

Incoloy 825합금 및 탄소강의 이종강종간 용접특성 연구

김희봉 · 이창희

한양대학교 금속공학과, 철강공정 및 응용 연구소

A Study of Dissimilar Weldability of Incoloy 825 with Mild Steel

H. B. Kim and C. H. Lee

Dept. of Met. Eng. Research Institute of Steel Process and Application,
The Hanyang University, 17 Haengdang Dong, Seong Dong Gu, Seoul, 133-791

(1996년 12월 13일 받음, 1997년 1월 21일 최종수정본 받음)

Abstract This study has evaluated the dissimilar weldability of Incoloy 825 Ni base alloy with a mild steel (SS41). Further a compatibility study of several Ni base filler metals with the dissimilar joint between the two alloys was also included.

The dissimilar weldability of Incoloy 825 with mild steel is strongly dependent upon the type of the filler metal used. Among the filler metals, ENiCrFe which has a chemical composition similar to that of Incoloy 825 was found to be most compatible to the joint. In addition, a filler metal which showed a good cracking resistance in one dissimilar alloy combination was not necessarily guaranteed to other combination.

Microstructural examination with SEM, TEM and Auger revealed that the solidification cracking resistance of the dissimilar joint between Incoloy 825 and SS41 was closely related with the Ti - Nb content and with the content of a low melting eutectic phase of Laves relative to that of MC type phase.

1. 서 론

열풍로의 expansion joint는 연소실과 환냉실을 연결시키는 역할을 하며 고온의 열풍에 의한 배관의 열팽창응력을 흡수하는 신축관이다. Joint의 연락관은 SS41과 유사한 화학성분과 특성을 가진 BS4360 (43A) 일반 탄소강이며 bellows는 Incoloy 825의 내열강으로 구성되어 있다. 이들을 연결하기 위하여 Fig. 1a와 같이 배관과 동일한 재질의 backing ring을 배관에 동종간 용접한 후 bellows-backing ring간의 이종강종간 용접을 한다. 하지만 가동중 동종간의 용접부(연락관과 backing ring) 및 bellows자체 용접부에는 큰 문제점이 없었으나 이종강종간의 용접부(용착금속 및 열영향부)에서 빈번하게 균열(Fig. 1b)이 발생하여 보수용접을 하는 경우가 많다. 하지만 보수용접 후에도 균열이 계속 발생함에 따라 정비물량을 증가시키는 경우가 많다¹⁾.

Incoloy 825는 Mo, Cu, Ti를 포함하는 Ni-Fe-Cr계 합금으로써 다양한 분위기에서의 전면 및 국부 내부식성이 강한 합금이다. 이 합금의 주 적용분야로는, 화학처리설비, 공해처리설비, 기름 및 가스환원설비, 산제조설비, 산세설비, 핵연료재처리 및 방사능폐기물설비 등에 다양하게 사용하고 있다. 그리고 이 합금은 극저온에서부터 약 500°C까지의 넓은 온도범위에서 좋은 기계적 특성을 보유하고 있다. 약 500°C 이상의 온도에서는 조직적 변화에 의해 급격

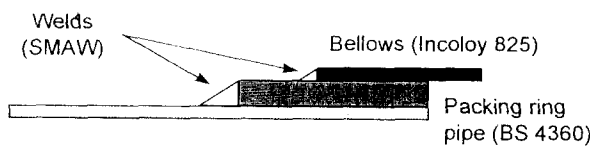
히 낮은 연성 및 인성을 나타내므로, 좋은 creep특성을 요구하는 설비에는 일반적으로 사용되지 않는다. 상온에서의 충격특성은 모재의 경우 약 107J을 나타내고, 용접열영향부에서는 약 60J정도를 나타내어 상당히 우수한 인성을 보유하고 있다. Incoloy 825의 특성은 다른 무엇보다도 우수한 내식성을 보유하고 있다는 것이다. 이 합금은 환원 및 산화성 분위기에 상관없이 전면부식, 기공부식, 틈부식, 입계부식 및 응력부식균열에 강하다. 그 중에서도 황산, 인산 및 황을 포함하는 연료가스에 강한 내식성을 보유하고 있다^{2,3)}.

일반적으로 Incoloy 825와 같은 high alloy의 용접시 가장 주의해야 할 문제점은 고온균열로써, 이는 크기가 미세하여 용접직후의 간단한 비파괴검사 등을 통하여 발견할 수가 없다. 하지만 이러한 고온균열은 본 연구의 대상이 되는 expansion joint와 같이 용접부가 반복되는 응력 혹은 응력 + 부식분위기에서 전파하여 용접후 얼마간의 시일이 경과한 다음 쉽게 관찰될 수가 있다. 그러므로 고온균열은 종종 상온에서 발생한 일종의 저온균열 혹은 피로균열로 오관되는 경우가 많다. 물론 저온에서의 반복되는 응력이 균열을 확대시켜 수명을 감축시키고 반복되는 보수용접을 해야하는 문제점을 유발시켰지만, 고온균열이 발생하지 않으면 용접부의 수명은 상당히 연장될 수가 있다⁴⁾.

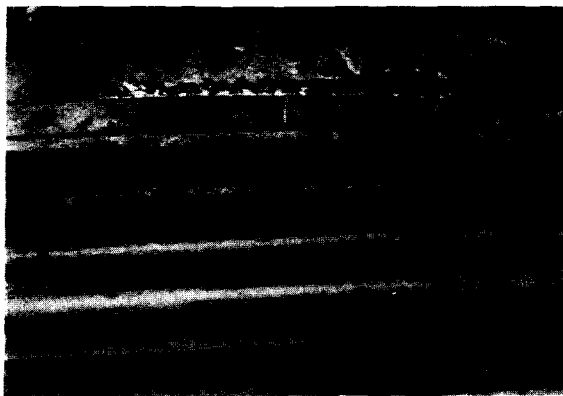
사용목적에 맞는 아무리 좋은 모재를 선택했음지라도 이들을 문제없이 용접을 할 수 없으면 좋은 모재의 선택은 무용지물이 될 수 밖에 없다. 일반적으로 동종간의 용접에는

Table 1. Chemistry of the base metals and filler metals evaluated.

