

체결 방식에 따른 유도탄의 동적 특성에 관한 실험적 연구

전호찬¹⁾ · 송오섭^{*,2)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

²⁾ 충남대학교 기계공학부

Experimental Study on the Dynamic Characteristics of a Missile Structure Depending on Fastening Method

Ho-Chan Jeon¹⁾ · Ohseop Song^{*,2)}

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

²⁾ School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

(Received 11 April 2019 / Revised 23 May 2019 / Accepted 7 June 2019)

ABSTRACT

In order to design and manufacture structures such as a guided missile, assembly process with fastener is an essential method of fabrication. In this study, the dynamic characteristics of a cylindrical structure with bolted joints were studied using experimental methods. The change of the natural frequency of the structure with the change of the fastening method and the tightening torque were measured by the test and the finite element analysis was performed using the stiffness model of the fastening part according to the fastening method and compared with the test results.

Key Words : Natural Frequency(고유진동수), Thin Layer Element(얇은 막 요소), Fastening Method(체결 방식), Stiffness of Joint(체결부 강성)

1. 서론

유도탄뿐만이 아니라 산업 현장에서 접하고 있는 대부분의 구조물은 아주 단순한 부품을 제외하고 여러 개의 부품 또는 부구조물이 조립된 형태로 설계 및 제작된다. 일반적인 구조물의 조립 방법에는 볼트

또는 스크류를 사용하는 체결방식, 용접 방식 또는 접착제 등을 활용하는 방법 등이 많이 사용된다. 구조물 제작에 적용되는 여러 가지 조립 방법 중에서 볼트 또는 스크류를 사용하는 체결 방식이 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이기 때문에 많은 구조물에 적용되고 있으며, 유도탄의 제작에도 작업의 용의성과 조립 작업에 따른 구조물의 변형 및 체결력과 같은 다양한 문제점에서 가장 자유로운 조립 방법인 볼트 또는 스크류와 같은 부품을 적용한 체결 방식을 주로 적용하

* Corresponding author, E-mail: songos@cnu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

고 있다.

일반적으로 유도탄도 다른 구조물과 유사하게 특정한 기능을 가지는 다양한 부구조물의 조립 형태로 구성되어 있으며, 각각의 부구조물을 조립하기 위하여 인장 또는 전단 조립 방식과 같이 대표적으로 두 가지 방법을 조립에 사용하고 있다. 이러한 조립 방식은 내부 구조물의 배치 공간 또는 중량 등과 같은 요인에 의해서 결정된다. 하지만 이와 같은 체결 방식은 유도탄 전체의 고유진동수에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이 값은 유도탄의 유도조종 알고리즘 설계에서도 중요한 입력 자료로 적용될 뿐만 아니라 유도탄 내부에서 탑재장비를 조립하는 장비 장착관 등의 설계에서 관련 주파수를 피해서 설계해야 되는 설계 제약 파라미터로 적용된다. 따라서 유도탄의 설계에 있어서 전체 유도탄에 대한 고유진동수에 대한 예측 및 평가가 필수적이다.

본 연구에서는 실제 유도탄에 적용되는 체결 방식에 따른 고유진동수 변화를 분석하기 위해 두 개의 부구조물이 조립되는 형태의 시험 구조물을 설계하고 제작하였다. 시험 구조물을 활용한 동특성 실험을 통해 다양한 체결 형태를 가지는 구조물의 고유진동수를 측정하여 이에 따른 구조물의 동적 거동을 분석하였으며, 유한요소 모델을 활용한 해석을 수행하여 체결부의 강성을 예측하였다. 원통형 시험 구조물에 대한 실험 및 해석을 통하여 실제 유도탄과 유사한 형태의 원통형 조립 구조물의 설계에 있어서 체결부 강성을 높게 가져갈 수 있는 체결부 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 동특성 시험

본 장에서는 다양한 체결 방식에 따른 원통형 구조물의 고유진동수 변화 특성을 측정하기 위한 동특성 시험에 대한 시험 구성, 시험 구성 및 수행된 실험 결과에 대하여 기술한다.

