

연강의 습식 수중 아크 용접 특성에 관한 연구 A Study on the Properties of Underwater Wet Arc Welding for the Mild Steels

곽희환 · 김창규

H. H. Kwak and C. G. Kim

Key Words : Underwater Wet Arc Welding(습식 수중 아크 용접), Welding Electrodes(용접봉), HAZ (열영향부), Mild Steel(연강), Welding Properties(용접특성), Arc Stability(아크 안정성)

Abstract : Underwater wet arc welds were experimentally performed on 11mm thick SS400 mild steel plate as base metal by using six different types of flux coated electrodes of 4.0mm diameter; KSKR, KSKT, USBL, JPUW, UWEA, and UWEB. As results, the developed flux coated underwater electrode had a good weldability compared with other domestic terrestrial electrodes. By rapid cooling rate, the hardness value of HAZ were increased by quenching effects. Mechanical properties for the multi-pass butt-welding specimen are also tested experimentally. The feasibility of the developed underwater electrode was experimentally studied and the results achieved in this wet arc welds have shown that the developed wet welding electrode UWEB can have a degree of integrity.

1. 서 론

과학 기술의 발달과 더불어 해저자원의 탐사 및 해양개발이 필연적으로 대두되고 있으며 선진국에서는 오래전부터 수중 용접과 절단에 대한 관심도가 고조되어 막대한 예산과 인력을 투입하여 제반 연구 활동 들이 활발히 진행되고 있다^{1~2)}.

현재에도 해저유전개발, 자원조사, 해상발전, 해저 파이프라인 설치 등 수 많은 해저구조물이 운영되고 있으며 이들의 보수 및 정비수단으로 습식 수중 아크 용접의 사용빈도가 증가하고 있어 미국을 비롯하여 선진국에서는 습식 수중 아크 용접 기술에 대한 관심도가 높아지고 있다^{3~4)}.

특히 삼면이 바다인 우리의 현실로 볼 때 산업적으로 중요한 장비와 설비 등이 해양으로 진출할 가능성이 크고 해난사고와 같은 긴급구조 및 군사적인 측면에서도 수중 용접과 절단에 대한 개발은 매우 중요하다고 생각된다⁵⁾. 해양개발에서 필수적인 것이 해양구조물이며 점차적으로 복잡하고 대

형화됨에 따라 수중에서의 조립 및 시공 작업이 필요하며 대형선박의 국부적인 보수 및 부식 등에 대한 정비수단으로, 또한 긴급 해난구조용으로도 수중 용접에 대한 기술이 연구 개발되어 필요한 자료와 정보가 제공되어야만 한다⁶⁾. 그리고 습식 수중 아크 용접에 대한 기술개발을 위하여 체계적이고 학문적인 연구가 선행되어야만 할 것으로 생각 된다⁷⁾.

습식 수중 아크 용접 실험은 고강도의 대형수조와 호흡할 수 있는 공기공급 장치 및 고가의 잠수장비세트, 또한 수중에서 잠수하여 직류 아크 용접을 할 수 있는 고용량의 직류 용접장치와 정밀한 측정기기 등의 시설이 필요하고 더구나 수중용접 실험요원은 잠수 기술을 습득한 후에 용접기술과 기능을 함께 갖추어야 하는 어려움이 있어 쉽게 접근하기가 곤란한 점이 많다⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 선진 외국에서 개발하여 시판중인 수중 용접봉과 최근 국내에서 개발된 수중 아크 용접봉을 이용하여 수중에서 2차원 속도제어가 가능하도록 자체적으로 설계하여 제작한 수중 용접장치에서 일반 구조용 연강판(SS400)을 수중 아크 용접 실험을 행하여 아크의 안정성, 용접부위의 기계적 특성 등을 고찰함으로써 습식 수중 아크

접수일 : 2006년 2월 16일, 채택확정 : 2006년 10월 16일
곽희환(책임저자) : 부경대학교 대학원 금속공학과
E-mail : symt03@yahoo.co.kr Tel. 051-620-1472
김창규 : 부경대학교 신소재공학부 금속공학시스템전공

용접시의 최적 조건을 선정하여 습식 수중 아크 용접의 실용화를 위한 기초 자료를 얻고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

