

엔진베이 환기용 이젝터시스템 개발

임주현* · 김용련* · 전상인** · 장성호** · 이상효**

Development of an Ejector System for the Engine-Bay Ventilation

Juhyun Im* · Yeongryeon Kim* · Sangin Jun** · Seongho Jang** · Sanghyo Lee**

ABSTRACT

This study has been conducted to develop an ejector system applied in the aircraft engine-bay ventilation system. Tandem-Ejector was selected as a component of ventilation system because it could achieve high ventilation performance in spite of motive flow with small flow rate. Tandem-Ejector is composed of a primary nozzle and two mixing ducts (1st mixing duct and 2nd mixing duct). In this study, 1-D Tandem-Ejector model has been built with conservation laws and isentropic relation for 1-D ejector sizing and performance prediction. Computational Fluid Dynamics(CFD) has been conducted to investigate ejector performance and flow characteristics in the ejector. Also, Tandem-Ejector performance tests have been conducted to obtain ejector pumping performance and to investigate stand-off (gap between primary nozzle and 1st mixing duct inlet) effect on ejector pumping performance.

Key Words : Engine-Bay Ventilation System, Tandem-Ejector System, Ejector Nozzle, Mixing Duct, Sizing Design, 1-D Analysis, CFD Analysis

기 호 설 명		
D	: 혼합덕트 직경	Tt : 전온도 [K]
d	: 노즐 직경	\dot{W} : 질량유량 [kg/s]
H	: 전엔탈피 [kJ/kg]	γ : Specific heat ratio
L	: 혼합덕트 길이	ω : 질유량비
M	: 마하수	τ : 전온도비
Pt	: 전압력 [psi]	Φ : Stream thrust ratio
Ps	: 정압력 [psi]	<Subscript>
R	: 일반공기상수	m : 혼합 흐름
		p : 주 노즐 흐름
		s : 2차 흐름 (secondary flow)
		ter : 3차 흐름 (tertiary flow)
		1 : 1차 혼합
		2 : 2차 혼합

† 2013년 11월 11일 접수 ~ 2013년 월 일 심사완료

* 국방과학연구소

** (주) 대한항공

연락처, E-mail: yrkim@add.re.kr

1. 서 론

항공기의 엔진베이는 엔진에서 발생하는 열을 외부로 배출하기 위한 환기장치가 필요하며, 환기덕트를 이용하여 엔진베이에 공기를 공급하고 고온의 공기를 외부로 배출하는 것이 일반적인 방법이다. 통상 비행중인 경우 비행 유동을 직접 엔진베이에 공급하여 냉각을 수행하나, 정지 조건에서는 엔진베이에 강제적인 냉각공기를 공급하기 위한 장치가 필요하다. 지상정지 조건인 경우, 엔진 블리드에어(Bleed air)를 사용한 이젝터를 구현하여 엔진베이 냉각공기를 발생시키는 설계들이 있으나, 엔진에서 많은 블리드에어를 사용함으로써 엔진성능의 저하가 발생되고, 고온가스를 취급해야 하는 단점이 있다. 본 개발에 적용할 환기 시스템은 엔진 블리드에어를 사용하지 않고, 고압공기를 이젝터의 구동원으로 하는 2차 펌핑 형식의 Tandem-Ejector가 적용된 환기시스템을 개발하고자 하였다. 이젝터 시스템은 Primary air의 모멘텀을 이용하여 Secondary air를 펌핑하는 원리를 이용한 것으로, 소량의 공기로 대량의 유량을 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 Tandem-Ejector는 엔진베이로 공급하는 유속은 낮으면서 대유량을 공급할 수 있는 개념의 장치로 분석되어 본 개발 항공기의 엔진베이 환기시스템에 적합한 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 엔진베이 환기장치에 사용하기 위해 개발한 Tandem-Ejector 시스템의 설계 및 해석, 시험 결과를 소개한다.

