

CAD 시스템에서의 고체추진기관 체결류 설계에 대한 연구 §

이강수^{*†}, 김원훈^{**}, 석정호^{***}

* 한밭대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소 1-6 부, *** (주)스페이스솔루션

Design of Fastener for Solid Rocket Motor Using Solid CAD System

Kang-Soo Lee^{*†}, Won-Hoon Kim^{**} and Jung-Ho Seok^{***}

* Division of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

** Div. 1-6, Agency for Defense Development,

*** Space Solution Co., Ltd.

(Received June 29, 2009; Revised June 1, 2010; Accepted June 7, 2010)

Key Words: Fastener(체결류), CAD, Configuration Design(편집 설계), Tension Bolt(인장 볼트)

초록: 체결류는 일반 제품을 설계할 때 널리 사용되며, 일반 부품에 비하여 표준화가 잘 되어 규격화 되어 있다는 특징이 있다. 그래서 체결류를 설계할 때에는 먼저 수식을 사용하여 원하는 기능을 가진 체결류를 계산하고, 최종 사양은 규격에서 계산된 용량을 만족하는 것을 선택한다. 이 연구에서는 이러한 체결류 설계의 특징을 살리며 삼차원 CAD 시스템에서 편리하게 체결류 설계를 할 수 있는 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 이 시스템에서 자동으로 설계하기에 적합한 체결류 형상을 정의하였으며, 체결류 설계에 필요한 설계 인자와 형상 치수를 규격에서 추출하여 데이터베이스를 구축하였다. 또한 체결류를 설계할 때 사용하는 설계식을 구현하여 설계식의 입력 인자와 출력 인자를 규격으로부터 추출한 데이터베이스 및 형상 치수와 연결시켰다.

Abstract: When we design a product, we spend a considerable amount of time in designing fasteners and their mating parts. Fasteners have special features because of which they are widely used and well standardized. Although we use some equations to design the fasteners, we should select these fasteners from the standardized table. In order to design them quickly using the CAD system, we proceeded as follows. First, we prepared some standardized shapes of fasteners to design them automatically. Next, we built a database of some fasteners such as a tension bolt, lock wire, thread, pin, and snap ring. Then, we used the design equations to quickly and precisely calculate the various parameters. Finally, we used a configuration design method to generate the shapes automatically using the results of the calculation and the values retrieved from the database. We applied this approach to the design of a propulsion structure, and demonstrated that this approach worked well and saved considerable time.

- 기호설명 -

- B_{gap} : 볼트 구멍부 최소 살두께 [mm]
- D_b : 볼트 체결부 피치원 지름 [mm]
- D_i : 볼트 체결부 안지름 [mm]
- D_{bolt} : 볼트 공칭 지름 [mm]
- C_{aFE} : 안지름 모따기부 길이 [mm]
- A_c : 모따기 각도 [deg]
- $Bolt_N$: 하중을 지지하기 필요한 볼트 최소 개수
- f_a : 하중안전계수

- f_p : 압력안전계수
- M_z : 작용하는 굽힘 모우멘트 [N.mm]
- N_x : 축방향 하중[N]
- P_d : 작용 압력[MPa]
- F_{bolt} : 볼트 1 개당 지지할 수 있는 최대하중 [N]

1. 서 론

제품에는 볼트와 같은 체결 부품이 많으며, 이에 따라 하나의 부품을 설계할 때 그 부품과 관련된 체결 부품 설계에 시간이 많이 소요된다. 보통 체결 부품을 설계할 때에는 설계식을 적용하여 계산하고, 카탈로그나 규격에서 필요한 데이터를 찾아야 한다. 또한 최근에는 점점 솔리드 CAD 시스

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 총칭지부 춘계학술대회 (2009. 5. 15., 대전컨벤션센터) 발표논문임

† Corresponding Author, kslee@hanbat.ac.kr

템을 이용하여 설계를 하여 체결류 형상을 모델링해야 하나 아직 상용 CAD 시스템에서 체결류 설계를 지원하는 기능은 미약하다. 그래서 CAD 시스템에서 체결류 설계를 할 때에는 설계 과정뿐 아니라 설계를 한 후 형상을 모델링 하는 데에도 많은 시간과 노력이 필요하다.

이 연구는 CAD 시스템을 이용하여 추진기관의 구조체를 설계할 때, 체결류와 체결류를 사용하는 상대 부품을 빠르고 정확하게 설계하는 방법을 제시한다. 여기에는 체결류를 설계하는 설계식 적용 및 체결류 설계 데이터베이스 구축 및 활용, 체결류 설계 GUI 구축, 설계된 체결 부품의 형상을 자동으로 모델링하는 과정이 포함되어 있다.

