

## 초저온 액화질소 저장용기의 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 특성 연구

최동준<sup>1</sup> · 박형욱<sup>2</sup> · 조종래<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2011년 4월 4일, 원고수정일 : 2011년 5월 6일, 심사완료일 : 2011년 5월 19일)

### A Study of Mechanical Properties for Austenite Stainless Steel of Cryogenic Liquied Nitrogen Storage Tank

Dong-Jun Choi<sup>1</sup> · Hyung-Wook Park<sup>2</sup> · Jong-Rae Cho<sup>†</sup>

**요 약 :** 초저온 구조 재료로 극저온에서 기계적 특성이 우수한 300계열의 오스테나이트계 스테인리스강이 널리 사용되어진다. 이 중에서도 오스테나이트의 안전성 향상을 위해 몰리브덴을 첨가한 316강이나 용접 중에 입계 석출을 줄이기 위해 탄소의 함유율을 감소시킨 316L강, 그리고 질소를 첨가시켜 강도와 오스테나이트를 동시에 향상시킨 316LN강이 대표적으로 많이 사용된다. 하지만 초저온 재료들의 용접조건 및 온도변화에 대한 기계적 특성 연구가 미진한 상태이다. 본 논문에서는 초저온 구조물에서 많이 사용되어지는 304강의 용접조건 및 온도변화에 대한 기계적 특성을 연구하였다.

**주제어 :** 초저온, 저장 용기, 스테인리스 강, 기계적 특성, 용접조건

**Abstract:** Austenitic stainless steels of 300 series are widely used as the structural material due to excellent their cryogenic mechanical properties at cryogenic temperature. There are 316 steel which molybdenum is added to improve the austenitic stability, 316L which carbon contents is reduced to decrease the grain boundary precipitation during welding process, and 316LN which nitrogen is added to improve the austenitic stability and the mechanical strength. But material researches for the welding conditions and mechanical properties at the cryogenic temperature were insufficient so far. In this paper, the characteristics of mechanical properties considering the effect of welding conditions and cryogenic temperature are studied.

**Key words:** Cryogenic, Storage tank, Stainless steel, Mechanical property, Welding condition

#### 1. 서 론

초저온(cryogenic)은 일반적으로  $-150^{\circ}\text{C}$  이하의 온도영역을 지칭하고, 초저온 공학(cryogenic engineering)이라 함은 첨단과학기술의 기초 기술에 해당한다. 초저온 기술은 초고순도 가스정제, 급속 냉각, 고진공, 항공우주, 식품 급속동결, 통신, 유전 공학, 생명보존, 의학, 반도체 등의 첨단과학 산업 전반에 기초적인 기술로서 광범위하게 활용되고 있

다. 반도체산업 관련분야의 활성화로 인해 산업용 가스(질소, 산소, 아르곤)와 의료용 특수가스(산소, 알곤, 헬륨 등)의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 최근 전 세계적으로 각종 난치병의 치료제로서 줄기세포에 대한 관심과 연구가 집중되고 있어 이를 냉동저장할 수 있는 초저온 장비에 대한 요구가 증가하고 있으며, 생명공학에 대한 국내외의 집중적인 투자와 노력이 지속되고 있어 바이오-초저온

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, E-mail: cjr@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4298)

1 부영CST(주)

2 한국해양대학교 기계공학과

용기 시장은 급성장 할 것으로 예상되고 있다.

상온에서 기체 상태로 존재하는 대부분의 가스들이 -40℃ 이상의 온도에서 액화되나 헬륨, 수소, 네온, 질소, 산소, 알곤, 공기, 메탄 등의 초저온 가스는 -150℃ 이하로 온도가 떨어져야만 액화가 되며, 액화 후에는 체적이 수백분의 1로 감소하게 된다. 동일 크기의 저장용기로 비교해 볼 때 초저온 가스를 액화상태로 저장하면 고압의 압축가스(기체 상태)로 저장하는 것에 비하여 저장능력을 수배로 증대시킬 수 있고, 충전압력을 보다 낮게 유지 할 수 있으므로 안전성이 크게 높아지게 된다.

