



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(3), 165-172(2022)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.3.165

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다중 홀 핀틀 인젝터와 연속형 핀틀 인젝터의 연소성능 비교

남정수¹, 이건웅², 구자예³

Comparison of Combustion Efficiency of Multi Hole Pintle Injector and Continuous Pintle Injector

JeongSoo Nam¹, KeonWoong Lee² and JaYe Koo³

Graduate school, Goyang, Korea Aerospace University¹

Department of Smart Air Mobility, Goyang, Korea Aerospace University²

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Goyang, Korea Aerospace University³

ABSTRACT

Pintle injector is the most suitable injector for thrust control because it can control the area of propellant injection. Accordingly, the combustion test of multiple hole pintle injector and continuous type pintle injector was carried out in this paper using liquid oxygen and gas methane. The combustion performance of the two pintles was verified with the characteristic speed efficiency, and the experimental results were compared according to the O/F and combustion chamber pressure and under similar conditions. The efficiency of the multi hole pintle was generally somewhat higher than continuous pintle when pintle opening distance(the area of dispensing oxidizer) was in a 100% thrust condition.

초 록

핀틀 인젝터는 추진제 분사면적 조절이 가능하기 때문에 추력제어에 가장 적합한 인젝터이다. 그에 따라 본 논문에서는 액체산소와 기체메탄을 사용하여 다중 홀 핀틀 인젝터와 연속형 핀틀 인젝터의 연소시험을 수행하였다. 특성속도효율로 두 핀틀의 연소성능을 확인하였고, O/F와 연소실 압력에 따라 두 파라미터가 유사한 조건에서 실험결과를 비교하였다. 개도(산화제 분사면적)가 100% 추력조건일 때 다중 홀 핀틀의 효율이 연속형 핀틀보다 다소 높은 결과를 나타내었다.

Key Words : Movable Pintle Injector(가변 핀틀 인젝터), Multi Hole Pintle(다중 홀 핀틀), Continuous Pintle(연속형 핀틀), O/F Ratio(O/F비), Characteristic Speed Efficiency(특성속도효율), Combustion Chamber Pressure(연소실 압력)

1. 서 론

재사용 발사체와 달탐사에 대한 관심이 증가하면서 추력제어 기술개발의 중요성 또한 증가하고 있다. 그에 따라 추력제어가 용이한 핀틀 인젝터 연구가 활발히 진행되고 있다.

핀틀 인젝터의 특징은 다음과 같다. 먼저 동축 전단 인젝터나 동축 스윙 인젝터와는 달리 추진제 분사면적 조절이 가능하다. 따라서 연소효율이 떨어지는 저추력 조건에서 분사면적을 감소시킴으로써 분사되는 추진제의 운동량을 높여 연소효율을 증가시킬 수 있다. 이러한 작동원리로 모든 추력제어 범위

† Received : July 28, 2020 Revised : November 6, 2021 Accepted : November 22, 2021

¹ Graduate Student, ² Postdoc Researcher, ³ Professor

³ Corresponding author, E-mail : jykoo@kau.ac.kr

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

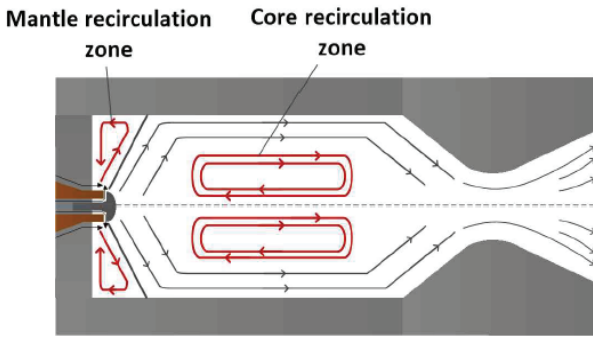


Fig. 1. Recirculation zone of pintle injector

에서 높은 연소성을 유지할 수 있다. 두 번째로 하나의 인젝터로도 충분한 추력발생이 가능하기 때문에 로켓 엔진의 경량화가 가능하며 제작비용이 감소하게 된다. 세 번째로 Fig. 1과 같이 연소실 상단과 중앙에 재순환 영역이 발생하는데 상단 재순환 영역(mantle recirculation zone)에서는 분열된 액적들이 연소실 벽에 닿으면서 증발하여 냉각역할을 하게 된다. 또한 중앙 재순환 영역(core recirculation zone)에서는 미연의 액적들이 재순환으로 혼합이 이루어져 연소효율이 증가하고 불안정이 감소하게 된다[1].

국내에서 핀틀 오리피스 형태에 따른 분무 및 연소시험이 수행되었다. 충남대학교에서는 1열/2열의 간격, 면적 비, 가로 세로 비를 고려한 사각슬릿 핀틀과 슬릿개수, 슬릿 각, 차단울을 고려한 기울어진 슬릿을 가지는 핀틀의 연구가 진행되었다[2,3]. 한국항공대학교에서는 핀틀 파트가 상하로 움직이는 가변 핀틀 인젝터의 설계절차를 연구하였고, 핀틀 오리피스가 홀 형태, 연속 형태인 핀틀 인젝터의 분무특성연구가 수행되었다[4,5].

