

π형 거더를 가진 4경간 사장교의 동적거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the dynamic behavior of 4-Span Cable-Stayed Bridge with π -Type Girder

조재영 / 김영민 / 이학은 / 윤기용

Cho, Jae Young / Kim, Young Min / Lee, Hak Eun / Yoon, Ki Yong

Abstract

Generally, a π -type girder composed of two I-type girders is known to have a significant disadvantage in wind resistance design because of aerodynamic instability. A representative bridge for this girder was Tacoma Narrows Bridge. Since Tacoma Narrows Bridge had very low stiffness of the bridge structure and its cross-section shape had aerodynamic instability, the bridge collapsed after severe torsion and vibration events in 19m/s wind speed. Aerodynamic vibration can be avoided by enhancing structural stiffness and damping factor and conducting a study of cross-section shapes. This study shows the angle of attack for the four-span cable stayed bridge having π -type cross-section and describes the aerodynamic characteristics of the changed cross-section with aerodynamic vibration damping additions, by carrying out two-dimension vibration tests. As a result of uniform flow and turbulent flow, the study shows that because the basic π -type cross-section alone can have efficient wind resistant stability, there is no need to have additional aerodynamic damping equipment. Since this four 230m-main-span bridge has a large frequency and also has a big stiffness compared to other bridges containing a similar cross-section, it has aerodynamic stability under the design wind speed.

Key words : π -type girder bridge, aerodynamic, flutter, wind-induced vibration, cable-stayed bridge, baffle plate

요 지

일반적으로, 2개의 I형 거더로 이루어진 π 형거더는 공기역학적으로 불안하여 내풍설계에 있어 매우 불리한 것으로 알려져 있다. 공기역학적 진동은 구조물의 강성이나 감쇠의 향상, 단면 형상의 연구 등에 의해 억제될 수 있으므로 본 연구에서는 π 형단면을 가진 4경간 사장교에 대해 영각과 공기역학적 제진장치의 추가로 인한 단면의 변화에 따른 2차원 진동실험을 통하여 공기역학적 특성을 파악하도록 하였다. 등류와 난류에서의 실험결과 본 교량단면은 기본단면만으로도 내풍안정성을 충분히 갖추고 있기 때문에 페어링(Fairing) 및 베플(Baffle Plate) 등의 추가적인 공기역학적 제진장치가 필요하지 않을 것으로 판단된다. 이는 본 교량의 경우 주경간이 230m인 4경간으로 이루어져 있어 비슷한 단면을 가진 교량에 비하여 수직 및 비틀림진동수가 크고 강성이 크기 때문에 설계풍속 내에서 공기역학적으로 안정한 것으로 보여진다.

핵심용어 : π 형 거더, 공기역학적 진동, 플러터(Flutter), 와류진동, 사장교, 공기역학적 제진장치, 베플

* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
** 정회원, (주)대우건설 교량설계 담당, 공학박사
*** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수
**** 정회원, 환경대학교 안전공학과, 교수

1. 서론

일반적으로 2주형 형식의 π 형 단면은 경제성이 뛰어나 서해대교, 삼천포대교, 그리고 북항대교와 같은 여러 장대교량에서 설계에 채택이 되어 시공되어졌다. 하지만 본 단면은 Tacoma Narrows교의 붕괴에서 알 수 있듯이 기본 단면으로서는 내풍공학적으로 매우 취약하다고 알려져 있다. 따라서 π 형 단면을 채택한 단면에서는 내풍공학적인 성능을 향상시키기 위하여 단면 주위에 구조물에 진동을 발생시키는 흐름상대가 형성되지 않도록 페어링(Fairing)이나 플랩(Flap)등의 공기역학적 부재를 추가로 설치하는 제진대책이 이루어졌다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 2주형 형식의 π 형 단면을 갖는 4경간 사장교에 대한 내풍안정성 향상 방안을 2차원 주형단면모형실험을 통하여 고찰하였고 단면하부에 발생하는 비정상적인 기류의 영향을 살펴보기 위하여 Baffle Plate라 부르는 수직판을 설치하는 등 여러 공기역학적 제진대책이 되어진 단면에 대해서 동적응답을 측정하였다.

본 연구의 대상교량은 중앙경간이 각각 230m, 측경간이 각각 106m로 이루어진 총경간 672m의 3주탑 4경간 사장교로 주형의 폭은 22m이며 형고는 3.052m이다.

2. 모형 및 실험조건

2.1. 실험모형

본 연구의 실험대상은 그림 1과 같은 단면을 갖는 교량이다. 실험 모형은 2차원 강체로서 1/70의 축척으로 제작되었으며 이는 풍동 측정부의 크기에 대하여 풍동실험에서 요구하는 각종 조건, 즉 폐쇄효과, 폭원과 모형 길이의 비를 모두 만족하는 축소율로 풍동의

폭을 최대한 이용한 값이다. 단면모형은 그림2와 같이 모형본체와 기류의 이차원성 확보를 위한 단판으로 구성되어 있으며 모형본체는 314.3mm의 폭과 43.6mm 높이로 아크릴을 이용하여 제작하였다. 강체를 확실히 유지할 수 있도록 내부를 보강하였으며 1mm 이하의 부재는 너무 가늘어 제작이 상당히 어려우므로 최소치수를 1mm로 하여 제작하였고 최소치수에 해당되지 않는 부재는 오차 $\pm 0.1\text{mm}$ 내에서 원형 그대로를 묘사하여 최대한 실제교량을 표현하도록 하였다. 방호벽은 아크릴과 철사로 제작하였으며 단판을 포함한 모형의 길이는 860mm이다. 모형의 회전중심은 시험축에 주형의 중앙분리대의 밑면에서 5.67mm(실제 0.397m) 위치에서 연결되었다. 모형의 동적특성은 표 1과 같다.

