

# 부식피로에 의한 선박용 알루미늄 합금재 용접부의 모서리 균열 전파거동에 관한 연구

임 우 조 · 이 진 열\*

부산수산대학 \*한국해양대학

(1988년 10월 30일 접수)

## A Study on the Behavior in the Corner Crack Propagation of Al-Alloy used for the Shipbuilding by the Corrosion Fatigue

Uh-Joh LIM and Jin-Yel LEE\*

National Fisheries University of Pusan \*Korea Maritime University

(Received October 30, 1988)

Recently with the rapid development in marine and shipbuilding industries such as marine structures, ships and chemical plants, it takes much interest in the study of corrosion fatigue characteristics that was closed up an important role in mechanical design.

In this study, characteristics of corner crack propagation on the base metal and heat affected zone of 5086 Al-Alloy was tested by using of a rotary bending fatigue tester and was investigated under the environments of specific resistance,  $\rho = 25 \Omega \text{ cm}$  and air.

The corrosion fatigue crack initiation and corrosion fatigue life sensitivity were quantitatively inspected for 5086 Al-Alloy in the specific resistance,  $\rho = 25 \Omega \text{ cm}$ .

Main results obtained are as follows :

- (1) The corrosion sensitivity of heat affected zone under specific resistance,  $\rho = 25 \Omega \text{ cm}$  shows approximately 1.69~2.22 and corrosion sensitivity of base metal is more susceptible than that of heat affected zone.
- (2) The corrosion fatigue life sensitivity on heat affected zone decreases eminently than that of initial corrosion fatigue crack.
- (3) The characteristics of quarter elliptical corner crack propagation shows that depth crack is more grown than surface crack at crack initiation, but the surface crack is more propagated than depth crack as the crack propagation is increased.
- (4) The surface crack and depth crack growth on heat affected zone by softness show delayed phenomenon than that of base metal.

### 서 론

최근 선박 건조에 있어서 특수선박은 경량화에 의한 고속화 및 에너지 절약을 위해 경량성의 고

력 알루미늄 합금재의 이용이 증대되고 있다. 고력 알루미늄에 의해 건조되는 선박은 고속함정, 소중형 어선, 고속 여객선 및 LNG선 등이 다<sup>1,2,3)</sup>.

이 합금재에 의해 건조되는 이들 선박은 Al-

Mg계 합금(A5000계)이 주로 이용된다. 특히 Al-Mg계 합금중 A5086은 선박에 적당한 강도와 내식성, 용접성 및 가공성이 양호하며, 현재 국내에서 건조되는 특수 선박은 이 알루미늄 합금재(A5086계)로 건조되고 있다<sup>4)</sup>.

이러한 선박들이 해양환경중에서 운항중 파랑 및 선체의 진동 등에 의한 반복 응력을 받게됨에 따라서 부식피로파괴에 의한 선박의 해난사고를 초래하게 된다. 이와 같은 해난사고는 귀중한 인명과 막대한 재산의 피해를 입히게 됨으로, 선박의 운항에 있어서 안정성은 대단히 중요하게 된다.

선박의 부식피로파괴에 있어서 더욱 중요하다고 생각되는 것은 평면 굽힘 하중에 의한 모서리 균열전파에 따른 균열의 형상변화는 표면균열을 가진 선박 부재의 부식피로균열 전파특성을 구명하는데 매우 중요한 요소라 할 수 있다<sup>5,6,7)</sup>.

그러나 각종 표면균열의 성장거동에 대해서는 Irwin, Rice 및 Koterazawa 등의 보고가 있으나, 특히 해양환경중에 있어서 부식피로에 의한 모서리 균열의 전파거동에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다<sup>8,9,10)</sup>.

따라서 본 연구에서는 특수 선박의 건조에 많이 사용하는 Al-Mg계 합금재중 5086-H116 알루미늄 합금 판재의 용접부위를 해양환경과 거의 같은 부식분위기에서 평면 굽힘 부식피로시험을 행하여 표면균열과 두께방향의 균열깊이의 전파거동을 관찰, 조사하였다.

이 결과를 토대로 하여 모재와 용접열 영향부의 부식피로균열 전파거동에 있어서 모서리 균열성장의 형상변화를 고찰하고, 부식 감수성을 정량

적으로 구하였다. 그리고 용접열 영향부의 부식피로균열 전파 지연거동을 구명함으로써 해양환경중에 사용되는 선박용 알루미늄 합금재의 부식피로파괴에 대한 기초 설계자료로서 기여하고자 한다.

