

자격루 오디세이 나의 과학사 연구 30년

남문현 (자격루연구회 이사장, 건국대 명예교수)[†]

1. 머리말

조선조 세종시대를 빛낸 과학문화를 이해하기 위한 기초적인 단계로, 홍이섭(洪以燮, 1914-1974)¹⁾은 다음과 같은 말로 복원의 필요성을 역설하였다. “..... 그러나 天文儀器 같은 기계적인 조작의 경우는 壬辰亂(1592년 日本軍의 侵入)으로 灰燼되자 그 중 정교한 것은 다시 복구되지 못하고 그대로 文字上 殘痕만 남기게 되었다. 이것은 元史의 기록과 이슬라미카(Islamica; 아라비아學)의 援用에 의해 復原의인 연구가 되어야 할 줄 안다. 아직 이러한 생각조차 우리 學界에 제시되지 않아 시도됨이 없으나 이러한 방법은 世宗時代 과학문화 이해의 기초적인 것이 될 것이다. 이런 관점에서 구체적 연구 이해 없이 현상적인 포착에서 자랑하는 것은 우선 삼갈 일이 아닌가 한다”고 하며, 이어서 “壬辰亂 이후에도 기계적이 아닌 것은

[†] 이 논문은 (사)자격루연구회 2011년도 “자격루와 수운의상대 연구” 과제에 의해 작성되었다.

1) 연희전문학교 문과 졸업(1938), 역사학회 회장(1952), 연세대 교수(1962), 문학박사(연세대, 1966), 학술원회원(1967). 1950년대에 한국의 과학사를 체계적으로 연구하여 한국사를 발전적으로 파악하고자 노력했으며, 조선 후기의 대표적 실학자인 정약용(丁若鏞)의 사상과 학문을 종합적으로 연구·검토했다. 연구경향은 일제강점기의 반제(反帝) 민족사관의 하나인 민족주의사학의 전통에 힘입은 바가 컸고, 8·15해방 이후 민족사학의 맥을 잇는 역할을 했다. 대표적인 후기 민족주의 사학자로 평가받고 있다. 과학사의 주요 저서로는 『朝鮮科學史』(일문 1944, 국역재판 1946), 『정약용의 정치경제사상연구』(1959) 등이 있다.

그대로 계승, 또는 亂中灰燼된 것도 복구된다”며 문자로만 남은 기계적인 의기의 복원을 강조하였다.²⁾ 반세기 전의 주장이지만 이 말은 오늘날에도 귀담아 들어야할 말이다. 비단 홍이섭 선생의 생각이 아니더라도 과학사에서 문헌이나 유물로 전해오는 것을 제대로 복원하는 일의 필요성 내지는 중요성은 널리 강조되어 왔다. 특히 일제강점기에 민족성의 발흥을 위해 금속활자와 인쇄술, 거북선, 측우기, ... 등을 한민족의 과학적 우수성의 상징물로 강조하다보니 홍이섭 선생의 표현대로 그것들이 갖고 있는 실체보다 은연중에 “현상적인 포착”에 머문 감도 없지 않았다.

2. 복원의 정의와 연구 · 제작

역사는 끊임없는 연구와 복원을 거치면서 정립되고, 그 내용이 풍요로워진다. 옛날에 살아본 일이 없는 오늘날의 사람들에게 있어 옛날의 일을 재현하는 일이란 그리 쉬운 일은 아닐 것이다. ‘사실’을 찾아내어, ‘분석’하고, 여기에 주관이나 객관의 사유를 가미하여 ‘종합’에 이르는 역사학의 방법론은 복원의 ‘과학성’을 뒷받침 해온 것이 사실이다. 그렇다고 복원이 역사연구의 유일한 방법론은 아니지만, 한 가지 도구로써 활용돼 온 것은 부정할 수 없는 사실이다. 과학사에 한정시켜 보더라도 동서양을 막론하고 과학사 또는 기술사 연구에서 ‘복원’이 막강한 도구라는 것은 대부분의 연구자들이 인정하는 바다. ‘복원’은 한자로는 우리나라와 일본에서는 ‘復元’, 중국에서는 ‘復原’, 영어로는 ‘reconstruction’, ‘restoration’이 같은 의미로 쓰이고 있다. 이와 유사한 말로는 ‘재현’, ‘부흥’, ‘재생’ 등이 있고, 영어에서는 ‘revival’, ‘renaissance’, ‘reproduction’ 등이 사용되고 있다. 이 말들은 “거의 원래의 상태로 ‘복귀’시킨다”는 의미를 내포하고 있어 사실상 ‘복원’이라는 말은 기록이나 유물에서부터 대규모의 유적이나 건축물, 더 나가서는 역사까지 원래의 상태로 복귀시킨다는 뜻을 포함한다고 보아야 하겠다.

위에서 열거한 단어들은 정도의 차이는 있지만 대체로 ‘과거에 있었던 것

2) 홍이섭, “科學·技術文化的 歷史의 推移: 그 斷層·近代와의 乖離”, 『思想界』, 1958년 10월호, 6-10쪽. 『洪以燮全集 1: 科學史·海洋史』(연세대학교출판부, 1993), 359쪽에서 재인용. 강조는 필자.

이지만 현재는 없는 것을 원래의 상태로 회복하는 것'을 뜻한다. 이것을 '복원'이란 용어로 정의해도 큰 무리는 없을 것이다. 더 나아가서 '어디까지가 복원'인지는 당사자와 이것을 보는 사람들이 인정하기에 달렸다. 기록이나 유물로부터 '도면이나 수리적 표현'으로 표시되는 '이론이나 모델'을 생산하는 일을 보통 복원(reconstruction)이라 하기도 하며, 더 나아가서 '작동 모형(working model)을 제작하여 실험하는 일'이나 '제품을 생산하는 일'에 이르기까지 복원의 단계는 그야말로 다층적이라 할 수 있다. 복원을 연구·제작과 관련시켜 고찰해 보기로 하자.

첫째, 과학문화유산은 대부분 간단한 사료(史料)의 형태로 존재하므로 복원이 매우 어렵다. 여기서 사료라 함은 역사를 기술한 역사서, 고전적(古典籍), 공문서, 문집, 서간, 금석문, 단서가 되는 유물 등을 포함하는 자료를 말한다. 따라서 이것을 복원하려면 개인이든 집단이든 조직에 의한 '연구'가 이루어지지 않으면 성취가 매우 어렵다. 이 경우는 연구인력 위주로 복원이 추진되므로 '복원연구'라 정의하는 것이 합당하겠다. 복원의 기초자료인 사료를 발굴, 정리, 번역하고 주석하는 작업은 거의가 문헌학, 고고학, 자연과학, 공학기술, 예술적 접근을 필요로 한다. 복원연구를 위해서는 기초자료에 대한 정리와 연구가 선행되어야 함은 물론, 이렇게 정리된 성과를 바탕으로 개념도를 작성하는 작업에서부터 모델 설정과 이를 입증하기 위한 실험이 뒤따르는 것이 보통이다. 실험을 거쳐 모델이 확정되면 이것을 근거로 제품을 제작하는 최종단계 이르게 된다.

보통 연구단계에서는 제작이전의 단계에서 연구논문을 발표하는 것으로 복원이 마무리되는 경우가 대부분이다. 복원연구는 대체로 대형연구과제로 추진되어야 하는데, 최종적으로는 실물(과 영상) 제작이 목표가 된다. 이러한 단계를 거쳐 복원연구의 성과를 제시한 대표적인 사례가 영국의 과학사가 조셉 니덤(Joseph Needham, 1900-1995)의 『신의상법요(新儀象法要)』 연구를 통한 '수운의상대(水運儀象臺)'의 금종기(擒縱器)복원이다. 니덤은 연구결과를 『천문시계(Heavenly Clockwork: The Great Astronomical Clocks of Medieval China)』로 묶어 발표함으로써 동아시아 과학사연구에 새로운 지평을 열었다. 이 글의 뒷부분에서 좀 더 상세히 살펴보겠지만 여기서는 니덤이 정의한 복원의 의미를 새겨 보기 위해 그의 연구를 요약해보기로 하겠다. 중국에서 발달한 고대의 물시계와 후세에 유럽에서 출현한 기계시계

사이의 연관성에 착안한 니덤은 유체가 흐르는 특성을 이용하는 물시계와 기계적인 진동을 활용하여 시간을 측정하는 것 사이의 중간단계 또는 ‘실종된 고리’의 존재를 확신하였다. 곧, 『신의상법요』 중에는 수력으로 회전되는 추륜(樞輪, 또는 水輪)의 속도를 일정하게 유지시킬 수 있는 천형(天衡)이라는 기구가 있는데, 이것이 추륜의 “회전-정지-회전”을 반복하게 해주는 금종기 역할을 한다. 이 금종기가 현대시계의 기계진동을 발생시켜주는 ‘탈진기(脫進機, escapement)’의 원조라는 것이다. 곧 무명의 기술자들이 공헌하여 발전시킨 물시계와 기계시계가 연속선상에 있다는 획기적인 발상이었다. 니덤은 추륜과 천형의 작동과 시간특성을 설명도로 도시(圖示)함으로써 수운의상대의 금종기를 복원하였다고 발표하였다. 이어서 “소송(蘇頌) 금종기구의 훨씬 정교한 모습이 실제로 작동 모델이 제작될 때까지는 정체를 드러내지 못할 것은 의심의 여지가 없다”라고 주석을 달았다.³⁾ 이 경우는 앞서 언급한 이론이나 모델의 설정단계를 복원으로 정의한 경우에 해당된다.

둘째, 보존, 발굴 등에 의해 유물을 수습하였지만 온전한 모습을 갖추지 못한 것들인 경우에 결손 부분을 보완하여 온전한 모습을 갖도록 하는 복원제작(복제(replica)의 제작 등)을 통한 복원이다. 이 경우는 제작이 목표이므로 복원연구와 제작을 병행하여 고품질의 연구결과와 제품을 생산하는 것이 목표가 된다. 세계적으로 주목을 끌고 있는 고대 그리스의 천체위치 계산기라고 알려진 안티키테라 기계장치(Antikythera Mechanism),⁴⁾ 우리나라의 국보 제230호 혼천시계 등은 사료에 의한 복원연구라기보다는 복원제작의 경우에 해당한다고 보아야겠다. 이러한 경우에는 컴퓨터 기법을 위시하여 고고학이나 기타 유사한 학문, 방사선학 등과 협력하거나 방법을 차용하는 것이 최근의 동향이다. 종래에는 복원이라 하면 물리적 실물을 제작하는 것을 우선하였고 현재도 그런 생각은 크게 달라지지 않고 있지

3) J. Needham, Wang Ling and D. J. Solla Price, *Heavenly Clockwork: The Great Astronomical Clocks of Medieval China (HC)*, 2nd ed. with supplement by J. H. Combridge (London: Cambridge University Press, 1986), p. 58.

4) J. Marchant, “Ancient Astronomy: Mechanical Inspiration,” *Nature* 468 (2010), pp. 496-498. <http://www.antikythera-mechanism.gr/project/general/the-project.html>는 그리스의 안티키테라 기계장치 연구 프로젝트(antikythera mechanism research project)에 대하여 상세한 정보를 알려주고 있다.

만, 최근에는 컴퓨터를 이용한 3차원 이미지 작성이나 애니메이션 등의 영상물을 이용한 복원 기법이 출현하는 등 새로운 기술이 속속 등장하고 있다. 요즘에는 컴퓨터 단층 촬영법 등이 문화재 복원에 활용되고 있으며, 부쩍 늘어나고 있는 일반인들의 문화유산에 대한 이해의 욕구를 충족시키는 중요한 수단으로 떠오르고 있다.

셋째, 앞서 복원연구에서 거론했던 전적의 연구도 넓게는 복원의 범주에 속하다고 보아야 하겠다. 이러한 전적의 정리와 연구는 앞서 말하였듯이 복원연구와 제작에 필수적인 기초 작업이다. 문헌학을 비롯하여 전 학문분야에 걸쳐 전문가들의 참여가 요구되며, 과학사 전공자들이 수행하기 어려운 분야들은 이 분야의 전문가들의 도움과 협력이 절실하다. 예를 들어, 중국 선진(先秦)시대의 과학기술 성취를 모은 『고공기(考工記)』는 중국문화사 내지는 세계문화사상에서 차지하는 위상으로 인해 사학계는 물론 과학사 연구자들이 관심을 가져온 전적이다. 최근 중국에서는 수십 년에 걸쳐 10권 50책이라는 방대한 규모의 『중국과학기술통회(中國科學技術通匯)』(大象出版社)를 발간하여 과기전적을 취합하였다. 우리나라에서도 일찍이 『과학기술사자료집』(여강출판사)을 발간한 바 있다. 유럽에서는 20세기 초부터 이슬람 과학에 대한 전적을 유럽어로 번역하고 일부를 복원하는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 이 가운데 하나가 이슬람 고대과학기술의 백과전서라 할 수 있는 알-자자리(al-Jazari)가 지은 『기발한 기계 장치들에 관한 지식백서(Kitáb fi ma'rifat al-biyal al-handasiyya)』를 영어로 번역하고 주석을 달아 도면을 복구하고 현대적으로 해석한 도널드 힐(Donald Hill)의 아랍과학 연구도 이 부류에 속한다.⁵⁾ 힐의 번역을 바탕으로 알-자자리의 주요 성과가 서방세계에 알려졌으며, 이 가운데 중요한 몇 가지 시계와 기계는 복원되었다. 아랍은 일찍이 그리스의 고대과학기술을 수입하여 번역함으로써 발전의 기틀을 마련하여 한때 황금시기를 이루었으며, 중세에 유럽은 거꾸로 아랍과학을 도입하여 중세를 열었다는 공감대가 형성됨으로써 유럽에 아랍과학 붐을 조성하는 데 한몫 거들었다.⁶⁾

5) Ibn al-Razzaz Al-Jazari, *Kitáb fi ma'rifat al-biyal al-handasiyya* (*The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices*), translated and annotated by D. R. Hill, (Dordrecht-Holland/Boston-U.S.A.: Reidel Pub. Co., 1974).

