

# 시공조건에 따른 저온용 FC 용접부의 파괴인성에 관한 연구

## Study of low temperature fracture toughness of FC weld by welding conditions

최준태\*, 김영일\*\*, 김대순\*\*\*  
\*, \*\*, \*\*\* 현대중공업 산업기술연구소

### 1. 서론

최근 해양 구조물은 심해용 부유식 구조물이 시장을 주도하고 있으며, 이와 함께 개발 지역의 부족한 인프라 극복을 위해 구조물이 대형화하면서 사용 강재가 고강도, 후물화 되는 특징을 보여 주고 있다. 해양 구조물에는 압력용기 혹은 선박에서 요구되지 않는 파괴인성이 요구되는데, 이와 관련해 두께 50mm 이상 용접부에 대해 최저 사용 온도 이하에서 0.25mm 이상의 CTOD 값을 요구하는 것이 일반적이다. 따라서, 해양 구조물에서 후판 강재의 사용 증가 추세와 맞물려 용접부에 대한 CTOD 시험에 대한 요구는 제작공법과 용접기법에 상당한 변화를 초래하고 있다. 과거 해양 구조물에서는 후판 강재의 사용량이 미미했기 때문에 용접 생산성은 떨어지지만 파괴인성이 우수한 SMAW 기법을 사용하거나, 혹은 용접 완료된 구조물을 후열처리하여 CTOD 요구를 면제받는 방법으로 구조물 제작이 가능했다<sup>(\*)</sup>. 그러나, 해양 구조물에서 CTOD 요구 부위가 증가하면서 고능용 용접기법을 적용하여 구조물을 경제적으로 제작하고자 하는 노력과 함께 해양 구조물 제작에서 70% 이상의 높은 적용 개소를 가지면서도 상대적으로 열등한 파괴인성을 보이는 FC (Flux Cored) 용접기법을 CTOD 요구 부위에 적용하고자 하는 연구가 국, 내외 제작업체와 용접재료 공급업체 주도로 진행되어 왔다.

본 논문에서는 해양 구조물 용접부의 파괴인성 요구와 관련해 가장 널리 사용되고 있는 80ksi급

FC 와이어에 대해 해양 구조물에서 요구하는 용접시공조건에 따른 용접부 파괴인성과 기계적 특성의 변화를 보고자 한다.

### 2. 실험 방법

해양 구조물 용접부의 파괴인성 요구와 관련해 가장 널리 사용되는 80ksi급 저온용 FC 와이어에는 CO<sub>2</sub>를 보호가스로 사용하는 루타일 (rutile) FC 와이어와 혼합가스를 사용하는 루타일(Ⅱ, Ⅲ) 그리고 베이직 (basic) FC 와이어 (Ⅳ)가 있다. 일반적으로 CO<sub>2</sub> 보호가스보다 혼합가스 (Ar+CO<sub>2</sub>)를 사용하는 FC 와이어가 상대적으로 파괴인성이 우수하여 극저온에서 CTOD (mm)를 요구하는 해양 구조물에 적용이 가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 혼합가스를 사용하는 루타일 및 베이직계 FC 와이어를 사용하여 실험을 실시하였다.

#### 2.1 실험 재료

아래 표 1에서는 실험에 사용된 FC 와이어의 종류와 함께 와이어에 파괴인성 확보를 목적으로 첨가한 주요 합금원소를 보여 주고 있다. 한편, 시험편 강재로는 항복강도 350MPa급 TMCP 강재 (EH36M)가 사용되었으며, 시험편의 두께가 CTOD 시험 결과에 큰 영향을 준다는 점을 고려해 76mm 후판이 사용되었다. 표 2는 시험 강재의 화학조성과 강도를 보여주고 있다.

표 1 : 80ksi 급 저온용 FC 와이어

종 류	보호가스	플럭스	합금원소
A	Ar+CO <sub>2</sub>	rutile	1.5%Ni-Ti-B
B	Ar+CO <sub>2</sub>	rutile	1%Ni-Ti-B
C	Ar+CO <sub>2</sub>	basic	2.5%Ni-Ti-B

