

# 제연기 가스유동 해석에 관한 연구 (A Study of Bore Evacuator Gas Flow Analysis)

강국정 (국방과학연구소)

## Abstract

Bore evacuator which have circular structure of cylindrical form is located at tube, and its function is to evacuate toxic gases generated during firing intervals. Between bore evacuator and bore interior, gas flow field is developed through the nozzles, and the charging and discharging process is formed. By these flow cycle(charging and discharging) the evacuation effect can be generated.

This report contains an analyses and results consideration about bore evacuator flowfield.

Key Words : 제연기, 흡입과정, 방출과정, 제연기 압력비(NPR)

### 1. 서론

화포 사격시 발생하는 추진제 연소 개스는 인체에 해로운 일산화탄소, 암모니아, 이산화질소 및 납성분 등을 포함하고 있다. 따라서 포탑 내부에서 사격을 하는 대구경 화포에서는 탄이 포구를 이탈한 후 포강 내부에 잔존하는 유독성 연소 개스를 포구를 통하여 대기중으로 방출시켜야 한다. 이러한 문제는 승무원의 원활한 임무수행 보장 및 적절한 운용환경 조성 측면에서 해결되어야 할 요소로써 제연기를 설치하므로써 해결이 가능하다. 제연기는 원통형의 구조를 가지며 수개의 노즐이 존재하고 이 노즐을 통해 가스 유동이 발생하게 된다. 이러한 가스의 흡입 및 방출 과정에 의해 제연 효과가 발생하게 된다.<sup>[1,2]</sup>

제연기의 설계를 위해서는 제연기 발생압력에 대한 예측 자료와 설계요소 전반에 대한 검토를 필요로 하며 이를 위해서는 유동장에 대한 해석 및 결과에 대한 고찰이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 제연기의 흡입 및 방출 과정에 대하여 해석하므로써 제연기 최대발생 압력에 대한 예측 및 시간 변화에 따른 압력 변화를 구하고자 한다. 또한 방출과정 동안 노즐에서의 유동장에 대한 해석을 통하여 노즐 각도 및 압력비의 변화에 따른 노즐 끝단에서의 압력 변화 및 이에 따른 제연기의 성능 변화에 대하여 고찰하고자 한다.

### 2. 제연기 압력해석

### 2.1 흡입 과정

제연기 내부의 개스는 완전기체법칙을 따르며, 또한 모든 과정은 준 정상상태(quasi-steady state) 및 단열과정으로 가정하였다. 노즐을 통한 가스 유동은 음속으로 되며 따라서 하류 조건에 무관하게 상류에서 하류로의 한 방향으로만 유동이 발생하는 것으로 고려하였다. 사격간 제연기에 발생하는 압력에 대한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V \frac{dP_R}{dt} = \gamma R T_{G_0}(t) \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

여기에서  $P_R$ ,  $m$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $\gamma$ ,  $T_{G_0}(t)$ 는 각각 제연기 압력, 개스 혼합 질량, 제연기 체적, 연소 개스 상수, 비열비, 제연기 노즐위치에서의 추진제 개스 정체를 나타낸다. 또한 노즐을 통해 제연기 내부로 유입되는 유량  $\frac{dm}{dt}$  은 이상기체의 등엔트로피 과정에 대한 압력, 온도, 밀도 관계식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = K(M_G) A (P_G \rho_G)^{1/2} \quad (2)$$

$P_G$ ,  $\rho_G$ 는 포강내의 압력, 밀도를 나타내며  $A$ 는 노즐 총단면적,  $K(M_G)$ 는 흡입 과정의 유량 계수를 나타내며 일반적으로 고정형태 노즐인 경우 0.3 정도의 값을 갖는 것으로 되어있다. 또한 포강 내부의 제연기 노즐 위치에서의 추진제 개스 물성치 ( $P_G, \rho_G, U_G, T_G$ ) 를 구하기 위해, 탄이 포강내에

있는 경우와 탄이 포구를 이탈한 후의 2가지 경우로 구분하여 고려하였다. 탄이 포구를 이탈하기 전까지의 물성치는 강내탄도 해석의 결과로부터 구하였으며, 탄이 포구를 이탈한 이후는 Leduc 이론을 적용하여 포강 내부의 제연기 노즐 위치에서 추진체 개스의 물성치를 구하였다.

