

# 바람에 의한 교량의 사고와 대처 방안

Article

# 05

(Bridge Accidents due to Wind and Countermeasures)



**김영민**  
(주)대우건설 기술연구원  
선임연구원, 공학박사



**김대영**  
(주)대우건설 기술연구원  
시험연구팀장, 공학박사

## 1. 서론

2007년 8월 1일 미국 미네소타주의 교량 붕괴사고는 우리나라의 성수대교 붕괴(1994)를 연상시키는 대형 참사였다. 지금까지 이러한 사고의 가장 큰 원인은 설계오류나 부실시공이라기보다는 부식이나 피로 때문에 무너졌을 가능성이 가장 높다고 알려져 있다. 즉, 시설물을 공용중에 체계적으로 모니터링하여 이상상태를 초기에 발견하여 사고의 징후를 미리 예측할 수 있는 방재 시스템이 제대로 갖추어 지지 않았기 때문이다. 재난 방지를 위한 모니터링 시스템의 개발은 공용중뿐만 아니라 시공중에도 필수적이며, 2007년 8월 완공을 앞두고 무너진 중국 후난성의 디시뎀대교와 9월 공사중에 붕괴한 베트남 켄터성 교량 참사는 현행 시공중 모니터링 시스템의 개선이 필요함을 방증하고 있다. 특히, 미국 워싱턴주의 Tacoma Narrows 교량 붕괴(1940) 사고에서 알 수 있듯이 우리나라의 경우 매년 태풍에 의한 위협에 노출되어 있으므로 바람에 취약한 초장대, 초고층, 초대형 구조물에 대한 Structural Health Monitoring System

구축을 통한 태풍 재난 방재 기술의 개발이 시급하다.

최근에도 태풍 루사(RUSA : 말레이지아어 '삼바사슴', 2002년)와 매미(2003년)에 의하여 사상최대의 피해가 발생한 바 있다. 특히, 루사와 매미는 태풍의 강도와 강수량, 풍속 등 여러 측면에서 1959년에 큰 피해를 입혔던 태풍 사라 이후 현재까지 최악의 태풍으로 기록되고 있다. 태풍 루사의 경우 태풍의 위력을 측정하는 중심기압이 사라에 이어서 사상 두 번째였으며, 그동안 한반도에 상륙한 대부분의 태풍들과는 달리 고힘 반도로 상륙하여 전남 순천과 전북 무주, 충북 보은, 강원 평창 등을 통해 동해로 빠져나가면서 한반도 전체에 걸쳐서 큰 피해를 입혔다. 또한, 한반도에 상륙한 후에도 그 위력이 약해지지 않고 느리게 진행하면서 강력한 바람까지 몰고 왔기 때문에 그 피해는 더욱 클 수밖에 없었다. 태풍 루사가 기록한 고산지역의 최대순간풍속은 56.7m/s로서 지난 2000년 태풍 프라피룬 때 기록한 흑산도의 최대순간풍속 58.3m/s에 이어 2번째로 강한 바람이었다. 그러나, 이 기록은 다음해 119명의 사망자와 12명의 실종자, 그리고, 20,000가구의 파손을 가져온 태

풍 매미의 최대순간풍속 기록 60.0m/s에 의하여 3번째로 밀려나게 된다. 이는 지구온난화로 인하여 초대형 태풍의 발생가능성이 점차 높아지고 있음을 알려준다.

본고에서는 교량에서 발생할 수 있는 사고와 그 대처 방안 중에서 특히 장대교량에 취약한 바람에 대한 문제와 그 해결 방안에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 바람에 의한 교량의 사고

풍하중에 대한 평가 부족으로 발생한 유명한 사건은 1879년 12월 28일 오후 7시경 Scotland의 Tay강에 놓인 85경간 철재 격자 트러스(Lattice Truss)형식인 Tay교의 13경간 연속트러스부가 풍속 30m/s에 의하여 달리던 열차와 함께 강물속으로 붕괴되어 승객 75명이 사망한 것이다. 상부가 철재 트러스, 교각은 주철재 파이프 6개로 구성된 당시 세계 최대의 교량이었다고 빅토리아 여왕은 설계자 Bouch에게 ‘경(Sir)’ 칭호를 하사하기도 한 교량이었으나 당시만 해도 풍하중에 대한 인식이 부족하여 열차가 교량을 통과할 때 열차가 받는 바람의 저항력이 교각에 수평력으로 작용되는 것을 간파하지 못했고, 설계시 고려되었던 약 30kgf/m<sup>2</sup>의 풍하중은 너무 과소한 것이었다. (이석주, 2007) 그후, 1887년에 재건된 新Tay교에 대해서는 273kgf/m<sup>2</sup>의 풍하중이 고려되었으며, 그 타당성은 Baker 등의 현장실험을 통하여 검증되었다.

