

## 구조물의 붕괴에 대한 사례 연구 Case Histories and the Study of Structural Failures



정 영 수\*

시공중인 행주대교의 붕괴와 함께 성수대교, 삼풍백화점의 붕괴 등 연속된 인재들을 우리에게 너무나 엄청난 손실을 초래함은 물론 우리의 자세에 대해서도 많은 것을 일깨워 주었다. 따라서 부실공사추방등 사회 각층에서의 다양한 변화 및 반성하는 새로운 각오들을 다짐하여 왔다. 그러나 과연 우리는 후배 혹은 후세 기술자들에게 남길 수 있는 지난 붕괴사고들에 대한 상세한 기록을 유지하고 있는가? 아니, 관련 공학지에 상세하게 발표한 적이 있는지 반문하고 싶다.

본 소고는 IABSE의 Structural Engineering International에서 연재되고 있는 Lessons from Structural Failures 중의 Vol. 4, 1995의 기사인 "Case Histories and the Study of Structural Failures"로서 최근의 우리들은 혹시나 지난 연속적인 인재들을 이제는 서서히 잊어만 가는 것이 아닌가 하는 우려 속에 번역소개한 것이다. 대소를 불문한 각종 사고에 대한 상세한 원인분석 등의 유지는 우리 기술자들의 책임임은 물론 우리의 기술발전에 다소나마 기여할 수 있으리라 생각하여 번역소개한 것이다.

\* 정희원, 중앙대학교 토목공학과 교수

### 요약(Summary)

구조물 붕괴사례에 대한 연구는 항상 공학관련 문헌에 한 부분이 되어 왔으나 교량기술의 향상에 기여할 수 있었던 1840년대와 1930년대 사이에 발생했던 여러 붕괴사례들은 기술혁신이 진행되면서 큰 관심사는 되지 못했던 것 같다. 끊임없이 향상되었던 해석이론 및 구조적 규모면에서 커다란 도약을 성취하였던 이 시대에도 몇몇 중요한 교량 붕괴사례를 목격하였다. 특히 Tacoma Narrow Bridge의 붕괴가 발생한 후 구조물 붕괴사례에 대한 연구는 구조설계와 시공분야에서 공학적인 통찰력과 판단력을 위한 중요한 자료로 인식되어지게 되었다.

### 1. 서론(Introduction)

공학에서 가장 오래된 고서로 간주되는 "the Ten Books on Architecture"에 따르면 Vitruvius는 시공자인 Paconius가 커다란 직사각형의 석재를 새로운 방법으로 운반하는 시도에서 경험했던 중요한 문제점을 기술하고 있다[1,2]. Chersiphron은 기둥으로 이용하기 위한 큰 원통

형의 석재를 운반하는데 석재의 평평한 양단에 회전을 위하여 만든 주축을 황소들의 멍에처럼 앞으로 돌출된 목재뼈대구조물에 맞도록 만들었다. 이 방법은 주축이 부담하는 무게로 인하여 운반도중 수레바퀴가 연약지반에 빠질 수도 있으므로 수레위로 무거운 석재를 들어 올리는 필요성을 방지하였다. 직사각형 모양의 구조물은 물론 Chersiphron의 방법으로 운반할 수 없었다. 그래서 그의 아들 Metagenes는 석재 양단에 회전을 위한 주축의 구멍을 만들고 황소의 멍에장치 모양에 맞도록 하는 목재바퀴를 제작하는 방법으로 수정하였다.(그림 1a)

고대 그리스에서 Selinus시의 한복판에 서있는 아폴로상의 주춧돌로 사용하기 위한 커다란 직사각형의 석재를 운반하는 공사가 있었다. 석재의 양단에 회전축의 구멍을 내는 작업은 마무리공사에서도 없앨 수 없는 석재표면에 흠을 내는 것이었으므로 경쟁력있는 시공자인 Paconius가 새로운 대안을 제시하였다. 그의 생각은 운반을 위한 뼈대 및 멍에장치를 제거하여 석재를 손상시키는 원인을 방지했을 뿐만 아니라 운반장치의 폭도 줄여 도시의 좁은 도로를 통하여 보다 더 적절하게 운반할 수 있게 하는 것이었다. 비록 그가 Metagenes의 축적된 경험은 맞보지 못했지만 Paconius는 보다 빠르고 값싸게 운반할 수 있으리라는 새롭게 고안된 방법을 제시하여 계약을 성취하였다.

