

홍대용 통천의의 혼천의 연구*
**A STUDY ON THE ARMILLARY SPHERE OF TONGCHEON-UI DESCRIBED
BY HONG DAE-YONG**

민병희^{1,4}, 윤용현², 김상혁¹, 기호철³

¹한국천문연구원, ²국립중앙과학관, ³문화유산연구소 길, ⁴과학기술연합대학원대학교
BYEONG-HEE MIHN^{1,4}, YONG-HYUN YUN², SANG HYUK KIM¹, AND HO CHUL KI³

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

²National Science Museum, Daejeon 34143, Korea

³Ghil Institute of Cultural Heritage, Gochang 56439, Korea

⁴Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

E-mail: bhmin@kasi.re.kr;

(Received September 30, 2021; Revised November 25, 2021; Accepted December 14, 2021)

ABSTRACT

This study aims to develop a restoration model of an armillary sphere of Tongcheon-ui (Pan-celestial Armillary Sphere) by referring to the records of *Damheonseo* (Hong Dae-Yong Anthology) and the artifact of an armillary sphere in the Korean Christian Museum of Soongsil University. Between 1760 and 1762, Hong, Dae-Yong (1731-1783) built Tongcheon-ui, with Na, Kyung-Jeok (1690-1762) designing the basic structure and Ann, Cheo-In (1710-1787) completing the assembly. The model in this study is a spherical body with a diameter of 510 mm. Tongcheon-ui operates the armillary sphere by transmitting the rotational power from the lantern clock. The armillary sphere is constructed in the fashion of a two-layer sphere: the outer one is Yukhab-ui that is fixed; and the inner one, Samsin-ui, is rotated around the polar axis. In the equatorial ring possessed by Samsin-ui, an ecliptic ring and a lunar-path ring are successively fixed and are tilted by 23.5° and 28.5° over the equatorial ring, respectively. A solar miniature attached to a 365-toothed inner gear on the ecliptic ring reproduces the annual motion of the Sun. A lunar miniature installed on a 114-toothed inner gear of the lunar-path ring can also replay the moon's orbital motion and phase change. By the set of 'a ratchet gear, a shaft and a spur gear' installed in the solstice-colure double-ring, the inner gears in the ecliptic ring and lunar-path ring can be rotated in the opposite direction to the rotation of Samsin-ui and then the solar and lunar miniatures can simulate their revolution over the period of a year and a month, respectively. In order to indicate the change of the moon phases, 27 pins were arranged in a uniform circle around the lunar-path ring, and the 29-toothed wheel is fixed under the solar miniature. At the center of the armillary sphere, an earth plate representing a world map is fixed horizontally. Tongcheon-ui is the armillary sphere clock developed by Confucian scholars in the late Joseon Dynasty, and the technical level at which astronomical clocks could be produced at the time is of a high standard.

Key words: general: history and philosophy of astronomy, astronomical instrumentation, methods and techniques: instruemntation: miscellaneous

1. 서론

홍대용(洪大容, 1731 ~ 1783)은 전라도 동복현(同福縣)

* 본 논문은 2021년 제11회 국제과학관심포지엄(International Symposium of Science Museums 2021)에서 발표한 '조선후기 기계 시계 통천의 천체운행시스템 모델 개발' 논문을 기초로 본문 내용을 확장하고 보강하여 자세히 기술하였다.

에 살던 나경적(羅景績, 1690 ~ 1762)에게 통천의(統天儀), 혼상의(渾象儀), 측관의(測管儀) 등의 제작을 의뢰하여 1760년 무렵 나주목(羅州牧) 금성관(錦城館)에 설치할 수 있었다. 홍대용은 그의 문집인 『담헌서(澹軒書)』의 「농수각의기지(籠水閣儀器志)」 <통천의(統天

儀)에 이들 천문관측기기를 자세히 기록하였다. 통천의는 기계식 시계장치로 혼천의를 자동운행하는 전형적인 조선의 혼천시계류이다(Kim, 2007; Mihn et al., 2020). 혼천시계는 1669년(현종10) 송이영(宋以穎, 1619 ~ 1682)에 의해 창제되었다(Jeon 2011; Kim et al., 2018). 현종 당시에 자동운행하는 혼천의는 이민철(李敏哲, 1613 ~ 1715)이 제작한 수차 동력을 사용하는 것(‘혼천의’라고 부름)과 송이영이 제작한 일본식 추동력을 사용하였는 것(‘자명종’이라고 부름)이 있었다(Hahn and Nam 1997; Kim, 2007).

혼천시계의 원류는 수격식 혼천의이다. 조선시대 혼천의는 1433년(세종 15)에 정초(鄭招, ? ~ 1434), 박연(朴堧, 1378 ~ 1458), 김진(金鎭, fl. 1433 ~ 1440) 등이 처음 만들었고, 간의대 사업 기간인 1432년 7월에서 1438년 1월 사이에 수격식 혼의-혼상을 제작하였다(Mihn et al., 2016). 그리고 1438년(세종 20) 1월에 흙경각이 완성되는데, 이때 수차 동력으로 흙경각 옥루 가산(假山)에 설치된 혼천의를 구동시킴으로써 수격식 혼천의의 모본이 형성되었던 것으로 보인다(Kim et al., 2011; Kim et al. 2017). 양란 이후 최유지(崔攸之, 1603 ~ 1673)에 의해 죽원자(竹圓子, 1657)가 제작되어 수격식 혼천의의 기본적인 틀이 정비되었고, 이민철에 의해 완성되었다(Kim 2007).

송이영의 혼천시계 제작 이후에 유학자들을 중심으로 혼천시계가 제작되는데, 그 대표적인 사례가 통천의이다. 실제 통천의에 대한 글을 홍대용이 작성했지만, 이에 대한 그의 실증적 과학기술 지식은 나경적에게서 많은 영향을 받았다(Hahn, 2003; Mihn et al. 2017a). 심지어 홍대용이 고향 천안에 만든 농수각(籠水閣)의 건물과 조형은 나경적의 고향 동북현의 정원을 그대로 옮겨놓은 것이었다(An, 2017).

홍대용의 유품으로 알려진 혼천의가 숭실대학교 한국기독교박물관에 전시되어 있다. 이 유물에 대한 제원이 조사되었지만, 기기 작동 및 활용, 기능 등에 대한 분석이 진척되지 않았다(Nam et al., 1995).

본 연구는 홍대용의 통천의에서 자동 운행하는 부분인 혼천의에 대한 모델을 설계하는 것이다. 이를 위해 『담헌서』 「농수각의기지」의 문헌을 분석하고, 숭실대학교 한국기독교박물관에 소장하는 혼천의 유물을 참고하였다. 2장에서는 통천의의 혼천의 문헌과 유물을 분석하고, 3장에서는 혼천의 모델의 구조와 특징을 설명하였다. 4장에서는 통천의의 혼천의 과학기술사적 의의를 논술하고, 5장에서 본 연구의 결론을 정리하였다.

2. 문헌과 유물

2.1. 홍대용 『담헌서』의 〈통천의〉

평소 실용적인 학문적 취향과 아울러 천문학에 관심이

많았던¹ 홍대용(洪大容)은, 1760년대인 그의 나이 30대에 접어들었을 때, 전라도 나주 금성관에서 나경적(羅景績, 1690 ~ 1762)이 만든 혼천의를 목격하였다(An, 2017). 홍대용은 『담헌서』 「항전척독(杭傳尺牘)」 〈건정동필담(乾淨洞筆談)〉에서 나경적 등이 앞서 제작한 천문관측기기를 설명하고 있다. 한편 그는 혼천의의 개량을 나경적에게 제안하고 이를 제작하는 것을 부탁하였다(Hahn, 2003).² 나경적이 죽은 후에는 그의 제자로 보이는 안처인(安處仁, 1710 ~ 1787)의 도움을 받아 가며 자동운행하는 혼천의를 재제작하였는데(Mihn et al., 2020), 이것이 『담헌서』 「농수각의기지(籠水閣儀器志)」에 설명된 〈통천의〉이다. 따라서 통천의의 대부분 구조와 설계는 나경적에서 비롯되었고, 그중 홍대용이 고안한 일부의 개선 사항이 반영된 것이 통천의였던 것으로 보인다. 이러한 제작 과정을 통해, 홍대용은 천체운동의 이치를 분명하게 깨달았던 듯하다.³

통천의는 외형적으로 크게 세 영역으로 구분된다. 하나는 천체운동을 구현하는 ‘혼천의’이고, 다음으로는 혼천의의 동력을 만들어주고 동시에 시계 역할을 하는 ‘자명종’이며, 마지막으로 이들 둘, 즉 혼천의와 자명종을 설치하고 자명종의 추가 오르내릴 공간을 확보해주는 받침 탁자[大卓]로 구성되어 있다(Mihn et al., 2020).⁴

본 연구는 통천의의 혼천의에 한정하여 그에 대한 구조를 분석하고 설계하였다.

2.1.1. 육합의과 삼신의

혼천의는 여러 환을 입체적으로 결합하여 구형으로 구성되며, 2 ~ 3개의 층구조를 가지고 있다. 통상 관측용 혼천의의 경우에는 최외곽에서 내부로, 각각 육합의(六

¹ 『담헌서(澗軒書)』 외집(外集) 권6 「농수각의기지(籠水閣儀器志)」 〈통천의(統天儀)〉 21a-22b, 요순시대 선기옥형(璇璣玉衡)이나 《주비(周髀)》의 개립(蓋笠)은 먼 옛날 일로 확실한 근거가 없어 중고(中古) 이래로는 천체를 담론하고 의기를 제작함에 대대로 새로운 방법이 있어 오로지 그 비슷한 것을 구했으나 대개는 들어보지 못하였다(唐虞之衡, 《周髀》之笠, 遠矣無徵, 中古以來, 譚天制器, 代有新法, 惟求其肖像, 蓋未之聞).

² 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21a-22b, 지금 혼천의(渾儀)의 구제(舊制)를 따르되 자질구레하여 번거로운 것은 참작하여 덜어내고 서양(西洋)의 방법을 모아 변통하여 이 새로운 의기(儀器) 하나를 처음으로 만들어 세우고 ‘통천의(統天儀)’라고 이름을 지었다(今就渾儀舊制, 酌損繁縟, 會通西法, 創立一儀, 名曰‘統天儀’).

³ 『담헌서』 외집 권3, 「항전척독(杭傳尺牘)」 〈건정동필담(乾淨洞筆談)〉 12a-15a.

⁴ 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21a-22b, 별도로 대탁(大卓)을 만들어 십자(十字) 받침과 기륜(機輪)의 갑(匣)을 나란히 그 위에 안치(安置)하고 …… (別爲大卓, 十字之附, 機輪之匣, 并安置其上, ……).

合儀), 삼신의(三辰儀), 사유의(四遊儀)로 구성되어 있다(Lee et al., 2010). 그러나 성리학이 혼천의를 교육적인 용도로 강조하면서, 가장 내부에 있는, 관측 도구의 기능을 가진 사유의가 지구를 상징하는 다른 기물로 진화하는데, 이러한 혼천의는 2층 구조의 혼천의라고 정의할 수 있다(Kim, 2007; Hahn, 2003). 다시 말해서, 최외곽에 있는 육합의는 지평좌표계의 근원을 제공한다. 더불어, 삼신의는 적도좌표계의 역할과 아울러 태양과 달의 궤도인 각각 황도와 백도를 포괄하는 구조이다. 특히 삼신의는 항성을 품은 하늘[天]의 일주운동을 구현하는 역할을 하고 있다.

이러한 관점에서, 통천의의 혼천의는 2층 구조를 지녔다고 볼 수 있다. 즉 육합의와 삼신의가 있는데, 각각 3개의 환이 결합하여 있다.

