

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.4.081>

엔진베이 환기용 탠덤 이젝터의 1차원 해석모델링 기법 개발

임주현^{a,*} · 김명호^a · 김용련^a · 전상인^b

1-D Analysis of Tandem-ejector for the Engine-bay Ventilation

Ju Hyun Im^{a,*} · Myung Ho Kim^a · Yeong Ryeon Kim^a · Sang In Jun^b

^aAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

^bAerospace Engineering Team, Korean Air, Korea

*Corresponding author. E-mail: juhyunim81@gmail.com

ABSTRACT

Tandem-ejector has been devised for engine-bay cooling. In this study, 1-D model has been developed to analyze Tandem-ejector. In the model, the primary, the secondary and the tertiary flow conditions have been analyzed with isentropic process. The mixing process has been analyzed with conservation laws based on the control volume analysis. The total pressure loss of the primary flow has been analyzed under the matching condition between the static pressure of Tandem-ejector discharge flow and atmospheric pressure. Consequently, 1-D model can predict Tandem-ejector performance accurately and provide the performance map.

초 록

엔진베이의 환기를 위해 Tandem-ejector 개념을 도입하고, 성능 예측을 위해 1차원 모델링을 개발하였다. 모델링에서 주 노즐 제트유동과 주 제트유동에 의해 유도된 2차 유동 및 3차 유동 해석은 등엔트로피 과정을 가정하고, 혼합 과정 해석은 질량, 운동량, 에너지 보존식에 기반한 검사체적해석 기법을 적용하였다. Tandem-ejector의 혼합유동이 대기로 방출되므로 방출되는 혼합유동의 정압력과 대기압력을 일치하도록 하고, 이러한 경계조건을 만족시키도록 주 노즐 제트유동의 압력손실 모델링을 구성하였다. Tandem-ejector의 1차원 해석을 통해 주 제트 유동의 압력변화에 따른 이젝터 성능 변화를 예측할 수 있었으며, 실 운용조건에서 주 제트유동의 공급압력 기준값 범위를 설정할 수 있었다.

Key Words: Engine-bay Ventilation System(엔진베이 환기장치), Tandem-ejector(탠덤 이젝터), Mixing(혼합), Conservation Law(보존식), Control Volume Analysis(검사체적해석)

Received 12 December 2013 / Revised 4 July 2014 / Accepted 11 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 추계학술대회(2013. 12. 4-5, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

A : Area

H : Total enthalpy
 h : Entalpy
 M : Mach number
 P_t : Total pressure
 P_s : Static pressure
 R : Gas constant
 T_t : Total temperature
 T_s : Static temperature
 W : Mass flow rate
 t : Nozzle throat diameter
 L : Mixing duct length
 d : Nozzle exit diameter
 D : Mixing duct diameter
 γ : Specific heat ratio
 ω : Ratio of mass flow rate
 τ : Total temperature ratio
 Φ : Stream thrust function

1. 서 론

항공기 엔진 운용 시, 엔진에서 발생하는 열을 외부로 배출하기 위한 환기 시스템(Ventilation System)은 장착구조물 및 탑재장비의 가열을 방지해야하기 때문에 매우 중요하다. 항공기 엔진 베이(Engine Bay)의 냉각은 일반적으로 비행 중에는 환기덕트 흡입구에 유입되는 유동을 이용하여 엔진베이를 직접 냉각하며, 정지 조건에서는 이젝터 혹은 냉각팬 등의 추가적인 장치를 이용하여 엔진베이 주위에 냉각공기를 강제로 공급한다.

이젝터는 구동유동인 주 유동(Primary Flow)의 모멘텀(Momentum)을 이용하여 2차 유동(Secondary Flow)을 펌핑하는 유체기계시스템으로 별도의 구동부(Moving Part)없이 소량의 공기로 다량의 유량을 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 이젝터는 항공기나 헬리콥터의 엔진베이 및 배기가스의 냉각 장치[1], 항공기의 소음 저감 장치[2], 냉동 및 공기조화 장치의 냉매 펌프[3,4] 등 다양한 시스템에서 사용되고 있으며, 연료 전지차의 수소 재순환 장치[5,6]로도

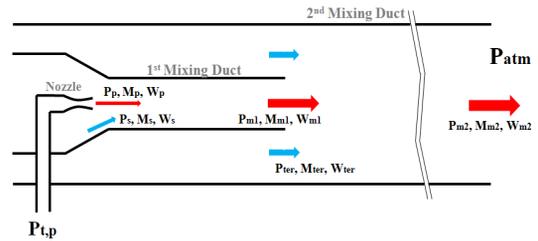


Fig. 1 Schematic of tandem-ejector system.

