

램 가속기 탄체 형상에 따른 데토네이션파와 가속 특성에 관한 연구

전용희* · 이재우**

The Formation of Detonation Wave and Acceleration Characteristics with the Ram Accelerator Projectile Shapes

Y. H. Jeon* · J. W. Lee**

ABSTRACT

Projectile shapes of the superdetonative ram accelerator have great effects on shock structures, detonation wave formation, and ram acceleration characteristics. In this study, cone-cylinder-cone, a baseline projectile configuration of the superdetonative combustion mode, double-cone configurations and power-law shape, have been numerically investigated to analyze the effect of the front/rear configuration changes, on the flow field around the projectile, detonation wave formation process, and projectile acceleration characteristics. Hence, a ram projectile configuration with conspicuously improved acceleration characteristics has been proposed by adjusting the double cone angle and height. The results provide useful information for the ram accelerator design optimization study.

초 록

초폭굉 램 가속기의 탄체 형상은 탄체 주위에 형성되는 충격파의 구조 및 데토네이션파의 생성, 그리고 탄체의 가속 특성에 커다란 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 초폭굉 모드의 기본 탄체 형상인 원추-원통-원추의 전·후면 반 꼭지각의 변화와 이중 원추, 그리고 Power-Law 형상 등의 탄체 전면 형상의 변화가 탄체 주위의 유동장, 데토네이션파의 형성 과정, 그리고 탄체 가속 특성에 미치는 영향을 수치적으로 해석하였으며, 이중 원추면의 높이와 각도를 변화시킴으로써 전·후면 반 꼭지각이 10° 인 ISL의 기본 형상에 비하여 약 31.0%의 향상된 가속 성능을 갖는 램 가속기 탄체 형상을 도출하였다. 이러한 탄체 가속 특성 연구 결과는 향후 램 가속기에 대한 설계 최적화 연구에 유용한 자료로 이용 될 것이다.

* 건국대학교 대학원 항공우주공학과(Konkuk Univ., Dept. of Aerospace Eng. Graduate School)

** 건국대학교 항공우주공학과 (Konkuk Univ., Dept. of Aerospace Eng.)

1. 서 론

램 가속기는 예 혼합기 내부를 고속으로 비행하는 탄체 주위의 충격파로 인하여 유도되는 연소 현상 (Shock Induced Combustion)을 이용하여 지속적 인 추력을 얻는 장치로 작동 모드에 따라 열적 질식 모드 (Thermally Choked Mode)와 초폭굉 연소 모드 (Superdetonative Mode)로 크게 구분 할 수 있다.

현재, 열적 질식 모드에 대해서 상대적으로 활발한 연구들이 수행되고 있으며, 열적 질식 모드에서 초폭굉 연소 모드로의 천이 과정에 대한 연구가 Hertzberg 등의 워싱턴 대학을 중심으로 연구 중에 있다^[1]. 초폭굉 연소 모드에 관한 연구는 프랑스의 ISL, 미국의 워싱턴 대학 등을 중심으로 실험적^[2], 수치적 연구^[3,4]가 비교적 최근부터 진행되고 있으며, 국내에서는 Choi 등^[5]이 초기 가속 영역에서의 혼합기의 구성비에 따른 점화 과정과 데토네이션파의 안정화 구조를 연구하였다.

램 가속기의 가속 특성에 영향을 미치는 주된 요 인들로는 혼합기의 조성파 초기 압력 및 온도, 탄 체의 초기 속도와 형상, 질량, 가속 장치의 길이 등 을 들 수 있다. Rom^[6]은 불발(Unstart) 현상을 일 으키는 혼합기의 과농 한계와 희박 한계를 연구하 였으며, Stewart 등^[7]은 혼합기의 초기 압력을 높 여줌으로써 더 큰 가속을 얻을 수 있음을 보여주었 다. 또한, 최근 Wang 등^[8]은 수치 최적화 기법을 이용하여 램 가속기의 전반적인 성능 향상을 연구 하였다.

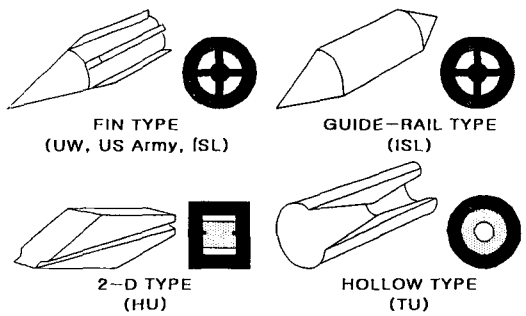


그림 1. 여러 가지 탄체 형상^[9]

탄체의 형상은 작동 모드에 따라 적절한 형상을 적용하며, 관내 유도방식에 따라 Fin Guided 형과 Rail Guided 형으로 크게 나누고, 기타 썬기형과 공동형 등이 있다. 탄체 자체의 형상에 관한 Parametric 연구는 워싱턴 대학과 ISL 등에서 실험적, 수치적 연구가 행해졌다^[10].