혼천의[儀]는 두 층(層)이 있어 각각 3개의 철환(鐵環)을 가로세로로 서로 연결하고 모두 단단하게 잠가서 수장(收藏)하기 편리(便利)하게 하였는데 합하면 대소(大小) 두 개의 구(球)가 되고 나누면 반규(半規)가 되는 것은 12개이다.⁵

통천의의 반환[半規]이 12개이다. 먼저 육합의와 삼신의의 각각 6개씩 반규(半規)⁶를 제작하고, 짝을 맞추어 각각 3개의 환을 서로 직교하게 겹쳐 구의 모양을 만든 것을 알 수 있다. 육합의와 삼신의가 모두 직교결합에 의해 안정된 구조로 제작된 것은 그 이전 혼천의에서 흔하지 않은 것이다(Hahn 2003). 이들은 모두 철로 제작하였다. 홍대용은 이 두 층을 단지 외층과 내층이라고 표현하였는데, 그 기능을 전자는 ‘육합(六合)의 광곽(匡郭)이 되며 변함없이 움직이지 않는다’고⁷ 하고, 후자는 ‘삼신(三辰)⁸의 모든 기틀이 되기 때문에 항상 돌아간다’고 설명하고 있다. 본 연구에서는 ‘서찬언(書纂言)’에 따르는 전통적인 명칭을 빌려서, 홍대용이 설명한 외층을 육합의, 내층을 삼신의로 명명한다.

외층은 지평규(地平規), 자오규(子午規), 묘유규(卯酉

規)가 서로 수직으로 결합해 있다. 자오규에 남북극(南北極)의 축(軸)을 받는 방규(方竅)라는 것이 있다. 이는 겹은 네모나고 중심에 (네모) 구멍이 있는 부품으로 방규와 결합된 육합의가 고정되도록 한다. 결국 자오규는 방규를 가지고 있는데, 지평에서 상하로 36도(度) 떨어진 곳에 설치하였다고¹⁰ 하였다. 이 도수는 북극출지(또는 남극입지)를 의미하는 것으로, 혼천의를 제작한 관측지의 위도를 말한다. 다시 말해서 통천의의 혼천의는 관측위도 36°를 기준으로 제작되었음을 말해 주고 있다. 이 36° 관측 위도는 본래 송(宋)의 채침(蔡沈)의 『서경집전(書經集傳)』의 「순전(舜典)」에 선기옥형(璿璣玉衡)의 북극출지(北極出地)에 근거하는 것으로 보인다.¹¹ 한편 현재 나주목 관아의 위도가 35°01'48"이고, 홍대용 농수각의 위도가 36°44'18"이다. 비록 홍대용 등이 「순전(舜典)」의 선기옥형(璿璣玉衡)을 따라 혼천의를 제작했는지라도, 나주목이나 농수각에서 혼천의의 운행이 그 지역의 천상의 모습과 크게 차이가 나지 않았을 것으로 보인다.

내층은 외층보다 직경이 당연히 작다. 또한 환의 너비도 내층이 외층보다 작다고 기술하고 있다.¹² 한편 이 두 층, 즉 육합의와 삼신의는 남북극에서 만난다. 그런데 삼신의의 양 극에는 원규(圓竅)가 있다.¹³ ‘원규’는 도넛 모양의 베어링을 말하는 것 같은데, 원규 중심에 둥근 구멍을 만들어 남북 양극 축에 끼우는데, 삼신의가 극축을 중심으로 회전할 수 있도록 한다. 그리고 삼신의의 남쪽 아래에 작은 원통(圓筒)을 두어 내층과 외층을 일정한 간격으로 띄워서, 이 두 층의 환들이 서로 부딪혀 마찰하지 않게 한다. 아울러 작은 원통을 통해 삼신의가 혼천의의 중심에 위치하게 한다.¹⁴ 내층에는 횡규(橫規)가 있는데, 곧 적도규(赤道規)를 말한다.¹⁵

내층은 적도규 외에 서로 직교로 결합한 두 종류의 규(規)가 있다. 이에 대해 홍대용은 별다른 이름을 명명하지 않았는데, 본 연구의 편의상, 이름을 붙이면 하나는 삼신규(三辰規)이고 다른 하나는 사상규(四象規)라고

5 『담헌서』 외집(外集) 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의(統天儀)〉 21a, 儀有兩層, 各以三鐵環, 縱橫相結, 并爲健鎖, 以便收藏, 合之爲大小兩球, 分之爲半規者十二.

6 홍대용은 환(環)과 규(規)를 같은 의미로 통용하였다. 다만, 환은 전체적인 모양을 대변할 때 사용하고, 규는 개별 기능을 가진 환으로써 설명하는 경향을 보인다.

7 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 此爲六合之匡郭而常不動焉.

8 삼신(三辰) : 일(日), 월(月), 성(星)을 가리킨다.

9 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 此所以爲三辰之全機而常運轉也.

10 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 距地平上下各三十六度爲方竅, 以受南北極軸.

11 『서경집전(書經集傳)』의 권1 「순전(舜典)」, 在璿璣玉衡以齊七政【…… 渾天言 其形體渾渾然也. 其術以爲天半覆地上, 半在地下. 其天居地上見者, 一百八十二度半強地, 下亦然. 北極出地上三十六度, 南極入地下亦三十六度 ……】.

12 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 其內層, 三環相結, 亦如外層. 但環之徑廣稍殺.

13 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 就南北交中爲圓竅, 貫于極軸.

14 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 軸之南下, 貫小圓筒, 以隔兩層, 令居中無碍而不下薄也.

15 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기(籠水閣儀器志)」 〈통천의〉 21b, 其橫規, 刻周天宿度, 是爲赤道.

할 수 있다. 삼신규와 사상규가 만나는 부분에 원규가 결합하여 있다. 이 삼신의 바깥에 북극환(北極環¹⁶)이 적도환에 수평이 되도록 결합하여 있다.¹⁷

외층의 지평규에는 24방위(位)와 24기(氣)의 눈금이 표시되어 있고, 내층의 적도규에는 28수도(宿度)가 새겨져 있다. 전자의 눈금은 양부일구의 지평환의 눈금과 흡사할 것으로 보이며, 후자는 송실대학교 한국기독교 박물관(이후 ‘송실대 박물관’으로 표기)에 소장된 홍대용 가문의 혼천의 유물을 참고해야 한다. 한편 북극환에는 4 모퉁이에 핀(短柱)이 나와 있는데, 여기에 359개의 톱니를 걸어서 고정한다고 하였다.¹⁸ 이 북극환은 자명종 또는 후종(候鐘)에서 나오는 회전동력을 전달받는 장치이다.

다만 주의할 것은 이 359 톱니가 북극환에 탈착할 수 있는 구조이다. 이는 환과 그에 따른 톱니를 서로 구별하여 제작하였음을 말해 주는데, 어떠한 연유로 환과 톱니를 구별하여 제작하였는지 밝혀지지 않았지만, 이러한 방식이 송실대 박물관에 남아있는 혼천의 유물에서 보편적으로 나타나는 것으로 보인다.

2.1.2. 천체운행기구

삼신의는 보통 적도환에 황도환과 백도환을 붙이고 있어서 만들어진 이름이다. 당 태종 정관(貞觀) 7년(633)에 이순풍(李淳風, 602 ~ 670)이 췌내 응휘각(凝暉閣)에 황도혼천의(黃道渾儀)를 설치하였는데, 삼신의는 기존 육합의에 붙어있던 적도환을 복제하여, 그 내부에 삼신쌍환과 결합하여 다시 만들고, 황도환과 월유환(백도환)을 조합하면서 비롯되었다(Mihn, 2016).¹⁹ 그 이후에 제작된 혼천의는 모두 삼신의를 제작하는데, 적도환이나 황도환에 눈금을 새겨 천체관측의 효율성을 높이는 역할을 했던 것으로 보인다. 무엇보다도 황도환과 백도환에 각각 태양과 달의 모형 등을 설치하고 자동으로 운행함으로써, 삼신의가 천구 좌표의 역할뿐만 아니라, (오행성을 제외한) 지구중심 우주구조의 모형을 구현하도록 하였다. 태양과 달의 우주구조 모형은 하루의 시간과 연중의 24기를 표현하고, 태음력의 역일을 표현하는 수단이었다(Kim, 2007).

통천의에서 혼천의의 삼신의 내외에도 이러한 부품이 부착되어 있는데, 조선 왕실에서 제작되었던 방식과

Table 1. Peripheral rings of Samsin-ui (三辰儀)

Name	Combining with the Samsin-ui	Inclination from equator (or its ring)	Number of teeth	Others
Solar Ring (日規)	Inner	23.5°	365	sun's miniature (太陽眞象)
Lunar Ring (月規)	Inner	28.5°	114	moon's miniature (太陰眞象)
Polar Ring (北極環)	Outer	parallel	359	—

다르게 서양의 방식을 많이 도입한 형태이다. 그 내층 적도규 안에 두 개의 규(規)를 비스듬히 연결했다고 설명하고 있다.

내층(內層)의 안쪽에 별도로 2개의 규(規)를 설치하고 적도(赤道)에 비스듬하게 연결한다. 밖에 있는 것은 365개의 톱니[牙]가 위로 태양진상(太陽眞象)에 따르니, 이것이 황도일규(黃道日規)가 되고, 적도의 남북과의 거리는 각각 23.5도(度)이다. 속에 있는 것은 114개 톱니가 위로 태음진상(太陰眞象)에 따르니, 이것이 백도월규(白道月規)가 된다. 적도(赤道)의 남북과의 거리는 각각 28.5도이고, 황도(黃道)에 비하면 5도 차이가 난다.²⁰

삼신의 안에는 황도일규(黃道日規)가 있고, 다시 그 안에 백도월규(白道月規)를 차례로 설치한다. 각각 황도와 백도에 해당하고, 각각 적도와 23.5°, 28.5° 차이를 가지고 있다. 황도일규에는 365개의 톱니가 있고, 백도월규에도 114개의 톱니가 있다. 이들 톱니 위에, 전자는 태양진상(太陽眞象, 태양 모형)을 후자는 태음진상(太陰眞象, 달 모형)을 설치하였다. 송이영의 혼천시계와 달리, 백도월규에서 월운환(月運環)의 존재를 설명하지 않고, 대신에 114개 톱니를 설명하고 있는 것이 특징이다 (refer to Table 1).

앞서 언급했듯이 삼신의 밖에 고정된 북극환(北極環)이 외부로부터 들어온 회전동력을 전달하면 삼신의가 회전하면서, 동시에 적도규에 붙어있는 황도일규와 백도월규도 함께 회전한다. 결국 통천의의 혼천의에서 회전하는 부속품은 삼신의와 그에 붙어있는 일규와 월규뿐이다.

황도일규와 백도일규가 삼신의와 함께 매일 일주운동을 모사한다. 이때 황도일규와 백도일규에 있는 기어

¹⁶ 통천의의 북극환은 혼천의에서 통상 천운환으로 부른다.

¹⁷ 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 22a, 內層之外, 中北極而設一環.

¹⁸ 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 22a, 四隅有短柱, 亦爲鍵鎖, 以固結之, 爲三百五十九牙.

¹⁹ 『구당서(舊唐書)』 「천문지(天文志)」, 『송사(宋史)』 「천문지(天文志)」 권1

²⁰ 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21b, 內層之內, 別設二規, 斜結于赤道. 在外者三百六十五牙, 上付太陽眞象, 是爲黃道日規. 距赤道南北, 各二十三度半. 在內者一百一十四牙, 上付太陰眞象, 是爲白道月規. 距赤道南北, 各二十八度半, 比黃道差五度.

위에 붙어있는 태양진상과 태음진상이 매일 조금씩 일주운동 방향과 반대의 회전 방향으로 이동한다. 『담헌서』 외집 3권 「항전척독(杭傳尺牘)」에도 황도일규와 백도일규의 기능에 대해서 언급하고 있다.

‘별도로 한 개의 환(즉, 황도일규)을 설치하여 365개의 톱니를 만들어서 삼신의(三辰儀) 안에 비스듬히 설치해 놓았으니 이것이 황도(黃道)가 된다. 위에 태양진상(太陽眞象)에 붙이고 기계[機]를 설치하여 날로 한 톱니씩 이동하여 우선(右旋)하여 365일에 1주천(周天)한다.’²¹ ‘또 한 개의 환(백도월규)을 설치하되 114개의 톱니를 만들어서 황도 안에 설치해 놓고 위에 태음진상(太陰眞象)에 붙이고, 역시 기계를 설치하여 하루에 4개의 톱니를 이동시키는데, 이렇게 태양진상을 우선시켜 28일 조금 넘어서 1주천(周天)하게 한다.’²²

여기서 우선(右旋)은 오른손 방향²³이며 천체의 일주운동 방향의 역회전 방향을 말한다. 한편, 기계[機]에 대한 자세한 설명이 「농수각의기지」 〈통천의〉에도 나온다. 이 기계는 격기(激機), 직철(直鐵), 유아(遊牙)가 하나의 세트로 구성되어 있다.