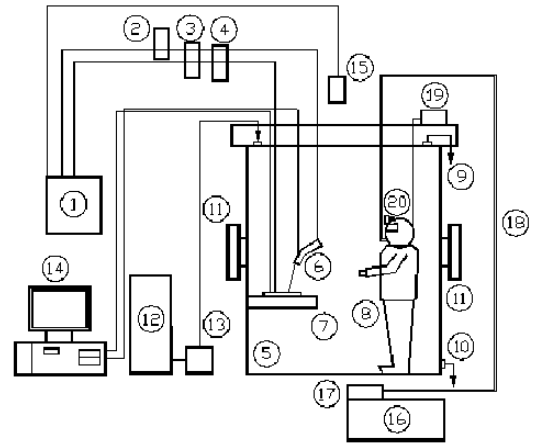
맞대기 용접에서 사용된 수중 용접 실험 장치는 Fig. 1에 보는 바와 같이 두께 28mm의 SS400 연강판을 사용하여 직경 2500mm 깊이 2000mm의 커다란 원통형 수조를 자체적으로 설계하여 국내의 모중공업회사에 의뢰하여 제작하였다.

수조 내부에서 용접을 보조할 수 있는 잠수사와 수중 용접사가 2m의 깊이에 잠수하여 수중용접 실험을 할 수 있도록 충분한 공간을 확보하였으며, 급수 및 배수를 조절 할 수 있게 하였다. 실험에 이용된 용접기는 용량 500A의 직류 아크 용접기를 사용하였으며, 수중 용접을 위한 용접봉 홀더는 Broco의 제품 Br 20을 사용했다.

잠수장비는 정밀필터를 장착한 압축기와 용접사의 산업용 풀 페이스 마스크(Neptune 2)와 고압호스로 연결하고 수중 용접 실험 중에는 용접사와 지상의 보조요원과 양 방향 통신이 가능하도록 하였다. 안전을 위하여 용접사 이외에 보조 잠수사가 함께 잠수하여 실험에 참가하였으며, 풀 페이스 앞에는 차광유리(차광도 10)를 붙인 핸드 실드를 장착시키고, 잠수복은 물이 몸에 직접 닿지 않는 건식을 이용하여 안전에 만전을 기하였다

습식 수중 용접부의 아크 안정성을 조사하기 위해 DT3001 PGL Board를 PC에 장착시켜 HP VEE (Hewlett Packard Visual Engineering Environment) 프로그램을 이용하여 수중 용접 중의 Volt, Ampere 등을 측정하였고 그 전압 전류를 FFT 분석을 하였다. 그리고 각각의 시편의 기계적 강도 테스트를 위해 경도 측정에 사용한 측정기는 Digital Microhardness Tester를 이용하여 측정하였고, 인장 시험기는 만능 재료 시험기(Universal Test Machine)를 사용하였으며, 충격 시험기는 해머 모멘트가 22.4kg, 750mm인 샤르피 충격 시험기를 사용하였다.

용접부의 외관형상, 비드 및 슬래그는 KODAK Megaplug Digital Camera ES 1.0과 DT 3157 Board 및 삼성 디지털 카메라 SDC 007을 사용하여 촬영하였다. 각 금속조직의 형태를 판독하기 위해 전자 현미경을 사용하였다.



- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| 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

2.2 실험 재료

본 연구에 사용한 용접 모재는 시중에서 흔히 사용되고 있는 일반 구조용 연강판(SS400)으로 크기는 250×125×12mm의 규격으로 유압 절단기로 절단하여 비드 용접 시험편을 사용하였고 시편의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타났다. 본 실험에 사용한 용접봉은 대기 중에서 일반적으로 사용하는 지름 4.0mm인 E4303(KT)과 E4313(KR)를 사용하였고 이미 일본과 미국에서 수중용접봉으로 사용되고 있는 미국 OHIO 주립대학 C. L. Tsai 교수가 개발하여 "Black Beauty"로 명명되어 인터넷으로 선전중인 연강용 수중용접봉(US)과 일본의 니쥬코 熔材 工業株式會社の 日亞溶接棒(Nichia Welding Electrode)(JP) 등을 이용하였다. 김복인 등이 개발한 UWEA와 UWEB 등 모두 6종류의 용접봉을 사용하였다. 용접봉들은 사용 전에 예열 처리를 하여 실험실에서 고안된 방습 및 방수처리를 한 후 대기 중에 방치하였다가 자연 그대로 용접 실험을 하였다.

