축소(Ⅰ) 수정형 엔진의 연소 시험

김영한*, 김용욱**, 이재룡***, 문일윤****, 고영성*****, 이수용******

Hot Fire Tests of Sub-scale(Ⅰ) Modified Engines

Young-Han Kim*, Yong-Wook Kim**, Jae-Yong Lee***, Il-Yoon Moon****, Young-Sung Ko*****, Soo-Yong Lee******

Abstract

In the preceding tests of Sub.(Ⅰ) engines, it was observed that the heat resistant capability of the engines was not enough, and the design of Sub.(Ⅰ) engines was modified to satisfy the mission requirement. Sub.(Ⅰ) Mod. engines have three major design parameters - the arrangement of main injectors, the impinging angle of main injectors and thermal barrier coating. More than 20 experiments were carried out to evaluate engine performance and heat resistance capability with respect to design parameters. Analysing the result of Sub.(Ⅰ) and Sub.(Ⅰ) Mod. engine tests, it is found that the decreased impinging angle, adopting the H-type arrangement(rather than radial type arrangement), and adopting the thermal barrier coating can increase heat resistance capacity substantially. The result show that the performance variation by design change is below 5 percents and the radial type arrangement of injectors has higher performance than H-type.

However, the performance of 15° impinging angle engine is higher than that of 20° impinging angle engine, which is inconsistent to our expectation. High frequency instabilities may cause such phenomenon, which will be verified by a series of tests.

초 록

기존의 축소(Ⅰ) 기본형 엔진에 대한 연소 시험을 실시한 결과 분사면의 내열 특성이 불량한 것으로 판명되었다. 이에 기본형 엔진의 설계를 다각도로 수정한 축소(Ⅰ) 수정형 엔진을 제작하게 되었다. 주요 설계 파라미터는 주분사기의 배열, 주분사기의 충돌각, 내열 코팅이었으며, 이들에 대한 시험적 연구를 수행하고 각 디자인에 따른 엔진 성능 및 내열 성능을 비교하였다. 내열 성능은 직교배열의 경우, 주분사기 충돌각이 작은 경우, 내열 코팅이 있는 경우 증가하는 경향을 보여주었다. 그에 따른 엔진 성능의 변화를 살펴보면 5% 범위 이내에서 성능 차이를 보이며 방사배열의 경우가 직교배열의 경우보다 성능이 높고, 주분사기 충돌각 15°의 경우가 20°의 경우보다 오히려 높게 나타났다. 이러한 현상은 고주파 불안정성과 관련성이 있을 것이며, 향후 시험을 통해 검증할 예정이다.

키워드 : **로켓엔진**(rocket engine), **모델엔진**(model engine), **엔진시험**(engine test), **엔진성능**(engine performance)

* 추진기관체계그룹/ yhkim@kari.re.kr
** 추진기관체계그룹/ kyw421@kari.re.kr
*** 추진기관체계그룹/ iymoon@kari.re.kr
**** 추진성능시험그룹/ iymoon@kari.re.kr
***** 추진성능시험그룹/ koys@kari.re.kr
****** 추진성능시험그룹/ sylee@kari.re.kr

1. 서 론

축소(Ⅰ) 기본형 엔진에 대한 연소 시험을 수차례 실시하였으며 그 결과 분사면의 열손상이 심각하게 나타났는데, 임무 시간에 훨씬 못 미치는 연소시간 동안 분사면은 심각한 열손상을 입었다. 따라서 이러한 분사면의 내열 특성을 개선하는 것이 중요한 과제로 대두되었으며, 이의 개선을 위한 일련의 시도가 이루어졌다.

