

# 액체로켓 터보펌프 터빈의 고열 저주기 피로수명 예측

이무형\* · 장병욱\* · 정은환\*\* · 전성민\*\* · 이수용\*\* · 박정선\*\*\*

## High-temperature Low-cycle Fatigue Life prediction of a Liquid Rocket Turbopump Turbine

Muhyoung Lee\* · Byungwook Jang\* · Eunhwan Jeong\*\* · Seongmin Jeon\*\* ·  
Sooyong Lee\*\* · Jungsun Park\*\*\*

### ABSTRACT

The life of components under high thermal load is typically shorter than other components. The turbopump turbine of liquid rocket is operated under these environments like high temperature and high centrifugal force due to high rotating velocity during operating time. These conditions may often cause low-cycle fatigue problem in the turbopump turbine. First of all, to analyze heat stress, ABAQUS/CAE is used and Coffin-manson's equation is used to consider elasticity and plasticity strain. S.W.T's method is used to consider the mean stress effect, using strain history, low-cycle fatigue analysis is done for turbopump turbine which may have FCL(fracture critical location). In this paper, strain life method is applied to analyze low-cycle fatigue.

### 초 록

높은 열하중하에 있는 부품의 수명은 일반적으로 다른 부품에 비해 짧은 수명을 가지고 있다. 액체로켓의 터보펌프 터빈은 작동시간 동안 높은 회전속도로 인한 높은 원심력과 높은 온도와 같은 환경하에서 작동된다. 이와 같은 환경은 터보펌프 터빈의 저주기 피로를 야기한다. 우선 열응력을 해석하기 위해 ABAQUS/CAE가 사용되었으며 탄성변형률과 소성변형률을 고려하기 위해 Coffin-Manson 방정식을 사용하였다. 평균응력의 변화를 고려하기 위해 S.W.T법을 사용하였으며, 열응력해석 결과로 얻어진 변형률 이력을 이용하여 터보펌프 터빈의 취약지점에 저주기피로해석을 수행하였다. 본 연구에서는 저주기 수명을 해석하기 위해 변형률 수명 방법이 적용되었다.

**Key Words:** Turbopump(터보펌프), Turbine(터빈), Low-cycle Fatigue(저주기 피로), Strain life Method(변형률 수명 방법), Strain history(변형률 이력), S.W.T's method(S.W.T방법).

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공우주연구원

\*\*\*정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과  
연락처, E-mail: jungsun@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0283

### 1. 서 론

터보펌프는 고온, 고압의 연소가스를 사용하여

내부의 터빈을 회전시킴으로써 작동하기 때문에 고온과 고압의 작동환경에서 높은 열하중과 높은 회전수에 따른 높은 원심력에 노출되어 저주기에서의 피로 수명을 가진다. 피로수명을 예측하는 것은 예상치 못한 파괴를 미연에 방지하고 구조물의 수명이나 교체시기를 예측하여 안전을 도모하며, 피해를 방지하기 위함에 있다. 이러한 작동환경에서 작동하는 터보펌프의 사용 중 안전성을 확보하기 위해서 설계 단계에서부터 사용수명에 대한 예측이 매우 중요하다. 본 연구에서는 온도 분포의 차이에 따른 열하중과 높은 회전수에 따른 원심력의 작용에 대한 터보펌프 터빈의 저주기 피로해석을 수행하였다. 터보펌프 터빈의 열응력해석은 ABAQUS를 사용하였으며, 피로해석은 MSC.Fatigue를 통해 수행하였다.

