

## 유한평판 및 필렛 용접부에 있어서 표면균열의 피로 파괴거동에 관한 연구

한 문 식\*

계명대학교 기계·자동차공학부

### A Study on Fatigue Fracture Behaviour of Surface Crack in Finite Plates and Fillet Weldment

Moonsik Han\*

Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 10 May 2004 / Accepted 27 May 2004)

**Abstract** : Fatigue crack growth from surface defects is one of the most important subjects for the evaluation and the assurance of safety in pressure vessels, piping systems, LPG/LNG fuel tank and other various structures. This paper attempts to analysis some practical or general problems such as the estimation of crack growth life to penetrate the plate thickness, based on fatigue crack growth a single surface flaw and the interaction of multiple flaws. An experiment on the coalescence of multiple undercuts was carried out under cyclic tension condition as a attempt to the analysis of multiple crack problems. It is noted that the fracture strength is characterized by the analogy to that in a single crack growth.

**Key words** : Fatigue fracture(피로파괴), Fillet weldment(필렛 용접부), Undercut(언더컷), Multiple crack(복수균열), Beach mark method(비치마크법)

### 1. 서론

최근 압력용기, 고압배관계, LPG/LNG 연료 Tank 등 수송기계 용접구조물의 사용조건이 더욱 가혹해지고 있다. 뿐만 아니라 경량화 요구가 검증되고 있어 이들의 안전성은 이전보다도 더 한층 강요되고 있다. 특히, 용접재 및 고장력 재료의 사용확대 등으로 인하여 종래의 설계수단만으로 효과적인 구조물 안전성 평가가 불가능하게 되었다.<sup>1-3)</sup> 그 이유로는 종래의 재료역학적 수법만으로는 재료의 열처리 및 취급과정에서 생긴 미소결함이나 제조과정에서 생긴 결함 또는 사용 중 피로와 부식에 의해 생긴 균열

등 각종 결함에 대하여 충분히 고려할 수 없기 때문이다. 용접구조물의 경우, 파손원인 중 대부분이 이러한 균열에 기인하는 것으로 조사 되었고,<sup>4)</sup> 이들 균열은 사용조건에 따라 급격한 파손 또는, 점진적인 파손을 야기하며 결과 적으로는 막대한 경제적 손실 및 인명피해를 초래한다. 따라서, 이러한 사고를 방지하기 위하여 근래에는 크랙형 결함의 존재 또는, 발생이 예상되는 구조물을 강도상안전하게 사용할 수 있도록 하는 하나의 공학적 수법으로 파괴역학이 발달하게 되었다.

선형파괴역학은 오늘날 사용기간 중 뿐만 아니라 설계, 재료의 선택, 제작, 검사 및 보수 등에 결정적인 또는, 실질적인 지침이 되는 각종 기준으로써 적

\*To whom correspondence should be addressed.  
sheffhan@kmu.ac.kr

극적으로 채용되고 있으며, 파괴 사고의 진단 등에서 널리 이용되고 있다. 그러나, 선형파괴역학의 테두리 안에서 해결해야 할 중요한 공학적 문제는 아직 무수히 많은 실정으로 그 중의 하나가 복잡한 형상을 가진 실제부재에서 발생하는 3차원 균열에 대한 피로 파괴강도 해석 및 진전거동이다.<sup>5)</sup>

즉, 하중을 받는 실제구조물에 발생하는 이른바 자연균열은 특수한 경우를 제외하고는 표면균열 또는, 평면균열이라 불리우는 3차원 특성을 지닌 균열 형태로 나타나는 것이 보통이며, 이러한 연구결과 및 관련 데이터 또한 부족한 상태에 있기 때문이다.<sup>6)</sup>

따라서, 구조물의 안전성 향상을 위한 근본적인 해결책으로 3차원 균열의 피로진전거동에 대한 연구가 선진국에서 집중적으로 이루어지고 있다.<sup>7,8)</sup>

이러한 배경에서 본 연구에서는 3차원 균열인 표면균열의 피로특성과악과 관련기술의 기초연구를 중점적으로 수행하였다. 설계제작 될 용접구조물의 내구도 설계 및 안전성평가, 해석 등에 도움이 되도록 안전강도상 중요문제가 되는 필렛 용접부 및 유한평판에 대한 3차원 표면균열의 피로파괴강도와 균열진전 특성에 대하여 분석검토하였다. 또한, 관련 시험기법 등의 그 효용성도 검토하였다.

### 2. 3차원 표면균열의 응력확대 계수

실제 구조물에 있어서 가장 흔한 결함중의 하나인 표면 결함의 경우, 파괴강도의 관점에서 신뢰성 있는 예측을 하기 위해서는 표면균열에 대한 정확한 응력확대계수(Stress Intensity Factor)가 필요하다.

