

공중 플랫폼용 레일 발사기구의 전자기계식 안전잠금장치 설계에 대한 연구

정소라^{*,1)} · 김용일¹⁾ · 이준호¹⁾ · 배민지¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제2기술연구원 제4체계개발단

A Study on the Design of Electromechanical Safety Locking Device of Rail Launcher for Air Platform

Sora Jeong^{*,1)} · Yongil Kim¹⁾ · Joon-ho Lee¹⁾ · Minji Bae¹⁾

¹⁾ 2nd R&D Institute 4th PMO, Agency for Defense Development, Korea

(Received 13 December 2024 / Revised 28 February 2025 / Accepted 5 March 2025)

Abstract

Rail launchers for air platforms have store locking devices. If excessive force is applied to the launcher beyond the allowable store locking force, the locking device will unintentionally release the store. In order to prevent the inadvertent release, an electromechanical safety locking device(ESLD) is newly applied to the rail launcher. The ESLD includes a structure which supports the end-tip of the detent to prevent the detent from rotating except at the moment of launch. The ESLD prevents detent rotation even if vibration or impact is applied. In this paper, the performance of the ESLD was verified through dynamic analysis and tests. For the analysis, vibration test profile, shock test profile and actual Barrier Arresting Kit pass-through measurement data were used. The analysis was performed by applying these values to the model. For the tests, vibration tests, shock tests and Barrier Arresting Kit pass test were conducted.

Key Words : Rail Launcher(레일 발사기구), Electromechanical Safety Locking Device(전자기계식 안전잠금장치), 동역학해석(Dynamic Analysis), 진동시험(Vibration Test), 충격시험(Shock Test), Air Platform(항공 플랫폼)

1. 서론

공중 플랫폼용 레일 발사기구의 잠금장치는 발사체의 고정 및 발사를 돕는 장치이다. 이 장치는 발사체가

발사기구에 장착되어 있다가 이탈 명령이 인가되었을 때만 이탈이 되도록 하며, 그 이외의 경우엔 발사체가 이탈하지 못하도록 구속하는 잠금장치이다. 일반적으로 발사기구는 기계식 잠금장치 방식이 적용되고 있으며, 이 방식은 장치 내에 조립된 디텐트 스프링의 힘으로 고정되어 있다가 발사체의 추력이 디텐트 스프링 힘 보다 커지면 디텐트가 회전하면서 구속이 해제

* Corresponding author, E-mail: sora@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

되고 발사체가 발사기구를 이탈하게 되는 방식이다.

그러나 이 방식은 발사체의 추력과 유사한 충격이나, 디텐트 스프링의 힘보다 큰 힘이 가해지면 의도치 않은 발사체의 이탈이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 실제로 Fig. 1과 같이 미국 항공모함에서 F/A-18의 착륙 충격으로 AIM-9 Sidewinder가 비정상적으로 이탈했고^[1], 또한 기계식 잠금장치를 적용한 발사기구의 시험 중 항공 플랫폼의 랜딩기어가 Fig. 2와 같은 도넛 형태의 초과저지장비(Barrier Arresting Kit, BAK)^[2]를 밟고 통과하면서 발생한 충격에 의해 발사체가 비정상 이탈한 사례가 있었다. 이러한 발사체의 비정상적인 이탈은 공중 플랫폼의 생존성에 영향을 줄 수 있어서 잠금장치는 발사기구에서 매우 중요한 부분이다. 본 논문에서는 이러한 기계식 잠금장치의 문제점을 보완하기 위해, 솔레노이드를 활용한 전자기계식 안전잠금장치(Electromechanical Safety Locking Device, 이하 ESLD)를 제안하여, 공중 플랫폼의 생존성을 높인 방식으로 설계하였다. 그리고 운용진동 조건, 기능 충격 조건, 초과저지장비 통과 조건에서의 발사체의 이탈 여부를 동역학 해석을 통해 검증하였으며, 시험을 통해 성능을 입증하였다.



Fig. 1. Inadvertent release^[1]



Fig. 2. BAK-14^[2]

2. 형상 및 설계구조

2.1 스프링을 활용한 기계식 잠금장치

스프링을 활용한 기계식 잠금장치는 디텐트, 디텐트 회전축 및 디텐트 스프링으로 이루어져 있으며 Fig. 3(a)와 같다. 발사체의 추진기관이 점화되어 전방으로 추력이 발생하면, 발사체가 추력방향으로 이동하며 디텐트의 팁 부분을 밀어내고, 디텐트가 회전축을 중심으로 시계방향으로 회전하며 디텐트 스프링이 압축된다. 이때 발사체는 발사기구를 이탈하게 된다. 디텐트 장치의 동작은 Fig. 3(b)와 같다.

