

# 선체용 압연강판에 대한 습식 수중 아크용접부의 기계적 특성에 관한 연구

## A Study on the Mechanical Properties of Underwater Wet Arc Welds using the SM41

김창규 · 곽희환 · 김민남

C. G. Kim, H. W. Kwak and M. N. Kim

**Key Words** : Underwater Wet Arc Welding(습식수중아크용접), Welding Electrodes(용접봉), HAZ(Heated Affected Zone(열영향부), Microstructure(현미경조직), Impact Value(충격값)

**Abstract** : Underwater wet arc welds of rolled steel plate (SM41) were studied welding and mechanical properties macro and narrow than that of the other things. Tensile strength of UWEB obtained to 521.5 MPa and of USBL was 524.1 MPa, but the highest elongation value was 4.68 %(UWEB). Bending strength(1166.6 MPa) of USBL is the largest and of UWEB in 1047 MPa, But deflection(22.73 mm) of UWEB in large than that of USBL(22.63 mm). Impact value(144.36 J/cm<sup>2</sup>) of JPUW is the largest and of UWEB(140 J/cm<sup>2</sup>) come after.

### 1. 서 론

육상자원의 고갈에 따른 새로운 대체에너지의 개발 및 각종 공해 등에 의한 생활환경의 파괴 등 여러 가지 문제점들의 해결방법으로 현대 산업구조는 새로운 첨단 메커니즘을 요구하고 있다.<sup>1)</sup>

그 하나의 해결방법으로 해양자원 및 해저공간의 이용률을 높이기 위하여 해양개발에 대한 연구가 다방면에 걸쳐 활발히 추진되고 있다. 그래서 각종 생산설비나 생활공간마저도 해양으로 진출하지 않을 수 없다고 보며, 그에 따라 해양구조물의 형태가 해양개발에 있어 매우 중요한 부분을 차지하게 될 것이다. 현재까지 개발된 기술은 습식 수중 용접법과 건식 수중 용접법으로 대별되며<sup>2)</sup>, 용접수치에 제약이 없고 설비비가 경제적이며 작업성이 좋은 습식수중 아크용접법이 활용가치가 크다고 보고되고 있다<sup>2-5)</sup>. 1802년, 미국의 Humply Davy(AWS, 1976)가 처음으로 수중에서 아크를 일으키기 시작한 이후 최근 각종 해양구조물의 가

공과 보수수단으로서의 수중용접기술의 개발 및 연구가 확대되기 시작했으며 이미 플라즈마 가스 아크용접 및 피복아크용접 등 각종 용접법이 수중 용접에 적용되어 비교적 양호한 결과를 얻는다고 보고되고 있으나<sup>6)</sup>, 국내에서는 수중 아크용접에 대한 연구실적은 다소 있지만<sup>7-8)</sup> 습식 수중 피복아크용접의 기계적 성질에 관한 체계적인 연구는 다소 미흡한 실정이다. 습식 수중아크용접의 장점을 잘 활용하려면 각종 구조물의 제작에 있어서 용접이음에 대한 신뢰성을 높이고 성능을 만족시키기 위하여 기본적인 문제점들을 파악·분석하여 해결함으로써 습식 수중 아크용접의 실용화를 도모할 수 있다고 생각된다. 기계 및 구조물을 형성하는 재료의 성질에는 여러 가지 항목이 있으나 외력에 의한 변형 및 파괴에 대한 저항성 등 기계적 성질의 기초적인 시험결과를 비교분석하는 것이 대단히 중요하다고 판단된다<sup>9)</sup>.

본 연구는 수중에서 2차원속도제어가 가능하도록 자체적으로 설계제작한 수중 용접실험장치를 이용하여 김복인<sup>10)</sup> 등이 개발한 습식 수중 아크용접봉과 시판 중인 용접봉을 사용하여 선체용 압연강판(SM41)을 습식 수중 아크용접시험을 실시하였으며, 이때 용접부의 용접성과 기계적 특성 등을 고찰하였다.

