

<論 文>

## 國產構造用 鋼板의 水中熔接性及 熔接強度特性

吳 世 奎\* · 南 起 祐\*

(1983年 2月 3日 接受)

### Weldability and Weld Strength of Underwater Welds of Domestic Structural Steel Plates

Sae Kyoo Oh and Ki Woo Nam

#### Abstract

Underwater welding by a gravity arc welding process was investigated by using six types of coated electrodes and SM41A steel plates of 10 mm thickness as base metal and it was ascertained that this process may be put to practical use.

Main results obtained are summarized as follows:

1. Angle of electrode affects no influence on bead appearance and the proper range of welding current and diameter of electrode for the high titanium oxide type is relatively wider than that for the ilmenite type. And the lime titania type, high titanium oxide type and ilmenite type of domestic coated arc welding electrodes of  $\phi 4$  mm could attain the soundest underwater welded joints which contain no welding imperfection.
2. According to macro-structure, micro-structure and hardness distribution inspections on underwater welded joint, the area between the HAZ and the surface of the weld in neighbourhood of the bond has the maximum hardness value. The structure of these parts is martensite and bainite. Other parts contain micro-ferrite, micro-pearlite structure, which contain soundness of welded joint free from weld imperfection.
3. On consideration of both tensile strength of more than 100 % joint efficiency and sufficient impact value, the welding condition which can get optimal welding strength is heat input of 1,400~1,500 J/mm, current of 200~215 ampere (voltage of 32~33 volts) in the case of lime titania type electrode.
4. Underwater welding strength (tensile strength, impact strength) depends on heat input (or current) quantitatively and they have the relationship of parabolic function. Each experimental equation has a high reliability and its percent of mean error is 4.14 %.
5. It is suggested that the optimal design of weld strength by welding condition (current, heat input) could be utilized for a quality control of underwater welding.

\* 正會員, 釜山水產大學 船用機械工學科

## 1. 序論

最近各方面에서 海洋開發에 關心이 높아짐에 따라 海洋構造物의 가공 및 補修 手段으로서 水中熔接技術의 開發, 研究가 先進國에서는 重要政策의 하나로 行하여져 상당한 成果를 얻고 있다<sup>1,2)</sup>. 그런데, 水中熔接에 대한 研究는 1802年 美國의 Humphry Davy가 燃氣으로 水中에서 아아크를 일으키는 데 成功한 후, M. S. Hibshman(1933) 및 C.D. Jensen(1934), W. Hummitzach(1947), R.C. Waugh(1954), C. Kändel(1946), N.M. Madatove(1965), K. Satoh(1970), K. Masubuchi(1972), I. Masumoto(1971), A. Hasui(1974~1981) 등에 이르기까지 近來 美國, 獨逸, 英國, 日本 등에서는 그 研究活動이 活發하여 많은 海洋構造物이 設置되고 있고, 深海域 石油生產 시스템도 檢討되고 있으며<sup>3)</sup>, 또 多樣化한 海洋開發計劃이 進行되고 있으나, 國內에서는 이 方面의 研究發表를 찾아 볼 수 없다. 특히 水中熔接에 있어서 熔接強度와 熔接條件과의 關係가 定量解析된 研究는 國內外의 으로 거의 없다.

따라서 本 研究에서는 市販되는 國內產 各種 被覆 아아크 熔接棒을 使用하여서 여러가지 熔接條件下에서 國內產 SM41A 鋼板에 대해 水中熔接實驗을 逐行하여, 水中熔接性을 調査하였고, 또한 熔接變數인 電流, 電壓, 入熱量과 熔接強度와의 相關關係를 定量解析하였고, 그리하여 水中熔接의 最適化 設計에 接近함을 最終 目的으로 삼았다.

## 2. 實驗材料 및 實驗方法

### 2.1. 試驗片 및 熔接棒

本 實驗에 使用된 試驗板材는 國產熔接構造用鋼板 두께 10 mm의 SM41A이며, 機械的 性質과 化學成分은 Table 1과 같다.

