

교량붕괴사고의 역사적 조명(Ⅱ)

변근주 / 우리 협회 회원,
연세대학교 교수

4. 바람(Wind)에 의한 교량사고

4.1 바람과 구조물

바람이 구조물에 미치는 영향은 크게 정적 효과와 동적 효과로 구분된다. 정적 영향은 풍압에 의한 풍하중, 정적 변형 이외에 좌굴, divergence 등과 같은 정적 불안정 현상을 포함한다. 동적 영향은 와류진동(vortex oscillation), 구조물 자체의 운동결과로 발생하는 풍하중의 변화에 의해 일어나는 자려진동(Flutter 현상), 난류성 유동에 의한 Buffeting 현상을 포함하고, 자려진동은 다시 진동의 발생형식 및 진동형태에 따라 연동 Flutter(coupling 또는 classic flutter), 비틀림 Flutter(torsional flutter), Galloping(구조물의 운동에 의하여 또는 classic flutter), 비틀림 flutter(torsional flutter), Galloping(구조물의 운동에 의하여 운동에너지가 공급받는 자려운동으로서 와류진동보다 진폭이 큰 진동)으로 나누어진다. 교량에서는 교량상부구조의 단면형상에 따라 풍하중이 여러 방향으로 작용한다. 바람에 의해 발

생되는 풍력은 6종류의 성분으로 구성되는데, 기류방향의 항력(drag), 기류직각방향의 양력(lift) 및 횡력, 그리고 이 3방향 힘의 방향을 회전축으로 하는 rolling, yawing, pitching moment를 포함한다.

바람으로 인한 교량의 붕괴문제는 오랜 역사를 가지고 있지만, 1940년 11월 미국 서부 워싱턴주 Tacoma시 교외에 건설된 Tacoma Narrows 현수교(중앙 경간 853m)가 풍속 19m/s에 의해 큰 진동을 일으키다가 붕괴된 이후부터 교량 및 고건축의 진동이 연구되기 시작했다. 참고로 바람에 의한 교량사고 예를 수록하면 표 1과 같다. 표에서 알 수 있듯이 바람에 의한 교량사고는 풍속 10~32m/sec 정도에서 발생하고, 완성 후만이 아니라 공사중에도 사고가 많음을 알 수 있다.

4.2 설계기준풍속

구조물의 설계에 고려되는 풍속을 설계기준풍속이라 한다. 기준풍속이란 구조물이 설치될 지점의 기상자료를 분석한 후, 구조물의 사용연

〈표 1〉 상대교량의 사고 예

교 량	소 재 지	형식(주경간)	건설년도	비 고
Brighton Chain pier 橋	영국	현수교 68m	1823년	1833년, 부분손상 1836년, 비틀림진동에 의한 파괴
Menai Straits 橋	영국	현수교 177m	1826년	3도이상 휨, 바람에 의한 파손, 상관 등 보수
Nassau 橋	독일	현수교 75m	1830년	1834년, Cable 파손
Niagara- Lewiston 橋	미국, 캐나다	현수교 318m	1850년	1864년, 강풍에 의해 파괴
Tacoma Narrows 橋	미국 워싱턴주 타코마해협	현수교 853m	1940년	1940년 11월, 19m/sec의 바람에 의해 비틀림 진동파괴
Fykesund 橋	노르웨이	현수교 228m	1937년	휨진동 발생, 보강
Golden Gate 橋	미국	현수교 1280m	1937년	25~30m/sec의 바람에 의해 부분 파손, 트러스 보강
Thousand Islands 橋	캐나다	현수교 244m	1938년	휨진동 발생
Deer Isle 橋	미국 메인주	현수교 329m	1939년	1942년, 32m/sec의 바람에 의해 휨진동 발생
Bronx- Whitestone 橋	미국 뉴욕	현수교 701m	1939년	진동 발생, 트러스 보강
Tay 橋	영국 스코틀랜드	75m	1878년	1979년 열차와 함께 붕괴, 75명 사망, 풍압에 의한
Chester 橋	미국 일리노이		-	1944년, 회오리바람에 의해 파손
木會川 橋	일본		-	1962년 8월, 태풍에 의해 건설중 1경간 낙교
Beauharnois 橋	캐나다 퀘벡	현수교 177m	-	휨진동
George Washington 橋	미국 뉴욕	현수교 1067m	1931년 1960 (下路)	잔잔한 휨진동, 미소비틀림진동
Lions Gate 橋	캐나다 밴쿠버	현수교 427m	-	휨진동(풍속 22~27m/sec)
Peace River 橋	미국	현수교 283m	-	미풍에 의한 진동, 22-28m/sec의 바람에 의해 비틀림
Liaed River 橋	미국	현수교 165m	-	미풍에 의한 진동, 18-26m/sec의 바람에 의해 비틀림
四德大橋	일본 나가노현	150m	1967년	5-6m/sec의 바람으로 강관진동말단의 보강
Forth Road 橋	영국 스코틀랜드	현수교 1006m	1964년	주탑에 독립시 진동, 슬라이딩 블록에 의해 진동억제
石狩河口 橋	일본 북해도	사장교 160m	1971년	건설중 휨의 한정적 진동 단면을 약간 변경
Severn 橋	영국 잉글랜드	현수교 987m	1966년	기울어진 행거가 진동 제진장치를 설치
六甲大橋	일본 고베	사장교 220m	1977년	Cable의 진동, Cable사이의 Wire를 팽팽하게 하여 진동 억제