연구되고 있다. 이러한 장점과 다양한 용도 때문에 예전부터 이젝터에 관한 연구가 이루어져 왔으며, 이젝터 형상 설계 및 성능 예측을 위한 다양한 해석적 연구가 수행되어 왔다. Keenan 등[7,8]은 상태 보존식을 이용하여 이젝터의 성능을 예측하기 위한 해석적 방법을 제시하였고, 해석과 시험 결과와의 비교를 통하여 해석모델링의 타당성을 입증하였다. Eames 등[4]과 Huang 등[9]은 Keenan의 모델에 이젝터 표면의 마찰손실을 고려한 모델을 제시하고 시험 결과와 비교하였다. Fabri 등[10,11]은 초음속 이젝터 해석을 위한 이론과 시험결과를 제시하고, 유도되는 2차 유동의 특성(Flow Regime)을 초음속 유동(Supersonic Flow), 포화 초음속 유동(Saturated Supersonic Flow), 아음속 유동(Subsonic Flow)으로 구분하였다. Presz와 Greitzer[12]는 검사체적해석을 이용하여 대기 중에서 작동 중인 이젝터의 성능을 예측할 수 있는 닫힌 형식 방정식(Closed-Form Equation) 형태의 모델을 제시하였다.

이젝터의 구동 유동(Motive Flow)은 엔진 블리드에어(Bleed Air)를 사용하는 방법이 있으나, 엔진 압축기에서 공기를 추출하여 사용하기 때문에 엔진성능의 저하를 유발한다. 따라서 본 연구에서는 이젝터의 구동을 위해 별도의 고압공기를 사용하면서 저속의 대유량을 공급할 수 있는 2차 펌핑 형식의 Tandem-ejector를 환기시스템에 적용하고, 설계검증 및 성능해석을 유체역학적인 관점에서 수행하기 위하여 1차원 해석을 수행하였다(Fig. 1). 1차원 해석 결과는 시험 값과의 비교를 통해 모델의 타당성을 입증하였고, 작동 조건 변화에 따른 이젝터 성능 변화 예측

결과를 보여준다.

2. Tandem-ejector 시스템

Tandem-ejector는 고압의 구동유동을 분사하는 주 노즐(Primary Nozzle)과 2개의 혼합 덕트(Mixing Duct)로 이루어져 있다. 고압의 주 유동(Primary Flow)이 노즐을 통해 분출되면, 주 유동의 모멘텀에 의해 혼합 덕트 내로 2차 유동(Secondary Flow)이 유입되고 두 유동간의 혼합이 이루어진다. 이와 같은 첫 번째 혼합 과정에 적용되는 혼합 유동, 혼합 덕트를 각각 1차 혼합 유동(1st Mixed Flow), 1차 혼합 덕트(1st Mixing Duct)라 한다. 1차 혼합과정 후, 두 번째 혼합 덕트에서는 1차 혼합 유동의 모멘텀을 이용하여 3차 유동(Tertiary Flow)이 유입 된다. 두 번째 혼합 과정에 적용되는 혼합 유동 및 혼합 덕트를 각각 2차 혼합 유동(2nd Mixed Flow), 2차 혼합 덕트(2nd Mixing Duct)라 한다. 이 때, 주 유동의 모멘텀에 의해 유입되는 2차 유동과 3차 유동은 대기로부터 유입되며, 2회의 연속된 혼합 과정을 거친 후 2차 혼합 유동은 Tandem-ejector로부터 대기로 분출된다.

3. Tandem-ejector 1차원 해석

3.1 1차원 해석에 적용되는 가정

Tandem-ejector의 성능을 유체역학적으로 예측하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하였다. 이젝터 내부의 유동은 정상조건(Steady State)의 1차원 비점성 유동(Inviscid Flow)으로 가정하고, 주 노즐 내부의 유동에 대해서는 등엔트로피 과정(Isentropic Process)을 가정한다[7-11]. 1차 혼합과정과 2차 혼합과정은 완전 혼합으로 가정한다. 따라서 1차 혼합 유동과 2차 혼합 유동은 균일한 속도분포와 압력분포를 가지고 분출된다. Keenan [7,8]과 Huang [9]에 따르면 이젝터 내부에서의 혼합이 충분히 이루어지기 위한 이젝터 혼합 덕트의 직경에 대한 길이비(L/D)는 7 이

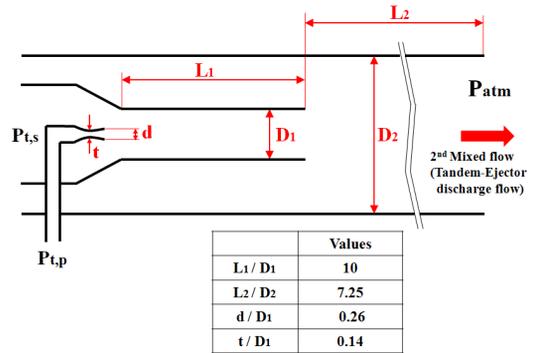


Fig. 2 Geometry of tandem-ejector.

