

다양한 Bleed 조건이 적용된 초음속 흡입구 성능 수치연구

Numerical Study of Supersonic Inlet Performance under Various Bleed Conditions

최요한, 김종암
Yohan Choe, Chongam Kim

서울대학교 항공우주공학과
Dept. of Aerospace Eng., Seoul National University

Abstract: This paper deals with a numerical investigation of bleed effect on supersonic inlet performance under various bleed conditions. Because of high computational cost of direct simulation of each bleed holes, Slater's 2009 bleed boundary condition model is used. Firstly, the bleed model is implemented and validated by solving validation cases. Then, a supersonic inlet used in Nagashima's experiments and bleeds are simulated to show the effect of bleed on performance of supersonic inlet. The kriging method in conjunction with a GA(Genetic Algorithm) is used to find the optimal condition of bleeds on the supersonic inlet, and EI(Expected Improvement) is introduced to enhance the kriging model. The optimal condition can be achieved when terminal shock is located in the throat of the supersonic inlet and an effect of flow separation is small.

Key Words: CFD, Supersonic Inlet, Bleed, Kriging-EI, GA

1. 서론

초음속 공기 흡입 엔진은 마하수 2에서 12사이의 초음속 영역에서 운용 가능한 엔진이다. 초음속 흡입구 엔진인 램제트 엔진은 초음속의 전방 자유류를 흡입하여 연소를 위해 아음속 상태까지 공기를 감속시킨 후 연소부에 공급하게 된다. 별도의 압축기 없이 공기를 압축하기 때문에 가볍고 효율적인 엔진으로 각광받고 있다. 하지만 단순한 형상에도 불구하고 그 내부의 유동은 충격파-충격파/충격파-경계층 상호작용 등이 빈번하게 일어나는 매우 복잡한 특성을 갖게 되며, 특히 흡입구 Buzz로 알려진 유동 불안정 현상이 발생할 우려도 있다. 엔진의 연소가 시작될 때 혹은 예기치 못한 외부의 영향을 받았을 때, 초음속 흡입구는 설계점을 벗어나는 탈 설계점 상태가 되는데 이러한 경우 유동 불안정 현상이 발생할 수 있으며 흡입구의 성능 또한 감소하게 된다. 이러한 유동 불안정 현상을 해소하고 흡입구의 성능을 향상시키기 위해, 유동 제어장치들이 사용되기도 한다. 유동 제어장치에는 여러 종류들이 있지만 그 중 효율적인 측면에서 각광받고 있는 제어장치로 Bleed 유동 제어장치를 들 수 있다. Bleed 유동 제어장치는 벽면에서 낮은 모멘텀을 갖는 유동 혹은 박리 영역 내부의 유동을 제거함으로써 유동을 제어하는데, 적은 에너지를 소모하여 높은 효율을 낼 수 있으며 흡입구 내부 유동장에 미치는 영향이 작기 때문에 많은 관심을 받고 활발한 연구들이 진행되고 있는 유동 제어장치이다. Bleed 유동 제어장치에 대해 실험적으로 혹은 수치적으로 여러 선행 연구들이 수행되었다. 최근에는 2012년에 Davis의 2명에 의해 실험이 진행되었는데, 여러 Bleed 구멍 형태에 대해 실험 Data를 얻어내었다[4]. Bleed 영역 내부의 구멍들을 하나 하나 수치적으로 모사하게 되면 굉장히 많은 시간과 계산 자원이 소모되므로, 경계조건(Boundary condition)의 형태로 Bleed를 모사하려는 노력들이 진행되어왔다. 그

중, 본 논문에서 사용한 2009년 Slater의 모델은, 각각의 마하수에 대해 다른 실험 Data를 사용하던 기존의 모델과 다르게 특정 마하수 영역 내에서의 실험 Data들을 하나의 곡선 형태로 나타내었으며, 경계층의 경계 부근이 아닌 벽면에서의 물리량을 이용함으로써 수치적으로 이용하기가 더욱 쉽게 되었다[3]. Bleed 유동 제어장치에 대해 최적의 성능을 갖는 Bleed 조건들을 찾고자 하는 연구들도 수행되었다. Liou와 Benson은 이중 췌기에 대해 Bleed 유동제어장치를 적용시킨 후 최대의 전압력 회복률을 갖는 Bleed 조건을 찾아내는 수치적인 연구를 수행하였다[8]. 하지만 이 연구는 초음속 흡입구에서의 최적화를 위한 선행적인 연구였으며, 현재까지 공개된 연구사례들 중 초음속 흡입구에 Bleed 유동 제어장치를 적용시켜 최적화를 진행한 연구가 수행된 사례는 없다

2. 수치해석 배경이론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 압축성 유동의 지배방정식으로 2차원/축대칭 Navier-Stokes 방정식을 선택하였다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{I}{y}G = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{I}{y}G_v + S \quad (1)$$

여기서 U 는 보존형 유동 변수 벡터이다.

$$U = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho w \quad e \quad \rho s_1 \quad \rho s_2]^T \quad (2)$$

식 (1)에서 E 와 F 는 각각 x , y 방향의 비점성 유속벡터이며, E_v 와 F_v 는 각각 x , y 방향의 점성 유속벡터를 나타낸다. G , G_v 항은 각각 축대칭 가정에 의한 축의 회전방향 비점성, 점성 유동벡터를 의미하며, 이 항이 없을 시 식 (1)은 2차원 N-S 방정식이 된다. 식 (2)에서 s_1 과

s_2 는 2방정식 난류모델의 변수이다.

