

횡방향 새그를 가진 자정식 현수교의 공탄성 거동(II)

- 주탑의 거동을 중심으로 -

Aeroelastic Behaviors of Self-anchored Suspension Bridge with Lateral Sag of Main Cable(II)

- Focused on the Behavior of Tower -

권 순 덕¹⁾ · 장 승 필²⁾

Kwon, Soon Duck Chang, Sung Pil

요 약 : 본 연구에서는 자정식 현수교 주탑의 내풍 안정성을 보기 위하여 주탑 모형 실험과 전교 모형 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 경사진 병렬 탑주를 가진 주탑의 경우에는 다양한 주파수대의 웨이크가 존재하므로 넓은 풍속대에서 진동이 발생한다는 사실을 확인하였다. 자정식 현수교의 경우에는 주형의 교축방향 지지조건에 따라 주탑의 진동 모드가 매우 민감하게 변화하였다. 본 연구 대상 주탑은 면외 휨 모드와 비틀 모드의 고유진동수가 매우 근접해 있어서 넓은 범위의 풍속에서 연성진동이 발생하였다. 주탑 진동을 완화하기 위한 공기역학적 수단으로 모서리 자르기를 시도하였는데, 탑주의 폭과 잘린 모서리의 비가 1/10일 때가 가장 효과적이었다.

ABSTRACT : Wind tunnel test results and their interpretations, which were performed to study the aerodynamic stability of tower of self-anchored suspension bridge, are presented in this paper. Tower and full models were tested under smooth and turbulent flow conditions. In the case of the tower with inclined two columns, the vibration due to wakes were occurred at wide velocity zone because the wakes with various frequencies were generated by inclined upstream column. It has to be emphasized that the vibration characteristics of the tower in the self-anchored suspension bridge may be very sensitive to the longitudinal boundary conditions of the girder at the supports. Because of the two natural frequency of the tower, out-of-plane bending and torsional, were not well separated, coupled motions were observed in a wide range of wind velocity. The effectiveness of corner cut, countermeasure to reduce the tower vibrations, was also studied. It has been found that 1:10, corner cut size to column width, may be the most effective ratio for reducing the vibrations.

1) 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

2) 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 1997년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면, 토의회답을 게재하겠습니다.

핵심용어 : 풍동실험, 자정식 현수교, 주탑 진동, 웨이크 비페팅, 모서리 자르기, 연성 진동
 KEYWORDS : wind tunnel test, self-anchored suspension bridge, tower vibration, wake buffeting, coner cut, coupled vibration

1. 서론

연계논문⁽¹⁾에서는 수도권 신공항 연육교 주경간 교량인 자정식 현수교를 대상으로 부분 모형 실험과 전교 모형 실험을 통하여 주형의 내풍안정성을 확보하였고, 기존 현수교들과 다른 독특한 구조적 특징으로 인한 주형의 거동을 실험적으로 규명하였다.

본 연구의 적용 대상이 되는 교량은 주 케이블의 정착방법과 형상에 있어서 기존의 현수교와 구별되는 특징을 지니고 있다. 주 케이블은 앵커리지 없이 바로 주형에 정착되어 장력을 주형의 축강성으로 지지한다. 따라서 교량의 종방향 진동 모드는 지지조건에 따라서 크게 영향을 받게 된다. 종방향 지지조건은 측경간이 스프링으로 구속되어 있는 것으로 설계되었다. 그러나 실험에서의 스프링 강성이 불확실하므로 주케이블에 의하여 탑정부에서 구속을 받는 주탑의 진동 모드도 스프링 강성에 따라 변하게 된다.

