

발사체의 배꼽 플러그 분리 안정성 연구

김 용 일^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

A Study on Separation Stability of The Umbilical Plug of A Store

Yongil Kim^{*,1)}

¹⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 12 April 2019 / Revised 10 May 2019 / Accepted 21 June 2019)

ABSTRACT

When a store is launched, the umbilical plug should be separated from the launcher without any physical interference and fragments. In order to satisfy these conditions, an umbilical plug and an umbilical separating device were designed. The plug is separated from the receptacle of the store while moving along inclined planes by the store thrust and the spring force connected from the launcher to the plug. As a result of the prototype test, the hanger on the store collided with the plug. Several tests were conducted after some actions were taken to prevent the collision. However, not only the same phenomenon was repeated, but also fragmentation occurred. In this study, the non-colliding conditions were analyzed through rigid and flexible multi-body dynamics analysis.

Key Words : Umbilical Plug(배꼽 플러그), Separating Device(분리장치), Collision(충돌), Fragment(파편), Multi-Body Dynamics Analysis(다물체 동역학 해석)

1. 서론

배꼽 플러그(Umbilical plug)는 발사체의 배꼽 리셉터클(Umbilical receptacle)과 연결되어 플랫폼으로부터 전원공급 및 각종 신호를 주고받는 역할을 한다. 반면 발사체가 발사기구를 이탈하면 배꼽 플러그와 배꼽 리셉터클은 분리되어야 하고 분리 시 발사체와 배꼽 플러그가 서로 간섭이 없어야 한다. 이때 배꼽 플러그

와 배꼽 리셉터클을 분리시켜주는 장치를 배꼽 분리 장치라고 한다¹⁾.

배꼽 플러그는 발사체에 발사 이탈 명령을 인가하기 전까지의 운용 과정에서는 확실한 체결 성능을 보장해야 하는 반면 분리 시점에는 확실한 분리 성능을 보장해야 한다. 유사 체계 중에서 Fig. 1 (a)는 일정 수준 이상의 추력이 발생하면 배꼽 리셉터클과 연결된 전단나사가 끊어지고 레버가 배꼽 플러그를 들어 올리는 구조다. 이 분리 구조의 경우 레버, 스프링, 전단나사 등의 설계가 중요하다. 그러나 구조가 복잡해지고 발사기구의 무게 및 크기가 커지는 단점이 있다.

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

Fig. 1 (b)와 (c)는 배꼽 플러그가 발사체 이동 방향으로 빠지는 구조이기 때문에 분리 성능이 확실하다. 그러나 Fig. 1 (b)는 항력이 증가할 뿐만 아니라 공력적 불안정성이 커질 수 있기 때문에 주변에 추가 날개가 필요하고 (c)는 배꼽 커넥터와 추진 노즐, 구동부가 몰려있어 내부 구조가 복잡하고 화염에 강건해야한다. 또한 크기가 작은 발사체에는 적용하기 어렵다.

본 논문에서 다루고 있는 분리 구조는 발사체가 발사기구의 레일을 따라 이동하면 배꼽 플러그가 발사기구의 배꼽 분리장치 경사로를 따라 위로 올라가면서 배꼽 리셉터클과 분리되는 방식이다. 이 방식은 구성품 수가 적고 구조가 단순하기 때문에 발사기구 무게 및 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 구조에서는 배꼽 케이블 길이, 경사로 각도, 스프링 힘 및 고정위치가 중요한 설계 변수인데 설계 오류로 배꼽 분리가 완벽하지 못해 배꼽 플러그가 충분히 올라가지 못하면 레일을 따라 전진하는 발사체의 행거와 충돌하게 되고 충돌에 의한 파편이 발생할 수 있다. 실제 시험에서 충돌 및 파편이 발생하는 현상이 나타났다. 이를 개선하기 위해 여러 가지 방안으로 시험을 수행

하였으나 충돌 및 파편이 지속적으로 발생하였다. 발사체 운용조건 하에서 발사체가 발사기구를 이탈하는 동안 어떠한 이물질도 발생하지 않아야 한다. 그러므로 본 연구에서는 다물체 및 유연 다물체 동역학 해석을 통해 배꼽 플러그 분리 시 충돌 현상을 재현하고 이를 방지하기 위한 케이블 길이, 스프링 사양 및 고정 위치, 경사각 조건을 도출하였다.

2. 형상 및 분리 구조

기본 구조는 Fig. 2와 같이 발사체 상부에 배꼽 리셉터클이 조립되어 있고 배꼽 플러그는 배꼽 리셉터클과 체결 나사로 조립된다. 배꼽 플러그에 조립된 체결 나사는 소켓 형태의 암나사이고 배꼽 리셉터클에는 수나사가 조립되어 있다. 발사기구는 레일, 배꼽 분리장치, 덮개 등으로 구성되고 레일 전방에 경사로 형태의 배꼽 분리장치가 서로 마주보게 조립되어 있다. 배꼽 플러그 양옆에는 경사로를 탈 수 있는 날개가 돌출되어 있다. 또한 발사기구 전방에 고정된 스프링의 반대쪽 끝단을 배꼽 플러그 전방에 걸쇠로 걸도록 되어있다. Fig. 2에서 배꼽 플러그 상부의 주황색 부분에 전원 및 통신용 케이블이 연결되어 있고 반대편은 발사기구에 연결된다. 전체 구조는 슬라이딩 덮개로 덮여 있다.

