

날개의 전개성능 확인을 위한 공압식 시험장치 성능 해석

이 등 훈^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

Performance Analysis of Pneumatic Device for Verification of Canard Deployment Performance

Donghoon Lee^{*,1)}

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

(Received 4 September 2015 / Revised 5 January 2016 / Accepted 25 March 2016)

ABSTRACT

In this paper, a pneumatic device for the deployment performance verification of canards deployed by inertia has been designed and the performance of the pneumatic device has been proven through analysis and tests. The pneumatic conveying process, orifice opening process and piston movement process of the pneumatic device were investigated by using numerical methods. The orifice diameter, pressure in a pressure tank and type of gas were regarded as the main design parameters of the pneumatic device. The error rate between analysis and test results under the same conditions was within 4 %. The accuracy of numerical methods used in this study were validated.

Key Words : Pneumatic Device(공압식 시험장치), Canard(귀날개), Control Volume(제어체적), Mass Flow(유량), Steady State(정상상태)

1. 서론

원통형 발사관을 사용하는 유도무기는 발사관 내 공간상의 제한으로 인하여 접이식 날개를 적용한다. 접이식 날개는 작동기와 연결되는 하단날개와 상단날개로 구성되며 힌지로 연결된 상단날개를 접어 동체 내부로 수납함으로써 원통형 발사관에 장입될 수 있다. 탄이 발사관을 이탈함과 동시에 접혀진 날개가 전개됨

으로서 탄은 조종력을 얻게 된다. 따라서 날개 전개여부는 탄의 비행 성능과 직결되므로 날개전개장치는 충분한 신뢰도를 보유하여야 한다.

Fig. 1은 관성에 의해 전개되는 접이식 귀날개의 전개 형상을 나타낸다. 경사진 힌지 축을 이용하여 기체의 축 방향으로 접혀진 날개는 유도탄이 가속될 때 얻어지는 관성력을 이용하여 기체 축과 90도 방향으로 수직각을 이루면서 전개된다. 이러한 접이식 귀날개는 유도무기의 안정성을 확보하기 위하여 짧은 시간 안에 전개되어야 하며 충분한 전개 신뢰도를 가져야 한다. 귀날개의 전개성능을 지상에서 검증하고 충분한 신뢰

* Corresponding author, E-mail: dh-lee@hanmail.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

도를 확보하기 위해서는 전개 환경을 모사할 수 있는 시험장치를 필요로 한다. 시험장치는 짧은 순간 일정 크기 이상의 가속도를 구현할 수 있어야 하며 안정적으로 반복적인 시험이 가능하여야 한다. 압축공기를 고압용기에 저장하여 필요에 따라 사용할 수 있는 공압식 시험장치는 출력 조절이 쉽고 성능 예측이 용이하므로 큰 힘을 필요로 하는 장치에 많이 사용되고 있다.

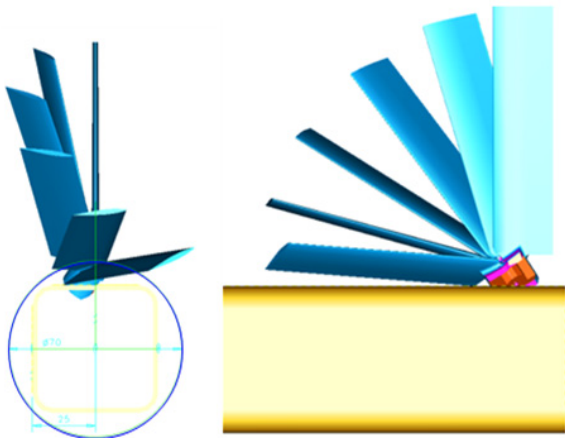


Fig. 1. Deployment shape of canard

본 논문에서는 관성으로 전개되는 접이식 날개의 전개 성능을 확인하기 위해 공압을 이용한 시험장치를 설계하였다. 수치 해석적 방법을 이용하여 주요 설계 변수에 대한 공압식 귀날개 전개시험장치의 성능을 예측하였다. 시험장치 내부를 3개의 제어체적(control volume)으로 정의하고 각 제어체적 별로 압력, 부피, 밀도 등 시험장치를 구동하는 기체의 특성을 계산하였다. 시험장치의 주요 설계 변수는 오리피스 직경, 압력 탱크 압력, 가스 종류 등이다. 수치해석 결과는 동일 조건에 대한 시험을 수행하여 비교함으로써 해석의 정확도를 확인하였다.

본 논문의 주요 내용은 다음과 같다. 2장에서는 시험장치에 대한 수치해석 모델링과 해석방법을 기술하였고 3장과 4장에서는 성능해석을 통하여 계산한 기체의 특성과 주요 설계변수가 시험장치의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 5장에서는 성능 해석 및 시험 결과를 비교함으로써 본 해석의 타당성을 최종적으로 입증하였다.

2. 수치해석 모델링

공압식 귀날개 전개시험장치^[1]의 주요 구성 및 작동 과정을 기술하고, 작동 매체인 고압가스의 유동 및 피스톤의 운동 과정을 수식화하면 다음과 같다.

