

습식 수중 용접봉의 기계적 성질에 관한 연구

김민남* · 김복인** · 한정동**

* 부경대학교 기계공학부

** 부경대학교 대학원 기계공학부

A Study of Mechanical Properties of Underwater Wet Welding Electrode

MIM-NAM KIM*, BOK-IN KIM** AND JEONG-DONG HAN**

*Pukyong National University, School of Mechanical Engineering, Pusan 608-739, Korea

**Pukyong National University, Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Underwater wet arc welding 습식수중 아크용접, Underwater welding electrode 수중 용접봉, HAZ 열 영향부, Weld metal 용접금속, Mechanical properties 기계적성질

ABSTRACT: This study has been performed for mechanical properties of underwater wet welding electrode with rolled steel (KR-RA) for ship structure, one kind (E 4313) of domestic covered arc welding electrode used in the air and two kinds (UWE-01, UWE-02) of underwater covered arc welding electrode experimentally developed on the same welding condition. The results obtained were as follows : The hardness value of underwater covered arc welding electrode (UWE-01) was about 8.3 % lower than domestic covered arc welding electrode(E 4313) in heat affected zone of test specimens. and that of UWE-02 was lower about 4.5%. Tensile strengths of UWE-01 were about 0.9%, and those of UWE-02 were about 6.5% higher than those of domestic covered arc welding electrodes(E 4313) in test specimens. The impact value of UWE-01 were about 15.5%, and those of UWE-02 were about 21.7% higher than those of domestic covered arc welding electrodes(E 4313) in test specimens. So mechanical properties of the underwater arc welding electrode were improved by the composition ratios of covering materials.

1. 서 론

육상 자원의 고갈에 따른 새로운 대체 에너지의 개발 및 각종 공해 등에 의한 생활 환경의 파괴 등 여러 가지 문제점들의 해결 방법으로 현대 산업 구조는 새로운 첨단 메커니즘을 요구하고 있다(Chung, 1987). 그 하나의 해결 방법으로 해양 자원 및 해저 공간의 이용률을 높이기 위하여 해양 개발과 해양구조물에 대한 연구가 다방면에 걸쳐 활발히 추진되고 있다. 이러한 해저구조물은 수중 공작 기술에 의한 작업이 필요하게 될 것이며, 또한 미래에는 수중 용접이 중요한 위치를 차지하게 될 것으로 생각된다(Cotton, 1983). 일반적으로 담수 또는 해수 중에서 행하는 수중 용접은 교량, 해저 파이프라인, 해양 구조물 등의 건조시의 현장용 장비나 보수용접에 적용되지만, 용접법 자체의 개발뿐만 아니라, 구조물의 수중 조립 기술과 그 주변 기술의 해결하지 못한 문제들이 있으며, 잠수 기술과 우수한 용접 기술을 함께 갖춘 기술자를 필요로 하고, 또한 복잡한 설비도 갖추어야 한다(Asnis et al., 1983) 그리고 수중에서 용접된 용접 이음부는 급랭되어 경도와 취성이 증가하는 등의 아직 해결하지 못한 연구과제들을 많이 가지고 있다(Howden, 1985; Videau, 1984; Masubuchi et al., 1983).