용접봉의 개발에 사용된 심선은 용접봉 제작 회사에서 용접봉 제작에 사용되고 있는 연강용 피복

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 비드 외관

Photo 1은 시험에 사용한 각각의 용접봉들의 비드를 디지털 카메라(digital camera)로 촬영한 것이다. 비드의 외관과 비드의 퍼짐성에 따른 아크의 안정성을 서로 비교하여 보았다.

용접이 이루어진 부분의 비드 외관은 대체로 양호한 편이었다. Table 4와 같은 용접조건으로 습식 수중 아크용접한 시편의 비드 형상은 용접봉의 종류에 따라서 커다란 차이점은 발견하기 어려웠으나, 김복인 등이 개발한 용접봉 UWEA와 일반 용접봉으로 사용 중인 KT용접봉의 비드 퍼짐성이 잘 나타났고, 비드의 형태는 UWEB와 JPUW가 가장 부드럽게 나타났다.

수중 용접실험에서는 물의 비등현상과 수온의 급속한 냉각 등으로 인하여 슬래그가 비드부에 용착하는 현상이 발생함을 알 수 있었다. 본 실험에서 고찰해 보면, 각종 용접봉 중에서 KSKR과 KSKT가 가장 딱딱한 슬래그를 형성하였고, JPUW는 슬래그 제거가 쉽지 않을 정도로 용착성이 크게 나타났다. UWEA와 UWEB는 비교적 쉽게 슬래그가 제거되었으며, US는 불안한 아크로 인하여 많은 스파트가 발생하였다.

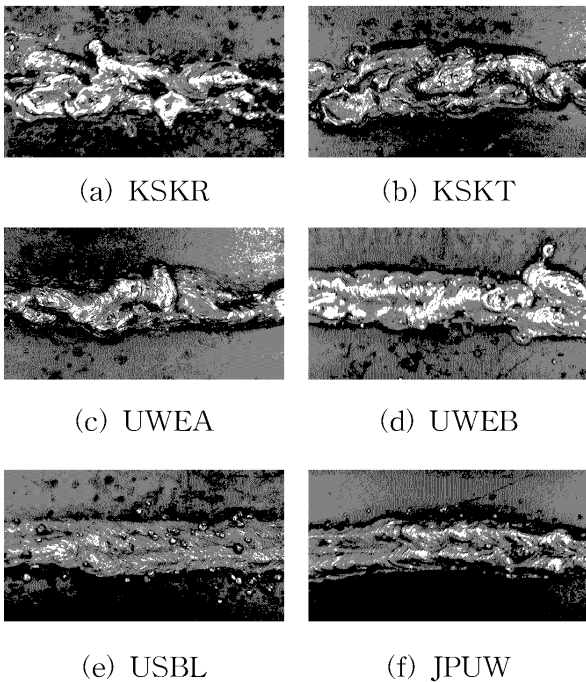


Photo 1 Bead appearance of multi-pass under-water wet arc welds

3.2 아크의 안정성

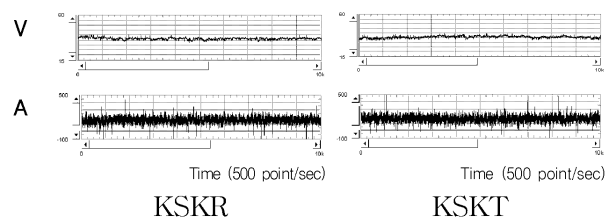
습식 수중 수동 아크 용접(underwater wet manual arc welding)시의 아크 안정성은 용접 기술에 따라 차이가 많을 수 있으나, 본 실험에서는 한 사람의 숙달된 기능에 의존하여, 실험에 이용한 6 종류의 다른 용접봉에 대하여 Table 4의 수중 용접 조건을 습식 수중 맞대기 용접 실험에 적용하여 타당성을 검토하여 보았다.

Fig. 3은 6 종류의 다른 용접봉에 대한 습식 수중 맞대기 용접 실험 중에 HP-VEE program으로 실시간으로 측정된 용접 전압과 용접 전류의 파형을 나타내고 있다.

