

경사충격파 간섭유동의 피동제어에 관한 수치해석적 연구

장성하* · 이 열**

Computational Study of the Passive Control of the Oblique-Shock-Interaction Flows

Sungha Chang* · Yeol Lee**

ABSTRACT

Computational study on the passive control of the oblique shock-wave/turbulent boundary-layer interaction utilizing slotted plates over a cavity has been carried out. The numerical boundary layer profile upstream of the interaction follows the compressible turbulent boundary-layer theory reasonably well, and the other results also show good agreements with the experimental observations, such as the wall surface pressures and Schlieren flow visualizations. Further, the effects of various slot configuration including number, location and angle of the slots on the characteristics of the interactions, such as the variation of the total pressures, the boundary-layer characteristics downstream of the interaction and the recirculating mass flux through the slots, are also tested and compared.

초 록

공동부 위에 설치된 슬롯판을 이용한 경사충격파와 난류 경계층의 간섭유동의 피동제어에 관한 수치적 연구가 수행되었다. 수치해석에서 얻어진 결과는 간섭전방에서 압축성 난류경계층 이론을 잘 따르고 있었으며, 또한 벽압력 분포와 쉐리렌 유동가시화와 같은 실험결과와 서로 잘 일치하고 있음이 확인되었다. 또한 슬롯의 위치와 개수, 슬롯의 각도 등 슬롯판의 다양한 형상변화가 간섭유동 특성에 미치는 영향이 관찰되었으며, 간섭유동 후방의 전압변화, 경계층 특성변화, 그리고 슬롯판을 통하여 공동부로 순환하는 질량유량의 변화 등이 서로 비교분석 되었다.

Key Words: Shock Wave(충격파), Interactions(간섭), Slot Control (슬롯제어), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

고속의 비행체 외부 또는 내부에서 발생하는 충격파와 경계층의 간섭(또는 상호작용) 현상은 일반적으로 비행체 효율을 크게 저하시켜 오랫동안 고속유동분야에서 주요문제로 다루어져 왔다. Settles와 Dolling[1]은 이러한 간섭유동 특성에 관한 과거 연구결과를 정리하여 소개한 바

† 2007년 1월 29일 접수 ~ 2007년 4월 18일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: ylee@hau.ac.kr

있다. 이러한 간섭유동 때문에 비행체 엔진입구에서 발생하는 유동박리와 전압감소 등의 문제점을 해결하기 위하여 과거 많이 사용되었던 경계층내 분출/흡입을 이용하는 능동제어 방법[2, 3]은 비행체의 무게증가 및 설계의 복잡성 때문에 그 적용에 한계가 있었다. 이에 따라 간섭유동이 위치하는 곳 하부에 다공판과 공동부를 설치하는 피동제어 방식[4, 5]이 많이 연구되어 왔으며, 최근 들어 다공판 대신에 슬롯 및 공탄성 플랩 등을 적용하는 진보된 피동제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[6, 7].

일반적으로 이러한 간섭유동 피동제어의 특성은 슬롯이나 플랩의 형상, 위치, 공동부의 구조, 그리고 충격파가 평판에 부딪치는 위치 등 다양한 관련 파라미터 변화에 매우 민감하기 때문에, 이러한 파라미터의 영향을 파악하는데 수치해석적 연구가 많이 사용되고 있다. 최근 McIlwain 등[8]과 Wood 등[9]은 경사충격파 간섭유동의 플랩제어에 관한 수치해석적 연구를 수행한 바 있으며, Jaiman 등[10]은 공탄성 플랩을 이용한 수직충격파 간섭유동의 피동제어에서 간섭유동 하단에 위치한 플랩의 수, 플랩 휨각도 등의 변화에 따른 간섭유동 후방에서의 전압회복과 경계층 특성변화를 관찰한 바 있다.