습식 수중 아크 용접은 용접에 필요한 국부적인 기체 공동의 형성과 용접 작업을 동시에 해야 하며 또한 수증기와 용융

금속의 반응, 용접부의 냉각 속도 증대 등에 의해 균열이나 기공 등 용접 결함이 발생하기 쉽다. 그러나 물을 차단하는 고체 용기를 이용하지 않으므로 용접 치수에 제약이 없고 설비비도 싸므로 피복 아크 용접봉을 사용하는 수중 피복 아크 용접은 수중에서의 가장 간편하고 경제적인 용접 방법으로 활용 가치가 있다(오 등, 1987). 습식 수중 아크 용접의 장점을 잘 활용하려면 각종 구조물의 제작에 있어서 용접 이음에 대한 신뢰성을 높이고 사용 성능을 만족시킬 수 있는 기초적인 문제점들을 분석하고 하나씩 해결함으로써 습식 수중 아크 용접의 실용화를 도모할 수 있다고 생각된다(AWS D3.6M, 1999). 그러므로 특수한 수중용 피복 아크 용접봉을 시험 제작하여 수중 용접 실험을 통해 용접봉에 대한 기계적 성질을 평가하여 습식 수중 아크 용접성을 연구하고 비교 검토해 볼 필요가 있다(김 등, 1999). 본 연구는 수중에서 용접 중에 2차원 속도 제어가 가능하도록 제작한 수중 용접 실험 장치를 이용하고, 피복제 시료를 적정한 비율로 혼합하여 시험적으로 제작한 수중용 피복 아크 용접봉과 일반적으로 육상에서 사용되는 국산 피복 아크 용접봉을 사용하여 습식 수중 아크 용접을 실시하였을 경우, 수중 용접부의 용접성과 기계적 성질들을 비교 고찰함으로써 습식 수중 아크 용접봉의 개발에 대한 기초 자료를 얻는데 중점을 두었다.

2. 실험 장치 및 실험 재료

본 실험에 사용된 수중 용접 장치는 용접봉의 각도, 용접 속도등을 임의로 변경할 수 있도록 자체적으로 제작한 수중 용접 실험장치로 1200×850×800mm의 수조 내부에 수돗물을 넣고 용접봉의 가이드 장치를 부착한 모재 고정용 작업대를 설치하였다. 실험에 사용된 용접기는 용량 600Amp의 직류 용접기로 용접 실험은 직류 역극성으로 하여 수심 200mm에서 수중 용접 실험을 실시하였다.

본 연구에 사용한 용접 모재는, 크기 125×250, 두께 11mm로 선박 제작에 많이 사용되는 선체용 압연 강판(KR-RA)을 이용하였고, 그 화학 조성과 기계적 성질은 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

그리고 실험에 사용한 용접봉은 이론적 피복제 조성비를 응용하여 습식 수중 아크 용접을 할 수 있도록 시험적으로 제작된 수중 피복 아크 용접봉(UWE-01, UAE-02)과 대기 중에서 일반적으로 이용되고 있는 고산화티탄계(E 4313) 용접봉을 실험에 사용하였다. 그리고 용접봉 제작에 사용된 심선은 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였으며, Table 3 에 화학조성을 나타내었다. Table 4 에는 시험 개발된 수중 용접봉의 피복제 배합 비율을 나타내고 있으며, 이러한 배합 비율을 기초로 하여 반죽시간 10분, 도장압력 7.35 MPa, 자연건조 2시간 및 인공건조 150 °C에서 1시간 이상 건조시킨 용접봉을 제작하도록, 전문업체에 의뢰하여 습식수중 아크 용접봉을 만들어 실험에 이용하였다.

Table 1 Chemical composition of base metal

Chemical composition (Wt %)								
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Mo	Ceq
0.13	0.25	0.57	0.017	0.01	-	-	-	0.22

Table 2 Mechanical properties of base metal

Mechanical properties			
Yield strength Yp(MPa)	Tensile strength Ts(MPa)	Elongation El (%)	Bend test
323.4	446.9	24	Good

Table 3 Chemical composition of core wires for covered electrode

Classification	Size	Mark	Chemical composition(Wt, %)					
			C	Si	Mn	P	S	Cu
I	φ4×400	SWRY-11	0.05	0.018	0.54	0.010	0.008	0.10

Table 4 Mixing ratio of flux materials

Raw materials	Mark	UWE-01	UWE-02
CAC		21	21
FMM		9	9
FLP		15	15
MIC		2	2
STH		6	6
RTS		35	15
IRP		7	5
SIC		5	5
TAL		1	1
DXT		1	1
ILT		0	23
TOTAL		102	103

