

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.9.745>

입구 와류발생과 질량분사가 있는 연소실 내부유동의 LES 해석

몬킨우*, 구희석**, 이창진***

LES for Turbulent Duct Flow with Surface Mass Injection and Vortex Shedding

Khin Oo Mon*, Heeseok Koo** and Changjin Lee***

ABSTRACT

Hybrid rocket shows interesting characteristics of complicated mixing layers developed by interactions between turbulent oxidizer flow and mass flow from surface due to fuel vaporization. In this study, compressible LES with a ring structure attached at the entrance of the combustor are performed. According to one recent report, adding a ring structure in the middle of the combustor helps increasing regression rate. From the numerical results, it is seen that vortex structures near the wall becomes stronger due to the interaction with surface mass injection, and the local heat flux increases due to the vortices. This phenomenon is obviously related to the generation of dimple structures which are seen in the number of experiments. Also, the ring structure at the entrance induces strong vortex flow which enhances heat transfer to the wall surface and mixing between fuel and oxidizer as well as reaction efficiency.

초 록

하이브리드 로켓은 축 방향의 산화제 유동과 고체 연료의 기화로 인한 벽면 분출 유동 사이의 상호 간섭에 의해 복잡한 형태의 혼합 전단층이 존재한다. 연소실 입구에 링이 설치되어 있고 질량분사가 있는 실린더 유동에 대하여 압축성 효과를 고려한 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 적용하여 수치계산을 수행하였다. 최근의 실험에 의하면 연료 중간에 링과 같은 다이어프램이 설치된 경우, 연소율의 증가가 관찰되었다. 계산 결과에 따르면, 축방향 유동과 벽면 분출 유동이 상호 간섭하여 발생하는 벽면 와류가 국부적인 연료 표면으로의 열전달을 증가시켜 실험에서 관찰되는 딴플이 생성되는 것을 확인하였다. 또한 연소실 입구에 설치된 링에 의하여 발생하는 와류는 벽면 와류가 보다 활발하게 생성되고 열전달과 혼합을 향상시키는 역할을 하며 이 때문에 연소율이 증가되는 것으로 보인다.

Key Words : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Large Eddy Simulation(대와류모사), Vortex pair(와류 쌍), Ring Vortex Shedding(링에 의한 와류 흘림)

† 2012년 6월 8일 접수 ~ 2012년 8월 27일 심사완료

* 정회원, 건국대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 서울대학교항공우주공학과

*** 정회원, 건국대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr

I. 서 론

고체 로켓모터 (solid rocket motor)에서 연소에 의한 열이 연료로 전달되면 고체 연료가 지속

적으로 증발하여 그레인 내부에 축적되며 이로 인한 내부유동이 발생한다. 유동(mass driven axial flow)은 하류방향으로 진행하면서 점차 층류유동으로부터 천이 상태를 거쳐 난류 유동으로 발달한다. 이때 발달된 축 방향유동은 지속적으로 연료의 기화에 의한 분출유동과 상호작용을 하여 다양한 유동 특성을 일으킨다. 특히 축 방향 유동과 연료 표면의 기화유동이 상호 간섭하여 전단층에서 발생하는 매우 작은 크기의 벽면 와류(parietal vortex shedding)는 고체 로켓모터의 연소불안정을 발생하는 원인으로 밝혀졌다. [1-2].

액체 산화제와 고체 추진제를 사용하여 추진력을 얻는 하이브리드 로켓(hybrid rocket)도 고체 로켓모터에서 발생하는 내부유동과 매우 흡사한 유동 현상을 보여준다. 즉, 로켓에 유입된 산화제의 축 방향 유동과 연료 기화에 의한 수직방향의 유동이 상호 간섭하여 고체로켓의 내부유동과 같이 연료 표면과 가까운 전단층에서 작은 크기의 와류가 발생한다[3-5]. 그러나 두 로켓의 내부유동에서 가장 큰 차이는 고체 로켓에서는 축 방향으로 진행하면서 유동이 층류, 천이과정, 난류로 변화하지만, 하이브리드 로켓 연소실 내부 유동은 처음부터 잘 발달된 난류 유동이 유입된다는 점이다.

