

## 論文

## 나선형 홈에 의한 하이브리드 로켓 고체연료의 연소율 증가 특성

황영춘\*, 이창진\*\*

## The Increase in Regression Rate due to Helical Grain in Solid Fuel of Hybrid Rocket

Young-Chun Hwang\* and Changjin Lee\*\*

## ABSTRACT

To understand the role of helical geometry on the regression rate enhancement, two competing underlying mechanisms such as turbulence enhancement and swirling motion production were studied by numerical calculations. Experimental results showed that the enhancement of heat transfer rate has the very close relation to the increase in regression rate even though the percentage of increase in heat transfer rate is different from that in regression rate. This discrepancy is presumably due to the change of turbulent flow feature caused by so-called "blowing mass flux" from the fuel surface. In this regard, the results of RANS calculation show that the blowing velocity is responsible for the reduction of the swirl generation and the increase in the turbulent kinetic energy. And the dominancy of one of the mechanisms causes the increase in the regression rate. Meanwhile, the increase in turbulent kinetic energy due to the mixing of blowing flow and free stream flow does not contribute for the enhancement of the heat transfer rate to the surface because the blowing flow pushes boundary layer away from the solid surface.

## 초 록

하이브리드 로켓 연료의 연소율 향상을 위한 나선형 홈이 유동 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 난류 증가와 선회 유동 발생에 대한 수치계산을 수행하였다. 나선형 튜브의 열전달 관계식을 이용하여 여러 형상의 나선형 홈이 있는 연료의 열전달 향상을 예측하였으며 연소율 측정값과 비교하여 상호 연관성을 확인하였다. 실험 결과와 열전달 향상 예측값은 동일한 경향을 나타내더라도 수치는 큰 차이를 나타냈는데 이것은 연료가 연소하기 위하여 기화할 때 발생하는 분출속도가 존재하기 때문이다. 분출효과를 고려하여 RANS 계산을 수행한 결과, 난류에너지는 상당히 증가한 반면 선회 수는 조금 증가하는 결과를 보여 주었다. 그럼에도 불구하고 나선형 홈에 의한 난류 증가 또는 선회유동 생성은 연소율을 증가시키는 중요한 메커니즘임이 밝혀졌다. 그러나 분출로 인하여 난류에너지가 증가되어도 열전달 향상에 기여하지 못하는 것으로 확인되었는데 이것은 분출 속도가 표면의 경계층을 밀어내어 대류 열전달이 증가되는 것을 차단하기 때문인 것으로 밝혀졌다.

**Key Words** : Hybrid rocket(하이브리드 로켓), Regression rate(연소율), Helical grain(나선산 그레인), Heat transfer enhancement(열전달 향상), Blowing effect(분출효과)

† 2006년 9월 12일 접수 ~ 2006년 11월 9일 심사완료

\* 정회원, 건국대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 정회원, 건국대학교 기계항공공학부  
연락처, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr  
서울시 광진구 화양동 1번지

## 1. 서 론

하이브리드 로켓은 고체 로켓에 비해 연소율이 낮은 특성이 있다. 이러한 단점은 하이브리드 로

켓을 실용화하는 데 가장 커다란 걸림돌로 여겨지고 있으므로 하이브리드 로켓에 대한 대부분의 연구는 고체 연료의 연소율을 향상시키기 위한 방법을 찾는 데 집중되고 있다. 연소율 향상을 이루기 위하여 연구되는 방법으로는 일반 연료에 미세 알루미늄 분말이나 AP와 같은 첨가물을 사용하거나, 연료 내부에 나선형 나사산을 가공하여 연소면적의 증가와 산화제가 선회 유동을 하도록 하며 동시에 난류 증가를 통해 연소율 향상을 이루는 방법이 있다. 이 중에서 나선형 나사산을 이용하여 연소율을 증가시키는 방법은 산화제 유동 특성 변화를 이용하여 열전달을 향상시켜 목적을 달성하는 방법이다[1].

앞선 연구자들의 연구결과를 살펴보면, 연소 실험에서 나사산의 피치 값에 따라서 연소율의 변화가 나타남을 확인하였는데, 낮은 피치인 피치 6의 경우 최대 20%의 연소율 향상을 나타내었다. 또한 피치 100에서는 피치 6인 연료에서보다 오히려 낮은 14%의 연소율 향상을 나타내었다. 그러나 피치 18, 피치 30의 나사산을 갖는 연료에 대한 연소 실험에서는 오히려 기본 형상보다 연소율이 증가하지 않거나 감소하는 결과를 얻기도 하였다[1]. 이처럼 연소율이 향상하거나 감소하는 것은 산화제 유동 특성 변화에 따라서 발생하는 것으로 판단되지만 구체적으로 어떤 인자에 의하여 연소율이 결정되는가에 대한 연구는 아직 이루어지지 않은 상태이다.

