

Converging-Diverging Nozzle의

형상 변화에 따른 공력 해석

Aerodynamic Analysis of Converging-Diverging Nozzle by changing in shape

박차림^{1*}, 박경수¹

건국대학교 항공우주정보시스템공학과¹

초 록

Converging-diverging 노즐은 시스템 내부 유동에 적용되는 속도면적 법칙을 통해, 아음속 유동을 초음속으로 만드는 장치이며, 항공기 엔진 등에서 추력을 얻기 위해 쓰인다. 이상기체, 등 엔트로피를 가정한 동일 입구 조건에서, 출구로 빠져나오는 유동의 속도는 오직 면적 비에만 관계한다. 그러나 실제 현상에서는, 출구에서의 유속이 유동의 압축성 효과 및 벽면에서의 전단력 등으로 인해 노즐 형상마다 상이한 결과를 낳는다. 본 연구에서는 EDISON Simulation을 활용하여 다양한 노즐 형상에 따른 출구에서의 Mach number를 구하고, 각각의 결과로부터 경향성을 찾는다. 또, 계산 결과를 이론식을 통해 도출되는 결과와 비교한다.

Key Words : 초음속노즐 (Converging-Diverging Nozzle), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 노즐 형상(Nozzle Shape)

1. 서 론

일반적으로 Converging-Diverging 노즐은 유동의 속도를 아음속에서 초음속으로 증가시키는 역할을 하며, 이 과정에서 노즐의 형상이 최종적인 유동 속도나 압력에 영향을 미친다. 이론적으로 노즐 입구, 노즐 목, 노즐 출구의 면적 비를 통해 유동 속도와 압력이 결정되나, 실질적으로는 노즐 벽면에서의 전단력이나, 노즐 목에서의 질식(choking)으로 인한 손실, 그리고 노즐 내부 diverging part에서의 충격파 등으로 인해 각 형상마다 상이한 결과가 도출된다. 따라서 노즐을 설계할 때, 주어진 유동 입구 속도에 대하여 위에 언급한 내용을 포함한 여러 가지 설계 변수를 고려해야 한다. 그러나 본 연구에서 EDISON Simulation을 통한 유동 해석에 대해서는 벽면에서의 조건을 다양하게 변경하기가 어렵다. 따라서 출구에서의 유동 속도가 높고, 압력비가 낮으며, 유동에 손실을 일으키는 충격파 등의 현상이 발생하지 않는 경우를 가장 성능이 우수한 것으로 정한다.

2. 본 론

2.1 노즐 형상

본 논문에서는 Converging-Diverging 노즐의 유동 특성을 분석하기 위해, Fig. 1을 기본 형상으로 사용하였다.⁽¹⁾ 노즐의 구조는 pre-converging part, converging part, 노즐 목, diverging part, after-diverging part 등으로 구성되어 있다. Converging part를 구성하는 곡률과 diverging part를 구성하는 수평 길이를 변화시켜 유동 분석을 수행하였다. 이 때 입출구와 노즐 목에서의 직경은 일정하다. Fig. 1의 converging part 곡률은 14.405mm이며, diverging part 수평 길이는 154.9mm이다. 이에 대하여, converging part의 경우에는 곡선을 구성하는 원의 곡률을 각각 10mm, 14.405mm, 45mm, 100mm로, diverging part의 경우에는 수평 길이를 각각 4.9mm, 34.9mm, 64.9mm, 154.9mm로 변화시켜 EDISON simulation을 수행하였다.

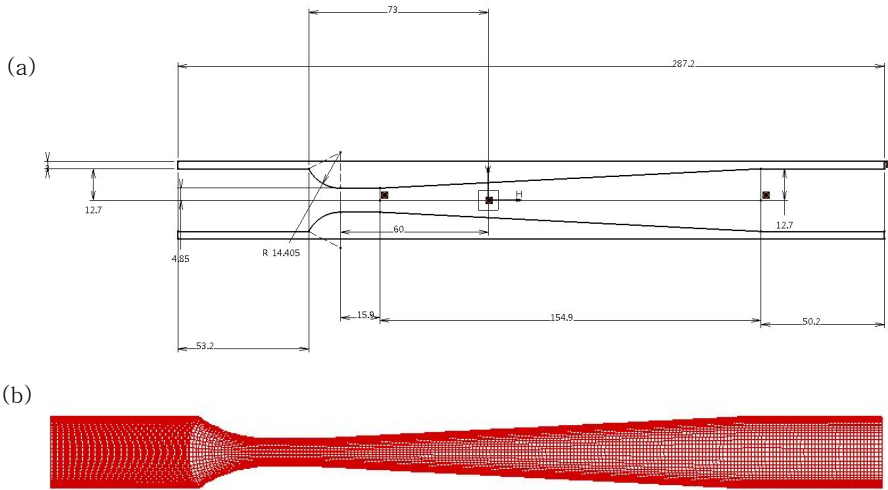


Fig. 1. Converging-Diverging Nozzle의 기본형상 (a) CATIA 도면 (b) Mesh

2.2 이론식

노즐 내부를 지나는 유동에 대하여 isentropic 상황을 가정하였을 때, 노즐 목 면적(A^*)과 노즐 출구 면적(A_e)에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{A_e}{A^*}\right)^2 = \frac{1}{M_e^2} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}$$

