

# 합성형 사장교의 3차원 공기역학적 특성에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on 3-Dimension Aerodynamic Properties of Composite Cable Stayed Bridge

민 인 기<sup>1)</sup> · 채 영 석<sup>2)</sup>  
*Min, In Ki      Chae, Young Suk*

요 약 : 본 연구의 목적은 3차원 풍동실험을 이용하여 합성형 사장교의 공기역학적 특성을 분석하는데 있다. 2차원 풍동실험에서 선정된 내풍개선 단면을 가지고 영각, 풍각에 대하여 3차원 모형의 내풍안정성을 평가한다. 설계풍속에서 수직, 비틀림 와류진동, 비틀림 플로터 등의 공기역학적 특성을 규명하였다. 또한 사장교는 FCM으로 대부분 가설하므로 가설단계에서 강성이 부족하다. 따라서 실험은 완성계, 2개의 가설단계, 독립주탑의 단계별로 나누어 진행되었다. 원설계가 강상형교로 설계되었기 때문에 강상형교와 합성형교의 내풍특성을 비교하였다. 이 논문은 중소형 합성형 사장교의 내풍특성의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다

ABSTRACT : The aim of this study was to analyze the aerodynamic properties of the composite cable-stayed bridge by conducting three-dimensional wind tunnel tests. Focusing on the improved section of the bridge in the two-dimensional wind tunnel tests, the bridge's aerodynamic stability was estimated based on the angles of attack and the wind angles. The aerodynamic properties of vertical galloping, torsion galloping, and torsion flutter were also estimated based on the design wind velocity, and because much of the cable-stayed bridge was constructed using FCM, it was not sufficiently stiff during the bridge's construction. Therefore, the experience progressed by stages: from the full stage to the tow stage, and until the bridge became a single tower. Since the original plane was designed to be a steel box girder, the aerodynamic properties of the steel-box-type and composite-type girder could be compared. The results of this study can be utilized as basic data regarding the aerodynamic properties of medium-length and short composite cable-stayed bridges.

핵심용어 : 풍동실험, 공기역학적특성, 강합성사장교, 내풍안정성

KEYWORD : wind tunnel test, aerodynamic properties, steel composite cable stayed, aerodynamic stability

### 1. 서론

사장교는 현수교와 같이 경간에 비해 강성이 작기 때문에 정적인 문제뿐만 아니라 고유진동주기가 길어 바람에 매우 민감하게 반응하므로 내풍안정성의 확보는 매우 중요하다. 현수교에서는 1940년 준공 4개월 만에 19m/s의 바람에 붕괴된 Old Tacoma Narrow교 이후, 바람에 의한 진동이 문제로 부상되었고, 1960년대 이후, 사장교에서도 지간이 장대화되면서 바람의 영향에 대한 연구가 본격적으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 Old Tacoma Narrow교와 같이 내풍공학적인 측면에서 불리한  $\pi$ 형 단면을 가지고, 중앙경간 230m, 측경간 103m의 경간을 가지고 양단에 2개의 I형 Main

Girder와 중앙에 Stringer가 배치된 강합성 사장교인 삼천포대교를 대상으로  $\pi$ 형 단면을 가진 합성형 사장교의 내풍특성을 평가하여 보다 합리적인 제진방법을 제시해 보고자 한다.(그림 1, 그림 2)

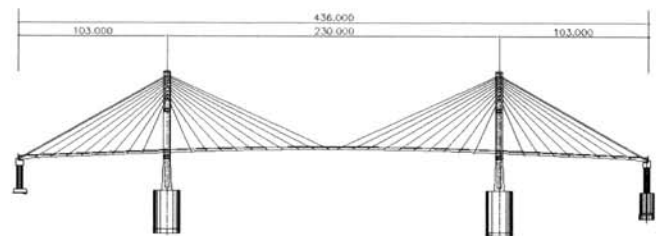


그림 1. 대상교량의 일반도

1) 우송정보대학 철도계열 교수, 공학박사(ikmin@wst.ac.kr)

2) 교신저자, 우송대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Tel. 042-630-9737, Fax. 042-630-9789, Email : chaey@susu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

실험은 장동일과 민인기 (1998)에서 선정된 단면을 가지고 3차원 전교 모형실험을 수행한다. 또한 대부분의 사장교는 FCM공법으로 가설되므로 시공단계에서 강성이 부족하여 바람에 취약하므로 2개의 가설단계와 독립주탑의 시공중 내풍 안정성에 대해서도 연구를 수행하였다. 대상교량은 원설계가 강상형으로 설계되었기 때문에 강합성사장교와 강상형사장교의 내풍공학적 특성을 직접적으로 비교할 수 있었다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 설계풍속

#### 2.1.1 완성계의 설계풍속

설계기본풍속은 한국도로교표준시방서에 따라 남해안의 40 m/s를 적용하였고, 가설지점이 해상임을 고려하여 조도구분 I을 적용하였다. 설계 풍속의 산정에 있어서는 토목/건축 분야의 국내·외 규준에 의거하여 설계풍속을 정리한 표1에 의하면 각 규준에서 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 와류진동에 대한 설계풍속은 한국도로교표준시방서에 따라 56.1m/s로 하며 Flutter에 대해서는 일본의 本州-四國 연락교공단의 풍동실험요령에 따라 안전율(=1.2)을 고려하여 67.3m/s로 적용하였다.

표 1. 국내의 규준의 설계풍속

규 준	조도 구분	지수 (a)	기본풍속 (m/s)	설계풍속 (m/s)
한국도로교표준시방서	I	0.12	40	56.1
도로교내풍설계편람(일본)	I	-	40	56.4
국내건축규준	I	0.10	40	55.5
건축물하중지침(일본)	I	0.10	40	56.0

#### 2.1.2 가설단계의 설계풍속

국내에서 사용하고 있는 설계기준풍속은 “공용기간 50년에 대한 비초과 확률 0.6의 10분간 평균 최대풍속”으로 정의되어 있다. 그러나 대상교량의 경우 가설기간이 2년 정도로 짧아 설계기본풍속을 재설정할 필요가 있다. 따라서 일본도로협회의 “도로교내풍설계편람”에 의하여 가설단계의 설계풍속을 산출한다.

