

## INTRODUCTION TO GENERAL PHYSICS LAB I

### I. Objectives

The experiments in this laboratory course have been chosen to make the students to have hands-on experiences on basic principles of physics learned in the lecture and to prepare them for the advanced courses which will be taken in the future. In particular, these experiments have the following objectives;

1. to acquaint the students with the techniques and apparatus used in physics experiments,
2. to demonstrate the physical concepts and principles learned in the lecture,
3. to introduce the methods of data analysis, and error analysis for real data,
4. to prepare the students for the experiments which they will take in the future advanced courses.

### II. Lab Grades

The lab grades are given according to the relative excellency criteria.

The code of academic honesty and integrity must be honored during the whole lab experiments as in other classes. If it is found to be violated in your report or exam, the grade will be confiscated.

### III. To The Students

#### A. General Comments

Because there are a large number of students enrolled in the physics laboratory course, a discipline is necessary in order to run the laboratory class.

You have to attend the lab class at your officially assigned time. Make-up labs are not permitted, except under very unusual circumstances; so be careful not to oversleep or "forget!" If you have a legitimate reason for not being able to attend the class at a scheduled time because of a<sup>1)</sup>n

unavoidable incidence such as a family funeral or serious illness, you should arrange for a make-up class as follows:

Notify your instructor in advance stating the reason for missing the class, later with official supporting documents which proves your request. Then you will determine when you make up for the lab. Except in the case of a sudden emergency (car crash, etc.) you are expected to request a make-up **BEFORE** you miss the lab.

In any event, the missed lab make-up must be made **within One Week** after the date of the missed lab. You will not be accepted into any lab other than the one you are assigned unless proper arrangements have been made by your instructor. The above regulations are necessary to prevent overcrowd or impediment of the class by the student who missed an experiment.

### **B. Preparation for Laboratory Experiments**

The experiments you will do in the laboratory are designed to be completed in the laboratory during the class hours. The lab reports must be submitted before the end of each class. It is expected that you have read the manual carefully before the experiment.

The properly prepared students are expected to arrive at the lab class with the following things prepared. You should *prepare the tables for the experimental results* when needed. You should know which *equations* you will be using for your result analysis, and how to estimate errors for your data. Your laboratory instructor will check such preparations before starting the lab, asking a few written quiz questions.

It is always the responsibilities of students to bring the following items to lab if their use is indicated by the lab manual.

1. Calculator
2. Graph papers; linear, log-log, and semi-log scales, always using 20 lines/in. or 10 lines/cm with every tenth line darkened.
3. Compass
4. Protractor
5. Colored pens or pencils
6. Drawing triangles or flexible curve.

### **C. Pre-Lab Test**

The pre-lab test is due by the beginning of the lab. The purpose of this test is to test your knowledge and understanding of the key concepts and procedures of the lab you will undertake. In addition, you might be asked to sketch a graph of the expected results, or you might be asked to carry out a simple calculation using one of the major equations in the lab manual.

---

1)

This must be submitted before the start of the lab.

#### **IV. Laboratory Reports**

Writing a lab report is important.

Your final report should include the following things:

1. Title page including the following information
  - Title of experiment
  - Date of Lab Class
  - Report Submission Date
  - Your name & Student ID No.
  - Your lab partners' name
  - Your instructor's name
2. Lab report including the answers to question on each experiment
  - Work sheet
  - Data sheets
  - Calculation results with appropriate units
  - Analysis results (tabular and/or graphical in nature)
  - Conclusions including error analysis

✱ This lab report must be submitted to the instructor before you leave the lab. A late report will cost a minimum loss of 20% per day and no point will be given after a week.

The data should be written in a neat, clear tabular form. Each table should be clearly labelled. All original data sheets must be turned in as part of the report. Recopying data sheets is unnecessary.

All calculations used in getting the results from the data should be clearly shown. If the results used the same set of equations repeatedly, a single complete calculation of one result has to be included in the report.

The experimental results together with the estimated uncertainties should be clearly expressed in the report (e.g,  $g = 980.1 \pm 0.3 \text{ cm/sec}^2$ ). If your results require graphs you should use a single sheet of graph paper for each graph. Always be sure to use a maximum area of each sheet of graph paper by selecting an appropriate conventional scale, i.e, 1, 2, 5, 10, etc.

