

## $\pi$ 형 단면의 내풍안정성에 미치는 페어링 효과에 관한 연구

김희덕\*

### The Fairing Effects on Aerodynamic Stability of $\pi$ -type Sections

Heeduck Kim\*

**Keywords :** Plate girder(플레이트 거더),  $\pi$  shape sections( $\pi$ 형 단면), fairing effects(페어링 효과), wind tunnel tests(풍동실험), aerodynamic stability(공기역학적 안정성)

#### Abstract

In this paper, the fairing effects on the aerodynamics stability of basic plate-girder sections are investigated through wind tunnel tests. As basis sections, two types of  $\pi$  shape sections with aspect ratios(D/B) of 1/5 and 1/10 are employed as the basic sections. And three types of triangular fairings are applied such as right-angled triangle(F1), inverted right-angled triangle(F2) and regular triangle(F3). The effects of attack angle on the dynamic response of each section are also investigated. As the results of experiments, fairings F2 is most effective to suppress flutter phenomenon or vortex induced vibration among three types of fairings.

#### 1. 서론

최근 현수교, 사장교 등과 같이 저 고유진동수를 가진 특수 장대교량의 건설이 활발히 진행되고 있는 시점에서 바람에 의한 동적안정성 확보는 설계과정에서 지배적인 요소로 작용한다. 장대교량의 내풍안정성평가는 정적설계로부터 주어진 단면현상에 대하여 축소모형에 의한 풍동실험을 통하여 이루어지는 것이 일반적이며, 설계풍속이하에서 플러터, 와류진동, 변동풍에 의한 버펄링 등과 같은 각종 공기역학적 유해진동이 발생할 경우, 요구된 동적 안정성[1]을 확보하기 위한 적절한 대책을 강구해야 한다. 동적 안정성 확보를 위한 대책[2-5]으로는 구조물의 질량, 강성 또는 감쇠를 증가시켜 와류진동진폭의 감소 및 플러터의 한계풍속 증가를 도모하는 구조역학적 방법(mechanical method)과 fairing, spoiler, deflector, flap 등과 같은 보조부재를 교량 상부구조에 부착하여 단면 주위의 흐름양상(flow pattern)을 변화시켜 유해진동의 발생을 억제하는 공기역학적 방법(aerodynamic method)이 있다.

본 연구는 각종 공기역학적 대책 중에서 페어링(fairing)에 의한 내풍성 향상효과를 고찰한 것으로 플레이트거더교의 기본단면형태라고 할 수 있는  $\pi$ 형 단면을 기본단면으로 채택하였다. 플레이트거더 형식은 2개의 I형 주거더 위에 바닥판 슬래브를 설치하는 구조형식이므로 구조적으로 간단하고 용접량이 적으므로 경제적인 강교형식이라 할 수 있으며, 시공성이 용이하고 공사기간도 단축할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, Tacoma Narrow교의 붕괴사고에 대한 원인분석에서도 알 수 있듯이, 단면 앞모서리부에서 확실한 기류의 박리점이 존재하고 단면 비대칭성으로 인한 상하부의 흐름양상이 판이하게 다르므로 바람에

의한 각종 유해진동의 발생 가능성이 높아 내풍안정성 측면에서는 매우 불리한 단면형상으로 알려져 있다. 이러한 단점에도 불구하고 경제적 측면과 내풍공학분야의 다양한 실험결과 및 연구성과[6-8]를 바탕으로 주로 사장교형식의 보강형으로서 플레이트 거더형식을 채용하는 예가 늘어가고 있다.

본 연구에서 채용한 기본단면은 변장비 1:5(P5 Model)와 1:10(P10 Model)의 2종류의  $\pi$ 형 단면으로 하였고, 페어링의 형상은 실제 내풍설계 또는 기존연구에서 적용 사례가 있는 직각삼각형(F1), 역직각삼각형(F2) 및 정삼각형(F3)의 3종류로 한다. 풍동실험에서는 페어링을 부착한 2차원 강체모형을 연직 및 비틀림모드로 분리하여 각각 1자유도계로 지지한 후 풍속증가에 따른 모형의 동적응답을 측정하여, 측정결과를 기본단면의 응답과 비교함으로써 페어링의 효과를 고찰하고자한다. 또, 기류의 경사각의 영향을 파악하기 위하여 영각  $-3^\circ$  및  $+3^\circ$ 에서 실험모형의 응답을 측정하였다.

