

# 응력집중을 고려한 십자형 필렛 용접부의 피로강도 평가

## Fatigue Strength Assessment of the Cruciform Fillet Welded Joint Considering Stress Concentration at Weld Toe

김대진\*, 석창성\*, 구재민\*, 박재철\*, 서정원\*\*, 구병훈\*\*

D. J. Kim, C. S. Seok, J. M. Koo, J. S. Park, J. W. Seo, B. C. Goo

### ABSTRACT

Under cyclic loading, the fatigue failures of welded joints occur at weld toes which induce stress concentration by weld shape. So we need to obtain the peak stress and the S-N curve to assess the fatigue strength of welded joints. However the measurement of peak stress is of high uncertainty and low reproducibility, so we use nominal stress instead in fatigue tests of welded joints. In this study, fatigue tests to obtain S-N curves and FE analyses to obtain stress concentration factors were conducted for the two types of cruciform fillet welded joints, that is, load-carrying and non load-carrying types. Then we changed the obtained S-N curves to that based on peak stress using the hot-spot stress concept. From the analyses of the S-N curves obtained, we have concluded that there is a need to develop a new method to evaluate the fatigue life.

### 1. 서론

용접부의 경우 피로 파괴가 발생하는 지점은 불연속적으로 형상이 변화하는 용접 지단부이다. 따라서 용접부의 수명을 평가하기 위해서는 용접 지단부의 최대 응력과 S-N 선도를 얻어야한다. 그러나 용접 지단부의 최대 응력을 구하기가 어렵고, 최대 응력을 구하더라도 최대 응력은 균열의 발생에는 큰 영향을 미치지지만 균열 전진 수명에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이에 여러 연구자들에 의해 구조적 응력집중계수  $K_t$ 와 공칭응력의 곱으로 표현되는[1] hot-spot 응력을 이용하면 모재의 S-N 선도로부터 용접 지단부의 응력집중을 어느 정도 고려한 용접부의 피로수명을 평가할 수 있다고 보고되어 있다. 용접부의 S-N선도는 균열전진 수명과 발생수명을 모두 포함한 완전 파괴시의 S-N 선도이다. 그런데 용접 지단부의 국부적인 응력집중효과는 초기 균열 발생 수명을 단축시켜 전체수명에서 균열전진수명이 차지하는 비율을 발생수명보다 높여주는 역할을 하게 된다. 또한 작용 응력이 감소하여 피로수명이 증가함에 따라 달라지는 응력 집중 효과를 고려하지 않고 기존의 hot-spot 응력과 S-N 선도로부터 피로 수명을 평가하면 작용 응력이 비교적 큰 단수명 영역에서는 응력집중계수가 과대 평가된다. 이는 모재의 S-N 선도와 응력집중계수를 이용하여 용접부의 피로 수명을 평가할 때 같은 형상의 용접재라도 단수명 영역에서와 장수명 영역에서 서로 다른 응력집중계수를 적용해야함을 의미한다. 본 연구에서는 이에 대한 고찰을 위해 십자형 조인트의 두 가지 형태인 하중 전달형과 하중 비 전달형 필렛 용접재 시험편에 대하여, 인축인장 피로 시험을 통해 공칭응력 기준 S-N 선도를 얻고 또한 유한요소법을 이용하여 응력집중계수를 해석적으로 구하였다. 1.1 결과를 이용하여 최대 응력 기준 S-N 선도를 구해 보았고 이를 시험 결과와 비교하여 1.2에 따른 문제점을 고찰

\* 삼천포대학교 기계공학부

\*\* 철도기술연구원, 정회원

하였다.

## 2. 일축인장 피로시험을 통한 공칭응력 기준 S-N 선도의 도출

### 2.1 시편 제작

SM490A를 시험재료로 사용하였으며, 화학적 조성 및 기계적 물성치는 Table 1과 같다. 300×300의 평판을 GMAW 반자동 로봇용접으로 1 Pass 용접한 후 횡단하여 시험편을 제작하였고 Table 2에 구체적인 용접 조건을 나타내었다. 하중 전달형 및 하중 비 전달형의 두 가지 시험편에 대한 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 일축인장 피로시험

SM490A 모재 및 십자형 필렛 용접부에 대한 공칭응력 기준 S-N선도를 얻기 위하여 일축인장 피로시험을 수행하였다. 하중제어 방식으로 20kN, R=0.1인 원정진폭 하중을 가하여 실험하였다. 시편이 양단 분리되는 순간을 과단 시점으로 정의하였으며, 최대  $2 \times 10^6$  cycle에서 미과단 시편이 발생할 때까지 실험을 진행하였다. 시험에는 25ton 용량의 유압식 만능시험기(Instron model 8802)를 사용하였다.

