

강철구조물에서 피로수명예측의 정확성보장을 위한 피로종합수정결수의 결정

최금혁

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《기계공학, 금속공학, 열공학, 재료공학을 비롯한 중요부문 기술공학들을 빨리 발전시키고 그 성과를 여러 경제부문에 적극 받아들여야 합니다.》

금속공업부문에서 리용되는 스킵권양압들과 유희장들에 있는 관성렬차구조물을 비롯한 많은 강철구조물들은 대부분 경영과정에 생기는 진동하중과 자연환경을 비롯한 여러 인자들의 영향을 받는다. 피로파괴는 그에 의하여 산생되는 기본파괴형식의 하나이다.

부재의 피로수명은 대부분 실험분석을 통하여 결정하는데 이때 여러가지 인자들의 영향을 종합적으로 고려하는가 못하는가가 매우 중요한 문제로 나선다.

선행연구[1]에서는 실제구조부재의 피로수명예측에 미치는 여러 인자들(응력집중, 치수효과, 부식 등)의 영향에 대한 분석을 진행할 때 서로 독립적인것으로 보고 계산하였다. 그러나 실천에서는 이러한 인자들사이에 일정한 영향관계가 존재하게 된다. 이러한 여러가지 인자들의 영향이 종합적으로 고려되는 정도를 나타내는 량을 피로종합수정결수라고 한다.

피로종합수정결수를 리용하여 부재의 피로수명을 평가할 때에는 일반적으로 피로에 인자리결수, 치수결수와 표면가공결수 등이 포함된다.

론문에서는 응력집중, 치수결수와 표면가공결수의 영향을 종합적으로 고려하여 실제구조부재의 피로세기수정과정을 구체적으로 밝히고 이 과정을 통하여 새로운 피로종합수정결수결정방법과 공식에 대하여 논의하였다.

1. 부재의 피로세기수정과정

제작 및 경영단계에서 실제구조부재는 많은 인자들의 영향을 받으므로 부재 혹은 시편의 피로세기는 미끄러운 시편의 피로세기와 매우 큰 차이를 가진다.

치수결수 ε 과 피로에인자리결수 K_f 에 기초하여 에인자리를 가진 미끄러운 시편의 피로한계 σ_{nf} 는 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_{nf} = \frac{\varepsilon \sigma_r}{K_f} \quad (1)$$

여기서 $\varepsilon \sigma_r$ 는 에인자리를 가진 시편과 같은 치수를 가진 미끄러운 시편의 피로한계, K_f 는 피로에인자리결수이다. 만일 미끄러운 시편이 아닌 경우에는 식 (1)에 표면가공결수 β_1 을 곱하여 계산한다.

그림 1에서는 부재의 치수와 부재에 있는 에인자리가 피로한계에 미치는 영향에 대하여 보여준다.

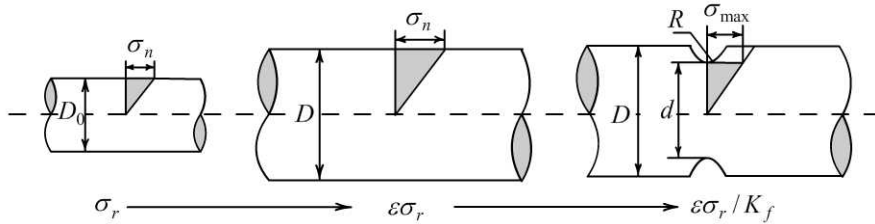


그림 1. 치수와 예인자리가 피로한계에 미치는 영향

시편의 직경이 D 인 예인자리가 있는 미끄러운 큰 시편의 피로한계는 직경이 D_0 인 미끄러운 표준시편의 피로한계를 리용하여 계산하는데 이때 치수결수 ε 과 피로예인자리결수 K_f 에 의한 수정을 통하여 해당하는 결과를 얻는다. 그중에서 치수결수 ε 은 미끄러운 시편에 의하여 결정되는데 실제구조부재에 적용할 때에는 미끄러운 시편과 예인자리를 가진 시편의 치수효과를 명백히 구별하여야 한다. 이러한 수정과정은 명백한 치수효과를 반영할 때 리용되며 치수효과가 명백하지 않을 때 비교적 큰 오차가 발생한다.

그림 2에서는 실제구조부재에 대한 피로결수의 수정과정에 대하여 보여준다.