Table 5 Typical underwater welding conditions

Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/m)	Welding angle (°)	Electrode source	Welding position
175	35	30	60	DCRP	Flat

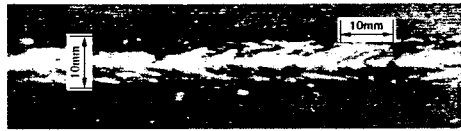
3. 실험 방법

3.1 수중 아크 용접 조건의 선정

실험 용접봉에 대한 기계적 성질을 고찰하기 위한 습식 수중 아크 용접 실험의 최적 조건을 찾기 위해, 수심 200mm에서 용접 각도 45°, 60°, 75°, 용접 전류 150Amp, 175Amp, 200Amp 및 용접 속도 등을 변화시켜 가며 반복된 기초실험을 통하여 비교 관찰한 결과를 종합해 보면, Table 5 와 같은 용접 조건으로 실험 용접하였을 때가 Photo 1에 나타난 것과 같이 용접봉의 종류에 관계없이 슬랙의 박리성이 좋고, 비드의 외관모양과 퍼짐성, 스패터 발생등의 용접성이 양호하였으며, Fig. 1에 보는 바와 같이 아크 안정성 면에서도 대체로 양호하게 나타났으며, 용접 작업성에서도 안정적으로 용접이 되는 것을 확인할 수 있어, 본 연구에서의 수중 아크 용접 실험은 Table 5 와 같은 용접 조건으로 기계적인 자동 안내를 받아 자동 용접의 형태를 취하면서, 용접 홀더를 손으로 직접 잡고 수중에서 아래보기 용접의 자세로 용접 실험을 실시하였다.



(a) UWE - 01



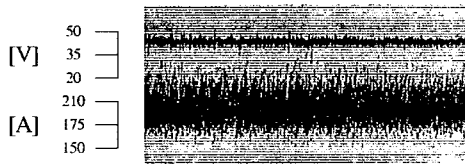
(b) UWE - 02



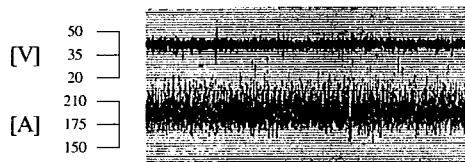
(c) E 4313

Photo 1 Bead appearance of wet welds

Welding conditions: as in Table 5



(a) UWE - 01



(b) UWE - 02



(c) E 4313

Fig. 1 Oscillograms of underwater wet welds

Welding condition: as in Table 5

3.2 시험편의 제작

강재의 압연 방향에 관계없이 125 × 250 mm로 기계톱으로 절단한 후 V홈 면을 밀링 가공 한 후 줄 다듬질을 하여 홈각도 60°, 루트간격 2mm, 루트면 2mm로 수중에서 아래보기 자세로 다층 맞대기 이음용접을 하였다. 각종 시험에 사용된 시험편의 위치는 Fig. 2에 나타낸 모양과 같이 6패스 이상으로

수중 용접된 시험편을 기계톱으로 절단하여 사용하였으며, 기계적 성질을 측정하기 위한 각종 시험편은 기계 가공하여 규격에 맞게 제작하였다.

경도 시험편은 용접열 사이클 부분이 비교적 준 정적 상태에 있다고 여겨지는 중앙 부분에서 소정의 치수로 경도 측정용 시험편을 연삭 가공한 후에, 샌드 페이퍼로 충분히 연마하였다. 인장 시험편은 강 구조물 설계 시 인장시험 결과가 기본이 되므로 용접판재에서 절단 된 시험편을 KS B 1호의 규격에 따라 Fig. 3과 같이 제작하였으며, 용접 금속의 중앙부와 시험편 폭방향의 노치중심이 열영향부를 통과하도록 시험편 양편에 노치를 주었다. 또한 습식 수중아크 용접방식으로 다층 맞대기 이음 용접된 시험편의 인장 시험시 용접부에 노치를 주지 않으면, 특별한 용접 결함이 없는 한 모재에서 파단이 일어나므로 용접 금속 혹은 열영향부의 중앙 부분에 노치를 주고 실험을 하지 않으면 안되었다.

