

점 용접 너깃부에서의 변형률 측정에 의한 피로균열성장 예측

김덕중*(동아전문대), 박희식·성백섭(조선대 대학원), 차용훈·최병기(조선대)

Prediction of the Fatigue Crack Growth from Strain Measurement on Spot Welded Nugget Zone

D. J. Kim (Dong-A College), H. S. Park · B. S. Sung (Graduate School
Chosun University), Y. H. Cha · B. K. Choi(Chosun University)

ABSTRACT

In case of spot-welded joints, the fatigue cracks generally originate from the weld interfaces of the neighborhood nugget tips, and propagate toward the outer surfaces of the sheets. Generally, because fatigue crack was observed in nugget around, strain gage was attached at nugget zone.

Accordingly, it was very difficult to detect the generation time of fatigue crack in spot-welded joints and to measure the propagation speed of fatigue crack. We developed the non-destructive method, according to which the fatigue crack propagation rate can be quantitatively estimated by utilizing information obtained from strain gages bonded on the electrode indentations of spot welds. The results measured by real crack were compared with the data which was measured by strain gauge method in fatigue testing. And so fatigue strength was evaluated by stress intensity factor. In this study behavior of fatigue crack propagation under repeated load were considered.

Keyword : Stress Intensity Factor(응력확대계수), Fatigue Crack Propagation(피로균열전파)
Electrode Indentation(전극 압흔), Spot Welded Joint(점용접이음)

1. 서론

점 용접 너깃부는 응력집중의 발생원이 되어서 피로강도면에서는 유리한 구조라 말할 수 없다. 따라서 점 용접부의 피로균열 성장에 따른 피로강도 평가를 위해서는 균열길이 측정의 정밀도가 중요한 요점이 된다.

일반적으로 점용접재의 피로균열은 두장이상의 박판이 중첩되어 압접된 부분의 선단근방에서 발생하여 너깃(nugget)경계근방을 따라 3차원적으로 복잡한 형태로 성장하며, 접합부의 모재표면을 관통하여 나타나며, 이 균열은 전수명의 10%정도의 시점에서 발생하여 점용접 수명의 대부분은 이 균열의

성장에 소비된다.^(1~4)

그렇지만 관찰과 예검출이 곤란하여 피로균열의 정량적인 관찰과 예측도 어렵다.

따라서 본 연구에서는 반복 인장-전단하중을 받는 점용접 너깃부에 스트레인 게이지를 부착하여 피로균열 성장에 따라 변화하는 동적스트레인을 측정하고, 이에 대한 데이터를 분석하여 시험편 두께방향으로 진전하는 내부균열길이를 예측하고자 한다. 또한 파괴역학적인 방법을 적용하여 점용접부의 피로파괴거동을 정량적으로 평가하고자 한다.^(5~6)

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 두께 1.0mm 및 2.0mm의 냉간압연강판 SPCC를 사용하였으며, 재료의 화학적성분은 Table 1에, 기계적성질은 Table 2에 나타냈다.

점용접시험편의 용접조건은 Table 3과 같으며, 미국 저항용접제조자협회(RWMA)가 추천하는 A-class 조건을 택하였다.

점용접부의 인장-전단 피로시험편을 JIS Z3138에 따라 Fig. 1과 같이 제작하였다.

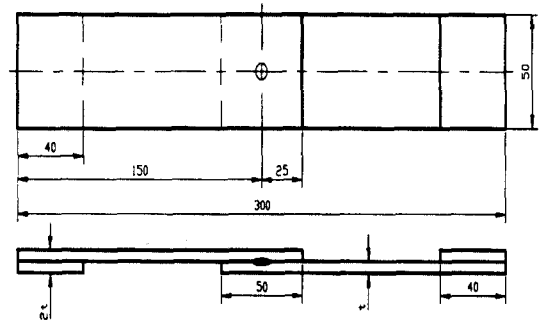


Fig. 1 Configuration and dimension of fatigue test specimens

Table 1 Chemical compositions of base metal (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.04	0.012	0.32	0.025	0.008

