

## 다공성 벽면(porous-wall)과 거칠기가 있는 벽면(rough-wall)에 관한 경계조건을 이용한 초음속 흐름의 수치모사

곽 인근,<sup>1</sup> 유 일용,<sup>1</sup> 이승수<sup>\*2</sup>

### NUMERICAL SIMULATION OF SUPERSONIC FLOW USING POROUS AND ROUGH WALL BOUNDARY CONDITIONS

E.K. Kwak,<sup>1</sup> I.Y. Yoo<sup>1</sup> and S. Lee<sup>\*2</sup>

The existing code which solves two-dimensional RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) equations and 2-equation turbulence model equations was modified to enable numerical simulation of various supersonic flows. For this, various boundary conditions have been implemented to the code. Bleed boundary condition was incorporated into the code for calculating wall mean flow quantities. Furthermore, the boundary conditions for the turbulence quantities along rough surfaces as well as porous walls were applied to the code. The code was verified and validated by comparing the computational results against the experimental data for the supersonic flows over bleed region on a flat plate. Using the newly modified code, numerical simulations were performed and compared with other computational results as well as the experimental data for the supersonic flows over an oblique shock with a bleed region.

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 초음속 유동(Supersonic Flow), RANS 방정식(RANS Equation), 2-방정식 난류 방정식(2-equation Turbulence Model equation), Bleed 경계조건(Bleed Boundary Condition), 다공성 벽면(Porous Wall), 거칠기가 있는 벽면(Rough surface)

### 1. 서 론

초음속 흐름과 같이 레이놀즈 수가 높은 유동에서는 유체의 관성력(inertia)이 점성 응력(viscous stresses)보다 매우 크기 때문에 관성력이 유동을 지배하게 되며 유동은 임의적인(random) 강한 떨림(fluctuation)을 동반한 불안정한 흐름인 난류 흐름이 된다.[1] 이러한 난류 흐름이 벽면에서 흘르게 되면 난류 경계층이 형성되며 점차 난류 경계층이 두꺼워지면서 흐름 분리(flow separation)로 이어진다. 흐름 분리는 초음속에서 운용하여 항공기나 미사일(missile)등의 비행에 실속(stall)과 같은 좋지 않은 영향을 준다. 특히 초음속에서 운용하는 가스터빈 엔진이나 램제트(ramjet) 엔진의 흡입구에서 발달하는 난

류 경계층은 압력 회복을 방해하고 충격파와 상호 작용하여 흐름을 불안정하게 만드는 등의 악영향을 미친다. 이러한 난류 경계층을 제어하기 위해 bleed와 같이 일부 유량을 제거하는 방법이 쓰인다. 그러므로 초음속에서 운용하는 비행체나 흡입구 주위의 유동을 해석하기 위해서는 일반적인 벽면에서의 초음속 난류 유동과 함께 다공성 구멍(porous hole)과 같은 bleed 장치가 있는 벽면에서의 초음속 난류 유동을 해석할 수 있어야 한다.

초음속 흐름에서의 bleed 효과에 대해서는 실험적인 연구에서 경계 조건 모델링(modeling)까지 여러 연구가 있어 왔다. Willis et al.[2]의 연구에서는 풍동 시험을 통해 bleed 영역이 있는 평판에서의 초음속 유동에 대해 연구하였다. 이 연구에서는 마하수, 구멍의 기울기, bleed 유량 등의 조건을 변화시키면서 downstream에서의 각 물성치의 분포 변화를 관찰하였다. Mayer et al.[3]의 연구에서는 실험 데이터를 이용한 constant-pressure bleed 경계 조건을 개발하였으며 Slater et

1 학생회원, 인하대학교 일반대학원 항공우주공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학부 항공우주공학전공

\* Corresponding author, E-mail: slee@inha.ac.kr

al.[4]의 연구에서는 fixed-exit bleed 경계 조건을 모델링하였다. Paynter et al.[5]의 연구에서는 벽면에서의 bleed 효과를 거칠기(roughness)를 이용하여 대수(algebraic) 난류 모델에 적용하였다.

초음속 난류 유동의 수치 모사를 위해 본 연구에서는 압축성 유동의 지배방정식인 RANS(Raynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식과 2-방정식 난류 모델 방정식을 사용하였다. 2-방정식 난류 모델은 대수 모델보다 실험적이지 않으며 시간에 따른 흐름의 변화(flow history)가 고려되기 때문에 많이 쓰이는 난류 모델이다[6]. 개발된 코드에는  $k-\omega$  SST 모델과  $q-\omega$  모델이 적용되어 있으며 본 논문에서는  $k-\omega$  SST 모델만을 사용하여 수치 모사 하였다. Bleed 영역의 물성치를 계산하기 위하여 constant-pressure bleed 경계조건을 RANS 방정식에 추가 하였고 다공성 벽면 경계조건을 난류 모델 방정식에 적용하였다. 그리고 벽면에서의 거칠기 변화를 고려하기 위해 거칠기가 있는 벽면에 대한 경계 조건을 난류 모델 방정식에 적용하였다. 코드의 검증을 위해 bleed 영역이 있는 평판에서의 흐름에 대해 수치 모사하고 결과를 실험치 및 타 수치해석 결과와 비교하였으며 난류 경계층과 경사 충격파의 상호 작용과 bleed 영역까지 혼재하는 흐름에 대한 수치 모사를 수행하였다.