층(層)의 환(環)의 가장자리에 각각 격기(激機)를 설치하였고 (일규 또는 월규의) 중간에 유아(遊牙)가 있는데 아울러 직철(直鐵)이 있어서 서로 끌어당겨서 단단히 잡아서 매었고, 일규(日規)와 월규(月規)의 톱니에 각각 들어간다.²⁴

통상 ‘격기-직철-유아’가 한 덩어리가 되어서 사용되는데, 유아는 황도일규나 백도월규의 톱니와 연결되어 있다.

극축(極軸)의 상하(上下)에 각각 기주(機柱)가 있는데 위에 있는 것은 단아(單牙)로 되어있고 밑에 있는 것은 4아(四牙)로 되어있다.²⁵

그런데 극축 상하에, 즉 북극과 남극 부분에 기주(機柱)가 있다고 한다. 북극에는 1 톱니[單牙]의 기주가, 남극에는 4 톱니의 기주가 있다. 위 문장만 가지고는 혼천의의 외층과 내층 중에 어느 것이 ‘기주’가 있는지, 또한 ‘기주’는 어떠한 형태인지 단정할 수 없다. 이는 송실대 박물관의 혼천의 유물의 분석을 통해서만 그 구조를 이해할 수 있다. 결과적으로 말하면, 이 기주는 격기와 부딪치는 외층 내부의 특정한 환에 붙어있는 부품인 것이다.

「농수각의기지」 〈통천의〉는 이 기주와 ‘격기-직철-유아’의 움직임에 대해서 더 설명하고 있다. ‘내층(內層)’이 좌선(左旋)하면 일규와 월규도 따라서 좌선한다.²⁶ 여기서 좌선은 ‘왼손법칙’²⁷을 의미하며, 별들의 일주운동 방향을 말한다. 이때 격기의 하단(下端)이 축기둥과 만나서 부딪치면, 격기는 반대로 오른쪽으로 돌려고 하고, 유아도 오른쪽으로 돌고, 일시적으로 일규와 월규도 점차 오른쪽으로 돈다. 내층이 더욱 돌아서 격기의 끝이 기주에서 이탈하면, 격기는 좌로 한 톱니 돌고, 직철이 이 회전력을 격동시켜 유아에 전달하여 급격히 좌(左)로 돌고, 일규 또는 월규의 톱니 1개를 우선(右旋)시킨다.²⁸ 결국 격기가 기주와 만나서 회전력을 얻어 유아에 전달하고, 유아가 1톱니 회전하면, 일규 또는 월규의 톱니를 오른손 방향으로 하나 돌린다.

일규(日規)가 단아(單牙)에 격동되면 하루에 1아(牙)를 이동하며 월규(月規)가 4아(四牙)에 격동되면 하루에 4아를 이동한다.²⁹

이들 톱니와 직접 연결되어 있는 태양진상과 태음진상은 톱니가 회전하는 방향만큼 같이 움직인다. 태양진상은 단아 기주에 의해 하루에 황도일규 1 톱니를 움직이고, 태음진상은 4아 기주에 의해 백도월규 4 톱니를 움직인다.

기주가 어떠한 형태를 가지든지 상관없이, 격기가 4번 부딪치는 4아[四牙] 기주를 만들어야 한다. 삼신환은 극축을 따라 돌고, 삼신환 내에 ‘격기-직철-유아’가 북극과 남극에 하나씩 설치되어 있다. 혼천의 구조상 북

21 『담헌서』 외집 3권 「항전척독(杭傳尺牘)」, 別設一環, 爲三百六十五牙, 斜置儀內, 是爲黃道, 上付太陽眞象, 設機使日移一牙, 右旋三百六十五日而一周天.

22 『담헌서』 외집 3권 「항전척독」, 又設一環, 爲一百一十四牙, 置之黃道之內, 上付太陰眞象, 亦設機, 使日移四牙, 右旋二十八日強而一周天.

23 우선(右旋)은 오른손 엄지손가락을 회전축으로 지향할 때 나머지 네 손가락이 감는 방향으로, 본 연구에서는 오른손방향으로도 표현한다. 반대로 좌선(左旋)은 왼손방향을 말한다.

24 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21b, 緣層環而各設激機, 中有遊牙, 并有直鐵以牽持之, 各入于日月規牙.

25 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21b, 極軸上下, 各有機柱, 在上者爲單牙, 在下者爲四牙.

26 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21b, 內層左旋, 日月之規, 隨而左旋.

27 왼손법칙은 왼손의 엄지손가락을 축의 방향과 일치시켰을 때, 나머지 네 손가락이 감는 회전방향을 말한다. 고대에 사용하던 용어 중 좌선(左旋)이 왼손법칙을 말하며, 천체의 일주운동의 방향을 의미한다.

28 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 21b-22a, 激機之下端, 遇軸柱而反右, 則日月之規, 亦隨而漸右. 內層益旋, 機端方脫, 則直鐵激之, 遊牙遽左而移規之一牙.

29 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 22a, 日規激於單牙, 則日移一牙, 月規激於四牙, 則日移四牙.

극축을 잡아주는 것은 자오환인데, 2.1.2 절에서 자오환이 단환일 때보다 쌍환일 때 4 톱니 기주를 만들기 유리하다. 아울러 자오환에 방규를 설치하기 위해서도, 자오환이 단환보다 쌍환일 때, 제작이 편리하다. 자오환이 단환인지 쌍환인지의 여부는 송실대 박물관 유물과 비교할 필요가 있다.

2.1.3. 지평판

통천의의 혼천의는 2층 구조라고 하였다. 반면 혼천의 중심에 지평을 상징하는 기물이 있다. 즉 혼천의가 지구중심설을 따르는 우주구조 모델임을 직접적으로 표현하고 있다.

극축(極軸) 한복판에 철판(鐵板)을 설치하여 지평과 가지런히 평평한데, 위에 산하총도(山河總圖)가 새겨져 있어 지면(地面)을 상징한다. 지판(地板)의 밖에 환(環) 1개를 설치하여 움직일 수 있게 하고 주위에 시각(時刻)을 표시하여 태양(太陽)에 따라서 시간을 보게 한다.³⁰

지판에는 지면을 상징하는 산하총도를 설치하였다. 혼천의 중심에 지판을 설치하는 것은 통천의 이전에도 있었다. 최유지(崔攸之, 1603 ~ 1673)는 「죽원자설(竹園子設)」에서 사유환을 없애고 지방(地方)을 설치하였다고 한다.³¹ 한편 최석정(崔錫鼎, 1646 ~ 1715)의 「제정각기(齊政閣記)」에서도 제정각 혼천의 중심에 지평(地平)을 설치하고 구주오악비해제국(九州五嶽裨海諸國)을 그렸다고 하였다(Kim, 2007).³² 즉 죽원자 혼천의의 중심에는 네모의 지판(地板)을 설치하였지만, 제정각 혼천의의 지평은 네모난 지판인지 원형 지판인지 확실하지 않다.

산하총도 지판 밖에 환이 하나 있다. 환에는 지평해시계에 해당하는 시각 눈금이 표시되어 있다. 이 시각 눈금을 가진 환은 낮의 시각을 재는 기능으로 보이며, 이전 혼천의들의 지판에는 나타나지 않았다. 지평판 위에 있는 황도일규의 태양진상이 있다고 가정하고, 묘유규와 자오규가 교차하는 천정에서 관측자가 혼천의를

바라볼 때, 가상의 지평면에 투영한 태양진상의 위치와 지판 밖의 시각환의 눈금과 비교하여 낮의 시각을 추정할 수 있다.

해시계 환 내에 있는 것으로 보아, ‘산하총도’는 원의 형태로 된 지면을 상징하는 그림임을 알 수 있다. 당시 이러한 산하총도에 해당하는 것으로 ‘천하도(天下圖)’가 있다.

2.2. 국립중앙과학관의 천하도

천하도는 조선후기 『여지도(輿地圖)』라는 이름의 고지도 도서에 있으며, 대부분 목판본으로 대량 인쇄되거나 다양한 필사본이 전해져 오고 있다. 그 제작연대에 대해서는 그 도서 내에 있는 조선의 지도에서 나오는 지역명의 변경 시기로 연대를 추정하는데, 대부분 17 ~ 18세기의 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 국립중앙과학관에 소장되어 있는 9개의 고지도에서 천하도를 조사하였다(NSM, 2013).

- ① 『동국여지도(東國輿地圖)』 (필사본, 1793년 이후)
- ② 『지도(地圖)』 (채색필사본, 1767년 이후)
- ③ 『여지도(輿地圖)I』 (채색필사본, 1767년 이후)
- ④ 『여지도(輿地圖)II』 (목판본, 1791~1793년)
- ⑤ 『조선여지도(朝鮮輿地圖)』 (채색필사본, 1793년 이후)
- ⑥ 『천하도(天下圖)』 (채색필사본, 1670년 또는 1730년)
- ⑦ 『천하지도(天下地圖)I』 (채색필사본, 1767년 이전)
- ⑧ 『천하지도(天下地圖)II』 (필사본, 1791~1793년)
- ⑨ 『지도첩(地圖帖)』 (목판본, 1791~1793년)

이들 고지도는 표제가 없는 경우가 많고, 제작연대가 18세기로 추정되고 있다. 이들 지도에 있는 「천하도(天下圖)」는 그 형태가 유사하지만, 그 안에 있는 지명의 명칭이 조금씩 차이를 보이곤 한다. 본 연구에서는 비교적 지도 그림 상태가 양호한 채색본과 단색본 각 한 점을 선택하여 Figure 1과 같이 복원하였다.

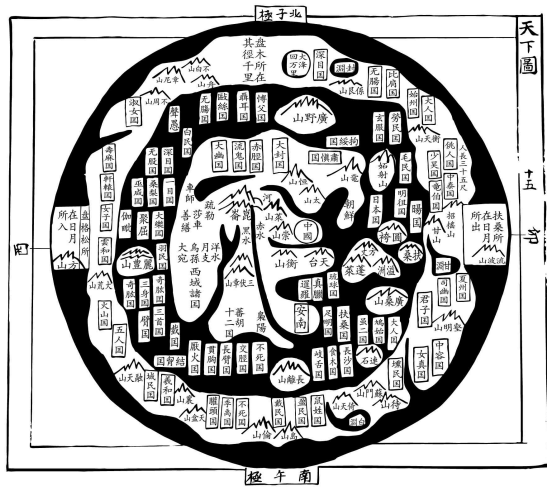
이 천하도에서 채색되어 있는 부분은 강 또는 바다이고, 흰 부분이 육지이다. 대략 144개의 국가명과 지역명이 표현되어 있다.³³

³⁰ 『담헌서』 외집 권6 「농수각의기지」 〈통천의〉 22a, 極軸當中設鐵板, 與地平齊, 上刻山河總圖, 以象地面. 地板之外, 設一環, 令可遊游移, 周表時刻, 隨太陽而考時.

³¹ 『계당집(溪堂集)』 권4 「죽원자설(竹園子設)」 27b, 且外有天圓, 而內無地方, 則有欠於兩儀之代體. 故從其簡易, 去四遊而設地方, 要人一見, 便知堪輿覆載之象.

³² 『명곡집(明谷集)』 권9 「제정각기(齊政閣記)」 2a, 用金爲日月, 而月體黑其半, 爲弦望朏魄. 去舊法衡管直距, 而中設地平, 畫九州五嶽裨海諸國.