이 후 교량이나 건축물 등 설계에 정량적으로 평가된 풍하중이 반영되는 풍토가 정착되었으나, 바람의 작용에 따른 또 하나의 중요한 문제인 바람에 의한 구조물의 진동문제에 대한 검토가 충분하지 않았다. 이 진동문제에 대한 본격적인 검토와 연구의 획기적인 전환점이 된

사건이 그 유명한 Tacoma Narrows교 붕괴 사고이다.

1940년 11월 7일 당시 George Washington교와 Golden Gate교에 이어 세계 3위의 장경간(854m) 현수교로 위용을 자랑하던 Tacoma Narrows 교량이 925 kgf/m(약 53m/s)의 풍하중에도 견딜 수 있도록 설계되었음에도 불구하고 풍속 19m/s의 바람에 의하여 심한 비틀림 진동이 발생하기 시작하여 마침내 붕괴에 이르렀다. (그림 1 참조)



[그림 1] Tacoma Narrows교의 붕괴

이 사고는 전세계 교량 공학자들에게 큰 충격을 주었고 현수교에 있어서 바람에 의한 진동문제가 매우 중요함을 인식하게 되어 풍동실험으로 대표되는 풍공학 분야의 비약적인 발전을 이루는 계기가 된다.

바람에 의한 피해 사고는 이 외에도 1836년 영국에서 발생한 Brighton Chain Pier교의 파괴 사고, Menai Straits교에서 1826년, 1836년, 1839년의 3회에 걸쳐 발생한 파괴 사고, 1854



[그림 2] 수직재를 보강한 방화대교

년 미국의 Wheeling교의 붕괴사고 등 많은 기록이 있다. 국내의 경우에도 많은 피해 사고가 보고되고 있지만, 공개된 사례로는 아름다운 경관을 자랑하는 한강의 방화대교 수직재가 바람에 의하여 심한 진동현상을 일으켜 수평 보강재를 설치한 예가 대표적이라 하겠다. ([그림 2] 참조) 바람에 의한 피해 및 사고 사례는 다음의 [표 2.1]에 정리되어 있다.

### 3. 교량에 미치는 바람의 영향

#### 3.1 정적인 풍압력의 작용

일반적으로 교량 등 구조물에 작용하는 바람의 문제는 풍압력에 관한 것이다. 오늘날 풍압력은 설계기준 등에 자세히 언급되어 있어서 큰 문제로 인식하고 있지 않으나 앞서 언급했던 Tay교의 붕괴 사고라든지 1962년 일본에서 발생한 木曾川橋의 가설 중 트러스가 태풍에 의

[표 2.1] 바람에 의한 교량의 사고 사례 (교량과 바람, 1998)

교량	소재지	형식 및 주경간장	준공년	피해 및 특기 사항
Brighton Chain Pier교	영국	현수교, 68m	1823	부분 파괴(1833), 비틀림 진동파괴(1836)
Menai Straits교	영국	현수교, 177m	1826	3회에 걸쳐 바람에 의하여 파손, 바닥 보수
Nassau교	독일	현수교, 75m	1830	현수 체인 파손 (1834)
Niagara-Lewiston교	미국·캐나다	현수교, 318m	1850	강풍에 의한 파괴 (1864)
Tacoma Narrows교	미국	현수교, 854m	1940	13~18m/s 상하한정진동, 19m/s 플러터붕괴
Fykesund교	노르웨이	현수교, 228m	1937	상하진동 발생에 따라 보강
Golden Gate교	미국	현수교, 1280m	1937	25~30m/s 풍속에서 진동, 부분파손 후 보강
Thousand Islands교	캐나다	현수교, 244m	1938	상하 진동 발생
Deer Isle교	미국	현수교, 329m	1939	32m/s 풍속에서 1차 대칭 상하 진동 (1942)
Bronx-Whitestone교	미국	현수교, 701m	1939	진동이 발생한 거더를 트러스로 보강
Tay교	영국	트러스교, 75m	1878	통행 열차 풍압으로 붕괴 75명 사망 (1897)
Chester교	미국	겔버 트러스교	-	회오리바람에 의해 파괴 (1944)
木曾川橋	일본	트러스교	-	태풍에 의해 가설중 거더 낙교 (1962)
Beauharnois교	캐나다	현수교, 177m	-	교축방향의 바람에 의해 상하 진동 발생
George Washington교	미국	현수교, 1067m	1931	미세한 상하 진동 및 비틀림 진동 발생
Lions Gates교	캐나다	현수교, 472m	-	상하 진동 (풍속 22~27m/s)
Peace River교	미국	현수교, 283m	-	소진동 (저풍속), 비틀림 진동 (22~28m/s)
Liard River교	미국	현수교, 165m	-	소진동 (저풍속), 비틀림 진동 (18~26m/s)
四徳大橋	일본	아치교, 150m	1967	강관 수직재 진동 (5~6m/s), 단부 보강
Forth Road교	영국	현수교, 1006m	1964	독립 주탑 진동, Sliding Block으로 제진
名狩河口橋	일본	사장교, 160m	1971	가설중 상하 한정진동 발생, 단면 약간 변경
Severn교	영국	현수교, 987m	1966	경사 행어의 진동발생, 제진장치 설치
六甲大橋	일본	사장교, 220m	1977	케이블 진동 발생, 케이블 사이를 와이어 연결

