

페어링부착단면의 풍응답특성에 미치는 난류효과에 관한 연구

김희덕*, 김재민**

Turbulence Effects on Wind-Induced Response of Rectangular Sections with Fairing

Kim, Heeduck*, Kim, Jae-Min**

Key Words : Wind-Resistant Design(내풍설계), Wind Tunnel Tests(풍동실험), Gust Response(난류응답), Grid Turbulence(격자난류), Fairings(페어링), Bluff Body

Abstract

In this study, a turbulence simulation is carried out in a suction type wind tunnel using grids, where turbulent flows with various turbulence intensity are successfully produced by the change of grid size, arrangement of grids and settling position, respectively. Response tests of rectangular cylinder models with aspect ratio of 2 and 4 are carried out in smooth flow and generated turbulent flows. Additionally, two types of fairing are considered such as right triangle and regular triangle. The effects of wind velocity fluctuations and fairing are discussed on vortex-induced oscillation.

1. 서론

태풍내습국의 하나인 우리나라에서 강풍은 장대교량의 설계에 있어 지진과 더불어 고려해야 할 가장 중요한 하중의 하나이다. 특히, 장대교량은 일반교량에 비해 유연성이 풍부하여 각종 외력에 대해 진동하기 쉬운 구조로서의 특징을 가지므로, 바람에 의한 동적 안정성 확보는 교량설계과정에서 매우 중요한 위치를 점유하고 있다. 내풍안정성평가는 정적설계로부터 주어진 단면현상에 대하여 축소모형에 의한 풍동실험을 통하여 이루어지는 것이 일반적이며, 설계풍속이하에서 플러터(flutter), 와류진동(vortex-induced oscillation), 버펫팅(buffeting) 등과 같은 각종 공기역학적 진동현상에 대하여 요구된 동적 안정성⁽¹⁾을 확보하기 위한 적절한 대책을 강구해야 한다. 바람에 의한 동적 안정성확보를 위한 대책^(2~4)으로는 질량, 강성 또는 감쇠를 증가시켜 와류진동진폭의 감소 및 플러터 한계풍속의 증가를 도모하는 구조역학적 방법(mechanical method)과 fairing, flap 등과 같은 보조부재를 구조물에 부착하여 단면 주위에 흐름양상(flow pattern)을 변화시켜 유해진동의 발생을 억제하는 공기역학적 방법(aerodynamic method)이 있다.

한편, 실제 대기류는 시·공간적으로 끊임없이 변동하는 난류로서의 성질을 가지고 있으므로 실제 구조물의 거동은 등류 중의 응답특성과는 분명히 다르나, 일반적으로 등류중의 실험결과를 내풍설계에 적용하는 이유는 대다수의 경우, 난류중의 응답이 등류중의 응답에 비하여 작게 나오므로 안전측으로 평가되기 때문이다. 하지만, 단면의 형상에 따라 난류중의 와류진동응답이 더 크게 발생하는 경우도 있고, 지형적으로 기류변동이 심한 곳

에 가설되는 경우는 피로현상에 관련되는 gust응답의 추정이 요구되므로 적절한 방법에 의하여 난류응답실험을 행하여 안정성을 검증할 필요가 있다^(5,7).

본 연구에서는 박스교량의 기본단면이라 할 수 있는 직사각형단면에 대하여 제진대책으로 채택된 예가 많은 fairing을 대상으로 기류변동의 영향과 fairing효과를 풍동실험을 통하여 파악하여 장대교량의 내풍설계의 기초자료를 획득하는 것을 목적으로 하며, 각종 공기역학적 진동현상 중에서 와류진동을 대상으로 하였다. 난류생성은 수동적 난류발생방법 중의 하나인 격자에 의한 방법을 채택하였고, 격자의 크기와 배치 및 설치위치를 변화시켜 다양한 난류강도를 가진 변동풍을 생성하였다. 응답실험에서는 공기역학적으로 흐름양상이 다른 변장비 1:2 및 1:4 단면을 기본단면으로 하고 정삼각형 및 직각삼각형 단면을 가진 2종류의 fairing을 기본단면에 부착하여, 등류와 난류중에서 동적응답을 측정하여 와류진동에 미치는 fairing효과 및 기류변동의 영향을 고찰하였다.