접수일 : 2008년 3월 27일, 채택확정 : 2008년 4월 18일

김창규(책임저자) : 부경대학교 신소재공학부

E-mail : metgyu@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6340

곽희환 : 삼영금속

김민남 : 부경대학교

## 2. 실험 재료 및 실험 장치

### 2.1 실험 재료

본 연구에 사용한 용접 모재는 크기 125×250×11 mm로 선박 건조에 많이 사용되는 선체용 압연강판(SM41)을 이용하였고, 그 화학조성은 Table 1, 기계적 성질은 Table 2에 각각 나타내었다.

본 실험에 사용한 용접봉은 시판 중인 지름 4.0 mm의 고산화타이타늄계(high titanium oxide type) 용접봉 KSKR(KS E4313)과 라임타이타니아계(lime titania type) 용접봉 KSKT(KS E4303)의 두 종류와 미국에서 시판 중인 수중 용접봉 USBL과 일본에서 수입한 수중 용접봉 JPUW, 그리고 김복인 등이 시험 개발한 두 종류의 수중 피복아크 용접봉 UWEA와 UWEB 등 모두 6 종류의 용접봉을 사용하여 실험하였다. 또한 시험 개발된 수중 용접봉의 심선은 용접봉 제작회사에서 용접봉 제작에 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였으며, Table 1에 그 화학적 조성을 나타내었다. 실험에 이용한 용접봉 KSKT 및 KSKR의 화학조성은 Table 3에 나타내었으며, 수중 용접봉으로 수입한 두 종류의 용접봉(USBL, JPUW)에 대한 구체적인 자료는 정확한 것을 구하지 못하여 제시하지 않았다.

Table 1 Chemical composition of basemetal(SM41) and core wires for UWE and UWEB(wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ceq
SM41	0.13	0.25	0.57	0.017	0.01		0.22
UWEA & UWEB	0.05	0.018	0.54	0.01	0.008	0.1	
SWRY-11, φ 4.0 × 400							

UWEA : Newly-developed underwater electrode-A type

UWEB : Newly-developed underwater electrode-B type

Table 2 Mechanical properties of basemetal(SM41)

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Bend test
323.4	446.8	24.0	Good

Table 3 Chemical composition of welding electrodes(wt.%)

Electrode	C	Si	Mn	P	S
KSKR	0.07	0.32	0.45	0.015	0.012
KSKT	0.07	0.15	0.37	0.014	0.013

KSKR : E4313, high titanium oxide type welding electrode

KSKT : E4303, lime titania type welding electrode

USBL : Imported underwater wet welding electrode, made in USA

JPUW : Imported underwater wet welding electrode, made in Japan

### 2.2 실험 장치

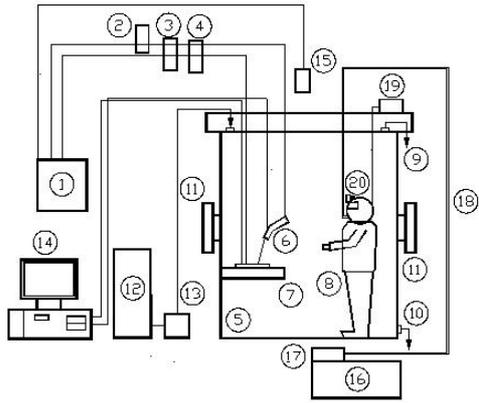
본 실험에 사용된 습식 수중 수동용접 실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 두께 28 mm의 SS400 연강관을 사용하여 직경 2500 mm, 깊이 2000 mm의 커다란 원통형 수조를 모 중공업에 의뢰하여 내부에서 용접을 보조할 수 있는 보조 잠수사와 직접 수중 수동용접을 할 수 있는 용접사 등 두 사람이 동시에 2000 mm 깊이의 물 속에서 습식 수중 수동 용접 실험을 할 수 있도록 커다란 수조를 제작하여 수돗물이 순환되도록 급수 및 배수 시설을 장치하여 실험 중에는 수심이 조절되고 수조내의 수온을 일정하게 유지시킬 수 있도록 하였다.