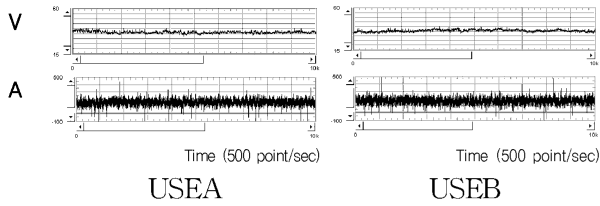
Fig. 3(a)는 시판되고 있는 고산화티탄계 용접봉(KSKR)과 라임티탄계 용접봉(KSKT)에 대한 용접 실험 중의 전압과 전류의 파형을 나타내고 있고, Fig. 3(b)는 시험 제작한 UWEA 용접봉 및 UWEB 용접봉의 전압과 전류의 파형을 나타내고 있다. 또한 외국에서 수입한 수중 전용 용접봉, USBL과 JPUW에 대한 전압과 전류의 파형은 Fig. 3(c)에 나타내고 있다.

용접봉의 종류별로 서로 비교하여 보면 피복제의 종류에 따라서 아크의 안정성이 조금씩 달라지는 현상을 관찰할 수 있으며, KSKR 용접봉이 KSKT 용접봉보다 전압은 약간 높고 전류는 조금 적게 나타났으며, 시험 제작한 UWEA 및 UWEB 보다 전압은 낮고 전류는 크게 나타났다.

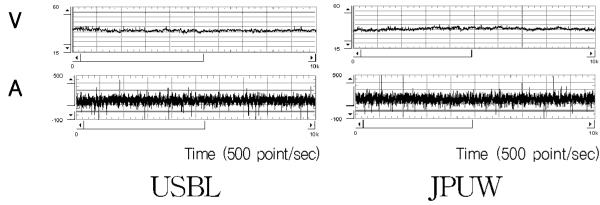
외국에서 수입하여 실험에 이용한 수중 용접봉, USBL 및 JPUW를 자체적으로 개발한 수중 피복 아크 용접봉 UWEA 및 UWEB 등과 서로 비교해 보면, 전압 파형의 흔들림이 USBL용접봉에서 크게 나타나고, JPUW와 UWEB 용접봉의 전압이 높게 되었으며, 전류 파형은 대체로 비슷한 경향을 나타내었다. 전압과 전류의 신호 크기가 급격히 변화하는 위치에서 아크가 불안정하게 이루어지고 용접불량이 예상되므로, 피복제 성분의 변화와 조성비에도 연관성이 있을 것으로 생각된다.



(a) KSKR and KSKT welding electrodes



(b) KSKR and KSKT welding electrodes



(c) KSKR and KSKT welding electrodes

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

3.3 다층 단면의 현미경 조직

Photo 3 은 Table 4와 같은 용접 조건으로 수중에서 수동으로 습식 다층 아크 용접 실험한 시험편의 용접 경계 부분의 단면에 대한 현미경 조직 사진으로, 각각의 용접봉에 대한 용접부(Weld), 본드부(Bond), 열영향부(HAZ) 및 모재부(Base)로 나누어 나타내고 있다.

전체적으로 살펴보면, 모재부는 페라이트와 펄라이트 조직을 나타내고, 열영향부는 다층 용접에 의한 후열 처리와 같은 효과로 비드 용접에 비하여 보다 복잡한 금속 조직의 해석이 요구된다. 대체적으로 고찰해 보면, 열영향부는 모재부에 비해 결정립이 다소 커져 있음을 알 수 있으며, 빠른 냉각 속도로 인하여 조대한 침상의 마텐사이트 조직이 보이며, 일부 베이나이트 조직도 혼합되어 있고, 일부는 비평형 마르텐사이트 조직을 발견할 수 있었다. 경계부에는 마르텐사이트와 안정화된 시멘타이트 조직이 약간 나타나고 있다. 용착 금속에는 빠른 냉각 속도로 인하여 침상의 마텐사이트 조직과 일부 위드만스타텐(widmanstatten) 조직도 혼합되어 있는 것으로 보이고, 전체적으로 용접금속부는 덴드라이트 조직도 나타난다. 표면에는 미세한 마텐사이트 조직이 발달되어 있음을 알 수 있다.

각 용접봉 별로 Weld metal 부와 bond부로 큰 차이는 찾을 수가 없었다. UWEB 시험편의 열영향부에서는 모재부와 별 차이가 없는 조직이 나타나서 UWEB가 열 영향이 다른 용접봉보다 적게 미친다는 것을 알 수 있었다. KSKR 및 KSKT 에서는 펄

라이트가 세립상으로 분할되어 입상 펄라이트 조직을 가지고 있고, USBL 및 JPUW 용접봉은 HAZ 부에서 미세한 마르텐사이트 조직이 발달 되어 있는 것으로 보인다.

