

水中熔接한 國產SM41A-2鋼板의 片振反復 引張荷重下の 疲勞強度特性에 관한 研究

吳世奎* · 朴柱星** · 韓相德***

Study on Tension-Tension Fatigue Strength Properties of Underwater
Welded Joints of SM41A-2 Plate-to-Plate

S. K. Oh, J. S. Park, S. D. Han

Abstract

Nowadays, the high development of industrial technique demands the optimal design of marine structures to be welded under the water, because the underwater welding of the ship hull and marine structures can decrease manpower and cost of production.

However there is not available at present any report on fatigue behavior about underwater welded joints. In this paper under tension-tension repeated fatigue stress with frequency of 10 cycles per second by load controlled system, the fatigue strength properties of underwater welded joints of SM41A-2 Plate-to-Plate of 10 mm thickness were experimentally examined.

The results obtained were as follows :

- 1) The fatigue strength of underwater welded joints of SM41A-2 was peaked at the heat input of about 1,400 joule/mm (180 A, 36 V), while, at the heat input of more than about 1,100 joule/mm (160 A, 33 V) that of the underwater welds at the higher than cycle of life rather than the lower cycle was higher than that of the base metal but lower than that of the atmosphere welds on account of both cooling and notch effects.
- 2) The fatigue limit of underwater welds increased with an increase of heat input resulting in a peak of that at the heat input of about 1,400 joule/mm and then decreased gradually.
- 3) The fatigue strength at N cycles was peaked between the heat input of about 1,400 and 1,700 joule/mm where the strain was rapidly increased.
- 4) It was confirmed that the optimal zone of heat input condition for obtaining the underwater welds fatigue strength higher than that of the base metal exists, and if out of this zone, the fatigue strength of the underwater welds was lower than that of the base metal because of lack weld penetration, inclusion of slag, voids, etc.

*正會員, 釜山水產大學

**正會員, 釜山船員學校

***正會員, 韓國重工業

- 5) By the fatigue test, the underwater welds fractured brittly without visual deformation, so the strain was remarkably less than that of the atmosphere welds.
- 6) The fatigue life factor was peaked at the heat input of about 1,600 joule/mm (200 A, 36 V) at which the mean strain is a little higher than that of the base metal but quite lower than those of the atmosphere welds, resulting in good underwater welds because both fotigue strength and ductility of the underwater welds are higher than those of the base metal at such heat input.

1. 序 論

陸·海上의 모든 構造物에 있어서 熔接의 利用이 광범위하게 됨에 따라, 材料의 節約, 熔接工數의 低減, 強度의 向上等 最適設計가 요구되어지고 있으며, 특히 造船 및 航海中 船舶修理, 流體移送 pipeline, 기타 海低資源開發分野에서는 水中熔接의 必要性이 대두되어, 1802年 美國의 Humply Davy가 처음으로 水中에서 아아크(arc)를 일으키기 시작한 이래 活潑한 研究^{1,2,3)}와 함께 그 利用分野가 점차 확대되어 가고 있다. 그러나 水中熔接은 大氣中 熔接과는 달리 熔接裝置의 製作, 熔接姿勢의 不良, 安全事故에 대한 대책 등이 수반되어 作業에 많은 어려움이 따르고, 熔接이음부는 急冷되어 취성이 증가하는 등 많은 연구과제를 갖고 있다.

一般的으로 熔接構造物은 材質의 缺陷, 熔接缺陷, 殘留應力 등이 포함되어 強度를 低下시키는 복잡한 構造物이며, 특히 船體는 熔接이음의 集合體로서, 航海中 長期間에 걸친 浮力의 變動, 波浪에 의한 外力, 엔진의 振動等 各種 變動荷重을 받고 있으므로, 熔接이음부에 缺陷이 생기면 이것이 應力集中部가 되어 局部的인 變形을 일으키고, 疲勞破斷의 원인이 되므로, 熔接이음부의 破壞靱性, 破壞壽命, 크랙(crack)의 發生과 傳播, 脆性破壞發生特性에 미치는 疲勞履歷

의 影響이 多角的으로 검토되어 왔지만^{4,5,6)}, 水中熔接疲勞強度特性에 對한 研究은 國內外的으로 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서, 本 研究은 市販인인 피복아아크 熔接棒을 使用하여 水中熔接한 國產 SM41A-2 熔接構造物 鋼板의 入熱量變化에 따른 疲勞強度特性을 實驗의 方法에 의한 研究을 通하여 규명하여 이를 熔接設計時 有用한 기초자료로 제공하고자 하였다.

2. 材料 및 實驗方法

2-1. 試驗片 및 熔接棒

本 實驗에 使用된 試驗片材料는 國內 P社에서 提供된 熔接構造物用 鋼板인 두께 10 mm의 SM 41A-2이며, 熔接棒은 溶接性 調査와 X線檢査를 通해서 가장 양호한, 市販인인 지름 4 mm인 熔接棒(E 4303)⁷⁾을 使用하였다.

Table 1 및 Table 2는 試驗片과 接接棒의 機械的 性質 및 化學的 成分을 나타내고 있다.

水中熔接을 하기 위해 위와 같은 性質의 試驗片材料를 65×45 mm로 切斷하여 Fig. 1과 같은 그루우브(groove)의 形狀⁸⁾과 積層順序를 갖도록 加工하였다.

