

工學碩士 學位論文

濕式水中아크熔接의 熔接性에  
關한 基礎研究

指導教授 金 敏 男

2002年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學科

蘆 昌 錫

蘆昌錫의 工學碩士 學位論文을 認准함

2001年 12月 26日

主 審 工學博士 林 祐 助 ㉠

委 員 工學博士 金 南 植 ㉠

委 員 工學博士 金 敏 男 ㉠

# 목 차

## ABSTRACT

|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>1. 서 론</b>         | 1  |
| 1-1 수중용접              | 1  |
| 1-2 수중 피복 아크 용접봉      | 3  |
| 1-3 수중 용접의 방수 및 보관    | 5  |
| 1-4 연구의 필요성과 목적       | 6  |
| <b>2. 실험장치 및 실험방법</b> | 7  |
| 2-1 실험장치              | 8  |
| 2-2 실험재료              | 10 |
| 2-3 실험방법              | 14 |
| <b>3. 실험결과 및 고찰</b>   | 17 |
| 3-1 아크의 안정성           | 17 |
| 3-2 슬래그 박리성과 스파터 발생   | 21 |
| 3-3 비드외관              | 23 |
| 3-4 경도시험              | 26 |

|                  |    |
|------------------|----|
| 3-5 금속조직 .....   | 27 |
| 4. 결론 .....      | 34 |
| REFERENCES ..... | 35 |

# **A Elemental Study on Weld-ability of Underwater Wet Arc Welding**

**Chang-Suk. Rho**

**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School.**

**Pu-kyong National University**

## **Abstract**

Underwater wet arc welding process was experimentally investigated by using the six types of flux coated electrodes of 3.2mm diameter and the KR-RA steel plate of 11mm thickness as base metal. Two types of electrodes were domestic covered arc welding electrode(CR13, CR14) and another two types of wet welding electrodes (UWCS, TN20) were imported goods, and the other two types(UWX1, UWX2) were individually designed flux coated electrodes for experimental welding purpose. Main experimental results were summerized as follows:

1 It was ascertained that individually designed flux coated electrode(UWX1) could be used in practice with KR-RA steel plate for underwater wet arc bead welds.

2. Welding arc could be generated easily and considerably kept in stable using TN20 and UWX1 electrodes.

3. The micro Vickers hardness value and the portion of martensite in the HAZ were increased in all the electrodes by rapid cooling rate, but it was relatively maintain stable for UWCS, TN20 and UWX1 electrodes.

# 1. 서 론

## 1.1 수중용접

용접의 역사는 오랜 옛날로부터 금속의 이용과 함께 내려온 것으로 생각되나, 그 당시에 사용되어 온 것은 극히 일부에 지나지 않았으며, 제1차 대전과 제2차 대전 이후부터는 무기제작에 따른 연구로 인해 철강 및 비철금속의 용접에 이르기까지 눈부신 발달을 하게 되었다. 특히, 1831년 Faraday가 전기분해와 감응에 관한 법칙을 통해 전기용접이 연구되어 1885년 Benardos와 Olszewski가 최초로 탄소 아크 용접을 고안하였고, 1888년 Slavianoff는 탄소전극대신에 금속전극을 사용하여 금속 아크 용접을 발명한 이후 용접의 발전은 급진하였다. 그러나 수중에서의 용접은 작업환경의 특수성 때문에 처음에는 순조롭지가 못했다. 수중용접으로서 최초의 효과적인 성공은 1939년 미 해군 해난구조대 대원에 의해 달성되었다. 이 때 사용한 용접봉이 피복 금속 아크 용접봉으로 피복제가 봉심 둘레에 피복되어 있어 모재가 계속 접촉하고 있으며 전류는 아크의 열을 발생시키고, 봉은 자체적으로 녹아 용접이 되는데 이것은 자가소모법(Self-consuming)에 의한 용접법이다. 최근까지는 이 자가소모법이 사용범위가 넓어 많이 애용되는데, 이는 오래 전부터 수중용접기술이 단순화되어 왔었기 때문이다. 수중용접은 수중절단처럼 응용도가 넓지 않지만 유익성과 필요성은 점차 커가고 있다. 앞으로 장비와 기술이 발달함에 따라 수중용접의 사용은 더욱 증가하리라 본다.<sup>1, 8)</sup>

수중용접은 크게 건식용접(Dry welding)과 습식용접(Wet

welding)으로 나누어진다. 건식용접은 수중의 용접할 지점에 사람이 들어갈 수 있도록 적당한 격실(Coffer dam)을 설치하고 그 안의 물을 제거시켜 육상의 조건과 똑같이 만들어서 용접하는 방법이다. 주로 인장강도가 높아야 하는 해상구조물작업에 많이 쓰인다. 건식용접은 육상용접과 똑같은 조건이므로 인장강도(Tensile strength)와 연성(Ductility)이 강하며, 준비과정이 복잡하고 시간과 소용경비가 과다하게 든다. 습식용접은 건식용접과는 달리 잠수사가 직접 수중에 노출된 채 용접하는 방법으로 수중용접의 대표적인 방법이다. 수중습식용접의 아크는 염분이 많을 때 탁월한 성능을 발휘한다. 이는 물의 염분도가 높으면 높을수록 염분의 전해질 성질이 증가되어 더 강력한 아크를 형성하게 되는 것이다. 습식용접은 미 해군과 세계 유명 산업 잠수업체들의 까다로운 실험결과 건식용접에 비해 인장강도가 80%, 연성이 50%로 판정되었다. 인장강도는 그런 대로 양호한편이나 연성이 상대적으로 약한 것은 물의 격심한 담금질(Quenching)현상 때문이다. 습식용접은 건식용접에 비해 기동성이 뛰어 나며 작업진행이 빠르고 간편해 소요경비가 적게 들고, 건식용접으로 할 수 없는 복잡한 곳에 유용하지만, 물의 냉각작용에 의한 빠른 담금질현상으로 건식용접에 비해 인장강도와 연성이 낮으나, 최근의 장비와 기술의 발달로 만족스런 효과를 얻고 있다. <sup>2~5)</sup>



## 1.2 수중 피복 아크 용접봉

국내에서는 수중전용으로 생산되는 용접봉은 없지만, 수중용접에 적합한 피복 아크 용접봉을 방수처리해서 사용한다. 수중용접에 적합한 봉은 AWS의 E6013, E7014와 국내에서 생산되는 용접봉은 KS의 E4313, E5014도 우수하고 신뢰할 만하다.<sup>8)</sup>

고산화티탄계(KS E 4313, AWS E 6013)는 영국과 독일에서 개발된 봉으로서 전 세계적으로 수요량이 가장 많은 봉이다. 피복제로는 45% 정도의 산화티탄을 함유한 중피복(中被覆, 피복제 두께가 중간 정도) 용접봉으로 매우 사용하기 편한 전자세용이며, 아크는 용접기의 무부하 전압이 낮은 경우에도 부드럽고 안정하며 스파터(Spatter) 발생이 적고 슬래그(Slag)는 스스로 일어나고, 비드 외관(Bead appearance)은 어느 용접봉도 이에 따를 수 없을 정도로 아름답고 용입은 얇은 편이지만, 내균열성은 어느 계열보다 뒤떨어진다. 기계적 성질에 있어 연성과 인성이 못한 점이 매우 큰 결함으로 되어 있다.

철분산화티탄계(AWS E 7014)의 기본은 AWS E 6013으로 여기에 철분이 더 가해진 중피복(中被覆)으로 전자세가 가능하면서 고능률적인 용접봉이다. 특성으로 용적이행은 스프레이(Spray)상이고 슬래그는 다공정성으로 제거가 용이하고 비드는 미려하며 용입은 얇은 편이며, 특히 용착효율은 E 6013 < E 7014 < E 7024 순으로 나타낼 수 있다.

