

하이브리드 로켓 산화제 난류 유동의 LES 해석

이창진*, 나양**

LES for Turbulent Flow in Hybrid Rocket Fuel Grain

Changjin Lee, and Yang Na

ABSTRACT

Recent experimental data shows that an irregular fuel surface pops up during the combustion test. This may contribute to the agitated boundary layer due to blowing effect of fuel vaporization. Blowing effect can be of significance in determining the combustion characteristics of solid fuel within the oxidizer flow. LES was implemented to investigate the flow behavior on the fuel surface and turbulence evolution due to blowing effect. Simple channel geometry was used for the investigation instead of circular grain configuration without chemical reactions. This may elucidate the main mechanism responsible for the formation of irregular isolated spots during the combustion in terms of turbulence generation. The interaction of turbulent flow with blowing mass flux causes to breakup turbulent coherent structures and to form the small scale isolated eddies near the fuel surface. This mechanism attributes to the formation of irregular isolated spot on the fuel surface.

초 록

최근의 실험 결과에 의하면 하이브리드 로켓 연료의 표면에 연소가 진행되지 않은 채 남아있는 점들이 존재함을 확인하였다. 이러한 불규칙적인 spot은 연료의 기화로 인한 분출유동(blowing effect)과 산화제의 유동 사이에서 발생하는 교란에 의한 현상인 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 LES를 이용하여 분출이 있을 때 channel 유동을 해석함으로써 연료 표면으로 전달되는 열전달 특성을 해석하였다. 비록 원형 그레인인 아니며 화학반응을 무시하고 열전달을 계산하였으나 근본적으로 연료 표면에서 발생하는 불규칙한 spot의 발생은 작은 크기의 난류 eddy의 존재 때문인 것으로 판단된다.

Key Words : LES, Turbulence breakup, Isolated spots, hybrid rocket fuel

1. 서 론

하이브리드 로켓은 개발 비용이 적고 안전한 개발이 가능하므로 많은 나라에서 각광을 받고 있다. 그럼에도 불구하고 아직도 하이브리드 로켓에 대한 많은 부분이 잘 알려지지 않은 것도 사실이다. 특히 확산연소가 지배하는 연소 현

* 건국대학교 항공우주공학과 교수

** 건국대학교 기계공학과 교수

연락처, E-mail: cjlee@konkuk.ac.kr

상은 기존의 로켓 연소와는 달리 상당한 속도를 갖고 있는 산화제 유동과 연료 기화로 인하여 발생하는 분출유동의 상호 간섭이 존재하기 때문에 경계층 해석에 의한 열전달 해석을 어렵게 만들고 있다.

한편, 최근 하이브리드 로켓 연료에 대한 연소 실험 결과 매우 특이한 현상이 발견되었다. 산화제 공급이 이론 O/F비를 초과하여 산화제 과잉 상태로 연소를 하였을 경우에도 불완전 연소로 인한 고립된 spot이 연료 표면이 발생함을 확인하였다. 특히 연료 그레이인 내부에서의 연소를 가시화 한 결과에 의하면 연소 초기에는 일반적인 난류구조의 형상을 한 coherent 구조 난류가 발생하지만 연소가 진행됨에 따라서 점점 coherent 구조는 사라지고 연료 표면에 불완전 연소로 인한 고립된 spot가 발생하는 것을 확인하였다. 어떤 경우에는 고립된 spot가 유동의 속도에 밀려 사라지기도 하며 어떤 경우는 같은 위치에서 생성되어 점점 그 크기가 커지기도 하는 것을 관찰하였다. 연료 입구 유동에 의한 영향을 살펴보기 위하여 선회류(swirl) 입구 유동을 주고 연소 실험을 한 경우에도 불완전 연소에 의한 고립된 spot들을 역시 발견할 수 있었다. 이러한 실험 결과는 연료 표면에서 발생하는 불완전 연소 spot은 산화제 입구 유동의 종류와 상관없이 발생하는 현상이며 오히려 하이브리드 로켓 연소의 특성을 나타내고 있는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구는 이렇게 연료 표면에서 발생하는 불완전 연소 spot의 형성이 연료 기화로 인한 분출유동과 산화제 유동과의 상호 간섭에 의한 현상임을 확인하기 위해 난류 유동에 의한 열전달 해석을 하였다. 일반적으로 난류모델을 적용한 해석은 작은 크기 에디를 묘사할 수 없으므로 LES 방법을 사용하였다. 또한 유동 해석에서 연소는 무시하였으며 오직 난류 유동의 과점에서 연구를 진행하였다. 사용된 연소기 형상은 직사각형 단면을 갖고 있는 channel 유동으로 실험에서 사용한 원형단면 연소기와는 다르다. 하지만 연료 기화로 인한 분출유동과 산화제 난류 유동의 상호 간섭으로 인한 현상은 정성적으로

