

# $\pi$ 형 주형을 가진 강합성 사장교의 공기역학적 제진방법에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on Wind Aerodynamic Improvement of Steel Composite Cable Stayed Bridge having $\pi$ -shaped Girder

장 동 일<sup>1)</sup> · 민 인 기<sup>2)</sup>  
Chang, Dong Il      Min, In Ki

**요 약** : 본 논문은 풍동실험을 통하여  $\pi$ 형단면을 가지는 강합성사장교의 공기역학적 특성과 제진방법에 대한 연구이다. 제진장치로는 Fairing, Extension, Post, Flap 등이 사용되었고, 가장 효과적인 개선단면을 선정하여 영각, 감쇠비와 난류실험을 수행하여 내풍안정성을 평가하였다. 실험결과 선정된 개선단면에서 공기역학적 내풍안정성이 향상되었고 공기역학적특성이 규명되었다. 따라서 본 연구에서 수행된  $\pi$ 형단면은 내풍설계의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

**ABSTRACT** : In this paper, aerodynamic properties and improvements of the  $\pi$ -shaped stiffening girder is studied by wind tunnel tests in steel composite cable stayed bridge. As an improvement device, fairing, extension, post and flap is tested, and the best improved section is selected and estimated on angles of attack, damping ratios and turbulent flows. It is shown that the selected fairing is effective to improve the aerodynamic stability. And this study can be utilized as a database of wind-resistant methodology of steel composite cable stayed bridge.

**핵심용어** : 풍동실험, 공기역학적특성, 강합성사장교, 내풍안정성

**KEYWORDS** : wind tunnel test, aerodynamic properties, steel composite cable stay bridge, aerodynamic stability

### 1. 서 론

재료의 개발과 설계 및 시공기술의 발달로 국내·외에 많은 장대교가 건설되었고, 또 시공 중에 있다. 장대교의 주종을 이루는 사장교와 현수

교는 공간에 비해 강성이 작기 때문에 고유진동주기가 길어 바람에 매우 민감하게 반응한다고 알려져 왔다. 특히, 1940년 준공 4개월만에 겨우 19m/s의 바람에 붕괴된 Old Tacoma Narrow 교는 큰 충격을 주었고, 그 후로 장대교에서 바람

1) 정회원, 한양대학교 지구환경건설공학부 교수  
2) 정회원, 대림산업 (주) 기술연구소 대리

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

에 대한 연구가 본격적으로 진행되어 왔다.

본 연구에서는 Old Tacoma Narrow교와 같이 내풍공학적 측면에서 불리한  $\pi$ 형단면을 가진 교량으로써, 중앙경간 230m, 측경간 103m의 경간을 가지고 단에 2개의 I형 Main Girder와 중앙에 Stringer가 배치된 강합성 사장교인 삼천포 대교를 대상으로  $\pi$ 형단면을 가진 합성형 사장교의 내풍안정성을 평가하여 보다 합리적인 제진방법을 제시해 보고자 한다.

먼저 제진장치를 부가하지 않은 기본단면의 2차원 주형모형실험을 수행하여 대상교량의 공기력 4특성을 검토한다. 일반적으로 영각은  $-3^\circ \sim +3^\circ$ 에서 변화시키지만, 본 연구에서는  $-5^\circ \sim +5^\circ$ 까지 변화시키면서 공기력진동의 발생을 검토한다. 또한 감쇠율과 난류효과 등의 변수에 대한 공기력특성을 규명한다.

기본단면에 대한 실험을 수행한 결과 와류진동이 크게 발생하고, 저풍속영역에서 발산진동이 발현되어 내풍안정성에 문제가 있음이 확인된다. 따라서 기존의 제진방법을 참고로 하여 대상교량에 적절한 여러 가지 제진장치를 구상해 보고자 한다. 영각  $0^\circ$ 에서 와류진동의 진폭과 발산진동을 조사한 후, 가장 효과적인 제진장치를 선정하여 영각의 변화, 난류효과, 감쇠율 등의 변수에 대하여 내풍안정성을 규명한다. 이러한 실험결과를 바탕으로  $\pi$ 형단면을 가진 강합성 사장교의 내풍안정성에 유리한 제진장치를 제안하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 실험방법

### 2.1 설계풍속

설계기본풍속은 한국도로교표준시방서에 의거, 남해안의 40m/s를 적용하였고, 가설지점이 해상임을 고려하여 조도구분은 I을 적용하였다. 설계풍속의 산정에 있어서는 토목/건축분야의 국내·외규준에 의거하여 설계풍속을 정리한 표 1에 의

하면 각 규준에서 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 와류진동에 대한 설계풍속은 한국도로교표준시방서에 의거, 56.1m/s로 하며 Flutter에 대해서는 일본의 本州-四國연락 교공단의 풍동실험요령에 의거, 안전율(=1.2)을 고려하여 67.3m/s로 적용하였다.<sup>(4)(5)(6)</sup>

표 1. 국내·외 규준에 의한 설계풍속

규 준	조도구분	지수( $\alpha$ )	기본풍속 (m/s)	설계풍속 (m/s)
한국도로교표준시방서	I	0.12	40	56.1
도로교내풍설계편람(일본)	I	-	40	56.4
국내건축규준(1998)	I	0.10	40	55.5
건축물 하중지침(일본)	I	0.10	40	56.0