2. 풍동 실험 결과 및 고찰

2.1 격자에 의한 난류생성

본 연구에서 사용한 풍동은 경일대학교 토목공학과 연구용 풍동으로서 형식은 흡입형(suction type)이며, 측정부의 크기는 0.7m(W)×1.0m(H)×4.0m(L)이다. 유효풍속범위는 0.5m/s~20m/s 이고 난류강도는 평균풍속 10m/s에 대하여 0.5%미만이며, 흡입구의 수축비(contraction ratio)는 5.76:1이다.

본 연구에서는 각종 난류발생방법⁽⁸⁾중에서 가장 손쉽게 다양한 난류강도를 가진 기류를 생성할 수 있는 격자에 의한 방법을 채택하여 난류를 생성하였다. 격자의 폭은 a=20mm, 30mm, 40mm 및 60mm의 4종류를 채택하여 배치간격을 종횡방향으로

* 경일대학교 토목공학과, heeduck@kiu.ac.kr

** 현대건설기술연구소, kim1970@hanmail.net

동일하게 격자폭의 2배~6배의 범위로 하였으며, 설치위치는 측정단면에서 풍상측으로 2m, 2.5m 및 3m로 하였다. 또, 격자의 두께는 동일하게 20mm로 하였으며, 생성된 기류의 목표값을 주류방향 난류강도에 대하여 $I_u=2.5\%$, 5% , 7.5% , 10% , 15% 및 20% 의 6종류로 하였다. 변동풍의 측정은 X-type 열선유속계(IWH-1000, Kanomax)을 사용하여 주류방향과 연직방향의 변동성분을 측정하였으며, 출력된 신호는 Low-pass filter(CFT-1000, CurioTec)를 거쳐 50Hz이상의 고주파 노이즈를 제거한 뒤, A/D 변환기를 통해 측정용 컴퓨터에 저장하였다. 데이터수집은 sampling주파수 100Hz로 40.96초간(4096개) 수집하였다. 격자의 크기, 배치간격 및 설치위치를 변화시켜 얻어진 각종 난류의 난류강도를 평균풍속에 따라 Fig.1에 나타냈으며, ●은 난류시뮬레이션에서 목표로 삼은 기류를 표시하고 있다. 생성된 기류의 주류방향 난류강도의 범위는 2%~25%로서 폭 넓은 범위의 다양한 난류가 성공적으로 생성되었음을 알 수 있다. 또, Fig.2는 생성된 난류의 주류방향(I_u)과 연직방향(I_w)의 난류강도비를 plot한 것으로 평균값이 $I_u/I_w=1.2$ 정도로 주류방향 난류강도가 연직방향 난류강도에 비해 약간 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 기존의 자연풍의 관측결과에서 난류강도비는 $I_u/I_w=2$ 정도인 점에 비추어 격자난류의 난류강도비가 자연풍에 비하여 비교적 작게 나타났다.

