

# 저주파 압력섭동에서 글로브 제어밸브의 유효 단면적에 따른 임피던스 특성 변화 해석

박성수\* · 윤웅섭\*\* · 엄원석\*\*†

## an Analysis of the Variation on the Impedance Characteristic according to Effective Area of Globe Control Valve at Low Frequency Perturbation

Seungsoo Park\* · Woongsup Yoon\*\* · Wonsuk ohm\*\*†

### ABSTRACT

In this paper, Analytical study is carried out on the impedance characteristics of the globe control valve, which is mainly used for thrust control in liquid rockets, according to the effective area at low frequency perturbation. The impedance tends to increase according to effective area and the cause of impedance characteristic change through flow field visualization is investigated.

In the future, the information on the change in the impedance characteristics of the control valve can be used to obtain the impedance of the supply system and it can be utilized to predict pogo phenomenon as well as design accumulator and orifice to reduce the pogo phenomenon.

### 초 록

본 논문에서는 액체로켓에서 추력제어를 위해 주로 사용되는 글로브 제어밸브의 대해 주기적인 저주파 압력섭동에서 유효 단면적에 따라 변하는 임피던스 특성에 관해 해석적 연구를 수행하였다. 유효 단면적에 따라 임피던스가 증가하는 경향을 확인하였으며, 유동장 가시화를 통해 임피던스 특성 변화를 일으키는 원인에 대해 알아보았다.

향후 제어밸브의 임피던스 특성변화의 관한 정보는 공급 시스템의 임피던스를 구하는데 활용될 수 있기 때문에 포고 현상 예측의 활용될 수 있을 뿐만 아니라 포고 현상 감소를 위해 완충기 및 오리피스를 설계할 때도 도움이 될 것이다.

Key Words: Impedance(임피던스), Globe control valve(글로브 컨트롤 밸브), Liquid rocket(액체로켓), Effective area(유효 단면적), Low frequency perturbation(저주파 섭동), Flow field visualization(유동장 가시화), Pogo phenomenon(포고 현상)

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: ohm@yonsei.ac.kr

비행 중에 액체로켓 동체 자체의 구조진동과 연소실의 추력진동이 서로 커플링 되면서 발생하는 공진 현상을 포고라고 한다. 포고는 5~40Hz 대의 저주파 공진 현상이다. 실제로 미국의 델타로켓, 타이탄로켓, 새턴로켓 등 많은 대형로켓에서 개발단계에서 포고가 발생되었다고 보고되었다[1].

포고는 로켓기체의 파손 및 미션 실패 등의 영향을 줄 수 있기 때문에 미연에 포고를 방지하는 것이 무엇보다 중요하다.

포고 현상 방지를 위한 연구를 위해 실제 완성된 로켓을 가지고 실험을 하기에는 시간과 비용이 많이 들기 때문에 보통 공급 시스템과 연소실을 따로 분리해서 지상에서 실험을 실시하게 되고, 이를 통해 얻은 데이터를 바탕으로 검증된 전산해석 프로그램을 사용하여 연구를 수행하게 된다.

지상에서 공급 시스템에 관한 실험을 통해 임피던스 데이터를 얻게 되는데, 임피던스란 포고가 발생했을 때, 공급 시스템에서 발생하는 저항을 의미한다.

임피던스는 연소실로 들어가기 직전의 유량 진폭 및 위상에 영향을 주어 최종적으로 연소실 추력에 영향을 미치기 때문에 포고 현상을 예측하고, 방지하기 위해서는 공급 시스템에서 발생하는 임피던스 데이터가 필요하다.

공급 시스템의 임피던스를 알기 위해서는 시스템을 이루는 각 구성품들의 임피던스 특성에 관해 알고 있어야 한다.

본 연구는 여러 구성품들 중에서도 특히 액체로켓에서 추력 조절에 핵심적인 작동기 역할을 하는 제어밸브의 임피던스 특성을 파악하고자 하였다.

현재까지 제어밸브의 임피던스 특성에 관해서 다양한 연구가 이루어져 왔는데, 주로 정상상태 기반의 임피던스 모델링의 관한 연구가 주를 이루었다[2,3]. 그러나 이를 통해 구한 임피던스와 실제 임피던스 모델링으로 구한 임피던스 값 사이의 차이가 있기 때문에 기존의 연구로는 제어밸브의 임피던스 특성 변화를 정확히 예측하지 못한다는 문제가 있다[2].