최근 김보훈 등[6]은 하이브리드 로켓의 내부 유동과 기화유동에 의한 상호 간섭을 모사하기 위해 실린더 형상의 연소실에 대하여 LES 기법을 적용한 수치연구를 수행하였다. 이 계산에서 화학반응은 고려되지 않았으며 증발에 의한 연료의 기화유동은 축방향으로 진행하는 산화제 질유량의 0-3%로 선형적으로 변화한다고 가정하였다.

계산결과, 축방향의 난류 유동과 기화유동이 상호 간섭하여 작은 크기의 와류가 연료 표면 근처에서 발생하는 것을 확인하였으며 스펙트럼 분석 결과 8.5-8.9의 무차원 각주파수 (angular frequency)로 진동하고 하는 특징을 보여 주었다. 이것은 유동의 상호 간섭으로 인하여 롤러형상의 와류 (roller-like vortex)가 발생하여 하류 방향으로 흘러가고 있음을 의미한다. 이 현상은 길이가 긴(길이/직경 비가 큰 로켓) 고체로켓의 하류에서 발생하는 벽면와류 발생과 동일한 원인에 의하여 발생하는 현상으로 어떤 조건에서 연소불안정으로 발전하기도 한다.

한편 최근 하이브리드 로켓의 연구에서 연소실의 연료 중간에 일부로 링과 같은 물체를 장착하여 와류를 발생시켜 연소에 어떤 영향을 미치

는가에 대한 연구를 진행하였다[7]. 링에 의하여 생성된 와류는 연료의 증발을 촉진시켜 연소율이 증가되는 효과를 얻기도 하였지만 어떤 경우에는 연소 도중에 연소 압력이 급격히 증가하여 심하게 진동하는 연소불안정 현상이 나타나기도 하였다. 연소율의 증가와 연소 압력의 진동은 모두 링을 설치하였을 때 나타나는 현상으로 어떤 원인에 의하여 발생하는가에 대한 연구는 아직 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 실린더 형상을 갖는 연소실 입구에 링을 설치하여 연소실로 유입되는 유동에 와류가 발생하도록 하였다. 이때 연소실로 유입되는 와류는 연료 기화에 의한 표면 분출 유동과 작용하여 그렇지 않은 경우에 비하여 매우 복잡한 유동 특성을 나타낼 것으로 기대한다. 수치계산은 LES (Large Eddy Simulation) 기법을 사용하였으며 화학반응은 고려하지 않았다. 특히 링에 의하여 발생된 와류가 표면의 분출유동과 간섭하는 경우와 링이 없을 때 나타나는 유동특성을 상호 비교하여 실험에서 나타난 연소율 향상 원인이 무엇인지 물리적인 설명을 시도하려 한다. 수치계산에서 화학반응이 제외되었음에도 불구하고 하이브리드 로켓 내부 유동의 물리적 특성과 와류발생, 그리고 와류 상호 간섭에 대한 유체역학적 특성을 설명할 수 있을 것이다.

II. 본 론

2.1 수치계산

2.1.1 지배방정식

수치계산을 위하여 저 마하수 영역에서 계산이 가능한 예조건화 기법 (preconditioning method)을 사용하여 비정상 3차원 LES 코드가 개발하였다. 무차원 지배방정식은 식 (1)과 같이 필터링된 연속 방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식으로 구성된다.

$$\Gamma \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial (F_j - F_{vj})}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

여기서 τ 와 t 는 시간을 의미하고, Q 와 W 는 보존형의 유동 변수 벡터(conservative variable vector)이며, F_j 와 F_{vj} 는 각각 각 방향의 비점성 유속 벡터(invscid flux vector)와 점성 유속 벡터(viscous flux vector)를 나타낸다.

$$Q = \begin{bmatrix} p \\ u_i \\ T \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad F_j = \begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j + p \delta_{ij} \\ \rho u_j H \end{bmatrix}$$

$$F_{vj} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{ij} + \tau_{ij}^* \\ u_i(\tau_{ij} + \tau_{ij}^*) - q_j + (\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

또한 ρ 와 p 는 필터링된 밀도와 압력을 의미하며, u_i 는 직교좌표계에서 각 방향의 속도성분이다. 그리고 E 는 전에너지(total energy)이며, 전엔탈피(total enthalpy)는 $H = E + p/r$ 으로 표현된다. 그리고 t_{ij} 와 τ_{ij}^* 는 각각 층류응력텐서(laminar stress tensor)와 난류응력텐서(turbulent stress tensor)를 의미하며, q_j 는 각 방향의 난류 열유속 벡터(total heat flux)를 나타낸다. 각 항의 정의는 식 (3)과 같다.