#### 2. 풍동실험방법

##### 2.1 사용모형의 특성

본 연구에서는 플레이트거더형식의 기본단면형상으로서 변장비 1:5(Model P5) 및 1:10(Model P10)의  $\pi$ 형 단면을 선정하였으며 단면치수를 Fig. 2에 나타냈다. 모형은 아크릴로 제작하였으며 풍동 측벽에 의한 경계층요소가 모형의 동적 거동에 미치는 영향을 배제하기 위하여 모형 양단에 단판을 설치하였다. 모형에 의한 풍동 폐쇄율 5%를 확보하기 모형의 높이를 P5 Model은 50mm, P10은 30mm로 하였다.

또, 적용할 페어링 단면의 선정은 박스형식 또는 플레이트거더형식 교량의 내풍안정성 향상을 도모하기 위한 내풍대책으로 적용된 사례가 있는 직각삼각형(F1), 역직각삼각형(F2) 및 정삼

\* 경일대학교 토목공학과, heeduck@kiu.ac.kr

각형(F3)의 3종류 단면을 채택하여 기본단면에 부착하여 동적응답실험을 행하였다. Fig. 2에는 선정된 페어링의 단면형상을 나타냈으며, 페어링은 초경량재료를 사용하여 제작하여 페어링부착에 따른 실험모형의 중량 및 고유진동수 변화를 최소화하였다.

Table 1에는 기본모형 및 페어링부착모형의 구조특성을 나타냈으며, 페어링부착에 의한 모형의 중량 및 고유진동수의 변화가 매우 작다는 것을 알 수 있다. 한편, 바람에 의한 각종 공기역학적 진동현상을 보다 큰 진폭으로 발생시켜 페어링의 부착효과를 보다 용이하게 관찰하기 위해 모형에는 어떠한 감쇠장치도 부착하지 않았다. 무풍중의 자유진동응답으로부터 측정된 연직 및 비틀림모드의 대수감쇠율은 0.002~0.003정도의 범위였다.

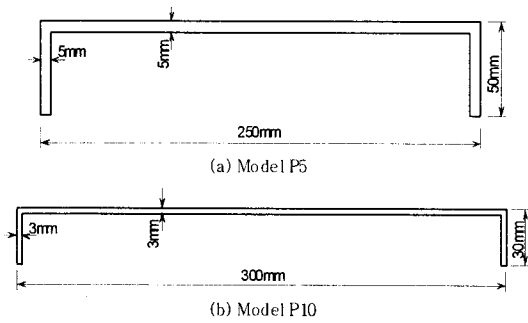


Fig. 1 Details of basic sections

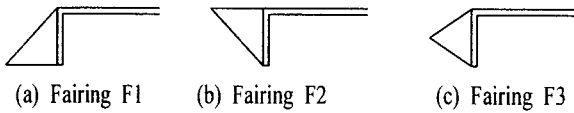


Fig. 2 Shape of applied fairings

Table 1. Structural characteristics of models

모델명	P5	P5+F1,F2,F3	P10	P10+F1,F2,F3
중량	3.955kgf	4.005kgf	3.060kgf	3.100kgf
고유진동수	연직모드 3.625Hz	3.625Hz	4.00Hz	4.00Hz
비틀림모드	4.80Hz	4.75Hz	4.95Hz	4.875Hz
대수감쇠율	연직모드 0.003	0.003	0.003	0.003
비틀림모드	0.002	0.002	0.003	0.002

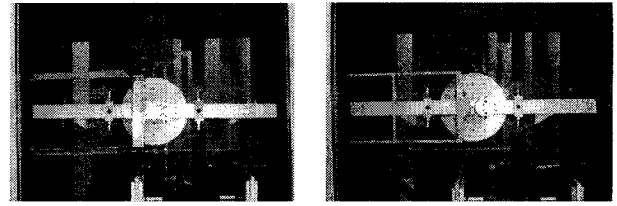
## 2.2 사용풍동 및 계측방법

본 연구에서 사용한 풍동은 경일대학교 토목공학부 연구용 풍동으로서 형식은 흡입형 (Suction type)이며 측정부의 단면은 0.7m(W)×1.0m(H)×4.0m(L)인 2차원 풍동이다. 최대풍속은 20m/s이며, 난류강도는 평균풍속 10m/s에 대하여 0.5%미만이고, 수축비 (contraction ratio)는 5.76:1이다.