2.2 난류모델

본 연구에서는 Menter가 개발한 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. $k-\omega$ SST 모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델의 장점을 결합한 Hybrid 모델로써, k 와 ω 값의 영향을 많이 받는 $k-\omega$ 모델을 벽면 근처에서 사용하고, $k-\epsilon$ 모델을 그 외의 위치에서 사용하는 모델이다. $k-\omega$ SST 모델에서 식 (2)의 s_1 과 s_2 는 다음과 같다.

$$s_1 = k, s_2 = \omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (3)$$

2.3 공간차분기법

AUSM 계열의 수치기법들은 제어면에서 물성치를 전달시키기 위한 전달 마하수를 정의한다. 이러한 전달 마하수는 정확성 측면에서 상당히 향상되었으나 비 물리적인 진동 현상을 유발한다는 문제점이 있다. 이는 제어면에서 마하수의 부호에 따라 좌우 물성치 중 한쪽의 물성치만을 전달시키는 형태이기 때문인데, AUSMPW+ 기법에서는 양쪽의 물성치들을 모두 고려하여 진동현상을 개선하였다[12].

2.4 시간차분기법

Yoon과 Jameson은 Lower-upper factorization과 Gauss-seidel relaxation에 기초를 둔 음적 해법을 제시하였다[11]. LU-SGS 기법은 ADI에서의 Relaxation of factorization이 필요하지 않고, 계산시 계산 시간과 메모리를 줄일 수 있는 장점이 있다.

2.5 기타 적용기법

다차원 효과를 고려하기 위해 TVD MUSCL 내삽기법을 적용하였으며 함께 Van Leer 제한자 및 Minmod 제한자를 사용하였다. 비정상 유동해석을 위한 2차의 외삽 가상시간 적분법(Pseudo-time method)을 고려하였으며 다량의 격자 계산을 위해 MPI(Message Passing Interface)프로그래밍을 이용하여 병렬계산을 수행하였다.

3. 최적화 기법 배경이론

3.1 유전 알고리즘

시간이 지남에 따라 열등한 개체는 제외되고 우월한 개체만이 남게 되는 자연에서의 진화 이론을 모방한 최적화 기법으로써, 계산시간이 상대적으로 많이 소요되기는 단점이 있으나 기울기를 필요로 하지 않으며 국소 최적점(Local optimum)에 빠지지 않고 전역 최적점(Global optimum)을 구할 수 있다는 장점이 있다[9]. 그림 1은 GA가 진행되는 과정을 간단히 나타내고 있다. 이 과정을 통해서 GA는 우월한 개체만을 남기고 열등한 개체는 제거하게 된다. 결국 주어진 디자인 면에서 최적의 해만이 남게 된다.

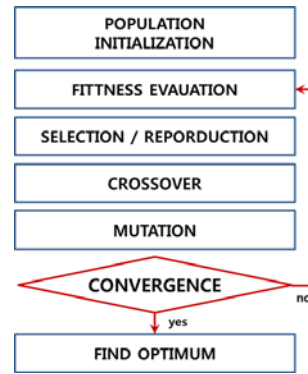


그림 1. GA의 과정

3.2 Kriging 모델링 기법

메타 모델링 기법 중 하나인 Kriging 모델링 기법은 주어진 샘플 포인트를 이용하여 디자인 공간 내의 새로운 포인트를 예측하는 내삽 기법으로써, 계산 시간이 많이 소요되지만 주어진 포인트에 대해 정확하게 만족하는 반응 모델을 구하기 때문에 비선형적인 요소가 많은 디자인 공간 내에서도 비교적 정확한 해를 구할 수 있다. Kriging 기법은 샘플 포인트에 따라 신뢰도가 크게 차이난다. 이로 인해 디자인 공간의 비선형성이 매우 크거나 공간 내 국소 최적점들이 다수 존재하는 경우 기존의 샘플 포인트들만으로는 디자인 공간 내의 새로운 포인트를 정확하게 예측하기 힘들기 때문에, 추가적인 샘플 포인트를 구하게 되는 EI(Expected Improvement)기법을 추가적으로 사용하여 정확도를 높일 수 있다.

4. Bleed 경계조건

4.1 Slater 모델(2009)

앞서 언급했던 것 같이, Bleed 유동 제어장치를 직접적으로 모사하기에는 너무도 많은 계산 시간이 소요되므로, 경계조건(Boundary condition)의 형태로써 Bleed 유동 제어장치를 모사하고자 하는 연구들이 수행되어져왔다. Bleed 경계조건은 그림 2와 같이 구성되어 있는데, Bleed 경계조건은 Bleed 영역이 연속적으로 구멍들이 뚫려있는(Continuously porous) 것으로 간주하여, 벽면에서의 각각의 셀에 Bleed 경계조건을 부과하여 유량이 빠져나가도록 모사한다. Bleed 경계조건 모델에는 여러 선행 연구자 혹은 그룹에 의해 개발된 모델들이 존재하나, 여기서는 Slater가 2009년에 제안한 모델[3]에 대해서 다루도록 한다.