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
171.6	294.5	56.0	0.2071×10^6	0.3

Table 3 Spot welding condition

Thickness (mm)	Force (kN)	Weld time (cycles)	Weld current (A)
1.0	2.31	10	9000
2.0	4.81	17	13500

2.2 피로시험

본 연구에 사용된 시험기는 $\pm 100\text{kN}$ 용량의 전기유압식 피로시험기(Shimadzu사)이며, 피로시험조건은 Table 4 처럼 정현파, 하중비(R) 0, 주파수 30Hz로 하였다. 또한 두께방향의 균열길이에 측을 위해 너깃부에 스트레인 게이지를 부착하여 변화하는 스트레인값으로부터 내부의 피로균열길이를 계산하였다.

Table 4 Experimental conditions of fatigue test

Thickness (mm)	P_{\max} (kN)	P_{\min} (kN)	Load Ratio	Frequency (Hz)
1.0	1.7	0	0	30
	2.0	0	0	30
2.0	5.5	0	0	20
	6.5	0	0	20

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열

스폿용접부의 표면에 나타나는 피로균열들은 모두가 모재와 열영향부의 경계부를 따라 3차원적으로 복잡한 형태로 성장하여 전파되고 있으며 마침내 판두께를 관통하여 외표면에 도달한다. 이러한 전파경로는 역학적 요인 이외에도 금속조직 또는 잔류응력의 영향도 약간 받는 것으로 알려져 있다. 피로균열의 발생위치는 저하중범위인

10^6 사이클 근처에서는 너깃경계면이나 너깃내부에서 발생하였고, 고하중인 10^5 사이클 이하에서는 열영향부와 모재사이에서 주로 발생하였다.

3.2 정적 하중 변화에 따른 스트레인 분포

Fig. 2는 용접부의 피로시험전 사이클에서 두께에 따른 스트레인 변화를 비교한 그림이다. 시험편 두께가 얇은 1.0mm는 동일한 하중범위에서 2.0mm에 비해 스트레인 범위가 크게 나타남을 알 수 있으며, 하중의 증가에 따라 인장 스트레인을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 3은 용접부의 피로시험전, 반타원 크랙 진전과정, 관통 크랙 개시과정 및 관통 크랙 성장과정에 대한 정적 스트레인을 비교한 그림이다. 피로 사이클 증가에 따른 변화양상을 보면 용접부의 경우는 초기 피로 사이클 이전에서의 스트레인 변화의 폭이 가장 크게 나타났다. 그리고 나서 하중이 증가함에 따라 인장 스트레인의 양상이 나타났으며, 점차 피로 사이클이 진행되면 변화량이 점차 적어지고, 균열이 관통되면 스트레인의 변화가 거의 없이 일정하였다. 또한 관통 크랙 이후의 스트레인 변화 양상은 관통 크랙 이전과는 달리 하중이 증가함에 따라 점차 압축 스트레인이 나타남을 알 수 있다.