배꼽 분리 원리는 발사체가 추력에 의해 발사기구의 레일을 따라 이동하면 배꼽 플러그의 날개가 배꼽 분리장치 경사로에 접촉한 후 경사면을 따라 올라간다. 이때 올라가는 힘이 나사 체결력보다 크면 체결

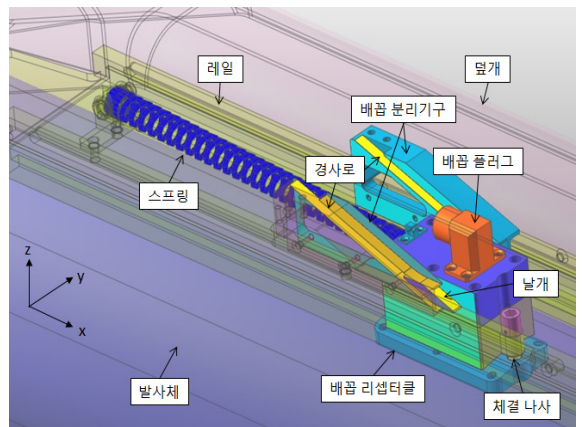
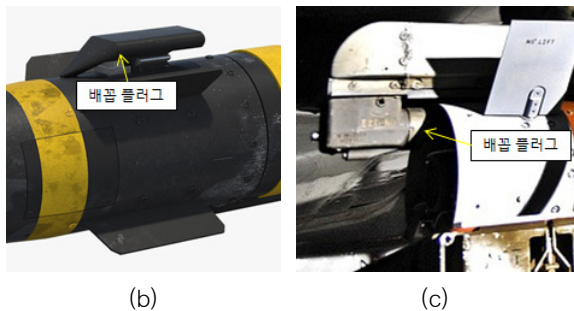
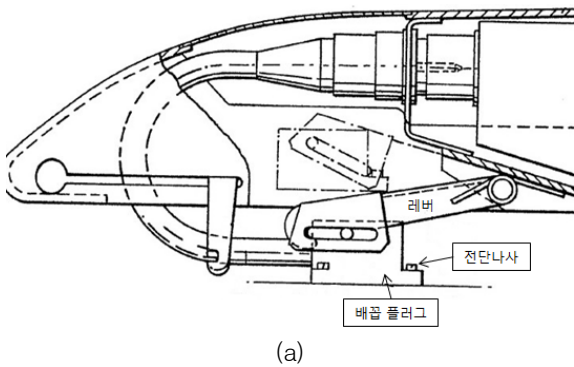


Fig. 1. The umbilical separation structures of analogous systems^[2]

Fig. 2. The components of umbilical assembly

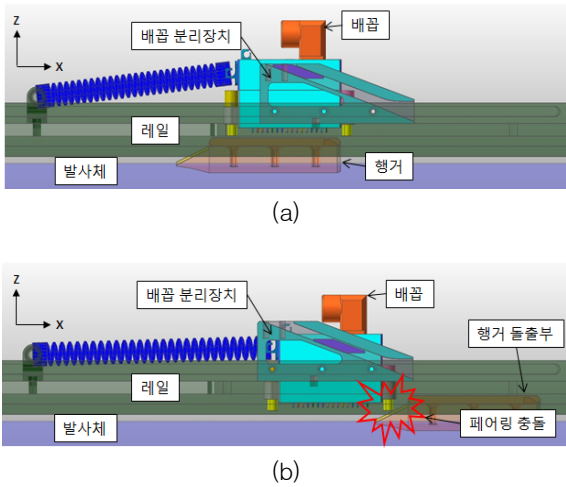


Fig. 3. Normal case and collision case of the umbilical plug separation

나사가 빠지면서 배꼽 플러그가 발사체로부터 분리된다. 분리된 배꼽 플러그가 스프링 힘에 의해 경사로 끝까지 이동하면 분리 과정이 완료된다. 발사체가 추력에 의해 전진함에 따라 발사체 중간에 있는 행거가 배꼽 분리장치 쪽으로 접근하게 되는데 이때 분리된 배꼽 플러그가 z축 방향으로 25 mm 이상 올라갈 경우, Fig. 3 (a)와 같이 발사체는 배꼽 플러그와 충돌 없이 레일을 빠져나가게 되고 그렇지 않은 경우는 Fig. 3 (b)와 같이 배꼽 플러그가 행거와 충돌하게 된다. 이때 배꼽 플러그 높이에 따라 행거 전방의 페어링부에 충돌할 수도 있고 행거 상부에 이탈명령 비인가 시 이탈을 방지하기 위해 돌출된 부분에 충돌할 수도 있다.

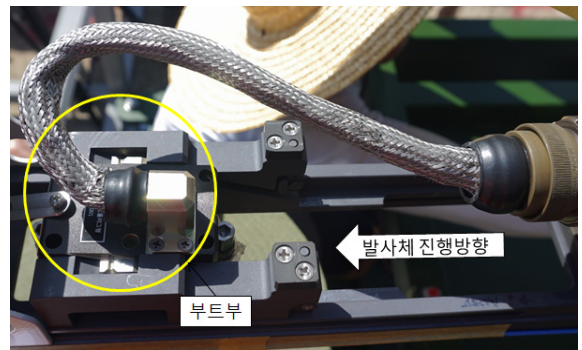
3. 초기 시험 결과 및 분석

개발 초기 단계에 설계된 형상으로 배꼽 분리 시험을 수행하였다. 경사로 각도, 배꼽 플러그 무게 등의 제원은 Table 1과 같다. 시험 결과, 배꼽 플러그와 리셉터클이 분리되어 발사체는 정상적으로 발사기구를 이탈하였으나 배꼽 플러그와 발사체가 충돌하는 현상이 발생하였다.

