

# 응력확대계수를 이용한 용접이음부 설계 연구

## Design of Welded Joints Using Stress Intensity Factors

박 지 우\*, 구 만 회, 최 창 성 완(국방과학연구소)  
J. W. Park(ADD), M. H. KOO(ADD), C. Chang(ADD), S. Wan(ADD)

### ABSTRACT

The assessments of weld defects by fracture mechanics are performed for design of welded joints. In general, butt, T-type, and L-type welded joint are useful for welding structure. When linear weld defects are in welded joint, stress intensity factors for each joints are calculated by finite element method. Analysis results are shown for the fracture modes and characteristics of joint types. And they are founded for the weaken order of welded joints being T-type, butt, L-type.

Key Words : Stress Intensity Factor(응력확대계수), Weld Defect(용접결함), Butt Joint(맞대기이음), T-Fillet Joint(T형 필릿이음), L-Fillet Joint(L형 필릿이음), Crack(균열), FEM(유한요소법)

### 1. 서 론

일반적으로 용접부는 용접형상 및 결함 등에 의해 응력집중을 받고 있으며 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 용접부 구조적 안정성에 대한 평가는 응력, 응력확대계수, 피로의 연구분야<sup>(1,2,3,4)</sup>에서 수행되고 있다. 많은 구조적 안정성 평가에 대한 연구는 외부용접형상에 의한 노치효과에 의해 균열이 발생하고 균열발생에 대한 응력확대계수 및 피로 거동 연구에 의해 용접구조물의 수명평가가 이루어지고 있다.

그러나 용접시공에서 발생할 수 있는 용접부내의 균열, 용합부족, 슬래스쉬임, 비금속개재물 등과 같은 선형적인 결함들은 균열로서 발생할 가능성이 높으나 이에 대한 연구<sup>(5,6,7)</sup>는 부족한 편이다. 용접부내의 용접결함은 구조물 품질을 결정하는 비파괴등급 설정의 요소로서 결함에 의한 구조물 안정성을 평가하는 것은 중요하다.

본 글에서는 구조물에 많이 사용되고 있는 용접이음형태인 맞대기이음, T형 필릿이음, L형 필릿이음 부내에 용접시공에 의한 선형결함이 내재되었을 때 유한요소법에 의한 파괴특성을 고찰하고자 한다.

$l=2a$ 가 존재할 경우 작용응력  $\sigma$ 에 의한 모우드 I 하에서의 균열선단 부근 임의점  $(r, \theta)$ 에서의 응력 성분은 다음과 같이 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 K는 응력확대계수라 하며 식(2)로 정의된다.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

유한한 크기를 갖는 실제 구조물에서의 응력확대계수는 식 (2)에 대하여 형상계수  $\alpha$ 의 요소를 고려하여야 하며 이에 의한 결과는 식(3)과 같다.

$$K = \alpha\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

### 2. 응력확대계수 이론<sup>(8,9,10)</sup>

어떤 무한평판내에 판재두께에 걸쳐 균열길이

Fig. 1에서와 같이 폭  $2W$ , 두께  $t$ 인 시편의 중앙

에  $l=2a$ 가 걸쳐 있을 때의 응력확대계수는 식(4)와 같다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\left(\frac{2W}{\pi a}\right) \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \quad (4)$$

여기서 형상계수  $\alpha$ 는 식 (5)로 나타낸다.

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{2W}{\pi a}\right) \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \quad (5)$$

형상계수  $\alpha$ 는 유한요소법에 의해 다차항식으로 표현이 가능하며 이의 결과로 식(4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \left[ \sec\left(\frac{2W}{\pi a}\right)^{1/2} \left[ 1 - 0.025\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \right] \quad (6)$$

### 3. 유한요소법에 의한 해석

#### 3.1 용접부 결합

구조물 제작시 용접시공에서 발생할 수 있는 용접 결합은 크게 다음과 같이 분류된다.

##### (1) 치수상의 결합

용접열에 의한 변형, 치수불량, 형상불량에 의한 것 등으로 주로 외관상 나타나는 필릿크기, 용접비이드 불량 등이다.

##### (2) 구조상의 결합

기공, 슬래그취임, 비금속개재물, 융합불량, 언더컷, 용접터짐, 표면결함 등이다.

##### (3) 성질상의 결합

인장강도, 항복강도, 피로강도, 경도의 부적합, 화학성분의 부적당 등과 같은 기계적, 물리적, 화학적 성질이 부족한 것을 말한다.

이러한 용접결함은 구조물 용접후 혹은 운용중에 용접균열을 야기시키는 내재적인 원인들을 제공하는 것으로 이들에 의해 용접균열이 발생할 때 구조물의 파손여부를 검증하는 것은 중요하다. Fig. 2는 용접 결합<sup>(11)</sup>에 대한 예이다.

