

덕트내부에서 질량분사가 있는 난류유동의 LES 해석

김보훈* · 나 양** · 이창진***

LES for Turbulent Duct Flow with Mass injection

Bohooon Kim* · Yang Na** · Changjin Lee***

ABSTRACT

Recent experimental data shows that the noticeable feature of irregular roughened spots on the fuel surface occurs during the combustion test. The generation of these unexpected patterns is likely to be resulted from the disturbed boundary layer due caused by wall blowing which is intended to simulate the process of fuel vaporization. LES without chemical reaction was conducted to investigate the flow characteristics at the near-fuel surface and the behavior of turbulent structures which is evolved by the wall blowing at the Reynolds number of 23,000. Cylindrical geometry was considered to get the most reality of the calculation results because real hybrid rocket motor is circular grain configuration. It was shown that the wall blowing pushed turbulent structures upwards making them tilted and this skewed displacement, in effect, left the foot prints of the structures on the surface. This change of kinematics may explain the formation of irregular isolated spots on the fuel surface observed in the experiment.

초 록

최근의 실험 결과를 통해 하이브리드 로켓 연료의 표면에 연소가 진행되지 않은 채 남아있는 고립된 부분들이 존재함을 확인하였다. 이러한 불규칙적인 spot은 연료의 기화로 인한 분출유동(wall blowing)과 산화제의 유동 사이에서 발생하는 경계층 교란에 의한 현상인 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 23,000의 높은 Reynolds수와 벽면분출 현상을 효과적으로 처리할 수 있도록 LES 기법을 이용하여, 연료 표면 근처의 난류 유동 특성을 해석하였다. 원형 단면을 갖는 하이브리드 로켓 모터의 그레인 형상을 사실적으로 모사하기 위하여 곡률효과를 포함한 3차원 실린더 형태의 지오메트리를 고려하였다. 연료 표면에서 발생하는 불규칙한 spot의 발생은 경계층과 분출되는 유동이 상호 간섭함으로써 난류구조들의 기구학적 특성을 변경시키기 때문인 것으로 추측되는 결과들을 얻을 수 있었다.

Key Words : Large Eddy Simulation(대와류모사), Hybrid Rocket Combustion(하이브리드연소), Surface Spot(표면 스팟), Wall Blowing(분출유동)

1. 서 론

하이브리드 로켓은 개발비용이 상대적으로 적고 운영상의 안정성이 높다는 장점으로 인해 현재 많은 나라에서 각광을 받고 있다. 그러나 아직도 하이브리드 로켓의 개발에 필요한 많은 기술적 부분들이 잘 알려져 있지 않은 것이 사실이다.

* 건국대학교 항공우주공학과 대학원

** 건국대학교 기계공학과

*** 건국대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: cjlee@konkuk.ac.kr

특히, 하이브리드 로켓 모터의 내부 유동은 고체 로켓과는 달리 산화제가 높은 속도의 난류 형태로 연소실에 유입되기 때문에 연료 기화에 의한 벽면 분출유동과 산화제의 난류 유동 사이의 상호간섭으로 인해 매우 복잡한 연소 과정이 발생하게 되므로 연료 표면에서의 유동특성을 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있다[1-2].

최근에 수행된 하이브리드 로켓 연소 실험 결과[1]를 살펴보면 불완전 연소 특성을 갖는 고립된 spot들이 연료 표면에 임의로 분포되고 있음이 보고되었다. Fig. 1은 PMMA/GOx를 사용한 하이브리드 로켓 연소 실험의 가시화 결과를 나타낸 것인데, 연소율이 크지 않은 연소초기에는 난류구조의 일반적인 특징인 주 유동 방향으로 길쭉한 coherent 형태와 비슷한 패턴들이 관찰되지만, 연소가 진행되어 감에 따라 연료 표면에서 발생하는 분출유동이 커지는 4초 이후에는 원형 또는 타원형 형태의 고립된 spot들이 점차 연료 표면에서 생성 되는 것을 볼 수 있다.

