

EDISON을 이용한 Compression Corner에서의 Supersonic Flow의 예측

Prediction of Supersonic Flow over Compression Corner using EDISON

이윤우^{1*}, 전상언¹, 박수형¹

건국대학교 항공우주정보시스템공학과¹

초 록

본 연구는 2차원 Compression Corner에서의 초음속 유동의 특성에 관한 수치적 해석을 목적으로 한다. 고속 유동에 관한 연구에 따르면 Compression corner에서 Peak pressure와 Recirculation region이 Flow velocity와 Corner angle에 의하여 크게 영향을 받는다는 것을 알게 되었다. 지정된 Mach number에서 Corner angle을 8°~24°로 변화시켜 가면서 Supersonic flow에서 유동해석을 하였다. EDISON을 사용한 Compression Corner 유동해석 결과를 건국대학교 In-house code 'k-flow'를 이용한 결과, 실험 결과와 비교분석하였다.

Key Words : 충격파 (Shock wave), 초음속 유동(Supersonic flow), Compression corner, k-flow

1. 서 론

경계층 박리와 충격파 상호작용을 다루는 가장 기본적인 문제 중의 하나로 compression corner 문제가 오래전부터 다루어져 왔다. Fig. 1은 이러한 형태의 문제에서 일어나는 유동현상을 표현한 그림이다. 평판을 타고오던 유동이 램프(ramp)를 만나면서 역압력 구배로 인한 박리가 발생하게 된다. 이 박리 거품의 효과로 인하여 corner보다 앞쪽에서 압축 팬(compression fan) 현상이 발생하고 이후 박리 거품이 끝나는 지점에서 다시 압축 팬이 나타난다. 이로 인해 비점성 가정에서 예측 할 수 있는 corner에서 일어나는 단일 경사 충격파와는 유동의 형태 및 압력변화 등이 확연한 차이를 보인다. 이러한 형태의 문제의 접근에 있어 유입류 경계층의 상태, 박리의 크기 등이 고려해야할 사항이다. 그에 따른 결과는 벽면에서의 압력 변화나 마찰 계수 등으로 확인할 수 있다.

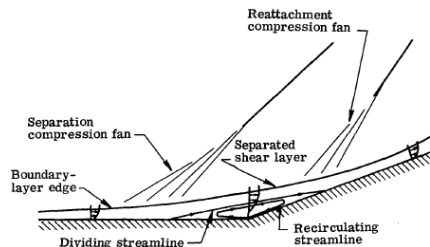


Fig. 1. Compression corner 유동 현상의 간략도

2. 본 론

2.1 유동 조건

경계층 박리 및 충격파의 상호작용에 관한 실험 및 전산 해석 결과는 이미 오래전부터 다양한 방법으로 시도 되었고 따라서 그 데이터 또한 가장 방대한 편이다. 이에 본 연구에서도 코드의 검증에 위해

Table 1. Compression corner 유입류 정보⁽²⁾

Ramp	8°	16°	24°
M	2.87	2.85	2.84
δ (mm)	26	26	23
Re/L(m ⁻¹)	60.8x10 ⁶	65.6x10 ⁶	68.3x10 ⁶

1단 압축성 램프에 대한 전산 해석을 수행하고 그 결과를 실험값과 비교하였다. 이때 사용한 실험의 데이터는 오래전부터 많은 검증 사례로 사용된 Settles⁽¹⁾의 풍동 실험이다.

해석에 사용한 유동 조건과 격자는 다음과 같다. Settles⁽¹⁾에서 제시한 램프의 각도는 8°, 16°, 24°의 총 세 가지 경우가 있고 각각의 유입류 조건은 참고문헌⁽²⁾에 정리되어 있는 조건을 활용하였다. 이때의 조건을 Table. 1에 정리하였다.

2.2 평판에서 경계층의 형성 해석

Settles⁽¹⁾의 풍동 실험과 해석 결과를 비교하기 위해서는 램프의 0.15m 앞쪽에서 정해진 경계층 두께 (δ)를 형성하여야 한다. EDSION에서는 유입류의 조건을 Mach number만 입력할 수 있기 때문에 주어진 경계층 두께를 형성할 수 있도록 램프의 앞부분에 일정 길이의 평판을 연결하는 방법을 이용해야 한다. 램프의 각도별 실험 조건이 다르고, EDISON(Menter k- ω SST Turbulent model)과 k-flow(Spalart-Allmaras Turbulent model)의 난류 모델이 다르기 때문에 총 여섯 가지 경우에 따라서 평판에서 경계층이 생성되는 것을 해석하였다. 경계층-충격과 상호작용의 문제 해석에서는 경계층의 형성이 중요하기 때문에 모든 경우 벽면에서 첫 번째 Cell 까지 간격은 2e⁻⁶으로 설정하였다. 해석을 통해 여섯 가지 경우별로 주어진 경계층 두께를 형성하는 평판의 길이를 Table. 2에 정리하였다.

