

경사충격과 간섭유동의 피동제어에 관한 수치해석적 연구

장성하* · 이 열** · 이용희***

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

Sungha Chang* · Yeol Lee** · Yonghee Lee***

ABSTRACT

Numerical study on the passive control of the oblique shock wave/turbulent boundary-layer interaction control utilizing slotted plates over a cavity has been carried out. Numerical results have been compared with the experimental observations, such as pitot/wall surface pressures and Schlieren flow visualizations, obtained for the same boundary conditions. It was found that the present numerical results shows a good agreement with experimental data. Further, the effect of different slot configurations including various number, location and angle of slots on the characteristics of the interactions are also tested, focusing on the variation of the pitot pressure and the boundary-layer characteristics downstream of the interaction and the recirculating mass flux through cavity.

초 록

공동부 위에 설치된 슬롯판을 이용한 경사충격파와 난류 경계층의 간섭유동의 피동제어에 관한 수치적 연구가 수행되었다. 얻어진 수치결과는 피토압력/벽압력 분포와 쉐리렌 유동가시화 등 동일한 경계조건에서 수행된 실험결과와 비교되었으며, 두 결과가 서로 잘 일치하고 있음이 확인되었다. 또한 슬롯의 위치와 개수, 슬롯의 각도 등 슬롯판의 다양한 형상변화가 간섭유동에 미치는 영향이 추가로 관찰되었다. 이러한 슬롯의 형상변화가 간섭유동에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여, 간섭유동 후방의 피토압력 및 전압 변화, 경계층 특성변화, 그리고 슬롯판을 통하여 공동부 내부로 유출입하는 질량유량의 변화 등이 관찰되었다.

Key Words: Shock Wave(충격파), Interactions(간섭), Slot Control (슬롯 제어), CFD(전산유체역학).

1. 서 론

초음속 비행체에서 발생하는 충격파와 경계층의 간섭현상은 비행체 효율을 크게 저하시키는 것이 일반적이다. 이에 따라 경계층에 분출/흡입 등을 적용하여 유동을 제어하는 능동제어 방식[1]과 간섭유동이 위치하는 곳 하부에 다공판과 공

* , *** 한국항공대학교 대학원

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

동부를 설치하는 피동제어 방식[2]이 많이 사용되어 왔으나, 최근 들어서 다공판 대신에 슬롯 및 공탄성 플랩 등을 적용하는 진보된 피동제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-4]. 일반적으로 이러한 간섭유동 피동제어의 특성은 유동과 관련된 다양한 파라미터 변화에 매우 민감하기 때문에, 이러한 파라미터 변화의 영향을 파악하는데 수치해석적 연구가 많이 사용되고 있다[5].

본 연구에서는 공동부 위에 설치된 슬롯판을 이용한 피동제어장치가 마하수 2.4에서 발생하는 이차원 경사충격과 간섭유동 특성에 미치는 영향을 수치계산을 통하여 분석하였다. 얻어진 수치결과는 피도압력/벽압력 분포와 유동가시화 등 동일한 경계조건에서 수행된 과거 실험결과 [6]와 비교되었다. 또한 사용된 슬롯의 위치와 개수, 그리고 슬롯의 각도 등 슬롯판의 다양한 형상변화가 간섭유동에 미치는 영향이 관찰되었다. 간섭유동에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여, 간섭유동 후방의 피도압력 및 전압 변화, 경계층 특성변화, 그리고 슬롯판을 통하여 공동부 내부로 유출입하는 질량유량의 변화 등이 관찰되었다.

2. 수치해석방법

2.1 수치계산 모델

Figure 1은 연구에 응용된 충격파 간섭유동의 개략도를 나타내고 있다. 자유유동 마하수가 2.4인 유동상부에 13°인 충격파 발생기(썰기)가 설치되어, 썰기전연에서 약 36°의 경사충격파가 발생된 후 시험부 하단의 경계층과 간섭한다. 다음 Fig. 2는 수치계산에 이용된 이차원 슬롯판과 공동부의 구조를 나타내고 있으며, 연구모델과 관련된 보다 구체적인 내용은 참고문헌 [6]에 나타나 있다.

