

스프링강의 피로 특성에 미치는 평균 응력의 영향

석창성[†], 김형익*, 장필수**, 주재만**, 강정훈**

Effect of Mean Stress on Fatigue Properties in Spring Steel

Chang-Sung Seok, Hyung-Ick Kim, Pil-soo Chang, Jae-Man Joo and Jeong-Hoon Kang

Key Words: Mean stress(평균 응력), Stress ratio(응력비), Bending fatigue test(굽힘 피로시험)

Abstract

Most of the fatigue test were achieved in fully reversed condition that mean stress is zero. But, generally, mean stress can not be zero. This research was achieved the bending fatigue test that changes mean stress to spring steel and was studied relation with the mean stress and the fatigue life. The method to search effect about mean stress was extended S-N graph in two cases. One method was extended S-N graph using modified Miner's rule with considering damage. Another was extended using tendency of S-N graph. The exponential value(α) of mean stress-alternating stress equation is converged between the Goodman's and the Gerber's value even if fatigue life increases.

1. 서론

기계 및 구조물의 설계시 허용 응력 이하의 설계 조건으로 설계하지만, 반복 작동을 하게 되는 기계 시스템의 경우에는 피로에 의한 파괴 현상이 나타나게 된다. 피로 시험의 대부분은 평균 응력 $\sigma_m = 0$ 인 완전 역전 조건(fully reversed condition)에서 수행되나, 실구조물에 작용되는 피로 하중은 평균 응력이 0(zero)이 아닌 경우가 자주 있다.

완전 역전 조건의 경우(응력비 $R = -1.0$)로부터 평균 응력이 증가하면 응력비는 커지고, 피로 한도는 증가하게 된다. Goodman은 피로 내구한도(응력 범위의 임계치)가 평균 응력에 미치는 영향을 나타내는 Goodman 도표(Goodman diagram)

를 고안해냈다.⁽¹⁾

평균 응력의 영향에 대한 실험 데이터를 나타내는 다른 방법으로 Haigh-Soderberg 도표가 있다.⁽²⁾ 여기서는 내구한도와 수명과의 관계를 평균 응력에 대해 나타내었다. 직선 관계는 Goodman의 제안을 나타내며, 포물선은 Gerber의 제안을 나타낸다. 연성 금속의 실험 데이터는 일반적으로 포물선에 더 가깝다. 그러나, 실험 결과에는 편차가 있고 노치 시편의 실험 결과는 Goodman 직선에 보다 가깝게 접근하므로 공학적인 설계시에는 직선 관계가 더 많이 이용된다.⁽³⁾

평균 응력의 영향을 나타내는 대표적인 관계식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

식 (1)은 Soderberg, 식 (2)는 Goodman 그리고

[†] 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

* 성균관대 대학원 기계설계학과

** (주) 삼성전자

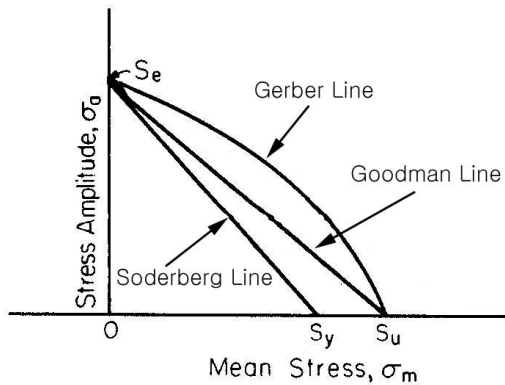


Fig. 1 Comparison of mean stress equations

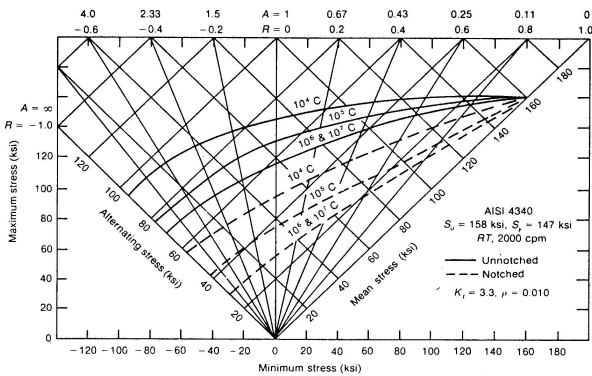


Fig. 2 Master diagram for mean stress

식 (3)은 Gerber의 제안을 나타낸다. 위 식들의 관계는 다음의 식 (4)와 같은 응력 진폭 σ_a 와 평균 응력 σ_m 과의 관계로 표현될 수 있다.

$$\sigma_a = S_e \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^\alpha \right] \quad (4)$$

여기서, Goodman 직선의 경우에는 $\alpha = 1$ 이고, Gerber 포물선의 경우에는 $\alpha = 2$ 이며, S_e 는 완전 역전 조건에서의 피로 내구 한도이다.

