

## 가스발생기용 단일 스윙 동축형 분사기의 추진제 분포 예측에 관한 기법 연구

이광진\* · 김종규\* · 김인태\* · 한영민\* · 설우석\*

### A study on prediction of propellant distribution of single swirl coaxial injector in gas generator

Kwang-Jin Lee\* · Jong-Gyu Kim\* · In-Tae Kim\* · Yeoung-Min Han\* · Woo-Seok Seol\*

#### ABSTRACT

The configuration and arrangement of injector in LRE gas generator and combustor have a great impact on combustion process and heat exchange because of affecting atomization, vaporization, mixing and chemical reaction. A relation between injector array and mixing distribution of propellants based on a physical approach was investigated in this study. Programming method of this relation is used to predict mixing distribution of propellants. Simplicity of physical approach and various assumptions make it reduce the accuracy and application of the results of present study. But, this method is very useful to predict the mixing distribution of full scale combustor due to difficulties in cold flow testing.

#### 초 록

인젝터의 배열과 형상 변화는 연소실내에서의 미립화, 증발, 혼합, 화학반응 등을 변화시킴으로써 액체로켓엔진의 연소 조건과 열 교환에 영향을 준다. 본 논문에서는 연소실내의 다양한 현상 중 인젝터 배열이 혼합비 분포에 미치는 영향을 물리적 접근방법을 통하여 살펴보고 프로그램을 작성하여 혼합비 분포를 계산 하고자 하였다. 단, 예측 방법의 유도 과정에서 도입된 물리 현상의 단순화와 여러 가정으로 인해 본 방법의 적용성과 정확성에는 한계가 있으나 mechanical patternator의 사용이 어려운 full scale 가스발생기나 연소기의 국부적인 혼합비 예측에 효과적인 활용이 될 수 있으리라 판단된다.

Key Words: Mixing Distribution(혼합분포), Swirl Injector(와류 분사기), O/F ratio(혼합비)

#### 1. 서 론

\* 한국항공우주연구원 엔지니어링  
연락처, E-mail: lkj@kari.re.kr

액체로켓엔진의 혼합과정은 산화제와 연료가

연소실로 유입된 후 액체상태와 기체 상태에서 충돌, 융합, 상호침투가 일어나며 혼합이 이루어진다. 특히 원심형 인젝터에서 나온 추진제 액적의 혼합은 추진제 미립화 cone 끼리 교차할 때 모아지게 되고 일부는 미립화 cone을 통해 상호 침투하고 이전의 방향으로 계속 움직이게 된다.[1],[2],[3] 추진제의 침투성 수준은 인젝터들 사이의 간격과 관계가 있으며 추진제의 운동량에 따라서 분사류는 연소실에서 한번 혹은 두번 교차 될 수 있다. 연소실의 횡단면에 대한 액적의 혼합은 상호 영향을 주는 분사류간의 영역에 관계없이 주로 인젝터 사이의 간격에 따라 제한되며 기준이 되는 인젝터의 축에서 멀리 멀어질수록 기준 인젝터가 액적의 혼합에 미치는 영향은 작아지게 된다. 따라서 본 논문에서는 인젝터 배열에 따른 혼합비 분포를 물리적 접근 방법을 통하여 살펴보고 프로그램을 작성하여 영역별 혼합비를 계산하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 원심형 인젝터의 분무 형상

본 연료와 산화제 인젝터가 교차 배열 되어 있는 경우 추진제 미립화 cone 끼리 그림1의 A 지점에서 교차 할 때 일부추진제는 한 다발(Bundle)로 모아지게 되며 일부는 미립화 cone을 통해 상호 침투하고 이전의 방향으로 계속 움직이게 된다. 추진제의 침투성 수준은 인젝터들 사이의 간격과 관계가 있으며 그림1의 AB다발의 방향은 산화제와 연료의 운동량에 의해 결정된다. 그림1의 (a)는 산화제의 운동량이 많은 경우이고 그림1의 (b)는 산화제와 연료의 운동량이 같은 경우의 분무 패턴이다. 추진제 교차를 가능케하는 또다른 요소는 액적이 기화할 때 일어나는 난류이다. 이때 난류 강도에 영향을 주는 요소를 보면 액적과 가스의 속도 차이, 액적이 기화시 액적 표면에 형성되는 가스 유출(outflow)현상, 연소실 단면별 유량분포의 불균일성, 추진제 액적들 사이의 기화 속도 차이등이 있다. 액적의 기화는 역류와 복사에 의해 인

