

천체까지의 거리는 어떻게 구할까?

형 식

충북대학교, 충청북도 361-763

How to determine the Distances to Heavenly Objects?

Siek Hyung

School of Science Education, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

요 약

하늘과 지구의 크기, 즉 우주에 대한 문제는 선사 이래 인류가 가장 궁금하게 생각하는 문제 중의 하나이다. 과학이 발달하면서 과학적인 탐구결과 밝혀진 증거에 근거하여 천체의 크기나 우주의 한계를 구체적인 숫자로 제시해도, 학생과 일반사람이 그 의미를 피부에 닿게 이해하기란 쉽지 않다. 교육현장에서 교사가 주어진 자료값의 변화에 따라 우주관이 어떻게 달라지고, 종교관에는 어떠한 영향이 있는지를 직접적으로 비교·적용하면서 쉽게 설명하는 것이 필요하다. 그러한 노력이 있지 않으면, 과학적인 결과는 단지 숫자일 뿐 상상할 수 없는 것이리라는 것 이외에 큰 의미를 주지 못한다. 이 연구에서는 고대 천문학적 지식을 소개하고 중학교 학습에서 활용할 수 있는 예시를 제시하여 어떻게 천체까지의 거리를 구하는지를 숙지하게 하여, 현장 학습에 도움이 되고자 하였다. 우주의 크기에 대한 인류의 이해의 역사나 과학적인 노력을 보여주는 좋은 한 예가 바로 제 7차 중학교 2학년 과정에 나오는 지구의 크기 측정에 관한 단원이다. 2학년 과정을 보면 2,200년 전, 에라토스테네스가 시에네와 알렉산드리아에서 정오에 관찰된 태양의 고도자료를 이용하여 지구의 크기를 계산한 결과가 나온다. 만일 지구가 둥글지 않고 편평하다면 어떠한 결과가 나올까? 이 연구에서는 동시대에 중국에서도 회남자에서 유사한 사실을 발견하고 직시하였음을 고찰하였다. 또한 이러한 자료를 활용하여, 즉 지구가 편평하다는 가정 아래 당시 중국인들이 태양까지의 높이를 어떻게 계산하였는지를 살펴보고, 이러한 사실을 어떻게 현장 학습에 활용할 수 있는지 예시를 제시하였다. 또한 현대 천문학에서 비슷한 원리를 사용하여 천체까지의 거리를 어떻게 구하고, 이에서 발전한 다른 예가 무엇인지를 간단히 논의하였다.

주제어 : 회남자 천문훈, 시차, 거리측정법, 태양의 남중 고도

서 론

우주의 크기를 아는 문제는 모든 인류가 가장 궁금하게 여겨 온 것 중의 하나이다. 과거 선조들의 관점에서 볼 때, 우리 의식으로는 그 크기는 짐작할 수가 없고, 크기를 수로 제시해도 단지 숫자일 뿐 상상할 수 없을 정도의 크기라는 것만을 인정할 따름이었을 것이다. 현대의 우주론에 의하면, 우주는 현재 빠른 속도로 팽창하고 있음이 밝혀졌는데, 유한한 빛의 속도와 현대 물리학에서 제시하는 여러 단서에 의하여, 우주 크기는 아마도 유한하거나, 적어도 우주의 지평의 크기는 계산해 볼 수 있다. 이런 세계는 확실히 인간의 눈으로 접하는 지구라는 현실 세계와는 확연히 다른 신비의 세계이다.

회남자(淮南子)는 기원전 2세기경 회남왕 유안(劉安)때 쓰인 것으로 우주와 자연의 원리에서부터 정부와 민간의 법제에 이르기까지 여러 가지 내용이 쓰인 책으로 처음부분에는 당시의 하늘과 땅에 대한 그들의 생각 즉 우주관을 살필 수 있는 자료가 나와 있다. 특히 권3의 천문훈(天文訓)에 당시의 천문학적 지식이 수록되어 있다. 기원전 수천 년 전부터 중국에서는 해 그림자 길이의 변화를 사용하여 정확한 정남과 정북을 알 수 있었고, 1년의 길이를 정확히 추정할 수 있었다.

