한국추진공학회 2007년도 추계학술대회 논문집 pp.76~79 2007 KSPE Fall Conference

진공환경에서 열적발산원리의 배압에 따른 효율분석

정성철* · 허환일**

Efficiency Analysis of Thermal Transpiration According to Back Pressure under Vacuum Condition

Sungchul Jung* · Hwanil Huh**

ABSTRACT

From the previous researches about flow characteristic of micro-nozzle, we found that viscosity and back pressure induced heavy losses in micro nozzle. To overcome thess losses, we began to study new conceptual micro propulsion system that is thermal transpiration based micro propulsion system. It has no moving parts and can pump the gaseous propellant by temperature gradient only (cold to hot). Most of previous research on thermal transpiration is in its early stage and mainly studied for application to small vacuum facility or gas chromatography in ambient condition using nanoporous material like aerogel. In this study, we focus on basic research of propulsion system based on thermal transpiration using polyimide material in vacuum conditions.

초 록

마이크로 노즐의 유동특성에 대한 선행연구로부터 우리는 마이크로 노즐에서 점성과 배압에 의해 유동손실이 발생함을 확인하였다. 이러한 유동손실을 극복하기 위해 열적발산원리를 이용한 새로운 개념의 마이크로 추진장치에 대한 연구를 진행하였으며, 이는 움직이는 부품이 없이 오직 온도구배만으로 추진제를 낮은 온도에서 높은 온도로 펌핑이 가능하다. 대부분의 열적발산원리에 대한 연구는 많은 발전을 거듭해 왔으며, 주로 대기압 환경에서 에어로젤과 같은 나노 다공물질을 이용하여 소형 진공설비나 가스 크로마토그래피에 적용 목적으로 연구되었다. 하지만 본 연구에서는 폴리이미드 재질을 이용하여 진공환경에서 열적발산원리를 이용한 추진장치의 기초연구를 진행하였다.

Key Words: Micro-Propulsion(마이크로 추진), Thermal Transpiration(열적발산원리), Knudsen Pump (누센펌프), Knudsen Number(누센수), Vacuum Condition(진공 조건)

1. 서 론

마이크로 인공위성의 자세제어를 위한 마이크로 추진장치에 대한 연구는 대부분 기존의 추진

* 충남대학교 항공우주공학과 석사과정
** 충남대학교 항공우주공학과
연락저자, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

장치를 소형화하는 방향으로 진행되고 있다. 하지만 미소추력 발생을 위한 노즐의 소형화는 점성손실, 배압에 의한 손실 등을 야기하며 선행 연구에서 대기압실험, 진공환경실험, CFD 해석을 통하여 검증하였다[1].

본 연구에서는 마이크로 노즐에서의 유동 손실을 극복하기 위한 방법으로 열적발산원리를 제안하며, 이에 대한 이론적 접근을 시도하고 실험을 통해 효율을 분석하였다. 마이크로 추진장치에 적용을 위한 열적발산원리는 움직이는 부품 없이 오직 온도구배만으로 유동을 제어할 수 있기 때문에 추진장치의 소형화로 야기되는 손실을 극복할 수 있을 것으로 기대되며, 기체의 희박효과를 이용하기 때문에 점성에 의한 추력손실을 극복할 수 있을 것으로 예상된다[2].

열적발산원리에 대한 연구는 세계적으로 많은 발전을 거듭해 왔으며, 대부분이 대기압 환경에서 소형진공설비나 가스 크로마토그래피에 적용을 위한 목적으로 연구 중에 있다[3]. 즉 추진장치에 적용을 위한 목적으로는 처음 시도되었으며, 본 연구에서는 타 연구에서와 다르게 에어로젤과 같은 나노 다공물질을 사용하지 않고 폴리이미드 재질의 맴브레인을 이용하여 진공환경에서 배압에 따른 열적발산원리의 효율을 분석하였다.

2. 마이크로 노즐의 효율 분석

마이크로 노즐의 유동특성을 분석하기 위해 선행 연구에서는 CFD 해석, 대기압실험, 진공환경실험을 진행하였다.