극저온(4K) 재료에 대한 기초 연구는 헬륨의 액화가 가능하게 되었던 1900년 초부터 이루어졌으며, 이러한 연구는 미국 표준기술연구원(NIST), 일본 재료연구소(NRIM), 일본 원자력연구소(JAERI), 일본 핵융합연구소(NIFS) 등에서 집중되어 오다가 VAMAS 프로젝트를 통하여 선진 7개국에서 공동으로 연구되었다. 국내에서는 한국표준연구원(KRISS)에서 1980년대 후반부터 약 6년에 걸쳐 시험장치를 개발하고 인장시험과 파괴인성 시험을 수행한 바 있으나 현재는 이러한 연구마저도 지속되지 않고 있다[1~3]. 더욱이 극저온 관련 부품에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 관련 자료를 찾기가 힘든 실정이다[4~8].

극저온 구조 재료로서는 극저온에서 물리적·기계적 특성이 우수한 300계열의 오스테나이트계 스테인리스강이 널리 사용되어 왔다. 이 중에서도 오스테나이트의 안정성을 향상시키기 위해 몰리브덴(Mo)을 첨가한 316이나 용접 중에 입계 석출물의 발생을 줄이기 위하여 탄소(C)의 함유율을 감소시킨 316L, 그리고 질소(N)를 첨가시켜 강도와 오스테나이트를 동시에 향상시킨 316LN이 상업화 되어 생산되는 대표적인 저온 구조 재료이다. 극저온 구조 재료는 복잡한 형상을 갖기 때문에 두꺼운 재료와 많은 용접량이 요구된다.

본 연구에서는 GTAW 용접과 EBW 용접이 사용된 강구조물이 보다 신뢰성 있는 설계 및 구조 건전성 확보를 위하여 모재뿐만 아니라 용접부에 대한 극저온에서의 기계적 성질을 파악하는 것이 목적이다.

## 2. 재료 및 용접부의 극저온 기계적 특성 평가

### 2.1 재료 및 용접

#### 2.1.1 모재 및 용가재

극저온에서 용접부는 사용되는 용가재, 용접방법, 용접조건에 따라 모재와 다른 화학적 조성과 미세조직을 가지며 이에 따라 기계적 특성도 달라

**Table 1:** Chemical compositions of base metal - STS304 [unit : wt.%]

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
Composition	Min.	-	-	-	-	8.00	18.00	-	-
	Max.	0.080	2.00	0.045	0.030	1.00	20.00	-	-

**Table 2:** Chemical compositions of welding rod - CSF 308L [unit : wt.%]

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
Composition	0.03	1.35	0.025	0.010	0.65	9.6	19.3

**Table 3:** Mechanical properties of base and welding rod

Material	$\sigma_{YS}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	Elongation (%)
STS304	205	520	40
CSF-308L	430	570	40

지게 된다.

모재와 용가재의 화학적 조성 및 인장특성을 각각 Table 1, Table 2와 Table 3에 나타내었다.

STS304는 가장 많은 용도로 사용되는 강종으로 Ni이 함유되어 Cr계 보다 한 층 뛰어난 내식성, 내열성 저온강도를 가지고 있으며 기계적 성질도 양호하다. 가공성은 크고 열처리로써는 강화되지 않으며 자성이 없다.

2.1.2 용접 방법 및 절차

본 연구에 사용된 용접은 모두 자동용접으로 자동 GTAW 용접과 EBW 용접을 사용하였다. Fig. 1은 GTA 용접 및 EB 용접을 위한 그루브형상을 나타내 것이다. 시편은 모두 플라즈마 절단을 한 후 잘삭 연마를 실시하였다.

