

내열 재료별 삭마형상에 따른 초음속 노즐 성능 분석

이지형* · 함희철*

A performance analysis on supersonic nozzle by ablated shape of thermal protectors

Jihyung Lee* · Heecheol Ham*

ABSTRACT

Pan and rayon materials, two types of carbon fabric/phenolics composites, are using as thermal protectors for SRM's nozzle. After burning tests, It was required to analyze the performance of nozzles by ablated shape because ablative patterns were different from each other. For studying of performance on supersonic nozzles that have ablated shape, 1-dimensional analysis and numerical analysis were performed and results were presented in this paper. As the results of this study, in case of the thrust loss, rayon was predicted about 0.53% higher than pan and in case of total impulse loss, rayon was predicted about 0.4% higher than pan.

초 록

Pan과 Rayon계 내열재료는 카본-페놀 복합재료로 고체 추진기관용 노즐 내열재로 사용되고 있다. 연소시험 후, 두 재료의 삭마패턴에 따라 삭마형상에 의한 노즐 추력성능 변화와 관련된 연구가 요구되었다. 본 연구에서는 연소시험 후 획득한 삭마형상을 이용한 1차원 면적분석과 유동해석 수행하여 Pan계 및 Rayon계 내열재의 삭마형상에 의한 추력 손실량을 예측하였다. 연구 결과, Rayon의 경우 Pan의 경우에 비해 약 0.53%의 추력손실이 더 있었으며, 약 0.4%의 더 많은 총 역적 손실이 예측되었다.

Key Words: Carbon fabric/phenolics composites(카본/페놀 복합재), Thrust loss(추력손실), Total impulse(총역적)

1. 서 론

고체 추진기관용 노즐 내열재로 사용되는 Pan

계 카본/페놀 내열재와 Rayon계 카본/페놀 내열재의 내열특성을 분석하고자 수행한 연소시험 결과 전반적으로 두 재료의 삭마 층과 숯 층의 두께를 더한 결과는 비슷한 경향을 보였으나 삭마와 숯 층의 두께는 서로 상이하게 나타났다. 즉, Pan계의 경우 삭마 층이 얇고 숯 층이 두꺼

* 국방과학연구소 추진기관부
연락처, E-mail: im_ljh@hanmail.net

운 반면 Rayon의 경우 삭마 층이 두껍고 숯 층이 얇은 경향이 나타났다. 일반적으로 연소 시험 후 노즐 내열재에 virgin층이 존재할 경우 노즐 내열의 문제점이 없는 것으로 판단되나 삭마에 의한 노즐 내부 Contour의 변화는 노즐의 추력 성능에 영향을 미칠 것으로 판단됨에 따라 삭마 형상에 따른 노즐 추력 성능 변화와 관련된 연구가 요구되었다. (Figure 1 참조)

본 연구에서는 연소시험으로 얻어진 Pan계 카본/페놀 확대부 내열재(20도 T/W)와 Rayon계 카본/페놀 확대부 내열재(0도 T/W)의 삭마형상이 노즐 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1차원적인 면적분석과 Fluent를 이용한 유동해석을 수행하였고 그 결과를 시험결과와 비교, 분석함으로써 삭마형상이 초음속 노즐의 추력 성능에 미치는 영향을 평가하였고 그 결과를 수록하였다.

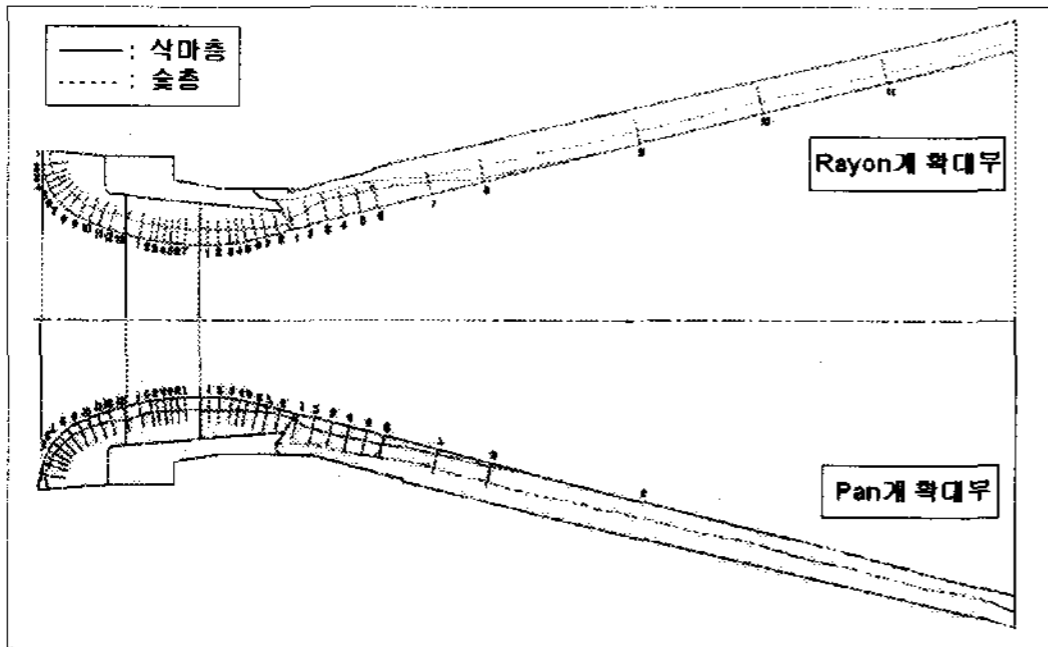


Fig. 1 Contours of Ablation and Char

2. 본 론

2.1 1차원 면적분석

일반적으로 고체 추진기관은 연소시험 후 확대부 끝단에서 삭마 층은 존재하지 않고 숯 층만이 존재한다. 따라서 연소시험 시 획득하는 추진기관 내부의 시간에 따른 챔버압력(P_c)과 추력(F_t)으로 추진기관이 연소 시 노즐 목의 삭마를 예측할 수 있다. 즉, 추력 계산식(1)에서 C_f 는 노즐 끝단에서의 압력(P_e)과 시간에 따른 노즐 목 면적변화(A_t)의 함수가 되며(식(2)참조), 식(3)에

