



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(9), 617-628(2019)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.9.617

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 파이로테크닉 분리 너트 거동에 대한 설계 인자의 영향 분석

우정민<sup>1</sup>, 김정호<sup>2</sup>, 조진연<sup>3</sup>, 장승교<sup>4</sup>, 이효남<sup>5</sup>, 양희원<sup>6</sup>

## Influence of Design Parameters on the Behavior of Pyrotechnic Separation Nut

Jeongmin Woo<sup>1</sup>, Jeong Ho Kim<sup>2</sup>, Jin Yeon Cho<sup>3</sup>, Seung-Gyo Jang<sup>4</sup>, Hyo-Nam Lee<sup>5</sup>

and Hee Won Yang<sup>6</sup>

Inha University<sup>1,2,3</sup>, Agency for Defense Development<sup>4,5</sup>, Hanwha Corporation<sup>6</sup>

### ABSTRACT

The currently considered pyrotechnic separation nut is separated through the complicated process, because it has many internal moving parts and two variable-volume chambers connected by the vent hole. Therefore, it has many design parameters. Some of these are the contact angles between internal moving parts, the masses of the internal moving parts, the inner diameter of the push rod protrusion, the initial volumes of the chambers, the mass of the explosive charge, and the diameter of the vent hole. To improve the pyrotechnic separation nut, it is necessary to understand how the behavior of the separation nut is changed according to design parameters. In this point of view, parametric studies are carried out using the previously proposed prediction model for pyrotechnic separation nut behaviors. In each case, the parameter of the interest is changed while the others are kept unchanged. From the results, it is investigated how each design parameter influences the separation behavior.

### 초 록

벤트홀로 연결된 두 개의 가변 체적 챔버를 가지고 있는 파이로테크닉 분리 너트는 복잡한 과정을 통해 분리를 수행하므로 많은 설계 인자를 가지고 있다. 접촉부의 각도, 구성품의 질량, 누름봉 돌출부 안쪽 지름, 환형 챔버의 초기 부피, 확장 챔버의 초기 부피, 화약질량, 벤트홀 지름과 같은 설계 인자들의 변화에 따라 분리 너트의 성능이 어떻게 달라지는지를 파악하면 설계 개선 방향을 결정하는데 도움이 될 수 있다. 이에, 선행 연구를 통해 개발한 파이로테크닉 분리 너트 거동 예측 모델을 이용하여 매개변수 연구를 수행하였다. 다른 설계 인자의 값은 고정된 상태에서 한 설계 인자의 값을 독립적으로 변화시키며 분리 시간이 어떻게 달라지는지, 변화의 원인이 무엇인지를 분석하였다.

**Key Words** : PMD(파이로테크닉 장치), Pyrotechnic Separation Nut(파이로테크닉 분리 너트), Segmented Nuts(분할 너트), Parametric Study(매개변수 연구)

† Received : May 21, 2019 Revised : July 19, 2019 Accepted : August 7, 2019

<sup>1</sup> Ph.D. Student, <sup>2</sup> Professor, <sup>3</sup> Professor, <sup>4</sup> Principal Researcher, <sup>5</sup> Principal Researcher, <sup>6</sup> Senior Researcher

<sup>3</sup> Corresponding author, E-mail : c jy@inha.ac.kr, ORCID 0000-0002-0984-7852

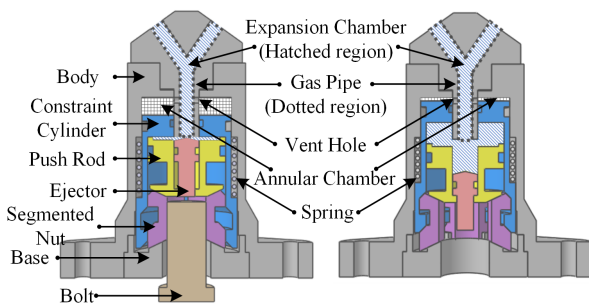
© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## I. 서 론

화약의 연소로 인해 만들어진 연소생성물의 압력으로 작동하는 분리 너트를 파이로테크닉 분리 너트라고 칭한다. ‘파이로테크닉’이라는 단어가 연소하는 화약이 만들어낸 압력으로 작동하는 장치를 의미하기 때문이다[1]. 파이로테크닉 분리 너트는 두 구성물을 결합시키고 있다가, 필요 시점에 신속히 분리할 수 있도록 설계되어야 하며, 항공우주분야에서 로켓이나 미사일의 단 분리 등에 사용되고 있다[2,3].

파이로테크닉 장치의 작동 시 발생하는 파이로 충격은 높은 주파수를 가지고 있어 전자기기고장의 원인이 될 수 있다[4]. 실제로, 파이로 충격으로 인한 미션 실패 사례가 다수 존재한다[5]. 파이로테크닉 분리 너트의 경우, 구성품의 거동이 파이로 충격의 주요 생성 원인이다[3]. 따라서 파이로테크닉 분리 너트 이용 시 파이로 충격을 줄이기 위해서는 작동 과정에서 구성품 간의 불필요한 충돌을 최소화해야 한다.

Figure 1은 본 연구의 대상이 되는 파이로테크닉 분리 너트의 단면을 보여준다. 선행연구[6,7]에서 설명한 바와 같이 파이로테크닉 분리 너트에서는 챔버 압력의 변화로 인해 내부 구성품들이 움직이게 되고, 이들의 위치 변화에 따라 환형 챔버(Annular Chamber, AC)와 확장 챔버(Expansion Chamber, EC)의 부피가 변화하게 된다. 이러한 부피변화는 다시 역으로 벤트홀로 연결되어 있는 두 챔버의 압력에 영향을 미치게 된다. 이와 같이 복잡한 상호작용을 통해 분리가 수행되기 때문에 성능에 영향을 미치는 설계 인자가 다수 존재할 수 있다. 또한, 반응성이 높은 화약을 사용하는 파이로테크닉 장치이므로 설계 인자의 작은 변화가 장치의 성능에 중대한 영향을 미칠 수 있다[8]. 그러므로 이러한 설계 인자의 변화에 따라 분리 너트의 성능이 어떻게 달라지는지, 그리고 그 영향력이 얼마나 지배적인지에 대한 정보를 알 수 있다면 분리 너트의 설계 변경 방향을 찾는 데 큰 도움이 될 수 있다.



a) Before separation      b) After separation

Fig. 1. Shapes of pyroshock-reduced separation nut

이에 본 연구에서는 각종 설계변수의 변화에 따른 매개변수 연구를 수행하고, 그 결과를 이용하여 각 설계 인자들이 파이로테크닉 분리 너트의 성능에 미치는 영향을 고찰 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1 해석 모델의 개발 및 검증

챔버의 압력을 계산하기 위한 지배방정식과 내부 구성품의 운동방정식을 미분방정식의 형태로 유도한 후, 연동하여 분리 너트 성능 예측 모델을 개발하였다. 챔버 압력 계산을 위한 지배방정식은 Saint Robert's law를 이용한 연소율 계산식, 질량 및 에너지 보존식, 질식 상태를 고려한 배출율 방정식 등을 포함하며, 최종적으로 화학적-열적-기계적 거동을 모사하는 지배 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 자세한 유도과정은 선행 연구인 참고문헌[7]에 기술되어 있다.