가설기간 N년 동안에 풍속이 재현기간 R년의 풍속기대치 U를 초과하지 않을 확률 P는 다음과 같다.

$$P = \left(1 - \frac{1}{R}\right)^N \quad (1)$$

여기서, P=0.6, 가설기간 N=2을 적용하면 R=4.4년이 계산된다.

또한, 재현기간 R과 풍속기대치 U와의 관계는 다음 식과 같고, 여기에 설계기본풍속  $U_{10} = 40 \text{ m/s}$ 를 적용하면

$$U = U_{10} \left[ 0.61 - 0.10 \ln \left( \ln \frac{R}{R-1} \right) \right] / 1.07 \quad (2)$$

가설단계의 설계기본풍속은  $U=27.9\text{m/s}$ 가 된다.

이를 이용하여 가설시의 설계풍속을 산출하면 다음과 같다.

$$U_d = 1.925 \times \left( \frac{35.7}{500} \right)^{0.12} \times 27.9 = 39.1 \text{ m/s} \quad (3)$$

즉, 주형의 가설단계에 대한 설계풍속은 39.1m/s로 한다. 단, flutter에 대해서는 안전율 1.2를 적용한다.

#### 2.1.3 독립 주탑에 대한 설계풍속

가설상태의 독립주탑의 경우, 내용연수가 상당히 짧고 대상 교량의 경우는 주탑이 독립적으로 유지되는 기간을 약 1년을 예상하였다. 가설단계의 설계풍속과 같은 방법으로 식 (1)에 가설기간 N=1, P=0.6을 적용하면 R=2.5년이 산정된다. 식 (2)에 R=2.5년을 적용하면 설계기본풍속은  $U=26.7\text{m/s}$ 로 산정되고 식 (3)에 따라 설계풍속은  $U_d$ 는 42.1m/s로 결정된다.

## 2.2 풍동 및 측정 기자재

실험에 사용된 풍동은 현대건설 기술연구소 대형경계풍동으로 측정부의 제원은 폭(W)×높이(H)×길이(L) = 4.5m×2.5m×25.0m이고, 각 실험에서의 진동수는 FFT Analyzer로 산출하였다. 난류강도의 측정은 열선풍속계를 이용하였고, 감쇠율의 조절은 Oil Damper를 사용하였다.

대상교량의 가설위치가 해안이므로 지표면 조도구분 I에 해당한다. 도로교표준시방서에 의하면 조도구분이 I일 경우, 대기경계층의 고도별 유속분포는  $\alpha = 0.12$ ,  $Z_G = 500\text{m}$ ,  $Z_b = 5\text{m}$ 의 특성을 갖는다. 고도별 난류강도에 대해서는 내풍설계기준이 제시되어 있지 않으므로 다음과 같은 일본도로협회의 “도로교내풍설계편람” 기준을 사용한다.

$$I_u = 0.1 \left( \frac{Z}{Z_G} \right)^{-\alpha - 0.05} \quad (4)$$

### 2.3 실험모형

#### 2.3.1 완성계의 실험모형

3차원 실험의 모형축소율은 1/100로 하였고 모형의 전체길이는 4.36m이다. 주형모형의 동적특성은 교축방향의 강성봉을 이용하여 연직방향의 탄성거동을 표현하였고, 비틀림방향의 탄성거동은 주탑과 연결된 케이블의 스프링에 의해 표현하였다(그림 2). 모형의 외형은 아크릴을 사용하였고 모형의 탄성거동을 표현하기 위하여 전경간을 19블록으로 등분하여 제작하였다.

진동변위를 측정하기 위한 target은 중앙경간 1/2지점의 주형 양단부에 2점 그리고 측경간의 1/2 지점의 주형 양단부의 2점에 설치하여 연직 휨1차, 2차 진동과 비틀림 진동 측정이 가능하도록 하였다.

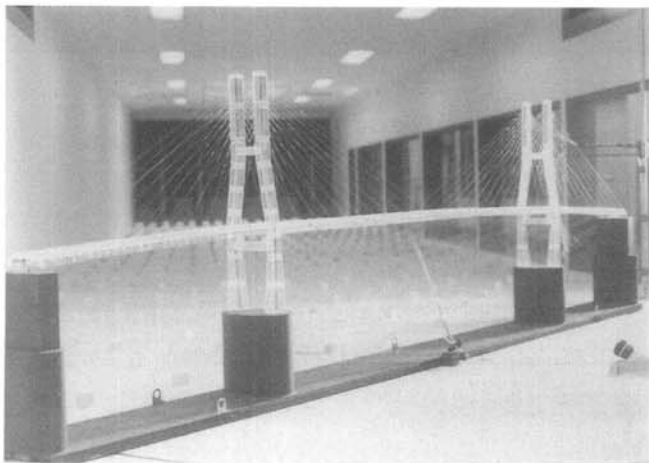


그림 2. 3차원 전교모형실험

표 2. 완성계의 동적특성

항 목		실교치	요구치	실험치
고유진동수 Hz	연직 휨1차	$f_{\eta} = 0.490$	$f_{\eta} = 3.80$	$f_{\eta} = 2.375$
	연직 휨2차	$f_{\eta} = 0.840$	$f_{\eta} = 3.070$	$f_{\eta} = 6.630$
	비틀림1차	$f_{\phi} = 1.270$	$f_{\phi} = 9.840$	$f_{\phi} = 9.810$
총질량	주탑(1개)	80920kN	80.92N	78.23kN
	주형(436m)	89100kN	89.10N	89.30kN
대수감쇠율		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
	연직 휨1차	0.033	0.037	0.044
	연직 휨2차	-	0.044	0.074
	비틀림1차	0.153	0.170	0.181

표 2는 실험에 사용된 모형의 동적특성을 나타낸 것으로 진동특성에 가장 큰 영향을 미치는 감쇠율의 경우, 2차원 주

형모형의 동적특성보다 전체적으로 높은 값을 보이고 있다. 국내에서 교량의 풍동실험을 수행할 경우, 대부분 일본의 “本州-四國 연락교 공단”의 실험요령을 참고로 하고 있다. 그러나 이 요령서는 중앙경간이 매우 긴 장대교에 대한 동적특성을 기본대상으로 하고 있으며 여기서의 감쇠율은 “0.02”로 상당히 낮은 값을 제안하고 있다. 그러나 대상교량의 경우, 중앙경간이 230m로 특수교량으로서는 매우 짧은 편에 속하므로 본 실험에서의 감쇠율이 실제사장교의 감쇠율에서 크게 벗어나 있지는 않다고 판단된다.