2.2. 설계풍속

본 교량의 설계기본풍속은 36.8m/s이며 10분 평균풍속(V_{10})은 다음과 같은 식(1)에 의하여 구해진다.

$$V_{10} = V_b k_t \ln(z/z_0) = 53.925\text{m/s} \quad (1)$$

여기서,

$$V_b(\text{설계기본풍속}) = 36.8\text{m/s}$$

$$z_0(\text{지형조도}) = 0.0075\text{m},$$

$$k_t(\text{지형계수}) = 0.17,$$

$$z(m) = 41.55\text{m}(\text{수면위로부터 구조물의 높이})$$

완공된 교량은 공기역학적 불안정성의 징후로서 한계 풍속에 대한 다음의 (2)사항을 만족해야 한다.(수면에 평행한 풍하중에 대해)

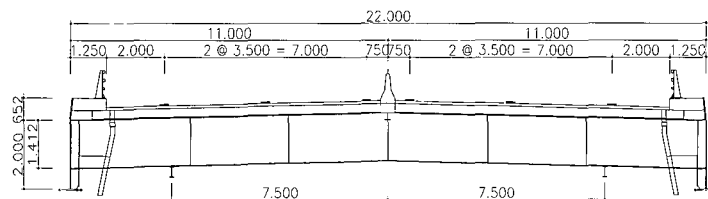
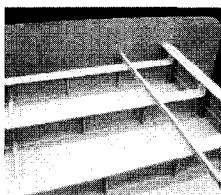


그림 1. 교량 단면의 제원
표 1. 모형(Original)의 동적특성

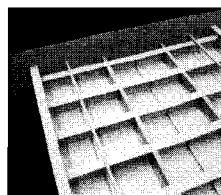
항 목	실교치	요구치	실험치	비교
수직 진동수 (Hz)	0.4598	3.847	3.863	0.42%
비틀림 진동수 (Hz)	0.8955	7.492	7.526	0.45%
진동수비	1.948	1.948	1.948	0.04%
단위폭당 질량 (kg/m)	26430	4.585	4.586	0.02%
단위폭당 질량관성모멘트 (kg-m ² /m)	1571000	0.05562	0.05595	0.59%
대수감쇠율(ξ)	BENDING		TORSIONAL	
	0.2 8%, 0.48%		0.15%, 0.56%	

표 2. 실험 조건

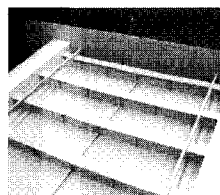
Case	모형	바람	감쇠비	영 각				
				-5°	-2.5°	0°	+2.5°	+5°
1	Original	등류	수직 0.28%, 비틀림 0.15%	○	○	○	○	○
2	Original	등류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○
3	Alt 1	등류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○
4	Alt 2	등류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○
5	Alt 3	등류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○
6	Alt 4	등류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○
7	Original	난류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○
8	Alt 1	난류	수직 0.48%, 비틀림 0.56%	○	○	○	○	○



Original Section



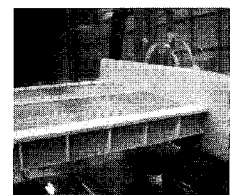
Alt 1 Section



Alt 2 Section



Alt 3 Section



Alt 4 Section

그림 2. 실험 모형

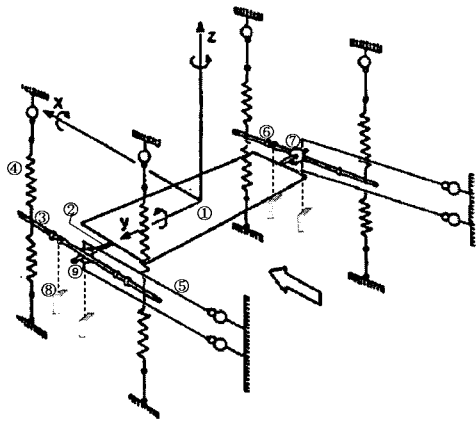
$$V_{cr} \geq 1.4 V_{10min}^{100years} = 75.5m/s \quad (2)$$

따라서, 각 Case에 대하여 실험풍속은 플러티가 발생하지 않는 조건 하에서 한계풍속 75.5m/s까지 교량이 안전한 가를 검토하였고 가능한 한 플러티가 발생하는 풍속까지 실험을 진행하였다. 한계풍속의 요구조건은 영각 0°에서 $V_{cr}=75.5m/s$ 이상, 영각 ±2.5°에서는 $V_{cr}/2=37.8m/s$ 이상, 영각 ±5°에서는 $V_{cr}/3=25.2m/s$ 이상이어야 한다.