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(x,y) \\ v \\ g(x,y) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

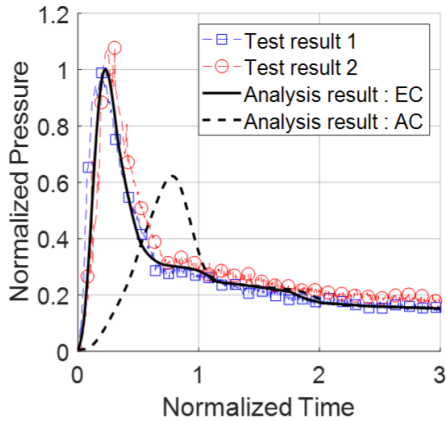
식 (1)에서  $M$ 은 각 내부 구성품들의 질량행렬,  $I$ 는 단위행렬을 나타낸다.  $x$ 와  $v$ 는 내부 구성품들의 변위벡터와 속도벡터,  $y$ 는 화약입자의 반지름, 연소 생성물의 온도, 각종 연소생성물의 질량 등으로 이루어진 연소상태 벡터를 나타낸다. 그리고  $f$ 는 압력, 마찰력 등 내부 구성품에 작용하는 하중벡터를 의미하며,  $g$ 는 구성품 위치와 연소상태에 의해 결정되는 벡터이다.

유도한 미분방정식의 수치해는 Dormand - Prince embedded Runge - Kutta method를 이용하여 구하였다. 개발한 모델의 검증을 위하여 실제 파이로테크닉 분리 너트를 제작하여 시험을 실시하고 챔버의 압력을 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 기준 상태 조건에 대하여, 해석과 시험 결과로부터 도출한 확장 챔버의 압력을 비교한 결과는 Fig. 2(a)와 같다. 다른 조건이 기준 상태 조건과 동일하고 벤트홀의 크기만 3mm로 늘어난 경우에는 분리에 실패하며, 그때의 챔버 압력 비교 결과는 Fig. 2(b)와 같다. 여기서 기준 상태 조건이란, Table 1에 정리한 입력 값을 의미한다. 선행 연구[7]에서 언급한 바와 같이, 개발한 모델의 검증을 위한 시험에서는 볼트 체결로 인한 체결력(Clamping Force)의 영향을 배제하기 위하여 볼트를 매우 작은 크기의 토크로 체결하였다.

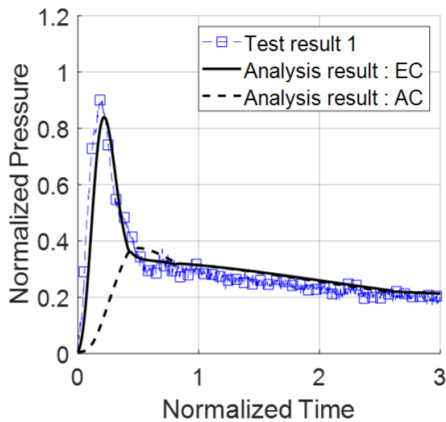
Figure 2는 기준 상태 조건에서의 해석 결과를 이용하여 정규화 하였다. 시간은 기준 상태 조건에서의 분리 시간을 이용하여 정규화 하였으며, 압력은 기준 상태 조건에서 확장 챔버의 최고압력으로 정규화 하

였다. 여기에서 분리 시간은 화약의 연소가 시작되는 순간부터 분할 너트와 볼트 나사산의 접촉이 해제되는 시점까지의 시간으로 정의한다.

Figure 2에 도시한 두 결과에서 모두 해석결과와 시험결과가 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 개발한 분리 너트 거동 예측 모델을 이용해 신뢰할만한 성능 예측 결과를 도출할 수 있다고 판단할 수 있다. 검증용 거친 개발 모델을 이용하여 매개변수 연구를 수행하고, 그 결과를 통해 각 설계 인자의 영향을 파악하였다.



a) The diameter of the vent hole : 2mm [7]



b) The diameter of the vent hole : 3mm

Fig. 2. Comparison of normalized chamber pressure obtained from test and analysis

Table 1. Input data for reference case

Design parameters	Value
Initial AC volume	1.6 cm <sup>3</sup>
Initial EC volume	5.1 cm <sup>3</sup>
Explosive charge mass	130 mg
Vent hole diameter	2.0 mm
Clamping force	0 N

## 2.2 분리 너트 구동 중 발생 가능한 충돌

Figure 1에 도시한 분리 너트의 구동 과정을 설명하면 다음과 같다. 화약의 연소 결과 생성된 연소가스가 확장 챔버로 유입 되면 구속원통(Constraint Cylinder)과 방출핀(Ejector)이 움직이게 된다. 구속원통이 운동하여 특정위치에 도달하면, 분할 너트(Segmented Nut)에 작용하고 있던 구속이 해제된다. 그러면 누름봉(Push Rod)과 분할너트도 운동할 수 있게 된다. 누름봉은 챔버의 압력으로 인해 축방향 하중을 받는다. 그리고 누름봉과 분할 너트의 접촉면에서 발생하는 접촉력이 분할 너트를 반경 방향으로 벌어지게 만든다. 분할 너트가 벌어지면 볼트와 너트의 나사산 접촉이 해제되어 볼트가 분리 된다. 연소가스 중 일부는 벤트홀(Vent Hole)을 통해 확장 챔버로 부터 환형 챔버로 유입된다. 환형 챔버에 유입된 연소가스는 분리과정에서 구속원통이 몸체(Body)에 충돌하지 않도록 완충 장치의 역할을 한다. 방출핀은 볼트의 분리가 잘 이루어지지 않는 경우에 볼트를 밀어내는 역할을 한다. 스프링은 사전 압축이 발생하도록 조립하여, 관성력으로 인해 원하지 않는 시점에 구속원통이 움직여 분리과정이 시작되는 것을 막는 역할을 한다.

분리 너트 구성품의 초기 배치가 Fig. 3(a)와 같을 때, 구동 과정 중 발생할 수 있는 충돌에 대해서도 도시하면 Fig. 3(b)-(f)와 같다. 충돌하는 두 물체는 격자로 강조하였고, 충돌면은 검정색 선으로 표시하였다. Fig. 3(b), (c)는 방출핀이 볼트에 충돌하는 경우, Fig. 3(d)는 방출핀이 운동 가능한 최대 범위까지 이동하여 누름봉에 충돌하는 경우를 나타낸다. Fig. 3(e)는 분할 너트가 운동 가능한 최대 범위까지 이동하여 구속원통의 안쪽 면과 충돌하는 경우, 그리고 Fig. 3(f)는 분할 너트와 구속원통의 기울어진 부분이 충돌하는 경우를 보여준다.

Figure 3(b)와 같이 분할 너트가 구속되어있는 상태에서 방출핀과 볼트가 충돌하는 경우는, Fig. 3(a)와 같이 초기 배치에서 두 구성품 사이에 틈새가 있는 경우에만 가능하다. 따라서 방출핀과 볼트 사이에 틈새가 존재하지 않도록 조립한다면 이 충돌을 예방할 수 있다. Fig. 3(c)-(e)의 경우는 분리 너트의 작동 과정에서 불가피하게 발생하는 충돌이다. 이 중 Fig. 3(e)의 경우는 거리차이로 인해 분할 너트와 볼트의 나사산이 접하고 있는 상태에서는 발생할 수 없는 충돌이다. 이에 반해 Fig. 3(f)의 경우, 발생하면 분리 시간이 크게 증가하지만, 분리과정에서 불가피하게 발생하는 충돌은 아니다. 따라서 Fig. 3(f)와 같은 충돌이 발생하지 않도록 하는 설계 인자의 조합을 찾아낸다면 불필요한 파이로 충격의 발생 또한 막을 수 있다.