³³ 章尼山, 不白山, 舟山, 盤木所在 其徑千里 (또는 千里 盤松), 大澤周萬里 (또는 大澤回萬里), 深目國, 封淵, 係良山, 無腸國 (또는 无腸國), 比肩國, 淑女國, 不周山, 聲愚 (또는 聲禺國), 白民國, 無腸國 (또는 无腸國), 馭絲國, 聶耳國 (또는 聶耳國), 博父國, 廣野山, 拘綏國, 玄服國, 勞民國, 始州國, 大人國, 衡天山, 壽麻國, 軒轅國, 巫咸國, 無暇國 (또는 无股國), 深目國, 一目國, 車師, 大幽國, 疏勒, 流鬼國 (流曳國), 赤脛國, 大封國, 河 (또는 黃河), 恒山, 泰山 (또는 太山), 肅慎國, 龜國 (또는 龜山), 姑射山 (또는 姑射山), 毛民國, 少昊國, 龍伯國 (또는 龍伯國), 佻人國, 中泰國, 人長三十五尺, 盤格松所在 日月所入 (또는 盤格松 日月入), 方山, 女子國, 雲和國, 伽毗國 (또는 伽毗), 聚屈國 (또는 聚屈), 麗豐山, 大樂國, 羽民國, 善善, 大宛, 莎車, 烏孫, 月支, 洋水 (또는 澤水), 崑崙 (또는 崑崙山), 黑水, 赤水, 萊山, 江, 崇山 (또는 嵩山), 衡山, 中國 (또는 中原), 天台 (또는 天台山), 朝鮮, 日本國, 方丈,



(a)



(b)

Figure 1. Restorations of the Cheonha-do (World Map) from (a) Cheonhaji-do (⑧) and (b) Ji-do (②).

蓬萊, 瀛洲 (또는 滄洲), 明祖國, 圓栲 (또는 圓嶠), 暘國 (또는 暘谷), 扶桑 (또는 扶桑山), 甘山 (또는 音淵), 招搖山, 甘淵, 扶桑所在日月所出 (또는 日出扶桑), 流波山, 大荒山, 火山國, 互人國 (또는 五人國), 奇肱國 (또는 奇肱國), 三身國, 臂國, 奇肱國, 西域諸國, 裁國, 三天子章山 (또는 三伏章山), 蕃胡十二國, 臬陽, 暹羅國 (또는 暹羅), 安南國 (또는 安南), 真臘國 (또는 真臘), 足明國, 琉球國, 扶桑國, 廣桑山 (또는 廣素), 虽二國, 鳩始國, 大人國, 君子國, 司幽國, 夏州國, 壑明山, 融天山, 結智國, 城民國, 義和國, 厭火國, 襄山, 天盒山 (또는 天台山), 貫胸國 (또는 貫胷國), 驩頭國, 長臂國, 季禹國, 交脛國, 不死國, 倫山 (또는 登修山), 長離山, 戴民國, 島山 (또는 契山), 岐舌國, 盈民國, 鼠姓國 (또는 鼠民國), 食木國, 長沙國, 倚天山, 白淵, 連石, 蘇門山, 待山, 堯民國, 女人國 (또는 女真國), 中容國.

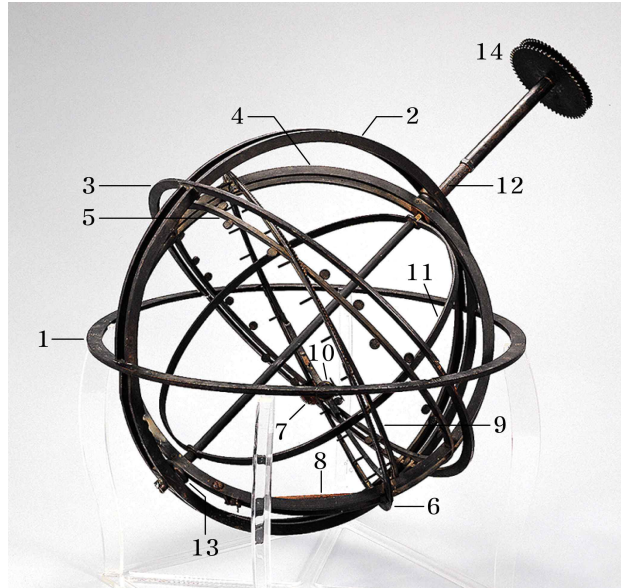


Figure 2. Armillary sphere artifact displayed by Korean Christian Museum at Soongsil University (KCMSU) (courtesy by Korean Christian Museum at Soongsil University). Explain the number in the picture:

1. Fixed outer terrestrial-horizon ring (지평규),
2. Meridian double ring (자오쌍규),
3. Fixed equator ring (적도규),
4. Solstitial-culture double ring (삼신쌍규),
5. Revolving equator ring (적도회규),
6. Inner ecliptic ring with 360-tooth (황도내규) and Outer ecliptic ring with 365-tooth (황도외규),
7. Sun-mode (태양모형),
8. Stright-iron gear for the ecliptic ring (태양직철기어),
9. Moon-path ring (백도규),
10. Moon carriage (달운행장치),
11. Moon transport ring (월운규),
12. Polar axis pipe (극축봉),
13. doughnut-shaped cylinder (원통),
14. 57-toothed wheel for a solar time (57-톱니바퀴) and 59-toothed wheel for a lunar motion (59-톱니바퀴).

2.3. 숭실대학교 혼천의 유물

숭실대 박물관에 혼천의 부품이 남아있다.³⁴ 이 혼천의는 홍대용의 혼천의로 알려져 있으나, 나경적에 의해서 제작된 것으로 보고 있다(Hahn 1997).

2.3.1. 의형과 그 구조

숭실대 박물관 혼천의는 완전한 형태로 남지 않았다 (refer to Figure 2). 이 혼천의의 다리 부품(4개로 추정)이 모두 유실되었고, 각 환들의 결합 부분과 부품 마감 부분 일부가 훼손된 상태이다. 하지만, 천체운행장치에

³⁴ 윤용현, 김상혁, 민병희, 기호철, 임병근은 주로 사진 촬영을 통해 혼천의 유물의 주요 구조 및 명문을 파악했다(2020.11.12).

해당하는 태양과 달 운행 메커니즘은 비교적 양호하여 작동 메커니즘 분석에 활용했다.

송실대 박물관 혼천의에 대한 실측자료는 남문현과 한영호 등이 진행한 것이 유일하다(Nam et al., 1995). 이 조사에 따르면, 가장 큰 환(環)은 지평규(地平規)로 외경이 350 mm, 폭이 11.8 mm, 두께가 4.8 mm이고, 가장 작은 환은 월운규(月運規)로 외경이 270 mm, 폭이 6.5 mm, 두께 2.4 mm이다(Nam et al., 1995). 이는 현존하는 송이영 혼천시계의 혼천의 지평환(地平環, 외경: 413 mm)보다 조금 작다(Needham et al., 1986).

통천의 혼천의의 외층을 구성하는 묘유규는 송실대 박물관 혼천의에는 나오지 않는다. 송실대 혼천의 유물은 송이영과 이민철의 혼천시계 혼천의의 외층 구조인 지평규, 자오규, (천상) 적도규의 구조를 따른다(refer to Figure 2).

또한 송실대 박물관 혼천의는 통천의 혼천의의 내층을 구성하는 사상규도 나오지 않고, 송이영의 혼천시계 혼천의를 따르고 있다. 통천의 혼천의와 달리, 송실대 박물관 혼천의는 가장 안쪽에 지평환이 가설된 흔적을 발견할 수 없었다.

2.3.2. 황도일규

통천의에서 설명한 혼천의는 황도일규가 내층(삼신의) 안에 있다고 하였는데, 송실대 박물관 유물은 이와 다른 구조를 지녔다. 송실대 혼천의의 황도규(ϕ 310 mm)는 적도규 내에 있지 않고 적도규(ϕ 300 mm)와 거의 같은 크기로 되어 삼신쌍환과 결합하여 있고 폭도 각각 8.2 mm, 9.0 mm로 세 환의 내경이 일치한다(Nam et al., 1995).

황도규는 2겹으로 구성되어 있다. 편의상 바깥지름이 상대적으로 작은 환을 황도내규라고 하고, 다른 환을 황도외규라고 지칭한다. 황도내규는 북면(윗면)에 24기(氣)가 표시되어 있고, 환 바깥으로 360개의 톱니가 구성되어 있다. 황도외규는 환 안쪽으로 365개의 톱니가 만들어져 있으며 환 바깥으로 태양모형이 부착되어 있다(Nam et al., 1995). 여기서 주목할 부분은 황도외규가 365-톱니의 내아륜(內牙輪)을 가진 것인데, 이는 통천의의 혼천의에서 황도일규가 365-톱니를 가진 것과 일치한다.

송실대 혼천의는 송이영의 태양운행장치를 기어장치로 개선하였다(Kim, 2007; Lee & Kim, 2007). 세종대 이후부터 혼천의의 황도환에 설치된 태양모형은 실을 이용하여 동쪽에서 서쪽으로 움직이는 방식이 성행하였다. 그러나 송실대 박물관 혼천의에서는 실로 끄는 방식 대신에 톱니바퀴를 사용해 태양 모형을 이동하도록 개량하였다.

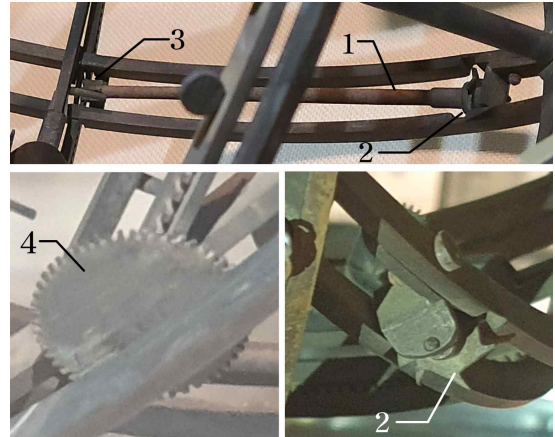


Figure 3. Sun-moving mechanism of armillary sphere artifact provided by KCMSU (courtesy by KCMSU). Explain the number in the picture:

1. Shaft (직철),
2. 6-toothed ratchet gear (격기),
3. 6-toothed spur gear (유아),
4. Sun model (태양모형).

2.1.2절에서 설명했듯이, ‘격기-직철-유아’의 세트가 황도외규의 내아륜에 연결되어 태양모형을 이동시킨다. Figure 3는 송실대 혼천의의 태양직철기어와 태양모형을 나타낸 것이다. 달직철기어는 혼천의 삼신쌍환 사이에 위치한다. 직철(1)의 양끝에는 격기(2)와 유아(3)로 구성되며, 모두 6개의 톱니가 있다.³⁵ 격기는 자오쌍환과 1회 마주치는 구조로 제작되었으며, 유아는 황도외규와 맞물려 매일 1 톱니를 움직였다. 이를 통해 황도상에서 태양의 운동을 표현했다.

2.3.3. 적도규와 28수도

송실대 박물관 혼천의 유물에서는 28수(宿)의 글자를 담고 있는 둥근 패(牌)를 적도규 남북면에 배치하고 있다. 이 수패(宿牌)는 적도규 북면에 13개(각, 저, 실, 루, 위, 묘, 필, 자, 정, 귀, 류, 성, 진), 남면에 15개(항, 방, 심, 미, 기, 두, 우, 여, 허, 위, 벽, 규, 삼, 장, 익)를 배치하였다. 송이영 혼천시계에서는 28수를 글자로 새겨 넣었는데, 그러한 방식과는 대비된다.

한편 국보 제228호 『천상열차분야지도』(1395) 명문을 기준으로 28수의 위치를 표현하면, 북면에 14개(각, 항, 실, 벽, 규, 루, 위, 묘, 필, 자, 정, 귀, 류, 성), 남면에 14개(저, 방, 심, 미, 기, 두, 우, 여, 허, 위, 삼, 장, 익, 진)가 위치하게 된다(Lee, 1986). 『의상고성(儀象考成)』(1744년), 『의상고성속편(儀象考成續編)』(1844), 남상길(南相吉, 1820 ~ 1869)의 『성경(星鏡)』(1861), 이준양(李俊養)의 『신법보천가(新法步天歌)』(1862)의 4

³⁵ 괄호 안에 첨부된 숫자는 그림에서 지칭하는 부속품의 숫자를 의미한다.