## 2. 수치 해석 기법

### 2.1 지배방정식

압축성 유동의 지배 방정식인 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)의 2차원 방정식과 2-방정식 난류 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

$W = [\rho \ \rho u \ \rho v \ \rho w \ e \ \rho s_1 \ \rho s_2]^T$ 는 보존형 유동 변수 벡터(conservative flow variable vector)를  $E$ 와  $F$ 는 각각  $x$ 방향과  $y$ 방향의 비점성 유속 벡터(inviscid flux vector),  $E_v$ ,  $F_v$ 는 각방향의 점성 유속 벡터(viscous flux vector)를 나타낸다.  $S$ 는 난류 방정식에 의해 생긴 원천항이다.

### 2.2 방정식 난류 모델

#### 2.2.1 $q-\omega$ 모델

$q-\omega$  모델의 경우 보존형 변수 벡터에 포함되어 있는 모델 변수는 다음과 같다.

$$s_1 = q = \sqrt{k}, \quad s_2 = \omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (2)$$

그리고 난류 점성계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_t &= C_\mu D_q \frac{\rho q^2}{\omega} \\ D_q &= 1 - \exp(-0.022R_q), \quad R_q = \frac{\rho q y}{\mu_m} \end{aligned} \quad (3)$$

$q-\omega$  모델은  $k-\epsilon$  모델에 비해 높은 수치적 안정성을 가지고 있으며 다른 2-방정식 모델들과는 달리 자유류의  $u$ ,  $q$ ,  $\omega$  값을 상수로 두고 계산을 시작할 수 있다[7,8].

#### 2.2.2 $k-\omega$ SST 모델

$k-\omega$  모델의 경우 모델 변수는 다음과 같이 정의 된다.

$$s_1 = k, \quad s_2 = \omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (4)$$

$k-\omega$  모델을 사용할 경우 원천항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_1 &= \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta^* \rho \omega k \\ S_2 &= \frac{\alpha \omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta \rho \omega^2 + 2(1-F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5)$$

각 모델 상수들은 blending function  $F_1$ 에 의해서 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1-F_1) \phi_2$$

$\phi_1$  :  $k-\omega$  난류 모델 상수

$$\beta^* = 0.09, \sigma_{k1} = 0.5, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075,$$

$$\alpha_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (6)$$

$\phi_2$  :  $k-\epsilon$  난류 모델 상수

$$\beta^* = 0.09, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 2} = 0.856,$$

$$\beta_2 = 0.0828, \alpha_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \kappa = 0.41$$

$k-\omega$  모델은 벽근처에서 감쇠(damping) 함수나 벽으로부터의 거리 없이 적용이 가능하며 자유류의 난류와 표면의 거칠기, 유량의 주입(Mass injection)을 쉽게 모델에 포함할 수 있

다[9]. 그러나  $k-\epsilon$  모델과는 달리 자유류 특성에 아주 민감하여 적용하는데 주의가 필요하다.  $k-\omega$  모델과  $k-\epsilon$  모델의 장점만을 채택한 것이 Menter에 의해 개발된  $k-\omega$  SST 모델이다[10].

### 2.3 수치 기법

국소 예조간화된 Navier-Stokes 방정식의 최종 형태는 예조간화 행렬을 시간 미분항에 곱해준 형태를 갖는다. 본 논문에서 사용한 예조간화 행렬  $\Gamma$ 는 Weiss et al.[11]의 예조간화 행렬을 사용하였다.

$$\Gamma \frac{\partial Q_p}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + S \quad (7)$$

여기서  $Q_p = [p \ u \ v \ T \ s_1 \ s_2]^T$ 는 원시형 유동 변수(primitive variable) 벡터이다. 나머지 비점성 유속 벡터와 점성 유속 벡터 그리고 원천향은 예조간화 이후에도 변하지 않는다. 앞의 예조간화된 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\Gamma \frac{\partial Q_p}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F} = \nabla \cdot \vec{F}_v + S \quad (8)$$

이 식을 그 크기가 작은 계산격자(computational cell)에 대하여 적분하고, 발산정리(divergence theorem)를 적용하면,

$$\Gamma \frac{d}{dt} \int_V Q_p dt + \int_S \vec{F} \cdot \hat{n} dS = \int_S \vec{F}_v \cdot \hat{n} dS + \int_S S dV \quad (9)$$

여기에서  $\hat{n}$ 은 cell edge에 수직한 단위 벡터이다. 식 (9)는 cell의 크기가 작기 때문에 다음과 같이 근사적으로 쓸 수 있다.

$$\Gamma \frac{d(VQ_p)}{dt} + \sum \hat{F} \Delta S = \sum \hat{F}_v \Delta S + VS \quad (10)$$

