

연료전지 수소재순환 이젝터 시스템에 관한 수치해석적 연구

남궁 혁준¹⁾, 문 종훈²⁾, 장 석영³⁾, 홍 창욱⁴⁾, 이 경훈⁵⁾

Numerical Study on a Hydrogen Recirculation Ejector for Fuel Cell Vehicle

Hyuck-Joon Namkoug, Jong-Hoon Moon, Seock-Young Jang, Chang-Oug Hong, Kyoung-Hoon Lee

Key words : Recirculation Ejector (재순환 이젝터), Fuel-Cell(연료전지), Hydrogen Recirculation Ratio (수소 재순환률), CFD (열유체 해석), Ejector Throat Area Ratio (이젝터 목면적비), Diffuser Diverging Angle (디퓨저 확대각)

Abstract : Ejector system is a device to transport a low-pressure secondary flow by using a high-pressure primary flow. Ejector system is, in general, composed of a primary nozzle, a mixing section, a casing part for suction of secondary flow and a diffuser. It can induce the secondary flow or affect the secondary chamber pressure by both shear stress and pressure drop which are generated in the primary jet boundary. Ejector system is simple in construction and has no moving parts, so it can not only compress and transport a massive capacity of fluid without trouble, but also has little need for maintenance. Ejectors are widely used in a range of applications such as a turbine-based combined-cycle propulsion system and a high altitude test facility for rocket engine, pressure recovery system, desalination plant and ejector ramjet etc. The primary interest of this study is to set up an applicable model and operating conditions for an ejector in the condition of sonic and subsonic, which can be extended to the hydrogen fuel cell vehicle. Experimental and theoretical investigation on the sonic and subsonic ejectors with a converging-diverging diffuser was carried out. Optimization technique and numerical simulation was adopted for an optimal geometry design and satisfying the required performance at design point of ejector for hydrogen recirculation. Also, some sonic and subsonic ejectors with the function of changing nozzle position were manufactured precisely and tested for the comparison with the calculation results.

1. 서 론

일반적으로 이젝터(ejector)는 고압의 유체를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 압축하여 수송하는 장치이다. 이젝터는 노즐(nozzle), 혼합부(mixing section) 및 디퓨저(diffuser)로 구성되어 있으며, 이젝터 시스템 전체에 어떤 회전부분이나 활동부분을 가지지 않는 유체기계이므로 고장이 적고, 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 압축 또는 수송 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이젝터는 1차 노즐로부터 방출되는 유동이 아음속(subsonic), 음속(sonic) 그리고 초음속(supersonic)인 경우 각각 아음속, 음속 및 초음속 이젝터로 분류된다. 일반적으로 산

업적 용도로 사용되는 이젝터에 있어서, 1차 노즐

- 1) 로템기술연구소
E-mail : namkoug@rotem.co.kr
Tel : (031)460-1313 Fax : (031)460-1782
- 2) 로템기술연구소
E-mail : jhmoon@rotem.co.kr
Tel : (031)460-1572 Fax : (031)460-1782
- 3) 로템기술연구소
E-mail : sychang@rotem.co.kr
Tel : (031)460-1563 Fax : (031)460-1782
- 4) 로템기술연구소
E-mail : cwhong@rotem.co.kr
Tel : (031)460-1563 Fax : (031)460-1782
- 5) 로템기술연구소
E-mail : marklee@rotem.co.kr
Tel : (031)460-1312 Fax : (031)460-1782

의 구동유체가 증기나 기타 압축성 기체인 경우에 대부분의 이젝터는 초음속 상태로 운전되며, 종래 이러한 초음속 이젝터들은 V/STOL항공기의 추력증강^[1]이나, 로켓엔진의 고고도상태(high altitude)의 모사^[2], 연소시험, 천연가스 재생, 식품제조, 건조 및 탈취, 소음저감 그리고 각종 화학공업^[3] 등에 널리 활용되고 있다.