2.3 사용풍동 및 계측방법

본 실험연구에 사용된 풍동은 고려대학교 풍동실험실 소재의 경계층 풍동으로 측정부의 크기는 1.0m(W) × 0.8m(H) × 4.5m(L)이며 최대풍속은 40m/s이다. 평균풍속의 측정은 피토크를 이용하여 Digital Micro-manometer(Furness Controls FCO510)로 측정하였으며, 난류는 열선풍속계(Hot-Wire Anemometer, KA-NOMAX)로 측정하였다. 모형은 그림 3과 같은 Spring Support System에 설치하였다. Spring Support System은 수직방향과 비틀림방향의 자유도를 가지며

8개의 Coil Spring으로 이루어져있다. 주형모형의 변위는 비접촉식 Laser Displacement Sensor(Keyence LB-1101/081/C2)를 이용하여 측정하였다. 측정된 데이터는 Low Pass Filter를 거쳐서 고주파의 잡음을 제거하고 A/D Converter를 통하여 각 풍속별로 채널당 250Hz로 1분간 디지털화하였다.



- ① 2차원 주형 모형 ② 수평 확장 막대
- ③ 가로대 ④ 코일 스프링
- ⑤ 4개의 판스프링으로 이루어진 자유도 구속 장치
- ⑥ 가로대의 조정된 질량
- ⑦ 수평 확장 막대의 조정된 질량
- ⑧ 레이저 변위계 ⑨ X-Hinge 자유도 구속 장치

그림 3. Spring Support System의 구성

2.4 실험조건

본 연구의 실험조건은 표 2와 같다. 그림 2와 같은 5 종류의 단면에 대하여 기류조건과 구조감쇠비를 달리 하여 8개의 Case에 대한 실험을 수행하였으며 1개의 case는 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 까지 5개의 영각별 실험으로 구성되어 있다.

2주형 형식의 π 형 단면의 경우 하면에 쉽게 박리와 류가 형성된다. 이 와류는 단면의 비틀림 진동에 의해 비정상적 움직임을 발생시키는데 이러한 비정상적인 기류의 발생을 방지하기 위한 대책으로 Alt 1의 경우 비틀림플러터의 발생을 억제하기 위해 주형단면의 하부면에 공기역학적 제진부재인 Baffle Plate를 가로보와 같은 높이인 1.412m로 설치하였고 Alt 2는 거더 끝부분에 주형 형고의 5/6 크기의 박스형 거더를 부착하여 내풍성의 향상을 살펴보았다. Alt 3의 경우는 주형 단면의 하부면을 완전히 밀폐함으로써 기본단면의 형상비를 가진 직사각형 단면의 내풍특성을 살펴보았고 Alt 4는 Alt 2 단면의 전면에 1m 폭의 페어링을 설치하여 제진효과를 검증하였다. 모든 단면하부에는 기본

적으로 점검차 레일이 설치되어 있는 상태로 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기본단면의 내풍특성

풍속의 증가에 따른 기본 단면(Original)의 감쇠비에 따른 동적 응답을 수직모드와 비틀림모드로 분리하여 그림 4에 나타냈다. 응답은 실제변위의 편진폭($\sqrt{2} \times \text{rms}$)으로 표현하였다. $\xi_v=0.28\%$, $\xi_t=0.15\%$ 의 경우 영각 2.5° 시 풍속 31m/s에서 25cm의 가장 큰 수직 와류진동이 발생하였으며 10m/s~30m/s에서 크고 작은 수직 와류진동이 관측되었다. 25m/s~30m/s에서 0.8° 에서 1.36° 정도의 비틀림 와류진동이 발생하였으며 비틀림플러터는 0° 와 2.5° 에서 한계풍속 75.5m/s 이내에서 발생하였었다. 여기서, 플러터 발생 시점의 기준은 교량의 최대 처짐이 경간장의 1/200배를 넘거나, 상판의 최대 회전 변위가 2° 를 초과할 때이다. 본 연구단면의 경우 감쇠율이 적은 경우에 와류진동과 플러터에 대하여 매우 취약한 결과를 보여줄 수 있다.

감쇠율을 증가시킨 $\xi_v=0.48\%$, $\xi_t=0.56\%$ 의 경우 비틀림방향의 큰 와류진동은 0.57° 이하의 작은 진동으로 줄어들었으며 수직방향의 와류진동은 약 15%의 감소가 있었으나 여전히 영각 0° 와 2.5° 에서 약 20cm의 와류진동이 발생하였다. 플러터 발생속도는 영각 2.5° 에서 75m/s로서 한계풍속 부근이며 그 외에서는 모두 한계풍속을 상회하였다. 영각 0° 에서 플러터 발생속도는 87m/s로 한계풍속 75.5m/s보다 약 15% 정도 높음을 알 수 있다.

3.2 공기역학적 제진장치가 설치된 단면의 내풍특성

각 공기역학적 제진대책이 세워진 단면의 실험결과는 그림 6~그림 7에 제시되어 있으며 수직와류진동과 비틀림와류진동의 거동 특성치는 각각 표3과 표4에 나타났으며 플러터 발생풍속은 표 5와 같다.