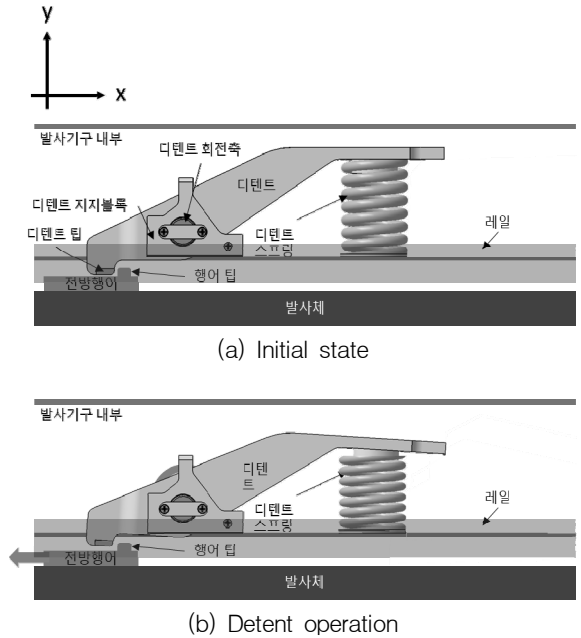


Fig. 3. Mechanical locking device

2.2 전자기계식 안전잠금장치(ESLD)

2.2.1 구성 및 작동원리

ESLD는 디텐트, 디텐트 회전축, 디텐트 스프링, 솔레노이드 장치, 디텐트 지지구조, 고정블록 및 마이크로 스위치로 이루어져 있으며 Fig. 4(a)와 같다. 이 장치의 동작 순서는 Fig. 4(b)와 같이 발사체의 발사 시점에 먼저 전원 인가를 통해 솔레노이드를 동작시켜 솔레노이드 플런저가 왼쪽으로 이동하도록 한다. 솔레노이드 플런저 축에 의해 디텐트 지지구조의 하부가 눌리면서 지지구조가 시계방향으로 회전하게 된다. Fig. 4(c)와 같이 발사체의 추진기관을 점화시켜 발사체가 추력방향으로 이동하면 발사체의 행어가 디텐트 팁을 밀어내고, 디텐트 회전축을 중심으로 디텐트가 시계방향으로 회전한다. 그리고 발사체의 행어가 완전히 레일을 이탈하면, 디텐트 스프링에 의해 디텐트는 Fig. 4(a)와 같이 원래 상태로 돌아온다. 발사가 종료되면 전원 차단에 의해 솔레노이드의 동작은 종료되고, 지지구조 내부의 토션 스프링에 의해 원래 상태로 돌아오게 된다. 그리고 솔레노이드의 플런저도 초기 상태로 원복한다. 평상시에는 Fig. 4(a)와 같은 상태를 유지하고, 발사체에 가해지는 외부의 충격에도 디텐트는 지지구조에 의해 회전할 수 없는 상태를 유지하기 때문에, 의도치 않은 발사체의 이탈을 막을 수 있다^[3].

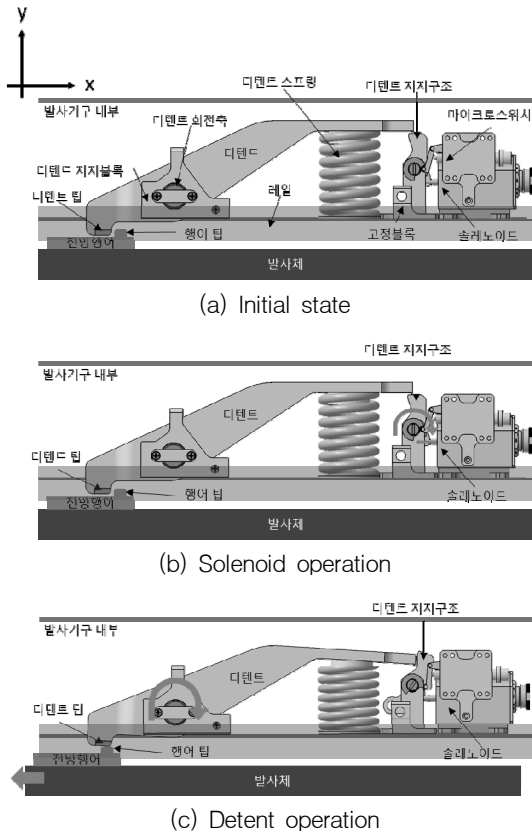


Fig. 4. Electromechanical safety locking device

2.2.2 솔레노이드 장치

축이 직선방향으로 움직이는 푸쉬 타입의 솔레노이드 장치는 내부 코일에 전류가 흐르면 자기장이 형성되어 플런저를 잡아당긴다. 이때 플런저에 연결된 축이 직선 방향으로 움직이며 운동을 한다. 본 논문의 ESLD에는 이러한 푸쉬 타입의 솔레노이드를 적용하였다. 솔레노이드를 작동시키면 플런저 축이 지지구조의 하부를 밀어내도록 설계하였다.