여기에서 computational cell의 표면에 대하여 합을 수행한다. 또한, 그 면에 수직한 비점성 및 점성 유량벡터는 다음과 같이 된다.

$$\hat{F} = \vec{F} \cdot \hat{n}, \quad \hat{F}_v = \vec{F}_v \cdot \hat{n} \quad (11)$$

유한 체적법으로 공간 미분항을 이산화한 준 이산화 방정식은 다음과 같다.

$$\Gamma \frac{dQ}{dt} + R = 0 \quad (12)$$

여기에서 residual은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{1}{V} \left\{ (\tilde{F} \Delta S)_{i+1/2} - (\tilde{F}_c \Delta S)_{i-1/2} \right\} + \left\{ (\tilde{F}_c \Delta S)_{j+1/2} - (\tilde{F}_c \Delta S)_{j-1/2} \right\} \quad (13)$$

그리고 식 (13)에 사용된 총유량 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{F}_c = \hat{F} - \hat{F}_v \quad (14)$$

준 이산화한 방정식 (12)에서 격자 경계면에서의 수치유량 벡터를 Roe의 근사 리만해[12]를 이용해서 비점성 유속벡터를 계산하여 안정적인 수치해석이 되도록 하였다.

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{i+1/2} &= \frac{1}{2} (\hat{F}_i + \hat{F}_{i+1} - \Gamma |A_\Gamma| \Delta Q) \\ &= \frac{1}{2} (\hat{F}_i + \hat{F}_{i+1} - \Gamma X_\Gamma |A_\Gamma| X_\Gamma^{-1} \Delta Q) \end{aligned} \quad (15)$$

Roe의 수치 점성항에서  $A_\Gamma$ 는 다음 식과 같고 기존의 Euler 방정식의 특성치가 바뀌는 것을 볼 수 있다.

$$A_\Gamma = \Gamma^{-1} A \frac{\partial W}{\partial Q} \quad (16)$$

식 (12)에 AF-ADI기법을 적용하면 다음과 같다.

$$\left[ \Gamma + \frac{\theta \Delta t}{V} A \right] \Gamma^{-1} \left[ \Gamma + \frac{\theta \Delta t}{V} B \right] \Gamma^{-1} \Delta Q = -\Delta t R \quad (17)$$

여기에서  $A, B, C$ 는 residual의 Jacobian 행렬이다. 각각의 Jacobian 행렬의 자세한 표현식은 [13]을 참고했다.

## 3. 경계 조건

### 3.1 Bleed 경계 조건

본 논문에서는 Mayer et al.[3]의 연구에서 제안한 constant-pressure bleed 모델을 적용하였다. Constant-pressure bleed 모델은 bleed가 일어나는 곳을 다공성 벽면(porous wall)으로 가정하고 국소(local) 흐름의 물성치와 porosity, 그리고 sonic coefficient를 이용하여 벽에 수직한 bleed 속도를 계산한

다. Bleed porosity는 bleed 영역의 넓이( $A_{surface}$ )와 실제 bleed 가 일어나는 구멍(hole)들의 넓이 합( $A_{bleed}$ )의 비로 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi = \frac{A_{bleed}}{A_{surface}} \quad (18)$$

Sonic coefficient는 유동이 질식 상태(choked condition)일 때의 국소 흐름에서 흐를 수 있는 이론적 최대 유량( $\dot{m}_{ideal}$ )과 실제 bleed 유량( $\dot{m}_{actual}$ )의 비로 bleed 구멍의 각도( $\alpha_{bleed}$ )와 국소 마하수( $M_{local}$ ), 그리고 공기실(plenum chamber)의 정압력과 국소 전압력의 비( $P_{plenum}/P_{T_{local}}$ )를 이용하여 실험 데이터에서 보간(interpolation)하여 구한다. Sonic coefficient의 정의는 다음과 같다.

$$Q_{sonic} \equiv \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{ideal}} = f(\alpha_{bleed}, M_{local}, \frac{P_{plenum}}{P_{T_{local}}}) \quad (19)$$

Bleed 속도는 노즐(nozzle) 흐름 방정식을 이용하여 구하며 국소 흐름의 물성치는 경계층의 경계면(boundary layer edge)에서의 물성치를 사용한다. 이상 기체의 단열 흐름을 고려하면 노즐 흐름 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{m} = \frac{Ap_t}{\sqrt{T_t}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} M \quad (20)$$

여기서  $M=1$ 인 유동 질식 상태가 되면 최대 유량이 되고  $Q_{sonic}$ 의 정의를 이용하면 식 (20)을 bleed 속도( $u_{bleed}$ )에 관한 식으로 변환할 수 있으며 다음과 같다.

$$u_{bleed} = Q_{sonic} \Phi \frac{T_w p_{t_{local}}}{p_w \sqrt{T_{t_{local}}}} \sqrt{\gamma R} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (21)$$

식 (21)에서  $p_w$ 와  $T_w$ 는 벽면에서의 물성치를 나타낸다. Bleed 흐름이 벽면의 수직이라 가정하면 다음과 같은 방법으로 bleed가 있는 벽면에서의 속도 경계 조건에 bleed 속도를 적용할 수 있다.

$$\vec{u}_w = \vec{u}_w + u_{bleed} \vec{n}_w \quad (22)$$

속도를 제외한  $p$ ,  $T$ 와 같은 변수들은 외삽법(extrapolation)을 이용하여 경계 조건에 적용한다.

