

## 피로에인자리결수가 강철구조물의 진동피로수명평가에 미치는 영향

최금혁, 리희균

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학자, 기술자들은 당이 마련해준 과학기술용마의 날개를 활짝 펴고 과학적재능과 열정을 총폭발시켜 누구나 다 높은 과학기술성과들을 내놓음으로써 부강조국건설에 이바지하는 참된 애국자가 되여야 합니다.》

금속공업부문에서 스킵권양탑을 비롯한 많은 강철구조물들은 대부분이 생산과정에 생기는 진동집의 작용을 받는다. 피로파괴는 그에 의하여 산생되는 기본파괴형식의 하나이다.

선행연구에서는 정력학적 및 동력학적집을 받는 탄소성재료의 세기와 파괴에 대한 계산모형과 보다 효과적인 풀이방법들[1], 피로세기에 영향을 미치는 여러가지 인자들의 영향, 피로과정에 금속의 성질변화, 피로해석에 의한 구조요소들의 피로수명결정방법과 같은 금속재료의 피로파괴와 해석에서 제기되는 과학리론적 및 실천적문제들[2], 에인자리를 가진 구조요소의 세기결정방법과 그것의 정확성평가[3]에 대하여 고찰하였다.

에인자리부위에서의 응력집중은 구조에 대한 피로설계를 진행하는데서 가장 관건적인 문제이다.

론문에서는 에인자리를 가진 강철구조물의 진동피로수명결정을 위한 일반적인 단계를 제시하고 피로에인자리결수가 피로수명평가에 미치는 영향에 대하여 밝혔다.

구조물에 대한 피로수명해석의 일반적인 단계는 다음과 같다.

우선 외부집의 작용을 받는 구조물에 대한 응답해석을 진행하고 그에 기초하여 구조의 위험부위에서의 응답을 결정한 다음 재료의 피로수명특성과 손상루적리론에 기초하여 구조에 생긴 루적손상을 계산한다. 이로부터 구조물의 피로수명을 결정한다. 에인자리를 가진 강철구조물에 대한 피로수명해석의 일반적인 단계는 그림 1과 같다.

현실에서는 매끄러운 부재에 대한 력학적해석에 기초하여 얻은 공칭응력  $\sigma_n$ 에 에인자리결수  $K_f$ 를 곱하여 에인자리를 가진 부재의 피로응력을 결정하고 이에 기초하여 에인자리를 가진 부재의 피로수명을 계산한다.[2, 3]

매끄러운 구조부재의 동력학적해석에 기초하여 공칭응력의 확률밀도함수를 구하고 피로에인자리결수  $K_f$ 를 결합하면 에인자리를 가진 구조부재의 피로수명이 얻어진다. 그에 대한 식은 다음과 같다.[2, 3]

$$T = \frac{1}{S_b / K_f} \nu \int_{S_e / K_f}^{\infty} \frac{p(S)}{N(SK_f)} dS \quad (1)$$

여기서  $S_b$ 는 구조부재의 한계당김세기(MPa),  $S_e$ 는 구조부재의 극한피로세기(MPa),  $K_f$ 는

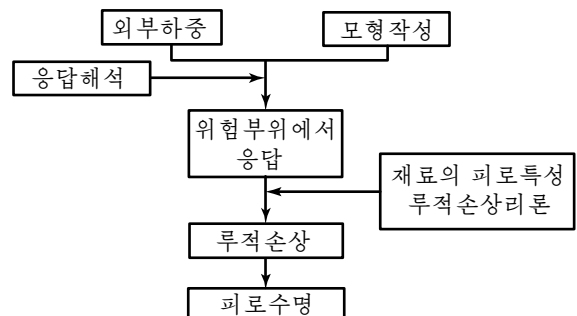


그림 1. 에인자리를 가진 강철구조물에 대한  
피로수명해석의 일반적인 단계

피로에인자리결수,  $\nu$ 는 단위시간에 해당하는 응력의 순환수,  $p(S)$ 는 응력진폭에 대한 확률밀도함수,  $N$ 은 응력진폭에 따르는 구조부재의 피로수명이다.

