

## 노치부의 피로균열발생 수명 비교

김성훈\*·배성인\*\*·함경춘\*\*\*·송정일\*\*

### The comparison of the fatigue crack initiation life in a notch

S. H. Kim, S. I. Bae, K. C. Ham and J. I. Song

**Key Words:** P-N curve (하중-수명 선도), S-N curve (응력-수명 선도),  $\epsilon$ -N curve (변형률-수명 선도), Elastic stress concentration factor ( $K_t$ ; 응력집중계수), Fatigue notch factor( $K_f$ ; 피로노치계수)

#### Abstract

For the life evaluating of notched members, it is the best way that performing the real fatigue test of structure containing notch. But this method required generally much times and costs to evaluate fatigue life. So, generally we use the modified S-N curve or several methods to predict fatigue life. In this study, crack initiation life was evaluated by fatigue testing the SAE keyhole specimen and smooth specimen made of Al 7075-T6 alloys using the constant load then obtained S-N curve of smooth specimen and P-N curve of SAE keyhole specimen. And, fatigue lives of keyhole specimen are predicted using some life prediction methods (Nominal range I method, Nominal range II method, FEM analysis) for investigating experimented results, and that were compared with experimental data. Predicted fatigue lives by FEM analysis were corresponded with experimental data between 1/3times and 3times on the whole, and predicted fatigue lives using modified S-N curve (Nominal range I method, Nominal range II method) were nonconservative compared with that of FEM analysis.

#### 기호설명

- $\sigma_a$  : nominal stress amplitude  
 $\sigma'_f$  : fatigue strength coefficient  
 $K_t$  : elastic stress concentration factor  
 $K_f$  : fatigue notch factor  
 $2N_f$  : reversals to failure  
 $b$  : slope of  $\sigma - 2N_f$  curve.  
 $p, q$  : slope of estimated  $\sigma - 2N_f$  curve  
 at notched members  
 $r$  : notch root radius  
 $a$  : material constant

#### 1. 서론

기계재료의 피로수명 예측 시 부품으로부터 직접적으로 얻어진 하중-수명선도(P-N curve)가 주어진 경우에는 부품 또는 관심부위에 대한 실질적인 수명예측이 이루어지지만, 실제 부품으로부터 얻어진 데이터가 없을 경우에는 동일한 재료에 대한 응력-수명선도(S-N curve)를 이용하여 수명예측이 이루어져야 한다. 특히 노치가 포함된 재료에 있어서 하중 수명선도를 이용한 수명 예측 방법은 부품의 제조과정에서 발생하는 여러 가지 영향과 응력집중 효과가 자동적으로 포함되어 따로 응력해석을 할 필요가 없다는 장점을 가지고 있지만 모든 제품에 대한 하중수명선도의 획득은 어려움이 있으며, 이러한 경우 역시 동일한 재료의 S-N 선도를 이용하여 수명예측을 하여야 한다.

\* 창원대학교 대학원  
 \*\* 창원대학교 기계공학과  
 \*\*\* 인하공전 기계설계과

따라서, 본 연구에서는 노치부의 피로균열발생 수명예측을 위해 항공산업분야에서 널리 사용되고 있는 Al 7075-T6 재의 노치 시편에 대해 일정 진폭피로시험을 수행하여 P-N 선도를 구하고, 동일재료의 평활 시편에 대해 일정진폭피로시험을 수행하여 S-N 선도를 구하였으며, 노치재의 피로 수명을 평가하기 위해 응력 집중효과가 고려된 수정 S-N 선도를 추정하고, 일정진폭피로시험에 대한 실험결과와 예측수명을 비교하였으며, 유한요소법을 이용한 시험편의 구조해석을 통하여 피로수명을 평가하는 방법을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

노치부의 피로균열발생수명을 예측하는 방법에는 부품의 P-N 선도를 직접적으로 이용하는 방법, 노치가 없는 평활 시험편의 S-N 선도로부터 노치 S-N 선도를 추정하여 이용하는 방법, 변형률-수명선도( $\epsilon$ -N curve)를 이용하는 방법 등이 있다<sup>(3)</sup>.

