

## 초음속 유도무기 지상 시험용 가열기 개념 설계

한풍규\* · 남궁혁준\* · 이경훈\* · 김영수\*

# Concept Design on Heating System for Supersonic Air-Breathing Engine Test Facility

Poong-Gyoo Han\*, Hyuck-Joon Namkoug\*, Kyoung-Hoon, Lee\*, Young-Soo Kim\*

### ABSTRACT

Vitiated air heater which could supply air of 700K and 6 bar was designed conceptually for the firing test on the ground of the air breathing propulsion engines. This vitiated air heater consists of pre-mixer with air and excessive gas oxygen, mixing head, combustor with gas passage, convergent-divergent nozzle and diffuser. the fuel was natural gas and/or liquefied natural gas. Through computational fluid dynamics, each component of the air heater was analyzed and flame-holding after ignition was investigated.

### 초 록

초음속 유도무기에 사용되고 있는 공기흡입 추진기관의 지상 연소시험에서 요구되는 700K-6바의 공기를 공급하기 위한 Vitiated형 공기 가열기에 대한 개념설계를 수행하였다. 본 가열기는 여분의 기체 산소와 공기를 혼합하는 예혼합기, 예혼합 기체와 연료를 혼합시키는 혼합기, 점화기를 포함하는 연소실과 수축팽창 노즐, 그리고 디퓨저로 구성하였다. 가열기에 사용된 연료는 천연가스이며, 유동해석을 통해 가열기의 각 구성요소의 성능을 파악하였으며, 점화 후 화염유지가 이루어지는 것을 해석적으로 확인하였다.

Key Words: Air Heater(공기가열기), Diffuser(디퓨저)

### 1. 서 론

초음속 공기흡입 추진기관의 지상연소 성능시험을 위해서는 추진기관으로 유입되는 공기가 실비행 속도 (마하수), 정체 온도 그리고 공기

중의 산소 함유량 측면에서 실제 공기 조건과 같도록 만들어 주는 시험설비가 필요하다. 이러한 시험설비로는 Storage형과 Vitiated형과 같은 공기 가열기가 사용되고 있는데, 작동매체로 실제 공기를 사용하는 Storage형 가열기가 실제 환경을 모사하는 가장 좋은 방법이겠으나, 장시간의 시험시간이 요구되는 내구성 시험이나 대형의 초음속 또는 극초음속 공기흡입 추진기관이

\* 정희원, 로템  
연락처, E-mail : poong@rotem.co.kr  
경기도 의왕시 삼동 462-18번지 로템기술연구소

나 그 추진기관을 장착한 비행체의 지상 연소 시험을 위해서는 Vitiated형 공기가열기가 사용 되는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 최대 30kg/s의 공기유량을 요구하는 초음속 공기흡입 추진기관의 지상연소 시험에 필요한 Vitiated형 공기가열기에 대한 개념 설계를 다루고 있으며, 비교적 저유량에서 고유량에 이르기 까지 공용으로 사용할 수 있는 방안을 구현코자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 Vitiated형 공기 가열기의 개발조건

본 연구에서 개념적으로 설계하고자 하는 Vitiated형 공기가열기는 4~30kg/s의 넓은 공기 유량 조건에서 작동할 수 있도록 하는 것이며, 초음속 공기흡입 추진기관으로의 공기 공급 조건은 700K와 6바를 목표로 한다. 추진제로서 산화제는 압축공기와 여분의 기체 산소가 사용되며, 연료로는 천연가스를 적용하였다. 출구에서의 가열된 공기의 산소함량이 대기에서의 공기 조건을 만족시키도록 여분의 산소를 주입하여야 하며, 추진기관으로 공급되는 공기의 온도와 압력의 절대 편차와 유동 단면에서의 온도와 압력의 상대 편차가 일정 수준 내에서 조절되어야 한다. 또한, 시험설비의 구성요소로서, 반영구적인 사용이 가능하도록 개발하는 것을 목표로 한다.