첫 번째 시도는 축소(Ⅰ) 기본형 엔진 설계의 기본 틀을 유지한 채 약간의 수정을 통해 내열 특성을 개선하고자 하는 것이었다. 열손상의 주원인으로 화염 기저부와 분사면 사이에 발생하는 유체의 재순환 현상이 고려되었는데 이 재순환 현상을 억제하는 방향으로 개선이 이루어졌다. 그 중 한가지는 분사면을 평면 가공하여 분사면의 돌출부에 의한 보염 효과(flame holding effect)를 약화시키는 것이었으며, 다른 한가지는 재순환 영역에 냉각홀을 뚫어 연료를 주입하여 재순환 현상을 억제하는 방법이었다. 그러나, 제작된 엔진의 성능 시험 결과로부터 이러한 시도들은 내열 특성을 만족스럽게 개선하지 못한다는 결론을 얻을 수 있었다.

따라서 축소(Ⅰ) 기본형 엔진의 설계를 수정하여 내열 특성을 개선하기 위한 시도가 이루어졌다. 축소(Ⅰ) 수정형 엔진은 주분사기의 배열, 주분사기의 분사각, 내열 코팅의 디자인 파라미터를 조합해서 제작되었으며 이들의 내열 성능 및 엔진 성능 평가를 위해 약 20여 회의 연소 시험이 수행되었다.

본 연구에서는 이러한 축소(Ⅰ) 수정형 엔진 시험의 대표적인 결과를 소개하고, 종합적인 관점에서 이러한 디자인 파라미터들이 내열 성능 및 엔진 성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

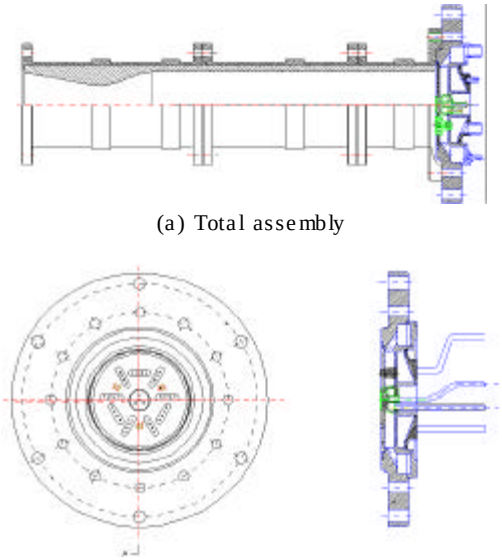
2. 본 론

2.1 축소 수정형 엔진

그림 1은 본 연구를 위하여 사용된 엔진 중의 하나로 축소 수정형(Ⅳ) 엔진의 도면이며, 이 엔진의 설계값은 표 1과 같다.

엔진 분사기 헤드부의 외경은 297㎜, 연소실의 길이는 565㎜이며 SUS로 제작되었다. 연소실 내부에는 용융 냉각(ablative cooling)을 위해 Silica/ Phenol 재질의 내열재가 설치되어 있는데 그 내경은 108㎜, 노즐목 부분의 직경은 62.4㎜로 제작되었다.

그림에서 보는 바와 같이 축소형 엔진은 중앙부분에 하나의 점화용 분사기와 9개의 주분사기로 구성되어 있다. 주분사기들은 그림 1과 같은 직교형으로 배열되어 있고, 열전달이 집중될 것으로 예상되는 지점의 내열재를 보호하기 위하여 막냉각 홀이 뚫려있다. 주분사기는 FOOF형의 비동류 충돌방식으로 충돌각은 15° 이며 연료측과 산화제측의 노즐(오리피스)직경은 각각 1.6, 2.2㎜이다. 점화용 분사기는 quadlet형으로 중간부분에서 액체 산소가, 주위로 점화제 및 연료가 분사되도록 설계되었고 충돌각은 20° 이다.