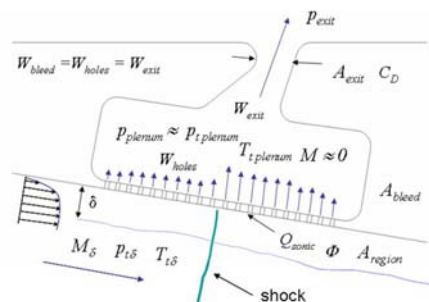


그림 2. Bleed 개념도

기존의 여러 **Bleed** 경계조건 모델들은, **Sonic flow coefficient** Q_{sonic} 을 구하기 위해, 실험을 통해 얻어진 데이터를 사용한다. Q_{sonic} 은 이론상 최대를 추출할 수 있는 **Bleed** 유량과 실제 **Bleed** 유량의 비로써, **Bleed**의 여러 파라미터 중에서 매우 중요한 파라미터이다. 기존의 모델들 중 다수는 이 데이터를 구하기 위해 경계층 경계에서의 유동의 물성치를 사용하며, Q_{sonic} 을 구할 때 실험 데이터베이스로부터 내삽(Interpolation)하여 구하기 때문에, 경계층 경계에서의 물성치를 알아야 하며 매 계산마다 내삽 과정을 거쳐야 하는 번거로움이 존재한다. Slater가 2009년에 제안한 **Bleed** 경계조건 모델은 이러한 점들을 해소하기 위해 벽면에서의 Q_{sonic} 데이터를 스케일링을 통해 그림 3과 같이 하나의 2차 곡선으로 나타내었으며, 경계층의 경계면이 아닌 벽면에서의 물성치들을 사용함으로써 수치적으로 이용하기가 더 수월해졌다. **Bleed** 경계를 통해 유출되는 유량은 다음과 같이 정의된다. (아래의 수식들은 모두 무차원화 된 식들이다)

$$\dot{m}_{bleed} = Q_{sonic-B} \dot{m}_{sonic-B} \quad (4)$$

여기서,

$$\dot{m}_{sonic-B} = \Phi A_{region} P_B \left(\frac{\gamma}{RT_B} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{-(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (5)$$

여기서, 아래첨자 **B**는 벽면에서의 값이라는 것을 나타낸다. Porosity Φ 는 **Bleed** 영역과 **Bleed** 영역 내의 **Bleed** 구멍 넓이 총 합에 비로써 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi = \frac{A_{bleed}}{A_{region}} \quad (6)$$

Surface sonic flow coefficient인 $Q_{sonic-B}$ 는 다음과 같이 2차의 함수로 정의된다.

$$Q_{sonic-B} = -0.59361420 \left(\frac{P_{plenum}}{P_B} \right)^2 + 0.03069346 \left(\frac{P_{plenum}}{P_B} \right) + 0.59799735 \quad (7)$$

여기서 P_B 는 바닥 벽면에서의 정압력을 나타내며, P_{plenum} 은 **Bleed**를 통해 빠져나간 유량이 유입되는 공기실의 정압력을 나타낸다. 이 과정을 통해 구해진 유량만큼이 빠져나가도록 경계조건을 부여해주게 된다.

4.2 경계조건 검증

본 해석에 사용한 **Bleed** 경계조건의 검증을 위해 다음과 같은 두 경우에 대한 유동 해석을 수행하였다.

1. 균일한 초음속 유동이 흐르는 평판
2. **Bleed** 영역 내로 경사충격파가 입사하는 경우

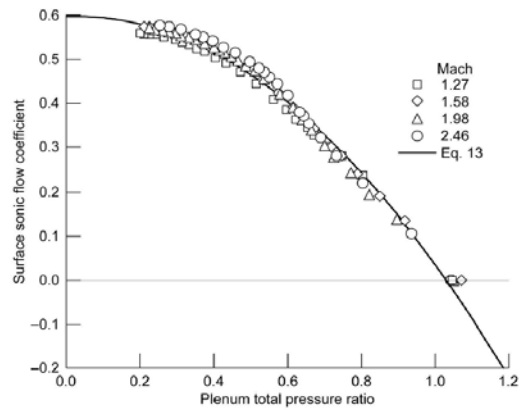


그림 3. Surface sonic flow coefficient 분포 곡선

두 문제를 해석하기 위한 지배방정식은 2차원 정상 압축성 N-S 방정식이며, 공간 차분을 위해 AUSMPW+ 기법이, 시간적분법으로는 LU-SGS 기법이 사용되었고, 고차의 정확도를 위해 MUSCL 기법과 Van-leer 제한자를 사용하였다. 난류 모델은 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다.

첫 번째 검증 문제로써, 균일한 초음속 유동이 흐르는 평판 문제에 대해 해석을 수행하였다. 주어진 문제의 유동 조건은 1996년에 Willis와 Davis가 수행하였던 실험 [14]에서의 조건과 동일하며, 수치해석에 필요한 조건은 Slater의 해석 조건[3]과 동일하다. 전체적인 계산 영역에 대해 그림 4에 도시하였다. 바닥면은 **Bleed** 영역에 **Bleed** 경계조건을 적용시켰으며 나머지 바닥면은 단열 점성 벽면을 적용시켰다. 자유류가 들어오는 면은 독립된 평판 계산을 통해 나온 결과를 경계조건으로 주었으며 (Prescribed B.C) 반대면에는 자유류 유출 경계조건을, 윗면에는 대칭 경계조건을 각각 적용시켰다. 해석 결과는 실험 결과와 비교하였으며, 또한 Slater의 결과와도 비교하였다. 해석된 결과에 대해, 마하수 contour를 그림 5에 나타내었다.

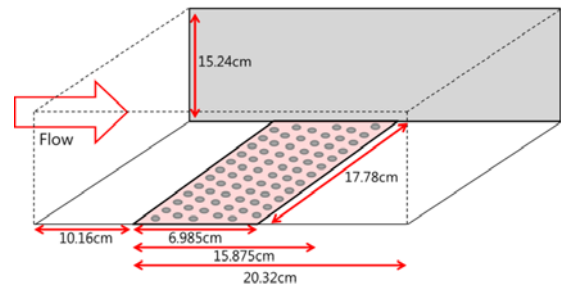


그림 4. 균일한 초음속 유동이 흐르는 평판의 계산영역

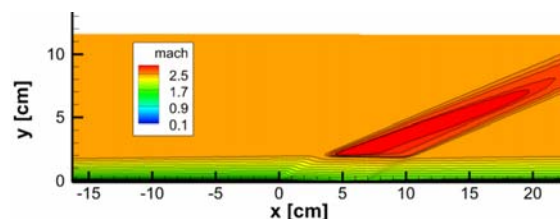


그림 5. 균일한 초음속 유동이 흐르는 평판의 마하수 Contour

그림 6에는 **Bleed** 영역 통과 전의 기준점(Reference)에서와 통과 후 후류에서의 속도 분포가 나타나있으며, 그림 7에는 Q_{sonic} 분포를 나타내었다. 실험치와는 다소 차이가 있지만 경향성은 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 경계조건을 사용하지는 않지만, 이러한 차이에 대해서는 차후 추가적인 연구를 통해 보완이 되어야 할 것이다.