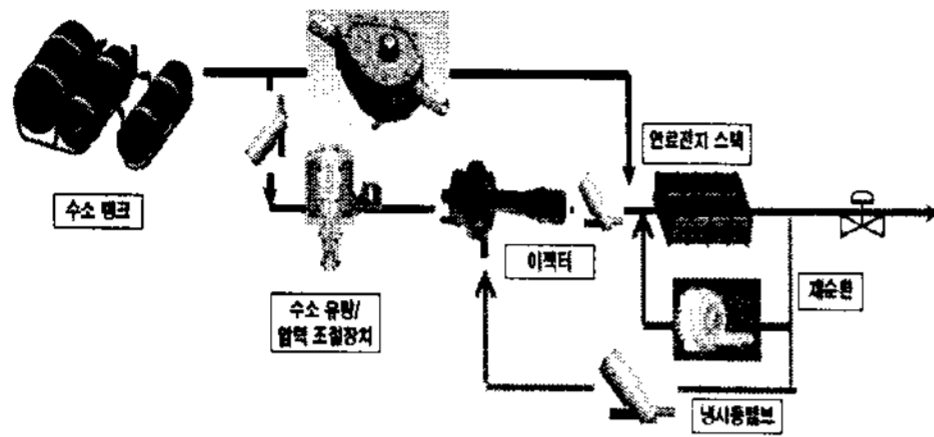


Fig. 1 연료전지자동차용 수소공급시스템

본 연구에서는 이러한 이젝터 시스템을 스택에서 미반응된 수소가 재순환되어 재사용하기 위한 수소재순환시스템으로 사용하게 되며 현재 수소재순환블로어를 적용한 수소공급시스템을 국내에서 개발 중에 있으나, 연료전지 차량의 향후 양산을 고려한 내구 성능, 가격 등을 고려하여 수소재순환이젝터를 적용하는 수소공급시스템의 개발 필요성이 요구되고 있다. 그림 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 하이브리드 방식의 수소재순환 시스템을 보여주고있다. 이젝터와 수소재순환 블로워를 동시에 사용하여 연료전지 차량의 운전 조건을 안정적으로 만족시키고자 하였다. 버스용 연료전지 수소재순환장치에 활용되는 이젝터가 하이브리드 운전 조건에서는 이젝터의 구동압력비가 비교적 낮으므로, 1차 노즐 출구에서 유동은 아음속이거나 음속상태로 설계하게 된다. 현재까지 아음속 및 음속 이젝터 유동에 관한 연구결과는 많지 않으며, 이젝터의 성능평가나 실용적 설계를 위한 연구자료는 매우 부족한 실정에 있다. 이것은 이젝터가 아음속 상태로 운전되는 경우, 이젝터 내부에서 발생하는 1차유동 및 2차유동의 혼합특성, 배기성능 및 진공성능 등의 이젝터 유동 특성들은 이젝터의 구동압력비에 강하게 의존하게 되므로, 단순한 이론적 수단으로 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하는 것은 용이하지 않기 때문이다. 또 부분적으로는 이젝터의 성능에 밀접하게 관계하는 1차노즐의 직경, 이젝터의 목직경, 혼합부의 길이, 디퓨저의 길이 등 초음속 이젝터 유동에 비하여 많은 유동 특성길이가 존재하게 되므로, 아음속 이젝터 유동장을 해석하는 것은 매우 곤란하다. 본 연구에서는 1차원 기체역학 이론에 1, 2차 유동의 압축비, 디퓨저의 손실계수, 2차 유동의 손실계수 및 디퓨저의 팽창비를 적용하였다. 또 아음속/음속 이젝터의 목면적비, 1, 2차 유동의 유량비, 1차 노즐의 출구 마하수를 이젝터의 구동압력비와 이젝터 목면적비의 함수로 나타내어, 이젝터 시스템의 설계나 성능평가가 용이하도록 하였다. 이렇게 결정된 형상에 대해서 열유동해석을 통해 수소 혼합가스 흡입량을 검증하고 최종 시험 조건을 도출하였다. 표 1은 연료전지 운전조건 관점에서의 설계점 이젝터 사양을 보여주고 있다.

흡입량이 고정된 관계로 성능 관점에서는 최적이지 않은 사양이며 공급라인에는 수소가 공급되며 흡입 라인에서는 질소 수소의 혼합가스가 가습된 상태로 흡입되고 있다.

Table 1. 수소재순환 이젝터 사양

Item	Contents	Unit	Value	Remarks
Configuration	Nozzle Throat Diameter	mm	2.8 ~ 4.1	
	Recess Length (Ld)	mm	0 ~ 20	
	Mixing Part Diameter	mm	7.0 ~ 9.0	
Operating Condition	Primary Pressure (P1)	bar	1.6 ~ 3.0	
	Secondary Pressure (P2)	bar	1.40 ~ 1.47	
Working fluid	Active gas	-	Dry hydrogen	
	Passive gas	-	Humidified hydrogen (+Nitrogen)	
Performance	Entrainment Ratio	-	1.2 ~ 2.5	
	Anode Inlet Pressure	Bar	1.5	
Fuel Cell Power		Watt	50kW 60kW 80kW	

