

## 잔류응력과 수축공극을 고려한 펠톤수차바가지의 피로수명평가

리철수, 강정철

펠톤수차바가지의 주요파괴형식은 피로파괴와 공동파괴이다.

균열은 대체로 구조상결함이 있는 부분이나 최대주응력이 작용하는 바가지뿌리부에서 발생하며 일정한 시간이 지나면 급격히 성장하여 수차날개의 파괴를 일으킨다.

선행연구[1]에서는 림계평면법에 의한 가스타빈회전자의 다축피로수명계산을 진행하였으며 선행연구[2]에서는 고순환다축피로짐을 받는 여러 금속재료의 피로수명을, 선행연구[3]에서는 수축공극을 포함한 시편의 피로수명을 Brown-Miller규준에 기초하여 평가하였다. 선행연구[4]에서는 잔류응력을 안전률로 고려한 구조물의 피로수명을 다축피로규준에 기초하여 평가하였다.

논문에서는 잔류응력과 수축공극을 고려하여 펠톤수차바가지의 수명을 정확히 평가하기 위한 방법을 제시하고 잔류응력과 수축공극을 고려하지 않은 경우와의 비교를 통하여 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 펠톤수차바가지의 잔류응력과 수축공극을 고려한 피로해석방법

주물모의계산과 계산결과를 ABAQUS로 넘기기 펠톤수차바가지의 피로수명계산을 위하여 펠톤수차바가지를 주물공정 모의프로그램 Procast를 리용하여 주물모의를 진행하였다.

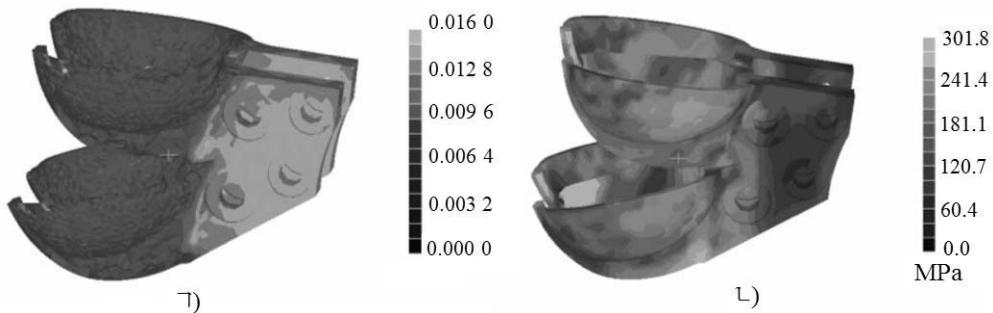


그림 1. 펠톤수차바가지의 주물모의결과

ㄱ) 수축공극, ㄴ) 응력분포도

주물모의를 통하여 얻어진 모형과 잔류응력 및 수축공극을 VB프로그램을 리용하여 UMAT부분프로그램의 사용자상수로 정의하여 ABAQUS로 넘긴다.

잔류응력과 수축공극을 고려한 비선형탄성응력해석 펠톤수차바가지의 비선형탄성해석을 진행하기 위하여 공극도를 포함하는 재료의 상태방정식을 작성하면

$$\begin{cases} \Delta\phi = (1-\phi)\Delta\varepsilon_{kk} \\ \Delta\sigma_{ij} = \lambda\delta_{ij}\Delta\varepsilon_{kk} + 2\mu\Delta\varepsilon_{ij} \end{cases}$$

와 같다.[3] 여기서  $\lambda$ ,  $\mu$  는 라메상수로서  $\lambda = \frac{E(\phi)\nu(\phi)}{(1+\nu(\phi))(1-2\nu(\phi))}$ ,  $\mu = \frac{E(\phi)}{2(1+\nu(\phi))}$  이며  $\phi$  는 공극도,  $\Delta\phi$  는 공극도변화,  $\Delta\sigma_{ij}$  는 응력진폭,  $\Delta\varepsilon_{ij}$  는 변형진폭, 탄성결수와 뿔송결수는 매 마디점에서 공극도의 함수로 설정된다.

$$E(\phi) = E_0 \left(1 - \frac{\phi}{0.5}\right)^{2.5}, \quad \nu(\phi) = \nu_s + \frac{\phi}{\phi_\infty} (\nu_\infty - \nu_s)$$

여기서  $E_0$  은 공극이 없는 재료의 탄성결수이고  $\nu_\infty = 0.14$ ,  $\phi_\infty = 0.472$ ,  $\nu_s = 0.3$  이다.

초기조건은  $\sigma_0 = \bar{\sigma}_0$ ,  $\phi_0 = \bar{\phi}_0$  이다. 여기서  $\bar{\sigma}_0$ ,  $\bar{\phi}_0$  은 각각 주조과정에 생긴 잔류응력과 초기공극도이다.

주조과정에 생긴 잔류응력과 초기공극도를 고려한 UMAT부분프로그램을 작성하여 펄톤수차바가지의 비선형탄성해석을 진행한다.

다축피로수명계산 펄톤수차바가지는 작업과정에 원심력과 수압을 받으며 주기적으로 변하는 수압에 의하여 비대칭순환짐을 받는다.

비대칭순환짐을 받는 구조물의 다축피로수명평가를 림계평면법에 의한 Brown-Miller 기준에 의하여 진행한다.[2]

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = 1.65 \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + 1.75\varepsilon'_f (2N_f)^c$$

여기서  $\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}$ ,  $\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}$  은 림계평면에서의 최대자름변형진폭과 접선응력평면에 수직인 변형진폭이고  $N_f$  는 피로수명,  $\sigma'_f$ ,  $\varepsilon'_f$ ,  $b$ ,  $c$  는 각각 피로세기결수, 피로연성결수, 피로세기지수, 피로연성지수로서 다축피로실험을 통하여 결정되는 양이며  $\sigma_m$  은 평균응력이다.

