

공동주위 분사위치에 따른 초음속 연소 유동해석

정은주* · 정인석*

Numerical Analysis of Supersonic Combustion Flows according to Fuel Injection Positions near the Cavity

Eunju Jeong* · In-Seuck Jeung*

ABSTRACT

To achieve efficient combustion within a manageable length, a successful fuel injection scheme must provide rapid mixing between the fuel and airstreams. The aim of the present numerical research is to investigate the mixing enhancement combustion phenomena according to fuel injector location near the cavity in supersonic flow. Fuel injector location changes the actual length to depth ratio of the cavity in the supersonic combustor. Therefore fuel injector location near the cavity effects different fuel/air mixing efficiency and combustion efficiency.

초 록

효과적인 초음속 연소를 수행하기 위해 연료와 공기의 빠른 혼합을 이룰 수 있는 연료 분사 기술이 요구된다. 본 수치적 연구의 목적은 초음속 유동장내에서 공동 주위 연료분사 위치에 따른 연료/공기 혼합 및 연소 현상을 살펴보고자 한다. 연료 분사 위치는 연소기내에서 영향을 미치는 공동의 길이-깊이비를 변화시킨다. 따라서 같은 형상의 공동이라 하더라도 공동 주위 유동 특성이 달라지므로 연소기 내부의 연료/공기 혼합과 연소 현상에 영향을 끼치게 된다.

Key Words: Cavity(공동), Supersonic Combustion(초음속연소), Fuel Injector Location(연료분사위치)

1. 서 론

초음속 유동장 내에서의 공동은 스크램제트 엔진 내에서 화염 안정화부와 연료/공기 혼합 증진과 초음속 노즐과 제트 유동의 제어를 위해 다년간 연구되어왔다. 공동으로 인한 유동의 진

동은 초음속 전단층에서 혼합을 증진시키는데 실질적으로 사용되어 왔다. 연료/공기 혼합은 음향적 교란에 의해 증진되고, 혼합 증진 정도는 공동의 형상에 의해 결정이 된다. 그러나 공동은 진파되는 파의 비정상적 성질로 인해 유동이 불안정해 지고 또한 연소기 내에서 불안정한 연소 현상을 유발할 수 있다. 공동내에서 발생하는 진동현상을 억제하기 위해 여러 제어 방법이 연구 되어왔으며, 후방부에 경사면을 가진 공동이 공

* 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: newaero1@snu.ac.kr

동내부에서 존재하게 되는 충격파의 형성을 제거함으로써 자유전단층의 비정상적 성질을 억제할 수 있다. 뿐만 아니라 공동을 포함하는 초음속 연소 유동장 내에서의 적절한 연료분사 위치는 공동이연료/공기 혼합 증진과 더불어 점화기, 화염 안정부 역할까지 할 수 있게 한다[1-4].

따라서 본 연구는 초음속 유동장내 공동주위 연료 분사 위치에 따른 연료/공기 혼합 정도와 연소에 미치는 영향을 살펴보고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 수치해석적 방법

2.1 지배방정식

2차원 초음속 연소기내 비평형 화학반응을 수반하는 초음속 점성 유동장을 수치적으로 해석하기 위하여 유동과 화학반응이 완전히 결합된 형태의 화학종 보존 방정식과 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 보존 방정식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + W$$

2.2 수치해석법

GRI-Mech 2.11에 기반한 25단계-9화학종 상세 반응 모델에 기초하여 사용하였다. 본 연구에서는 연소 반응에 큰 영향을 미치지 않는 N_2 의 해리 반응을 제외하여, $H, H_2, O, O_2, H_2O, OH, H_2O_2$ 및 HO_2 등을 반응성 화학종으로, N_2 를 비활성 기체로 고려한 25단계 화학 반응 모델을 이용하였다. 각 화학종의 비열은 6000K까지 유효한 NASA 다항식을 이용하였다[5]. 각 화학종의 동점성 계수와 열전달 계수는 6000K까지 유효한 온도의 다항식 표현을 인용하였다. 초음속 연소기 내의 레이놀즈 수는 매우 높기 때문에 완전 난류 유동으로 가정하였다. 본 연구에서는 난류 모델로 Menter의 SST(Shear Stress Transport)모델을 사용하였다. SST모델은 전단