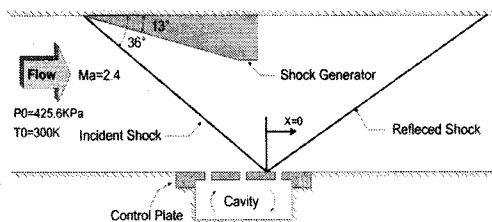


Fig. 1 Shock-interaction model.

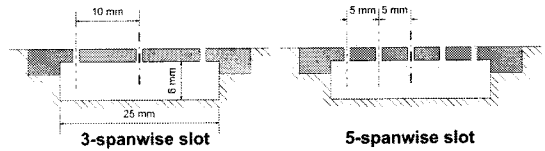


Fig. 2 Three- and five-spanwise slots.

2.2 수치기법

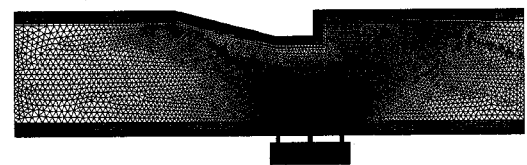
수치계산을 위하여 이차원 Navier-Stokes 코드가 사용되었으며, 수치해석을 위한 계산격자의 수는 평판의 경우는 약 30,000 개, 슬롯이 있는 경우는 최대 약 80,000 개이다. 아울러 벽면근처에는 정렬격자를, 그 밖의 영역에는 비정렬 격자를 사용하였다(Fig. 3 참조). 이때 경계층이 있는 영역의 격자를 조밀하게 구성하고, 격자하부 평판에서의 첫 번째 격자점이 $y^+ \sim 1$ 이 되도록 하였다. 또한 grid adaptation을 통하여 밀도변화를 이 큰 영역의 격자를 좀더 조밀하게 구성하였다.

난류모델은 $k-\epsilon$ 모델과 Spalart-Allmaras 모델 두 가지가 사용되어 그 결과가 서로 비교되었으며, 시간전진법, 내재적(implicit) 방법, 그리고 이산화된 방정식의 공간항들은 2차 풍상차분법을 이용하였다. 모든 계산은 계산오차가 10^{-4} 가 될 때까지 수행하였다.

이상기체 및 단열조건이 설정되었고 점성계수는 Sutherland 법칙을 이용하여 계산하였다. 또한 자유유동의 입구조건은 실험조건과 동일하도록 마하수 2.4, 전압 P_0 는 425.6 kPa, 전온은 300



(a) flat plate case with no control



(b) 3-spanwise slot case

Fig. 3 Hybrid grid system with grid adaptation.

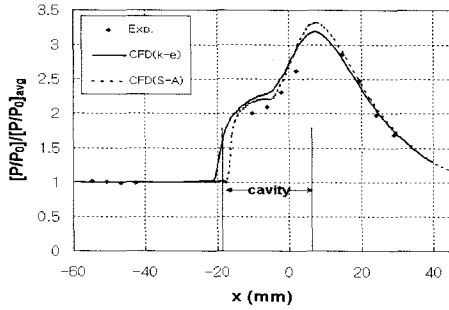


Fig. 4 Comparison of wall pressures.

K로 설정하였다. Figure. 3-(a)와 Fig. 3-(b)는 각각 간섭유동 제어가 되지 않은 평판의 경우와 3-슬롯/공동부가 설치되어 간섭유동이 제어되는 경우에서의 격자구조를 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충격파와 제어되지 않은 평판사이의 간섭유동

수치해석의 검증을 위하여 제어장치가 없는 평판의 경우에 대한 경사충격파 간섭유동의 수치해석이 수행되어, 그 결과가 시험부 중심선상 ($z=0$)에서 측정된 무차원화된 벽압력 분포와 비교되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이($x=0$ 위치는 비점성 경사충격파가 바닥에 부딪히는 지점), 수치해석은 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 서로 다른 두 가지 난류모델에 따른 수치결과는 거의 차이가 나타나지 않고 있다.