상인데, 본 연구에서 적용된 Tandem-ejector의 경우 1차 혼합 덕트와 2차 혼합 덕트의 길이-직경비가 각각 $L_1/D_1 = 10$, $L_2/D_2 = 7.25$ 이므로 완전혼합의 가정은 타당하다.

3.2 Tandem-ejector 해석 조건

Tandem-ejector의 1차원 해석을 수행하기 위하여, Tandem-ejector의 형상 조건과 작동 조건이 필요하다. 형상조건으로 주 노즐의 목(Throat) 및 출구(Nozzle Exit)의 직경이 각각 t 와 d 로 주어진다. 그리고 1차 혼합 덕트와 2차 혼합 덕트의 직경은 D_1 , D_2 이다. Tandem-ejector의 형상은 Fig. 2에 보이는 바와 같다. 혼합 덕트의 길이 정보는 Fig. 2에 기재되어 있으나 1차원 해석에서 완전 혼합을 가정하므로 길이는 해석에서 사용되지 않는다. 다만 앞서 언급하였듯이 각각의 혼합 덕트의 직경에 대한 길이비는 7 이상이므로 완전 혼합 가정을 적용하였다.

Tandem-ejector에서는 주 유동이 노즐 주위의 유동을 유발하여 펌핑이 일어난다. 주 유동의 전 온도(Total Temperature)는 시험 조건인 대기 온도(288 K)로 설정하였고, 주 유동의 전압력 변화는 주위 유동을 유도하여 결과적으로 엔진 베이에 저속/대유량의 냉각 공기를 공급한다. 본 연구에서는 주 유동의 전압력을 7 bar, 8.5 bar, 10 bar로 변화시키면서 이젝터 펌핑 성능 변화를 해석적으로 조사하였다. 즉, Tandem-ejector의 형상 조건과 작동 조건이 주어지면 1차원 해석을 통하여 Tandem-ejector 출구에서의 속도와

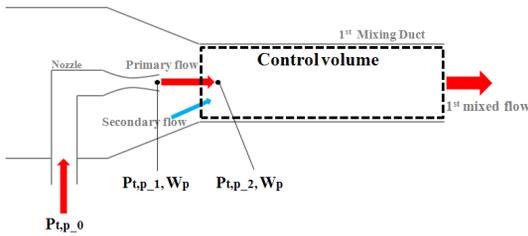


Fig. 3 Control volume for 1st mixing process.

전압력을 알 수 있으며, 결과적으로 펌핑 성능을 예측할 수 있다.

3.3 Tandem-ejector 1차원 해석 모델링

1차원 해석 모델링에서 Tandem-ejector의 구동력을 제공하는 주노즐의 제트유동과 유입된 2차, 3차 유동의 상태해석은 등엔트로피 관계식(Isentropic Relation)을 적용하고, 혼합과정해석은 검사체적해석(Control Volume Analysis)기법을 적용하였다. Fig. 3은 1차 혼합과정에 적용되는 검사체적을 보여준다.

초음속 이젝터의 해석 모델링은 유입유동의 특성에 따라 초음속 유동과 아음속 유동에 따른 모델을 적용한다[7-11]. 유입유동이 초음속 유동인 경우 주 유동과 2차 유동 혼합의 해석은, 1) 2차 유동의 주 노즐 출구에서의 초킹(Chocking) 조건에서는 Constant-Area Mixing 방법을 이용하고, 2) 2차 유동의 주 노즐 출구 하류에서의 초킹 조건에서는 Constant-Pressure Mixing 방법을 이용한다. 이 때, 2차 유동이 초킹되는 주 노즐 하류의 임의의 위치에서 2차 유동 단면적은 'Hypothetical Throat' 혹은 'Effective Area'라 한다[9,13]. 본 연구에 적용되는 Tandem-ejector는 혼합덕트의 직경이 주노즐 유량 대비 충분히 크기 때문에 아음속 디퓨저에 해당한다. 또한 2차 유동은 주 유동과 비교하여 전압력이 매우 작고, 넓은 면적을 통해 1차 혼합 덕트로 유입되므로 아음속 유동으로 고려한다. Fabri 등[10]도 주 유동 압력에 따른 배기성능곡선에서 주 유동과 유입유동의 압력비가 0.21 이하인 경우, 아음속 2차 유동을 고려하였고, 이는 Tandem-ejector의 작동조건에 적용 가능하다. 따라서, Tandem