중국과 동양에서는 서양과는 달리 북극을 중요시하고, 밤에 관측되는 별들을 태양보다 중시한 듯하다. 중국과 동양에서는 오래 전부터 계속되어 온 정오에 측정한 그림자의 길이를 통해서 하지와 동지, 그리고 1년의 길이, 절기, 정확한 계절 등을 알아서 농사에 응용했는데, 이러한 사실에 비추어 높은 천문지식이 있었음을 알 수 있다. 그림자를 통하여 정확한 동, 서, 남,

*교신저자: hyung@chungbuk.ac.kr, Tel: 043-261-2726, Fax: 043-271-0526

북을 파악하고 동지, 하지, 춘분, 추분점의 하늘에서의 태양의 고도를 파악했으며, 천구 상에 태양이 위치하는 날 중 특히 동지(또는 춘분)날은 1년을 시작하는 중요한 날이었다. 그림자 길이의 변화와 별자리상의 태양의 위치 변화에 관한 지식은 주로 진나라나 한나라 당시, 낙양을 기준으로 기술되었다. 그보다 전인 춘추전국시대에는 주나라 이전부터 내려오던 고급 천문지식이 각 나라에 전해져 여러 나라에서도 천문에 관한 지식을 보유하려고 노력하였고, 앞에서 기술한 유사한 천문관측들이 이루어진 듯하다. 그러한 기록들에 대해 진시황 때 측정 단위 등의 통일로 인하여 같은 기준에서 비교할 수 있는 계기가 마련된 듯하다. 진나라가 멸망한 후 다시 통일된 한나라 때에 이르러서 과거의 자료들을 비교하는 과정에서 지역에 따라 편차가 발생함을 알게 된 것 같다.

당시 중국인은 전 지구의 땅의 중심이 스스로 아마도 중국(China)이고 당시 수도인 낙양 부근쪽이라고 생각하였는데, 하늘의 중심이 북 또는 북서쪽으로 기울어져 있다고 생각하였다. 그러나 그들 중국인들은 중국이 세상의 중심이라고 믿었지만, 태양은 정오에 결코 낙양의 천정을 지나지 않는다. 즉, 중국이 적도를 지나지 않기 때문에 그리스 시에네에서처럼 그림자가 전혀 없는 태양이 천정에 있는 경우는 관측이나 관측자료의 기록을 통하여 발견하지는 못하였다. 대신에 그들은 여러 곳에서 측정된 태양의 고도가 다름을 직시하였다.

천문헌에 나온 예에 의하면 1장(丈) 높이의 표(약 30cm 높이의 막대기)를 정남북에 1천 리 거리에 세운 다음, 같은 날 그림자의 길이를 재어서 이 결과를 사용하여 태양까지의 높이를 잴 수 있다고 믿었던 것 같다. 위와 같은 방법으로 측정된 두 지점 중 북쪽에 있는 표의 그림자는 약간 길어서 2척(尺)인 반면, 남쪽에 있는 표의 그림자의 길이는 약간 짧은 1척(尺) 9촌(寸)이었다. 당시에는 땅이 편평하다는 생각에서 벗어나지 못했으므로 위의 결과를 숙고하여 태양까지의 높이를 삼각법으로 계산하였다. 다음에서는 이러한 사실을 사용하여 하늘까지의 높이가 얼마인지 추정하는 것을 해보기로 한다.

이 논문은 지구가 편평하다고 가정하고, 그 편평한 지구 위에 태양(해)이 떠오를 경우 오전에는 지평선에 있고 정오에는 가장 높이 뜨는데, 이 정오에 태양이 위치할 하늘의 높이를 계산하는 방법에 대한 글이다. 또한 별이 지구보다 큰지 작은지, 태양은 지구보다 큰지 작은지 등도 추론해 보는 학습 활동으로서 중학교 고학년 또는 영재 학습에 적당한 수준의 내용이다.

천체의 고도를 이용한 지구, 하늘의 크기 계산법

기원전 그리스 천문학자들의 지구 크기 알기

아리스토텔레스(Aristoteles: BC 384-322)는 어느 수학자가 지구의 원주를 400,000 스타디아(stades)라고 말하고 있다고 언급하는데 이것이 아마도 BC 350년경 언급된 최초의 지구의 크기에 대한 글이다. 아르키메데스(Archimedes: BC 230?)는 그의 Sand Reckoner에서 지구의 원주는 300,000 스타디아라고 인용하고 있는데, 아마도 BC 285년 무렵의 학자의 계산일 것이라고 짐작하고 있다. 역사상 자세한 기록이 알려진 인물로는 Cleomedes 기록에 의하면 BC 3세기의 에라토스테네스(Eratosthenes: BC 276-194)가 처음이다. 에라토스테네스는 알렉산드리아(Alexandria)와 5,000 스타디아(900 km) 떨어진 시에네(Syene)가 같은 자오선 상에 있다고 가정하고, 하짓날 정오에 시에네에서 햇빛이 우물 속에 수직으로 비칠 때, 북쪽의 알렉산드리아에서는 똑바로 세운 그림자 끝이 약 7.2° 기울어진 곳에 생긴다는 사실을 이용하여 지구의 원주는 250,000 스타디아임을 계산하였다. 에라토스테네스가 구한 250,000 스타디아가 현재의 단위로 얼마인가는 정확히 알기는 쉽지 않지만, 그 결과는 현대의 측정치에서 크게 벗어나지 않는 것만은 분명하다.