식 (1)을 통하여 알수 있는것처럼 피로에인자리결수를 결정하는것은 구조물의 진동 피로수명을 결정하기 위한 중요한 조건으로 된다.

피로에인자리결수를 결정하는 방법에 대하여 보기로 하자.

리론적인 정력학적응력집중결수는 응력의 집중성정도만을 표시하는데 이것은 구조의 기하학적형태에만 관계된다. 구조의 리론적인 응력집중결수만을 가지고는 그것의 피로특성을 원만히 설명할수 없다.[3]

논문에서는 에인자리를 가진 구조부재의 피로특성에 영향을 미치는 피로에인자리결수  $K_f$ 에 대하여 고찰하였다. 이것을 피로응력집중결수 혹은 피로에인자리결수라고도 한다.  $K_f$ 에 대한 계산공식은 다음과 같다.

$$K_f = \frac{\text{매끄러운 시편의 피로세기 } S_e}{\text{에인자리를 가진 시편의 피로세기 } S_N} \quad (2)$$

$K_f$ 는 리론적인 응력집중결수  $K_T$ 와 관계될뿐아니라 재료의 화학적조성, 내부에 있는 에인자리, 미세구조, 표면처리상태, 짐작용형식, 외부환경 등에 관계된다. 선행연구[3]에서는 재료의 소성이  $K_f$ 에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나라는데 대하여 언급하였다.

$K_f$ 와  $K_T$  사이의 관계를 언급하기 위하여 에인자리의 민감도결수  $q$ 를 도입한다.  $q$ 는 다음의 식으로 계산한다.

$$q = \frac{K_f - 1}{K_T - 1} \quad (3)$$

$q$ 가 취할수 있는 값의 범위는 0~1이다.

에인자리를 가진 구조부재의 뿌리부위에서 응력집중현상이 나타난다. 응력은 반경방향(그림 2에서  $x$ 방향)을 따라가면 급속히 감소하게 되는데 마지막에는 공칭응력으로 다가간다. 에인자리를 가진 부재의 뿌리부분에서 탄성단계응력은 그림 2에서와 같이 분포된다.

원형구멍을 가진 시편인 경우 에인자리부위에서의 응력분포식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma(x)}{\sigma_n} = \frac{K_T}{3} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\rho+x} \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{\rho}{\rho+x} \right)^4 \right] \quad (4)$$

여기서  $K_T$ 는 에인자리를 가진 부재의 리론적인 응력집중결수,  $\sigma_n$ 은 에인자리를 가진 부재가 받는 면마당응력으로서 이것은 공칭응력으로 근사화할수 있다.  $\rho$ 는 에인자리부위의 반경,  $x$ 는 에인자리로부터 떨어진 거리이다.

$$\text{만일 } k = \frac{1}{3} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\rho+x} \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{\rho}{\rho+x} \right)^4 \right] \text{ 이라고 하면}$$

$$\sigma(x) = k \cdot K_T \cdot \sigma_n \quad (5)$$

으로 표시된다.

구조의 기하학적형태와 외부짐이 확정적인 값이라면 그 응력집중결수  $K_T$ 와 공칭

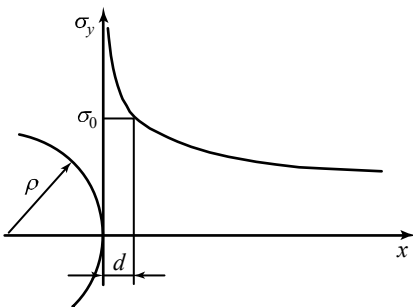


그림 2. 에인자리부위에서  
응력의 분포

응력  $\sigma_n$ 은 모두 확정적인 값으로 된다. 그러므로 위의 식에 의하여 에인자리부위에서의 응력분포를 얻을수 있다.  $x$ 에 따르는  $k$ 값의 변화는 그림 3과 같다.