Vitruvius가 일화에서 말하기를 그림 1b에 보여지듯이 Paconius는 직사각형의 석재둘레로 실패 모양의 원형틀을 제작하면서 확실한 자신감을 갖

고 일을 진행하였다. 그는 이 실패둘레에 줄을 감아 채석장에서 동상위치까지 황소들을 이용하여 당기게 하였다. 그러나 막상 운반하였을 때 Paconius는 이 새로운 운반장비를 직선으로 진행시키는 것이 상당히 어려우며 무거운 짐은 길에서 자주 방향을 바꾸게 된다는 것을 알게 되었다. 그리고 이러한 현상이 발생할 때마다 길 가운데로 석재의 방향을 바꾸는데 상당한 노력과 시간을 소모하였다. 결국 Paconius는 잘못됨을 인정하고 좌절의 아픔을 겪어야 했다.

Vitruvius는 실패사레연구의 하나로써 Paconius의 일화를 말하고 있다. 그리고 이것은 전보다 향상된 기술인 것으로 보이는 모험적인 설계를 수행했던 많은 기술자들에게 자체로서 뿐만 아니라 비유적으로도 알려지고 있는 실패사레의 이야기이다. Vitruvius는 기술 및 설계의 진일보 및 혁신에 반대하였던 것이 아니라 과거 경험으로부터 약간의 벗어남이 예견할 수 없었던 새로운 형태의 실패가능성을 내포하고 있는 변경된 시스템을 만들었다는 것을 인정하자는 것이었다. Vitruvius가 Paconius일화를 언급한 이래로 이천년동안 공학적인 설계와 시공에 대한 사려깊은 많은 기술자들이 구조물을 계획하면서 반복되는 많은 실패사레들을 기록했는 이것은 시행착오의 형태가 얼마나 난해하고 잠행성인가를 새로운 세대들이 이해할 수 있게 돕기 위한 것이었다.

## 2. 갈릴레오의 사례(An Example from Galileo)

Vitruvius의 기록 후의 17세기에는 갈릴레오가 르네상스시대의 공학도들이 경험하고 있었던 문제점들에 관한 자세한 이야기를 그의 초기 저서인 "Dialogues Concerning Two New Sciences"[2, 3]에 기술하였으며 당시는 작은 구조물들의 성공적인 운반사례들 보다 기하학적으로 규모가 방대해진 오벨리스크나 선박같은 구조물들을 파괴위험없이 운반하기 위하여 특별한 주의를 요하던 시기로 알려져 있었다. 이러한 구조적 파괴들은 기하학적만으로는 설명할 수 없었다. 그래서 갈릴레오는 크고 작은 동물들의 뼈를 예로 제시하면서 자연적인 구조물들은 기하학적 균형을 엄격히 유

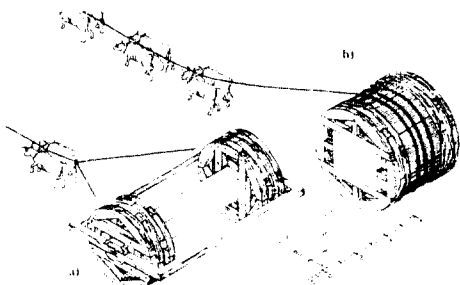


Fig. 1 Two ancient schemes for moving large piece of stone : a) that of Metagenes : b) that of Paconius [16]

지하는 것은 아니며 기하학적인 균형이외에 힘의 원리를 이해해야 한다고 제안하였다.

오벨리스크나 선박의 파괴들에 관한 예들이 충분하지는 않았지만 사람들이 파괴를 방지하기 위해 고심하고 노력하였음에도 불구하고 발생하였던 심각한 파괴사례들의 이야기를 갈릴레오는 반복하였다. Venetian 작업장에 보관되고 있는 대리석 기둥에 관한 일화가 있었다. 갈릴레오에 의하면 무거운 기둥은 두 지점에 의해 지지되고 있었으며 이는 오늘날 그림 2에 보인 바와 같이 단순보로 설명될 수 있다. 한 인부가 이것을 보면서 큰 오벨리스크나 선박이 자체의 무게로 인해 균열이 발생하고 파괴되는 경향을 생각하면서 발생할 수 있는 파괴를 방지하기 위해 중앙점에 세 번째의 지지점을 첨가하자고 제안하였다. 누구나 이야기하는 아주 훌륭한 아이디어는 생각해 보았을 것이고 세 번째 지지점을 그림 2에서와 같이 첨가하게 되었다. 이러한 예방조치가 취해짐으로써 대리석 기둥의 파괴에 대한 우려는 사라지게 되었으며 작업장의 구석에 필요로 할 때까지 안전하게 보관할 수 있으리라고 생각하게 되었다.