그러므로 본 연구에서는 보다 정확한 값을 예측하기 위해 실제 임피던스 모델링을 사용하여 전산해석을 수행하였고, 또한 유동장 가시화를 통해 제어밸브의 유효 단면적에 따른 임피던스 특성 변화를 알아보았다.

## 2. 설 계

### 2.1 제어밸브 형상

본 연구에서는 여러 형태의 밸브들 중에서도 특히 유동방향과 플러그의 이동방향이 같은 축을 이루는 동축형 밸브를 사용하였다[4,5].

동축형 밸브는 플러그와 시트 사이의 유효 단면적을 변화시켜 유량을 조절해주고, 다른 형태의 밸브들에 비해 작동을 위해 요구되는 파워가 작기 때문에 구동기의 크기 및 무게가 작으며, 유량제어 특성 또한 좋기 때문에 액체로켓에서 주로 많이 사용된다[4,5].

Fig.1은 본 연구에서 쓰인 동축형 제어밸브 형상이다.

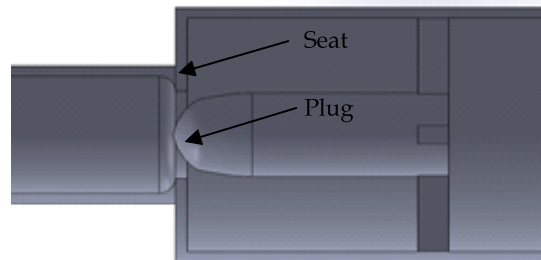


Fig. 1 Shape of flow control valve

본 연구에서는 최대 유효 단면적( $A_0$ ) 대비 플러그에 의해서 좁아진 유효 단면적( $A$ )의 비율이 50%인 밸브를 제작 후 사용하였다[5].

## 3. 이 론

### 3.1 임피던스

주기적인 저주파 압력섭동 유동에서 유량의 진폭 및 위상의 영향을 미치는 밸브의 저항특성을 임피던스( $Z$ )라고 하고, Eq. 3으로 표현한다[2]. 또한 임피던스( $Z$ )를 무차원

화 시켜 Eq. 4와 같이 표현해주시기도 한다.

$$Z = \frac{\dot{p}}{\dot{m}} (p = \bar{p} + \dot{p}, \dot{m} = \bar{m} + \dot{m}) \quad (3)$$

$$Z = \frac{\dot{p}/\bar{p}}{\dot{m}/\bar{m}} (p = \bar{p} + \dot{p}, \dot{m} = \bar{m} + \dot{m}) \quad (4)$$

상기 식에서  $\dot{p}$ 은 압력섭동(bar),  $\dot{m}$ 은 유량섭동(kg/s),  $\bar{p}$ 는 평균압력(bar),  $\bar{m}$ 는 평균유량(kg/s)을 의미한다.

### 3.2 난류모델

본 연구에서는  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 난류를 모델링 해주었고, 난류모델의 상수 값은 초기 값을 그대로 사용해 주었다.

$k-\epsilon$  난류모델은 운동 방정식의 비 선형항인 레이놀즈 응력을 모사해준다[6].

## 4. 연구 순서

본 연구에서는 수치해석과 수류실험이 각각 진행되었다.

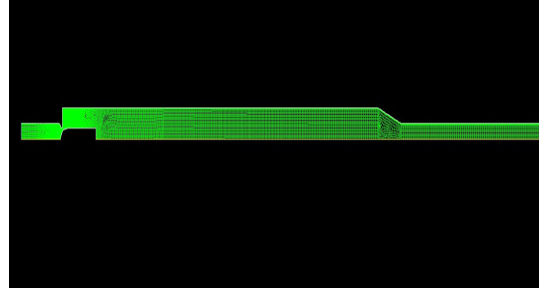
수치해석을 위해 전산유체해석 프로그램인 Fluent를 사용하였고, 수류실험을 통해 수치해석을 검증하였다.

제어 밸브는 최대 유효 단면적( $A_0$ ) 대비 플러그에 의해서 좁아진 유효 단면적( $A$ )이  $0.5A_0$ 인 제어 밸브를 사용하였고, 5Hz의 주기적인 저주파 압력섭동에서 제어밸브의 임피던스 특성을 알기 위해 해석 및 실험을 수행하였다.

