

## 論文

## 크리프-피로 영향을 고려한 터보펌프 터빈의 손상해석

이무형\*, 장병욱\*, 김진한\*\*, 정은환\*\*, 전성민\*\*, 이수용\*\*, 박정선\*\*\*

## Damage Analysis of Turbopump Turbine considering Creep-Fatigue effects

Mu-Hyoung Lee\*, Byung-wook Jang\*, Jin-Han Kim\*\*, Eun-Hwan Jeong\*\*, Seong-Min Jeon\*\*,  
Soo-Yong Lee\*\*, and Jung-Sun Park\*\*\*

## ABSTRACT

Structures under high temperature may have creep behavior and fatigue behavior. Durability study of the structures need the damage analysis with the creep-fatigue effects. In this paper, the damage analysis is studied for a turbine blade in the turbopump for a liquid rocket engine which is operated under high temperature condition. First of all, the load cycle is required for defining the operational characteristics of turbopump. The thermal stress analysis is done for a turbine blade of the turbopump. The stress analysis results are used to judge damage due to the creep and the fatigue. The strain-life method with miner rule is used for fatigue damage analysis. The Larson-Miller parameter master curve and robinson rule are used for the creep damage analysis. The linear damage summation method is used to consider creep-fatigue effects of turbopump turbine. Finally, the analysis results for fatigue and the influence are compared to figure out the damage phenomenon of the turbopump turbine.

Key Words : Turbopump(터보펌프), Turbine(터빈), Creep(크리프), Low-cycle Fatigue(저주기 피로), Strain-life Method(변형률-수명법), Larson-Miller parameter(라르손-밀러 파라미터)

## 1. 서 론

터보펌프는 액체로켓엔진의 중요한 구성장치로 고온, 고압의 연소가스로 구동되는 터빈을 이용하여 연료와 산화제를 액체로켓엔진에 공급하는 장치이다. 이러한 고온 환경에서 작동하는 터보펌프는 고온 환경으로 인해 예상치 못한 고장이나 파손이 발생될 수 있는 장치이다. 일반적으로

로 고온 환경에서 구동되는 부품들은 작동 시 가해지는 기계적, 열적 하중과 고온에서 발생하는 재료의 강도저하를 고려한 손상해석이 필요하다. 주로 고온 환경에서 구동되는 부품은 고온 크리프 거동(creep behavior)과 피로 거동(fatigue behavior)의 발생과 함께 두 거동의 복합적인 영향을 받는 크리프-피로 효과가 나타난다. 즉, 크리프, 피로 그리고 크리프-피로는 부품 및 구조물에 손상(damage)을 유발하며, 전체적인 수명을 단축시키는 원인이 되고 있다. 따라서 고온 하중과 반복적인 기계하중 하에서 구동하는 부품의 수명을 보다 정확히 추정하기 위해 고온의 영향을 고려한 크리프 손상해석 및 피로 손상해석과 함께 크리프-피로 영향에 대한 손상해석이 수행되어야 한다[1,2].

2009년 12월 15일 접수 ~ 2010년 3월 19일 심사완료

\* 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 회원, 한국항공우주연구원

\*\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : [jungsun@kau.ac.kr](mailto:jungsun@kau.ac.kr)

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

크리프-피로 영향을 고려한 손상해석을 위하여 일반적으로 크리프 손상과 피로 손상에 대한 관계를 이용하여 전체적인 손상해석을 하는 방법이 많이 사용되었다[3]. ASME Pressure and Vessels and Piping Division에서는 크리프와 피로의 손상을 계산한 후 크리프손상과 피로손상을 선형적으로 합산하여 크리프-피로 손상을 계산하는 선형손상합산법칙(linear damage summation method)를 제안하였으며[4], Nakamura[5]등은 크리프와 피로의 손상관계를 연구하기 위해 비대칭 하중(unsymmetric load)를 적용하여 선형손상모델(linear damage model)과 비선형손상모델(nonlinear damage model)을 적용하는 크리프-피로 손상에 대하여 연구하였다. 또한 크리프-피로 비선형손상모델에 대한 손상해석을 위하여 이중선형손상함수(bilinear damage function)가 제안되었다[6]. 크리프-피로 손상해석을 위해서는 크리프 손상과 피로 손상에 대한 관계를 이용하므로 우선 크리프 손상해석과 피로 손상해석이 수행되어야 한다. 일반적으로 크리프 손상해석은 라르손-밀러 파라미터 곡선(LMP, Larson-Miller parameter master curve)과 로빈슨 법칙(robinson rule)을 이용하여 크리프 손상을 산출한다. 라르손-밀러 파라미터 곡선은 크리프에 영향을 끼치는 온도, 응력 그리고 시간의 변수를 매개화하여 생성한 곡선으로 온도와 응력 수준별 파단시간을 산출할 수 있도록 정식화된 곡선이다. 또한 로빈슨 법칙은 오래전부터 사용되어온 방법으로 크리프 파단시간에 대한 실제 운용시간의 비(ratio)를 이용하여 손상을 계산하는 방법이다. 또한 피로 손상해석을 수행하기 위한 방법에는 여러 가지 방법들이 사용되고 있지만 터보펌프와 같이 높은 열하중과 기계적 하중을 받는 부품은 주로 변형률-수명법(strain-life method)을 이용하여 피로 손상을 산출한다. 변형률-수명법은 표준 피로 설계 방법으로 구조물의 변형률과 수명과의 관계를 바탕으로 저주기 피로 손상을 해석하는 방법으로 구조피로문제에 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 액체로켓용 터보펌프 지상시험에서의 안정성확보를 위해 지상시험용 구동사이클을 정의하였으며, 정의된 지상시험용 구동사이클에 대한 크리프-피로의 영향을 고려한 손상해석을 수행하였다. 우선 터보펌프 구동특성을 고려한 구동사이클을 정의하였으며, 구동사이클에 대한 열전달해석과 응력해석을 수행하였다. 열전달해석과 응력해석결과를 통해 선정된 터보펌프 터빈블레이드의 취약지점(F.C.L., fracture critical