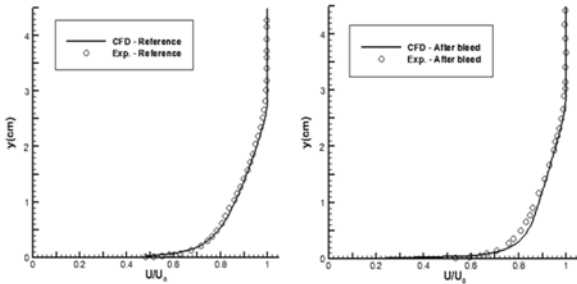


그림 6. Bleed 영역 통과 전/후의 속도 분포

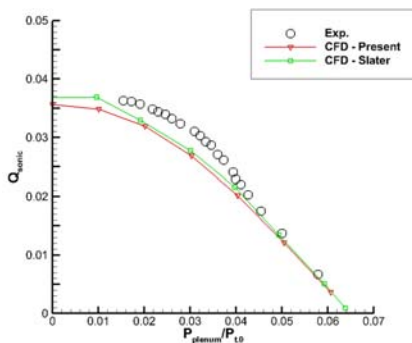


그림 7. Q_{sonic} 분포 곡선

두 번째 검증 문제로서, **Bleed** 영역 내로 경사충격파가 입사하는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 주어진 문제의 유동 조건은 실험[15]에서와 동일하며, 수치해석 조건은 Slater의 해석 조건[3]과 동일하다. 전체적인 계산 영역에 대해 그림 8에 도시하였다. 바닥면은 **Bleed** 영역에 **Bleed** 경계조건을 적용시켰으며 나머지 부분은 단일 점성 벽면을 적용시켰다. 자유류가 들어오는 면은 독립된 평판 계산을 통해 나온 결과를 경계조건으로 주었으며(Prescribed B.C) 반대면에는 자유류 유출 경계조건을, 윗면에는 비점성 벽면 경계조건을 각각 적용시켰다.

최대의 유량이 빠질 시의 마하수 contour를 Slater의 결과와 함께 그림 9에 나타내었다. 그림 10에는 벽면에서의 압력 분포가 나타나 있다. 압력 분포의 경우 **Bleed** 유량이 커질수록 실험치와의 차이 또한 큰것을 볼 수가 있는데, 실제 **Bleed** 영역 내부는 여러 **Bleed** 구멍들이 분포하여 그림11와 같이 국소적인 팽창과 압축이 반복되고, 실험에서 벽면 압력을 측정할때는 각 구멍에서의 압축 효과의 영향을 받은 후류에서의 압력이 측정되었기 때문에 **Bleed** 영역을 연속적인 구멍으로 간주한 경계조건을 사용할 때와 비교하여 **Bleed** 영역 내부의 압력이 상대적으로 더 높게 나오는 것이라고 볼 수 있다.

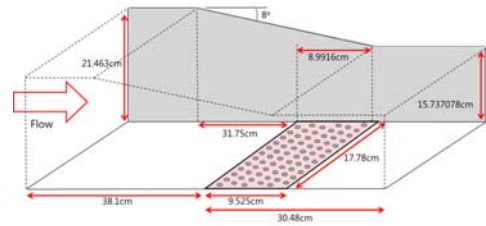
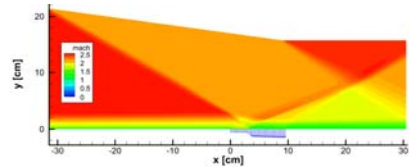
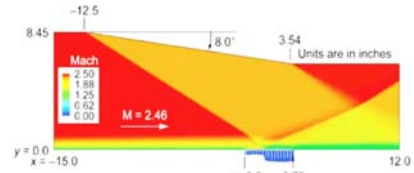


