

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(10), 868-874(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.10.868

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

이중 매니폴드 분사기에서 접선방향 유입구의 변화에 따른 분사특성 연구

이인규, 정석규, 윤정수, 박구정, 윤영빈*

Study on Spray characteristics of Dual-Manifold Injector with Various Tangential Entries

Ingyu Lee, Seokgyu Jeong, Jungsoo Yoon, Gujeong Park and Youngbin Yoon*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

ABSTRACT

Thrust variation is an essential parameter in a space mission such as landing on an atmosphereless planet or docking a spacecraft. In order to achieve the thrust variation control, using throttleable injector is a representative and general method. A dual-manifold injector, one of throttleable injectors, was used to control mass flow rate. Five kinds of injectors were designed and investigated in order to compare the spray characteristics of the dual-manifold injector with various tangential entries. Spray angles and patterns were measured to determine external flow characteristics and film thicknesses were measured in order to investigate the internal flow patterns.

초 록

가변추력은 대기가 없는 행성에 착륙하거나, 우주공간에서의 도킹에 필수적인 것으로 알려져 있다. 추력을 조절하기 위해 질유량 조절이 가능한 분사기를 사용하는 방법이 대표적으로 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 추력조절을 위하여 이중매니폴드 분사기를 사용하여 질유량을 조절하였다. 이중매니폴드 분사기의 주요 변수 중 하나로 판단되는 접선방향 유입구의 개수의 변화에 따른 분사특성을 확인하기 위하여 분무각, 분무패턴을 포함하는 외부유동을 측정하였으며 내부유동 특성 파악을 위한 film thickness를 확인하였다.

Key Words : Throttling(가변추력), Dual-manifold injector(이중매니폴드), Internal flow(내부유동), External flow(외부유동)

1. 서 론

우주 탐사선에 사용되는 엔진에는 일반적인 엔진이 아닌 가변추력 엔진을 사용하게 되며, 착

륙선 및 궤도선에는 필수적인 요소로 알려져 있다. 가변추력 엔진에서는 일반적으로 연료 분사기를 통해서 분사되는 추진제의 유량을 조절하는 방식으로 추력을 조절한다[1]. 액체로켓에서 사용

† Received : April 15, 2015 Revised : August 28, 2015 Accepted : September 2, 2015

* Corresponding author, E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

되는 가변추력 분사기는 각 미션 구간에서 적절한 추력을 낼 수 있도록 설계되며, 연속적으로 추력을 변화시킬 수 있기 때문에 일반적인 엔진보다 우수한 효율을 보인다[2]. 또한 미션에 따라 적절한 연료를 분사시켜 줄 수 있기 때문에 효율적인 연료 소비가 가능하다. 따라서 발사체 질량의 상당부분을 차지하는 추진제 탑재질량을 감소시킬 수 있으며 payload를 증가시킬 수 있다는 장점을 가진다. 가변추력 분사기는 유량의 조절 범위가 넓기 때문에 운용되는 범위에서 안정적인 분사형태를 보일 필요가 있다. 이러한 가변추력 분사기의 성능에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.

일반적으로 사용되는 이중 유입구 분사기는 하나의 매니폴드를 사용하여 연료를 분사함에 따라 단일 스웰 분사기와 동일한 유량범위를 갖는다. 따라서 단일 스웰 분사기 혹은 이중 유입구 분사기의 경우 분사차압을 통해서만 분사유량을 조절할 수 있다. 하지만 이중매니폴드 분사기는 이중 유입구 분사기와 달리 2개의 독립적인 매니폴드를 사용하며, 저유량 구간에서 접선방향 유입구가 작은 매니폴드를 사용하고, 중유량 구간에서는 접선방향 유입구가 큰 매니폴드를 사용하여 분사한다. 대유량 구간에서는 두 개의 매니폴드를 동시에 사용하여 분사하게 된다. 이에 따라 하나의 분사기가 3개의 분사기를 사용하는 효과를 가진다는 장점을 갖는다. 하지만 하나의 연료 탱크에서 독립적으로 유량을 제어할 수 있는 피드라인을 구성해야하기 때문에 무게가 증가한다는 단점을 가지게 된다.