지구의 크기를 측정할 수 있는 또 다른 방법으로는 별을 이용하는 방법이다. BC 100년경의 포시도니우스(Posidonius: BC 135-51)는 모든 별 중 두 번째로 밝고, 우리나라에서는 제주도에서만 1월경 잠깐 볼 수 있는, 카노프스(Canopus, 노인성)의 관측으로부터 지구의 크기를 계산하였다. 카노프스는 그리스에서 보이지 않는다. 우리나라에서도 카노프스, 즉 노인성은 남쪽이 있는 제주도에서는 출몰성으로 관측되지만 서울과 한반도에서는 관측할 수 없는 전몰성이다. 즉 별의 적위(δ)와 지구의 위도(ϕ)와 남중고도(a) 사이는 다음의 상관관계가 있다.

$$a = \delta + 90 - \phi$$

포시도니우스는 에라토스테네스와 같이 로디스(Rodes)와 알렉산드리아 두 지점의 거리가 5000 스타디아라 가정하고, 두 지점에서 본 카노프스의 고도 차이는 두 관측지점의 위도차가 된다는 점을 이용하여, 240,000 스타디아로 지구 원주를 계산하였다(Evans, 1998). 우리에게 8학년 교과서에 에라토스테네스의 예가 소개되어 더 잘 알려져 있지만, 천문학적인 관점에서는 포시도니우스의 예가 더욱 중요한 의미를 가진다.



그림 1. 거리를 알지 못하는 적색 성운

앞의 두 예는 태양이나 별까지의 거리를 무한대에 가까운 어떤 곳에 있다고 가정한 결과 얻게 된 지구의 크기에 대한 결과이다. 별과 천체의 거리는 우리가 측정할 수 없는 무한대의 거리에 놓여 있을까? 멀다면, 별, 태양, 달은 점광원으로 보이고, 크기와 모양은 없을 것이다. 하지만, 그림 1에서 보듯이 천체는 모양과 크기를 가지고 있다. 20세기 초에는 성운이 우리 우주밖에 존재하는 또 다른 '섬우주(지금의 외부우주)'인지 연구의 대상이 되었지만, 우리우주(지금의 은하수)안에 있는 천체가 지구만한지, 혹은 태양 크기인지를 아는 것도 무엇보다 먼저 파악해야 할 난제였다. 가령 (1) 어떤 아마추어 천문학자 A가 그림 1의 천체는 지구보다 약간 큰데, 시간이 지남에 따라 지구로 진화하는 별이라고 추정하였다. 즉, 이 천체가 진화하여 지구처럼 될 것이라고 생각하였다. 따라서 지구는 아마도 외핵 부분은 비어있고 지구 내부에는 중심별이 존재할 것이라고 생각했다고 하자. 또한 (2) 다른 아마추어 천문학자 B는 위의 천체가 진화하여 태양 같은 모양의 이글거리는 별이 될 것이라 생각하였다. 그러므로 태양 표면은 6000 K이지만 내부는 비어있고, 온도도 높지 않은 영역이 있어 사람이 살 수도 있을 것이라고 추정했다.

위의 의견 중 누가 올바른 추론을 했을까? 이 천체는 태양의 크기일까? 지구의 크기일까? 달 정도의 크기일까? 밤하늘에 가끔 관측되는 혜성은 서울의 크기일까? 작은 마을의 크기일까? 이러한 것들을 어떻게 구분할 수 있을까? 어떠한 물리적 변수

(값)를 알아야 위의 천체의 크기를 정확하게 알 수가 있을까? 이것에 대해 고대 천문학자들이 제시한 처음의 해답이 삼각시차법이다.