본 연구에서와 같이 유한판에 균일한 인장력 S가 작용하는 경우 표면균열에 대한 Mode I 응력확대계수는 다음과 같이 표시된다.<sup>9,10)</sup>

$$K_I = S \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{w}, \phi\right) \quad (2.1)$$

여기서, a와 c는 유한판에 존재하는 반타원형(Semi-elliptical) 균열의 깊이와 장반경을 각각 나타낸다. 또한, 판의 두께를 t, 너비를 w로 표시한다. 식(2.1)에서는 Q는 형상계수(Shape factor)이고 F는 경계수정계수(Boundary correction factor)로서 무한고

체 평판에 존재하는 균열에 대한 응력확대계수의 경계의 영향 즉, 앞면(Front face)과 뒷면(Back face) 그리고 유한한 넓이의 영향을 고려한 계수이다. 본 연구에서는 유한평판이 표면균열에 대하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 New-man과 Raju<sup>11)</sup>가 제안한 수정계수 식을 사용 하였다.

필렛 용접부에서 단일 3차원 형상의 용접 지단부에 존재하는 반타원형 균열에 대한 응력 확대계수는 균열깊이 a 및 균열길이 c의 방향으로 식(2.2)와 식(2.3)과 같이 쓸수 있다.

$$K_a = [M_{k,m,a} M_{m,a} \sigma_m + M_{k,b,a} M_{b,a} \sigma_b] \sqrt{\pi \frac{a}{\phi}} \quad (2.2)$$

$$K_c = [M_{k,m,c} M_{m,c} \sigma_m + M_{k,b,c} M_{b,c} \sigma_b] \sqrt{\pi \frac{a}{\phi}} \quad (2.3)$$

여기서, 첨자 a 및 c는 각각 균열깊이 및 길이 방향을 나타내며,  $\phi$ 는 완전타원 적분으로서 근사식은 식(2.4)와 같다.

$$\phi = \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}\right] \quad (2.4)$$

2차원 형상에 기초한  $M_k$ 값을 3차원 형상에 대하여 확장 적용할 경우에는, 3차원 형상에 있어 비균열 용접부 존재에 의한 보강 효과를 고려하여 감소 계수를 식(2.2)과 식(2.3)에 각각 곱하여 용접지단부에 존재하는 3차원 반타원 균열의 응력확대계수를 구한다.

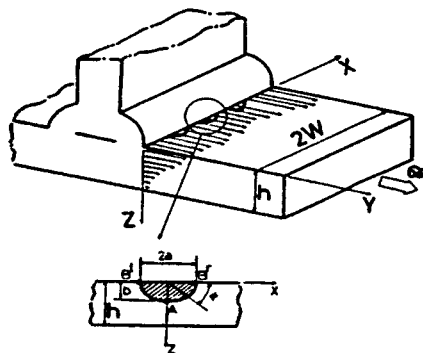


Fig. 1 Model for stress intensity factor of welded join

Fig. 1에 보인 필렛 T용접부에서의 복수 균열에 관한 표면균열 A점에서 응력확대계수( $K_A$ )는 식 (2.7)과 같다.

$$K_A = M_t M_k \sigma_o \frac{\sqrt{\pi b}}{E(1)} \quad (2.5)$$

여기서,  $E(1)$ 은 제2종 완전타원적분,  $\sigma_o$ 은 일축방향 응력,  $b$ 는 표면균열의 깊이방향 길이이다. 평판 중 단일표면균열의 응력확대계수( $K$ )의 수정계수  $M_t$ 는 J. C. Newman의 제안식<sup>11)</sup>을 이용한다. 판두께 방향 응력분포의 수정 계수  $M_k$ 는

$$M_k = \frac{K_w}{K_s} \quad (2.6)$$

이 때,  $K_w$ 는 반무한판균열의 내면에 집중력이 작용하는 경우의  $K$ 에 분포응력의 경우를 합한 후 적분하여 구하며,  $K_s$ 는 일축방향 응력장의 반무한판에 대한  $K$ 값이다.

표면균열 B점에서의 응력확대계수( $K_B$ )는 식 (2.7)과 같다.

$$K_B = M_t M_s \sigma_o \frac{\sqrt{\pi b}}{E(1)} \quad (2.7)$$

여기서, 판 표면에서 응력분포의 수정계수  $M_s$ 는 균열이 있는 무한판에 분포하중 작용하는 경우의  $K$  값이다.

### 3. 피로균열전파 실험

#### 3.1 개요

피로균열의 성장과정은 재료의 파괴현상에 있어 일부분에 지나지 않으나, 구조물의 검사, 보수 및 안전성 평가의 측면에서는 극히 중요한 기본 과정으로 실제 구조물의 수명 예측, 추정하기 위한 근본적인 해석 모델이 된다. 또한, 피로균열 전파에 관한 시험기준 및 평가방법은 파괴역학에 대한 연구가 상당히 진행됨에 따라 1973년 미국 기계학회 Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI에 최초로 Code화됨으로써 각종 공업 Code에서도 계속 발전 적용시키고 있다.

