

# 터보펌프 터빈의 내구성 확보를 위한 구조적 특성 연구

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

## Study on Structural Characteristic for Durability Insurance of Turbopump Turbine

Muhyoung Lee\* · Byungwook Jang\* · Jeongsik Kwon\* · Jinhan Kim\* · Eunhwan Jeong\*\*  
Seongmin Jeon\*\* · Sooyong Lee\*\* · Jungsun Park\*\*\*

### ABSTRACT

The life of a component decreases when it was exposed at the extreme condition. A turbine blade of a turbopump used for a liquid rocket engine is operated under the environment of high temperature and pressure, and experienced high centrifugal force. Thus the durability of the turbopump operated under the these conditions become lower than expected because of the severe fatigue and creep influence. The damage of the turbine being considered the fatigue and the creep influence is estimated to ensure the durability of turbopump turbine. ABAQUS/CAE and MSC.Fatigue are used for the fatigue analysis, and Larson-Miller parameter and robinson's rule are used for the creep analysis. In this paper, comparison and analysis of the fatigue and the creep influence were performed to ensure the life expectancy of turbopump turbine.

### 초 록

극심한 작동환경에 노출되는 부품은 일반적으로 수명이 줄어들게 된다. 액체로켓의 터보펌프는 높은 회전속도로 인한 높은 원심력과 높은 온도와 같은 환경에서 작동한다. 이와 같은 환경에서 작동하는 터보펌프는 극심한 피로와 크리프의 영향으로 재료의 내구성이 떨어지게 된다. 75톤급 터보펌프 터빈의 내구성을 확보하기 위하여 피로와 크리프의 영향을 고려한 손상률을 계산하였다. 터보펌프 피로해석에는 ABAQUS/CAE와 MSC.Fatigue를 사용하여 해석을 수행하였으며, 크리프 해석을 수행하기 위해서 Larson-Miller parameter 곡선과 로빈슨 법칙을 사용하였다. 본 연구에서는 터보펌프의 터빈에 대한 내구성을 확보하기 위하여 피로의 영향과 크리프의 영향을 비교, 분석하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Turbine(터빈), Low-cycle Fatigue(저주기 피로), Creep(크리프), Larson-Miller Parameter(라르손-밀러 파라미터), Robinson's Rule(로빈슨 법칙)

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공우주연구원

\*\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

연락처, E-mail: jungsun@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0283

### 1. 서 론

액체로켓에서 터보펌프는 고온, 고압의 연소 가스를 이용하여 추력을 발생한다. 이러한 터보

펌프의 작동환경으로 인해 터보펌프 터빈은 고온의 환경으로 예상치 못한 고장이나 파손이 발생할 수 있다. 특히 고온의 환경에서는 피로 및 크리프 손상이 주로 발생한다. 고온의 환경의 열적 피로문제를 해결하기 위해 Coffin과 Manson [1955]는 변형률-수명테이터를 log-log좌표상에 나타내었다. Larson과 Miller[1952]는 온도와 응력 그리고 크리프 파단시간의 변수를 정식화하여 함수로 나타내었다. 이후 고온의 환경에서 작동하는 부품에 대한 손상 메커니즘의 연구가 활발히 진행되었으며, 피로와 크리프의 영향을 복합적으로 고려하기 위해 ASME Code N47에 피로와 크리프손상을 선형관계로 합산하는 Linear Damage Summation Method[1993]을 제안하였다. 본 연구에서는 터빈의 피로와 크리프가 복합적으로 작용하는 수명을 예측하기 위해 Linear Damage Summation Method를 통하여 손상률을 계산하고 각각의 영향을 비교, 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 저주기 피로(Low Cycle Fatigue) 수명

터보펌프의 경우 높은 열하중과 높은 원심력으로 인해 저주기 피로수명의 특징을 가진다. 저주기 피로수명은 변형률-수명법(strain-life method)을 이용하여 수명을 산출한다[1]. 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[2].

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

여기서  $\Delta \epsilon$ 는 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. 실제 구조물에 작용되는 하중은 일

정진폭하중이 아닌 실험 결과로부터 얻어진 재료의 피로특성을 피로해석에 사용할 때는 평균 응력의 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.

