

碩士學位論文

압력에 따른 물로켓 궤도분석



濟州大學校 教育大學院

物理教育專攻

崔元俊

2008年 8月

압력에 따른 물로켓 궤도분석

指導教授 姜 永 奉

崔 元 俊

이 論文을 教育學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 8月

崔元俊의 教育學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

김 동식



委 員

강 영봉



委 員

김 세현



濟州大學校 教育大學院

2008年 8月

A Study on the Trajectory of the Water Rocket by Pressure

Won-Jun Choi

(Supervised by professor Young-Bong Kang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Education

2008. 8.

This thesis has been examined and approved

KANG DONG SHIK

Kang Young Bong

KIM, SE-HUN

02.07.2009

Major in Physics Education
GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

[국문초록]

압력에 따른 물로켓 궤도분석

최 원 준

제주대학교 교육대학원 물리교육전공

지도교수 강영봉

본 연구는 물로켓 궤도분석에 관한 연구로서, 추진력은 노즐을 빠져나가는 물의 압력과 노즐 단면적을 곱한 값으로 정의했다. 내부압력은 PASCO사의 MBL 압력센서를 이용하여 측정하였다. 이 압력 데이터로부터 추진력을 수치적으로 계산하고 최고고도를 구하여 실험값과 비교하였다. 물 350 mL와 초기압력 200 ~ 350 kPa 조건에서 수치결과로부터 얻은 최고고도와 실험으로부터 얻은 최고고도는 3 % 이내에서 일치하였다. 이 조건에서 물로켓 발사실험을 중·고등학교 과학실험활동에 이용하면 좋은 과학교육 자료가 될 것이다.

차 례

[국문초록]	iii
I. 서론	1
II. 이론적 배경	3
1. 물로켓의 작동원리	3
2. 로켓의 구조 및 역할	4
3. 로켓에 사용된 물리법칙	6
4. 물로켓의 추진력에 관한 이론	7
1) 추진력과 속도 가속도	7
2) 로켓의 이차원 궤도에서 추진력과 속도 가속도	9
3) 물로켓 내부압력과 추진력에 의한 궤도방정식	11
III. 실험방법	13
1. 실험장치 구성	13
2. 실험 순서	14
IV. 실험결과 및 고찰	17
1. 실험결과	17
1) 물 350 mL에서 실험	17
2) 물 750 mL에서 실험	24
2. 고찰	25
V. 결론	28
참 고 문 헌	29
[Abstract]	32

I. 서론

로켓은 대포의 포탄과 다르게 자체 추진력을 가진 비행체로 최초 제작 국가는 화약을 발명한 중국으로 알려져 있다. 우리나라에서는 고려 말기 최무선의 화포, 조선시대 다연장로켓인 신기전과 같은 무기들이 로켓과 관련 있다. 최초의 근대 로켓에 관하여 1898년 치올코브스키의 논문이 발표된 후, 1926년 미국의 고더드의 로켓연구 그리고 1940년대 독일의 V2 로켓에 관한 연구를 거쳐, 1957년 소련이 세계 최초의 인공위성 “스푸트니크 1호”를 발사함으로써 현대적인 로켓이 출현하였다 [1-3]. 미국은 나사(National Aeronautics and Space Administration; NASA)의 1969년 아폴로 계획을 통해 인간을 달에 보냈으며 일본, 중국 등 여러 나라에서 로켓발사를 하고 있다. 최근 우리나라도 액체로켓에 관해 연구를 하고 있으며 [4-6], 전남 고흥에 우주센터를 건립하여 2008년에 자력으로 국산 우주발사체 KSLV(Korea Space Launch Vehicle) 1호 로켓을 발사할 예정이다 [7-9]. 이러한 환경에 기인하여 우주와 로켓에 대한 관심이 고조되고 있으며, 학교현장에서 과학체험 활동 소재로 로켓 발사실험이 활용되고 있다. 학생실험에 사용되는 로켓 종류는 추진제에 따라 소량의 화약을 이용한 모델로켓, 에탄올과 같은 가스 폭발력을 이용한 가스로켓, 물과 압축공기에 의한 물로켓 등이 있다. 특히 안전한 물로켓 발사실험은 초·중·고등학생과 일반인에게 널리 활용되고 있다. 로켓 발사실험은 물리교과에서 배우는 뉴턴 운동법칙과 같은 기본적인 역학운동을 설명하는 학습도구이다 [10, 11]. 따라서 세계적으로 과학에 흥미를 유발하는 좋은 소재이기 때문에 로켓발사에 대한 교재 개발과 교육에 응용할 수 있는 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 우리나라도 여러 인터넷 사이트를 중심으로 초·중·고등학생들의 많은 관심 분야로 자리 잡고 있다 [12].

외국의 물로켓에 관한 연구는 주로 분사되는 액체의 분출속도를 이용하여 추진력을 구하는 방식으로 로켓의 궤도운동을 분석하고 있다. 국내에서는 로켓의 간단한 원리를 바탕으로 전람회에 출품된 자료는 있지만 로켓의 분출속도를 이용하여 로켓의 궤도운동을 자세히 분석하는 연구는 거의 없는 실정이다 [13-20].

또한 물로켓의 내부 압력변화와 관련지어 로켓의 궤도를 분석하는 연구는 아직 미흡한 실정이다. 한편 최근 많이 연구되고 있는 컴퓨터 기반실험(Micro-computer Based Laboratory; MBL) 교육은 학생들로 하여금 오차해석, 그래프 분석, 통계적 적용, 변인통제 등의 과학적 학습 및 기술적 활용 방법을 배우는 도구로 활용되고 있다 [21-24].

본 연구의 목적은 MBL의 압력센서를 통해서 물로켓의 압력을 측정된 후 추진력을 수치적으로 계산하여 구한 최고고도 값을 실험으로부터 얻은 최고고도 값과 비교하는 것이다 [25, 26]. 또한 내부압력, 추진력, 비행고도 사이의 최적인 조건을 도출하여 중·고등학교 과학실험활동의 과학교육 자료로 물로켓 발사실험을 이용할 수 있는 방안을 제시하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 로켓비행원리, 추진력, 비행고도 사이의 관계를 이론적으로 고찰하였다. III장에서는 물로켓 발사실험 장치를 제작하여 압력과 최고고도를 측정하는 실험방법을 설명한다. IV장에서는 MBL 압력센서를 이용하여 압력을 측정하여 추진력과 최고고도를 수치적으로 구하고 실험으로부터 얻은 최고고도와 비교·고찰하였다. V장에서는 결론을 맺는다.

II. 이론적 배경

1. 물로켓의 작동원리

물로켓이 발사될 때 총 비행구간을 I, II, III, IV인 4구역으로 나눌 수 있다. 그림 II-1에서는 추진력이 발생하는 구간에 대해 시간에 따른 추진력의 변화를 예시하였다 [27-29]. I 구간은 액체가 분사되는 구간으로 순간적으로 중력가속도의 거의 150배나 가속된다. 또한 시간은 대체로 10-50 ms 이내가 된다. 이 범위 동안 전형적으로 액체분사에 의해 질량이 크게 감소하며 추진력은 선형적으로 감소한다. 액체가 모두 빠져나갔을 때 최고 가속도를 갖는다. 이때 순간 추진력에 관한 그래프 모양은 위로오목에서 아래로오목으로 변한다. II 구간에서는 아직 내부에 있는 공기가 빠져나오면서 최고 속도를 이루는 구간이며 공기 저항력에 의하여 가속도가 0에 가까워지는 구간이다. 앞의 I 구간에 비해서 추진력은 지수함수적으로 급격히 감소한다.

그림 II-1에서는 볼 수 없으나 II 구간 후인 III 구간에는 로켓이 계속 비행하여 감속하여 최고점인 최고고도에 이르게 된다. 이 구간에서는 저항력과 중력에 의해 감속된다.

IV 구간에서는 오직 중력과 공기저항 저항력에 의해 비행(활공)하는 구간이다. 이 구간은 지상으로 낙하 하는 구간이며, 이때 저항력이 속도에 반대로 작용하므로 처음의 방향과 반대이므로 종단속도에 이르게 되면 일정한 속도로 낙하하게 된다. 한편 다른 논문에서는 직접 추진력과 관련지어 실험을 실시하였는데 결과는 이와 같은 이론과 좀 다르게 모양이 비교적 전체적으로 선형 곡선을 나타내고 있음을 볼 수 있으며 I, II 구간이 명확히 구분되기 힘든 것을 보여 주고 있다 [30]. 이 외에도 여러 논문에서는 노이즈에 의한 효과를 무시한다면 전체적으로 선형과 비슷한 곡선 형태로 추진력이 감소함을 보여 주고 있으며, 총 추진력 변화시간은 액체에 의한 추진력 변화 뿐 아니라 II 구간에서 즉, 기체에 의해서도 짧지만 비교적 비선형 곡선을 그리며 추진력이 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다.

따라서 로켓 내부 압력변화 데이터를 이용하여 분출되는 물질(공기, 액체)의 압력과 노즐의 단면적을 곱하면 추진력이 된다 [31-33].

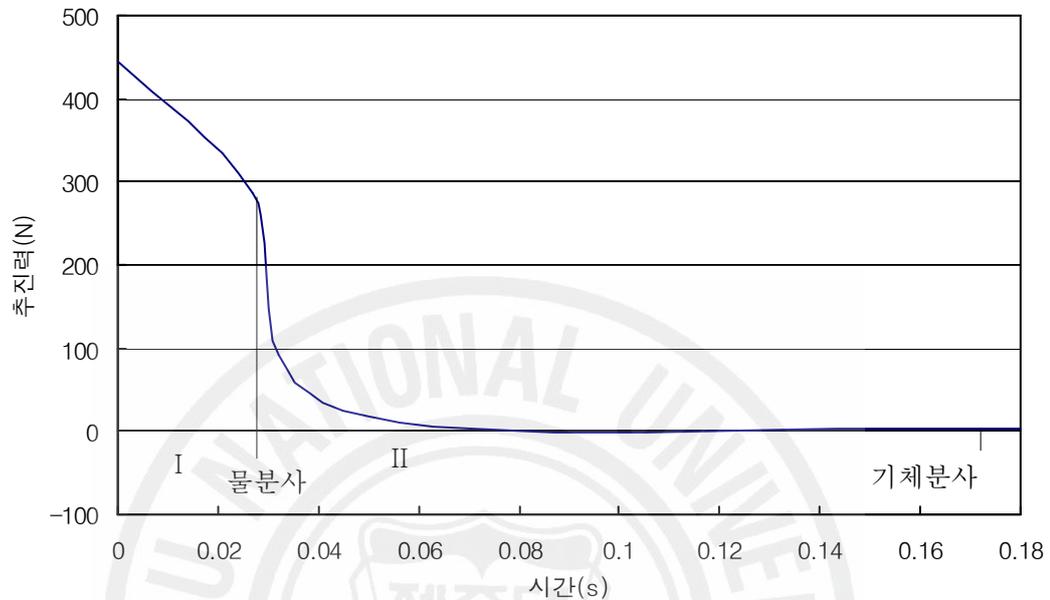


그림 II-3. 물로켓의 시간과 추진력

2. 로켓의 구조 및 역할

로켓은 크게 로켓 몸체, 추진제, 연소실, 노즐로 이루어져 있으며 로켓의 종류는 추진제 종류에 따라 다시 나뉜다. 크게 고체로켓 액체로켓으로 나뉘며 액체로켓 중 본 연구에서는 압축된 물이 추진제 역할을 하는 물로켓을 연구대상으로 선정하였다. 또한 물로켓은 일반로켓처럼 연소에 의해서 추진력을 얻는 것이 아니라 압축공기가 밀어내는 내부 물과 기체의 작용으로 추진력을 얻는 것이 물로켓의 특징이다 [34].