한편, 열교환기를 설계하고 연구하는 분야에서는 외부의 추가적인 노력 없이 열전달을 향상시키는 방법에 대해 많은 연구가 진행 되어왔다. 그중에서 나선형 튜브(spirally fluted tube)를 이용한 방법은 매우 높은 열전달 향상을 이룰 수 있으며 압력 강하도 비교적 적기 때문에 효과적인 방법으로 알려져 있다. 나선형 튜브는 내부유동이 선회 유동으로 변화하도록 유도하거나 나사산 형상이 있는 튜브 표면의 주기적 변화에 의하여 경계층이 파괴되어 대류 열전달 향상이 이루어지는 것으로 알려져 있다. 또한 다양한 나사산 형상과 유동 Reynolds 수에 따른 수많은 열전달 실험을 통해서 나사산 형상 매개 변수에 따른 열전달 예측이 가능한 실험식을 제시하였다[2,3].

하이브리드 로켓 연료로 사용되는 고체 연료의 나선형 형상은 열전달 향상을 위하여 사용되는 나선형 튜브와 동일한 내부 형상을 갖고 있다. 그리고 고체 연료의 연소율은 고온 유동으로부터 고체 연료로 전달되는 열전달과 비례한다[4,5,6]. 따라서 하이브리드 로켓 연료의 나선형 형상을 통한 고체 연료의 열전달은 나선형 튜브에서

발생하는 열전달 향상과 같은 경향을 보여줄 것으로 기대할 수 있다. 또한 나선형 형상의 변화에 대한 열전달 증가를 예측할 수 있으며 연소 실험을 통하여 측정된 연소율 변화와 열전달 예측을 비교함으로써 하이브리드 로켓의 고체 연료의 연소율을 결정하는 중요한 인자들에 관한 이해를 넓힐 수 있을 것이다.

따라서 본 논문의 목적은 나선형 튜브의 열전달 실험식을 이용하여 열전달 향상을 예측하고 연소 실험에서 측정된 연소율과 상호 비교하여 피치 값 변화에 따른 연소율 향상 또는 감소의 원인을 파악하는 것이다. 그리고 나선형 튜브의 내부유동에 대한 수치 계산을 통해 유동의 선회수와 난류 증가를 계산하여 나사산 형상을 갖는 연료의 연소율과 나선형 튜브의 열전달 예측 사이의 차이의 원인을 규명하려 한다. 이를 위한 수치 계산은 상용코드인 CFD-ACE를 사용하였다.

## II. 나선형 튜브의 열전달 특성

### 2.1 나선형 홈이 있는 연료의 열전달과 연소율

하이브리드 로켓에 사용되는 고체 연료의 연소율은 고체연료 표면으로 전달되는 열전달 양에 비례하여 증가한다. 따라서 나선형 홈이 있는 고체 연료의 연소율을 예측하기 위해서는 나선형 홈을 통과하는 내부유동의 특성과 유동에 의하여 결정되는 대류 열전달 특성에 관한 이해가 필요하다. 이때에 나선형 홈이 있는 연료의 내부 형상은 열전달 향상을 위하여 사용되는 나선형 튜브와 동일한 형상을 갖고 있다. 따라서 나선형 홈을 갖고 있는 고체 연료의 연소율 예측은 나선형 튜브 내부의 열전달 특성을 나타내고 있는 실험식을 이용하여야 한다.

그림 1은 열전달 향상을 위하여 사용되고 있는 나선형 튜브의 기하학적 형상과 형상 인자를 나타내고 있다. 나선형 튜브를 이용한 열전달 향상 연구 결과를 살펴보면, 열전달 향상은 나사산

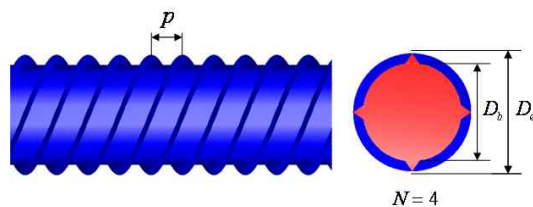


Fig. 1. Geometry of spirally fluted tube

형상을 유동이 따라가면서 발생하는 선회 유동 발생과 나선형 형상이 있는 벽 표면의 주기적 변화에 의한 경계층의 교란에 의한 두 가지 원인에 의하여 이루어진다[3]. 이때 나선형 열교환기 튜브의 형상을 정의하기 위한 매개 변수는 그림 1에서 나타내 있는 것처럼 직경  $D_e$ (mm), 부피를 기준으로 계산한 튜브 지름  $D_v$ (mm), 나선산 깊이  $e$ (mm), 피치  $p$ (mm), 그리고 나선형 각도  $\theta = \tan^{-1}(\pi D_e / Np)$  등이다.

