

# 확률론적 방법을 이용한 점용접구조물 피로수명의 신뢰성 평가 Reliability of Fatigue Crack Growth Model for Spot Welded Structure under Cyclic Loading Conditions Using Probabilistic Technique

#이역섭<sup>1</sup>, \*최혜빈<sup>2</sup>, 김동혁<sup>2</sup>, 김흥민<sup>2</sup>

#O. S. Lee(leeos@inha.ac.kr)<sup>1</sup>, \*H. B. Choi<sup>2</sup>, D. H. Kim<sup>2</sup>, H. M. Kim<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> 인하대학교 기계공학부, <sup>2</sup> 인하대학교 기계공학과 대학원

Key words : Spot Welding, Fatigue Strength, Stress Intensity Factor, Local Equivalent Stress Intensity Factor, Reliability, FORM(First Order Reliability Method), Failure Probability

## 1. 서론

점용접은 용접의 자동화로 인한 높은 생산성과 내구성을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 점용접은 자동차, 철도차량과 전자제품 등 구조용 압연강판의 체결방법으로 널리 사용되고 있다. 하지만 점용접은 자동화된 공정과정에서의 결함을 내포하고 있으며, 더욱이 피로하중에 아주 민감한 체결 방법이다. 이러한 피로의 민감성 때문에 점용접의 피로강도 및 수명에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.

일반적으로 용접부는 용접후의 모재와 용접부의 재료의 특성이 달라져 균질재료가 되지 않는다. 이러한 용접의 특징으로 인하여 용접부는 항상 결함을 내재되어 있다. 또한 용접부의 기하학적인 형태는 응력집중을 수반하며, 이에 따른 국부대변형이 생기게 된다. 이러한 용접부의 재료와 기하학적인 특징 때문에 용접부의 피로수명 예측에는 확률론적인 방법과 파괴역학적인 접근방법을 필요로 한다.

따라서 본 논문에서는 점용접의 피로수명예측에 많이 사용되고 있는 Lap Shear 시편의 경우를 선정하여, 파괴역학적 방법과 확률론적인 기법인 일계신뢰성 방법을 이용하여 파손확률을 산출하는 연구를 수행하였다.<sup>1</sup>

## 2. 피로파손 모델

Lap Shear 시편의 점용접부 균열모델은 Fig.1 (a), (b)와 같이 이차원형상으로 이상화 시킬 수 있다. 점용접부의 균열은 주균열과 꺾인 균열로 표현할 수 있다. 주균열과 꺾인 균열과의 관계를 이용하여 등가응력확대계수를 산출하여 피로수명모델에 적용하였다.

### 2.1 Global Stress Intensity Factor for Main Crack

본 연구에서는 Pook, Swellam 그리고 Zhang 에 의하여 제안된 서로 다른 응력확대계수를 이용하여 피로수명의 파손확률을 비교 하였다. 각각의 식에서  $P$ 는 작용하중,  $d$ 는 용접부위의 너깃지름(nugget diameter),  $t$ 는 시편의 두께를 의미한다.

#### 2.1.1 Solutions of Pook

Pook 은 Lap Shear 시편의 global 응력확대계수를 다음과 같이 제안하였다.<sup>2</sup>

$$K_I = \frac{P}{d\sqrt{d}} \left[ 0.964 \left( \frac{d}{t} \right)^{0.397} \right] \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P}{d\sqrt{d}} \left[ 0.798 + 0.458 \left( \frac{d}{t} \right)^{0.710} \right] \quad (2)$$

#### 2.1.2 Solutions of Swellam

Swellam 은 Lap Shear 시편의 global 응력확대계수를 다음과 같이 제안하였다.<sup>2</sup>

$$K_I = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{6tP}{d^2\sqrt{d}} \quad (3)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{d^2\sqrt{d}} \quad (4)$$

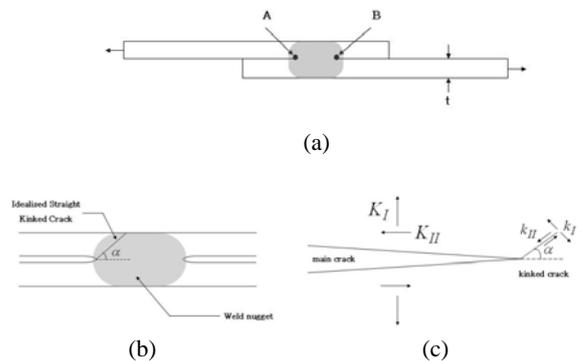


Fig. 1 (a) A schematic of a lap-shear specimen.

