

# 構造鋼 鋸接部の 局部靱性分布에 관한 研究

## A Study on Local Distribution of Fracture Toughness for Welded Joints of Steel Structure

장	동	일*
Chang,	Dong	Il
용	환	선**
Young,	Hwan	Sun
김	동	희***
Kim,	Dong	Hee

### Abstract

In the welded structure, the most dangerous section is welded parts and almost fractures of welded structure occur from welded parts. Accordingly, in order to prevent fracture, it is important seeking the fracture behavior of welded parts.

In this study as basic investigation of fracture behavior of welded parts, it is investigated that local distribution of fracture toughness and effect of multipass electrode welding, also effect of release of residual stress were investigated, as the subjected material, the used steel having fatigue history and unused steel were selected.

As the result of this study, it is clear that the base metal of unused steel and heat affected zone and weld metal are different each other in fracture toughness, and it seems clear that the weld metal may will become source of fracture because of it having the most low fracture toughness.

Especially, in the case of crack occur in the used steel, it will be the most brittle section in the structure because of it having low fracture toughness than weld metal. It affirms that, if welded parts has not flaw, the multi pass electrode welding effective to improve of fracture toughness, also release of residual stress is none effective to improve of fracture toughness in this study.

### 요 지

용접구조에 있어서 가장 위험한 단면은 용접부이며 대부분의 파괴가 용접부로부터 발생하였다. 따라서 용접부의 파괴거동을 확인하는 것은 파괴방지를 위하여 중요한 요소라 할 수 있다.

본 연구는 용접부의 파괴거동에 관한 기초적인 연구로서 용접부의 국부적인 인성분포와 다층용접

\* 정희원 · 한양대학교 공과대학 교수, 토목공학과

\*\* 정희원 · 대림공업전문대학 조교수, 토목공학과

\*\*\* 정희원 · 철도청 토목기과

의 효과 및 잔류응력제거풀림의 효과를 조사하였다. 연구에 사용된 기본소재로서는 피로이력을 갖고 있는 강재와 피로이력이 없는 강재를 선택하였다.

용접부에서 미사용강재(피로이력이 없는 강재)모재, 열영향부 용착금속의 파괴인성이 각각 차이가 있었고 용착금속은 균열저지능력으로서 파괴인성이 가장 작아서 파괴발생원이 될수 있음을 확인하였다. 특히 본연구의 대상강재인 기사용강재(피로이력을 갖고 있는 강재)는 파괴인성이 용착금속보다 작아서 균열이 존재하는 경우 가장 취약한 단면이 될수 있다는 것을 확인하였다.

다층용접은 용접부에 결합이 존재하지 않는다면 인성개선에 효과가 있음을 확인하였고 또한 잔류응력제거 풀림은 본연구에 관한 한은 효과가 없는 것으로 밝혀졌다.

## 1. 서 론

교량, 압력용기, 해양구조물 등의 대형구조물은 대부분 용접에 의해 만들어 지고 이들 구조물에서 파손 파괴는 거의 용접부의 균열상결합에서 시작된 피로균열이 성장하여 구조물의 종국파손을 일으킨다. 근간 용접구조물의 증가에 따라서 사용중 보수보강의 문제가 제기되고 있다. 특히 국내의 강철도교의 경우 매년 다수의 주구조재를 손용접에 의해 보강하고 있어 이러한 문제는 타구조물에서도 제기되리라고 생각된다<sup>(1,2,3)</sup>.

강구조물의 보수보강시 용접에 의해 접합하는 경우 안전성을 확보하는데 있어 균열의 발생과 내재균열의 성장에 대한 문제를 고려하지 않으면 안된다.

특히 교량과 같이 항상 동적인 재하상태에 있는 부재용접부에서 피로균열의 발생 및 성장에 대한 저항성인 파괴인성은 사용중 발생할 수 있는 파괴관리에 있어서 중요한 인자가 될수 있다<sup>(4,5)</sup>.

종래의 연구결과에 의하면 용접부에는 porosity, inclusion, lack of penetration, surface ripple 등의 균열상결합 이외에 용접열에 의한 야금학적인 취화 잔류응력 및 잔류변형에 의한 변형구속이 포함되어 인성을 저하 시키며 균열성장의 저지능력 및 피로수명을 단축시킨다. 더우기 지속적인 진동을 받아 피로가 누적된 강재를 용접하는 경우 용접부의 노치인성은 상당히 낮아지는 것으로 밝혀진 바 있다<sup>(6,7)</sup>.