Table 1. Mechanical properties and chemical composition of base metal (SM41 A-2)

Mechanical properties	Tensile strength kg/mm^2		Yield strength kg/mm^2		Elongation %	Charpy impact value kgm/mm^2
		46		28		31
Chemical composition (Wt %)	C	Si	Mn	P	S	
	0.16	0.04	0.86	0.013	0.012	

Table 2. Mechanical properties and chemical Composition of welding electrode(E4303)

Mechanical properties	Tensile strength kg/mm^2		Yield strength kg/mm^2		Elongation %	Charpy impact value kgm/cm^2
		49		43		32
Chemical composition (Wt %)	C	Si	Mn	P	S	
	0.07	0.15	0.37	0.014	0.013	

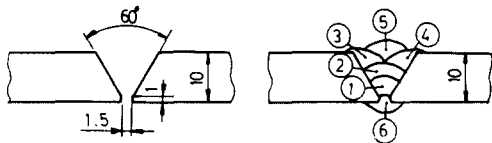


Fig. 1. Shape of groove and welding sequence (mm).

Fig. 2는 片振反復引張 疲勞試驗用 試驗片의 形狀으로서 熔着金屬部의 疲勞強度를 구하기 위하여 熔着金屬部에 깊이 1 mm의 120°V 노치(notch)를 研削加工하였으며, 試驗機의 引張로드그립(rod grip)에 固定될 수 있도록 $\phi 8$ mm의 핀호출(pin hole)을 各各 2個씩 가공하였다.

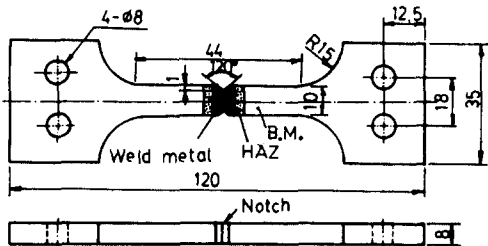


Fig. 2. Tension-tension fatigue test specimen(mm).

2-2. 實驗裝置

水中熔接에 使用된 熔接裝置는 自作한 重力式 自動熔接裝置로서, 熔接棒角度와 運棒比를 變化시킬 수 있도록 되어 있으며, 60×60×100 cm의 水槽内部에 水道水を 入水시키고, 母材移動에 必要한 移動車(carriage)를 設置하였으며, 아아크에 依해 發生된 빛과 물의 비등 때문에 熔接棒의 熔着池를 확인하는데 어려움이 있으므로 正確한 熔着池를 갖도록 하기 위하여, 熔接棒 양쪽에 2個의 안내봉(guide)을 두었다.

熔接機는 直流正極性 熔接을 수행하기 위해 國產 AC 아아크 熔接機를 다이오드(diode) 整流機로 電波整流하여 使用하였으며, 電流計와 電壓計를 附着시켜 電流와 電壓의 變化를 항상 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 熔接裝置와 熔接機의 外觀 및 이의 개략도를 나타내고 있다.

疲勞試驗에 使用된 試驗機는 最大荷重이 10 ton 인 電氣油壓서어보(servo)式 疲勞試驗機(Instron

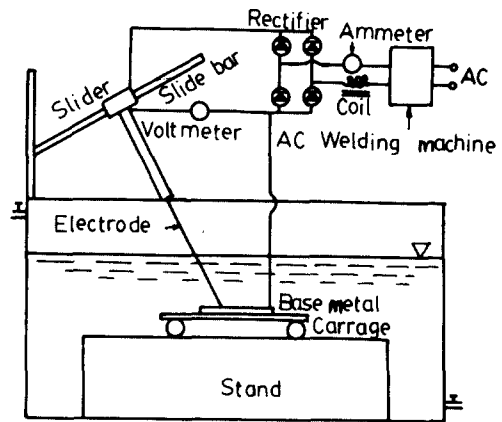
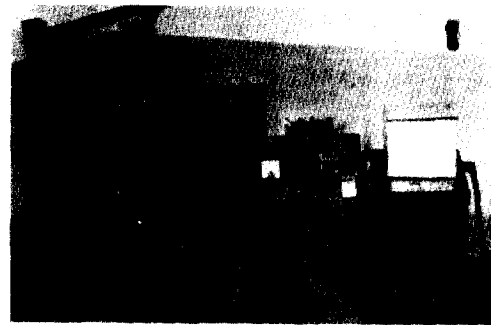
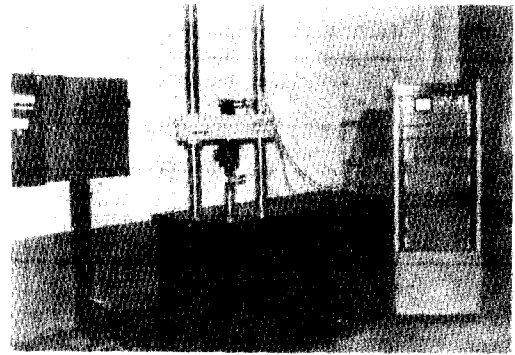


Fig. 3. (a) Appearance and (b) block diagram of experimental underwater welding apparatus (gravity type).

1350)로서 試驗機 本體에는 프레임(frame), 액추에이터(actuator), 油壓動力源(hydraulic power supply) 등으로 構成되어 있으며, 로우드 컨트롤(load control), 스트레인 컨트롤(strain control), 스트로크 컨트롤(stroke control) 및 波形制御를 할 수 있는 各種 制御機器와 記錄計가 裝置되어 있으며, Fig.4 (a), (b)는 이의 外觀과 개략도를 나타내고 있다.



