

Copper-Nickel Alloy Pipe와 Carbon Steel Sleeve의 이종 재질 용접 연구

A Study on Dissimilar Metal Welding of Copper-Nickel Alloy Pipe and Carbon Steel Sleeve

신 동진*, 장 태원, 윤 동렬, 장 경복, 문 종현

*삼성중공업 용접연구파트

1. 서 론

LNG선, FPSO 및 해양구조물 등에서 많이 사용 중인 Copper-Nickel Alloy Pipe(이하 CuNi)는 일반적으로 해수를 이용하는 Fire Washing Piping, Foam Piping System, Ballast Pipe Line 및 Bilge Line 등에 사용된다. 특히 CuNi Pipe는 뛰어난 내식성 등으로 인해 사용 범위가 점차 확대되고 있다. 이 같은 비철(Nonferrous) Pipe의 결합 방법은 다양하지만, 대부분의 산업 현장에서는 안전성, 작업성 및 결합성 등의 이유로 인해 용접을 많이 채용하고 있다.

이들 비철 Pipe가 FPSO 및 해양구조물과 같은 Steel Hull 구조물에서는 필연적으로 Wall 또는 격벽(Bulkhead)을 관통해야만 한다. 이 경우 구조물에서 발생하는 하중 등의 직접적인 영향이 CuNi Pipe에 전달되는 것을 최소화하기 위해 Carbon Steel 형태의 Sleeve(이하 C/S)를 이용하곤 한다. 이 C/S는 CuNi Pipe와 1차 용접 후 Sleeve와 Wall 또는 격벽(Bulk-head)이 2차 용접되는 방식을 적용하고 있다.

본 연구에서는 CuNi과 C/S 사이에 널리 적용 중인 2가지 용접재료(AWS E(R)NiCu-7과 AWS E(R)Ni-1)에 대해서 다양한 시험을 통해 상호 비교 검토를 수행하였으며, 이와 함께 AWS E(R)CuNi 용접 재료에 대해서도 시험을 수행하여 그 문제점을 파악하였다.

2. 용접 시험 개요

CuNi과 C/S는 전형적인 비철(Nonferrous Alloy)과 철(Ferrous Alloy) 용접이다. 작업의 난이도 및 용접결함 등을 유발할 수 있는 다양한 인자를 가지고 있어 작업 시 주의가 요망되는 이종 재질 용접이다. 본 시험에서는 생산 현장에서 많이 사용되는 90% Copper - 10% Nickel Pipe(ASME B466)와 ASME A106 Grade B Carbon Sleeve를 모재로 이용하였다. 그리고 다양한 종류의 용접재료, Gap 조건 및 용접 입열량을 변화시키면서 용접부 중심 및 열영향부(HAZ)에서의 균열 발생 경향과 그에 적합한 적정 용접 조건을 검토하기 위함이다.

2.1 시험 종류

본 연구에서는 3가지의 각각 용접재료 (AWS ERNiCu-7, AWS ERNi-1, AWS ERCuNi), 2가지 Root Gap(0.1mm/1.5mm) 조건 및 2종류의 용접 입열(1.0KJ/mm이하/1.5KJ/mm이상)에 대해서 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) Manual 용접이 수행되었다.

용접재료의 경우 일반적으로 많이 사용되고 있는 Nickel Base의 AWS ERNiCu-7과 AWS ERNi-1에 대해서 검토하였으며, 추가로 Copper Base의 AWS ERCuNi에 대해서도 함께 시험이 수행되었다.

Root gap의 경우, 구속 조건의 영향을 고려하기 위해 각각 0.1mm 이하(실제 zero에 근접함)와 1.5mm의 2가지에 대해서 수행하였다. 1.5mm는 해양 구조물에서 적용 중인 도면상 최

대 Gap이다.

또한 용접 입열은 현장에서 실제 사용 중인 조건 보다 약간 낮은 수준의 입열량(Root Pass만 약 1.0kJ/mm)과 이 보다 높은 수준의 입열량(약 1.5kJ/mm)의 2가지로 선정하였다.