따라서 본 연구에서는 앞에서 기술한 이론적 배경과 관련 공업 규격에 따라 수송기계구조물의 안전성 시험평가기술의 근본이 되는 3차원 균열의 피로전파특성을 파악하기 위하여 아래와 같은 5가지 경우의 피로균열 전파시험을 실시하였다.

- a) 관통균열에 대한 피로 균열 전파속도와 파괴강도의 평가시험(Compact-tension specimen test)
- b) 3차원 표면결합의 피로전파 평가시험(Surface planar flaw specimen test)
- c) 필렛 용접부의 3차원 표면결합의 피로전파 평가 시험(Fillet weldment specimen with thumb-nail crack test)
- d) 필렛 용접부의 3차원 표면결합에 대하여, 용접 구조물 제작 시 발생하는 단일 Undercut의 영향 검토를 위한 피로균열 전파시험(Real fillet weldment specimen with single deep undercut test)
- e) 필렛 용접부의 3차원 표면결합에 대하여, 용접 구조물 제작 시 발생하는 다수 Undercut의 영향 검토를 위한 피로균열 전파시험(Real fillet weldment specimen with multi-undercut test)

#### 3.2 시험편과 용접지단부 형상 측정

시험편 재료는 E-grade modified mild steel로서 기계적 성질 및 화학성분은 Table 1 및 Table 2와 같다.

평판 및 필렛용접시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2에 보였다.

용접시험편 제작을 위하여 Fig. 3에서와 같이 접합재를 모재에 직각으로 구속한 후, 자동용접으로 필렛길이 15mm 비이드 길이 500mm인 필렛 이음재를 제작하였다. 용접 조건은 Table 3에 나타내었다. 이와 같이 제작된 용접 이음재에 대하여 dye check를 실시하여 표면용접결함이 없는 부위에서 Fig. 2

Table 1 Mechanical properties of material

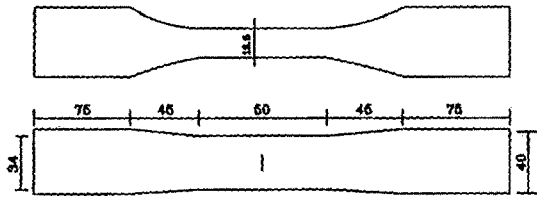
Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation(%)
321.8	439.5	42.8

Table 2 Chemical compositions of material

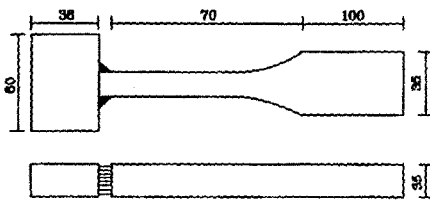
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.07	0.15	1.28	0.013	0.001	0.31	0.07

Table 3 Welding condition

Ampere (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat induction (KJ/cm)	Electrode
250	30	36	13	AWS ETIT-1



(a) Planar surface flaw specimen



(b) Fillet welded joint specimen  
(Fillet welded joint: Leg length 15mm)

Fig. 2 Configuration of the specimen for beach mark test

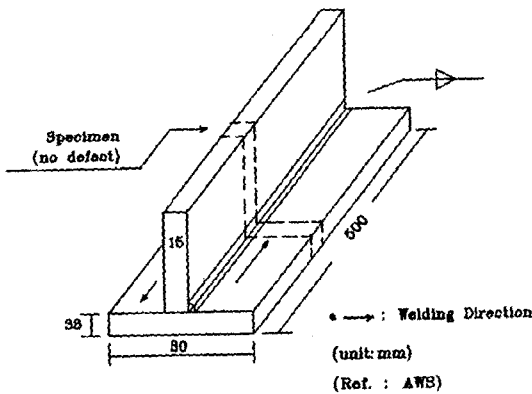


Fig. 3 Selection of fillet welded joint specimen

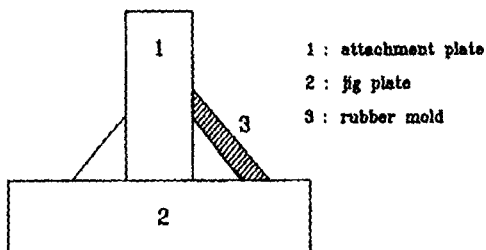


Fig. 4 Method for weld profile measurement

와 같은 시험편을 채취하였다.

