

## 파이로스타터 개발 현황

홍문근\*, 이수용\*\*

### The current status of the development of pyrostarters

Moongeun Hong\*, Soo Yong Lee\*\*

#### Abstract

The current status of the development of pyrostarters, which play a role as a turbo pump starter in liquid propellant propulsion systems by supplying pressurized gas to power turbines for engine start, has been introduced. Firstly, the development history is briefly summarized, and secondly the current technical status in core parts for the development of pyrostarters such as solid propellants, internal ballistics, rupture discs, and igniters are presented. The current technical achievements could make it feasible to fulfill the development requirements for pyrostarters.

#### 초 록

초기 엔진 시동을 위해 터빈을 구동하기 위한 고압가스를 제공함으로써, 발사체 액체추진기관의 터보펌프 시동기 역할을 수행하는 파이로스타터의 개발 현황에 대해 간단히 소개하기로 한다. 우선 개발 이력을 간단히 정리하였으며, 파이로스타터 개발에 있어서 핵심 부분이라고 할 수 있는 고체추진제, 내탄도, 럽처디스크, 점화기 부분에서의 현재 기술 현황을 정리하였다. 현재의 기술개발 수준을 고려해 볼 때, 향후 파이로스타터 개발요구조건을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 파이로스타터(Pyrostarter), 고체추진제 가스발생기(Solid propellant gas generator), 터보펌프 시동기(Turbo pump starter), 럽처디스크(Rupture disk)

#### 1. 서 론

우주발사체의 효율적인 엔진 설계를 위해 일부 추진제의 연소가스를 이용하여 작동하는 터보펌프식 추진제 공급방식을 일반적으로 채택하고 있으며, 주연소기에 공급되는 추진제의 일부를 사용하여 가스발생기 내에서 연소시킴으로써 터보펌프 구동에 필요한 고온의 가스를 얻게 된다. 한편 이러한 터보펌프를 이용한 추진제 공급방식의 액체추진기관은 초기 터보펌프의 터빈을 구동하기 위한 터보펌프 시동기를 필요로 하며, 파이

로스타터는 일종의 고체추진제 가스발생기로서 터보펌프 구동을 위해 짧은 시간동안 터빈에 연소가스를 제공함으로써 터보펌프 시동기 역할을 수행한다.

본 논문은 현재까지의 파이로스타터 개발 현황을 정리하여 소개하고자 하며, 우선 2절에서는 현재까지 진행된 개발 내용에 대한 전반적이고 간단한 소개를 다루고, 3절과 4절에서는 최근 연구개발 내용을 정리하도록 한다. 3절에서는 파이로스타터의 성능을 근본적으로 좌우한다고 볼 수 있는 추진제 및 내탄도 관련 내용을, 그리고 4절

접수일(2010년 1월 20일), 수정일(1차 : 2010년 4월 20일, 2차 : 2010년 6월 24일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

\* 발사체미래기술팀/conquet@kari.re.kr

\*\* 발사체미래기술팀/sylee@kari.re.kr

에서는 파이로스타터의 체계적 측면에서 주요 핵심 부품이라고 할 수 있는 점화기 및 립쳐디스크 개발 내용에 대해서 소개하기로 한다.

본 논문 내용은 현재까지의 파이로스타터 개발 현황에 대한 전반적인 소개의 성격을 가지며, 세세한 기술적인 내용 설명은 깊이 있게 다루지 않았으나 관심 부분에 대한 기술적인 내용은 참고문헌 등을 통해 접할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 개발 현황

파이로스타터의 초기 개발은 2004년부터 시작되었으며, 그 당시 개발을 추진한 추진제의 기본 산화제는 AN(Ammonium Nitrate)를 바탕으로 한 복합추진제를 사용하였다 [1,2]. 전체 시스템 개발보다는 저온 가스발생기용 고체추진제 개발을 주목적으로 하였기 때문에, 내탄도 및 파이로스타터의 전체 체계적 측면에서는 최적 설계까지 이루지 못하였지만, 대부분의 개발요구조건들은 만족되는 것으로 나타났다. 하지만 당시 개발된 고체추진제의 불안정한 점화 특성으로 인해 고체추진제에 대한 보다 면밀한 개발 필요성이 대두되었다.