물의 온도를 측정하기 위해 측정온도 0-100 °C까지 측정할 수 있는 디지털 온도계를 이용하였다. 수조 탱크 내의 밝기를 조절하기 위하여 탱크 중간 부분의 전면과 이면에 잠수정에 이용되고 있는 특수 유리를 장착하였으며, 실험에 사용된 용접기는 용량 600 A의 직류 용접기로, 용접실험은 직류 정극성으로 하였으며, 용접 장치에 대한 전기적인 안전을 위하여 마그넷 스위치를 이중으로 설치하였다. 통신장비를 통하여 물 속의 보조사 및 용접사와 항상 통화를 하면서 수중 아크용접은 꼭 필요한 시기만 용접 전류를 흐르게 하여 용접사의 안전에 최대한의 노력을 기울였다.

## 3. 실험 방법

### 3.1 수중 수동용접 실험

실제 산업 현장에서는 습식 수중 아크용접에 대한 기본적인 지식의 습득과 깊은 물 속에서 활동할 수 있는 잠수기술 및 피복 아크 용접 기능기술의 숙



- ① DC arc welding machine
- ② On/off magnet switch
- ③ Ampere meter
- ④ Voltage meter
- ⑤ Chamber
- ⑥ Electrode holder
- ⑦ Work bench
- ⑧ Driving dress
- ⑨ Over flow pipe
- ⑩ Drainage
- ⑪ Sight glass
- ⑫ Cooling water tank
- ⑬ Circulating pump
- ⑭ Data acquisition system
- ⑮ Welding machine power on/off switch
- ⑯ Air compressor
- ⑰ Precision air filter
- ⑱ High pressure hose
- ⑲ Communication phone box
- ⑳ Diver's full mask

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipments

달이 필수적이라는 것을 체험할 수 있었으나, 본 실험 연구에서는 자체적으로 제작한 수중 용접실험장치를 이용하여 실내에서 한정된 조건에서 기본적인 습식 수중 아크용접을 할 수밖에 없는 실정이었다. 실험재료에서 기술한 바와 같이 6종류의 선택된 용접봉들과 모재에 대한 최적의 용접조건은 김복인 등이 실험한 용접 조건을 선택하여 사용하였는데, 그 용접 조건을 Table 4에 나타내었다.

실험실에서 제작한 실험용 수조 내에서 습식 수중 아크용접에 적합하도록 특별히 고안된 용접 홀더를 손으로 잡고, 자체적으로 설계한 용접봉 운송 장치의 기계적인 안내를 받으면서 반자동용접의 형태를 취하면서 습식 수중 아크용접 실험을 하였다. 각각의 용접봉의 종류에 관계없이 용접속도와 용접 각도, 운봉비, 용접기 상태 등을 기계적으로 일정하게 고정하여 두고, Table 4와 같은 동일한 용접조건으로 수심 2000 mm에서 직류 정극성(DC straight polarity)으로 습식 수중 아크 용접을 실시하였다. 또한 수조 내는 예비 급수탱크와 펌프 등을 사용하여 냉각수를 계속하여 순환시키고, 수돗물을 이용하여 급수시키면서 항상 배수가 적당히 되도록 하여 수조 내의 수온은 20 °C로 일정하게 유지할 수 있게 하고, 용접 슬래그에 의한 물의 혼탁을 방지하였다.

Table 4 Typical experimental welding conditions

Welding Conditions	
Current (A)	190
Voltage (V)	35
Welding speed (mm/min)	300
Bead length / Electrode length used	0.5
Welding angle (°)	75
Electrode source	DCSP
Welding position	Flat