또한, beach mark test를 위하여 평판 시험편 및 용접토우부 중앙에 전기 방전가공 방법을 이용하여 표면길이 1.5mm 및 1.1mm, 깊이 0.5mm 및 0.4mm의 초기표면균열(Thumbnail crack)을 형성한다. 또한, 용접부에 대한 응력확대계수 산출 시에 평판에서와 는 달리 응력 집중계수를 산정, 반영하여야 하며, 이를 위해서는 Flank 각 ( $\theta$ )와 지단부 곡률 반경( $\rho$ )값이 필요하게 된다. 그러나, 이들 값은 용접조건 및 필렛 치수 등에 따라 크게 달라지며 동일 비이드에서도 일정하지 않다.<sup>12)</sup>

본 연구에서는, 시험편의 용접비이드를 와이어 브러쉬로 잘 닦아낸 다음, 인상재(GCEXAFLEX)를 이용하여 Fig. 4에서와 같이 비이드 형상을 찍다. 얻어진 필렛부 형상을 비이드 길이방향으로 두께 2mm 정도로 잘게 절단하여, 이들을 50배의 확대경에 투영시켜 트레이싱지에 그 형을 옮긴 후, 이로부터 Flank 각과 지단부 곡률 반경을 측정 하였다. 이와 같은 과정을 통하여 측정된  $\theta$ 와  $\rho$ 의 평균치는 각각  $120^\circ$ 와 2.67mm이다.

### 3.3 실험방법

본 실험에서는 ASTM E647 규정에 준하여 피로 실험을 행하였다.<sup>13,14)</sup> 사용된 피로시험기는 유압제어식으로 하중용량은 30ton이다. 작용하중은 균일인장으로 응력비 0.05와 주파수 7-9Hz 범위의 Sine 파형이다. 각 시험편에 대한 실험하중 조건을 Table 4에 보였다.

Table 4 Load condition for fatigue crack propagation test

Specimen	Max. stress (MPa)	Min. stress (MPa)	Stress range (MPa)	Stress ratio	Frequency (Hz)
PC1	294.3	14.7	279.6	0.05	7
TC1	196.2	9.8	186.4	0.05	9
TU1	196.2	9.8	186.4	0.05	9
TU3	196.2	9.8	186.4	0.05	9
TU5	254.3	12.3	232.0	0.05	9

본 실험에서는 반복수 증가에 따른 피로균열 형상을 측정하기 위하여, Beach Mark 기법<sup>15)</sup>을 사용하였는데, 이것은 일정 반복수마다 응력범위를 변화시켜 피로 파면상에 해안선 형태의 흔적을 형성하는 방법이다. 이 방법에 의해서 일정 하중하에서 반복되는 일정 cycle수에 대해 진전되는 피로균열의 길이 및 형태를 개략적으로 측정할 수 있으며, 균열의 시작 및 전파과정을 추정할 수 있다.

본 실험의 경우, 실험초기에는 최대응력 범위에서 초기균열 및 용접지단부 표면에서 미세한 균열이 확인될 때까지 주기적으로 dye check를 실시하면서 실험을 진행하였다. 균열이 확인된 후에는 피로균열이 성장함에 따라 균열선단에서의 응력확대계수가 커진다는 사실을 고려하여 응력범위를 조정하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

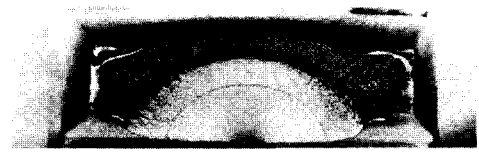
AWS D1.1-88 및 ASTM E647에 준하여 행한 평판 및 필렛 용접시편에 대한 피로균열전파 실험의 결과로 각 시험편의 파단면 사진을 Photo.1에 보였으며, 이로부터 매 beach mark마다의 균열길이 및 길이와 해당 cycle 수를 평판소재에 존재하는 3차원 표면결함을 갖는 필렛 용접부위에서 3차원 표면결함에 대하여 계측 정리하여 평판, 단일 및 복수결함을 갖는 필렛 용접시편에 대하여 균열진전에 따른 응력확대 계수, 피로수명 및 균열형상 변화 등을 고찰하였다.

#### 4.1 평판시편 및 단일결함을 갖는 필렛 용접시편

##### 4.1.1 응력확대계수

균열진전과 파괴강도인 응력확대계수와와의 관계를 살펴보면, Fig. 5와 Fig. 6에서와 같이 3가지 경우 모두 최심점과 표면점에서의 응력확대계수범위는 균열이 깊어짐에 따라 선형적으로 증가하는 동일한 경향을 나타내고 있다.