#### 3.2 용접이음부 모델링

본 연구에서는 구조물 제작시 전형적으로 많이 사용되고 있는 용접이음형태인 맞대기이음, T형 필릿이음, L형 필릿이음에 대해 용접시공시 모재와 용착 금속간에 용접균열, 융합부족, 슬래그취임, 비금속개재물 등의 선형용접결함에 의해 균열이 발생할 시에 응력확대계수의 특성을 보았다.

용접이음별 용접결함에 의한 모델링은 다음과 같다.

##### (1) 맞대기이음

Fig. 3의 맞대기이음에서는 모재와 용착금속간의 내부에서 융합부족에 의한 선형 용접결함 길이가 1-5mm까지 1mm씩 증가할때까지를 나타낸다. 하중은 이음부의 단면에 수직하중으로 하였으며 1/4 부분을 모델링하였다.

##### (2) T형 필릿이음

Fig. 4에서와 같이 T형 필릿이음에서는 수평판재와 수직판재간의 미용착부위 부터 모재와 용착금속간에 융합부족 등에 의한 선형용접결함이 존재하여 1-5mm까지 1mm씩 증가하는 것을 나타낸다. 하중은 수직판재의 인장으로 작용시켰으며 수직판재 두께의 1/2 부분을 모델링하였다.

##### (3) L형 필릿이음

Fig. 5에서와 같이 L형 필릿이음은 용입부족 등의 선형용접결함이 수직판재의 중심부에 존재할 때를 나타낸다. 결합길이는 2-5mm까지 1mm씩 증가하는 것으로 하였으며 수평판재의 두께는 19.0mm(Type 1), 8.0mm(Type 2) 2가지로 하였다

### 4. 해석결과 및 고찰

#### 4.1 모델링 검증

유한요소법에 의한 파괴해석을 하기 위하여 모델링의 균열선단부 singular element에 대한 요소크기를 0.375mm, 그외의 부분은 quadratic element로 하였다. 해석은 2차원 평면변형률의 구속조건으로 변위의삽법에 의해 응력확대계수를 계산하였다. 이에 의한 유한요소해석결과와 식 (6)의 결과는 Fig. 6과 같다. 오차는  $a/W=0.1$ 일 때 0.34%이고  $a/W=0.9$ 일 때 오차는 최대 1.21%이다.

#### 4.2 해석결과

유한요소법에 의한 용접이음형태에 따른 파괴역학

해석결과는 Fig. 7에서 Fig. 10과 같다.

### 4.3 고찰

선형용접결합의 용접이음형태별 파괴역학해석결과는 다음과 같다.

#### (1) 맞대기이음의 경우

균열길이가 증가함에 따라 모우드 II의 값은 선형적으로 증가하나 모우드 I은 낮은 값에 수렴하는 양상을 보인다. 또한 균열길이의 증가에 따라 상부 균열선단의 모우드 II의 값이 크게 나타남으로 파단의 시작은 이 부근에서 발생함을 알 수 있다.

#### (2) T형 필릿이음의 경우

균열길이가 증가함에 따라 모우드 I과 모우드 II의 값은 모두 선형적으로 증가하는 양상을 보이고 모우드 I이 모우드 II보다 약간 큰 기울기를 갖는 것으로 보인다. 그리고 균열의 증가에 따라 균열선단의 모우드 I의 값이 커져 균열은 이 부근에서 인장파단이 발생함을 알 수 있다.

#### (3) L형 필릿이음의 경우

Type 1은 균열길이의 증가에 따라 맞대기이음과는 반대로 모우드 I은 선형적으로 증가하나 모우드 II은 일정한 값에 수렴하는 경향을 보인다.

Type 2는 Type 1과는 다르게 모우드 I과 모우드 II의 값이 모두 증가하는 양상을 보였으며 상부균열선단에서의 모우드 I은 일정한 균열길이 이상에서는 수렴하는 양상을 보인다.

파단의 양상에 있어 Type 1은 균열이 증가되는 부분에서의 응력확대계수가 증가하나 Type 2는 균열이 증가되는 부분이 아닌 수평판재의 초기균열 위치에서 응력확대계수가 증가되는 것으로 나타났다.

