

# 램제트 천이 시 점화 및 연소 특성 연구

윤재건\* · 윤현걸\*\* · 길현용\*\*†

## A Study on the Ignition and Combustion Characteristics During the Transition from the Rocket Booster to Ramjet Sustainer

Jaekun Yoon\* · Hyungull Yoon\*\* · Hyunyong Gil\*\*†

### ABSTRACT

The flow and combustion dynamics in the ignition and ramjet sustainer phase of an integrated rocket-ramjet(IRR) engine are investigated. The physical model includes the entire engine flowpath, from the freestream in front of the inlet to the exit of the exhaust nozzle. The flowfield obtained from a rocket booster study is used as the initial condition for the present analysis, so that the complete operation history of the engine can be obtained. The analysis for the primary factor governing flame propagation during the ignition and the key mechanisms for driving and sustaining the flow oscillations are performed.

### 초 록

통합형 로켓 부스터 램제트(IRR) 엔진에서의 점화 및 램제트 단계에서의 유동 및 연소의 동적특성에 대한 연구를 수행하였다. 연구대상모델은 흡입구 전방 자유흐름 영역에서부터 노즐 출구까지 엔진 전체 유로가 포함되도록 하였으며, 로켓 부스터에 대한 연구[1]를 통해 얻어진 유동장 계산 결과를 본 연구의 초기조건으로 사용함으로써 엔진의 작동 과정 전체에 대한 정보를 얻을 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 점화과정에서 화염전파에 가장 영향을 미치는 요소와 유동의 진동을 유발하고 지속시키는 메커니즘에 대해 연구를 수행하였다.

Key Words: Integrated Rocket Ramjet(통합형 로켓 부스터 램제트), Ignition Transient(점화천이), Combustion Instability(연소불안정), Acoustic(음향), Interaction(상호작용)

### 1. 서 론

램제트 엔진에서 주요 설계 목표 중 하나는 흡입구와 연소기가 안정된 성능과 높은 연소 효율을 가지도록 하는 것이다.

\* 정회원, 한성대학교 기계시스템 공학과 교수

\*\* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

† 교신저자, E-mail: iroad7306@gmail.com

흡입구는 연소기에서 필요한 공기를 충분히 포획하여 엔진에 공급해야 하며, 높은 압력회복과 함께 적절한 안전여유를 가지고 작동해야 하고, 연소기는 높은 신뢰도를 가지고 점화되어야 하며, 적절한 효율과 안정된 연소를 유지할 수 있어야 한다. 하지만 지난 약 50여년 이상의 심도 있는 연구에도 불구하고 이러한 설계 목표는 아직까지도 새로운 엔진개발에 있어서 중요한 기술적 과제로 남아있는 것이 현실이다.

다양한 작동 모드에서 최소한의 내부 유동 손실을 유지한 채 안정된 연소를 유지하는 것 또한 주요 기술적 장애중 하나이다. 특히 로켓 부스터 단계에서 램제트 전환 과정에서의 유동의 불안정은 자주 엔진 내부 유동의 커다란 교란을 초래하며, 이러한 교란이 효과적으로 제거되지 않을 경우 연소실 내부에 큰 진동을 일으키게 되며 극단적인 경우 연소불안정에 의해서 유발된 음향파가 종말충격파를 흡입구에서 이탈시킴으로서 엔진의 램제트 작동 실패를 유발한다.

흡입구와 연소기는 공기역학적으로 직접적으로 결부되어있기 때문에 이들의 상호작용은 가끔 엔진에서의 진동을 악화시킨다. 특히 덤프형 연소기에서의 불안정한 연소는 상류와 하류 양 방향으로 전파되는 음향파를 생성하게 되어 상류로 전파된 음향파는 흡입구 충격파의 주기적인 진동을 유발하기도 하며, 하류로 전파된 음향파는 화염영역에서의 연소 진동을 심화시키기도 한다[2].

본 연구에서는 IRR 엔진에서의 부스터에서 램제트 작동 단계로의 천이 과정에서의 흡입구와 연소기간의 상호작용에 의한 점화 및 램제트 단계로의 안정화 과정에서의 유동의 전개과정과 연소 동특성에 대해서 연구하였다.

## 2. 점화 천이

앞에서 언급한 바와 같이 초기 유동장은 로켓 부스터에 대한 연구[1] 결과를 이용하며, 흡입구의 마개가 제거되어 공기가 공급되기 시작하는 시간을  $t=0.0$  초로 정의한다. 연료 공급은 덤프

면 상류 4cm 지점에서 이루어지며, 연료 유량은 0.12 kg/s로 당량비는 0.8이다. 점화원은 덤프면 구석의 재순환 영역에서 제공되며 점화는  $t=1.2\text{ms}$ 에 이루어졌다.