6) A. Y. al-Hassan & D. R. Hill, *Islamic Technology: An Illustrated History* (London: Cambridge

국내에서도 일찍부터 일부 학자들에 의해 거북선, 화약무기와 운반체 등의 복원이 추진되었으며, 1980년대 초에는 한국과학사학회가 중심이 되어 과학문화재에 대한 본격적인 조사가 이루어졌으며, 그 후 이것이 주요 과학문화재 복원연구에 기초자료가 되었다.⁷⁾

필자는 피드백 제어의 원류에 대하여, 일찍이 뮌헨의 독일박물관장 오토 마이어(Otto Mayr)박사의 저서 『피드백 제어의 기원』을 읽고 물시계의 수위제어에 대하여 관심을 갖게 되었고⁸⁾, 박성래(朴星來)교수님의 한국과학사 방송강의를 들으면서 과학사에 입문하게 되었다.⁹⁾ 그 후 세종시대 자격루의 자동화 시스템에 관심을 갖게 되어 조선시대의 자동시보 계시기인 자격루와 과학의기에 대한 복원연구에 종사하게 되었다. 이 가운데 자격루 연구에 얹힌 이야기들은 이미 필자의 저서에서 밝힌 바 있으며,¹⁰⁾ 세종 15년(1433) “자격루(自擊宮漏)”란 이름으로 제작된 ‘보루각자격루(報漏閣漏)’는 실물규모로 복원되어 2007년 11월부터 국립고궁박물관에 진열되었다.¹¹⁾ 그리고 세종 19년(1437)에 제작되어 다음 해부터 사용된 흥경각 자격루(欽敬閣漏)와 이보다 앞서 세종 15년에 제작된 혼천의(간의대 수운혼천(簡儀臺 水運渾天)) 복원연구는 아직도 진행 중이다.¹²⁾

이 글에서는 필자가 지난 30년간 과학사 연구에 종사해오면서 겪은 체험담을 자격루 복원 연구와 보루각자격루 복원제작을 중심으로 회고하고,

University Press, 1986), pp. 1-35.

7) 전상운 등, “한국의 과학문화재 조사보고”, 『한국과학사학회지』 6권 1호 (1984), 58-118쪽; 한국과학문화재단편, 『우리의 과학문화재』 (서해문집, 1997).

8) O. Mayr, *The Origins of Feedback Control* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1970). Mayr 관장은 1990년 10월 국립중앙과학관 개관식 참석차 내한했던 길에 덕수궁 자격루 유물을 관람하고 세계적인 유물이라 평가하면서 필자의 복원연구를 격려하고 그의 저서 *Authority, Liberty & Automatic Machinery in Early Modern Europe* (Baltimore and London: Johns Hopkins University Press, 1986)을 보내주었다.

9) 박성래, 『韓國科學史』 (한국방송사업단, 1982).

10) 필자의 자격루 연구에 대하여는 남문현, “자격루의 원형을 찾아서”, 『장영실과 자격루』 (서울대학교 출판부, 2002)에서 이미 밝힌 바 있다.

11) 국립고궁박물관편, “자격루”, 『전시안내도록』 (2007), 284-289쪽.

12) 한영호·남문현·이수웅·이문규, “조선의 천문시계: 세종의 흥경각루에 대하여”, 『技術과 歷史』 1권 1호 (2000), 11-152쪽; 한영호·남문현·이수웅, “조선의 천문시계: 수직식 혼천시계”, 『한국사연구』 113호 (2001), 57-83쪽.

아울러 혼천의 연구를 위해 소송의 『신의상법요』 연구와 수운의상대 복원 연구를 추진했던 학자들과의 만남을 통해 들은 복원의 의미와 방법을 되새겨 보고자 한다. 이 글에서 논의한 복원연구의 사례는 필자의 연구 가운데 주로 기구(機構)와 기계적으로 작동되는 과학기구에 한정하였다. 이러한 체험을 바탕으로 나름대로 도출해본 바람직한 복원연구와 제작에 이르는 방법론도 제시하였다. 자격루 복원에 대한 필자의 여정은 아직도 끝나지 않고 어찌면 미로 속을 헤매고 있는지도 모른다. 끝으로 과학사 연구는 역사적 사실의 과학적 탐색과 병행되어야 한다는 것을 강조하는 것으로 전망에 대신하고자 한다.

3. 자격루 복원연구와 제작

1) 자격루는 자동화 시스템인가?

1984년 5월 마지막 날에 열렸던 대한전기학회 계측제어시스템연구회에서 “이제 우리도 옛 것(한국사 속의 ‘자격루’를 비롯한 자동제어 장치를 뜻함 - 필자 주)을 찾아 제어공학 교과서에 실어 보자”는 의견이 공론으로 발전하여 시작된 자격루 연구는 1년 뒤에 이 시계의 구조와 기능을 제어공학적인 관점에서 해석한 논문으로 발표되었다.¹³⁾ 이 발표를 계기로 자격루(보루각루를 지칭)는 동력발생, 유량조절 디바이스, 동력전달, 기구 및 기계로 구성된 시보장치를 갖춘 매우 복잡하고 정교한 ‘자동 사이클 반복 기계’로 규정하고, 고전적 샘플치 제어 시스템의 개념을 이용하여 모델을 구성하였다.¹⁴⁾ 자격루는 아직 현대제어이론이 태동하기 이전인 15세기 초에 만든 것이지만 오늘날에 보아도 “단한 루프 제어의 실재를 이용한 자동제어 디바이스”의 특징을 갖춘 자동화 시스템일 것이라는 확신을 갖게 되었고, 복원을 위한 연구로 한 걸음 더 내딛게 되었다.

세종 자격루의 복원연구는 이 계시기의 제작에 직·간접으로 참여했던

13) 남문현, “15世紀 韓國의 물시계에 대한 制御工學的 解析”, 『大韓電氣學會 計測制御研究學術大會論集』 (1985), 47-52쪽.

14) 남문현, “물시계를 이용한 한국의 시간측정방법에 대한 시스템 연구”, 『연구보고』 10집 (1985), 75-89쪽.

집현전 학사 김돈(金墩, 1385-1440)과 김빈(金鎰, ? - 1455)이 기록한 보루각 기문, 서문과 명문의 내용을 현대의 기술언어로 해석(解釋)하여 이것에 부합하는 모델을 만드는 과정이라 할 수 있다. 김돈은 사대부 관료로서 종래 누각(漏刻)에 의한 시간측정만이 보편적인 기술이었던 당시, 행사직 장영실(蔣英實, 1380?-1445?)이 만든 구슬을 방출하는 물시계, 나무로 만든 인형을 작동시켜 종과 북 그리고 징을 울려 12시와 경점시간을 청각적으로 알려주고, 또한 시패를 잡은 보시인형을 차레대로 전시하여 12시를 시각적으로 알려주는 자격공루의 세부적인 메커니즘을 매우 사실적으로, 그리고 체계적으로 기술하였다. 기문 작성에는 『서경(書經)』을 비롯하여, 『신의상법요』, 심괄(沈括)의 「부루의(浮漏議)」와 「혼의의(渾儀議)」 등이 참고 되었지만 오히려 이것들보다 창의적으로 기구와 기계에 대한 기술지식을 창조하는 데 크게 기여하였다. 김빈의 경우도 이에 못지않아 복잡한 기구와 장치를 요약하여 명문으로 기술할 만큼 기계장치에 능통하였다고 할 수 있다. 그의 졸기(卒記)에서도 자격루 제작에 참여했다고 하였으니,¹⁵⁾ 일단은 제작팀의 일원으로 참가했다고 보아야 하겠다.

한편, 자격공루의 창제시말과 구조와 원리, 기능과 작동, 운전과 운영법 등을 기록한 「보루각기(報漏閣記)」는 계시기 제작기술 문헌으로서 완벽하다 할 만큼의 내용을 갖추었지만 아쉽게도 몇 가지를 미비하였다.¹⁶⁾ 첫째, 기구의 치수 가운데 중요한 것 몇 가지만 제시하였다. 따라서 제시된 치수를 근거로 치수가 표시되지 않은 기구의 것을 추정해야 하는 어려움이 따른다. 둘째, 기하학적 도식(圖示)이 없다. 기문이므로 설계도를 삽입한다는 것은 쉽지 않으리라는 것은 인정하더라도 아쉬운 점은 남는다. 물론, 의궤(儀軌)의 형태로 제작하여 사각(史閣)에 보관했던 보고서에는 설계도면이 존재했을 것이다.¹⁷⁾ 셋째, 기구나 기계학에서 중요시 되는 역학적 개념을

15) 『世祖實錄』 1년 乙亥, (1455, 景泰)

16) 『世宗實錄』 卷65, 世宗16年 7月1日 丙子.

17) 이항복(李恒福)의 중수의상서(重修儀象序)에 이르기를, “예전에 서운관에 있던 천문관 측용 의상은 모두 우리 세종대왕께서 성지를 신묘하게 쓰시어 친히 지도하고 교화하시어서 만든 것이다. 기계의 운전하는 제도와 길고 짧은 치수는 신 정초, 신 김빈, 신 김돈 등의 서와 명에 자세히 설명되어 있다. 본 기계의 부분(副本)은 사각에 보관하여 일대의 훌륭한 제도를 후세에 전하기로 하였는데, 임진왜란 때에 모두 타버렸다. (李恒福重修儀象序曰書雲觀舊有觀天儀象皆我 世宗大王妙運聖智 親自指教 而裁定者 機其運制度長短尺寸 臣鄭招臣金鎰臣金墩等序若銘詳之鑑之 本器副藏史閣以垂一代之盛制 壬辰之亂學

기구학적으로만 설명함으로써 기계장치의 우수성과 독창성을 기술하는 데 한계를 드러냈다. 그러나 이러한 미비점이 이 계시기의 가치를 평가하는 데 있어서 크게 문제가 되지는 않는다. 한편, 이러한 미비점을 찾아 보완하는 것이 복원연구의 주요 과제의 하나이기도 하다.

먼저, 위에서 열거한 과제들과 이를 해결하여 보루각루의 ‘1-물시계 2-시보 시스템 모델’이 확립되기까지 거쳐야 했던 시행착오와 모델 정립과정에 대하여 기술하겠다. 이것은 필자의 자격루 연구사를 회고하는 것이기에 앞서 과학문화재의 복원에 있어서 ‘가장 알맞은 모델 만들기’의 중요성을 강조하려는 부차적인 의도를 가지고 있기도 하다.

2) 시스템 접근법을 이용한 자격루의 해석

「보루각기」를 바탕으로 구성한 자격루의 시스템 모델을 발표한 것을 계기로, 1986년부터 2년간 한국과학재단(현 한국연구재단)의 연구비 지원을 받아 「보루각기」와 「흙경각기」를 기술적 관점에서 한글과 영문으로 정밀하게 번역하고 해석하는 일에 착수하였다. 이때 송상용 교수님의 인도로 과학사학회에 입회하게 되었다. 이 과정에서 두 개의 자격루는 구조는 물론 기능과 용도가 다르다는 것을 알게 되어 따로 따로 연구하기로 하고 먼저 보루각루(자격공루)를 연구한 다음 단계로 흙경각루 연구에 착수하기로 하였다. [흙경각루 연구는 후일 한국기술사연구소 설립과 동시에 착수한 혼천의 연구와 병행하였다.] 「보루각기」의 새로운 해석과 분해공학을 활용하여 물시계를 이용한 12시(하루)와 경점(야간) 보시신호의 발생과 이 두 가지 보시 시스템(장치)의 기능이 분석되었다.¹⁸⁾ 이에 따라 구성부품들이

爲灰燼.....)”(『增補文獻備考』 象緯考 3 儀象 2 (세종대왕기념사업회, 1980), 17) 또한 중종 31년(1531)에 보루각루를 복제하여 제작한 신보루각루가 임진왜란 중에 파괴됨으로서 광해군 8년부터 10년까지 보루각을 개수한 공사내용은 『報漏閣改修儀軌』라는 보고서로 엮여 두었는데 1856년에 이 책을 강화도의 외규장각으로 이전하여 보관하던 중 1866년 병인양요의 와중에 소실되었다. 이로 미루어 보루각루를 제작하거나 개수할 때마다 설계도도 함께 작성되었으나 지금은 전해지지 않는다고 보아야 한다.

18) 이 방법은 최근에 소프트웨어와 군사 분야에서 시도되고 있는 분해공학(reverse engineering) 공정과 유사한 것이다. [E. J. Chikofsky & J. H. Cross II, “Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy,” *IEEE Software* 7:1 (1990), pp. 13 - 17.] 웹스터 사전에 따르면, “분해공학은 인간이 만든 장치, 사물이나 시스템의 기술 원리를 분석을 통하여 그것의 구조,

다음과 같이 식별되었다. 1) 12시와 경점측정용 두 개의 물시계 2) 12시와 경점 측정용 계량호 위에 설치한 두 개의 보시(報時) 구슬 방출기구 3) 12시와 경점 보시장치 제어기 4) 당중기구(撞鐘機構)와 12시 전시 시스템으로 구성된 12시 보시장치 5) 경기(更機), 초점기(初點機)와 점기(點機)로 구성된 경점기(更點機)¹⁹⁾ 또한 세종시대에 사용된 부전(浮箭)을 복원하기 위해 『칠정산내편(七政算內篇)』과 『누주통의(漏籌通義)』를 연구하면서 국보 제229호 보루각자격루를 비롯하여 국내의 천문·계시의기에 대한 유물조사도 병행하였다. 한편, 소규모 보시장치의 모델 만들기과 실험을 병행하여 얻은 데이터를 바탕으로 구성한 12시와 경점 보시의 시스템 모델은 국내외 학계에 보고되었고,²⁰⁾ 원래 자격루 연구에서 의도했던 대로 자격루 모델이 제어공학 교재에 실렸으며, 학술연구서로 간행되었다.²¹⁾

「보루각기」에 기술된 신루(新漏: 보루각루, 자격공루, 자격루, 금루(禁漏) 등을 말한다)는 조선조 전기에 채용한 시제(時制)를 실현하기 위해 제작되었다. 이 시제는 고려 말부터 사용해왔던 수시력(授時曆)을 한양의 위도에 맞춰 교정한 『칠정산내편』에 의거하여 하루(一日)의 주야시간과 밤 시간(야간)을 2원화하여 천체운동에 따라 일상생활을 영위하도록 만들어진 것이다. 곧 밤과 낮을 합친 하루를 12등분하여 12시로 삼고, 12시에 매시 8 1/3각(刻)을 정규 분배하여 일일십이시백각법(一日十二時百刻法)(십이시법(十二時法))을 만들어 사용하였다. 매시(double-hours)는 현재의 두 시간에 해당된다. 야간은 일몰 후 2.5각과 일출 전 2.5각을 제외한 나머지 시간을 5등분하여 5경으로 삼고, 다시 1경을 5등분한 시간을 5점으로 하는 5경이

기능과 조작법을 발견하는 공정"이라고 정의할 수 있다.

19) 남문현, “世宗朝의 漏刻에 관한 研究”, 『東方學志』 57집, (1988), 53-94쪽.

20) 남문현, “世宗 自擊漏의 報時 시스템에 관한 研究”, 『한국과학사학회지』 11권 1호 (1989), 19-38쪽; 남문현, “世宗 自擊漏의 更點 報時 시스템의 復元”, 『전기학회논문지』 38권 12호 (1989), 1022-1032쪽; M. H. Nam, “A Reconstruction of Double-hour Annunciating System of the King Sejong's Striking Clepsydra,” The 6th International Conference on the History of the Science in China (ICHSC), Cambridge, UK, August 2-7, 1990; M. H. Nam, “Chagyongnu: The Automatic Striking Water-Clock,” *Korea Journal* 30:7 (1990), pp. 23-44; 南文鉉, “朝鮮 世宗朝 觀天授時 儀表創製事業和自擊漏”, 中國與其他國間天文學交融史國際學術研討會, 中國 北京古觀象臺, 1993; 南文鉉, “對於 朝鮮世宗朝創制的 觀天授時儀器的技術考察(漢語)”, 『自然科學史研究』 (北京) 第14卷 第1期 (1995), 42-50頁.

