

스크램제트에서 램제트로의 모드 천이로 인한 불허지역

하정호* · Foluso Ladeinde** · 김태호* · 김희동*

Non-Allowable Regime in Scram-to-Ramjet Transitions

Jeongho Ha* · Foluso Ladeinde** · Taeho Kim* · Heuydong Kim**

ABSTRACT

A drastic pressure increment at the combustor inlet induced thermal choking is inevitable during scram-to-ramjet transitions. This phenomenon which is called by Non-Allowable Region(NAR) was observed on the excessive increment in the equivalent ratio. However, many studies were not investigated about factors which affects a variation of NAR. In the present study, a variation of NAR with regard to Mach number in the inlet of isolator is numerically and analytically analyzed. The conclusions from the investigation show that increasing the Mach number in the isolator inlet enlarged in the range of NAR.

초 록

스크램에서 램제트로의 천이가 일어날 때, thermal choking으로 인한 연소실 입구에서의 급격한 압력 상승은 불가피하다. NAR이라고도 불리는 이러한 현상은 당량비의 과도한 증가에 의해서 관찰된다. 그러나, NAR의 변화에 영향을 미치는 요소들에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 격리부 입구에서의 마하수에 따른 NAR의 변화는 수치해석적 그리고 이론해석적으로 분석되었다. 결론적으로 격리부 입구의 마하수 증가는 NAR의 범위를 확대시킨다.

Key Words: Dual-mode scramjet(이중모드 스크램제트), Non-Allowable Region(불허지역), Thermal choking(열초킹)

1. 서 론

최근 많은 연구자들은 초음속 그리고 극초음속 추진 기관에 대한 연구를 수행해왔다. 마하수 5 이상으로 비행하는 극초음속 추진기관의 개발은 군용, 산업용 그리고 우주발사체의 발전에 큰 이점을 가지고 있다. 특히, 그 중에서 이중모드 스크램제트에 대한 연구가 활발하다. 비행 마하수가 3~6에서는 램제트 모드일 때, 엔진 성능 효율이 좋지만, 비행 마하수가 6이상 일 때는 스크램제트 모드에서 엔진 성능 효율이 가장 좋다. 이 두 가지 모드에서 모두 작동할 수 있는 이중모드 스크램제트는 모드 천이 시 발생하는 문제점들만 잘 제어한다면, 매우 효율적으로 작동할 것이다. Billing [1]은 처음으로 모드 천이를 관찰하였다. Heiser 등[2]은 1차원 해석의 접근을 통해 이중모드 스크램제트에서 발생하는 유동장을 해석하고 스크램제트 모드 해석을 함에 있어서 중요한 식들을 제시하였다. Sullin [3]은 수소 연료를 이용한 실험을 통해 모드 천이를 발견하였다. Micka 등[4]은 화염의 위치에 따라 스크램제트 램제트 모드를 구분하였다. Fotia [5]는 이중모드 스크램제트 모델에서 당량비의 증감에 따라 모드 천이 시 급격한 압력변화로 인한 NAR을 발견하였고, 모드 천이가 발생할 때 연소실의 벽면 압력이 급격하게 변화함을 발견하였다. Ha 등[7]은 스크램제트 모드에서 램제트 모드로의 천이가 발생하는 원인과 이에 미치는 격리부 입구의 마하수, 전온도 등의 영향을 조사하였다.

