

# 캐비테이션 환경에서의 액체로켓엔진용 연료펌프의 고주파 신호 분석

김대진\* · 강병윤\* · 최창호\*

## High Frequency Signal Analysis of Fuel 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 fuel pump for the liquid rocket engine. RMS values of each data are shown according to the cavitation number and compared with those of the LOx pump tests and the impact of the cavitation instability is also explored. Analogies about the cavitation number are confirmed between high frequency data of both pumps. In addition, the cavitation instability is found in all the signals and has an affect on the outlet pressure pulsation of the fuel pump.

### 초 록

액체로켓엔진용 연료펌프의 캐비테이션 시험 중 입출구 배관과 펌프 케이싱에서 측정된 고주파 신호를 분석하였다. 각각의 데이터의 RMS 값을 캐비테이션 수에 따라 표현하였다. 측정 결과는 산화제펌프의 결과와 비교하였으며, 캐비테이션 불안정성의 영향도 검토하였다. 산화제펌프와 연료펌프 고주파 신호 사이에 유사성이 확인되었다. 또한, 캐비테이션 불안정성은 연료펌프 출구 배관 압력섭동에 영향을 주었다.

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

### 1. 서 론

액체로켓엔진의 주요 구성품 중 하나인 터보 펌프는 연소실에서 필요로 하는 고압의 추진제

를 공급하기 때문에 ‘발사체의 심장’이라고도 불리운다. 대부분의 엔진이 산화제와 연료의 두 개의 추진제를 사용하기 때문에 펌프 역시 두 개가 필요하며, 두 펌프의 배치는 추진제와 엔진의 종류에 따라 달라진다. 액체산소와 케로신을 추진제로 하는 가스발생기 방식의 엔진인 한국형 발사체용 엔진은 산화제펌프와 연료펌프를 하나

\* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail: rain301@kari.re.kr

의 터빈으로 구동한다. 또한 산화제펌프와 터빈 사이에 연료펌프를 배치하여 산화제펌프의 캐비테이션 성능 향상을 도모하고 터빈의 고온이 산화제펌프에 영향을 주지 않도록 한다[1]. 또한 산화제펌프와 연료펌프의 임펠러 앞에는 임펠러에서의 캐비테이션을 지연하기 위한 세 날 인듀서를 설치한다.

본 논문에서는 액체로켓엔진용 연료펌프의 캐비테이션 시험 중 측정된 고주파 신호의 RMS (Root Mean Square) 값을 분석하였다. 캐비테이션 시험은 안정성을 위해 상사 매질인 물을 사용하였다. 측정된 RMS는 산화제펌프에서의 결과[2]와 비교하였으며, 인듀서에서 발생하는 캐비테이션 불안정성의 영향에 대해서도 알아보았다.

## 2. 시험 개요

### 2.1 연료펌프의 구성

시험품인 연료펌프는 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 한국형발사체용 1단 및 2단 엔진에 사용 예정인 터보펌프의 구성품이다. 일축식 배치로 인해 연료펌프는 작동 유체가 반경 방향으로 공급된다. 펌프의 임펠러는 주날개 여섯 개, 보조날개 여섯 개로 구성되며, 낮은 입구 압력에서 작동하기 위해 세날형 인듀서가 임펠러 앞에 장착된다. 인듀서와 임펠러의 전후방에는 펌프 구동에 필요한 베어링이 위치한다. 베어링의 냉각은 작동 유체 중 일부를 순환시키는 방식을 적용한다. 연료펌프의 내부 구조는 Fig. 1[3]과 같다.

### 2.2 시험 개요 및 주요 변수

연료펌프의 상사매질 캐비테이션 시험은 한국항공우주연구원 의 터보펌프 대형상사 시험설비 내에 위치한 펌프시험실에서 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. 효율은 기

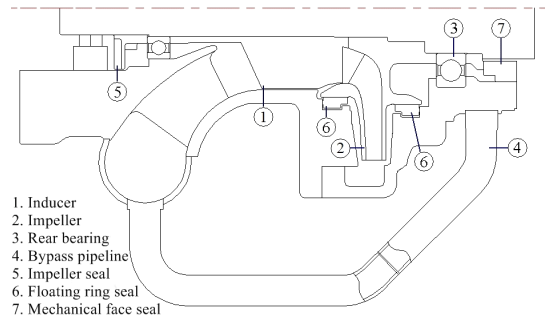


Fig. 1 Layout of fuel pump

어박스과 펌프 사이에 위치한 비접촉식 토크플랜지에서 측정하였으며, 회전수 역시 토크플랜지에서 측정하였다. 유량은 회수 배관에 장착한 터빈유량계를 사용하였다. 양정을 측정하기 위해 펌프의 입구 배관과 출구 배관과 압력센서를 유도관으로 연결하였다.