#### 2.3.2 가설단계의 실험모형

가설단계의 모형은 3차원 완성상태의 모형을 절단하여 사용하였고, 모형의 축소율은 1/100이다. 가설단계는 그림 3과 그림 4과 같이 중앙경간이 55% 가설된 상태와 91% 가설된 상태로 실험하였다.

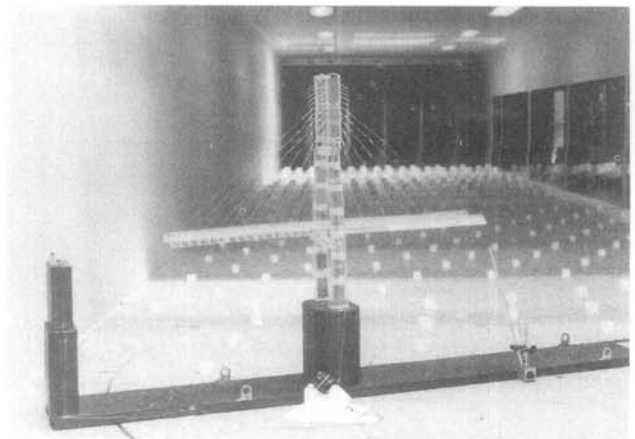


그림 3. 중앙경간 55% 가설상태

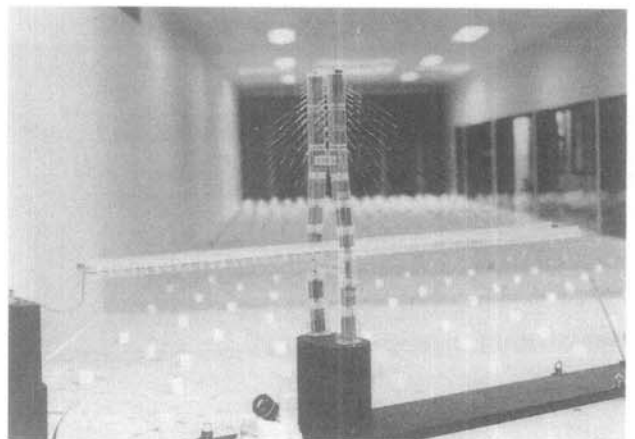


그림 4. 중앙경간 91% 가설상태

가설시에는 2차사하중이 작용하지 않으므로 가설단계의 모형에 있어서는 2차사하중에 해당하는 질량을 제거하는 한편, 작업장비에 해당하는 질량은 추가시켰다. 대상교량은 가설시,

주형의 수평방향 진동을 억제하기 위해 주탑부근에서 주형을 횡방향으로 고정하게 된다. 따라서 가설단계실험에 있어서는 주탑과 주형이 접하는 곳에서 주형의 횡방향 거동이 억제되도록 하였다. 진동변위를 측정하기 위한 target은 주탑을 중심으로 한 외팔보의 양단부와 주탑의 정상부에 설치하였다. 모형의 동적특성은 표 3과 같다.

표 3. 가설단계의 동적특성

항 목		실교치	요구치	실험치
55% 가설 단계				
고유 진동수 Hz	연직 휨1차	$f_{\eta} = 0.31$	$f_{\eta} = 3.10$	$f_{\eta} = 4.09$
	수평 휨1차	$f_{\eta} = 0.840$	$f_{\eta} = 4.10$	$f_{\eta} = 6.40$
대수 감쇠율		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
	연직 휨1차	0.037	0.040	0.044
	수평 휨 1차	0.097	0.103	-
91% 가설 단계				
고유 진동수 Hz	연직 휨1차	$f_{\eta} = 0.21$	$f_{\eta} = 2.10$	$f_{\eta} = 2.88$
	수평 휨1차	$f_{\eta} = 0.41$	$f_{\eta} = 4.10$	$f_{\eta} = 1.25$
대수 감쇠율		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
	연직 휨1차	0.033	0.036	0.043
	수평 휨 1차	0.207	0.234	-

2.3.3 독립 주탑모형

대상교량의 주탑의 실제 높이는 89m이고, 실험모형의 축소율은 1/60로 그림 5와 같다.

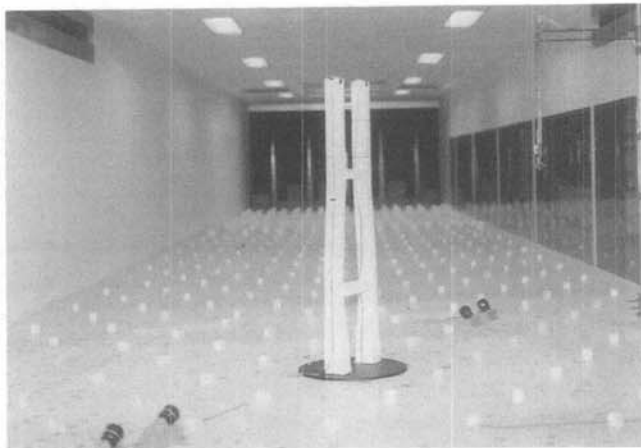


그림 5. 독립주탑 모형실험

모형의 동적특성은 강성봉과 질량을 이용하여 상사시켰고 주탑의 형상은 아크릴을 이용하여 묘사하였다. 모형의 탄성거동이 잘 표현되게 하기 위해 모형 전체를 높이 방향으로 9블록으로 분할하여 제작하였다. 주탑의 진동실험에 있어서는 면

내 및 면외의 휨진동과 비틀림진동을 대상으로 하였다. 진폭을 측정하는 광학식변위계는 주탑의 정상부에 4곳, 중간부에 2곳을 설치하여 각각 휨진동과 비틀림진동을 측정할 수 있도록 하였다. 모형의 동적 특성은 표 4와 같다.