$$\tau_{ij} = 2\mu_l \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right), \quad \tau_{ij}^* = 2\mu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$q_j = -\frac{\gamma R}{(\gamma-1)} \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{p}{\rho} \right) \quad (3)$$

자세한 수치계산 기법과 방정식 그리고 경계 조건에 관한 설명은 참고문헌 [6]에 매우 상세하게 언급되어 있으므로 더 이상의 설명은 생략하기로 한다.

2.1.2 계산조건과 검증

Fig. 1은 수치계산을 위한 계산영역과 사용된 링 주위의 격자를 보여주고 있다. 실린더의 길이는 반경(R)으로 무차원화 되었다. 계산영역에 물리적으로 충분히 발달된 난류유동을 공급하기 위해 계산 영역 앞부분에 재순환 영역을 설치하였다. 표면에서 분출유동 속도는 실험[7] 결과를 바탕으로, 0%부터 선형적으로 증가하여 계산영역의 출구에서 실린더 중심선 유속의 3%가 되도록 구성하였다. Reynolds 수는 30,600이며 링을 설치하여 실험연구 논문들의 실험조건을 고려하였다[7].

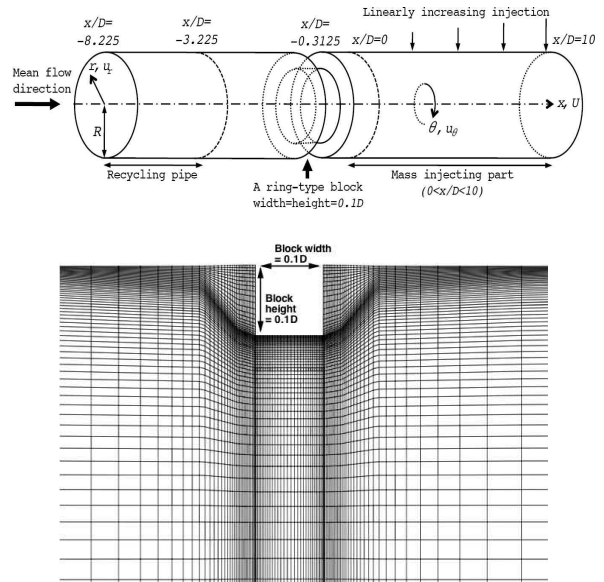


Fig. 1. Computational domain and grid system around a ring

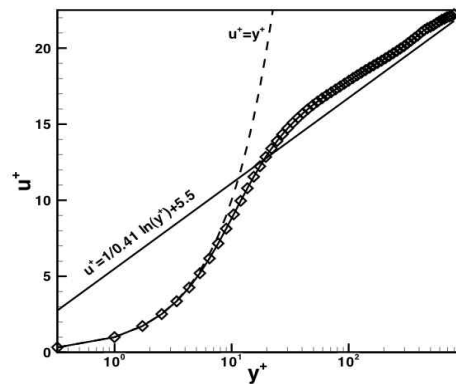


Fig. 2. Comparison of log law and numerical results

벽면 분출이 없는 영역의 계산 결과를 이용하여 완전 발달된 난류의 특성을 확인하고 수치계산의 타당성을 검증하기 위하여 참고문헌[6]의 해석 결과를 비교하였다.

Fig. 2는 본 연구의 수치계산 결과와 이론적으로 알려진 벽 법칙(law of the wall)을 비교한 그림이다. 사각형 기호로 표시된 수치계산 결과는 대부분의 영역에서 이론적인 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

2.2 계산결과

Fig. 3은 완전하게 발달된 난류를 계산영역으로 공급하기 위하여 설치한 난류 발생 영역에서 계산한 축방향 순간 속도분포를 보여주고 있다. 그림에서 x축은 지름으로 나눈 유동의 진행방향