이 때, γ 는 이상기체를 가정하였을 때 약 1.4이며, M_e 는 출구에서의 Mach number를 의미한다.

기본적으로 diverging part를 거치면서 유동이 초음속의 특성을 갖게 하기 위해서는 노즐 목에서의 mach number가 1이 되어야 한다. 이외의 경우에는 질식 상태이거나, Mach number가 1에 이르지 못하여 diverging part에서 오히려 감속이 일어난다.

2.3 해석 절차

EDISON simulator를 통해 노즐의 형상을 설계하기 위해서는 converging part의 곡선의 끝이 노즐 목의 시작되는 점과 불연속 되는 점이 없도록 해야 한다. 초음속에 대한 계산을 수행하기 때문에, 형상변화가 급격하면 충격파를 발생시켜 원하는 결과를 얻을 수 없다. EDISON simulator를 이용한 격자 생성은 위와 같은 상황에서 한계를 드러낸다. 두 점 사이를 잇는 곡선이 부드럽게 연결되지 않으며, 다양한 종류의 곡선을 선택할 수도 없다. 따라서 노즐의 정확한 형상 설계를 위해 CATIA 및 POINTWISE 프로그램으로 기본 형상을 구성하고 solver를 적용하였다. 또한 생성된 격자정보가 EDISON simulation에 알맞게 들어갈 수 있도록 파일 일부를 수정하였다.

2.4 유동해석 조건

격자생성 및 형상설계 과정에서 노즐의 입구와 출구, 벽면에서의 벽 조건을 Table 1 와 같이 설정하였다. 노즐 입구에서는 아음속으로 유동이 진입하여, diverging part를 지나 초음속으로 나가는 상황을 가정하였고, 벽면에서는 adiabatic으로 손실이 없도록 하였다. 연구를 수행하는 도중 격자 생성 이후 converging part에서의 급격한 형상 변화로 인해 연산 수행이 불가능해지는 문제가 발생하였으며, 이를 해결하기 위해 격자 생성 프로그램 내부 solver를 이용하여 격자가 완만하게 이어지도록 하였다. 한편,

제 2회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 경진대회

격자 생성 완료 후 최종적으로 EDISON simulator을 수행하기 위해 Table 2 의 유동 조건을 입력하였다. converging part에 대해 4가지, diverging part에 대해 4가지 변수를 적용하여 총 16 case이며, 각각의 길이 변화에 대한 경향성을 얻기 위해 노력하였다.

Table 1. 노즐 격자생성 조건

분류	설정값
노즐입구	Subsonic Inlet
노즐출구	Supersonic Outlet
벽면	Viscous Adiabatic Wall
격자 벽면 solver	Steger-sorenson type
격자 내부 solver	Fixed Grid type

Table 2. 노즐분석을 위한 EDISON simulator 유동조건

분류	초기값
해석모델	2D_Comp-2.1
Mach number(inlet)	0.7
Reynolds number	100000
CFL	1.0
Flow type	Turbulent flow
Total iteration	30000
Steadiness	Steady flow

Table 3. 각 case에 대한 노즐 형상 조건

Diverging \ Converging	4.9mm	34.9mm	64.9mm	154.9mm
10mm	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
14.405mm	Case2-1	Case2-1	Case2-3	Case2-4
45mm	Case3-1	Case3-2	Case3-3	Case3-4
100mm	Case4-1	Case4-2	Case4-3	Case4-4