### 3.2 다공성 벽면과 거칠기가 있는 벽면에 관한 난류 경계조건

Wilcox[1]에 따르면  $k-\omega$  난류 모델에서는 벽면 경계에서의  $\omega$ 를 다음과 같이 지정하면 벽면의 거칠기의 영향을 고려할 수 있다.

$$\omega = \frac{u_\tau^2}{\nu} S_R \quad at \quad y = 0 \quad (23)$$

여기에서  $S_R$ 은 다음과 같다.

$$S_R = \begin{cases} \left(\frac{200}{k_s^+}\right)^2, & k_s^+ \leq 5 \\ \frac{100}{k_s^+} + \left[\left(\frac{200}{k_s^+}\right)^2 - \frac{100}{k_s^+}\right] e^{5-k_s^+}, & k_s^+ > 5 \end{cases}$$

여기에서  $k_s^+$ 는 무차원화 된 거칠기로  $k_s^+ = u_\tau k_s / \nu$ 이며  $k_s$ 는 거칠기의 평균 높이이다. Wilcox에 따르면 다공성 벽면에서의 경계 조건은 다음과 같다.

$$\omega = \frac{u_\tau^2}{\nu} S_B \quad at \quad y = 0 \quad (24)$$

식 (24)는 거칠기의 영향을 고려하는 위의 식 (23)와 동일하다. 여기에서  $S_B$ 는 다음과 같다.

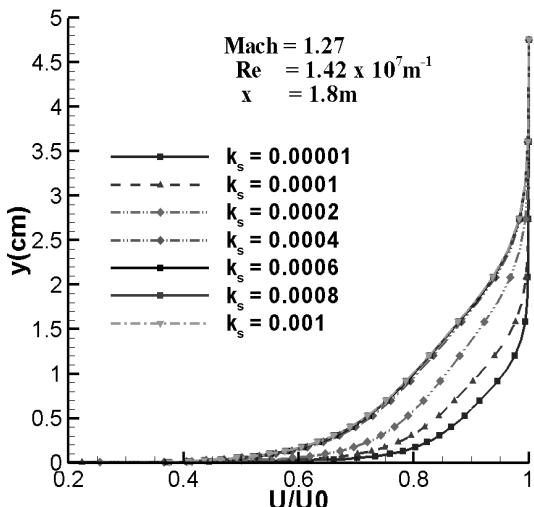
$$S_B = \frac{25}{v_w^+ (1 + 5v_w^+)}$$

여기에서  $v_w^+$ 는 무차원화 된 다공성 벽면에서의 수직 흐름 속도로  $v_w^+ = v_w / u_\tau$ 이며  $v_w$ 는 다공성 벽면에서의 수직 흐름 속도이다.

## 4. 수치해석결과

### 4.1 거칠기에 따른 유동의 변화

거칠기에 따른 유동의 변화를 살펴보기 위해 2 m 길이의 평판 위에서의 유동을 해석하였다. 자유류(free-stream)의 마하수는 1.27이며 단위 길이당 레이놀즈 수는  $1.42 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 이다.



(a) Normalized Velocity Profiles

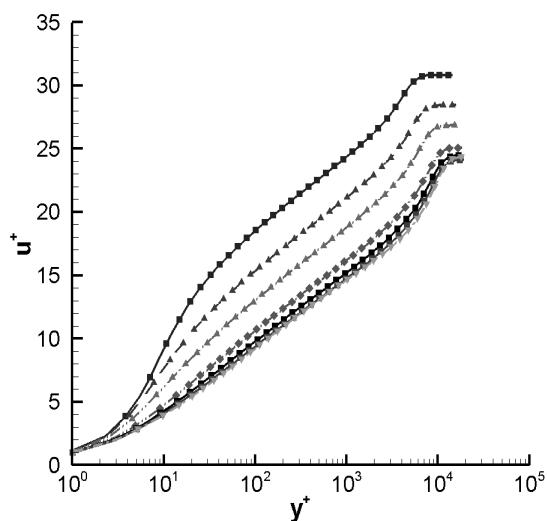
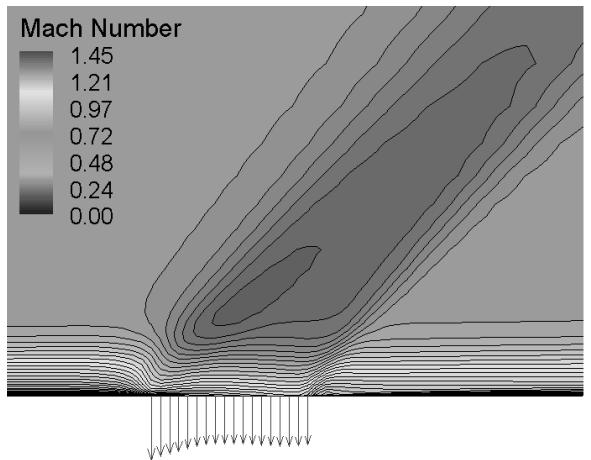
(b) Velocity Profiles using  $u^+$  and  $y^+$ 