핀틀 인젝터의 적용 예는 다음과 같다. Space-X의 Merlin 엔진을 사용한 Falcon Heavy 1단 발사체의 성공적인 회수가 2015년도에 23번 이루어졌다. 따라서 핀틀 인젝터가 추력제어에 적합하며 신뢰성이 입증되었다고 볼 수 있다[6]. TRW사에서는 Apollo 프로그램에 사용된 달 착륙선(Lunar Module Descent Engine; LMDE)이 개발되었으며 가변 핀틀 인젝터가 사용되었다. 추력 제어비를 10:1로 하여 최고 추력에서 추력제동단계를 거쳐 서서히 착륙시키는 과정이 성공적으로 이루어졌다[7]. The University of Texas에서는 수직 이착륙선인 JANUS를 개발하고 있다. CROME-X 엔진이 연구되고 있으며, 2열 홀 핀틀 인젝터가 사용된다[8].

본 연구에서는 다중 홀 핀틀과 연속형 핀틀의 선행된 분무실험을 토대로 액체산소와 기체메탄을 사용한 연소시험을 수행하였다. 핀틀 개도와 추진제 공급압력에 따라 조건을 설정하여 실험이 진행되었고, 두 핀틀의 연소시험 결과를 비교해보았다.

II. 본 론

2.1 실험장치 및 실험방법

2.1.1 500N급 소형엔진

액체산소와 기체메탄을 사용하는 500N급 가변 핀틀 인젝터 소형 추력기 연구가 목표이며, 설계 추력 제어 비는 4:1, 핀틀 형상은 다중 홀과 연속형으로 나누어 연구를 진행하였다. 핀틀 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

2.1.2 가변 핀틀 인젝터

연소시험에 사용된 가변 핀틀 인젝터의 형상은 Fig. 2와 같다. 액체 주입부(liquid injection part)내부로 액체산소가 공급되어 핀틀팁에서 반경방향으로 분사되며, 기체 주입부(gas injection part)내부로 메탄이 공급되어 환형갭(annular gap)에서 수직방향으로 분사가 이루어진다. 마이크로미터를 사용하여 핀틀로드와 결합된 핀틀팁을 위아래로 움직여 개도(L_{op})를 조절하게 된다. 개도는 핀틀이 상하로 움직여 개방된 핀틀 오리피스의 수직거리를 의미한다.

Table 1. Specifications of a 500N engine

Vacuum thrust (N)	500
O/F	3.8
Chamber pressure (bar)	20
Total propellant mass flow rate (g/s)	177.3
LOx mass flow rate (g/s)	137.9
GCH4 mass flow rate (g/s)	39.4
Throttling ratio	4 : 1

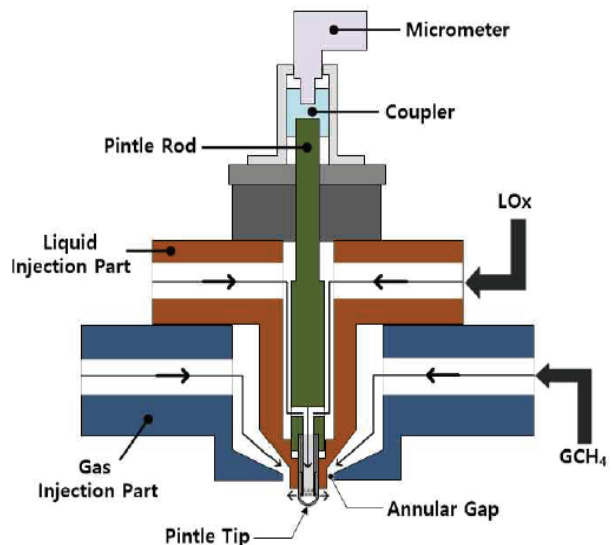
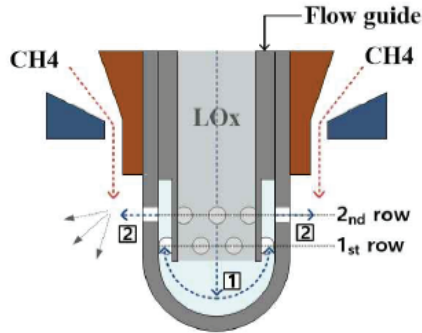
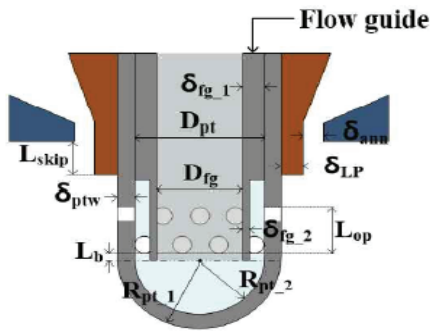