본 연구에서는 가변추력 분사기의 하나인 이중 매니폴드의 형상 변수인 접선방향 유입구의 변화에 따른 분사특성에 관한 연구를 수행하였다. 상단과 하단의 면적비를 약 4:1이 되도록 제작하였으며, 접선 방향유입구의 개수의 변화와 분사압력 변화에 따른 분사특성을 확인하였다. 특성 파악을 위하여 스트로보스코프와 카메라를 동기화시켜 분무 패턴을 파악하였으며, 오리피스 끝단에서 액막 두께 측정을 통해 내부유동을 파악하였다.

II. 실험 방법 및 조건

2.1 실험 장치 및 실험 방법

이중 매니폴드 분사특성 파악을 위한 실험을 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험 유체로는 액체추진제를 대신하여 물을 사용하였

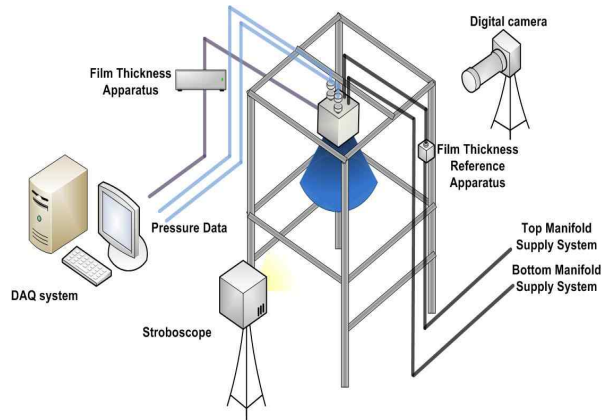


Fig. 1. Schematics of the test facility

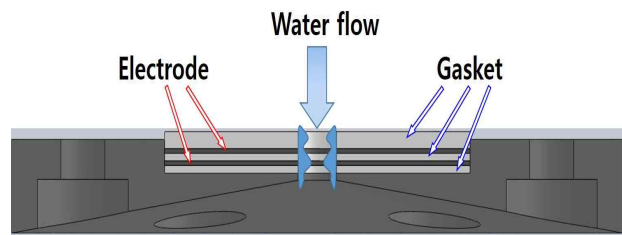


Fig. 2. Film thickness measurement

다. 두 개의 챔버와 두 개의 매니폴드를 연결하는 공급라인 및 컨트롤러를 독립적으로 조절하여 유량을 변화시킬 수 있도록 하였다. 각 매니폴드에서 스웰 챔버로 분사된 물은 분사기 끝단에서 액막 두께 측정 장치를 통과하여 분사된다. 외부 유동 파악을 위해 동기화된 스트로보스코프와 디지털 카메라를 사용하여 분무를 촬영하였다. 분무각의 경우 약 30장의 이미지를 평균한 이미지를 통하여 분무각을 측정하였다.

액막 두께는 연료 분사기의 주요한 특성 파라미터 중 하나인 액적크기에 큰 영향을 미칠 뿐 아니라, 스웰 분사기의 측방향 속도를 측정할 수 있는 주요한 요소이다[3]. 실험에 사용된 액막 두께 측정 장치는 Fig. 2와 같이 제작되었다. 물의 전기전도도를 이용하는 이 장치는 Suyari와 Lefebvre가 제안한 것으로 두 개의 titanium 판 사이에 테프론 판을 삽입하였고, 두 titanium 판 사이에 흐르는 전압을 측정하여 전극의 두께를 측정할 수 있다[4]. 이 장치를 사용하여 Suyari 및 Kim 등은 액막 두께에 대한 실험적 결과와 수치적 결과를 비교하였으며, 거의 유사한 결과를 보이는 것을 확인한 바 있다[4, 5].