location)에 대한 크리프 손상해석과 피로 손상해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 크리프-피로의 영향을 고려한 손상해석을 수행하였다.

## 2. 터보펌프 터빈의 구조해석

### 2.1 액체로켓용 터보펌프

액체로켓용 터보펌프는 고온, 고압의 연소가스에 의하여 구동되며 고온, 고압으로 산화제와 연료를 연소실에 공급하는 구성품이다. 작동 중의 터보펌프는 충분한 동력을 얻기 위해서 다량의 연소가스가 공급된다. 터보펌프에 공급되는 연소가스는 초기 시동 단계에서 파이로 시동기(pyro starter)로부터 공급된 후, 정상상태에서 가스발생기(gas generator)로부터 공급된다. Fig. 1은 액체로켓의 계략적인 시스템을 보여주고 있다.

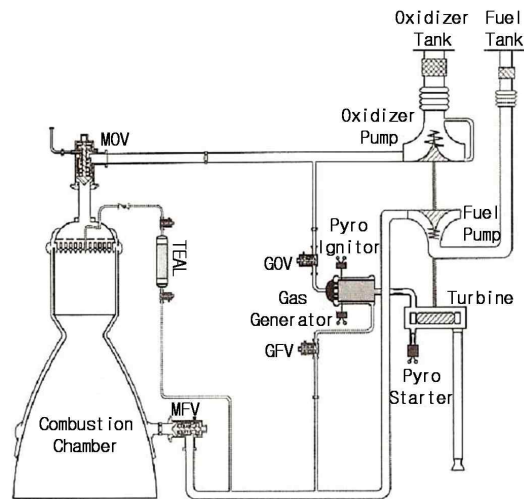


Fig. 1 Schematic of liquid rocket engine system[7]

### 2.2 해석 모델

본 연구에서는 75톤급 액체로켓용 터보펌프 터빈의 손상해석을 수행하기 위해서 Fig. 2와 같은 75톤급 터빈 블레이드 모델을 사용하였다. 사용된 터빈에는 117개의 등근 모서리형태의 블레이드로 구성되어 있으며, 회전 중심에서 팁(tip)까지의 반경은 216.3mm이다. 터보펌프 터빈 블레이드의 재료는 고온에서 우수한 기계적 특성을 갖는 니켈기 초합금 계열의 INC-718을 사용하였으며, 이 재료를 어닐링(annealing)처리 후 시효(aging)처리의 열처리과정 후 사용하였다.

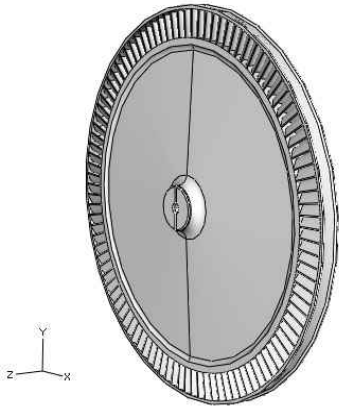


Fig. 2 Turbopump turbine solid model

유한요소 모델은 해석 시간을 줄이기 위하여 부분 모델을 사용하였으며, 11169개의 절점과 8794개의 육면체요소(hexahedron element)로 구성되어 있다. 응력 해석 시에는 유한요소모델의 양면에 cyclic 대칭조건을 사용하였다. Fig. 3은 해석에 사용한 터빈 블레이드에 대한 유한요소모델을 보여주고 있다.

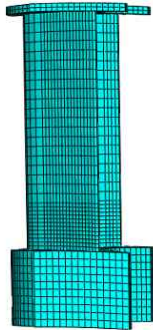


Fig. 3 Finite element model of turbine

### 2.3. 하중 조건

본 연구에서는 75톤급 액체로켓용 터보펌프 지상시험의 안정성확보를 위한 손상해석을 수행하였다. 손상해석을 수행하기 위해 터보펌프 지상시험의 구동특성을 고려한 구동사이클의 정의가 필요하다. 터보펌프 지상 시험은 Fig. 4와 같이 1,270K~1,300K의 높은 온도의 연소가스에 의해 0~8,000rpm 회전수로 상승한 후, 8000rpm 이후 가스공급기로부터 공급되는 810K~840K의 연

소가스에 의해 더욱 가속되어 11,200rpm까지 회전수가 증가한 후 3.0초 이후 rpm이 1,300rpm까지 감소하는 운전 시나리오를 가지고 있다.

