

論文

추진제탱크 가압용 인젝터 출구에서의 유동가시화 및 해석

권오성*, 한상엽*, 권기정*, 정용갑*

Flow Visualization and Calculation at the Outlet of Propellant Tank Pressurizing Gas Injector

Oh-Sung Kwon*, Sang-Yeop Han*, Ki-Jung Kwon* and Yong-Cahp Chung*

ABSTRACT

Propellant tank pressurizing gas injector is used in the pressurization system of liquid propellant rocket to reduce incoming gas velocity and distribute the gas in the tank. Temperature distribution in the propellant tank ullage is varied according to the gas injector shape, and it has influence on the required pressurant gas and thermal phenomena in the tank. In this paper, diffuser type gas injector was studied to make the ullage have stratified temperature distribution. Injected gas flow at the outlet of prototype diffuser was visualized using particle image velocimetry method and it was compared with the results of calculation. Calculation was well agreed with measurement and was used as an inlet condition of propellant tank ullage calculation.

초 록

추진제탱크 가압용 인젝터는 액체추진기관 발사체의 가압시스템에서 추진제탱크로 유입되는 가압가스의 유속을 감소시키고 이를 적절히 분산시키기 위해 사용된다. 인젝터의 형상에 따라 추진제탱크 내부 얼리지의 온도분포가 달라지게 되는데, 이것은 가압가스 소모량과 추진제탱크 내의 열적인 현상들에 영향을 미친다. 본 논문에서는 추진제탱크 얼리지가 성층화된 온도분포를 가질 수 있도록 하는 디퓨저 형상의 인젝터에 대하여 출구 유동형태를 살펴보았다. 입자영상유속계 기법을 이용하여 제작된 인젝터 출구에서의 가압가스 유동을 가시화하였고, 이를 CFD 해석결과와 비교하였다. 해석결과는 측정결과와 비교적 잘 일치하였고, 이것을 추진제탱크 얼리지 해석에 있어 입구조건으로 사용하여 얼리지의 상태를 확인하였다.

Key Words : Pressurizing Gas Injector(가압용 인젝터), Propellant Tank(추진제탱크), Diffuser(디퓨저), PIV(입자영상유속계)

1. 서 론

액체추진기관 발사체의 가압시스템은 추진제가 엔진시스템으로 적절히 공급될 수 있도록 추

진제탱크의 압력을 유지하는 역할을 한다. 가압가스를 추진제탱크 내부로 분사하여 추진제의 배출에 의해 증가하는 얼리지(ullage)를 일정한 압력으로 채우게 되는데, 이때 요구되는 가압가스의 총소모량은 그 자체의 질량 및 저장탱크의 크기에 영향을 주어 가압시스템 전체의 무게를 결정하는데 있어 중요한 변수가 된다.

가압가스의 총소모량은 추진제탱크 얼리지 내부의 가스 상태에 의해 결정되는데, 이에 영향을

† 2009년 9월 18일 접수 ~ 2009년 12월 11일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

교신저자, E-mail : oskwon@kari.re.kr

대전시 유성구 과학로 115

미치는 주요 인자는 가스와 탱크 벽면과의 열전달, 가스와 추진제 표면과의 열 및 물질전달, 얼리지 내부 가스의 혼합 등이 있다[1]. 특히 엔진 시스템의 열교환기를 거쳐 고온으로 가열된 가압가스가 액체산소와 같은 극저온 추진제탱크로 유입되는 시스템인 경우, 얼리지 내의 가압가스와 이를 둘러싼 극저온 환경 사이의 열전달은 가압가스를 냉각시키게 된다. 이로 인해 추진제탱크의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 더 많은 가압가스가 요구되고 결국 전체 가압시스템의 무게 증가로 이어지게 된다[2].