21 마이크로 노즐의 형상에 따른 효율

마이크로 노즐의 유동 특성에 대한 실험에 앞서 마이크로 노즐의 형상(원형, 정사각 노즐)에 따른 유동특성을 FLUENT를 통해 분석하였다. 해석 결과 원형 노즐의 경우 노즐 단면 전체에서 속도분포가 일정한 반면에 정 사각 노즐의 경우는 전체적으로 포물선 형태를 보였다. 이는 원형노즐이 정 사각 노즐보다 벽면에서 점성에 의한 경계층 효과가 작아 효율이 뛰어남을 의미한다[4].

22 노즐의 소형화에 따른 유동 손실

노즐의 소형화에 따른 유동특성 분석을 위해 추진장치의 노즐 목 직경을 1, 0.5, 0.25 mm, 팽창비를 2, 4로 각각 제작하였으며, 미소추력 측정을 위해 7.6 mN ~ 1000 mN 의 추력을 측정할 수 있는 미소추력 측정 장치를 설계, 제작하였다.

- 추진제 : 질소, 아르곤
- 시험환경 : 대기압 환경, 저진공 환경(100 Pa)

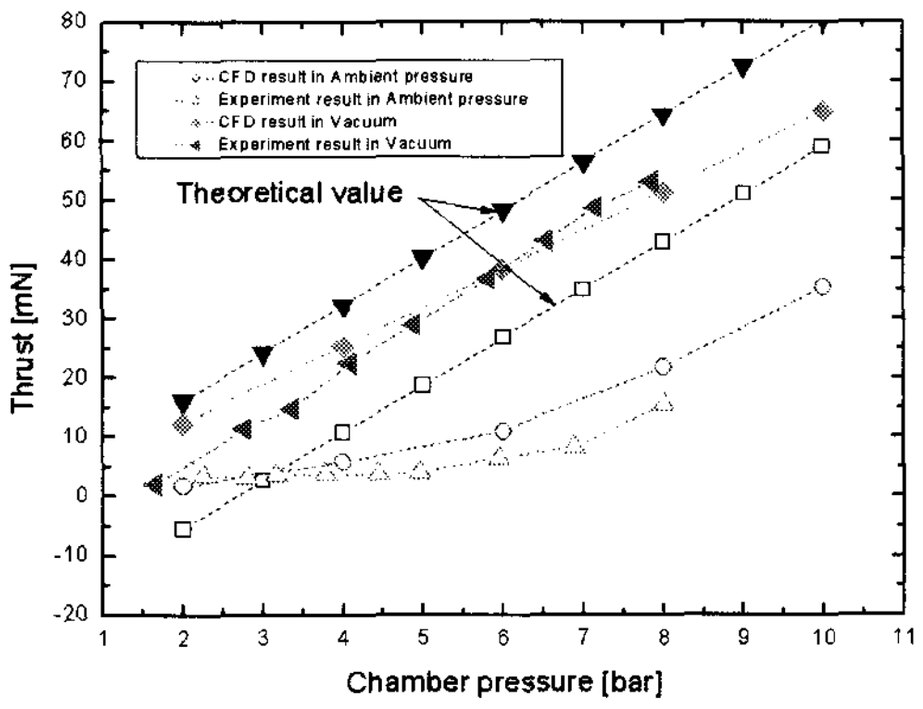

Fig. 1 추력 비교(CFD vs. Exp.)