(A)

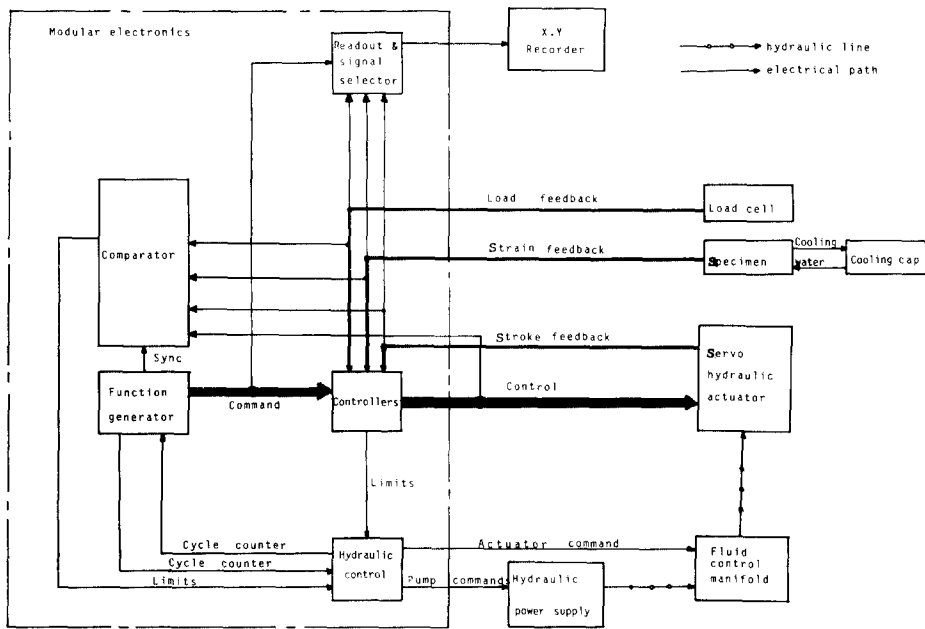


Fig.4. (a) Universal fatigue testing machine (Instron 1350, dynamic type) and (b) its block diagram.

2-3. 實驗方法

入熱量 變化에 따른 熔接構造用 鋼板 SM41A-2의 最適熔接 入熱량을 구하기 위하여 水深 20 cm의 水導水中^{9,10}에서 熔接電流를 140 A, 160 A, 180 A, 200 A, 220 A로 變化시켜 Table 3과 같은 條件으로 水中熔接을 수행하였으며, 試驗片에 熔着金屬의 均等한 熔入을 위하여 60° 그루우브(goove), 1.5mm 루우트(root)를 두고, 지름 4 mm의 라임티타니아(lime titania)系 피복아아크 용접봉(E 4303)을 건조상태로 하여 熔接棒角度

60°, 運棒比(비이드길이/봉사용길이) 1, 即 熔接棒速度 28 cm/min의 條件으로 하였다.

水中熔接材와 大氣中熔接材의 疲勞強度를 비교 검토하기 위하여 水中熔接條件과 同一條件에서 大氣中 熔接을 하여 疲勞試驗을 수행하였다.

本 疲勞試驗은 破壞反復數가 大部分 10⁴以上の 高 cycle 疲勞試驗으로서 彈性變形에 依한 疲勞破壞¹¹를 일으키도록 하였으며, 熔接材의 疲勞試驗은 片振試驗에 依한 것이 압도적이라는 文獻¹²에 따라 應力比 R이 0인 片振反復 引張荷重 制御方式을 택하였으며, 使用周波數는 600 cpm,

Table 3. Range of underwater welding conditions in case of lime titania type electrode

Electrode	Root (mm)	No. of pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Electrod eangle (°)	Bead length/ Electrode length used	Welding speed (cm/min)
Lim titania type E4303 (φ4 mm)	1.5	6	140	28	60	1	28
			160	33			
			180	36			
			200	38			
			220	40			

波形은 정현파(sine wave)로 하였다.

노치를 가진 平板試驗片은 軸線과 荷重方向의 正確한 일치를 위하여 Fig.5와 같은 平板試驗片 締結用 그림(grip)을 考案해서 自作하여 試驗機의 환봉척에 裝着할 수 있도록 하였다.

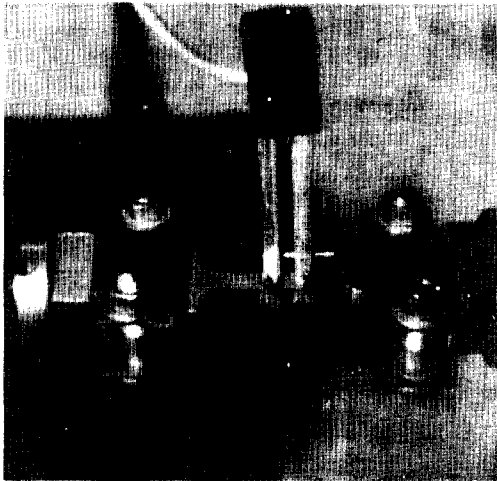


Fig. 5. View of tension-tension fatigue test setup on universal testing machine.

3. 結果 및 考察

3-1. 水中熔接時의 入熱量, 電流 및 電壓의 相關性

熔接材는 熔入不足으로 인한 内部缺陷, 形狀에 의한 外部缺陷, 殘留應力等, 強度를 低下시키는 많은 要因들이 있는데¹²⁾, 그 중에서 熔入不足의 影響을 重要視해야 한다. 熔入은 入熱量의 變化에 거의 의존하게 되는데, 入熱量은 電流, 電壓의 變化에 따라 비례적으로 변하고 있다.

