

# 액체로켓 추진기관의 후류처리장치 고찰

조남경\* · 이광진\* · 한영민\*

## Investigation of Exhaust Facility of Liquid Rocket Propulsion System

Nam-Kyung Cho\* · Kwang-Jin Lee\* · Young-Min Han\*

### ABSTRACT

Exhaust facility has basically the role of flame deflector, and considering additional functions, it can be classified by noise/emission suppressor and altitude simulation facility. In this paper, principles of flame deflector, jet pump, emission suppression are presented for exhaust treatment facility. Principles of noise suppression caused by Mach wave mitigation, jet energy mitigation by water evaporation and condensation are shown. In addition, a concept of vertical exhaust treatment facility is presented applying basic principles aforementioned.

### 초 록

후류처리 장치는 기본적으로 화염유도로의 역할을 하며 추가적인 기능에 따라 소음/배기가스 처리 장치, 고공 모사 장치 등으로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 화염 및 충격파로 부터의 발사체 보호, 제트펌프, 유해배기 가스 저감 등 후류처리 장치에 적용되는 원리를 제시하였다. 물 분사에 의한 소음감소는 마하파를 약화시키며 물의 증발 및 응축을 통해 제트의 에너지를 줄이는 원리를 이용함을 보였다. 또한 후류처리 장치에 적용되는 원리의 고찰을 통하여 수직형 후류처리 장치의 개념을 제시하였다.

Key Words: Exhaust System(후류장치), Flame Deflector(화염유도로), Jet Pump(제트펌프), Noise Suppression(소음 감쇄), Emission Suppression(배기가스 감쇄), Vertical Exhaust System(수직형 후류장치)

### 1. 서 론

액체로켓 추진기관은 엔진에서 배출되는 제트

에 의해 추력이 발생한다. 제트 배출은 액체로켓 추진기관의 고유한 특성이며 추력을 발생시킨 후 제트 풀룸은 적절하게 처리되는 것이 필요하다. 발사 시에는 정상추력이 발생할 때까지는 지상으로 제트 풀룸이 배출되며 이것이 발사체에 영향을 미치지 않아야 한다.

\* 한국항공우주연구원 추진시험팀  
† 교신저자, E-mail: cho@kari.re.kr

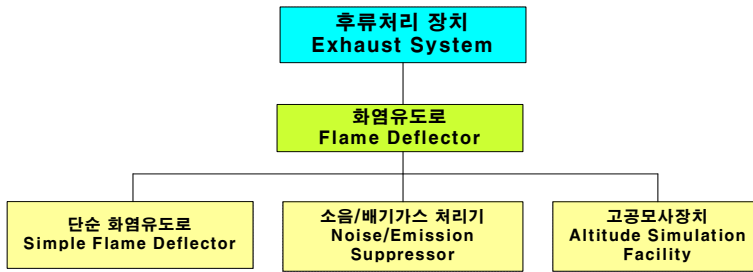


Fig. 1 Classification of exhaust system

배출 제트가 더욱 문제가 되는 것은 장시간 제트 풀름을 처리해야 하는 지상 연소시험의 경우이다. Fig. 1에 후류처리장치를 분류도를 제시하였다. 모든 후류장치는 기본적으로 화염의 방향이 발사체에 영향을 주지 않게 하는 화염유도로(flame deflector)의 역할을 한다. 이러한 화염유도만을 담당하는 단순화염유도로와 아울러 후류에 대한 소음 및 유해배기가스를 제거하는 소음기 및 배기가스 저감기로 별도 분류할 수 있다. 또한 후류의 압력저감을 통하여 고공조건을 모사하는 고공모사설비는 별도로 분류한다. 본 연구에서는 Fig. 1에서 제시한 각각의 후류처리 장치의 작동원리와 설계특성 등을 간략히 고찰한다. 또한 연소기 및 엔진, 추진기관 시스템 시험설비에 일반적으로 적용되는 수직형 후류처리 장치의 개념을 제시한다.