(a) Total assembly

(b) Injector head

그림 1. Drawings of the Sub(Ⅰ). Mod.(Ⅳ) engine

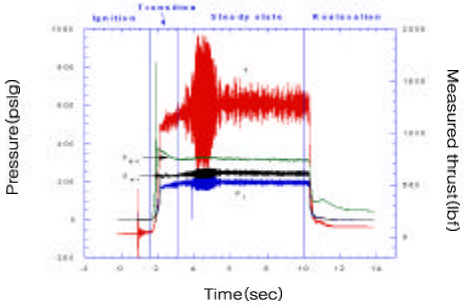
표 1. Design conditions of the engine

전체 연료(Jet A-1) 유량	819	[g/ s]
전체 산화제(LOx) 유량	1915	[g/ s]
점화제(TEAl) 유량	80.8	[g/ s]
O/ F 비	2.34	
연소실 압력	200	[psia]

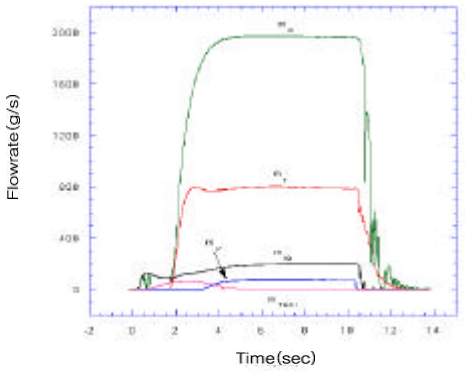
2.2 대표적 시험결과

약 20회에 이르는 축소형엔진 시험을 수행하였는데, 그 중 2회의 시험에서 연소 불안정 현상이 관찰되었다. 그림 2는 연소 불안정 현상을 보이는 전형적인 시험결과로서 유량 및 압력·추력 경향을 보여주고 있으며, 표 2에서는 측정값 및 성능 계산값을 보여주고 있는데, 각종 측정값들은 측정값들이 안정되기 시작하는 4초의 시점부터 4초간의 구간에서 계산되었다.

설계조건에 비해 시험값에서 전체 연료 유량은 -3.3%, 전체 산화제 유량은 +2.87%, 연소실 압력은 +5%, 전체 O/F비는 +5.98%의 탈설계점에서 시험이 수행되었다.



(a) Pressure and thrust



(b) Flowrate

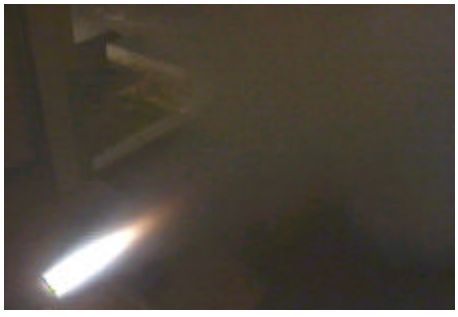
그림 2. Experimental results

그림 2(a)에서 연소실 압력(P_c) 그래프를 살펴보면 점화명령이 전달(t= 0)된 후 약 1초의 시점에서 점화제에 의한 점화가 이루어졌음을 알 수 있고 그림 3(a)의 이미지로 확인할 수 있다.

이어서 주분사기를 통하여 Jet A-1과 액체산소가 공급되면서 t= 2 지점에서 압력이 빠르게 증가하여 설계 압력까지 상승하게 되는데, 이때 화염의 길이 또한 급격히 신장하여 그림 3(b)와 같은 상태에 이르게 된다. 이러한 압력상승 경향은 기존에 시험했던 분사기 시험용 엔진의 것과 비교할 때 매우 짧은 것이다.

액체 산소가 처음 상온인 공급관 및 매니폴드 내에 들어오면 기화하게 되는데, 액체 산소가 계속 공급되어 이 공급관 및 매니폴드의 온도가 기화점 이하로 낮아질 때까지 연소실로는 상당량의 기체 산소가 공급되게 된다. 이 기체 산소가 초기 천이 구간을 형성하는 주요한 원인으로 생각되는데, 축소형 엔진의 경우에는 주분사기가 9개의 단위분사기로 구성되어 있고 유량 또한 분사기 시험용 엔진의 것보다 크므로 냉각이 보다 빠르게 진행된다. 따라서 기체 산소의 활동 시간을 감소시켜 천이 구간이 짧아지는 것으로 보인다.