2. 본 론

2.1 공력 해석

본 절에서는 아음속/음속 (초음속) 이젝터의 성능을 평가하기 위해 일차원 기체역학 이론을 이용하여 성능해석을 수행하였다. 3차원 해석 결과와 비교함으로써 아음속/음속/초음속 이젝터에 대한 1차원 코드 검증을 수행하였으며 오차에 대해서 1차 노즐의 유량계수, 디퓨저의 손실계수를 도출하여 이론해석의 정확도를 높였다. 일반적으로 이젝터 내부에서 발생하는 1차 유동 및 2차유동의 혼합특성, 배기성능 및 진공 성능 등의 이젝터 유동 특성들은 이젝터 구동 압력비에 강하게 의존하게 된다. 음속, 아음속 이젝터는 구동 압력비가 낮을 경우 사용되며 이러한 아음속 이젝터의 경우는 1차 노즐의 직경, 이젝터의 목직경, 혼합부의 길이, 디퓨저의 길이 등 초음속 이젝터에 비하여 많은 유동 특성 길이가 존재하게 되므로, 아음속 이젝터의 유동장 해석을 수행하는 것은 많은 시간이 소요된다. 특히 1차 유동과 2차유동의 혼합, 비정상성, 3차원성 등 매우 복잡하여 1-D 계산 결과와 3차원 계산 결과를 적절하게 조율하여 당사는 강건한 1차원 기체역학 Code를 개발하였다. 반면 음속 이젝터의 경우 구동 압력비가 비교적 높을 경우 일반적으로 사용되며 압력비가 증가함에 따라 유동은 이젝터 목에서 초크하여, 이젝터 디퓨저에서 발생하는 충격파 시스템으로 인하여 압력이 증가하게 된다. 따라서 이젝터 디퓨저에서 발생하는 충격파 상류에서는 유동이 초음속으로, 디퓨저 내에서의 충격파와 디퓨저 벽면의 경계층과 상호 간섭 현상이 발생하게 된다. 이렇게 음속 이젝터의 경우 디퓨저 내부에서의 복잡한 유동으로 인하여 시스템에 불안정한 요인으로 작용하게 될 수 있으나 이젝터 목에서 초킹이 발생한 후에는 배압의 변화에도 유량 변화가 없게 되므로 안정한 유량 조절이 가능해진다. 초음속 이젝터의

이론 해석은 패브리 초킹 (Fabri Choking)이 발생한다는 가정을 이용하여 이차목을 갖는 환형 분사 초음속 이젝터로 모델링 된다. 2차 유동의 압력을 예측하기 위해서 혼합 챔버 입구에서 패브리 초킹면 사이를 비혼합 이론 (Non mixing theory)을 이용하여 계산한다. 이러한 과정으로 얻어진 패브리 초킹면의 주유동 압력과 2차유동 압력이 같은 조건을 만족시키는 경계면의 2차 유동 압력을 계산한다.