### 2.2 풍동 및 측정기자재

실험에 사용된 풍동은 현대건설 기술연구소 소형풍동으로 측정부의 제원은 폭( $W$ ) $\times$ 높이( $H$ ) $\times$ 길이( $L$ )=1m $\times$ 1.5m $\times$ 6m이고, 각 실험에서의 진동수는 FFT Analyzer로 산출하였다. 난류강도의 측정은 열선풍속계를 이용하였고, 감쇠율의 조절은 Oil Damper를 사용하였다.<sup>(1)</sup>

### 2.3 제진 사례

본 연구를 효과적으로 수행하기 위해  $\pi$ 형단면을 갖는 교량중에서 중앙지간이 200m가 넘는 교량의 내풍성 및 내풍대책을 조사하였다(그림 1)<sup>(2)(3)(8)</sup>. 교량[A]는 1940년 바람에 의해 붕괴된 Tacoma Narrows교이다. 당시 장대교의 내풍설계는 정적 풍하중에 대해서만 고려되었다. 따라서 Flutter와 같은 동적거동을 예상하지 못하고 결국 붕괴된 사고에 대해서는 이미 잘 알려진 바와 같다. 교량[B]는 대상교량과 거의 비슷한 Alex Fraser교이다. 이 교량도 바람에 대한 안정성이 문제가 되어 주형단면의 양단에 2.0m의 Extension을 설치하여 안정성을 확보하고 있다.

교량(C)과 (D)에 있어서도 마찬가지로 Extension을 설치하여 내풍안정성을 확보하고 있다. 교량(E)의 경우는 삼각형의 Fairing를 제진대책으로 채택하고 있다. 그러나  $\pi$ 형단면이라고 해서 모두 공기력진동이 발생하는 것은 아니다. 교량(F)와 (G)에 있어서는 바람에 의한 진동이 전혀 발생하지 않아 기본설계의 단면형태를 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 교량(H)와 (J)는 마찬가지로 Extension의 효과를 보고 있으며 교량(K)와 (L)의 경우는 주형의 하면에 Plate를 설치하여  $\pi$ 형의 단면형태를 Box형태로 바꿔버린 예이다. 교량(I)와 (M)은 바람에 대해 큰 문제가 없었으며 교량(N)과 (O)는 난간부분에 Flap을 설치하여 진동을 억제하고 있다.

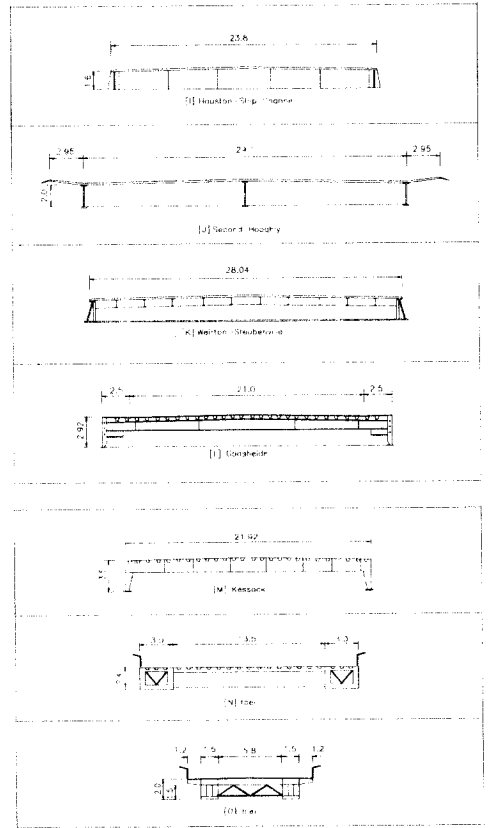
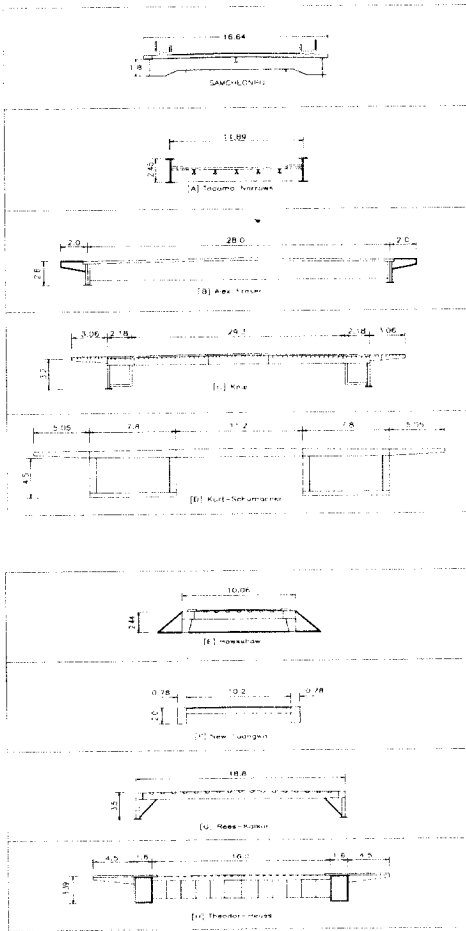


그림 1.  $\pi$ 형단면의 내풍대책

## 2.4 실험모형

사례를 검토하여 그림 2와 같은 7가지의 제진모형을 선정하였다. 모형의 축소율은 1/50로 하였다. 이는 풍동실험에서 요구하는 각종조건 즉, 폐쇄효과, 폭원, 모형길이 및 풍동측정부의 크기와의 관계를 모두 만족시키는 범위내에서 모형을 가능한 크게 제작할 수 있는 축소율이다. 모형의 재질은 경량화를 위해 발사와 히노기를 이용하였고 단판은 아크릴을 이용하였다. (6)(7)

