

## 論文

## 채널유동에서 질량분사에 의한 표면유동의 진동 특성

나 양\*, 이창진\*\*

Oscillation Characteristics of Turbulent Channel Flow  
with Wall Blowing

Yang Na\* and Changjin Lee\*\*

## ABSTRACT

The interaction between wall blowing and oxidizer flow can generate a very complicated flow characteristics in combustion chamber of hybrid rockets. LES analysis was conducted with an in-house CFD code to investigate the features of turbulent flow without chemical reactions. The numerical results reveal that the flow oscillations at a certain frequency exists on the fuel surface, which is analogous to those observed in the solid propellant combustion. However, the observation of oscillating flow at a certain frequency is only limited to a very thin layer adjacent to wall surface and the strength of the oscillation is not strong enough to induce the drastic change in temperature gradient on the surface. The visualization of fluctuating pressure components shows the periodic appearance of relatively high and low pressure regions along the axial direction. This subsequently results in the oscillation of flow at a certain fixed frequency. This implies that the resonance phenomenon would be possible if the external disturbances such as acoustic excitation could be imposed to the oscillating flow in the combustion chamber.

## 초 록

하이브리드 로켓 연소에서 발생하는 산화제 난류 유동과 연료의 기화로 인한 분출유동 사이의 상호 간섭은 매우 복잡하고 특별한 유동 간섭을 일으킨다. 이를 연구하기 위하여 연소반응을 제외하고, 산화제의 난류 유동과 연료 벽면에서의 분출 유동을 모사한 채널 유동에 대한 LES 해석을 수행하였다. 고체추진 로켓의 연소 과정에서 관찰되는 현상과 매우 흡사하게 벽면 근처에서 특정주파수로 진동하는 유동 현상이 존재한다는 것을 확인하였고, 산화제와 분출 유동의 간섭에 기인한 유동의 진동현상은 벽면 근처의 매우 얇은 영역에서만 존재하였다. 큰 길이 스케일의 유동현상을 보여주는 압력 섭동장으로부터 채널 내 주유동이 특정 주파수 특성을 갖고 하류로 진행해 가는데, 이는 산화제 유동이 분출유동과 상호작용을 하면서 발생된 전단유동의 특성을 나타낸 것이다. 그러나 하이브리드 로켓 연소실 유동의 진동 특성은 고체추진 로켓에서 관찰되는 유동 특성과는 달리, 진동의 강도가 벽면에서 온도 구배를 변화시켜 열전달의 향상을 발생시키기에는 충분하지 못한 것으로 보인다. 그러나 벽면 근처에서 특정 주파수 특성을 갖는 유동현상이 존재한다는 사실은 비슷한 크기의 주파수를 갖는 음향 가진과 같은 외부교란이 작용한다면 공진으로 발전할 수 있는 가능성을 의미한다.

**Key Words** : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Wall blowing(벽면 분출), Surface Flow(표면 유동), Intrinsic Oscillatory Flow(유동의 진동 특성)

† 2008년 9월 5일 접수 ~ 2008년 10월 30일 심사완료

\* 정회원, 건국대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 건국대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr

서울시 광진구 화양동 1번지

## I. 서 론

하이브리드 로켓은 개발비용이 상대적으로 낮으며 지속적으로 안정한 운영이 가능하다는 장점으로 인하여 현재 많은 나라에서 각광을 받고 있다. 그러나 많은 장점에도 불구하고 하이브리드 로켓의 개발에 반드시 필요한 기술적 부분들이 아직도 잘 알려져 있지 않은 상태이다. 특히 하이브리드 로켓의 연소는 고체 로켓의 예-혼합 연소와는 다른 확산연소 특성을 갖고 있으며 산화제가 매우 높은 속도로 연소실로 유입된다. 따라서 연료 기화에 의하여 발생하는 분출유동과 산화제의 난류 유동 사이의 상호 작용이 발생한다. 그러나 이러한 복잡한 상호간섭이 있는 연소 과정을 정확하게 이해한다는 것은 매우 어려운 일이다[1-4].