-ejector의 해석은 초음속 주유동, 아음속 2차 유동 조건에서 해석을 수행하였다. 초음속 주노즐을 갖는 아음속 디퓨저에서 이젝터의 펌핑 성능을 예측하기 위해서는 초음속의 주 유동과 아음속의 2차 유동의 혼합과정에서의 주 유동 전압력 손실 해석이 필요하다. 본 연구의 해석모델링에서는 주 유동의 전압력 손실(Total Pressure Loss)을 해석하기 위하여 Tandem-ejector 출구에서의 2차 혼합 유동의 정압력(Static Pressure)과 대기압력의 일치조건(Matching Condition)을 제한조건으로 사용하였다. Tandem-ejector 1차원 해석 모델링은 주 유동의 전압력을 주 유동의 공급부, 노즐 출구, 혼합덕트 입구의 세 지점에서 정의하고, 각각을 $P_{t,p,0}$, $P_{t,p,1}$, $P_{t,p,2}$ 라 명명하였다(Fig. 3). Tandem-ejector의 작동조건은 주 유동 공급부의 전압력($P_{t,p,0}$)으로 정의하며, 노즐 내부에서의 유동은 등엔트로피 과정이므로 노즐 출구에서 주 유동의 전압력($P_{t,p,1}$)은 주 유동 공급부의 전압력($P_{t,p,0}$)과 동일하다. 하지만 1차 혼합과정에서 주 유동의 손실을 무시하고 Tandem-ejector 해석을 수행하면, 이젝터 출구에서의 일치조건(Matching Condition)을 만족시킬 수 없으므로 일치조건을 만족하는 전압력 손실이 고려된 주 유동의 전압력($P_{t,p,2}$)을 검사체적 입구인 혼합덕트 입구에서 정의하였다. 이 때, 1차원 모델링은 노즐 출구에서 주 유동의 전압력($P_{t,p,1}$)과 혼합덕트 입구에서 주 유동의 전압력 ($P_{t,p,2}$)의 차이를 주 유동의 전압력 손실로 해석하였다. Fig. 4는 Tandem-ejector 1차원 해석 모델링에서의 전압력 손실 해석 방법을 해석 흐름도(Flow Chart)를 이용하여 보여준다.

주 노즐의 제트 유동은 등엔트로피 과정으로, 수축-확장 노즐(Convergent-Divergent Nozzle)을 통해 1차 혼합 덕트로 공급되는 초음속 유동이다. 주 유동의 압력과 유량은 노즐 목(Throat)에서의 초킹(Chocking) 조건을 이용하여 산출한다. 단, 혼합과정에서의 손실을 고려하기 위하여 주 유동 손실($\Delta P_{t,p} = P_{t,p,2} - P_{t,p,1}$)은 앞서 설명한 손실 해석 방법을 이용하였다. 주 노즐 제트 유동의 모멘텀에 의해 유입되는 2차 유동은 대기로부터 유입되므로 2차 유동의 전압력과 전온도는

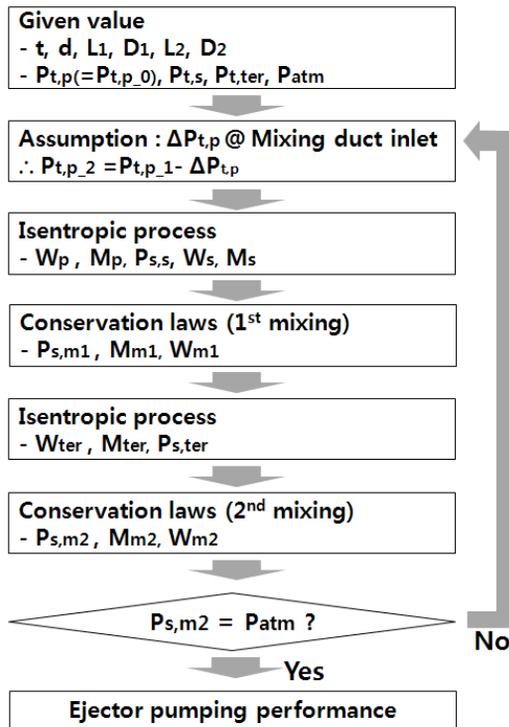


Fig. 4 Flow chart of tandem-ejector 1D analysis.

대기 조건이고 정압력, 속도 및 유량은 주노즐의 제트 유동 조건에 따라 결정된다. 주 노즐 유동과 유도된 2차 유동을 해석하기 위한 등엔트로피 관계식은 아래와 같다.