경계층 문제에 많이 쓰이는 표준 $k-\epsilon$ 모델과 벽면 난류 현상 예측에 유리한 Wilcox의 $k-\omega$ 모델을 혼합한 후, 역압력 구배 유동 문제에 중요한 전단응력의 전달효과를 고려한 모델이다. 연소기 내부의 유동장을 수치적으로 해석하기 위하여 지배 방정식을 유한 체적법을 이용하여 이산화하였다. 점성항은 중심 차분법을 이용하여 이산화하였다. 대류 플럭스항은 일반 좌표계에서 다원 혼합기체에 대하여 유도된 Roe의 FDS (Flux Difference Splitting)기법[6]을 사용하여 차분하였고, MUSCL (Monotone Upstream Method for Scalar Conservation Law)기법[7]을 이용하여 고차의 공간 차분 정확도를 유지하였으며, TVD 성질[5]을 유지하기 위하여 미분형 제한자를 사용하였다. 또한, LU-SGS기법[8]을 이용하여 완전 내재적인 시간 적분을 수행하였다.

2.3 수치해석적 형상 및 조건

초음속 연소기 내 공동주위의 연료분사 위치에 따른 연료 혼합 및 연소현상을 살펴보기 위하여 본 연구에서 수행된 공동의 길이-깊이비는 대략 4.8정도의 값을 가진다. 수치해석적 형상은 아래 세 가지로 구분된다.

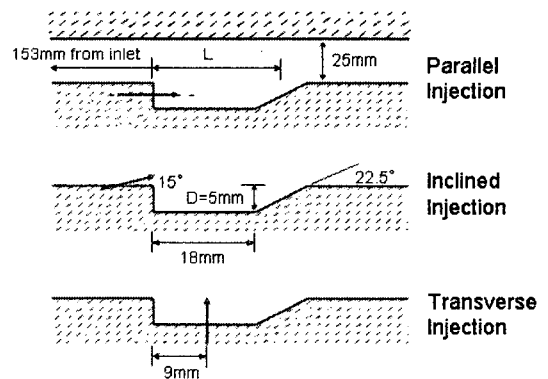


Fig. 1 Cavity Geometry and Injector Ports

평행분사의 경우 수소 연료가 후방단 중심부에서 공동내로 공기의 유입방향과 동일한 방향으로 분사된다. 경사분사의 경우 연료가 공동이전

아래벽면에서 공기 유동 방향의 15° 윗방향으로 분사된다. 수직분사의 경우 공동내의 아래벽면에서 수직 방향으로 연료가 분사된다. 모든 경우에 대해 연료분사구의 폭은 1mm의 슬릿 형태로 동일하다. 각 경우에 따른 유입공기 유동과 수소 연료의 조건은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Inlet and Fuel Injection Conditions

	Inlet	Fuel Injection
Mach Number	4.12	1
Static Pressure	86.2 kPa	240 kPa
Static Temperature	1190 K	250 K
Static Enthalpy	6 MJ/kg	-
Equivalent Ratio	0.13	

또한, 연소기 내의 벽면 압력 분포를 살펴보기 위하여 Fig. 2에서 제시한 위치에서 압력을 살펴 보았다.

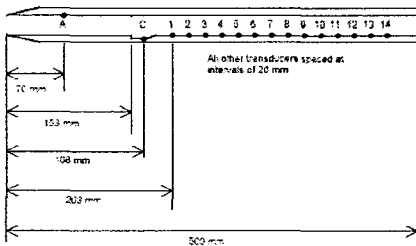


Fig. 2 The location of Numerical Probes

2.4 혼합 효율 및 연소 효율

혼합효율과 연소 효율은 아래의 식을 통해 구해낼 수 있다[9-10].

$$\eta_m = \frac{\int_A \rho u Y_R dA}{m_F} \quad \eta_c = 1 - \frac{\int_A \rho u Y_{H_2} dA}{m_F}$$

여기서, 국소적으로 희박영역일 경우 $Y_R = Y_{fuel}$ 이고, 과농영역일 경우 $Y_R = f(1 - Y_{fuel})$ 이다.

