

Technical Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2024.28.2.053>

파이로구동장치를 이용한 발사체 역추진모터 시험결과

임유철^{a,*} · 장민호^a · 마근수^a

Retro Motor Test Result of Launch Vehicle using PYDU

Youchol Lim^{a,*} · Minho Jang^a · Kensu Ma^a

^aLaunch Vehicle Technology Research Division (2), Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: yclim1002@kari.re.kr

ABSTRACT

In the case of KSLV-II flight test, the retro motor ignition is performed at the same time as the stage separation pyro-lock detonation, and the ignition energy of the retro motor is also supplied by an electrical drive signal from the PYDU(Pyrotechnic Driving Unit). Therefore, in order to verify final reliability prior to the KSLV-II flight test, a retro motor ignition test including a stage separation pyro-lock was performed at the dock of the Naro Space Center on August 11, 2021. The test results are summarized and described in this paper.

초 록

한국형발사체 비행시험의 경우 단분리시 단분리 파이로락 기폭과 동시에 역추진모터 점화도 함께 이루어지며 역추진모터 점화 또한 파이로구동장치에서 전기적 구동신호를 공급한다. 따라서 한국형발사체 비행시험에 앞서 최종 신뢰성 확보차원에서 2021년 8월 11일에 나로우주센터 선착장에서 단분리 파이로락을 포함한 역추진모터 점화시험을 수행하였으며 본 논문에서 그 결과를 정리하여 기술한다.

Key Words: INGU(Inertial Navigation Guidance Unit, 관성항법유도장치), KSLV-II(Korea Space Launch Vehicle-II, 한국형발사체), PYDU(Pyrotechnic Driving Unit), Pyro(파이로), Retro Motor(역추진모터), Stage Separation (단분리), SAD(Safe Arm Device, 안전장전장치)

1. 개 요

파이로구동장치(PYDU: Pyrotechnic Driving Unit)는 한국형발사체에 각 단별로 탑재되는 전자탑재

장치중 하나이다. 1단 PYDU의 주요기능은 화재 안전장치 파이로벨브 점화, 1/2단 분리 및 1단 역추진모터 기폭관을 점화하며, 2단 PYDU는 2단 가속모터 점화, 2/3단 분리 및 2단 역추진모터 점화를 수행한다. 마지막 3단 PYDU는 페어링분리 및 위성분리 파이로를 점화하게 된다. 본 논문에서 기술되는 역추진모터 점화 시험은 1단 PYDU 기능 중 1/2단 단분리 및 1단 역추진모터 기폭 시험에 해당되는 내용이다. PYDU의 계측데

Received 4 December 2023 / Revised 13 March 2024 / Accepted 16 March 2024

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2023년도 추계학술대회(2023.11.29.~12.1, 경주 리한셀렉트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

이터는 크게 2가지로 분류되는데 RS-422통신을 통해 전달되는 PYDU 내부에서 계측되는 데이터와 DAQ (Data Acquisition) 점검장비를 통하여 외부에서 계측하는 데이터로 구분된다. RS-422 데이터는 200Hz의 샘플링으로 PYDU 자체에서 계측하여 전송되며 DAQ 점검장비에서는 최소 1kHz이상으로 데이터를 외부에서 계측하여 저장하도록 구성된다. 본 시험의 데이터 분석은 기폭시 전압과 전류의 상호 연관성 파악, 파이로 수량에 따른 기폭 전압 및 전류 변화, 기폭 데이터들의 일관성 여부, 샘플링 주파수에 따른 계측 가능성 여부에 주안점을 두고 시험결과를 정리한다.

본 논문의 순서는 편의상 PYDU 규격 및 형상을 간략히 소개하고 PYDU를 포함한 역추진모터와 단분리용 파이로락 사이의 시험구성에 대해 기술한 후 마지막 역추진모터 점화 및 단분리 파이로 구동 시험결과에 대해 전기적 시험데이터를 기반으로 결과를 분석하고 정리한 후 결론을 맺도록 한다.

