



Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.2.111>

기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기의 슬릿 형상에 따른 연소성능에 관한 연구

유이상^a · 최지선^a · 김태완^a · 고영성^{a,*} · 김선훈^{a,b} · 김형모^c

A Study on Combustion Performance by the Shape of Slit of the Canted Slit Type Pintle Injector

Isang Yu^a · Jiseon Choi^a · Taewoan Kim^a · Youngsung Ko^{a,*} ·
Sunhoon Kim^{a,b} · Hyungmo Kim^c

^aSchool of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea

^bSatellite Mechanical Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^cEngine Parts Research Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

ABSTRACT

In this paper, combustion tests were performed to investigate performance characteristics of a canted slit-type pintle injector engine which uses kerosene and liquid oxygen as propellants. The number of slits, slit angle and blockage factor were chosen as design variables of the pintle injector. ΔSR was newly defined as the difference of skip ratio caused by both sides of the tip of the canted slit. The experimental results showed that optimal combustion was performed when the blockage factor is about 1 and the difference is less than 0.26.

초 록

본 논문에서는 연소 실험을 통해 케로신/액체산소를 추진제로 사용하는 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기 로켓엔진의 연소 성능을 살펴보았다. 슬릿 형상 관련 설계 변수는 슬릿 개수, 슬릿 각 및 차단율로 선정하였다. 그리고 기울어진 슬릿에 의한 양 끝단의 skip ratio의 차이를 ΔSR 로 새롭게 정의하였다. 실험 결과, 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기의 슬릿 형상에서 BF를 1에 가깝게 하고, ΔSR 을 0.26 이내로 설계하면 최적의 연소성능을 발휘함을 확인하였다.

Key Words: Pintle Injector(핀틀 분사기), Canted Slit(기울어진 슬릿), Blockage Factor(차단율), Skip Ratio(직경 대 길이 비), ΔSR (skip ratio 변화량)

Received 28 October 2016 / Revised 6 December 2016 / Accepted 10 December 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

BF : blockage factor

D_C : diameter of chamber
 D_P : post diameter of pintle injector
 L_s : skip distance
 L_s' : tip skip distance by the canted slit
 N : the number of slits
 TG_p : gap size of the canted slit
 TMR : total momentum ratio
 ΔSR : difference between skip ratios of the
 pintle post($(L_s' - L_s)/D_P$)

1. 서 론

핀틀 분사기는 단순한 구조로 상대적인 개발 비용이 저렴하고 추력제어가 용이하여, 우주 추진용 추력기부터 발사체용 고추력 엔진에 이르기까지 다양한 용도로 활용되고 있다. 가장 먼저 임무에 사용된 핀틀 분사기는 TRW사가 1960년대 아폴로 달착륙선 추진기관(LMDE)으로 사용하였을 때이며, 이 추력기는 10:1의 추력비(1,000~10,000 lbf)로 추력 조절이 가능하였다[1]. 이후 이 기술을 바탕으로 TR201을 개발하여 델타(Delta) 발사체의 2단 엔진으로 약 80여회의 무사고 운용을 이루어냈다[2]. 특히 2008년 미국의 SpaceX의 Falcon 9 에 적용한 Merlin 엔진이 핀틀 분사기를 적용하여, 발사체 시장에서 두각을 나타내었다. 또한 핀틀 분사기는 130여개의 다양한 엔진에 활용되어 비행 실패나 연소불안정의 사례가 보고되지 않아 높은 안정성을 입증하였다[3].

한국항공대학교에서는 핀틀 슬릿 두께에 따른 수류시험을 진행하여, 패터네이터를 통해 공급 압력이 일정할 때 슬릿 두께가 커질수록 운동량비(이하 TMR; 추진제의 유량과 유속의 곱인 운동량의 비율)가 증가함을 확인하였다. 또한 충돌한 추진제가 원뿔 형태로 분사되어 중심으로 흘러내려오는 유체가 거의 없는 것을 확인하였다[4]. 한국항공우주연구원에서는 슬릿형, 원형, 사각형 등의 다양한 분사기의 수류시험을 진행하였으며, 예측된 분사각과 실제 수류시험에서 관찰된 각도가 약 20도 이내의 차이를 보임을 확

인하였다[5]. 이상과 같이 핀틀 분사기에 대한 관심은 국내외적으로 지속적으로 증가하고 있지만, 공개된 국외 자료는 매우 오래된 자료 외에는 찾기 어려우며 국내에서는 아직까지 주로 수류시험만이 수행되고 있는 실정이다.