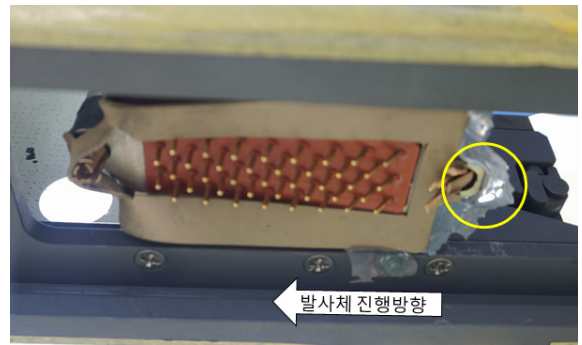
Fig. 4는 시험 직후 사진으로, 배꼽 플러그의 날개가 경사로 상부 끝까지 올라가지 못했고 케이블 부트부(Boot)는 꺾여 있었다(Fig. 4 (a)). 배꼽 플러그의 전

Table 1. Test specification of the prototype umbilical assembly

Spec.	Value
Slope angle	20°
Umbilical plug wight	440 g
Spring stiffness	0.37 N/mm
Fastening force	150 N



(a)



(b)

Fig. 4. The umbilical plug after the prototype test

방 체결 나사는 이상 없이 빠져있는 것으로 보이나 후방 체결 나사는 발사체 진행 방향으로 구부러져 있으며, 배꼽 플러그의 핀도 일부 같은 방향으로 구부러져 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4 (b)). 참고로 체결 나사가 갈라져 있는 이유는 배꼽 플러그와 리셉터클의 분리를 비교적 쉽게 하기 위함이다.

발사체를 회수해서 배꼽 플러그와 충돌한 부분을 확인해본 결과, Fig. 5 (a) 및 (b)와 같이 행거 페어링

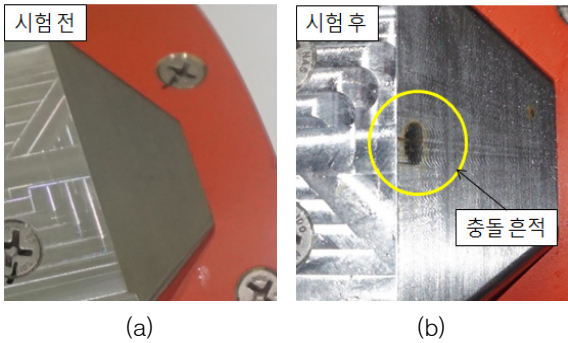


Fig. 5. The hanger fairing before and after the prototype test

에 시험 전에는 없었던 검은 자국을 찾을 수 있었다. Fig. 4 (b)에 표시된 배꼽 플러그 몸체 하단의 체결나사 하우징 부분과 Fig. 5 (b)에 표시된 행거 페어링이 충돌한 것으로 판단된다. 행거의 충돌 부위로 미루어 보아 충돌 발생 시점은 배꼽 플러그가 15~20 mm 올라간 시점으로, 충돌 현상을 방지하려면 배꼽 플러그는 25 mm 이상 올라가야 한다. 결론적으로 Fig. 4 (a)와 같이 배꼽 플러그의 부트부가 꺾여있는 것과 날개가 경사로 끝까지 올라가지 못한 것으로 보아 케이블 길이가 충분히 길지 않았기 때문이라고 판단되었다. 상기 판단근거는 덮개가 덮인 상태에서 배꼽 플러그가 경사로를 따라 위로 올라갈수록 케이블 부트부가 꺾이면서 아래 방향으로 누르는 힘이 작용하여 배꼽 플러그가 더 이상 경사로를 올라가지 못하도록 방해하기 때문이다.

4. 추가 시험 결과 및 분석

초기 시험 이후 조치 사항으로 Table 2와 같이 케이블 길이를 290 mm에서 430 mm로 늘리고 이후 50 mm 씩 530 mm까지 변화시키면서 시험을 수행하였다. 추가적으로 기존 배꼽 플러그의 체결 나사가 소켓 형상에 끝부분이 갈라져있는 형태였는데 배꼽 리셉터클과의 체결력을 보강하기 위해 완전한 소켓 형태로 변경되었다.

시험 결과, 모든 시험에서 충돌이 발생하였고 Test 0와 달리 Test 1~3에서는 체결 나사가 절단되었다. Table 3에 시험 결과를 간략히 나타내었다. Fig. 6에 추가 시험 후의 배꼽 플러그들을 나타내었다. 초기 배

꼽 플러그(Prototype)와 달리 Type 1~3은 체결 나사가 모두 절단된 것을 확인할 수 있다. 반면 배꼽 플러그 몸체 하단의 체결 나사 하우징 부분에 부딪힌 흔적을 찾을 수 없었다. 체결력을 보강하기 위해 완전한 소켓 형태로 변경함에 따라 체결 나사의 강성이 증가하여 구부러지는 대신 절단된 것으로 보인다. 따라서 케이블 길이 증가만으로는 충돌 현상을 방지할 수 없음을 확인하였다. 다만 배꼽 플러그의 발사기구 장착성을 고려했을 때 Type 2가 가장 적절하다고 판단하였다.

Table 2. Three kinds of umbilical plug types

Umbilical plug	Cable length
Prototype	290 mm
Type 1	430 mm
Type 2	480 mm
Type 3	530 mm

Table 3. Test results by the umbilical plug types

Test	Plug type	Collision	Fastening part
Test 0	Prototype	O	Bended
Test 1	Type 1	O	Cut
Test 2	Type 2	O	Cut
Test 3	Type 3	O	Cut

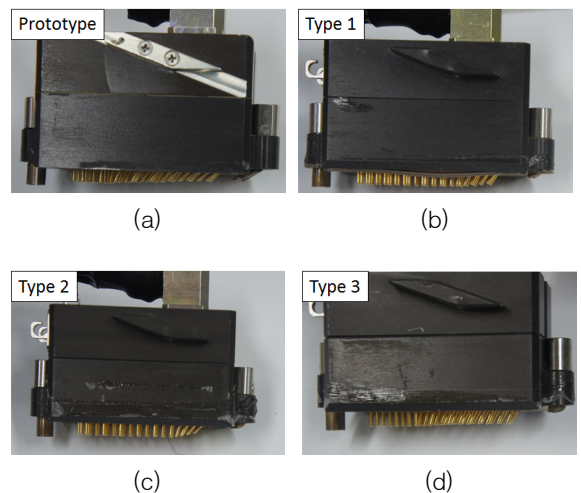
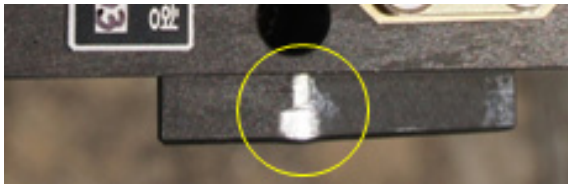