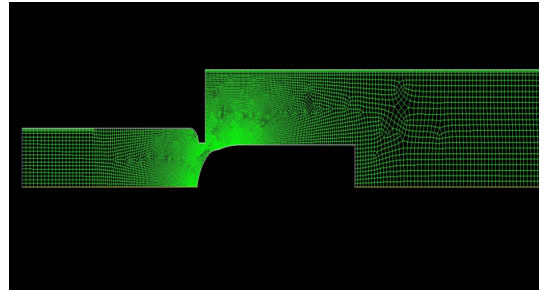
### 4.1 수치해석 조건

밸브 형상은 축대칭으로 모델링 하였고, Solver는 Pressure based이며, Time은 Unsteady이고, Time step은 0.5msec이다. 격자 개수는 총 24000개, 지배 방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식을 사용하였다.

본 연구에서 쓰인 격자 형상은 Fig.2와 같다.



(a) Overall shape of grid



(b) Amplification of grid

Fig.2 Grid for Valve ( $0.5A_0$ )

경계조건으로는 입구와 출구의 압력조건을 주었으며, 입구 압력조건은 실험을 통해서 구한 5Hz의 압력 값을 바탕으로 UDF(User Defined Function)을 사용하여 Fig.3와 같이 실험값을 모사해주었고, 출구 압력조건은 대기압으로 방출되는 상황을 모사해주기 위해 0 Pa로 주었다.

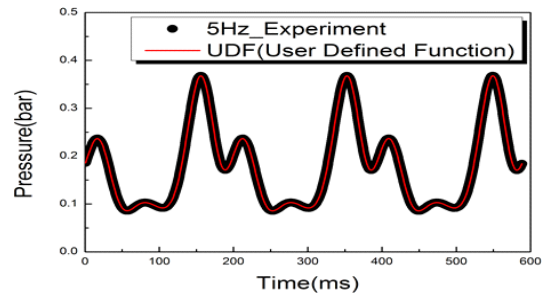


Fig.3 UDF (User Defined Function) [5Hz]

수치해석을 통해서 밸브 목에서 50mm 앞선 지점에서 전단압력과 유량 값을 얻었다.

이후에는 검증된 수치해석 기법을 사용하여 밸브의 유

효 단면적이  $0.1A_0$ ,  $0.3A_0$ ,  $0.5A_0$ ,  $0.7A_0$ ,  $0.9A_0$ 로 바뀔 때, 주기적인 저주파 압력 섭동 유동에서 임피던스 특성 변화를 확인하였다.

#### 4.2 수치해석 검증

5Hz의 주기적인 저주파 압력섭동에서 수치해석 검증을 위해 임피던스의 지배적 변수인 수류실험과 수치해석 사이의 유량( $\dot{m}$ )값을 Fig.5를 통해 비교하였다.

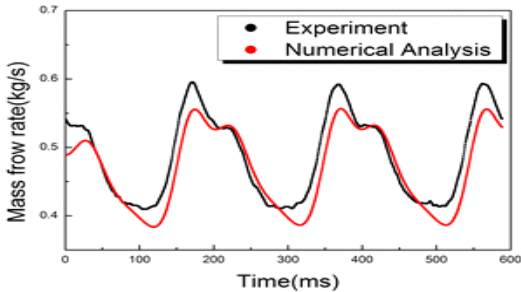


Fig.5 Amplitude Comparison of Numerical and Experimental results [ $0.5A_0$ , 5Hz]

Eq.4를 통해 무차원으로 표현해 준 임피던스 실험 값은 5.17 임피던스 해석 값은 5.51이다.

유량에 대해서 실험과 해석 사이의 오차를 비교해보면, 유량섭동  $\dot{m}$  (최대값 기준)의 오차는 10%이고, 유량평균  $\bar{m}$ 의 오차는 4.26%이다.

#### 4.3 수류실험

5Hz대의 주기적인 저주파 압력섭동에서 제어밸브에 대한 실험을 통해 압력섭동과 유량섭동을 측정하여 Eq.4를 통해 임피던스를 무차원으로 표현해 주었다.

임피던스를 구성하는 지배적 변수인 유량섭동과 유량 평균 값에 대해 수류실험과 수치해석과의 비교를 통해서 수치해석 기법을 검증하였다.

#### 4.4 제어밸브의 유효 단면적에 따른 임피던스 특성 변화

검증된 수치해석 기법을 사용하여 밸브의 유효 단면적이  $0.1A_0$ ,  $0.3A_0$ ,  $0.5A_0$ ,  $0.7A_0$ ,  $0.9A_0$ 로 바뀔 때, 주기적인 저주파 압력 섭동에서 임피던스 특성 변화를 확인하였다.