가압가스는 공급배관을 거쳐 추진제탱크 내부로 고속으로 유입되는데, 일반적으로 추진제탱크 상부에 인젝터를 장착하여 유입되는 가압가스의 속도를 감소시키고 얼리지 내부에서 원하는 형태로 적절히 분사되도록 한다. 인젝터의 형상은 반경방향 분사형, 수직방향 분사형, 디퓨저 형태 등으로 다양한데, 발사체의 운용조건 및 유입되는 가압가스의 조건이 동일한 경우, 인젝터를 통한 가압가스의 분사형태에 따라 추진제탱크 내부 얼리지의 온도분포가 달라지게 되고 결과적으로 가압가스의 총소모량을 변화하게 된다.

일반적으로 수직방향으로 분사되는 인젝터를 사용할 경우 가압가스의 소모량이 가장 적은 것으로 알려져 있는데, 이는 고온의 가압가스가 추진제탱크의 축방향으로 깊숙이 침투됨으로 인해 얼리지 내부가 비교적 높은 온도로 유지되고, 가압가스의 냉각에 가장 큰 영향을 미치는 탱크 벽면과의 열전달이 줄어들기 때문이다. 그러나, 이 경우 추진제 표면의 교란, 가압가스와 추진제 표면 사이의 열 및 물질전달의 증가, 추진제 상층부의 온도 상승과 같은 역효과가 발생할 수 있다[3]. 반면 디퓨저 형상의 인젝터를 사용할 경우 추진제탱크 내부에서의 가압가스 유속을 크게 감소시키고 얼리지 내부에 고르게 분사되도록 함으로써 얼리지 내부가 탱크 축방향으로 성층화된 온도 분포를 가지도록 할 수 있다. 이 경우 수직방향 분사형 인젝터에 비해 가압가스의 총소모량은 다소 증가하지만 가압가스의 온도를 효과적으로 유지하고 추진제 표면과의 상호작용을 줄일 수 있다[3,4]. 반경방향으로 분사되는 인젝터의 경우는 추진제 표면과의 상호작용이 적지만 탱크 벽면과의 열전달이 증가하게 된다.

이에 본 연구에서는 디퓨저 형상[4,5,6]의 추진제탱크 가압용 인젝터 개발의 일환으로, 인젝터 출구에서의 가압가스 분사형태에 대한 유동가시화 및 CFD 해석을 수행하였다. 기본적인 해석을 통하여 인젝터의 형상을 결정하고 이를 바탕으로

제작된 시제품에 대하여 입자영상유속계(particle image velocimetry, PIV) 기법을 이용하여 유동가시화를 수행하였다[7]. 또한, 인젝터 시제품에 대하여 3차원 유동해석을 수행하였고 이를 측정결과와 비교 검증하였다. 본 연구에서는 시험과 해석을 통하여 인젝터 출구에서의 분사형태를 파악하는데 중점을 두었으나, 인젝터 출구에서 얻어진 데이터를 추진제탱크 얼리지 해석을 위한 입구조건으로 적용하여 얼리지 내에서의 가압가스 온도분포까지 예측해 보았다.

II. 가시화를 통한 유동장 측정

2.1 인젝터 형상

본 연구에서는 인젝터 출구에서의 분사형태를 파악하고자 하는 것이 목적이었으므로, 추진제탱크 내에서의 열전달에 의한 가압가스 유량의 변화 및 얼리지의 압력을 고려하지 않고, 단순히 배출되는 추진제의 부피와 동일한 부피의 얼리지를 가압가스가 채운다고 가정하였다. 이에 따라 압력조건에 관계없이 인젝터를 통과하는 가압가스의 체적유량을 규격으로 삼았다.

10톤급 발사체의 산화제 탱크에 적용이 가능하도록 인젝터의 규격을 선정하였는데, 입구배관의 직경을 1인치로 하였을 때 입구에서의 가스유속은 50 m/sec이다. 인젝터의 크기는 직경이 120 mm, 출구에서의 유속이 5 m/sec를 넘지 않도록 하였다.

