

3차원 초음속 제트의 유동 및 소음 해석 Numerical Analysis of Three Dimensional Supersonic Jet

이인철, 이덕주

In Cheol Lee, and Duck Joo Lee

한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

(발표자 연락처 : essence@acoustic.kaist.ac.kr)

ABSTRACT When a launcher takes off, the jet flow generates some noise. In particular jet noise that propagates upstream can cause serious damage to equipment in the launcher and to the launcher itself. Thus an analysis of jet noise is very important in establishing the conditions for a safe launch. To reproduce supersonic jet flow and noise, a fourth-order optimized compact scheme and fourth-order Runge-Kutta method are used to solve the 3D unsteady Euler equation. First, the pulse jet problem is calculated and compared with experimental and other numerical results. And the flow field of the jet Mach number 1.76 is calculated and the pressure signal with respect to time is compared with other result. The agreement with other results means that the present method can simulate the three dimensional supersonic jet correctly. The pressure contour of the jet Mach number 1.43 is obtained and the result shows present method can simulate supersonic jet noise numerically.

Keyword : Computational aeroacoustics, Supersonic jet, Screech tone,

1. 서 론

발사체 설계, 제작에 있어 추진력을 얻게 하는 제트에 대한 해석은 매우 중요하다. 고온, 고압의 연소실에서 방출되는 제트는 충격파와 유동박리 등 복잡한 유동현상을 일으키며 130dB이상의 강력한 소음을 일으킨다. 발사 초기에 제트에서 발생하는 고주파 소음은 연소실 내부에 공명을 일으키며 연소 불안정성을 야기시키므로 제트소음의 정확한 특성 파악은 발사체의 초기 안정성 확보에 반드시 필요하다고 할 수 있다. 또한, 제트 소음은 발사체 구조물 및 탑재 장비에 영향을 주며 심한 경우는 파손시킬 수도 있다. 초음속 제트에 의한 충격 소음, 난류 혼합 소음 등은 발사체 표면에 음향 하중으로 작용하게 되고 이는 발사체 내부로 전파되어 전자장비 및 탑재물의 파괴를 일으킬 수 있다. 따라서 제트 특성 소음 해석을 통하여 이를 방지할 수 있는 방안을 모색할 수 있다.

본 연구에서는 3차원 초음속 제트를 해석하였다. 이를 위해 고차, 고해상도 수치 해석 기법을 이용하여 프로그램을 개발하고 검증하였으며 그 결과를 축대칭 초음속 제트 해석 결과와 비교하여 보았다.

2. 지배 방정식과 수치 기법

본 연구에서는 3차원 Euler 방정식을 해석함으로써 3차원 효과를 고려할 수 있게 되었다. 3차원 Euler 방정식

을 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} = 0$$

$$\hat{Q} = \frac{Q}{J}$$

$$\hat{E} = \frac{1}{J} (\xi_x E + \xi_y F + \xi_z G)$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} (\eta_x E + \eta_y F + \eta_z G)$$

$$\hat{G} = \frac{1}{J} (\zeta_x E + \zeta_y F + \zeta_z G)$$

여기서 J는 아래와 같이 정의 된다.

$$J = \frac{1}{x_\xi(y_\eta z_\zeta - y_\zeta z_\eta) + x_\eta(y_\zeta z_\xi - y_\xi z_\zeta) + x_\zeta(y_\xi z_\eta - y_\eta z_\xi)}$$

일반적인 유동 해석 프로그램은 과도한 수치적 확산 예러로 보통 유동의 1/10000 정도의 스케일을 가지는 acoustic wave를 잘 포착하기 힘들고, 하나의 파형을 잡기 위해 많은 격자를 필요로 한다.

그러므로 수치적 오차가 적고, 적은 수의 그리드로 파동을 잘 포착할 수 있는 고차-고해상도의 수치기법이 필요하다. 그러므로 제트에서 발생하는 소음을 모사하기 위해서는, 유동장과 소음장을 동시에 해석할 수 있도록 고차의 정확도와 고해상도를 갖는 CAA(computational aeroacoustics) 수치기법을 이용하여야 한다.