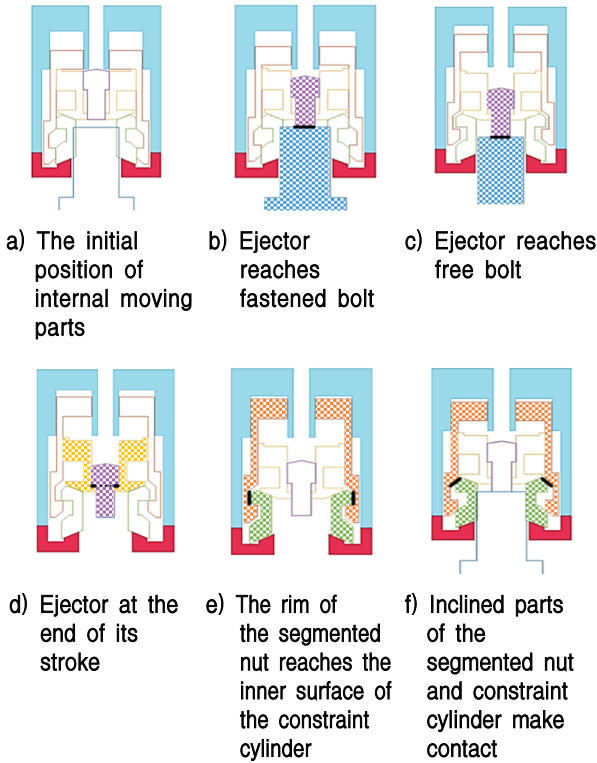


Fig. 3. Example of the collision among internal moving parts of separation nut

### 2.3 설계 인자의 영향

성능에 영향을 미치는 설계 인자의 후보로 접촉부의 각도, 구성품의 질량, 누름봉 돌출부 안쪽 지름, 환형 챔버의 초기 부피, 확장 챔버의 초기 부피, 화약질량, 벤트홀 지름 등을 꼽을 수 있다.

선행연구[7]에서 화약질량, 벤트홀 지름의 변화에 따른 영향을 고찰하였으므로 본 논문에서는 이외의 설계인자에 대하여 고찰하도록 한다.

체결력은 볼트의 규격 및 체결부가 견뎌내야 하는 하중, 진동에 대한 플럼특성[6,9] 등을 고려하여 정해지는 값이므로 설계 인자에서 제외한다. 구속원통은 체결 과정에서 너트가 반지름 방향으로 벌어지는 것을 막는 역할을 하는데, 이로 인해 너트와 구속원통의 접촉면에는 마찰력이 발생한다[6]. 체결력이 정해지면 이 마찰력의 크기도 정해진다. 앞서 설명한 바와 같이 분리 너트에 장착되어있는 스프링은 관성력으로 인해 원하지 않는 시점에 구속원통이 움직여 분리과정이 시작되는 것을 막는 역할을 한다. 즉, 스프링의 강성 및 사전 변형량은 시스템의 관성력과 구속원통에 작용하는 저항력을 고려하여 우선 결정해야 하는 값이다. 따라서 설계 인자에서 제외한다.

다른 설계 인자의 값을 Table 1에 나열한 기준 상태와 같이 고정한 상태에서, 하나의 설계 인자 값이 달라질 때 성능이 어떻게 달라지는지 분석하였다. 이때, 분리과정에서 Fig. 3(f)와 같은 불필요한 충돌이

발생하지 않는 경우에 파이프 충격의 발생과 분리 시간이 모두 감소한다. 따라서 파이프테크닉 분리 너트의 성능은 분리 시간의 관점에서 판단하였다.

Figures 5, 6, 9-12, 14-16의 가로축에 표기한 매개변수 척도(Parameter scale)는 해석 시 사용한 설계 인자의 값을 기준 상태 값으로 정규화하여 나타낸 결과이다. 즉 매개변수 척도 값이 2인 경우는 기준 상태에 비해 설계 인자 값이 2배 되었다는 의미이다. 설계 인자의 변동 폭 한계를 벗어나서 해석결과가 존재하지 않는 영역은 파란색 빗금으로 표시하였다. 회색으로 표시한 영역은 분리에 실패하는 매개변수 척도 값의 범위를 나타낸다. 그래프 가로축의 시간은 기준 상태 조건에서의 분리 시간을 이용하여 정규화 하였으며, 세로축의 압력은 기준 상태 조건에서 확장 챔버의 최고압력으로 정규화 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 분리 시간은 화약의 연소가 시작되는 순간부터 분할 너트와 볼트 나사산의 접촉이 해제되는 시점까지의 시간으로 정의한다. 압력 그래프에 표기한 화살표는 매개변수 척도가 증가함에 따라 챔버 최고 압력의 변화 방향을 표시한 것이다.

#### 2.3.1. 접촉부 각도의 영향

분리 과정에서 분할 너트의 운동에 영향을 미치는 접촉부는 두 가지로, 분할 너트-밀판(Base)의 접촉부, 분할 너트-누름봉의 접촉부이다. 분할 너트-밀판 접촉부의 각도는 Fig. 4(a)에 표시한 것과 같고  $\theta_{NB}$ 로 표기한다. 분할 너트-누름봉 접촉부의 각도는 Fig. 4(b)에 표시한 것과 같고  $\theta_{NP}$ 로 표기한다. 두 각도를 변화시키며 해석을 수행해본 결과, Figs. 5, 6과 같은 결과를 얻었다. 이때, 각도는 특정 값 범위에서만 변화시켰다. 두 가지 경우에서 모두 환형 챔버의 최고 압력은 감소하고 확장 챔버의 최고 압력은 다소 증가하였다. 그리고 매개변수 척도와 분리 시간이 비선형적인 관계를 보였다. 이는 각도 변화에 따라 분리 시간에 상반된 영향을 미치는 요소들이 존재하기 때문이다.

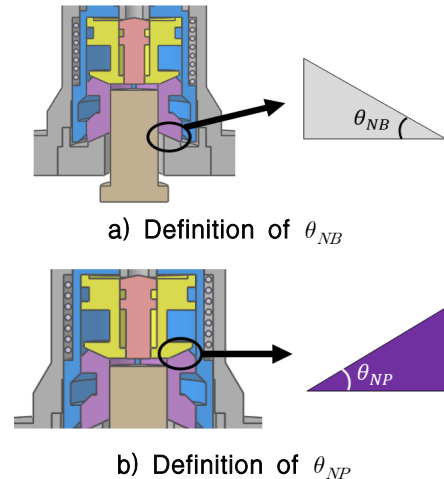
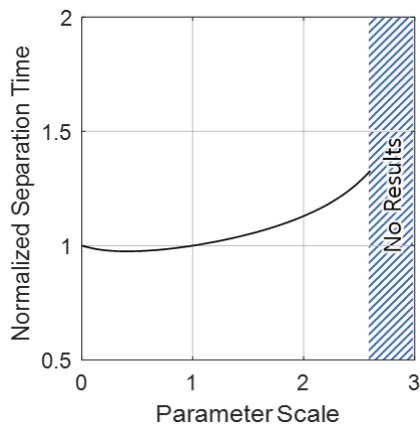
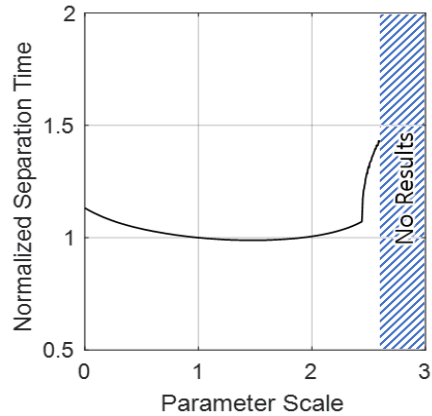