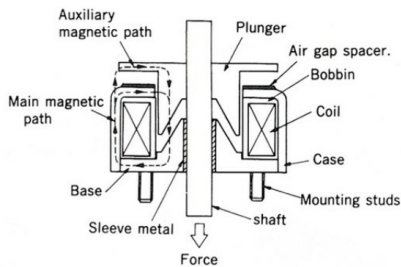


Fig. 5. A push type solenoid^[4]

3. 설계검증

3.1 동역학 해석

외력이 작용했을 때 ESLD의 디텐트 지지구조가 디텐트 회전을 방지하여 발사체의 이탈을 막는지 확인하기 위해 동역학 해석을 수행하였다. 해석 소프트웨어는 상용해석툴인 리커다인을 사용하였다.

3.1.1 해석모델

Fig. 6과 같이 해석모델을 정의하였다. ESLD가 적용된 모델은 총 8개의 몸체로 구성되었다. 움직임이 있는 몸체는 레일, 발사체, 디텐트, 디텐트 지지구조이고 고정된 몸체는 디텐트 지지블록, 고정블록, 전방행어, 후방행어이다. 후방행어는 그림에 보이지 않지만, 전방행어와 유사한 형상으로 발사체 후방에 있다. 디텐트 지지블록과 고정블록은 레일에 고정되어 있고 디텐트 및 디텐트 지지구조와 각각 pin joint로 연결되어 있다. 전방행어와 후방행어는 발사체에 고정되어 있다. 기계식 잠금장치 모델은 디텐트 지지구조와 고정블록이 제외된 형상이다. 레일은 ground와 translate joint로 연결되어 있다. 해당 구속조건들을 Table 1에 나타내었다. 디텐트와 레일 사이 및 디텐트 지지구조 핀 조인트에 각각 선형 스프링 힘 및 토션 스프링 힘을 적용하였다. 디텐트 선형 스프링 상수는 29.49 N/mm, 토션 스프링 상수는 0.5811 N·mm/deg를 적용하였다. 디텐트와 전방행어, 디텐트와 레일, 디텐트와 디텐트 지지구조, 레일과 전방행어, 레일과 후방행어 사이에는 접촉 정의가 되어있다. 접촉 계수들을 Table 2에 정리하였다. Table 2에서 Stiffness Coefficient는 접촉하는 두 대상 소재의 탄성계수와 포아송비, 접촉면의 곡률 반경을 이용하여 계산되었다^[5]. 마찰력이 없는 상태가 약조건이므로 디텐트와 전방행어 사이를 제외한 다른 접촉 조건에는 마찰을 적용하지 않았다. Fig. 6에서 -X축 방향이 발사체가 전진하는 방향이다.

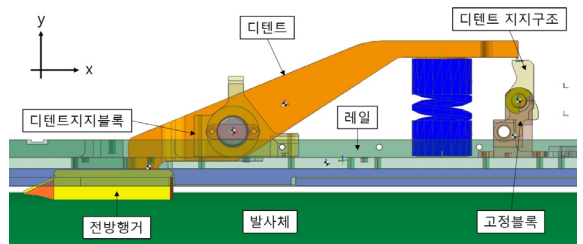


Fig. 6. Dynamic analysis model

Table 1. Kinematic constraints between bodies

No.	연결 대상	구속조건
1	디텐트 - 디텐트 지지블록	pin joint
2	지지구조 - 고정블록	
3	레일 - 디텐트 지지 블록	fixed joint
4	레일 - 고정블록	
5	레일 - 슬레노이드 조립체	
6	Ground - 레일	translate joint

Table 2. Contact parameters : stiffness and friction coefficients

Base	Action	Stiffness Coefficient (N/mm)	Friction Coefficient
디텐트	전방행어	76188403.04	0.12
디텐트	레일	26558934.65	0
디텐트	지지구조	26558934.65	0
레일	전방행어	26558934.65	0
레일	후방행어	26558934.65	0

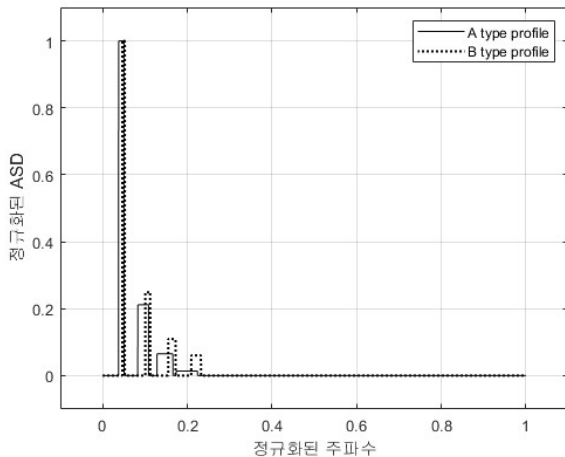


Fig. 7. A and B type vibration test profile

3.1.2 외력

플랫폼 운용진동 및 기능충격, 초과저지장비 통과 충격 등 총 세 가지 외력이 고려되었다. 운용진동은

발사체 운용 플랫폼에 따라 A형과 B형으로 나누어지고 MIL-STD-810G의 진동 프로파일을 테일러링한 데이터를 적용하였다. Fig. 7에 해당 프로파일을 나타내었다. A형 및 B형 운용진동 프로파일로부터 해석에 필요한 랜덤 진동가속도-시간 데이터를 추출하였다. 기능충격은 MIL-STD-810G의 20 g / 11 ms 톱니파^[5]를 적용하였다. 초과저지장비 통과 충격은 플랫폼 운용 활주로에 설치된 BAK-14를 통과할 때 측정된 진동 데이터를 이용하였다. 외력은 레일의 translate joint 상에서 가속도 motion으로 적용하였다.