水中熔接性 調査의 試片은 母材를 100×50 mm로 剪斷하여 使用했으며, 熔接試片의 그루우브(groove)와 비이드(bead) 積層順序는 Fig. 1과 같으며, 熔着金屬部에 노치(notch)를 加工한 衝擊試驗片은 Fig. 2와 같고, 熔接이음부의 強度를 알기 위한 引張試驗片은 Fig. 3에 表示되어 있다.

熔接部의 硬度分布와 微視組織検査를 위한 試驗片은 熔接方向의 橫斷面에 觀察되도록 하였으며, 매크로(macro) 및 微視組織検査를 위한 腐蝕液은 硝酸 5cc+알코올 100 cc이며, 매크로 檢查用 試片과 微視組織檢

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of base metal (SM41A)

Mechanical properties	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Charpy impact value (kgm/cm <sup>2</sup> )	
	19.57	30.5	33	17.6	
Chemical compositions (Wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.17	0.04	0.83	0.016	0.02

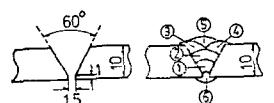


Fig. 1 Shape of groove and welding sequence (mm)

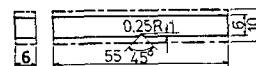


Fig. 2 Impact test specimen (mm)

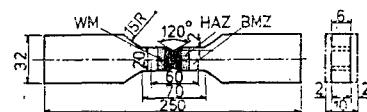


Fig. 3 Tension test specimen (mm)

查用 試片을 위한 腐蝕時間은 각각 90秒, 50秒로 하였다.

使用된 國產被覆 아아크 熔接棒은 市販中인 6種, 即, 일미나이트(ilmenite)系(KSE4301), 라임티타니아(lime titania)系(KSE4303), 高셀룰로우스(high cellulose)系(KSE4311), 高酸化티탄(high titanium oxide)系(KSE4313) 및 低水素系(KSE4316)는  $\phi 4$  mm이며, 鐵粉酸化鐵系(KSE4327)는  $\phi 5$  mm를 使用하였다. 특히 일미나이트系, 高酸化티탄系에 관해서는  $\phi 3.2$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm의 熔接棒에 대해서도 檢討를 하였다.

이 때, 使用한 熔接棒에는 防水剤를 바르지 않았다.

### 2.2. 實驗裝置 및 實驗方法

水中熔接에 使用된 裝置는 運棒比, 熔接棒의 角度 및 棒徑을 任意로 變化시킬 수 있는 自作의 重力式 熔接裝置로서 그 개략도는 Fig. 4와 같다.

이 裝置에 使用된 熔接機는 容量 250 A의 國產 AC熔接機를 采用하고 오우드(diode) 整流器로 全波整流하여 DC電流로 轉換시켰으며, 熔接은 直流正極性에서 逐行되

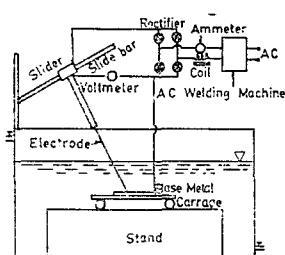


Fig. 4 Schematic block diagram of experimental underwater welding apparatus (gravity type)

었고, 用水는 上水道水와 海水의 경우 差異가 없다는 文獻<sup>4)</sup>에 따라 室溫의 上水道水量 利用하였고, 水面에서 熔接位置까지의 깊이는, 水深 5m(水壓 0.5 kg/cm<sup>2</sup>相當)까지의 水中熔接에 있어서 影響이 거의 없다는 文獻<sup>5)</sup>에 따라 20 cm로 하였다. 이 때 水槽의 크기는 600

$\times 600 \times 1,000$  mm로 하였다.

