

용접잔류응력을 고려한 저순환피로수명계산

김정금, 리영섭

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《현시대는 과학기술의 시대이며 과학기술의 발전수준은 나라의 종합적국력과 지위를 규정하는 징표로 됩니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 38페이지)

선행연구[2]에서는 용접후 구조물에 남아있는 잔류응력을 예측하고 피로집이 작용하는 경우 잔류응력이 피로수명에 주는 영향에 대하여 논의하였고 선행연구[1]에서는 확장유한요소법을 리용하여 피로균렬성장해석의 수학적모형화를 진행하였으며 선행연구[3]에서는 파리스법칙에 기초한 저순환피로해석과정에 대하여 논의하였다.

본문에서는 용접후 구조물에 남아있는 잔류응력을 고려하여 균렬이 있는 판의 저순환피로해석을 진행하고 구조물의 력학적상태에 미치는 잔류응력의 영향에 대하여 논의하였다.

1. 저순환피로해석때 잔류응력의 고려방법

유한요소법을 리용하여 잔류응력을 고려한 피로해석을 진행하는 방법들의 부족점은 균렬위치를 알고있어야 하며 균렬성장경로를 정의해주어야 하는것이다.

ABAQUS에서 리용하는 확장유한요소법은 저순환피로해석을 그물재분할이 없이 임의의 경로에 따라 진행할수 있는 우점이 있지만 열해석결과 얻어진 잔류응력을 저순환피로해석에 직접 받아들이지 못하는 결함이 있다.

우리는 저순환피로해석때 용접으로 하여 생기는 구조물의 잔류응력을 고려하기 위하여 열해석결과에 기초한 각이한 잔류응력상태를 구하는 프로그램을 작성하였으며 그것을 저순환피로해석단계의 초기조건으로 설정하였다.

먼저 ABAQUS 6.11로 잔류응력을 무시한 경우의 저순환피로해석을 모의한 후 Inp파일에 초기조건으로서 잔류응력을 고려하기 위한 명령문을 다음과 같이 입력한다.

*Initial Conditions, type=stress

부분품이름.요소번호, s_{11} , s_{22} , ...

그러면 ABAQUS는 잔류응력을 초기응력으로 하고 그것을 고려하여 외부짐에 대한 해석을 진행한다.

2. 확장유한요소법에 기초한 저순환피로해석

유한요소법은 구조물의 력학적거동을 해석하는데 널리 리용되고있지만 균렬이 있는 피로거동을 연구하는데서 다음과 같은 부족점을 가지고있다.

우선 균렬경로를 모르는 경우 균렬성장모형화가 불가능한것이다.

또한 새로운 균렬성장앞끝형성을 위하여 그물재분할이 필수적으로 제기되는것이다.

최근 개발된 단위분할에 기초한 확장유한요소법에서는 균열을 변위근사에 기초하여 모형화할수 있으며 균열에 따라 불연속인 함수는 균열의 존재를 모형화하기 위한 변위근사계산에 추가된다. 그러므로 균열성장에서 요소재분할이 필요없다.

확장유한요소법에서 균열모형화를 위한 변위근사는 다음과 같다.[1]

$$u = \sum_{I=1}^m N_I(x) \left[u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha} \right] \quad (1)$$

여기서 $N_I(x)$ 는 표준마디형태함수, u_I 는 유한요소폴이의 표준마디변위벡토르, a_I 는 마디증강자유도벡토르, $H(x)$ 는 균열면을 교차하는 불연속비약함수로서 $H(x) = \begin{cases} 1, & (x-x^*)n \geq 0 \\ -1, & (x-x^*)n < 0 \end{cases}$ 과 같이 표시된다. x 는 가우스적분점이고 x^* 은 x 에 가장 가까운 균열면의 점이며 n 은 x^* 에서 균열까지의 단위의법선벡토르이다. b_I^{α} 은 마디증강자유도벡토르, $F_{\alpha}(x)$ 는 탄성균열끝점근함수이다.