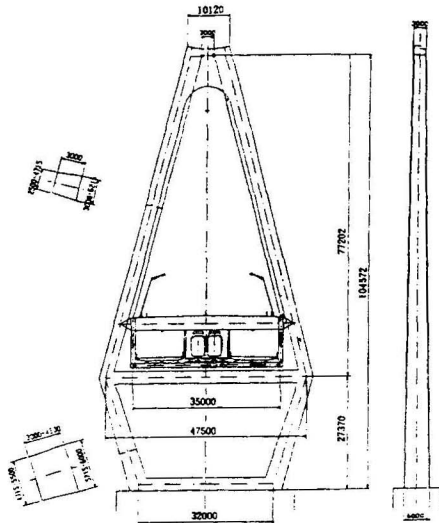


그림 1. 수도권 신국제공항 연육교 주경간 교량의 주탑

본 연구 대상 교량의 또다른 특징으로는 주 케이블이 횡방향 새그를 가진다는 점이다. 즉 주 케이블이 측경간에서는 벌어져 있지만 주탑에서는 한곳으로 모이고 중앙경간의 중심부에서 다시 갈라지는 형상을 하고 있다. 따라서 주탑 형상도 기존 현수교의 門形과는 다른 A형으로 되었다. 주탑이 A형일 때 기존 현수교 주탑의 거동과 다른 점은, 횡방향으로 지지되지 않은 긴 탑주에서 진동이 발생하기 쉽고, 상류측 탑주에 의해 교란된 다양한 웨이크(wake)가 발생할 수 있다는 점이다.

또다른 차이점으로는 케이블이 탑정부의 중앙에서 지지하고 있으므로 회전에 대한 구속이 작아서 비틀림 진동이 발생할 가능성이 상대적으로 높다는 점이다.

주경간 교량의 주탑은 앞에서 언급한 특징들로 인하여 기존 현수교의 주탑과는 다른 내풍 거동을 보일 것으로 예측되므로, 본 연구에서는 주탑 모형 실험과 전교 모형 실험을 통하여 주탑의 거동을 중점적으로 검토하였다. 주탑에서 진동이 발생할 경우에 발생 원인을 공기역학적 관점에서뿐만 아니라 구조적인 관점에서도 분석하였다. 아울러 구조적 및 공기역학적 방법을 통한 제진 대책도 강구하였다.

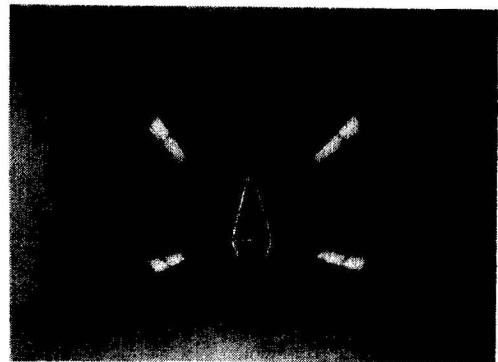


그림 2. 주탑 모형 실험

2. 실험의 개요

본 연구에서는 주탑 공탄성 모형 실험 (tower aeroelastic model test), 전교 공탄성 모형 실험 (full bridge aeroelastic model test), 주탑 가시화 실험 (flow visualization test)을 수행하였다. 주탑 모형 실험은 다양한 기류 조건하에서 시공중 및 완공후 주탑의 거동을 검토하는 것을 목적으로 하였다. 가시화 실험은 유체의 흐름을 직접 관찰하여 진동 발생 원인을 규명하기 위해 실시하였다. 전교 모형 실험은 주탑 모형 실험 결과를 최종 검증하고, 주 케이블과 연계된 복합적인 거동을 보기 위하여 실시하였다.

주탑 모형 실험은 실험구간의 폭이 1.37m이고 높이가 0.95m인 서울대학교의 풍동을, 전교 모형 실험을 위해서는 폭이 16m이고 높이 1.9m인 東京大學의 풍동을 사용하였다. 난류를 구사하기 위해서는 두 풍동에서 모두 격자를 사용하였다. 사용한 풍동이나 난류에 대한 자세한 사항은 참고문헌(1)에 나타나 있다. 가시화 실험을 위해서는 측정부 크기가 폭 11cm, 높이 0.9m인 東京大學의 연기풍동(smoke wind tunnel)을 사용하였다.