Srinivasan 등은 나선형 형상 변수를 변화시킨 튜브를 이용하여 열전달 실험을 실시하였고, 실험 결과를 이용하여 나선형 형상 변화에 따라서 열전달 향상을 추정할 수 있는 실험식을 완성하였다. 이때 열전달 예측은 무차원된 변수를 사용하였으며 무차원 변수의 정의는 다음과 같다 [2].

$$e^* = e/D_e \quad p^* = p/D_e \quad \theta^* = \theta/90$$

$$Re = \rho AD/D_v \quad (1)$$

$$\frac{Nu}{Pr^{0.4}} = 0.014 Re^{0.842} e^{*-0.067} p^{*-0.293} \theta^{*-0.705}$$

$$500 \leq Re \leq 5,000 \quad (2)$$

$$\frac{Nu}{Pr^{0.4}} = 0.014 Re^{0.773} e^{*-0.242} p^{*-0.108} \theta^{*-0.599}$$

$$5,000 \leq Re \leq 80,000 \quad (3)$$

여기서 식 (2)와 (3)은 나선형 튜브의 무차원 형상변수와 Reynolds 수를 이용하여 Nusselt 수를 계산할 수 있는 실험식이다. 한편 튜브를 진행하는 유동에 의한 대류 열전달에 관한 이론적인 관계식은 식 (4)와 같다 [3].

$$\frac{Nu}{Pr^{0.4}} = 0.023 Re^{0.8} \quad (4)$$

앞서 언급한 바와 같이 고체연료 내부의 나선형 홈은 나선형 튜브의 외부 형상과 동일하므로 식(2)와 (3)을 이용하여 고체 연료로 전달되는 대류 열전달 양을 예측할 수 있다. 그림 2는 하이브리드 로켓 연소실험에 사용된 6가지의 고체 연료 형상을 보여주고 있다. 고체 연료의 나선형 홈은 연료의 후반부에만 나타나도록 가공을 하였으며 오직 피치 값 변화에 따른 연소율 변화를 알아보기 위해서 나선형 홈의 깊이와 단면 형상은 모두 동일하게 가공하였다. 사용된 고체 연료는 아크릴 계통인 PMMA이며 길이 200 mm, 산화제가 흘러가는 연료 내부 지름은 20 mm이다.

표 1은 실험에 사용된 6 종류 연료의 나선형 홈의 형상과 열전달 예측 결과를 정리한 것이다. 여기서 Reynolds 수는 실험에 사용된 산화제



Fig. 2. Helical fuel grains used for combustion test

Table 1. Summary of flute geometry and Nusselt number enhancement of test fuels

	$e^*$	$p^*$	$\theta^*$	N	$D_v$	Re	$Nu/Pr^{0.4}$	$E_h$
pitch6	0.157	0.270	0.945	1	22.23	53065	535.54	3.65
pitch12	0.166	0.567	0.886	1	21.15	50477	488.32	3.33
pitch18	0.169	0.867	0.829	1	20.77	49582	476.91	3.25
pitch30	0.171	1.466	0.722	1	20.47	48854	482.03	3.28
pitch80	0.168	0.767	0.437	5	20.87	49818	712.36	4.85
pitch100	0.166	0.592	0.373	8	21.1	50367	814.88	5.55

유량 15g/s를 기준으로 계산한 값이다. 위의 결과에서 열전달은 나선형 홈이 하나인 피치 6부터 30까지에서 약 3배 정도의 열전달 향상을 예측할 수 있었다. 그리고 나선형 개수가 5개와 8개인 피치 80과 피치 100의 연료에서는 더 높은 열전달 향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 실제로 이렇게 높은 열전달 향상이 발생하지 못하며 단순히 실험식이 한 개의 나선형을 갖는 경우에 대한 것이 때문인 것으로 여겨진다.

여기서 매우 중요한 사실은 피치 6인 연료에서 얻어지는 열전달 향상은 유동 경계층 파괴와 난류증가에 의한 대류 열전달의 증가이며 피치 100인 연료에서 발생하는 열전달 향상은 내부 유동이 나선형 홈을 따라 진행하면서 유도되는 선회유동 때문인 것으로 설명할 수 있다[5].

그림 3은 6 종류의 연료를 사용한 연소 실험에서 측정된 산화제 유량에 따른 연소율을 나타낸 결과이다. 이때 산화제는 기체 산소를 사용하였다. 여러 가지 형상을 갖고 있는 나선형 연료의 연소율 증가는, 피치 6과 피치 100인 연료에서 확실한 연소율 향상이 일어났지만, 피치 18,

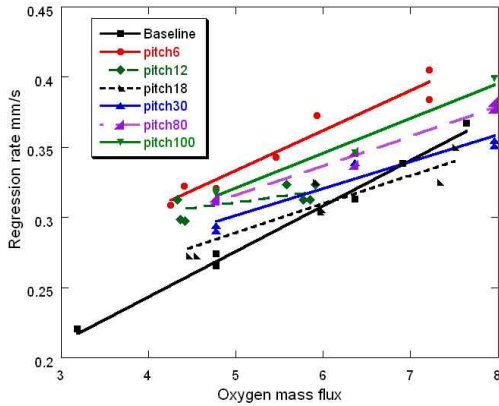


Fig. 3. Regression rates of test fuels of baseline, pitch 6, 12, 18, 30, 80, and 100[4]