앞서 언급한 슬롯을 이용한 피동제어의 실험적 연구[7] 결과에서 간섭유동의 특성은 슬롯의 수, 특히 슬롯의 위치에 따라 크게 달라지는 것이 확인된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 공동부 위에 설치된 슬롯판의 형상이 다양하게 변화할 때, 이를 이용한 피동제어장치가 마하수 2.4에서 발생하는 이차원 경사충격파 간섭유동 특성에 미치는 영향을 수치계산을 통하여 비교분석하였다. 얻어진 수치결과는 벽압력 분포와 유동가시화 등 동일한 경계조건에서 수행된 과거 실험결과[7]와 비교검증 되었으며, 사용된 슬롯의 위치와 개수, 그리고 슬롯의 각도 등이 간섭유동에 미치는 영향이 관찰되었다. 이러한 영향을 보다 정량적으로 파악하기 위하여, 간섭유동 후방의 전압변화, 경계층 특성변화, 그리고 슬롯판을 통하여 공동부 내부로 유출입하면서 재순

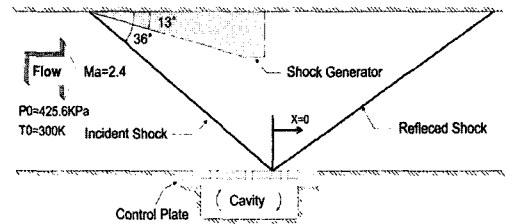


Fig. 1 Shock-interaction model

환되는 질량유량의 변화 등이 관찰되어, 제어되지 않은 간섭유동과 비교분석 되었다.

2. 수치해석방법

2.1 수치계산 모델

Figure 1은 본 연구에서 응용된 충격파 간섭유동의 개략도를 나타내고 있다. 자유유동(시험부 높이 35 mm) 마하수가 2.4인 유동상부에 있는 13°인 충격파 발생기(췌기)에 의하여 췌기전연에서 약 36°의 경사충격파가 발생되어 시험부 하단의 경계층과 상호작용한다. 이때 유동방향의 좌표는 비점성 충격파가 하단 평판에 부딪치는 위치를 $x=0$ 로 정하였다. 충격파가 부딪치는 바닥에 다양한 형태의 슬롯 제어판이 위치하는데, 이러한 슬롯판의 피동제어의 원리는 다음과 같다.

제어판 상단에 충격파가 부딪힐 때 나타나는 충격파 전후방 압력과 제어판 하단의 공동부에

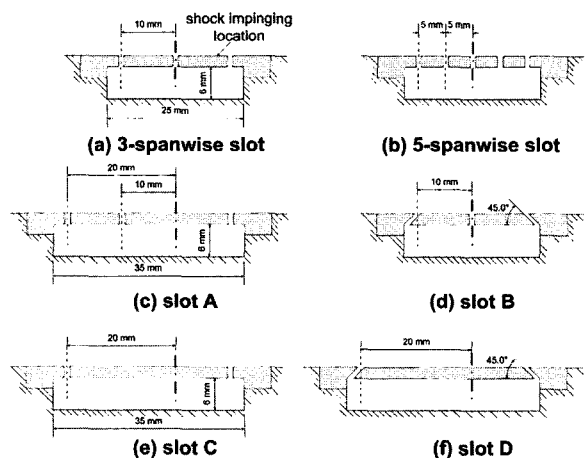
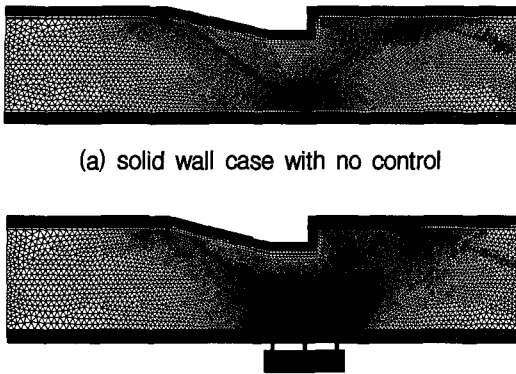


Fig. 2 Various tested slot configurations



(a) solid wall case with no control

(b) 3-spanwise slot case

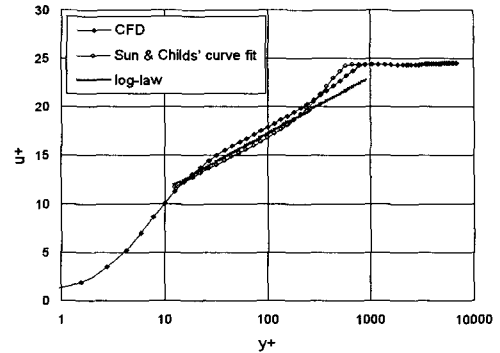
Fig. 3 Hybrid grid system with grid adaptation