2. 관련 연구

체결 부품에 대한 연구는 이미 많이 수행되어 서적^(1,2)이나 핸드북, 표준 규격⁽³⁾ 등에 기술되어 있다. 또한 사용 환경에 따라 체결 부품 설계에 대한 연구도 수행되고 있다. Ekh⁽⁴⁾는 유한 요소법을 사용하여 여러 개의 볼트를 사용하였을 때 최적으로 하중이 전달되는 해석 방법에 대해 연구하였으며, Thompson⁽⁵⁾은 레일에 사용되는 체결 시스템에 대한 연구를 수행하였으며, Pai^(6,7)는 전단 동하중을 받는 볼트가 풀어져서 파손되는 과정을 실험하고 이를 삼차원 유한 요소를 이용하여 검증하였다. 대부분의 체결류는 많이 사용되므로 표준화된 부품을 정리하여 규격 또는 제조업체의 카타로그로 설계자에게 제공되고 있으며, 설계자도 표준화된 규격품을 사용하고 있다. 부품의 형상을 CAD 시스템에서 모델링하는 방법 중 이 연구에서는 편집 설계 방법^(8,9)을 사용하였다. 편집 설계란 설계하고자 하는 대상을 파라메트릭 모델링(parametric modeling)한 후, CAD 시스템에서의 파라미터를 변경함으로써 원하는 형상으로 모델링하는 방법이다. 이러한 방법을 이용하여 Yoo^(10,11)는 동력전달장치에 사용되는 부품의 설계 시스템을 구현하였으며, Kim⁽⁸⁾은 고체 추진기관의 추진제 설계 시스템을 구현하였으며, Kim⁽¹²⁾은 고체 추진기관의 구조체 설계 시스템을 구현하였다. 이러한 설계 시스템은 편집 설계 방법을 이용하고 설계식을 이용하여 설계 시스템을 구현한 점은 본 논문과 유사하나, 표준품으로 사용되는 체결류 설계와 같이 표준화된 데이터베이스를 구축하여 사용하는 점과 구축하는 시스템이 설계 대상물이 아니고 모든 설계에 사용되는 표준품이라는 점이 다르다.

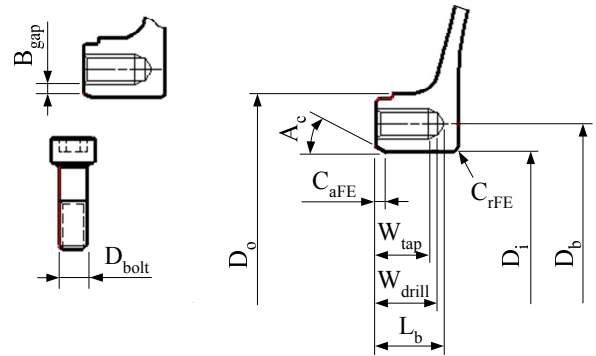


Fig. 1 Design of a tension bolt

UG NX 나 I-DEAS, Catia v.5 와 같이 널리 사용되고 있는 CAD 시스템에서도 체결류 설계를 제공하고 있다. 그러나 그 기능이 파라미터 설계 기능으로 사용자가 형상을 정의하거나, 체결류 중 볼트의 표준 데이터베이스를 제공하여 볼트 형상을 모델링하는 정도의 제한된 기능을 제공하고 있다.

본 연구에서는 볼트뿐 아니라 5 종류의 체결 부품에 대해 표준 규격의 데이터베이스를 이용한 설계를 할 수 있으며, 또한 설계식을 사용하여 체결 부품을 바로 선정할 수 있다. 또한 본 연구에서는 체결 부품 자체를 모델링하는 것이 아니라, 체결 부품의 상대 부품을 모델링하는 것이 연구의 목적이나 상용 CAD 시스템에서는 그러한 기능은 없다.

본 연구에서는 부품 설계를 할 때 이 부품과 관련된 체결류 5 종류를 설계식을 이용하여 설계할 수 있으며, 설계 결과를 가장 최적으로 만족시키는 표준 치수를 데이터베이스에서 가져오고, 현재 설계하고 있는 부품에 체결류 설계 결과를 적용하고, 편집 설계 방법을 이용하여 형상 모델링이 자동으로 되도록 하였다.