Fig. 1 Velocity Profile as Various Roughness

$k_s$ 를 0.00001부터 0.001까지 변화시켜가며 평판 위를 1.8 m 흐른 후의 유동의 속도 분포를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 (a)에서는 속도  $U$ 를 경계층 경계에서의 속도  $U_0$ 로 표준화(normalization)하여  $y$ 에 대해 나타내었으며 (b)에서는  $u^+$ 와  $y^+$ 로 나타내었다. Fig. 1을 통해  $k_s$ 의 변화에 따른 속도 분포의 변화를 볼 수 있으며  $k_s$ 가 0.0004 이상에서는 속도 분포의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 속도 분포의 경향성은 타 문헌들을 통해 정성적으로 확인 하였으며 추후 정량적인 검증이

Fig. 2 Mach Contour( $M=1.27$ ,  $\alpha_{bleed}=90^\circ$ )

필요하다.

#### 4.2 Bleed 영역이 있는 평판에서의 흐름 해석

개발한 코드에 적용된 bleed 경계 조건을 검증하기 위해 bleed 영역을 포함한 평판 위에서의 흐름을 2차원 해석하였다. 해석 결과는 Willis et al.[2]의 풍동 시험 결과와 비교하였다. Willis et al.의 연구에서는 다양한 조건에서 시험이 수행되었으나 본 논문에서는 그 중 두 경우에 대해 비교해 보았다. 첫 번째 해석 조건은 마하수 1.27의 초음속 균등한(uniform) 흐름이고 단위 길이당 레이놀즈 수는  $1.42 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 이다. Bleed 영역은 6줄(row)로 총 72개의 구멍(hole)이 분포되어 있으며 각 구멍은 지름이 0.635 cm이고 기울기가  $90^\circ$ 이다. Porosity는 약 0.19 정도이며 bleed 양이 최대가 되는 plenum chamber의 정압력에 대해 해석하였다. 두 번째 해석 조건은 마하수가 1.58이고 bleed 구멍의 기울기가  $20^\circ$ 이며 단위길이 당 레이놀즈 수는  $1.56 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 이다. 그 외의 다른 조건은 첫 번째 조건과 동일하다. Willis et al.의 연구와 같은 조건에서 해석하기 위해서 bleed 영역 앞 쪽으로 채널을 길게 늘려 거칠기를 변화시켜 가며 여러 번 수치 모사를 하였고 이를 통해 입구에서 원하는 기준 속도 분포(reference velocity profile)를 얻었다.

Fig. 2에서는 첫 번째 해석 경우에 대한 마하수 분포(Mach contour)를 나타내었다. Bleed가 시작되는 부분에서 흐름은 점차 가속이 되어 1/3지점에서 최대 마하수를 보이며 점차 감속하여 bleed 영역이 끝나는 지점에서는 본래의 마하수를 회복하는 것을 볼 수 있으며 bleed 양이 큰 곳이 가속이 크게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 Slater et al.[4]의 연구에서 fixed exit bleed 모델을 이용한 결과와 큰 차이가 없었다. Fig. 3에는 각각의 경우에 대해 upstream과 downstream의 속도 분포를