평판의 길이를 살펴보면 여섯 가지 경우에 따라서 값이 모두 다른 것을 알 수 있다. 8°와 16°의 경우 주어진 경계층 두께가 같은데 계산을 따로 수행하였다. 계산을 따로 수행한 이유는 램프의 각도에 따라 전체적인 격자의 형태가 달라지기 때문이다. 그 결과 난류 모델, 격자의 형태에 따라 평판의 길이에 차이가 발생함을 알 수 있다. 이 과정에서 얻은 평판의 길이를 램프를 포함한 전체 격자에 적용하였다.

2.3 Ramp 형상 해석

Table 1, 2의 조건을 바탕으로 램프 각도에 따라서 계산을 수행하였다. 격자수, Solver, 벽면조건은 Table 3에 나타내었다. 해석한 결과를 박리의 생성위치와 크기, 압력계수, 마찰계수를 각도에 따라 비교하였다.

Table 2. 경계층 두께를 형성하는 평판의 길이

Ramp	δ (mm)	평판의 길이	
8°	26	EDISON	5.42
		k-flow	2.9
16°	26	EDISON	3.54
		k-flow	2.81
24°	23	EDISON	3.17
		k-flow	2.25

Table 3. 계산 조건

		8°	16°	24°
격자수		211*173	231*173	221*173
First cell distance		2e ⁻⁶		
Solver	EDISON	2-D Comp - Turbulent (Menter k- ω SST)		
	k-flow	Turbulent(Spalart-Allmaras)		
벽면 조건	출/입구	Supersonic Inlet/Outlet		
	평판, 램프	Viscous Adiabatic Wall		
	외곽	Far-field		

2.3.1 램프 각도 8°

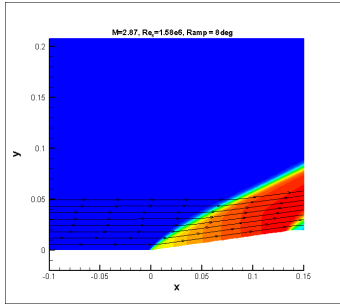


Fig. 2. 압력 분포(8°) EDISON

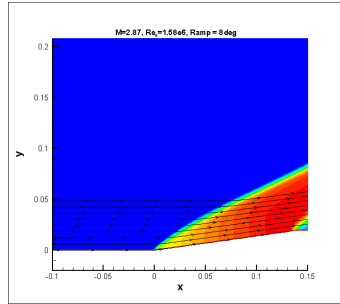


Fig. 3. 압력 분포(8°) k-flow

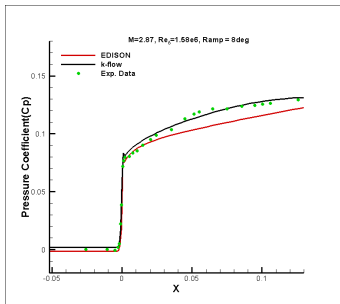


Fig. 4. 압력 계수(8°)

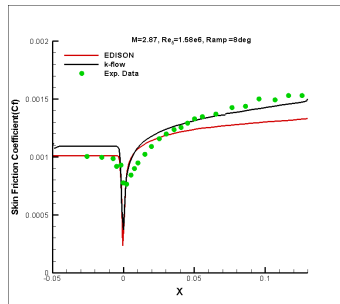


Fig. 5. 표면 마찰 계수(8°)

Fig. 4, 5는 램프각 8°인 경우의 벽면 압력 계수와 표면 마찰 계수를 나타낸 것이다. Fig 4를 살펴보면 램프가 시작 되는 지점에서 압력 상승을 보이고 있다. 이는 램프가 시작 되는 지점에서 충격파가 생성 되었다는 것을 의미한다. Fig. 5를 살펴보면 박리가 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 벽면 압력에서는 난류모델에 따른 차이를 찾아 보기 힘들지만 마찰 계수의 경우에는 그 차이가 존재하고 있다.