물의 전기전도도는 온도와 물의 순도에 영향을 받기 때문에 실험에 앞서 정밀한 보정이 필요하다[4]. 온도에 따른 보정을 위하여 물의 공급라인 전단에 액막 두께 측정 장치와 동일한 방식의

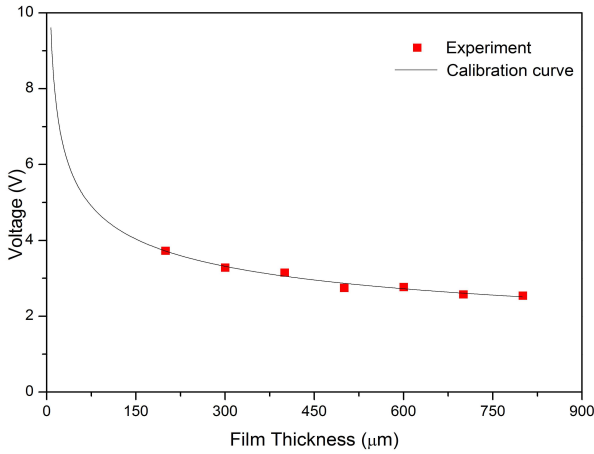
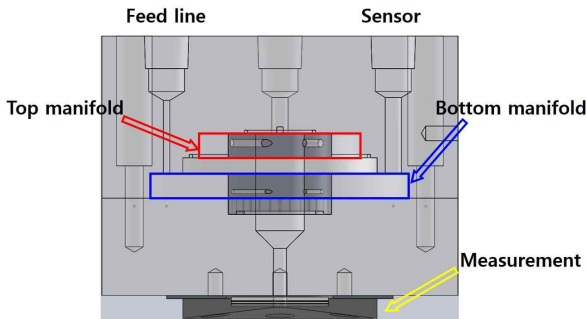


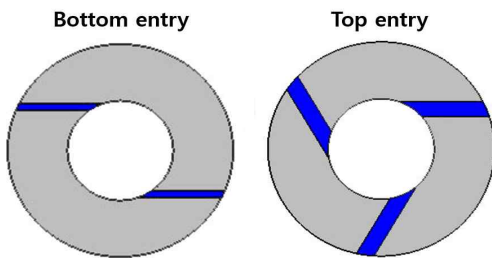
Fig. 3. Film thickness calibration curve

Table 1. Diameter of tangential entry(mm)

Injector	3-3	3-4	4-3	2-3	3-2
Top	2.3	2.3	2.0	2.9	2.3
Bottom	1.2	1.0	1.2	1.2	1.4



(a) Schematics of dual manifold injector



(b) Cross section of '3-2' injector

Fig. 4. Schematics of dual-manifold injector

장치를 설치하였다. 또한 액막의 두께에 따른 보정을 위하여 오리피스 끝단에 축방향으로 아크릴 막대를 삽입하였다. 막대의 직경은 2.4 mm ~ 3.6 mm 이며 총 7개를 사용하여 Fig. 3과 같이 두께와 전압에 따른 보정곡선을 얻었다.

2.2 분사기 형상 및 실험 조건

본 연구에서는 이중 매니폴드 분사기에서의 접선방향 유입구의 개수 변화에 따른 분사특성을 비교하기 위하여 Fig. 4와 같은 형상의 분사기를 설계하였다. 접선방향 유입구의 총 면적을 고정시킨 상태에서 상단 매니폴드와 하단 매니폴드의 면적비를 약 4:1로 고정하고 접선방향 유입구의 개수를 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 분사기는 총 5개로 'a-b'로 명명하였다. a는 상단의 접선방향유입구의 개수이며, b는 하단의 접선방향 유입구의 개수이다. 각 분사기에서의 접선 방향 유입구의 개수와 직경은 Table 1과 같다.

분사특성 파악을 위해 각 매니폴드의 분사압력을 1 bar ~ 7 bar까지 증가시켜가며 실험을 수행하였으며, 액막두께는 약 20,000 sample/sec으로 1초단위로 6회 측정하였다.