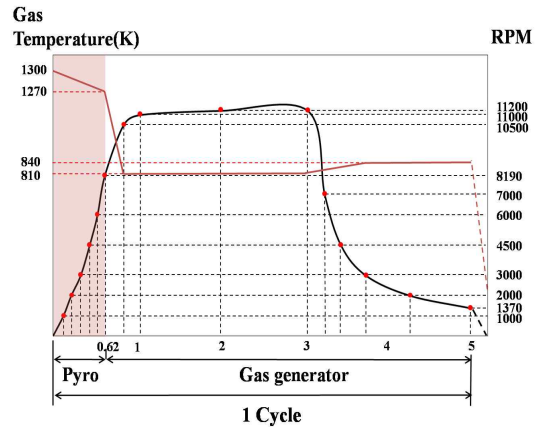


Fig. 4 Operation history of turbopump turbine

본 연구에서는 75톤급 액체로켓용 터보펌프 터빈 블레이드 지상 시험에 대해 손상해석을 수행하기 위해 0~5.0초 운전구간을 지상 시험 1cycle로 정의하였다. 터보펌프 터빈 블레이드의 응력해석을 위해 정의된 구동사이클에 대하여 15개의 해석지점을 선정하였다.

### 2.4 열전달 해석

터보펌프 터빈 블레이드의 구조해석을 수행하기 위해 터보펌프 구동특성을 고려한 구동사이클의 해석지점에 대한 열전달해석을 통하여 절점별 온도분포를 정의해야 한다. 열유동해석 상용프로그램인 FineTurbo의 해석결과를 통해 획득한 터보펌프 터빈 블레이드에 대한 대류 열전달계수와 블레이드 주변 온도분포, 그리고 해당 재료인 INC-718의 열전도도(11.4 W/m°C)를 이용하여 열전달해석을 수행하였다. Fig. 5와 6은 열전달 해석을 통한 터보펌프 터빈 블레이드에 대한 온도분포 결과와 작동시간에 대한 온도이력 (temperature history)을 보여주고 있다. 열전달 해석 결과 초기 파이로 시동구간은 1,000°C 정도의 온도분포가 나타났으며, 가스발생구간에서는 600°C 정도의 온도 분포가 나타남을 확인하였다. 열전달 해석 결과 획득한 절점별 온도분포를 이용하여 정의된 구동사이클 해석 지점별에 대한 응력해석을 수행하였다.

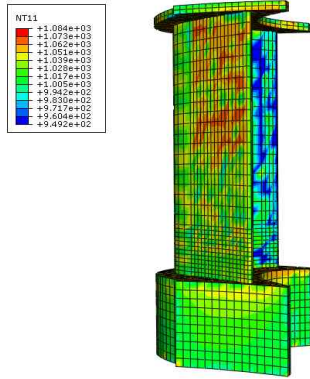


Fig. 5 Temperature distribution(°C)

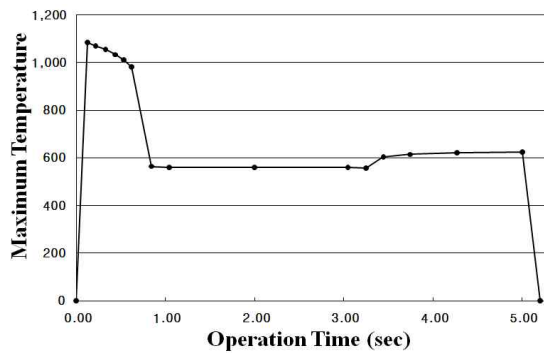


Fig. 6 Maximum temperature history(°C)

## 2.5 구조 해석

정의된 구동사이클의 해석 지점별 열전달 해석 결과인 절점별 온도정보와 rpm정보를 이용하여 응력해석을 수행하였다. 본 연구의 목적인 터보펌프 터빈 블레이드에 대한 크리프-피로의 영향을 고려한 손상해석을 수행하기 위해 터빈 블레이드에 대한 취약지점(F.C.L., fracture critical location) 선정 및 온도이력, 응력이력, 그리고 변형률이력이 필요하다. 높은 하중 및 온도에서는 응력-변형률의 관계가 선형영역을 벗어나고 온도에 따라 재료의 기계적 특성이 크게 변화하기 때문에 정확한 해석을 위해 재료의 비선형성(nonlinearity)이 반영되어야 한다. 흔히 설계 초기단계에서 응력해석 시 응력-변형률의 관계가 선형적으로 유지된다고 가정하여 보수적인 결과를 얻음으로써 설계의 안정성을 보장하게 된다. 변형률의 경우 이러한 선형해석을 통해 얻어진 결과는 실제에 비해 작은 값이 얻어지기 때문에 재료의 국부적인 소성변형을 전제로 하는 저주기 피로(low-cycle fatigue), 크리프(creep)등의 손상

기구에 대한 수명예측에 적용하기에 어려움이 있다. 따라서 실제에 가까운 변형률 결과를 얻기 위해서는 재료의 온도에 따른 물성치와 실제의 응력-변형률 선도를 반영한 비선형 해석이 필요하다. 이를 위해 ABAQUS/CAE의 비선형 해석을 이용하였다. 응력 해석 결과 터빈 블레이드 루트부근에 최대 응력이 발생함을 확인하였다. Fig. 7은 터보펌프 터빈 블레이드의 응력분포(stress distribution)를 보여주고 있다.