	WELD	BOND	HAZ
KSKR			
KSKT			
UWEA			
UWEB			
USBL			
JPUW			

Photo 3 Microstructures of welds in the underwater wet welds for various welding electrodes

3.4 다층 시편의 경도 시험

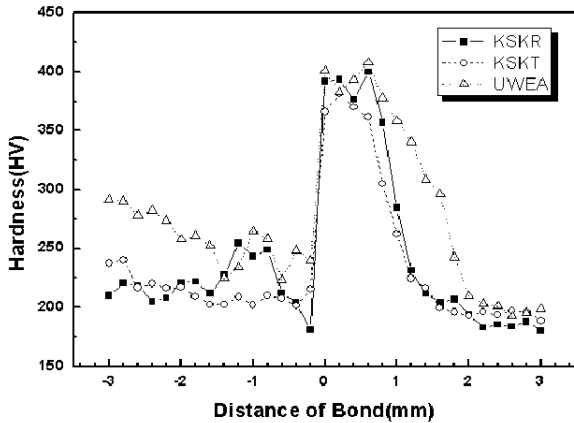
각 시편의 경도측정은 모재 표면에서 1mm 내부의 점을 측정점으로 선정하여 각각 0.25mm 간격으로 측정하였으며, 용접봉의 종류에 따라 열 영향부의 경도차이가 크게 나타났다.

Fig. 4는 용접 전류 250A에서 용접봉의 종류에 따른 열 영향부의 경도 분포를 나타낸 것으로 KR과 JP의 경우에는 최고 경도가 나타났으며, KT와 시험개발한 UWEB는 최고 경도치가 낮게 나타났음을 알 수 있다. 각 부분의 경도치를 비교 분석해 보면 수냉에 의한 열처리가 발생하였음을 알 수 있다.

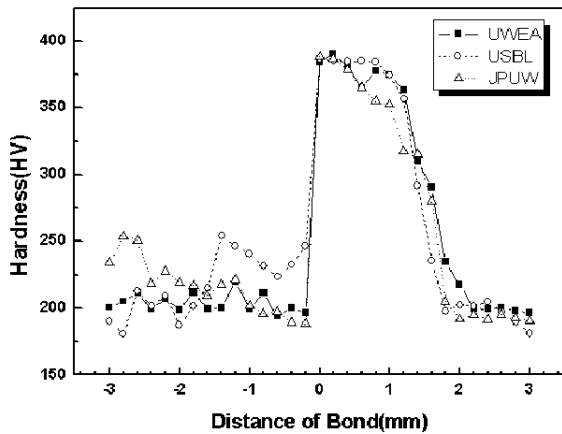
실험의 결과를 분석하여 보면 습식 수중 아크 용접시의 열 영향부에 대한 경도 분포는 용접봉의 종류에 관계없이 전반적으로 열 영향부 영역에서 공통적으로 상승되었고 용착 금속부분에서는 모재부의 평균 경도 보다 높은 것으로 나타났다. 이것은 습식 아크 용접의 경우 용접부가 주위에 있는 물의

영향을 받아 급냉되고 담금질 효과에 의하여 경화되어 있음을 알 수 있다.

모재 부분에서 일정하게 나타났던 경도는 열영향부에 접어들면서 서서히 상승하였고 용융풀에 가까워질수록 일정하지 않고 급격한 경도 변화를 나타내었다.



(a) KSKR, KSKT and UWEA welding lectrodes



(b) UWEB, USBL and JPUW welding electrodes

Fig. 4 Hardness distributions of the Under-water wet welds for comparison of various welding electrodes

3.5 다층 시편의 기계적 강도 시험

습식 수중 아크 용접된 시험편의 기계적 성질을 조사하기 위하여 용접봉 KSKR, KSKT, UWEA, UWEB, USBL 및 JPUW의 6가지 종류에 대한 다층 맞대기 이음 용접한 판재 중에서 용접상태가 양호하다고 판단되는 시험편을 Fig. 2와 같이 절단/채취 하여 굽힘시험, 충격시험 및 인장시험 등 기계적 성질을 측정하였다.