서 A_t 를 가정함에 따라 노즐 출구에서의 마하수 (M_e)를 구할 수 있고 계산된 M_e 를 식(4)에 대입하여 노즐 출구에서의 압력(P_e) 계산하고 계산된 P_e 를 다시 식(2)에 대입하여 C_f 를 구한 후, 식(1)에 의하여 계산된 추력 값과 시험 시 획득한 추력 값과 비교함으로써 연소 시험 중 시간에 따른 노즐 목 삭마량을 예측할 수 있다. Figure 2는 이 방법을 통하여 연소시험동안 예측된 노즐 목의 변화를 나타내며 노즐 목의 삭마는 Pan의 경우 0.15 이후에, Rayon인 경우 0.16 이후에 발생됨을 알 수 있다. 이 현상은 시험 환경상의 온도차에 의하여 발생된 것으로 판단된다.

$$F_t = C_f P_c A_t \quad \text{----- (1)}$$

$$C_f = \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} + \left(\frac{P_e}{P_c} - \frac{P_{amb}}{P_c}\right) \frac{A_e}{A_t} \quad \text{----- (2)}$$

$$\frac{A_e}{A_t} = \frac{1}{M_e} \left[\left(\frac{2}{\gamma+1}\right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right) M_e^2 \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad \text{----- (3)}$$

$$\frac{P_e}{P_c} = \left[\frac{\gamma+1}{2\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right)} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{----- (4)}$$

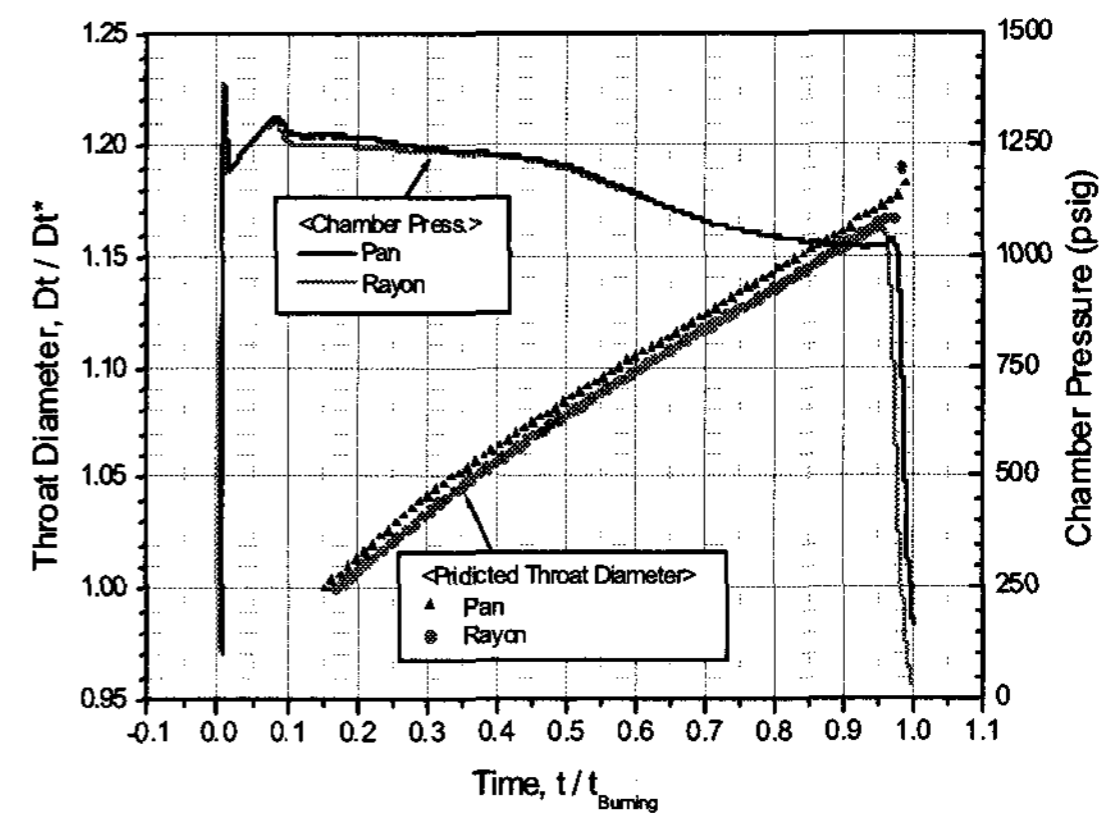


Fig. 2 Throat Diameter Prediction

2.2 2차원 수치해석

1차원적인 면적분석 결과 동일 챔버 압력하에 동일 노즐 목 직경에서의 경우가 존재하지 않아 Pan계의 삭마형상과 Rayon계의 삭마형상에 따른 추력성능비교를 수행하고자 Fluent를 이용하여 수치해석을 수행하였다. Table 1은 해석에 사용된 물성치를, Figure 3은 해석에 사용된 Mesh(Rayon경우)를 보여주며 Figure 4는 수치해석을 수행한 해석 점을 나타내는 것으로 동일압력 1050psig에서 동일 목 직경(Rayon기준 : 1.14263)을 사용하였다. 또한 노즐 목 후방 확대부에서의 삭마량은 평균 삭마율을 고려하여 삭마형상을 예측하였다.