AWS A 5.1-81(연강용 피복아크 용접봉)의 규격 중에서 용착금속(Deposited metal)의 화학성분을 Table 1과 같이 나타내고 있다.<sup>6)</sup>

Table 1 Chemical composition of covering

| AWS Classification                                    | Chemical composition, max percent <sup>a,b,c</sup> |      |                    |                    |                    |                    |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                                       | Mn                                                 | Si   | Ni                 | Cr                 | Mo                 | V                  |
| E6013, E6011, E6012,<br>E6013, E6020, E6022,<br>E6027 | No specific chemical limits                        |      |                    |                    |                    |                    |
| E7016 <sup>d</sup> , E7018 <sup>d</sup> , E7027       | 1.60 <sup>**</sup>                                 | 0.75 | 0.30 <sup>**</sup> | 0.20 <sup>**</sup> | 0.30 <sup>**</sup> | 0.08 <sup>**</sup> |
| E7014, E7015, E7024 <sup>c</sup><br>E7028, E7048      | 1.25 <sup>*</sup>                                  | 0.90 | 0.30 <sup>*</sup>  | 0.20 <sup>*</sup>  | 0.30 <sup>*</sup>  | 0.08 <sup>*</sup>  |

- a. Composition limits are intended to insure a plain carbon steel deposit.
- b. For obtaining the chemical composition, DCEN may be used where DC, both polarities is specified.
- c. The total of all elements with the asterisk (\*) shall not exceed 1.50 percent. The total of all elements with the double asterisk (\*\*) shall not 1.75 percent.
- d. Upon agreement between the supplier and the purchaser, electrodes classified as E7016 or E7018 may be supplied to a minimum Charpy V-notch impact requirement of 20 ft · lb at -50°F(27J at -46°C). Such electrodes shall be identified as E7016-1 or E7018-1, as appropriate.
- e. Upon agreement between supplier and purchaser, electrodes classified as E7024 may be supplied to a minimum elongation of 22 percent . Such electrodes shall be identified as E7024-1.

## 1.2 수중 용접봉의 방수 및 보관<sup>1, 7~8)</sup>

피복제에 물이 스며들면 못쓰게 된다. 따라서 피복제를 방수시켜야만 만족스런 용접이 이루어진다. 만약 용접시 검은 연기가 너무 많이 발생한다면 방수처리가 잘못된 것이다. 그리고 작업에 임할시 필요 없이 많은 양의 용접봉을 가지고 잠수해서는 안 되며, 비록 방수처리가 되었다하더라도 오랜 시간 노출시키면 피복제가 약화된다. 방수액으로는 에폭시(Epoxy), 씨락(Sealac), 아세톤(Acetone)에 셀룰로이드(Celluloid)를 녹인 용액, 등이 있다.

용접봉은 습기에 민감해서 특별히 보관에 주의해야 하며, 보관 장소는 지면보다 높고 건조한 장소로서 진동이 없어야 한다. 특히, 잠수현장에서 회수한 용접봉은 보관에 신중을 기해야 하며, 사용하기 전 70~100℃의 온도로 30분~1시간 정도로 충분히 건조시켜 사용해야 한다.

### 1.3 연구의 필요성과 목적

최근 각종 해양 구조물의 가공과 보수 수단으로서의 수중 용접 기술의 개발 및 연구가 확대되기 시작했으며<sup>9)</sup>, 플라즈마 아크 용접, 탄산가스 아크 용접 및 피복 아크 용접 등 각종 용접법이 수중 용접에 적용되어 비교적 양호한 결과를 얻었다는 것이 보고 되고 있으나<sup>10~14)</sup>, 국내에서는 수중 아크 용접에 대한 연구 실적이 적으며<sup>15)</sup>, 특히, 습식 수중 피복 아크 용접봉 개발과 수중 용접에 관한 연구가 아주 미흡한 실정이다.

수중용접 및 절단작업은 특수한 것이기 때문에 전망이 밝지 않겠느냐는 근시안적인 판단을 하기 쉬운데 우리나라뿐만 아니라 세계 어느 나라에서도 수중 용접 절단만 전문적으로 할 수 있는 일감은 없다. 단지 보수, 수리 등 작업 여건상 필요에 의해 용접할 일이 있으면 한시적으로 용접을 하고 불필요한 부분은 제거(절단)하는 것에 지나지 않는다. 그리고 수중용접은 육상용접에 비해 강도가 현저히 떨어지므로 꼭 수중용접을 해야 할 경우가 아니라면 먼저 육상용접을 할 수 있는 방법을 생각해야 할 만큼 불가피한 경우 또는 임시 조치로 쓰일 때가 많다. 선박의 긴급수리를 요할 경우, 파손된 선체에 수밀을 요할 경우, 수중토목 시공 또는 보수작업을 요할 경우, 부두시설의 강관 Pile에 아노드(Anode)를 부착 할 경우, 그 밖의 간단한 수리작업 등이 적용되는 사례이다<sup>16)</sup>.

그래서, 습식 수중 아크 용접의 장점을 잘 활용하려면 각종 구조물의 제작에 있어서 용접 이음에 대한 신뢰성을 높이고 사용 성능을 만족시킬 수 있는 기초적인 문제점을 분석하고 하나씩 해결함으로써 습식 수중 아크 용접의 실용화를 도모할 수 있다고 생각된다.

본 연구는 실제 수중용접에 사용되고 있는 용접봉 중에서 국내에서 생산되는 일반 피복 용접봉과 수입한 수중용접봉 및 피복제 시료를 적정한 비율로 혼합하여 시험 개발한 수중용접봉을 수중에서 2차원 속도 제어가 가능하도록 자체적으로 제작한 수중 용접 장치에서 용접을 실시하여 아크의 안정성(Arc stability), 슬래그 박리성, 비드 모양, 경도 및 금속 조직 등을 비교 고찰함으로써, 습식 수중 아크 용접에 대한 용접봉의 적응성과 수중 용접시의 최적 조건을 선정하여 습식 수중 아크 용접의 실용화를 위한 자료를 얻는데 중점을 두었다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

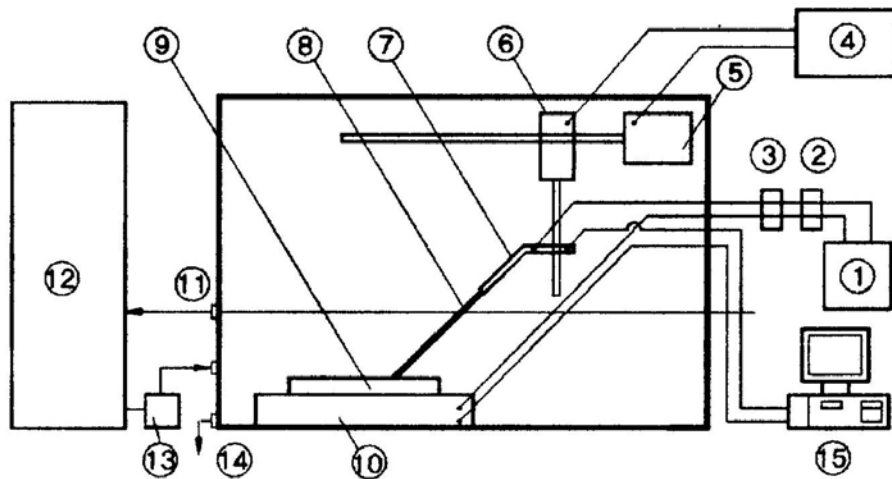
### 2.1 실험장치

실험에 사용된 수중 용접 장치의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 용접봉의 각도, 용접 방향 및 속도 등을 임의로 제어할 수 있는 자동장치와 용접봉 가이드 장치를 부착한 모재 고정용 작업대를 설치한 1200×850×800mm의 수조에 물을 채운 장치이다.

용접 장치에 대한 정기적 안정을 위해  $DC\pm 25V$  이내의 범위에서 전압의 미소 조정으로 속도 조절이 될 수 있도록 감속 모터를 장치에 부착하여 수중 용접 실험에 알맞게 2차원 속도 제어가 가능하도록 제작하였다.

그리고 용접 실험 중에는 수조내의 수온을 일정하게 유지시키기 위해 수돗물을 계속하여 순환할 수 있도록 순환장치가 연결되어 있고, 신호변환장치를 이용하여 용접시 발생하는 전류와 전압을 PC로 전송하여 아크의 안정성을 확인할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 용접기는 용량 600A의 직류 용접기이며, 직류 정극성으로 수심 200mm에서 실시하였다.