Type	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Fe	Cu	P	S	Ni	Remark	
Base Metals	SS41	0.122	0.057	0.69	0.02	0.01	Tr	Tr	Tr	bal	Tr	0.014	0.0100	0.02	Mild steel
	Inconel 600	0.055	0.170	Tr	16.24	Tr	Tr	Tr	Tr	7.10	0.36	0.007	0.0014	bal	Ni base
	Inconel 718	0.033	0.055	Tr	19.00	3.32	5.19	1.00	0.65	17.04	0.18	0.003	0.0010	bal	Ni base
	Incoloy 825	0.011	0.052	0.39	24.02	3.33	Tr	1.20	0.27	28.01	1.91	0.015	0.0005	bal	Ni base
Filler Metals	Inco.S	0.015	Tr	1.05	15.64	0.02	0.03	0.61	0.54	5.29	0.012	0.0061	0.0001	Tr	ENiCrFe-2 SMAW
	Inco.82	0.018	Tr	2.74	19.19	0.07	2.55	0.31	Tr	0.76	0.074	0.0056	0.0013	Tr	ERNiCr-3 GRAW
	Inco. 112	0.016	Tr	0.05	21.64	8.60	3.49	0.37	0.83	2.44	0.150	0.0060	0.0019	Tr	ENiCrMo-3 SMAW
	Inco. 182	0.014	Tr	2.16	15.48	0.04	0.02	3.16	Tr	6.36	0.044	0.0060	0.0014	Tr	ENiCrFe-3 SMAW



(a)



(b)

Fig. 1a. Schematic drawing of the joint between bellows and backing ring.

1b. Pictorial view of repair welds at joint and bellows.

모재에 맞게 개발된 용접재료를 이용하여 쉽게 용접할 수가 있다. 하지만 이중강종간의 용접에는 용접하고자 하는 두 모재와 용접재료가 잘 조합이 되도록 용접조건 및 재료를 선택하지 않으면 용접부는 용접도중 혹은 사용시 문제점을 유발시킨다. 일반적으로 filler metal의 용접 및 열팽창계수가 두 모재의 중간이 되어야 한다. 만약에 두 모재의 용융 온도의 차이가 크면 용접시 용접온도가 낮은 모재 부위에서 용고도중 균열을 유발시킬 확률이 높다. 그러므로 용착금속의 용고온도가 두 모재 사이에 있는 것이 유리하다. 용접온도와 열팽창계수가 서로 다른 Incoloy 및 탄소강의 이중강

종간 용접시 가장 유의해야 할 사항은 물리적 특성을 고려해서 적절한 용접재료를 선택해야 하고 용접조건도 모재와의 희석정도를 결정하므로 잘 선정해야 한다^{4~6)}.

Ni합금과 같은 high alloy의 동종간의 용접특성에 관한 연구는 구미등에서는 지난 80년대 초부터 많은 연구가 진행되고^{7~10)} 있으며, 이들 Ni합금의 용접부에서 가장 큰 문제는 용접부의 응고 도중에 발생하는 응고균열이며 이들은 대부분 응고시 발생하는 특정한 원소들이 결정립계에 편석하여 저용점상을 형성하는 것이 주요 원인이라는 것을 관찰하였다^{9~14)}. 저용점상의 종류는 상당히 많으며 이는 재료의 화학성분에 의해 결정되어지고, 그 양은 화학성분 뿐만 아니라 용접조건에도 의존한다고 알려져 있다^{14~16)}. 하지만 국외에서도 탄소강과의 이중강종간 용접특성, 특히 Incoloy 825의 균열특성에 관한 연구자료는 아직까지 많지 않은 실정이다. 국내에서의 Incoloy 825에 관한 동종 및 이중강종간의 용접특성에 관해 알려진 연구결과는 전무한 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 Incoloy 825의 탄소강과의 이중강종간 용접부의 균열특성을 파악하고 균열의 생성 원인을 규명하고자 했으며 다른 Ni 합금인 Inconel 600 및 718과의 균열감수성을 비교하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

시험재

본 연구에 사용한 모재로는 현재 발전소 및 제철산업에서 열풍로 expansion joint의 bellows 재질로 많이 사용하고 있는 Incoloy 825와 backing재료인 일반탄소강인 SS41이다. 그리고 Incoloy 825와 유사한 Inconel 600 및 718도 포함시켰다.

그리고 적정 용접재료를 파악하기 위하여 Ni합금-일반탄소강의 이중강종간의 용접시 전세계적으로 가장 많이 사

Table 2. Chemical composition of the welds for combinations of base metals and filler metals.

Base metal	Filler metal	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Co	Ti	Al	Fe	Cu	P	S	Ni
825-SS41	182	0.021	0.393	1.80	16.29	1.00	1.00	0.136	0.46	0.15	27.49	0.61	0.0094	0.0038	bal
	112	0.022	0.324	0.19	20.73	4.86	1.84	0.152	0.30	0.041	24.97	0.71	0.0059	0.0004	bal
	A	0.019	0.250	0.89	14.44	1.71	0.85	0.110	0.45	0.068	37.38	0.51	0.0070	0.0007	bal
	82	0.019	0.161	1.69	17.79	0.92	1.20	0.134	0.48	0.050	30.10	0.59	0.0066	0.0006	bal
600-SS41	182	0.026	0.262	1.80	11.53	0.05	0.94	0.033	0.37	0.030	30.78	0.15	0.0096	0.0070	bal
	112	0.031	0.221	0.24	15.43	3.85	1.92	0.033	0.07	0.058	16.38	0.17	0.0052	0.0028	bal
	A	0.041	0.205	1.19	10.21	0.81	0.97	0.022	0.10	0.081	37.50	0.10	0.0086	0.0061	bal
	82	0.029	0.187	1.69	15.97	0.08	1.36	0.073	0.25	0.107	15.78	0.17	0.0068	0.0031	bal
718-SS41	182	0.028	0.232	1.80	11.96	0.89	2.30	0.042	0.42	0.061	37.50	0.08	0.0064	0.0049	bal
	112	0.025	0.184	0.25	14.47	4.41	2.73	0.031	0.38	0.044	37.50	0.05	0.0010	0.0023	bal
	A	0.024	0.234	0.92	12.92	1.67	2.65	0.051	0.24	0.122	31.14	0.08	0.0050	0.0047	bal
	82	0.019	0.125	1.50	15.80	1.12	2.87	0.081	0.37	0.144	26.98	0.09	0.0032	0.0016	bal