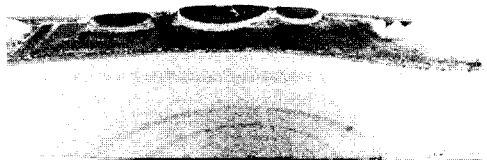
평판시편 PC1의 경우, 초기단계를 제외하고는 균열길이 방향에 따라 표면점에서의 응력확대 계수 범위가 최심점에 비해 큰 값을 보이고 있어, 표면점이 최심점에서 보다 취약한 것을 알 수 있다. 응력확



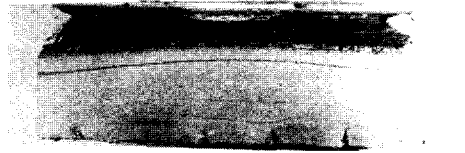
(a) PC1: Flat plate with single planar surface flaw



(b) TC1: Fillet welded joint with single thumb nail crack



(c) TU1: Fillet welded joint with single undercut



(d) TU3: Fillet welded joint with multiple undercut



(e) TU5: Fillet welded joint with multiple undercut

Photo. 1 Fracture surface with beach marks for test specimens

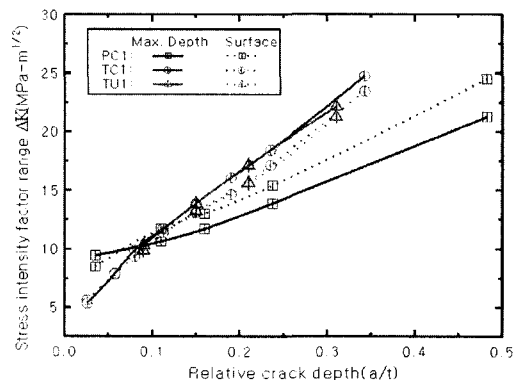


Fig. 5 Relative crack depth vs. stress intensity factor ranges

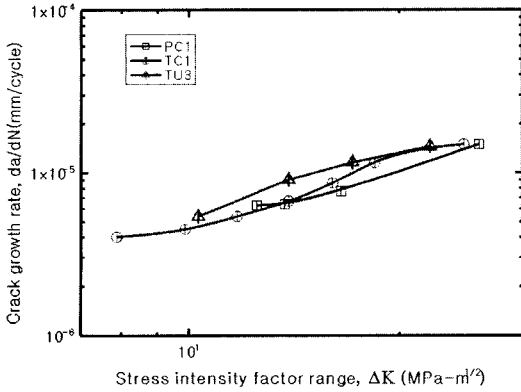


Fig. 6 Fatigue crack growth rate rate according to crack length for single surface crack

대개수 범위의 증가율은 양자가 거의 비슷하나, 균열이 깊이 방향으로 진전함에 따라 표면에서의 증가율이 다소 커지는 경향을 나타내고 있다.

여기서, 표면점에서의 응력확대계수 범위가 최심점에서 보다 큰 것은, 균열의 형상비  $a/c$ 가 균열진전에 따라 지속적으로 1보다 큰 값을 갖기 때문이며, 깊이 방향을 장축으로 하는 반타원형 균열의 전형적인 예를 보여주고 있다. 한편, 필렛 용접시편 TC1 및 TU1에 있어 균열진전에 따른 응력확대계수 범위 값은 최심점 및 표면점에서 각각 거의 동일하나, 최심점에서 다소 크다. 따라서, 평판시편과는 달리 양자는 모두 최심점에서의 균열전파속도 및 파괴강도가 크므로 최심점이 상대적으로 취약함을 알 수 있다. 여기서, 단일결함을 갖는 2개의 필렛 용접시편에 대한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

즉, 균일인장하에서 깊이 0.5mm, 길이 0.75mm이고 초기균열 형상비 0.667의 인공적인 반타원형 초기결함을 갖는 필렛용접시편과 AWS규정 이하 (깊이 0.25mm)인 한 개의 자연적 용접결함(Undercut)을 갖는 시편의 피로균열 진전에 따른 응력확대계수 범위는 거의 동일한 값으로 나타난다.

#### 4.1.2 피로수명

Fig. 7 및 Fig. 8에 상대수명과 상대균열깊이 및 길이와의 관계를 보였는데, 여기서 상대수명  $N/N_f$ 는 피로수명과 최종 파단수명과 의 비이다.