따라서, 熔接速度를 一定히 하여 水中에서 아아크를 發生했을 때에 측정된 電壓(E volt)과 電流(I amp) 및 入熱量(H joule/mm)과 電流의 相關關係를 實驗적으로 구하기 위해 最小 2乘法(least squares method)을 利用한 回歸解析法(regression analysis)¹³⁾에 適用시켜 電算된 結果는 다음과 같다.

$$E = -1.25 \times 10^{-3} I^2 + 0.60 I - 30.6 \quad (1)$$

(Mean % Error = 0.70)

$$H = -1.53 \times 10^{-2} I^2 + 18.4 I - 1438.2 \quad (2)$$

(Mean % Error = 0.50)

이때 入熱量(H joule/mm)을 계산하는데 利用된 式¹⁴⁾은 다음과 같다.

$$H = EI/V \quad (3)$$

Fig. 6은 이의 相關關係를 나타내며, 電流의 증가에 따라 入熱量은 그림과 같이 直線의으로 증가하고 있는데 比하여 電壓은 증가율이 점점 감소하는 것을 알 수 있다.

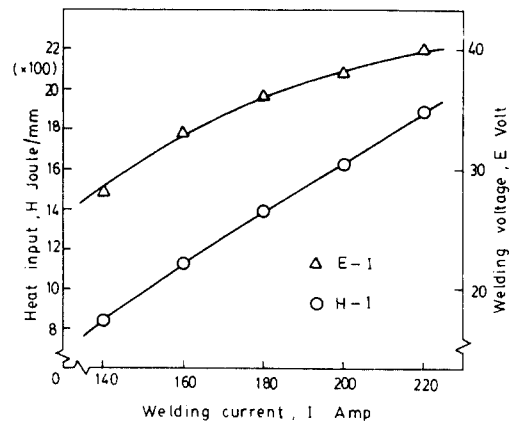


Fig. 6. Interrelation of heat input, welding current and voltage during underwater welding of SM41A-2.

Table 4. Fatigue limits of base metal, atmosphere welds and underwater welds calculated by Pantereb's equation

Specimens for tension-tension fatigue test	S-N curves	Number of cycles		Stress (kg/mm ²)		Fatigue limit by Pantereb's eq. σ_F (kg/mm ²)	
		N_1	N_2	σ_1	σ_2		
SM41A-2 base metal	B. M.	1×10^4	1×10^4	36.5439	11.3719	11.32	
Underwater welds at ampere of	140	UW 140	"	"	20.3489	10.2352	10.20
	160	UW 160	"	"	22.0536	12.9596	12.92
	180	UW 180	"	"	25.0891	16.8285	16.78
	200	UW 200	"	"	23.7067	15.4859	15.44
	220	UW 220	"	"	22.9800	14.9400	14.89
Atmosphere welds at ampere of	140	AW 140	"	"	32.2131	24.4187	24.30
	160	AW 160	"	"	35.5593	25.0849	25.03
	180	AW 180	"	"	30.0800	23.5196	23.47
	200	AW 200	"	"	28.3219	23.2076	23.11

3-2. S-N線圖 및 實驗式

σ -logN 좌표평면상에서의 S-N(應力-反復數)線圖作成에 있어서 Table 3과 같은 熔接條件으로 水中熔接을 수행한 후 加工된 疲勞試驗片 各各에 對하여 片振反復引張試驗을 실시하여 얻어진 應力-反復數(σ -N)의 모든 實驗值로부터 回歸解析法에 의하여 電算된 各直線의 實驗式[(5)~(13)]에서 反復數 $N_1=10^4$ 과 $N_2=10^6$ 에서의 應力 σ_1 과 σ_2 를 구한 두 점으로부터 熔着金屬部の 疲勞限度(σ_F)를 구하기 위하여 다음과 같은 Pantereb의 式¹⁵⁾을 利用하였으며,

$$\sigma_F = \sqrt{(N_2 - N_1)\sigma_1^2\sigma_2^2 / (N_2\sigma_1^2 - N_1\sigma_2^2)} \quad (4)$$

Table 4는 그 結果를 나타내고 있다.

Fig. 7은 片振反復引張 疲勞強度(σ)와 反復數(N) 사이의 關係를 위와 같이 구한 S-N曲線으로서, 水中熔接材의 疲勞強度는 電流가 가장 낮은 140A($H=839.83$ joule/mm)에서의 水中熔接材에서 最小로 나타내며, 電流의 증가에 따라 疲勞強度가 높아져서 UW180($H=1,338.29$ joule/mm)에서 最大로 된다. 그 후 UW200($H=1,628.25$ joule/mm)을 지나면서부터 疲勞強度가 점차 감소되는 경향을 나타내고 있다. 그림에 표시된 (A), (B)는 同一條件下의 水中熔接材로서 거의 비슷한 應力($A=15.8$ kg/mm², $B=17.7$ kg/mm²)을 받았으나 (A)는 1.3×10^4 cycle에서 破斷되었고, (B)는 1.0×10^6 cycle에서도 破斷되지

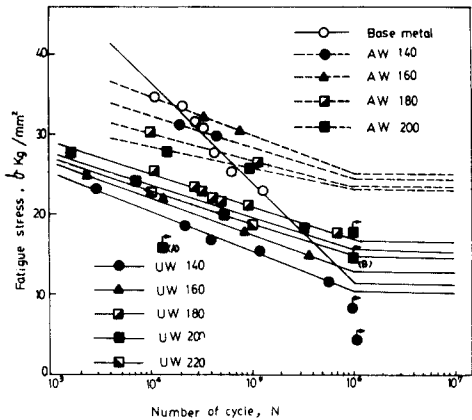


Fig. 7. S-N curve of base metal, atmosphere welds and underwater welds of SM41A-2, welded at 140 A through 220 A.