권의 책에서 적도 위치를 살펴보면 모두 28수의 남북면 위치가 동일한 것을 확인할 수 있었다. 이를 적도규에 배치하면, 북면에 11개(실, 벽, 규, 루, 위, 묘, 필, 자, 정, 귀, 류), 남면에 17개(각, 향, 저, 방, 심, 미, 기, 두, 우, 여, 허, 위, 삼, 성, 장, 익, 진)이다. 18~19세기 천문학 사료들과 송실대 유물의 적도규에서 28수의 남북면 위치가 상이한 것을 확인했다.

2.3.2절에서 언급했듯이, 송실대 박물관 혼천의는 황도규와 적도규가 같은 크기를 가지고 있다. 결국 혼천의 유물은 『천상열차분야지도』나 조선후기 『의상고성(儀象考成)』 중의 어느 한 문헌을 선택하여 적도 남북의 위치에 맞게 그 28 수패(宿牌)를 배치하되, 황도규 때문에 설치가 불가능한 수패는 남북의 위치를 바꾼 것으로 추정된다. Table 2와 같이, 적도규에 대해 황도규의 승교점은 실(室)과 벽(壁)의 사이에 있는데, 벽(壁)과 규(奎)의 수패가 적도 북쪽에 있어야 하지만 황도규와 만나서 적도 남쪽(▽)으로 이동하였다. 마찬가지로 강교점은 익(翼)과 진(軫) 사이에 있는데, 마찬가지로 적도 이남에 있는 진(軫)의 수패가 황도규의 설치를 방해하므로 이를 적도 북쪽(△)으로 변경하였다. 다만, 성(星)의 수패가 적도 이북에 설치된 것을 보아 홍대용은 『천상열차분야지도』를 참고하여 수패를 배열한 것처럼 보이지만, 향(亢)과 저(氏)의 배치가 서로 정반대이다. 이때 저(氏)의 배치는 『의상고성』(1744년) 이후의 천문서에서 보이는 28수 배치와도 맞지 않는다.

만약 홍대용이 『천상열차분야지도』를 참고하여 수패를 배열했다고 가정하면, 남방칠수가 시작되는 정(井)수를 적도규의 남점과 일치시켜 우선(右旋)의 방향으로 28수의 주천도수에 맞게 수패의 간격을 맞추어 배열한 것으로 추정된다. 이렇게 가정하면, 진(軫)이 황도규의 강교점 다음에 배치되고, 기(箕)가 적도규의 북점 다음에 놓이며, 벽(壁)이 승교점 다음에 위치한다. 이는 송실대 박물관 혼천의 유물의 적도규에 설치된 28수 수패의 동서남북 기점 배치와 잘 일치한다.

2.3.4. 백도월규

지구에서 볼 때, 달은 지구와 태양과의 상대적 위치에 따라서 그 모양이 달라진다. 여기서 달의 위치는 태양과 매일 약 12°.2씩 벌어지며, 달의 위상인 월령은 매일 1/29.5일씩 변한다. 이러한 운동을 보여 주는 것이 달운행장치이다. 달운행장치를 구동하는 동력은 송이영 혼천시계 혼천의 남극축에 있는 57-톱니바퀴와 59-톱니바퀴로부터 발생한다. 전자는 삼신규 구동과 관련이 있고, 후자는 백도규의 월운환 구동에 관여한다.

Table 2. Position of circled 28 Lunar Mansions' signboards

Signboard of 28 Lunar Mansions	Cheonsang Yeolcha Bunya Jido (1395)		Yixiang Kaocheng (1744)		Armillary Sphere Extant (KCMSU)	
	North	South	North	South	North	South
(of Equator)						
Gak (角, Jiao)	○			○	○	
Hang (亢, Kang)	○			○		○
Jeo (氏, Di)		○		○	○	
Bang (房, Fang)		○		○		○
Sim (心, Xin)		○		○		○
Mi (尾, Wei)		○		○		○
Ki (箕, Ji)		○		○		○
Du (斗, Dou)		○		○		○
Uh (牛, Niu)		○		○		○
Yeo (女, Nu)		○		○		○
Heo (虛, Xu)		○		○		○
Wi (危, Wei)		○		○		○
Sil (室, Shi)	○		○		○	
Byeok (壁, Bi)	○		○			▽
Gyu (奎, Kui)	○		○			▽
Ru (婁, Lou)	○		○		○	
Wih (胃, Wei)	○		○		○	
Myo (昴, Mao)	○		○		○	
Pil (畢, Bi)	○		○		○	
Ja (觜, Zi)	○		○		○	
Sam (參, Can)		○		○		○
Jeong (井, Jing)	○		○		○	
Gwi (鬼, Gui)	○		○		○	
Ryu (柳, Liu)	○		○		○	
Seong (星, Xing)	○			○	○	
Jang (張, Zhang)		○		○		○
Ik (翼, Yi)		○		○		○
Jin (軫, Zhen)		○		○		△
Total	14	14	11	17	13	15

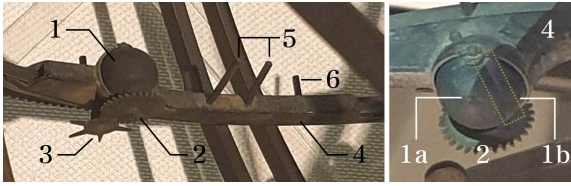


Figure 4. Moon-moving mechanism of armillary sphere artifact provided by KCMSU (courtesy by KCMSU). Explain the number in the picture:

1. Moon model(달모형), 1a. dark part on the moon sphere (달의 음영부분), 1b. bright part on the moon sphere(달의 조명부분),
2. 29-toothed wheel(29-톱니바퀴),
3. 6-toothed wheel(6-톱니바퀴),
4. Moon carriage(달운행장치),
5. supporting pins for Moon transport ring(월운환 고정핀),
6. 27 pins for Moon-pass ring(백도환의 27-핀).

송실대 혼천의의 달운행장치는 송이영의 장치와 유사하다(Kim, 2007; Lee & Kim, 2007). Figure 4는 달운행과 관련된 장치를 나타낸 것이다. 달운행장치(4)에는 달모형(1), 29-톱니바퀴(2), 6-톱니바퀴(3), 월운환 운행 2-핀(5)으로 구성된다. 달운행장치의 길이는 대략 10 cm 내외이며, 백도환면을 슬라이딩하며 움직인다. 달 모형에 붙어있는 29-톱니바퀴(2)는 6-톱니바퀴(3)와 연동된다.³⁶

달운행장치의 6-핀기어(3)와 백도환의 27-핀(6)이 부딪혀 달의 위상을 변화시킨다. 다만 현재 유물의 백도환과 달운행장치의 상하조립이 서로 반대로 되어있어 6-핀기어(3)와 27-핀기어(6)가 맞물려 있지 않다.

한편 송이영 혼천시계의 복원품에서는 29-톱니바퀴를 2개 사용하여 실제 하늘에서 보이는 초승달부터 상현달, 보름달, 하현달, 그믐달 등의 월령의 변화를 표현하였다(Kim, 2007). 여기에서는 6-톱니바퀴와 29-톱니바퀴 사이에 달 모형의 회전 방향을 반대로 하는 또 다른 6-톱니바퀴가 있다. 반면 송실대 유물의 겉보기에서는 6-톱니바퀴와 29-톱니바퀴만으로 구성된 것으로 보므로, 추가로 맞물리는 또 다른 보조적인 기어의 존재를 가정해 볼 수 있다. 현재의 톱니바퀴 조합으로는 달의 월령변화가 반시계방향으로 일어나기 때문이다.

송실대 혼천의에서 보이는 달운행장치는 송이영의 혼천시계에서 보이는 구조와 유사하다(Kim, 2007). 백도환 위에서 슬라이딩 되는 장치와 월운환을 움직이는 2-핀이 모두 갖추고 있다. 반면 통천의 혼천의의 경우, 월운환이 존재하지 않는다. 114-톱니를 가진 기어와 달직철기어가 기존 유물에서 월운환의 역할을 대신하기 때문이다. 따라서 통천의의 혼천의가 송이영의 달운행장치를 더욱 개선한 것임을 알 수 있다.

송실대 박물관 혼천의가 통천의의 혼천의와 동일하지 않은 부분은 다음과 같다. 첫째, 통천의 혼천의에서 설명한 묘유규와 사상규가 유물의 환과 정확히 일치하지 않는다. 둘째, 유물에는 지평판(산하총도)의 설치 흔적을 찾을 수 없다. 셋째, 유물에는 월운환이 있지만, 달운행을 위한 ‘격기-직철-유아’의 세트가 없다. 송실대 박물관 혼천의에서 월운환이 존재하는 것을 고려하면, 송이영 혼천시계 제작 이후 송실대 박물관 혼천의가 제작되었고, 이후 통천의 혼천의가 제작된 것으로 추정된다.

3. 통천의의 혼천의 모델

3.1. 태양달 모형의 운행 모델

3.1.1. 태양진상 운행

통천의의 혼천의 모델에서 태양과 달의 운행시스템에 대해 고찰할 필요가 있다. Table 1을 참고하면, 북극환, 황도일규 내아륜, 백도월규 내아륜의 톱니 수는 각각 359-톱니, 365-톱니, 114-톱니로 정리할 수 있다.

통천의의 자명중 모델에 따르면, 15-톱니를 가진 천운소륜이 혼천의 북쪽으로 들어가 하루에 24회 회전한다(Mihn et al., 2020). 이 천운소륜이 혼천의의 북극환의 톱니에 맞물려 하루에 360톱니 만큼 동력을 전달한다.

매일 태양은 천구의 기준(예, 춘분점)에서 반시계방향[右旋]으로 $360^\circ/365.25 = 0.9856^\circ$ 만큼 이동한다. 즉 하루 동안에 천구가 360° 회전할 때, 태양은 359.0122° 만 회전한다. 홍대용은 서양의 천문학을 수용하여, 천구의 일주운동에서 태양이 1일에 약 359° 도는 것을 북극환과 천운소륜에 적용하였다. 톱니바퀴의 1 회전수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$360^\circ (\text{천구 1회/일}) = 359^\circ (\text{태양 1회/일})$$

여기서 좌선하는 천운소륜이 하루 동안 이동시키는 톱니 수가 360톱니이고, 북극환은 359-톱니이므로, 북극환도 좌선하여³⁷ 360/359 회전하게 된다. 북극환은 삼신의에 고정되어 있으므로, 하루 동안 삼신의는 1.00279회 회전한다. 천운소륜의 회전동력은 삼신의의 일주운동을 재현한다. 이때 삼신의의 일주운동은 천구가 아닌 태양을 중심으로 삼고 있다. 또한 북극환이 1톱니 더 돌아가 태양진상의 격기가 매일 1번씩 기주와 부딪쳐 1톱니 회전할 수 있다.

지구의 1 회귀년은 약 365.25일이다. 이는 태양의 연

³⁶ 괄호 안에 첨부된 숫자는 그림에서 지칭하는 부속품의 숫자를 의미한다.

³⁷ 천운소륜의 회전축과 삼신의 회전축이 서로 마주보고 있다. 이때 천운소륜과 북극환이 서로 맞물려 돌아가면, 천운소륜 좌선이기 때문에 북극환(삼신의)도 좌선한다.

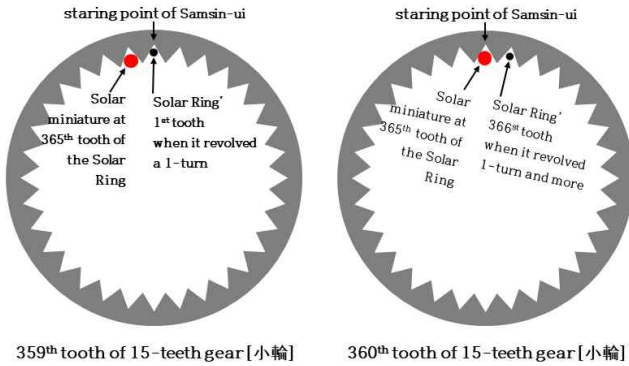


Figure 5. Solar miniature(太陽眞象)s diurnal motion on the Solar Ring (日規).

