

현장 실무자를 위한 구조물 피로수명 평가 방법

A Fatigue Life Evaluation Method of Structures for Field Engineers

구병춘*, 정흥채*, 이찬우*
Goo, Byeong-Choon, Jung, Hung-Chai, Lee, Chan-Woo

ABSTRACT

To evaluate the fatigue lifetime of structures, it is necessary to identify the value of parameters through tests or literature. It is difficult for field engineers to get the necessary data through tests from the viewpoint of time and cost. In this study, we surveyed literature and proposed a procedure to identify the fatigue parameters for fatigue life evaluation by local strain approach.

1. 서론

구조물의 피로수명을 평가하기 위해서는 여러 가지 방법이 있고 각 방법을 적용하기 위해서는 피로 특성을 나타내는 특성값을 알아야 한다. 그런데 피로특성을 나타내는 상수의 값을 구하기 위해서는 많은 피로시험이 필요하다. 그런데 이러한 피로시험은 시험장비나 피로에 관한 전문가를 보유한 경우가 아니면 쉽게 수행하기가 어렵고 시간과 비용도 문제가 되어 여러 연구자들은^(1,2) 인장시험과 같이 간단한 시험으로 피로특성을 파악할 수 있는 방법을 연구해 오고 있다. 경도, 인장특성 등 간단한 시험결과로부터 신뢰할 수 있는 피로 물성치를 얻을 수 있다면 시간과 비용을 대폭적으로 절감할 수 있을 것이다.

피로균열의 발생수명을 평가하기 위해서는 전통적으로 사용되어 오고 있는 공칭응력에 기반을 둔 방법과 ($\sigma - N$ approach) 노치부의 응력집중에 의한 소성변형을 고려하기 위해 국부변형률을 이용한 수명평가법이 ($\epsilon - N$ approach) 활용되고 있다. 공칭응력에 기반을 둔 피로수명 평가식으로는 응력비 $R = S_{\min}/S_{\max} = -1$ 일 때 Basquin의 식이⁽³⁾ 사용된다.

$$\Delta S/2 = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

여기서 $\Delta S/2$ 는 응력의 진폭이고 N_f 는 사이클 수이다. 이 식에서는 피로강도계수 σ'_f , 피로강도지수 b , 두 가지 상수가 사용되고 있다. 평균응력이 존재하는 경우는 Modified Goodman Diagram이나 다른 식을 사용하여 평균응력의 효과를 반영할 수 있다.

국부 변형률을 이용한 피로수명 평가에는 여러 가지 식들이 사용되고 있는데 응력비 $R = -1$ 일 때 대표적인 식의 하나가 Coffin-Manson의 식으로⁽³⁾ 다음과 같이 표현된다.

* 한국철도기술연구원, 차량기계연구본부, 정회원

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^o \quad (2)$$

여기서 $\Delta\epsilon/2$, $\Delta\epsilon_e/2$, $\Delta\epsilon_p/2$ 는 각각 전 스트레인, 스트레인의 탄성 성분 그리고 소성성분이다. 평균응력이 존재하는 경우 이에 대한 고려는 여러 가지 방법들이 제안되고 있는데 대표적인 것이 S.W.T. 파라메타로 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{\max}\epsilon_a E = (\sigma_f')^2 (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' E (2N_f)^{b+o} \quad (3)$$

피로수명과 관련하여 천이점 수명 (transition life)이라는 개념이 사용되는데 이는 탄성 성분과 소성 성분의 크기가 같은 점에서의 수명을 의미하고 다음과 같이 표현된다.

$$N_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_f'}{\epsilon_f' E} \right)^{1/(o-b)} \quad (4)$$

본 연구에서는 피로수명 평가에 필요한 주요 개념들을 간단히 정리하고 기존의 문헌에 발표된 자료로부터 탄성계수와 경도와 같은 간단한 재료 특성값을 이용하여 피로수명을 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 인장 특성과 피로특성의 관계