### 2.2 Vitiated형 공기 가열기의 구성

Vitiated형 공기가열기는 여분의 산소와 공기를 공급하는 방식에 따라 개발 방식에서 차이가 있다. 액체로켓엔진의 핵심 구성요소인 연소기 또는 가스발생기를 이용 또는 용융하여, 우선 연료와 산화제를 연소시킨 후, 연소실 또는 노즐 후단에서 여분의 산소와 공기를 공급하는 방식이 있을 수 있으나, 이러한 방식은 연소부에서 발생하는 연소가스의 온도가 높아져서, 사용횟수가 제한적일 수 있게 된다. 하지만, 공기와 연료를 직접적으로 연소시키는 방식의 경우에는 점

화의 어려움 뿐만 아니라, 점화 이후 화염을 유지시켜 주는 것이 상대적으로 어려운 일이 되지만, 사용 가능 횟수를 크게 증가시킬 수 있게 된다.

본 연구에서 설계하고 있는 Vitiated형 공기가열기는 반영구적인 사용횟수를 보유토록 하는 것을 목표로 하고 있으므로, 공기와 연료를 직접적으로 연소시키는 방식을 선택하였으며, 여분의 산소는 연소실 이전에 공기와 미리 혼합되도록 하였다. 본 연구에서 검토하고 있는 Vitiated형 공기가열기의 기본 구성은 그림 1과 같다.

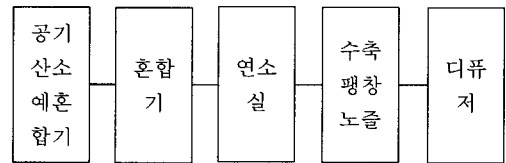


Fig.1 Vitiated형 공기가열기의 구성

### 2.3 Vitiated형 공기 가열기 개념설계

공기산소 예혼합기에서 수축팽창노즐까지를 연소부라 하면, 그림 1의 Vitiated형 공기가열기는 크게 연소부와 디퓨저로 구분될 수 있으며, 다음에는 연소부와 디퓨저로 나누어서, 개념설계 내용을 설명하기로 한다.

#### 2.3.1 연소부

본 연구에서 개념 설계된 Vitiated형 공기 가열기의 연소부의 형상과 기본 작동 조건을 그림 2에 나타내었다.

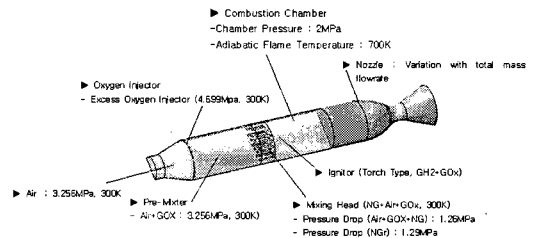


Fig. 2 Vitiated 공기 가열기의 연소부

공기산소 예혼합기에서는 공기저장장치로부터 공급되는 공기와 산소공급장치로부터 공급되는 여분의 산소를 혼합시켜 주는 기능을 한다. 여분의 산소는 기체 상태로 공급되며, 갑작스런 공기산소 예혼합기 내의 작동 환경 변화에 의해 공기산소 혼합가스가 역류하지 않도록 1.4MPa의 분사차압 조건에서 기체 산소가 분무되도록 설계하였다. 공기산소 예혼합기에서 기체산소는 수직분사토록 배열하여, 공기와 산소의 혼합 성능을 크게 하였으며, 상대적으로 공기산소 예혼합기의 길이를 작게 설계할 수 있었다. 또한 기체 산소의 분사기는 노즐 이론에 따라 내경이  $\phi$  2.4mm 단순 분사공으로 설계되었으며, 원주방향으로 15도 간격으로 총 24개를 배열하였다. 혼합기에는 공기산소 예혼합 기체 중심의 분사기를 장착하였으며, 기상 또는 액상의 천연가스가 공기산소 예혼합 기체에 수직 분사토록 하였는데, 그 기본 형상은 그림 3과 같이 단순한 형태로도 요구 성능을 충족시킬 수 있었다.