주운동에 해당한다. 매일 태양이 1회전할 동안 천구는 약 1°도 더 지나가므로, 1년 365.25 태양일이 지나면 천구는 366.25 항성일이 된다.

$$365.25 \text{ (태양일/1년)} = 366.25 \text{ (항성일/1년)}$$

$$365.25 \text{ 회} \times x[\text{톱니}] = 366.25 \text{ 회} \times y[\text{톱니}]$$

여기서 1년동안 태양(또는 태양일)을 1회전시키는 톱니바퀴의 톱니 수는 x , 천구(또는 항성일)을 1회전시키는 톱니바퀴의 톱니 수는 y 이다.

$$\frac{y}{x} = \frac{365.25[\text{톱니}]}{366.25[\text{톱니}]} \approx \frac{365[\text{톱니}]}{366[\text{톱니}]} \quad (1)$$

식 (1)에서 삼신의에 고정된 황도일규의 내아륜은 365-톱니로 천구(또는 항성일)를 1회전시키는 톱니 수와 일치한다. 이때 태양진상에 관련된 톱니는 실제 우선(右旋)으로 366-톱니를 가지면 된다. 이때 통천의 혼천의의 삼신의는 태양의 일주를 기준으로 가지기 때문에, 태양이 회귀하면, 상대적으로 삼신의가 366-톱니를 지나게 된다.

삼신쌍환 내에는 ‘격기-직철-유아’ 세트가 있는데, 격기는 하루에 1톱니 회전한다. 이때, 삼신쌍환은 좌선하므로 격기는 우선(右旋)한다. 따라서 유아도 우선하는데, 유아가 내아륜과 맞물리므로 내아륜도 우선한다. 황도일규 내아륜이 우선하므로 태양진상도 1톱니 우선한다.³⁸ 따라서 격기의 1톱니 회전이 태양진상의 입장에서는 마치 366-톱니가 우선하는 효과를 보인다(refer to Figure 5).

³⁸ 만약 유아와 만나는 아륜이 보통의 기어의 톱니라고 하면 태양진상은 좌선하므로 실제 천체현상에 어긋난다.

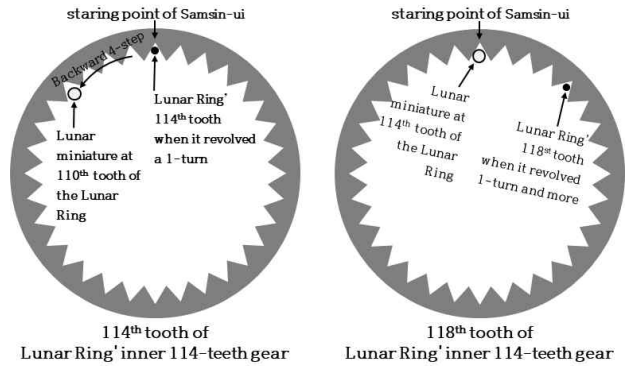


Figure 6. Monthly Lunar miniature(太陰眞象)’s revolution on the Lunar Ring (月規).

위의 일주운동에서 삼신의(곧 천구)가 매일 1/359[°]를 더 회전한다. 따라서 황도일규에서 태양진상은 365.25 태양일동안 360°/365.25일(= 0.98563[°/일])만큼 우선해야 한다. 한편 황도일규의 내아륜은 약 1년의 태양일을 고려하여 365-톱니로 제작하였다.

$$\frac{1}{359} \times \frac{360}{365.25} = \frac{k}{365}$$

$$k = 1.00210$$

여기서 k 는 1.00210으로 1.00279보다 0.00069의 차이를 만든다.

3.1.2. 태음진상 운행

백도일규의 태음진상 운동도 황도일규의 태양진상과 같은 원리가 적용된다. 1 삭망월은 약 29.5(태양)일이고, 매일달은 약 12.2°씩 미치지 못하므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$29.5 \text{ 태양회전(1삭망월)} = 28.5 \text{ 달회전(1삭망월)}$$

$$29.5 \text{ 회} \times x[\text{톱니}] = 28.5 \text{ 회} \times y[\text{톱니}]$$

여기서 1삭망월 동안 태양(日) 회전을 나타내는 톱니바퀴의 톱니 수는 x , 달(月) 회전을 나타내는 톱니바퀴의 톱니 수는 y 이다.

$$\frac{y}{x} = \frac{29.5[\text{톱니}]}{28.5[\text{톱니}]} = \frac{59[\text{톱니}]}{57[\text{톱니}]} = \frac{118[\text{톱니}]}{114[\text{톱니}]} \quad (2)$$

백도일규는 삼신의에 고정되어 있고, 남쪽의 삼신쌍환에 ‘격기-직철-유아’ 세트가 설치되어 있다. 삼신의의 회전은 태양의 일주운동을 기준으로 하고 있기 때문에,

식 (2)에서 x 는 114-톱니이며 이는 백도월규 내아륜의 톱니 수와 일치한다. 그런데 남쪽 격기는 4번 기주와 부딪쳐서 4톱니가 회전하므로, 결국 태음진상은 118톱니를 우선하는 효과가 있고(refer to Figure 6), 이는 식 (2)의 y 와 일치하게 된다.

특히 백도월규 내아륜에 부착된 태음진상은 매일 약 12.2° 우선하는 것뿐만 아니라, 달의 위상도 이동하는 위치와 함께 회전한다. 태음진상의 구면은 흰색과 검은색을 반반씩 칠하고, 그 구의 반 영역을 반구 덮개로 가리고 있다. 백도월규 외규의 남쪽에 27개의 핀을 설치하고 있다. 태음진상이 백도월규 외규를 따라 1회전할 때, 태음진상도 회전시키려고 한다면, 톱니바퀴를 핀과 맞부딪치게 하면 된다. 이때 (외규) 핀의 수와 (태음진상 기어) 톱니 수의 비율에 따라, 태음진상이 외규를 1회전 할 동안 스스로 회전하는 정도를 결정할 수 있다. 그런데 달의 항성월은 약 27.32일이고, 삭망월은 29일이다. 이런 연유로 백도월규 외규의 핀은 항성월을 따라 27개가 균등하게 둘러 있고, 태음진상의 기어는 삭망월에 의해 29-톱니를 가져야 한다(Kim, 2007).

3.2. 구조와 제원

2장에 제시된 문헌 내용과 숭실대 박물관 유물의 자료를 참고하여 홍대용 통천의의 혼천의 모델을 개발하는데 필요한 요구사항을 다음과 같이 설정하였다.

- 가. 육합의(외층)와 삼심의(내층)은 세 환이 직교결합하게 결속시킨다.
- 나. 극축은 육합의에 고정되어 회전하지 않는다.
- 다. 삼심의 안에 황도일규가 있고, 그 안에 백도월규가 있다.
- 라. 삼심환 내부에 ‘격기-직철-유아’ 세트를 설치는데, 북극 쪽에는 황도일규 남극 쪽에는 백도월규에 위치하여 고정시킨다.
- 마. 황도일규와 백도월규는 얇은 두 환을 결합한 2겹 구조이다. 이들을 외규(外規)와 내아륜(內牙輪)이라 명명하며, 외규의 지름이 내아륜의 지름보다 크고, 내아륜은 톱니가 환은 안쪽에 있다.
- 바. 황도일규에서 내아륜은 외규보다 북쪽에 있고, 태양진상은 내아륜에 고정되어 있다.
- 사. 백도월규에서 내아륜은 외규보다 북쪽에 있고, 태음진상이 내아륜에 부착되어 있으며, 외규의 남쪽에는 27개의 핀이 균일하게 분포되어 있다.
- 아. 산하총도(천하도)는 혼천의 중심에 지평규와 평행하게 설치한다.

통천의 혼천의의 모델은 삼심의의 북극고도를 36°로 설정하여 제작하였다. Table 3과 같이, 혼천의 모델은

Table 3. Specification of the Tongcheon-ui's armillary sphere.

Category	Parts	Sub-parts	Outer diam. [mm]	Width [mm]	Inner diam. [mm]	Thick (total) [mm]	Num of Tooth
Yukhab-ui fixed frame	horizontal ring		510	25	460	6	
	meridian double-ring		490	15	460	4(22)	
	east-and-west ring		490	15	460	4	
Samsin-ui moving frame	solstitial-coure double-ring		428	14	400	4(22)	
	equatorial ring		428	14	400	4	
	equinoctial-coure ring		428	14	400	4	
Ecliptic parts [黃道]	Solar Ring	outer ring	399	24.5	350		
		inner gear	389	13.25	362.5	3	365
	ratchet gear [激機]		16		7		6
	spur gear [遊牙]		8		3.5		6
Sum miniature		24.8		23		60	
Lunar-P ath parts [白道]	Lunar Ring	outer ring	349	43.5	262		
		inner gear	330	20.63	288.75	3	118
	ratchet gear		16		7		6
	spur gear		20		8.75		6
	Moon miniature [太陰眞象]	miniature					
29toothed wh		24.8		21.2		29	
6-tooth gear		6.4		2.8		6	
6-spoke helm		20		8.75		6	
Center	world map		180				
	sundial ring		200	10	180		
Driving parts	polar ring		361	10	356.5	3	359
	15-toothed wheel		17		12.5		15

대략 500 mm(육합의의 지평환 지름 510 mm)의 크기로 설계하였다. 육합의는 지름 460 ~ 510 mm의 세 환을 서로 수직하게 결합하여 구성하였다. 한편 삼심의의 구는 지름 400 ~ 428 mm를 가진다.

황도일규는 지름 350 ~ 399 mm인데, 일규의 외규가 있고, 365개의 톱니가 있는 내아륜(지름 362 ~ 389 mm)이 외규 북면에서 미끄러지면서 회전한다. 마찬가지로 백도월규도 지름 262 ~ 349 mm의 외규가 있고, 그 북면에 114-톱니의 내아륜이 미끄러지며 회전한다. 혼천의 중심에는 지름 180 mm의 산하총도가 있고, 시각환이 10 mm 너비로 감싸고 있다(refer to Figure 7).

육합의 지평규의 네 방향과 육합의 천저에 각각 기둥을 설치하고 이들을 십자 받침에 고정하였다. 혼천의의 십자 받침에는 물흙을 만들기도 하지만 본 모델에서는 생략하였다.

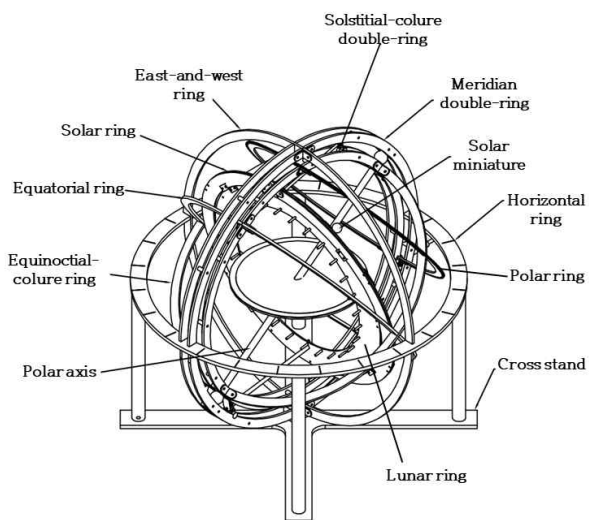


Figure 7. Bird-eye view of the Tongcheon-ui's armillary sphere.

3.2.1. 눈금

자오쌍환과 삼신쌍환에는 360°의 눈금을 표시하였다. Figure 7에서 지평규는 너비가 25 mm이며 규의 안팎에 각각 24기와 24방위의 눈금을 표시하였다. 24방위의 눈금은 지평규를 24등분해서 복점을 자(子), 남점을 오(午)로 일치시켜 그린다. 24기의 눈금의 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\tan A}{\sin H} = -\frac{\cos \phi}{\tan \delta}$$

$$\text{단, } H = \cos^{-1}\left(-\frac{\tan \phi}{\tan \delta}\right)$$

$$\delta = \sin^{-1}(\sin \epsilon \cdot \sin \lambda)$$

여기서 A 는 남점을 기준으로 했을 때의 방위각이고, H 는 자오선에서 켜 시간각이며, ϕ 는 관측자의 위도이고, δ 는 태양의 적위이다. 또한 ϵ 은 황도경사각이며, λ 는 황경이다. 이때 황도상에서 춘분점으로부터 황경의 매 15°에 해당하는 태양의 적위를 구한다.