3.2 슬롯으로 제어된 간섭유동

Figure 2에 제시된 이차원 슬롯과 공동부를 이용하여 간섭유동이 제어된 경우에 수치해석이 수행되었다. 수치해석결과, 슬롯 수의 차이에 따른 제어유동의 특성변화는 매우 미미함이 관찰

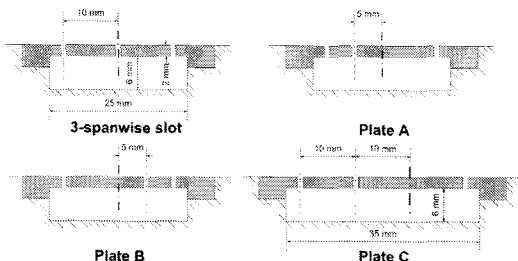


Fig. 5 Different slot locations

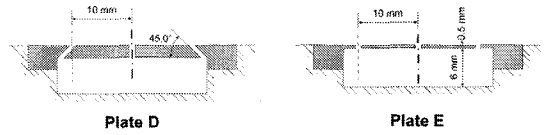


Fig. 6 Change of slot's angle and thickness

되었다. 따라서 슬롯의 수가 3개로 고정될 때 슬롯위치 변화가 간섭유동에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Figure. 5에 제시된 바와 같이 기존의 3-슬롯판의 중앙 슬롯위치를 유동전방으로 5 mm 이동시킨 슬롯판(plate A)과 유동후방으로 5 mm 이동시킨 슬롯판(plate B), 그리고 반사충격파 전방으로 크게 이동시킨 슬롯판(plate C)에 대한 수치계산이 수행되어 그 결과가 비교되었다. 또한 Fig. 6에서와 같이 슬롯의 위치는 변하지 않을 때 슬롯의 각도변화(plate D)와 슬롯의 두께변화(plate E) 영향도 비교 분석되었다.

슬롯을 통하여 분출/흡입되는 질량유량

세 개의 슬롯을 통과하여 공동부 내부에서 재순환되는 질량유량(단위 폭 당)이 위의 세 가지 슬롯판 경우에 대하여 계산되어, 그 결과가 Fig. 7에 공동부에서 유출되는(blowing) 유동은 "+"로, 공동부로 유입되는 유동은(bleeding) "-"로 표시되어 비교되고 있다. Figure 7에서 중앙슬롯이 반사충격파 전방에 위치한 경우(plate C)에 나타나는 재순환 질량유량이 기존의 3-슬롯판(original)에서의 경우보다 약 7% 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 경우에 피동제어로 인한 경계층 유출/흡입되는 효과가 최대임을 알 수 있다. 또한 중앙슬롯이 후방으로 움직인 plate B의 경우에 재순환 질량유량이 가장 작게 나타났다.

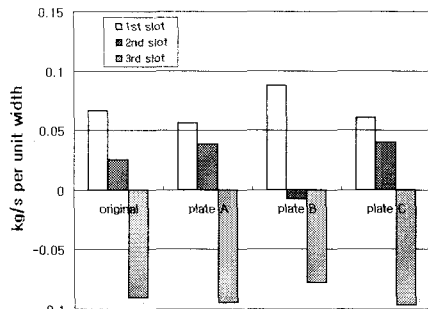


Fig. 7 Comparison of recirculation.

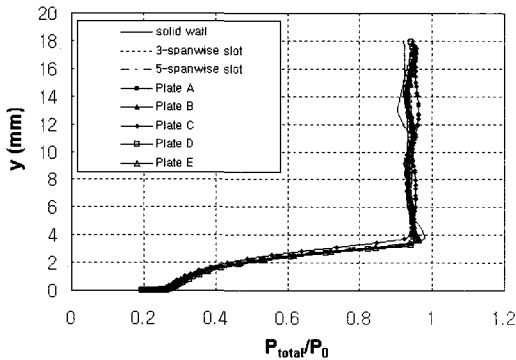


Fig. 8 Comparison of total pressures.