본 연구실에서는 케로신/액체산소를 추진제로 사용하는 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기의 수류시험과 연소시험을 통해, TMR 변화와 특성길이 변화에 따른 추진제 분무 및 연소 특성을 관찰하였다[6-8]. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 토대로 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기의 TMR이 추천범위 내에서 일정할 때, 슬릿의 형상 설계 변수가 연소성능에 미치는 영향을 특성속도효율을 통해 확인하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 분사기 설계 변수

본 연구에서 실험한 핀틀 분사기는 연소실압력 10 bara, 진공추력 755 N이다. Table 1과 같이 각 추진제의 유량에 따라 추진제 분사면적에 의해 설계차압과 핀틀 포스트 직경(D_P)이 선정되었다. 차압의 경우 보통 각 추진제를 비슷한 수준으로 설계하나, 분사면적의 크기가 매우 작기 때문에 가공 가능 범위를 고려하여 서로 상이하게 설계되었다. 차례로 D_P 에 따라 연소실 직경(D_C) 및 슬릿 개수 12개, 슬릿 각 45°가 결정되

Table 1. Basic specification of pintle injector.

Chamber pressure	10 bara	
Thrust(Vac.)	755 N	
O/F ratio	2.2	
Propellant	Kerosene	LOx
Mass flow rate	88 g/s	194 g/s
Pressure drop	5.14 bar	1.5 bar
Dia. of post(D_P)	12 mm	
Dia. of chamber(D_C)	60 mm	
No. of slits(N)	12	
Slit Angle(θ)	45°	
BF	1	
TMR	1	

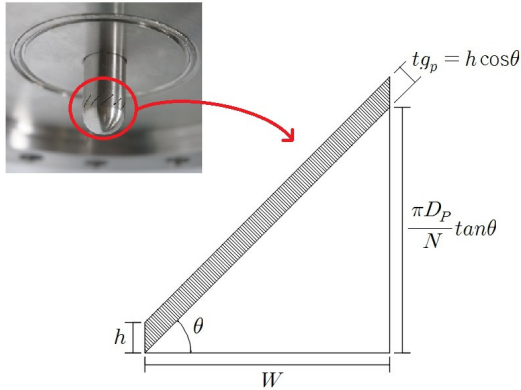


Fig. 1 Canted slit shape.

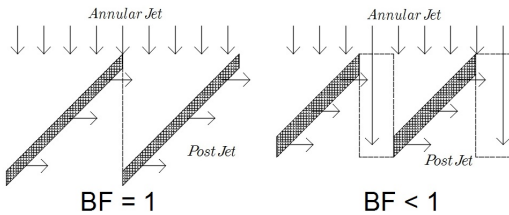


Fig. 2 Jet impinging models by blockage factor.

었다. 기울어진 슬릿의 기본 형태는 Fig. 1과 같으며 형상 설계 변수를 슬릿 개수(N), 슬릿 각(θ) 그리고 차단율(이하 BF; blockage factor)의 세 가지로 선정하였다.

선정한 세 가지 변수의 영향을 확인하기 위해 Table 2와 같이 기준 분사기를 1번 분사기로 설정하였다. BF에 의한 영향을 알아보기 위해 슬릿 개수와 슬릿 각을 유지한 채 2,3번 분사기와 같이 15%씩 차이를 두어 설계하였다. BF는 식 (1)과 같이 핀틀 포스트 둘레($\pi \times D_p$) 중 슬릿에서 추진제가 분사되는 영역의 총 너비($N \times W$)가 차지하는 비율이다. 따라서 Fig. 2와 같이 BF=1인 경우 환형제트가 포스트제트와 모두 직접 충돌하게 된다. BF<1인 영역에서는 환형제트가 슬릿 사이를 빠져나가는 영역이 발생한다. TRW에 의하면 사각슬릿의 경우 BF 추천치가 0.3~0.7이나[9], 기울어진 슬릿에 관한 추천치는 언급되어있지 않다. 따라서 BF를 0.7부터, 추진제의 미 충돌 영역이 존재하지 않는 1.0까지 증가시켜 BF에 의한 영향을 관찰하고자 하였다.