물로켓과 비슷한 교구용으로 사용되는 모델로켓의 일반적인 1단 로켓 구조는 그림 II-2처럼 노즈콘 또는 탄두(nose cone), 로켓동체, 엔진 마운트, 로켓모터로(로켓엔진 또는 연소실) 이루어져 있다. 노즈콘은 로켓진행 중 공기역학적인 저

항력을 줄여주는 역할을 하며 보통 원추형으로 뾰족하고 로켓동체는 낙하산과 같은 회수시스템 및 로켓엔진 등 필요에 따라 다양한 장비가 들어가는 곳이다. 엔진마운트는 로켓모터(엔진)와 동체를 연결하는 부분이며 이 로켓모터 외부 부위에는 날개 그리고 끝부분에는 노즐이 위치하고 있어, 이 노즐을 통해서 입자를 분사함으로써 추진력을 얻도록 구성되어 있다. 한편 물로켓인 경우 로켓엔진 역할을 하는 곳에 압축공기와 물이 채워져 있으며 다른 점은 모두 모델로켓과 동일하다.

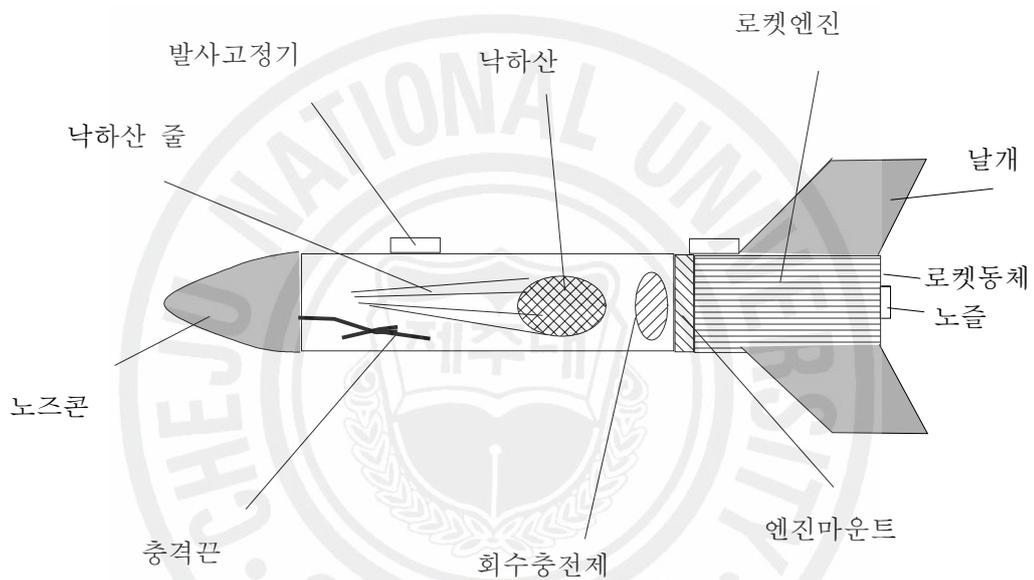


그림 II-4. 로켓의 구조

그리고 물로켓과 발사를 위한 모듈의 일반적인 전체 구조는 그림 II-3에서처럼 물로켓(보통 빈 페티병으로 이루어짐)과 발사대 압축공기를 불어넣는 컴프레서(압축기)로 이루어져 있으며 로켓본체는 내부인 연소실(엔진)역할을 하는 곳에 물과 압축공기를 채워 넣어 실험할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 발사대는 필요에 따라 발사 각도를 달리할 수 있는 지지대와 발사버튼이 달려 있는 연결줄 등으로 구성되어 있다.

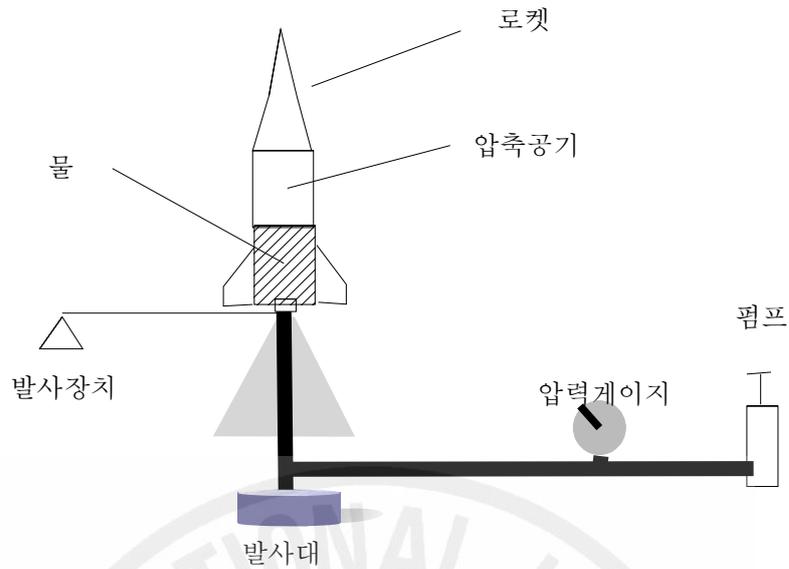


그림 II-5. 물로켓 및 발사를 위한 모듈 구성도

3. 로켓에 사용된 물리법칙

모든 로켓은 물리에서 운동에 관한 기본법칙 중 하나인 뉴턴 운동에 관한 제2 법칙을 통해 추진력인 힘과 운동에 관한 연관성을 이해할 수 있다. 운동을 일으키는 추진력의 발생 기본원리는 제3법칙인 작용-반작용의 법칙에 근거하고 있다. 이 뉴턴의 작용-반작용의 법칙에 의하면 로켓에서 추진력을 만들어 주는 분사용 물질의 미는 힘이 다시금 로켓에 가해져 작용과 반작용의 힘으로서 역할을 하여 로켓이 진행할 수 있게 되는 원리이다. 따라서 물로켓인 경우 주로 액체(물)의 후방 분사에 의해 추진력을 얻는다. 이것은 내부에서 압축된 공기와 물이 연소실의 역할을 하여 이 물이 로켓 본체 뒷면을 향해 노즐을 빠져나갈 때 생기는 추진력을 통해 앞으로 진행하게 되며 이때 용기 입장에서는 노즐 뒤로 물이 내부 압력만큼 밖으로 압력을 밀어내는 역할을 하므로, 유체역학의 기본정리인 베르누이 정리를 이용하여 유체 압력을 계산할 수 있다면 이를 통해 용기에서 빠져나가는 유체의 분출 속도를 계산할 수 있다 [35].

한편 직접 로켓 내부압력을 측정할 수 있다면 로켓의 후방으로 밀어내는 힘을 알 수 있으며 이를 앞에서 언급한 뉴턴의 작용-반작용 법칙을 적용하여 추진력

을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 추진력을 이용하여 로켓궤도에 관한 식들에 적용하면 최고고도를 계산할 수 있다.

4. 물로켓의 추진력에 관한 이론

1) 추진력과 속도 가속도

추진제와 추진력에 대한 이론은 그림 II-4에서 보듯이 추진력과 로켓의 무게, 공기역학적 저항력으로 세분하여 힘을 나눌 수 있으며 추진력은 로켓의 진행방향으로 미는 역할을 하며 로켓의 무게는 추진력의 반대방향으로 운동을 방해하는 역할을 한다 [36]. 또한 물로켓 또는 모델로켓은 모두 추진제(엔진모터 또는 물)가 로켓 하단부에 집중되어 있으며 이로 인해 무게 중심이 하단부에 위치한다고 볼 수 있으며, 로켓이 비행할 때도 연소하거나 내뿜는 액체로 인해서 특히 상승할 때는 비슷하게 하단부에 무게 중심이 있다고 가정할 수 있다.

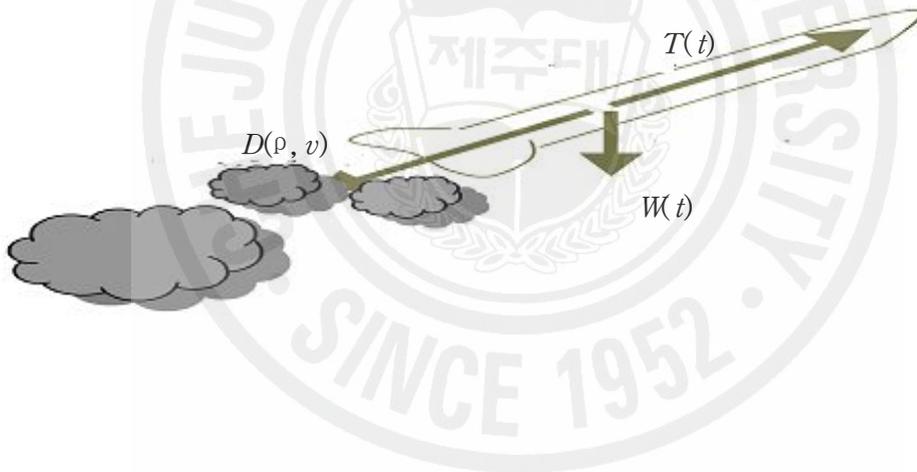


그림 II-6. 로켓이 진행하는 동안 작용 받는 힘들. T(추진력,Thrust). W(로켓의 무게). D(공기역학적 저항력, Aerodynamic drag)

한편 로켓무게는 중력의 방향으로 지구중심방향이며 공기역학에 의한 저항력은 크기가 속도에 비례하며 추진력에 대해 반대방향을 향한다. 그림 II-5은 일반적인 로켓(모델로켓)이 진행하는 동안 작용 받는 추진력의 예이다.