해 떨어진 사고 등이 이에 해당한다.

구조물이 바람에 의한 하중을 받을 때 단면의 형상에 따라 풍압의 분포는 달라지며, 구조물에 작용하는 힘은 풍압의 총합으로 작용하기 때문에 일반 하중과는 달리 구조물의 형상에 따라 하중의 크기가 달라진다는 점이 풍하중의 특징이다. 교량에 작용하는 하중은 크게 항력(Drag), 양력(Lift) 및 피칭 모멘트(Pitching Moment)로 구분된다. 항력은 교축직각방향(수평방향)으로 불어오는 힘이고, 양력은 교량 주형에 수직으로 작용하는 힘이다. 피칭 모멘트는 거더를 비틀리게 하려는 힘이다. 또한, 자연풍은 교축직각방향으로만 불어오는 것이 아니기 때문에 트러스거더 등에 대해서는 교축방향에 대한 풍하중도 검토하여야 한다.

구조물에 작용하는 자연풍은 항상 일정한 강도로 부는 것이 아니라 풍향 및 풍속이 공간 및 시간적으로도 변화하기 때문에 구조물에 작용하는 힘은 일정한 정상류가 아니다. 따라서 설계시 고려해야 할 풍하중은 순수한 정적인 하중과 차이가 있으며 공간 및 시간적으로 변화하는 풍하중은 구조물에 불규칙적이면서 강제적으로 가진 시키는 힘이 작용하게 되므로 동적인 하중효과에 대한 고려가 반드시 필요하다.

### 3.2 바람에 의한 구조물의 진동

바람에 의한 교량 진동 문제로서는 현수교와 사장교의 주형 및 주탑 등의 진동이 일반적으로 잘 알려져 있다. 그러나 실제 교량에 있어서는 이와 같은 구조물 전체 시스템으로서의 진동뿐만 아니라 케이블이라든지 트러스의 복부재나 아치의 수직재와 같은 구조부재에 대한 진동이 문제가 되는 경우가 많다. 교량에 대한 대표적인 공

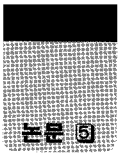
기역학적 진동 현상은 다음과 같다.

#### 3.2.1 플러터 (Flutter)

교량, 탑, 건물 등 토목 및 건축 구조물에 바람이 작용하면 일반적으로 구조물은 비유선형 단면 형상을 갖고 있기 때문에 다양한 공기역학적 불안정 진동 현상이 발생한다. 이 중 자발적인 진동으로서 대표적인 것이 플러터 현상이다. 플러터현상은 구조물에 바람이 작용할 경우 구조물의 진동 변위에 의해 생성되는 부가적인 공기력이 유체력으로 귀환(Feed Back)하여 발생하는 현상이다. 플러터현상으로는 휨 1자유도 플러터인 갤로핑(Galloping), 비틀림 1자유도 플러터, 그리고 휨과 비틀림이 합성된 합성플러터가 있으며, 이러한 플러터의 발생은 교량을 순식간에 붕괴에 이르게 할 수 있기 때문에 설계풍속내에서 반드시 피해야 하는 현상이다.

합성플러터는 진동중에 물체에 작용하는 시간적으로 변화하는 공기력이 휨과 비틀림의 독립된 항뿐만 아니라 2자유도간 합성된 항을 포함한 형태로 정식화된다. 합성플러터의 한계풍속은 휨에 대한 비틀림의 고유진동수 비가 약 1.1일 경우에 최저가 되므로 일반적으로 휨에 대한 비틀림 고유진동수의 비를 2 이상으로 설계하는 것이 안전하다고 알려져 있다.

