

정조 대 한강 배다리[舟橋]의 구조에 관한 연구

김평원†

1. 서론: 한강 배다리[舟橋]의 의의

중국의 배다리 제도는 『시경(詩經)』에 언급될 정도로 매우 오래되었지만 한국의 경우, 고대부터 조선 중기까지 사서에 남긴 배다리 관련 기록을 통해 그 구조를 추론하는 것은 불가능하다. 배다리 제도는 물론 간단한 가설 방법조차 기록으로 남기지 않았기 때문이다. 중국의 배다리가 한국의 사서에 처음 등장한 것은 수양제가 고구려를 침공하기 위해 요하를 건너면서 가설한 ‘부교(浮橋)’였다. 『삼국사기』에 따르면 이 수나라의 부교는 육지에서 미리 제작한 모듈을 끌어다가 연결하는 방식이었다.¹ 배다리와 관련된 고려 때의 첫 기록은 임진강 나루에 설치한 ‘부량(浮梁)’이었다.² 한강 배다리 관한 최초의 기록은 태종 17년(1417) 오늘날 송파에 해당하는 곳에 가설된 ‘주량(舟梁)’이었다.³

이후 연산군 때에는 한강 배다리와 관련된 기록이 늘어났으며, 배들을 촘촘하게 연결한 후 묶는 가설 방법이 간단히 언급되었다. 연산군은 백성들의 배를 강제로 동원하여 배다리를 만들게 한 후 청계산을 자주 왕래하며 사냥을 즐겨 백성들의 생계 수단인 배를 강에 묶어 두어 그들에게 피해를 주었다. 더 큰 문제는 수백 척의 크고 작은 배들로 촘촘하게 배다리를 만들 경우 배다리를 만드

† 인천대학교, pwkim@inu.ac.kr

1 『三國史記』 卷20, 高句麗本紀 第8, 嬰陽王 23年(612) 2月.

2 『高麗史』 世家, 卷6, 靖宗11年(1045) 2月 1日.

3 『太宗實錄』 卷33, 17年(1417) 3月 26日.

는 시간이 지체되어 한강 수로를 막아 한강을 중심으로 전국 각지의 물품이 유통되는 흐름을 오랜 시간 차단하는 것이었다.⁴ 이처럼 연산군의 배다리는 왕의 사냥을 위한 시설물이었고, 필요에 따라 800척이 넘는 백성들의 배를 강제로 모아 건설했다는 점에서 비체제적이었다.

정조 대에 한강에 건설한 주교(舟橋, 이하 배다리)는 이전 시기의 배다리와는 차이가 있었다. 정조 대의 배다리는 배다리를 관리하는 기관인 주교사(舟橋司)를 설치하여 설계 방법을 연구하면서 발전시켰음은 물론 문서 형태의 매뉴얼을 남겨 실무에 활용했다는 점에서 체계적이었다. 되도록 동일한 크기의 대형 조운선을 동원하여 백성들의 배를 동원하는 일을 최소화 하였으며, 촘촘하게 배를 나열하여 묶는 방식이 아니라 배와 배 사이에 간격을 두고 보[beam]를 얹어 결합하는 연속 구조체로 설계했다는 점은 특히 주목할 만하다.

정조 대의 한강 배다리 건설과 관련된 기록은 『조선왕조실록』을 비롯한 다양한 사서에 상세히 남아 있으며, 이를 토대로 주교사와 한강 배다리의 변천 과정을 탐구한 연구가 사학계를 중심으로 시작되었다.⁵ 토목 공학 분야에서도 한강 배다리의 구조를 분석한 연구가 시작되었으나 후속 연구로 이어지지 못했다.⁶ 한편, 사학계에서는 배다리의 건설 과정을 역사 대중화 차원에서 입체 영상으로 재현하는 시도가 있었다.⁷ 이처럼 한강 배다리에 관한 선행 연구들은 관련 자료를 소개하고 배다리의 구조를 재현했다는 점에서 의미가 있으나, 복잡하게 얽혀 있는 배다리 관련 자료를 정리하지 못한 상태에서 배다리의 구조를 추론함으로써 재현한 구조가 사료와 맞지 않거나 분석의 깊이가 공학적인 측면까지 이르지 못했다는 점에서 한계가 있었다.

1795년 정조의 화성 행차를 위한 한강 배다리 건설 프로젝트는 사료에 기록

4 『燕山君日記』 卷60, 11年(1505) 11月 19日.

5 이현중, “주교사 설치와 변천”, 『향토 서울』 36 (1979), 7-46; 신병주, “정조의 한강 건너기 프로젝트—주교지남(舟橋指南)”, 『고전포럼-고전의 향기』 239 (한국고전번역원, 2012. 10. 8), <http://www.itkc.or.kr/bbs/boardView.do?id=75&blIdx=31701&page=1&menuId=126&bc=0> (2017. 4. 10 접속); 김문식, “한강 배다리·화성 축조 아이디어 다듬은 멘토 정조”, 『한겨레신문』, 2012. 7. 4. 26면.

6 배다리를 포함한 전통 교량의 특성에 대해서는 손영식, “韓國 古 橋梁의 構造形式에 관한 研究” (한양대학교 박사학위논문, 1992); 정조 대 주교의 건설 과정에 대해서는 장동일·손영식, “傳統 舟橋의 構造 形式에 관한 研究-朝鮮末 舟橋司節目을 中心으로”, 『대한토목학회논문집』 12:3 (1992), 57-64.

7 KBS 다큐드라마, “의궤, 8일간의 축제” (KBS한국방송, 2013), 2013. 10. 10 방송.

된 것 중에서 한강 다리에 건설된 배다리 중 가장 많은 인원이 동시에 건너야 하는 가장 큰 규모였으며, 1789년 설계부터 1795년 시공까지 6년에 걸친 개설회 과정은 현대의 토목 공사 과정에 견주어도 손색이 없을 정도로 체계적이었다.⁸ 다리의 계획과 설계부터 다리를 시공하여 유지하고 보수하는 모든 과정을 연구하는 분야가 교량 공학이라고 한다면, 18세기 후반 조선에서도 교량을 건설 전문 기관인 주교사를 통해 한강에 배다리를 건설하고 건설, 해체, 유지, 보수하는 교량 관리 시스템이 존재했다고 평가할 수 있다.⁹ <표 1>은 정조대 한강 주교를 설계하는 과정을 현대 교량 건설 과정과 비교한 것이다.

표 1. 1795년 한강 배다리 건설 과정

건설 단계		사료
계획	시공사 선정	① 1789년 12월, 주교사 설치 후 공사 발주
	건설 계획	② 1789년 묘당에서 “주교절목” 제출
설계	설계 감리	③ 1790년 “묘당찬진주교절목논변(廟堂撰進舟橋節目論辨)”
	시방서	④ 1790년 7월, 정조의 공사 지침 『주교지남』 발표
시공	준공 보고서 초안	⑤ 1793년 주교사가 수정 보완된 “주교사개정절목” 발표
	공사	⑥ 1795년 2월 13일 - 2월 24일(12일)
	준공 검사	⑦ 1795년 윤 2월 4일, “주교도섭습의(舟橋渡涉習儀)”
	최종 준공 보고서	⑧ 1795년 『원행을묘정리의궤』, 권4 “주교”

이 연구의 목적은 정조 대 한강 배다리가 어떠한 과정을 거쳐 건설되었는지 사료를 중심으로 개관하고, 1795년 최종 완성된 배다리의 구조적 특성을 현대의 공학적 관점에서 분석하는 것이다. 필자의 논증은 배다리 건설 계획에 해당하는 “주

⁸ 1795년(을묘년)은 정조가 왕위에 오른 지 20년이 되는 해이며, 어머니인 혜경궁 홍씨와 동갑인 아버지 사도세자가 회갑을 맞는 의미 있는 해였다. 정조는 국왕의 권위를 드러내기 위한 성대한 행차와 더불어 친위 부대인 장용영의 군사 훈련, 어머니의 회갑 축제를 겸한 대국민 행사를 기획하였다. 이 행사는 화성을 건설하는 비용의 약 1/8에 해당하는 10만 냥이 투입된 엄청난 규모의 축제였다. 1794년 12월부터 행사를 주관하는 기관인 整理所가 설치되어 축제 준비를 시작하였다. 정조의 화성 행차에서 가장 큰 문제는 소규모 원행과 비교할 수 없을 정도로 많은 인원이 동시에 한강을 건너는 일이었다.

⁹ 현대의 교량 공사는 계획, 설계, 시공 단계를 거친다. 계획 단계에서는 지형, 지질, 유속 등을 조사하여 최적의 위치를 선정하고 교량의 형식을 결정한다. 설계 단계에서는 하부 구조와 상부 구조를 나누어 도면으로 그리고 매뉴얼에 해당하는 示方書를 작성한다. 시공 단계에서는 설계와 시방서를 토대로 먼저 하부 구조를 만들고, 이어서 상부 구조를 만들어 간다. 설계와 시공 단계에서 발생할 수 있는 실수와 부정을 방지하기 위해 감리와 설계 경제성 검토를 받는다. 시방서란 건설 공사 현장에서 사용하는 작업 설명서를 말한다.

교절목(舟橋節目)”, 시방서(示方書)에 해당하는 『주교지남(舟橋之南)』, 준공 보고서에 해당하는 “주교사개정절목(舟橋司改定節目)”을 바탕으로 하고 있다.

1789년 주교사에서 처음 제출한 “주교절목”은 책이 아니기 때문에 『정조실록』과 『승정원일기』에서는 “주교사절목(舟橋司節目)”, 『홍재전서』에서는 “주교사목(舟橋事目)”, 『주교지남』에서는 “주교절목” 등으로 다양하게 지칭되고 있다.¹⁰ 이 때문에 후대에 출간된 것으로 추정되는 책인 『주교사절목』과의 혼란이 불가피해졌다.¹¹ 혼란은 여기서 그치지 않고 1793년 “주교사개정절목”을 1790년 『주교지남』과 동일하게 보는 경우까지 발생하였다. 이렇게 혼동하게 된 이유는 『주교지남』으로 묶여 전하는 규장각 필사본 중 일부가 1793년 “주교사개정절목”을 포함하고 있기 때문이다.¹² 이처럼 정조 대 한강 배다리와 관련된 사료들은 ‘책으로 전해지는 것’, ‘다른 문헌 속에 전문으로 전해지는 것’, ‘다른 문헌을 통해 재구성할 수 있는 것’, ‘시기가 서로 다른 것을 하나의 책으로 묶은 세 종류의 필사본’ 등이 복잡하게 얽혀 있다. 이 때문에 배다리의 구조를 논의하기에 앞서 서지학적 정보를 일목요연하게 정리할 필요가 있다.¹³ 필자는 1790년 『주교지남』을 기준으로 1789년 주교사에서 처음 제출한 것을 “주교절목”이라고 부르고, 1793년 수정 보완하여 제출한 것을 ‘주교사에서 개정한 것’이라는 것을 강조하기 위해 “주교사개정절목(舟橋司改定節目)”이라고 명명하여 둘을 구분하는 방식이 가장 무난하다고 보았다.¹⁴ <표 2>는 한강 배다리 구조를 확인할 수 있는 사료들을 필자가 시기별로 정리한 것이다.

¹⁰ 『正祖實錄』卷30, 14年(1790) 7月 1日, “廟堂撰進舟橋司節目, 爲之論辨, 仍以御製文, 弁其首, 名曰 舟橋指南”; 『承政院日記』, 88冊, 正祖 13年(1789) 12月 8日, “上曰, 舟橋司節目, 從近成出, 而判尹看作已任, 擔當善爲可也. 我東凡事, 輒倣中原, 而獨於浮橋, 尙未模倣, 彼國之譏笑, 固無所怪矣”; 『正祖實錄』卷37, 17年(1793) 1月 11日, “舟橋司進舟橋節目”; 『弘齋全書』卷59, 雜著六, 舟橋指南. “答廟堂舟橋事目.” (밑줄은 필자, 이하 같음).

¹¹ 서울대학교 규장각에는 특별한 형식 없이 44개조 절목으로 구성된 ‘주교사절목’ (奎中 11433)이 전해지고 있다.

¹² 필사본으로 전해지는 『주교지남』 규장각 본은 모두 세 가지이다. <奎 3172>본은 『정조실록』, 『홍재전서』에 담긴 내용과 동일한 하지만, <奎 5485>본은 이후의 “舟橋司改定節目”과 “全羅監司鄭民始狀啓”를 포함하여 묶은 책이다. <奎 7315>본은 舟橋司改定節目만 추가되었고 全羅監司鄭民始狀啓가 빠져 있다.

¹³ ‘책으로 전해지는 것’은 『주교지남』, 『주교사절목』, ‘다른 문헌 속에 전문으로 전해지는 것’은 “주교사개정절목(1793)”, ‘다른 문헌을 통해 재구성할 수 있는 것’은 “주교절목(1789)”이다.

¹⁴ 신병주, 앞의 글에서는 ‘주교절목(1789)-주교지남(1790)-주교사절목(1793)’으로 지칭되고 있으며, 김문식, 앞의 글에서는 ‘주교지남(1790)-주교절목(1793)’으로 지칭되고 있다.

