

고차의 수치적 기법을 적용한 충격소음의 생성 및 전파 해석

Numerical analysis of the impulsive noise generation and propagation using high order scheme

김민우*·김성태**·김규홍*·이수갑†

Minwoo Kim, Sungtae Kim, Kyuhong Kim and Soogab Lee

Key Words : Impulsive Shooting Noise, Numerical Analysis, Computational Aeroacoustics, Wavenumber Extended Finite Volume Scheme

ABSTRACT

Impulsive shooting noise is basically complex phenomenon which contains the linear and non-linear characteristics. For those reasons, numerical analysis of impulsive shooting noise has the difficulties in control of the numerical stability and accuracy on the simulation. In this research, Wave-number Extended Finite Volume Scheme (WEFVS) is applied to the numerical analysis of impulsive shooting noise. In the muzzle blast flow simulation, the generation of the precursor wave and the induced vortex ring are observed. Consequently, blast wave – vortex ring interaction and vortex ring – bow shock wave interaction are evaluated on the shooting process using the accurate and stable scheme. The sound generation in the interactions can be explained by the vorticity transport theorem. The shear layer is evolved behind the projectiles due to the jet flow. In these computations, the impulsive shooting noise is generated by the complex interaction with shooting process and is propagated to the far-field boundary. The impulsive shooting noise generation can be observed by the applications of WEFVS and analyzed by the physical phenomena.

1. 서 론

일반적으로 소음을 규정할 때, 감각적인 기준에 근거해서 ‘원하지 않는 소리’, 즉, 일상생활에서 지장을 주거나, 혹은 불쾌감을 동반하는 등의 사람에게 있어서 좋지 않는 영향을 미치는 소리로 총체적으로 정의된다. 이러한 소음은 일상생활에서 자주 접할 수 있으며 이중 대표적으로 생각할 수 있는 소음원의 예로는 자동차, 철도, 비행기에서 발생하는 교통 소음이나, 일상에서 발생하는 생활 소음, 그리고 공사현장 및 군 사격장과 특수현장에서 발생하는 충격소음을 꼽을 수 있다.

이중에서도 충격소음의 경우, 교통 소음 및 생활 소음과 같은 다른 소음에 비해서 대부분 지속 시간(duration time)이 짧고 최대 음압의 크기가 매우 큰 특징을 가진다. 이로 인해서 수음자의 입장에서 충격소음에 의한 성가심(annoyance)의 정도는 같은 크기를 가지는 기타소음원에 의한 성가심(annoyance)보다 더 크다고 알려져 있다.[1] 또한 충격소음의 경우 지속 시간 짧기 때문에, 충격소음원의 특징은 파장이 긴 저주파 특성을 가지고 있다. 이러한 저주파 특성은 신체적, 정신적으

로 많은 영향을 미치고 있으며, 현재 이러한 저주파에 의한 위해성에 대한 연구는 진행중인 상태이다.[2] 따라서 충격소음에 의한 연구를 위한 선결 조건으로는 충격소음원의 소음 발생 과정을 규명해야 하는 것이 1 차적인 단계라고 할 수 있겠다.

충격소음을 해석하기 위해서는 먼저 일반 소음 해석과 구분해야 하는 점은 충격소음의 특성은 일반 진동 및 공력소음과는 달리 비선형 현상이 발생한다는 사실이다. 이러한 복잡한 물리현상이 있기 때문에 충격소음의 접근은 유체역학을 기반한 접근방법을 통해서 유동구조에 관찰하거나 단지 충격소음이 발생하는 과정의 현상에 대한 실험적인 기술에 근거하고 있다.[3,4,5] 하지만 유체역학을 기준으로 한 접근 방법은 음향을 해석하는 방법과는 다르다. 이전의 접근법이 충격소음이 발생하는 근접장내에서의 유동량의 변화량을 관찰하는 것에 목적을 두고 있다면, 음향의 입장에서는 근접장 뿐만 아니라 원방에 도달하게 되는 음향파와 같은 섭동량의 정확도가 보장되어야 한다. 따라서 수치적으로 충격소음의 발생 및 전파과정을 해석하기 위해서는 음향파의 소산(dispersion) 및 감쇄(dissipation)와 같은 현상을 최소화할 수 있어야 한다. 이러한 음향파의 소산 및 감쇄 특성을 만족시키기 위해서는 고차의 중심차분기법 (high order central difference)을 바탕으로 하여, 음향파의 소산 및 감쇄의 특성을 억제하여 한다. 하지만 충격소음의 경우, 충격소음의 발생과정에서 강한 비선형을 동반하므로 음향파의 전달과정 역시

