

Flow-3d를 이용한 표면장력 탱크용 메시 스크린 모델링

김현탁* · 임상혁** · 윤호성** · 박정배*** · 권세진*†

Modeling of Mesh Screen for Use in Surface Tension Tank Using Flow-3d Software

Hyuntak Kim* · Sang Hyuk Lim** · Hosung Yoon** · Jeong-Bae Park*** · Sejin Kwon*†

ABSTRACT

Mesh screen modeling and liquid propellant discharge simulation of surface tension tank were performed using commercial CFD software Flow-3d. 350×2600 , 400×3000 and 510×3600 DTW mesh screen were modeled using macroscopic porous media model. Porosity, capillary pressure, and drag coefficient were assigned for each mesh screen model, and bubble point simulations were performed. The mesh screen model was validated with the experimental data. Based on the screen modeling, liquid propellant discharge simulation from PMD tank was performed. NTO was assigned as the liquid propellant, and void was set to flow into the tank inlet to achieve an initial volume flow rate of liquid propellant in 3×10^3 g acceleration condition. The initial flow pressure drop through the mesh screen was approximately 270 Pa, and the pressure drop increased with time. Liquid propellant discharge was sustained until the flow pressure drop reached approximately 630 Pa, which was near the estimated bubble point value of the screen model.

초 록

상용 CFD 프로그램 Flow-3d를 활용하여, 표면 장력 탱크 적용을 위한 메시 스크린의 모델링 및 추진제 배출 해석을 수행하였다. Flow-3d 내 거시적 다공성 매체 모델을 사용하였으며, 350×2600 , 400×3000 , 510×3600 DTW 메시 스크린에 대한 공극률, 모세관압, 항력계수를 스크린 모델에 대입 후, 기포점 측정 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 실험 데이터와 비교하였으며, 메시 스크린 모델링의 적절성을 검증하였다. 이를 기반으로 스크린 모델을 포함한 PMD 구조체에 대한 추진제 배출 해석을 수행하였다. 추진제는 액상의 NTO를 가정하였으며, 3×10^3 g 가속 조건에서 초기 유량을 만족하도록 void를 유입시켰다. 메시 스크린을 통한 차압은 초기 약 270 Pa에서 시간에 따라 증가하였으며, 스크린 모델의 예상 기포점과 유사한 630 Pa에 이르기까지 액상 추진제 배출을 지속하였다.

Key Words: Surface Tension Tank(표면장력 탱크), Propellant Management Device(추진제 관리 장치), Mesh Screen(메시 스크린), Porous Media Model(다공성 매체 모델), Bubble Point(기포점)

1. 서 론

우주비행체를 미소 중력 조건 내에서 운용하는 경우, 가압 기체가 액상의 추진제와 혼합되어 엔진으로 공급될 우려가 있으므로 이를 방지하기 위한 탱크의 설계가 필요하다. 다이어프램(Diaphragm), 피스톤(Piston) 등 다양한 장치들이 활용되고 있으며, 이 중 표면 장력 탱크는 내부의 메시 스크린(Mesh screen), 베인(Vane) 등의 구조체에서 추진제의 표면장력을 활용함으로써 액상 추진제의 이송 및 배출을 유도하는 방식이다. 표면 장력 탱크는 구동부가 없는 구조로 신뢰성이 높고, 전 부분을 티타늄 등의 금속 재질로 구성함으로써 부식성 추진제의 사용 조건에서도 장기 운용이 가능한 장점이 있다.

위에서 언급한 메시 스크린(Mesh screen)은 수십 마이크로미터 두께의 금속 와이어를 직조한 다공성 재질로 표면 장력 탱크의 핵심 구성 요소 중 하나이다. 미세 공극 상 추진제의 표면장력에 의해 기체와 액체 간 계면을 일정 차압 내에서 유지시킬 수 있다. 이러한 성질로 인해 일정 조건에서 가압 기체가 메시 스크린을 통과하지 못하게 되고, 스크린을 탱크 유로에 설치함으로써 액상의 추진제 배출을 유도할 수 있다.