표 4. 주탑모형의 동적특성

항 목		실교치	요구치	실험치
고유진동수 Hz	면외휨1차	$f_{\eta} = 0.490$	$f_{\eta} = 3.80$	$f_{\eta} = 2.375$
	면내휨1차	$f_{\eta} = 0.840$	$f_{\eta} = 3.070$	$f_{\eta} = 6.630$
	면내휨2차	$f_{\eta} = 1.560$	$f_{\eta} = 12.08$	$f_{\eta} = 16.490$
	비틀림1차	$f_{\phi} = 1.270$	$f_{\phi} = 9.840$	$f_{\phi} = 9.810$
총진량 kg		8092000	37.5	36.2
대수감쇠율		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_5$
	면외휨1차	0.040	0.040	0.050
	면내휨1차	0.130	0.140	0.160
	비틀림1차	0.170	0.170	-

3. 완성계의 내풍특성

3.1 기본조건에 대한 내풍특성

2차원주형실험에 있어서 내풍성이 검증된 fairing은 경제성을 고려하여 중앙경간에만 설치하여 내풍성을 검토하였다. 2차원 주형실험결과, 내풍대책으로 채택된 fairing은 그림 6와 같다.

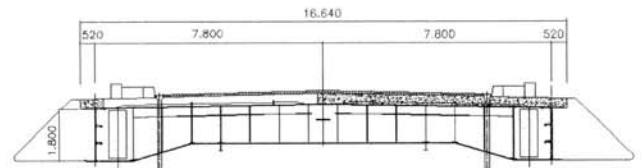


그림 6. 중앙경간에 설치한 fairing

그림 7의 완성상태에 대한 실험결과에서 알 수 있듯이 비틀림 진동에 대해서는 매우 안정된 거동을 보이고 있으므로 연직거동에 대해서만 고찰하기로 한다.

실험결과를 보면, 설계풍속내에서 연직와류진동이나 갠로핑은 발생하지 않는다. 즉, 2차원주형실험에서 채택된 fairing을 측경간에 설치하지 않고 중앙경간에만 설치하여도 제진효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 단, 2차원실험과는 달리 3차원전체모형실험에서는 현장상황의 난류경계층을 그대로 묘사하여 실험을 수행하였기 때문에 난류강도가 2차원실험(5%)의 경우보다 약 2배 이상 크다. 따라서 3차원실험결과는 난류강도의 증가에 따라 buffeting 효과에 의해 전체적으로 진

폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 3의 결과에서 최대진폭은 약 28cm로 나타났는데 이를 중력가속도로 환산하면 0.067g로 일본의 本州-四國 연락교 공단 기준의 심리적 불편감을 느끼는 기준인 0.124g보다 작음을 알 수 있었다.

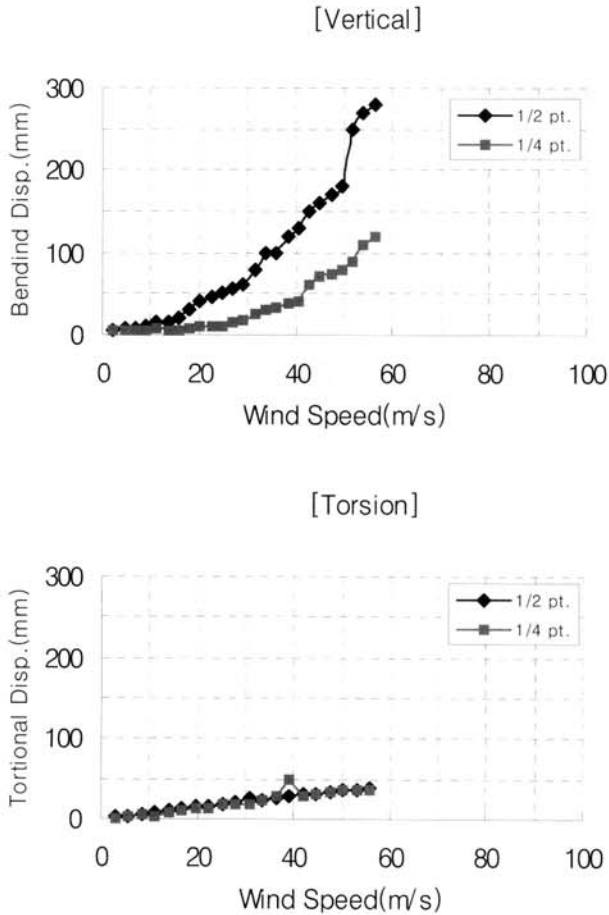


그림 7. 기본조건에 대한 내풍특성

R. L. Wardlaw (1992)는 대상교량과 같이  $\pi$ 형 주형의 사장교인 Longs Greek Bridge와 Hawkshaw Bridge의 경우 거더 사이의 하면을 감싸는 플레이트와 fairing을 채택하여 내풍안정성을 확보하였는데, 이는 많은 재료의 손실을 요하므로 본 연구에서는 거더에 fairing만을 부착하여 보다 경제적으로 내풍안정성을 확보하였다.

2차원 시험에서는 20.3m/s에서 19.9cm의 와류진동과 55m/s에서 플러터가 발생했었다. 이는 2차원 모형은 소규모의 풍동에서 주형만의 모형으로 제진장치의 종류를 선정하기 위한 작업으로 주탑과 케이블의 강성을 코일스프링으로 모사하므로 감쇠율과 강성을 정확하게 모사하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다. 교량형식이 같은 서해대교(신영기 등 1992)의 경우와 같이 2차원 모형실험에서는 플러터가 발생했지만 3차원 모형실험에서는 발생하지 않았다. 풍동시험은 2차원 실험으로 제진장치를 선정하는데 중점을 두고 보다 신

뢰할 수 있는 실험모형실험인 3차원 모형실험을 통하여 교량의 동적특성을 규명하고 있다.

### 3.2 수평풍각에 대한 내풍특성

수평풍각은 교축직각방향이 0이고, 10°, 20°, 30에 대해서 고찰하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 수평풍각에 따른 거동은 수평풍각이 0일 때와 거의 동일한 양상을 보인다. 즉, 와류진동 및 발산형진동이 발생하지 않으며, 2차원실험결과에 비해 난류경계층에 의한 buffeting이 나타나므로 대상교량의 경우 수평풍각변화에 대한 3차원적인 공기력거동은 발생하지 않음을 알 수 있다.

