

**研究論文**

## SM 490A강으로 제작된 T형 편면용접이음재의 굽힘피로강도에 관한 연구

엄동석\* · 강성원\* · 이태훈\*\* · 이해우\*\*\* · 조수형\*\*\*\*

### A Study on Bending Fatigue Strength of One Side Fillet Welded T-Joint by SM 490A steel

D. S. Um\*, S. W. Kang\*, T. H. Lee\*\*, H. W. Lee\*\*\* and S. H. Choi\*\*\*\*

**Key Words** : one side fillet welded T-joint (T형 편면용접이음재), bending fatigue strength (굽힘 피로강도), optimum weld joint design (최적 용접이음 설계), burn through (용락), F. E. M analysis (유한요소법 해석), SM 490A steel (SM 490A강)

#### Abstract

In this study, a fillet size for bending fatigue strength of one side fillet welded T-joint, used in box type girder and other welding structure, was investigated by bending fatigue test with or without edge preparation and burn through, with variation of joint shape.

As a result, the following conclusions were obtained.

(1) In one side fillet welded T-joint, the larger the leg length, the greater the bending fatigue strength. The increase of the horizontal leg length rather than vertical leg length contributed to the increase in bending fatigue strength.

(2) One side fillet welded T-joint with edge preparation showed higher bending fatigue strength than that with twofold-large leg length and without edge preparation.

(3) In one side fillet welded T-joint without edge preparation, both manual welding and automatic welding were carried out with same condition. In this case, automatic welding showed deeper penetration and more increased horizontal leg length than manual welding, so that automatic welding offers greater bending fatigue strength.

※ 1998년 8월 29일 접수

\* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

\*\* 학생회원, 부산대학교 조선해양공학과 대학원

\*\*\* 정회원, 삼성중공업 조선플랜트 연구소

\*\*\*\* 정회원, 볼보 중장비사업본부 생산기술팀

(4) For one side fillet welded T-joint without edge preparation, the ratio ( $h/t$ ) of the leg length ( $h$ ) and the main plate thickness ( $t$ ) in which toe crack can occur was 1.2 over

(5) In one side fillet welded T-joint with edge preparation, the burn through led to reduced bending fatigue strength. However, this bending fatigue strength was higher than that of one side fillet welded T-joint without edge preparation and with a larger leg length.

## 1. 서 론

T형 편면용접이음<sup>1)</sup>은 구조물에서 양면용접이 어려운 부위나 박스형 거더 그리고 기타용접구조물에 채용되고 있는 용접이음의 한 형태이다. 근래에 용접자동화가 이루어지면서 T형 편면용접이음재 제작시 기존의 홈가공을 적용하면, 홈가공의 정확도문제로 용락현상이 발생되며, 이로 인해 자동용접 중간에 작업이 중지되는 문제가 생긴다. 또 용락과 같은 결함은 보수가 완벽하지 못해 실제 작업환경에서 많은 문제를 일으킬 수 있다. 공수상에 있어서도 Table 1과 같이 홈가공 공정으로 인해 많은 손실이 따르게 된다. 따라서 홈가공 공정을 생략할 경우 이러한 문제의 해결이 가능하나 이음부의 강도에 대한 새로운 평가가 있어야 한다. 최근 용접이음부의 피로강도에 대한 많은 연구가 행해지고 있지만, T형 편면용접이음재의 피로강도, 그 중에서도 굽힘피로강도에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 용입부족부를 갖는 T형 편면용접이음재는 피로하중을 받게되면 루트부 또는 토우부에서 파단한다. 그러나 루트부에서 발생, 전파하는 피로균열은 발견 및 보수가 곤란하므로 용입부족부가 있는 T형 편면용접이음재를 제작할 경우에는 루트파괴가 일어나지 않도록 치수를 결정할 필요가 있다<sup>2)</sup>.

이에 본 연구에서는 T형 편면용접이음재의 홈가공 유·무 및 용접이음형상에 따른 굽힘피로강도를 조사하여 T형 편면용접이음재 제작시 용접시공 조건과 설계기준을 제공하고자 한다. 또한 작업과

정중에 용락현상이 발생한 경우의 굽힘피로강도를 확인하기 위해, 고의적으로 용락을 생기게 하는 시공방법에 의해 제작한 이음재에 대한 굽힘피로강도에 대해서도 조사하였다.