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

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

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

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

### 2.2 크리프(Creep) 수명

크리프는 재료가 특정 온도 및 하중에서 일정 시간 노출될 때 재료조직구조의 변화가 원인이 되어 영구적인 변형이 일어나는 현상으로, 주로 고온에서 작동하는 부품에서 발생할 수 있는 현상이다. 크리프 손상에 영향을 미치는 요소는 주로 응력, 온도 그리고 시간이다. 이 세 가지 요소 중 온도와 시간을 변수로 설정하여 응력에 대한 함수로 나타내는 Larson-Miller Parameter가 크리프의 파단시간을 결정하는 함수로 아래 Eq. 4에 나타나 있다[4].

$$P = (T + 460)(C + \log t_r) \quad (4)$$

Eq. 4의  $P$ 는 응력수준,  $T$ 는 온도수준, 그리고  $t_r$ 은 크리프 파단시간을 의미한다. 일반적으로 니켈기반의 초내열합금에서는 상수  $C$ 값을 20으로 정하여 사용한다[5]. 크리프 수명은 파단(Rupture)이 발생하는 시간과 작동시간의 비율을 이용하여 계산한다. 크리프의 파단시간을 구하기 위해 LMP master curve를 이용하며, 구조해석 결과 얻어진 응력과 Eq. 4를 이용하여 크리프

파단시간(Rupture Time)을 계산한다.

### 2.3 선형손상누적법칙

피로와 크리프손상이 복합적으로 작용할 때 구조물의 수명을 예측하기 위해 누적되는 손상을 합산하는 과정이 필요하다. 이를 위해 ASME Code N47의 Linear Damage Summation method를 사용하여 손상률을 합산한다. 이 방법은 피로손상률을 누적하는 Miner의 방법과 크리프손상률을 누적하는 Robinson의 방법을 선형적으로 더하는 방법으로, 전체 손상률이 1이 될 때 구조물이 파괴가 일어난다는 의미를 가지고 있다. 아래 Eq. 5는 Linear Damage Summation Method를 보여주고 있다.

$$\sum D_i = \sum \frac{n_i}{(N_f)_i} + \sum \frac{t_{operation}}{t_{rupture}} \quad (5)$$

## 3. 터빈의 구조해석

### 3.1 하중 조건

터빈의 구조해석을 수행하기 위해서는 작동 특성의 파악이 필요하다. 터보펌프는 초기 0.8초까지의 구간에는 파이로 시동기에서 공급되는 1200K의 연소가스에 의해서 회전수가 8000rpm까지 상승한 후, 800K의 연소가스에 의해서 회전수가 11000rpm까지 상승한다. 초기 8000rpm까지 증가하는 구간을 pyro 시동구간이라고 하며, 그 이후의 구간을 가스발생구간이라고 한다. 터빈의 구조해석을 위해 초기 시동구간부터 가스발생구간인 5.0초 구간의 15개 지점을 선정하여 온도조건과 회전수를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 아래 Table 1은 터보펌프 두 구간에 대한 온도와 회전수 조건을 보여주고 있다.

Table 1. Temperature and RPM condition

	온도 조건(K)	회전수(rpm)
pyro시동구간	1200	0~8000
가스발생구간	800	0~11000

### 3.2 해석 모델

본 연구에서는 터보펌프 터빈의 수명을 예측하기 위해 Fig. 1과 같은 75톤급 모델을 사용하였다. 사용된 터빈에는 118개의 블레이드가 있고, 회전 중심에서 팁까지의 반경은 216.3mm이다. 터빈의 재료로는 내열성과 내식성이 뛰어난 초합금인 니켈기반의 초내열합금인 INC-718을 사용하였다.

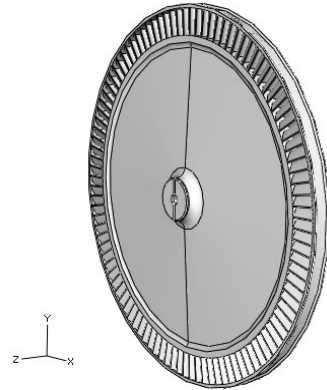


Fig. 1. Turbopump Turbine Solid Model

FEM모델은 해석의 시간을 줄이기 위해 부분 모델을 사용하였으며, 해석 시에는 FEM모델의 양면에 cyclic symmetry조건을 사용하였다. 해석에 사용한 유한요소모델은 Fig. 2와 같다.