습식 수중 용접 시의 용접 아크 안정성을 실시간으로 측정하기 위하여 전압과 전류의 파형 측정 프로그램인 HP-VEE(Hewlett-packard Visual Engineering Environment) 5.0을 활용하였다. 시스템에 적용시키기 위해 용접전압은 1/100로 줄이고, 전류는 분리기(shut)를 이용하여 50 mV 이하가 되도록 신호 입력 단자에 연결하여 습식 수중 아크용접에 따르는 특별한 애로사항은 없었다. 자료수집 시스템의 두 개 채널을 동시에 이용하였고, gain은 1.0, rate는 500을 기준으로 하였으며, 용접전압과 전류 측정점이 각각 500 point/sec가 되도록 시스템을 세팅하였다. 용접 실험 중에는 실시간으로 전송이 되도록 하여 용접 전압과 전류를 측정하고 모니터링을 할 수 있도록 하였다. 또한 CA 열전대를 이용하여 수중 용접실험 중의 용접부 주위의 수온도 동시에 측정하고 PC상에서 관찰이 가능하도록 하였다.

### 3.2 기계적 특성 시험

습식 수중 아크용접된 시험편의 기계적 성질을 조사하기 위하여 6가지 종류의 용접봉에 대한 다층 막대기 이음용접한 판재 중에서 양호한 시험편(Fig. 2)을 절단, 채취하여 굽힘시험, 충격시험, 인장시험 등 기계적 성질을 측정하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 용접 아크 안정성 고찰

습식 수중 아크용접의 경우 용접 입열량이 적으면 아크의 발생이 어렵고 단락되는 경우가 있으나 Table 4와 같은 조건으로 용접기의 조절 노브를 고정하여 두고 피복제가 다른 6종류의 용접봉을 사용하여 용접 작업성을 비교하여 보았다. 수심 2 m 수

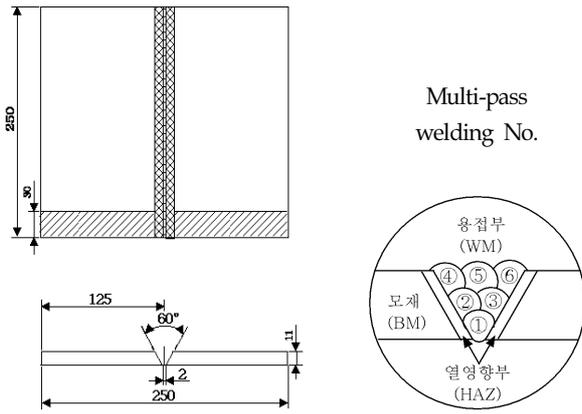


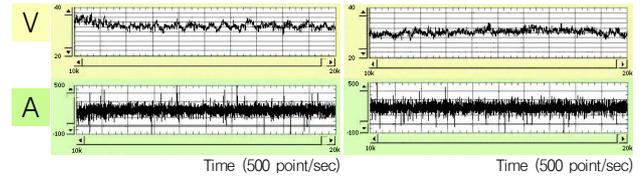
Fig. 2 Joint design and location of polarization testspecimens

조 내부에 설치한 작업대에 용접지그를 장착하고 여기에 시험편을 고정하였다.

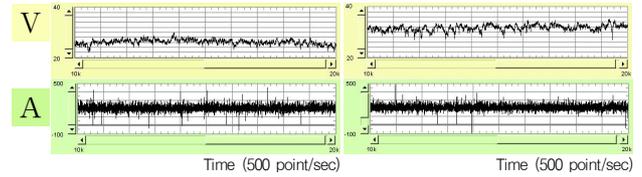
용접아크의 시작과 발생은 피복제의 종류에 따른 차이점은 발견할 수 없었으나, 수중 용접 중의 아크 안정성은 약간의 차이가 있었다. 용접봉의 종류에 따라 HP-VEE program의 실시간으로 실추된 전압과 전류는 Fig. 3와 같다. 피복제의 성분에 따라 영향이 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 실험 연구의 범위 내에서는 수중 수동 아크용접에 있어서 별다른 문제없이 용접을 할 수 있었다. KSKR 용접봉의 수중 슬래그 제거 작업이 가장 어려웠으며, 시험제작한 UWEB 용접봉이 UWEA용접봉보다 슬래그 제거가 용이하였다. 슬래그 형상은 수입한 수중 용접봉 JPUW와 서로 비슷한 모양이 되었으며, 슬래그 제거는 와이어 브러쉬와 치핑해머로 하였다.