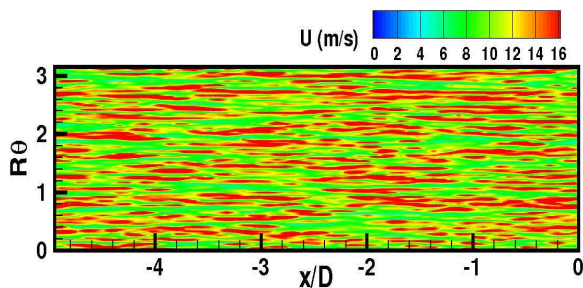


Fig. 3. Snapshot of axial velocity at $y^+=10$ for the recycling pipe

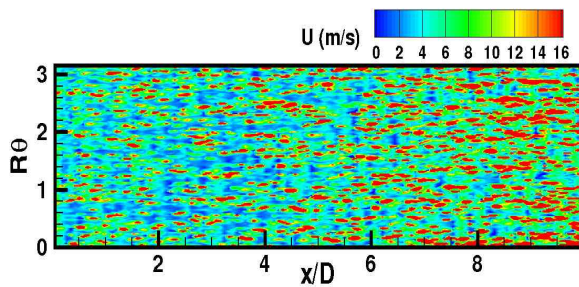


Fig. 4. Instantaneous axial velocity distribution near the wall with mass blowing at $y^+=10$

(x/D)이며 y 축은 실린더의 원주 방향 길이를 절단하여 펼친 후 반경을 곱한 값($R\theta$)이다. 순간속도는 표면으로부터 $y^+=10$ 인 지역에서 속도를 이용하였으며 벽면과 매우 근접한 부분이다.

벽면과의 마찰에 의하여 축방향 속도 분포가 길게 늘어진 형태를 나타내고 있으며 별레가 기어가는 형상은 전형적인 난류의 경계층에서 관찰되는 긴 에디 형상과 일치한다. 앞서 Fig. 2에서 확인하였듯이 계산된 속도 분포는 벽 법칙(log law of the wall)과 일치하였으며 잘 발달된 난류유동이 발생하여 주 계산영역으로 유입되는 것을 확인하였다.

Fig. 4는 벽면 분출이 있는 계산영역에서 순간 축방향 속도 분포를 보여주고 있는 그림이다. 이때 영역 입구에 링은 설치되지 않았으며 Fig. 3과 같은 위치에서 축방향 속도를 도시하였다.

축 방향 난류 유동과 표면에서 분출되는 분출유동 사이의 간섭으로 난류의 긴 구조가 잘게 부서져 작은 크기의 단절된 에디로 변화하는 현상이 발생한다. 유동 입구에서 시작된 간섭은 하류로 진행하면서 반경방향으로 특정한 고리 모양의 속도분포를 만들기 시작한다. 이 현상은 고체추진 로켓의 내부 유동에서도 나타나는 현상으로 축방향 유동과 벽면 분출 유동이 상호 간섭하여 생성되는 와류에 의한 유동 형태이다.

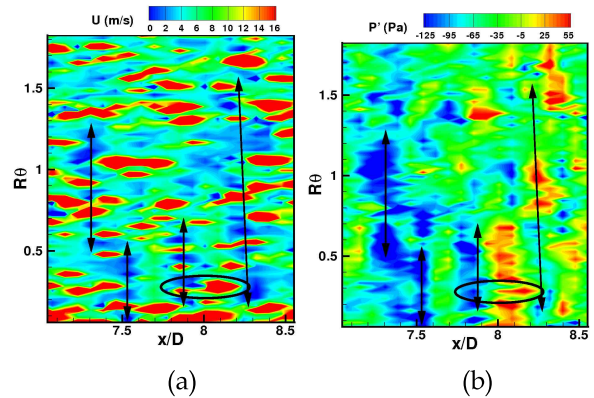


Fig. 5. Zoomed view of (a) axial velocity(u) and (b) pressure fluctuations(p') near the wall

Fig. 5는 사각형 부분을 확대하여 벽면 근처에서의 축방향 속도(u)와 압력교란(p') 분포를 나타내었다. 각 그림에서 화살표로 표시된 부분은 원주 방향으로 일정한 값을 유지하고 있음을 보여주는 특징들이다. 특히 압력교란(p') 분포를 살펴보면 원주방향으로 일정한 모양을 유지한 채 축방향으로 또는 반경방향으로 낮은 압력에서 순간적으로 높은 압력으로 변화하는 주기성을 보여주고 있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 롤러형상의 와류가 표면 근처에서 형성되어 하류로 진행하고 있음을 보여주고 있다.