풍동실험에서 채택된 2차원 강제모형은 2개의 십자스프링 (cross spring)과 8개의 코일스프링 (coil spring)을 사용하여 풍동내에 지지하였으며 모형의 동적변위응답은 모형측 양단에 설치된 모드분리장치를 사용하여 연직 및 비틀림모드로 분리하고 각각 1자유도 지지상태에서 응답을 측정하였다. Picture 1에는 연직 및 비틀림 1자유도로 지지된 모형의 설치상태를 보여주고 있다.

모형의 동적응답은 풍속을 점차적으로 증가시켜가면서 응답진폭이 일정해진 후, 2대의 레이저식 비접촉변위계 (Keyence, LK-081/2101)로 측정하였고, 60Hz의 일반전원 노이즈를 제거하기 위하여 측정주파수를 120Hz로 설정하고 40초간(4800개)의 시계열 데이터를 수집하였다. 또, 풍속은 피토크관 (pitot tube)에서 얻어지는 동압으로부터 마이크로 마노미터 (Furness controls, FCO12)를 사용하여 측정하였다. 또, 계측된 모든 데이터는 Low pass

filter를 통과시켜 50Hz이상의 바람직하지 못한 고주파수의 노이즈를 제거한 후 AD변환기를 통하여 측정컴퓨터로 저장하였다. 또, 기류의 경사각의 변화에 따른 각 단면의 풍속응답특성을 파악하기 위하여 영각 +3° 및 -3°에서 응답실험을 행하였다.



(a) Vertical SDOF (b) Torsional SDOF

Picture 1. Supporting system of model

## 3. 실험결과 및 고찰

풍속의 증가에 따른 각 단면의 동적응답은 연직진폭과 비틀림진폭으로 분리하여 풍속-응답곡선 (V-A curve)으로 정리하였다. 연직모드의 경우, 연직변위의 R.M.S.값을 모형의 대표치수(D)로 나눈 무차원 진폭( $Z_{RMS}/D$ )을 사용했으며, 비틀림모드의 경우는 회전 각변위  $\theta$ (degree)의 R.M.S.로서 나타냈다. 또, 풍속은 평균 풍속을 모형의 진동수와 대표치수로 나눈 기준풍속 (reduced wind velocity;  $U_r = U/D$ )을 사용하여 표시하였다.

### 3.1 P5-series 단면의 풍속응답특성

기본단면인 P5와 더불어 페어링을 부착한 단면의 V-A곡선의 일예(영각  $\alpha=0^\circ$ )를 Fig. 3에 나타냈다. 이 그림에서 의 경우, 기본단면은 비틀림모드의 발산진동에 의해 지배되고 연직 및 비틀림모드에서 큰 진폭의 와류진동이 발생함을 알 수 있다. 페어링을 부착한 경우 페어링의 형상에 따라 기본단면의 풍속응답에 다양한 영향을 미치고 있다. 먼저 직각삼각형 페어링(F1)의 경우, 연직 및 비틀림모드의 와류진동의 진폭을 1/2배정도 저하시키면서 발생풍속도 증가시키는 효과가 있으며, 역직각삼각형 페어링 (F2)을 부착한 경우는 영각  $0^\circ$ 에서 문제시될만한 동적현상이 전혀 나타나지 않음을 알 수 있다. 한편, 정삼각형 페어링(F3)의 부착한 경우는 전술의 F2 및 F3과는 다르게 발산진동의 한계풍속이 기본단면에 비해 약 50%정도 감소하는 역효과를 가져다줄 수 있다.

