

*De  
revolutionibus orbium coelestium  
et  
momentis vehicularum liberorum*

*auctore  
Alberto Liberio Humaniense Disciplino*

*die  
vicesima Augusta MMXVI*

*factum magnum super regnum publicam  
imperii super libertatem et veritatem  
democratia proficit in fascismum et nazismum  
libertas proficit in mendacium publicam  
sed verum dictum a te aliquando reveletur  
rerum litterae aeternum permaneant  
possit nemo prohibere*

*feb mmxvi alhid*

**Kerbal Space Program이란?**



# Contents

Kerbal Space Program이란?	5
<b>Part 1. 시작하기</b>	9
Chapter 1. 궤도에 올리기	11
1. 운동에너지 얻기	11
2. 공기저항	11
3. 공기역학 및 안정성	11
4. 재진입시 주의사항	11
Chapter 2. 다단 로켓과 $\Delta v$	13
1. 연료	13
2. 다단 로켓 (Linear Staging)	14
3. 아스파라거스 (Asparagus Staging)	14
4. $I_{sp}$	14
Chapter 3. 궤도운동	15
1. 용어설명 및 주의사항	15
2. 원궤도	15
3. 타원궤도	15
4. 쌍곡선궤도 - 탄성충돌	16
5. 슬링샷	16
Chapter 4. 달 미션	19

<b>Part 2. 매뉴버</b>	21
<b>Part 3. 미세조정 (Fine-tuning)</b>	23
<b>Part 4. 행성간 비행</b>	25
Chapter 5. 시간계획 정하기	27
Chapter 6. 포획 (Capturing)	29
1. 대기를 이용한 포획 (Atmospheric Capture)	30
2. 위성을 이용한 포획 (Sling-shot Capture)	30
3. 포획을 위한 궤도조정 (Fine-tuning with Sling-shot Capture)	30
Chapter 7. 사례들	31
1. Juno's Maneuver	31
<b>Part 5. 다루어지지 않은 것들</b>	33
Chapter 8. 3체 문제 (Three Body Problem)	35
1. KSP의 간략화	35
2. 근일점 변화	35
3. 세차운동	35
Chapter 9. 상대론적 문제	37
1. 특수상대론: 로렌츠변환	37
2. 특수상대론: 적색/청색편이	37
3. 일반상대론적 효과 및 천체모델의 근사성	37
<b>Part 6. 천체 데이터 및 프로토콜</b>	39

## Part 1

# 시작하기



## CHAPTER 1

### 궤도에 올리기

1. 운동에너지 얻기

2. 공기저항

3. 공기역학 및 안정성

3.1. Over-compensating.

4. 재진입시 주의사항

4.1. 방열판 (Heat Shield).

4.2. 낙하산 (Parashute). | 이름 | 작동속도 | 면적 |



## CHAPTER 2

### 다단 로켓과 $\Delta v$

#### 1. 연료

$$(1) \quad \Delta v = I_{sp} g_0 \log \frac{M + m}{M}$$

$$(2) \quad \Delta v = I_{sp} g_0 \log \frac{M + (1 + \alpha)m}{M + \alpha m}$$

$$(3) \quad \Delta v \rightarrow I_{sp} g_0 \log(1 + \alpha^{-1})$$

is independent of thrust force but only depend on isp and etc

Let's assume  $I_{sp} = 320s$  and

Estimated Engine Mass / Fuel Mass = 1/6

Estimated Fuel Tank Mass / Fuel Mass = 1/8

$$\Delta v = 4669.78m/s$$

실제로는 1단의 경우 공기저항으로 인해 연료를 많이 실을 수록 오히려 얻을 수 있는 운동에너지가 줄어드는 결과를 보이기도 한다. 따라서 많은 양의 화물(Load)을 쏘아 올리기 위해서는 '다단 로켓 (multi-stage rocket)'과 '아스파라거스 로켓 (asparagus-staging rocket)'이 필요하다.