경계조건으로는 입구와 출구의 압력조건을 주었으며,

입구의 압력조건을 주기 위해 5Hz의 정현파(Sin Wave)로 UDF(User Defined Function)을 사용하여 Fig.6와 같이 모사해주었고, 출구 압력조건은 대기압으로 방출되는 상황을 모사해주기 위해 0 Pa로 주었다.

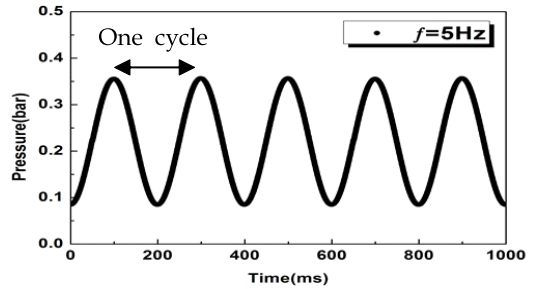


Fig. 6 UDF(User Defined Function) [5Hz, Sin Wave]

수치해석 결과를 바탕으로 밸브의 유효 단면적에 따른 임피던스 변화를 무차원으로 표현해주었고, 수치해석 결과는 Fig. 7와 같다.

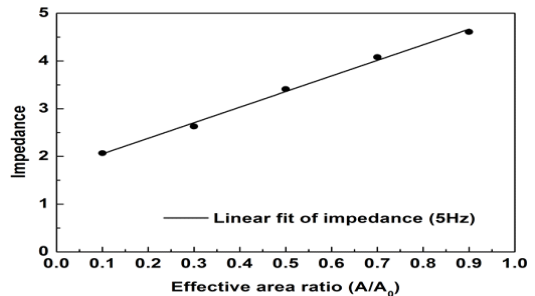


Fig. 7 Impedance characteristics for 5Hz

이를 통해 유효 단면적이 커질수록 임피던스 값이 선형적으로 증가한다는 사실을 알 수 있었다.

이와 같은 경향을 보이는 이유를 파악하기 위해 유효 단면적이 가장 작은  $0.1A_0$ 와 가장 큰  $0.9A_0$  사이에서 주기적인 압력섭동에 의한 속도 변화 분포를 확인하고자 Fig. 6에서의 압력섭동 1주기 (최대 진폭에서 다음 최대 진폭까지의 시간)에 대해서 유동장 가시화를 수행하였고, 이를 Fig. 8와 Fig. 9를 통해 나타내 주었다.

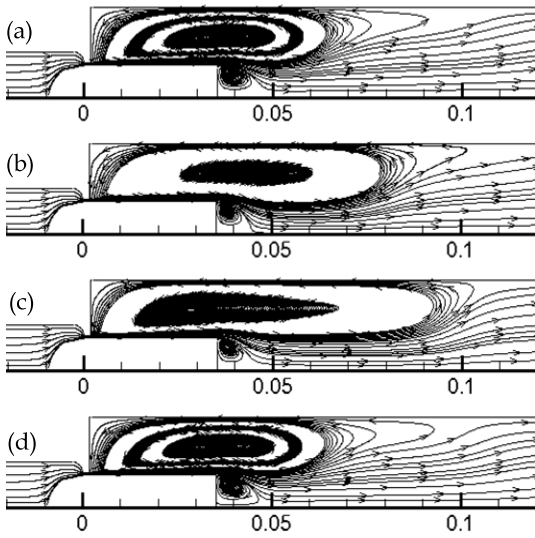


Fig. 8 Instantaneous streamlines of velocity,  $0.1 A_0$ ; (a)  $1/4T$  (b)  $2/4T$  (c)  $3/4T$  (d)  $4/4T$

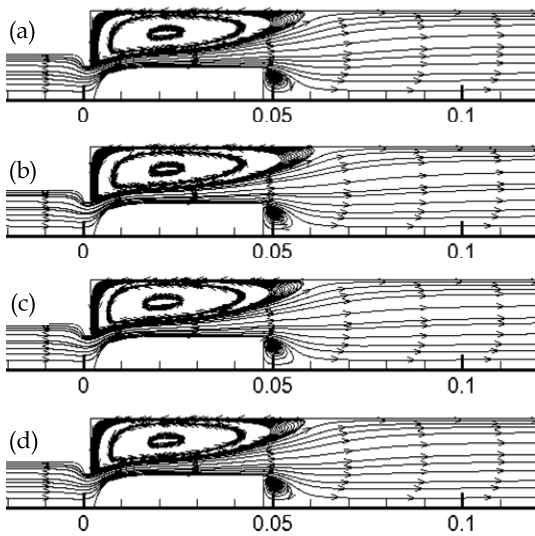


Fig. 9 Instantaneous streamlines of velocity,  $0.9 A_0$ ; (a)  $1/4T$  (b)  $2/4T$  (c)  $3/4T$  (d)  $4/4T$