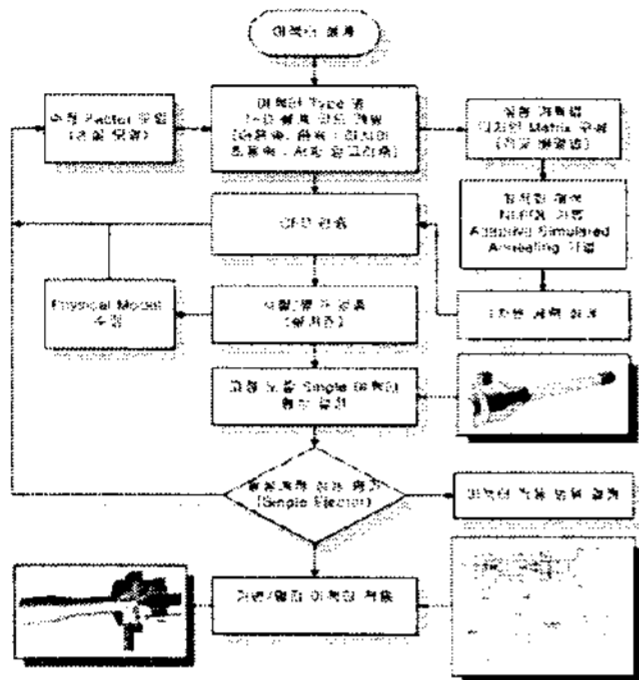


Fig. 2 이젝터 개발 Flow

그림 2에서는 이젝터 개발 과정을 보여 주고 있다. 운용 조건에 따라 이젝터 Type을 결정하게 되며 기하학적 변수 및 유동 변수에 따라 설계점에서 성능 계산을 수행하게 된다. 위에서 언급한 일차원 기체 역학 이론 계산을 바탕으로 하여 3차원 CFD 결과 및 시험 결과를 통해 설계 형상을 검증하게 된다. 다음 단계로서 탈설계점에서도 설계 조건을 만족하는 최적 형상을 결정하게 되며 모델 별 압력 상승과 흡입 성능을 분석하여 유량 조건에 따른 Grouping 방안 및 가변 노즐 설치안을 도출하게 된다. 이러한 계산 과정에서는 3차원 유동 해석과 최적 설계 알고리즘을 연동 해서 계산을 수행하여 일차원 해석에서 고려할 수 없는 흡입구의 위치 및 노즐과 믹싱 챔버와의 거리, 흡입 챔버의 직경, 흡입구 직경 등에 따른 성능 변화를 평가하였다.

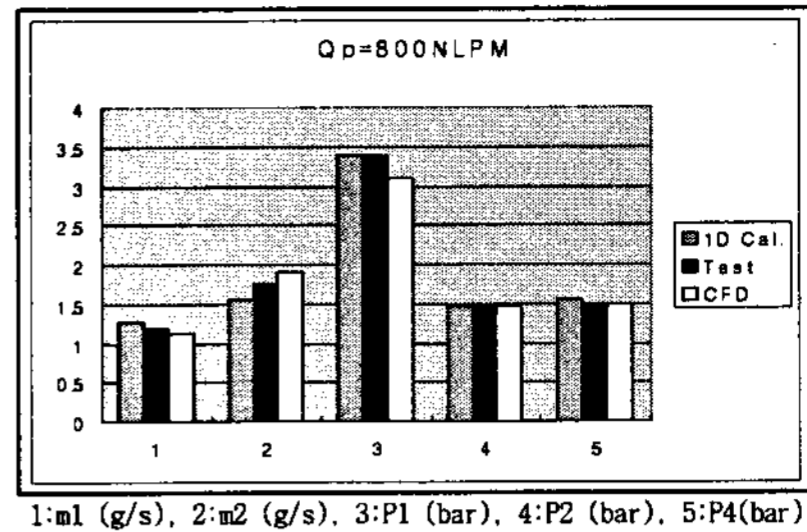
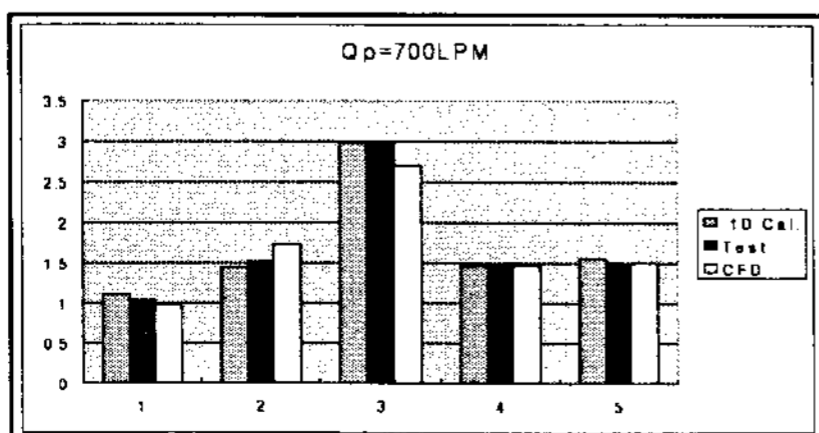
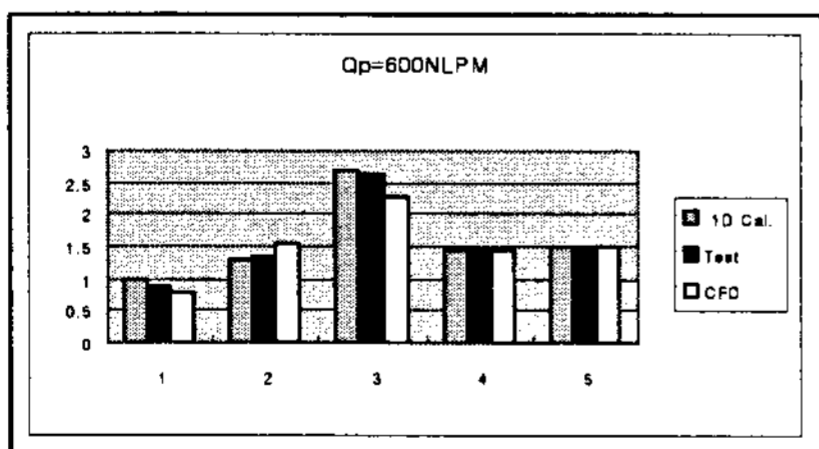


Fig. 3 이젝터 설계 코드 검증 결과

그림 3은 1-D 설계 결과 및 CFD 해석 결과와 시험결과와의 비교를 통해 설계 및 해석 방법에 대한 검증을 수행하였다. 공급 유량, 흡입 유량, 공급 압력, 흡입 압력에 대해 비교를 한 결과 10%이내의 오차로 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 결국 설계 코드에 대한 신뢰성을 확보하였고 이를 활용하여 설계점 최적화 설계를 수행하였다.