최근에 수행된 몇몇 하이브리드 로켓의 연소 실험 결과에 의하면, 연소 후 연료 표면에 작고 불규칙한 셀 모양의 패턴이 형성되는 현상이 보고되었다. 이런 현상은 PMMA/GOx를 사용하는 실험 뿐 아니라 HTPB/GOx, N<sub>2</sub>O/HTPB를 사용한 다른 독립적 실험에서도 관찰되고 있다. 실험결과들을 비교해보면, 비록 연소된 연료 표면의 거칠기 정도에는 차이가 있지만 표면이 국부적으로 더욱 거칠게 발생했다는 점과 축 방향을 따라 하류로 진행해 감에 따라 거칠기의 정도가 점점 더 심해진다는 것을 알 수 있다. 이는 연료 및 산화제의 종류보다는 하이브리드 모터 내에서 형성되는 유동특성에 의한 것으로 판단된다. 구원모 등[3]의 연구 결과에 의하면 이와 같은 셀 패턴의 형성은 산화제 난류 유동과 연료의 기화로 발생하는 분출유동의 상호 간섭작용에 의한 결과인 것으로 보고되었다.

한편 하이브리드 로켓의 연소에서는 불규칙적인 연료 표면이 발생하는 현상 외에도 연소 과정 중에 추진체의 연소율이 갑자기 증가하면서 이에 따라 연소압력도 급격하게 상승하는, 이른바 DC-shift 연소 불안정 현상도 관찰되고 있다[5-7]. 이 현상은 원래 고체추진 로켓에서 발생하는 대표적인 비선형 연소불안정 현상으로 알려져 있다[8]. 고체 추진 로켓의 경우, 연소율은 연소 압력에 비례하여 증가되는 특성이 있으나, 하이브리드 로켓의 연소율은 압력의 변화와 무관한 특성이 있다. 그럼에도 불구하고 DC-shift 연소 불안정이 하이브리드 로켓 연소에도 나타난다는 사실은 두 종류의 로켓 연소과정이 공통으로 갖는 역학적 특성이 존재한다는 것을 의미한다.

고체 로켓에서는 연료의 기화로 발생하는 질량이 추진체 앞부분에서 축적되기 시작하면서 하류로 진행하는데, 축 방향으로 층류 및 천이 상태를 거치면서 난류 유동으로 변화해 간다. 이때

표 1. 고체, 하이브리드 로켓의 연소실 유동조건

	Solid Rocket	Hybrid Rocket
Inlet Flow	No inlet flow	Fully turbulent Oxidizer flow
Flow Regime	Laminar, Transition, Turbulent	Turbulent Flow
Flow Oscillation Response to Excitations	Certain Fixed frequency Amplification	? ?

분출 구동된 축방향 유동 (injection-driven flow)은 지속적으로 분출유동과 상호작용하면서 특정한 주파수 특성을 갖는 고유의 진동 유동으로 발전한다. 이와 같은 유동의 진동 특성은, 분출유동이 축-방향 유동과 상호작용에 의하여 생성된 전단층에서 발생하는 벽면 와류 (parietal vortex shedding) 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다[9, 10].

그러나 하이브리드 로켓의 경우, 난류 상태의 산화제가 빠른 속도로(30-40m/sec) 연소실로 유입되는 점이 고체 로켓의 유동 조건과 다른 특성이 있다. 따라서 산화제 난류 유동이 존재하는 하이브리드 로켓의 연소에서 연료 기화에 의한 분출유동과 산화제 난류 유동의 상호 간섭이 어떤 역학적 특성을 나타낼 것인가를 살펴보는 것은 매우 흥미로운 일일 것이다. 또한 유체 공학적 관점뿐만 아니라 고체 로켓의 DC-shift가 왜 하이브리드 로켓의 연소에서도 관찰되는 지에 대한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 표 1은 고체 추진 로켓과 하이브리드 로켓의 연소실 유동조건의 차이를 요약한 표이다.

본 연구는 연료 기화에 의한 분출유동을 고려함으로써, 벽면 분출과 연소실로 유입된 산화제 난류유동의 상호 작용에 의한 난류 특성과 벽면에서 유동의 진동 특성을 살펴보는 것을 목적으로 하고 있다. 특히 벽면 근처에서 특정한 주파수로 진동하는 유동의 발생여부를 연구의 주목적으로 하였다. 실험[3]에서 사용된 높은 Reynolds 수 (22,500)의 유동을 효과적으로 모사하기 위해서 LES 기법을 사용하였으며, 연소과정은 고려하지 않았다.