Table 2. Variation of pintle injectors.

Inj.	BF	N	θ	ΔSR	Post shape
1	1	12	45°	0.262	
2	0.85	12	45°	0.223	
3	0.7	12	45°	0.185	
4	1	18	45°	0.174	
5	1	12	60°	0.453	

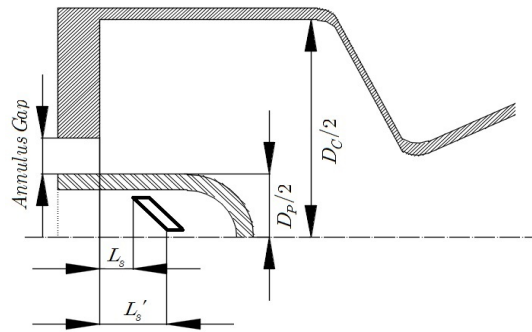


Fig. 3 Layout of canted slit pintle injector.

$$BF = \frac{NW}{\pi D_p} \quad (1)$$

슬릿 개수의 영향을 확인하기 위해 BF와 슬릿 각을 유지한 채, 1번 분사기의 12개에서 50% 증가한 18개의 슬릿을 가지는 4번 분사기를 설계하였다. 또한 슬릿 각은 기존 45°에서 60°로 가파르게 세운 5번 분사기를 설계하였다.

2.2 기울어진 슬릿의 ΔSR

Skip ratio는 skip distance(L_s)와 핀틀 포스트 직경(D_p)의 비(L_s/D_p)로 정의한다. Fig. 3과 같이 환형제트가 핀틀 포스트를 따라 흐르다가 슬릿

에서 분사된 포스트제트와 최초로 충돌하기 전까지의 거리를 skip distance(L_s)라고 한다. 사각 슬릿과 다르게 기울어진 슬릿 형태에서는 skip distance가 L_s 부터 L_s' 까지 변화하게 되어 해당 변수에 대한 정의가 필요하다.

기울어진 길이로 인한 끝단의 skip ratio (L_s'/D_p)과 첫 단의 skip ratio의 차이를 ΔSR 로 기울어진 슬릿 형태에 한하여 새롭게 정의하였다.

Skip ratio가 커져 skip distance가 길어질 경우, 마찰에 의해 환형제트가 감속되어 해당 추진제의 운동량이 줄어들게 되며, 반대로 skip distance가 짧아지게 되면 화염면이 헤드면과 가깝게 형성된다. 참고문헌에서 제공하는 skip ratio의 추천치는 1이다[9,10].

본 연구에서는 분사기 헤드면과 핀틀 선단(tip)의 열적 손상을 방지하고, L_s 가 D_p 와 일치하도록 skip ratio를 1로 선정하였다.

2.3 수류 시험

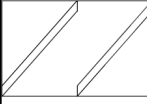
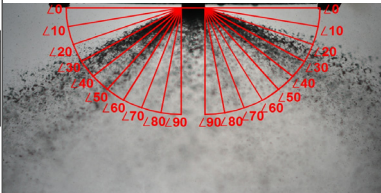
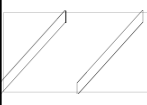
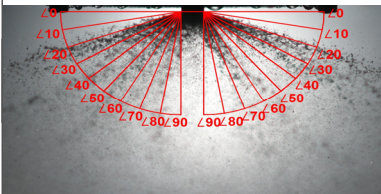
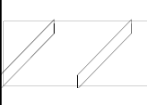
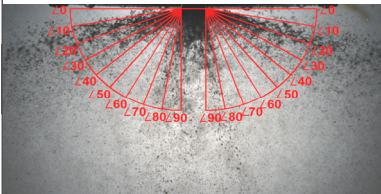