표 2 : 모재 화학조성 및 강도

사 양	화학조성 (wt.%)			
	C	Si	Mn	Ni
EH36M	0.07	0.22	1.46	0.17

인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
515	431	33

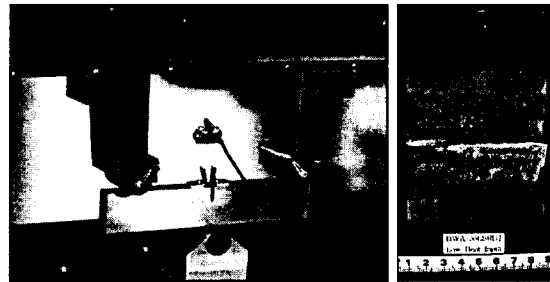
2.2 용접시공조건

시험편 용접에 사용한 용접시공조건은 API RP 2Z의 기본 개념에 따라 용접입열, 예열온도 그리고 층간온도를 조합하여 용접부 냉각속도가 가장 빠르고 (저입열), 가장 느린 (고입열) 조건을 선정하여 시험편 용접을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 용접시공조건을 살펴보면 저입열은 예열과 층간온도가 70℃을 넘지 않도록 하고, 입열은 8~11kJ/cm 범위에서 적용하였다. 또한, 고입열 용접은 예열 180℃ 이상, 층간온도 최대 250℃ 그리고 입열은 18~25kJ/cm 범위에서 용접하였다.

2.3 CTOD, 충격 및 강도시험

CTOD 시편은 시편의 길이방향이 용접방향에 수직하게 채취하여 CTOD 노치가 용접길이 방향이 되도록 가공하였으며, 시편 크기는 용접부 두께가 63mm 이상인 경우 Tmm x Tmm (두께 x 폭) 시편이 요구되는 API RP 2Z 규정에 따라 70mm x 70mm x 350mm (두께 x 폭 x 길이) 시편을 제작하였다. CTOD 시험 절차는 BS 7448에 따라 시험을 실시하였다. 또한, 용접부 CTOD 시험 결과를 기타 기계적 특성과 비교하기 위해서 CTOD 시험 이외에 충격시험, 인장시험 그리고 주요 합금원소와 불순물 (산소와 질소) 분석을 실시하였다.

그림 1 : CTOD 시험장면 및 파단면



3. 실험 결과

그림 2에서 보인 것과 같이 FC 용접부의 탄소당량 (Ceq)은 0.40~0.48% 범위에 있으며, 용접부 강도는 탄소당량이 가장 높은 2.5%Ni-Ti-B 용접부 (A)가 가장 높고 다음으로 1.5%Ni-Ti-B 용접부 (B) 그리고 1.0%Ni-Ti-B 용접부 (C) 순이었다. 저입열 용접부와 고입열 용접부를 비교하면 상대적으로 저입열 용접부가 탄소당량 및 강도가 모두 높다는 사실을 알 수 있다.

그림 2 : 용접부 강도 및 탄소당량

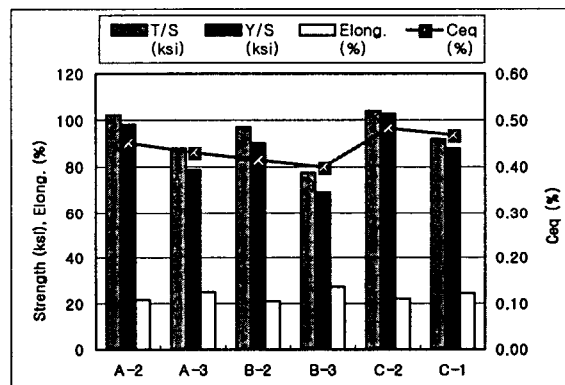
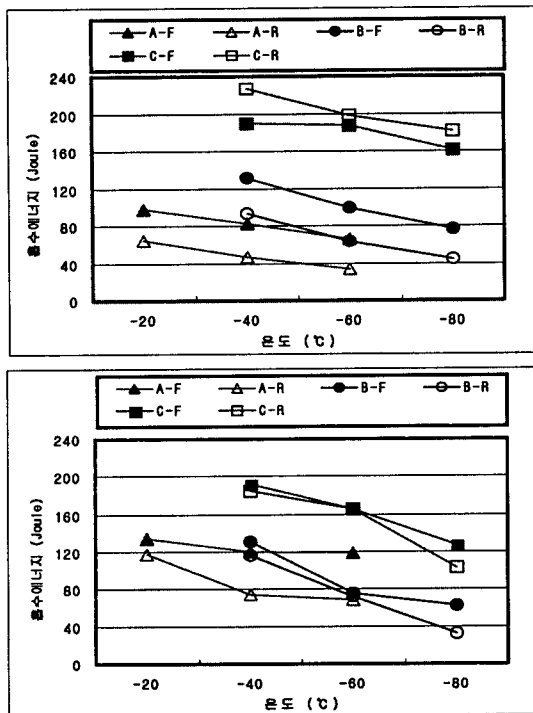