본 연구에서는 소음 해석을 위해, 본 연구실에서 자체적으로 개발된, 고차-고해상도의 수치기법인 OHOC (Optimized High-Order Compact) 공간차분법[1]과 LDDRK (Low Dissipation and Dispersion Runge-Kutta) 시간적분법을 사용한다. 그리고 경계에서의 음파의 비물리적 반사를 줄이고, 정확한 계산을 위한 특성치 경계조건(characteristic boundary condition)[2], 계산의 수치적 안정성을 위한 인공점성항인 ANAD(Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation) 모델[3] 등을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

3. 수치 해석 결과

3.1. Pulsejet 문제를 통한 검증

3차원 Euler 방정식모사를 위한 수치해석 프로그램 검증하기 위해 1999년 R. Ishii et al.이 수행한 pulse 제트 [4]에 대한 실험과 수치적 해석을 기준으로 하여 새로이 해석을 해보았다.

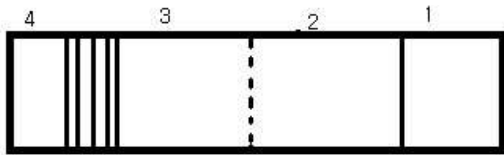


그림 1 shock tube 문제

실험은 shock tube에서 압력비에 따라 조건을 달리한 뒤 shock tube를 터뜨리고 난 후에 발생하는 pulse jet의 시간에 따른 진행과정을 측정하는 것이다. R. Ishii et al.은 실험 이외에도 TVD Scheme을 이용하여 같은 조건에서 해석을 수행하기도 하였다. 실험 조건은 그림 1에 나타나 있다. 이 그림은 shock tube가 터지고 나서의 모습을 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험 조건은 1영역과 4영역의 압력비로 나타내었다. 먼저 살펴본 결과는 압력비 $p_4/p_1=8.7$ 인 경우이다.

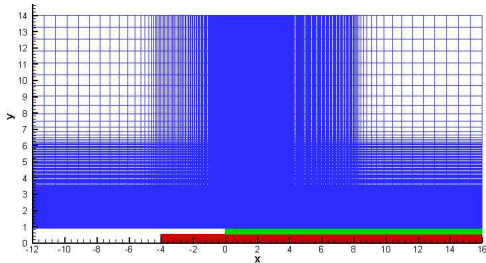


그림 2 pulse jet을 위한 격자계 구성

사용한 격자계를 그림 2에 나타내었다. 격자계는 Block1, Block2, Bloc3 총 3부분으로 나누어져 있다. 2

차원 격자계에서 격자계 수는 약 6만 3천개이고 θ 방향으로 360도를 20개로 나누었기 때문에 3차원 해석을 위한 총 격자계는 약 126만 개이다. 최소 격자계의 간격은 노즐 출구 근방에서 $x/D=y/D=0.02$ 이다.

시간에 따른 밀도 contour를 아래에 나타내어 보았다. 그림에서 위쪽은 이전에 수행하였던 축대칭 해석의 결과[5], 아래쪽은 3차원 해석의 결과이다.

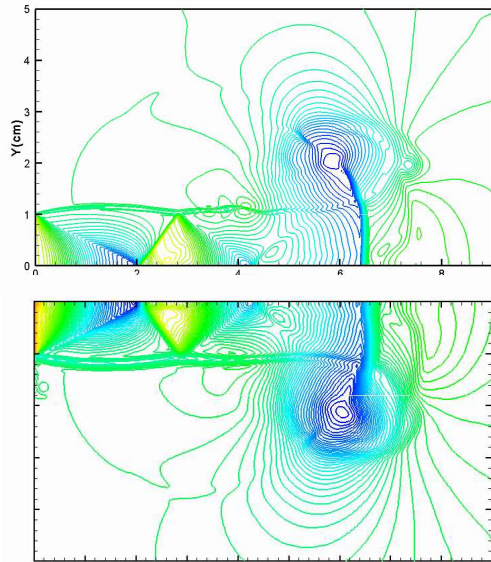


그림 3 순간적인 밀도 contour 1 ($t=351\mu s$)

위의 그림 3에서 알 수 있듯이 3차원 해석의 결과가 이전의 축대칭 해석 결과와 잘 일치한다. 실험과의 결과 비교를 위해 압력비 $p_4/p_1=11.8$ 인 경우에 대해 3차원 해석 결과를 실험 결과와 비교해 보았다. 격자계는 이전과 같은 격자계를 사용하였다.

