

海洋構造物用 알루미늄합금의 SCC에 의한 破壞研究

—電位變化에 의한 SCC거동—

金 貴 植

The Fracture Study of SCC of Al-Alloy for Marine Structures

—Behavior of SCC in Various Potentials—

Gui-sig Kim

The test specimen, designated the double cantilever beam, was employed for a fracture mechanics study of stress corrosion cracking (SCC) of type 5083 Al-alloy in seawater.

Stress intensities for this DCB specimen were calculated by using compliance, strain energy release rate and relation between stress intensity and strain energy release rate.

Analytical expression for compliance as a function of crack length was obtained by applying beam theory.

It was investigated that the polarization potentials affected the growth rate and surface of stress corrosion cracking.

The results are as follows,

The critical stress intensity was $134.81-148.38 \text{ kg/mm}^{\frac{3}{2}}$ and K_{Ii} under polarization potentials was $75.92-145.78 \text{ kg/mm}^{\frac{3}{2}}$.

The minimum stress corrosion crack growth rate was occurred at -987 mV SCE .

Insoluble compound on β phase was looked into through SCC.

The greater anodic potential is, the larger insoluble compound on β phase becomes.

序 論

Al-Mg系 알루미늄합금은 가볍고 耐蝕性 및 熔接性이 양호하므로 海洋構造物 및 특수선박에의 적용이 고려되고 있다.¹⁾ 이 構造用材料는 기체나 액체 환경 중에서 靜荷重 또는 反復荷重을 받으면 低應力 혹은 短壽命으로 破壞하는데, 靜荷重의 경우를 應力腐蝕 龜裂(SCC)이라 한다.

海洋構造物의 경우, 海洋의 波浪으로 인한 應力의 영향이 크고, 海水 및 海洋大氣의 부식성, 異種金屬들을 함께 사용할 때 金屬간의 電解電池 형성 등의 應력과 腐蝕이 조합되어서 SCC을 일으킨다. 이러한

SCC現象의 해석에 彈性破壞力學의 수법을 적용함으로써 環境의 영향을 고려한 材料나 構造物에 허용되는 직접적인 強度設計의 기준치를 구할 수 있다. 또 腐蝕性環境의 材料強度低下를 防止하는 方法으로 i) 材料의 선택과 처리, ii) 부식성환경의 억제, iii) 電氣防蝕法 등이 있으나 이 중에서 電氣防蝕法이 가장 확실한 方法으로 알려져 있다.

本研究에서는 海洋構造物用材料로서 최근 수소가 급증하는 高力耐蝕性 알루미늄합금(Al-Mg系)의 SCC現象의 해석으로서 5083 알루미늄합금을 DCB시험편으로 가공하여 beam bending理論을 적용한 compliance法에 의해 應력확대계수를 구하고, 電氣防蝕法에

* 濟州大學校 : Jeju University

의한 SCC防止效果를 조사하기 위하여 數種의 分極 電位에서 응력확대계수와 [Crack성장속도, 分極電位와 crack성장속도 그리고 分極電位에 따른 SCC面을 調査 檢討하였다.

- I : moment of inertia of one of the arms. $Bh^3/12$
- C : Specimen compliance. reciprocal stiffness
- E_0 : polarization potential. -mV SCE
- G : Strain energy release rate

Nomenclature

材料 및 方法

- K_I : Stress Intensity Factor. $kg/mm^{3/2}$
- K_{Ic} : Critical Stress Intensity Factor. $kg/mm^{3/2}$
- K_{Ii} : K_I Value at Crack length a_i . $kg/mm^{3/2}$
- K_{Isc} : a K_I Value below which subcritical crack propagation does not occur. $kg/mm^{3/2}$
- a : Crack length. mm
- a_i : Crack growth length after submerged seawater. mm
- a_0 : an empirical rotation correction equal to $0.6h$. mm
- h : Specimen height. mm
- y : the total deflection of the two arms at the load point. mm
- E : modulus of elasticity. $7200kg/mm^2$
- B : Specimen thickness. mm
- V : Crack growth velocity. m/sec
- P : Load. kg

1. 試驗片

本實驗에 사용된 材料는 아닐링한 5083알루미늄합금으로서, 그 化學成分과 機械的 性質은 Table 1과 같다.

