



수치 최적화 기법을 이용한 램 가속기 성능 향상 연구

A Study on the Ram Accelerator Performance Improvement
Using Numerical Optimization Techniques

○전 용 회¹⁾, 이 재 우²⁾, 변 영 환³⁾

Yong-Hee Jeon, Jae-Woo Lee and Yung-Hwan Byun

Abstract

Numerical design optimization techniques are implemented for the improvement of the ram accelerator performance. The design object is to find the minimum ram tube length required to accelerate projectile from initial velocity V_0 to target velocity V_e . The premixture is composed of H_2 , O_2 , N_2 and the mole numbers of these species are selected as design variables. The objective function and the constraints are linearized during the optimization process and gradient-based Simplex method and SLP(Sequential Linear Programming) have been employed. With the assumption of two dimensional inviscid flow for internal flow field, the analyses of the nonequilibrium chemical reactions for 8 steps 7 species have been performed. To determine the tube length, ram tube internal flow field is assumed to be in a quasi-steady state and the flow velocity is divided into several subregions with equal interval. Hence the thrust coefficients and accelerations for corresponding subregions are obtained and integrated for the whole velocity region. With the proposed design optimization techniques, the total ram tube length had been reduced 19% within 7 design iterations. This optimization procedure can be directly applied to the multi-stage, multi-premixture ram accelerator design optimization problems.

1. 서론

현재 개발된 대부분의 발사체는 탑재체를 궤도에 진입시키기 위하여 자체 추진 기관과 추진제탄 장착하고 있다. 기존 발사체의 이러한 구조는 수백Kg의 탑재체를 궤도에 발사하기 위해 수백 톤의 연료를 싣고 올라가야 하며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존 발사체의 단점을 절충하는 형식의 공중 발사형 우주발사체나, 자체에 추진 기관을 갖지 않는 램 가속기나 레이저 추진 기관 등의 다각적인 노력이 행해지고 있다.

램 가속기는 80년대 후반 Hertzberg[1]에 의해 제시되었으며, 예 혼합기 내부를 고속으로 비행하는 탄체 주위의 충격파로 유도되는 연소 현상을 이용, 지속적인 추력을 발생시키는 장치이다. 작동 모드에 따라 크게 열적 질식 모드(Thermally Choked)와 초폭굉 연소 모드(Superdetonative)의 두 가지 형태로 구분할 수 있으며, 열적 질식 모드를 중심으로 천이 모드와 초폭굉 연소 모드에 관한 연구가 프랑스의 ISL, 미국의 워싱턴 대학 등을 중심으로 실험적[2], 수치적 연구[3,4]가 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 요인들로는 혼합기의 조성비와 초기 압력 및 온도, 탄체의 초기 속도와 형상, 질량, 가속 장치의 길이 등을 들 수 있다. Rom[6]은 불발(Unstart) 현상을 일으키는 혼합기 조성비의 과능 한계와 회박 한계를 연구하여 예 혼합기 조성비가 초기 발진 과정과 작동 성능에 미치는 영향을 연구하였으며, Stewart 등[7]은 램 가속기 Launcher의 초기 압력과 배기 효과에 대한 실험적 연구를 통하여 높은 압력에서 더 큰 가속을 얻을 수 있음을 보여주었다. 이외에도 램 가속기의 작동 성능에 주요한 인자로 작용하는 탄체 형상은 Imrich 등[8]의 실험적 연구와 Jeon 등[9]의 수치 연구를 통하여 연소면의 생성과 안정화에 미치는 영향을 연구하여 램 가속기 성능 향상을 연구하였다.

최근, 수치 최적화 기법을 적용하여 Sabean 등[10]은 $M_0 \sim M_e$ 의 속도 영역에서 작동하는 스크린 가속기의 탄체 형상에 대한 최적화 연구를 수행하였는 바, 탄체 형상과 관련된 설계 변수를 선정하고 유동을 비점성

1) 건국대학교 항공우주공학과 대학원

2) 정희원, 건국대학교 항공우주공학과 (143-701, 서울특별시 광진구 모진동 93-1, Tel : 02-450-3461)

3) 건국대학교 항공우주공학과 (143-701, 서울특별시 광진구 모진동 93-1, Tel : 02-450-3548)

으로 가정하였으며, 속도영역을 분할하여 추력 계수를 이차 곡선으로 보간하여 이를 최대화시키는 형상에 대한 연구를 수행하였으며, Wang 등[11,12,13]은 비점성, 정상 유동 가정의 다단계 램 가속기 각 단의 진입 속도에 대한 예 혼합기의 조성비를 최적화 하여 전체 다단계 램 가속기 성능 향상을 연구하였으며, 최근 혼합기의 조성비와 탄체 형상을 동시에 고려한 최적화를 수행하였다[14].