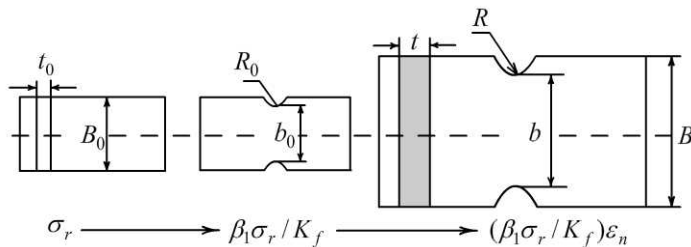


그림 2. 피로결수의 수정과정

σ_r 는 응력비가 r 인 경우 재료의 피로한계이며 ε_n , β_1 , K_f 는 각각 부재의 치수결수, 예인자리표면가공결수, 피로예인자리결수이다. 따라서 $\beta_1 \sigma_r / K_f$ 는 표면가공결수와 피로예인자리결수를 수정한 후의 구조부재의 피로세기이다.

예인자리가 있는 작은 시편은 실제구조부재의 모의비례축소모형과 같으며 그것의 피로세기는 재료의 피로세기를 수정하거나 혹은 실험을 통하여 얻을수 있다.

예인자리를 가진 시편의 치수결수를 리용하여 작은 모형에 대한 피로세기를 수정함으로써 실제구조부재의 피로세기를 결정한다. 이때 시편의 표면은 미끄럽지 않다.

그러므로 이러한 방법은 당김을 받는 부재의 피로세기를 수정하는데 합리적으로 적용될수 있다.

2. 피로종합수정결수와 결정식

공칭응력법을 리용하여 피로수명을 평가할 때 종합결수 K_σ 는 매우 중요한 결수이다.

우에서 언급한 예인자리를 가진 시편의 피로세기수정과정에 기초하여 피로종합수정결수 K_σ 를 응력집중, 표면가공결수와 치수결수로 된 세변수함수로 정의할수 있다.

$$K_\sigma = f(K_f, \beta_1, \varepsilon) \quad (2)$$

일반적인 식은 다음과 같다.[3]

$$K_{\sigma} = \frac{K_f}{\varepsilon \beta_1} \quad (3)$$

$$K_{\sigma} = \frac{1 + q(K_T - 1)\beta_1}{\varepsilon \beta_1} \quad (4)$$

$$K_{\sigma} = \frac{K_f}{\varepsilon} + \frac{1}{\beta_1} - 1 \quad (5)$$

실제구조부재에서는 에인자리의 영향이 비교적 작으므로 식 (5)는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$K_{\sigma} = \frac{K_T}{\varepsilon} + \frac{1}{\beta_1} - 1 \quad (6)$$

선행연구[2]에서는 응력집중과 치수의 동시작용, 응력집중과 표면가공의 영향을 동시에 고려한 경우 피로세기계산공식에 대하여 언급하였다. 응력집중과 치수의 동시작용, 응력집중과 표면가공의 영향을 반영한 결수계산공식은 다음과 같다.

$$K_{SS} = \frac{K_f}{\varepsilon} = \frac{K_T}{0.5 \left[1 + \left(\frac{1}{88.3} \frac{L}{\bar{G}} \right)^{-v_s} \right]} = \frac{K_T}{F\left(\frac{L}{\bar{G}}, v_s\right)} \quad (7)$$

$$K_{sn} = K_f + \frac{1}{\beta_1} - 1 \quad (8)$$

여기서 v_s 는 응력집중과 치수에 대한 재료의 민감도, \bar{G} 는 응력그라디언트, L 은 피로손상구간의 특성길이이다.

식 (3)–(5)는 1개의 인자가 미치는 영향을 반영한것이므로 식 (7), (8)을 식 (6)에 대입하여야 한다.