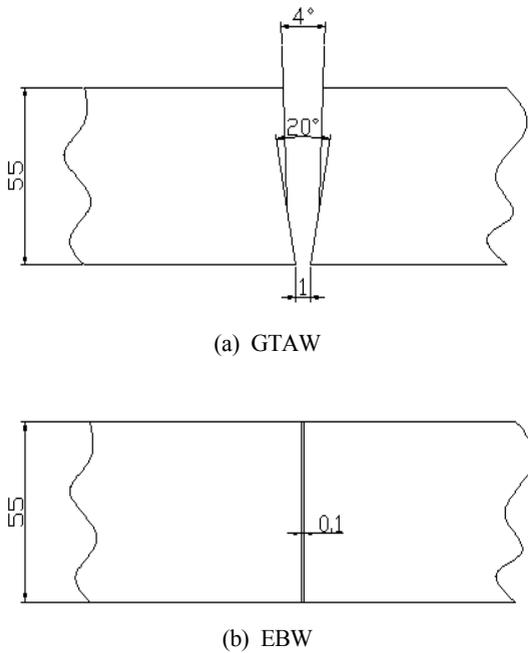


Figure 1: Configuration for welding groove (a) GTAW, (b) EBW

Table 4와 Table 5는 두 용접방법에 대한 용접 조건을 나타낸 것이며, 먼저 GTAW 용접의 경우 폭이 300mm이고, 길이가 각각 700mm와 1000mm의 압연판을 사용하여 최종 그루브각이 약 4° 정도로 매우 협소한 그루브 용접을 시행하였다. 이러한 용접

은 그루브각이 넓은 수동용접에 비해 용접량이 적기 때문에 용접속도가 빠르고 용접 열영향을 적게 받는 장점을 가지고 있다. 용접전류는 80~150A이며 전압은 10~15V 이내로 하였고 용접 층간 온도를 150℃ 이하로 유지하였으며, 총 45회 걸쳐 용접을 실시하였다.

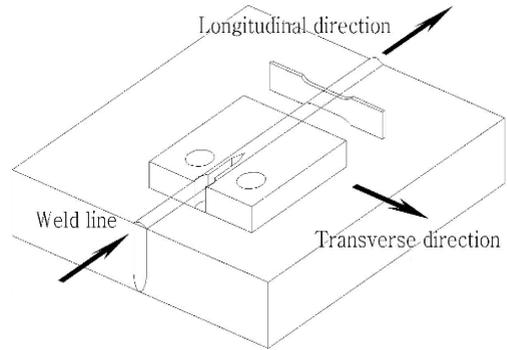
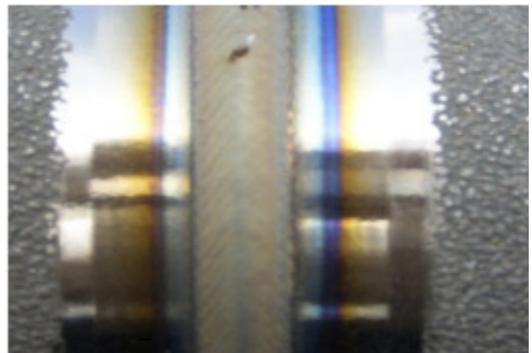


Figure 2: Specimen locations at weld region



(a) GTAW



(b) EBW

Figure 3: Photos of weldment (a)GTAW, (b)EBW

**Table 4:** Welding conditions for GTAW

Layer No.	Peak current (A)	Base current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Welding Position
1	185	90	10.3/0	5.6	2G
2	200	140	10.0/9.4	8.9	
3	220	140	10.2/9.6	7.1	
4	240	160	10.5/10	7.1	
5~40	250	200	10.6/10	6.6~8.4(7.9)	
41~43	180	160	9.8/9.6	8.9	
44~45	150	120	9.8/9.4	9.9	

**Table 5:** Welding conditions for EBW

Beam current(mA)	Focusing current(mA)	Weaving width(mm)	Weaving type	Weaving frequency (Hz)	Welding Speed (mm/min)
230	725	1	0	800	200

**Table 6:** Chemical compositions of all materials

[unit :wt.%]

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
Base metal	0.022	1.14	0.026	0.001	0.69	10.10	17.76	2.01	0.132
EBW	0.022	1.35	0.026	0.001	0.69	10.08	17.51	2.12	0.115
GTAW	0.066	5.83	0.011	0.003	0.36	15.92	17.31	2.24	0.033

EBW 용접의 경우는 진공용기 및 용접 전용장비를 사용하였으며 230mA의 빔 전류와 60kV의 가속 전압을 적용하였다. 또한 용접속도를 최소 200mm/min으로 빠르게하여 한번에 용접하게 하였다.