2.1 시험 시편

본 연구에 사용된 구조물은 일반적인 유도탄의 체결 형태를 모사할 수 있도록 하였다. 실제 구조물을 적용한 실험에는 많은 어려움과 제약이 있으므로, 유도탄의 고유진동수 특성을 표현할 수 있는 체결부를 가진 원통형 시편을 구성하여 동특성 실험을 수행하였다.

실험에 적용된 시편의 기본 형상은 Fig. 1과 같다. 두 개의 부구조물은 길이 500 mm 및 직경 100 mm로 구성하였으며, 유도탄을 모사한 시편의 전체 길이는 1000 mm로 설계 및 제작하였다.

시편의 설계 단계에서는 실험에 적용되는 원통형 구조물을 빔 요소를 적용한 간략한 유한요소 해석을 수행하여 시험 구조물의 고유진동수 특성을 미리 확인하여, 실제 대상 유도탄의 1차 고유진동수와 유사하도록 시편을 설계하였다. 두 개의 부구조물만 활용하여 시편을 제작하여 일반적인 유도탄 비행 조건과 유사한 Free-Free 조건으로 구성할 때에는 구조물의 1차 고유진동수가 실제 구조물과 비교하여 너무 높은 값(약 530 Hz)을 나타낼 것으로 예상되어 부구조물 1의 전방에 더미 중량체를 부가하고, 경계조건은 장입유도탄 조건인 Fix-Free 조건으로 구성하여 일반적인 유도탄의 고유진동수와 유사하도록 하였다. 두 개의 부구조물은 구조물의 가공성이 좋으며 유도탄 제작에도 많이 적용되는 알루미늄 소재를 사용하였으며, 더미 중량체는 일반적으로 사용되는 스틸을 이용하여 제작하였다.

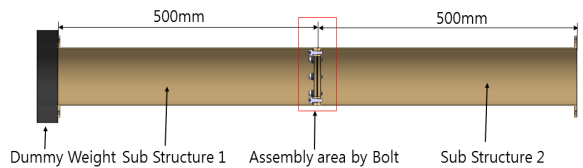


Fig. 1. Configuration of test specimen

실험에 적용된 시편의 외부 형상은 Fig. 1과 같지만 유도탄을 조립할 때 사용하는 체결 방식은 구조물 내부에서 조립하는 인장 체결 방식과 구조물 외부에서 조립하는 전단 방식으로 구분할 수 있으므로, 본 연구에서는 두 가지 종류의 조립 방식 및 조립 토크 변화에 따른 고유진동수 변화 특성을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 두 개의 부구조물이 조립되는 체결부의 형상을 실제 유도탄과 동일하도록 설계하여 실험을 수행하였다.

실험에 적용된 시편은 Fig. 2와 같이 네 가지 종류의 조립부 형상을 가지고 있다. 인장 또는 전단 형상의 조립부를 모사하여 시편을 설계-제작하였으며, 가장 큰 조립부 강성을 모사한 일체형 시편(Fig. 2의 상단 좌측은 인장 일체형, 하단 좌측은 전단 일체형을 나타내고 있음)을 기준 시편으로 사용하였다. 이러한

기준 시편은 조립에 따라 체결부의 강성이 어떻게 변화하고 이에 따라 구조물의 고유진동수가 어떻게 변화하는지를 평가하는 기준값으로 사용하기 위해 적용하였다. 인장 조립형 시편은 “ㄴ”와 “ㄹ”와 같은 형상의 프레임을 내부에서 MS20004(직경 1/4 inch) 볼트를 사용하여 조립 가능하도록 하기 위해 부구조물 1의 내부에 볼트를 조립할 수 있는 탭이 있는 형태로 시편을 구성하여 제작하였다. 전단 조립형 시편의 조립부는 일자 형태의 형상을 가지고 있으며, 바깥쪽으로 조립되는 프레임의 내부 지름과 내부에서 조립되는 프레임의 외부 지름의 기준 치수는 동일하고 공차만 “+” 또는 “-”로 관리하여 제작하였으며, 조립은 직경이 작은 내부 조립 구조물의 내부에 스크류를 조립할 수 있는 탭을 가지고 있는 너트 플레이트를 장착하여 외부에서 MS24694(직경 1/4 inch) 스크류를 활용하여 조립할 수 있도록 하였다. 이러한 두 가지 방식의 조립은 유도탄에 가장 일반적으로 적용하고 있는 섹션 체결 방식이며, 시험을 통하여 이러한 일반적인 체결 부품을 적용하는 구조물의 고유진동수 특성 변화를 측정하고자 하였다.