(b) A schematic of the cross section near the spot weld.

(c) A schematic of a kinked crack with kinked angle  $\alpha$ .

### 2.1.3 Solutions of Zhang

Zhang 은 Lap Shear 시편의 global 응력확대계수를 다음과 같이 제안하였다.<sup>2</sup>

$$K_I = \frac{\sqrt{3}P}{2\pi d\sqrt{t}} \quad (5)$$

$$K_{II} = \frac{2P}{\pi d\sqrt{t}} \quad (6)$$

## 2.2 꺾인 균열의 국부 등가응력확대계수

주균열과 꺾인균열에서의 응력확대계수는 Fig. 1(c)와 같이 형상화 된다. 이때 주균열에서의 인장과 전단의 응력확대계수는 꺾인균열에서의 국부응력확대계수와 다음과 같은 관계를 가진다.<sup>2</sup>

$$k_I = \frac{1}{4} \left( 3 \cos \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{3\alpha}{2} \right) K_I + \frac{3}{4} \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right) K_{II} \quad (7)$$

$$k_{II} = -\frac{1}{4} \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right) K_I + \frac{1}{4} \left( \cos \frac{\alpha}{2} + 3 \cos \frac{3\alpha}{2} \right) K_{II} \quad (8)$$

꺾인 균열에서의 인장과 전단 국부응력확대계수는 실험적으로 다음 식(9)와 같이 등가국부응력확대계수로 나타낼 수 있다. 여기서  $\gamma$ 는 실험적으로 구해진 상수이다.<sup>2</sup>

$$k_{eq} = \sqrt{k_I^2 + \gamma k_{II}^2} \quad (9)$$

## 2.3 피로균열성장 모델

Paris 에 의하여 제안된 피로균열전파이론은 꺾인균열에서의 등가응력확대계수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(k_{eq})^m \quad (10)$$

여기서  $a$ 는 결인균열의 길이,  $C$ 와  $m$ 은 재료상수,  $N$ 은 피로수명이다.<sup>2</sup>

### 3. 일계신뢰성방법 (FORM)

일계신뢰성방법은 모든 확률변수들이 정규분포이며, 확률분포가 평균과 표준편차에 의하여 결정된다는 가정이 들어간다. 일계신뢰성방법의 파손기준인 한계상태방정식(LSF : Limit State Function)은 Taylor 급수의 1차항만을 이용하여 이루어진다. 한계상태방정식(LSF)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$Z = RE - LO \quad (11)$$

여기서  $RE$ 는 저항성분의 확률변수,  $LO$ 는 하중성분의 확률변수로 나타내어진다. 각각의  $Z$ ,  $RE$ ,  $LO$  성분은 정규분포를 이루며 파손확률은 다음과 같이 산출된다.<sup>1</sup>

$$PF = P[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{S_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{S_Z}\right)^2\right\} dZ$$

$$PF = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{U^2}{2}\right\} dU = \Phi(-\beta) \quad (12)$$

신뢰도 지수( $\beta$ )를 이용하여 쉽게 파손확률을 산출할 수 있다. 신뢰도 지수는 다음과 같이 나타내어지며, 여기서  $\mu$ 와  $S$ 는 각  $Z, R, L$  성분의 평균과 분산을 의미한다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{S_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{S_R^2 + S_L^2}} \quad (13)$$

한계상태방정식이 비선형인 경우에 신뢰도 지수는 Rackwitz와 Fiessler에 의하여 제안된 수치해석적 기법을 이용하여 신뢰도 지수가 임의의 값( $\Delta\beta \leq 0.001$ )에 수렴한 값을 사용하여 파손확률을 산출한다.<sup>1</sup>

### 4. A Case Study

본 연구에서는 점용접에 사용이 되는 마르텐사이트 강을 이용하여 파손확률을 산출하였다. 파손확률을 구하기 위한 확률변수들 및 확률변수 값을 다음 Table 1에 표기하였다. 피로수명을 산출하기 위한 각각의 피로모델에 동일한 값이 사용되었다. 시편의 두께  $t$ 는  $0.65mm$ 이다.