메시 스크린이 가압 기체를 통과시키기 직전의 기체-액체 계면에 형성되는 최대 차압을 기포점(Bubble point)이라 칭하며, 메시 스크린의 주요 성능 지표 중 하나이다. IPA, 물, LH₂, LCH₄ 등 다양한 기준 유체 및 추진제, 다양한 메시 스크린 사양에 대해 기포점 측정 관련 실험적 연구가 이루어져 왔다 [1-3].

위 메시 스크린을 포함하여 표면 장력 탱크 내 액상의 추진제 배출을 유도하는 구조물 일체를 PMD(Propellant management device)라 칭하며, 갤러리(Gallery), 베인(Vane), 스펀지(Sponge), 트랩(Trap) 등 여러 종류의 구조물에 대해 각종

형상 변수를 내포한다[4, 5]. 따라서 다양한 파라미터를 고려한 실험적 연구는 제약이 따를 수 있으며, 베인 등 상대적으로 작은 미소 중력 조건에서 개방형 유로를 활용하는 경우 지상 추진제 배출 실험이 불가능하다[6]. 그러므로 CFD를 통한 표면장력 탱크 추진제 배출 해석은 다양한 작동 조건 및 PMD 형상 변수에 따른 추진제 거동을 이해하고, 탱크를 설계하는 데 유용하게 활용될 수 있다.

상기 추진제 배출 해석을 수행하기 위해서는 핵심 요소 중 하나인 메시 스크린에 대한 모델링이 필수적이다. Chato, McQuillen 등은 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 통해, 갤러리 내 유동 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 때 메시 스크린에 'porous jump' 경계 조건을 적용함으로써 액상의 추진제가 스크린을 통과할 때 생기는 압력 강하를 모델링하였다[7, 8]. 그러나 앞서 언급한 메시 스크린의 기포점 특성을 모델링한 사례는 찾아보기 힘들다. 이는 스크린을 활용하는 표면장력 탱크 내 액상 추진제 배출 현상을 해석적으로 구현하기 위해 반드시 필요한 부분이다.

본 연구에서는 자유표면 해석에 상대적으로 강점을 지닌 상용 CFD 프로그램 Flow-3d를 사용하여, 메시 스크린을 모델링하였다. 거시적 다공성 매체 모델(Macroscopic porous media model)을 활용하여 메시 스크린 모델 영역에 공극률(Porosity), 모세관압(Capillary pressure), 항력 계수(Drag coefficient)를 지정하고, 이를 기반으로 기포점 측정 시뮬레이션을 수행, 해석 결과와 실험 데이터 간 비교 및 검증은 수행하였다. 이를 기반으로 메시 스크린 및 PMD 구조체를 포함한 탱크의 추진제 배출 해석을 수행하고, 기포점 특성의 반영 여부를 확인하였다.

2. 이론 및 해석 조건

2.1 거시적 다공성 매체 모델

메시 스크린의 사양은 350×2600 DTW와 같이 표현된다. 첫 번째 숫자는 인치(inch) 당 세로 와이어(warp wire)의 개수, 두 번째 숫자는 인치

* 한국과학기술원 항공우주공학과

** (주) 스페이스솔루션

*** 국방과학연구소

† 교신저자, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

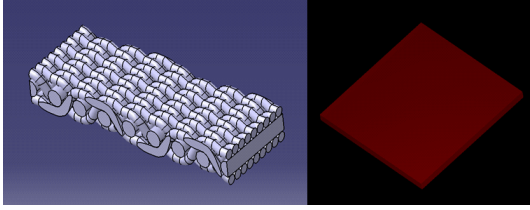


Fig. 1 Real geometry-based mesh screen model (left) and mesh screen model based on macroscopic porous media model in Flow-3d (right)

당 가로 와이어(shute wire)의 개수, DTW 등의 문자는 직조 방식을 의미한다. DTW(Dutch Twilled Weave) 방식의 경우, 복잡한 직조 형상이 기체의 침투를 막는데 용이하므로 타 방식에 비해 많이 활용된다[9].