각 제진대책으로는 Fairing, Extension, Post 및 Flap으로 구분된다. Fairing의 경우는 형태에 따라 3종류로 구분하여 제작하였으며, Fairing의 길이는 일반적으로 주형의 높이와 비슷하게 할 때 효과가 크다는 점을 고려하여 2.25m로 하였

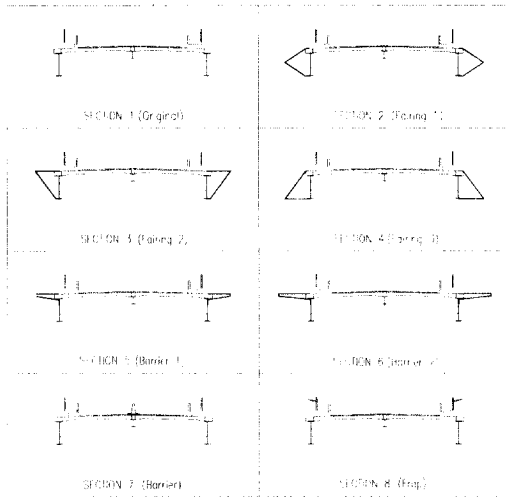
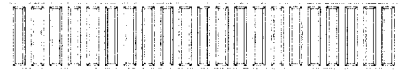


그림 2. 실험모형

고, Extension은 2 종류를 사용하였는데 길이는 기존의 문헌을 참조하여 2.25m, 3.25m로 결정하였다. 보도의 난간은 그림 3와 같이 기본난간과 Post난간 2종류를 비교/검토하였으며, Barrier의 효과는 그림 4과 같은 Fence형태의 중앙분리대를 사용하여 검토하였다. Flap에 대해서는 그림 4과 같이 Post난간에 길이 70cm의 Flap에 대해서 검토하였다. 모든 제진대책과 난간 및 분리대는 기본모형에 부착, 분리가 가능토록 제작하였다. 모형제작에 있어서 질량과 질량관성모멘트를 충분히 조절할 수 있도록 가능한 가볍고 질량이 단면중심에 집중되도록 주의하였다

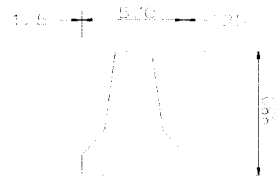


(기본난간)

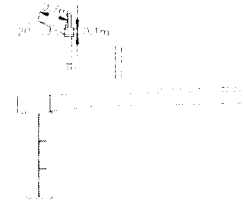


(Post 난간)

그림 3. 난간의 형태



(Barrier)



(Flap)

그림 4. Barrier 및 Flap

## 2.5 모형의 SET-UP

공기력진동실험에 있어서 모형의 자유도는 횡방향과 비틀림방향의 2자유도이다. 상하 2개씩 모두 8개의 Coil Spring을 이용하여 자유도를

표 2. 모형의 동적특성

항 목	실 교 치	요 구 치	실 험 치	비 고		
연직고유진동수( $f_y$ )	0.468 Hz	3.309 Hz	3.500~3.438 Hz	5.8~3.9%		
비틀림고유진동수( $f_\phi$ )	0.823 Hz	5.819	5.125~4.813 Hz	11.9~17.3%		
진동수비( $f_\phi/f_y$ )	1.759	1.759	1.464	16.8%		
질량	860 t	6880 g	6892~7122 g	0.2~3.5%		
질량관성모멘트	23892.99 t · m <sup>2</sup>	764.5 kg · cm <sup>2</sup>	746.9 kg · cm <sup>2</sup>	2.3%		
대수감쇠율	BENDING(mm)			TORSION(deg)		
	$\delta_{1.5}$	$\delta_3$	$\delta_5$	$\delta_{0.5}$	$\delta_1$	$\delta_2$
	0.014	0.015	0.017	0.005	-	-
	0.032	0.034	0.034	0.021	0.022	0.023

주었고 기류방향의 자유도는 피아노선으로 구속하였다.

고유진동수는 질량증가의 제곱에 반비례하므로, 먼저 모형이 설치된 상태에서 횡방향의 고유진동수( $F_{bo}$ )를 측정하고, 모형에 질량( $M_a$ )을 추가하였을 때 횡방향의 고유진동수( $F_{ba}$ )를 측정하여 모형의 질량을 산정하였다. 모형의 질량산정 후 요구치에 일치하도록 질량을 추가하였다. 질량조정 후 횡방향의 고유진동수는 스프링의 강성을 바꿔주면서 요구치에 근접하도록 조정하였다. 비틀림방향의 고유진동수( $F_{lo}$ )를 측정하고, 모형에 질량( $M_a$ )을 추가하였을 때 비틀림방향의 고유진동수( $F_{la}$ )를 측정하여 모형의 질량관성모멘트를 구한 후 추가질량의 위치를 조정하면서 요구치에 접근하도록 하였다. 질량관성모멘트를 조정 한 후 비틀림고유진동수를 조정하였는데 스프링의 간격을 조정하면서 요구치에 접근하도록 하였다.

