Research Paper

DOI: https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.6.061

7톤급 터보펌프 산화제펌프의 고주파 신호 분석

배준환^{a,b} · 최창호^a · 최종수^{b,*}

High Frequency Signal Analysis of Oxidizer Pump for 7-tonf Turbopump

Joon-Hwan Bae^{a,b} · Chang-Ho Choi^a · Jong-Soo Choi^{b,*}

^a Turbopump Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea ^bDepartment of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea ^{*}Corresponding author. E-mail: jchoi@cnu.ac.kr

ABSTRACT

7-tonf turbopump real-propellant tests in Naro Space Center were conducted and high-frequency signals from an accelerometer and pressure sensors installed on the casing and the inlet/outlet pipeline of LOX pump were analyzed to estimate the structural and hydrodynamic stabilities. Waterfalls, frequency spectrums and RMS(Root Mean Square) values of the measured signals were calculated and characteristic instability frequencies by the rotating cavitation and the rear floating ring seal(F.R.S) were investigated. Static pressures of the inlet/outlet pipeline and an acceleration of the pump casing are strongly affected on pressure fluctuation induced by the rear floating ring seal in the leakage path. Despite the acceleration RMS value seems totally small, the rotating-speed-related synchronous frequency affecting the shaft instability is distinctly observed in the frequency contour.

초 록

7톤급 터보펌프 실매질시험에서 계측된 고주파 신호인 가속도와 압력섭동에 대한 주파수 분석 (waterfall, frequency spectrum), 실효값(RMS) 계산 등의 신호 처리를 통해 산화제펌프의 신뢰성을 평가하였다. 계측된 압력섭동 신호 분석을 통해 산화제펌프의 누설 유로에 위치한 산화제 후방 플로 팅 링에 의한 강한 압력섭동이 발생하였고 이는 산화제펌프 입구 및 출구 압력과 가속도 신호에도 영향을 주는 것을 확인하였다. 터보펌프의 가속도 실효값 계산을 통해 정격 운용 조건에서의 터보펌 프는 양호한 진동 성능을 보여주고 있으며 가속도 회전수 성분 중 축계에 영향을 주는 회전수 동기 주파수 성분이 강하게 나타나는 것을 확인하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Acceleration(가속도), Pressure Fluctuation(압력섭동), High Frequency Signal Analysis(고주파 신호 분석), Floating Ring Seal(플로팅 링 실)

Received 22 July 2020 / Revised 23 October 2020 / Accepted 27 October 2020 Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 [이 논문은 한국추진공학회 2020년도 춘계학술대회(2020. 7. 16-17), 온라인 학술대회) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

LA104	: Acceleration	sensor	on	LOX	pump
	volute				

- LP113 : Static pressure sensor of LOX pump rear floating ring
- *LP115* : Static pressure sensor of LOX pump impeller exit
- FOIP : Fluctuation of Oxidizer Inlet Pressure
- FOEP : Fluctuation of Oxidizer Exit Pressure
- RMS : Root Mean Square

현재 개발 중인 한국형 발사체는 액체 엔진을 탑재하고 있으며 높은 탑재 하중을 얻기 위해 고압의 탱크를 통해 추진제를 가압하는 대신 저 압의 탱크와 터보펌프를 이용하여 산화제와 연 료를 연소기에 공급하여 추진력을 얻게 된다. 이 때 터보펌프는 작동 유체에 따라 극저온, 상온, 고온의 다양한 온도 조건에서 높은 회전수로 작 동하며 저압의 추진제를 높은 압력으로 가압하 여 연소기에 공급하므로 높은 신뢰성이 요구된 다. 한국형 발사체 3단 엔진에 적용될 7톤급 터 보펌프는 기존에 개발된 30톤급 및 75톤급 터보 펌프를 기반으로 현재 개발 중에 있으며 설계 및 제작을 거쳐 현재 비행 모델에 대한 성능 검 증 시험이 진행되고 있다[1-3].