2.2 시험 조건

아래 Figure 1은 용접될 시험편의 형상을 보여 주고 있으며, 한쪽면에서 Single-Pass 용접 완료 후 맞은편에서 다시 Multi-Pass 용접을 수행하였다.

CuNi Pipe와 C/S 사이의 Gap 정도를 정확히 유지시키기 위해 C/S의 내면을 사전에 Milling 가공 처리하였다. 모재와 용접재료의 물리적 특성 및 화학적 조성은 Table 1에 표시하였으며 전류, 전압, 용접속도, 예열, 층간온도 및 입열량과 같은 용접 조건은 Table 2에 나타내었다.

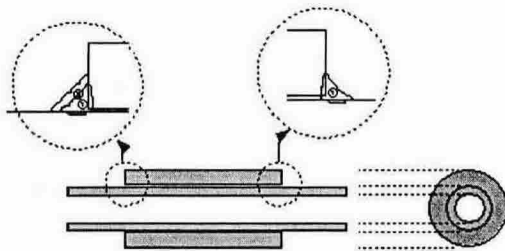


Figure 1 용접 시험편 형상

Table 1 물리적 특성 및 화학적 조성

		Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	elong. (%)
Base Metal	CuNi (B-465)	182	350	-
	C/S (A106-B)	307	478	44.2
	관용 Plate (API 2H ED)	476	546	51.0
Filler Metal	AWS ERCuNi	N/A		
	AWS ERNiCu-7			
	AWS ERNi-1			

		Cu	Ni	Fe	Zn/Ti	Mn	C	Si	Cr	기타
Base Metal	CuNi (B-465)	Bal.	10.1	1.26	Zn:0.06	0.53	-	-	-	Pb: 0.011
	C/S (A106-B)	0.03	0.02	-	-	0.75	0.19	0.21	0.05	P:0.011 S:0.006 CEQ: 0.33
	관용 Plate (API 2H ED)	0.31	0.7	-	-	1.35	0.05	0.16	0.03	P:0.004 S:0.003 CEQ: 0.36
Filler Metal	AWS ERCuNi	Cu+Ag Bal.	Ni+Co 30.6	0.55	Ti:0.27	0.72	-	0.04	-	P:0.002 S:0.002 Pb:0.001
	AWS ERNiCu-7	28.8	Ni+Co 64.7	0.88	Ti:2.27	3.22	0.004	0.05	-	P:0.003 S:0.002
	AWS ERNi-1	0.09	Bal.	0.06	Ti:3.43	0.4	0.02	0.13	-	P:0.004 S:0.006 AL:0.35

Table 2 용접 조건

시험편 No.	용접재료 (AWS)	Root 입열량 (kJ/mm)	Root Gap	1st Side		Preheat-ing	Inter-pass	용접 조건			
				2nd Side				전류	전압	속도	입열량 (kJ/mm)
01	ERCuNi	1.0 이하 (저입열)	0.1mm	Single	15°C	110°C	230	12	18.3	0.9	
				Multi	10°C		230	11.5	17.0	0.9	
				Multi	10°C		235	12	10.3	1.6	
			1.5mm	Single	20°C	233	12.5	16.0	1.1		
				Multi	14°C	100°C	230	11.5	20.0	0.8	
				Multi	14°C	100°C	233	12.5	14.0	1.2	
04	ERCuNi	1.5 이상 (고입열)	0.1mm	Single	14°C	110°C	231	12.5	10.7	1.6	
				Multi	14°C		232	12.5	11.0	1.5	
				Multi	14°C		232	12.5	12.2	1.4	
			1.5mm	Single	14°C	233	12.5	12.1	1.4		
				Multi	14°C	100°C	233	12.5	12.6	1.4	
				Multi	14°C	100°C	233	12.5	12.4	1.4	
02	ERNiCu-7	1.0 이하 (저입열)	0.1mm	Single	12°C	100°C	230	12	20.0	0.8	
				Multi	20°C		230	12	18.0	0.9	
				Multi	14°C		233	12	18.9	0.9	
			1.5mm	Single	14°C	80°C	233	12.5	20.5	0.9	
				Multi	14°C	80°C	231	12.5	19.3	0.9	
				Multi	14°C	107°C	231	12.5	10.0	1.7	
05	ERNiCu-7	1.5 이상 (고입열)	0.1mm	Single	14°C	135°C	232	12.5	10.5	1.6	
				Multi	14°C		232	12.5	11.5	1.5	
				Multi	14°C		232	12.5	11.7	1.5	
			1.5mm	Single	14°C	107°C	232	12.5	12.9	1.4	
				Multi	14°C	107°C	232	12.5	12.5	1.4	
				Multi	14°C	107°C	232	12.5	12.5	1.4	
03	ERNi-1	1.0 이하 (저입열)	0.1mm	Single	10°C	130°C	230	12	19.3	0.9	
				Multi	20°C		230	12	16.2	1.0	
				Multi	14°C		230	12	8.8	1.9	
			1.5mm	Single	14°C	80°C	230	12	17.7	0.9	
				Multi	14°C	80°C	232	12.5	17.5	1.0	
				Multi	14°C	80°C	232	12.5	8.9	2.0	
06	ERNi-1	1.9 이상 (고입열)	0.1mm	Single	14°C	N/A	232	12.5	9.1	1.9	
				Multi	14°C	120°C	232	12.5	10.4	1.7	
				Multi	14°C	120°C	232	12.5	9.9	1.8	
			1.5mm	Single	14°C	140°C	231	12.5	9.1	1.9	
				Multi	14°C	140°C	232	12.5	10.0	1.7	
				Multi	14°C	140°C	232	12.5	9.3	1.9	