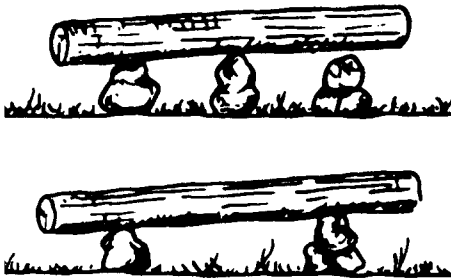


Fig. 2 Galileo's marble column : top, with modified support : bottom, as originally supported

그러나 몇 달뒤에 작업장의 구석에 보관한 기둥의 주위를 산책하던 사람에게 의해 기둥이 두동강이 난 것이 발견되었다. 파괴를 방지하기 위한 예방조치가 취해졌음에도 불구하고 그림 3과 같이 우려했던 사고가 발생한 것이다. 갈릴레오는 심사숙고 끝에 보강될 것이라 생각되었던 추가 지지점의 첨가로 인한 설계변경이 사실상의 파괴를 일으킨 것으로 설명했다. 기둥을 처음과 같이 두 개의 지지점 상태로 보관하였더라면 실제로 이러한 붕괴

는 결코 발생하지 않았을 것이라고 갈릴레오는 언급하였다. 갈릴레오는 이 경우의 파괴를 다음과 같이 분석했다.

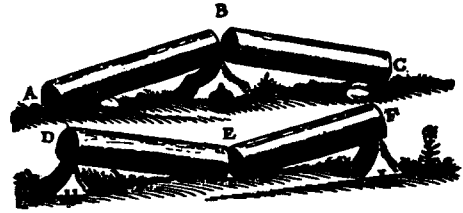


Fig. 3 Galileo's illustration failure modes for the marble column : top, as occurred : bottom, as feared[3]

원래대로 지지했다면 기둥은 자체의 무게로 파괴에 가까운 상태에 있었을 것이며 만일 작업공이 기둥위에 앉거나 갑자기 또는 부주의하게 운반한 경우 등의 추가적인 하중이 생기지만 않는다면 파괴는 일어나지 않았을 것이다. 지지점이 땅에 불균일하게 위치된다면 기둥의 위치는 재조정될 수 있다. 그러나 이것이 반드시 파괴를 일으키는 원인은 아닐 것이다. 그러나 세 번째 지지점의 추가는 추가 지지점과 기존의 두 지지점 중 하나에 의한 안정이 기둥 중량의 반을 왼쪽 혹은 오른쪽으로 작용하게 하는 외팔보의 형태로 양분되는 보를 만들었으며 이것이 두 개로 부서지게 한 것이다. 따라서 반영된 설계변경은 확실한 과하중을 만들었다.

## 19세기의 붕괴(Nineteenth-Century Failures)

갈릴레오가 당시의 구조역학이론의 부적합성을 공개적으로 밝히고 그것에 의하여 외팔보에 대한 그의 유명한 해석이론을 증명하기 위하여 파괴사례 연구를 수행할 시기인 19세기까지는 구조해석방법의 개선점을 제안하기 위해 직접적으로 파괴사례들을 이용하려는 경향은 별로 나타나지 않았다. 이는 해석기술의 급속한 발달과 대안설계의 증가에 부분적으로 기인된 것으로 보였다. 파괴가 일어나지 않는다고 말할 것이 아니라 설계와 해석이론을 발전시키기 위하여 파괴의 원인을 보

다 넓게 공개적으로 공표함으로써 그들의 관계를 잘 이해하는 것이 좋다. 당시에는 파괴가 발생할 가능성이 있는 공법은 간단히 버리는 경향이 공학자들 사이에 만연되어 있었다.

예를 들면 현수교의 경우 1840년대 까지 철도에 사용되던 현수교형식으로부터 탈피하여 형식면에서 영국식의 교량건설을 실용화하는 데에 있어서 구조적이고 기능적인 면에서 수많은 실패사례를 경험하여 왔다. Menai Strait deck의 붕괴나 강풍하에서 Brighton Pier suspension의 붕괴 등 연속적인 교량사고들을 군인들의 규칙적인 행진과정에 비유한 유럽대륙에서는 상당한 자중을 지지해야 하고 증기기관차의 운행에 의한 충격 등을 지지해야 하는 형태로서 현수교를 적용하는데 많은 편견이 있었다.

미국기술자인 John Roebling은 현수교의 붕괴를 총괄적으로 형식의 탓으로 여기지 않고 그러한 붕괴사례들을 수집하면서 배우기 위한 교훈으로 분석했다. 1841년 발표된 논문에서 그는 붕괴를 형식의 탓으로 돌리려는 생각이기 보다는 성공적인 교량을 건설하기 위해서 고려해야 할 하중을 파악하고자 하는 그의 의견을 주장하였다[4]. Roebling의 논문에서 해빙의 형식으로 지직한 바와 같이 당시에는 그것은 명백한 공학적인 실패에 지나지 않는다는 전문가들의 반대의견들이 있었다.

붕괴의 근본원인을 제거하기 위하여 명확한 설계안을 제시한 Scott Russell[5]은 당시에는 그의 관심을 받지 못했던 것 같다.

