

캐비테이션 환경에서의 액체로켓엔진용 산화제펌프의 고주파 신호 분석

김대진* · 강병윤* · 최창호*

High Frequency Signal Analysis of LOx Pump for Liquid Rocket Engine under Cavitating Condition

Dae-Jin Kim* · Byung Yun Kang* · Chang-Ho Choi*

ABSTRACT

High frequency signals are analyzed which are measured at the inlet / outlet pipeline and pump casing during cavitation tests of the LOx pump for the liquid rocket engine. RMS values of data are shown according to the cavitation number. RMS values of the synchronous frequency, its harmonic frequencies and frequencies of cavitation instabilities are also calculated. The pressure pulsations of the inlet and outlet pipeline are affected by cavitation instabilities. 3x component is predominant in the outlet pulsation sensor since 3x component generated at the inducer is amplified at the impeller. The cavitation instability is also found at the accelerometer signal of the casing.

초 록

액체로켓엔진용 산화제펌프의 캐비테이션 시험 중 입출구 배관과 펌프 케이싱에서 측정된 고주파 신호를 분석하였다. 각각의 데이터의 RMS 값을 캐비테이션 수에 따라 표현하였다. 회전수 동기 주파수와 날개 개수 성분, 캐비테이션 불안정성 주파수의 RMS를 계산하였다. 입구 배관의 압력섭동은 캐비테이션 불안정성의 영향을 받았다. 출구 배관의 경우 3x 성분이 탁월하였는데, 인듀서에서 발생한 3x 성분이 임펠러에서 증폭된 결과로 해석된다. 케이싱에 부착된 가속도계에서도 캐비테이션 불안정성에 해당하는 주파수가 확인되었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), LOx Pump(산화제펌프), High Frequency Signal Analysis(고주파 신호 분석), Pressure Pulsation(압력 섭동), Acceleration(가속도)

1. 서 론

액체로켓은 연소실에서 요구되는 고압의 추진제를 효과적으로 공급하기 위해 고압 탱크 대신 저압 탱크와 터보펌프의 조합을 사용한다. 터보펌프에는 주로 원심형 펌프를 채택하며 터빈으로 구동된다. 보다 많은 탑재량을 확보하기 위해

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail: rain301@kari.re.kr

액체로켓 탱크의 운용 압력은 낮아야 하며 펌프의 회전수는 높아야 한다. 그러나 이는 펌프의 성능을 저하시키는 캐비테이션이 발생하기 쉬운 조건이다. 실제로 액체로켓엔진의 운용 조건에서 펌프는 어느 정도의 캐비테이션에 노출되기 때문에 이에 대한 면밀한 관찰이 필요하다.

원심펌프의 캐비테이션은 양정과 효율의 감소와 함께 극심한 진동을 수반한다. 터보펌프에서는 이를 보상하기 위해 펌프 임펠러 전단에 축류형 날개의 일종인 인듀서를 장착한다. 인듀서에서 발생하는 캐비테이션은 임펠러에 도달하기 전에 사라지기 때문에 낮은 입구 압력에서도 펌프 성능이 크게 떨어지지 않는다. 반면 특정 조건에서 인듀서 캐비테이션으로 인해 일부 주파수의 크기가 급증하는 캐비테이션 불안정성이 나타난다. 캐비테이션 불안정성은 펌프의 안정성을 해치는 요소로 작용하며, 액체로켓엔진의 개발 과정 중 이로 인한 피해 사례가 다수 보고된 바 있다[1-3].

본 논문에서는 액체로켓엔진용 산화제펌프의 캐비테이션 시험 중 측정된 고주파 신호의 RMS (Root Mean Square) 값을 분석하였다. 캐비테이션 시험은 안정성을 위해 상사 매질인 물을 사용하였다. 원심펌프의 고주파 신호는 회전수의 배수와 날개 개수에 해당하는 주파수가 탁월하다고 알려져 있기 때문에 이에 해당하는 주파수의 RMS를 구하여 전체 RMS와 비교하였다. 또한 캐비테이션 불안정성에 의해 야기될 수 있는 주파수의 영향에 대해서도 평가하였다. 이를 통해 현재 진행되고 있는 터보펌프 실패질시험, 엔진 개발시험 등의 분석에 도움이 되고자 한다.