관찰이 가능하다.

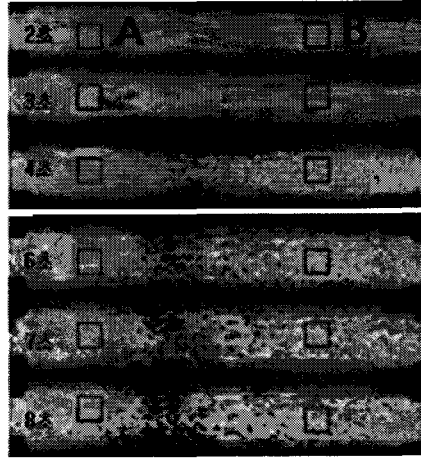


그림 1. 난류 coherent 구조와 isolated spot 생성

2. 동적혼성모델을 이용한 LES

동적혼성모델을 이용한 LES해석 기법을 온도/농도장 해석에 적용하기 위한 알고리즘으로 확장하는 작업이 성공적으로 수행되었다. 간략히 LES 알고리즘을 소개하면 다음과 같다.

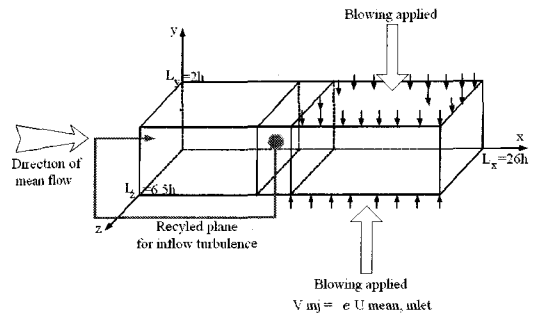


그림 2. 계산 영역과 유동조건

비압축성 유체의 경우, 수동스칼라로 가정되는 온도장의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이, 필터링이 수행된 연속방정식, Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식으로 주어진다.

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - q_j) \quad (3)$$

여기서 overbar는 격자 필터링이 수행된 변수를 나타내며, 잔류 응력(residual SGS stress) 텐서와 잔류 열유속벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (4)$$

$$q_j = \overline{T u_j} - \overline{T} \overline{u_j} \quad (5)$$

DMM을 사용하는 경우, 잔류응력은 다음과 같이 두 가지 항으로 구성된다.

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_i \bar{S}_{ij} + (L_{ij}^m - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk}^m) \quad (6)$$

$$\nu_i = C_s \bar{\Delta}^{-2} \bar{S} \quad (7)$$

식 (6)의 우변의 첫 번째 항은 모델링이 필요한 eddy viscosity 를 포함하고 있으며, 두 번째 항은 해상된 유동장의 정보를 사용하여 외재적으로 직접 계산해 낼 수 있는 수정된 Leonard 항이다. 이 계산에 필요한 모델계수는 Zang et al.(1993)에서처럼 다음과 같은 과정을 통해 동적으로 결정된다.

$$L_{ij}^m = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (8)$$

$$C_s = \frac{1}{2\bar{\Delta}^2} \frac{M_{ij}(L_{ij} - H_{ij})}{M_{kl}M_{kl}} \quad (9)$$

$$M_{ij} = \left[\widetilde{\widetilde{S S}}_{ij} - (\overline{\Delta} / \overline{\Delta}) \widetilde{\widetilde{S S}}_{ij} \right] \quad (10)$$

$$L_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (11)$$

$$H_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (12)$$

잔류 열유속벡터(residual heat flux vector) 도 위의 경우에서와 유사한 방법을 적용하면 다음과 같이 확장되어지는데, 잔류응력텐서에서와 같이 두 항의 합으로 구성되어 진다.