Fig. 2. Geometry of movable pintle injector

다중 홀 핀틀의 개략도는 Fig. 3과 같고, 연속형 핀틀은 Fig. 4와 같다. 다중 홀 핀틀은 한 열에 8개씩 2열 홀 핀틀을 사용하였다. 또한 Fig. 3(a)에서처럼 핀틀 내부에 유동 가이드(flow guide)를 추가하여 액체산소가 핀틀팁 밑바닥까지 도달한 후(①) 흘

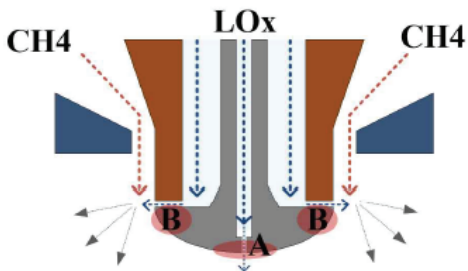


(a) Multi hole type pintle flow direction

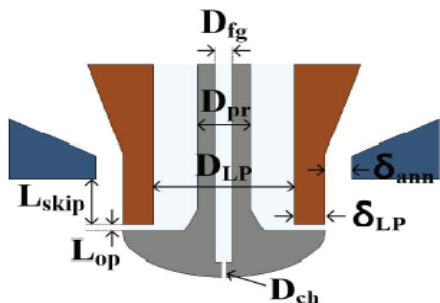


(b) Multi hole type pintle tip

Fig. 3. Schematic of multi hole type pintle tip



(a) Multi hole type pintle flow direction



(b) Multi hole type pintle tip

Fig. 4. Schematic of continuous type pintle tip

Table 2. Specifications of pintle tip

Multi hole type pintle tip		Continuous type pintle tip	
L_b	0.4 mm	D_{fg}	2 mm
δ_{ptw}	1 mm	D_{pr}	5 mm
R_{pt1}	4 mm	D_{LP}	8 mm
R_{pt2}	3 mm	D_{ch}	0.2 mm
D_{fg}	3.5 mm	δ_{LP}	2.25 mm
δ_{fg1}	1.25 mm	δ_{ann}	0.5 mm
δ_{fg2}	0.5 mm	L_{skip}	3 mm
D_{pt}	6 mm		
δ_{LP}	2.25 mm		
δ_{ann}	0.5 mm		
L_{skip}	3 mm		

에서 분사(②)되도록 하여 고온 환경에서 파손을 방지한다. 이와 마찬가지로 연속형 핀틀 내부에도 유동 가이드를 가공하였다. Fig. 4(a)처럼 액체산소 일부가 유동 가이드 내부로 공급되어 핀틀팁 밑바닥 A지점을 냉각하고, 반경방향으로 분사되는 액체산소가 B지점을 냉각하여 파손을 방지한다. 연소온도로 인해 냉각유로 내에 기화된 산소가 배출될 수 있도록 직경 0.2mm의 냉각홀(D_{ch})을 가공하였다. 다중 홀 핀틀팁의 제원은 Table 2 좌측과 같으며, 연속형 핀틀팁의 제원은 Table 2 우측과 같다.

2.1.3 연소실 및 노즐

연소시험에 사용된 연소실과 노즐의 형상은 Fig. 5와 같고 제원은 Table 3과 같다. 고온에 의한 노즐의 변형을 최소화하기 위해 열전도성이 우수한 구리를 사용하여 덤프냉각(dump cooling) 방식을 적용하였다. 콘형 노즐에서 노즐의 수축각도, 팽창각도, 팽창부 길이 등을 최적설계 식을 참고하였다[9].

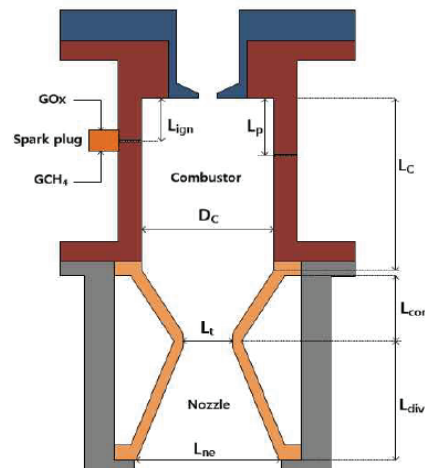


Fig. 5. Schematic of chamber and nozzle

Table 3. Specifications of combustion chamber and nozzle

연소실 길이(mm)	Lc	84
연소실 직경(mm)	Dc	68
노즐 수축부 길이(mm)	L _{con}	41.9
노즐 팽창부 길이(mm)	L _{div}	70
노즐목 직경(mm)	L _t	13.3
노즐 출구 직경(mm)	L _{ne}	55
노즐 팽창비	ε	17.1
점화기 위치(mm)	L _{ign}	19
압력 측정 위치(mm)	L _p	29
특성길이(m)	L*	2.2

유량이 예상보다 과다하여 오리피스 직경을 4mm에서 3.5mm로 축소하였고, 반대로 액체산소는 유량이 적어 2mm에서 3.5mm로 수정하여 사용하였다.