이후 실제적인 시제품 개발 대신에 설계요구조건에 대한 개념 설계가 진행되면서[3], 한편으로 유럽 우주발사체 Ariane의 Vulcain 엔진에 사용되는 파이로스타터를 제작/납품하고 있는 네덜란드 업체인 APP(Aerospace Propulsion Product)와의 국제협력을 통해 파이로스타터에 대한 설계요구조건, 핵심설계요소 및 설계개념에 대한 면밀한 연구가 진행된다. APP의 과거 개발 경험과 보유한 관련 기술 내용들이 설계 자료들에 직/간접적으로 상당 부분 포함되어 있었기 때문에, 파이로스타터 개발에 있어서 매우 빠른 접근이 가능할 수 있을 것으로 기대되었다 [4].

2008년 중반 이후부터 새로운 저온 가스발생기용 고체추진제에 대한 개발과 동시에, 국제협력을 통해 보다 체계화된 설계개념을 바탕으로 전체 체계적 측면에서도 최적화된 파이로스타터 TM( Technology Model) 개발이 진행되었다 [5].

한편 현재는 TM의 성능을 보다 향상시킨 EM(Engineering Model)을 연구 개발 중에 있다. 그림 1에서 APP의 개념설계보고서에 제안한 파이로스타터의 3D 단면도와 이를 기초로 개발된 실제 EM-1 시제품 사진을 확인할 수 있으며, 2008년 이후 개발 진행 중인 파이로스타터 TM과 EM-1의 연소시험 이력을 표 1에 정리하였다.

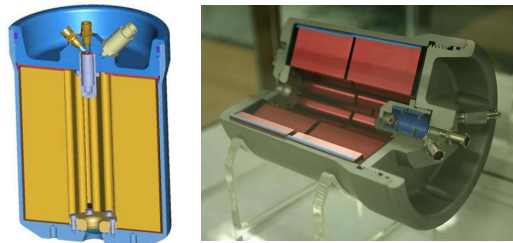


그림 1. 파이로스타터 3D 단면형상 [4] 및 EM-1 시제품 사진

표 1. 파이로스타터 연소시험 내용

	#	내용	일시
TM	01	헤비타입, 온도측정, 끝단 한면 연소	09.02
	02	추진제 끝단 한면 연소	09.02
	03	추진제 끝단 양면 연소	09.03
EM-1	01	추진제 두 개로 분리(끝단 내면 연소)	09.07
	02	인코넬 립쳐디스크 사용	09.10
	03	전시용	-
	04	헤비타입, 온도측정, 추진제 변경(연소속도 증가)	10.01
	05	A-286 구조물 적용	10.02
	06	점화기량 및 점화기 분사각도 변경	10.04
	07	저온환경시험, 점화기 분사각도 45도	10.05
	08	진동시험	-
	09	고온환경시험	-
	10	내구성 확인	-

3절과 4절에서는 현재 연구 개발 중인 파이로스타터 EM-1의 핵심 부분이라고 할 수 있는 고체추진제, 내탄도, 점화기, 그리고 립쳐디스크에 대한 개발 내용 및 기술 현황을 소개하기로 한다.

### 3. 추진제 및 내탄도

파이로스타터의 기능은 짧은 시간동안 설계된 에너지를 터빈에 공급함으로써, 액체추진기관의 터보펌프를 시동시키는 것이다. 터빈에 공급되는 에너지는 다음의 간단한 식을 통해 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Power &= \dot{m} \Delta h \\
 &= \dot{m} c_p T_i \left[ 1 - \left( \frac{p_o}{p_i} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서  $\dot{m}$ 는 터빈에 공급되는 가스의 질유량,  $\Delta h$ 는 단위 질유량당 가용엔탈피(가용에너지) 변화를 의미한다.  $T_i$ 과  $p_i$ 는 각각 터빈 입구에서의 정압이며,  $k$ 는 연소가스의 비열비이다. 따라서 연소가스의 분자량과  $k$ 가 작을수록, 그리고 연소가스 온도가 높을수록 단위 질유량당 가용에너지가 증가하게 된다. 한편 고온 가스에 의한 터빈의 손상을 피하기 위해 파이로스타터의 연소가스 온도에 대한 규제가 설정되어 있으며, 이를 감안하여 에너지 설계를 수행하여야 한다.

