

배꼽 분리장치의 거동 분석 및 검증

이민형^{1,†} · 전광규¹ · 최장섭²¹LIG넥스원 PGM체계종합연구소²국방과학연구소

Behavior Analysis and Verification of Umbilical Separation Device

Minhyoung Lee^{1,†}, Koang-Kyu Jeon¹ and Jang-Seob Choi²¹Cruise Missile System R&D(Subsonic), LIG Nex1²Agency for Defense Development

Abstract

An umbilical separation device can maintain and disconnect electrical connections with a missile launched from a launch tube. In this paper, an umbilical separation device was designed according to mechanical characteristics of a missile. Its behavior was analyzed with Recurdyn software. Based on analysis results, its performance was verified through a verification test.

초 록

배꼽 분리장치는 발사관 내에서 발사되는 미사일과의 전기적 접속을 유지하고 해제시키는 장치이다. 본 논문은 배꼽 분리장치를 유도탄의 기계적 특성에 맞춰 설계하고 Recurdyn으로 거동을 분석하였다. 이후 분석된 결과를 바탕으로 검증시험을 통해 성능을 입증하였다.

Key Words : Umbilical Separation Device(배꼽 분리장치), Umbilical Connector(배꼽 연결기)

1. 서 론

배꼽 연결기는 유도탄과 외부 장비 간 전기적 접속을 유지하여 교신 및 점검을 수행하고, 유도탄이 발사되면 접속을 해제시켜야 한다. 이때 배꼽 연결기의 접속을 해제시키는 장치가 배꼽 분리장치이다[1][2].

본 논문에서 제시된 배꼽 분리장치는 본 사업의 설계조건을 선정하고 선정된 설계조건에 따라 유사 사업에서 제작된 4절 링크 구조 설계를 활용하여 형상설계

를 진행하였다. 이후 유도탄 발사 시 신속하게 작동하여 유도탄과의 간섭이 없어야 하므로 상용 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn을 이용한 시뮬레이션으로 작동 시간 및 거동을 분석하였다. 이후 검증시험을 통해 해석과 실제 시험의 작동 시간을 비교하였다.

본 논문에서는 배꼽 분리장치의 설계부터 해석 및 검증까지 진행한 과정에 대해 소개하고자 한다.

2. 배꼽 분리장치 설계

2.1 발사관 구성 및 배꼽 분리장치 동작 과정

Fig. 1 은 본 연구에 적용된 발사관과 발사관 내부에 유도탄이 장입된 형상을 개념적으로 나타내었다.

Received: Jun. 17, 2024 Revised: Sep. 12, 2024 Accepted: Oct. 21, 2024

† Corresponding Author

Tel: ***-****-**** E-mail: minhyoung.lee@lignex1.com

© The Society for Aerospace System Engineering

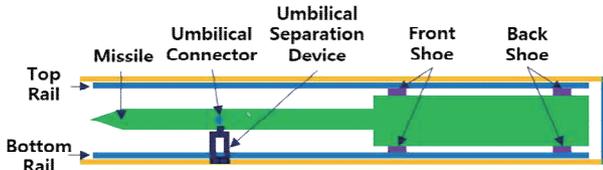


Fig. 1 Schematic of Launching System and missile

슈는 유도탄의 부스터 전후에 고정되어 있는 금속구조물로 유도탄이 발사 시 발사관 내측의 레일을 타고 전진하여 유도탄이 발사관 밖으로 완전히 사출될 때까지 자세 유지를 해주는 가이드 역할을 수행한다.

레일은 발사관 내측 벽을 따라 조립된 일체형의 금속 구조물로 유도탄의 슈가 안정적으로 전진할 수 있도록 ‘凹’ 단면형상으로 제작하였다.

배꼽연결기는 유도탄과 외부 장비 간 전기적 접속을 유지하여 교신 및 점검을 수행하고, 유도탄이 발사되면 접속을 해제시켜야 한다. 유도탄의 배꼽연결기와 발사관의 배꼽연결기가 배꼽 분리장치로 연결된다.

유도탄은 발사 시 추진부가 점화되며 발생된 추력으로 전진하게 된다. 이 때 배꼽 분리장치가 유도탄에 의해 발사관 전방으로 전진하게 되면 Fig. 2의 피스톤에 장착된 스프링의 인장력을 이기고 배꼽연결기가 링크를 따라 회전한다. 이 때 유도탄 후방의 부스터가 배꼽 분리장치에 접촉되지 않도록 배꼽 분리장치를 설계해야 한다.