2. 파이로구동장치 규격

PYDU의 입출력을 간략히 요약하면 4가지의 외부명령을 입력받아 24채널 기폭스위치에서 해당 스위치를 구동하여 기폭에너지를 출력하는 것이다. 4가지 외부명령에 각각 16채널, 2채널, 2채널, 4채널의 기폭스위치를 매핑하여 입출력을 수행하도록 설계하였다. 또한 각 채널의 기폭스위치는 FET와 Nonlatch 릴레이 조합으로 설계

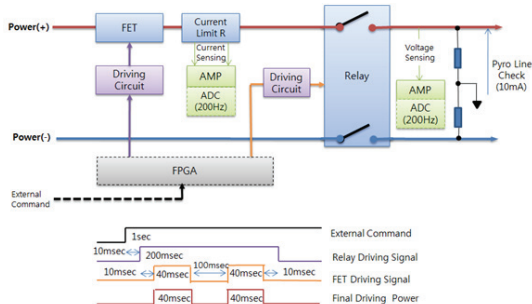


Fig. 1 Configuration of PYDU firing switch circuit.

Table 1. Specification of 24CH PYDU.

Parameter	Spec
Mass	< 6.8 kg
Number of Input Command	4
Number of Firing Switch	24
Type of Firing Switch	FET + NL Relay
Firing Pulse Width & Current	5±0.2A/CH, PW 40msec
Max number for simultaneous detonation	24
Number of Analog monitor	31
Number of Discrete monitor	16
Serial Communication	RS-422 (230,400 bps)
Input Power Voltage	28±6 V

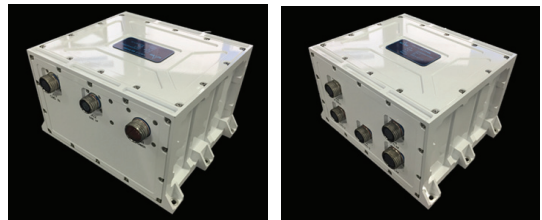


Fig. 2 Real product of KSLV-II PYDU.

되었으며 각 채널당 기폭전류는 40msec동안 5±0.2A로 설정되었다. 세부 설계규격 및 채널별 스위치 구성도는 그림 1과 같다.

실제 PYDU는 6.68 kg 무게와 214.7(L) × 267.4(W) × 157(H) mm 크기에 커넥터는 총 8개로 그림 2와 같이 제작되었다. J01은 28±6V 전원입력, J02는 Pre-ARM & ARM 제어 및 RS-422 통신, J03은 외부명령입력, J04와 J05는 모니터링 상태 신호 출력, J06~J08은 8채널씩 총 24채널 기폭출력으로 구성되었다.

3. 단분리 시험 구성

한국형발사체의 단분리 명령 계통과 관련된

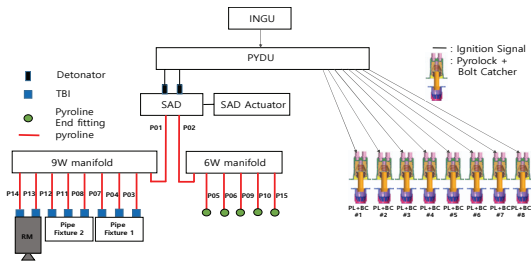


Fig. 3 Concept configuration of stage separation test.

구성품은 관성항법유도장치(INGU), 파이로구동장치(PYDU), 안전장전장치(SAD), 단분리 시스템, 화약전달계통 구성품 및 역추진모터(카울포함) 등으로 구성된다. 본 시험에서는 단분리 계통의 관련 구성품을 동일하게 구성하는데 제한적인 조건이 있어 단분리 명령은 1/2단 파이로구속장치 8기에 착화기를 각각 1기씩 적용하여 총 8기의 파이로락 분리를 수행하도록 하였고 역추진모터 점화 명령은 8기중 1기만 설치하여 화약전달계통 및 카울을 포함하고 있는 역추진모터 작동 여부를 확인하는 데 사용하였다. 이와 관련된 단분리 명령과 역추진모터 점화 명령 계통에 대한 대략적인 시험 구성도는 그림 3과 같다.

