

# 하이브리드 로켓 추진장치 연소 열원을 이용한 절단기초실험

유덕근<sup>†</sup> · 김수종\* · 김진곤\* · 구자예\* · 문희장\* · 이보영\* · 길성민\*\* · 오재영\*\* · 국태승\*\*

## A cutting Experiments the materials by using heat source of the Hybrid Propulsion System Combustion

Doc-Koon Yoo, Soo-Jong Kim, Jin-Kon Kim, Ja-Ye Koo, Hee-Jang Moon, Bo-Young Lee, Seong-Mahn Kil, Jae Young Oh and Tae-Seung Kuk

**Key Words:** Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Combustion(연소), Cutting(절단), Propulsion(추진), Welding(용접)

### Abstract

The purpose of this study is to ascertain the ability of New type cutter using Hybrid Rocket Propulsion System to cut normal carbon steel and also compound metal like stainless steel which cannot be cut by regular oxygen-acetylene cutter. To compare cutting performance, Two different types of experiment with oxygen-acetylene and Hybrid Combustion cutters were performed.

As a result, Hybrid Combustion cutter is used to cut both carbon steel and stainless steel with cutting speed of 400mm/min(carbon steel) and 250mm/min(stainless steel). Otherwise, oxygen- acetylene cutter can be used to cut only carbon steel with cutting speed of 500 ~ 700mm/min. The possibility of Hybrid Combustion cutter as a cutting machine was confirmed.

## 1. 서 론

항공우주산업은 최첨단 기술력, 막대한 자금수요, 높은 위험부담과 장기간의 자금 회임기간등으로 인해서 진입과 육성이 매우 힘든 산업이지만, 응용분야가 넓고, 타 산업에 미치는 파급효과가 크다. 본 연구는 기존의 발사체 혹은 Booster로 연구되고 있는 하이브리드 로켓의 열원을 이용하여 산업현장에서 사용할 수 있는 절단 실험장치를 구성하여 강 절단으로 널리 사용되고 있는 산소-아세틸렌 절단기와 성능을 비교하였다.

오랜 역사를 바탕으로 기술축적과 인력이 풍부한 산소-아세틸렌 절단기는 일반적으로 S45C와 같은 일반 강을 절단하는데 많이 사용되고 있다. 하지만 산소-아세틸렌 절단기는 철을 제외한 합금강, 비철재질의 절단에는 적합하지 않을뿐더러, 아세틸렌의 특성상 폭발 등 안전사고의 위험성이 있고, 장비의 특성상 휴대하기가 어렵다.

이에 비해 하이브리드 추진 절단은 안전하며, 휴대하기도 편리하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구는 하이브리드 추진 절단 실험장치를 구성하여 여러 가지 재료(철, 비철금속, 합금강) 등의 절단여부를 확인하고 절단속도 등의 절단성능에 대한 실험을 수행함으로써 절단기로서의 가능성을 확인해보는데 그 목적이 있다.

---

† 책임저자의 소속 한국항공대학교  
항공우주 및 기계공학과 대학원  
E-mail : dkyoo76@nate.com  
TEL : (02)300-0057 FAX : (02)3158-4429

\* 저자 2의 소속 한국항공대 항공우주·기계공학과  
\*\* 저자 3의 소속 (주)스페이스 리서치

---

## 2. 하이브리드 연소

### 2.1 하이브리드 연소의 개념

하이브리드 연소란 산화제를 포함한 고체연료로 구성된 고체 추진장치와 액체연료와 산화제를 기반으로 한 액체 추진장치를 혼합한 추진장치로 대개 고체연료와 액체산화제로 구성되어 있다.