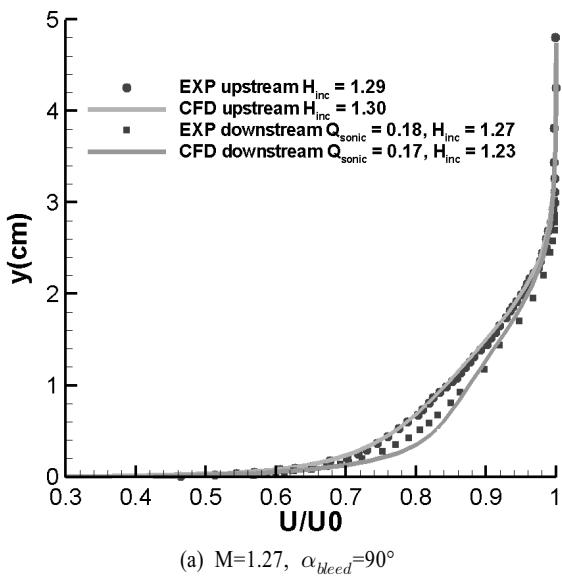
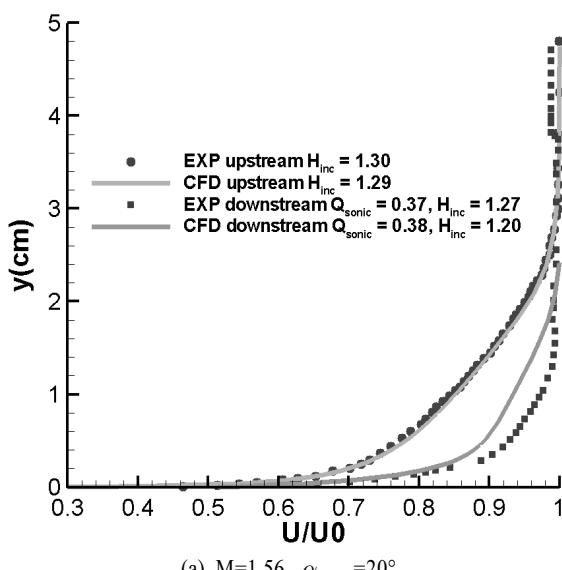
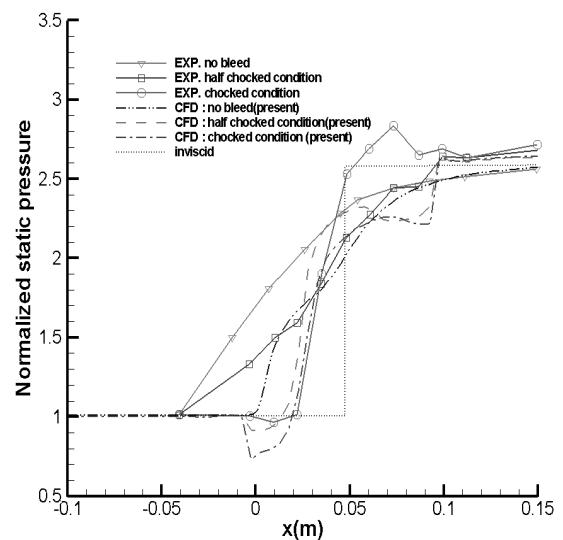
(a)  $M=1.27, \alpha_{bleed}=90^\circ$ (a)  $M=1.56, \alpha_{bleed}=20^\circ$ 

Fig. 3 Normalized Velocity Profiles

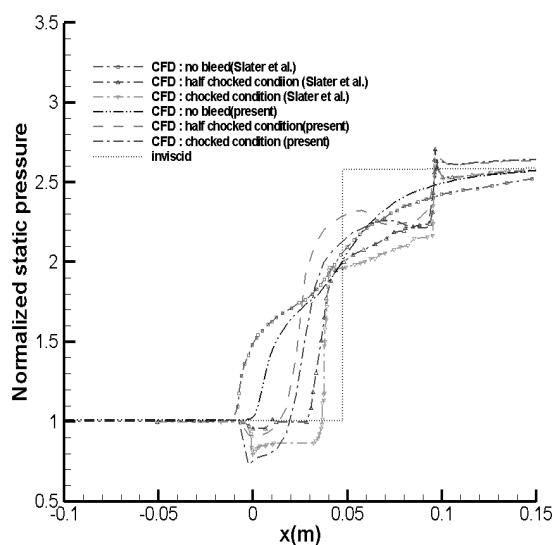
도시하였으며 downstream에서의 incompressible shape factor ( $H_{inc}$ )와 sonic coefficient ( $Q_{sonic}$ )를 함께 나타내었다. Incompressible shape factor는 경계층의 적분 parameter로 다음과 같이 정의 된다.

$$H_{inc} \equiv \frac{\delta^*}{\theta} \quad (25)$$

식 (25)에서  $\delta^*$ 은 displacement thickness<sup>o</sup>이고  $\theta$ 는 momentum



(a) Comparing with Willis et al.[14]



(b) Comparing with Slater et al.[4]

Fig. 4 Wall Static Pressure Distributions around Bleed Region

thickness이다. Fig. 3을 보면 두 경우 모두 실험치와 본 연구의 결과가 상이한 것을 볼 수 있다. 이는 upstream에서의 속도 분포는 같지만 평판 표면의 거칠기가 다르고 bleed 장치의 설치로 인한 흐름의 변화를 본 연구에서는 고려할 수 없기 때문에 오는 차이로 생각할 수 있다. 그러나 bleed 전후의 결과를 비교해보면 두 경우 모두 bleed 후에  $H_{inc}$ 가 감소하는

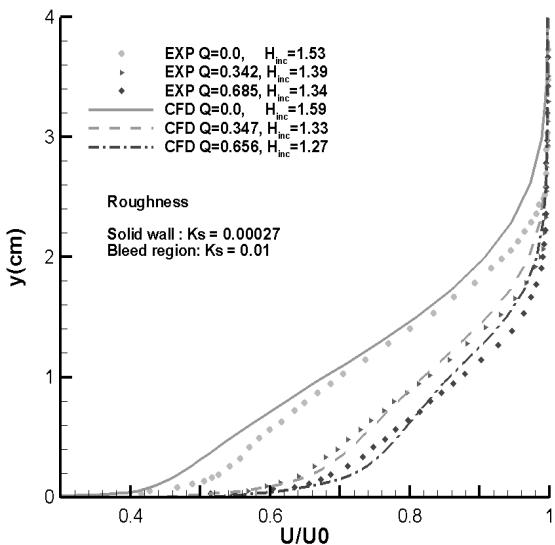


Fig. 5 Normalized Velocity Profiles

경향을 보이고 있으며 속도 분포에서도 흐름이 평판에 밀착되는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 본 코드에 적용된 bleed 모델이 실험치와 비슷한 경향을 가지고 있다는 것을 확인하였지만 실험치와 정량적으로 차이가 나는 부분은 bleed 모델에 대해 보완하여 해결해 나갈 과제이다.