2.2 설계점 최적화 설계

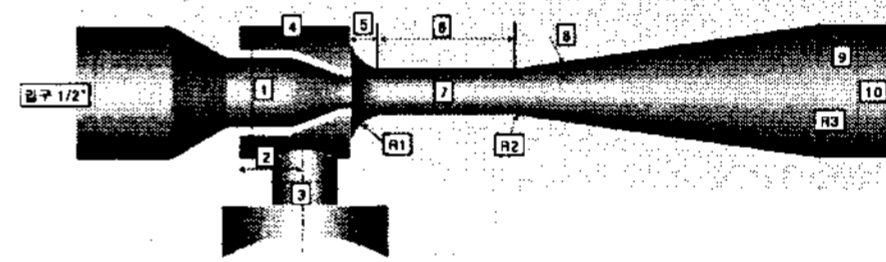


Fig. 4 이젝터 기하학적 형상 변수

그림 4에서는 이젝터 성능 해석을 위한 기하학적 형상 변수를 보여주고 있다. 이러한 형상 변수 및 1차, 2차 유동의 유량, 압력비 등은 이젝터 성능에 영향을 주고 있으며 Optimal Latin Hypercube 법^[4]에 의한 Sampling Matrix를 수립하고 최적화 해석을 수행하여 각 변수 간에 교호 관계 및 민감도 분석을 수행하였다.

Table 2. 이젝터 변수 및 형상

변수	비고
m1 (g/s)	주유동 유량
m2 (g/s)	흡입 유동 유량
p1 (Bar)	공급 압력
p2 (Bar)	흡입 압력
p4 (Bar)	이젝터 출구 압력
Ramda2	흡입유동 무차원 속도
D1 (mm)	NozzleThroat
D3 (mm)	혼합부 직경 (7)
D4 (mm)	디퓨저 출구 (10)
Angle (Deg)	디퓨저 각도 (8)
f	(7), (10) 면적비

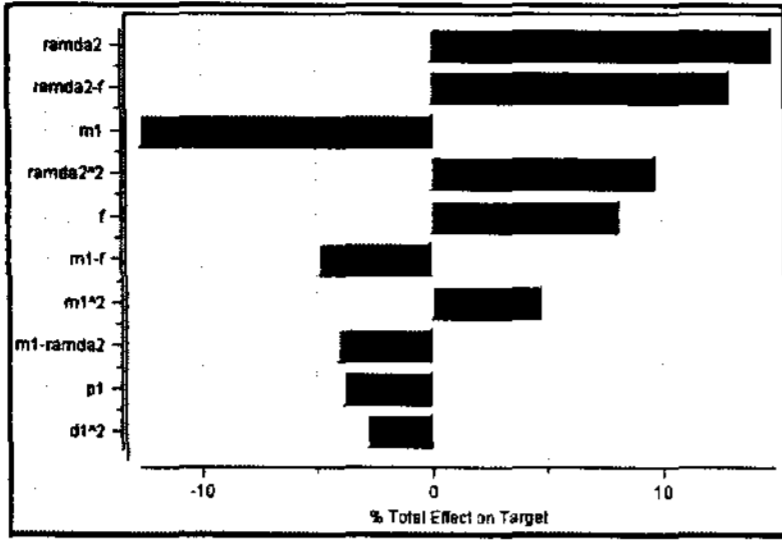


Fig. 5 이젝터 성능 Pareto 분석

그림 5는 실험 계획법 (Design of Experiment)에 의한 민감도 해석 결과를 보여주고 있다. 설계 출구 압력과 오차는 흡입 유동의 음속에 대한 무차원 속도 (ramda2)가 커질수록 대체로 오차가 감소하는 쪽으로 영향을 미치고 있음을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 주유동의 유량과 디퓨저의 면적비 (f)의 곱함에 대해서는 그 값이 커질수록 오차가 증가함을 알 수 있다. 마찬가지로 주유동의 유량이 작아지게 되면 오차도 증가하게 되며 2차 유동의 속도와 면적비의 곱에 대해서는 반대 경향을 보이고 있다. 한편, 기타 다른 변수의 성능에 대한 영향도가 그리 크지 않다.