2.1 실험 모형

주탑 모형의 기하학적 축척은 풍동의 크기를 고려하여 1:150로 결정하였고, 다른 구조적 특성치는 Froude number에 의하여 정해진 상사율을 따라 결정하였다. 주탑 모형의 동적 특성치는 표 1에 나타내었는데, 측정치와 요구치의 차이가 작으므로 모형은 실제 주탑의 동력학적 거동을 잘 구현한다고 판단된다.

표 1. 주탑 모형의 동적 특성치

Mode	고유진동수(Hz)			감쇠비 (%)
	실교	요구치	측정치	
1 (면외1차)	0.3434	4.206	4.291	0.22
2 (면내1차)	0.9092	11.135	11.061	0.45
3 (비틀1차)	1.7697	21.674	20.404	0.17
4 (면외2차)	2.1438	26.256	-	-
5 (면내2차)	3.5416	46.376	42.375	-

주탑 모형은 시공단계에 따라 독립탑과 완성계 두가지로 구분하였다. 완성계를 묘사하기 위해서는 현수교 주 케이블의 구속력에 해당하는 등가 강성을 해석을 통하여 구한 후, 등가 강성에 상당하는 스프링을 탑정부에 고정시켰다. 이때 각 스프링 상수가 948.0N/m인 4개의 스프링을 주 케이블의 정착부에 설치하였다.

가시화 실험을 위해서는 상부 탑주의 중간지점에 해당하는 단면을 1/100으로 축소한 강체 모형을 사용하였다. 전교 모형은 축척 1:100인 총 길이 5.5m로 제작하였는데, 주요 제원은 참고문헌(1)에 나타나 있다.

2.2 실험 조건

주탑 모형은 수평 입사각을 0°에서 90°까지 변화시키면서 독립탑과 완성계에 대한 실험을 수행하였다. 기류 조건은 등류(uniform flow)와 12%, 18%의 난류(turbulent flow)를 사용하였다. 한편 수정한 주탑 단면에 대해서는 등류에서만 실험을 수행하였고, 효과를 확인하기 위해 연기 풍동(smoke wind tunnel)에서 가시화 실험을 수행하였다.

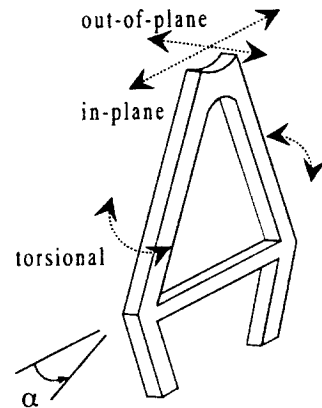


그림 3. 수평방향 입사각과 진동방향의 정의

전교 모형 실험도 등류와 10%의 강도를 가지

는 난류에 대하여 실시하였다. 모형의 응답은 상부 탑주의 1/2 지점에서 면내(in-plane) 및 면외(out-of-plane) 진동을 측정하였다.

3. 독립탑의 거동 및 제진대책

등류하에서 독립탑에 대한 주탑 모형 실험 결과는 그림 4에 나타내었다. 그림 4를 보면 설계풍속 내에서 발산진동인 갈로핑(galloping)은 발생하지는 않았다. 그러나 저풍속 영역의 좁은 풍속대에서 면외 휨 진동이 발생하였고, 광범위한 고풍속 영역에서 비틀 진동에 발생하였다.

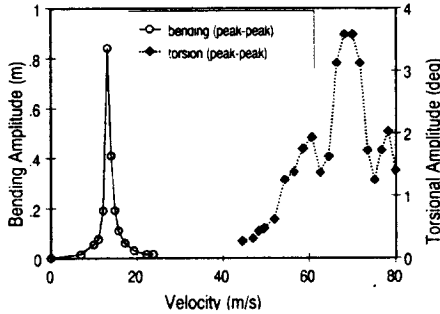


그림 4. 등류하에서 독립탑의 응답($\alpha=0^\circ$)

풍속 13.1m/s에서 최고가 되는 휨 진동은 전형적인 와류진동(vortex induced vibration)이다. 그림 5와 같이 휨 진동은 수평 입사각이 증가함에 따라 진폭도 줄어든다. 그러나 최대 배진폭이 약 1.08m이고, 이때 추정 가속도는 약 2.51m/s^2 이므로 피로문제 뿐만 아니라 작업성에도 어려움이 있으므로 제진대책이 필요하다고 판단된다.