표 2의 조정된 모형의 동적특성(실험치)을 살펴보면, 고유진동수는 요구치와 3.9 ~ 17.3%의 차이를 보이고 있는데 무차원풍속으로 평가가 가능하므로 내풍특성을 평가하는 데에는 문제가 없다고 사료되고, 질량과 질량관성모멘트는 요구치에 비하여 실험치의 오차는 각각 3.5%와 2.3%로 만족할 만한 실험조건으로 판단된다. 일본의 本州-四國연락교공단의 실험요령<sup>(7)</sup>에 의하면 감쇠율을  $\delta = 0.02$ 로 적용하고 있다. 그러나 이는 중앙경간이 매우 긴 장대교에 대한동적특성을 대상으로 하므로 상당히 낮은 값을 제시하고 있다. 따라서 본 대상교량의 경우 중앙경간이 230m로 사장교로서는 짧은 편에 속하므로 2종류의 대수 감쇠율( $\delta = 0.005 \sim 0.014$ ,  $\delta = 0.021 \sim 0.032$ )을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 기본단면의 내풍특성

기본단면의 등류(Uniform Flow)실험결과를

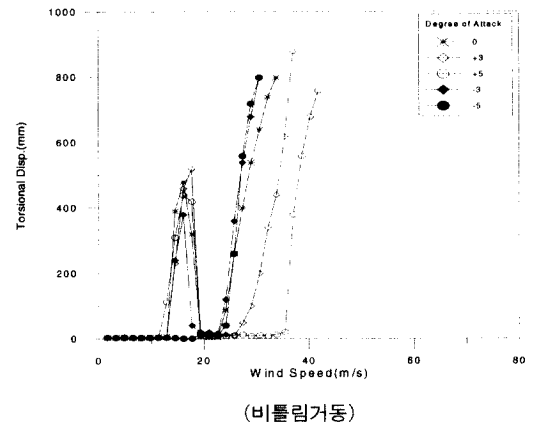
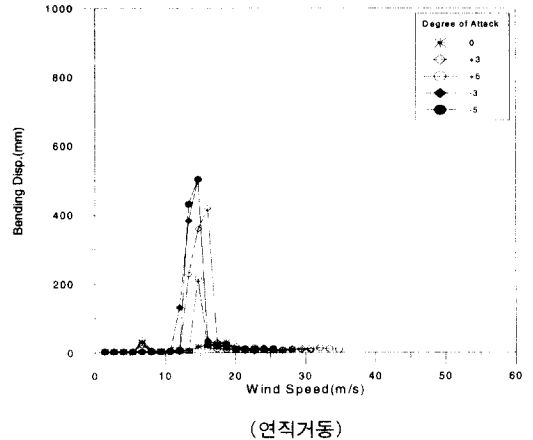


그림 5. 기본단면의 영각에 대한 내풍특성

그림 5와 표 3에 제시하였다.

그림에서 X-축은 풍속이며, Y축은 진동변위를 나타내며, 비틀림변위는 주형의 폭원의 단부에서의 변위이다. 와류진동은 진폭이 5cm이상일 경우에 진동발생으로 판단하였으며, Flutter는 진동회전각이 2° (폭원의 단부에서 29cm의 진폭)를 초과할 때의 풍속을 진동발생풍속으로 판단하였다.

표 3. 기본단면의 영각에 대한 내풍특성

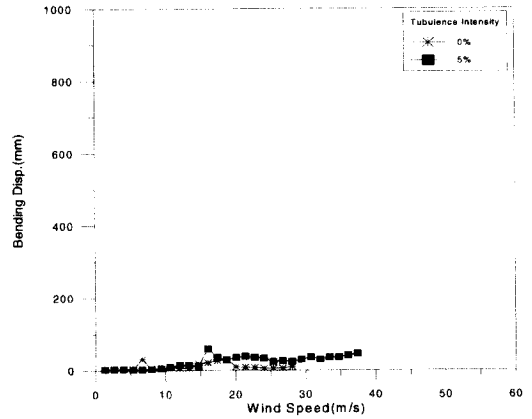
영 각	연직와류진동		Flutter (m/s)
	풍속(m/s)	진폭(cm)	
0°	-	-	26.0
+3°	16.0	42.0	31.0
+5°	14.7	21.6	36.0
-3°	14.7	50.3	25.0
-5°	14.7	50.3	26.0

풍속 16.1m/s에서 진폭 47.8cm의 비틀림방향의 와류진동이 발생하였고, 비틀림Flutter는 26m/s에서 발생하였다. 대상교량의 주형은 비틀림모드에 대하여 내풍성이 취약함을 알 수 있었으며, 특히 Flutter에 대해서는 매우 불안정하였다. 실험결과는 영각이 0° 인 경우, 즉 수평으로 바람이 작용할 경우에 대한 것이다. 그러나 바람은 항상 수평으로 작용하지는 않으며, 경우에 따라서 아래에서 불어 오르기도 하고, 위에서 불어 내리기도 한다. 이와 같이 바람이 작용하는 각도를 영각(迎角: Angle of attack)이라고 하는데 일반적으로 영각변화에 따라서 공기력진동의 진폭은 증가 하는 경향이 있다. 영각변화에 따른 내풍특성을 보면, 우선 영각이 “-”일 경우에는 연직와류진동의 최대진폭이 약50cm, 비틀림와류진동의 최대진폭이 약44cm정도이다. 그리고 비틀림Flutter는 상당히 낮은 풍속에서 발생한다. 한편 영각이 “+”의 경우에는 연직와류진동의 최대진폭이 약42cm, 비틀림와류진동의 최대진폭이 약52cm정도이며 비틀림Flutter도 상당히 낮은 풍속에서 발생한다. 결국 대상교량은 공기력진동에 있어서 상당히 불안정함을 알 수 있다.