3개의 시편은 모두 거의 유사한 진전경향을 보이며, 상대수명 70% 근처에서 급한 상승세를 나타내

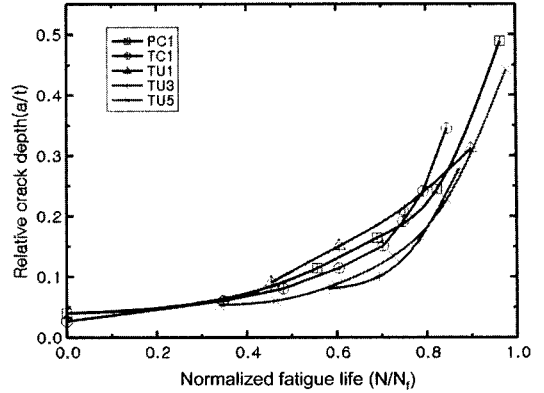


Fig. 7 Normalized fatigue life vs. relative crack depth

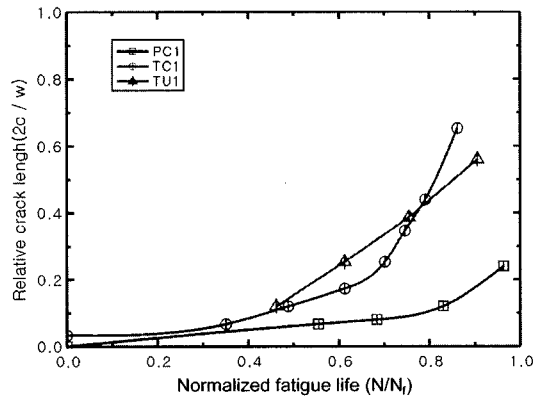


Fig. 8 Normalized fatigue life vs. relative crack length

고 있는데, 이러한 경향은 복수결함을 갖는 필렛 용접시편 TU3 및 TU5에서도 마찬가지이다.

또한, 모든 시편이 파단시까지 두께의 50%이하에 머물고 있음을 알 수 있다. 예상한 바와 같이, 평판 및 단일결함의 경우가 복수결함에 비해 깊이 방향으로의 진전율이 크다는 것을 알 수 있다. 필렛 용접시편 TC1 및 TU1의 표면방향 진전은 깊이방향의 경우와 유사한 경향을 보이고 있으나, 평판의 경우는 전술한 바와 같이 균열형상비  $a/c > 1$ 의 양상으로 진전되는 예외적인 경우로서 용접시편에 비해 극히 완만한 증가현상을 나타내고 있으며, 균열길이가 시편 전폭의 20%정도일 때 파단이 일어났다.

#### 4.1.3 균열형상의 전개

Fig. 9에 균열깊이와 균열길이와의 관계를, Fig. 10에는 상대균열깊이에 따른 균열형상비를 각각 보였는데, 필렛 용접시편은 전술한 바와 같이 양자가

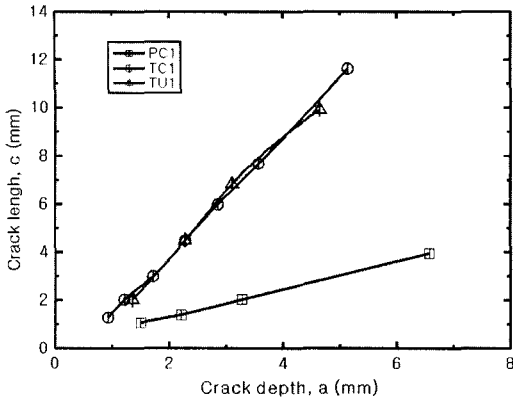


Fig. 9 Crack depth vs. crack length

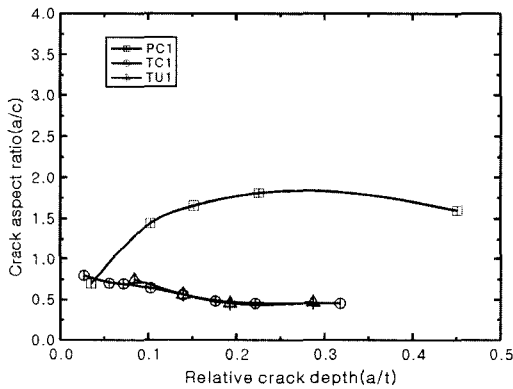


Fig. 10 Relative crack depth vs. crack aspect ratio

거의 동일한 경향을 보이고 있다. 즉, 상대균열깊이  $a/t=0.1$  이후에 균열형상비  $a/c=0.5$  정도의 일정한 값으로 균열이 진전하였다.

## 4.2 복수결함을 갖는 필렛 용접시편

### 4.2.1 응력확대계수

균열진전과 응력확대계수와의 관계를 살펴보면 Fig. 11과 Fig. 12에서와 같이 깊이 방향에 따라 최심점에서의 응력확대계수 범위가 표면점에서 보다 취약한 것을 알 수 있다. 또한 진전 속도와 응력확대계수와의 관계는 복수결함을 갖는 필렛 용접시편 TU3와 TU5가 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며 이는 다수결함에서는 결함 수에 전파특성이 크게 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