여기서 f 는 이론반응 공연비를 뜻한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경사분사

경사분사의 경우 공동을 지나 가장 높은 압력 분포를 나타내고 있는데, 이는 공동의 앞부분에

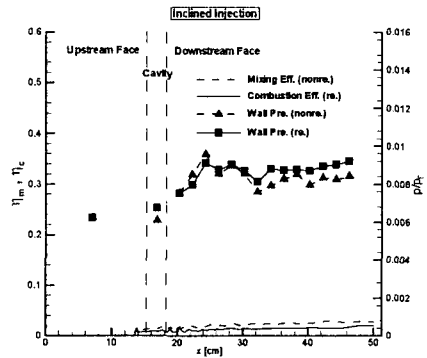


Fig. 3 Wall Pressure Distribution, Mixing and Combustion Efficiency

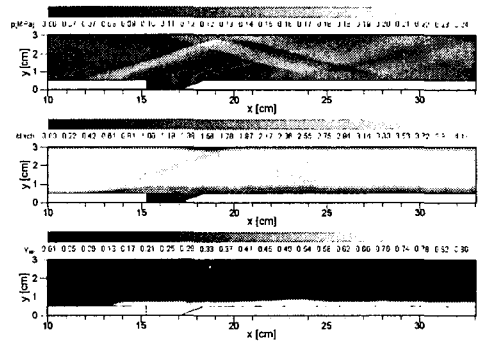


Fig. 4 Non-Reacting Flow (Inclined Injection)

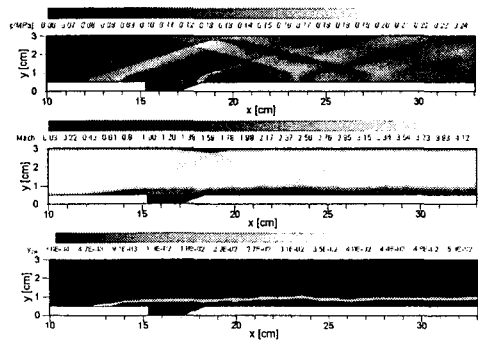


Fig. 5 Reacting Flow (Inclined Injection)

서 분사되는 연료가 15°정도의 각을 가지는 일종의 썰기 역할을 하여 이로 인해 공기유입유동이 경사충격파를 발생시킨다. 또한 공동 앞부분에서 분사된 연료 유동은 공동 내부를 채우고, 공동의 앞전에서 분리된 자유 전단층은 공동의 뒷전 경사면에 재부착됨으로써 유동의 진동현상이 약하게 일어난다. 15°의 경사를 가지고 연료 분사를 시킨 경우, 4.12의 높은 마하수를 가지는 유입공기로의 연료가 깊이 침투하지 못하고 유동의 흐름을 따라 서로 다른 층을 형성하였다. 따라서, 연료와 공기가 만나는 전단층에서만 연료/공기 혼합이 일어날 뿐 그 외의 영역에서는 연료/공기 혼합이 일어나기 힘들므로, 혼합효율이 0.05의 낮은 값을 가진다. 뿐만 아니라, 낮은 혼합 효율은 연소기 전 영역에 걸쳐 연소 효율이 낮게 나타난다. 이는 공동 내부 영역에 연료가 주로 존재하여 공기와의 적은 혼합으로 인해 공동이 연소가 발생할 수 있는 조건을 충족시켜주지 못하기 때문이다.

3.2 평행분사

공동내 앞전 벽면에서 연료가 분사되는 경우, 연료가 평판과 같은 역할을 하여 공동의 깊이를 줄이게 되므로 유동장 내에서 유효하게 되는 공동의 길이-깊이비가 4.8에서 12로 늘어나게 된다. 공동의 길이-깊이비가 10이상인 폐쇄형 공동의 경우 공동의 길이방향으로 유동의 진동이 발생하게 되어, 이런 현상이 여러 개의 충격파를 발생시킨다. 뿐만 아니라, 공동내부에 존재하는 재순환영역이 연료분사의 방향에 영향을 끼쳐 공동 위쪽유동의 진동을 더욱 증가시킨다. 이런 진동 현상으로 인해 공기 유동에 교란을 주게 되고 따라서, 공기와 연료의 혼합이 활발하게 일어나게 된다. 실제적으로 연료가 과도하게 존재하게 되는 공동내부에는 혼합효율이 낮지만, 공동을 지난 연소기 후반부에서는 상대적으로 적은 연료량과 유동의 진동으로 인해 혼합효율이 증가하게 된다. 혼합효율에 있어서 높고 낮음이 나타나는 이유는 유동의 출렁임으로 인해 국소적으로 연료량이 적은 부분이 존재하고, 더불어 공