현재까지의 램 가속기에 관한 연구들은 유동 현상 자체의 난해함과 실험적 난이도로 인하여 관련 분야 의 연구들이 기초적인 단계에 머무르고 있다. 탄체 의 가속은 탄체 형상에 따른 유동장과 이에 따른 데 토네이션파의 형상에 따라 크게 좌우된다. 탄체의 형상이 이러한 가속 메커니즘에 중요한 영향을 미치 고 있지만 탄체의 형상 변화가 램 가속기내의 유동 장의 변화 및 탄체 가속에 미치는 영향에 대한 연구 는 아직 미진한 상태이다.

본 연구에서는 초폭굉 연소 모드로 운용되는 램 가속기에서 탄체 형상에 따른 가속 특성과 탄체 주 위 유동장 및 데토네이션파의 생성에 대한 연구를 수치적으로 해석하고 가속 특성이 우수한 탄체 형상 을 제시하고자 한다.

2. 램 가속기 내부 유동의 해석

2.1 지배 방정식과 수치해석

탄체 가속기의 내부 유동은 높은 마하수의 고온, 고압의 압축성 유동장인 동시에 점성의 효과를 고려 해야 하며, 생성항이 존재하는 비평형 화학반응을 동시에 고려해야 한다. 따라서, 유동장의 지배 방정 식은 비평형 화학 반응에 의한 생성항이 존재하는 2 차원/축대칭 Navier - Stokes 방정식을 이용하여 계산하여야 하며, 계산 평면 (Computational Domain)에서 무차원화 된 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(F - F_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(G - G_v)}{\partial \eta} + \alpha(H - H_v) = W$$

여기서, Q는 보존변수벡터를 F, G, H는 각각

의 축 방향 대류 플럭스, F_v, G_v, H_v 는 점성 플럭스를 나타내고 W 는 화학반응에 의한 생성항을 나타낸다.

대류항에 대한 공간차분은 Roe의 FDS기법을 적용하고, 고차확장은 MUSCL 기법을 사용하며, minmod 제한자를 도입하여 해의 진동을 방지하였다. 점성항은 중심 차분 기법을 적용하였다. 비평형 화학 반응과 경계층의 존재로 상당한 강성이 발생하여 시간 적분은 완전 내재적 기법인 LU-SSOR 기법을 적용하였다. 지배 방정식을 공간 차분된 형태의 완전 내재적인 시간 적분 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{i,j} = W_{i,j}^{n+1} - aH_{i,j}^n + aH_{v,i,j}^n + J_{i,j} \left(\frac{\partial F_v}{\partial \xi} + \frac{\partial G_v}{\partial \eta}\right)_{i,j}^n - J_{i,j} \left(\frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta}\right)_{i,j}^{n+1}$$

강성에 크게 기여하지 않는 축대칭 좌표항과 점성항은 외재적으로 처리한다. 정리된 식을 플럭스 Jacobian의 미분은 FVS 기법, 대류항의 미분은 각 격자 경계의 수치 플럭스의 차이로 표시하고, LU 분해 형태를 취하여 Jacobian 행렬의 근사 분할 방법을 이용 두 단계로 전체 행렬의 연산을 수행한다. 난류 모델은 Baldwin-Lomax의 Algebraic Eddy Viscosity Model을 적용하고 시간 간격은 CFL 수를 기준으로 적용하였다.

초폭굉 연소 모드를 모사하기 위한 초기 조건은 다음과 같다.

- 혼합 기: $2H_2+O_2+8N_2$
- 탄체속도: $2500m/sec$ ($f_{overdrive} = 1.47$)
- 혼합기 압력, 온도: $25atm, 300K$
- 격자계: 400×60 (축방향, 수직방향)

탄체 가속을 위한 연료는 주로 탄화수소 계열 (C_mH_n)과 수소가 사용되며, 본 연구에서는 계산상의 효율성을 고려하여 Moretti^[11]가 제안한 8단계 6 화학종(H, H_2 , O, O_2 , OH, H_2O)의 수소/산소 혼합기의 반응을 고려했고, 각 반응 단계의 데이터는 Evans와 Schexnayder^[12]의 값을 사용하였다.

3. 탄체 형상에 따른 가속 특성

3.1 램 가속기 내부의 데토네이션파

초폭굉 모드의 램 가속기 내부의 데토네이션파는 충격파-경계층 상호작용에 의한 경계층 내의 박리 기포와 연소면 간의 상호 지지에 의한 경우와 충격파-충격파 상호작용으로 생성되는 등 두 가지의 경우로 구분할 수 있다.