앞서 언급한 대로 3 5초의 구간에서 압력은 강한 진동을 나타내어 연소 불안정성을 보이고 있는데, 실제로 이는 시험시 소리로도 감지할 수 있었다. 이 압력 진동은 곧바로 추력(T)으로 반영되며, 또한 연료(P_{MF}) 및 산화제 매니폴드(P_{MO})에까지 전달된 것을 확인할 수 있다. 여기서 연료측과 산화제측 매니폴드의 압력 진동을 비교해보면 연료측의 진동 크기가 산화제측보다 큰 것을 알 수 있는데, 이는 산화제측의 분사 차압이 연료측보다 훨씬 커서(표 2 참조) 산화제 매니폴드로 압력 섭동이 비교적 잘 전달되지 못하는데서 기인한 것으로 추측된다.



(a) Ignition

(b) Transient state

(c) Steady state

그림 3. Firing images

이러한 압력 진동은 곧바로 감쇠되어 5초 이후에는 그 진동폭이 매우 감소한 것을 알 수 있다. 이후에는 정상 상태(그림 3(c))에 도달하여 연소 종료까지 각종 측정값들이 유지된다. 정상 상태에서의 화염의 길이는 천이 구간(그림 3(b))와 비교할 때 다소 짧아진 후 형상이 일정하게 유지되는 특성을 보인다.

표 2. Experimental result of the engine

전체 연료측 유량	792.8	[g/ s]
전체 산화제측 유량	1970	[g/ s]
전체 O/ F 비	2.48	
점화제 유량	65.59	[g/ s]
점화기측 연료 유량	72.04	[g/ s]
점화기측 산화제 유량	193.3	[g/ s]
점화기 O/ F 비	2.68	
연소실 압력	210	[psia]
연료측 분사차압	34.1	[psi]
산화제측 분사차압	62.8	[psi]
추력(교정값)	1428.56	[lbf]
비추력(Isp)	234.54	[sec]
특성속도(c*)	1601.83	[m/ s]

그림 4는 압력 진동이 가장 심한 4 6초 사이의 구간을 Fourier 변환하여 그 절대값을 표시한 그래프이다. 그림에서 76.95Hz대에서 강한 극값(peak)이 발생한 것을 볼 수 있다. 그림 2(a)에서 볼 때 압력 진동은 6초 이후 급격히 감쇠하는데, 이를 Fourier 변환을 할 경우 그 극값이 점차로 낮

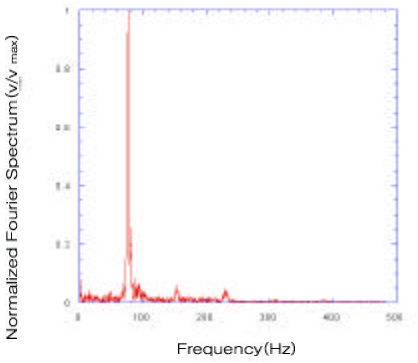


그림 4. Fourier spectrum of pressure(4 6s)

2.3 전체적 시험결과

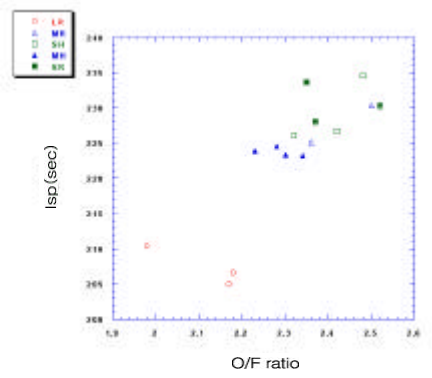
축소(I) 수정형 엔진 설계에서 변경 파라미터는 주분사기 배열, 주분사기 충돌각, 내열 코팅이다. 주분사기의 배열은 기존의 축소(I) 기본형 엔진의 것과 같은 방사형 배열과 그림 1(b)와 같은 직교형 배열의 두가지 모델에 대하여 시험하였다. 그리고 주분사기의 충돌각에 대해서는 30°, 20°, 15°의 세 가지 유형을 시험하였으며 분사면의 내열 특성을 강화하기 위해 분사면에 zirconium 내열 코팅을 한 엔진도 시험하였다.