그림 8. Bleed 영역 내 경사충격파가 입사하는 경우의 계산영역

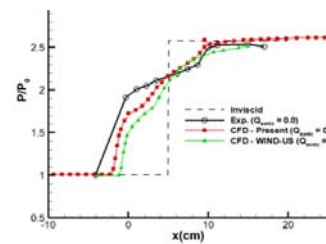


(a) 본 논문의 결과

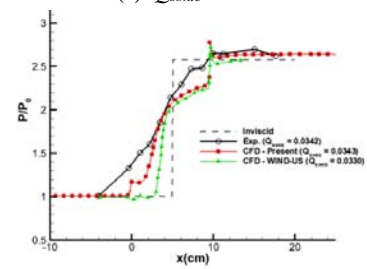


(b) Slater의 결과

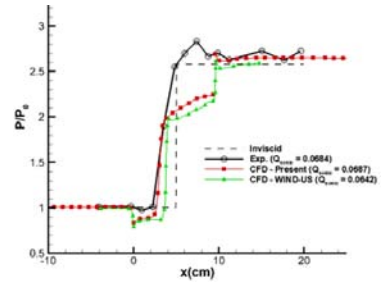
그림 9. 마하수 Contour 비교



(a) $Q_{sonic} = 0.0$

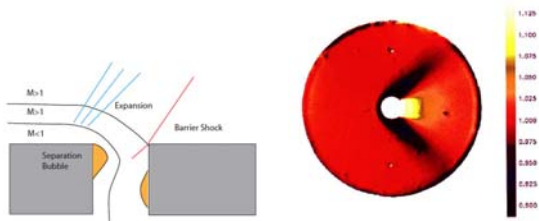


(b) $Q_{sonic} = 0.0342$



(c) $Q_{sonic} = 0.0684$

그림 10. Bleed 영역 벽면에서의 압력 분포 곡선 비교



(a) Bleed 구멍 주변의 유동 (b) Bleed 구멍 주변의 압력

그림 11. Bleed 구멍 주변의 유동

그림 12에는 Q_{sonic} 분포를 나타내었다. 마찬가지로 실험치와는 다소 차이가 있지만 경향성은 따라가고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 경계조건을 사용하긴 하지만, 이러한 차이에 대해서는 차후 추가적인 연구를 통해 보완이 되어야 할 것이다. 특히 충격파가 Bleed 영역 내로 입사하는 경우는 초음속 흡입구 내에 Bleed 유동 제어장치를 설치할 경우 빈번하게 일어나는 현상이기 때문에 차후 추가적인 연구가 더욱 필요할 것으로 보인다.

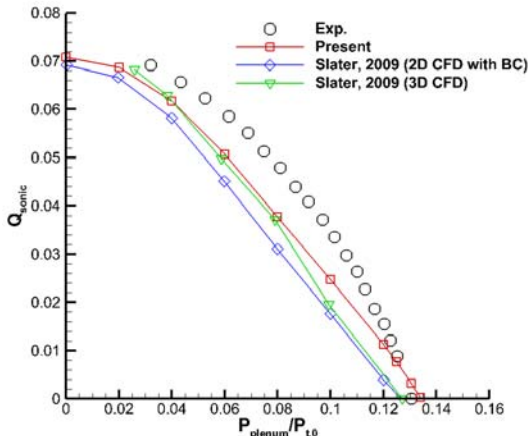


그림 12. Q_{sonic} 분포 곡선

5. Bleed가 적용된 초음속 흡입구

5.1 형상 및 경계조건

해석에 사용된 형상은 Nagashima가 1972년에 수행한 실험[6]에 사용하였던 형상을 사용하였으며, 유동 조건 또한 실험에서의 조건과 동일한 조건을 사용하였고 이는 표 1에 정리되어있다. 해석에 사용된 지배방정식은 2차원-축대칭 정상 압축성 N-S 방정식이며 사용된 다른 수치 기법들은 검증문제에서와 동일하다. 적용된 경계조건은 그림 13와 같다.

표 1, 유동 조건 및 격자 정보

Inflow Mach number	2.0
Reynolds number	1.0×10^7
Stagnation speed of sound	330 m/s
T.R(Throttling Ratio)	2.41
Grid size	About 50,000 grids, 14 blocks (51×71)

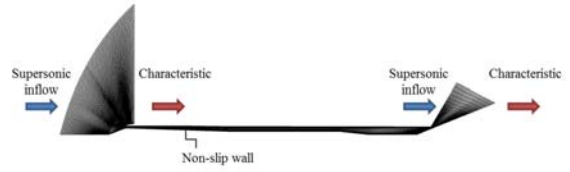
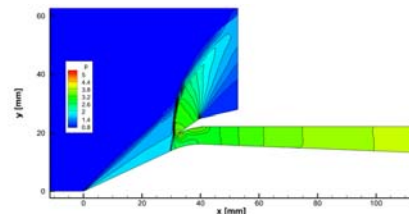
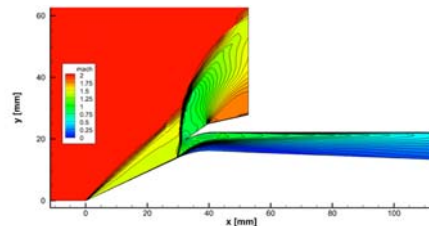


그림 13. 경계 조건

입출구비(T.R)는 2.41로 정하였는데, 이 값에서의 초음속 흡입구는 입계상태(Critical)에서 아입계상태(Sub-critical)로 전환되는 지점이며, 정상상태(Steady state) 유동이기 때문에 입출구비 2.41에서 최적화를 수행하도록 하였다. 입출구비 2.41 및 주어진 유동 조건에서 수치 계산 결과 Nagashima의 흡입구 형상에서의 유동은 그림 14와 같이 아입계(Sub-critical)상태였다. Nagashima의 실험에서는 입출구비 2.41에서 입계(Critical)에 가까운 초입계(Super-critical)상태였는데, 이는 저자도 논문 상에서 언급했던 것 같이 실험이 완전한 축대칭 조건에서 이루어진 것이 아니었기 때문에 3차원 효과로 인해 축대칭을 가정하였을 때 보다 더 많은 유량이 확보되어 아입계 상태가 되지 않은 것으로 볼 수 있다. 이 내용에 관해서는 참고 논문[16] 참고하면 보다 자세한 내용을 알 수 있다. Bleed 경계조건은 총 두개가 각각 그림 15에서와 같이 Center body, 그리고 Inner cowl면에 부여되도록 하였다.