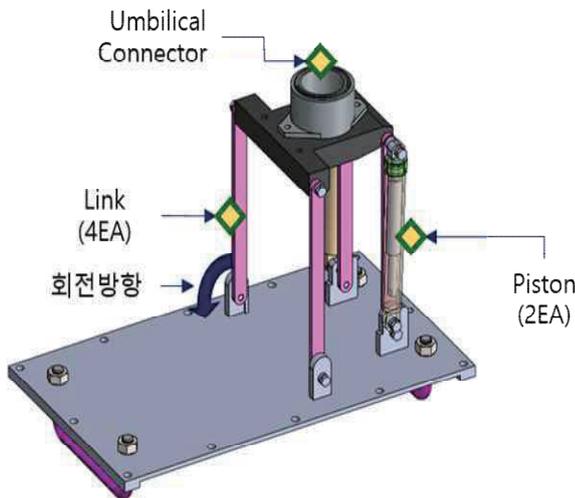


Fig. 2 Modeling of Umbilical Separation Device

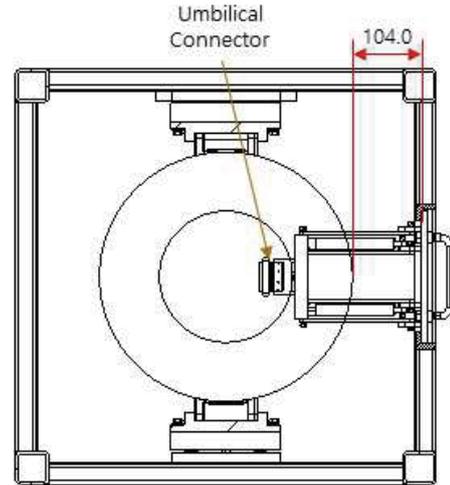


Fig. 3 Layout Design of Umbilical Separation Device

2.2 배꼽 분리장치 설계조건

배꼽 분리장치 설계조건들을 Table 1, 2와 같이 정리하였다. Fig. 3의 배꼽분리장치 배치설계에 따라 Table 1에 정리된 배꼽 분리장치와 부스터의 간섭회피 설계조건을 정리하였다. 배꼽 분리장치와 유도탄이 부딪치지 않기 위한 간섭회피 높이는 104 mm 이하이어야 한다.

발사 후 부스터의 배꼽 분리장치 위치까지 도착시간은 Table 2의 부스터 도달 시간 설계조건에 따라 0.2sec 이며 배꼽 분리장치는 0.2sec 이내에 동작이 완료 되어야 한다.

Table 1 Design Condition of Interference Avoidance

Constraints	Parameter
부스터-발사관 간격	104 mm
간섭회피 높이	104 mm 이하

Table 2 Design Condition of Arrival Time

Constraints	Parameter
유도탄 중량	000 kg
부스터 추력	00 kN
도달거리	0000 mm
부스터 도달시간	0.2 sec

2.3 배꼽 분리장치 세부설계

배꼽 분리장치는 기구학의 4절 링크 중에서 Parallelogram Linkage 형태로 Fig. 2와 같이 설계하였다. 가장 중요한 배꼽 분리장치의 동작시간을 확인하기 위해 배꼽 분리장치의 거동을 분석하였으며, Fig. 4와 같이 3단계 상태로 구분하였다.

1단계는 유도탄과 배꼽 분리장치가 접촉된 초기상태이다. 1단계에서 유도탄의 부스터가 점화하여 발생된 추력으로 유도탄의 발사가 시작되면 배꼽 분리장치는 유도탄에 이끌려 동작을 시작한다. 이 때, 배꼽 분리장치는 정지상태에서 유도탄과 동일한 가속도를 받아 등각가속도로 움직인다고 가정한다.

2단계는 배꼽 분리장치가 유도탄으로부터 완전히 분리되어 등속운동을 시작하는 단계이다. 이때는 외부에서 가해지는 힘이 없이 등각속도로 움직이기 시작한다.