표 2. 정조 대 한강 배다리 설계와 관련된 사료

시기	본 연구에서 지칭한 명칭	항목	비고
1789년 정조 13년	주교절목 (舟橋節目)	21	책으로 전하지 않고, 전문을 그대로 수록한 문헌도 없어, 다른 문헌들을 통해 간접적으로 확인 가능함. 『정조실록』: “주교사절목”으로 지칭 『승정원일기』: “주교사절목”으로 지칭 『홍재전서』: “주교사목”으로 지칭 『주교지남』: “주교절목”으로 지칭
1790년 정조 14년	주교지남 (舟橋指南)	15	『정조실록』, 『홍재전서』에 “주교지남”, “묘당찬진주교절목논변” 전문이 수록됨. 규장각 필사본 <奎 3172>
1793년 정조 17년	주교사개정절목 (舟橋司改定節目)	36	아래 문헌 속에 전문이 수록됨. 『정조실록』: “주교절목”으로 지칭 『주교지남』: “주교사개정절목”으로 지칭
미상	주교사절목 (舟橋司節目)	44	항목 수가 “주교사개정절목”보다 많으므로, 1793년 이후에 출간된 책으로 추정됨.

2. 한강 주교 설계의 발전 과정

1) 건설 계획: “주교절목” 21항

1789년(정조 13년) 12월, 정조의 명에 의해 설치된 주교사는 대규모 인원이 동시에 한강을 건널 수 있는 배다리 건설 프로젝트에 들어갔다. 주교사가 세워짐과 동시에 묘당(廟堂, 의정부)에서는 노량진 나루터를 최적의 입지로 선정하여 설계 초안인 “주교절목”을 제출하였다. “주교절목”은 책으로 전하지 않고 전문을 그대로 수록한 문헌도 없지만, 『정조실록』, 『홍재전서』, 『주교지남』 속에 포함된 “묘당찬진주교절목논변(廟堂撰進舟橋節目論辨)”을 통해 그 내용을 간접적으로 파악할 수 있다.

노량진 나루터의 지형과 조류 분석이 잘못되었다는 비판, 길이와 자재는 재어 보기 전에는 알 수 없다는 지적, 배마다 큰 고리를 장착하여 배들을 줄로 묶는 핵심 공법 자체를 부정한 점 등 “주교절목”에서 제시한 거의 모든 내용은 배다리

를 가설하는 공법으로 적합하지 못하다는 부정적 평가를 받았다.¹⁵ “주교절목”에 대한 정조의 냉담한 반응은 『승정원일기』와 『홍재전서』를 통해 확인할 수 있다. 『승정원일기』에는 우리의 배다리 제도가 중국의 배다리 제도를 참조하지 않아 비웃음을 사게 되었다는 정조의 언급이 기록되어 있다.¹⁶ 『홍재전서』에는 정확한 측정을 토대로 구체적인 근거를 밝혀야 함에도 불구하고, “주교절목”이 주먹구구식으로 제안된 것에 불과하다는 정조의 꾸짖음이 기록되어 있다.¹⁷

표 3. “주교절목”의 설계 감리 및 설계 경제성 검토 결과

계획	초안	감리 및 경제성 검토	결과
1	배다리 위치와 환경 분석	노량진 나루터의 지형과 수심 분석이 잘 못되었음.	재조사
2	배를 구하는 법	건설 방법이 구체적으로 결정되어야 결정할 수 있는 일임.	보류
3	배를 구하는 것과 관련된 규제		보류
4	조운선 활용법		보류
5	개인 소유 배 활용법	특정 집단의 독점 이익이 예상됨.	기각
6	지방의 배 활용법	특정 집단의 피해가 예상됨.	기각
7	배 운송 체계	합리적으로 원안 대폭 수정함.	수정
8	배다리 보관 창고 계획	지금 논의할 단계가 아님.	보류
9	비용 조달 방법	불필요한 지출이 많음.	기각
10	배다리 공법	크고 둥근 고리로 각 배의 상하 좌우를 연결하여 묶는 방법은 적합하지 않음.	기각
11	바닥판 필요량 및 조달 방법	불필요한 지출이 많음.	기각
12	연결 나무의 필요량		기각
13	선창다리 자재의 필요량		기각
14	연결용 생 철 구입 방법	할당하지 말고 일괄 구입함.	수정
15	선창다리용 짜리바자	송판으로 대체하니 불필요함.	기각
16	크고 둥근 고리와 각종 철물	둥근 고리 불필요함.	기각
17	빈 가마니 조달 방법	할당하지 말고 일괄 구입함.	수정
18	기타 목재 조달 방법	난간용 나무의 종류를 변경함.	수정
19	잔디 조달 방법	낭비가 심함.	기각
20	시공 책임자 선정	일부 직책은 불필요함.	수정
21	배다리 인력 배치	자질구레한 것으로 나중에 결정함.	보류

¹⁵ 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日; 『弘齋全書』 卷59, 雜著六, 舟橋指南; 『舟橋指南』, “廟堂撰進舟橋司節目論辨.”

¹⁶ 『承政院日記』 正祖 13年(1789) 12月 8日, “上曰, 舟橋司節目, 從近成出, 而判尹看作已任, 擔當善爲可也. 我東凡事, 輒倣中原, 而獨於浮橋, 尙未模倣, 彼國之譏笑, 固無所怪矣.”

¹⁷ 『弘齋全書』 卷59, 雜著六, 舟橋指南, 正祖 14年(1790), “予於是決意欲行之, 諮于廟堂, 詢

결국 “주교절목” 21개 항목은 대부분 기각되었고, 이 때문에 “주교절목”은 책으로 묶이지도 못하고 전문으로 수록되지도 못한 채 문힐 수밖에 없었다. 오늘날 토목 공사 과정으로 본다면 설계 감리와 경제성 검토에서 불합격 판정을 받은 셈이다. <표 3>은 “주교절목” 21개 항목의 검토 결과를 정리한 것이다.

2) 시방서: 『주교지남』 15항

1790년 7월 1일 정조는 “주교절목” 21개 항목을 15개 항목으로 대폭 수정한 『주교지남』을 발표했다. 『주교지남』은 1789년에 주교사를 세움과 동시에 묘당에서 급히 제출한 “주교절목”을 정약용이 제시한 배다리 공법을 반영하여 수정 보완한 후, 왕명으로 발표된 것으로 추정된다.¹⁸ 『주교지남』은 묘당에서 처음 제출한 “주교절목” 21개 항목을 조목조목 비판한 “묘당찬진주교절목논변”과 함께 대안으로 제시한 15개 항목의 배다리 지침을 정조의 어제문(御製文)을 첫머리에 얹혀 하나의 책자로 구성한 것이다. 이처럼 『주교지남』은 묘당에서 제출한 “주교절목”을 비판한 후 대안으로 제시한 시방서 초안일 뿐, 이대로 실제 배다리가 건설된 것은 아니었다.

『주교지남』은 건설 계획에 해당하는 지형 분석 2개 항목, 현대의 조선 공학에 해당하는 하부 구조 설계 4개 항목, 현대의 교량 공학에 해당하는 상부 구조 설계 3개 항목, 상판 안전 시설 설계 2개 항목, 건설 행정 규정 4개 항목 등 모두 15개 항목으로 구성되었다. 『주교지남』에서는 배다리 공법과 선창(부두)과 주교를 연결하는 선창 다리의 연결 공법 등이 “주교절목”과는 비교할 수 없을 정도로 상세하게 보완되었다. 『주교지남』을 현대적 관점에서 해석한다면 국가가 건설하는 교량의 시방서를 대통령이 직접 발표한 셈이다. 이를 통해 정조가 얼마나 배다리 건설에 신경을 썼는지 알 수 있다. 『주교지남』 15개 항목을 정리하면 <표 4>와 같다.

及父老者, 非不勤且懇矣, 對揚之地, 未嘗以分數明三字, 留心著手.”

¹⁸ 당시 초계문신으로 정조와 가까이 있었던 정약용은 보를 이용하는 거더교(girder bridge) 방식과 부판 형식의 선창다리 공법을 정조에게 제안한 것으로 보인다. 이처럼 정약용의 아이디어를 참조하여 발전시킨 후 이를 『주교지남』으로 발표했다고 보는 것이 필자의 입장이다.

표 4. 『주교지남』의 내용

항목	분야	내용
1	지형 분석(건설 계획)	배다리를 놓을 위치 (노랑진 나무터)
2		강물의 넓이 (다리 길이)
3	하부 구조 설계	배의 선택 (평저선)
4		배의 수호 (60척)
5		배의 높이 (예비 부력의 측정)
6	상부 구조 설계	종량(縱梁): 보(거더) 설치 공법
7		횡판(橫板): 바닥판 설치 공법
8	상판 안전시설 설계	잔디 깔기 (충격 흡수)
9		난간 (안전 시설)
10	하부 구조 설계	뚝을 내리는 일
11	건설 행정	자재의 보관 (일련 번호 부여)
12		배를 운용하는 관리 감독 체계
13		상벌 (안전 규칙과 처벌)
14		배를 소집하는 방법
15	상부 구조 설계	선창 다리: 부판(浮板) 공법

오늘날 정조 대 한강 배다리는 다산 정약용이 설계한 것으로 널리 알려졌지만, 이를 입증할 수 있는 사료는 스스로 지은 묘지명[自撰墓誌銘]뿐이다. 다음은 정약용의 “자찬묘지명” 중에서 자신이 배다리와 화성 설계를 주도했음을 설명하는 내용이다.¹⁹

이해 겨울에 수원에 성을 쌓게 되었다. 주상이 이르시기를, “기유년(1789년) 주교(舟橋)의 역사에 용(鑪)이 그 규제(規制)를 진달하여 사공(事功)이 이루어졌으니, 그를 불러 사제(私第)에서 성제(城制)를 조진(條陳)하도록 하라”고 하셨다. 용이 이에 윤경(尹鼎)의 보약(堡約)과 유 문충공(柳文忠公) 성룡(成龍)의 성설(城說)에서 좋은 제도만 채택하여 초루(譙樓)·적대(敵臺)·현안(懸眼)·오성지(五星池) 등 여러 방법을 정리하여 진달하였다. 주상이 또 『고금도서집성(古今圖書集成)』과 『기기도설(奇器圖說)』을 내려 인중법(引重法)·기중법(起重法)을 강구하도록 하셨다. 용이 이에 “기중가도설(起重架圖說)”을 지어 올렸다. 활차(滑車)와 고륜(鼓輪)은 작은 힘을 써서 큰 무게를 옮길 수 있었다. 성역(城役)을 마친 뒤에 … 주상이 이르시길, “다행히 기중가(起重架)를 써서 돈 4만 냥

¹⁹ 정약용의 “자찬묘지명”은 직접 무덤 속에 넣을 壙中本과 문집 속에 담을 集中本이 있다. 이 중에서 집중본은 군영인 정조의와 일화를 소개하고 있어 정약용의 기술 분야 업적을 연구하는데 중요한 근거가 된다.

의 비용을 줄였다.”라고 하셨다.²⁰

“자찬묘지명”에 따르면 정약용이 주교 제도에 관한 글을 정조에게 올린 것은 분명하지만, 그 시점을 1789년(기유년)이라고 언급한 점에서 정약용의 설계안이 그 해 묘당에서 올린 “주교절목”에 반영되었는지, 그 직후인 1790년 정조가 발표한 『주교지남』에 반영되었는지 여부는 불분명하다.

필자는 『홍재전서』에 기록된 “주교절목”에 대한 정조의 냉정한 비판을 볼 때, 왕에게 주먹구구식이라고 비판받은 초안을 정약용이 “자찬묘지명”에 자랑스럽게 언급할 리 없다고 보았다. 따라서 1789년에 정약용이 올렸다는 배다리 제도에 관한 글은 묘당에서 올린 “주교절목” 이후에 제출되었으며, 이들 토대로 정조가 『주교지남』을 발표한 것으로 보는 것이 타당할 것이다. 28세 1년 차 관리가 제안한 한강 주교 건설 방법이 너무나도 탁월했기 때문에 정조는 정약용의 실력을 인정했고, 몇 년 뒤 31세 초급 관리에 불과한 정약용에게 신도시 화성을 설계하라는 과중한 책임을 맡겼을 것이라고 추론하는 것이 합리적이기 때문이다.²¹

정약용의 “자찬묘지명”과 『승정원일기』를 통해 드러난 정조의 언급을 통해 정조 대 한강 배다리는 중국의 제도나 외국의 기술 서적을 많이 참조한 거중기와 수원 화성 시설물과는 달리, 조선의 자생적인 기술로 설계되었음을 알 수 있다.

3) 준공 보고서: “주교사개정절목” 36항

주교사는 『주교지남』 15개 항목을 토대로 1793년 1월 11일, 준공 보고서 초안인

²⁰ 丁若鏞, “自撰墓誌銘”(集中本) 『定本 與猶堂全書』文集 卷十六 墓誌銘, “是年冬, 城于水原. 上曰, 己酉冬, 舟橋之役, 鏞陳其規制, 事功以成, 召之使于私第條陳城制. 鏞乃就尹畊堡約及柳文忠成龍城說, 採其良制, 凡譙樓敵臺懸眼五星池諸法, 疏理以進之. 上又內降圖書集成奇器圖說, 令講引起重重之法, 鏞乃作起重架圖說以進之, 滑車鼓輪, 能用小力轉大重. 城役既畢 … 上曰幸用起重架, 省費錢四萬兩矣.”