(a) 압력 Contour



(b) 마하수 Contour

그림 14 베이스라인(Baseline) 압력 및 마하수 Contour

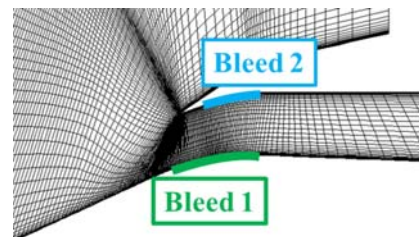


그림 15. Bleed 경계조건 적용면

5.2 디자인 최적화 계획

초음속 흡입구 성능이 최대가 되는 Bleed 조건을 찾기 위해 최적화 기법을 적용하도록 하였다. 목적함수는 공기실에서의 평균 전압력 회복률로 설정하였으며 이 값이 최대가 되도록 하는 Bleed 조건을 구하도록 하는 것을 목표로 하였다. 공기실에서의 평균 전압력 회복률을 선택한 이유는, 초음속 흡입구에서 압축된 공기는 공기실을 통과한 뒤 연소가 되기 때문에, 이때의 압축 효율을 보는 것이 엔진의 성능을 가늠하는데 있어서 매우 중요하다고 볼 수 있기 때문이다. Bleed 경계조건을 적용시키지 않은 베이스라인의 경우 공기실에서의 평균 전압력 회복률은 69.25%이다. 디자인 변수로는 각 Bleed에 대해 다음과 같이 3개씩 변수로 갖게 되어 총 6개의 디자인 변수가 존재한다.

1. Bleed 영역 시작점의 x-좌표
2. Bleed의 너비(Bleed영역 끝점의 x-좌표)
3. Bleed 공기실(Plenum chamber)에서의 압력

각 변수마다 제약조건이 존재하는데, 우선 Center body 면의 Bleed 시작점의 경우, 그림 16에서처럼 30mm 위치를 시작점으로 잡았다. 이 지점에서 궁형 충격파가 벽면에 닿아있기 때문에, 이 지점보다 상류의 지점에서는 압력이 상대적으로 낮아서 매우 적은 유량을 추출하게 되며, 이 영역에서는 경계층 박리 등 전압력 회복률에 악영향을 끼칠만한 요소가 없어서 이 지점을 시작점으로 결정하게 되었다. 다음으로 Inner cowl 면에서의 Bleed 시작점 위치는 33mm인데 이 지점은 Cowl lip 지점에 가까운 곳이다. Cowl lip을 시작점으로 하지 않은 이유는, 이 지점에 Bleed 구멍을 뚫어서 공기를 추출하기에는 너무 얇기 때문에 물리적으로 불가능할것이라 생각하여 어느 정도의 여유분을 둔 것이다. 다음으로 Center body 면의 Bleed 영역의 너비는 Bleed 구멍의 너비 등을 고려하여 최소값을 1mm로 하였으며, Bleed 영역이 갈 수 있는 가장 끝점은 Center body의 곡률이 끝나는 지점이 되도록 Bleed의 너비 범위를 정하였다. 이 지점까지 곡률이 상대적으로 크게 변하기 때문에 이 곡률영역에서 경계층 박리 등의 복잡한 유동현상이 일어날것이라 예상했기 때문이다. 또한 이 지점 뒤로는 거의 일정한 각으로 면적이 천천히 증가하므로 흡입구 내부 유동에 악영향을 끼칠만한 요소가 적다. Inner cowl의 Bleed 너비 위치 또한 같은 이유로 최소값은 1mm, Bleed 영역의 끝점이 갈 수 있는 한계선은 곡률이 끝나는 지점인 42mm까지로 하였다. Bleed Plenum chamber 압력의 경우, 1000Pa에서 1기압인 101325Pa를 범위로 설정하였는데, 이에 대해서는 명확한 근거를 찾지 못하였기 때문에 평판에서 Bleed 검증을 하였던 실험의 Plenum chamber 압력 범위를 참고하여 이 범위를 설정하였다. 디자인 변수들에 관해서는 표 2에 정리되어있다.

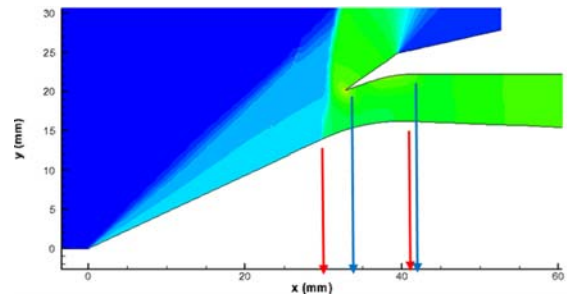


그림 16. Bleed 영역의 범위

표 2. 디자인 변수와 최적값

Bleed 번호	디자인 변수	최소값	최대값	최적값
1 (Center body)	$X_1 = X_{start_1}$	30 mm	40 mm	32.246 mm
	$X_2 = X_{width_1}$	1 mm	10 mm	5.047 mm
	$X_3 = P_{plenum_1}$	1000 Pa	101325 Pa	89091 Pa
2 (Inner cowl)	$X_4 = X_{start_2}$	33 mm	41 mm	33.011 mm
	$X_5 = X_{width_2}$	1 mm	8 mm	1.093 mm
	$X_6 = P_{plenum_2}$	1000 Pa	101325 Pa	52878 Pa

5.3 디자인 최적화 결과

Kriging-EI 기법을 이용하여 메타 모델링을 수행하였고, 유전 알고리즘(GA)을 이용하여 최적값을 구하였다. Kriging-EI를 통한 메타 모델링을 위해 LHS(Latin Hypercube Sampling)기법을 이용하여 총 66개의 샘플 포인트를 얻어내었으며, EI를 통해 추가적으로 16개의 포인트를 얻어낸 후 EI값의 수렴으로 인해 유전 알고리즘을 이용하여 최적의 점을 찾아내는 것으로 최적화 과정을 종료하였다. 그 결과 얻어진 각 디자인 변수의 최적값은 표2에 나타나있으며, 표 3에는 최적점에서의 전압력회복률, 베이스라인에서의 흡입구 유량으로 나눈 Bleed 유량과 흡입구 유량이 나타나있다.