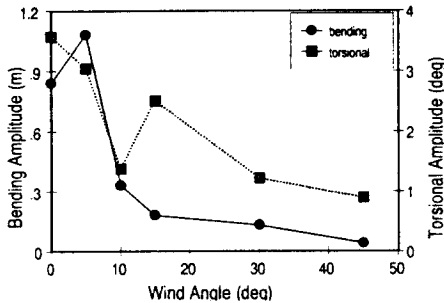


그림 5. 수평 입사각에 따른 독립탑의 응답

그림 6을 보면 휨 진폭은 감쇠비와 상당히 밀접한 관계가 있으므로, sliding block 등을 사용하여 감쇠비를 증가시키면 제진효과를 거둘 수 있다.

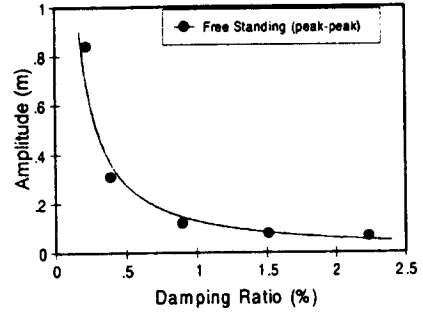


그림 6. 독립탑의 휨 진폭과 감쇠비의 관계(측정치)

고풍속 영역의 비틀진동은 넓은 범위에서 발생하고 있는데, 진동 특성이 와류진동은 아니고 웨이크(wake)에 의한 진동이라 판단된다. 웨이크에 의한 진동은 상류측 탑주에 의하여 교란된 기류가 하류측 탑주를 규칙적으로 때리면서 발생하는 진동이다. 만약 탑주의 간격이 일정하다면 발생하는 웨이크의 주파수와 탑주의 진동수가 비슷한 풍속대가 좁은 범위로 한정이 된다. 그러나 본 연구 대상 주탑은 탑주의 간격이 변화하므로 웨이크 발생 주파수도 탑주 간격에 따라 다르게 분포되어 있다. 따라서 풍속이 변해도 주탑의 진동수와 비슷한 진동수를 가진 웨이크가 존재하게 된다. 이러한 이유로 인하여 진동 발생 풍속대가 넓은 범위에 분포되어 있다. 그림 7에서는 진동 발생 원인을 규명하기 위한 가시화 실험을 보여주고 있다.

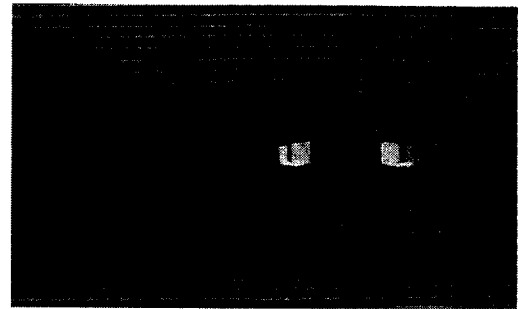


그림 7. 주탑의 가시화 실험

비틀림 진동도 그림 5에서 보듯이 수평 입사각이 증가함에 따라 진폭이 감소한다. 비틀림진동이 발생하는 풍속은 시공중 설계풍속보다는 높다. 따라서 독립탑은 비틀림진동에 대해서는 제진대책을 수립할 필요가 없다고 판단된다.