試驗片은 double cantilever beam 시험편으로 그 길이방향과 原材의 壓延方向이 동일하도록 절취하여 Fig.1과 같이 제작하였다.

試驗片상의 先在crack은 bolt 中心線에서 길이 $18 \pm 0.43mm$, 두께 $0.74mm$ 되게 가공하고 Crack 成長 길이를 측정하기 위하여 試驗片兩面에 $50mm$ 길이 reference scale을 height gauge로 作成하였다.

2. 試驗片 解析

DCB試驗片은 K_I 감소형으로 소수의 시험편으로 K_{Isc} 을 결정할 수 있으므로 실험실에서 많이 利用되고 그 力學과 거동에 대하여 많이 研究되어 왔다. 2), 3) ASTM STP 410에 의하면 DCB시험편의 K_I

Table 1. Chemical Composition and Mechanical Properties of Test Specimen

Chemical Composition (%)									Mechanical Properties		
Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al	T.S. (Kg/mm^2)	P.S (Kg/mm^2)	Elongation (%)
0.14	0.03	0.21	0.65	4.51	0.02	0.11	0.01	Re.	30	15	22

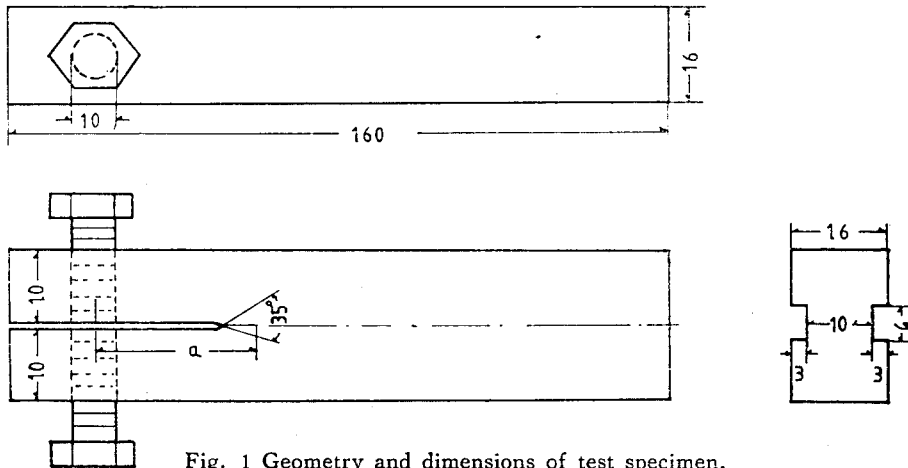


Fig.1 Geometry and dimensions of test specimen.

計算式이 주어져 있지만, $\frac{a}{h}$ 의 오차범위가 주어지지 않으면 compliance法에 의하도록 권장하고 있다. 4) crack길이의 함수로서 compliance에 beam理論을 적용한 해석방법은 다음과 같다.

$$y = \frac{P}{E} \phi \dots\dots\dots(1)$$

$\phi = Aa^n$, A, n은 常數

$$A = \frac{C_1}{I} \quad C_1 \text{은 常數}$$

y을 고쳐쓰면

$$y = \frac{P}{E} \frac{C_1}{I} a^n \dots\dots\dots(2)$$

beam 理論은

$$y = \frac{2Pa^3}{3EI} \dots\dots\dots(3)$$

여기에서 실험적으로 구한 C_1 과 n 은 beam 理論에서의 값과 거의 일치하므로 $C_1=0.667$, $n=3$ 을 적용한다. 2)

따라서 compliance은 다음과같이 표현된다.

$$C = \frac{y}{P} = \frac{2a^3}{3EI} \dots\dots\dots(4)$$

Mostovoy et al³⁾은 경계조건을 적용하여 compliance을 다음과 같이 나타내었다.

$$C = \frac{2}{3EI} [(a+a_0)^3 + h^2a] \dots\dots\dots(5)$$

그리고 crack이 단위면적만큼 진전했을 때 彈性體로부터 解放되는 에너지를 에너지해방율(G)이라고 하고 이 값이 材料의 특유한 값에 도달하면 crack이 成長한다고 보며, 다음과 같이 나타낸다.

