

교량붕괴사고의 역사적 조명(I)

변근주 / 우리 협회 회원
연세대학교 교수

1. 머릿말

인류의 역사와 함께 있어온 공학기술은 과거의 경험과 실패의 반복과정을 거쳐 발전되어온 것이 사실이고 건설기술도 예외는 아니다. 실패는 성공의 아버지, 실패는 산 교훈, 건설붕괴는 가장 효과적인 산 교육이라고 하는 것도 바로 이때문일 것이다. 크고 작은 교량 붕괴가 있을 때마다 교량기술은 기술적으로 변화되고 배워온 것이 사실이다.

2000여년 전에 건설된 아치교나 현재 국내의에 남아 있는 많은 구조물들도 오랜 기간 동안의 실패나 사고의 시련을 겪어 얻어진 성과라고 할 수 있다. 강, 철근 콘크리트가 출현하고 교량이 근대과학의 한 분야로 성장한 것도 크고 작은 교량사고와 깊은 관련이 있다. 사고가 중대할수록 그에 비례하여 귀중한 교훈을 얻었다. 이런 의미에서 본고에서는 1970년 이전에 발생했던 교량사고 중 교량기술에 영향을 준 몇 가지 사례를 소개하고자 한다.

2. Scotland의 Tay교의 붕괴

1876년 미국 Ohio 주의 Ashtabula교 및 1879년 Scotland의 Tay교 붕괴는 교량기술의 발전에 크게 영향을 준 교량사고 중의 하나이다. Tay교는 Tay강을 횡단하는, 즉 Edingburgh

와 Dundee를 연결하는 전장 3000m의 단설철도 교였다. 당시 유명했던 Thomas Bouch가 기장으로 담당했던 Tay교는 85경간의 鍊鐵製 트러스교이고, 이중 주향로상의 13경간은 지간 75m의 연속트러스였다. 교각은 해저암반상에 축조된 석공구조의 기초 위에 6개의 주철관기둥이 세워진 구조였다. 트러스는 해면상 약 27m 위치에 건설된 것으로서 당시로서는 최신품의 최대 걸작품으로 평가되었었다. 1878년 6월 1일 개통된 지 1년반 후인 1879년 12월 18일 오후에 폭풍이 몰아쳤고, 이때 많은 Dundee 시민들이 교량을 걱정하여 교량 북쪽에 있는 신호소에 몰려나왔다. 오후 7시 15분경 풍력이 최고도에 달했을 때 Edingburgh 발 열차가 교량 위에 진입한 지 수분 후 어둠 속에서 불꽃을 띠뜨리며 13경간의 트러스가 열차와 함께 강에 추락하면서 1명의 생존자도 없이 75명의 생명이 희생되었다.

이 당시에는 풍압에 대한 적절한 시방서도 없었기 때문에 약 100여년 전인 1759년 John Smeaton이 제안했던 다음과 같은 풍압이 유일한 자료였다.

큰바람 : 29kg/m²

강 풍 : 39kg/m²

폭 풍 : 59kg/m²

Tay교의 설계시 어떤 풍압을 고려하였는지는 불명확하였지만, 약 $98\text{kg}/\text{m}^2$ 를 고려했을 것이라는 얘기가 있었으나, Bouch 자신은 풍압에 대하여 특별한 고려를 하지 않았다고 증언한 바 있다.

이 값은 현행시방서의 $300\text{kg}/\text{m}^2$ 에 비하여 매우 적은 값이라고 판단된다. 당시의 조사위원회의 보고서는 이 교량이 붕괴되려면 약 $195\text{kg}/\text{m}^2$ 정도의 풍압이 필요했다고 보고하고 있다. 이 풍압은 약 $40\text{m}/\text{sec}$ 의 풍속에 해당되는 값이다. 이 사항만으로 이 교량이 바람에 의해 붕괴되었다고 판단하기에는 미흡했던 것 같다.