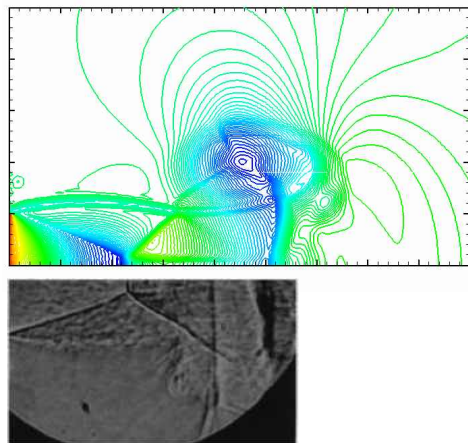


그림 4 순간적인 밀도 contour 2 ($t=288\mu s$)

그림 4에서 알 수 있듯이, 실험과의 비교에서도 3차원 해석 수치 해석 결과가 유사한 모습을 보여주고 있다.

3.2. 근거리 유동장 검증

앞서서 pulse jet 문제를 통해 개발된 3차원 초음속 제트의 유동장을 정성적으로 검증해 보았다. 하지만 소음은 실제 압력에 비해 그 크기가 매우 작기 때문에 소음을 잘 해석하기 위해서는 유동장을 정량적으로 잘 해석할 수 있어야 한다. 그렇기 때문에 개발된 코드가 정량적으로 유동장을 잘 해석하는지를 알아보기 위해서 마하수 1.76인 불완전 팽창 조건의 초음속 제트 유동을 수치적으로 모사하여 본다. 기준이 되는 실험은 1990년 Wang and Widhopf가 수행한 실험[6]이며 그들은 같은 조건에서의 수치 해석도 수행하였다. 이 실험과 본 프로그램의 수치 해석 결과를 비교해봄으로써 초기 유동장의 정확성을 알 수 있다. 사용한 격자계는 이전의 pulse jet 문제에서 사용한 격자계와 동일한 격자계이다. 정량적인 비교를 위해 $x/D = 0.012$, $y/D = 1.49$ 지점에서 압력 신호 측정하여 다른 결과와 비교하였다.

그림 5에서 알 수 있듯이 본 연구에서 개발된 프로그램은 실험 결과와 유사한 결과를 보여준다. 수치 해석 결과를 다른 CFD 결과, 그리고 이전 연구에서 사용된 2차원 축대칭 프로그램의 결과와도 비교하였다. 다른 CFD 해석 결과에 비해서는 상대적으로 뛰어난 결과를 보여주고 있으며 축대칭 프로그램의 결과와는 비슷한 결과를 보인다. 그러나 압력의 최고치에 이르는 시간, 그리고 시간이 지남에 따라 압력이 떨어지면서 나타나는 기울기는 축대칭 프로그램보다 3차원 프로그램이 상대적으로 조금 더 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

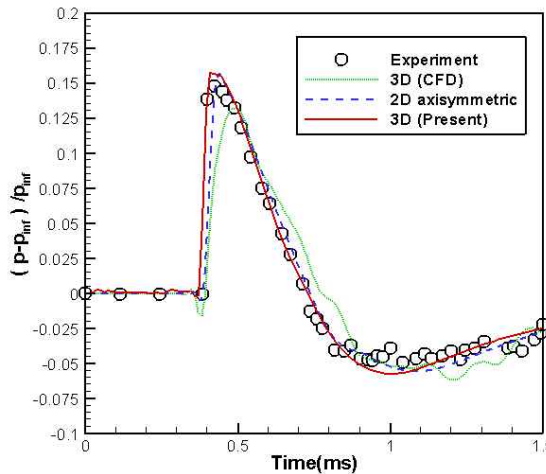


그림 5 압력 신호 측정 1 ($x/D=0.012$, $y/D=1.49$)

다른 지점에서 측정한 압력 신호는 어떠한 경향을 보이는지 알아보기 위하여 시간에 따른 압력 신호를 측정하였다. 각 그림에서 실선은 Wang and Widhopf가 수행한 실험을, 점선은 그들의 수치 해석의 결과를 나타

낸다. 그들의 수치 해석 결과는 A와 B로 분리되어 있는데, 이는 각각 다른 격자계를 사용하여 해석한 것이다. 본 연구의 결과는 원모양(○)으로 표시하였다.