Fig. 1⁽⁴⁾의 Soderberg 직선으로 나타낸 것과 같이 설계가 항복강도에 기준을 두었다면, 식 (4)에서 인장강도 S_u 대신 항복강도 S_y 를 대입해야 한다. 따라서, Soderberg에 의한 방법은 매우 보수적인 평가 방법이다.⁽⁵⁾

이러한 응력 진폭과 평균 응력과의 관계를 특정 피로 수명에 대하여 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.^(3, 6) 본 논문에서는 스프링강의 피로 특성에 미치는 평균 응력의 영향에 대하여 알아보려고 한다.

Table 1 Result of tensile test

| Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) |
|----------------------|------------------------|
| 1,464 | 1,639 |

2. 인장시험

2.1 시험장치 및 방법

인장시험에 사용된 시험편은 판재 시험편으로 시험전 #300~#1200 연마지로 연마하여 사용하였다. 인장시험에는 25ton 용량의 정적 만능 시험기를 사용하였다. 상온(20℃)에서 0.5 mm/min의 시험 속도로 시험을 수행하였으며, gage length 50 mm의 게이지를 부착하여 시험편이 파단될 때까지 변위를 측정하였다.

본 시험을 시작하기 전에 하중, 변위 및 변형률에 대한 교정을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였다.

모든 시험의 제어, 데이터 처리 및 결과 해석은 PC를 사용하여 수행되었다. 인장시험이 진행되는 동안 하중 신호와 변위 신호를 제어기를 통하여 컴퓨터에 연속적으로 기록하였다.

2.2 인장 시험 결과

항복강도는 0.2% 오프셋(0.2% offset) 법을 사용하여 결정하였다. 인장강도는 ASTM E8에 따라 최대 하중을 원단면적으로 나누어 결정하였으며, 인장 시험에서 얻어진 하중-변위 선도에서 공칭 응력-공칭 변형률 선도를 얻었다. 인장 시험 결과를 Table 1에 나타내었다.

3. 굽힘 피로시험

3.1 굽힘 피로시험식

보의 단면의 도심을 지나는 길이 방향 축의 처짐 선도를 탄성 곡선(elastic curve)이라 한다. 외팔보(cantilever beam)에 대한 보의 탄성 곡선의 처짐량은 식 (5)와 같다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI_z} \quad (5)$$

보의 길이방향 응력분포와 보의 단면에 작용하는 내부 합 굽힘 모멘트와의 관계식을 전개하기 위해서 재료는 후크의 법칙(Hooke's law)에 따라 선형탄성 거동을 한다고 가정한다.

일반적인 탄성 굽힘 공식과 모멘트 식으로부터 외팔보의 끝단에 작용하는 집중하중 P 에 대해 식을 변환하면,

$$P = \frac{3EI_z}{L^3} \delta \quad (6)$$

과 같이 된다. 식 (5)에 식 (6)을 대입하여 외팔보에 작용하는 최대 응력 σ_{max} 에 대하여 정리하면,

$$\sigma_{max} = \left(\frac{3Eh\delta}{2} \right) \frac{1}{L^2} \quad (7)$$

과 같이 된다. 식 (7)과 같이 외팔보에 작용하는 최대 응력 σ_{max} 은 재료의 탄성계수 E 와 시험편의 두께 h , 외팔보의 처짐량 δ , 외팔보 전체 길이 L 의 함수가 된다.

본 시험에서는 시험편의 단면 형상을 직사각형으로 고정하고 외팔보에 일정한 처짐량을 주는 시험 장치를 이용하여, 외팔보에 작용하는 최대 응력이 외팔보 전체 길이의 함수가 되게 하였다.