다음으로 Fig.5에서 원으로 표시되어 있는 부분을 더 확대하여 3차원 유선(streamlines)과 함께 Fig. 6에 표시하였다. 이 그림은 벽면 근처에서 변화하는 3차원 유선의 모양을 나타내고 있는 그림이다. 축 방향 속도가 빠른 영역은 붉은색으로 느린 영역은 청색으로 나타내었다. 유선의 변화를 보면 벽면으로부터 떨어져 있는 부분에서 시작된 유동은 벽면근처에 형성된 빠른 속도영역으로 끌려 들어온다. 이후 어느 정도 함께 진행한 후에 벽면으로부터 분리되어 다시 처음의 진행방향으로 복귀하게 된다.

이 같은 유동은 그림 (c)에서 나타나 있는처럼 서로 다른 방향으로 회전하는 와류 쌍(vortex pair)을 이용하여 설명할 수 있다. 압력분포를 확대한 그림에서도 동일한 유선변화를 볼 수 있다. 축 방향 유동과 벽면의 분출 유동이 간섭하여 형성되는 와류는 서로 반대 방향으로 회전하는 쌍을 형성하여 벽면과 거리가 있는 부분의 유동을 벽면근처로 끌어당긴다. 다른 방향으로 회전하는 와류에 의하여 다시 벽면으로부터 분리되어 원래의 유동방향으로 진행하게 된다. 이런 유선의 변화에 의하여 실제 연소실에서는 고온의 연소가스

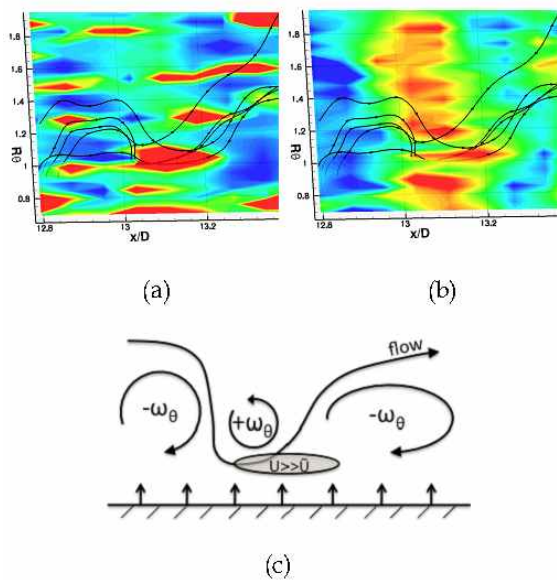


Fig. 6. Magnified view of 3D streamlines over (a) axial velocity (b) pressure fluctuation (c) Cartoon of vortex pair and streamline

가 벽면 근처로 이동하여 국부적인 열전달 향상을 가져온다. 또한 열전달에 의하여 기화된 연료 기체는 다른 와류에 의하여 연소부근 영역으로 진행하여 산화제와 혼합하고 연소 증가에 기여하게 되며 이로 인하여 국부적인 연소압력 상승 (p')을 기대할 수 있다. 결국 와류 쌍에 의한 유선의 변화는 열전달 향상과 연소압력 변화를 일으키는 기본적 기구로 작용하고 있음을 알 수 있다. 하이브리드 로켓 실험에서 연소 후 연료 표면에서 관찰된 불규칙적인 덩플(dimple)은 이런 와류 발생에 의한 열전달 향상과 밀접한 관계를 갖고 있는 것으로 보인다.

Fig. 7은 연소실 입구에 링을 설치한 경우와 그렇지 않은 경우의 축 방향 순간속도 분포를 비교를 위해 축방향으로 반으로 절단한 그림이다.

연소실 입구에 링이 설치되지 않은 경우의 단면의 축방향 순간속도 분포는 참고 문헌 [6]의 결과와 정성적으로 일치하고 있다. 축방향으로 유동이 진행하면서 표면에서 분출되는 수직방향의 유동과 간섭하여 매우 작은 크기의 와류를 형성하며 하류에서는 표면 근처의 제한된 영역에서 유동이 진동하고 있음을 보여준다. 이때 와류는 분출 유동 때문에 벽면에서 떨어진 매우 좁은 영역에서 존재한다.