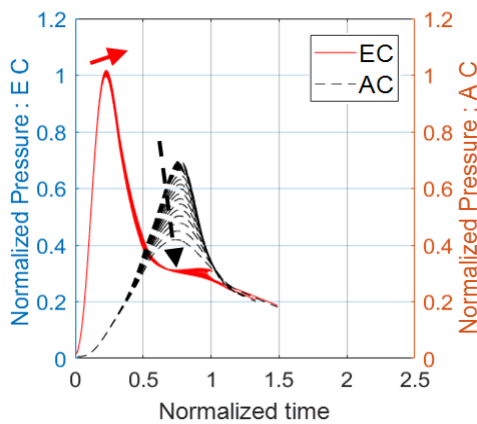
Fig. 4. Definition of  $\theta_{NB}$  and  $\theta_{NP}$



a) Change of the separation time depending on  $\theta_{NB}$

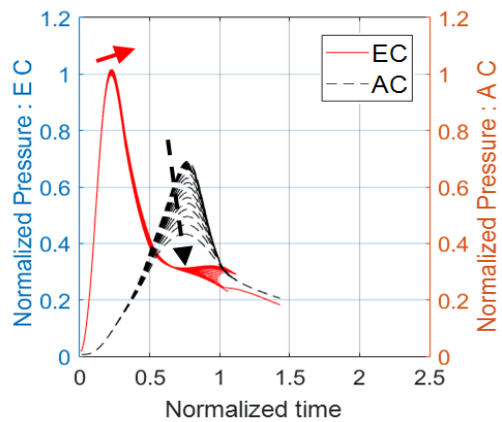


a) Change of the separation time change depending on  $\theta_{NP}$



b) Chamber pressure change depending on  $\theta_{NB}$

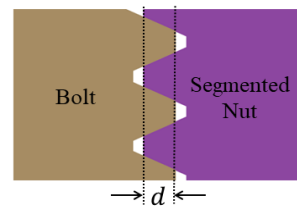
Fig. 5. Parametric study result depending on the contact angle between the segmented nut and the base ( $\theta_{NB}$ )



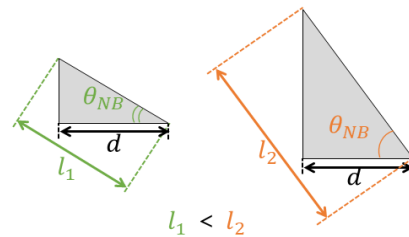
b) Chamber pressure change depending on  $\theta_{NP}$

Fig. 6. Parametric study result depending on the contact angle between the segmented nut and the push rod ( $\theta_{NP}$ )

Figure 7(a)는 분할 너트와 볼트가 체결되어있을 때 나사산을 확대하여 도시한 것이다. 나사산 접촉부의 높이를  $d$ 라고 할 때, 너트가 반지름방향으로  $d$  이상 이동해야 나사산의 접촉이 해제된다. 너트가 반지름방향으로  $d$ 만큼 이동하기 위해서는  $\theta_{NB}$ 인 빗면 위를  $l$ 만큼 이동해야 한다. Fig. 7(b)는 밑변의 길이가  $d$ 로 동일하고, 끼인각의 크기가  $\theta_{NB}$ 일 때 빗면 길이  $l$ 의 변화를 보여준다.  $\theta_{NP}$ 가 기준 상태와 같이 고정된 상태에서  $\theta_{NB}$ 가 커지면 나사산의 접촉이 해제되기 위하여 너트가 이동해야 하는 빗면의 길이  $l$ 이 증가한다. 한편,  $\theta_{NB}$ 가 커지면 너트를 빗면 방향으로 밀어내는 하중의 크기 역시 증가한다. 너트가 이동해야 하는 빗면의 길이가 증가하는 것은 분리 시간이 증가하는 효과를 가져오지만 너트를 반지름 방향으로 밀어내는 하중의 크기가 커지는 것은 분리 시간을 단축하는 효과를 가져오므로 서로 상반된 역할을 하게 된다.



a) Enlarged view of the threaded part



b) Change of the length of the inclined plane depending on the different value of  $\theta_{NB}$

Fig. 7. Relation between  $\theta_{NB}$  and  $l$

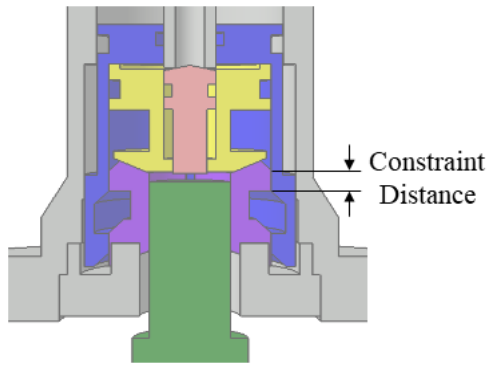


Fig. 8. Definition of the constraint distance

Figure 8에 표기한 구속 거리(Constraint Distance)는 분할 너트에 작용하는 구속을 해제하기 위하여 구속원통이 이동해야 하는 축방향 거리를 의미한다. 분할 너트를 반지름방향으로 밀어내는 하중은 구속원통의 운동을 방해하는 마찰력을 만들어낸다. 따라서 분할 너트를 반지름방향으로 밀어내는 하중이 커지면 분리 시간이 증가하는 효과가 있다. 그러나 분할 너트에 작용하던 구속이 해제된 이후에는 분할 너트를 각도가  $\theta_{NB}$ 인 빗면 방향으로 밀어내는 하중이 클수록 분리 시간이 짧아진다. 즉, 구속원통의 운동을 방해하는 힘과, 분할 너트를 각도가  $\theta_{NB}$ 인 빗면 방향으로 밀어내는 힘은 서로 상반된 효과를 가져온다. 이러한 두 힘의 크기가  $\theta_{NP}$ 의 값에 따라 달라지기 때문에 매개변수 척도와 분리 시간은 선형적인 관계를 보이지 않는다. 그리고 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이, 매개변수 척도가 2.44 이상인 구간에서는 Fig. 3(f)와 같은 충돌이 발생하여 분리 시간이 급격히 증가한다.

$\theta_{NB}$ 와  $\theta_{NP}$ 가 동시에 변화하는 경우에는 두 각도의 변화가 분리 시간 변화에 어떤 영향을 미칠지 직관적으로 판단하기 어려우므로, 해석을 통해 확인해 보아야 한다.

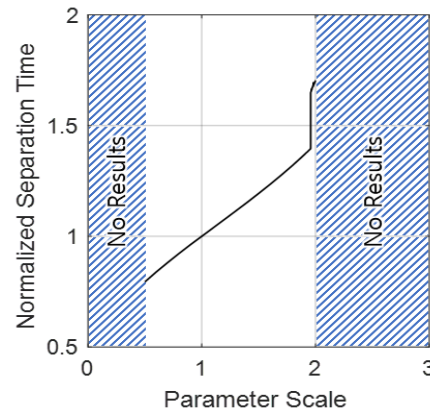
### 2.3.2 구성품 질량의 변화

구성품에 높은 응력이 작용하여 보강이 필요한 경우, 또는 시스템의 경량화가 필요한 경우에는 구성품의 질량이 변경될 수 있다. 따라서 기준 상태보다 질량이 0.5배 이상, 2.0배 이하가 되는 범위에서 해석을 수행하고 결과를 고찰하였다.

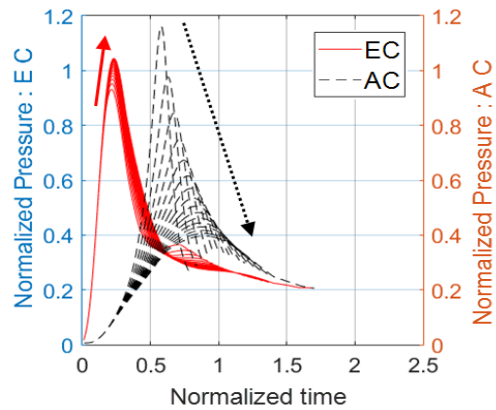
#### 2.3.2.1. 구속원통 질량

Figure 9는 구속원통 질량 변화에 따른 매개변수 연구 결과를 보여준다.