램 가속기에 대한 기존의 연구는 램 가속기 내부 유동 현상의 난해함으로 인해 실험적 방법에 근거한 Parametric 연구와 수치 해석을 이용한 현상의 모사에 집중되어왔다. 이러한 기존의 연구도 주로 열적 질식 모드에 대해 편중됨으로 인하여 초폭굉 모드 램 가속기의 작동 성능 향상에 관한 연구는 소수를 제외하고는 전무한 실정이다.

본 연구는 초폭굉 모드 램 가속기의 작동 성능 향상을 위해 내부 유동장을 수치적 방법으로 해석하고, 구배법에 기반한 수치 최적화 기법을 이용한 램 가속기의 예 혼합기 조성비 최적화 연구를 수행, 램 가속기의 가속 성능을 향상하고 시스템 설계에 기반이 되는 연구를 수행하고자 한다.

2. 램 가속기 작동 특성

램 가속기 내부의 유동은 고온, 고압하에 급격한 비평형 화학 반응이 존재하는 고속유동으로, 탄체 주위의 공기역학적인 힘들과 화학반응에 의한 추진력이 탄체에 작용함으로 인하여 시간에 따라 비정상적인 거동을 나타내게 되고, 이에 따라 램 가속기 성능에 대한 예측이 상당한 어려움을 겪게 된다.

일반적으로 램 가속기의 작동 성능을 나타내는 대표적인 값으로 다음과 같이 무차원화 된 추력 계수의 값이 사용된다. 이 식에서 P_0 는 초기압력, A 는 탄체 단면적, F 는 탄체에 작용하는 외력, a 는 탄체에 작용하는 가속도를 각각 나타낸다.

$$C_t = \frac{F}{P_0 A} = \frac{ma}{P_0 A} \tag{1}$$

상대적으로 열적 질식 모드의 작동 성능은 지배 방정식의 간략화 된 형태인 일차원 탄도 모델 식 2)를 적용하여 근사하게 예측 가능하다[Fig 1]. 열적 질식 모드의 일차원 탄도 모델을 적용하여 초기 예 혼합기에 대한 Mixture Map을 작성하고 작성된 도표 상에 나타난 혼합기의 발열량과 추력 관계를 이용하여 추력 성능 향상을 위한 혼합기 조성의 최적화에 적용하는 기법으로 Washington 대학을 중심으로 개발되어 실제 실험상의 추력 성능 예측에 효과적으로 적용되고 있다[15]. Fig 2는 $CH_4/O_2/He$ 조성의 혼합기에 대한 Mixture Map 기법의 적용 예로 Mixture Map 상의 등-발열량 선과 등-진입 마하수 선, 등-추력 계수 선을 이용하여 높은 추력 계수를 갖는 조성비의 탐색과 보정에 적용한 예이다.

$$C_t = M_0 \Gamma \left(1 + \frac{(\gamma_0 - 1)}{2} M_0^2 + \bar{q} \right)^{1/2} - (1 + \gamma_0 M_0^2) \tag{2}$$

where, $\Gamma = \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \left(\frac{2(\gamma_1^2 - 1)}{\gamma_0 - 1} \right)^{1/2}$, $\bar{q} = \frac{\Delta q}{C_{p0} T_0}$

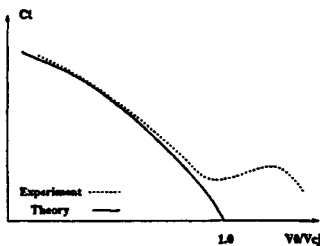


Fig 1. 1-D Ballistic Model[11]

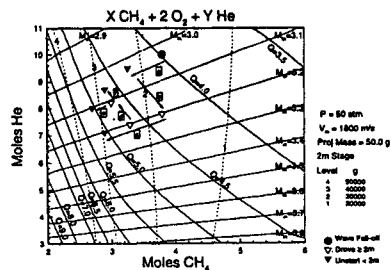


Fig 2. $CH_4/O_2/He$ Mixture Map with iso-Q and iso- M_{in} Lines[15]