²¹ 당시 정약용이 본래의 직무를 면제 받고 연구에 전념하면서 왕이 낸 과업을 수행할 수 있었던 초계문신 신분이었다는 점과 정약용 이외에 자신이 했다고 주장하는 인물이 없다는 점, 정조 사후 유배된 정약용을 당시 노론들이 비중 있게 평가할 리가 없었다는 점, 배다리와 화성을 설계할 당시 정약용의 나이가 너무 어리고 관직에 막 입문하여 직급이 매우 낮았다는 점, 화성 설계를 누가 했는지를 명확히 밝힌 기록은 없으나 결국 정약용의 “성설”과 정조가 발표한 건설 지침인 “어제성화주략”이 일치한다는 점 등을 종합할 때, 배다리의 경우도 수원 화성과 마찬가지로 정조의 명에 따라 정약용이 주도적으로 설계한 것으로 보는 것이 필자의 견해이다.

“주교사개정절목” 36개 항목을 완성하여 제출하고, 교각으로 쓸 배와 건설 자재를 준비하였다.²² “주교사개정절목”은 배다리 공법, 자재 준비, 운영 방법 등을 최종적으로 36개 항목으로 종합한 것으로 교각 역할을 하는 교배선의 개수와 배와 부두를 연결하는 선창 다리 공법을 제외하고는 대부분 『주교지남』과 일치한다.

이후 1795년 원행을 앞두고 2월 13일 공사를 시작하여 2월 24일까지 12일 만에 배다리 공사를 마쳤다. 그 해 윤 2월 4일에는 원행 직전 많은 인원이 강을 건널 수 있는지를 시험하는 주교도섭습의(舟橋渡涉習儀)가 있었다. 이는 배다리를 건너는 의식 절차를 익히기 위한 예행 연습이 주된 목적이었지만, 많은 인원이 동시에 배다리를 건널 때의 하중과 진동을 견디어낼 수 있는지를 점검할 수 있었다는 점에서 오늘날 준공 검사(竣工檢查)에 해당한다.²³ 화성 원행을

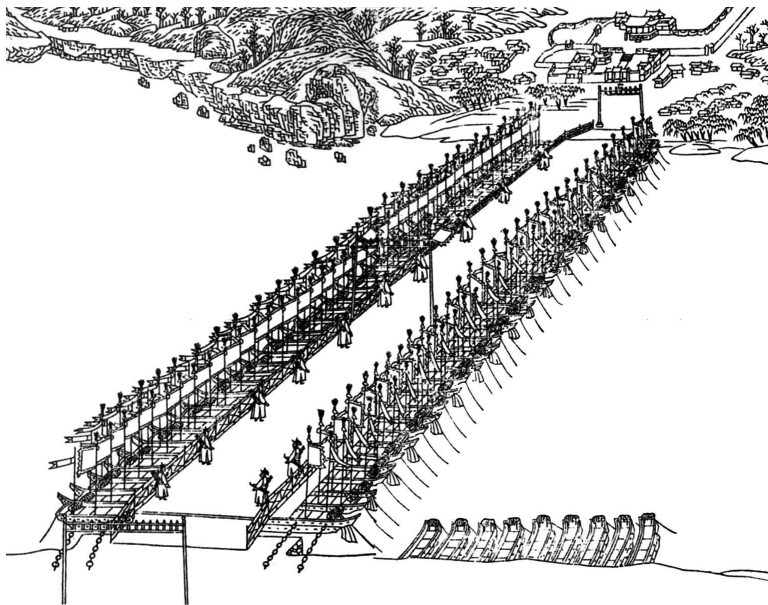


그림 1. “주교도” [출처: 『園幸乙卯整理儀軌』, “卷首·圖式”, 29b-30a (서울대학교 규장각한국학연구원 소장, 奎 14532)]

²² 『正祖實錄』 卷37, 17年 1月 11日, “舟橋司進舟橋節目.”

²³ 『承政院日記』 92冊, 正祖 19年(1795) 2月 15日, “傳于李肇源曰, 朝筵已有下教矣, 進饌內習儀, 雖不備例爲之, 念後各差備等, 卽當下去云, 其前其後, 連值齋日, 過齋後十九二十間, 略習儀節一度於女官, 而駕轎習儀, 念後過齋後, 廿五六間爲之, 只依後苑調馬例舉行. 園幸,

무사히 마치고 간행한 『원행을묘정리의궤(園幸乙卯整理儀軌)』는 최종 준공 보고서이며, 주교편에 담긴 “주교도”는 배다리의 전체 구조를 간략하게 묘사한 최종 도면에 해당한다[그림 1]. 후술하겠지만 “주교도”는 배를 앞뒤가 엇갈리게 배치하지 않고 같은 방향으로 표현하는 오점을 남겼다.

3. 한강 배다리의 구조적 특성

1) 하부 구조 결합 공법

한강에 설치할 배다리의 상부 구조는 천 명이 넘는 대규모 인원이 동시에 건널 수 있도록 하중을 분산시켜야 했으며, 하부 구조는 부력으로 하중을 지탱해야 함은 물론 흔들림을 최소화하거나 흔들림에 견딜 수 있도록 설계해야 했다. 배다리 하부 구조인 조운선은 크기가 커 예비 부력이 큰 장점은 있으나, 많은 세곡을 적재하기 위하여 선체의 높이가 높기 때문에 무게 중심이 높아져 복원력은 좋지 못한 편이었다[그림 2].²⁴ 따라서 배다리 상부 구조는 복원력이 좋지 못한 하부 구조를 보완할 수 있도록 설계해야 한다.

1789년 최초 설계안인 “주교절목”에서는 배의 상하 좌우에 둥근 고리를 박아 철 줄로 꿰어 묶는 공법이 제시되었다. 이 방식은 배들이 교각 역할을 하는 것이 아니라 부유 구조물(pontoon)에 불과하기 때문에 대규모 인원이 동시에 건널 경우 심하게 출렁거릴 수 있다.²⁵ 기록에 따르면 연산군 때의 배다리가 이러한 부유 구조물 방식이었는데, 800척이 넘는 수많은 배들을 촘촘하게 배치해야 하는 까닭도 안전 때문이었다.²⁶ 오늘날 군부대에서 사용하는 리본교(ribbon bridge)는 완벽한 방수 처리로 높은 부력을 얻을 수 있지만, 백성들의 크고 작

每以陵幸之當前，瑞慈臺試射，不爲之，而今番則自別，晦初間，趁司馬回榜放榜前爲之，試官則總理大臣及堂上郎廳爲之，過回榜放榜後，舟橋渡涉習儀爲之，旗軍洗馬，亦依朝筵下教，只以調馬例爲之，該寺提調以下，進去舉行事，令整理所知悉。”

²⁴ 국립해양문화재연구소, 『전통 선박 조선 기술 IV: 조운선』 (목포: 글모음 디자인, 2012), 68-69.

²⁵ 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日, “大圓環朴排, 徒繁工役, 而反有悠揚之患矣, 尤萬萬不當.” (크고 둥근 고리를 다는 것은 한갓 공사만 번거롭고 도리어 흔들흔들 일렁이게 할 염려가 있으므로 더욱 부당하다.)

²⁶ 『燕山君日記』 卷60, 11年 11月 19日.

은 배들을 모아 가설한 부유 구조물은 충분한 부력을 얻기에는 부족하였다.

주교사는 『주교지남』을 토대로 노량진 나루터의 정확한 강폭을 측정하였는데, 배다리를 놓아야 하는 강폭의 길이는 190발(把)이었다. 양팔을 벌린 길이가 1발이니, 오늘날 사용하는 미터 단위로 환산하면 강폭의 전체 길이는 대략 340m 정도였다.²⁷ 배다리 건설 전에는 배의 개수를 60척으로 추정했지만, 교배선으로 동원한 배들이 규모가 비교적 큰 조운선이었으므로 36척만으로 다리를 완성할 수 있었다.

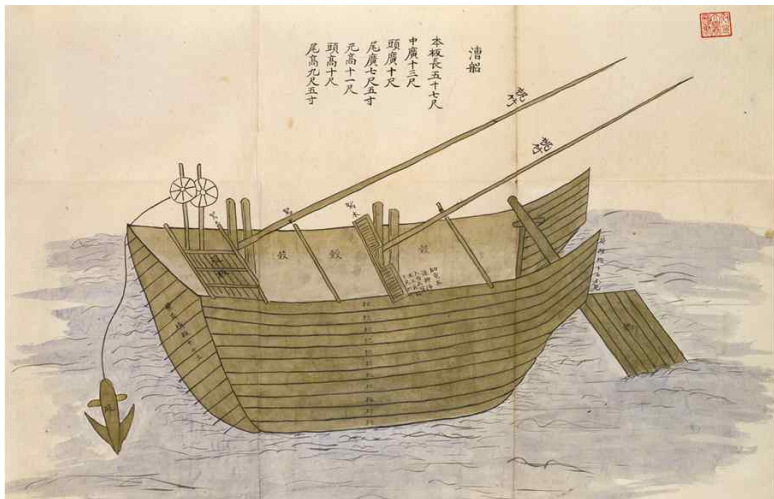


그림 2. 조운선 [출처: 『각선도본(各船圖本)』彩色圖筆寫本 (서울대학교 규장각한국학연구원 소장,奎 15752)]

『각선도본』의 조운선 그림을 토대로 복원한 국립 해양 문화재 연구소의 조운선 도면을 참조하면 36척으로 이어 만든 340m 길이의 배다리의 구조를 합리적으로 추론할 수 있다.²⁸ 교배선으로 징집된 조운선들은 오늘날 미터법으로 환산하면 대략 높이가 3.3m, 너비가 7.5m, 길이가 24m 정도로 매우 큰 편이었

²⁷ 『正祖實錄』卷30, 14年(1790) 7月 1日, “橋梁所用船隻, 南北船艙, 相距爲一百九十把, 則容入大船, 當爲三十六隻, 以京江私船及訓局船擇用.” (교량에 쓰일 선척에 대해서는 남북으로 선창의 거리가 1백 90발이므로 여기에는 큰 배가 의당 36척이 소요될 것이니, 경강의 개인 배와 훈련도감의 배를 택하여 쓰기로 한다.)

²⁸ 국립해양문화재연구소, 『조운선』(각주 24), 44-49.

다[그림 3]. 모든 교배선의 너비를 합치면 대략 270m이다($7.5\text{m} \times 36\text{척} = 270\text{m}$). 강폭의 길이 340m에서 270m를 뺀 나머지 70m를 배와 배 사이 공간 35개와 배와 선창 다리 사이 2개 공간을 합친 37개 공간으로 분배하면, 배와 배 사이의 공간은 대략 1.9m 정도로 추론할 수 있다. 따라서 최종적으로 완성된 배다리는 상부 구조의 80% 정도가 교배선 갑판 위에 올라가 있는 매우 안정적인 구조를 취하게 된다.

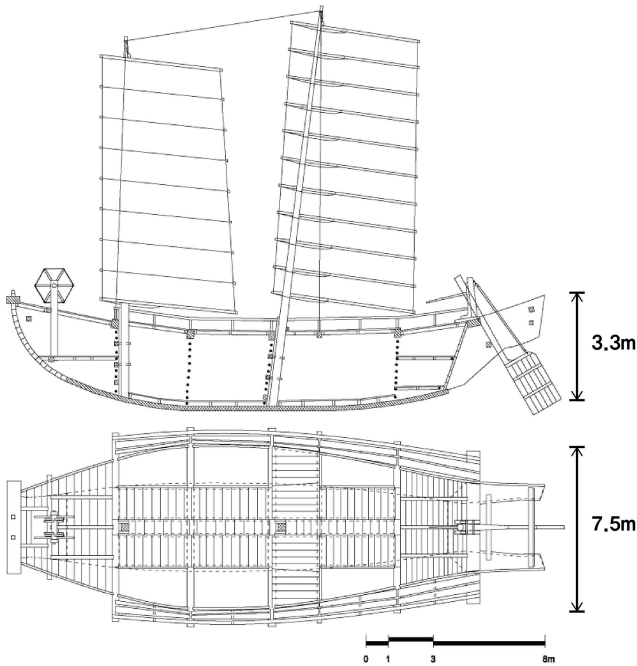


그림 3. 복원 조운선의 도면 [출처: 국립해양문화재연구소, 『전통 선박 조선 기술 IV: 조운선』 (목포: 글모음 디자인, 2012), 49]

다리의 하부 구조가 상부 구조의 무게를 잘 버티기 위해서는 무게를 잘 분산해야 하는데 이를 위해서는 구조물이 아치 형태를 이루고 있어야 한다. 『주교지남』에서도 이러한 아치형 구조를 강조하였다. 교배선 36척 중에서 몸체가 가장 크고 뱃전이 가장 높은 배(예비 부력이 가장 큰 배)를 골라 강 한복판에 정박시켜 기준으로 삼고, 그 배를 시작으로 크기 순서대로 선창까지 나열하면 결국 아치교(arch bridge) 모양이 된다[그림 4].²⁹

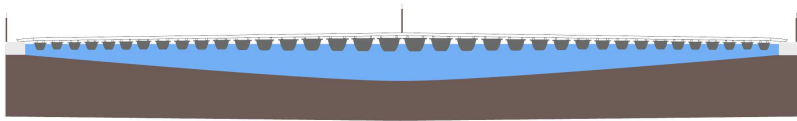


그림 4. 교배선 36척의 배열 (출처: 필자)

교량의 하부 구조를 설계할 때 밑바닥이 평평한 평저선(平底船)의 특성을 이 용하였고, 예비 부력을 체계적으로 측정하여 활용하였다. 『주교지남』에서는 배 밑바닥이 좁은 소금 배는 침저선(尖底船)이기 때문에 쓸모가 없다고 밝히고 있 다.³⁰ 나아가 배의 높이(depth of hull)를 흘수(draft)와 건현(freeboard)으로 구분하여 배의 부력을 평가하고 추정하는 과정을 상세히 설명하고 있다.³¹ 빈 배 상태에서 같은 크기의 평저선은 침저선에 비해 흘수가 작기 때문에 부력이 작다. 하지만 건현이 크기 때문에 예비 부력이 매우 크다는 점에 주목해야 한다.