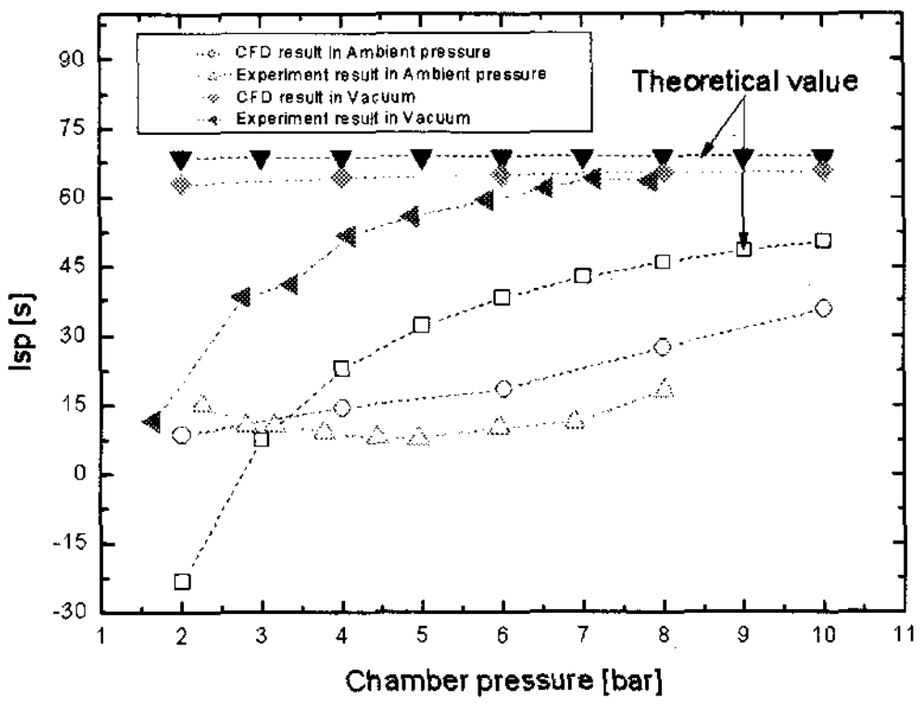

Fig. 2 비추력 비교(CFD vs. Exp.)

Figure 2, 3 결과를 보면 대기압 환경에서 추력 값이 저압부에서 선형적으로 증가하지 못하고, 진공상태의 경우 압력 증가에 따른 추력 값이 거의 선형적으로 증가하지만 비추력 결과가 곡선 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 노즐의 소형화에 따라 노즐 출구의 배압과 유체의 점성에 의한 손실이 증가한다는 사실을 선행 연구를 통해 확인할 수 있었다.

3. 진공환경에서의 열적발산원리

3.1 열적발산원리를 이용한 마이크로 추진장치

열적발산원리(일명:누센펌프)는 Reynolds(1879)에 의해 최초로 연구되었고 현재는 미 남가주대학(USC)과 NASA 산하의 Jet Propulsion Lab.에서 소형진공설비와 가스 크로마토그래피에 적용을 위한 목적으로 활발히 연구되고 있다[5]. 하지만 본 연구에서는 진공환경에서 배압에 따른 맴브레인의 효율을 분석하여 열적발산원리의 추진장치에 적용 가능성을 확인하고자 한다.

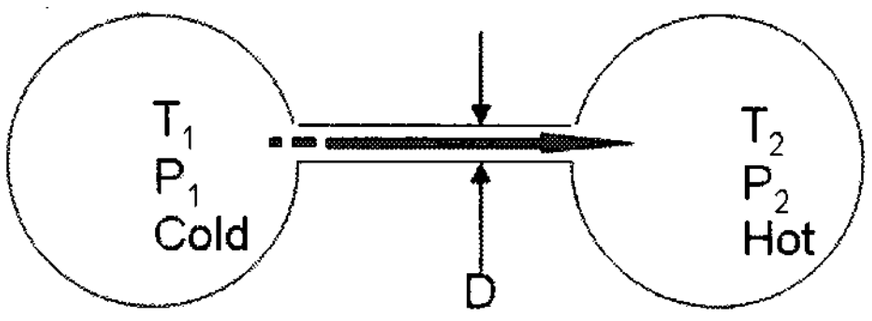

Fig. 3 누센펌프의 원리

열적발산원리는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 가스분자의 평균자유행정 보다 작은 직경을 가진 멤브레인에 의해 챔버가 연결되어 있을 때 멤브레인 좌우의 온도구배는 압력구배를 유발하고 온도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 유동이 발생하는 원리를 말한다. 이는 온도차에 의한 기체의 입사빈도의 차이로 발생하며, 최대 효율에서 유동은 압력이 온도구배의 제곱근이 될 때까지 지속된다.