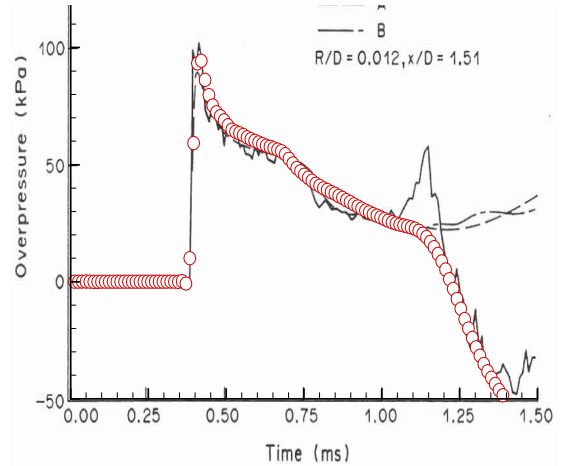


그림 6 압력 신호 측정 4 ($x/D=1.51$, $y/D=0.012$)

앞의 그림 5의 결과와는 달리, 그림 6에서는 다른 경향을 보이고 있다. 실험에서는 시간이 진행됨에 따라 shock wave가 지나간 이후 압력이 서서히 감소되면서 약 1.2ms부터는 overpressure 값이 음의 값을 가지는 경향을 보인다. 이전의 수치 해석 결과의 경우 이러한 패턴을 잘 모사하지 못하는데 반해, 본 연구에서 개발한 프로그램은 이러한 경향을 잘 모사하고 있다.

3.3. 3차원 초음속 제트의 소음 방사

검증을 마친 개발된 코드를 이용하여 3차원 현상을 볼 수 있는 제트 마하수가 1.43인 조건을 해석하여 보았다. 또한 3차원 효과를 볼 수 있도록 하기 위하여 기존의 θ 방향으로 360도를 20개로 나누던 것을 40개로 나누었다.

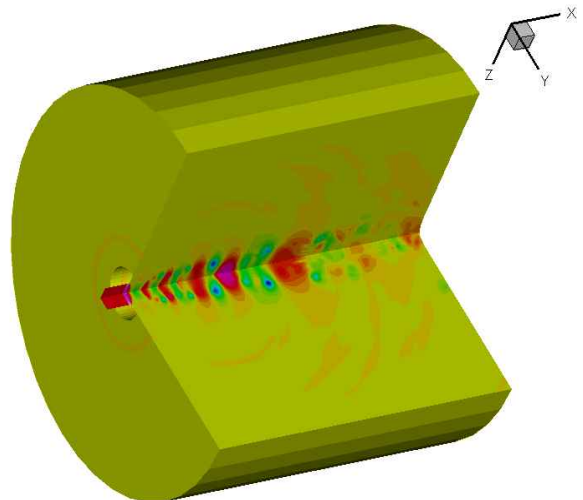


그림 7 초음속 제트의 유동 가시화($M_j=1.43$)

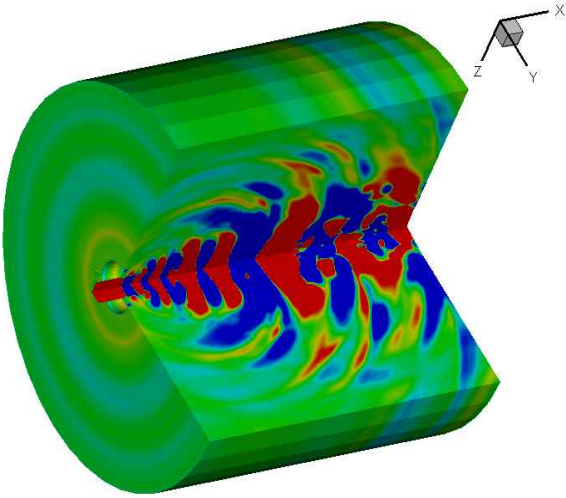


그림 8 초음속 제트의 소음 가시화($M_j=1.43$)