않고 있음을 보여주고 있으며 (Fig. 8(A), (B)는 그 破斷面을 보여주고 있음), 그 이유는 Fig. 8에서 (A)의 경우는 接합불량(a), 슬래그(slag) (b), 블로우홀(blow hole) (c)等 熔接技術不足으로 인한 熔接缺陷 때문에 試驗初期破斷을 일으킨 것이며, (B)의 경우는 破斷面이 母材와 거의 비슷한 양호한 接合을 가진 것으로서, 疲勞限度 以上에서도 破斷되지 않고 있기 때문이다.

水中熔接材의 時間強度는 低 cycle에서는 母材보다 상당히 낮았으나, 高 cycle에서는 入熱量

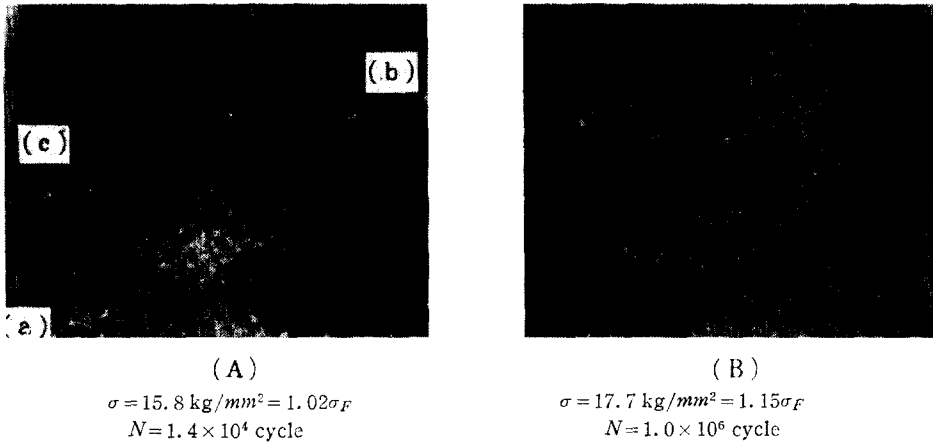


Fig. 8. Cause of the dropping of fatigue strength and life.

이 적은 839.83 joule/mm($I=140$ A)의 경우를 제외하고는 反復數의 증가에 따라 母材보다 높게 나타나고 있다.

그런데 水中熔接材의 疲勞強度가 大氣中 熔接材의 疲勞強度 보다는 대체로 낮게 표시되고 있음을 알 수 있는데, 이는 一般的으로 水中熔接平滑材의 引張強度는 大氣中 熔接平滑材보다는 높다는 報告¹⁶⁾가 있으나, 本 研究에서의 水中熔接노치材의 熔着金屬部 疲勞強度는 熔接後의 높은 冷却效果和 熔着金屬部の 120° V노치 效果 때문에 大氣中 熔接平滑材의 경우보다 낮아진 것이라고 생각된다.

Fig. 7의 S-N線圖에서, 疲勞強度(σ kg/mm²)—反復數(N cycle)의 相關關係 實驗式을 구하기 위하여 回歸解析法¹³⁾에 의해 電算된 結果는 다음과 같다.

$$B. M. ; \sigma = 86.89 - 1.26 \times 10 \log N \quad (5)$$

$$(\text{Mean \% Error} = 3.02, \sigma_F = 11.32)$$

$$UW140 ; \sigma = 40.58 - 5.06 \log N \quad (6)$$

$$(\text{Mean \% Error} = 1.45, \sigma_F = 10.20)$$

$$UW160 ; \sigma = 40.24 - 4.55 \log N \quad (7)$$

$$(\text{Mean \% Error} = 1.22, \sigma_F = 12.92)$$

$$UW180 ; \sigma = 41.61 - 4.13 \log N \quad (8)$$

$$(\text{Mean \% Error} = 1.33, \sigma_F = 16.78)$$

$$UW200 ; \sigma = 40.15 - 4.11 \log N \quad (9)$$

$$(\text{Mean \% Error} = 2.57, \sigma_F = 15.44)$$

$$UW220 ; \sigma = 39.06 - 4.02 \log N \quad (10)$$

$$(\text{Mean \% Error} = 0.01, \sigma_F = 14.89)$$

$$AW140 ; \sigma = 47.80 - 3.89 \log N \quad (11)$$

$$(\sigma_F = 24.30)$$

$$AW160 ; \sigma = 53.50 - 4.74 \log N \quad (12)$$

$$(\sigma_F = 25.03)$$

$$AW180 ; \sigma = 43.20 - 3.28 \log N \quad (13)$$

$$(\sigma_F = 23.47)$$

$$AW200 ; \sigma = 38.55 - 2.58 \log N \quad (14)$$

$$(\sigma_F = 23.11)$$

위 實驗式들의 信賴性을 誤差解析法(error analysis)에 의해 檢査한 結果, 水中熔接材의 경우, 平均誤差의 總平均이 1.32%로서, 具 等에 의해 發表된 Stüssi法¹⁷⁾을 利用한 경우의 2.96%¹⁸⁾와 比較하면 위 實驗式들의 信賴度가 높음을 알 수 있다.

3-3. 水中熔接材의 時間強度, 疲勞限度 및 疲勞壽命係數

Fig. 7의 S-N線圖에서 式(6)~(10)에 의하여 水中熔接 노치材의 $N=10^4$, $N=10^5$ 및 $N=10^6$ 에서의 時間強도와 Pantereb의 式에 의한 疲勞限度 및 다음 式에 의한 疲勞壽命係數 K 는 Table 4에 보이고 있다.

$$K = \tan \phi \quad (15)$$

여기서, ϕ 는 S-N線圖가 종축(應力軸)과 이루는 각.