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dc}{da} \dots\dots\dots(6)$$

또 에너지해방율(G)와 응력확대계수(K_I)의 관계는 다음과 같다.

$$K_I = (GE)^* \dots\dots\dots(7)$$

DCB시험편의 응력확대계수는 (5), (6), (7)式에서 다음과 같다.

$$K_I = \frac{yEh \sqrt{3h(a+0.6h)^2 + h^3}}{4[(a+0.6h)^3 + h^2a]} \dots\dots\dots(8)$$

3. 實驗裝置 및 方法

本研究의 實驗裝置는 Fig.2와 같다.

水槽는 아크릴板(두께 10mm)으로 700L×500W×300Hmm되게 제작하여 天然海水를 채웠다. 이때 사용한 海水의 質은 Table 2와 같으며, 수조내에서 試驗片을 세웠을때 실험용수의 水位가 crack先端에서 10mm위에 있도록 하였다.

Table 2. Quality of Sea water for the experiment

Hardness (ppm CaCO ₃)	M Alkalinity (ppm CaCO ₃)	Chloride (ppm Cl ⁻)	Specific Resistance (Ω-cm)	P. Temp. H. (°C)
4,400	94	14,300	26	8.26 15

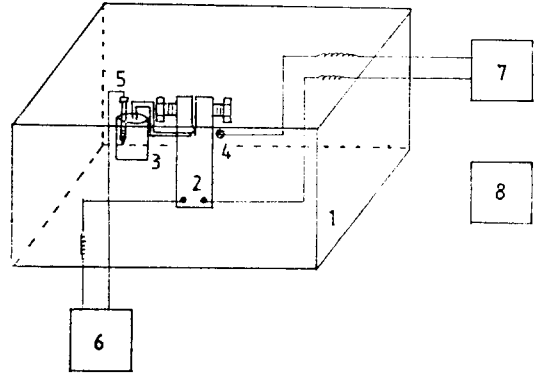


Fig. 2 Experimental Apparatus.

1. Water Tank
2. Test Specimen
3. Luggin Capillary
4. Pt insoluble electrode
5. Reference Electrode (SCE)
6. Potentiometer
7. D.C. Power Supply
8. Measurement Microscope

응력확대계수는 負荷볼트를 돌려서 crack이 생길 때의 볼트中心線의 變位(y)와 crack길이(a)을 측정하여 (8)式으로 K_Ic 을 결정하고, 各分極電位에서 K_Ii 을 결정하기 위하여 排流用端線과 測定用端線을 부착하고 crack先端을 제외한 前부분을 에폭시도료를 칠하여 絶緣한 후 水槽에 침지하였다.

crack成長速度는 crack길이의 시간에 대한 변화율로서, crack길이는 시험편兩面の reference scale과 measurement microscope (100×, 비力精工Co, p-303)으로 측정하였다.

分極電位는 DC power supply (0~5A, 30V, ALPHA Electronics)에 의해 백금電極과 시험편에 電流를 印加한 후 crack先端에서 1mm 떨어진 곳에 Luggin capillary을 설치하여 salt bridge에 의해 포화칼로멜電極으로 電位差計(Digital multimeter, DL 703, Trio-kenwood)로써 측정하였다. 이때 사용된 自作한 Luggin capillary은 photo.1과 같다.