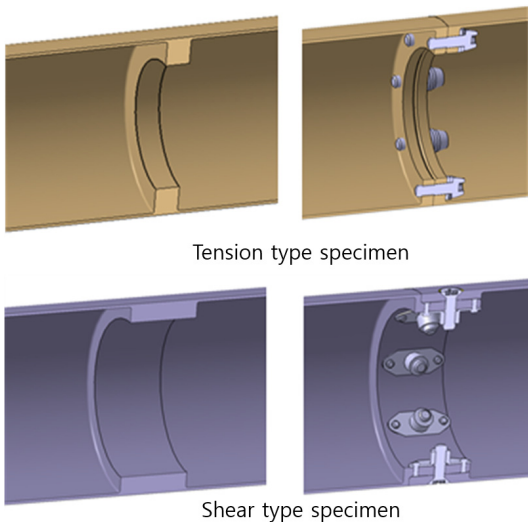


Fig. 2. 4 Types of assembly configuration for test specimen

2.2 시험 구성

유도탄을 모사하는 원통형 구조물의 고유진동수 변화 특성을 확인하기 위한 진동 실험의 원통형 구조물 시편의 형상은 Fig. 3과 같다.

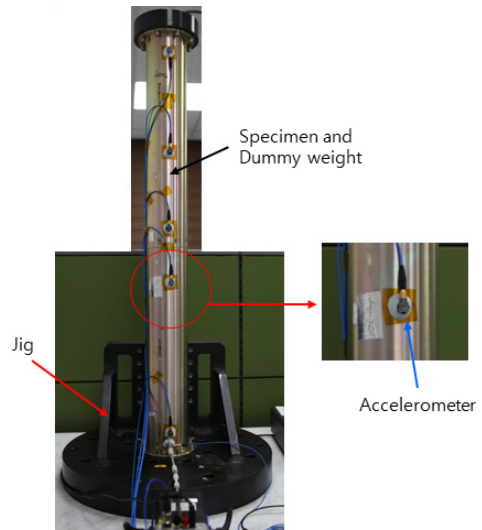


Fig. 3. Test specimen and accelerometer

실험 시편의 구성은 앞 절에서 설명된 더미 중량을 가진 원통형 시편을 조립할 수 있는 시편 고정치구 (Base)와 시편을 가진할 수 있는 가진장치 및 구조물의 진동 특성을 측정하기 위한 가속도 센서로 구성되어 있다. 시험에 적용된 가속도 센서는 시편의 길이 방향으로 200 mm 간격으로 총 5개를 설치하였으며, 이를 통해 계측된 가속도를 분석하여 구조물의 고유진동수와 모드 형상을 획득하였다.

Fig. 4는 조립부를 가진 원통형 구조물의 고유진동수 특성을 측정하기 위한 실험 구성을 보여주고 있다. 실험은 그림에서 보는 바와 같이 시편 고정치구에 원통형 구조물 시편을 수직으로 세워서 조립하였으며, 외팔보 형태로 실험을 구성하여 수행하였다. 치구와 구조물의 조립부가 일반적인 구조해석에서 고정단 조건이 되도록 8개의 볼트를 사용하여 고정하였으며, 일반적인 조립 토크보다 큰 체결력을 부가하여 구조물-치구 조립부위가 실제 시험의 결과에 영향을 미치지 않도록 조립하였다. 진동 시험에서 가진 장치를 이용한 하중 입력은 구조물 축 방향과 수직으로 가진하는 방식을 적용하였으며, 구조물이 굽힘 형태로 가진되도록 구성하여 0 ~ 500 Hz의 주파수 범위에서 랜덤으로 가진하여 시험을 수행하였다. 시편에 부착된 가속도 센서의 출력은 SIEMENS사의 LMS SCADAS mobile 장비를 활용하여 계측하였으며, 동일 업체에서 제공하는 LMS S/W를 활용하여 계측된 가속도 데이터를 분석하였다.