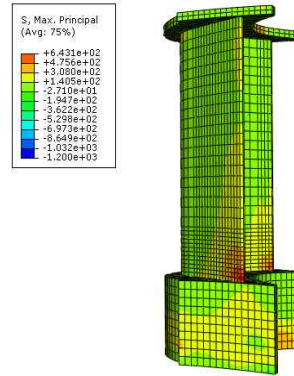


Fig. 7 Stress distribution(Mpa)

응력 해석 결과 터보펌프 터빈 블레이드의 최대 응력지점인 블레이드 루트부근 515번 절점을 취약지점(F.C.L. fracture critical location)으로 선정하였다. 저주기 피로 해석과 크리프 해석을 위해 선정된 취약지점에 대한 응력이력, 변형률이력을 정의해야 한다. 취약지점에 대해 정의된 응력이력(stress history), 탄성변형률이력(elastic strain history)과 소성변형률이력(plastic strain history), 그리고 총변형률이력(total strain history)은 Fig. 8~11에 나타나 있다.

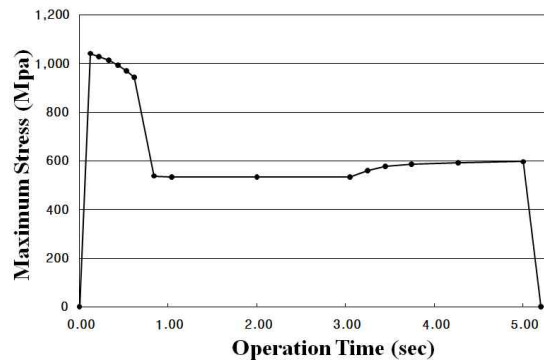


Fig. 8 Stress history at F.C.L.

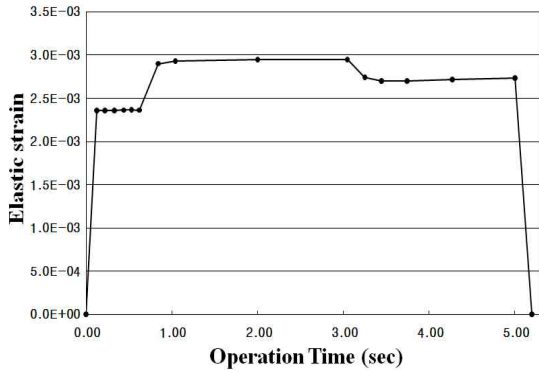


Fig. 9 Elastic strain history at F.C.L.

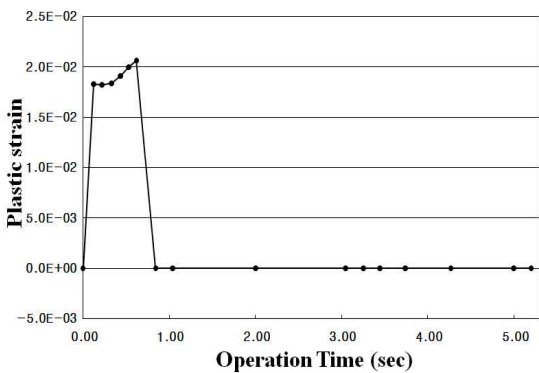


Fig. 10 Plastic strain history at F.C.L.

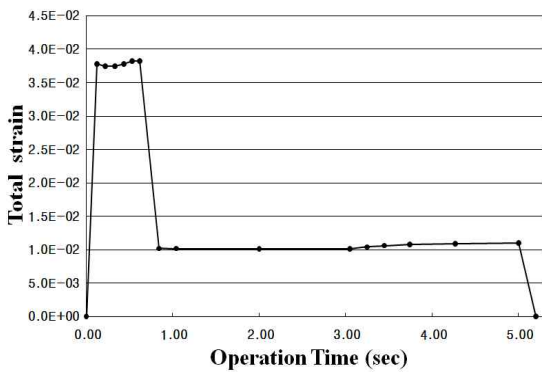


Fig. 11 Total strain history at F.C.L.

응력 해석결과 초기 파이로 시동구간이 가스 발생구간보다 낮은 응력수준이 나타났지만 변형률결과를 파이로 시동구간이 가스발생구간보다 큰 수준이 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 응

력결과와 변형률결과와의 반대양상은 파이로 시동구간과 가스발생구간의 응력 해석결과와 해당재료의 재료강도를 확인하여 분석할 수 있다. 파이로 시동구간은 300Mpa의 응력과 1,000°C 정도의 온도가 나타났으며, 가스발생구간은 600Mpa의 응력과 600°C 정도의 온도가 나타났다. 터보펌프 재료인 INC-718는 700°C 전후로 항복응력이 급격하게 변화한다. 즉 700°C 전 온도에서는 높은 항복응력 수준인 800Mpa 이상의 항복응력을 가지고 있으며, 700°C보다 높은 온도에서는 항복응력이 급격히 감소하여 900°C 이상에서는 250Mpa 이하의 항복응력을 가지고 있다[8]. 즉 파이로 시동구간에서는 해당온도의 항복응력보다 높은 응력으로 소성변형률이 나타났으며, 가스발생구간에서는 해당온도의 항복응력보다 낮은 응력으로 탄성변형률만이 나타남을 확인할 수 있다.