## 시험편 및 실험방법

### 1. 시험편

본 실험에서 사용된 시험재료는 두께 7.1mm인 A5086-H116 알루미늄 합금 판재로, 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1에 보인다.

이와 같은 판재를 모재로 하여 이 판재 위에 Al-Mg계(5000계) 알루미늄 합금재 MIG 용접용 Welding wire ER5356 (AWS 규격, 직경: 1.2mm)을 사용하였으며, Welding wire의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 함께 표시되어 있다.

용접조건은 Table 2와 같으며, 용접은 모재원판(1500×6000mm) 2장을 평면위에 맞대어 놓고 H-빔으로 판재를 구속하여 tack welding한 후 Table 2의 Joint형상과 같이 U-groove를 형성시키고, air grinder에 부착한 wire wheel brush를 이용 용접부를 청소하였다. 그리고 반자동 용접기(model IK-72T에 MIG welding gun을 부착)를 사용하여 1차에 back bead형성 용접, 2차 용입용접 및 3차 마무리 용접한 다음 판재의 반대면에 다시 U-groove를 형성시키고 cleaning한 후 마무리 용접하였다.

시험편은 상술한 판재로 부터 그 길이 방향이

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of used material

a) Chemical composition(Wt %)									
Description	Mn	Cr	Cu	Mg	Si	Ti	Fe	Zn	Al
Base metal (A5086 H116)	0.48	0.11	0.047	4.07	0.19	0.022	0.375	0.07	Res.
Welding wire (AWS ER5356)	0.20	0.20	0.10	5.50	0.25	0.20	0.40	0.10	Res.

b) Mechanical properties			
Material	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Base metal	24.12	32.5	13.5

압연방향과 동일하도록 취하여 제작하였다.

시험편 및 노치(notch)의 형상은 Fig. 1과 같으며, 여기서 모재 및 용접열 영향부에 각각 노치의 위치가 오도록 하여 각각 별개의 시험편으로 제작하였다.

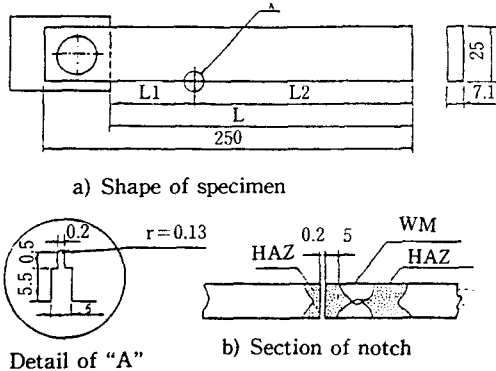


Fig. 1 Specimen dimensions and notch position for corrosion fatigue test.

용접 열영향부는 Table 2와 같은 용접조건으로 용접한 Fig. 2와 같은 판재로부터 절취하였으며, 보강부(reinforcement) 높이에 의한 응력 집중이 부식피로균열에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험 이 외에는 용접한 후 보강부를 모두 삭제하였다.

한편 시험편 표면은 사포 2000번까지 연마한 후 아세톤으로 탈지하고 시험편 표면의 전기화학적 영향을 제거하기 위하여 노치선단을 제외한 시험편 전표면을 투명한 에폭시 수지로 피복하여 절연 시켰다.

## 2. 실험장치

본 실험에 사용한 편심륵식 정변위 평면 굽힘 피로시험기의 전체 계통도는 Fig. 3과 같다.

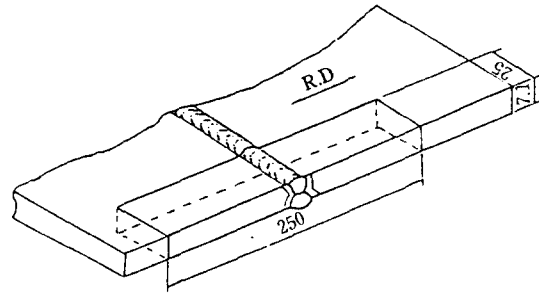


Fig. 2 Welding plate configuration and extraction of specimen.