† 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : solee@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-7385, Fax : (02) 874-4360

* 서울대학교 기계항공공학부

** 두산중공업

충격파(shock wave)등과 동반하여 유동량의 불연속적인 특징을 가지고 있다. 그로 인해 비선형성을 수치적으로 해석하기 위해서는 수치적인 비물리파(spurious wave)의 발생을 최대한으로 제어해야 한다. 일반적으로 수치적인 비물리파를 제어하기 위해서는 인공적인 감쇄량을 이용하게 되는데, 감쇄량의 적용에 따라서 물리량의 차이를 발생시킬 수 있으므로 소산 및 감쇄량을 최적화하기 위해서는 고차의 중심차분기법의 경우 매우 큰 어려움으로 작용하게 된다. 반면에, 전산유체역학에서 일반적으로 적용되는 풍상차분법(Upwind difference)의 경우, 비교적 낮은 차수에서도 충분히 충격파를 모사할 수 있는 장점을 가진다. 하지만 이러한 접근법은 위에서도 언급하였다시피 음향파의 전파를 해석함에 있어서 소산 및 감쇄를 최소화하지 못하는 단점을 가지게 된다. 충격소음의 해석을 위해서는 음향파 전파 과정에서의 소산 및 감쇄를 최소화하는 동시에 비선형 해석에서 발생하게 되는 비물리파에 대한 적절한 대처가 필요함을 의미한다.

따라서 충격소음에 의한 소음의 해석을 위해서는 소음전파에 관한 선형문제와 충격파를 포함하는 비선형문제에 대한 대처가 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 공간주파수 확장 유한체적법(WEFVS, Wave-number Extended Finite Volume Scheme)을 이용하여 음향파와 충격파가 서로 복합적으로 존재하는 문제는 총구(muzzle)에서 발생하는 충격소음 문제에 적용하였다. 또한 충격소음 발생과정에서 나타나는 압축 충격파(Muzzle Blast wave) 및 기타 충격파와 유동현상에 의한 상호작용에 의한 충격소음의 발생과정에 대해서 모사하였다.

2. 접근 방법

2.1 지배 방정식

총구(muzzle)에서 탄환이 발사되는 경우, 실제 총구 내부 및 주변의 유동은 점성의 영향 및 화학반응과 같은 복합적인 특성이 동시에 발생하게 된다. 하지만 충격소음해석에 있어서 점성 및 화학반응에 의한 영향은 작기 때문에 오일러(Euler)방정식으로 충분히 해석할 수 있으며, 또한 일반적인 총구(muzzle)의 구조는 중심축에 대해서 축대칭 관계를 가지고 있으므로 축대칭 오일러 방정식으로 지배방정식을 결정할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial r} + \frac{1}{r} \mathbf{S} = 0 \quad (2.1)$$

이 때, 각 행렬 벡터 \mathbf{U} , \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{S} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{pmatrix} \quad (2.2a), \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{pmatrix} \quad (2.2b),$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{pmatrix} \quad (2.2c), \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e + p)v \end{pmatrix} \quad (2.2d)$$

이 때의, 각 행렬의 변수, ρ, u, v, p 는 유동의 원시변수를 의미하며, 체적당 총에너지량, e 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2) \quad (2.3)$$

2.2 수치해석 기법

음향파에 의한 선형현상과 충격파에 의한 비선형현상이 존재하는 문제를 수치적으로 해석하기 위해서 WEFVS 기법을 이용하여 문제를 접근하였다[6]. 이때, 계산 격자 경계면에서의 유동 변량, $\mathbf{F}_{\frac{1}{2}}$, 은 압력 벡터 \mathbf{P} 및 보존(conservative) 벡터 $\mathbf{\Psi}$ 에 의해서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{F}_{\frac{1}{2}} = M_L c_{\frac{1}{2}} \mathbf{\Psi}_L + M_R c_{\frac{1}{2}} \mathbf{\Psi}_R + (P_L^+ \mathbf{P}_L + P_R^- \mathbf{P}_R) \quad (2.4)$$