피치 30인 연료에서는 오히려 기본형 (baseline) 연료에 비해 연소율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 측정된 연소율과 열전달 예상치를 비교하면, 연소율이 증가된 순서는 피치 6, 피치 12, 피치 30, 피치 18의 순서로 일어났고, 열전달 예상치의 경우에도 연소율과 같은 순서를 보여주고 있다. 그러나 측정된 연소율 증가와 예측한 열전달 향상 크기를 비교하면, 실제의 연소율은 피치6인 연료에서 최대 약 20%의 증가를 나타내고 있으나 열전달 예상치는 약 360%의 증가가 일어나는 것으로 계산되었다. 이러한 연소율 향상과 열전달 향상 값 사이의 커다란 차이는 하이브리드 로켓의 내부 유동과 나선형 튜브의 내부 유동이 서로 상이하기 때문에 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 따라서 나선형 홈을 갖는 고체 연료의 내부 유동과 나선형 튜브의 내부 유동에 대한 수치 계산을 수행하여 유동 특성 차이를 규명하며 연소율 증가 또는 감소가 발생하는 원인을 해석하였다.

## 2.2 RANS 수치 해석

하이브리드 로켓의 나선형 홈을 갖는 연료와 나선형 튜브에서 발생하는 열전달 향상은 내부 향상에 의한 내부유동의 선회유동 발생과 난류 증가를 통해서 일어난다. 따라서 내부유동에 대한 수치적 해석을 통해 선회유동의 선회 강도와 난류 증가 변화를 계산 한다면, 두 변수를 통해서 열전달 향상을 예측할 수 있다. 따라서 나선형 홈이 있는 연료의 내부유동을 해석하기 위하여 화학반응이 없는 유동에 대한 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) 계산을 수행하여 열전달 변화를 예측하고 실험에서 측정된 연소율과 비교하였다. 또한 이를 통하여 연소율 증가 발생

하는 원인과 감소가 측정되는 이유에 대한 물리적 해석을 시도하였다.

하이브리드 로켓 연료의 내부유동과 열전달 향상을 위한 나선형 튜브의 내부유동 사이의 근본적인 차이는 유동의 벽면이 증발, 기화하여 연소에 참여하는가의 여부이다. 즉, 연소현상이 발생하는 고체 연료의 내부 유동에서는 연료의 기화에 따른 벽면으로부터의 분출효과(blowing effect)가 발생하게 된다. 그러나 나선형 튜브에서는 이러한 분출효과가 존재하지 않는다. 따라서 각 경우의 내부유동에 대한 수치 계산은 각기 다른 벽면 경계조건을 사용하여야 한다. 즉, 나선형 튜브의 경우에는 내부 유동을 완전 발달 유동으로 가정하며 일반적인 no-slip 조건을 적용한 벽면 경계조건을 사용한다. 그리고 나선형 홈이 있는 하이브리드 로켓 연료에 대한 수치 계산에서 유동의 기본적 특징은 연소현상이 존재하여도 그 변화가 크지 않기 때문에 비-반응 유동으로 가정하며 연료의 기화로 인한 분출효과를 고려하기 위하여 벽면에서는 수직 방향으로 일정한 질량 유동이 존재하는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 두 경우의 수치 해석은 기하학적 형상이 일치한다 하더라도 다른 유동 특성을 보여줄 것으로 기대할 수 있다.

내부유동을 계산하기 위해서 상용 소프트웨어인 CFD-ACE를 이용하였고 난류모델은 sst k- $\omega$  모델을 이용하였다. 작동유체는 기체산소이며, 초기에 유입되는 유량은 15g/s를 기준으로 하였으며 이때 Reynolds 수는 약 48,000이다. 내부유동에 대한 수치 계산은 나선형 홈이 없는 기본형 (baseline)을 기준으로 하였으며 실험 결과 연소율 증가가 확인된 피치 6, 피치 100 인 연료와 연소율이 감소된 피치 30 등 모두 4가지 경우에 대하여 수치계산을 진행하였다. 사용된 격자는 나선형 홈의 특성을 포함하여 계산하기 위하여

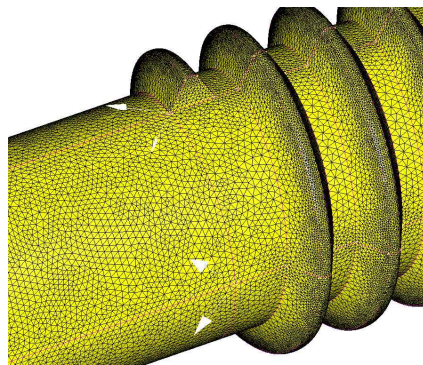


Fig. 4. Unstructured grids for calculation

비정렬 격자(unstructured grid)를 사용하였으며 그림 4는 계산에 사용된 그리드를 보여주고 있다.