### 3. 저주기 피로 해석

#### 3.1 변형률-수명법

변형률-수명법은 항복하중 근처의 높은 반복하중의 작용에 따른 구조물의 저주기 수명을 예측하기 위한 방법으로 소성 변형이 현저한 노치선단 및 고온 환경과 낮은 항복점을 갖는 재료의 피로수명 예측에 사용된다. 변형률-수명법에서 탄성변형률과 수명 관계로 널리 사용되는 Basquin 관계식과 소성변형률과 수명 관계로 널리 알려진 Coffin-Manson 관계식을 고려한 총변형률과 수명과의 관계식을 사용하며, 식 (1)과 같다[9].

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

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 피로연성지수를 의미한다. 위 식에서 우측 첫 번째 항은 탄성(elastic)변형의 효과를 나타내며, 두 번째 항은 소성(plastic)변형의 효과를 나타낸다. 변형률과 수명의 관계식인 식 (1)을 파단수명과 변형률에 대한 관계를 로그(log) 스케일로 그래프로 나타내면 Fig. 12와 같으며, 그래프에서  $\sigma'_f$ ,  $b$ ,  $\epsilon'_f$ ,  $c$ 는 각각 탄성선과 소성선의 절편과 기울기를 나타낸다.

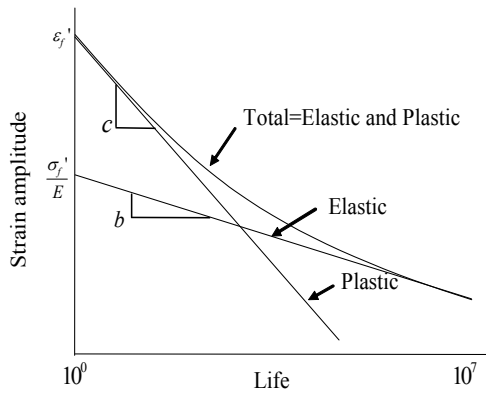


Fig. 12 Strain life curve (E-N curve)

일반적으로 재료의 피로특성은 완전교변의 일정진폭제어 시험으로 얻는다. 하지만 실제 구조물에 작용되는 하중은 일정진폭하중이 아닌 복합적인 하중이 작용한다. 복합적인 하중상태를 고려하여 저주기 피로 해석을 수행하기 위해 평균응력(mean stress)의 효과를 고려해야 한다. 변형률-수명법에서 평균응력을 고려하기 위하여 대표적으로 사용되는 방법은 S.W.T.(Smith Watson Topper)법과 Morrow법이 있다. Morrow법은 변형률이력이 탄성항이 지배적인 경우에 어울리는 방법이며, S.W.T.법은 최대응력이 인장응력인 경우 어울리는 방법이다. 본 연구에서는 소성변형률이 탄성변형률에 비해 지배적이며, 최대응력이 인장응력이므로 S.W.T.법을 사용하였다. S.W.T.법은 식 (2)와 (3)과 같다[10].

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

$$\sigma_{\max} = \frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_o \quad (3)$$

여기서,  $\Delta \sigma$ 는 응력진폭,  $\sigma_o$ 는 평균응력이다.

### 3.2 마이너 법칙(Miner's rule)

피로해석 시에는 하중이력의 작용에 따른 손상을 누적하기 위하여 다양한 누적손상법칙이 사용되고 있다. 이 중에서 가장 기본적이며 널리 사용되고 있는 방법은 식 (4)와 같이 표현하며, 선

형손상누적법칙중 하나인, 마이너 법칙(Miner's rule)이라 한다. 여기서  $n_i$ 는 각각의 변형률 수준(strain level)의 반복 횟수이고,  $(N_f)_i$ 는 각 변형률 수준에서의 수명으로서 변형률-수명 곡선에서 구해진다.  $D_i$ 는 손상지수(damage index)이며 피로손상의 정도를 나타낸다. 피로해석 시에는  $\sum D_i = 1$ 일 때 구조물이 파괴된다하며, 변형률 수명법에서는 초기 균열의 생성을 의미한다.

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

### 3.3 피로해석 결과

터보펌프 터빈의 최대 응력이 발생한 지점은 취약 지점인 터빈 블레이드 루트부근이다. 터빈 블레이드의 피로해석을 수행하기 위해 취약지점에 대한 변형률이력을 바탕으로 저주기 피로해석을 수행하였다. 정의된 변형률이력에 대한 저주기 피로해석에는 피로해석 상용프로그램인 MSC.Fatigue를 사용하였다. 피로 손상해석에는 상온 INC-718 피로데이터를 사용하였으며, 고온의 피로영향을 고려하기 위해 상온데이터를 50%까지 감소한 데이터를 이용하여 피로손상률을 산출하였다. 또한 응력해석 결과 최대응력이 인장응력으로 나타나므로 평균응력의 영향을 고려하기 위해 S.W.T.방법을 사용하였다. Fig. 13은 터빈 블레이드의 손상률 분포(damage distribution)를 나타내고 있으며, Table 1은 피로해석 결과를 나타내고 있다.