- ① DC Arc Welding machine ② Ampere meter ③ Voltage meter  
 ④ Control console box ⑤ Horizontal moving device ⑥ Vertical moving device ⑦ Electrode holder ⑧ Electrode ⑨ Welding specimen ⑩ Work bench ⑪ Over flow pipe ⑫ Cooling Water supply ⑬ Control console box ⑭ Control console box ⑮ Computer

Figure 1-1-1 Schematic diagram of the DC arc welding system

## 2.2 실험재료

본 연구에 사용한 용접 모재는 크기 125×250×11mm로 선박 건조에 많이 사용되는 선체용 압연강판(KR-RA)을 이용하여 그 화학조성과 기계적 성질은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

수중 습식 용접의 가장 큰 문제점은 주위의 물로 인한 인장 강도와 연성의 약화이다. 즉, 열에 가열된 금속이 급속히 냉각됨으로서 금속이 굳어지는 현상인데, 이 때 탄소강에 균열이 발생한다. 이런 균열은 모재의 탄소당량(Carbon equivalent)이 0.40보다 클 때 발생한다. 탄소당량이 높은 모재는 예열이 필요하고, 따라서 수중 습식 용접에는 적당치 않다. 이 탄소당량은 다음의 식으로 사용하여 얻는다.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{\ni+Cu}{15} \quad (2.1)$$

식(2.1)에 적용하면 선체용 압연강판은 0.40보다 작음을 알 수 있다.

본 실험에 사용한 용접봉은 모두 6종류이며, 일반 용접봉 중에서 CR13(AWS A5.1 E6013, KS E4313)과 CR14(AWS A5.1 E7014, KS E4313) 용접봉, 미국과 독일에서 개발되어 사용되고 있는 UWCS와 TN20 수중 용접봉, 이론적 피복제 조성비를 개선하여 시험 개발한 UWX1과 UWX2 수중 용접봉을 사용하였다.

또한 시험 개발된 수중 용접봉의 심선은 용접봉 회사에서 용접봉 제작에 일반적으로 사용되고 있는 연강용 피복 아크 용접봉의 심선 재질과 동일한 SWRY-11을 사용하였으며, Table 4에서 화학적 조



성을 나타내었다.

또한 본 실험에 사용한 용접봉의 피복제 개발에 적용된 조성비와 질량분석기(XRF-1700)에 의해 피복제를 성분 분석한 결과를 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 2 Chemical composition of base metal (KR-RA)

| Chemical composition (wt, %) |      |      |       |      |      |
|------------------------------|------|------|-------|------|------|
| C                            | Si   | Mn   | P     | S    | Ceq  |
| 0.13                         | 0.25 | 0.57 | 0.017 | 0.01 | 0.22 |

Table 3 Mechanical properties of base metal (KR-RA)

| Mechanical properties |                              |                   |           |
|-----------------------|------------------------------|-------------------|-----------|
| Yield point<br>(MPa)  | Tensile<br>strength<br>(MPa) | Elongation<br>(%) | Bend test |
| 323.4                 | 446.8                        | 24.0              | Good      |

Table 4 Chemical composition of core wires

| Chemical composition (wt, %)   |       |      |      |       |     |
|--------------------------------|-------|------|------|-------|-----|
| C                              | Si    | Mn   | P    | S     | Cu  |
| 0.05                           | 0.018 | 0.54 | 0.01 | 0.008 | 0.1 |
| SWRY-11, $\phi 3.2 \times 350$ |       |      |      |       |     |

Table 5 Mixing ratio of flux materials

| Classification |                                                                       | UWX1 | UWX2 |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|------|------|
| Raw materials  | CAC                                                                   | 21   | 21   |
|                | FMM                                                                   | 9    | 9    |
|                | FLP                                                                   | 15   | 15   |
|                | MIC                                                                   | 2    | 2    |
|                | STH                                                                   | 6    | 6    |
|                | RTS(RZM)                                                              | 15   | 35   |
|                | IRP                                                                   | 5    | 7    |
|                | SIC                                                                   | 5    | 5    |
|                | TAL                                                                   | 1    | 1    |
|                | DXT                                                                   | 1    | 1    |
|                | ILT                                                                   | 23   | 1    |
|                | Total                                                                 | 103  | 103  |
| Binder         | 46 Be' ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{K}_2\text{SiO}_3 = 3 : 1$ ) |      |      |

Table 6 Chemical composition of covering (wt, %)

| Classification | CR13  | CR14  | UWCS  | TN20  | UWX1  | UWX2  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ca             | 13.89 | 10.34 | 0.38  | 15.36 | 25.14 | 9.22  |
| Ti             | 22.96 | 16.40 | 16.55 | 26.22 | 23.24 | 25.15 |
| Si             | 26.85 | 25.99 | 28.82 | 25.51 | 21.45 | 25.91 |
| Mn             | 10.99 | 10.52 | 5.49  | 10.04 | 9.16  | 11.15 |
| Fe             | 3.36  | 14.38 | 22.95 | 3.92  | 5.86  | 8.74  |
| Al             | 8.77  | 8.33  | 8.82  | 7.77  | 5.84  | 7.94  |
| Na             | 4.41  | 6.15  | 6.46  | 1.14  | 4.02  | 5.02  |
| K              | 7.23  | 6.63  | 6.61  | 8.87  | 3.69  | 5.20  |
| Mg             | 1.00  | 0.91  | 3.36  | 0.27  | 1.15  | 1.28  |
| Zr             | 0.30  | 0.18  | 0.28  | 0.31  | 0.23  | 0.21  |
| Nb             | 0.14  | 0.11  | 0.12  | 0.17  | 0.14  | 0.13  |
| P              | 0.34  | 0.04  | –     | –     | 0.02  | 0.03  |
| S              | –     | 0.03  | –     | 0.02  | 0.02  | –     |
| Cr             | –     | –     | 0.11  | 0.07  | –     | 0.06  |
| Rb             | 0.02  | –     | –     | –     | –     | –     |
| Sr             | 0.02  | –     | –     | –     | –     | –     |
| Co             | –     | –     | 0.05  | –     | –     | –     |
| Mo             | –     | –     | –     | 0.32  | –     | –     |

## 2.3 실험방법

습식 수중 아크용접에서는 물 속에서 아크용접을 할 수 있는 잠수부의 용접기술이 필요하나, 본 실험에서는 자체적으로 제작한 수중 용접 실험장치를 이용하였다. 지름 3.2mm의 용접봉과 두께 11mm의 강판에 대한 습식 수중 아크용접 실험에서 비교분석을 하기 위하여 동일한 용접조건을 택하여 용접을 실시하였으며, 수차 실험에 의해 Table 7과 같이 최적의 용접조건을 선택하여 기계적인 자동용접의 형태를 취하면서 용접속도와 용접각도, 운봉비, 용접자 세 등을 기계적으로 고정하여 두고, 수심 200mm에서 용접을 실시하였다. 또한 수조내의 물을 순환시켜 수온 약20℃로 유지하도록 하였다. 용접시에 발생하는 전류 및 전압을 측정하기 위해서 아날로그 신호변환장치를 이용하여 신호를 PC로 전송되도록 하였으며, 이에 실시간 확인 및 저장을 위하여 HP-VEE를 사용하였다. 여기서, 용접 전류 및 전압은 각각 500point/sec가 되도록 설정하여 측정하였으며 Fig. 2에 그 예를 나타내었다.

용접을 한 후 그 단면을 기계톱 및 정밀 절단기로 절단하여 샌드페이퍼로 연마하여 평면을 맞추고, 연마한 시편을 용착금속에서 모재부분으로 나오면서 0.5mmr 간격으로 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 1000g으로 경도를 측정하였으며, 경도 측정이 끝난 시편을 다시 연마, 폴리싱하여 부식을 시켜서 현미경 조직을 관찰하고 조직 사진을 촬영을 하여, 용착 금속부분, 열영향부(Heat affected zone), 본드(Bond)부, 모재부까지의 용접열에 의한 경도 변화의 차이와 각 부분의 현미경조직을 비교해 보고 기계적 성질의 차이를 알아보았다.