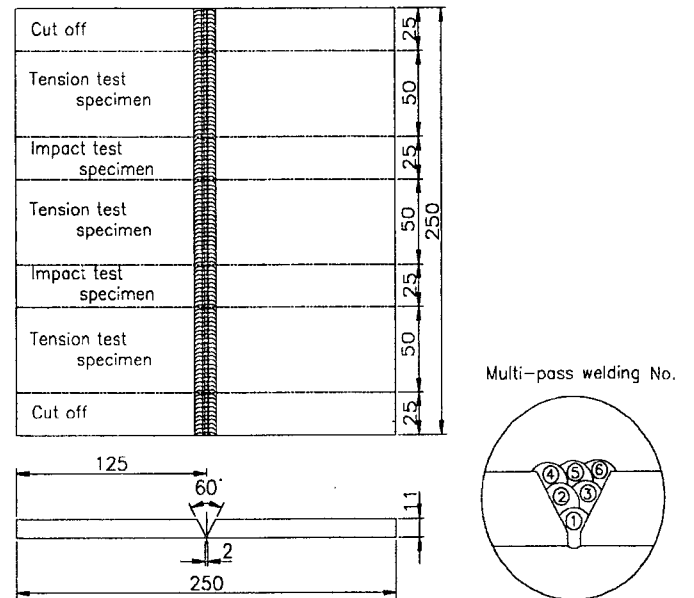


Fig. 2 Joint design and locations of test specimens from underwater welded joints

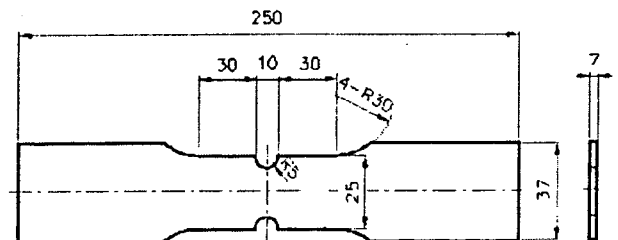


Fig. 3 Tension test specimen of underwater welded joints

충격 시험편은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 충격시험으로 절단한 용접 시험편에서 노치의 위치가 용접 금속의 중앙 혹은 열

영향부의 중앙에 오도록 깊이 2mm의 V형 노치를 주고 KS B 0809의 4호 시편에 준하여 기계 가공하여 제작하였다. 충격시편의 형상과 크기는 Fig. 4에 나타냈으며, 충격시험시의 시편 온도는 10°C를 기준으로 하였다.