Figure 2는 인장시험편과 소형인장시험편(compact tension, CT)에 대하여 용접부에서의 채취 위치 및 방향을 개략적으로 나타낸 것이며, Fig. 3는 GTAW 용접 및 EBW 용접에 의한 판재의 사진을 나타낸 것이다.

## 2.2 용접부의 조직 분석 및 경도 특성

### 2.2.1 화학 성분 및 조직 특성

스테인리스강 STS304는 극저온 응용분야에서 사용빈도가 점차 증가하고 있다. 질소를 첨가함에 따라 강은 상온 및 저온에서 우수한 기계적 성질을 가지는 동시에 부식에 대한 저항 성능을 향상시킬

수 있다. 용접 중 질소의 상실에 따른 용착금속의 강도 감소 및 블로우홀(blowhole)의 발생에 의해 용접성을 감소시키는 경우가 발생할 수 있기 때문에 용접 시공시 용접 조건 선정에 세심한 주의를 기울여야 한다.

Table 6은 모재 및 두 용접재의 용착금속에 대한 화학성분 분석 결과를 나타낸 것이다. 모재는 약 10.1wt.%의 Ni과 17.7wt.%의 Cr, 그리고 0.13wt.%의 N을 함유하고 있는 재료이며, ASTM A240에서 제시한 기준값을 만족한다. EB 용접은 용가재를 사용하지 않고 모재를 용융시키므로 화학적 조성은 모재의 것과 거의 유사한 결과가 나타났다. 그러나 질소(N)의 함유율은 질소 가스가 용접 중에 약 0.02wt.% 정도 손실되었기 때문에 모재보다 감소된 것으로 생각된다.

GTA 용접재의 경우 전반적으로 용가재의 화학

적 조성을 그대로 따르고 있으며 GTA 용접을 위한 용가제는 탄소(C), 망간(Mn), 그리고 니켈(Ni) 함량이 모재나 EBW 용착 금속보다 높은 값을 가지고 있고 이 원소들은 모두 오스테나이트의 안정화 성분들이다.

특히 망간의 경우는 질소의 고용도를 증가시키는 원소로서 용접시 질소 가스의 손실을 최소화하기 위해 첨가하는 원소이다.

Table 6의 화학성분 분석 결과를 바탕으로 Figure 4의 셔플러 선도(Schaeffler diagram)를 이용하여 응고모드와 델타 페라이트 함량을 예측한 당량식(1)에 나타내었다[9].

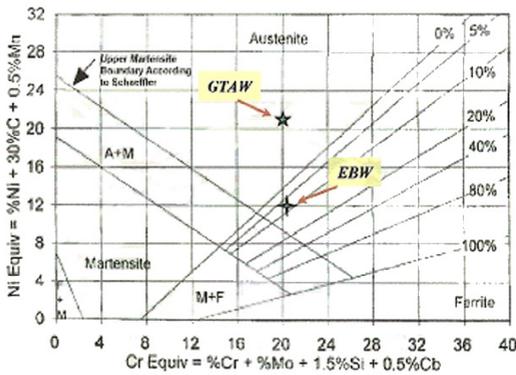


Figure 4: Schaeffler diagram

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn$$

EB 용접 용착금속의 경우  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  값이 1.48~1.95를 가지므로 용접 금속의 응고 모드는 초정 델타 페라이트로 응고하는 FA 모드임을 알 수 있다. GTA 용접 용착금속의 경우  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  값이 0.90~0.96를 가지므로 용접 금속의 응고 모드는 초정 오스테나이트로 응고하는 A 모드임을 알 수 있다. 미세조직 관찰 결과에서는 EB 용접 용착금속이  $\gamma$  와  $\delta$  의 2상 조직을 가지며, GTA 용접 용착금속의 경우  $\gamma$  의 단상 조직을 가진 것과 일치하는 결과가 나타났다.