3단계는 배꼽 분리장치가 완전히 접혀서 바닥면에 접촉된 단계이다. 바닥면과 부딪쳐서 발생하는 반발력에 의해 추가적인 바운딩이 발생될 수 있으나, 바운딩되어 발생될 유도탄과의 간섭은 수식화하기 어려우므로 세부설계 단계에서는 무시하고 해석에서 진행하였다.

구간 1(1,2단계 사이)의 각도는 θ_1 , 구간 2(2,3단계 사이)의 각도는 θ_2 로 정의하며 각 구간별 시간을 구해 합산하여 예상되는 배꼽 분리장치의 동작시간을 계산하였다. 이 때 배꼽 분리장치의 움직임은 고정된 한 점에 관한 강체의 운동으로 가정하여 진행하였다[3].

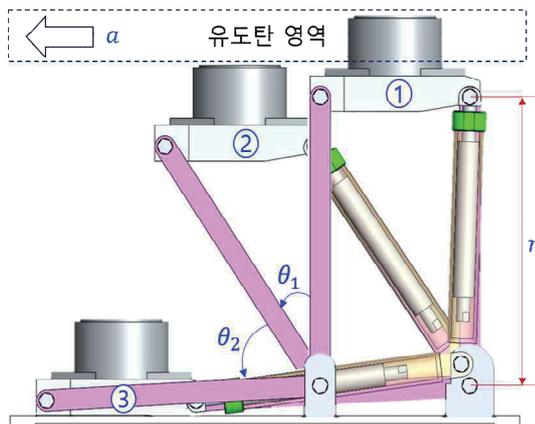


Fig. 4 Behavior Analysis of Umbilical Separation Device

구간 1에서 배꼽 분리장치는 유도탄과 연결되어 유도탄이 발사되면 유도탄의 가속도로 움직인다. 이때 유도탄의 가속도를 a , 링크의 길이를 r 이라 하면 배꼽 분리장치의 각 가속도 α 는 아래 Eq. 1과 같다.

$$\alpha = \frac{a}{r} \dots\dots\dots (1)$$

구간 1의 각속도 ω_1 는 정지상태에서 각 가속도로 시작되므로 구간 1의 동작시간을 t_1 이라 하면 아래 Eq. 2와 같다.

$$\omega_1 = at_1 \dots\dots\dots (2)$$

구간 1의 각도 θ_1 은 아래 Eq. 3과 같으며 Eq. 3에 초기 각속도 $\omega_0 = 0$, 초기 위치 $\theta_0 = 0$ 이면 Eq. 4와 같다.

$$\theta_1 = \theta_0 + \omega_0 t_1 + \frac{1}{2} at_1^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$= \frac{1}{2} at_1^2 \dots\dots\dots (4)$$

Eq. 4로부터 구간 1의 동작시간 t_1 을 구하면 아래 Eq. 5와 같다.

$$t_1 = \sqrt{\frac{2\theta_1}{a}} = \sqrt{\frac{2r\theta_1}{a}} \dots\dots\dots (5)$$

구간 2의 각속도 ω_2 는 구간 1의 각속도 ω_1 으로 시작하여 등각속도 운동이라고 가정하면 하면 아래 Eq. 6과 같다.

$$\omega_2 = \omega_1 = at_1 = \frac{at_1}{r} \dots\dots\dots (6)$$

구간 2의 각도 θ_2 는 아래 Eq. 7과 같으며 Eq. 7에 Eq. 6을 대입하면 Eq. 8과 같다.

$$\theta_2 = \omega_2 t_2 \dots\dots\dots (7)$$

$$= \frac{at_1 t_2}{r} \dots\dots\dots (8)$$

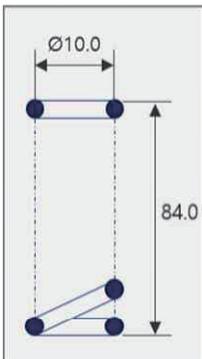
Eq. 8로부터 구간 2의 동작시간 t_2 를 구하면 아래 Eq. 9와 같다.

$$t_2 = \frac{r\theta_2}{at_1} \dots\dots\dots (9)$$

각 구간별 동작시간은 Table 3으로 정리된 조건을 대입하면 t_1 은 0.034sec, t_2 는 0.028sec으로 전체 동작시간 t_{total} 은 t_1 과 t_2 를 합산한 0.062sec로 배꼽 분리장치의 설계조건인 동작시간 0.2sec 이내를 충분히 만족한다.