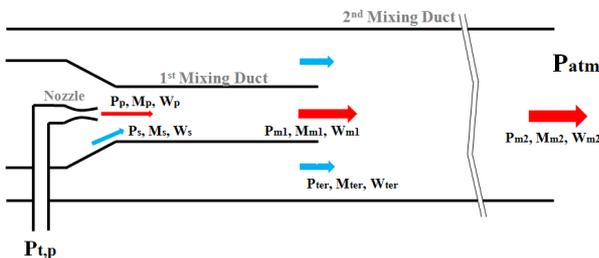


Fig. 1 1-D Analysis Model

2. 1차원 해석 및 사이징 설계

2.1 1차원 해석모델

Figure 1은 Tandem-Ejector 시스템의 1차원 해석모델의 개념도(Schematic)이다. 1차원 해석에 사용되는 등엔트로피 관계식 및 지배방정식은 다음과 같이 구성된다.

- 등엔트로피 관계식 (Isentropic relation)

$$(1) \frac{P_t}{P_s} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$(2) \frac{T_t}{T_s} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$$

$$(3) \frac{W\sqrt{T_t}}{P_s A} = M \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)}$$

- 지배방정식 (Governing equation)

$$(1) W_{m1} = W_p + W_s$$

$$(2) W_{m2} = W_{m1} + W_{ter}$$

$$(3) \Phi_{m1} = \frac{\Phi_p + \Phi_s \omega_1 \sqrt{\tau_1}}{\sqrt{(1+\omega_1)(1+\omega_1\tau_1)}}$$

$$(4) \Phi_{m2} = \frac{\Phi_{m1} + \Phi_{ter} \omega_2 \sqrt{\tau_2}}{\sqrt{(1+\omega_2)(1+\omega_2\tau_2)}}$$

$$(5) H_{m1} = \frac{H_p + H_s \omega_1}{(1+\omega_1)}$$

$$(6) H_{m2} = \frac{H_{m1} + H_{ter} \omega_2}{(1+\omega_2)}$$

$$(7) \omega_1 = \frac{W_s}{W_p} \quad \& \quad \omega_2 = \frac{W_{ter}}{W_{m1}}$$

$$(8) \tau_1 = \frac{T_{t_s}}{T_{t_p}} \quad \& \quad \tau_2 = \frac{T_{t_{ter}}}{T_{t_{m1}}}$$

2.2 1차원 Sizing 및 해석 결과

Tandem-Ejector는 1개의 Primary nozzle과 2개의 혼합덕트(Mixing duct)로 구성되어 있다 (Fig. 1). Primary flow의 모멘텀을 이용하여 1차 혼합덕트와 2차 혼합덕트를 통해 두 번의 펌

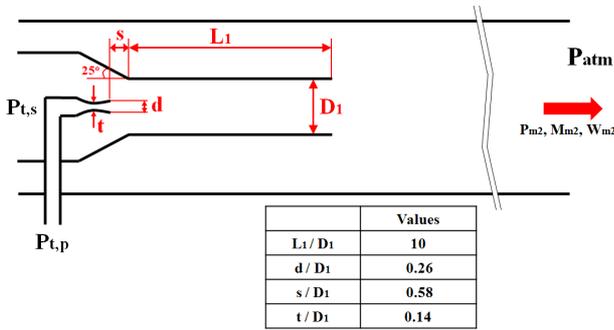


Fig. 2 1-D Sizing Results

평과정이 이루어진다. Tandem-Ejector의 1차원 해석(1-D Analysis)은 연속된 2번의 혼합과정(1차 혼합덕트, 2차 혼합덕트)에 대하여 질량 · 운동량 · 에너지 보존식을 만족하도록 검사체적 해석(Control volume analysis)을 수행하였다. Tandem-Ejector 시스템의 1차원 해석에서 Secondary flow와 Tertiary flow는 대기에서 유입되므로 전압력값(Total pressure)이 대기압과 같고, 각각의 혼합과정은 완전혼합(Complete mixing)조건이 가정되어 1차, 2차 Mixed flow는 균일한 속도분포를 갖는다.