21) 남문현·이상호·남부희, 『제어 시스템 공학』 (자유아카데미, 1990), 8-10쪽; 남문현, 『한국의 물시계: 자격루와 제어계측공학의 역사』 (건국대학교출판부, 1995).

십오점법(五更二十五點法, 혹은 경점법(更點法))을 만들어 사용하였다.

12시법은 매시가 균등하므로 정시법(定時法)이라 하며, 경점법은 천체운동에 따라 낮과 밤의 길이가 매일같이 달라지는 데 따라 5경, 곧 25점의 길이가 매일 달라지므로 부정시법(不定時法)이라 한다. 조선시대에는 천체운동에 따라 일상생활을 영위하기 위해 매일 달라지는 경점의 길이 변화를 알아내어 여기에 맞춰 모든 경제활동, 성문의 개폐, 통금과 해제를 실시했다.²²⁾ 따라서 신루는 물시계로 하루 12시를 측정하면서 동시에 매시와 매경점의 시작시각을 알리는 계시기로서 12시는 시·청각, 경점은 청각 신호로 알려주는 2원화된 시보기능을 갖추야 했다.

「보루각기」에서 서술한 구조, 기능, 원리 가운데 기본적으로 서술되었어야 할 정보가 결정적으로 결여된 곳이 몇 군데 있다. 이런 연유로 번역이나 해석을 할 때 본의 아니게 억측을 넣거나 나아가서는 추론에 머물게 하거나 잘못된 방향으로 결과가 도출될 우려가 없지 않았다. 앞서 언급한 바와 같이 1433년에 자격궁루를 제작할 당시에 분명히 설계도를 작성하였겠지만 중도에 전란으로 유실되어 아쉽게도 지금까지 전해지는 것은 없다. 물론 설계도가 남아있다면 기록에 표현되지 못한 정보나 오늘날 이해하기 어려운 용어들도 크게 문제가 되지 않았을 것이다.

3) 1-물시계 2-시보 시스템 모델의 탄생

상기 단계까지는 개인 연구실에서 연구가 가능하였으나 보루각루를 일정 규모로 복원하기 위해서는 일정 규모의 연구개발체제를 갖추어 추진하지 않으면 성취가 어렵다는 것을 깨닫게 되어 1993년에 건국대학교에 한국기술사연구소(韓國技術史研究所)를 창설하여 조직을 갖추었다. 이 연구소는, 1990년에 조직된 자격루연구회가 임의단체였으므로 대외적인 연구 활동에 어려움이 많아 이를 해체하고, 대학 부설 연구기관으로 발족되었다. 연구주제로는 자격루와 조선의 혼천의(渾天儀) 연구를 표방하였다.²³⁾ 연구재정을 확보하기 위해서는 무엇보다 복원의 필요성과 타당성 조사, 복원

22) 남문현, “朝鮮 初期의 時制”, 『學術誌』 37집 (1993), 83-97쪽.

23) 南文鉉·韓永浩·李秀雄·梁必承, “朝鮮朝의 渾天儀 研究”, 『學術誌』 39집 (1995), 519-543쪽. 이 연구는 연구소의 첫 번째 연구업적이었다.

가능성을 가시화한 모형제작이 요구되었으며, 나아가서는 관련 학계, 정부 관련기관과의 협력과 지원이 필요하였다. 다행히 1992년부터 시작된 문화재관리국(현 문화재청)의 경복궁 복원사업에 세종시대의 천문·계시의기들도 복원하는 계획이 추진되어 자격루(홍경각루 포함) 복원도 그 안에 포함되었다. 다행스러웠던 것은 공학 분야의 동료 교수들이 연구소에 동참하여 준 것이었다. 정부 출연을 포함한 전통과학기술 연구개발비가 조성되었고, 문화재관리국은 ‘보루각자격루 복원설계’ 사업을 추진하였다. 1994년부터 전통과학기술 개발을 촉진하기 위한 정부(당시 과학기술처, 현 교육과학기술부)의 특별연구사업의 지원을 받아 대규모 모델을 제작하여 실험할 수 있는 기회가 생겼다.²⁴⁾

① 2-물시계 2-시보 시스템 모델은 적합한가?

자격루 연구의 핵심은 자동시보장치를 얼마만큼 사료 곧 「보루각기」에 가깝게 구현하느냐에 있지만, 이에 앞서 드러난 어려운 문제의 하나는 “물시계의 모델 설정”이었다. 우선, 「보루각기」와 현존하는 유물(상단에 대형 저수조, 중단에 가로로 두 개의 중·소형 물항아리를 배치한 세 개의 파수호와 하단에 설치한 두 개의 수수호로 구성된 국보 제229호 보루각자격루)을 근거로 12시와 경점을 독립적으로 측정할 수 있는 두 개의 물시계와 두 가지 보시장치로 구성된 모델을 구성하였다.²⁵⁾

이러한 모델을 설정한 이유는 「보루각기」에 “파수호가 네 개”라고 기술되어 있고, 현존 보루각루 유물에는 “파수호가 세 개”인데다 대형 파수호(저수조) 밑에 두 개의 중·소형 파수호를 가로로 나란히 배열한 점을 고려해서 유물이 두 개의 물시계로 사용되었을 것이라고 추측하였기 때문이었다.²⁶⁾ 따라서 파수호가 2단으로 배열돼 있으므로 상단에는 두 개의 저수

24) 이 사업은 필자가 책임연구원으로 참여한 1994-5년도에 과학기술처의 특별연구사업의 하나로 수행되었다. 이 사업에서는 자격루 외에 일성정시의, 양부일귀와 척도기도 개발되었다. 『전통과학기기의 복원기술개발』 (1995, 1996).

25) 각주 13, 14 참조.

26) 이러한 사고의 이면에는 徐浩修, 成周憲, 金泳이 1796년에 편찬한 『國朝曆象考』 卷4, 更漏條에, “.....受水筒二徑俱一尺二寸長俱六尺八寸晝夜遞用卽古萬水壺.....”라 하여 “두 개의 수수호는 각각 낮과 밤에 번갈아 쓴다”는 기록에서 비롯된 점도 없지 않다. 니덤 등이 제안한 2-물시계 모델은 ‘한 개의 저수조에 두 개의 출수관을 꽂아 두 개의 작은 항아리를 거쳐 각각의 수수호로 연결하는 구조로 현재 세종대왕기념관 구내에 설치된

조를, 중단의 파수호 두 개에는 부자밸브(float-valve)나 오버플로(overflow)를 이용한 수위제어기를 설치하면 일정 유량을 수수호에 유입시키는 것이 가능할 것이라는 생각에서였다.

니덤은 1950년대부터 중국의 과학과 문명을 연구하던 중 조선시대에 세종대왕이 건립한 간의대의 천문관측의기를 비롯하여 여러 가지 해시계와 장영실이 발명한 자동물시계, 현종 10년에 제작된 자명종(현재 국보 제230호 혼천시계 - 필자 주) 등에 관심을 갖게 되었다. 특히 자동물시계가 동아시아의 전통을 계승한 누각법(漏刻法)과 이슬람 지역에서 전래한 것으로 보이는, 구슬이 낙하하면서 발생한 에너지로 작동되는 목인(木人)이 종, 북, 징을 울려 시간을 알리는 보시장치가 결합된 것에 주목하였다. 1959년에 출간된 『중국의 과학과 문명(*Science and Civilisation in China*)』 3권에서 처음으로 세종 자격루를 소개한 데 이어,²⁷⁾ 1960년대 중반에 「보루각기」 연구에 착수하여 자동시보 물시계의 대강을 발표하였다.²⁸⁾ 또한 1986년에 출간된 “조선서운관천문의기와 계시기(朝鮮書雲觀天文儀器與計時機)”라고 명서된 『조선의 서운관(*The Hall of Heavenly Records: Korean Astronomical Instruments and Clocks 1380-1780*)』에서 세종대에 만들었던 각종 천문의기에 대한 기록을 소상하게 번역하여 소개하고 자격루에 대한 자세한 분석과 함께 복원 모델을 제시하였다.²⁹⁾ 이것은 하루 12시와 야간의 경점시각을 독립적으로 측정하는 두 개의 유입식(流入式) 물시계와 12시와 경점을 독립적으로 알려주는 시보장치로 구성된 소위 2-물시계 2-시보장치 모델이었다.³⁰⁾ 이미 소송의 수운의상대 등의 복원연구로 탁월한 연구업적과 경험을

국보 제229호의 소규모 모델을 참고한 것이다. J. Needham, G-D Lu, J. H. Combridge and J. S. Major, *The Hall of Heavenly Records: Korean Astronomical Instruments and Clocks, 1380-1780 (HHR)* (London: Cambridge University Press, 1986), p. 32, Fig. 2.2 참조.

27) J. Needham, *Science and Civilisation in China*, Vol. III (Cambridge: Cambridge University Press, 1959).

28) J. Needham, Wang Ling, *Science and Civilisation in China (SCC)*, Vol. IV (London: Cambridge University Press, 1965), pp. 517-518.

29) Needham, Lu, Combridge and Major, *The Hall of Heavenly Records*, pp. 23-44. 이 책은 조지프 니덤 등 지음, 이성규 옮김, 『조선의 서운관: 조선의 천문의기와 시계에 관한 기록』 (살림, 2010)으로 번역되었으며, 자격루는 53-83쪽에 수록됨.

30) 2-물시계 모델의 내용을 인용하면 다음과 같다. “두 개의 유입식 물시계 (부전루) 향아리에서 두 개의 부전 (浮箭)이 떠오르는데, 하나는 낮과 밤의 시용(12시용)이며 다른 하나는 경용(밤의 경점용)이다. 잣대가 떠오르면서 그 (향아리들) 위에 수직으로 세운 정동

축적한 니덤은 자격루 복원에 대하여 “실제 적절한 규모의 모델링과 실험을 거치지 않고서는 일부 중요한 역할을 제공하는 기구들의 구조와 작동에 대한 정보의 결여로 이것들이 복원되더라도 추측(가정)이상의 수준을 넘지 못할 것”이라고 하여 자격루 연구에서 당면하게 될지도 모르는 심각한 정보의 결여를 우려하였다.³¹⁾ 국내에서도 내부 메커니즘(mechanism)의 복원을 위해 비교연구의 필요성이 제기되기도 하였다.³²⁾

이러한 선행연구와 권고를 염두에 두고 필자는 「보루각기」를 구현하기 위해 모델링과 실험을 포함한 새로운 연구방법을 창안하여 결여된 정보나 있을 지도 모를 기록의 오류 등을 바로 잡을 수 있는 방안을 강구하지 않으면 안 되었다.

② 모델링과 실험

앞서 언급한 바와 같이 필자는 1995년에 대규모 작동모형을 제작하여 위에서 제안한 ‘2-물시계 2-시보장치 모델’을 실험할 수 있는 기회를 갖게 되었다.³³⁾ 이 실험에서는 물시계의 유량조절장치로 저수조(대파수호)에서 유량공급용 항아리(소파수호)로 유입되는 유량과 유량공급용 항아리에서 계량호(수수호)로 유입되는 유량을 동시에 조절할 수 있는 기준수위 조절 기능을 갖는 부자밸브를 유량공급용 항아리 안에 설치하였다.³⁴⁾ 두 개 계량호(수수호)의 뚜껑 위에는 각각 두 개의 잣대와 같은 길이의 동판에 12시와 경점 시각 눈금(시점)에 대응하여 시점 표시용 보시 구슬을 수납할 수

선반에서 각각 시용 12개와 경용 25개의 작은 청동 구슬을 떨어뜨린다(From two inflow clepsydra vessels there rose up two floating indicator-rods, one for the day and night double-hours, the other for the night-watches, dislodging as they did so 12 and 25 small bronze balls respectively from vertical bronze racks fixed above the clepsydra.···).” - 필자 번역. Needham, Ling, *Science and Civilisation in China*, pp. 517-518. 이 내용은 Needham, Lu, Combridge and Major, *The Hall of Heavenly Records*, p. 33에 일부 수정되어 수록되었다. Needham, Ling, Solla Price, *Heavenly Clockwork*, 2nd ed. with supplement by Combridge., pp. 211-2 참조.

31) Needham, Lu, Combridge and Major, *The Hall of Heavenly Records*, pp. 33-34.

32) 박성래, “世宗朝 自擊漏에 관한 재고찰”, 제34회 전국역사학대회 발표요지, 1991년 5월 31일-6월 1일, 건국대학교, 333-339쪽.

33) 각주 24 참조.

34) H. Diels, *Antike Technik*, 1st ed., (Leipzig: 1914). 부자밸브의 역사와 물시계 응용 실험에 대해서는 남문현, 『한국의 물시계』의 1장과 8장의 부록에서 상세히 언급하였다.

있는 구슬-수납기구를 설치한 방목(方木)을 수직으로 세웠다. 계량호 앞에는 깔때기를 놓고 방목의 구슬-수납기구에서 떨어지는 구슬이 그 안으로 떨어져 보시(자격)장치와 연결된 통로를 거쳐 보시장치로 이동되도록 하였다. 계량호와 보시장치를 연결하는 통로(넓은 판)에는 구슬 통로를 교대로 바꿔주는 통로 전환기를 설치하였다. 이것은 하루건너 계량호를 교체하여도 방목에서 방출된 두 가지(12시와 경점용) 구슬이 고정적으로 해당되는 좌(12시), 우(경점) 동통(銅筒)으로 진입되도록 하기 위해서다. 12시 보시기계는 청각보시와 시각보시 기구로 구성하였고, 매시를 알리는 종소리에 이어 해당 시패를 잡은 보시인형이 차례로 상승-하강되어 1시진(時辰)씩 전 시되도록 하였다. 경점 보시기계는 북과 징소리로 매경과 매점을 알려주는 청각보시기구로 구성하였으며, 두 가지 기계를 함께 6면체로 구성된 철제로 제작한 틀 안에 설치하였다. 모형은 건국대학교 공과대학 섬유공학과의 천정 높이가 3.5미터 되는 대형실험실에 설치하였다. 공간 구조상 물시계의 계량호는 높이 1미터, 시보장치 궤는 2.5미터 정도로 제작하고 틀의 상부 벽을 제외하고는 5면은 개방하였다. 실험장치의 설계는 섬유공학과의 서문호(徐文浩), 기계공학과의 한영호(韓永浩), 이재효(李載孝) 교수가, 제작은 기계공학과 공작실 주인이었던 정봉룡(鄭奉龍) 삼양정기(三陽精機) 대표가, 실험은 앞의 세 교수와 필자가 수행하였다.