3.1.3 해석 결과

먼저 슬레노이드에 의한 디텐트 지지구조 및 디텐트가 정상 동작할 경우를 Fig. 8에 나타내었다. 디텐트 지지구조가 회전한 후 발사체가 추력에 의해 전진하면 디텐트가 회전하여 구속을 벗어나게 된다. 발사체가 해제되기 위한 디텐트 최소 각도는 3.25°이고, 디텐트 지지구조에 의해 디텐트 회전이 구속되면 디텐트는 0.6°만 회전하게 된다.

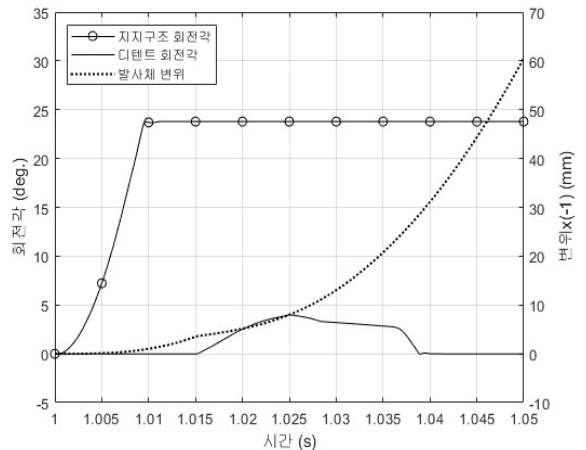


Fig. 8. The normal operation of the detent and detent support block of ESLD

3.1.3.1 운용진동 해석 결과

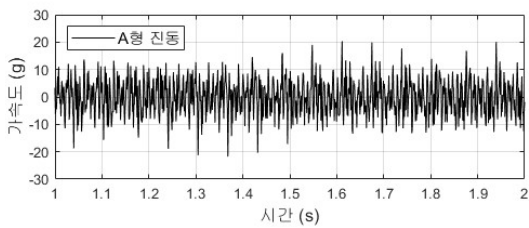
Fig. 9에 A형 운용진동 입력에 대한 디텐트 지지구조 및 디텐트, 발사체의 거동을 나타내었다. Fig. 9(b)에는 기계식 잠금장치 모델의 디텐트와 발사체 운동을 나타내었고 Fig. 9(c)는 ESLD가 적용된 모델의 디텐트 지지구조, 디텐트, 발사체 운동을 나타내었다. A형 운용진동은 ±20 g 사이의 진폭을 가진 랜덤 진동

이다. 두 가지 모델 모두 발사체 이탈이 일어나지 않았다. Fig. 10에는 B형 운용진동 입력에 대한 거동을 나타내었다. Fig. 10(b)에는 기계식 잠금장치 모델의 디텐트와 발사체 운동을 나타내었고 Fig. 10(c)에는 ESLD가 적용된 모델의 디텐트 지지구조 및 디텐트, 발사체 운동을 나타내었다. B형 운용진동은 ± 10 g 사이의 진폭을 가진 랜덤 진동이다. A형 운용진동 입력 시의 해석 결과와 마찬가지로 두 모델 모두 발사체 이탈이 일어나지 않았다. Fig. 9 ~ 10에서 발사체 변위는 0 ~ 5 mm 사이를 왕복하고 있는데, 이는 디텐트에 의한 전진 구속 및 후방행어 뒤쪽 멈춤 판에 의한 후진 구속 사이에 최대 5 mm의 틈새가 있기 때문이다. 따라서 5 mm 만큼 레일을 따라 앞뒤로 움직일 수 있다. 그래프에서 0 mm는 전방행어가 디텐트에 맞닿아 있을 때의 위치이고, 5 mm 움직인 위치는 후방

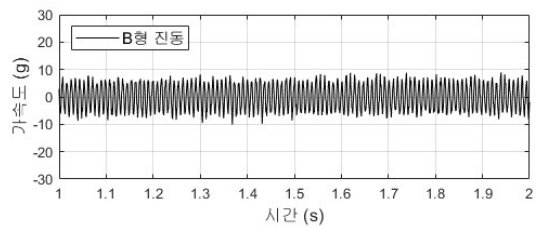
행어가 멈춤 판에 도달했을 때의 위치이다. 5 mm 후 진했다가 다시 디텐트와 닿았을 때 발사체 가속에 의한 힘으로 디텐트가 회전하는데, 특히 Fig. 9(b)에서 간헐적으로 발사체가 0 mm 보다 작은 위치로 움직인다. 이는 기계식 잠금장치에는 스프링 이외의 별도의 잠금장치가 없어서 발생하고 디텐트가 회전하는 각도만큼 발사체가 전진한다. 반면 ESLD가 있는 모델에서는 진동이 인가되더라도 디텐트가 최대 0.6° 회전한다.