한편, 메시 스크린의 복잡한 미세 구조를 모두 모델링하는 것은 상당한 시간이 소요될 뿐 아니라, 이를 탱크 해석에 적용하는 경우 수많은 격자수로 인해 과도한 계산 용량 및 시간이 소요될 우려가 있다. Flow-3d에서는 거시적 다공성 매체 모델을 제공하여, 단순 평판형의 모델링으로도 평균적인 다공성 물성을 지정하여 메시 스크린의 특성을 반영하도록 한다(Fig. 1). 거시적 다공성 매체 모델에서 필요로 하는 물성은 공극률, 모세관압, 항력 계수 등 총 3가지이다.

2.2 기포점 측정 시뮬레이션 해석 조건

Fig. 2의 좌측은 기포점 측정 실험장치를 모델링한 형상이다. 외기가 고려되지 않은 1 fluid 조건의 해석으로, 유체는 JP-8을 가정하였다. 우측 실린더 상단에 원형의 메시 스크린 모델이 지정되어 있으며, 초기 양 실린더에 가득 차있던 유체는 지구중력 조건에서 좌측 실린더 하단의 출구를 통해 배출된다. 메시 스크린이 일정 차압을 버티는 특성에 의해 우측 유체기둥은 일정 시간 정지해 있다가, 스크린이 기포점에 다다르면 우측 유체기둥이 붕괴된다. Fig. 2의 우측은 유체 배출 영역을 포함한 직교격자 구성이며, 메시 스크린 부근 및 유체 기둥 영역을 상대적으로 조밀하게 설정하였다. 격자 경계조건은 실험장치 구조로 인한 일부 wall 조건 외에 Flow-3d의 기본 경계조건 (Symmetry: zero-gradient and

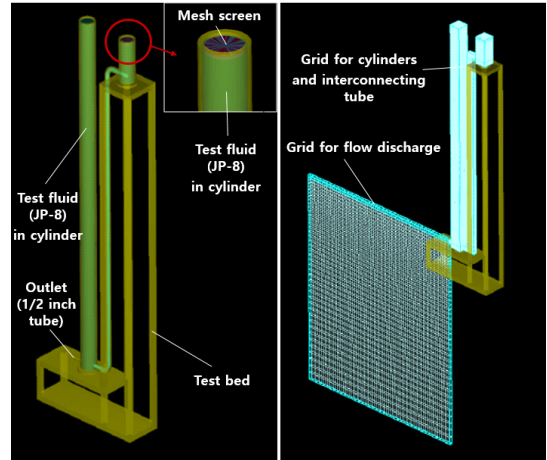


Fig. 2 Modeling of bubble point apparatus (left) and computational grid (right)

zero-velocity condition) 이 설정되었다. 본 논문에서는 350×2600 , 400×3000 , 510×3600 DTW 등 3종류의 메시 스크린 모델을 지정하였다. 메시 스크린의 공극률은 스크린 와이어의 사양 및 DTW 형상을 고려하여 Fischer가 제시한 절차에 따라 도출하였다[10]. 모세관압의 경우, 모세관안에 액체가 정지해있는 정수역학적 상황에서 액체-기체 계면에 형성되는 차압으로 정의될 수 있으며, 아래 식으로 표현된다.