## 2. 저주기 피로해석

### 2.1 변형률 수명법

터보펌프의 경우 높은 열하중과 높은 원심력으로 인해 저주기 피로수명의 특징을 가진다. 저주기 피로수명은 변형률-수명법(strain-life method)을 이용하여 수명을 산출한다. 변형률-수명법은 항복점 근처의 높은 반복하중의 작용에 따른 구조물의 저주기 수명을 예측하기 위한 방법으로 소성변형이 현저한 노치선단 및 고온 환경과 낮은 항복점을 갖는 재료의 피로수명 예측에 사용된다. 변형률-수명법에서는 Basquin식과 Coffin-Manson식으로 Equation 1과 같다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \quad (1)$$

여기서  $\Delta\epsilon$ 은 변형률진폭,  $N_f$ 는 파단수명,  $E$ 는 재료의 탄성계수이며,  $\sigma_f'$ 은 피로강도계수,  $b$ 는 피로강도지수,  $\epsilon_f'$ 은 피로연성계수,  $c$ 는 피로연성지수이다. Eq. 1에서 우측 첫 번째 항은 탄성변형의 효과를 두 번째 항은 소성변형의 효과를 나타낸다. Eq. 1을 그래프로 나타내면 아래 Figure 1과 같으며 그래프에서  $\sigma_f'$ ,  $b$ ,  $\epsilon_f'$ ,  $c$ 는 각

각 탄성선과 소성선의 절편과 기울기를 나타낸다.

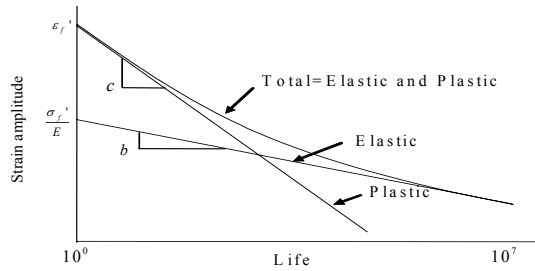


Fig. 1 Strain Life Curve (E-N curve)

### 2.2 평균응력의 영향

실제 구조물에 작용되는 하중은 일정진폭하중이 아닌 실험 결과로부터 얻어진 재료의 피로특성을 피로해석에 사용할 때는 평균응력의 효과를 고려하여야 한다. 변형률-수명법에서 평균응력을 고려하기 위하여 대표적으로 사용되는 방법은 S.W.T법과 Morrow법이 있다. Eq. 2는 Morrow법을 나타내며 Eq. 3은 S.W.T법을 나타낸다.

$$\frac{\Delta\epsilon_i}{2} = \frac{(\sigma_f' - \sigma_m)^2}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 + \frac{\Delta\sigma}{2}$$

Morrow법은 탄성항에 평균응력을 사용하여 탄성항을 수정한 형태이며 S.W.T법은 최대 응력이 음수가 될 수 없으므로 인장응력이 지배적인 경우에 사용이 용이하다.

### 2.3 선형 손상누적법칙

저주기 피로해석을 수행하기 위해서는 변형률 이력에 의해 발생한 손상을 누적하기 위한 다양한 누적손상법칙이 사용되어지고 있다. 이 중에서 널리 사용되고 있는 방법이 선형손상누적법칙이며, Miner의 법칙이라고도 하며, 아래 Eq. 4

과 같다.

$$\sum D_i = \frac{n_i}{(N_f)_i} \quad (4)$$

여기서  $n_i$ 는 각각의 변형률 수준의 반복횟수이며  $(N_f)_i$ 는 각 변형률 수준에서의 수명이다.  $D_i$ 는 손상(damage)이며 피로손상의 정도를 나타낸다. 손상의 합, 즉  $\sum D_i = 1$ 일 시 파괴가 되며 이를 이용하여 수명을 산출한다.