이러한 페어링효과를 좀더 체계적으로 고찰하기 위하여 먼저 와류진동에 대하여 영각변화와 페어링형상에 따라 최대진폭과 발생풍속을 조사하여 그림 Fig.4에 그 결과를 모형명과 병기하여 각 진동모드별로 나타냈다. 이 그림에서 모형명 ( )속의 값은 영각의 크기를 의미한다. 또, 발산진동은 전체 실험case에서 비틀림모드만 발생하였고, 각 단면별로 비틀림 플러터 개시풍속을 조사하여 Fig.5에 나타냈다.

먼저 직각삼각형 페어링(F1)의 경우, 영각  $\alpha=0^\circ$ 에서 연직 및 비틀림모드의 와류진동의 진폭을 1/2배정도 저하시키면서 발생풍속도 증가시키는 효과를 가져다주었으나,  $\alpha=-3^\circ$ 에서는 진폭저하효과는 그다지 크지 않고 발생풍속만 증가되는 경향을 보여주고 있다. 한편,  $\alpha=-3^\circ$ 에서는 두드러진 크기의 풍진동이 전혀 나타나지 않는 매우 안정적인 내풍성을 가져다줄 수 있다. 또, 발산진동에 대해서는  $\alpha=0^\circ$ 에서 기본단면과 유사한 풍속에서 비틀림플러터가 발생하여나, 그 외의 경우에는 발산진동이 발생되지 않았다. 역직각삼각형 페어링(F2)을 부착한 경우는 영각  $\alpha=+3^\circ$ 에서 소규모의 연직 및 비틀림 와류진동이 발생한 것을 제외하면, 전 조사풍속영역에서 문제시될만한 동적현상이 전

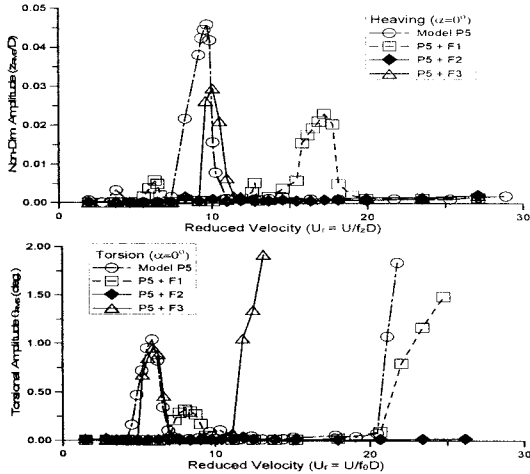


Fig. 3 V-A curves of Model P5-series ( $\alpha=0^\circ$ )

혀 나타나지 않음을 알 수 있다. 정삼각형 페어링(F3)의 부착은 경유는 영각 부여유무에 관계없이 비틀림플러터가 발생하였으며, 영각  $\alpha=0^\circ$ 에서는 오히려 기본단면에 비하여 한계풍속이 약 50% 감소하고  $\alpha=+3^\circ$ 에서는 플러터 개시풍속이 약 25% 감소하였다. 또, 와류진동에 대해서도 모든 영각에서 연직 및 비틀림모드의 와류진동이 발생되었으며, 연직모드는 기본단면과 비교하여 발생풍속이 조금 상승하였고 최대진폭도 약 30% 정도 감소되었음을 알 수 있다. 하지만, 비틀림모드의  $\alpha=+3^\circ$ 에서는 P5 단면에 비해 2배정도의 큰 진폭으로 와류진동이 발생하였고 영각이 (+)방향으로 증가함에 따라 진폭이 감소하여  $\alpha=+3^\circ$ 에서는 50% 정도 감소하였으며, 발생풍속은 기본단면과 비슷하였다.

이상에서 변장비 1:5  $\pi$  단면의 내풍안정성 향상을 위해서는 직각삼각형 및 역직각삼각형 페어링이 효과적이며 그중에서도 역직각삼각형 페어링이 양호한 것으로 판단되며, 정삼각형 페어링은 플러터 한계풍속이 감소하는 등 오히려 내풍안정성을 저하시킬 우려가 있으므로 적용에는 충분한 사전 검증이 필요한 것으로 사료된다.