3. 시험 결과

3.1 용착금속 표면 중균열

AWS ERNiCu-7의 경우 Root Gap 1.5mm에서 약간의 용접부 중심 중균열(고온균열 유형, 전체 용접장중 약 5% 정도)이 조사되었으며, AWS ERNi-1의 경우 역시 Root Gap 1.5mm에서 상당량의 중균열이 발견되었으나 AWS ERCuNi에서는 조건에 관계없이 균열이 발생되지 않았다. 결과는 Table 3에 나타내었으며 아래와 같이 요약된다.

첫째 용접선 길이 방향의 균열은 공통적으로 Root Pass 용접에서만 발생되었으며, 둘째 AWS ERNiCu-7의 경우 상대적으로 입열량이 낮은(1.0kJ/mm 이하) 조건과 Root Gap이 큰 1.5mm에서만 일부 부분적으로 발생되었지만 입열량을 충분히 가질 경우(1.5kJ/mm 이상)에는 Root Gap에 관계없이 발생되지 않았다. 셋째 AWS ERNi-1은 낮은 입열량과 Gap이 큰 경우 균열 발생 빈도가 타 용접봉 대비 높게 나타났다. 그러나 본 용접재료 역시 입열량이 상대적으로 높거나 구속도가 낮은(Gap 0.1mm 이하) 경우에는 중균열이 발생되지 않았다.

Table 3 용접부 표면 균열 결과

시험편 No.	용접재료 (AWS)	Root 입열량 (kJ/mm)	Root Gap	1st Side (Single Pass)	2nd Side (Multi Pass)
01	ERCuNi	1.0 이하 (저입열)	0.1mm	No Cracking	No Cracking
61			1.5mm	No Cracking	No Cracking
04		1.5 이상 (고입열)	0.1mm	No Cracking	No Cracking
59			1.5mm	No Cracking	No Cracking
02	ERNiCu-7	1.0 이하 (저입열)	0.1mm	No Cracking	No Cracking
60			1.5mm	일부 Cracking	No Cracking
05		1.5 이상 (고입열)	0.1mm	No Cracking	No Cracking
58			1.5mm	No Cracking	No Cracking
03	ERNi-1	1.0 이하 (저입열)	0.1mm	No Cracking	No Cracking
57			1.5mm	일부 Cracking	No Cracking
06		1.9 이상 (고입열)	0.1mm	No Cracking	No Cracking
56			1.5mm	No Cracking	No Cracking

3.2 열양향부에서의 균열 발생

CuNi Pipe와 C/S의 용접 후 각 모재의 열영향부(이하 HAZ)에 대한 현미경조직 검사를 Figure 2의 위치에서 수행되었으나 CuNi Pipe 방향의 HAZ에서는 용접재료, Root Gap 및 입열량에 관계없이 의심스러운 결함은 발견되지 않았다. 그러나 AWS ERCuNi의 경우 C/S 방향의 HAZ에서 다량의 미세균열이 발견되었다.