2.2.2 경도 시험

Figure 5와 Figure 6은 각 용접 방법으로부터 얻

은 용착금속 단면의 중앙으로부터 모재에 걸쳐 비커스 경도(micro Vickers, Hv) 분포를 나타낸 것이다. Figure 5는 GTW 용접의 경우로 용접 표면부의 경도가 가장 낮고, 용접 루트부가 가장 높은 경도 값을 갖는 경향을 나타냈다. 모재는 184~232Hv로 위치별 경도분포의 차이는 거의 없었다. GTA 용접은 다층용접에 의한 용접 열이력 차이에 의해 용접 표면부보다 용접 루트부의 경도 값이 높게 측정된 것으로 판단된다.

Figure 6은 EB 용접의 경우로 측정 위치에 관계없이 용착금속의 경도는 179~212Hv, 용접 열영향부는 190~200Hv, 모재는 176~193Hv로 비교적 균일한 경도 분포를 나타낸 것이다.

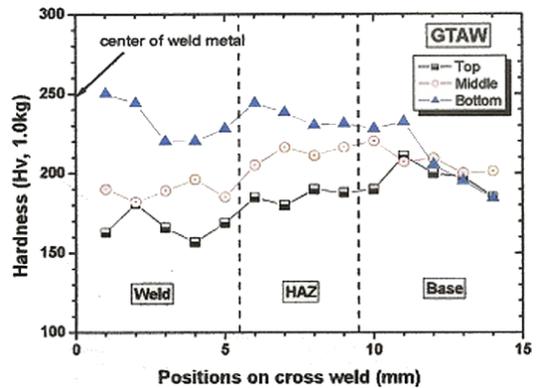


Figure 5: Hardness change of weldment for GTAW weld plate

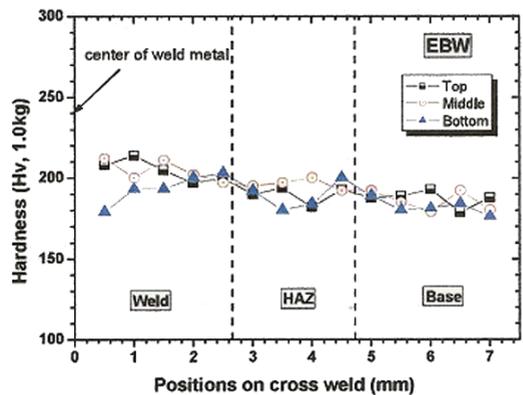


Figure 6: Hardness change of weldment for EBW weld plate

2.3 극저온 인장특성 평가

2.3.1 시험편

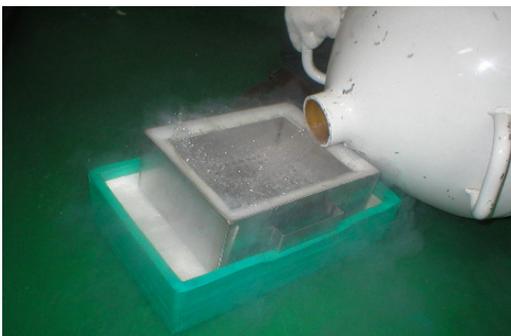
시험편은 Figure 2에 나타난 것처럼 모재 및 두 용접재로부터 제작하였으며 극저온 인장시험 규격인 ASTM E1450에 근거하여 제작하였고, 시험편 전체길이는 68mm, 직경은 10mm이다. Table 7은 각 시험온도 및 시험편 수량을 나타낸 것으로 총 33개를 제작하였으며 각 조건별 3개씩 총 27번을 시험하였고 나머지 6개는 여유분으로 사용하였다.

2.3.2 시험방법 및 절차

Figure 7에 나타난 극저온 인장시험은 용기의 내통에 시험편을 고정 후 액체질소를 주입하였고, 내통의 액체질소를 용기의 외통에 옮긴 후 다시 내통을 시험기에 연결하는 방식으로 데이터를 측정하였다. 시험기의 최대 하중은 50톤이며 하중 측정의 변위 속도는 1mm/min 이다.