두 개의 물시계로 시간을 측정하려면 먼저 12시용 물시계의 계량호에 매일 정오(12시)에 물을 주입하기 시작하여 다음날 정오에 그친 다음, 이어서 갈오(渴烏, siphon)를 써서 계량호 안에 가득찬 물을 빼낸다. 이러한 계량호 비우기는 이 계량호를 그 날 밤에 경점용으로 사용하기 위해서다. 경점용 계량호에는 당일 저녁 1경1점 시각(12시 단위로 표시)에 물을 주입하기 시작하여 다음 날 새벽 5경5점이 끝나는 시각에 그친 다음, 이어서 이 계량호 안에 들어 있는 물을 빼낸다. 이것은 이날 정오부터 새로운 12시 측정용으로 이 계량호를 사용하기 위해서다. 이에 따라 방목에 설치한 동판기구, 구슬이동통로의 통로 전환기도 계량호와 함께 교체해야 한다. 이와 같이 계량호, 동판기구와 구슬통로를 매일 교체해야 하는 두 개의 물시계 배치를 갖는 2-물시계 모델을 실험하면서 다음의 사실들이 밝혀졌다. 첫째, 2-물시계법은 2원 시제의 시간측정법에 대한 원칙에 위배된다.³⁵⁾ 경점은 태양을 기준으로 생활에 편리하도록 인위적으로 구분한 시간단위로 12시

에 종속된 단위이므로 별도로 측정할 수 없다. 둘째, 2-물시계는 계량호, 방목에 설치된 동판기구, 구슬통로를 매일 교체해야하는 등 운영이 매우 번거롭다. 따라서 1-물시계라야 하며, 12시와 경점용 동판 구슬-수납기구는 교체하지 않고 고정시켜야 한다. 매시, 매경점마다 구슬을 방출할 수 있도록 방목마다 좌측면에는 12시용, 우측면에는 경점용을 설치해야 한다. 이러한 관찰을 바탕으로 실험이 끝난 뒤에 누기에 대한 유물조사를 거쳐 2-물시계 모델의 부적합성을 재검증하여 2-물시계 모델을 폐기하고, 1-물시계 모델로 대체하였다.³⁶⁾ 셋째, 좌측 계량호 방목에는 12시용을, 우측 계량호 방목에는 경점용을 따로 따로 설치하는 것이 아니라 각각의 방목마다 좌측면에는 12시용 동판을, 우측면에는 경점용 동판을 설치해야 한다는 사실을 「보루각기」 원문을 통하여 확인하였다. 한 개의 방목 좌·우 측면에 각각 동판기구들을 설치하여 위치를 고정시켜주면 계량호에서 시보장치로 통하는 통로도 고정되므로 번거로운 통로 전환기가 필요 없게 된다.

③ 보루각 자격루의 복원

실험을 통하여 시스템 모델 구성부품에 대해 몇 가지 수정과 개선이 이루어 졌다. 1) 동통기구(銅筒竅機)의 고안: 방목의 동판기구에서 낙하된 소환(보시구슬)이 물시계와 보시장치 간의 연결 통로를 지나서 보시장치 중간층에 설치된 좌, 우 동통기구에 차례대로 진입하여 가로 놓인 동통 하면에 뚫린 구멍에 차례대로 낙하하도록 장치한 자동식 구멍기구(규기(竅機))를 고안함으로써 종래 손가락 기구인 기사(機匙)의 지렛대와 구멍기구를

35) 당시 역법에서는 하루를 자정(子正)에서 다음 날 자정까지로 정하고 이것을 12등분하여 주야 12시를 결정하였고, 이 가운데서 일몰과 다음 날 일출 간의 시간을 밤 시간으로 보아 경점시간을 결정하였다. 따라서 경점은 해를 기준으로 생활에 편리하도록 인위적으로 구분한 12시에 종속된 시간단위이다. 예를 들어, 수시력(授時曆)에서 동지절의 1경 1 점은 유초(酉初) 1각 4분이듯이, 경점 시간은 독립적인 시계로 측정할 수 있는 성질의 시간단위가 아니라 12시에 종속이므로 별도의 경점 측정용 시계가 있는 것이 아니다. 참고로 『漏籌通義』에 의하면 경점 시간은 12시를 기준으로 계산하는 외에 절기에 따른 中星으로 파악하는 방식을 제시하고 있으나 이것은 어디까지나 개략적인 시각을 알아 내는 지표일 뿐이다.

36) 남문현, “自擊漏의 水位制御 方式에 대한 歷史的 考察”, 『산업기술연구논문집』 23집 (1998), 91-103쪽; M. H. Nam & Y. H. Hahn & J. H. Lee & D. Y. Han, & M. H. Seo, “One inflow clepsydra model with dual-time signal generator,” The 9th International Conference History of Science in China, Berlin, August 23-28, 1998.

연동시켜주는 방식을 대체하였다.³⁷⁾ 2) 평륜(平輪) 회전제어 탈진기의 복원: 12시 보시기계 가운데 평륜을 회전시켜 보시인형을 차례로 전시창문까지 올려주었다가 시간이 다하면 하강시키고 다음의 인형으로 교체시키는 기구에 대한 복원이다. 「보루각기」에 따라 정밀하게 해석하여 “보시인형의 발밑에 비스듬하게 설치된 동판이 평륜의 회전을 30도로 제한시켜주는 탈진기구의 요소”임을 규명하였다. 곧, ‘보시인형이 시보가 끝난 뒤에 바퀴면에 되돌아오는 과정에서 유발시킨 중력에 의해 평륜이 회전 된다’는 사실을 확인하였다. 이 방식은 한영호 교수에 의해 원문에 충실하게 복원되었다. 이에 따라 새로 고안된 기구로 종래 캠(cam)과 깔쭉 톱니바퀴(ratchet wheel) 등과 같은 기기로 평륜을 회전시키는 방식을 대체하게 되었다.³⁸⁾ 한편, 니덤 등은 평륜이 예를 들어 역회전 멈춤쇠(pawl-and-ratchet)와 같은 수단에 의해 회전될 수 있다고 가정하였다.³⁹⁾ 이와 같이 장영실이 발명한 기구의 특징은 단순성(simplicity)에 있다는 것을 새삼 느끼게 해준 대목이었다. 3) 경점 보시기계의 구현: 이것은 자격장치의 가장 중요한 “오도메이션 시스템”으로 실험과정에서 모델링과 구현에 많은 개선이 이뤄졌다.⁴⁰⁾

새로운 모델은 ‘1-물시계 2-시보장치 모델’로 수정되어 학계에 보고되었다.⁴¹⁾ 모델링과 실험을 통하여 「보루각기」의 몇 가지 오기도 시정되어 보

37) 남문현, 『한국의 물시계』 149쪽의 그림 5-6은 종래 동통 및 철환방출 기구의 구 모델이다. 이러한 기구의 고안에 대하여 니덤의 공동연구자로서 수운의상대의 탈진기 복원과 자격루 복원연구에 종사했던 존 컴브리지는 동통에 뚫린 구멍이 “술가락 기구와 연동되는 것이 아니라 자동으로 개폐되는 디바이스”라는 점을 지적하면서 동통에 사각형의 구멍을 뚫고 한 쪽에 추축(pivot)을 부착한 문(trap-door)을 설치하는 아이디어를 제시해 주었다.(1990년 9월 24일과 11월 5일私信) 이러한 코멘트를 받아들여 필자는 새로운 방식의 고안에 착수하였다. 구슬이 구멍에 추락하면 그 구멍을 밑에서 막고 있던 추축이 부착된 문이 회전되면서 위쪽의 구멍이 저절로 닫혀 다음 구슬이 지날 수 있는 통로를 제공하는 방식이 기구학 전문가인 KAIST의 윤용산(尹用山) 교수에 의해 고안되었으며, 후일 이 고안은 복원제작 과정에서 개선되었다.

38) 남문현, 『한국의 물시계』 150쪽의 그림 5-7은 12시 시보기구의 구 모델이다.

39) Needham, Lu, Cambridge and Major, *The Hall of Heavenly Records*, p. 38.

40) 남문현, 『한국의 물시계』의 그림 5-12는 경점기 모델이다. 이 모델은 필자의 연구 동료인 건국대학교 섬유공학과와 서문호(徐文浩) 교수, 정밀기계 전문가인 정봉룡(鄭奉龍)님의 노력으로 개선되어 복원제작에 적용되었다. 특히 고 정봉룡님은 전체 모델을 제작하여 기능을 일관적으로 검증하는 데 협력하였다.

41) M. H. Seo & Y. H. Hahn & J. H. Lee & M. H. Nam, “Clock-Work Mechanisms of the Automatic Striking Clepsydra Jagyungnu,” *Proc. Int. Symp. History of Machines and Mechanisms*,

다 구체적인 자격공루의 모습이 눈앞에 드러났다.⁴²⁾ 주요 구성부품에 대한 아이디어는 특허로 출원·등록되었으며, 후일 문화재관리국이 발주한 보루각자격루 설계에 활용되었다.⁴³⁾

필자의 연구팀을 제외하고 유일하게 자격루 복원에 종사했던 니덤 등은 「보루각기」에 언급되지 않은 몇 가지 기구들의 구조와 작동원리를 (기계시계의 발달과정 등을 인용하여) 추론하였다. 비록 이것들이 한국적 풍토에 적합하지는 못했어도 필자를 포함하여 연구자들에게 많은 통찰력과 영감을 주어 자격루 연구에 도움을 주었으며, 그들의 이러한 노력은 높이 평가되어야 할 것이다. 이에 대하여 필자는 자격루 연구사에서 자세하게 언급한 바 있다.⁴⁴⁾

④ 자격루의 복원제작

2004년 12월 문화재청이 발주한 ‘자격루 복원제작’ 사업은 세종 16년(1434) 7월 초 하루부터 표준으로 사용한 보루각루를 제작 당시의 상황으로 복원·제작하는 것으로서, 우리 과학문화재의 독창성과 우수성을 널리 알리고, 새로 건립되는 국립고궁박물관에 전시하여 역사교육 자료로 활용하는 것이 목표였다.⁴⁵⁾ 사업지침에 따라서 1997-1998년에 문화재관리국이 시행했던 『보루각자격루 복원설계 용역보고서』 및 국보 제229호 보루각자격루와 연구자료를 참고로 하였고, 척도는 세종시대 주척(周尺)을 207.0미터로 환산하여 적용하였다. 물시계의 누기와 『누주통의(漏籌通義)』의 11전법(箭法)에 따라 잣대를 제작하여 『세종실록』의 기록대로 12시와 5경점을 시·청각적으로 알리도록 보시(자격)장치를 갖춘 자격루 1기와 교육용 자격루 1기를 제작해야 했다. 정재훈(鄭在鏞, 전 문화재관리국장) 교수를 위원장으로 각계 전문가 10명으로 자문위원단을 구성하였고, 전통기술을 보

Cassino, Italy, May 10-13, 2000, pp. 341-350.

42) 이 작동모형은 1996년 말부터 수차에 걸쳐 한국방송공사(KBS), 교육방송(EBS) 등이 방영하여 대중들에게 널리 알려졌다.

43) 보고서는 『보루각자격루의 복원 설계』(문화재관리국, 1998)로 제출되었으며, 이 설계를 바탕으로 2004-5년에 복원사업이 추진되었다.

44) 남문현, 『장영실과 자격루』 제4부 2장 (서울대학교 출판부, 2002), 227-234쪽.

45) 이 사업은 문화재청(청장 兪弘濬)이 발주하여 2004년 12월 9일에 건국대학교(총장 鄭吉生) 산학협력단(단장 鄭善浩)과 용역계약(연구책임자 南文鉉)이 체결되었다.

유한 국가지정 기능보유자들과 문화재 보수 및 제작 전문기업체를 선정하였다. 설계·감리는 설계자인 건국대 한국기술사연구소와 사단법인자격루 연구회가 담당하였다. 수요기관인 국립고궁박물관은 용역기관의 과제수행을 감리하기 위해 유물과학과의 서준(徐埈, 구명 徐昇佑)주무관을 자격루 사업 담당자로 임명하여 제작현장 감독, 궁중유물자료 제공, 국보 제229호 복제 및 재질성분조사, 부품조달검사, 시운전 감리와 제품검사, 각종 회의 준비 및 학술활동 참가 등 과제수행이 원활하도록 협력하였다. 사업기획, 회의, 현장 점검과 기록, 제작 일정 관리 등의 프로젝트 관리는 자격루연구회의 이영시(李泳時), 홍용선(洪容善), 정봉룡(鄭奉龍) 연구원이 담당하였다. 물시계의 누기는 범종 주조 전문업체인 성종사(聖鐘社)(원광식(元光植), 중요무형문화재 제112호 주철장, 名匠), 교육용 물시계의 누기(유리제품)는 경기과학(嚴宰鎔), 물시계 건축설비와 보시장치는 여진미술관(如眞美術館)(이진형(李鎭炯), 대전시 무형문화재 제6호 불교조각장), 연리지불교공예사(連理枝佛教工藝社)(이남炯(李南炯), 도(都)편수 이광복(李廣福), 단청 양영송(梁泳松)), 노반금속공예(爐盤金屬工藝)(최교준(崔敎俊), 문화재철물보수 기능자 701호)이 선정되었다. 사업이 착수되자 연구원, 자문위원, 제작진 일부를 중국과 일본 현지에 보내 천문·계시 유물, 복원사례를 견학하도록 하였다. 물시계 설비와 보시장치 제작을 위해 필요한 목재(금강송)를 확보하여 처리작업에 들어가는 한편, 물시계의 누기를 제작하기 위해 국보 제229호 보루각자격루 유물을 조사하고 복제하였다. 유물을 조사해보니 제작된 후 470여 년을 지나면서 360여 년은 실내에서, 30여 년은 노천에서, 그리고 70여 년은 비를 가려줄 지붕만 있는 곳에 진열되는 동안 남아있는 것이라고는 파수호 세 개, 수수호 두 개, 부전 한 개, 부자 두 개와 도수관 부품으로 보이는 파이프 두 토막 등이었다. 더욱이 파수호와 수수호에 파손된 부분이 여러 군데 발견되었다. 또한 수리한 흔적도 두어 군데, 향아리 뚜껑과 도수관 등 부품은 유실된 채였다. 물 향아리들의 부식과 변형이 매우 심하여 측정 위치에 따라 길이나 두께에 상당한 차이가 있어 동서 및 남북 방향으로 구분하여 치수를 측정하는 한편, 실측이 어려운 부분은 탁본을 떠서 치수를 비교·절충하여 복원도면 작성을 위한 치수를 결정하였다. 특히, 구름을 타고 비상하는 오조룡(五爪龍)이 부조된 높이 2,270밀리미터인 수수호는 안지름과 원측의 변형이 심하여 탁본, 실측 치수에 따라

비교·검토한 뒤에 측에 맞춰 바로 잡은 다음, 주형제작을 위해 먼저 시험용 석고 모형을 제작하여 변형부분을 검증한 다음 본 주형을 제작해야 했다. 이러한 과정은 전통기술은 물론 최신의 기법을 적절하게 활용하여 해결하였으며, 여러 분야 전문가들의 지식과 경험이 주효하였다.