#### 3.1 추진제 개발

일반적인 고체추진기관에 적용하는 고성능 추진제로는 HTPB(HydroxylTerminatedPoly Butadiene/AP(Ammonium Perchlorate)계의 복합추진제를 많이 사용하고 있지만, 가스발생기용으로는 연소가스의 친환경성 및 가스온도를 고려하여 AN(Ammonium Nitrate)계열의 산화제를 사용하는 복합추진제를 적용한 사례가 많다. AP를 산화제로 사용하는 경우에는 연소가스에 HCl 성분을 포함하고 있어 기계부식 또는 대기오염의 이유로 파이로스타터의 추진제로는 적당하지 않다. AN을 사용하는 추진제 역시 AP에 비해 수분 흡습성이 강하고, 온도 변화에 따른 상변화가 일어나며 추진제 점화 특성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 초기의 파이로스타터용 추진제 조성 개발에 있어 이러한 문제를 해결하기 위해 AN 산화제를 주로 사용하고, 점화성을 향상시키기 위해

AP를 소량 사용하며 그 함량을 5%이하로 적용하고자 하였다 [1,2]. 그러나 추진제 점화 문제와 AP를 전혀 사용하지 않는 조성으로 추진제 개발 방향이 전환되면서, 새로운 추진제 조성 개발의 필요성이 대두되었다.

새로운 추진제 조성에서의 산화제는 매우 적은 함량의 RDX를 적용하고, 산화제를 대신하여 고에너지 가소제를 사용하였고, 고에너지 가소제와 상용성(Compatibility)이 좋은 프리폴리머를 바인더로 선정하였다. 또한 낮은 온도의 요구조건을 만족하기 위해 고체분말형태의 DHG(Dyhydroxy glyoxime)를 냉각제를 적용하여 파이로스타터 조성을 설계하였다 [6].

새로운 추진제의 경우, 안정된 점화특성과 연소특성을 보이고 있으며 연소온도 또한 개발규격을 만족하는 것으로 나타났다. 추진제 개발을 위한 이론적 성능 분석 및 연소속도, 기계적 물성 특성을 포함한 연소특성 내용은 참고문헌 [6]에서 자세히 확인할 수 있다. 한편 파이로스타터의 전체적인 크기를 줄이고, 추진제 그레이인 형상의 구조적 안정성을 높이기 위해 고에너지 가소제 BTTN(Butanetriol trinitrate)를 첨가하여 추진제의 연소속도를 기존 대비 15%(6.0→7.0mm/s at 138bar, 20°C) 증가시켰으며, 연소속도를 높인 새로운 추진제 조성은 EM-1 4호기부터 적용하여 사용하고 있다.

#### 3.2 내탄도 설계

초기 터빈의 완만한 시동 특성을 위해 공급에너지에 대한 설계요구선도는 2.8에서 1.9MW로 감소하는 형태이며, 이와 같은 내탄도 특성을 목표로 하여 내탄도 설계를 수행하였다. TM의 연소시험 결과, 설계 예측값과 실제 측정된 압력선도의 감소 기울기에 차이점이 나타났는데, 이는 점화기의 제트 화염에 의해 고체추진제의 초기 연소 표면적의 증가부분을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 주추진제 표면으로 분사되는 점화기 제트화염에 의해 추진제 내부 깊숙이 연소면적이 증가하면 추진제 연소면적 증가하게 되는데, 이와 같은 결과는 그림 2에서 확인할 수

있으며, 이후로 점화기 제트화염에 의한 추진제 증가 부분을 보상할 수 있는 연소면적 보상계수를 적용하여 압력 선도를 예측하였다.