간섭유동 후방의 전압변화

다음 Fig. 8은 다양한 제어슬롯 형상변화에 따른 충격과 충돌후방($x=14.7$ mm)에서 수치적으로 얻어진 전압(자유유동의 전압 P_0 에 의하여 무차원화 됨)의 y 방향변화를 비교하고 있다. 차이는 작지만, 거의 모든 슬롯제어방식에서 후방 유동 전압은 제어되지 않은 경우(solid wall)보다 크게 나타나고 있으며, 그 중에서 plate C의 경우에 후방전압 회복도가 가장 우수한 것으로 판명되었다. 이는 앞서 공동부 재순환 질량유량 비교 (Fig. 7)의 내용과 일치되는 결과이다.

간섭유동 후방 경계층 특성변화

수치해석결과를 이용하여 동일한 $x=14.7$ mm에서의 경계층 특성이 관찰되었다. 주요 슬롯의 형상변화에 따른 경계층의 두께(δ), 배제두께(δ^*), 운동량두께(θ) 등이 Sun & Childs' code를 이용하여 계산되었고, 그 결과가 자유유동에서의 경계층 두께 δ_0 (at $x=-25$ mm)에 대하여 무차원화 되어 다음 Table 1에 비교되어 있다.

Table 1에서, 간섭유동 후방에서의 δ^*/δ_0 의 값이 평판 난류경계층의 경우보다 매우 크게 나타나 그곳에서의 경계층 구조가 전방의 박리영향

Table 1. Boundary-layer characteristics.

	δ/δ_0	δ^*/δ_0	θ/δ_0
solid(no control)	4.799	1.527	0.523
original 3 slots	4.899	1.583	0.533
plate A	4.879	1.650	0.530
plate C	4.636	1.431	0.501
plate D	4.527	1.388	0.491
plate E	4.715	1.494	0.517

을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 차이는 작지만, 슬롯의 각도변화를 통하여 공동부 재순환유동을 보다 부드럽게 유도할 수 있으리라 기대되는 plate D의 경우에 간섭유동 후방에서 경계층의 두께, 배제두께 및 운동량두께가 가장 작게 나타나, 후방유동의 경계층 특성이 가장 우수한 것으로 판명되었다.

4. 결 론

슬롯형상 변화에 따른 피동제어의 특성차이가 수치해석을 통하여 이루어졌으며, 그 결과 특정한 각각의 슬롯형상에 대하여 간섭유동 후방에서 전압회복 증가, 또는 경계층 특성의 개선이 관찰되었다. 따라서 향후 슬롯의 경사 및 위치변화가 조합된 개선된 제어장치에 대한 성능의 평가가 요구된다.

참고 문헌

- [1] Gridley, M. and Walker, S., "Advanced Aero-Engine Concepts and Controls," AGARD Proceedings, No. 572, 1996.
- [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] Gefroh, D., et al., "Control of an Oblique Shock /Boundary-Layer Interaction with Aeroelastic Mesoflaps," AIAA Journal, Vol. 40, No. 12, Dec. 2002, pp.2456~2466.
- [4] Smith, A. N., et al., "Shock Wave Boundary Layer Interaction Control Using Streamwise Slots in Transonic Flows," J. of Aircraft, Vol. 41, 2004, pp. 540-546.
- [5] Jaiman, R. K., et al., "Simulation of Normal Shock Boundary-Layer Interaction Control Using Mesoflaps," Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, pp. 344-352.
- [6] 장성하, 이 열, 이용희, "슬롯을 이용한 경사 충격파와 난류경계층의 간섭유동 제어," 항공우주학회 2006년도 춘계학술발표회, 2006.