기원전 동양 한나라의 회남자의 하늘의 높이 측정법

삼각시차란 어떤 물체를 다른 위치에서 바라볼 때 생기는 위치의 차이와 삼각법을 사용해서 거리를 측정하는 방법이다. 서로 다른 두 시점에서 물체를 볼 때, 그 물체는 꼭 다른 위치에 있는 것처럼 보이게 된다. 간단한 실험을 해보면 눈앞에 연필을 들고 보면서 왼쪽 눈을 감고 연필을 볼 때와 오른쪽 눈을 감고 연필을 볼 때의 위치가 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 이 때 생기는 편이된 각도를 시차라 하며, 이것은 삼각형의 한 각이기도 하다. 또 두 지점 사이의 거리는 삼각형의 한 변이기도 하다. 삼각형에서 두 지점 사이의 거리와 그에 따른 각도를 이용하여 물체의 거리를 쉽게 계산해 낼 수 있는데 이것을 삼각시차라 한다(부록 I 그림 1, 2 참조). 이러한 삼각시차는 별이 너무 멀기 때문에 기원전 천문학자들이 별까지의 거리를 측정하는데 이용하지 못했다. 하지만, 앞의 논의에서 보듯이 이러한 기하학적 원리를 이용하여 그리스 천문학자들은 지구의 크기를 측정하는데 사용하였다.

BC 120년 무렵 중국에서는 삼각시차법으로 하늘의 높이를 측정하려는 시도가 있었다. 당시의 천문학적 배경에 대해 살펴보고, 어떠한 결과를 얻었는지 알아보자.

서양에서는 바빌로니아의 전통에 따라 태양이 별자리 사이를 지나는 황도를 중요시 하였는데, 동양에서는 적도와 황도를 포함하고 달의 움직임을 중시하는 28수(宿)를 사용하였다. 28수는 일시적으로 만들어진 것이 아니고, BC 1700년 무렵 허수(虛宿) 등이 몇 개의 별자리 기준이 정해진 후 28개로 체계화된 듯하다. 현대 천문학자에게 잘 알려진 지구 자전축의 세차운동을 알지 못한 그들은 하늘의 북쪽, 즉 동지점이 차츰 하늘의 서쪽으로 움직이고, 하늘의 별들이 일주하는 천구의 북극도 지구(중국이나 당시 조선과 같은 북반구)에서 보면 북쪽으로 기울어 있음을 해석하기 위하여 하늘이 서북쪽으로 기울어졌다고 생각하였다. 당시 중국은 지금보다 크지 않았는데, 주위 나라는 번두리로 보고 땅의 중심 위치를 차지하는 나라를 자기 나라 중국이라고 보았다. 그래서 (1) 중국의 북서쪽에 주로 높은 산맥들이 있고, (2) 남동쪽에 바다가 있는 것들을 보고, 편평한 땅이 약간 동남쪽으로 기울어져 있다고 생각하였다. 그러한 땅의 중간 지점에 (3) 북동-남서 대각선 방향으로 큰 강들이 흐르고

있는데 이는 하늘에 흐르는 은하수와 유사하다고 생각하였다. 하지만 전반적으로 지구는 편평하다고 보고, 태양은 정사각형 땅의 한 변의 중심인 동쪽에서 떠올라 한낮에 가장 높은 곳인 하늘에 머물고 저녁에는 서쪽 땅 부근으로 진다고 생각했다 (홍영희와 형식, 2007).

기원전 중국 고대 천문학에서는 해, 달의 운동에 대해 진보적인 기하학적 해석을 하지 않았다. 달은 매일 약 13° 움직여 가는데, 기원전 4세기경 '석신(石申)'은 이 비율이 변함을 알았고, 달의 궤도가 황도에서 남북으로 어긋남도 알아, 달이 지나는 9개의 길을 언급하였다. 서양에서는 바빌로니아의 기록이 프톨레마이오스 이후 사라졌는데, 바빌로니아와 동시대의 일식 기록이 '서경'에 나와 있다. 이보다 더 오랜 일식과 같은 천문기록이 그 이전 갑골문자에도 기록되어 있다. 상대에 이르러서는 월식을 역법상의 즉 자연 현상의 일부로 이미 해석하고 있다. 월식보다 매우 드물게 일어나는 일식은 주기를 찾을 수가 없어서 이 현상 뒤에 두려운 그 무엇이 있는 것으로 해석하였다 (Needham, 1956). 그리스에서 발달된 기하학이 중국에는 없지만 그래도 땅을 4각형으로 하늘을 원으로 보고 해의 운동 등을 당시의 우주관에 비추어서 해석하려 하였는데, 그 예를 살펴보고자 한다.

다음은 회남자(淮南子)의 천문훈(天文訓)에 중국인이 하늘의 높이를 측정 한 기록이다 (유안 劉安, 2001). 이 자료를 사용하여 당시 방법대로 하늘의 높이를 구해보자.