실패사례에 대하여 공개적으로 검토하고자 하는 태도는 점점 증가추세의 철도교량에 강(iron)의 사용을 허용하면서 많은 실패들이 실제로 발생할 수 있는 사고일지 모른다는 결론으로부터 나온 것이었다. 예를들면 Robert Stephenson은 한계안전계수로 설계된 트러스 거더 형식의 Dee Bridge의 1847년 붕괴로 곤란을 겪고 있었으며 Royal Commission 이 철도교에 대한 강(iron)의 사용을 조사·검토하도록 하였다. [see, e.g., 2] 몇몇 위원들이 Dee Bridge 붕괴의 정확한 원인에 대해 다소 의문이 남아 있었지만 그 사건은 그러한 형식의 설계에 대한 더 이상의 개발을 멈추게

하였으며 Stephenson을 당시 건설중이었던 영국식의 tubular교량의 설계에 보다 주의를 기울이게 하였다.

Stephenson은 붕괴의 교훈이 공학지식의 중요한 일부분이라는 것을 알았다. 1856년, 검토중인 원고에 대하여 편집자에게 발송하는 편지에서 Stephenson은 다음과 같이 말하였다. [quoted in 6 ; see also ; 2, 7]

”대규모 공사에서 발생한 사고기록 및 손상보수에 사용된 방법에 관한 기록만큼 젊은 전문기술자들에게 교훈적인 것은 아무것도 없다. 그런 사고들로 인하여 결과적으로 부딪치게 되는 조치방안들에 관한 상세한 설명은 가장 성공적인 공사에 관한 설명보다도 훨씬 가치가 있다. 경험있는 기술자들은 그들 자신의 일이나 다른 공사에서 발생했던 사고들에 대한 면밀한 관찰로부터 아주 유용한 경험을 축적하여 왔으며 이것들을 관계하는 협회의 책자에 성실하게 기록하게 하는 것은 매우 중요한 것이다.”

19세기 후반에는 미국 뿐만 아니라 영국에서도 강철도교 형태의 많은 붕괴사례가 있었다. 그러나 많은 인명을 빼앗아간 Dee Bridge의 사고처럼 붕괴에 대한 조사의견들은 기술자 및 일반인들의 논쟁을 지배하는 경향이 있었다. 1876년 Ohio에서의 Ashtabula 교량의 붕괴와 1879년 스코틀랜드에서의 Tay 교량의 붕괴는 끊임없는 의문을 야기시켰으며 교량건설에 엄청난 영향을 미친 교량기술의 이정표가 되는 사건들이었다. 예를들어 Tay 교량의 붕괴는 Forth의 Firth를 가로지르는 장대한 캔틸레버교의 설계와 건설에 큰 영향을 주었고 Forth Bridge 차례로 19세기 후반과 20세기 초반에 전세계의 교량건설에 크나큰 영향을 주었다. [8]

### 붕괴사고에 대한 공론(A Forum for Failures)

1887년에 매우 영향력있는 무역저널이며 당시 미국의 철도 기술자인 Arthur Mellen Wellington이 공동편집자이었던 Engineering News는 편집자의 머리기사에 “붕괴의 교훈[9]”이라는 기사를 다음과 같이 시작하면서 게재하였다.

“만약 우리가 시설들을 가지고 있다면 즉 붕괴가 어떻게 그리고 왜 발생했는지를 보여줄 수 있는 완벽한 설명으로 실패한 공학적인 설계들이 실제의 작업에서 부적절했다는 것을 입증할 수 있는 기록들을 확보할 수 있다면 우리는 세계에서 가장 재미있고 가장 교훈적이고 가장 가치있는 공학저널을 쉽게 출판할 수 있을 것이다. 소위 모든 공학 학문들은 이러한 실패의 기록들로부터 만들어진 것이다. 만약 그가 과거를 돌아보면서 자신에게 정직하다면 그에게 가장 가치있고 효과적인 가르침은 자신의 실수로부터 얻을 것이라는 것을 부인할 공학도는 아무도 없을 것이다.”

필자는 “붕괴되는 구조물들은 우리에게는 실질적으로 교훈을 줄 수 있는 구조물이다. 왜냐하면 붕괴되지 않은 구조물들은 잘 설계되었는지 아니면 재료 및 경비 등이 쓸모없이 낭비되어 과잉 설계되었는지를 구조물 자체에서는 쉽게 알 수 없기 때문이다.” 라고 계속하여 기술하고 있다. Engineering News는 “청탁 혹은 태만으로 인해 사고에 책임이 있는 사람들의 본성은 가능한 사건을 조용히 덮어 두고자 한다.”고 인정하고 있다. 큰 재난이 없거나 혹은 인명의 손실이 없으므로 공표하기에 어렵지 않은 사건들의 경우에도 실패에 관한 책임이 있는 사람들이 발표를 주저하는 그들의 본래의 감정을 극복하기 위하여 Engineering News는 익명으로 요청하고 있다. 또한 이러한 정보의 제공을 용이하게 하기 위하여 Engineering News는 정보제공자들에게 합리적인 비용의 보상을 약속했으며 사진과 도면 특히 큰 크기의 상세도는 환영하였다.