### 2.1 응력-수명선도를 이용하는 방법

평활 시편에 대한 S-N 선도가 주어진 경우 노치재의 피로수명 예측시, 주어진 S-N 선도를 기초로 대상 노치에 대한 노치 S-N 선도를 추정한 후, 하중이력에 대한 데이터를 공칭응력으로 변환하여 추정된 노치 S-N 선도와 비교하여 피로수명을 예측할 수 있다.

이 방법은 부품을 설계하는 초기에 유용하게 적용될 수 있으며, 제품의 재질과 형상의 변화에 민감하게 수명예측을 할 수 있다는 장점이 있으나 피로의 원인이 되는 노치선단의 소성을 설명할 수 없으며, 평균응력 효과를 잘 고려할 수 없고, 정도 높은 수명예측을 위해 실험적인 응력집중계수  $K_t$ , 피로노치계수  $K_f$ 가 필요하다는 단점이 있다.

평활시험편에 대한 S-N 선도가 주어져 있을 때 노치 S-N 선도를 추정함에 있어서, 평활 시편에 대한 응력과 수명의 관계는 식(2-1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2-1)$$

이때, 노치 S-N 선도를 추정하는 방법으로는 피로노치계수  $K_f$ 를 이용하는 경우가 많으며, 그 중 비교적 간단한 방법으로는 Fig.1과 같은 방법

을 생각할 수가 있다<sup>(1)</sup>.

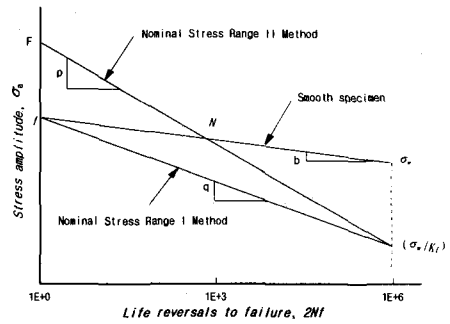


Fig.1 Method for estimating notched stress-life curve

Nominal Stress Range I Method는 평활시편의 피로한도( $\sigma_w$ ), 엄밀하게는 한계되풀이수(본 연구에서는  $2N_f=10^6$ 을 사용)에 대응하는 시간강도의  $1/K_f$ 이 되는 노치재의 피로한도  $\sigma_w/K_f$ 와, 평활 시험편의 파단수명  $2N_f=1$ 에 대응하는  $\sigma'_f$ 의 점 f를 잇는 방법으로, 추정된 노치 S-N 선도의 관계는 식(2-2)와 같이 표현되어 진다<sup>(4)</sup>.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^q \quad (2-2)$$

$$q = b - (\log_{10} K_f)/6.0$$

이 방법은 노치의 약화효과가 전 피로수명영역에서 존재한다고 가정하는 것으로, 특히 취성재료에 적합하다고 할 수 있다.

Nominal Stress Range II Method는 위의 노치재의 피로한도 점과, 노치의 피로수명에 미치는 약화효과가 거의 없어지는 저되풀이수 피로와 고되풀이수 피로의 경계부근 ( $2N_f=10^6$ )의 점 N을 이어 연장되는 그림중의 직선  $\overline{KNF}$ 를 노치 S-N 선도로 사용하는 방법으로, 추정된 노치 S-N 선도의 관계는 식(2-3)과 같이 표현되어 진다<sup>(2)</sup>.

$$\sigma_a = K_f \sigma'_f (2N_f)^p \quad (2-3)$$

$$p = b - (\log_{10} K_f)/3.0$$

이 방법은 특히 강도 및 연성이 비교적 높은 합금강의 경우 저되풀이수 피로영역에서 나타나는 노치의 피로수명 강화효과<sup>(4)</sup>를 고려하기 위한 방법이다. 위에서 서술한 방법에 의해 노치 S-N 선도를 추정할 경우에 필요한 피로노치계수  $K_f$ 에

관해서는 현재까지 많은 경험식이 제안되고 있으나<sup>(5)</sup>, 실제 실험결과와 비교적 잘맞는다는 보고<sup>(6)</sup>가 있는 Peterson의 식<sup>(7)</sup>을 여기서는 이용하기로 하였다. 즉,

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{a}{r}} \quad (2-4)$$

### 3. 일정진폭 피로시험

#### 3.1 시험장치 및 시편

피로시험은 마이크로 컴퓨터를 이용하여 컨트롤하였으며, 시스템의 구성도를 Fig.2에 나타내었다. 실험에 사용된 피로시험기는 MTS사의 전기 유압식 서보 피로시험기로서 최대용량 10톤의 것을 사용하였다.