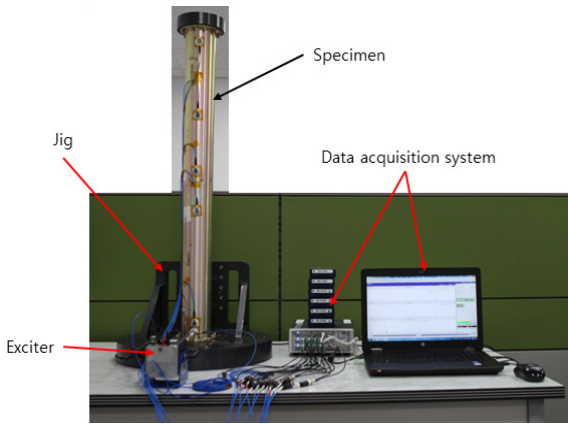


Fig. 4. Vibration test setup

실험은 앞 절에서 설명한 4종의 시편을 활용하여 수행하였으며, 실제 체결 부품(1/4 inch 볼트 또는 스크류)을 사용하는 시편에서는 각 체결 부품의 적정한 조립 토크인 60 in-lbf 뿐만 아니라, 적정 토크보다 크거나 작은 조건(40 in-lbf 및 80 in-lbf)의 체결력을 부가한 조건에서 시험을 수행하였다. 인장 및 전단 체결 방식에 대해서 일체형 및 3종인 조립 토크 조건과 같은 4가지 조건의 시험을 수행하여, 체결 방식에 따른 고유진동수의 변화를 실험적으로 확인하였다.

2.3 시험 결과

체결부를 가지는 원통형 구조물의 고유진동수 특성 시험의 결과는 다음의 그림 및 표와 같다. Fig. 5와 6은 인장 및 전단 조립 방식 및 체결부품의 조립 토크 변화에 따른 실험 결과를 나타내고 있다. Fig. 5는 인장 조립 방식에 따른 실험 결과를 나타내고 있으며, 시편 설계 단계에서 설명한 바와 같이 비교 시편인 일체형의 실험 결과와 비교하여 3종의 조립 토크 변화를 가지는 조립형은 모두 고유진동수가 조금 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 체결을 함으로써 비교 시편보다 고유진동수가 감소하지만, 체결 토크에 따른 영향은 크게 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 전단 조립을 적용하는 경우는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 인장 조립과는 상당히 다른 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 인장 방식과 동일한 경향으로 비교 시편보다는 고유진동수가 감소하는 현상을 나타내고 있지만, 감소량은 상당히 큰 것을 알 수 있다. 또한 적정 토크 보다 높은 체결력을 부가하더라도 고유진동수가 상당히 많이 감소하

고 있으며, 체결 토크가 감소함에 따라 구조물의 고유진동수는 현저하게 감소되는 것을 그림을 통하여 확인할 수 있다.