## 2.2 방출과정

제연기와 포강 내부의 압력이 동일한 수준에 이르러 노즐을 통한 개스의 흐름이 더 이상 없다면 제연기 내부의 압력은 최고 수준에 도달하게 되며, 이때부터 제연기의 방출 과정이 시작된다. 압력 강하가 진행되는 동안 포강 내부의 압력은 제연기 압력에 비해서 더욱 급격하게 압력이 강하되므로 제연기 내부의 개스는 노즐을 통하여 포강으로 방출된다. 제연기 노즐에서 개스가 방출되는 동안 제연기 내부의 압력 변화는 탄이 포구를 떠난 후의 물성치를 구하기 위해 방출과정의 유량계수  $C_D$  를 도입하므로써, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{P_R}{P_{Ri}} = \left[ 1 + \frac{t}{\phi} \right]^{-2\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)} \quad (3)$$

여기에서

$$\phi \equiv \frac{2V}{C_D A (\gamma - 1)} \left[ \frac{m_{Ri}}{\gamma P_{Ri} V} \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$P_{Ri}$  는 제연기 최고 압력을 나타내며  $m_{Ri}$  는 최고 압력시의 제연기 내부 개스량을 나타낸다.

## 2.3 해석결과

그림 1. 에서 그림 4. 까지에는 제연기 내부에 발생하는 압력을 계측하여 이론해석 결과와 비교 분석한 결과를 나타내고 있다. 전체 사이클 시간은 약 1.5 sec 수준으로 나타났다. 노즐에서의 유량계수는 체크밸브형태노즐  $C_{1i}=0.05-0.06$ , 고정형태노즐  $C_{2i}=0.26-0.29$ 의 분포를 가지는 것으로 나타났다.

패쇄기가 개방되는 시간의 제연기 압력 수준이 높을수록 포강 내부의 개스로 전달되는 운동량의 증대로 인하여 제연 효과는 더욱 활발하게 일어난다.

사격시의 발생 압력이 높을수록 제연기 노즐의 유량 계수는 증가하는 경향을 나타내었으나 전체적으로 각 사격 조건별 유량 계수는 비슷한 수준이었

다. 또한 이 결과를 이용한 제연기의 설계요소 전반에 대한 검토를 통하여 설계요소의 특성 고찰이 가능할 것으로 판단된다.

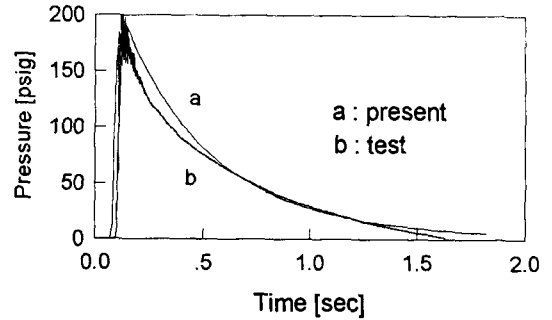


그림 1. 사격압력 58,000 psi 인 경우

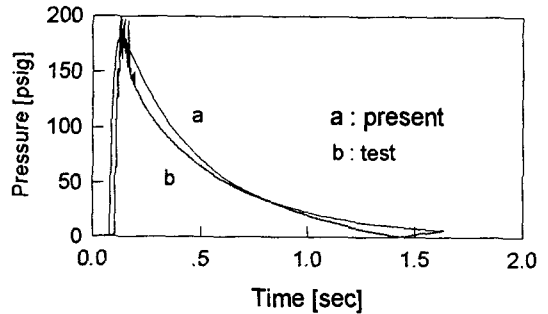


그림 2. 사격압력 54,000 psi 인 경우

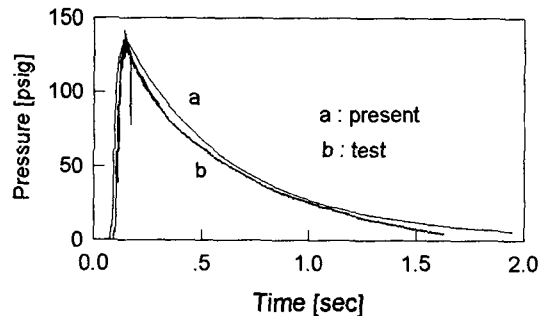


그림 3. 사격압력 33,000 psi 인 경우

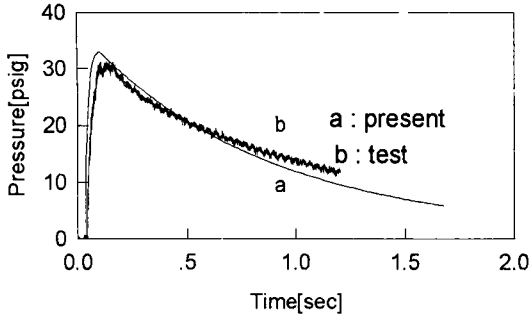


그림 4. 사격압력 6,000 psi인 경우

에 대하여 고찰하고자 한다.