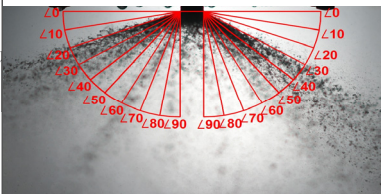

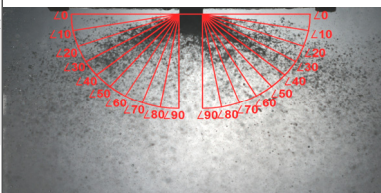
제작된 분사기의 차압에 따른 유량 공급 특성과 분사형태를 파악하기 위해 수류시험을 진행하였다. 질소 가스로 추진제 탱크를 가압하였으며, 안전을 위해 모의 추진제로 물을 사용하였다. 측정된 모의 추진제의 유량을 실제 추진제별 밀도 환산을 통해 실제 추진제가 공급되었을 경우의 유량을 계산하였다.

Table 3에 각 분사기의 분사패턴을 나타내었다. 기본 형태인 1번 분사기는 TMR과 분사각의 관계에 의해, 분사각 90°로 예측하였으나 130°로 측정되었으며, 슬릿 개수가 18개로 늘어난 4번 분사기는 12개인 1번 분사기와 같이 분사각이 130°로 분사 형태에서는 슬릿 개수에 따른 차이를 보이지 않았다. 슬릿 각도가 60°로 가파르게 세워진 5번 분사기는 추진제 충돌에 의한 분사 경계면의 형태가 또렷하지 못하여 분사각을 정의하기 힘든 것을 알 수 있다. 해당 현상의 원인으로 5번 분사기의 skip ratio와 skip ratio'의 차이(ΔSR)가 커져, skip ratio' 부근에서 환형제트의 운동량이 감소하여 단위슬릿 내에서 추진제 혼합이 불균일하여 혼합효율이 감소했기 때문으로 판단된다.

Injector 1~3으로 BF가 감소할수록 분사각이 약 130°에서 140°, 160°로 증가하며 3번 분사기에서는 환형제트가 포스트제트와 직접 충돌하지 않고 아래로 흘러내려가는 drizzling 현상이 분명하게 관찰되었다.

이는 단위슬릿의 충돌부분에서 슬릿 개수가 같고, 슬릿의 총 면적이 동일하며 너비가 줄어들었기 때문에 충돌지점의 포스트제트의 운동량이 증가하였기 때문이다.

Table 3. Spray pattern of various injectors.

Post shape	Spray pattern
 <p data-bbox="762 891 871 923">Injector 1</p>	
 <p data-bbox="762 1103 871 1134">Injector 2</p>	
 <p data-bbox="762 1311 871 1342">Injector 3</p>	
 <p data-bbox="762 1522 871 1554">Injector 4</p>	
 <p data-bbox="762 1762 871 1793">Injector 5</p>	

반면 환형제트는 줄어든 단위슬릿의 너비만큼, drizzling이 발생하여 충돌부분의 운동량이 감소하게 된다. 따라서 TMR이 충돌부분에서 증가하여 분사각이 증가하는 경향을 보인다. 이와 같이 설계 TMR=1에서도 형상 설계 변수에 따라 분사각이 영향을 받은 것을 확인하였다.

2.4 연소 시험

수류시험을 통해 획득한 설계유량의 압력을 바탕으로 Fig. 4와 같이 실추진제를 이용하여 연소시험을 수행하고 대표적인 실험데이터를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5와 같이 모든 연소시험에서 설계점과 거의 일치하게 추진제가 공급되어 일정한 연소압력을 형성하였음을 확인하였다.

슬릿 형상 설계 변수인 슬릿 개수와 슬릿 각에 의한 영향을 Fig. 6과 7에 나타내었다. 슬릿의 총 면적을 유지하고 슬릿 개수를 12개에서 18개로 50% 증가시켰을 때 모두 특성속도효율이

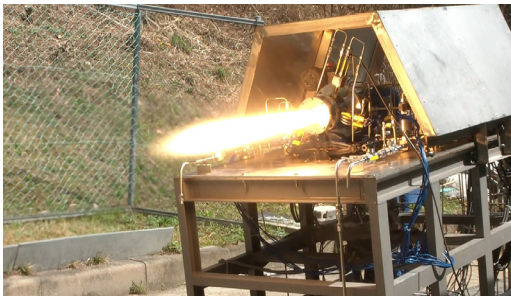


Fig. 4 Combustion test.