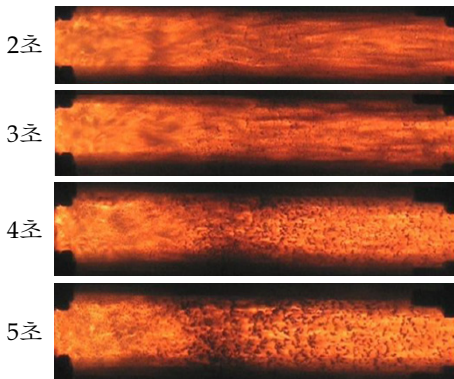


Fig. 1 Visualization of Hybrid Rocket Combustion[1]

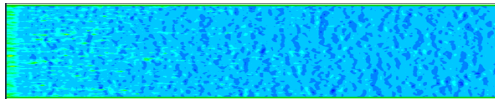


Fig. 2 Vortex Contour from LES near the Wall[2]

사용된 연료의 화학적 특성에 기인한 것인지의 여부도 살펴보았는데 HTPB를 사용한 경우에는 spot의 직경과 길이가 상대적으로 더 증가함을 확인하였다. 연료의 후퇴율이 표면에 나타나는 고립된 spot의 크기에 영향을 미치는 것으로 볼 때, 연료 표면 근처에서 나타나는 주유동과 분출유동 사이의 상호작용으로 인한 물리적

특성과 관련되어 있는 것으로 판단된다.

이러한 실험적 결과들을 수치해석적 방법으로 분석하기 위해 화학반응을 배제한 사각 채널 형상에 대해 수행된 분출유동이 있는 난류 유동장 해석 연구[2]에서는 실험적으로 확인된 연료표면의 불규칙한 spot들이 벽면 근처에 존재하는 난류구조들의 기하학적 변형과 관련되었다는 사실을 보고하였다. Fig. 2는 LES 계산으로 도출된 벽면 분출과 주유동간 상호작용이 있는 벽면 근처에서의 난류 vortex를 나타낸 것인데, 이 vortex 패턴이 실험에서 관찰된 spot들의 모양과 그 형태가 매우 일치하는 것으로 보아, spot의 생성 원인이 산화제와 기화유동간 상호작용이 촉진시킨 hydrodynamic 불안정성과 연관이 있다고 설명하였다. 그러나 이 연구는 실제로 사용되고 있는 원형 형상의 모터에 존재하는 곡률효과를 무시한 직사각형 단면을 갖고 있는 2차원적 채널을 연구대상으로 하였기 때문에 주유동과 분출유동간 상호작용에 대해서는 정성적 정보를 제공하였지만, 2차원적 연구결과에는 물리적 한계가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 실제 geometry의 현실성을 고려하여 하이브리드 로켓 연소중 관찰된 연료 표면에서 발생하는 고립된 spot의 형성 원인이 무엇인지 알아보는 것을 목적으로 하였다. 실제에 근접한 하이브리드 모터 내부 유동을 모사하기 위해 곡률 효과를 고려한 3차원 덕트에서 연료 기화로 인한 분출유동을 고려하였고, 산화제 유동과의 상호 작용으로 인한 unsteady 난류 구조의 특성과 변화를 살펴보고자 LES 기법을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 LES코드의 개발

본 연구를 수행하기 위해 예조건화 기법이 적용된 비정상 3차원 압축성 LES 코드가 개발되었다. 지배방정식은 다음과 같이 필터링된 연속방정식, 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 F_j 와 F_{vj} 는 각각 각 방향의 비점성, 점성 플럭스를 의미한다.