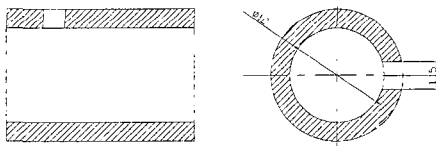


Fig. 3 공기산소 예혼합기체-연료 분사기

그림 3의 공기산소 예혼합기체-연료 분사기와 단순하게 공기산소 예혼합기체만을 분무하는 분사기는 그림 4와 같은 배열로 혼합기에 장착되도록 하였으며, 공기 공급 유량 조건에 따라 공기산소 예혼합기체-연료분사기는 표 1과 같이 설치되도록 하였다.

연소실에는 기체수소-기체산소를 추진제로 하는 토치형 점화기를 혼합기 출구에서 약 40~50mm 위치에 장착토록 하였다. 한편, 혼합기에서의 압력차압도 연소가스 역류방지를 위해 1.3MPa로 설정하였다.

또한 연소실 내에는 역시 그림 4와 같은 배열의 가스패시지를 선택적으로 설치하도록 하였는데,

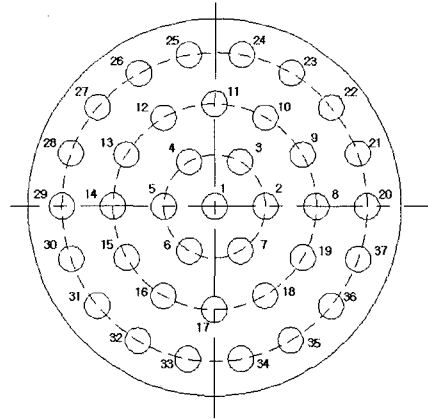


Fig. 4 공기산소 예혼합기체 분사기의 배열

Table 1 연료공급 분사기 장착조건

유량조건 (kg/s)	공기산소 예혼합 기체-연료 분사기 장착 위치
4	1+8+11+14+17
8	3+4+6+7+20+23+26+29+32+35
10	C8+9+13+17
15	1~7+8+10+12+14+16+18 +21+24+27+30+33+36
20	ALL-8-10-12-14-16-18 -21-24-27-30-33-36
25	ALL-2-5-11-17-22-31
30	ALL

이것은 혼합기의 출구에서 분무되는 공기산소 예혼합기체와 연료의 혼합가스가 축방향으로 큰 모멘텀을 가지고 분무되기 때문이며, 가스패시지를 설치함으로써, 연소실의 길이를 감소시킬 수 있도록 하였다. 또한 수축팽창 노즐을 장착한 것은 고온의 공기유동을 우선적으로 초침시킴으로써, 하류에서의 작동 환경에 따라 상부가 영향을 받지 않도록 하기 위함이었다.

### 2.3.2 디퓨저

초음속 유도무기 지상 시험 조건을 만족시키기 위해서 연소기 후류에 디퓨저를 장착한 시험장치를 구성하게 되는데 이때 노즐 팽창부에서의 유동 박리현상을 제거하여야 하며, 흐름의 안