### 2.3 피로시험 결과

Fig. 2는 NLC(non load-carrying)와 LC(load-carrying) 및 모재의 피로시험 결과를 공칭응력 범위  $\sigma_r$  과 피로수명  $N_f$ 에 대하여 정리한 S-N선도이다. 또한 박재실[2]의 연구결과로부터 본 연구에서 사용된 재료인 SM490A를 맞대기 용접한 후 그라인딩을 통해 비드를 제거한 시험편에 대한 S-N 선도를 함께 도시하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490A

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Fe   | $\sigma_r$ | $\sigma_w$ | Elongation |
|------|------|------|-------|-------|------|------------|------------|------------|
| 0.20 | 0.55 | 1.60 | 0.035 | 0.035 | Bal. | 331 MPa    | 514 MPa    | 17 %       |

Table 2 Welding condition

| Welding Condition | GMAW Semi-auto Robot   |     |
|-------------------|--|-----|
|                   | Pass   | 1   |
|                   | Current(A)   | 270 |
|                   | Voltage(V)   | 28  |
|                   | Speed(cm/min)  | 30  |
| Wire Size         | Φ1.2   |     |
| Welded Material   | Filler Metal Spec : KC-28, Classification : AWS ER 70S-6<br>Yield Strength : 480 N/mm <sup>2</sup> , Ultimate Strength : 580 N/mm <sup>2</sup> |     |
| Shield Gas        | Ar + 20% CO <sub>2</sub>   |     |

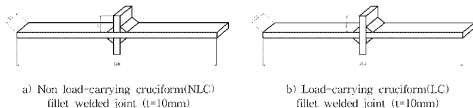


Fig. 1 Specimens for fatigue test

무현수명을 일반적인 강의 경우인  $2 \times 10^6$  cycle로 보았을 때, 모재의 피로한도는 271MPa로 얻어졌다. 십자형 용접재의 경우 피로한도는 LC가 83MPa, NLC는 102MPa로 모재와는 각각 63%와 62%의 차이를 나타냈다. 비드를 제거한 맞대기 용접재의 경우는, 형상변화에 의한 응력집중이 없으므로 필렛 용접된 십자형보다는 피로한도가 높지만, 용접과정에서 형성된 열영향부의 강도 저하로 인해 모재보다는 피로강도가 낮음을 알 수 있다. 전체적으로는 십자형 용접재로부터 비드를 제거한 맞대기 용접재를 거쳐 모재로 가면서 대략  $10^4$  cycle을 기준점으로 회전하는 경향이 나타났다. 이와 같은 경향은 Fig. 3에서, 용접재를 그라 인딩하거나 피닝처리할 때 따른 피로강도 개선 효과가 용접재의 S-N 선도를 회전 이동시키는 효과로 나타나고 있는 점과 일치한다. 또한 Fig. 3은 개선 효과가 키질수록 피로 균열 진전 수명에 의해 지배되던 용접재가 점차 균열개시수명의 지배를 받는 모재와 같은 피로 성향을 갖는 재료로 바뀌는 것을 의미하며[3], 이것은 다시 Fig. 2로부터, 십자형 용접재는 피로 수명이 아크 용접 과정에서 발생하는 용접 결함인 intrusion의 균열 진전에 의해 지배되므로 균열 발생 수명이 전체 수명에서 차지하는 비율이 매우 작은 반면, 모재는 이와 반대로 균열 발생까지의 수명이 전체 수명의 대부분을 차지하므로 인해 십자형 용접재와 모재의 기울기가 차이를 보이는 것[3]과도 일맥상통한다. NLC와 LC의 기울기는 서로 유사한 경향을 나타내었고, 피로 시험을 통해 얻은 NLC와 LC에 대한 공칭 응력 기준 S-N 선도는 각각  $N=1.33 \times 10^{13} \cdot \sigma_r^{-3.40}$  과  $N=1.1 \times 10^{13} \cdot \sigma_r^{-3.61}$ 로 나타났다.