熔接條件의 檢討를 위하여 電流 90~210 A, 熔接速度 28 cm/min(運棒比=비이드 길이/使用棒 길이=1)로 설정하였고, 熔接棒直徑은  $\phi 3.2$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm이고 棒角度는  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ 로 하였다. 그리고 各種 熔接棒에 대한 適正電流에서 비이드 外觀과 X線検査를 하여, 가장 良好한 熔接結果를 얻을 수 있는 熔接棒種類와 棒角度, 棒直徑 및 運棒比를 Table 2와 같이 選定하여 水中熔接實驗을 逐行하여, Fig. 2, Fig. 3과 같은 形狀의 試驗片으로 引張試驗, 衝擊試驗을 逐行하였고, 最適電流의 熔接條件下에서 水中熔接된 熔接材에 관하여 微視組織을 觀察하였다.

硬度測定은 最適電流 熔接條件下에서 熔接材 熔接層의 上下에서 1 mm 떨어진 位置에서 0.5 mm 간격으로 測定하고, 또 熔接部의 中心線을 따라 0.5 mm 간격으로 測定하였다.

Table 2 Range of underwater welding conditions in case of lime titania type electrode

Electrode	Root gap (mm)	No. of pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Electrode angle ( $^\circ$ )	Bead length/ Electrode length	Welding speed (cm/min)
E4303 ( $\phi 4$ mm)	1.5	6	140	24			
			160	28			
			180	30	60	1	28
			200	32			
			220	33			

### 3. 結果 및 考察

#### 3. 1. 水中熔接條件의 檢討

Fig. 5는  $\phi 4$  mm의 일미나이트系 熔接棒을 使用해서 電流 160 A, 熔接棒角度를  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ 로 變化시킨 경우 어느 熔接棒의 angle에 있어서도 비이드의 外觀 및 熔入이 良好한 結果를 얻었다.

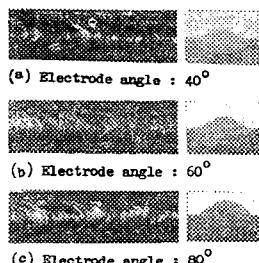


Fig. 5 Effect of electrode angle on bead appearance of underwater welds of SM41A as ilmenite type electrode ( $\phi 4$  mm) is used.

Fig. 6은  $\phi 4$  mm의 일미나이트系 熔接棒의 angle를  $60^\circ$ 로 하고 電流 90 A, 160 A, 210 A로 變化시킨 경우로서, (a)는 90 A의 경우로 電流가 적어서 熔入不足이 생겼고, (c)는 210 A의 경우로 비이드 外觀이 균일하지 못하고 언더컷(undercut)이 생겼다. 이는 電流가 過度하였기 때문이라고 생각된다. 한편 (b)는 160 A의 경우로서 熔接欠陷이 보이지 않고 비이드 外觀이 아름다우며 良好한 熔接이 얻어졌으므로, 電流 160 A内外

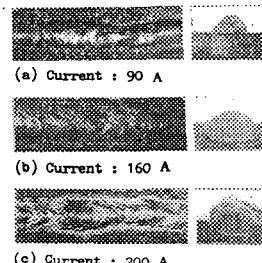


Fig. 6 Effect of welding current on bead appearance of underwater welds of SM41A as ilmenite type electrode ( $\phi 4$  mm) is used

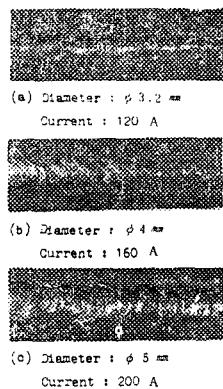


Fig. 7 Effect of diameter of electrode on bead appearance of underwater welds of SM41A as ilmenite type electrode is used

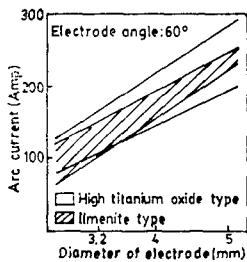


Fig. 8 Effects of arc current and diameter of electrode on appearance of welds of SM41A

가適正範圍라고 생각된다.