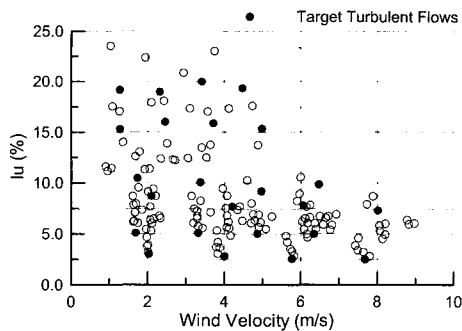


Fig.1 Turbulence intensity of generated flows

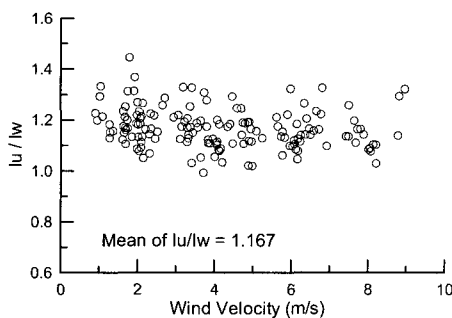


Fig.2 Ratio of horizontal and vertical turbulence intensities

2.2 2차원 모형의 제원

응답실험에서 사용된 2차원 모형의 높이는 50mm(풍동 폐쇄율 5%)로 하였고, 모형의 단면형상 및 치수를 Fig.3에 나타냈다. 전연에서 박리된 기류가 모형표면에 재부착점이 약 $B/D=2.7$ 이므로 재부착여부에 따른 응답특성을 고찰하기 위하여 기본단면으로서 변장비 $B/D=2$ 및 4의 직사각형단면을 선정하였다. 또, fairing의 형상은 실제 적용예가 있는 정삼각형과 직각삼각형을 채택하여 기본단면에 부착하여 총 6가지 단면에 대하여 응답실험을 행하였다. Table 1에는 기본단면 A0 및 B0의 단면치수 및 구조특성을 나타냈다. 여기서, 각종 공기역학적 진동현상을 보다 큰 진폭으로 발현시켜 기류변동 및 fairing효과를 보다 용이하게

관찰하기 위해 모형에는 어떠한 감쇠장치도 부착하지 않았다. 또, fairing부착에 의한 모형의 중량 및 고유진동수 변화를 최소화하기 위하여 fairing은 경량재료인 발사를 사용하여 제작하였다.

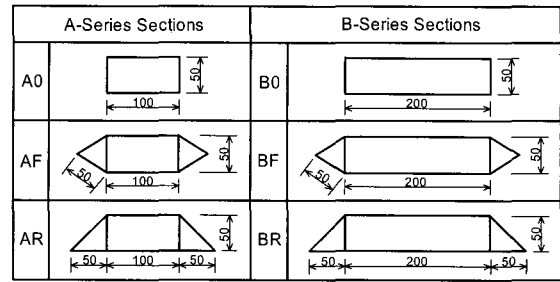


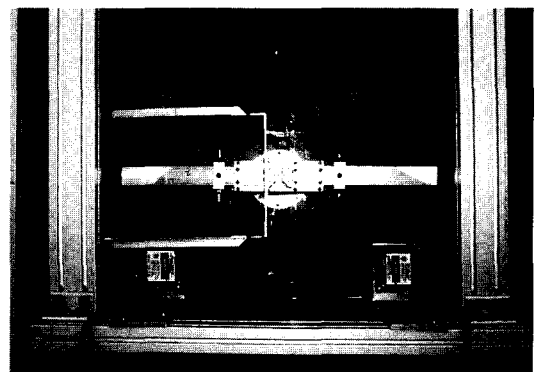
Fig.3 Sectional shapes of models

Table 1 Structural characteristics of models

Aspect ratio		1:2 (A0)	1:4 (B0)
Dimension(B×D×L)		200×50×600(mm)	100×50×600(mm)
Weight		3.0kg · f	2.2kg · f
Moment inertia		0.339kg·f·cm ²	0.287kg·f·cm ²
Natural frequency	Vertical(f_z)	4.75Hz	5.46Hz
	Torsional(f_a)	6.50Hz	8.00Hz
Frequency ratio(f_a/f_z)		1.37	1.27
Logarithmic decrement	Vertical	0.002	0.002
	Torsional	0.003	0.003

2.3 응답실험 결과 및 고찰

응답실험에서는 격자를 사용하여 얻어진 난류와 등류 중에서 Picture 1에 나타낸 것과 같이 8개의 코일스프링(coil spring)과 2개의 십자스프링(cross spring)을 사용하여 연직-비틀림 2자유도계로 모형을 지지하여 응답측정을 행하였다. 응답실험은 앞에서 생성된 난류중에서 $I_u=2.5\%$, 5% , 7.5% 및 10% 의 4종류의 난류 및 격자를 제거한 등류 중에서 행하였다.