Table 1 Properties for CFD

입구 압력 (Psia)	1064.7 (1050psig)	γ	1.1435
입구 온도 (oK)	3515	Cp	2241.25
출구 압력 (Psia)	14.7	Mw	29.56
출구 온도 (oK)	300		

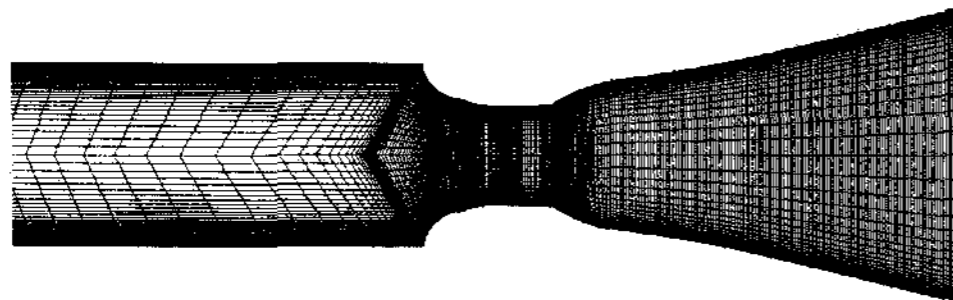


Fig. 3 Mesh for CFD

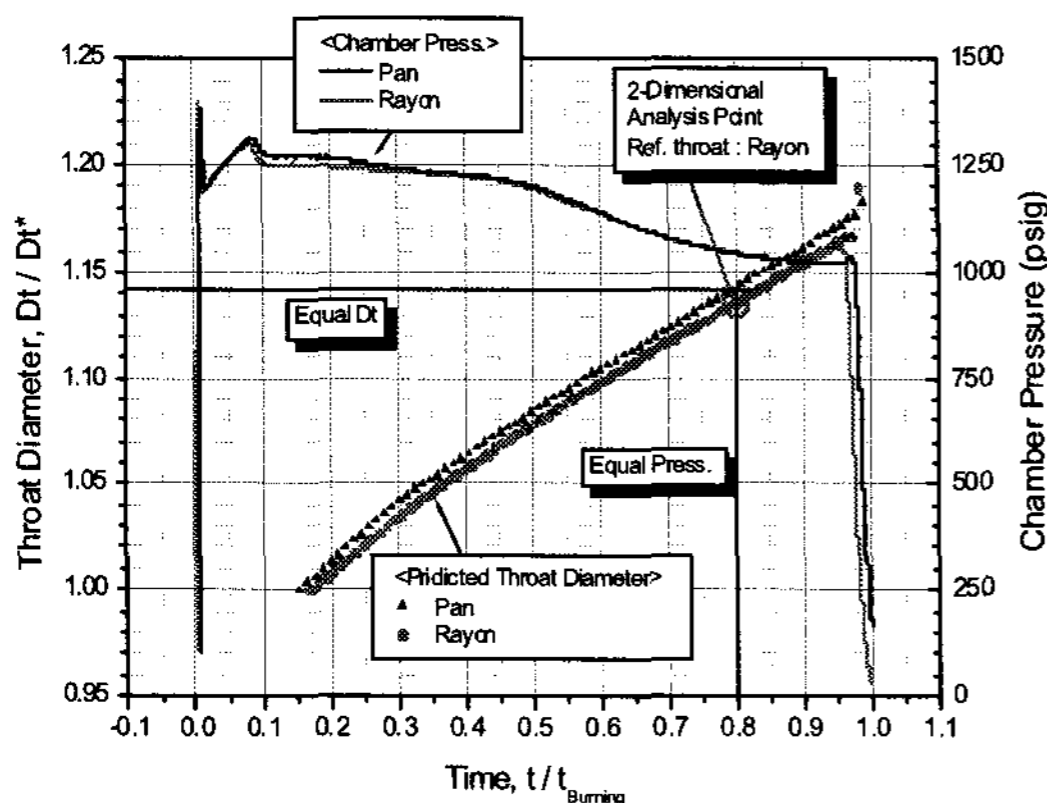


Fig. 4 Analysis Point for CFD

3. 결과 분석

3.1 1차원 면적분석 결과

Figure 5는 연소 시험결과로 획득된 추력 값으로 같은 챔버 압력에서의 추력 차(Pan : 1.01726, Rayon : 1.00440)와 1차원 면적분석에 의하여 구해진 같은 노즐 목 면적에서의 추력 차(Pan : 1.01726, Rayon : 1.01153)를 나타낸다. 같은 챔버 압력의 경우 노즐 목 직경 차는 약 0.89mm이며, 같은 노즐 목 면적인 경우 압력차는 6psi 차가 발생하였다. 즉, 노즐 목 직경차가 0.89mm이나 같은 챔버 압력에서의 추력 차는 약 1.268%로 나타났으며 챔버 압력차는 6psi이나 같은 목 직경에서의 추력 차는 약 0.57%로 나타났다.

