

열-기계하중 적용 속도 변화에 따른 터빈휠의 수명 변화 연구

박훤* · 김현재* · 김지수* · 신동익* · 류시양* · 신종섭*

A Study on the influence of the rate of thermo-mechanical loads on the fatigue of turbine wheel

Hwun Park*[†] · Hyunjae Kim* · Jeosoo Kim* · Dongick Shin* · Shiyang Ryu* · Jongsub Shin*

ABSTRACT

A turbine wheel undergoes high heat flux and centrifugal force when a gas turbine starts. The temperature and stress of the turbine wheel increase rapidly, and the time point and rate of them may not coincident. The difference of heating and rotating rates influences the life of turbine wheel. We conducted thermo-mechanical fatigue analysis with finite element methods to study the influence. The low acceleration and deceleration of the wheel extends the life. If the turbine wheel decelerate faster than cooling, the life increases.

초 록

가스터빈 시동 시 터빈휠은 급격한 온도 변화와 원심하중을 받게 된다. 터빈휠 온도와 응력은 빠르게 증가하게 되며, 적용되는 시점과 정도가 서로 다를 수 있다. 온도 및 원심력 적용 속도 차이에 따른 수명 변화를 연구하기 위해서 열-기계피로 유한요소해석을 수행하였다. 시동 시 터빈휠 속도가 천천히 증가하고, 중단 시 천천히 감속하면 상대적으로 수명이 길어진다. 만약 속도 감소가 냉각속도보다 빠르면 오히려 수명이 증가한다.

Key Words: Turbine wheel, Thermo-mechanical fatigue, Low cycle fatigue

1. 서 론

가스터빈에서 고온 연소가스가 팽창하면서 터

빈휠을 회전시키고 운동 에너지를 생성하게 된다. 이때 터빈휠 블레이드를 따라서 고온, 고압의 연소가스가 흐르게 되고 동시에 터빈휠 뒷면에서는 냉각 공기가 흐르게 된다. 복잡한 열분포로 인하여 다축 열응력이 발생한다. 또한, 연소가스에서 받는 압력과 회전을 하게 되면서 발생

* 한화테크윈

† 교신저자, E-mail: hwun.park@hanwha.com

하는 원심하중으로 인하여 터빈휠에는 응력이 발생한다. 특히 가스터빈 시동 그리고 중단시 고온환경에서 터빈휠에 높은 교번 응력이 발생하기 때문에 손상이 발생하고 수명이 크게 감소하게 된다. 터빈휠에 열이 전달되어 가열되는 시점과 회전속도가 증가하여 원심력이 발생하는 시점에 차이가 있으므로, 정적 상태를 가정한 피로 해석으로는 정확하게 피로 평가를 수행 할수 없다[1,2]

시간에 따른 열과 기계하중의 변화를 동시에 고려하는 열-기계피로 모델을 적용해야 정확하고 신뢰성 있는 평가 결과를 얻을 수 있다.

2. 열기계피로 모델

본 연구에서 사용된 열기계 피로 모델은 고온물성치 및 크리프 발생에 따른 피로수명 저하가 반영된 수정된 Coffin-Manson 피로 모델이다. 열기계피로 수명에 큰 영향을 미치는 각 조건의 위상차 효과도 반영이 된다. 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_{f,tmf} (2N_f)^{c_{tmf}}$$

$$\varepsilon_{f,tmf} = \frac{\varepsilon_f}{(1 - \psi_1)^{c_{tmf}}}$$

$$c_{tmf} = \frac{c}{1 - \psi_2}$$

$$\psi_1 = (1 - t_{in}) \cos(\phi)$$

$$\psi_2 = t_{out} \sin(\phi)$$

σ_f , ε_f , b , c 는 Coffin-Manson 피로 모델 계수이고 ψ , θ 는 열과 기계하중 적용 위상차를 나타낸다. 이 위상차에 따른 수명저하는 Fig. 1에 나타나 있다. 역위상에 가까울수록 수명이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

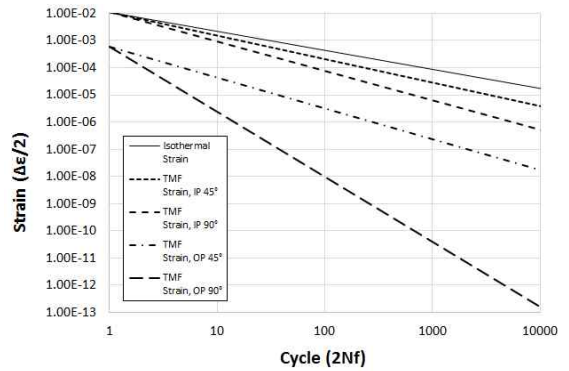


Fig. 1 Life fluctuation by Phase of Thermo-Mechanical Loadings in Low Cycle

장시간 하중을 받게 되면 크리프가 크게 발생하면서 응력 완화 현상이 발생하게 된다. 이것은 상기 피로모델에서 중응력이 감소하는 효과를 가져오게 된다. 이러한 중응력 감소에 따른 피로수명 변화도 반영되었다.