입구에 링이 설치된 경우에는 좀 더 복잡한 유동 간섭이 발생한다. 수치계산에서 벽면에서 유입되는 기화유동은 $x/D=0$ 부터 시작하였고 링은 그

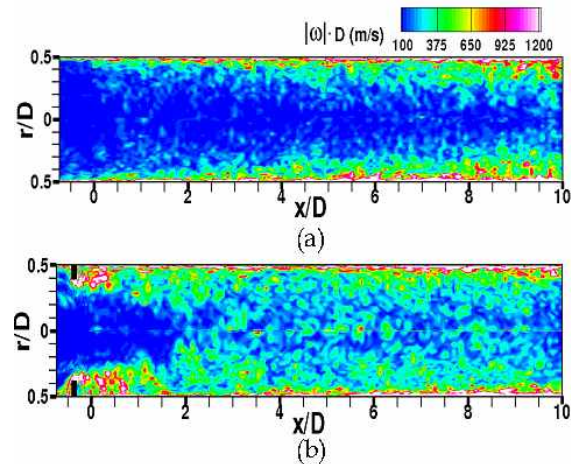


Fig. 7. Cut view of Instantaneous axial velocity (a) without ring (b) with a ring

이전에 설치되었다. 우선 링에 의한 와류가 발생하여 연소실로 유입된다. 그림 (b)의 앞부분에 집중되어 발생하고 있는 와류는 링에 의하여 발생되고 있는 와류이다. 링에 의하여 생성된 와류는 $x/D=2.0$ 까지 벽면에 재 부착되는 등 영향을 미치다가 그 이후에는 소멸되는 양상을 보여준다. 이때 (a)와는 달리 실린더의 중심부분에는 링에 의하여 생성된 와류가 남아있어 연소실 출구까지 하류 방향으로 와류가 소산되고 있음을 관찰 할 수 있다. 그러나 지속적으로 분출되는 벽면 분출 유동과 간섭하여 대략 $x/D=3.0$ 이후부터 벽면 근처에서 작은 크기의 와류가 발생하고 있다. 그러나 중심 부근 영역에서는 아직도 링에 의해 형성된 와류가 남아 있으며 벽면 근처에서 발생한 와류와 상호작용을 하고 있는 것처럼 보인다. 중심부분의 와류와 벽면 근처에서 형성된 와류가 어떤 상호 간섭을 하는가는 좀 더 연구가 필요한 부분이다.

Fig. 8은 링을 설치한 경우와 그렇지 않은 경우의 축 방향 순간 와류분포를 비교한 단면 그림이다. 링이 없는 경우에는 벽면 근처에서 전단층의 영향으로 경계층이 발달하며 와류가 축방향으로 생성되는 모습을 형상을 보여준다. 원주방향 와류(azimuthal vorticity) 분포이며, 속도벡터에 curl을 취하여 절대 값으로 표현한 수치이다.

$$|\omega_\theta| = \left| \left(\frac{\partial u_r}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right| \quad (4)$$

그러나 링이 있는 경우에는 링이 없는 경우의 와류 발생과 조금 다른 발달 특성을 보여준다. 앞서 언급한대로 링에 의해 발생한 와류는 일정

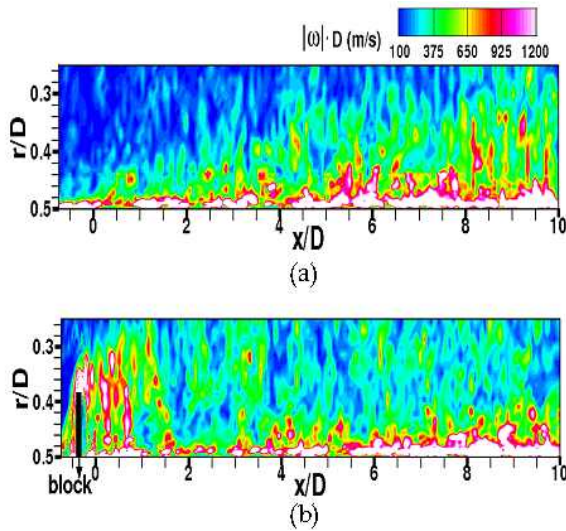


Fig. 8. Comparison of cut view of instantaneous vorticity profile (a) without ring (b) with a ring