3.5.1 굽힘 시험

Fig. 5에서 모재의 표면적인 굽힘시험 결과를 도식적으로 나타낸 것이다. 습식 수중 용접한 모든 시편의 용접부위에서 굽힘 각도 80도 전후에서 용접봉의 종류에 따라 다소 굽힘 각도의 차이가 달라지면서 크랙이 발생하지 시작하였다.

용접봉 종류별 최대 굽힘 강도와 처짐량의 평균값을 수치로 비교해 보면 수입한 미국제품 USBL의 굽힘 강도가 1093.13 MPa로 가장 높았고 그 다음으로 국내에서 자체 개발한 UWEB의 굽힘 강도가 997.17MPa로 높게 나타났다. 또한 처짐량에 있어서도 USBL이 22.61mm로 가장 높았고 그 다음으로 UWEB과 JPUW가 높은 값을 나타내었다.

본 시험 결과에서 시편의 굽힘강도 및 처짐량에 있어서 국내에서 자체 개발된 UWEB가 국외 용접봉인 USBL, JPUW와 비교하여 용접부의 연성과 안정성이 충분히 양호한 것으로 볼 수 있다.

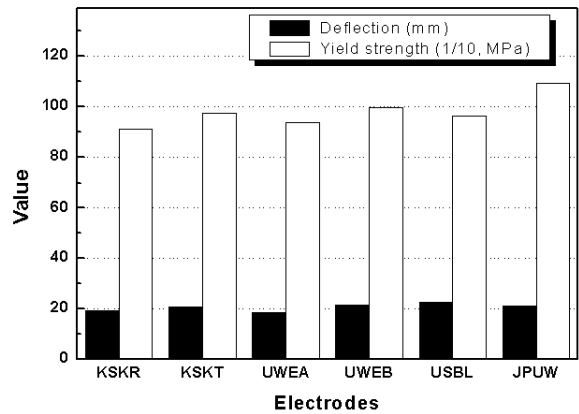


Fig. 5 Comparison of bending test results in underwater wet welding electrodes

3.5.2 충격 시험

Fig. 6은 각각의 용접시편에 대한 샤르피 충격 시험 결과를 용접봉 종류별로 도식화한 것이다. 시편의 열 영향부에 노치 위치를 선정하고, 깊이 2mm, 각도 45°의 V형 노치를와이어 가공하여 충격 시험편을 제작하였으며, 10°C의 온도 분위기에서 충격 시험을 실시하였다.

용접봉 종류별 충격치의 평균값을 비교해 보면 수입한 JPUW(일본)가 140.72(J/cm²)이고, 그 다음이 국내에서 자체 개발된 UWEB가 139.46(J/cm²)로 JPUW와 아주 비슷한 값을 나타내었다.

이와 같이 국내에서 자체적으로 개발된 용접봉 UWEB가 다른 용접봉과 비교해 볼 때 충격치가 높

게 나타나 기계적 특성이 양호함을 확인할 수 있다. 또한 이 정도의 충격치를 갖는다면 수중 용접한 이음매의 충격치에 관해서는 실용상 큰 문제점이 없을 것으로 생각된다.

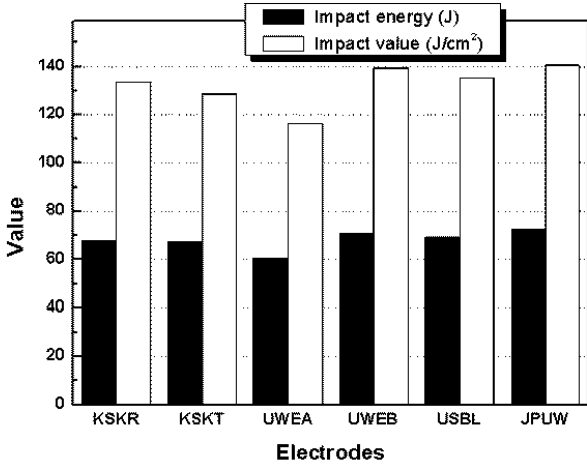


Fig. 6 Comparison of impact test results in underwater wet welding electrodes

3.5.3 인장 시험

인장시험 후 시편이 파단된 위치를 관찰한 결과 수중 용접된 용접부위보다 모재부에서 모두 끊어지게 되어 모재보다 용접부의 인장응력이 더욱 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그래서 각 시험편의 용접부에 노치를 주어 인장시험을 하여 용접봉 종류에 따른 시험결과를 Fig. 7에 도식화하여 나타내었다.