터빈휠은 연소가스 팽창에 의해서 일을 생성하기 때문에, 적용되는 온도와 응력은 동위상이라고 할 수 있다. 가스터빈 시동시 고온 연소가스가 터빈휠에 도달하면서 순간적으로 온도가 증가하게 된다. 이때 터빈휠의 가속도는 로터의 관성모멘트 및 로터와 연결되는 부가장치에 따라 달라진다. 가스터빈 중단시에는 찬 공기가 유입되면서 터빈휠은 냉각되고 속도 역시 자연적으로 감소한다. 이때 감속도도 로터 형상에 따라 달라진다.

이러한 터빈휠 가감속 변화에 따라서 터빈휠이 받는 열과 하중에 시차가 생기게 되고 이것은 터빈휠의 수명에 영향을 미치게 된다.

3. 터빈휠 열기계피로 해석

본 연구에서는 가열 및 냉각 속도는 일정하다고 가정하였으며, 회전 가속 및 감속에 변화를 주었다. Figure 2는 이러한 터빈휠에 발생하는 온도 및 속도 변화를 보여주고 있다. 시동 및 중단시 각 3가지 가속/감속 조건을 선정하였으며,

각 경우 발생하는 손상 및 해당 수명을 산출 하였다.

Stop	(a)	10.02	9.98%
	(b)	6.16	16.3%
	(c)	185.9	0.054%

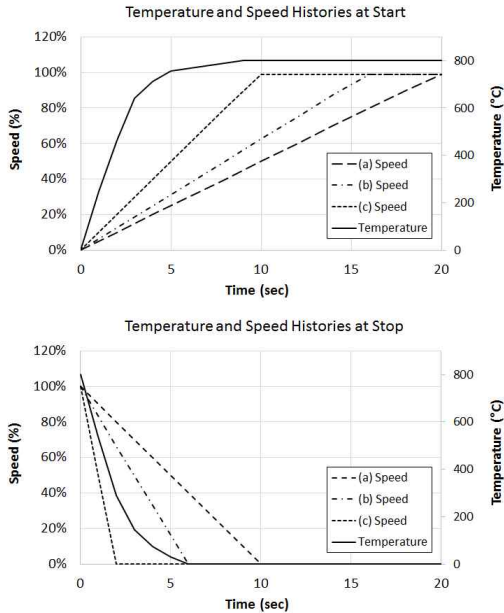


Fig. 2 Temperature and Rotating Speed Variation of Turbine Whell at Start and Stop

터빈휠 소재는 Inconel 738LC이며, 문헌조사에서 수록된 물성치를 적용하였다. 유한요소해석은 fe-safe를 이용하여서 수행하였다[3,4].

Table 1은 각 속도 조건에서 터빈휠에 발생하는 손상과 이에 따른 수명을 보여주고 있다. 가동시에는 터빈휠 속도가 천천히 증가하는 것이 더 긴 수명을 가지다는 것을 알수 있다. 중단시에도 천천히 감속되는 경우가 수명이 길어지는 것을 보여준다. 만약 냉각속도 보다 빠른 속도로 속도가 감소하면 오히려 수명이 더 증가하는 것을 보여 주고 있다.

Table 1. Rate of Turbine Speed and Minimum Life

	Speed	Min. Life (Hr)	Damage (%)
Start	(a)	7.89	12.7%
	(b)	11.36	8.80%
	(c)	149.7	1.38%

4. 결과 분석 및 결론

해석결과와 터빈휠의 가감속에 따른 수명 차이를 명확하게 보여 주고 있다. 전반적으로 열과 응력은 동위상이지만, 터빈휠 부분별 냉각속도 차이에 따른 압축응력을 발생한다는 것을 감안하면, 요소단위에서 역위상인 부분이 존재한다. 이러한 위상차이가 수명의 차이를 가져왔다고 여겨진다.

열전달 속도는 이차 유로 변경과 열차폐코팅 적용으로 조절할 수 있고, 로터 가감속은 판성모멘트 조절등 기계적 부가 장치로 조절이 가능하다. 만약 가스터빈 시동 및 중단에서 발생하는 수명 손상이 크다고 판단되면, 이러한 변수를 조절하여서 수명을 연장시키는 것이 가능하다.

참고 문헌

1. Sehitoglu H. "Thermo-Mechanical Fatigue Life Prediction Method", ASTM STP 1122, pp47-76
2. C. Cai, P. K. Liaw, M. Ye, J. Yu, "Recent Developments in the Thermomechanical Fatigue Life Prediction of Superalloys", JOM, 1999
3. 에릭 플러리, 하정수, 현중섭, 장석원, 정훈, "가스터빈 블레이드용 IN738LC의 열기계피로수명에 관한 연구" 대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집
4. fe-safe User Manual, Dassault Systems