한 거리가 지난 후에 벽면에서 수직방향으로 어느 정도 떨어져 있는 영역에 존재하며 벽면 근처에서 발생하는 작은 크기의 벽면 와류와는 직접적인 상호 간섭을 하지 않는 것처럼 보인다. 그림 (b)를 살펴보면 벽면 와류와 링에 의하여 생성된 축방향 와류의 흔적은 서로 혼합되지 않은 채 두 개의 층을 형성하여 진행되는 것처럼 보인다. 이 때문에 벽면 와류는 벽면 근처의 매우 좁은 영역에만 제한적으로 존재하고 경계층의 발달은 그렇지 않은 경우에 비하여 매우 느리게 진행된다. 이것은 링이 없는 경우의 벽면 와류 발달 모습과 상이한 특성이다. 즉, 벽면 와류의 발달이 벽면 근처에서만 국한되고 있는 것은 Fig. 6에서 보여주고 있는 것처럼 궁극적으로 벽면 근처의 유선 변화에 많은 영향을 미쳐서 벽면으로 열전달이 좀 더 활발하게 일어나도록 하는 원인으로 작용한다. 결국 연료 중간에 링을 장착하여 연소 실험을 진행하였을 때, 연료 연소율이 증가하는 것은 벽면 와류가 활발하게 발달하여 연소가스를 벽면으로 향하도록 하여 열전달을 증가시키며 동시에 증발되는 기체를 산화제 유동이 있는 중심 부분으로 이동시켜 보다 활발하게 혼합시키는 역할을 하기 때문이라 판단된다.

Fig. 9는 연소실을 축 방향을 절단한 후, 일정한 크기 이상의 와류에 대한 순간적 윤곽선 (vorticity contour)을 나타내고 있는 그림이다.

벽면 근처에 존재하는 작은 크기의 와류는 벽면 분출 유동 때문에 벽면으로부터 약간 떨어진 곳에서 존재한다. 링이 설치되지 않은 경우에는, 왼쪽의 입구부터 점차적으로 와류가 형성되어 하

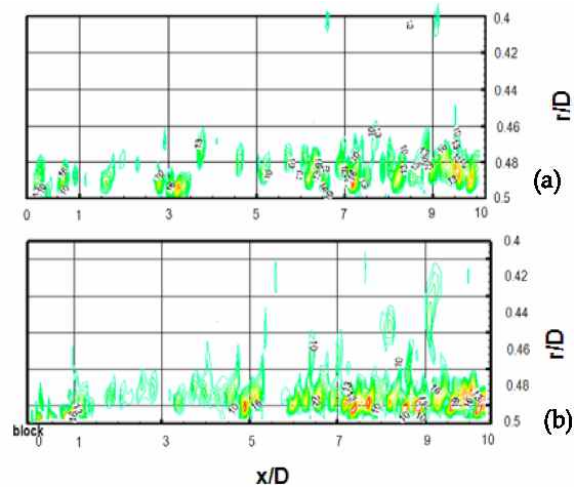


Fig. 9. Instantaneous azimuthal vorticity contour near the wall (a) without ring and (b) with a ring

류 부근에 밀집되고 있다. 그러나 링이 설치된 경우에는 일정한 거리를 지나는 동안 벽면 근처에서 와류가 형성되지 못한다. 링에 의하여 형성된 와류가 축 방향 유동의 변화를 일으켜 벽면 근처의 와류 형성을 억제하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 하류로 진행할수록 링이 없는 경우에 비하여 오히려 벽면 와류가 더 활발하게 발생하고 있다.

링이 설치된 경우에 나타나는 연소실 내부의 유동 변화는 매우 복잡한 특성을 보여준다. 그 중에서도 벽면 와류가 보다 더 활발해지는 현상은 실험에서 관찰된 연소율 증가와 매우 밀접한 특성을 갖고 있는 것으로 보인다. 실험에서 관찰되는 연소 화염은 대체적으로 벽면에 가까운 영역에($r/R < 0.15$) 존재하고 있다. 따라서 Fig. 6에서 언급하였듯이 벽면 와류의 활발한 생성은 상대적으로 높은 온도를 유지하고 있는 기체를 더 많이 벽면으로 이동시키고 동시에 벽면의 기화유동을 연소 영역으로 공급하는 역할을 보다 활발하게 하는 역할을 한다. 이러한 이유로 링을 설치하여 실험하는 경우 연소율이 그렇지 않은 경우에 비하여 향상되는 것으로 설명할 수 있다.