균열성장의 저지능력인 인성의 관점에서 용접 열영향부(heat affected zone)는 결정조직의 변태로 인한 경화 때문에 모재에 비하여 상당히 낮아지고 용착금속(weld metal)도 급속한 용융 및 응고현상과 용접봉과 용제(flux)의 영향에 의

해 모재 및 열영향부와 다른 현상을 나타낸다<sup>(8,9,10)</sup>. 또한 열영향부도 용융선(fusion line)으로부터 거리에 따라 열영향이 다르므로 인성이 변한다. 이러한 원인에 의해 용접부에서는 극부적으로 인성이 불균일하게 되고 극부적인 인성의 불균일은 균열의 성장거동에 큰 영향을 줄수 있다고 생각한다. 용접부에서 균열의 성장거동은 이방성(anisotropy)을 나타내는 것으로 Sandifer, Bowie는 연구결과를 발표한 바 있다.<sup>(11)</sup> 이러한 원인은 인성의 불균일이 원인인 것 같으며 파괴거동의 파악에 있어서 확인하여야 할 과제라고 생각한다.

따라서 본연구는 용접부에서 극부적인 인성의 분포를 조사하고 아울러 손용접(manual welding)시에 다층용접(multipass electrode welding)의 영향 및 잔류응력제거풀림(stress relief annealing) 영향을 조사하였다. 본연구에 사용된 기본소재로는 피로이력을 갖고 있는 강재(이하 기사용강재)와 피로이력이 없는 강재(이하 미사용강재)를 택하였다.

## 2. 파괴인성

파괴인성이란 파괴기구를 규명하는데 있어서 파괴에 대한 저항능력을 나타내는 가장 효과적인 방법으로서 Rolf는 인성이란 노치를 갖고 있는 재료가 소성적으로 변형하거나 하중을 받을 수 있는 능력이라 정의하였고 응력강도계수(stress intensity factor)라는 항으로 표시하며 응력강도계수가 극한값에 이르면 균열은 성장한다<sup>(13,14)</sup>. 특히 연강 등 저인성재료에서 정적 동적 충격하중에 의한 극한 응력강도계수를 파괴인성이라 한다.

균열성장에 대한 저항으로서 파괴인성에 영향

을 주는 요소는 여러가지가 있으며 이들은 복합적으로 작용하기 때문에 파괴해석에 있어서 영향인자를 일률적으로 제어하는 것은 불가능하다. 따라서 현재까지는 각각의 영향인자에 대하여 인성에 미치는 영향이 연구되고 있으며 다만 정량적으로 모델화가 가능한 균열형상, 시험편의 형상 작용응력의 함수로 응력강도계수를 계산하는데 머물고 있다<sup>(15,16)</sup>.

그러나 실제문제에 있어서 강재는 연성재료에서 항복응력이 있는것 같이 취성재료로서 파괴인성값을 갖고 있기 때문에 특정온도 특정부하 조건에서 불안정균열이 성장하는 한계값인 파괴인성을 실험에 의해 경험적으로 결정하는 것이 현재까지는 현실적이다. 이로부터 인성의 제어가 가능하게 되고 설계, 감리, 검사 등에 있어서 경험적으로 얻어진 파괴인성값이 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나 파괴인성을 실험적으로 구하는데 있어서 실제구조물의 파괴에서와 같은 취성 파괴조건을 만족할수 있는 조건 즉 평면변형하의 탄성파괴를 만족할 수 있도록 균열끝의 소성역의 크기의 영향이 무시될 수 있기 위하여는 시험편의 폭, 두께, 균열길이 등이 다음의 조건에 만족되어야 한다<sup>(12)</sup>.

$$\text{균열길이 } a \geq 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$\text{시험편의 두께 } B \geq 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$\text{시험편의 폭 } W \geq 5.0 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.3)$$

여기서  $K_{IC}$  : 정적파괴인성

$\sigma_y$  : 0.5% offset 항복강도

상기의 조건을 만족하자면 시험편이 충분히 커야되고 시험편제작 및 기계설비 등의 엄청난 경비가 필요하게 되는 등 여러가지 실험의 제약조건이 되어 각국의 지방서에서는 요구 인성치를 간편한 시설과 작은 시험편으로 시험이 가능한 CVN노치 인성치에 근거를 두고 있으며 이러한 방법은 용접선이나 핵압력용기에서도 마찬가지로 사용된다. 이러한 시험편 및 실험장치의 소형화의 요구에 따라 T. yokomaku 와 H. Toyda 는  $J_{IC}$  파괴인성을 Charpy 모양의 소형실험편에 의해 구한 경우도 있다<sup>(20)</sup>.