2. 시험 개요

2.1 산화제펌프의 구성[4]

시험품인 산화제펌프(Fig. 1)는 액체산소를 작동 유체로 하며, 한국형발사체용 1단 및 2단 엔진에 사용 예정인 터보펌프의 구성품이다. 펌프의 임펠러는 주날개 여섯 개, 보조날개 여섯 개로 구성되며, 낮은 입구 압력에서 작동하기 위해

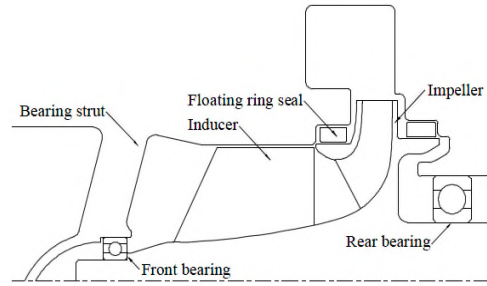


Fig. 1 Layout of LOx pump

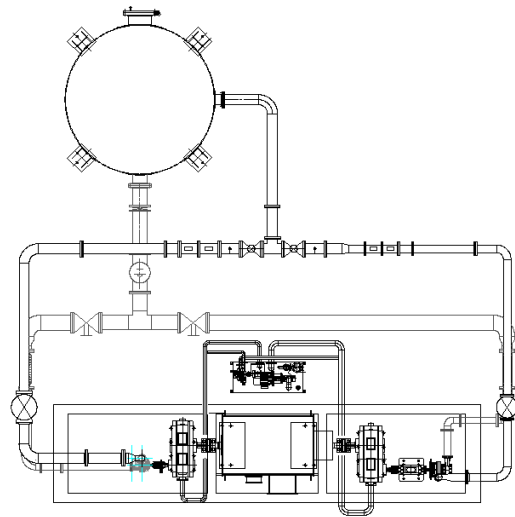


Fig. 2 Piping plan of pump test cell

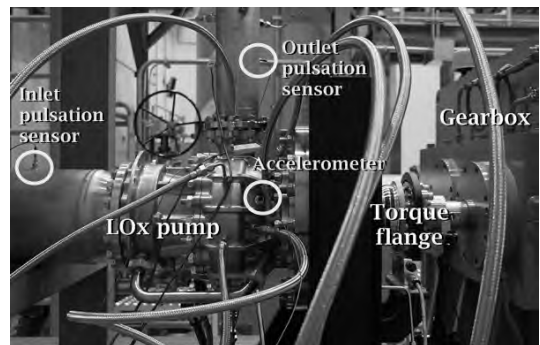


Fig. 3 Location of high frequency sensors

세날형 인듀서가 임펠러 앞에 장착된다. 인듀서와 임펠러는 전후방에 위치한 두 개의 베어링에

의해 회전하게 된다. 이 중 전방 베어링은 네 개의 지주(strut)에 의해 고정되며, 이 지주는 입구 가이드 베인의 역할을 겸한다. 또한 임펠러의 전방과 후방의 누설 유체는 플로팅 링 실에 의해 조절된다.

2.2 시험 개요 및 주요 변수

산화제펌프의 상사 매질 캐비테이션 시험은 한국항공우주연구원의 터보펌프 대형상사 시험설비 내에 위치한 펌프시험실(Fig. 2)에서 이루어졌다. 펌프시험실은 상온의 물을 매질로 사용하는 폐회로 방식의 시험기로 시험 목적에 따라 탱크를 가압 또는 감압할 수 있다. 펌프는 전기모터로 구동되며 기어박스를 통해 회전수를 높인다. 효율 계산을 위한 토크는 기어박스과 펌프 사이에 위치한 비접촉식 토크플랜지에서 측정되며, 회전수 역시 이 곳에서 측정된다. 유량 측정은 회수 배관에 장착한 터빈유량계를 사용하였다. 양정을 계산하기 위해 펌프의 입구 배관과 출구 배관을 압력센서와 유도관으로 연결하였다.