Picture 1 Model supporting system

바람에 의한 동적 변위는 2대의 비접촉식 레이저변위계(LB-081/LB1101W, Keyence)를 사용하여 측정하였으며, sampling주파수는 120Hz로 설정하고 136.5초간(16384개)의 data를 수집하였으며, 레이저 변위계로부터의 출력신호는 Low-pass filter를 거쳐 측정용 컴퓨터에 저장하였다. 또, 모형의 양단에는 단판(end plate)를 설치하여 풍동 측벽으로부터 발생하는 경계층 요소가 응답에 미치는 영향을 최소화하였다.

등류 및 각 난류별로 풍속 증가에 따른 각 단면의 동적 변위는 후처리과정을 통하여 연직모드와 비틀림모드로 분리하였다.

연직모드의 경우, 응답의 R.M.S.(Root Mean Square)값을 모형의 대표치수(D;모형의 높이)로 나눈 무차원 진폭(z/D)을 사용했으며, 비틀림모드의 경우는 회전각변위(degree)의 R.M.S.로서 나타냈다. 또, 풍속도 Strouhal수의 역수인 기준 풍속(reduced wind velocity; $U_r=U/fD$)을 사용하여 무차원으로 표시하였다.

(1) A-series 단면 (B/D=2)

변장비 1:2의 직사각형단면(A0)을 비롯하여 fairing을 부착한 AF 및 AR 단면에 대한 연직 및 비틀림 응답을 Fig.4에는 등류중 응답을 Fig.5에는 난류강도 $I_u=5\%$ 에 대한 응답을 표시하였다.

등류중 기본단면(A0)의 경우, 연직모드 및 비틀림모드의 와류 진동의 최대응답이 각각 $U_r=5$ 및 6에서 발생함을 알 수 있고, $I_u=5\%$ 난류중에서는 등류중과 비교해 연직와류진동의 변화는 두드러지지 않으나, 비틀림 와류진동의 진폭이 급격히 감소하고 그 발생영역도 감소함을 알 수 있다.

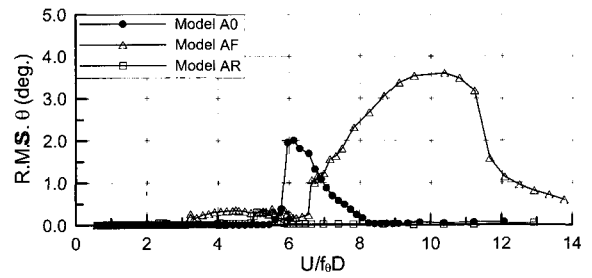
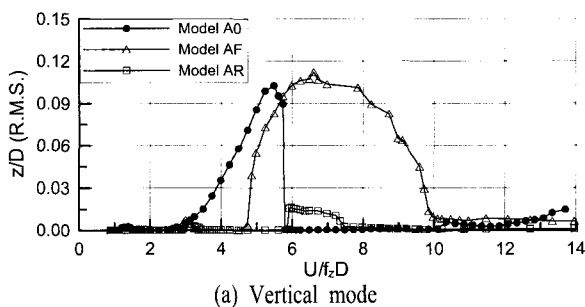
정삼각형 fairing을 부착한 AF단면의 경우, 연직와류진동의 최대진폭은 기본단면 A0과 비슷한 크기이지만, 발생풍속영역이 $U_r=5\sim10$ 정도로 기본단면 A0에 비해 약 2배정도 증가하였고, 비틀림 모드의 경우 발생풍속은 감소하였으나, 그 발생영역이 약 3배정도 넓어졌고 최대진폭 또한 2배정도 증가하였음을 알 수 있다. 또, 난류중의 V-A곡선 형상은 등류중의 결과와 유사하나, 연직와류진동의 최대진폭이 등류에서 보다 오히려 더 증가함을 알 수 있다. 한편, 비틀림모드의 와류진동은 기류변동의 영향으로 진폭이 감소하고 발생풍속영역도 감소하였으나, 기본단면 A0에 비하여 뚜렷한 응답감소는 보이지 않았다.