비틀림 1자유도 플러터는 비교적 변장비가 큰 단면에서 많이 발생하며 Tacoma Narrows 교량 붕괴의 직접적인 원인으로 알려져 있다. 비틀림 플러터는 Scruton 수  $(2m\delta/\rho D)^2$ ,  $2I\delta/\rho D^4$ , 여기서  $m$ : 질량,  $I$ : 극관성모멘트,  $\delta$ : 구조감쇠,  $\rho$ : 공기밀도,  $D$ : 대표길이)에 민감하다. 비틀림 플러터를 효과적으로 제진하기 위해서는 단면의 단부를 유선형으로 하거나 Fairing과 같은 공기역학적 제진장치를 설치하여야 한다.



갤로핑이라고도 부르는 횡 1자유도 플러터는 정사각형을 포함하여 일정한 범위내의 변장비, 즉 사각형 기둥에서  $B(\text{폭})/D(\text{높이})=0.7\sim 2.8$  부근을 갖는 사각형 단면에서 발생하는 것으로 알려져 있다.

### 3.2.2 와류진동 (Vortex-Induced Oscillation)

와류진동은 구조물의 후면이나 측면에서 생성되는 주기적인 와류의 발생에 의하여 생기는 동적인 공기력의 작용에 의한 진동현상으로 횡진동, 비틀림진동 외에도 경우에 따라 풍향방향으로도 발생하지만, 그 발생 진폭이 어떤 값 이상으로는 크게 되지 않는 제한적인 진동 현상이다. 따라서 와류진동에 의하여 구조물이 순식간에 붕괴되지는 않으나, 일상적으로 발생하기 쉬운 비교적 저풍속에서 발생하기 때문에 진동에 의한 반복적인 응력이 작용하여 부재의 피로 문제를 야기시킬 수 있으며, 통행자에게 불쾌감이나 불안감을 주는 요인이 된다. 와류진동현상을 완전히 억제시킬 수 없는 경우에는 가능한 사용성에 문제가 없는 범위로 최소화하여야 한다.

### 3.2.3 거스트 응답 (Gust Response)

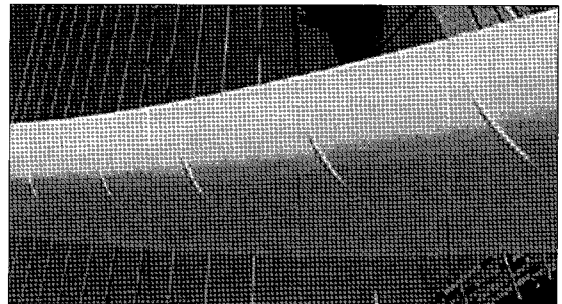
바람의 난류에 의한 변동으로 인하여 구조물에 불규칙적인 변동 공기력이 작용하여 발생하는 강제진동현상을 거스트 응답이라고 하며, 이것을 버펫팅(Buffeting)이라 부르기도 한다. 버펫팅 진동은 자연풍과 같이 변동을 수반하는 흐름 속에서 구조물의 형상과 풍속영역에 관계 없이 크던지 작던지 간에 발생한다. 통상 거스트 응답에 대해서는 준정상 응답(Quasi-Steady Response)로 생각할 수 있으며 평균풍속과 변동풍속에 비례하여 응답이 증가하게 된다. 설계에서는 일반적으로 최대평균풍속에서의 응답치가 중요하므로 동적인 하중효과를 정적

인 풍하중으로 환산하고, 이것을 평균풍속에서의 정적 풍압에 의한 하중과 합하여 설계에 반영한다.

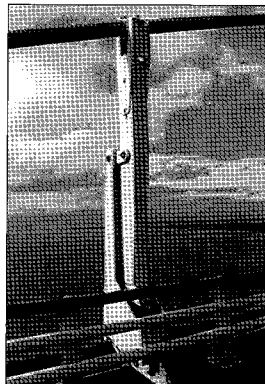
### 3.2.4 케이블 진동 (Cable Vibrations)

사상교 케이블 등에서 많이 발생하는 공기역학적 진동 현상으로는 풍우진동 (Rain-Wind Induced Vibration) 과 웨이크 갤로핑 (Wake Galloping) 현상이 있다. 풍우진동현상은 강우시 바람이 케이블에 대하여 어떤 편각을 가지고 불어올 때 발생하는 현상이다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 Dimple이나 Helical Rib와 같은 케이블 피복관에 표면처리를 하게 된다.