Fig. 6. The umbilical plugs after the Test 0 ~ Test 3



(a)



(b)

Fig. 7. Both sides of the wings of the umbilical plug



Fig. 8. Upper side of the inclined face in the umbilical separation device

한편 Fig. 7 (a), (b)와 같이 배꼽 플러그의 양쪽 날개 상부 모서리가 변형된 것이 확인되었고 Fig. 8과 같이 배꼽 분리장치 경사로 윗면에서도 찍힌 흔적이 발견되었다. 이는 배꼽 플러그가 분리되어 경사로를 타고 올라가는 속도가 발사체가 이동하는 속도보다 느려서 배꼽 플러그가 Fig. 8의 표시된 위치에 도달할 때 행거와 충돌하거나 또는 표시된 위치에 걸려 정지된 상태에서 행거와 충돌하는 경우로 생각할 수 있다. 두 경우 모두 스프링 힘이 충분하지 않았기 때문이라고 판단하였다. 또한 경사로의 각도를 높이면 배꼽 플러그가 보다 빨리 올라갈 것이라고 판단하였다.

5. 배꼽 분리 스프링 사양 검토

먼저 배꼽 분리에 사용되는 스프링 사양을 검토하였다. 초기 시험 및 추가 시험에서 사용된 스프링은

Misumi社의 12-70 이었다. 시험에 사용된 스프링 및 변경 검토 중인 스프링들을 Table 4에 나타내었다. Table 5에는 스프링을 발사기구에 장착할 때 작용하는 스프링 힘을 나타내었고 관련 식은 다음과 같다^[3].

$$F_s = F_0 + k(x_d - x_0) \quad (1)$$

여기서 F_0 는 스프링 초기하중(Pre-load), k 는 스프링 상수(Spring coefficient), x_d 는 발사기구와 배꼽 플러그의 스프링 고정 위치 사이 거리, x_0 는 스프링 자유길이(Free length)와 걸쇠 길이(33.56 mm)의 합이다.

Fig. 2에서 발사기구의 스프링 고정 위치부터 배꼽 플러그의 스프링 고정 위치까지 거리는 Table 5와 같이 183.2 mm 이다. 스프링 자유길이 및 걸쇠 길이를 뺀 값으로 Eq. (1)을 이용하여 계산한 결과, 14-90을 제외한 나머지 스프링들은 제원 상 스프링 최대하중(Max. load)을 초과한다. 또한 시험 시 12-70의 인장길

Table 4. Spring specification^[3]

Model	12-70	14-70	14-80	14-90
Free length (mm)	70	70	80	90
Max. def. (mm)	69.7	46.2	58.3	68.1
Max. load (N)	32.37	38.24		
Pre-load (F_0 , N)	5.39	8.43		
Spring coeff. (k , N/mm)	0.37	0.64	0.51	0.43

Table 5. The results of Eq (1)

Model	12-70	14-70	14-80	14-90
Distance (x_d , mm)	183.2			
Tensile length ($x_d - x_0$, mm)	79.67	79.67	69.67	59.67
Spring force (F_s , N)	34.87	59.42	43.96	34.09

이는 허용 인장 길이(Max. deformation)보다 약 10 mm 초과한다. 따라서 초기 스프링 선정이 잘못되었음을 확인하였고 스프링 힘은 비교적 작으나 14-90으로 교체하는 것이 적절하다고 판단하였다.

6. 다물체 및 유연 다물체 동역학 해석

6.1 다물체 동역학 해석 모델

기존 스프링 12-70과 앞 장에서 검토된 스프링 14-90으로 배꼽 분리장치 경사로의 각도를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 변화 경사각은 20°, 30°, 40°이다. 스프링 14-90은 12-70보다 자유길이가 20 mm 길기 때문에 인장길이를 더 확보할 필요가 있다. 따라서 기존 위치(Position 1)에서 Fig. 9와 같이 40 mm 위쪽으로 고정위치를 이동한 경우(Position 2)도 해석에 추가하였다. 해석 조건은 총 12가지이고 모든 조건들을 Table 6에 나타내었다. 스프링 12-70은 인장길이를 초과하여 실제 적용할 수는 없지만 해석 결과 비교를 위해 조건에 추가하였다.

해석을 위해 사용한 소프트웨어는 Recurdyn V9R2이며 해석 모델에는 세 가지 가정들을 적용하였다.

- 접촉 및 조인트의 마찰은 무시
- 모델의 구조적 굽힘이 존재하지 않음
- 케이블 저항은 배꼽 플러그에 수직으로 일정하게 작용

배꼽 플러그 날개 및 행거의 이동을 용이하도록 배꼽분리장치 경사로와 레일에 고체윤활피막을 적용하였다.

금속과 금속 사이 윤활에 의해 마찰력이 작아졌으므로 마찰을 무시하였다.

케이블 저항을 해석 모델에 고려하기 위해 배꼽 플러그를 발사기구와 연결한 상태에서 경사로 끝까지

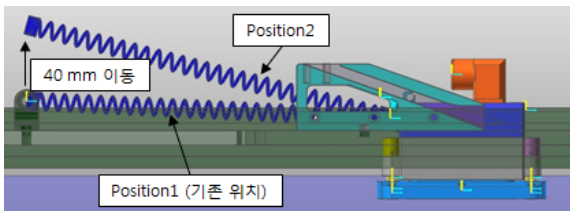


Fig. 9. Spring positions

올라가는데 필요한 힘을 측정하였다. 측정 결과, 케이블 저항은 평균 6.52 N 이다.