#### 4.2 용접부 조직

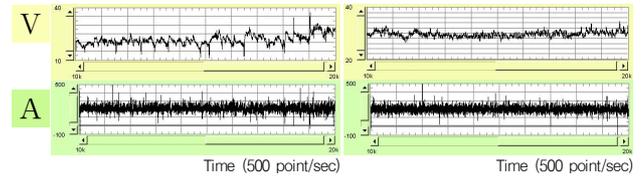
Photo. 1은 다층 용접한 시험편의 마크로 단면 조직사진을 나타내고 있다. 김복인 등이 제작한 UWEA 및 UWEB 용접봉의 단면 조직이 시판 중인 KSKR 및 KSKT 용접봉보다 다소 양호한 상태를 보였고, 용접봉의 종류에 따른 상이점보다는 잠수사 겸 용접사의 기능기술의 영향이 크게 작용한 결과라고 사료된다. Photo. 2와 3은 Table 4와 같은 용접조건으로 수중에서 수동으로 습식 다층 아크용접 실험한 시험편의 용접 경계 부분의 단면에 대한 현미경 조직 사진으로, 각각의 용접봉에 대한 용접금속부와 본드부 및 열영향부로 나누어 나타내고 있다. 용접금속부(WM)는 용가제(용접봉)에 모재의 일부가 녹아 합쳐져서 응고한 부분으로 주조조



(a) KSKR and KSKT welding electrodes



(b) UWEA and UWEB welding electrodes



(c) USBL and JPUW welding electrodes

Fig. 3 Oscillograms by underwater wet arc welds for various welding electrodes

직을 보이며, 용융지 밀 부분에서 직접 내부에 온도 구배에 따르는 주상정이 성장하여 일반적인 ingot에서 나타나는 내부의 입상정은 볼 수 없다. 또한 용접금속부는 급랭으로 인하여 침상(針狀)의 마텐사이트 (martensite) 조직과 일부의 위드먼스텝텐 (widmans-tätten) 조직도 혼합되어 있는 것으로 보이나, 전체적으로 용접금속부에서는 덴드라이트 (dendrite) 주조조직을 나타낸다. 용착금속부에 접하는 본드부(BM)는 용접까지 가열된 부분으로 결정립이 조대화된 위드먼스텝텐 조직으로 각 용접봉에 따른 조직적으로 큰 차이는 찾아 볼 수 없다. 본드부는 가장 경화하는 영역으로 용접균열이 발생하기 쉽고 노치 인성도 저하하는데, UWEB가 다른 용접봉에 비해 본드부의 영역이 좁아 기계적 특성 면에 있어서 타 용접봉보다 양호할 것으로 사료된다. 또 열영향부(HAZ)는 다층 용접으로 인해 용접부가 재가열(再加熱)되면서 노말라이징(normalizing) 열처리되어 미세화된 것으로 사료된다.