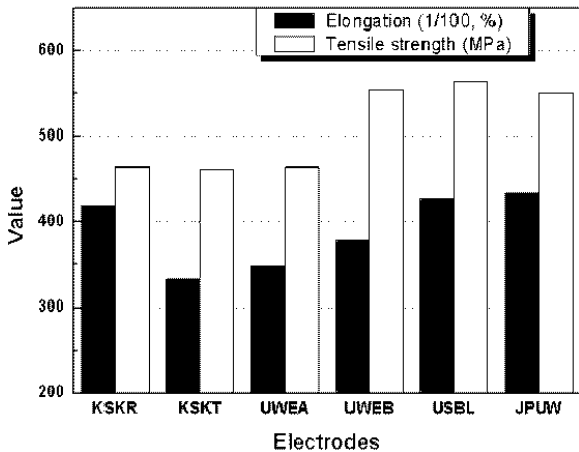


Fig. 7 Comparison of tensile test results in underwater wet welding electrodes

6종류의 용접봉 중 USBL의 인장강도가 564.8 MPa로 가장 높았고 국내에서 개발된 UWEB가

554.7 MPa로 USBL보다 조금 낮게 나타났다. 연신율에 있어서도 USBL이 4.34%로 가장 높았고 JPUW가 4.28로 그 다음 이었다. 용접봉 UWEB는 다른 용접봉과 비교하여 연신율은 조금 낮았지만 적정수준의 높은 인장 강도를 나타내었다.

이상의 결과로 보아 국내에서 개발한 UWEB가 국산 용접봉 KSKR, KSKT보다 인장강도가 우수하고 국외 용접봉인 USBL과 JPUW와 비교하여 뒤지지 않는 인장강도를 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나 연신율이 조금 떨어지는데, 이는 수중 용접 자체가 숙련된 용접 기술에 크게 의존하므로 좀 더 연구가 이루어져야 하겠다.

4. 실험 결과 및 고찰

공기 중에서 사용되고 있는 일반 용접봉(KSKR, KSKT)과 수중 용접봉 (UWEA, UWEB) 및 일산 수중용접봉(JP) 그리고 미국산(USBL)을 비교 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 비드의 외관, 슬래그 박리성, 스패트 발생 등의 측면에서 서로 비교하여 보면 UWEA보다는 UWEB가 더 양호한 결과치를 얻을 수 있었다.
- 2) 실험에 이용된 용접봉들의 열 영향부 경도는 물의 영향을 받아 급냉되었고 담금질 효과에 의해 급격히 상승하여 모재부 보다 높은 경도치를 가지고 있다.
- 3) 용착 금속과 열 영향부의 금속조직은 다층 용접의 후 열처리와 같은 영향으로 안정화된 미세한 마르텐사이트 조직이 증가하는 경향이 있다.
- 4) 기계적 성질은 UWEB용접봉이 다른 용접봉에 비해 인장강도와 연신율이 대체로 양호하며, 인성과 연성이 좋아 일산(JPUW)이나 미국산(USBL)과 대등하게 평가될 수 있는 양호한 용접봉으로 나타났다.

참고 문헌

1. ANSI/AWS D3.6M, 1999, "Specification for Underwater Welding". pp. 1~91.
2. AWS, 1971, "Welding Handbook", 7th Edition, Vol. 1, Fundamentals of Welding, pp. 3~23.
3. K. Masubuchi, 1985, "Some idea about the

future developments of underwater welding technologies", Int' Workshop on Quality in Underwater Welding, MIT, pp. 13~14.

4. R. J. Dexter et al., 1990, "Performance of underwater weldments", Ship Structure Committee SSC-335, pp. 1~241.
5. J. P. Vida, 1984, "Hardness testing in the heat affected zone of steel welds", IIW. DOC, IX-1309-84
6. H. C. Cotton, 1983, "Welding underwater and in the splash zone-a review", Proceedings of the Int. Conference, IIW, pp. 4~48.
7. Richard N. Fultion, "Progress in underwater welding", J of Ocean industry, pp. 40~44.
8. A. E. Asnis, I. M. Savich, 1983, "The new method of mechanized underwater welding", Proceedings of the Int. Conference, IIW, pp. 311~317.