모델은 크게, 움직이는 바디(Moving body)와 고정된 바디(Fixed body)로 나누어진다. 움직이는 바디 중 배꼽 리셉터클과 행거는 발사체에 고정되어 있다. 각 바디의 무게와 구속조건을 Table 7 및 Table 8에 나타내었다.

접촉 조건을 생성할 때 두 접촉면을 Base와 Action으로 지정하게 되는데 움직임이 작거나 상대적으로 큰 바디를 Base로 지정하고 움직임이 크거나 상대적으로 작은 바디를 Action으로 지정한다^[4]. 모델 내에

Table 6. Analysis cases

	Slope angle (deg)	Spring position	Spring model
Case 1	20	Position 1	12-70
Case 2	20	Position 1	14-90
Case 3	20	Position 2	12-70
Case 4	20	Position 2	14-90
Case 5	30	Position 1	12-70
Case 6	30	Position 1	14-90
Case 7	30	Position 2	12-70
Case 8	30	Position 2	14-90
Case 9	40	Position 1	12-70
Case 10	40	Position 1	14-90
Case 11	40	Position 2	12-70
Case 12	40	Position 2	14-90

Table 7. Mass of bodies

	Body	Weight (kg)
Moving body	Umbilical plug	0.44
	Umbilical Receptacle	0.07
	Store	43.8
	Hanger	0.56
Fixed body	Rail	4.08
	Umbilical sep. device(L/R)	0.11

Table 8. Constraints in the model

Joint	Body - Body
Translational	Ground - Store
Fixed	Rail - Umbilical sep. device(L/R)
	Store - Hanger
	Store - Umbilical receptacle
	Ground - Rail

고려된 접촉은 1) 배꼽 플러그의 측면과 배꼽 분리장치 측면, 2) 날개의 상하부면과 배꼽 분리장치 경사로 상하면, 3) 배꼽 플러그 전/후방 체결 나사와 배꼽 리셉터클 전/후방 체결부, 4) 후방 체결 나사와 행거다. 각 바디의 접촉 가능한 면을 고려하여 생성된 접촉 조건은 총 6가지다.

접촉 조건에 필요한 강성(Stiffness) 및 댐핑계수(Damping coefficient) 등의 파라미터는 Hertz contact model을 이용하여 구할 수 있는데 접촉하는 두 소재의 탄성계수(Young's modulus)와 포아송비(Poisson's ratio), 접촉면의 곡률 반경을 이용한다^{5,6)}.

곡률 반경(R)은 Eq. (2)와 같이 접촉 조건이 생성된 면의 반경을 이용하여 구한다. 또한 탄성계수(E)는 Eq. (3)을 이용하여 구할 수 있으며, Eq. (2)와 (3)의 결과를 Eq. (4)에 대입하여 강성(K)을 구할 수 있다⁷⁾. Base와 Action에 따른 재질과 곡률반경을 각각 Table 9와 Table 10에 나타내었다. 이때 평평한 면은 곡률 반경 500,000 mm를 적용하였다. Eq. (2) ~ (4)에 따라 계산된 강성 값을 Table 11에 나타내었다. 댐핑 계수는 강성 값의 1/10000을 적용하였다.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

$$E = \frac{E_1 E_2}{E_2(1 - \nu_1^2) + E_1(1 - \nu_2^2)} \quad (3)$$

$$K = \sqrt{\frac{16RE^2}{9}} \quad (4)$$

여기서 R_1 과 R_2 는 접촉면의 곡률반경이며, E_1 과 E_2 는 접촉이 일어나는 바디 소재의 탄성계수고, ν_1 과 ν_2 는 각각의 포아송비다.

Table 9. Base contact parameters

Contact	Material	R_1 (mm)	E_1 (GPa)	ν_1
1	Aluminum	500,000	71	0.33
2	Aluminum	3.5	71	0.33
3	Aluminum	2	71	0.33
4	Aluminum	81	71	0.33
5	Steel	500,000	210	0.285
6	Steel	500,000	210	0.285

Table 10. Action contact parameters

Contact	Material	R_1 (mm)	E_1 (GPa)	ν_1
1	Aluminum	500,000	71	0.33
2	Beryllium	2.9	125	0.3
3	Aluminum	1	71	0.33
4	Aluminum	81	71	0.33
5	Beryllium	2.9	125	0.3
6	Steel	500,000	210	0.285

Table 11. Stiffness of contact

Contact	R (mm)	E (MPa)	K (N/mm)
1	2.500E+05	3.984E+04	2.656E+07
2	1.586E+00	5.043E+04	8.467E+04
3	6.667E-01	3.984E+04	4.337E+04
4	4.050E+01	3.984E+04	3.380E+05
5	2.900E+00	8.580E+04	1.948E+05
6	2.500E+05	1.143E+05	7.619E+07

6.2 다물체 동역학 해석 결과

먼저 초기 시험 결과와 비교를 위해 기존 경사각 및 기존 스프링 위치, Table 2의 Prototype 조건으로 해석을 수행하였다. 290 mm에 대한 케이블 저항 측정 값이 없기 때문에 기존 측정 결과의 보간값인 11.38

N을 적용하였다. 해석 결과 Fig. 10 (a)와 같이 0.0989 초에 충돌이 일어났다. 충돌 부위는 Fig. 10 (b)와 같이 배꼽 플러그 하단의 체결 나사 하우징과 행거 페어링으로 Fig. 5 (b)의 초기 시험 결과와 일치한다.