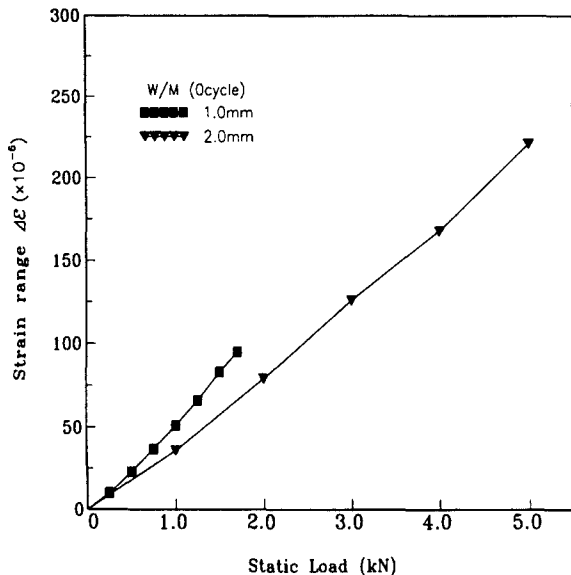


Fig. 2 Strain distribution obtained from increasing static load at 0 cycle

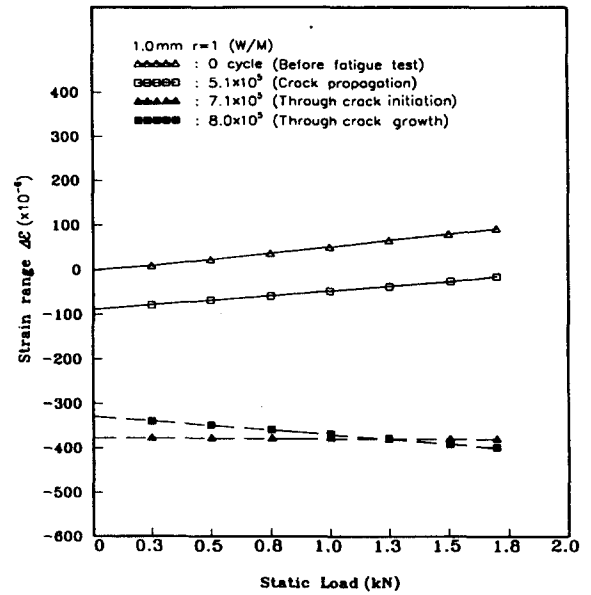


Fig. 3 Strain distribution obtained from increasing static load during fatigue test

3.3 $\Delta \epsilon_r - N$ 선도 고찰

Fig. 4, 5는 반복하중에 따른 너깃표면의 동적 스트레인 변화를 측정된 $\Delta \epsilon - N$ 선도를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 동적 스트레인의 최소점 $\Delta \epsilon_{min}$ 과 최대점 $\Delta \epsilon_{max}$ 은 피로균열 발생 및 성장에 크게 관여하고 있음을 알 수 있다. 즉, 최소점은 초기 균열발생의 시작점을 의미하며, 최대점은 판의 외표면에 크랙이 보이기 시작하는 관통크랙의 시작점을 의미한다. 이것은 최소, 최대점에 이를 때 시험편을 절단하여 확인이 가능하였다.

따라서 $\Delta \epsilon_{min} \sim \Delta \epsilon_{max}$ 구간은 Paris가 제안한 피로균열성장식의 제2단계인 안정성장단계에 해당된다고 할 수 있다.

피로반복수가 증가할수록 압축스트레인 값이 계속 증가하다가 균열이 표면에 나타나면 감소하면서 변곡되는 양상을 보였다.

Fig. 6, 7은 반복하중에 따른 너깃표면의 스트레인 변화율 $\Delta \epsilon_r(\%)$ 과 피로반복수 N 과의 관계를 나타낸 $\Delta \epsilon_r - N$ 선도로서, 이것은 Fig. 4, 5에서의 데이터를 스트레인 변화율 $\Delta \epsilon_r(\%)$ 로 표현한 것이며, 이것은 실제로 측정된 Fig. 10, 11의 $a - N$ 선도와 매우 밀접한 상관관계를 보이고

있음을 알 수 있다.

$$\Delta \epsilon_r = (1 - \Delta \epsilon / \Delta \epsilon_i) \times 100 \quad (1)$$

여기서, $\Delta \epsilon_r$ 은 스트레인 범위 변화율, $\Delta \epsilon$ 은 동적스트레인 범위, $\Delta \epsilon_i$ 는 초기스트레인 범위이다.

3.4 a-N 선도 고찰

Fig. 8, 9는 Fig. 6, 7로부터 계산된 반복사이클에 따른 피로 균열길이를 나타낸 그림이다. Fig. 10, 11은 일정 사이클 후 시험편의 단면을 절단하여 두께방향의 실제 균열길이를 측정하고 본 연구의 방법을 대비하여 나타낸 그림으로서, 상당히 일치하는 양상을 보이고 있다. 따라서 외면 스트레인 변화율로부터 시험편 두께방향으로 성장하는 내부균열길이의 예측이 가능함을 알 수 있다.