III. 실험 결과

3.1 질유량 변화

이중 매니폴드 분사기에서는 사용되는 유량범위에 따라 공급에 사용되는 매니폴드를 변화시켜가며 유량을 조절한다. 저유량 구간에서는 접선방향 유입구의 면적이 작은 하단 매니폴드를 사용하며, 중유량 구간에서는 접선방향 유입구의 면적이 큰 상단 매니폴드를 사용하여 분사한다. 대유량 구간에서는 두 개의 매니폴드를 동시에 사용하여 분사한다. 이를 통해 이중매니폴드 분사기에서는 분사 유량에 따라 적절한 매니폴드를 사용하여 연료를 분사함으로써 추력을 조절하게 된다.

본 연구에서는 매니폴드의 분사압력을 조절하면서 접선방향 유입구의 개수 변화에 따른 분사유량을 측정하였다. 분사유량은 모든 조건에서 약 20초간 분사하였으며, 총 3번을 측정한 후 평균값을 사용하였다.

$$\dot{m} = C_d A_e \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1)$$

하단의 접선방향 유입구의 개수 변화에 따른 유량특성을 Fig. 5에 도시하였다. 하단, 상단, 두 개의 매니폴드를 모두 사용하는 경우 모두 압력이 증가함에 따라 분사유량이 증가함을 확인하였다. 연료 분사기의 분사유량은 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 접선방향 유입구의 개수 및 면적이 동일한 상단 매니폴드를 사용하는 경우 본 연

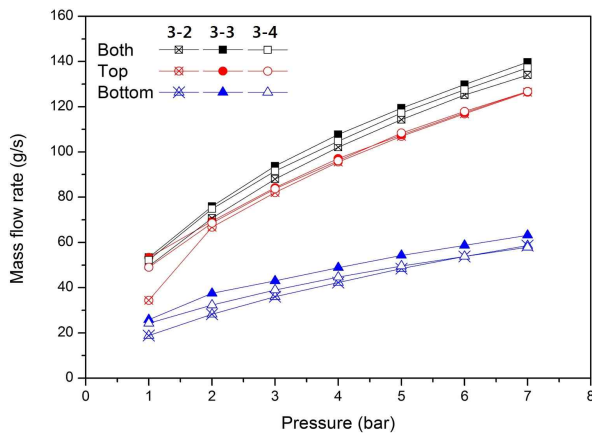


Fig. 5. Mass flow rate via manifold pressure

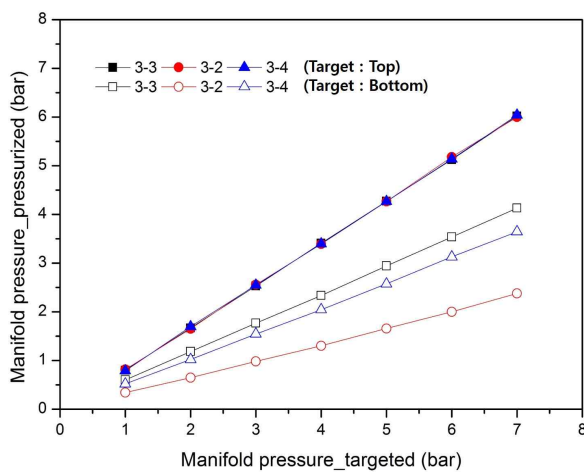


Fig. 6. Pressure relationship between target manifold and the other manifold

구에서 사용된 5개의 분사기 모두 실험 범위에서 유사한 유량을 갖는 것을 확인하였다. 하지만 하단 매니폴드를 사용하는 경우와 두 개의 매니폴드를 모두 사용하는 경우에는 약간의 차이가 발생하게 된다. 이는 접선 방향 유입구의 분사면적 (A_e)에 의한 영향인 것으로 사료된다. 하단 매니폴드의 경우 분사면적이 '3-2', '3-3', '3-4' 분사기에 대해서 각각 3.08, 3.39, 3.14 mm²이다. 따라서 하단매니폴드를 사용하는 분사조건에서 '3-3' 분사기가 가장 큰 유량을 보이며, '3-2' 분사기가 가장 작은 유량을 보이는 것을 확인할 수 있다.