열적 질식 모드에 비해 초폭굉 모드는 작동 성능을 효율적으로 예측할 수 있는 모델이 정립되어 있지 않으나, 전반적인 가속 성능의 경향은 열적 질식 모드와 유사한 경향을 나타내며 다단계 램 가속기의 경우에도 각 단계의 경향이 Fig 3과 같이 동일한 경향을 나타내며, 전체 다단계 램 가속기의 작동 성능의 경우에도 무한히 많은 수의 단계가 중첩될 경우 Fig 4와 같이 단일 단계의 램 가속기의 작동 성능과 동일한 속도에 대한 이차 함수의 경향을 지님이 알려져 있다[11].

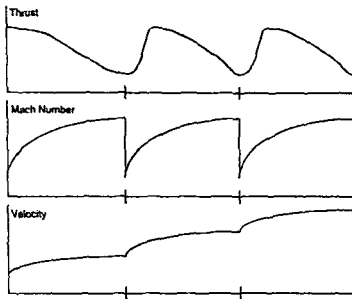


Fig 3. Performance of Multi-Stage Ram Accelerator[16]

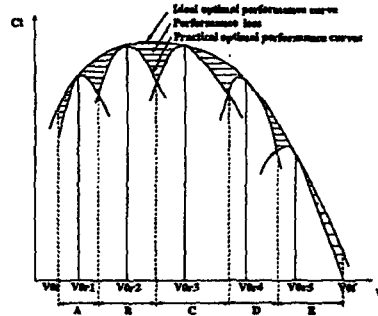


Fig 4. Overall Thrust Coefficient of Multi-Stage Ram Accelerator[11]

3. 램 가속기 성능 향상을 위한 예 혼합기 조성비의 수치 최적화

기존의 실험적, 수치적 연구를 통하여 예 혼합기의 조성비와 압력, 탄체의 형상 등이 램 가속기의 작동 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소임이 알려져 있다. 이 중, 램 가속기 내부의 예 혼합기 조성비에 대한 수치 최적화를 수행하여 램 가속기 작동 성능의 향상과 시스템의 최적 설계에 기반이 되는 연구를 수행하였다.

3.1 램 가속기 내부의 수치 해석

램 가속기 내부는 고온, 고압의 비평형 화학 반응이 존재하며, 시간적으로 비정상적인 거동을 보인다. 본 연구에서는 연산의 효율성을 고려하여 내부 유동을 비점성으로 가정하여 생성항이 존재하는 이차원 Euler 방정식을 지배방정식으로 고려한다. 계산 평면에서 무차원화 된 지배방정식은 식 3)과 같고, 각각의 공간 방향의 플럭스 F , G 는 연쇄법칙을 적용하고, 반전속도 U , V 를 이용하여 나타내면 식 4)와 같다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} = \frac{1}{J} W \quad 3), \quad F = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_1 U \\ \vdots \\ \rho_N U \\ \rho u U + \xi_x P \\ \rho v U + \xi_y P \\ U(e_t + P) \end{bmatrix}, \quad G = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_1 V \\ \vdots \\ \rho_N V \\ \rho u V + \eta_x P \\ \rho v V + \eta_y P \\ V(e_t + P) \end{bmatrix} \quad 4)$$

식 3)의 형태로 정리된 지배 방정식에 대해 공간차분은 Roe의 FDS를 적용하였으며, 고차 정확도로의 확장을 위해서 MUSCL기법과 minmod 제한자를 이용하였다.

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_{i,i} = W_{i,i}^{n+1} - J_{i,i} \left(\frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} \right)_{i,i}^{n+1} \quad 5)$$

비평형 화학 반응과 복잡한 반사 충격파의 존재로 상당한 강성이 발생하므로, 시간 적분은 완전 내재적 기법인 LU-SSOR 기법을 적용하였다. 지배 방정식을 공간 차분된 형태의 완전 내재적인 시간 적분 식으로 나타내면 식 5)와 같다. 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 이중 두 단계로 전체 행렬의 연산을 수행한다.

화학 반응 모델은 Moretti[17]가 제안한 8 단계 7 화학종(H , H_2 , O , O_2 , OH , H_2O , N_2) 반응과 Evans와 Schexnyder[18]가 제시한 화학 반응 데이터를 사용했다.