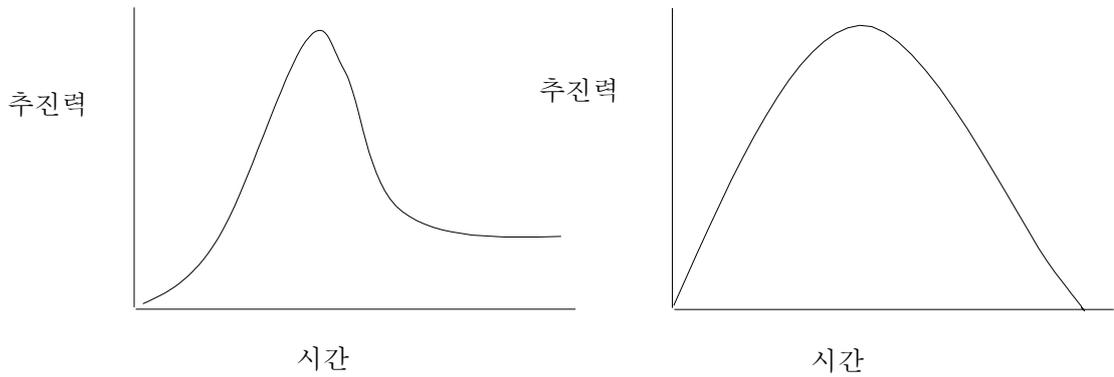


그림 II-7. 일반적인 모형로켓의 추진력곡선

시간 τ 는 추진제가 연소실 내부에서 연소 또는 액체분사 되면서 추진력을 발생하는 총 시간이다. 여기서 충격량 J_T 는 추진력 T 의 시간적분

$$J_T = \int_0^{\tau} T dt \quad (1)$$

으로 주어진다. 로켓 무게는 W 이고, 중력가속도 g 는 고도 1 km 정도 올라갈 때 0.03 % 줄어든다. 따라서 고도에 따른 중력가속도 변화는 무시해도 된다.

연료의 질량은 전체 로켓의 질량의 10 % 혹은 그 이상이므로 시간에 종속적이다. v_g 는 분출 가스(입자) 속도, m_f 는 연료량 또는 연소실의 질량이며 추진력 T 는

$$T = -v_g \frac{dm_f}{dt} \quad (2)$$

이다. 시간 $t + \Delta t$ 에서 총질량 m 은

$$m(t + \Delta t) \cong m(t) - \frac{m_f T(t) \Delta t}{J_T} \quad (3)$$

이다. 만약 다단계 로켓의 경우는 단이 떨어질 때 질량 시간은 더 이상 지속적인 함수가 아님을 고려해야 한다. 로켓에서 공기역학의 저항력 $D(\rho, v)$ 에 관한 식은

$$D(\rho, v) = \frac{\rho C_D A v^2}{2} \quad (4)$$

이다. 여기서 v 는 로켓의 순간속도, C_D 는 저항력계수, ρ 는 공기밀도, A 는 로켓

단면적이다. 공기 밀도는 해발 1 km 고도에서 약 12 % 감소된다. 따라서 만약 고도에서 공기온도의 변화를 무시하면 공기밀도 $\rho(t)$ 의 변화는 고도에 따라 다음과 같이

$$\rho(t) = \rho(0)e^{-\frac{\rho(0)gy}{p(0)}} \quad (5)$$

주어진다. 여기서 $\rho(0), p(0)$ 는 지상에서의 공기밀도와 초기 대기압력이다.

저항력계수 C_D 는 로켓의 공기역학적 효율로 Gregorek가 계산한 방법을 따라 로켓의 저항력계수 값을 추정할 수 있다 [36]. 즉, 대부분 C_D 값은 0.4에서 0.6 값을 나타내므로 본 실험에서는 평균적으로 C_D 값을 0.5로 대입하였다.

수직으로 발사되는 로켓의 모든 힘은 서로 평행하다. 따라서 로켓의 가속도는

$$a(t) = \frac{(T(t) \pm D(\rho, v) - m(t)g)}{m(t)} \quad (6)$$

이다. D 값은 상승하는 동안은 지면에 대해 -이며 하강하는 동안은 +이다. 일반적인 수학적계산은 시간간격이 충분히 작고, 가속도 또한 효과적으로 일정해야 한다. 작은 시간간격 Δt 동안 로켓의 속력 v 와 고도 y 사이의 관계식은

$$v(t + \Delta t) \cong v(t) + a(t)\Delta t \quad (7)$$

와

$$y(t + \Delta t) \cong y(t) + v(t)\Delta t \quad (8)$$

이다.

식 (4) · (6) · (7)을 식 (8)에 적용하면 고도 $y(t)$ 에 관한 식

$$y(t + \Delta t) \cong y(t) + [v(t) + \left\{ \frac{(T(t) \pm D(\rho, v) - m(t)g)}{m(t)} \right\} \Delta t] \Delta t \quad (9)$$

를 얻을 수 있다. 따라서 식 (9)에 초기조건 $t=0, a(0)=0, v(0)=0, y(0)=0$ 을 대입하고 계산하면 Δt 시간간격의 변화에 따라 비행고도를 수치적으로 예측할 수 있다.

2) 로켓의 이차원 궤도에서 추진력과 속도 가속도

이차원 궤도의 경우, 계산은 수직 발사된 궤도계산과 완전히 평행한 궤도를 그

리며 벡터 표현할 수 있다. 첫째는 그림 II-4에서 3가지 힘의 합 벡터를 찾아야 한다. 그래서 순간가속도 벡터 $\vec{a}(t)$ 에 관한 식

$$\vec{a}(t) = \frac{(\vec{T}(t) + \vec{D}(\rho, v) + m(t)\vec{g})}{m(t)} \quad (10)$$

을 얻을 수 있다. 이 식에서 각 지상 관측자를 기준으로 하는 2차원 직각좌표계에 의한 성분으로 나눌 수 있으며 각각의 가속도 성분 식은

$$a_x(t) = a(t) \cos(\theta(t)) \quad (11)$$

와

$$a_y(t) = a(t) \sin(\theta(t)) \quad (12)$$

이다. 여기서 $\theta(t)$ 는 순간 가속도의 방향각이다.

속도벡터의 성분 방정식은 시작 시간 t 와 Δt 시간간격 사이에 다음과 같은 방정식

$$v_x(t + \Delta t) \cong v_x(t) + a_x(t)\Delta t \quad (13)$$

와

$$v_y(t + \Delta t) \cong v_y(t) + a_y(t)\Delta t \quad (14)$$

로 나타낼 수 있으며, 속도벡터 $\vec{v}(t)$ 의 크기는

$$v(t) = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} \quad (15)$$

이고, 방향은

$$\theta_v(t) = \arctan\left(\frac{v_y(t)}{v_x(t)}\right) \quad (16)$$

이다. 따라서 시간에 따른 이차원 궤도에서의 각 성분은

$$x(t + \Delta t) \cong x(t) + v_x(t)\Delta t \quad (17)$$

와

$$y(t + \Delta t) \cong y(t) + v_y(t)\Delta t \quad (18)$$

이다. 이때 발사대에 의해 처음에 설정한 발사 각도를 θ_0 로 하여 식 (10)에 대입하면 여기서 비행궤도를 계산할 때 가속도에 대한 식은

$$a(t) = \frac{(T(t) - D(\rho, v) - m(t)g \sin \theta_0)}{m(t)} \quad (19)$$

를 얻을 수 있다.

주의할 점은 로켓이 약 1 m의 얇은 금속 발사대를 따라 미끄러져가며 안정되어야 한다. 발사대인 막대에 로켓이 초기에 지지되어 있지 않으면 느린 속도로 로켓은 발사대를 벗어나다가 갑자기 로켓 머리 부분의 방향이 회전하여 탄두가 지상에 부딪쳐 떨어져 나가거나 아니면 로켓 본체 또는 날개가 떨어져 나갈 수 있다. 이러한 이유로 원하는 방향으로 로켓을 발사할 수가 없기 때문에 초기 발사 장치와 로켓의 설정에 주의하여야 한다.

3) 물로켓 내부압력과 추진력에 의한 궤도방정식

액체로켓의 한 종류로 볼 수 있는 물로켓은 발사체 내부 압력에 의해 노즐을 빠져 나가는 액체의 속도를 베르누이방정식으로 구할 수 있으나 [37] 여기서는 로켓 내부에 있는 액체와 공기가 노즐 바깥으로 내뿜어지는 압력을 직접 측정하

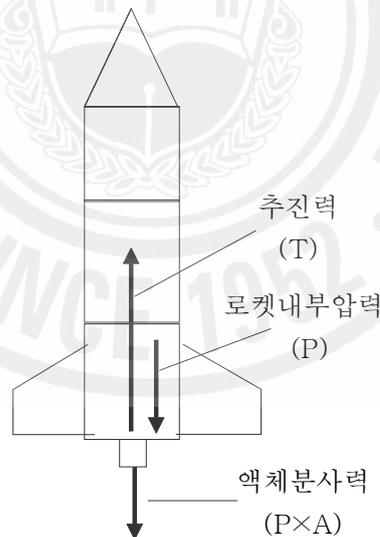


그림 II-6. 내부압력과 추진력

여 이 변화를 통해 추진력을 추정하는 방법을 활용하였다. 즉, 그림 II-6에서 보듯이 로켓을 밀어내는 액체의 분사압력에 의한 추진력이 빠져나가는 액체에 의해 가해지는 힘과 같으므로 추진력 T 와 액체 분사력은 서로 작용과 반작용력으

로서 크기가 서로 같다. 따라서 시간에 따른 내부압력 변화 $P(t)$, 노즐의 반경을 r 이라 하면 노즐의 단면적 $A = \pi r^2$ 이 되고 추진력은

$$T(t) = P(t)A = P(t)\pi r^2 \quad (20)$$

이다. 여기서 시간에 따른 압력변화에 관한 식 $P(t)$ 를 식 (20)와 식 (9)에 대입하여 시간에 따른 궤도변화에 관한 식

$$y(t + \Delta t) \cong y(t) + [v(t) + \left\{ \frac{(P(t)\pi r^2 \pm D(\rho, v) - m(t)g)}{m(t)} \right\} \Delta t] \Delta t \quad (21)$$

을 구할 수 있다.