Fig. 7은  $\phi 3.2$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm 일미나이트系熔接棒의角度를  $60^\circ$ 로 하여 熔接電流 120 A, 160 A, 200A로 한 경우로 어느 熔接棒에서도 適正電流에서는 비이드外觀이良好하게 나타났다.

Fig. 8은 일미나이트系熔接棒外에 高酸化 티탄系에 대하여以上과 같은 實驗을 하여良好한 비이드熔接이 얻어지는 棒徑과 電流의範圍를 나타낸 것이다. 일미나이트系의 경우는 直徑의 증가에 따라서 適正熔接電流範圍가 좁게 나타나고, 高酸化 티탄系의 경우는比較的 넓다는 것이 確認될 수 있다.

### 3.2. 水中熔接部의 外觀과 X線透過検査

Fig. 9는水中熔接實驗을逐行하여良好한熔接으로 추정되는各熔接條件에서直徑 4 mm의 일미나이트系, 라임티타니아系, 高셀률로우스系, 高酸化 티탄系, 低水素系 및直徑 5 mm의 鐵粉酸化鐵系를使用하여비이드 만들기熔接한 경우를 나타낸다. 低水素系 및 高셀

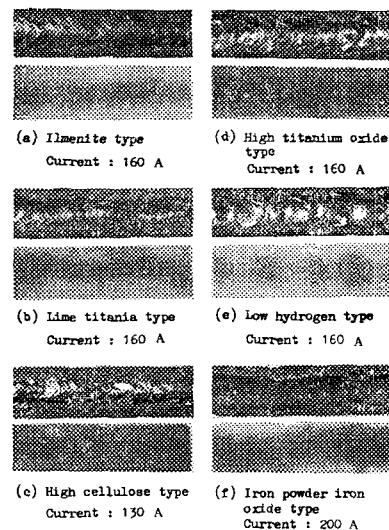


Fig. 9 Bead appearance and X-ray inspection result of underwater welds of SM41A according to each electrode of  $\phi 4$  mm for (a)~(e) and  $\phi 5$  mm for (f)

률로우스系에 의한 비이드가不良하게 나타난 것 외에는 어느系의熔接棒에 의해서도 블로우홀(blow-hole), 언더컷(undercut) 등의熔接欠陷이 없는良好한熔接이 얻어졌다.

특히 라임티타니아系, 高酸化 티탄系 및 일미나이트系에 의한熔接부는 스패터(spatter)가 거의 없는극히良好한外觀을 나타내고 있으며, 이는前者 2개種類의熔接棒의 경우, Hasui 등의 보고<sup>4)</sup>와 매우 잘 일치한다.

### 3.3. 水中熔接强度의 最適化

Table 2와 같은熔接條件下에서水中熔接한 후,熔接部에관하여引張試驗과衝擊試驗을遂行하여,電流와電壓의相關關係,電流 및入熱量이熔接强度(引張强度,衝擊强度)에 미치는影響 등을實驗的으로解析한結果는各各Fig. 10, Fig. 11과 같다.

Fig. 10에서,電流의增加에따라서電壓은增加하며,熔接부의引張强度는增加하다가 180~220 A에서熔接이음efficiency이100%以上이되고,그후다시減少하는경향이있고,衝擊值은減少하다가 180~200 A에서最低가되며(이때스트레인이最大),그후다시增加하고,耐力(proof stress)은언제나母材의것보다熔接材의것이더높은경향이있음을알수있다.