## II. 본 론

### 2.1 하이브리드 로켓 연소의 유동 특성과 LES 계산

고체 로켓에서는 연료 기화로 인한 벽면 분출

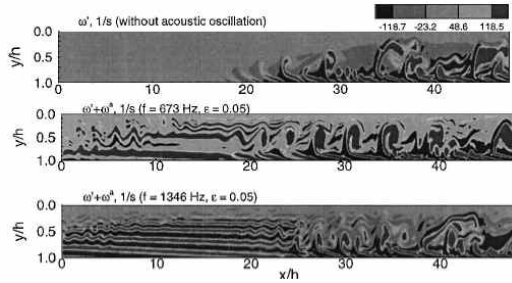


그림 1. 분출유동에 의한 고체로켓 연소실의 유동불안정과 음향교란에 의한 공진 [10]

유동이 선두부에서 발생하여 축 방향으로 진행한다. 이 유동은 하류에서 발생하는 벽면 분출유동과 계속적으로 간섭하면서 층류상태 및 천이 과정을 거쳐서 연소실의 후반부에서는 난류로 변화한다. Fig. 1은 Apte [10] 등이 LES기법을 사용하여 비-반응 유동에 대하여 계산한 결과이다. 첫 번째 그림은 외부 교란이 없는 경우에 분출 구동된 유동이 층류, 천이, 난류 유동으로 변화하면서 벽면 분출유동과 상호 간섭하여 유동 불안정성을 발생시키는 것을 보여주고 있다.

두 번째와 세 번째 사진은 와도(vorticity)의 변동량( $\omega'$ )을 살펴봄으로써, 음향가진(acoustic excitation)을 가했을 때 유동장이 이에 반응하여 공진하는 것을 보여주고 있는 그림이다. 연소실의 후반부로 진행할수록 음향가진 여부와 상관없이 유동이 심하게 불안정해 지는 것을 볼 수 있다. 그러나 하이브리드 연소실에서는 빠른 유속을 갖는 산화제 난류유동이 추가로 존재하기 때문에 고체로켓의 연소실에서 관찰된 유동과는 다른 특성을 나타낼 것으로 보인다. 하지만 이에 대한 많은 연구가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 하이브리드 연소실에 존재하는 축방향의 강한 산화제 유동과 연료의 기화로 인하여 발생하는 벽면 분출 유동의 상호 작용으로 인한 유동 특성의 변화와 비정상상태의 유동장 해석을 위하여 LES 기법을 채택하였다. LES를 사용한 방법론과 계산 영역의 정당성 등은 참고 문헌 [11]에 잘 설명되어 있다.

Fig. 2는 본 계산에 사용된 계산영역과 유동조건을 보여주고 있다. 계산영역의 입구에서 물리적으로 타당한 난류 유동조건을 만들기 위하여 본 연구의 관심영역( $x > 13h$ )의 앞부분에 단순채널을 임의로 위치시키고( $0 < x < 13h$ ), 단순채널의 입구로부터 난류 특성길이에 비해 충분히 멀리 떨어져 있는 위치( $x = 12.2h$ )에서의 유동을 지속적으로 입구에 재순환하도록 하였다. 이런 방법을 이

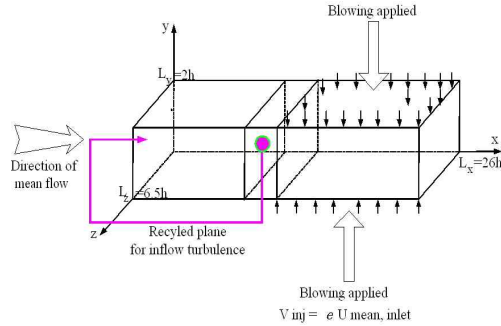


그림 2. LES 계산영역과 유동조건

용하여, 잘 발달된 난류유동(fully-developed turbulent flow)이 본 연구의 주 관심영역인 벽면 분출이 있는 계산영역( $x > 13h$ )으로 들어가도록 하였다. 계산에 사용된 레이놀즈(Re) 수는 실험조건과 유사하도록 22,500으로 하였으며, 격자 계는 여러 번의 해상도 점검 후, 513x193x257로 결정하였다.

분출유동의 크기는  $x = 13h$ 의 위치에서 평균 산화제 유동 속도의 1%로 주어졌으며, 이후 선형적으로 증가하여 출구 ( $x = 26h$ )에서는 5%가 되도록 하였는데 이 값은 최근에 보고된 실험결과를 참조하여 결정되었다[2, 3].