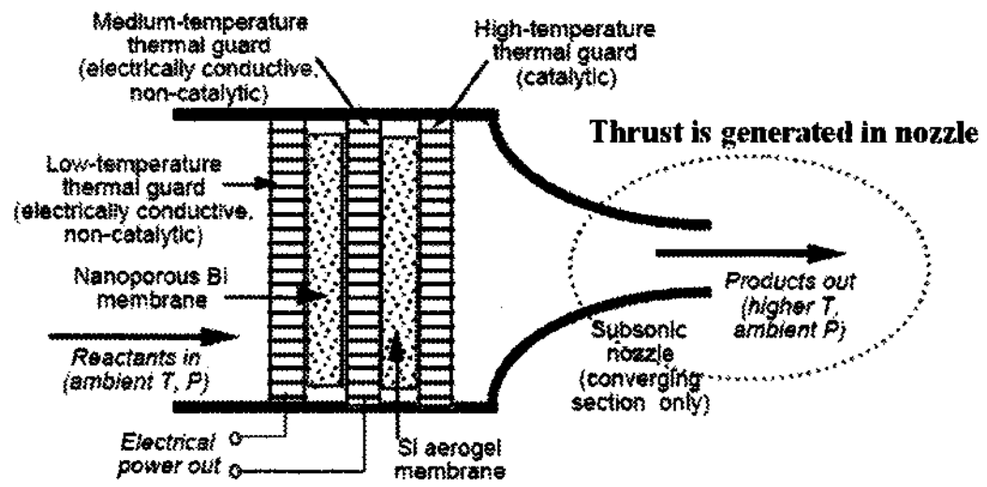

Fig. 4 열적발산원리를 이용한 추진장치 개념

Figure 4 는 열적발산원리를 이용한 마이크로 추진장치에 대한 개념도를 모사하고 있다.

3.2 연구방향

누센펌프의 효율은 Fig. 5와 식 (1)에서 볼 수 있듯이 기체의 누센수와 온도구배에 영향을 받는다. 즉, 열적발산원리의 효율은 맴브레인 좌우의 온도구배가 클수록 그리고 유체의 누센수가 증가할수록 증가한다.

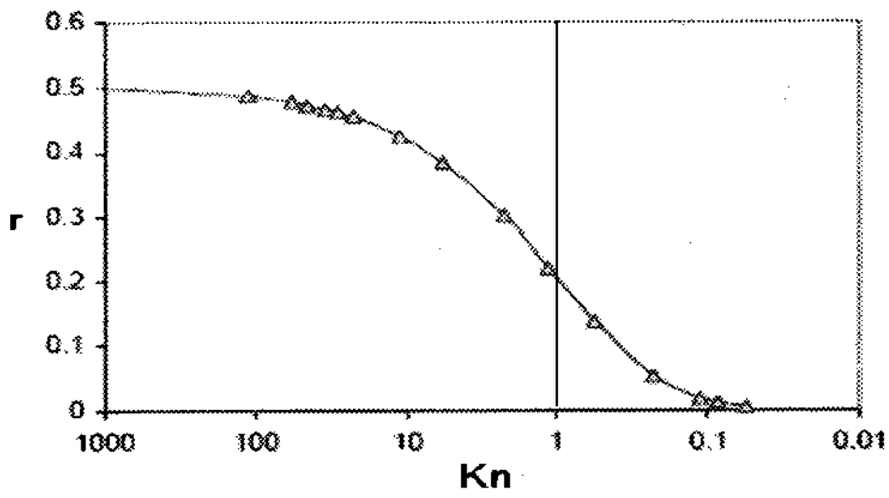

Fig. 5 누센수에 따른 누센펌프의 최대압력구배

$$\frac{P_2}{P_1} = \left\{ \frac{T_2}{T_1} \right\}^r \tag{1}$$

이러한 조건을 형성하기 위해 나노 스케일의 다공물질(멤브레인)이 필요하며, 온도구배가 클수록 압력 구배도 커지기 때문에 열전도율이 작은 물질을 멤브레인으로 사용하여야 한다. 그러나 비록 나노 스케일의 멤브레인이 아니더라도 진공설비를 이용하여 가스분자의 평균자유행정을 오히려 증가시키면 비교적 가공이 가능한 수준에서 이와 같은 효과를 평가할 수 있다.