## 2. 시험편 제작 및 실험방법

본 연구에 채용한 용접이음재는 SM 490A강을 사용해 두께가 14mm인 판에 12mm판을 T형으로 배치하여 제작하였다. A type 이음재는 홈가공한 후 1pass로 자동용접, B type 이음재는 홈가공하지 않고 1pass로 자동용접하였고, C type 이음재는 홈가공하지 않고 1pass로 수동용접하였다. D, E, F type 이음재는 홈가공하지 않고 각 2, 3, 4pass로 자동용접해 다리길이가 증가 되도록 제작하였다. G type 이음재는 판 사이에 gap을 2mm 유지하여 반자동 수동용접으로 용락이 발생하게 용접하였다.

1pass일 경우, 각변형은 거의 없었으나 1pass이상일 경우 각변형이 예상되어 가용접을 다수 실시하고 web재를 구속하여 용접함으로써 각변형을 억제시켰다. 제작한 이음재를 정반 위에 올려놓고 끝단을 다이알게이지로 확인하여 보았으나 각변형량은 0.5mm이하였다.

Fig. 1은 각 type 용접이음재의 개략도이다. 각 용접이음재의 용접조건과 용접부 형상은 Table 2에 나타내었다.

사용강재의 기계적 성질과 화학조성은 Table 3과 Table 4에 용착금속의 기계적 성질과 화학조성은 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

피로시험편은 용접이음재에서 Fig. 2와 같이 편

Table 1. Reduction of time depend on edge preparation omission

edge preparation omission	box girder type manufacture of 1 type box girder of A company (minute)	manufacture of 2 type box girder of A company (minute)
reduction of edge preparation time	26	23
reduction of welding time	30	28

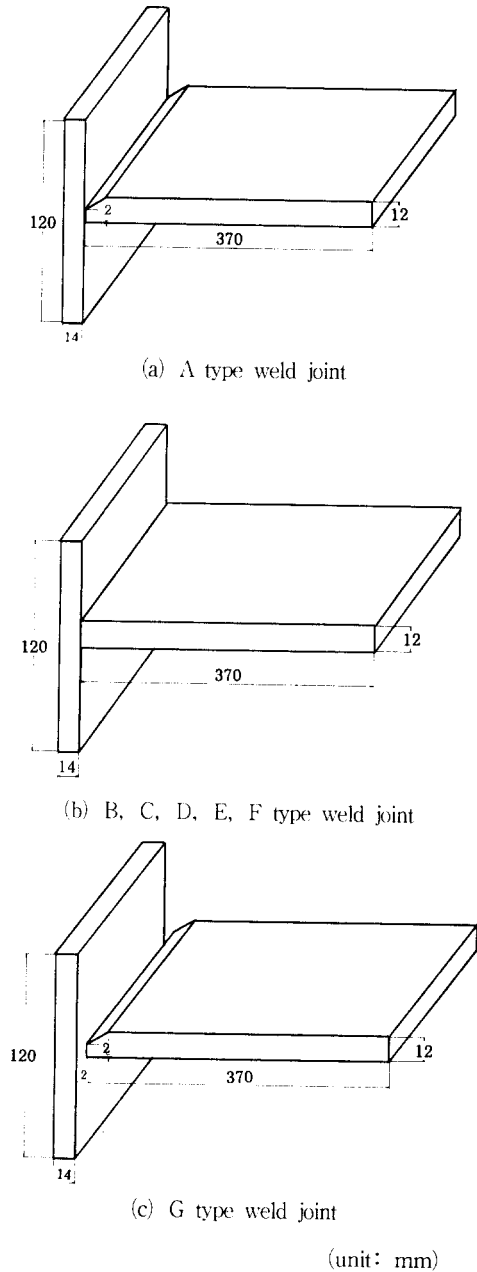


Fig. 1 Schematic diagram of weld joint

면필릿용접된 일정단면 외팔보 시험편을 이음재에서 가스절단한 후 절단부를 기계가공하여 제작하였다. 그 후 시험편의 필릿부분을 마크로 부식한

후 광학현미경으로 관찰하여 각 시험편 type에 따른 용접부의 용입형태를 조사하여 그 평균치를 Table 7에 나타내었다.