고주파 신호 측정을 위해 두 개의 압력섭동 센서를 펌프의 입출구 배관에 설치하였으며, 펌프 케이싱의 고정단 베어링 부근에 가속도계를 장착하였다(Fig. 3 참조). 측정된 고주파 신호의 샘플율은 25.6 kHz이며, 1 Hz 간격으로 Fourier 변환하였다. 이 데이터를 토대로 1 - 5,000 Hz에 해당하는 주파수의 RMS를 계산하였다. 또한 펌프 임펠러와 인듀서의 날개 개수를 참고하여, 회전수 동기 성분(1x) 및 이의 세 배, 여섯 배, 열두 배, 스물네 배(3x, 6x, 12x, 24x)에 해당하는 주파수의 RMS를 구하였다. 이러한 분석은 차수 분석(order tracking)이라고 불리는데, 회전체의 고주파 신호를 분석하는데 유용하다고 알려져 있다. 그리고 김대진 등의 연구[5-6]에서 나타난 캐비테이션 불안정성 주파수 범위인 1.1x - 1.2x 구간과 0.3x - 0.6x 구간의 RMS를 계산하였다. 1.1x - 1.2x는 초조화 선회 캐비테이션(super-synchronous rotating cavitation)의 주파수로 펌프 회전체에 반경 방향으로 힘을 가해 펌프의 작동 안정성을 해치는 것으로 알려져 있다. 0.3x - 0.6x는 미국의 FASTRAC 터보펌프

시험 중 입구 압력섭동 센서에서 측정된 불안정성 주파수이다[7].

시험은 펌프 회전수 8000 rpm, 설계유량비 조건에서 수행되었다. 펌프가 정속 회전수에 도달한 뒤 탱크의 상부에 연결된 진공펌프를 작동시켜 캐비테이션 환경을 조성하였으며, 펌프의 양정 저하가 가시화될 때까지 입구 압력을 연속적으로 감소시켰다. 캐비테이션의 지표인 캐비테이션 수는 시험 종료 때의 캐비테이션 수(하첨자 b)를 기준으로 무차원화하였다. 양정과 유량은 모터의 정속 도달 후 측정된 값을 기준으로 무차원화하였으며, 고주파 신호의 RMS 값은 정속 도달 후 측정된 전체 RMS를 기준으로 무차원화하였다(상첨자 *). 캐비테이션 수와 양정의 정의는 Eq. (1) - (2)과 같다. 여기서 P_{o1} 는 펌프 출구 전압, P_{i1} 는 입구전압, U_{t1} 는 인듀서 끝단 속도, U_{t2} 는 임펠러 끝단 속도, P_v 는 입구 배관에서의 유체 증기압이다.

$$\text{head coefficient } \psi = (P_{o1} - P_{i1}) / (0.5\rho U_{t2}^2) \quad (1)$$

$$\text{cavitation number } \sigma = (P_{i1} - P_v) / (0.5\rho U_{t1}^2) \quad (2)$$