3.3 실험장치 구성

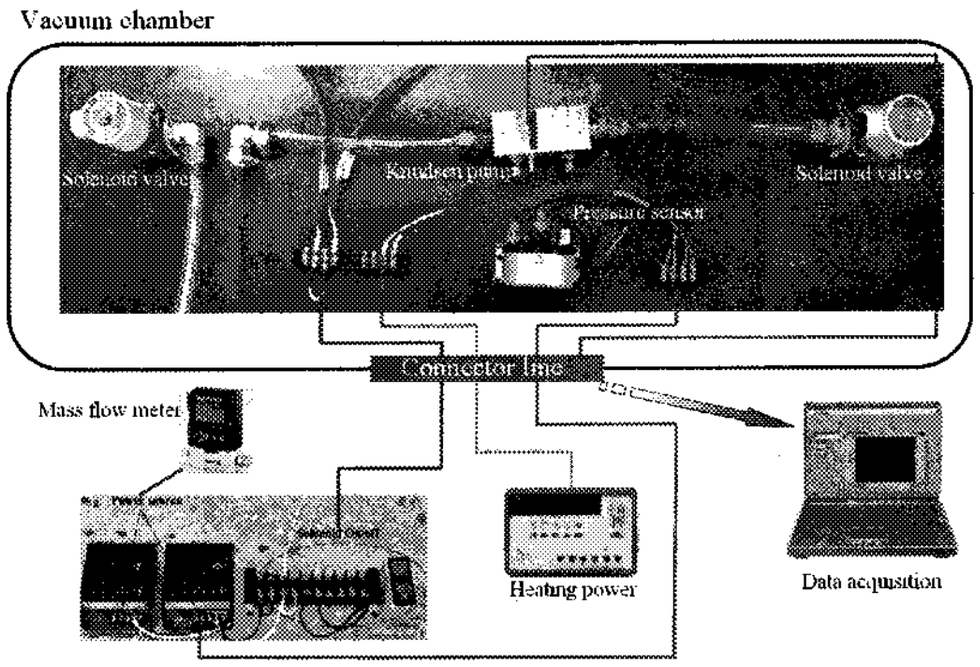

Fig. 6 누센펌프 실험장치 개략도

Figure 6은 진공환경에서 배압에 따른 열적발산원리의 효율분석을 위한 실험장치의 모습을 보여주고 있다. 온도구배는 파워서플라이로 제어를 할 수 있도록 하였으며, 최대 124 Pa 까지의 차압을 측정할 수 있는 차압계를 사용하였다.

맴브레인의 재료로는 열전도율(0.29 W/mK)이 낮

고 고온(300°C)에서 연속 사용이 가능한 플라스틱 계열의 폴리이미드(Polyimide)를 사용하고, 정밀 가공을 통해 직경 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.1 mm 의 홀(hole)을 가공하였다.(홀 개수 : 121개)

3.4 실험결과

Figure 7 은 두께가 2 mm이고 홀 직경이 0.5 mm 인 맴브레인의 전단부 온도(Hot-section) 변화에 따른 누센펌프의 압력구배에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 40, 67, 107 Pa 의 배압환경에서 실험적으로 측정된 압력구배와 K-type 열전대로 측정된 맴브레인 전단부와 후단부의 온도를 기준으로 계산된 이론적 값을 비교하였다.

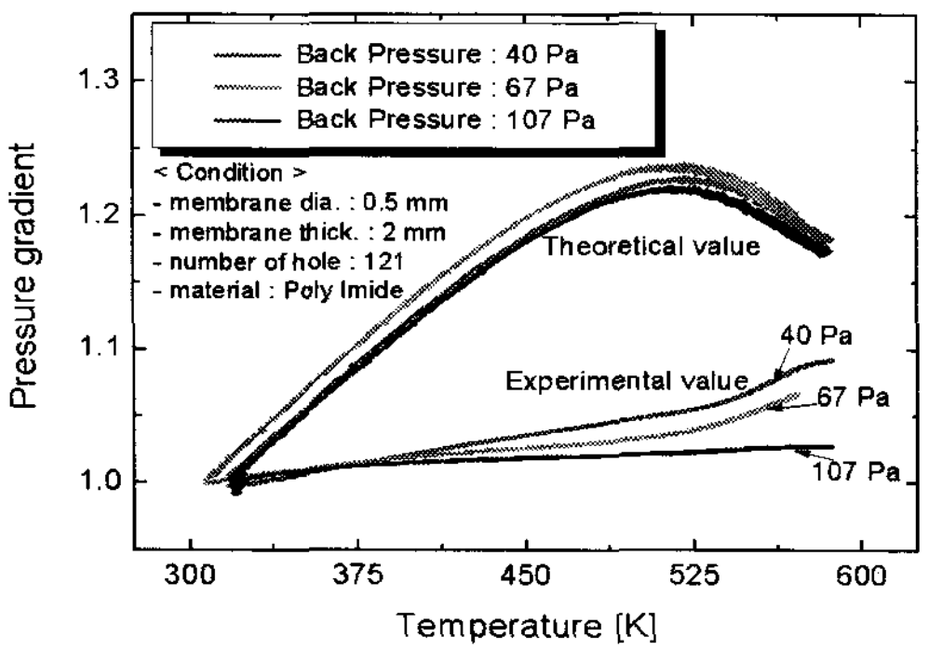

Fig. 7 전단부 온도에 따른 압력구배(Theory vs. Exp.)