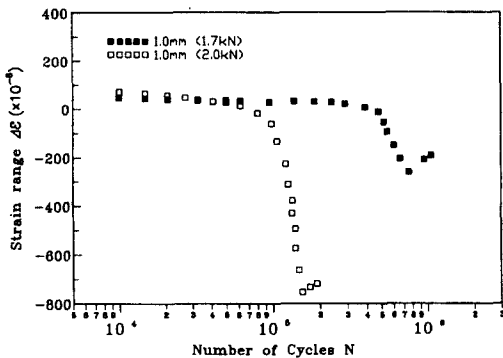


Fig. 4 Relation of strain range ($\Delta \epsilon$) versus number of cycles (N)

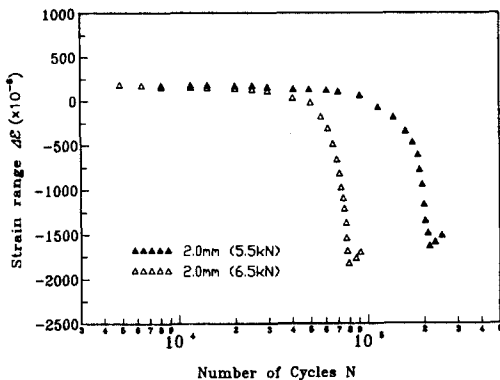


Fig. 5 Relation of $\Delta \epsilon - N$

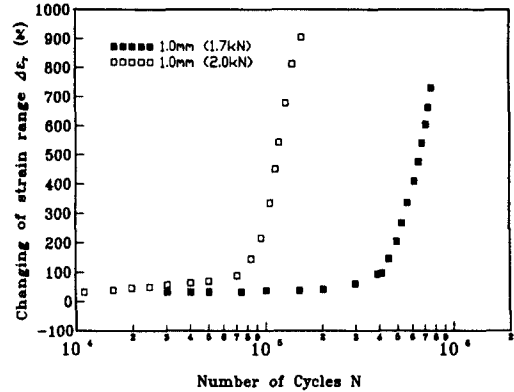


Fig. 6 Relation of changing rate of strain range ($\Delta \epsilon_r$) and number of cycles (N)

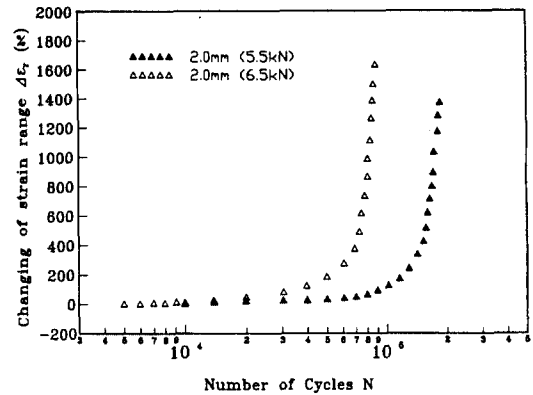


Fig. 7 Relation of changing rate of strain range ($\Delta \epsilon_r$) and number of cycles (N)

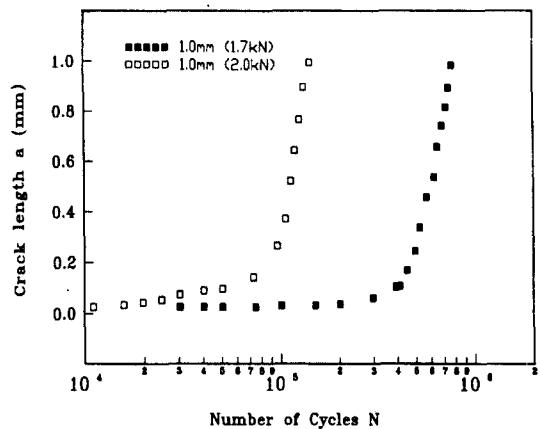


Fig. 8 Relationship between real crack length (a) number of cycles (N)