$$\Delta P = \frac{4\sigma\cos\theta}{d_{eff}} \quad (1)$$

ΔP 는 모세관압(Pa), σ 는 액체의 표면장력(N/m), θ 는 액체의 모세관 벽에 대한 접촉각, d_{eff} 는 모세관의 유효 직경(m)이다. 이는 메시 스크린의 기포점과 물리적으로 동등한 개념이다. 본 해석에 앞서 위 3종류의 메시 스크린에 대한 기포점 측정 실험을 수행하였으며, 그 결과값을 모세관압 물성에 대입하였다. 한편, 기포점은 메시 스크린 내 유체가 정적인 상황에서 측정되는 값이므로 이론적으로 항력계수의 설정은 필요하지 않다. 그러나 실제 해석 시 초기 압력 분포가 수렴하는 과정을 거치고, 항력이 설정되지 않은 다공성 매체의 경우 이 과정에서 액체를 유출시키게 되므로 적정값의 설정이 필요하였다. 항력

Table 1. Macroscopic porous media properties for the three DTW mesh screens

Mesh screen	Porosity	Capillary pressure(Pa)	Drag coefficient(1/s)
350 × 2600	0.336	6525	6.0×10^5
400 × 3000	0.336	7815	6.4×10^5
510 × 3600	0.316	10094	6.5×10^5

계수는 다르시 법칙(Darcy's law)에 근거한 모델의 계수를 사용하였으며, 타 사양 메시 스크린의 일정 조건에서의 항력계수값 및 경험식 등을 참고하여 약 6.0×10^5 1/s 수준으로 설정하였다 [11,12]. 각 메시 스크린 모델에 대해 설정한 3가지 물성값을 Table 1에 제시하였다.

2.3 PMD 추진제 배출 해석 조건

2.2절에서 수행한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 거시적 다공성 매체 모델을 통한 메시 스크린 특성의 구현 가능성을 확인하고, PMD를 포함한 탱크 내 추진제 배출 해석을 시범적으로 수행하였다. Fig. 3의 좌측은 PMD의 일종인 Sump 구조체가 탱크 밑면에 부착된 형태를 모델링한 모습이다. 위 Sump 상단의 메시 스크린, Sump 측면의 개구부(open area)는 각각 스펀지, 갤러리 등 타 PMD 구조체와 접하는 부분이나, 본 논문에서는 단독 Sump 구조체에 대한 해석만을 고려하였다. Fig. 3의 우측은 Sump 격막(Cover plate) 하단의 베인 및 출구 메시 스크린의 배치를 보여준다. 둥근바닥 형태의 격막은 Sump 내 잔존 기포를 Sump 상단, 즉 탱크 출구와 멀어지는 방향으로 이송 및 상단 스크린으로의 배출에 용이한 구조를 제공한다. 베인은 표면장력에 의해 추진제가 부착하여 미소 중력 조건에서 유체가 원활히 이동하는 경로를 제공하며, 출구 메시 스크린은 최종적으로 기포를 배제하는 역할을 담당한다. 외기가 고려되지 않은 1 fluid 조건의 해석으로 추진제는 액상의 NTO를 가정하였다. 정지궤도 위성 운용조건을 일부 참고하여 +y 축 방향으로 3×10^{-3} g의 가속조건을 설정하였으며, 탱크 측면에서 공동(void)이 약 15 cc/s의 유

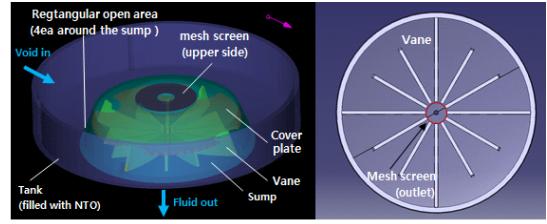


Fig. 3 Modeling of sump in a tank (left) and lower part of the sump structure (right)

량으로 유입되어 탱크 내 추진제가 Sump 출구 메시 스크린을 거쳐 배출되도록 하였다. Fig. 2와 유사하게 유체 배출 영역 및 탱크를 포함한 직교격자 영역을 구성하였다. 스크린 모델의 공극률은 0.3으로 지정했으며, 모세관압은 Eq. 1에 NTO의 표면장력 및 80 × 700 DTW 스크린의 유효 세공 직경(effective pore diameter)을 대입하고, 임계 지스만 표면장력(Critical Zisman surface tension) 개념에 따른 $\theta = 0$ [13] 및 안전 계수 2를 추가적으로 고려하여 610 Pa로 지정하였다. 기포점 측정 시뮬레이션과 달리 스크린을 투과하는 유량이 존재하므로, 해당 조건을 반영한 항력계수의 지정이 필요하다. 항력계수는 유체가 스크린을 투과할 때 생기는 압력 강하와 밀접한 관련이 있으며, 해당 차압 산정을 위해 80 × 700 DTW 스크린에 대한 아래 실험식을 사용하였다.