### 4.2.2 피로수명

Fig. 13에서 보인 바와 같이, TU5는 파단수명의

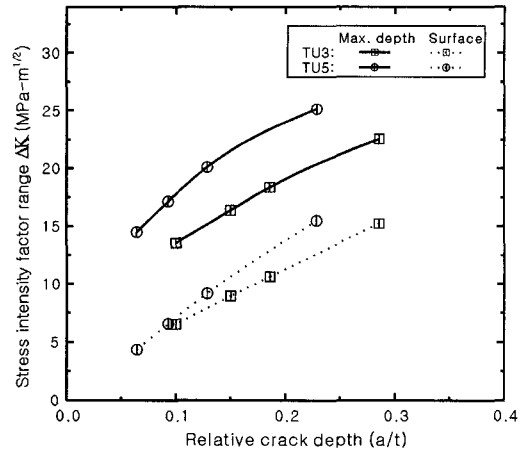


Fig. 11 Relative crack depth vs. stress intensity factor range

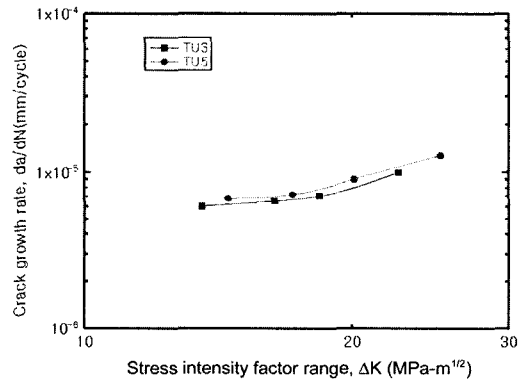


Fig. 12 Fatigue crack growth rate data according to crack length for single surface cracks

58.6% 이전에서, TU3은 46.8%에서 균열합체가 이루어지는 것으로 볼 때, 복수결함의 경우 균열합체까지에 피로전파수명의 상당부분이 소요된다는 사실을 확인할 수 있었으며, 이 때 상대균열깊이는 각각 8.0% 및 6.5% 였다. 또한, 파단직전의 상대수명은 각각 97.7% 및 98.9% 이고, 이 때의 상대 균열깊이는 0.547 및 0.445로서 두계의 50%내외에서 파단에 이른다는 것을 알 수 있었다.

### 4.2.3 균열형상의 전개

Fig. 13에 보인 바와 같이 TU3과 TU5의 경우, 중앙부 주균열의 깊이 방향 진전은 전반적으로 거의 같은 수준을 나타내고 있으나, ASME Pressure Vessel Code, Sec XI에서 권장하는 길이 방향으로의 확장균열길이( $C'$ )는 TU3에서 급증하는 경향을,

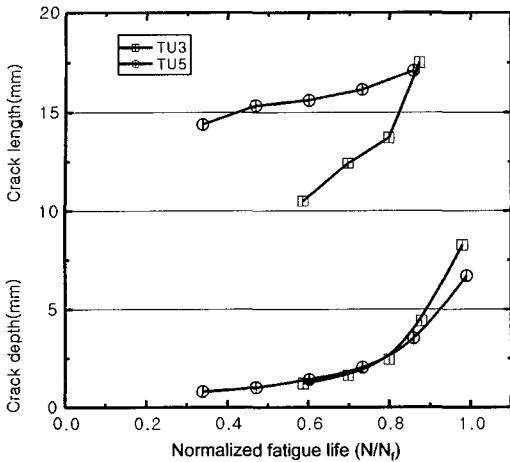


Fig. 13 Normalized fatigue life vs. crack depth and length

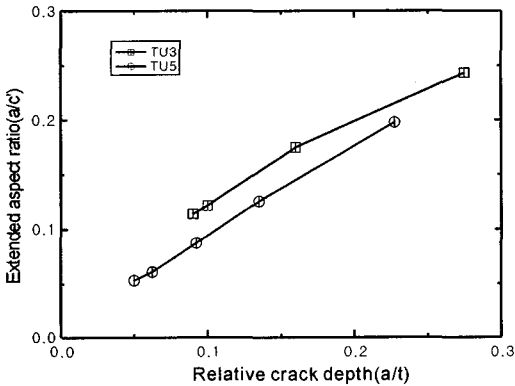


Fig. 14 Relative crack depth vs. extended aspect ratio

TU5에서는 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

TU3의 경우는 TU1의 길이방향 증가율과 근사하며, 이러한 급격한 증가현상은 상대적으로 길이가 긴 균열이 인접하여 존재하기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 균열합체 구역인 구간 4.5 [상대수명 0.8-1.0] 사이에서 확장균열 길이가 급격히 증가하는 추세를 보이는 반면, 균열깊이는 0에 가까운 가장 완만한 증가율 즉, 진전지연현상을 보이는데, 이것은 Morgan 및 Snijder<sup>16,17)</sup> 등이 지적한 바와 잘 일치한다.

합체 후의 단일 반타원형 균열이 단균열로 천이되는 TU3 및 TU5의 구간 4.5에서 균열깊이의 급격한 증가현상을 보이고 있는데, 이는 반타원형 균열과 단균열이 균열선단에서의 응력 확대계수가 현저한 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다.