CVN 값이 연성재료의 파괴거동에 있어서 인

성을 결정하는 방법으로 사용된 것은 파괴역학이 발전되기 이전부터이며 다행히도 CVN 시험편의 노치에서 평면변형상태의 구속이 이루어지고 천이온도가 평면변형상태의 파괴인성 ( $K_{IC}$ ) 시험과 같다는 것이 Clausing, Hollomon 등의 연구결과에서 밝혀졌으며 이를 토대로 Rolf-Barsom-Novok 가 다음과 같은  $K_{IC}$  CVN 관계식을 제안하였다<sup>(12)</sup>.

Upper Shelf Region

$$\left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 = \frac{5}{\sigma_y} \left[ CVN - \frac{\sigma_y}{20} \right]$$

Transition Region

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = A [CVN]$$

여기서 CVN : Charpy V-Notch 충격시험의 흡수에너지

A : 상수

伊藤 등은 Rolf-Barson 의 식을 C.G.S 단위로 환산하여 다음과 같은 관계가 있음을 발표하였다<sup>(17)</sup>.

용접부 Bond 부에서

$$K_{IC} = 120 (V_E)^{\frac{3}{4}}$$

항복강도를 고려해서

$$\left( \frac{K_{IC}}{100} \right)^2 = 300 \left( \frac{V_E}{\sigma_y} \right)$$

여기서  $V_E$  : Impact energy

본 연구에서는 실험시설의 제약 및 시험편의 두께가 ASTM E 399~74 에 미달되는 8~9 mm 밖에 되지않아 충격흡수에너지로부터 伊藤의 식에 따라 정적 파괴인성치 ( $K_{IC}$ )를 계산하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험방법

실험재료는 피로이력을 갖고 있는 강재(이하 기사용강재)로서 철거된 철도교리베타판형에서 채취하였으며 이와 용접한 강재는 포철산 SWS 41 (이하 미사용강재)이다.

화학성분 및 기계적성질은 표 3.1 과 같다.

강재의 용접은 그림 3.1 과 같이 개선각(벌림각) 45° 의 맞대기흡용접으로 하였으며 용접봉은 저수조제일미나이트용접봉을 사용하였다.

용접시에 다층 용접의 영향을 검토하기 위하

표 3.1 Chemical composition of test material

	(%)				
steel	C	S <sub>i</sub>	M <sub>i</sub>	T	S
unused steel	0.28	0.07	0.76	0.15	0.016
used steel	0.31	0.06	0.43	0.023	0.050

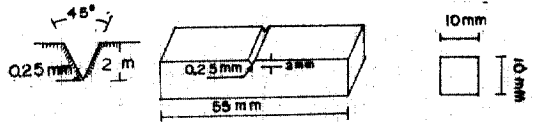


그림 3.3 Shape of Charpy V-notch impact test specimen

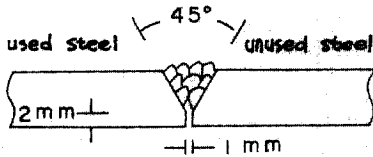


그림 3.1 Configuration of welding

여 용접봉의 이송 방법을 one pass 와 two pass 로 하였고 two pass 용접을 표준으로 하여 one pass 용접과 비교하였다. 또한 용접에 의한 잔류 응력의 영향을 검토하기 위하여 1개의 용접재를 550°C 에서 2시간동안 잔류응력제거풀림(stress relief)하였다.

충격시험편은 용착금속 열영향부 모재에 노치가 위치 하도록 하여 각각 4개씩 만들었으며 다층용접의 영향을 비교하기 위하여 one pass 시험편에서 H.A.Z, WM 에 노치가 오도록 각각 1개씩 SR 효과를 확인하기 위하여 SR 시험재의 용착금속 열영향부 모재에서 각 1개씩 4개 등도합 22개를 만들었다.

시험편의 채취위치는 그림 3.2와 같다. 충격시험편의 형상은 KSB 0809 에 따라서 그림 3.3과 같도록 제작하였으며 노치는 표준노치로서 각 45°, 길이 2 mm, 끝의 반경은 0.25 mm 로 하였다.