## 2. 후류처리 장치의 작동원리

### 2.1 화염유도 요구조건

우주발사체용 발사대 및 시험설비는 로켓엔진의 점화 및 연소과정에서 발생하는 3000 K가 넘는 초음속 화염을 발사체 후류로부터 안전하게 전향시키기 위한 화염유도로를 설치 운용하게 된다. 로켓제트는 화염유도로 내에는 화염유도로 방향으로 발생하고 반사되어 돌아오는 최대충격파에 의해 발사체 구조에 손상을 줄 수 있는 커다란 저주파 진동이 발생하기도 하는데 이러한

충격파가 발생하는 메커니즘과 발사체로 전파되는 경로에 대한 이해는 발사대를 설계함에 있어 중요 인자가 된다. 우주발사체 선진국의 경우가 초기 파(wave)를 점화 중압(overpressure) 파(wave)라 부르며 연소가스에 물을 분사시켜 연소가스의 밀도를 증가시키는 방법을 제시하고 있다[1, 2].

### 2.2 제트 펌프의 원리 및 적용

모든 후류장치에는 Fig. 3에 제시한 제트펌프의 원리가 적용된다. 제트 펌프의 고압부는 고압 가스를 노즐로부터 배출한다. 고압의 가스는 노즐을 지나면서 압력은 감소하고 속도는 증가하게 된다. 즉 압력에너지가 속도에너지로 전환된다. 노즐로부터 배출된 고속의 제트는 내부 공기를 밀어내게 되고 노즐부 앞부분에 저압영역을 만든다. 따라서 주위에서 저압공기가 유입되게

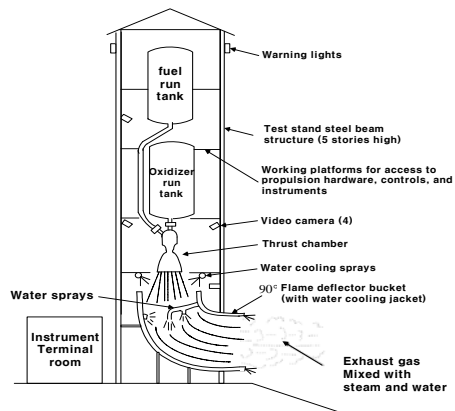


Fig. 2 Test Facility and Exhaust System

된다. 디퓨저를 통과하면서 저압기체와 고압기체의 혼합이 일어나게 된다[3]. 이것은 고압가스의 속도를 줄이게 되며, 따라서 제트의 소음을 낮추게 된다. Fig. 3에서 고압가스는 엔진에서 배출되는 제트플룸으로, 저압의 유입공기는 스탠드 주위에서 유입되는 공기로 간주할 수 있다. 항공기 제트에 대한 소음은 Fig. 4에 제시한 대로 저압의 유입공기와 항공기 제트플룸의 혼합에 의한 제트펌프 방법으로 낮출 수 있다[4].

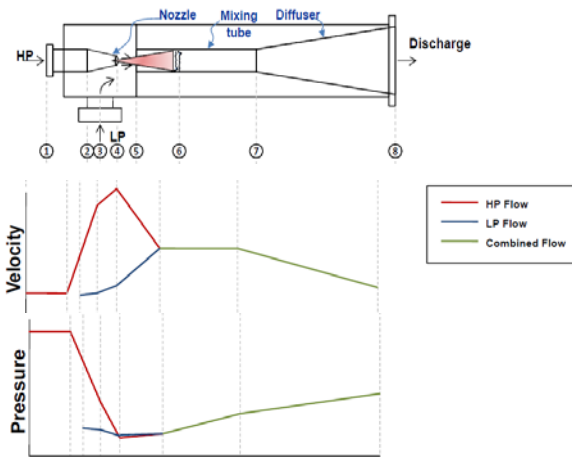


Fig. 3 Principle of Jet Pump

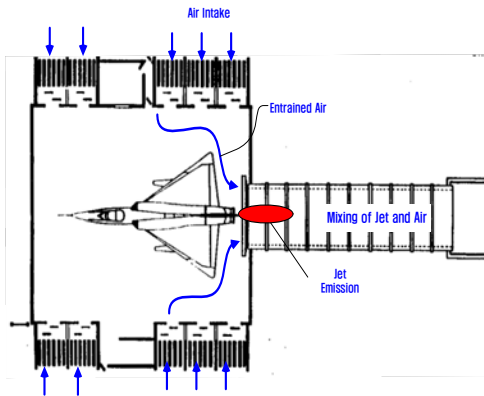


Fig. 4 Jet Noise Suppression of Aircraft

위와 같은 제트펌프의 원리는 고공조건을 모사하는 고공모사설비에도 적용된다. Fig. 5의 고공시험설비를 보면 air intake가 없기 때문에 시