그림 1, 2에서 보여준 수정과정과 식 (8)에 기초하면 당김을 받는 부재의 피로세기 σ_{cr} 는 다음과 같이 구할수 있다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_r}{K_{\sigma}} = \sigma_r \frac{\beta_1}{K_{sf}} \varepsilon_n = \frac{\sigma_r}{K_{sn}} \varepsilon_n = \frac{\sigma_r}{K_f + \frac{1}{\beta_1} - 1} \varepsilon_n \quad (9)$$

웃식을 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_r}{\left(K_f + \frac{1}{\beta_1} - 1 \right) \frac{1}{\varepsilon_n}} = \frac{\sigma_r}{\frac{K_f}{\varepsilon_n} + \left(\frac{1}{\beta_1} - 1 \right) \frac{1}{\varepsilon_n}} = \frac{\sigma_r}{K_{SS} + \left(\frac{1}{\beta_1} - 1 \right) \frac{1}{\varepsilon_n}} \quad (10)$$

그러므로 피로종합수정결수 K_{σ} 에 대한 식은 다음과 같다.

$$K_{\sigma} = K_{SS} + \left(\frac{1}{\beta_1} - 1 \right) \frac{1}{\varepsilon_n} \quad (11)$$

에인자리를 가진 시편의 치수결수와 관련한 식을 대입하면 다음과 같다.

$$K_{\sigma} = K_{SS} + \left(\frac{1}{\beta_1} - 1 \right) \frac{(L_L / \bar{G}_L)^{\lambda}}{(L_S / \bar{G}_S)^{\lambda}} \quad (12)$$

식 (7)에서 보는바와 같이 K_{SS} 는 변수 L/\bar{G} 의 함수이고 기하학적근사성을 가진 큰 시편에 대하여 식 (12)를 리용하여 결정한 K_{σ} 도 기본적으로 변수 L/\bar{G} 에 의하여 얻어진다.

3. 매 변화량에 따르는 피로종합수정결수의 민감도분석

여기서는 계차법을 리용하여 피로종합수정결수식 (12)의 매 변수에 대한 민감도정도를 각각 계산하고 위에서 언급한 몇가지 피로종합수정결수식들인 식 (3)–(5), (12)에 대한 민감도정도를 비교분석하였다.

우선 리론적응력집중결수 K_T 에 대한 피로종합수정결수 K_{σ} 의 민감도분석에 대하여 보기로 하자.

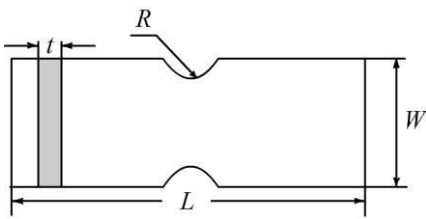


그림 3. 평판시편의 치수

그림 3에 평판시편의 치수를 보여주었다. 너비 $W=10$, 길이 $L=100\text{mm}$, 두께 $t=1\text{mm}$, 재료는 강45, 재료상수 $\nu_{강s}=0.1$ 이다.

피로종합수정결수 K_{σ} 에 미치는 리론적응력집중결수의 영향을 계산할 때에는 표면가공결수와 에인자리의 치수결수는 변하지 않는다고 하고 식 (3)–(5), (12)에 의한 피로종합수정결수를 각각 계산한다.

시편의 치수가 매우 작아 표준시편의 치수범위에 들어가므로 당김힘이 작용하는 경우 미끄러운 시편의 치수결수는 $\varepsilon=1$, 에인자리를 가진 시편의 치수결수는 $\varepsilon_n=1$, 표면가공결수 $\beta_1=0.8$ 로 취할수 있다. 서로 다른 리론적응력집중결수를 구해야 하므로 평판의 에인자리반경 R 를 변화시키면서 이 값을 구해야 한다.

선행연구[3]에서는 당김힘이 작용하는 경우 그에 따르는 리론적응력집중결수변화상에 대하여 보여준다. 에인자리의 반경 R 가 각각 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4W 일 때 그에 대응하는 리론적응력집중결수 K_T 는 각각 2.64, 2.28, 1.98, 1.74, 1.62, 1.58, 1.55, 1.52이다.

에인자리의 반경 R 에 따르는 민감도결수 q 를 구하고 민감도결수법을 리용하여 에인자리의 반경 R 에 따르는 피로에인자리결수 K_f 를 계산한다. 이와 함께 응력집중과 치수결수의 영향을 고려한 식 (7)에 의하여 K_{SS} 를 계산할수 있다.

$$L = 2t = 2 \times 1$$

상대적응력그라디엔트는 다음과 같다.[2]

$$\bar{G} = \frac{2.3}{R} \quad (R = 0.05W \sim 0.15W)$$

$$\bar{G} = \frac{2}{R} \quad (R = 0.2W \sim 0.4W)$$

계산한 K_f , K_{SS} 와 이미 알고있는 조건들을 각각 식 (3)–(5), (12)에 대입하여 피로

종합수정결수들을 구하면 표와 같다.