본 연구에 사용한 피로시험기는 용량 70kgf 일정진폭 굽힘피로시험기이며 시험편 자유단의 변위제어에 의하여 시험부의 응력을 제어하도록 한 시험기이다.

피로하중의 파형은 정현파를 채용하였고, 하중반복속도는 6-10Hz에서 시험하중의 크기에 따라 변화시켰다. 피로시험방법은 자유단의 변위제어 피로시험법을 채용하였으며 응력비  $R=-1$ 로 완전양진상태가 되도록 하였다.

본 연구에서 피로수명은 시험편이 완전히 파단한 하중반복수로 정의하였고, 시험편의 파단수명이 길 경우에는  $3 \times 10^6$ 회의 반복수에서 피로시험을 중지하였다.

스트레인 게이지를 토우부와 토우부로부터 113mm 떨어진 지점의 상하면에 부착하여, 시험편이 완전양진상태로 체결되었는지를 확인하였다.

Fig. 3은 본 연구에 채용한 굽힘피로시험 시스템이다.

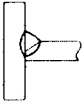
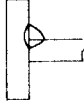

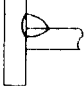
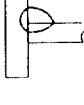
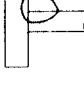

### 3. 유한요소법에 의한 해석

T형 편면용접이음재의 토우부 및 루트부의 응력상태를 조사하기 위해 범용해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 각 이음재의 필릿형상을 고려한 모델링에 의해 응력해석을 수행하였다. 시험편의 선체적 모델링은 Fig. 4, 필릿부는 Fig. 5와 같이 하였고 필릿부의 모델링시 시험편 type에 따른 불용입부의 길이는 시험편의 용접부단면을 부식시켜 측정된 치수를 채용하였다.

토우부와 루트부는 (1/16)t로 mesh를 작게 하여 응력집중의 효과가 나타나도록 하였고 나머지 부분은 (1/5)t로 auto-mesh하였다.

실제 피로실험에서는 변위가 최소  $\pm 3.81\text{mm}$ 에서 최대  $\pm 15.24\text{mm}$ 이나, 유한요소해석에서는 0에서 15mm까지 1mm씩 변위를 증가시켜가며 해석을 수행하였다. 본 시험편의 경우 (-) 변위, 즉 루트부에 압축응력이 작용할 때에도 contact<sup>3)</sup> 문제가 발생하지 않았기 때문에 (-) 변위일 때와 (+) 변위일 때의 해석치가 근사하여 (+) 변위의 경우만 해석하였다. 그리고 변위가 큰 경우 토우부 및 루트부에

Table 2. Shape of weld zone and welding condition

condition type	Shape of weld zone	Leg length (mm) (vertical × horizontal)	Edge preparation	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Diameter of wire ( $\phi$ )	Welding process	Shielding gas
A		3×9	○	1 pass	320	29	35	1.6	automatic	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%
B		9×10	×	1 pass	350	40	35	1.6	automatic	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%
C		13×8	×	1 pass	350	40	35	1.6	manual	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%
D		10×11	×	1 pass	350	25	35	1.6	automatic	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%
				2 pass	320					
E		13×14	×	1 pass	300	26	35	1.6	automatic	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%
				2 pass	320					
				3 pass	280					
F		14×17	×	1 pass	320	26	35	1.6	automatic	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%
				2 pass	300					
				3 pass	280					
				4 pass	280					
G		5×12	○	1 pass	250	23-35	35	1.6	semi- automatic	Ar 80% CO <sub>2</sub> 20%

**Table 3.** Mechanical properties of plate (SM 490A)

Rolling direction	Tensile Test		
	Y. P. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T. S. (kgf/mm <sup>2</sup> )	EL. (%)
L	39.8	54.6	25
C	39.5	54.1	23

**Table 4.** Chemical composition of plate (SM 490A)

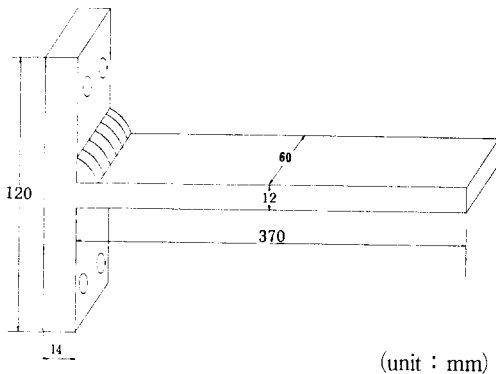
chemical composition (wt. %)					
C	Si	Mn	P	S	Nb
0.13	0.41	1.12	0.016	0.012	0.03