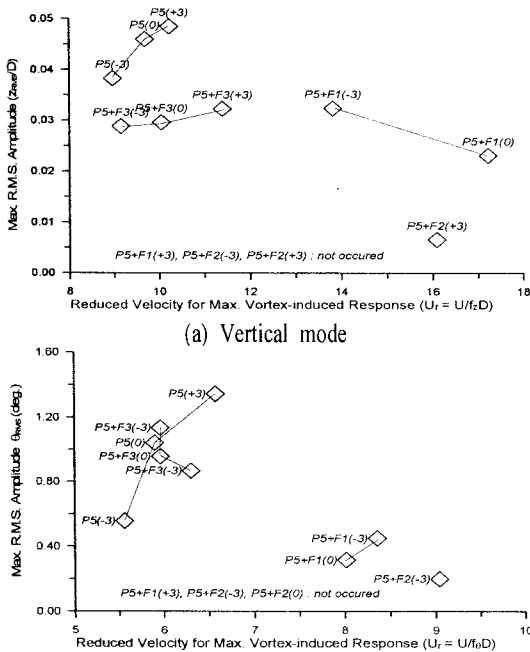


Fig. 4 Maximum vortex-induced amplitude and its occurrence velocity of P5-series

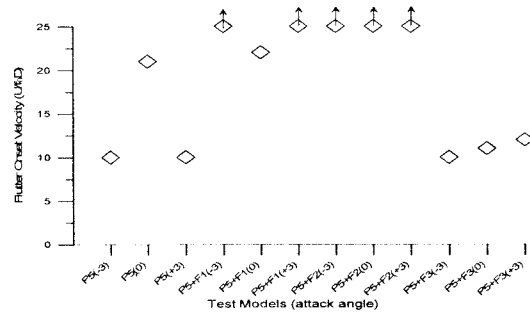


Fig. 5 Critical velocity for torsional flutter (P5)

### 3.2 P10-series 단면의 풍응답특성

변장비 1:10의 P10 단면의 내풍안정성도 Fig. 6의 V-A 곡선으로부터 비틀림 플러터에 의해 지배되고 있으며, P5 단면과 유사하게 연직모드에서 큰 진폭의 와류진동이 발생하였으며, 연직와류진동의 진폭 및 발생풍속은 영각이 증가할수록 증가하는 양상을 보여주고 있다.

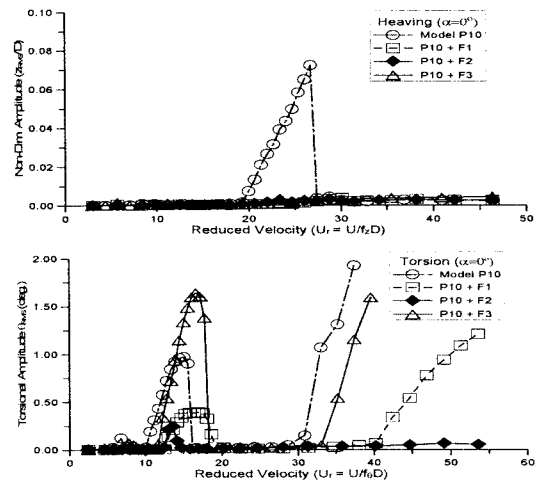


Fig. 5 V-A curves of Model P10-series ( $\alpha=0^\circ$ )

페어링 효과로서 먼저 직각삼각형 페어링(F1)의 경우는 비록 기본단면에 비하여 높은 풍속이지만, 영각  $\alpha=0^\circ$  및  $-3^\circ$ 에서 비틀림 발산진동이 나타났으며,  $\alpha=+3^\circ$ 에서는 연직 및 비틀림 와류진동이 발생하였으며 연직최대진폭이 기본단면에 비하여 조금 증가하였으나 비틀림진폭은 감소되었음을 알 수 있다. 한편, (+)영각에서는 매우 안정적인 내풍특성을 보유하고 있는 것을 알 수 있다.