현장주재 기사였던 Gröthe는 다른 추론을 제시하였다. 즉 열차가 연속트러스 단부경간의 인접경간에 이르렀을 때 단부경간의 거더단부에 부반력이 생겨 단부가 들리게 되고, 이때 바로 풍하중에 의하여 트러스가 횡방향 변위를 일으킨 상태에서 열차가 단부경간상에 도달할 때 부상했던 단부거더가 내려오면서 받침부에 충격을 가하게 됨으로써 받침부와 주철관 교각기둥을 붕괴시켰다고 추론하였다. 이 경우 트러스는 연속교구간 전체가 붕괴될 수 밖에 없었다. 그러나 열차가 단부경간의 직전 경간위치에서 추락하였기 때문에 Gröthe의 추론에도 문제가 있는 듯하다.

Tay교는 1882~1887년 사이에 붕괴된 위치로부터 떨어진 위치에 구교와 평행하게 새로 건설되었다. 구교의 철재를 대부분 수리하여 재사용하였고, 풍압을 $273\text{kg}/\text{m}^2$ 로 취하여 복선교로 설계 및 가설되었다. 한편 Bouch는 Tay교의 붕괴 전에 2경간 현수교인 Forth교를 설계하도록 되어 있었으나 사고 책임문제로 Forth교에는 관여할 수 없게 되었고, Tay교 사고에 충격을 받아 사고 다음 해에 세상을 떠났다.

이 Tay교의 사고는 큰 피해를 주었지만, 이로 인하여 풍압의 중대성이 인식되었고 바람에 대한 설계지침의 개발과 발달에 대한 연구를 촉진시켰고, 이 사고 이후에 건설된 Forth교의 설계시에는 풍압에 대한 현장실험까지 수행하도록 하였다. 그러나 이후에도 이와 유사한 사고가 발생한 것은 매우 유감스러운 일이다.

미국 St. Paul의 Smith Avenue교가 1904년에, 미시시피강의 Gerber Truss교인 Chester교가 1944년에 바람에 의해 하천에 추락하였다. 한편 일본에서는 1962년 태풍으로 인하여 各神高速道路上の木曹川橋 Truss 한 경간이 횡방향으로 전도되어 하천에 낙하하였고, 같은 날 역시 건설성이 건설중이었던 興津橋의 연속 Box Girder 일부가 하천에 낙하하는 사고가 발생한 바 있다.

3. Canada의 Quebec교의 붕괴

캐나다 Quebec시의 St. Laurence 강 위에는 현재 세계 최장경간($157+549+157\text{m}$) Gerber Truss교인 Quebec교가 있다. 이 시대는 교량건설에 鍊鐵 대신에 鋼이 사용되기 시작하던 시대였다. 이 교량은 당시 철도교의 세계적인 권위였던 Theodor Cooper라는 주임기사에 의하여 건설중 붕괴사고가 발생하였다.

1904년 착공 이후 공사는 순조롭게 진행되어, 남측 경간과 Cantilever 부분의 시공이 완성되었고, 중앙 경간의 Suspended Truss(길이 196m , 무게 약 5000톤)의 가설을 시작한 1907년 8월에 교각 부근의 큰 압축력을 받는 최대단면의 트러스 하현재 일부에 복부 좌굴의 징조가 발견되었다. 70세의 고령인 Cooper는 이 소식을 듣고 상세한 조사와 복부판 보강에 대한 연구를 지시하였다. 그러나 1907년 8월 29일 보강대책을 전혀 세우지 않고 가설용 crane을 경

간 중앙방향으로 이동시키자 교각 부근의 주요 하현재에 좌굴파괴가 일어나며 약 9000톤의 강재가 수중에 낙하하고, 측경간의 중앙부에서도 Truss가 절단되는 대사고가 발생하였다. 교량 상에서 작업중이던 86명 중 생존자는 11명이고, 75명이 희생되었다.