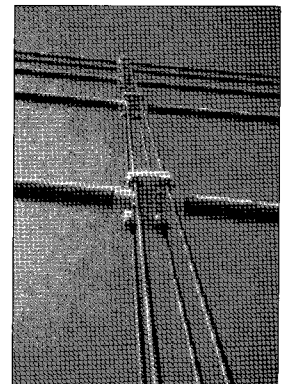
웨이크 갤로핑은 병렬로 된 케이블에서 풍상측에 있는 케이블로부터 발생한 웨이크의 영향으로 풍하측 케이블



(a) Helical Rib



(b) External Damper



(c) Cross-Tie

[그림 3] 케이블 진동 대처 방안

이 진동하는 현상이다. 이 경우 두 케이블 사이의 간격을 직경의 일정 간격 이상으로 떨어뜨려 주고 병렬 케이블을 Spacer 등으로 묶어주는 대책이 사용되고 있다.

이 밖에 결빙에 의하여 발생하는 Ice Galloping이나 케이블의 버펄링 진동에 의한 공진으로 발생하는 케이블 진동(Parametric Excitation) 현상이 있다. 케이블 진동이 심할 경우에는 Cross-Tie를 이용하여 제진하거나 외부댐퍼(External Damper) 등을 추가로 설치하여 케이블의 댐핑값을 증가시켜 진동을 억제할 필요가 있다. ([그림 3] 참조)

## 4. 내풍설계 기반 유지관리 방재 시스템

### 4.1 교량의 풍동실험과 내풍설계

‘내풍설계(耐風設計, Wind Resistant Design)’라는 용어가 일반에 정착된 지 오래되었으나, 교량에 적용하는 풍하중에 대하여 정량적으로 평가되어 설계에 고려된 것은 1890년에 완성된 Forth 철도교가 최초인 것으로 추정된다. (교량과 바람, 1998)

구조물의 내풍설계 및 해석은 일반적으로 풍동실험(Wind Tunnel Test)에 의한 방법과 수치해석에 의한 방법으로 크게 나눌 수 있다. 최근에 컴퓨터 과학의 발전으로 인하여 수치해석에 의한 방법(Computational Fluid Dynamics, CFD)이 각광을 받고 있으나 3차원의 복잡한 형상을 구현하기 힘들고 아직까지 풍동실험에 비하여 해석결과를 신뢰하기 어렵기 때문에 바람에 의한 구조물의 거동 특성은 풍동실험에 의하여 검증하고 설계 및 해석에 이용하고 있는 현실이다.

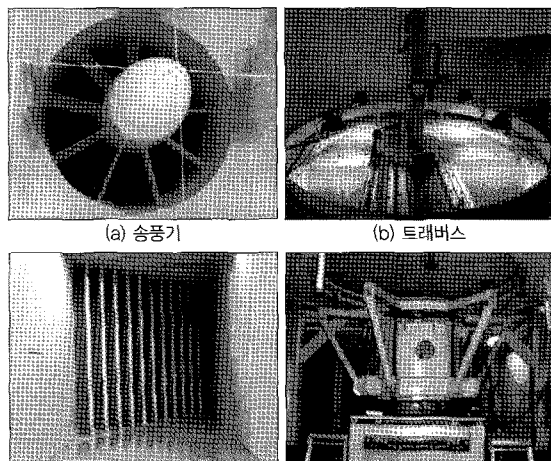
풍동(風洞, Wind Tunnel)이란 인공적으로 바람을 발생시키는 장치이며, 송풍기에 의해 덕트(관로)안에 바람

을 발생시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 본고에서는 풍동 실험실의 시설 및 장비를 당사의 경우를 대상으로 하여 소개하고자 한다. 본 풍동실험실은 풍동본체, 송풍기, 트래버스장치 및 턴테이블, 제어·계측시스템 등으로 구성되어 있다. ([그림 4] 참조)

풍동본체는 철골조에 석고보드 및 Plywood 마감으로 구성되어 있으며, 길이 20m의 축정부 단면(높이×폭)은 2m×3m이다. 또한, 축류동 단부에서 3m, 16m에 폭 3m의 관측창과 모형고정장치가 설치되어 있으며 풍동 전체에 풍동외부로부터의 소음을 차단하기 위하여 특수 차음 슈트를 설치하였다.

송풍기는 직경 3,060mm의 축류송풍기로서 풍동본체 외부에 설치된 132kW의 전동기와 직결되어 있다. 전동기는 사이리스터 레오나드방식에 의해 1,150rpm까지 회전수 제어가 가능하다.