4. 완성계의 거동

완성계를 모사하기 위한 주탑 모형에서 주탑 정부에 설치한 스프링 강성을 변화시켰을 때 면외 휨 및 비틀림 진동수의 변화를 해석적으로 구한 결과는 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보듯이 스프링 강성이 증가함에 따라 휨 진동수는 급격히 증가하고, 모드 형상(mode shape)도 외팔보의 2차 모드 형상과 유사한 형태로 바뀌게 된다.

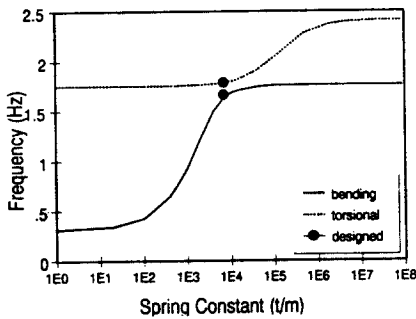


그림 8. 완성계 모사 주탑의 고유진동수

비틀림 진동수는 스프링 강성의 증가에도 불구하고 큰 변화가 없다가 휨 진동수가 일정한 값을 유지하는 시점부터 증가하기 시작한다. 스프링 강성은 케이블에 의한 주탑의 구속 정도를 의미하므로, 자정식 현수교의 경우에는 교축방향 경계 조건이 휨 모드에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 본 교량에서 설계된 값은 면외 휨 진동 모드와 비틀림 진동 모드가 아주 근접하게 위치하고 있으므로, 두 모드가 서로 간섭하여 진동을 일으킬 수 있다.

그림 9에서는 동류하에서 완성계 모사 주탑 실험 결과와 전교 모형 실험 결과를 비교하여 보여주고 있다. 주탑 모형 실험 결과를 보면, 휨진동이

초기에 시작되어 진폭이 점점 증가하다가 점차 비틀림 진동으로 변화해 갔다. 전교 모형 실험에서도 모드의 전이(transition) 과정을 관찰할 수 있었다. 진동의 발생원인은 독립탑에서와 마찬가지로 웨이크에 의한 진동으로 판단된다. 두 실험에서 발생 풍속대가 다른 것은 모형 제작 오차로 전교모형의 주탑 진동수가 요구치보다 낮기 때문이다.

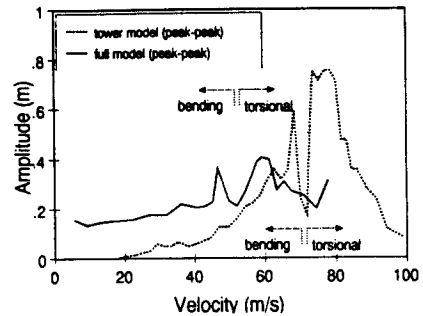


그림 9. 풍속에 따른 완성계 주탑의 응답

모드의 전이가 일어나는 풍속대에서는 휨과 비틀림이 결합된 형태의 연성(coupled) 진동이 발생하였다. 연성 진동이 발생하는 이유는 앞서서도 언급했듯이 두 모드가 매우 근접해 있기 때문이다. 또한 이러한 이유로 인하여 진동이 발생하는 풍속도 넓은 범위에 걸쳐져 있다. 그림 10에서는 풍속에 따라 발생하는 진동의 응답 주파수를 보여주고 있다. 처음에 휨 모드에서 시작한 진동이 점차 진동수가 증가하면서 비틀림 모드로 바뀌어 가는 과정을 볼 수 있다.

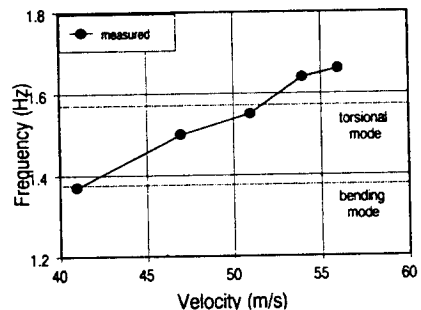


그림 10. 풍속에 따른 응답 주파수의 변화

동류하에서의 연성 진동과는 달리 난류하의 전교 모형 실험에서는 면외 휨 진동이 지배적이었다. 고풍속에서 주형의 수직방향 진동이 심하게 발생하는데, 주형과 주탑이 연결되어 있으므로 주형의 진동이 탑주끼리 반대의 위상(phase)을 가지는 비틀 진동이 발생하는 것을 방해하는 원인중의 하나인 것으로 판단된다.