기본단면에 직사각형 fairing을 부착한 AR 단면은 등류 및 난류중에서 문제시 될 만한 진동현상이 나타나지 않음을 알 수 있다.

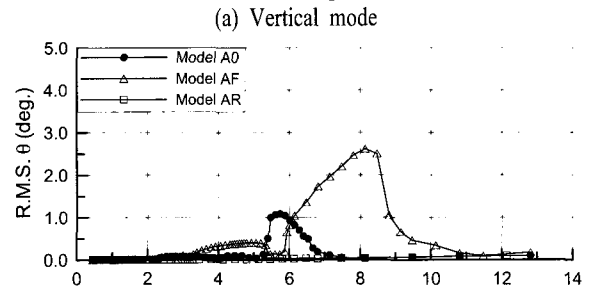
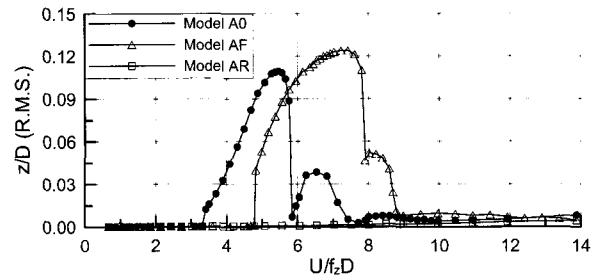
이상에서, 변동기류의 존재에 의해 와류진동은 단면형상에 따라 다른 양상을 가지고 있음을 알 수 있었다. 와류진동이 발생한 기본단면 A0 정삼각형fairing 부착단면 AF단면에 대하여, 난류효과를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 등류와 난류중의 와류진동 최대진폭의 비인 최대 진폭비(maximum amplitude ratio; R_A)로서 난류효과를 고찰하였으며, 난류강도변화에 따른 최대진폭비의 변화를 각 단면별로 Fig.6에 정리하였다.

$$R_A = \frac{z_{\max, \text{turb.}}}{z_{\max, \text{uniform}}} \text{ or } \frac{\theta_{\max, \text{turb.}}}{\theta_{\max, \text{uniform}}} \quad (1)$$

이 그림에서, 기본단면 A0의 연직와류진동은 기류변동의 영향을 거의 받지 않으나, 비틀림 진동은 난류강도의 증가와 더불어 급격한 진폭감소를 보임을 알 수 있다. 반면에 정삼각형 fairing을 부착한 AF단면은 기류변동이 오히려 연직와류진동의 최대진폭을 증가시키는 결과를 초래함을 알 수 있고, 이러한 경향은 저 난류강도일 때 더 두드러졌다. 비틀림 진폭은 A0단면의 경우와 같이 난류강도가 증가할수록 응답이 감소하였으나, A0단면에 비하여 감소효과는 적음을 알 수 있다.



(b) Torsional mode
Fig.4 V-A curves of A-series models in smooth flow



(b) Torsional mode
Fig.5 V-A curves of A-series models in turbulence ($I_u=5\%$)

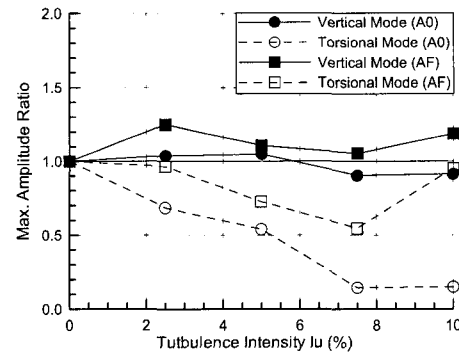


Fig.6 Maximum amplitude ratio of A-series models

(2) B-series 모형 (B/D=4)

변장비 1:4를 기본단면으로 하는 B-series 단면에 대해서도 등류 및 난류강도 $I_u=5\%$ 중의 와류진동응답을 각각 Fig.7 및 Fig.8에 나타냈다. 등류중 기본단면(B0)의 연직와류진동의 경우, 2개의 peak($U_r=5$ 및 9)가 발생하였는데, 이는 단면 배후면에 생성된 Kármán 와류에 의한 진동과 모형 상하면에 발생하는 교대 공기력에 의한 자발형 와류진동이 모두 발생한 것으로 사료된다. 난류중의 응답은 기류변동의 영향으로 연직모드의 와류진동은 거의 발생하지 않았고, 비틀림 와류진동은 등류중과 비교해 최대진폭은 비슷하나 발생영역이 작아짐을 알 수 있다.