그림 3을 통하여 알수 있는것처럼 에인자리로부터 떨어진 거리가 구멍의 반경  $\rho$ 의 밖에 있을 때 응력분포는 비교적 평탄하며 그것의 수값은 먼마당응력과 거의 같다.

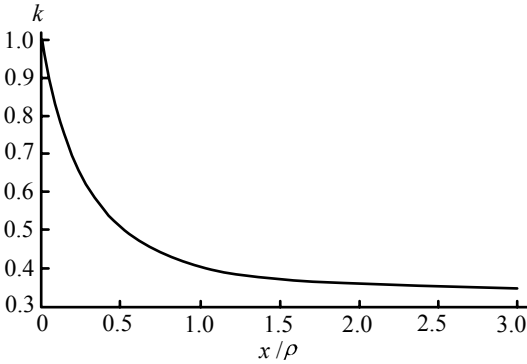


그림 3.  $x$ 에 따르는  $k$ 값의 변화

여기서  $\sigma_n$ 은 공칭응력,  $K_T, K_f$ 는 에인자리를 가진 부재의 이론적응력집중결수와 피로에인자리 결수이다.

$$\left. \begin{aligned} K_T &= \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = \frac{AD}{NF} \\ K_f &= \frac{\sigma_d}{\sigma_n} = \frac{ME}{NF} \\ q &= \frac{K_f - 1}{K_T - 1} = \frac{ME - NF}{AD - NF} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

에인자리부위에서 응력분포가 선형이라고 가정하면 그것의 응력분포는 그림 4에서 직선  $AEF$ 에 해당된다. 선형관계에 대한 식은 다음과 같다.

$$\sigma - \sigma_{\max} = k \cdot x \quad (8)$$

여기서  $\sigma$ 는 에인자리로부터  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 응력으로서  $x$ 에 관한 1차함수이다.

$D, M, N$ 에 대응하는 자리표  $x$ 의 값을 각각  $0, a, \rho$ 라고 하면 그에 대응하는 응력값은 각각  $AD = \sigma_{\max}, ME = \sigma_{\max} + ka, NF = \sigma_{\max} + k\rho$ 로 된다.

이것을 에인자리민감도결수공식에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{q} = \frac{K_T - 1}{K_f - 1} = \frac{AD - NF}{ME - NF} = \frac{\rho}{\rho - a} = 1 + \frac{a}{\rho - a} \geq 1 + \frac{a}{\rho} \quad (9)$$

또한 에인자리부위에서 응력이 1/2제곱함수형식으로 분포되었다고 가정하면 응력분포는 그림 4에서 곡선  $AE_1F_1$ 에 대응된다. 그에 대한 식은 다음과 같다.

$$\sigma - \sigma_{\max} = k \cdot x^{1/2} \quad (10)$$

$D, M, N$ 에 대응한 응력값은 각각  $AD = \sigma_{\max}, ME_1 = \sigma_{\max} + k\sqrt{a}, NF_1 = \sigma_{\max} + k\sqrt{\rho}$ 라고

에인자리부위밖에서 일정한 단위길이만큼 취하고 계산을 진행해보자. 응력분포가 제곱함수형식이라고 가정하자.(그림 4) 직선  $AEF$ 는 에인자리부위에서의 응력이 선형분포라는것을 의미한다. 또한  $AE_1F_1$ 는 에인자리부위에서의 응력이 1/2차제곱함수분포라는것을 의미한다. 그리고  $AE_2F_2$ 는 에인자리부위에서의 응력이 2차제곱함수라는것을 의미한다.

$$\left. \begin{aligned} AD &= \sigma_{\max} = K_T \sigma_n \\ ME &= \sigma_d = K_f \sigma_n \\ NF &= \sigma_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

