

9.5톤급 액체추진엔진용 터보펌프 시스템의 로터다이나믹 해석

양 훈 준* · 김 경 호* · 김 영 수* · 우 유 철*

The Rotordynamic Analysis of TurboPump System for 9.5ton thrust Liquid Rocket Engine

Hong-Jun Yang* · Kyoung-Ho Kim* · Young-Soo Kim* · Yoo-Cheol Woo*

ABSTRACT

In this paper, we investigate the rotordynamic characteristics of turbopump system for 9.5ton thrust liquid rocket engine. A finite element method is used to analyze the vibrational characteristics of a rotor-bearing system. The turbopump rotating system is modeled by shaft with sixty elements, nine rigid disks, four ball bearings and four floating ring seals. The calculation results show that the margin of 1st critical speed is increased from 12% to 68% by use of elastic damping ring. In addition, the margin of the 2nd critical speed near the operating speed is increased from 30% to 63% by the stiffness and damping of floating ring seals.

1. 서 론

터보펌프는 액체로켓엔진(Liquid rocket engine)에서 엔진 연소실에 추진제를 안정적으로 공급하기 위한 시스템으로서, 산화제 펌프, 연료펌프, 터빈이 하나의 축으로 연결되어 단일 블록 내에 장착되어진다.^[1] 터보펌프의 작동은 별도의 가스발생기로부터 생성된 고온 고압 가스 팽창에 의한 터빈의 구동으로 펌프가 작동하여 로켓 엔진의 주연소실로 고압의 산화제와 연료를 주입하게 된다. 본 연구 대상인 고압터보펌프는 50,000rpm의 작동회전수에서 작동하므로 이에 동반하여 발생하는 높은 하중 및 진동에 대한 안전성 확보가 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 터보펌프의 개발에 있어서 시스템의 안정화에 대한 평가를 목적으로 로터다이나믹 해석에 따른 작동특성에 대해 연구하였다.

2. 본 론

2. 1 축의 해석 모델

축의 해석방법에는 전달 행렬법에 의한 방법과 유한요소법에 의한 방법이 주로 사용되어 왔다.^[4] 본 연구에서는 유한요소 모델링에 의한 방법을 사용하여 해석을 수행하였으며, 고압터보펌프 회전체의 3차원 모델은 Fig. 1에서 나타난 바와 같다. 터보펌프 회전체는 산화제를 압축하기 위한 산화제 펌프 부분과 연료를 압축하기 위한 연료펌프 부분, 그리고 회전체를 구동하기 위한 터빈 부분으로 나누어지며 산화제펌프 축과 연료펌프 축은 스플라인(Spline) 축으로 연결되어 있다. 해석에서 사용된 모델은 Fig. 2에 나타나 있으며 60개의 축요소, 9개의 강체 디스크, 4개의 볼베어링(Ball bearing), 그리고 4개의 플로팅 링 시일(Floating ring seal)로 구성되어 있으며, 토크 전달축의 특성을 고려하기 위해서 전체 로터를 3개의 축으로 모델링하였다. 또한

* 현대모비스 기술연구소 (Hyundai Mobis)

토크 전달축의 스플라인 연결부는 스프링 요소를 사용하여 모우먼트 강성을 조절할 수 있도록 하였으며, 회전체해석 전용프로그램인 RODAP을 이용하여 해석을 수행하였다.

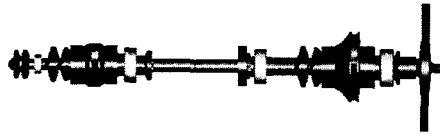


Fig. 1 고압터보펌프 회전체 3차원 모델

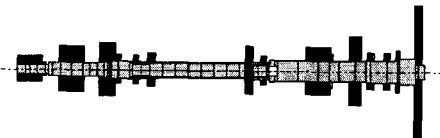


Fig. 2 고압터보펌프 회전체 해석모델

2. 2 해석에 사용된 물성 데이터

터보펌프 회전체의 재질에 대한 물성값은 Table. 1과 같다^[1]. Table. 1에서 알수 있듯이 터빈만 소결합금으로 이루어져 있고 나머지 다른 요소들은 모두 Steel로 이루어져있다. 재질에 대한 물성값은 터보펌프의 작동온도가 93~110K의 극저온이기 때문에 온도에 따른 영향을 고려하였다. 즉, Steel의 경우 온도에 따른 탄성계수(E)와 프와송비(ν)를 사용하였다. 또한 해석에 사용되는 주요 데이터인 회전체 주요부품의 Mass, Mass . Center, Moment of inertia(Ixx, Iyy, Izz)는 Table. 2에 주어져 있으며, I-DEAS 8.0 프로그램을 사용하여 Fig. 1의 터보펌프 회전체 3차원 모델을 통하여 계산을 수행하였다. 그리고 고압터보펌프 시스템에 사용된 베어링은 Table. 3과 같이 강성이 다른 3종류의 볼 베어링을 사용하였으며, 베어링의 강성을 조절하기 위해 터빈부의 베어링 #1에 탄성 댐핑링(Elastic damping ring)을 적용하였다.