그림 1은 기본적인 유동해석을 통하여 설계, 제작된 인젝터 시제품을 모델링한 형상이다. 고속으로 유입되는 가압가스가 인젝터를 통하여 추진제 표면을 전체적으로 고르게 눌러주도록 하기 위하여 인젝터의 외곽으로 더 많은 가압가스가 분사되도록 하였다. 내부의 타공판은 인젝터의 중심으로 유입되는 가압가스의 많은 부분이 인젝터의 외곽으로 향하도록 하는 역할을 하는데, 가

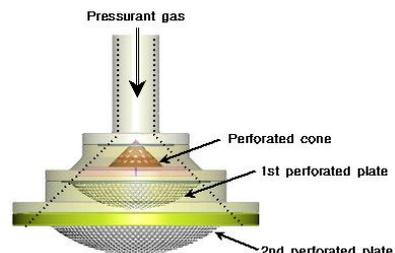


그림 1. 디퓨저 형상의 인젝터 시제품

표 1. 타공판 및 타공콘의 규격

	구멍직경	구멍개수	개구율	구반경
1차타공판	2 mm	547	37.4 %	50 mm
2차타공판	2 mm	1141	34.6 %	75 mm
타공콘	3 mm	36	25.5%	-

압가스의 일부는 타공판의 구멍을 통하여 인젝터의 가운데로 향하게 된다. 2장의 타공판은 가압가스가 인젝터의 중심과 외곽부분으로의 주 유동 방향을 유지한 상태로 인젝터 출구에서 분산될 수 있도록 하는 역할을 한다. 표 1은 타공콘 및 타공판의 규격이다.

2.2 시험장치 및 방법

그림 2는 인젝터 출구에서의 분사형태를 가시화하기 위한 시험장치의 개략도이다. 시험장치는 크게 가압가스를 공급하기 위한 유공압 부분과 가시화를 위한 측정 부분으로 나누어진다.

인젝터로 공급되는 가압가스의 유량은 레귤레이터와 질량유량계를 이용하여 조절하였다. PIV 측정을 위해서는 추적 입자를 유동장에 공급하여야 하며, 이를 위해 인젝터 앞단에 입자발생기를 설치하였다. 입자발생기에 적절한 압력을 부과하기 위하여 오리피스를 설치하고 입자발생기로 공급되는 가스를 유량계 후단에서 분기함으로써 인젝터로 공급되는 혼합가스의 전체 질유량을 알 수 있도록 하였다. 인젝터 입구에 온도, 압력센서를 설치하여 인젝터를 통과하는 혼합가스의 체적 유량 조건을 계산하였다.

PIV 측정은 가압가스 내부로 공급되는 추적입자, 이를 조사하기 위한 광원, 측정을 위한 카메라 및 동기 장치로 크게 구성된다. 본 시험에서는 광원으로 200 mJ 이중 헤드 펄스 Nd:YAG 레이저를 사용하여 가이드암을 통해 인젝터에 평면광으로 조사되도록 하였다. 평면광의 폭과 두께는 각각 300 mm와 1 mm이다. CCD 카메라는 레이저 평면광에 수직한 방향으로 약 700 mm 떨어진 위치에 설치하였다. 입자발생기는 라스킨 노즐 방식을 적용한 것으로서, DEHC 유체를 사

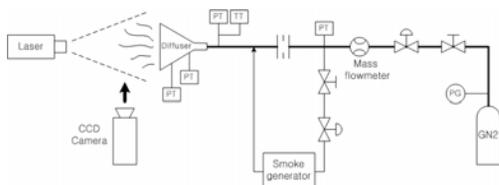


그림 2. 유동가시화 시험장치 개략도

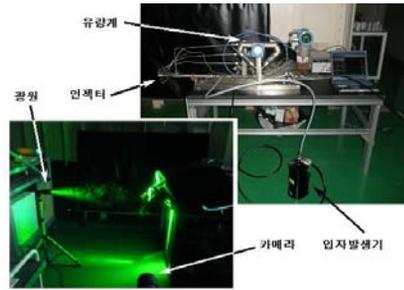


그림 3. 유공압장치 및 측정장치 사진

표 2. 시험조건

조건	체적유량 (m ³ /sec)	배관직경 (inch)	타공판수	비고
1	0.021	1	2	기준유량 (50 m/sec)
2	0.030	1	2	+ 50% 유량
3	0.011	1	2	- 50% 유량

용하여 평균 직경 1 μm의 입자를 생성하도록 하였다. 그림 3은 유공압장치와 측정장치 사진이다.