교량의 붕괴 전후를 살펴볼 때 기술적으로 붕괴는 예측할 수 있었던 것인데 크게 두가지를 오판한 것으로 판단된다. 첫째로, Cooper가 발생된 문제점의 조사와 연구를 지시한 것까지는 좋았으나, 조사연구기간 동안 공사를 중지시키지 않았다는 점이다. 둘째로, 세계 최대가 되는 이 교량공사에서 문제점을 가진 상황에서 공사를 계속하게 되면 교량에 중대사고가 발생할 수 있다는 생각을 가진 기술자가 Cooper 이외에는 없었던 점이다.

사고조사위원회의 조사에 따르면 bracing이 너무 약하기 때문에 압축하현재의 복부판에 국부좌굴이 일어났고, 압축부재의 이음부의 밀착이 불완전한 데다 부분적으로 리벳이 떨어진 것이 사고의 원인으로 보고되었다. 이들 직접적인 원인 외에 시방서가 불충분하고 허용응력이 과대하고 사하중을 적게 고려하는 등의 결함이 있었던 것으로 밝혀졌다. 그러므로 가설이 일시적으로 무사하게 완료되었다 하더라도 소정의 활하중에 대한 안전성은 부족하였을 것으로 판단된다.

이 사고 후에 Ralph Modjeski를 위원장으로 하는 위원회가 설치되었고, 신교의 건설은 Modjeski가 책임을 떠맡았고, Cooper는 책임을 지고 물러난 후 수년 후에 세상을 떠났다.

사고 후 2년간 조합압축부재의 좌굴, 리벳 이음, bracing, eye-bar, 연강과 고장력 니켈강의 비교 등에 관한 광범위하고 면밀한 실험과 연구가 추진되었다. 그 결과 신교에서는 허용응

력이 연강에 비하여 약 40% 정도 큰 니켈강을 주구조부재 전부에 사용하고, 보다 엄격한 새로운 시방서를 설정하였다. 또한 트러스교의 안전성, 강성도, 시공성, 경제성을 높이기 위하여 K Truss 형식을 채택하고, 주인장재에는 eye-bar의 사용, 하현재의 격점은 리벳 결합, 기타는 pin 결합으로 하였다.

또한 복구 초기에는 붕괴된 구교의 교각기초를 목조케이슨으로 보강계획을 수립하였으나 실패하였기 때문에 구교의 기초를 포기하고 남쪽으로 18.5m 떨어진 곳에 공기케이슨 공법으로 기초를 새로 시공하여 1914년에 하부구조를 완성하였다. 한편 신교의 측경간은 동바리공법으로 가설되었고, Cantilever 부분은 Cantilever 가설공법으로 가설하여 1916년에 완성되었다. 중간지간의 길이 195m, 무게 5000톤의 suspended 트러스는 육상에서 제작한 후, barge 선으로 현장에 운반하고 양쪽의 Cantilever 선단과 수압 Jack을 이용하는 lifting 공법에 의해 건설이 착수되었다. 1회에 60cm씩 인양하던 중 Truss를 지지하던 4개의 지지부재 중 한 곳이 파괴되어 트러스가 비틀리고 기울어지면서 하천에 붕괴낙하하는 사고가 발생하였고 이로 인하여 13명의 사망자, 14명의 부상자를 내는 참사가 다시 발생하였다. 이 사고의 조사결과에 따르면 복잡한 십자형의 지지구조를 채택한 것이 문제점으로 지적되었다.

사고 후 1년간 트러스를 재제작하였고, 주물 지지구조대신 鉛板을 사용하여 4일만에 트러스의 가설을 완성하였고, 1918년 8월에 Quebec 교가 개통되어 오늘에 이르고 있다.

Quebec교의 사고와 관련하여 수행된 많은 조사연구의 결과로 조합압축부재의 강도, 복부의 국부좌굴, bracing, 격점구조 등의 강교상세 설계의 중요한 본질이 밝혀지게 되었다.