그림 3에 보인 용접부의 충격인성 시험결과에서는 강도가 가장 높은 2.5%Ni-Ti-B 용접부(C)가 용접시공조건에 관계없이 -80℃ 까지 100Joule 이상의 높은 충격인성을 보였고, -35℃ CTOD 시험결과 (표 3)에서도 0.6mm 이상의 우수한 파괴인성을 보였다. 일반적으로 FC 용접부는 다른 용접기법에 비해 산소 및 질소 함유량이 높아 인성이 열등하며, 이러한 경향은 용접부 강도가 증가하면 더욱 증가하는 것으로 알려져 있지만<sup>(2,3)</sup> 상대적으로 강도가 가장 높았던 2.5%Ni-Ti-B 용접부(A)가 우수한 충격인성과 파괴인성을 보인 것은 표 4에 알 수 있듯이 2.5%Ni-Ti-B 용접부의 산소량이 가장 작기 때문이다.

그림 3 : 충격인성 시험결과



a) 저입열 용접부 b) 고입열 용접부

표 3 : CTOD 시험결과

종 류	용접자세	온도	CTOD (mm)		
			=	>	>
A	2G	-10°C	= 0.16	= 0.13	= 0.13
	3G		> 0.61	> 0.61	> 0.63
B	2G	-35°C	= 0.06	= 0.22	= 0.32
	3G		> 0.68	> 0.67	= 0.47
C	2G	-35°C	> 0.64	> 0.64	> 0.62
	1G		> 0.65	> 0.67	> 0.66

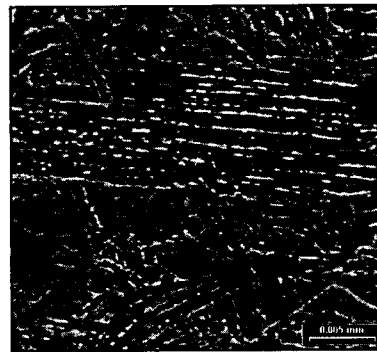
표 4 : 산소 및 질소 함유량 (ppm)

종 류	용접자세	O	N
A	2G	721	30
	3G	532	19
B	2G	611	30
	3G	500	32
C	2G	286	53
	1G	333	23

표 4에서 알 수 있듯이 상대적으로 높은 산소량을 보인 1.5%Ni-Ti-B (A)와 1.0%Ni-Ti-B (B) 용접부는 2.5%Ni-Ti-B (C) 용접부 보다 충격인성이

열등하였으며, 또한 저입열 용접부의 충격인성과 CTOD 시험결과가 고입열 용접부 보다 더욱 낮은 특성을 보였는데, 이러한 특성은 그림 4에 보인 저입열 용접부에 생성된 조대한 베나이트 (banite) 조직이 저입열 용접부의 강도 증가와 충격인성 및 파괴인성 저하의 주요 원인이 되었기 때문이다.

그림 4 : 1.5%Ni-Ti-B 저입열 용접부



#### 4. 결 론

이상의 실험을 통해 얻어진 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 베이직계 2.5%Ni-Ti-B 용접부는 상대적으로 높은 탄소당량과 강도를 보였지만 파괴인성과 충격인성은 가장 우수하였다.
- 2) 베이직계 2.5%Ni-Ti-B 용접부의 높은 인성은 용접부의 낮은 산소량에 기인한다.
- 3) 루타일계 용접부는 특히 저입열 용접부에서 열등한 충격인성과 파괴인성을 보였는데, 이는 용접부의 높은 산소량과 함께 조대한 경화조직 생성이 인성 저하의 주요 원인이었다.

#### 참고문헌

- \*1. EEMUA 158 : Engineering Equipment & Materials Users Association
- \*2. T. Suga, K. Ikemoto, "Toughness of Weld Metal by MAG Welding Flux-Cored Wire for Low Temperature Service Steel", IIW Doc. II-1492-97 (1997).
- \*3. F. Matuda, K. Ikeuchi, Y. Fukuda, Y. Trans. JWRI, 24 (1995), 1