트래버스는 외장형으로서 센서를 소정의 위치까지 정확히 이동시켜 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위하여 풍 방향(X축), 풍직각방향(Y축), 연직방향(Z축) 및 회전(q축)의 정확한 4축의 위치제어가 가능하다.



[그림 4] 풍동실험 시설 (대우건설 기술연구원)

코너베인은 모서리에서의 기류가 원활하게 흘러갈 수 있도록 하는 역할을 하며, 턴테이블은 교량이나 건축구조물의 수평공간에 따른 응답 분석을 위하여 실험 모형이 360°로 회전할 수 있도록 한다.

송풍기, 트래버스, 턴테이블 등은 전용 컨트롤러를 통하여 자동제어되며, 계측기로는 국내 최대 규모의 512 CH 다점풍압동시측정기와 3분력계 및 6분력계, 진동실험을 위한 짐발장치 및 교량 단면 모형 실험을 위한 Spring Supported System 등을 보유하고 있다.

교량의 내풍설계 및 해석을 위한 풍동실험은 주형단면 모형실험, 독립주탑모형실험, 그리고, 전교모형실험의 3가지로 크게 나눌 수 있다. 주형단면모형실험은 내풍설계를 위한 물성치를 제공하고, 내풍안정성을 평가하는데 있어서 가장 기본이 되면서도 중요한 실험이다. 주형단면모형실험은 와류진동의 발생 풍속 및 진폭, 그리고, 플러터나 버펫팅의 측정이 가능하며, 이처럼 유해한 진동을 억제하기 위한 여러 가지 제진장치들인 Fairing, Vane, Flap, Extension 등을 제시하게 된다.

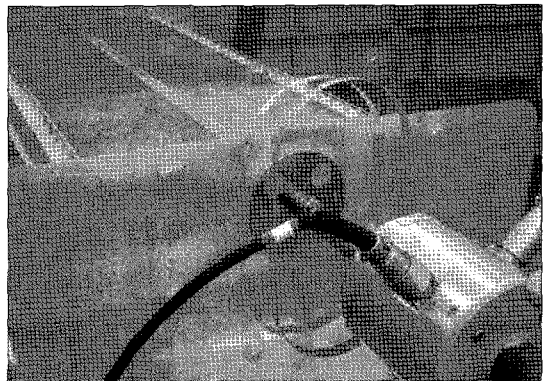
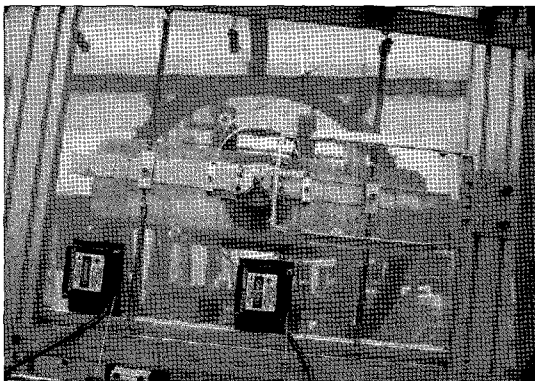
주형단면모형실험은 항력계수, 양력계수 및 모멘트계수의 공기력계수를 측정하는 정적실험과, 와류진동 및 플러터나 버펫팅 현상과 같은 진동현상을 규명하기 위

한 동적실험으로 나누어진다.

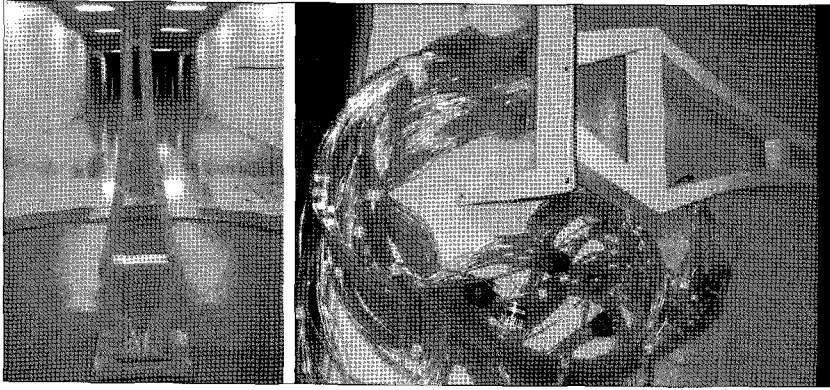
정적실험에서 공기력계수는 풍동에 설치된 분력계(Load Cell)에 의하여 구해지며, 여기서 계산된 공기력계수는 설계기준에서 제시하는 값과 비교하여, 설계에 반영된다. 진동실험에서는 유해한 진동현상을 사전에 발견하여 설계에 반영하며, 기존에 설계 또는 시공된 구조물에서 문제가 발생할 경우에는 진동억제 또는 제거를 위한 공기역학적 제진장치 등을 제시하게 된다. 이를 위하여, 풍동에는 Spring Supported System이 구축되어 있어야 한다. 또한, 내풍안정성의 평가에 있어서, 적정범위의 영각 및 감쇠비의 변화가 반드시 고려되어야 한다. (그림 5 참조)