일정진폭 피로시험에 사용된 시편은 평활 시편(smooth specimen)과 노치 시편(SAE keyhole specimen)으로, 평활 시편의 형상 및 치수는 Fig.3과 같다. 시험편의 채취방향은 균열방향이 재료의 압연방향과 일치하도록 하였다. 중간부에 원형 노치가 있는 노치 시편의 형상 및 치수는 Fig.4와 같다. 시편의 채취방향은 균열의 진전방향이 재료의 압연방향과 일치하도록 하였으며, 먼저 중간부에 드릴을 이용하여 구멍을 뚫은 후 밀링커터로 한쪽 면에서 홈까지 절단하였다.

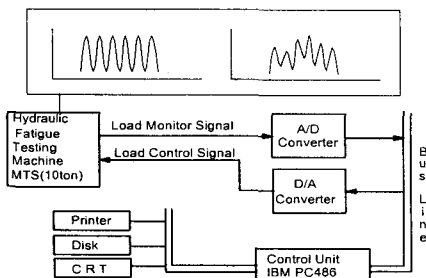


Fig.2 Composition of fatigue testing system

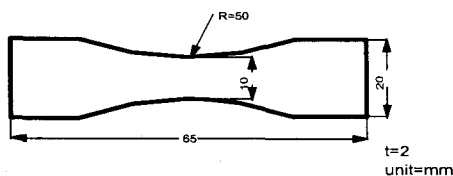


Fig.3 Shape and dimension of smooth specimen

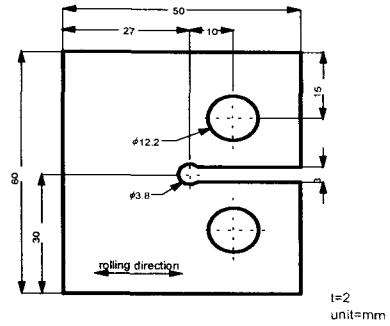


Fig.4 Shape and dimension of SAE keyhole specimen

#### 3.2 평활 시편에 대한 피로시험

평활 시편에 대한 피로시험은 실온에서 하중 반복 주파수=10Hz, 응력비 R=0.1로서 사인파형의 인장-인장(tension-tension)하중제어 방식으로 행하였으며, 그 결과를 Fig.5에 응력-수명 선도(S-N curve)로 표시하였다. 이때, 응력과 수명의 관계는 식(3-1)과 같다.

$$\sigma_a \text{ (MPa)} = 647.6 (2N_f)^{-0.111} \quad (3-1)$$

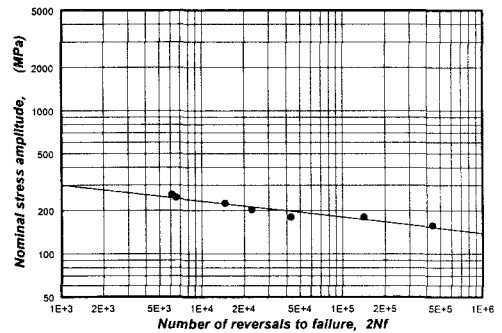


Fig. 5 Constant amplitude stress-life diagram of Al 7075-T6 alloy

(smooth specimen, uniaxial loading, R=0.1)

#### 3.3 노치 시편에 대한 피로시험

시험조건은 평활 시편에 대한 피로시험과 같은 조건으로 행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 하중-수명 선도(P-N curve)로 표시하였다. 이때, 하중과 수명의 관계는 식(3-2)와 같다.