The conclusions you draw from your experiment should be written clearly including the following:

1. What has been found in the experiment.
2. How well it is verified, or what discrepancies are found.
3. A discussion of the probable sources of errors together with suggestions for improvement the techniques. This discussion often shows how well you understood the experiment.
4. The meaning and interpretation of the graphs you draw.

The lab report should not copy the manual. Items such as the list of apparatus and procedure given in the manual should not be reproduced in your report. However, procedures you followed differently from the manual must be carefully stated.

#### **※ Warning**

1. Always keep the ethics code; never copy other's work including your lab partner's.
2. But data can be shared within the team members .
3. Do not submit the work violating the plagiarism rule.

#### **V. The Relationship Between Students and Lab Instructor**

You can discuss with your instructor during the lab or outside the class on the physical concepts and ideas you are working on. You are strongly encouraged to do so. In no case will the grade you will be affected by asking silly or trivial questions.

#### **VI. Final lab test**

At the end of the semester a closed-book lab test will be given. This test will contain questions where you will make experimental measurements similar to the ones given in the lab.

#### **VII. Other Regulations**

1. Food and beverages are not allowed in the lab.
2. Clean your experiment area when you leave the lab, after finishing the experiments.

VIII. Lab information

1. Location: Science Bldg. IV, Room 102
2. Recommended books
  - "University Physics with modern physics" by Young and Freedman
  - "An Introduction to Error Analysis" by John R. Taylor
3. Web page: <http://edulab.postech.ac.kr/>

## 1-0. 오차해석 (Error analysis)

### I. 오차론

실험을 통해 얻은 측정값이 참값으로부터 벗어난 정도를 오차라 하며, 오차의 원인을 이해함으로써 측정값을 보다 신뢰할 수 있다. 실험은 기존의 이론적 원리 또는 새로운 자연현상을 이해하기 위한 조작적 방법으로 복잡한 실제 세계를 “실험장치”라는 단순한 모형을 이용하여 정량적으로 분석하는 과정이다. 실험이 진행되는 동안 다양한 종류의 오차가 측정값에 영향을 끼치게 되며, 오차는 크게 인위적인 오차, 계기의 상태에 따른 오차, 주위 환경에 따른 오차 그리고 원인을 알 수 없는 우연오차 등이 있다. 오차가 가중된 측정값들로부터 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위해서는 측정값에 대한 다양한 통계적 처리가 요구된다.

### II. 오차의 종류와 특성

① 계통오차 (systematic error): 해석 가능한 오차로 보정이 가능하다.

- i) 계기오차 (instrumental error): 계기의 보정오차
- ii) 환경오차 (environmental error): 온도, 습도 등에 의한 오차
- iii) 이론오차 (theoretical error): 이론적 근사에 따른 오차
- iv) 개인오차 (personal error): 실험자 개인의 습성으로부터 기인하는 오차

② 과실오차 (erratic error)

실험과정에 있어 실험자의 부주의로 가중되는 오차로 주로 계기의 취급 부주의로 발생하는 오차이다.

③ 우연오차 (random error)

오차의 원인을 해석할 수 없기 때문에 보정이 불가능한 오차이다. 그렇기 때문에 우연오차에 의해 가중되는 오차를 최소화하기 위해서는 측정의 횟수를 가능한 한 많이 증가시키는 것이다. 이 측정결과들로부터 얻은 평균값을 측정값으로 사용함으로써 보다 신뢰할 수 있는 실험결과를 얻을 수 있다.

### III. 오차 및 상대오차

실험이 진행되는 동안 임의의 물리량에 대한 측정값은 오차로 인해 매번 측정할 때마다 다른 값을 가지게 되며, 이들 측정값들은 다양한 분포특성을 보이게 된다. 주어진 분포특성을 대표하는 값으로는 평균값, 중앙값, 그리고 최빈값이 있다.

① 평균값 (산술평균-arithmetical mean)

$n$ 개의 측정값이 주어질 경우, 이들의 합을 측정횟수  $n$ 으로 나눈 값이다.

② 중앙값 (median)

통계집단의 변량을 크기의 순서대로 늘어놓았을 때, 중앙에 위치하는 값으로 총수  $n$ 이 홀수일 때는  $(n+1)/2$ 번째의 변량 그리고  $n$ 이 짝수일 때는  $n/2$ 번째와  $(n+2)/2$ 번째의 변량의 산술평균을 취한다.