### 2.3 나선형 튜브의 내부유동

나선형 튜브의 내부유동 계산을 위해서 완전 발달된 유동을 입구 조건으로 적용하여 계산하였으며 입구에서 축 방향 속도와 난류 에너지는 그림 5와 같은 분포를 갖는다.

그림 6은 피치 6, 30 그리고 100인 튜브 내부 유동에 대한 계산 결과이며 축 방향으로 서로 다른 위치에서 접선 속도를 나타낸 그림이다. 위의 결과에 의하면 나선이 없는 부분에서는 접선 방향 속도가 존재하지 않지만 나선형 홈이 있는 부분에서는 접선방향 속도 성분이 형성되며 특히 피치 100인 형상에서 가장 큰 접선 방향 속도 성분이 나타난다. 또한 축 방향으로 진행됨에 따라서 발생한 접선방향 속도 성분이 중심 방향으로 전파되어 점차로 평균유동의 산화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이때 내부 선회유동의 속도는 피치 100에서 가장 큰 속도를 나타낸다.

앞선 언급하였듯이 나선형 홈이 있는 튜브의 열전달 향상은 나선에 의하여 발생하는 선회유동과 밀접한 관련이 있거나 또는 표면의 주기적인 형상 변화로 경계층 교란이 발생하고 이로 인한 난류의 증가에 의하여 열전달이 향상된다. 따라서 수치 계산을 이용하여 나선산 형상 변화에

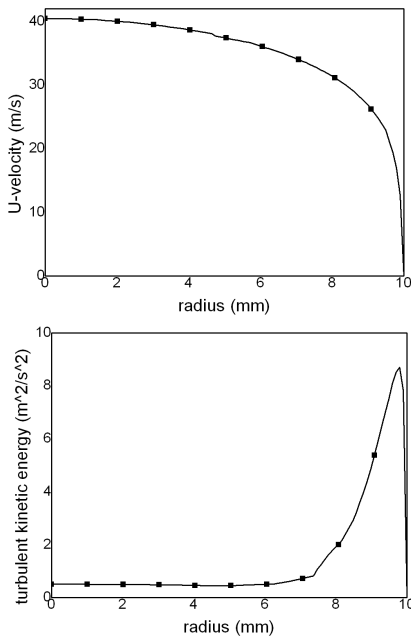


Fig. 5. Velocity and turbulent kinetic energy profile for inlet condition

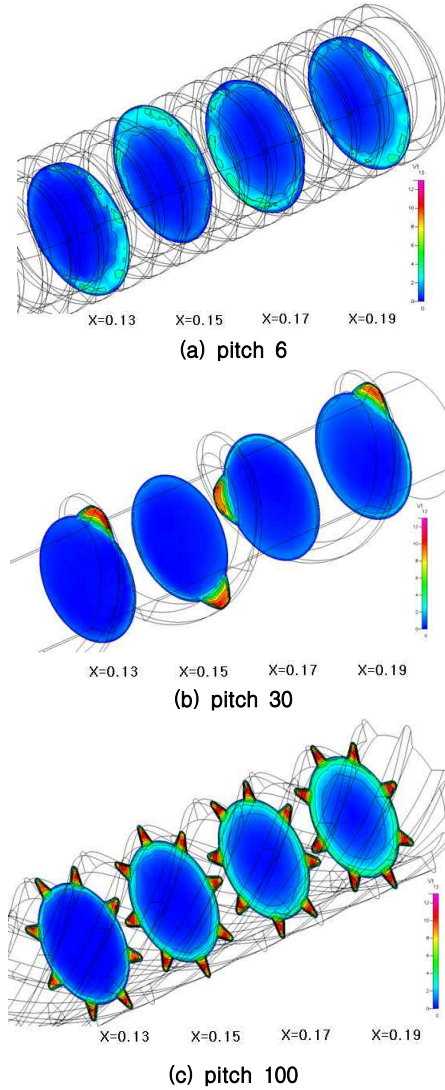


Fig. 6. Tangential velocity at several axial locations for pitch 6, 30 and 100

따른 내부유동의 평균 선회 수(swirl number) 변화와 난류에너지 값을 계산하였다. 이때에 선회 수를 계산하기 위해서 식 (5)를 사용하였다.

$$G_\phi = \int_A uv_\theta \rho 2\pi r^2 dA \quad G_x = \int_A u \rho u 2\pi r dA$$

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \tag{5}$$

그림 7은 각각 유동의 선회 수와 난류에너지의 축 방향 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 아주 특징적인 두 가지 유동 특성을 확인할 수 있다. 우선 하류 방향으로 진행 할수록 난류에너지가 감소한다. 이것은 초기 조건으로 완전 발달

