# 공동형상에 따른 경사충격파와 경계층 상호작용의 피동제어 성능 비교 연구

## 김 홍 규

서울대학교 기계항공공학부

슬롯판을 이용한 경사충격파와 경계층 간섭유동 제어에서, 슬롯판 아래에 있는 공동부의 형상을 바꾸어 가며 제어 성능을 비교하는 수치적 연구가 수행되었다. 공동형상 직사각형 5개, 사다리꼴 3개를 선정하여 shock 뒤에서 경계층 안정성, 전압손실을 기준으로 제어 성능을 평가하였다. 수치해석 결과 모든 형상에 대해 제어하지 않은 상태보다 좋은 성능을 얻었다. 그 중 경계층 안정성 측면에서는 형상 L과 R, 전압손실 감소 측 면에서는 형상 M과 A가 효과적임을 확인하였고, 종합적으로 슬롯의 끝 면과 공동의 길이방향 끝 면이 일치하 는 형상에서 상대적으로 좋은 결과를 얻음을 확인했다. 또한 슬롯과 공동 내부유동을 분석하면서 경계층 안정 성과 전압손실 감소에 영향을 미치는 것은 separation 영역을 얼마 원활히 흡입하는지의 여부임을 알 수 있었 고 상류 슬롯에서 발생하는 shock에 대한 추후 해결 연구도 필요함을 알 수 있었다.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 충격파 경계층 상호작용(Shock boundary layer interaction), 피동제어(Passive control), 전압(Stagnation pressure)(Total pressure), 공동(Cavity), 슬롯(slot),

## 1. 서 론

초음속으로 운행하는 비행체의 램젯, 스크램젯 엔진에서는 경사충격파가 발생한다. 경사충격파는 난류 경계층과 상호작 용을 일으켜(그림 1)[4] 경계층 박리를 유도하고 이로 인해 전 압 손실, choking, 진동과 소음을 유발[1]하여 유동의 불안정 성을 야기하고 비행체의 성능을 저하시킨다. 이러한 충격파와 경계층의 상호작용을 제어하기 위한 방법으로 variable shape, vortex generator, bleed 등이 있다. 하지만 variable shape은 에 너지 소모가 크고 vortex generator는 core flow에 영향을 크게 미치는 단점을 가진다. Bleed의 경우 좋은 제어 성능을 보이 긴 하지만 노즐 설치를 위한 공간이 필요해 엔진의 cowl에서 사용하기 어렵다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 충격파가 입사하는 위치 주변에 공동을 만들고 그 위에 슬롯이나 다공 벽을 설치하는 피동제어 방식이 있다. 충격파 뒤쪽에 높은 압 력을 가진 기체가 슬롯이나 다공을 통해 공동부에 흡입되고 이러한 기체들은 다시 압력이 상대적으로 낮은 앞쪽으로 슬 롯이나 다공을 통해 유출(그림 2)되어 충격파의 강도가 약해 진다. 이러한 피동제어 방식은 다른 능동적인 제어 방법과는 달리 부가적인 에너지가 들지 않고 공간에 비교적 제약이 자



그림 1 충격파와 경계층 상호작용

유롭다는 장점이 있다. 이러한 피동제어 방법에서 슬롯과 다 공벽의 형상에 대한 실험적, 수치적 연구가 있어왔다. 1997년 최영상, 권순범, 조철영[1]은 다공벽의 기공률, 공동의 넓이와 깊이에 따른 제어 성능에 대한 연구를 실험적으로 수행하였 다. 또한 2006년 장성하와 이열[2]은 다양한 슬롯 형상에 따 른 제어 성능에 대한 연구를 실험적으로 수행하였고, 2007년 [3] 같은 주제에 대한 연구를 수치적으로 수행하였다. 하지만 앞선 연구들은 슬롯이나 다공벽 자체의 형상만을 다루었고 공동부 형상에 대해서는 연구되지 않았다. 따라서 본 연구에 서는 고정된 슬롯 형상에 대해 공동의 형상이 충격파와 경계 층 상호작용 제어 성능, 특히 에너지 효율 측면에서 중요한 전압 손실과 경계층 안정성을 알아보는데 목적을 두었다.



그림 2 슬롯을 이용한 피동제어 개략도

#### 2. 해석 방법

#### 2.1 수치해석 모델

경사 충격파와 경계층의 간섭유동을 발생시키기 위해 장성 하와 이열[2]의 2006년 "슬롯 형상이 경사충격파 간섭유동의 피동제어에 미치는 영향에 관한 연구"에서 사용된 초음속 풍 동 모델(Fig. 1)을 약간 변형하여 수치해석 모델로 사용하였 다. 이 때 슬롯의 개수는 3개로 하였고 일반적인 상황을 위해 상류의 슬롯은 충격파 전, 중간 슬롯은 충격파와 경계층의 상 호작용이 일어나는 지점, 하류의 슬롯은 충격파 후에 위치하 도록 하였다. 이를 위해 입사충격파(incident shock)가 공동부 의 상류로부터 약 2/3 지점에 오도록 형상을 조절해 주었고 이를 원점으로 정하였다.