③ 최빈값 (most probable value)

측정값들 중 가장 빈도가 높은 측정값을 최빈값이라 한다.

오차의 분포특성을 정의하는 대표적인 통계량들은 다음과 같다.

측정값	참값	측정횟수	평균값
$x_i$	$X$	$N$	$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$

오차 ( $\varepsilon_i$ )나 편차 ( $\delta_i$ )가 작을수록 측정값은 참값 및 평균값에 가깝다.

오차:  $\varepsilon_i = x_i - X$       오차의 크기 =  $|\varepsilon_i| = |x_i - X|$       상대오차 =  $\frac{|\varepsilon_i|}{X} \times 100\%$

가중평균 (weighted average) =  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i x_i$ , ( $f_i$ : 동일 측정값이 반복되는 빈도수)

편차 =  $\delta = x_i - \bar{x}$       평균편차 =  $\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\delta_i|$  (참값이 알려지지 않을 경우 평균값을 사용)

IV. 분산과 표준편차

분산과 표준편차는 측정값의 분포상태와 정밀도를 나타내는 지표로 다음과 같이 정의된다.

측정값	평균값	측정횟수	오차	분산
$x_i$	$\bar{x}$	$N$	$\varepsilon_i$	$\delta_i$

분산과 표준편차는 측정값의 분포상태와 정밀도를 나타내는 지표

① 분산 (variance)

측정값이 평균값을 기준으로 하여 어떻게 분포하고 있는지를 나타내는 지표이다.

② 표준편차 (standard deviation)

분산의 양의 제곱근으로 정의되는 통계량으로 각 측정값의 평균적인 불확정도 (uncertainty)를 나타낸다.

③ 표준오차

평균값의 표준편차로 평균값의 불확정도를 나타낸다.

① 참값이 주어질 경우

$$\text{분산} = S = \frac{1}{N} \sum_i \varepsilon_i^2 = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - X)^2$$

$$\text{표준편차} = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \varepsilon_i^2}$$

② 참값이 주어지지 않을 경우

$$\text{분산} = \frac{1}{N} \sum_i \varepsilon_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_i \delta_i^2$$

$$\text{표준편차} = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i \delta_i^2}$$

$$\text{③ 표준오차} = \sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

V. 표준편차를 이용한 측정값의 예 (철사의 두께 = d)

철사의 두께 측정

	d (mm)	편차
1	1.014	-0.002
2	1.016	0.000
3	1.011	-0.005
4	1.017	0.001
5	1.020	0.004
6	1.014	-0.002
7	1.019	0.003
8	1.015	-0.001
평균	1.016	
표준편차	0.003	

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \sum_{i=1}^8 x_i / 8 = 1.016(mm)$$

$$\sum \delta^2 = 59.5 \times 10^{-6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{59.5 \times 10^{-6}}{7}} = 0.003$$

평균 : =  $\bar{x}$

분산 : =  $\delta$

표준편차 =  $\sigma$

$\therefore d = 1.016 \pm 0.003(mm)$



※ 표준편차는 측정값들이 평균값 또는 참값을 기준으로 얼마나 넓게 분포하고 있는가를 나타내는 척도로,  $1\sigma$ 는 측정값들의 68%가 평균값으로부터  $\pm\sigma$  내에 분포하고 있음을 나타내며  $2\sigma$ 는 95% 그리고  $3\sigma$ 는 99%를 각각 의미한다.

