

# 스플릿 타입 분리장치의 수학적 동적 분리 거동 모델링

황대현\* · 한재홍\*<sup>†</sup> · 이용조\*\* · 김동진\*\*\*

## Mathematical separation behavior modeling for the split-type separation device

Dae-Hyun Hwang\* · Jae-Hung Han\*<sup>†</sup> · Yeungjo Lee\*\* · Dongjin Kim\*\*\*

### ABSTRACT

When many space launchers and rockets need to be separated, the pyrotechnic separators have been widely used because of their high reliability and high energy generation. However, intensive pyroshock and debris from the high-explosive type separator may cause fatal damage to the equipment inside of the space launchers or rockets. To solve this problem, a pressure-cartridge type low-impact separator has been developed. In this study, one of the low-impact separators, the split-type pyrolock, was used. We established a mathematical model for the split-type pyrolock that simulates the state of combustion gas and the separation behavior of four independent internal components and verified the mathematical model through comparing with experiment results.

### 초 록

많은 우주 발사체와 로켓에 분리가 필요한 순간에 작동하는 파이로 분리장치는 높은 신뢰도 및 에너지를 갖는다는 장점을 가져 널리 활용되어 왔다. 그 중 high-explosive 타입의 분리장치에서 발생하는 충격과 파편은 발사체 내부 탑재 장치에 치명적 손상을 야기 할 수 있고, 이러한 문제를 해결하기 위해 압력 카트리지 방식의 저충격 분리장치가 개발되어 왔다. 본 연구에서는 저충격 분리장치중 하나인 스플릿 타입 파이로락에 대하여 연소상태와 파이로락을 구성하는 4개의 독립적 내부 부품의 분리 거동을 모사하는 수학적 모델을 설립하고, 실험 결과와 비교를 통해 검증을 수행하였다.

Key Words: Pyrotechnic Separation Device(파이로 분리 장치), Pressure Cartridge(압력 카트리지), Initiator(착화기), Mathematical Model(수학적 모델)

### 1. 서 론

\* KAIST 항공우주공학과

\*\* 국방과학연구소 기4-1

\*\*\* (주)한화 종합연구소

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: jaehunghan@kaist.ac.kr

우주 구조물과 로켓 발사체의 분리에 활용되는 분리장치에는 주로 폭발 현상을 이용하는 방

식을 사용한다[1]. 이러한 화약을 사용하는 분리 장치는 분리 볼트와 분리 너트, 그리고 핀폴러 등 다양한 장치가 있고, 분리 방식은 고폭약에서 발생한 detonation wave를 이용하여 구조를 절단하는 high-explosive 타입과 화약의 연소시 발생된 압력을 작동력으로 활용하여 기계적 잠금을 해제하는 pressure cartridge 타입으로 분류할 수 있다[1]. 본 연구에서는 국내에서 개발한 pressure cartridge를 적용한 분리볼트 중 하나인 스플릿 타입 파이로락에 대하여 작동시 장치 내부에서 발생하는 분리 거동의 메커니즘을 모사하는 수학적 모델을 설립하고, 이를 실험결과와 비교하였다.

## 2. 스플릿 타입 파이로락

### 2.1 구조 및 작동 원리

스플릿 타입 파이로락은 볼트와 볼트 머리 둘레에 위치하여 인장하중을 지지하는 4개의 스플릿, 스플릿을 구속하여 초기 상태에 분리가 되지 않도록 고정하는 바디, 착화기에서 생성된 압력을 볼트에 전달하는 피스톤, 그리고 내부 부품을 감싸는 하우징과 캡 너트로 이루어져 있다. 분리 거동을 간략히 설명하면, 먼저 장착된 착화기로 전기 신호가 들어와 내부 화약이 점화된다. 점화된 화약에서 연소 가스가 발생하고, 이때 생성된 챔버내부의 고압 환경은 피스톤과 바디를 밀어내게 된다. 바디가 스플릿의 높이만큼 이동하면 스플릿을 감싸고 있던 구속이 해제되며 압력힘과 구조인장력에 의해 볼트와 스플릿이 wedge sliding 운동을 하며 분리가 이루어진다.