터보펌프의 성능 검증을 위해 한국항공우주연 구원에서는 나로우주센터에 터보펌프 실매질시 험설비를 구축하여 2014년부터 액체산소(LOX)와 케로신(Kerosine)을 추진제로 사용하여 7톤 및



Fig. 1 Layout of 7-tonf oxidizer pump and sensors.

75톤급 터보펌프의 실매질시험을 수행하고 있다 [4-6]. 터보펌프 실매질시험에서는 터보펌프의 효 율, 수두, 유량비 등의 성능을 평가하기 위해 터 보펌프 내, 외부에 다수의 압력, 온도, 유량 계측 센서를 설치하여 저주파 신호를 계측하고 있으 며 추력 베어링 부근에서의 가속도 신호와 입구, 출구 배관에서의 압력섭동에 대한 고주파 신호 를 계측하여 터보펌프의 구조 및 유체 성능 관 점에서의 신뢰성을 평가하고 있다.

터보펌프 시험 중 나타날 수 있는 캐비테이션 이상 거동에 의한 극심한 진동이나 플로팅 링 실의 불안정성에 기인한 마모 및 파손과 같은 터보펌프의 비정상적 작동은 주로 고주파 신호 인 가속도와 압력 섭동 신호의 주파수 분석을 통해 발생 시간, 빈도수, 거동 주기, 신호 강도 등 의 특징들을 파악할 수 있다. 이러한 터보펌 프의 불안정한 현상에 대한 고주파 신호 분석은 시험 중 내부 관찰이 어려운 캐비테이션 현상이 나 플로팅 링 실의 운동에 관한 학문적 이해와 더불어 실제 시험 과정에서 발생할 수 있는 비 정상적인 작동을 감시하고 관리하는 시험 시스 템의 구현에 큰 도움을 줄 수 있다.

본 연구에서는 터보펌프 실매질시험설비에서 수행된 7톤급 터보펌프 성능 시험에서 계측된 산화제펌프의 가속도 및 압력섭동 신호를 분석 하여 정격 운용 조건에서의 주파수 특성, 가속도 실효값(RMS), 회전수 동기 신호 및 고조파 (harmonics) 특성 등을 살펴보았으며 이를 통해 터보펌프 작동 시 발생하는 고주파 신호의 특징 및 특이 현상에 대해 조사하였다.

2. 산화제펌프 구성 및 시험 방법

2.1 산화제펌프 구성

한국형발사체 3단 엔진에 사용될 7톤급 터보 펌프의 산화제펌프는 Fig. 1과 같이 간략히 표현 된다[7]. 산화제펌프의 작동 유체는 액체 산소이 며 3개의 날개로 구성된 인듀서와 주날개 여섯 개, 보조날개 여섯 개로 구성된 임펠러로 구성된 다. 인듀서와 임펠러를 지지하기 위해 전, 후방 에 두 개의 베어링이 설치되어 있으며 베어링을 냉각하기 위한 누설 유로가 펌프 내부에 자리 잡고 있다. 베어링 냉각 유량은 누설 유로 내에 있는 전, 후방 플로팅 링 실에 의해 조절되며 플 로팅 링 실의 형상과 크기에 따라 터보펌프의 성능은 크게 변하게 된다[8]. 플로팅 링 실이 작 동 환경 조건에서 형상, 크기, 노즈(nose) 등이 적절히 설계된 경우 펌프의 시동 시 작동 유체 에 부유하여 편심 위치를 능동적으로 찾은 후 케이싱에 부착된다. 또한 축계 진동에 의한 축계 와 플로팅 링 실의 간극 변화에 의해 발생하는 반경 방향의 유체력에 의해 플로팅 링은 축계 의 움직임과 동기화 되어 펌프의 정상 운행 중 회전축계와 접촉하지 않으므로 액체 산소 내에 서 발화의 위험이 있는 접촉실에 비해 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다[9-11].