## VI. 그래프를 이용한 자료의 분석

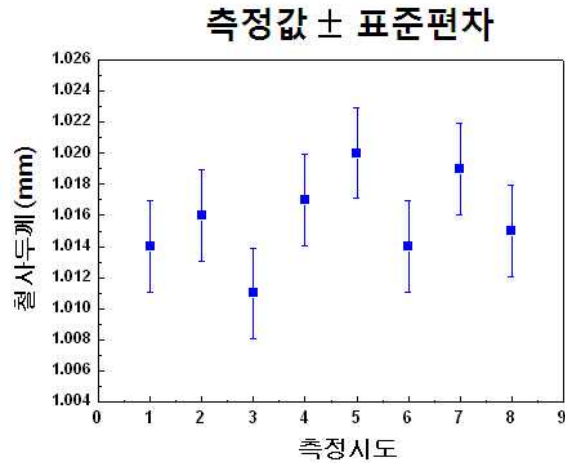
자연현상이란 여러 물리량들의 복잡한 상호작용의 결과로 나타나며 주어진 현상에 대한 원인과 결과 사이에는 적절한 상관관계가 존재하게 된다. 일반적으로 원인과 결과는 독립변수와 종속변수에 대응되며 이들 사이의 상관관계는 선형회귀 (linear regression) 분석을 통해 조사할 수 있다. 실험을 통해 얻은 불연속적인 자료들 사이의 상관관계를 조사하기 위하여 응용프로그램 (엑셀프로그램, 오리진 등)을 이용하여 독립변수에 따른 종속변수의 변화 그래프를 얻은 다음 최소제곱 회귀분석법 (least-square regression)을 이용하여 선형맞춤 (linear fitting)을 수행하게 된다. 이와 같은 분석과정을 통해 그래프로부터 다양한 물리적 정보를 얻을 수 있다.

### 1. 실험자료 분석을 위한 엑셀프로그램 사용법

- 실험 자료는 text file (ASCII 형식)로 저장한다. (예, `***.text`)
- 엑셀프로그램을 실행한 뒤 text 형식으로 저장되어 있는 파일을 선택한다.
- 자료를 선택한 뒤 메뉴들 중 “삽입”을 누르고 “차트”를 선택한다.
- 그래프의 종류는 반드시 “분산형”으로 선택한다.
- “차트옵션”을 이용하여 x-축, y-축을 정의한다.
  
- 추세선 그리기
  - X축과 Y축 사이의 관계를 보기 위해서는 추세선이 필요하다.
  - 찍힌 점을 선택한 뒤 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 [추세선 추가]를 클릭한다.
  - 기대되는 개형의 추세선을 선택한 뒤 적용시켜 본다.
  - 추세선의 식을 함께 보고 싶다면 [옵션] 탭에서 수식추가를 선택한다.
  - 상관계수 ( $R^2$ )를 함께 보고 싶다면 [옵션] 탭에서 “R-제곱값”을 선택한다.  
( $R$ 은  $0 \leq |R| \leq 1$ 의 범위를 가지며,  $|R|$ 이 클수록 강한 상관관계를 나타낸다.)
  - 추세선이 오차막대(error bar)를 너무 많이 벗어날 경우에는 개형 모델의 신뢰성이 떨어지므로 다른 모델을 적용시켜 본다. 가능한 일차식으로 표현할 수 있게 그래프를 만든다.
  
- 에러범위 표시하기 (그래프 상에 오차막대(error bar) 추가)
  - 그래프가 활성화된 상태에서 “차트도구”의 “레이아웃”을 선택한다.
  - 레이아웃 중 “오차막대”의 “오차막대(표준편차)”을 선택한다.
  - 그래프 상에서 x-축 오차막대 위에 마우스를 올려놓고 오른쪽 버튼을 이용, 제거한다.
  - y-축 오차막대의 크기는 “오차막대”의 “기타오차막대옵션”을 이용하여 직접 입력한다.

2. 철사의 두께 측정결과 그래프 (엑셀을 이용한 분석)

	d (mm)	편차
1	1.014	-0.002
2	1.016	0.000
3	1.011	-0.005
4	1.017	0.001
5	1.020	0.004
6	1.014	-0.002
7	1.019	0.003
8	1.015	-0.001
평균	1.016	
표준편차	0.003	

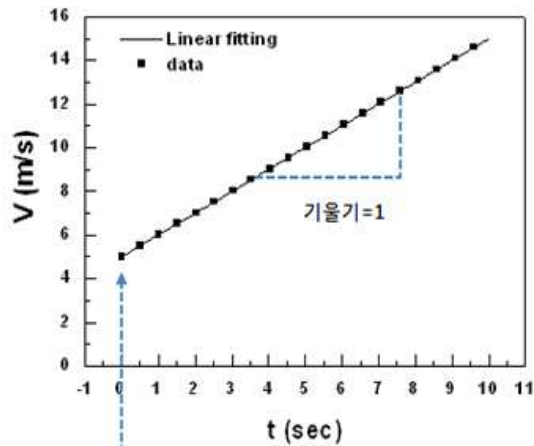


3. 비선형방정식 (non-linear equation)의 선형화 (linearization)

비선형방정식으로 기술되는 복잡한 자연현상을 적절한 함수를 이용하여 선형방정식으로 변환시켜 주어진 현상을 쉽게 분석 및 해석할 수 있다.