인젝터 출구에서의 가압가스 분사형태 파악을 목적으로 하였으므로, 별도의 추진제탱크 열리지 모사장치 없이 상온의 질소를 작동유체로 사용하여 대기중으로 분사하였다. 인젝터를 통과하는 체적유량을 시험조건으로 정하였고, 기준유량과 ±50% 유량조건에 대하여 시험을 수행하였다. 표 2에 시험조건을 정리하였다.

시험조건을 맞추기 위하여 질량유량과 인젝터 입구에서의 온도, 압력을 이용하여 체적유량을 계산하였다. 가압가스가 시험장치를 거치면서 단열팽창하여 측정시간동안 온도가 감소하였으므로, PIV 측정시간 동안의 온도, 압력, 유량 데이터를 평균하여 시험조건을 설정하였다. 각 시험조건당 1회 측정을 하였으며 정상 상태에 도달한 후 22초 동안 데이터 저장 및 PIV 측정을 수행하였다.

카메라를 이용하여 촬영된 입자 영상 측정 영역(field of view)은 150 × 150 mm로 이 때 확대비는 약 13 pixel/mm 이다. 인젝터에서 토출되는 예상 유속을 고려하여 두 장의 영상쌍이 150 μs의 시간 지연을 가지고 취득되었으며 두 프레임을 이용한 상호상관법(cross-correlation method)에 의해 영상 처리되었다. 초당 4쌍의 영상을 얻었으며 한 개의 측정조건을 위해 64 쌍의 영상을 위치 평균하여 구하였다. 영상 처리를 통한 벡터 추출을 위해 32 × 32 pixel 조사 구간

(interrogation) 및 50% 오버랩(overlap)을 적용하여 하나의 벡터가 실제 유동장에서 약 $1.1 \times 1.1 \text{ mm}^2$ 의 해상도를 가지도록 하였다.

2.3 측정결과

그림 4는 PIV 측정을 통해 얻은 인젝터 출구에서의 가압가스 분사형태에 대한 유동가시화 결과이다. 인젝터 형상 결정을 위해 수행했던 기본적인 해석의 결과와 유사하게 인젝터의 외곽으로 많은 유량이 토출되는 결과를 얻을 수 있었으나, 가스가 분사되지 않는 부분 및 순환되는 영역이 발생함을 알 수 있었다.

그림 4의 (a), (b), (c)는 유량조건 변화에 따른 가시화 결과를 나타내는데, 인젝터로 유입되는 유량의 변화에 따라 출구에서의 유속의 크기는 차이가 나지만 가압가스의 분사형태는 거의 동일함을 볼 수 있다. 이것은 실제 발사체에서 선가압, 주가압 사이의 가압가스 유량차이, 혹은 추진제탱크 내부에서의 열전달에 의한 가압가스 유입 유량의 변화에 관계없이 인젝터 출구에서의 분사형태는 일정하게 유지됨을 의미한다.

그림 5는 1번 시험조건에 있어 입자의 발생량을 크게 하여 가압가스의 분사모습을 촬영한 것이다.