이때, 보존 벡터 $\mathbf{\Psi}$ 는 원시(primitive) 벡터 $\mathbf{\Phi}$ 에 의해 결정된다. 따라서 원시 벡터의 최적화를 통해서 유동변량에 대한 최적화를 수행한다. 또한 Gibbs 현상을 이용한 유동 특성에 대한 각 선형 및 비선형일 때의 원시벡터량을 결정할 수 있다.

선형 구간일 경우, 원시 벡터는 중심차분의 형태의 다항식특성을 가진다.

$$\Phi_L = \bar{\Phi}_i + 0.5\beta_L \Delta\Phi_{i-\frac{1}{2}}, \quad \Phi_R = \bar{\Phi}_i - 0.5\beta_R \Delta\Phi_{i+\frac{3}{2}} \quad (2.5)$$

비선형 구간에서의 원시 벡터는 제한자(Limiter)를 이용하여 불필요한 과도감쇠를 억제한다.

$$\Phi_L = \bar{\Phi}_i + 0.5\phi(\beta_L)\Delta\Phi_{i-\frac{1}{2}}, \quad \Phi_R = \bar{\Phi}_i - 0.5\phi(\beta_R)\Delta\Phi_{i+\frac{3}{2}} \quad (2.6)$$

이때, β 및 제한자 $\phi(r)$ 는 최적화 과정에 의해서 결정된다.

2.3 격자 구조 및 초기 조건

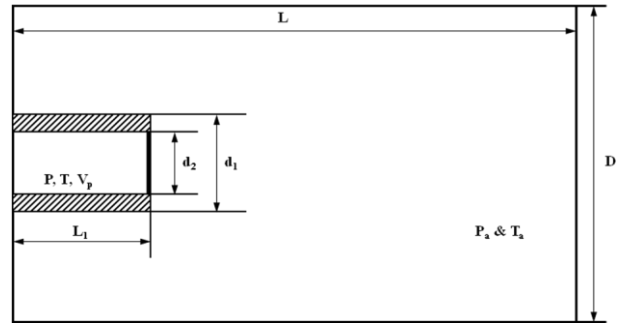
2.3.1 격자 구조

총구(muzzle)에서 발생하는 충격소음의 발생 및 전파를 모사하기 위해서 <그림 1> 과 같이 계산 격자를 구성하였다.

총구에서 발생하는 충격소음을 모사하기 위해서 탄환(projectile) 및 총구의 직경을 기준으로 무차원하였다. 먼저 탄환을 원통형의 물체로 가정하였으며, 각각의 길이(L_1)와 직경(d_2)을 기준으로 무차원화 되었다. 또한 총구의 외경(d_1)은 길이 및 직경의 2 배의 크기를 가지도록 무차원화 하였다. 전체의 계산 영역은 원방까지의 전파 특성을 보기 위하여 가로의 길이는 무차원 거리 12.5 ($L=12.5L_1$), 세로의 길이는 무차원 거리 15 ($D=15d_2$)의 크기를 가지도록 결정하였으며, 각각의 개별적인 계산 격자의 크기는 $\Delta x = 0.025$, $\Delta y = 0.025$ 이다.

2.3.2 초기 조건

일반적으로 충격소음이 생성되는 과정은 실제 환경에서 발생하게 되므로 총구 외부의 압력과 온도는 대기조건을 따른다. ($P_a = 1atm$, $T_a = 297K$) 총구내부에서의 밀도 및 압력은 충격파 후면속도에 의해 결정되고 이때, 충격파 후면 속도는 탄환의 속도라고 가정할 수 있다. 이때 탄환의 속도가 $V_p = 429m/s$ ($M_p = 1.25$) 일 경우의 충격파 후면에서의 압력비(p/p_∞)와 밀도 비(ρ/ρ_∞)는 4.5 와 2.667 의 값을 가진다.