Table 5에서 알 수 있듯이 各時間強도와 疲勞限度의 크기를 比較하면 다음과 같다.

$$[\sigma]_{N=10^4} ; B. M. > UW 180 > UW 200 > UW$$

Table 5. Fatigue strength at N cycles, fatigue limit and fatigue life factor

Specimens	$(\sigma \text{ kg/mm}^2)$			σ_F (kg/mm^2)	K
	$N=10^2$	$N=10^5$	$N=10^6$		
B. M.	36.54	23.96	11.37	11.31	0.98
UW 140	20.35	15.29	10.24	10.20	2.43
UW 160	22.05	17.51	12.96	12.92	2.72
UW 180	25.09	20.96	16.83	16.78	2.90
UW 200	23.79	19.60	15.49	15.44	3.04
UW 220	22.98	19.00	14.94	14.89	2.79

220>UW 160>UW 140

$[\sigma]_{N=10^5}$; B. M. > UW 180 > UW 200 > UW

220 > UW 160 > UW 140

$[\sigma]_{N=10^6}$; UW 180 > UW 200 > UW 220 > UW

190 > B. M. > UW 140

σ_F ; UW 180 > UW 200 > UW 220 > UW 160 >

B. M. > UW 140

위의 사실을 미루어 보아 $N=10^4$ 과 $N=10^5$ 에서는 母材(B. M.)의 경우가, 한편 $N=10^6$ 에서는 UW 180 熔接材의 경우가 그 時間強度가 가장 높다. 반면에 入熱量이 적은 UW 140의 경우가 가장 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

一般的으로 水中熔接材의 時間強度는 $N=10^5$ cycle의 反復數를 지나면서부터 母材보다 높게 나타나고 있음을 생각할 때 熔接時의 入熱量의 증가가 材料에 韌性を 주고 있는 것으로 생각된다.

3-4. 入熱量이 水中熔接材의 疲勞限度에 미치는 영향

Fig. 9는 入熱量과 片振反復引張 疲勞限度, 충격값 및 스트레인(strain)과의 相關關係를 實驗的으로 구한 結果이다. 이 그림에서 水中熔接材의 疲勞限度는 入熱量 930 joule/mm ($I=145$ A)를 지나면서부터 母材보다 증가하기 시작하여 入熱量 1,388 joule/mm($I=180$ A)와 1,740 joule/mm(215 A) 사이에서 疲勞限度의 피이크(peak)가 있으며, 이때 충격값과 스트레인의 회복범위를 고려해 볼 때, 本 研究에서의 두께 10 mm SM41A-2 鋼板에 대한 水中熔接 最適條件 범위는 入熱量 약 1,700~1,900 joule/mm($I=210$ ~

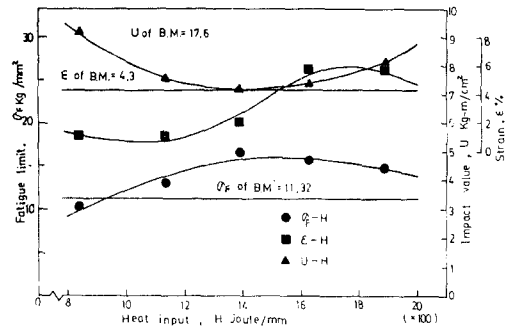


Fig. 9. Effect of heat input on tension-tension fatigue limit of underwater welds of SM41A-2, relating to impact value and strain.

225 A)임을 알 수 있다(Fig.9 및 Fig.6 참조). 여기서 水中熔接 노치材의 片振反復引張 疲勞強度試驗에 의한 熔接條件의 最適범위는 吳等の 發表⁷⁾에서 보인 水中熔接 노치材의 靜的 引張強度試驗에 의한 熔接條件의 最適범위인 入熱量 약 1,400~1,500 joule/mm($I=200$ ~215 A)로부터 上記와 같이 보정되어야 한다고 생각된다. 그리고 熔接材의 片振引張 疲勞強度는 단순 引張強度와 비례한다는 文獻¹²⁾과 흡사하게 Fig.9에서 入熱量의 증가에 따라 水中熔接 노치材의 片振反復引張 疲勞強度의 증가-피이크-감소의 양상이 吳等の 發表⁷⁾에서 水中熔接 노치材의 引張強度의 경우와 같은 양상을 띄고 있음을 알 수 있었고, 疲勞強度-入熱量 關係는 2차함수적 관계가 있음이 밝혀졌다. 電算된 그 實驗式은 다음과 같다.

$$\sigma_F = -1.15 \times 10^{-5} H^2 + 3.61 \times 10^{-2} H - 12.22 \quad (16)$$

(Mean % Error = 4.02)

이때 충격값(U kg-m/cm²) 및 스트레인(ε%)의 入熱量(H joule/mm)과의 相關關係 實驗式은 다음과 같이 電算되었다.

$$U = 5.76 \times 10^{-8} H^2 - 1.66 \times 10^{-2} H + 19.03 \quad (17)$$

(Mean % Error = 0.62)

$$\epsilon = -2.40 \times 10^{-8} H^3 + 1.01 \times 10^{-4} H^2$$

$$-1.32 \times 10^{-1}H + 54.61 \quad (18)$$

(Mean % Error = 0.43)