구속원통의 질량이 커질수록 운동을 위해 더 큰 힘이 필요하므로 확장 챔버의 부피 증가가 어려워져 최고 압력이 상승한다. 반대로 환형 챔버의 경우는 부피 감소가 어려워졌으므로 최고 압력이 하강한다.



a) Change of the separation time depending on the mass of the constraint cylinder



b) Chamber pressure change depending on the mass of the constraint cylinder

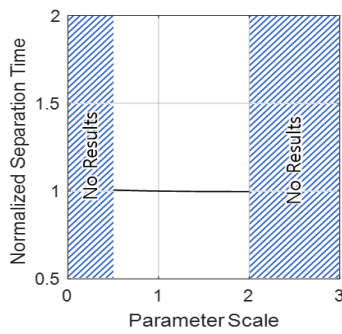
Fig. 9. Parametric study result depending on the mass of the constraint cylinder

구속원통의 속도가 느려져 Fig. 8에 표기한 구속 거리만큼 운동하는 시간이 길어지면 분리 시간 역시 길어진다. 따라서 분리 시간은 구속원통의 질량에 비례하여 증가하는 현상을 보인다. 그러다가 매개변수 척도가 1.957보다 커지게 되면 Fig. 3(f)와 같은 충돌이 발생하여 Fig. 9(a)에 나타난 것과 같이 분리 시간이 급격히 증가한다.

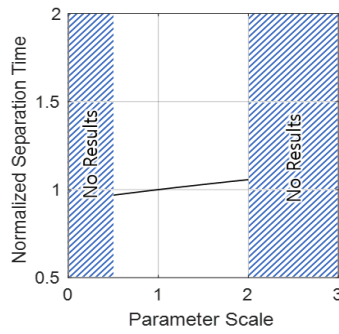
#### 2.3.2.2. 방출핀 질량

Figure 10은 방출핀 질량 변화에 따른 매개변수 연구 결과를 보여준다.

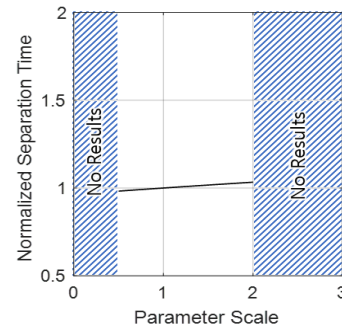
초기배치에서 Fig. 3(a)와 같이 방출핀이 볼트에 접해있지 않는 경우, 방출핀은 너트가 구속되어 있는 상태에서도 운동이 가능하다. 방출핀이 운동하면 확장 챔버의 부피가 증가한다. 따라서 방출핀의 질량은 확장 챔버의 부피 변화에 영향을 미친다. 방출핀의 질량이 크면 이동속도가 느려져 확장 챔버의 부피 증가 속도 역시 느려지므로 분리 시간 단축 효과를 얻을 수 있지만 그 효과가 미미하다.



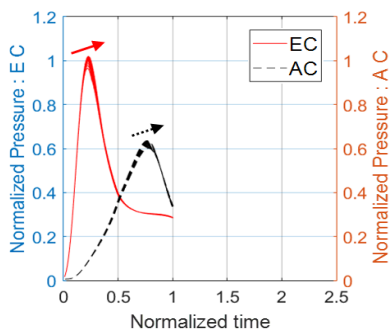
a) Change of the separation time depending on the mass of the ejector



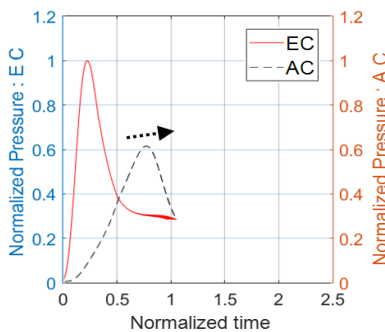
a) Change of the separation time depending on the mass of the segmented nuts



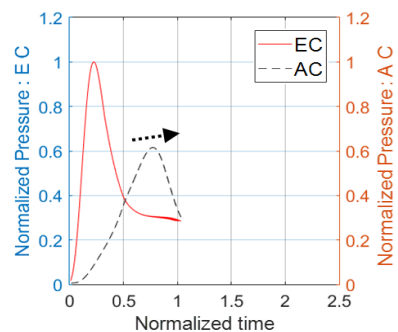
a) Change of the separation time depending on the mass of the push rod



b) Chamber pressure change depending on the mass of the ejector



b) Chamber pressure change depending on the mass of the segmented nuts



b) Chamber pressure change depending on the mass of the push rod

Fig. 10. Parametric study result depending on the mass of the ejector

Fig. 11. Parametric study result depending on the mass of the segmented nuts

Fig. 12. Parametric study result depending on the mass of the push rod

2.3.2.3. 분할 너트, 누름봉의 질량

Figures 11, 12는 각각 분할 너트와 누름봉의 질량 변화에 따른 매개변수 연구 결과를 보여준다. 두 구성품의 질량 변화와 확장 챔버의 최고 압력변화는 무관하다. 이는 구속원통이 Fig. 8에 표시한 구속 거리만큼 이동하여 분할 너트에 작용하고 있는 구속이 해제되기 전에 확장 챔버의 압력이 최고값에 도달하기 때문이다.

두 구성품의 질량이 커질수록 너트가 이동하여 나사산의 접촉이 해제되는데 걸리는 시간이 증가하므로 분리 시간이 증가한다. 그러나 Figs. 11(a), 12(a)에서 확인 가능하듯이, 질량 증가량에 비해서 큰 변화라고 볼 수 없다.

2.3.3 누름봉 돌출부 안쪽 지름의 변화

Figure 13에 누름봉 돌출부의 안쪽 지름과 바깥쪽 지름, 그리고 방출핀의 바깥쪽 지름이 각각  $d_{II}$ ,  $d_{Po}$ ,  $d_{Eo}$ 로 표기되어 있다.  $d_{II}$ 는  $d_{Po}$ 보다 커지거나,  $d_{Eo}$ 보다 작아질 수 없다. Fig. 14는 누름봉 돌출부 안쪽 지름의 변화에 따른 매개변수 연구 결과를 보여준다.

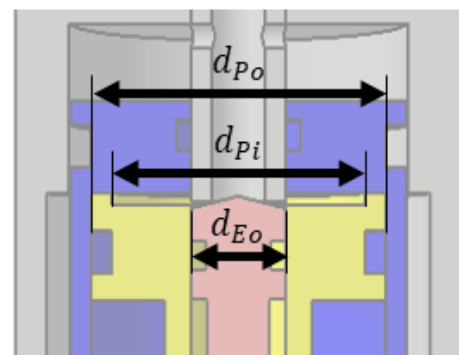


Fig. 13. Definition of  $d_{Po}$ ,  $d_{Pi}$  and  $d_{Eo}$

Figure 3(a)에 도시한 것과 같이, 분리 너트 구성품의 초기 배치에서 누름봉의 윗면은 구속원통에 접해 있다. 따라서 누름봉 돌출부의 안쪽 지름  $d_{II}$ 가 커질수록, 초기에 누름봉과 구속원통에 작용하는 압력의 작용 면적이 증가한다.  $d_{II}$ 가 커지면 누름봉과 구속원통에 작용하는 초기 하중이 커지므로 구속원통이 더 빨리 운동하기 시작한다. 이로 인해 확장 챔버의 부피

가 빨리 증가해 최고 압력이 감소한다. 그리고 환형 챔버의 부피는 빨리 감소하여 최고압력이 증가한다. 누름봉 돌출부 안쪽 지름의 경우, 매개변수 척도가 작아질수록 분리 시간이 증가하지만 그 영향이 크지는 않다. 그러다가 매개변수 척도가 0.47보다 작아지면, 압력 작용 면적이 너무 작아져 분리에 실패한다.