Table 3 Design Condition of Umbilical Separation Device

Constraints	Parameter
유도탄 가속도(a)	137.67 m/s^2
링크 길이(r)	0.13 m
구간 1 각도(θ_1)	35.05° (0.612 rad)
구간 2 각도(θ_2)	58.72° (1.025 rad)



- 재질 : KS D 3535, STS304-WPB
- 선경 : Ø2.0
- 자유장 길이 : 84.0
- 유효감김수 : 16
- 총감김수 : 18
- 감김방향 : 오른쪽
- 스프링상수(K) : 2.14±0.02kg/mm

Fig. 5 Design Conditions of Spring

다음으로 배꼽 분리장치에 설계 적용된 스프링을 분석하였다. 스프링은 배꼽 분리장치가 Fig. 4의 1단계와 3단계에서 자세를 유지시키기 위해 적용하였다.

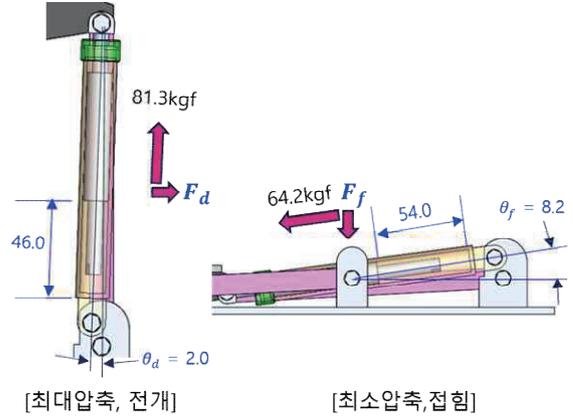


Fig. 6 Analysis of Spring Force

Fig. 5와 같이 설계된 스프링을 바탕으로 Fig. 4 스프링 변위에 따른 상태별 힘을 분석한 결과 전개상태에서 스프링의 힘 F_{Sd} 는 최대압축량이 38mm이므로 간단한 스프링 힘의 공식으로 정리하면 Eq. 10과 같다.

$$F_{Sd} = kx = 2.14 \times 38 = 81.3 \text{ kgf} \dots\dots\dots (10)$$

이때 전개상태를 유지하기 위한 힘 F_d 은 Eq. 11과 같고 값은 2.8 kgf 이다.

$$F_d = F_{Sd} \cos(90 - \theta_d) = 81.3 \times \cos(88) = 2.8 \text{ kgf} \dots\dots\dots (11)$$

접힘상태에서 스프링의 힘 F_{Sf} 는 최대압축량이 30mm이므로 간단한 스프링 힘의 공식으로 정리하면 Eq. 12와 같다.

$$F_{Sf} = kx = 2.14 \times 30 = 64.2 \text{ kgf} \dots\dots\dots (12)$$

접힘상태를 유지하기 위한 힘 F_f 는 Eq. 13과 같고 값은 9.15 kgf 로 나타났다.

$$F_f = F_{Sf} \times \sin(\theta_f) = 64.2 \times \sin(8.2) = 9.15 \text{ kgf} \dots\dots\dots (13)$$

분석된 힘 F_d 와 F_f 를 바탕으로 배꼽 분리장치가 유도탄에 조립 전 상태를 유지하고 유도탄 발사 후 접힘상태를 유지하기에는 충분한 힘이 확보되었다고 판단하였다.

마지막으로 배꼽 분리장치가 동작 후 유도탄과 간섭 회피가 가능한지 분석하였다. Fig. 7과 같이 접힘상태에서 53.5mm이므로 간섭회피 높이인 104mm 이내를 충분히 만족하였다. 앞서 확인한 분리장치의 거동 분석에서 예측된 1차 바운딩은 이어진 동역학 해석으로 검증하였다.

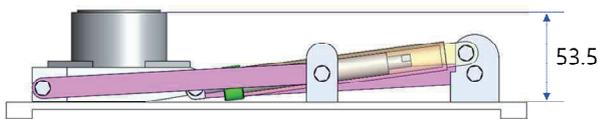


Fig. 7 Analysis of Interference Avoidance

3. 동역학 해석

동역학 해석 모델은 다물체 상용 해석 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 구축하였다[4][5]. Fig. 8과 같이 완성탄과 동일한 중량의 배꼽연결기를 정지상태에서 부스터 추력으로 가속한 다음 배꼽 분리장치의 거동을 확인하였다.