특히 Figure 3에서와 같이 이들 균열은 2가지의 특징을 함께 보여 주고 있다. 사진 (a), (b)와 같이 대부분의 균열은 Fusion line(이하 F/L)으로 침투된 용착금속이 균열 발생의 시작점 이었으며, 현미경조직에서 볼 때 입계를 따라 침투된 것으로 조사되었으나 이후 균열이 전파형상은 아래 두 사진 c), d)와 같이 입내 균열이 상당수를 차지하고 있었다.

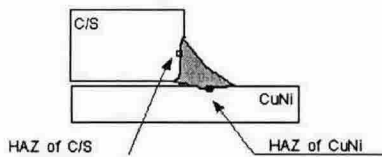


Figure 2 현미경 조직 시험 위치

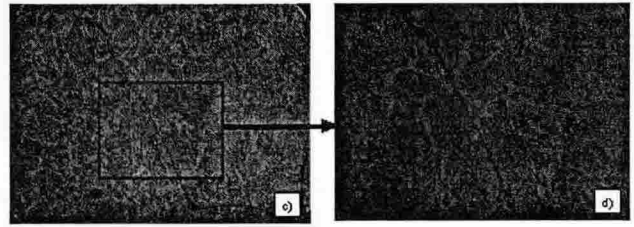
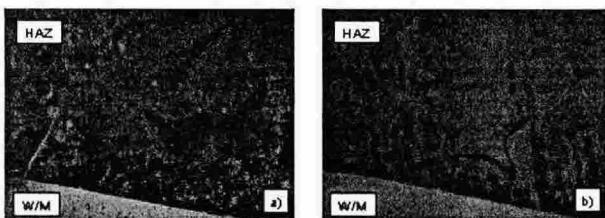


Figure 3 C/S 방향의 HAZ에서 현미경 사진

3.3 관통 Plate와 용접 시 균열 발생

관통 Plate와 C/S에 대한 열응력 해석 결과 상당한 크기의 응력이 C/S의 Root부에 작용되고 있음을 확인하였다. 이들 열응력은 CuNi Pipe와 C/S 사이에 발생된 균열들에 영향을 미쳐 그들의 진행을 촉진시키고 있었다. Figure 4는 관통 Plate 용접시험편 및 Macro-Section 형상이다.

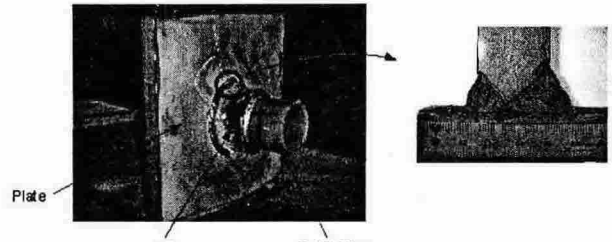


Figure 4 관통된 Plate의 용접 형상

4. 결 론

- 1) AWS ERNi-1은 다양한 분석에서 양호한 결과를 나타내었다. 단 Root Gap이 크고 용접 입열이 작은 Single Pass 용접 시 용착금속 표면에서의 응고균열 현상이 일부 발생되었다.
- 2) AWS ERNiCu-7의 경우 용착금속 응고균열은 AWS ERNi-1 보다 는 다소 양호하였다.
- 3) AWS ERCuNi는 CuNi와 C/S와 같은 이종 재질 용접에 직접 사용할 경우 C/S 방향의 HAZ에서는 미세 균열 발생 가능성이 많았다.

참고문헌

1. Welding Handbook, 8Edition, Vol. 1 and 4
2. ASM Handbook, Vol. 1 and 2, 'Properties and Selection: Ferrous/Non-ferrous Alloy and Special-Purpose Materials'
3. Welding Metallurgy, Vol.1