실험은 표준형 30 kg-m용량의 Charpy V-notch 충격시험기를 사용하였으며 흡수에너지의 측정

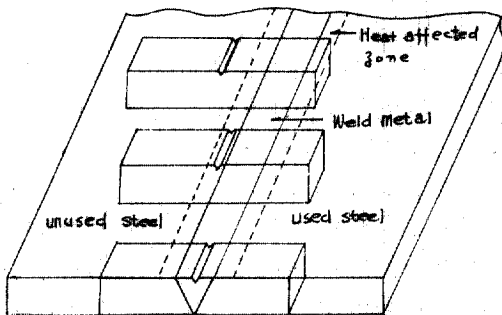


그림 3.2 The position of extraction of specimen

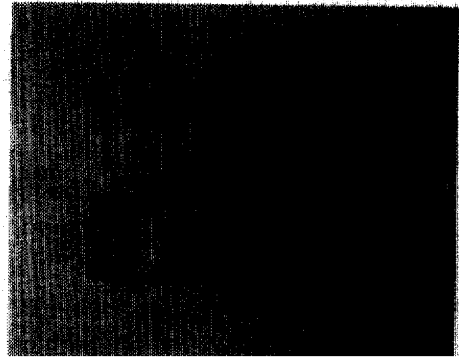


그림 3.4 Figure of test specimen

은 4개 온도 (-20°C, 0°C, 10°C, 20°C)에서 행하였고 정적파괴인성(K<sub>IC</sub>)은 伊藤의 식을 사용하여 계산하였다.

제작된 충격시험편의 모양은 그림 3.4와 같다.

#### 4. 고 찰

표 4.1 및 표 4.2는 4개 온도(20°C, 10°C, 0°C, -10°C)와 S.R한 시험재 및 one pass 시험재에서 시험위치(모재 열영향부 용착금속)에 따른 충격 흡수에너지와 정적파괴인성이다.

그림 4.1은 각시험 위치에 있어서 온도변화에

표 4.1 The impact energy obtained from Charpy V-notch impact test

classification	base metal		HAZ	WM
	used steel	unused steel		
20°C	4.6	18.8	16.9	9.2
10°C	4.2	19.8	16.4	7.3
0°C	1.7	17.9	12.9	5.4
-20°C	3.1	6.1	8.6	3.9
S.R.(10°C)	4.9	18.1	14.7	7.1
one pass(10°C)			17.1	5.1

표 4.2 The fracture toughness calculating by Ito equation

classification	Base metal		HAZ	WM
	used steel	unused steel		
20°C	376.8	1083.6	1008.6	633.6
10°C	351.6	1096.8	978.0	639.0
0°C	178.8	1039.8	816.7	424.8
-20°C	279.6	463.2	602.4	333.0
S.R.(10°C)	395.2	1074.8	900.1	521.9
one pass(10°C)			1009.8	407.2

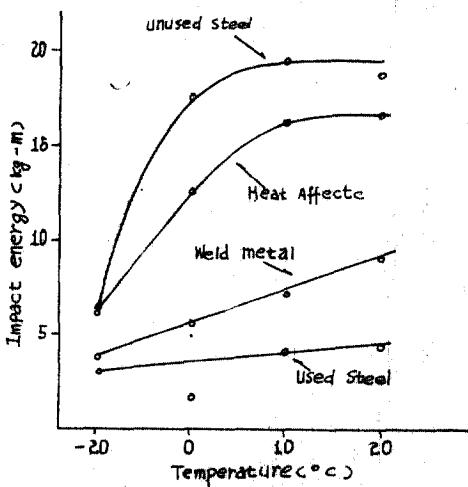


그림 4.1 The relation of impact energy and temperature of test specimen.

다른 흡수에너지 천이현상을 나타낸다. 표 4.2 및 그림 4.1을 참고하면 정적파괴인성은 기사용강재 모재를 제외하면 작은도에서 공히 미사용강재 모재가 가장 크고 열영향부 용착금속의 순서로 감소하였다. 이러한 현상은 일반적인 경향과 일치하지만 기사용강재모재는 정적파괴인성이 전체온도영역에서 열영향부 용착금속보다도 훨씬 작았다. 그 차이는 미사용강재 모재보다 20°C에서 14.2 kg-m, -20°C에서 3.0 kg-m 정도이며 용착금속에 비해서는 20°C에서 4.8 kg-m, 0°C에서 0.8 kg-m가 작았다. 그림 4.1을 참고하면 미사용강재모재와 열영향부에서는 흡수에너지 천이현상이 뚜렷하고 일반적인 흡수에너지 천이의 경향에 부합되나 용착금속 및 기사용강재모재에서는 천이현상을 거의 나타내지 않았고