계산에 사용된 필터링된 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식은 아래와 같이 구성되어 있으며, 수치계산과 관련된 설명은 참고문헌 [11]에 자세히 언급되어 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu \bar{S}_{ij} - \tau_{ij}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - q_j) \tag{3}$$

여기서 변수 위의 바(̄)는 격자 필터링이 수행된 변수를 나타내며, 잔류 응력(residual SGS stress) 텐서와 잔류 열 유속 벡터(residual heat flux vector)는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = \bar{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad q_j = \bar{T u_j} - \bar{T} \bar{u}_j \tag{4, 5}$$

LES를 수행하는 경우, 잔류응력 텐서와 잔류 열 유속 벡터가 모델링이 필요한 부분들이 된다.

동적혼성모델 (DMM)을 사용하는 경우, 먼저 잔류응력 텐서의 모델은 다음과 같이 두 가지 항으로 구성된다.

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_t \overline{S_{ij}} + (L_{ij}^m - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk}^m) \quad (6)$$

$$\nu_t = C_s \overline{\Delta}^2 \overline{S} \quad (7)$$

식 (6)의 오른쪽 첫 번째 항은 모델링이 필요한 eddy viscosity를 포함하고 있으며, 두 번째 항은 해상된 유동장의 정보를 사용하여 외재적으로 직접 계산해 낼 수 있는 수정된 Leonard 항이다.

Fig. 3과 4는 여러 축방향 위치에서의 축-방향 평균유동 속도( $u_{mean}$ )와 평균온도( $T_{mean}$ ) 분포이다. 그림에서 보듯이 벽면근처의 유동이 분출 유동에 의하여 위쪽으로 들어 올려져 있음을 알 수 있다. 또한 온도 경계층도 일반적인 채널 유동의 경계층보다 들어 올려져 벽면 근처에서는 온도

구배가 작아져 있음을 볼 수 있다. 벽면 근방에서 온도 구배가 작아짐에 따라서 벽면으로 전달되는 열전달량도 감소하게 되나, 온도구배 변화와는 다른 요인에 의해 열전달량의 급격한 변화가 발생할 수도 있다. 예를 들어, 고체추진 로켓의 경우, 벽면 분출로 구동된 축 방향 유동의 속도 및 열 경계층이 분출유동의 직접적인 작용으로 인해 벽면으로부터 들어 올려지게 되며, 이 경우 벽면 온도구배가 작아지게 되면서 전도 모드에 의한 열전달량은 급격히 줄어든다.

그러나 어떤 특별한 경우에는 오히려 열전달량이 증가하여 DC-shift와 같은 연소불안정에 이르기기도 하므로 난류 유동장에서 발생하는 유동의 불안정성 특성을 파악하는 것은 로켓 모터 내부의 연소과정을 이해하는데 매우 중요할 것으로 생각된다.

Fig. 5는 x-방향 유동 속도의 교란에 대한 평균값(rms)을 나타낸 그림이다. 앞서 유동의 평균에 대한 Fig. 3-4에서 보았듯이 벽면 분출로 인한 유동 간섭 때문에 난류에너지 생성이 벽면에서 떨어진 부분에서 활발하게 진행되고 있다. 그러나 분출유동과의 상호 간섭에 의하여 유동이 단순하게 평행 이동하는 것이 아니라, 매우 복잡하고 특이한 간섭효과를 보여주고 있다.

Fig. 6은 분출유동과의 상호 간섭에 의하여 변형된 벽면근처의 와류 분포와 가시화 실험에서 관찰된 연료표면의 유동특성을 비교한 그림이다. 수치계산 결과를 보면 채널유동에서 일반적으로 발견되는 축방향의 난류구조 (quasi-streamwise vortices)가 더 이상 존재하지 않는다는 것을 알 수 있는데, 이는 벽면 근방의 난류구조들이 벽면 분출에 의해서 기하학적 구조가 변경되었기 때문이다. 하이브리드 로켓 연소는 확산화염이 지배적이므로 연소는 벽면에서 떨어진 공간에서 발생