3.1.3.2 기능충격 해석 결과

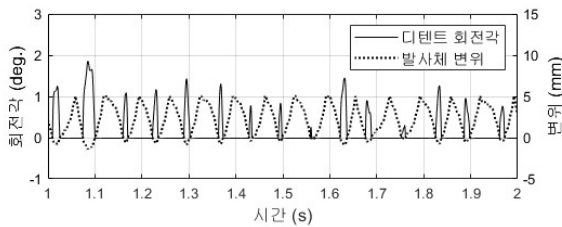
Fig. 11에 +X 방향 톱니파 충격 입력에 대한 디텐트 지지구조 및 디텐트, 발사체의 거동을 나타내었다. Fig. 11(b)는 기계식 잠금장치 모델의 디텐트와 발사체 운동을 나타내었고 Fig. 11(c)는 ESLD가 적용된 모델의 디텐트 지지구조, 디텐트, 발사체 운동을 나타내었



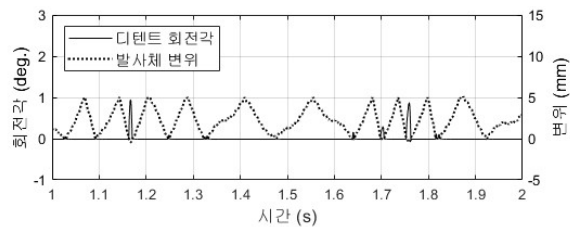
(a) Random vibration of the A type profile



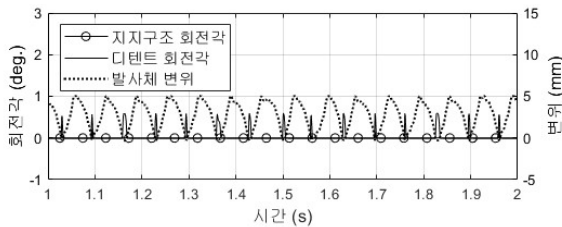
(a) Random vibration of the B type profile



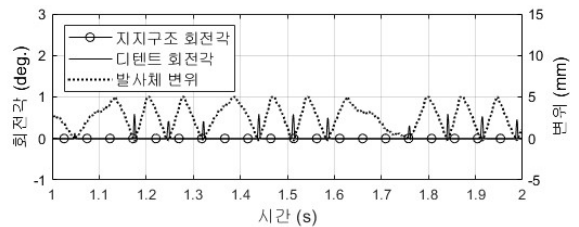
(b) Mechanical locking device only



(b) Mechanical locking device only



(c) Mechanical locking device with ESLD



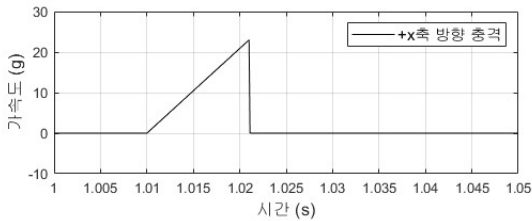
(c) Mechanical locking device with ESLD

Fig. 9. The reactions of mechanical locking device and ESLD w.r.t. the A type vibration

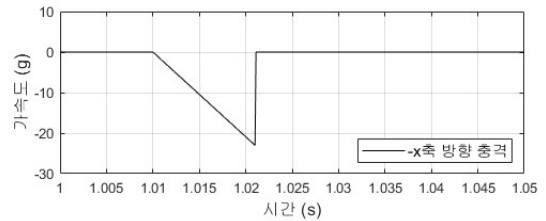
Fig. 10. The reactions of mechanical locking device and ESLD w.r.t. the B type vibration

다. Fig. 12에는 -X 방향 톱니파 충격 입력에 대한 디텐트 지지구조 및 디텐트, 발사체의 거동을 나타내었다. Fig. 12(b)는 기계식 잠금장치 모델의 디텐트와 발사체 운동을 나타내었고 Fig. 12(c)는 ESLD가 적용된 모델의 지지구조, 디텐트, 발사체 운동을 나타내었다. Fig. 11(b)와 같이 기계식 잠금장치만 있는 모델에 +X 방향 충격이 인가되었을 때는 디텐트가 해제되면서 발사체가 이탈한다. 반면 ESLD가 있는 모델은 Fig. 11(c)와 같이 디텐트 지지구조에 의해 디텐트가 0.6° 이상 회전하지 못하고 제자리로 돌아가는 것을 알 수 있다. -X 방향 톱니파 충격이 인가될 경우, Fig. 12(b) 및 Fig. 12(c)처럼 두 가지 모델 모두 충격이 인가되더라도 발사체는 5 mm 틈새 구간 내에서 움직일 뿐 이탈하지 않는다. 이것으로 -X축 방향 즉 발사체의 전진