2.1 공압식 시험장치의 작동 순서

공압식 시험장치의 개념적인 형상은 Fig. 2와 같다. 작동압을 저장하는 압력탱크, 귀날개가 조립되는 장착부, 귀날개를 가속시키기 위한 실린더와 피스톤, 가이드 등으로 구성되며 가속도계와 레이저센서 등을 이용하여 귀날개의 전개 거동을 측정한다.

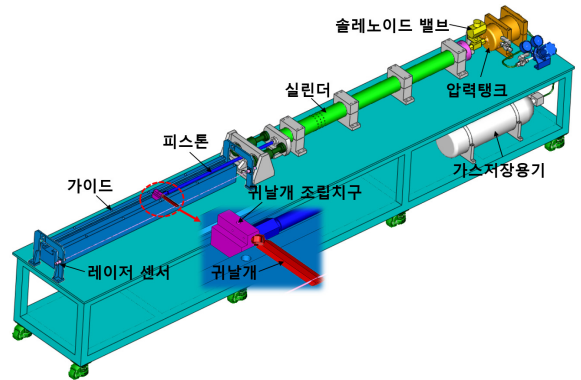


Fig. 2. 3D-model of pneumatic device

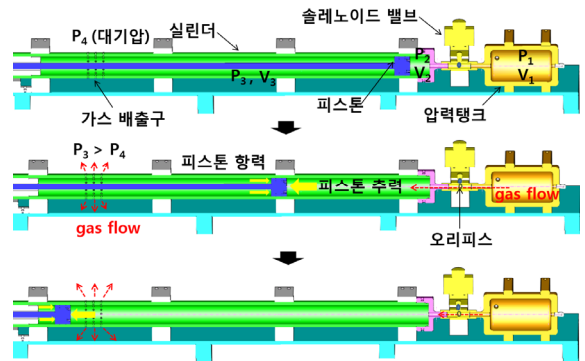


Fig. 3. Movement process of piston according to flow of high pressure gas

시험장치의 작동 과정은 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 작동 명령이 인가됨에 따라 솔레노이드 밸브가 열리면 오리피스를 통해 압력탱크 내 고압가스가 실린더 내부로 유입되고 피스톤이 움직이게 된다. 이때, 피스

톤은 압력 P_2 에 의해 추진력을 받으면서 동시에 실린더 내부 압력 P_3 로 인해 항력을 받고 일정 시간이 지난 후 정지하게 된다. 실린더 내부 압력 P_3 는 대기압 P_4 보다 높은 상태로 압축되면 실린더 좌측의 가스배출구를 통해 배출된다. 피스톤 앞쪽에 장착된 귀날개는 가이드를 따라 이동하게 되고 일정 수준 이상의 가속조건에 도달하면 전개된다. 이때 레이저 센서를 이용하여 귀날개의 전개시간을 측정한다.

2.2 공압 메커니즘 모델링

2.2.1 가정과 지배법칙

고압가스가 실린더 내로 유입되고 피스톤이 운동하는 일련의 과정은 비가역적, 비정상상태 거동이다. 이러한 거동을 수식화하여 해석하는 것은 불가능하기 때문에 다음의 가정과 지배법칙^[2]을 통해 해석상의 편이를 도모하고 수식을 단순화하였다.

- 모든 열역학적 거동은 짧은 순간 가역단열과정이며 정상상태(steady state)이다.
- 고압가스는 이상기체(ideal gas)이다.
- 제어체적 내의 모든 열역학적 값은 균일한 상태를 유지한다.
- 피스톤 및 유체와 실린더 사이 마찰은 고려하지 않는다.
- 가스 배출구를 제외하고 시험장치 외부로의 가스 누출은 고려하지 않는다.
- 모든 거동은 열역학 제1법칙, 질량보존의 법칙, 기체상태방정식을 따른다.

2.2.2 제어체적 설정

본 해석은 3개의 제어체적으로 구성된다. 제어체적 1은 Fig. 3에서 오리피스 기준 우측에 위치한 압력탱크로서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 고정체적(V_1)이며 제어체적 2로 질량이 배출($\dot{m}_{1 \rightarrow 2}$)되기 때문에 시간이 경과함에 따라 압력(P_1)이 감소한다.

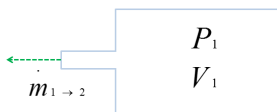


Fig. 4. Control volume 1

제어체적 2는 오리피스에서부터 피스톤 후방부로 구

성되는 영역이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 제어체적 1으로부터 유입되는 유량($\dot{m}_{1 \rightarrow 2}$)에 의하여 제어체적내의 압력(P_2)이 증가하고 피스톤을 이동시킴으로써 부피가 증가하는 가변체적(V_2)이다. 피스톤이 가스 배출구를 지나게 되면 제어체적 2에서 대기로 흐르는 유량($\dot{m}_{2 \rightarrow 4}$)이 생성된다.