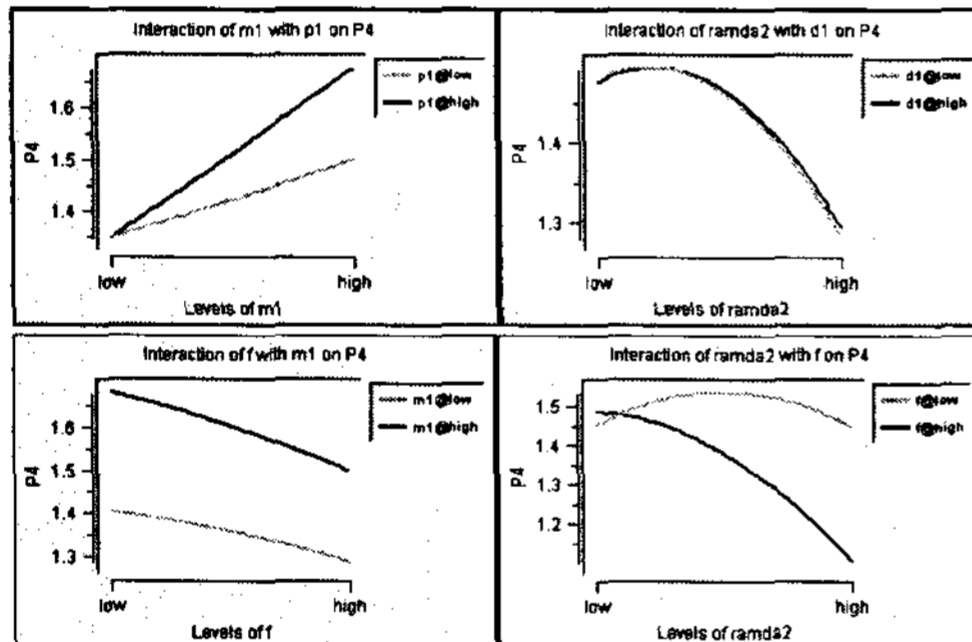


Fig. 6 이젝터 성능 주 영향도 분석

그림 6은 각각의 변수에 대한 주영향도 분석표를 보여주고 있다. 각각의 변수에 대한 출구 상승 압력에 대한 오차 영향도는 1차 함수 또는 2차 함수 관계에 있다. 특히 노즐 출구 면적비 (f)와 흡입 유동 속도는 오차와의 역비례 관계에 있다. 디퓨저 출구 면적비 (f)가 작은 경우는 흡입 유동 속도에 민감하지 않지만 디퓨저 출구 면적비가 큰 경우는 흡입 유동 속도에 역비례 관계로 크게 변화함을 알 수 있다. 따라서 디퓨저 면적비를 크게 하면 흡입량의 범위를 크게 할 수 있다고 판단된다. 또한, 여기서 사용된 최적화 기법으로는 Adaptive Simulated Annealing 기법^[4]과 NLPQL 기법^[4]을 순차적으로 사용하여 Local한 최대점이 아닌 Global한 최대점을 도출할 수 있도록 하였다.

표 3은 본 연구에서 사용되는 이젝터의 최적화 변수 및 제한조건을 나타내고 있다. 목적함수로서 스택으로 공급되는 압력, 즉 이젝터 출구 압력과 계산 결과의 오차를 최소화하는 방향으로 설계하였으며 그림 7과 같이 제한 조건 내에서 흡입 유량 (m2)를 크게 하면서 이젝터 크기를 최소화할

수 있는 설계안을 도출하였다.

Table 3. 최적화 변수 및 제한 조건

Design Variables	Type	Lower Bound	Current Value	Upper Bound
m1 (kg/s)	REAL	0.00013		0.0012
m2 (kg/s)	REAL	0.003		0.0045
ramda2	REAL	0.1		0.9
p1 (Bar)	REAL	1		5
d1 (mm)	REAL	1		5
f	REAL	0.5		0.99