하늘의 높이를 알려면, 높이 1장(丈)의 표(表) 2개를 정남북에 1천리 거리를 두고 세운 다음, 같은 날 그 그림자를 쟀다. 북표의 그림자가 2척(尺), 남표의 그림자가 1척 9촌(寸)이다. 이 경우 북표에서 계속해서 남표를 지나서 남쪽으로 가면, 2 만리(里) 지점에서 그림자는 없어지는데, 이 지점이 해가 직하하는 곳이다.

만일 1장=30 cm, 1장=10척, 1척=10촌, 10리=4 km로 가정한다면, (ㄱ) 높이 30 cm 자 2개를 정남북에 400 km 거리를 두고 세운 다음, 같은 날 그 그림자를 쟀다. (ㄴ) 북쪽에 세운 자의 그림자의 길이가 6 cm, 남쪽 자의 그림자의 길이는 5.7 cm이다. (ㄷ) 이 경우 북쪽 자가 있는 지점에서 계속해서 남쪽으로 내려가면, 8,000 km 지점에서 그림자는 없어지는데, 이 지점에 해가 직하할 것으로 추정하고 있다. 이러한 추정과 삼각법을 이용해 회남자에서는

그림자의 길이는 2척이고, 그림자를 생기게 하는 자의 높이가 1장이라면 그림자는 1이고 높이는 5의 비율이다. 그러므로 이곳에서 남쪽으로, 해의 직하에 해당하는 리수(里數)는 2 만리이므로, 이것을 5배하면 하늘의 높이는 10 만리가 된다.

라고 하여 태양이 지나는 하늘까지의 높이는 10 만리, 즉 40,000 km가 된다고 추정하였다.

그리스에서는 적도가 지나는 이집트를 여행하여 900 km 떨어진 두 지점 중, 한 지점에서 태양이 직하하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 중국에서는 그러한 것이 가능하지 않아서 직하지 않았던 두 지점의 그림자 길이를 측정하여 땅이 편평하다는 가정 아래, 직하하는 지점이 더욱 남쪽에 8,000 km 떨어져 있는 곳에 있다고 추정하였다. 그리고 추정되는 직하 지점에서 높이가 40,000 km되는 지점에 정오에 태양이 있을 것이고, 하늘의 높이가 40,000 km라고 판단하였다.

회남자에서 이용한 자료는 사실 에라토스테네스가 이용한 자료와 같은 종류의 자료이다. 단지 이 자료를 해석하는데, 별이나 태양까지의 거리가 멀 것이라는 가정이 빠졌기 때문에 전혀 다른 모습의 우주를 그리게 된 것이다. 이러한 영향은 기상 현상인 구름과 햇무리, 달무리에도 적용되었는데, 해와 달 아래에서 그리 멀지 않는 곳에 구름이 있고, 햇무리, 바람, 비 등의 기상현상을 통해, 하늘의 경도가 땅에 내려진다고 생각하였다. 하늘에 대해서 서양의 천구에 대응하는 개념이 있었을까? 서양에서 완전한 천구를 도입하여 동심원의 여러 천구를 설정하고, 물질적인 천구 하나를 제외하고 나머지는 신적인 천구를 여럿이 도입하여 하늘을 설명하였다. 동양에서는 이러한 천구의 개념이 없는 대신 28수나 태양, 달이 지나는 하늘은 높이가 앞에서 구한 정도, 즉 40,000 km라고 여겼고, 좀 더 하늘의 북쪽으로 가면, 북극 부근은 더 멀거나 끝이 없는 텅 빈(太虛, 가장자리(邊)가 없는 비물질적인) 세계로 생각한 듯하다. 따라서 위에서 계산한 하늘의 높이는 태양이 지나는, 측정이 가능한 하늘까지의 높이이다. 당시에는 천구의 북극에 오늘날의 북극성이 없었는데, 북두칠성 등 여러 다른 별자리가 서양의 행성의 역할을 하는 신적인 존재였던 것으로 보인다.

결론 및 제언

이 연구에서 처음 언급한 예와 천문학에 응용되고 있는 예들은 인류가 별을 관찰하면서 우주에 대해서 어떻게 부단히 고민해왔는가를 보여주고 있다. 우주는 별과 인간, 그리고 그 모든 것이 일시적으로 태어나서 성장하고 마침내는 죽어가는 곳이다. 인간이 지구를 의지해서 살다가 죽음을 맞이하듯이, 별들은 은하에 의지해서 살아가고 있고, 언젠가는 죽음을 맞이한다. 이 우주는 하나의 생명체처럼 서로 유기적으로 연관되어 있고, 이러한 우주와 밤하늘의 별들은 우리의 상상력을 끊임없이 자극

해왔다. 과거에 인류는 맨눈으로 관찰한 밤하늘을 단지 사유하고 관조해왔지만, 현대 천문학자들은 망원경을 사용해 우주를 관찰하고 있다. 현대의 천문학자들은 이제 기기를 사용해 얻은 지식을 해석하기 위해 보이지 않는 우주까지를 대상으로 연구하고 사색한다.