$$\Delta P = 0.01083\rho Q^2 + 1.41 \times 10^5 \mu Q \quad (2)$$

ΔP 는 흐름 차압(Pa), ρ 는 추진제 밀도(kg/m^3), μ 는 추진제 점도($\text{Pa}\cdot\text{s}$), Q 는 스크린 단위면적(cm^2)당 추진제 부피 유량(cc/sec)이다. 위 식을 기반으로 예상되는 출구 스크린을 통한 초기 차압은 약 40 Pa이며, 스크린 세공 기준 레이놀즈수를 고려했을 때 폴츠하이머(Forchheimer) 항력 모델을 기반으로 한 2개의 항력계수 설정이 필요하다. 그러나 본 해석은 메시 스크린의 기포점 도달 현상 자체에 초점을 맞추어, 항력식으로는 보다 간단한 다르시 모델을 사용하였다. 이에 기반하여 초기 차압 기준을 약 270 Pa로 높이고, 항력 계수는 1120으로 설정하였다.

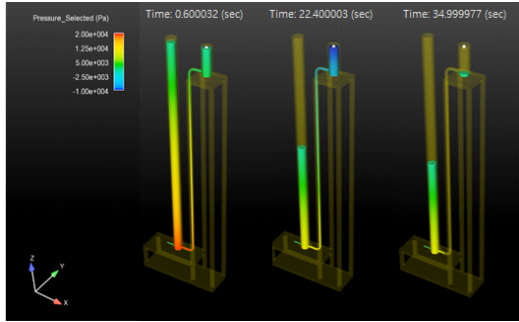


Fig. 4 Fluid behavior in bubble point test simulation (350 × 2600 DTW mesh screen)

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 기포점 측정 시뮬레이션

Fig. 4를 통해 기포점 측정 시뮬레이션의 유체 거동 양상을 나타내었다. 좌측 실린더에서 유체가 배출될수록 양 유체 기둥의 수위차가 커지면서, 우측 실린더 상단의 메시 스크린에 걸리는 차압이 점점 커진다. 이 때 외부가 진공조건이므로, 스크린 상단 압력은 0 Pa이고 스크린 하단 압력은 음수를 나타낸다. 차압의 증가는 압력 분포에 따른 색상 변화를 통해 그림 내에서 정성적으로 확인할 수 있다. 차압이 메시 스크린의 기포점에 도달하게 되면 우측 실린더에서 정지해있던 유체 기둥이 붕괴되고 좌측 실린더 내 유체와 함께 하류로 배출된다.

Table 2를 통해 세 종류의 메시 스크린에 대한 기포점 측정 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 오차 수준을 감안했을 때 스크린의 기포점 특성이 해석적으로 잘 구현되었다고 볼 수 있으며, 이는 Flow-3d의 다공성 매체 모델에서 기포

Table 2. Comparison between the bubble points in the experiments and simulations

Mesh screen	Bubble point in experiment (Pa)	Bubble point in simulation (Pa)	Error (%)
350x2600	6525	6632	1.6
400x3000	7815	7908	1.2
510x3600	10094	10194	1.0