그림 6은 기준유량을 흘려보내는 1번 시험조건에서 측정된 인젝터 출구의 속도벡터를 보여준다. 그림에서 측은 PIV 측정시 기준점 위치에 대한 상대좌표이다. 인젝터 표면에서 25 mm 떨어진 지점의 유속을 살펴본 결과 중심부에서 최대

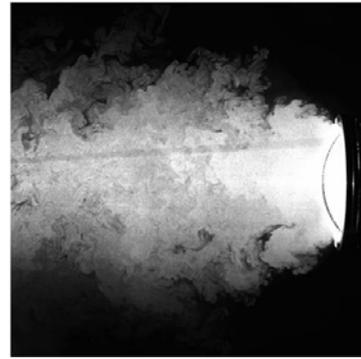


그림 5. 가압가스 분사모습

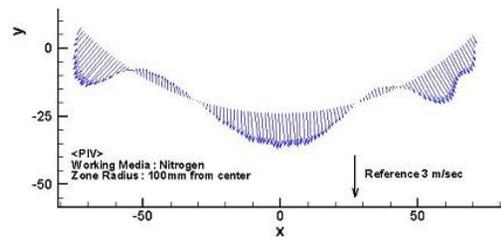


그림 6. 인젝터 출구 속도벡터 (시험조건 1)

2.5 m/sec, 외곽부에서 최대 3 m/sec를 나타내었다. 인젝터로 유입되는 50 m/sec의 가압가스 유속이 충분히 감속되어 중심부와 외곽으로 분산되는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 가압가스가 인젝터 출구 전체에 걸쳐 고르게 분사되는 것이 아니고, 중심부와 외곽으로 주유동이 분사되고 있으므로 가압가스의 분사가 약한 영역에서 가압가스의 재순환이 발생하였다.

III. 유동해석

3.1 인젝터 유동해석

다양한 형상에 대하여 수행한 기본적인 해석을 바탕으로 인젝터의 상세형상을 결정하였고, 이를 바탕으로 제작된 시제품에 대하여 3차원 유동해석을 수행하였다.

Gambit 프로그램을 사용하여 축기준으로 원주방향 60° 영역에 대하여 볼륨을 구성하였고, 전체영역에 대하여 1 mm 크기의 격자 306,521개를 형성하였다. 상용 계산 프로그램인 Fluent를 사용하여 3D, double precision, coupled implicit, realizable $\kappa - \epsilon$ model로 계산을 수행하였다. 그림 7은 Gambit을 사용한 볼륨 생성 순서를 보여준다.