Ⅲ. 실험방법

1. 실험장치 구성

그림 III-1과 같이 실험실 실내에 1단 물로켓(한국교재사의 모델 M-26000)을 준비하여 스탠드를 이용 움직이지 않도록 고정하고, 상단부에 직경 6 mm 구멍을 뚫어 직경 6 mm 에 길이 5 m 호스의 끝부분을 약 5 cm 로켓에 주입 후 주위에 공기가 새지 않도록 글루건으로 밀봉했다. 외부로 나온 호스는 직경 6 mm의 압력센서 입력부위와 연결하고 다시 압력센서는 인터페이스와 연결되며 인터페이스는 최종적으로 컴퓨터에 연결 되도록 한다. 여기서 압력센서와 호수가 분리되지 않도록 역시 연결부위를 글루건으로 접착시킨다. 이때 사용된 MBL 장비는 PASCO사의 제품으로 그 구성은 압력센서(모델 ci-6532a, 측정가능 범위는 0-700 kPa)와 입력인터페이스(모델 7500 interface)를 이용하여 컴퓨터의 USB포트에 연결 데이터를 저장 분석하도록 구성되었다. 그리고 로켓 하단 노즐은 공기 주입

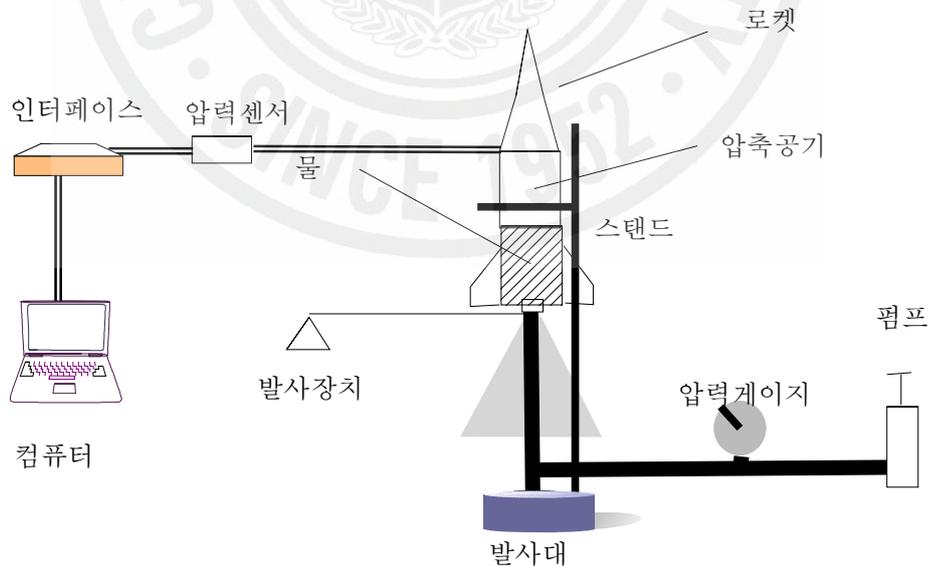


그림 III-1. 압력센서를 연결한 물로켓 실험장치

기(컴프레서, 24V)와 연결하여 압축공기를 불어 넣어 내부 압력을 높일 수 있도록 했다. 로켓노즐의 직경은 10 mm 이었다.

한편 최고고도를 실험하기 위하여 야외에서 그림 III-2에서처럼 로켓 본체 하단 노즐 주위에 낚싯줄을 매달고 발사대를 수직으로 하고 실험했다.

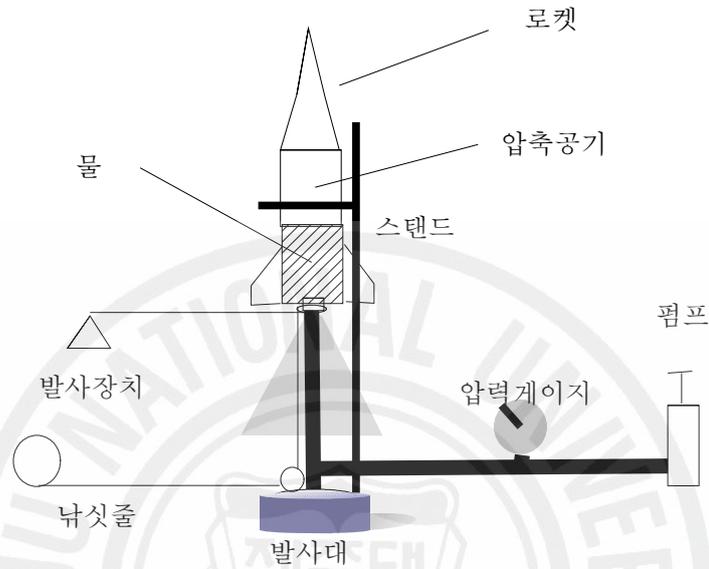


그림 III-2. 실을 연결한 물 로켓 실험장치

2. 실험 순서

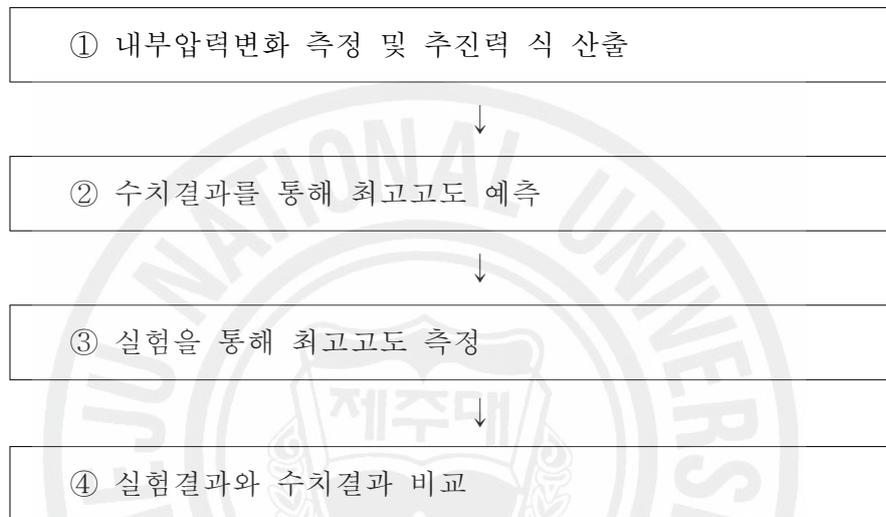
실험순서는 표 III-1처럼 진행되었으며 각 단계에 대한 구체적인 설명은 다음과 같다.

① 내부압력변화 측정 및 추진력 식 산출

그림 III-1과 같이 내부압력 변화 측정시 로켓의 길이는 0.51 m, 날개의 개수는 4개, 반경은 0.04 m, 노즐의 반경은 5 mm 이고 물이 채워지지 않은 빈 로켓의 총무게는 245 g 이었으며 실험은 동일조건에서 이루어지도록 같은 로켓을 이용 반복 실험하였으며, 첫 실험은 주입된 물의 무게를 일정하게 한 후 초기 압력을 변화시키며 압력변화를 측정하였다. 두 번째 실험은 초기 압력을 일정하게 하고 물의 무게를 변화시키며 압력변화를 측정한다. 물로켓 내부압력은 컴프레서의 압력게이지를 보면서 컴프레서를 구동시켜서 원하는 압력을 얻었으며, 압축공기

를 주입하여 필요한 압력에 이르면 컴프레서를 끄고 컴퓨터에서 MBL 실험기구인 PASCO사의 장비 구동 프로그램 Data Studio를 실행시켜 start 아이콘을 눌러 압력변화를 받을 준비를 하고 발사 버튼을 눌러 노즐을 분리시켜 센서를 통해 실시간으로 압력변화를 측정 인터페이스를 통해 컴퓨터에 기록되도록 하였다. 실험을 마치면 stop 아이콘을 눌러 실험을 끝내고 같은 조건에서 반복실험을 실시한다.

표 III-1. 실험진행 순서



시간에 따른 압력변화에 대한 이 데이터들을 각 실험 조건에 따라 분류하여 엑셀로 옮겨 압력변화 시작점과 끝점을 선택하여 복사하고 엑셀프로그램에서 지원하는 메뉴를 이용하여, 각 초기조건의 압력을 y절편이 되게 설정한다. 그리고 2차곡선(2차식)에 의한 근사곡선으로 추세선을 그래프와 식으로 나타낸다. 여기서 얻은 추세선식을 시간에 따른 압력에 대한 식 $P(t)$ 로 한다. 또한 이 압력 값은 대기압력 100 kPa을 0으로 환산한다. 이렇게 해서 얻은 시간에 따른 압력에 대한 식 $P(t)$ 에 노즐의 단위면적 A 를 곱하여 식 (19)와 같은 시간에 따른 추진력 변화에 대한 식 $T(t)$ 를 얻는다.

② 수치결과를 통해 최고고도 예측

앞에서 행한 추진력 식 $T(t)$ 를 이용 추진력 지속시간과 함께 식 (21)에 대입하고, 초기조건은 $t=0$ 에서 고도를 0으로 하며, dt 시간간격을 0.03초로 할 때 시간에 따른 고도를 엑셀시트에서 계산 및 표시해본다. 이 결과를 토대로 최고고

도를 예측해본다. 주의할 점은 추진력 지속시간 동안 추진력이 발생할 것이므로 추진력 지속시간 이후로는 추진력을 0으로 한다 [38].

③ 실험을 통해 최고고도 측정

그림 III-2와 같이 실험을 통한 최고고도를 측정하기 위한 야외실험에서는 비교적 바람이 약한 날을 택하여 바람의 영향을 최대한 줄였다. 노즐주위에 낚싯줄을 묶고 물은 비커를 이용 150 mL ~ 900 mL에 걸쳐 다양하게 준비하여 로켓의 노즐 마개를 열어 물이 밖으로 흐르지 않게 주입하고 컴프레서와 노즐의 연결 시 물이 외부로 흘러내리지 않게 고정한다. 그리고 압력 게이지를 보면서 컴프레서를 구동시켜 압축공기를 주입하여 필요한 압력에 이르면 공기 주입기 또는 컴프레서를 끄고 로켓의 탄두를 수직으로 하여 발사대에 놓고 발사대를 고정 한 후 발사 준비를 마치고 발사버튼을 눌러 발사한다.

최고고도에 이를 때 풀려나간 실의 길이를 기록하여 지면으로부터 최고로 올라간 최고고도를 기록한다. 이때 수직으로 발사된 로켓이 최고고도에 이르는 시점에서 올바르게 풀려나간 실의 길이를 측정하여야 하며 로켓이 곡선을 그리거나 기울어지게 진행하여 오차가 생기지 않도록 주의하여 실험한다.

④ 실험결과와 수치결과 비교

수치적으로 예측된 최고고도와 실험에 의한 최고고도를 서로 비교하여 오차를 구하고 고찰한다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 실험결과

1) 물 350 mL에서 실험

물은 350 mL로 하였으며, 초기 내부압력을 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 350 kPa, 400 kPa로 변화를 주며 실험하였다. 그 외의 나머지 로켓에 대한 환경과 실험조건은 동일하게 유지 하였다. 각각의 조건은 로켓반경 0.04 m, 날개는 로켓 하단부에 개수 4개, 노즐 반경은 0.005 m, 물로켓 총무게 0.599 kg[0.249 kg(빈 로켓무게) + 0.350 kg(물의무게)], 발사각도는 수직으로 하여 스탠드에 고정하여 움직이지 않도록 하여 실험을 하였다.

압력센서 모듈의 데이터 수집 조건은 10000 Hz로 하였다. 단, 여기서 모든 압력은 대기압 100 kPa을 0로 환산한 값이다.