2.5 해석결과

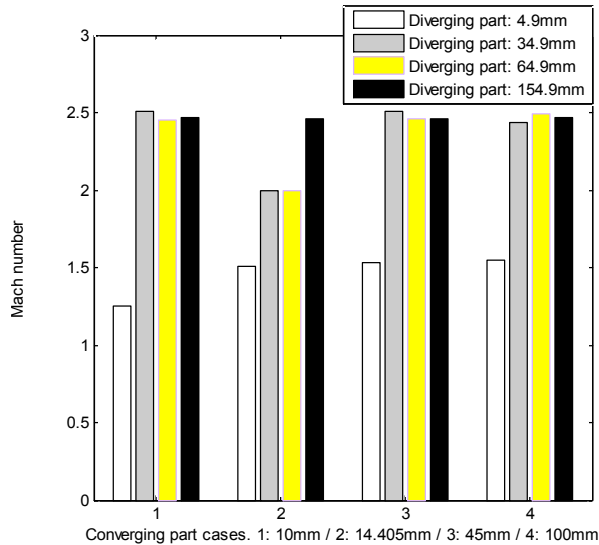
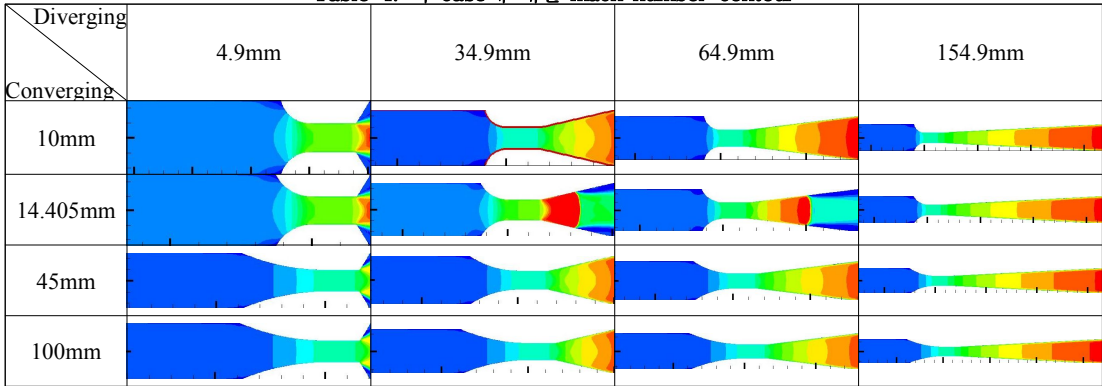


Fig. 2. 노즐의 각 case에 대한 유동 해석 결과

Table 4. 각 case에 대한 mach number contour



EDISON simulation을 통해 각 case에 대한 유동 분석 결과를 도출해낼 수 있으며, 대표적인 비교 변수로 Mach number를 고려해볼 수 있다. diverging part의 수평 길이가 4.9mm인 모든 경우에는 노즐 내부에 충격파가 발생하였고, Mach number가 현저히 감소하였다. 또한 converging part 수평거리가 길어질수록 출구에서의 Mach number가 증가하고, converging 되는 기울기가 작을수록 충격파로 인한 손실이 적어짐을 확인할 수 있다. 16가지의 case 중 가장 mach number가 높은 형상은 converging part의 곡률이 각각 10mm, 45mm이면서, diverging part의 수평 길이가 34.9mm인 2개의 형상이다. 이 때, 출구 mach number는 2.51이며, 면적 비를 통한 이론식으로 계산한 출구에서의 Mach number인 2.49와 약 0.8%의 오차를 보인다.

3. 결론

본 연구를 통해 Converging-Diverging 노즐의 형상에 따른 출구 성능을 EDISON simulator를 활용하여 확인할 수 있었으며, 여러 가지 case 중 출구에서의 Mach number가 가장 높은 노즐 형상을 도출할 수 있다. 또한, converging 및 diverging part의 길이를 과도하게 줄일 경우, 충격파 등의 현상으로 인해 mach number가 오히려 줄어들 수 있다는 결론을 얻었다. 또한 벽면에서의 점성이 존재하고 압축성 효과, 정상상태 등을 고려한 상황에서, EDISON simulation에 의한 계산 결과가 이론값과 대체적으로 잘 들어맞는다는 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 EDISON 중앙센터와 열유체 전문센터의 지원을 받아 수행되었고, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) LAM C.Y. and LIU C. Y., 1999, "An Experimental Facility for Compressible Flow," Int. J. Engng Ed. Vol. 15, No. 1, pp. 58-63.
- (2) Chowdhury M.S.U. , Ahamed J.U. , Faruque P.M.O. and Bhuiya M.M.K., 2011, "COMPUTATIONAL STUDY OF SUPERSONIC FLOW THROUGH A CONVERGING DIVERGING NOZZLE," Engineering e-Transaction, Vol. 6, No. 1, pp. 37-42.
- (3) Pougatch K., Salcudean M., E. Chan, Knapper B., 2008, "Modelling of compressible gas-liquid flow in a convergent-divergent nozzle," Chemical Engineering Science 64, pp. 4176-4188.
- (4) John D. Anderson, Jr., "Fundamentals of Aerodynamics," Mc Graw Hill, Fourth Edition, pp. 618-654.