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

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

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

주 제트 유동과 2차 유동의 혼합(Mixing)의 해석을 위한 검사체적은 1차 혼합 덕트의 입구와 출구, 그리고 혼합 덕트 외벽으로 둘러싸인 공간으로 설정하였다(Fig. 3). 혼합 덕트 외벽은 단열조건(Adiabatic Condition)으로 가정하였으며, 검

사체적 입구에서 주 유동과 2차 유동이 유도되고, 출구에서 1차 혼합 유동이 분출되므로 검사체적 내에서 유입유동과 분출유동은 질량, 운동량 및 에너지 보존 법칙을 만족해야 한다.

$$W_{m,1} = W_p + W_s \quad (4)$$

$$\Phi_{m,1} = \frac{\Phi_p + \Phi_s \omega_1 \sqrt{\tau_1}}{\sqrt{(1+\omega_1)(1+\omega_1\tau_1)}} \quad (5)$$

$$H_{m,1} = \frac{H_p + H_s \omega_1}{(1+\omega_1)} \quad (6)$$

위 식에서, Φ 와 H (Total Enthalpy)는 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{1 + \gamma M^2}{M\sqrt{2(\gamma+1)\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)}} \quad (7)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad (8)$$

이상의 관계식으로부터 1차 혼합 덕트에서의 1차 혼합 유동의 전압력, 정압력, 속도, 온도, 질유량(Mass Flow Rate)을 구할 수 있다.

Tandem-ejector에서 2차 혼합의 구동력은 1차 혼합 유동으로 생성된 제트 유동으로, 1차 혼합 유동의 모멘텀이 3차 유동을 유도하여 2차 혼합 유동을 생성하고 2차 혼합유동은 Tandem-ejector 출구를 통하여 대기로 방출된다. 2차 혼합 유동의 해석은 1차 혼합 유동의 해석과 동일한 방식으로 이루어진다. 3차 유동(Tertiary Flow)의 상태값은 등엔트로피 관계식을 적용하여 해석하고, 2차 혼합 덕트 내에서의 1차 혼합 유동(1st Mixed Flow)의 제트유동과 3차 유동의 혼합유동의 상태값들은 질량, 운동량, 에너지 보존식을 이용한 검사체적해석기법을 적용하여 해석한다. 이 때 2차 혼합유동 출구의 정압력은 대기 압력과 일치해야 하며, 일치조건이 맞지 않을 경우, 주노즐 제트유동의 전압력 손실을 재가정

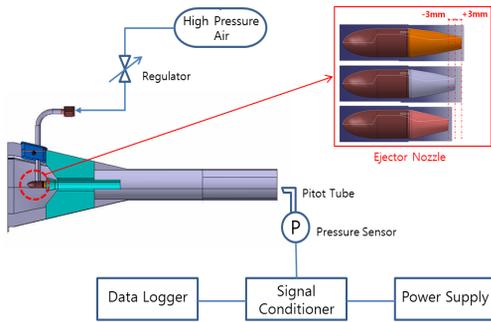


Fig. 5 Schematic of tandem-ejector performance test equipment.

하고 반복계산(Iteration)을 수행한다. Tandem-ejector 출구에서 2차 혼합 유동의 정압력과 대기 압력이 일치하는 전압력 손실값을 찾을 때까지 반복계산을 수행함으로써 Tandem-ejector의 유동평형 상태를 구하도록 하였다. 이상의 Tandem-ejector의 1차원 성능해석 방법은 Fig. 4에 보이는 해석 흐름도(Flow Chart)와 같다.

4. Tandem-ejector 성능 시험

Tandem-ejector의 펌핑 성능 및 1차원 해석 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 비장착 조건에서 성능시험을 수행하였다. Fig. 5는 Tandem-ejector의 성능을 측정하기 위한 시험 장치의 개념도이다. 성능 시험에서 주 노즐의 제트유동은 고압 공기를 이용하여 발생시켰으며, 고압 공기의 압력 조건을 7 bar, 8.5 bar, 10 bar로 바꾸어가며 Tandem-ejector의 성능시험을 수행하였다. 주 노즐에 인가되는 전압력은 고압 탱크와 노즐 사이에 설치된 레귤레이터(Regulator)를 이용하여 조절하였다. Tandem-ejector의 펌핑 성능을 측정하기 위해 2차 혼합 덕트 출구에서 피토티브(Pitot Tube)를 이용하여 이젝터에서 배출되는 2차 혼합 유동의 전압력을 측정하였다. 측정된 전압력과 대기 압력을 이용하여 Ejector 출구에서 속도를 계산하였고 단면적을 이용하여 질유량을 환산하였다. Tandem-ejector의 출구 부분 형상은 Fig. 6과 같이 곡관의 형태로 실험에