표 3. 최적점에서의 흡입구 성능

	전압력회복률 (목적함수)	$\dot{m}_{bleed} / \dot{m}_{inlet0}$	$\dot{m}_{inlet} / \dot{m}_{inlet0}$
베이스라인	69.25%	0.0%	100%
최적점	75.74%	3.52%	114.6%
차이	+6.49%	+3.52%	+14.6%

최적화의 결과, 전압력은 6.49%만큼 더 회복되었으며, Bleed로 인해 베이스라인 흡입구 유량의 3.52%에 해당하는 유량을 잃게 되었지만 아임계 상태에서 임계상태에 가까워지면서 흡입 유량이 증가하여 Bleed 유량인 3.52%를 제외하고도 11.08%만큼의 유량이 증가했음을 확인할 수 있다. 최적화 결과, 그림 17와 같이 전압력 회복률도 증가했을 뿐만 아니라 엔진 흡입 유량 또한 증가했음을 확인할 수 있다.

그림 18는 Bleed 영역 주변의 유동이 어떠한 특성을 갖고 있는지를 보여주고 있다. Bleed 1과 Bleed 2 모두 충격파를 움직이지 않게 잡아두고 있는 것을 볼 수 있는데, 이 또한 Bleed 유동 제어장치의 역할 중 하나인 충격파 안정화, 혹은 충격파 덫(Shock trap)의 역할을 하고

있음을 확인할 수 있다. 충격파 뒷의 경우 그림 19와 같이 충격파 후류의 압력 증가로 인해 후류에서는 더 많은 유량을 추출하게 되고 이로 인해 충격파 뒤쪽의 압력이 낮아져 충격파가 더이상 앞으로 나아가지 못하도록 한다. 이는 충격파가 앞으로 가려고 하면 할 수록 더 많은 유량을 추출하여 압력을 더 낮추기 때문에, 스스로 안정해지는 메커니즘이라고 볼 수 있다.

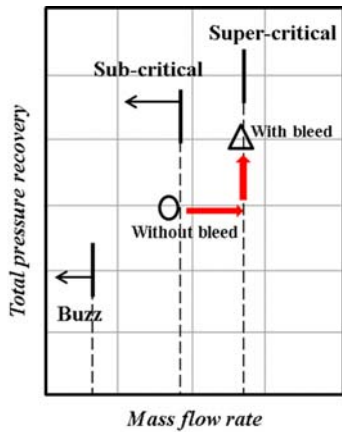


그림 17. 최적점에서의 흡입유량/전압력회복률

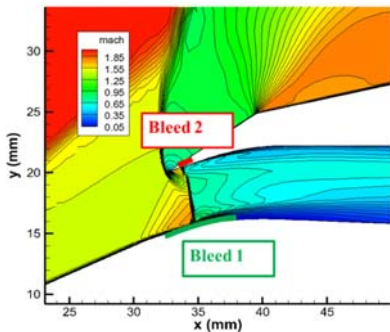


그림 18. 최적점에서의 Bleed 영역 주변의 유동

초음속 흡입구에서 종단 충격파는 노즐에서와 마찬가지로 가장 면적이 좁은 목(Throat)부근에 위치할 때 전압력 회복률이 가장 높다[17]. 본 연구에서 사용한 Nagashima의 형상은 외부 압축(External compression) 형상이기 때문에, Cowli lip 부근이 가장 면적이 좁은 목이 된다. 따라서, 이 부근에 종단 충격파가 위치할 때 가장 좋은 성능을 낼 수 있음을 알 수 있다.

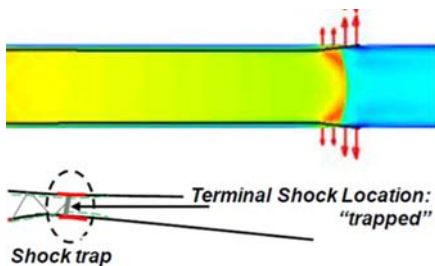


그림 19. 충격파 뒷(Shock trap)의 개념도[17]

그림 20는 충격파 위치에 따른 흡입구 성능을 나타내고 있다. Bleed 유량의 차이도 존재하고 미약하나마 유동 박리의 영향도 존재하긴 하지만, 전반적으로 종단 충격파의 위치가 목 부근에 있을수록 흡입구의 성능이 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

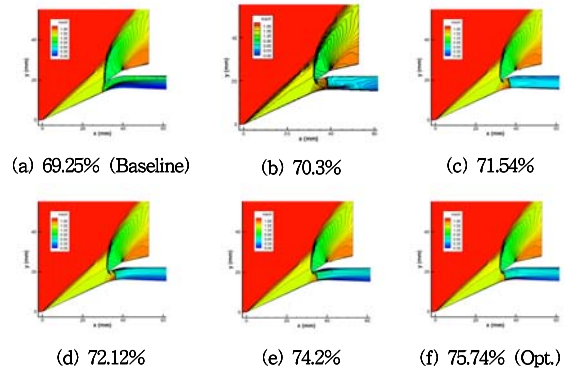


그림 20. 종단충격파 위치에 따른 유동과 전압력회복률

유동의 박리 또한 흡입구 성능에 좋지 않은 영향을 미친다. 또한 유동의 박리는 흡입구의 유로를 좁아지게 만드는 역할을 하며, 이는 충격파의 진동을 유발하고 흡입구 버즈(Inlet buzz) 현상을 발생시킬 수 있는 위험이 있다. 그림21는 유동의 박리가 흡입구 성능에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 한가지 예를 나타내고 있다. 충격파의 위치가 최적화된 결과와 비슷한 위치에 있기 때문에 최적점에서의 값과 비슷한 값을 기대할 수 있지만, 유동의 박리로 인해 전압력 회복률이 약간 감소한 것을 확인할 수 있다.

