

초음속 흡입구 형상 설계 및 Bleeding을 활용한 유동제어 연구

Supersonic Intake Design & Flow Control Analysis using Bleeding Condition

최재환^{1*}, 천소민¹, 김종암¹
 서울대학교 기계항공공학부¹

초 록

초음속 흡입구는 설계점에서 안정적으로 작동하지만 설계점 밖에서는 엔진성능이 급격히 감소하거나 충격과 불안정 문제가 발생할 수 있다. 초음속 흡입구의 일반적인 특성을 파악하기 위해 2단 꺾임각을 갖는 외부 압축식 2차원 흡입구를 설계하고 EDISON_열유체 시스템을 이용하여 최종적으로 설계 마하수 2.5에서 작동하는 형상을 얻었다. 그러나 설계 마하수 이하의 영역에서는 충격파-경계층, 충격파간 상호작용으로 인해 유동에서 박리가 발생하고 최종적으로 흡입구 목을 질식시켜 아임계 상태로 천이된다. 이를 해결하기 위해 유동 제어 방법 중 하나인 bleeding을 이용하여 경계층을 제거하거나 유동의 박리를 방지하여 충격파를 cowl lip 전방에 안정하게 고정시킬 수 있었으며, 결과적으로 목적하였던 마하수 2.0에서 2.5에 이르는 작동 영역에서 강건하게 운용될 수 있는 초음속 흡입구를 설계하였다.

Key Words : 초음속 공기흡입 엔진 (Ramjet Engine), 초음속 흡입구 (Supersonic Air Inlet), 유동 유출 (Bleeding)

1. 서 론

초음속 공기흡입엔진은 항공기, 대륙간 탄도미사일 등 다양한 분야에서 운용되고 있는 엔진이다. 초음속 공기흡입엔진은 별도의 압축기가 없으며 흡입구 전방의 경사형상에서 발생하는 충격파와 이를 반사시킨 반사 충격파로 포획된 공기를 압축하므로 기체가 가볍고 효율이 높다. 초음속 흡입구에 대한 연구들은 민병영 등⁽⁴⁾, M. Valorani 등⁽⁵⁾에 의해서 수행되었으며 기본적인 설계방법의 개선이나 흡입구의 공력특성 이해에 관한 연구가 수행되었다. 초음속 공기흡입엔진의 흡입구 형상은 매우 단순하기 때문에 기본적인 압축성 유체역학⁽¹⁾적 지식만으로 간단한 형상 설계가 가능하다. 그러나 점성특성, 충격파-경계층 상호작용, 충격파간 상호작용 등의 복잡한 물리현상에 의해 cowl lip 후방의 목 단면적, 내부 압축면 곡률 반경 등을 결정하는데 개념 설계의 방법으로는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 전산유체역학적인 접근을 시도하였고 유동해석 프로그램 중, 온라인상에서 쉽게 접근이 가능하고 다양한 파라미터 계산에 필요한 많은 계산자원이 허용되는 EDISON_열유체를 해석도구로 선정하였다. 따라서 본 연구에서는 EDISON_열유체 환경을 이용하여 초음속 엔진 흡입구 형상을 설계하고 여기에서 발생하는 압축성 유체 및 점성유체의 교과서적 물리현상에 대해 확인하고 분석하였다. 더 나아가 bleeding을 활용하여 전압력 회복률을 개선할 수 있는 조건을 찾아보았다.

2. 본 론

2.1 개념설계

압축성 유체역학⁽¹⁾에서 배운 지식을 바탕으로 M. Valorani 등⁽⁵⁾을 참고하여 간단한 흡입구 형상을 개념적으로 설계하고 EDISON_열유체를 이용하여 Euler equation⁽²⁾을 지배방정식으로 유동해석을 수행하였다. 유동 조건(이하 설계점)은 전방류 마하수(이하 M_∞) 2.5, 열량적 완전기체로 가정한 STP 상태에 대해 충격파가 집중되도록 cowl lip의 위치, inner cowl면의 최고점의 위치 그리고 외부 압축면의 경사각

을 결정하고 형상을 설계하였다. Cone의 2단 꺾임각의 값은 첫 번째 경사면이 지면에 대해 7도, 두 번째 경사면이 첫 번째 경사면에 대해 4도 기울어 진 것으로 결정하였다. 해석영역의 윗면과 아랫면은 모두 비점성 벽면으로 가정하였고 전방으로부터 마하 2.5의 초음속 유동이 들어오며 흡입구 끝부분에는 초음속으로 유동이 유출되는 경계조건을 부여하였다. 그 결과 Fig. 1에서처럼 경사면에서 충격파가 발생되고 두 경사충격파가 cowl로 가정한 상부의 한 점에 집중된 후 반사를 반복하는 것을 확인할 수 있었다.