독립주탑모형실험은 케이블에 지지되기 전에 취약한 독립주탑의 시공 중 안정성 여부를 검토하는 실험으로서, 주형모형실험과 마찬가지로, 영각과 감쇠비에 따라 내풍안정성이 평가된다. [그림 6은 독립주탑의 풍력 및 풍압 모형실험 장면이다.

전교모형실험은 가설단계를 포함하여 완성계까지 내풍안정성을 전체적으로 검토 및 평가하게 된다. 최근의 연구결과에 의하면, 현수교는 가설단계초기(약 10~20%)에서 발산진동에 상당히 취약한 현상이 발견되



[그림 5] 주형단면모형실험



[그림 6] 독립주립의 풍력 및 풍입 모형 실험

있으며, 이를 극복하기 위하여 비대칭 가설 공법이 제시되기도 하였다. [그림 7]은 가설단계를 포함한 현수교의 전교모형실험 예를 보여주고 있다.

#### 4.2 재해위험도 분석을 통한 유지관리 방재 시스템

바람에 의한 교량의 사고에 대처하기 위해서는 설계단계에서 현장의 기상자료를 분석하고 가설단계를 포함한 풍동실험 등을 통하여 풍하중에 대한 합리적인 설계 물성치 산출과 내풍 안정성에 대한 충분한 검토 및 공기역학적 제진 대책을 수립해야 하는 것은 주지의 사실이다.

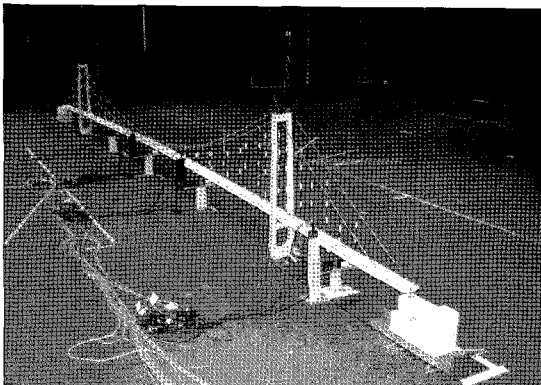
또한, 시공단계에서부터 준공 후 사용 상태까지 지속적인 유지관리 계획 및 모니터링을 통하여 구조물의 내

풍 안정성을 평가하고 내풍 재해 방재 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

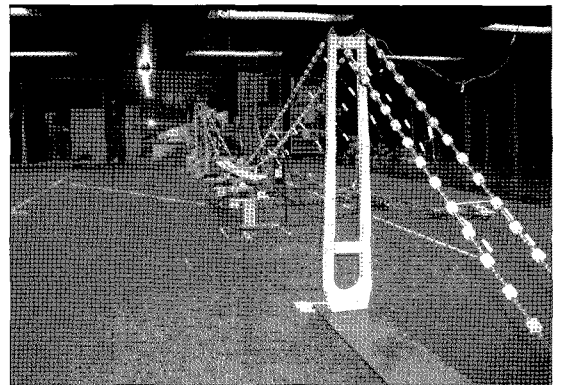
기존의 모니터링 시스템은 확률적 재해 위험도 분석에 의한 구조물 성능 평가에 대한 충분한 이해가 부족하여 사고의 징후를 미리 정량적으로 예측하여 이에 대비하

는 데 어려움이 있다. 따라서 시설물에 센서를 설치하여 나온 데이터를 수집하여 단순히 추세분석에 그치는 것이 아니라, 구조물의 건전성 및 생애주기를 평가하고 설계 가정에 Feed Back하여 시공중 및 사용중 유지관리를 수행하고 구조적 Well-Being 상태를 유지할 수 있도록 헬스모니터링(Structural Health Monitoring)에 의한 방재 시스템을 구축해야 한다.