Tandem-Ejector의 기본설계를 위한 1차원 Sizing은 Primary flow와 Secondary flow의 압력 조건, 혼합덕트의 소요유량을 기준으로 이젝터 노즐의 직경을 결정하였다. 일반적으로 이젝터 혼합덕트의 길이(L_1)는 Primary flow와 Secondary flow의 충분한 혼합을 위하여 혼합덕트 직경(D_1)의 7배~14배 정도의 길이를 채택하나, 본 설계에서는 공간적 제약을 고려하여 $L_1/D_1 = 10$ 으로 결정하였다. Fig. 2는 1차원 사이징 결과를 토대로 설계된 이젝터 노즐 및 믹싱 덕트의 형상을 나타낸다.

1차원 해석을 통해 Tandem-Ejector의 성능을 예측할 수 있다. 1차원 해석에서는 두 번의 혼합과정에서 완전혼합을 가정하므로 노즐출구와 혼합덕트입구 사이의 거리를 고려하지 않았으며 ($s=0$), Tandem-Ejector를 통해 이젝터 흐름이 대기로 방출되므로 2nd Mixed flow의 정압력(Static pressure)과 대기압력(Atmospheric pressure)과의 일치(Matching condition)을 제

Table 1. Analytical performance results by 1-D Ejector model

Primary 압력	Mixing Duct 출구압 (psi)	Mixing Duct 출구 속도 (m/s)
101.5 psi (7 bar)	14.84	39.92
123.3 psi (8.5 bar)	14.90	47.60
145.0 psi (10 bar)	14.97	54.96

한조건으로 하여 해석을 수행하였다. 1차원 해석을 통한 Primary flow의 압력 조건 변화에 따른 Tandem-Ejector성능은 Table 1에 정리되어 있다.

3. 3차원 유동 해석

3.1 해석 모델 및 경계조건

1차원 Sizing 해석을 통해 Tandem-Ejector의 기본설계를 수행하였으며, Tandem-Ejector의 내부유동특성 및 성능을 예측하기 위하여 Fluent v.13을 이용하여 3차원 전산해석을 수행하였다. 해석은 Density Base 압축성 유동해석을 수행하였고, 격자는 비정렬격자를 사용하여 약 106만 개의 격자수를 적용하였으며, 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 전산해석을 위하여 경계조건은 노즐 출구와 Secondary flow, Tertiary flow의 유입면(Suction surface)를 Inlet 조건으로, 2nd Mixing duct의 출구를 Outlet 조건으로 하였으며, 이젝터의 1st Mixing duct와 2nd Mixing duct는 Wall로 설정하고 Adiabatic condition을 부여하였다. Table 2는 해석에 적용한 Inlet 및 Outlet의 경계조건을 나타낸다.

Table 2. Boundary Conditions for CFD

Boundary Conditions	Inlet-1	Inlet-2	Outlet
Location	Nozzle Exit	Secondary Flow Inlet	2 nd Mixing Duct Outlet
Pt (psi)	117.48	14.70	-
Ps (psi)	13.85	14.70	14.70



Fig. 3 CFD Analysis Result

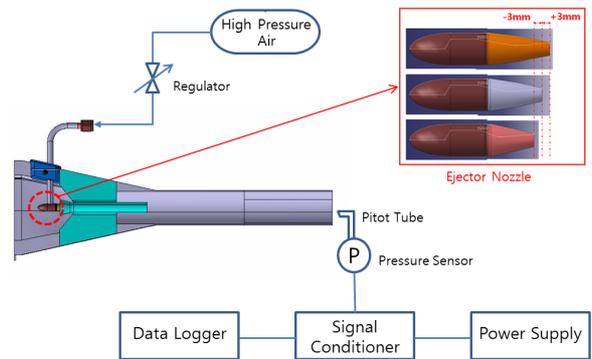


Fig. 5 Schematics of Test Equipment

3.2 해석 결과

Figure 3은 전산유체해석을 통한 이젝터 내부의 유동특성을 보여준다. 전산해석은 노즐 출구와 혼합덕트 입구 사이의 간격(Stand-off, s)을 $1d$, $1.75d$, $2.5d$ 로 변화시키며 수행되었으며, 간격변화에 따른 혼합덕트의 출구 유량을 비교하였다. 출구 유량은 Primary flow의 유량과 Primary flow의 모멘텀에 의해 유입된 Secondary flow의 유량을 더한 값이므로 이젝터 펌핑 성능을 나타낸다. 전산해석결과 노즐출구와 혼합덕트입구의 간격이 $1.75d$ 인 경우에 이젝터 펌핑 성능이 제일 우수하였으며, 간격이 $2.5d$, $1d$ 의 순서대로 변함에 따라 펌핑성능이 점점 더 저하되었다.