<그림 1> 계산 격자의 구성

3. 결과 및 논의

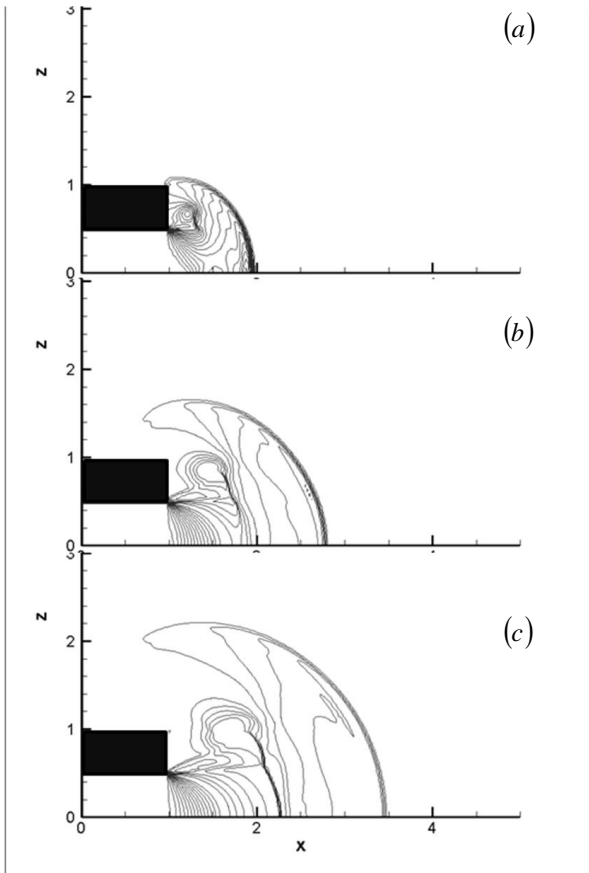
3.1. 압축 충격파 (Muzzle Blast Wave)

총구(muzzle)에서 탄환이 발사될 때, 총구에서 탄환이 발사되기 전까지의 유동은 일반적으로 알려진 충격파관의 문제로 모델링하여 생각할 수 있다. 이는 총구 밖으로 발사되는 탄환에 의하여 총구 내부는 압축되고 이러한 내부 압력은 주위 정상상태와 비교하여 보면 높은 물리량을 가지기 때문이다. 이에 의해서 총구 내부의 높은 압력은 총구의 전면에서 충격파(shock wave)를 형성하는 원동력이 된다. 이러한 충격파는 전조파(precursor wave)라고 한다. <그림 2>에서는 총경 길이(barrel length)가 400mm 이고 탄환의 직경이 7.62mm 인 경우에 대한 Muzzle Blast 의 해석을 이용하였다. 각 시간이 25ms, 50ms, 75ms, 인 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 일반적으로 전조파의 경우 외부에 의한 교란이 존재하지 않기 때문에 반경방향으로 전조파는 전달되고, 충격파관에 의해 모서리에서의 굴절에 의해서 와류 고리 (Vortex ring)가 생성됨을 확인할 수 있다.

3.2. 2 차 압축 충격파 (Secondary Blast Wave)

탄환이 총구에서 발사되는 경우에서도 마찬가지로 고압의 공기가 팽창을 일으키면서 앞으로 전파하게 된다. 하지만 이전의 전조파가 전달되는 방식과는 다르게 후면충격파의 경우, 이전에 존재하는 전조파, 와류 고리(vortex ring), 그리고 탄환과 같은 구속조건의 영향을 받게 된다. 이로 인해서 각각의 유동현상은 상호작용을 일으키게 되고, 이로 인한 유도 음향파가 발생하게 된다.