그림 IV-1의 굵은 선은 시간에 따른 압력변화 값으로 압력변화를 시간의 변화에 따라 나타낸 것으로 초기 압력이 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 350 kPa 일 때 측정된 값이다. 또한 각각의 굵은 선과 함께 보이는 가는 실선은 시간에 따른 압력변화 식으로 최소제곱법으로 구한 근사식의 추세선이다. 이 추세선 식의 값을 살펴보면, 초기압력이 100 kPa인 경우 시간에 따른 압력변화를 추정하여 2차식에 의한 근사식

$$P(t)_{100kPa} = -1.7807t^2 - 113.94t + 100 \text{ kPa} \quad (22)$$

를 얻었다. 이 시간에 따른 압력변화 식을 이론 식 (19)에 대입하면 추진력은

$$T(t)_{100kPa} = P(t) \times A = (-1.7807t^2 - 113.94t + 100) \times \pi \times 0.005^2 \text{ N} \quad (23)$$

이었다. 이때 그래프를 통해 얻은 압력에 의한 추진력 지속시간은 $T_{100kPa} = 0.76$ s로 측정되었다. 초기 압력이 200 kPa, 300 kPa, 350 kPa인 경우 시간에 따른 압력변화 식 $P(t)$ 를 다음과 같이 얻었다.

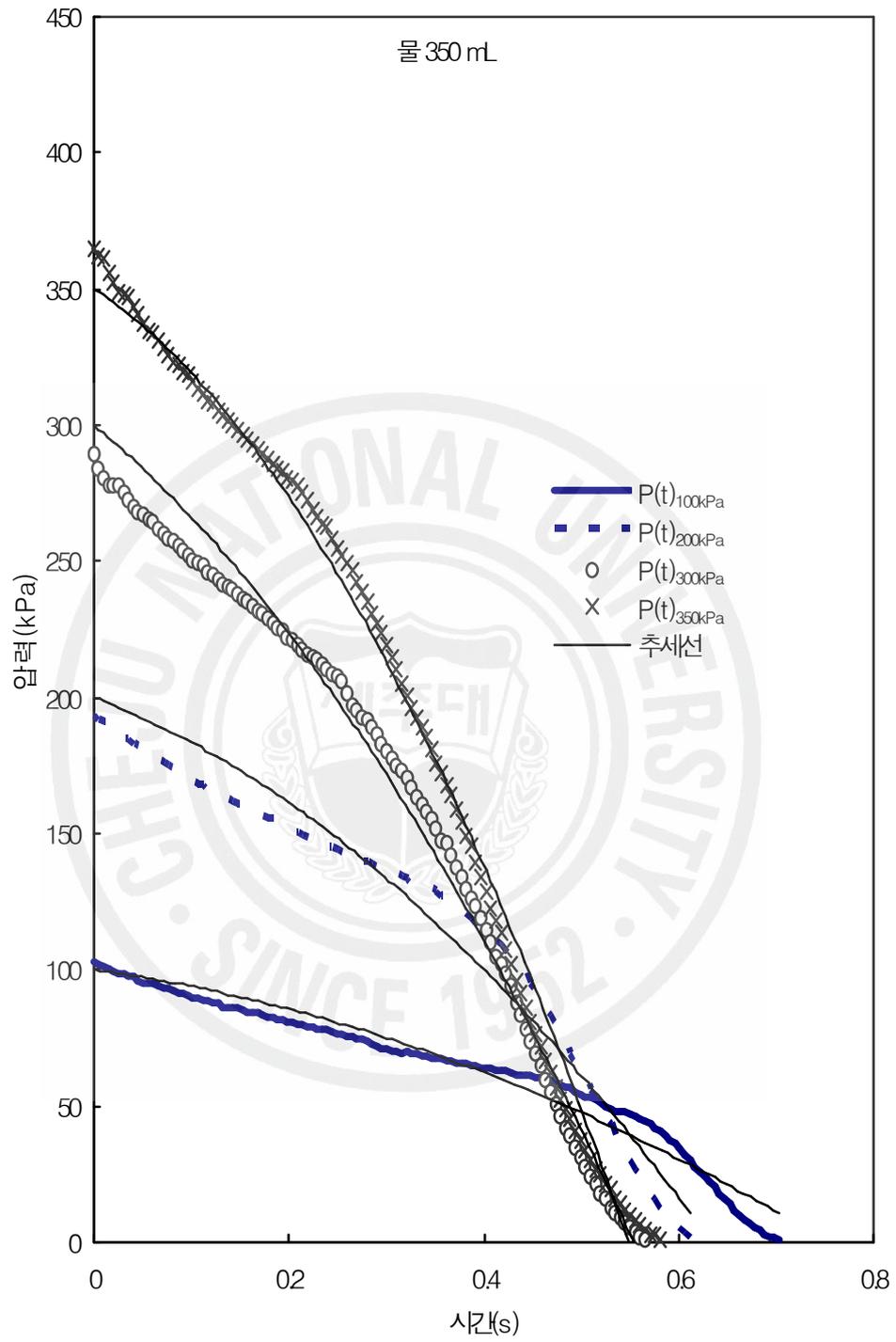


그림 IV-1. 물 350 mL, 초기압력 100 kPa ~ 250 kPa 일 때 압력변화

$$P(t)_{200kPa} = -269.84t^2 - 141.24t + 200 \text{ kPa}, \quad (24a)$$

$$P(t)_{300kPa} = -454.63t^2 - 291.16t + 300 \text{ kPa}, \quad (24b)$$

$$P(t)_{350kPa} = -840.2t^2 - 199.73t + 350 \text{ kPa} \quad (24c)$$

추진력 $T(t)$ 는 압력변화 식 (24)에 노즐 단면적을 곱한 값으로 다음과 같이

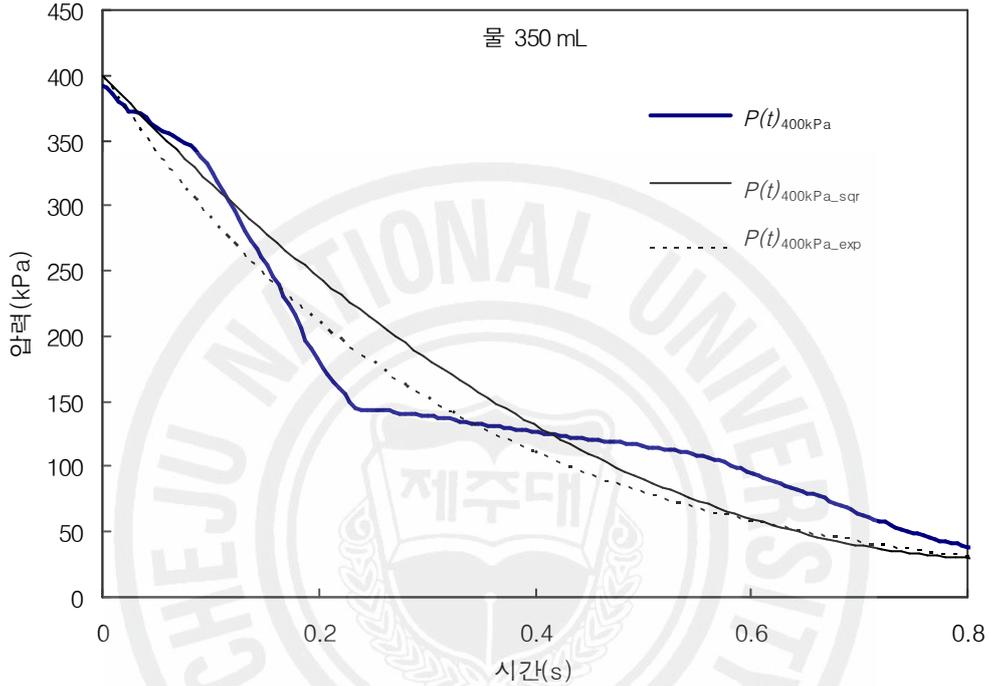


그림 IV-2. 물 350 mL, 초기압력 400 kPa 일 때 압력변화

$$T(t)_{200kPa} = P(t) \times A = (-269.84t^2 - 141.24t + 200) \times \pi \times 0.005^2 \text{ N}, \quad (25a)$$

$$T(t)_{300kPa} = P(t) \times A = (-454.63t^2 - 291.16t + 300) \times \pi \times 0.005^2 \text{ N}, \quad (25b)$$

$$T(t)_{350kPa} = P(t) \times A = (-840.2t^2 - 199.73t + 350) \times \pi \times 0.005^2 \text{ N} \quad (25c)$$

로 주어진다. 또한 초기압력에 따른 그래프 IV-1에서 추진력 지속시간은

$T_{200kPa} = 0.61 \text{ s}$, $T_{300kPa} = 0.57 \text{ s}$, $T_{350kPa} = 0.58 \text{ s}$ 이었다. 한편 초기 내부압력이 400 kPa인 경우 압력변화와 그에 따른 추세선은 두가지 경우로 그림 IV-2에 나타내었다. 그림 IV-2의 굵은 실선은 물 350 mL 초기압력 400 kPa에서

압력변화를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 2차식에 의해 산출된 식들은 첨자 sqr 을 붙이고 지수함수 형식으로 산출된 식들에는 exp 라고 붙였다. 그래프에서 보이는 가는 실선과 점선은 시간에 따른 압력변화 추세선의 값으로 2차식 꼴을 한

$$P(t)_{400kPa-sqr} = -521.98t^2 - 879.94t + 400 \text{ kPa} \quad (26a)$$

와 지수함수 꼴을 한

$$P(t)_{400kPa-exp} = 400e^{-3.3558t} \text{ kPa} \quad (26b)$$

를 얻었다.