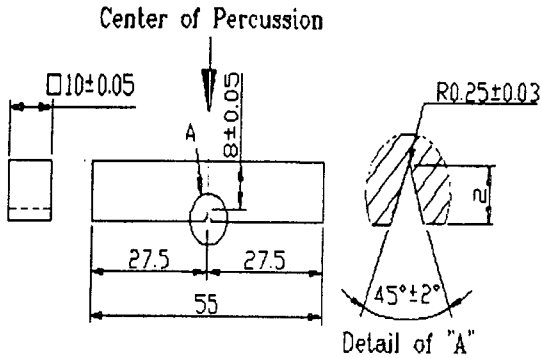


Fig. 4 Charpy impact test specimen of underwater welded joints

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 경도 시험

Fig. 5 는 Table 5 와 같은 수중 용접 조건으로 다층 맞대기 이음 용접한 시편의 열 영향부에 대한 미소 경도(micro Vickers hardness, load 500g) 분포 상태를 나타낸 것이다. 다층 용접시는 복잡한 열사이클에 의하여 예열 및 후열처리와 같은 효과가 있으므로 다층 용접시의 경도 특성 해석은 복잡하게 될 것이지만 3종류의 각각 다른 용접봉을 사용하여 시험한 결과 습식 수중 용접시의 열 영향부에 대한 경도 분포는 용접봉의 종류에 관계없이 전반적으로 열 영향부에서 가장 높게 나타났고 용착 금속 부분에서는 모재 부분의 경도치보다 약간 높게 나타났다. 대기 중에 일반적으로 사용되는 고산화티탄계 (E 4313) 용접봉을 사용한 경도 분포는 열영향부의 최고 경도치가 Hv 288 정도로 다른 용접봉에 비해 비교적 높게 나타났다.

그러나 UWE-01 수중용 피복 아크 용접봉을 사용한 경우의 용접 조건에 따른 경도 분포는, 용접 시편의 열영향부 최고 경도치가 Hv 264 정도로 다른 종류의 용접봉을 사용한 실험에 비해 비교적 낮게 나타났음을 관찰할 수 있었으며, E 4313에 비교하면 약 8.3 %감소함을 알 수 있었고, UWE-02 수중용 피복아크 용접봉을 사용한 경우의 경도 분포는 열 영향부의 최고 경도치가 Hv 275 정도로 나타났으며, 약 4.5 %가 감소됨을 알 수 있었다.

이렇게 볼 때 3종류의 용접봉을 사용하여 수중에서 용접 실험한 결과를 종합하여 비교해 보면, 용착 금속 부분의 평균 경도치는 약 Hv 190 정도이고 모재의 평균 경도치는 Hv 150 정도로 나타났으나, 열 영향부에 대한 최고 경도치는 Hv 264~288 정도로 용접봉의 종류에 따라 조금씩 다르게 나타났다.

그리고 5mm 정도의 열 영향부 영역에서는 용접봉의 종류에

관계없이 공통으로 급격히 최고경도가 상승되었으며, 이것은 습식 수중 아크용접의 경우 용접부가 강한 수냉의 영향을 받아 급랭되고 담금질 효과에 의하여 열영향부가 경화되었음을 나타내고 있다.