역직각삼각형 페어링의 경우는 F1 페어링과는 반대로 (+)영각에서만 비틀림 플러터가 발생하였고 P10과 비슷한 규모의 비틀림와류진동도 발생하였다. 영각  $\alpha=0^\circ$  및  $+3^\circ$ 에서는 연직 및 비틀림 와류진동이 발생하였으나 진폭이 작고 발생풍속영역도 좁아 비교적 안정적인 내풍특성을 보여주고 있다.

정삼각형 페어링의 경우는 전술의 P5-series에서와 유사한 응답특성을 보여주고 있다. 영각과 관계없이 비틀림 발산진동이 발생하였으며, 비틀림 와류진동의 최대진폭이 기본단면에 비하여 상당히 증가된 값을 보여주고 있다.

변장비 1:10  $\pi$  단면에 미치는 페어링효과로서 P5 단면과 유사하게 직각삼각형 및 역직각삼각형 페어링에 대해서는 분명한 제진효과를 확인하였으나, 정삼각형 페어링의 경우는 기본단면에 비하여 고속이지만 비틀림플러터가 발생하였고 비틀림 와류진동의 최대진폭이 증가하는 역효과가 있음을 알 수 있다.

Table 2는 본 연구에서 얻어진  $\pi$ 형단면의 와류진동 및 플러터에 대한 페어링효과를 종합적으로 정리한 결과를 보여주고 있으며, 이 표는 플레이트거더 형식교량의 내풍설계에 있어 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

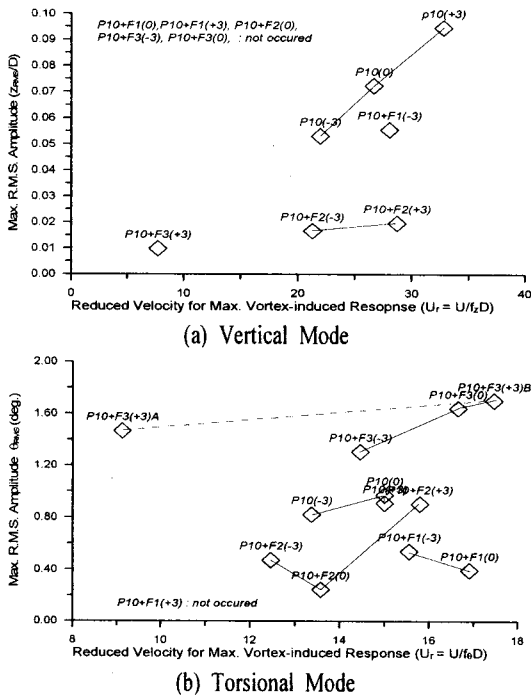


Fig. 4 Maximum vortex-induced amplitude and its occurrence velocity of P10-series

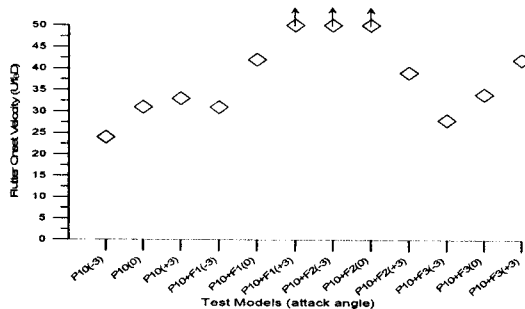


Fig. 5 Critical velocity for torsional flutter (P10)

#### 4. 결론

본 연구에서는 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 변장비 1:5  $\pi$ 형 단면의 내풍안정성 향상을 위해서는 직각삼각형 및 역직각삼각형 페어링이 효과적이며 그중에서도 역직각삼각형 페어링이 가장 양호한 것으로 판정되었으나, 정삼각형 페어링은 영각 0°에서 플러터 한계풍속이 감소하고 -3°에서 와류진동진폭이 증가하는 등 내풍안정성을 저하시킬 우려가 있으므로 적용시 충분한 사전 검토가 필요하다.

2. 변장비 1:10  $\pi$ 단면에 미치는 페어링효과로서 직각삼각형 (F1) 및 역직각삼각형(F2) 페어링에 대해서는 분명한 제진효과를 확인하였고, F1은 (+)영각에서 F2는 0° 및 (-)영각에서 효과적이며, 정삼각형 페어링(F3)의 경우는 기본단면에 비하여 고풍속이지만 비틀림플러터가 발생하였고 비틀림 와류진동의 최대진폭이 증가하는 역효과가 있음을 알 수 있다.