부품의 조사, 설계, 제작 단계마다 자문위원회의 결정을 받아 작업에 착수 하였다. 그야말로 무에서 유를 창조하는 일이라 많은 시행착오를 거쳐 제작된 시제품은 7회의 전체 자문회의, 12회의 소위원회, 30여 회의 연구 및 감리원회의, 6회의 감리단과 제작진 합동회의, 3회의 세미나(1박2일)를 거쳐 검증된 뒤에 최종적으로 제작이 승인되었다. 소규모 금속 부품은 납청유기공방(納淸鑪器工房)(이봉주(李鳳周), 중요무형문화재 77호 유기장(鑪器匠)), 물시계 부품의 칠은 한송울칠공방(박성규(朴成奎), 칠피공예(漆皮工藝) 기능전수자 99-1), 옥가공은 김영희(金永熙)(경기도 무형문화재 180호, 옥장(玉匠)) 공방, 대목작업은 토담목재(崔碧奎, 강릉)에서, 석재는 일등석재(一等石材)(이흥균(李興均), 영주), 북은 김관식(金寬植)(대전시 무형문화재 제12호 악기장) 등 해당 분야 전문가들의 손을 거쳐 제작되었다. 총괄 책임자로서 필자는 십 여 곳에 산재된 현장을 해당 자문위원, 연구원들과 함께 누비며 현장지도를 하는 한편, 건축물 설계자인 주남철(朱南哲, 고려대 명예교수), 도편수 이광복(李廣福), 서준(徐淳) 주무관과 전시장에 초석을 놓고 제품을 설치하는 일에 주력하였다. 현장에 조립된 물시계는 이재효(李載孝), 김성균(金盛均) 교수팀이, 보시장치 실험은 서문호(徐文浩), 한영호(韓永浩) 교수팀이, 조립된 모든 기구와 기계장치는 60여 성상을 정밀기계 분야에 종사해온 정봉룡 연구원의 손을 거쳐 조율(調律)되어 성공리에 시운전을 마친 뒤 2005년 12월 28일 국립고궁박물관에 납품되었다. 필자가 짓고, 이태진(李泰鎭, 서울대)위원이 감수, 서예가 소헌 정도준(紹軒 鄭道準)이 휘호한 “자격루 복원기”가 봉헌되었다. 2006년 1월에 마지막으로 완제품 설계도와 조감도가 한국기술사연구소(소장 한영호(韓永浩))와 조선건축사사무소(대표 윤대길(尹大吉))에 의해 작성되어 납품되었다. 이로써 1년여에 걸친 자격루 복원제작이 마무리 되었다.⁴⁶⁾

46) 박물관의 리모델링 작업으로 제품은 1년 반 동안 포장하였다가 개관에 임박하여 풀어 점검한 뒤 공개하였다. 복원과정과 결과는 여러 편의 논문으로 발표되었다. 서준, “자격루 복원 과정과 의의”, 『고궁문화』 창간호, (2007), 92-134쪽에 “자격루 복원기”가 실려

이로써 사반세기에 걸친 자격루 연구로 보루각루가 복원되었다. 2007년 11월 20일 자격루 전시관 개관식장에서 필자는 한국 계시기 역사의 새로운 장을 쓴다는 사명감으로 제작·연구·자문·감리에 참여해 준 30여 분을 호명하고 함께 내빈들에게 소개하였다. 유홍준 청장이 “이제 보루각 자격루가 복원되었으니 덕수궁 유물은 어떻게 보존하는 것이 좋겠습니까?”라는 물음에 “옛 모습대로 처음에 설치했던 곳으로 복귀시켜야 하겠지요”라고 답하였다. “제 자리로 돌려놓아야 하겠지요. 그렇게 해보도록 하겠습니다.” 벌써 네 해 전의 일이다. 그날의 심정을 글로 적어 두었다.

돌이켜 보면, 한국인의 자랑스러운 과학발명품 중 으뜸, 우리 朝鮮의 시간 지킴이 - 그 이름 모르는 이 없는 자격루! 世宗聖王께서 조선풍토에 맞는 역상수시(曆象授時) 시책 펴실 때 1433년 9월 궁중기술자 장영실(蔣英實)이 자격공루(自擊宮漏)를 제작하였다. 만세에 전할 기물이라 칭찬하시면서 경복궁에 “시간 알리는 집 보루각(報漏閣)”을 짓고 1434년 7월 초하루 날에 보루각자격루를 표준 계시기(計時機)로 만포하신지 어언 570여 성상. 1536년 中宗大王께서 이것을 본떠 창덕궁에 재창(再創)하셔서 두 개가 되니 한양성 밖 모든 백성 인정(人定)·파루(罷漏) 종소리에 맞춰 생업에 종사하였다. 임진왜란 중에 경복궁 불타 자격공루 소실되니 1616년 光海 임금께서 “백성들에게 시각을 알리는 일은 하루라도 폐할 수 없다”하시고 창경궁에 보루각을 새로 짓고 누기(漏器) 남은 것에 더하여 개수(改修)하였다. 이때의 시말(始末)을 보루각개수의궤(報漏閣改修儀軌)로 만들어 외규장각에 보관할 때 병인양요에 불타 없어지니 정교한 제도(制度) 영영 알 길이 없게 되었다. 1866년 高宗皇帝께서 경복궁 중건하실 때 누국(漏局) 짓고 옮겼다가 1895년 인정·파루 제도가 폐지되니 물 흐름이 멈추었다. 1908년 제실박물관(帝室博物館) 진열품으로, 1938년 덕수궁 이왕가미술관(李王家美術館) 진열품으로, 110 여년이 물 향아리 빈 채로 침묵

있다. 『건국기술연구논문집』 31집 (2006)에 실린 다음의 “보루각 자격루 연구” 특집 논문들도 참조하라. 이재효·김성균·남문현, “(I)-누기”, 67-74쪽; 김성균·이재효·한영호·남문현, “(II)-계시시스템”, 75-84쪽; 한영호·서문호·남문현, “(III)-주시기계”, 85-94쪽; 서문호·한영호·남문현, “(IV)-경점기계”, 95-104쪽. 다음 논문도 참조하라. M. H. Nam & Y. H. Hahn & M. H. Seo & J. H. LEE & J. Seo, “The Reconstruction of King Sejong's Striking Clepsydra Jagyeongnoo at the National Palace Museum of Korea,” *The Chinese Journal for the History of Science and Technology* 31:4 (2010), pp. 461-470 (with Chinese Abstract).

속에 흘렀다. 世宗實錄 읽어보고 보루각자격루 유물 살펴가며 옛 모습 만들어 내니 2007년 대한민국에서 물이 예전처럼 다시 흐르게 되었다. 이제 470여 성상을 풍상 속에 지내온 나라의 보배 - 국보 제229호 보루각자격루 - 는 창경궁 금루각(禁漏閣) 옛터에 새집지어 옛 모습 간직하기를 축수하고 또 축수합니다. 그 날이 얼른 오시기를.....

지금까지 보루각루의 복원연구와 제작에 이르기까지의 과정을 요약하여 서술하였다. 앞서 언급한 바와 같이 흙경각루 연구는 보루각루 연구와는 별도로 조선중기의 혼천의 연구와 병행하여 수행되어 비교적 최근에 연구 결과가 나왔다. 「보루각기」가 자격공루에 대한 구조와 기능, 운전특성 등을 비교적 상세하게 기술한 반면, 「흙경각기」는 설명이 간명하여 모델링이 쉽지 않았다. 논문에서 언급하였듯이 흙경각루는 조선 천문시계의 전형으로서 중국 천문시계의 역사와 기술적 장단점을 파악한 뒤에 제작된 것으로 중국 천문시계의 역사를 계승·발전시킨 것이라 할 수 있다. 흙경각루는 이보다 앞서 제작된 간의대 수운혼천과 자격공루(Striking Palace Clepsydra)를 취합하여 제작된 것이며, 자행자격(自行自擊)하는 천문시계(Striking Heavenly Clepsydra)로 또 하나의 자격루였다.⁴⁷⁾

4. 수운의상대의 복원 사례

자격루와 혼천의 복원연구에서 긴요하게 참고로 했던 자료가 앞서 언급한 『신의상법요』와 이것을 연구하여 수운의상대의 금종기를 복원함으로써 이것이 현대기계시계에 사용되는 탈진기의 원조라는 것을 밝혀낸 『천문시계』 등이었다.⁴⁸⁾ 수운의상대 복원연구가 1950년대 초부터 중국과 영국에서 시작된 이래 많은 학술연구와 제품이 저작과 전시품으로 발표되었다.⁴⁹⁾

47) 수운혼천에 관해서는 『世宗實錄』 卷77, 世宗19年 4月 15日 甲戌, 9ㄴ ; 흙경각루에 관해서는 『世宗實錄』 卷80, 世宗20年 1月 8日 壬辰, 5ㄱ-6ㄱ, 김돈이 지은 「흙경각기」에 자세히 기록되어 있다. 이에 대한 연구논문은 각주 12 참조.

48) Needham, Ling and Solla Price, *Heavenly Clockwork*

49) 水運儀象臺에 대한 자세한 연구 결과물에는 상기 니덤 등의 『천문 시계』 외에 다음의 연구들이 있다. 王振鐸, 『科技考古論叢』 (文物出版社, 1989), 238-273쪽; 李志超, 『水運儀象志- 中國古代天文鐘的歷史』 (中國 合肥: 中國科學技術大學出版社, 1997).

이 장에서는 수운의상대 복원연구에 길잡이가 되어온 니덤, 왕진탁(王振鐸), 이지초(李志超) 교수 등의 복원제작과 연구사례를 소개하기로 하겠다.

1) 원우혼천의상(元祐渾天儀象) - 수운의상대

중국 북송 말 원우 3년(1088년)부터 소송의 주관 아래 한공렴(韓公廉)이 설계·제작한 수운의상대는 중국의 역대 천문시계 중에서 가장 뛰어난 작품으로, 과학기술사의 위대한 업적으로 평가되어 왔다. 『신의상법요』의 첫머리에 나오는 “진의상장(進儀象狀)”에는 이 천문시계의 창제시말이 서술돼 있다. 그러나 제작과 설치운영 등에 대하여 『송사(宋史)』 「율력지(律曆志)」를 비롯하여 자료마다 제작 날짜에 차이가 있으나 대체적으로 과정을 요약하면 다음과 같다.⁵⁰⁾ 원우 원년(1086) 겨울 11월에 새로운 혼의로 구혼의⁵¹⁾를 교체하라는 조서가 내려 소송은 새로운 것을 제작하기 위해 한공렴으로 하여금 동한(東漢)의 장형(張衡)이래 당 개원(開元)년간인 725년에 일행(一行)과 양영찬(梁令瓚), 태평흥국시기에 장사훈(張思訓)이 제작한 태평혼의의 수격지법(水激之法) 등 옛날의 법식을 모두 섭렵하도록 한 다음 설계에 착수하였다. 두 해 뒤인 1088년 5월에 우선 소형 모형이 조성되었고, 이것을 바탕으로 그 해 12월 (또는 다음해 1월)에 목재로 된 대형 모형이 완성되었다. 혼의와 혼상을 포함하여 구조물 대부분이 목재로 제작되었다. 목재로 만든 모형을 갖고 여러 가지 시험을 거친 뒤에 청동으로 혼의와 혼상 등을 주조하여 집영전(集英殿)에 안치하였다. 원우 7년(1092년) 4월에 소송은 “혼천의명(渾天儀銘)”을 지었고, 이어 6월에 “원우혼천의상”이 완성되었다. 이어 1094-96년(소경초년)에 소송은 『신의상법요』를 편찬하여 수운의상대의 전모를 소상히 후대에 전하였다. 수운의상대는 높이 약 12미터, 폭 약 7미터에 이르며, 위는 좁고 아래는 넓은 목재구조건축에 맨 위에는 지붕과 사방이 터진 자리를 만들고 천문관측이 가능한 혼의를 설치하였다. 아울러 밀폐된 공간에는 천상(天象) 연시용 혼상을 설치하고 계시와 보시 장치를 설치하여 관측·연시·계시·보시의 3대 기능을 갖춘 거대한 기계 시

50)李志超, 앞의 책, 76-82頁 등.

51) 북송시기에 조성된 太平, 至道, 皇祐, 熙寧 渾儀와 元祐渾天儀象을 5대 혼이라 한다. 원우 이전의 혼의를 구혼이라 불렀다.

시스템이다.⁵²⁾ 이 기계는 부품 400개, 부품명칭 90여 개, 8개의 기능단위로 조성에 있다. 기계구조는 크게 동력발생계통, 동력전달계통, 집행계통, 그리고 제어계통으로 구성되어 있다. 집행계통은 혼의를 이용한 관측, 혼상을 이용한 연시, 그리고 보시계통으로 구성된다. 제어계통은 추륜연동 금중기구로 구성되어 추륜회전을 정밀하게 제어해 주도록 되어 있다. 이 천문시계는 금나라가 북송의 수도인 개봉을 침범한 소위 정강지란(靖康之亂, 1127) 때 훼손된 이래로 다시 복구되지 못하였다. 수운의상대의 전통은 원나라의 곽수경(郭守敬)과 순제(順帝)에 이어졌으며, 맥이 끊어졌다가 조선시대 세종이 간의대 관천시설로 재창함으로써 중국 수운의상의 전통은 결국 조선에서 이어졌다. 앞서 언급한 간의대 수운혼천, 보루각루와 흙경각루는 바로 역대 중국의 수운의상, 특히 원우혼천의상에서 영감을 얻어 제작된 것이다. 중국에서는 명대말까지 수운의상이 제작되지 못한 반면, 조선에서는 효종시대에 흙경각 제도가 혁파된 뒤에 이민철(李敏哲)과 송이영(宋以穎)에 의해 혼천의와 자명종으로, 그리고 홍대용(洪大容)⁵³⁾, 남병철(南秉哲)⁵⁴⁾ 등에 의해 계승되어 동아시아 천문시계의 계승자로서 소임을 하였다.⁵⁵⁾

2) 금중기는 서양 기계시계의 탈진기의 원조인가?

중국에서의 수운의상대 연구는 1950년대 초에 북경 청화대학의 유선주(劉仙洲) 교수가 중국의 원동기 역사 연구에 착수하면서 고대 원동기기술과 동력전달장치의 발명에 대한 연구결과를 1953년과 54년에 발표하면서 비롯되었다.⁵⁶⁾ 서구에서는 영국의 케임브리지대학의 니덤 박사가 1954년에 착수하여 1956년 1월 11일 영국고시계학회에 처음으로 연구결과를 발표한다⁵⁷⁾ 이어 3월 31일자 『네이처(Nature)』지에 연구노트를 발표함으로써

52) 『宋史』「天文志」는 “上置渾儀 中設渾象 旁設昏曉更籌 激水以運之 三器一機 吻合踴度 最爲奇巧”라고 간결하게 이 천문시계를 묘사하였다.

53) 홍대용, 『담헌서(湛軒書)』 卷8, 外集 「농수각기(籠水閣記)」

54) 남병철, 『의기집설(儀器輯說)』 上卷, 「혼천의설」 下卷 「험시의설(驗時儀說)」

55) 각주 12와 南文鉉·韓永浩·李秀雄·梁必承, 앞의 논문; 남문현, 『한국의 물시계: 자격루와 제어계측공학의 역사』 등 참조.