### 3.1 지배방정식

압축성 유동장에 대한 비정상 TLNS(Thin Layer Navier Stokes) 방정식을 다음과 같이 일반화된 좌표계에 대한 식으로 변환시켜 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \eta} = \vec{H} + \frac{\partial \vec{F}_v}{\partial \eta} \quad (4)$$

변수  $\vec{Q}$ 는  $\vec{Q} = \frac{\gamma}{J}(\rho, \rho u, \rho v, e)^T$  으로  $J$ 는 좌표 변환의 Jacobian 으로 정의된다.  $\vec{E}, \vec{F}$ 는 유동 벡터항을 나타내며,  $\vec{F}_v$ 는 점성유동 벡터항을  $\vec{H}$ 는 생성 벡터항을 나타낸다.

### 3.2 해석방법

제연기의 방출과정 동안 노즐 내부에서의 유동장 해석을 위하여 공간 이산화의 기법으로 유동방향( $\xi$ ) 으로는 상류차분법을, 유동방향에 수직한 방향( $\eta$ ) 으로는 중앙차분법을 적용하였으며, 시간 이산화의 기법으로는 Euler 내재적 기법을 적용하였다. 이에 따라 유동벡터 분할기법 및 LU 분해기법(Lower Upper decomposition scheme)을 적용하여 계수매트릭스를 전방(forward), 후방(backward) 차분에 의해 한번의 반복계산을 완료하는 내재적 DD ADI(Diagonally Dominant ADI) 기법을 적용하여 수치계산 알고리즘을 구성하였다. 또한

$A, B, B_{v1}, B_{v2}$ 는 Jacobian 매트릭스를 나타내며, 고유치의 부호에 따라 분할된 유동벡터 및 변수의 시간변화량  $\Delta \vec{Q}$ 를 구하기 위하여 각 반복계산당 전방 및 후방 차분을 적용하면 다음과 같이 2 단계로 구분하여 나타낼 수 있다.

I 단계 : 전방차분

$$\begin{aligned} & [D + \Delta t \left\{ \frac{\partial}{\partial \eta} B - \frac{\partial}{\partial \eta} (R_1 \frac{\partial}{\partial \eta} B_{v1} + R_2 \frac{\partial}{\partial \eta} B_{v2}) \right\}] \Delta \vec{Q}^* = \\ & - \Delta t \left[ \frac{1}{\Delta \xi} ((\vec{E}_{i,j}^+)^n - (\vec{E}_{i-1,j}^+)^*) + k \frac{1}{2\Delta \xi} ((\vec{E}_{i,j}^+)^n \right. \\ & \left. - 2(\vec{E}_{i-1,j}^+)^* + (\vec{E}_{i-1,j}^+)^*) \right] + \\ & \left( \frac{\partial \vec{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \eta} - \vec{H} - \frac{\partial}{\partial \eta} (R_1 \frac{\partial \vec{Q}_1}{\partial \eta} + R_2 \frac{\partial \vec{Q}_2}{\partial \eta}) \right)^n \end{aligned}$$

제연기의 방출과정 동안 작용하는 모든 힘에 대한 상관 관계를 고려 하는 경우, 제연기의 방출과정 동안 포구에서의 압력이 대기압 수준인데 반해 포미에서의 압력은 대기압보다 낮은 수준이므로 이 힘의 차이에 의해 포미방향으로 작용하는 힘이 발생한다. 벽면에서의 마찰저항력도 역시 포미방향으로 작용하는 힘으로 제연기의 제연효과 발생에 대한 저항력으로 작용한다. 따라서 제어체적 내부에서 포구방향으로 작용하는 유일한 힘은 방출과정 동안 노즐 출구에서의 개스에 의해 발생하는 추력 성분이다. 또한 노즐 출구에서 힘의 상관 관계를 고려하면 노즐끝단(lip) 에서 작용하는 힘은 포미방향으로 작용하여 개스 유동을 편향시키며 제연효과 발생에 저항력으로 작용한다. 따라서 제연효과를 발생시키기 위한 유효힘은 노즐 개스 추력에서 노즐끝단 저항력을 제외한 힘이 된다. 따라서 개스의 유효힘이 전술한 두 가지의 저항력보다 커야만 포구 내부에서 유독성 개스를 포구쪽으로 추출할 수 있는 힘의 발생이 가능해진다. 노즐 출구에서의 개스 유효힘을 정확하게 계산하는 것은 제연기의 제연 효과에 대한 정량적 평가를 가능하게 하는 중요한 요소가 된다.<sup>[4]</sup>