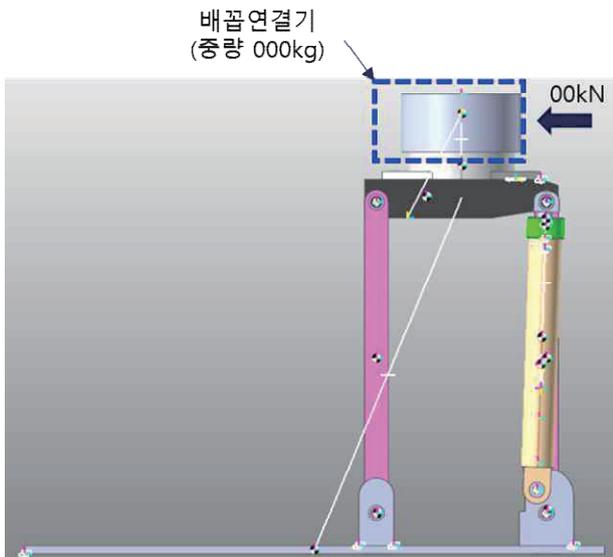


Fig. 8 Modeling of Umbilical Separation Device

해석의 주 목표는 장치의 접힘 후 반력에 의한 1차 바운딩까지의 거동 분석과 전개시간 계산이었다. 전개시간은 작동 후 1차 접촉시점까지로 설정하고 부스터 도달시간인 0.2sec 이내를 목표로 진행하였다.

배꼽 분리장치의 해석결과는 Fig. 9와 같이 부스터 도착시간 이내인 0.08sec에 1차로 바닥면에 접촉하고, 이후 접힘 후 반력에 의한 1차 바운딩 거동은 9.9mm 상승되어 간섭구간 밖에서 발생하는 것으로 확인되었다. 이를 통해 배꼽 분리장치의 안전성을 해석적으로 최종 확인하였다.

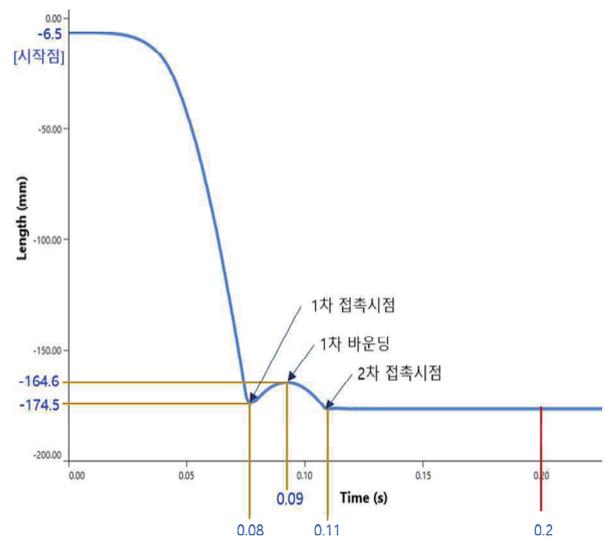


Fig. 9 Profile of Umbilical Separation Device

이후 세부설계에서 계산된 0.062sec와 해석결과인 0.08sec간 차이가 발생한 원인을 고찰하였다. 세부설계에서 링크간 마찰을 고려하지 않았으나 동역학 해석은 기본적인 디폴트 값으로 마찰계수 관련 값들이 적용되어 전체 시간이 늘어난 것으로 판단되었고, 배꼽 분리장치를 제작하여 성능시험을 진행하여 최종 검증을 진행하였다.

4. 배꼽 분리장치 성능시험

배꼽 분리장치의 설계 타당성을 검증하고 유도탄에 적용 전에 발생가능한 문제점을 파악하기 위해 유도탄 모사장비를 Fig. 10과 같이 제작하여 성능시험을 진행하였다.