3.2 굽힘 피로시험 장치의 구성

Fig. 3에 굽힘 피로시험에 사용할 시험 장치를 나타내었다. 굽힘 피로시험 장치는 T-슬롯(T-slot)을 장착하여 지그의 위치를 변화시켜가며 실험할 수 있도록 설계하였다. 지그가 양쪽으로 두 개가 설치되어 동시에 두 개의 시험편에 대해 굽힘 피로시험을 할 수 있도록 하였다. Fig. 3에서 왼편의 지그에는 지그의 상하 운동을 통해 시험편에 모멘트가 작용하도록 설계하였고, 오른편의 지그는 이중 롤러로 시험편을 고정하여 시험편의 상하 변위를 구속시키고 모멘트가 작용하지 않도록 부시(bush)를 장착하여 설계 제작하였다.

3.3 굽힘 피로시험 방법

Fig. 3의 고정부가 변위 ± 9 mm, 60 Hz의 속도로 왕복운동을 하고, 시험편이 파단될 때까지의 시간을 측정하여 시험편에 작용한 피로 사이클 수를 계산하였다. 외팔보에 작용하는 최대 응력

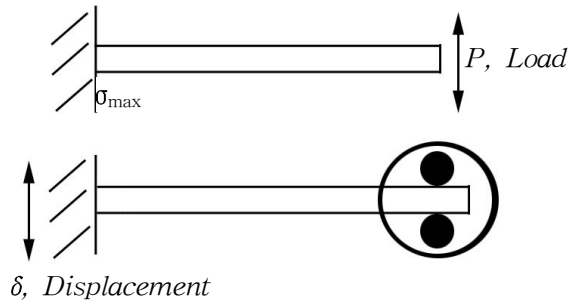


Fig. 3 Appearance of the bending fatigue tester

은 굽힘과 외팔보 전체 길이에 민감하므로 시험기와 시험편의 축 정렬과 외팔보 전체 길이에 주의하였다.

시험에는 단면 크기 10 mm×1.7 mm($b \times h$)인 직사각형 단면의 판형 시험편을 사용하였다.

본 굽힘 피로시험은 피로한도가 나타날 때까지 시험을 하지 않고 S-N선도 상에서 직선부에 해당하는 기울기를 추정할 수 있고, 피로한도를 개략적으로 예측할 수 있다고 판단되는 응력에서 시험을 중단하였다.

4. 평균 응력에 따른 굽힘 피로시험

모멘트가 작용하는 지그에 바이어스를 높이별로 추가하여 실험하였다. 바이어스를 0.0, 1.6, 2.4, 5.0 mm로 증가시키면 평균 응력이 달라져 응력비가 -1.00, -0.70, -0.58, -0.29로 바뀌게 된다.

4.1 직선적 피로 수명 확장 선도

수정 Miner법을 이용하여, S-N선도의 직선부분을 피로한도 이하의 영역까지 연장하여 피로한도 이하의 응력에 의한 손상을 고려하였다.⁽⁷⁾ 약 10^4 에서 10^5 회의 피로 수명에서 직선부에 해당하는 피로시험 결과를 가지고, 직선의 기울기를 구하고 확장하였다. S-N선도의 직선 식은 다음과 같

Table 2 Results of straight-base line extension of S-N curves

| stress ratio | Bias (mm) | c | b | maximum stress (MPa) | | | | |
|--------------|-----------|------|--------|--|--|--|--|--|
| | | | | fatigue life of 10 ⁴ cycles | fatigue life of 10 ⁵ cycles | fatigue life of 10 ⁶ cycles | fatigue life of 10 ⁷ cycles | fatigue life of 10 ⁸ cycles |
| -1.00 | 0.0 | 3.39 | -0.073 | 1,253 | 1,059 | 895 | 757 | 640 |
| -0.70 | 1.6 | 3.43 | -0.073 | 1,374 | 1,161 | 982 | 830 | 701 |
| -0.58 | 2.4 | 3.46 | -0.073 | 1,472 | 1,245 | 1,052 | 889 | 752 |
| -0.29 | 5.0 | 3.52 | -0.073 | 1,690 | 1,429 | 1,208 | 1,021 | 863 |
| a | | | | 1.84 | 1.65 | 1.49 | 1.26 | 1.15 |