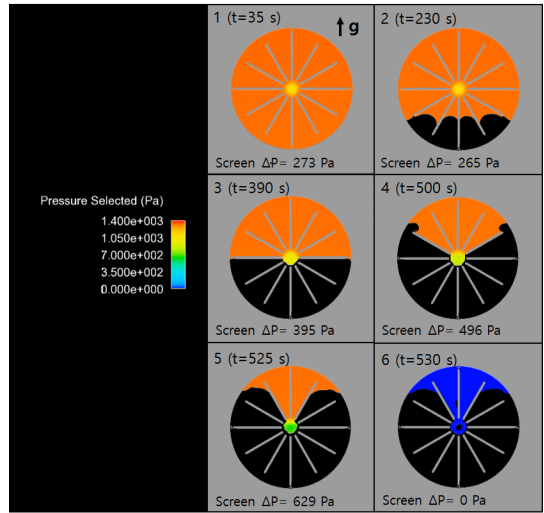


Fig. 5 Fluid behavior in liquid propellant discharge simulation

점과 물리적으로 동등한 모세관압 물성을 직접 설정하는 구조에 기인한다. 메시 스크린 모델을 포함한 표면장력 탱크의 추진제 배출 해석 수행 시, Eq. 1을 통한 계산 또는 실험값 대입을 통해 기포점 특성을 반영할 수 있으며, 본 시뮬레이션에서 해석적 필요성에 의해 설정된 항력계수는 실제 유동조건에 부합하도록 조정이 필요하다.

3.2 PMD 추진제 배출 시뮬레이션

Fig. 5를 통해 Sump 하부 단면을 기준으로 한 추진제 배출 양상을 나타내었다. Fig. 3의 우측과 동일한 형태로 각 그림의 상단에 추진제 배출 경과시간을, 하단에 출구 메시 스크린과 탱크 내 공동 영역과의 압력차를 나타내었다.

추진제가 배출되면서 공동 영역이 확장되고, 잔존하는 추진제들은 미소 중력 방향으로 분포한다. 또한 추진제의 표면장력으로 인해 배인 구조체 사이에서 지속적으로 메니스커스(Meniscus)가 형성된다. 출구 스크린이 기포점 영역에 도달하기 이전까지 Sump 출구로 액상의 추진제가 원활히 배출되었다. Sump 내 공동영역이 점점 커짐에 따라 유량이 지나갈 수 있는 출구 스크린의 단면적이 지속적으로 감소하므로, 스크린을 통한 차압이 지속적으로 증가한다. 이와 동일하게 Sump 내 공동영역과 출구 스크린 내부 간

압력차가 증가하고, 기포점에 도달하게 되면 액상의 추진제 배출이 중단된다. 6번 그림을 통해 출구 스크린 안쪽 중심에 공동이 형성된 모습을 확인할 수 있으며, 이는 실제 상황에서 탱크 내부의 가압 기체가 유출되는 상태를 나타낸다. 외기가 고려되지 않은 1 fluid 해석이므로 탱크 외부 압력은 0 Pa이고, 최종적으로 스크린 내 유체 영역이 붕괴된 이후 탱크 내부도 0 Pa로 수렴했음을 확인할 수 있다.

Fig. 5의 5번 그림에서 스크린 내 유체영역이 붕괴되기 직전 차압은 약 630 Pa로 스크린 모델에 지정된 모세관압 610 Pa과 유사하다. 즉, 스크린 모델의 기포점 특성이 추진제 배출 해석에서도 잘 구현됨을 나타낸다. 본 시뮬레이션 이전 trial and error 과정에서 스크린 모델의 기포점 특성이 발현되지 않는 경우를 확인하였으며, 이는 격자 영역을 통한 해석 형상의 반영 및 전처리 과정에서 모델링 상으로 결합되어 있던 메시 스크린과 주변 구조체 간 접합부에 미세한 균열이 형성된 데에 기인하였다. 상대적으로 복잡한 형상의 PMD 구조체를 적용하는 경우, 메시 스크린의 물성 지정과 함께 기밀 조건이 확립된 구조체의 모델링 및 격자 형성이 수행되어야 한다.