Table 6의 각 조건에 대한 해석 결과를 Fig. 11 (a), (b), (c)에 나타내었다. Fig. 11 (a)는 Case 1~4, (b)는 Case 5~8, (c)는 Case 9~12에 대한 배꼽 플러그의 z축 변위를 나타내고 있다. Fig. 11 (a)의 Case 1~4 배꼽 플러그 분리 시점은 0.0269초이고 (b)는 0.0263초, (c)는 0.0257초로 경사각이 높아질수록 빨라진다. Case 1~8까지는 경사각이 올라갈수록, 스프링 고정 위치가 올라갈수록 배꼽 플러그가 경사로를 올라가는 높이가 증가하였으나 모두 배꼽 플러그와 행거가 충돌하였다. 또한 Case 1~6까지는 Fig. 3 (b)와 같이 발사체 행거의 페어링 부분에 충돌하였다. 그러나 Fig. 11 (b)에서 Case 7, 8의 경우에는 배꼽 플러그가 상부로 더 올라간 뒤 충돌했는데 이때 행거쪽 충돌 부위는 Fig. 3 (b)에 표시된 행거 돌출부이다. Fig. 11 (c)에서는 모든 경우에 배꼽 플러그와 행거의 충돌이 일어나지 않았다. 따라서 경사각이 40° 이상에서 배꼽 플러그가 충돌하지 않는 것을 알 수 있다. 결론적으로 배꼽 플러

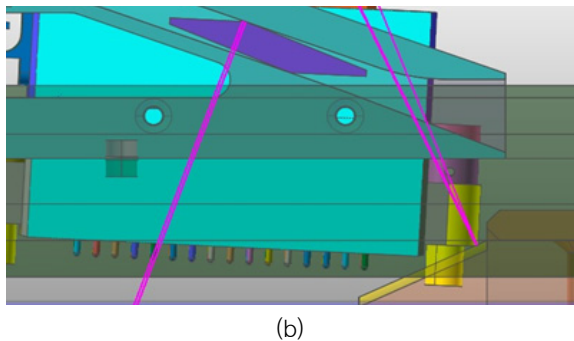
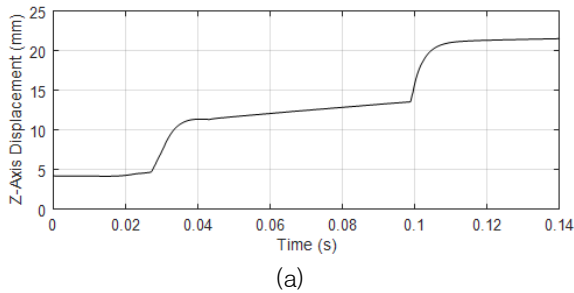


Fig. 10. The MBD analysis results with respect to the prototype test

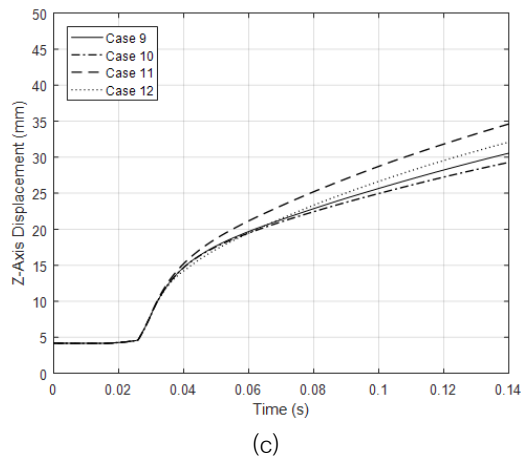
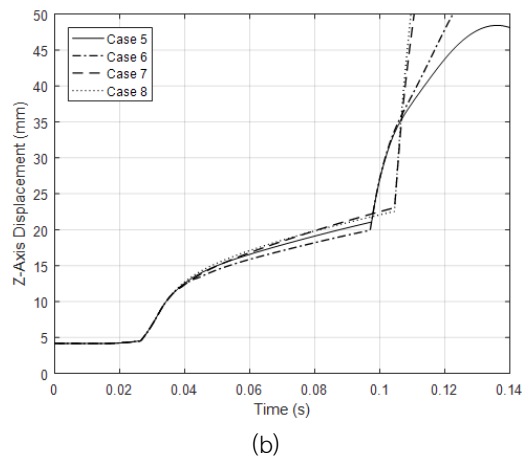
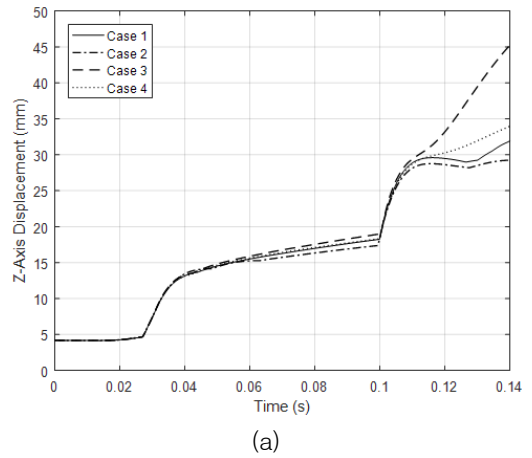


Fig. 11. The z-axis displacements of the umbilical plug according to slop angle, spring position, and spring model

그가 경사로를 원활하게 올라가는데 있어 스프링 힘보다 경사각이 큰 역할을 하는 것을 알 수 있다. 다만 스프링 12-70은 인장길이를 초과하기 때문에 실제 적용은 14-90만 가능하다.

6.3 유연 다물체 동역학 해석 모델

발사기구의 레일은 끝단이 자유단인 외팔보 형태를 하고 있다. 따라서 레일 자중과 조립 구성품들의 무게로 인해 처짐이 발생한다. 또한 발사체가 발사기구를 빠져나가면서 무게 중심이 전방으로 이동하기 때문에 추가적인 처짐이 발생한다. 배꼽 플러그와 행거가 충돌하지 않았다고 하더라도 레일 끝단에서 처짐이 크게 발생하면 레일이 발사체를 칠 수 있기 때문에 레일을 유연체로 모델링하여 동역학 해석을 수행함으로써 레일 끝단의 처짐량을 확인해 볼 필요가 있다.