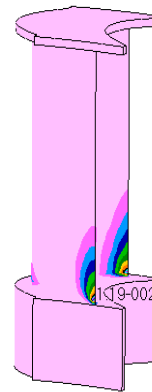


Fig. 13 Damage distribution

Table 1 Results of fatigue analysis

데이터 감소율	S.W.T.	
	손상률	피로수명
0%	0.011848	84
10%	0.014327	69
20%	0.017301	57
30%	0.021142	47
40%	0.028090	35
50%	0.037037	27

## 4. 크리프 해석

### 4.1 크리프

크리프는 재료가 특정 온도 및 하중에서 일정 시간 노출될 때 재료조직구조의 변화가 원인이 되어 영구변형이 일어나는 현상으로, 주로 고온에서 작동하는 부품에서 발생하는 현상이다. 크리프 손상에 영향을 미치는 요소는 응력, 온도와 그리고 시간이다. 이 세 가지 요소 중 온도와 시간을 변수로 설정하여 함수로 나타내는 라르손-밀러 파라미터(Larson-Miller parameter)가 크리프의 파단시간을 결정하는 함수로 식 (5)에 나타나 있다.

$$P = (T + 460)(C + \log t_r) \quad (5)$$

식 (5)의  $T$ 는 온도, 그리고  $t_r$ 은 크리프 파단시간을 의미한다. 일반적으로 니켈기반의 초내열합금에서는 상수  $C$ 값을 20으로 정하여 사용한다 [11]. 크리프 수명은 파단이 발생하는 시간과 작동시간의 비율을 이용하여 계산한다. 크리프 파단시간을 구하기 위해 라르손-밀러 마스터 곡선을 이용하며, 구조해석 결과 얻어진 응력과 식 (5)를 이용하여 크리프 파단시간(rupture time)을 계산하였다.

### 4.2 로빈슨 법칙(Robinson rule)

크리프 해석 시 정의된 하중사이클에 대한 크리프 손상률을 구하기 위해 가장 널리 사용하고 있는 방법은 로빈슨 법칙이다. 로빈슨 법칙은 식 (6)와 같이 구조물에 작용하는 온도와 응력에 대한 크리프 파단시간과 운용시간에 대한 비율을 이용하여 크리프 손상률을 산출한다.

여기서  $t_{operation,i}$ 는 정의된 응력과 온도에 대한 작동시간을 의미하며,  $(t_{rupture})_i$ 는 크리프 파단시간을 의미한다.  $D_i$ 는 손상지수(damage index)이며 크리프손상 정도를 나타낸다. 크리프 해석 시에는  $\sum D_i = 1$ 일 때 구조물이 크리프 파괴를 일으킨다고 정의한다.

$$\sum D_i = \frac{t_{operation,i}}{(t_{rupture})_i} \quad (6)$$

### 4.3 크리프 해석 결과

크리프 해석을 사용하기 위해 터보펌프의 지상시험 작동특성을 고려한 운용시간을 정의하여야 한다. 터보펌프 지상시험에는 초기 0.62초동안은 파이로 시동구간으로 정의하고, 이후 구간을 가스발생구간으로 정의한다. 크리프 해석은 각 구간에 대한 정의된 온도와 작용응력에 대하여 크리프 해석을 수행하였으며, 정의된 온도와 작용응력은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Temperature and stress condition

해석 구간	크리프 해석 조건	
	온도	작용 응력
파이로 시동	971.1°C	297.2Mpa
가스 발생기	533.4°C	492.0Mpa

구간별 정의된 온도와 작용응력을 이용하여 크리프 손상률 및 수명을 산출하기 위해 본 연구에서는 로빈슨 법칙을 사용하였다. 로빈슨 법칙은 식 (6)에 나타난 바와 같이 구간별 크리프 파단시간과 운용시간을 사용하여 크리프 손상률을 계산한다. 크리프 파단시간은 터보펌프 터빈 블레이드재료인 INC-718의 라르손-밀러 마스터 곡선(LMP, Larson-Miller parameter master curve)과 구간별 온도와 작용응력을 이용하여 산출하였다. Fig. 14는 INC-718의 라르손-밀러 마스터 곡선을 보여주고 있으며, 식 (7)과 (8)은 라르손-밀러 마스터 곡선의 변수인 INC-718의 라르손-밀러 파라미터와 작용응력과의 관계식을 보여주고 있다.

$$Stress(Mpa) = -87.068 \times (LMP) + 3862.3 \quad (7)$$

$$LMP = (T + 460) \times (20 + \log t_r) / 10^3 \quad (8)$$

계산된 크리프 손상률 및 파단시간, 그리고 구간의 운용시간은 Table 3에 나타나 있다. 크리프 해석결과 파이로 시동구간과 가스발생구간의 크리프 손상률의 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 각 구간별 크리프 손상률의 차이는 구간별 계산된 크리프 파단시간의 차이로 인해 발생한 것이라 할 수 있다.