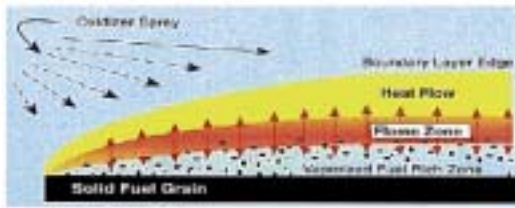


Fig 1. A conceptual diagram of Hybrid combustion

하이브리드 연소는 Fig 1과 같이 고체연료의 열분해로 생성되는 복잡한 연소가스와 산화제의 반응으로 열이 발생하고 연료의 열분해를 위한 열은 화염에서 발생하는 열의 대류와 복사에 의해 얻어져 화염을 중심으로 해서 산화제와 연료가 나누어지는 전형적인 확산 화염 연소현상을 보인다. 하이브리드 추진장치의 기술을 응용한 하이브리드 절단기는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

#### 2.1.1 안전성

하이브리드 추진장치는 고체연료와 액체산화제가 따로 저장·분리되어 있어 서로 상호작용을 하지 않을 뿐만 아니라, 점화나 에너지의 투입이 없이는 산화제와 연료가 서로 반응하지 않으며 연소 시에도 특정 조건에서만 연소 반응이 일어나고 비 작동 영역에서는 바로 연소가 중단되므로 이러한 정확한 제어 연소특성으로 인하여 구조적으로 가장 뛰어난 안전성을 가지고 있다

#### 2.1.2 구조의 단순성

하이브리드 추진장치의 고체연료는 Polymer계열의 고밀도 플라스틱(PE, PP, PMMA)을 사용하므로 취급 시 특별한 면허나 추가 설비 없이 사용할 수 있고, 고체연료의 밀도가 커 소형·경량

화가 가능하고, 산화제 공급 배관만 필요하기 때문에 구조가 매우 간단하다.

### 2.1.3 경제성

고체연료로 사용되는 Polymer계열의 플라스틱 고분자 화합물(PE, PP, PMMA등)은 일반적으로 저렴한 가격에 쉽게 구할 수 있고, 추가 설비없이 하나의 산화제 공급배관만으로 장치를 구성할 수 있다.

## 3. 하이브리드 절단실험장치 구성

### 3.1 전체 실험장치 구성

하이브리드 절단 실험장치는 하이브리드, 연소 절단기, 시편이송장치, 산화제 공급배관, 데이터 획득 장치, 그리고 점화장치로 나눌 수 있다. 전체 실험장치 구성은 Fig 2와 같다.

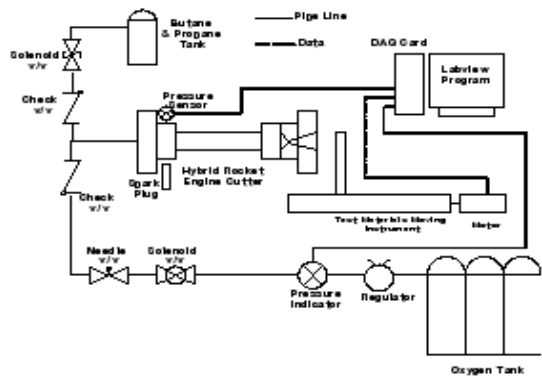


Fig 2 Lab-scale hybrid rocket cutter experiment composition

#### 3.1.1 하이브리드 연소절단기

하이브리드 연소절단기는 고체연료(Chamber)와 Pre-chamber, Nozzle Part가 Flange로 고정되어 있다. 절단기 전체는 Al Profile로 구성되어 있으며, 시편이송장치와 실험장치 구동을 위한 Control Box가 들어가 있고, 각각의 Part는 절단 실험 시 생기는 열로부터 보호하기 위해 분리되어 있다. 하이브리드 연소절단기는 연료형상, 노즐형상에 따라 연소절단실험을 수행할 수 있도록 Fig 2와 3과 같이 구성하였다.



Fig 3 Lab-scale hybrid rocket cutter experiment

연소기 재질은 SUS 304로 가공되었으며, 고체 연료를 제외한 Pre-chamber와 노즐은 고온에서 견딜 수 있는 Graphite로 구성되어 있다. 각각의 부품들은 조립되어 연소기를 구성한다.