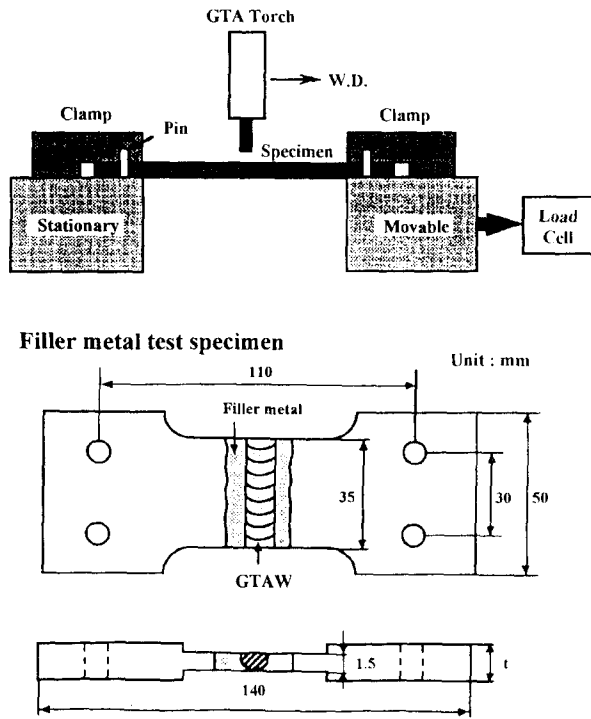


Fig. 2. Dimension and shape of specimen for the tensile type test.

용하고 있는 4가지 용접재료의 특성을 실험하였다. 모재 및 용접재료의 화학성분 및 사용되는 용접재료는 Table 1에 주어졌다. Inco. 용접봉 A (AWS ENiCrFe-2), 112 (AWS ENiCrMo-3) 및 182 (AWS ENiCrFe-3)은 수동용 SMAW(Shielding Metal Arc Welding) 피복용접봉이며 Inco. 82 (AWS ERNiCr-3)는 수동/반자동 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)용 용접wire이다.

이들 4가지 용접재료를 사용하여 이종강종간 (Incoloy 825-SS41, Inconel600-SS41 및 Inconel718-SS41) 용접한 부위의 화학성분은 Table 2에 주어졌다. 용접한 부위의 화학성분은 용접시 두 모재 및 용접재료와의 희석에

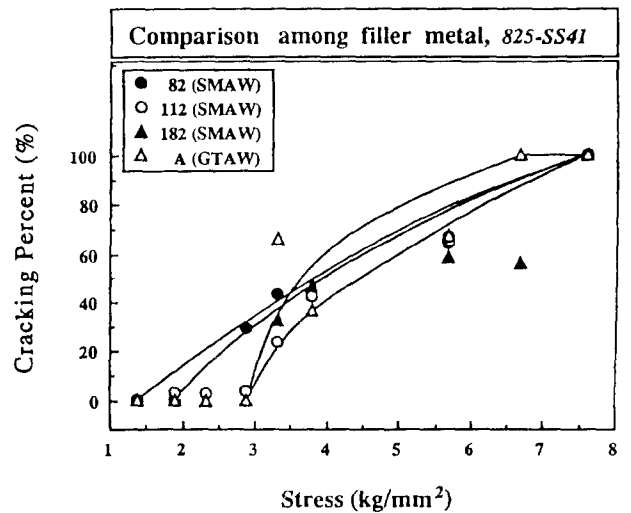


Fig. 3. Comparison of filler metal cracking susceptibility for dissimilar welding of 825-SS41.

의하여 사용한 용접재료의 화학성분과 다름을 알 수 있다.

실험방법

균열시험

본 연구에 사용된 균열장치는 external loading type 형태의 MC(Multi-Cracker)로써, 이는 전세계적으로 가장 많이 사용하는 굽힘형태(bending type)의 시험방법인 VarestaintTM 및 인장형태(tensile type)고온균열 시험인 SigmaJig 방법의 장점을 보완하여 한 장치를 통하여 두가지 시험을 할 수 있도록 연구자에 의해 자체 제작된 장치이다¹⁰. 본 연구에서는 인장형태의 실험만 수행하였다.

시편의 형상 및 크기는 Fig. 2에 나타나 있으며, 길이방향으로 인장을 가할때 clamp로부터 미끄러움을 방지하기 위하여 시편양쪽에 hole을 두개씩 가공하였다. 이종강종간 용접부의 균열특성을 관찰하기 위하여 jig를 사용하여 두강판을 1mm의 간격을 두고 용접재료를 사용하여 맞대기 용접한후 그림에 주어진 형태와 같이 용접부위가 시편의 중앙에 위치

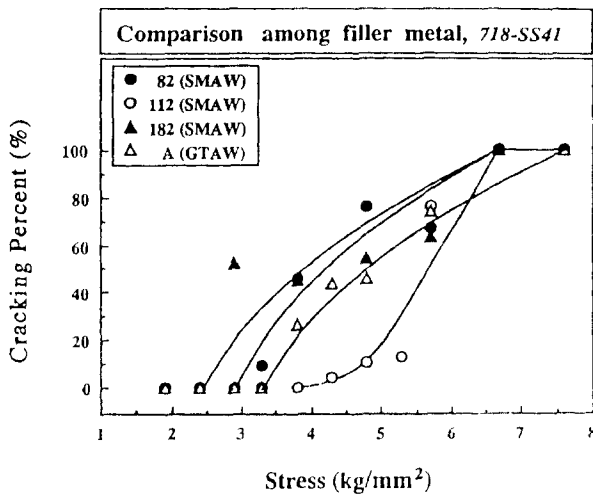


Fig. 4. Comparison of filler metal cracking susceptibility for dissimilar welding of 718-SS41.

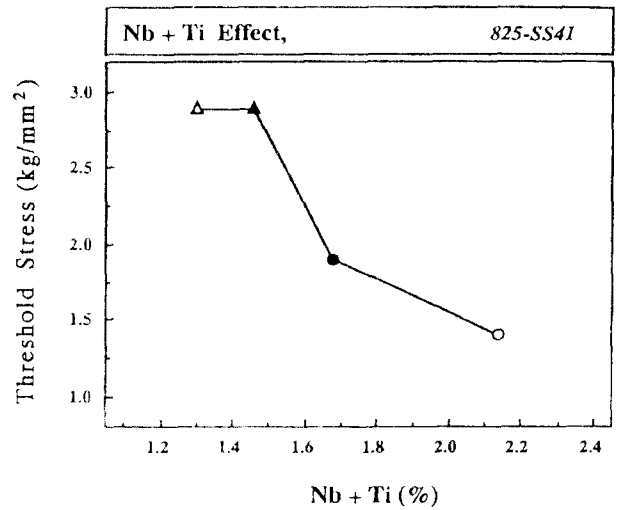


Fig. 6. Relationship between threshold stress and Nb + Ti content.