### 3. 터빈의 고열 피로수명 예측

#### 3.1 하중 조건

본 연구에서는 30톤급의 액체로켓엔진의 터보펌프 모델을 사용하였다. 모델은 아래 Fig 2와 같으며 해석의 단순화를 위하여 부분모델을 모델링한 후 Cyclic Symmetry조건을 이용하여 유한요소모델을 생성하였다. 모델을 이용하여 해석을 수행할 시에는 시간에 따른 작용하중의 변화를 나타내는 하중이력의 정의가 중요하다. 터보펌프의 작동은 아래 Fig 3와 같이 0.5초이내의 구간에서는 파이로 시동기에서 공급되는 1430K의 연소가스에 의하여 약 10000RPM까지 상승 후, 1.2초부터는 가스공급기로부터 공급되는 900K의 연소가스를 통하여 더욱 가속되어 1.5초 이후에는 정상상태에 도달하여 18000RPM이상으로 구동된다.[1] 피로해석에는 0~2.5초구간을 1cycle로 정의하고, 이 구간의 반복에 대한 피로 해석을 수행하였다.

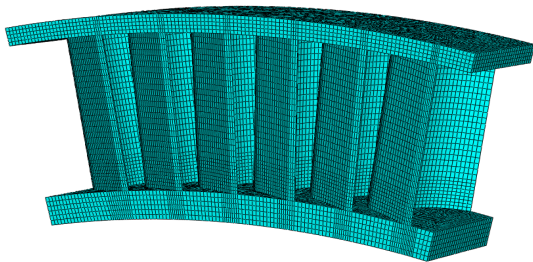


Fig. 2 FEM Model of Turbine

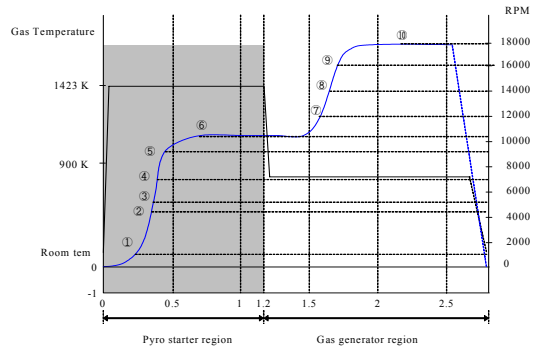


Fig. 3 Analysis points for generating a strain history

#### 3.2 열응력 해석 결과

열응력해석과정은 우선 지정된 해석지점에 대한 열전달 해석을 통한 열분포를 구한 후 원심력에 대한 효과를 이용하여 열응력 해석을 한다. 열전달 해석은 파이로 시동기에서 공급되는 기간의 5지점에 대한 열전달 해석을 하였다. 터보펌프 터빈의 하중이력은 선정된 10개 지점에 대한 열응력해석 결과를 이용하여 생성한다. 열응력 해석결과는 Fig. 4에 나타나 있으며 이 열응력 해석결과들을 이용하여 변형률이력을 생성하였다. 열응력 해석결과를 이용하여 탄성변형률과 소성변형률의 합인 전체 변형률은 Fig. 5에 나타나 있다.

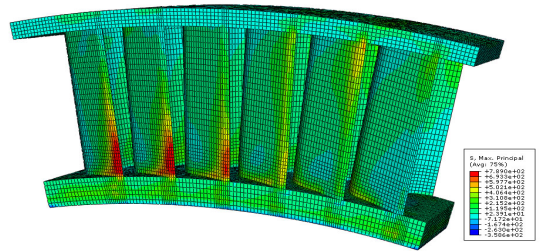


Fig. 4 Thermal Stress Analysis Result

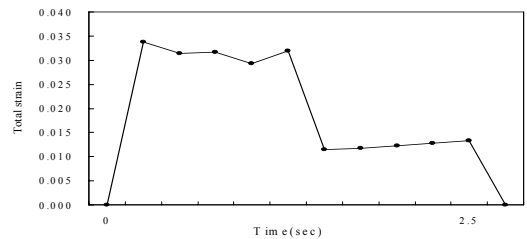


Fig. 5 Total strain history of time variation

### 3.3 저주기 피로 해석 결과

터보펌프의 작동시간에 따른 정해석 결과를 가지고 피로해석을 수행할 수 있다. 피로해석을 수행하기 위해 MSC.Fatigue를 사용하여 피로해석을 수행하였다. 앞에서 언급했듯 선형손상누적법칙을 이용하기 위하여 손상률을 구할 수 있다. 터빈의 손상률은 아래 Fig 6에 나타나 있다. 획득한 손상률의 정보를 이용하여 피로해석을 수행할 수 있다.

