

핵융합로 초전도자석의 관내연선도체용 STS 316LN의 용접성 연구

Welding of STS 316LN for cable in conduit conductor(CICC)

송광용*, 이광태, 김봉수, 서수정, 서창제, 임병수**, 김기만**
 성균관대학교, 삼성종합기술원 Energy Lab.(**)

1. 서론

차세대 전기에너지 분야에 대한 연구로서 핵융합 초전도 마그네트, 초전도 에너지 저장 장치, 초전도 발전기 및 초전도 케이블 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 핵융합 초전도 마그네트와 같은 규모가 큰 초전도 자석의 경우, 초전도 선재를 꼬아서 만든 케이블을 강도가 큰 구조재료로 에워싼 형태의 관내연선도체(Cable-In-Conduit, CICC)를 주로 사용하고 있다. 관내연선도체는 큰 안정성, 높은 절연과괴전압, 높은 기계적 강도, 그리고 냉각용 액체헬륨의 전체 질량을 줄일 수 있다는 특징이 있다.

이러한 관내연선도체형 초전도도체 재료(Nb_3Sn , $NbTi$)를 감싸주는 CICC Jacketting 재료로 사용되는 Incoloy 908 합금과 STS 316LN은 일반적인 기계적 특성은 매우 우수한 것으로 알려져 있으나 용접변수에 따른 영향이나 용접 시공후의 용접부 특성(기계적성질, 조직)변화에 대한 평가가 국내에서는 아직 이루어지지 않았고, 또한 기존의 보고된 내용일지라도 재료에 대한 물성평가나 용가재사용에 의한 용접부에 대한 고찰이 대부분이며, 특히 극한 환경에서 사용이 요구되는 이 재료의 용접 시공후의 안전성과 신뢰성에 대해서는 전무한 실정이다. 이러한 용접 시공 후 재료의 기계적 특성, 열화에 대한 평가 등이 확보되지 않으면 CICC 조관이 사실상 불가능하므로 이들 재료를 수입에 의존할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 CICC 조관시 용접기술 지원을 위해 CICC Jacketting 재료 중 STS 316LN에 대한 용접부 특성(비드외관, 미세조직, 기계적특성 평가 등)을 조사하여 최적의 용접기술을 확립하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 STS 316LN의 화학조성은 Table 1과 같고 용접 시편제작을 위해 STS 316LN을 1050°C에서 5분간 annealing을 한 후 Inverter TIG를 사용하여 butt용접을 자동으로 행하였으며, 적정 용접조건하에서 Pulse의 영향을 살펴보기 위해 Frequency를 변화시켜 용접을 행한 후 용접 bead 형상과 용입깊이를 조사하였다.

Table 1 Chemical composition of STS 316LN (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Fe
<0.03	<0.5	1.6	<0.025	<0.01	17.00	2.30	12.00	0.06	Bal.
		~			~	~	~	~	
		2.00			18.00	2.70	12.50	0.08	

적정용접조건에 의해 형성된 용접부, 열영향부(HAZ) 및 모재의 경도변화를 알아보기 위해 용접한 시편을 bead 방향에 수직하게 절단한 후 Microvickers 시험기를 이용하여 용접부의 중심에서 모재 방향으로 1mm 간격으로 경도분포를 조사하였다. 또한 인장 강도측정을 위해 시편 중앙에 용접 bead가 위치하도록 하여 ASME규격에 기준하여 제작하였으며, V-notch type Charpy 충격 시험을 통해 시편의 내충격성을 조사한 후 파단면을 관찰하여 용접조건 차이에 따른 변화를 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 용접입열량에 따른 적정 용접조건을 설정하기 위해 용접전류 100~200A, 이송속도 20~80cm/min.으로 각각 변화시켜 용접을 행한 결과 입열량이 증가(낮은 이송속도, 고전류)하면

weld pool의 면적이 증대되며 피용접물이 박판이므로(3mm) 용접부가 함몰되는 용입과다 현상이 발생하였고, 입열량이 감소(높은 이송속도, 저전류)하면 용입부족으로 인해 back bead 형성이 어려운 것을 관찰할 수 있었고 용접전류 150A, 이송속도 25cm/min의 조건에서 가장 양호한 용접 bead를 얻을 수 있었다. 또한 pulse에 대한 용접부의 형상을 조사하기 위해 앞서 얻어진 용접조건(용접전류 150A, 이송속도 25cm/min)에서 frequency를 변화시켰을 경우, 같은 입열량에서 frequency가 높아질 수록 깊은 용입을 얻을 수 있었고 용융지의 가열 및 냉각의 반복과정과 용융지의 흔들림 증가로 인해 언더컷을 줄일 수 있었다.