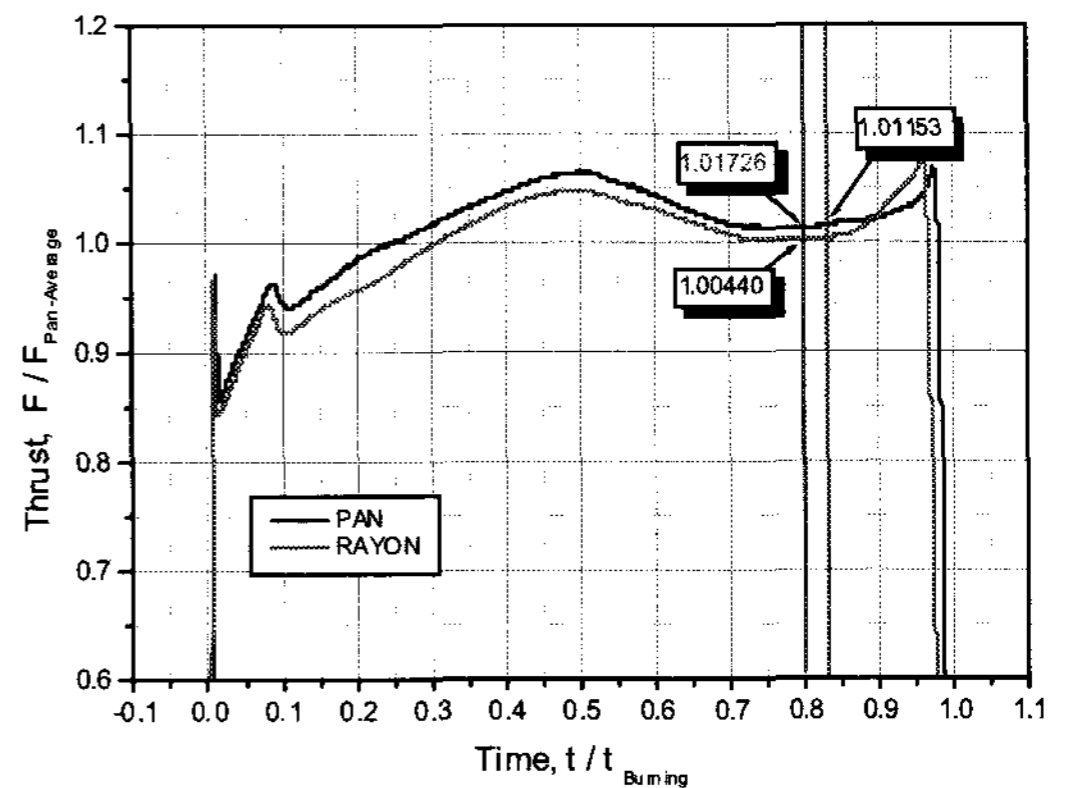


Fig. 5 Thrust Difference (1-D Analysis)

3.2 2차원 수치해석 결과

Figure 6, Figure 7은 각 조건별 압력 및 Ma수 분포를 비교한 것이다. 유입부 내열재와 목 삽입재 및 확대부 내열재의 구분선에서 나타나는 불연속적 형상에서 충격파가 형성되어 노즐 내부 유동에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Pan의 경우 확대부 내열재 시작 단에 존재하는 삭마형상에 의한 충격파가 발생하여 노즐 내부유동의 속도가 감소함을 알 수 있으며 Rayon의 경우는 이러한 충격파의 강도가 더 강하게 나타남을 알 수 있다.

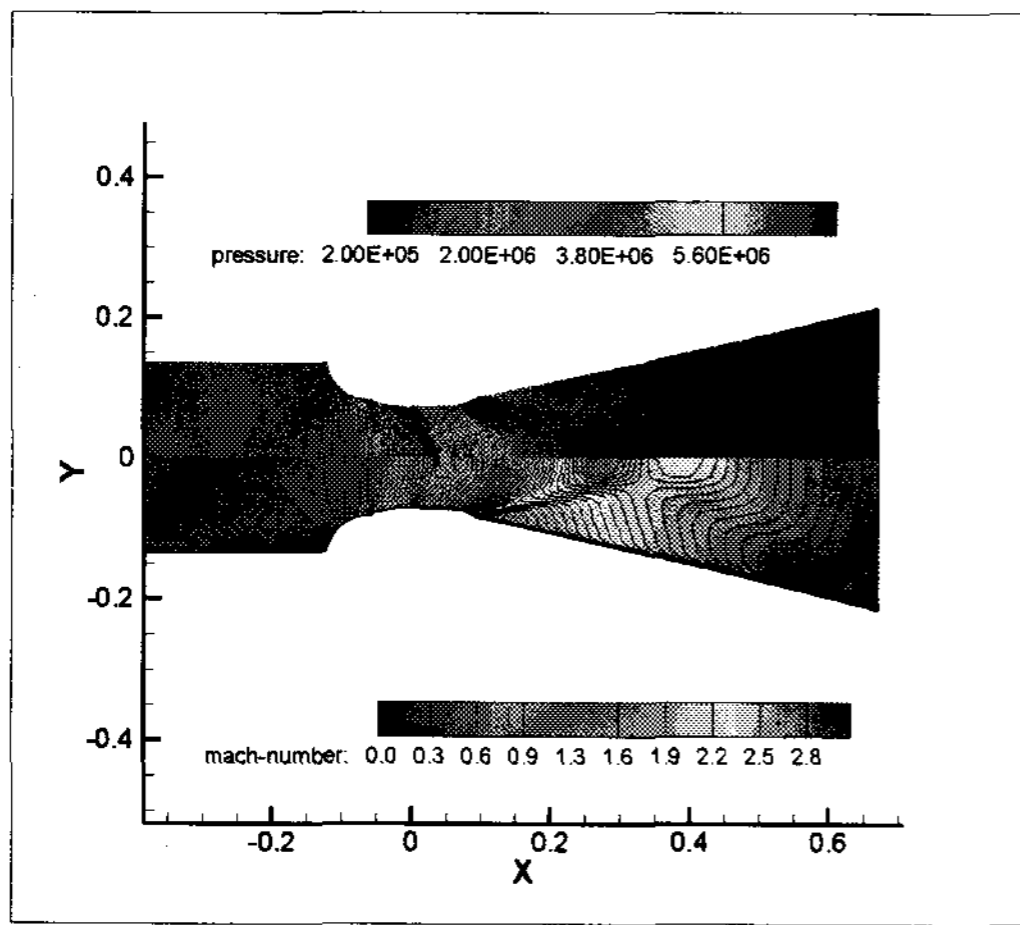


Fig. 6 Pressure and Ma No. Distribution (Pan case)