Figure 4는 2차 혼합덕트 출구에서의 속도분포 (Velocity contour)를 보여준다. Fig. 3에서의 결과와 동일하게 간격(stand-off, s)이 $1.75d$ 인 경우에 유속이 높은 영역이 제일 넓은 것을 확인할 수 있으며, 간격이 $2.5d$, $1d$ 로 변함에 따라 유속이 높은 영역이 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

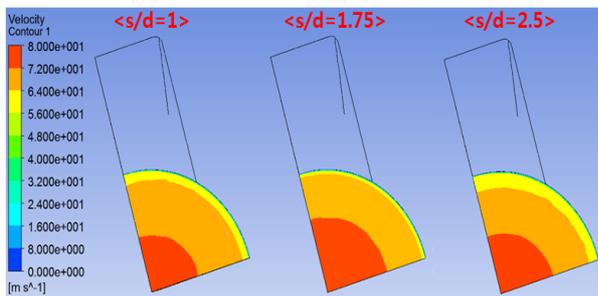


Fig. 4 Exit Velocity CFD Result

4. 시 험

4.1 시험장치 구성

Tandem-Ejector의 펌핑성능을 확인하기 위하여 시험을 수행하였으며, Fig. 5는 Tandem-Ejector 시험장치의 개념도(schematic)이다. 시험에서 Primary nozzle flow는 고압공기를 이용하여 발생시켰으며, 중간에 레귤레이터(Regulator)를 설치하여 시험 조건에 따라 고압공기의 압력을 조절하고, 시험 수행 시에는 일정한 압력의 공기를 Primary nozzle에 제공하였다. Tandem-Ejector의 펌핑 성능을 측정하기 위해 2차 혼합덕트 출구에서 피토투브(Pitot-tube)를 이용하여 이젝터에서 배출되는 2nd mixed flow의 전압력을 측정하였으며, 압력값을 이용하여 속도와 유량을 계산하였다. 피토투브를 이용한 압력 측정은 ETM-DC-375-30A 압력센서를 이용하였으며, $\pm 0.5\%$ 의 정확도를 가진다.

시험에서는 이젝터 노즐 출구와 혼합덕트 입구 사이의 간격(Stand-off)이 이젝터 펌핑에 미치는 영향을 조사하기 위하여 간격을 $1d$, $1.75d$, $2.5d$ 로 변화시켜가면서 시험을 수행하였다.

4.2 시험 결과

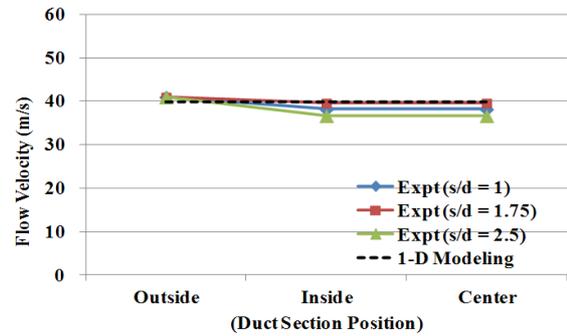
Tandem-Ejector 성능시험에서 전압력은 2차 혼합덕트 출구면의 중앙(Center), 외곽부(Outside), 그리고 중앙과 외곽부의 가운데 지

