

## 고온 고압 환경에서 가변추력기용 핀틀의 열전달 계수에 대한 수치적 연구 및 2D 실험

박순상 · 문영기 · 곽재수<sup>†</sup>

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

## Numerical Analysis and 2-D Experiment of Heat Transfer Coefficient on the Pintle of a Controllable Thruster Nozzle

Soon Sang Park · Young gi Moon and · Jae Su Kawk<sup>†</sup>

### ABSTRACT

In this paper, 2-D experiment and steady-state computational fluid analysis were conducted for measuring the heat transfer coefficient of pintle type controllable thruster in high pressure and temperature. In case of 2-D experiment, transient liquid crystal technique was used for measuring heat transfer coefficient for the 2-D pintle model. The experimental result was used to validate the CFD result. The CFD results well predicted the heat transfer coefficient on the pintle surface except the nozzle downstream region, where the results by CFD was higher than experimental results. The CFD results were also compared with the result by Bartz equation and the it was shown that the Bartz equation overestimated the heat transfer coefficient on the nozzle throat as much as 80%.

Key Words : Controllable thruster, Heat Transfer Coefficient, Pintle

### - 기호설명 -

$\alpha$  : 시험부의 열확산도

$k$  : 시험부의 열전도도

$t$  : 천이 시간

$h$  : 열전달 계수

### 1. 서 론

최근 국내외로 로켓 추진기관에 대한 추력 조절이 유연하면서 간단한 구조에 내구성을 요구하는 기술에 대한 연구가 수행되고 있다. 또한 추력 조절이 가능한 액체 추진 로켓에서 근래에는 고체 추진 로켓의 추력 조절이 가능하도록 하는 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 특히 정밀한 공력제어 및 병진운동을 수행 할 수 있는 발사체에 대한 연구가 진행되고

<sup>†</sup>2012년 11월 15일 접수 ~ 2012년 12월 18일 심사완료

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: jskwak@kau.ac.kr

있는데, 이는 고고도에서 발생하는 희박 상태에서 공력을 이용한 궤도수정이 불가능하기 때문이다.

정밀 추력 제어 중 대표적인 기술은 핀틀을 이용한 제어 기술이다. 이 기술은 비행체의 궤도를 수정하거나 미세 자세 제어를 위해서 추력이 연속적으로 발생되면서 유동적으로 크기를 조절 수 있는 보조 추진기관에 대한 기술이다. 이와 같은 핀틀 기술은 현재 우리나라에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.[2] 이에 따라 정밀한 자세 제어 시스템에 관한 연구가 진행 중에 있으며, 그 중에서도 고온 고압 환경과 같은 열적 구조에서의 제어 시스템에 대한 연구가 가장 핵심이라 할 수 있다.

특히 고온 고압환경에서 작동함에 따라 높은 열부하에 노출되는 가변추력기의 핀틀을 설계하기 위해서는 정확한 열전달계수 분포 및 계산방법이 필수적이다. 이에 본 논문은 고온 고압의 환경에서 가변추력기의 핵심부위인 핀틀 부분의 열전달 경향성과 열전달계수에 대한 2-D 모델 실험을 수행하였으며, 전산유체해석(CFD)을 통하여 계산 및 실험 결과를 비교 및 분석하였다.

## 2. CFD 및 실험 측정이론

### 2.1 CFD 유효성 검증

고온 고압환경에서 작동하는 로켓엔진 내부의 정확한 실험값을 적용할 수 없으므로 문헌에 있는 실험적 결과를 바탕으로 CFD 유효성 검증을 수행하였다.[3, 4] 입구조건으로는 압력 조건을 적용하였으며, 수치해석 프로그램으로는 FLUENT가 사용되었다. 벽면 열전달 계수 측정을 위하여 벽면 근처 유동의 정확성이 높은 SST  $k-\omega$  모델을 사용하였다. 그리고 원통형의 모델을 고려하여 Axis symmetry 방식을 사용하여 계산을 수행하였다. 수치해석 값과의 비교를 위하여 다음의 Bartz 식을 사용하였다.