본 실험에서 설정된 적정용접조건인 용접전류 150A, 이송속도 25cm/min(SampleA)와 동일한 입열량에 frequency를 10Hz(SampleB), 500Hz(SampleC)로 용접한 시편의 경도를 측정된 결과 모든 조건에서 용착부의 경도값은 모재보다 증가하였고, HAZ부의 경도값은 다소 감소하는 경향이 나타났는데 이러한 이유는 용착부의 경우 급열·급랭에 의한 용착부 조직의 미세화와 austenite 기지 입계에 불연속적인 vermicular 구조를 갖는 δ -ferrite로 인한 경도 상승 때문이고 HAZ부의 경우 용접 입열에 의해 결정립성장이 일어나 조직이 조대화 됨으로써 경도가 감소하는 것이라고 사료된다. 그러나 Pulse frequency가 증가할수록 빠른 용융·응고로 인해 용착부에 미세한 dendritic structure를 형성하여 경도가 상승할 것이라고 기대되었으나 본 실험에서 행한 용접조건은 저펄스이기 때문에 pulse에 따른 경도값은 거의 변화가 없는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig.1(a), (b)는 동일한 용접조건에 의해 제작된 시편을 인장시험을 행한 후 측정된 항복강도 및 최대 인장 강도를 나타낸 결과이다. Pulse frequency가 500Hz일 때 가장 높은 인장강도를 나타내었으며 모든 용접 조건에서 HAZ부가 파단된 것을 관찰할 수 있었다. 또한 충격시험을 행한 결과, Fig.2에서 보는 바와 같이 모든 조건에서 용착부와 모재의 충격치의 차이가 거의 없고 시험편의 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 전체적으로 Dimple현상을 갖는 연성파괴임을 나타내는 것으로 보아 양호한 용접부임을 알 수 있었다.

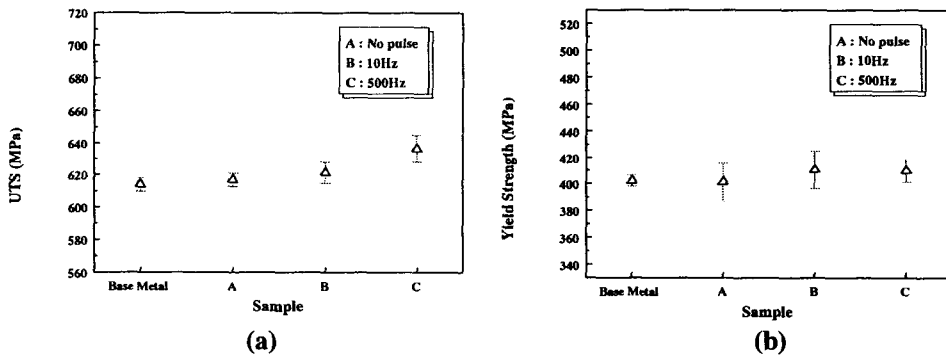


Fig1. Ultimate tensile strength and Yield strength of the base metal and weldments with welding condition

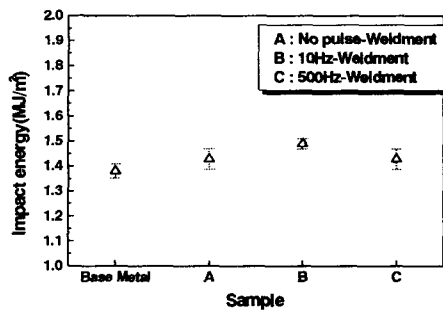


Fig2. V-Charpy impact energy of the base metal and weldments with welding condition

4. 참고문헌

- 1) 류 경우, 류 강식, 오 봉환, 오상수 "토카막 핵융합장치용 초전도 자석" Proceeding of KIEE. Vol. 45 No.7. Jul, 12, 1996
- 2) G. Deis et al, "TPX Superconducting Tokamak System", 16th Symp on Fus Eng, Sept 1995, 138, 1996
- 3) 스텐레스 강관의 생산성 및 품질향상 기술개발, 산업자원부 April, 1998
- 4) D. J. Alexander and G. M. Goodwin "Thick-section weldments IN 21-6-9 and 316LN stainless steel for fusion energy application" Advances in Cryogenic Engineering, Vol.38, 1992
- 5) K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. M. Solokha "Effect of delta-ferrite on the properties of welds in austenitic steels at cryogenic temperatures" Advances in Cryogenic Engineering, Vol.40, 1994