더우기 기사용강재모재는 그 현상이 불규칙하다. 천이온도를 고려하는 경우 미사용강재나 열영향부는 -20°C에서 0°C사이라고 할 수 있으나 용착금속이나 기사용강재에 있어서는 천이온도를 상온영역까지로 볼 수 있기 때문에 상온에서도 취성을 갖고 있는 것으로 생각된다. Banks<sup>(9)</sup>의 연구결과 (22.5 kg/mm<sup>2</sup> 급강재 및 35.7 kg/mm<sup>2</sup> 급강재)와 비교하면 기사용강재의 천이온도가 10°C 이상 높다. 또한 기발표된 연구결과<sup>(6)</sup>와 비교하여도 기사용강재의 천이온도가 10°C 이상 높은 것으로 나타났다. 기사용강재의 이러한 거동은 연성상실을 의미하며 온도의 영향을 크게 받지 않는 상온에서도 변형구속이 크게 작용하는 것으로 생각된다. 이러한 원인은 기사용강재의 경화가 원인인 것으로 생각되고 이러한 경향은 기발표된 연구결과<sup>(6,6)</sup>에서 논의된 바와 같다. 이상의 결과로부터 현재 철교보수시 기사용강재와 미사용강재를 용접하는 경우 기사용강재의 저인성현상은 안전확보라는 관점에서 문제점이 될수 있다고 생각된다.

손용접에 의한 용접에 있어서 열영향을 줄이기 위하여 비드의 이송을 다층으로 하는 경우 파괴인성에 대한 영향을 조사하기 위한 two pass 용접과 one pass 용접의 시험결과를 비교한 것이 표 4.3이다. 측정온도는 10°C로서 동일한 조건을 부여하였다. 표 4.3에 의하면 파괴인성은 열영향부에서 one pass 시험편과 비슷하나 용착금속부에서는 two pass 시험편이 크다. 따라서 용접부의 파괴발생근원인 용착금속에서 slag를 완전히 제거한다면 열영향을 적게 받을 수 있는 two pass 용접이 유리한 것으로 생각된다.

치수가 큰 실구조물에의 적용은 곤란하나 연구를 목적으로 하여 용접시험편을 S.R 하는 경우가 많으며 이에 관한 연구결과가 보고된 바 있다<sup>(19)</sup>.

표 4.4는 본연구에 있어 S.R 하지 않은 시험편과 S.R 한 시험편의 정적파괴인성을 나타낸 것이고 10°C의 동일한 온도에서 측정계산된 것이다. 그림 4.2는 표 4.4를 도표화한 것이다. 표 4.4와 그림 4.2에 의하면 파괴인성은 기사용강재를 제외하면 모든 실험위치(미사용강재모재 열영향부 용착금속)에서 S.R 한 것이 작았다. 그

표 4.3 The fracture toughness of two types of electrode passing(10°C)

position type	kg mm <sup>-3/2</sup>	
	HAZ	WM
two pass	978	639
one pass	1009	407

표 4.4 The fracture toughness of normal and S.R specimen(10°C)

classification	(kg mm <sup>-3/2</sup> )			
	used steel	unused steel	HAZ	WM
normal	351.6	1096.8	978	639
S.R	395.2	1074.8	900	521.9

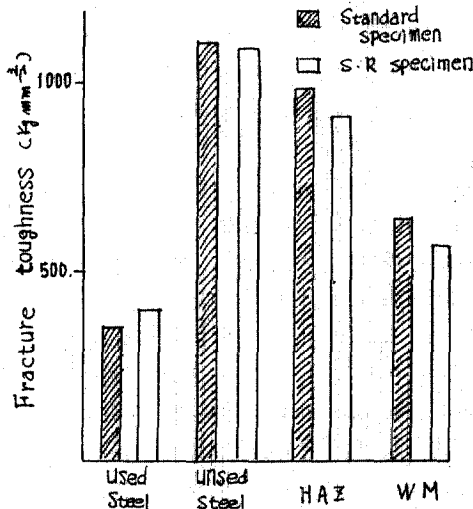


그림 4.2 The fracture toughness for tested material(10°C)

러나 그 차이는 크지 않았다. 실험결과는 S.R 이 인성을 개선한다는 연구결과와 일치하지 않아 본실험결과로부터는 S.R 이 별로 효과가 없는것 같고 일부의 연구결과는 S.R 취화 가능성을 제시하고 있어서 더 연구하여야 할 과제라고 생각한다.