충격파에 의한 개별적인 유동의 상호작용에

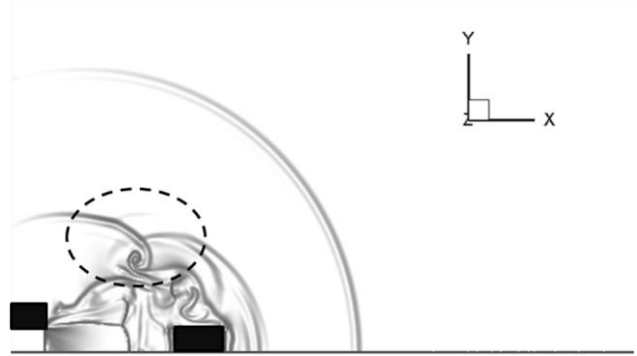


<그림 2> 압축 충격파의 전파 및 와류 고리의 생성 (a) 25ms, (b) 50ms, (c) 75ms

의한 변화를 살펴보자면, <그림 3>에서도 알 수 있듯이 각각의 충격파와 와류의 충돌로 인해서 2 차적인 반사 충격파가 발생하는 현상이다. 먼저, 압축 충격파에 의해 발생하게 되는 와류 고리(vortex ring)는 탄환이 나가고 나서 발생하게 되는 2 차 압축 충격파에 의해서 상호 작용을 일으키게 된다. 충격파에 의해서 와류 고리와 충돌하게 되고 이로 인해 Mach reflection 을 일으키게 된다. 두번째로는 와류와 탄환에 의한 충격파사이의 상호 작용으로 인한 음향파 발생과정이다. 이는 와도 전달 방정식(vorticity transport equation)으로도 유추할 수 있다. 2 차원 유동에 대한 와도전달 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

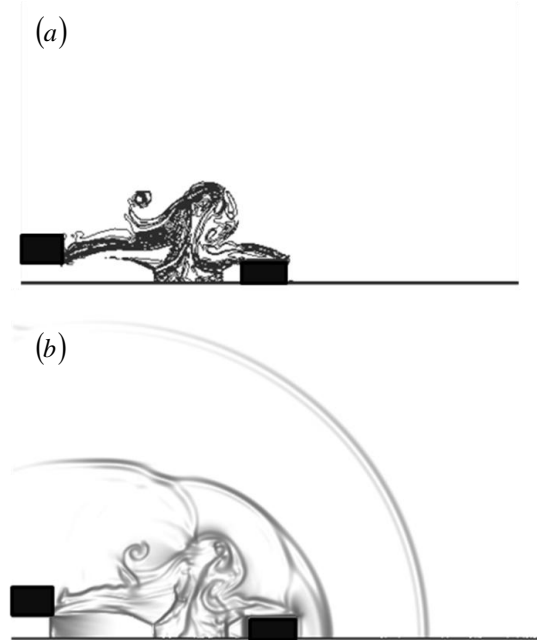
$$\frac{D\vec{\omega}}{Dt} = -\vec{\omega}(\nabla \cdot \vec{u}) - \frac{\nabla p \times \nabla \rho}{\rho^2} \quad (3.1)$$

이때, 좌변은 와도(vorticity)의 변화율을 의미하며, 우변의 첫번째 항의 경우 압축성 유동일 경우 0 이 되지 않기 때문에 압축성에 의한 효과라고

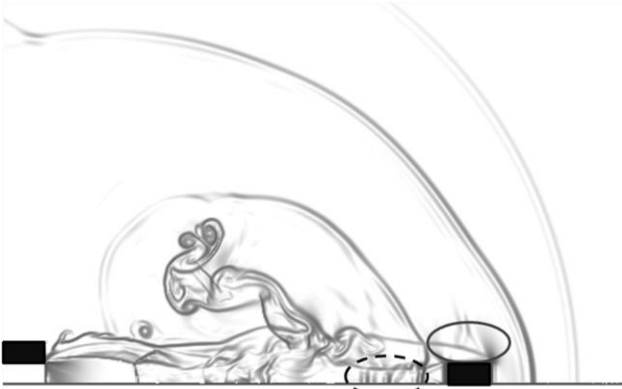


<그림 3> Mach reflection

생각할 수 있다. 또한 우변의 두번째 항의 경우 경압효과(baroclinic effect), 즉 밀도의 구배와 압력 구배에 의한 영향을 의미한다고 할 수 있다. 다시 말하자면, 밀도 구배와 압력 구배가 서로 평행하지 않는 경우, 시간이 지남에 따라서 와도의 변화량이 발생한다는 것을 의미한다. 이는 와류와 탄환사이의 충격파에 의해서 충격파 후면부에 새로운 와도가 생성되는 것을 뜻하며, 이로 인해 새로운 음향파가 발생할 수 있음을 의미한다. <그림 4>는 탄환이 진행 될때의 충격파 뒷면에서의 발생하는 와도(vorticity)를 보여 주고 있으며, 충격파 후면에서 새로운 와도(vorticity) 가 발생함을 알 수 있다.