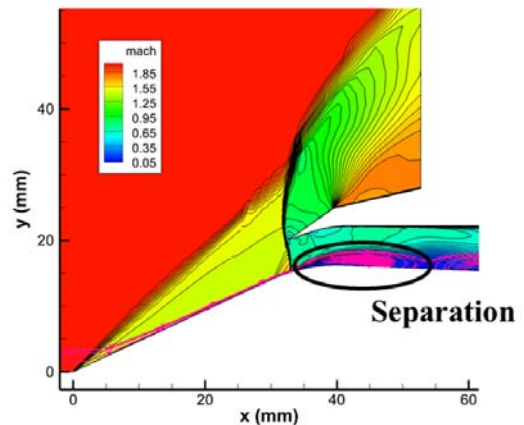


그림 21. 유동 박리 영역이 큰 경우 (전압력회복률 74.06%)

6. 결론

Bleed 경계조건을 모사하고 이를 초음속 흡입구에 적용하여 최적의 효율을 갖는 Bleed 조건을 찾아내었다. Bleed 경계조건인 경우 Slater가 2009년에 제안하였던 모델을 사용하였으며, 실험치와의 다소 차이는 존재하나 전체적인 경향은 따르는 것으로 간주하여 이 모델을 사용하게 되었다. 하지만 추후에는 이러한 차이들을 개선할 수 있는 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다. 초음

속 흡입구에서의 최적화 수행의 경우, 최적점에서 약 6.49%의 전압력 회복률 증가를 확인했으며 아입계 상태에서 초입계 상태로 상 변화가 일어남에 따라 흡입 유량 또한 증가했음을 확인할 수 있었다. 초음속 흡입구의 성능에 영향을 미치는 요인으로써 종단 충격파의 위치와 유동의 박리 정도를 들 수 있었다. 종단 충격파는 가장 면적이 좁은 목 부근에 위치할 때 성능이 가장 좋았으며, 유동의 박리 또한 작을수록 흡입구의 성능이 좋아짐을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 기준점으로써 입출구 비 2.41을 사용하였지만 차후 연구에서는 버즈 현상이 발생하는 입출구비로 알려졌있는 1.0 근처까지 몇몇 특정 입출구비에 대해 최적화를 진행할 예정이다. 그리고 성능 개선 뿐만 아니라 버즈 현상도 억제하여 초음속 흡입구가 버즈 현상 없이 운용될 수 있는 범위를 늘리는 연구도 수행할 계획이다.

7. 후기

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스·교육허브개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2011-0020559).

8. 참고 문헌

- [1] Harloff, G. J., Smith, G. E., "On Supersonic-Inlet Boundary-Layer Bleed Flow," NASA Contractor Report 195426, 1995
- [2] Mayer, D. W., Paynter, G.C., "Boundary conditions for unsteady supersonic inlet analyses," AIAA Journal, Vol. 32, No. 6, 1994
- [3] Slater, J. W., "Improvements in Modeling 90° Bleed Holes for Supersonic Inlets," NASA/TM2009 - 215597, 2009
- [4] Davis, D. O., Vyas, M., Slater, J., "Research on Supersonic Inlet Bleed, 50th AIAA 2012 - 0272, 2012
- [5] Ghosh, S., Choi, J. I., Edwards, J. R., "Simulations of Shock/Boundary Layer Interactions with Bleed using Immersed Boundary Methods," AIAA 2009-1330, 2009
- [6] Nagashima, T., Obokata, T., and Asanuma, T., "Experimental of Supersonic Air In-take 0," Institute of Space and Aeronautical Science of Tokyo, JAPAN, Rept. 481, May 1972.
- [7] Liou, M. F., "A Full Navier-Stokes Based Optimal Design of Bleed Flow," AIAA 2011-3003, 2011
- [8] Liou, M. F., Benson, T. J., "Optimization of Bleed for Supersonic Inlet," 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, 2010
- [9] McCall J., "Genetic algorithms for modelling and optimisation," Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005, 184, 205-222.
- [10] Myers R.H., Montgomery D.C., "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments," New York, Wiley, 1995.
- [11] Simpson T.W., Mauery T.M., Korte J.J., Mistree F., "Comparison of response surface and kriging models for multidisciplinary design optimization," AIAA paper 1998-4775
- [12] Kim, K. H., Kim, C., and Rho, O. H., "Methods for the Accurate Computations of Hypersonic Flows, Part 1: AUSMPW+ Scheme," Journal of Computational Physics, Vol. 174, No. 1, 2001, pp. 38, 80.
- [13] Yoon, S., and Jameson, A., "Low-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations," AIAA Journal, Vol. 26, No. 9, 1988, pp. 1026, 1026.
- [14] Willis, B. P., Davis, D. O., "Boundary Layer Development Downstream of a Bleed Mass Flow Removal Region," AIAA 96-3278, 1996
- [15] Willis, B. P., Davis, D. O., and Hingst, W. R., "Flowfield Measurements in a Normal-Hole-Bled Oblique Shock-Wave and Turbulent Boundary-Layer Interaction," AIAA/SAE/ASME/ASEE 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995
- [16] Hong, W., "Computational Study on Hysteretic Characteristics of Inlet Buzz under Varying Mass Flow Conditions," Ph.D. dissertation, Seoul National University, 2013.
- [17] Domel, N. D., Baruzzini, D., Miller, D. N., "A Perspective on Mixed-Compression Inlets and the Use of CFD and Flow Control in the Design Process," AIAA-2012-14-501, 2012