(a) Test machine



(b) Liquid nitrogen from cryogenic vessel

Figure 7: Photographs of testing machine with cryogenic vessel

2.3.3 극저온 인장시험 결과

Table 7은 각각 모재, GTA 및 EB 용접재에 대한 인장 시험결과를 평균값으로 나타낸 것이다. Figure 8-Figure 10에는 각 시험편 종류에 대하여 293K, 77K, 4K에서 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타낸 것으로 온도 293K와 77K에서는 전형적인 하중-변형률 곡선을 나타냈으나, 온도 4K에서는 모든 시험편에 대하여 불연속 변형이 발생하였다.

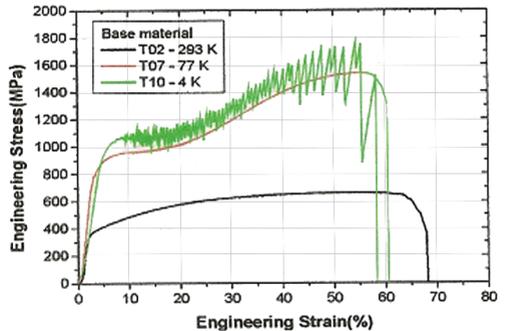


Figure 8: Engineering stress-strain curves with temperature for base metal

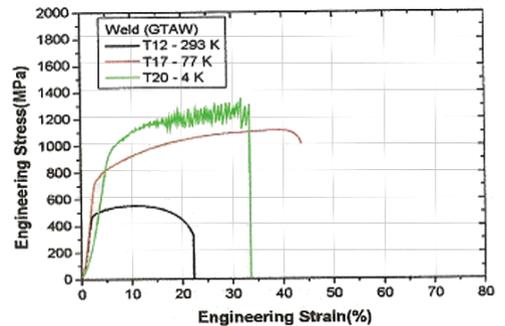


Figure 9: Engineering stress-strain curves with temperature for GTA weld

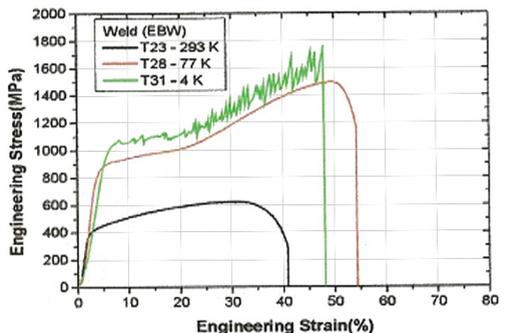


Figure 10: Engineering stress-strain curves with temperature for EBW weld

**Table 7:** Mechanical properties for different cases

Specimen	Temp(K)	E(GPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\delta$ (%)	RA(%)
Base	293	329	329	653	59.3	79.6
	77	726	726	1532	52.2	61.8
	4	862	862	1759	50.8	59.9
Weld (GTAW)	293	430	430	549	20.7	73.1
	77	713	713	1086	32.6	55.3
	4	885	885	1308	28.1	45.1
Weld (EBW)	293	328	328	619	34.3	81.9
	77	755	755	1506	50.7	60.7
	4	994	994	1718	43.4	44.6

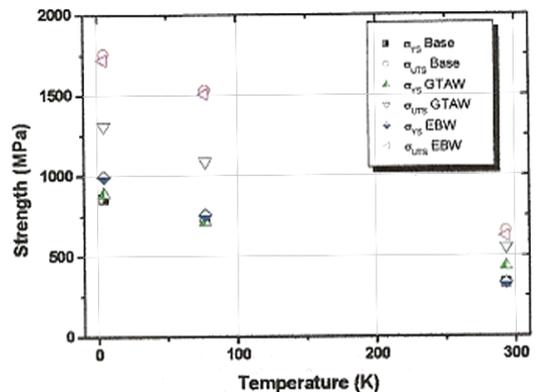
또한 변위량이 증가함에 따라서 불연속 변형의 발생빈도는 감소했으나, 하중 강하량은 증가하였다. 특히 모재의 곡선상에서는 최대하중을 지난 후 극저온 특유의 세레이션(serrations) 현상이 규칙적으로 발생하였다. 불연속 변형의 발생은 일반적으로 재료와 소성변형 능력과 관계되며[10~11], 소성변형 능력이 작은 재료에 대해서는 비록 온도 4K의 극저온이라 하더라도 발생되지 않는다고 알려져 있다.