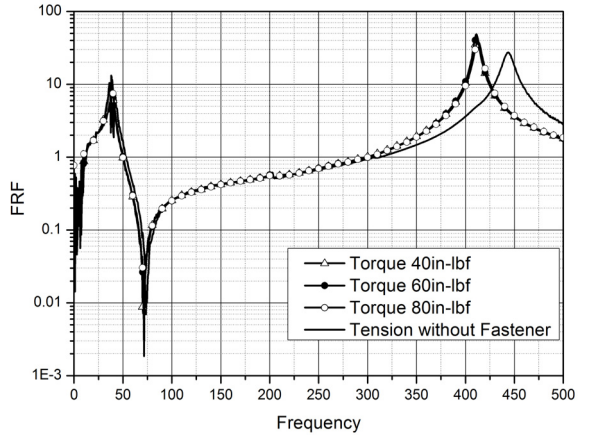


Fig. 5. Test results of tension type specimen

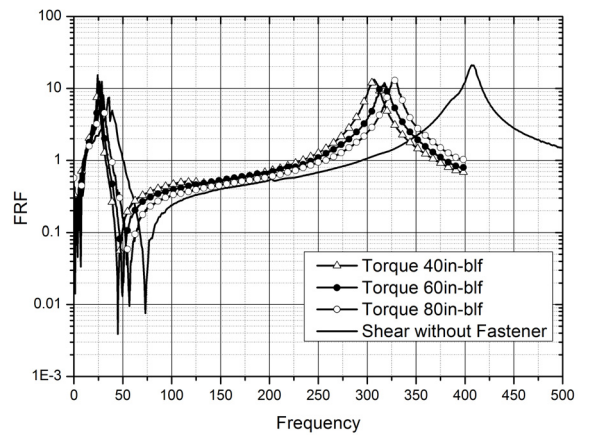


Fig. 6. Test results of shear type specimen

Table 1은 체결 방식 및 체결 토크에 따른 시편 구조물의 1차 및 2차 고유진동수의 변화 및 일체형 구조물에 대한 고유진동수의 감소율을 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 두 가지 조립 방식에 대하여 일체형인 경우에는 고유진동수 값이 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하지만 실제 구조물의 형태인 체결 부품을 적용하는 경우에는 체결방식에 따라 결과에서 상당히 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 인장 형태의 조립 방식을 적용할 경우에는 적정 토크 보다 작은 경우에도 약 7 % 수준의 고유진동수 감소

가 발생하여 조립 토크의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 전단 조립의 경우에는 과도한 체결력을 부가하더라도 20 % 이상의 고유진동수의 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 과도한 체결력 부가는 조립 단계에서 체결 부품의 강도를 저하시키는 효과가 있으므로 일반적으로 허용하지 않는 조립 방법임에도 불구하고 전단 체결에서 높은 체결력을 확보하기 위해 수행하더라도 인장 방식과 비교하면 상대적으로 강성이 부족한 것을 알 수 있다.

Table 1. Natural frequency and reduction rate

Fastening		Natural Frequency (Hz)		Reduction rate (%)	
Type	Torque	1st	2nd	1st	2nd
Tension	without Fastener	40.22	443.00	-	-
	80in-lbf	37.79	412.50	6.1	6.9
	60in-lbf	37.66	411.50	6.4	7.1
	40in-lbf	37.34	411.00	7.2	7.2
Shear	without Fastener	37.14	407.00	-	-
	80in-lbf	29.05	328.10	21.8	19.4
	60in-lbf	26.82	317.60	27.8	22.0
	40in-lbf	24.88	305.90	33.0	24.8

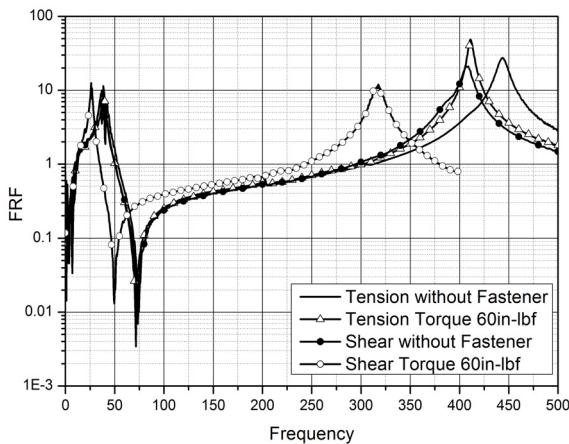


Fig. 7. Comparison of frequencies for different fastening types

Fig. 7은 각각의 체결 방식에 대하여 일체형과 적정 토크(60in-lbf)를 부가한 조립형에 대한 시험 결과를 비교한 그래프이다. 위의 표에서 본 바와 같이 일체형 시편에서는 전단과 인장 조립 방식에 따른 고유진동수는 큰 차이가 발생하지 않고 있지만, 전단 방식의 조립을 적용할 경우에는 다른 조건과 비교하여 현저하게 고유진동수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 전체적인 조립부의 강성에 있어서 전단 조립 방식이 인장방식과 비교하여 상대적으로 취약함을 알 수 있다.

3. 유한요소 해석

본 연구에서 다루고 있는 체결 부품을 이용한 조립 방법을 적용하는 구조물의 동적 특성을 해석하기 위해 다양한 방법이 적용되었다. 볼트 조립부에 접촉 요소를 적용 등의 다양한 해석적 접근 방법이 이용되었다^[1,2].