Table 6에서 Case 4와 Case 12에 해당하는 두 경우에 대하여, Fig. 12와 같이 레일을 유연체로 변경 후 해석을 수행하였고 결과를 비교하였다. 소재는 알루미늄이며 탄성계수와 포아송비는 각각 71 GPa, 0.33이다. Hex8 솔리드 요소를 사용하였고 총 노드수는 186,988개이다. 레일과 기존 강체 바디들과는 Rigid element를 이용하여 Fixed joint를 연결하였다⁴⁾.

바디들의 제원 및 구속조건은 강체 해석 시 조건과 동일하나 발사체 이동에 따른 레일의 처짐량을 확인해야하므로 레일과 발사체의 Translational joint를 삭제하고 Fig. 13 (a), (b)와 같이 레일과 행거의 접촉 조건을 추가하였다. 참고로 레일의 처짐이 발생하면서 레일 접촉면의 접촉 반경이 계속 변화하므로 상기 접촉 조건에서는 강체 해석과 같은 Hertz contact model은 사용하지 않았다. 따라서 접촉 강성 값은 접촉 조건

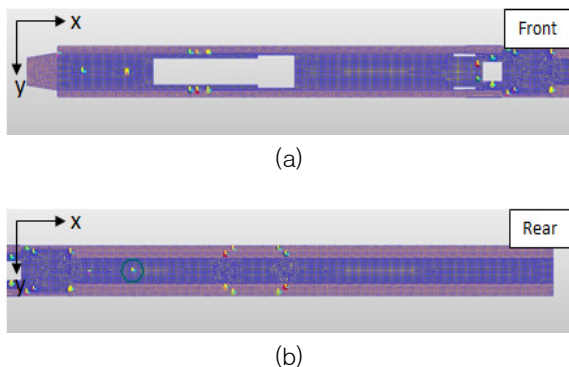


Fig. 12. Flexible body model of the rail

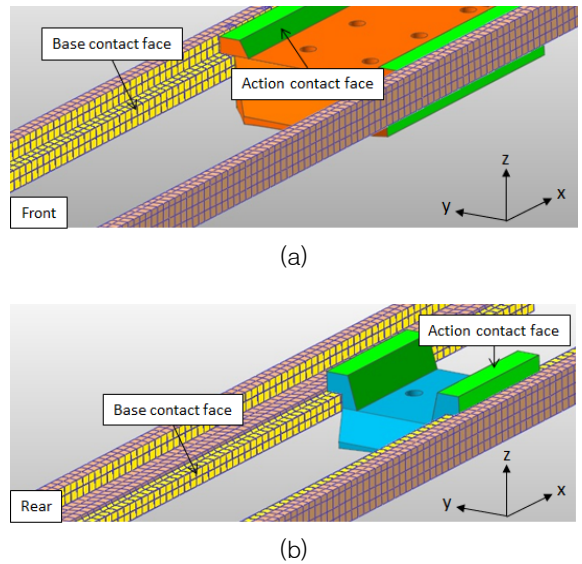


Fig. 13. Contact faces between rail and front/rear hangers

생성 시의 기본값인 100,000 N/mm를 사용하였다.

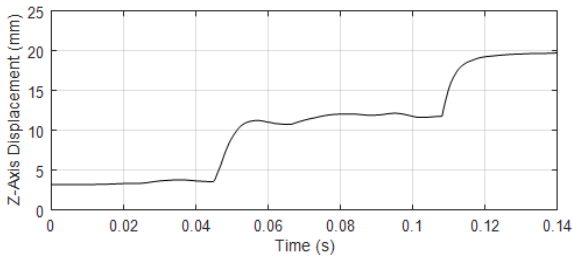
유연 다물체 모델도 강체 모델과 마찬가지로 다음 세 가지 가정 사항들을 적용하였다.

- 접촉 마찰 무시
- 레일을 제외한 나머지 바디들의 굽힘은 존재하지 않음
- 케이블 저항은 배꼽 플러그에 수직으로 일정하게 작용

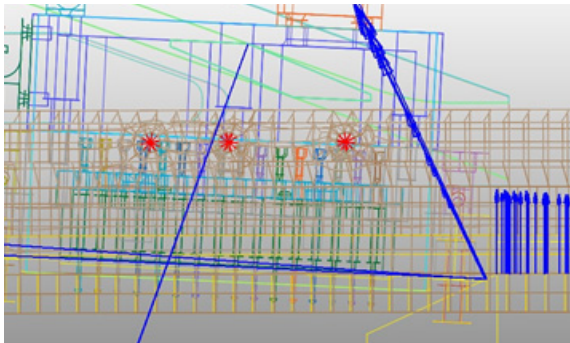
6.4 유연 다물체 동역학 해석 결과

유연 다물체 해석도 앞 절과 마찬가지로 기존 경사각 및 기존 스프링 위치, Table 2의 Prototype 조건으로 해석을 수행하였다. 해석 결과 Fig. 14 (a)와 같이 0.0448초에 배꼽 플러그가 분리됐고 0.1081초에 행거와 충돌이 일어났다. 충돌 부위는 Fig. 14 (b)와 같이 배꼽 플러그 하단의 체결 나사 하우징과 행거 페어링으로 Fig. 5 (b)의 초기 시험 결과 및 Fig. 10 (b)의 강체 해석 결과와 일치한다.