2.3.2 램프 각도 16°

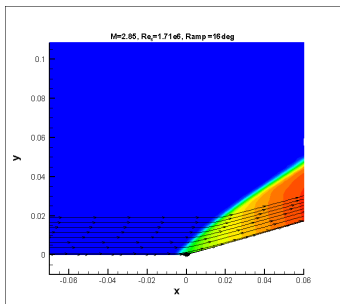


Fig. 6. 압력 분포(16°) EDISON

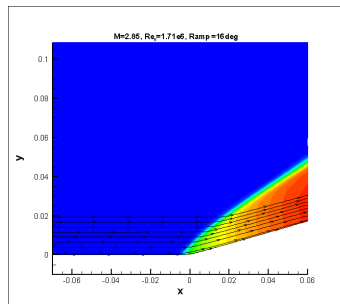


Fig. 7. 압력 분포(16°) k-flow

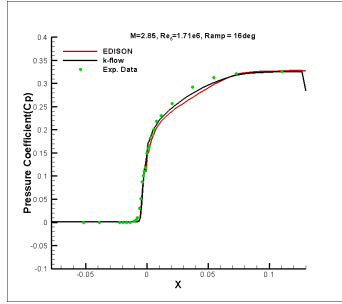


Fig. 8. 압력 계수(16°)

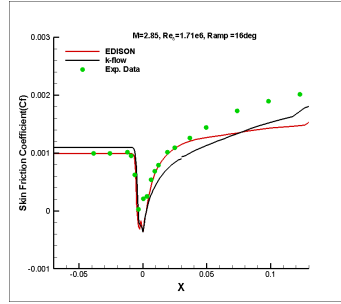


Fig. 9. 표면 마찰 계수(16°)

램프의 각도가 16°로 증가한 경우를 살펴보자. Fig. 8은 벽면 압력 계수로 두 난류 모델간의 차이가 발생하고 있으며 이는 Fig. 9의 마찰 계수 그래프에서 그 이유를 찾아 볼 수 있다. 마찰 계수 그래프 상에서 램프각의 증가로 인해 박리가 형성 된 것을 확인할 수 있으며 EDISON의 경우 k-flow 보다 박리의 크기를 약간 더 크게 예측하고 있다. 충격파의 생성 위치가 달라졌기 때문에 압력 계수 그래프 상에서 EDISON의 경우가 보다 약간 앞쪽에서 압력의 상승이 이루어진다. Fig. 6과 Fig. 7은 두 난류 모델의 압력 contour를 나타낸 것이다. 그림에서 박리의 크기가 매우 작지만 존재하고 있음을 다시 확인 할 수 있으며 k-flow의 경우에는 EDISON보다 더 작은 크기의 박리가 발생하였기에 같은 크기의 그림에서는 박리를 관찰하기 힘들다.

2.3.3 램프 각도 24°

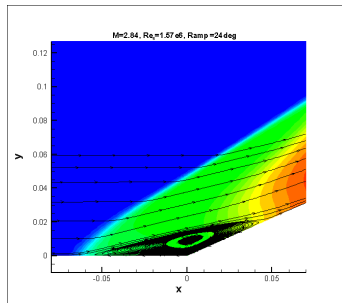


Fig. 10. 압력 분포(24°) EDISON

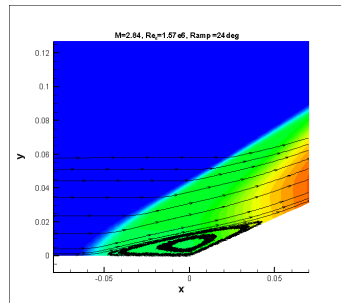


Fig. 11. 압력 분포(24°) k-flow

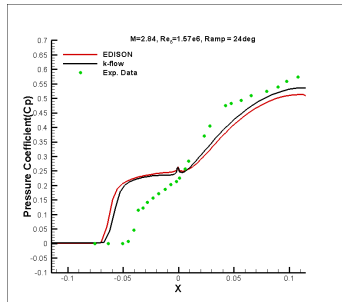


Fig. 12. 압력 계수(24°)

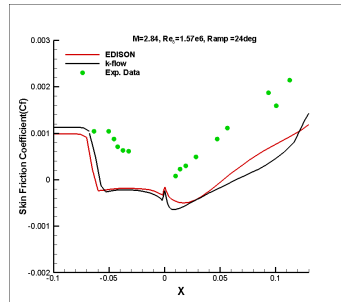


Fig. 13. 표면 마찰 계수(24°)