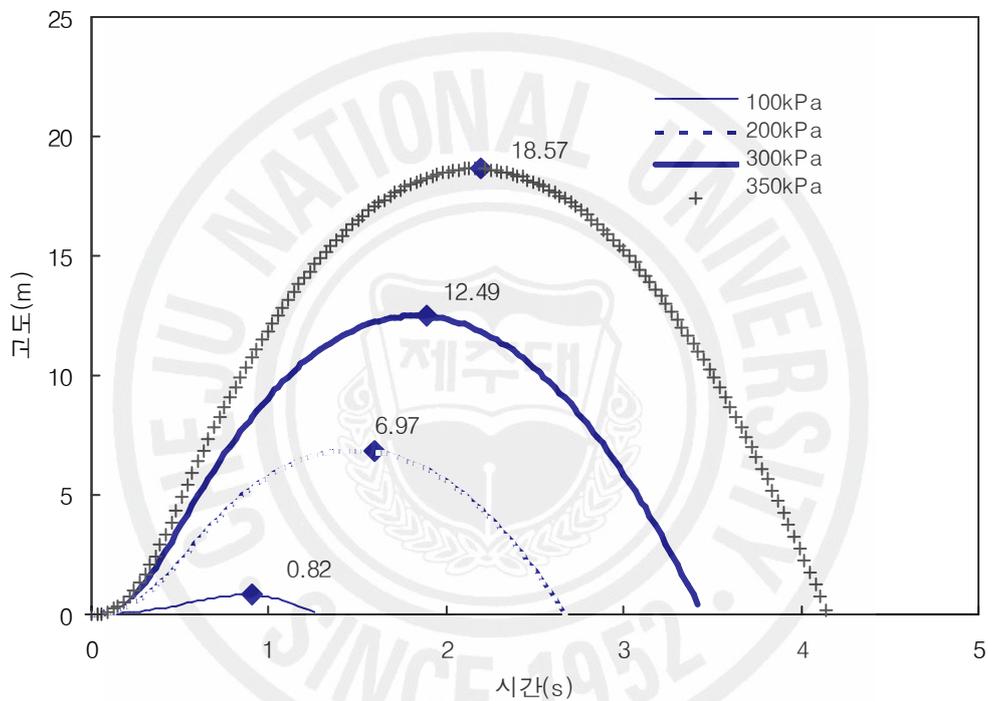


그림 IV-3. 물 350 mL, 초기압력 100 kPa ~ 350 kPa 일 때 수치결과

이 식들은 모두 최소 제곱법으로 구한 근사식이다. 이 압력변화 식을 이론식 (20)에 대입하면 추진력에 관한 식은 다음과 같이

$$T(t)_{400kPa-sqr} = P(t) \times A = (-521.98t^2 - 879.94t + 400) \times \pi \times 0.005^2 \text{ N}, \quad (27a)$$

$$T(t)_{400kPa-exp} = P(t) \times A = (400e^{-3.3558t}) \times \pi \times 0.005^2 \text{ N} \quad (27b)$$

를 얻었다. 이때 그래프를 통해 얻은 추진력 지속시간은 $T_{400kPa} = 1.01$ s로 측

정되었다.

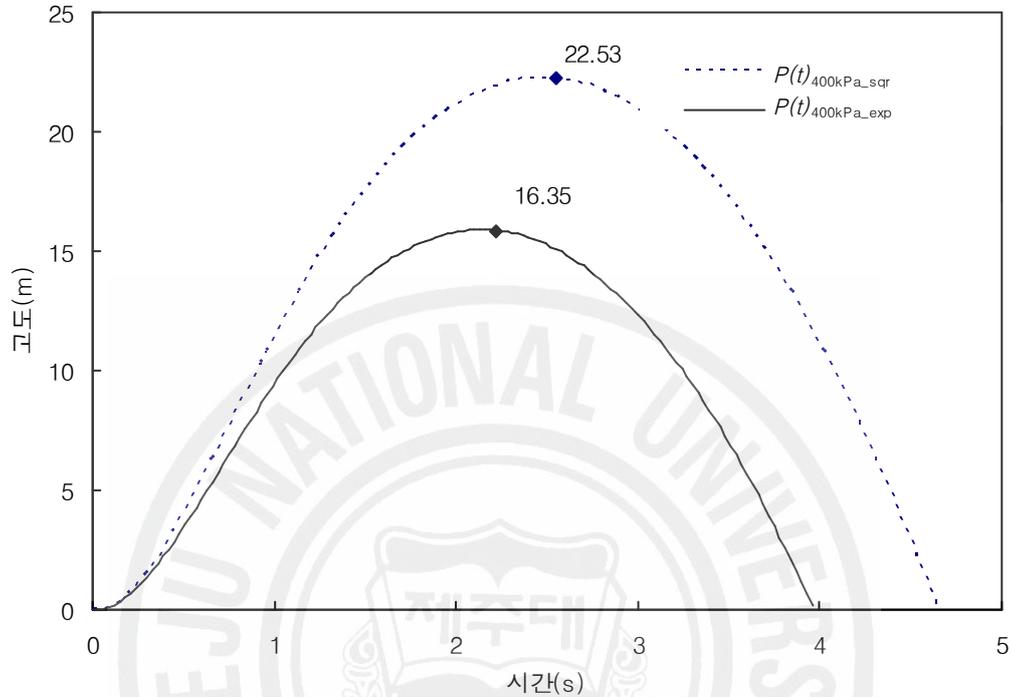


그림 IV-4. 물 350 mL, 초기압력 400 kPa 일 때 수치결과(실선과 점선은 각각 압력이 $P(t)_{400kPa_sqr}$ 와 $P(t)_{400kPa_exp}$ 경우)

물 350 mL로 하여 최고고도에 대한 수치결과를 얻기 위하여 시간 간격 Δt (시간 간격)=0.03 s로 하였으며, 이때 초기압력 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 350 kPa의 경우에 대해, 앞에서 압력변화 측정을 통해 얻은 추진력에 대한 식 $T(t)_{100kPa}$, $T(t)_{200kPa}$, $T(t)_{300kPa}$, $T(t)_{350kPa}$ 을 식 (21)에 대입하여 시간에 따른 고도를 계산하였다. 초기조건은 고도를 0으로 설정하며 추진력 지속시간 내에서 값을 갖도록 하였다. 이 모든 식을 엑셀시트에 넣어 시간에 따른 수치결과로부터 얻은 고도 변화를 그림 IV-3에 나타내었다. 초기압력이 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 350 kPa 일 때 각각의 경우 계산된 최고고도는 $Y_{100kPa} = 0.82$ m, $Y_{200kPa} = 6.87$ m, $Y_{300kPa} = 12.49$ m, $Y_{350kPa} = 18.35$ m이었다.

한편 초기 압력이 400 kPa 일 경우에는 2가지 압력변화 $P(t)_{400kPa-sqr}$ 와 $P(t)_{400kPa-exp}$ 을 이용 추진력 $T(t)_{400kPa-sqr}$ 와 $T(t)_{400kPa-exp}$ 를 얻고, 이 추진력을 식 (21)에 대입하였다. 초기조건을 고도 0으로 설정하며 추진력 지속 시간 내에서 값을 갖도록 하였다. 이 모든 식을 엑셀시트에 넣어 시간에 따른 수치 결과로부터 얻은 고도 변화를 그림 IV-4에 나타내었다. 이 그래프로부터 최고고도의 계산결과는 초기압력 400 kPa에서 각각의 경우 $Y_{400kPa-sqr}$ 는 22.53 m 이고 $Y_{400kPa-exp}$ 는 16.35 m 이었다.

표 IV-1. 물 350 mL에서 초기압력에 따른 최고고도의 실험값

실험조건		물의 비율	측정1 (m)	측정2 (m)	측정3 (m)	실험결과 평균(m)	비고
물(mL)	초기압력 (kPa)						
350	100	22.9 %	0.27	0.30	1.85	-	$Y_{100\text{ kPa}}$
350	200	22.9 %	6.78	6.70	7.60	7.03	$Y_{300\text{ kPa}}$
350	300	22.9 %	12.80	10.65	13.82	12.42	Y_{200p}
350	350	22.9 %	20.00	17.60	16.8	18.13	$Y_{350\text{ kPa}}$
350	400	22.9 %	15.58	16.40	15.85	15.94	$Y_{400\text{ kPa}}$

물 350 mL은 물로켓 내부부피에 비해 물의 비율이 22.9 %의 경우에 해당하며, 초기압력이 100 kPa에서 400 kPa로 변화시키며 측정된 최고고도에 관한 측정 결과는 표 IV-1에 나타내었다. 이때 물로켓이 최고고도에 이를 때 풀려나간 낚싯줄의 길이를 측정하여 최고고도 높이로 하였다. 신뢰도를 높이기 위하여 각각의 조건에 대해 5번의 반복 실험 중 최고, 최저 값을 제외한 3번의 실험결과를 기준으로 평균을 산정하였다. 단, 초기 내부압력이 100 kPa인 경우 편차가 심하여 제외하였다.

물 350 mL에서의 앞 실험 결과를 토대로 350 mL인 동일조건에서 초기압력변화에 따른 최고고도에 대한 실험결과와 수치결과를 비교한 결과를 표 IV-2에 나타내었다. 이 표에서 100 kPa의 경우는 앞서처럼 편차가 크기 때문에 제외하였고, 특히 초기압력 400 kPa인 경우의 실험결과는 2가지로 표시하였다.

표 IV-2. 물 350 mL에서 초기압력에 따른 최고고도에 대한 실험결과와 수치 결과

실험조건		물의 비율	수치결과 Yi(m)	실험결과 평균 Yr(m)	상대오차	비고
물(mL)	초기압력 (kPa)					
350	100	22.9 %	0.82	-	-	Yi ₁₀₀ kPa
350	200	22.9 %	6.87	7.03	2.28 %	Yi ₃₀₀ kPa
350	300	22.9 %	12.49	12.42	0.54 %	Yi _{200p}
350	350	22.9 %	18.65	18.13	2.76 %	Yi ₃₅₀ kPa
350	400	22.9 %	22.53(P(t) _{400k-sqr} 일 때)	15.94	29.24 %	Yi ₄₀₀ kPa
			16.35(P(t) _{400k-sqr} 일 때)		4.46 %	

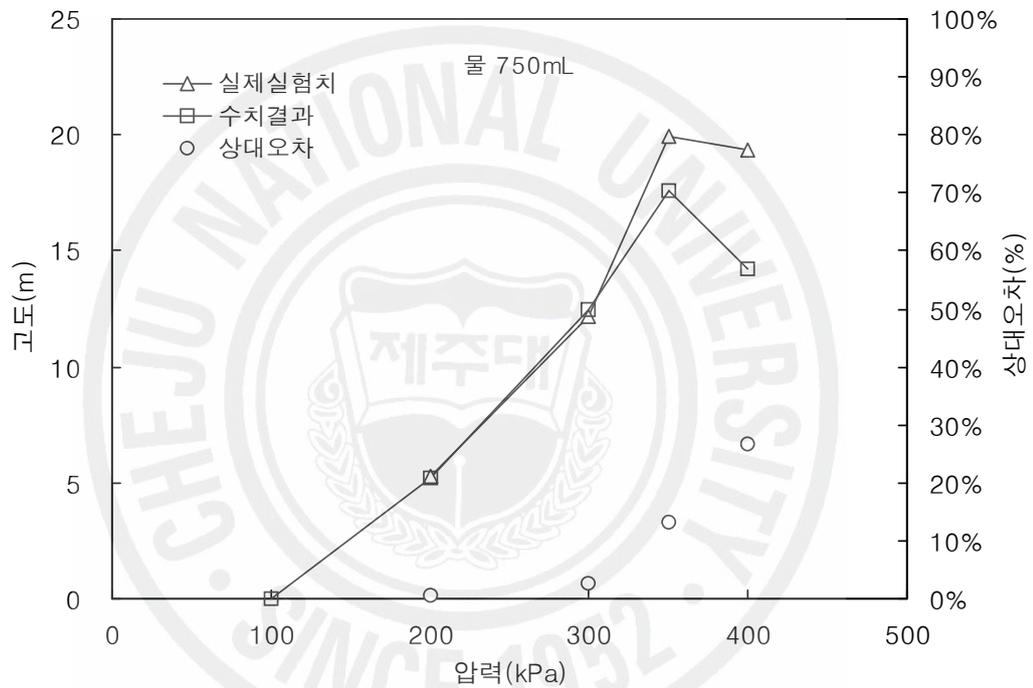


그림 IV-5. 물 350 mL에서 초기압력에 따른 최고고도에 대한 실험결과와 수치 결과 비교

즉, 400 kPa인 초기 압력의 경우 첫 번째 압력에 관한 근사식을 이차식 $P(t)_{400kPa-sqr}$ 으로 선정할 때의 결과와 다른 한 가지는 지수함수 $P(t)_{400kPa-exp}$ 로 선정한 수치결과 실험결과와 이에 따른 오차를 각각표시 하였다. 이들 결과 값은 $P(t)_{400kPa-sqr}$ 의 경우에는 오차가 29.24 %인 반면 $P(t)_{400kPa-exp}$ 의

경우에는 오차가 4.46 %로 줄어 들었다.