Case 4와 12에 대하여 해석 결과를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15 (a)는 배꼽 플러그의 z축 변위이고 (b)는 레일 끝단의 처짐량이다. Fig. 15 (a)에서 강체 해석 결과와 마찬가지로 경사각 20°에서 충돌이 발생하였고 40°에서는 발생하지 않았다. 배꼽 플러그가 분리



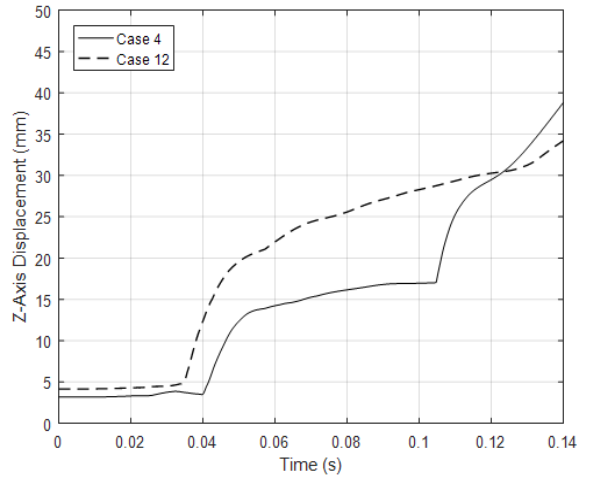
(a)



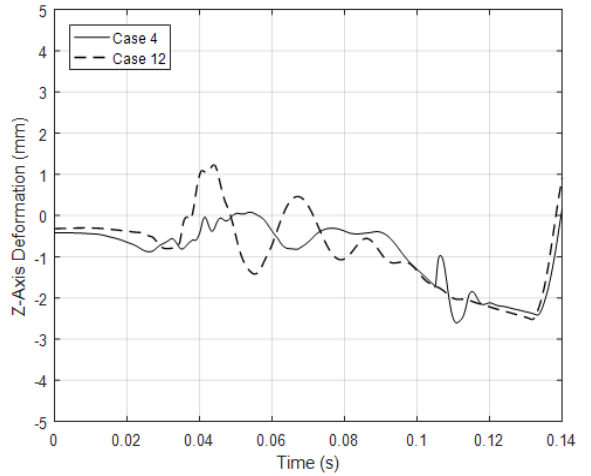
(b)

Fig. 14. The MFBDF analysis results with respect to the prototype test

되는 시점은 Case 4의 경우 0.0400초이고 Case 12의 경우 0.0346초이다. 앞 절의 강체 해석 결과와 비교해서 분리 시점이 Case 4의 경우 0.0131초, Case 12의 경우 0.0089초 늦는데 이는 레일의 굽힘이 발생했기 때문이다. 또한 Case 12보다 Case 4의 배꼽 분리 시점이 더 느린 것은 경사각이 상대적으로 완만하기 때문이다. Fig. 15 (b)에서 Case 12가 Case 4에 비해 진동 폭이 큰데 Case 12가 경사각이 20° 크기 때문에 배꼽 분리 시 하중이 위쪽으로 더 많이 작용한다. 따라서 레일 끝단이 더 많이 진동한다. 그리고 Case 4의 경우 0.1046초부터 한 주기 진동이 발생하는데 이때 배꼽 충돌이 일어났다. 피크의 진폭은 1.633 mm 이다. Fig. 15 (b)에서 처짐이 -5 mm 이하로 내려가면 발사체와 부딪힐 가능성이 있는데 해석 결과 Case 12의 최대 처짐은 -2.522 mm로 발사체와 접촉할 가능성은 낮다고 판단된다. 따라서 유연 다물체 동역학 해석 결과도 강체 해석 결과와 마찬가지로 경사각 40° 이상에서 배꼽 플러그가 충돌하지 않았고 레일의 처짐도 발사체가 발사기구를 이탈하는데 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 15. The z-axis displacements of the umbilical plug and rail tip

7. 결론

발사체 발사 시의 배꼽 분리 과정에서 발생된 배꼽 플러그와 발사체 간 충돌 현상을 방지하기 위해 먼저 배꼽 케이블 길이를 증가시켜 시험을 수행하였으나, 케이블 길이 증가만으로는 충돌 현상을 방지하기에 역부족이란 것을 확인하였다. 이후 스프링 사양 재검토를 통해, 기존 스프링 적용 시 배꼽 분리에 필요한 스프링 인장 길이와 하중이 스프링 사양을 초과하여 스

프링 선정이 적절치 않음을 확인하였고 이를 만족하는 스프링으로 변경하였다. 초기 시험과 같은 조건으로 배꼽 분리 다물체 및 유연 다물체 해석을 수행하여 충돌 현상을 재현하여 해석 모델의 적절성을 확인한 후, 경사로 각도 및 스프링 고정위치에 따른 해석을 통해 배꼽 플러그와 발사체가 충돌하지 않는 설계안을 도출하였다. 따라서 배꼽 분리장치와 배꼽 플러그 날개의 경사각은 20°에서 40°로 증가시켰고, 배꼽 스프링을 12-70에서 14-90으로 변경하였고, 마지막으로 스프링 고정부는 기존 위치에서 상부로 40 mm 이동하였다. 추후 본 연구의 결과를 바탕으로 시제를 제작하여 추가 시험을 통해 설계안을 검증할 예정이다.

References

- [1] S. Ahn, "A Study on the Hidden Type Separation Device for Missile Umbilical Connector," Journal of the Korea Institute of Military and Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 598-606, 2013.
- [2] D. Griffin, C. A. Field, "Improved Missile Launcher," European Patent Application, 1985.
- [3] Misumi, "Extension Springs - Extralight, Light, Light to Medium, Medium Load Type," FA Mechanical Standard Components, 2014.
- [4] Recurdyn V9R2, "Recurdyn Help," <http://www.functionbay.com/documentation/onlinehelp/default.htm>: FunctionBay Inc., 2018.
- [5] Recurdyn, Recurdyn/Solver Technical Manual, FunctionBay Inc., pp. 87-117, 2017.
- [6] R. L. Jackson, H. Ghaednia, H. Lee, A. Rostami, X. Wang, "Tribology for Scientists and Engineers : Chapter 3 Contact Mechanics," Springer New York, pp. 93-140, 2013.
- [7] J. Lee, "Recurdyn Contact," Recurdyn User's Day, pp. 3-12, 2016.
- [1] S. Ahn, "A Study on the Hidden Type Separation Device for Missile Umbilical Connector," Journal of