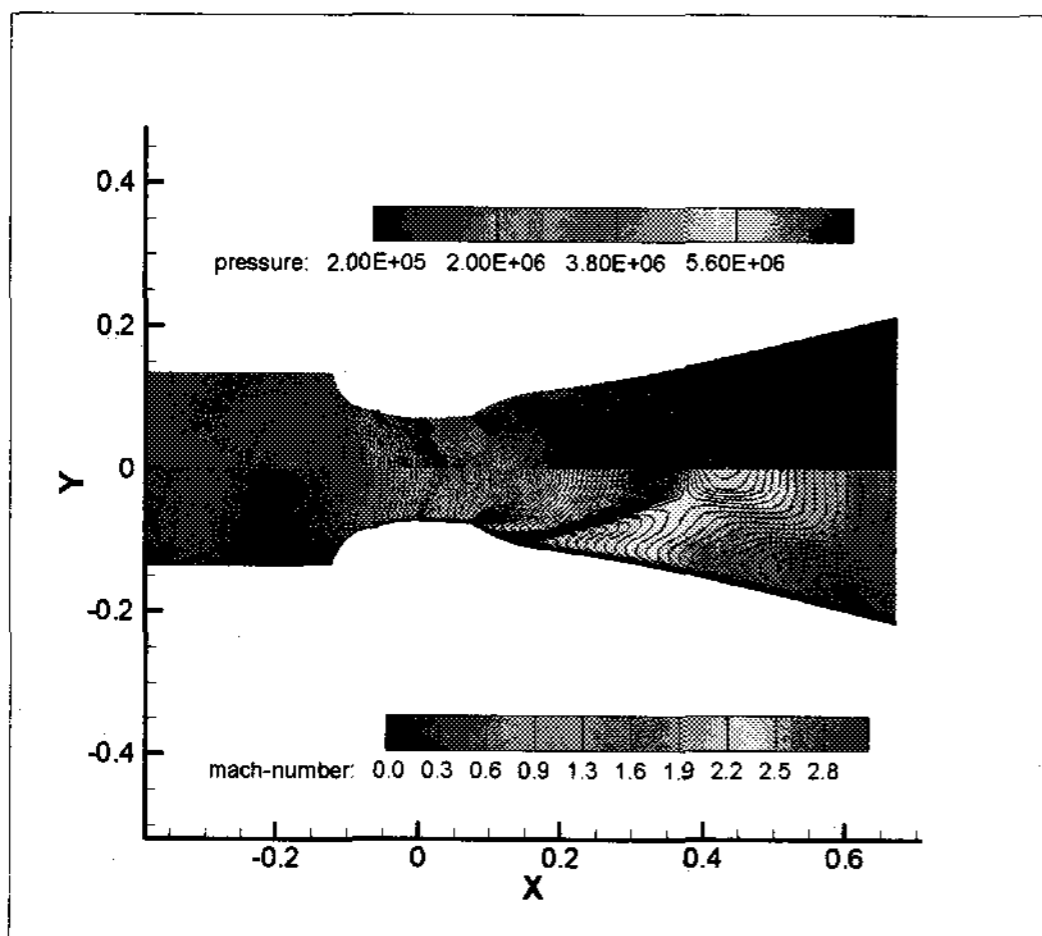


Fig. 7 Pressure and Ma No. Distribution (Rayon case)

Figure. 8은 중심축 상에서의 노즐 목 후방 압력분포를 나타내며 Figure 9는 중심축 상에서의 온도분포를 나타낸다. 압력과 온도분포를 보면 노즐 목 후방에서 2개의 충격파가 존재하는 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 노즐 목 후방에서 발생한 2개의 충격파는 전방의 경우, 목 삽입재의 불연속적 형상에 기인한 것이며 후방의 경우 삭마형상에 기인한 것이다. 유동패턴의 결과에서 알 수 있듯이 삭마형상에 기인한 충격파의 강도는 삭마가 심한 Rayon의 경우가 가장 크게 나타나며 충격파의 위치 또한 후방으로 밀려

남을 알 수 있다. 해석 결과에 표현된 Normal의 경우는 노즐 목 후방 확대부 부분에서 이상적인 삭마가 발생한 경우로 노즐 목 후방에서의 단이 존재하지 않는 경우이다.