서의 압력크기(일반적으로 충격파 전후방 압력의 평균)의 차이로 인하여 슬롯이나 다공판 구멍을 통하는 유동 재순환이 나타난다. 이러한 유동재순환은 제어판 전방 경계층에는 분출(blowing)을, 제어판 후방 경계층에는 흡입(bleeding)유동을 동시에 만들어 내고(Fig. 1 참조), 충격파의 구조변화를 만들어 경계층 박리강도의 감소와 후방 유동전압의 크기 증가를 유도할 수 있다.

Figure 2는 본 수치계산이 적용된 다양한 이차원 슬롯판과 공동부의 구조를 나타내고 있다. 이때 모든 슬롯판에서 슬롯 틈의 크기는 간섭유동 바로 전방 $x=-25$ mm에서 실험적으로 관찰된 경계층 두께($\delta_0=1.4$ mm)와 비슷한 크기인 1 mm로 정하였다. 연구모델과 관련된 보다 구체적인 내용은 참고문헌 [7]에 나타나 있다.

2.2 수치기법

수치계산을 위하여 이차원 Navier-Stokes 상용 코드가 사용되었으며, 수치해석을 위한 계산격자의 수는 슬롯이 있는 경우에 최대 약 80,000 개이다. 아울러 벽면근처에는 정렬격자를, 그 밖의 영역에는 비정렬격자를 사용하였다. 이때 경계층 내부의 격자를 보다 조밀하게 구성하여 격자하부 바닥에서의 첫 번째 격자점이 $y^+ \sim 1$ 이 되도록 하였다. 또한 grid adaptation을 통하여 밀도 변화율이 큰 영역의 격자를 좀더 조밀하게 구성하였다. 또한 $x=-25$ mm에서 실험적으로 관찰된

Fig. 4 Boundary-layer profile upstream of the interaction ($x=-25$ mm)

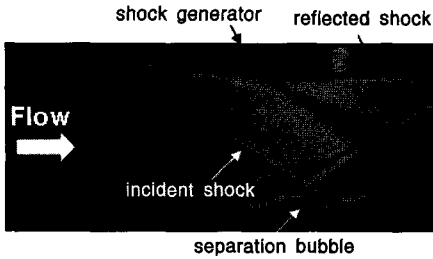
경계층 두께가 수치해석에서도 동일하게 나타나도록, 계산격자의 입구길이(위치)는 $x=-125$ mm까지 연장하였고, 자유유동의 입구조건은 실험조건과 동일하도록 마하수 2.4, 유동전압 P_0 는 425.6 kPa, 전온은 300 K로 설정하였다.

난류모델은 $k-\epsilon$ 모델과 Spalart-Allmaras 모델 두 가지를 사용하여 그 결과를 서로 비교하였으며, 이상기체 및 단열조건을 설정하여 모든 계산은 계산오차가 10^{-4} 가 될 때까지 수행하였다. 아울러 특정한 슬롯형상(슬롯 B)에 대한 계산에서 사용된 격자수를 각각 12% 증가, 또는 14% 감소시켜 독립된 계산을 수행한 결과, 본 연구의 수치해석결과는 계산격자 수와 무관하다(grid independency)는 사실이 확인되었다. Figure 3에서 (a)와 (b)는 각각 제어가 되지 않은 평판간섭의 경우(solid wall)와 3-슬롯/공동부가 설치되어 간섭유동이 제어되는 경우에 사용된 계산격자의 일부를 나타내고 있다.

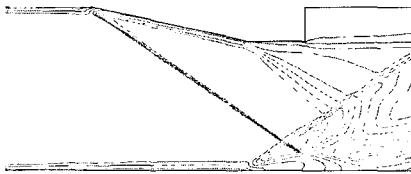
3. 결과 및 고찰

3.1 간섭전방유동의 경계층 특성

수치해석 진행과정에서 충격파 간섭유동 전방에서의 경계층 특성이 전형적인 압축성 난류경계층의 특성과 일치하는 지에 관한 확인이 이루어졌다. 이를 위하여 본 연구에서는 충격파 간섭



(a) Schlieren picture[7]



(b) CFD result(iso-density contour)