$$h_g = \left[ \frac{0.026}{D_t^{0.2}} \left( \frac{\mu^{0.2} C_p}{Pr^{0.6}} \right) \left( \frac{p_{c,ns} g}{c^*} \right) \left( \frac{D_t}{R} \right)^{0.1} \right] \left( \frac{A_t}{A} \right)^{0.9} \sigma \quad (1)$$

$$c_p = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{4\gamma}{9\gamma - 5} \quad (3)$$

$$\mu = (46.6 \times 10^{-10}) (\bar{m})^{0.5} T^w \quad (4)$$

$$C = \text{Characteristic velocity (sound speed)} \quad (5)$$

### 2.2 2D 실험 장치 구성

Figure 1은 본 실험에 대한 실험 장치 구성도이다. 작동유체가 되는 공기는 압축탱크에서 공급되어 에어 히터를 통과한다. 이때 히터는 본 실험을 위해서, 주유동을 충분히 가열할 수 있도록 설계하였다. 또한 입구 유동의 일정한 온도 유지 및 유출을 위하여 솔레노이드 밸브 시스템을 구성하였다. 실험부 상단에는 본 실험의 주유동 측정을 위해서 카메라를 설치하였다. 본 실험에 적용되는 작동유체에 대한 유량 및 특성을 일정하게 유지하기 위해서 유량 측정 장치 및 데이터 획득 시스템을 설계하였다. 실험부의 가공은 핀틀의 2차원 형상에 적합하도록 가공하였다. 실험 측정 부분은 측정면이 측정 카메라로 촬영이 가능하도록 투명한 재질을 사용하였다.

### 2.3 열전달 계수 측정 이론

천이액정법은 시험면을 1차원 반무한 고체로 가정하고 주유동의 온도 변화를 통한 액정의 색변화를 통해 실험부의 열전달 계수를 측정하는 방법이다. 실험의 이상적인 결과를 얻기 위해서는 측정부위의 온도가 급격하게 변해야만 한다. 하지만 실제 실험의 경우, 급격한 온도변화를 얻는 것은 거의 불가능하다. 이와 같은 이유로 측정하고자 하는 열전달계수의 온도에 이르기까지 일정 시간이 걸리게 되는데, 시간에 따른 온도변화를 고려하기 위해서 Duhamel의 중첩법을 이용한 다음 식(6)을 이용한다.[5, 6]

$$T_w - T_i = (T_{m,0} - T_i) \times F\left(\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right) + \sum_{i=1}^n \left[ F\left(\frac{h\sqrt{\alpha(t-\tau_i)}}{k}\right) \Delta T_{m,i} \right] \quad (6)$$

여기서,  $F(x) = 1 - \exp(x^2) \operatorname{erfc}(x)$ 이다.

주유동의 온도( $T_m$ )와 표면의 초기온도( $T_i$ )를 측정하고 측정부의 도포된 액정의 색상 변화로부터 초기 온도에서 원하는 표면 온도에( $T_w$ )에 이르기까지의 시간( $t$ )를 측정하면 식(3)을 통해서 열전달계수( $h$ )를 계산할 수 있다.

천이액정법을 적용하기 위해서 압축공기는 미리 정해진 온도로 가열될 때까지 바이패스 되며, 목표 온도에 이르게 되면 유동이 측정 부분으로 유입되도록 솔레노이드 밸브를 조작하였다. Fig. 2는 핀틀 열전달 측정부에 대한 그림이다.

핀틀 겉표면은 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 천이액정법을 적용할 수 있도록 흑색 페인트를 도포한 후, 그 위에 액정(35Cw, Hallcrest)을 도포하였다. 실험부상단에 CCD 카메라를 설치하여 실시간으로 색변화 기록을 얻을 수 있도록 설정하였다. 이와 동시에 열전대를 통한 온도값을 데이터 획득 장치를 통해 수집하였다. 본 실험에서의 적용된 핀틀 거리는 핀틀 상단면 곡률 중심에서 하단면 곡률 중심에 이르는 거리(D)와 상단면과 하단면 최단거리(d)의 비로, 약 5% 개도되었을 때의 실험을 수행하였다.