박리기포와 연소면 상호 지지 구조로 생성되는 데토네이션파는 탄체 전면의 경사면과 탄체 중반부에 형성되며^[5], 두 경우 모두 상호 지지 구조에 의한 생

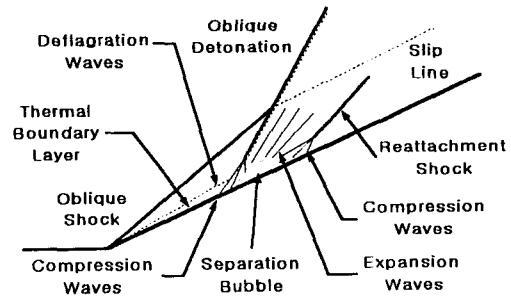
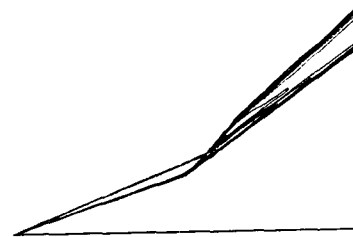
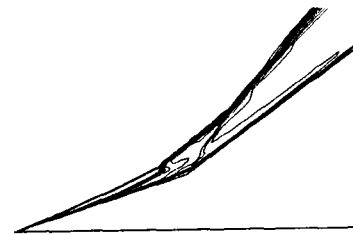


그림 2. 경사면 상의 데토네이션파^[5].



a) 동결 유동



b) 비평형 유동

그림 3. 이중 원추 주위의 온도 분포

성과 안정화 메커니즘으로 설명되어 진다. 그림 2는 경사면의 데토네이션파의 안정화^[5] 구조를 나타낸다.

비평형 유동하의 이중 경사면의 유동장과 연소면의 구조는 충격파-충격파의 상호 작용과 이로 인하여 후면에 발생하는 데토네이션파의 형성 등으로 동결 유동(Frozen Flow)의 경우와는 현저히 다른 형태를 보여준다. 수치 해석을 통한 동결 유동과 비평형 유동의 해석 결과는 그림 3과 같으며, 이는 Yungster 등^[13]의 해석 결과와 일치하는 경향을 나타낸다.

3.2 탄체 형상의 선정

초폭굉 연소 모드의 일반적인 탄체 형상은 원추-원통-원추형이며 탄체 형상은 그림 4와 같다. 또한, 탄체의 전면 형상을 원추가 아닌 이중 원추 형상과 Power-Law 형상을 각각 선정하여 탄체 주위의 유동장과 가속 특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

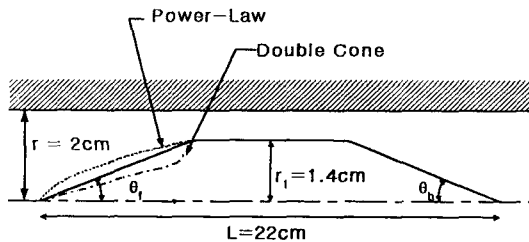


그림 4. 탄체 형상

- 원추-원통-원추 형상: 초폭굉 모드 탄체 가속기의 단순 기본 형상으로서 탄체의 세장비는 1:9.17이며, 기준 형상은 전·후면 경사각이 10°이며 가속기 관의 반지름이 r(=2cm) 일 때 가속기 벽면과의 간극은 0.3r이다. 탄체 전면의 경사면에서 유도된 경사 충격파의 강도와 위치는 탄체 표면의 박리기포와 연소면의 형성에 결정적인 요인이다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 전·후면각을 갖는 형상을 수치적으로 해석하였다.

- a) θ_f : 8°, 9°, 10°, 11°, 15°
- b) θ_b : 8.5°, 10° (θ_f 는 10° 고정)

위의 탄체 형상들 중 a)의 경우는 전방의 탄체 각에 따른 데토네이션파의 형성과 가속성을 연구하기 위한 형상이고, b)는 탄체 후방 경사면의 시작 위치에 데토네이션파를 위치시켜 가속성을 향상시키기 위한 형상이다.

- 이중 원추 형상: 충격파-충격파 상호작용을 파악하기 위하여 선정된 이중 원추의 형상은 그림 5와 같이 정의되고 선정된 형상은 공히 전면각 8° ($\theta_{f1}=8^\circ$), 최대 반지름($r_3=0.7r$)을 갖는다. Case 1에서 Case 4에 대한 채원은 다음과 같다.

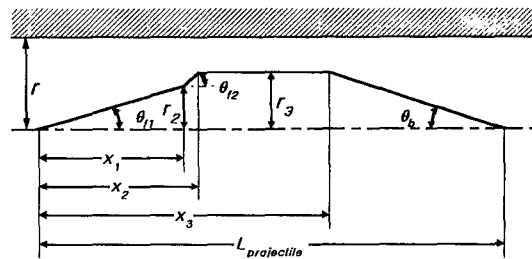


그림 5. 이중 원추 형상의 정의

- a) Case 1 : $\theta_{f2}=33^\circ$, $\theta_b=10^\circ$, $r_2 = 0.55r$
- b) Case 2 : $\theta_{f2}=70^\circ$, $\theta_b=8^\circ$, $r_2 = 0.65r$
- c) Case 3 : $\theta_{f2}=70^\circ$, $\theta_b=8^\circ$, $r_2 = 0.625r$
- d) Case 4 : $\theta_{f2}=55^\circ$, $\theta_b=8^\circ$, $r_2 = 0.625r$

- Power-Law 형상: 탄체의 공력 특성을 향상시키기 위하여 극초음속 영역에서 최소 항력을 갖는 Power-Law 형상(지수 0.69)을 채택, 항력 감소로 인한 가속력의 증대를 해석하였다.