단면 BF의 경우, 비틀림모드의 와류진동의 최대진폭이 기본 단면인 B0에 비해 약 3배정도 증가하였고, 그 발생영역이 상당히 넓어졌음을 알 수 있다. 또, 난류중의 V-A곡선의 형상은 등

류종과 유사하지만, 연직 및 비틀림모드의 와류진동 발생풍속이 감소함을 알 수 있고 난류에 의한 응답감소효과는 거의 보지 않았다.

한편, 기본단면에 직각삼각형 fairing을 부착한 BR단면은 AF 단면의 결과와 유사하게 등류 및 난류중에서 문제시 될 만한 어 떠 진동현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서, 직사각형 단 면의 fairing은 등류중 뿐만 아니라 난류중에서도 제진성능이 뛰 어난 것으로 판단된다.

또, B0 및 BF단면에 대한 난류강도변화에 따른 와류진동의 최대진폭비를 나타낸 Fig.9로부터, 단면 B0의 와류진동은 작은 기류변동만으로도 연직응답이 급격히 감소하고 난류강도 $I_u=7.5\%$ 이상에서는 비틀림진동도 완전히 사라짐을 알 수 있다. 반면, 단면 BF의 비틀림 와류진동은 등류중과 비교해 조금 증가 하는 경향을 보였으며, 연직진동은 난류의 영향으로 진폭이 조 금 감소함을 알 수 있으나, 둘 다 난류강도의 변화에는 큰 영향 을 받지 않음을 알 수 있다.

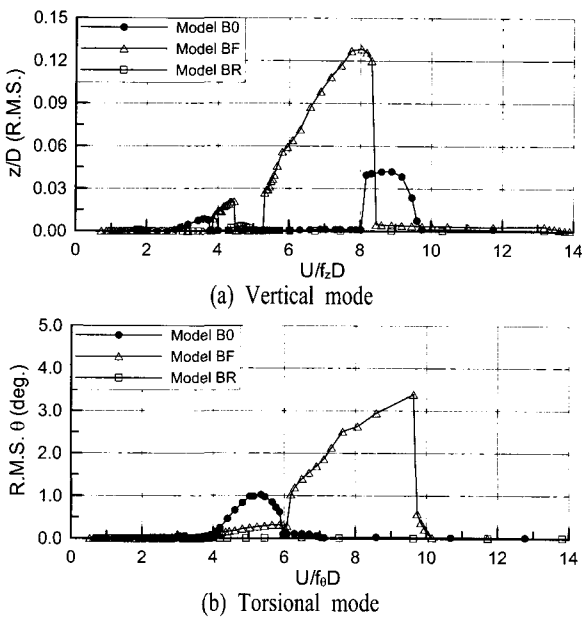


Fig.7 V-A curves of B-series models in smooth flow

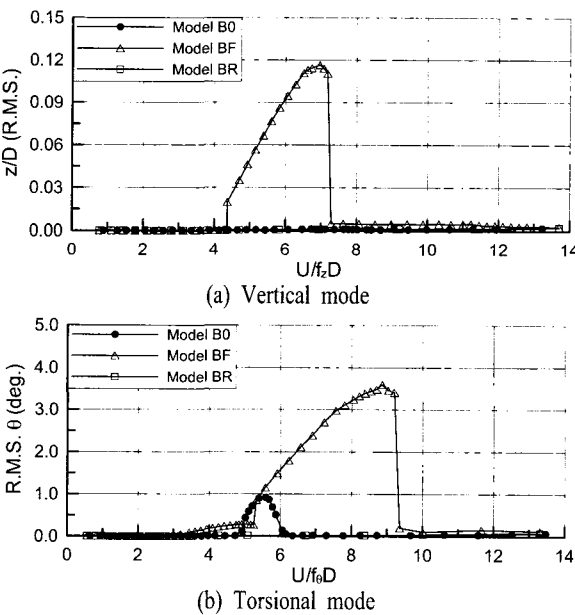


Fig.8 V-A curves of B-series models in turbulence ($I_u=5\%$)