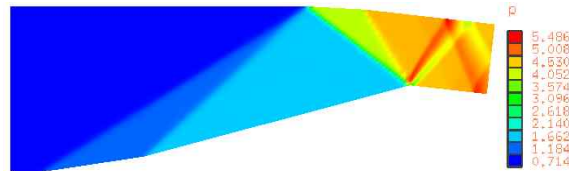


Fig. 1. 개념설계 형상의 압력분포 곡선

2.2 On-Design Condition 형상 설계

앞서 수행된 개념설계의 기본형상을 바탕으로 점성해석을 위한 4만개의 해석격자를 구성하였다. 충격파가 외부로 방출되는 아임계상태를 고려하기 위해 Fig. 2와 같이 흡입구의 내부와 외부 일부의 격자를 형성하였다. Cowl lip의 구조적 안정성과 격자체작의 용이성을 위해 L. W. Pearson 등⁽⁶⁾을 참고하여 Fig. 3에서와 같이 곡률을 주었다. 점성해석을 위해 목의 단면 폭(L^*)을 1, 레이놀즈수는 260만으로 가정하였다. 초기 형상의 목 위치는 흡입구 후방의 노즐 입구가 되도록 설계 하였다.

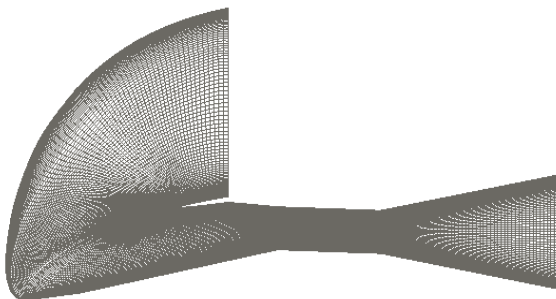


Fig. 2. 설계한 형상의 격자

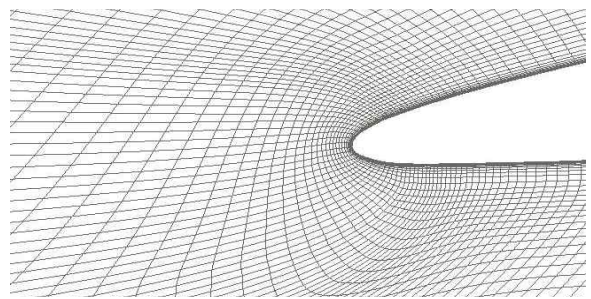


Fig. 3. Cowl lip 부근 확대도

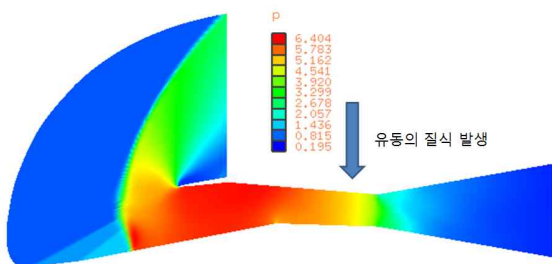


Fig. 4. 경계층에 의한 입구 목 질식

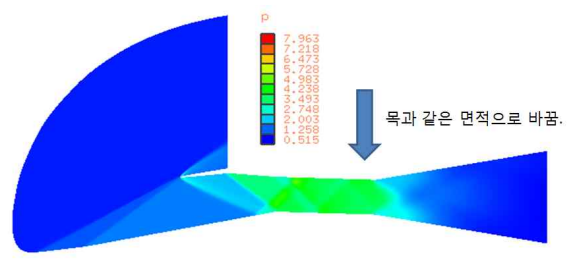
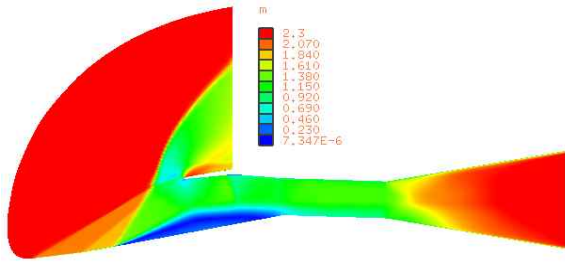
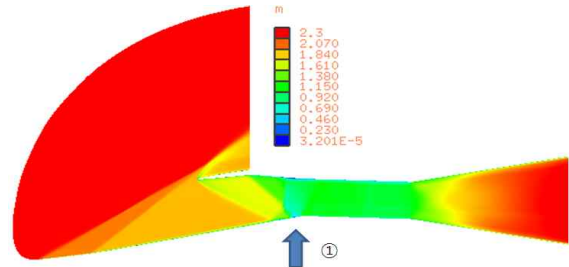