### 2.2 수학적 모델링

스플릿 타입 파이로락은 이동하는 바디의 충돌 및 정지 시 발생하는 기계적 충격을 저감하기 위해 4개의 좌굴 기둥이 부착된 충격흡수장치를 활용한다. 바디가 이동하는 과정에서 받는 좌굴 저항력을 예측하기 위해 우선 ANSYS AUTODYN을 활용하여 단일 좌굴 기둥에 대한 Explicit 해석을 수행하였다. 획득한 저항력은

sgolay filter를 통해 MATLAB에 변위 대비 저항력의 형태로 입력된다. 스플릿의 미끄럼 운동의 각도는 스플릿이 원주방향으로 4등분된 형태이므로 단면의 각도 30 deg가 아닌 작동 궤적을 고려하여 24 deg를 산출하여 적용하였다. 부품간 접촉 상호작용은 '스플릿-볼트', '스플릿-하우징', '스플릿-피스톤' 3가지를 고려하였으며, 각각 가상의 스프링과 댐퍼를 적용하여 상대운동으로 기술하였다. 접촉과 비접촉 상태는 ODE solver의 수렴성을 위해 sigmoid 함수로 근사하였다. 수학적 모델은 연소 변수와 바디, 피스톤, 볼트 그리고 링 스플릿의 변위 및 속도를 포함하여 총 12개 변수에 대한 연립 미분방정식으로 구성된다.

## 3. 해석 결과 및 검증

### 3.1 수학적 모델 결과

MATLAB ODE45함수를 이용한 해석 결과, 최대 압력은 0.144 ms에서 3554 psi이고 연소 종료 시점은 0.328 ms임을 확인하였다. 바디의 거동은 0.4ms에 최대 거리에 도달하며, 이동 속도는 20.27m/s까지 상승한 뒤 충돌에 의해 정지한다. 스플릿, 피스톤과 볼트는 스플릿에 대한 구속조건이 제거된 후 동시에 가속되고, 볼트는 피스톤과 스플릿이 충돌하는 순간 피스톤과 접촉이 해제되어 등속 운동을 한다. 스플릿은 약 2.6 mm 이동 후 하우징 내벽과 충돌하고 이후 피스톤과 충돌하여 정지하게 된다. 분리시점은 스플릿 사이에 접하는 원의 내경이 볼트 헤드의 외경과 같아지는 시점으로 정의하면 0.8493 ms이다. 동일 모델에 대한 3회의 실험 결과에서 바디의 최대 속도는 평균 19.99 m/s, 볼트가 1.48 mm, 1.70 mm 거리에 도달하는 시간은 0.84 ms, 0.91 ms로, 수학적 모델의 결과와 비교하면 바디의 최대 속도에서 1.40%, 볼트의 변위 도달 시간에서 각각 0.60%, 5.05%의 오차를 보여 본 연구에서 설립한 수학적 모델의 타당성을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스플릿 타입 파이로락의 분리 거동에 대한 수학적 모델링을 수행하였다. 수학적모델은 CEA library를 바탕으로 한 연소 모델과 파이로락 내부 5개 부품 간 상호작용을 모사한 12개 변수의 연립방정식으로 구성된다. 해석 결과, 장치 내부에서 발생하는 최대 압력, 그리고 바디와 스플릿, 피스톤과 볼트에 대해 1 ms 내에 발생하는 분리 거동을 획득하였다. 실험 결과와 비교를 통한 검증으로 수학적 모델의 타당성을 입증하였다.

#### 후 기

본 연구는 '유도탄용 고성능 PMD 기술' 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. Bement, L.J. and Schimmel, M. L. (1995). "A Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification", *NASA, NASA Technical Memorandum 110172*, 1995