사용된 탄체는 초폭굉 모드 램 가속기의 일반적인 형상인 원추-원통-원추 형상을 사용하였으며 탄체 형상과 질량(=100g)은 변하지 않는다. 사용된 탄체의 형상과 격자계는 Fig 5와 같다.

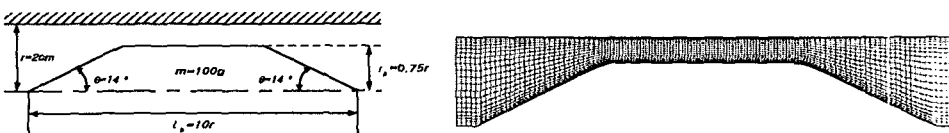


Fig 5. Projectile Geometry and Computational Grids

3.2 최적화 문제의 정의와 공식화

본 연구에서는 탄체가 수소/산소/질소로 구성된 20atm, 300K 상태의 예 혼합기 속을 초기속도 $V_0=2500m/s$ 로 진입하여 출구에서 속도 $V_e=3000m/s$ 로 가속되는 임무를 수행하며, 이때, 탄체를 가속시키기 위해 필요한 램 가속기의 가속관의 길이를 최소화시킴으로써 전체 램 가속기의 작동 성능에 대한 최적화를 수행하였다.

최적화를 위한 목적함수는 가속관의 길이 L_{tube} 를 선정하였고, 설계변수로는 수소/산소/질소로 구성된 혼합기의 몰수 중 산소에 대한 수소와 질소의 상대적인 몰비를 선정하였다. 구속 조건으로 Wave Fall-off 현상을 방지하고 설계영역을 한정하기 위해 당량비(Equivalence Ratio, Φ) 조건과 설계변수의 범위를 다음과 같이 정의했다.

- 목적함수 : $L_{tube} [=F(C_i)]$
- 설계변수 : $X1H_2/O_2/X2N_2$ 혼합기, $\bar{X}=(X1, X2)$
- Equivalence Ratio : $\Phi \geq 1$
- Side Constraints : $0 \leq (X1, X2) \leq 10$

연산상의 효율성을 고려하고 램 가속기 작동 성능의 속도에 따른 추력 계수의 변화 경향을 고려하기 위하여 초기속도 V_0 에서 출구속도 V_e 까지 속도 영역의 세 점(2500m/s, 2750m/s, 3000m/s)을 정하고 예 혼합기 조성에 따른 각 속도에서의 C_f 값을 수치 해석을 통해 얻은 후, C_f 곡선을 식 6)과 같이 속도에 대한 이차 다항식으로 보간하여 램 가속기의 전체 작동 성능을 결정한다.

$$C_f(V) = a_0 + a_1V + a_2V^2 \quad (6)$$

임의의 예 혼합기 조성에 대한 가속관의 길이는 식 1)의 추력 계수의 정의와 다음 식 7)로부터 수치 적분하여 구한다.

$$\frac{dV}{dx} = \frac{dV}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{a}{V} \left(= \frac{C_f P_0 A}{m A} \right) \Rightarrow L_{tube} = \int dx = \int_{V_0}^{V_e} \frac{V}{a} dV \quad (7)$$

$$= \frac{m}{P_0 A} \int_{V_0}^{V_e} \frac{V}{C_f} dV$$

3.3 수치 최적화 기법

램 가속기 작동 성능 최적화를 수행하기 위한 전체 최적화 과정은 Fig 6과 같다.

각 혼합기의 조성비에 따른 목적함수(L_{tube})를 구하기 위해서는 세 가지 속도에 대한 수치 해석이 필요하다. 최적화 과정에서 수치 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위해 각 속도별 수치 해석을 3대의 연산장치를 이용하여 분산 수행함으로써 연산에 소요되는 시간을 줄였다.

수치 최적화에 사용된 기법으로는 구배법에 기반한 Simplex 방법 및 SLP (Sequential Linear Programming) 등[19]과 함께 최적화 전과정에서 목적 함수를 근사식을 사용하는 근사 최적화(Sequential Approximation Optimization)를 수행하여 연산 효율성을 고려하였다.

최적화의 과정에서 최적점으로의 수렴성을 가속시키기 위한 방법으로, 열적 질식 모드의 램 가속기에 대해서 훌륭히 사용되었던 Mixture Map 기법[15]을 응용하여 설계점 이동 방향의 보정에 사용하였으며, 목적 함수의 구배가 상당히 큰 구간에서 목적 함수의 근사로 인한 해의 수렴성 저하를 막기 위하여 설계 변수의 Move Limit을 작게 조절하였으며, 일차원 탐색 기법을 적용하여 다음 설계점을 선정하였다.