$$\frac{AP}{2} \text{ (kN)} = 6.65 (2N_f)^{-0.204} \quad (3-2)$$

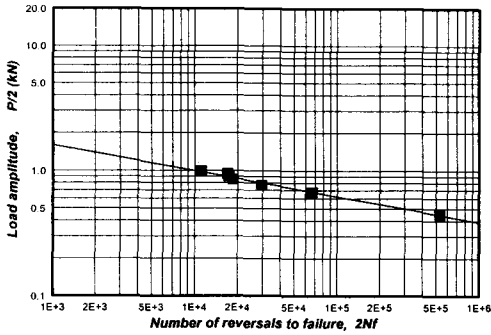


Fig. 6 Constant amplitude load-life diagram of Al 7075-T6 alloy (notched specimen, uniaxial loading, R=0.1)

#### 4. 노치 시편의 피로수명 고찰

##### 4.1 응력-수명선도를 이용한 수명예측

평활 시편에 대한 S-N 선도를 이용한 노치 시편의 수명예측은 평활 시편의 일정진폭 피로시험의 결과를 바탕으로 노치 시편에 대한 S-N 선도를 추정하여 수행하였다.

피로노치계수  $K_f=2.51$ 을 이용하여 노치 S-N 선도의 식을 추정하면,

Normal Stress Range I Method의 경우,

$$\begin{aligned} \sigma_a &= 647.6 (2N_f)^q \\ q &= b - (\log_{10} K_f)/6.0 \quad (4-2) \\ &= -0.178 \end{aligned}$$

Normal Stress Range II Method의 경우,

$$\begin{aligned} \sigma_a &= 1625 (2N_f)^p \\ p &= b - (\log_{10} K_f)/3.0 \quad (4-3) \\ &= -0.244 \end{aligned}$$

가 된다. 여기서, 공칭응력진폭  $\sigma_a$ 의 단위는 MPa이다.

노치 시편(SAE Keyhole specimen)의 P-N 선도로부터 계산된 공칭응력을 이용하여 수정된 S-N 선도인 Method I과 Method II를 이용하여 수명예측한 결과를 Fig.7 ~ Fig.9에 나타내어 비교하였다.

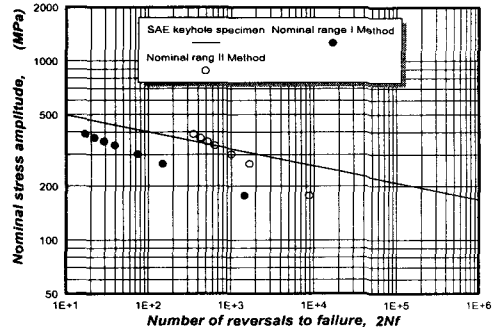


Fig. 7 Comparison of predicted life using nominal range method I and II

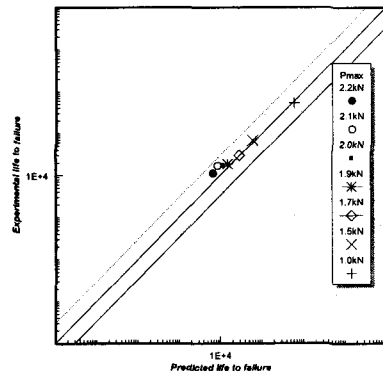


Fig. 8 Comparison of experimental data and predicted fatigue lives using S-N method(Method I)

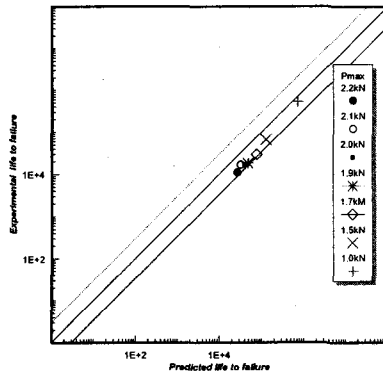


Fig. 9 Comparison of experimental data and predicted fatigue lives using S-N method(Method II)

#### 4.2 유한요소해석에 의한 피로수명예측

시편의 형상에 따른 응력분포를 실제 구조물에서 적용될 수 있는지 알아보기 위해 인장 시편과 노치 시편의 인장시험을 수행하였다. 유한요소법을 이용하여 노치 부위의 응력분포를 확인하기 위해 인장시험에서 얻어진 물성치를 바탕으로 단위하중에 대하여 탄소성 해석을 수행하였다. 해석에는 ANSYS 5.6을 사용하였고, 해석에 사용된 요소(element)는 plane82로 2개의 자유도를 가지며 재료의 소성거동을 잘 표현하는 요소이다.