Fig. 11에서,入熱量이1,100~1,500 J/mm일때熔接부의引張强度가母材보다높으며(이때이음efficiency

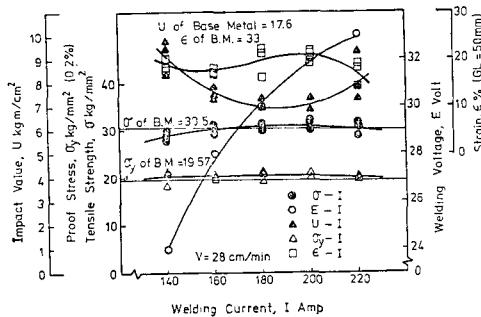


Fig. 10 Effects of welding current and voltage on tensile strength and Charpy impact strength of underwater welds of SM41A  
(Welding conditions: as in Table 2)

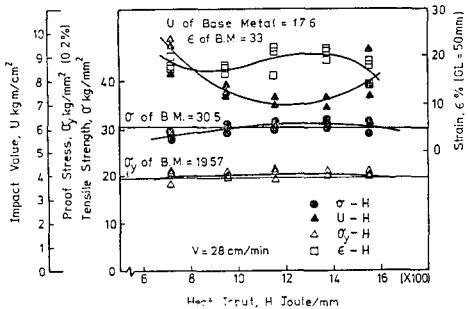


Fig. 11 Effects of heat input on tensile strength and Charpy impact strength of underwater welds of SM41A  
(Welding conditions: as in Table 2)

이 100% 이상이고 耐力도 母材보다 높음), 反面에 衝擊值는 減少됨을 알 수 있다(이 때 스트레인의 퍼이크가 있음).

따라서, Fig. 10과 Fig. 11에서 熔接強度(引張强度)가 母材보다 높으며(이 음効率 100% 以上), 衝擊值가最少值를 벗어난 熔接條件은, 耐力과 스트레인을 고려해서 入熱量 1,400~1,500 J/mm, 즉, 電流 200~215 A (Fig. 10의 E-I 曲線에서 電壓 32~33 V)임을 알 수 있다.

이 때 入熱量(H, Joule/mm)은, 電流(I, Amp), 電壓(E, Volt) 및 熔接速度(運棒比  $V=20 \times 10/60$  mm/sec)로부터 다음 式<sup>6)</sup>에 의해서 구할 수 있었다.

$$H = EI/V \quad (1)$$

電壓(E, Volt), 引張強度( $\sigma$ , kg/mm<sup>2</sup>), 衝擊值(U, kg/m/cm<sup>2</sup>), 耐力( $\sigma_0$ , kg/mm<sup>2</sup>) 및 스트레인( $\epsilon$ , %)과 電流(I, Amp) 혹은 入熱量(H, Joule/mm)과의 相關

關係를 定量的으로 解析하기 위하여, Fig. 10과 Fig. 11의 各 實驗值로부터 最少自乘法(least squares method)을 利用한 回歸解析法(regression analysis)<sup>7)</sup>에 의하여 算出한 結果는 各各 다음과 같다.

$$E = -1.071 \times 10^{-3} I^2 + 4.9571 \times 10^{-1} I - 24.257 \quad (2)$$

( $140 \leq I \leq 220$ , Mean % Error = 0.5 %)

$$\sigma = -8.4762 \times 10^{-4} I^2 + 3.2598 \times 10^{-1} I - 0.35074 \quad (3)$$

( $140 \leq I \leq 220$ , M % E = 2.2 %)

$$U = 1.0238 \times 10^{-3} I^2 - 3.8220 \times 10^{-1} I + 4.2570 \quad (4)$$

$\times 10 + 0.6861$

( $140 \leq I \leq 220$ , M % E = 5.5 %)

$$\sigma_0 = -1.5357 \times 10^{-4} I^2 + 5.6186 \times 10^{-2} I + 15.060 \quad (5)$$