3. 본 연구에서 채택한 3종류의 페어링 중에서 기본단면의 내풍안정성을 향상을 위한 내풍대책으로서 페어링 F2가 가장 우

Table 2 Summary of fairing effects on  $\pi$ -type sections

영각	변장비	단면/페어링형상	발산진동		와류진동				
			발생여부	발생풍속	최대진폭	발생풍속			
			Z	$\Theta$	Z	$\Theta$	Z	$\Theta$	
0°	1:5	기본단면	×	○					
		직각삼각형	×	○	-	↘	↘	↗	↗
		역직각삼각형	×	×	-	-	×	×	-
	1:10	정삼각형	×	○	-	↘	↘	↗	↗
		기본단면	×	○	-				
		직각삼각형	×	○	-	↗	↗	-	↘
3°	1:5	직각삼각형	×	×	-	-	×	×	-
		역직각삼각형	×	×	-	-	↘	↘	↗
		정삼각형	×	○	-	↗	↗	↗	↘
	1:10	기본단면	×	○	-				×
		직각삼각형	×	×	-	-	×	-	×
		역직각삼각형	×	○	-	↗	↘	↘	↗
-3°	1:5	정삼각형	×	○	-	↗	↘	↗	↗
		기본단면	×	○	-				×
		직각삼각형	×	×	-	-	↘	↘	↗
	1:10	역직각삼각형	×	×	-	-	↘	↘	↗
		정삼각형	×	○	-	↗	↗	↗	↘
		기본단면	×	○	-				×

\* 1:10에 정삼각형을 부착한 단면(P10+F3)은 영각 3°에서 2회의 비틀림 와류진동이 발생  
 ※ 기호설명 ○: 발생함 ×: 발생하지 않음 ↗: 다소증가 ↘: 다소감소 ↗: 큰 폭으로 증가 ↘: 큰 폭으로 감소 ≒: 비슷함 (기본단면응답과 비교)

한 것으로 나타났으나, 영각에 따라 발산진동의 발생가능성이 있으므로 적용을 위해서는 교량가설지의 기류특성에 대한 충분한 조사가 필요하다.

4. 본 연구에서 대상으로 삼은  $\pi$ 형 단면의 풍응답에 미치는 페어링효과는 페어링 단면형상 뿐만 아니라 기본단면의 변장비 및 영각의 변화에도 큰 영향을 받았으며, 이러한 페어링 효과를 보다 체계적으로 분석하여 진동발생 또는 진동억제 메커니즘을 규명하기 위해서는 단면주위 기류흐름의 가시화, 표면압력측정 또는 비정상공기력 측정 등의 후속실험이 필요한 것으로 판단되며 이러한 사항들은 금후의 과제로 한다.

#### 후기

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대 비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축 사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

#### 참고문헌

[1] 日本道路協會, 1991, 道路橋耐風設計便覽  
 [2] 김윤석, 김희덕, 백병지역, 1998, 바람과 교량, 한국풍공학회  
 [3] Sockel,H.(ed.), 1994, Wind-Excited Vibrations of Structures, Springer-Verlag  
 [4] 日本鋼構造協會, 1997, 構造物の耐風工學, 東京電機大學出版局  
 [5] 日本土木學會, 2002, 橋梁の耐風設計-基準と最近の進歩-, 丸善  
 [6] Wardlaw,R.L.,1991, Cable Supported Bridges under Wind Actions, Proc. Cable-Supported Bridges, Yokohama, Japan  
 [7] Kubo,Y. & etc, 2002, Aerodynamic Performance of Improved shallow  $\pi$  shape bridge deck, J. Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.90, pp.2113-2125  
 [8] 김희덕, 김재민, 2002, 격자난류를 사용한 페어링 부착단면의 와류진동 응답특성에 관한 실험적 연구, 한국풍공학회지, 제6권, 제2호, pp.147-156.