적도규에는 28수 수패(宿牌)를 설치하는데, Table 2에서 『의상고성(儀象考成)』(1744년)의 적도 남북을 고려해서 배치하였다. 송실대 박물관 유물과 같이 정(井)수를 적도규의 남점과 일치시켜 우선(右旋)하는 방향으로 28수의 수패의 간격을 맞추어 설치하였다.

원형의 산하총도에는 시각환이 있어, 지평해시계에 해당하는 시각 눈금을 그린다.

$$z = \tan^{-1}(\tan H \cdot \sin \phi)$$

여기서 z 는 남점을 중심을 하는 지평해시계의 시간각이다(Mihn et al. 2017b).

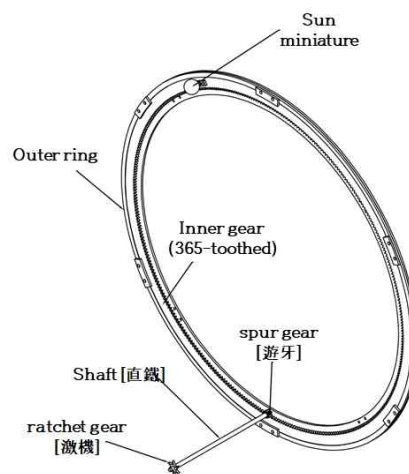


Figure 8. Structure of the Solar Ring.

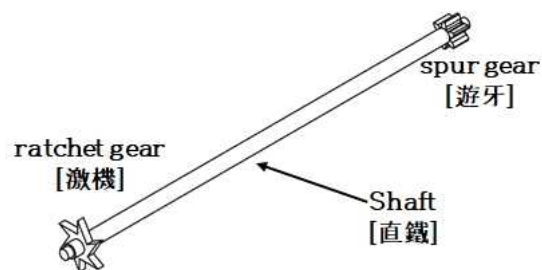


Figure 9. Apparatus moving the Sun/Moon miniature counter-clockwise.

3.2.2. 황도일규

황도일규는 적도규에 대해서 23.5° 기울여 고정되어 있다. Figure 8과 같이, 황도일규는 외규와 내아륜, 그리고 ‘격기-직철-유아’로 구성된다. 외규의 너비는 24.5 mm이며 미끄러지듯 회전하는 내아륜이 이탈하지 않도록 사방에 네모판을 덧대고 있다. 내아륜은 365-톱니를 가지고 있고, 내아륜의 옆면에 태양진상이 고정되어 있다. ‘격기-직철-유아’는 삼신쌍환 내에서 지지받아서 그 위치를 유지한다. 직철과 내아륜은 서로 직각으로 만나도록 구성되어야 하며, 이에 따라 자오쌍환 안쪽에 있는 북쪽 기주의 위치가 정해진다. 자오쌍환의 기주는 격기를 반시계방향(우선)으로 한 톱니 움직이게 한다.

Figure 9와 같이, 송실대 박물관 혼천의 유물을 참고하여 격기는 깔죽톱니(ratchet)로 설계하였다. 궁극적으로 ‘격기-직철-유아’는 시계방향(좌선)으로 회전하지 않고 반드시 반시계방향(우선)으로만 회전한다. 유아는 일반적인 톱니바퀴이다. 삼신쌍환 내 북쪽에 있는 ‘격기-직

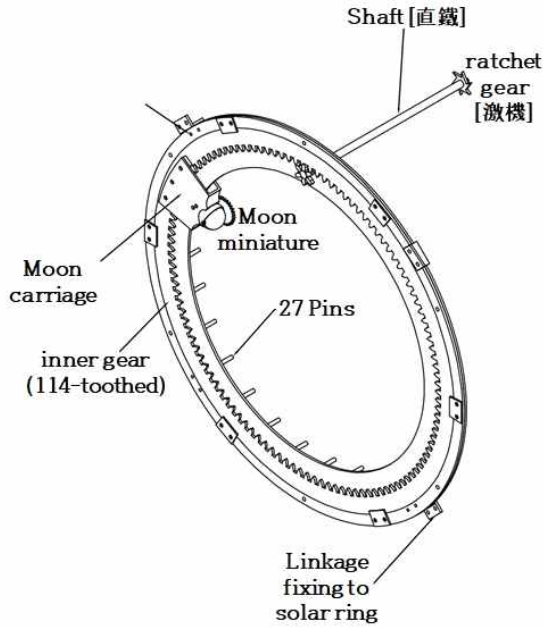


Figure 10. Structure of the Lunar Ring.

철-유아’는 황도일규의 내아륜을 돌리고, 남쪽에 있는 것은 백도월규의 내아륜을 돌린다.

3.2.2. 백도월규

백도월규는 황도월규보다 복잡한 구조를 지녔다. 3.1.2절에서 언급했듯이, 태양에 대한 달의 공전운동과 아울러 태음진상의 회전을 통해 월령을 나타내기 때문이다. 월령을 통해 대략의 음력 날짜를 추정할 수 있다.

백도월규의 달의 공전운동은 황도일규의 구조와 거의 일치한다. Figure 10과 같이, 백도월규의 외규는 435 mm의 너비를 가지고, 상대적으로 내아륜은 20.6 mm의 너비를 가진다. 외규의 사방의 네모판은 월규 내아륜이 이탈하지 않도록 지지하고 있으며, 태음진상이 있는 달 운행장치를 단단하게 고정하고 있다. 다만 ‘격기-직철-유아’는 남쪽에서 내아륜과 연결되는 것이 황도일규의 구조와 차이점을 가진다. 또한 직철이 외규를 통과해야 한다. 여기에서도 ‘격기-직철-유아’와 내아륜이 수직을 이루도록 설치되어야 하고, 이에 따라 남쪽 자오쌍환 내에 있는 4개 기주(機柱)의 위치가 결정된다. 외규의 양단에는 황도월규에 고정하기 위한 연결판이 설치되어 있다.

달운행장치(Moon carriage)는 태음진상을 월규의 내경 안쪽에 가지고 있는데, 이는 송실대 박물관의 유물을 참고한 것이다. 달운행장치는 태음진상의 회전을 용이하게 하기 위해 특이한 구조를 지녔다. 이때 달운행장치의 외형(housing)은 유아와 부딪히지 않아야 하고,

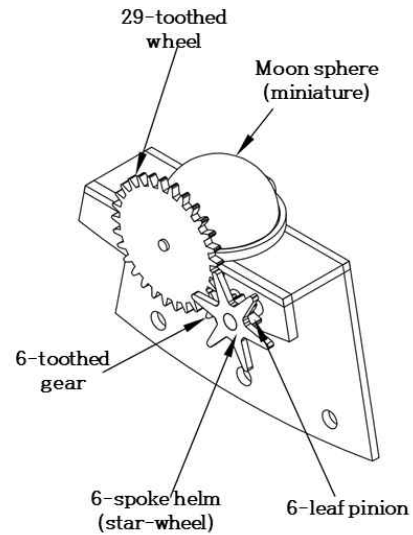


Figure 11. Structure of the Moon carriage.

외규 남면에 설치된 27핀과 마주쳐야 한다.

Figure 11은 달운행장치의 아랫면을 자세히 보여 준다. 태음진상의 월구(Moon sphere)는 반만 검은색으로 칠하고, 시계방향으로 회전해야 한다. 송이영의 혼천시계에는 월구(月球)를 돌리게 하는 27핀이 백도환 남면에 있는데(Kim, 2007), 이를 참조하여 27핀이 백도월규 남쪽에 설치하였다. 달운행장치가 반시계방향(우선)으로 돌면, 별톱니바퀴(star-wheel)는 시계방향(좌선)으로 돈다. 그런데 27:29의 비율을 갖추기 위해서(3.1.2절 참조), 중간에 보조 톱니바퀴를 사용해야 한다. 이때 월구와 같은 회전축을 공유하는 29-톱니바퀴가 시계방향으로 회전해야 하고, 별톱니바퀴도 시계방향으로 회전하기 때문에, 이 두 톱니바퀴를 바로 연결할 수 없고, 한 개의 보조톱니바퀴가 필요하다. 그래서 별톱니바퀴와 동축의 6-톱니바퀴와 29-톱니바퀴를 연결하는 또다른 6-톱니바퀴를 설치하였다.

4. 토의

4.1. 자동운행 혼천의

통천의의 혼천의 모델은 태양진상과 태음진상을 자동으로 운행하게 한다. 이렇게 천체모형을 자동으로 운행시키는 혼천의는 흠경각루에서도 보인다. 흠경각루의 가산에는 그 상부에 혼천의를 설치하며 매일 태양(모형)이 뜨고 지는 것을 재현하였다(Kim et al., 2011; Kim et al, 2017). 그러한 태양 모형의 자동운행 모델은 송이영의 혼천시계에서 그 원형을 확인시켜 주고 있다(Kim, 2007).

송이영의 혼천시계에서 주목할 부분은 달운행장치가 단순히 달의 공전운동을 구현하는 것뿐만 아니라 월구의 회전운동도 구현한다는 것이다.

달의 공전운동을 위해서, 송이영은 식 (2)의 비율을 사용하였다. 송이영은 혼천시계의 혼천의 남극에 57-톱니바퀴와 59-톱니바퀴를 같은 회전축에 설치하고 동시에 한 보조바퀴에 맞물려 놓았다. 이렇게 함으로써, 57-톱니바퀴와 59-톱니바퀴는 모두 시계방향(우선)으로 회전하게 하였는데, 전자는 삼신의의 회전을 맡고, 후자는 월운환의 회전을 담당하였다. 삼신의가 1회전했을 때, 월운환이 1회전하려면 2 톱니가 모자라게 된다. 역으로 이러한 결과는 삼신의 매 1회전마다 월운환이 2 톱니 반시계방향으로 회전하는 결과를 낳았다.

월구의 회전운동을 위해서, 송이영은 백도환 아래(남쪽)에 27핀을 설치하고, 월구에 29-톱니바퀴를 설치하였다. 3.1.2절에서 언급했듯이, 27핀은 항성월 주기를, 29-톱니바퀴는 삭망월 주기를 나타낸다. 이때 월구의 회전방향을 시계방향으로 회전하도록 설계하면 되었다.

홍대용 통천의의 혼천의는 태양모형(태양진상)과 달 모형(태음진상)의 자동운행을 송이영의 혼천시계처럼 모두 구현하였다. 그러나 홍대용은 송이영처럼 태양모형을 줄로 잡아당겨서 이동시키고, 달운행장치를 월운환으로 이동시키지 않았다. 오직 북극환이 삼신의를 돌리는 회전력과 기어장치만으로 이 두 모형을 천체운동에 맞게 자동 운행시켰다.

특히 태양모형의 운동에 있어서 송이영의 혼천시계는 주변의 온도와 습도 등 환경적인 영향에 의해 불규칙적인 결과를 가져올 수 있지만, 홍대용은 오직 기계적인 움직임만을 통해 태양모형(태양진상) 운동의 오차를 획기적으로 줄였다. 홍대용은 ‘격기-직철-유아’와 기주를 이용하여, 삼신의와 고정된 황도일규를 시계방향으로 1회전 시키는 동안 태양진상을 반시계방향으로 1 톱니 움직이게 하였다. 마찬가지로 백도월규의 태음진상도 삼신의에 고정된 월규를 시계방향으로 1회전시키는 동안 달운행장치를 4 톱니 반시계방향으로 이동시켰다. 이때 월규 내아륜의 114-톱니가 송이영 혼천시계의 57-톱니바퀴에 대응하고, 4 톱니 역방향으로 이동한 달운행장치가 혼천시계에서 월운환을 돌리는 59-톱니바퀴에 대응한다.

홍대용은 태양진상과 태음진상을 반시계방향으로 이동하기 위해 2가지 부속품을 적용하였다. 하나는 ‘격기-직철-유아’와 기주이고, 다른 하나는 일규과 월규에서 슬라이딩되는 내아륜이다. 조선시대 혼천의에서 내아륜을 사용한 것은 홍대용 통천의가 처음이자 마지막이었다.