( $140 \leq I \leq 220$ , M % E = 3.15 %)

$$\epsilon = -8.5100 \times 10^{-5} I^3 + 4.4883 \times 10^{-2} I^2 - 7.7687 I$$

+ 459.88

( $140 \leq I \leq 220$ , M % E = 7.66 %)

$$\sigma = -7.4412 \times 10^{-6} H^2 + 1.9015 \times 10^{-2} H$$

+ 18.800

( $720 \leq H \leq 1555$ , M % E = 2.2 %)

$$U = 9.0538 \times 10^{-6} H^2 - 2.2015 \times 10^{-2} H + 20.324 \quad (8)$$

( $720 \leq H \leq 1555$ , M % E = 5.3 %)

$$\sigma_0 = -1.3328 \times 10^{-6} H^2 + 3.1314 \times 10^{-3} H$$

+ 18.352

( $720 \leq H \leq 1555$ , M % E = 3.16 %)

$$\epsilon = -8.0376 \times 10^{-8} H^3 + 2.6536 \times 10^{-4} H^2$$

- 2.7950  $\times 10^{-1} H + 112.16$

( $720 \leq H \leq 1555$ , M % E = 7.63 %)

위 實驗式의 信賴性을 檢查하기 위하여 誤差解析法(error analysis)에 의한 結果는 實驗值와 實驗式 期待值와의 全體 平均 誤差의 總平均은 4.14 %로서, 實驗式의 信賴度가 非常 높다고 할 수 있으며, 水中熔接強度(引張强度, 衝擊强度)도 摩擦壓接強度<sup>8,9)</sup>와 유사하게 熔接條件(熔接電流 혹은 入熱量)에 대해 2次函數的關係가 있음이 實驗的으로 確認되었다.

### 3.4. 水中熔接部의 매크로 및 마이크로 組織 檢查

Fig. 12는 라임티타니아系를 使用한 경우(Table 2)의 6 패스 熔接部의 代表의 매크로 組織을 나타내고 있다. 이 때, 언더컷은 確認될 수 없었으며, 充分한 熔入이 되어있음을 알 수 있다. 또한, 初層部에서 5層部까지 5 패스와 백 패스(back-pass)인 6 패스의 계속된 熔接에 의하여 熔接部가 再加熱되어, 熔接部의 組織의in 變化를 發生하고 있는 狀態가 觀察될 수 있다.

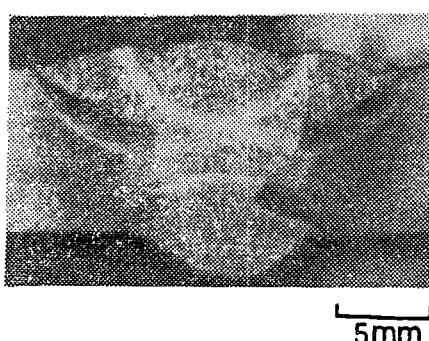


Fig. 12 Macro-structure of underwater welds of SM41A as lime titania type electrode is used

Fig. 13 은 역시 라임티타니아系를 사용한 경우(Table 2)의 6 패스 熔接部에 關한 마이크로(micro) 組織을 나타내고 있다.

Fig. 13 A부는 페라이트(ferrite)와 퍼얼라이트(pearlite)가 分布된 일 반적인 母材組織을 나타내고, 본드(bond)로부터 0.5 mm 멀어진 热影響部 B부는 마르텐사이트(martensite), 베이나이트(bainite), 퍼얼라이-

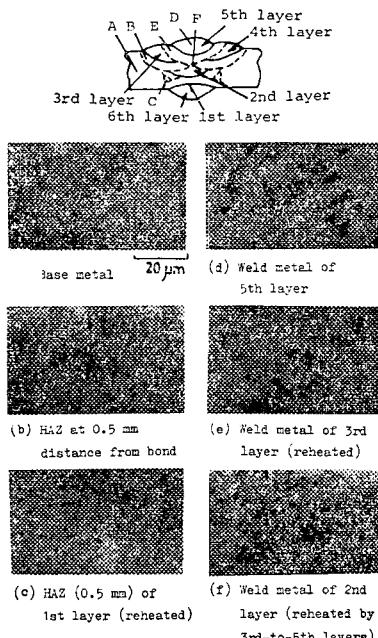


Fig. 13 Micro-structure of base metal and underwater welds of SM41A as lime titania type electrode is used