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

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

그리고 τ_{ij} 와 τ_{ij}^* 는 층류와 난류 응력을 의미하며, q_j 는 각 방향의 총 열 플럭스(heat flux)를 나타낸다. 각 항의 정의는 Eq. 3과 같다.

$$\tau_{ij} = 2\mu_i \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right),$$

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

$$q_j = -\frac{\gamma R}{(\gamma-1)} \left(\frac{\mu_i}{Pr_i} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{p}{\rho} \right) \quad (3)$$

본 연구를 위하여 개발된 LES 코드는 동적 Smagorinsky 모델을 사용하였고 그 외의 LES 코드에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [3, 4]에 언급되어 있으므로 이를 참조하기 바란다.

2.2 계산영역 및 유동조건

본 연구를 수행하기 위해 원통형 domain을 Fig. 3과 같이 구성하였다. 계산영역의 입구에서 물리적으로 타당한 난류 유동을 만들기 위해 본 연구의 관심영역($5 < x/R < 10$)의 앞부분에 단순 덕트를 입의로 위치시키고($0 < x/R < 5$) 이를 재순환 영역으로 하여 잘 발달된 난류가 관심영역으로 공급되도록 하였다. 또한 결과의 현실성을 높이기 위해 실험조건 [1]과 유사하게 Reynolds 수 (여기서, Re 는 덕트의 직경 D 와 centerline에서의 속도 U_c 로 정의됨)를 23,000으로 하였으며, 격자계는 x 와 θ 방향으로 등간격, R 방향으로는 \tanh 함수를 사용하여 벽면에서 격자를 밀도 있게 구성하였다. 격자는 x, r, θ 방향으로 $129 \times 65 \times 65$ 를 사용하였고 Prandtl수는 1로 하여 온도장의 적합해상도가 유동장에 비해 증가하지 않도록 하였

다. 기화과정으로 발생한 분출유동의 크기는 실험적으로 측정된 값을 근거로, $x/R=5$ 에서부터 선형적으로 증가하여 계산영역의 출구인 $x/R=10$ 에서 산화제 centerline유속의 3%가 되도록 하였다.

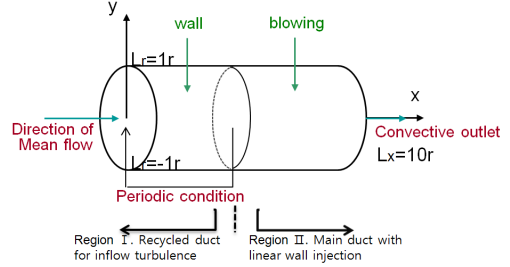


Fig. 3 A schematic of computational domain

2.3 계산의 검증

벽면 분출이 없는 Region I에서 잘 발달된 난류의 특성을 파악하고 계산의 타당성을 확보하기 위해 참고문헌 [5]의 실험 및 수치해석 결과와 비교하여 검증하였다. Fig. 4는 평균 속도 분포를 나타내는 log 법칙을 비교하여 나타낸 것이다. 계산 결과가 벽면에서 멀어질수록 dissipative한 양상을 나타내고 있지만 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

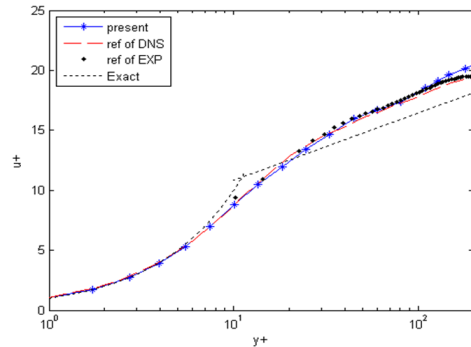


Fig. 4 Mean Axial Velocity

3. 계산 결과

Figure 6은 벽면에서부터 중심부까지의 평균 유속을 나타낸 것이다. 벽면분출이 하류로 갈수록 점차 강해지면서 경계층을 들어올리며 출구 근처인 $x/R=9.2$ 의 위치에서의 속도 분포는 완만

한 타원형으로 바뀌었음을 확인할 수 있다.