Table 3. Total Pressure Test Result

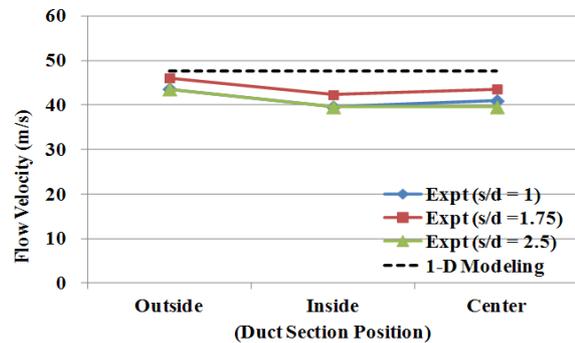
Primary압력	s/d	Mixing Duct 출구압(psi)		
		Outside	Inside	Center
101.5 psi (7 bar)	1.00	14.85	14.83	14.83
	1.75	14.85	14.84	14.84
	2.50	14.85	14.82	14.82
123.3 psi (8.5 bar)	1.00	14.87	14.84	14.85
	1.75	14.89	14.86	14.87
	2.50	14.87	14.84	14.84
145.0 psi (10 bar)	1.00	14.92	14.88	14.88
	1.75	14.91	14.89	14.89
	2.50	14.90	14.86	14.87

점(Inside)의 세 지점에서 피토투브를 이송하며 측정되었다. Table 3은 Primary nozzle flow의 전압력이 7bar, 8.5bar, 10bar로 변하는 각각의 이젝터 작동 조건에 대해 노즐 출구와 혼합덕트 입구의 간격(Stand-off)이 1d, 1.75d, 2.5d로 변할 때의 덕트 출구에서의 전압력 측정값을 정리한 것이다. 이젝터 내부의 흐름은 대기 중으로 방출되므로 측정된 전압력과 대기압력(14.7 psi)을 이용하여 덕트 출구에서의 이젝터 흐름의 속도를 계산할 수 있으며, 이는 Fig. 6에서 세 개의 이젝터 작동 조건(7 bar, 8.5 bar, 10 bar)에 따라 정리되어 있다. Fig. 6에는 시험결과와 해석에 의한 예측값을 비교하기 위하여 1차원 Tandem-Ejector 해석 결과를 그래프에 같이 나타내었다. 1차원 해석에서는 혼합덕트 출구에서 균일한 흐름을 가정하므로 Outside, Inside, Center에서 같은 값을 갖는다.

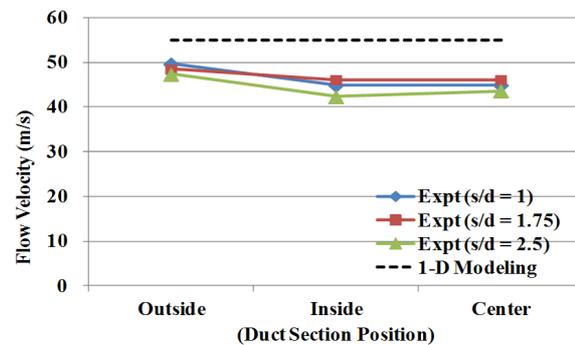
시험결과와 비교할 때, 1차원 Tandem-Ejector 모델은 실제 이젝터 성능을 유사하게 예측한다. 1차원 Tandem-Ejector 모델은 두 번의 혼합과정에서 검사체적해석을 수행하여 혼합과정에서 질량, 운동량, 에너지 보존을 고려하였으며, 이젝터 출구에서 2nd mixed flow의 정압력과 대기압력의 일치(matching)을 제한조건으로 하여 혼합과정에서 초음속 유동인 Primary nozzle flow의 손실을 적절히 고려하였다. 이와 비교하여 전산



(a) Pt, p = 7 bar



(b) Pt, p = 8.5 bar



(c) Pt, p = 10 bar

Fig. 6 Flow Velocity Test Result

유체해석(CFD) 결과는 시험결과와 약 40%의 오차를 보인다. 이는 전산해석에서 적용한 노즐 출구의 경계조건이 초음속의 Primary flow와 아음속의 Secondary flow 간의 혼합 과정에서 일어나는 초음속 유동의 영향을 적절히 반영하지 못했기 때문으로 판단된다.

시험결과를 보면 Primary flow의 전압력이 증가함에 따라 혼합덕트 출구의 유속이 증가하였다. Primary flow의 전압력 증가는 Secondary

flow를 유입하는 Motive flow의 모멘텀이 증가하는 것이므로, Primary flow의 전압력이 증가함에 따라 Secondary flow의 유입량이 증가하여 펌핑 성능이 향상되었다.