점화과정에서 화염전파에 가장 지배적인 역할을 하는 요소를 알아보기 위해 화염속도에 관한 실험식을 사용하였다. 화염속도는 국부적인 혼합가스의 온도와, 압력, 당량비, 난류정도 등에 의해 결정된다. 본 연구의 계산조건에서의 최대 화염 속도를 알아보기 위해 연료는 완전히 혼합되었으며, 연소기에서의 혼합기체 온도는 흡입구를 통해 압축된 공기의 온도와 동일하다고 가정하였다.

Meghalchi와 Keck의 층류화염속도[3] 식은 다음과 같으며, 연소실 압력  $p=5.5 \text{ atm}$ , 혼합가스 온도  $T=540 \text{ K}$ , 당량비  $=0.8$ 를 적용하면 층류 화염속도( $S_L$ )는 0.44 m/s이다.

$$S_L(T_u, p) = (B_M + B_2(\phi - \phi_{Mref})^2)(T_u / T_{uref})^\gamma (p / p_{ref})^\beta$$

여기서  $B_M$ 과  $B_2$ 는 경험상수로 각각 34.22 cm/s와 -138.65 cm/s이며,  $\gamma = 2.18 - 0.8(\phi - 1)$ ,  $\beta = -0.16 + 0.22(\phi - 1)$ 이다.

하지만 일반적으로 램제트 연소기에서 난류섭동 속도( $\nu'_s$ )가 층류화염속도보다 훨씬 크기 때문에 Klimov의 난류화염속도 모델[4]을 적용하여 계산하면 화염속도는 약 34.3 m/s가 된다.

$$S_i / S_L = 3.5(\nu'_s / S_L)^{0.7}$$

난류확산에 의한 화염전파속도를 이용해 점화가 이루어지는 덤프면 위치에서 노즐까지 화염이 확산되는데 소요되는 시간을 계산하면 약 12 ms의 시간이 필요하게 된다. 하지만 이는 이전 연구결과[1]의 1 ms와는 큰 차이를 가짐을 알 수 있다.

반면 유동에 의한 열에너지의 전달 과정을 통한 화염확산 속도는 본 연구의 경우 점화가 이루어지는 초기에 연소기내 평균 유속이 약 300 m/s로 난류화염속도보다 훨씬 크며 점화원에서

에서 노즐까지 화염이 전파되는 시간은 약 1.2 ms가 된다. 이 결과로부터 연소기내 유동속도가 큰 램제트 점화에서는 화염 전파가 난류의 확산이 아닌 평균 유동장에 의해 지배적이라는 것을 알 수 있다.

Figure 1은 점화가 이루어진 후 연소실에서의 온도장을 나타낸다. 화염은 최적의 당량비 조건을 만족하는 면을 따라 확산되며, 화염면은 전단층에서의 와류에 의한 영향으로 끊임없이 변화해 된다. 화염은  $t=4.48$  ms에 반경방향으로 팽창하여  $t=4.71$  ms에 하류방향으로 확장된다. 그리고  $t=5.19$  ms에는 와류 영향에 의해 덤프면 모서리 부근에서 화염이 말리기 시작하면서  $t=5.53$  ms에 화염면이 미연소가스가 위치한 중심축 방향으로 이동하고, 이어  $t=6.02$  ms에서와 같이 미연소가스 영역을 떼어내는 형상을 가지게 된다. 이러한 화염의 동적인 특성을 유발하는 요소로 연소실내에서 생성되는 와류가 밀접하게 연관되며, 와류는 화염면에서의 열방출에 의해 형성된 국부적인 큰 밀도구배에 의해서 생성되며 화염면을 주름지게 한다.