단분리시험에서 역추진모터 점화의 기폭에너지 전달 개념은 다음과 같다. 초기에 안전모드(safe mode)상태인 안전장전장치를 시험용 안전장전장치 구동기(SAD Actuator)를 이용하여 장전모드(arm mode)상태로 전환한 후 PYDU에서 기폭 전기 신호를 기폭관에 보내면 기폭관이 기폭된다. 기폭관의 기폭으로 생성된 기폭에너지는 안전장전장치 후단의 파이로라인에 전달되어 9구 매니폴드 및 6구 매니폴드 내부의 선형 화약을 기폭시키고 이를 통해 9구 매니폴드 및 6구 매니폴드 출력단 파이로라인으로 기폭에너지가 전달되어 최종적으로 9구 매니폴드 출력단 파이로라인 끝단에 조립되어 있는 격벽착화기를 기폭시킨다. 격벽착화기 6기는 방폭 치구 내부에 조립되어 있는 배관형 치구 1, 2에 각각 3기씩 조립하여 격벽착화기 기폭시 발생하는 파편이 외부로 유출되지 못하도록 하였으며 격벽착화기 2기는 역추진모터 점화기의 입력단에 기폭에너지를 전달하게 된다.

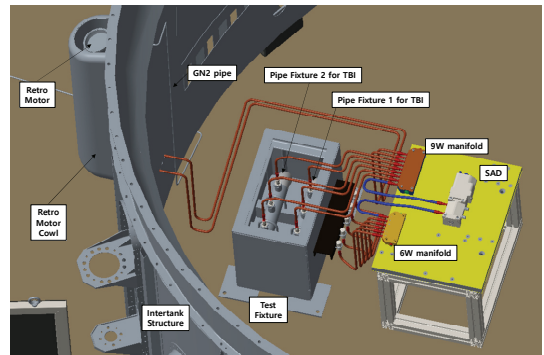


Fig. 4 Concept configuration for retro-motor ignition.

참고로 본 시험에 사용된 구조체는 역추진모터가 장착되는 KSLV-II 1단 산화제탱크와 연료탱크 사이의 탱크연결부이며 단분리용 파이로락은 산화제탱크 위의 전방동체 단분리면에 위치하게 되는데 시험 편의상 파이로락 또한 탱크연결부 구조체 안쪽에 위치시키고 시험을 진행하였다.

안전을 위하여 SAD 및 파이로락 분리볼트로부터 기폭장치에 해당하는 PYDU까지의 연결 케이블은 안전을 고려하여 20m로 설계 제작하였다. 실제 KSLV-II 비행시험의 경우 PYDU는 1단 전방동체에 탑재되어 1/2단 분리면의 분리볼트까지의 케이블 길이는 3m 이하로, 탱크연결부의 역추진모터 점화용 SAD까지의 케이블 거리는 15m 이하로 설계된다. 구축된 단분리시험 구성은 그림5와 같다.

그림5에서 보듯이 PYDU는 탱크연결부 구조체와 대략 15m 떨어진 공간에 위치시켰으며 화약류에 해당되는 8개의 파이로락과 1기의 SAD는 구조체 안쪽에 설치하였다. PYDU의 기폭채널 1

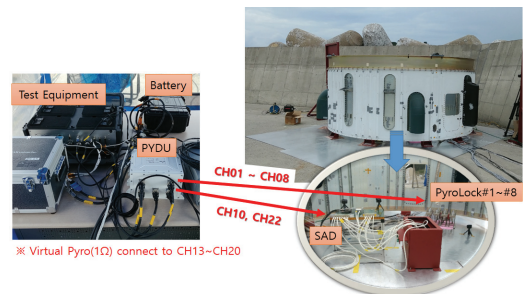


Fig. 5 Real configuration of stage separation test.