2.2 시험 개요

터보펌프 실매질시험에서의 가속도 및 압력섭 동 신호 계측을 위한 측정 장치는 NI사의 PXIe-4499를 사용하였다. 고주파 계측 장비의 샘 플율(sampling rate)은 25.6 kHz이며 계측된 데 이터는 0.5 초 간격, 주파수 분해능 2 Hz 간격으 로 이산 푸리에 변환(discrete fourier transform) 을 하여 주파수 분석 작업을 수행하였다. 계측된 데이터의 실효값은 주파수 변환 주기와 동일한



Fig. 2 H.F Sensors spec & position on LOX pump.

주기(0.5초)로 수집된 고주파 신호에 대해 10-5,000 Hz 또는 10-10,000 Hz의 대역통과필터 (band pass filter)를 적용하여 Eq. 1과 같이 계산 되며 Parseval's theorem에 따라 대역통과필터 범위 내의 이산 푸리에 변환 주파수 성분(X(f))의 제곱 합의 평균 제곱근으로 구해진다. 여기서 f1 과 f2는 대역 통과 필터의 최소 주파수와 최대 주파수를, N은 한 주기 내의 데이터 수를 의미 한다.

$$RMS = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{f_1}^{f_2} |X(f)|^2}$$
(1)

신호 계측에 사용된 가속도 및 압력섭동 센서 의 종류, 위치, 계측 정보는 Fig. 2에 나타내었 다. 산화제펌프 후방 베어링 근처에 설치된 단축 가속도 센서는 차지(charge) 타입 센서를 사용하 였으며 PCB사의 in-line charge converter를 사 용하여 센서의 전하량 출력 값을 전압으로 변환 하였다. 펌프 입, 출구 배관에 설치된 압력섭동 센서는 ICP 타입의 센서가 사용되었다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 가속도 신호 분석
7톤급 터보펌프 실매질시험을 통해 계측된 산
화제펌프 후방 베어링 부근의 가속도 신호와 평





균값, 10-10,000 Hz의 대역통과필터를 통해 잡음 (noise)이 소거된 가속도 신호를 Fig. 3에 나타내 었다. 가속도 신호의 평균값은 0에 가까우며 이 를 통해 가속도 신호가 외부 저주파 교란 신호 의 유입 없이 정상적으로 계측된 것을 알 수 있 다. 10-10,000 Hz의 주파수 영역에서의 가속도 신호의 최대 실효값은 약 20.1 g, 최대 계측값은 약 102.7 g로 분석되었으며 시험 시작 후 110초 가 지난 시점에서 가속도가 2배 이상 급격히 커 지는 현상이 나타났다.

실매질시험에서 계측된 가속도 신호는 푸리에 변환을 통해 시간에 따른 주파수 그래프 (waterfall)로 변환하여 Fig. 4-5에 나타내었으며 일반적으로 알려져 있는 회전수와 관련된 터보 펌프 가속도의 특성 주파수 성분과 발생 요인을 Table 1에 표시하였다. 주파수 그래프를 통해 터 보펌프 회전수의 동기 주파수(불평형 질량)와 이

Table 1. Acceleration characteristic frequencies.

Harmonics of	Related factor		
rotating speed			
1X	Unbalance		
1.2X	Rotating cavitation		
2X	Misalignment		
3X	Inducer blade Number		
4X	Inlet strut Number		
6X	Impeller blade Number		
12X	Impeller splitter Number		



Fig. 4 Waterfall of acceleration(0-3,000 Hz).