3. 시험 결과 및 분석

캐비테이션 시험 중 산화제펌프의 양정과 효율의 경향을 Fig. 4와 같이 나타내었다. 인듀서를 장착하였기 때문에 산업용 원심펌프와 달리

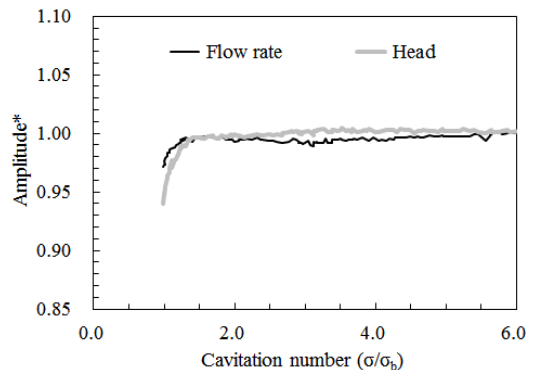


Fig. 4 Cavitation curve of LOx pump

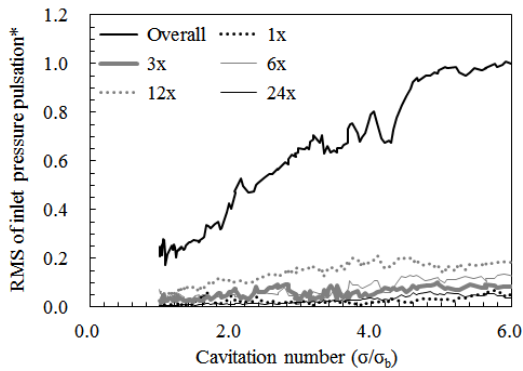


Fig. 5 RMS and order tracking of inlet pressure pulsation sensor

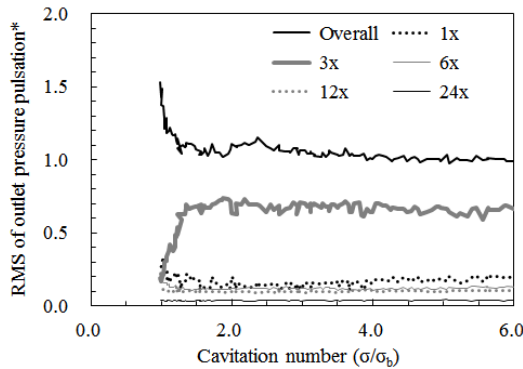


Fig. 6 RMS and order tracking of outlet pressure pulsation sensor

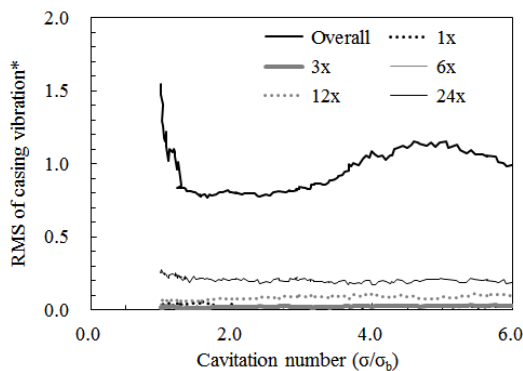


Fig. 7 RMS and order tracking of accelerometer

낮은 캐비테이션 수에서도 성능 감소가 크지 않다. 따라서 엔진 운용 조건까지는 유량과 압력 공급이 원활할 것으로 예상된다.

입구 배관의 압력섭동 센서에서 측정된 고주파 신호와 주요 회전수 배수의 RMS를 Fig. 5에 비교하였다. 입구 배관의 압력섭동은 캐비테이션 수가 늘어날수록 심해졌다. 캐비테이션 수가 클 때 인듀서의 전단에는 역류가 활발하게 발생하는데, 이로 인해 유동이 교란되고 펌프 입구와 배관을 가진하여 압력섭동이 증가하는 것으로 추정된다. 회전수 배수 성분 중에는 12x 성분이 상대적으로 두드러졌는데, 개수가 3개인 인듀서 날개와 4개인 입구 가이드 배인에 의해 발생하는 유동의 영향으로 보인다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 입구 배관에서의 섭동 중 회전수 배수 성분의 영향은 크지 않았다.

Figure 6은 출구 배관의 고주파 신호와 주요 회전수 배수의 RMS를 정리한 것이다. 출구 배관의 압력섭동은 캐비테이션 수가 작아질수록 점차 증가하다가 시험 종료 직전 급증하였다. 특히 Fig. 4에서 양정이 급감하는 지점과 출구 배관의 압력 섭동이 급증하는 지점이 일치하고 있어, 이 때 임펠러 캐비테이션이 본격화되고 있음을 유추할 수 있다. 회전수 배수 성분 중에는 3x 성분이 탁월하였다. 임펠러의 날개 개수에 해당하는 6x와 12x가 아닌 3x가 탁월한 것은 인듀서에서 발생한 압력 섭동이 임펠러에서 증폭되었기 때문이다. 이는 임펠러의 날개 개수가 인듀서의 날개 개수의 배수인 것과는 관계가 있다. 또한 펌프의 양정 감소가 나타나기 조금 전부터 3x 섭동이 줄어든다. 인듀서의 캐비테이션이 심화되어 인듀서에서 양정 상승이 둔화되면 이것이 출구 배관의 3x 섭동에 반영되는 것으로 추정된다.