온도 77K 및 4K에서 모재와 EB 용접 시험편의 응력-변형률 곡선은 293K 결과와는 달리 소성변형도중에 하중이 급격히 증가하는 현상을 나타냈다. 그러나 GTA 용접 시험편의 경우에는 이러한 하중 증가가 나타나지 않았다. 이러한 현상은 준 안정한 스테인리스강에서 변형률 유기 마르텐사이트 변태에 의하여 변형률 경화가 일어났기 때문이다. 보통 오스테나이트강에 있어서 오스테나이트상의 안정도가 낮을 경우 저온에서 변형을 가할 때 변형률에 유기되는 마르텐사이트 변태가 발생된다고 알려져 있다[12].

Figure 11은 온도에 따른 항복강도와 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 항복강도와 인장강도는 온도가 감소함에 따라 증가하고 있다. GTA 용접 시험편의 경우 다른 시험편들과 비교하였을 때 항복강도는 유사하지만 인장강도가 가장 낮은 값을 나타내고 있는데, 이것은 GTA 용접부에서 변형률 경

화가 일어나지 않아 온도 감소에 따른 영향만을 받았은 것으로 판단된다.

Figure 12는 온도감소에 따른 연신율의 변화를 나타낸 것으로 모재의 경우 온도감소에 따라 감소하는 경향을 보이거나 GTA와 EB 용접재의 경우, 연신율은 77K에서 최대값을 보이고 293K에서 최소값을 보인다. 일반적으로 열영향부는 용착금속이나 모재보다 기계적으로 취약하여 용접 시험편은 인장 시험동안 비교적 강도가 낮은 열영향부 근처에서 국부적인 소성이 발생되어 파단을 경험하게 된다. 이것은 인장시험편의 파단위치로부터 알 수 있으며, 모재의 경우 대부분 시험편의 중앙에서 파단하였으며 용접재의 경우에는 열영향부에서 파단하였다.



**Figure 11:** Yield strength( $\sigma_{YS}$ ) and tensile strength( $\sigma_{UTS}$ ) with temperature for all metal

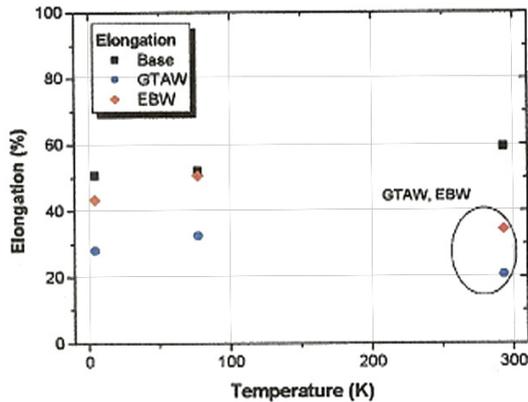


Figure 12: Elongation with temperature for all metal

### 3. 결 론

본 연구는 용접의 종류에 따른 STS304의 극저온 특성을 평가해 봄으로써 온도에 따른 기계적 성질의 변화를 확인하였다.

(1) 용착금속의 조직특성에서 EB 용접 용착금속이  $\gamma$  와  $\delta$  의 2상 조직을 가지며, GTA 용접 용착금속의 경우  $\gamma$  의 단상 조직을 가짐을 확인할 수 있었다.

(2) 경도시험에서 GTA 용접의 경우 용접 표면부의 경도가 가장 낮고 용접 루트부가 가장 높은 경도값을 보였으며, EB 용접의 경우 측정 위치에 관계없이 일정한 분포가 나타났다.

(3) 극저온 인장시험에서 공칭응력-변형률 선도는 293K, 77K, 4K에서 전형적인 하중-변형 곡선을 타나냈으나, 온도 4K에서는 모든 시험편에 불연속 변형이 발생함을 알 수 있었다.

(4) 특히 EB 용접의 시험편에서는 293K 결과와는 달리 77K 및 4K에서 소성변형 도중 하중이 급격히 증가하는 현상을 나타냈다. 이러한 현상은 준안정한 스테인리스강에서 변형률 유기 마르텐사이트 변태에 의해 변형률 경화가 일어났기 때문이다.