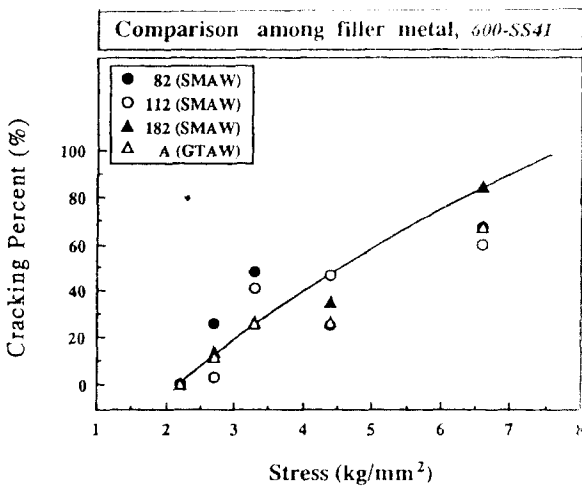


Fig. 5. Comparison of filler metal cracking susceptibility for dissimilar welding of Inco 600-SS41.

Table 3. Summary of threshold stresses of filler metals.

Filler Metal	Threshold Stress(kg/mm ²)			Remark
	825-SS41	718-SS41	600-SS41	
82	1.9	2.9	2.2	GTAW
112	1.4	3.8	2.2	SMAW
182	2.9	2.4	2.2	SMAW
A	2.9	3.3	2.2	SMAW

하도록 최종 가공하였다.

인장응고균열시험은, 그림에서 보여주듯이 가공된 시편을 장착대 hole을 통하여 고정시킨 다음 용접하기전 원하는 만큼의 하중(preload)을 가한 후 응력방향과 수직방향인 시편의 중심선을 따라 GTA용접을 실시한다. 이때의 용접 조건은 예비시험을 통하여 설정된 시편두께를 완전 용입시키는 조건이었다. (전류: 75A, 용접속도: 700mm/min,

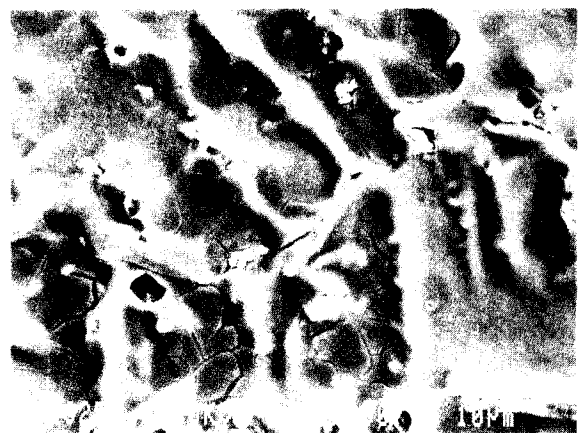
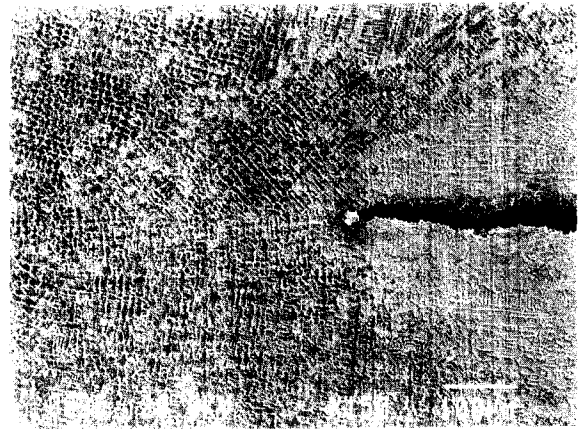
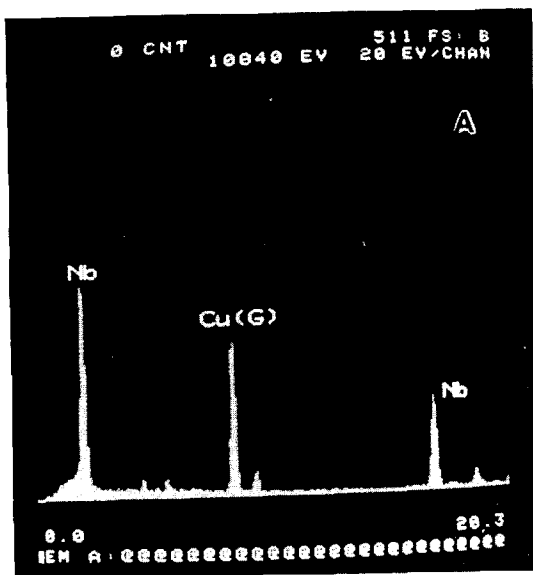
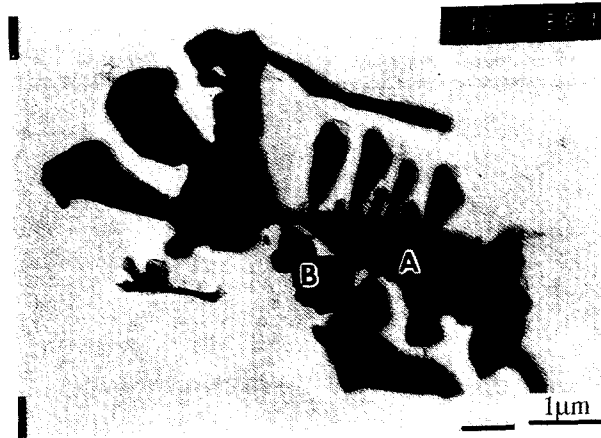
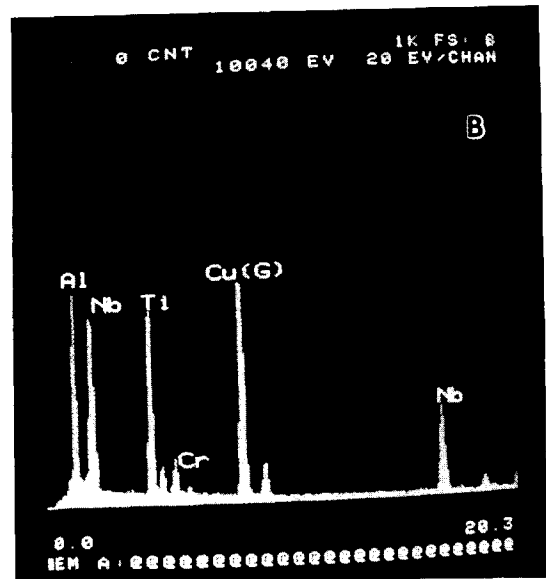


Fig. 7. Typical centerline crack in weld of 825-SS41-Inco182.