그림 4에서 보여준 바와 같이 건설중이던 Quebec Bridge의 붕괴에 관한 보고서의 요약본이 저널로서 Engineerin News의 Wellington's Vision란에 1907년에 기술되었다[2]. 뒤엀킨 철재 등의 도해적인 묘사와 사진들은 법률적인 서류는 물론 분석고찰을 위한 모델들이었다. 더욱이 자문 기술자이며 사실상의 책임자인 Theodore Cooper와 그밖의 기술자들로부터 수집된 Royal Commission의 요약기사는 당시에는 견줄 수 없는 설계와 시공법에 관한 깊은 이해력을 제공하였다. 게다가 Quebec Bridge의 상세붕괴사는 아마 지

금은 잘 알 수도 없을 뿐더러 알더라도 일부분일 것이다. 왜냐하면 그 붕괴는 1890년 Forth Bridge의 준공이래로 교량분야를 지배하여 왔던 스펀 캔틸레버교량에 대한 기록으로는 마지막이 되었기 때문이다. 현재까지 재설계된 주지간 길이 550m인 Quebec bridge는 세계 최장의 교량일 것이다.



Fig. 4 The collapsed Quebec Bridge [17]

### 현수교(Suspension Bridge)

Quebec Bridge가 붕괴될 때까지 철도교통을 위한 장지간의 교량구조로서 캔틸레버구조와 현수교의 두 설계안에 대한 상당한 경쟁이 있었다. 1880년대 후반 뉴욕의 허드슨강을 가로지르기 위해 설계된 중간 교각이 없는 약 914km의 지간길이를 가진 현수교 형태로서의 Gustav Lindenthal의 제안은 Forth 캔틸레버 방식의 확실한 구조적 성공과 철도교통하에서 증명된 강성 때문에 부분적으로 반대에 부딪혔다. 만약 Lindenthal의 거대한 계획에 대한 경제적 요인이 논의되지 않았다면 Quebec Bridge붕괴는 쉽게 현수교 형태의 설계로 돌려졌을 것이다. 그러나 기술이 발전됨에 따라 허드슨 강밀로 터널을 뚫는 대안과 철도에 대한 실행가능한 대안으로서 자동차와 트럭의 증

가를 감안하여 새로운 교량에 대한 제안들이 도출되었는데 이것은 George Washington이라고 불려진 179th street에 있는 상당히 값싼 현수교를 포함하였다.[10]

웅장한 Hell Gate아치교이 Lindenthal의 조력,자인 Othmar Ammann은 그의 노스승에게 다소 규모가 작은 현수교가 뉴욕시 주변의 변화하는 교통환경에 적합하더라는 것을 확신시키려고 했으나 실패하였다. 자동차, 트럭 경량철도교통을 위한 구조물의 설계만을 주로 다루었던 Ammann은 Lindenthal이 수공할 수도 없을 만큼의 적은 금액을 제안할 수 있었으므로 George Washington Bridge는 현장에서 건설될 수 있었고 최초로 차량을 위한 도로교로 건설되었다. 교량위의 교통상태 그리고 바람에 대한 측면의 강성이 cable과 deck 자체의 사하중과 어떻게 관계되는지에 대한 바람직한 가정을하여 교량은 설계되었고 그 교량은 최초에는 그림 5에서 보인 것처럼 일반적인 보강트러스없이 단층 deck로서 설계되고 건설되었다. 이 교량은 Menai Strait와 Brighton Pier와 같은 보강되지 않은 deck를 가진 19세기 초의 현수교와 유사한 구조로 만들어졌다. 그러나 이들 deck의 구조적 붕괴가능성은 George Washington과 같은 거대한 강교의 중량감과 설계계산을 전례없이 정확하게 수행하게 했던 진보된 해석 때문에 20세기에는 전혀 문제가 없는 것으로 생각되었다.

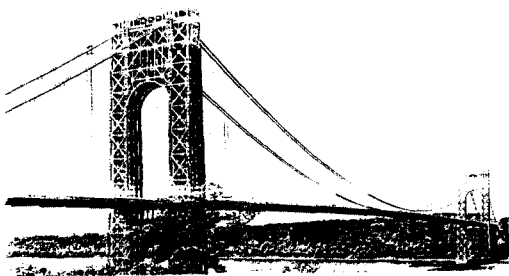


Fig. 5 The George Washington Bridge, as completed in 1931 with a single deck(courtesy of special Archive, Triborough Bridge and Tunnel Authority)

