가 발달한 조직인데 노치근처에서 페라이트 결정입계를 따라 전진하다가 강물무늬의 취성파괴로 천이하는 형태를 보여 주고 있다. SMA용접에서 열영향부는 그 폭이 넓고 매우 조대한 페라이트가 발달하였는데 파단면은 전체적으로 입계파괴가 일어났음을 나타내는데 비해 용착금속부는 전혀 다른

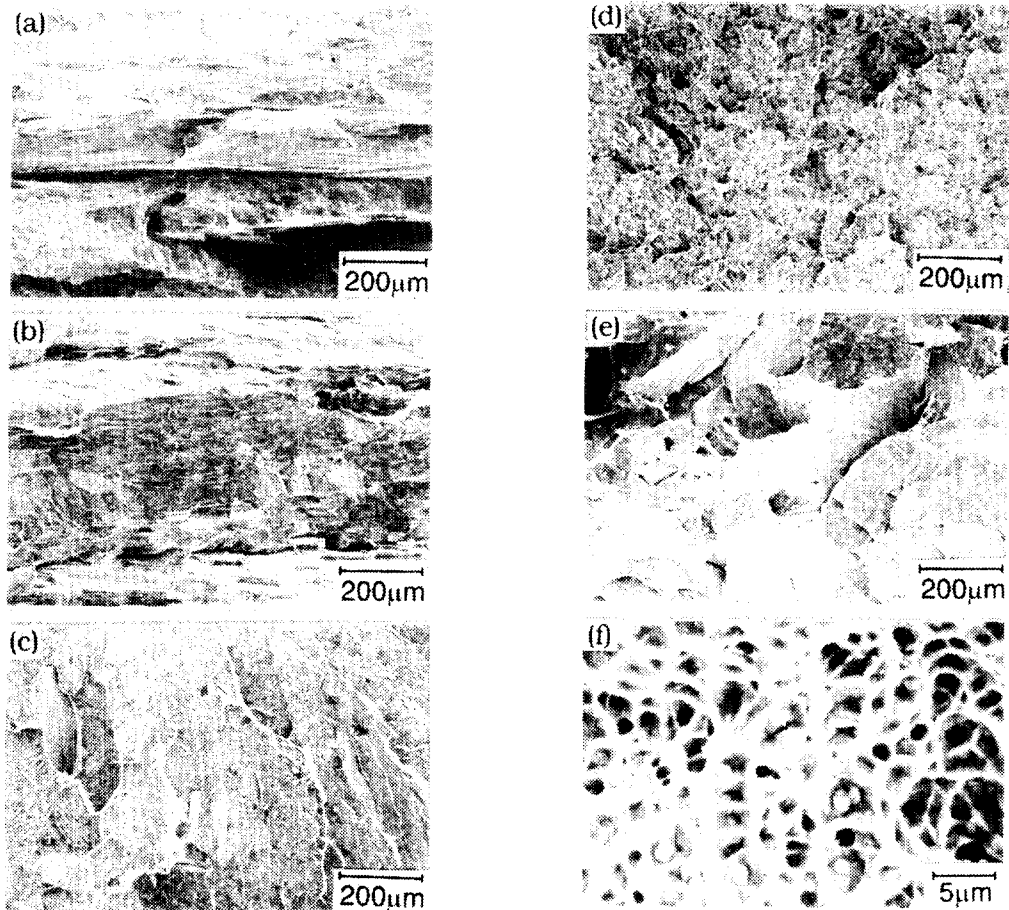


Fig. 7 Fracture surface near the notch front subjected to impact test at  $-100^{\circ}\text{C}$ . (a) base metal, (b) weld metal, GTAW, (c) heat-affected zone, GTAW, (d) weld metal, SMAW, (e) heat-affected zone, SMAW, and (f) high magnification of (d)

파괴거동을 나타내었다. 상온에서  $-196^{\circ}\text{C}$  사이의 전 온도영역의 모든 파단면에서 일부 조대한 석출입자에 의한 딤플과 함께 전 영역에서 미세한 딤플만 관찰되었다. 앞서 설명한 바와 같이 SMA용접에서 용착금속부의 미세조직은 오스테나이트 함량이 약 94%인 두꺼운 판상의 오스테나이트이고 다층용접시 반복된 가열냉각에 의해 매우 많은 미세한 석출물이 생성되었던 것으로, 이 때문에 경도는 높고 충격인성은 매우 낮으면서 온도변화에 따른 인성의 변화가 없었던 것으로 보이는데 미소공동의 발생, 성장, 합체로 인해 관찰되는 딤플이 연성파괴의 특징이더라도 석출물이 과도하게 많으면 전위의 이동과 공동의 성장 및 합체에 필요한 슬립변위가 너무 작아 거시적으로는 매우 작은 소성 변형에서 쉽게 파괴가 일어날 수 있음을 보여주고 있다.