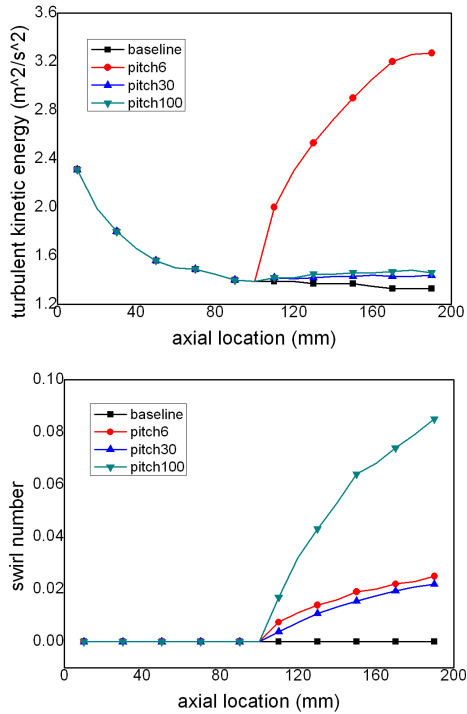


Fig. 7. Swirl number and turbulent kinetic energy distribution at several axial locations

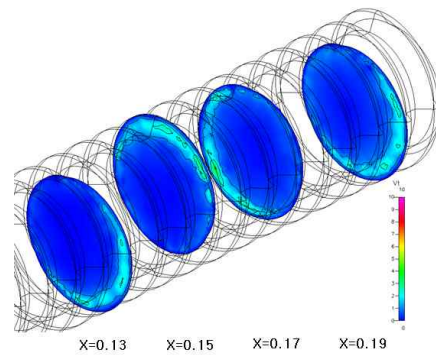
된 난류유동을 사용하였기 때문이다. 그러나 나선형 홈이 시작되는 부분에서부터는 난류에너지가 증가하며 피치 6에서 유동의 난류에너지는 초기 난류에너지에 비하여 약 2배 정도까지 증가하는 것으로 계산되었다. 그러나 피치 6인 경우를 제외한 다른 형상들에서는 난류에너지의 증가가 매우 작은 수준임을 확인할 수 있다.

한편, 그림 7 두 번째 그림은 하류방향으로 선회 수 분포를 보여주고 있다. 나선형 홈이 없는 부분에서 선회 수는 0이다. 나선형 홈이 시작되면 홈에 의한 유동의 선회가 시작되므로 평균 선회 수가 증가하며 특히 피치 100인 형상에서는 선회수가 최대 0.08까지 증가한다. 그러나 그 외의 피치 6과 30에서는 선회 수 증가가 크지 못하는 것으로 나타나 있다. 위의 계산결과와 표 1에서 제시하고 있는 나선형 튜브의 열전달 증가 예측 값과 비교하면 다음과 같은 결론이 가능하다. 즉, 열전달 증가는 나선형 홈에 의한 난류에너지가 매우 큰 값으로 증가하거나 (피치 6의 경우) 나선형 홈에 의한 평균유동의 선회 수가 매우 증가에 (피치 100의 경우) 의하여 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 피치 30의 경우에는 난류에너지 증가도 크지 못하며 선회 수의 증가는 0.02 정도

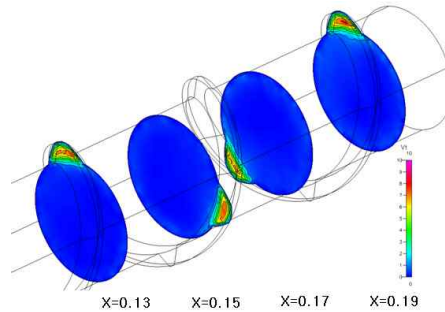
로 피치 6과 거의 비슷한 수준이다. 이러한 원인 때문에 피치 30에서는 상대적으로 낮은 열전달 증가를 예측할 수 있다. 결론적으로 나선형 홈은 내부유동의 난류에너지를 증가시키거나 평균유동의 선회 수를 증가시켜 열전달을 증가시키는 중요한 메커니즘임을 알 수 있다.

### 2.4 분출효과를 고려한 유동 해석

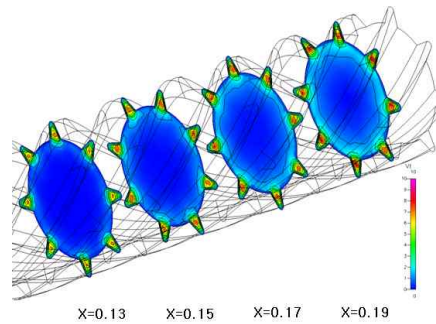
하이브리드 로켓의 나선형 홈이 있는 연료의 내부유동을 계산하기 위해서 연료가 승화되어 과정이 포함되어야 한다. 연료의 기화에 의하여 발생하는 현상을 분출효과 (blowing effect)라 하며 벽면 경계조건에 이를 적용하기 위해서 전체 벽



(a) pitch 6



(b) pitch 30



(c) pitch 100

Fig. 8. Tangential velocity at several axial locations for pitch 6, 30 and 100

면을 입구 조건으로 설정하여 벽면에 수직인 일정한 속도를 설정하였다. 이때의 벽면으로 분출되는 수직 속도는 연소실험에서 계산된 연소율을 바탕으로 계산하였으며 산화제 유입속도의 1% 정도인 0.25 m/s 로 가정하였다[5].