각 단위하중에서의 해석결과로 keyhole에서의 최대변위를 구하였고, 노치 시편의 인장 시험시 keyhole의 실제 변위와 비교하여 Fig.10에 나타내었다.

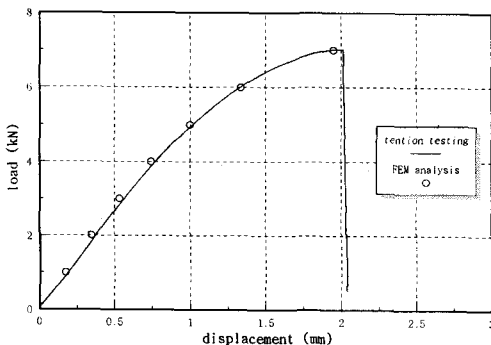


Fig. 10 Comparison of Load-Displacement curve of SAE keyhole specimen tension testing from FEM results

노치 시편의 인장시험결과와 해석결과를 비교해볼 때 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 유한요소해석결과가 노치 부위의 실제 응력분포를 잘 나타냄을 알 수 있다.

#### 4.3 유한요소법을 이용한 피로수명평가

앞에서 설명한 바와 같이 수정 S-N 선도를 이용한 노치부의 수명예측은 피로의 원인이 되는 노치선단의 소성을 설명할 수 없으며, 평균응력효과를 잘 고려할 수 없고, 정도 높은 수명예측을 위해 실험적인 응력집중계수  $K_t$ , 피로노치계수  $K_f$ 가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 다시 말해 수정 S-N 선도를 사용한 수명예측은 노치부에서의 응력을 탄성 해석함으로써 실제 노치부에서 소성변형이 일어날 때의 응력 상태보다 높게

계산된 응력을 이용함으로써, 다소 보수적인 수명예측이 이루어진다. 이에 반해 P-N 선도를 이용할 경우 응력 집중효과가 자동으로 포함됨으로 노치부의 실질적인 피로수명예측이 가능하므로 본 연구에서는 실험에서 구한 P-N 선도의 실험중으로 탄소성 해석을 수행하고, 이때 노치부의 최대 주응력을 이용하여 노치부의 S-N 선도를 추정하였다. 해석결과로부터 추정된 응력-수명의 관계식은 식(4-4)와 같다.

$$\sigma_a = 423(2N_f)^q \quad q = -0.0589 \quad (4-4)$$

Fig.11에 평활 시편에 대한 S-N 선도와 노치 시편의 유한요소해석결과로 추정한 S-N 선도를 비교하였으며, Fig.12에 동일한 응력 레벨에서 노치 시험편의 피로수명과 평활 시편에서의 피로수명을 비교하였다. 비교결과에서 볼 때 노치 시험편의 실험결과와 동일한 응력 레벨에서의 평활 시험편의 피로수명은 1/3~3배 사이에서 잘 맞으며 예측수명이 실험결과보다 다소 작게 평가되어 예측수명이 안정수명임을 알 수 있다.

Fig.13은 수정 S-N 선도(Nominal range I method, Nominal range II method)를 이용한 예측수명과 유한요소법을 이용한 예측수명을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 노치부의 공칭 응력을 이용한 수명평가보다 탄소성해석을 통한 노치부의 응력을 이용하여 예측한 수명이 비교적 잘 맞음 알 수 있다.