2.1 경도, 인장강도, 천이점 수명의 관계

저, 중 강도의 강과 합금강에 대해 브리넬 경도 HB 와 인장강도 S_u 의 관계는 식 (5)와 같은 선형적인 관계로 표현될 수 있다.

$$S_u \approx 3.45HB \text{ (MPa)}, HB < 350 HB \quad (5)$$

HB 500까지 확장하여 2차식으로 근사하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_u \approx 3.3HB + 0.0012(HB)^2 \quad HB < 500 HB \quad (6)$$

이 관계에서 상관계수(correlation coefficient), R 의 값은 $R^2 = 0.96$ 정도이다.

브리넬 경도와 10^6 cycle에서의 피로한도 S_f 의 관계를 선형적합곡선으로 표현하면 다음과 같다.

$$S_f \approx 1.43HB \quad (7)$$

피로강도를 인장강도로부터 예측하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_f \approx 0.5S_u \text{ for } S_u < 1400 \text{ MPa}$$

$$S_f \approx 700 \text{ MPa for } S_u \geq 1400 \text{ MPa} \quad (8)$$

700 MPa 이상에서 피로한도가 일정한 것은 개재물의 영향 때문으로 보인다. 인장강도와 피로한도 데이터의 시험결과에는 많은 산란을 갖고 분포하므로 식 (8)에 의한 인장강도로부터 예측된 피로한도는 실험값과 많은 차이가 있고 대부분의 강에 대해 보수적인 결과를 주지 않는다. 전통적으로 많은 피로시험은 회전굽힘시험으로 수행되었다. 회전굽힘시험에서는 인장피로시험에 비해 상대적으로 큰 응력을 받는 부분이 작고 결함의 확률도 작아 피로한도가 높다. 인장과 회전굽힘 피로시험에서 얻은 모든 데이터로부터 인장강도와 피로한도의 관계를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_f \approx 0.38 S_u \quad (9)$$

브리넬 경도와 권이점수경도의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\log(2N_f) = 5.755 - 0.0071 HB \quad (10)$$

2.2 인장 특성과 피로 특성의 관계

피로강도계수 σ'_f 는 인장시험에서 얻어지는 진파단강도 σ_f 와 유사하며 $(0.92 \sim 1.15)\sigma_f$ 의 범위에 있다. 피로강도계수는 브리넬경도와 인장강도에 크게 의존하며 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma'_f = 4.25 HB + 225 \text{ (MPa)} \quad (11)$$

$$\sigma'_f = 1.04 S_u + 345 \text{ (MPa)} \quad (12)$$

문헌의 자료들에 의하면 피로연성계수 ϵ'_f 는 인장시험에서 얻어지는 진파단연신율 ϵ_f 와 밀접한 관계를 갖기 어려우며 대략 $(0.15 \sim 1.15)\epsilon_f$ 의 범위에 있다. 따라서 진파단연신율로부터 피로연성계수를 추론하는 경우 큰 오차를 유발할 수 있다. 최근 Roessle 등은⁽²⁾ ϵ'_f 를 브리넬 경도 및 탄성계수와 밀접한 관계가 있다고 보고 아래와 같은 식을 제시하고 있다.

$$\epsilon'_f = \frac{\sigma'_f(2N_f)^b}{E(2N_f)^c} \quad (13)$$

여기서 피로강도계수 σ'_f 는 식 (11) 혹은 (12)로 구할 수 있다. 분자는 권이점 수명 N_f 에 대응하는 권이점 피로강도 (transition fatigue strength) $S_t = \sigma'_f(2N_f)^b$ 이다. 이 S_t 와 브리넬 경도는 매우 큰 상관관계가 발견된다.

$$S_t = 1.15 HB + 0.004 (HB)^2 \quad (14)$$

식 (10)에서 N_f 를 구하여 분모에 대입하고, 식 (14)을 분자에 대입하면 ϵ'_f 는 아래와 같이 주어진다.