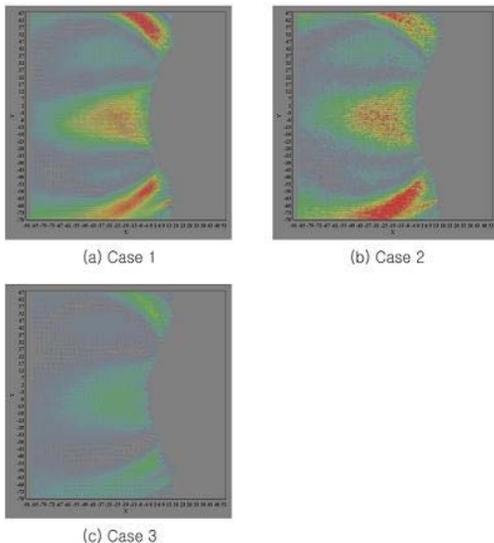


그림 4. 유동가시화에 의한 출구 속도벡터

표 3. 입구유동 조건

유량 (m ³ /sec)	온도 (K)	밀도 (kg/m ³)	유속 (m/sec)
0.0205	286.4	1.195	49.78

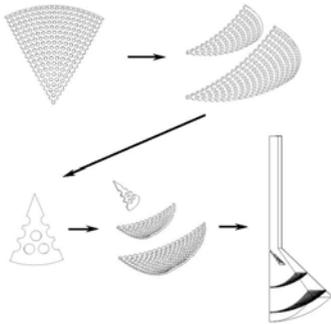


그림 7. 유동해석을 위한 볼륨생성

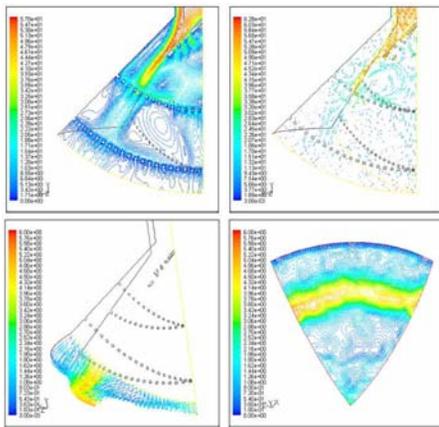


그림 8. 인젝터 3차원 유동해석 결과

인젝터 입구유동 조건은 PIV 측정시 얻은 가압가스 조건을 그대로 적용하였다. 표 3은 인젝터 입구에서의 가압가스 조건이다.

그림 8은 기준유량 조건에 대하여 작동유체로 헬륨을 사용한 경우, 인젝터 내부 및 출구에서의 유동형태를 보여준다. 유입되는 가압가스의 대부분이 타공콘에 의해 인젝터의 외곽으로 향하고, 타공콘의 구멍을 통해 중심부에서도 약한 분사가 이루어지고 있다. 인젝터의 외곽부 유속은 약 5 m/sec이고, 그 외에는 전체적으로 1~2 m/sec의 유속을 가졌는데, 측정결과에 비해 외곽부로 더 많은 가압가스가 분사되는 결과가 나타났다.

그림 9는 기준유량 조건에 대하여 인젝터 표면에서 10 mm 떨어진 지점의 속도벡터에 대한 해석결과를 나타낸 것으로서, 위는 작동유체를

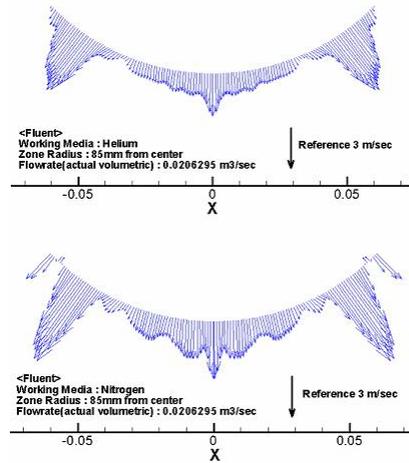


그림 9. 작동유체에 따른 출구 속도벡터

헬륨으로 하였을 경우이고 아래는 작동유체를 질소로 계산하였을 경우이다. 두 가지 경우 모두 PIV 측정결과와 달리 가압가스가 인젝터의 외곽으로 더 집중되어 분사되고, 표면에서의 유속이 상대적으로 고르지 않은 경향을 보였으며, 재순환되는 영역이 발생하지 않았다. 이는 유동해석에 있어 전 영역에 동일한 크기의 격자를 주어 타공콘과 타공판의 각각의 구멍에 대해 충분한 격자가 생성되지 않았기 때문에 suction 현상을 모사하지 못한 것으로 판단된다.

3.2 격자수정 및 측정결과와 비교

인젝터의 타공판과 타공콘의 구멍 내부에 격자를 보다 조밀하게 생성하고 인젝터 출구 부분의 해석영역을 넓은 격자에 대하여 유동해석을 다시 수행하였다. 각 구멍을 별도의 볼륨으로 분할하여 내부에 조밀한 격자가 생성되도록 하였는데, 이로 인하여 전체 격자수가 2,218,004개로 늘어났다. 해석방법은 이전과 동일하게 수행하였다.