Output Constraints	Type	Lower Bound	Current Value	Upper Bound
D3	REAL	0.5		11.5

Objectives	Type	Direction	Current Value
Target	REAL	minimize	

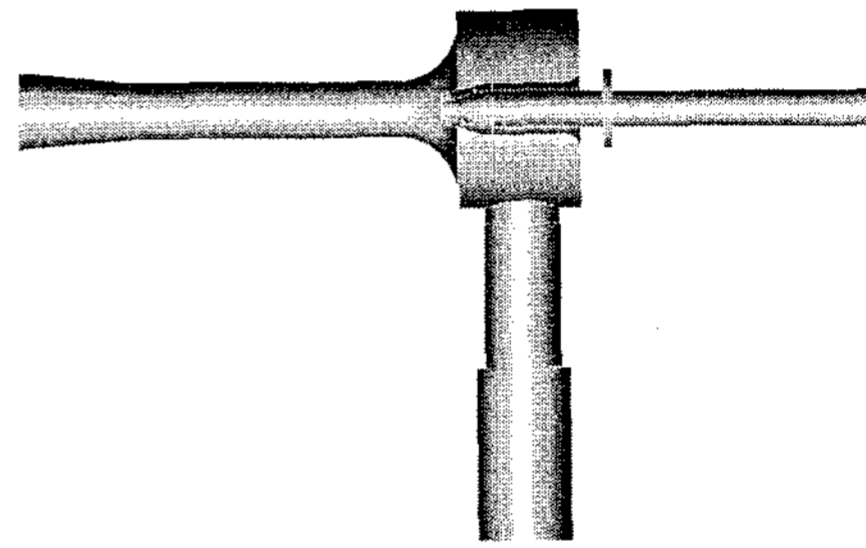


Fig. 7 이젝터 최적화 형상

2.3 최적 형상 CFD 해석

노즐에서의 유동해석의 지배 방정식으로 정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치해법에서 공간차분은 Node Base의 유한 체적법을 적용하였으며, 난류 모델은 Standard K-ε 모델을 사용하였다. 성능 최적화 시체에 대해서 유동 해석 및 성능 평가를 수행하였다. Grid System은 사각형 Mesh와 삼각형 Mesh를 사용한 Hybrid Grid System을 구축하였고 해석에 사용된 격자수는 약 65만개로서 벽면에 대한 경계층 및 점성 효과를 모사하기 위해서 Y+값이 100이하로 Prism 격자를 생성시켰다. 격자는 3차원 전 영역을 계산함으로써 수소가스 및 흡입 혼합가스가 디퓨저 벽면에 충돌 후 발생할 수 있는 2차 유동 효과까지 계산하여 결과의 정확도를 향상시키고자 하였다.