터빈 유량계로 액체산소의 유량을 측정하였으며, 메탄은 측정압력과 연소실 압력의 차압 그리고 환형 갭 면적을 적용한 유량계수 식으로 유량을 계산하였다. 산소탱크 내부와 배관 내부온도를 측정하여 기체가 아닌 액체 상태로 공급이 되는지 확인하였다. 기체산소를 사용하여 액체산소를 가압하였으며, 연소 후 질소가스로 퍼지를 수행하였다. Fig. 7은 실제 추진제를 이용한 연소시험 이미지이다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{\gamma \rho_1 P_1 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (1)$$

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (2)$$

2.1.4 연소시험장치

연소시험장치 배관연결 개략도는 Fig. 6과 같다. 주 연료로 액체산소와 기체메탄을 사용하였으며 토치 점화기 연료는 기체산소와 기체메탄을 사용하였다. 본 실험에서처럼 토치 점화기 연료배관에 직경 2mm 오리피스를 사용하고 산소공급압력 10bar, 메탄공급압력 8bar로 하였을 때 연소실 내벽에 손상 없이 점화기의 연소가 가장 원활히 이루어졌다. 주 연료 메탄의 오리피스는 초킹 조건에서의 orifice plate 질량 유량을 나타내는 Eq. 1을 적용하였고, 액체산소의 오리피스는 Eq. 2를 적용하였다. 테스트 결과 메탄은



Fig. 7. Combustion test image

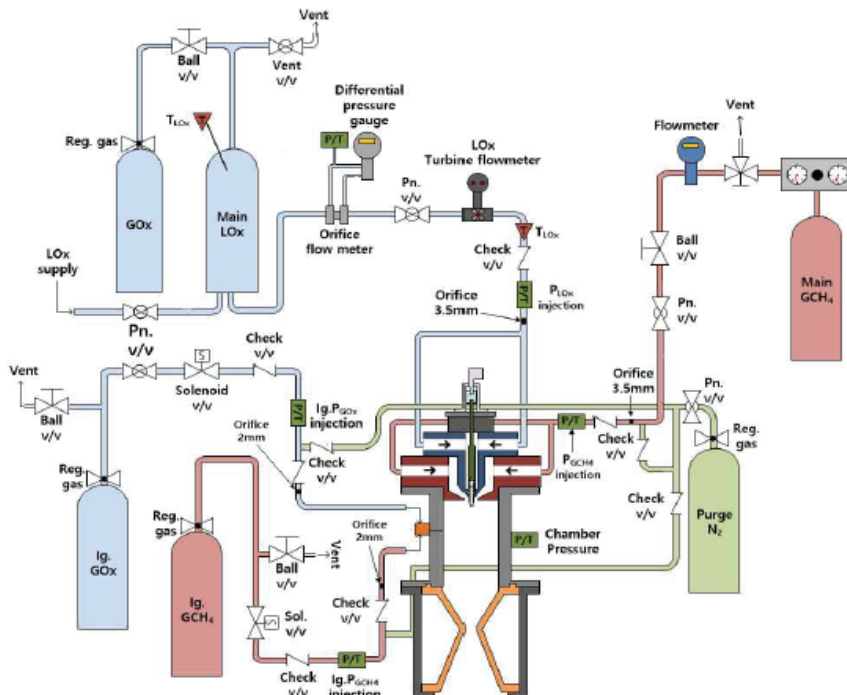


Fig. 6. Schematic of overall piping connections used in combustion test

2.1.5 연소시험방법 및 실험데이터

연소시험 순서는 다음과 같다. 배관 내 기화된 산소를 배출시키기 위해 점화기 연료와 함께 액체산소를 0.5초간 먼저 분사하게 된다. 이후 스파크 플러그를 작동시켜 점화기를 점화시킨 후 메인메탄을 분사하여 총 1초간 연소가 이루어지게 된다. 연소종료 후 4초간 점화기 연료배관과 메인메탄배관 그리고 연소실 내부를 질소로 퍼지하게 된다. 개도는 고정된 상태에서 추진제 레귤레이터를 사용하여 O/F와 연소실 압력을 조절하였다. 전체 시퀀스 개략도는 Fig. 8 과 같다.

Figure 9는 메탄, 액체산소의 공급압력과 연소실 내 압력 데이터이다. 괄호 안의 숫자는 좌측이 시간, 우측은 압력을 나타낸다. 측정데이터는 연소실 압력이 일정한 구간(주황색 사각형 내부에 있는 데이터)을 평균하였다.