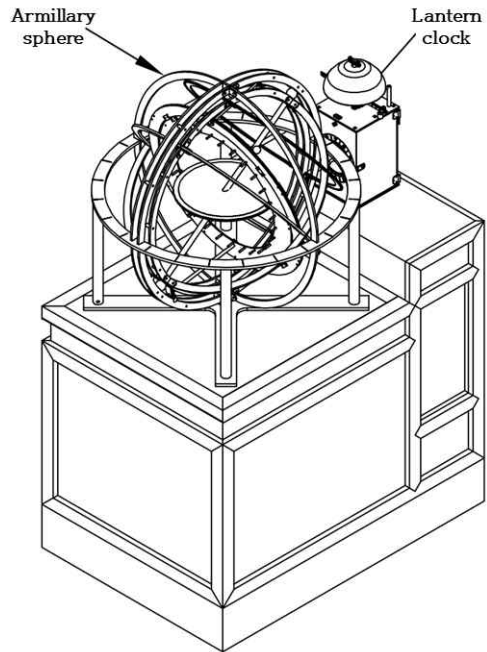


Figure 12. Assembly of the Tongcheon-ui.

4.2. 통천의의 역사적 의미

홍대용 통천의에서, 혼천의의 중심에 산하총도가 있는 것은 지구중심설로 대표되는 당시 천문학적 우주 구조론을 잘 설명하고 있다. 송이영의 혼천시계의 혼천의에서도 중심에 탈부착할 수 있는 지구의가 있는 것도 같은 맥락에서 이해할 수 있다.

주목할 점은 통천의의 혼천의는 산하총도가 지평환이라는 것이다. 동아시아 천문학에 있어서, 지평의 개념은 땅[地]을 형상화한 전형적인 개념이었다. 동아시아에서는 지중[地中, 땅의 중심]이 지표면에 있었다. 오늘날 땅은 구의 형태라는 것이 상식이지만, 홍대용 당시에는 여전히 지평의 개념이 성리학의 중심적인 사상이었음을 알 수 있다.

그러나 홍대용은 『의산문답(醫山問答)』을 통해서 지전설(地轉說)을 주장한 학자로 널리 알려져 있다. 홍대용은 티코 브라헤(Tycho Brahe, 1546 ~ 1601)의 천문학을 적극적으로 수용하는 태도였고, 나아곡(羅雅谷, Jacob Rho, 1593 ~ 1638)이 『오위력지(五緯曆地)』에서 설명한 ‘천동설에 대한 이설이 있음’을 홍대용이 알고 지전설을 설명한 것이었다(Minn, 1975; Park, 1981). 그럼에도 불구하고 통천의의 산하총도를 보았을 때, 홍대용은 서양과학의 ‘지구’보다 동양적인 ‘지평’을 선호했던 것처럼 보인다. 사실 홍대용은 청나라에 연행을 가기 전에 통천의를 제작하였다. 홍대용이 중국의 연경에

갔을 때, 그는 서양선교사와 만났고 그 후로 서양과학을 신뢰했던 것 같다.

1760년대 제작된 통천의는 송이영의 혼천시계(1669년 제작)보다 100년 뒤에 민간 주도로 개발된 자동운행 혼천의이다. 국가에서 주도한 송이영의 혼천시계는 추동력으로 혼천의의 회전동력을 얻는다. 통천의도 마찬가지로 Figure 12처럼, 추동력을 받아 시각을 제어하는 자명종을 이용하여 혼천의를 구동한다(Mihn et al., 2020). 혼천시계류인 통천의는 태양모형과 달모형 운동에 있어서 송이영의 혼천시계보다 구조적으로 개선된 혼천의를 개발하였다.

5. 결론

홍대용은 통천의를 1760 ~ 1762년 사이에 제작하였다. 통천의는 나경적이 기본구조를 설계하고 홍대용이 그 일부를 개선한 것을 안치인이 실물로 제작한 것이다. 통천의는 추동력으로 움직이는 자명종에서 회전력을 이어받아 혼천의를 운행하는 혼천시계류의 천문기기이다. 특히 혼천시계류에서 볼 수 있는 태양모형과 달모형을 천체운동에 일치하게 자동운행시키는 특징이 통천의에도 나타난다.

통천의의 혼천의는 육합의와 삼신의의 2층 구조로 이루어져 있다. 이들은 모두 세 종류의 환이 서로 수직으로 결합하여 구의 형태를 가지며, 육합의가 기둥과 십자 받침에 고정되는 반면, 삼신의는 육합의 안에서 극축에 대해 회전한다. 삼신의 외곽에는 자명종에서 들어오는 회전력을 북극환이 전달받고, 그 내부에는 차례로 황도일규와 백도월규가 고정되어 있다. 전자는 삼신의 적도규와 23.5° 기울어져 있고, 후자는 28.5° 기울어져 있다. 마지막으로 혼천의 중심에는 산하총도라 불리는 지평관이 고정되어 있다.

황도일규에는 태양진상이 있어 하루에 약 1°씩 반시계방향으로 움직이고, 백도월규에는 태음진상이 있어 하루에 약 13.2°씩 반시계방향으로 회전한다. 또한 송이영의 혼천시계처럼 태음진상의 월구는 스스로 회전하여 매일의 월령을 나타내준다. 태양진상과 태음진상의 운동을 모사하기 위해, 통천의는 자오쌍환에 기주(機柱)를 설치하고, '격기-직철-유아'의 세트를 삼신쌍환 내에 고정하였다. 북쪽과 남쪽에 기주와 '격기-직철-유아'를 설치하였는데, 전자는 황도일규의 내아륜에, 후자는 백도월규의 내아륜에 연결된다. 통천의는 내아륜을 처음 도입하며 이들을 반시계방향으로 돌리고, 내아륜에 부착된 태양진상과 태음진상을 천체현상과 일치하게 회전시킨다. 특히 태양진상의 연주운동은 통천의의 방식이 송이영 혼천시계의 것보다 정밀하게 이동시킨다.

본 연구에서 개발한 통천의의 혼천의 모델은 『담헌서(澹軒書)』 「농수각의기지(籠水閣儀器志)」의 문헌 내

용과 송실대 박물관의 혼천의 유물을 참조하여 개발하였다. 이 모델의 크기는 지름 510 mm의 구형체이다. 지평환에는 24기와 24방위의 눈금이 안팎으로 표시되어 있고, 삼신의의 극축은 지평과 36° 기울어져 있다. 황도일규의 365-톱니 내아륜과 태양진상은 문헌자료를 반영하였고, 백도월규의 114-톱니 내아륜과 태음진상은 송실대 박물관 혼천의 유물과 송이영 혼천시계의 유물을 참고하여 문헌과 일치하게 설계하였다. 특히 달운행장치는 그 형태는 송실대 박물관 혼천의 유물, 그 동작 원리는 송이영 혼천시계의 유물을 참고하였다. 결과적으로 백도월규는 남면에 27개 핀을 등분하여 설치하였고, 태음진상은 월규의 앞면에서 보일 수 있게 하였다. 산하총도는 국립중앙과학관의 고지도에 있는 9종의 천하도 중에서 하나를 선별하여 제작하였다.

통천의는 조선후기 지방에서 유학자가 제작한 혼천시계이다. 이미 17세기의 송이영의 혼천시계는 서구식의 기계시계 제작기술을 고대 동아시아의 천문시계의 전통에 결합한 혁신적인 기기라고 평가되고 있다(Needham, 1986). 그런데 통천의는 100년 전에 제작된 송이영 혼천시계의 천체운행을 획기적으로 개선했으므로, 혁신적이고 가치가 높다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구를 위해 홍대용 가문의 혼천의 유물을 조사할 수 있도록 허락해 주신 송실대학교 한국기독교박물관 관계자에게 감사드립니다. 본 연구는 2021년 국립중앙과학관 기본연구과제 "조선후기 기계시계 장치 전시품 개발 연구(연구책임자 윤용현)"의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2019R1 F1A1057508).

REFERENCES

- An D. G., 2017, Korean translation of Seokdang Silki, Compilation Committee of Seokdang Silki (Honam Institute for Korean Studies) (Gwangju), pp.101-148
- Hahn Y. -H., 2003, Astronomical Clocks of Nongsugak, Korean Historical Review, Yoksa Hakbo, 177, 1-32
- Hahn Y. -H. & Nam M. -H., 1997, Reconstruction of the Armillary Spheres of Mid-Chosun: The Armillary Clocks of Yi Mihnchol, The Korean Journal for the History of Science, 19, 3
- Jeon S. W., 2011, A History of Korean Science and Technology, NUS Press (Singapore), pp.118-156
- Kim S. H., 2007, A study on the Operation Mechanism of Song I-yŏng's Armillary Clock, PsD Thesis, Chung-Ang University

- Kim S. H., Lee Y. S., & Lee M. S., 2011, A Study on the Operation Mechanism of *Ongnu*, the Astronomical Clock in Sejong Era, JASS, 28, 79
<https://doi.org/10.5140/JASS.2011.28.1.079>
- Kim S. H., Yun Y.-H., Ham S. Y., Mihn B.-H., Ki H.-C., Yoon M. K., 2017, A Study on an Analysis and Design of the Internal Structure of *Heumgyeonggak-nu*, JASS, 34, 171
<https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.2.171>
- Kim, S. H., Mihn, B. -H., Seo, Y. -K., & Lee, Y. S., 2018, Life and Astronomical Contribution of Song, I-Yeong, PKAS, 33, 31
- Lee E. S., 1986, Analysis on Cheonsang-Yeolcha-Bunya-Jido, Sejong Studies Research, 1, 63
- Lee Y. S. & Kim S. H., 2007, Study on the Structure and Working Principle of Song I-yŏng's Armillary Clock, JASS, 24, 167
- Lee Y. S., Lim S. H., Lee M. S., & Jeong, J. H., 2010, A Study on the Armillary Spheres of the Confucianists in Joseon Dynasty, JASS 27, 383
<https://doi.org/10.5140/JASS.2010.27.4.383>
- Minn Y. G., 1975, Tychonic Theory Developed in the 17th Century Korea, The Journal of Korean Studies, 16, 1
- Mihn B. -H., 2016, study on the Astronomical Instruments and Calendars In Early Joseon Dynasty, PsD Thesis, Chungbuk National University
- Mihn B. -H., Lee M. S., Choi G. & Lee K. -W., 2016, Manufacturers of Astronomical Instruments Invented During the Ganui-Dae Project In Joseon Dynasty, PKAS 31, 77
<https://doi.org/10.5303/PKAS.2016.31.3.077>
- Mihn, B. -H., Ham S. Y., & Choi G. E., 2017a, Concept on the Na Kyeong-Jeok's clock and its Structure in Proceeding of Conference on a Pioneer of a Practical Confucian, Seokdang, Na Kyeong-Jeok, Honam Institute for Korean Studies (Gwangju), 69-88
- Mihn, B. -H., Lee Y. S., Kim S. H., Choi W. -H., & Ham S. Y., 2017b, Estimation of the Latitude, the Gnomon's Length and Position About *Sinbeop-Jipyong-Ilgu* in the Late of Joseon Dynasty, JASS 34, 161
<https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.2.161>
- Mihn B. -H., Yun Y.-H., Kim S. H., & Ki H. C., 2020, Mechanical Power System of Tongcheon-ui, an Astronomical Clock made by *Hong, Dae-yong*, PKAS 35, 43
<https://doi.org/10.5303/PKAS.2020.35.3.043>
- Nam M. -H., Hahn Y. -H., Lee S. -W., & Yang P. -S., 1995, Armillary Spheres during the Chosen Dynasty, KonKuk University Academic Journal, 39, 519
- National Science Museum (NSM), 2013, 2013 Collection of the National Science Museum, NSM (Daejeon), pp.177-207
- Needham, J., Lu, G. -D., Combridge, J. H., & Major J. S., 1986, The Hall of Heavenly Records: Korean astronomical instruments and clocks 1380-1780, Cambridge University Press (Cambridge), pp.115-150
- Park S. R., 1981, Scientific Ideas of *Hong Tde-Yong*, Hankuk Hakpo (Journal of Korean Studies), 7, 159