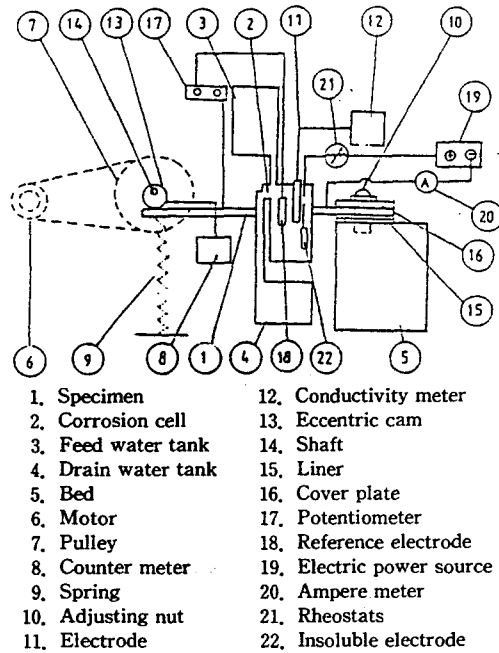


Fig. 3 Schematic diagram of test apparatus.

Table 2. Welding condition

Side	Electrode	Mix Gas	Amp. (A)	Volt (V)	Speed (Cm/Min)	Heat Input (KJ/Cm)	Joint Configuration
Face	1.2φ AWS ER 5356	2Kg/Cm <sup>2</sup> (75Helium + 25 Argon)	160	28	70	17.2	
			190	30	60		
			200	32	50		
Back	(Mg Alloy)	200	32	50	7.7		

Fig. 3의 부식피로 시험기는 자작한 것으로 판상 시험편의 일단은 덧개로 덮어 볼트로 고정하고 자유단은 편심륜의 회전에 의하여 평면 굽힘 반복하중을 받게 하였으며, 시험편은 동시에 5개 까지 장치할 수 있도록 하였다.

그리고 Fig. 1에 나타낸 고정단과 하중점과의 길이(L), 고정단과 노치와의 길이(L1) 및 Fig. 3에 보인 하중점에서 편심륜의 편심량을 변화시킴으로서 반복응력을 미세하게 조절할 수 있도록 하였다.

평면 굽힘 반복응력은 모터에 의해 구동되는 편심륜에 의해 받으며, 반복회수는 폴리축에 연결되어 있는 회전계메타(counter meter)로써 측정하였다.

이 실험에 사용한 반복응력의 각 형태는 Fig. 4에 표시한 바와 같이 응력비  $R=0$ 인 편진 반복응력이며, 또 반복하중의 속도는 모두  $300rpm$  ( $f=5 Hz$ )으로 하였다. 이때 반복하중의 회전수 측정에는 펄스(pulse)식 센사(sensor)와 계수적 산회전계(digital integration counter)를 이용하였다.

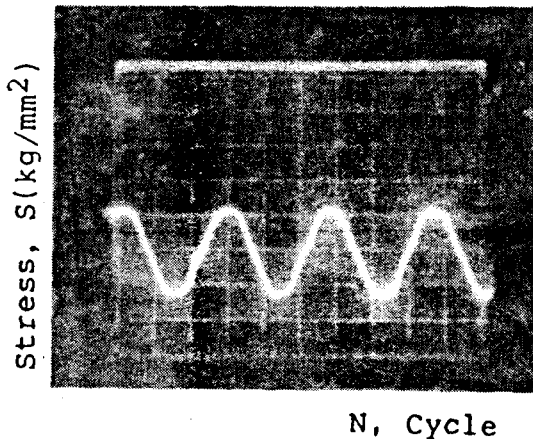


Fig. 4 Stress wave form(stress ratio,  $R=0$ ).

### 3. 실험방법

부식환경조는 플라스틱으로 제작하고, 부식분 위기는 비저항값이  $25\Omega cm$ 되게 고정하였으며, 실험중의 부식용액은 실내온도로 유지하였다.

또한 부식환경조내의 부식용액은 Cl이온의 농도 및 전도도의 변화를 방지하기 위하여 시간당

4l의 량으로 계속하여 순환시켰으며, 부식생성물에 의한 전기화학적 영향을 제거하기 위하여 절연성 필터를 사용하여 부식피로시험을 행하였다.