표 IV-2에서 초기 압력 400 kPa인 경우 압력을 오차가 적은 지수함수 $P(t)_{400kPa-exp}$ 로 산정할 때를 선택하고 나머지 각각의 초기압력에 따른 수치결과 및 실험결과를 그림 IV-5에 나타내었다. 왼쪽 y축은 고도의 범위를 나타내며 오른쪽 y축은 오차에 관한 범위를 표시하였다. 이들 결과에 의하면 수치결과와 실험결과 사이의 오차는 0.54 % ~ 4.46 % 이었다. 그러나 200 kPa ~ 350 kPa의 범위에서는 초기압력에 따라 선형적으로 최고고도가 증가하는 것을 볼 수 있으며 오차 또한 3 % 이내였다. 이들 압력조건 중 350 kPa에서 최고고도에 대한 실험값은 16.13 m, 수치결과값은 16.65 m을 나타내며 이 조건에서 다른 압력조건에 비해 최대로 올라간다. 400 kPa에서는 오히려 고도가 각각 15.94 m, 16.35 m로 줄어들었다.

표 IV-3. 물 750 mL에서 초기압력에 따른 최고고도에 대한 실험결과와 수치 결과

실험조건		물의 비율	수치결과 Yi(m)	실험결과 평균 Yr(m)	상대오차	비고
물(mL)	초기압력 (kPa)					
750	100	49.0 %	0	-	-	
750	200	49.0 %	5.23	5.26	0.51 %	
750	300	49.0 %	12.47	12.14	2.68 %	
750	350	49.0 %	17.61	19.92	13.09 %	
750	400	49.0 %	14.22	19.37	26.57 %	

2) 물 750 mL에서 실험

물의 양만을 750 mL로 변경하고, 물 350 mL에서의 실험과 같은 방식으로 실험을 실시하였다. 이 값은 물로켓 내부부피에 비해 물의 비율이 49.0 % 이다. 나머지 조건은 동일하게 하여 압력변화측정, 수치결과를 통한 최고고도를 계산하고, 실험을 통해 최고고도를 측정하고 결과를 표 IV-3에 나타내었다. 여기서 400 kPa인 초기압력의 경우는 앞서서의 오차가 적은 지수함수 형태의 압력을 기준으로 수치결과를 구하였다. 그림 IV-12의 그래프에 계산된 최고고도와 실험을 통

해 얻은 최고고도 사이의 오차를 나타내었다. 실험결과를 살펴보면 200 kPa ~ 350 kPa의 범위에서 실험값은 선형적으로 초기압력에 따라 최고고도가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 수치결과에서도 같은 경향을 보인다. 또한 이들 사이의 오차는 0.51 % ~ 13.09 % 이었다. 한편 초기 압력 100 kPa인 경우 실험에서 노즐과 발사대의 마찰이 심해 편차가 크고 수치결과도 0 m로 측정되어 오차를 구할 수 없었다. 압력조건 중 350 kPa에서 최고고도에 대한 실험값은 19.92 m, 수치결과 값은 17.61 m을 나타내며 이 조건에서 다른 압력조건에 비해 최대로 올라간다. 400 kPa에서는 오히려 고도가 각각 19.37 m, 14.22 m로 줄어들었다.

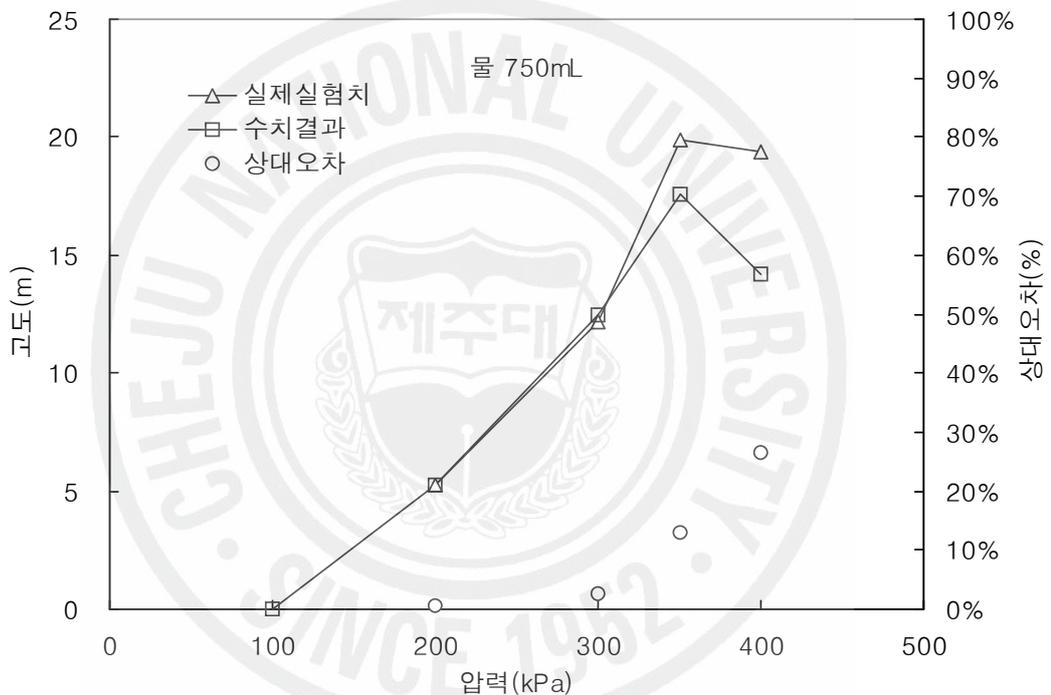


그림 IV-6. 물 750 mL에서 초기압력에 따른 최고고도에 대한 실험결과와 수치 결과 비교

2. 고찰

첫 번째 실험은 물 350 mL의 경우로 이것은 물로켓 본체 1.5 L 기준으로 약 30 % 내외에 해당하며, 다른 문헌에서 비행성능이 최고라고 언급한 300-400 mL

범위에 속한다. 이때 압력을 2차식으로 산정한 100 kPa ~ 350 kPa에서는 추진력 지속시간은 비슷한 값을 가지지만 총 면적은 압력이 커질수록 증가함을 볼 수 있다. 따라서 초기압력이 클수록 예상 최고고도는 높아질 수 있을 것으로 짐작된다. 이와 같은 결과는 표 IV-2와 그림 IV-5에서 확인할 수 있다. 즉, 초기압력 100 kPa의 최고고도 계산 값은 가장 작다. 나머지 조건에서는 초기 내부압력에 따라 점점 최고고도가 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 100 kPa에서 추진력 지속시간이 가장 길었으며, 이는 다른 압력 조건에 비해 낮은 내부 압력으로 인하여 물을 배출하는데 시간이 오래 걸린 탓으로 볼 수 있다. 한편 실험결과를 살펴보면 편차가 심한 100 kPa를 제외해야 했다. 이유는 초기압력에 의한 추진력보다 노즐과 발사대간의 마찰이 심한 것이 원인이었다. 또한 초기 압력 400 kPa에서는 오히려 350 kPa 경우에 비해 최고고도가 줄어들었다. 이는 시간에 따라 압력의 급격한 변화로 액체 분사시간이 기체분사시간에 비해 상대적으로 다른 압력조건에 비해 짧아져 추진력이 줄어든 결과이다. 이때 압력을 지수함수로 계산하여 최고고도를 산정하면 이차식의 경우에 비해 오차를 29.24 %에서 4.46 %로 줄일 수 있다. 이상으로부터 200 kPa ~ 350 kPa 압력에서는 계산결과 및 실험결과 모두에서 압력에 대해 최고고도는 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 이들 사이의 오차는 0.54 % ~ 2.76 %이다.

두 번째 실험은 물 750 mL에서 실시하였으며 실험 350mL 일 때와 과정은 동일하다. 이들 결과 표IV-3과 그림 IV-6을 통해 살펴보면, 초기 압력 100 kPa인 경우 실험에서 노즐과 발사대의 마찰이 심해 편차가 크고 수치결과도 0 m로 측정되어 오차를 구할 수 없었다. 하지만 내부 압력변화가 200 kPa ~ 350 kPa 일 때는 350mL에서 실험한 것처럼 압력에 따라 선형적으로 최고고도가 증가하고 있다. 실험결과와 계산결과와의 오차는 0.51 % ~ 13.09 %였다. 압력 400 kPa에서는 지수함수로 근사식을 구했음에도 오차가 29.57 %였다. 이는 기체분사구간이 다른 조건에 비해 증가한 것을 원인으로 볼 수 있다.

이상의 모든 실험을 통해 내부 압력변화를 통한 최고고도에 관해 살펴본 결과는 다음과 같다. 수치결과와 실험결과 사이의 오차가 3 % 이내를 얻은 350 mL인 경우가 가장효과적인 실험조건임을 알 수 있으며, 이는 다른 문헌의 경우와 일치한다. 따라서 350 mL에서 압력변화를 200 kPa ~ 350 kPa로 할 때 최고고

도 값은 계산된 값과 측정된 값 사이에 유사한 결과를 나타냄을 볼 수 있었다. 이유는 액체 분사구간이 대부분인 이 압력조건에서는, 추진력이 이론에서처럼 노즐을 통과하여 분출되는 구간인 액체의 영역이 대부분을 차지하게 되고, 후반부 구간에서의 기체에 의한 추진력은 비교적 적게 작용하게 되어 오차가 적었음을 알 수 있다. 따라서 이 범위에서 본 실험은 MBL 장비를 이용하여 압력변화를 통해 최고고도를 효과적으로 비교해 볼 수 있을 뿐 아니라, 물로켓 궤도 운동에 대한 이론을 검증할 수 있는 좋은 결과를 얻을 수 있다.