Fig 5. Comparison for solid wall case

의 영향을 받기 전인 $x=-25$ mm(즉 $x=$ 약 $-18\delta_0$) 위치에서 수치해석을 통하여 얻어진 경계층 속도분포와 Sun과 Childs[11]의 압축성 난류경계층의 이론을 따라 계산된 곡선적합(curve fitting) 결과가 서로 비교되었으며, 그 결과가 Fig. 4에 제시되어 있다. 추가적인 비교를 위하여 비압축성 경우의 벽법칙(log-law of the wall) 결과도 Fig. 4에 같이 나타나 있다. Figure 4에서 알 수 있듯이 현재 수치해석 결과는 Sun과 Childs의 이론과 잘 맞고 있으며, 점성저층(inner layer)에서의 속도분포도 이론과 잘 일치하고 있음이 확인되고 있다. 아울러 Fig. 4에 제시된 수치계산 결과는 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한 경우이고, Spalart-Allmaras 난류모델의 경우도 그 결과는 거의 차이가 나타나지 않음이 확인되었다.

3.2 충격파와 제어되지 않은 평판사이의 간섭유동

본 연구에서 얻어진 수치계산결과의 추가적인 검증을 위하여 제어장치가 없는 평판(solid wall)의 경우에 대하여 경사충격파 간섭유동의 수치해석이 수행되었다. Figure 5에는 제어되지 않은 평판의 경우에 수치해석적으로 얻어진 등밀도선도가 동일한 조건에서 관찰된 쉐리렌 유동가시화 결과[7]와 서로 비교되어 있다. 유동가시화 결과에서 충격파가 바닥에 부딪치면서 바닥면

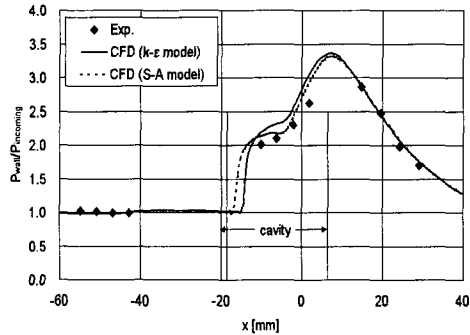


Fig. 6 Comparison of wall pressures (solid wall with no control)

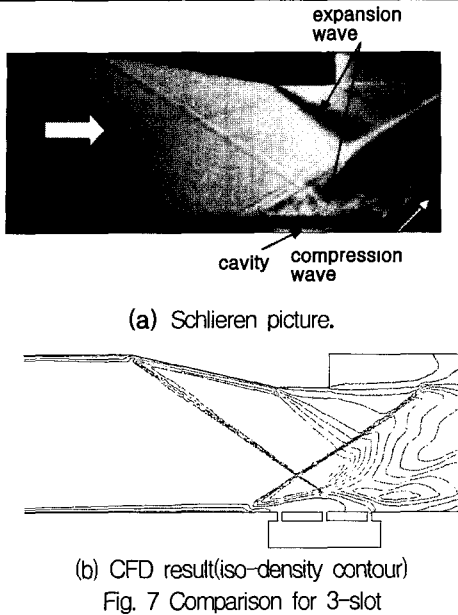
경계층이 박리되고, 이로 인한 경계층 두께증가와 함께 박리영역 앞전에서는 반사충격파가 발생하는 구조 등이 수치해석의 등밀도선도와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

또한 수치계산에서 얻어진 벽압력 분포가 시험부 중앙선(유동방향)에서 측정된 벽압력 분포와 비교되었으며, 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. Figure 6에서 측정 또는 수치계산된 벽압력(P_{wall})은 충격파 간섭 전방 네 지점에서의 벽압력을 평균한 $P_{incoming}$ 에 대하여 무차원화 되었다. Figure 6에 나타난 바와 같이 제어되지 않은 경우의 벽압력은 충격파 충돌전방에서 거의 일정하게 유지되다가 박리유동 하부에서 증가하고 후방으로 가면서 갑자기 감소하고 있다. 이렇듯 충돌후방에서 벽 압력이 갑자기 감소하는 이유는 유동 상부에 설치된 췌기 후방에서 발생한 팽창파에 의한 것으로 판명되었다. Figure 6의 결과, 수치해석은 실험결과와 서로 잘 일치하고 있으며, 또한 추가로 서로 다른 두 가지 난류모델에 따른 수치결과는 거의 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다.