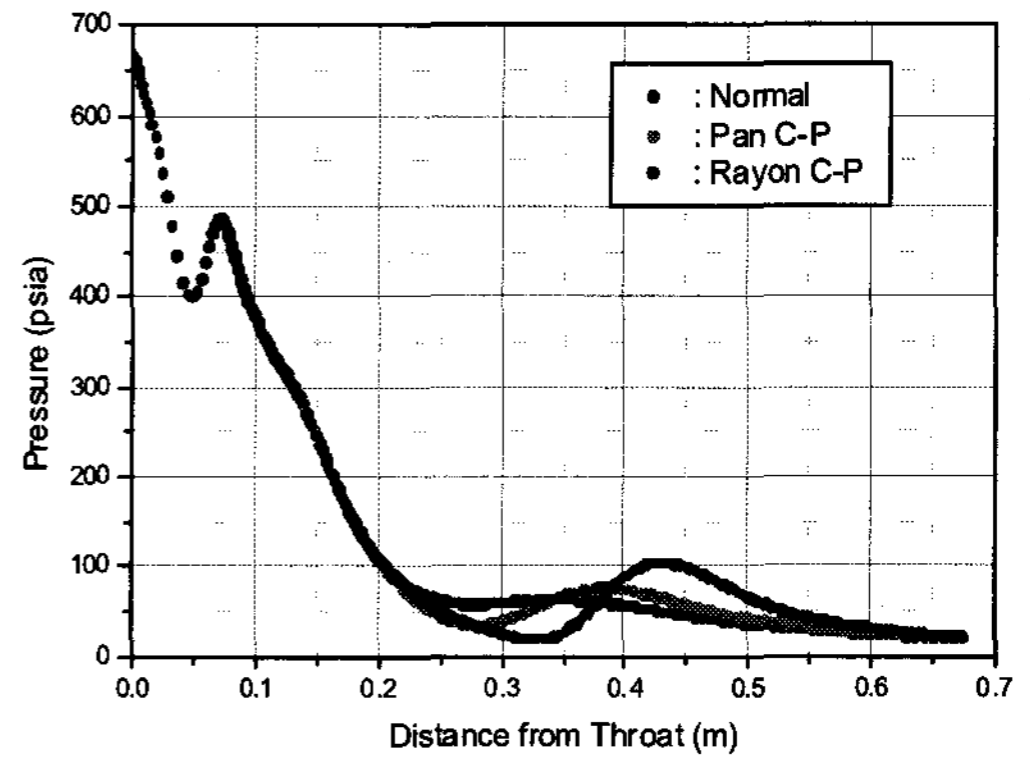


Fig. 8 Pressure Distribution on Center Line

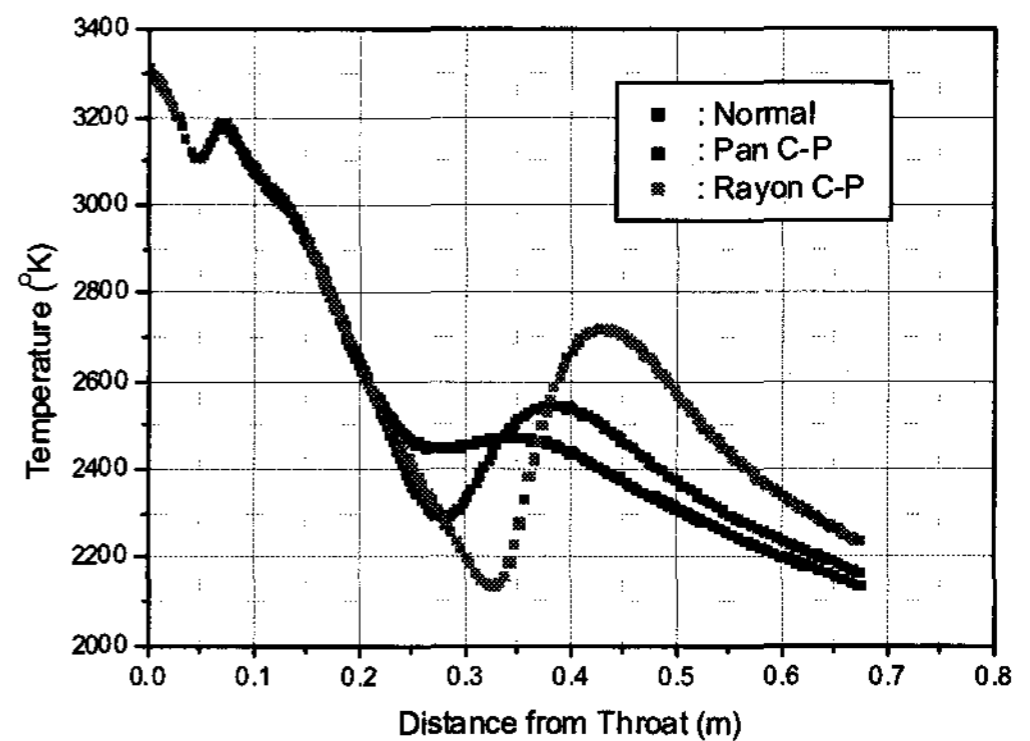


Fig. 9 Temperature Distribution on Center Line

Figure 10은 해석에 적용된 노즐 벽면에서의 정압분포로 불연속적 형상에 의한 큰 압력 변화가 노즐벽면에 나타남을 알 수 있다. 삭마형상에 의해 발생하는 불연속적 형상에 의한 압력강하 후, 삭마형상에 따라 팽창되고 삭마형상의 기울기가 감소하는 영역에서 충격파가 발생하여 압력이 상승하고 다시 팽창됨을 알 수 있다. Pan의 경우 보다 Rayon의 삭마형상이 크고 깊게 존

재함에 따라 팽창이 더 많이 발생되며 삭마형상의 기울기 변화가 완만하여 충격파에 의한 영향이 노즐 후방에 더 넓게 분포함을 알 수 있다.