Table 7 Typical welding conditions

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| Current (A)                         | 120   |
| Voltage (V)                         | 30~35 |
| Welding speed (mm/min)              | 250   |
| Bead length / Electrode length used | 0.8   |
| Welding angle (°)                   | 75    |
| Electrode source                    | DCSP  |
| Welding position                    | Flat  |

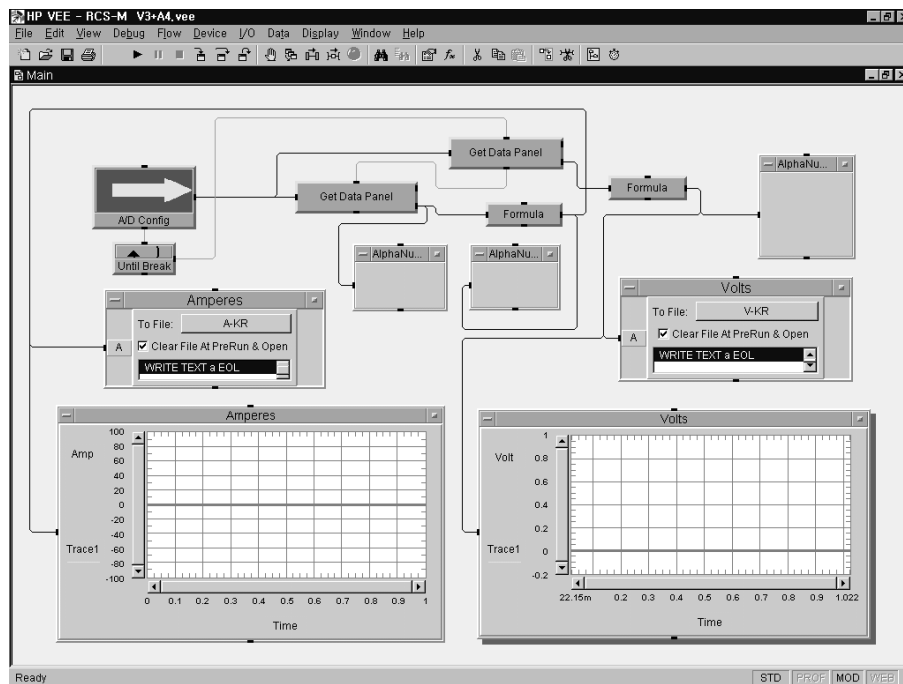


Fig. 2 An example of the HP-VEE programs



### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 아크의 안정성

습식 수중 아크 용접은 물 속에서 용접 아크가 발생하게 되므로 용접 중에 아크가 단절되거나 불안정하게 되는 경향이 나타나게 되고, 이것이 용접결합의 원인이 되기도 한다. 아크의 안정성은 용접 전류와, 용접 속도, 용접봉 재질, 모재 등의 여러 가지 변수에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 용접봉의 종류에 따라 아크의 안정성을 서로 비교하였다<sup>17~18)</sup>. 용접조건은 Table 7과 같이 실시하였으며, 자동 용접에 의해 이루어져 비교적 안정적인 용접을 행할 수 있었다.

각 용접봉은 약 60sec 동안 연속 용접 비드가 이루어졌는데, 실험 결과를 비교하기 위해서 용접 개시 후 정상적인 용접이 이루어졌다고 여겨지는 구간 25sec부터 45sec까지의 시간을 선택하였고, 전압은 0-50V 범위로 전류는 0-300A의 범위로 불러들여 비교하였다. 즉, 용접 개시 후 시편의 중앙 부분에서 20초간 이루어진 부분을 선택하여 아크의 안정성을 확인한 것이다. 전압과 전류의 신호 크기가 급격히 변화하는 위치에서 아크가 불안정하게 이루어지고 용접불량이 예상되므로, 피복재 성분의 변화와 조성비에도 연관성이 있을 것으로 생각된다.

6종류의 용접봉의 용접에서 얻어진 신호를 Fig. 3 ~ Fig. 8까지 나타내었으며, 이 중에서 TN20과 UWX1이 아크전류, 아크전압의 표준편차의 변동이 상당히 양호함을 발견 할 수 있었다. 아크 안정

성에 대한 심도 있는 분석이 요구되지만, 본 실험에서는 시험 제작한 수중 용접봉의 아크 현상을 다른 용접봉과 비교하여 피복제 조성비 개선에 따른 용접성 평가의 기초 자료로 삼고자 하였다.

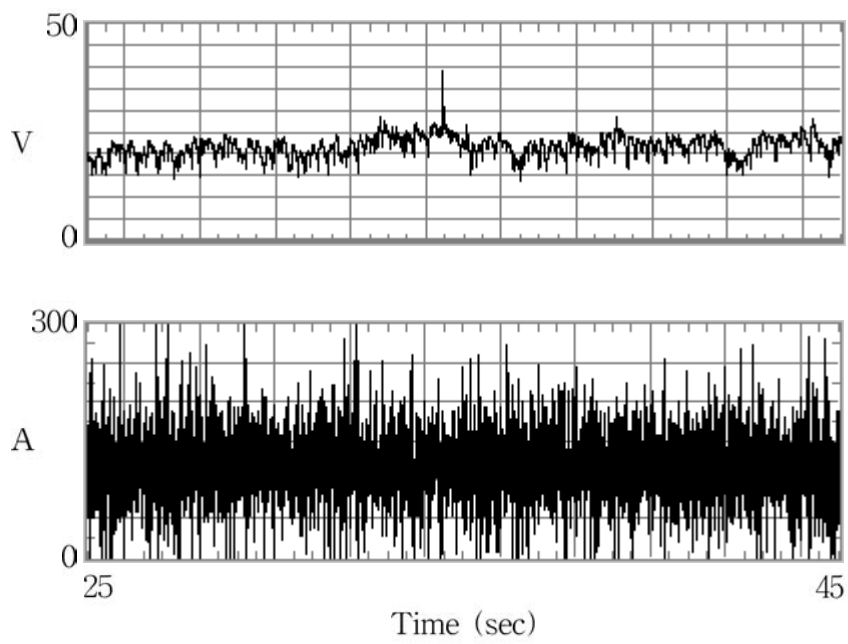


Fig. 3 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals (CR13)

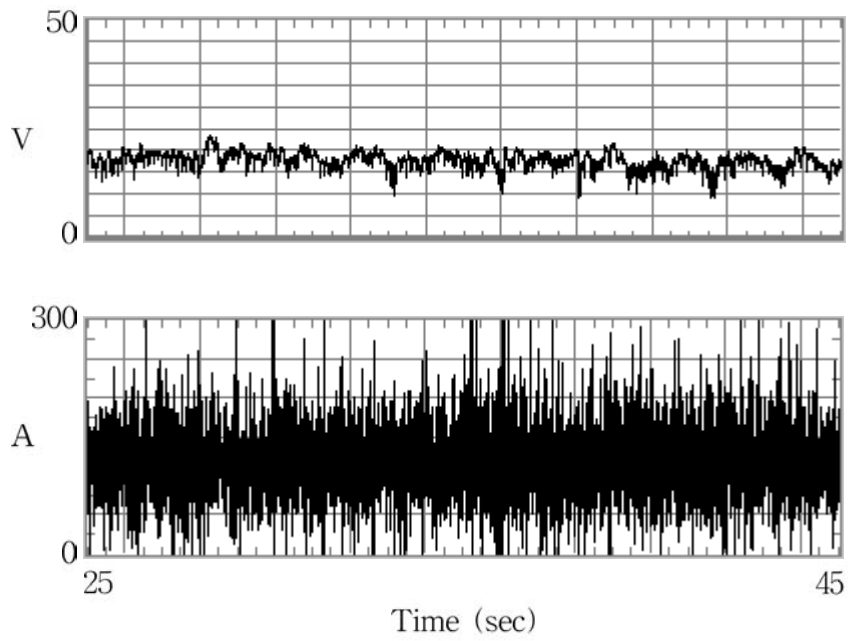


Fig. 4 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals (CR14)