그림 10은 수정된 격자에 대한 유동해석의 결과를 보여준다. 좌측은 인젝터 출구에서의 가압가스 유속을 나타내고, 우측은 인젝터 표면에서 25 mm 떨어진 면에서의 속도벡터를 나타낸다. PIV 측정결과와 유사하게 인젝터의 외곽부와 중심부에 가압가스의 분사가 집중되어 있고 재순환영역이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11에서 기준유량조건에 대하여 작동유체를 질소로 하였을 경우 PIV 측정결과와 유동해석결과를 속도벡터를 통하여 비교하였다. 해석결과에서는 인젝터 출구에서 떨어져도 가압가스가 분산되지 않고 운동에너지를 유지한 채로 진행하는 모습을 보였지만, 외곽부와 중심부의 상대적

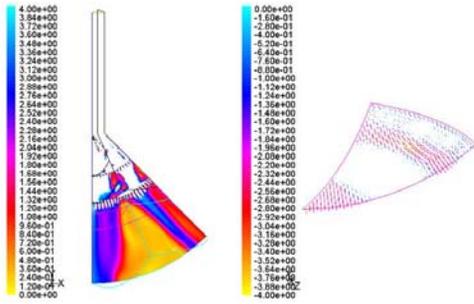


그림 10. 수정격자에 대한 유동해석 결과

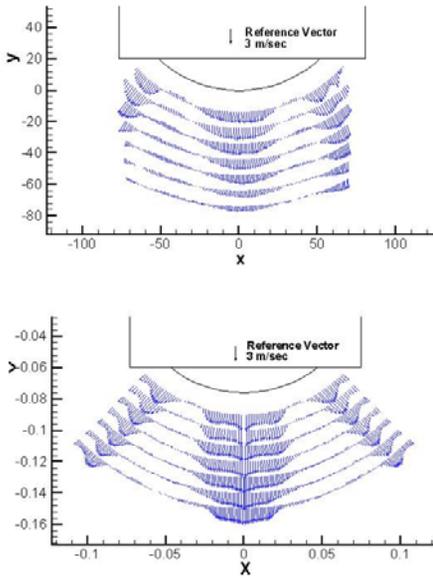


그림 11. 인젝터 출구 속도벡터 비교

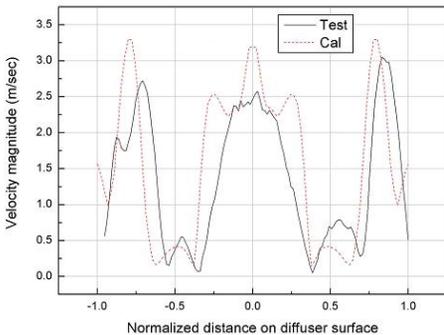


그림 12. 인젝터 출구 속도크기 비교

인 유속이나 재순환영역의 발생 등에 있어 측정 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 12는 인젝터 표면에서 25 mm 떨어진 면에 대하여 가압가스의 유속을 비교한 것이다. 해석결과에서의 유속이 측정결과보다 좀 더 크게

나오긴 하였으나, 최대 유속이 3.3 m/sec로서 초기에 설정한 인젝터의 출구유속 기준 5 m/sec 이하를 만족하였다. 수정된 격자에 대한 유동해석결과가 인젝터 출구의 각 위치별로 측정결과와 일치하지는 않았으나 가압가스의 분사 형태를 비교적 잘 예측해 주었다. 본 자료에는 첨부하지 않았으나, X, Y 축으로 유속을 분해하여 비교한 경우에도 해석과 측정이 비교적 잘 일치하였다.

3.3 추진제탱크 얼리지 해석

추진제탱크 내부 얼리지에서의 가스 유동 및 온도분포를 보기 위하여 인젝터 출구 유동해석에서 얻은 데이터를 추진제탱크 얼리지 해석의 입구 데이터로 적용하였다. 탱크 내부는 추진제가 없는 빈 공간으로 가정하였고, 탱크의 바닥면 전체를 통해 가스가 빠져나가도록 하였다. 인젝터 자체에 대한 해석과는 달리 온도조건을 적용하여 유입되는 가압가스의 온도를 500 K으로, 탱크 벽면 및 바닥의 온도를 90 K으로 가정하였다.