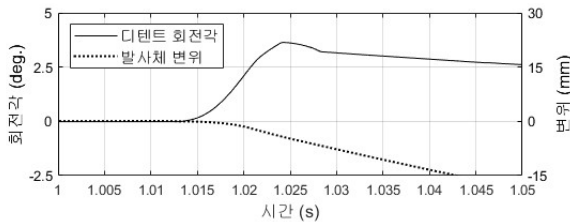
방향으로 충격이 인가되면 기계식 잠금장치로도 이탈을 방지할 수 있지만 +X축 방향인 발사체의 후진 방향으로 충격이 인가될 때는 ESLD가 적용되어야 발사체 이탈을 방지할 수 있다는 것을 알 수 있다. 초과저지장비 통과 충격 해석 결과 Fig. 13에는 초과저지장비인 BAK-14 통과 충격 입력에 대한 디텐트 지지구조, 디텐트 및 발사체의 거동을 나타내었다. Fig. 13(b)에는 기계식 잠금장치 모델의 디텐트와 발사체 운동을 나타내었고 Fig. 13(c)에는 ESLD가 적용된 모델의 지지구조, 디텐트, 발사체의 거동을 나타내었다. BAK-14 통과 충격이 인가되었을 때는 Fig. 13(b)와 같이 기계식 잠금장치 모델의 발사체가 이탈한다. Fig. 13(a) 그 래프 신호의 첫 번째 충격으로 디텐트가 회전하였다. 디텐트와 전방행어 충돌 및 발사체 거동에 의한 관성



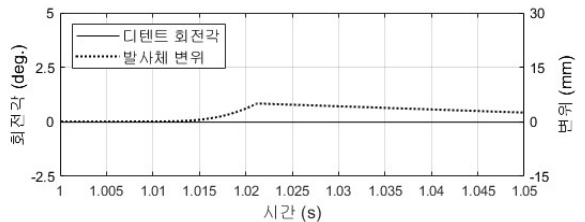
(a) Shock profile(+X axis)



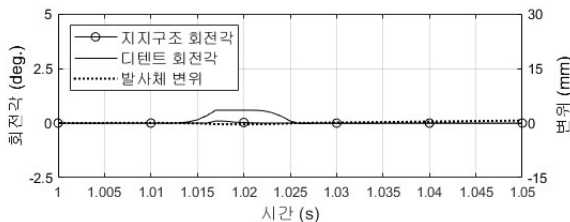
(a) Shock profile(-X axis)



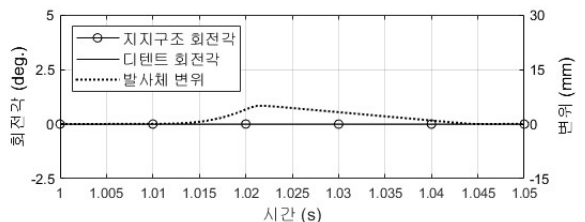
(b) Mechanical locking device only



(b) Mechanical locking device only



(c) Mechanical locking device with ESLD



(c) Mechanical locking device with ESLD

Fig. 11. The reactions of mechanical locking device and ESLD w.r.t. the functional shock on +X axis

Fig. 12. The reactions of mechanical locking device and ESLD w.r.t. the functional shock on -X axis

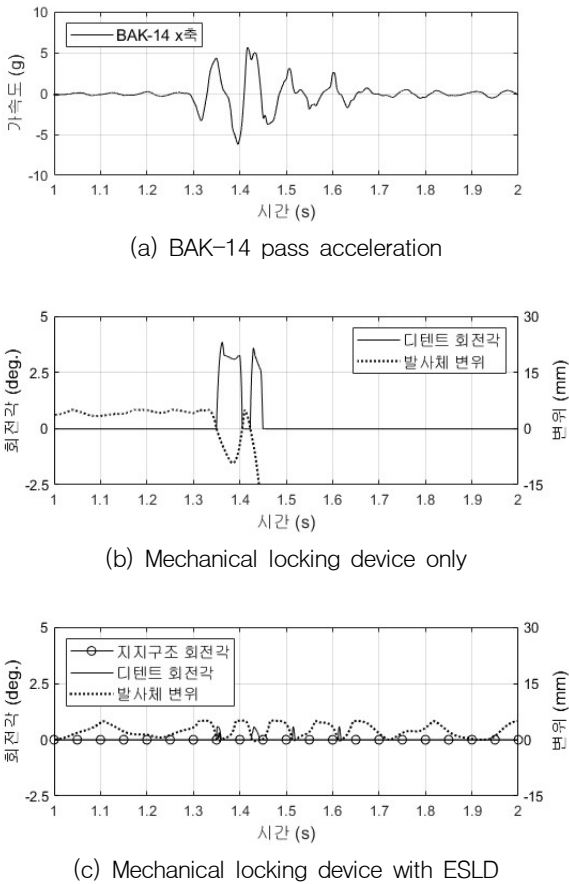


Fig. 13. The reactions of mechanical locking device and ESLD w.r.t. the BAK-14 passing shock

영향으로 디텐트가 3.85° 회전하였고 발사체가 전방 이동하였다. 이후 레일의 반대 방향(진진 방향) 가속으로 발사체가 이탈되지 않고 다시 구속 상태로 돌아갔으나 두 번째 충격이 인가되자 발사체가 완전히 이탈하였다. 이때 디텐트는 3.59° 회전하였다. ESLD가 적용된 모델에 BAK-14 통과 충격이 인가되었을 때는 Fig. 13(c)와 같이 디텐트 지지구조에 의해 디텐트가 최대 0.6° 회전하여 발사체 이탈을 방지하였다.