4.3 기계적 특성

1) 인장강도

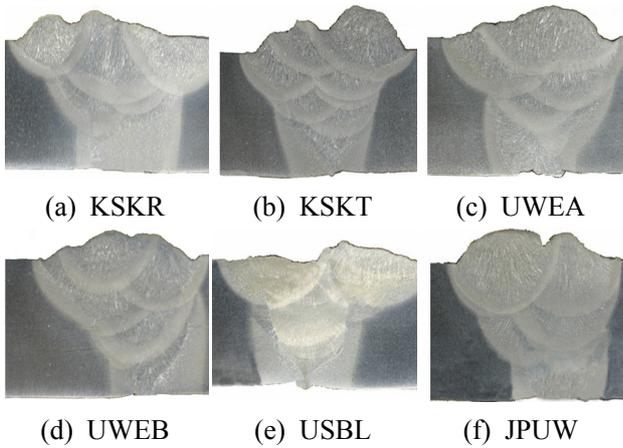


Photo. 1 Macrostructures of underwater wetwelds

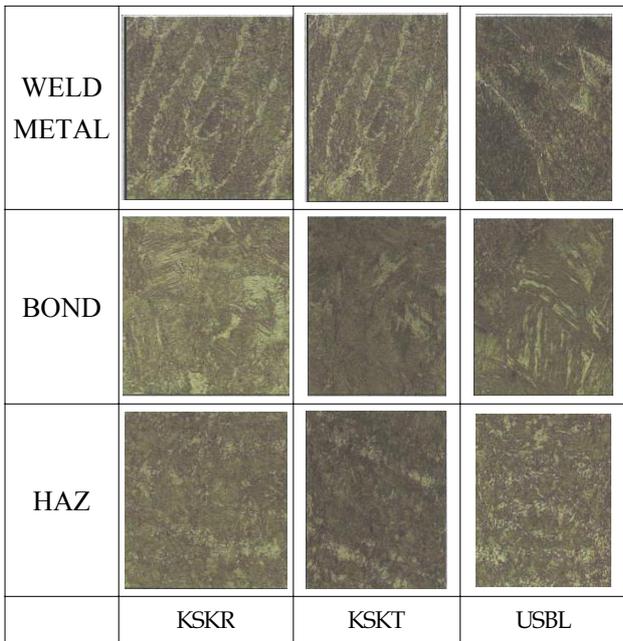


Photo. 2 Microstructures of weld (KSKR, KSKT, USBL)

Table 5는 용접봉 종류별로 인장시험한 측정결과인데, 최대인장강도 및 연신율의 평균값을 나타내었다. USBL이 524.1MPa로 가장 높았고, 김복인 등이 개발한 UWEB이 521.5 MPa로 미국 제품보다 약간 낮게 나타났다. 반면 연신율은 USBL이 4.46 %이지만 UWEB는 4.68 %로 가장 높게 나타났다. 일반적으로 용접봉의 우수성은 용접 후 용착금속의 인장강도와 연신율의 값에 의해 평가된다.

2) 충격강도

Table 6과 Fig. 5에 수중용접의 샤르피 충격시험 결과를 나타내었다. 시험편의 열영향부에 노치 위치를 선정하고 길이 2 mm, 각도 45°의 V형 노치를 와이어 가공하여 충격시험편을 제작하였으며 10 °C의 온도분위기에서 충격시험을 반복 실시한 시험결과의 평균치를 나타내었다. 이때의 값은 각각 5회의 값을 평균한 것이다. 이 결과로부터 시험제작한 용접봉 UWEB가 다른 용접봉들과 비교하여 충격강도가 뒤떨어지지 않는 것을 알 수 있었다.

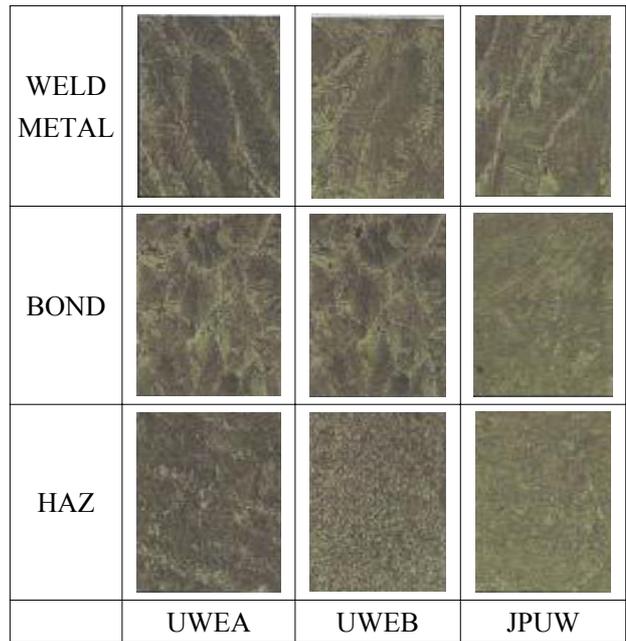


Photo. 3 Microstructures of weld(UWEA, UWEB, JPUW)