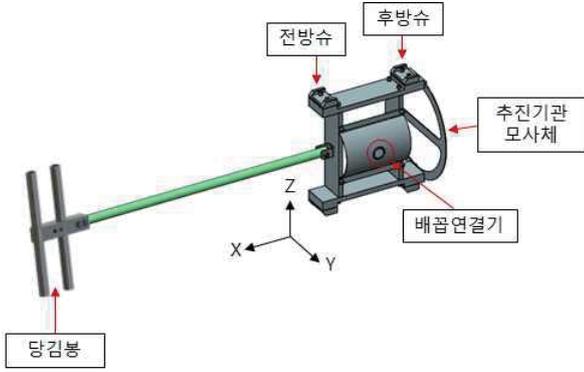


Fig. 10 Shape of Missile Simulation Equipment

Fig. 11과 같이 배꼽 분리장치에 가속도 센서를 부착하고 유도탄 모사장비로 발사관 내부에서 배꼽분리장치를 동작시킨 후 배꼽 분리장치 Y축 방향의 시간에 따른 가속도 변화량을 측정하여 동작시간을 확인하였다.

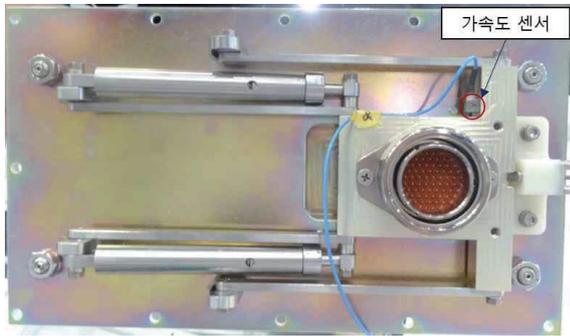


Fig. 11 Location of Accelerometer

시험 결과, Fig. 12와 같이 모사장비 동작으로 확인 시점부터 배꼽연결기와 바닥면이 접촉되어 반력이 발생한 시간까지 0.065sec 로 계측되었다. 이는 세부설계에서 예측된 0.062sec와 유사하며 동역학 해석으로 예측된 0.08sec와 다소 차이를 보였다.

마지막으로 동역학 해석에서 고찰된 내용을 토대로 계측값을 검토하였다. 분리장치의 링크 사이에 윤활제가 도포되어 전체적인 마찰력이 감소되었고, 마찰이 무시된 계산값 0.062sec에 근접한 값으로 계측되었다고 판단되었다. 해석값은 계산값이나 계측값과 다소 차이가 발생하였지만, 모두 부스터 도달시간 0.2sec 이내로 동작시간이 확보되어 만족스러운 결과가 도출되었다.

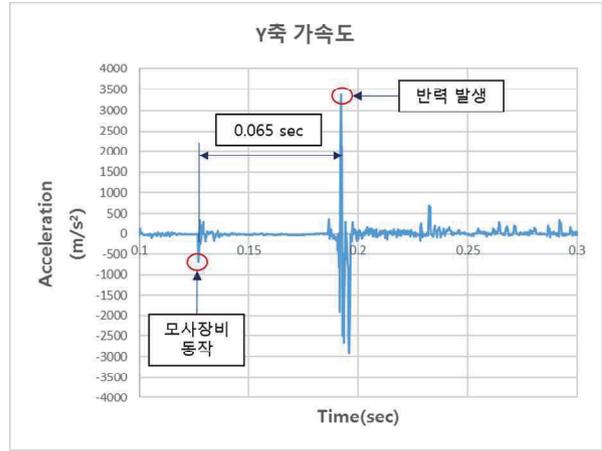


Fig. 12 Acceleration Time Result Graph

5. 결 론

본 논문에서는 배꼽 분리장치의 설계과정과 동역학 해석 및 성능시험 방법에 대해 기술하였다. 개발된 배꼽 분리장치는 설계조건 상세화와 세부 설계를 거쳐 동역학 해석을 통한 안전성 검증과 실제 성능시험을 적용하여 만족스런 결과를 도출하였고, 향후 개발되는 유도무기 체계의 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] S. Ahn, “A Study on the Hidden Type Separation Device for Missile Umbilical Connector”, *Journal of the KIMST*, Vol. 16, No. 5, pp. 598~606, Oct. 2013.
- [2] Y. 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.
- [3] C. E. Wilson and J. P. Sadler, “Kinematics and Dynamics of Machinery”, 3rd Ed., Prentice Hall, 2003.
- [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