**3.1.2 시편이송장치**

다양한 형태의 재료 절단시험을 위해 시편이송 장치를 구성하였다. 이송장치는 절단재료의 종류에 따라, 절단 속도변화에 따른 절단성능(절단속도)을 분석하기 위해 DC Motor와 감속기, 속도 콘트롤러, Ball Screw를 이용하여 시편을 0~1500mm/min의 속력으로 이송시킬 수 있다.



Fig 4 Cutting materials moving instrument

**3.1.3 점화장치(Ignition System)**

초기 실험에서는 점화원으로 니크롬선을 사용하였으나, 1회용으로만 사용가능하고, 연소절단기 후방에서 장착되어 노즐 Sizing할 때 문제점이 발견되어 산업용으로 많이 쓰이고 있는 가스토치를 응용하여 부탄가스와 산소가스를 혼합한 후 점화플러그를 이용하여 초기 점화원으로 사용하였다.

점화시스템과 고전압발생기의 제원은 Fig 5와 Table 1과 같다.



Fig 5. hybrid cutter's Ignition equipment

Table 1. High Voltage generator specification

구분	규격
모델명	KSG110
전원전압	DC 1.5V
출력전압	15kV이상
방전주파수	12±5 Hz
방전에너지	2.0 mJ이상

**3.1.4 데이터 획득장치 (DAQ System)**

하이브리드 연소 절단기 시험장치의 제어와 실험데이터 획득을 위하여 NI사의 DAQ Card를 이용하여 구성하였다.

NI사의 DAQ Card와 LabView Program을 이용하여 시편이송장치 작동 및 방향 Control, 산화제 공급 On/Off, 점화장치 작동 파워 공급 등 각 실험 장치를 컴퓨터로 순차적으로 제어하였으며, 실험을 통해 얻은 산화제 공급 압력 값에 대한 신호는 Analog Input Channel을 통해 컴퓨터로 저장되어 진다.

**3.2 산소-아세틸렌 절단 실험장치 구성**

하이브리드 연소절단기의 성능(절단속도, 절단 가능재료의 분별)을 비교실험하기 위해 실제 산소-아세틸렌 절단 실험 장치를 구성하였다.

각각의 실험조건에 따라 여러 가지 형상의 노즐을 이용하여 탄소강, Stainless steel, 비철금속(알루미늄)등의 절단실험을 수행하여 절단가능여부와 최적절단속도를 살펴보았다.

위 실험을 위해 Fig 6과 같이 산소-아세틸렌 절단 실험 장치를 구성하였다.



Fig 6. Oxygen-Acetylene cutting experiment

### 4. 실험

#### 4.1 산소-아세틸렌 절단 실험

산소-아세틸렌 절단 실험은 절단 가능한 재료의 구별과 절단속도에 대한 실험을 수행하였다. 실험조건은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Oxygen-Acetylene cutting conditions

산화제 공급압력	5 ~ 10kgf/cm <sup>2</sup>
아세틸렌공급압력	0.5 ~ 1kgf/cm <sup>2</sup>
절단재료	S45C, Stainless steel
시편 Size	100mm(폭)×8mm(두께)
절단속도	400 ~ 1000mm/min

#### 4.2 하이브리드 연소 절단 실험

본 연구에서의 하이브리드 연소절단 실험은 기존 산소-아세틸렌 절단기와 비교실험을 통해 절단기로써의 가능성을 확인하고, 최적의 하이브리드 절단기 설계에 필요한 설계 변수를 획득하는 것으로 고체연료, 노즐형상, 그리고 산화제 유량(O/F ratio)를 변화시켜 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 고체연료는 PE(Poly-Ethylene)을 사용하였고, 연료와 산화제의 비(O/F ratio)를 조절하기 위해 고체연료 길이를 100mm, 200mm로 변경하여 실험을 수행하였다.