가속도계에서 측정된 고주파 신호의 분석 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 캐비테이션 수 σ/σ_b 5.0 이하에서 전체 RMS는 캐비테이션 수가 작아질수록 감소하다가 펌프 성능 저하가 일어나는 시점에 급증한다. 이 역시 캐비테이션 심화로 펌프의 진동이 늘어났기 때문으로 이 구간의 경향은 출구 배관에서의 측정 결과와 유사하다. 회전수 배수의 진동 성분 중에는 12x와 24x가 확인된다.

입구 압력섭동의 주파수 중 캐비테이션 불안

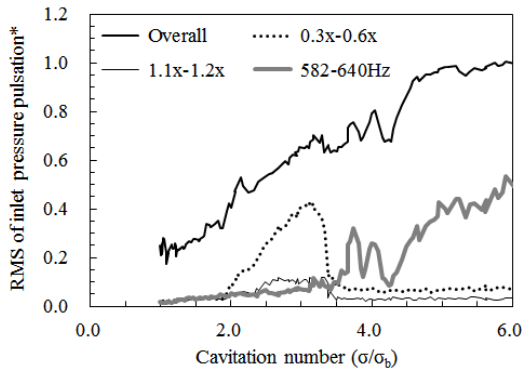


Fig. 8 RMS of specific frequencies of inlet pressure pulsation sensor

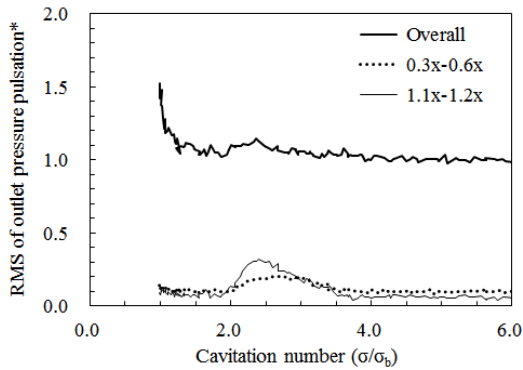


Fig. 9 RMS of specific frequencies of outlet pressure pulsation sensor

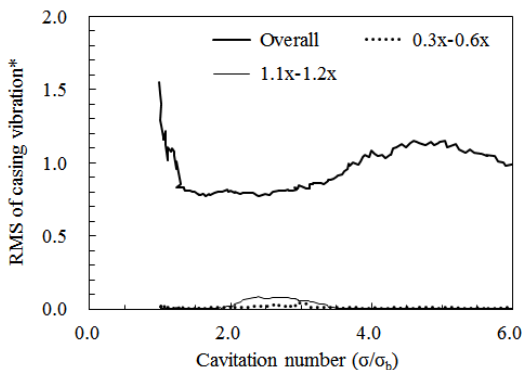


Fig. 10 RMS of specific frequencies of accelerometer

정성에 해당하는 주파수인 0.3x - 0.6x와 1.1x - 1.2x 그리고 Fourier 변환에서 확인된 582 - 640 Hz의 RMS 값을 Fig. 8에 나타내었다. 압력

섭동이 강하게 나타난 캐비테이션 수 σ/σ_b 3.5 이상인 구간에서 582 - 640 Hz의 압력 섭동이 탁월하였으며, 전체 RMS와의 유사성도 드러났다. 불안정성 주파수 중에는 0.3x - 0.6x가 캐비테이션 수 σ/σ_b 2.0 - 3.3 범위에서 두드러졌다.

출구 압력섭동에서 캐비테이션 불안정성의 영향은 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 입구에서는 0.3x - 0.6x만이 활발했던 것에 비해 출구에서는 두 개의 불안정성 성분 모두 뚜렷하게 계측된다. 초조화 선회 캐비테이션에 의한 섭동이 임펠러에서 증폭되는 것으로 추정된다.