등방성탄성재료에서의 균열끝점근함수는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$F_{\alpha}(x) = [\sqrt{r} \sin(\theta/2), \sqrt{r} \cos(\theta/2), \sqrt{r} \cos(\theta/2)\sqrt{r} \sin(\theta/2), \sqrt{r} \cos\theta\sqrt{r} \sin\theta] \quad (2)$$

여기서 (r, θ) 는 균열끝에 원점을 가지는 극자리표이다.

구조물에 대한 피로수명을 결정하기 위한 이전방법은 구조물에서 재료의 S-N곡선을 리용하는것이였다. 이 방법은 공학구조물의 피로저항을 예측하기 위해서 많은 경우에 현재까지 설계에 리용되고있으나 변형에너르기가 일정한 상태에 대하여 순환수와 지지반력 혹은 균열길이사이 관계에 대하여는 논의하지 못한다.

ABAQUS에서 피로균열성장의 시작은 응집요소로 된 균열끝에서의 균열성장에 기인된다. 저순환피로해석에서 피로균열성장시작규준은 ΔG 에 의하여 특징지어지는데 그것은 구조물이 최대짐과 최소짐사이의 짐을 받을 때 파피에너르기방출률이다.

피로균열성장의 초기규준은 $f = N/(c_1 \Delta G^{c_2}) \geq 1.0$ 과 같다. 여기서 c_1 과 c_2 는 재료상수이고 N 은 순환수이다.

피로균열성장시작규준이 응집요소에서 만족되면 균열성장속도 da/dN 는 상대적인 파피에너르기방출률에 기초하여 계산할수 있다. 순환당 균열성장속도가 $G_{\text{thresh}} < G_{\text{max}} < G_P$ 로 되면 파리스법칙에 의하여 $da/dN = c_3 \Delta G^{c_4}$ 과 같이 계산된다. 여기서 c_3, c_4 는 재료상수이다.

3. 계 산 실 례

우리는 그림 1과 같은 모형으로 해석을 진행하였다.

논문에서는 재료 ST37-2[2]를 리용하는데 강철판의 기하학적크기들을 보면 $L=0.8\text{m}$, $B=0.01\text{m}$, $a=0.001\text{m}$ (초기균열길이), $b=0.001\text{m}$ (용접두께)이다. W 는 용접부길이이다.

재료특성은 다음과 같다.

$$E = 210\text{GPa}, \nu = 0.3, G_I = 86.7\text{MPa}$$

$$c_1 = 0.5\text{회}/(N^{c_2} \cdot \text{m}^{-2c_2}), c_2 = -0.1, c_3 = 4.88 \times 10^{-6} \text{m}^{1+c_4}/(N^{c_4} \cdot \text{회}), c_4 = 1.15$$

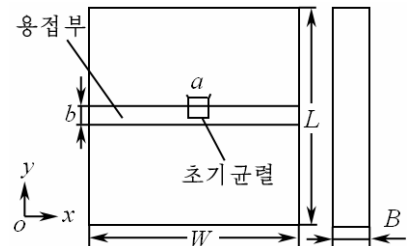


그림 1. 기하학적모형

먼저 모형을 6 300개의 요소들로 분할하고 용접부에 대한 열해석을 진행하여 구조물에 남아있는 잔류응력을 얻은 다음 그 값을 저순환피로해석의 초기응력으로 받아들인다.

판의 오른쪽 옆면을 고정하고 옷면과 아래면을 순환당 0.000 72m로 당기면서 파리스법칙에 기초한 저순환피로해석을 진행하면서 균열 성장에 주는 잔류응력의 영향을 비교하였다.

론문에서는 잔류응력이 25% 고려된 경우와 50% 고려된 경우 저순환피로해석을 진행하여 잔류응력이 없는 경우와 비교하였다.

ABAQUS 6.11을 리용하여 진행한 열해석결과 얻어진 잔류응력은 그림 2와 같다.