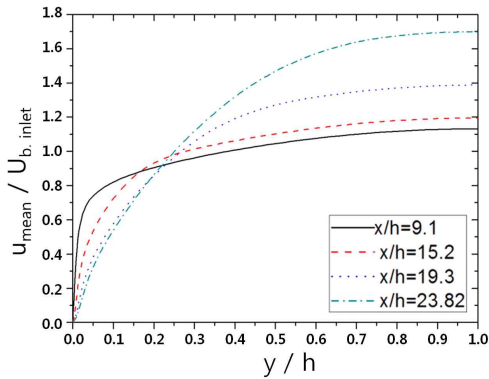


그림 3. 평균 주유동방향 속도 분포

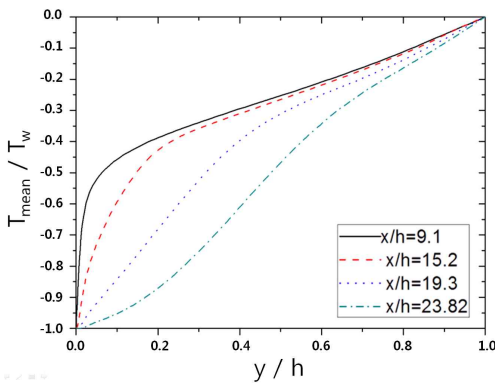


그림 4. 평균 온도 분포

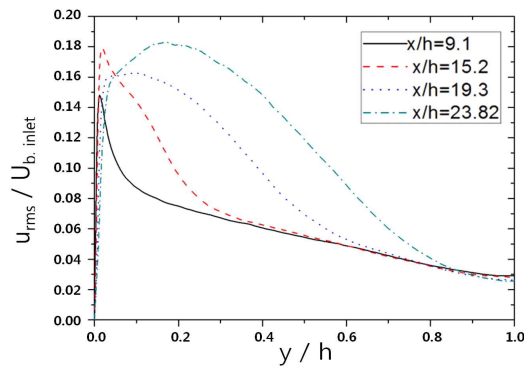


그림 5. x-방향 속도 교란의 평균값 ( $u_{rms}$ )

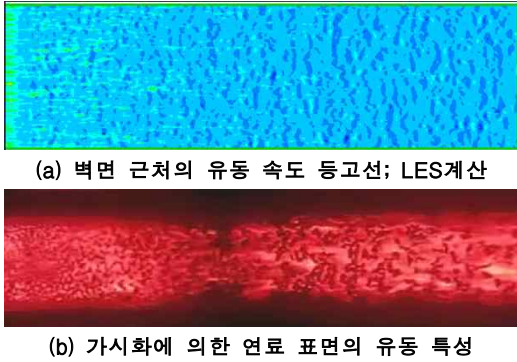


그림 6. LES 계산 결과와 유동 가시화 비교

한다. 따라서 연료 표면에서는 화학반응이 없는 난류 유동이 지배적이므로, 실험 가시화 사진은 연료 표면의 유동 특성을 보여준다고 할 수 있다. 위 그림의 직접적인 비교를 통해, 실험에서 관찰되는 연료 표면에 형성된 작은 크기의 셀 모양의 표면 돌기들은 산화제 유동과 벽면분출의 상호 간섭에 의하여 생성되는 난류구조(coherent vortex)의 기하학적 변형과 매우 밀접한 관계가 있는 것처럼 보인다. 그러나 지금까지의 수치 계산연구는 연소반응을 포함하지 않고 진행하였기 때문에 와류의 변형이 어떻게 열전달량의 변화와 불균일한 표면을 형성하게 되었는가에 관한 연구는 좀 더 진행되어야 할 것이다.

분출유동과 산화제 유동의 상호 간섭으로 발생하는 현상은 표면 근처의 작은 크기의 와류 분포 외에도 특정 주파수로 진동하는 유동의 진동 특성을 만들어 낸다. 그림 1에서 보듯이 고체 추진 로켓의 경우, 축 방향 유동과 분출유동의 상호 간섭으로 유동 불안정이 발생하고 있으며 이 유동불안정은 하류 유동장 전체에 영향을 미치고 있다.

Fig. 7은 벽면 근처( $y/h=0.0001$ ) 주-유동 방향 속도의 주파수 스펙트럼을 나타내고 있는데, 특정 주파수에서 에너지가 증폭되는 경우가 발생하고 있다. 이 에너지의 증폭현상은 벽면 분출이 있는 위치에서만 일어나고 있으며, 벽면 근처의 유동이 대략적으로 특정 주파수(무차원 주파수  $=7\sim 8$ )를 갖고 진동하고 있다. 그러나 벽면 분출이 없는 위치의 유동은 일반적인 난류유동에서 볼 수 있는 스펙트럼을 나타내고 있으며 특정 주파수에서의 증폭이 없음을 알 수 있다. 따라서 산화제 유동의 분출유동과의 상호 간섭은 벽면 근처 난류 유동이 특정한 주파수로 진동할 수 있는 환경을 만들고 있으며, 이는 앞서 언급한 고체로켓에서 나타나는 벽면 와류(parietal vortex