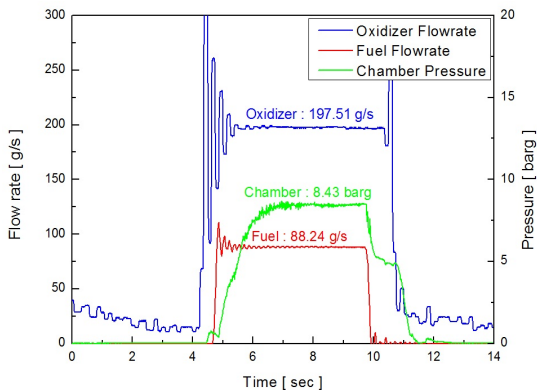


Fig. 5 Combustion test results.

약 93.7%로 거의 차이가 없음을 확인하였다.

반면에 동일한 조건에서 슬릿 각이 45°에서 60°로 가파르게 세워진 5번 분사기는 Fig. 7과 같이 특성속도효율이 약 90%로 1번 분사기에 비해 약 3.8% 하락하였다. 이는 Table 3의 수류시험 결과, 5번 분사기의 분사패턴이 고르지 못한 것처럼 추진제 혼합효율이 감소하였기 때문으로 판단하였다.

슬릿 개수와 슬릿 각에 의한 각각의 성능 효과 외에도, Fig. 8과 같이 skip ratio는 슬릿의 기울어짐에 의해 각 추진제가 처음으로 만나는 부분과 마지막으로 만나는 부분에서 차이가 발생한다. 따라서 Fig. 9에서는 두 형상 변수에 의해

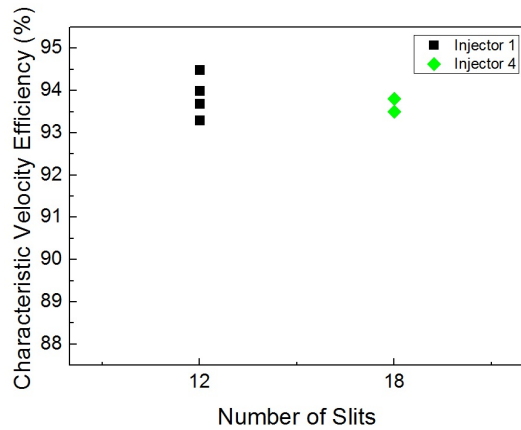


Fig. 6 Number of slits Vs η_{C^*} .

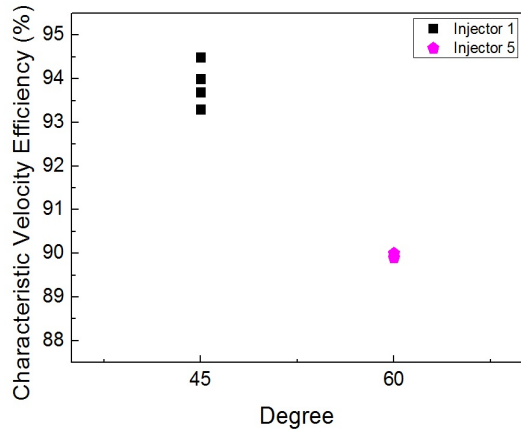


Fig. 7 Degree Vs η_{C^*} .

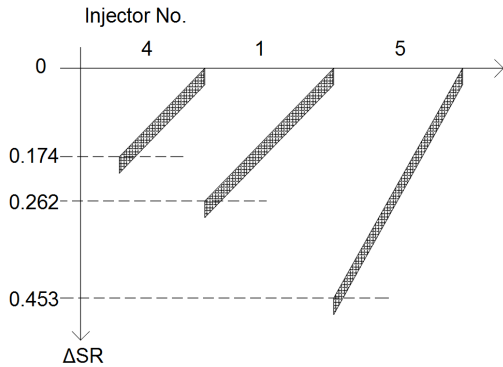


Fig. 8 Difference of skip ratio by the shape of injectors (1).