그림 3 초음속 풍동 수치해석 모델

유동 조건은 풍동 입구에서 마하수 2.4가 되도록 설정하였 고 밀도와 압력, 음속은 전 처리기 eMEGA의 default 값인 1, 0.736, 1로 설정하였다. 또한 Reynolds number는 장성하와 이 열[2]의 실험적 연구에서 사용한 단위 길이 당 5.7×10<sup>7</sup>이 되도록 1.96×10<sup>6</sup>으로 설정하였다. 유동 해석은 정렬격자 기반 2차원 압축성 유동 범용 해석 SW(3.0 version)을 이용하 였고, steady, Turbulent flow로 최대 iteration 횟수 10000, 오차 범위 1.0E-5, CFL number 1로 설정하여 수행하였다. 이 때 flux scheme은 RoeM flux 사용하였고 2차 정확도를 위해 Van Albada limiter를 사용하였다. 또 시간 전진 기법으로는 LU-SGS method, 난류 모델로는 Menter s k-omega 2-equation turbulent model을 적용하여 유동을 해석하였다.

#### 2.2 공동 형상

최영상과 권순범, 조철영의 "다공벽을 이용한 충격파 강도 의 피동제어"[1] 논문에 의하면 공동내부의 면적(2차원 상에 서)이 커질수록 공동 내부의 유동저항이 작아져 충격파 전후 로 슬롯을 통해 분출과 흡입이 원활하게 이루어지고 이로 인 해 충격파의 강도가 낮아진다고 하였다. 따라서 공동 형상이 제어 성능(전압 손실 감소, 경계층 안정성 증가)에 미치는 영 향을 알아보기 위해서 면적이 같고 가로 세로가 다른 직사각 형 모양의 공동 5개를 비교하였고, 공동 내부의 꺾임에 따른 제어성능을 알아 보기위해 면적이 같고 높이가 다른 3개의 사다리꼴 모양의 공동을 비교하였다. 또한 제어부분을 설치하 지 않은 baseline에 대해서도 해석을 하여 제어성능 비교 지표 로 삼았다. 그림 3은 직사각형 공동형상 A와 사다리꼴 공동 형상을 나타낸 그림이고, 표 2는 직사각형 공동형상 5개의 길 이(L)와 깊이(H)를 나타낸 값이다. 사다리꼴 공동 형상은 오 른쪽 위를 L 왼쪽아래를 M, 오른쪽 아래를 R로 정하였다.



그림 4 공동 형상

표 2 직사각형 공동 형상

직사각형 공동형상	L (mm)	H (mm)
А	23	6
В	24.75	5.58
С	26.5	5.21
D	28.25	4.88
E	30	4.6

모든 공동은 슬롯의 위치에 따른 제어성능의 변화를 없애 기 위해 깊이가 2mm, 폭이 1mm인 3개의 슬롯을 가지고 상류 와 하류의 슬롯의 거리는 22mm로 고정하였다.

#### 2.3 격자 설정



그림 5 초음속 풍동 격자와 multi-block

격자 개수는 약 190,000~210,000 개로 구성하였고 효율적인 계산을 위해 8~10개의 multi-block으로 나누어 계산하였다. 이 때 풍동 입구의 높이(35mm)가 특성길이 1이 되도록 모든 길 이를 무차원화 하였고, spacing은 0.1을 기준으로 하였을 때 난류 경계층을 정확히 모사하기 위해 벽면에서 1.0E-5의 수준 으로, 꺾이는 지점에서는 1.0E-4의 수준이 되도록 설정하였다. 또한 상대적으로 입구와 출구에 비해 충격파와 경계층이 상 호작용을 일으키는 공동 주변부에 격자를 조밀하게 만들어 주었다.

#### 3. 결과 해석

#### 3.1 경계층 안정성 비교

충격파와 경계층 상호작용이 일어난 이후의 경계층 안정 성을 보기 위해 모든 공동 형상에 대해 원점기준 14mm 떨어 진 지점에서 무차원화 된 경계층을 구하였고 이를 서로 비교 하여 공동 형상에 따른 제어 성능을 판별하였다. 경계층의 안 정성은 박리가 일어나지 않아야 높은데 이러한 수준은 shape factor(H)(식 (1))를 이용해 확인할 수 있다. 일반적으로 shape factor가 클수록 경계층은 더 박리하기 쉽기 때문에 shape factor가 낮을수록 더 안정한 경계층이라고 할 수 있다.