의 2배수(축 정렬 이상), 3배수(인듀서 날개수), 4 배수(입구 스트럿 개수), 5배수(1X의 고조파), 6 배수(임펠러 날개수), 9배수(3X의 고조파), 12배 수(임펠러 스플릿 개수) 등 의 회전수 고조파 성 분 및 선회 캐비테이션(rotating cavitation)에 의 한 회전수의 약 1.2배수 성분이 뚜렷이 관찰되었 다. 선회 캐비테이션에 의한 회전수의 1.2 배수 성분은 인듀서의 날개 전면에 발생하는 초조화 선회 캐비테이션(super-synchronous rotating cavitation)과 관련이 있으며 각 날개 면의 공동 (cavity)이 인듀서의 회전 방향으로 회전수의 0.1 - 0.3배의 주기로 크기가 규칙적으로 변하면서 발생하는 것으로 알려져 있다[12-13].

시험 시간 110초 부근의 급격한 진동 증가 현 상은 5000 Hz 이상의 고주파 영역에서 발생한 주파수 성분에 의한 것이며 산화제펌프 후방 플 로팅 링에 의해 발생하는 것으로 보이는 300-400 Hz 근방의 특이 주파수 및 고조파 성분들은 시 험 시작 110초 이후 갑자기 사라지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 시간에 따른 회전수 동기 주파수 및 주요 고조파의 크기 변화를 나타낸 그래프로 전 시험 구간동안 회전수의 1, 6, 12배수 성분이 강 하게 나타나고 있음을 보여준다. 또한 1.2배수 성분을 통해 선회 캐비테이션이 약 280초 이후 발생하는 것을 확인할 수 있다.

110초 부근의 급격한 가속도 증가 현상은 5000 Hz 이상의 고주파 영역에서 나타나는 주파 수 성분에 의한 것임을 확인하기 위해 Fig. 7에



Fig. 5 Waterfall of acceleration(3,000-10,000 Hz).

서 10-5,000 Hz와 10-10,000 Hz 대역통과필터를 지난 가속도 실효값을 시간에 따라 나타내었다. 10-5,000 Hz 대역에서의 가속도 실효값은 시험 110초 구간 전, 후에서 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있으며 산화제펌프에 작용하는 가속도 실 효값의 약 75%에 해당하는 값은 터보펌프의 구 조 안정성에 큰 영향을 미치지 못하는 5,000 Hz 이상의 고주파 영역에서 발생함을 확인하였다.

Fig. 8는 시험 시간 500초에서의 가속도 주파 수 스펙트럼이며 터보펌프의 진동 변위에 영향 을 미치는 저주파 영역의 가속도 성분은 회전수 의 1배수 성분이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 산화제펌프 회전축계의 불평형 질량 이 상대적으로 큰 것을 의미하며 이 성분이 과 도하게 큰 경우 회전축을 지지하는 베어링에 무 리를 줄 수 있으며 이는 축 밸런싱 작업을 통해 개선될 수 있다. 3.2 압력섭동 신호 분석

10-10,000 Hz 영역의 대역통과필터를 통해 변 환된 산화제펌프 입구(FOIP) 및 출구(FOEP) 배 관의 압력섭동 신호 실효값을 Fig. 9에 나타내었 으며 최대 실효값은 각각 0.23 bar, 0.97 bar로 계산되었다. 압력섭동 신호는 가속도와는 달리 시험 시작 후 약 110초가 지난 시점에서 큰 폭 의 감소가 나타나며 이는 출구 배관의 압력섭동 신호에서 특히 크다.

입, 출구 배관의 압력섭동 신호 waterfall을 Fig. 10-11에 나타내었다. 입구 배관에는 회전수 의 1, 3, 4, 6배수 성분을 비롯하여 설비 특성으 로 보이는 다양한 특성 대역의 주파수 성분들이 나타난다. 출구 배관에서는 회전수 성분과 함께 2, 3, 4, 5, 6배수의 고조파 성분이 나타나며 산 화제펌프 후방 플로팅 링에 의한 것으로 보이는 300-400Hz 근방의 특이 주파수와 2-6 배수의 고 조파 성분들이 시험 시간 110초까지 매우 강하



Fig. 6 Harmonics of rotating speed.