험대상물을 감싸고 있는 공간의 압력은 계속적으로 낮아지게 된다. 즉 제트에 의해 형성된 낮은 배압은 스탠드부의 공기를 빨아들이게 되며 계속적으로 저압을 유지시킨다. 배압을 보다 더 낮추기 위해서는 steam을 이용한 이젝터 시스템을 적용하기도 한다[5].

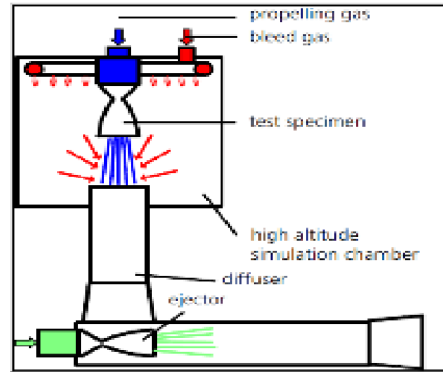


Fig. 5 Schematics of Altitude Simulation Facility

### 2.3 유해배기가스 저감원리

Figure 6은 유해 배기가스 저감 개략도를 보인다. 일반적으로 연소실에서는 다량의 CO가 발생하고 배출되기 때문에 아래의 식 (1)과 같이 CO<sub>2</sub>로 중화시킬 필요가 있다.



연소기(로켓 엔진)에서 (1)의 연소화학이 분출되면 화염의 core 부분에서 (2)와 같이 core 물분사를 통하여 화염의 온도를 1,600K-2,000K 정도로 낮추게 된다. core 물분사에 의해 연소화학의 온도를 낮춤으로 질소(N<sub>2</sub>)의 해리를 방지하여 산화질소 계열 유해배기물이 형성되는 것을 억제하는 효과가 있다. 이와 함께 화염 제트가 냉각채널 내부의 공기를 밀어내어 내부 압력을 낮춤으로 (3)과 같이 다량의 공기가 유입되게 되며 이 유입공기에 의해 CO가 CO<sub>2</sub>로 바뀌는 중화반응이 일어난다. 위와 같은 중화반응에 의해 연소반응 시 다량으로 생성된 유해한 일산화탄소

(CO)가 획기적으로 감소한다. 중화반응은 발열 반응이기 때문에 혼합가스(물+제트가스)의 온도가 올라가게 되는데 채널을 이중채널로 구성하여 냉각함으로써 설비를 보호할 수 있다.

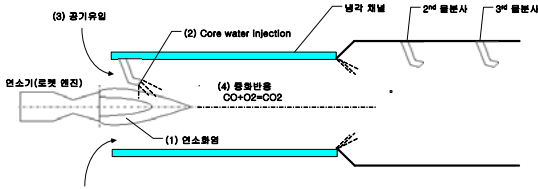


Fig. 6 Schematics of Emission Suppression

#### 2.4 물분사를 통한 소음저감 원리

초음속 제트 소음은 크게 광대역 충격파 소음 (broadband shock noise), 고주파 소음 (screech tones), 난류 혼합소음 (turbulent mixing noise)으로 나눌 수 있다. 불안정하게 팽창되는 초음속 제트에 대해서 배출 풀룸에는 반복되는 shock-cell 구조가 보인다. 이러한 shock-cell은 서로 간섭하여 넓은 범위의 소음을 만들어낸다. shock-cell이 피드백되어서 보다 고주파가 되고 커지는 경우 (screech tones)도 있을 수 있다. 또한 마하파는 모든 경우 난류를 발생하여 난류혼합 소음을 발생시킨다. 물분사를 통해 마하파의 생성, 피드백에 의한 고주파 생성, 난류 혼합소음 정도를 감소시킨다고 알려져 있다[6].