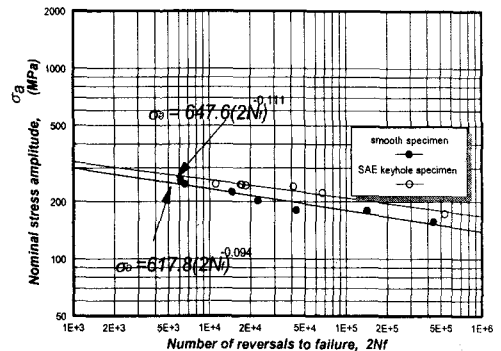


Fig. 11 Comparison of stress-life diagram of Al7075-T6 alloy

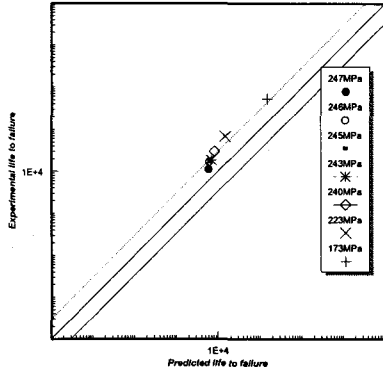


Fig. 12 Comparison of experimental data and predicted fatigue lives using S-N curve from FEM results

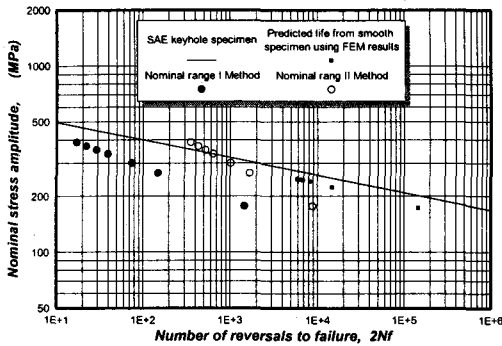


Fig. 13 Comparison of predicted life using nominal range method and fem results

## 5. 결론

평활 시편의 피로시험결과를 이용한 일정진폭 하중하에 A17075-T6재 노치 시편(SAE keyhole specimen)의 피로수명예측에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 평활 시편과 노치 시편의 피로시험을 통하여 S-N 선도와 P-N 선도를 구하였다.
- (2) 노치 시편의 유한요소해석을 통하여 노치부의 응력집중계수( $K_t$ )와 피로노치계수( $K_f$ )를 구하고 평활 시편의 S-N 선도로부터 노치 시편의 S-N 선도(Method I, Method II)를 추정

하였으며, 추정된 S-N 선도를 이용한 수명예측과 노치 시편의 피로시험결과를 비교하였다.

- (3) A17075-T6재의 인장시험으로부터 구한 응력-변형률선도를 이용하여 노치 시편의 탄소성 해석을 수행하였으며, 노치 시편의 인장시험결과와 유한요소해석을 비교한 결과 시험결과와 해석결과가 잘 일치하였으며, 탄소성 해석결과가 재료의 거동을 잘 표현함을 확인하였다.
- (4) 노치 시편의 P-N 선도로부터 각 시험하중에 대한 탄소성 해석을 하였으며, 해석결과인 노치부의 최대 주응력을 이용하여 노치 시편의 P-N 선도로부터 S-N 선도를 추정하고 동일한 응력 레벨에서 실제 노치 시편의 수명과 평활 시편의 수명을 비교하였다. 여기서 예측된 수명은 실험결과와 비교해 볼 때 1/3~3배 사이에서 잘 맞으며, 수정 S-N 선도를 이용하는 방법보다 비교적 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) 하재선, 송지호, 이시중, "변동하중하의 피로수명예측 - 제1보: 피로균열 발생까지의 수명 -", 대한기계학회 논문집 제12권, 제4호, pp. 760~780, 1988
- (2) Manson, S. S., Frecke, J. C. and Ensign, C. R., "Applications of a Double Linear Damage Rule to Cumulative Fatigue", Fatigue Crack Propagation, STP-415, ASTM, Philadelphia, 1967, p. 384
- (3) Fatigue Design Handbook AE-10, 2nd Edition, pp. 231~249, 1988.
- (4) 日本機械學會編, "金屬材料疲勞設計便覽", 養賢堂, p. 46, 1978.
- (5) 日本機械學會編, "金屬材料疲勞設計便覽", 養賢堂, pp. 48~57, 1978.
- (6) Peterson, R.E., "Stress Concentration Factors", John & Sons, Inc., pp. 9~11, 1974.
- (7) Peterson, R.E., "Stress Concentration Factors", John & Sons, Inc., p. 41, 59, 1974.