**Table 5.** Mechanical properties of weld metal

Y. P. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T. S. (kgf/mm <sup>2</sup> )	EL. (%)	I. V. (J)	Heat treatment after welding
46.94	55.10	31	140	As received after welding

**Table 6.** Chemical composition of weld metal

Chemical composition (wt. %)				
C	Mn	Si	P	S
0.090	0.980	0.440	0.010	0.010

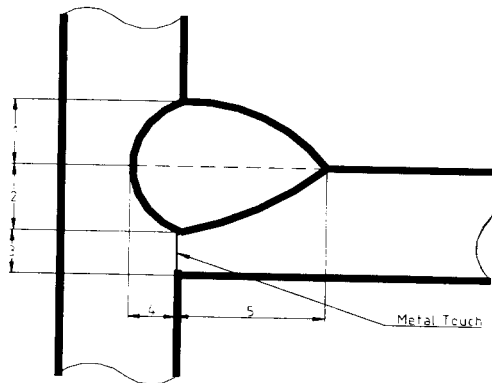


**Fig. 2** Schematic diagram of bending fatigue test specimen

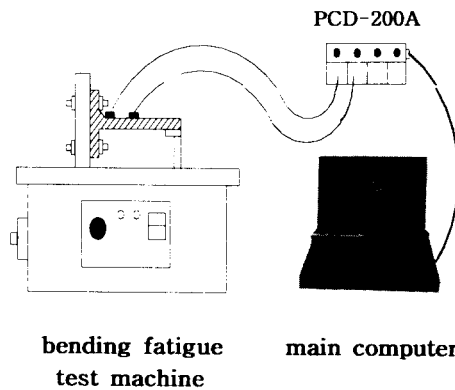
작용하는 응력이 항복응력 이상이므로 Newton Raphson법을 이용하여 비선형 탄소성해석을 수행하였다'.

Fig. 6-12는 0에서 15mm까지 1mm씩 변위를 증가시킬 때, 각 시험편 type에 따른 토우부와 루트

**Table 7.** Dimension of weld zone



dimension \ specimen type	1	2	3	4	5
A	3	10	2	3	9
B	9	6	6	4	10
C	13	2	10	5	8
D	10	4	8	2	11
E	13	4	8	2	14
F	14	2	10	2	17
G	5	11	1	2	12



**Fig. 3** Schematic diagram of bending fatigue test system

부의  $|\sigma_{EQV}|$  와  $|\epsilon_{EQV}|$  를 나타낸 것이다<sup>5,6)</sup>.

$$\sigma_{EQV} = \sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2$$

$$\epsilon_{EQV} = \epsilon_x^2 - \epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_y^2 + 3\epsilon_{xy}^2$$

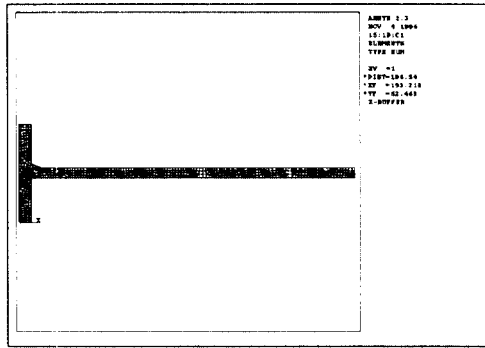


Fig. 4 Shape of F. E. M analysis modeling

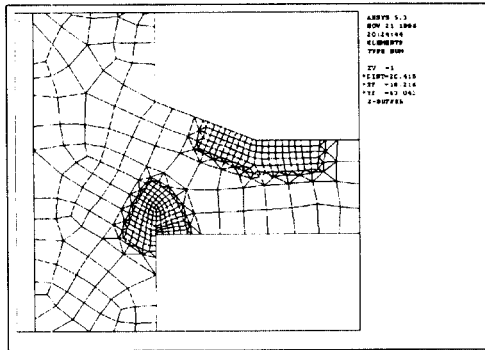


Fig. 5 Shape of F. E. M analysis modeling fillet vicinity

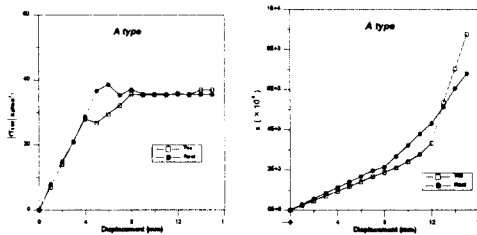


Fig. 6  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\epsilon_{EQV}|$  of A type specimen