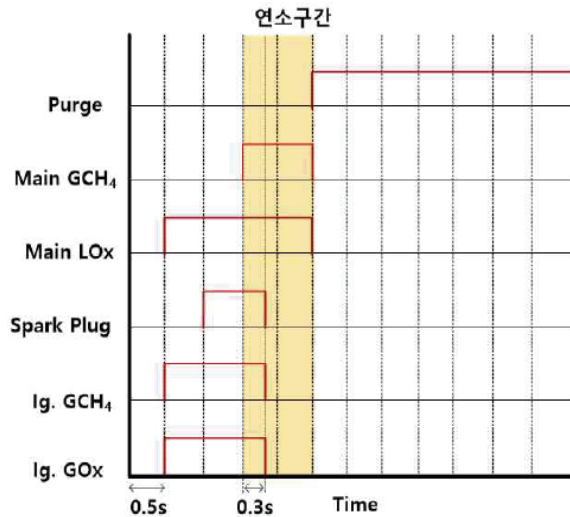


Fig. 8. Schematic of combustion sequence

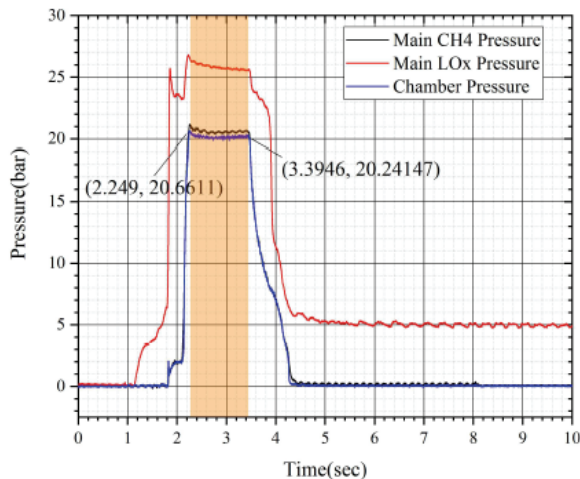


Fig. 9. Schematic of pressure data

2.2 다중 홀 핀틀의 연소시험결과

개도 1.6mm일 때 연소

개도 1.6mm는 모든 홀을 개방한 상태이며, 100% 추력조건에 해당된다. 먼저 O/F에 따른 특성속도와 특성속도효율 결과는 Fig. 10과 같다. 그림에서 사각형은 실험으로 도출한 특성속도이고 원형은 CEA로 계산한 이론적인 특성속도, 삼각형은 특성속도효율을 나타낸다. 특성속도효율은 Eq. 3과 같이 실험값과 이론값(CEA)의 비로 계산하였다. 노즐 목의 경우 연소 후 변형이 있을 수 있으므로 각 시험마다 노즐목 직경을 측정하여 효율을 계산하였다. Fig. 10을 통해 알 수 있듯이 O/F가 5~6 사이일 때 특성속도효율이 가장 높은 결과를 나타낸다. 다중 홀 핀틀은 동일 추진제를 사용한 연속형 핀틀 연구에서 O/F가 3.1~3.8 일 때 99% 이상의 효율을 나타낸 것과는 다른 결과를 보였다[10].

연소실 압력(P_c)에 따른 특성속도와 특성속도효율 결과는 Fig. 11과 같다. 그림과 같이 연소실 압력이 증가하면서 효율 또한 증가하게 됨을 알 수 있다. Table 4를 통해 연소실 압력은 서로 유사하지만 O/F가 다른 #1과 #2 그리고 #3과 #4 결과를 보면 특성속도효율이 약 8~10% 정도 차이가 발생하게 된다. 즉 O/F가 연소효율에 주요한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 결과적으로 실험을 통해 다중 홀 핀틀의 높은 효율을 발생시키는 O/F를 확인할 수 있었으며, 설계된 최대 연소실 압력인 20bar 부근에서 높은 효율을 나타내게 된다.

$$\eta_{C^*} = \frac{C^*_{\text{exp}}}{C^*_{\text{CEA}}} \times 100(\%) \quad (3)$$

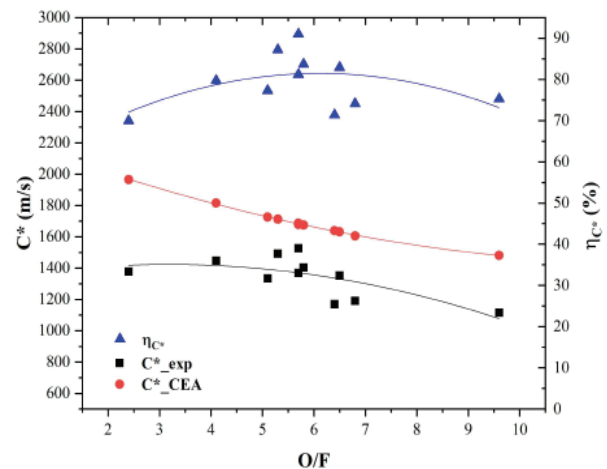


Fig. 10. The characteristic speed and characteristic speed efficiency according to the O/F at 1.6mm pintle opening distance of multi hole pintle