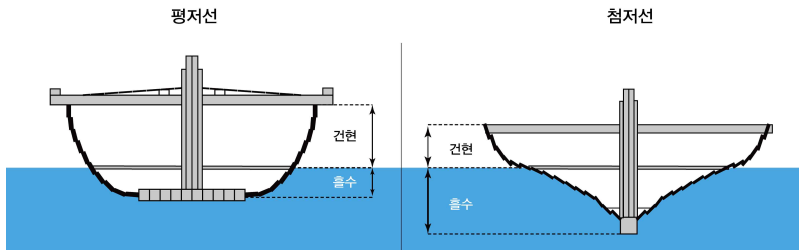


그림 5. 평저선과 침저선의 흘수와 건현 (출처: 필자)

²⁹ 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日. “橋制, 排聯之際, 先擇諸船中體最大杉最高者, 碇住於江中, 以表中央. 仍以大小高下, 次第班聯於左右, 屬之船艙, 使橋制中高而兩端低下, 如穹橋之形.” (배다리의 제도는, 배지하여 연결시킬 즈음 먼저 여러 배 가운데서 몸체가 가장 크고 뱃전이 가장 높은 것을 골라 강 한복판에 정박시켜서 중심의 표적을 삼게 한다. 그리고 이어 크고 작고 높고 낮직한 것들을 차례로 왼쪽과 오른쪽에 줄지어 연결시켜 선창에 닿게 함으로써, 다리의 모양새를 가운데는 높고 양쪽은 낮은 것이 궁륭교 모양이 되게 한다.)

³⁰ 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日, “今議將以牙山漕船及訓局船數十隻, 用之江心, 兩邊則以鹽船充用, 蓋鹽船舷薄而底窄, 不堪用.” (지금의 의견에 의하면 앞으로 아산의 조세 운 반선과 훈련도감의 배 수십 척을 가져다가 강 복판에 쓰고 양쪽 가장자리에는 소금배로 충당 해 쓰겠다고 하나, 소금 배는 뱃전이 얇고 밑바닥이 좁아서 쓸모가 없다.)

³¹ 『正祖實錄』, 같은 기사, “而第其尺量高低, 便有兩段, 一爲入水之高, 一爲出水之高, 此若不精審, 則易致乖舛. 出水之高, 宜用垂線, 入水之高, 宜用曲尺, 其完不完, 亦須十分精審, 從公該錄.” (배의 높이를 재는 방법은 두 가지가 있다. 그 하나는 물 속에 들어간 높이이고 하나는 물 밖에 나온 높이이니, 이것을 만약 정밀하게 살피지 않으면 어긋나기 쉽다. 물 밖에 나

많은 사람들이 배다리를 건너면서 상부 구조의 하중이 증가하면 흠수가 점차 깊어지게 되는데, 이때 부력도 함께 증가하면서 새로운 평형 상태를 찾게 된다 [그림 5]. 평저선은 흠수가 깊지 않고 배의 폭이 커서 방향 전환과 움직임이 자유롭기 때문에 배를 정렬하고 보를 연결하기에 편리하다.

배가 잠기는 깊이인 흠수는 부력과 중력이 평형을 이루는 지점으로 『주교지남』에서는 물속에 들어간 높이를 재어 부력을 측정하였으며, 물 밖에 나온 높이인 건현을 수직선으로 재어 예비 부력을 계량화하였음을 알 수 있다. 상부 구조에서 전해지는 활하중(사람, 말, 가마)과 고정하중(횡판+난간+잔디)을 버텨 내야 하는 배는 상당한 양의 예비 부력을 가지고 있어야하기 때문에 예비 부력을 측정하는 일은 그만큼 중요하다.³²

1780년 『주교지남』에서는 긴 장대를 사용하여 여러 배 위에 걸쳐 뼈대로 삼는 기존 방식을 지양하고, 오늘날 거더(girder, 보)교의 상부 구조와 같이 종량(縱梁)들을 연결하여 상판을 떠받치는 안정된 구조를 제안하였다[그림 6].

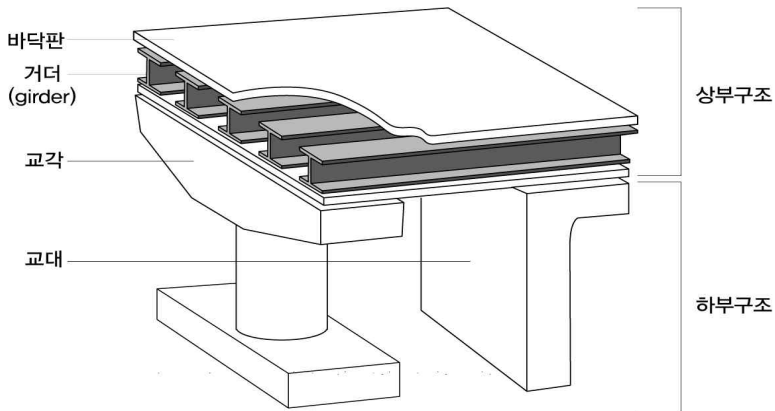


그림 6. 현대 거더교의 구조 (출처: 필자)

은 높이는 수직선으로 재어야 하고 물속에 들어간 높이는 곡적으로 재어야 하며, 완전한가 완전하지 않은가에 대해서도 또한 충분히 살펴서 공정하게 기록해야 한다.)

³² 배의 예비 부력과 관련된 내용들은 주교사에서 제출한 『주교절목』에는 없던 내용이다. 이를 통해 정조가 부력에 관한 상당한 수준의 소양을 갖추고 있었음을 확인할 수 있다. 필자의 견해에 따라 정조가 정약용에게 아이디어를 얻은 후 『주교지남』을 발표한 것이 맞다면, 정약용은 조선 공학에도 상당한 수준의 식견을 갖추고 있었던 것이다.

『주교지남』에서 제안한 배다리 구조는 교량의 상부 구조에서 전달되는 하중을, 하부 구조에 작용하는 조운선의 부력에 의지해 안전하게 분산시키는 방식을 취하고 있다. 교량의 하부 구조는 부력을 크게 하고 좌우로 흔들리는 것을 최소화하기 위해 배 밑이 평평한 대형 조운선을 앞 뒤 방향을 엇갈려 배치한 후, 하중을 가장 안정적으로 지탱할 수 있는 배의 골격이 되는 ‘가룡목(駕龍木)’ 위에 보를 올려놓도록 설계하였다. 이때 ‘가룡목 위’는 ‘명에’에 해당하는 부분이다[그림 7].³³ 일부 사료에서는 ‘가목(駕木)’을 ‘명에’라고 지칭하기도 하는데, 결국 ‘명에’는 갑판과 닿은 가룡목으로 이해하면 된다.

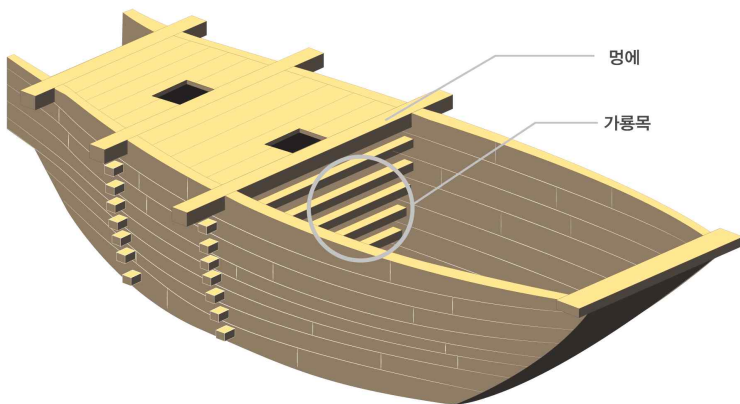


그림 7. 가룡목과 명에 (출처: 필자)

이처럼 배의 가룡목에 주목한 까닭은 가룡목이 없는 부위에 보를 얻어 상부의 하중이 가해질 경우 교배선 난간에 무리를 주게 됨은 물론 다리의 안전성에도 영향을 끼치기 때문이다. 인접한 배의 명에 위에 종량을 서로 걸치게 한 후 침 줄로 묶기 위해 종량의 길이는 배의 넓이 5발에 비해 다소 긴 7발 정도로

33 『正祖實錄』卷30, 14年(1790) 7月 1日, “又其甲船縱梁之盡頭處, 正當乙船之駕龍木 [即舟中橫木, 以撐船腹, 分爲一間二間者] 之上, 而與乙船縱梁相合, 乙船縱梁之盡頭處, 正當甲船之駕龍木, 而與甲船縱梁相合, 以葛纜縛之, 以撐枉促之.” (또 그 갑이란 배의 종량 끝부분이 을이란 배의 가룡목 [곧 배 안에 가로지른 나무로서 배 안에 버티놓아 한 간, 두 간으로 가르는 것이다] 위에 맞닿아 을이란 배의 종량과 서로 합하게 하고 을이란 배의 종량 끝부분이 갑이란 배의 가룡목과 맞닿아 갑이란 배의 종량과 서로 합하게 한 다음 침 줄로 동이고 탕개로 조인다.)

가공하였다.³⁴ 종량 5개는 배 갑판 위에 세로로 나란히 놓인 두 개의 횡량(橫樑) 위에 고정되었고, 이 때문에 모두 72주의 횡량이 사용되었다.³⁵ 이 때 횡량은 종량을 떠받치는 기능을 하는 동시에, 조운선 갑판 위와 난간 사이의 높이 차이를 맞추는 기능도 했을 것으로 추정된다.³⁶

가롱목의 양쪽의 끝이 서로 닿지 않도록 어긋나게 배치하는 까닭은 배의 가롱목 위에 종량(종보)을 연결하여 걸쳐 놓게 하기 위해서이다. 『주교지남』에서는 구체적으로 설명하지는 않았으나, 1793년 “주교사개정절목”에서는 ‘개의 이빨[犬牙]’에 비유하여 이 배와 저 배의 뱃전 판자가 개 이빨처럼 서로 맞물려

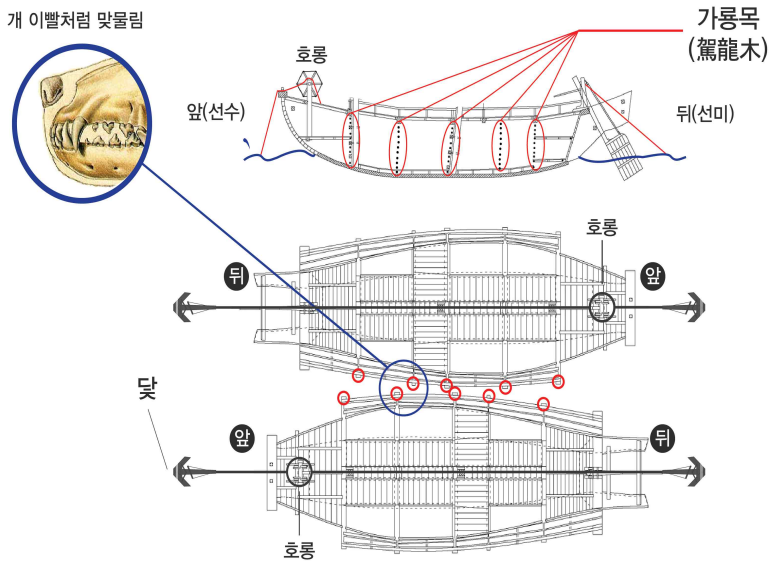


그림 8. 뱃을 내린 후 배를 배열하는 방법 (출처: 필자)

34 『正祖實錄』, 같은 기사, “今不用長竿, 而聯巨多船, 只以每船用結一竿爲準約. 船廣爲五把, 則梁長以七把爲準, 使其二把之餘長, 分跨船舷之兩界…” (이번엔 긴 장대를 쓰지 않고 많은 배를 연결할 때 다만 배마다 장대 1개씩 쓰는 것을 기준으로 삼아야 한다. 배의 넓이가 5발이 되면 종량의 길이는 7발로 기준을 삼아 그 2발의 나머지 길이가 뱃전의 양편을 걸쳐게 해야 하니…)

35 교각으로 동원된 배 한 척당 갑판 위에 2개의 횡량이 소요되고 모두 36척이므로 72주의 횡량이 필요하다. 횡량 수는 『萬機要覽』 재용편 5, 舟橋에서 확인할 수 있다.

36 국립해양문화재연구소에서 복원한 조운선 도면[그림 3]을 살펴보면, 갑판과 난간 사이에 약간의 높이 차이가 있음을 알 수 있다.

틈새가 나지 않도록 해야 한다고 강조하였다.³⁷ 이를 도면으로 설명하면 <그림 8> 과 같다.