Ar 보호가스: 20l/min, arc distance: 2mm) 인가된 preload는 시편마다 일정한 간격으로 증가시켜가며 실험을 실시하였으며, 시험은 용접선을 따라 시편이 완전히 분리될 때까지 실시하였다. 시험이 끝난후 모든 시편은 저배율 현미경을 이용하여 균열길이를 측정한 후 용접길이와의 비율



Nb : 93.910 %
 Ti : 2.690 %
 Cr : 3.400 %



Al : 22.946 %
 Nb : 44.307 %
 Ti : 27.544 %
 Cr : 5.203 %

Fig. 8. MC type carbide in 825-SS41-182 weld.

을 계산하였다. 이때 균열이 발생하기 시작하는 응력을 임계응력(threshold stress)이라 하며, 임계응력은 동일한 용접조건 하에서의 재료간의 응고균열 감수성을 평가하는데 사용하였다. 즉, 임계응력이 낮을수록 재료의 균열 감수성은 높다.

조직 검사

재료의 균열특성과 조직적인 특성과의 상관관계를 고찰하기 위하여 시편의 일부를 선택하여 연마 및 부식(glycerin용액)한 후 광학현미경, 주사현미경(SEM/EDAX), Auger를 이용하여 일반적인 조직관찰과 균열부위, 파단면, 결정립계에서의 특정원소의 편석상태를 파악하였다. 그리고 용착부에 형성된 상의 화학성분 및 형태를 파악하기 위하여 carbon replica를 용접표면에서 채취하여

TEM/SAD/EDAX를 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 균열특성

Fig. 3, 4 및 5에는 4가지 용접재료를 사용하여 825-SS41, 718-SS41, 600-SS41간의 용접부위의 균열특성을 비교하고 있다. 각 그림에서는 응력변화에 따른 균열분율변화를 나타내고 있다. 그리고 균열이 발생되기 시작하는 임계응력은 Table 3에 요약되어 있다.

825-SS41간의 이종강종간 용접의 경우, 사용한 용접재료에 따라 균열이 발생하는 임계응력에 차이가 있음을 발견할 수 있다. 182 (ENiCrFe-3) 및 A (ENiCrFe-2)의 임계응력이 2.9kg/mm² 으로 가장 높고 82 (ERNiCr-3)이



Fig. 9. Typical centerline crack in weld of 825-SS41-Inco112.

1.9kg/mm²으로 중간을 나타내며, 112 (ENiCrMo-3) 이 1.4kg/mm²으로 가장 낮게 나타난다. 그러므로 인장균열 시험에서는 임계응력이 낮을 수록 균열감수성이 높으므로 112 SMAW용접봉이 균열 감수성이 가장 높고 그 다음으로는 82 GTAW용접 wire이고, A 및 182 SMAW용접봉이 균열특성이 가장 우수함을 알 수가 있다. 그러므로 825-SS41용접시에는 Incoloy 825와 유사한 Ni-Cr-Fe가 주성분인 용접재료를 사용할때 가장 우수한 용접균열 특성을 나타냄을 알 수가 있다.

이들 용접봉의 균열특성 차이는 무엇에 기인한지는 명확하지 않으나 Fig. 6에 주어진 용접부의 Nb·Ti 함량과 임계응력간의 상관 관계를 보면 Nb, Ti함량이 많을 수록 임계응력이 낮아져서 균열 감수성이 높다는 것을 유추할 수 있다. 그 외에도 화학성분을 자세히 관찰해보면 Mn함량이 높을 수록 균열 특성이 좋아지는 것도 알 수가 있다. Mn의 좋은 영향은 일반적으로 Mn이 응고시 S와 결합하여 MnS를 석출하여 S편석에 의한 저융점 sulfide 형성을 감소시켜 균열특성을 좋게 한다고 알려져 있다. 그러므로 Ni합금에는 용융접부에 S함량이 낮아 균열특성에 큰 영향을 미치지 않겠지만, 작은 양이나마 Mn에 의해 저융점 sulfide 형성을 저감시켰으리라 예상된다.

Fig. 4에는 Inconel 718-SS41의 이중상종간의 균열특

성을 보여주고 있는데, 예상외로 182를 제외하고는 전 용접재료의 균열특성이 825-SS41용접시 보다 양호한 균열특성을 보여 주고 있으며, 718 용접시에는 112 용접봉 사용이 가장 좋은 것으로 나타나고, 600-SS41 (Fig.5)용접시에는 용접재료에 상관없이 동일한 수준의 균열특성을 가지고 있다.

718-SS41의 균열특성을 화학성분과 검토해 보면, 이들 용접부에는 다른 용접부에 비해 상대적으로 높은 Nb·Ti를 가지고 있고 용접재료간 큰 차이를 보이지 않아 Nb, Ti의 다른 성분이 균열특성 변화에 영향을 주었으리라 예상된다.

실험결과로부터 관찰한 가장 중요한 사실은 모재가 달라질때 사용해야 할 용접재료도 달라야 한다는 것이다. 같은 Ni계 합금이라도 성분계가 다를때에는 다른 용접봉을 사용해야 한다는 것이다. 어떤재료 용접시 가장 좋은 결과를 가졌다 하더라도 다른재료간 용접시에는 가장 나쁜 균열특성을 보여준다는 평범하지만 중요한 사실을 발견할 수가 있다.

나. 조직특성

Fig. 7에는 인장형 균열시험편에서 관찰할 수 있는 전형적인 용접중심선 균열을 보여 주고 있다. 인장형태의 실험에는 응력이 용접방향에 수직으로 작용하므로 전 용접부에서 마지막으로 응고가 완료되는 centerline을 통하여 균열이 발생하는데, 그 증거로는 그림에서 보여주듯이 양쪽에서 성장해오는 결정립과 주상정 성장방향으로부터 알 수 있다. 그리고 양쪽 결정립들이 만나는 중심선에서의 편석이 가장 심하고 그에 따른 용접온도 하강 정도도 가장 심하다.