내열 특성 개선이 본 시험에서의 주요한 목적

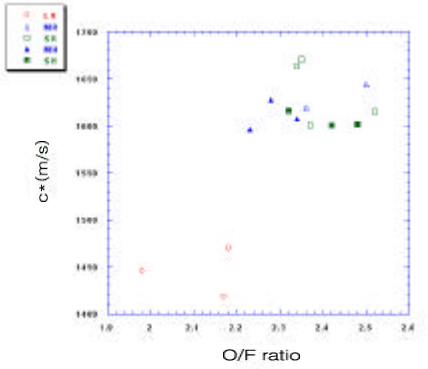
중의 하나인 바, 내열 성능의 관점에서 엔진들을 평가하면 기대한 바와 같이 방사형 배열보다 직교형 배열의 내열 성능이 우수하였이며 주분사기의 충돌각이 작을수록 내열 성능이 뛰어난 것으로 판명되었다. 분사면의 내열 코팅 또한 내열 성능 향상에 기여하고 있는 것으로 관찰되었다.

직교형 배열이 방사형 배열보다 주분사기 분무간의 간섭 효과가 보다 후류 쪽에서 형성됨으로써 화염과의 거리를 증가시키고 재순환 영역의 발생을 억제하는 효과가 있어서 내열 성능이 신장된 것으로 보인다. 또한 주분사기의 충돌각의 효과는 충돌각이 작아질수록 화염 기저부가 보다 후류 쪽에 형성됨으로써 분사면으로의 열전달량이 감소하는데 그 원인이 있는 것으로 추정되며, 보다 감소한 분무 성능도 그 역할을 하는 것으로 보인다.

결론적으로 방사형 배열보다 직교형 배열이, 분사각이 작을수록, 내열 코팅을 할수록 내열 성능은 증가한다. 또한 30초 시험을 실시한 결과 내열 코팅이 있는 방사형 배열의 경우 분사각 15°, 직교형 배열의 경우 분사각 20°, 15°인 엔진의 분사면은 연소 후 용융 등의 열손상이 전혀 발생하지 않아서 내열 성능이 충분히 개선된 것으로 판단된다.



(a) Specific Impulse(Isp)



(b) Characteristic Velocity(c*)

그림 5. Performance of Sub. engines

이러한 내열 성능의 개선을 위한 설계변경은 앞서 언급한 바와 같이 보다 불량한 분무 특성을 동반할 수 있다. 따라서 내열 성능의 개선과 더불어 엔진 성능이 얼마나 감소되었는지 검증해볼 필요가 있다.

그림 5[1]에서는 로켓 엔진의 성능을 평가하기 위해 주로 사용되는 비추력 $I_{sp} = T_c/(\dot{m}g_0)$ 과 특성속도 $c^* = P_c A_n/\dot{m}$를 비교한 그래프를 보여주고 있다. 여기서 주분사기 충돌각 30°인 엔진의 경우 연소실의 길이가 기타 엔진에 비해 짧기 때문에 다른 엔진과의 직접적인 비교는 불가능하다는 것을 밝혀두고자 한다. 따라서 직접적인 성능 비교는 주분사기 충돌각 20°, 15°인 경우에만 가능하다. 또한 O/F 비의 효과를 염두에 두어야할 것이나, ±15% 범위 내에 산재해 있어서 직접적인 비교에는 크게 무리가 없을 것으로 판단된다.

그리고 내열 코팅의 경우는 성능 및 저주파 불안정성에 미치는 영향을 무시할 수 있을 것으로 판단하여 내열 코팅이 있는 엔진과 없는 엔진을 동일하게 처리하였다.