### 3. 응력집중계수 해석

#### 3.1 해석 모델 및 방법

미쯔요(Mitutoyo)사의 stylus type 디지털 형상측정기(CV-4000 S4)를 이용하여 비드의 형상을 측정된 결과, 피로시험에 사용된 시편들의 평균 비드 형상치수는 다리길이 9.1mm, 비드 높이 0.6mm, 저단부의 반경  $r=0.2$ 였고 이러한 치수들을 유한요소 모델링에 적용하였다. Fig. 4에 유한요소망을 나타내었다. 8절점 솔리드 요소를 33,984개 적용하였고 절점 수는 41,069개이다. 탄성계수  $E=200\text{GPa}$ , 프와송 비  $\nu=0.3$ 을 적용하였고, 모델링과 유한요소해석에 각각 PATRAN Ver. 7.0과 ABAQUS Ver. 5.8을 사용하였다. LC와 NLC의 경우를 하나의 모델로 해석하기 위하여 Fig. 4의 가운데 상재도와 같이 폭 0.05mm의 gap element를 적용하였고, LC인 경우 좌·우측, NLC인 경우 상·하 부분에 모재 사이가 떨어져 있는 것을 모사하였다.

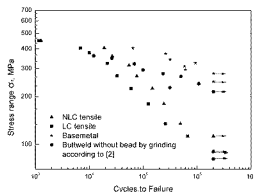


Fig. 2 S-N diagrams for uniaxial fatigue tests, R=0.1

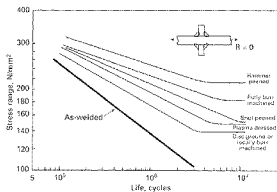


Fig. 3 Typical improvement in fatigue strength of mild steel fillet welds resulting from toe dressing or peening according to [3]

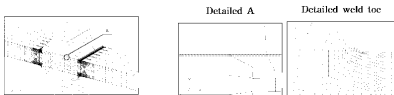


Fig. 4 Finite Element Mesh

### 3.2 해석의 검증 및 결과

유한요소 해석의 검증 및 용접 지단부에서의 응력집중 효과를 파악하기 위하여 용접 구에 측정을 스트레인 게이지(FXV-1-11-003J, TML4)를 이용하여 시편의 길이방향 변형률을 측정하였다. 시편 폭의 중앙에 용접 지단부에서부터 2개의 게이지를 연속으로 붙여 총 10개 지점의 변형률을 측정하였고, 이때의 측정점은 용접 지단부에서 각각 2, 4, 6, 8, 10, 14, 16, 18, 20, 22mm만큼 떨어진 지점이다. Switching box(SS-24R, KYOWA)와 Strain indicator(P-3500, INSTRUMENTS DIVISION)를 연결하고 유압시험기를 이용하여 하중을 가한 상태에서 변형률을 측정하였으며 Fig. 5는 이러한 실험장치를 나타낸다. Fig. 6은 해석모델에 변형률 측정 실험에서의 동일한 하중을 주었을 때의 해석결과와 스트레인게이지를 이용한 변형률 측정 실험 결과를 비교한 그래프로서, 실험과 해석이 거의 일치하여 유한요소법의 유효성을 확인할 수 있었다. 용접 지단부에서의 최대 응력집중계수 ( $K_t$ )<sub>max</sub>는 LC가 4.45로 NLC의 3.58보다 24.3% 높게 나타났다.