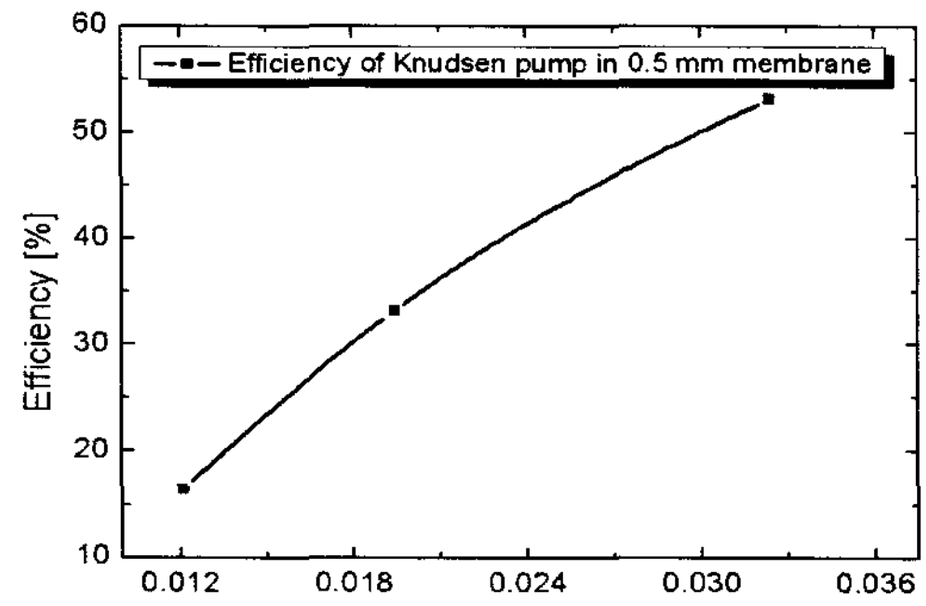

Fig. 8 누센수에 따른 누센펌프의 효율

Figure 8 은 배압의 변화, 즉 누센수의 변화에 따른 누센펌프의 압력구배 효율을 분석한 결과이다. 누센수가 증가할수록 압력구배 효율은 증가하였으며 이는 추진장치에 적용을 위한 열적발산장치의 설계 시 중요한 기초자료로 활용이 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 추진장치에서 발생하는 유동 손실을 극복하기 위해 열적발산원리를 추진장치에 적용하는 방안을 제시하였다. 전체적으로 열적발산원리의 배압환경에 따른 맴브레인의 압력구배 효율을 분석하여 누센수가 증가함에 따라 열적발산장치의 효율이 증가함을 확인할 수 있었다. 즉 맴브레인 좌우에서 기체의 희박효과로 유동이 발생하는 열적발산원리는 오직 온도구배만으로 유동을 제어할 수 있기 때문에 추진장치의 소형화로 야기되는 손실을 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2006년 정부재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원 (과제번호: KRF-2006-311-D00043) 및 한국과학재단의 목적기초연구지원(과제번호 : KOSEF R01-2005-000-11735-0)으로 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 문성환, 오화영, 허환일, "마이크로 노즐 성능평가", 한국우주공학회지, 제33권, 제5호, 2005, pp.72-78.
2. 정성철, 신강창, 김연호, 김혜환, 이용우, 허환일, "열적발산원리를 이용한 마이크로 추진장치에 대한 연구", 2007년 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, pp.25~29.
3. G. Pham-Van-Diep, P. Keeley, P. Muntz, E. and P. Weaver, D. "A micromechanical Knudsen compressor," In Rarefied Gas Dynamics. eds. J. Harvey, G. Lord, Oxford University Press, Oxford.
4. 한명신, 서지한, 명노신, 허환일, "Navier-Stokes CFD 모델을 이용한 소형 노즐 유동장 해석," 2004년 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집(II), pp. 699-702.
5. G. Pham-Van-Diep, P. Keeley, P. Muntz, E. and P. Weaver, D. "A micromechanical Knudsen compressor," In Rarefied Gas Dynamics. eds. J. Harvey, G. Lord, Oxford Univ. Press, 1999.