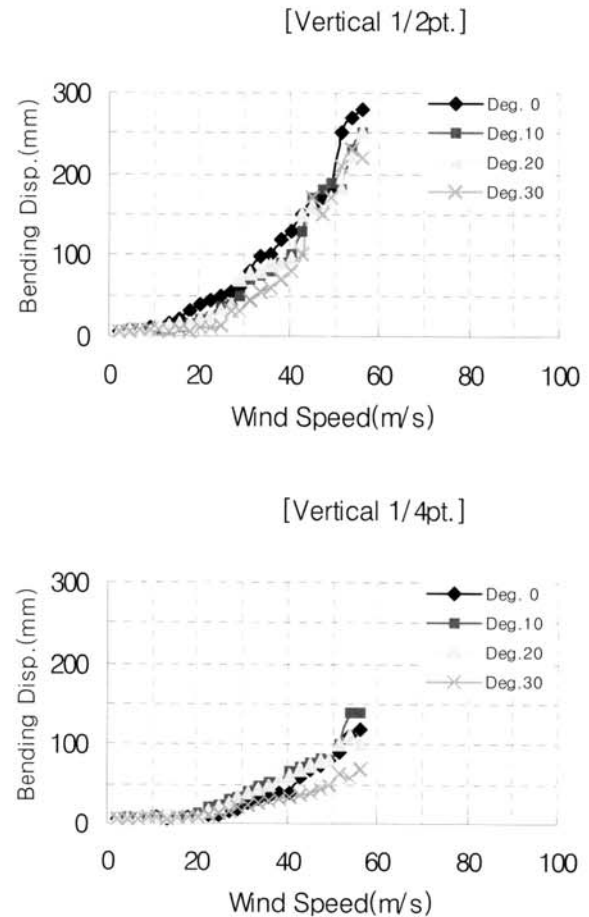


그림 8. 수평풍각에 대한 내풍특성

### 3.3 영각변화에 대한 내풍특성

영각은 -5°, -3°, +3°, +5에 대하여 실시하였고, 그림 9에서 알 수 있듯이 영각변화에 대해서도 와류진동 및 발산형진동은 발생하지 않았다. 영각변화에 따른 공기력거동은 영각이 0°일 경우보다 진폭이 약간 감소하는 특성을 보이고 2차원실

험결과에 비해 buffeting 효과가 나타남을 알 수 있다.

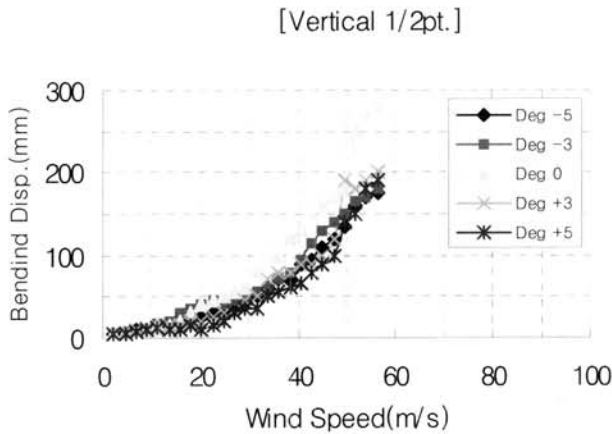


그림 9. 영각변화에 대한 내풍특성

#### 4. 가설단계의 내풍특성

##### 4.1 55% 가설단계의 내풍특성

###### 4.1.1 기본조건에 대한 내풍특성

수평변위는 주탑에서 wind shoe를 이용하여 주형의 횡방향을 구속하고 있기 때문에 매우 작게 나타났다. 기본조건에 대한 중앙경간 55% 가설상태의 연직방향 내풍특성을 그림 10에 나타낸다. 완성상태와 마찬가지로 가설단계에 있어서도 와류진동이나 깎로핑 등은 발생하지 않으며, 난류에 의한 buffeting 효과가 나타난다. 설계풍속(39.1m/s) 부근에서 연직방향의 진폭은 약 17cm 정도로 완성상태에 비해 1/2배 정도로 안정함을 알 수 있었다.

[Vertical 1/2pt.]

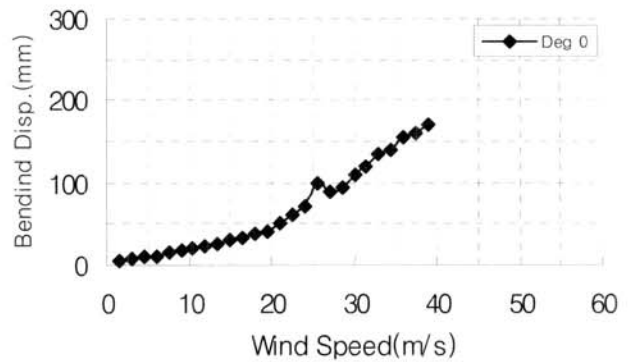
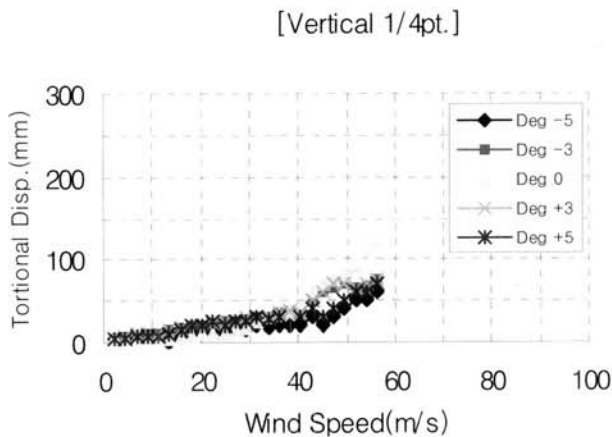


그림 10. 55% 가설단계의 내풍특성

###### 4.1.2 수평풍각에 대한 내풍특성

수평풍각에 대해서는 그림 11과 같이 0°, ±10°, ±20°, ±30°에 대해서 실험을 수행하였다. 실험결과, 각각의 수평풍각에 있어서 내풍특성은 거의 동일하다. 최대연직진폭은 수평풍각이 30일 때 20cm로 수평풍각이 0일 때 보다 약간 크게 나타났다 수평풍각에 대해서도 수평진동은 거의 발생하지 않았다.