동에서 발생된 충격파가 벽면으로 부터 반사되면서 연료유동을 후방으로 밀어내어 국소적으로 연료량을 증가시키기 때문이다. 화학반응의 경우, 공동위 유동의 진동으로 인해 발생하는 충격파가 일종의 점화기 역할을 하여

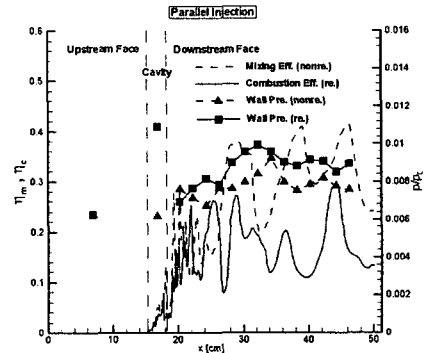


Fig. 6 Wall Pressure Distribution, Mixing and Combustion Efficiency

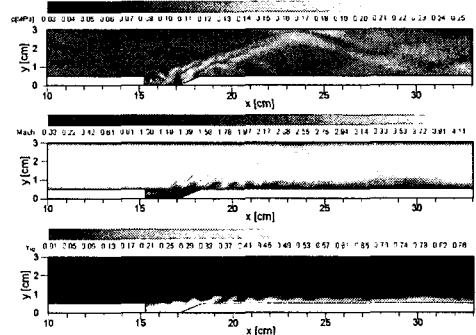


Fig. 7 Non-Reacting Flow (Parallel Injection)

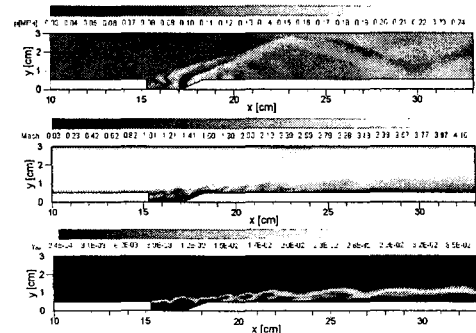


Fig. 8 Reacting Flow (Parallel Injection)

연소가 발생한다. 비화학 반응에서 알 수 있듯이 연소기 내부에 국소적으로 증가된 혼합양상으로 인해 연소효율도 연소기 전 영역에서 고른 분포를 보이지 못하고 효율의 증감을 보이고 있다.

3.3 수직분사

공동내부에서 수직으로 연료가 분사되는 경우, 연료분사가 수직 평판 역할을 하여 공동의 길이 방향으로의 크기가 줄어든다. 따라서 유동 내에서 실제 영향을 끼치게 되는 공동의 길이-깊이비가 1.8로 줄어들게 되고 작은 개방형 공동의 형태로 변화된다. 수직으로 분사된 연료는 공동의 높이 부분인 5mm 정도까지 침투하고 공동의 앞전에서 발생하는 자유 전단층이 수직 분사되는 연료부분과 재부착하게 되고, 이 부분에서 강한 충격파가 발생하게 된다. 그러므로 공동 이번 평판에서 15°의 경사로 분사되는 경우보다는 혼합효율이 높게 나타난다. 그러나 개방형 공동은 공동의 길이 방향으로의 진동보다는 깊이방향으로 진동이 발생하므로, 유입 유동의 교란에 크게 영향을 주지 못하므로 연료와 공기의 혼합이 평행 분사의 경우보다 적게 일어난다.

화학반응의 경우, 혼합 효율은 평행분사보다 낮았지만, 줄어든 공동의 길이-깊이비는 공동의 뒷전에서 높은 저항을 발생시키므로 이 저항이 연소를 유도하게 된다. 또한 공동의 저항으로 인해 발생한 강한 충격파가 연소면과 상호 작용하여 연소가 더욱 활발히 일어나게 한다. 이는 연소기 내 연소효율의 높낮이와 연소기내 벽면 압력분포가 서로 유사하다는 점에서 유추해 볼 수 있다.