젝터 면에서부터 시작되며 기화 초기 형성된 가스량이 소량일 때는 액적 속도  $w_k$ 가 가스속도  $w_r$  보다 크다. 액적이 기화됨에 따라 가스 속도는 빨라지고 연소실의 임의의 영역에서는 속도가 같아지게 된다. 즉  $w_k=w_r$  이 되는 경우 기화한 추진제 양은 총 양의 10~35%가 된다. 액적과 가스의 이후 운동 속도는 액적 속도가 가스 속도보다 느려지게 된다. 따라서 형성된 액적 다발의 주변가스의 속도도 가스의 주 분사류 속도  $w_r$ 보다 느려지게 된다. 이 속도 차이로 인해 액적 다발의 주변 가스가 가스의 주 흐름과 난류성 혼합을 일으키게 된다. 액적의 기화로 형성된 가스의 정상적인 흐름이 액적에 존재한다는 것 또한 주 흐름과 가스의 난류성 혼합을 가능케 한다. 앞의 이유들 때문에 가스의 혼합은 주로 인젝터 사이의 간격이 규칙적으로 배열 되어 있는 영역에서 주로 이루어진다.[3]

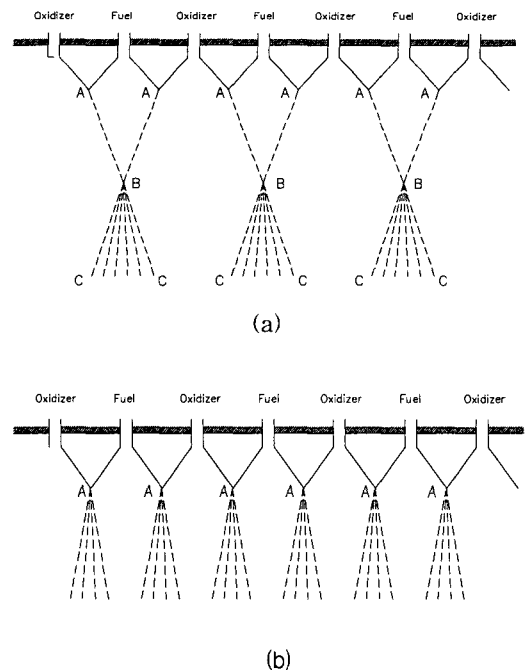


Fig.1 Spray pattern of single co-axial injector

## 2.2 인젝터 축 근처의 추진제 분포

그림2는 추진제 분포 분석의 간략화를 위해 원심형 인젝터의 바둑판 배열(a) 및 벌집형 배열(b)을 나타낸 것이다.