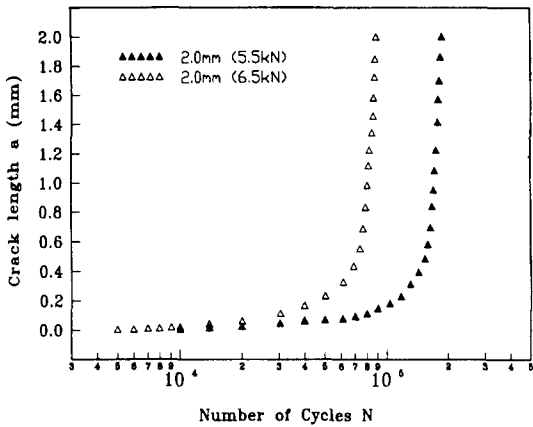


Fig. 9 Relationship between real crack length (a) and number of cycles (N)

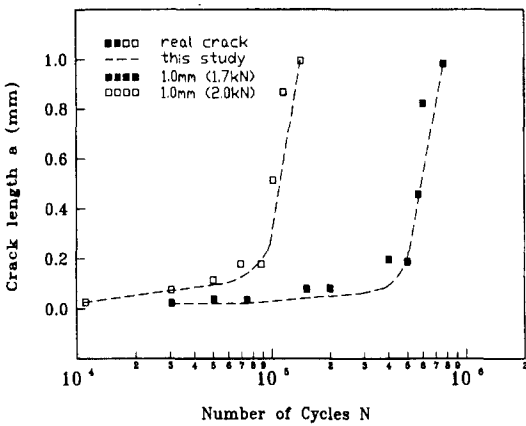


Fig. 10 Comparison of real crack and this study in a-N curve

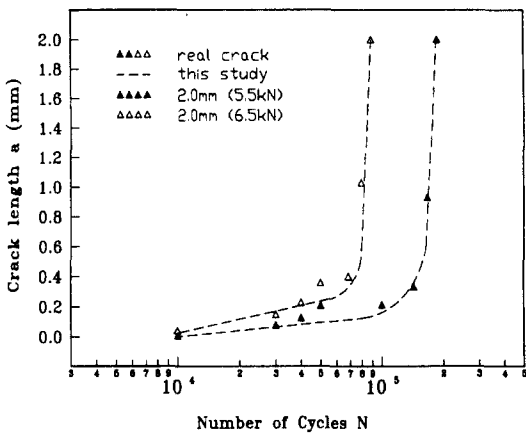


Fig. 11 Comparison of real crack and this study in a-N curve

3.5 da/dN-ΔK 선도 고찰

외면 스트레인 변화량 $\Delta \epsilon_r$ 에 의해 두께방향에 대한 내부의 크랙길이를 계산하였으며, 이렇게 구한 균열길이를 그때의 반복사이클수에 대해 응력확대계수 K를 적용하여 da/dN-ΔK 선도로서 피로균열성장 거동을 해석하였다. K는 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$K = \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \sigma_y \sqrt{r} \quad (2)$$

Fig. 12, 13은 고하중과 저하중 영역에 대한 da/dN-ΔK 관계를 나타낸 것으로서 동일한 ΔK영역에서 고하중에 비해 저하중상태가 피로수명이 증가함을 알 수 있다.