#### 4.3 경사충격파와 Bleed 영역이 있는 흐름 해석

개발된 코드에 적용한 경계 조건을 이용하여 초음속 흐름에 대한 수치 모사를 수행하였다. 이를 위해서 아래에는 bleed 영역을 가진 평판이 있고 위쪽에는 평판이  $8^\circ$ 의 기울기를 가지고 위치해 있어 bleed 영역과 경사 충격파 간의 상호 작용이 발생하는 문제를 선택하였다. 해석 마하수는 2.46이고 단위 길이 당 레이놀즈 수는  $1.81 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 이다. Bleed 영역은 흐름 방향으로 25개의 열로 총 100개의 구멍으로 이루어져 있으며 각각의 구멍은 지름이 0.635cm이고 기울기가  $90^\circ$ 이다. Porosity는 0.2096이고 공기실(plenum chamber)의 정압력은 반질식(half choked) 조건일 때 자유류 전압력의 10.1%이고 질식(choked) 조건일 때는 자유류 전압력의 3.21%이다. Bleed 영역의 위치는 이론적으로 경사충격파가 bleed 영역 중앙에 생기도록 위치해 있으며 bleed 영역의 흐름 방향 길이는 9.52cm이다. 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해 Willis et al.[14]의 실험 결과 및 Slater et al.[4]의 수치 해석 결과와 비교하였다. 비교를 위해서는 입구에서의 흐름이 Willis et al.의 실험에서의 기준 속도 분포를 따라야 한다. 이를 위해서 벽면의 거칠기를 변화시켜가며 평판 흐름을 해석하였으며 길이가 2.6m, 거칠기( $k_s$ )가 약 0.00027 정도에서 원하는 기준 속도 분

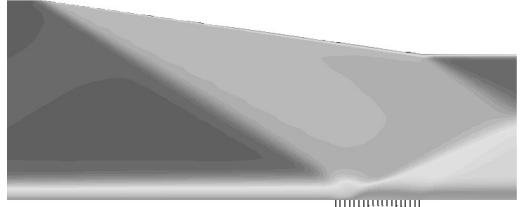
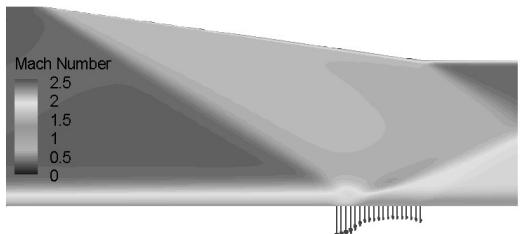
(a)  $Q = 0.0$ (b)  $Q = 0.342$ (c)  $Q = 0.685$ 

Fig. 6 Flow Domain and Mach Contours

포를 얻을 수 있었다. 또한 bleed 장치로 인해 벽면의 거칠기가 증가하는 효과를 적용하기 위해 bleed 영역에서의 거칠기는 0.01로 증가시켰다. Fig. 4에는 bleed 영역 근처의 벽면에서의 압력 분포를 나타내었다. Bleed 영역은  $X=0.0\text{m}$ 에서  $X=0.0952\text{m}$ 까지이다. Fig. 4의 (a)는 Willis et al.의 실험치와 비교한 것이고 (b)는 Slater et al.의 수치 해석 결과와 비교한 것이다. 실험치와 비교한 Fig. 4의 (a)를 보면 압력이 증가하기 시작하는 지점이 실험치와 본 연구의 결과가 다르며 압력이 다시 일정해지는 지점은 비슷하다. 실험치가 경사충격파와 bleed 영역간의 상호 작용으로 인한 흐름 분리 영역이 넓다는 것으로 해석 할 수 있다. Fig. 4의 (b)에서는 두 수치해석 결과 간의 큰 차이는 없으며 비슷한 경향성을 가지고 있다.

Fig. 5에서는 bleed 영역의 시작점에서 18 cm 거리의 downstream에서의 속도 분포를 비교하였다. Willis et al.의 연구에서는 bleed 공기실에서의 정압력이 주어져 있어 이용하였다. 결과를 보면 각각의 경우에 bleed 양이 실험치와 잘 일치

한다. 또한 본 연구 결과의 속도 분포가 실험에서의 속도 분포와 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 5에는 각 경우에 대해 incompressible shape factor도 속도 분포와 함께 표시하였다. Slater et al.의 연구에서의 incompressible shape factor는 bleed가 없을 때 1.63, 반질식 조건에서 1.36, 질식 조건에서 1.30으로 본 연구의 결과와 마찬가지로 incompressible shape factor가 bleed가 없을 때는 실험치보다 크게 나타나고 bleed가 있을 경우에는 작게 나타난다. 이는 수치 해석을 통한 결과가 bleed의 영향을 크게 예측한다는 것을 말해 준다.