본 연구에서는 조립부를 가지는 유도탄의 고유진동수 특성을 해석하기 위해서 두 개의 부구조물이 체결 부품을 이용하여 조립되는 체결부를 얇은 막 요소 (Thin Layer Element)^[3-5]로 가정하여 유한요소 모델을 구성하였다. 얇은 막 요소는 볼트로 조립되는 체결부를 임의의 강성을 가진 고체 요소로 가정하여 고유진동수 해석에 적용하는 방법이다. 아래의 Fig. 8은 실제 구조물의 체결부 형상과 얇은 막 요소를 적용한 체결부의 형상을 나타낸 것이다.

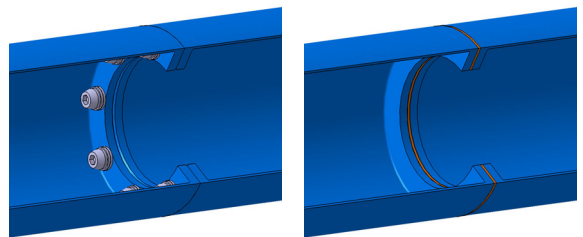


Fig. 8. Shape comparison of test specimen and FE model using thin layer element

3.1 조립부 모델

볼트 조인트는 스프링의 조합으로 생각할 수 있으며, 볼트 조립부의 강성은 볼트 강성과 그림 강성으로 구분할 수 있다. 아래의 그림은 일반적인 볼트 조립부

에 대한 단면을 나타내고 있다. 그림은 아래쪽의 구조물에 볼트를 조립할 수 있는 나사산이 있는 경우를 나타내고 있다. 조립부의 강성을 구성하는 서로 다른 두 개의 부구조물을 조립하는 볼트의 강성은 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$k_B = \frac{A_B E_B}{L_B} = \frac{\pi E_B d_B^2}{4L_B} \quad (1)$$

위의 식에서 d_B , E_B 및 L_B 는 볼트의 직경, 탄성계수 및 길이를 나타내고 있다.

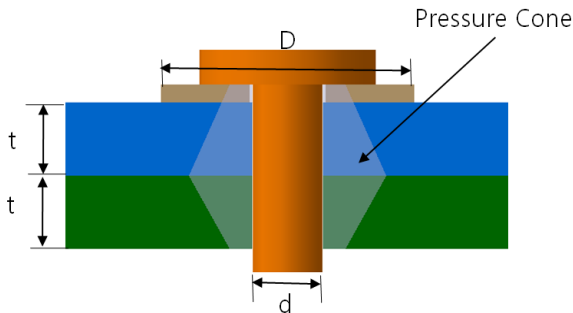


Fig. 9. Cross section of bolt assembly part

볼트의 체결력에 의해 발생하는 두 부구조물의 접촉부에 대한 그림 강성은 아래의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$k_{gi} = \frac{\pi E_S d \tan \alpha}{\ln \left[\frac{(D+d)(D-d+2t \tan \alpha)}{(D-d)(D+d+2t \tan \alpha)} \right]} \quad (2)$$

위의 식에서 E_S , D 및 d 는 구조물 재료의 탄성계수, 볼트 머리에 의해 압력이 가해지는 부분의 직경 및 볼트 구멍의 직경을 나타내고 있다. 식에서 α 는 볼트 체결에 따른 조립부의 응력 분포에 의해 발생하는 압력 콘의 각도를 나타내고 있다. 두 개의 부구조물이 조립되는 부분의 그림 강성은 각각의 부구조물에 의한 그림 강성이 연결된 것으로 볼 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_G = \frac{k_{g1} k_{g2}}{k_{g1} + k_{g2}} \quad (3)$$

따라서 유도탄의 부구조물을 조립하는 볼트의 강성은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_t = N(k_B + k_G) \quad (4)$$

위의 식에서 N 은 두 개의 부구조물을 조립하는 볼트의 수량을 나타내고 있다.

얇은 막 요소는 위에서 구한 조인트 강성을 평균적으로 모사할 수 있는 가상의 요소이다. 즉 얇은 막 요소가 가지고 있는 강성의 합은 부구조물의 조립을 위해 적용한 볼트 강성의 합과 동일하게 된다. 이러한 얇은 막 요소를 이용하여 유도탄 조립부를 모델링하면, 조립부의 강성은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_t = \frac{k_1 k_2 k_3}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3} \quad (5)$$

위 식에서 k_1 , k_2 , k_3 는 부구조물의 조립부 강성 및 얇은 막 요소의 강성을 표현하고 있으며, 각각의 강성은 $k_i = E_i A_i / L_i$ 와 같이 표현할 수 있다. 여기서 E , A , L 은 부구조물 및 얇은 막 요소의 탄성계수, 면적 및 두께를 나타낸다.