Alt 3 단면의 경우 수직, 비틀림 와류진동 및 플러터에 있어서 상당한 제진성을 보여주었다. -2.5° 에서 2.5° 의 영각시 수직와류진동은 4cm 이하였으며, 비틀림와류진동은 “+”영각에서는 거의 발생하지 않았다. 플러터발생속도 또한 모든 영각에서 100m/s를 상회하고 있다. 이는 주형하부에 박리와류가 쉽게 생성되지 않아 비정상공기력에 의한 영향이 줄어들기 때문으로 보인다. Alt 1 단면은 모든 영각에서 수직와류진동에 대한 진폭감소효과는 컸으나 비틀림와류진동에 대해서는 별 효과가 없었다. Alt 2 단면의 경우 5° 를 제외한 영각에서 약간의 제진성을 보였지만 그 효과는 매우 미비하였고 플러터 발생풍속 또한 Original 단면과 비교하

여 큰 차이가 없었다. 2주형 단면에 있어서 박스형 거더는 I형 거더단면과 비교하여 내풍안정성에 있어서 큰 효과가 없음을 알 수 있다. Alt 2 단면에 페어링을 부착시킨 Alt 4 단면의 경우는 수직와류진동은 Alt 2 단면과 차이가 거의 없었으나 비틀림와류진동에 있어서는 약 32%의 감소효과가 있었고 플러터 발생풍속도 약간 증가하였다. 페어링이 2주형 단면의 비정상적 기

류의 발생을 어느 정도 방지하는 것을 알 수 있다.

그림 5에서와 같이 기본단면을 포함한 모든 단면은 최대풍속이하의 범위에서 플러터에 대하여 안전함을 알 수 있으며 Alt 1~Alt 4의 단면 변화로 인하여 플러터에 대한 내풍안정성에 대한 안전율이 어느 정도 커짐을 알 수 있다.

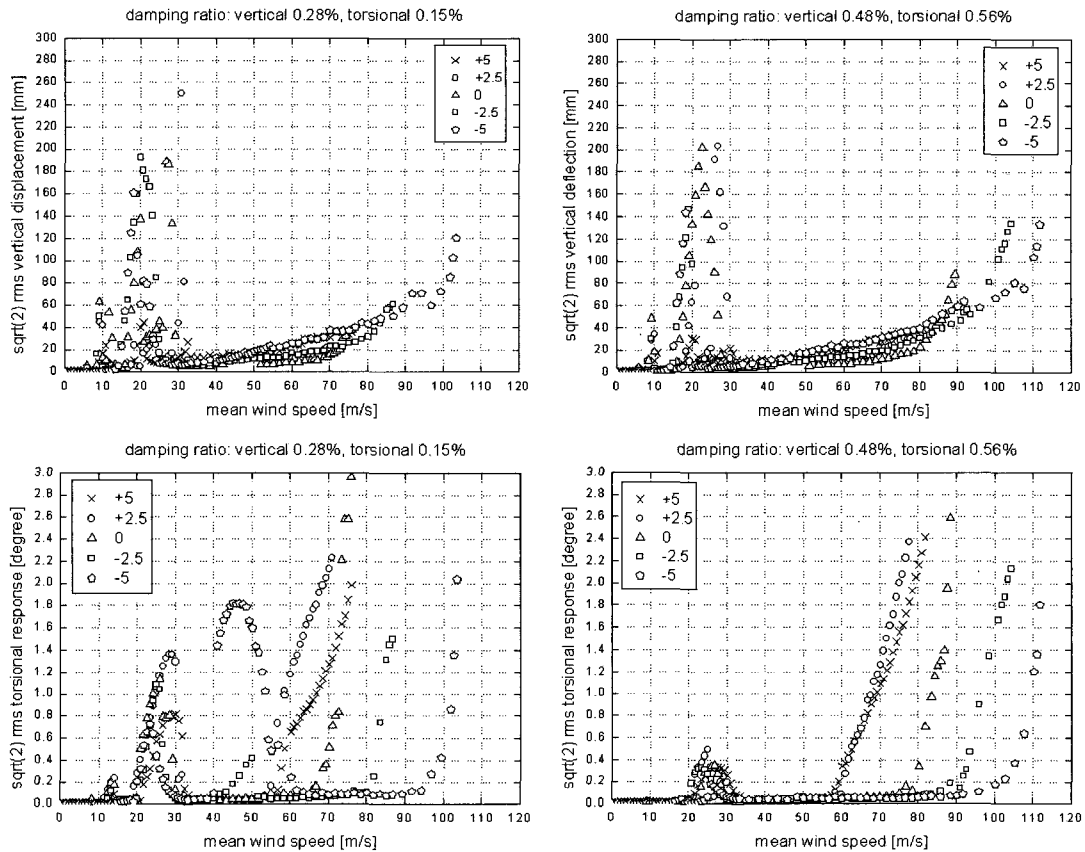


그림 4. 기본단면의 대수감쇠율별 내풍특성

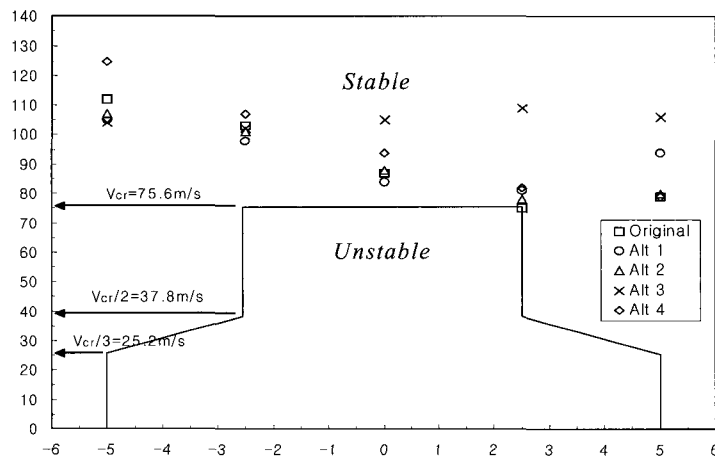


그림 5. 등류에서의 내풍안정성평가

표 3. 각 단면의 영각별 거동특성

단면	수직와류진동:cm(m/s)				
	0°	2.5°	5°	-2.5°	-5°
Original	20.2 (22.5)	20.3 (26.7)	3.0 (20.0)	14.7 (19.2)	14.4 (18.4)
Alt 1	7.1 (19.2)	2.9 (10.0)	2.0 (19.2)	13.7 (19.2)	12.3 (17.5)
Alt 2	16.7 (20.9)	17.3 (23.4)	13.7 (21.7)	12.6 (18.4)	13.3 (18.4)
Alt 3	2.8 (9.2)	-	14.1 (20.9)	3.8 (9.2)	11.6 (20.9)
Alt 4	13.0 (20.0)	18.4 (23.4)	19.8 (25.1)	13.2 (18.4)	13.2 (17.5)