3-5. 入熱量이 水中熔接材의 時間強度에 미치는 영향

Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12는 實驗結果로서 各 各 $N=10^4$, $N=10^5$ 및 $N=10^6$ cycle에서의 時間強度를 나타내고 있으며, 모든 時間強度는 入熱量 1,388 joule/mm($I=180$ A)와 1,740 joule/mm (215 A) 사이에서 피크가 있으며, 스트레인의 증가율도 가장 높게 되는 것을 알 수 있으며 各各의 時間強度를 비교해 보면 $N=10^4$ cycle에서의 平均時間強度는 母材의 62.5%에 불과했으나, $N=10^5$ cycle에서는 77.1%까지 증가하였고 $N=10^6$ cycle에서는 入熱量 930 joule/mm($I=145$ A) 이하를 제외하고는 母材보다 높게 증가되는 것을 알 수 있다. Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12의 入熱量 증가에 따른 時間強度 증감상태를 스트레인의 회복범위와 母材의 時間強度와를 비교하여 水中熔接 최적범위는 역시 前述한 바와 같이 入熱量 약 1,700~1,900 joule/mm($I=210\sim 225$ A)임을 알 수 있다. 이때 本 研究인 水中熔接에 있어서 入熱量(H joule/mm)과 時間強度($N=10^4$, $N=10^5$, $N=10^6$ 때의 σ kg/mm²)와의 相關關係 實驗式을 電算한 結果는 다음과 같다.

$$[\sigma]_{N=4} = -9.24 \times 10^{-6}H^2 + 2.79 \times 10^{-2}H + 3.15 \quad (19)$$

(Mean % Error = 2.11)

$$[\sigma]_{N=10^5} = -1.03 \times 10^{-5}H^2 + 3.17 \times 10^{-2}H - 4.37 \quad (20)$$

(Mean % Error = 2.88)

$$[\sigma]_{N=10^6} = -1.15 \times 10^{-5}H^2 + 3.61 \times 10^{-2}H - 12.03 \quad (21)$$

(Mean % Error = 4.02)

3-6. 入熱量이 水中溶接材의 疲勞壽命에 미치는 영향

疲勞壽命은 上述한 $K = \tan \phi$ 의 式을 利用하여 Fig. 7에서 구하여 (Table 5참조) 入熱量(H joule/mm)과 疲勞壽命係數 K 와의 相關關係를 Fig. 13에 나타내었으며, 이때 電算된 相關關係 實驗式

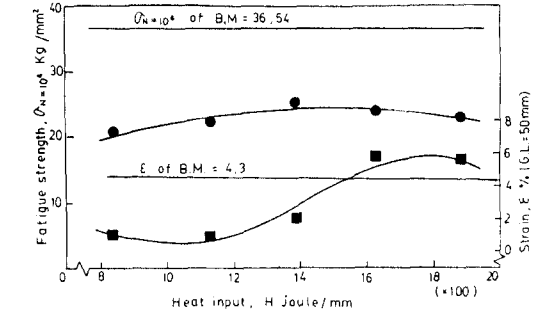


Fig. 10. Effect of heat input on tension-tension fatigue strength(at 10^4 cycles) of underwater welds of SM41A-2.

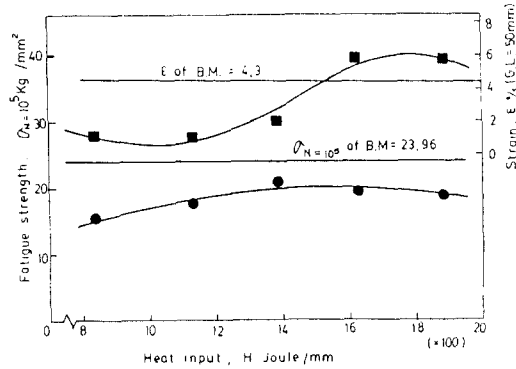


Fig. 11. Effect of heat input on tension-tension fatigue strength(at 10^5 cycles) of underwater welds of SM41A-2.

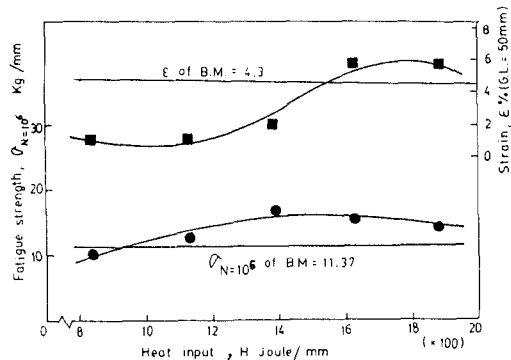


Fig. 12. Effect of heat input on tension-tension fatigue strength (at 10^6 cycles) of underwater welds of SM41A-2.

은 다음과 같다.

$$K = -6.90 \times 10^{-7} H^2 + 2.44 \times 10^{-3} H + 0.86 \quad (22)$$

(Mean % Error = 0.66)

Fig. 13에서 疲勞壽命係數 K 는 入熱量(H joule/mm)의 증가와 함께 계속 증가하다가 $H=1,740$ joule/mm($I=215$ A)를 지나면서부터 점차 감소하는 경향을 보이며, 入熱量(H joule/mm)의 넓은 범위에서 母材보다는 상당히 높아 $H=839.83$ joule/mm($I=140$ A)에서는 母材의 약 2.5배, $H=1,628.25$ joule/mm($I=200$ A)에서 最高 약 3.1 배에 이르러 本 實驗($H=839.83$ joule/mm~ $H=1,885.34$ joule/mm)에서는 水中熔接材의 疲勞壽命이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 이는 취성이 높은 표층부가 제거되고, 再加熱에 의한 누적입열량이 많은 多層熔接部가 試驗片에 靱性を 주었기 때문으로 보인다.

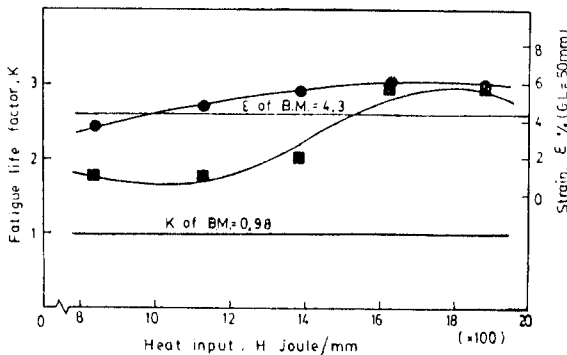


Fig. 13. Effect of heat input on tension-tension fatigue life factor of underwater welds of SM41A-2.