그림 6 Shape factor와 난류 경계층[5]  $H = \frac{\delta_1}{\delta_2} \left( \delta_1 : 변위두께, \delta_2 : 운동량두께 \right) (1)$ 

그림 6[5]은 난류 경계층의 모양과 shape factor의 관계를 나타내는데 shape factor가 낮을수록 경계층이 벽면에 더 부착 되어있는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 수치해석 결과를 이용해 공동형상에 따른 경계층을 나타낸 것이다. 이 때, 수치해석 모델에서 35mm를 특성길이 1로 무차원화 하였으므로 y=0.055 는 실제 1.925mm를 의미하고 이는 수치모델을 참고한 참고문



그림 7 공동형상에 따는 경계층 헌[3]에서의 경계층 두께 1.4mm 와도 비슷한 결과이다. 따라 서 그림 6을 수치해석 결과에 적용해 보면 공동형상 중 L과

R이 충격파 이후 경계층 안정성 측면에서 가장 뛰어나고 B 와 E가 가장 좋지 않을 경계층 특성을 보인다고 할 수 있다. 또한 모든 공동형상에 대해 baseline보다 shape factor가 높으므 로 슬롯을 이용해 제어를 했을 때 제어를 하지 않았을 때 (baseline)보다 충격파, 경계층 상호작용 뒤에서 경계층 안정성 이 높아진다고 볼 수 있다.



그림 8 R 공동형상 내부 유동



그림 9 L 공동형상 내부 유동



그림 10 B 공동형상 내부 유동



그림 11 E 공동형상 내부 유동

그림 8과 9는 공동형상 R과 L의 내부유동을, 그림 10과 11 은 공동형상 E와 B를 나타낸 것이다. R, L과 B, E의 차이점 을 살펴보면 경계층 안정성이 높은 R과 L에서는 2번째 슬롯 에서 흡입을 하여 공동 내부로 유동이 흘러들어오는 반면 B 와 E에서는 2번째 슬롯의 통로가 순환유동에 의해 거의 막혀 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 R과 L의 형상이 B와 E의 형 상보다 separation 영역의 유동을 2번째 슬롯을 통해 더 잘 흡 입하여 충격파, 경계층 상호작용을 줄여줄 수 있기 때문에 하 류의 경계층의 안정성이 상대적으로 높아지게 된다.

#### 3.2 전압(total pressure) 손실 비교

전압을 측정할 때 반사충격파의 영향과 공동부 형상의 영 향을 뚜렷이 보기 위해 원점기준 14mm 떨어진 지점에서 수 직방향으로 100개의 점의 각 압력과 마하수를 이용해 전압을 계산하였다. 이 때 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{\gamma/(\gamma - 1)} \left(\gamma = 1.4\right) \tag{1}$$

또한 전압 손실을 알아보기 위해 풍동 입구에서의 전압 으로 무차원화 하여 계산한 후 측정된 점들을 이용해 면적가 중으로 적분하여 전압을 비교하였다. 또한 전압 손실을 알아 보기 위한 파라미터로 다음 값을 사용하였다.

$$\alpha = 100(1 - \int_{0}^{1} P_{0}/P_{0i}dy) \ (P_{0i} \succeq 입구 전 입)(\%)$$
(2)

이를 이용해 원점에서 하류로 14mm 지점의 전압과 전압

손실 파라미터를 구해보면 다음과 같다.

공동형상	전압손실(%)	전압손실 감소(%)
А	21.35	1.71
В	21.99	1.07
С	21.71	1.35
D	21.76	1.31
E	21.82	1.24
М	21.55	1.52
L	21.67	1.40
R	21.74	1.33
Baseline	23.06	0.00

표 3 공동형상과 전압손실



그림 12 공동형상과 x=14mm에서 전압

그림 12와 표 3을 보면 모든 공동형상에 대해 제어를 하 지 않았을 때(baseline)보다 전압손실이 줄어든 것을 볼 수 있 다. 또한 제어를 하지 않았을 때와 제어를 했을 때 가장 큰 전압손실의 차이는 1.71% 이고, 공동 형상끼리 가장 큰 전압 손실의 차이는 0.64% 이므로 공동의 형상이 전압손실 감소 제어를 하는데 영향력이 있음을 알 수 있다. 표 3에서, 공동 형상 A와 M에서 전압손실 감소가 1.71, 1.52%로 크게 나타났 고 B와 E가 각각 1.07, 1.24%로 가장 좋지 못한 성능을 보였 다.