한편, 이중매니폴드 분사기는 유량을 공급하기 위한 매니폴드는 분리되어 있지만, 스윙 챔버를 통해 연결된 구조를 가지게 된다. 따라서 상단 매니폴드 혹은 하단 매니폴드를 사용하는 경우 Fig. 6과 같이 사용되는 매니폴드 외에 다른 매니폴드가 가압되게 된다. 상단 매니폴드를 사용하는 경우 분사기에 관계없이 하단 매니폴드가

동일한 압력으로 가압되는 것을 확인할 수 있다. 반면 하단 매니폴드를 사용하는 경우 가압된 상단 매니폴드의 압력이 하단 매니폴드를 사용하는 경우와 다른 경향을 보이게 된다. 하단 매니폴드의 접선방향 유입구의 면적이 커질수록 가압되는 압력이 커지는 경향을 보이게 된다. Likov의 연구에 따르면 스윙 챔버 내부의 벽면에 가해지는 압력은 접선방향 유입구의 면적에 비례한다고 하였으며, Yoon은 이중매니폴드 분사기에서 미 사용 매니폴드의 압력은 스윙 챔버 내부의 압력과 유사한 경향을 보이는 것을 확인한 바 있다[6,7]. 따라서 상단 매니폴드를 사용하는 경우 접선방향 유입구의 면적이 동일하기 때문에 하단 매니폴드가 동일하게 가압되는 것이며, 하단매니폴드의 접선방향 유입구의 면적이 커질수록 가압되는 압력이 커지는 경향을 보이게 된다.

3.2 분무 형상 및 분무각 변화

실제 로켓에서는 스윙 분사기는 하나의 분사기가 아닌 여러개의 분사기를 동시에 사용되기 때문에 분무각을 고려한 분사기 배치를 필요로 하게 된다. 또한 분사된 연료의 점화성능, 분사기 헤드의 냉각에 주요한 요소가 되기 때문에 분무각은 분사기 연구에서 중요한 요소가 된다. 더욱이 추력조절이 가능한 가변추력 분사기에서는 유량변화에도 일정한 분무각을 가지도록 설계하는 것이 중요하다[7].

일반적인 스윙 분사기에서의 분사각은 연료의 접선방향 속도(U_r)와 축방향 속도(U_a)에 영향을 받게 된다.

$$U_r = \frac{\dot{m}}{\rho_l A_l} = \frac{4\dot{m}}{\rho_l n_t \pi d_t^2} \quad (2)$$

$$U_a = \frac{\dot{m}}{\rho_l A_l} = \frac{\dot{m}}{\rho_l \pi (r_o^2 - r_h^2)} \quad (3)$$

위의 수식 (2,3)에서 보이는 것과 같이 속도성분은 유량, 분사면적, 접선방향 유입구의 면적을 통해 계산할 수 있다. 축방향 성분은 유량이 증가함에 따라 분무각이 커지게 된다. 하지만 위의 수식 (2,3)의 U_r 과 U_a 는 단일매니폴드를 사용하는 분사기인 경우에 해당되며 이중매니폴드 분사기의 경우 사용되는 매니폴드에 따라 차이를 가지게 된다.