## 성공의 선례(Precedent of Success)

물론 George Washington Bridge는 대단한 성공이었다. 그러나 Wellington이 Engineering News의 편집기사에서 지적한 것처럼 성공적인 구조물들도 그대로 따라하기에는 불완전한 사례가 될 수 있다. 사실 이러한 구조물들은 그들의 구조적 혁신을 만들었던 원리에도 명백한 오류가 있을 수도 있다. 이러한 사실에 주의를 기울이지 않고 Ammann과 동시대의 George Washington Bridge와 같은 구조물들을 해석가능하게 했던 변위해석법을 개발했던 David Steinman과 Leon Moisseiff들은 1930년의 후반에 더 가볍고 날씬한 현수교를 계속하여 설계했다[8,11]. 대표적인 것들은 Moisseiff가 자문기술자로 참가했던 Golden Gate Bridge, Ammann이 책임기술자였던 Bronx-Whitestone, Steinman이 설계했던 Deer Isle Bridge, 그리고 자문기술자로서 Moisseiff가 주요 책임을 맡은 Tacoma Narrow Bridge 등이 있다.

Golden Gate는 풍력에 대해 매우 유연한 것으로 인정되고 있으며 오늘날까지도 도로교 아래에 경량철도교통시설을 추가적으로 수용할 만큼 구조적으로 충분히 강하지 못한 것으로 생각되고 있다. 1930년대 후반에 Bronx-Whitestone과 Deer Isle Bridge 등도 풍력에 상상한 유연성을 보였고 풍력에 대해서 구조적으로 위험한 움직임은 아니지만 정신적으로 불안정하게 하는 문제점이 있는 것이므로 Ammann과 Steinman들은 지지cable과 장치들을 면밀히 검토논의하였다. 1940년 중반에 Tacoma Narrow가 최초로 개통되었을 때 풍력에 대한 예상하지 못하였던 유연성도 구조물에 위험스러운 것이라고 인식되어지지 않았다. 그러나 교량이 준공된 지 겨우 3개월만에 대재해의 붕괴로 야기될 비틀림 진동이 나타나기 시작했을 때 기술자 모임들은 성공의 모델에 지나치게 의존했다는 것을 깨닫기 시작했다.

## 붕괴해석(Failure Analysis)

그림 6에 보여진 Tacoma Narrow Bridge의 붕

괴는 자연히 붕괴원인 등을 조사하도록 하는 기술 위원회의 결성을 가져왔다. 위원회는 1930년대 미국의 현수교 설계와 건설의 토대를 조성했던 George Washington Bridge를 설계한 Othmar Amman, 1936년에 완성된 San Francisco-Oakland Bay Bridge를 설계한 Glenn Woodruff, California Institute of Technology에서 Guggenheim Aeronautical 실험실의 책임자인 Theodore von Karman 등을 포함하고 있다. Tacoma Narrow가 붕괴된 지 수일만에 기계공학자이며 기체공학자인 Von Karman이 붕괴의 중요한 원인으로서 공기역학적인 불안정성을 공식적으로 확인하였지만 조사위원회의 보고서 초안 및 결론이 요약될 때까지는 그는 교량 기술자들의 의견을 따랐던 것으로 보인다.

Tacoma Narrow Bridge[12]의 붕괴에 관한 보고서에는 교량의 붕괴는 풍력에 의한 과도한 진동에 기인했다는 것을 인정하면서도 유사한 구조물의 설계에서 항상 고려하여야 하는 모든 정적 하중에 안전하게 저항하는 것으로 아주 잘 설계된 구조물이라고 선언했다. 더욱이 “구조물의 보통을 넘는 유연성과 동적하중을 흡수하기에는 비교적 작은 능력 등은 구조물에 과도한 수직·비틀림 진동을 가능하게 하였다. 비록 Tacoma Narrow Bridge의 유연성은 다른 장시간 현수교의 경우보다 지나치게 과도했지만 더 가볍고 지간이 짧은 유연성 있는 현수교에서 위험하다고 판명되어졌던 동적하중이 Tacoma Narrow Bridge와 같은 거대한 구조물에도 영향을 미칠 것이라는 사실은 인정하지 않았다.”

보고서는 많은 부분에서 Tacoma Narrow와 당대의 기술자들이 예시했던 “과도한 유연성”을 갖는 구조물을 취급하기 위해서는 부적절한 기술에 대한 변론이었다. Tacoma Narrow 설계의 유연성을 극히 얇은 deck 단면의 미적인 목표를 이루기 위하여 보강트러스보다 plate girder의 사용과 처짐이론에 대한 Moisseiff의 자신감에 주로 기인했다. Moisseiff 고문의 설계기술로부터 많은 영향을 받았던 책임기술자인 Ammann 은 1939년에 개통된 후 세밀한 조사를 받고 있었던 Bronx-Whitestone 교량들에 자신이 사용했던 것에 대해

비판적인 것에 대해 당연히 저항하였다.