표 4. 각 단면의 영각별 거동특성

단면	비틀림와류진동: ° (m/s)				
	0°	2.5°	5°	-2.5°	-5°
Original	0.35 (26.7)	0.49 (25.1)	0.33 (26.7)	0.33 (23.4)	0.18 (25.9)
Alt 1	0.49 (24.7)	0.51 (27.2)	0.18 (26.4)	0.40 (23.1)	0.27 (23.1)
Alt 2	0.26 (25.1)	0.19 (26.7)	0.37 (24.2)	0.23 (22.5)	0.13 (24.2)
Alt 3	0.01 (24.2)	0.02 (23.4)	0.11 (24.2)	0.19 (23.4)	0.23 (23.4)
Alt 4	0.18 (23.4)	0.21 (26.7)	0.27 (28.4)	0.18 (22.5)	0.08 (25.9)

표 5. 각 단면의 영각별 거동특성

단면	플러터(Flutter) :m/s				
	0°	2.5°	5°	-2.5°	-5°
Original	87	75	79	103	112
Alt 1	84	81	94	98	105
Alt 2	88	78	80	101	107
Alt 3	105	109	106	102	104
Alt 4	94	82	79	107	125 이상

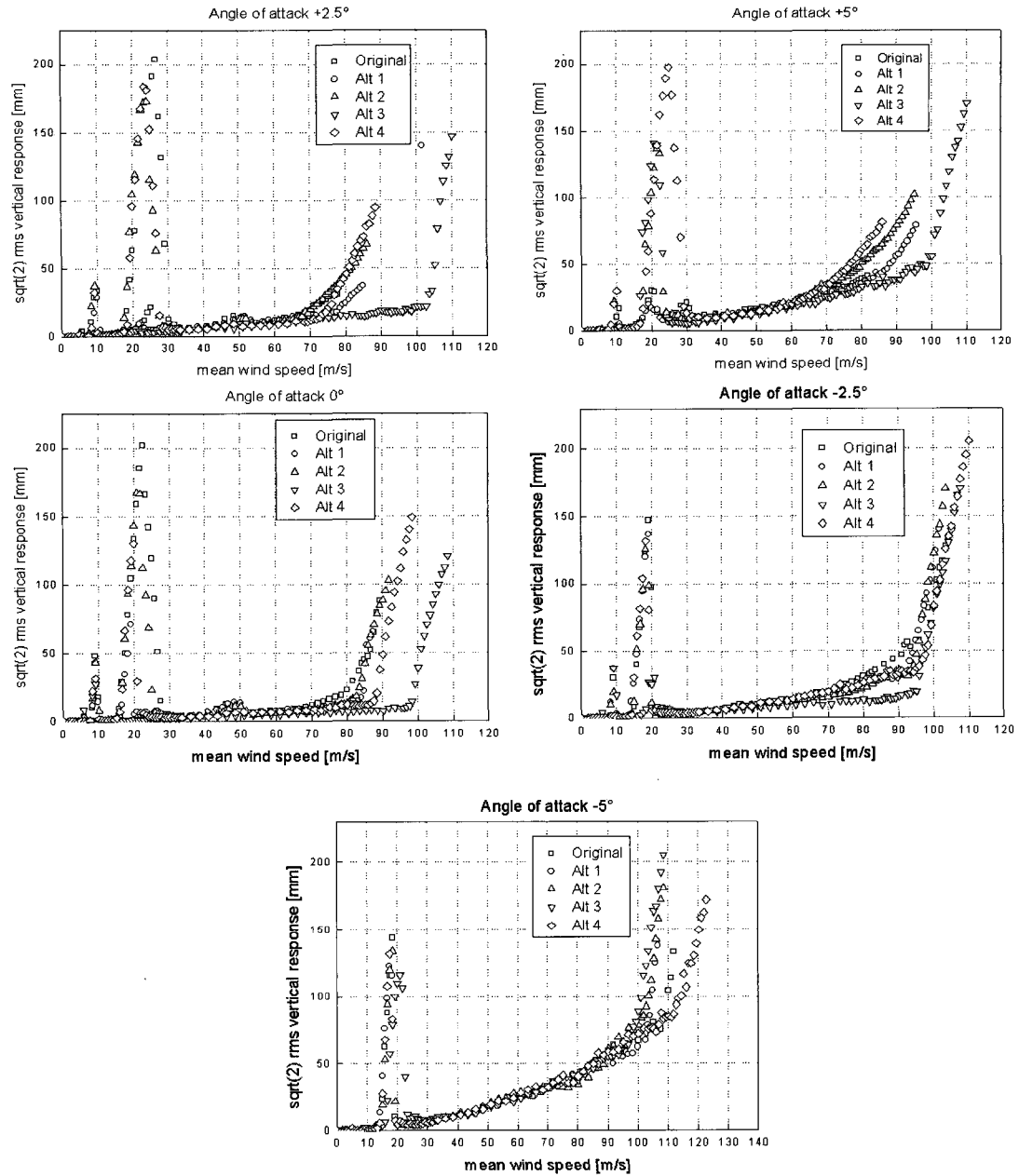
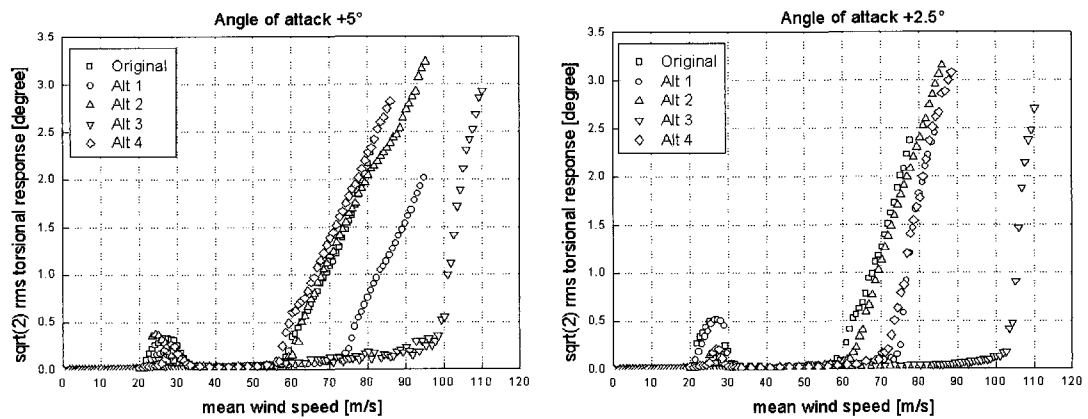