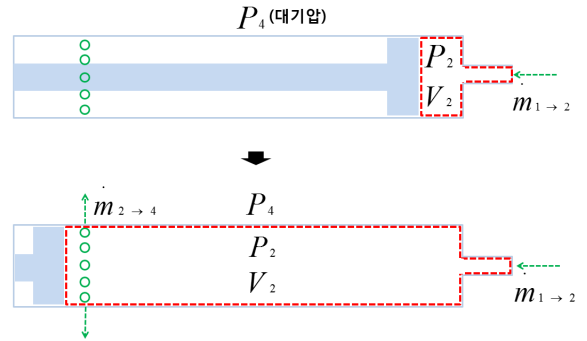


Fig. 5. Change of control volume 2

제어체적 3은 피스톤 전방에 위치하는 실린더의 체적으로서 Fig. 6에서 보는 바와 같이 피스톤이 이동함에 따라 체적(V_3)이 감소하고 제어체적의 압력(P_3)이 대기압(P_4)보다 높아지면 대기로 흐르는 유량($\dot{m}_{3 \rightarrow 4}$)이 생성된다. 피스톤이 가스 배출구를 지나면 대기로 흐르는 유량은 사라지게 된다.

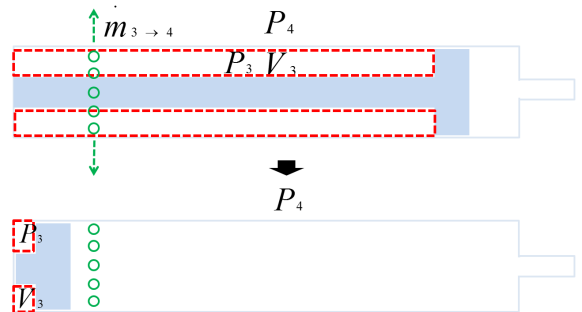


Fig. 6. Change of control volume 3

2.2.3 해석 방정식

2.2.3.1 공압 전달방정식

기체의 이동(유량, \dot{m})에 의한 공압 전달 과정은 다음과 같은 지배방정식^[3]으로 표현된다. 기체의 유량은 제어체적사이의 압력 구배가 일정한 값 이상으로 커져

도 임계유량 이상으로 증가할 수 없다. 이때의 압력비를 임계압력비라고 하며 식 (1)과 같이 정의된다. 여기서 γ 는 기체의 비열비, P_i 는 절대압력을 의미한다.

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_i}\right)_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \quad (1)$$

오리피스를 통과하는 유량비는 식 (2)와 같으며 실제유량과 임계유량의 비율로서 오리피스 좌/우의 압력비가 임계압력비 이상이 되면 유량비는 1이 된다.

$$\frac{P_{i,i+1}}{P_{i,crit}} = \frac{\dot{m}}{m_{crit}} = \left[\frac{\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{\gamma-1}{2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right] \quad (2)$$

오리피스를 통과하는 유량은 식 (3)과 같이 오리피스 유량계수(C_D), 유속계수(Γ), 온도(T), 압력(P_i), 오리피스 단면적(A_o), 유량비($\overline{P_{i,i+1}}$), 기체상수(R) 등에 의해 결정된다. 유속계수는 식 (4)와 같으며 기체상수와 기체의 비열비로 계산된다.

$$\dot{m}_i = C_D \frac{\Gamma}{\sqrt{T_i}} P_i A_o \overline{P_{i,i+1}} \quad (3)$$

$$\Gamma = \left[\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

제어체적 내의 압력변화율(\dot{P})은 식 (5)와 같으며 유량의 입출력 차이와 제어체적의 용적 변화(예: 피스톤 이동에 의한 유효체적 변화)에 의한 유량율(Q_i) 차이에 의하여 결정된다.

$$\dot{P}_i = \frac{\gamma R T_i}{V_i} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} - Q_i) \quad (5)$$

$$Q_i = \rho A_p v$$

(ρ :기체 밀도, A_p :피스톤 단면적, v :피스톤 속도)

위에서 구한 압력변화율을 시간에 대하여 적분하면

식 (6)과 같이 각 제어체적 내의 압력이 산출된다.

$$(P_i)_t = (P_i)_{t-1} + (\dot{P}_i)_t \times dt \quad (6)$$

2.2.3.2 오리피스 개폐방정식

솔레노이드 밸브를 통과하는 유량은 오리피스의 개폐면적에 의하여 결정된다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 오리피스의 개폐 면적은 솔레노이드 밸브의 작동거리(y)의 함수이며 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

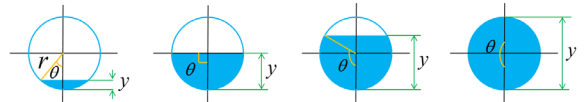


Fig. 7. Change of opening area of orifice according to increase of y value

$$A_o = \frac{r^2}{2} (2\theta - \sin 2\theta) \quad (7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{r-y}{r} \right), \quad 0 \leq y \leq 2r$$

2.2.3.3 피스톤 운동방정식

피스톤의 운동방정식은 고압용기로부터 전달되는 압력에 의해 피스톤에 추가되는 힘(F_t)과 피스톤의 움직임을 방해하는 저항력(F_d)으로 구성되며 식 (8)과 같다. 저항력은 피스톤의 이동에 따른 마찰력과 제어체적 V_3 에서 생성되는 부압으로 구성되며 본 해석에서는 마찰력은 무시하고 부압만을 반영하였다.

$$F_t = P_t A_p (t=1, 2, 3 \dots) \quad (8)$$

$$F_t - F_d = m_p a_t$$

부압은 기체의 밀도(ρ), 피스톤 속도(v), 압력이 작용하는 면적(A_d), 항력계수(C_d)에 의하여 식 (9)와 같이 결정된다.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 A_d C_d \quad (9)$$

식 (8)에 의하여 계산된 피스톤 가속도를 적분하여 피스톤의 속도와 이동거리를 계산한다.