상부 구조 바닥판은 현대 가설 교량의 복공판(覆工板)에 해당하며 『주교지남』에서는 횡판(橫板)이라고 표현하였다. 배다리의 바닥판은 난간과 더불어 하부 구조가 지탱하는 고정 하중에 해당하기 때문에 가볍고 튼튼한 소나무가 선택되었다. 『주교지남』에서는 가로 1자 이상, 두께 3치 정도의 크기로 제시하였으며, 큰 소나무 1주당 횡판 4장이 나오는 것으로 산출하였다.³⁸

2) 상부 구조 결합 공법

1789년 “주교절목”에서 제안한 상부 구조는 송판 위에 빈 가마니를 펴 흙을 채우고 잔디를 입히는 방식에 불과하였다. 이는 하부 구조가 배 사이에 보를 올려놓는 방식이 아니라 수백 척의 배를 촘촘하게 나열하는 방식과 관련이 있다.³⁹ 1790년 『주교지남』에서 제안한 상부 구조는 보를 사용하는 거터교 방식이므로, 보를 결합하는 위치와 결합하는 방법에 따라 세부 공법을 구분할 수 있다. 목재 보를 결합하는 방법으로는 짜 맞춤과 칠 목음 그리고 못질이 있다. 상식적으로 보와 보를 튼튼하게 결합하기 위해서는 못질을 하거나 칠 끈만으로 묶는 것보다는 짜 맞춤을 한 후 칠 줄로 묶거나 못질해야 한다.

37 『正祖實錄』卷37, 17年(1793) 1月 11日, “編結之法, 船隻先向上流下碇, 而駕龍木勿令兩頭相接, 錯排互進, 直當彼此, 杉板有若犬牙相制, 毋得動退.” (늘어세워 묶는 방법은, 배를 먼저 상류를 향해 닿을 내리게 하고 가룻목은 양쪽의 끝이 서로 닿지 않도록 어긋나게 배치하여 서로 끼어들게 해서 바로 이 배와 저 배의 뱃전 판자가 개 이빨처럼 서로 맞물려 틈새가 나지 않도록 한다.)

38 『正祖實錄』卷30, 14年(1790) 7月 1日, “七曰橫板, 御路之廣, 爲四把則橫板之長, 亦四把矣. 廣則以一尺[卽指尺. 尺樣比營造尺減八分, 比禮器尺加二分]以上爲準, 厚則以三寸[營造尺]爲準.” (7. 횡판: 어로의 넓이가 4발이 된다면 횡판의 길이도 또한 4발이다. 횡판의 넓이는 1척 [곧 지척을 말한다. 자의 규격이 영조척에 비하면 8푼이 적고 예기척에 비하면 2푼이 많] 이상으로 표준을 삼고, 두께는 3치 [영조척으로 따진다] 이상으로 표준을 삼는다.)

39 『正祖實錄』, 같은 기사, “造橋制度, 船隻隨其體制大小, 次次鱗付, 下碇牢堅, 以大葛索編結. 又以大圓環, 朴排於各船上下左右, 以小葛索貫結, 上鋪縱結木, 橫鋪長松板, 并間用大小釘, 鋪以空石實土被莎, 兩傍設欄干, 以爲界限.” (배다리를 만드는 제도는 배 자체의 대소에 따라 차례대로 이어 붙인 다음에 닻을 내려 단단히 고정시키고 굵은 칠 줄로 동이며, 또 크고 둥근 고리로 각 배의 상하 좌우를 연결하고 가는 칠 줄로 꿰어 처맨 다음, 위에는 길이로 연결된 나무를 깔고 가로로 긴 송판을 깔고서 모두 간간이 크고 작은 못을 친다. 그 다음 빈 가마니를 펴 흙을 채우고 잔디를 입히며, 양쪽 가에는 난간을 설치하여 한계를 만든다.)

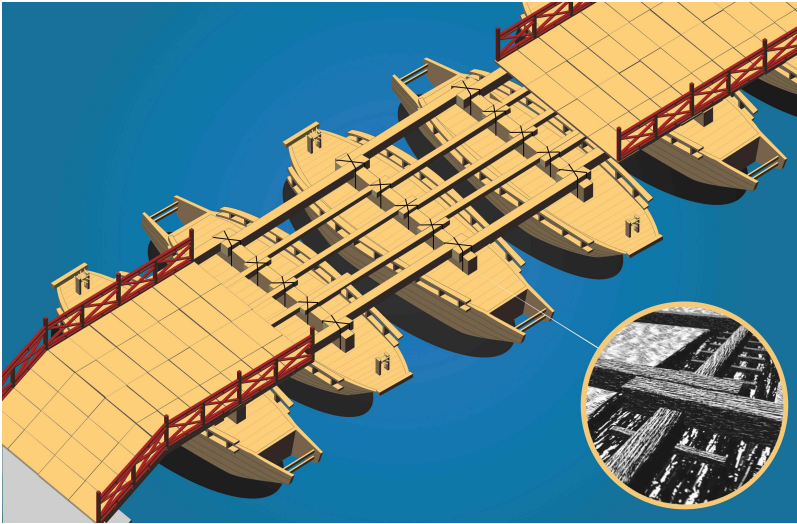


그림 9. 2013년 KBS 다큐드라마에서 복원한 한강 배다리 공법 (출처: 필자)

KBS 다큐드라마 역시 갑판 위에 놓인 횡량에 종량을 짜 맞추는 상식적인 방법으로 재현하였다[그림 9].⁴⁰ 이 영상에서 배 갑판 위의 놓인 횡량이 하나뿐인 까닭은 『주교지남』에 언급된 ‘가룽목’을 ‘횡량’과 동일한 것으로 해석하였기 때문이다.

『주교지남』에서는 ‘가룽목’을 ‘배 가운데 가로로 지른 나무로서 배 안에 버터 놓아 한 간, 두 간으로 가르는 것[卽舟中橫木以撐船腹分爲一間二間者]’으로 설명하였는데, KBS 다큐드라마에서는 횡목(橫木)의 방향을 배를 기준으로 하지 않고 배다리 상부 구조의 가로 방향으로 해석하고, ‘배 안[船腹]’의 의미를 ‘배의 갑판 위’로 해석하여 입체 영상으로 재현하였다.⁴¹ 하지만 사료에 배다리를 만들 때 72주의 횡량이 사용되었다는 기록이 명백하게 남아있기 때문에, 횡량과 가룽목을 동일하게 보고 배다리의 구조를 추론하는 것은 타당하지 않다.⁴²

⁴⁰ 그림 속의 확대 부분 [출처: KBS 다큐드라마, “의궤, 8일간의 축제”, (KBS한국방송, 2013), 2013. 10. 10 방송 화면]

⁴¹ 각주 32 참고.

⁴² 『萬機要覽』, 財用編 5 舟橋, “橫樑七十二株, 縱樑一百七十五株, 鋪板一千三十九立, 撐柱一百七十箇, 蛭木七十箇. 回龍木一百八箇, 叉釘木一百七十五箇, 大小釘九百箇, 牽馬鐵五千八百四箇, 頭釘二十四箇, 大叉釘十箇, 小叉釘十箇, 輪筒十坐, 大蛭釘十箇, 大牽鐵八箇, 鐵索七十七巨里, 大鐵索八巨里, 左右衛護船十二隻, 無定數, 隨多寡排立, 欄干二百四

가룽목을 배다리의 횡량으로 가정한다면 횡량은 72주가 아니라 그 절반인 36주만 필요하기 때문이다.⁴³

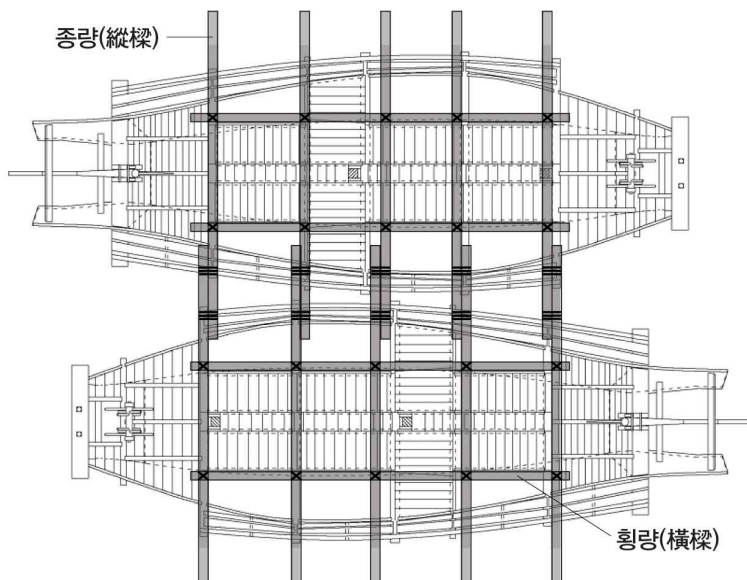


그림 10. 배 사이에서 칠 줄로 묶는 공법의 평면도 (출처: 필자)

十隻, 舟橋左右排設. 板九十二箇, 法首二百四十二柱, 曲釘六百九十二箇, 鶴鐵七十三箇, 排目一百四十六箇, 紅箭門三面, 舟橋南北及中央. 鶴板二坐, 頭釘八箇, 升旗紅大索四巨里, 撤橋時, 藏置本司庫.” (횡량 72주·종량 175주, 포판 1,039입, 탕주 170개, 질목 70개, 회룽목 108개, 차정목 175개, 대·소정 900개, 견마철 5,804개, 두정 24개, 대차정 10개, 소차정 10개, 운통 10좌, 대질정 10개, 대견철 8개, 철삭 77거리, 대철삭 8거리, 좌우위 호선 12척[일정한수가 없고 다과에 따라서 배립함], 난간 240척[배다리의 좌우에 배설함]. 판 92개, 범수 242주, 곡정 692개, 관철 73개, 배목 146개, 홍전문 3면[주교 남북과 중앙]. 관판 2좌, 두정 8개, 깃발을 올려 다는 홍대삭 4거리. 주교를 철거하였을 때에는 본사의 창고에 저장한다.) 출처: 한국고전번역원, 한국 고전 종합 DB http://db.itkc.or.kr/itkcdb/text/nodeViewIframe.jsp?bizName=MK&seoJid=kc_mk_e001&gunchalId=av005&munchelId=09&finId=025 (2017. 4. 2 접속)

- 43 가룽목을 지칭하는 한자는 ‘加龍木’과 ‘駕龍木’이 있는데, 일부 사서에서는 배의 가로 뼈대인 長鎖를 加龍木으로 표현하기도 한다. 하지만 加와 駕를 구분하는 경우는 없고, 『日省錄』과 『各司謄錄』과 같은 공문서를 통해 정조 시대에는 ‘駕龍木’과 ‘加龍木’을 구분하지 않고 동일하게 사용했음을 확인할 수 있다. 『海東繹史』 제29권, 宮室志, 器用 편에는 배의 ‘횡량’을 ‘駕龍’이라고 표현하였다. 배의 ‘駕龍’을 횡량이라고 표현하는 까닭은 배를 기준으로 했을 때 가로

오늘날의 관점에서는 갑판 위에서 짜 맞추어 결합하는 공법을 선호하겠지만, 정조 대 한강 배다리에 적용된 방법은 배와 배 사이에서 보를 칠 줄로 묶어 결합하고 보조적으로 보 사이에 구멍을 뚫어 빗장을 질러 넣는 공법이였다[그림 10].⁴⁴ 빗장을 질러 넣는 방식은 부재와 부재 사이를 핀(pin)으로 결합하는 현대 트러스(truss)교의 결합 방법이기도 하다. 하지만 빗장은 오늘날 사용하는 금속 핀과는 달리 엄청난 응력(應力, stress)을 견디어 내지 못하므로 한강 배다리 상부 구조의 주된 공법은 칠 줄로 묶는 방식으로 보는 것이 타당하다.

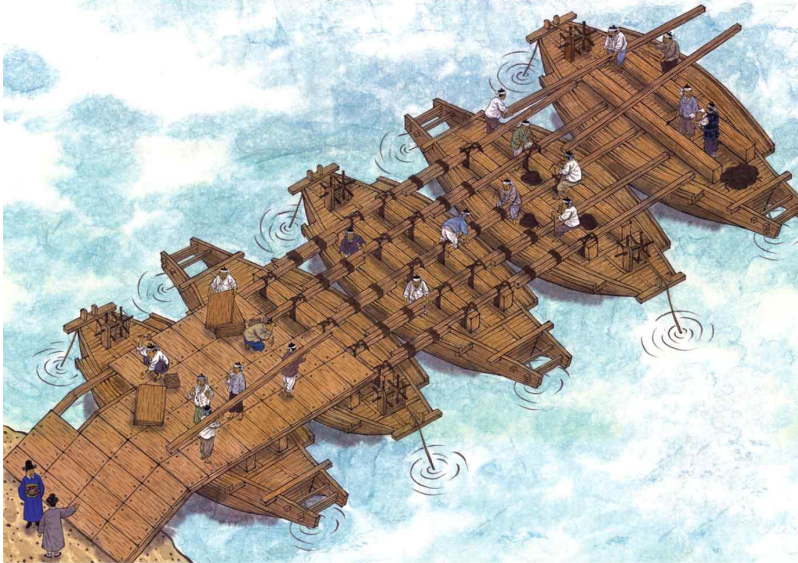


그림 11. 배다리의 건설 장면 (출처: 필자)

종량의 크기나 보가 견디어야 하는 하중 등을 고려할 때 못을 박아 결합하는 방법은 힘을 견디어 내는 데 무리가 있으며, 국가 기관인 주교사가 보를 비롯한 배다리 구성 부품들을 창고에 관리하면서 해마다 조립과 분해를 반복한다는 점에서 짜 맞추는 기법도 한계가 있다. 배다리는 필요할 때마다 가설하고 다시 분해하는 작업을 반복하는 임시 교량이므로 짜 맞추는 기법보다는 칠 묶음 방법이 더

방향이기 때문이다.