그림 6. 단면의 수직방향 내풍특성



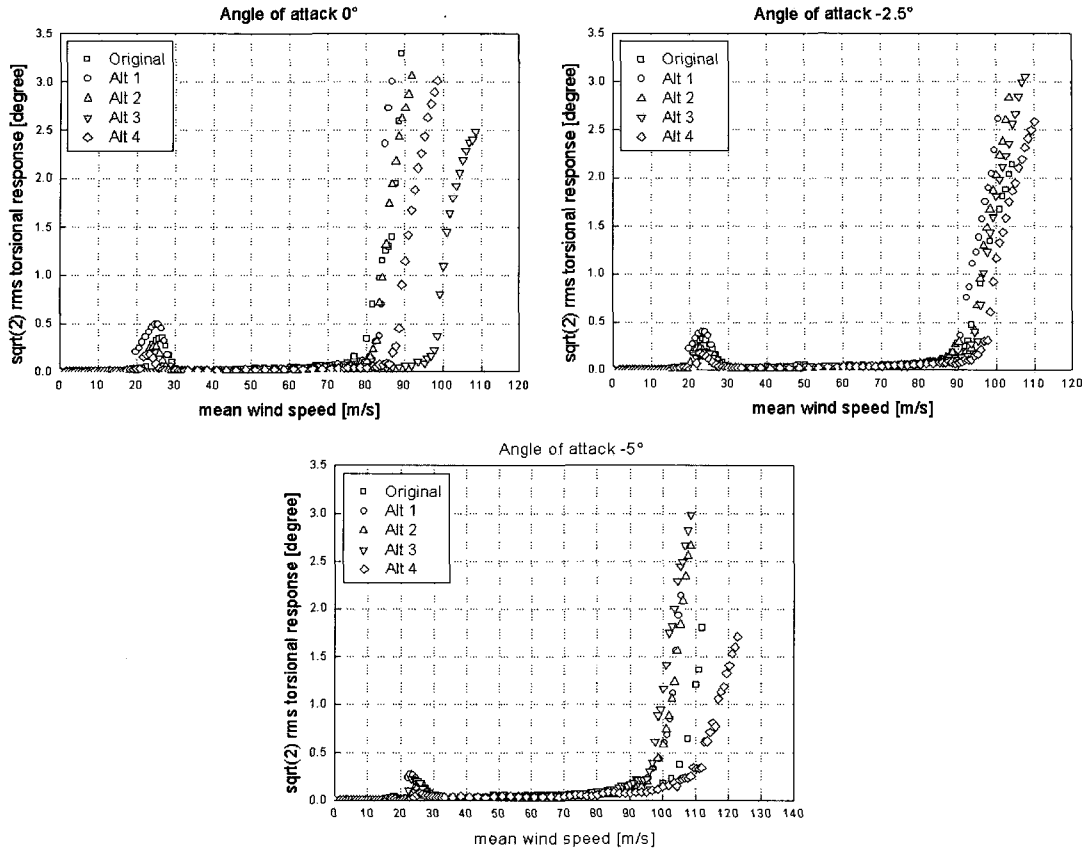


그림 7. 단면의 비틀림방향 내풍특성

본 연구에 고려된 교량 단면은 등류에서 공기역학적으로 안정한 것으로 판단되며, 이상의 실험 결과를 정리해 볼 때, 기본단면을 포함한 모든 단면이 내풍에 대한 안정성을 확보하고 있으나 사용성 측면에 있어서는 수직와류진동의 진폭이 상대적으로 작은 Alt 1과 Alt 3의 단면이 좀 더 내풍안정성을 가지고 있는 것으로 사료된다. 하지만 미소의 와류진동은 난류에 의해 억제될 수 있으며 공기역학적 보조부재의 추가적인 설치 는 교량의 미관, 시공성 및 유지관리 등에 영향을 미치므로 실제 교량의 최종 단면 결정에 있어서는 보다 최적화된 연구가 필요하다.