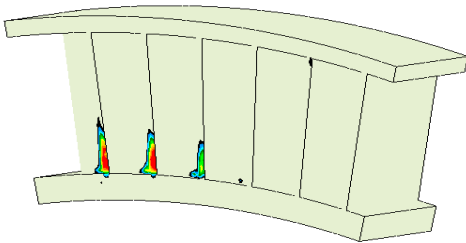


Fig. 6 Fatigue Analysis Result(Damage)

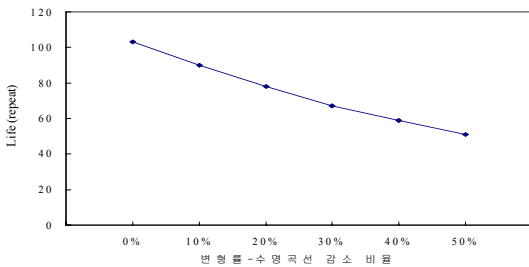


Fig. 7 Estimated life of Morrow's method

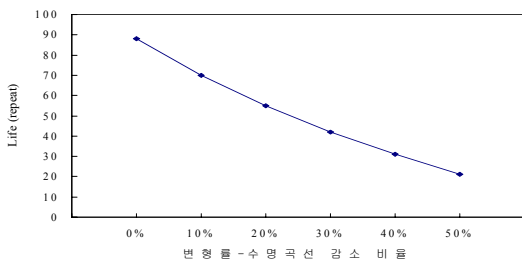


Fig. 8 Estimated life of S.W.T's method

저주기 피로해석을 수행하기 위하여 고온 피로 데이터가 필요하다. 하지만 실험적 방법을 통하여만 고온 피로데이터를 획득확실할 수 있어 상온 데이터를 10%씩 감소하여 50%까지 감소한 데이터를 사용하여 피로해석을 수행하였다. 선형감소한 고온 피로데이터를 이용하여 피로 해석

을 수행하기 위하여 Morrow법과 S.W.T법을 사용하여 피로 수명을 산출하였다. 두 가지 방법으로 피로수명을 산출한 결과 S.W.T법이 더욱 보수적인 수명이 나타남을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고온, 높은 원심력의 환경하에서 작동하는 터보펌프 터빈의 고열 저주기 피로 수명을 해석하였다. 열분포와 원심력에 대한 열응력해석을 수행하였으며 열응력해석을 이용하여 변형률이력을 정의하였다. 선형손상누적법칙과 평균응력을 고려하여 저주기 피로해석을 수행하였다. 하지만 고온 피로데이터를 확보하지 못하여 정확한 수명을 예측하는 데는 한계가 있었다. 이 결과 우선 실험을 통하여 고온 피로데이터를 획득하여야 하며 획득한 데이터를 이용하여 정확한 피로수명을 예측하여 터보펌프 터빈의 안전성을 확보하여야 한다는 결론을 얻었다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 터보펌프 방식의 액체엔진 성능 향상 연구 사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 이인철, 변용우, 구자예, 이상도, 김귀순, 문인상, 이수용, "터빈 블레이드 회전수 변화와 터빈 블레이드 엣지 형상 변화에 따른 표면 가스 온도 분포 해석", *KSPE*, 2008, pp. 49~52
- Coffin L. F., "A Study of the Effect of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, 1954, Vol. 76.
- Manson, S. S, "Behavior of Material under Conditions of Thermal Stress," *Heat Transfer Symposium*, University of Michigan, 1953, p. 9-75
- Smith, K. N., Watson, P., and Topper, T. H., "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metal," *J. Metal.*, Vol. 5, No. 4, 1970, p. 767-778