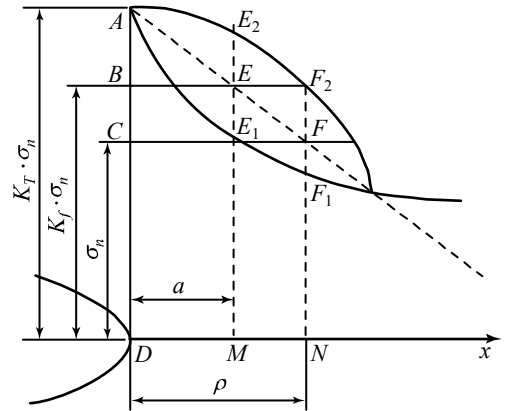


그림 4. 에인자리부위에서 몇가지 응력의 분포특성

하자. 이것을 에인자리민감도결수식에 대입하여 풀이를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{q} = \frac{K_T - 1}{K_f - 1} = \frac{AD - NF_1}{ME_1 - NF_1} = \frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho} - \sqrt{a}} = 1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{\rho} - \sqrt{a}} \geq 1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{\rho}} \quad (11)$$

에인자리부위에서의 응력이 2차함수형식으로 분포되었다고 가정하면 응력분포는 그림 4에서 곡선  $AE_2F_2$ 와 같다. 그에 대한 식은 다음과 같다.

$$\sigma - \sigma_{\max} = k \cdot x^2 \quad (12)$$

$D, M, N$ 에 대응한 응력값이 각각  $AD = \sigma_{\max}$ ,  $ME_2 = \sigma_{\max} + ka^2$ ,  $NF_1 = \sigma_{\max} + k\rho^2$ 이라고 하자. 이것을 에인자리민감도결수식에 대입하여 풀이를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{q} = \frac{K_T - 1}{K_f - 1} = \frac{AD - NF_2}{ME_2 - NF_2} = \frac{\rho^2}{\rho^2 - a^2} = 1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{\rho} - \sqrt{a}} \geq 1 + \frac{a^2}{\rho^2} \quad (13)$$

여기서  $a$ 는 재료상수로서 재료의 당김세기에 의하여 결정된다.  $a$ 값은 일반적으로 비교적 작다.  $\rho$ 는 에인자리부위의 곡률반경이다. 식 (9), (11), (13)의 오른쪽은 근사적으로 결정되는데 이렇게 근사적으로 결정한 값의 오차는 그리 크지 않으며 구조적인 요구를 만족시킨다. 이렇게  $K_f$ 를 리용하여 매끄러운 구조부재의 수명을 수정하여야 에인자리를 가진 부재의 실제수명을 계산해낼수 있으며 그 오차률도 감소시킬수 있다.

## 맺 는 말

에인자리를 가진 강철구조물의 진동피로수명결정을 위한 일반적인 단계를 제기하고 피로에인자리결수가 피로수명평가에 미치는 영향에 대하여 밝혔다.

## 참 고 문 헌

- [1] 리두렬 등; 파괴역학과 재료세기, 과학백과사전출판사, 24~245, 1995.
- [2] 전순정; 금속의 피로파괴와 해석, 김책공업종합대학출판사, 25~92, 주체104(2015).
- [3] Zheng Xiulin et al.; Notch Strength and Notch Sensitivity of Materials[M], Beijing: Science Press, 118~130, 2008.

주체109(2020)년 3월 15일 원고접수

## Effect of Fatigue Notch Factor about the Prediction of Vibration Fatigue Life of Steel Structures

*Choe Kum Hyok, Ri Hui Gyun*

In this thesis the general stages for the prediction of vibration fatigue life of steel structures were presented and the effect of fatigue notch factor about the prediction of fatigue life was proved.

Keywords: vibration fatigue, stress concentration factor, fatigue notch factor