Fig. 7 RMS of band pass filtered acceleration.



Fig. 8 Frequency spectrum of acceleration(500 sec).





게 발생하는 것을 알 수 있다. 가속도 신호와는 달리 압력섭동 신호는 후방 플로팅 링에 의한 특이 주파수 신호가 전체 주파수 범위에서 차지 하는 비중이 높기 때문에 이 성분들이 사라지는 110초 이후 압력섭동 실효값이 갑자기 감소하는 경향을 보인다.

산화제 임펠러 출구와 후방 플로팅 링 후미에 서 계측된 정압 데이터를 Fig. 12에 나타내었다. 후방 플로팅 링 후미 압력은 시험 시간 110초까 지 불규칙한 거동을 보이다가 110초 이후 압력 이 정상적으로 회복된 후 안정화 된다. 이는 펌 프의 시동 후 케이싱 또는 회전축계와의 마찰로 인해 후방 플로팅 링 자체에 불규칙한 진동이 발생하거나 불안정한 자리 잡음으로 인해 플로 팅 링을 지나는 유동의 섭동이 불규칙하게 진동 하다가 플로팅 링이 정상적으로 누설 유로 내부 에 자리를 잡고 누설 유량을 제어하게 되는 것 을 의미한다. 이러한 후방 플로팅 링의 불안정한 거동으로 인한 누설 유동의 불안정성은 산화제 임펠러 출구 압력 뿐 아니라 배관 입구 압력과 펌프의 진동 레벨에도 영향을 주게 된다.

산화제 출구 배관 압력섭동 및 후방 플로팅 링 후미의 정압에 대한 0-500 Hz 대역의 waterfall과 후방 플로팅 링 정압 곡선을 Fig. 13 에 함께 나타내었다. 산화제 출구 배관 압력섭동 waterfall에서 발생하는 300-400 Hz 근방의 특이 주파수 성분은 후방 플로팅 링 후미의 정압 waterfall에서 발생하는 특이 주파수 성분 및 정 압 곡선과 일치한다. 이를 통해 300-400 Hz 대 역의 입, 출구 압력섭동 특이 주파수와 고조파 성분들은 후방 플로팅 링의 이상 거동에 의해 발생함을 유추할 수 있다.



Fig. 10 Waterfall of inlet pressure fluctuation.



Fig. 11 Waterfall of outlet pressure fluctuation.



Fig. 12 Impeller exit & rear F.R.S pressure level.



Fig. 13 Waterfalls of outlet pressure fluctuation & rear F.R.S static pressure.

4.결 론

본 논문에서는 7톤급 터보펌프 실매질시험에 서 계측된 산화제펌프의 가속도와 압력섭동 고 주파 신호에 대한 실효값 및 주파수 분석을 통 해 실매질 환경에서 작동중인 산화제펌프의 동 적 안정성을 평가하였다. 또한 산화제펌프 후방 플로팅 링 실이 가속도 및 압력섭동 신호의 불 안정성에 미치는 영향을 살펴보았으며 이를 아 래와 같이 요약하였다.

- 산화제펌프 작동 중 계측되는 가속도 신호 는 전체 주파수 영역에서 5,000 Hz 이상의 고주파 영역의 주파수 성분이 대부분을 차 지하고 있으며 5,000 Hz 이하의 주파수 대 역에서 최대 실효값은 약 5 g 수준으로 평 가된다.
- 산화제 입, 출구 배관의 압력섭동 신호의 최대 실효값은 각각 약 0.23 bar, 0.97 bar 수준으로 평가된다.
- 가속도와 압력섭동 신호는 시험 시작 후 약 110초 전, 후 급격한 변동이 발생하며 이는 산화제 후방 플로팅 링 실의 불안정성에 기 인한다.
- 4. 가속도와 압력섭동 신호의 주파수 분석을 통해 회전수 동기 주파수와 고조파 성분이 전 시험 구간동안 지속적으로 관찰되며 시 험 시작 후 약 110초까지 산화제 후방 플로 팅 링 실에 의한 300-400 Hz 대역의 주파수 성분과 고조파 성분이 강하게 나타난다.
- 5. 산화제 후방 플로팅 링 후미의 불안정한 압 력섭동이 터보펌프의 성능과 구조 안정성에 미치는 영향은 크지 않지만 이러한 불안정 거동에 대한 구체적인 발생 원인과 물리적 의미에 대해서는 후속 연구가 필요하다.