3. 시험장치 성능 분석

수치해석을 통하여 공압식 귀날개 전개시험장치의 주요 거동을 분석하였다. 해석조건은 고압용기 초기 압력 180 psi, 오리피스 직경 10 mm이며 작동 기체는 질소이다. 주요 해석결과와 다음과 같다.

Fig. 8과 9는 시간에 따른 각 제어체적의 유량 변화와 유량비를 나타낸 것이다. 압력탱크에서 피스톤 후방의 실린더로 유입되는 유량($\dot{m}_{1 \rightarrow 2}$)은 유량비($P_{1,2}$)가 임계유량비(critical ratio)에 도달할 때까지 증가하지만 실린더로 이동하는 유량에 의하여 압력탱크의 압력(P_1)이 감소(Fig. 11 참조)함에 따라 유량비도 감소하

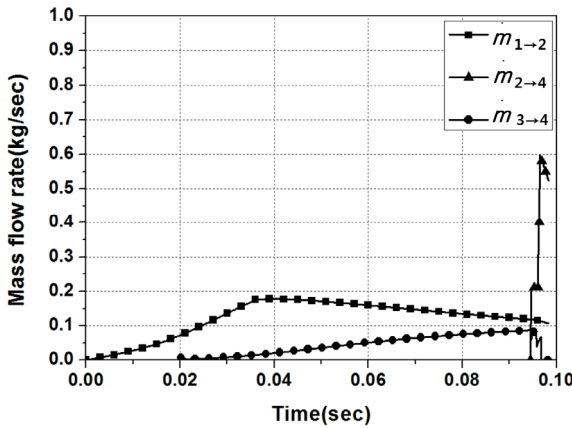


Fig. 8. Change of mass flow rate in each control volume

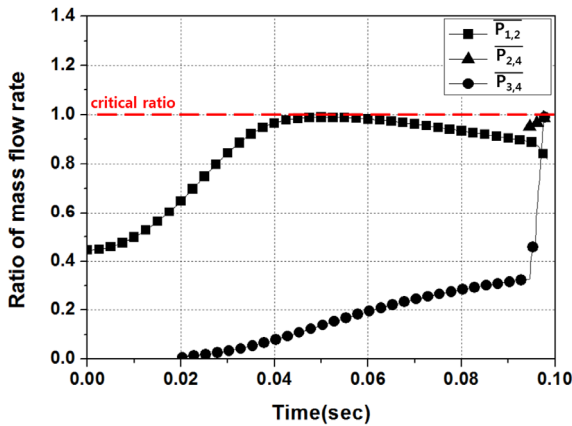


Fig. 9. Change of ratio of mass flow rate in each control volume

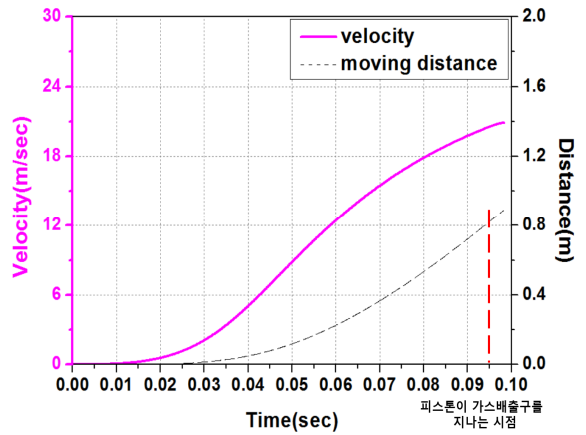


Fig. 10. Change of piston velocity and moving distance according to time

면서 실린더 내로 유입되는 유량($\dot{m}_{1 \rightarrow 2}$) 역시 감소하게 된다. Fig. 10은 피스톤의 속도와 이동거리를 나타낸 것이다. 피스톤 끝단과 가스배출구 사이의 거리는 약 0.81 m이며 피스톤이 0.81 m 이동한 시점은 약 0.095초이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 피스톤 후방의 실린더에서 대기로 흐르는 유량($\dot{m}_{2 \rightarrow 4}$)은 피스톤이 가스배출구를 지나는 시점(0.095초)부터 생성되기 시작한다.