고주파 신호 측정을 위해 두 개의 압력섭동센서를 펌프의 입출구 배관에 설치하였으며, 펌프 케이싱의 고정단 베어링 부근에 가속도계를 장착하였다. 측정된 고주파 신호의 샘플율은 25.6 kHz이며, 1 Hz 간격으로 Fourier 변환하였다. 이 데이터를 토대로 1 - 5000 Hz에 해당하는 주파수의 RMS를 계산하였다. 계산된 결과는 같은 엔진에 사용 예정인 산화제펌프의 캐비테이션 시험 중 측정된 RMS와 비교하였다. 또한 세 날 인듀서에서 많이 관찰되는 초조화 선회 캐비테이션(super-synchronous rotating cavitation)의 주파수인 1.1x - 1.2x 성분의 RMS를 구하여 연료펌프 고주파 신호에 미치는 영향을 분석하였다. 초조화 선회 캐비테이션은 세 날 인듀서에서 나타나는 대표적인 캐비테이션 불안정성으로 과도할 경우 펌프의 작동 안정성을 해치는 것으로 알려져 있으며[4-5], 한국형발사체용 산화제펌프와 연료펌프에서도 측정된 바 있다[6-7].

시험은 펌프 회전수 8000 rpm, 설계유량비 조건에서 수행되었다. 펌프가 정속 회전수에 도달한 뒤 탱크의 상부에 연결된 진공펌프를 작동시켜 캐비테이션 환경을 조성하였으며, 펌프의 양정 감소가 가시화될 때까지 입구 압력을 낮추어가며 시험하였다. 캐비테이션의 지표인 캐비테이

선 수는 산화제펌프와의 비교를 위해 산화제펌프 시험에서의 종료 캐비테이션 수(하첨자 OP\_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  $P_{o_i}$ 는 펌프 출구전압,  $P_{i_i}$ 는 입구전압,  $U_{t_1}$ 은 인듀서 끝단 속도,  $U_{t_2}$ 는 임펠러 끝단 속도,  $P_v$ 는 입구 배관에서 유체 증기압이다.

$$\text{head coefficient } \psi = (P_{o_i} - P_{i_i}) / (0.5\rho U_{t_2}^2) \quad (1)$$

$$\text{cavitation number } \sigma = (P_{i_i} - P_v) / (0.5\rho U_{t_1}^2) \quad (2)$$

### 3. 시험 결과 및 분석

캐비테이션 시험 중 연료펌프의 양정과 효율의 경향을 Fig. 2에 나타내었다. 산화제펌프보다 높은 캐비테이션 수에서 캐비테이션 붕괴가 나타나는데 이는 인듀서의 직경이 작은 영향으로 보인다. 또한 양정 감소가 나타나기 전부터 유량 감소가 관찰되는데 이에 대해서는 추후 분석이 필요하다.