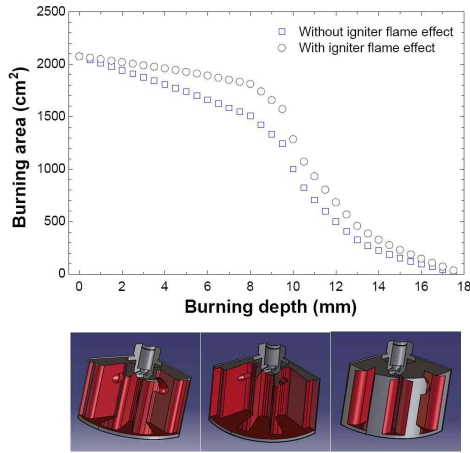


그림 2. 점화기 화염을 고려한 연소면적 증가 경향

파이로스타터의 연소압력 기울기를 증가시키기 위해서 EM-1 1호기부터 추진제 충전체를 2개로 분리하여 추진제 양 끝단 연소면적을 2배로 증가시켰으며, 그림 3에서 볼 수 있듯이 EM-1의 연소시험 결과를 통해, 요구되는 압력선도 및 공급에너지 선도를 구현하였을 뿐만 아니라, 연소면적 보상계수를 사용한 설계 예측값과 실제 시험값과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 향후 터보펌프 터빈과의 연계시험을 통해 파이로스타터의 성능을 충분히 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 점화기 및 립쳐디스크 개발

파이로스타터의 주요 구성품 중, 주요 핵심 부품이라고 할 수 있는 점화기와 립쳐디스크에 대한 부품 단계 개발을 추가로 진행하였으며, 이에 대한 개발 현황을 정리하도록 한다.

##### 4.1 점화기 개발

점화기는 추진기관 내부공간에 점화장약 연소

에 의해 발생한 열에너지를 공급하여 추진기관 내부의 초기 압력을 상승시키고 추진제 표면의 점화온도까지 도달시켜 추진제의 연소가 시작되도록 하는 에너지 전달기구이다. 파이로스타터용

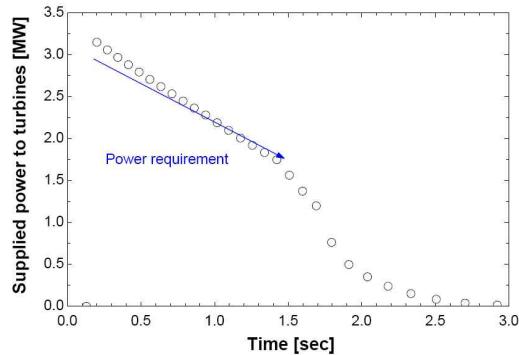
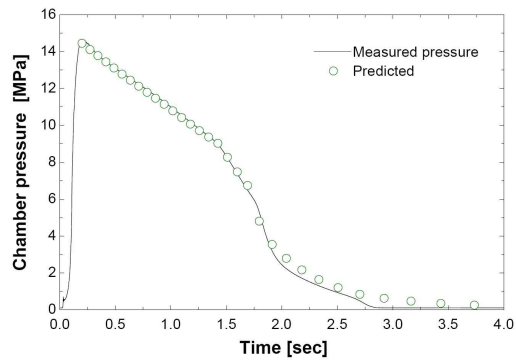


그림 3. EM-1 4호기 연소압력 및 터빈 공급에너지 선도 (연소면적 보상계수: 0.9)

점화장치는 착화기 PC-1400 압력 카트리지를 사용하고, 점화장약으로 기존 점화장약으로 사용한 B/KNO<sub>3</sub>보다 자체 에너지 함유량이 높고 환경 저항성, 제작성, 안전성이 우수한 MTV 점화제를 선정하였다. 점화기 재질은 외형 변화를 적게 가지고 연소 시 점화기 이탈 및 연소 시 고온/고압으로부터 형상을 유지하기 위해 STS 316을 사용하였다. 또한 주추진제의 점화성능을 확보하기 위해 주추진제 표면에 점화기의 연소화염이 직접 분사되도록 하였다.