3.3 슬롯으로 제어된 간섭유동

3.3.1 유동가시화/벽압력 결과 비교

Figure 7에는 3-폭방향 슬롯(Fig.2의 (a))의 경우에 얻어진 쉐리렌 유동가시화 결과와 본 연구의 수치해석을 통해 계산된 등밀도선도가 서로 비교되어 있다. 슬롯을 적용한 경우 평판의 경우



와 전체적인 유동구조에서 큰 차이가 나타나지는 않지만, 경계층의 박리시작점이 제어되지 않은 경우보다 유동전방으로 이동하고, 또한 반사된 충격과의 각도가 약간 증가하는 특성이 수치 해석결과와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

앞서와 동일한 방법으로, 3-폭방향 슬롯제어 경우 수치해석에서 얻어진 벽압력(공동부 바닥 포함) 결과가 시험부 중앙선에서 측정된 벽압력 측정결과와 비교되었으며, 그 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 폭방향 슬롯으로 제어한 경우에도 수치해석 압력결과는, 공동부 바닥면(-18.6 mm <math>< x < 6.35 \text{ mm}</math>)에서 실험결과를 최대 약 10% 정도 크게 예측하고 있는 것을 제외하고는, 실험결과와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 아울러 앞서 Fig. 6의 경우와 같이 서로 다른 두 가지 난류모델에 따른 수치결과는 거의 차이가 나타나지 않고 있다.

3.3.2 슬롯판 형상변화

앞서 Fig. 2에 제시된 다양한 이차원 슬롯형상 변화에 따른 간섭유동 제어특성이 비교되었다. 수치해석결과, 3-슬롯 제어판(Fig. 2-(a))과 5-슬롯 제어판(Fig. 2-(b))의 유동특성 차이는 매우 미미함이 관찰되어, 여기서는 슬롯 A, B, C, D에 대

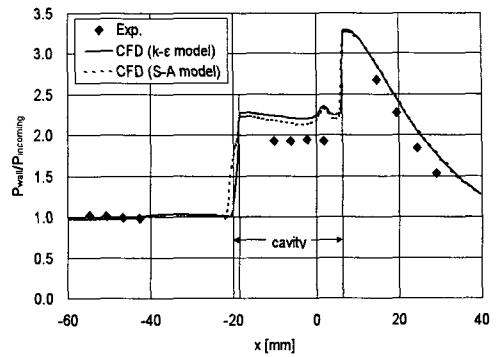


Fig. 8 Comparison of wall pressures (3-slot control)

한 유동변화에 관하여 초점을 맞추고자 한다. 이때 슬롯 A는 첫 번째 슬롯이 반사충격과 전방으로 크게 이동된 경우이며, 슬롯 B는 슬롯의 각도가 45 도로 설정된 경우, 그리고 슬롯 C와 슬롯 D는 간섭유동 바로 하단에 위치한 가운데 슬롯을 없애고 두 개의 슬롯만 사용한 경우이다.

3.3.3 공동부 내부 유선의 구조

Figure 9에는 다양한 슬롯형상 변화에 따른 공동부 내부의 재순환유동의 유선구조가 비교되어 있다. Figure 9-(a)와 -(b)처럼 슬롯이 세 개인 경우에는 첫 번째와 두 번째 슬롯에서 경계층에 분출유동을, 그리고 후방 세 번째 슬롯에서 경계층에 흡입유동을 동시에 만들어 내고, Fig. 9-(c)와 -(d)처럼 두 개의 슬롯 경우에는 첫 번째와 두 번째 슬롯에서 각각 분출유동과 흡입유동이 나타나고 있다.