56) 劉仙洲, “中國在原動力方面的發明”, 『機械工程學報』 第1卷 第1期, 1953년 10월; “中國在傳動機件方面的發明”, 『機械工程學報』 第1卷 第1期, 제2권 제1기, 1954년 7월.

성과가 알려졌다. 이 두 사람은 수운의상대에 활용된 수륜연동 금종기구가 실질적으로 묘상탈진기(錨狀脫進機, anchor escapement)와 같다는 데 의견 일치를 보았다. 이러한 정보는 중국에도 전해졌으며, 왕진탁 등 중국의 과학기술사가들을 크게 고무시켰다. 종래 4대 발명에 더하여 5대 발명국이 된 것이다! 최초의 수운의상대 복원모형은 중국역사박물관(현 중국국가박물관)의 왕진탁 연구원이 이끄는 팀에 의해 1958년 6월 1일에 완성되었으며, 논문으로 정리되었다.⁵⁸⁾ 이 논문에는 니덤이 제안한 현대 기계시계에 채용된 탈진기의 원조가 수운의상대의 추륜의 속도제어에 사용된 금종기라는 이론을 수용하였고, 35매의 도면 가운데 25매는 정밀한 복원모형 기계공정도로 작성되었다. 이 도면들은 매우 귀중한 성과로 판명되어 뒷날 복원연구의 중요자료로 널리 활용되었다. 이 자료들의 공개발표로 새로운 복원공정과 대량작업이 가능하게 되었으며, 현재 수운의상대 복원의 시발 논문으로서 매우 귀중한 가치를 지닌다. 한국에서는 전상운(全相運)박사가 1970년대에 『신의상법요』를 참고하여 “선기옥형(혼천의)천문시계”라는 수운의상대 모형을 제작하여 성신여자대학교 박물관에서 전시한 바 있다.⁵⁹⁾

① 『천문 시계』의 금종기 복원 모델

니덤의 관심은 수운의상대 전체에 대한 복원보다는 시계장치(clockwork)와 추륜의 회전속도가 천형(天衡)기구에 의해 일정하게 제어된다는 탈진기 역사의 정립에 있었다. 따라서 장형의 수운혼천의로부터 소송에 이르기까지 중국의 역대 천문시계의 발달과정을 섭렵하고, 아울러 이슬람과 유럽의

57) The Antiquarian Horological Society를 말한다. 이 학회는 회지 *Antiquarian Horology*를 발간하는데, 1990년에 니덤과 공동으로 자격루를 연구한 존 컴브리지의 소개로 필자의 ‘자격루 복원도’가 간단한 설명과 함께 19권 2호, 1990년 겨울호 표지에 실림과 동시에 필자의 연구(M. H. Nam, “Chagongnu: The Automatic Striking Water-Clock,” *Korea Journal* 30:7 (1990), pp. 23-44)에 대한 소개가 동지 서평란(p. 208)에 실렸다.

58) 王振鐸, “宋代水運儀象臺的復原”, 『文物參考資料』 第9期 (1958), 1-9頁. 이 논문은 대약진운동으로 공개되지 못하다가 『科技考古論叢』 (北京: 文物出版社, 1989), 238-274頁에 재록되면서 공개되었다. 王振鐸은 1936년 北平研究院 시절부터 중국의 과학문화유산을 복원하는 일에 종사하여, 地動儀 (“漢張衡候風地動儀製法的推測”, 燕京學報, 제20期, 1936.), 指南車, 記里鼓車를 비롯하여, 『新儀象法要』에 기재된 혼상, 혼의, 수운의상대 등 현재 중국국가박물관에 진열된 80여종의 과학문화재를 복원한 博物館科學工作家이다.

59) 전상운·나일성·박성래·남문현, 『과학기술문화재 복원 기초조사 및 설계용역 보고서』 (문화재관리국, 1992), 74쪽.

기계시계에 미친 영향을 연구하여 1960년에 고시계학회 연구총서 1호로 『천문 시계』를 출판하였다. 이 책의 표지에는 『신의상법요』에 도식된 도면을 조합하여 작성한 수운의상대의 복원도가 실감나게 그려져 있다. 수운의상대의 새로운 탄생을 고시한테 이어, 도면 목차, 중국역사 연대기, 노트와 일러두기 등 번역주해에 따르는 유의사항, 서문이 이어진다. 서문에서는 앞서 소개한 연구동기와 중국학자들과의 교류내용이 서술돼 있다. 제1장은 엽몽득(葉夢得)의 『석림언어(石林燕語)』등에서 인용한 소송(蘇頌, 1020-1101)의 전기이며, 1086년 이부상서(吏部尙書)에 임명되어 옛 혼의를 검증한 뒤 새로운 혼의를 제작하라는 명을 받고, 이부의 하급관리인 수학자이자 기술자인 한공렴을 만나 1088년부터 제작에 들어가서 1092년에 『신의상법요』를 찬하고, 1094년에 “혼천의명”을 짓기까지의 과정을 기술하였다. 니덤은 소송을 북송에서 과학마인드를 갖춘 뛰어난 인물의 한 사람이라고 평하고 있다. 반면, 수운의상대의 설계·제작의 주인공인 한공렴에 대하여는 특별히 언급하지 않았다. 제2장은 『사고전서총목제요』에 기재된 『신의상법요』의 내용에 대한 소개와 아울러 여러 가지 판본에 대한 기술이다. 그리고 전희조(錢熙祚) 교정의 『수산각총서(守山閣叢書)』의 내용을 텍스트로 하게 된 경위를 적었다. 제3장은 『신의상법요』 첫 머리의 “진의상장”에 대한 역주다. 제4장은 『신의상법요』 권하(3권) 수운의상대의 번역이다. 제5장은 수운의상대에 대한 현대적 해석으로서 시계장치를 상세하게 복원하고, 소송 시계의 탈진기 사이클의 각 단계를 해석하는 데 중점을 두었다. 특히 『천문시계』에 실린 ‘소송 시계의 탈진기 사이클 단계들(Stages in the escapement cycle of Su Song's clock)’ 그림⁶⁰⁾은 이 책의 하이라이트다. 이것은 탈진장치의 작동을 2차원으로 도식한 것으로서 모형을 제작하여 실험을 한다면 금중기의 교묘한 특성을 알 수 있다고 공언한 복원도이다. 이러한 공언은 이 책의 이어지는 그림인 ‘소송 시계의 탈진기 작동 경로를 보여주는 타임-차트 도표(A diagrammatic time-chart to illustrate the course of events in the escapement action of Su Song's clock)’⁶¹⁾에 의해 뒷받침될 수 있다고 하였다. 이것은 실험결과의 예측으로서 매우 중대한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 여기 까지가 『신의상법요』 권하 수운의상대의 번역·주해·도식·복원 과정

60) Needham, Ling and Solla Price, *Heavenly Clockwork*, p51, Fig. 26.

61) Needham, Ling and Solla Price, *Heavenly Clockwork*, p59, Fig. 32.

에 대한 기술로 본문 205쪽 가운데 59쪽까지의 내용이다. 제6장부터 9장까지는 전부가 과학사 탐구에 대한 내용으로서 제6장과 7장은 각각 소송 전후의 시계장치 발달, 제8장은 발명의 맥락, 제9장은 천문시계의 역사와 전파에 대한 내용이다. 제7장에는 칼 루퍼스(Carl Rufus)의 『조선 천문학(Korean Astronomy)』에서 전제한 조선시대의 천문시계인 송이영의 자명종 사진⁶²⁾과 함께 내용을 소개하였다.⁶³⁾ 이어서 이 시계의 특징을 여덟 가지로 설명한 다음, “세계의 제대로 된 과학기술사박물관이면 소송의 시계와 마찬가지로 이 시계에 대한 설명과 함께 복제품(replica)을 소장해야 할 것이다”고 부연하였다. 마지막으로 중국의 시계를 부록으로 실었다. 한마디로 이 책은 풍부한 연구경험과 상상력으로 중국의 천문시계유산을 새롭게 복원하는 동시에 동아시아 과학사 연구의 새로운 지평을 연 걸작의 하나로 평가받기에 부족함이 없다고 할 수 있다.

② 컴브리지(Combridge)의 금종기 작동 모델

니덤의 저서가 출간된 1년 뒤에 니덤의 탈진기 복원모델에 대한 작동모델이 존 컴브리지(John Combridge)에 의해 제작되었다. 1961년 7월 존 컴브리지는 물 대신에 고운 모래를 이용하여 추륜을 작동시킬 수 있는 금종기 모델을 제작하여 발표하였다.⁶⁴⁾ 이어 1962년에도 개선된 모델을 발표하였다. 이와 함께 1/48 규모의 수운의상대 골격모델과 1963년에 1/6규모의 수력식 추륜 모형을 개발하였다. 추륜에 설치된 수수호(scoop)는 니덤의 고정식과는 달리 가동식(可動式)이었다. 1967년에는 영국 머지사이드(Merseyside) 군립 박물관에, 그리고 1969년과 1984년에는 미국 일리노이주 락포드시의 타임 박물관(Time Museum)과 일본 츠크바국제박람회에 1/2 규모의 작동모

62) Needham, Ling and Solla Price, *Heavenly Clockwork*, Fig. 59.

63) W. C. Rufus, *Korean Astronomy*, Vol. 26 (Seoul: The Bravch, 1936).

64) 이 실험 장치는 J. H. Combridge, “The Celstial Balance: A Practical Reconstruction,” *Horological Journal* 104:2 (1962), pp. 82-86; Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. IV, Part 2. Fig. 659. Experimental working model (driven by fine sand) of the Chinese water-wheel link work escapement, as demonstrated in July 1961 by J. Combridge (Anon. 61)에 잘 나타나있다. 영국통신(BT)의 기사 출신인 컴브리지는 은퇴 후에 중국어를 배워 수운의상대 연구에 가담하게 되었다고 필자에게 밝혔으며, 니덤의 자격루 복원연구에도 참여하였다.

형을 설치했거나 자문하였다.⁶⁵⁾ 이러한 작동 모델 개발에 관한 이야기는 니덤이 1986년에 출간한 『천문 시계』 2개정판에 컴브리지가 보충한 내용에 잘 나타나 있다.⁶⁶⁾ 필자는 하버드대의 과학사학과와 앤드류 윌리엄스(Andrew Williams) 학예실장의 소개로 1994년 타임 박물관에 설치된 금종기 모형을 직접 작동해 보았다.⁶⁷⁾ 이 모형은 12시 100각법에 의해 시간을 유지하기 위하여 36개의 버킷(bucket 또는 수두(水斗), 수수호(受水壺))을 설치한 물레방아 형 수격식 추륜의 시간단위 간격은 24초로 1주야(하루)에 정밀하게 100회전을 했다.⁶⁸⁾ 이 모형은 중국을 비롯하여 많은 연구자들의 지지를 받아 널리 보급되었다.⁶⁹⁾

③ 소송과기관(蘇頌科技館)의 수운의상대 모형

앞서 언급한 바와 같이 1958년 왕진탁에 의해 수운의상대 설계도가 작성된 이래 1990년대 들어서 북경의 중국역사박물관에 1/5 규모의 모형이 제작되어 전시되었다(이것은 작동모형은 아님). 중국 복건성 하문(廈門)의 진연항(陳延杭), 진효(陳曉) 부자는 전동기로 추륜을 구동시켜주는 1/5 규모의 모형을 개발하여 보급하였다.⁷⁰⁾ 혼천의 과제를 수행하던 중인 1994년 2월 초에 필자는 중국 남경 자금산천문대의 서진도(徐振韜), 상해의 반내(潘甯), 자연과학사연구소의 오희경(吳熙敬) 교수의 안내로 복건성 동안현

65) 이런 규모의 작동모형은 런던의 바넷 앤 월즈(Barnett and Walls)사에서 제작되어 유럽을 비롯하여 전 세계에 널리 보급되었다. 애석하게도 타임 박물관(Time Museum)은 1990년대 말에 폐쇄되었다. 이 박물관에는 우리가 흔히 “사팔시계”라고 불렀던 조선시대 자명종이 소장되어 있었다.

66) Needham, Ling and Solla Price, *Heavenly Clockwork*, pp. 206-15.

67) A. J. Turner, “Reconstruction of Su Song’s Astronomical and Time-telling Tower,” *Time Museum Catalogue of Collection: Time Measuring Instruments, Part 3, Water-clocks, Sand-glasses, Fire-clocks* (Time Museum, 1984), pp. 59-65. 이 박물관에는 서양인의 솜씨로 제작된 수운의상대가 박물관 구내에 자리 잡고 있어 관람객들을 즐겁게 하고 있었다.

68) 니덤과 왕진탁이 버킷을 추륜에 고정시킨 반면, 컴브리지는 물이 차면 떨어지는 가동식 버킷(tipping bucket, 翻斗)을 추륜에 설치하였다. 시간단위 간격은 버킷 한 개를 채우는데 걸리는 시간을 말한다. 이것은 唐代 李蘭의 秤漏를 응용한 것이다. 1회전에 걸리는 시간은 $36개 \times 24/60 = 14.4분$ 이며, 1각이다. 100회전하면 $1,440분/60분=24시간$ 이 된다.

69) 대표적으로 『中國大百科全書: 機械工程』의 “中國古代計時器”條(918쪽)에 도면과 함께 실리기에 이르렀다.

70) 陳延杭, 陳曉, “古代天文鐘: 蘇頌水運儀象臺復原模型研制”, 『計時儀器史論叢』 第一輯 (1994), 52-67頁.

(同安縣)의 소송 구거인 노산당(蘆山堂)을 방문하고, 소송과기관과 천주(泉州)의 중국해외교통사박물관에 전시된 진씨의 모형을 관람한 적이 있다. 진씨는 1988년 11월 수운의상대 창시 900주년을 기념하여 동안현의 소송과기관에 전시용 모형을 납품한 뒤, 1990년에 북경고관상대에도 납품하였다.⁷¹⁾ 소송 연구자인 길림대(吉林大)의 관성학(管成學)교수는 그의 저서에서 이 사실을 확인한 바 있다.⁷²⁾ 진연항 선생은 중국고대 선박에 대한 자신의 저서를 필자에게 건네주며 “청화대학 유선주 교수의 제자로서 앞으로 아국(중국)의 고대과학장치모형을 복원 제작하여 적절한 설명과 함께 중화문명의 극치를 보여주는 일을 계속할 것”이라고 포부를 밝혔다. 그런데 물 대신 저속 전동기를 사용한 것에 대하여, “관람객에게 천체운동을 연시해주는 혼의, 혼상과 하루 동안의 시각을 알려주는 여러 가지 보시기구의 동작을 짧은 시간 내에 보여주기 위해서”라는 좀 의외의 답변을 하였다. 물의 흐름을 빠르게 하여 추륜의 회전속도를 높여도 소기의 목적을 달성할 수 있는데도! 왕·진 의 1/5 모형은 동작이 되지 않거나 물이 아닌 전동기의 힘으로 구동한다는 점 때문에, 더 나아가서는 진씨의 경우 학계에서 제기된 문제들에 대한 답변을 내놓지 못하고 있어 아직도 개선의 여지가 많은 것으로 비쳐질 수밖에 없었다. 필자의 견해로는 사용자측의 요구나 복잡한 동력전달장치, 연시와 보시장치의 실험을 효과적으로 수행하기 위해 일시적으로 전동력을 활용할 수는 있어도, 동력원으로 전동기를 채용한 것은 좀처럼 납득할 수 없었다.