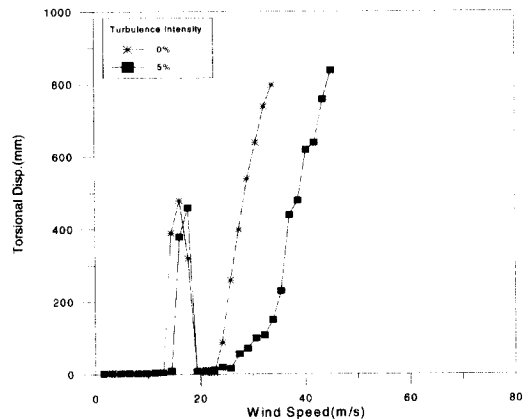
### 3.2 기본단면의 난류에 대한 내풍특성

실제 대기류는 실험풍동에서와 같이 등류가 아닌 난류상태(Turbulence Flow)이다. 난류를 발생시키는 방법으로는 스파이어(Spire)와 격자등이 많이 사용되는데, 본 실험에서는 난류격자를 이용하였다. 이와 같은 풍속의 변동특성을 난류강도(Turbulence Intensity)로 나타내는데 본 연구에서는 난류강도 5%에서 실험하였고 열선풍속계(Anemometer)를 이용하여 측정하였다. 그림 6는 연직모드와 비틀림모드에서 난류와 등류의 실험결과이다. 실험결과로부터 등류와 난류에서의 실험결과를 비교하면, 와류진동에 있어서는 등류와 거의 변함이 없으나, Flutter는 난류에 의해 내풍성이 향상됨을 알 수 있다. 이것은 난류에서

풍속의 변동성분이 와류의 규칙적인 방출을 방해함으로써 진동을 억제하기 때문이다. 따라서 난류강도가 증가함에 따라 대상교량과 같은  $\pi$ 형단면은 와류진동과 Flutter의 발생풍속이 증가함을 알 수 있다.



(연직거동)

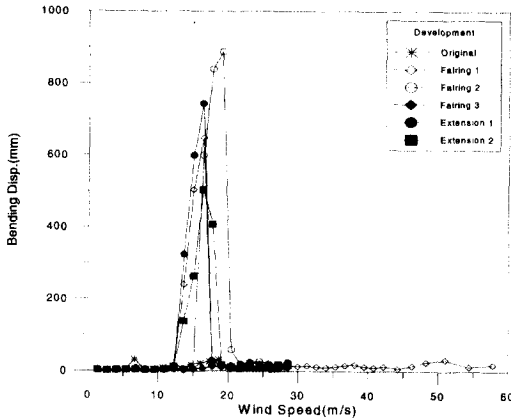


(비틀림거동)

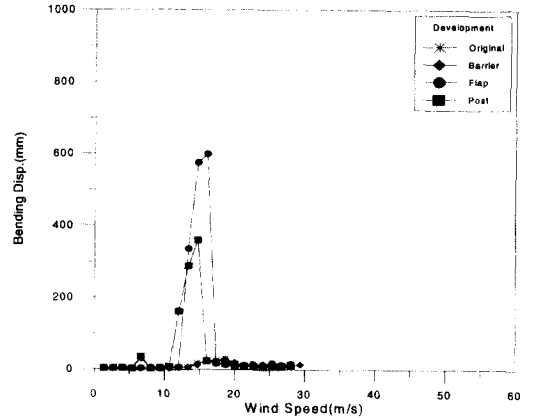
그림 6. 기본단면의 난류에 대한 내풍특성(영각 0°)

### 3.3 여러 가지 제진대책에 대한 내풍특성

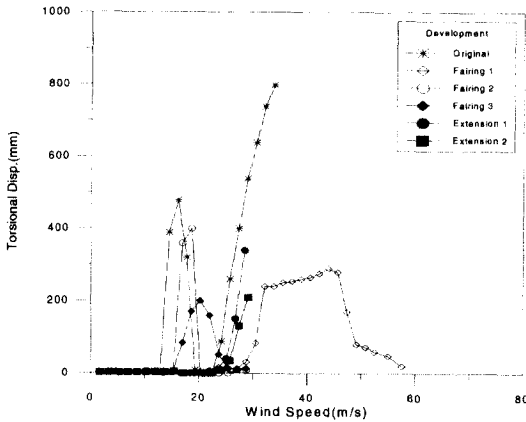
기본단면에 그림 2과 같이 각각의 제진대책에 대한 실험결과를 그림 7,8과 표 4에 나타내었고, 기본단면과 각각의 제진대책들과 비교하면 다음과 같다.