## 4. 고찰

### 4.1 Hot-spot 응력

Hot-spot이란, 반복하중을 받는 구조물에서 최대 응력이 작용하는 지점으로서 피로균열이 최초로 발생하는 지점이며, 이 지점에서의 응력을 hot-spot 응력이라고 한다[5]. 이러한 hot-spot 응력은 Linear Surface Extrapolation(LSE), Through Thickness at the Weld Toe(TWTT), the Dong method 등에 의해 구할 수 있으며[6], 그 중 용접 지단부에서 일정거리만큼 떨어진 두 지점에서의 응력값을 용접 지단부까지 외삽하는 방법인 LSE가 널리 쓰이고 있다. Hot-spot 응력은 구조적 응력집중계수  $K_t$ 와 응력용력의 곱으로 표현될 수 있다. 이때 응력용력을 기준으로 한 일반적인 S-N 선도의 식  $N=A \cdot (\sigma)^m$  은 다음 식과 같이 hot-spot 응력 기준 S-N 선도로 바뀔 수 있다[1].



Fig. 5 Experimental setup for measuring strain

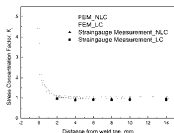


Fig. 6 Structural concentration factors obtained by experiment and FEA

$$N = A \cdot (1/K_I)^{-m} \cdot (\sigma_{red})^{-m} = A^* \cdot (\sigma_{red})^{-m} \quad (1)$$

국제용접학회(International Institute of Welding; IIW)에서 제시하고 있는 외삽 기준점(0.5t, 1.5t)에서 구조적 응력집중계수를 구해본 결과 용접 지단부에서 너무 멀리 떨어져 있어 LC와 NLC가 모두 1로 나타났다. 이는 응력집중이 없음을 의미하며 이 경우 hot-spot 응력을 모재의 S-N 선도에 적용하여 수명을 평가하게 되면 수명을 지나치게 과대 평가하게 됨을 알 수 있다. 따라서 모재의 S-N 선도를 이용하여 십자형 용접재의 피로 강도를 평가할 경우 hot-spot 응력을 구할 때 다른 방법을 사용해야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 LSE에 의한 방법을 이용하여, 공칭응력과 용접 지단부의 최대응력집중계수  $(K_I)_{peak}$  를 곱하여 LC와 NLC에 대한 최대 응력 기준 S-N 선도를 구하였다.

#### 4.2 최대 응력 기준 S-N 선도

공칭응력 기준 S-N 선도로부터 얻어지는 실험상수  $A, m$ 과 유한요소해석을 통해 구한  $(K_I)_{peak}$  및 식 (1)의 관계로부터 구해지는 최대 응력 기준 S-N 선도의 상수  $A^*$ 를 Table 3에 정리하였다. Fig. 7은 LC와 NLC에 대하여  $(K_I)_{peak}$ 를 적용했을 때의 최대 응력 기준 S-N 선도를 Fig. 2의 결과와 함께 나타낸 것이다.

Fig. 7로부터 같은 재료에 동일한 용접방식으로 제작된 LC와 NLC의 공칭응력 기준 S-N 선도는 용접 지단부의 응력집중계수  $(K_I)_{peak}$ 를 적용하여 최대 응력 기준 S-N선도로 바꾸게 되면 두 선도가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최대 응력 기준 S-N 선도가 모재의 S-N 선도보다 현저하게 높게 나타났다. 실제 용접재의 경우 undercut이나 intrusion같은 용접결함으로 인하여 응력집중계수 값을 고려한 것 보다 더 심한 피로강도의 저하가 발생할 수 있는데도[3], 모재의 S-N 선도보다 높게 나타난 것은 단순한 응력집중계수만으로 최대 응력을 구하여 수명을 평가할 경우 수명을 과소 평가할 수 있음을 의미한다. 용접재의 파괴수명은 균열 발생 수명과 균열 진전 수명의 합으로 나타낼 수 있으며 표면에서의 응력 집중계수는 균열 발생 수명에는 큰 영향을 미치지만 균열 진전 수명에는 비교적 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. 즉 응력집중계수의 증가에 따라 발생 수명은 현저히 감소하지만 진전 수명에는 큰 영향이 없으므로

Table 3. Coefficients for S-N diagrams

| Specimen Type | $(K_I)_{peak}$ | A                      | m    | $A^*$                  |
|---------------|----------------|------------------------|------|------------------------|
| NLC           | 3.58           | $1.330 \times 10^{15}$ | 3.40 | $1.016 \times 10^{12}$ |
| LC            | 4.45           | $1.100 \times 10^{15}$ | 3.51 | $2.076 \times 10^{12}$ |

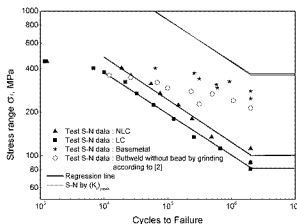


Fig. 7 S-N diagrams obtained by parallel shift of nominal S-N diagrams

표면에서의 최대 응력을 이용하여 수명을 평가할 경우 너무 보수적인 결과를 얻게 된다. 따라서 최대 응력이 아닌 적절한 위치에서의 응력을 hot-spot 응력으로 정의하여 수명 평가에 이용하여야 한다.