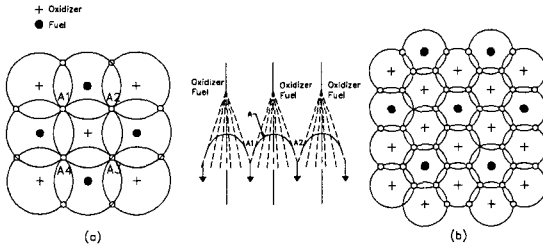


Fig. 2 Shape of Propellant mixing bundle

산화제 및 연료의 운동량이 동일하다고 하면 그림2의 A점에서 화염(flame or burner jet)이 교차한 후의 다발 방향은 축 방향이 될 것이다. 인접한 산화제 인젝터와 연료 인젝터의 화염 교차하는 라인 A1-A-A2를 따라 이루어진다. 화염 교차선의 투영에 의해 헤드와 수평인 면에 직선 A1-A2가 생기고 A1-A-A2 교차선에서 연료 및 산화제가 함유한 후 액적들은 수직(축 방향)과 수평의 합성 속도를 가지게 된다. 추진제의 수평 합성 운동 속도는 점 A1과 A2에 인젝터 축을 향한 선으로부터 방향이 나게 될 것이다. 그결과 점 A1과 A2에서 추진제 혼합 다발이 형성된다. 바둑판 배열 방식에 따라 배열되어 있는 인젝터들이 상호 작용할 때 점 A1과 A2와 같은 지점에서 액적 다발로의 혼합 및 용합이 이루어질 뿐 아니라, 미립화 cone이 교차되면서 추진제의 혼합이 이루어진다. 벽에 가장 근접해 있는 인젝터의 축보다 더 벽 근처에 존재하는 액적들은 항상 벽 쪽으로 떨어진다. 바둑판 배열의 점 A1, A2, A3, A4에서 형성된 액적 다발들은 연소실 축과 평행하게 운동하며 가스가 이 액적을 데려갈 뿐 아니라 매우 소량의 액적이 침투하고 추진제 액적이 기화하므로 다발들은 확대 팽창하게 된다. 그림2의 (b)는 벌집형 인젝터에서 다발이 형성되는 모습을 보여 주고 있다. 헤드로부터 충분히 떨어져 있을 때

다발 축 주위의 추진제 분포는 그림3의 line 1과 같으며 이는 그림3의 가우스 법칙의 line 2와 유사한 분포법칙을 따른다. 따라서 다발 축으로부터 산화제 및 연료의 제곱 평균 RMS(root mean square) 기울기는 인젝터 사이의 간격(pitch), H에 비례하며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

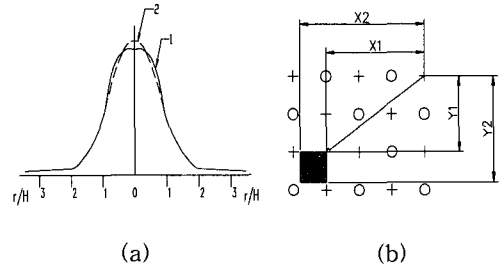


Fig. 3 Propellant distribution

$$\frac{dG_o}{dF} = ke^{-\frac{r^2}{2H^2}} \quad \text{식(1)}$$

$G_o$ : 인젝터를 통과한 추진제 유량

$dG_o$ : 인젝터 축에 수직이고 축으로부터 r 만큼 떨어진 곳에 분포되어 있는 면 dF를 통과한 추진제 유량

k: 비례계수

$$G_o = k \iint e^{-\frac{r^2}{2H^2}} r dr d\phi = k \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} re^{-\frac{r^2}{2H^2}} dr = 2k\pi H^2$$

$$k = \frac{G_o}{2\pi H^2}$$

식(1)에 k를 대입하면 인젝터 축 근처의 추진제 분포를 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dG_o}{dF} = \frac{G_o}{2\pi H^2} e^{-\frac{r^2}{2H^2}} \quad \text{식(2)}$$

만일 추진제 중 하나(산화제 혹은 연료)의 액적 운동량이 나머지 하나보다 많다면, 그림1의 (a)에서처럼 추진제 다발의 점 B에서 2차 교차가 이루어지게 된다. 2차 교차는 실질적인 변화를 동반하지 않으며, 식(2)는 바둑판 배열 뿐 아니라 다른 배열에서도 인젝터 축 주위의 추진제 분포 값을 구하는데도 유효하게 된다. 그림3의

(b)는 임의의 단면적이 받는 추진제의 양을 알아보기 위해 간략히 도시화한 것으로 연소실 단면적에서 자유롭게 배열된 면적  $\Delta$ 이 r만큼 떨어진 곳의 인젝터로부터 받은 추진제 양  $G_{na}$ 은 식(3), 식(4)와 같이 계산된다.

$$G_{na} = \frac{G_o}{2\pi H^2} \iint e^{-\frac{r^2}{2H^2}} dx dy \quad \text{식(3)}$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$G_{na} = \frac{G_o}{2\pi H^2} \iint e^{-\frac{x^2}{2H^2}} e^{-\frac{y^2}{2H^2}} dx dy \quad \text{식(4)}$$

### 2.3. Computer Code

혼합비 분포 계산을 위한 프로그램은 simpon method에 의해 식(4)을 계산하게 되며 연료 유량, 산화제 유량, 인젝터 사이의 거리를 입력값으로 하여 지정된 셀 간격에 대한 혼합비를 계산하게 된다.