Fig. 7은 825-SS41 용접시 가장 양호한 용접특성을 가지고 있는 182 용접부에서 관찰된 전형적인 centerline균열과 균열 tip주위의 고배율 SEM조직을 보여주고 있다. 조직은 순수 오스테나이트 기지조직에 결정립계 및 주상정 임계를 따라 비연속적인 석출물(회색 보이는 상)을 관찰할 수 있다. 이들을 탄소 replica를 통하여 TEM으로 관찰된 조직, 성분 및 형태는 Fig. 8에 나타내었다. 화학성분으로부터 예상할 수 있듯이 이들은 주로 Nb이 주성분인 MC-오스테나이트의 공정상이다. 공정상의 중심 및 가지조직에는 Nb가 주성분을 이루지만 가지사이의 약간 둥글게 보이는 부위에는 Nb뿐 아니라 Ti 및 Al도 상당히 많이 포함되어 있다. 그러므로 형태 및 위치로 보아 Al이 많이 포함하는 particle은 NbC-오스테나이트 공정상이 석출한 다음 가지 조직과의 경계선에 존재하던 액상이 마지막으로 응고하면서 형성된 것으로 추측된다.

Fig. 9 및 10에는 825-SS41의 이중상종간 용접시 균열특성이 가장 나쁜 112 용접부의 조직 및 분석을 나타내고 있다. 전체적으로 182 용접부 조직과 유사하나 결정립계 및 주상정임계에 석출한 particle양이 많고 다소 연속적이어서 균열이 발생할 때 centerline에 잔존하던 액상의 양이 많았음을 시사하며 이것이 균열 특성을 나쁘게 한 이유로 생각된다. 한편 석출물의 화학성분을 관찰해 보면, 이들은

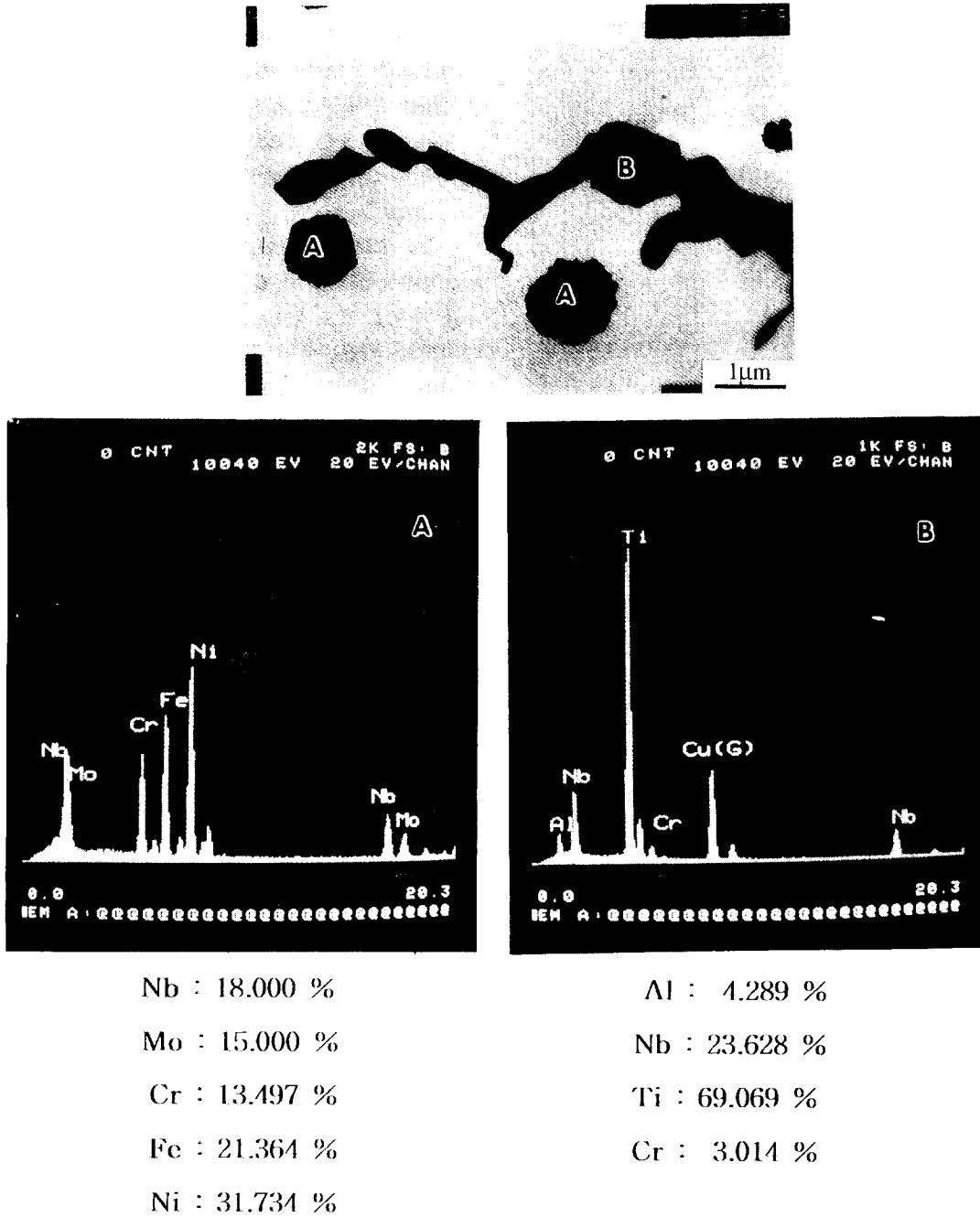


Fig. 10. (A)Laves and (B)MC type carbides in 825-SS41-112 weld.

Ti을 주성분으로 하는 TiC-오스테나이트와 그 주위에 응고 시 마지막으로 형성한 것으로 예상되는 Ti, Ni, Fe, Cr, Mo, Nb를 포함하고 있는 Laves상도 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 112 용접부의 균열 특성이 지조한 이유는 결정립계에 잔존하는 액상의 양이 많음과 동시에 상대적으로 반응온도/용점온도가 MC-오스테나이트 공정상 보다 낮은 Laves-오스테나이트 공정상이 존재하기 때문으로 사료된다.

82 및 A로 용접한 부위나 다른 합금조합(718, 600-SS41)에서도 상기와 유사한 조직과 석출물이 관찰되었는데 용접재료간 및 합금간의 균열 특성차이는 화학 조성 차이

에 의한 약간의 석출물량과 MC/Laves상의 비율 차이인 것으로 나타났으며, Laves공정상이 MC공정상 보다 상대적으로 많은 용접부에서의 균열특성이 지조하였다.