④ 대만과 일본의 수운의상대 복원

1990년 영국 캠브리지 로빈슨 칼리지에서 열렸던 제6차 국제중국과학사 회의에서 대만 대표는 대중(臺中)에 새로 설립된 과학기술박물관을 기념한 수운의상대의 복원계획을 발표하였다. 1999년 8월에 ‘조선의 천문시계’ 과

71) 이 전시에 대해 당시 영문판 『中國日報』는 1991년 8월 13일자 기사에서 “과학자들이 북송시기의 수운의상대를 복원함과 아울러 북경고관상대에 설치하였다”고 상세히 보도하였다.

72) 『宋遼夏金元科學技術史』에서 “왕진탁선생의 복제품은 북경역사박물관, 이약슬(李約瑟)은 조셉 니덤의 중국 이름) 선생의 복제품은 영국 사우스켄싱턴의 과학 박물관(Science Museum), 진연항, 진효부자가 복원한 수운의상대는 소송의 고향에 있는 동안현 소송과기관에 진열되었다”고 적고 있다.

제(연구책임자 건국대 한영호 교수) 조사차 신죽(新竹) 청화대학 역사연구소(대학원)의 황일농(黃一農) 교수의 안내로 이 박물관의 수운의상대를 관람하였다. 규모는 1/1이었고, 물로 작동되었는데 정확한 자료조차 마련된 것이 없어 외관만 관찰하고 돌아왔고, 아직도 이것에 대한 문헌자료는 확보하지 못해 이것에 대한 정보제공은 유보해야 하겠다. 2000년 필자는 한영호, 서문호, 이재효, 김지인 교수(이상 건국대), 김명호(서울대), 이성규(인하대) 교수 등의 동료들과 함께 한국학술진흥재단 과제를 수행했던 2000년 1월에, 그리고 자격루 복원 과제를 수행했던 2005년 2월에 일본국립천문대의 후루카와 기이치(古川麒一郎)교수의 안내로 일본 세이코 시계사(日本精工 会社)가 이 회사 창업자의 고향인 나가노현(長野縣) 수와코시에 건립한 시(時)의 과학관 의상당(儀象堂)을 방문하여 복원설계 책임자였던 전 세이코 시계사업본부 토옥영부(土屋榮夫)씨의 안내로 복원된 수운의상대를 관람하였다.⁷³⁾ 일본 경도대학이 주체가 되어 관서일원의 대학연구자들이 참여하여 4년간에 걸친 연구 결과 『신의상법요』 번역문, 작동원리해석과 1/1의 규모로 설계한 도면 400장이 완료되었다고 한다. 이것은 토옥씨가 1993년에 발표한 글로 알려지게 되었고,⁷⁴⁾ 복원제작에 관한 책자는 1997년 3월에 발간되었다.⁷⁵⁾ 『신의상법요』의 역주는 수산각총서본을 저본으로 문연각사고전서본 및 문란각본(文瀾閣本)에 의해 교정하였다고 한다. 토옥씨는 시계설계전문가로서 복원의 목표를 “실물과 같은 크기로서 완전하게 복원하여, 매일 작동시킬 수 있도록 견고하게 제작하는 것”에 두었다고 한다.⁷⁶⁾ 옛날에 작동했던 것처럼 이것을 오늘날에 간단히 하기는 어렵다. 옛

73) 이 진열품은 대만의 복원계획과 연관하여 1990년대 초에 계획하였는데, 중도에 계획이 변경되어 7-8년에 완성되었다고 한다.

74) 土屋榮夫, “復原中國古代科技之集大成: 水運儀象臺”, 『國際時計通信』 134卷, 399期 (1996), 35頁.

75) 山田慶兒, 土屋榮夫, 『復元 水運儀象臺: 十一世紀中國의 天文觀測時計塔』 (東京: 新曜社, 1997). 이 책은 山田慶兒의 “水運儀象臺: 十一世紀中國의 天文觀測時計塔”, 山田慶兒와 內田文夫 譯, 山田慶兒 校訂·譯註 北宋 蘇頌 撰『新儀象法要』- 新しい渾儀·渾象の方式の概要, 土屋榮夫의 “水運儀象臺の復元”을 내용으로 하고 있다.

76) 2010년 9월에 동경 미타카(三鷹市) 소재 일본국립천문대에서 개최된 제7차 동양천문학사회의(ICOA-7)에 참석했던 길에 필자는 국립고궁박물관에 진열된 자격루 사진을 약속대로 의상당에 기증하였다. 노구에도 먼 길을 마다않고 두 번씩이나 안내해주신 후루카와 박사님께 이 지면을 통해 감사의 말씀을 드린다.

날에는 이것을 운영하는 데 수십 명이 전적으로 매달렸고 인력으로 운전하였다고 하지만 실제 제작하여 복원하는 데서는 인력에 의해 유지하는 대신 주요 부분을 물이나 경년 변화에 견디는 특수처리 된 목재를 사용하도록 하였고, 시각이 틀리는 것을 자동으로 보정해주는 장치를 부착하고, 원초의 본질을 훼손하지 않는 범위에서 최소한의 현대기술을 활용하고, 신뢰성을 높여 운전하도록 하였다고 한다. 실제 복원에서는 제공된 자료(번역물)의 내용을 충실하게 재현하고, 부품을 조립할 때 가급적 당시의 상태를 재현하도록 하고, 재료는 당시와 같은 것을 쓰도록 하였다. 현대의 동작 상태를 전시하는 데 필요한 사항은 오리지널품의 본질을 훼손하지 않는 범위에서 성력화(省力化, 자동화에 해당하는 일본어)와 메인터넌스 프리(無補修性)를 지향하였다. 원문(오리지널)에 추가하여 경년변화에 대한 신뢰성을 높였는데, 특히 물과 접촉하는 부분의 목재, 철재 부품에 대하여 특수처리를 행하였고, 현대식 치차 설계법의 차용, 순환수의 수질유지 장치를 부착하였다. 운전시의 자동화 대책으로 천지(저수조)의 수위검출기 부착(수동으로 실연할 수 있도록), 시간오차 보정장치, 혼의와 혼상 오차 보정장치 등을 부착하였다. 이와 같은 사항을 추가하여 엄밀하게 복원한 결과 지금까지 (타)연구나 복원에서 드러나지 않은 것들도 해명할 수 있었다고 한다. 토옥씨는 수운의상대의 연속적인 시간분할을 가능하게 해주는 금종기(일종의 디지털공학에서 말하는 아날로그/디지털변환기, A/D converter - 펄자 주)의 설계에 있어 추륜에 설치한 물받이 통(수두(水斗), 일본어로 수수상(受水箱))을 니덤과 왕진탁이 제안한 고정식이 아닌 컴브리지가 제안한 가동식 수수호(tipping bucket)로 설계·제작하였다고 한다. 더구나 원동기인 추륜을 기본적으로 수력으로 회전시키도록 설계하는 한편(이것은 실연하는 경우에 한해 활용), 평소 전시에는 추륜의 회전축을 전동기로 구동시키는 방식을 택하였다고 한다. 복원을 기록한 책자는 여타 복원에서는 얻기 어려운 정보(번역문, 설계도, 실험 데이터 등)를 체계적으로 정리하여 이 방면의 연구자들에게 도움을 줄 수 있으리라 생각하며, 복원기록 영상도 참고할 만하였다.

⑤ 중국에서의 수운의상대 복원 바람

중국 안휘성 합비에 자리 잡은 중국과기대학의 이지초 교수는 1980년에

중국과기대에 자연과학사연구실을 개설하고 중국 고대 혼천의와 소송의 수운의상대를 위시한 천문시계, 고대로부터 명청대에 이르는 누각 등 소위 중국의 시간과 공간 연구를 선도하였다. 이 연구실은 대표적인 중국과학사 연구의 산실로 일찍부터 자리 잡았으며, 중국고대 시간계량기술사의 중요 문제를 일거에 해결하고 중국고대 정밀계량방면의 몇 가지 항목은 세계를 선도하였다고 한다. 이 연구실의 최초의 업적은 실험을 통한 중국 과학사 연구로, 화동욱(華同旭) 교수의 1989년 박사학위 논문을 1991년에 출판한 『중국누각(中國漏刻)』을 들 수 있다.⁷⁷⁾ 이 책은 중국과기대 자연과학사연구실에서 수행된 중국의 역대 누각을 실험용으로 복원하여 정밀도를 중심으로 성능을 파악하고, 아울러 이론적으로 해석하는 데 중점을 둔 것으로 중국의 시간연구사의 “한 획을 그은 연구”로 평가되고 있다. 필자가 1993년 북경의 자연과학사연구소에서 강연한 뒤에 화동욱 박사 지도교수의 한 분이었던 박수인(薄樹人)교수로부터 받은 책이 이 책이었으며, 필자도 이에 자극되어 『한국의 물시계』를 저술하게 되었다.

이지초 교수도 2년에 걸친 그의 수운의상대 복원연구를 정리하여 1997년에 『수운의상지(水運儀象志)』를 내놓았다. 이 책은 1995년 4월 중국계시의기사학회의 결정으로 『중국고대기계시계사』 총서 집필을 이교수에게 의뢰하기로 한데서 비롯되었다고 한다. 1996년 중국 심천(深圳)에서 개최된 제7차 국제중국과학사회의에서 발표한 논문 두 편에서 이전 연구의 착오를 바로잡고,⁷⁸⁾ 추륜기기의 설계에 대한 문제점 등을 분석하고 새로운 해결책을 제시하였다. 1996년에는 “수운의상대 석의(釋義)”를 발표하여 니덤 모델의 작동분석(time-chart)의 착오를 지적하였다.⁷⁹⁾ 이 세 편의 논문마다 수운의상대의 연보고증, 추륜 회전수, 태양일과 항성일 차이에 대한 의상대 치수(齒數)설계의 영향, 『신의상법요』의 정본과 별본의 관계 및 연제과정 중의 설계개변 등 세부적인 사항을 추가하여 출판하게 되었다. 그 동안에 중국계시의기사학회는 일본 나가노현 의상당의 수운의상대 복원 기사를 읽고 학회의 장하령(張遐齡) 명예회장을 일본에 파견하여 견학하도록 하였다고 한다.⁸⁰⁾ 한편 주일중국대사관 문화참찬관이 국가 고위층에 보고하였

77) 華同旭, 『中國漏刻』(中國 合肥: 安徽科學技術出版社, 1991).

78) 李志超, “唐宋元水輪天文鐘和星象演示器”와 “水運儀象臺的物理分析和解疑”

79) 李志超, “水運儀象臺釋義”, 『尋根』 3期, (1996)

다고李교수는 1997년 10월에 그의 저서를 필자에게 건네주며 말하였다. 의상당 수운의상대 복원은 니덤의 『네이처』지 연구노트만큼 중국을 놀라게 하였음이 분명하다. 이교수는 일본의 복원에 대해 그의 저서에서 간단히 논평하였는데, 외국인으로서 중국의 역사에 관심을 갖고 복원한 데 대해 크게 감사한다고 하였다. 이로써 수운의상대에 대한 학술발전의 또 하나의 실적이 쌓이게 되었고, 조만간에 중국도 과거의 실패를 거울삼아 최후의 성과를 내기를 바란다고 하였다. 결국, 지금까지 여러 가지 모델이 발표되었지만 수운의상대의 가치는 온전한 복원이 이뤄진 뒤에나 평가할 수 있을 것이라고 내다보았다.

⑥ 원점에서 - 복원연구의 새 물결

1990년 8월에 영국 케임브리지 니덤 연구소(NRI)에서 열린 제6차 국제중국과학사회의에서 영국의 도널드 힐 박사가 이슬람 물시계를, 미국의 시빈(Nathan Sivin) 교수와 네덜란드의 슬리스윅이 수운의상대를, 그리고 필자가 보루각자격루의 복원을 발표하는 고대물시계 심포지엄이 열렸었다. 이 자리에서 슬리스윅은 컴브리지의 가동식 수수호 방식을 택한 금종기 복원 모델이 원문에 근거하지 않았음을 주장하였다. 이유인즉 원문(사료)과 부합하지 않는다는 것이다. 이 자리에 참석했던 컴브리지의 반론도 만만치 않아 문제는 마무리 되지 못한 채 끝났다. 그러나 제안된 슬리스윅의 이론도 크게 호응을 받지 못하였는데, 한공림의 원래 의도를 반영하지 못했다는 평가를 받았다. 천형-관쇄(關鎖)계통은 금종기의 추형(樞衡)을 작동하기 위해 보조계통으로 만든 것이지 현대 시계의 탈진기와는 개념상 직접 동등하다고는 볼 수 없다는 것이다. 엄격히 말하면 금종계통은 추형에 천형-관쇄를 추가해서 일체로 만든 것으로서 분리해서 생각할 수 없다. 가동식 수수호도 마찰을 고려하지 않은 것으로서 정밀도가 매우 낮아 설계수준이 한공림에 훨씬 못미쳐, 고인의 의도를 왜곡했다고 이지초 교수는 항변하였다. 결국, 수운의상대의 속도제어에 활용된 금종기는 니덤이 찾으려했던 서양기계시계의 탈진기의 원조라기보다는 중국식 천문시계에 사용된 금종기(수륜연동금종기구)의 원조라는 관점을 갖고 차분하게 원점에서 출발해야할

것이라는 인상을 받았다.

최근 10여 년 동안 중국은 국가자연과학기금을 투입하여 청화대를 위시하여 북경항공항천대,⁸¹⁾ 상해 동제대(同濟大)와 서북농과대학(西北農科大學) 등의 학자들에게 그룹으로 수운의상대 복원제작을 지원하고 있다. 동제대는 1982년 4월에 중국고대기계제작실을 설립하고 복원연구에 종사하여 지금까지 고대기계모형 90여종을 제작하여 이 가운데 11종은 중국군사박물관 및 중국과기관에 진열한 실적을 자랑하는 그 방면의 대가이다. 대만에서는 국립성공대학(國立成功大學)이 중화고기계연구중심(센터장 안홍삼(顏鴻森) 교수)을 설립하고 수운의상대를 비롯하여 고대수력기계와 쇠대(鎖具)연구를 진행하고 있다. 이 연구실은 최근에 수력기계의 복원설계에 관한 안교수의 저서 『잃어버린 고대 중국의 기계장치의 복원 설계 (Reconstruction Design of Lost Ancient Chinese Machinery)』를 상재하였다.⁸²⁾ 중국은 자연과학사연구소가 중심이 되어 2012년에 북경에서 개최되는 국제천문연맹(IAU)총회에 수운의상대의 전시를 계획하고 있다. 국립고궁박물관의 자격루를 관람한 장백춘 소장(張柏春)과 손소순(孫小淳) 부소장은 필자의 자격루 복원 경험을 수운의상대 복원에도 나눠 주었으면 좋겠다며 자문(諮詢)을 구하였다. 필자는 “장소장은 蘇頌과 같은 분이시니 우선, 韓公廉 같은 노련한 기술자를 초빙하십시오. 연구소 안에 공작실을 만들고 대학원생들과 더불어 작동 모형을 개발한 다음, 이것을 바탕으로 전문가와 기업체들로 하여금 제작하도록 안배(按配)하십시오”라고 권고한 적이 있다.