한, 구조계의 안전성 및 안정성, 풍속의 재현기간 등을 고려하여 결정되는 풍속을 의미한다. 따라서 기준풍속을 도출하려면 풍속, 풍향, 최고풍속의 장기간의 기상 관측자료와 교량건설지점의 주변지형, 구조물의 높이, 구조물의 수평 및 연직 높이 등의 자료가 필요하다.

우리나라 도로교 표준시방서에서는 개활지의 지형조건에서 지표면상 10m 높이의 10분간의 평균풍속을 측정 한 풍속자료를 통계처리하여, 50년간 설계풍속을 초과하지 않을 확률이 0.6이 되는 풍속을 교량설계에 사용하는 기준풍속으로 정하고 있다. 이는 거의 100년 재현기간에 해당되는 풍속이라고 할 수 있으며, 주경간이 100m 이상의 교량설계에서는 기상자료분석을 수행하지 않는 경우에는 도로교 시방서의 30~50m/sec의 기준풍속을 지역에 따라 사용할 수 있다.

한편 지간 100m 미만의 중소교량의 풍하중 산정에는 평균풍속 40m/sec을 설계기준풍속으로 정하고 있다.

한편 일본에서는 우리나라와 동일한 방법으로 기준풍속을 정하고 있고, 미국은 10m 높이에서의 최대풍속, 영국에서는 10m 높이에서의 1시간 평균풍속을 설계기준풍속으로 취하고 있다.

4.3 바람에 의한 현수교의 사고

보강형을 갖지 않은 원시적인 현수교가 강풍시에 안정을 유지하지 못하여 손상 또는 추락한 예는 옛날부터 많다. 기록상 최초의 예는 1818년 추락한 Scotland의 Dryburg Abbey 교이다. 지간 137m의 영국 Berwick 교는 개통 후 6개월만인 1820년에, 독일의 Nassau 교는 완성 후 3년만에 바람에 의해 붕괴되었다. 1840년에 완성된 프랑스의 Roche Bernard 교도 교량 바닥구조가 바람에 의해 떨어졌고, 1836년에는

영국의 Brighton Bernard 교도 교량바닥구조가 바람에 의해 떨어졌고, 1836년에는 영국의 Brighton Chain Pier 교, 1854년에는 미국의 Wheeling 교가 바람에 의해 추락하였다.

Telford에 의해 1826년 개통된 유명한 영국의 Menai Straits 교는 3번이나 바람에 의해 수난을 겪었다. 본교는 지간 177m의 연철 eyebar에 의한 무보강형 현수교였으나, 1826년, 1836년, 1839년에 바람에 의한 비대칭 비틀림 진동때문에 hanger, 연철 세로보, 바닥판 등이 파괴되었고, 보강 후 다시 사용되다가 1893년에는 강풍에 의해 교량바닥구조가 완전히 붕괴되었다. 그러나 이때 Benjamin Baker라는 기술자에 의해 바닥판구조를 강구조로 개조한 후 1940년까지 사용되다가, 현재는 새로운 교량으로 교체건설되어 사용하고 있다.