Fig. 11과 12는 각각 주요 제어체적의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 피스톤이 이동함에 따라 피스톤 전방의 제어체적 (V_3)은 감소하고 압력(P_3)은 증가한다. 또한 대기로 배출되는 유량($\dot{m}_{3 \rightarrow 4}$)은 증가(Fig. 8 참조)하기 시작하며 피스톤이 가스배출구를 지나면 사라진다. 또한 피스톤이 가스배출구를 지나면 피스톤 전방부 실린더의 압력(P_3)이 증가하고 유량비($P_{3,4}$)도 급격하게 증가하지만 배출구가 없기 때문에 외부로 배출되는 유량($\dot{m}_{3 \rightarrow 4}$)은 사라지게 된다. 가스배출구를 지나기 전 피스톤 후방에 위치한 제어체적(V_2)의 압력(P_2)은 압력탱크에서 실린더로 유입되는 유량($\dot{m}_{1 \rightarrow 2}$)과 피스톤 이동에 따른 제어체적(V_2)의 변화에 의하여 결정된다. 압력탱크에서 실린더로 유입되는 유량($\dot{m}_{1 \rightarrow 2}$)은 지속적으로 존재하지만 피스톤이 가속되기 시작하는 0.04 초를 기준으로 급격하게 제어체적(V_2)이 증가함에 따라 실린더의 압력(P_2)은 오히려 떨어진다. 피스톤 전방에 위치한 실린더의 부피(V_3) 역시 초기에는 변화가

작지만 0.04초 이후 급격하게 감소하기 시작한다. 하지만 이러한 부피 감소가 압력(P_3) 증가로 이어지지는 않는다. 그 이유는 증가된 압력으로 인해 실린더에서 대기로 흐르는 유량($\dot{m}_{3 \rightarrow 4}$)이 발생하기 때문이다. 이후 피스톤이 가스배출구를 지나면 대기로 흐르는 유량($\dot{m}_{3 \rightarrow 4}$)은 사라지게 되고 실린더 내 압력(P_3)은 감소되는 제어체적(V_3)에 비례하여 급격하게 증가함으로써 피스톤을 감속시켜 안전하게 정지시키는 기능을 수행한다.

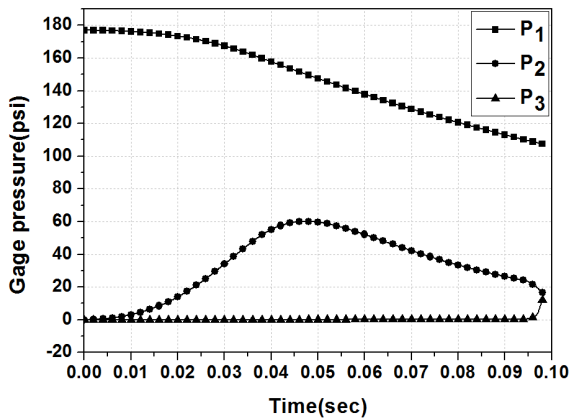


Fig. 11. Change of pressure in control volume according to time

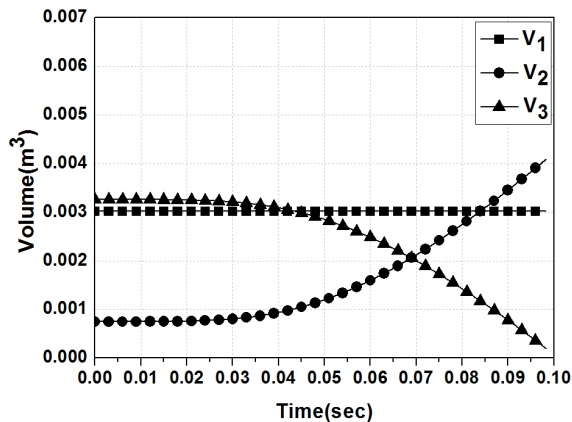


Fig. 12. Change of control volume according to time

Fig. 13은 피스톤의 가속도를 도시화한 것이다. 본 귀날개 전개성능시험에서 필요로 하는 최대가속도 요구조건(35g)을 만족하고 있음을 알 수 있다.

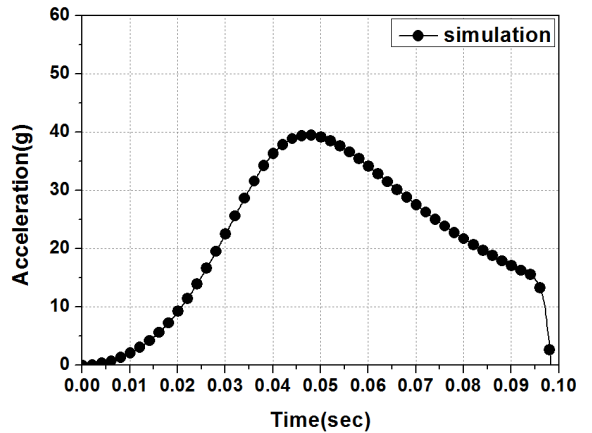


Fig. 13. Change of piston acceleration in nominal case

4. 설계변수에 따른 특성 분석

공압식 날개 전개시험장치는 압력탱크의 초기 압력, 오리피스 직경, 작동매체의 종류 등에 따라 작동 특성이 달라진다. 이들 설계변수가 공압식 날개 전개 성능 시험장치의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1 오리피스 직경

오리피스 직경은 고압용기로부터 시험장치로 공급되는 유량을 결정한다. Fig. 14는 오리피스 직경에 따른 피스톤의 가속도 변화를 나타낸 것이다. 오리피스 직경이 증가할수록 피스톤의 가속도는 증가한다. Table 1에서 보는 바와 같이 오리피스 직경이 6 mm에서 12 mm로 증가하면 피스톤의 최대 및 평균 가속도는 약 3배 증가한다.