누름봉 윗부분의 돌출부로 인하여 축 방향뿐 아니라 반지름 방향으로도 압력이 작용하므로, 이 부분의 응력 및 변형으로 인해 설계 수정이 필요한 경우에는 누름봉 안쪽 지름의 변화에 따른 영향을 고려해야 한다.

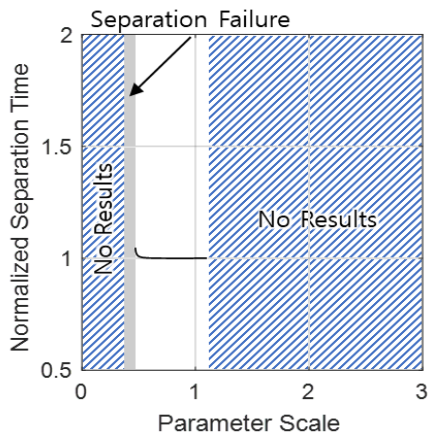
**2.3.4 환형 챔버 초기 부피 변화의 영향**

Figure 15는 환형 챔버의 초기 부피 변화에 따른 매개변수 연구 결과를 보여준다.

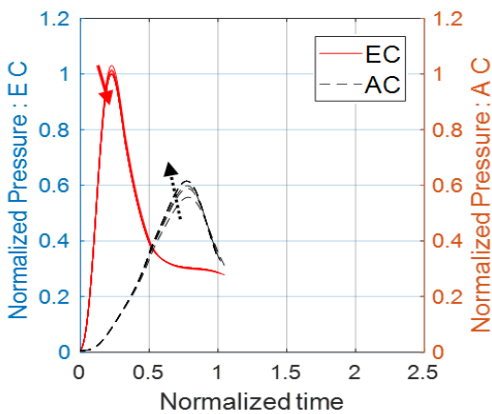
환형 챔버의 초기 부피가 작으면, 벤트홀을 통해 비슷한 양의 연소생성물이 유입되더라도 밀도가 더 커지고 압력도 더 높아지게 된다. 따라서 Fig. 15(b)와 같이, 환형 챔버의 초기 부피가 작아질수록 환형 챔버의 압력 증가율과 최고 압력은 더 커진다. 그러

다가 매개변수 척도가 0.766 이하가 되는 경우에는 분리에 실패한다. 구속원통이 윗 방향으로 Fig. 8에 표시한 구속 거리만큼 운동해야 분할 너트가 반지름 방향으로 벌어져 볼트를 분리할 수 있게 된다. 그러나 구속원통이 구속 거리만큼 운동하기 전에 환형 챔버의 압력이 지나치게 높아지면, 구속원통이 초기 운동 방향과 반대로 운동하게 되어 다른 구성품의 운동이 시작될 수 없으므로 분리에 실패하게 된다.

Figure 15(a)의 매개변수 척도가 0.90 이상, 1.39 이하인 구간에서는 분리 시간이 급격히 감소하는데, 이는 Fig. 3(f)와 같은 충돌이 발생하지 않기 때문이다. 그러나 이 구간에서 환형 챔버의 초기 부피가 달라져도 분리 시간은 크게 달라지지 않는다. 이 결과로부터 분리 시간은 환형 챔버의 초기 부피 변화보다는 구성품의 충돌 여부와 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다.

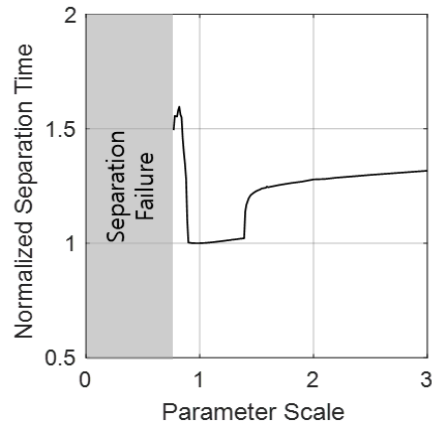


a) Change of the separation time depending on  $d_{Pi}$

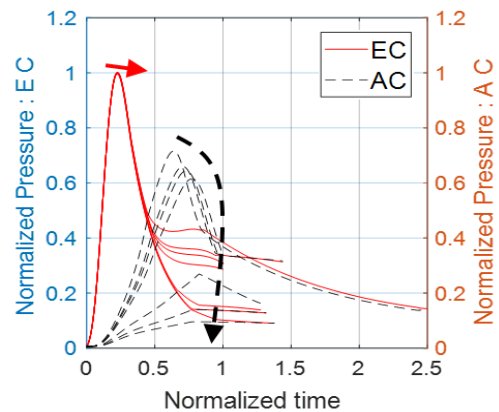


b) Chamber pressure change depending on  $d_{Pi}$

Fig. 14. Parametric study result depending on the inner diameter of the push rod protrusion( $d_{Pi}$ )



a) Change of the separation time depending on the initial volume of the annular chamber



b) Chamber pressure change depending on the initial volume of the annular chamber

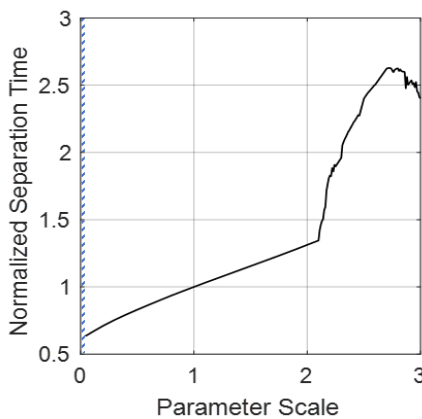
Fig. 15. Parametric study result depending on the initial volume of the annular chamber



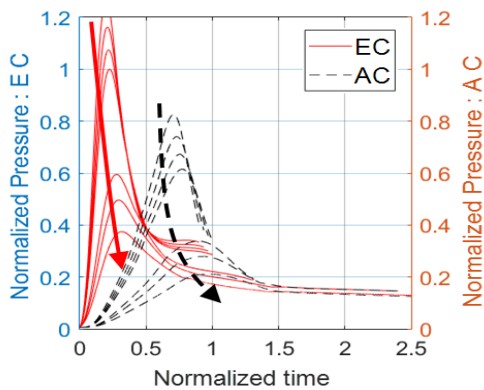
### 2.3.5 확장 챔버 초기 부피 변화의 영향

Figure 16은 확장 챔버의 초기 부피 변화에 따른 매개변수 연구 결과를 보여준다. 선행연구[7]에서 챔버의 압력을 계산하기 위한 지배방정식 유도 시에, 고체상태의 화약이 확장 챔버 내에서만 연소한다고 가정하였다. 따라서 확장 챔버의 초기 부피는 화약의 부피보다 작아질 수 없다.