Table 5 Results of tensile tests of underwater wet welds by practical underwater manual wet arc welding using various welding electrodes

Electrode	Peak		
	YS(MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
KSKR	453.249	507.717	4.38
KSKT	445.330	492.489	4.58
UWEA	454.979	506.537	4.28
UWEB	462.40	521.479	4.68
USBL	471.078	524.104	4.46
JPUW	465.335	518.179	4.42

3) 굽힘시험

각종 용접봉을 사용하여 수중 용접한 후 용접부

의연성과 안정성을 조사하기 위하여 굽힘시험을 하였다. 시험방법은 표면굽힘시험(face bend test) 방법으로 하였으며, Table 7에 그 결과를 나타내었다. 모든 시험편의 용접부에서 굽힘각도 90°까지는 표면에 크랙이 발생하지 않았으나 90°가 지나면서 용접부의 종류에 따라 다소 굽힘각도의 차이가 달라지면서 크랙이 발생하기 시작했다. USBL의 굽힘강도가 1166.6 MPa로 가장 높았고, UWEB의 경우는 1046.9 MPa로 그 다음으로 높았다. 또 UWEB의 처짐량값은 22.72 mm로 가장 크게 나타났다. 일반적으로 굽힘강도가 클수록 처짐량이 많아지고 처짐량이 많아질수록 그만큼 늦게 균열이 발생하여 용접부의 연성과안정성이 증대하게 되며, 최대처짐량에서 크랙 발생의 개시점을 나타내게 된다.

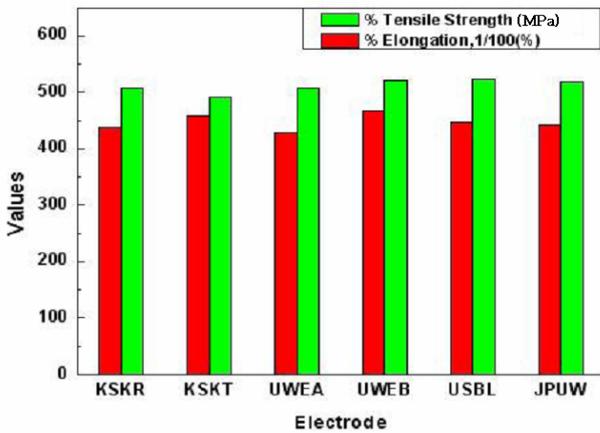


Fig. 4 Comparison of tensile test results of underwater wet welds by practical underwater manual wet arc welding using various welding electrodes

Table 6 Results of impact tests of underwater wet welds by practical underwater manual wet arc welding using various welding electrodes

Test specimen	Impact energy(J)	Impact value(J/cm <sup>2</sup> )
KSKR	66.7	126.3
KSKT	66.7	120.6
UWEA	63.3	121.7
UWEB	72.7	139.8
JPUW	73.1	144.4
USBL	63.1	114.6

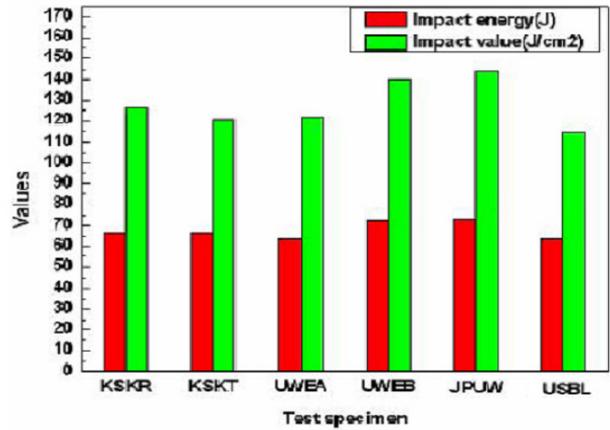


Fig. 5 Results of the impact test results of underwater wet welds by practical underwater manual arc welding using various welding electrodes