## 2. 다단 로켓 (Linear Staging)

a

## 3. 아스파라거스 (Asparagus Staging)

### 4. $I_{sp}$

$$(4) \quad I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g_0}$$

## CHAPTER 3

# 궤도운동

### 1. 용어설명 및 주의사항

\*근일점은 꼭 태양과 지구사이만의 의미가 아니고 일반적으로 사용할것임

### 2. 원궤도

### 3. 타원궤도

별 (start) 우주선 (projectile) 위치에너지 (potential energy)

$$(5) \quad r^2\dot{\theta} = l$$

$$(6) \quad \ddot{r} - \frac{l^2}{r^3} + \frac{GM}{r^2} = 0$$

$$(7) \quad -l^2r^{-2}\frac{d^2r^{-1}}{d\theta^2} - l^2r^{-3} + GMr^{-2} = 0$$

$$(8) \quad \frac{d^2r^{-1}}{d\theta^2} + r^{-1} - GMl^{-2} = 0$$

이러한 우주선(projectile)의 운동방정식의 해는 다음과 같다.

$$(9) \quad r^{-1} = \frac{GM}{l^2} + \sqrt{\frac{2\epsilon}{l^2} + \left(\frac{GM}{l^2}\right)^2} \cos(\theta + \theta_0)$$

여기서  $\epsilon$ 은 우주선(projectile)의 질량당 총 에너지이다. 이러한 식은 이차곡선(원, 타원, 포물선, 쌍곡선)을 나타내는 표현이다. 따라서 이는 역제곱힘에서의 궤도가 이차곡선이 된다는 증명이다. 이 식을  $l$ 과  $\epsilon$ 이 아닌  $l$ 과 근일점( $r_p$ )의 함수로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$(10) \quad r^{-1} = \frac{r_p^{-1}}{2} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon(GM)^{-1}r_p} + \frac{r_p^{-1}}{2} \cdot \frac{1 + 2\epsilon(GM)^{-1}r_p}{1 + \epsilon(GM)^{-1}r_p} \cos(\theta + \theta_0)$$

$r$ 이 무한대로 가지 않고 유한한 영역에서 진동하고 있으면 원이나 타원, 즉 구속 궤도(bound orbit)이 되고,  $r$ 이 무한대, 즉  $r^{-1} = 0$ 인 지점이 있으면 비구속궤도(unbounded orbit)가 될 것이다.

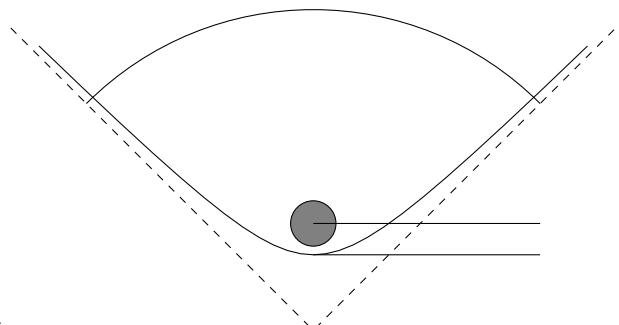
#### 4. 쌍곡선궤도 - 탄성충돌

#### 5. 슬링샷

$$(11) \quad \Delta\theta = \pi + 2 \sin^{-1} \frac{1}{1 + 2\epsilon(GM)^{-1}r_p}$$

특정 기준계에 대한 슬링샷 결과 어떤 기준계에 대해서 우주선의 입사 속도가  $\vec{v}_s(t = -\infty)$ , 천체의 속도가 상수  $\vec{v}_c$ 라고 한다면, 위와 같은 계산결과에 따라 우주선의 최종 속도가 어떻게 되는지 계산해보자.

우선 천체계에서 우주선의 속도는  $\vec{v}_s(t = -\infty) - \vec{v}_c$ 가 될 것이다.



예) 달을 이용한 가속

진입속도  $v$ , 근접거리  $r$ .



## CHAPTER 4

### 달 미션



## Part 2

매뉴버



## Part 3

# 미세조정 (Fine-tuning)



## Part 4

# 행성간 비행



## CHAPTER 5

### 시간계획 정하기



## CHAPTER 6

### 포획 (Capturing)

행성계 외부에서 진입하는 물체는 탈출속도를 넘어서므로<sup>1</sup> 힘이 작용하지 않으면 쌍곡선 궤도를 그리며 다시 행성계 밖으로 탈출하게 될 것이다. 안정적인 미션 수행을 위해서 행성간 미션에서는 도착지에서 충분히 감속하여 구속궤도를 만들 수 있는 기술이 필요하다. 이를 ‘포획’이라고 부르도록 하겠다. 포획이 이루어지지 않는다면 행성의 인공위성 궤도에 진입하는 미션을 수행할 수 없으며, 착륙 미션에 경우 한번만에 성공해야 하는 부담을 안게 된다.<sup>2</sup>

엔진을 이용한 능동적인 감속은 설명이 필요없으므로 여기서는 동력을 사용하지 않고 포획당하는 방법에 대해서 설명하고자 한다. 두가지 방법을 생각할 수 있을텐데, 행성의 대기를 이용한 방법과 행성의 위성을 이용한 방법이 있을 것이다. 각각의 방법에 대해서 설명하고자 한다.