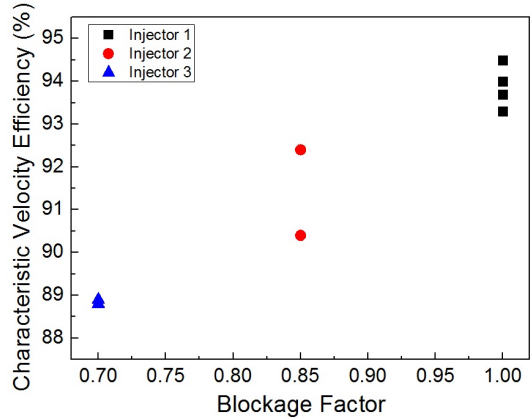


Fig. 10 Blockage Factor Vs η_c .

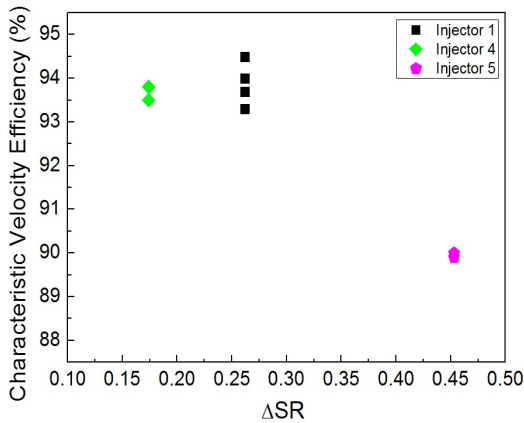


Fig. 9 ΔSR vs. η_c .

ΔSR 이라는 새로운 변수에 따른 연소성능 변화를 살펴보았다.

Fig. 9와 같이 ΔSR 이 일정 범위를 넘어서면 특성속도효율이 감소함을 알 수 있다. 이는 환형 제트가 핀틀 포스트 벽면의 마찰에 의해 유속이 감소(TMR의 분포 향 감소)하여 아랫부분에서 국부적으로 중심추진제의 힘이 우세(TMR 값의 증가)해져 TMR의 불균형 현상이 발생한 것 때문이라 판단된다[7].

슬릿의 총 면적과 슬릿 개수 및 각도가 동일할 때, BF가 0.7에서 1.0까지 증가할 때의 특성속도효율을 Fig. 10에 나타내었다. BF가 0.15 증가할 때마다 특성속도효율이 약 2.5%씩 증가하는 경향을 보인다. 슬릿의 총 면적을 유지하고

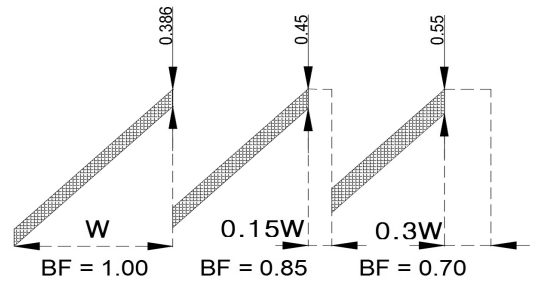


Fig. 11 Propellant impinging regions by BF.

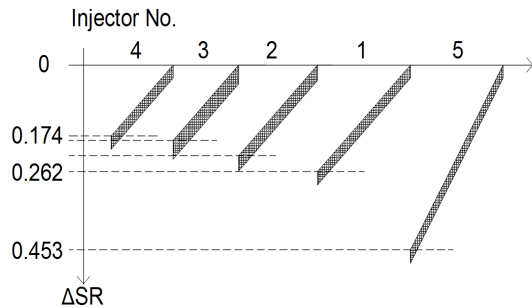


Fig. 12 Difference of skip ratio by the shape of injectors (2).

BF를 조정하자, Fig. 11과 같이 BF가 낮아질수록 drizzling이 발생하는 미 충돌 영역과 슬릿의 두께가 증가하였다. 또한 Fig. 12와 같이 BF에 따라 ΔSR 도 변화하였다.