번부터 8번까지 8개의 파이로락에 1:1로 매칭하여 연결하였고 채널 10번과 22번은 역추진모터 점화용 SAD에 연결하였으며 추가로 채널 13번부터 20번까지는 1Ω 저항에 연결하였다. 8개 기폭채널에 1Ω 저항을 연결한 이유는 비행조건과 전기적 조건을 유사하게 가져가기 위한 목적으로 실제 단분리용 파이로락에는 1기당 2개의 기폭채널이 연결되는데 이를 간접적으로 모사한 것이다.

단분리 명령은 INGU장치로부터 명령을 직접 전달받도록 구성하였으며 PYDU의 전원은 순간적으로 80A 전류공급이 가능한 +28V 배터리를 사용하였다. PYDU로부터 출력되는 상태신호를 계측하기 위해 점검장비와 DAQ계측 컴퓨터를 PYDU에 연결하였고, 원격 점화선 점검 및 모드 전환을 수행하기 위해 PYDU의 직렬통신 커넥터에 RS422통신용 컴퓨터를 이용하여 제어할 수 있도록 구성하였다. 역추진모터를 포함한 탱크연결부 내부의 화약계통 상세 연결구성 및 형상은 다음과 같다.

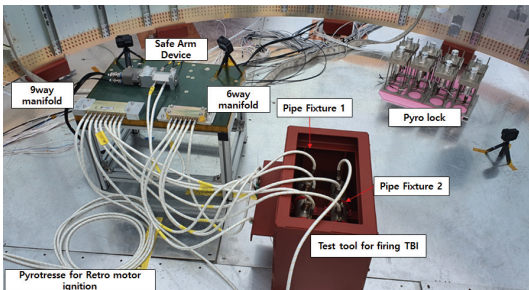


Fig. 6 Real configuration for retro-motor ignition and stage separation.

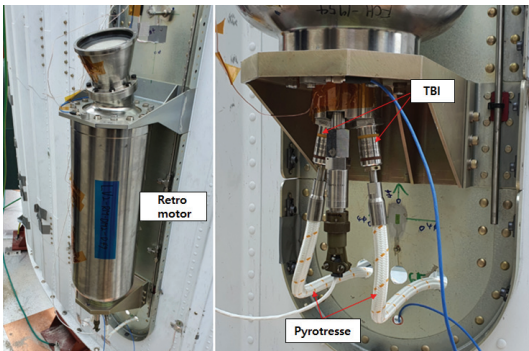


Fig. 7 Real product of KSLV-II retro-motor.

4. 단분리 시험결과

역추진모터 점화를 포함한 단분리 시험은 정상적으로 수행되었다. 본 논문의 목적은 PYDU 입장에서 단분리 및 역추진모터 점화시 전기적 특성을 파악하는 데 있다. 따라서 단분리시 점검장비를 통해 계측된 PYDU 상태정보를 자세히 살펴보도록 한다. PYDU 계측데이터는 크게 2가지로 분류되는데 RS-422통신을 통해 계측되는 데이터와 DAQ 점검장비를 통하여 계측하는 데이터로 구분된다. RS-422데이터는 200Hz의 샘플링으로 PYDU 자체에서 계측하여 전송되며 DAQ 점검장비에서는 4kHz의 샘플율로 데이터를 계측하여 저장하도록 설정하였다.

PYDU 규격에서 언급했듯이 1단 PYDU에는 전체 24채널의 기폭스위치가 있으며 이번 시험에서 채널1~8번에 파이로락 분리볼트의 착화기를 연결하고 채널10번과 22번에 역추진모터 점화용 SAD 기폭관을 그리고 채널 13~20번에는 1Ω 저항을 연결하여 총 18채널의 스위치를 동시 구동하였다. 단분리시 Pre-ARM 스위치와 ARM 스위치를 통하여 흐른 전류와 그 때의 전압 상태를 보여준다. 우선 전압과 전류 상관관계에서 봤을 때 약 83A의 전류가 흐르는 동안 전압이 대략 32V에서 26V까지 대략 6V정도 떨어지는 것을 확인할 수 있으며 Pre-ARM과 ARM의 전압과 전류 특성은 거의 동일하게 계측된 것을 확인할 수 있었다.