4. 탄체 형상에 따른 연소면의 형성과 가속 특성

4.1 원추-원통-원추 형상

4.1.1 탄체 주위의 연소면 형성과 유동장

혼합기 속을 50r(=100cm) 전진시 탄체 주위에 형성되는 유동장을 그림 6에 나타내었다. 탄체 전면 각에 따른 탄체 주위의 유동장은 그림 6의 a)에서 e)에 나타나 있다. 박리기포-데토네이션파간의 상호 지지 구조를 b)~e)에서 확인 할 수 있다. 전면각에

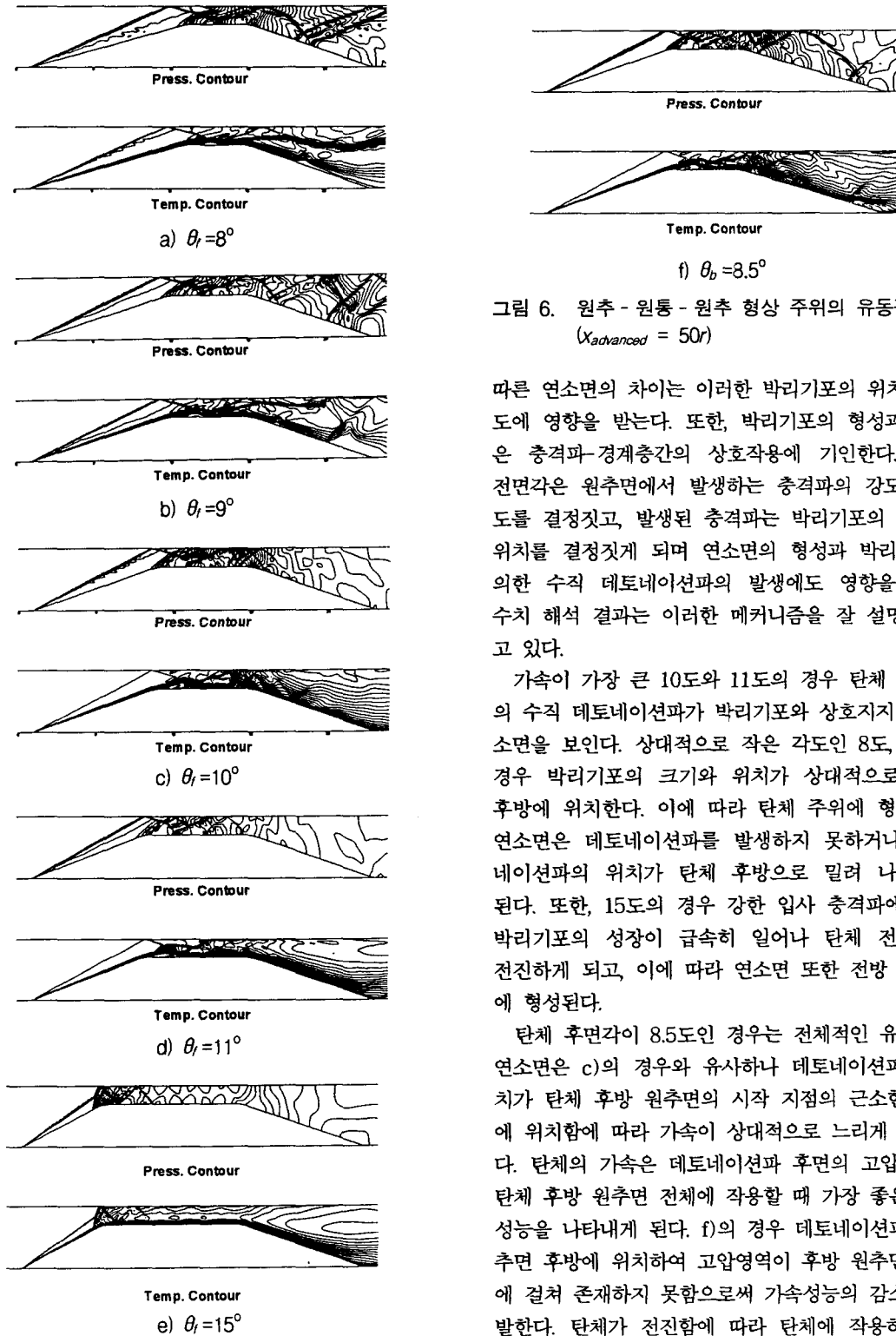


그림 6. 원추 - 원통 - 원추 형상 주위의 유동장 ($X_{advanced} = 50r$)