균열 성장길이(crack growth length)는 일정한 반복하중을 가한 후 20배의 현미경으로 부식피로 균열의 발생초기( $a=0.4mm$ )부터 파단까지 연속적으로 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 균열전파의 형상변화

Photo. 1과 Fig. 5는 부식환경의 비저항값이  $25\Omega cm$ 중에 있어서 모재의 편측관통 노치 선단

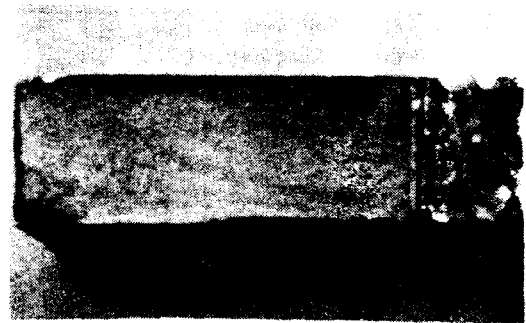


Photo 1. Beach marks of fracture surface.

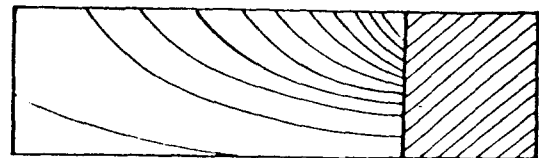


Fig. 5 Macrograph of beach marks of fracture surface.

으로부터 균열이 성장된 부식피로균열전파의 비치마크와 거시적 파면의 양상을 보이고 있다.

이에 의하면 평면굽힘 반복하중에 의한 피로균열 전파는 노치 선단으로부터 균열이 성장된 4분 타원형의 모서리 균열전파특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 4분 타원형 모서리 균열전파양상을 구명하기 위하여, Fig. 6~7에 공기중과 비저항값  $25\Omega cm$ 중에 있어서 표면균열길이 a와 두께반

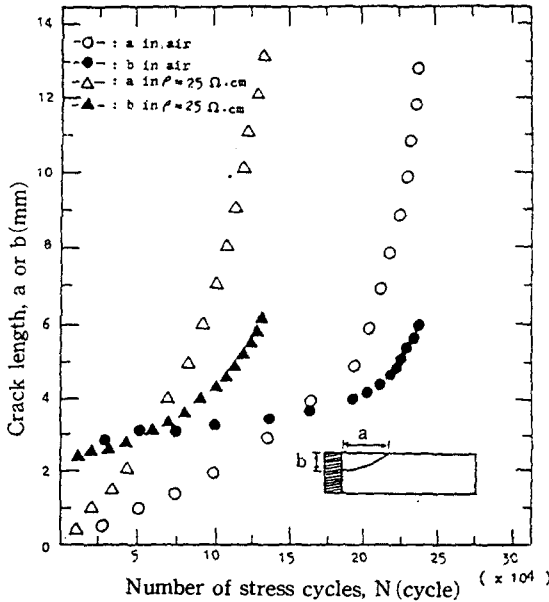


Fig. 6 Crack length versus number of stress cycles for base metal in air and specific resistance,

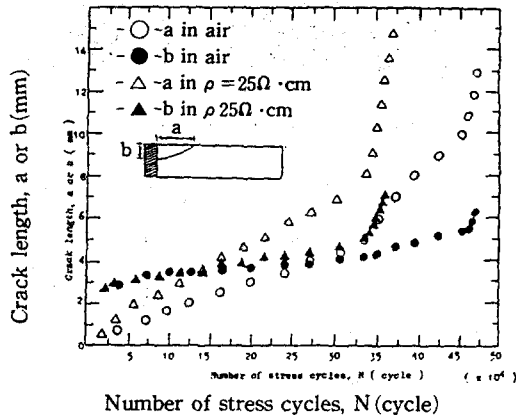


Fig. 7 Crack length versus number of stress cycles for heat affected zone in air and specific resistance,  $\rho = 25\Omega \cdot \text{cm}$

향의 균열길이(이하 균열길이라 칭한다)  $b$ 를 응력반복수에 따른 균열성장거동에 대해 보인 것이다. 이에 의하면 균열 발생 초기에 있어서는 균열길이의 성장이 표면균열의 성장보다 빨리 진전되고, 균열이 전파됨에 따라 표면균열길이와 균열길이의 차는 작아지다가 균열길이 3~4mm에서 서로 같아지다가 균열이 더욱 성장됨에 따라

표면 균열길이가 균열길이보다 더 빨리 균열이 전파되고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 균열전파 초기에 있어서는 평면 굽힘 반복하중에 의해 표면은 항상 최대굽힘 응력을 받고 모서리 균열이 전파하면서도 표면의 균열선단에서는 최대굽힘응력은 변화하지 않으나 두께방향의 균열 선단에서는 균열이 전파함에 따라 응력이 감소하므로 균열길이가 표면균열 길이보다 성장이 빠르고, 균열이 성장됨에 따라 평면 굽힘 반복하중에 의한 표면에 인장하중이 작용하여 표면균열길이가 균열길이보다 균열이 더 빨리 전파될 것으로 생각된다.