이상의 기법을 이용하여 다음의 초기 조건을 시작점으로 하여 램 가속기에 대한 최적화를 수행하였다.

- $2H_2 + O_2 + 5N_2$ 의 조성비 : $\bar{X}=(2, 5)$
- 초기 압력, 온도 : 20atm, 300K
- Equivalence Ratio : $\Phi \approx 0.8$ (Infeasible Condition)

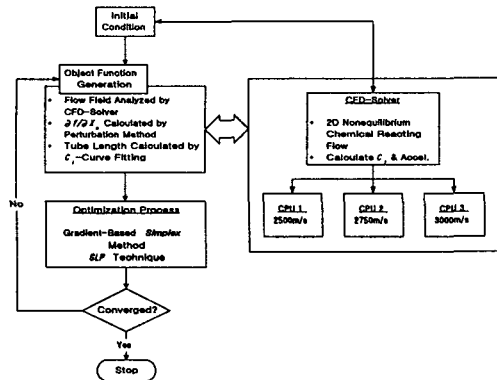


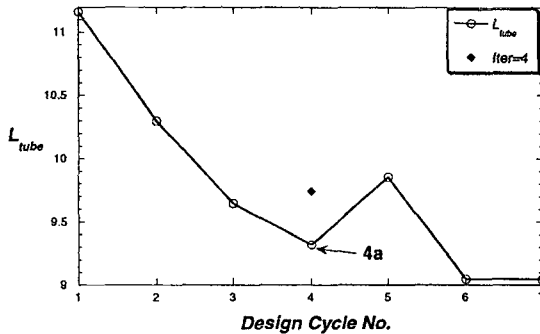
Fig 6. Flow Chart of Ram Accelerator Performance Optimization



4. 수치 최적화 수행 결과 및 토의

4.1 수치 최적화에 따른 목적함수와 조성비의 변화

초기조건에서 수치 최적화를 반복 수행하는 동안 목적함수 L_{tube} 의 변화와 예 혼합기의 조성은 다음과 같이 변화한다.

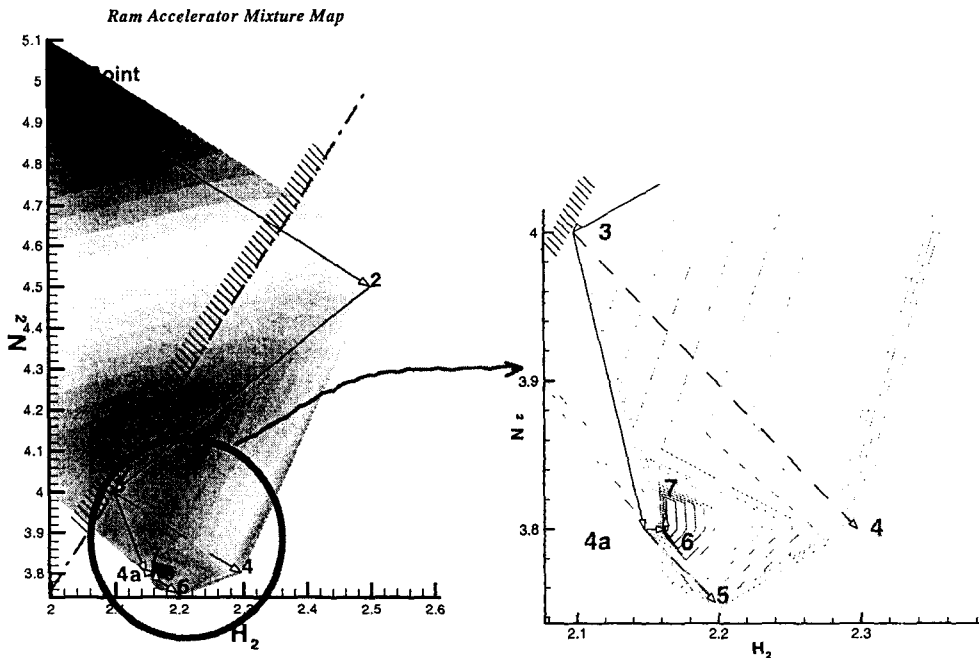


Iteration	X1	X2	$L_{tube}(m)$
1	2.00	5.0	11.16
2	2.50	4.5	10.30
3	2.10	4.0	9.65
4	2.30	3.8	9.74
4a	2.15	3.8	9.32
5	2.20	3.75	9.85
6	2.16	3.8	9.047
7	2.16	3.81	9.044