3. 체결류 설계 시스템

3.1 체결류

체결류란 두 부품을 결합할 때 사용되는 요소로 이 연구에서는 추진기관의 구조체에 사용되는 볼트와 록와이어, 나사, 핀, 스냅링 등 5 종의 체결류에 대한 설계 자동화를 연구하였다.

3.2 체결류 설계식

체결류를 사용할 때에는 사용 목적에 맞게 해석을 하여야 한다. 볼트의 경우 설계 하중을 견딜 수 있는 지 계산해야 한다. 본 연구에서 개발된 시스템에서는 굽힘 모멘트와 축하중, 압력이 있

는 연소관을 체결하기 위해 사용되는 인장 볼트를 설계할 때 사용될 수 있다. 여기에서는 다음과 같이 볼트 구멍 주위 최소 살 두께 B_{gap} 과 작용 하중을 지지할 수 있는 최소 볼트 개수 $Bolt_N$ 을 구하는 식 (1), (2)가 구현되어 있어, 입력 데이터에 따라 최소 살두께와 최소 볼트 개수가 자동으로 계산되고, 계산 결과는 자동으로 형상에 반영된다.

$$B_{gap} = \frac{D_b - D_i}{2} - \frac{D_{bolt}}{2} - C_{aFE} * \tan(A_c) > 0 \quad (1)$$

$$Bolt_N = \text{int} \left\{ \frac{16f_a M_z + (4f_a N_x + \pi f_p P_d D_i^2) D_b}{4F_{bolt} D_b} + 0.5 \right\} \quad (2)$$

3.3 체결류 데이터베이스 구축

체결류는 널리 사용되므로 대부분 그 규격이 표준화되어 있다. 개발된 설계 시스템에서는 설계 과정에서 규격집을 찾을 필요가 없게 하기 위해 체결류 데이터베이스를 구축하였다. 한 예로, Table 1 은 볼트의 데이터베이스를 나타낸다. Table 1 에서 설계하는 볼트가 보통 나사면 B_{pitch1} 을 사용하고, 가는 나사면 B_{pitch2} 를 사용한다. 또, 설계하는 볼트가 정밀급이면 Table 1 에서 B_{hole1} 을 사용하고, 보통급이면 B_{hole2} 를 사용한다. 이러한 데이터베이스는 KS 규격집과 볼트 제조업체의 카타로그, 자체 기술 데이터를 사용하여 작성하며, 록와이어와 나사, 핀, 스냅링 등 볼트 이외의 다른 체결류도 동일한 방식으로 데이터베이스를 구축한다.

Table 1 Data to build a database for a tension bolt

연소관내경(D _i)	60~100	100~140	140~180
D _{bolt} [mm]	6	8	10
B _{pitch1} [mm]	1	1	1.5
B _{pitch2} [mm]	0.75	0.75	1.25
B _{hole1} [mm]	6.4	8.5	10.5
B _{hole2} [mm]	6.6	9	11
L _{bolt} [mm]	0	0	0
F _{bolt} [N]	26100	47600	75400
D _b -D _i [mm]	12	14	16
D _o -D _i [mm]	24	30	36
C _{rFE} [mm]	0.5	0.5	1
C _{aFE} [mm]	1.4	1.5	1.5
A _c [mm]	30	30	30
W _{tap} [mm]	6	8	10
W _{drill} [mm]	10	12	14

3.4 편집 설계

편집 설계^(8,9)는 설계하고자 하는 대상을 파라메트릭 모델링하고, CAD 시스템에서의 파라미터를 모델링하고자 하는 형상에 맞게 변경함으로써 원하는 형상으로 모델링하는 방법이다.