식 (5)에서 k_t 는 식 (4)에서 계산한 k_t 와 동일한 값이므로 이를 이용하여 얇은 막 요소의 재료 물성인 탄성계수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_2 = \frac{N(k_B + k_G) k_1 k_3 L_2}{k_1 k_3 - N(k_B + k_G)(k_1 + k_3)} \quad (6)$$

유한요소 모델을 적용한 해석에서는 위에서 계산된 탄성계수를 얇은 막 요소의 재료 물성치로 활용하여 동특성 해석을 수행하게 된다.

3.2 해석 결과

얇은 막 요소를 적용한 유한요소 모델은 아래의 Fig. 10과 같으며, 실험에 적용된 구조물과 동일한 형상을 가지고 있다. 그림에서 더미 중량체 조립 반대면에 고정 조건의 경계조건을 부가하였다. 두 개의 부구조물이 조립되는 경계 위치에 얇은 막 요소(Thin layer element)를 적용하였으며, 해석 모델을 적용한 동특성 해석은 범용 공학 해석용 S/W인 ABAQUS를 사용하였다.

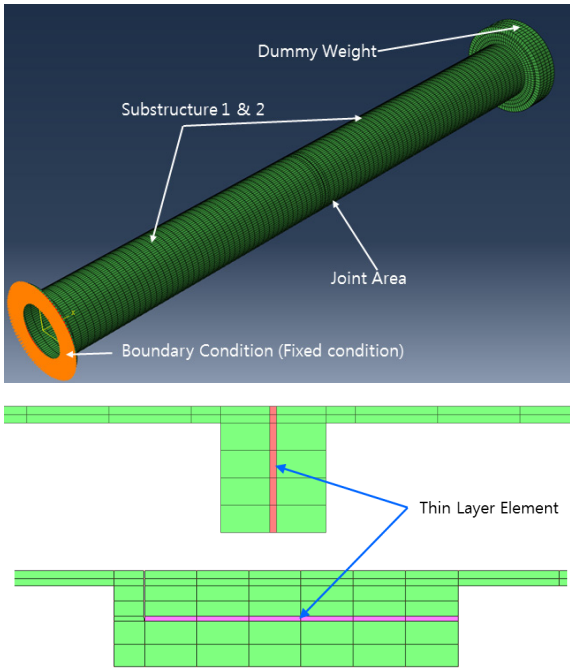


Fig. 10. Finite element model

아래의 Table 2는 실험에 적용된 4가지 시험 구조물에 대한 동특성 해석 결과와 해석에 적용된 얇은 막 요소의 물성치를 나타내고 있으며, 구조물의 조립하는 체결 토크의 감소에 따라 얇은 막 요소의 재료 물성도 감소하는 것을 알 수 있다. Table 2에서 보는 바와 같이 전단 방식의 조립을 적용하는 경우에는 체결부를 모사하는 얇은 막 요소의 탄성계수가 인장 방식의 조립과 비교하여 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 체결부의 강성 차이에 따라 고유진동수의 감소가 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

해석 결과에서 보는 바와 같이 해석에서 계산된 구조물의 1차 고유진동수는 앞 절에서 설명된 동특성 실험에서의 측정값과 유사한 것을 알 수 있다. 전체적으로 실험과 해석은 2 Hz 이내의 차이를 보이고 있으며, 전단 체결 방식의 40in-lbf 체결 토크 조건에서 가장 큰 5.5 %의 결과 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 2차 고유진동수는 시험과 비교하여 해석에서 상당히 낮은 값이 나타나고 있지만, 체결력에 따른 고유진동수의 변화 경향은 유사한 것을 알 수 있다. 시험 결과와 비교하면 해석에서 상대적으로 체결 토크 변화에 따라 고유진동수의 값이 더 많이 변화하는 것을 알 수 있다.