펄톤수차바가지의 피로수명을 Brown-Miller기준에 기초한 UMAT부분프로그램을 작성하여 계산한다.

잔류응력과 수축공극을 고려한 펄톤수차바가지의 피로수명평가알고리즘은 그림 2와 같다.

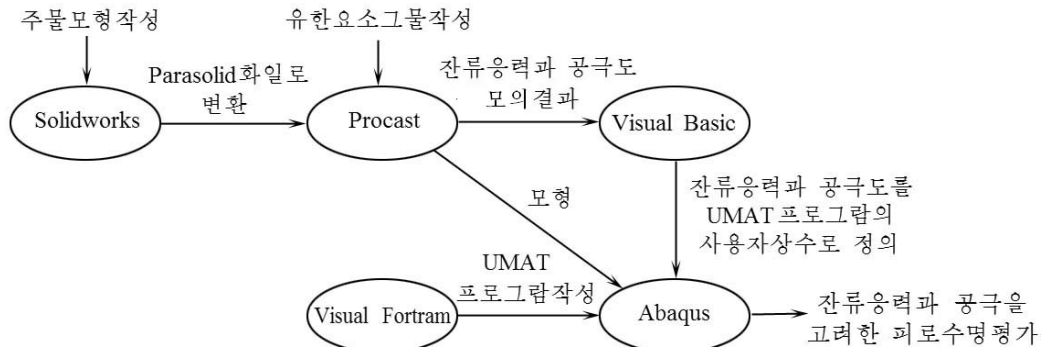


그림 2. 잔류응력과 수축공극을 고려한 피로수명평가알고리즘

## 2. 계산결과분석

펠톤수차바가지재료는 30CrNi3, 탄성계수는 220GPa, 가로변형계수는 0.23 이고 펠톤수차바가지의 안면이 받는 압력분포는 그림 3과 같다.

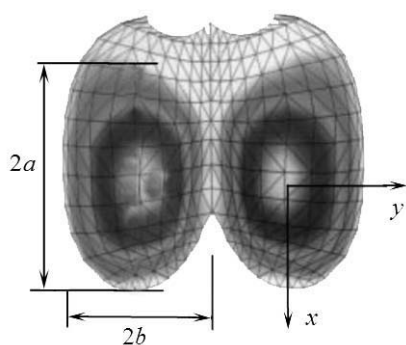


그림 3. 바가지안면이 받는 압력

분포특성으로 보아 외력을

$$P = P_{\max} - \frac{P_{\max} \cdot x^2}{a^2} - \frac{P_{\max} \cdot y^2}{b^2}$$

의 형태로 가정할수 있다. 여기서  $P_{\max}$  는 노즐앞끝압력의 21%에 대응된다.

따라서 어떤 발전소의 계산략차 420m에 해당하는 분포압력은  $P = 0.864 - 12.353x^2 - 30.003y^2$  이다.

수압외에 외력으로서 회전수 360r/min에 대응되는 원심력이 작용되며 이때 회전각속도는  $\omega = 37.68\text{rad/s}$  로 된다.

변위경계조건으로서 발통의 볼트구멍에 고정경계조건을 준다.

펠톤수차바가지의 피로수명특성량들인  $\sigma'_f$ ,  $\varepsilon'_f$ ,  $b$ ,  $c$ 는 각각 1 936MPa, 0.42, -0.121, -0.693이다.[3]

계산결과는 피로수명이 잔류응력과 공극을 고려하지 않은 경우보다 잔류응력만 고려한 경우 6.5배, 수축공극만 고려한 경우 5.5배, 공극과 잔류응력을 고려한 경우 7.8배 감소된다는것을 보여준다.(표)

표. 피로수명계산결과

	최대주응력/MPa	피로수명/회	잔류응력과 공극을 고려하지 않은 경우와의 비
잔류응력과 공극을 고려하지 않은 경우	132.5	$3.423 \times 10^9$	
잔류응력을 고려한 경우	254.7	$5.254 \times 10^8$	6.5
수축공극을 고려한 경우	190.7	$6.126 \times 10^8$	5.5
잔류응력과 공극을 고려한 경우	316.6	$4.345 \times 10^8$	7.8

## 맺 는 말

논문에서는 잔류응력과 수축공극을 고려하여 펠톤수차바가지의 수명을 정확히 평가하기 위한 새로운 방법을 제기하였다.

다음으로 펠톤수차바가지의 주물모의를 진행하고 잔류응력과 수축공극을 고려한 경우의 피로수명이 잔류응력과 수축공극을 고려하지 않은 경우보다 7.8배 감소한다는것을 밝혔다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Srinivasan et al.; Engineering Failure Analysis, 7, 347, 2000.
- [2] Jia Liu et al.; Journal of Materials Engineering and Performance, 22, 1161, 2012.
- [3] R. A. Hadin et al.; The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 40, 581, 2007.
- [4] R. Akrache et al.; Journal of Mechanical Engineering, 57, 7, 547, 2011.

주체104(2015)년 6월 5일 원고접수

## **Evaluation of Fatigue Life of Pelton Turbine Bucket Considered Residual Stress and Shrinkage Porosity**

*Ri Chol Su, Kang Jong Chol*

We suggested the method to correctly evaluate the fatigue life of Pelton turbine bucket by considering residual stress and shrinkage porosity and verified the validity of the suggested method by comparison with case not considering residual stress and shrinkage porosity.

Key word: Pelton turbine bucket