Figure 7과 같이 core injection의 위치는 제트 풀룸의 온도가 가장 높은 곳에 분사한다. core injection에서 분사하는 물은 15m/s, 10기압, 유량은 추진제 유량의 2배 정도에 해당하게 한다. 대부분의 소음이 core injection 및 1<sup>st</sup> injection 부분에서 감쇄되며 2<sup>nd</sup> injection과 3<sup>rd</sup> injection에서의 분사 위치 및 유량은 큰 영향을 미치지 않는다.

Jet 소스에서 소음은 Fig. 8과 같이 node를 가진 파의 형태로 전파되며 소음저감을 위해 node를 끊는 것이 필요하다. 따라서 1<sup>st</sup> injection, 2<sup>nd</sup> injection, 3<sup>rd</sup> injection의 위치는 node를 끊어주는 위치에 설치되어야 한다[7].

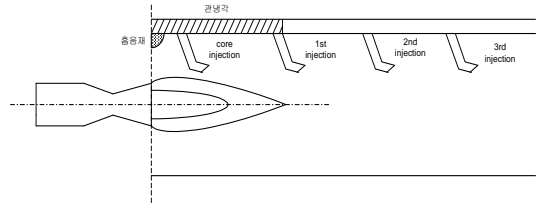


Fig. 7 Schematics of Noise Suppressor

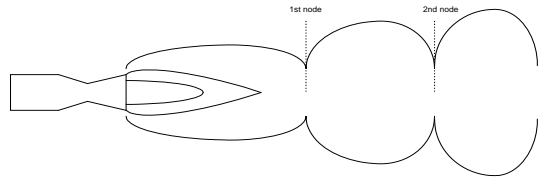


Fig. 8 Mach Wave Propagation

제트풀룸에서 발생하는 소음은 거시적으로 보면 식 (2)-(4)와 같이 유속에 가장 크게 의존한다. 대부분의 소음이 발생하는 마하수 0.5부터 2 영역은 속도의 8승에 비례하기 때문에 속도를 낮출 필요가 있다.

$$W = k_0'' \frac{\rho^2 u^6 d^2}{\rho_0 c^2} \text{ for } M < 0.5 \quad (2)$$

$$W = k_0'' \frac{\rho^2 u^8 d^2}{\rho_0 c_0^2} \text{ for } 0.5 < M < 2 \quad (3)$$

$$W = k_0'' \frac{\rho^2 u^3 d^2}{\rho_0 c_0^2} \text{ for } M > 2 \quad (4)$$

물분사를 통해 제트의 유속 및 에너지 저감은 Fig. 9와 같이 분사된 물의 전도에 의한 열전달과 상변화에 의한 열전달에 의해 주로 이루어지게 된다. 후연소가 된 배기가스에는 물을 분사하여 포화(saturation)를 시키게 되는데 이러한 과정을 통하여 제트 풀룸의 에너지가 급속도로 감소하게 된다. 일단 포화가 된 후에 추가적으로 물을 분사하여 추가적인 열전달과 아울러 제트 풀룸의 에너지를 추가적으로 낮추게 한다[8].

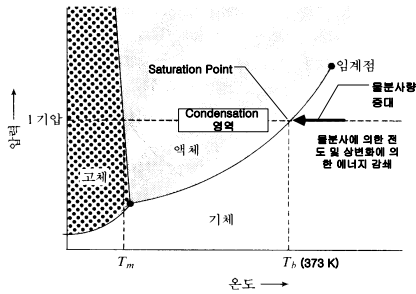


Fig. 9 Energy Decrease by Water Injection

### 3. 수직형 후류처리 장치의 설계

Figure 10은 현재 항공우주연구원 추진시험팀에서 고려하고 있는 연소기 시험을 위한 후류처리 장치의 개형을 보인다. Table 1에 제시한 각 부분별 기능을 보면, 제트플룸에 의한 제트펌프 효과에 의해 상부에서 air가 유입되며 이는 상부 냉각 및 식(1)과 같이 CO를 CO<sub>2</sub>로 변환시키는 역할을 한다. film cooling은 상부 및 엘보우 부 벽면을 냉각한다. 화염중심부 물분사(core injection)는 화염에서 생성되는 충격파 구조와 간섭하고 제트플룸의 에너지를 줄임으로서 소음을 저감시키고, 화염의 온도를 낮춤으로서 NOX 생성을 저감한다. 1번째 ring 분사와 2번째 ring 분사는 역시 충격파 구조에 간섭하고 물의 증발 냉각 및 응축을 유도함으로써 제트의 에너지와 속도를 감소시키는 역할을 한다. 또한 수직형 화염유도로의 특징상 엘보우 부분에 고온/고속의 제트의 충돌이 야기되므로 이 부분은 이 중 채널냉각을 수행하고 각 채널에서 냉각된 물은 내부로 배출되어 증발냉각을 유도함으로써 추가적인 벽면 냉각을 수행한다.