[Vertical 55% stage]

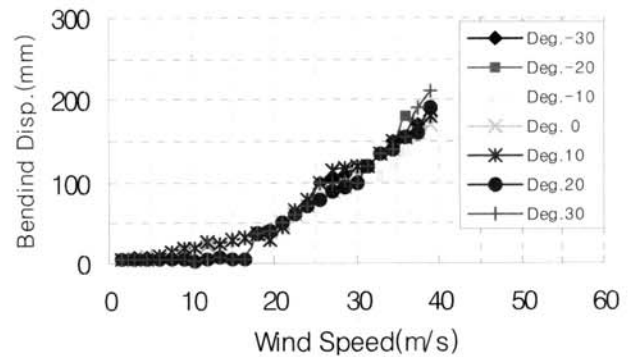


그림 11. 55% 가설단계의 풍각에 대한 내풍특성

###### 4.1.3 영각에 대한 내풍특성

영각범위 -5°, -3°, 0°, +3°, +5에 대한 실험결과 그림 12에 나타난 바와 같이 영각변화에 대해서도 와류진동 및 발산형 진동은 발생하지 않았으며 buffeting만 나타났다. 영각변화에 따른 연직거동은 영각 0일 경우보다 진폭이 약간 감소하는 경향을 보이며 이는 완성상태와 동일한 특성이다.

[Vertical 55% stage.]

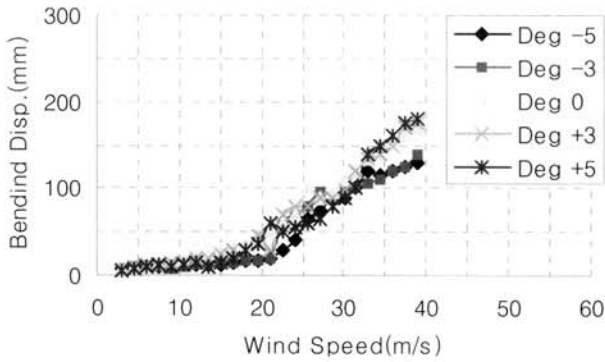


그림 12. 55% 가설단계의 영각에 대한 내풍특성

#### 4.2 91% 가설단계의 내풍특성

##### 4.2.1 91% 기본조건 내풍특성

51% 가설상태와 마찬가지로 수평변위는 주탑부근에서 주형의 횡방향을 구속하고 있기 때문에 매우 작게 나타났다.

중양경간 91% 가설상태의 내풍특성은 그림 13에 나타난 바와 같이 와류진동이나 깎로핑 등은 발생하지 않으며, 난류에 의한 buffeting 효과가 나타난다. 설계풍속(39.1m/s) 부근에서 연직방향의 진폭은 완성상태의 약 22cm 정도로 완성상태에 비해 1.5배 정도 작게 나타남을 알 수 있다.

[Vertical]

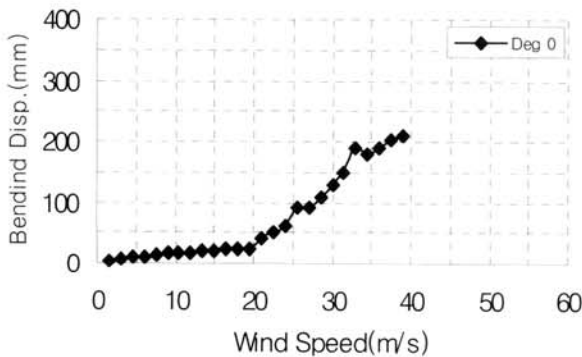


그림 13. 91% 가설단계의 내풍특성

##### 4.2.2 수평풍각에 대한 내풍특성

수평풍각변화에 따른 실험결과 그림 14에서 알 수 있듯이 실험결과, 55% 가설상태와 마찬가지로 각각의 수평풍각에 있어서 내풍특성은 거의 동일하다. 그러나 최대연직진폭은 수평풍각이 10일 때 약 36cm로 수평풍각이 0일 때보다 약 1.8배 크다. 이것은 완성 상태보다 중양경간이 접합된 풍각의 영향에 민감하다는 것을 알 수 있다.

[Vertical 91% stage]

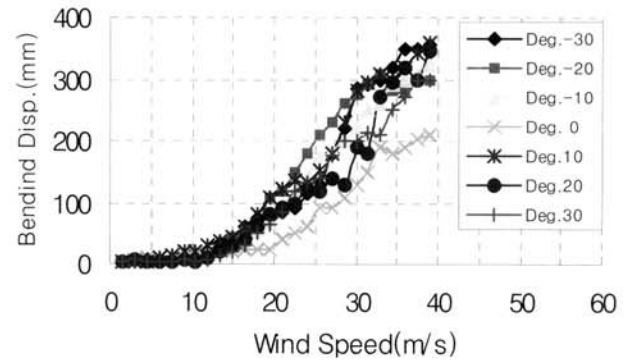


그림 14. 91% 가설단계의 풍각에 대한 내풍특성

##### 4.2.3 영각에 대한 내풍특성

그림 15에서 알 수 있듯이 영각범위에 대한 실험결과, 영각변화에 따른 연직거동은 0일 경우보다 진폭이 증가하는 경향을 보이며 이는 완성상태와 상반된 특성이다. 와류진동 및 발산형 진동은 발생하지 않으며 buffeting 효과가 나타났다. 그러나 영각 +3일 때 최대연직진폭은 약 34cm로 약 1.7배 크게 나타났다. 이는 풍각 변화와 마찬가지로 접합시 내풍안정성에 각별한 주의를 요한다.

[Vertical 91% stage.]