지금까지 수운의상대 추륜의 속도 제어장치인 금종기 복원연구와 제작을 비롯하여 수운의상대 복원연구와 제작에 대하여 몇 가지 사례를 소개하였다. 최근 청화대학의 고선(高宣) 박사는 수운의상대 복원을 주제로 북경항공항천대학에서 박사학위를 취득하였다. 고박사의 연구는 1950년대 이래 착수된 수운의상대 복원연구의 틀을 혁신하는 데 두고, 반세기의 걸친 연구에도 수운의상대의 제어부품, 동력전달, 운전모델이 제대로 정립되지 못함을 절감하고 학위논문의 주제로 택하였다고 한다. 앞에서 고찰한 바와

81) 清華大 科技史暨古文獻研究所의 高宣 박사와 航天大의 陸震 교수팀은 제어공학적 접근방법으로 수운의상대를 복원하고 있다.

82) H-S. Yan, *Reconstruction Design of Lost Ancient Chinese Machinery* (Heidelberg: Springer, 2007). 안교수는 최근 북경의 자연과학사연구소의 장백춘(張柏春) 소장(張柏春)과 공동으로 수운의상대 복원연구를 진행하고 있다.

같이 왕진탁과 니덤은 수수호를 추륜에 고정하는 방식을 제안한 반면, 컴 브리지 등은 수수호에 축을 매다는 가동식을 주장하는 등 아직도 의견의 일치를 보지 못한 것이 한 두 가지가 아니다. 고박사는 청화대학 부설 과학사 및 고문헌연구소(科技史暨古文獻研究所, 도서관 부설 연구교육기관)의 풍부한 자료를 활용하여 복원연구의 기초가 되는 『신의상법요』의 판본과 전승에 대한 조사부터 착수하여 수운의상대 제작과 관련된 시기와 별본, 이본을 가려내었다. 1089년 대목양(大木樣, 대형 목재 모형)이 완성된 뒤에 소송이 지은 정본 『신의상법요』 외에 1096년 집영전에 기계를 안치한 뒤에 소송이 아닌 제3자가 지은 또 하나의 별본이 있다는 것이다. 이 문제는 앞으로 시일을 두고 세심한 검토가 필요하다고 한다. 전해온 과정도 아리송한 점이 많은데, 10종의 판본 가운데 1772년 판 사고전서본이 가장 믿을 만하다고 한다. “그렇다면 어떤 판본이 소송의 것에 가장 근접할 것인가? 이 문제를 거론한 연구자들은 이전에는 없었다고 한다. 이 문제의 해결은 향후 복원의 중요한 열쇠가 될 것”이라고 고박사는 힘주어 말했다. 아울러 송대 이전부터 출현된 수력기계에 대한 종합적 연구로 수력기계의 발전연대와 특징을 찾는 과제도 수행하였다.⁸³⁾ 예를 들면, 『신의상법요』에는 추륜에 설치한 수수호의 수자를 36개로 고정하였으나, 별본에는 (회전토크를 증가시키기 위해) 48개로 증가시키는 것이 작은 글자로 써여 있다. 그 외에도 혼의, 혼상과 보시장치를 구동시키기 위해 동력을 전달하는 천주(天柱)를 천제(天梯)로 교체하는 것이 있어 연구자들을 혼란에 빠뜨렸다. 고박사는 필자에게 “920년 전에 제작된 것을 오늘날 쉽사리 복원한다는 것이 한 날 기대에 머물지라도 부품 개개를 형태, 크기, 작동원리, 기능에 따라 분석하고 모델을 구성하여 시뮬레이션한 뒤 실험을 통하여 모든 가능성을 검증할 것”이라고 장래 포부를 밝혔다. 필자는 자동제어 시스템 해석법을 적용해 볼 것을 권고하였다. 수운의상대 복원에 대한 새로운 학풍이 중국 대륙을 휩쓸고 있다는 것을 곳곳에서 느낄 수 있었다. 이러한 바람이 필자의 자격루 오디세이의 종점이 가까워 옴을 알려주는 신호는 아닐까.

83) Gao Xuan, “Research on the Perfect Water-powered Astronomical Instrument of Ancient China: The Astronomical Clock Tower,” *Proc. HMM 2000, Int. Symp. History of Machines and Mechanisms*, Cassino, Italy, May 10-13, 2000, pp. 135-139,

5. 모델은 진화 한다

“과거에 있었던 것이지만 현재는 없는 것을 원래의 상태로 회복하는 것”을 복원이라고 한다. 대부분의 문화유산이 그렇듯이 장구한 세월을 지나오는 동안 전쟁과 사회변동에 따른 유실, 변형(경년변화 포함), 훼손 등에 의해 사료나 원형이 온전하게 보존된 것은 극히 드물 수밖에 없다. 남아있는 것들도 단편적이거나 간단한 사료의 형태로 존재하므로 복원이 매우 어려우며, 개인 보다는 조직에 의한 복원연구가 그나마 기대하는 성과를 가져왔음도 위의 사례에서 알 수 있었다. 또한 앞에서 고찰한 바와 같이 복원을 통해 합리적인 결과를 얻으려면 다양하게 문제에 접근하고 아울러 다양한 분야의 전문지식이 활용되어야 가능하다는 것도 알 수 있었다. 복원 연구의 방법으로 활용된 것 가운데 가장 중요한 도구가 모델링과 실험이라는 것은 필자 뿐 아니라 복원에 종사해본 연구자들의 경험이 말 해주고 있다. 복원연구를 통해 구성된(또는 제안된) 모델은 어디까지나 가설이므로 이것의 적합성은 대규모 또는 실물규모의 작동 모델을 제작하여 실험을 거쳐 입증될 수 있음을 니덤은 그의 수운의상대와 자격루 연구를 통해 말하였다. 실험을 통해 모델이 작동하였다고 해서 그 모델의 적합성을 보증하지는 못한다. 어떤 모델도 시뮬레이션이나 실험을 통해 작동될 수 있기 때문이다. 어쩌면 연구자는 “모델은 진화 한다”는 명제를 항상 꼬리표처럼 달고 살아야 할지 모른다. 그렇다고 해서 완전한 모델이 출현되기를 기대하여 머뭇거리는 것도, 완전하다고 생각되는 것만을 인정하려는 이상주의도 학문 발달을 위해 바람직한 자세는 아닌 것 같다. 완전한 모델은 영원히 구성될 수 없을지도 모른다. 일회성이라는 문화유산의 특징을 거론하지 않더라도 현대를 사는 사람들이 지난날의 삶의 양식을 복원한다는 것은 불가능한 일이다. 한때 “역사적”인 복원이라고 여겨졌던 복원 모델들이 소리 없이 학계와 진열대에서 사라진 경우를 우리는 많이 보아왔다. 복원에도 어김없이 시장원리가 작용된다고 보아야 할 것은 아닐까.

풍부하지 못한 사료에 의거한 복원은 다양한 추론과 가설이 생산될 소지가 많아 다양한 연구결과가 생산된다. 특히 역사적으로 중요성이 검증된 유물은 연구원이 속한 집단의 정황이나 전문성이 다르기 때문이기도 하지만 연구에 필요한 재원의 조달이라던가, 기타 사회상황에 따라 연구나 복

원의 필요성이 다양하기 때문이다. 이렇게 보면 다양한 연구결과와 생산은 당연한 일이라 하겠다. 앞서 보기를 든 안티키테라 기계장치나 수운의상대의 복원이 대표적이라 하겠다. 이 두 가지는 세계의 웅만한 박물관이나 과학관이면 어떤 형태로든 복제품을 전시하고 있으며, 복원의 열기는 더하면 더했지 식을 줄 모른다. 복원의 목표는 일차로 학술적 연구 단계에서 성취되는 것이 보통이지만, 고품질의 제품을 생산하는 것을 필요로 하는 경우가 보통이다. 보존, 발굴 등에 의해 유물을 수습하였지만 온전한 모습을 갖추지 못한 것들인 경우에 결손 부분을 보완하여 온전한 모습을 갖도록 하는 복원은 앞서 거론한 다양성이라는 면을 더욱 증폭시켜 준다. 문제는 다양성을 어떻게 수용하고 인정하느냐다. 보기로, 석굴암의 원형 복원에 대한 논의는 이렇다 할 정설로 확립된 것은 없다고 해도 과언이 아니라고 할 만큼 다양한 이론들이 제기되었다. 이러한 실정을 고려해서인지 경주의 신라역사과학관 석우일(昔宇一) 관장은 그 동안 제안된 대표적인 학설을 바탕으로 "석굴암 무엇이 문제인가. 모형으로 재조명 한다"라는 주제를 붙여 학계의 논쟁점을 축소모형 8기(1/10 7기, 1/5 1기)로 정리하여 전시하고 있다. 이러한 가시적인 모델링은 실험과 관찰이라는 실험고고학의 방법이 복원연구에 많은 도움이 될 수 있음을 보여준 것이다.

6. 과학사 연구와 실험

이상의 논의를 통해 복원연구의 방법론을 도출해보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 무엇보다 사료가 복원연구의 표준이 되는 시료(試料)가 되어야 한다. 복원연구를 위한 자료수집과 분석에서 바탕이 되는 자료들은 대체로 모형, 고적기록, 고고자료, 실물 등이다. 이러한 사료에 부합하는 복원이라야 제대로 된 복원임은 두말할 나위가 없다. 과학기술 발전의 연속성을 고려한다면 유물이 제작된 당시는 물론 같은 시간선상에서 진화된 후대의 자료들도 포함시키는 것이 당연하다. 고대의 기구와 기계들은 어떤 이론이나 원리에 근거하여 제작되기보다는 대개는 시행착오에 의해 발명되고 제작된 경우가 대다수이므로 복원연구에 있어서 필수적으로 기구와 기계의 기능, 역학원리 등을 연구자들의 전문지식과 최신의 이론과 수단을 심분 활

용하여 규명하고 이론적으로 평가하는 것이 필요하다. 아울러 복원연구 과정에서 역사적 정황에 부합되는 당시의 과학기술 수준, 성능표현, 연구결과의 합리성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 대체로 연구자는 주변상황을 고려하여 기술발전의 맥락, 성능표현의 가치와 의의를 파악하는 것이 필요하다.

복원연구나 제작은 당연히 시장의 동향, 요구에 따라야 하며, 시장과 긴밀한 관계를 유지하며 더불어 발전한다고 보는 것은 크게 틀림이 없다. 이것이 반드시 상업성을 띤다고 볼 수만은 없지만, 상업적 접근은 복원연구의 본질과 크게 어긋날 수 있음을 유의해야한다. 그렇다고 맑고 고고한 담론, 공리공담은 스스로를 묶는 병폐를 초래할 우려가 있다. 담론을 떠나 실체에 근접하려는 과학자적 태도가 필수불가결이다. 이러한 관점에서 두 번째의 표준은 실험으로부터 얻은 자료에 근거한, 곧 과학 원리에 부합되는 복원이라야 된다. 일반 과학연구에서와 마찬가지로 과학사 연구에 있어서 실험은 이것을 통해 얻은 결과를 바탕으로 다음과 같은 함의를 갖는다.

- 1) 실제 규명에 도움이 된다. 실험은 사실을 보여줌으로써 실체를 파악하게 도와준다. 바꿔 말하면 과장 또는 과소평가를 떠난 실체의 접근에 이르게 해준다.
- 2) 논란의 종식으로 학술적 논쟁을 활성화 시켜준다. 앞서 말했듯 다양성을 인정한 결과를 실체화함으로써 중국에는 학술적 논쟁의 활성화를 유도한다. 학술적 논쟁이 없는 실험 결과는 발전에 크게 도움이 되지 못한다.
- 3) 과학사 연구의 도구로서 실험의 필요성은 이미 입증된 사례들이 증명하는 바다. 물론 잘 계획되고 합당한 결과를 얻은 실험에 한해서다.
- 4) 당대의 사회상 연구를 촉진시켜준다. 역사연구의 목적이 당대 인간사회를 복원하는 것이라면 과학사 연구에 필요한 내재적, 외재적 요소의 연결고리 찾기는 실험을 통해서 얻어질 수 있다.

실험이 갖고 있는 위와 같은 함의는 앞선 사례들에서 찾을 수 있을 것이다. 니덤이 과학사 연구의 도구로서 복원 아니면 모델링, 실험을 주장한 것은 어디에 근거한 것일까? 그는 잘 알려진 대로 저명한 생화학자이며 런던 왕립학회를 무대로 활동한 중국과학사가다. 그의 연구방법의 배경이 초창기 왕립학회의 강령은 아니었을까? “아이디어를 갖고 계신가요? 그러면 시

연해 보십시오, 그리고 실험을 해서 그것을 증명해 보십시오.” 이 말은 오늘날의 과학사 연구에서도 금과옥조로 받아 들여야 하지 않을까? 이러한 과학적 방법은 서양의 과학사 교육에서도 잘 나타나 있다. 1994년 여름 필자가 하버드대학교 과학사학과의 갤리슨(Galison) 교수를 만났을 때 그는 학과 소속의 ‘역사적인 과학기구 박물관(Historic Scientific Instruments Museum)’의 학예실장이며 학습 시연가(Preceptor)인 앤드류 윌리엄스를 소개해 주었다. 그는 내게 박물관을 안내하면서 어느 경우에도 쉬지 않고 돌아가는 폴리오 탈진기(verge and folio escapement) 모형을 시연해 보여주었다. 그는 과학사 실험시간에 이것을 비롯하여 여러 가지 실험이나 모형을 갖고 수업을 한다고도 했다. 앞서 소개한 이지초 교수는 필자와의 대화 가운데 “과학사를 ‘사학개념’으로만 이해하려는 경향은 구식이다. 실험은 필수적이다.”고 강조하였다. 실험이 과학 유물의 복원을 해결해주는 만능의 도구는 아니지만 필요한 도구의 하나라는 것을 여러 가지 사례가 말해주고 있다.

과학사에서 복원의 중요성은 우리나라에서도 일찍부터 제기되었지만 구체적인 방법론에 대한 담론은 활발하지 못했다. 이것은 과학사와 관련 이웃들, 그리고 복원의 수요자와 공급자들 간의 언어와 소통의 장벽 때문이라 생각된다. 앞으로 이러한 장벽은 한국과학사 연구의 앞날을 위해 반드시 극복해야할 과제이다. 미래 사회는 지식과 정보를 새로운 방식으로 연결해 새로운 가치를 창출하는 융합의 시대다!