Figure 9의 (a)와 (b)에서, 두 경우 모두 가운

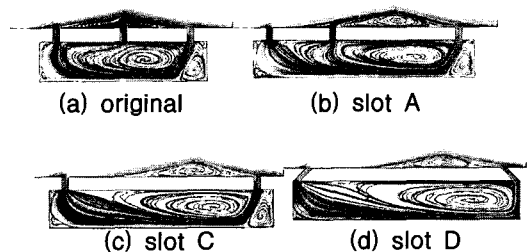


Fig. 9 Streamlines inside the cavity

데 슬롯에서는 경계층으로의 유동분출이 관찰되고 있는데, 3-슬롯(Fig. 9-(a), original)의 경우에는 공동부 내부에서 두 번째 슬롯으로 휘돌아 나가는 유동구조가 슬롯 A의 경우보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이로 인하여 첫 번째 슬롯을 통한 유동분출 효과가 반감되어 전체적으로 제어성능이 감소되리라 판단된다. 또한 슬롯 C와 D의 경우에는 가운데 슬롯(공동부 내부 순환 유동의 재부착 지점)을 없앴으로 역시 유동분출 효과가 작아지고 있음을 알 수 있다.

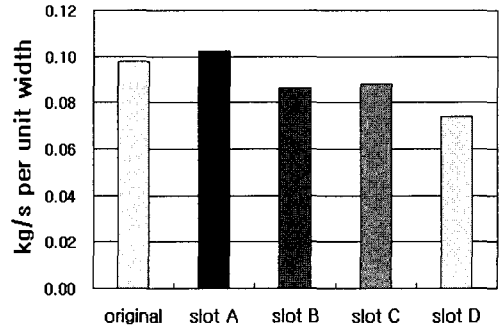


Fig. 10 Comparison of the recirculating mass flux inside the cavity

3.34 슬롯을 통하여 분출/흡입되는 질량유량

앞서의 결과에서 슬롯형상의 변화에 따라 슬롯/공동부를 통하여 재순환되는 유동의 전체 질량유량(단위 폭 당)의 크기에 차이가 나타날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 각각의 슬롯형상에 대하여 공동부 내부 재순환유동의 질량유량이 계산되어 그 결과가 Fig. 10에 비교되어 있다. Figure 10에서 슬롯을 통하여 재순환되는 유동의 단위 폭 당 질량유량은 슬롯 A 경우에 최대 0.104 kg/s/m로 나타나 전체 자유유동의 질량유량의 1%에 약간 못 미치고 있다.

Figure 10에서 슬롯 A의 경우에 나타나는 재순환 질량유량이 기존의 3-슬롯판(original)에서의 경우보다는 약 6%, 재순환 질량유량이 가장 작은 슬롯 D의 경우보다는 약 38 % 정도 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 Fig. 9의 공동부 내부의 유선구조에서 관찰된 결과와 동일하며, 따라서 순환유동이 공동부에서 유출되는 첫 번째와 두 번째 슬롯의 위치가 순환유동에 크게 관여함을 알 수 있다.

3.35 간섭유동 후방 경계층 특성변화

슬롯판 형상변화가 간섭유동 후방의 두 지점(x=14.7 mm, 50 mm)에서의 경계층 특성에 미치는 영향이 수치해석 결과를 이용하여 관찰되었다. 경계층의 두께(δ), 배제두께(δ^*), 운동량두께(Θ)가 Sun & Childs[11]의 곡선적합 계산을 통하여 얻어졌으며, 그 결과가 자유유동에서의 경계층 두께 δ_0 (=1.4 mm, 위치 x=-25 mm)에 대하

여 무차원화 되어 다음 Table 1에 비교되어 있다.

Table 1에서, 대부분의 슬롯제어는 제어되지 않은 경우와 비교하여, 간섭유동 후방에서 경계층 구조가 전방의 유동박리 영향을 더 크게 받으며, 따라서 경계층의 두께 등 전체적인 경계층 특성은 슬롯제어로 인하여 향상되지 않는 것으로 나타났다.

3.36 간섭유동 후방의 전압변화

다음 Fig. 11은 다양한 슬롯형상 변화에 따른 충격파 충돌후방(x=14.7 mm)에서 수치적으로 얻어진 전압(자유유동의 전압 P_0 에 의하여 무차원화 됨)의 변화를 비교하고 있다. 이때 유동 수직 좌표(y)는 x=-25mm에서의 경계층 두께 δ_0 에 대