따른 연소면의 차이는 이러한 박리기포의 위치와 강도에 영향을 받는다. 또한, 박리기포의 형성과 성장은 충격파-경계층간의 상호작용에 기인한다. 탄체 전면각은 원추면에서 발생하는 충격파의 강도와 각도를 결정짓고, 발생된 충격파는 박리기포의 크기와 위치를 결정짓게 되며 연소면의 형성과 박리기포에 의한 수직 데토네이션파의 발생에도 영향을 준다. 수치 해석 결과는 이러한 메커니즘을 잘 설명해 주고 있다.

가속이 가장 큰 10도와 11도의 경우 탄체 중반부의 수직 데토네이션파가 박리기포와 상호지지된 연소면을 보인다. 상대적으로 작은 각도인 8도, 9도의 경우 박리기포의 크기와 위치가 상대적으로 작고 후방에 위치한다. 이에 따라 탄체 주위에 형성되는 연소면은 데토네이션파를 발생하지 못하거나 데토네이션파의 위치가 탄체 후방으로 밀려 나타나게 된다. 또한, 15도의 경우 강한 입사 충격파에 의한 박리기포의 성장이 급속히 일어나 탄체 전방으로 전진하게 되고, 이에 따라 연소면 또한 전방 경사면에 형성된다.

탄체 후면각이 8.5도인 경우는 전체적인 유동장과 연소면은 c)의 경우와 유사하나 데토네이션파의 위치가 탄체 후방 원추면의 시작 지점의 근소한 후방에 위치함에 따라 가속이 상대적으로 느리게 진행된다. 탄체의 가속은 데토네이션파 후면의 고압영역이 탄체 후방 원추면 전체에 작용할 때 가장 좋은 가속 성능을 나타내게 된다. f)의 경우 데토네이션파가 원추면 후방에 위치하여 고압영역이 후방 원추면 전체에 걸쳐 존재하지 못함으로써 가속성능의 감소를 유발한다. 탄체가 전진함에 따라 탄체에 작용하는 가