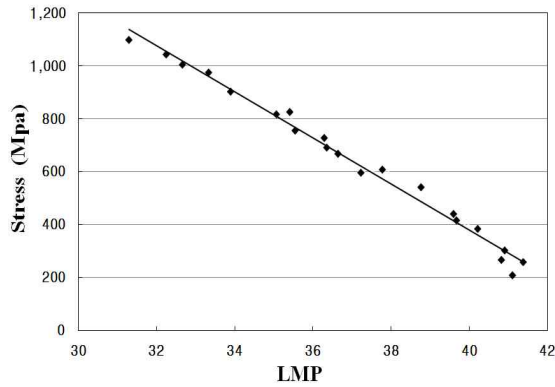


Fig. 14 LMP master curve of INC-718[11]

Table 3 Results of creep analysis

해석 구간	크리프 해석 조건		해석 결과
	운용시간 (sec)	파단시간 (hour)	
파이로 시동	0.62	5.19E-2	3.32E-3
가스 발생기	4.38	4.66E6	2.61E-10

크리프 현상은 일정수준이상의 응력과 온도의 영향으로 인해 발생한다. 일반적으로 작동온도가 해당 재료의 용융점(melting point)의 0.4배 이상에서는 온도의 영향으로 인해 크리프 현상이 발생하며, 해당 재료의 녹는점의 0.4배 이하에서는 항복응력(yield stress)이상에서 크리프 현상이 발생한다[13]. 일반적으로 INC-718의 용융점은  $1,300^{\circ}C$ 이고, 가스발생구간의 경우 온도는  $533.4^{\circ}C$ 으로 용융점의 0.41배정도이고 응력은 항복응력이하이다. 위와 같은 가스발생구간의 온도와 작용응력으로 인해 크리프 현상이 아주 적게 발생하였다고 할 수 있다. 또한 위와 같은 크리프 현상으로 인해 파이로 시동구간과 가스발생구간의 손상률이 큰 차이가 나타났다고 할 수 있다.

## 5. 크리프-피로

### 5.1 선형손상합산법

위에 서술한 바와 같이 고온 하중과 반복적인 기계하중 하에서 구조물의 수명을 예측하기 위해서는 크리프 및 피로거동에 따른 각각의 손상해석 뿐만 아니라 크리프-피로 영향에 의한 손상효과도 역시 고려해야 한다. 본 연구에서는 75톤급 액체로켓용 터보펌프 터빈 블레이드에 대한 크리프-피로 영향을 고려한 손상해석을 수행하기 위해 선형손상합산법을 이용하여 손상해석을 수행하였다. 선형손상합산법은 크리프 손상해석에 사용되는 로빈슨 법칙과 피로 손상해석에 사용되는 마이너 법칙을 합산하는 방법으로 계산과정은 간단하나 비교적 높은 정확도를 가지고 있어 일반적으로 많이 사용되고 있는 방법이다. 즉 선형손상합산법은 피로 손상률과 크리프 손상률을 선형적으로 더하는 방법으로, 전체 손상률이 1이 될 때 구조물이 파괴가 일어난다는 의미를 가지고 있다. 식 (9)은 선형손상합산법을 보여주고 있다.

$$\sum D_i = \sum \frac{n_i}{(N_f)_i} + \sum \frac{t_{operation,i}}{(t_{rupture})_i} \quad (9)$$

### 5.2 손상 해석 결과

75톤급 액체로켓용 터보펌프 터빈의 지상시험 조건에 대한 크리프-피로 영향을 고려한 손상 해석을 위해 크리프 손상률과 피로 손상률을 계산하였다. 또한 크리프-피로 영향을 고려하기 위해 선형손상법칙을 사용하여 크리프-피로 손상해석을 수행하였다. 크리프-피로의 영향을 고려한 손상률과 크리프와 피로 각각의 영향의 정도는 Table 4에 나타나 있으며, 데이터 감소에 따른 저주기 피로만을 고려한 수명과 크리프-피로의 영향을 모두 고려한 수명을 나타낸 결과는 Fig. 15에 나타나 있다. 해석 결과 저주기 피로 상온 데이터를 사용한 경우 크리프의 영향이 21.89%가 나타났으며, 저주기 피로데이터의 감소 비율에 따라 크리프의 영향이 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 저주기 피로 데이터의 감소로 인해 발생하는 저주기 피로 손상률의 증가로 인해 발생한 크리프의 영향의 감소라 할 수 있다.