표. 피로종합수정결수에 대한 계산결과

R	K_T	K_f	K_{SS}	K_σ			
				식 (3)	식 (4)	식 (5)	식 (12)
0.5	2.64	2.08	1.95	2.6	2.33	2.33	2.2
1.0	2.28	1.95	1.76	2.44	2.20	2.20	2.01
1.5	1.98	1.76	1.57	2.20	2.01	2.01	1.82
2.0	1.74	1.60	1.40	2.00	1.85	1.85	1.86
2.5	1.62	1.51	1.32	1.89	1.76	1.76	1.57
3.0	1.58	1.49	1.30	1.86	1.74	1.74	1.55
3.5	1.55	1.47	1.29	1.84	1.72	1.72	1.54
4.0	1.52	1.45	1.28	1.81	1.70	1.70	1.53

피로종합수정결수 K_σ 는 K_T 가 증가하는데 따라 거의 선형관계로 변한다. 그중에서 변화가 가장 명백한것은 식 (3)을 리용하여 계산한 K_σ 이다. 다음으로 변화상태가 명백한것은 식 (4), (5)에 의한 계산결과인데 거의 일치한다. 상대적으로 식 (12)에 의한 계산결과와는 변화가 비교적 완만한데 이것은 식 (12)에서 이론적응력집중결수 K_T 가 K_σ 에 주는 영향이 비교적 작다는것을 의미한다. 즉 K_T 에 대한 K_σ 의 민감도가 매우 작다는것을 의미한다.

앞에서 언급한 임의의 식을 리용하여 계산한 피로종합수정결수값들은 모두 거의 직선으로 변화되었다. 이것은 이론적응력집중결수와 표면가공결수가 변하지 않을 때 K_σ 와 ϵ_n 사이의 관계를 선형으로 표시할수 있다는것을 알수 있다.

표면가공결수 β_1 의 증가에 따라 피로종합수정결수 K_σ 는 점차 감소한다. 또한 이 두가지 량사이에는 비선형관계가 성립한다고 볼수 있다.

식 (3)에서는 표면가공결수 β_1 의 변화가 피로종합수정결수에 미치는 영향이 제일 크고 명백하였으며 식 (12)에서는 표면가공결수 β_1 의 변화가 피로종합수정결수에 미치는 영향이 제일 작았다. 전체적인 표면가공결수의 변화범위에서 식 (4)를 리용하여 계산한 피로종합수정결수 K_σ 와 식 (5)를 리용하여 계산한 피로종합수정결수 K_σ 의 변화곡선은 거의 일치하였으며 식 (3)을 리용하여 계산한 K_σ 의 변화량은 1.5, 식 (12)를 리용하여 계산한 K_σ 의 변화량은 0.77이었다. 결과 두 식사이에는 대략 2배만 한 오차가 있었다.

이와 같이 식 (3)–(5)에 대한 계산결과들은 거의 근사하였지만 식 (12)를 리용하여 계산한 결과를 보면 3개의 변수에 의한 민감도는 제일 작았다.

이것은 식 (12)에서 변수변화에 대한 파동성이 제일 작으며 비교적 안정하다는것을 의미한다. 결국 계산결과에 대한 오차가 제일 작으므로 실제상태를 가장 정확하게 반영하였다고 볼수 있다.

맺는 말

위의 민감도분석결과들은 새로운 피로종합수정결수를 리용하여 계산을 진행하는것이 비교적 합리적이라는것을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] 송학진 등; 피로파괴리론 1, 김책공업종합대학출판사, 112~254, 주체109(2020).
- [2] 李舜韶; 机械疲劳与可靠性设计, 科学出版社, 1~15, 2009.
- [3] 陈耀明; 评价及估算切口疲劳强度的新方法, 航空工业出版社, 4~10, 2009.

주체110(2021)년 3월 5일 원고접수

Calculation of the Comprehensive Fatigue Correction Factor for Precise Prediction of Fatigue Life in the Steel Structures

Choe Kum Hyok

In this paper, considering the stress concentration coefficient, size and surface processing state synthetically, we have determined the calculation formula of a new fatigue comprehensive modification correction used to fatigue strength calculation of actual structural part.

Keywords: stress concentration coefficient, fatigue limit