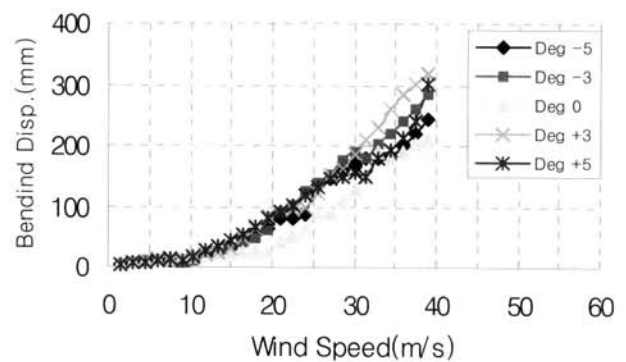


그림 15. 91% 가설단계의 영각에 대한 내풍특성

## 5. 독립 주탑의 내풍특성

### 5.1 기본조건에 대한 내풍특성

독립주탑에서 면내 휨진동은 발생하지 않았으며, 비틀림 진

동도 거의 발생하지 않아, 난류경계층에서 수평풍각이 0° 일 때, 면외의 휨진동과 비틀림진동에 대해서만 고찰한다.

대상교량의 독립주탑에서 발산진동은 발생하지 않았으며, 풍속 약 30m/s 부근에서 면외의 휨와류진동이 발생하는데, 주탑정상부에서의 최대진폭이 14.5cm로 측정되었다. 이 진폭이 작업성측면에서 허용할 수 있는 범위의 것인가를 평가하기 위해 다음과 같은 고찰을 수행하였다.

[Vertical]

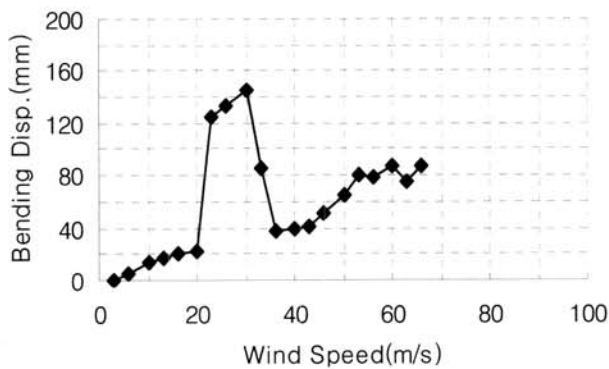


그림 16. 기본조건의 내풍특성

교량의 사용성 측면에서의 진동허용한계는 주행차량의 안전성, 승차감, 운전자 및 보행자의 진동에 대한 불쾌감 등을 고려하여 현재까지 아래와 같은 연구결과가 허용진폭을 판단하는 기준으로 사용되어 왔다. 그러나 대상교량의 주탑에 대한 진동은 사용성이 아닌 작업성에 대한 평가라고 할 수 있다. 현재로서는 현장의 작업성에 대한 허용진폭에 대한 기준은 없기 때문에 사용성에 대한 기준을 작업성에 적용하여 검토한다.

[일본의 本州-四國 연락교 공단 기준]

도로교의 경우는 "최대가속도 0.124g 이하"의 진동으로 규정되어 있다. 진동변위가 불규칙하지 않고 일정한 주기를 갖는 정현파라는 가정 하에서 가속도와 진폭의 관계는 다음과 같다.

$$A = (2\pi f)^2 \times D \tag{4}$$

여기서 A : 진동의 최대가속도

D : 진폭

f : 고유진동수

[대상교량 주탑의 경우]

대상교량 독립주탑의 최대진폭 14.5cm는 배진폭(double

amplitude)이므로 위식에 D=7.25cm를 대입한다.

$$(2 \times \pi \times 0.49)^2 \times 0.0725m = 0.687 m/s^2 = 0.07g \leq 0.124g \tag{5}$$

식 (5)에서 알 수 있듯이 대상교량의 독립주탑에 있어서 수평풍각 0°에서의 휨와류진동은 작업성 측면에서 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

### 5.2 수평풍각에 대한 내풍특성

수평풍각에 대한 검토는 5°, 10°, 20°, 30°, 90°의 5가지에 대해서 수행하였다. 표 5와 그림 17의 결과에서 면내의 휨와류진동과 비틀림진동, 깔로핑은 발생하지 않았으므로 면외 휨와류진동에 대해서만 고찰한다.

표 5. 수평풍각에 따른 내풍특성(면외 휨와류진동)

수평풍각	0°	5°	10°	20°	30°	90°
면외휨와류진동	14.5cm 30m/s	9.3cm 22m/s	9.4cm 28m/s	-	-	-

[Vertical]

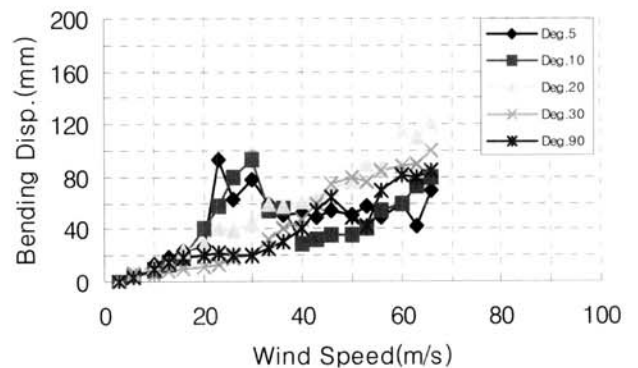


그림 17. 풍각에 대한 내풍특성

대상교량의 독립 주탑은 교축직각 이외의 방향에서 부는 바람에 대해서는 매우 안정함을 알 수 있다. 수평풍각이 0일 경우 14.5cm의 휨와류진동이 발생하는데 수평풍각이 5또는 10가 되면 진폭이 작아져 약 9cm 정도의 와류진동이 발생하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이, 이 정도의 진폭은 시공성 측면에서 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 수평풍각이 20° 이상에서는 와류진동이 발생하지 않았다.



## 6. 강상형교와 합성형교의 비교

### 6.1 완성계와 가설단계

표 6과 표 7에서 알 수 있듯이 강상형교에서는 영각 0° 풍각 0의 기본조건에서 플러터와 갤로핑의 발산진동 뿐만 아니라 와류진동도 전혀 나타나지 않았지만 합성형교에서는 약간의 buffeting이 발생하였다.