Welding current: 200 A

Other welding conditions: as in Table 2

트(pearlite) 및 少量의 粒界 페라이트에서 생긴 粗大組織으로 되어 있다. C부는 初層 때의 热影響部가 2, 6 패스의 熔接에 의해 再加熱 되었고, 粗大 페라이트 粒界에 마르텐사이트, 베이나이트, 퍼얼라이트 및 페라이트 組織으로 되어 있다. D부는 5層部의 熔着金屬으로서, 주로 베이나이트와 퍼얼라이트로부터 生成되어 粒界에 페라이트가 보인다. E부는 第 3 層 熔接에 의한 熔着金屬이 第 5 層 熔接에 의해 再加熱되어 微細化 되었고, 微細 페라이트와 퍼얼라이트가 形成되어 있다. F부는 第 2 層 熔接에 의한 熔着金屬이 第 3~5 層 熔接에 의해 세번 겹쳐서 再加熱되어 더욱 微細化된 페라이트와 퍼얼라이트 組織으로 되어 있다. 이 때, 어느 部分에도 熔接缺陷은 發見되지 않았다.

### 3.5. 水中熔接部의 硬度分布

Fig. 14 와 Fig. 15는, 라임티타니아系를 使用해서 6 패스 水中熔接을 한 경우 (Table 2)의 硬度分布를

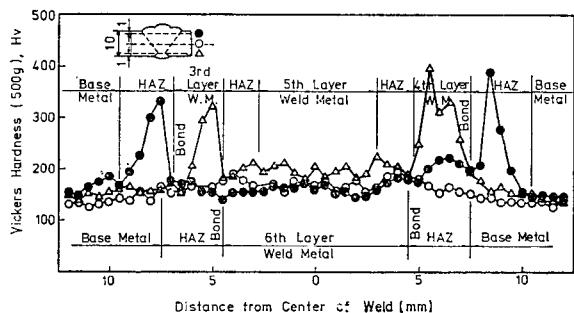


Fig. 14 Typical longitudinal hardness distribution of underwater weld (6th-pass welding) of SM41A in case of 200 A  
(Welding conditions: as in Table 2)

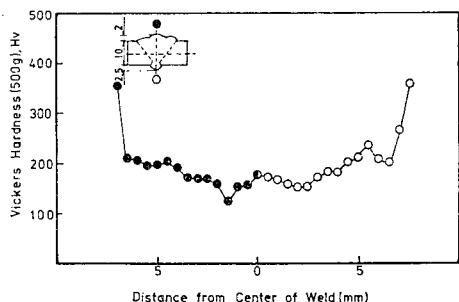


Fig. 15 Vertical hardness distribution of underwater weld (6th-pass welding) of SM41A in case of 200 A  
(Welding conditions: as in Table 2)

測定한 結果로서 熔接部 橫斷面에 관하여, Fig. 14는 縱方向으로, Fig. 15는 垂直方向으로 調査된 마이크로 빅커스(micro-Vickers) 硬度(荷重 500g)의 分布를 나타낸다. Fig. 14에서 最終 퍼스의 본드에 接하는 母材 热影響部(HAZ)에 最高硬度가 나타남이 確認되었다.

이것은, 初層熔接 혹은 第2層熔接에 의해서 증가된 硬度가 그 후 계속된 熔接層에 의하여 再加熱되어 硬度가 低下된 反面(Fig. 13의 F部 및 Fig. 14의 中心線의 熔着金屬中央部), 第3, 4, 6層의 경우는 增加된 硬度가 低下 影響을 받지 않았기 때문이다(Fig. 13의 B部, C部 및 Fig. 14의 外周部 1mm 깊이 部分). 그外 계통의 熔接棒에 의한 熔接部에 있어서도 이와 유사한 結果가 얻어졌다.

Fig. 15에서는, 熔着金屬의 垂直斷面에서 물에 接하는 上下 表面部의 硬度가 약 Hv 350으로서 가장 높은 理由는 水中熔接中과 後의 물의 冷却效果 때문이라고 생각된다.