$$q_j = -\alpha_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + F_j^m \quad (13)$$

$$\alpha_i = C_T \bar{\Delta}^{-2} \bar{S} \quad (14)$$

여기서

$$F_j^m = \overline{\overline{T u_j}} - \overline{\overline{T}} \overline{\overline{u_j}} \quad (15)$$

$$C_T = \frac{1}{\bar{\Delta}^2} \frac{(F_k - G_k) H_k}{H_k H_k} \quad (16)$$

$$F_k = \overline{\overline{T u_k}} - \overline{\overline{T}} \overline{\overline{u_k}} \quad (17)$$

$$G_k = \overline{\overline{\overline{T u_k}}} - \overline{\overline{\overline{T}}} \overline{\overline{\overline{u_k}}} \quad (18)$$

$$H_k = \overline{\overline{\overline{\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_k}}}} - (\overline{\overline{\overline{\Delta}}} / \overline{\overline{\overline{\Delta}}})^2 \overline{\overline{\overline{S}}} \overline{\overline{\overline{\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_k}}}} \quad (19)$$

지배방정식 (1)-(3)은 준 내재적(semi-implicit) 방법을 사용하여 시간상에서 적분이 수행되었는데, 관성항에는 3차 Runge-Kutta법(Spalar et al., 1991)이 사용되었고, 점성항에는 2차 정확도를 갖는 Crank-Nicolson법이 사용되었다. 모든 공간상의 차분은 2차 정확도를 갖는 중심차분법을 사용하였으나, 온도장의 경우에는 수치적 불안정성을 피하기 위해 관성항에 QUICK scheme (Leonard, 1979)을 사용하였다.

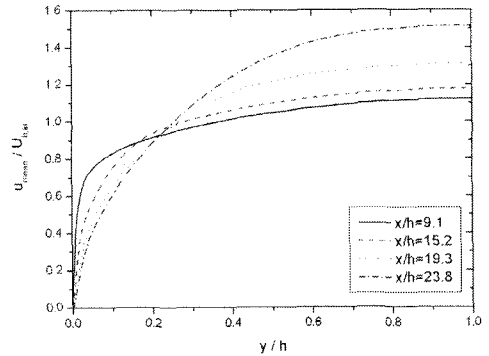


그림 3. Mean streamwise velocity profiles.

그림 3은 계산 결과 채널의 각 위치에서 평균 유속을 나타내고 있다. 채널의 앞부분에서 분출 유동이 없으므로 난류 경계층에 의한 유동 분포를 볼 수 있으나 분출이 있는 부분에서는 유동이 위쪽으로 들어 올려져 있는 것을 확인할 수 있다.

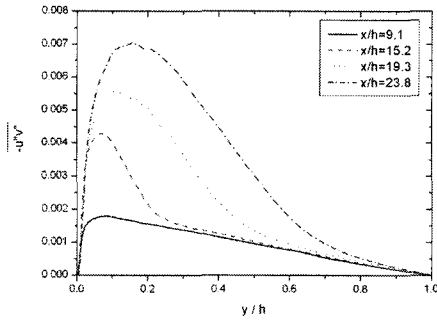


그림 4. Reynolds stress distributions.

한편 그림 4는 레이놀즈 스트레스를 나타내고 있는 그림으로 분출에 의하여 유동의 위쪽에서 매우 큰 유동 스트레스가 작용하고 있으며 이로 인하여 상당히 큰 혼합이 발생 할 수 있음을 유추할 수 있다.

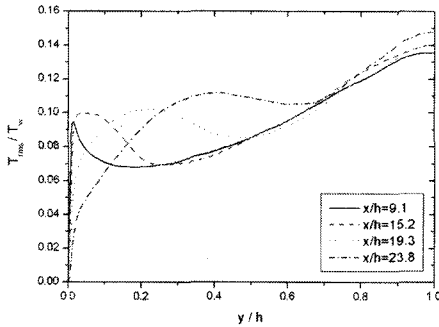


그림 5. rms temperature statistics.