점화기의 홀 크기와 홀 수 등을 결정하기 위해, 실제 파이로스타터와 비슷한 프리볼륨(free volume)의 C.B.T 시험을 통해 다양한 점화기 형

태에 대한 초기 내부압력 상승 및 도달 시간을 비교 분석하여 최적의 점화기 형태를 선정하였다. 참고문헌[7]에서 파이로스타터용 점화기 개발에 관한 자세한 내용은 확인할 수 있다. 한편 점화기의 설계 초기 점화장약 MTV의 양은 19g이었으나, 연소시험을 통해 획득한 파이로스타터 초기 내부압력 증가 경향과 점화기 연소시간을 분석하여 (그림 4 참조), EM-1 6호기부터 점화장약을 기존에 비해 반으로 줄인 10.2g로 감소시켜 사용하고 있다. 점화기의 연소시간을 기존 300ms에서 200ms 가량으로 줄이면서도, 동시에 빠른 시간 내에 파이로스타터 내부 초기 압력 상승을 이전과 동일한 수준으로 유지하기 위해 점화장약의 표면적을 충분히 확보하여야 한다. 이를 위해 실린더 형태의 점화장약을 얇은 두께로 7개로 분리하여, 적층 형식으로 점화기 내부에 점화장약이 충전된다.

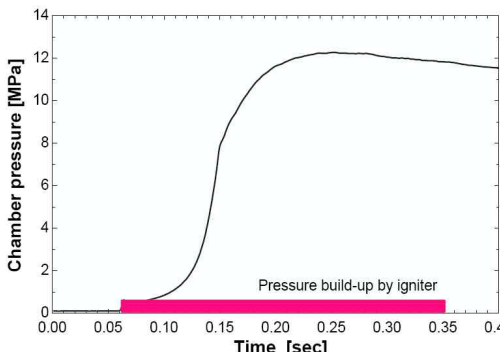


그림 4. 파이로스타터 내부압력 변화 및 점화기 연소시간 비교 (점화장약 19g인 경우)

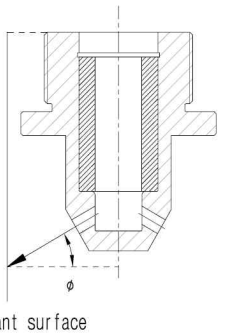


그림 5. 점화기 형태 및 분사 각도

그림 5의  $\phi$ 는 점화기에서 주추진제 표면에 점화기 화염이 분사되는 각도를 의미하는데, 3.2절에서 언급했듯이 점화기의  $\phi$ 의 조정만으로 내탄도 특성을 조절할 수 있다.  $\phi$ 가 커질수록 점화기 화염에 의한 주추진제의 연소면적 증가 부분이 감소하기 때문에 공급에너지 감소 기울기가 증가할 것으로 예상된다.

## 4.2 립쳐디스크 개발

파이로스타터 내부에 충전되는 고체추진제의 외부와의 환경적인 격리뿐만 아니라, 연소 초기 연소실 내부의 충분한 압력 증가를 통해 저온 고체추진제의 점화특성을 향상시킬 수 있는 파이로스타터용 립쳐디스크 개발을 위해 립쳐디스크 두께, 스코어 깊이 및 형태, 가압 속도에 따른 파열압력과 파열반경 경향에 대한 시험을 수행하여, 설계파열압력 및 요구 파열반경 등 실제 운영 조건을 만족하는 파이로스타터용 립쳐디스크의 성능을 시험결과를 통해 확인하였다. 립쳐디스크에 대한 자세한 개발 내용은 참고문헌[8]을 통해 확인할 수 있다.