$$\epsilon'_f = \frac{1.15HB + 0.004(HB)^2}{E[10^{(5.755 - 0.0071HB)}]^{-0.56}} \quad (15)$$

식 (15)의 다항식을 전개하여 2차항까지 사용하여 단순화시키면 $150 < HB < 700$ 범위에서 실험값과 잘 일치하는 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\epsilon'_f = \frac{487HB + 0.32(HB)^2 + 191000}{E} \quad (16)$$

Morrow는⁽³⁾ 에너지 관계로부터 피로이 가공경화지수 n' 와 피로강도지수 b , 피로연성지수 c 의 관계를 아래와 같이 제시하였다.

$$b = \frac{-n'}{1 + 5n'}, \quad c = \frac{-1}{1 + 5n'} \quad (17)$$

그러나 이 예측식들은 실험값과 잘 맞지 않는다. $b=(-0.057 \sim -0.140)$ 의 범위에 있고 평균값은 -0.09 , $c=(-0.39 \sim -1.04)$ 의 범위의 값을 취하며 평균값은 -0.60 이다. 피로강도지수 b 의 평균값은 -0.09 로 Modified Universal Slope 방법의 지수와 같으므로 일정한 값 -0.09 를 갖는다고 추정한다. 그리고 피로연성지수 c 의 평균값 -0.6 은 Modified Universal Slope 방법의 지수와 유사하므로 -0.56 의 일정한 값을 갖는다고 가정한다.

위에서 구한 피로상수들의 값을 식 (2)에 대입하면 아래의 식을 얻는다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{4.25HB + 225}{E} (2N_f)^{-0.09} + \frac{-487HB + 0.32(HB)^2 + 191000}{E} (2N_f)^{-0.56} \quad (18)$$

위와 유사한 연구로 몇몇 연구자들은 인장 시험에서 얻어지는 성질로부터 변형률과 피로 수명의 관계를 찾기 위해 연구를 하여 오고 있다. Park 과 Song⁽¹⁾은 문헌에 발표된 6가지의 식으로 강, 합금강, 알루미늄 합금, 티탄 합금 등에 대해 평가하였는데 아래와 같이 기술되는 Modified Universal Slope 방법이 가장 좋은 상관관계를 주는 것으로 밝혀졌다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 0.623 \left(\frac{S_u}{E} \right)^{0.832} (2N_f)^{-0.09} + 0.0196 (\epsilon_f)^{0.155} \left(\frac{S_u}{E} \right)^{-0.53} (2N_f)^{-0.56} \quad (19)$$

한편 49개의 강에 대한 Ong⁽⁶⁾의 연구에서는 Modified Four-Point Correlation법이 가장 좋은 결과를 주고 있다.

평균응력이 있는 경우 식 (1)의 Basquin의 관계식을 아래와 같이 표현하고

$$\sigma_o = \Delta\sigma/2 = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (20)$$

식 (18)에 곱하여 S.W.T. 파라미터와 유사하게 정리하면 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\sigma_a \Delta \sigma E}{2} - (4.25HB + 225)^2 (2N_f)^{-0.18} \quad (21)$$

$$+ (4.25HB + 225)[-487HB + 0.32(HB)^2 + 191000](2N_f)^{-0.65}$$

여기서 식 (21)을 적용할 때 응력비 $R \neq 1$ 인 경우 $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} + \Delta\sigma/2$ 를 대입한다. 이 식으로 수명을 평가하는 경우 탄성계수 E 와 브리넬경도 HB 만 알면 되므로 현장 엔지니어나 설계자들에게 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

3. 노치 및 잔류응력을 고려한 수명예측

철도차량 구조물은 용접으로 제작되는 경우가 많고 대부분의 피로파손은 용접부에서 발생하므로 노치효과와 잔류응력에 대한 고려가 필요하다. 잔류응력이 피로거동에 미치는 영향을 고려하기 위해서 국부변형률을 이용한 수명예측은 Reemsnyder⁽⁶⁾, Lawrence⁽⁷⁾, Seeger⁽⁸⁾ 등에 의해 각각 아래와 같은 식 (22), (23), (24)가 사용되었다.