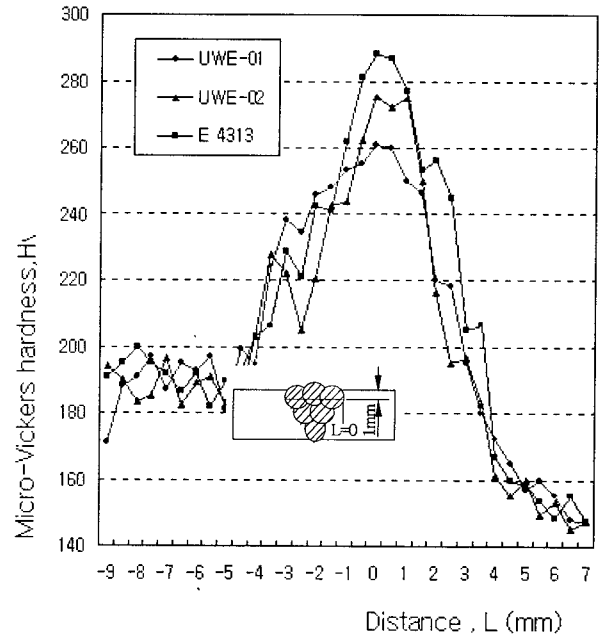


Fig. 5 Hardness distribution of underwater wet welds

4.2 인장시험

수중 200mm의 깊이에서 각 종류의 용접봉을 사용하여 다층 맞대기 이음 용접한 용접 시편 중에서 용접상태가 양호하다고 판단되는 시편을 골라 Fig. 3에 보는 바와 같이, KS B (ISO 4136-1985) 1A호 규격으로 인장 시험편을 기계 가공하여, 30 ton 용량의 만능 재료 시험기(universal material test machine computer type)에서 인장강도와 연신율을 동시에 측정하였으며, 그 결과를 Table 6 과 Fig. 6 에 나타내고 있다. 여기서 자세히 고찰해 보면 대기 중에서 사용되는 고산화티탄계(E 4313) 용접봉을 사용한 시험편은 최대 인장강도 512.246 N/mm², 연신율은 8.01%로 나타났으며, 피복재 배합 비율을 달리하여 자체 개발한 수중 아크 용접봉 UWE-01 에서의 최대 인장강도는 545.57 N/mm², 연신율은 7.84%로 나타났고, UWE-02의 최대 인장강도는 516.75 N/mm², 연신율은 8.94%로 나타났다.

이와 같은 실험 결과를 종합해 보면, 모재인 KR-RA 강의 인장 강도보다 수중 용접 이음부의 강도가 모두 크게 나타났으며, E 4313 용접봉을 사용한 경우의 최대 인장강도와 비교하면, UWE-01의 경우는 약 6.5%, UWE-02인 경우는 0.9% 높게 나타난 것을 알 수 있다.

피복재 중에서 RTS 성분을 약 35% 첨가한 UWE-01에서 가장 높게 나타난 것을 본 실험 연구에서 관찰할 수는 있었으나, 정확한 원인에 대하여는 자세히 알 수 없었으며, 여기에 대한 좀 더 깊은 연구가 있을 예정이다.

Table 6 Result of Tensile test

Electrode	Load(kN)	Peak	
		Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
E 4313	5.38	512.25	8.01
UWE-01	5.73	545.57	7.84
UWE-02	5.43	516.75	8.94

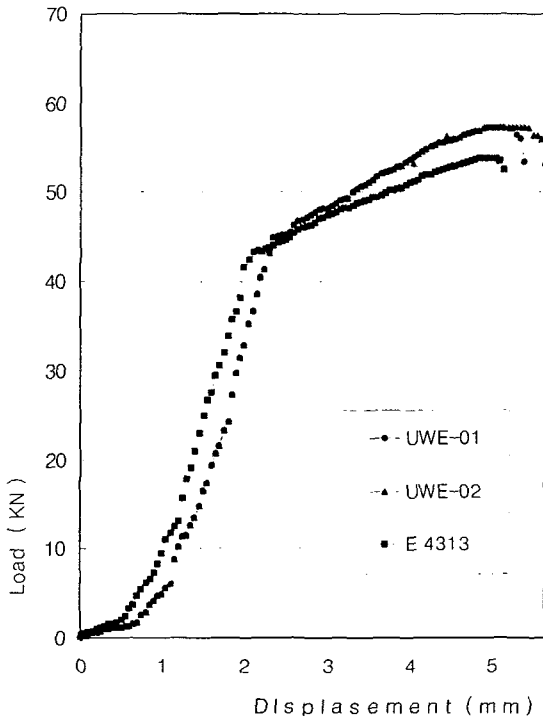


Fig. 6 Relation of load and displacement for various weld tension specimen

4.3 충격시험

Table 5 와 같은 용접조건으로 수중 용접한 용접 시편의 열 영향부에 노치 위치를 선정하고, 깊이 2mm, 각도 45 °의 V형 노치를 와이어 가공하여 Fig. 4 와 같이 충격 시험편을 제작 하였으며, 10℃ 의 온도 분위기에서 충격 시험을 반복 실시한 시험 결과를 Table 7에 나타냈고, 평균치를 요약하여 충격 시험 결과를 도식화하여 Fig. 7에 나타내었다 .