Figure 7은 분무형상 및 분무각을 파악하기 위해 유량증가에 따른 분사형상을 보여준다. 동일 매니폴드를 사용하는 경우에는 유량이 증가할

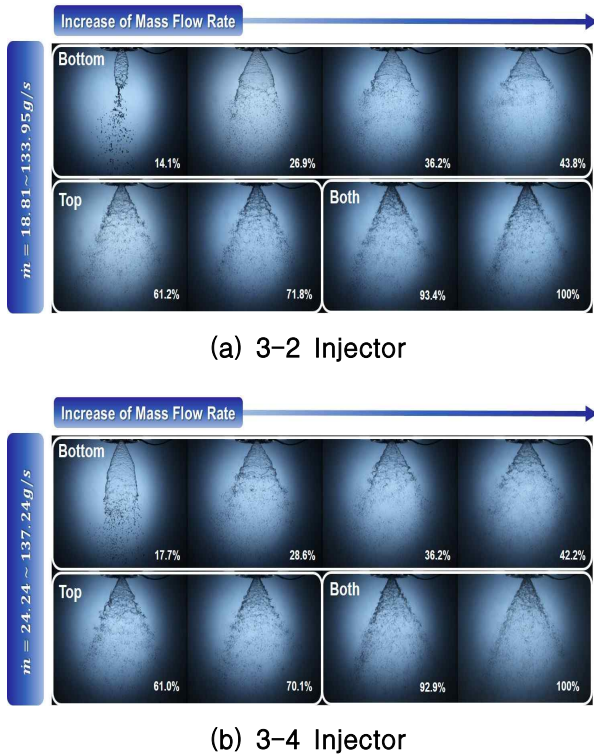


Fig. 7. Spray patterns with various mass flow rates and manifolds

수록 분무각이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 모든 분사기에서 분무각이 증가하는 것을 Fig. 7 (a)와 (b)에서 확인할 수 있다. 또한, 최저유량 구간에서는 분무가 완전히 형성되지 않는 것을 확인할 수 있다. 최저유량의 경우 분사압력이 작기 때문에 유량이 작은 값을 가지며 이에 따라 축방향속도가 매우 작은 값을 가질 뿐 아니라 마찰이 분무에 큰 영향을 미치기 때문에 분무가 잘 분열되지 않게 된다.

Figure 8에는 분무각의 변화를 파악하기 위해서 질유량 변화와 분사기 형상에 따른 분무각을 도시하였으며, 유량변화에 따른 분사특성 비교를 위해 x축에는 분사기의 최대유량을 기준으로 하는 %유량이 사용되었다. 하단 매니폴드를 사용하는 저유량 구간의 경우 분무각의 변화폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 한편 저유량 구간에서는 접선 방향 유입구의 개수와 면적이 동일함에도 불구하고, '3-3' 분사기는 작은 분무각을 가지게 된다. 이는 가공상의 오차로 접선방향 유입구의 면적이 크게 가공되었기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 분무각의 크기는 접선방향 속도(U_r)와 축방향 속도(U_a) 뿐 아니라 형상변수 ($K = 4R_T R_n / nd_t^2$)에도 영향을 받게 된다. 접선방향 유입구의 개수 및 면적이 증가할수록 형상

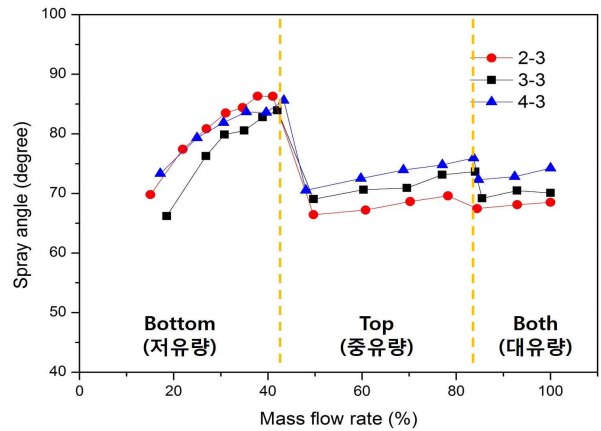


Fig. 8. Spray angle with various mass flow rate

변수가 감소하게 되며, 이에 따라 분무각이 감소하게 된다[7].

중유량 구간에서는 앞서 언급한 것과 같이 상단의 매니폴드를 사용하게 된다. 3개의 분사기에서의 형상변수(K)가 거의 유사한 값을 가진다. 일반적인 분사기에서는 형상변수가 증가할수록 분무각이 커지는 형상을 보인다고 언급하였으나, 형상변수가 큰 차이를 보이지 않는 경우, 접선방향 유입구의 개수가 많을수록 분무각이 커진다는 것을 확인할 수 있다.