또한 노즐 출구와 혼합덕트 입구의 간격(Stand-off)이 변화할 경우에는 시험에 적용된 세 가지 이젝터 작동 조건(7 bar, 8.5 bar, 10 bar)에서 간격이 1.75d인 경우 제일 향상된 이젝터 펌핑 성능이 측정되었다. 이러한 간격(Stand-off) 변화에 따른 이젝터 펌핑 성능 변화의 경향성은 CFD를 통한 3차원 유동해석 결과와도 일치한다. 위와 같은 시험결과를 통해 크기가 동일한 Tandem-Ejector에서도 이젝터 펌핑 성능을 최적화 할 수 있는 이젝터 노즐과 혼합덕트 사이의 간격(Stand-off)의 특이값(Critical value)이 존재함을 알 수 있다.

5. 결 론

Tandem-Ejector 시스템은 엔진베어 환기장치에 사용하기 위하여 연구되었다. Tandem-Ejector는 2차의 펌핑과정을 통해 소량의 Motive flow를 이용하여 다량의 이젝터 유량을 발생시킬 수 있는 장점이 있으므로 본 시스템에 적용되었고, 1차원 해석, 전산유체역학(CFD), 시험 등의 방법을 통해 연구되었다. 1차원 Tandem-Ejector 해석을 통해서 이젝터 작동조건(Primary flow 전압력, 대기압력)에서 주어진 성능조건(혼합덕트 소요유량)을 충족하는 이젝터의 기초 형상을 결정하기 위한 Sizing 작업이 수행되었으며, 작동 조건 변화에 따른 이젝터 펌핑성능이 예측되었다. 1차원 Tandem-Ejector 해석으로 예측한 펌핑성능은 실제 시험결과와 비교하였을 때 유사한 결과를 보여주어 모델의 신뢰성을 보여주었다. 이젝터 성능 예측 및 이젝터 내부 유동 특성을 확인하기 위하여 3차원 전산유체해석(CFD)를 수행하였다. 전산유체해석 결과는 정량적으로는 시험결과와 차이를 보이지만 노즐 출구와 혼합덕트 입구 간격(Stand-off) 변화에 따른 이젝터 성능 변화의 경향성은 적절히 예측하였으며, 이

에 따른 이젝터 내부 유동 특성 변화의 관찰을 가능하게 하였다. 전산해석의 시험결과와 큰 차이를 보이는 것은 전산해석에서 적용한 노즐 출구의 경계조건이 Tandem-Ejector 내부의 혼합과정에서 일어나는 초음속의 Primary flow의 영향성을 적절히 반영하지 못했기 때문으로 판단되므로, 향후 더 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 전산해석과정에서 초음속 유동의 처리 방법에 대한 추가적인 논의가 필요하다.

Tandem-Ejector는 Primary flow의 전압력이 증가함에 따라 모멘텀의 증가로 더 많은 Secondary flow가 유입되어 펌핑 성능이 향상되었다. 또한 노즐 출구와 혼합덕트 입구의 간격(Stand-off)의 변화에 따라 이젝터 펌핑성능이 변화하는 것을 시험을 통해 확인하였고, 이젝터 펌핑성능을 최적화 할 수 있는 간격의 최적값(Optimum value)가 존재함을 본 연구를 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] "A Method of Presenting Realistic Generalized Pumping Performance Data for Air Ejectors", WADC TR 52-128.
- [2] "Ejectors and Jet Pumps", ESDU-92042.
- [3] Kroll A. E., 1947, "The Design of Jet Pump", Chemical Engineering Progress.
- [4] Sun, D., Eames, I. W., 1995, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors - a Review", J. Institute of Energy, 68, pp. 65-79
- [5] Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P., Petrenko, V. A., 1999, "A 1-D Analysis of Ejector Performance", International Journal of Refrigeration, pp.354-364
- [6] 남궁혁준, 한풍규, 김영수, 2009, "이젝터 시스템의 설계 및 작동 특성에 관한 연구", 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, pp. 627-630
- [7] 홍용식, "우주추진공학", 청문각, 1998