44 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日. “於兩縱梁相遇處, 相對鑿孔, 以椶簪插之, 則尤爲萬全矣.” (두 종량이 서로 맞닿는 곳에 구멍을 뚫고 빗장을 질러놓으면 더욱 안전하게 될 것이다.)

효율적이다. 배와 배 사이의 간격과 높이가 조금씩 다르기 때문에 한 번 분해한 종량을 다시 조립할 때는 정확한 위치를 찾아 배치하는 일이 만만치 않기 때문이다. 더불어 짜 맞춤보다는 첩 묶음 방식이 교각으로 동원한 조운선들을 다시 원래 상태로 복구하기 쉽다는 것도 고려했을 것이다. 짜 맞춤 기법에서도 나무 망치로 큰 압력을 가해 목재와 목재를 결합시키기 때문에, 한 번 결합된 것을 분해하는 작업 또한 만만치 않다. 이에 비해 첩으로 묶어 결합하는 방법은 쉽게 결합하고 분해할 수 있다는 장점이 있다. 〈그림 11〉은 정조 대 한강 배다리를 건설하는 공법을 설명하기 위해 여러 단계의 공사 장면을 한 장에 담은 상상도로 표현한 작품이다.⁴⁵

『주교지남』에서는 물이 새거나 부력을 상실하여 교배선 기능을 할 수 없는 배를 교체하는 상황을 가정한 경우를 언급하고 있는데, 이와 관련 지어 갑판 위에서 보를 결합하는 공법을 취하지 않은 까닭을 추론할 수 있다. 갑판 위에서 결합하는 공법은 교배선을 교체할 경우 이웃한 배 두 척의 상판을 모두 뜯어내

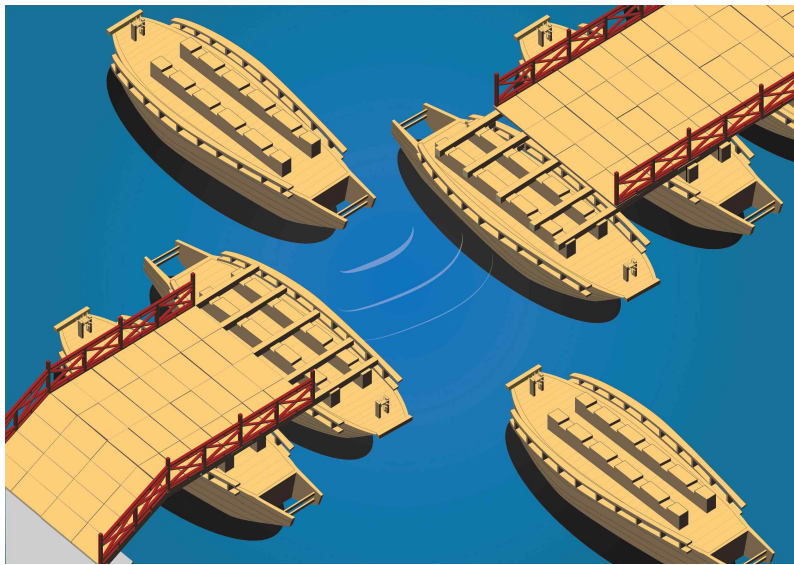


그림 12. 갑판 위 짜 맞춤 공법으로 가설한 다리의 교배선 교체 작업 (출처: 필자)

45 이 그림에는 보를 연결하는 장면, 보를 묶는 장면, 상판을 못질하는 장면을 동시에 작업하는 것으로 묘사하였으나, 실제로는 한 단계가 마무리 되어야 다음 공정으로 진행할 수 있다. 이 상상도는 필자의 간단한 스케치를 삽화가에게 의뢰하여 제작한 작품으로 필자에게 저작권이 있음을 밝혀둔다.

야하는 번거로움을 피할 수 없다[그림 12]. 이에 비해 배와 배 사이에서 보를 연결하는 공법은 한 척의 배와 다섯 개의 보가 하나의 모듈에 해당하기 때문에 인접한 두 배의 상판을 뜯어내는 번거로움 없이 고장난 배만을 교체할 수 있는 장점이 있다[그림 13].⁴⁶

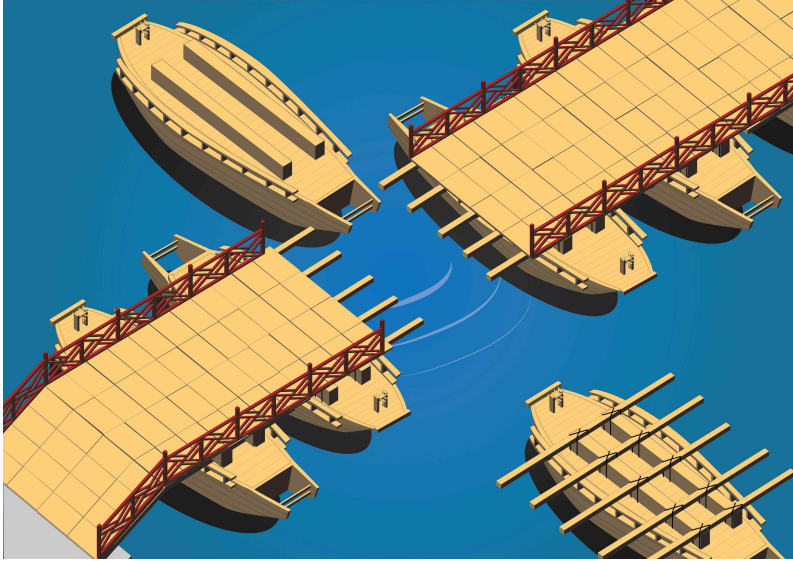


그림 13. '배 사이 침 뚫음 공법'으로 가설한 다리의 교배선 교체 작업 (출처: 필자)

4. 한강 배다리의 안전성

1) 가변형 선창 다리

노량진 나루터가 배다리를 놓을 최적의 장소임은 분명하지만 조수(潮水)의 영향을 받는 곳이어서 수위가 변한다는 문제가 있었다. 배다리의 시작과 끝 지점을 설계하는 데 해결해야 할 중요한 과제는 조위(潮位) 변화에 영향을 받는 않

46 『正祖實錄』卷37, 17年(1793) 1月 11日, “且大長而橫亘多船, 一船有頃, 解纜亦難.” (크고 긴 것을 가로로 여러 배에 뻗혀 있게 함으로써 배 한 척에서 탈이 발생하면 묶은 줄을 풀기가 또한 어려웠다.)

는 안정적인 선창(船倉) 다리 공법을 개발하는 것이다.⁴⁷ 노량진에 설치하는 배 다리는 밀물일 때는 선창보다 배다리 상부 구조가 높아지게 되고, 썰물일 때는 배다리가 선창과 같거나 오히려 낮아지게 되기 때문이다.

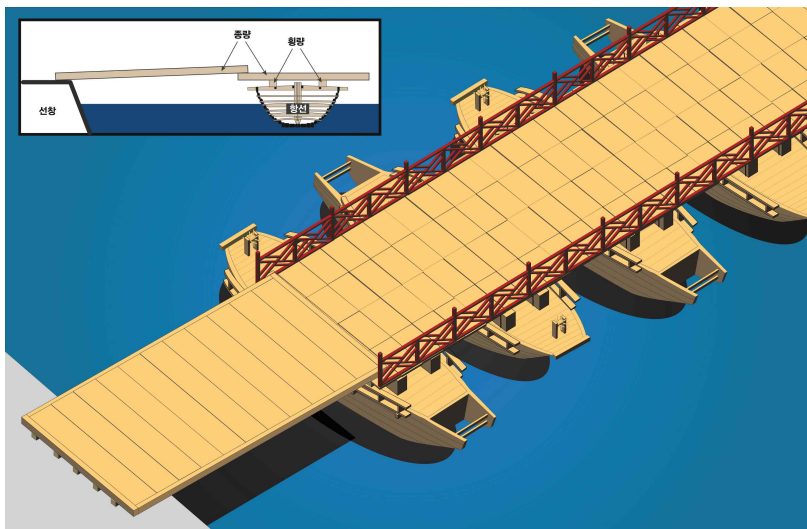


그림 14. 1789년 “주교절목”의 선창 다리 공법 (출처: 필자)

선창 다리를 만드는 구체적인 공법은 세 가지 방식으로 발전하게 되었다. 1789년 “주교절목”에서 제일 먼저 제안한 방식은 선창과 배 사이를 판자로 걸쳐 놓은 간단한 방식이었다. 선창의 높이가 자주 변화하는 상태에서 선창 다리의 경사를 최소화하려면 선창과 항선 사이의 거리를 되도록 길게 유지해야 한다. 하지만 선창 다리의 길이가 길어질수록 판자가 견디어야 하는 하중 또한 증가하므로 붕괴될 우려가 있다. 또한 이 방식은 선창과 배 사이를 걸쳐놓은 판자를

47 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日, “露梁津形, 北岸頗高而南岸平低, 爲一望沙場, 南北岸形, 已是不同, 則兩岸相對而高云者, 固誤矣. 且潮水往來, 水面之高下, 朝夕變幻, 則舟橋亦當隨而高下, 中流平穩而深云者, 亦誤矣, 深字尤無意味,” (노량 나루터의 지형은 북쪽 언덕은 높고 남쪽 언덕은 평편하고 낮으며 한결같이 모래사장으로서 되어 남쪽 언덕과 북쪽 언덕의 형세가 다른데 양쪽 언덕이 마주 대해 높이 솟아있다고 한 것은 실로 잘못이다. 또 조수의 왕래로 인하여 수면의 높낮이가 조석으로 변하니 배다리 역시 응당 높아졌다 낮아졌다 하게 되는데, 강 북편의 흐름은 평온하면서도 깊다는 말 또한 잘못이며 깊다고 한 말은 더욱 의미가 없다.)

결속하는 공법이 불분명하여 판자가 흔들거리며 이탈할 가능성이 크다[그림 14].

『주교지남』에서는 판자 방식 선창 다리의 위험성을 경고하였으며, 부판(浮板) 방식을 새로운 대안으로 제시하였다. 부판은 오늘날 군부대에서 사용하는 리본교의 부유 구조체에 해당하는 것이다. 부판의 부력이 매우 약해 안전에 문제가 있을 것이라는 반대론자들의 우려에 대해 『주교지남』에서는 다음과 같이 부력의 원리를 들어 반박하고 있다.

어떤 사람은 말하기를 ‘배다리는 많은 배를 서로 연결하여 그 세력이 서로 버티기 때문에 발로 차고 밟아도 움직이지 않지만, 지금 이 부판은 단순하고 머리가 가벼운 만큼 큰 다리로 내리누르고 많은 말이 밟으면 떴다 잠겼다 하지 않을 수 있겠는가?’라고 한다. 하지만, 이것은 그렇지 않다. 대개 물에 뜨는 이치는 물체의 밀창이 클수록 물의 압력을 많이 받는다. 지금 부판은 수십 개의 큰 판자를 가로로 연결하여 물에 띄워 놓은 만큼 그 물의 힘을 받는 것은 몇 만 근 정도가 아니다.⁴⁸

부판을 선창에 연결해두기 위해서는 너무 과하지도 너무 약하지도 않는 힘으로 지속적으로 당겨 주어야 한다. 『주교지남』에서는 중력을 활용하여 부판을 선창에 결속하는 방식으로 이 문제를 해결하였다. 이 방식은 부판의 머리에 매어둔 굵은 밧줄을 Y자 형태의 두 개의 기둥에 돌을 담은 주머니에 걸어 선창 다리 쪽으로 끌어당기게 하고, 부판의 반대쪽은 굵은 밧줄로 향선의 가롱목에 동여매는 구조이다. 추에 해당하는 돌 주머니는 배다리의 상부 구조에서 전해지는 하중이 증가할 때는 부판이 물에 가라앉지 않을 정도로 무거워야 하지만, 그렇다고 너무 무거워서 썰물 때 수면이 내려감에 따라 부판이 함께 내려가지 못하는 경우가 발생해도 곤란하다[그림 15].

먼저 Y형태의 큰 나무 두 그루를 베어다가 두 개의 기둥을 만들어 선창 다리의 좌우 머리에 마주 세워 놓고 굵은 밧줄로 선창 다리와 맞닿아 있는 첫 번째 배의 가롱목에 동여 맨다. 다음은 아주 굵은 밧줄로 부판 머리를 매고 세워 놓은 기둥의 Y자 사이에 줄을 올려 걸고 밧줄 끝에 큰 주머니를 달아 많은 돌덩이를 주머

48 『正祖實錄』, 같은 기사, “或曰: 舟橋百舟相維, 勢力相撐, 故蹴踏而不動. 今此浮板, 勢單而頭輕, 以大橋壓之, 萬馬踏之, 能不乍沈而乍浮乎?云爾, 而是則不然. 凡浮法, 其底愈大而水力愈撐. 今此浮板, 橫聯數十大板, 浮之水上, 則其倚水力也, 不啻萬勻.”