가속도계 신호에서 캐비테이션 불안정성 주파수의 RMS 값을 계산한 결과는 Fig. 10과 같다. 여기서는 1.1x - 1.2x에 해당하는 주파수의 진동이 확인되나 그 절대값은 크지 않다. 이는 가속도 계측의 특성상 고주파 신호가 상대적으로 두드러지기 때문이다. 선회 캐비테이션이 발생할 때 가속도계의 전체 RMS에 큰 변화가 확인되지 않아 전체 RMS만으로는 선회 캐비테이션 유무를 파악하기 어려울 것으로 보인다. 또한 계측된 가속도계 신호에 회전수 배수 성분과 캐비테이션 불안정성 주파수의 비중이 크지 않기 때문에 반대로 설비에서 유래된 진동이 상당 부분 포함된 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 논문에서는 수류 상사 조건에서 캐비테이션 환경에 노출된 액체로켓엔진용 산화제펌프의 고주파 신호를 측정하여 그 RMS 값을 구하였다. 또한, 차수 분석과 캐비테이션 불안정성 주파수 범위의 RMS 계산을 통해 이를 분석하였다.

- 1) 회전체의 진동 분석에 사용하는 차수 분석은 산화제펌프 출구 배관에서의 압력섭동 분석에 유용하였다.
- 2) 캐비테이션 불안정성 주파수는 입구 배관과 출구 배관의 압력섭동에 잘 확인되었다.
- 3) 입구 배관의 압력섭동에는 0.3x - 0.6x에 해

당하는 캐비테이션 불안정성 주파수와 582 - 640 Hz의 주파수가 크게 작용하였다.

- 4) 출구 배관의 압력 섭동은 3x 성분이 크게 두드러졌는데, 인듀서에서 발생한 압력 섭동이 임펠러에서 증폭되었기 때문이다.
- 5) 산화제펌프의 성능이 저하되는 캐비테이션 수에서 출구 배관의 3x 섭동 역시 감소하였다. 인듀서에서의 캐비테이션 심화로 인듀서의 양정 상승이 둔화된 결과로 풀이된다.
- 6) 펌프 케이싱의 진동에서는 1.1x - 1.2x에 해당하는 초조화 선회 캐비테이션 주파수가 확인되나 펌프 전체의 진동에 비해서는 그 크기가 크지 않았다.

Conference of Korean Society for Fluid Machinery, Busan, 2016.

6. Kim, D.-J., Choi, C.-H. and Kim, J., "Cavitation Instabilities of Fuel Pump for KSLV-II," *Proceedings of 2016 Summer Conference of Korean Society for Fluid Machinery, Busan, 2016.*
7. Zoladz, T., "Observations on Rotating Cavitation and Cavitation Surge From the Development of the FASTRAC Engine Turbopump," *Proceedings of the 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Huntsville, Alabama, AIAA-2000-3403, 2000.*

참 고 문 헌

1. Kamijo, K., "Experiences in the Development of Japanese Rocket Engines," *the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 106, No. 1013, pp. 286-288, 2003 (in Japanese).*
2. Ryan, R. S. and Gross, L. A., "Developmental Problems and Their Solution for the Space Shuttle Main Engine Alternate Liquid Oxygen High-pressure Turbopump," *NASA technical paper, 3533, May 1995.*
3. Tsujimoto, Y., and Semenov, Y. A., "New Types of Cavitation Instabilities in Inducers," *Space Launcher Liquid Propulsion: 4th International Conference on Space Launcher Technology, Liege, Belgium, 2002.*
4. Kim, D.-J., Hong, S.-S., Choi, C.-H., and Kim, J., "Water Tests of Lox Pump for 75-ton Class Liquid Rocket Engine," *Aerospace Engineering and Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 122-128, 2011.*
5. Kim, D.-J., Choi, C.-H. and Kim, J., "Cavitation Instabilities of LOX Pump for KSLV-II," *Proceedings of 2016 Summer*