이와 같이 종래의 연구에서는 모드 천이가 발생할 때, 유동 특성들에 관해 수많은 연구가 수행되었던 반면에, 당량비의 증가에 따른 급격한 압력상승은 NAR의 발생을 초래하는데, 이 NAR에 영향을 미치는 요소들에 대한 연구는 아직까지 심도 있게 연구되지 않았다. Fotia[6]는 이론적으로 NAR의 발생을 예측하였고, Ha 등[7]은 격리부 입구 마하수 증가에 따라 NAR의 구간은

더 확대될 것으로 예측했지만, 이에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 않았다. 실제 공학적 응용에서 이러한 현상의 중요성이 증대됨에 따라 NAR에 영향을 미치는 요소 중의 하나인 격리부 입구의 마하수에 대한 영향을 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 Fotia [6]가 제시한 이론식을 기반으로 연구를 수행하였고, 수치해석 결과와 비교하였다. 결론적으로 수치해석 결과와 이론해석 결과는 잘 일치함을 보여주고 있다. 하지만, 격리부 입구 마하수의 증가에 따른 NAR 구간의 폭이 넓어지는 원인은 명확하게 밝혀지지 않았다.

2. 수치해석 방법

수치해석에 사용되는 모델은 Micka 등[4]이 사용한 실험 장치 모델을 사용하였다. 격리부와 연소실 부분을 기반으로 한 이중모드 연소실의 실험 장치를 계산영역으로 정했다. 상세 내용은 참고 논문에 기술되어 있다.[8]

수치해석에 사용된 격자는 대략 9만개의 정렬 격자를 적용하였고, 경계층 유동이 발달하는 벽 주변 및 공동내부에 격자를 집중시켰다. 모든 벽면의 경계조건은 no-slip 조건을 적용하였고, 노즐 입구에 pressure inlet 조건, 연소실 확대부 외부에 직사각형으로 pressure outlet 조건을 적용하였다. 연료 주입구에는 mass-flow inlet 조건을 적용하였다. 본 연구에서는 모델의 복잡한 내부 유동의 수치모사를 위해 향상된 난류모델과 화학 반응 모델을 사용하였다. 상세 내용은 참고 논문에 기술되어 있다.[8]

3. 결과 및 토론

이전의 연구에서 초기조건은 격리부 입구의 마하수가 2.2, 전온도가 1400K 그리고 전압력이 590kPa이었다. Fig. 1과 같이 스크램제트 모드에서 당량비를 서서히 증가시키면, 격리부 출구에

* 국립안동대학교

** 한국뉴욕주립대학교

† 교신저자, E-mail: kimhd@anu.ac.kr

서 유효 유동 단면적이 더욱 감소하여 격리부 출구의 마하수는 약 1.3에 도달하게 된다. 여기에서 연료 당량비를 더욱 증가시키더라도 격리부 출구 마하수는 1.3을 넘지 않다가 갑자기 마하수 1미만으로 급감하게 된다. 따라서 격리부 출구에서 마하수가 연료 당량비의 증가에 따라 연속적으로 감소하는 것이 아니라, 불연속적으로 감소하게 된다.

Fig. 2는 격리부 입구 마하수에 따라 NAR의 변화를 조사하였다. 격리부 입구 마하수가 증가할수록 NAR의 폭이 넓어졌다. 이와 같이 수치 해석 결과도 유사하게 나타날 것이라고 예상했다. Yang 등[8]도 입구 마하수가 증가할수록 불연속적인 압력 변화의 폭이 더 커질 것이라고 예측하였다. 여기서 나타내는 급격한 압력비의 변화는 마하수의 급격한 변화로 설명할 수 있다.

여기에서 하첨자 1, 2 각각 격리부 입구 및 출구 상태를 의미하며, γ 는 기체의 비열비, P 는 압력 그리고 M 은 마하수이다.

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \gamma M_1^2 - \gamma M_1 M_2 \sqrt{\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2}} \quad (1)$$

위의 식에서 압력 P_1 , P_2 그리고 마하수 M_1 의 값을 이용하면, 다음과 같이 2 위치에서 유효 유동 단면적을 구할 수 있다.

$$\frac{A_{2c}}{A_1} = \frac{1}{\gamma M_2^2} \left[\frac{P_1}{P_2} (1 + \gamma M_1^2) - 1 \right] \quad (2)$$

위의 식에서 A_1 은 1 위치에서 유로 단면적, A_{2c} 는 2 위치에서 유효 유동 단면적이다.