Fig 7. Optimization Result of L_{tube}

Table 1. Mixture Components and L_{tube}

Fig 7에서 알 수 있듯이 최적화의 과정을 거치며 가속관의 길이는 성공적으로 감소한다. 반복 횟수 4번 이후로는 램 가속기의 특성으로 인하여 조성비의 약간의 변화에도 목적 함수의 값이 민감하게 바뀌는 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 목적 함수를 단순히 일차 선형화 된 형태로 적용함으로써 나타나는 현상으로 발열량이 높은 혼합기 조성으로 설계점이 이동될수록 두드러지게 나타난다.



a) Optimization History on the Mixture Map

b) Mixture Map around the Optimum Point

Fig 8. Mixture Map of Ram Accelerator and Optimum Process.

목적함수의 강한 비 선형성으로 인한 설계상의 난점을 해결하고 해의 수렴을 가속화하기 위해 반복 횟수 4회 이후의 과정에서 열적 질식 모드 램 가속기에서 적용되고 있는 Mixture Map 기법과 일차원 탐색 기법을 적용함으로써 목적함수의 구배가 큰 구간에 대한 최적해의 수렴성을 가속시켰다. 이러한 기법의 적용으로 초기 가속관의 길이 11.16m에서 7번의 설계반복으로 9.044m까지 약 19.0%의 가속관 길이의 감소를 볼 수 있었다. 설계변수에 대한 Mixture Map 상의 결과는 Fig 8과 같다.

4.2 최적화에 따른 작동 성능의 변화

램 가속기의 작동 성능에 대한 수치 최적화 기법을 수행함에 따라 램 가속기의 작동 성능을 나타내는 대표적인 수치인 추력 계수, C_f 값의 변화는 다음 Fig 9와 같다.

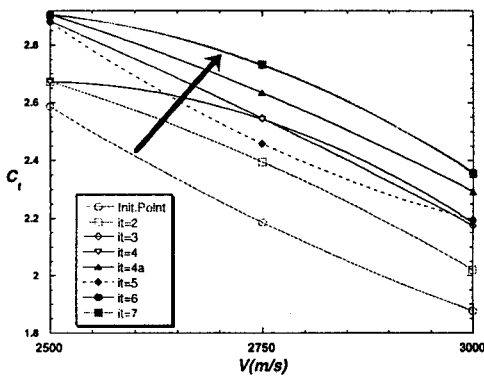


Fig 9. C_f Curve Variation as Ram Accelerator Optimization

최적화가 진행됨에 따라 C_f 곡선의 값이 전반적으로 상승되는 경향을 나타내며 곡선의 형태 또한 속도에 대하여 위로 볼록한 2차 곡선의 형태로 변화함을 알 수 있다.

C_f 곡선의 변화를 통해 C_f 값에 비례하는 탄체의 가속도 또한 동일한 형태로 변화함을 알 수 있으며, 혼합기의 발열량도 증가하는 방향으로 변화함을 알 수 있다. 이에 따라 전 속도 영역에서의 탄체 가속 능력이 향상됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 수치 최적화의 과정에서 예 혼합기의 조성비가 램 가속기의 작동 속도 전 영역에 걸쳐 최적의 성능을 발휘할 수 있는 조성비로 수렴되었음을 시사한다.

4.3 최적화에 따른 탄체 표면의 압력 분포 변화

탄체에 작용하는 추력은 탄체 표면에 작용하는 압력의 벡터 합으로 결정된다. 따라서, 최적화의 과정을 통한 탄체 표면의 압력 분포의 변화를 살펴봄으로써 최적화에 따른 물리적 현상의 특성을 파악 할 수 있다.

Fig 10에서 압력 분포의 일반적인 경향은 최적화가 수행될수록 탄체 전체에 걸쳐 압력이 증가하는 방향으로 변화함을 알 수 있다. 탄체의 중반부에 작용하는 압력은 탄체의 중심축을 기준으로 대칭 작용하여 서로 상쇄됨으로 탄체에 작용하는 가속도에는 영향을 주지 않는다. 따라서, 탄체의 전·후면의 경사면에 작용하는 압력 분포가 탄체의 가속을 결정하며, 전체 속도 영역에서의 작동 성능을 결정 짓는다.