유동장 가시화를 통해서 주기별로 유효 단면적이  $0.1 A_0$ 에서의 재순환 유동의 크기가 유효 단면적이  $0.9 A_0$ 보다 상대적으로 크다는 것을 확인하였고, 유효

단면적이  $0.1 A_0$ 일 때가 유효 단면적  $0.9 A_0$ 보다 상대적으로 주기에 따라 순간적으로 변하는 재순환 유동의 크기 분포가 크다는 점을 통해 압력섭동에 따라 실시간으로 유효 단면적이 작을수록, 재순환 유동의 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

결국 유효 단면적이 작을수록, 재순환 유동을 통해 압력저항의 영향을 더 크게 받기 때문에 전반적으로 유량이 줄어들게 되고, 그것에 의한 영향으로 유량평균 및 유량섭동 값이 줄어들게 된다.

동일한 진폭의 주기적인 압력섭동에 대해 유효 단면적이 작을수록 재순환 유동이 상대적으로 커지면서 평균유량 및 섭동유량 모두 감소하게 되는데, 이때 재순환 유동에 의해 평균유량이 섭동유량에 비해 감소하는 폭이 상대적으로 크기 때문에 전체적으로 임피던스 값이 유효 단면적이 작을수록 감소하게 된다.

재순환 유동은 압력저항으로 작용하기 때문에 외부에서 주어지는 압력교란의 대해 압력진폭을 감소시키고, 이를 통해 유량섭동의 진폭 또한 감소시킨다.

결국 유동장 분석을 통해서 임피던스 변화의 주요 원인이 압력섭동에 의해 주기적으로 바뀌는 재순환 유동의 크기 변화 때문이라는 점을 알게 되었다.

## 5. 결 론

액체로켓에서 추력제어를 위해 주로 쓰이는 제어밸브의 유효 단면적에 따라 변하는 임피던스 특성에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구를 통해 저주파의 주기적인 압력섭동에서 유효 단면적의 크기에 따라 밸브의 임피던스 변화가 선형적으로 증가함을 확인하였다.

유효 단면적의 크기에 따라서 유동 환경이 변하게 되고, 이에 영향을 받게 된 재순환 유동의 크기 변화가 임피던스 변화의 주요 원인을 확인하였다.

본 연구를 통해서 얻게 된 제어밸브의 임피던스 변화 특성에 관한 정보를 활용하게 되면, 액체로켓 공급 시스템의 임피던스 데이터를 얻는데 활용될 수 있고, 이걸 통해 연소실로 공급되는 연료 및 산화제의 유량 섭동에 관한 정보를 얻을 수 있을 뿐 아니라 이를 바탕으로 포고 현상 예측 및 로켓기체의 미치는 영향 등에 대해서도

알 수 있다. 또한 이를 통해 포고를 막기 위해 구조진동과 추력진동의 위상 및 진동수를 바꿔주거나 추력진동의 진폭을 낮춰주기 위해 설치되는 유압완충장치나 오리피스 등을 설계하는 데 도움을 줄 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(No. 2013073861)의 연구 결과입니다.

#### 참고문헌

1. 윤웅섭, 김영수, “로켓공학”, 경문사, 2004
2. D N Johnston and K A Edge, “The impedance characteristics of fluid power components :

- restricter and flow control valves”, Journal of System and Control Engineering. Vol. 205, Issue 1, 1991, pp.3-10
3. Bohdan W. Oppenheim and Sheldon Rubin, “Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets”, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 30, No. 3, 1993, pp.360-373
4. 정태규, 이수용, “BLDC 모터로 구동되는 액체 추진제 로켓엔진용 극저온 추력제어밸브 개발”, 한국항공우주학회지, V.38, No.10, 2010, pp.1026-1030
5. 심명보, 최희수, 김상훈, 윤웅섭, “동축형 밸브의 유효 단면적에 따른 유량계수 특성 해석”, 한국추진공학회 2014년도 추계학술대회 논문집, 2014, pp.397-402
6. James A. Davis and Mike Stewart, “Predicting Globe Control Valve Performance-part 1: CFD Modeling”, Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, Vol. 124, No. 3, 2002, pp.772-777