니 속에 채워서 늘어뜨려 추로 만든다. 추의 무게는 반드시 늦춰지지도 않고 끌어당기지도 않게 하는 것을 한도로 한다. 늦추어지지 않게 한다는 것은 사람과 말이 선창을 밟아도 부판이 조금도 잠기지 않음을 말함이고, 끌어당기지 않는다는 것은 부판이 조금도 저절로 들리지 않음을 말한다.⁴⁹

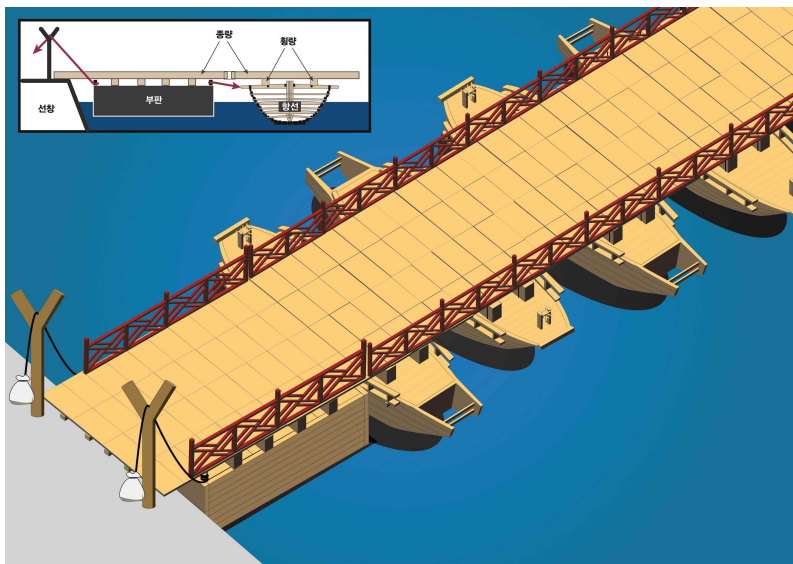


그림 15. 1790년 『주교지남』의 선창 다리 공법 (출처: 필자)

부판 결속 방식의 선창 다리는 일제 강점기 군산 내항에 설치한 부잔교(浮棧橋)에서 폰툰에 걸쳐 놓은 도교(渡橋)를 일정한 압력으로 눌러 주는 방식과 동일하다. 군산 부잔교는 일명 ‘뽕 다리 부두’로서 일제가 호남 평야의 미곡을 수탈하기 위하여 군산 내항에 설치한 시설이다.⁵⁰ 군산 부잔교의 구조물은 도교에

49 『正祖實錄』, 같은 기사, “先取丫頭大木二株, 削爲兩柱, 對立豎樹于檣橋左右頭之地, 以大纜縛之舟橋船 之駕龍木, 次以極大纜繫浮板之頭, 上掛于樹柱丫處, 次於纜端繫一大網囊, 次取許多石塊, 盛于囊中, 用作垂鍾, 而鍾之重, 須以勿放勿引爲度. 勿放者謂人馬踏檣, 而浮板不能沈入一分也.”

50 일제는 화물 전용 철로를 해변까지 연결하고 대형 화물선에 선적할 수 있도록 부잔교 시설을 군산 내항 곳곳에 설치하였다. 군산 부잔교는 일제의 식민지 수탈과 관련하여 중·고등학교 한국 지리와 한국사 과목에서 오랫동안 다루고 있는 내용이나 구체적인 원리를 소개하는 내용은 없었다. 박성신, “군산의 근대 창고 건물 현황 및 산업 유산으로서의 가치에 관한 연구”, 『건축역사연구』 20:6 (2011), 21-39 중 30-31.

걸어든 쇠사슬을 콘크리트 구조물 상단에서 방향을 전환한 후, 콘크리트 추를 달아 중력을 이용하여 도교를 당겨 올리도록 설계되었다. 이 때 추의 무게는 정 약용의 돌 주머니와 마찬가지로 폰툰을 가라앉게 하지 않을 정도로만 눌러줄 정도로 적당히 무거워야 한다. 너무 무거우면 썰물 때 수면이 내려감에 따라 폰툰과 함께 도교가 내려가지 못하고 공중에 떠있게 된다. 반대로 추가 너무 가벼우면 도교가 폰툰을 과하게 누르게 되어 폰툰이 물에 잠기게 된다. 〈그림 16〉은 군산 내항 부잔교의 원리를 필자가 도면으로 정리한 것이다.

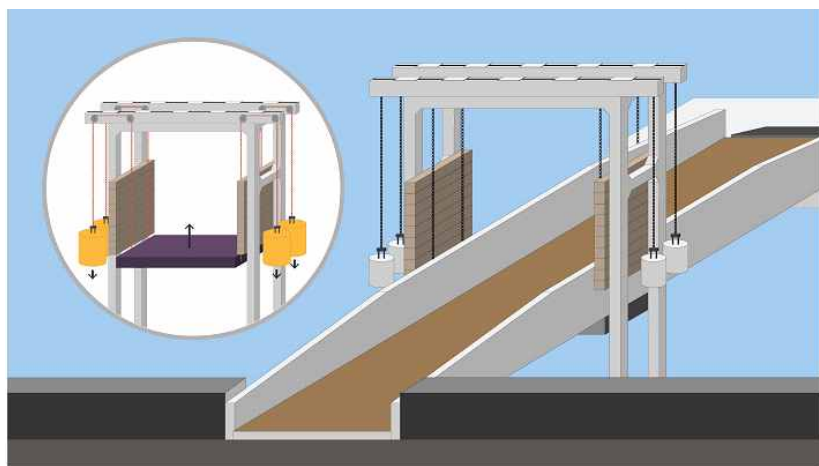


그림 16. 일제 강점기 군산 내항 부잔교(뜰다리 부두)의 원리 (출처: 필자)

선창 다리를 만드는 세 번째 공법은 주교사에서 최종적으로 선택한 공법으로 요철 결합 방식이었다. 요철 결합 공법은 널다리의 바닥판을 받치는 종보(=종량) 5개의 머리를 배의 종보 머리에 연결시켜, 요철(凹凸) 모양으로 깎아 서로 잇대서 철심을 박아 자유자재로 구부러지고 펴지도록 한 것이다.⁵¹ 요철 결합 방식은 조립과 설치가 간단하다는 장점은 있으나 요철 부위에 심한 하중에 전

⁵¹ 『正祖實錄』 卷30, 14年(1790) 7月 1日, “略倣弔橋之制, 造成板橋, 而縱排縱梁, 橫鋪廣板, 一如橋制. 以板橋縱梁之頭, 接於項船縱梁之頭, 而削爲凹凸之形, 相接插鑿, 如三排目制樣, 以爲圓轉屈伸之地.” (대략 조교[吊橋]의 제도를 본떠 널다리를 만들되, 세로로는 종보를 배치하고 가로로는 넓은 널빤지를 깔아 다리 모양처럼 똑같이 만든다. 그리고 널다리의 종보 머리를 항선의 종보 머리에 연결시키되, 요철 모양으로 깎아 서로 잇대서 비녀장 지르는 것을 마치 삼배목 궤도와 같이 하여 자유자재로 구부러지고 펴지도록 한다.)

달되기 때문에 요철의 파손이 우려되며 한 번 사용한 선창다리를 다음 해에 재 활용하기는 힘들었을 것이다.

사실 두 번째 부판 방식이 요철 결합 방식에 비해 더 안전한 방식이었다. 『주교지남』에서는 부판을 모듈 별로 분해·조립하여 보관하고 조립하는 전략까지 상세히 안내하였으나 비용과 효율성 문제를 고려하여 세 번째 요철 결합 방식으로 최종 시공된 것으로 보인다.⁵²

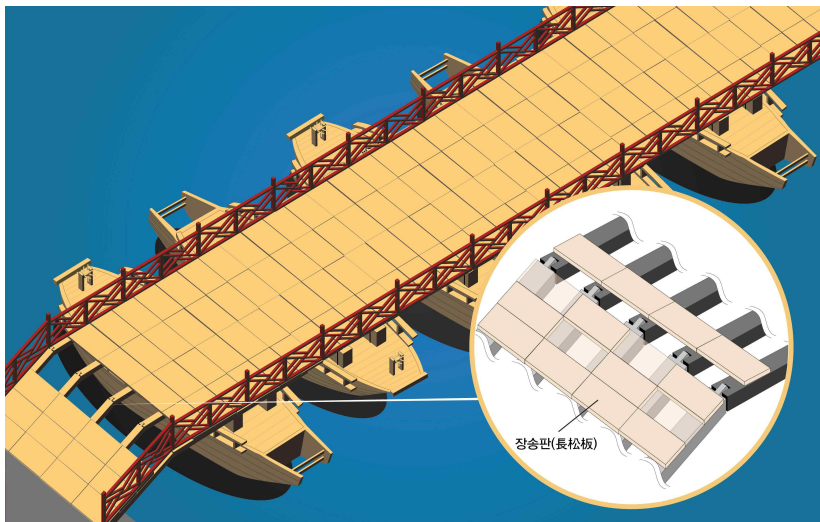


그림 17. 1793년 “주교사개정절목”의 선창 다리 공법 (출처: 필자)

2) 연성 구조체

노량진 나루터는 조류의 영향을 크게 받는 곳이기 때문에 밀물과 썰물 때마다 조류의 방향이 바뀌게 된다. 배의 앞과 뒤를 서로 엇갈려 배열한 상태에서, 닻을 감아 올리고 풀어 내리는 장치인 호롱이 설치된 배의 앞부분에서만 닻을 내

⁵² 『正祖實錄』, 같은 기사, “若其浮板轉運之道, 就於板底, 量宜作六輪或八輪, 則不過五六人挈之, 可以登岸矣. 又若以體大, 藏舂之不便爲難, 則分爲兩隻或三隻[如帳革帳分合], 臨時更合, 何足謂之弊也.” (그리고 부판을 이동하는 방법은 부판의 밑장에다 바퀴를 여섯 개나 여덟 개쯤 달면 5, 6인이 끌어도 언덕에 올릴 수 있을 것이다. 또 물체가 커서 보관하기가 불편한 것이 문제라면 그것을 두 척, 혹은 세 척으로 나누었다가 [가죽 과녁을 나누었다 합쳤다 하는 것과 같이 한다] 필요할 때 다시 합친다면 무엇이 문제이겠는가?)

릴 경우 조류 방향이 바뀔에 따라 배를 지지하는 닻줄이 서로 달라 기준점이 일치하지 않는 문제가 발생한다. “노량주교도섭도(鷺梁舟橋渡涉圖)”를 보면 한 척의 배에서 두 개의 닻을 내리는 방식으로 이러한 문제를 해결하였음을 알 수 있다[그림 18].⁵³

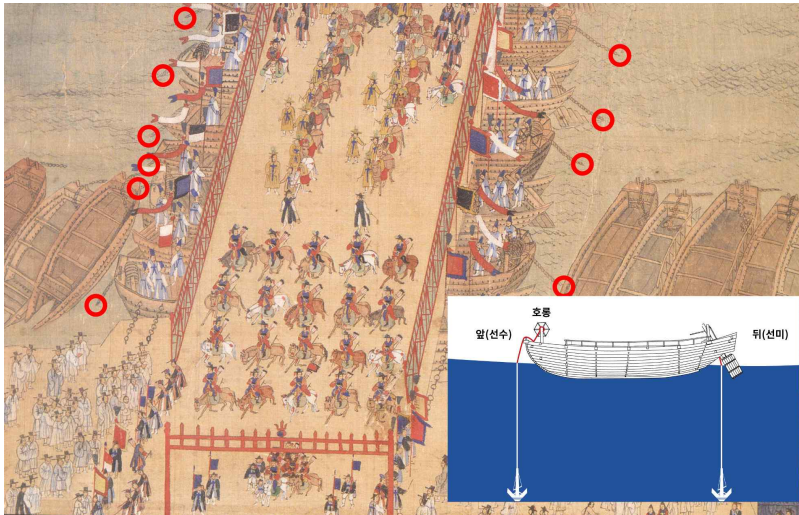


그림 18. 두 개의 닻줄로 고정된 교배선 [출처: “華城陵幸圖屏風” 중 漢江舟橋還御圖 (고궁박물관 소장, 창덕 6409).]

하지만 배마다 내린 두 개의 닻줄만으로 배가 흔들리는 것을 막을 수는 없다. 오늘날 대형 선박과는 달리 조운선은 좌우로 출렁거리는 롤링(rolling)은 물론 머리와 꼬리가 출렁거리는 피칭(pitching)이 심하기 때문이다. 현대 교량은 교각과 교각 사이보다는 교각 위에서 보를 결합하고 있지만 이것만으로 교량의 안전성이 보장되는 것이 아니다. 교각과 교각 사이가 멀어질수록 그 사이에 걸쳐 놓은 보는 심한 응력을 받기 때문이다.

1994년 성수대교 붕괴 사고에서 보듯이 교각과 교각 사이 한 가운데가 구조적으로 가장 취약하다.⁵⁴ 보의 상단부에서 발생하는 압축 응력과 하단부에서 발

⁵³ 정리소에서는 의궤와는 별도로 정조의 화성 행차를 8폭의 병풍으로 묘사한 “華城陵行圖屏”을 제작하였는데, 제8폭 그림인 “鷺梁舟橋渡涉圖”는 “주교도”보다 더 상세하게 배다리의 최종 결과물을 표현하였다.