5. 완성계의 제진대책

완성계 주탑에서 발생하는 진동은 발생 형태로 보아 사용성 문제는 일으키지 않을 것으로 생각된다. 구조 검토에서 발생 응력은 피로 문제에 대하여 안전측인 것으로 나타났다. 그러나 교량 완공 후 실제 발생 응력이 검토 응력을 초과하여 문제가 발생할 가능성에 대비하여 제진대책을 제시하여 필요할 경우에 효과적으로 사용할 수 있도록 하였다.

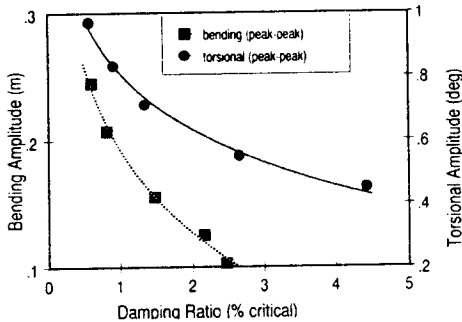
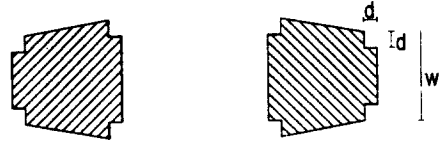


그림 11. 구조감쇠비와 주탑 진폭의 관계 (전교 모형 실험, 추정치)

구조적인 방법으로 진동을 줄이기 위해서는 감쇠비를 증가시키는 방법이 있는데, 그림 11에서는 구조 감쇠비와 휨 및 비틀 진폭의 관계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 휨 진동은 구조 감쇠를 조금만 높여도 효과를 쉽게 볼 수 있지만, 비틀 진동을 억제하기 위해서는 감쇠비를 상당히 증가시켜야 한다.

공기역학적인 방법으로 진동을 완화시키기 위해서 탑주의 모서리를 둥글게 하는 방법, 공기흐

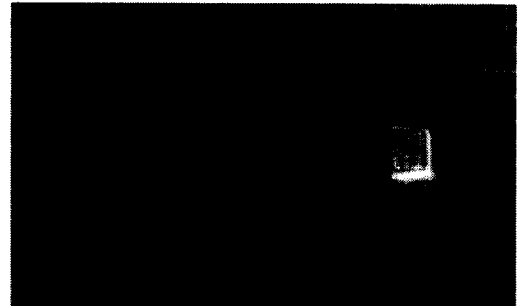
름 유도용 vane이나 deflector를 부착하는 방법 등의 다양한 방법을 시도하였으나 큰 효과를 보지 못하였다. 최종적으로 그림 12와 같은 탑주 모서리 자르기(corner cut)^{(4),(5),(6)}를 시도하였다.



$$\text{corner cut ratio} = d/w$$

그림 12. 탑주의 모서리 자르기

모서리 자르기가 적절히 크기를 조절하면 박리(separation)된 유선(flow stream)의 재부착길이(reattachment length)를 줄여서 효과를 볼 수 있다. 그림 13에서는 탑주의 폭과 잘린 모서리 크기의 비율에 따른 가시화 실험 결과를 보여주고 있다. 원단면의 실험결과 (a)와 모서리가 1/10 잘린 단면의 결과 (b)를 비교해 보면, (b)에서 후류가 훨씬 안정화되어 있음을 관찰할 수 있다.