Table 1. Boundary-layer characteristics

x(mm)	control type	δ/δ_0	δ^*/δ_0	Θ/δ_0
14.7	no control	2.71	0.74	0.28
	3 slot	2.75	0.74	0.28
	slot A	3.06	0.91	0.33
	slot B	2.68	0.73	0.28
	slot C	3.14	0.89	0.33
	slot D	3.00	0.82	0.31
50.0	no control	5.02	0.80	0.25
	3 slot	5.85	0.88	0.27
	slot A	6.26	0.98	0.30
	slot B	5.63	0.87	0.27
	slot C	6.47	0.97	0.30
	slot D	6.17	0.93	0.29

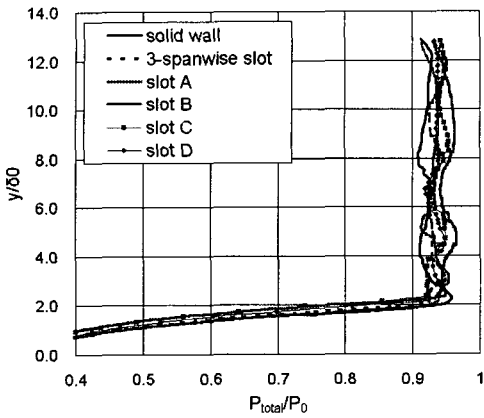


Fig. 11 Comparison of total pressures

하여 무차원화 되어 있다. 그 차이는 크지 않지만, 거의 모든 슬롯 제어방식에서 후방 유동전압은 제어되지 않은 경우(solid wall)보다 크게 나타나고 있으며, 그 중 슬롯 A의 경우에 후방전압 회복도가 가장 우수한 것으로 판명되었다.

3.3.7 간섭유동 후방의 전압회복 파라미터

Figure 11에서, 슬롯제어에 따라 간섭유동 후방 x=14.7 mm에서 나타나는 유동전압의 크기는 유동 수직방향으로 일정하지 않으므로, 유동전압의 크기를 다음 식 (1)와 같이 적분과정을 통하여 질량가중평균값으로 계산하였다. 이때 유동 수직방향으로의 적분구간은 시험부 높이의 절반인 h=18 mm까지로 설정하였다.

$$\overline{P_{total}} = \frac{\int_{y=0}^h \rho u P_{total} dy}{\int_{y=0}^h \rho u dy} \quad (1)$$

식 (1)를 통하여 얻어진 질량가중평균 전압의 크기를 자유유동 전압(P₀)에 대한 비율로 나타내기 위하여 다음 식 (2)와 같이 α가 정의되었고,

$$\alpha (\%) = \overline{P_{total}} / P_0 \times 100 \quad (2)$$

이때 정의에 의하여 α는 등엔트로피 과정에서 100 %로 나타난다. 또한 제어된 유동후방의 전압크기의 증가정도를 제어되지 않은 경우와 정량적으로 비교하기 위하여 다음 식 (3)과 같이 β

가 정의되어 다양한 슬롯 경우에 계산되었다.

$$\beta (\%) = \frac{\alpha - \alpha_{solid}}{100 - \alpha_{solid}} \times 100 \quad (3)$$

여기서 α_{solid}은 제어되지 않은 평판의 경우에 간섭유동 후방에서 계산된 α 값을 나타낸다. 따라서 제어되지 않은 평판의 경우에 β 값은 0이 되며, 평판 경우보다 유동후방 전압이 클 경우에는 양수, 작을 경우에는 음수로 나타난다.

이러한 정의에 의하여 다양한 슬롯제어 경우에 계산된 α와 β의 값이 Table 2에 나타나 있다. 그 결과 모든 슬롯제어는 x=14.7 mm 지점에서 간섭후방 유동전압의 증가를 보여주지만(β > 0), x=50 mm 지점에서는 3-폭방향 슬롯, 슬롯C와 슬롯D의 경우에 오히려 평판보다 전압의 크기가 작게 나타나고 있다(β < 0). 아울러 모든 슬롯제어에서 유동후방으로 갈수록(x=50 mm), 슬롯의 제어성능은 감소하는 것으로 나타났다. 그 크기 차이가 크지는 않지만, 간섭유동 후방전압의 크기 측면에서 제어슬롯 A의 성능이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 이는 앞서 제시한 공동부 내부의 유동구조(Fig. 9 참조) 및 공동부를 재순환하는 질량유량의 크기비교(Fig. 10 참조)와 일치하는 결과이다.