하지만 연소시험 결과, 특성속도효율의 증가는 BF가 높아짐에 따라 미 충돌 영역이 감소하여,

추진제의 혼합효율이 증가하는 현상이 연소성능에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 그러므로 BF에 영향을 받아 변화한 슬릿의 두께는 소형엔진임을 감안하면 0.368~0.55 mm의 두께 변화에서는 연소성능에 미치는 영향이 미미하며, ΔSR 은 Fig. 8, 9 그리고 12를 토대로 2,3 번 분사기는 연소성능에 영향을 미치지 않는 영역에 위치함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 케로신/액체산소를 추진제로 사용하는 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기 액체로켓엔진의 슬릿 형상 설계 변수에 따른 연소시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 슬릿 개수가 12개에서 18개로 증가하였으나 연소성능에는 영향이 없었다.
- (2) 슬릿 각이 45°에서 60°로 변화하자 특성속도 효율이 약 3.8% 하락하였다.
- (3) BF가 0.7에서 1.0으로 0.15씩 증가함에 따라 특성속도효율이 2.5%씩 상승하였다.
- (4) 앞서 선정된 형상 설계 변수에 의해 ΔSR 이 변화하여 연소성능에 영향을 미쳤으며 $\Delta SR = 0.26$ 이내에서는 연소성능에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
- (5) 따라서 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀 분사기의 슬릿 형상 설계 시, BF를 1에 가깝게 하고, 슬릿 형상에 의한 ΔSR 을 0.26 이내로 선정하면 최대의 연소성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 우주핵심기술개발사업으로 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (No. NRF-2016M1A3A3A02017562)

References

1. Dressler, G.A., "Summary of Deep Throttling Rocket Engines - A Historical Perspective," *42nd AIAA Joint Propulsion Conference*, Sacramento, C.A., U.S.A., AIAA 2006-5220, Jul. 2006.
2. Calvignac, J., "Design and Testing of a Non-Toxic 870-LBf Engine," *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Las Vegas, N.V., U.S.A., AIAA 2000-3851, Jul. 2000.
3. Dressler, G.A. and Bauer J.M., "TRW Pintle Engine Heritage and Performance Characteristics," *36th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsville, A.L., U.S.A., AIAA 2000-3871, Jul. 2000.
4. Yu, K.J., Son, M., Kim, D.H., Lee, K.W., Shin, B.C., Song, W.S. and Koo, J.Y., "Sprayed Pattern by a Opening Distance from Pintle Injector," *2015 KSPE Spring Conference*, Jeju, Korea, May. 2015.
5. Kim, H.M., Lee, H.S., Park, P.M. and Yang, S.S., "Spray Characteristic of Liquid-Liquid Pintle Injectors," *2014 KSPE Fall conference*, Jeongseon, Korea, Dec. 2014.
6. Kim, S.H., Kim, W.C., Kim, T.W., Ko, Y.S., Kim, S.J. and Kim H.M., "Analysis on Combustion Phenomena by Spray Pattern of Canted Slit Type Pintle Injector," *2016 KSPE Spring Conference*, Jeju, Korea, May. 2016.
7. Lee, J.H., Yu, I.S., Lee, S.M., Ko, Y.S., Kim, S.J. and Kim, H.M., "Combustion Performance of the Pintle Injector Rocket Engine with Canted Slit Shape by Total Momentum Ratio," *2015 KSPE Fall Conference*, Gyeongju, Korea, Nov. 2015.
8. Lee, J.H., Kim, W.C., Kim, M.S., Kim, S.H., Ko, Y.S. and Kim, H.M., "Combustion Performance of the Pintle Injector Rocket

- Engine with Canted Slit Shape by Characteristic Length," *2015 KSPE Fall Conference*, Gyeong-ju, Korea, Nov. 2015.
9. Daric, W.E., "Design and Preliminary Hot Fire and Cold Flow Testing of Pintle Injectors," Thesis of Master Degree, The Graduate School of the Pennsylvania State University, Dec. 1996.
10. Nasser, A., *Handbook of Atomization and Sprays*, Springer, Toronto, Canada, 2011.