회남자의 예에서 하늘까지의 높이를 계산한 것을 학생들에게 실습시키고 나서, 그리스의 에라토스테네스가 어떻게 진실 보한 결과를 얻게 되었는지를 학습하면 학생들은 좀 더 쉽게 과학의 내용을 이해할 수 있으리라고 생각된다. 또한 왜 그러한 놀라운 과학적 사실과 발견이 서양이나 동양의 과학과 사회의 발전에 활용되지 못하고 지구가 편평하다는 생각에 머물렀어야 했는지, 왜 아메리카로 일찍 여행할 생각은 하지 못했는지를 학생들 스스로 생각해보는 자유로운 분위기 속에서 과학에 대한 흥미를 키우는 계기가 되었으면 한다. 이 연구에서는 서양에서 어떠한 방법으로 지구의 크기를 측정하였는지를 살펴보고, 동시대 동양에서는 유사한 자료로 어떻게 다른 결과가 나왔는지를 살펴보았다. 이러한 연구에 근거해 부록에 학습활동에 어떻게 이용될 수 있는지 예를 제시하였다. 끝으로 이와 유사한 연구가 많이 진행되어 동양이나 한국에서도 서양 과학과 유사한 예가 많음을 인식하는 계기가 마련되기를 바란다. 그러한 예들이 현장과학교육학회지를 통해 많이 발굴되어 현장교육과 현장학습에 활용되기를 바란다.

감사의 글

원고를 자세히 검토 수정해주신 현장과학교육학회 편집위원 홍명수님께 감사드립니다. 본 연구는 한국과학재단(ARCSEC)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

ABSTRACT

Since the prehistoric period, one of the human's most intriguing questions is to know the distance of the heaven and earth size. It is still not an easy matter for students or the public to visualize them meaningful, even if scientists are guided with the real figures, the scale of the celestial objects and the Universe based on the scientific research. Hence, it would be necessary for teachers to guide them, with some direct comparative examples which may change their view on the Universe or the religious belief. Without teacher's such clever role, the scientific discover could sometimes be nothing other than a simple dull figure which is beyond the imagination. In this study, we investigate the ancient Astronomical

endeavor on the determination of celestial distances, of which knowledge can be useful in the middle school teaching classes. A good example which shows the ancient Astronomers' endeavor to figure out the Universe extent is the circumference measurement of the Earth, given in the 8th grade textbook of the 7th National Curriculum. About 2,200 year ago, Eratosthenes (276BC-194BC) analyzed the altitude difference (measured at noon) between Alexandria and Syene, and found the size of the Earth. If the Earth is not round and flat instead, what kind of scientific discovery will come out from such observed data? In this study, we investigate the case of the China Han dynasty of the same period with Greece, who also observed the similar difference between north and south provinces. On the other hand, the Chinese tried to determine the sky height where the Sun located at noon, assuming the Earth's flatness. We discuss the Western Han dynasty (about 200 BC) case and provide the tutorial an example for middle school students's learning classes. We also review modern celestial distance determination methods, e.g. from triangular parallax to other evolved developed system.

Key words : HuaiNanTzu Tianwen(Astronomy), parallax, distance determination, Sun's meridian transit altitude.

참고문헌

- 유완 편자, 안길환 편역, 신완역 회남자 (2001) 명문당 pp178-180.
 홍영희, 형식 (2007) 기원전 동양에서의 5행성 운동 관찰. 한국 지구과학회(제출 중).
 Evans J (1998) The History and Practice of Ancient Astronomy. Oxford, Oxford University Press p63.
 Needham J (1956) Science and Civilization in China (SCC) Cambridge University Press vol. 2 pp330-497.

부록 I. 천체까지의 거리 측정하기

1. 학습 목표

- (1) 지구가 편평하다면 태양의 고도(높이)변화의 의미를 알아본다.
- (2) 정오에 그림자의 높이가 위치에 따라 다른 이유를 고찰해본다.
- (3) 태양계 내의 행성, 별, 외부 은하들까지의 거리 결정 방법을 이해할 수 있다.

2. 준비물

각도기, 압정, 노끈, 30-50cm자, 줄자, 필기도구, 계산기, B4 용지

3. 학습 내용

강을 건너지 않고도 강 저편까지 거리를 알 수 있듯이 별까지의 거리를 알 수 있을까?