3.2 진동 및 충격 검증시험

3.2.1 운용진동 시험

공중 플랫폼에 장착된 상태로 발사체가 비행할 때 발생하는 진동조건에서도 전자기계식 안전잠금장치가 발사체의 이탈을 방지하는지 확인하기 위해 진동시험을 수행하였다.

3.2.1.1 운용진동 시험 조건

운용진동은 발사체 운용 플랫폼에 따라 A형과 B형으로 나누어지고, 프로파일은 Fig. 7과 같다. 진동의 방향은 X축 방향(전/후 방향)에서 1시간 동안 수행하였다. 시험은 발사기구에 발사체를 장착한 Fig. 14와 같은 형상으로 수행하였다.

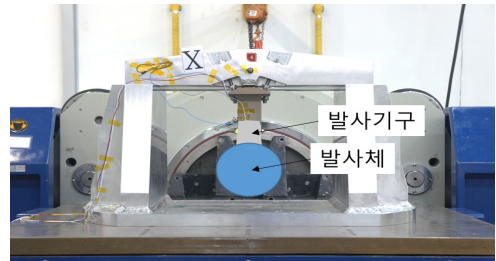


Fig. 14. Vibration and shock test configuration

3.2.1.2 운용진동 시험 결과

시험 전과 후에 육안 점검을 통해 발사체 이탈 여부를 확인하였다. 발사체와 발사기구에 락을 둘러 육안 확인을 쉽게 하였고, 락의 상대적인 위치를 확인하여 발사체의 이탈 여부를 판단하였다.

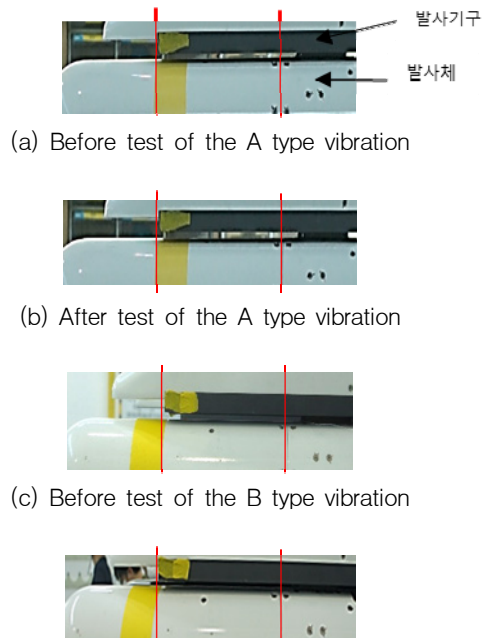


Fig. 15. Vibration test result of ESLD

시험 결과, 발사체와 발사기구의 위치는 시험 전/후가 같음을 확인하였고, 발사체가 운용진동 조건에서 이탈하지 않음을 검증하였다. Fig. 15는 측면에서 바라본 발사기구와 발사체 형상으로 시험 전과 후에 촬영한 것이다.

3.2.2 기능충격 시험

발사체가 공중 플랫폼에 장착된 상태로 비행할 때 발생하는 외부의 충격 조건에서도 ESLD가 발사체의 이탈을 방지하는지 확인하기 위해 충격시험을 수행하였다. ESLD의 효과를 비교하기 위해 기존의 기계식 잠금장치의 충격시험 결과와 비교하였다.

3.2.2.1 기능충격 시험 조건

충격시험은 MIL-STD-810G 516.6에 Functional Test, Flight Vehicle Equipment^[5]의 기준을 적용하였고, Table 3과 같다. 이 조건에서 발사체의 이탈을 방지할 수 있는지 확인하였으며, 시험의 충격인가 방향은 발사 방향을 -X축 방향으로 정의하여, +X, -X축 방향에서 각 3회씩 수행하였다. 시험품의 설치형상은 Fig. 14와 같다.

Table 3. Shock test parameter

Test Category	Peak value(Am)	Duration(T _D)
Sawtooth	20 g	11 ms

3.2.2.2 기능충격 시험 결과

충격시험 전/후로 육안 점검을 통해 발사체 이탈 여부를 확인하였다. 발사체와 발사기구에 락을 돌려 육안 확인이 쉽게 하였고, 락의 상대적인 위치를 확인하여 발사체의 이탈 여부를 판단하였다. 기계식 잠금장치시험 결과는 Fig. 16과 같고, 시험 후에 발사체가 발사 방향으로 이동하여 발사체가 이탈함을 확인하였다. ESLD의 시험 결과는 Fig 17과 같고 시험 전과 후를 비교했을 때 발사기구와 발사체의 위치가 변함없음을 확인하였다.