하이브리드 연소 절단 실험조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Hybrid combustion cutting conditions

	항목	규격
고체연료	고체연료	PE(Poly-ethylene)
	내부 Port 직경	5mm, 10mm
	연료길이	100mm, 200mm
산화제	산화제	GOx
	산화제 공급압력	10 ~ 25kgf/cm <sup>2</sup>
연소실	연소실 압력	7 ~ 22kgf/cm <sup>2</sup>
	노즐 목 직경	1, 1.5, 2mm
	팽창비	2 ~ 6
	노즐 재질	Graphite
절단재료	재질	탄소강, Stainless steel
	사이즈	100×200×8mm
	시편이송속도	100 ~ 1000mm/min

### 5. 실험결과

#### 5.1 산소-아세틸렌 절단

실험은 초기 시편의 모서리 부분을 초기 예열한 후 추가 산소를 공급하는 전형적인 방법을 선택하였다. 총10회의 실험을 수행한 결과, 탄소강(S45C)의 경우에는 별다른 어려움 없이 절단이 가능하였다. 절단속도는 500~700mm/min이고, 절단면은 절단 속도에 따라 조금씩 차이가 있었지만 전체적으로 고르게 절단되었다. 본 연구에서 절단면의 고르기 정도는 고려되지 않았다.

Stainless Steel의 경우는 표면에 내화성 크롬산화물을 형성하기 때문에 일반적인 산소-아세틸렌 절단으로는 절단실험이 불가능 하였다.[1]

#### 5.2 하이브리드 절단 실험

하이브리드 절단방법은 산소-아세틸렌 절단실험과는 약간의 차이가 있다. 산소-아세틸렌 절단은 초기 예열 후 2차 산소를 공급하여 예열된 부분에서 다시 연소가 일어나게 하여 절단하는 연소 절단의 방법이고, 하이브리드 절단실험은 2차 산소의 공급 없이 연소기내에서 일어나는 연소에 의한 열원만을 이용하여 절단하는 용융절단의 형태라 할 수 있다.

하이브리드 절단실험은 다음과 같은 순서로 진행되었다.

[초기산소공급(6-7sec)] → [부탄+프로판 가스공급(8-10sec)] → [점화플러그 작동(8.5-10sec)] → [화염전파에 의한 초기점화] → [주 산화제 공급(10sec)] → [연소시작(10sec)] → [산화제 공급중지(50sec)]

초기 산소공급은 점화를 위한 공급으로 부탄+프로판 가스가 공급될 때 연소기 내에 남아있는 산소와 혼합하여 점화를 발생시키도록 구성하였다. Fig 7은 고체연료 내부에서 점화가 일어나는 과정을 나타낸 그림이다. 실험결과 초기 점화에서 화염이 전파되어 고체연료가 기화하여 연소가 가능한 기체상태의 연료가 발생하고 주 산화제와 만나 연소가 진행되는 전형적인 확산화염 형상을 확인할 수 있었다.



Fig 7 Flame shape as combustion processing in chamber

하이브리드 연소절단실험도 산소-아세틸렌 절단기와 같은 방법으로 초기에 시편의 위치를 하이브리드 연소화염에 맞추어 모서리에 맞추어 놓고 연소가 진행되면 시편이송장치를 이용하여 시편을 원하는 속도로 이송시키는 방법으로 진행하였다. 탄소강(S45C)[100mm(폭)×8mm(두께)]의 경우는 화염이 지나간 절단면은 비교적 깨끗하게 나타나는 것을 알 수 있지만, 절단이 진행되는 동안 화염이 시편에 의해 굴절되어 이미 절단된 면에 2차적으로 생성물이 용착되는 것을 알 수 있었다.

Fig 8은 하이브리드 연소절단후의 탄소강의 형상을 나타낸 그림이다.