그러나 강상형교에서도 풍각에는 전혀 영향이 없었지만 영각이 변함에 따라 합성형교보다는 작지만 약간의 buffeting이 발생하였다. 이는 감쇠율이 강상형교가 합성형교보다 약간 크기 때문이기도 하지만 단면 형상 자체가 합성형교보다 강상형교가 내풍특성이 우수하기 때문인 것으로 사료된다.

표 6. 강상형교와 합성형교의 내풍특성 비교(완성상태)

	기본조건	영각	풍각
강상형교	-	26.9cm	-
합성형교	28cm	20cm	25cm

표 7. 강상형교와 합성형교의 내풍특성 비교(가설단계)

	기본조건	영각	풍각
강상형교	-	13.3cm	-
합성형교	22cm	34cm	36cm

### 6.2 독립주탑

표 8. 강상형교와 합성형교의 내풍특성 비교(완성상태)

		강상형교	합성형교
기본 조건	면외 휨와류진동	48.0cm 14.1m/s	14.5cm 30m/s
	비틀림와류진동	56.0cm 79.3m/s	-
풍각 변화	면외 휨와류진동	14.0cm 17.0m/s	9.40cm 28.0m/s
	비틀림와류진동	-	-

표 8에서 합성형교의 비틀림와류진동은 전혀 발생하지 않았지만 약간의 와류진동이 발생하였다. 그러나 강상형교에서는 휨와류진동도 크게 나타났지만 비틀림와류진동도 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 합성형교의 주탑은 H-형이고, 강상형교의 주탑은 다이아몬드형으로 내풍특성이 크게 상이함을 알 수 있다. 따라서 다이아몬드 형태의 강형 주탑은 가설기간

에 독립적으로 유지될 때 내풍에 대하여 각별한 주의가 필요하다고 사료된다.

## 7. 결론

본 논문에서는 2차원 주형실험으로 선정된 개선단면을 가지고 완성계에 영각, 풍각에 대하여 공기역학적 특성을 규명하였고, 구조물의 강성이 확보되지 않아 불안정한 시공 중 가설단계와 독립주탑의 내풍안정성을 검증하였다. 또한 같은 조건의 두가지 형식을 비교하여 중소지간 사장교의 내풍공학적 특성을 직접적으로 비교, 분석 하였다.

실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2차원 모형실험에서 개선된 단면의 3차원 완성계의 실험결과 설계풍속내에서 연직 와류진동 및 비틀림 와류진동은 발생하지 않았지만 buffeting효과가 나타났다. 최대진폭은 약 28cm로 중력가속도 0.067g로 불쾌감을 주는 기준인 0.124g 보다 작음을 알 수 있었다.
- (2) 기존의 사례에서는  $\pi$ 형 단면을 가진 사장교의 경우 거더 사이의 하면을 감싸는 하면플레이트와 fairing을 부가하여 내풍안정성을 확보하였는데 이는 많은 재료의 손실이 따르므로 본 연구에서는 거더에 fairing을 부착하여 보다 경제적으로 내풍안정성을 확보하였다.
- (3) 개선된 단면은 완성계에 있어서 영각과 풍각의 변화에 대해 연직 와류진동, 비틀림 와류진동과 비틀림 플러터가 발생하지 않았다.
- (4) 가설단계에 있어서 설계풍속내에서 연직 와류진동, 비틀림 와류진동 그리고 비틀림 플러터도 발생하지 않았지만 진폭이 36cm로 시공시 내풍안전성에 필요한 대책을 고려해야 할 것으로 판단된다.
- (5) 독립주탑에 있어서 비틀림와류진동, 갤로핑은 발생하지 않았지만 면외의 휨와류진동은 수평풍각 0일 때 풍속 30m/s 부근에서 배진폭 약 14.5cm의 진동이 발생하였다. 이 진폭은 일본의 本州-四國 연락교 공단의 허용치를 만족시키는 값으로 작업성에 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.
- (6) 같은 조건의 강상형교와 합성형교의 비교에서 완성계와 가설단계 모두 기본조건과 풍각에서는 강상형교는 전혀 진동이 발생하지 않았고, 영각에서도 약 35%와 61% 정도 강상형교가 작은 진동을 나타내고 있어 중소지간의 사장교에서는 강상형교가 내풍특성이 우수하다고 판단된다.
- (7) 그러나 가설기간 중 독립주탑의 경우 강상형교에서는

휨 와류진동과 비틀림 와류진동이 모두 발생하였지만  
합성형교의 경우 진폭의 크기도 작았고, 비틀림 와류  
진동은 발생하지 않아 합성형교의 내풍특성이 우수하  
다고 판단된다.

### 참 고 문 헌

신영기, 장동일, 유철수, 윤정방, 이학은 (1992) 서해대교의 풍  
동실험 결과분석 및 풍동실험 요령서, 한국강구조학회.  
건설부, (1996) 한국도로교표준시방서.  
박명석, 박영환, 김영진, 안일상, 박종섭 (1995) 장대교량의 설  
계 및 시공에 관한 연구, 한국건설기술연구원연구보고서,  
pp. 197-207.  
건축학회, (1998) 건축규준개정안.  
건설교통부, (1996) 삼천포대교 풍동실험 보고서.  
윤재근, (1993) 사장교의 내풍안정성 평가, 한양대학교 석사학

위논문 .  
장동일, 민인기, (1998)  $\pi$ 형 주형을 가진 강합성 사장교의 공기  
역학적 제진방법에 대한 실험적연구, 한국강구조학회논문  
집, 제 10권 4호 pp. 801~811.  
R.L.Wardlaw (1992) The improvement of aerodynamic  
performance, Proceedings of the first international  
symposium on aerodynamics of large bridges, pp.  
59~70.  
Huang, J. S. and Fielding, BY. D. J (1971), "Shear in  
Steel Beam-to-Column Connections", *Welding Research  
Supplement*, July, pp.313~326.  
M. S. Troitsky, (1988) Cable Stayed Bridges.  
Manabu Ito, (1991) Cable Stayed Bridges.  
일본도로협회, (1991) 도로교내풍설계편람.  
本州-四國연락교공단, (1980) 풍동실험요령.  
(접수일자 : 2008. 8. 18 / 심사일 2008. 8. 27 /  
게재확정일 2008. 11. 24)