4. 결론

초음속 유동장내의 공동주위의 연료 분사 위치에 따른 혼합과 연소에 미치는 영향을 살펴보기 위해 2차원 유동에 대해 본 연구를 수행하였다. 연료분사의 위치에 따른 공동의 영향을 살펴보기 위해 공동 주위의 서로 다른 위치에서 동

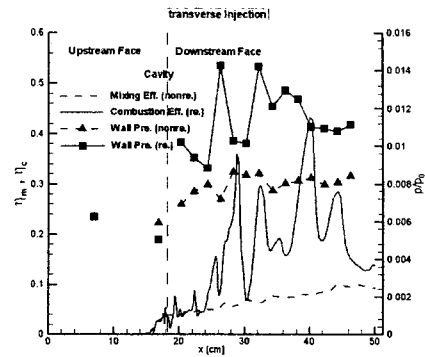


Fig. 9 Wall Pressure Distribution, Mixing and Combustion Efficiency

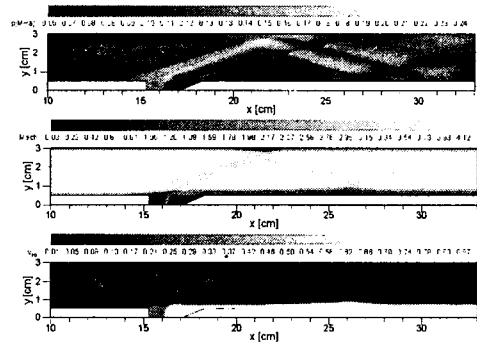


Fig. 10 Non-Reacting Flow (Transverse Injection)

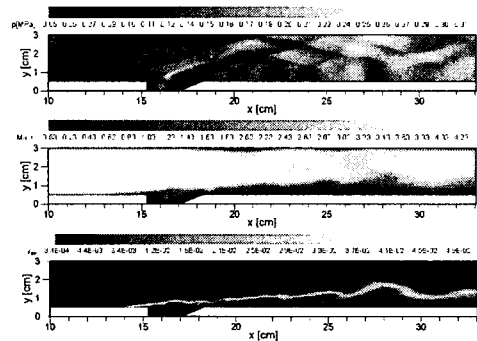


Fig. 11 Reacting Flow (Transverse Injection)

일한 연료, 당량비, 질유량을 분사하였다. 수치 계산 결과 연료 분사의 위치는 공동의 실질적인 L/D를 변화시키므로써 초음속 연소 유동장에서의 공동의 특성 자체를 변화시켰다. 또한 각 연료 분사의 위치는 연료와 공기의 혼합

에 서로 다른 영향을 끼침으로써 혼합효율과 연소효율을 변화시켰다.

후 기

본 연구는 서울대학교 BK21 기계 분야 사업의 일환으로 호주국방대학(ADFA) 호주국립대학(ANU)과의 국제 공동연구의 일부이며, 이에 감사드리고, 후반부 연구는 NRL 2005의 재정적 지원으로 진행되었습니다.

참 고 문 헌

1. K. H. Yu, K. J. Wilson, K. C. Schadow, "Effect of Flame-Holding Cavities on Supersonic-Combustion Performance," *Journal of Propulsion and Power*, Vol 17, No. 6, 2001, pp. 1287-1295
2. A. Ben-Yakar, R. K. Hanson, "Cavity Flame-Holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: An Overview," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.17, No.4, July-August 2001, pp. 869 - 877
3. M. R. Gruber, R. A. Baurle, T. Mathur, K.-Y. Hsu, "Fundamental Studies of Cavity-Based Flameholder Concepts for Supersonic Combustors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.17, No.1, January-February 2001, pp. 146 - 153
4. R. Boyce, C. Riley and N. Mudford, F. Houwing, A. Neely, M. Gruber, "Hydrocarbon and Hydrogen-Fueled Scramjet Cavity Flameholder Performance at High Flight Mach Numbers," AIAA-2003-6989, 12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, Norfolk, Virginia, Dec. 15-19, 2003
5. W. C. Gardiner, Jr., "Combustion Chemistry," Springer-Verlag, New York, 1984.
6. P. L. Roe, "Approximation Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes," *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, 1981, pp. 357-372
7. C. Hirsch, "Numerical Computation of Internal and External Flows," Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 1990
8. S. Shuen and S. Yoon, "Numerical Study of Chemically Reacting Flows Using a Lower-Upper Symmetric Successive Overrelaxation Scheme," *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 12, 1989, pp. 1752-1760
9. R. Krishnamurthy, D'Anthony M. Woods and S. Chandra, "Mixing in Hypervelocity Flows," *Flow, Turbulence and combustion* 64, pp. 29-41, 2000
10. J.-H. Kim, Y. Yoon, I.-S. Jeung, H. Huh, J.-Y. Choi, "Numerical Study of Mixing Enhancement by Shock Waves in Model Scramjet Engine," *AIAA Journal*, Vol.41 No.6 pp. 1074-1080, 2003