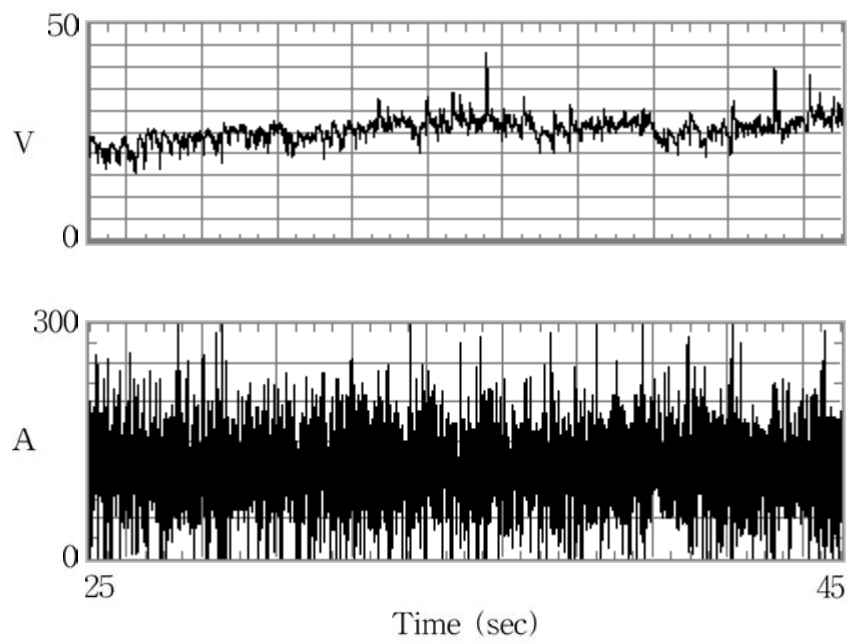


Fig. 5 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals (UWCS)

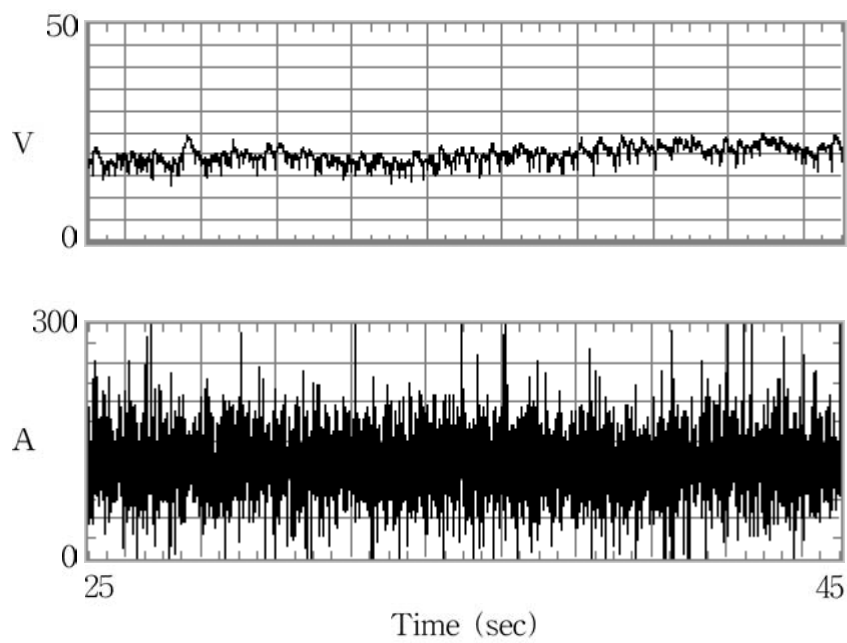


Fig. 6 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals (TN20)

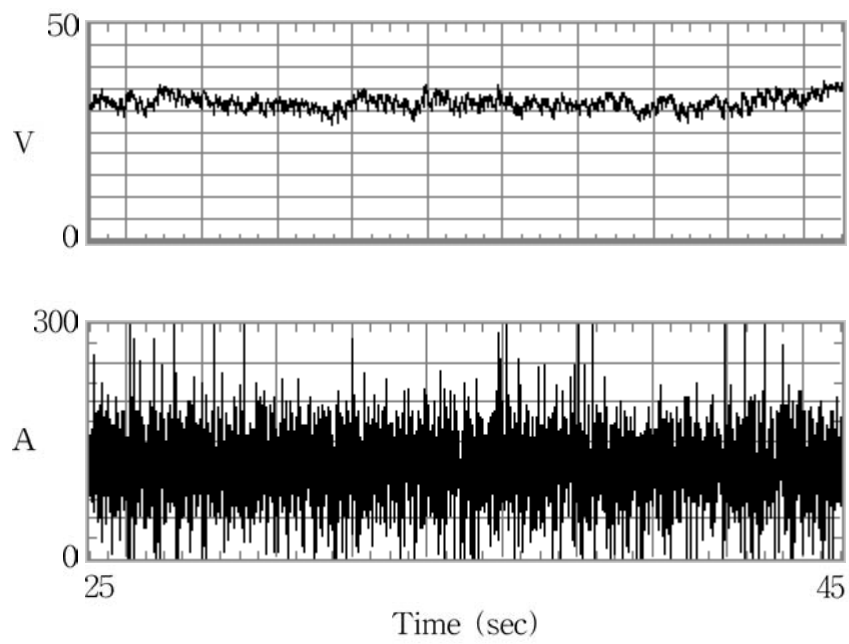


Fig. 7 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals (UWX1)

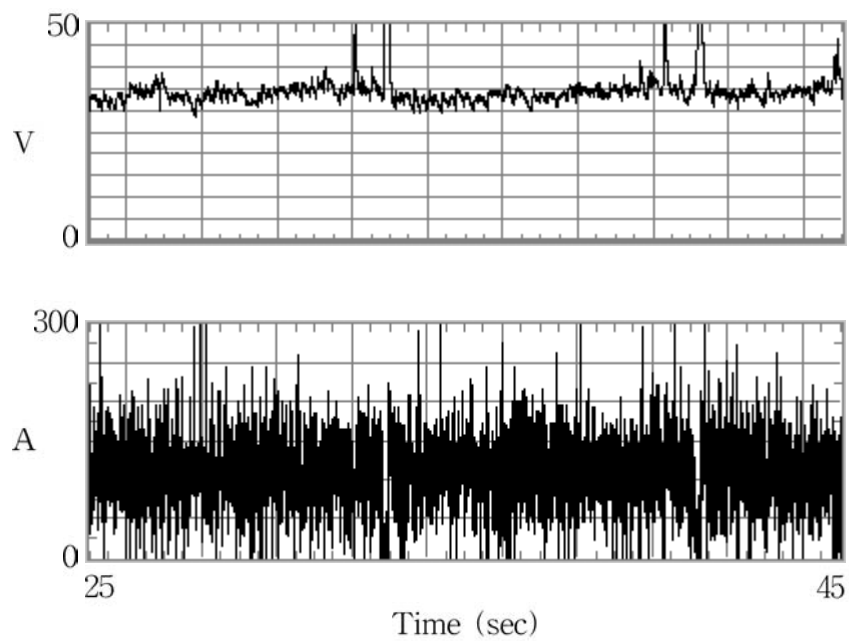


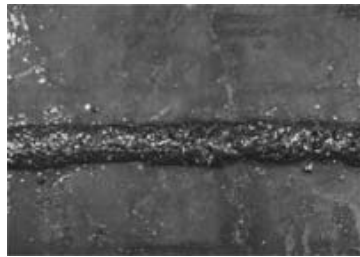
Fig. 8 HP-VEE data acquisition system of voltage and current signals (UWX2)



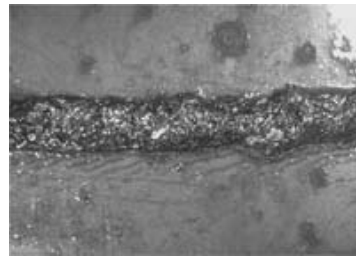
### 3.2 슬래그 박리성과 스패터 발생

습식 수중 아크용접은 물 속에서 행하는 만큼 슬래그를 제거하는 작업은 쉬운 일이 아니며, 특히 수중 용접부에 슬래그가 밀착되어 박리성이 나쁘면 실용화에 어려움이 가중 될 것이다. 본 연구에서는 전술한 6종류의 용접봉에 대하여 수중 용접부의 슬래그 박리성에 대하여 검토하여 보았다.