## 2. 용접부의 부식피로균열 전파거동에 미치는 부식 감수성

Fig. 8은 공기중과 부식환경인 비저항값이  $25\Omega \text{cm}$ 중에 있어서 응력 반복수에 따른 모재와 용접열 영향부의 표면균열 전파거동을 보인 것이다.

이에 의하면 표면균열의 발생은 부식환경인 비저항값  $25\Omega \text{cm}$ 중에서의 모재가 가장 빠르고, 공기중에서의 용접열 영향부가 가장 늦었다. 그러나 균열이 성장 되면서 부식환경인 비저항값  $25\Omega \text{cm}$ 중에서의 용접열 영향부가 공기중에서의 모재보다 균열전파가 지연되었다.

Fig. 9는 모재와 용접열 영향부의 부식피로균열 초기발생 및 부식피로수명에 대한 부식 감수

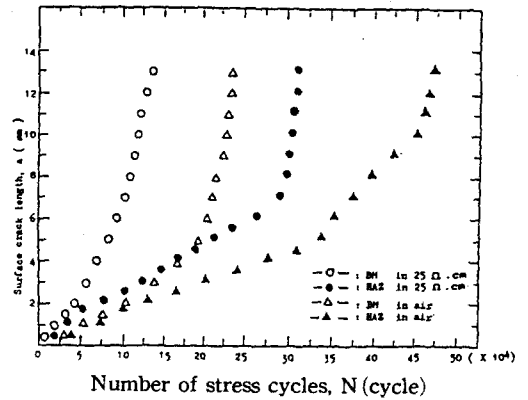


Fig. 8 Surface crack length versus number of stress cycles for base metal and heat affected zone in air and specific resistance,  $\rho = 25\Omega \cdot \text{cm}$

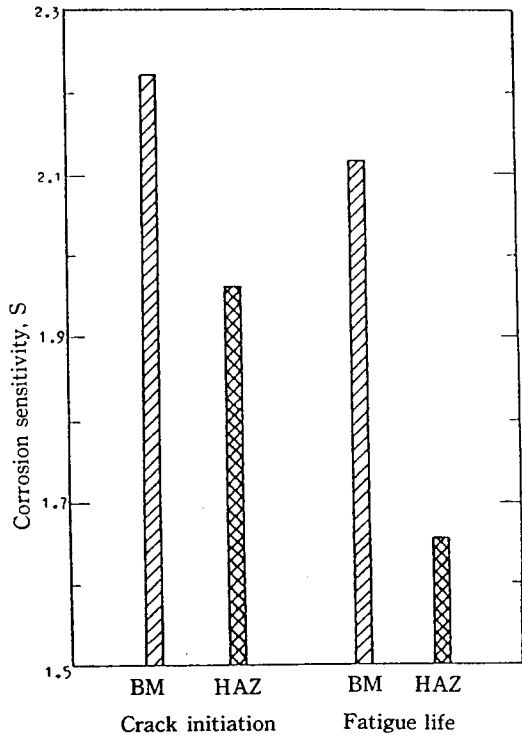


Fig. 9 Corrosion sensitivity of fatigue crack initiation and fatigue life for base metal and heat affected zone in  $\rho = \Omega \cdot \text{cm}$ .  
( $S = \text{Number of stress cycles of crack initiation and fatigue life in air} / \text{Number of stress cycles of crack initiation and fatigue life in } \rho = 25\Omega \cdot \text{cm}$ )

성을 계산하여 보인 것이다.

여기서 부식 감수성은 다음과 같이 계산하였다.