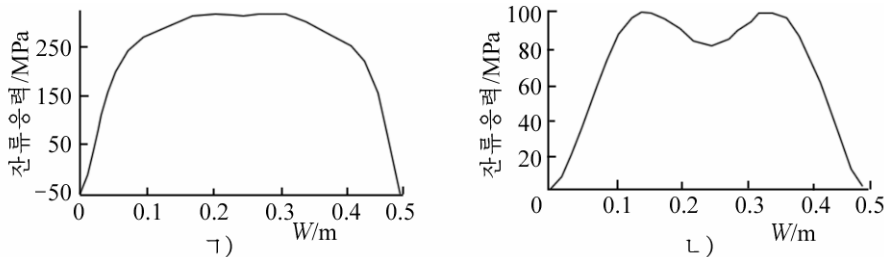


그림 2. 열해석결과 얻어진 잔류응력

Γ) y축방향, L) x축방향

각이한 잔류응력상태에서 저순환피로해석결과 얻어진 균열벌어짐변위는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 잔류응력이 있는 경우 잔류응력이 없는 경우에 비하여 균열벌어짐변위가 더 크다.

각이한 잔류응력상태에서 순환수에 따르는 판에서의 지지반력상태는 그림 4와 같다.

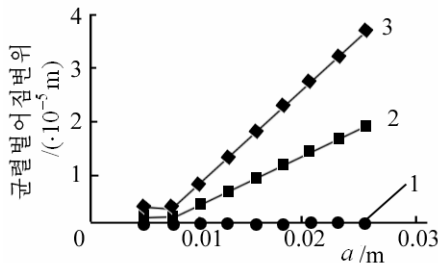


그림 3. 균열길이에 따르는 균열벌어짐변위

1-3은 각각 잔류응력을 0, 25, 50% 고려한 경우

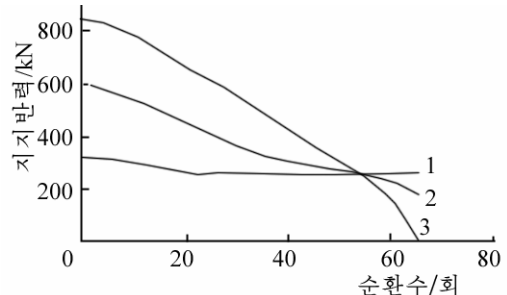


그림 4. 순환수에 따르는 지지반력

1-3은 그림 3에서와 같음

그림 4에서 보는바와 같이 잔류응력을 고려하지 않은 경우 구조물의 지지반력은 균열이 성장하는 동안만 감소하지만 잔류응력을 고려한 경우에는 감소속도가 빨라지다가 그 값이 일정한 수준에 도달하면 완전히 상실된다.

맺 는 말

론문에서는 확장유한요소법에 기초하여 구조물에서 용접잔류응력을 고려하고 초기균열이 존재하는 경우 저순환피로해석방법을 제시하고 구조물의 역학적상태에 주는 잔류응력의 영향에 대하여 고찰하였다. 저순환피로해석을 통하여 용접후 구조물에 남아있는 잔류응력수준이 높을수록 구조물에 존재하는 균열의 균열벌어짐변위는 더 커지며 구조물의 지지반력(수명)은 급속히 감소한다는것을 알수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Hua Yang Zhang et al.; Materials, 8, 7094, 2015.
- [2] Z. Barsoum et al.; Engineering Failure Analysis, 2, 1, 2008.
- [3] I. Ralph et al.; Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, 35~145, 2001.

주체 105(2016)년 12월 5일 원고접수

Low Cycle Fatigue Life Calculation in Consideration of Welding Residual Stress

Kim Jong Gum, Ri Yong Sop

The low cycle fatigue analysis method in consideration of welding residual stress using the extended finite element method of plane is suggested. The extended finite element method combined with the cohesive zone model adopted to model the low cycle fatigue crack growth behavior. It is shown that residual stress changes the low cycle fatigue crack growth path and reduces the life.

Key words: residual stress, low cycle fatigue