3.3 난류에서의 내풍특성

자연의 바람은 시간적으로나 공간적으로나 끊임없이 풍속이 변화하는 난류로서의 성질을 가지고 있으므로 실제 구조물의 거동은 등류에서의 응답특성과는 다르게 나타난다. 따라서 난류중의 응답실험을 통하여 난류에서의 안정성을 검증하고 등류에서의 내풍특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다.

본 연구에서는 풍상측에 설치된 나무격자에 의해 생

성된 평균류 방향 난류강도 $I_u=8.3\%$ 에 대하여 5종류의 단면 중에서 Original 단면과 Alt 1 단면에 대하여 응답실험을 행하였으며 실험결과를 그림 9에 제시하였다.

Original 단면의 경우 기본단면으로서 등류에서의 실험결과 20cm 정도의 수직와류진동이 발생하는 사용성문제외에는 내풍안정성에 문제가 없으므로 난류에서의 거동을 확인할 필요가 있으며 Alt 1 단면의 경우 하부면에 설치된 수직판에 의하여 Original 단면에 발생 하였던 수직와류진동이 “+”영각에서 상당부분 억제가 되었기 때문이다. Alt 3의 단면의 경우 가장 내풍안정성이 우수하였지만 2주형 형식의 π 형 단면이 아닌 박스형 단면이므로 제외시켰다.

등류조건에서의 실험결과와 비교해 볼 때, 등류 중에 발생하였던 횡방향 및 비틀림 방향의 와류진동은 모두 소멸되었으며 비틀림플러터 발생풍속도 향상됨을 알 수 있다. 풍속이 증가함에 따라서 동적 응답도 점차 커짐을 알 수 있었으나, 난류에 의한 특이한 진동현상은 관측되지 않았다. 따라서, Original 단면과 Alt 1 단면은 수직 와류진동 및 비틀림 와류진동에 대하여 안정한 것으로 판단된다.