---

<sup>1</sup> 정확히는 ‘행성계 관점에서 보았을 때 양(陽)의 에너지를 갖으므로’라고 하는 것이 옳을 것이다. ‘탈출속도’라는 개념은 보통 원궤도를 그리던 물체에 얼마만큼의  $\Delta v$ 가 주어져야 탈출할 수 있는지에 대한 얘기이다.

<sup>2</sup> 비구속궤도(쌍곡선궤도)로부터 대기권으로 진입할 때, 높은 진입속력으로 인해 높은 열이 발생하게 되어 우주선이 소실될 위험성이 커지게 되며, 또한 다시 튕겨나가지 않고 충분히 감속할 수 있는 가능성도 줄어들게 된다.

## 1. 대기를 이용한 포획 (Atmospheric Capture)

## 2. 위성을 이용한 포획 (Sling-shot Capture)

다음은 위성을 이용한 슬링샷으로 행성계에서의 속도를 줄일 수 있는지 검토해 보도록 하자. 위성과 조우시 위성의 속도가 우주선의 반대방향이라면 위성의 운동량을 받아 감속할 수 있으리라고 예상할 수 있을 것이다. 하지만 행성간 여행에서 그렇게 정확한 타이밍을 맞출 수 있으리라고 기대하기는 어렵다. 이번 section에서는 행성계 진입후 주어진 상황에서 감속할 수 있는지에 대해 알아볼 것이다. 다음 section에서는 진입 타이밍을 조정하는 법에 대해 논의해 보겠다.

우선 행성과 위성은 충분히 멀리 떨어져 있어서 조우(encounter)를 탄성충돌로 근사할 수 있다고 가정할 것이다. 사실 KSP는 각 천체의 '영향권'내에서 1체문제로 환원함으로서 이러한 가정을 충실히 따르고 있다.

## 3. 포획을 위한 궤도조정 (Fine-tuning with Sling-shot Capture)

## CHAPTER 7

### 사례들

#### 1. Juno's Maneuver

- (1) 지구계를 탈출한다.
- (2) 약 2배의 공전궤도를 만들어 다시 지구와 만날 수 있게 한다.
- (3) 원일점에서 근일점을 낮게 하는 매뉴버를 실시하여 다음 매뉴버에서의 에너지 효율을 높인다.
- (4) 지구를 이용한 슬링샷 효과를 포함하여 목성과의 접점을 만든다.
- (5) 목성근체에서 목성과 비슷한 속도로 가속하여 목성궤도로 들어간다.



## Part 5

다루어지지 않은 것들



## CHAPTER 8

### 3체 문제 (Three Body Problem)

#### 1. KSP의 간략화

#### 2. 근일점 변화

$$(12) \quad \frac{d^2r^{-1}}{d\theta^2} + r^{-1} - GMl^{-2} - l^{-2}r^2V'(r) = 0$$

$$(13) \quad \frac{d^2r^{-1}}{d\theta^2} + r^{-1} - GMl^{-2} + 2l^{-2}r^3 \left( \frac{|\alpha_-| - |\alpha_+|}{2} + \frac{|\alpha_-| + |\alpha_+|}{2} \cos(\theta - \omega t) \right) = 0$$

#### 3. 세차운동

\*로켓발사로 인한 변화

애초에 축은 0도로 고정



## CHAPTER 9

### 상대론적 문제

1. 특수상대론: 로렌츠변환
2. 특수상대론: 적색/청색편이
3. 일반상대론적 효과 및 천체모델의 근사성



## Part 6

# 천체 데이터 및 프로토콜



## 탄도학 기초 for Kerbal Propulsion Lab

De revolutionibus orbium coelestium et momentis vehiculorum liberorum

---

저자 Albertus Liberius Humaniensis Disciplinus

[twpf.jp/alblib](http://twpf.jp/alblib)

초판 초쇄 2016년 8월 20일

---

이 저작물은 크리에이티브 커먼즈 저작자표시-동일조건

변경허락 4.0 국제 라이선스 에 따라 이용할 수 있습니다.



라이선스 본문: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.ko>

본 라이선스에 따라 공유 및 기여를 할 수 있는 원문의 주소는 다음과 같습니다.

<https://github.com/alblib/kerbal-book>

단, 기초자료로서 활용된 Kerbal Space Program의 데이터는 Squad사의 저작물로서 저작권 보호를 받습니다. (<https://kerbalspaceprogram.com/>)