립쳐디스크의 파열압력은 대략 8~10MPa로 설계되었으며, 그림 6에서 볼 수 있듯이 실제 연소 시험에서도 매우 정교하게 설계 압력에서 립쳐디스크가 파열되는 것은 확인할 수 있다. 그러나 초기 립쳐디스크 소재였던 알루미늄 Al 1050의 경우, 파열과 동시에 립쳐디스크의 페달(pedal)이 떨어져 나가는 문제가 발생하였는데(그림 7참조), 알루미늄의 용융점이 낮다고 하더라도 이 때문에 터빈 블레이드에 손상을 줄 수 있는 단점이 있다. 이에 립쳐디스크의 재질을 인코넬 재질로 대체하고, 설계 파열압력에 적합한 스코어 설계를 재수행하게 된다. EM-1 2호기이후 인코넬 재질의 립쳐디스크를 사용하고 있으며, 그림 7에서 볼 수 있듯이 페달이 떨어져 나가는 문제점을 해결함으로써 파이로스타터 운영요구조건에 적합한 립쳐디스크를 최종 개발 완료하였다.

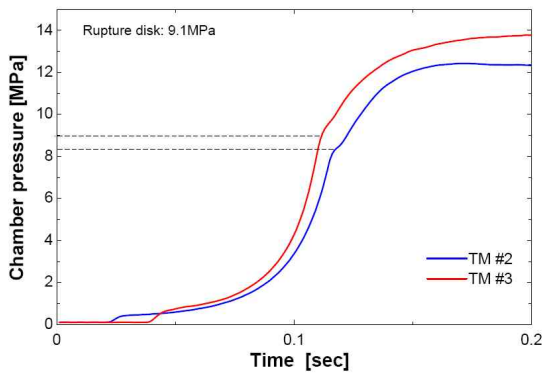


그림 6. 립처디스크 파열압력 선도

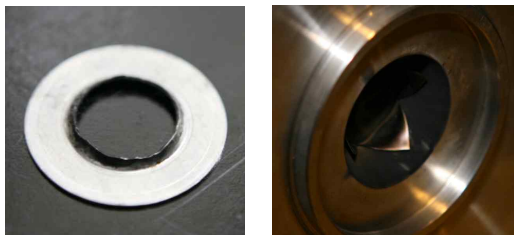


그림 7. 연소시험 후 립처디스크 사진 (좌: 알루미늄 재질, 우: 인코넬 재질)

#### 4. 결 론

초기 엔진 시동을 위해 터빈을 구동하기 위한 고압가스를 제공함으로써, 발사체 액체추진기관의 터보펌프 시동기 역할을 수행하는 파이로스타터의 개발 현황에 대해 우선 개발 이력을 간단히 정리하였으며, 파이로스타터 개발에 있어서 핵심 부분이라고 할 수 있는 고체추진제, 내탄도, 립처디스크, 점화기 부분에서의 현재 기술 상황을 정리하였다. 우주발사체용 고체추진제 가스발생기인 파이로스타터의 국내 최초 개발이 시작된 이후 상당한 기술력이 확보된 것으로 판단하며, 현재의 기술개발 수준을 고려해 볼 때, 파이로스타터 향후 개발요구조건을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. 홍문근, 한상엽, 터보펌프 시동기 개발 현황 및 향후 계획, KARI-PCG-TM-2005-002, 2005.
2. 이수용, 홍문근, "터보펌프 파이로 시동기 기초 연구", 한국추진공학회지 제12권 제2호, 2008, pp.74~80
3. 홍문근, 파이로스타터 기본 설계, KARI-LVFD-TM-2007-009, 2007.
4. 홍문근 외, "Feasibility study for the development of a pyro starter", International Astronautical Congress 2009
5. 홍문근, 이수용, 파이로스타터 TM 개발, KARI-FLT-TM-2009-002, 2009.
6. 송종권 외, "터보펌프 시동기 추진제 개발", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2009, pp.7~10
7. 박호준 외, "파이로스타터용 점화기 개발", 한국추진공학회 추계학술대회, 2009, pp.149~152
8. 박호준 외, "파이로스타터용 립처디스크 개발", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2009, pp.219~222