3.2.3 초과저지장비 통과 시험

3.2.3.1 초과저지장비 통과 시험 조건

발사체와 발사기구가 결합된 상태로 주행을 진행하면서 활주로 위의 초과저지장비인 BAK-14를 통과하여 통과 전/후의 발사체 장착상태를 육안으로 점검하였다.

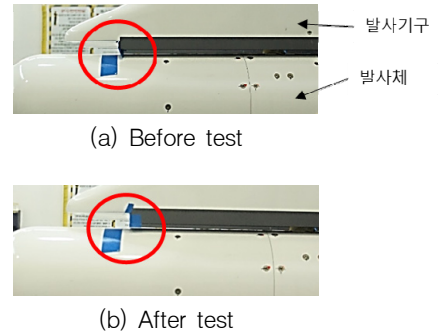


Fig. 16. Shock test result of mechanical safety lock on -X axis

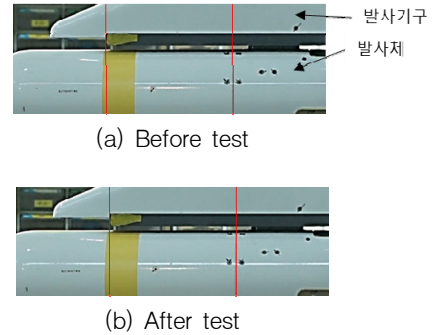


Fig. 17. Shock test result of ESLD on -X axis

3.2.3.2 초과저지장비 통과 시험 결과

육안 점검 결과는 Fig. 18과 같다. 기계식 잠금장치를 적용했을 때는 BAK-14 통과 후 발사체가 전방으로 이동하여 비정상 이탈하였고, ESLD를 적용했을 때는 발사체의 이동이 없으므로, 비정상 이탈이 없음을 확인하였다.

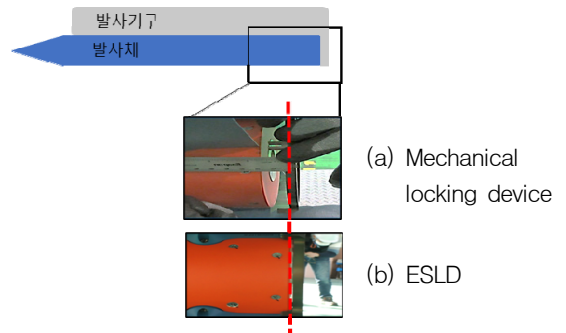


Fig. 18. Test equipment position after passing through BAK-14

4. 결론

본 연구에서는 진동 및 충격에 의한 발사체의 의도치 않는 이탈을 방지하기 위해 ESLD를 제안하였고 동역학해석, 진동시험, 충격시험, 초과저지장비 통과 시험을 통해 ESLD의 성능을 아래와 같이 확인하였다.

- (1) 동역학 해석을 통해 운용진동, 기능충격, 초과저지장비 통과 충격 등 총 세 가지의 외력이 작용할 때, 발사체가 발사기구를 이탈하지 않음을 확인하였다.
- (2) MIL-STD-810G 규격의 공중 플랫폼의 진동, 충격 시험과 초과저지장비 통과 시험을 수행하였다. 시험 전과 시험 후의 육안 점검을 통해 발사체가 발사기구를 이탈하지 않음을 확인하였다.

References

- [1] Eugene L. Fleeman and Schetz, Joseph A ed, "Missile design and system engineering," p. 534, 2012.
- [2] Brad Bachtel, "Commercial Operations on Runways with Arresting Systems," Boeing AERO, Issue 57, p. 22, 2015.
- [3] Joon-ho Lee, Minji Bae, Yong-il Kim, Sora Jeong "DUAL DETENT APPARATUS FOR ROCKET," Patent No. 10-2661457, 2024.
- [4] SHINWOO SOLTECH CO., "Push-Pull Solenoid," <http://sol2000.co.kr>
- [5] Yongil Kim, "A Study on Separation Stability of The Umbilical Plug of A Store," Journal of the KIMST, Vol. 22, No. 4, pp. 441 ~ 451, 2019.
- [6] DOD, MIL-STD-810G "Environmental Engineering Considerations And Laboratory Tests," 2008.
- [7] Yong-il Kim, Sora Jeong, Minji Bae, Joon-ho Lee, "Analysis of Vibration and Shock Characteristics of a Detent Support," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 148 ~ 149, 2023.
- [8] Sora Jeong, Joon-ho Lee, Minji Bae, Yong-il Kim, "Electro-mechanical Detent Device for Rail Launcher," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 104 ~ 105, 2023.
- [9] DOD, MIL-T-7743F, "Testing, Store Suspension and Release Equipment, General Specification For," 1993.