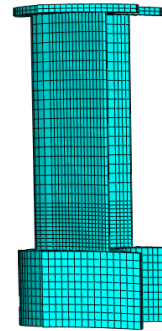


Fig. 2. FEM Model of Turbine

### 3.3 구조 해석

터빈의 구조해석을 수행하기 위해 우선 정의된 해석지점에 대하여 열전달 해석을 수행해야 한다. 열전달 해석은 제공받은 터보펌프 터빈 주

변의 대류 열전달계수와 주변온도조건을 사용하여 열전달해석을 수행하였다. 해석결과 pyro 시동구간에는 900°C수준의 온도분포가 나타났으며, 가스발생구간에서는 500°C수준의 온도분포가 나타났다. 열전달해석결과인 온도분포를 이용하여 해석지점에 대한 회전수를 고려하여 열응력 해석을 수행하였다. 열응력 해석에는 ABAQUS를 이용하여 수행하였으며 해석결과는 아래 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다.

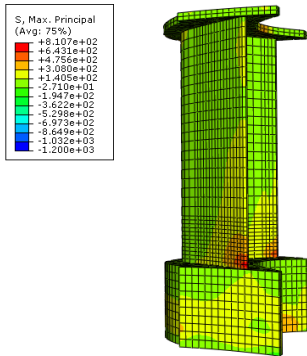


Fig. 3. Thermal Stress Analysis Results

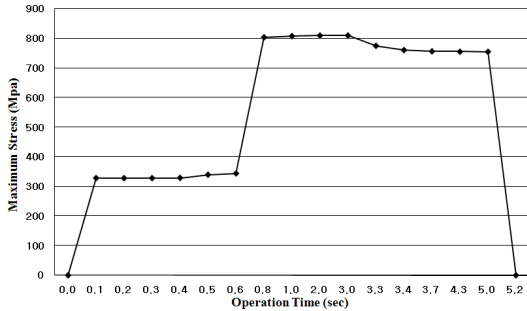


Fig. 4. Results of stress analysis

열응력 해석결과는 Maximum stress principle을 이용하여 응력분포를 확인하였다. 최대응력은 블레이드 루트 부근에서 발생하였으며, pyro 시동구간에는 340Mpa정도의 응력수준과 가스발생구간에는 810Mpa정도의 응력수준이 나타났다. 구조해석결과 최대응력이 발생한 블레이드 루트지점의 온도이력과 변형률이력, 그리고 응력이력을 이용하여 피로해석과 크리프해석을 수행하였다.

#### 4. 터빈의 수명 예측

##### 4.1 피로 해석 결과

터빈의 구조해석결과를 바탕으로 MSC.Fatigue을 사용하여 피로해석을 수행하였다. 해석결과 응력수준이 가장 큰 블레이드 루트 부근에서 가장 큰 손상률이 나타난 것을 확인하였다. 피로해석의 평균응력의 영향을 고려하기 위하여 Morrow방법과 S.W.T방법을 사용하였으며[3], 현재 확보한 상온데이터를 기준으로 데이터를 10%씩 감소한 데이터를 이용하여 수명을 산출하였다. 아래 Table 2는 Morrow방법과 S.W.T방법을 사용하여 계산된 손상률과 피로수명을 나타내고 있다.

Table 2. Results of fatigue analysis

데이터 감소율	Morrow		S.W.T	
	손상률	피로수명	손상률	피로수명
0%	0.010152	98	0.011848	84
10%	0.011173	89	0.014327	69
20%	0.012077	82	0.017301	57
30%	0.013245	75	0.021142	47
40%	0.014556	68	0.028090	35
50%	0.016611	60	0.037037	27

##### 4.2 크리프 해석 결과

구조물의 크리프 손상을 계산하기 위해 열응력해석결과 얻어진 온도조건과 응력수준을 이용하여 크리프 파단시간을 구해야 한다. 이를 위해 온도와 파단시간, 그리고 응력의 관계식으로 표현된 LMP master curve를 사용하여 파단시간을 구하였다. 아래 Fig. 5은 해석에 사용된 INC-718의 LMP master curve를 보여주고 있다[5].