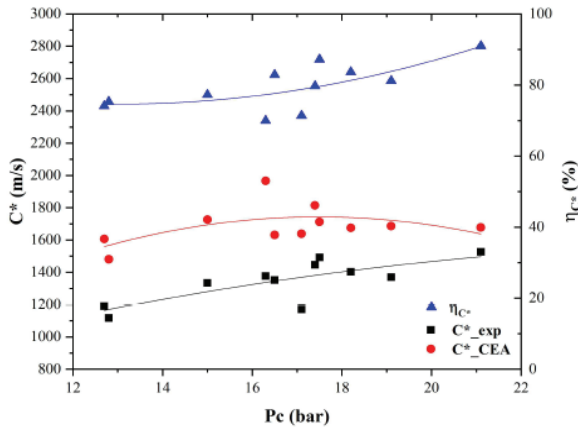


Fig. 11. The characteristic speed and characteristic speed efficiency according to the combustion chamber pressure at 1.6mm pintle opening distance of multi hole pintle

Table 4. Experimental results data at pintle opening distance 1.6mm of multi hole pintle

구분	O/F	연소실 압력 (bar)	η_{C^*} (%)
#1	4.1	17.4	79.7
#2	5.3	17.5	87.2
#3	2.4	16.3	70
#4	6.5	16.5	82.9

2.3 연속형 핀틀의 연소시험결과

개도 0.22mm일 때 연소

연속형 핀틀의 개도 조건은 다중 홀 핀틀의 개도 조건과 분사면적이 동일한 개도 0.22mm이며, 100% 추력조건에 해당된다. O/F에 따른 특성속도와 특성속도효율 결과는 Fig. 12와 같다. 그림을 통해 알 수 있듯이 O/F가 3.5와 5 사이에서 76.5~94.6%의 효율 분포를 나타내며, O/F가 3.9일 때 가장 높은 효율 (94.6%)을 나타내었다.

연소실 압력에 따른 특성속도와 특성속도효율 결과는 Fig. 13과 같다. 그림과 같이 연소실 압력이 증가하면서 효율 또한 증가하게 됨을 알 수 있다. Table 5에서 O/F가 4.6~4.8로 유사한 #1, #2, #3조건에서 연소실 압력이 증가함에 따라 효율 또한 증가하게 된다는 사실을 확인할 수 있다. #4와 #5에서 O/F가 3.9로 동일하지만 연소실 압력이 2배 가까이 차이가 나는 조건에서 효율은 약 20%차이가 나게 되는데 이를 통해 효율은 연소실 압력에 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 하지만 O/F가 5.6으로 동일한 #6과 #7에서 연소실 압력이 6.5bar 정도 차이가 나지만 효율은 거의 유사한 것으로 보아 특정 O/F가 되면 연소실 압력과 특성속도효율 간의 비례 관계가 성립하지 않게 됨을 알 수 있다.

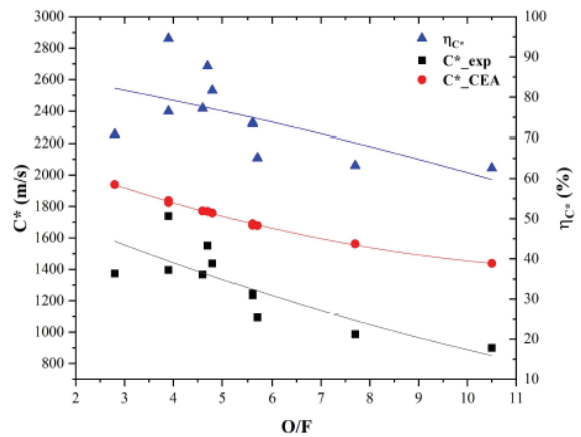


Fig. 12. The characteristic speed and characteristic speed efficiency according to the O/F at 0.22mm pintle opening distance of continuous pintle

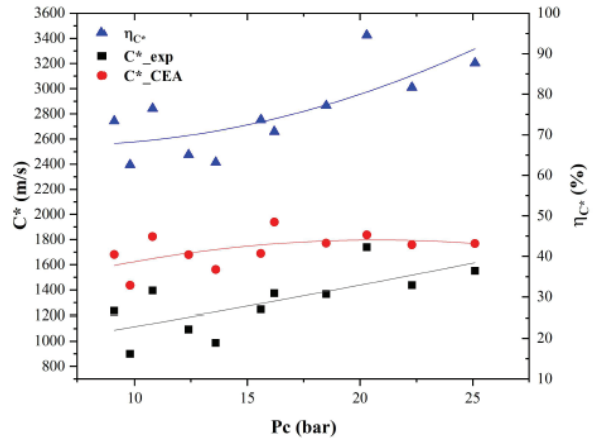


Fig. 13. The characteristic speed and characteristic speed efficiency according to the combustion chamber pressure at 0.22mm pintle opening distance of continuous pintle