### 3-3. 내응력 부식성

재료의 내응력 부식성을 평가하는 방법은 정하중 시험, 정변형 시험 등이 있으나 이들 방법은 오랜 시간이 걸린다는 단점이 있다. 따라서 본 실험에서는 SSRT에 의해 2상 스테인리스강 용접부의 내응력 부식성을 평가하였다.

Fig. 8은 상온 및 공기중과 비등 40%  $\text{MgCl}_2$  용액중에서 GTA용접과 SMA용접한 용접재에 대해 변형속도를 변화시켰을 때의 응력-파단시간 곡선으로서 모재부의 경우와 비교하였다. 여기서는 저온충격 시험과는 달리 점하중 인장시험 중앙부에 용접부가 놓이도록 하여 고온 염화물용액에서 모재와 모재사이에 놓인 용접부가  $10^5 \sim 10^7/\text{sec}$ 의 변형속도범위의 인장하중을 받을 때에 가혹한 환경이 미치는 영향을 조사하기 위함이었다. 이 그림에서 공기중에서  $3 \times 10^6/\text{sec}$ 의 변형속도에서 모재와 용접재의 파단시간이 약간 차이가 났을뿐 고온 염화물용액에서는 모재와 용접재에 관계없이 거의 비슷한 응력-파단시간 곡선을 보여주고 있는데 변형속도가 감소함에 따라 파단시간과 최대응력이 감소함을 나타내었다. 일반적으로 용접부는 내식성이 문제가 되는데 특히 열영향부는 모재부

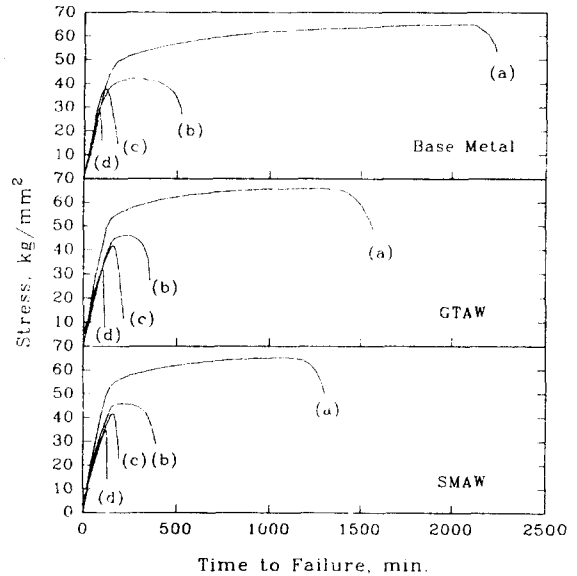


Fig. 8 Nominal stress-time to failure curves of the base metal and weldments. (a) at strain rate of  $3.0 \times 10^6/\text{sec}$  in air, (b), (c), and (d) at strain rate of  $2.0 \times 10^5/\text{sec}$ ,  $3.0 \times 10^6/\text{sec}$ , and  $2.4 \times 10^7/\text{sec}$  in boiling 40%  $\text{MgCl}_2$  solution, respectively.

에 비해 응력부식균열에 매우 민감한 것으로 알려져 있으나 본 실험에서 파단전후에 시편의 표면을 조사한 결과 상대적으로 모재부보다 경도가 높은 용착금속부 및 열영향부 근처의 표면에서는 균열(잔금)을 관찰할 수 없었고 파단이 일어난 모재부 주위의 표면에서 많은 미세한 균열이 관찰되었다. 이러한 사실은 경도가 상대적으로 낮은 모재부 금속표면에서 균열발생과 관련한 슬립계단의 우선적인 발달, 슬립계단의 용해 그리고 부동태피막의 생성 및 파괴과정을 거치면서 발생한 균열의 성장에 기인한 것으로 보인다<sup>14)</sup> 추후 세밀한 실험적 보완 및 고찰이 필요하다고 본다.

응력부식 저항성은 응력부식 균열을 조장하지 않는 분위기에서의 파단시간 및 최대응력의 비로 평가하기도 한다.<sup>15)</sup> Fig. 9는 비등 40%  $\text{MgCl}_2$  용액에서 변형속도가 모재 및 용접재의 SCC 예민화에 미치는 영향을 보여주고 있는데 여기서 용액에

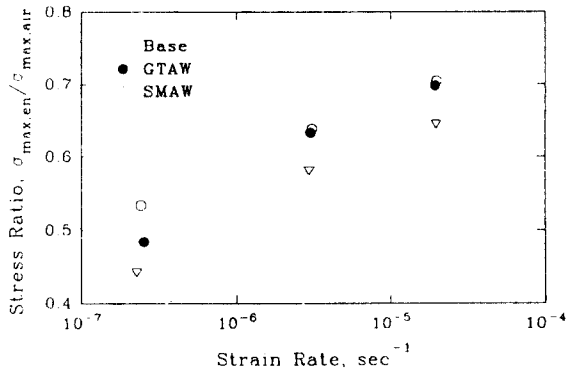


Fig. 9 Strain rate dependency of SCC susceptibility of the base metal and weldments at boiling 40% MgCl<sub>2</sub> solution.