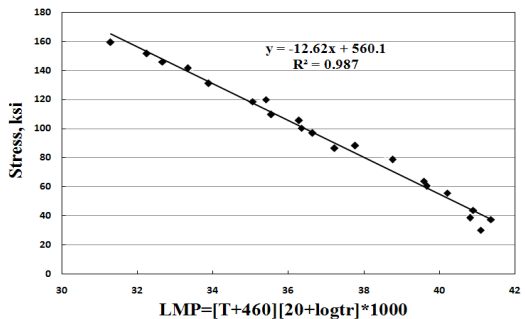


Fig. 5. LMP master curve of INC-718

열응력해석결과인 블레이드 루트부근에 발생한 최대응력과 해당노드의 온도이력을 이용하여 크리프파단시간을 계산하였다. 터빈은 두 개의 구간으로 작동하기 때문에 각각의 크리프 파단시간을 구해야 한다. 구해진 크리프 파단시간의 해석결과는 pyro 시동구간에 0.042시간의 파단시간과 가스발생구간에 16908시간의 파단시간이 계산되었다. 계산결과 pyro 시동구간과 가스발생구간의 파단시간의 차이가 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 해당재료녹는점의 0.4배 이상의 온도수준이상에서 크리프 현상이 발생한다[4]. 하지만 터보펌프의 재료인 INC-718의 녹는점은 1300°C 이고, 가스발생구간은 500°C수준의 온도분포가 나타나 INC-718의 녹는점에 대해 0.4배 이하의 온도수준이 나타났다. 이런 원인으로 인해 파단시간이 상당히 큰 값이 계산되었다. 그러므로 구동특성상 응력수준은 낮지만 온도수준이 높은 pyro 시동구간에서 크리프현상을 고려해야 한다고 할 수 있다.

#### 4.3 수명 예측

피로 해석과 크리프 해석을 기반으로 피로와 크리프의 영향을 고려한 터빈의 수명을 예측하기 위해 Miner의 법칙과 Robinson의 법칙을 선택적으로 합한 방법[8]을 사용하여 손상률을 계산한 결과 아래 Table. 3에 나타나 있다. 전체 손상률은 피로해석 중 평균응력의 영향을 고려한 Morrow방법과 S.W.T방법으로 구한 각각의 손상률을 크리프 손상률과 더한 값을 사용하였다. 계산된 손상률의 결과 상온데이터를 사용할 시 크리프의 영향이 30%정도의 영향이 나타났으며, 피로데이터를 감소하면서 나타나는 피로 손상률의 증가로 인해 크리프의 영향이 감소하는 경향이 확인되었다.

Table. 3 Total damage and creep influence

데이터 감소율	Total (Morrow)	크리프 영향(%)	Total (S.W.T)	크리프 영향(%)
0%	0.015390	34.03	0.017086	30.65
10%	0.016410	31.91	0.019564	26.77
20%	0.017315	30.25	0.022538	23.24
30%	0.018482	28.34	0.026379	19.85
40%	0.019793	26.46	0.033327	15.71
50%	0.021849	23.97	0.042274	12.39

## 5. 결 론

본 연구에는 높은 열하중을 받는 터보펌프 터빈에 대한 손상 메커니즘을 연구하였다. 우선 터보펌프의 작동조건을 고려한 해석지점을 선정하였다. 선정된 해석지점에 대한 열응력해석을 수행하여 변형률 이력을 생성한 후 피로해석을 수행하였다. 또한 터보펌프의 구동특성을 고려하여 pyro 시동구간과 가스발생구간의 각각의 온도조건과 응력수준에 대한 크리프해석을 수행하였다. 해석 결과 터보펌프의 초기 구동인 pyro 시동구간에 고온의 영향으로 인한 피로와 크리프의 특성이 강하게 나타남을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. S. Majumdar, "Low-Cycle Fatigue and Creep Analysis of Gas Turbine Engine Components", J. of Aircraft, Vol. 12, No. 4, April 1975, pp. 376~382.
2. Bannantie, J. A., Comer, J. J., Handrock, J. L., "Fundamentals of metal fatigue analysis", 1989, Prentice-Hall.
3. Coffin L. F., "A Study of the Effect of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal", Trans. ASME, Vol. 76, 1954.
4. Manson, S. S, "Behavior of Material under Conditions of Thermal Stress", Heat Transfer Symposium, University of Michigan, 1953, p. 9-75.
5. 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.
6. R. W. Evans and B Wilshire, "introduction to Creep", Institute of materials, 1993, pp. 46~57.