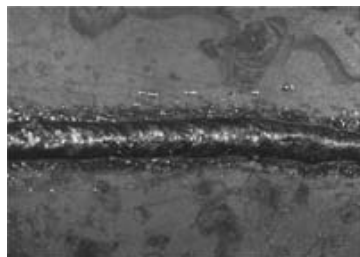
슬래그 제거는 수중에서 용접 실험을 하였지만, 관찰 및 실험을 위해서 대기 중에서 꺼내어 제거하였다. 용접시 물의 비등 현상과 주변의 물에 의하여 급속 냉각되므로 슬래그가 용착 금속 표면에 부착되는 경향과 그 모양이 허물어지는 현상이 나타났으며, 용접부 주변의 스패터는 급속 냉각에 의해 적게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었다. 특히, 수중 용접 실험에서의 스패터는 CR13, CR14, TN20 및 UWX1에서는 전반적으로 스패터를 발견 할 수 없었으며, UWX2 및 UWCS에서는 슬래그 제거가 다소 어려웠지만 큰 차이는 발견할 수 없었다. Photo. 1은 수중 용접 후 슬래그 제거전의 비드를 나타 낸 것이다.



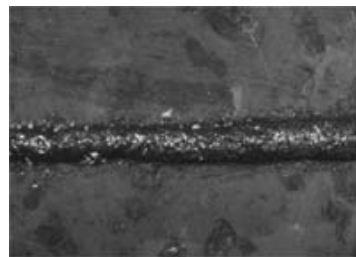
(a) CR13



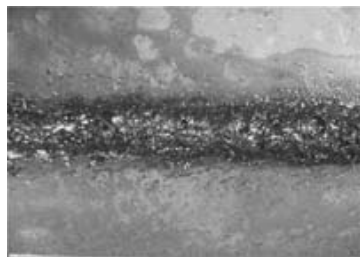
(b) CR14



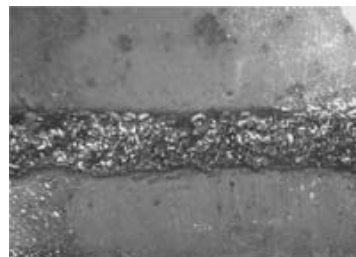
(c) UWCS



(d) TN20



(e) UWX1



(f) UWX2

Photo. 1 Appearance of slag in various welding electrode  
when underwater wet welding

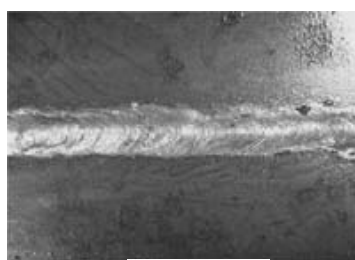
### 3.3 비드 외관

Photo. 2 및 Photo. 3은 수중 용접에 의한 용접 비드의 외관을 나타낸 것이다. 시험편 대부분 용접 비드가 양호하게 나타났다. 특히 시험 개발된 용접봉 UWX1과 UWX2가 비드의 퍼짐성이 크게 나타났으며, Photo. 3에 보는 바와 같이 비드 단면의 형상이 타원형으로 퍼져 있음을 알 수 있었다. UWCS와 TN20은 비드의 퍼짐성은 보통이나 비드 형상면에서는 상당히 양호한 편이었다. 본 실험의 범위 내에서 시판되는 일반 용접봉들과 비교했을 때 수중 용접봉으로 개발한 용접봉이 비드 외관과 비드 거칠기면에서 개선의 효과가 있었으며, 외국산 수중 용접봉과 비교했을 때도 큰 차이를 느낄 수는 없었다.

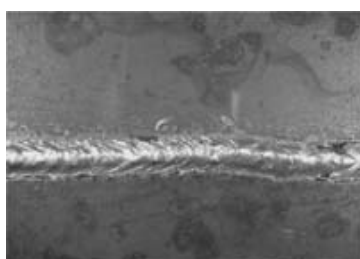
동일한 용접 조건에서 동일 규격의 용접봉 심선을 사용할 때 피복제 성분의 조성비 변화에 의해 충분히 개선할 수 있음을 알 수 있었다.



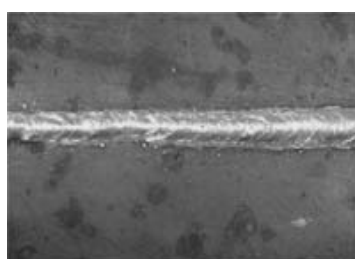
(a) CR13



(b) CR14



(c) UWCS



(d) TN20

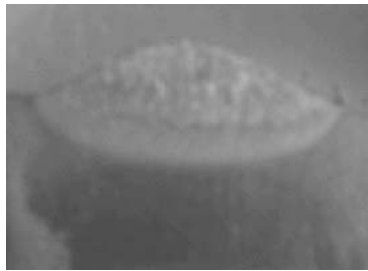


(e) UWX1

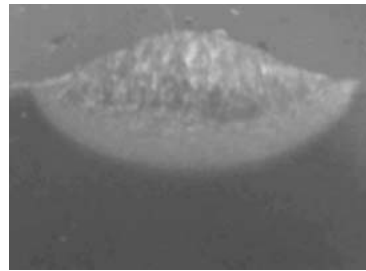


(f) UWX2

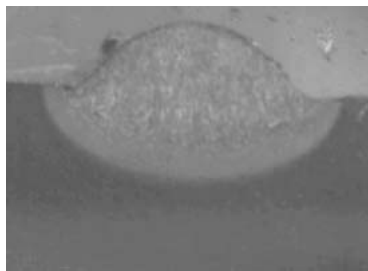
Photo. 2 General appearance of weld alloy surface



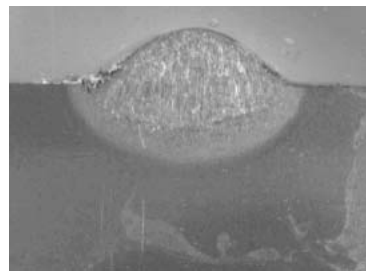
(a) CR13



(b) CR14



(c) UWCS



(d) TN20



(e) UWX1



(f) UWX2

Photo.3 General appearance of alloy cross sections

### 3.4 경도 시험

Fig. 9는 용접한 시편의 단면에 대한 경도 시험 결과를 나타내었다. Photo. 3과 같은 비드 단면에 대한 HAZ부(Heat affected zone)의 경도 특성을 검토하기 위하여 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 조사하였다. 이때 하중은 1,000g으로 일정하게 하여 비드 단면에 대하여 표면에서 수직방향으로 0.5mm 간격으로 측정하였다. 각종 용접봉에 따라 수중 비드 용접한 시편의 경도 분포를 고찰해 보면, 본드부(bond line)에서 약 1.5mm정도가 열영향부로 되고, 일반 용접과는 다르게 물에 의한 급냉의 영향으로 마이크로 비커스 경도치가 높게 됨을 알 수 있었다.