Table 1. Comparison of piston acceleration according to orifice diameter

직경 (mm)	최대가속도 (g)	평균가속도 (g)	비고
6	16.2	8.1	압력: 180 psi 가스 종류: N ₂
8	28.3	15.2	
10	39.5	21.7	
12	48.5	26.6	
14	57.5	31.6	

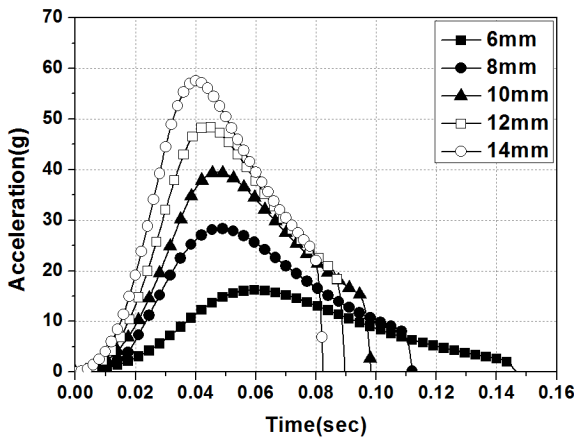


Fig. 14. Change of piston acceleration according to orifice diameter

4.2 압력탱크 압력

두 번째 설계변수는 압력탱크의 충전 압력이다. 해석을 통해 고압 조건에서 피스톤의 최대 및 평균 가속도를 예측하였다. Fig. 15는 압력탱크 압력(제어체적 1의 압력)에 따른 피스톤의 가속도 변화를 나타낸다. Table 2에서 보는 바와 같이 압력탱크의 초기압력을 400 psi로 충전하면 피스톤의 최대가속도 약 60 g를 구현할 수 있다.

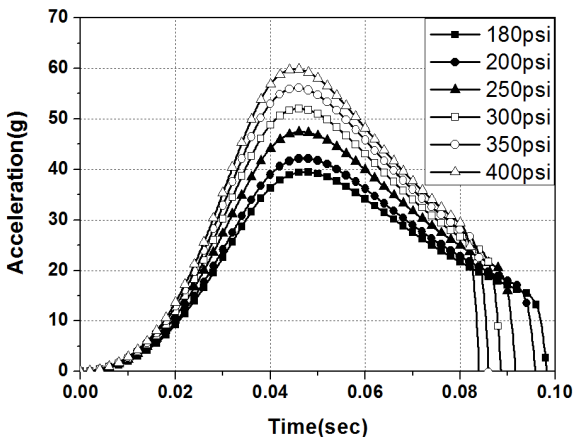


Fig. 15. Change of piston acceleration according to pressure in pressure tank

4.3 가스 종류

작동 기체의 특성에 따른 시험장치의 성능 변화를 분석하였다. 본 해석에서 고려한 가스는 질소(N₂)와

Table 2. Comparison of piston acceleration according to pressure in pressure tank

압력 (psi)	최대가속도 (g)	평균가속도 (g)	비고
180	39.5	21.7	오리피스 직경: 10 mm 가스 종류: N ₂
200	42.2	23.2	
250	47.4	26.1	
300	52.0	28.7	
350	56.1	30.9	
400	59.9	32.9	

Table 3. Properties of the gases for actuation

종류	비열비(γ)	기체상수(R) (J/kg·K)	밀도(ρ) (kg/m ³)
N ₂	1.40	297	1.17
He	1.67	2077	0.17

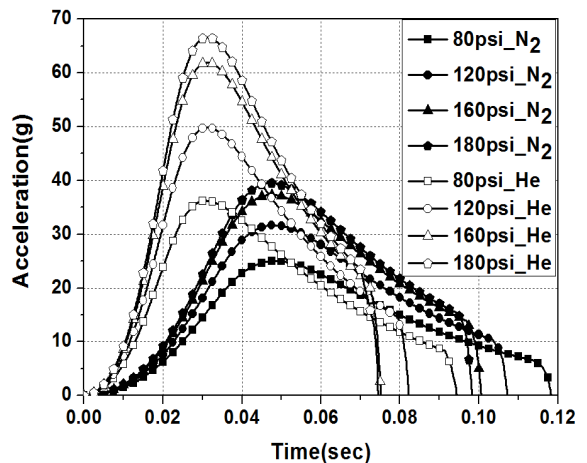


Fig. 16. Change of piston acceleration according to type of gas

헬륨(He)이며 주요 특성은 Table 3과 같다. 밀도 측면에서 헬륨은 질소의 1/7 수준이며 기체상수(R)와 비열비(γ) 등에서도 차이를 가진다. Fig. 16은 가스 종류에 따른 피스톤 가속도 변화를 나타낸 것이다. 질소 대신 헬륨 가스를 사용하였을 때 전반적으로 피스톤 가속

도가 증가한다. 가스 종류에 따른 피스톤 가속도 차이는 기체 상수 차이에 의한 것으로 식 (5)에서 기술한 바와 같이 기체상수가 커질수록 공압이 빠르게 전달된다. 동일한 압력조건에서 질소 및 헬륨 가스를 사용하여 얻을 수 있는 피스톤의 최대 및 평균 가속도는 Table 4와 같다. 헬륨 가스를 이용하면 고압용기의 초기압력을 80 psi 정도로만 유지하여도 35 g 이상의 가속도를 얻을 수 있지만 질소 가스는 2배 이상의 초기압력을 필요로 한다.