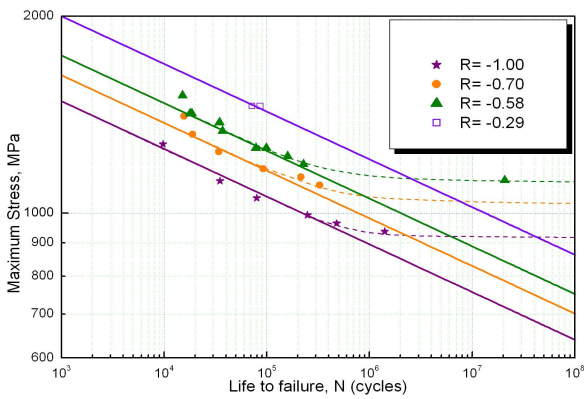


Fig. 4 S-N curves by the effect of mean stress

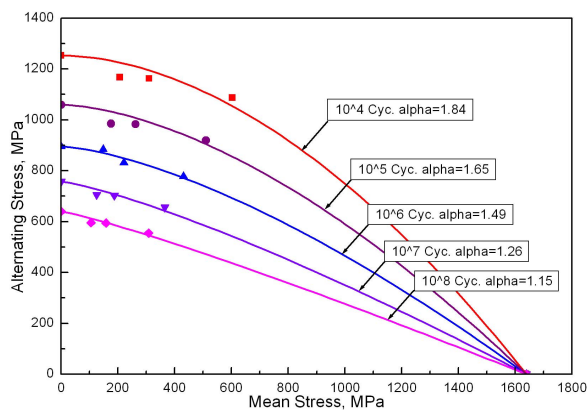


Fig. 5 Relation between alternating stress and mean stress for straight-base line extension

이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$S = 10^c N^b \tag{8}$$

$$\log S = c + b \log N \tag{9}$$

Fig. 4에 평균 응력에 따른 굽힘 피로시험의 결과에 대한 직선적 피로 수명 확장 선도를 나타내었다. Table 2에는 직선부의 기울기 *b*와 응력축의 절편 *c*를 나타내었으며, 각 수명에 해당하는 응력값을 나타내었다. 응력비가 -0.29인 경우, 피로시험 데이터가 적어 다른 시험 조건에서의 직선부 기울기가 동일한 것으로 나타나 이 기울기를 가지고 예측하였다.

특정 피로 수명(10⁴, 10⁵회 등)에서의 응력 진폭 대 평균 응력의 관계를 살펴보기 위해, 식 (4)를 이용하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\sigma_a = S_n \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^\alpha \right] \tag{10}$$

모든 항은 식 (4)와 동일하며, 완전 역전 조건에서의 피로한도 *S_e* 대신 완전 역전 조건에서의 특정수명에 해당하는 응력 *S_n*을 대입하였다. 이러한 관계에서 유도한 계수 *α*값을 Table 2에 나타내었으며, Fig. 5와 같이 나타내었다. 특정수명이 10⁴회에서 10⁸회로 커짐에 따라 계수 *α*값은 1.84에서 1.15로 작아지는 것으로 나타났다.

4.2 곡선적 피로 수명 확장 선도

Table 3에는 곡선적 피로 수명 확장에 대한 각 수명에 해당하는 응력값을 나타내었다. 응력비가 -0.29인 경우, 피로시험 데이터가 적어 곡선적인 확장 선도에서 배제하고, 10⁴회와 10⁵회의 피로 수명은 직선부에 해당하므로 위의 4.1의 결과와 동일한 결과를 이용하였다.

Table 3 Results of curve-base line extension of S-N curves

| stress ratio | Bias (mm) | maximum stress (MPa) | | | | |
|--------------|-----------|--|--|--|--|--|
| | | fatigue life of 10 ⁴ cycles | fatigue life of 10 ⁵ cycles | fatigue life of 10 ⁶ cycles | fatigue life of 10 ⁷ cycles | fatigue life of 10 ⁸ cycles |
| -1.00 | 0.0 | 1,253 | 1,059 | 933 | 920 | 918 |
| -0.70 | 1.6 | 1,374 | 1,161 | 1,059 | 1,041 | 1,037 |
| -0.58 | 2.4 | 1,472 | 1,245 | 1,141 | 1,120 | 1,116 |
| α | | 1.84 | 1.65 | 1.63 | 1.58 | 1.56 |