상대균열깊이의 진전에 따른 주 균열깊이(a)와 확장균열깊이(C')의 비는 Fig. 14에 보인 바와 같다. TU3 및 TU5의 균열형상비(a/c)는 예상한 바와 같이 0.3미만의 낮은 범위의 값으로서, 깊이가 작고 길이가 긴 초기균열로부터 성장하는 단일 반타원형 균열의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다.

확장균열형상비는 양자가 모두 선형적으로 증가하고, 그 증가율도 거의 비슷하나, TU3가 다소 큰 값을 보이는 것은 TU3의 확장 균열길이 자체가 TU5에 비해 작기 때문인 것으로 보인다.

### 5. 결론

본 연구에서는 필렛 용접부 및 유한 평판에 대한 3차원 표면균열의 파괴강도와 균열 진전특성에 대하여 분석 파악과 함께 관련 시험기법 등의 유효성을 검토하였다. 이는 구조물의 용접·제작 시 필연적으로 발생하는 Undercut의 개수와 관계없이 전파특성이 유사한 경향을 나타내고 있음을 보였으며, 단일 표면 결함이 존재 시에도 같은 경향을 나타내고 있다.

또한 용접부위의 3차원 표면결합들이 있을 경우 깊이 방향에 따라 표면점에 비해 최심점에서 진전이 빠르고 취약하다는 결과를 얻었고 모재부에서는 반대의 현상을 보였다. 따라서 내구도 설계 및 안전성 평가 시 이에 대한 면밀한 고찰 및 대책이 요구되어야 할 것으로 사료되며, 앞으로 수송기계 구조물의 피로설계 및 안전성 평가를 위하여 실구조물에서의 3차원 표면 균열 피로전파 특성연구의 연계가 필요할 것이다.

### References

- 1) P. E. O'Donoghue, T. Nishioka, S. N. Atluri, "Multiple Surface Cracks in Pressure Vessels," Engng Fract. Mech. Vol.20, pp.545-560, 1984.
- 2) H. Adib, J. Gilgert, G. Pluvinage, "Fatigue Life Duration Prediction for Welded Spots by Volumetric Method," Int. J. of Fatigue, Vol.26, No.1, 2004.
- 3) M. S. Han, Y. S. Lee, "Fatigue Characteristics of SPFC590 Laser Welded Sheet Metal for



- Automobile Body Panel," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.143-150, 2003.
- 4) S. Ohta, "Fatigue of Worked Metallic Member and Structure," J. of JSME, Vol.87, p.1024, 1984.
  - 5) K. Iida, Y. Kho, "Empirical Expressions of Surface Fatigue Crack Shape," Journal of SNAJ, Vol.147, pp.203-210, 1982.
  - 6) D. L. Corn, "A Study of Techniques for Obtaining Partial Thickness Cracks of Pre-Selected Depths and Shapes," Engineering Fracture Mechanics, Vol.3, pp.45-52, 1971.
  - 7) W. O. Soboyejo, J. F. Knott, "The Propagation of Non-coplanar Semi-elliptical Fatigue Cracks," Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol.14, No.1, pp.37-49, 1991.
  - 8) M. W. Brown, "Aspect of Fatigue Crack Growth," Proc. Instn Mech. Engrs 202, (C1), pp.19-29, 1988.
  - 9) G. R. Irwin, "Crack-extension Force for a Part-through Crack in a Plate," Journal of Applied Mechanical Transaction of ASME, E, Vol.84, pp.651-654, 1962.
  - 10) P. M. Scott, T. W. Thorpe, "A Critical Review of Crack Tip Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Cracks," Int. J. of Fatigue, Vol.4, No.4, 1981.
  - 11) J. E. Newman Jr., I. S. Raju, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack," Engineering Fracture Mechanics, Vol.15, No.1-2, pp.185-192, 1981.
  - 12) X. Niu, G. Glinka, "Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Surface Cracks in Welded Joints," Int. J. of Fracture, Vol.40, pp.255-270, 1989.
  - 13) ASTM Specification E647-86A, "Standard Test Method for Measurements of Fatigue Crack Growth Rates," 1987.
  - 14) 1984 Annual Book of ASTM Standards 03.10., (1), "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10<sup>8</sup>-8m/cycle," 1984.
  - 15) W. O. Soboyejo, R. A. Smith, J. F. Knott, "A Study of the Interaction and Coalescence of Two Coplanar Fatigue Cracks in Bending," Fatigue Engng Mater. Struct., Vol.12, No.3, pp.167-174, 1989.
  - 16) H. G. Morgan, "Interaction of Multiple Fatigue Cracks," Int. Cong. on Fatigue of Welded Constructions, Paper No.35, 1987.
  - 17) H. H. Snijder, "Fatigue Crack Growth Modeling for Multiple Initiated Cracks at Weld Toes in Tubular Joints," BOSS '88, 1988.