Ammann이 현수교의 역사적인 예로서 Menai Stait를 가로지르는 Telford 교량을 언급했을 때 그는 종종 풍력에 대한 구조물 붕괴적인 거동에 대한 설명을 생략한 채 단지 미학적인 보기로서 그들을 언급했다. 구조물의 붕괴에 대한 사례연구로서 불멸한 실패사례로 하기보다는 Roebling 이 했던 것처럼 Ammann 과 동시대의 기술자들은 그들을 규준에서 지울만큼 기술은 역사적인 사례들보다 훨씬 지나치게 진행된 것이라는 것을 명백히 느꼈다. 풍력에 대한 현수교 거동의 긴 이력은 서로가 관련되어 나타나고 있다는 것에 대한 놀라움에 의해서 기술자 사회는 너무 많은 시간을 Tacoma Narrow에 할애하였다.

Tacoma Narrow 붕괴 이후 오래되지 않아 J. Kip Finch는 Engineering News-Record에서 “보강트러스의 발전과 쇠퇴”[13]에 대한 회고적인 기사를 게재했다. 거기서 그는 한세기 이상 동안이나 기론되어 왔던 풍력에 대한 현수교의 문제점들을 상세히 기록했다. 2주일 후에 편집자에게 보낸 편지에서 붕괴에 대한 보고서의 저자들과 같이 Finch는 붕괴기록에 대한 주의를 기울이지 않은 탓으로 1930년대에 건설되었던 경량의 현대식 구조물들에서도 풍력에 대해 유사한 거동을 예상하지 못했던 것에 대하여 교량설계위원회를 기소할 의도는 아니었다는 것을 독자들에게 명백히 재확인시키었다. 사실 그는 “현대의 기술자들은 이전의 붕괴들에 대한 세부사항을 알아야 하고 Tacoma의 붕괴를 예견했어야 했다”는 것을 독자들이 인지하도록 의도했다는 것을 명백히 부정하였다.

그러나 이것은 Finch가 그의 기사에서 주장했던 분야에서 틀림없이 가치있는 역사적인 사례연구가 되었다. 사실 Vitruvius 와 Galileo는 후세의 설계자들이 미래에 유사한 실패를 방지할 수 있도록 돕기 위해 그들의 실패사례연구를 제시하였다. 특히 고대와 르네상스 공학도들은 구조물의 규모를 키우면서 부딪칠 수 있는 밝혀지지 않은 위험들에 대해 명백히 경고하였다. Tacoma Narrow Bridge의 규모에 관한 우려들은 대부분승의 과정에서 제출된 계획들을 평가하면서 Reconstruc-

tion Finch Corporation 에 소속되어진 자문기술자인 Theodore Condron에 의해 교량 건설전에 이미 제시되었다[12, Appendix IV]. Condron은 지간길이에 대한 교량폭이 과도하게 작음에 대하여 큰 우려를 나타냈음은 물론 도로의 폭이 증가되어야 한다고 강력히 주장했다. 물론 이것이 교량 deck의 비틀림 강성을 증대시킬 수 있으며 그것이 교량의 성공 혹은 파괴에 대한 갈림길이 되었을 Bridge를 포함하여 그때까지 성공적인 설계를 해왔던 Moisseiff같은 기술자들의 명성에 의해 무시되었다. 그러나 Condron의 주의깊은 보고서는 Sibly와 Walker의 교량사고에 대한 훗일의 체계적인 연구조사결과들을 예견했던 것이었다[14, 15]. 그들의 연구는 구조물의 붕괴는 기술에 대한 자만심과 관련된 역사적인 사례연구들에 대한 무시풍조속에서 일어날 수 있다는 것을 보여주었다.

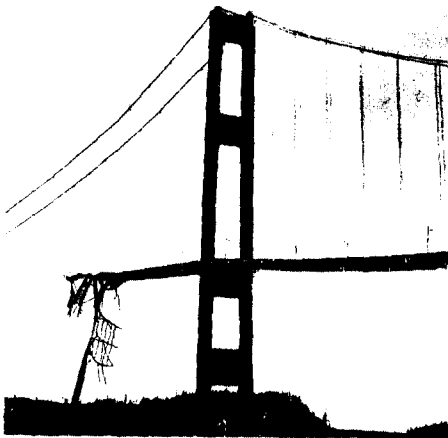


Fig. 6 The failed Tacoma Narrows(courtesy of University of Washington)

### 사례연구의 가치(The Value of Case Studies)

제2차 세계대전이 장기간 현수교의 설계나 건설을 막지 않았더라도 Tacoma Narrows의 붕괴는 분명히 있었을 것이다. 왜냐하면 유사한 구조물의 역사적인 붕괴사례에 관한 참조없이 그 기술에 관한 흥미가 재평가되고 있었기 때문이다. 전쟁 전에 건설되어진 몇몇의 Vierendeel 트러스 교량을 포함한 용접된 강구조물에 취성 균열들이 당시

에는 증가추세에 있었다. 조용한 수면위에서 용접된 Liberty 선박들의 갑작스럽고 자체적인 파손은 갈릴레오가 일찍이 3세기경에 묘사했던 큰 목선들과 대리석 기둥들에 발생된 예기치 못한 문제들을 회고시키게 하는 것이었다. 그리고 이러한 파괴들에 대한 연구는 지금의 균열역학으로 알려진 공학을 발생시키었으며 그러한 사례들의 연구는 이론과 실험의 지원 및 동기를 유발하는 중요한 역할을 한다.