(1) 선형그래프 (직선):  $y = ax + b \rightarrow v(t) = v_0 + at$

시간(s)	속도(m/s)
0	5
0.10101	5.10101
0.20202	5.20202
0.30303	5.30303
0.40404	5.40404
0.50505	5.50505
0.60606	5.60606
0.70707	5.70707
0.80808	5.80808
0.90909	5.90909
1.0101	6.0101
1.11111	6.11111
1.21212	6.21212
1.31313	6.31313
1.41414	6.41414
1.51515	6.51515
1.61616	6.61616
1.71717	6.71717
1.81818	6.81818
1.91919	6.91919
2.0202	7.0202
2.12121	7.12121
2.22222	7.22222
2.32323	7.32323
2.42424	7.42424
2.52525	7.52525

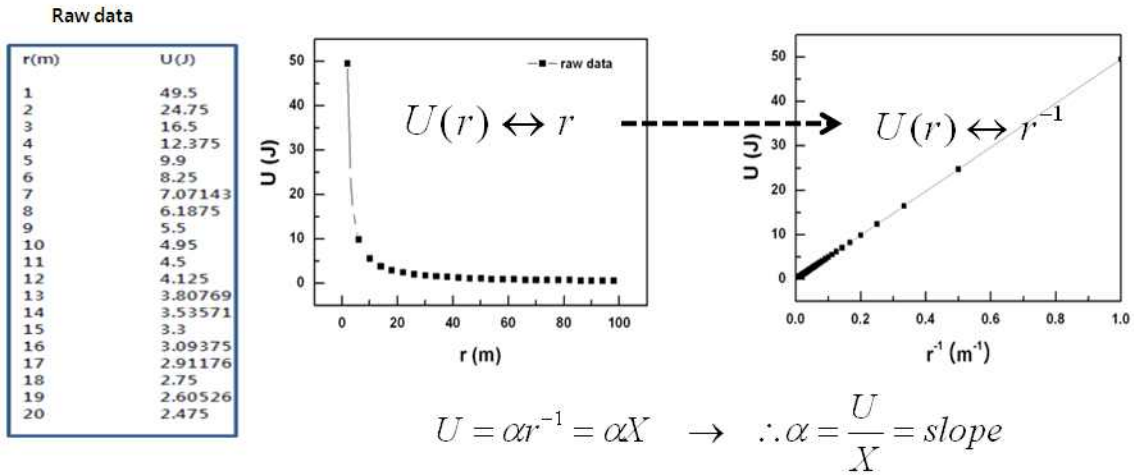


$v_0 = 5 \text{ m/s}, (t = 0)$

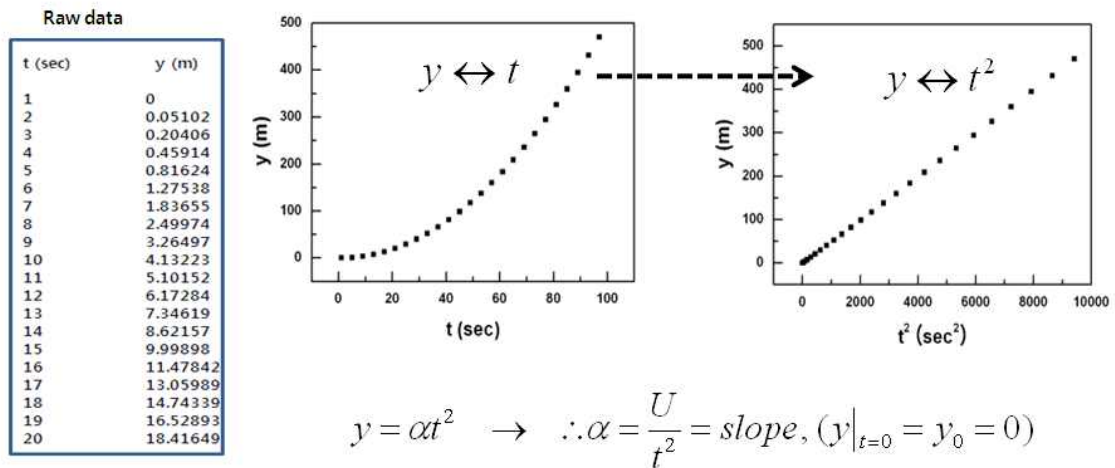
$$\therefore a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v - v_0}{t} = \text{slope}$$