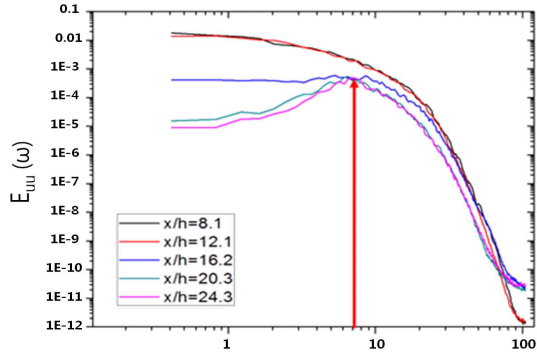


그림 7. 벽면근처의 주유동방향 속도의 주파수 스펙트럼 ( $y/h=0.0001$ )

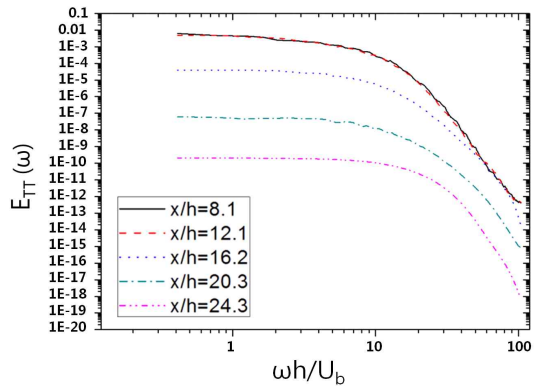


그림 8. 벽면근처에서 온도의 주파수 스펙트럼

shedding)의 특성과 직접적으로 연관이 있다. 채널의 높이를 10cm, 산화제 속도를 30m/sec로 가정하여 환산하면 Fig. 7에서 보여준 특성 주파수의 크기는 대략 250-300Hz 부근이다.

본 계산에서는 온도장을 passive scalar로 가정하여 온도 분포를 구하였다. 이 방법은 실제 물리적 온도 분포를 구하기보다는 온도 차이가 있는 유동에서 온도분포가 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 데 사용되는 방법이다.

Fig. 8은 passive scalar 방법을 사용하여 계산한 벽면 근처( $y/h=0.0001$ ) 온도 분포의 진동 특성이다. 유동의 진동 특성과는 달리 특정한 주파수로 진동하는 모습을 볼 수 없다. 분출 유동과 산화제 유동이 상호 간섭을 하여 유동은 특정한 주파수로 진동하고 있음에도 불구하고 온도분포는 난류에서 보이는 가장 특징적인 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 이것은 벽면 근처의 유동이 진동하고 있음에도 불구하고 그에 따른 온도 구배 변화가 약하게 이루어져 벽면으로 전달되는 열전달량의 변화가 없음을 의미한다.

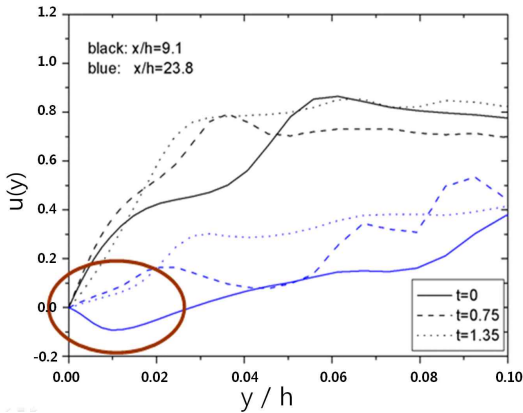


그림 9. 벽면근처에서 순간 유동 속도분포

Fig. 9는 벽면 근처( $y/h=0.0001$ )에서 순간 축 방향 속도 분포( $u(t,y)$ )를 시간에 따라 순차적으로 그린 그림이다. 분출 유동이 없는 위치와 분출 유동이 있는 경우의 순간 속도 분포를 비교하였는데, 분출유동에 의하여 축 방향 속도가 음의 값과 양의 값 사이에서 진동하고 있음을 볼 수 있다. 벽면 근처의 속도 성분이 음과 양의 값 사이에서 진동하는 것은 passive scalar 특성을 갖는 온도 구배 역시 진동하도록 함으로써 열전달의 급격한 증가를 일으키는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는, 특정 주파수로 유동의 진동이 발생함에도 불구하고 그 크기가 온도 구배의 진동을 구동시킬 만큼 강하지 못하고 오직 벽면 근처에서만 제한적으로 진동하고 있기 때문에 열전달량의 변화를 일으키지 못하는 것으로 보인다.