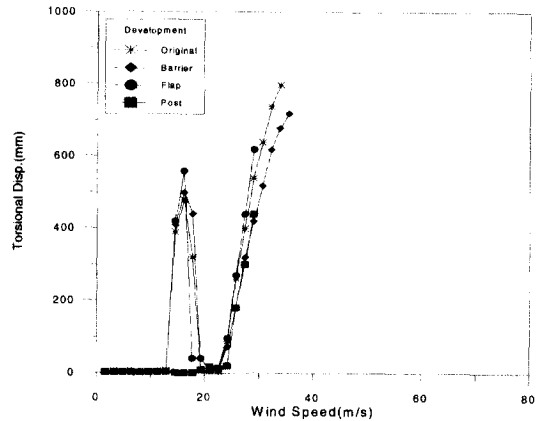
(연직거동)



(연직거동)



(비틀림거동)



(비틀림거동)

그림 7. Fairing과 Extension에 대한 내풍특성(영각 0°)

그림 8. Barrier, Post와 Flap에 대한 내풍특성(영각 0°)

1) Fairing 1 : 비틀림거동에 대해서는 약간의 제진효과를 기대할 수 있으나, 연직거동에 대해서는 상당히 큰 와류진동이 발생하여 오히려 내풍성을 저하시킴을 알 수 있다.

2) Fairing 2 : 비틀림Flutter에 대해서는 상당한 제진효과를 보인다. 그리고 비틀림와류진동에 대해서도 어느 정도 제진효과를 보이고 있으나 연직거동에서는 Fairing 1과 마찬가지로 상당히 큰 와류진동이 발생하여 오히려 내풍성을 저하시킴을 알 수 있다.

3) Fairing 3 : 3종류의 Fairing중에서 Fairing 3이 가장 좋은 제진효과를 나타낸다. 비틀림

표 4. 여러 가지 제진대책에 대한 제진효과

단 면	연직와류진동		Flutter (m/s)
	풍속(m/s)	진폭(cm)	
Fairing 1	19.1	88.7	33.0
Fairing 2	16.3	64.7	78.0
Fairing 3	20.3	19.9	55.0
Extension 1	16.3	74.3	62.0
Extension 2	16.3	50.3	82.0
Barrier	-	-	26.0
Flap	16.0	59.9	26.0
Post	14.7	36.0	27.0

와류진동도 상당히 축소가 되었으며, Flutter의 발생풍속도 상당히 높아짐을 알 수 있다.

4) Extension 1 : 기본단면보다 오히려 내풍성이 상당히 저하된다. 74cm의 연직와류진동이 새롭게 발생하며, 진폭100cm이상의 비틀림와류진동이 약26m/s부터 발생하여 약60m/s까지 이어지며 곧바로 Flutter로 발산하는 불안정한 양상을 보인다.

5) Extension 2 : 기본단면에 비해 특히 와류진동에 대한 내풍성이 저하된다. 약50cm의 연직와류진동이 새롭게 발생하며, Fairing 1과 마찬가지로 상당히 큰 와류진동이 발생하여 오히려 내풍성을 저하시킴을 알 수 있다. 비틀림와류진동은 진폭이 약72cm로 증가되나, Flutter에 대해서는 풍속 82m/s까지 발생하지 않아 상당히 내풍성이 향상됨을 알 수 있다.

6) Barrier : Fence형태의 중앙분리대를 이용하여 Barrier의 제진효과를 검토한 결과, 제진효과는 거의 없고 기본단면과 거의 동일한 내풍특성을 나타냄을 알 수 있다.

7) Flap : Flap을 설치할 경우는 약60cm의 연직와류진동이 새롭게 발생하며, 비틀림와류진동도 약간 증가한다. 대상교량에 있어서 Flap의 제진성은 기대할 수 없으며, 오히려 내풍성을 저하시킴을 알 수 있다.

8) Post : 대상교량의 보도난간의 경우, 그림 3와 같이 통풍율이 비교적 작을것으로 판단된다. 난간의 통풍율에 따라서 공기력거동이 변화하는 사례도 있으므로 Post난간을 설치하여 통풍율을 크게 하였을 경우, 내풍특성에 미치는 영향을 검토하였다. 기본단면에 Post난간을 설치하면 비틀림와류진동은 억제되지만, 연직와류진동이 새롭게 발생하며, 비틀림Flutter는 거의 비슷한 풍속에서 발생한다. 이 경우에도 제진효과는 기대할 수 없다.

### 3.4 개선단면의 내풍특성

이상으로 여러 제진대책을 검토한 결과, 대상

교량의 내풍성을 가장 향상시킬 수 있는 것은 Fairing 3으로 판단되었다. 따라서 대상교량의 내풍안정성을 확보하기 위해 기본단면에 Fairing 3이 설치된 단면을 개선단면으로 선정하고, 개선단면의 제진효과를 좀더 상세하게 확인하기 위하여 영각에 대한 검토, 난류에 대한 검토 및 감쇠율에 대한 검토를 수행하였다.