A type은 변위가 작을 때에는 토우부와 루트부에 근사한 값이 작용하나 변위가 커질수록 토우부에 작용하는 값이 높은 것으로 나타났다. B, C, D type은 변위가 작을 때에는 토우부와 루트부에 근사한 값이 작용하나 변위가 커짐에 따라 루트부에 작용하는 값이 더 높은 것으로 나타났다. E, F

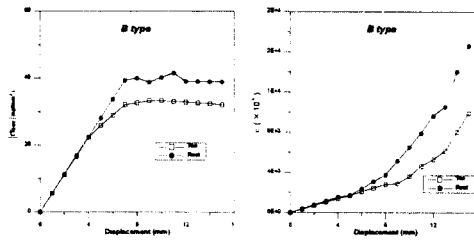


Fig. 7  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\epsilon_{EQV}|$  of B type specimen

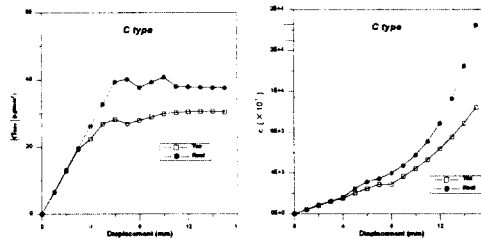


Fig. 8  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\epsilon_{EQV}|$  of C type specimen

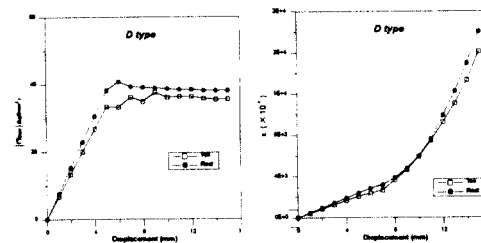


Fig. 9  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\epsilon_{EQV}|$  of D type specimen

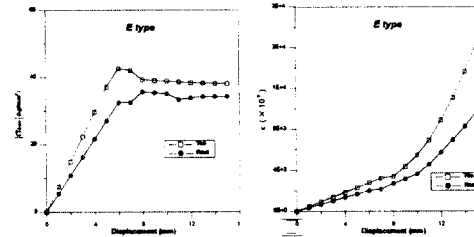


Fig. 10  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\epsilon_{EQV}|$  of E type specimen

type은 전 범위에서 토우부에 더 큰 값이 작용하였다. G type은 변위의 증가에 따라 토우부와 루트부의 값이 근사하게 증가하나 큰변위에서 토우부에 더 큰 값이 작용하였다.

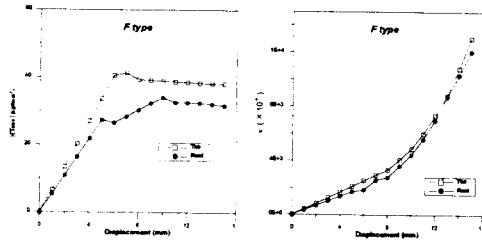


Fig. 11  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\varepsilon_{EQV}|$  of F type specimen