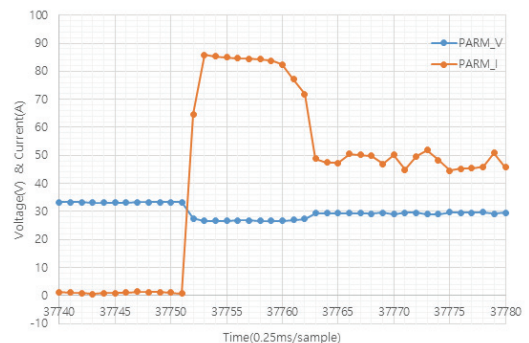


Fig. 8 PYDU Pre-ARM current and voltage at stage separation command time.

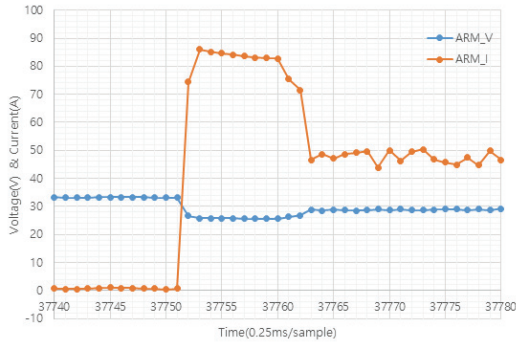


Fig. 9 PYDU ARM current and voltage at stage separation command time.

실제 단분리 착화기가 기폭되는데 경과된 시간은 대략 2.5msec 임을 확인 할 수 있었다. 이는 참고문헌[1-3]에서 알려진 착화기 기폭시간 1~1.5msec 보다는 약간 길게 측정되었다.

상대적으로 대략 1msec 시간이 늘어난 이유는 여러 개의 착화기 및 기폭관이 동시에 기폭되면서 소모전류가 증가됨에 따라 착화기에 전달되는 공급전압이 케이블 저항에 의해 낮아(drop)지면서 공급전류가 상대적으로 줄어들었기 때문이다. 이에 대한 근거는 한국형발사체 개발과정에서 시험을 통해 확인된 표 2의 단분리용 분리볼트 착화기의 기폭특성이 뒷받침해준다.

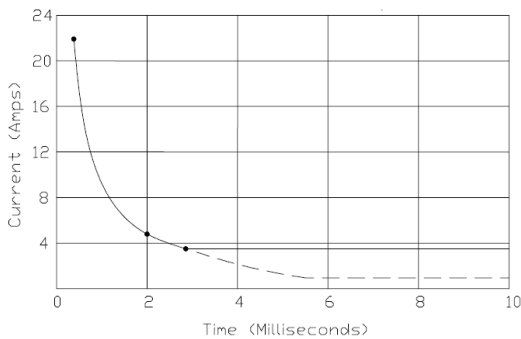


Fig. 10 Current vs Time ignition curve of NSI PC-23.

Table 2. Ignition test result of KSLV-II PC-800[4].

Current (A)	5	4.65	4.5	4.18	4.07
Time (ms)	1.5	2.25	2.5	3	3

다음은 단분리시 각각의 해당 채널에서 측정된 전압신호이다. 분리볼트의 착화기가 연결된 8 채널과 역추진모터 기폭관에 연결된 2채널 모두 기폭순간 대략 14~15V를 2.5msec(1.75msec) 유지하다가 기폭이 완료된 후 약 28V로 상승하는 동일한 결과를 보인다. 14~15V 전압을 유지하는 동안 채널당 전류는 ARM 전류를 근거로 할 때 $4.61A(=83A \div 18\text{채널})$ 정도 각각의 착화기와 기폭관에 흐른 것으로 추정된다. 여기서 83A는 그림 9의 기폭구간에 평균 ARM 전류값을 의미한다. 이는 엄밀하게 5A의 기폭전류 요구조건을 만족시키지 못하는데 그 이유는 PYDU로부터 착화기(기폭관)까지의 케이블이 실제 비행조건 대비 매우 길게 구성함으로써 케이블 저항이 증가되었기 때문으로 판단된다. 즉 공급된 전압과 전류를 근거로 착화기와 기폭출력 케이블의 저항을 계산해보면 대략 $3.15\Omega(=14.5V \div 4.61A)$ 정도임을 알 수 있다. 따라서 공급되는 전압 및 케이블 저항 조건이 변경되면 5A의 기폭전류 요구조건은 만족될 것으로 예상된다.