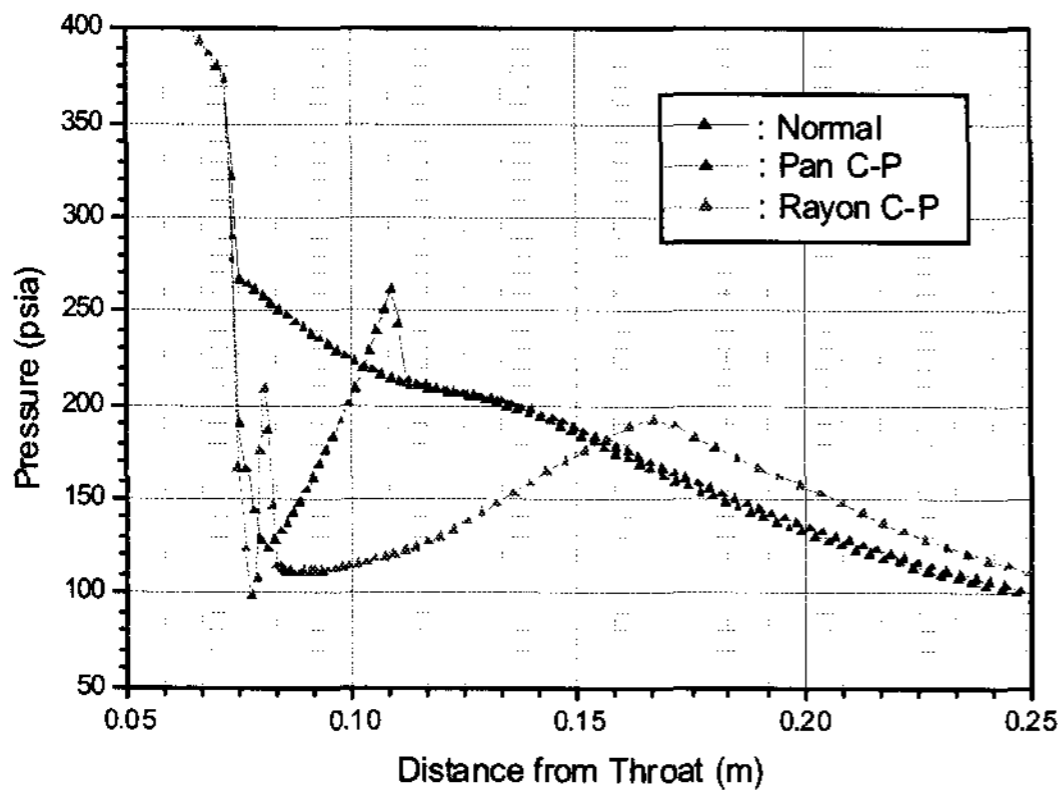
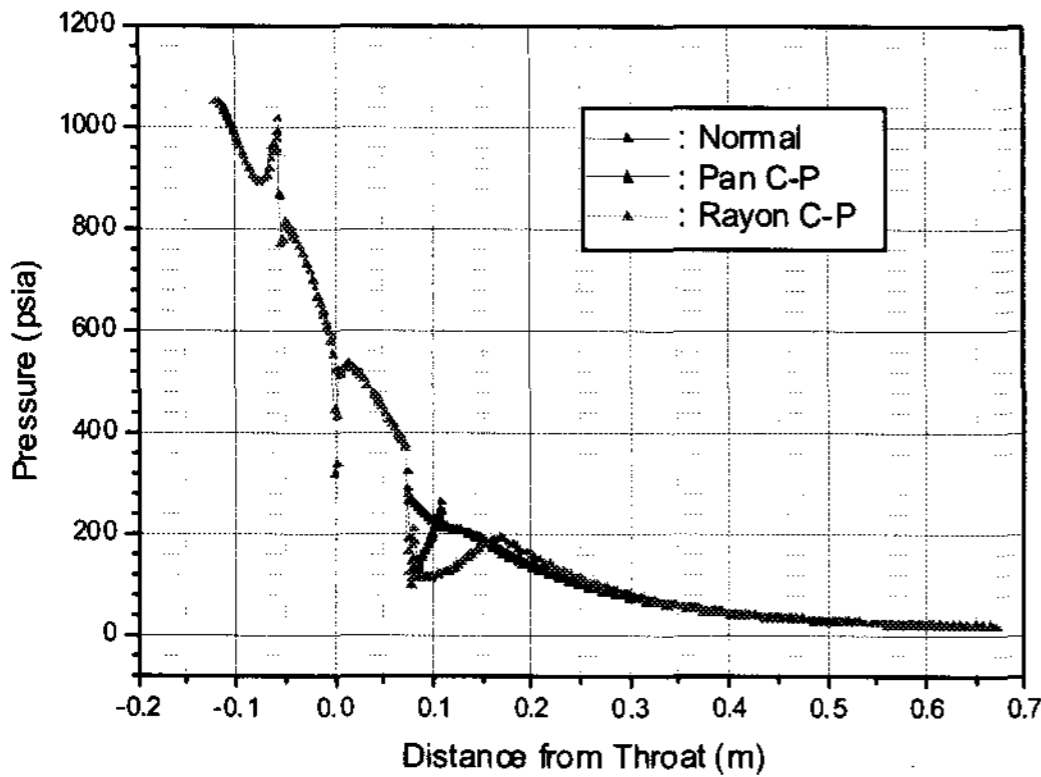


Fig. 10 Pressure Distribution on Nozzle Wall

Fluent를 이용하여 챔버 압력 1050psig, 목 직경 1.14263에 대하여 Pan계와 Rayon계의 해석결과 Pan의 경우 1.01752, Rayon의 경우 1.01219의 추력 값을 나타내었으며 추력 차는 약 0.533%로 예측되었다. 이 결과를 전체 연소시간에 대해 내삽, 외삽법을 적용하여 총 역적차를 구하면 Pan의 시험결과에 대하여 예측된 Rayon의 총 역적 차는 약 0.35% 낮게 나타나며 Rayon의 시험결과에 대하여 예측된 Pan의 총 역적 차는 약 0.26% 높게 나타난다. Figure 11과 Figure 12는 그 결과를 나타낸다.