### 4. 결론 및 요약

본 연구에서 수행한 로켓 엔진 후류처리 장치에 대한 고찰은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 가. 후류처리 장치는 기본적으로 화염유도로의 역할을 하며 추가적인 기능에 따라 소음/배기 가스 처리장치, 고공 모사 장치 등으로 분류될 수 있다.
- 나. 후류처리 장치는 화염 및 충격파로부터의 발사체 보호, 제트펌프, 유해배기 가스 저감 원리가 적용된다.
- 다. 물 분사를 통해 제트플룸의 마하파를 약화시키고 물의 증발/응축을 통해 제트의 에너지를 약화시켜 소음을 감소시킬 수 있다.
- 라. 후류처리 장치에 적용되는 원리의 고찰을 통해 수직형 후류처리 장치의 개념을 제시하였다.

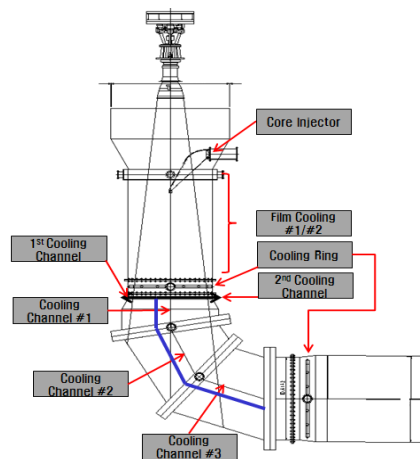


Fig. 10 Vertical Exhaust System

Table 1. Function of Exhaust System Section

화염유도로	기능
Air cooling	상부 entrained air유입: 상부냉각 및 CO 전환
Film Cooling	상부 벽면 냉각
Core Injector	화염중심 분사: 소음/화염온도(NOX) 저감
1st Cooling Ring	화염 ring 둘레 분사: 소음저감
1st Cooling	첫번째 냉각채널 : 벽면냉각/소음저감
2nd Cooling Channel	두번째 냉각채널 : 벽면냉각/소음저감
3rd Cooling Channel	세번째 냉각채널 : 벽면냉각/소음저감
2nd Cooling Ring	화염 ring 둘레 분사: 소음저감

## 참 고 문 헌

1. C. Francisco and F. Abdelkader, "Study of the Ignition Overpressure Suppression Technique by Water Addition," Journal of spacecraft and rockets, vol. 43, No. 4, 2006, pp. 853-865
2. 이광진 외, "분사 냉각시스템을 이용한 발사대 화염유도로의 냉각특성", 한국추진공학회 2011년 추계학술발표회 논문집, 2011
3. Sacha Sarchar, Njam Beg, "A novel application of jet pump technology to boost production", Offshore Gas Processing Technical Conference 22nd February, 2006
4. HQ AFLC/DEP and HQ USAF/LEEVX, "HUSH HOUSE SITE PLANNING BULLETIN", October, 1987
5. Klaus Schäfer, "SIMULATION OF FLIGHT CONDITIONS DURING LIFT OFF FOR ROCKET ENGINE TESTING", Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conference on Green Energy Propellants for Space Program, June, 2004
6. Daniel C. Allgood, Grady P. Saunders, Lester A. Langford, "Reduction of Altitude Diffuser Jet Noise Using Water Injection", Stennis Space Center, 2011
7. 조남경 외, "로켓 엔진 후류처리 장치 설계 국외전문가 자문 보고서", KARI-SPD-TN-2001-011-v.1-rev.1, 2001
8. 조남경 외, "로켓엔진 지상연소시험장에서의 물분사를 이용한 소음저감설비", 대한기계학회 2001년 열유체/유체공학부문 공동 추계학술발표회 논문집, 2001