분출에 의한 효과는 열전달에도 많은 영향을 미치는 데 분출이 있는 경우에는(x/h=23.8) 벽면 근처에서부터 떨어진 부분에 온도 섭동이 가장 큰 값을 보여주고 있다.

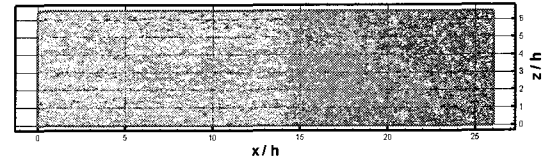
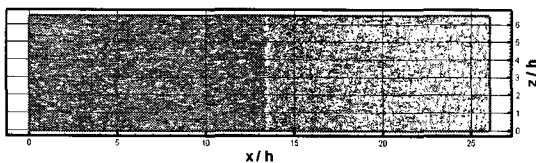


그림 6. Contours of instantaneous stream-wise velocity in (x-z) planes. (a) y/h=0.01 (b) y/h=0.1

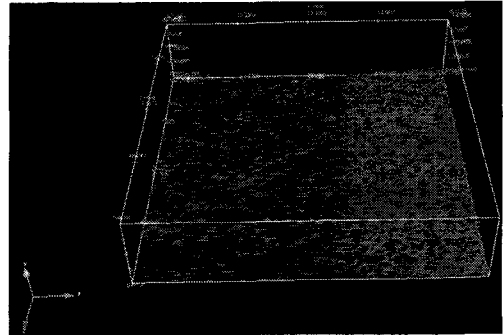


그림 7. Iso-contours of coherent structures in the region near the initiation line of wall injection. (a) whole spanwise domain

그리고 난류 규모에 관한 해석결과에 의하면 분출이 없는 채널의 전반부에서는 잘 알려진 coherent 구조의 난류가 발생하지만 분출유동과의 상호 간섭으로 난류 구조가 위쪽으로 들어올러지면서 coherent 구조의 끝부분이 벽면과 접하게 된다. 동시에 coherent 구조는 깨지면서 작은 크기의 난류로 변화하게 된다. 그림 6-a와 그림 7은 이러한 경향을 잘 보여주고 있는 그림이다. 그림 8은 난류 유동의 스펙트럼 분포를 보여주고 있다. 분출이 없을 때는 난류의 에디 분포 가진 영역에 걸쳐서 분포하고 있으나 분출이 있는 경우에는 이로 인한 특정 주파수의 난류 주파수가 큰 에너지를 갖고 있음을 보여준다. 아직까지 이러한 특정 주파수의 난류 에디에 관한 연구는 이루어지지 않았으나 분출효과에 의하여 주 산화제 유동의 난류가 깨지면서 발생하는 에디가 일정한 크기를 갖고 있음을 의미하는 것으로 판단되며 앞으로 좀 더 많은 연구가 있어야겠다.

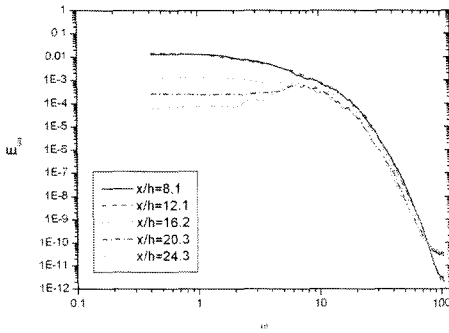


그림 8. Frequency spectra of streamwise velocity very near the wall

4. 결 론

최근 하이브리드 로켓의 연소 실험에서 밝혀진 불완전 연소 spot에 대한 생성 원인을 하석하기 위하여 LES 난류 유동 해석을 실시하였다. LES 결과에 의하면 불완전한 연소 spot의 생성은 난류의 coherent 구조가 분출유동과 상호간섭

과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 특히 그림 6-a 와 그림 7은 실험에서 관찰된 연료 표면에서 관찰되는 고립된 spot과 비슷한 형태의 고립된 난류구조를 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. 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, Reno, 2005.
2. Brian Evans, Nicholas A. Favorito, and Kenneth 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. 황영춘, 이창진 "산화제 유입조건에 따른 하이브리드 로켓 연료의 연소율 향상" 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집 pp.1~4. 2005