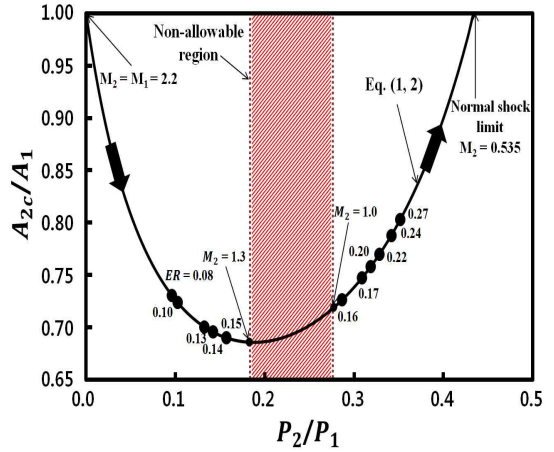


Fig. 1 Variation of confined flow area fraction ($T_0 = 1400K$)

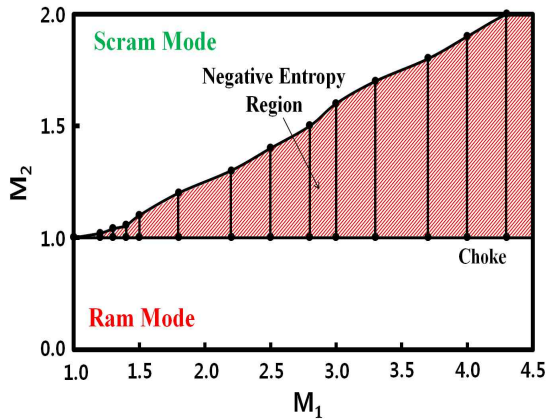


Fig. 2 Negative entropy region between scram and ramjet modes

4. 결론

본 연구에서는 격리부 입구의 정압과 전온도가 일정할 경우, 격리부 입구의 마하수가 증가할수록 모드 천이 시 격리부 출구에서의 압력 증가의 폭이 커지고 이로 인해 해를 얻을 수 없는 NAR이 넓어진다. 이론해석을 통해 격리부 입구 마하수가 2.2, 2.5 그리고 3.0인 경우, NAR의 범위가 1.3~1.0, 1.4~1.0 그리고 1.5~1.0으로 서서히 증가할 것이라고 예측하였고 수치해석을 수행한

결과는 이론해석과 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단(NRF)의 사업인 중견연구자지원사업 (No.NRF-2016R1A2B3016436)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Billing, F.S., "Combustion Processes in Supersonic Flow," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 3, pp. 209-216, 1988.
2. Heiser, W.H. and Pratt, D.T., "Hypersonic Air-breathing Propulsion," *AIAA Education Series*, AIAA, 1994.
3. Sullins, G.A., "Demonstration of Mode Transition in a Scramjet Combustor." *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 4, pp. 515-520, 1993.
4. Micka, D.J., "Combustion Stabilization, Structure and Spreading in a Laboratory Dual-Mode Scramjet Combustor," *Doctor of Philosophy in the University of Michigan*, 2010.
5. Fotia, M.L., "Mechanics of Combustion Mode Transition in a Direct-Connect Ramjet-Scramjet Experiment," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 1, pp. 69-78, 2015.
6. 하정호, 윤영빈, Ladeinde, F. and 김희동, "스크램-램제트 모드 천이에 미치는 연료 당량비의 영향," 한국추진공학회 논문집, 2017. (검토 중)
7. 하정호, Das, R., Ladeinde, F. and 김희동, "스크램제트 엔진에서의 모드 천이에 관한 수치해석 연구," 한국추진공학회 논문집, 2017. (검토 중)
8. Yang, Q., Bao, W., Chetehouna K., Zhang, S. and Gascoin, N. "Thermal Behavior of an Isolator with Mode Transition Inducing Back-Pressure of a Dual-Mode Scramjet," *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017.