Table 7 Results of bending tests of underwater wet welds by practical underwater manual wetarc welding using various welding electrodes

Electrode	Deflection(mm)	Bending strength(MPa)
KSKR	19.1	912.35
KSKT	20.82	951.24
UWEA	19.14	942.26
UWEB	22.72	1046.96
JPUW	21.99	972.18
USBL	22.64	1166.61

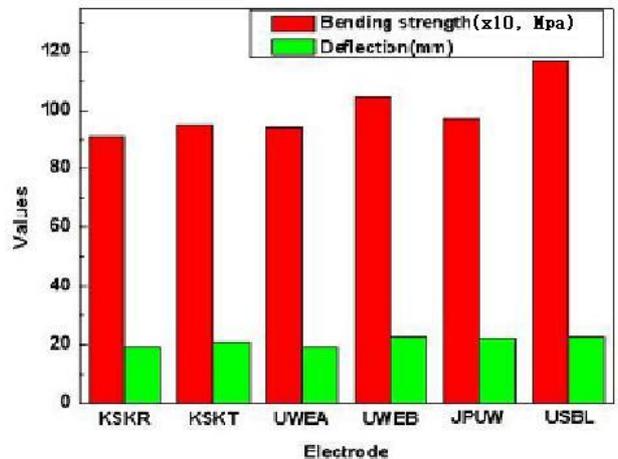


Fig. 6 Results of the bending test results of underwater manual arc welding using various welding electrodes

## 5. 결 론

선체용 압연강판(SM41)에 대한 습식 수중 피복 아크용접 시의 용접성을 확인하고 용접열영향부와 용착금속부의 모재부에 대한 기계적 특성을 규명하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 각 용접봉에 대한 시편의 단면 미시 및 현미경 조직은 모두 유사하며, UWEB의 경우 용접부에 대한 기계적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 본드부의 간격이 다른 용접봉에 비해 좁았다.

2) 인장강도는 UWEB가 약 521.5MPa로 USBL의 524.1MPa보다 약간 낮으나 연신율은 4.68 %로 가장 높았다.

3) 굽힘강도는 USBL가 1166.6MPa로 가장 높았고, UWEB는 1047MPa로 나타났지만 처짐량은 22.73 mm로 USBL의 22.64 mm보다 높았다.

4) 충격값은 JPUW가 144.36 J/cm<sup>2</sup>으로 가장 높았고, UWEB가 약 140 J/cm<sup>2</sup>으로 그 다음으로 높았다.

## 후 기

이 논문은 2004학년도 부경대학교 발전기금 재단 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

1. J. S. Chung, 1987, "Technologies for petroleum and mineral", J. of OET, Vol. 1, No. 1, pp. 10~20.
2. H.C. Cotton, 1983, "Welding underwater and in the splash zone a review", proceedings of Int.. Conference. IIW, pp. 4~48.
3. H. Yara and Y. Makishi, 1983, "Study on wet underwater wet welding(report1)", quarterly journal of the japan welding society, Vol. 1, pp. 183~187.
4. H. Yara and Y. Makishi, 1985, "Study on wet underwater wet welding(report2)", quarterly journal of the japan welding society, Vol. 2, pp. 156~156.
5. H. Yara and Y. Makishi, 1985, "Study on wet underwater wet welding(report3)", quarterly journal of the japan welding society, Vol. 3,

pp. 156~161.

6. A. E. Asnis, I. M. Savich, 1983, "The new method of mechanized underwater welding", Proceedings. of Int. Conference. IIW, pp. 311~317.
7. 오세규, 강문호, 김민남, 1983, "선용강판 수중 용접부의 인장구속균열특성에 관한 연구", 대한박용기계학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 211~218.
8. 오세규, 김민남, 1987, "TMCP강의 습식수중아크용접에 관한 고찰", 대한용접학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 28~35.
9. 금속공학편람편찬위원회, 1996, 금속공학편람, pp. 419~440.
10. 김복인, 2003, "습식수중용접봉 개발에 관한 연구", 부경대학교 박사학위논문, pp. 106~108.