태풍 등 바람에 의한 방재 시스템을 정량적으로 구축하기 위해서는 대상 구조물을 주요 부재 또는 공정별로 구분하여 대상 지역의 강풍 발생 위험 요소(Hazard)를 평가하고 내풍 특성에 의한 취약도(Fragility)를 계산하여 재해 위험도(Risk)를 산출해야 한다. 재해 위험도의

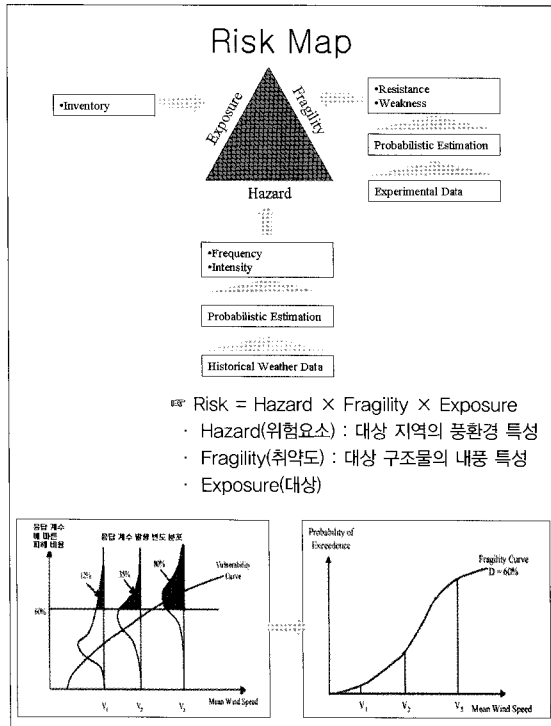


[그림 7] 가설단계를 포함한 3차원 전교모형실험 (현수교)





산출 방법을 다음의 [그림 8]과 같이 간단히 정리하였다.



[그림 8] 내풍 재해 위험도 분석

정량적으로 평가된 내풍 재해 위험도에 따라 구축된 유지관리 방재 시스템은 시공 중에 계절별 공정 Phase의 배치 변화와 극한 풍속 및 응답 계수 확률 분포를 이용하여 피해 비용이나 파괴 정도에 따른 기준(피해도)을 설정함으로써 효율적인 공정관리에 활용이 가능하며 실시간 풍속 계측 및 내풍 취약도 분석을 통하여 안전한 공

사 관리에 도움이 될 것으로 사료된다. 또한, 사용 중에 헬스모니터링에 의한 구조 부재별 건전도를 평가하고 태풍 자료에 의한 위험도 분석을 통하여 태풍의 내습에 대비한 구조물 안전 관리 및 경제적인 유지관리 및 보수·보강 계획 수립이 가능할 것으로 사료된다.

## 5. 맺음말

환경과 미관을 중요시하는 추세에 따라 장대교량의 건설 수요는 점차 증가할 것이며, 지구 온난화 등의 원인으로 초대형 태풍의 발생 가능성 또한 커지고 있다. 따라서 바람에 취약한 장대교량에 대하여 풍동실험 등 내풍설계 및 내풍 안정성에 대한 체계적이고 면밀한 검토가 반드시 이루어져야 한다.

평범한 의사는 환자의 병이 커져 고통으로 신음할 때 치료를 하고, 훌륭한 의사는 환자의 미미한 병세를 보고 큰 병이 들기 전에 조치를 취하며, 천하의 명의를 환자가 아픔을 느끼기 전에 얼굴빛만 보고 장차 발생할 병의 원인을 미리 제거해 준다.

교량과 같이 많은 사람들이 이용하는 중요 구조물은 사고가 나서 조치를 취하기에는 그 피해가 너무도 심각하다. 따라서 재해위험도 분석을 통한 유지관리 방재 시스템을 구축하고 상시 모니터링함으로써 바람에 의한 교량의 사고를 미연에 방지하는 지혜가 필요하다.

### 참고문헌

1. 김영민, 김대영, 이학은 (2003) 長大橋梁의 耐風解析, 한국강구조학회지, 제15권, 제1호, pp.104-113.
2. 김대영, 김영민 (2006) 橋梁과 建築 構造物의 風洞實驗과 耐風設計, 한국풍공학회지, 제10권, 제2호, pp.136-145.
3. 김윤석, 김희덕, 백병기 번역, 교량과 바람 (1998) 한국풍공학회
4. 이석주 (2007) 낙교사고를 통해 본 교량기술발전, 대한토목학회지, 제55권, 제12호, pp.111-116.
5. 이승수, 함희정 (2007) 산업용 시설물의 풍해취약도함수 국산화 연구, 국립방재교육연구원 방재연구소