3.5 체결류 설계를 편집 설계에 적용

체결 부품이 표준화되어 규격화되어 있어 형상에 관련된 치수들을 데이터베이스화하기 쉬우며, Fig. 2 와 같이 데이터베이스화된 형상 치수를 이

Table 2 Input and output data shown at Fig. 2

Input/Output	Parameter	Expression	Remark
Input	P _d [MPa]	작용 압력	체계조건
	D _i [mm]	볼트 체결부 안지름	체계조건
	M _z [N.mm]	작용하는 굽힘 모멘트	
	N _x [N]	축방향 하중	
	f _a	하중안전계수	
	f _p	압력안전계수	
	B _{pitch}	볼트 피치 종류	
	B _{grade}	볼트 등급	
	C	Attachment coefficient	
	S _{fcy}	안전계수	
	S _{by} [MPa]	구조체의 항복 강도	재료 선택
	n ₁	계수	
	n ₂	계수	
Output	D _{bolt} [mm]	볼트 단품 지름	Table 1
	B _{pitch} [mm]	볼트 피치	Table 1
	B _{hole} [mm]	드릴 구멍 지름	Table 1
	L _{bolt} [mm]	볼트 길이	Table 1
	F _{bolt} [N]	볼트당 최대 하중	Table 1
	D _b [mm]	볼트 체결부 피치원 지름	Table 1
	D _o [mm]	볼트 체결부 외경	Table 1
	L _b [mm]	볼트 체결부 길이	Table 1
	C _{rFE} [mm]	바깥지름 모따기부 길이	Table 1
	C _{aFE} [mm]	안지름 모따기부 길이	Table 1
	A _c [deg]	모따기 각도	Table 1
	T _b [mm]	맞추기 단 두께	Table 1
	W _o [mm]	맞추기 단 깊이	Table 1
	W _{drill} [mm]	드릴 깊이	Table 1
	W _{Tab} [mm]	탭 깊이	Table 1
	C _{a2FE} [mm]	모따기	Table 1
	B _{gap} [mm]	볼트 구멍부 최소 살두께	Eq. (1)
Bolt _N	사용 볼트 개수	Eq. (2)	
L _{br} [mm]	플랜지 두께	Table 1, Eq. (1)	

용하여 체결류 설계를 편집 설계에 적용하기 쉽다.

Fig. 2 는 편집 설계 방법을 이용하여 체결류인 인장 볼트를 설계하기 위한 GUI 를 보여주며, 입력 및 출력 인자는 Table 2 에 정리되어 있다. CAD 모델에서 인장 볼트를 사용하는 부위의 치수는 GUI 의 입력 인자 또는 출력 인자와 연결되어, GUI 상에서 인자의 값이 변경되면 CAD 모델의 형상이 자동으로 변하도록 구현되어 있다. 체결류인 인장 볼트를 사용하는 연소관을 설계하는 Fig. 2 에서 보면, 입력 인자를 입력한 후 다이얼로그의 중간에 있는 [계산] 버튼을 누르면 출력 인자 중 일부는 Table 1 에서 가져 오며, 일부는 식 (1), (2) 를 이용해 계산되어 화면에 나타난다. 계산 결과를 검토한 후 원하는 설계가 맞으면 [적용] 버튼을 누르며, 설계 과정 데이터가 필요한 경우 [계산 결과 저장]을 눌러 설계 과정 데이터를 저장한다. 또한 체결 상대 부품이 있는 경우, 상대 부품에서 인장 볼트 체결부 설계를 다시 할 필요가 없

이 [상대 부품 설정]을 눌러 현재 설계한 설계를 상대 부품에 그대로 전달할 수 있다.

3.6 체결류 설계 시스템 개발

고체 추진기관 설계 자동화 시스템을 개발하며, 추진기관의 구조체에 많이 사용되는 체결류 설계 시스템을 개발하였다. 추진기관의 구조체에는 인장 볼트와 록와이어, 나사, 핀, 스냅링 등의 체결류가 사용되며 이 체결류에 대한 설계 시스템을 구현하였다. 또한, 설계 방법이 체결류와 유사한 O 링과 용접 결합에 대해서도 동일하게 설계하도록 시스템을 개발하였다.

Fig. 3 은 고체추진기관 중 연소관을 설계하는 화면이다. 이 연소관의 체결 방식으로는 인장 볼트가 사용되었으며, 인장 볼트를 설계하기 위해 상단의 [인장 볼트] 탭을 누르면 Fig. 2 와 같이 인장 볼트를 설계하는 화면이 나온다. 여기에서 3.5 에서 설명한 바와 같이 체결류 설계를 진행한다.