그림 7은 제트 마하수가 1.43인 경우 유동을 가시화한 것이다. 왼쪽에서 오른쪽으로 나아가는 초음속 제트 유동이 처음에는 x축을 기준으로 대칭을 유지하게 되지만 유동이 진행하는 거리가 일정 이상 되게 되면 대칭이 되는 모습이 깨지면서 3차원의 효과가 나타나게 된다. 그림 8은 같은 조건에서 제트 소음을 중심으로 가시화한 것이다. 상대적으로 유동보다 크기가 작은 소음을 기준으로 나타낸 것이기 때문에 크기가 큰 중심축 부분의 유동은 대부분 파란색과 빨간색으로 나타남을 알 수 있다. 그림 8에서는 그림 7에서 볼 수 없었던 소음의 전파를 관찰할 수 있다. 특히 유동의 진행 방향과 반대가 되는 방향, 유동의 진행방향과 수직인 방향으로 소음이 전파되고 있음을 알 수 있다.

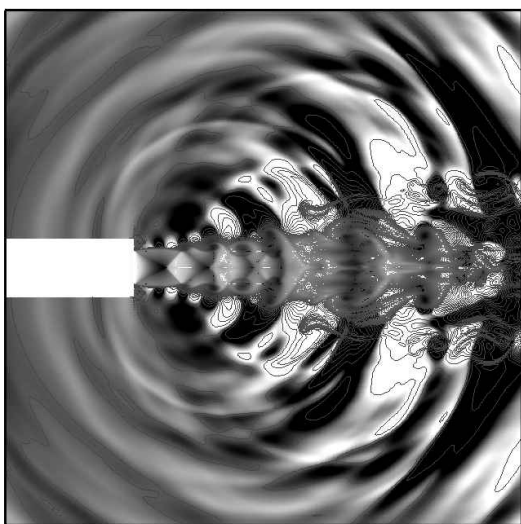


그림 9 초음속 제트의 소음과 유동 ($M_j=1.43$)

그림 9는 초음속 제트의 유동과 소음을 2차원 평면으

로 동시에 나타낸 것이다. 유동의 진행방향과 반대 방향으로 소음이 전파되는 것을 알 수 있으며 유동이 진행되면서 발생하는 와류와 소음의 상호 작용에 의해 또 다른 소음이 발생하여 복잡한 현상을 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 초음속 제트해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 검증에 위해 pulse jet 문제를 해석하였다. 이 문제를 통해 유동장의 정성적인 검증을 할 수 있었다. 정량적인 검증을 위해 마하수 1.76의 제트 문제를 해석하고 근거리 유동장을 다른 해석 결과와 비교하였다. 검증된 프로그램을 이용하여 마하수 1.76의 제트를 해석하였다. 유동장에서 3차원 효과를 확인할 수 있고, 소음장에서는 다양한 방향으로 복잡하게 전파되는 소음을 확인할 수 있다. 본 연구를 통해 3차원 초음속 제트를 해석할 수 있는 프로그램이 올바르게 수치 해석을 할 수 있음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 한국 과학기술정보 연구원 슈퍼 컴퓨팅 센터 5차 전략 과제 중 3차원 초음속 제트 유동 및 소음 해석 연구 결과의 일부임을 밝힙니다.

참고 문헌

- [1] J.W. Kim and D.J. Lee, "Optimized compact finite difference schemes with maximum resolution," AIAA Journal, Vol. 23, No. 5, 1995, pp. 887-893.
- [2] J.W. Kim and D.J. Lee, "Generalized characteristic boundary conditions for computational Aeroacoustics," AIAA Journal, Vol. 38, No. 11, 2000, pp. 2040-2049.
- [3] J.W. Kim and D.J. Lee, "Adaptive nonlinear artificial dissipation model for computational Aeroacoustics," AIAA Journal, Vol. 39, No. 5, pp. 810-818, 2001.
- [4] R. Ishii, H. Fujimoto, N. Hatta and Y. Umeda, "Experimental and numerical analysis of circular pulse jets", Journal of Fluid Mechanics 392:129-153, 1999.
- [5] I.C. Lee, J.W. Kim, and D.J. Lee, "An analysis of screech tone noise from supersonic jet using optimized compact scheme", Internoise2003, Jeju, Korea, 2003.
- [6] Wang, J.C.T. and Widhopf, G.F., "Numerical Simulation of Blast Flowfields Using a High Resolution TVD Finite Volume Scheme", Computers & Fluids, Vol. 18, No. 1, p.103-137, 1990.