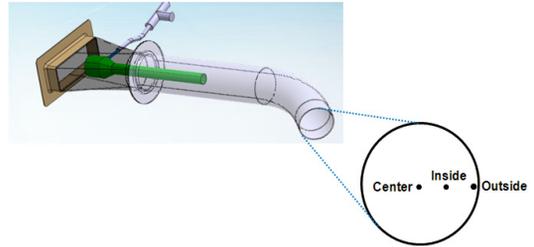
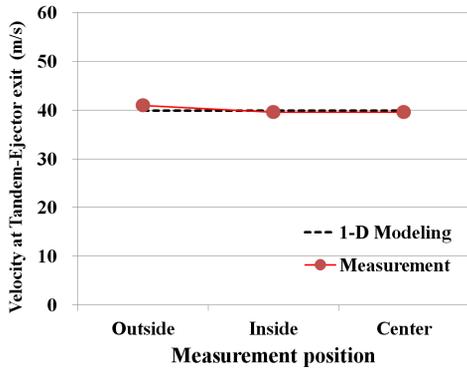


Fig. 6 Measurement points of total pressure at tandem-ejector exit.

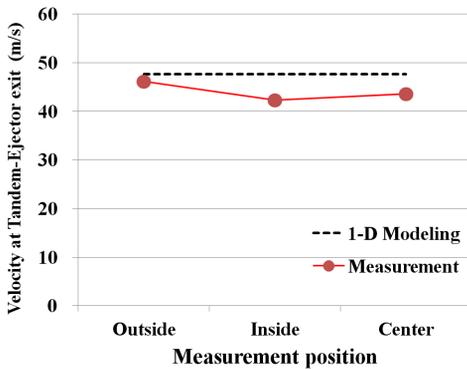
서는 이젝터 출구의 중앙부(Center), 외곽부(Outside), 그리고 중앙부와 외곽부 중간 지점(Inside)에서 압력을 측정하였다. 피토티브를 이용한 압력 측정은 ETM-DC-375-30A 압력센서를 이용하였으며, 센서의 정밀도는 $\pm 0.5\%$ 이다.

5. 결과 분석

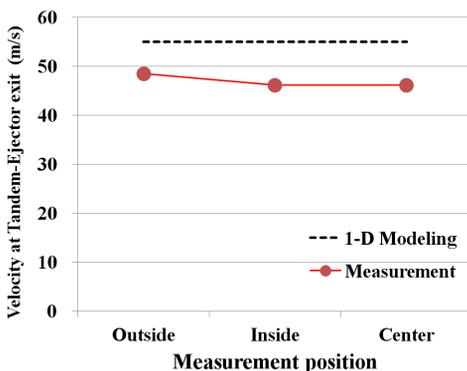
1차원 Tandem-ejector 해석 모델은 시험 결과와의 비교를 통해 해석모델이 이젝터의 성능분석에 활용 가능함이 Fig. 7에서 확인되었다. Fig. 7은 Tandem-ejector 출구에서 2차 혼합유동의 속도 그래프로, 1차원 해석 결과와 비교한 것이다. 성능시험인 경우에는 이젝터 출구의 전압력을 세 지점(Center, Inside, Outside)에서 측정하였지만, 해석 모델링인 경우, 1차원 해석과 완전 혼합조건을 가정하였으므로 출구조건에 평균 상태값을 보여준다. 이젝터 출구에서 속도 측정값은 모든 시험 조건($P_{t,p} = 7 \text{ bar}, 8.5 \text{ bar}, 10 \text{ bar}$)에서 Outside 지점이 높은 값을 나타내고, 따라서 주 유동이 8.5 bar와 10 bar 조건에서는 해석 모델링 결과와 오차가 상대적으로 작게 나타난다(Fig. 7). 이는 2차 혼합덕트 출구부가 곡관(Bent-Duct)이므로, Tandem-ejector 성능 측정 시 유동의 모멘텀에 의해 Outside 지점에서 상대적으로 높은 속도가 측정되는 것이다. 이 때, Outside 측정지점은 벽면 근처이긴 하나 점성효과가 주요한 경계층의 밖에 위치하므로 Tandem-ejector의 위치에 따른 출구 속도의 차이는 곡관에서의 유동 모멘텀 효과에 기인한다.



(a) $P_{tp} = 7 \text{ bar}$



(b) $P_{tp} = 8.5 \text{ bar}$



(c) $P_{tp} = 10 \text{ bar}$

Fig. 7 Velocity distribution at tandem-ejector exit (analysis vs. test results).