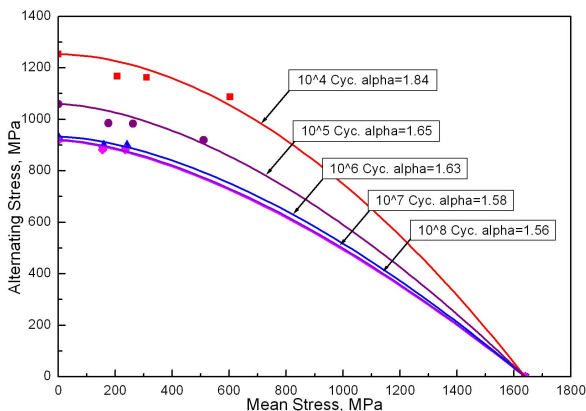


Fig. 6 Relation between alternating stress and mean stress for curve-base line extension

Fig. 6을 살펴보면 곡선적인 피로 수명 확장
 경우, 약 10⁶회에서 피로 한도가 나타나기 때문에
 10⁶회 이상의 피로 수명에서의 α값의 저하현상
 은 둔화되고 있다. 10⁸회 이상 피로 수명이 증가
 하여도 α값은 약 1.5에 수렴하리라 예측된다.

5. 결 론

직선적인 피로 수명 확장 선도에서의 α값과
 곡선적인 피로 수명 확장 선도에서의 α값을 Fig.
 7에 비교하였다. 직선적인 피로 수명의 확장은
 곡선적인 피로 수명의 확장에 비해 보수적인 결
 과를 얻었고, 곡선적인 피로 수명의 확장에서는
 피로 수명이 증가하여도 α값은 약 1.5에 수렴하

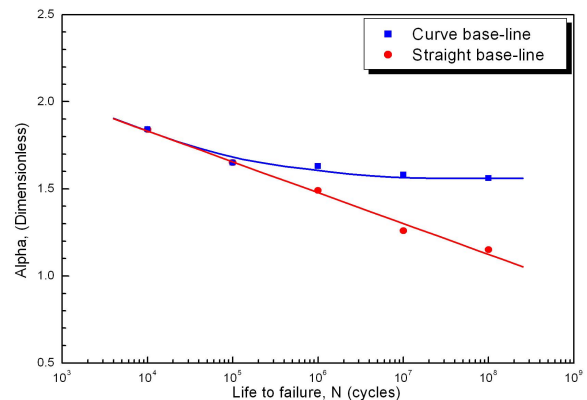


Fig. 7 An alpha variation for extension form of S-N curves

는 것으로 나타났다. 따라서, 스프링강의 피로 한
 도에서의 응력 진폭 대 평균 응력의 관계를 다음
 과 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$\sigma_a = S_e \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^{1.5} \right] \tag{11}$$

이러한 결과는 Goodman 선도와 Gerber 선도
 사이의 값을 얻은 우병철⁽⁸⁾ 등의 연구 결과와 비
 슷하게 나타났다.

참고문헌

- (1) John Goodman, 1899, *Mechanics Applied to Engineering*, Longmans, Green & Co. Ltd., London.
- (2) C. R. Soderberg, 1930, *Trans. ASME*, Vol. 52, APM-52-2, pp. 13 ~ 28.
- (3) H. J. grover, 1966, *Fatigue of Aircraft Structures*, U. S. Government Printing Office, pp. 317 ~ 322.
- (4) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, pp. 1 ~ 10.
- (5) G. E. Dieter, 1990, *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw Hill, Korean 3rd Edition, pp. 242 ~ 253.
- (6) J. A. Collins, 1981, *Failure of Materials in Mechanical Design*, Wiley, pp. 216.
- (7) K. S. Han, 1997. 12, *The Material degradation and the Strength evaluation by Fatigue*, The materials and the Strength evaluation of Industrial

structure, Safety and Structural Integrity Research Center, SKKU, pp. 37 ~ 51.

(8) Byung-chul woo, Sang-soo Kim, Byung-guel Kim and Chang-min Suh, 2001, "Characteristic of

Fatigue Properties with Tension and Bending Loading Using High Strength Steel Wire," *KSME(A)*, Vol. 25, No. 1, pp. 161 ~ 167.