### 3. 해석 결과 및 실험 결과 분석

#### 3.1 CFD 해석 결과

Figure 3, 4, 5는 노즐 내부의 유동해석 결과이다. Fig. 3은 속도 분포로 수축-확대 노즐의 특성대로 노

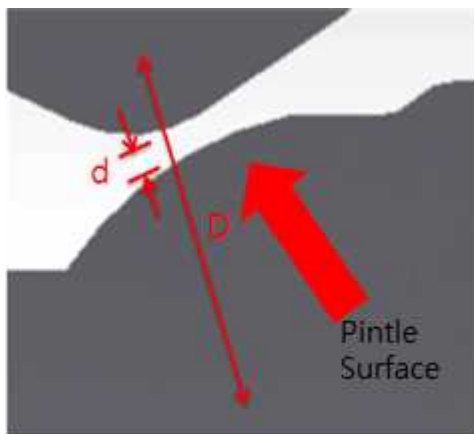


Fig. 2 Test part of Controllable Thruster

즐목에서 부터 속도가 가속되는 것을 볼 수 있다. 또한 노즐 목 부근의 벽면에서 충격파가 생기는 것을 볼 수 있다. 이 충격파는 출구 배압에 따른 압력불균형으로 인해 생성된 것으로 판단된다. Fig. 4는 마하수 분포로 속도 분포와 비슷한 경향성을 나타내고 있으며, 노즐 목 부근에서 마하수가 1인 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 정압 분포를 나타낸 것이다. 이 분포를 통해서 속도가 가속됨에 따라 압력이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 입구 유량 및 입구 압력조건에 대해서 각각 노즐 부분에서의 열전달 계수에 대한 CFD 해석 결과값과 실험값 그리고 Bartz 식을 통해 계산한 열전달

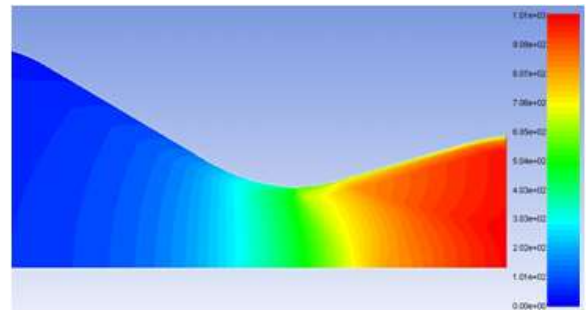


Fig. 3 Velocity Contour

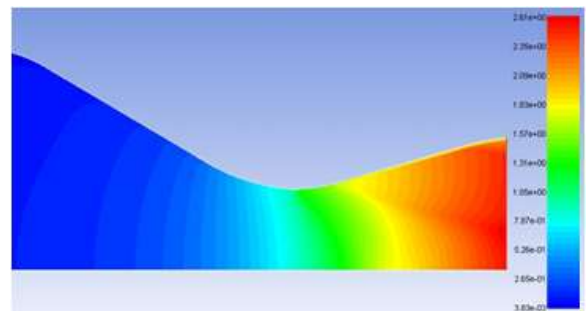


Fig. 4 Mach Number Contour

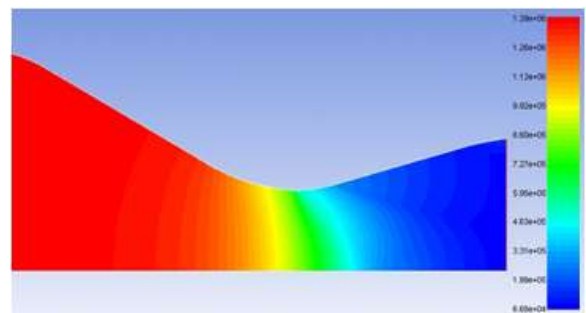


Fig. 5 Static Pressure Contour

계수 값을 비교한 그래프이다.

Bartz 식을 통해 계산한 값은 CFD 해석 값 보다 더 높은 결과값 나타내고 있으며, 실험값과의 비교에서는 해석값과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 열전달계수 값은 노즐 목에서 단면적 감소에 따른 초킹에 의해 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

### 3.2 실험 결과

Figure 7은 개도가 약 5% 일 때의 열전달계수 결과이다. 핀틀의 최소단면적 부분인 노즐 목 부분에서 열전달이 가장 활발히 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 노즐 표면에서 경계층 발달에 따라 열전달 계수가 감소한다. CFD를 이용한 수치적인 결과에서도 핀틀 초입부터 말단에 이르기까지의 경향이 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 하지만 최대 열전달계수가 나타나는 지점은 CFD 계산 결과값과 다른 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 이는 실험에 있어서 1D 열전달을 가정했지만, 실제 실험에서 발생하는 열전달은 3차원으로 전달된다. 이에 따라 CFD 결과값 보다 실험에서 얻게 된 열전달계수가 더 낮게 나온 것으로 판단된다. 또한 전체적으로 일치하지 않는 점은 천이액정법 상의 오차와 실험부분의 가공 상의 오차, 실험 진행시의 최적 조건이 아님에 의해서 발생하는 실험 오차로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 가변추력기에서 핀틀의 열전달계수를 수치해석과 2D 실험에 대한 연구를 수행하였다. 고온, 고압 노즐에 대한 참고문헌 실험결과를 이용하여 CFD 유효성 검증을 수행하였다. 실험값이 없는 고온, 고압 환경에서의 해석결과를 검증하기 위하여 Bartz 식을 이용하였다. 또한 단순화된 핀틀 노즐의 2D 실험과 CFD 유효성 검증을 수행하여 두 결과값을 비교하였다.