정성이 확보되는 디퓨저 설계가 이루어져야 한다. 이러한 디퓨저 내부에서 완전 발달된 충격파 시스템을 통해 대기 압력과 거의 같은 압력 회복이 이루어지게 된다. 여기서 Second Throat Exhaust Diffuser (STED)는 이러한 시험을 위한 적절한 장치이다. Straight Cylindrical Exhaust Diffuser (SED) 장치에 비해서 낮은 연소실 압력의 엔진에서도 적용될 수 있다. 박리가 없는 노즐 흐름을 만들기 위해서는 노즐 출구단에서 요구 압력까지 팽창이 이루어져야 하고 디퓨저 내부에서도 유동의 박리가 없는 흐름을 위해서는 두번째 목에서 수직 충격파가 발생되어야 한다. 이러한 충격파 시스템에서는 시험 공간에서 효과적인 밀폐 환경을 구축할 수 있게 된다. 하지만 충격파 구조의 위치는 STED의 기하학적 형상에 민감하게 영향을 받게 된다. 즉 Ramp ( $X/D_d$ ) 앞에서의 직선 실린더 영역의 길이, Ramp의 각도 노즐과 디퓨저 사이의 환형의 간극, 두번째 Throat Area Ratio ( $A_{st}/A_d$ ), 두번째 목 영역의 길이 ( $L/D_{st}$ ) 아음속 디퓨저의 면적비 ( $A_{si}/A_{so}$ ), 연소기 연소실 압력, 또한 초기 시작 시점의 점화시점 변화는 충격파의 위치에 영향을 주게 된다. 그림 5에서는 최적 설계를 위한 노즐 및 디퓨저의 직접 연결 시스템의 Schematic이다. 그림 6에서는 1-D 가스다이나믹 설계 및 최적화 해석 알고리즘을 도시하고 있다. 이를 통해 적은 비용으로 적절한 지상 시험용 가열기 환경을 안정적으로 구축하는 디퓨저 기하학적 형상에 대해서 개념 설계를 수행하였다.

표 2에는 디퓨저 초기 설계 데이터를 나타내었으며, 표 3에는 그림 6에 나타나 있는 디퓨저 최적 설계 알고리즘에 따라 개발된 코드를 활용하여 구한 디퓨저 1차원 설계 결과이다.<sup>[1][2][3]</sup>

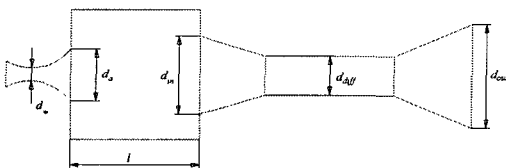


Fig. 5 노즐 및 디퓨저 기하학적 변수

Table 2 디퓨저 초기 설계 데이터

Parameters	기호	값	단위
연소실 내부 압력	$P_{KC}$	20	Bar
연소실 내부 온도	$T_{KC}$	869.9	K
노즐목 직경	$D_{KP}$	0.122	M
노즐 출구 직경	$D_C$	0.2	M
노즐을 통해 분사된 연소생성물의 열역학 특성		CEC Code	

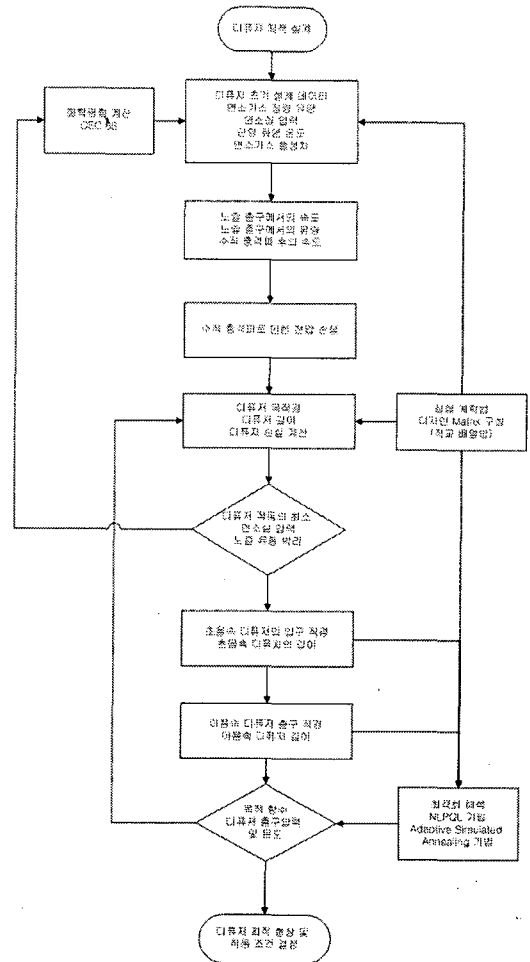


Fig. 6 디퓨저 최적 설계 알고리즘

Table 3 디퓨저 1차원 설계 결과(유량조건:30kg/s)