Table. 1 재질의 물성값

재 질	E (kg/mm ²)	ν	ρ (kg/mm ³)
소결합금	0.000232	0.31	8350000
Steel	0.000214	0.288	7900000

Table. 2 고압터보펌프 회전체 주요부품의 특성값

부품명	Mass (kg)	Center (m)	Ixx (1E-6)	Iyy (1E-6)	Izz (1E-6)
Booster inducer	0.054	0.015	6.626	5.234	5.412
Inducer (LOX)	0.034	0.064	12.30	11.99	11.07
Pump wheel (LOX)	0.324	0.105	156.7	157.6	158.2
Impeller (LOX)	0.060	0.157	11.78	7.215	7.214
Pump wheel (LCH4)	0.095	0.271	37.67	20.31	20.29
Inducer (LCH4)	0.090	0.352	35.29	38.61	35.55
Impeller (LCH4)	0.675	0.396	555.8	442.7	442
Hub	0.041	0.446	12.46	6.376	6.342
Turbine	1.382	0.498	4077	2050	2.050

Table. 3 볼 베어링 강성

NO	Stiffness	비 고
1	8390	C = 850kg/mm (Elastic damping Ring 적용)
2,3	6815	
4	2359	

2. 3 임계속도 해석

회전체 시스템에서 회전체의 고유진동수와 작동 회전수가 일치되는 경우 시스템에 급격한 진동이 발생하는데 이러한 속도를 임계속도(Critical speed)라고 하며, 일반적으로 회전체 설계시에 계산된 임계속도는 터보펌프 회전체의 작동회전수와 최소한 20~30% 이상의 분리여유(Margin)를 확보^[2]하여야 한다. 본 해석에서는 탄성 댐핑링을 적용하지 않은 경우와 탄성 댐핑링을 적용한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 탄성 댐핑링을 적용하지 않은 해석 결과는 Fig. 3의 Campbell Diagram에 나타나 있으며, 1차 임계속도는 44,000rpm으로 작동 회전수

50,000rpm에 12%의 분리여유를 가지는 터빈부의 강제모드를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 임계속도에 대한 분리여유의 확보를 위해 탄성 댐핑링을 적용하여 터빈부의 베어링 강성을 축소시킴으로서 Fig. 4와 같이 1차 임계속도를 작동회전수 아래에 존재하도록 하여 임계속도를 지날 때 발생하는 진동에너지를 축소시켜 진동에 의한 안전성을 확보하였다. 탄성 댐핑링을 적용하였을 경우 1차 임계속도는 15,769rpm이며 68%의 분리여유를 나타내어 탄성 댐핑링에 대한 설계 타당성을 입증하고 있다^[5]. 또한 해석 결과에 있어서 작동회전수와 가장 근접한 임계속도는 산화제 펌프부의 굽힘모드를 가지는 2차 임계속도이며, 이 경우의 분리여유도 30%로써 충분한 여유를 가지고 있음을 알 수 있었다. 임계속도에 따른 모드 형상은 Fig. 5 ~ Fig. 8에 나타나 있다.

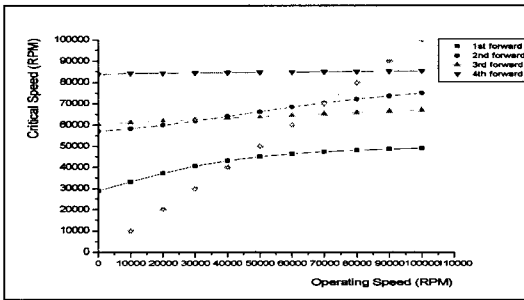


Fig. 3 Campbell Diagram (Ball bearing)

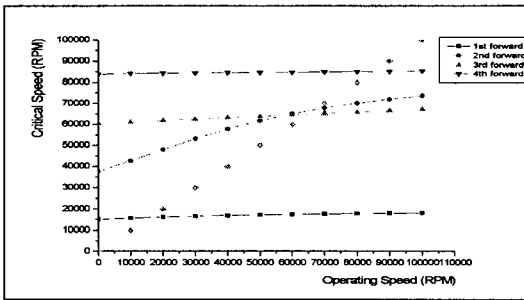


Fig. 4. Campbell Diagram (Elastic damping ring)

Table. 4 임계속도 해석 결과

No	Critical Speed	Mode Shape
1	44000	15769 Angular turning of a turbine
2	65080	65060 Oxidizer Pump rotor bending
3	70400	67040 Fuel Pump rotor bending
4	85200	85100 Spline coupling shaft bending