해석에 있어서의 가변추력기 열전달 계수 계산은 통상적으로 Bartz 식을 이용하여 계산한 결과가 실험값 보다 80%에서 100%정도 높은 결과값이 도출되었다. 이번 해석 결과에서도 더 높은 열전달 계수값이 나타났으며, 이에 대한 결과를 검증할 수 있었다.

2D 실험의 경우, 천이액정법을 이용하여 가변추력기의 핵심 부분인 핀틀에서의 최대 열전달 계수를 측정하여 CFD 결과와 비교하였다. 그 결과, 노즐 단면적 최소 영역에서 유동의 가속에 의해 최대 열전달 계수가 측정되었으며, 실험과 CFD에서 모두 최소 유동 면적 부근에서 최대 열전달 계수를 확인할 수 있었다. 노즐목 하류에서는 경계층 성장, 난류로의 천이, 박리 등에 의해 열전달 계수의 증감이 발생하였으며, 실험과 CFD에 의한 열전달 계수에 대한 분포는 대체로 일치하였다. 또한 최대 열전달 계수의 경우, CFD 계산 결과가 높게 도출되었다. 이는 실제로 발생하는 열전달이 3차원 열전달 현상이므로, 해석 결과 값보단 낮게 나타난 것으로 판단된다.

열전달계수 값은 노즐 목에서 단면적 감소와 초킹 현상으로 인해 가장 높게 나타났으며, CFD 결과, 실험

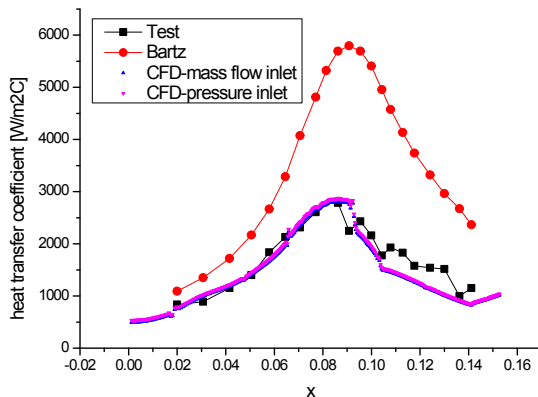


Fig. 6 Heat transfer coefficient at nozzle

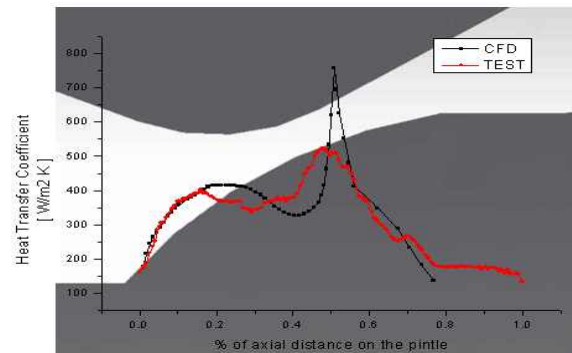


Fig. 7 Comparison between Results

값, Bartz 식 결과 모두 유사한 경향성과 열전달 계수를 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] D. K. Huzel, and D. H. Huang, "MODERN ENGINEERING FOR DESIGN OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES", AIAA, 1992
- [2] 구승희, 이방엽, 조원만, 이영신, "로켓 추진기관의 추력방향 조종 장치(TVC) 기술 분석," 대한기계학회, 고체 및 구조역학 부문 학술대회 논문집, pp.66-69, 2004
- [3] L. H. Back, P. F. Massier, H. L. Gier, "Convective Heat Transfer in a Convergent-Divergent Nozzle," NASA Technical Report No.32-415, February 1965
- [4] B. Betti, F. Nasuti, "Numerical Simulation of Hot-Gas Side Heat Transfer Enhancement in Thrust Chambers by Wall Ribs," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit , 47th, 2011-5622, 31 July - 03 August, 2011
- [5] 김석범, 이용진, 최은영, 전창수, 곽재수, "딴플이 설치된 회전 유로의 높이가 열전달 계수에 미치는 영향에 대한 실험적 연구" 유체기계저널:제13권, 제3호, pp.30~36, 2012
- [6] S. S., Lee, K. S. Park, S. D. and J. S. Kwak, "Measurement of the heat transfer coefficient in the dimpled channel: effects of dimple arrangement and channel height," Journal of Mechanical Science and Technology, pp. 624-630, 2009