그림 13의 좌측은 추진제탱크 내부에서의 가압가스의 유속분포를, 우측은 온도분포를 나타낸다. 인젝터에서 분사된 가압가스는 추진제탱크 내부에서 확산되어 탱크 상부의 일부영역을 제외하고는 전체적으로 0.03 m/sec 이하의 균일한 유속으로 이동하였다. 인젝터 외곽 방향으로의 분사량이 다소 적어 추진제탱크 상부는 성층화 정도가 약하였으나 중간부 아래로는 뚜렷하게 성층화된 온도분포를 보여주었다. 이를 통하여 제작된 인젝터가 디퓨저로서의 기능을 원활히 수행함을 확인하였고 외곽방향으로의 분사량을 늘린다면 추진제 표면을 전체적으로 고르게 눌러줄 수 있을 것으로 생각된다.

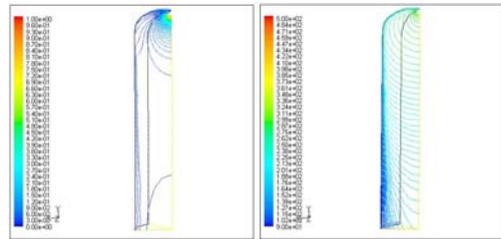


그림 13. 얼리지 내부 가압가스 속도 및 온도분포

IV. 결 론

추진제탱크 가압용 인젝터 개발의 일환으로 인젝터 시제품을 제작하고 이에 대한 유동가시화

및 유동해석을 통하여 출구에서의 가압가스 분사 형태를 알아보았다. 인젝터 형상을 결정함에 있어 가압가스의 유속을 충분히 감소시키고 추진제 탱크 내부에 고르게 분사되도록 하기 위해 2장의 타공판을 가진 디퓨저 형태로 제작하였으며, 외곽방향으로 보다 많은 가압가스가 분사되도록 하기 위하여 타공콘을 삽입하였다. PIV 기법을 사용하여 인젝터 출구 유동을 가시화하였고 유량의 변화에 관계없이 가압가스의 분사형태는 동일하게 유지됨을 확인하였다. 인젝터 자체에 대한 상세 유동해석을 수행하고 이를 측정결과와 비교하여 해석결과를 검증하였다. 또한, 인젝터 출구에서의 데이터를 추진제탱크 얼리지 해석의 입구데이터로 적용하여 디퓨저 형태의 인젝터를 통해 얼리지 내부가 성층화된 온도분포를 가질 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 디퓨저 형태의 인젝터를 제작함에 있어 주유동의 방향을 결정짓는 타공콘과 가압가스의 분산에 영향을 미치는 타공판 등의 설계 노하우를 쌓을 수 있었고 유동해석을 통해 인젝터의 분사형태를 예측할 수 있음을 확인하였다. 추후 인젝터를 사용하여 실제 추진제탱크 내부의 현상을 파악하는 시험이 진행될 계획이며 그 과정을 통해 인젝터에 대한 추가 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Dieter, K. Huzel and David, H. Huang, "Modern engineering for design of liquid propellant rocket engines", AIAA progress in astronautics and aeronautics, Vol. 147, 1992.
- 2) M. E. Nein and J. F. Thomson, "Experimental and analytical studies of cryogenic propellant tank pressurant requirements", NASA TN D-3177, 1996.
- 3) Richard, L. DeWitt, Robert, J. Stochl and William, R. Johnson, "Experimental evaluation of pressurant gas injectors during the pressurized discharge of liquid hydrogen", NASA TN D-3458, 1966.
- 4) "Pressurization systems for liquid rockets", NASA SP-8112, 1975.
- 5) "Centaur space vehicle pressurized propellant feed system tests", Lewis Research Center, NASA TN D-6876, 1972.
- 6) Takehiro, H., Akira, K., Masanori, T., Moriyasu, F., Osamu, K. and Toshinori, W., "Numerical investigation of liquid behavior in the propellant tank of H-IIA", AIAA 2002-3987, 2002.
- 7) 권오성, 권기정, 한상엽, 정용갑, "PIV를 이용한 추진제탱크 가압디퓨저 유동장 측정", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 2007, pp. 1449~1452.