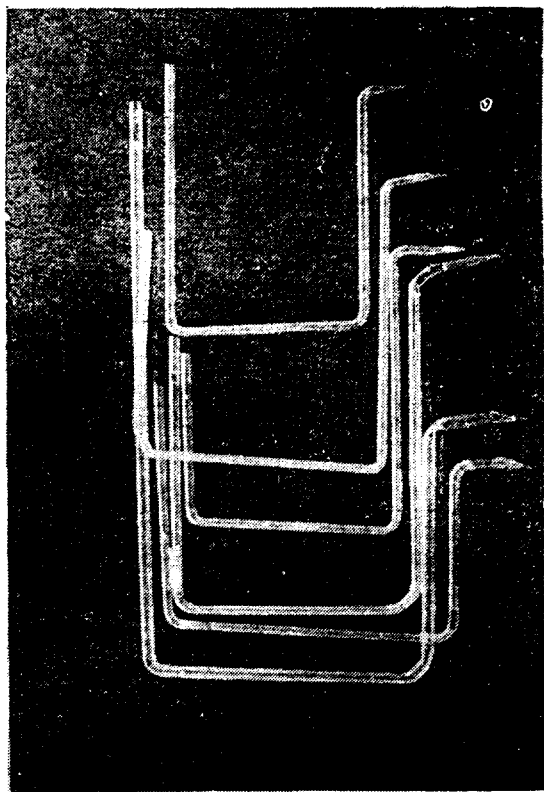


Photo. 1 Luggin Capillary.

結果 및 考察

1. K_I 와 V 의 관계

실험결과 얻어진 資料는 Table 3과 같고, 電位變化에 따른 K_I 와 V 의 거동은 Fig. 3에 도시하였다. 임계응력확대계수(K_{IC})는 134.81~148.38 $kg/mm^{\frac{3}{2}}$ 이었으며 이러한 차이가 보이는 것은 材質의 불균일과 crack先端의 특이성 때문이라 생각된다. 海水浸

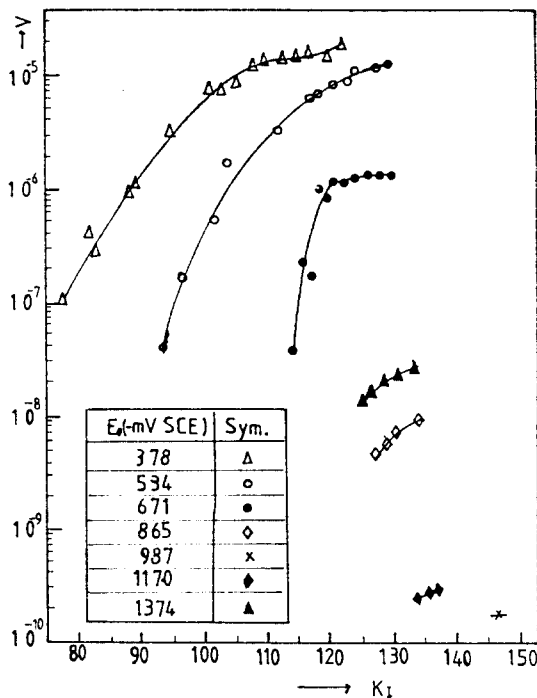


Fig. 3 Relation of K_I - V on polarization potential.

漬 554~1008시간의 범위에서 各 分極電位에 따른 K_{Ii} 은 75.92~145.78 $kg/mm^{\frac{3}{2}}$ 이었으며 7075-T6알루미늄합금의 NaCl과 $MgCl_2$ 혼합용액에서 K_{Isc} 가 95 $kg/mm^{\frac{3}{2}}$ 와는 陽分極電位 -534mV SCE에서 거의 비슷한 값을 나타내고 있다.