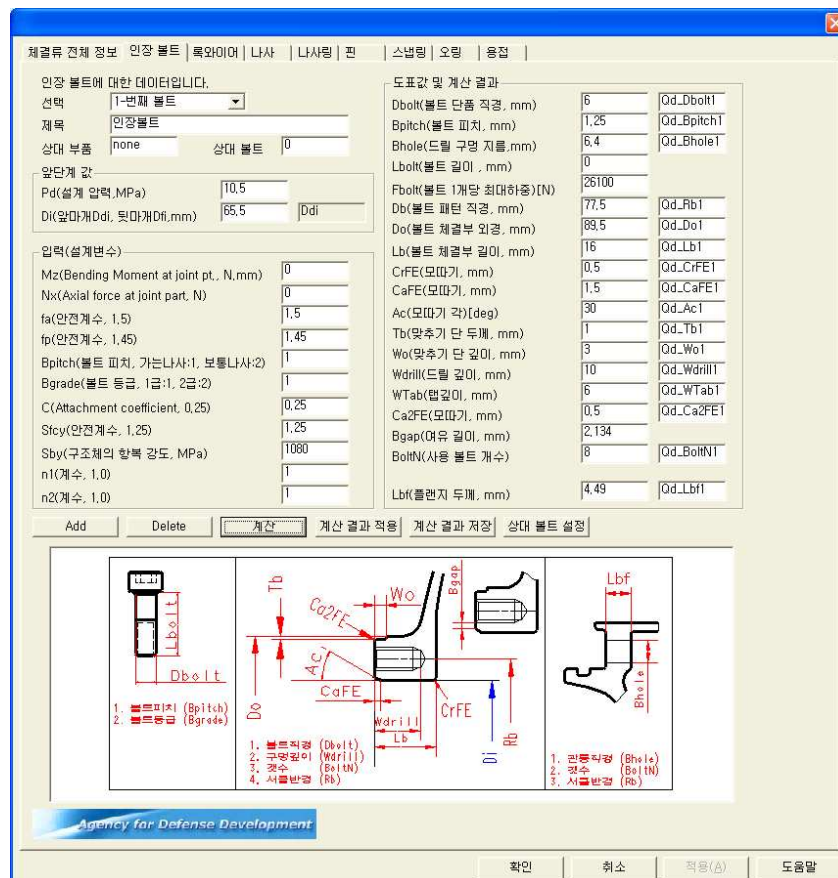
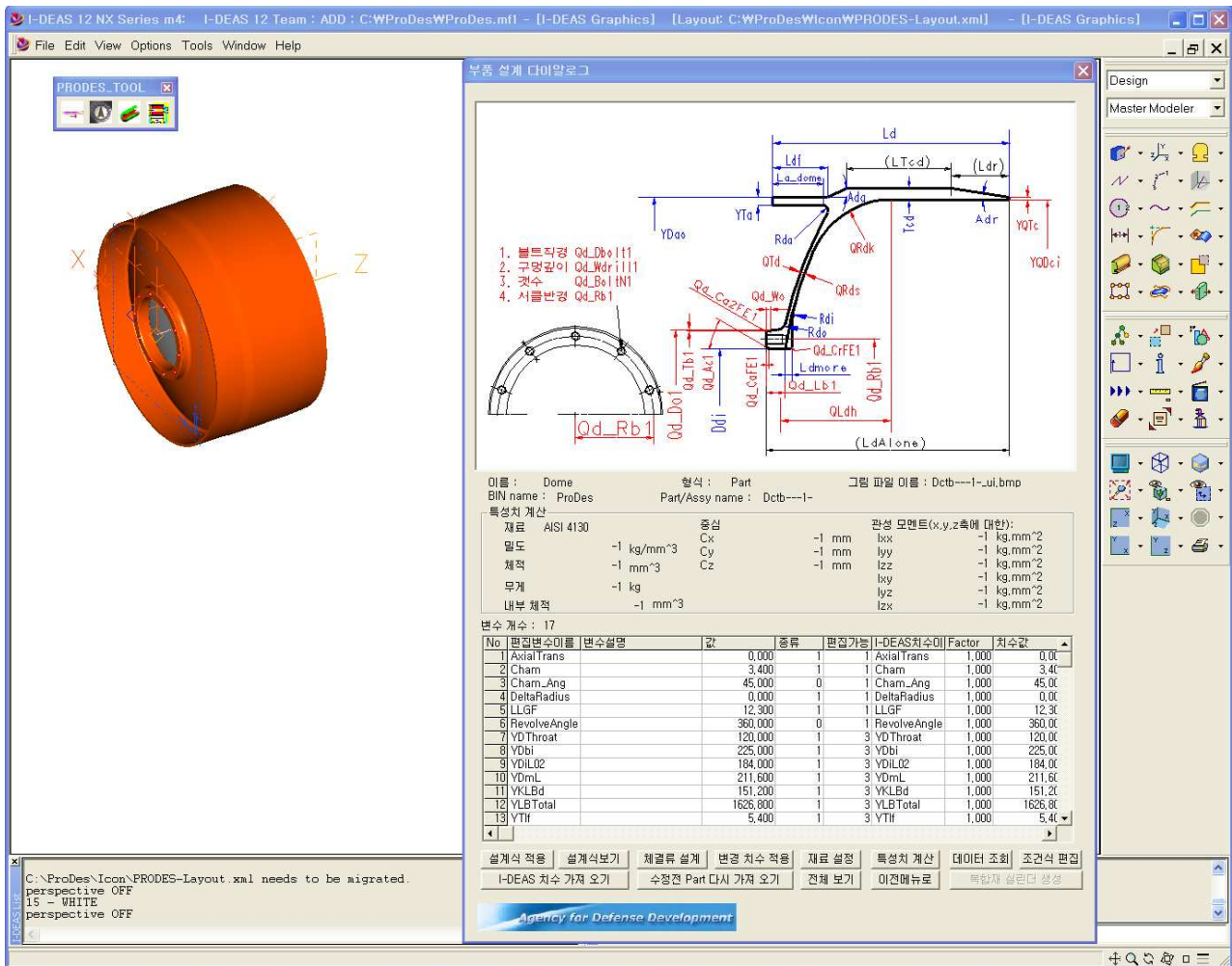