⁵⁴ 1994년 10월 21일 일어난 성수대교는 붕괴 사고는 10번과 11번 교각 사이 120미터에서 발생하

생하는 인장 응력을 모멘트가 가장 큰 보의 중간 부위에서 견뎌내지 못하면 교량은 파괴되고 만다. 그렇다고 무조건 교각과 교각 사이를 촘촘하게 할 수는 없다. 교량의 안전을 위해 교각을 촘촘하게 설치할수록 공사비는 감당할 수 없을 정도로 증가하기 때문이다. 따라서 교량 설계는 안전을 해치지 않는 선에서 교각을 최소로 건설하는 방향으로 이루어진다.

배다리 역시 이러한 교량 설계의 원칙에서 크게 벗어나지 않는다. 배들을 틈이 없을 정도로 촘촘하게 나열하면 가장 안전한 배다리가 되지만, 많은 수의 배를 동원해야하기 때문에 많은 비용이 발생하게 된다. 결국 배다리 설계의 핵심은 교각으로 동원하는 배의 수를 최소화하되, 배 사이에 걸쳐 놓은 보들이 상부 구조의 하중을 충분히 견딜 수 있도록 설계하는 것이다. 규모가 매우 큰 배들을 활용할 수 있다면 일반 교량과 다름없는 튼튼한 배다리를 만들 수 있다. 하지만 이러한 튼튼한 배다리는 예비 부력이 충분한 대형 선박을 교각으로 사용해야 하고, 하중에 따른 압축 응력과 인장 응력을 감당할 수 있는 강철로 만든 형강(beam)을 보로 사용해야 한다.⁵⁵

정조 대 한강 배다리에 적용된 배와 배 사이에서 보를 결합하되 짚으로 묶는 공법은 한강 조류에 의해 흔들릴 수밖에 없는 교량 하부 구조를 고려할 때 매우 합리적이다. 짜 맞춤 공법은 처음에는 튼튼하게 결합시킬 수 있는 것처럼 보이지만 상부 구조의 하중과 하부 구조가 흔들리면서 받는 복잡한 내부 응력이 누적될 경우 빠져거리면서 결국 파손되는 것을 피할 수 없기 때문이다. 한강 배다리는 뼈대에 해당하는 보의 재료가 철강이 아닌 목재이기 때문이다. 목재 역시 탄력성이 있어 완충 작용, 반발 작용, 진동 감쇠 작용을 어느 정도 갖지만 상부 구조의 엄청난 하중과 흔들리는 하부 구조를 견디어 내는 인장 강도에는 한계가 있다.⁵⁶ 오늘날 교각에 사용하는 형강과는 달리, 목재 보는 강(強)하지만 강(剛)하지 못하기 때문이다. 즉 지속적인 응력을 받으면 변형되면서 부러지는

였다. 사고의 원인은 교량 상부 구조의 하중을 분산시키는 이음새 연결이 부실하여 발생한 피로 균열이 누적되어 트러스(truss) 48미터가 붕괴된 것이다.

⁵⁵ 일반 교량과 다름이 없는 튼튼한 배다리의 사례는 교량 건설의 대가 구스타브 린덴술(*Gustav Lindenthal, 1850-1935*)이 구상한 허드슨 강의 배다리를 들 수 있다. 이 배다리는 갑판 위에서 양쪽의 트러스 구조 모듈을 결합하는 방식으로 설계되었는데, 배의 갑판 위가 바로 교각 상단이 된다. 결국 구스타브 린덴술의 배다리는 교각을 대형 선박으로 바꾸었을 뿐 일반 교량 설계와 큰 차이가 없다[헨리 페트로스키, 문은실 옮김, 『기술의 한계를 넘어』 (생각의 나무, 2009), 60.]

⁵⁶ 철강의 인장 강도는 $4,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도이고 뱃나무의 인장 강도는 $742\text{kg}/\text{cm}^2$ 수준이다.

“태강즉절(太剛則折)”의 재료인 것이다.

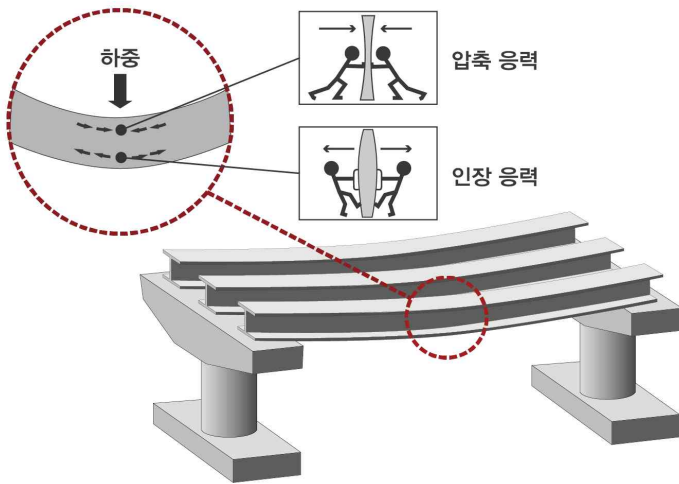


그림 20. 거더가 받는 압축 응력과 인장 응력. (출처: 필자)

목재로 만든 보는 하단부에서 발생하는 인장 응력에 특히 취약하다. 조운선들을 교각으로 활용한 조선 후기의 배다리는 흔들리는 하부 구조가 상부 구조의 불규칙한 하중을 견디어야하는 연속 구조체이다. 따라서 오늘날 관점에서 배다리의 설계를 평가한다면 외부 충격이 가해질 때, 충격에 저항하기보다는 구조물이 변형될 수 있도록 함으로써 대형 참사를 방지하는 내진 설계 철학(seismic design philosophy)으로 접근해야 한다.⁵⁷

구조물의 변형은 구조물의 형태와 하중에 의해서 결정된다. 배다리 구조체는

⁵⁷ 내진 설계 철학은 내진 설계의 대원칙으로 지진에 대하여 구조물을 어느 정도로 보호할 것인가를 결정하는 원칙이다. 1980년대 미국 캘리포니아 엔지니어 협회에서 채택한 내진 설계 철학은 세 가지로 정리할 수 있다[김장훈, 『상식과 지식으로 버무린 내진 설계 철학』(예영커뮤니케이션, 2008), 100-102.].

표 5. 내진 설계 철학의 개요

지진 세기	보호 정도	목적
약하거나 중간	손상 방지	구조물의 보호
강한 지진	손상 허용	수리 후 사용 가능
아주 강한 지진	파손 허용	붕괴 방지(생명 보호)

사람이 건너기 시작하면서 출렁거리기 시작하여 36척 교배선의 변위는 시간에 따라 각각 다르게 변화하는 다자유도(multi degree of freedom) 구조물이다. 출렁거리는 구조체에서는 관성력과 감쇠력, 복원력이 복잡하게 작용하기 때문에 이를 철저히 해석한다는 것은 오늘날의 내진 설계 기술로도 쉽지 않은 일이다. 한강 배다리를 설계할 때 이렇게 복잡하게 계산했을 리는 없었겠지만, ‘강성(剛性)’, ‘구조적 연속성’, ‘탄성 설계(elastic design)’, ‘소성 설계(plastic design)’와 같은 공학적 측면을 평가할 때 한강 배다리는 매우 유연한 구조체임을 확인할 수 있다.⁵⁸

철 묶음 공법은 배다리 상부 구조(황판, 난간, 잔디)의 고정 하중과 사람과 말들이 다리를 건너는 동안 변화하는 활하중은 물론 배다리 하부 구조의 진동을 흡수할 수 있도록 연결 부위가 변형될 수 있다. 철 묶음을 통해 배다리 시스템이 상부 구조의 불규칙한 하중과 하부 구조가 흔들리는 복잡한 응력 변형(應力變形, stress strain)에 반응하는 연성 구조물(ductile structure)로 거듭날 수 있다.

배다리 전체가 연성 구조물로 작용하기 위해서는 구조 부재의 경계에 강성(剛性)과 구조적 연속성을 부여해야 한다. 한강 배다리는 교각 역할을 하는 배와 보 5개를 하나의 모듈로 구성하여 강하게 결합한 후, 모듈과 모듈 사이(배와 배 사이)를 느슨하게 결합하는 방식으로 응력 변형이 배 사이에 집중되도록 유도한 후 에너지를 소산시키는 방식으로 강성을 부여할 수 있었다. 보는 엇갈려 이웃한 배의 가용목 위에 걸쳐있기 때문에 배와 배 사이에 놓은 보들은 서로에 의지해 이중으로 묶여있는 셈이고, 이들 사이의 마찰 면적이 커 에너지를 소산시킬 수 있었다.⁵⁹

배다리는 극단적인 파괴 상태를 전제로 설계한 것은 아니지만, 최악의 경우 특정 부위로 소성 힌지(plastic hinge)를 유도할 수 있다. 보와 보를 너무 강하게 결합하여 부러지는 것보다는 느슨하게 결합하여 흔들리게 하고, 최악의 경우 결합 부위 철 끈만 끊어지도록 하는 것이다. 극단적인 상황에서 철 끈은 보가 부

58 소성 설계란 구조물의 일부에 소성 변형이 생기더라도 그것이 어느 한도 이상으로 진행하지 아니하도록 하는 내진 설계 기법이다. 소성이 붕괴되거나 파괴되지 않는 하중의 한계치를 구하여, 이것을 기준으로 하여 설계한다.

59 이는 서로의 자유도를 서로가 구속하게 하는 연속보(continuous beams) 개념으로 이해해도 무난하다. 이는 서로 연결은 되어 있으나 상호 신뢰를 바탕으로 각자의 독립성을 유지하면서 분리되어 있는 ‘이완 결합 체제(loosely coupled system)’ 조직과도 같은 원리이다.

러지는 것을 막기 위해 미리 끊어지게 된다. 이는 전기 장치와 회로에 설치한 퓨즈가 과전류가 흘렀을 때 회로를 보호하기 위해 끊어지는 것과 같은 원리이다.

5. 맺음말

본 연구에서 정리한 바와 같이, 조선 후기 정조 대 한강 배다리는 국가 건설 기관인 주교사를 설립하고, 백성들의 배를 동원하여 피해를 주지 않도록 설계함은 물론, 많은 인원이 동시에 건널 수 있는 있는 교량 가설 기술을 『주교지남』, “주교사개정절목”이라는 매뉴얼로 정리한 후, 해마다 교량 건설 작업에 활용했다는 점에서 기술사적으로 큰 의미가 있다.

조선의 치밀한 기록 정신은 배다리 기술 분야에도 예외가 없었다. 『조선왕조실록』에는 배다리의 제도에 관해 치열하게 고민한 흔적이 기록되었으며, 왕실의 예산으로 발행된 『원행을묘정리의궤』에 한강 배다리 건설과 관련된 기록을 남김으로써 유사한 프로젝트를 기획할 때 참조할 수 있도록 하였다. 『주교지남』과 『주교사절목』과 같은 책들은 실무자를 위한 기술 매뉴얼로 손색이 없을 정도로 꼼꼼하게 관련 정보를 기록하고 있다. 또, 『승정원일기』와 『홍재전서』에서 확인할 수 있는 배다리 관련 기록을 통해서도 정조가 얼마나 배다리 설계에 관심을 가졌는가를 확인할 수 있다. 이처럼 배다리와 관련된 다양한 기록이 있음에도 불구하고 그 동안 과학계나 공학계에서 배다리의 구조와 건설 기술에 관한 깊이 있는 연구 성과가 거의 없었던 것은 실용적인 연구를 중시하는 풍토에서 과거 한강 배다리의 구조에 대한 연구에 집중할 학자가 거의 없었기 때문이다.

본 연구의 의의는 조선 후기 정조 대 한강 배다리와 관련된 서지학적 정보를 정리한 후, 배다리의 공법을 상부 구조와 하부 구조로 나누어 공학적으로 접근한 점이다. 배다리와 관련된 연구 성과물은 기술사적인 측면 뿐 아니라 정조와 정약용이 동시에 관련되어 있다는 점에서 역사, 과학, 수학, 기술 분야를 융합하는 창의 인재 교육 측면에서도 의미가 있다. 앞으로 여러 학문이 융합된 관점에서 한강 배다리와 관련된 다양한 연구가 활성화 되고, 실험을 통해 배다리의 구조를 과학적으로 분석하는 깊이 있는 후속 논의가 계속되기를 기대한다.

(투고: 2017년 3월 7일, 심사 완료: 2017년 4월 17일, 게재 확정: 2017년 4월 23일)

The Structure of the Han River Pontoon Bridge in Late Joseon Period

KIM Pyoung-Won (Incheon National University)

Abstract. This article investigates the structural characteristics of the Han river pontoon bridge designed by Jeong Yagyong 丁若鏞 (1762-1836) and constructed in 1795, from a contemporary engineering perspective. To this end, this article thoroughly examines a set of focal texts concerning the construction of the pontoon bridge, including the *Jugyo jeolmok* 舟橋節目, *Jugyojinam* 舟橋之南, and *Jugyo sagaejeong jeolmok* 舟橋司改定節目. This analysis shows that the Han river pontoon bridge had the same structural characteristics as the modern girder bridge. The Han river pontoon bridge was designed to have a structure of multi-degree of freedom (ductile structure) so that it could resist complex stresses, by tying the beam with strings. The pier bridge was designed using the same mechanism as one that installed in the Gunsan Port during the Japanese colonial period.

Keywords. Han river pontoon bridge, Jeong Yagyong 丁若鏞, *Jugyo jeolmok* 舟橋節目, *Jugyojinam* 舟橋之南, *Jugyo sagaejeong jeolmok* 舟橋司改定節, girder bridge