또한 두 개의 매니폴드를 모두 사용하는 대유량 구간에서는 중유량 구간의 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 분사에 사용되는 접선 방향 유입구의 총 면적 중에서 상단 접선방향 유입구의 면적의 비율이 큰 값을 가지기 때문이다. 이에 따라 상단매니폴드의 분사특성이 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

저유량에서 중유량 구간으로 넘어가는 경우 분무각의 변화가 크게 변화하게 된다. 이는 사용되는 매니폴드가 변화하게 됨에 따라 나타나는 현상으로, 저유량 구간에서는 하단의 접선방향 매니폴드를 사용하며 중유량 구간에서는 상단의 매니폴드를 사용한다. 이에 따라 분사에 사용되는 접선방향유입구의 면적이 4배로 증가하기 때문이다. 또한, 중유량 구간에서 대유량 구간으로 변화하는 경우 변화폭이 상대적으로 매우 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 언급한 것과 같이 접선방향 유입구의 면적의 변화율이 매우 작기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 액막 두께 변화

분사기 끝단에서의 액막 두께는 연료분사기의 분사성능에 큰 영향을 미치는 요소이므로 분사

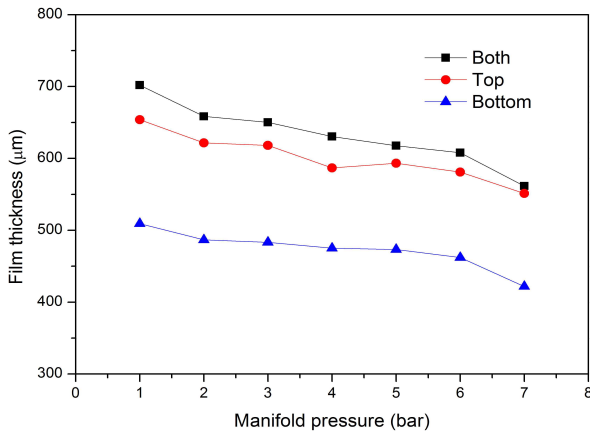


Fig. 9. Film thickness with various manifold pressure (3-3 injector)

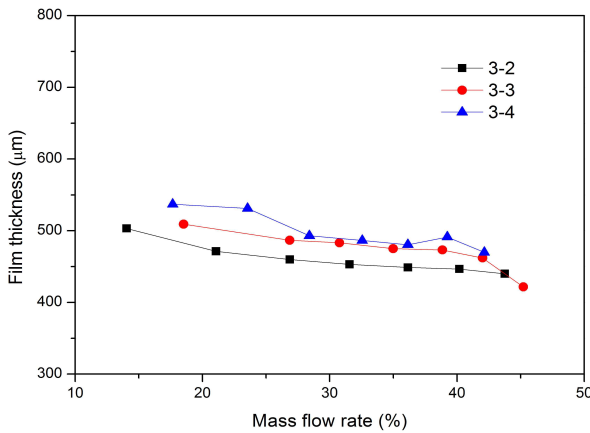


Fig. 10. Film thickness with various mass flow rate (bottom manifold)

특성과약을 위해 분사기 끝단에 전기전도도를 이용한 액막 측정 장치를 설치하여 액막의 두께를 측정하였다.

Figure 9에 '3-3' 분사기의 매니폴드 압력변화에 따른 액막의 두께를 도시하였다. 동일한 분사 압력 조건에서는 하단의 매니폴드를 사용하는 경우 가장 작은 액막두께를 나타내었으며, 상단의 매니폴드를 사용하는 경우의 액막 두께가 가장 두꺼운 것으로 확인되었다. 또한 매니폴드의 분사압력이 증가함에 따라 액막의 두께가 감소하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 액막의 두께는 분사 면적과 분사압력에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

접선 방향 유입구의 개수가 다른 경우 유량 변화에 따른 액막의 두께 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 접선방향 유입구의 개수가 많아질수록 액막의 두께가 두꺼워 지는 것을 확인할 수 있다. 이는 접선 방향 유입구의 개수가 많아질수록