대기 중에서 많이 사용되는 있는 고산화탄소계(E 4313)용접 봉으로 용접된 시험편의 충격치는 약 45.71 J/cm²로 나타났고, 시험 제작한 수중 아크 용접봉 UWE-01으로 용접된 시험편의 충격치는 약 52.79 J/cm² , UWE-02로 용접된 시험편의 충격치는 약 55.62 J/cm²로 나타났다.

여기서 볼 때 대기 중에서 사용되는 고산화탄소계(KS E4313) 용접봉으로 용접된 시험편에 비해 수중 피복 아크 용접봉으로 시험 제작된 UWE-01 용접봉으로 용접된 시험편의

충격치가 약 15.5%, UWE-02가 약 21.7% 정도 높게 나타났다는 것을 관찰 할 수 있다. ILT 성분을 23% 첨가하여 시험 제작한 수중 아크 용접봉 UWE-02에서 충격치가 가장 높게 나타났음을 알 수 있었으며, 이 성분이 금속조직에 영향을 주는 요인에 대한 것도 차후의 연구 과제로 남겨 계속 연구할 예정이다.

Table 7 Results of Impact test of underwater welding

Test specimen	cos β	cos β - cos α	Impact value (J/cm ²)	
			Measured value	Average
E 4313	-0.30	0.13	41.9	45.71
	-0.29	0.13	42.37	
	-0.24	0.19	53.92	
	-0.30	0.11	40.89	
	-0.30	0.14	41.45	
UWE-01	-0.27	0.17	47.26	52.79
	-0.24	0.17	52.24	
	-0.20	0.22	62.43	
	-0.25	0.16	50.41	
	-0.24	0.21	53.61	
UWE-02	-0.24	0.19	53.92	55.62
	-0.24	0.19	53.92	
	-0.20	0.22	62.43	
	-0.26	0.17	48.24	
	-0.21	0.21	59.6	