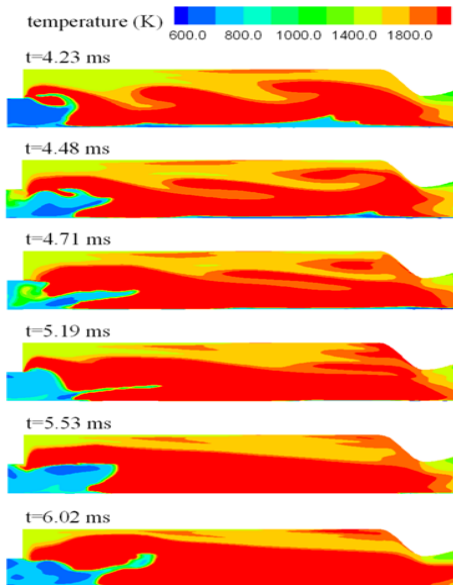


Fig. 1 Temperature field in the combustor during ignition transient

Figure 2는 점화과정에서의 공기유로 전체 유동장에서의 와류 형상을 나타내며 양의 값은 시계방향 회전을 나타낸다. 흡입구의 카울 부근 벽면으로부터 강한 와류가 생성되며, 충격파와 경계층간의 상호작용에 의한 유동분리현상도 일어난다. 와류는 공기유입부 외에도 연소기에서 화염면의 움직임이나 속도의 불균일에 의해서도 발생한다. 연소기로부터 유발된 일시적인 음향파에 의해 종말충격파가 영향을 받으면 흡입구에서 와류가 형성되어 하류에 전달되게 된다. 이들 와류는 연소실로 전파되게 되며 연소실에서의 음향파가 와류형성 주기와 일치하는 경우엔 덤프면에서 커다란 링 형상의 와류가 형성되게 된다. 이러한 와류의 형성 주기는 대략 연소기에서 국부적으로 압력이 일시적으로 최대가 되는 시간과도 일치한다. 즉 음향압력이 덤프면에서 최대가 되는 순간에 커다란 링 형상의 와류를 형성되게 된다. 와류 생성 주기는 Strohal 수와 연관되며 평균 유속이 250 m/s인 본 계산 조건의 경우 그 주기는 약 700 Hz이다. Fig. 3은 덤프면 직후방에서의 측정된 연소실압력에 대한 분석결과로 지배적인 주파수는 약 380 Hz, 770 Hz 및 1,390 Hz로 와류 형성주기와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 덤프형 램제트 연소기에서 와류의 형성과 소멸은 앞선 다른 연구[5-7]에서 지적한 바와 같이 연소불안정을 야기하고, 화염의 동적인 거동에 중요한 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다.

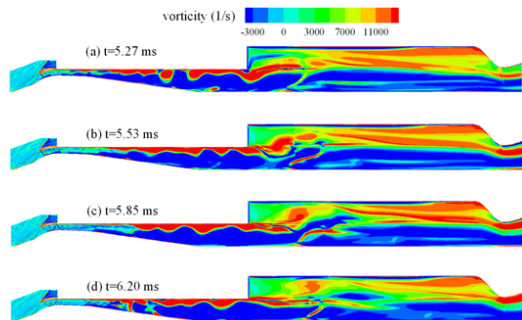


Fig. 2 Temporal evolution of the Vorticity field in the entire engine during ignition transient.

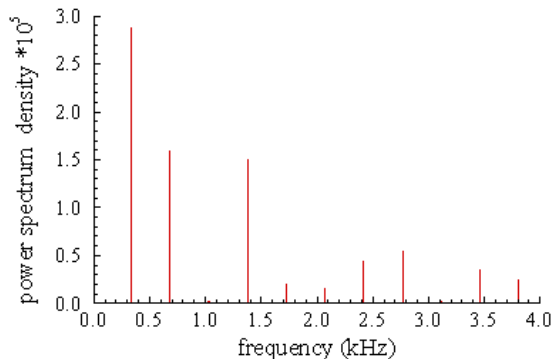


Fig. 3 Frequency spectrum of pressure fluctuation at the combustor.

### 3. 결 론

램제트 천이 과정에서의 점화와 흡입구와 연계한 연소 특성에 대한 연구를 수행하였다. 연소기 내에서의 유속이 화염속도에 비해 빠른 램제트 점화 과정에서 화염의 전파특성은 난류 확산이 아닌 평균 유동장에 의해 지배적이다.

연소기의 음향파와 흡입구 충격파의 상호 작용에 의해 생성된 와류는 연소기에서의 연소불안정을 유발하며, 화염의 동적인 거동에도 중요한 영향을 미친다.

### 참 고 문 헌

1. H.G. Sung and V. Yang, A Unified Analysis of Internal Flowfield in an Integrated Rocket Ramjet Engine, Part I.

- Transition from Rocket Booster to Ramjet Sustainer, Aerospace Science and Technology, submitted with the present paper
2. V. Yang and F. E. C. Culick, Analysis of Unsteady Inviscid Diffuser Flow With a Shock Wave, Journal of Propulsion and Power, 1 (3), 1985, pp.222-228
3. M. Metghalchi and J. C. Keck, Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane, and Indolene at High Pressure and Temperatures, Combustion and Flame, 48, 1982, pp.191-210
4. M. Klimov, Premixed Turbulent Flames-Interplay of Hydrodynamic and Chemical Phenomena, Progress in Astronautics and Aeronautics, 88, 1983, pp.133-146
5. K. Ahn, G. Stamp, and K.H. Yu, Vortex-Heat Release Interaction in A Dump Combustor, 30th International Symposium on Combustion, 2F5-14, 2004, pp.212-220
6. A.M. Annaswamy and A.F. Ghoneim, Active Control of Combustion Instability: Theory and Practice, IEEE Control Systems Magazine, 22 (6) ,2002, pp.37-54
7. J. E. Crump, K. C. Schadow, Y. Yang, and E. C. Culick, Longitudinal Combustion Instability in Ramjet Engines: Identification of Acoustic Modes, Journal of Propulsion and Power, 2 (2), 1986, pp.502-510