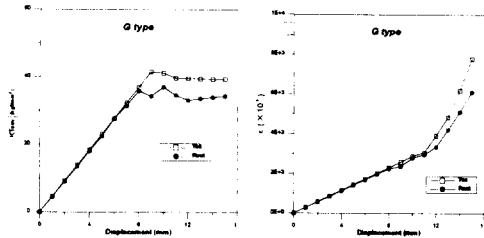


Fig. 12  $|\sigma_{EQV}|$  and  $|\varepsilon_{EQV}|$  of G type specimen

#### 4. 실험결과 및 고찰

피로시험결과 A type 시험편은 시험한 변위중 가장 큰 변위에서는 토우부에 균열이 먼저 발생, 전파하여 모재에서 파단하였고, 그 이하의 변위에서는 루트부에 균열이 발생하여 용접부를 관통하면서 전파하여 파단하였다. 이는 홈가공으로 인해 용입이 깊게 되어 횡방향다리길이는 일정길이를 유지하는 대신 종방향 다리길이가 작아지면서 프랭크각이 줄어들어 토우부는 응력집중이 적은 반면, 루트부에 응력집중이 크게 되어 Fig. 6의 유한요소법 해석결과에서 나타나듯이 토우부보다 루트부에 더 큰 응력이 작용하여 루트부에서 먼저 균열이 발생, 전파하여 파단하였고, 시험한 변위중 가장 큰 변위에서는 루트부에 응력이 집중되기 전에 먼저 토우부에 큰 변형률 집중에 의하여 토우부에서 균열이 발생, 모재를 따라 전파하여 파단하였다고 생각된다.

B, C, D type의 모든 시험편은 루트부에서 파단을 일으켰다. 이는 유한요소법 해석에서도 나타나듯이 B, C, D type의 시험편이 필릿치수가 작아 토우부에 응력집중이 적은 대신 루트부에 응력집중이 크게 되어 루트부에서 균열이 발생, 전파하여 파단하였다고 생각된다.

T형 편면용접이음에서 홈가공하지 않고, 동일한 조건으로 자동용접(B type)과 수동용접(C type)을 실시하면 자동용접이 수동용접에 비해 용입도 깊게 되고 횡방향다리길이기도 증가하여 굽힘피로강도가 우수한 것으로 나타났다.

E, F, G type의 모든 시험편은 토우부에서 파단을 일으켰다. E, F type의 경우는 홈가공하지 않았을 때 토우파괴가 일어나기 위한 임계다리길이가 이상으로 제작되어, Fig. 10, 11의 유한요소법 해석결과에서 나타나듯이 루트부보다 토우부에 더 큰 응력이 작용하게 되어 토우부에서 균열이 발생, 전파하여 모재에서 파단하였다. G type 시험편은 이음새에 gap을 주어 루트부에 용락이 발생하도록 제작한 것으로 루트부의 결함이 증대하여 상대적으로 다리길이가 작으면서 용락이 발생하지 않도록 용접한 시험편(A type)에 비하여 강도가 저하되었으나, 홈가공으로 인해 용입이 깊게 되어 홈가공하지 않은 시험편보다는 향상된 강도를 나타내었다.

굽힘피로강도는 A-G-F-E-D-B-C type 시험편의 순으로 나타났다.

이상을 정리하면, T형 편면용접이음재의 굽힘피로강도는 홈가공한 경우가 홈가공 하지 않은 경우에 비해 높은 강도를 나타내었으며, 용락이 발생하면 강도는 저하되나 홈가공으로 인해 용입이 깊게 되면 홈가공하지 않은 경우보다는 높은 강도를 나타내었다. 홈가공하지 않았을 때는 용접 pass수를 증가시켜 다리길이를 증가시키에 따라 굽힘피로강도는 향상되었고, 종방향 다리길이의 증가보다 횡방향 다리길이를 증가시키는 것이 굽힘피로강도가 향상되었다.

토우부에서 113mm 떨어진 위치에 작용하는 응력과 파단수명과의 관계를 홈가공한 경우 (a)와, 홈가공하지 않은 경우 (b)에 대하여 Fig. 13에 나타내었다. 여기서  $\Delta S$ 는 완전양진 변위제어 굽힘피로시험에서의 공칭응력범위이다. 그리고 피로시험결과를 최소자승법으로 직선회귀하여  $\Delta S$ 와  $N_f$ 와의 관계식을 얻었다.