그림 8은 분출효과를 적용하여 계산한 접선 속도 분포이다. 그림에서 보듯이 분출효과를 적용하지 않았을 경우와 비교할 때 나사산 부분에서의 유동의 회전속도가 작아진 것을 확인할 수 있다. 이것은 분출효과에 의해서 나사산 내부유동이 영향을 받은 결과이며 그림 6에서의 속도 분포와는 달리 접선속도가 나사산 가운데로 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 분출효과를 고려하여 계산한 선회수와 난류에너지 분포이다. 그림에서 실선은 그림 7을 다시 나타낸 것이고 점선은 분출효과를 고려한 계산 결과이다. 먼저 난류에너지 분포를 살펴보면 축 방향으로 진행할수록 난류에너지가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 고체 표면에서 발생하는 분출유동과 산화제 유동이 충돌하면서 난류에너지를 생성하기 때문이다. 이러한 경향은 피치 6인 경우를 제외한 다른 형상에서 비슷한 크기의 난류에너지 증가를 확인할 수 있다. 그러나 피치 6에서는 매우 큰 난류에너지 증가가 일

어나며 다른 형상에서 발생하는 난류에너지에 비하여 대략 2배 정도의 증가를 나타낸다. 따라서 그림 3에서 보듯이 피치 6의 연소율이 가장 높은 이유는 나선형 홈 때문에 발생하는 난류에너지의 증가가 가장 중요한 원인인 것으로 판단된다.

한편 선회 수 분포를 살펴보면, 분출을 고려하면 선회 수 증가는 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림에도 불구하고 피치 100인 경우의 선회 수가 가장 큰 값을 나타내며 다른 형상에서 발생하는 선회 수 보다 대략 2배 정도의 크기를 갖는다. 이런 계산 결과로 볼 때 피치 100에서 관찰된 연소율의 증가는 나선형 홈에 의하여 유동의 선회 수가 증가하고 선회 수 증가는 다시 열전달 증가로 이어지는 메커니즘을 확인할 수 있다.

난류에너지 증가는 유동의 난류 강도를 증가시켜 대류 열전달을 높여주는 효과가 있음은 잘 알려져 있는 사실이다. 따라서 분출효과를 고려한 계산 결과를 살펴볼 때, 그렇지 않은 경우와 비교해서 상당한 수준의 열전달 향상이 있을 것으로 예상할 수 있다. 또한 열전달이 증가하면 연소율이 증가될 것으로 예측할 수 있다. 그러나 그림 9에서 보듯이 피치 6 경우의 난류에너지 증가는 분출효과가 없는 경우보다 약 4배 이상 증가하였지만, 열전달 양과 비례하는 연소율 증가를 그림 3에서 찾아보면 약 25% 증가에 그치고 있다. 따라서 난류에너지 증가가 직접적으로 열전달 증가에 기여하지 못하도록 하는 다른 원인을 생각할 수 있다.

그림 10은 나선형 홈이 없는 기본 형상에 대하여 분출효과가 없는 경우와 있는 경우의 난류에너지를 계산한 후, 축 방향 위치 10cm 지점에서 난류에너지의 반경방향 분포를 나타낸 결과이다. 위 결과에서 확인할 수 있듯이 분출효과를

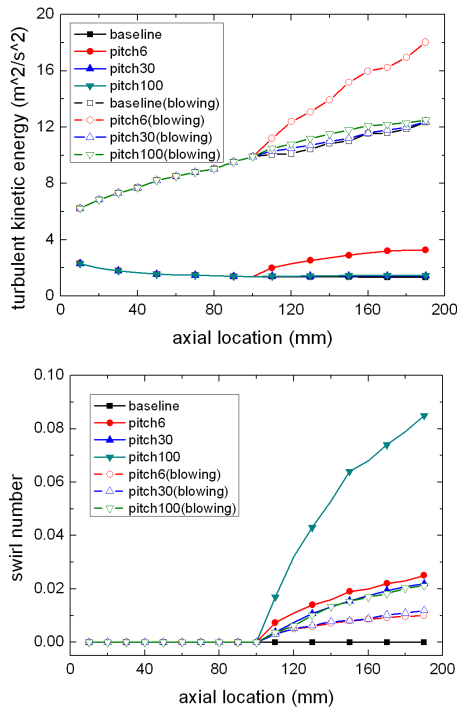


Fig. 9. Swirl number and turbulent kinetic energy distribution with blowing effect