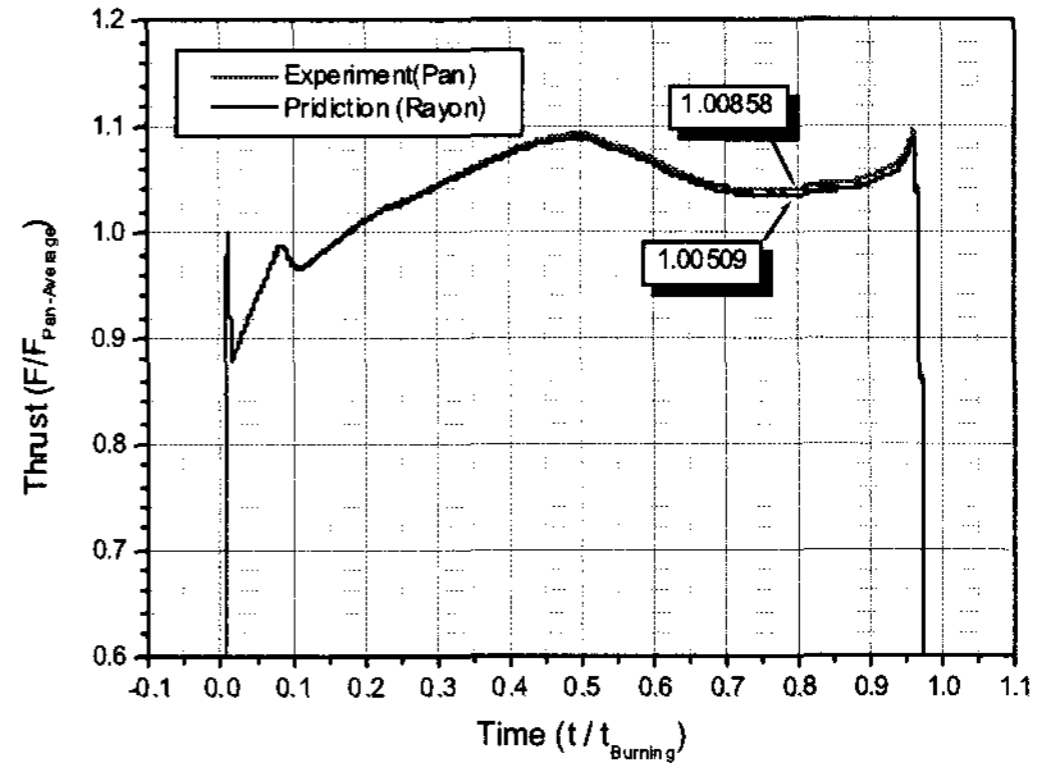


Fig. 11 Thrust Prediction (ref. Pan Test)

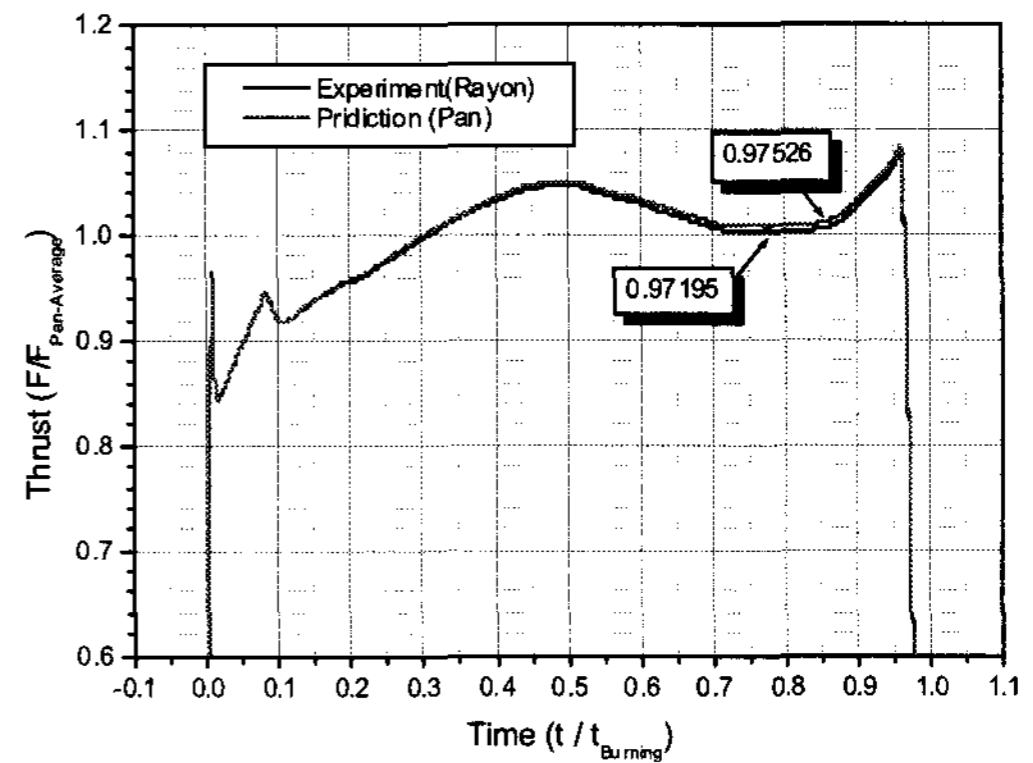


Fig. 12 Thrust Prediction (ref. Rayon Test)

4. 결 론

노즐 내열재의 삭마형상이 노즐 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연소시험 결과를 이용한 1차원적인 면적분석과 Fluent를 이용한 유동해석 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반적으로 연소시험 결과, 노즐 확대부 끝단에서의 삭마가 존재하지 않기 때문에 1차원 면적분석을 통한 시간에 따른 노즐 목 삭마량 예측방법이 타당하다.
- 2) Pan계의 확대부 삭마형상과 Rayon계 확대부

삭마형상에 따른 추력차를 1차원 면적분석 결과, 노즐 목 직경차가 0.89mm이나 같은 챔버 압력에서는 약 1.268%로 나타났으며 챔버 압력차는 6psi이나 같은 목 직경에서는 약 0.57%로 나타났다.

- 3) 연소시험 결과를 이용하여 동일 목 면적, 동일 압력하의 해석 점을 선정하고 Fluent를 이용한 2차원 해석 결과 Rayon의 경우가 Pan의 경우에 비해 약 0.53%의 추력손실이 예측되었다.
- 4) 해석된 추력 손실 값을 전 연소시간에 대해 내삽법과 외삽법을 이용하여 적용한 결과 Pan의 시험결과에 대하여 예측된 Rayon의 총 역적 차는 약 0.35% 낮게 나타나며 Rayon의 시험결과에 대하여 예측된 Pan의 총 역적 차는 약 0.26% 높게 나타났으며 이 결과로 약 0.4%미만의 총 역적차가 발생하는 것으로 판단된다.

- 5) 본 결과는 향후 로켓 노즐 설계 시 설계자료로 활용가능 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. NASA, " Solid Rocket Motor Nozzles, NASA Space Vehicle Design Criteria" , NASA-SP-8115, June 1975
2. Coats, D. E., "Effects of Nozzle Inlet and Throat Geometry of the specific Impulse of Solid propellant Rocket Motors", AIAA Paper 81-0036, Jan 12-15. 1981.
3. Randall Smith-Kent and Jeffrey P. Ridder and Hai-Tien Loh, " Effects of ITE and Nozzle Exit Cone Erosion on Specific impulse of Solid Rocket Motors", AIAA Conference 1993-1926, June, 1993