다. 파면검사 및 Auger분석

Fig. 11에는 112로 용접한 825-SS41 용접부에서 관찰된 전형적인 응고균열 파단면을 보여주고 있다. 전 표면이 매끄럽고 주기적인 산(peak)과 골짜기(valley)를 보여주는 주상정 조직을 보여주고 있어 균열은 응고 마지막 단계에 지용침상이 용접 중심선을 따라 연속적으로 존재하는 상태에서 균열이 발생한 것임을 예측할 수 있다.

파단면을 자세히 관찰해 보면 morphology가 표면, 중심

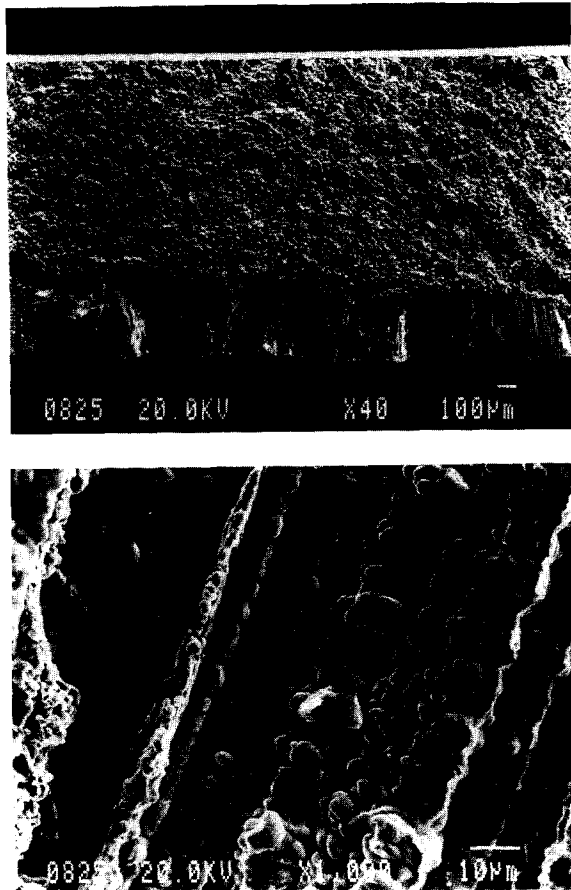


Fig. 11. Typical solidification crack surface in Incoloy 825.

부 및 하부의 3가지 형태로 나타나고 있는데 이는 부위에서의 열전달방향에 따른 주상정 성장 방향이 차이 있기 때문이다. 즉 상부표면 및 하부의 시편표면이하로 완전 용입된 지역은 대기로의 열전달에 의하여 주상정이 용접중심선과 평행 혹은 작은 각도로 성장하여 파단면에서는 사진과 같이 주상정의 형태를 완전히 구분할 수 있다. 한편 대부분의 용접부에서의 열전달은 모재방향인 용접선과의 수직방향이기 때문에 파단면에서는 주상정 tip만 발견할 수 있다.

Fig. 12에는 균열 파단면에서의 Auger 전자에너지 변화에 따른 Auger events/에너지(dn/dE)를 나타내고 있다. 12(a)에는 파단직후의 분석결과이고 12(b)는 Ar으로 5000Å 정도 표면연마(sputtering)후의 분석 결과이다. 파단직후의 분석결과를 보면 주원소인 Ni, Cr, Fe등은 거의 관찰되지 않고 Ti, Si만 관찰되고 있다. 높은 C peak는 파단후 검사시까지 표면오염 때문이며, O peak는 표면오염 및 균열후 상온까지 냉각시의 산화 때문이다. Ar으로 sputtering하여 표면오염을 제거시킨 후의 분석인 Fig. 12(b)를 관찰해 보면, Ni, Cr, Fe등의 주원소는 급격히 증가한 반면에 Ti, Si은 표면과 유사한 정도로 검출되고 있다. 이들 원소외에도 약간의 Mo, S등이 검출되고 있다.

Fig. 13 에는 sputtering시간 변화 (즉, 깊이변화)에 따른 원소분포도를 보여주고 있다. Ti이 주 편석원소이며 편

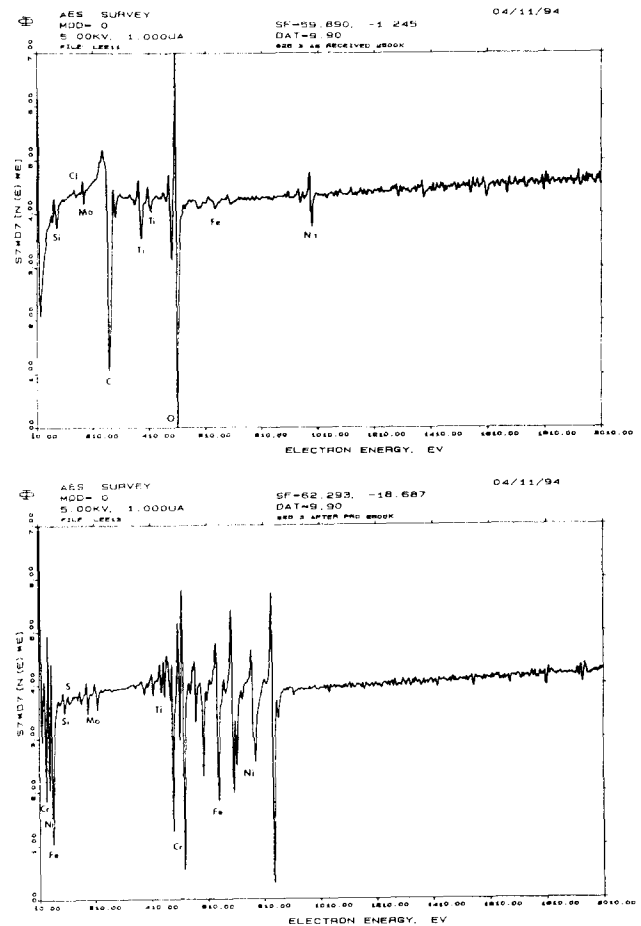


Fig. 12. Auger spectrum at as fractured surface (a) and after Ar sputtering (b) from Incoloy 825.

석깊이는 약 6000Å 이상이 된다. 이들 편석 원소들은 앞에서 replica로 관찰한 결과와 잘 일치하고 있다. 즉 Ti이 풍부한 Laves상과 MC탄화물이 용접부에서 마지막으로 응고하는 centerline에 많이 형성되어 균열감수성에 영향을 주었으리라 예상된다.