구분	파단형태	K
맞대기이음	모우드 II (전단파단)	80.47
T형 필릿이음	모우드 I (인장파단)	107.93
L형 필릿이음 (Type 1)	모우드 I (인장파단)	47.33
L형 필릿이음 (Type 2)	모우드 I (인장파단)	33.29

Table 1. Fracture analysis of welded joints

Table. 1에서 용접이음별 응력확대계수가 가장 큰

것은 T형 필릿이음이며 그 다음으로 맞대기이음, L형 필릿이음의 순으로 나타났다. T형 필릿이음이 가장 크게 나타난 것은 판재간의 미용착부가 균열길이를 작용하였기 때문에 나타난 것으로 이의 이음형태를 구조물에 적용하고자 할 때 파괴의 위험이 작도록 미용착부의 길이를 설정하는 것이 중요한 것으로 보인다.

### 5. 결 론

유한요소법을 이용하여 모재와 용착금속간에 선형용접결합이 존재할 시에 파괴역학 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 맞대기이음부는 선형용접결합이 커짐에 따라 모우드 II는 선형적으로 증가하고 이에 따른 전단파단이 발생되었다. 그러나 모우드 I에는 안정하였다.

(2) T형 필릿이음은 선형용접결합이 커짐에 따라 모우드 I과 모우드 II가 같이 증가하나 모우드 I이 모우드 II보다 크게 나타나 인장파단이 발생하였다.

(3) L형 필릿이음의 Type 1은 선형용접결합이 커짐에 따라 모우드 I은 선형적으로 증가하고 모우드 II는 일정한 값에 수렴하였으며 파단은 결함이 증가되는 부분에서의 모우드 I에 의한 인장파단으로 나타났다. Type 2는 선형용접결합의 커짐에 따라 모우드 I과 모우드 II가 모두 증가하였다. 파단은 모우드 I에 의한 수평판재의 초기 위치에서 발생하는 것으로 보인다.

(4) 용접이음별 파괴의 가능성이 높은 것은 T형 필릿이음, 맞대기이음, L형 필릿이음의 순으로 나타났다.

### 참고문헌

1. D.S.Kim, C.L.Tsai, J.Liao, and J.Papritan II, "Evaluation of Local Brittle Zones Using the Finite Element Method", Welding Journal, pp257s-264s, 1994
2. J.Cordes, A.Chang, N.Nelson and Y.Kim, "Computational Method to Predict Elastic-Plastic Fracture", Engineering Fracture Mechanics, Vol.51, No.1, pp151-159, 1995
3. Chon L, Tsai, D.S. Kim, "Analysis Fatigue Crack Propagation Behavior in Fillet Welded T-Joint", Engineering Fracture Mechanics,

4. A.Hobbacher, "Stress Intensity Factors of Welded Joints", Engineering Fracture Mechanics, Vol.46, No.2, pp173-182, 1993
5. W.Soete, "A Criterion for the Acceptability of Weld Defects", 3rd International Symposium of the Japan Welding Society, pp63-70, 1978
6. S.J.Maddox, "Recent Advances in the Fatigue Assessment of Weld Imperfections", Welding Journal, Vol.72, Issue7, pp42-51, 1993
7. W. Lucas, "Making Defective Welds for Sizewell 'B'", Welding & Metal Fabrication, pp81-86, March 1992
8. T.L. Aderson, "Fracture Mechanics : fundamental and application", CRC Press, 1991
9. E.E. Gdoutos, "Fracture Mechanics Criterion and Applications", Kluwer Academic Publishers, 1990
10. Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, 1980
11. "용접부 결함 판정기준 및 공정별 결함 최소화 대책", 한국산업기술, 1995