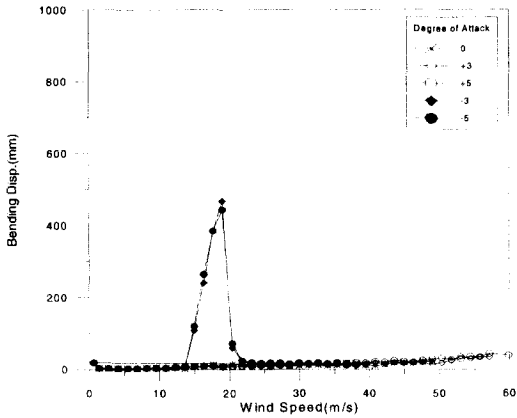
#### 3.4.1 영각에 대한 내풍특성

개선단면의 영각에 실험결과를 그림 9와 표 5에 제시하였다. 단, 기류는 등류이며, 감쇠율은 연직방향에  $\delta = 0.014$ , 비틀림방향에  $\delta = 0.005$ 이다. 영각변화에 따른 내풍특성을 보면, 우선 영각이 "+"일 경우에는 비틀림 및 연직와류진동이 거의 발생하지 않으며 Flutter의 발생풍속도 상당히 향상되었다. 반면, 영각이 "-"의 경우에는 진폭40cm의 연직와류진동과 진폭30cm정도의 비틀림와류진동이 발생하였다. 그리고 Flutter발생풍속도 낮아져 내풍성이 저하되었다. 그러나 3.1절의 기본단면의 영각변화에 대한 실험결과보다는 내풍성이 크게 향상되어 있음을 알 수 있었다. Box형 단면과 비교하면 Box형 단면에서는 일반적으로 비틀림모드에서 영각이 "+"일 경우 내풍성이 현저히 저하되었지만  $\pi$ 형단면에서는 다른 양상을 가짐을 알 수 있었다.

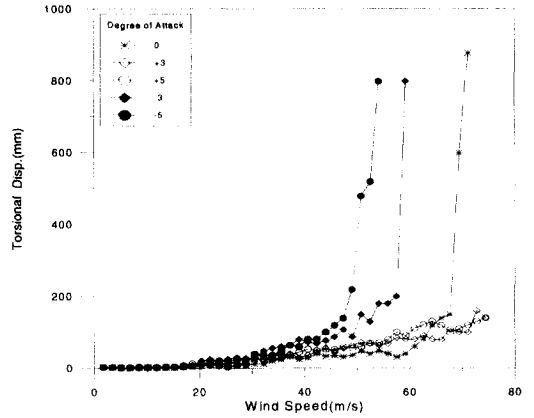
#### 3.4.2 영각 및 난류에 대한 내풍특성

개선단면에 난류강도 5%의 기류와 영각에 대한 실험결과를 표 5와 그림 10에 제시하였다. 단, 감쇠율은 연직방향에  $\delta = 0.014$ , 비틀림방향에  $\delta = 0.005$ 이다. 난류에서의 내풍특성에서는 등류의 실험결과에 비해 모든 공기력거동에 있어서 내풍성이 향상되어 있음을 알 수 있었다. 본 실험에서의 난류강도는 5%로 가설위치의 난류강도(약10%)보다 절반정도로 낮다. 따라서 실제의 대상교량에 있어서는 내풍안정성이 향상될 것으로 판단된다.

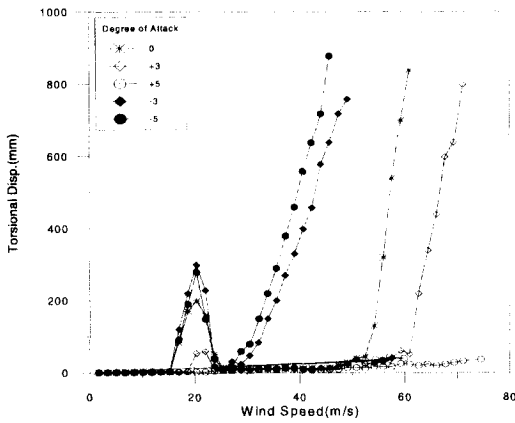




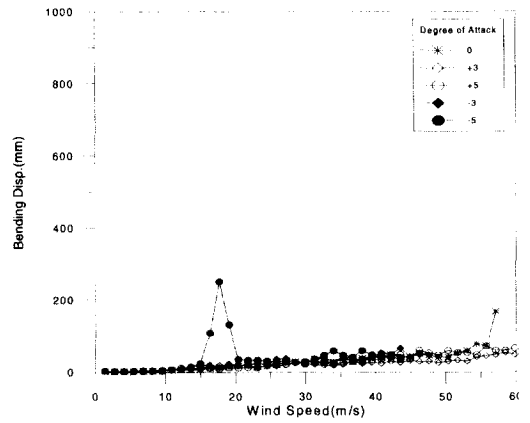
(연직거동)



(연직거동)



(비틀림거동)



(비틀림거동)

그림 9. 개선단면의 영각에 대한 내풍특성(등류)

그림 10. 개선단면의 영각에 대한 내풍특성(난류:5%)

표 5. 영각변화에 따른 개선단면의 내풍특성(난류:5%)

영각	기류	연직와류진동	비틀림와류진동	비틀림 FLUTTER
0°	등류	-	20.3m/s:19.9cm	55m/s
	난류	-	-	68m/s
+3°	등류	-	22.0m/s:6.0cm	63m/s
	난류	-	-	76m/s이상
+5°	등류	-	-	80m/s이상
	난류	-	-	76m/s이상
-3°	등류	19.1m/s:46.7cm	20.3m/s:29.9cm	38m/s
	난류	-	-	58m/s
-5°	등류	19.1m/s:44.3cm	20.3m/s:27.9cm	36m/s
	난류	17.7m/s:25.2cm	-	50m/s

### 3.4.3 감쇠율증가에 대한 내풍특성

각각의 영각에서 감쇠율에 따른 내풍특성은 표 6에 제시되어 있듯이, 감쇠율이 작을 경우 “+”영각과 0°에 있어서는 내풍안정성에 문제가 없었으나, 영각“-5°”에서 진폭25cm의 연직와류진동과 영각“-3°”에서 Flutter개시풍속이 내풍안정성에 문제가 될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 감쇠율을 좀더 크게하여 현실적인 평가를 수행하였다. 감쇠율은 연직방향이  $\delta = 0.032$ , 비틀림방향은  $\delta = 0.021$ 이며, 난류강도는 5%이다. 앞서 언급한 바와 같이 영각“+”에 있어서는 내풍안정성에 문제가 없는 것으로 나타났으므로 감쇠율증