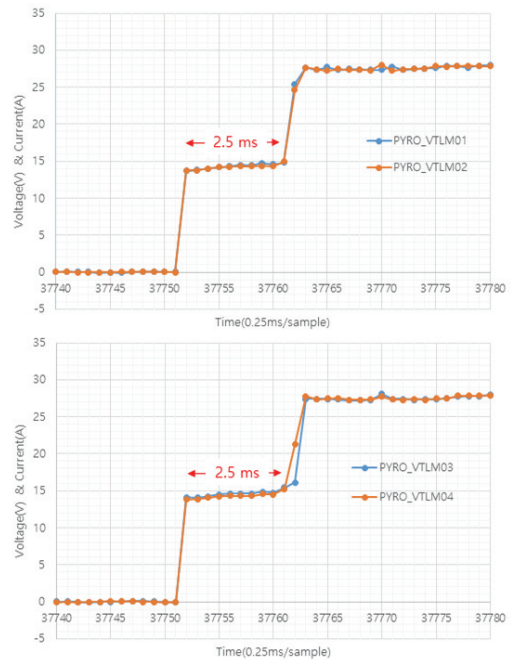


Fig. 11 Firing voltage of pyro-lock #1~#4.

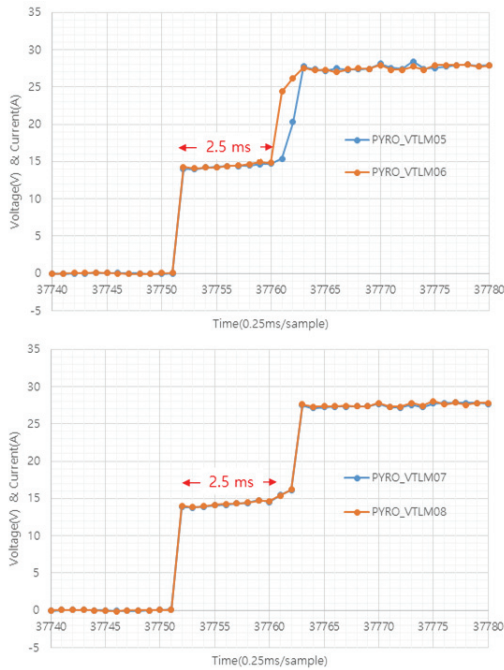


Fig. 12 Firing voltage of pyro-lock #5~#8.

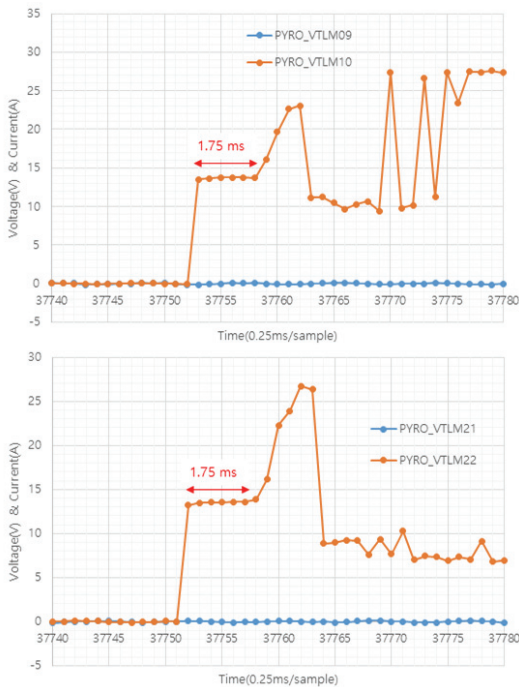


Fig. 13 Firing voltage of retro-motor SAD.