Tandem-ejector 출구 속도는 펌핑 성능을 대표하는 값으로 주 노즐 제트 유동의 전압력이 증가함에 따라 Tandem-ejector의 펌핑 성능이

증가됨을 보여 준다. 이러한 경향은 1차원 해석 결과에서도 동일하게 나타나며, 해석 결과는 시험결과와 비교할 때 최대 17%의 오차 이내에서 이젝터 성능을 비교적 정확히 예측하고 있다. 주 노즐 전압력이 증가함에 따라 해석과 시험 결과의 오차도 같이 증가하는 경향을 보이는데, 이는 2차 혼합유동의 손실과 주 유동의 덕트 내 손실을 고려하지 않음으로 야기된 차이인 것으로 판단된다. 실제 Tandem-ejector의 작동 환경에서 주 노즐 유동의 압력이 증가할수록 유입되는 2차 유동의 속도가 증가하므로, 마찰 손실(Friction Loss)과 1차 혼합 덕트 입구에서의 유동박리(Flow Separation)에 의한 전압력 손실이 크게 증가될 것이다. 또한 주 유동은 공급부로부터 곡관을 포함한 덕트를 지나 노즐 출구에서 분출되는데, 덕트 내의 마찰 및 곡관 손실은 속도의 제곱에 비례하여 증가하므로 주 노즐 유동 속도 증가에 따른 손실도 증가한다[14]. 이러한 이유로 전압력 손실량이 커지는 $P_{tp} = 10 \text{ bar}$ 와 같은 고압 조건에서 해석오차가 증가되고 이보다 낮은 압력조건에서의 해석결과는 측정된 이젝터 성능과 10% 오차 이내로 해석 오차가 감소되고 있다. Tandem-ejector의 운전 시 1차 혼합 유동에서 주노즐 제트유동의 전압력 손실을 고려한 해석모델링을 적용함으로써, 허용 가능한 범위의 오차 내에서 Tandem-ejector의 성능 해석이 가능했다.

실 작동조건에서 유입되는 2차 유동의 전압력은 흡입구 조건 때문에 대기압보다 낮아지게 된다. 이러한 부압조건에서 주 제트유동이 유도할 수 있는 펌핑 성능의 한계를 고려한 운용가능영역(Envelop of Operation Range)의 설정과 적용 시스템에서 인가할 주 제트유동의 압력 결정이 필요하다. 따라서 다음과 같이 2차 유동의 효율 변수를 도입하여

$$\eta_s = P_{ts} / P_{atm} \quad (9)$$

주 노즐의 전압력에 대한 펌프한계 성능을 구하면 Fig. 8과 같은 성능맵(Performance Map)을 구할 수 있다. 해석결과에 보이는 바와 같이 2차

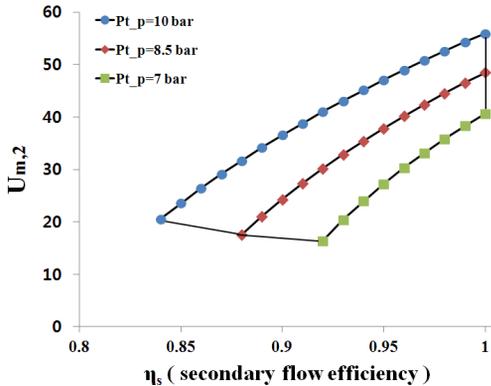


Fig. 8 Tandem-ejector operation range with variation of secondary flow efficiency.

유동으로 유입되는 입구압력이 감소할수록 펌핑 성능이 저하되고 펌핑 성능을 유지하기 위해서는 주노즐로 공급되는 압력을 증가시켜야 넓은 범위의 펌핑 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

1차원 해석 모델은 Tandem-ejector의 펌핑 성능을 비롯하여 주요 위치에서 유동 특성을 제시할 수 있다. Table 1은 $\eta_s = 1$ 조건에서 Tandem-ejector 모델이 예측하는 이젝터 내부의 유동 특성(압력, 마하수, 1차/2차 펌핑 성능)을 보여준다. Tandem-ejector 내부에서 두 번에 걸쳐 이루어지는 펌핑 과정을 자세히 보면, 주유동과 2차 유동에 대한 1차 펌핑 성능(W_s/W_p)은 1차 혼합유동과 3차 유동에 대한 2차 펌핑 성능(W_{ter}/W_{m1})에 비해 약간 더 큰 값을 갖지만 그 차이는 작다. 즉, Tandem-ejector에서 두 번의 펌핑 과정은 이젝터 펌핑 성능에 기여하는 정도가 비슷함을 해석결과로부터 알 수 있다.

6. 결 론

Tandem-ejector 시스템은 엔진베이 냉각 장치로 고안되었으며, 본 연구에서는 Tandem-ejector의 성능을 유체역학적으로 예측하기 위하여 1차원 해석모델링을 개발하였다. Tandem-ejector의 1차원 해석을 위해 정상상태의 비점성 유동과 완전 혼합 조건 등이 가정되었으며, Tandem

Table 1. Analysis results for tandem-ejector performance (for $\eta_s = 1$).