이밖에도 오차의 원인으로 바람의 영향을 무시하거나 로켓의 공기저항력계수 값을 평균적으로 0.5로 산정한 것을 들 수 있다. 그리고 본 실험에서 최고고도는 5번의 실험에서 최소값과 최대값을 빼고 나머지 3번의 실험결과의 평균을 산출한 데이터를이용 수치결과와 비교하였는데, 좀 더 많은 실험횟수와 엄격히 통제할 수 있는 환경에서 실험한다면 더 좋은 실험결과를 얻을 수 있을 것이다.



V. 결 론

물로켓의 내부압력변화는 PASCO사의 MBL를 이용하여 측정하였다. 측정된 압력 데이터로부터 추진력·질량·가속도·속도를 수치적으로 구한 후 고도 $y(t)$ 를 계산하여 최고고도를 얻었다. 수치결과로부터 얻은 최고고도와 실험을 통해 얻은 최고고도를 비교하여 수치결과가 타당한지 확인하였다. 최고고도에 대한 수치결과와 실험결과 사이의 상대오차는 350 mL에서 4.46 %, 750 mL에서 29.57 % 이내였다. 초기 내부압력이 200 kPa ~ 350 kPa인 경우, 최고고도에 대한 실험값과 계산값 사이의 오차는 350 mL에서 2.47 %, 750 mL에서 13.09 % 이내였다. 모든 실험에서 초기 내부압력이 100 kPa와 400 kPa일 때 오차가 많이 났다. 초기 내부압력 100 kPa인 경우 오차가 큰 이유는 압력에 의한 추진력보다 발사대와 로켓이 분리될 때 마찰력이 크게 작용하기 때문이고, 초기 내부압력 400 kPa인 경우에 오차가 큰 이유는 다른 초기 내부압력보다 전체 추진력이 작용하는 시간 중 기체 분사시간이 길기 때문이다. 400 kPa인 경우 추진력에 대한 근사식을 지수함수 형태로 나타낸 식을 사용하면 상대오차를 줄일 수 있었다. 이외에도 오차의 원인으로 바람의 영향과 공기저항력 계수의 값을 평균 0.5로 하였음을 들 수 있다. 따라서 실내에서 공기 저항을 최대한 줄이고 로켓에 대한 공기저항력 계수를 정밀하게 측정하면 더욱 오차를 줄일 수 있을 것이다.

이들 결과로부터 물로켓 발사에서 최적 실험조건은 물의 용량 350 mL일 때 초기 내부압력이 200 kPa ~ 350 kPa인 1단 로켓발사 실험이다. 또한 이 조건에서 물로켓 궤도를 수치적으로 분석 가능하다.

따라서 본 연구에서 제시한 MBL을 활용한 물로켓 발사 실험방식을 중·고등학교 과학실험 활동에 이용하면 좋은 과학교육 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이진영, 로켓노즐에서 2차 분사의 위치 변화가 추력 방향에 미치는 영향, 석사 학위논문, 강원대학교, 2001, pp. 1~8.
- [2] 홍용식, 인공위성과 우주발사체(청문각, 서울, 1985), pp. 16~20.
- [3] 윤용섭·김영수, 로켓공학(경문사, 서울, 2004), pp. 1~12.
- [4] 김재수·박남은·김종록·김양수·우철훈·박정주·오범석·옥호남, 조선대학교 기계기술연구 7, 1 (2004).
- [5] 전성민·김진한·이대성, 한국항공우주학회지 31, 77 (2003).
- [6] 양희성·박병훈·윤용섭, 한국항공우주학회지 35, 805 (2007).
- [7] 박일홍, 물리위성, 물리학과 첨단기술 37, (2006).
- [8] "사인언스 in 뉴스: 노을속의 '카운트다운' 그 비밀을 밝혀라.", 조선일보, 2008.3.24. http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2008/03/24/2008032401656.html
- [9] "지축을 흔드는 굉음과 화염...소유즈 발사 성공.", SBS 인터넷뉴스부, 2008.4.8. http://news.sbs.co.kr/section_news/news_read.jsp?news_id=N1000401344
- [10] 황재효, 주니어 발명 마스터과정(특허청 국제지식재산연수원, 2007).
- [11] "Water Rocket", P. A. Grosse, 1 st April 2008. <http://ourworld.compuserve.com/homepages/pagrosse/h2orocketlinks.htm>
- [12] "Water Rocket: What is a Water Rocket?", TRD Associates, 2007. <http://www.water-rockets.com>
- [13] 시그마트리즈, 2007. <http://www.waterrocket.com>
- [14] 문성환, 물리학과 첨단기술 12, 22 (2003).
- [15] "Water Rocket", 에듀넷, 2008. <http://www.edunet4u.net/teacher/index.html>
- [16] 박연옥·신진훈, "어떤 물로켓이 과녁을 정확히 맞힐 수 있을까?", 48회 전라남도 과학전람회, 2003.
- [17] 윤영빈, 액체로켓엔진 최적 분사시스템 설계기술 M0104-00-0058, 2006, pp.

1~10.

- [18] 지평삼, 물 분사에 의한 로켓엔진 소음 감소에 관한 실험적 연구, 박사학위 논문, 충남대학교, 1998, p. 20.
- [19] 손채훈, 한국항공전자학회지 **29**, 79 (2001).
- [20] 지영무 외, 한국항공전자학회지 **33**, 18 (2005).
- [21] 최신영 · 이현규, 한국과학교육연구 **5**, (2007).
- [22] 구양삼 · 박금호 · 이국행, 경북 대학교 과학연구지 **30**, 73 (2005).
- [23] 박금홍 · 구양삼 · 회병순 · 신애경 · 이국행 · 고석범, 한국교육학회지 **25**, 67 (2005).
- [24] 박상용 · 박재근 · 여상인, 초등과학교육 **25**, 454 (2006)
- [25] "Rocket Simulations", NASA, 14 st April 2008. http://my.execpc.com/~culp/rockets/rckt_sim.html
- [26] 한정화, 실제실험학습과 가상실험학습이 과학과 학업성취도와 태도에 미치는 영향, 석사학위논문, 전북대학교 교육대학원, 2003, pp. 1~12.
- [27] W. K. Esler and D. Sanford, Water Rocket Workout, The Science Teacher **56**, 20 (1989).
- [28] "Water rocket : Iterative Predictors of Water Rocket Flight Events.", Strutz and Christian, 2008. <http://www.schulphysik.de/strutz/predictors.pdf>
- [29] A. Ulas, Passive flow control inn liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi, Flow Measurement and Instrumentation, 2006, pp.93~97.
- [30] "Thrust curves from a water rocket test stand.", C. Strutz, S. Koberle and S. Bach, 2008. <http://www.schulphysik.de/strutz/teststand.pdf>
- [31] T. Nobuyuki, W. Rikio, A. V. Nebylov, Acta Astronautica **61**, 11 (2007).
- [32] G. Frédéric, B. Paul and C. Walter, Aerospace Science and Technology **7**(4), 317 (2003).
- [33] H. W. Zhang, W. Q. Tao, Y. L. He and W. Zhang, International Journal of Heat and Mass Transfer **49**, 349 (2006).
- [34] "Water Rocket.", NASA, 15 st April 2008. <http://exploration.grc>.

nasa.gov/education/rocket/

- [35] 일반물리학교재 편찬위원회, *일반물리학*(북스힐, 서울, 2007), p. 105.
- [36] K. David, *The Physics Teachers*, 274 (1990).
- [37] L. J. Clancy, *Aerodynamics*(Wiley, New York, 1975), pp. 12~15.
- [38] 김동휘, 물리교육에서 Spreadsheet 활용에 대한 연구, 석사학위논문, 제주대학교 교육대학원, 2001, p. 1.



[Abstract]

A study on the trajectory of the water rocket by pressure

Won-Jun Choi

Major in Physics Education

Graduate School of Education, Cheju National University

Jeju, Korea

Supervised by professor **Young-Bong Kang**

This research study is about on water rocket trajectory. Thrust of water rocket was multiplied by the value of eruption pressure and nozzle area. In order to measure pressure, by using the equipment Microcomputer Based Laboratory(MBL) sensors of PASCO. After calculating the data from this figures, the thrust is to obtain the highest altitude, compare to the value of the experiment. The initial terms of water is about 350 mL in 200 ~ 350 kPa pressure, the results obtained from the highest altitude of numerical and experiment results are matched within 3 %. Conditions of this experiment, water rocket launches to take advantage of activities in middle and high school science experiments, will be a good science education.

[감사의 글]

우선 강영봉 지도교수님을 비롯하여 논문심사 및 지도편달을 아낌없이 해주신 강동식, 김세현 세 분의 교수님께 감사의 뜻을 전합니다. 특히 이상철 교수님의 조언에 감사드립니다. 고인이 되신 강정우 교수님께도.. 그리고 이때까지 저를 아껴주신 분들 그리고 용기를 주시고 도와주신 분들 모두에게 감사드립니다. 교육대학원 선후배님들께도 감사의 마음을 전합니다.

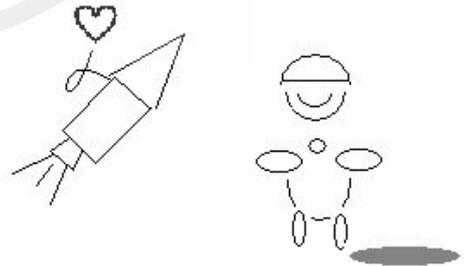
덧붙여 학위를 마무리하며 이렇게 논문을 무사히 끝마치게 된 것을 기쁘게 생각하고 특히 여러 사람들과의 많은 일들이 떠올라 몇 자 적어봅니다. 부고 교생실습을 통해 좋은 인연을 나눈 학생들이며 동료 선생님, 부고 선생님들, 그동안 저를 멀리서 응원해주신 물리교육과 학생들과 선후배 그리고 물리학과 교수님, 학생 그리고 선후배, 모든 분들께 감사드립니다.

끝으로 이 자리에 있을 수 있게 한 가족들 화순, 수경, 성빈 그리고 물심양면으로 사랑과 격려를 해주시는 양가 부모님들과 형, 동생, 친지들 모두에게 감사함의 마음을 전합니다.

♡감사의 마음♡

가슴에서 한가슴으로 흐르는 길을 따라 가다보면
물이 흐르는 곳을 따라 가다보면
고이고이 모이는 곳이 있지요

세상 사람들도 모이고 모이는 곳이 있지요
그것은 사랑이 한줄기 머무는 곳
그것은 꿈이 한줄기 모이는 곳
그것은 숨이 한줄기 모이는 곳
그것은 감사하는 사람들 모두들이 모이는 곳이지요.
저는 그곳에서 모두에게 감사의 마음을 전합니다.



2008. 7월 어느 날...