#### 4. 結論

두께 10mm의 國產熔接構造用鋼板(SM41A)의 水中熔接性과 熔接強度에 관하여 實驗과 統計的으로 解析한 結果는 다음과 같다.

1) 熔接棒의 角度는 비이드 外觀에 影響을 주지 않고 高酸化 티탄系의 경우는 適正電流와 棒徑의 範圍가 比較的 넓고, 熔接缺陷이 없는 가장 良好한 水中熔接部를 얻을 수 있는 國產被覆 아아크 熔接棒은 直徑 4mm인 라임티타니아系, 高酸化티탄系 및 일미나이트系이다.

2) 水中熔接部에 대한 매크로組織, 微視組織 및 硬度分布調査에 의하면, 본드附近의 热影響部 및 熔接表面層에 硬度의 最高值가 나타나며, 마르텐사이트와 베이나이트組織을 나타내고, 그外는 微細한 페라이트, 퍼얼라이트組織으로서, 熔接缺陷이 없는 良好한 熔接部를 갖는다.

3) 最適熔接強度를 얻을 수 있는 熔接條件은, 이음効率 100% 이상의 引張強度와 충분한 衝擊值를 고려하여, 直徑 4mm의 라임티타니아系를 使用하여 運棒比 1인 경우에, 入熱量 1,400~1,500 J/mm, 즉, 電流 200~215 A이다.

4) 水中熔接部의 引張強度, 衝擊強度는 入熱量에 定量的으로 依存하며, 2次函數의 關係가 成立한다. 이에의 實驗式은 그 平均誤差가 4.14 %로서 높은 信賴性을 갖고 있다.

5) 따라서, 水中熔接의 品質向上을 위하여 熔接條件(電流, 入熱量)에 의한 熔接強度의 最適화를 위한 시스템 設計가 可能하다고 提案된다.

#### 後記

本研究를 위한 實驗裝置製作에 助言을 아끼지 않은 日本慶應義塾大學 理工學部 A. Hasui 教授에게 感謝드린다.

#### References

- S. Fukushima, T. Fukushima and J. Kinugawa, "Preliminary Experiment on Improvement of Underwater Wet Plasma Welds Using Filler Metal", J. JWS, Vol. 50, No. 3, pp. 92-98, 1981.
- 品田幸三郎, "局部乾式水中自動熔接システムの開発", 日本慶應義塾大學大學院工學博士學位論文, 1981.
- T. Takeda, S. Yamada and I. Fukunaga, "Study on the Weldability of Ultra High Strength Steel for Deep Submersible Research Vehicle", J. JWS, Vol. 50, No. 8, pp. 807-814, 1981.
- A. Hasui and Y. Suga, "On Underwater Gravity Arc Welding (Report 1)", J. JWS, Vol. 43, No. 8, pp. 767-775, 1974.
- A. Hasui, Y. Suga and M. Kurihara, "On Formation of Porosity in Underwater Weld Metal", J. JWS, Vol. 50, No. 12, pp. 1225-1231, 1981.
- AWS, Welding Handbook, AWS, 1-7, pp. 36, 1976.
- N.R. Draper and H. Smith, "Applied Regression Analysis", Wiley, pp. 163-195, 1966.
- K.K. Wang, G.R. Reif and S.K. Oh, "In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques", Proc. 63rd Annual AWS Conv., Sess. 5-A (Apr. 27), 1982. Welding Journal, Res. Supp. AWS, 61-9 (Sept.), pp. 312-320, 1982.
- S.K. Oh, A. Hasui, T. Kunio and K.K. Wang, "Effects of Initial Energy on Acoustic Emission Relating to Weld Strength in Friction Welding", Trans. JWS, 13-2 (Oct.), pp. 15-26, 1982. Proc. 4th Int. Sym. JWS, 4 JWS-V-8 (Nov. 24-26), pp. 713-718, 1982.