Fig. 6에서는 bleed 유량을 나타내는  $Q$ 에 따른 마하수 분포도를 비교하였다. Fig. 6의 (a)에서는 경사 충격파와 난류 경계층의 상호 작용으로 인해 흐름이 정체되어 분리가 일어나는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6의 (b)와 (c)에서는 흐름이 정체되는 곳을 볼 수 없다. 이것으로 bleed가 흐름의 분리를 방지하는 역할을 한다는 것을 확인할 수 있으며 충격파와 난류 경계층의 상호 작용이 큰 문제로 대두되는 초음속 흡입구에 bleed가 쓰이는 이유 중 하나이다. 또한 bleed에 따라 경사 충격파가 아래 평판과 만나는 지점이 달라지는 것을 볼 수 있다. 이것은 bleed를 이용하여 충격파의 위치를 조절할 수 있다는 것을 보여주는 것이며 초음속 흡입구에서는 이를 이용하여 종단 충격파(terminal shock)의 안정성을 도모한다.

#### 4. 결 론

2차원 RANS 방정식과 2-방정식 난류 방정식을 기반으로 한 기존의 코드에 벽면 거칠기에 관한 경계 조건과 bleed 경계 조건을 추가하여 벽면 근처에서의 초음속 난류 흐름에 대한 수치모사를 수행하였다. 거칠기가 있는 벽면의 효과를 난류 방정식의 경계 조건으로 적용하였으며 벽면에서의 bleed 속도를 계산하기 위한 bleed 경계 조건과 다공성 벽면에 대한 난류 경계 조건을 적용하였다. 이를 이용하여 경사충격파와 난류 경계층간의 상호 작용이 있는 bleed 영역에서의 흐름에 대해 수치모사를 수행하였으며 실험치 및 타 수치 해석 결과와 비교하였다. 이를 통해 다양한 벽면에서의 초음속 난류 흐름에 대한 수치 모사가 개발한 코드를 통해 가능함을 확인하였다.

개발된 코드의 경계 조건을 이용한 bleed 장치가 있는 초음속 흡입구 유동의 수치 모사에 대한 연구가 진행 중이며 더 나아가 흡입구 주변의 비정상 유동 해석에도 이용할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 2006, Wilcox, D.C., *Turbulence modeling for CFD-3rd edition*, DCW Industries, Inc, California, pp.3-5, 182-187.
- [2] 1996, Willis, B.P. and Davis, D.O., "Boundary layer development downstream of a bleed mass flow removal region," *AIAA Paper 96-3278*.
- [3] 1994, Mayer, D.W. and Paynter, G.C., "Boundary condition for unsteady supersonic inlet analyses," *AIAA Journal*, Vol.32, No.6.
- [4] 2008, Slater, J.W. and Saundar, J.D., "Modeling of fixed-exit porous bleed systems," *AIAA 2008-94*.
- [5] 1993, Paynter, G.C. et al., "Modeling supersonic inlet boundary-layer bleed roughness," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.9, No.4, pp.622-627.
- [6] 1985, Sahu, J. and Danberg, J., "Navier-Stokes computations of axisymmetric transonic flows with a two-equation model of turbulence," *AIAA-85-0373*.
- [7] 1983, Coakley, T.J., "Turbulence modeling methods for the compressible Navier-Stokes equations," *AIAA-83-1693*.
- [8] 1994, Gerlinger, P., Algermissen, J. and Bruggemann, D., "Simulation of turbulent slot injection of different gases into a supersonic air stream," *AIAA-94-2247*.
- [9] 1996, Chima, R.V., "Application of the  $k-\omega$  turbulence model to quasi-three-dimensional turbomachinery flows," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.12, No.6, pp.1176-1179.
- [10] 1999, 김창성, 김종암, 노오현, "2-방정식 난류모델을 이용한 고양력 익형주위의 비압축성/압축성 유동장 해석," *한국전산유체공학회지*, 제4권, 1호, pp.53-61.
- [11] 1995, Weiss, J.M. and Smith, W.A., "Preconditioning applied to variable and constant density flows," *AIAA Journal*, Vol.33, No.11, pp.2050-2057.
- [12] 1981, Roe, R.L., "Approximate riemann solvers, parameter vectors and difference schemes," *J. of Comp. Physics*, Vol.43.
- [13] 2006, 류세현, 이승수, 김범수, "저속 압축성 유동에 대한 국소 예조건화 기법 적용연구," *한국군사과학기술학회*, 제9권, 2호, pp.152-160.
- [14] 1995, 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-95-2885*.