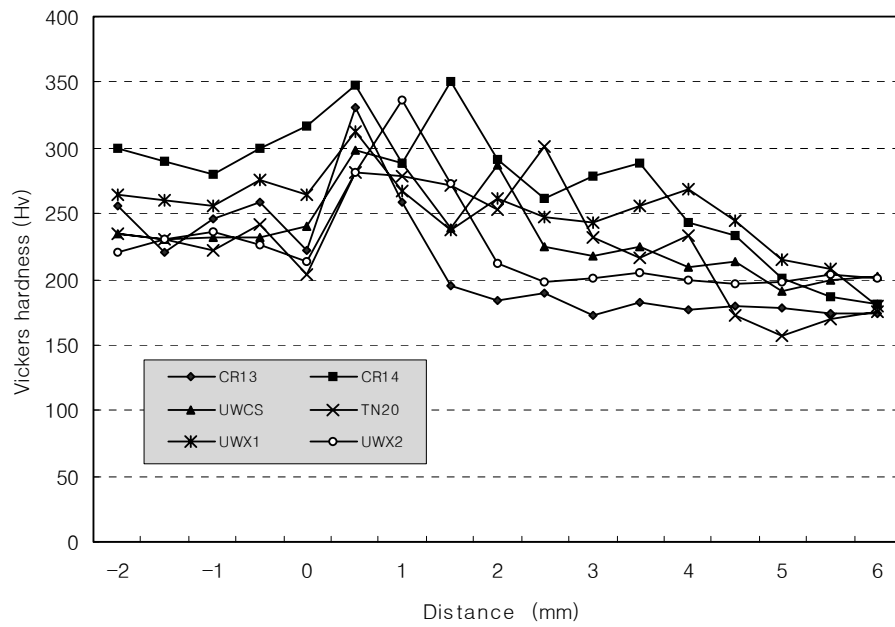


Fig. 9 Hardness distribution of underwater wet welds

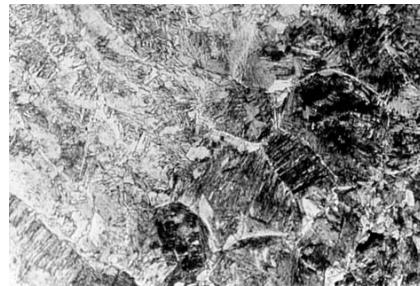
### 3.5 금속 조직

Photo. 4는 용접부 단면의 현미경 조직으로 BM(Base metal)부위는 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite) 조직을 나타내고 있으며, 펄라이트 밴드는 용접 후 열처리 온도가 증가할수록 확산으로 인해 조금씩 소멸되고 있는 것으로 사료된다. HAZ부는 BM부나 모재부에 비해 결정립이 다소 커져 있음을 알 수 있으며, 베이나이트(Bainite) 조직과 마텐사이트(Martensite) 조직이 혼재되어 있었다. 즉, 빠른 냉각 속도로 인하여 열영향부는 조대한 침상의 마텐사이트 조직이 보이며, 일부 베이나이트 조직도 혼재되어 있는 것으로 사료된다. 표면에서의 용접 금속 조직은 마텐사이트 조직이 발달되어 있고, 공기 중 용접에서와 같은 베이나이트 조직은 미세하게 나타났다. 여기서, UWCS, TN20, UWX1에서 대체적으로 다른 조직에 비해 마텐사이트 조직이 안정화 되어가는 것으로 사료된다.

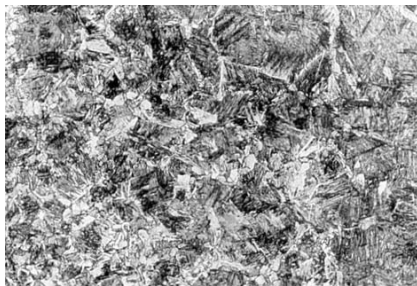




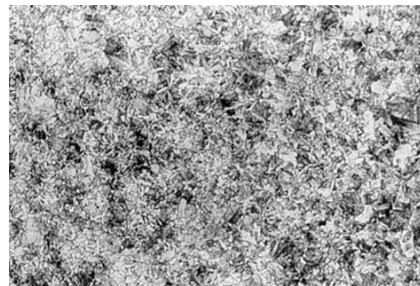
(a) WM



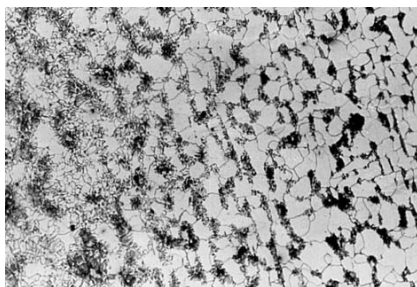
(b) WM/HAZ



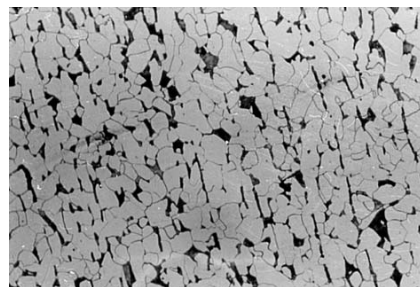
(c) HAZ 1



(d) HAZ 2



(e) HAZ/BM



(f) BM

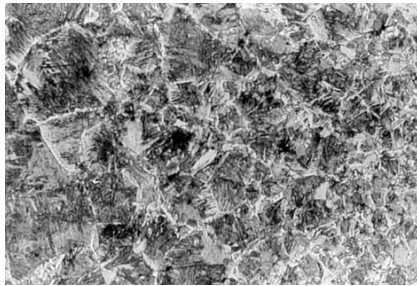
Photo. 4 Microstructures of weld (CR13)



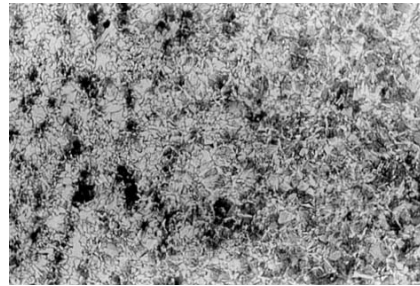
(a) WM



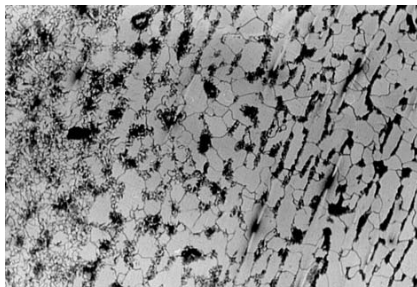
(b) WM/HAZ



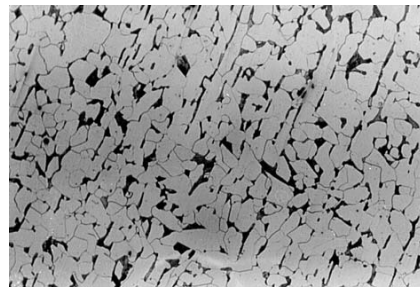
(c) HAZ 1



(d) HAZ 2



(e) HAZ/BM



(f) BM

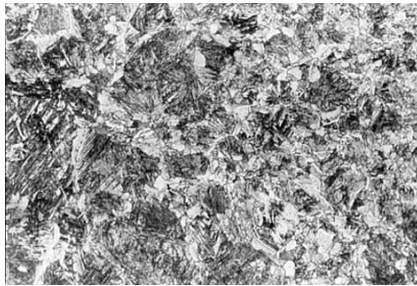
Photo. 5 Microstructures of weld (CR14)



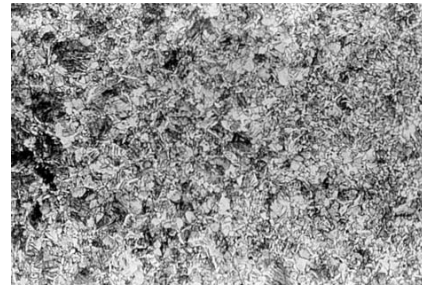
(a) WM



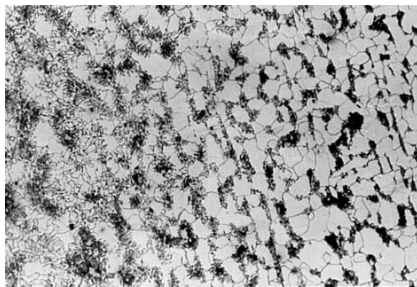
(b) WM/HAZ



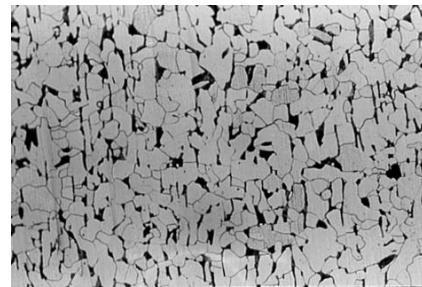
(c) HAZ 1



(d) HAZ 2



(e) HAZ/BM



(f) BM

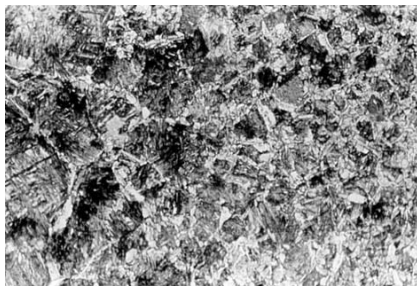
Photo. 6 Microstructures of weld (UWCS)