분출유동과 산화제 유동과의 상호 간섭에 의한 벽면 근처 유동의 진동 현상을 관찰하기 위하여 압력의 교란 성분을 가시화 하였다. 여기서 고체 로켓에서 사용하였던 와도 교란 성분( $\omega$ )을 사용하여 유동의 진동 특성의 가시화를 시도하는 것은 효과적이지 못한 방법이다. 하이브리드 로켓연소실의 경우, 산화제가 난류의 특성을 갖고 있으므로, 유동장 내에 다양한 스케일의 교란이 존재하므로, 순간 유동장을 살펴봄으로써 벽면 근처 유동이 진동하는 것을 가시화하는 것이 사실상 불가능하기 때문이다. 따라서 와도가 아닌 다른 물리량을 살펴볼 필요가 있는데, 유동장 내에 특별한 형태의 난류구조가 존재한다면 그 구조의 중심부에서의 압력은 상대적으로 낮을 것이므로, 압력의 교란 성분( $p'$ )을 살펴보았다. Fig. 10은 분출유동과 산화제 유동의 상호 간섭에 의하여 벽면 근처에서 발생하는 유동의 압력 섭동 성분을 나타낸 그림이다.

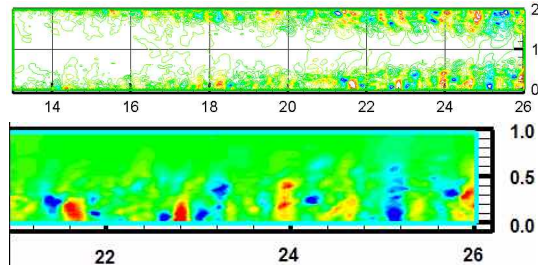


그림 10. 채널 중심면에서의 압력 섭동( $p'$ ) 등고선

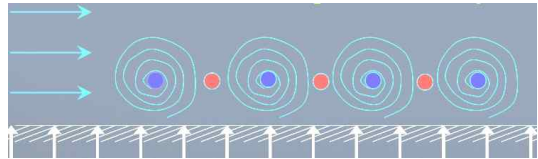


그림 11. 압력 섭동( $p'$ )과 와류 분포와의 관계

위 사진은 분출유동이 있는 영역에서의 압력 섭동에 대한 가시화이고 밑의 그림은 축방향 위치  $x/h=21-26$ 까지의 계산 영역 중에서 아래 부분의 반쪽을 확대한 그림이다. 그림에서 검은색은 압력이 평균값보다 낮은 부분이며 희게 나타나는 부분은 압력이 높은 부분이다. 상대적으로 높은 압력과 낮은 압력이 교차하며 벽면근처에 나타나고 있다. 이것은 벽면근처에 존재하고 있는 와류가 매우 규칙적인 간격을 유지하면서 하류로 전파되고 있음을 의미한다. 이러한 양상은 분출유동과 산화제 유동의 상호 간섭에 의하여 발생된 전단층에서 생성되는 와류의 조각들에 의하여 생성되고 있으며, 이 와류 분포의 직접적인 영향으로 순간 축 방향속도 성분도 음과 양의 값을 가지며 변화 하는 것으로 판단된다. Fig. 11은 이런 압력 변화를 도식적으로 설명하고 있는 그림이다.

그러나 앞서 언급한 바와 같이, 와류의 강도는 열전달의 변화를 발생시킬 수 있을 만큼 강력하지 못하고 와류의 영향도 벽면 근처의 매우 얇은 영역에만 한정되어 있으므로 유동의 진동으로 인한 열전달의 향상은 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 즉, Fig. 6에서 보는 벽면근처에서 와류의 흔적은 실험에서 관찰된 불균일한 표면을 생성할 만큼의 열전달 변화를 주지만 더 이상 유동장 전체의 특성 변화를 일으키지 못하며 그로 인한 연소불안정으로 발전하는 경우도 없다.