참고로, 전압분포를 현재의 질량가중평균이 아닌 면적가중평균으로 계산하였을 때에도, Table 2에 제시된 각 슬롯형상에 대한 α와 β의 값의 우열은 그대로 유지됨이 확인되었다. 따라서 슬롯

Table 2. Parameters α and β of the total pressure recovery at x=14.7, 50.0 mm

	α (%)		β (%)	
	x location		x location	
	14.7mm	50mm	14.7mm	50mm
solid wall	87.9	85.1	0	0
3-spanwise	88.3	82.4	3.59	-18.1
slot A	89.1	85.5	9.90	2.64
slot B	88.4	85.4	4.03	1.63
slot C	88.0	84.2	1.24	-6.16
slot D	88.2	84.7	3.05	-3.14

A와 같이, 첫 번째 슬롯의 위치가 제어되지 않는 간섭유동의 박리점 전방에 위치하고, 슬롯판 중앙 슬롯의 위치가 공동부 내부 재순환 유동의 재부착점에 위치할 때 간섭유동제어에 관한 순기능을 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

슬롯형상 변화에 따른 피동제어의 성능비교가 수치해석을 통하여 이루어졌으며, 다양한 슬롯형상에 대하여 공동부에서의 순환유동 효율성, 간섭유동 후방에서 전압크기 증가, 그리고 후방 경계층 특성의 개선정도 등이 관찰되었다. 특정한 슬롯형상에서 간섭유동 후방 전압증가가 관찰되었으나, 경계층 특성은 개선되지 않음이 밝혀졌다. 또한 다양한 슬롯형상에 대한 계산결과 비교에서 공동부로부터 분출유동이 발생하는 첫 번째 슬롯의 위치는 제어되지 않은 간섭유동의 박리점 전방에 위치하여야 하며, 공동부 내부 재순환 유동의 재부착점에 유출을 위한 슬롯이 위치할 때 전체적인 피동제어에 순기능을 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 슬롯의 배치는 공동부 내부 재순환 유동, 그리고 더 나아가 간섭후방 유동특성에 적지 않은 영향을 미치고 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. Settles, G. S. and Dolling, D. S., "Swept Shock Wave/Boundary-Layer Interactions," Tactical Missile Aerodynamics, Vol 104, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 1986, pp.297-379
2. Delery, J. M., "Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interaction and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 22, No. 4, 1985, pp.209-280
3. Gridley, M. C. and Walker S. H., "Advanced Aero-Engine Concepts and Controls," CP-572, AGARD, 1986
4. Bur, R., Corbel, B., and Delery, J., "Study of Passive Control in a Transonic Shock Wave/Boundary-Layer Interaction," AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, 1998, pp.394-400
5. Raghunathan, S. and Mabey, D., "Passive Shock-Wave/Boundary-Layer Control on a Wall-Mounted Model," AIAA Journal, Vol. 25, No. 2, 1987, pp.275-278
6. Lee, Y., Hafenrichter, E., Dutton, J. C., and Loth, E., "Skin Friction Measurements for Recirculating Normal Shock Boundary Layer Interaction Control," AIAA Journal, Vol. 42, No. 4, 2004, pp.806-814
7. 장성하, 이 열, "슬롯형상이 경사충격파 간섭유동의 피동제어에 미치는 영향에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 34권 12호, 2006, pp.18-24
8. McIlwain, S. T., Kim, J. Y., Breitenfeld, S., Loth, E., Geubelle, P.M. and Tortorelli, D., "Simulation of an Aeroelastic Control System for Shock/Boundary-Layer Interactions," AIAA 01-16181, 2001
9. Wood, B., Lath, E., and Geubelle, P., "Simulation of Aeroelastic Mesoflaps for Shock/Boundary-Layer Interaction," Journal of Fluids and Structures, Vol. 16, No. 8, 2002, pp.1127 - 1144
10. Jaiman, R. K., Loth, E., and Dutton, J. C., "Simulation of Normal Shock Wave/Boundary-Layer Interaction Control Using Mesoflaps," Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 2, 2004, pp.344-352
11. Sun, C. C. and Childs, M. E., "A Modified Wall Wake Velocity Profile for Turbulent Compressible Boundary Layers," Journal of Aircraft, 10, 1973