그림 5에서 먼저 주목할 점은 엔진 각각의 성능이 5% 차이 이내에 있어서 성능상의 차이는 크게 없다는 점이다. 배열에 따른 성능을 비교해 보면(MR↔MH, SR↔SH), 특성속도 그래프를 참조할 때 방사형 배열의 성능이 다소 높은 것을 볼 수 있다. 또한 주분사기 충돌각의 관점에서

1) 그림 5 의 참조표에서 첫 번째 알파벳은 주분사기의 충돌각을 말하는 것으로 L, M, S 각각 30°, 20°, 15°를 말하며 두 번째 알파벳은 배열을 표시하는 것으로 R, H 각각 방사형 배열, 직교형 배열을 의미한다. 예를 들어 LR은 주분사기 충돌각 30°에 방사형 배열을 이룬 엔진을 말한다.

비교해보면(MR↔SR, MH↔SH) 기대한 바와 달리 비추력에서 충돌각이 작은 15° 엔진이 20° 엔진보다 높게 나타났다.

방사형 배열의 경우 직교형 배열보다 분무 및 혼합 특성이 양호하기 때문에 보다 높은 성능이 나타난 것으로 보인다. 그러나 주분사기 충돌각 20°와 15°의 경우 충돌각이 작은 15° 엔진의 분무 및 혼합특성이 나쁠 것으로 기대되나 오히려 성능이 보다 높게 나타난 것은 현재의 데이터로는 이해하기 힘들며, 고주파 연소불안정성에 의한 혼합 증대 및 기화 성능 증대 효과가 있지 않을까 추측된다.

이러한 부분들에 대하여 확실한 결론을 내리기 위해서는 성능 및 고주파 연소 불안정성 특성 파악을 위한 추가적인 시험이 필요할 것이다.

3. 결 론

내열 성능 개선을 위해 주분사기의 배열, 주분사기의 충돌각, 내열 코팅의 디자인 파라미터에 따라 축소(Ⅰ) 수정형 엔진을 제작하였으며 시험을 통하여 내열 성능 및 엔진 성능을 평가한 결과 다음과 같이 결론을 내렸다.

1. 내열 성능은 방사형 배열보다 직교형 배열이, 주분사기 충돌각은 작을수록, 내열 코팅이 존재할수록 뛰어났다. 이는 분무·혼합특성의 변화에 따른 화염과의 거리, 재순환 영역의 왜곡 등에 기인한 것으로 보인다.
2. 내열 코팅이 있는 방사형 배열의 경우 충돌각 15°, 직교형 배열의 경우 충돌각 20°와 15°에서 충분한 내열 성능을 확인할 수 있었다.
3. 디자인 변경에 따른 성능 변화의 폭은 5% 정도이며 직교형 배열보다 방사형 배열의 경우, 충돌각 20°보다 충돌각 15°의 경우 성능이 보다 높게 나타났는데, 분무·혼합특성의 변화와 고주파 연소불안정의 효과에 원인이 있는 것으로 추측된다.

참고문헌

1. 박정, 김용욱, 김영한, 문일윤, 이재룡, 강선일, 정용갑, 조남경, 오승협, 2000, "소형 액체 로켓 엔진에서의 점화시퀀스 결정 및 인젝터 수명 연장 기법 평가", 한국연소학회 논문집, 5권 1호, 2000
2. 박정, 김용욱, 김영한, 정용갑, 조남경, 오승협, "로켓 엔진의 연소성능 예측 및 시험", 대한기계학회 논문집 B권, 24권 5호. 2000
3. D. K. Huzel and D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines", AIAA, 1992.
4. David T. Harrje, "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", NASA SP-194, 1972.
5. Vigor Yang, William E. Anderson, "Liquid Rocket Engine Combustion Instability", AIAA, 1995.
6. A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Co., 1989.