Table 5. Experimental results data at pintle opening distance 0.22mm of continuous pintle

구분	O/F	연소실 압력 (bar)	η_{C^*} (%)
#1	4.6	18.5	77.2
#2	4.8	22.3	81.7
#3	4.7	25.1	87.7
#4	3.9	20.3	94.6
#5	3.9	10.8	76.5
#6	5.6	15.6	73.7
#7	5.6	9.1	73.4

2.4 연소시험 결과비교

2.4.1 O/F와 연소실 압력에 따른 특성속도효율 비교

먼저 O/F에 따른 특성속도와 특성속도효율 비교 그래프는 Fig. 14와 같다. 그래프에서 사각형은 다중 홀 핀틀의 개도 1.6mm 조건을 나타내며 비어있는 사각형은 특성속도효율을, 채워져 있는 사각형은 특성속도를 의미한다. 삼각형은 연속형 핀틀의 개도 0.22mm 조건을 나타내며 비어있는 삼각형은 특성속도효율을, 채워져 있는 삼각형은 특성속도를 나타낸다. 그림을 통하여 다중 홀 핀틀과 연속형 핀틀이 고 효율일 때의 O/F 범위가 서로 다르다는 사실을 알 수 있다. 또한 연속형 핀틀의 결과가 보다 선형적인 경향성을 나타낸다. 즉 연속형 핀틀은 실험결과 내에서 O/F가 비교적 작은 조건일 때 효율이 높으며, 다중 홀 핀틀은 O/F가 5~6 이의 조건에서는 비교적 효율이 낮음을 의미한다.

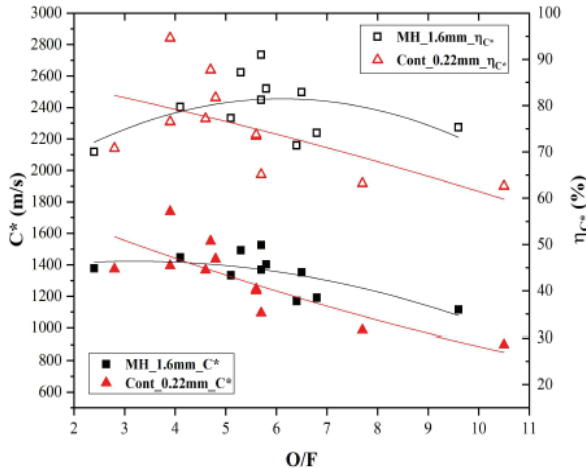


Fig. 14. The characteristic speed and characteristic speed efficiency according to O/F

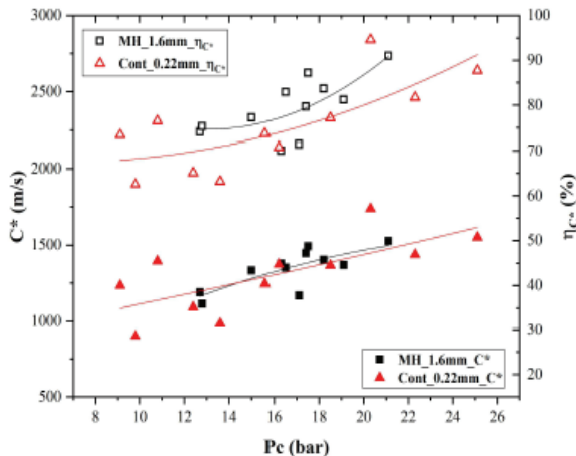


Fig. 15. The characteristic speed and characteristic speed efficiency according to combustion chamber pressure

연소실 압력에 따른 특성속도와 특성속도효율 비교 그래프는 Fig. 15와 같다. 그림을 통해 알 수 있듯이 연소실 압력이 12~19bar 범위에서는 다중 홀 핀틀의 효율이 약 4~5% 정도 더 높았으며, 연소실 압력이 20~21bar 범위에서는 연속형 핀틀의 효율(94.6%)이 다중 홀 핀틀의 효율(91%)보다 큰 결과를 나타내었다.

최고특성속도효율에서의 차이는 재현성의 부족으로 추가실험이 필요해 보이며, 대체로 다중 홀 핀틀의 효율이 더 높은 것으로 보아 추진제의 분열과 혼합이 더 원활한 형태는 다중 홀 핀틀임을 알 수 있다.

2.4.2 유사조건에서 특성속도효율 비교

O/F와 연소실 압력이 모두 유사한 조건일 때 특성속도효율은 Table 6과 같다. MH는 다중 홀 핀틀을 의미하고, C는 연속형 핀틀을 의미한다.

먼저 케이스 #1에서는 다중 홀 핀틀의 효율이 3.6% 정도 더 크며, #2에서는 연속형 핀틀이 0.8%, #3에서는 다중 홀 핀틀이 2.5% 더 큰 결과를 나타낸다. 결과적으로 O/F와 연소실 압력이 모두 유사할 때 대체로 다중 홀 핀틀이 연속형 핀틀보다 더 효율적이다. 하지만 효율 측면에서 큰 차이는 아니기 때문에 핀틀 인젝터에서 핀틀 형태 선정 시 반드시 다중 홀 형태를 선택할 필요는 없다고 사료된다.