참고로 단분리 파이로락의 경우 기폭후에 복귀되는 전압이 배터리 전압인 32V가 아닌 28V인 이유는 기폭채널 13~20번에 연결된 1Ω 저항에는 40ms동안 기폭전류가 지속적으로 공급되면서 나타나는 현상이며, 역추진모터 점화용 SAD가 연결된 채널 10번과 22번의 경우 1.75ms 기폭후에 랜덤한 전압 특성을 보이는 것은 기폭후 Post-firing short circuit 현상에 의한 것으로 판단된다. 추가로 기폭지연시간에 있어 국내업체에서 제작된 분리볼트의 착화기와 외국에서 수입된 SAD의 기폭관 사이에 차이가 있는데 이는 각 제조사 화약의 특성차가 있음을 확인할 수 있다. INGU로부터 기폭명령이 입력된 후 실제 기폭출력까지의 지연시간은 21.5msec로 설계된 규격대로 동작한 것을 아래 파형을 통해 또한 확인할 수 있었다.

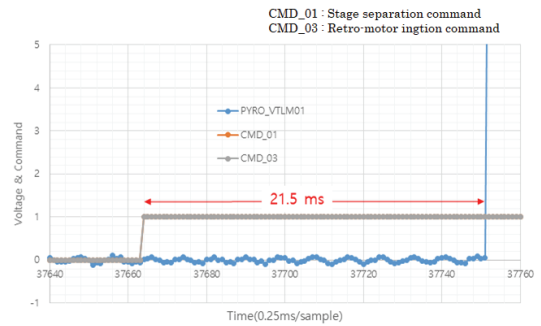


Fig. 14 Time between stage separation command and firing voltage output.

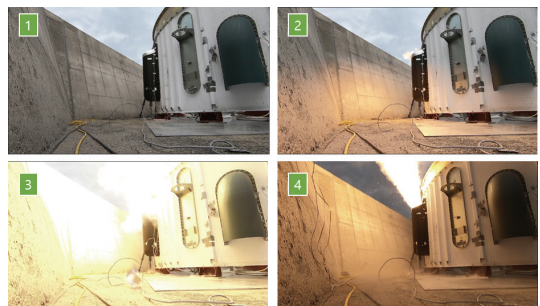


Fig. 15 Screen capture of retro-motor ignition test.

5. 결 론

본 논문은 한국형발사체 단분리 화약계통 검증 및 신뢰성 확보차원에서 2021년 8월 11일에 나로우주센터 선착장에서 역추진모터를 포함한 단분리 시험을 수행하였으며 PYDU 관점에서 그 결과를 정리하였다. 단분리 시험은 역추진모터 접화에 좀 더 주안점을 두고 시험을 진행하였으며 PYDU의 기폭 명령도 INGU로부터 직접 받도록 시험을 구성하였다.

단분리 시점에서 계측된 데이터를 분석한 결과 모사저항을 포함한 착화기 및 기폭관 연결된 18채널 모두 정상적으로 기폭된 것을 확인하였으며 기폭시간은 각각 2.5ms, 1.75ms로 계측되었다. 또한 측정된 데이터를 근거로 하여 기폭출력 하니스의 저항 및 기폭시 착화기에 인가되는 전류량이 4.61A임을 간접적으로 유추할 수 있었으며 INGU로부터 구동명령이 입력된 후에 기폭신호가 출력되기까지의 지연시간은 21.5msec로 계

측되었다. 이는 설계규격 범위 내에서 동작되었음을 재확인하였다. 본 자료는 실제 한국형발사체 비행시험 데이터 분석에 유용하게 활용되었다.

References

1. Laurence J.B. and Morry, L.S., *A Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification*, NASA Technical Memorandum 110172, 1995.
2. "The PC-23 NSI Commercial Equivalent User's Guide," HSTC 9392410-5944, Hi-Shear Technology Corporation, 2008.
3. *PC23 Initiator, Equivalent NASA Standard Initiator(NSI) Datasheet*, Hi-Shear Technology Corporation, <http://www.hstc.com>.
4. Y.C. Lim., Stage Separation Test Result, KARI-ELT-ELN-2021-005, KARI technical note, 2021.