1869년 Niagara 폭포 하류에 Samuel Kee·fer에 의해 건설된 당시의 기록적인 장대 교였던 Niagara-Clifton 현수교(지간 365m)는 처음에 목조 보강트러스로 된 교상구조이었으나, 1888년 McNulty에 의해 교폭도 확대되고 교상도 강구조로 개조되었다. 그러나 개조한지 7개월만에 폭풍때문에 완전히 붕괴되고, 현재는 그 자리에 아치교가 서 있다.

이상의 교량들은 대부분 보강형을 가지고 있지 않거나 강성이 부족한 현수교들이었다. 그러나 이후에는 Tay 교의 사고가 교훈이 되어 풍압, 바람에 대한 교량의 횡저항성의 중요성이 인식되었고, 보강트러스 또는 보강형이 현수교에서는 중요시되기 시작했다. 따라서 이후에 건설된 Brooklyn 교, Golden Gate교, San Francisco-Oakland Bay 교 등의 장대 현수교에는 대규모 보강트러스가 도입되어 현재까지 큰 문제없이 사용되고 있다.

그러나 미국에서는 1939년과 1940년에 지금

〈표 2〉 Bronx-Whitestone 현수교와 Tacoma Narrows 현수교의 주요제원

교 명	중앙 경간장(m)	교 폭(m)	거더 높이(m)	지간/폭	지간/거더높이
Whitestone 교	701	22.6	3.35	31	209
Tacoma Narrows 교	853	11.9	2.44	72	390

까지 사용되던 보강트러스 대신에 plate girder 를 보강형으로 사용한 장경간 현수교가 두 곳에 건설되었다. 하나는 O.A.Anman이 설계하여 1939년 New York 시내에 건설된 Bronx-Whitestone 현수교이고, 또 하나는 거장 Leon S. Moissieff의 설계로 Tacoma 시 교외의 Puget Sound 위에 건설된 Tacoma Narrows 현수교이다. 이 두 교량의 주요제원은 표 2와 같다.

두 교량은 시방서 규정에 벗어난 것이 없고, 풍하중에 대해서도 시방서의 규정에 따르며 충분한 안전도를 가지고 있었다. 두 교량의 차이는 지간/교폭과 지간/거더높이의 비에 있었다. 두 교량 모두 개통 직후부터 공기 역학적 불안정성을 보였다. 다만 Whitestone 교는 15cm 정도의 변위가 발생하였으나, Tacoma 교는 강풍시에 상부구조의 횡운동과 함께 상하로 1m 이상씩 진동을 일으켰다. 이런 문제때문에 Whitestone교에 대하여는 Princeton 대학의 E. K. Timby교수, Tacoma교는 Washington 대학의 F. B. Farquharson 교수가 각각 위탁을 받아서 조사연구를 수행하였다. 그 결과 Whiteston교에서는 지간 중앙에서 주cable과 보강거더를 경사케이블로 연결하고, 교량 바닥 구조 단부와 탑기둥 사이에 마찰완충장치를 두어 증방향운동을 제어토록 하였다. 한편 Tacoma교에서는 개통 후 3개월만에 지름 60mm의 케이블로 측경간 중앙을 지상에 고정시켜 중앙경간을 제어토록 하였다.

그러나 이 노력에도 불구하고 개통 후 4개월

만인 1940년 11월 7일 19m/sec의 강풍에 의하여 완전히 붕괴되었다. 붕괴 전야부터 불기 시작한 바람 속도는 7일 아침 9시에 붕괴속도 19m/sec까지 이르렀다. 이때 교량의 운동을 영화로 기록하기 위하여 교량위에 있었던 Farquharson 교수는 교량바닥구조의 수평이동은 약 60cm이었으나, 상하운동은 9m까지 이르렀고, 좌우 보강거더의 진동위상이 상위하여 교상이 45° 가까이까지 기운 것으로 관찰되었다. 이때 초기의 진동주기는 1.7초이었으나 10시경에는 주기가 약 4.4초 정도로 되었고, 교상의 상하운동, 파동, 비틀림이 증대되면서, 드디어 오전 11시 직전에 보강형 중앙부가 끊어지고 여러 개의 hanger가 절단되고, 약 300m의 교상부가 추락하였다. 이후 교량의 운동은 급속히 일단 정지되었다가 다시 새로운 동요가 생기면서 측경간으로 이동하였고, 이후 중앙경간의 잔존부가 완전히 붕괴되었다.