III. 결 론

다중 홀 핀틀과 연속형 핀틀의 연소성능을 O/F와 연소실 압력, 그리고 앞의 두 조건이 유사할 때를 비교해보았다. 먼저 O/F에 따른 특성속도효율에서 고 효율일 때 O/F가 다중 홀 핀틀은 5~6, 연속형 핀틀은 3.5~5로 서로 다른 결과를 나타내었다. 연소실 압력에 따른 결과는 다중 홀 핀틀이 연속형 핀틀보다 효율이 약 4~5% 정도 높은 결과를 나타낸다. 또한

Table 6. Experimental results data at pintle opening distance 0.22

핀틀	O/F	연소실 압력 (bar)	η_{C^*} (%)
#1			
MH	5.1	15	77.3
C	5.6	15.6	73.7
#2			
MH	2.4	16.3	70
C	2.8	16.2	70.8
#3			
MH	4.1	17.4	79.7
C	4.6	18.5	77.2

O/F와 연소실 압력 모두 유사한 조건에서 다중 홀 핀틀의 효율이 약 2.5~3.6% 정도 높거나 연속형 핀틀이 약 0.8% 높은 결과를 나타내고 있다. 효율에서 이 정도의 차이는 압력센서나 유량계와 같은 장비의 측정오차로 볼 수 있으며, 측정오차를 제하고 본다면 다중 홀 핀틀이 추진제의 분열과 혼합 측면에서 더 효과적임을 알 수 있다. 하지만 큰 차이는 아니기 때문에 효율만으로 어떤 핀틀 형태를 사용하는 것이 유리하다고 단정 지을 수는 없다. 다만 다중 홀 핀틀은 핀틀 팁 냉각을 위해 팁 내부에 유동 가이드가 추가되어야 하므로 설계와 제작에 다소 어려움이 있다. 반면 연속형 핀틀은 추가 파트 없이 냉각 유로 공간만 확보하면 되므로 제작이 비교적 단순하다는 특징이 있다.

실험결과 연소효율은 70~90%에 분포해 있다. 핀틀 인젝터는 중심재순환 영역이 존재하고, 선행연구결과에 따라 90%대의 효율을 예상하였지만 다소 낮은 결과를 보인다. 연소효율을 결정짓는 요인 중 액적크기와 액적분포에 원인이 있을 것으로 보이므로 연소에 사용된 핀틀 인젝터의 분무실험이 필요해 보인다.

후 기

이 논문은 2020년 한국연구재단 BK21 FOUR(과제 번호 : 5199990714521)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

- 1) Dressler G. A. and Bauer J. M., "TRW Pintle Engine Heritage and Performance Characteristics," *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, A.L., U.S.A, AIAA 2000-3871, 2000.
- 2) Yu, I. S., Choi, J. S., Kim, T. W., Ko, Y. S., Kim, S. H. and Kim, H. M., "A Study on Combustion Performance by the Shape of Slit of the Canted Slit Type Pintle Injector," *Journal of the*

Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 21, No. 2, 2017, pp. 111~118.

- 3) Ryu, H. B., Yu, I. S., Kim, W. C., Shin, D. H., Ko, Y. S. and Kim, S. J., "Experimental Investigation on Combustion Performance of a Pintle Injector Engine with Double-row Rectangular Slot," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 3, 2017, pp. 25~33.

- 4) Son, M., Radhakrishnan, K., Koo, J. Y., Kwon, O. C. and Kim, H. D., "Design Procedure of a Movable Pintle Injector for Liquid Rocket Engines," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 33, No. 4, July-August 2017, pp. 858~869.

- 5) Nam, J. S., Lee, K. W., Park, S. J., Huh, H. I. and Koo, J. Y., "Spray Characteristics of a Movable Pintle Injector with Pintle Tip Shape," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 47, No. 9, 2019, pp. 658~664.

- 6) Seedhouse, E., "SpaceX Making Commercial Spaceflight a Reality," *Springer Science Business Media New York*, 2013.

- 7) Dressler, G. A., "Summary of Deep Throttling Rocket Engines with Emphasis on Apollo LMDE," *42nd AIAA Joint Propulsion Conference & Exhibit*, July 9-12, 2006.

- 8) Lopez, I., "Design of a 2000lbF LOx/LCH4 Throttleable Rocket Engine for a Vertical Lander," *Master's Program in Mechanical Engineering*, The University of TEXAS at El Paso, May 2017.

- 9) Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engines," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 147, 1992.

- 10) Haidn, O., Arnold, R., Oswald, M. and Soller, S., "LOX/Methane Technology Efforts for Future Liquid Rocket Engines," *Conference paper Source : DLR*, May 2008.