Table 1 Mean and C.O.V of probabilistic parameters

확률변수	평균 (Mean)	변동계수 (C.O.V)
$C$	$1.36 \times 10^{-7} MPa\sqrt{m}$	0.02
$m$	2.25	0.02
$\gamma$	1	0.02
$d$	6.4mm	0.02
$\alpha$	55°, 63°	0.02

### 5. 결과

다음의 Fig. 2와 Fig. 3은 각각 결인균열의 각도  $\alpha$ 가 각각 55°와 63°일 때의 피로수명에 대한 파손확률이다.

### 6. 결론

본 연구에서 적용한 마르텐사이트 강의 점용접부의 파손확률을 산출한 결론은 다음과 같다.

(1) Pook, Swellam 그리고 Zhang에 의하여 제안된 각각의 응력확대계수 값을 이용한 파손확률은 결인각도  $\alpha$

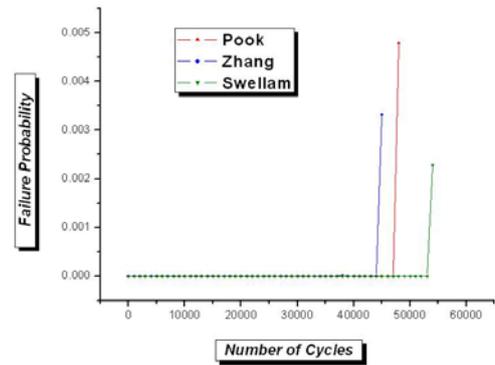


Fig. 2 Failure Probability of the spot weld with kinked angle  $\alpha = 55^\circ$

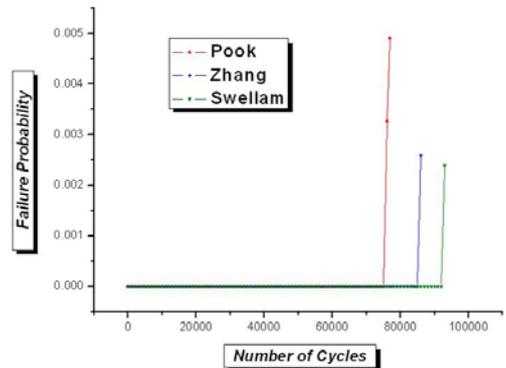


Fig. 3 Failure probability of the spot weld with kinked angle  $\alpha = 63^\circ$

가 55°인 경우에는 약 48000 cycle, 54000 cycle, 45000 cycle에서 파손확률이 급격히 증가한다. 결인각도  $\alpha$ 가 63°인 경우에는 각 모델의 파손확률은 약 77000 cycle, 93000 cycle, 86000 cycle에서 파손확률이 급격히 증가한다.

(2) Table 1의 조건일 때 평균적으로 균열의 전파는 결인균열각도  $\alpha$ 가 55°~63°의 각도로 전파한다.<sup>2</sup> 결인균열의 각도  $\alpha$ 의 평균값이 55°와 63°인 경우 각각의 파손확률은 현격한 차이를 보인다. 따라서 일계신뢰성방법을 이용한 파손확률의 산출은 결인균열각도  $\alpha$ 의 값은 실험적으로 정확한 확률변수 값이 요구된다.

(3) 동일 피로파손조건하에서 Pook, Swellam 그리고 Zhang의 모델에 따라 파손확률 및 피로수명은 각기 10%내외의 오차를 가진다. 이는 각 이론의 가정이 응력확대계수의 값에 영향을 주어 결인균열부의 등가응력확대계수가 달랐기 때문이다.

### 후기

본 연구는 인하대학교 POSCO 석좌교수연구기금으로 연구하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

### 참고문헌

- 이억섭, 최혜빈, 김동혁, 김홍민, “확률론적 기법을 이용한 18Ni 강의 저 사이클 피로 신뢰성 평가,” 대한기계학회 재표 및 파괴부문부문 춘계학술대회 강연 및 논문집, 210-215, 2008
- Tusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "A Fatigue Crack Growth Model for Spot Welds under Cyclic Loading Conditions," Int. J. Fatigue, **28**, 792-803, 2006.