20세기 후반에 붕괴에 대한 사례연구들은 혁신적인 구조물들의 설계와 건설을 위해 필요한 통찰력과 이해력들을 돕기 위한 가치있는 정보로서 인식되어져 왔다. 차세대의 교량이나 선박들은 과거의 구조물들과 유사성을 가지고 있지 않은 것처럼 보일지도 모르고 또한 컴퓨터로 인한 진보된 해석 기술들의 사용이 과거의 연필과 종이에 의한 방법들 보다 우세할 것처럼 보일지도 모르지만, 사실 오늘 그리고 내일의 구조물 설계와 건설들은 인간의 시행착오 즉 오벨리스크, 선박과 현수교 등에서 경험하였던 인간의 실패원인에 의한 것이다. 또한 구조물의 가장 진보된 합성재료들은 궁극적으로는 갈릴레오가 17세기에 연구했던 짐착에 관한 동일한 법칙에 따르는 것이다. 따라서 과거에는 적절하였던 방법들이 오늘날에는 적절하지 않을 수도 있다. 그러나 과거의 실수들을 생각하면서 기술자들이 유사한 실패를 또다시 반복하지 않을 수도 있다. 그러나 과거의 실수들을 생각하면서 기술자들이 유사한 실패를 또다시 반복하지 않도록 구조공학도들에게 그들의 실패 역사를 알리는 것이 당연할 것이다. 이러한 실패들은 붕괴 사례연구들에 기록되어야 하며 그들은 역사상 가장 효과적인 교훈중의 하나가 될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. VITRUVIUS, The Ten Books on Architecture. Translated by M. H. Morgan, Dover Publications, New York, 1960
2. PETROSKI, H, Design Paradigms : Case Histories of Error and Judgement in Engineering, Cambridge University Press, New York, 1994
3. GALILEO, Dialogues Concerning Two New



- Sciences. Translated by H. Crew and A. de Salvio, Dover Publications, New York, 1994
4. ROEBLING, J. A., Remarks on Suspension Bridge and on the Comparative Merits of Cable and Chain Bridges, American Railroad Journal and Mechanics Magazine 6(n.s., 1841), pp. 193-196
  5. RUSSELL, J. S., On the Vibration of Suspension Bridge and Other Structures : and the Means of Preventing Injury from this Cause, Transactions, Royal Scottish Society of Arts 1, pp. 304-314
  6. WHYTE, R. R., ed., Engineering Progress through Trouble, Institution of Mechanical Engineering, London, 1975
  7. PETROSKI, H., To Engineer Is Human : The Role of Failure in Successful Design, St. Martin's Press, New York, 1985
  8. PETROSKI, H., Engineers of Dreams, Great Bridge Builders and the Spanning of America. Alfred A. Knopf, New York, 1995
  9. The Teaching of Failures, Engineering News, April 9, 1887, pp. 237-238
  10. DOIG, J. W. : BILLINGTON, D. P. Ammann's First Bridge : A Study in Engineering, Politics, and Entrepreneurial Behavior. Technology and Culture 35, pp. 537-570
  11. BILLINGTON, D. P., History and Aesthetics in Suspension Bridge, Journal of the Structural Division : Proceedings of the ASCE 103 (1977) : 1655-1672. See also, discussion, ibid, 104(1978) : various pages ; and closure, ibid, 105 : (1979) : 671-687
  12. AMMANN, O. H. ; VON KARMAN, T. ; WOODRUFF, G. B., The Failure of the Tacoma Narrows Bridge, Federal Works Agency, March 28, 1941.
  13. FINCH, J. K., Wind Failures of Suspension Bridge, Engineering News Record, March 13, 1941, pp. 74-79. See also, March 27, 1941, p. 43.
  14. SIBLY, P. G., The Prediction of Structural Failure. Ph. D. Thesis, University of London, 1977.
  15. SIBLY, P. G. ; WALKER, A. C., Structural Accidents and Their Causes, Proceedings of the Institution of Civil Engineers 62, pp. 191-208.
  16. COULTON, J. J., Ancient Greek Architects at Work : Problems of Structure and Design, Cornell University Press, Ithaca, NY, 1977.
  17. Government Board of Engineers, The Quebec Bridge over the St. Lawrence River near the City of Quebec on the Line of the Canadian National Railway, Dept of Railways and Canals, Ottawa, Canada, 1918. 