4. 結 論

本 論文은 國產熔接構造用 鋼板(SM41A-2)의 入熱量 變化에 따른 水中熔接材의 疲勞強度特性을 규명하기 위하여, 市販中인 라임티타니아계 熔接棒(E4303)을 使用하여 6層 맞대기 熔接을 한 후 片振反復引張 荷重制御方式의 高 cycle 疲勞試驗을 수행하여 얻어진 結果를 요약하면 다음과 같다.

1. 水中熔接材의 疲勞強度는 入熱量이 약 1,400 joule/mm(電流 180 A, 電壓 36 V)에서 最大로 되고, 入熱量이 약 1,100 joule/mm(電流 160

A, 電壓 33 V) 이상에서는 低 cycle 보다는 高 cycle 쪽에서 水中熔接材의 疲勞強度가 母材보다는 높게 나타났으나, 水中에서는 높은 냉각효과와 노치효과 때문에 大氣中 熔接材 보다는 낮게 나타났다.

2. 入熱量의 증가에 따라 疲勞限度는 계속 증가하다가, 入熱量이 약 1,400 joule/mm(電流 180 A, 電壓 36 V)에서 피이크(peak)로 되고, 그 후부터 점차 감소하고 있다.

3. 時間強度는 入熱量이 약 1,400 joule/mm와 1,740 joule/mm 사이에서 피이크가 있으며, 이때 스트레인(ε%)은 급속히 증가하고 있다.

4. 母材以上の 水中熔接材 疲勞強度를 갖는 最適 入熱量의 범위가 존재하며, 이러한 最適條件을 벗어나면 熔入不足 및 슬랙 등으로 인하여 疲勞強度가 母材의 경우보다 低下되고 있음이 확인되었다.

5. 모든 水中熔接材의 疲勞破斷은 巨視的 變形을 일으키지 않고 破斷에 이르렀으며, 스트레인은 大氣中 熔接材에 비하여 현저한 저하를 보였다.

6. 疲勞壽命은 入熱量이 약 1,600 joule/mm(電流 200 A, 電壓 38 V)에서 最大이며, 이때의 平均 스트레인은 母材보다 조금 높으나 대기중 용접의 경우보다 훨씬 낮으며, 이 入熱量은 疲勞強度와 연성이 母材보다 모두 높은 양호한 水中熔接 入熱量이라고 생각된다.

參 考 文 獻

- 1) Hibshman, M. S., C. D. Jensen and W. E. harrey(1933): Electric arc welding underwater, AWS Welding Journal Vol. 12, No.10, 4-9.
- 2) Brown, A., J. A. Staub and K. Masubushi (1972): Fundamental study of underwater welding, OTC No. 1621. II-55-II-64, Houston, Texas.
- 3) Satoho K.(1970): Underwater welding and underwater gas cutting method, Welding Technology, Vol. 18, No. 2, 56-61.
- 4) 前田幸雄, 川井豊(1974): 薄肉溶接ハイブリツ

- ド・ガ-ダの曲げ疲勞強度に関する研究, 日本熔接學會誌, Vol. 43-7, p.736-742.
- 5) 小倉信和, 安藤柱, 豊田和司(1978): HT 83鋼熔接部における遅れ割れとその破壊力學的評價(第1報), 日本熔接學會誌, Vol.47-9, p.638-643.
- 6) 正岡功 外(1976): 厚板60kg/mm²高張力鋼溶接部の脆性破壊發生特性(第1報), 日本熔接學會誌, Vol.45-3, p.222-229.
- 7) 吳世奎, 南起祐(1983): 國産構造用鋼板의 水中熔接性斗 熔接強度特性, 大韓機械學會誌 論文集, 第7卷, 第3號, p.263-269.
- 8) 日本熔接學會誌(1977): 熔接便覽, 改訂 3版, 日本熔接學會編, p.165-178.
- 9) Hasui, A., and Y. suga (1974): On underwater gravity arc welding(report 1), Journal of JWS Vol.43, No.8, 767-775.
- 10) Hausi, A., and Y. Suga and M. Kurihara (1981): On formation of porosity in underwater weld metal, Journal of JWS Vol.50, No.12, 1225-1231.
- 11) 日本材料學會(1977): 金属材料強度試驗便覽, 養賢堂, p.211-248.
- 12) 日本金屬學會強度委員會(1964): 金属材料の強度と破壊, 丸善株式會社, p.426-429.
- 13) Draper, N, and H, Smith(1966): Applied regression analysis, Wiley p.163-195.
- 14) AWS(1976): Welding hand book, AWS, 1-7, p.36.
- 15) Pantereb, B.M. (1970): Fracture of Metals (V.S.Ivanova), Trans, by T, Yokobori, p.190.
- 16) 屋良秀夫, 菊田米男(1981): 水中熔接に関する基礎的研究(第1報), 日本熔接學會誌, p.302-303.
- 17) Stüssi(1971): Fatigue design of machine components, L. Sors, p.6.
- 18) Oh, Sae Kyoo, Sang Deok Han and Uh Joh Lim(1983): Effect of Postwelded Aging Treatment on Rotary Bending Fatigue Strength of Friction Welded Joints at Elevated Temperature, J, Korean Society of Marine Engineers, 7-2, 36-49,
- 19) 模搦武夫(1978): 材料強度學, 技報堂, p.149-158.