$P_{t,p,0}$	7 bar (700 kPa)	8.5 bar (850 kPa)	10 bar (1,000 kPa)
$P_{t,p,2}$ (kPa)	162.9	197.5	244.0
$P_{t,s}$ (kPa)	101.3	101.3	101.3
$P_{t,m1}$ (kPa)	108.3	111.3	114.8
$P_{t,ter}$ (kPa)	101.3	101.3	101.3
$P_{t,m2}$ (kPa)	102.3	102.8	103.3
$M_{p,2}$	0.90	1.09	1.28
M_s	0.28	0.34	0.40
M_{m1}	0.32	0.39	0.45
M_{ter}	0.10	0.12	0.13
M_{m2}	0.12	0.15	0.17
W_s/W_p	2.86	2.80	2.77
W_{ter}/W_{m1}	2.63	2.62	2.61

-ejector 출구에서의 혼합유동의 정압력과 대기 압력을 일치하도록 하여 초음속의 주 제트 유동과 아음속의 2차 유동의 혼합과정에서의 전압력 손실이 분석될 수 있도록 모델링을 고안하였다. 1차원 해석에서는 주 제트 유동과 2차, 3차 유동의 특성을 계산하기 위하여 등엔트로피 관계식을 이용하였으며, 혼합과정을 해석하기 위하여 상태보존식을 이용한 검사체적 해석을 수행하였다. 개발된 1차원 해석모델링 기법은 시험에서 측정된 이젝터 펌핑 성능을 상당히 정확하게 예측하였으나, 2차 혼합유동에서 손실을 고려하지 않았기 때문에 주 제트 유동의 전압력이 10 bar와 같이 높은 경우에는 해석 결과가 성능시험 결과와 다소 오차가 큰 17%의 차이를 보였다. 개발된 모델링을 적용하여 Tandem-ejector 내부의 주요위치에서의 유동특성을 예측할 수 있었으며 주 제트 유동에 의해 유도된 2차 유동입구의 압력변화에 따른 성능맵을 얻을 수 있었고, 이를 통하여 정상운용을 위한 주 제트노즐 유동의 공급압력 범위를 결정할 수 있었다.

References

1. Toulmay, F., "Internal Aerodynamics of Infrared Suppressor for Helicopter Engines," *Journal of American Helicopter Society*, Vol. 33, No. 4, pp. 4-14, 1988.
2. Koutmos, P. and Mcquirk, J.J., "Turbofan Forced Mixer/Nozzle Temperature and Flow Field Modeling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 6, pp. 1141-1153, 1989.
3. Elbel, S. and Hrnjak, P., "Ejector Refrigeration : An Overview of Historical and Present Developments with Emphasis on Air Conditioning Applications," *Proceedings of the 12th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2008.
4. Eames, I.W. and Aphornratana, S., "A Theoretical and Experimental Study of a Small-scale Steam Jet Refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 18, No. 6, pp. 378-386, 1995.
5. Jegal, S. and Song, S.J., "Humidity Effect on the Hydrogen Re-circulation Ejector Performance," *Proceedings of KSME 2008 Spring Annual Meeting*, pp. 488-492, 2008.
6. Bernardi, D., Bozzolo, M., Marsano, F., Tarnowski, O. and Agnew, G., "Ejectors Design in the Rolls-Royce 1MW Hybrid System," ASME GT2005-68085, pp. 41-50, 2005.
7. Keenan, J.H. and Neumann, E.P., "A Simple Air Ejector," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 9, A75-A81, 1942.
8. Keenan, J.H., Neumann, E.P. and Lustwerk, F., "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, pp. 299-309, 1950.
9. Huang, B.J., Chang, J.M., Wang, C.P. and Petrenko, V.A., "A 1-D Analysis of Ejector Performance," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 354-364, 1999.
10. Fabri, J. and Siestrunk, R., *Supersonic air ejectors in Advances in Applied Mechanics*, Academic Press Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1958.
11. Fabri, J. and Paulon, J., "Theory and Experiments on Supersonic Air-to-air Ejectors," NACA T.M. 1410, 1958.
12. Presz, W.M. and Greitzer, E.M., "A Useful Similarity Principle for Jet Engine Exhaust System Performance," *Proceedings of 24th ASME, SAE, and ASEE Joint Propulsion Conference*, 1988.
13. Munday, J.T. and Bagster, D.F., "A New Ejector Theory Applied to Steam Jet Refrigeration," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 16, No. 4, pp. 442-449, 1977.
14. White, F.M., *Fluid Mechanics*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, N.Y., U.S.A., 2008.