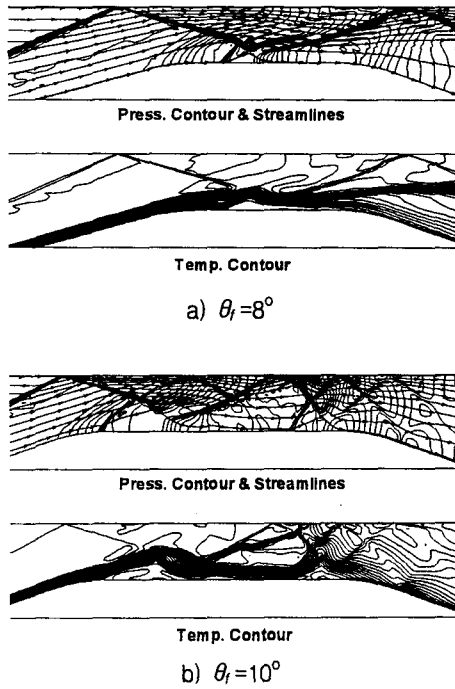


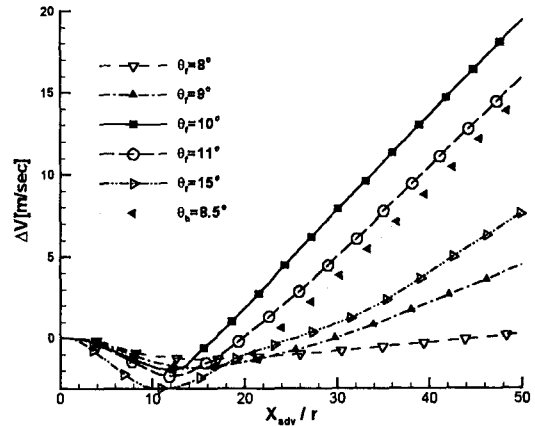
그림 7. 전면각에 따른 박리기포와 주 연소면

속도는 10도의 경우와 비슷하며 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

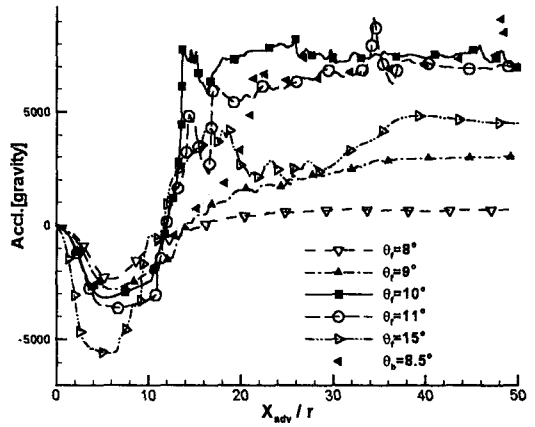
그림 7은 탄체 주위에 형성되는 연소면을 중심으로 확대한 유동장으로써 a)의 $\theta_f = 8^\circ$ 경우 작은 전면각으로 경사 충격파와 경계층 간의 상호작용으로 인한 박리기포가 b)의 $\theta_f = 10^\circ$ 와 비교할 때 상대적으로 미약하고 연소면을 형성하는데 필요한 이차 경사면의 역할을 하지 못하며, 따라서 탄체 후방의 유동장 전체에 걸쳐 그림 2와 같은 안정화된 데토네이션파가 발생되지 않는다. 그림 b)의 경우 전방의 경사 충격파로 인한 탄체 표면의 박리기포의 생성이 a)에 비하여 상대적으로 크게 일어나 탄체 전방에 안정화되어 경계층 내부의 연소면을 벽면으로 부양하는 이차 경사면의 역할을 하고, 박리기포 후면의 재부착 충격파도 탄체와 벽면사이에 안정화된 데토네이션파의 생성을 유발한다.

4.1.2 속도와 가속도의 변화

그림 8에서 볼 수 있듯이 탄체가 혼합기를 돌입하여 연소면을 형성하며 가속을 시작하는 구간은 전



a) 속도 변화



b) 가속도 변화

그림 8. 원추-원통-원추 형상의 속도와 가속도 변화

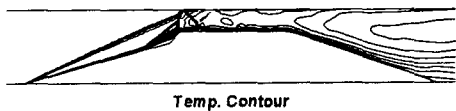
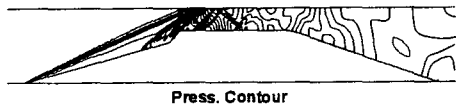
탄체가 혼합기로 돌입한 직후임을 알 수 있다. 형상에 따른 속도와 가속도의 경향은 전·후면의 반쪽 각각에 관계없이 일정한 경향을 띄고 있다.

다만, 전·후면각에 따른 연소면의 위치와 강도의 차이로 인하여 가속도와 속도의 변화 값만이 차이를 나타낸다. 실험적 연구^[10]에서도 동일한 조건 하에서 탄체 전면 각도의 변화에 따라 가속 특성의 차이를 나타내게 되고, 일정한 각도에서 최상의 가속 성능을 보이게 된다. 본 연구에서는 전·후면각이 10° 인 경우가 기본 형상 중에서 가장 좋은 가속 특성을 보였다.

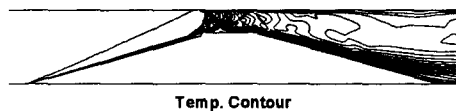
4.2 이중 원추 형상과 Power-Law Shape

4.2.1 탄체 주위의 연소면 형성과 유동장

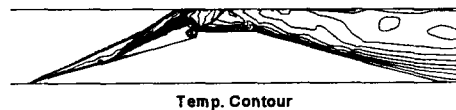
각 형상에 대한 탄체 주위의 유동장은 다음 그림 9와 같다.



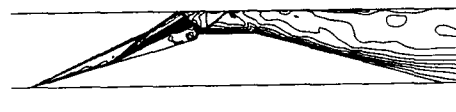
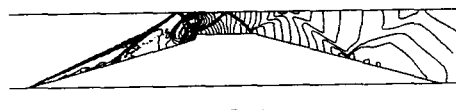
a) Case 1



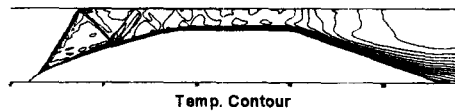
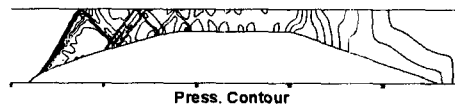
b) Case 2



c) Case 3($X_{advanced} = 32.5r$)



d) Case 4($X_{advanced} = 32.5r$)



e) Power-Law Shape

그림 9. 이중 원추 형상과 Power-Law 형상의 유동장($X_{advanced}=50r$, except c), d])

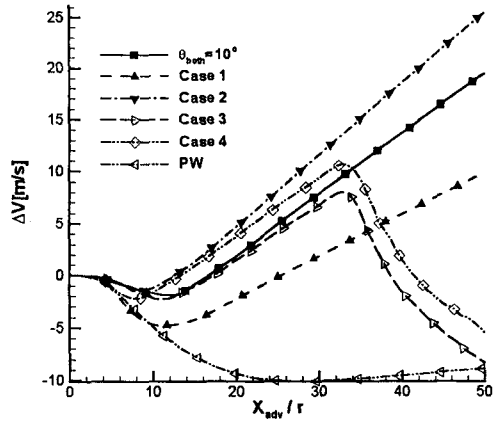
이중 원추 주위의 유동장은 기본 형상과는 달리 충격파 - 충격파간의 상호작용으로 주 연소면이 이중 원추면 상에 부착되어 탄체를 지속적으로 가속한다. 그림 9의 이중 원추 형상 주위의 연소면은 모두 두 번째 원추면을 중심으로 형성됨을 알 수 있다. 기본 형상과는 달리 이중 원추 형상의 탄체는 혼합기 속을 돌입하여 혼합기가 이중 원추면을 지나면서 주 연소면이 박리기포의 천이 과정 없이 형성되어 빠른 안정화를 이룬다. Power-Law 형상의 경우 동결 유동의 유동장과는 달리 충격파 유도 연소 현상으로 인하여 탄체 전면에 고압력 구배가 걸리는 유동장을 형성하여 동결 유동과는 상당히 다른 특성을 나타낸다.