III. 결 론

하이브리드 로켓의 연소실 내에서 발생하는 산화제 유동과 연료 기화에 의한 벽면 분출 유동의 상호 간섭과 연소실 내부에 설치된 링에 의하여 발생하는 와류 홀림과 연소에 미치는 영향을 연구하였다. 수치계산은 3차원 실린더 형상에 대

하여 압축성 효과를 포함한 비-반응 LES 코드를 개발하여 수행하였다.

축 방향 유동과 벽면 분출 유동은 벽면 근처에서 상호 간섭을 하여 작은 크기의 와류를 생성한다. Fig. 6에서 보듯이 이 와류는 벽면에서 떨어져 있는 영역의 유동을 벽면으로 이동시키는 역할과 함께 벽면에서 분출된 유동을 벽면으로부터 떨어진 영역으로 밀어내는 역할을 한다. 따라서 실제 연소에서는 이러한 와류의 영향으로 고온 가스가 벽면으로 이동하여 열전달을 증가시키고 동시에 기화된 연료를 연소가 진행되는 영역으로 이동시켜 혼합을 촉진하는 역할을 한다. 하이브리드 로켓 실험에서 연료 표면에 남는 울퉁불퉁한 덩어리는 와류에 의한 열전달 증가가 원인 때문인 것으로 설명할 수 있다.

한편, 최근의 실험 결과에 의하면 하이브리드 로켓의 연료 중간에 링을 장착하면 연소율이 증가되는 효과가 나타났다. 어떤 변화에 의하여 연소율 증가가 발생하였는지 설명하기 위하여 먼저 링을 설치한 형상에 대한 수치계산을 진행하여 링이 없는 경우의 유동 특성과 비교하였다. Fig. 7, 8 그리고 9에서 확인할 수 있듯이, 링에 의한 와류 생성은 벽면 분출 유동과 간섭하여 발생하는 벽면 와류가 벽면 근처에서 보다 활발하게 와류 쌍을 생성하여 중심부의 유동을 벽면으로 이동시킨다. 따라서 실제 연소에서는 이런 와류 쌍의 활발한 생성과 활동으로 고온영역의 연소가스를 벽면으로 이동시켜 이 때문에 열전달이 향상되어 연소율 증가가 나타나는 것으로 판단된다.

화학반응을 포함한 보다 상세한 수치계산은 앞으로 더 진행하여야 하는 연구과제이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견연구자사업(2011-0027980) 지원을 받아 수행한 연구결과임을 밝히며 지원해주신 한국연구재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Kourta, A., "Acoustic-Mean Flow Interaction and Vortex Shedding in Solid Rocket Motors," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 22, 1996, pp.449~465.
- 2) Apte, S., Yang, V., "A large-eddy simulation study of transition and flow instability in a porous-walled chamber with mass injection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 477, 2003, pp.215-225.
- 3) Na, Y., Lee, C. J., "Large Eddy Simulation of Flow Development in Chamber with Surface Mass Injection," *Journal of propulsion and power*, Vol. 25, No. 1, 2009, pp.51-59.
- 4) 나양, 이창진, "채널유동에서 질량분사에 의한 표면유동의 진동 특성," *한국항공우주학회지*, 제37권 제1호, 2009, pp.62~68.
- 5) 강동훈, 이창진, "하이브리드 로켓에서의 DC-shift 발생 특성," *한국항공우주학회지*, 제38권 제5호, 2010, pp. 456-466.
- 6) 김보훈, 나양, 이창진, 질량분사가 있는 덕트 난류유동의 LES해석, *항공우주학회지*, 제39권, 제3호, 2011, pp232-241.
- 7) Grosse, M., "Effect of a Diaphragm on Performance and Regression of a Laboratory Scale Hybrid Rocket Motor Using Nitrous Oxide and Paraffin," *45th Joint Propulsion Conference & Exhibit*, AIAA-2009-5113, Denver, CO, 2009
- 8) 나양, 이창진, "분출유동이 있는 채널 난류유동의 LES 해석," *한국항공우주학회지*, 제35권 제8호, 2007, pp.699~705.