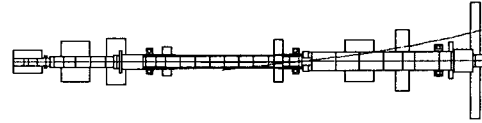


Fig. 5 1차 Critical Speed Mode Shape

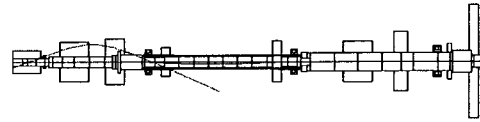


Fig. 6 2차 Critical Speed Mode Shape

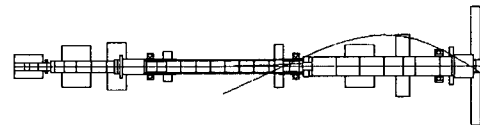


Fig. 7 3차 Critical Speed Mode Shape

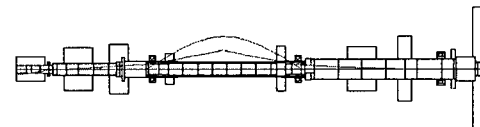


Fig. 8 4차 Critical Speed Mode Shape

2. 4 플로팅 링 시일을 고려한 임계속도 해석

플로팅 링 시일을 고려한 해석결과는 Fig. 9의 Campbell Diagram과 Table. 5에 나타나 있으며 각 임계속도에 따른 모드 형상은 Fig. 5 ~ Fig. 7에 나타나 있다. 플로팅 링 시일을 고려한 해석의 경우는 플로팅 링 시일이 회전체의 지지부 기능을 함으로써 지지강성의 증가로 인해 임계속도를 증가시키는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 작동 회전수와 임계속도의 분리여유를 증가시켜 진동에 의한 불안정성을 더욱 낮추는 결과를 가져옴을 알 수 있었다.

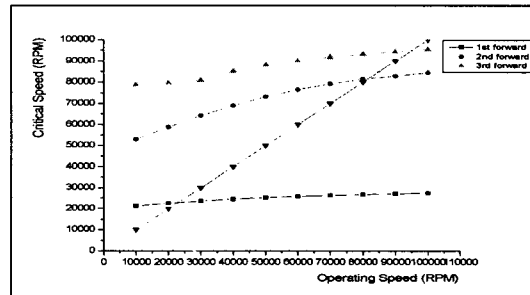


Fig. 9 Campbell Diagram (Floating Ring Seal)

Table. 5 임계속도 해석 결과 (플로팅 링 실)

No	Critical Speed	Mode Shape
1	22900	Angular turning of a turbine
2	81300	Fuel Pump rotor bending
3	94620	Oxidizer Pump rotor bending

3. 결 론

액체 로켓 엔진에 추진제를 공급하기 위한 고압터보펌프의 회전체를 대상으로 로터다이나믹 해석을 수행하였다. 일반적으로 임계속도의 위치는 축의 강성, 디스크의 질량 및 베어링 지지부의 강성을 조절하는 방법이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 사용된 고압터보펌프에서는 탄성 댐핑링을 적용함으로써 베어링 지지부의 강성을 조절하여 임계속도에 대한 분리여유를 확보하였다. 위의 해석결과에 따르면 탄성 댐핑링을 적용함으로써 1차 임계속도가 44,000rpm에서 15,769rpm으로 낮아짐에 따라 작동회전수와 분리여유를 12%에서 68%로 향상시키는 결과를 도출하였다. 또한 작동 회전수와 가장 근접한 2차 임계속도의 경우도 65,060rpm으로 30%의 분리여유를 가짐으로써 진동에 의한 영향에 대한 안정성을 입증하였다. 그리고 플로팅 링 시일을 적용한 경우는 플로팅 링 시일에 의한 지지부의 강성 증가로 인해 임계속도가 높아져 작동회전수와 분리여유가 더욱더 증가하는 결과를 나타내었다. 따라서 현 설계에서의 고압터보펌프 회전체는 임계속도에 대해 안정적이라고 할 수 있으며, 제작시 적절한 밸런싱이 수행된다면 임계속도에 의한 진동문제는 예상되지 않는다.

후 기

이 논문은 민군겸용기술개발 과제인 “고압터보펌프 개발” 사업의 일환으로 수행된 내용의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 우유철 “액체로켓엔진용 고압터보펌프개발”

2nd. Sym. Space Launch Technology, March 2001.
 2) John M. Vance, “Rotordynamics of Turbomachinery”, John Wiley & Sons. Inc.
 3) Fredric F. Ehrich, " Handbook of Rotordynamics", McGRAW-HILL.INC.
 4) William T. Thomson, "Theory of Vibration with Applications", Prentice Hall, 1990.
 5) Keldysh Research Center, “Critical Speed of Shaft Stress Analysis of Pumps And Turbine (2D/3D)”, July 2000.