- (1) 과거에 인류는 둥그런 친구라는 하늘이 있고, 태양, 달, 행성, 별들은 그 하늘에 박혀있다고 생각하였다. 이 때 하늘의 높이를 측정할 수 있는 방법을 궁리하였다.
- (2) 또 다른 고대인들은 하늘에는 별들이 보석처럼 박혀있지만, 별들과는 달리 태양, 달, 행성의 거리는 조금 가까워서 하늘과 태양 사이에 있다고 생각하였다.

4. 학습활동

1) 삼각시차 이해하기

• 활동 1 - 우주의 거리 측정(삼각시차 이해하기)

시차 관측이 매우 어려웠기 때문에 사람들은 오랜 기간 천동설을 지지하지 않을 수 없었다. 말하자면 시차가 매우 작았다는 것은 별이 인간이 상상할 수 있는 거리 이상으로 떨어져 있었다는 것을 의미한다. 지구가 6개월 간격으로 위치가 변할 때 비교적 별이 가까이 있다면, 별의 시차가 측정될 것이다. 가장 큰 별의 시차는 1838년에 센타우루스자리 알파별 (α -Centauri)로서 그 값은 매우 작은 0.76초(″) 정도였다. 이런 정밀한 측정은 19세기에 와서, 정밀한 광학이 발전된 후에야 가능하게 되었다.

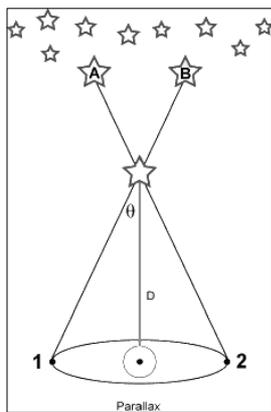


그림 1. 별의 시차 (stellar parallax)

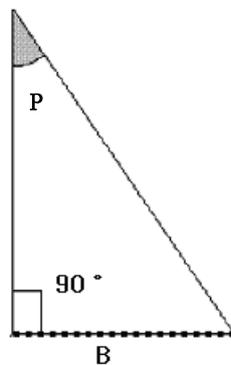


그림 2. 삼각 시차

• 활동 2 - 탐구과정

- (1) 50 cm의 간격으로 2개의 압정을 고정시킨다. (또는 B4 용지를 세로로 놓고, 밑에 5 cm선 3개를 각각 따로 그린다. 이 선들은 삼각형의 밑변이 되며, 그림 2의 B와 유사한 기선이 3개 그려진 것이다.)
- (2) 기선으로부터 거리가 1 m, 2 m, 3 m 떨어짐에 따라 (또는 B4 용지의 각 기선에 높이가 10 cm, 20 cm, 25 cm인 직각삼각형을 각각 그려서) 그 꼭지 각도가 얼마만큼 변하는지 그 각도를 측정하여 기록한다.
- (3) 기선의 간격이 1 m인 경우에도 (2)의 실험을 계속하여 그 각도를 측정한다.

• 활동 3 - 관찰

- (1) 기선으로부터 거리가 멀어질수록 꼭지 각도는 어떻게 변하는가?
- (2) 기선의 길이가 클 때와 기선의 길이가 작을 때, 각도는 어떤 연관성이 있는가?
- (3) 실험에 사용된 결과들을 비교해 보자.

① 기선이 50 cm일 때

기선으로부터 거리	기선 : 50 cm (B4 : 밑변기선 5 cm)	1 m (10 cm)	2 m (20 cm)	3 m (25 cm)
꼭지 각도(°)	---			

② 기선이 1 m 일 때

기선으로부터 거리	1 m	2 m	3 m
꼭지 각도 (°)			

2) 땅이 편평하다면 정오에 태양이 지나는 하늘의 높이는?

• 활동 4 - 삼각법을 천체에 적용하기

- (1) 기선이 1억 5천만 km일 때 1″의 꼭지각도에 해당하는 길이는 얼마인가? (1″ 각은 100원짜리 동전을 약 4 km 떨어져서 보았을 때의 사잇각)
- (2) 삼각법을 이용해 하늘의 높이를 재려는 노력이 BC 140 년경 중국에서 있었다.
 - 삼각형을 그려서, 밑변이 8,000 km (2만리)일 때, 한 끝에서 직각으로 다른 끝에서는 위에서 제시한 각으로 올릴 경우 높이는?
 - 태양이 있는 하늘까지의 높이는? (단위: 리 또는 km)

〈보기 1〉

회남자(淮南子)의 천문헌에 의하면 하늘의 높이를 알려면
 ㄱ. 높이 30 cm 자 2개를 정남북에 400 km 거리를 두고 세운 다음, 같은 날 그 그림자를 쬐다.
 ㄴ. 북쪽에 세운 자의 그림자의 길이가 6 cm, 남쪽 자의 그림자의 길이는 5.7 cm이다.
 ㄷ. 이 경우 북쪽 자가 있는 지점에서 계속해서 남쪽으로 내려가면, 8000 km 지점에서 그림자는 없어지는데, 이 지점이 해가 직하하는 곳이다.