4. 결 론

1. Incoloy 825 및 Inconel 718, 600의 용접부 응고균열은 응고시 Nb, Ti, Mo, Si, P 등이 결정립계 및 주상정립계에 편석하여, MC, Laves 등의 저용점상 및 오스테나이트 기지조직과의 공정상을 형성하고 고상선 온도 이하에서 결정립 내부에는 응고가 완료되었으나, 결정립계를 따라 액막(liquid film)으로 존재하여 용착금속이 응고시 발생하는 수축응력, 구속력(보수용접시)이 액막에 의해 취화된 결정립계에 집중하므로 발생한다.

2. 용접재료 변화에 따른 균열 감수성 차이는 성분변화에 의한 저용점상 형태가 달라지기 때문이며, 저용점상의 대부분은 Ti, Nb, Mo편석에 의한 MC, laves-오스테나이트 공정상이다. Laves공정상이 MC 공정상에 비해 상대적으로 많을수록 균열 감수성은 높다.

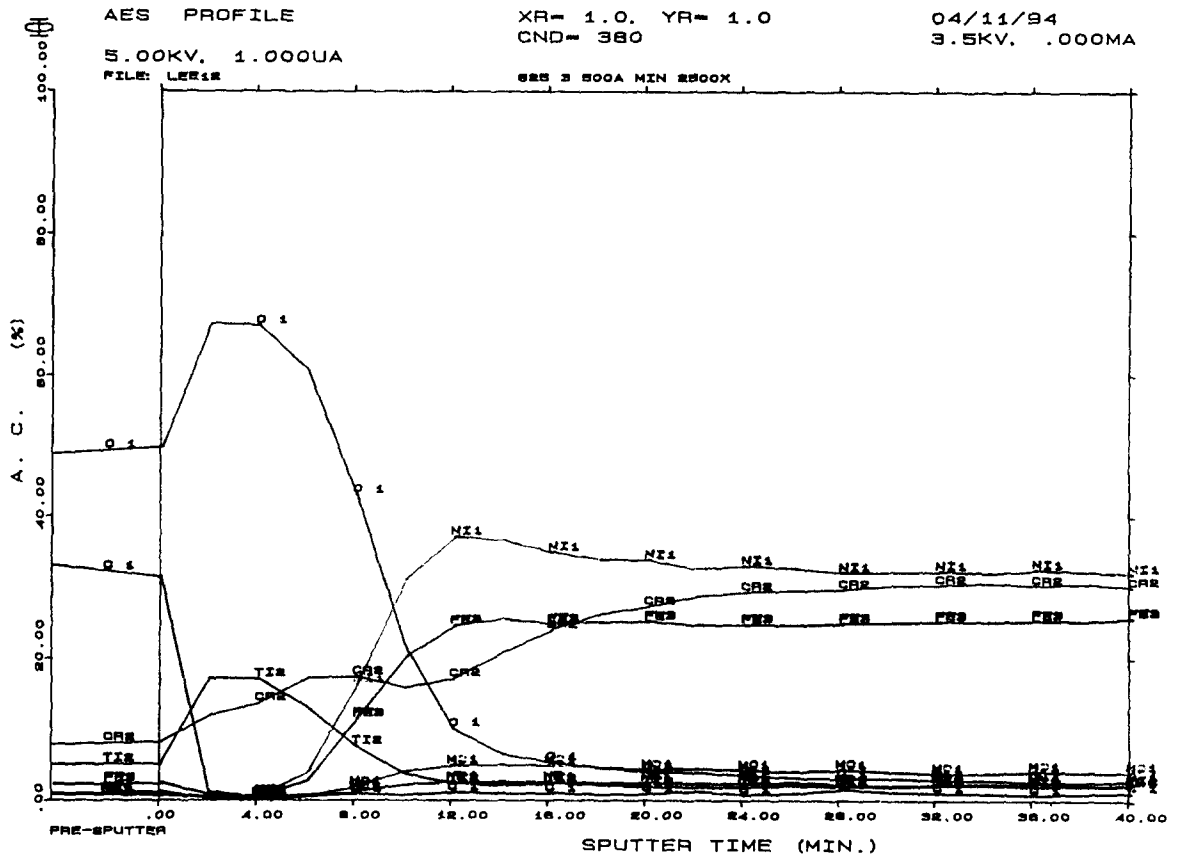


Fig. 13. Auger elemental distribution as a function of sputtering.

3. 용접재료 선정시 한 모재계열에서 우수한 특성을 보유했다고 다른 합금계에도 유사한 특성을 가지지 않는다. 석출경화형 Ni기 합금을 용접할 경우 NiCrFe계열이 가장 적합한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한양대학교 1995년도 신진교수 정착연구비로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. C.H. Lee et al, Unpublished research, (1994)
2. Incoloy alloy 825, Bulletin, Inco Alloys International, Inc., (1987)
3. SUPERALLOYS II, Edited by, C.T. Sims, N.S. Stoloff and W.C.Hagel, John Wiley & Sons, Pub.
4. Welding Nickel Alloys, Bulletin, Inco Alloys International, Inc., (1989)
5. T.J. Kelley, Welding Journal, 69(11), 422s, (1990)
6. M.J. Cieslak, T.J. Headley and A.D. Romig., Metallurgical Transactions A, 17A(11), 2035, (1986)
7. A.C. Lingenfelter, Welding Journal, 51(9), 430s, (1972)

8. J.A. Brooks and R.W. Krenzer, Welding Journal, 23(6), 242s, (1974)
9. H. Yoshimura and K. Winterton, Welding Journal, 51(3), 132s, (1972)
10. J.A. Brooks, Welding Journal, 53(11), 517s, (1974)
11. J.C. Lippold, Welding Journal, 62(1), 2s, (1983)
12. S.C. Ernst, W.A. Baeslack III and J.C. Lippold, Welding Journal, 68(10), 418s, (1989)
13. R. Nakkalil and M.C. Chaturvedi, Metallurgical Transactions A, 24(5), 1169, (1993)
14. B. Radhakrishnan and R.G. Thompson, Metallurgical Transactions A, 22(4), 887, (1991)
15. W.F. Savage, E.F. Nippes and G.M. Goodwin, Welding Journal, 56(8), 246s, (1977)
16. T. Sawai, Y. Useshima and S. Mizoguchi, ISIJ International, 30(7), 520, (1990)
17. C.H. Lee, and R.W. Chang, J. of the Korean Inst. of Met. and Mater. 31(6), 818, (1993)
18. C.D. Lundin, C.H. Lee and R. Menon, WELDING RESEARCH, THE STATE OF THE ART, ASM International, 86, (1985)