- 94 -



그림 13 공동형상 A 내부 유동



그림 14 공동형상 M 내부 유동

그림 13과 14는 공동형상 A와 M의 내부 유동을 나타낸 것이다. 경계층 안정성과 마찬가지로 A와 M도 두 번째 슬롯 이 위치하는 지점 즉, separation이 발생하는 부분에서 흡입이 활발히 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. Separation 영역에 서 이루어지는 흡입은 충격과, 경계층 상호작용을 줄일 수 있 게 되고 이로 인해 전압손실이 줄어들었다. 반면 그림 10과 11에서 볼 수 있듯이 공동형상 B와 E의 경우는 separation영 역의 흡입이 원활하지 못해 제어가 효과적으로 되지 않아 상 대적으로 작은 전압손실의 감소만 있었다.

#### 3.2 종합적 해석

앞서 살펴본 경계층 안정성과 전압손실 감소를 고려해 보 있을 때 가장 효과적인 공동형상은 A, M, L, R임을 알 수 있다. L과 R은 경계층 안정성에서 좋은 결과를 보여주었고 전압손실 감소 측면에서도 평균이상의 결과를 보여주었다. 또한 A와 M을 사용하여 제어할 경우 전압손실을 줄이는데 다른 공동형상보다 효과적이었고, 경계층 안정성 측면에서도 L과 R 다음으로 높은 shape factor를 가졌다. 이 네 가지 효과 적인 공동형상 A, M, L, R은 그림 8, 9, 13, 14를 보면 모두 공동 길이의 끝이 슬롯의 끝과 일치한다는 것을 알 수 있고, 그림 11과 12를 보면 상대적으로 좋지 못한 결과를 낸 B와 E 는 공동 길이의 끝과 슬롯의 끝이 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 슬롯의 끝보다 공동이 더 긴 경우 남은 공간에서 그림 11의 오른쪽 끝과 같이 circulation 영역이 생기 게 되고 steady 상태에서 이러한 circulation의 회전이 유지되 기 위해 흡입되는 유동으로부터 운동량을 받아야 하므로 공 동 내부의 유동이 방해를 받기 때문이라고 생각된다.

공동을 이용한 제어도 단점이 존재한다. 그 중 하나가 앞 부분 슬롯을 통해 유동이 분출될 때, 분출된 유동이 separation과 같은 역할을 하여 슬롯부분에서 shock이 발생하 는 것이다. 제어를 하지 않은 그림 15와 공동을 이용한 피동 제어를 했을 때 그림 16을 비교해 보면 첫 번째 슬롯에서 shock이 발생한 것을 볼 수 있다. 이번 연구에서는 큰 문제가 되지 않았지만 유동의 분출이 심하거나 민감한 기계장치에 쓰이게 되면 슬롯에서 발생하는 shock이 문제를 일으킬 것으 로 생각된다.



그림 15 Baseline 충격파 경계층 상호작용





#### 4.결 론

본 연구에서는 경사충격파와 경계층의 상호작용으로 인한 유동의 불안정성을 제어하기 위해 공동을 이용한 피동제어 방식에서, 공동의 형상을 바꾸어 가며 경계층 안정성과 전압 손실 감소를 기준으로 효과적인 형상을 찾았다. 본 연구에서 선정한 공동형상 8가지에 대해 경계층 안정성, 전압손실 감소 에 있어서 모두 제어하지 않았을 때(baseline)보다 좋은 성능 을 얻었다. 또한 이번 연구를 통해 성능 평가의 지표였던 경 계층 안정성과 전압손실 감소는 충격파와 경계층 상호작용으 로 인한 separation영역의 유동이 슬롯을 통해 공동으로 원활 하게 흡입될 때 제어가 효과적인 것을 알 수 있었다. 그리고 경계층 안정성과 전압손실 감소의 수치해석 결과를 고려해 보았을 때, 같은 면적을 가진 공동형상에 대해 공동의 양쪽 길이방향 끝 면이 슬롯 끝 면과 서로 일치할 때 상대적으로 그렇지 않을 때 보다 제어가 효과적임을 알 수 있었다. 마지 막으로 공동을 이용한 피동제어에서 상류의 슬롯에서 shock이 생기는 단점은 상황에 따라 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각되므로 이에 대한 추후 연구가 필요하다.

# 후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한 국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받 아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

#### References

- [1] 1997, 최영상, 권순범, 조철영, "다공벽을 이용한 충격과 강도의 피동제어," 대한기계학회 논문집 B권, 21(1), 174-184
- [2] 2006, 장성하, 이열, "슬롯 형상이 경시충격과 간섭유동의 피동제어에 미치는 영향에 관한 연구," 한국항공우주학회 지, 34(12), 18-24
- [3] 2007, 장성하, 이열, "경사충격파 간섭유동의 피동제어에 관한 수치해석적 연구," 한국추진공학회지 11권, 2호, 18-25
- [4] 2011, Suman Muppidi,, "DNS of Unsteady Shock Boundary Layer Interaction," AIAA 2011-724
- [5] 2011, Frank M. White, "Fluid Mechanics 7<sup>th</sup> ed.," McGraw-Hill, Singapore