Fig. 5. 형상 개선 후 설계점에서 유동해석 결과

개념설계상으로는 질식이 생기지 않아야 하지만 점성 경계층에 의해 유효면적이 좁아져 목 부근에서 질식이 발생하였고 Fig. 4와 같이 최종적으로 아임계 상태의 공형 충격파가 발생하였다. 이를 개선하기 위해 cowl lip과 inner cowl면에서 반사되는 충격파들이 모이는 곳을 목이 되도록 변경하여 목의 단면적을 7% 가량 증가시켰고 그 결과 Fig. 5와 같이 유입유동이 모두 확산기로 빠져나가는 것을 확인하였다. 이로서 비점성을 가정한 개념설계의 형상으로부터 시작하여 점성유동에서 발생하는 문제점을 수정하여 마하 2.5에서 작동하는 흡입구의 형상설계가 완료되었다.

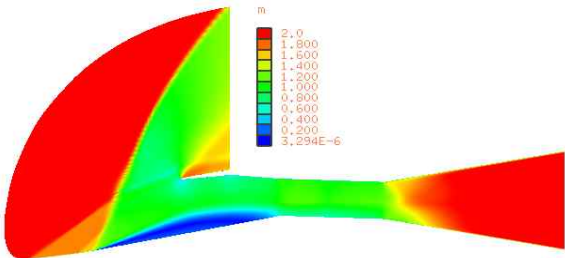
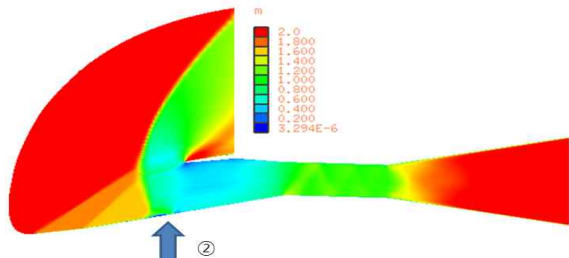
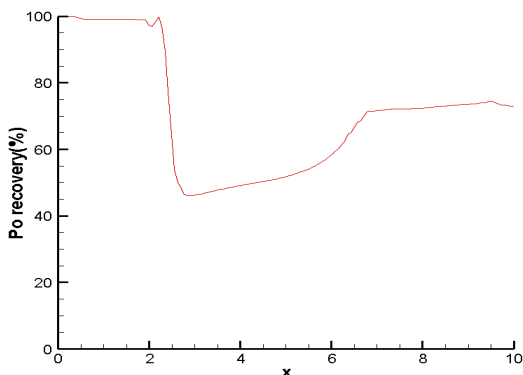
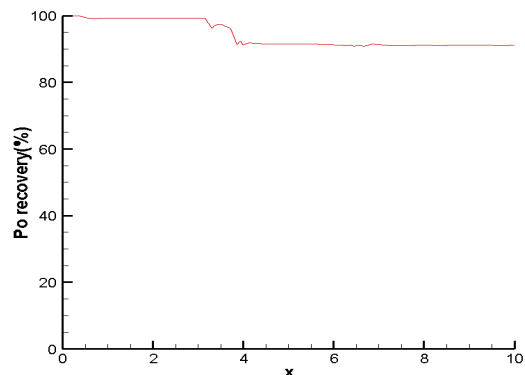
2.3 Off-Design Condition 형상 설계

실제 초음속 공기흡입엔진을 운용하게 되면 설계점을 벗어난 영역에서도 작동하므로 이러한 상황에서도 안정성을 확보해야 한다. 2.2에서 설계한 형상에 대해 $M_\infty = 2.3$ 로 낮추어 유동을 해석한 결과 Fig. 6과 같이 유동의 박리가 발생하고 목의 질식이 생겨 아임계 상태가 발생하였다. 넓은 작동영역 내에서는 형상을 수정만으로는 한계가 있으므로 유동 제어 장치를 적용하기로 하였다.