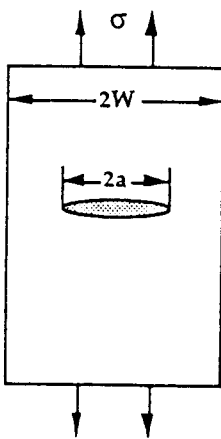


Fig. 1 A center cracked plate in tension

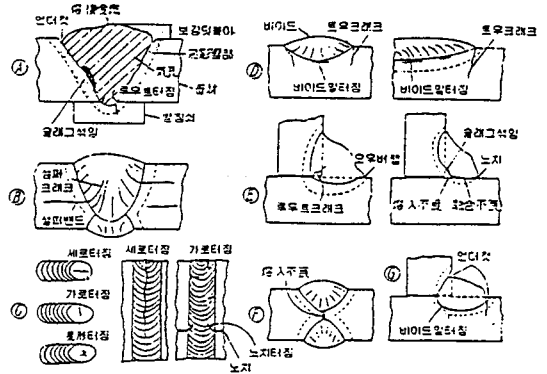


Fig. 2 Configuration of weld defects

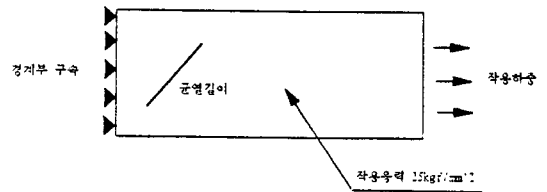


Fig. 3 FEM Modeling of butt joint

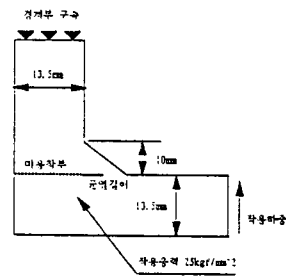
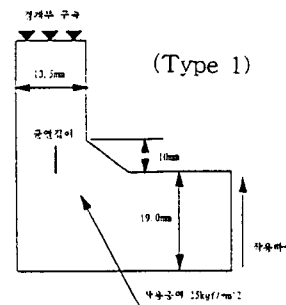


Fig. 4 FEM modeling of T-fillet joint



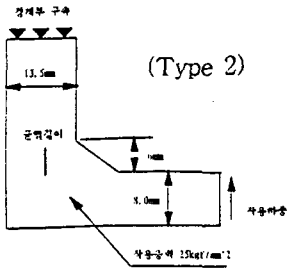


Fig. 5 FEM modeling of L-fillet joint

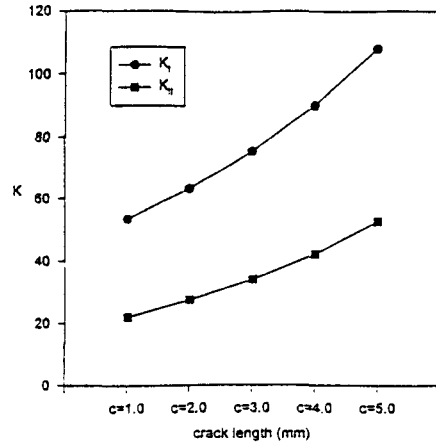


Fig. 8 K analysis of T-fillet joint

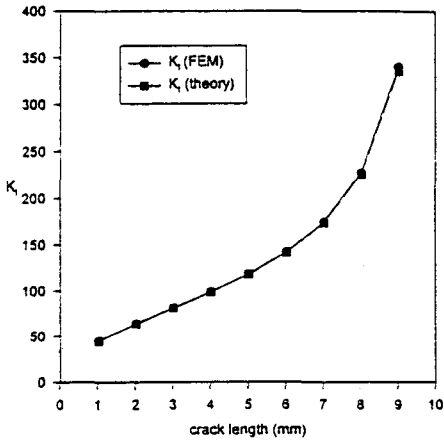


Fig. 6 Comparison between theory and FEM

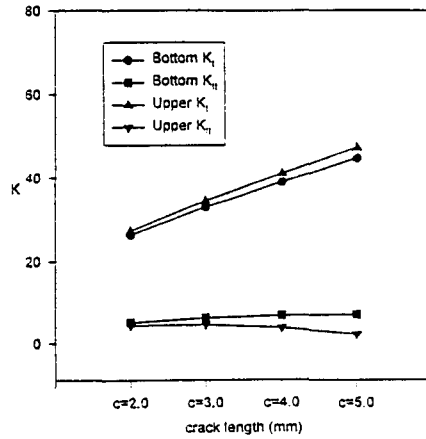


Fig. 9 K analysis of L-fillet joint (Type 1)

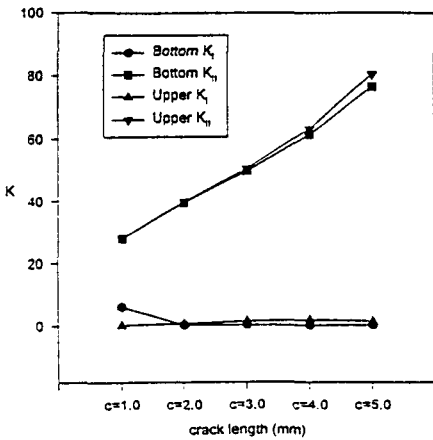


Fig. 7 K analysis of butt joint

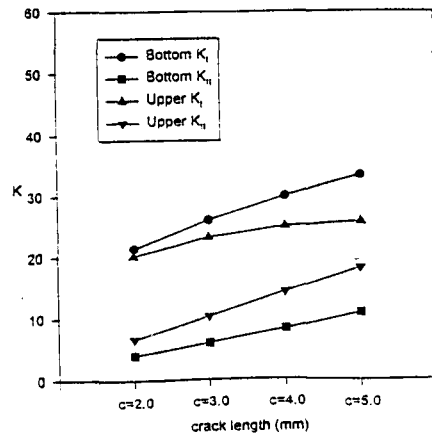


Fig. 10 K analysis of L-fillet joint (Type 2)