Table 2. Results of FEM analysis for test specimen

Fastening		1 st Natural Frequency (Hz)	E2 of Thin Layer element
Type	Torque		
Tension	without Fastener	40.40	-
	80in-lbf	37.20	5.40×10^7
	60in-lbf	36.25	3.71×10^7
	40in-lbf	35.41	2.80×10^7
Shear	without Fastener	37.38	-
	80in-lbf	28.78	7.25×10^6
	60in-lbf	27.41	5.82×10^6
	40in-lbf	26.24	4.82×10^6

Table 3. Comparison of experimental and FEM results

Fastening	Test (Hz)		FEM (Hz)		Difference (%)	
	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd
Tension w/o Fastener	40.22	443.0	40.40	379.2	0.45	22.7
Tension 80in-lbf	37.79	412.5	37.20	335.9	1.56	20.8
Tension 60in-lbf	37.66	411.5	36.25	325.7	3.74	15.5
Tension 40in-lbf	37.34	411.0	35.41	317.5	5.17	14.4
Shear w/o Fastener	37.14	407.0	37.38	363.1	0.65	15.9
Shear 80in-lbf	29.05	328.1	28.78	270.7	0.93	15.5
Shear 60in-lbf	26.82	317.6	27.41	268.2	2.20	17.5
Shear 40in-lbf	24.88	305.9	26.24	257.2	5.47	10.7

4. 결 론

본 연구에서는 유도탄 조립에 주로 적용되는 인장 및 전단 체결방식의 적용에 따른 구조물의 고유진동수 변화에 대한 실험 및 해석을 수행하여 각 조립 방식에 따른 구조물의 동적 특성 변화에 대하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

- (1) 인장 조립 방식을 적용할 경우에는 일체형 구조물과 비교하여 고유진동수의 감소는 약 7 % 수준으로 발생하는 것으로 계측되었으며, 해석에서도 거의 유사한 결과를 획득하였다. 실험과 해석의 변화 경향은 비슷하지만 실험에서는 그 변화의 차이가 미미하고, 이상적인 해석에서는 조립 토크의 변화에 따른 고유진동수 변화가 선형적으로 나타난다.
- (2) 전단 조립 방식을 적용할 경우에는 일체형 구조물과 비교하여 약 20 % 이상의 고유진동수 감소가 발생하는 것으로 계측되었으며, 해석에서도 실험과 거의 유사한 변화를 획득하였다. 조립 토크의 감소에 따른 고유진동수 감소량은 인장 형태의 조립 방식보다 크게 발생하는 것으로 확인되었다.
- (3) 전단 형태의 조립 방식은 인장과 비교하여 상대적으로 낮은 조립부 강성을 가지고 있음을 시험 및 해석을 통하여 확인할 수 있었다. 따라서 유도탄의 섹션 체결부 설계에 있어서 구조물의 강성을 높이기 위해서 인장방식을 사용하는 것이 유리한 것으로 확인되었다.
- (4) 얇은 막 요소를 적용하여 해석을 수행할 경우, 실험 결과와 최대 5 % 정도의 오차 범위에서 유사

한 결과가 나타남을 확인하였다. 따라서 얇은 막 요소를 조립부를 가지는 구조물의 동특성 해석에 적용함으로써 초기 설계 단계에서 유도탄 구조물의 동적 특성을 예측하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] I. Piscan, T. Janssens and C. Pupaza, "Dynamic Parameter Estimation of Bolted Assemblies," International Conference on Noise and Vibration Engineering, pp. 341-3474, 2012.
- [2] Jeong Kim, Joo-Cheol Yoon and Beom-Soo Kang, "Finite Element Analysis and Modeling of Structure with Bolted Joints," Applied Mathematical Modelling, Vol. 31, No. 5, pp. 895-911, 2007.
- [3] C. S. Desai, M. M. Zaman and J. G. Lightner, "Thin-Layer Element for Interfaces and Joints," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8, No. 1, pp. 19-43, 1984.
- [4] X. Y. Yao, J. J. Wang and X. Zhai, "Thin-Layer Element Modeling of Aero-Engine Bolted Joints," International Conference on Advanced Materials and Structural Engineering, pp. 477-482, 2015.
- [5] Richard G. Budynas and J. Keith Nishett, "Shigley's Mechanical Engineering Design", Mc Graw Hill, US, pp. 416-424, 2015.