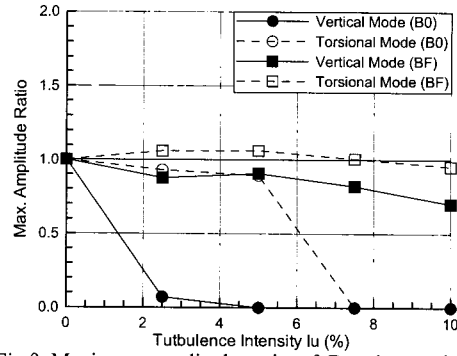


Fig.9 Maximum amplitude ratio of B-series models

3. 결론

본 연구에서는 변장비 $B/D=2$ 및 4의 직사각형단면을 기본단 면으로 하여 직각삼각형 및 정삼각형 fairing을 부착한 단면을 대 상으로 등류 및 격자난류중에서 동적응답실험을 행하였으며, 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 기본단면인 변장비 1:2 및 1:4 직사각형단면은 모두 난류강도 가 증가함에 따라 와류진동의 진폭이 감소 또는 발생하지 않 았으며, 1:4단면이 1:2단면에 비하여 난류의 안정화효과가 더 큰 것으로 나타났다.
2. 직각삼각형fairing은 측정된 전 풍속영역에서 문제시 될만한 진동이 전혀 발생하지 않았으나, 삼각형fairing은 기본단면에 비하여 와류진동의 최대진폭이 2배이상, 발생풍속영역도 확대 되는 역효과를 가져다 주었다. 따라서, 와류진동에 대한 내풍 대책으로서는 정삼각형fairing은 부적절한 것으로 판단된다.
3. Fairing부착단면에 대한 난류응답실험결과로서, 직각삼각형 fairing 부착단면은 등류중의 결과와 동일하게 매우 안정적이 었으나, 1:2단면에 정삼각형fairing을 부착한 경우는 연직모드, 1:4의 경우는 비틀림모드의 와류진동진폭이 등류중의 진폭에 비해 더 증가하였다. 따라서, 기류의 변동은 내풍안정성에 안 정화 효과가 있는 것으로 널리 알려져 있으나, 단면에 따라서 는 오히려 난류의 영향으로 응답이 증가할 수 있으므로 교량 건설지점의 난류특성을 고려한 내풍설계가 필요하다고 사료 된다.

참고문헌

- [1] 日本道路協會, 道路橋耐風設計便覽, 丸善 (1991)
- [2] 김윤석, 김희덕, 백명기, "바람과 교량", 한국풍공학회 (1998).
- [3] Ito, M., Control of wind-induced vibration of structures, Proc. Jubilee Conf. on Wind Effects on Buildings & Structures, Porto Alegre, Brazil (1998), pp.297-306.
- [4] 日本鋼構造協會, 構造物の耐風工學, 東京電機大學出版局(1997)
- [5] Kim, H. : Wind-induced Vibration with Limited-Amplitude of Bridge Girder Section in Turbulent flows, Dept, Civil Eng., Osaka Univ.(1992)
- [6] 김희덕, 박광우, 직사각형단면의 내풍특성에 미치는 fairing 효과에 관한 연구, 한국풍공학회지, 제5권, 제1호 (2001), pp.55-65.
- [7] 김희덕 : 2차원 직사각형단면의 와류진동에 미치는 난류효과에 관한 연구, 한국풍공학회지, 제2권, 제1호 (1998), pp.138-146.
- [8] 김희덕 : 풍동내 난류발생방법에 대한 소개, 한국풍공학회지, 제1권, 제1호 (1997), pp.25-32.