Table 4. Comparison of piston acceleration according to type of gas

압력 (psi)	가스 종류	최대 가속도 (g)	평균 가속도 (g)	비고
80	N ₂	24.8	12.3	오리피스 직경: 10 mm
	He	36.2	19.0	
120	N ₂	32.7	17.0	
	He	49.8	27.0	
160	N ₂	38.2	20.6	
	He	61.9	34	
180	N ₂	39.5	21.7	
	He	66.7	36.4	

본 4장에서는 시험장치 설계변수에 따른 성능 변화를 분석하였다. 오리피스 직경과 압력탱크 압력이 증가할수록 피스톤의 최대가속도가 증가하지만 필요 이상의 압력은 피스톤에 부하를 가져올 수 있다. 이 때문에 가속도 요구조건(35 g)을 만족시키는 범위에서 시험장치를 설계할 필요성이 있다. 작동 가스의 경우 헬륨 가스가 질소 가스 대비 상대적으로 높은 가속도를 구현할 수 있는 장점이 있으나 고가의 가격 때문에 반복적인 시험을 수행하기 위해서는 질소 가스를 사용하는 것이 유리하다고 판단된다.

5. 해석 및 시험 결과 비교

5장에서는 공압식 날개전개장치에 대한 성능시험 수행하여 수치 해석적 방법의 타당성을 확인하였다.

Fig. 17은 시험에 사용된 공압식 시험장치를 나타낸다. Fig. 3에서 기술한 바와 같이 슬레노이드 밸브가 열리면 압력탱크 내 고압의 가스가 실린더 내부로 유입된다. 고압가스에 의해 피스톤 앞쪽에 조립된 귀날개는 가이드를 따라 이동하면서 관성력에 의하여 전개된다. 압력게이지를 통해 압력탱크 내 압력을 측정하고 귀날개가 조립되는 치구의 전방에 가속도계를 부착하여 피스톤의 가속도를 측정하였다. 또한 피스톤 표면에 테플론 코팅 작업을 하여 작동 중에 마찰을 최소화시켰다.

시험 조건은 오리피스 직경이 10 mm이고 작동 매체는 질소이다. 고압용기의 충전 압력은 초기 40 psi를 기준으로 점진적으로 증가 시키면서 전개장치의 거동을 측정하였다.

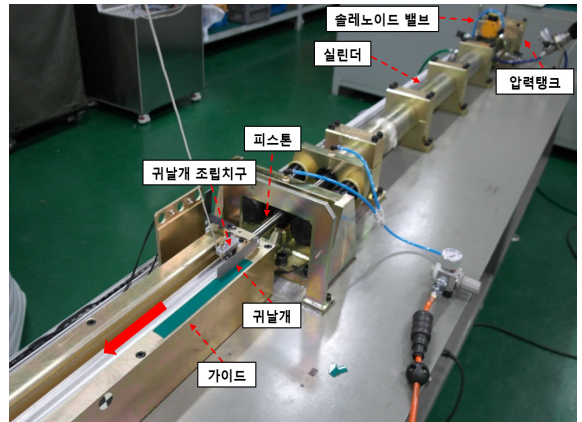


Fig. 17. pneumatic device

Fig. 18, 19는 각각 Fig 7에서 기술한 오리피스 개폐 면적 변화의 고려 여부에 따른 압력탱크의 압력 및 피스톤의 가속도를 비교한 것이다. 오리피스가 초기부터 완전히 열려 있다고 가정해 해석은 시험결과보다 빠르게 압력이 감소하였고 가속도도 훨씬 빠르게 증가하였다. 초기에 오리피스가 닫혀 있으며 시간이 경과함에 따라 식 (7)과 같이 개폐 면적이 점점 증가한다고 가정한 해석결과는 시험결과와 유사한 압력 및 가속도 거동을 나타내었다. 피스톤의 가속도는 피스톤 후방에 위치한 실린더의 부피(V_2)가 급격하게 증가하는 시점(0.045초)에서 최댓값을 나타냈고 피스톤이 가스배출구를 지나는 시점(0.095초) 이후에는 급격히 감소하였다.

Fig. 20은 압력 변화에 따른 피스톤의 가속도를 비교

한 것이며 각 압력 별 최대 및 평균 가속도를 정리하면 Table 5와 같다. 시험장치의 주요 성능 인자인 최대 가속도의 경우 해석결과는 오차율 4 % 이내에서 시험 결과와 일치하였다.