최적화가 수행됨에 따라 혼합기의 조성은 열 방출량이 큰 조성비로 변화해 가고, 이에 따라 충격파로 유도되는 연소면 강도와 후면의 압력상승은 커진다. 이러한 경향은 어느 정도 이론적 완전 연소가 일어날 혼합기의 조성비로 접근할수록 두드러지지만, Fig 11의 a)에서와 같이 혼합기의 조성이 발열량이 증대되는 조성비로 변

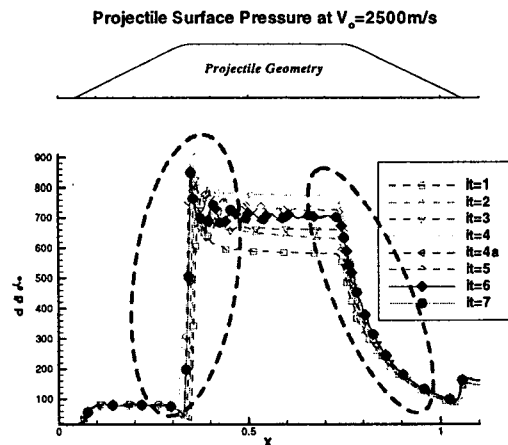
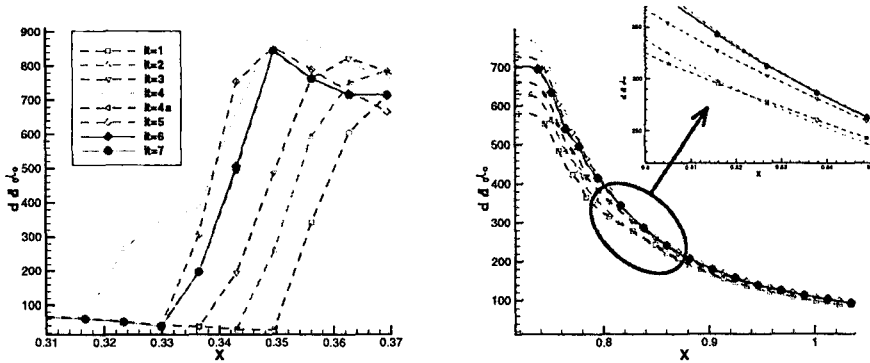


Fig 10. Pressure Distribution on the Projectile Surface ($V=2500m/s$)



화함에 따라 탄체 표면에 생성되는 데토네이션파의 강도와 압력 상승으로 탄체 후면의 압력은 Fig 11의 b) 처럼 상승하나 발열량의 증대와 더불어 탄체 표면에 안정화되는 위치는 탄체 전면으로 이동된다.

형성된 데토네이션파의 위치가 전방의 경사면의 앞부분으로 이동함에 따라 어느 한계점을 지나면 연소면 후방의 고압력 구배가 탄체 전방 경사면에 작용하여 탄체에 항력으로 작용하게 된다. Fig 11의 a)의 경우 데토네이션파를 통한 압력 상승은 설계점 4에서 가장 높게 나타나지만 데토네이션파의 위치가 탄체 전방 경사면에 위치함으로 인해 가속 성능은 오히려 설계점 4a나 6, 7에 비해 낮아짐을 알 수 있다.



a) Pressure on the Projectile Nose Cone b) Pressure at Projectile Tail Cone

Fig 11. Detailed Pressure Distribution on Nose and Tail Cone($V=2500m/s$)

이상의 탄체 표면의 압력 분포 변화에 대한 고찰을 통하여 램 가속기의 최적의 작동 성능을 나타내는 일정한 예 혼합기의 조성비가 존재함과, 본 연구의 램 가속기 예 혼합기 조성비에 대한 수치 최적화가 램 가속기의 작동 성능 향상에 적절히 이용 될 수 있음을 확인 할 수 있다.