부식 감수성 = 공기중에서의 피로균열 초기발생 및 수명까지의 응력 반복수 / 부식환경인 비저항값  $25\Omega \text{ cm}$ 에서의 부식피로균열 초기발생 및 수명까지의 응력 반복수

이에 의하면 비저항값이  $25\Omega \text{ cm}$ 중에 있어서 용접부의 부식 감수성은 약 1.69~2.22로서 부식 피로균열 초기발생에 있어서 모재의 부식 감수성이 가장 민감하고, 부식피로균열 초기발생과 부식피로수명에 대한 모재의 부식 감수성은 용접열 영향부의 부식 감수성보다 더 예민하게 나타나고 있다. 그리고 부식피로균열 초기발생에 있어서 모재와 용접열 영향부의 부식 감수성이 부식피로수명에 있어서 모재와 용접열 영향부의 부식 감수성보다 현저히 민감해지고 있다. 또한 부식피로수명에 있어서 모재에 대한 용접열 영향부의 부식 감수성 차는 부식피로균열 초기발생에 있어서 그 부식감수성 차보다 현저히 크게 됨을 알 수 있다. 환언하면 용접열 영향부에 있어서 부식피로 수명 감수성은 초기 부식피로균열 감수성에 비하여 현저히 낮아짐을 알 수 있다.

### 3. 용접부의 부식피로균열 전파특성

Fig. 10은 공기중과 비저항값  $25\Omega \text{ cm}$ 중에 있어서 모재 및 용접열 영향부의 균열깊이에 대한

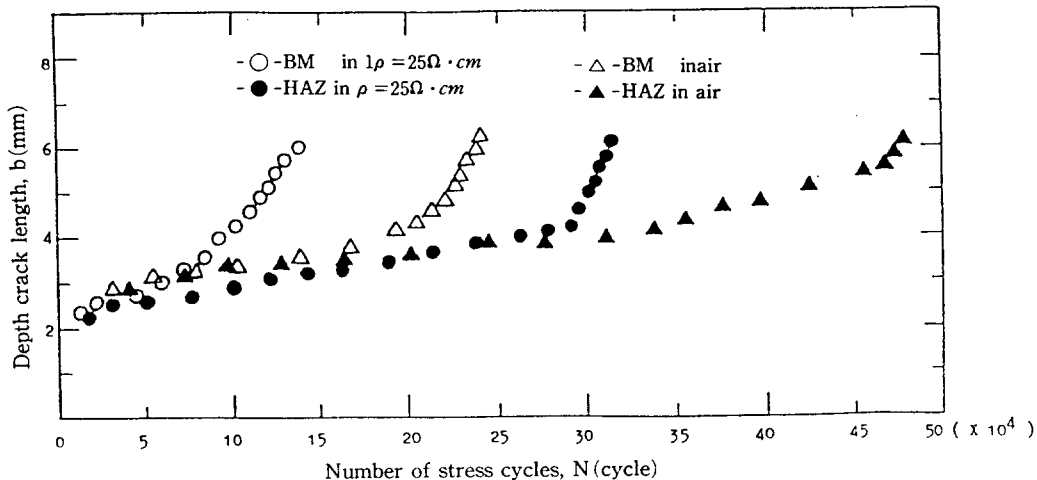


Fig. 10 Depth crack length versus number of stress cycles for base metal and heat affected zone in air and specific resistance,  $\rho = 25\Omega \cdot \text{cm}$

성장거동을 응력 반복수에 따라서 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 Fig. 8과 같이 용기중과 부식환경인 비저항값  $25\Omega\text{ cm}$ 중에 있어서 용접열 영향부의 부식피로균열 성장거동은 모재의 부식피로균열 성장거동에 비해 현저히 지연되고 있으며, Fig. 9에 있어서도 용접열 영향부의 부식 감수성이 모재의 부식 감수성보다 둔감해지는 양상을 나타내고 있다.

이와 같이 용접열 영향부의 부식피로균열 전파가 모재의 부식피로균열 전파에 비해 현저히 지연되는 원인을 분석하기 위해 용접부의 기계적 특성을 조사한 결과를 Table 3에 정리하여 보이고 있다.

Fig. 11(a)와 같이 용접된 판재로부터 절취하여, Fig. 11(b)와 같은 형상의 시험편을 제작하였다. 이와 같은 시험편을 이용하여 용접부위의 샤피충격시험을 하였다.

Table 3은 용접열 영향부 및 모재에 대한 샤피

피충격치를 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 용접열 영향부의 샤피충격치가 모재의 샤피충격치보다 더 크게 나타나고 있음을 보이고 있다.

이러한 결과는 용접열 영향부가 연화에 의해 모재보다 소성변형을 쉽게 일으켜 최대하중에도 달한 후, 서서히 하중이 저하하여 연성과괴리를 하는 것으로 생각된다<sup>11)</sup>.

이와 같이 연화된 용접열 영향부의 균열선단은 평면 굽힘 하중을 받는 조건하에 있어서 모재의 균열선단보다 소성변형이 쉽게 발생할 것으로 기대된다.