### 5. 결 론

피로이력을 갖고 있는 기사용강재와 피로이력이 없는 미사용강재를 용접할 때 용접부에서 국부적인 인성분포에 관한 연구의 결과를 요약하

면 다음과 같다.

1. 용착금속부의 파괴인성은 열영향부나 모재보다 상당히 낮아서 용접구조의 파괴시 파괴발생원이 될 수 있다는 파괴현상의 일반적인 경향에 부합되나 기사용강재의 경화성으로 인한 연성상실은 경우에 따라서 용착금속보다 더 큰 파괴의 위험요소로서 작용할 수 있다는 것을 알 수 있었다.
2. 용접열에 의한 잔류응력의 영향을 고려한다면 two pass 용접이 입열량이 큰 one pass 용접보다도 효과가 있다는 것을 알 수 있었다.
3. 본연구에 있어서 S.R 은 경화도가 큰 기사용강재에서는 효과가 있었으나 미사용강재, 열영향부, 용착금속에서는 효과가 없음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. M.A. Hirt and J.W. Fisher "Fatigue Crack Growth in Welded Beam" *Engineering Fracture Mechanics Vol. 5*, 1973.
2. 阿部英彦 "鐵道橋における疲勞と對策" *Proc JSCE Vol. 15 No. 166*, 1979.
3. 西村俊夫 "鋸接鐵道橋の破壞事故" *日本溶接學會誌* 第37卷 第10號 1968.
4. Toyota and Sato "靱性分布をもつ溶接部の破壞と評價" *關西造船協會誌*, 第179號 1970. 12.
5. 장동일, 용환선 "鐵道橋梁의 鋸接部에서 피로균열의 成長特性" *대한토목학회논문집* 제 4 권 제 1 호 1984. 3.
6. 장동일, 황윤국, 용환선 "구조용연강재의 피로경화의 영향에 관한 연구" *대한토목학회논문집* 제 2 권 제 4 호 1982. 12.
7. T. Kawabata and Izumi. O., "On the Relationship between Ductility and Fracture Toughness in an Al-60% Zn-2.5% Mg Alloy" *Acta Metallologica Vol. 29*, 1981.
8. 橋內梁雄 "突合せ溶接部材および母材のき裂傳播舉動" *日本機械學會誌*, 第49卷 第419號(1971. 7).
9. E. Banks "Toughness Properties of H.A.Z. Structure in Structural Steel" *Welding Research Supplement* July 1974.
10. E. smith 등 "Weld Hest Affected Zone Structure and Properties of Two Mild Steels" *Welding Metal, Fabrication*, June. 1970.

11. J.P. Sandifer and G.Z. Bowie "Fatigue Propagation in A537 Steel" ASTM STP 648.
12. S.T. Rolf and J.M. Barso "*Fracture and Fracture Control in Structure*" prentice Hall 1977.
13. G.R. Irwin "Linear Fracture Mechanics, Fracture Transition and Fracture Control" Engineering Fracture control" *Engineering Fracture Mechanics Vol. 1*, 1968.
14. Y. Ueda and T. Yao "Calculation Method of Stress Intensity Factors" 日本溶接學會誌, 第42卷 第9號
15. V. Weiss "Fracture Mechanics 1975-An Overvie" *Application of Fracture Mechanics to Design* plenum press 1979, pp.1~22.
16. 鄭榮和 "應力強度係數의 計算에 관한 기초" 강원 대학교 논문집 제18호 1983.
17. 小倉信和 "破壊靱性とその試験方法" 日本溶接學會誌, 第42卷 第9號 1973.
18. 菊田米男 "調質鋼溶接部の組織と靱性" 溶接學會誌, 第50卷 第1號 1981.
19. 佐藤誠 "50kg~60kg級 非組質鋼 溶接部の組織と靱性" 溶接學會誌, 第50卷 第1號 1981.
20. T.Yokomaku, H. Toyoda " $J_{Ic}$  Fracture Toughness Test on Charpy-size Specimens and Its Application to Evaluation of Heated Affected Zone Toughness in Steel Plates" *Proc JSMS Vol. 33, No. 368*, 5, 1984.

(接受: 1984. 4. 20)