주탑정부는 양안방향으로 약 3.5m의 변위를 일으켰고, 측경간은 약 9m 정도 밑으로 늘어진 후 정지상태로 되었다.

Tay 교의 사고로부터 약 50년간 이런 종류의 사고에 면적이 되어있던 세계의 교량기술자들은 Tacoma 교의 붕괴로 큰 충격을 받았다. Tacoma 교는 거장 Moissieff가 설계했고, cable은 John A. Roebling Sons 사가 공급했고, 강구조는 Bethlehem 사가 시공하는 등 당시의 전세계 1류 기술진에 의해 건설되었었다. 물론 정역학적으로 53m/sec의 바람에 안전하도록 설계된 수천 톤의 강, 콘크리트의 거대 교량

이 풍압의 관점에서 보면 설계치의 1/9 정도의 바람에 의해서 대형사고가 발생하였다.

조사 후 알려졌지만, 이 교량의 문제는 공기 운동학의 문제이다. 바람이 교량에 미치는 양상은 풍압 또는 풍하중으로 표현되는 구조 정역학상의 문제, 바람에 의한 진동이나 공진으로 인한 구조물의 동역학적 거동과 공기 동역학적 문제로 나눌 수 있다. Tay 교의 사고원인은 구조 동역학적 원인이었으나, Tacoma 교의 사고는 동역학적 원인이었다. Tacoma 교의 사고를 계기로 Timby 교수와 Farquharson 교수를 필두로 하여 현수교의 공기역학적 거동과 안정성에 관한 연구가 세계도처에서 수행되기 시작하였다.

이후 이 문제는 장대 현수교의 가장 중요한 문제 중의 하나로 부각되었고, D.B.Steinmann은 이것을 “剛性度”라 정의하고, 이것이 어떤 값 이하가 되면 구조가 불안정하게 되고, 강성도를 크게 하기 위해서는 교량 상부구조의 중량, 교폭, 보강트러스의 높이를 증대시키고, 교상에 바람의 영향을 경감시키고, 경사 cable이나 완충장치에 의하여 교상의 운동을 제어할 것을 제안하였다.

Tacoma Narrows의 새로운 교량은 구교에 비하여 2.44m 높이의 보강거더대신에 높이 10m의 보강트러스를 채택하였고, 교폭을 11.9m에서 18.3m로 넓히고, 강성도를 37배 증가시켜 1949년에 착공하고, 1950년 10월에 완성하였고, 그후 현재까지 별 문제없이 사용되

고 있다.

Whitestone 교는 개통 후 수차례 보강을 하였으나, Tacoma 교의 사고 이후 1946년에는 재래의 보강거더위에 보강트러스를 증설하였고, 주탑정부로부터 교상 사이에 경사케이블을 보강하여 현재까지 사용되고 있다.

Golden Gate 교도 바람의 영향을 많이 받아왔다. 이 교량은 공사중은 물론 개통 후까지도 지진에 의한 주탑 및 기타 부분의 진동관측, 바람에 의한 진동관측이 계속되어 왔다. 그중 개통 후 8개월만인 1938년 2월 9일과 1941년 2월 11일에는 약 28m/sec의 강풍시에 교상에 파고 약 60cm의 파동 진행이 관측되었다. 이때 진동은 주로 상하운동이고 비틀림 진동은 적었기 때문에 실질적인 피해는 적었으나, Tacoma Narrows 교의 붕괴사고 후 미국내에 조직된 현수교 내풍안전성 위원회의 한 사업으로 금문교의 실측연구가 시작되었고, 1943년에는 풍력계, 가속도계를 각각 10개소에 설치하였고, 상세한 계측과 연구가 시작되었다. 그러나 1951년 12월 1일 오전에 불어닥친 25~30m/sec의 풍속에 의하여 3.3m의 상하운동과 3.7m의 수평운동이 발생하면서 보강트러스의 완충장치와 교량신축이음장치의 일부분이 파손되었고, 지간 중앙부에서는 전주가 주케이블과 접촉하여 cable 손상을 일으키는 피해가 발생하였다. 그 결과 보강트러스의 비틀림강성을 증대시킬 필요가 인식되었고, 따라서 보강트러스 하면에 수평 bracing을 추가한 후 현재에 이르고 있다.