알루미늄합금 5083의 自然電位는 -865mV SCE였으며 이 보다 큰 것은 陽分極電位를, 적은 것은 陰分極電位를 나타낸다. 陽分極의 증대시 crack성장속도가 빨라지는데 이는 腐蝕의 영향이 큰 때문으로 생각되며, V 가 K_I 에 증속되는 구간(Region I)과 독립인 구간(Region II)이 대체적으로 나타나고 있

Table 3. Obtained Data

Specimen No.	Applied Ampere (A)	Applied Voltage (V)	Polarization Potential (-mV SCE)	y (mm)	a (mm)	a_i (mm)	K_{IC} (Kg/mm $^{\frac{3}{2}}$)	K_{Ii} (Kg/mm $^{\frac{3}{2}}$)
1	0.60	5.0	378	1.16	21.53	31.94	139.75	75.92
2	0.15	2.0	534	0.96	18.26	25.41	146.56	93.42
3	0.03	1.0	671	1.06	19.88	23.36	143.41	113.11
4	—	—	865	0.94	19.01	19.83	135.68	127.64
5	0.02	1.0	987	1.01	18.76	19.00	148.38	145.78
6	0.05	2.3	1170	1.12	21.02	21.61	139.76	134.20
7	0.10	4.0	1374	1.09	21.14	22.15	134.81	125.93

으며, Region II에서 crack성장속도는 各 分極電位에 따라 陽分極電位の 감소시에 저하하고 陰分極電位の 증가시에 상승한다. 그리고 최소 crack성장속도는 $-987mV$ SCE에서 나타났다.

2. V와 E₀의 관계

Region II에서의 V와 E₀의 관계는 Fig. 4와 같다. Speidel⁶⁾에 의하면 $10^{-10} \sim 10^{-11} m/sec$ 이하의 crack성장속도에서의 K_I를 K_{I,SCC}로 간주하여도 된다고 하였는데 本研究에서는 $-987mV$ SCE의 陰分極電位에서 $2.5 \times 10^{-10} m/sec$ 로 최소의 crack성장속도를 보여주고 있다.

알루미늄의 SCC에 대한 陰極防蝕의 관찰은 crack成長이 陽極溶解에 의한다는 가정하에 행하여질 수 있다. E₀에서의 陰極防蝕이 수소취화한다는 논쟁이 있으므로 알루미늄의 電位에 의해 crack成長을 최소화하는 것의 연구는 수소취부에 대한 研究와 병행하여야 할것으로 생각된다.

Speidel의 Al-Zn-Mg-Cu알루미늄(7079)의 KI溶液에서의 실험에 의하면 매우 낮은 陰極電位에서 부식속도가 상승하므로 수소취화가 아니라 음극알카리부식의 가능성도 있다고 하며, $-1.3 \sim -1.4$ VSCE에서 crack 성장속도가 최소화함을 제시하고 陰極防蝕의 效果를 보여주고 있다.

本研究에서도 $-987mV$ SCE에서 crack성장 속도가 최소화함을 나타내었다.

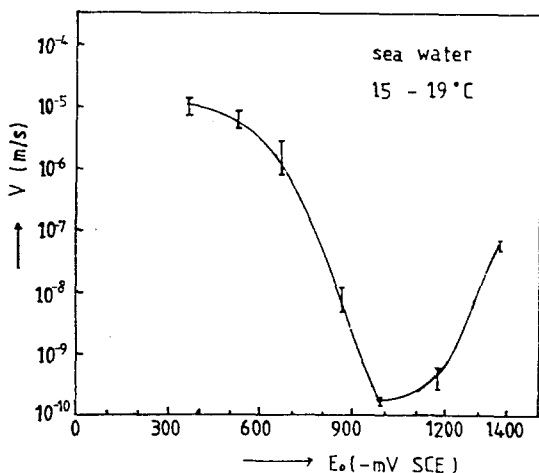


Fig. 4 Relation of V-E₀ at Resion II.

3. SCC面

알루미늄의 SCC은 粒界에서 β相(Mg₂Al₃)의

석출이 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다.⁷⁾

본실험의 SCC面을 microscope (×24)로 확대한 것은 Photo. 2와 같다. β相의 석출은 陽分極이 크면 크게 나타나고, 電位變化에 대한 crack성장속도가 빠르면 크게 나타난다.