References

1. Kim, J.H., "Status of the Development of Turbopump in Korea," Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 73-78, 2008.

- Kim, J.H., Hong, S.S., Jeong, E.H., Choi, C.H. and Jeon, S.M., "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine," AIAA Paper 2007-5516, 43rd AIAA/ASME/ SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, July 2007.
- Hong, S.S., Kim, J.S., Kim, D.J. and Kim, J.H., "Performance Test of Turbopump Assembly for 75ton Liquid Rocket Engine Using Model Fluid," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 56-61, 2011.
- Kim, J.S., Han, Y.M. and Ko, Y.S., "Construction and Validation Test of Turbopump Real-propellant Test Facility," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 85-93, 2015.
- Kwak, H.D., Kim, D.J., Kim, J.S., Kim, J.H., Noh, J.G., Park, P.J., Bae, J.H., Shin, J.H., Yoon, S.H., Lee, H.G., Jeon, S.M., Jeong, E.H., Choi, C.H., Hong, S.S., Kim, S.L., Kim, S.H. and Han, Y.M., "Performance Test of a 7 tonf Liquid Rocket Engine Turbopump", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 65-72, 2015.
- Jeong, E.H., Kwak, H.D., Kim, D.J., Kim, J.S., Noh, J.G., Park, M.J., Bae, J.H., Shin, J.H., Wang, S.W., Yoon, S.H., Lee, H.G., Jeon, S.M., Choi, C.H., Hong, S.S., Kim, S.L., Kim, S.H., Han, Y.M. and Kim, J.H., "Performance Test of a 75 tonf Rocket Engine Turbopump", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 2, pp. 86-93, 2016.
- Kim, D.J., Kang, B.Y., Choi, C.H. and Bae, J.H., "High Frequency Signal Analysis of LOx Pump for Liquid Rocket Engine under Cavitating Condition," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.

22, No. 4, pp. 61-67, 2018.

- Choi, C.H., Noh, J.G., Kim, D.J. Hong, S.S. and Kim, J.H., "Effects of floating-ring seal clearance on the performance of the pump," *Journal of the Korean Society of Fluid Machinery*, Vol. 10, No. 6, pp. 38-43, 2007.
- Lee, Y.B., An, K.M., Kim, C.H. and Ha, T.W., "Comparison of Theoretical analysis with Test Results of Floating Ring Seals for the LRE Turbo Pump," *Journal of the Korean Society of Fluid Machinery*, Vol. 7, No. 6, pp. 21-27, 2004.
- An, K.M., Lee, Y.B., Kim, C.H. and Ha, T.W., "Experiment Study on the Leakage Performance Characteristics of Floating Ring Seal," *Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubricantion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 183-189, 2004.

- Mariot, A., Arghir, M., Helies, P., and Dehouve, J., "Experimental Analysis of Floating Ring Annular Seals and Comparisons with Theoretical Predictions," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 138, No. 4, 042503, 2016.
- Kim, D.J., Kang, B.Y. and Choi, C.H., "Operational Characteristic of Liquid Rocket Engine by Cavitation Instability at Low Inlet Pressure Condition," 2020 Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference, Korea, 2020-1015, Jul. 2020.
- Kang, D.H., "A Cause and Suppression Methods of Cavitation Instabilities in an Inducer for Rocket Engines," Ph.D. Thesis, Osaka University, 2010.