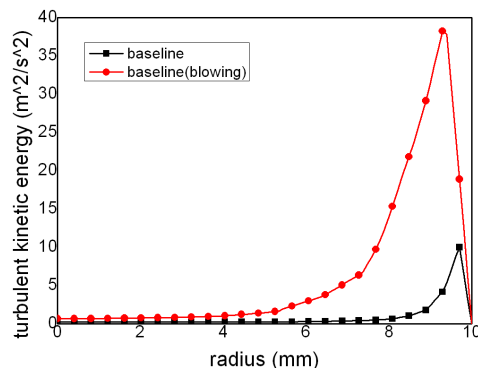


Fig. 10. Turbulent kinetic energy profile of baseline along the radial direction

적용할 경우 난류에너지가 큰 쪽으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 최대값을 나타내는 위치는 벽면근처인  $r=9.8\text{mm}$ 에서  $9.0\text{mm}$  부근으로 이동하였음을 확인할 수 있다. 이것은 축 방향 유동과 분출 유동이 벽면에서  $1\text{mm}$  정도 떨어진 지점에서 혼합되고 있음을 의미한다. 또한 이때 발생한 난류는 상당히 큰 강도를 나타내고 있음에도 불구하고 벽면을 통한 열전달 향상에는 기여하지 못함을 알 수 있다. 따라서 분출효과 있는 경우에는 난류에너지가 매우 큰 값으로 증가하여도 열전달의 증가로 이어지지 못하게 된다.

### III. 결 론

나선형 홈을 갖는 고체 연료의 연소율 증가 특성을 파악하기 위하여 열전달 증가를 예측하였으며 피치 값 변화에 따른 수치 계산을 수행하였다. 열전달 향상 예측 결과와 연소율 실험결과를 비교하여 열전달 증가 예측 순서와 실제의 연소율 증가 순서가 동일하게 이루어지고 있음을 확인하였다. 그러나 열전달 증가 예측은 기본 형상에 비하여 대략 300% 정도임에 불구하고 연소율 증가는 약 20% 정도 내외로 상당히 큰 차이를 보였는데 이것은 연료 증발로 인한 분출속도 때문인 것으로 판단된다.

열전달 예측과 연소율 증가 사이의 차이를 규명하기 위해 CFD-ACE를 이용한 내부유동 RANS 계산을 실시하였다. 수치계산에 사용된 형상은 기본 형상, 피치 6, 30, 100의 네 종류가 사용되었다. 계산 결과에 의하면, 피치 6의 경우에는 난류 에너지의 증가가 주도적 역할을 하여 열전달이 향상되며 이 때문에 연소율의 증가가 있음을 확인하였다. 그리고 피치 100 경우에는 나선형 홈에 의한 선회 유동 발생이 열전달 향상이 일어나게 하는 주요한 요인인 것으로 파악된다. 그러나 피치 30의 경우에는 난류에너지의 증가도 미약하며 유동 선회 수 증가도 매우 작은 것으로 계산되었다. 따라서 열전달 향상을 이룰 수 있는 주도적 요소가 없기 때문에 연소율 증가가 작거나 오히려 감소가 일어날 수 있다는 것을 확인하였다.

또한 분출 유동을 고려한 계산결과에 의하면

난류에너지는 약 600% 증가하지만 이러한 난류에너지의 증가는 축 방향 유동과 분출 유동이 혼합하면서 일어나는 현상이며 최대값의 위치는 오히려 유동 안쪽으로 이동하기 때문에 열전달 향상에 직접적으로 기여하지 못하는 것으로 파악되었다. 따라서 분출이 있는 고체연료의 연소율과 난류 유동 에너지와의 직접적인 상관관계는 분출이 없는 경우와 다른 경향을 보여주고 있으며 이러한 원인에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- 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, *AIAA Conference and Exhibit*, Reno, 2005.
- 2) V. Srinivasan and R. N. Christensen, "Experimental Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Flow through Spirally Fluted Tubes", *Aviation Experimental Thermal and Fluid Science*, No. 5, 1992, pp 820-827.
- 3) S. Garimella, V. Chandrachood, R. N. Christensen, and D. E. Richards, "Investigation of Heat transfer and Pressure Drop Augmentation for Turbulent Flow in Spirally Fluted Tubes", *ASHRE Transactions*, Vol. 94, part 2, 1988, pp 1119-1131.
- 4) Changjin Lee, Yang Na. and Gunho Lee, "The Enhancement of Regression Rate of Hybrid Rocket Fuel by Helical Grain Configuration and Swirl Flow", AIAA 2005-3906, *42nd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Tucson, 2005.
- 5) Changjin Lee, and Yang Na, "Turbulent Flow in the Helical Grain of Hybrid Rocket Fuel", AIAA 2006-4344, *42nd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Sacramento, 2006.
- 6) 황영춘, 이창진, "스웰 유동과 나선형 그레인에 의한 하이브리드 로켓 연료의 연소율 향상", 한국항공우주학회지, 제 34권, 제 4호, 2006.