<그림 4> 충격파 후면에서의 와도의 변화량 (a) 와도 선도 (b) 밀도에 대한 음영사진 결과



<그림 5> 전단 경계층 및 제트 유동

3.3. 탄환과 제트에 의한 상호작용

<그림 5>를 통해서 탄환이 전진함에 따라서 발생하는 전단경계층(shear layer)의 변화를 살펴볼 수 있다. 탄환의 시간에 대해 전진함에 따라 탄환의 모서리에서는 전단경계층이 발생하게 된다. 이때의 전단경계층의 방향은 진행방향과 진행 반대 방향에 대해서 향하고 있으며, 이는 탄환 후방에서 높은 압력 값이 강한 팽창을 유발하고 있기 때문이다. 이러한 과정에서 탄환 후면부는 높은 제트 속도를 유도할 수 있으며, 탄환진행방향으로 성장하는 전단경계층을 확인할 수 있다.

4. 결 론

충격소음을 수치적으로 해석하기 위해서는 선형 및 비선형 전파를 적절하게 대처할 수 있어야 한다. 이를 위해서 공간주파수 확장 유한 체적기법을 이용하여, 총구에서 방사되는 충격소음에 대한 소음해석을 수행하였다.

먼저 총구(Muzzle)에서 발생하는 압축충격파에 대한 해석을 통하여, 압축충격파의 전파 및 와류 고리가 발생함을 확인할 수 있다. 또한 압축충격파 - 와류 고리 의 상호 작용 및 와류 고리 - 궁형충격파의 상호작용 해석을 통해서 충격파 전후면에서 발생하는 와도의 발생을 통하여 음향파가 발생함을 확인하였으며, 고속의 탄환의 후면에서 발생하는 제트유동과 탄환에서 발생하는 전단 경계층의 발달을 확인하였다.

현재의 수치해석에서는 탄환의 구조 및 총경의 구조에 대해서 간략히 모델링한 조건을 적용하였다. 실제의 경우, 탄환의 형태 및 총경의 내부 구조는 현재의 수치해석에서 적용된 것과 차이가 있겠지만, 충격소음이 발생할 때 일어나는 압축충격

파, 와류 고리 등의 복잡한 유동의 상호 작용으로 인한 충격소음의 발생과정과 전파특성을 고찰할 수 있었다. 이러한 연구가 실제적인 연구로 더 진행되기 위해서는 화기의 총경 구조 및 탄환 속도, 탄환의 형태 등의 유동의 발생에 영향을 미치는 인자에 대한 추가적인 연구가 필요로 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10301-0) 지원으로 수행 되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rylander R.; Lundquist B., 1996, "ANNOYANCE CAUSED BY NOISE FROM HEAVY WEAPON SHOOTING RANGES.", Journal of Sound and Vibration, Vol.192, No.1, pp199-206
- (2) Schust M., 2004, "Effects of low frequency noise up to 100 Hz.", Noise Health Vol. 6, pp.73-85
- (3) Z. Jiang, 2003, "Wave dynamic process induced by a supersonic projectile discharging from a shock tube", Physics of Fluid, Vol.15, NO.6, pp. 1665~1675.
- (4) J.I.Erdos, P.D.D.Guidice, 1975, "Calculation of Muzzle Blast Flowfields", AIAA Journal, Vol.13, NO.8, pp. 1048~1055.
- (5) E.M.Schmidt, D.D.Shear,"Optical Measurement of Muzzle Blast", Vol. 13, No.8.
- (6) Sungtae Kim, Kyuhong Kim, Soogab Lee, "Development and application of Wavenumber-Extended High-order High-resolution Oscillation Control Finite Volume Scheme for Multi-dimensional Aeroacoustic Computation", submitted to the Journal of Computational Physics.