본 장에서는 노즐끝단에서의 압력 분포가 제연기의 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 노즐의 유동장에 대한 해석을 하고자 한다. 대기압에 대한 제연기 압력비 및 노즐의 각도 변화에 따른 노즐 끝단에서의 압력 분포를 이론적으로 구하고 제연 효과를 발생시키기 위한 노즐의 유효힘 수준

(5)

II 단계 : 후방차분

$$\begin{aligned}
 & [D' + \Delta t \left( \frac{\partial}{\partial \eta} B - \frac{\partial}{\partial \eta} (R_1 \frac{\partial}{\partial \eta} B_{v1} + R_2 \frac{\partial}{\partial \eta} B_{v2}) \right)] \Delta \vec{Q} = \\
 & - \Delta t \left[ \frac{1}{\Delta \xi} ((\vec{E}_{i+1,i})^{n+1} - (\vec{E}_{i,i})^*) - k \frac{1}{2 \Delta \xi} ((\vec{E}_{i,i})^* \right. \\
 & \left. - 2(\vec{E}_{i+1,i})^{n+1} + (\vec{E}_{i+2,i})^{n+1}) + \right. \\
 & \left. \left( \frac{\partial \vec{E}^+}{\partial \xi} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \eta} - \vec{H} - \frac{\partial}{\partial \eta} (R_1 \frac{\partial \vec{Q}_1}{\partial \eta} + R_2 \frac{\partial \vec{Q}_2}{\partial \eta}) \right) \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기에서 대각항  $D'$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D' = I - \Delta t D + \bar{k} \frac{\Delta t}{\Delta \xi} (A_i^+ - A_i^-)$$

전방 및 후방차분의 계수 매트릭스는 block tri-diagonal 매트릭스의 해를 필요로 하며, 식 (5) 및 식(6)의 결합으로 1번의 반복 계산이 완료된다.

또한  $\bar{k} = 1 + \frac{k}{2}$  으로 1차상류차분법의 경우  $k=0$  으로 되며 2차 상류차분법의 경우  $k=1$ 이 된다.

### 3.3 경계조건

벽면 경계조건은 No-slip condition 을 적용하여 Contravariant Velocity는 0으로 하였다.

$$U = V = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, T = T_w$$

여기에서 n은 벽면에 수직한 방향을 나타내며,  $T_w$ 는 벽면의 온도를 나타낸다. 출구에서 Jacobian matrix의 고유치(eigenvalue)를 구하여 초음속인 경우 단순 extrapolation을 취하였으며, 아음속인 경우 1개의 경계조건과 3개의 고유치에 대한 특성방정식을 적용하였다.

### 3.4 해석결과 및 고찰

그림 5.에서 그림 7.까지는 노즐 각도 및 압력비에 따라 노즐끝단에서의 압력 분포에 대한 해석 결과를 나타낸 것으로 가로축의  $Z/d$ 는 노즐끝단 시작점에서부터의 거리를 노즐 직경으로 무차원화시킨 것이며,  $P_e$ 는 노즐끝단 시작점에서의 압력을 나타낸다. 또한 NPR은 대기압에 대한 제연기 압력비를 나타낸다. 그림 5.에는 노즐 각도가 60°인 경우 노즐 끝단에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 노즐끝단 압력 분포는 포강쪽으로 갈수록 감소하는 것으로 나타났으며, 압력비는 약 0.8 수준까지 분포