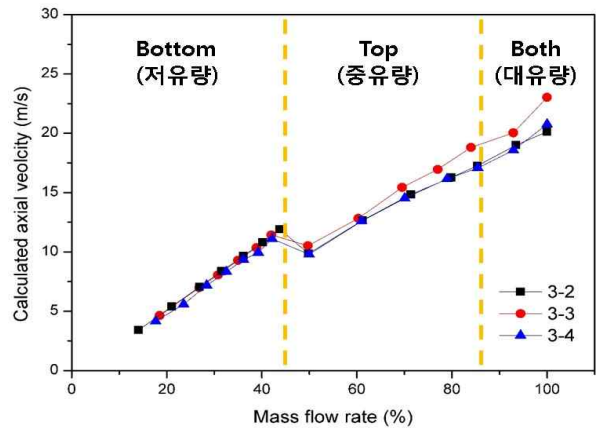


Fig. 11. Calculated axial velocity with various mass flow rate

매니폴드에서 스윙챔버로 분사되는 접선 방향 유입구의 출구 길이가 가까워지게 됨에 따라 각 접선 방향 유입구에 의해 스윙 챔버로 분사되는 유체가 서로 충돌하게 된다. 스윙 챔버 내에서 발생한 유체간의 충돌로 인하여 반경방향의 속도가 감소하게 되고, 이에 따라 원심력이 약해지기 때문에 노즐 끝단에서의 액막의 두께가 두꺼워 지는 것으로 사료된다.

한편 액막의 두께를 통하여 분사기의 축방향 속도(U_a)를 계산하였다(Fig. 11). 분사기에서의 축방향 속도는 3.2에서 언급한 수식 (2.3)을 통해 계산할 수 있다. 하단의 매니폴드의 경우 접선방향 유입구의 개수변화에 관계없이 동일한 %유량에서의 축방향 속도가 거의 유사한 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉 분사속도의 경우 접선방향 유입구의 개수 혹은 면적에 무관하게 유량이 증가함에 따라 속도가 증가하는 것을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 저유량 구간에서 중유량 구간으로 이동함에 따라 분사속도가 감소한 이후 다시 증가하게 된다. 따라서 이중 매니폴드 분사기에서는 분사유량이 증가함에 따라 분사속도가 선형적으로 변화하지 않으며 접선방향 유입구의 분사면적에 영향을 받는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

이중 매니폴드 분사기에서 접선 유입구의 변화에 따른 분사특성을 분사유량, 분무각, 액막두께, 분사속도의 측면에서 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이중매니폴드 분사기에서는 스윙 챔버를 통해 두 개의 매니폴드가 연결되게 되어, 한쪽을

사용한 분사시에 다른 쪽 매니폴드에 의한 영향을 받게 된다. 미사용 매니폴드의 가압 정도는 접선방향 유입구의 면적이 증가함에 따라 증가하는 것을 확인하였다.

2) 분사유량은 접선방향 유입구의 면적에 의한 영향이 개수에 의한 영향보다 큰 것으로 보인다.

3) 이중매니폴드 분사기에서는 두 개의 천이구간을 갖게 되는데, 이는 접선방향 유입구의 면적 변화에 따라 변화하게 된다.

4) 액막의 두께의 경우 접선방향 유입구의 개수가 많아질수록 액막이 두꺼워지는 경향을 보이게 된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

Reference

- 1) Matthew J. Casiano, James R. Hulka, and Vigor Yang, "Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review," 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Aug. 2009.
- 2) G. A. Dressler, "Summary of Deep Throttling Rocket Engine with Emphasis on Apollo LMDE," 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Jul. 2006.
- 3) A. H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion," McGraw Hill Book Co., New York, pp. 228-233, 1983.
- 4) M. Suyari and A. H. Lefebvre, "Film Thickness Measurement in a Simplex Swirl Atomizer," Journal of Propulsion and Power, Vol. 2, pp. 527-533, Nov. 1986.
- 5) Sunghyuk Kim, Taeock Khil, Dongjun Kim, and Youngbin Yoon, "Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector," Measurement Science and Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 015403, 2009.
- 6) Likov, M. W., and Leochik B. T., "Atomization Drying," Mashinostroenie, Moscow, pp. 331, 1966.
- 7) Jungsoo Yoon, Sunghyuk Kim, and Youngbin Yoon, "Experimental Study of Spray Characteristics on Throttleable Dual Manifold Injector," Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 22-30, 2011.