### 2.4. 해석 결과

그림4는 지름 240mm에 산화제 인젝터 172개, 연료 인젝터 177개 그리고 인젝터간 거리 10mm로 구성된 바둑판 배열의 인젝터 헤드를 보여준다. 그림5는 바둑판 배열의 인젝터 구조에서 산화제유량 10g/s, 연료유량 10g/s인 경우에 대한 혼합비 분포를 보여주는 것으로 계산된 셀의 크기는 가로 세로 10mm×10mm이다. 중앙 부분은 혼합비가 1정도가 되며 외곽 부분은 다소 낮은 0.5값을 갖지만 부분적으로 1.2가 넘어 국부적으로 벽면에서 hot spot이 생길 소지를 포함하고 있다. 그림6은 지름 58mm에 산화제 인젝터 6개, 연료인젝터 13개 그리고 인젝터간 거리 10mm로 구성된 벌집형 배열의 인젝터 헤드를 보여준다. 그림7은 벌집형 배열의 인젝터 구조에서 산화제유량이 10g/s, 연료유량 10g/s인 경우에 대한 혼합비 분포를 보여 주는 것으로 계산된 셀의 크기는 가로 세로 2.165mm×1.25mm이다. 중앙에서 벽면으로의 혼합비는 1.5에서 시작하여 벽면으로 갈수록 혼합비가 연료과잉으로 가고 있음을 알 수 있다.

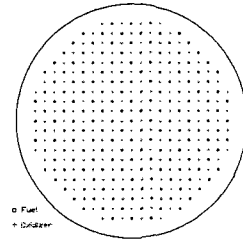


Fig.4 Rectangular arrangement of injector

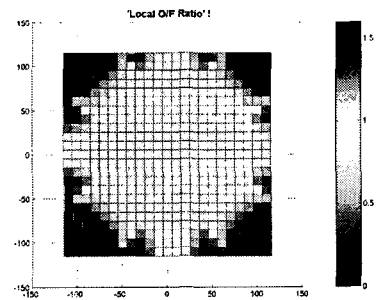


Fig.5 Mixing distribution of Rectangular arrangement

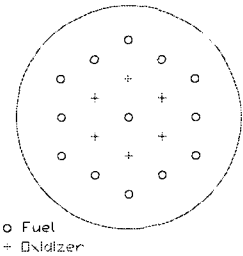


Fig.6 Honeycomb arrangement of injector

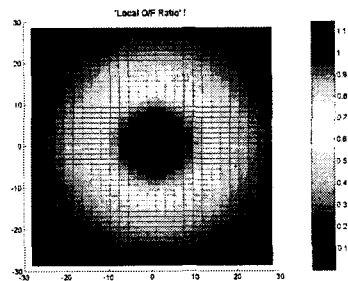


Fig.7 Mixing distribution of Honeycomb arrangement

### 3. 결 론

기본적인 Single co-axial 인젝터의 분무패턴을 이해하고 이웃하는 인젝터와의 관계를 파악함으로써 인젝터 배열에 따른 혼합비 분포 형상을 예측할 수 있었다. 이를 위해 사용된 물리적 접근방법은 유도 과정에서 물리 현상의 단순화와 여러 가정으로 인해 적용성과 정확성에 다소 한계가 있으나 mechanical patternator의 사용이 어려운 full scale 엔진의 가스발생기나 연소기의 국부적인 혼합비 예측에 효과적인 활용이 될 수 있으리라 판단된다. 향후에 실물형 가스발생기에 대한 추진제 질량분포 및 혼합비를 측정하여 이론상으로 해석한 결과와의 비교를 수행할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y.H. Zahao, M.H. Hou & J.S. Chin. "Drop-size Distribution from swirl & Airblast Atomizer", Atomization and spray and spray Technology 2(1986)
- [2] Mahmood Mani, M. Dadkhah, A.Gili. "A simple code for calculation of mixture ratio in liquid propellant rocket engine & its evaluation," AIAA-200-3765
- [3] 도브로볼스키, "액체로켓엔진," 모스크바, 1968.