입구 배관의 압력섭동을 계산하여 Fig. 3과 같이 산화제펌프에서의 결과, 초조화 선회 캐비테이션 주파수의 RMS와 비교하였다. 산화제펌프

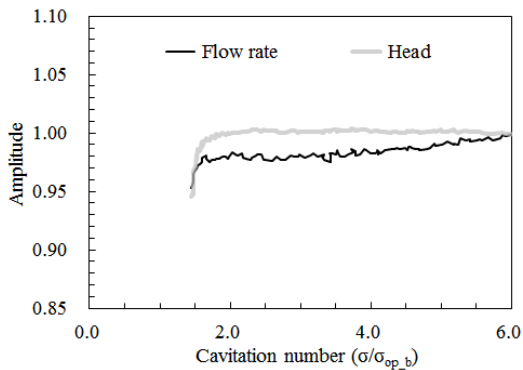


Fig. 2 Cavitation curve of fuel pump

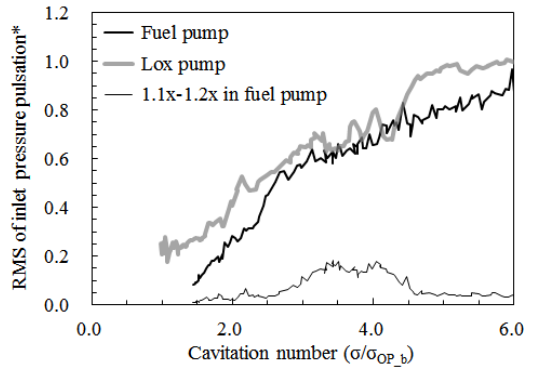


Fig. 3 RMS of inlet pressure pulsation

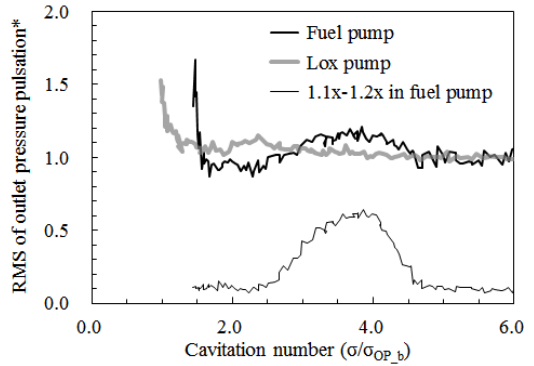


Fig. 4 RMS of outlet pressure pulsation

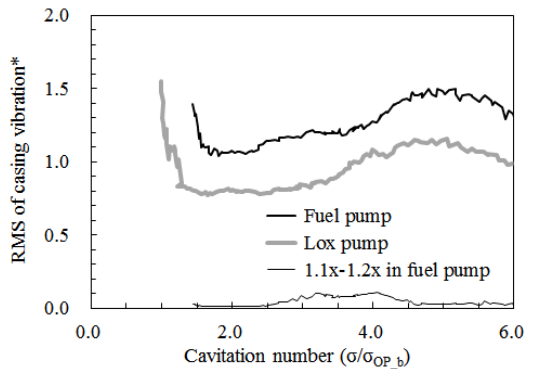


Fig. 5 RMS of casing vibration

와 마찬가지로 캐비테이션 수가 작아질수록 입구 배관의 섭동이 감소하였다. 한편, 산화제펌프와 달리 입구 배관에서 초조화 선회 캐비테이션이 뚜렷하게 관측되었다. 인듀서의 형상, 펌프의

형태, 압력섭동 센서의 설치 위치[5] 등이 영향을 끼쳤을 것으로 추정된다.

출구 배관에서의 압력섭동은 Fig. 4에 정리하였다. 연료펌프 출구 배관의 압력섭동은 양정 감소가 본격화되는 시점에 급증하였는데 이는 산화제펌프에서의 경향과 동일하다. 초조화 선회 캐비테이션 역시 우세하였으며 특히 초조화 선회 캐비테이션이 우세한 구간에서 압력 섭동이 함께 증가하였다. 산화제펌프에 비해 그 영향력 또한 컸는데 산화제펌프 출구 배관에서 탁월했던 3x 성분이 연료펌프에서는 감소했기 때문이다.

가속도계에서 측정된 고주파 신호의 분석 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 출구 배관과 마찬가지로 펌프 성능 저하가 일어나는 시점에 연료펌프의 RMS가 급증하였는데, 캐비테이션 심화로 펌프의 진동이 늘어났기 때문이다. 또한 두 펌프의 진동 RMS의 경향에 유사점이 확인된다. 크기는 크지 않지만 초조화 선회 캐비테이션 역시 가속도계에서도 측정된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 수류 상사 조건에서 캐비테이션 환경에 노출된 액체로켓엔진용 연료펌프의 고주파 신호를 분석하였다.

- 1) 연료펌프는 산화제펌프보다 높은 캐비테이션 수에서 양정 붕괴가 나타났다.
- 2) 연료펌프의 고주파 신호의 전체 RMS 경향은 산화제펌프와 유사하였다.
- 3) 연료펌프 캐비테이션 시험 중 모든 센서에서 초조화 선회 캐비테이션이 확인되었다.
- 4) 초조화 선회 캐비테이션은 연료펌프 출구 배관 압력섭동 RMS에 영향을 주었다.

#### 참 고 문 헌

1. Kim, J., Choi, C.-H., Jeong, E., Jeon, S.-M. and Hong, S.-S., "Development Status of a Turbopump for Korea Space Launch Vehicle (KSLV-II)," *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical & Space Science Fall Conference*, Jeju, pp. 254-263, 2012.
2. Kim, D.-J., Kang, B.Y. and Choi, C.-H., "High Frequency Signal Analysis of LOX Pump for Liquid Rocket Engine under Cavitating Condition," *Proceedings of the 2017 KSPE Spring Conference*, Jeju, 2017.
3. Kim, D. -J., Choi, C. -H., Hong, S. -S., Kwak, H. D. and Kim, J., "Water Tests of Fuel Pump for 75-ton Class Liquid Rocket Engine," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-65, 2011.
4. Kamijo, K., Yoshida, M., and Watanabe, M., "Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 6, pp. 819 - 826, 1993.
5. Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S. and Hashimoto, T., "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, No. 4, pp. 775-781, 1997.
6. Kim, D.-J., Choi, C.-H. and Kim, J., "Cavitation Instabilities of LOX Pump for KSLV-II," *Proceedings of 2016 Summer Conference of Korean Society for Fluid Machinery*, Busan, 2016.
7. 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.