Table 4 Total damage, fatigue, and creep influence

데이터 감소율	Total Damage	Fatigue Influence	Creep Influence
0%	0.015169	78.11%	21.89%
10%	0.017647	81.18%	18.82%
20%	0.020622	83.90%	16.10%
30%	0.024462	86.43%	13.57%
40%	0.031411	89.42%	10.58%
50%	0.040358	91.77%	8.23%

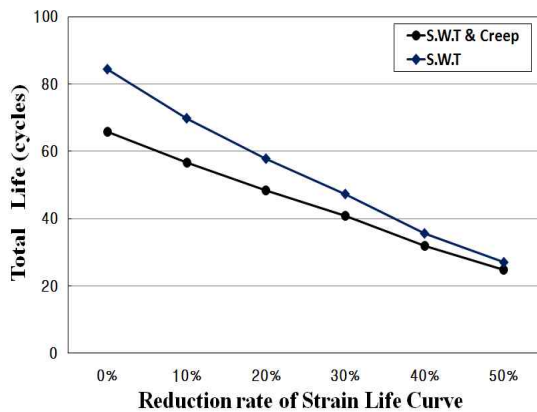


Fig. 15 Results of life prediction

### 6. 결 론

본 연구에서는 높은 열적, 기계적 하중을 받는 75톤급 액체로켓용 터보펌프의 지상시험조건에 대한 손상해석을 수행하였다. 우선 터보펌프 지상시험 구동특성을 고려한 구동사이클을 정의한 후, 해석 지점을 선정하였다. 선정된 해석지점에 대하여 대류열전달 계수, 주변온도분포, 열전도도를 이용하여 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 해석결과 획득한 절점별 온도분포를 고려하여 터보펌프 터빈 블레이드에 대한 응력해석을 수행하였다. 고온 환경에서 작동하는 구조물의 손상의 주된 원인인 크리프손상과 피로손상, 그리고 크리프-피로 손상을 분석하기 위해 취약지점으로 선정된 터보펌프 터빈 블레이드 루트부근의 각각의 손상률을 산출하였다. 또한 크리프-피로 영향을 고려하기 위해 선형손상합산법을 이용하여 터

보펌프 터빈 블레이드의 전체 손상을 및 수명을 산출하였다. 구조해석결과 온도의 영향으로 발생하는 재료강도저하의 원인으로 낮은 작용응력이지만 높은 온도에서 구동하는 파이로 시동구간에서 높은 작용응력으로 구동하는 가스발생구간보다 높은 변형률이력이 나타남을 확인하였다. 크리프 해석 결과 파이로 시동구간에서는 높은 온도로 크리프 손상률이 크게 나타났으며, 가스발생구간에서는 낮은 온도와 이에 대한 항복응력이하의 작용응력으로 인하여 크리프 손상률이 아주 적게 나타남을 확인하였다. 크리프-피로 선형손상합산법을 채택하여 크리프-피로영향을 고려한 손상률을 산출한 결과 피로의 영향이 크리프의 영향보다 크게 나타났으며, 저주기 피로 데이터의 감소에 따라 피로손상률의 증가로 크리프의 영향이 감소하는 경향이 나타남을 확인하였다.

### 후 기

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

### 참고문헌

[1] Majumdar, S., "Low-Cycle Fatigue and Creep Analysis of Gas Turbine Engine Components," *Journal of Aircraft*, Vol. 12, No. 4, April 1975, pp. 376~382.

[2] Chen, L. J., Gao, G., Tian, J. F., Wang Z. G., Zhao, H. Y., "Fatigue and Creep-Fatigue Behavior of a Nickel-Based Superalloy at 850 °C," *International Journal of Fatigue*, 1998, pp. 543~548.

[3] Mahadevan, S., Mao, H., Ghiocel, D., "Probabilistic Simulation of Engine Blade Creep-Fatigue Life," *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, April 2002, pp. 22~25.

[4] AMSE Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NH Class 1, ASME, New York, 1998.

[5] Yaguchi, M., Nakamura, T., Ishikawa, A., Ashada, Y., "Creep-Fatigue Damage Assessment by Sequent Fatigue Straining," *Nuclear Engineering and Design*, 1996, pp. 97~106.

- [6] Viswanathan, R., "Damage Mechanism and Life Assessment of High-Temperature Components," ASM international, 1989, pp. 121~135.
- [7] Park, S. Y., Seol, W. S., "Numerical Analysis on the Startup of a Rocket Engine," *Journal of the Korean Society Propulsion Engineers*, Vol 11, 2007, pp. 60~71.
- [8] Lee, K. O., Lee, S. B., "Dynamic Strain Aging under Tensile Loading Conditions in Some High-Temperature Alloys," *KSME*, June 2006, pp. 2754~2758.
- [9] Stephens, R. I., Fuchs, H. O., Fatemi, A., Stephens, R. R., "Metal Fatigue in Engineering," Wiley & Sons, 2001, pp. 93~121.
- [10] Bannantie, J. A., Comer, J. J., Handrock, J. L., "Fundamentals of metal fatigue analysis," Prentice-Hall, 1989, pp. 40~87.
- [11] Bartolotta, P. A., Bowman, R. R., Kruse, D. L., Halford, G. R., "Long-term durability analysis of a 100,000+ HR Stirling Power Converter Heater Head," *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit*, Vol. 1, 2000, pp. 259~265.
- [12] Evans, R. W., Wilshire, B., "introduction to Creep," Institute of materials, 1993, pp. 46~57.
- [13] Cope, D., Yazdani, S., Ju, J. W., "A Method to Generate Damage Functions for Quasi-Brittle Solids," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 72, 2005, pp. 553~557.
- [14] Kim, D. H., Kim, J. H., Sa, J. W., Lee, Y. S., Park, C. K., Moon, S. I., "Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor," *Materials Science and Engineering A*, 483-484, 2008, pp. 262~265.