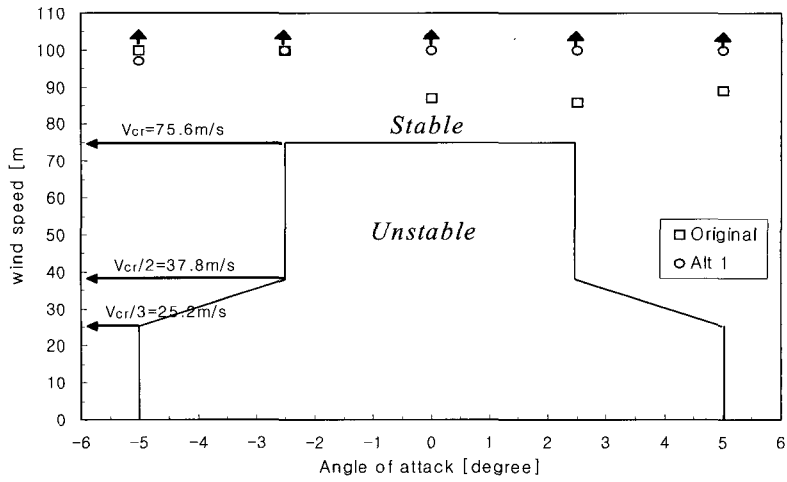


그림 8. 난류에서의 내풍안정성평가

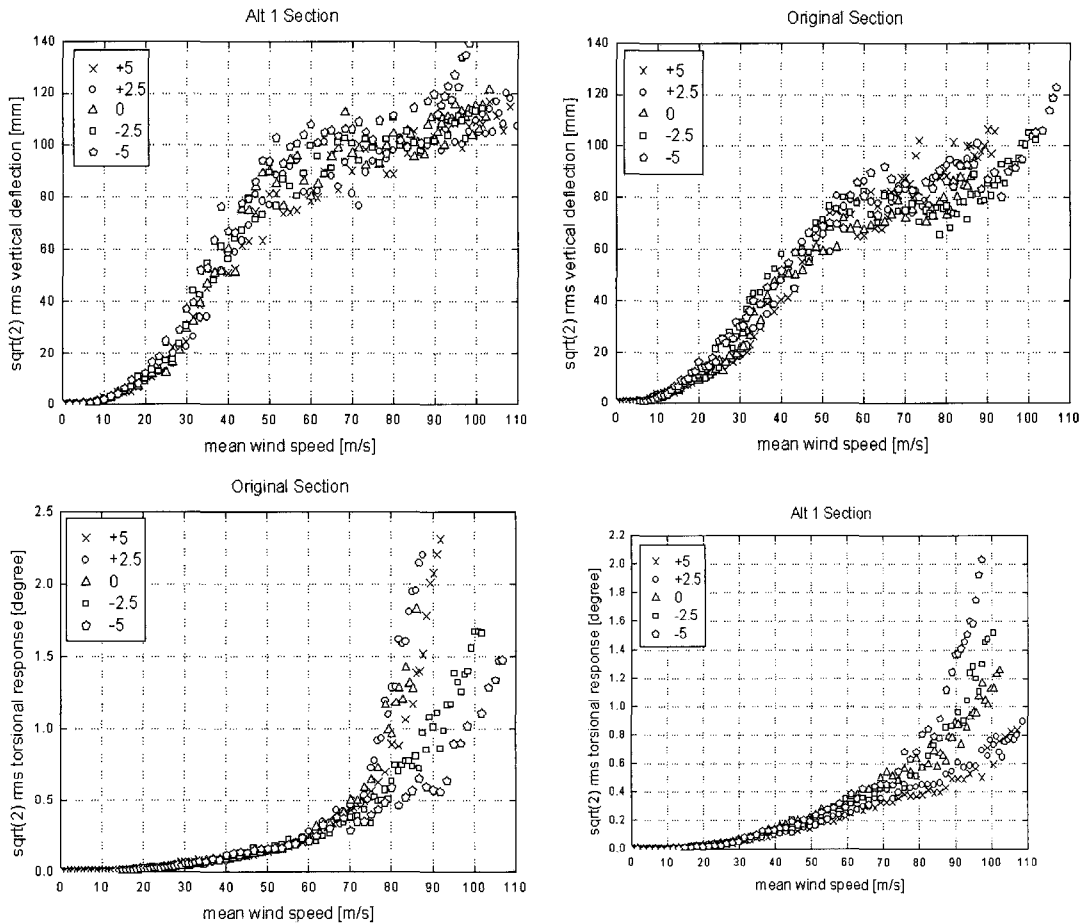


그림 9. 난류에서의 내풍특성

한계풍속선에 대하여 설계풍속과 플러터의 발생풍속을 비교해보면 그림 8과 같다. 실제 기류조건인 난류 조건시 최대풍속이하의 범위에서 Original 단면과 Alt

1단면 모두 플러터에 대하여 충분한 내풍안정성을 가지고 있음을 알 수 있다.

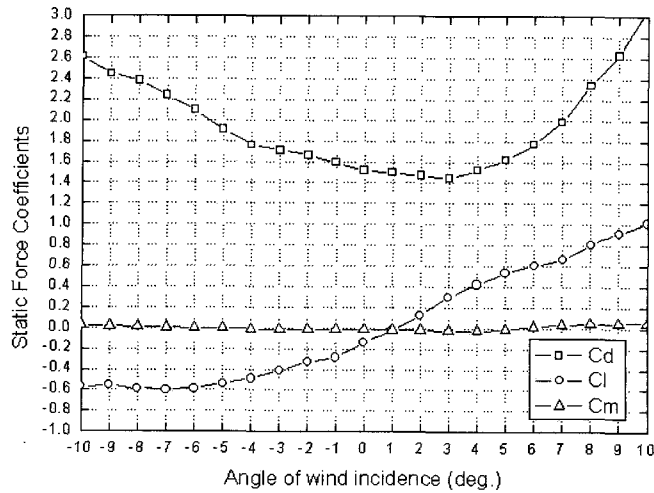


그림 10. 기본단면의 공기력계수

3.4 공기력측정실험

등류조건에서 측정된 대상교량의 공기력 계수는 그림 10과 같다. 항력계수는 교량의 형고 3.052m (2.652m +0.4m), 양력계수와 모멘트계수는 교폭 22m를 기준으로 계산되었으며, 영각 0°에서 항력계수는 1.514, 양력계수는 아래로 0.139, 모멘트계수는 시계방향 0.015로 측정되었다.

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 여러 공기역학적 제진대책이 되어진 Alt 1, Alt 2, Alt 3, Alt 4 단면들은 경우에 따라 내풍안정성이 증가 또는 감소되는 경우가 있으나 플러터 발생 풍속이 한계풍속인 75.5m/s를 상회하며 기본단면 또한 영각 2.5°에서 플러터발생속도가 75m/s로 한계풍속보다 0.7%가 낮지만 실제교량의 경우 보다 큰 감쇠율을 가지므로 전체적으로 내풍안정성에 문제가 없는 것으로 판단된다.
- Alt 1 단면의 동적응답에서 Baffle Plate가 내풍안정성을 약간 향상시키는 것으로 나타났다. 하지만 해안가의 실제기류에 해당하는 난류조건하에서 실험결과 등류에서 발생한 와류진동이 기본단면에 발생하지 않으므로 제진대책은 불필요하며 본 연구교량은 기본단면만으로도 내풍안정성이 충분할 것으로 판단된다.

- 최종 교량의 단면의 결정에 있어서는 내풍안정성은 물론, 미관 및 시공성 그리고 유지관리 등을 고려한 최적화된 개선단면에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Y.Kubo, et al. (2001), Improvement of aeroelastic instability of shallow π section, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 89 1445-1457
- Kim, Young-Min (2001), P. Wind-Induced Characteristics of π -Type Girder Bridges Considering Shape Factors, Ph. D. dissertation, Korea University, Korea
- 김윤석, 김철환, 박정일, 권대건 (1993), 두 개의 I형 주형을 갖는 교량단면의 내풍대책에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표논문집, No.1, 276-279
- H.E. Lee, Y.M.Kim & Y.S. Kim.(2002), Aero-dynamic Characteristics of Channel-Type Bridge Deck Sections, The Second International Symposium on Wind and Structures, Busan, Korea, August 21-23, pp.581-588
- 김영민, 조재영, 이학은 (2000), 구조동역학의 기본방정식 시스템을 이용한 플러터발생속도추정, 한국풍공학회 학술발표논문집, pp.85-90