확장 챔버의 초기 부피가 줄어들면 확장 챔버의 압력 상승률이 높아져 최고 압력이 증가한다. 높은 확장 챔버의 압력은 구속원통의 운동 속도를 높이므로 분리 시간이 짧아지고, 환형 챔버의 부피 감소 속도가 높아져 환형 챔버의 최고 압력 역시 증가한다. 매개변수 척도가 3.0보다 커지는 경우에는 구속원통을 움직일 만큼 충분한 압력이 만들어지지 않아 분리에 실패한다. Fig. 16(a)에 나타난 것과 같이 매개변수 척도가 2.10 이상인 후반부에서 분리 시간이 급격히 증가한 구간은 Fig. 3(f)와 같은 충돌이 발생한 구간이다.



a) Change of the separation time depending on the initial volume of the expansion chamber



b) Chamber pressure change depending on the initial volume of the expansion chamber

Fig. 16. Parametric study result depending on the initial volume of the expansion chamber

확장 챔버의 초기 부피 감소에 따른 성능 변화는 화약 질량이 증가하는 경우와 유사한 효과를 가져온다. 따라서 확장 챔버의 초기 부피를 조절하여 목표하는 분리 시간을 달성하기 위해 필요한 화약의 질량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

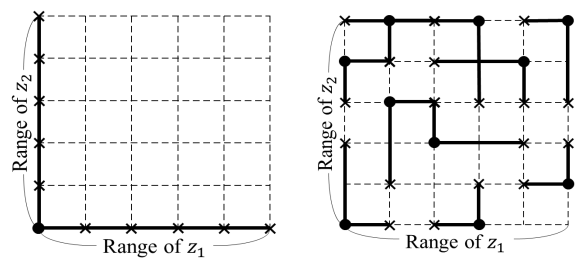
### 2.4 선별법을 이용한 설계인자 중요도 파악

시스템의 최적화 시, 시스템에 미치는 영향이 큰 주요 설계인자를 도출하고 그 영향이 미미한 인자들을 제외할 수 있다면 복잡한 모델을 간략화 할 수 있으며 계산에 필요한 시간을 줄일 수 있다. 선별법 (Screening Method)을 이용하면 설계인자의 중요도에 따라 순위를 매길 수 있으므로, 다른 설계 인자에 비해 상대적으로 결과에 대한 영향력이 적은 항목을 식별할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Morris 방법 (The Method of Morris)을 이용하여 설계인자의 중요도를 파악하였다.

Figure 17은 설계인자의 개수가  $z_1, z_2$ 로 두 가지인 경우, 분석 방법에 따른 입력데이터의 분포를 비교하여 보여준다. 그림에서 검정색 점은 초기상태를 의미하고, 엑스는 초기상태로부터 설계인자의 값을 변화시켜 새로 얻은 설계인자의 조합을 의미한다. 두 방법은 모두 한 번에 한 개의 인자만을 변화시키므로 OAT (One-factor-at-a-time) 방법에 속한다. 앞서 제시한 매개변수 연구 결과는 Fig. 17(a)와 같이 고정된 하나의 초기상태를 기준으로 설계인자를 변화시키며 챔버 압력 및 분리 시간에 미치는 영향을 파악하였다. 이 방법을 이용하는 경우, 설계인자간의 교호작용을 파악할 수 없다. Morris 방법을 이용하면 입력데이터가 Fig. 17(b)와 같이 분포한다. 무작위로 지정한 여러 개의 초기상태로부터 설계인자의 값을 하나씩 바꾸어 새로운 설계인자의 조합을 만들어 낸다. 결과적으로 설계인자의 조합은 임의의 분포를 가지게 되며, 얻어낸 조합을 이용해서 해석을 하면 설계인자의 교호작용을 확인할 수 있다.

초기상태에서 개수가  $k$ 인 설계인자의 집합을  $z$ 라고 하면 이는 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$z = (z_1, \dots, z_{i-1}, z_i, z_{i+1}, \dots, z_k) \tag{2}$$



a) An example of input space for parametric study

b) An example of input space for the method of Morris

Fig. 17. Comparison of input space

$i$ 번째 설계인자  $z_i$ 의 값이  $\Delta$ 만큼 변했고, 두 입력에 대한 출력  $y$ 를 알고 있다면 Elementary effect라고 정의하는 값  $d_i$ 를 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$d_i(\mathbf{z}) = \frac{y(z_1, \dots, z_{i-1}, z_i + \Delta, z_{i+1}, \dots, z_k) - y(\mathbf{z})}{\Delta} \quad (3)$$

이 Elementary effect 절대값의 평균  $\mu^*$ 는 출력변수에 미치는 영향을 의미하며 식 (4)로 계산할 수 있다.  $\mu^*$ 가 크면, 그 설계인자가 시스템에 미치는 영향이 크다고 판단할 수 있다. Elementary effect의 표준편차  $\sigma$ 는 다른 입력변수와의 상호작용을 의미하며 식 (5)로 계산할 수 있다.  $\sigma$ 가 작다면 이 설계인자는 다른 설계인자와의 상호작용이 적고 거의 독립적이라고 판단할 수 있다. 식 (4), (5)에서  $r$ 은 샘플링 사이즈를 의미한다[10].

$$\mu^* = \sum_{i=1}^r \left| \frac{d_i}{r} \right| \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r (d_i - \mu^*)^2}{r}} \quad (5)$$

분리에 실패하는 경우에는 분리 시간이 존재하지 않는다. 그러나 이 경우에 분리 시간에 임의의 큰 값을 부여하면 분리에 실패하는 경우도 분리 시간의 관점에서 표현이 가능하다. 설계인자의 변화에 따라 분리에 실패하거나 불필요한 충돌이 발생하여 분리 시간이 급격히 증가하는 경우, Elementary effect 값이 증가하므로 이 설계인자의 영향이 크다고 판단할 수 있다. 이러한 인자는 주요 설계인자로 선정하여 최적화 시 고려해야 한다.

설계인자의 개수  $k$ 가 11이고, 각 설계인자가 Table 2에 정리한 범위에서 25 수준으로 변화할 때, 샘플링 사이즈  $r$ 을 75로 설정하면 총  $r \times (k+1) = 900$ 개의 설계인자 조합에 대하여 해석을 수행하게 된다. 설계인자 값의 변화에 대한 분리 시간의 변화를 이용해서 Elementary effect를 계산하면 총  $r \times k = 825$ 개의 값을 얻을 수 있다. 해석 결과 도출한 Elementary effect 절대값의 평균  $\mu^*$ 와 표준편차  $\sigma$ 를 최댓값으로 정규화한 후 도시하면 Fig. 18과 같다. Fig. 18에서 데이터에 표시한 숫자는 설계인자의 번호를 의미한다. 각 설계변수의 번호와 순위는 Table 3과 같이 매길 수 있다.

Figure 18에서 확인 가능하듯이, 환형 챔버의 초기 부피(⑧)는 분리 시간에 미치는 영향이 가장 클 뿐만 아니라 다른 설계인자와의 상호작용도 강하다. 따라서 설계 최적화 시 필수적으로 고려해야 한다. 챔버의 압력과 관련된 설계인자인 이와는 반대로 누름봉 질량(④), 분할너트 질량(⑥), 방출핀의 질량(⑤)은 분리 시간에 미치는 영향 뿐 아니라 다른 설계인자와

의 상호작용도 약하다. 그러므로 설계 최적화 시 설계인자에서 제외하여 해석 시간을 단축할 수 있다.

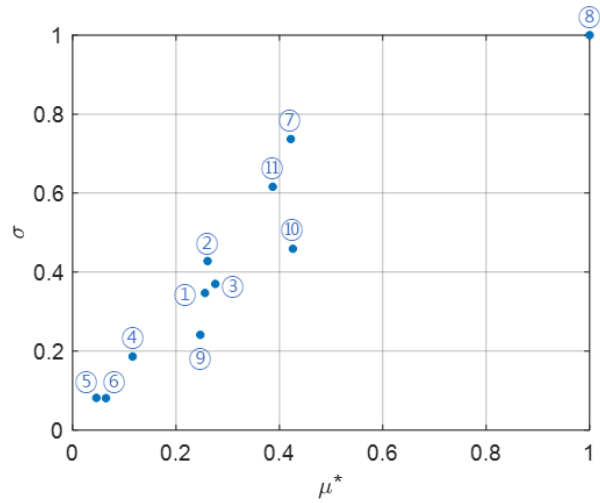


Fig. 18. Result of the Morris experiment on the design parameters for pyrotechnic separation nut