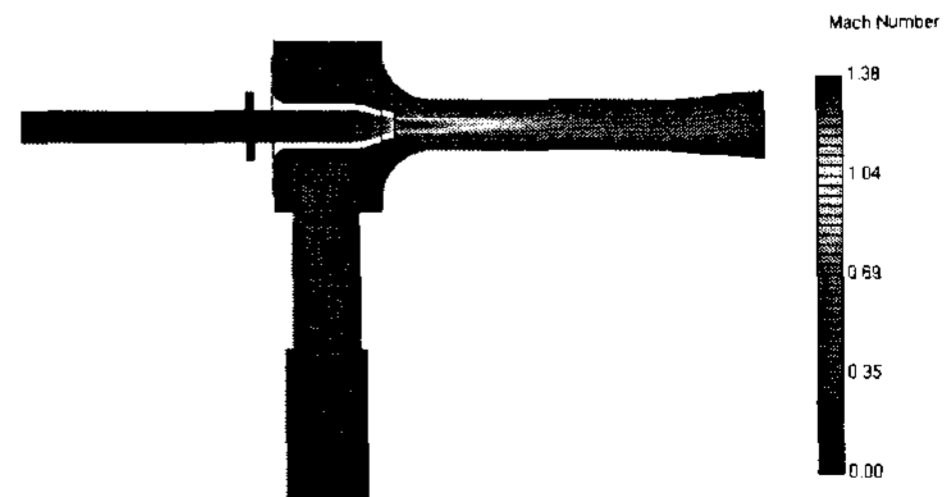


Fig. 8 마하수 분포

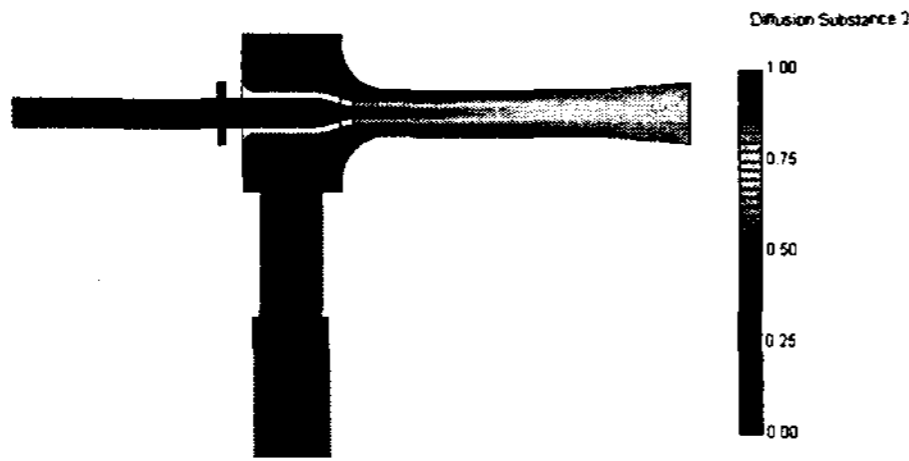


Fig. 8 수소 혼합가스 Mole Fraction

그림 7 ~ 8까지는 최대 흡입량 운전 조건에서의 마하수 분포 및 수소혼합가스의 Mole Fraction을 보여주고 있다. 1차 정체실의 고압의 수소가 축소노즐(convergent nozzle)로부터 방출되는 경우에, 발생하는 분류의 전단작용에 의해 2차 정체실의 저압기체(혼합 수소)가 이젝터 입구로 흡인되어 1차 유동인 분류와 혼합한다. 1차 유동과 2차 유동의 혼합기체는 이젝터의 목과 단면 믹싱 챔버 부분에서 완전히 혼합된 후, 디퓨저를 통하여 대기로 방출된다. 아음속 작동의 경우 내부 유동장에 충격파가 발생하지 않지만 흡입부의 압력이 변함에 따라 공급 유량이 변함을 확인하였다. 음속 작동의 경우는 노즐목에서 초킹이 발생하면 흡입부의 압력이 감소하더라도 공급 유량은 변하지 않는다. 하지만 공급 압력의 상승으로 흡입 효율은 아음속 이젝터에 비해 낮다.

Table 4. 공력해석 및 CFD 계산 결과 비교

	1D	CFD
m1 (g/s)	0.903	0.903
m2 (g/s)	2.5	2.8
p1 (Bar)	4.68	4.5
p2 (Bar)	1.44	1.44
p4 (Bar)	1.53	1.5
Entrainment Ratio	2.8	3.1

표 4에서는 최적 설계 형상의 이젝터에 대해서 공력해석 결과와 CFD해석 결과를 비교하였다. 시험 결과가 반영된 공력설계 Code는 해석 결과와의 비교를 통해 결과의 신뢰성이 확보되었으며 향후 설계점 이외의 운전 조건에서도 안정적 작동이 확보된 이젝터를 설계하는데 본 설계 Code가 활용될 수 있다고 판단된다.

3. 결론

본 연구를 통해 수소재순환 이젝터에 적용하기 위한 공력 설계 Code를 개발하였으며 시험 및 CFD 해석 결과를 통해 검증하였다. 공력 설계 Code를 활용한 이젝터 최적 형상 설계를 수행하였다. 연료전지 스택으로 공급되는 압력을 일정하게 유지하면서 흡입 유량 (m2)를 크게 하고 이젝터 크기를 최소화할 수 있는 설계안을 도출하였다.

상품성과 외부 환경에 따른 운용이 용이한 수소재순환이젝터의 적용 가능성을 파악하기 위하여 블로어와 이젝터가 동시에 사용되는 하이브리드 방식의 수소공급시스템의 통합 설계/제어 기술을

개발 중에 있으며 이와 관련하여 이젝터 설계 평가 기술을 확보하였다. 또한 이젝터의 탈 설계 성능을 향상시켜 수소공급시스템의 효율을 높이기 위한 기본 틀을 확립하였으며, 가변 수소 유량/압력 조절을 통해 하이브리드 운전 범위를 확대하고, 이젝터만을 장착한 수소공급시스템의 설계안을 도출할 계획이다.

References

- [1] Georgiadis, N. J., Walker, J.F., and Trefny, C. J., "Parametric study of the ejector process within a turbine-based combined-cycle propulsion system," AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 12-15, 1998.
- [2] Goethert, B. H., "High altitude and space simulation testing," ARS Journal, Vol. 32, No. 12, 1962, pp. 872-882
- [3] Olds, J., "Options for flight testing rocket-based combined-cycle (RBCC) engines," "AIAA 96-2688, 1996, Lade Buena Vista, FL, USA
- [4] iSIGHT version 9, User's guide Reference, 2006
- [5] SC/Tetra version 6, User's guide Preprocessor Reference, 2005
- [6] 문종훈, 장석영, 전성복, 남궁 혁준, 홍창욱, 김영수, "연료전지자동차용 수소공급시스템 부품 및 설계 기술 개발", 2007 친환경연료 전지자동차핵심부품및시스템기술개발 Work Shop 논문집