Fig 8. Normal steel materials by cutting hybrid combustion cutter

절단 속도가 느린 영역에서는 절단 폭이 크고 절단면이 비교적 깨끗한데 비해 절단 속도가 빠른 영역에서는 절단 폭은 작지만 화염의 굴절이 심해져 절단면은 많은 양의 2차 생성물이 용착되는 것을 알 수 있었다. 또한 하이브리드 절단연소기의 탄소강 절단속도는 최대 약 400mm/min이다.

Stainless steel 절단의 경우는 탄소강의 경우보다 더 많은 열량을 요구한다. 본 실험에서는 탄소강에서의 조건(절단속도, 산화제 공급압력 등)을 동일시하여 실험을 수행하였다. 탄소강과 같은 조건에서는 연소가스가 지나간 흔적만 생기고 절단은 실패하였다. 여러 번의 절단 실패는 충분한 예열 전에 시편 이송과 산화제 공급압력을 낮게 설정하여 시편을 절단시킬 수 있는 충분한 온도까지 올라가지 못하는데 그 원인이 있었다.

절단속도 150~280mm/min에서 하이브리드 연소 절단기의 Stainless steel 절단실험이 성공하였다. 절단 성공조건은 산화제 공급압력이 15kgf/cm<sup>2</sup> 이상이 되었을 때이다. 그 이하일 경우는 열량, 연소온도와 연소 속도 등이 Stainless steel 용융절단이 불가능하였다. 산화제 공급압력이 20 kgf/cm<sup>2</sup>일 때가 가장 안정적이고 효과적으로 절단되었다. 산화제 공급압력이 Fig 9는 하이브리드 연소절단기에 의해 절단된 Stainless steel 시편을 보여주고 있다.



Fig 9. Stainless steel materials by cutting hybrid combustion cutter

초기점화시간 약 3초, 연소시간 40초, 총 40초간의 연소후의 고체연료는 초기상태를 유지한 채로 연소되었지만, 연속해서 2분 이상 연소시킨 고체연료는 열에 견디지 못해 경도가 약해서 Flange의 누르는 힘에 의해 일그러짐을 볼 수 있었다. 이러한 문제점은 고체연료 외부에 case를 장착함으로써 문제를 해결할 수 있었다.

Fig 10은 고체연료의 연소 전·후의 형상을 나타낸 그림이다.



Fig 10. Solid Fuel(PE) shape before and after combustion

#### 4. 결 론

하이브리드 로켓 추진기관의 연소가스를 이용하여 개발된 하이브리드 연소절단기의 기초절단실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험실에서 보유하고 있는 항공우주산업 기술인 하이브리드 로켓 추진기관을 응용하여 하이브리드 연소 절단실험장치의 절단기로서의 가능성을 확인하였다.

(2) 탄소강 절단의 경우 최대 절단속도 400mm/min으로 절단이 가능하였고, 화염의 굴절 및 절단폭등에 대한 문제점을 알아낼 수 있었다. 추후 실험에서는 화염의 굴절 및 절단 폭 그리고 절단면에 대한 성능개선이 있어야 할 것이다.

(3) Stainless steel의 경우에는 산소-아세틸렌 절단기에 비해서 확연히 다른 점을 볼 수 있었다. 절단속도 면에서는 약 200mm/min 정도로 탄소강에 비해 느리지만 절단실험을 통해 합금강 및 비철금속의 절단기로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 공통핵심 기술개발사업의 지원 하에 “하이브리드 열원을 이용한 절단기 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) 고진현, 김광수, 김정환, 방국수, 연운모, 이보영, 이상을 공역, 2002, “Modern Welding Technology”, Howard B. Cary, Fifth Edition pp 271-274
- (2) (주)스페이스 리서치, 2003, “하이브리드 열원을 이용한 절단기 개발” 산업기술개발사업 중간 보고서
- (3) George P. Sutton, Oscar Biblarz, “Rocket Propulsion Elements”, Wiley Interscience, Seventh Edition, pp 579-606
- (4) Ronald W. Humble, Gary N. Henry, Wiley J. Larson “Space Propulsion analysis and Design” McGraw-Hill, pp 365-439