표 6. 영각변화와 감쇠율에 대한 개선단면의 내풍특성

영 각	기류	연직와류진동		Flutter (m/s)
		풍속(m/s)	진폭(cm)	
0°	감쇠율(대)	-	-	68.0
	감쇠율(소)	-	-	72.0
-3°	감쇠율(대)	-	-	58.0
	감쇠율(소)	-	-	68.0
-5°	감쇠율(대)	17.7	25.2	50.0
	감쇠율(소)	-	-	68.0

가에 대한 실험은 “-”영각만을 대상으로 수행하였다. 실험결과 와류진동은 전혀 발생하지 않으며 Flutter개시풍속도 모두 향상되어 풍속 68m/s 이상에서 Flutter가 발생함을 알 수 있었다. Flutter에 대한 안전율(=1.2)를 고려한 설계풍속이 67.3m/s이므로 대상교량의 주형에 대한 내풍안정성은 충분하다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 제진사례를 기초로하여  $\pi$ 형단면을 가진 강합성 사장교의 내풍안정성에 적합하다고 사료되는 모형들의 공기역학적 특성을 실험을 통하여 규명하고, 가장 유리한 모형을 제안하였다. 공기역학적 특성은 영각, 감쇠율, 기류 특성 등을 주요 변수로 하였다. 실험 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 실험결과와 검증에 기준이 되는 설계풍속을 국·내외의 기준을 참고로 하여 67.3m/s로 정하였고, 이미 사용되고 있는 제진장치를 참고로 하여 8가지의 단면에 대해 실험을 수행하였다. 모형은 상사법칙에 의해 질량, 고유진동수, 질량관성 모멘트 등의 동적특성 등을 모사하였다.

2) 제진장치를 부가하지 않은 기본단면에 대한 실험결과 영각 0°에서는 연직방향의 이상진동은 발생하지 않았지만 비틀림방향의 와류진동은 48.7cm로 과도하였고, 26m/s에서 Flutter도 발생하였다. 따라서 대상교량의 기본단면은 공기역학적 제진장치가 부가되어야 함을 알 수 있었다.

3) 기본단면의 난류에 대한 실험결과 와류진동에는 난류와 동류가 비슷한 경향을 나타냈으나, Flutter에서는 난류에 의해 내풍성이 향상됨을 알 수 있었는데, 이는 난류의 풍속변동이 와류의 주기적인 방출을 억제하기 때문이다. 난류실험결과  $\pi$ 형단면에서는 난류강도가 세짐에 따라 공기역학적 내풍안정성이 향상된다는 사실을 발견하였다.

4) 기본단면의 내풍안정성을 향상시키기 위해 여러 가지(Fairing, Extension, Barrier, Flap, Post) 제진장치에 대해 검토한 결과 삼각형 모서리가 아래로 향한 Fairing이 가장 좋은 제진효과를 보여 개선단면으로 채택하였다. 따라서 합성형 사장교에서 많이 사용되고 있는  $\pi$ 형단면에서 제진대책으로 본 연구에서 채택한 단면이 가장 효과적임을 알 수 있다.

5) 채택된 개선단면에 대한 영각실험결과 감쇠율이 작은 경우 영각 “+”에서는 와류진동과 Flutter가 모두 안정적이었으나, 영각이 “-”일 경우에는 진폭 40cm의 연직 와류진동, 진폭 30cm의 비틀림 와류진동과 약 30m/s에서 Flutter가 발생하였다. 그러나, 주경간이 230m인 실제의 교량은 감쇠율이 어느 정도 크므로, 연직방향  $\delta = 0.032$ , 비틀림방향  $\delta = 0.021$ 로 실험한 결과 와류진동은 발생하지 않았고 67.3m/s에서 Flutter가 발생하였다. 가정한 감쇠율의 타당성을 검증하기 위해 시공완료 후 대상교량에 대한 초기치 계측에서 얻어진 실측 감쇠율과의 비교·검토가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

6) 대상교량에서는 Galloping이 나타나지 않았다. 일반적으로 Galloping은 B/D가 0.7~2.8 정도에서 발생하는데, 대상교량의 단면비는 약 8.0이므로 Galloping이 발생하지 않은 것으로 사료된다. 대상교량과 같은 형태의 단면에서는 Flutter가 안정성에 중요한 문제이다. Flutter를 명확하게 규명하기 위해서는 기류가시화 방법이나 수치해석적방법을 통한 보다 상세한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 현대건설 기술연구소 "삼천포대교 풍동실험보고서" 1998
- (2) M.S.Troitsky "Cable Stayed Bridges" 1988
- (3) Manabu Ito "Cable Stayed Bridges" 1991
- (4) 건설부, "한국도로교표준시방서" 1996
- (5) 건축학회, "건축규준개정안" 1998
- (6) 일본도로협회, "도로교내풍설계편람" 1991
- (7) 本州-四國연락교공단 "풍동실험요령" 1980
- (8) Danish Maritime Institute, "Aerodynamics of Large Bridges "
- (9) 윤재근, 사장교의 내풍안정성 평가, 한양대학교 석사학위논문, 1993

(접수일자 : 1998년 11월 3일)