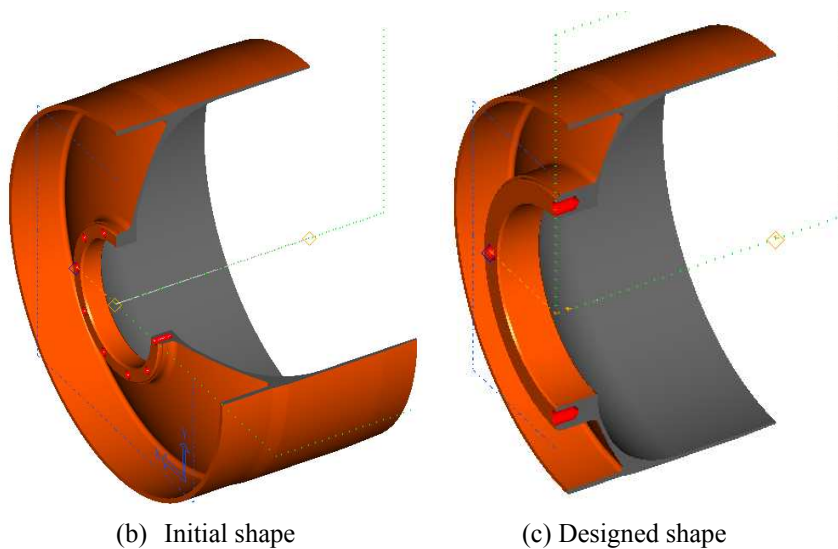