要 約

分極電位變化에 따른 高力 耐蝕性 알루미늄(5083)의 SCC 거동을 研究 檢討한 결과를 要約하면 다음과 같다.

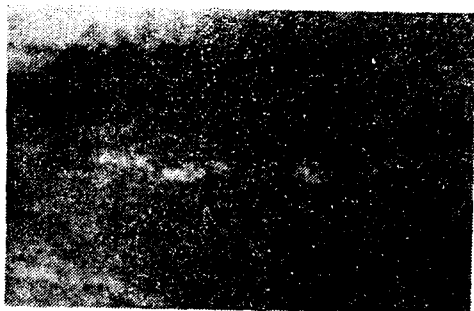
- 5083 알루미늄의 K_{IC}은 134.81~148.38kg/mm^{3/2}이며, 電位變化에 따라 K_I는 75.92~145.78kg/mm^{3/2}이다.
- K_I-V의 거동은 陽分極時 Region I과 II가 나타나고, K_I/K_{IC}의 비가 작을수록 crack成長速度도 빠르게 나타난다.
- 分極電位 $-987mV$ SCE에서 crack성장속도가 가장 지연되므로 122mV SCE을 陰分極하면 SCC防止效果를 얻을수 있을 것으로 생각된다.
- 粒界의 β相의 석출은 分極電位가 클수록 크게 나타난다.

文 獻

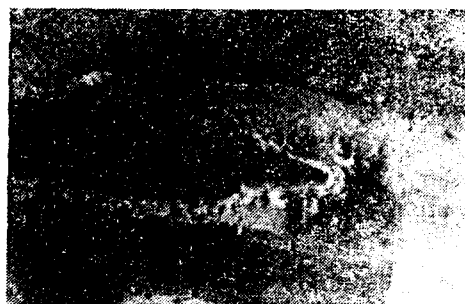
- 內藤(1982): 船舶におけるアルミ材利用の現状. M. E. S. J., 7(2), 68~75.
- Hoagland R.G. (1967): On the Use of the Double Cantilever Beam Specimen for Determining the plane Strain Fracture Toughness of metals. Journal of Basic Eng., Trans. ASME, Septem., 525~532.
- Mostovoy S., P.B. Crpsley, E.J. Ripling (1967): Use of Crack Line Loaded Specimen for Measuring Plane-strain Fracture Toughness. Journal of Basic Eng., Trans. ASME, Septem. 661.
- Brown W.F., J.E. Srawley (1966): Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials. ASTM STP 410.
- 최용식, 김대순(1983): Alclad 7075-T6의 NaCl 및 MgCl₂ 혼합수용액내에서의 SCC研究. KSME 春季抄録集, 99-103.

6. Speidel O. (1975) : Stress Corrosion Cracking of Al-Alloys, Metallurgical Trans., 6A, April, 631-651.

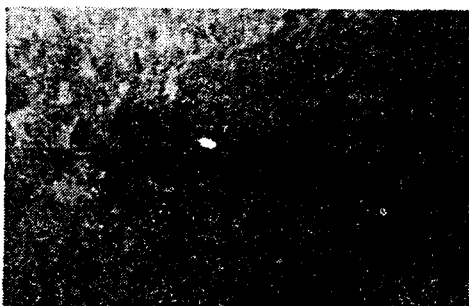
7. 圓城, 黒田, 篠永(1978) : 5083アルミニウム合金の應力腐食れに及ぼす不溶性化合物及びひび割れの影響, 軽金属熔接, 16(2), 553-560.



(1)



(4)



(2)



(5)



(3)



(6)

Photo. 2 Surface of SCC under various polarization potentials along 544-1008 hours.

- | | | |
|----------------|----------------|-----------------|
| 1) -378 mV SCE | 2) -534 mV SCE | 3) -671 mV SCE |
| 4) -865 mV SCE | 5) -987 mV SCE | 4) -1374 mV SCE |