Fig. 6. $M_\infty = 2.3$, Bleeding 전Fig. 7. $M_\infty = 2.3$, Bleeding 후

2.4 Bleeding

Bleeding 효과를 모사하기 위해 압축면의 일부분에서 질량 유량이 빠져나가는 경계조건을 설정하고 질량 유량은 J. W. Slater 등⁽⁸⁾을 바탕으로 선정하였다. Bleeding을 하기 전 $M_\infty = 2.3$ 에서 유동 해석 결과는 Fig. 6과 같고 매우 넓은 영역에서 유동의 박리가 발생하였다. 동일한 유동조건에서 Fig. 7의 목의 앞부분(위치 ①)에 bleeding을 활용한 경우 유동의 박리가 일어나지 않고 유동이 매끄럽게 흘러가는 것을 확인할 수 있다. 그러나 M_∞ 이 2.3보다 작아지면 Fig. 7의 ①위치에서 bleeding을 해도 Fig. 8과 같이 유동의 박리현상이 나타나게 되었다. 이를 해결하기 위해 Fig. 9의 cowl lip 앞부분(위치 ②)에 bleeding 경계조건을 설정하였다. 그 결과 Fig. 8에서 생긴 유동의 박리가 Fig. 9에서는 나타나지 않고 bleeding을 적용하기 전보다 공형충격파가 cowl lip에 가깝게 고정된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8. $M_\infty = 2.0$, Bleeding 전Fig. 9. $M_\infty = 2.0$, Bleeding 후Fig. 10. $M_\infty = 2.0$, Bleeding 전 전압력 회복률Fig. 11. $M_\infty = 2.0$, Bleeding 후 전압력 회복률

Bleeding을 적용한 후 발생한 효과를 정량적으로 파악하기 위해 $M_\infty = 2.0$ 에 대해 bleeding을 적용하기 전과 후의 전압력 회복률을 center body에서 $0.15(\Delta y/L^*)$ 만큼 떨어진 곳에서 계산한 결과가 Fig. 10과 Fig. 11이다. Fig. 10을 살펴보면 bleeding을 하기 전 궁형 충격파가 발생하고 유동의 박리가 일어난 지점($x/L^*=3$ 전후) 이후로 전압력 회복률이 50%로 급격히 낮아지고 이후 회복이 크게 일어나지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 11을 살펴보면 동일한 지점($x/L^*=3$ 전후)에서 전압력 회복률은 99% 정도를 나타내고 있으며 유동의 전 영역에서 80%이상의 높은 전압력 회복률을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로써 bleeding을 적용하게 되면 전압력 회복률이 현저하게 개선되며 충격파를 고정시킬 수 있는, 충격파 안정화 역할까지 수행하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 기초적인 압축성 유체역학 배경지식과 EDISON_열유체를 이용하여 공기흡입엔진의 흡입구 설계에 대해 개념적인 접근을 시도하였다. 압축성 유체역학에 기초한 유입 유동조건 아래서의 충격파 각도 및 물성치를 계산하여 초기 형상을 정하였고 이후 EDISON_열유체를 통한 수십 가지 경우의 파라미터 계산을 동 시간에 수행함으로써 설계점에서 타당한 최종 형상을 단시간 내에 얻을 수 있었다. 추가적으로 설계점 밖에서 작동할 수 있도록 유동제어 장치인 bleeding을 고려하였다. Bleeding의 위치와 유량 파라미터를 조합한 많은 경우의 해석을 통해 마하수 2.0 ~ 2.5 내에서 박리와 질식을 방지하는 bleeding 위치와 유량을 결정하였다. 향후 bleeding을 하는 위치를 더 추가하고 최적화된 질량 유량을 결정하게 되면 넓은 작동영역에서 운항할 수 있는 초음속 공기흡입엔진 형상을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 EDISON 중앙센터와 열유체 전문센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 노오현, 2011, 압축성 유체역학, *박영사*, 서울시, pp.65~213
- (2) Frank M. White, 2008, Fluid Mechanics, *McGraw-Hill*, New York, pp.137~519
- (3) John J. Mahoney, 1990, Inlets for Supersonic Missiles, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.*, Washington, pp.1~151
- (4) 민병영, 이재우, 변영환, 2002. 6, "IRR형 Ramjet Intake 초음속 확산부 형상 최적설계", *한국추진공학 회지*, 제 6권 제 2호, pp.65~74
- (5) M. Valorani, F. Nasuti, M. Onofri and C. Buongiorno, 1999, "Optimal Supersonic Intake Design for Air Collection Engines (ACE)", *Acta Astronautica*, Vol. 45, No. 12, pp.729~745
- (6) L. W. Pearson and L. F. Jilly, 1968, *Hypersonic Research Engine Project - Phase IIA Inlet Program*, Airesearch Manufacturing Company, Los Angeles, pp.1~108
- (7) N. D. Domel, D. Baruzzini and D. N. Miller, 2012, "A Perspective on Mixed-Compression Inlets and the Use of CFD and Flow Control in the Design Process", *AIAA 2012-0014*, pp.1~14
- (8) J. W. Slater and J. D. Saunders, 2008, "Modeling of Fixed-Exit Porous Bleed Systems", *AIAA 2008-94*, pp.1~12
- (9) D. W. Mayer and G. C. Paynter, 1994, "Boundary Conditions for Unsteady Supersonic Inlet Analyses", *AIAA*, Vol. 32, No. 6, pp.1200~1206