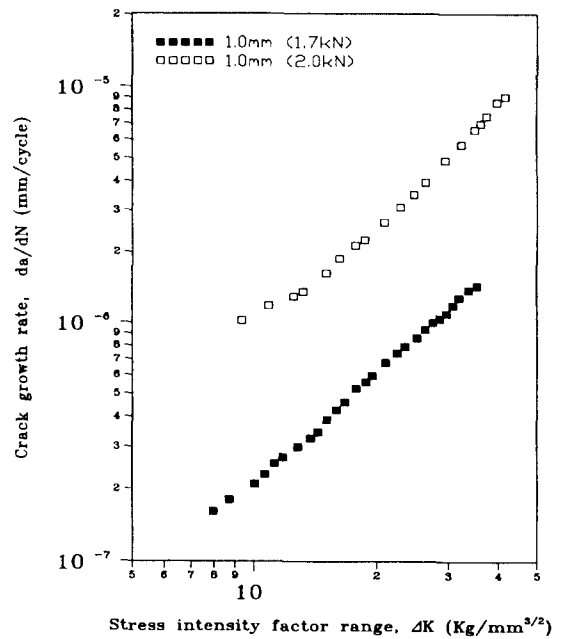


Fig. 12 Relationship between crack growth rate, da/dN and stress intensity factor, ΔK in low load and high load range

References

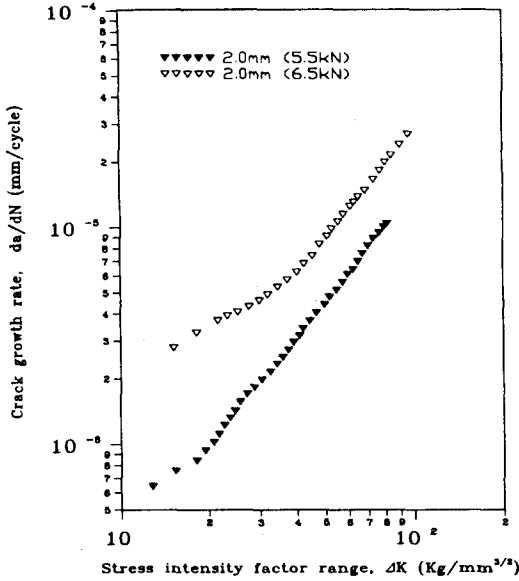


Fig. 13 $da/dN-\Delta K$ relations of the low load and high load range

4. 결론

점용접재에서 피로균열진전에 따른 스트레인의 변화를 이용하여 파괴역학적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 점 용접부 너깃 표면의 스트레인 변화를 $\Delta \epsilon$ 로 부터 내부균열길이 a 를 예측하는 방법이 유용함을 알 수 있었다.

2. 고하중 범위에서는 HAZ와 모재의 경계근방에서 반복 소성변형에 의하여 균열이 발생, 성장하는 것으로 보이고, 저하중 범위에서는 너깃 내부에서 피로균열이 발생, 성장함을 알 수 있다.

3. $da/dN-\Delta K$ 관계에서는 동일한 ΔK 영역에서 고하중에 비해 저하중 상태의 피로균열성장속도가 감소함을 알 수 있었다.

- (1) T. Satoh, H. Abe and K. Ishibashi : An Investigation on Fatigue Crack in Spot Welded Joints -Effects of pressing spot welds -, -The Japan Welding Society, Preprints of the National Meeting of J.W.S., No. 29, 1981
- (2) T. Satoh, H. Abe and S. Kataoka : An Investigation on Fatigue Crack in Spot Welded Joints [4]-Fatigue strengt and propagation speed -, The Japan Welding Society, Preprints of the National Meeting of J.W.S., No. 34, 1984
- (3) Davison, J. A. and Imhof, Jr. E. J., "The Effect of Tensile Strength on the Fatigue Life of Spot-Welded Sheet Steels", SAE Paper 840110, 1984
- (4) Kitagawa, H., Satoh, T. and Fujimoto, M., "Fatigue Strength of Single Spot-Welded Joints of Rephosphorized High-Strength and Low-Carbon Steel Sheets", SAE paper 850371, 1985.
- (5) McFadyen, N.B., R.Bell, O. Vosikovsky "Fatigue crack growth of semi-elliptical surface cracks" Int. J. Fatigue, Vol.12, No.1, PP.43-50, 1990
- (6) M. Shinozaki, T.Kato, T. Irie, I. Takahashi ; Fatigue of Automotive High Stength Steel Sheets and Their Welded Joints, SAE paper 830032(1983)