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = \frac{1}{E} \left(\frac{K_f S_{\max}}{1 - \sigma_{r_{\max}} / \sigma_{\max}} \right)^2 \quad (22)$$

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = \frac{(K_f S_{\max} + \sigma_{r_{\max}})^2}{E} \quad (23)$$

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = -\frac{(K_f S_{\max})^2}{E} + \frac{\sigma_{\max} \sigma_{r_{\max}}}{E} \quad (24)$$

여기서 첨자 max는 최대값을 표시한다. 식 (22), (23), (24)는 외력이 작용하여 최대값 S_{\max} 에 도달할 때의 국부응력과 국부변형률을 계산하는데 필요한 식이다. 하중이 최대점에서 줄어들어 최소점에 도달하는 경우에 최소 국부변형률 ϵ_{\min} 과 국부응력 σ_{\min} 은 식 (25)와 같이 표현된다.

$$(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) = -\frac{(K_f \Delta S)^2}{E} \quad (25)$$

여기서 첨자 min은 최소값을 의미한다.

하중의 최대점과 최소점에서의 응력과 변형률의 값은 식 (22)~(25)와 반복 하중에 대한 변형률-응력의 관계를 기술하는 아래의 Ramberg-Osgood 식⁽⁹⁾을 이용하여 구한다.

$$\frac{(\Delta\sigma)^2}{E} + 2\Delta\sigma \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E} \quad (26)$$

여기서 K' : 재료의 되풀이 변형에 대한 강도계수이고 $\Delta\sigma$ 와 ΔS : 국부응력과 작용응력의

변화량을 나타낸다.

위 식들을 이용하여 국부 응력과 변형률을 구하려면 피로이 강도계수 K' 와 피로이 가공 경화지수 n' 의 값이 필요하다. 이들 값을 실험으로 구하는 것이 정확하지만 근사적으로 경도와 탄성계수로부터 구할 수 있다. 피로이 가공경화지수 n' 는 피로연성지수와 피로강도지수로부터 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$n' = \frac{b}{c} = 0.15 \quad (27)$$

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\epsilon_f')^{n'}} = \frac{E^{0.15} (4.25HB + 225)}{[-487HB + 0.32(HB)^2 + 191000]^{0.15}} \quad (28)$$

감사의 글

본 연구는 공공기술연구회가 지원하는 기본연구사업으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. H. Park, J. H. Song (1995) "Detailed evaluation of methods of estimation of fatigue properties," *Int. J. Fatigue*, Vol. 17, No. 5, pp. 365-373
- (2) M. L. Roessle, A. Fatemi (2000), "Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations," *Int. J. Fatigue*, Vol. 22, pp. 495-511
- (3) R. I. Stephens, A. Fatemi (2001) R.-R. Stephens, H. O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc.
- (4) J. A. Bannantine, J.-J. Comer, J. L. Handrock (1990) *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice-Hall, Inc.
- (5) J. H. Ong (1993), "An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data," *Int. J. Fatigue*, Vol. 15, pp. 213-219
- (6) H. Reemsnyder (1981) *Experimentation and Design in Fatigue: Evaluating the Effect of Residual Stresses on Notched Fatigue Resistance*, pp. 273-295.
- (7) F. V. Lawrence, J. D. Burk, J. Y. Yung (1982) "Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments," *ASTM STP 776*, pp. 33-43.
- (8) M. Vormwald, T. Seeger (1987) *Residual stresses in Science and Technology: Crack Initiation Life Estimations for Notched Specimens with Residual Stresses Based on Local Strains*, pp. 743-750.