4.2.2 속도와 가속도의 변화

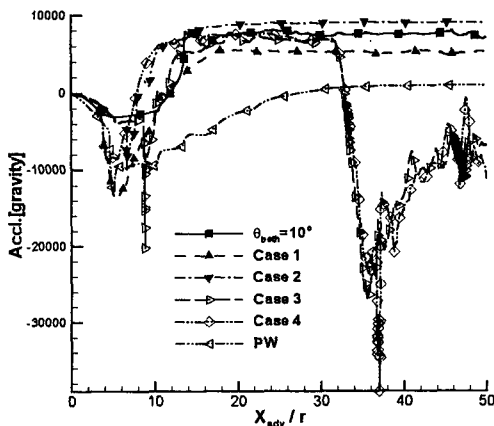
각 형상에 대한 속도와 가속도의 변화는 다음의 그림 10과 같다.

이중 원추 형상은 기본 형상에 비하여 상대적으로 초기 연소면의 형성이 빠르게 이루어져 속도와 가속도의 천이 구간이 상당히 짧은 특징을 나타낸다. 가속도의 안정화가 비교적 빠르게 일어나 전체 가속 성능의 예측을 가능케 한다. 특히 Case 2의 경우는 앞절의 기본 형상을 포함한 전체 형상 중 전·후면 각이 10° 인 ISL의 형상에 비해 속도는 31.0%, 가속도는 25.3%의 향상을 보여 가장 우수한 가속 특성을 나타내고 있다.

Case 3과 Case 4는 안정 상태에서 급격한 가속도의 감소를 나타내고 있다. 이는 이중 원추면의 경사각이 급한 경우 Case 2와 비교하여 상대적으로 두 번째 원추면이 차지하는 높이가 크고 경사각도



a) 속도 변화



b) 가속도 변화

그림 10. 이중 원추와 Power-Law 형상의 속도와 가속도 변화

Case 1에 비해 상당히 크기 때문에 이중 원추면의 접합 부분에서 초기에 형상으로 인하여 발생하는 박리기포가 Case 1과 2에 비하여 상대적으로 크고, 주 연소면 후방의 충격파 - 경계층 상호작용으로 인한 박리기포가 탄체의 가속에 따라 탄체 전면으로 이동하여 이중 원추 접합부의 박리기포와 합쳐져 더욱 성장하게 되고 주 연소면 전면에 위치하게 되어 주 연소면이 탄체 전면으로 전진하게 된다. 이와 동시에 박리기포도 탄체 전면으로 빠르게 성장하는 상호작용을 통하여 급격한 고압력 구배가 탄체 전면을 차지하여 탄체는 급격한 감속을 겪게 된다.

Case 3에 비해 Case 4는 이중 원추면의 경사각

이 55°로 작지만 이중 원추면이 차지하는 높이가 같아 전체 가속 특성은 Case 3과 유사한 경향을 지닌다. 그림 9의 c)와 d)는 이러한 급격한 감속 과정이 시작되는 탄체 주위의 유동장($x_{advanced}=32.5r$)을 나타내고 있다. 이중 원추의 두 각의 차이가 큰 경우 일정한 가속도를 안정적으로 유지하기 위한 이중 원추면의 형상은 이중 원추면의 각도보다는 이중 원추면이 차지하는 높이가 중요한 요소이다. 이러한 결과로부터 탄체의 형상이 이중 원추 형상인 경우 데토네이션파를 유지하면서 안정적인 가속을 얻고, 항력을 줄이기 위해서는 이중 원추면의 높이를 가능한 작게 선정하여야 하며 이중 원추면의 최적 높이 선정은 앞으로의 심도 있는 설계 최적화에 대한 연구를 필요로 한다.

Power-Law 형상의 경우 초기 혼합기로 돌입하면서 탄체 전면의 곡률이 큰 부분에서 급격한 연소가 진행되어 수직에 가까운 데토네이션파가 탄체 전면에 위치하여 큰 감속을 받는다. 부착된 데토네이션파는 더 이상 탄체 전면으로 전진하지 않으며, 전면의 고압부로 인해 50r 전진시 감속된다. 이러한 현상은 비연소 유동(Cold Flow)과는 상반되는 결과를 보여주고 있으며, 충격파 유도 연소 현상에 대한 이해와 심층적인 연구의 필요성을 시사한다.