Fig. 2 GUI for designing a tension bolt



(a) GUI for designing a chamber of a solid rocket motor



(b) Initial shape

(c) Designed shape

Fig. 3 Case study – a chamber of a solid rocket motor

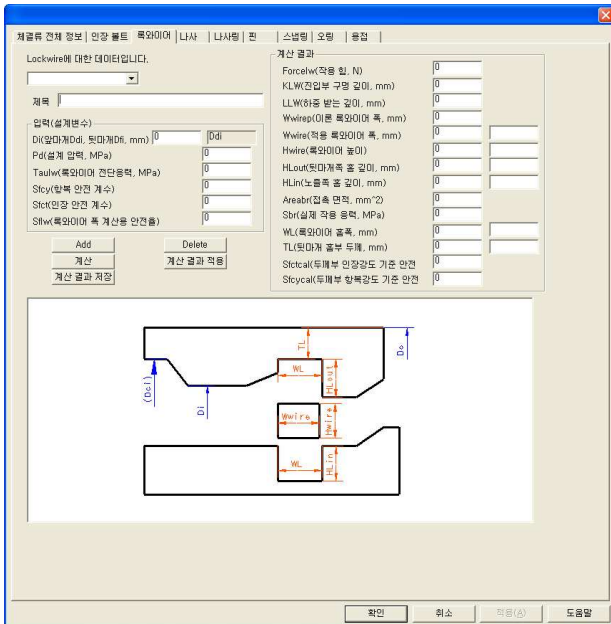


Fig. 4 GUI for designing a lock wire

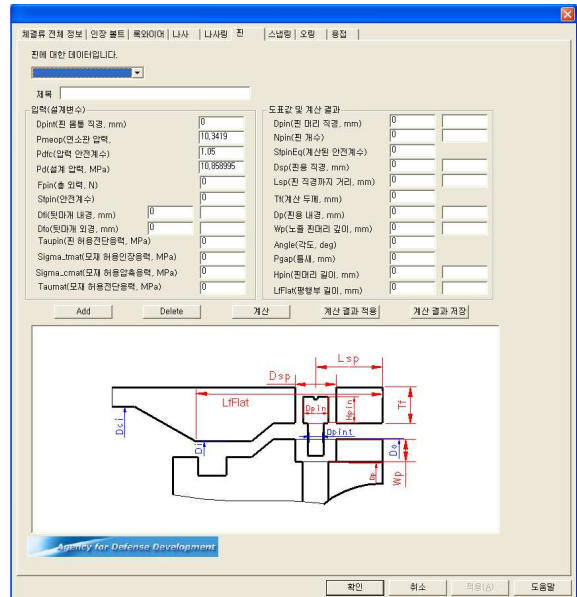


Fig. 6 GUI for designing a pin

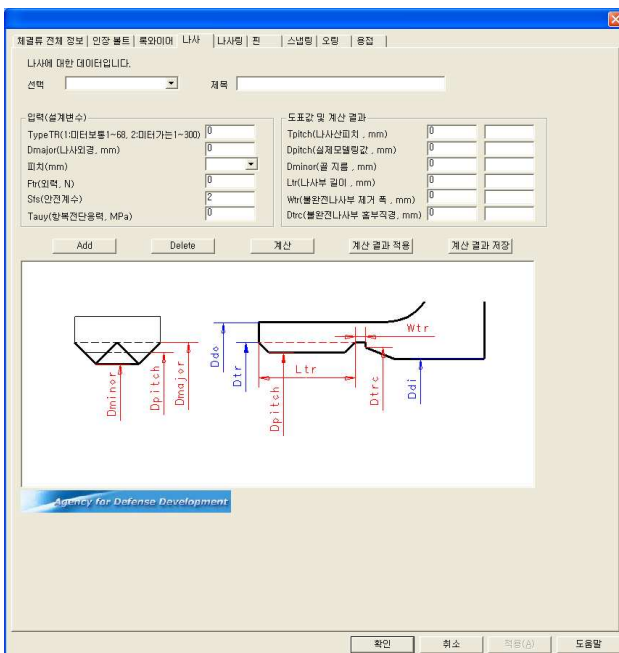


Fig. 5 GUI for designing a thread

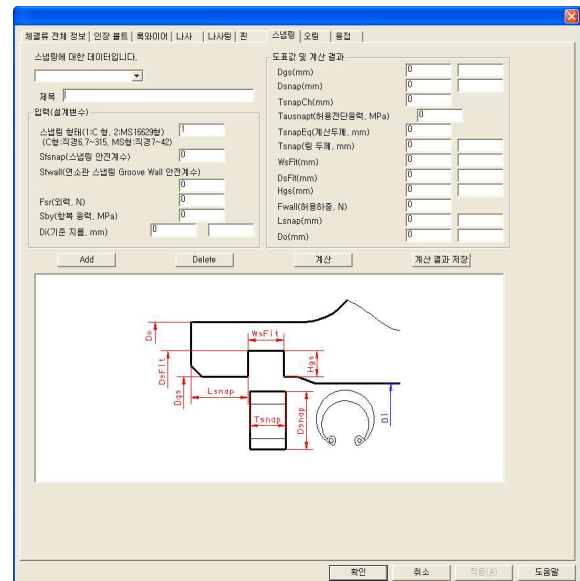


Fig. 7 GUI for designing a snap ring

4. 적용 예

본 연구에서 개발한 체결류 설계 시스템을 고체 추진기관의 구조체 설계에 적용하였다. Fig. 3(b)는

5. 적용 예

본 연구에서 개발한 체결류 설계 시스템을 고체 추진기관의 구조체 설계에 적용하였다. Fig. 3(b)는 구조체 중 연소관의 초기 형상으로 여기에는 편집 설계를 하기 위한 설계 인자들이 모델링되어 있다. 이 연소관은 상대 부품과 인장 볼트로 체결되므로 인장 볼트를 사용하기 위한 형상과 설계 인자도 모델링되어 있다.

Fig. 3(a)는 연소관을 설계하기 위한 GUI 로, 작용 압력을 10.5 MPa, 굽힘 모우멘트 M_z 을 10 N.mm, 축방향 하중 N_x 를 10 N 으로 설정한 후 하