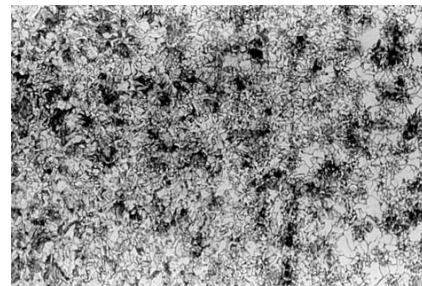
(a) WM



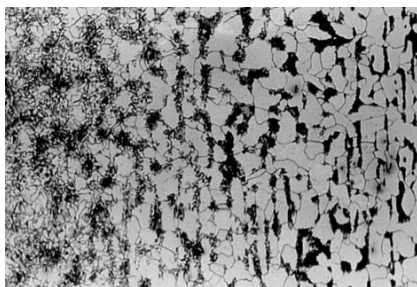
(b) WM/HAZ



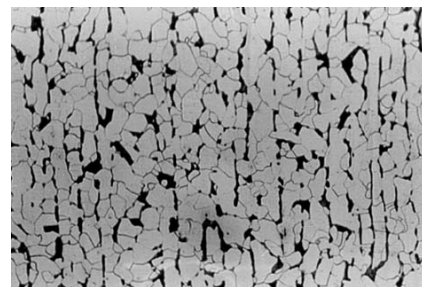
(c) HAZ 1



(d) HAZ 2



(e) HAZ/BM



(f) BM

Photo. 7 Microstructures of weld (TN20)



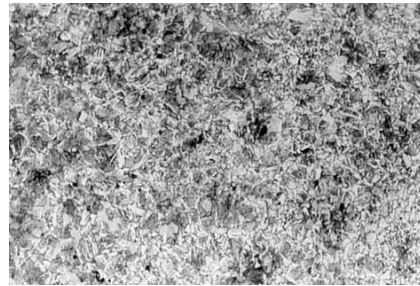
(a) WM



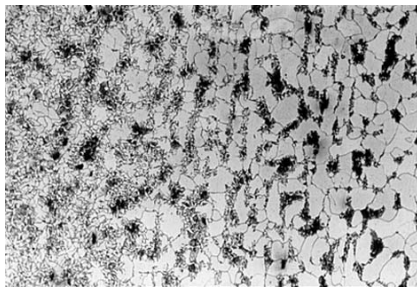
(b) WM/HAZ



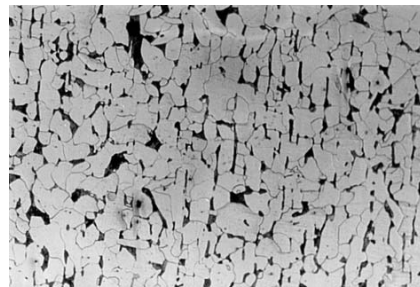
(c) HAZ 1



(d) HAZ 2



(e) HAZ/BM



(f) BM

Photo. 8 Microstructures of weld (UWX1)



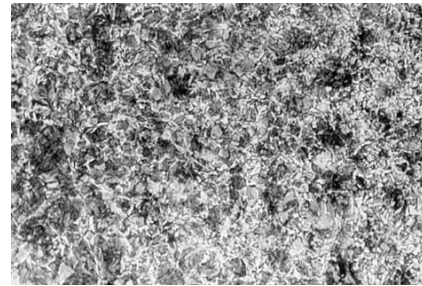
(a) WM



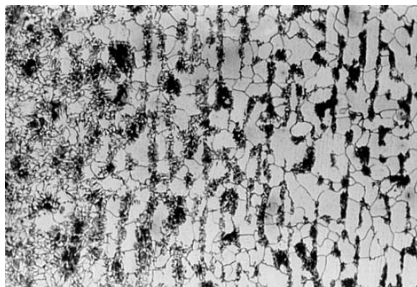
(b) WM/HAZ



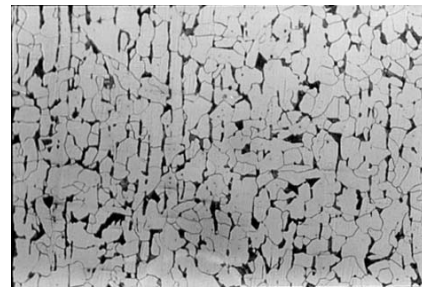
(c) HAZ 1



(d) HAZ 2



(e) HAZ/BM



(f) BM

Photo. 9 Microstructures of weld (UWX2)

#### 4. 결론

용접봉은 일반적으로 용접봉 제작사에서 사용 중인 시료들을 배합하여 수차례의 실험에 의해 기존에 자체 연구되었던 용접봉에 방해석을 추가로 첨가한 UWX1과 금홍석의 비율을 조정하고 일미나이트를 제외시켜 제작한 용접봉 UWX2, J사의 일반 용접봉 CR13과 CR14, 미국산 UWCS와 독일산 TN20의 용접봉을 동일한 규격과 같은 조건 하에서 선체용 압연 강판(KR-RA)에 대한 습식 수중 아크 실험을 실시한 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 피복제의 조성비율을 개선하여 습식 수중 아크 용접봉으로 시험 개발된 UWX1은 습식 수중 아크 용접봉으로 실용화 할 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 아크의 안정성 면에서도 TN20과 UWX1이 비교적 안정적이었으며, CR14에서는 다소 불안정하였다.

(3) 슬래그 박리성과 스파터 발생 및 비드 외관 등은 모든 용접봉에서 거의 비슷한 경향이 나타났다.

(4) 실험에 이용된 용접봉들의 HAZ부 경도는 급격히 상승하였으며, HAZ부 금속 조직도 급격한 온도 변화에 의해 마텐사이트 조직이 증가함을 알 수 있었다. 그 중에서 UWCS와 TN20이 상대적으로 마텐사이트 조직이 안정화 되어 있었고, UWX1도 양호한 편이었다.



## REFERENCES

- [1] 박종우, “熔接工學”, 일진사, pp 30~98, 2000
- [2] Chung, J. S, “Technologies for petroleum and mineral”, J. of OET, 1 (1), pp 10 ~20, 1987
- [3] I.M. Richardson, “Arc welding underwater”, Welding Design and Fabrication, Mar, pp 48- 55, 1991
- [4] D. L .Olson and S. Ibarra, “Underwater welding metallurgy”, International Workshop on Quality in Underwater Welding of Marine Structures, Nov, pp 1~9, 1995
- [5] Duke Ogden, “School brings wet welder training on-site”, Welding Journal, June, pp 54~56, 1996
- [6] 김태영, “被覆아크熔接棒의 選擇法과 使用法”, 기전연구사, pp 21-37, 1995
- [7] 김태영, “熔接概說”, 기전연구사, pp 15~37, 1995
- [8] 여무연, 차주홍, “수중용접절단” 풍등출판사, 1992
- [9] Richard N. Fultion, “Progress in underwater welding” J. of Ocean Industry, pp 40~44, 1998
- [10] R. J. Dexter, E. B. Norris, W. R. Schick, P. D. Watson, “Performance of underwater weldments”, Ship Structure Committee SSC-335, pp 1~241, 1998
- [11] 運井淳, 菅泰雄, 關水信之, “水中におけるキプ マーミアーク熔接 (第1報)”, 日本 溶接學會誌 48(9 ), pp 689~695, 1972



- [12] 松田一夫 外 2名, “水中溶接による軟鋼溶接継手の割れ感受性に關する研究 (第2報)”, 日本溶接學會誌, 50(9), pp 881~887, 1981
- [13] 屋良秀夫, 眞喜志康二, 菊田米男, 松田福久, “濕式水中アーク溶接に關する 研 究 (第3報)”, 日本溶接學會誌, 2(2), pp 392~397, 1985
- [14] 大韓熔接學會, “熔接 用語 대사전”, 원창出版社, pp. 27~514, 1992
- [15] 오세규, 강문호, 김민남, “船用鋼板 水中 熔接部の 인장 구속 균열 特性에 關한 研究”, 大韓船用機械學會紙, 11(3), pp. 211~218, 1987
- [16] 한국산업잠수협회, “해양개발과 산업잠수-산업잠수이용기술-수중용접”, <http://www.kcdta.or.kr/main/development/use-skill.htm#수중용접>
- [17] 강성구, 문형순, 나석주, “스패터 양을 이용한 아크 안정성 판별에 관한 연구”, 大韓熔接學會誌, 제15권 제6호, pp.41~48, 1997
- [18] 조상명, “교류 피복 아크 용접에 있어서 아크 안정성의 정량적 평가에 관한 연구”, 大韓熔接學會誌, 제16권 제4호, pp125~135, 1998