5. 결 론

초폭굉 램 가속기의 탄체 형상에 대한 수치적 연구를 통하여 탄체 전·후면의 형상이 탄체의 가속 특성과 연소면의 형성에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 탄체의 전·후면각이 데토네이션파의 생성과 가속 특성에 직접적인 영향을 미침을 확인하였고, 원추 - 원통 - 원추 형상의 경우 전·후면각이 10°인 형상이 본 연구의 해석 조건하에서 가장 가속 성능이 우수하였다.
- 전면 형상이 이중 원추인 탄체는 충격파 - 충격파 상호작용을 이용하여 이중 원추 각과 높이를 조절함으로써 데토네이션파의 생성위치와 강도를 결정할 수 있었다.
- 이중 원추 형상은 기본 형상에 비해 연소면의 빠

른 형성과 안정화를 이룰 수 있었으며, 이를 이용하여 전·후면의 각이 10° 인 ISL 기본 형상에 비해 속도는 31.0%, 가속도는 25.3% 향상된 탄체 형상을 도출하였다.

- 이중 원추 형상에서 데토네이션파를 유지하면서 탄체 항력의 감소와 지속적이고 안정적인 가속을 얻기 위해서는 이중 원추면의 높이를 가능한 작게 선정해야 하고, 이중 원추면 높이의 최적값은 앞으로의 설계 최적화에 대한 심도 있는 연구를 필요로 한다.

본 연구에서 고려한 탄체의 전·후면 형상 외에도 탄체와 가속기 벽면과의 간극, 탄체 후면의 형상들도 탄체 주위의 유동장과 가속 특성에 영향을 미치는 중요한 요소들이며 이에 대한 연구가 앞으로 수행될 예정이다. 이러한 연구 결과들은 향후 램 가속기 성능에 대한 설계 최적화 연구의 기초 자료로 이용 될 것이다.

후 기

본 연구는 한국 과학 재단의 연구비 지원(핵심연구과제, 과제번호 981-1010-065-2)으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 한국 과학 재단에 감사드립니다. 또한, 본 연구에 많은 도움을 주신 최정렬 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

1. Hertzberg, A., Bruckner, A.P., and Bogdanoff, D.W., "Ram Accelerator: A New Chemical Method for Accelerating Projectiles to Ultrahigh Velocities," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 2, Feb. 1988, pp. 195~203.
2. Seiler, F., Patz, G., Srulijes, J., "The Rail Tube in Ram Acceleration: Feasibility Study with ISL's RAMAC 30," Second International Workshop on Ram Accelerators, July 17~20, 1995.
3. Yungster, S., "Numerical Study of Shock - Wave / Boundary - Layer Interactions in Premixed Combustible Gases," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 10, Oct. 1992.
4. Yungster, S., Bruckner, A.P., "Computational Studies of a Superdetonative Ram Accelerator Mode," *Journal of Propulsion and Power*, Vol 8, No. 2, March-April, 1992.
5. Choi, J.Y, Jeung, I.S., Yoon, Y., "Numerical Study of Scram Accelerator Starting Characteristics," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 6, June 1998.
6. Rom, J., "Analysis of the Limits for the Start and Unstart of the Subdetonative and Superdetonative Ram Accelerator," Third International Workshop on Ram Accelerators, July 16~18, 1997.
7. Stewart, J.S., Bruckner, A.P., Knowlen, C., "Effects of Launch Tube Shock Dynamics on Initiation of Ram Accelerator Operation," Third International Workshop on Ram Accelerators, July 16~18, 1997.
8. Wang, X., Spiegler, E. and Timnat, Y. M., "Optimization of Ram Accelerator Systems Design," AIAA Paper 98-3448, 1998.
9. Chang, X, Shimomura, Y., and Taki, S. "Preliminary Tests of A Rectangular Bore Ram Accelerator," Second International Workshop on Ram Accelerators, July 17~20, 1995.
10. Imrich, T.S., Elvander, J., and Bruckner, A.P. "The Impact of Projectile Geometry on Ram Accelerator Performance," Second International Workshop on Ram Accelerators, July 17~20, 1995.
11. Moretti, G., "A New Technique for the Numerical Analysis of Nonequilibrium Flows," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, 1965, pp.223~229.

12. Evans, J.S., and Schexnayder, C.J.,
"Influence of Chemical Kinetics and
Unmixedness on Burning in Supersonic
Hydrogen Flames," *AIAA Journal*, Vol.
18, Feb. 1980, pp.188~193.

13. Yungster, S. and Rabinowitz, M.J.
"Computation of Shock-Induced Com-
bustion Using a Detailed Methane-Air
Mechanism," *Journal of Propulsion and
Power*, Vol. 10, No. 5, Sept.-Oct. 1994.