하는 것으로 나타났다. 이것은 노즐 각도가 60°인 경우 노즐끝단(lip)의 길이가 짧기 때문에 벽면에서의 확산량이 적어지며 압력이 높은 분포를 가지는데 따른 결과로 판단된다. 그림 6.에는 노즐 각도가 45°인 경우에 대한 노즐끝단 압력 분포를 나타낸 것이며 압력비는 약 0.7 수준까지 강하하는 것으로 나타났다. 그림 7.에는 노즐 각도가 30°인 경우의 결과로써 노즐끝단 압력비는 약 0.5-0.6 수준까지 강하하는 것으로 나타났다. 이상의 검토결과 노즐의 각도가 작을수록 노즐끝단에서의 압력분포는 낮아지는 것을 알 수 있으며 노즐의 각도가 30°인 경우 노즐 끝단에서의 압력 분포는 가장 낮아지며 이에 따라 노즐에서 유출되는 유동에 미치는 힘도 가장 작아진다. 따라서 노즐의 편향각은 가장 작아지게 되며 제연효과 발생을 위한 개스의 유효힘은 커지게 된다. 그림 8.에는 제연효과 발생을 위한 유효힘을 제연기 압력비 NPR의 변화에 대하여 나타낸 것으로 NPR 2.5 수준까지는 유효힘은 직선적으로 증가하며 이후에는 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. NPR이 2이하인 경우 제연효과 발생을 위한 유효힘은 약 0의 값을 가지므로 제연 효과는 거의 발생할 수 없음을 알 수 있다. 또한 NPR 3 이상의 압력범위에서는 전노즐 각도에 대하여 개스유효힘은 거의 일정한 값의 분포를 가지는 것으로 나타났다. 이것은 NPR의 증가에 따라서  $P_e$ 와 노즐끝단 평균압력  $P_w$ 가 비슷한 구배를 가지는 데 따른 결과로 판단된다.

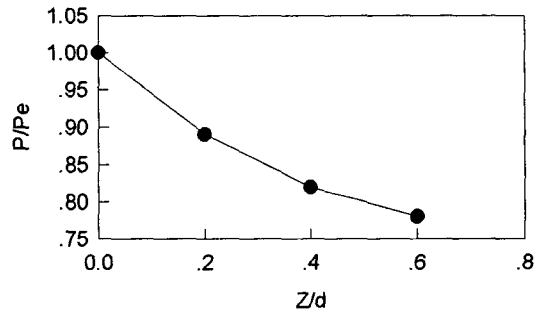


그림 5. 노즐각도 60°인 경우

노즐끝단(lip)에서의 벽면 압력이 작을수록 제연 효과 발생을 위한 가스유효힘은 증가한다. 충분한 제연효과 발생을 위해서는 제연기 압력비 NPR은 최소 2 이상 유지하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Charles.A.Andrade, "Cannon Bore Evacuator Flow Theory, CFD And Experimental Validation", AIAA 92-0832, 1992. 1.
2. Alperin, M., "Thrust Augmenting Ejectors, Part I", AIAA J. 21(10),1428 -1436, 1983. 10
3. AMCP 706-251, "Muzzle Devices", 1968. 5
4. Mario Rivera, "Pressure Distribution and Pumping Force of Discharging Bore Evacuator Holes", proceedings of the 7th U.S.Army Symposium on Gun Dynamics, p.11-p.28, 1993. 5.

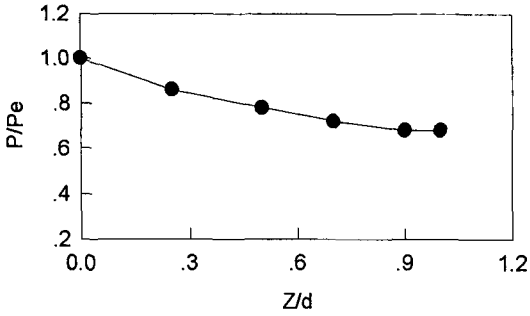


그림 6. 노즐각도 45° 인 경우

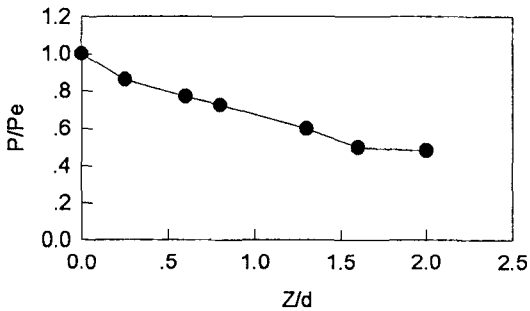


그림 7. 노즐각도 30° 인 경우

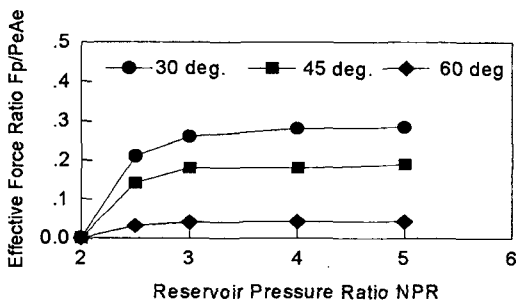


그림 8. 압력비 변화에 따른 제연기 유효힘

4. 결론

제연기 내부 압력변화에 대한 해석 결과, 노즐 유량계수는 전 사격 조건에 대하여 비슷한 값의 분포를 가지고 있다. 노즐에서의 유동장 해석 결과