그러나 Fig. 1에서 보듯이 외부로부터 작용하는 음향가진(acoustic excitation)이 있을 때에는

벽면 근처 유동이 갖고 있는 특정주파수의 진동이 공진(resonating)으로 발전될 가능성이 있다. 이런 경우에 대한 연구를 통해 벽면근처의 유동 특성 변화와 열전달 특성의 변화를 파악한다면 하이브리드 로켓 연소에서 관찰되는 비정상 연소 특성을 논리적으로 설명할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

### III. 결 론

하이브리드 로켓 연소에서 발생하는 산화제 난류 유동과 연료의 기화로 인한 분출유동의 상호 간섭을 연구하기 위하여 연소반응을 제외한 난류 유동과 분출 유동을 고려한 LES 해석을 채널의 형상에서 진행하였다. 본 연구를 통해, 고체추진 로켓의 연소에서 관찰되는 것과 동일하게 벽면 근처에서 특정주파수로 진동하고 있는 유동 양상이 존재하고 있는 것을 확인하였다.

벽면 근처 유동의 진동은 산화제 난류 유동과 연료의 기화로 발생하는 벽면 분출 유동과의 상호 간섭에 의하여 발생하며, 유동 간의 간섭은 벽면 근처에 매우 작고 약한 크기의 와류 흔적들을 만들어 여러 실험에서 관측된 셀 모양의 불규칙한 표면 패턴의 생성 원인이 된다.

고체추진 로켓에서 관찰되는 유동 특성과 달리, 하이브리드 로켓 연소실 유동의 진동 특성은 벽면 근처의 매우 얇은 영역에만 국한되어 있으며 진동의 강도도 벽면에서 온도 구배를 변화시켜 열전달의 향상을 발생하기에 충분하지 못한 것으로 판단된다. 그러나 특정 주파수로 진동하고 있는 벽면 근처 유동에 비슷한 주파수를 갖는 음향가진 등의 외부교란이 작용하면 공진으로 발생할 가능성이 있으며, 이에 관한 연구는 앞으로 더 진행되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구의 두 번째 저자는 2007년도 학술진흥재단 기초연구지원사업에 (과제번호 D00126) 의하여 지원을 받아 수행하였으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Changjin Lee, Yang Na, Young-Choon Hwang, and Sung-Taick Lee, Turbulent flow in the helical grain of hybrid rocket fuel, AIAA-2006-4344, 41st AIAA Joint propulsion meeting, Sacramento, Ca., 2006.
- 2) B. Evans, Nicholas A. Favorito, and K. K. Kuo. "Oxidizer-Type and Aluminum-Particle Addition Effects on Solid-Fuel Burning Behavior", AIAA paper 06-4676, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
- 3) 구원모, 이창진, 산화제 난류 유동 변화에 대한 하이브리드 로켓 연소 특성, 한국추진공학회 춘계학술대회 논문, 2007.
- 4) K.H Shin, C. Lee, S. Y. Chang, and J. Y. Koo, "The enhancement of regression rate of hybrid rocket fuel by various method", AIAA 2005-0359, 2005.
- 5) J. P. Avres and H. S. Jones, "Explanation of DC-shift in Hybrid Rocket Motor", *AIAA Paper 1997-2938*, 1997.
- 6) Boardmann T. A., Carpenter, R. L. and Clafin, S. E., A Comparative Study of the Effect of Liquid versus Gaseous Oxygen Injection on Combustion Stability in 11 inch Diameter Hybrid Motors, *AIAA Paper 1997-2936*, 1997.
- 7) J. P. Avres and H. S. Jones, "Elimination of DC-shift in Hybrid Motors", *AIAA Paper 1997-2939*, 1997.
- 8) M. A. Karabeyoglu "Thermal Transients in Hybrid Rockets Fuel Grains-Non-Linear Effects" AIAA paper 07-5369, Cincinnati, OH, 2007.
- 9) G. Avalon, G. Casalis, and J. Griffond, "Flow Instabilities and Acoustic resonance of channels with wall injection", AIAA paper 98-3218, Cleveland, OH, 1998.
- 10) S. V. Apte, and V. Yang, A large eddy simulation study of transition and flow instability in a porous-walled chamber with mass injection, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 477, pp. 215-225, 2003.
- 11) 나양, 이창진, 분출유동이 있는 채널 난류 유동의 LES 해석, 항공우주학회지, 제35권 제8호, pp. 699-705, 2007.