(5) 온도에 따른 기계적 특성에서는 항복강도와 인장강도의 경우 온도가 극저온으로 내려갈수록 증가함을 확인했으며, 연신율의 경우 모재는 온도감소에 따라 감소하는 경향을 보이거나 GTA와 EB 용접재의 경우 연신율은 77K에서 최대값을 보이고 293K에서 최소값을 나타냈다.

(6) GTA 용접과 EB 용접의 결과를 바탕으로 용접 후 모재의 성질을 가장 잘 나타낸 것은 EB 용접임을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 2010년도(1차년도) 기업부설연구소 설치지원사업 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.K20702001648-10E0100-07010).

### 참고문헌

- [1] H. Nakajima, K. Yoshida and S. Shimamoto, "Development of new cryogenic steels for the superconducting magnets of the fusion experimental reactor", The Iron and Steel Institute of Japan(ISIJ) International, vol. 30, pp. 2170223, 1990.
- [2] 방건웅, 이해무, 허용학, 구조용 재료의 극저온에서의 기계적 성질 연구(제3차년도), 한국표준연구소, KSRI-89-100-IR, 1989.
- [3] 이해무, 신주연, 신형섭, 극저온 구조재료의 역학적 특성연구(제2차년도), 한국표준과학연구원, KRIS-98-045-IR, 1998.
- [4] 김명근, 김철웅, 강상국, 김천근, "극저온 환경 하에서 CFRP 일방향 복합재료의 인장물성 측정", 한국항공우주학회 2004년도 춘계학술대회는논문집, pp. 484-487, 2004.
- [5] 김명근, 강상국, 김천근, 공철원, "복합재/알루미늄 링 시편의 극저온 특성 평가", 한국항공우주학회, 한국항공우주학회지, 제34권, 제9호, pp. 484-487, 2006.
- [6] 정호승, 김영환, 조종래, 김정환, 김정렬, 박재현, "유한요소법을 이용한 극저온 미니어처 글로브 밸브의 구조설계에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제4호, pp. 373-349, 2007.
- [7] 김동균, 김정환, "LNG선박용 글로브 밸브 구조해석에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제8호, pp. 1013-1019, 2007.
- [8] 신동원, 김동락, 양형석, 최연석, "극저온 냉동기를 이용한 열전도도 측정 시스템 개발", 대

한기계학회 논문집 B권, 제35권, 제1호, pp. 93-100, 2011.

- [9] A. Schaeffer, "Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal", Metal Prog., vol. 56, no. 11, pp. 680-680B, 1949.
- [10] Z. S. Basinski, "The instability of plastic flow of metals at very low temperature", Proceedings of The Royal Society, vol. 240, no. 1220, pp. 229-242, 1957.
- [11] N. M. Madhava and R. W. Armstrong, "Discontinuous twinning of titanium at 4.2K", metallurgical transactions, vol. 5, pp. 1517-1519, 1973.
- [12] T. Ogata, K. Nagai, Ishikawa, K. Shibata, and S. Urase, "VAMAS Second Round Robin Test of Structural Materials at Liquid Helium Temperature", Advances in Cryogenic Engineering(Materials), vol. 38, pp. 69-76, 1992.

## 저 자 소 개



### 최동준(崔東俊)

1979년 동의대학교 기계설계과(공학사), 2006년 한국해양대학교 기계공학과(공학석사), 2009년 한국해양대학교 기계공학과(공학박사), 현재 부영CST(주) 대표



### 박형욱(朴炯昱)

2004년 동아대학교 기계공학과 (공학사), 2006년 동아대학교 기계공학과(공학석사), 2006년 - 2008년 (주)넥센타이어연구소, 2008년 한국조선기자재연구원, 2008년 - 현재 한국해양대학교 기계공학과(박사과정)



### 조종래(趙琮來)

1982년 부산대학교 기계공학과 (공학사), 1984년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사), 1993년 한국과학기술원 정밀공학과(공학박사), 1984년 - 1995년 한국중공업 기술연구소, 1999년 Post-Doc.(영국-Birmingham Univ.) 1995년 - 현재 한국

해양대학교 기계정보공학부(교수).