Parameters	값	단위
Mass Flow Rate	31.49	Kg/Sec
Diameter Of Throat	0.22	M
아음속 Diffuser출구 직경	0.258	M
초음속 Diffuser 길이	0.274	M
Throat 길이	1.76	M

#### 4. 유동해석을 통한 성능평가

혼합기와 연소실에 대한 열유동 해석을 수행하여 공기와 산소의 혼합 성능을 평가하였으며, 공기산소 예혼합기체와 연료의 혼합 성능까지 계산하여, 연소 반응 계산을 위한 Cold Flow 결과를 도출하였다. 지배 방정식으로 정상 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치 해법에서 공간차분은 Node Base의 유한 체적법을 적용하였으며, 난류 모델은 Standard K-ε 모델을 사용하였다. Grid System은 사각형 Mesh와 삼각형 Mesh를 사용한 Hybrid Grid system을 구축하였고 해석에 사용된 격자수는 약 120만개로서 벽면에 대한 경계층 및 점성 효과를 정확히 모사하기 위해서 Y+값이 30으로 Prism 격자를 생성시켰다.

공기산소 예혼합기체가 혼합기를 통과하기 전에는 공간상에서 산소 농도 분포가 균일하지 못하였으나, 가스패시지 기능도 함께 하는 혼합기를 통과하면서, 그림 7과 같이 산소의 농도가 균일해지는 것을 확인할 수 있었다.

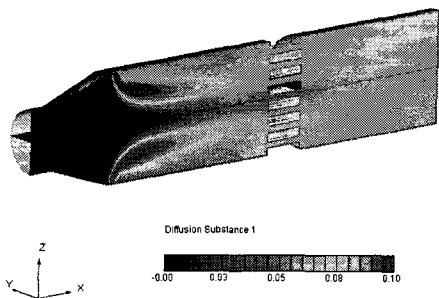


Fig. 7 산소 Concentration 분포

혼합기는 통과한 공기산소 예혼합기체의 속도분포도 균일해지는 것을 알 수 있었으나, 연소부의 중앙부에서 속도 성분이 보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 그 영향이 수축 팽창 노즐에 까지 이르고 있다. 이러한 현상은 저유량 조건에서 더욱 두드러 질 것으로 예상되는데, 앞서 설명한 바와 같이, 그림4와 같은 형상의 가스패시지를 추가함으로써, 축방향 단면내에서 축방향 속도 성분이 편차를 줄여 줄 수 있을 것이다.

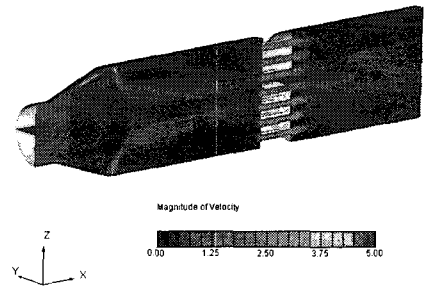


Fig. 8 속도 분포

그림 8에서 보면, 공기가스 예혼합기 내에서는 공기 산소 예혼합기체의 유선이 축방향으로 정렬되지 못하던 것이, 혼합기를 통과하면서 축방향으로 정렬되고 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 Vitiated형 공기 가열기의 개발 조건중의 하나인 유동 단면에서의 일정 수준의 온도와 압력의 상대 편차를 만족시키는데 혼합기가 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있었으며, 보다 나은 결과를 위해서는 연소실 내에 가스패시지를 추가하는 것을 고려할 수 있을 것이다.