또한 적절한 hot-spot 응력을 구하였다 할지라도 식 (1)을 이용할 경우 S-N 선도를 평행 이동시키므로 무한 수명 영역에서는 일치하겠지만 단수명 영역에서는 hot-spot 응력이 과대 평가됨을 알 수 있다. 따라서 동적 응력 S-N 선도로부터 hot-spot S-N 선도를 구할 때는, 응력의 크기에 따라 달라지는 응력집중 효과의 영향과, 항복강도 이상의 큰 응력에서는 소성변형에 의해 응력이 재분포 되는 것을 고려하여, 동적 응력 기준 S-N 선도를 회전 이동시키는 것이 타당하다고 판단된다. 이는 모재의 S-N 선도와 hot-spot 응력집중계수를 이용하여 용접재의 피로 수명을 구할 때 같은 형상의 용접재라도 단수명 영역에서와 장수명 영역에서 서로 다른 응력 집중 계수를 적용해야 함을 의미한다.

## 5. 결론

용접 지단부의 응력 집중을 고려한 용접재의 피로강도 평가를 위하여 하중 전달형 및 하중 비 전달형 십자형 필렛 용접재에 대한 인축인장 피로시험 및 유한요소법을 이용한 응력집중계수 해석을 수행하였고, 용접 지단부의 최대 응력과 피로 수명과의 관계를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 두께 10mm 판재의 십자형 필렛 용접 부재의 경우, hot-spot 응력을 구하기 위하여 국제 용접 학회에서 제시하고 있는 외삽 기준점에서 구조적 응력 집중 계수를 구할 경우 응력 집중이 거의 없는 것으로 나타난다. 기존의 hot-spot 응력 방법으로는 적절한 피로 수명 평가를 할 수 없음을 알 수 있다.
- (2) 용접 지단부 표면에서의 최대 응력을 이용하여 모재의 S-N 선도로부터 피로 수명을 평가할 경우, 표면에서의 최대 응력은 균열 발생 수명에는 큰 영향을 미치나 균열 전진 수명에 미치는 영향은 미비하므로 수명을 과소 평가하게 된다. 따라서 적절한 위치에서의 hot-spot 응력을 이용한 평가 방법이 필요하다.
- (3) 모재의 S-N 선도와 hot-spot 응력집중계수를 이용하여 용접재의 피로 수명을 평가할 때 같은 형상의 용접재라도 단수명 영역에서와 장수명 영역에서 서로 다른 응력집중계수를 적용해야 보다 정확한 수명을 평가할 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 국가지정연구실(NRL) 사업(원도기술연구원) 및 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 한승호, 한정우, 신병철, "Hot-Spot 응력에 의한 용접부의 피로강도평가 및 피로설계기준의 도출", 대한기계학회 논문집 A권, 제22권, 제11호, pp. 2072~2083, 1998.
- [2] 박재선, 석광성, 구재민, 김대진, 신재호, 구병준, "대차 프레임용 SM490A강 용접재의 피로 특성 평가", 한국정밀공학회지, 제21권, 제12호, 계획 예정, 2004.
- [3] S. J. Maddox, Fatigue strength of welded structures, Abington Publishing, 1991.
- [4] Tokyo Sokki Kenkyuio Co. Ltd., Precise & Flexible Strain Gauges, TML Pam E-1010, pp. 36.
- [5] BS 7608, Code of practice for Fatigue design and assessment of steel structures, 1993.
- [6] Ilkka Poutiainen, Pasi Tanskanen, Gary Marquis, "Finite element methods for structural hot spot stress determination - a comparison of procedures", International Journal of Fatigue, 26, pp. 1147~11547, 2004.