따라서 모재에 비해 용접열 영향부의 부식피로균열 전파지연은 균열선단에 있어서 소성영역이 발생됨으로써 균열선단의 폐구현상과 균열선단의 압축으로 인한 부식전류의 감소현상에 의해 기인되는 것으로 사료된다<sup>12)</sup>.

### 결 론

부식피로에 의한 선박용 알루미늄 합금재 용접부의 모서리균열 전파거동에 관한 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비저항값  $25\Omega\text{ cm}$ 중에 있어서 용접부위의 부식 감수성은 약 1.69~2.22이며, 모재의 부식 감수성은 용접열 영향부의 부식감수성보다 더 민감하다.
2. 용접열 영향부에 있어서 부식피로수명 감수성은 초기부식피로균열 감수성에 비해 현저히 낮아진다.
3. 4분 타원형 모서리균열 전파특성은 초기에는 표면균열길이에 비해 균열깊이가 빨리 성장되고, 균열이 전파됨에 따라 균열깊이에 비해 표면 균열 성장이 더 빨리 전파된다.
4. 용접열 영향부의 연화에 의해 용접열 영향

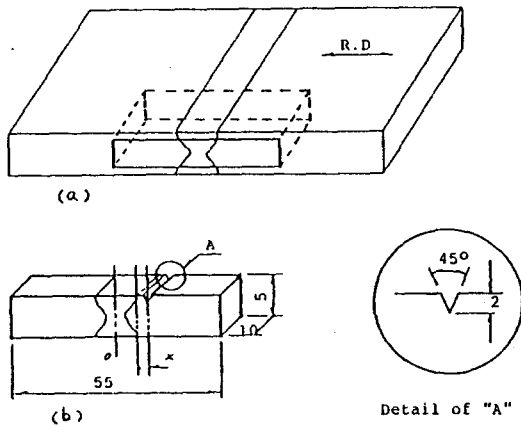


Fig. 11 Specimen dimensions for charpy's impact test.

Table 3. The results of charpy's impact test for A5086 (Unit :  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ )

Position x (mm) Test No.	HAZ					Base metal	Weld metal
	1	3	5	7	10	0	0
1	1.47	1.77	1.49	1.50	1.30	1.20	1.20
2	1.85	1.47	1.43	1.40	1.37	1.30	1.25
3	1.86	1.32	1.42	1.50	1.35	1.30	1.25

부의 표면균열과 균열깊이의 성장은 모재의 이들 균열 성장보다 더 지연되는 양상을 나타내고 있다.

### 參考文獻

1. 田大熙(1985) : 우리나라 腐蝕界의 어제와 오늘. 한국부식학회지 14(1), 33.
2. 何井喜彦·村田雅人(1979) : 스테인레스鋼應力腐蝕割れ對する破壞力學適用フッて. 日本溶接學會誌 48(11), 5.
3. 山田盛雄(1985) : マルシニウム技術便覽. 輕金屬出版株式會社. 東京, 1675-1701.
4. 水野政夫口章(1972) : マルシニウムとその合金溶接. 産業出版株式會社, 99.
5. 川原正言·栗原正好(1975) : 表面き裂疲勞よる傳播成長過程 に関する豫備的考察, 日本造船學會 論文集 137, 297-306.
6. 金澤·町田·糸賀(1972) : 表面缺陷からの疲勞龜裂傳播特性フして(等一報). 日本造船學會 論文集 132, 297-306.
7. 何井喜彦·山崎信二(1782) : 刑狀不連續付平板の非貫通形 缺陷に對する 曲げ疲勞壽命豫測(等一報). 日本造船學會 論文集 151, 245-254.
8. Irwin, G.R. (1962) : The Crack Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate. Trans. ASME, J.Appl. Mech., 651~656.
9. Rice, J.R. and M. Levy (1972) : The Part-Through Surface Crack in on Elastic Plate. Trans. ASME, J.Appl. Mech., 185.
10. 小寺澤良一·南坂繁(1977) : へ返し曲げよる非貫通疲勞き裂の進展. 日本材料學會誌 26(289), 955~961.
11. 金水泳·金植圭, 吳根鎬(1986) : 機械材料. 文運堂, 318-319.
12. Jaske, C.E. J.H.Payer and V.S. Balirt(1981): Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments. 1st ed., Springer-Verlag, Heidelberg.