5. 결론 및 향후 계획

초폭굉 모드 램 가속기의 작동 성능에 대한 수치 최적화를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 예 혼합기 조성에 따른 작동 성능의 효율적 예측을 위하여, 전 속도영역의 일정 속도를 선정, 각 속도 별로 다수의 연산장치를 이용하여 수치 해석을 수행하여 얻은 값으로 추력 계수 C_L 를 속도의 함수로 보간하여 작동 성능을 예측하여 연산 효율성을 고려한 효과적인 결과를 얻었다.
- 각 설계점에서 목표함수를 근사함과 동시에 Mixture Map 기법과 일차원 탐색 기법을 적용하여 구배가 심한 구간의 설계점 선정의 효율성을 고려하였다.
- 예 혼합기의 수치 최적화를 통하여 탄체를 2500m/s에서 3000m/s로 가속하는 데 필요한 가속관의 길이를 19.0% 감소시켰으며, 제시된 램 가속기 작동 성능에 대한 최적화가 타당함을 확인할 수 있었다.
- 최적화를 통하여 램 가속기가 작동하는 전 속도 영역에 걸쳐 고른 작동 성능 향상을 이루어, 지속적인 추력 발생 효과를 얻었다.
- 램 가속기의 수치 해석상의 어려움으로 인해, 설계영역의 효과적인 설정을 위한 구속 조건의 설정과 램 가속기 자체의 비 선형성을 고려한 최적화 기법의 적용이 요구됨을 확인하였다.
- 최적의 작동 성능을 나타내는 혼합기의 조성비가 존재함을 확인하였으며, 조성비에 따른 데토네이션파의 형성과 안정화 된 위치가 작동 성능에 지대한 영향을 미침을 확인하였다.
- 제안된 기법을 탄체를 초고속으로 가속하기 위한 단단계 램 가속기의 각 단계에 반복 적용함으로써 전체 단단계 램 가속기의 작동 성능 최적화에 적용할 수 있다.



본 연구의 결과를 바탕으로 하여 향후 램 가속기의 작동 성능 향상과 실질적인 최적 설계를 위하여 다음
의 연구가 요구되고 있으며, 향후 연구 과제로 삼는다.

- Response Surface Method 를 적용한 연산 수치 해석량의 감소
- Genetic Algorithm, Response Surface Method 등의 전역 최적화 기법을 이용한 연구
- 탄체 형상, 예 혼합기 초기 압력 등의 작동 성능에 주요한 인자를 추가한 최적화 연구
- 램 가속기 내부 유동의 실질적인 모사를 위한 점성 효과의 고려와 이에 따른 연산 효율성의 향상
- Ramjet Intake의 수치 최적화를 위한 연구에의 응용

후기

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비지원('98 과학기술 기초 중점연구, 기계공학분야)으로 수행되었으며,
연구비를 지원해주신 한국학술진흥재단에 감사드립니다.

Reference

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. 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.
9. 전용희, 이재우, "램 가속기 탄체 형상에 따른 데토네이션파와 가속 특성에 관한 연구," *한국추진공학회지*, 제3권, 제2호, 1999. 6.
10. Sabeau, J. W. and Lewis, M. J., "Performance Optimization of a Supersonic Combustion Ram Accelerator Projectile," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 5, Sept.-Oct. 1997.
11. Wang, X., Spiegler, E. and Timnat, Y. M., "On the Optimization of Thermally-Choked Ram Accelerator Systems," Third International Workshop on Ram Accelerators, July 16-18, 1997.
12. Wang, X., Spiegler, E. and Timnat, Y. M., "Application of Simulated Annealing Algorithm to Thermally Choked Ram Accelerator Design," *AIAA Paper* 98-3150, 1998.
13. Wang, X., Spiegler, E. and Timnat, Y. M., "Optimization of Ram Accelerator Systems Design," *AIAA Paper* 98-3448, 1998.
14. Wang, X., "Numerical Study of Design Optimization and Operational Limits in Superdetonative Ram Accelerators," *AIAA Paper* 99-2268, 1999.
15. Elvander, J. E., Knowlen, C. and Bruckner, A. P., "Recent Results of High Acceleration Experiments in the University of Washington Ram Accelerator," *AIAA-97-2650*, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 6-9, 1997.
16. 최정렬, "초음속 연소 램 가속기의 초폭평 모드 발진 과정," 서울대학교 박사학위논문, 1997년 2월.
17. Moretti, G., "A New Technique for the Numerical Analysis of Nonequilibrium Flows," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, 1965, pp. 223-229.
18. 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.
19. Vanderplaats, G. N., *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, 3rd ed.*, Vanderplaats Research & Development, Inc. 1999.