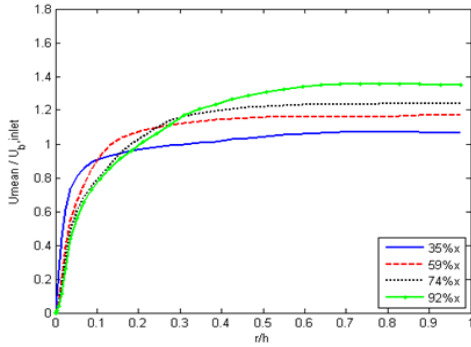


Fig. 6 Mean Velocity profiles of Axial Flow

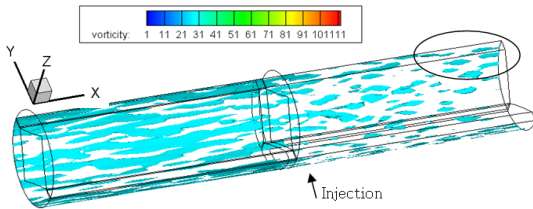


Fig. 7 Iso-Contour of Vorticity near the Wall

Figure 7은 분출유동과의 상호 간섭에 의하여 변형된 벽면근처의 와류 분포를 나타낸 것이다. 질량분사가 없는 Region I에서는 축방향의 난류구조들이 나타나고 있지만, 벽면 분사가 시작된 이후에는 coherent 구조들이 벽면 분출에 의해서 기하학적 구조가 변경된 모습을 나타내고 있는데 이는 연소 가시화에 의해 관찰된 고립된 spot의 모양과 비슷한 패턴으로 보여진다. 하이브리드 로켓 연소는 확산화염이 지배적이므로 연소특성은 벽면에서 떨어진 공간에서 우세하고 연료 표면에서는 난류 유동이 지배적이므로, 실험에서 관찰되는 연료 표면에 형성된 검은 spot들은 산화제 유동과 벽면분출의 상호 간섭에 의하여 생성되는 난류구조의 기하학적 변형과 매우 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

4. 결 론

최근의 하이브리드 로켓의 연소 실험에서 관찰된 연료 표면에서 발생하는 고립된 연소 spot

의 생성 원인을 해석하기 위하여 곡률효과를 포함한 덕트 유동에 대한 LES 해석을 수행하였다. 물성치의 변화를 초래하는 연소 반응을 고려하지 않은 결과이므로 실험결과와의 정량적인 비교는 한계가 있지만 연료 기화 과정을 모사하는 벽면분출에 의하여 발생하는 난류 구조들의 변화에 대한 정성적인 해석은 가능하다고 판단된다. 해석결과에 의하면, 주유동 속도에 벽면분출 유동이 중첩되면 난류구조들이 점차 위쪽으로 들어 올려지면서 기울어지는 기구학적 특성을 만들어 하류방향으로 진행할수록 작은 크기의 원형 또는 타원형 형태의 고립된 와류 발자국들을 만들어내는 것을 확인하였으나, 보다 정확한 해석은 연소과정을 포함한 해석에 의존하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 구원모, 이창진, "산화제 난류 유동 변화에 대한 하이브리드 로켓 연소 특성," 한국추진 공학회 춘계학술대회논문, 2007.
2. 나양, 이창진, "분출유동이 있는 채널 난류유동의 LES 해석," 한국우주학회지, 제35권, 제8호, 2007, pp.699-705
3. Weiss, J., Maruszewski, J., and Smith, W., "Implicit Solution of Preconditioned Navier-Stokes Equations Using Algebraic Multigrid," AIAA Journal, Vol. 37, No. 1, 1999, pp. 29-36
4. Park, S., Lee, J., and Kwon, J., "Preconditioned HLLC Method for Flows at All Mach Numbers," AIAA Journal, Vol. 44, No. 11, 2006, pp. 2645-2653
5. Eggels, J., Unger, F., Weiss, M., Westerwell, J., Adrian, R., Friedrich, R., Nieuwstadt, F., "Fully developed turbulent pipe flow : a comparison between direct numerical simulation and experiment," J. Fluid Mech., Vol. 268, 1994, pp.175-209