단의 [체결류 설계]란 버튼을 누르면 Fig. 2 와 같이 인장 볼트를 설계하기 위한 GUI 가 나타난다. 초기 형상인 Fig. 3(b)는 데이터베이스화된 초기 형상으로 연소관 지름(D_i)이 89 mm 였으나, 이를 140 mm 로 변경하여 설계하였다. Fig. 3(a)에 나타난 처음 형상에서 M6 볼트가 10 개 사용되었고 볼트 체결부 피치원 지름(D_b)가 150 mm, 체결 깊이가 11 mm 였다. 개발된 프로그램을 이용해 인장 볼트를 설계한 결과 Table 1 과 식 (1), (2)에 의해 볼트는 M10 으로 설계되었고, B_{gap} 은 2.134 mm 로 0 보다 크게 설계되었으며, 체결 볼트 개수 $Bolt_N$ 은 4 개, D_b 가 176 mm, 체결 깊이가 21 mm 로 설계되었다. 설계 결과는 Fig. 3(b)에 반영되고, [변경 치수 적용]이란 버튼을 누르면 연소관 형상이 Fig. 3(c)와 같이 최종 형상으로 변하게 된다.

6. 결론

이 연구에서는 체결 부품을 사용하는 부품의 설계 자동화에 대한 연구이다. 대부분의 체결 부품은 설계식이 필요하며 또한 설계한 후 표준화된 규격 중에서 사용해야 한다. 이러한 체결 부품의 특성을 이용하여 다음과 같이 연구를 수행하였다.

(1) 사용하려는 체결 부품의 형상을 표준화하여 설계 자동화에 이용하였다.

(2) 체결 부품을 쉽게 설계하기 위해 필요한 설계식을 프로그램 내에서 사용할 수 있도록 하였으며, 계산 결과가 바로 체결류의 형상에 적용되도록 하였다.

(3) 체결 부품의 표준화된 규격을 데이터베이스화하여 체결 부품을 설계한 후, 설계 결과를 가장 잘 만족시키는 규격을 데이터베이스에서 가져오도록 하였다.

(4) 설계 결과를 이용하여 체결류를 사용하는 부품의 체결부 형상을 자동으로 생성할 수 있게 하였다. 이 과정에서 편집 설계 방법을 이용하였다.

추진기관에 사용되는 모든 체결 부품 설계에 동일한 방법으로 적용이 가능하며, 이 연구에서 접근한 방법이 타당함을 알 수 있었다.

위와 같은 체결류 설계 자동화를 추진기관의 구조체 설계에 적용하여 그 효용성을 입증하였다. 추진기관을 설계하기 위해서는 많은 체결 부품을 사용해야 하며, 이 연구에서 개발된 체결 부품 설계 자동화 프로그램을 사용하여 정확하고 신속하게 체결 부품 및 상대 부품을 설계할 수 있었다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Han, D.C. and Jung S.M., 2005, *Standard Machine Design*, Dongmyoungsa, Seoul, pp. 74~239.
- (2) Norton, R. L., 2006, *Machine Design - An Integrated Approach*, Pearson Prentice Hall, New Jersey, pp. 811~876.
- (3) <http://www.standard.go.kr/>
- (4) Ekh, J. and Schon, J., 2007, "Finite Element Modeling and Optimization of Load Transfer in Multi-fastener Joints Using Structural Elements," *Composite Structures*, Vol. 82, pp.245~256.
- (5) Thompson, D. J. and Verheij, J. W., 1997, "The Dynamic Behavior of Rail Fasteners at High Frequencies," *Applied Acoustics*, Vol. 52, No. 1, pp. 1~17.
- (6) Pai, N. G. and Hess, D. P., 2001, "Experimental Study of Loosening of Threaded Fasteners due to Dynamic Shear Loads," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 253, No. 3, pp. 585~602.
- (7) Pai, N. G. and Hess, D. P., 2001, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Threaded Fastener Loosening due to Dynamic Shear Load," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, pp. 383~402.
- (8) Kim, B.H., Lee, K.S., Yang, J.S., Lee, D.H., Oh S.J., Kwon, H.S. and Kim S.H., 2008, "Development of a Solid Fuel Design Automation Program Using Configuration Design Method," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 372~381.
- (9) Lee, J.M. and Han, S.H., 2000, "Configuration Design of Products Using Commercial Part Databases," *Proceedings of 2000 Korean CAD/CAM Conference*, pp.117~122.
- (10) Yoo, W.S. and Kim, S.K., 2000, "Development of the 3D Parametric Modeling System for Transmission Gears of Tractor," *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 23, No. 57, pp. 87~92.
- (11) Yoo, W.S. and Jung, J.C., 2002, "Development of the Parametric Modeling System for Machine Parts," *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 14~19.
- (12) Kim, W.H., Koo, S.H., Moon, S.I., Hwang, K.Y., Lee, K.S. and Seok, J.H., 2006, "Development of Automatic Design Program for Solid Rocket Motors Structure," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 18~25.