(a) Corner cut ratio = 0/10



(b) Corner cut ratio = 0/10

그림 13. 탑주의 가시화 실험 결과

잘린 모서리 비에 따른 진폭의 변화는 그림 14에 나타내었다. 잘린 모서리 비를 적절히 조절하면 휨과 비틀 진폭을 각각 최대 50%, 60%까지 감소시킬 수 있었다. 특히 잘린 모서리의 비율이 1/10일 때가 최적이고, 그 이상과 이하에서는 진폭 감소가 크지 않았다.

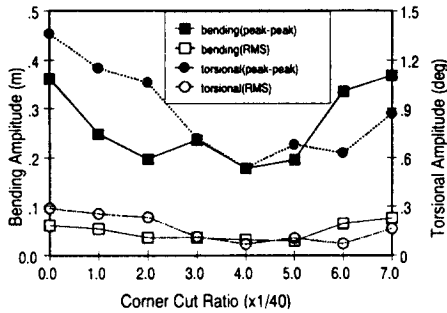


그림 14. 잘린 모서리 비와 진폭의 관계(측정치)

6. 결 론

수도권 신국제공항 연육교 주경간 교량의 내풍 안정성 평가를 위한 일련의 풍동실험 결과를 주탑의 거동을 중심으로 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

① 독립탑이나 완성계에서 발산진동인 겐로핑은 설계풍속내에서 발생하지 않았다. 따라서 본 연구대상 교량의 주탑은 동적 불안정 현상에 대해서는 안정하다고 판단된다.

② 독립탑에서는 면외 휨 모드의 와류진동이 발생하였으므로 감쇠비와 진폭의 관계를 제시하여 제진대책을 수립할 수 있도록 하였다. 완성계에서는 와류진동으로 추정되는 진동이 발생하지 않았다.

③ 병렬 탑주의 경우에는 웨이크 베퍼핑이 발생하기 쉽고, 특히 탑주의 간격이 변하는 경우에는 다양한 주기의 웨이크가 존재하므로 진동이 넓은 풍속대에서 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 독립탑에서 발생한 비틀진동의 원인을 규

명하기 위한 가시화 실험 결과 확인되었다.

④ 자정식 현수교에서 완성계 주탑의 진동수는 케이블에 의한 주탑의 구속 정도에 따라 매우 민감하게 변화였다. 주탑에서 휨과 비틀 모드가 매우 근접한 경우에는 발생하는 진동이 휨 모드에서 연성 모드를 거쳐서 비틀 모드로 전이됨을 확인할 수 있었다.

⑤ 고품속 영역에서 발생한 웨이크에 의한 진동을 줄이기 위해서, 유선을 유도하기 위한 부착물들은 큰 효과가 없었으나 모서리 자르기는 효과가 있었다. 특히 탑주의 폭과 잘린 모서리의 비가 1/10일 때가 진동을 완화하는데 가장 최적이었다.

참 고 문 헌

- (1) 권순덕, 장승필 : 1997, "횡방향 새그를 가진 자정식 현수교의 공탄성 거동(I) -주형의 거동을 중심으로-", 한국강구조학회 논문집 제9권 제2호
- (2) 교통부 : 1993, 수도권 신국제공항 연육교 실시설계 구조계산서
- (3) 서울대학교 공학연구소 : 1993, 수도권 신국제공항 연육교 주경간 교량의 풍동실험 연구
- (4) Okawa et al. : 1988, "Aerodynamic stability of a long-spanned cable-stayed bridge", International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Its Applications, Kyoto
- (5) Shiraishi et al. : 1987, "On aerodynamic stability effects for bluff rectangular cylinders by their corner-cut", 7th International Conference on Wind Engineering
- (6) 岡島厚 外 : 1991, "隅切り矩形断面柱の空力特性におよぼすレイノズ数の影響", 日本風工學會誌, 49號
- (7) 京都大 : 1986, 東神戸水路橋主塔の制振対策に関する調査研究
- (8) 首都高速道路公團 : 1983, 横浜港横断橋上部構造の施工検討報告書-第3編: 塔架設時の風洞試験概要
- (9) 橋と風編集グループ : 1990, 橋と風

(접수일자 : 1997. 5. 13)