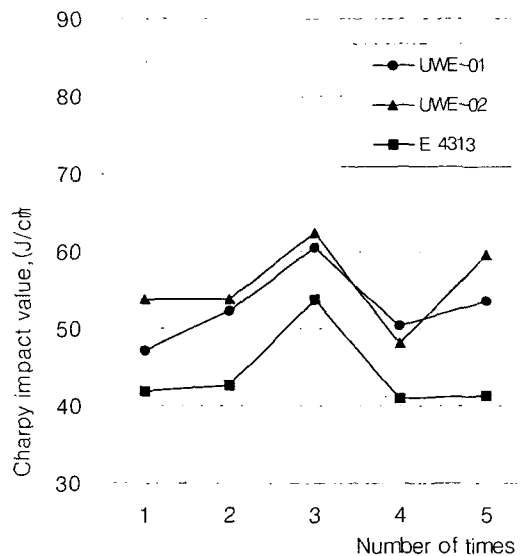


Fig. 7 Comparison of Charpy impact value of underwater wet welds

5. 결 론

용접봉의 피복재 조성비를 시험적으로 조정하여 제작한 습식 수중 피복 아크 용접봉(UWE-01, UAE-02)과 대기 중에서 사용되는 고산화티탄계(E 4313) 용접봉으로 동일한 규격과 같은 조건 하에서 선체용 압연 강관(KR-RA)에 대한 습식 수중 아크 용접 실험을 실시한 결과 중에서, 그 기계적 성질에 대하여 고찰해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험 제작한 수중 아크 용접봉 (UWE-01) 을 사용하여 습식 수중 아크 용접한 시험편의 열 영향부 최고 경도치가 고산화티탄계 (E 4313) 용접봉을 사용한 시험편 보다 약 8.3% 정도 낮게 나타났으며, UAE-02를 사용한 경우는 약 4.5% 낮게 나타났다.
- (2) E 4313 용접봉을 사용한 수중 용접 시험편의 최대 인장강도 보다 시험 제작한 수중 피복 아크 용접봉 UAE-01을 사용한 시험편의 최대 인장강도는 약 6.5%, UAE-01을 사용한 시험편의 최대 인장 강도는 약 0.9% 정도 높게 나타났다.
- (3) E 4313 용접봉을 사용한 수중 용접 시험편에 비해 시험 제작한 수중 아크 용접봉 UAE-01을 사용한 용접 시험편의 충격치가 약 15.5%, UAE-02 을 사용한 시험편에서는 약 21.7% 상승 효과가 있었다.
- (4) 본 실험 연구를 종합해 보면 피복재의 종류와 배합 비율에 따라서 수중 용접봉의 기계적 성질에 대한 개선 효과가 있음을 알 수 있었으며, 습식 수중아크 용접봉의 국산화 개발에 대한 중요한 기초자료가 될 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- 김민남, 강정근(1999). "습식 수중 용접봉의 피복재 개발에 관한 기초연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제4호, pp 28~36.
- 오세규, 강문호, 김민남(1987). "선용강관 수중용접부의 인장 구속 균열 특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제11권, 제3호, pp 211~218.
- 오세규, 김민남(1987). "TMCP강의 습식 수중아크 용접성에 관한 고찰", 대한용접학회지, 제5권, 제4호, pp 28~35.
- AWS D3.6M(1999). "Specification for Underwater Welding". Supersedes ANSI/AWS D3.6-93.

- Asnis, A. E., Savich, I. M.(1983). "The new method of mechanized underwater welding". *Proc. of Int. Conf. IIW*, pp 311~317.
- Chung, J. S.(1987). "Technologies for petroleum and mineral". *J. OET*, Vol. 1, No. 1, pp 10~20.
- Cotton, H. C.(1983). "Welding underwater and in the splash zone-a review", *Proc. of Int. Conf. IIW*, pp 4~48.
- Howden, D. G.(1984). "Behavior of hydrogen in arc welded pools", *W. J.*, Vol. 61, No. 4, pp 103s-108s.
- Masubuchi, K., Gaudiano, A. V. and Reynolds, T. J.(1983). "Technologies and practices of underwater welding". *Proc. of Int. Conf. IIW*, pp 49 ~70.
- Videau, J. P.(1984). "Hardness testing in the heat affected zone of steel welds". *IIW. DOC*, IX-1309-84.
- 屋良秀夫, 眞喜志康二, 菊田米男, 松田福久(1985). "濕式水中アーク溶接に関する研究(第3報)", *日本 溶接學會誌*, 第2卷, 第2号, pp 392~397.
- 運井淳, 菅泰雄, 關水信之(1979). "水中におけるキプマーミアーク溶接(第1報)". *日本 溶接學會誌* 第48卷, 第9号, pp 689~695.
- 運井淳, 菅泰雄(1974). "水中における重力式アーク溶接(第1報)", *日本 溶接學會誌*, 第43卷, 第8号, pp 767~775.
- 松田一夫 外 2名(1981). "水中溶接による軟鋼溶接 継手の割れ感受性に関する研究 (第2報)", *日本溶接學會誌*, 第50卷, 第9号, pp 881~887.
- 衣川純一 外2(1979). "濕式水中溶接における熱影響部の變態舉動". *日本 溶接學會誌*, 第48卷, 第5号, pp 273~278.
- 福島貞夫, 福島孟, 衣川純一(1981). "溶加材を用いた 濕式水中プラズマ溶接部の改善に 關する一實驗", *日本 溶接學會誌*, 第50卷, 第3号, pp 309~314.
- 屋良秀夫, 眞喜志康二(1983). "濕式水中アーク溶接に関する研究 (第1報)", *日本 溶接學會誌*, 第1卷, 第2号, pp 285~289.
- 屋良秀夫, 眞喜志康二, 菊田米男, 松田福久(1984). "濕式水中アーク溶接に関する研究(第2報)", *日本 溶接學會誌*, 第2卷, 第4号, pp 721~726.

2000년 3월 21일 원고 접수

2000년 9월 23일 수정본 채택