• 활동 5 - 실습에 대한 토의

- (1) 〈보기1〉에서 언급한 1천리에 그림자의 길이가 1촌씩 짧아지면, 20배 되는 2 만리의 남쪽으로 가면 실제 그림자가 없어질까?
- (2) 중국의 옛 서울 낙양에서 남쪽으로 가면 그림자가 없어지는 지점이 있을까? 만일 없어진다면 그러한 이유는 무엇에서인가?

5. 참고사항: 천문학에서의 거리 측정법

(1) 연주시차

앞에서와 같이 삼각시차법의 응용인 연주시차를 통해 별까지의 거리를 알 수 있고, 쌍성의 경우도 거리를 알 수가 있다. 그런데 쌍성의 경우 두 별이 회전하는 주기도 알 수 있으므로 이 두 값을 이용하여 별들의 질량까지도 계산할 수 있다. 하지만 연주시차로 거리를 알 수 있는 별들은 전체 별들에 비해 많지 않다. 천문학에서는 먼 곳까지의 거리를 알기 위해 다른 많은 방법을 사용한다. 교과서에서 연주시차의 예가 대표적으로 제시되어 이 방법이 천문학에 사용되는 가장 일반적인 방법이라고 오해하고 있지만, 천문학에서는 극히 제한된 별들에만 적용되고 있다.

(2) 거리지수=실시등급-절대등급

별의 밝기는 등급으로 표시되는데 이는 우리 눈의 빛에 대한 생리적 반응을 기준으로 나타낸 것으로 거리를 알려면 약간 복잡한 log 관계가 필요하다. 최종 사용할 수 있는 식은 $m - M = 5 \log r - 5$ 이다. 여기서 r 은 파섹(pc)단위이고, m

은 겉보기 등급, M 은 절대등급이다. 구상성단이나 산개성단이 거리지수로 측정할 수 있는 대표적인 예로, 이 경우 많은 별들 중 태양 같은 G형별은 절대 등급 $M=5$ 이고, 시리우스 같은 별은 $M=0$ 이므로, 이러한 절대등급과 겉보기 등급과의 관계를 통해 거리를 알 수 있다.

(3) 세페이드 변광성

두 가지 변수, 즉 ① 광도(밝기)의 변화 ② 변광 주기를 이용하여 구할 수 있다. 큰 별은 광도가 크고, 변광 주기도 긴데, 이러한 직접적인 상관관계를 이용해 거리를 구할 수 있다.

-세페이드 변광성: 주기 5일-30일인데, 주기가 긴 것이 밝으므로 거리를 알려주는 대표적인 등대구실을 하는 별로 알려져 있다.

-거문고 자리 RR형: 겉보기 등급을 알면 주기와 상관없이 절대등급($M = 0.5$)이므로, 세페이드 변광성과 유사한 방법으로 거리를 구할 수 있다.

20세기 초에 우리 우주(지금의 은하수)밖에 또 다른 우주(지금의 외부은하)가 있는지 궁금해 했는데, 세페이드 변광성 연구를 통해 LMC, SMC, 안드로메다성운이 우리은하 밖의 또 다른 섬우주(지금에는 외부은하로 정의됨)임이 밝혀지기도 했다.

(4) 폭발변광성

-신성 : 밝기가 급격히 변하는 별. 매년 30-50개가 발견된다.

-초신성 : 1세기에 한 은하에 1-3개 정도 폭발하는데, 최대 밝기가 일정하므로 이를 이용해 거리를 구할 수 있다. 초신성이 폭발한 후 최대 밝기 때의 절대등급은 약 -20^m 이므로, 이 역시 초신성이 발생한 은하까지의 거리를 측정하는 도구가 된다.

(5) 허블의 법칙

빛을 내는 물체가 멀어질 때 스펙트럼선이 장파장으로 이동하는데, 우주 안의 은하들은 거리에 비례하여 빠른 속도로 멀어지고 있다. 즉 후퇴속도는 은하까지의 거리에 비례함을 이용한다.

$$v(km/s) = H(km/s/Mpc) d(Mpc)$$