(2) 비선형그래프 (parabola, hyperbola, etc):  $y = ax^m + b, (m \neq 1)$

\*)  $y = ax^{-1} \longrightarrow U(r) = \frac{\alpha}{r}$  (potential energy)



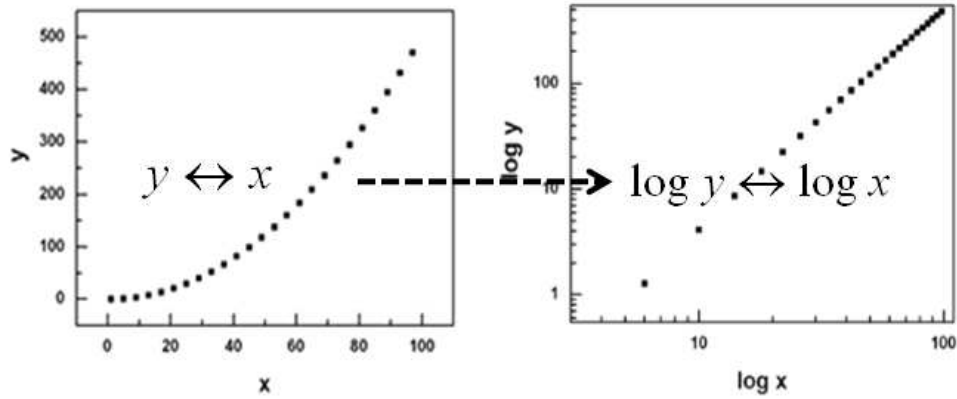
\*)  $y = ax^2 + b \longrightarrow y(t) = y_0 + \frac{1}{2}at^2$  (motion with constant acceleration)



\*)  $y = ax^2 \longrightarrow y(t) = y_0 + \frac{1}{2}at^2$  (motion with constant acceleration)

Linear regression using log-log graph

$y = ax^m \rightarrow \log y = \log a + m \log x$

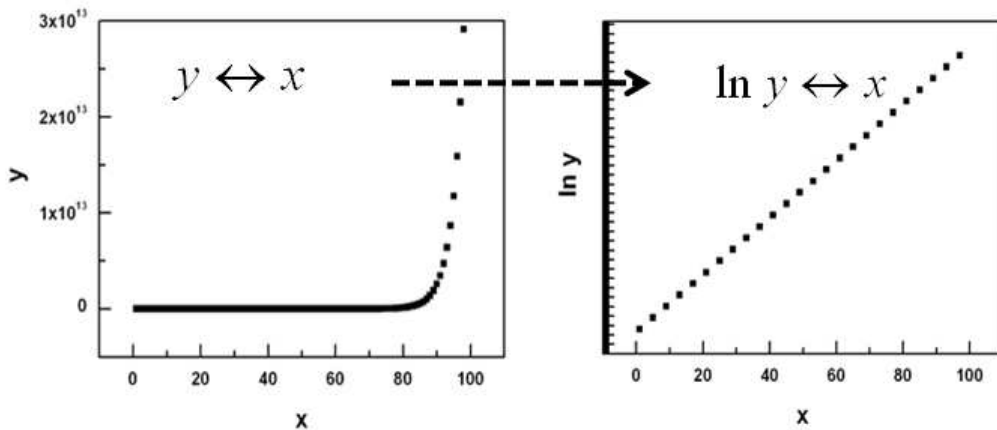


$y = ax^2 \rightarrow \therefore \log y = \log a + 2 \log x$

\*)  $y = ae^{mx}$

Linear regression using semi-log graph

$y = ae^{mx} \rightarrow \ln y = \ln a + mx$



$\ln y = \ln a + mx \rightarrow \therefore m = \frac{\ln y}{x}, \quad y|_{x=0} = a$