4. 결 론

상용 CFD 프로그램인 Flow-3d를 활용하여, 표면장력 탱크용 메시 스크린의 모델링 및 추진제 배출 해석을 수행하였다. 메시 스크린의 복잡한 미세구조 모델링을 대신하여 거시적 다공성 매체 모델을 사용하였으며, 스크린 모델에 대한 공극률, 모세관압, 항력계수 등 3가지 물성을 설정하였다. 기포점 측정 시뮬레이션과 메시 스크린 및 PMD를 포함한 탱크 내 추진제 배출 시뮬레이션을 수행한 결과, 스크린 모델의 기포점 특성이 원활하게 반영됨을 확인하였다. 실제 작동 조건에 보다 근접한 추진제 거동을 구현하기 위해 향후 항력 모델의 보정, 탱크 내 가압 유체를 고려한 2 fluid 해석 수행 및 적용 물리 모델의 다양화 등이 필요하다. 본 결과를 기반으로 향후

표면장력 탱크 설계를 위해 다양한 형태의 PMD 및 작동 조건을 반영한 추진제 배출 해석 수행이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 민군기술협력 개발과제(액체연료용 급속박막형 표면장력탱크(STT)내 유동장 해석)의 지원을 받았으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. David J. C and Maureen T. K, "Screen Channel Liquid Acquisition Devices for Cryogenic Propellants" NASA-TM-2005-213638, 2005
2. Hartwig, J., Mann, J. A. Jr., Darr, S. R., "Parametric Analysis of the Liquid Hydrogen and Nitrogen Bubble Point Pressure for Cryogenic Liquid Acquisition Devices", Cryogenics, Vol. 63, 2014, pp. 25-36
3. Jurns, J. M., McQuillen, J. B., "Bubble Point Measurement with Liquid Methane of a Screen Capillary Liquid Acquisition Device", NASA-TM-2009-215496, 2009
4. Jaekle, D. E. Jr., "Propellant Management Device: Conceptual Design and Analysis: Galleries", AIAA 29th Joint Propulsion Conference, AIAA-97-2811, 1997
5. Jaekle, D. E. Jr., "Propellant Management Device: Conceptual Design and Analysis: Traps and Troughs", AIAA 31th Joint Propulsion Conference, AIAA-95-2531, 1995
6. Yu, A., Ji, B., Zhuang, B. T., Hu, Q., Luo, X. W., Xu, H. Y., "Flow Analysis in a Vane-type Surface Tension Propellant Tank", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 52, No. 7,

2013, Article number: 072018

7. Chato, D. J., McQuillen, J. B., Motil, B. J., Chao, D. F., Zhang, N., "CFD simulation of Pressure Drops in Liquid Acquisition Device Channel with Sub-Cooled Oxygen", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 3, 2009, pp. 144-149
8. McQuillen, J. B., Chao, D. F., Hall, N. R., Motil, B. J., Zhang, N., "CFD simulation of Flow in Capillary Flow Liquid Acquisition Device Channel", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 6, 2012, pp. 640-646
9. Hartwig, J., Chato, D., McQuillen, J., "Screen Channel LAD Bubble Point Tests in Liquid Hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 2, 2014, pp. 853-861
10. Fischer, A., Gerstmann, J., "Flow Resistance of Metallic Screens in Liquid, Gaseous and Cryogenic Flow", 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences, Munich, Germany, 2013
11. Fries, N., Odic, K., Dreyer, M., "Wicking of Perfectly Wetting Liquids into a Metallic Mesh", 2nd International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering, 2007
12. Seo, M, K., Kim, D, H., Seo, C, W., Lee, S, Y., Jang, S, P., Koo, J., "Experimental Study of Pressure Drop in Compressible Fluid through Porous Media", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol. 37, No. 8, pp. 759-765, 2013.
13. Hartwig, J., Mann, J. A., "Bubble Point Pressures of Binary Methanol/Water Mixtures in Fine-Mesh Screens", *AIChE Journal*, Vol. 60, No. 2, 2014, pp. 730-739