$\Delta S$ 와  $N_f$ 와의 관계식에서  $3 \times 10^6$ 회의 시간강도를 피로한도로 정의할 경우, A type은  $17.5 \text{ kgf/mm}^2$ , B type은  $11.15 \text{ kgf/mm}^2$ , C type은  $10.21 \text{ kgf/mm}^2$ , D type은  $12.25 \text{ kgf/mm}^2$ , E type은  $12.50 \text{ kgf/mm}^2$ , F type은  $13.91 \text{ kgf/mm}^2$ , G type은  $15.89 \text{ kgf/mm}^2$

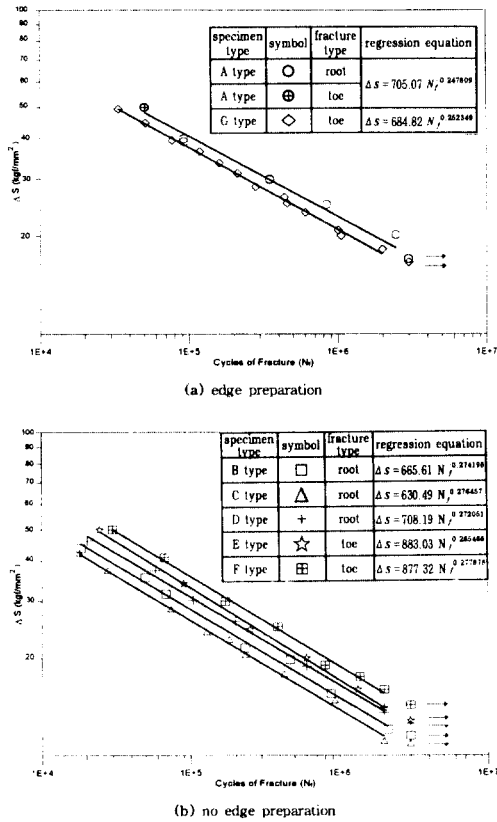


Fig. 13 Fatigue test result ( $\Delta S$ : stress from 113mm from Toe)

이 각각의 경우의 피로한도가 된다.

따라서 T형편면용접이음재 제작시에는 홈가공한 경우가 하지 않은 경우보다도 우수한 강도를 지니고 있기 때문에, 강도상 중요한 부위에 홈가공공정을 생략하는 것은 위험하며, 강도상 중요하지 않은 부위라면 Fig. 13의 S-N 선도를 참고로 하여 홈가공공정의 생략여부를 판단하는 것이 바람직하다고 하겠다.

### 5. 결 론

홈가공 여부와 다리길이를 변화시켜서 제작한

시험편에 의하여 T형 편면용접이음재의 굽힘피로강도 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) T형 편면용접이음에서는 다리길이가 증가함에 따라 굽힘피로강도도 향상되었고, 종방향 다리길이 보다는 횡방향다리길이의 증가가 굽힘피로강도의 향상에 기여하였다.

2) T형 편면용접이음에서 홈가공했을 때는, 홈가공하지 않고 다리길이를 2배 늘여 제작한 경우보다도 굽힘피로강도가 우수한 것으로 나타났다.

3) T형 편면용접이음에서 홈가공하지 않은 경우, 동일한 조건으로 수동용접과 자동용접을 실시하면 자동용접이 수동에 비해 용입도 깊게 되고 횡방향다리길이도 증가하여 굽힘피로강도가 우수한 것으로 나타났다.

4) T형 편면용접이음에서 홈가공하지 않은 경우 토우파괴가 일어나기 위한 다리길이 (h)와 주판두께 (t)의 비 h/t는 1.2이상 이었다.

5) T형 편면용접이음에서 홈가공한 경우에 용락이 발생하면 굽힘피로강도는 저하되나, 홈가공으로 인해 용입이 깊게 되면, 홈가공하지 않고 상대적으로 다리길이가 큰 경우보다도 높은 굽힘피로강도를 나타내었다.

### 참 고 문 헌

1. Leonard P. Connor : Welding Handbook. Eight Edition, Vol 1, (1987), pp. 152-153
2. 康聖原, 河佑逸 : 용입不足部를 갖는 필렛용접이음부의 引張疲勞強度에 關한 研究, 釜山大學校 工科大學 研究報告 第29輯, (1985), pp. 107-108
3. Peter Kehnke : ANSYS Elements References. Swanson Analysis System, (1993), pp. (4-77)-(4-365)
4. Peter Kehnke : ANSYS Manual. Swanson Analysis System, (1993), pp. (2-11)-(2-13)
5. R. A. C. Slater : Engineering Plasticity. 清文閣, (1997), pp. 82-83
6. W. F. Chen, D. J. Han : Plasticity for Structural Engineers. Springer-Verlag New York Inc., (1988), pp. 77-83