서의 최대응력 대 공기중에서의 인장강도의 비를 SCC 저항의 척도로 나타낸 것으로 이 비값이 클수록 응력부식 저항성이 좋은 것을 의미한다. 이 그림에서 변형속도가 감소함에 따라 응력부식 저항성이 감소하고 동일한 변형속도에서 모재보다 용접재가 응력부식 저항성이 좋게 나타났으며 두 용접재간에는 거의 차이가 나타나지 않았다.

이상에서 본 바와 같이 본 실험에서 적용한 용접방법 및 조건에서는 용접재의 내응력 부식성은 모재부에 비해 나쁘지 않은 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

22Cr-5Ni-2Mo 2상 스테인리스강을 제조하여 GTA 및 SMA용접한 용접재의 미세조직이 저온 충격인성과 고온 염화물용액에서의 내응력 부식성에 미치는 영향을 모재와 비교검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저온충격인성은 GTA용접한 용착금속부가 가장 높았고 SMA용접한 용착금속부와 열영향부는 거의 비슷하면서 가장 낮게 나타났는데 이는 오스테나이트 함량 및 조직형태와 용접후 냉각속도차이에 따른 석출물의 농도차이에 기인한 것으로 사료된다.

2. 고온 염화물용액에서 변형속도와 함께 감소하는 내응력 부식성은 용접재가 모재에 비해 다소 우수하였으며 두 용접재간에는 거의 차이가 없었다.

#### 후 기

본 연구는 1993년도 포항중합체철주식회사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) P. Guha and C. A. Clark, "Properties and Application of Chromium Duplex Stainless Steels", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp355~368, 1983
- 2) G. Herbsleb and P. Schwaab, "Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and Their Influence on Corrosion Behavior in Acids", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp15~38, 1983
- 3) S. Bernhardsson and J. Oredsson, C. Martenson, "The Stress Corrosion Cracking Resistance of Duplex Stainless Steels in Chloride Environments", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp267~273, 1983
- 4) H. D. Solomon, "Age Hardening in a Duplex Stainless Steel", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp41~68, 1983
- 5) S. K. Srivastava, "Superplasticity in a Duplex Stainless Steel", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp1~4, 1983
- 6) C. H. Sump and G. C. Dodine, "Process Development, Testing and Evaluation of high silicon Duplex Austenitic-Ferritic Stainless Steel Tubing", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp71~92, 1983
- 7) S. Mark Wilhelm and R. D. Kane, "Effect of Heat Treatment and Microstructure on the Corrosion and SCC of Duplex Stainless



- Steels in  $H_2S/Cl$  Environments", Corrosion Engineering, Vol.43, No. 12, pp431~439
- 8) Ingo Von Hagen and Manfred Keller, "Interrelation between Fabrication Processes and Mechanical Properties of AF22 Duplex Steel Tubes", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp325~353, 1983
  - 9) Rudolf Dirscherl and Stan Barth, "Duplex Stainless Steel Fabrication", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp503~531, 1983
  - 10) 김효중, 박성훈, 이성근, 성장현, "2상 스테인리스강의 오스테나이트상의 분포가 인장성질과 내식성에 미치는 영향", 대한금속학회지, 29권, 4호, 1991
  - 11) 김효중, 이성근, 성장현, "20Cr7Ni3Mo 2상 스테인리스강의 인장성질 및 내식성에 미치는 첨가원소 Cu의 영향", 대한금속학회지, 31권, 5호, 1993
  - 12) T. G. Gooch, "Weldability of Duplex Ferritic -Austenitic Stainless Steels", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp573~599, 1983
  - 13) M. Liljas, "The Welding Metallurgy of Duplex Stainless Steels", Forth Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, Vol. 1, KV, 1994
  - 14) R. N. Parkins, "Environment Sensitive Fracture of Metals", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 31, No. 2, pp79~94, 1992
  - 15) M. Onoyama, N. Hayashi, K. Shitani, and T. Suehiro, "Evaluation of Corrosion Resistance of a Duplex Stainless Steel in  $H_2S-CO_2-Cl$  Environments", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels, pp191~209, 1983