이상에서 보는 바와 같이 시험을 통하여 본 논문에서 사용한 수치 해석 모델이 비교적 정확하게 전개장치의 성능을 모사하고 있음을 확인하였다. 또한 최대 가속도 요구조건(35 g)을 만족하는 최적 설계 변수 조건은 오리피스 직경 10 mm, 작동 기체는 질소, 압력탱크의 압력은 160 psi인 것으로 확인되었다.

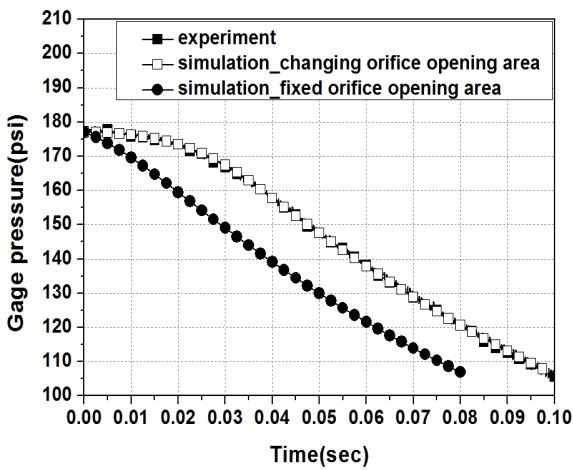


Fig. 18. Change of pressure in pressure tank according to orifice opening condition

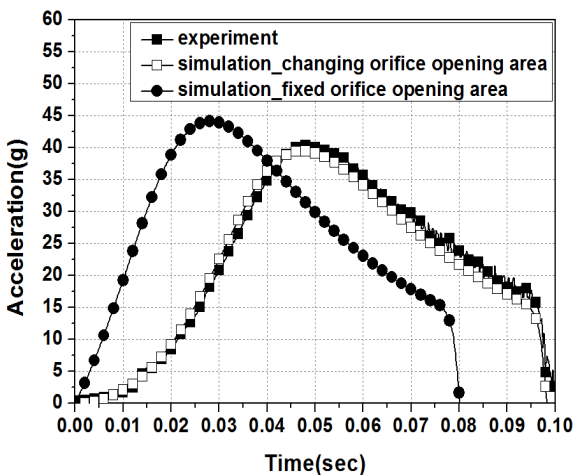


Fig. 19. Change of acceleration of piston according to orifice opening condition

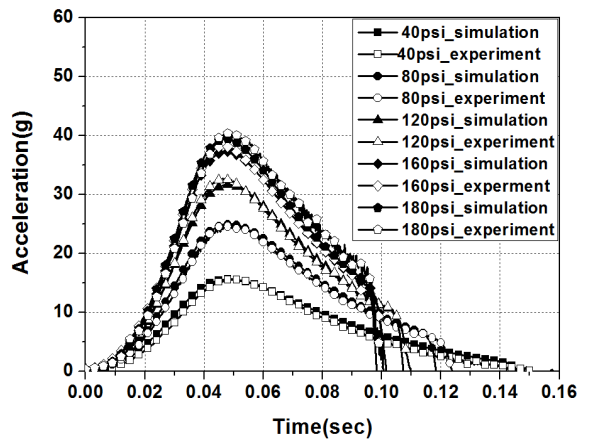


Fig. 20. Comparison of piston acceleration between simulation and experiment according to pressure

Table 5. Comparison of piston acceleration between simulation and experiment

압력 (psi)	종류	최대 가속도 (g)	오차율 (%)	평균 가속도 (g)
40	해석	15.7	0.0	7.4
	시험	15.7		6.5
80	해석	25.0	0.8	13.2
	시험	24.8		12.3
120	해석	31.7	3.1	17.1
	시험	32.7		17.0
160	해석	37.3	2.4	20.4
	시험	38.2		20.6
180	해석	39.5	2.2	21.7
	시험	40.4		21.9

6. 결론

공압식 시험장치의 공압 전달 과정, 오리피스 개폐 및 피스톤의 운동과정을 해석적으로 모사하였으며 주요 설계변수에 따른 시험장치의 성능 변화를 분석하였다.

오리피스 직경과 압력탱크의 초기압력이 증가함에 따라 피스톤의 가속도는 비례적으로 증가하였다. 상대적으로 낮은 밀도와 높은 기체상수를 가지는 헬륨(He)은 질소(N₂)보다 낮은 압력의 고압용기를 사용하여도 높은 가속도를 얻을 수 있었다.

동일 조건의 해석 및 시험 결과를 비교하여 본 연구에서 모사한 수치 해석적 방법의 정확도를 검증하였다. 다양한 압력 조건에서 해석결과는 오차율 4 % 이하의 수준에서 시험결과와 일치하였다.

본 연구에서 모사한 수치 해석적 방법은 유사한 공압식 기계장치의 기본설계에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] D. Lee, J. Kim, "The Spreading Performance Analysis and Test of Wings Deployed by the Inertia," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 1491-1492, 2014.
- [2] C. Kang, M. Won, "A Study on Characteristics of a Pneumatic Device for Deploying Fins," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 365-371, 2010.
- [3] B. W. Andersen, "The Analysis and Design of Pneumatic Systems," John Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 17-47, 2001.