Table 2. Design parameters and ranges of its value

Design parameters		Value range	
①	Contact angle between segmented nut and base	min	0 °
		max	70 °
②	Contact angle between segmented nut and push rod	min	0 °
		max	70 °
③	Constraint cylinder mass	min	0.5×Ref. case
		max	2.0×Ref. case
④	Push rod mass	min	0.5×Ref. case
		max	2.0×Ref. case
⑤	Ejector mass	min	0.5×Ref. case
		max	2.0×Ref. case
⑥	Segmented nuts mass	min	0.5×Ref. case
		max	2.0×Ref. case
⑦	Push rod protrusion inner diameter	min	0.377×Ref. case
		max	1.1×Ref. case
⑧	Annular chamber initial volume	min	0.582×1.6 cm <sup>3</sup>
		max	3.0×1.6 cm <sup>3</sup>
⑨	Expansion chamber initial volume	min	0.0×5.1 cm <sup>3</sup>
		max	3.0×5.1 cm <sup>3</sup>
⑩	Explosive charge mass	min	0.5×130 mg
		max	3.0×130 mg
⑪	Vent hole diameter	min	0 mm
		max	3 mm

**Table 3. Rank of design parameters for pyrotechnic separation nut**

	Design parameters	Rank	
		$\mu^*$	$\sigma$
①	Contact angle between segmented nut and base	7	7
②	Contact angle between segmented nut and push rod	6	5
③	Constraint cylinder mass	5	6
④	Push rod mass	9	9
⑤	Ejector mass	11	10
⑥	Segmented nuts mass	10	11
⑦	Push rod protrusion inner diameter	3	2
⑧	Annular chamber initial volume	1	1
⑨	Expansion chamber initial volume	8	8
⑩	Explosive charge mass	2	4
⑪	Vent hole diameter	4	3

### III. 결 론

벤트홀로 연결된 두 개의 가변 체적 챔버를 가진 파이로테크닉 분리 너트는 복잡한 상호작용을 통해 분리가 수행되며, 이로 인해 성능에 영향을 미치는 설계 인자가 매우 많이 존재하게 된다. 이러한 설계 인자들이 분리성능에 미치는 영향을 파악하면, 설계 개선 방향을 모색하는데 큰 도움이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 선행연구를 통해 개발한 분리 너트 거동 예측 모델을 이용한 매개변수 연구 결과를 이용하여 파이로테크닉 분리 너트의 각 설계 인자들이 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 분리과정에서 불필요한 충돌이 발생하지 않을 때, 파이로 충격의 발생과 분리 시간이 모두 감소하므로 성능은 분리 시간의 관점에서 판단하였다. 매개변수 연구에서는, 다른 설계변수 값들을 기준 상태와 같은 값으로 고정하고 설계 인자 하나의 값을 독립적으로 변화시키며 분리 시간의 변화와 그 원인을 확인하였다.

분리 너트의 설계 인자가 될 수 있는 값으로는 접촉부의 각도, 구성품의 질량, 누름봉 돌출부 안쪽 지름, 환형 챔버의 초기 부피, 확장 챔버의 초기 부피, 화약질량, 벤트홀 지름 등을 꼽을 수 있다. 스프링강성 및 사전 압축량은 시스템의 관성력과 구속원통에 작용하는 저항력을 고려하여 정해야 하는 값이고, 적정 체결력은 볼트규격을 고려하여 정해야 하는 값이므로, 설계 인자에서 제외하였다.

접촉부의 각도가 달라질 때, 분리 시간에 영향을

미치는 상반된 요소들이 존재하였다. 그러므로 접촉부 각도와 분리 시간은 비선형적인 관계를 보였으며, 직관적으로 판단하기 다소 어려운 면이 있다.

구속원통을 제외한 누름봉, 방출핀, 분할 너트의 질량 변화가 분리 시간에 미치는 영향은 크지 않았다. 그러나, 누름봉 돌출부의 안쪽 지름이 너무 작아지는 경우에는 분리에 실패할 수 있다. 따라서 이 구성품들의 응력 및 변형을 고려한 설계 개선이 필요한 경우, 이에 유의하여 형상을 변경해야 한다.

구속원통의 경우에는 질량이 작아질수록 분리 시간이 줄어드는 효과가 있었다. 이는 분리과정에서 불필요한 충돌이 발생하지 않는 경우, 분할 너트에 작용하고 있던 구속이 해제되는데 걸리는 시간이 분리 시간을 좌우하기 때문이다.

확장 챔버의 초기 부피가 줄어들면 확장 챔버와 환형 챔버의 최고압력이 증가하면서 분리 시간이 감소하며, 이는 화약 질량이 증가할 때와 유사한 효과를 갖는다. 따라서 확장 챔버의 초기 부피를 조절하여 목표하는 분리 시간을 달성하기 위해 필요한 화약의 질량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

환형 챔버의 초기 부피와 분리 시간 사이에서는 뚜렷한 연관성을 찾기 어려웠다. 그러나 환형 챔버의 초기 부피 변화로 인해 구성품 간의 불필요한 충돌이 발생하게 되는 경우, 분리 시간이 급격히 증가하였다. 이 결과로부터 구성품 간의 불필요한 충돌을 예방해야 분리 시간과 파이로 충격을 최소화 하는 결과를 얻을 수 있다고 판단할 수 있다.

매개변수 연구 결과를 통해, 각 설계 인자의 변화에 따라 분리 너트의 거동이 어떻게 달라지는지 분석할 수 있었다. 또한 Morris 방법을 이용한 설계 인자의 중요도를 분석할 수 있었다. 구속원통을 제외하더라도 구성품의 질량은 분리과정에 미치는 영향 및 다른 설계인자와의 상호작용이 적었으므로 설계 인자에서 제외하여 최적화를 위한 계산시간을 단축할 수 있다. 환형 챔버의 초기 부피는 분리시간에 미치는 영향 및 다른 설계인자와의 상호작용이 모두 강했으므로 최적화 시에 필수적으로 고려해야 한다.

### 후 기

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

### References

- 1) Brauer, K. O., *Handbook of Pyrotechnics*, Chemical Publishing Co., New York, 1974.
- 2) Woebkenberg, W., Matteo, D. N., and

Williams, V. D., "Development of an Ultra-Low-Shock Separation Nut," *The 16<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA, United States, 1982, pp. 87~98.

3) Chang, K. Y., "Pyrotechnic Devices, Shock Levels and Their Applications," *9th International Congress on Sound and Vibration*, Orlando, FL, 2002.

4) Harris, C. M., and Piersol, A. G., "Pyroshock Testing," *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 5<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 2002, pp. 26.15~26.33.

5) Fosness, E. R., Buckley, S. J., and Gammill, W. F., "Deployment and Release Devices Efforts at the Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate," *AIAA Space 2001 Conference and Exposition*, AIAA Paper 2001-4601, 2001.

6) Woo, J. M., Kang, D. H., Choi, J. Y., Kim, J. H., Cho, J. Y., Jang, S. G., and Yang, H. W., "Effect of Clearance on Clamping Characteristics of Segmented Nuts in Pyrotechnic Separation Nut," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 12, 2018, pp. 994~1003.

7) Woo, J. M., Cha, S. W., Cho, J. Y., Kim, J. H., Roh, T. S., Jang, S. G., Lee, H. N., and Yang, H. W., "Prediction of Pyroshock-Reduced Separation Nut Behaviors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 34, No. 5, 2018, pp. 1240~1255.

8) Han, D. H., Sung, H. G., Jang, S. G., and Ryu, B. T., "Parametric Analysis and Design Optimization of a Pyrotechnically Actuated Device," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 17, No. 3, 2016, pp. 409~422.

9) Choi, J. Y., Woo, J. M., Kang, D. H., Kim, J. H., Cho, J. Y., Jang, S. G., and Yang, H. W., "Bolt Loosening Analysis under Transverse Vibration for Design of Reliable Pyrotechnic Separation Nut," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 12, 2018, pp. 1004~1011.

10) Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., and Ratto, M., *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004.