램프각 24°는 실험 결과 중 박리가 가장 큰 경우로 다른 경우들에 비해서 박리의 효과를 가장 뚜렷하게 확인할 수 있다. Fig. 12, Fig. 13은 24°의 압력 계수, 표면 마찰 계수를 나타낸 것으로 이전 결과들에 비해 박리의 크기가 가장 크며 충격파의 위치 또한 가장 앞쪽에서 생성 되고 있다. Fig. 10, Fig. 11의 contour가 이 결과를 뒷받침 해주

고 있다. 하지만 실험값과 비교를 하면 24°의 경우 박리 생성 시작점이 8°, 16°에서의 결과와 다르게 큰 차이를 보이는 것을 볼 수 있다.

2.3.4 전체 현상 해석

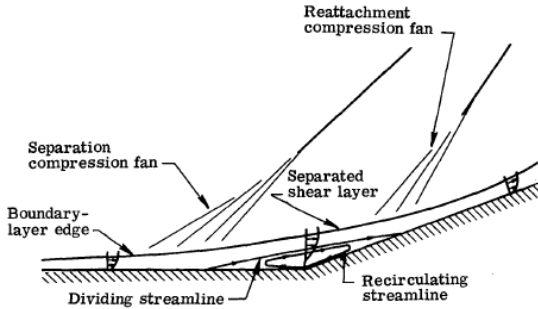


Fig. 1 Compression corner 유동 현상의 간략도

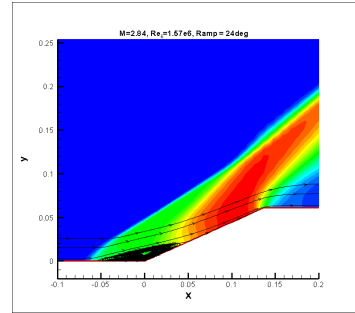


Fig. 14 압력 분포(24°)

Fig. 14는 앞의 Fig. 10의 전체적인 모습을 나타낸 그림이며 좌측의 Fig. 1은 서론에서 설명한 compression corner에서 발생하는 물리적인 현상을 설명하는 개략도이다. 램프의 각도가 일정 이상 증가하여 박리가 어느 이상의 크기로 자라면 박리의 시작점 쪽으로 1차 충격파가 이동하며 박리가 재부착 되는 지점에서 2차 충격파가 발생한다. Fig. 14에서 이러한 기본적인 물리적 현상들이 잘 나타나 있는 것을 확인할 수 있다. 박리 재부착 이후의 2차 충격파는 램프의 각도가 작아서 박리의 크기가 작은 경우에는 그 위치가 뚜렷하게 구별 되지 않으나 박리가 일정 이상 크기로 커진 이후에는 이러한 현상이 나타나기 시작하는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 경계층 박리와 충격파 상호작용에 관련된 배경지식과 EDISON, k-flow를 이용하여 compression corner 문제 해석을 시도하였다. 오랜 동안 경계층 박리와 충격파 상호작용에 참고문헌으로 사용된 Settles⁽¹⁾의 풍동 실험에 기초해 유동 조건과 램프 모델을 결정하였고, 유동 조건에 적합한 경계층 두께(δ)의 생성을 위하여 경우에 따라 평판 해석을 수행하였다. 이후 EDISON, k-flow에서 각기 다른 난류모델을 사용하여 얻은 결과를 실험 결과와 비교 해석하였다. 벽면 압력계수와 표면 마찰계수를 통하여 박리의 생성 시작점과 크기를 예측할 수 있었으며 압력 contour를 통하여 예측 결과를 확인할 수 있었다. 향후 실험 시 국부적 데이터가 아닌 전역적인 데이터를 획득하고 CFD해석에서 좀 더 적합한 난류모델과 유입류 조건을 입력한다면, 실험과 CFD결과에서 발생된 차이를 줄여 정확한 유동해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 EDISON 중앙센터와 열유체 전문센터의 지원을 받아 수행되었고, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Settles, G. S, I. E. Vas,t and S. M. Bogdonoff, 1979, "Detailed study of attached and separated compression corner flowfields in high Reynolds number supersonic flow," AIAA Journal, Vol.17, No.78, pp.579-585.
- (2) Oliver, A. B , R. P. Lillard, A. M. Schwing, G. A. Blaisdell and A. S. Lyrintzis., 2007, "Assessment of turbulent shock-boundary layer interaction computations using the

OVERFLOW code," 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting; 8-12 Jan. Reno, NV. United States.