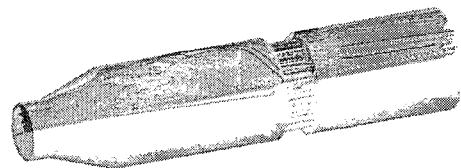


Fig. 9 유동장 Path Line

그림 10~11에서 보면, 토치식 점화기에 의해 점화된 공기산소 예혼합기체와 연료의 혼합가스는 화염을 유지하고 있음을 비정상 열유동해석

을 통해서 확인할 수 있었다. 또한 점화 후 화염 유지가 되면서, 공기의 최고 온도는 공기산소 예 혼합기체-연료분사기의 출구에서 약 50-60 mm 떨어진 위치에서 약 1,100K 근처에서 수렴하고 있음을 확인하였으며, 연소실 및 노즐 케이스 근처의 공기 온도는 더욱 낮은 결과를 보임으로써, 구조의 열적 안정성을 확보하기 위한 냉각시스템을 고려하지 않아도 됨과 동시에, 거의 반영구적인 사용이 가능함을 추정할 수 있었다.

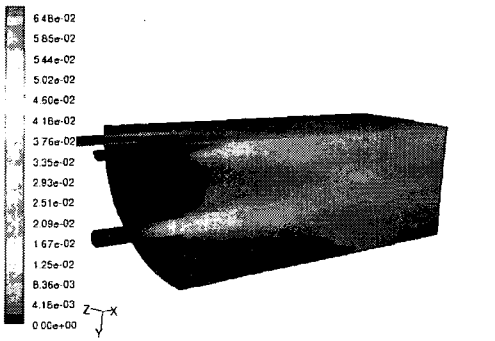


Fig. 10 Co<sub>2</sub> Mole Fraction 분포

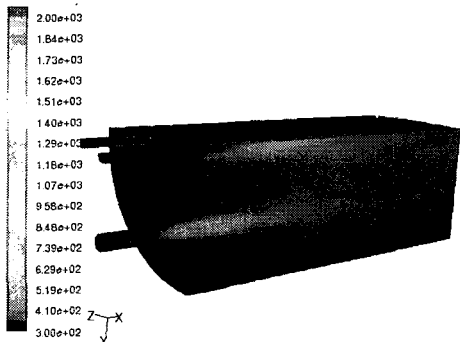


Fig. 11 점화 후 화염 유지

## 5. 결 론

본 연구를 통해서 Vitiated형 공기 가열기를 개

념설계하였으며, 설계 과정에서 성능 특성을 파악하면서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 개념설계에서 도입한 혼합기 설계방안을 통해, 유동단면에서의 공기의 온도와 압력, 그리고 축방향 속도성분을 구할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 연소실 내에서의 공기온도가 최대 1,200K 미만으로서, 연소실 및 노즐에 냉각시스템을 사용하지 않아도 됨으로써, 저렴한 개발비용으로도 높은 성능을 보여주는 공기가열기 설계방안을 구할 수 있었다.
- 3) 초음속 공기흡입 추진기관의 지상 연소시험이 안정적으로 수행될 수 있도록, 고온고압의 공기가 출구 유동조건을 만족하면서 공급될 수 있도록 하는 디퓨저의 최적 형상 설계기법을 수립하였다.

## 참 고 문 헌

1. Fabri J. and Siestrunk R, "Supersonic air ejectors," *Advances in Applied Mechanics* (eds Von Meiss and Von Karman), Academic Press, New York USA, 1958, V, pp.1-34
2. K. Annamalai, T. N. V. Satyanarayana, V. Sriramulu, K. A. Bhaskaran, "Development of design methods for short cylindrical supersonic exhaust diffuser," *Experiments in Fluid*, 29, 2000, pp.305-308
3. B.J. Huang, J. M. Chang 1999, "A 1-D analysis fo ejector performance", *International Journal of Refrigeration*, 22, pp379-288