

횡방향 새그를 가진 자정식 현수교의 공탄성 거동(I)

- 주형의 거동을 중심으로 -

Aeroelastic Behaviors of Self-anchored Suspension Bridge with Lateral Sag of Main Cable(I)

- Focused on the Behavior of Girder -

권 순 덕¹⁾ · 장 승 필²⁾
Kwon, Soon Duck Chang, Sung Pil

요 약 : 본 연구에서는 주 케이블에 횡방향 새그를 가진 자정식 현수교의 내풍안정성을 검토하기 위하여 풍동실험을 수행하고, 주형의 거동을 중심으로 그 결과를 분석하였다. 등류와 난류하에서 수행한 부분 모형 실험에서 가장 내풍안정성이 뛰어난 단면을 최종단면으로 선정하고, 전교 모형 실험을 통하여 검증하였다. 또한 차후 연구를 위한 플러터 계수를 측정하여 제시하였다. 교량의 사용성과 피로문제를 검토하기 위하여 버페팅 응답을 조사하였지만, 공학적 관점에서 만족할 만한 수준인 것으로 나타났다. 주형의 항력계수가 상당히 큼에도 불구하고 횡방향 변위가 매우 작게 나타났는데, 이는 주 케이블의 횡방향 새그가 주형의 변위를 구속하기 때문인 것으로 판단된다.

ABSTRACT : Wind tunnel test results and their interpretations focused on the behavior of girder, which were performed to study the aerodynamic stability of a self-anchored suspension bridge with lateral sag of main cable, are presented in this paper. The shape of the girder which has the best aerodynamic stability was selected based on the section model test under uniform and turbulent flow conditions. Good performance of the selected section was confirmed in the full bridge model test. Measured flutter derivatives are presented for further study. Buffeting response was investigated to check the fatigue problem and serviceability of the bridge but it was found to be acceptable from the engineering point of view. Even though the drag coefficient of the girder had high value, the amplitude of the lateral vibration was found to be very low. This may be due to the restraint provided by the lateral sag of the cables.

1) 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
2) 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 1997년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면, 토의회답을 게재하겠습니다.

핵심용어 : 풍동실험, 풍하중에 의한 진동, 자정식 현수교, 횡방향 세그, 플러터 계수, 버페팅 응답

KEYWORDS : wind tunnel test, wind induced vibration, self-anchored suspension bridge, lateral sag, flutter derivatives, buffeting response

1. 서론

본 연구의 적용 대상이 되는 수도권 신공항 연육교는 현재 하부구조를 건설중에 있으며, 완공되면 신공항과 육지를 연결하는 주요한 통로가 되므로 내풍안정성의 확보가 무엇보다도 중요한 교량이다. 연육교의 총 경간 4420m의 대부분은 강박스와 트러스가 결합된 단면인 경간 100m의 교량으로 구성되어 있다. 주경간 교량은 그림 1에서와 같이 중앙경간이 300m이고 측경간이 각각 125m인 현수교로 구성되어 있다.⁽¹⁾

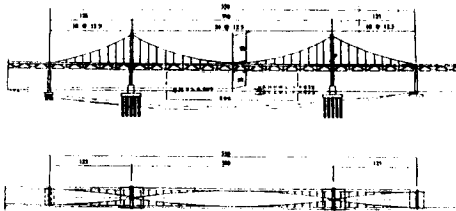


그림 1. 수도권 신공항 연육교 주경간 교량의 주요 제원

주경간 교량이 위치한 인천 부근은 태풍의 진로에 위치하고 있으므로 상륙 가능성이 있는 지역 중의 하나이다. 또한 주형의 형고가 평균수위에서 35m로 상당히 높아서 설계풍속은 56m/s로 결정되었다.⁽¹⁾

주경간 교량은 기존의 현수교와 비교하여 몇가지 새로운 특징을 지니고 있다. 먼저 단면을 보면 많은 교통량을 소화하기 위하여 그림 2와 같이 강박스와 트러스가 결합된 복층 구조로서 상부에 왕복 6차선, 하부에 철도 복선과 왕복 4차선으로 이루어져 있다. 이 교량의 가장 큰 특징은 앵커리지 없이 주 케이블이 바로 거더에 연결되어 있는 자정식이란 점이다. 보통의 현수교는 수직방향에 대해서는 sag를 가지지만 수평방향으로는 케이블이

주형과 평행하게 설치되어 있다. 그러나 주경간 교량은 수직 뿐만 아니라 수평방향으로도 인위적으로 형성된 sag를 가지는 독특한 구조로 설계되어 있다. 즉 케이블이 측경간 지점부에서는 분리되어 있다가 주탑에서 두 케이블이 합쳐지고, 중앙경간 중심부에서 다시 갈라진다.

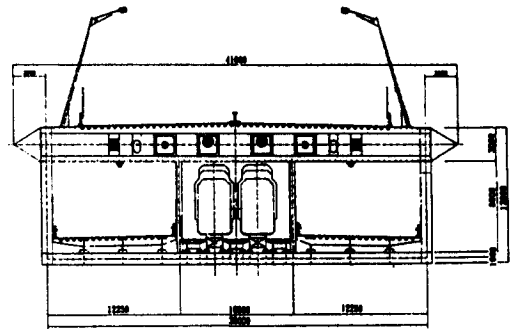


그림 2. 단면 형상

연육교 주경간 교량은 이러한 특징으로 인하여 기존 현수교들과 다른 내풍 특성을 보일 것으로 예측되었으므로, 본 연구에서는 일련의 풍동실험을 통하여 주경간 교량의 내풍안정성을 확보하는 것을 목적으로 하였다. 또한 주경간 교량의 독특한 구조적 특징으로 인한 풍하중에 의한 거동 특성도 실험적으로 규명하고자 한다. 아울러 차후 연구를 위한 기초 자료로서 정적 공기력 계수 및 플러터 계수(unsteady aerodynamic coefficient, flutter derivative)도 제시하고자 한다.

2. 실험의 개요

본 연구에서는 주형의 거동을 보기 위하여 부분 모형 실험(section model test)과 전교 공탄성 모형 실험(full bridge aeroelastic model test)을

수행하였다. 부분 모형 실험은 기본 단면의 내풍 안정성을 검토하고, 필요시 보완을 위하여 수행하였다. 전교 모형 실험은 부분 모형 실험 결과를 최종 검증하고, 구조계의 복합적인 거동을 보기 위하여 실시하였다.

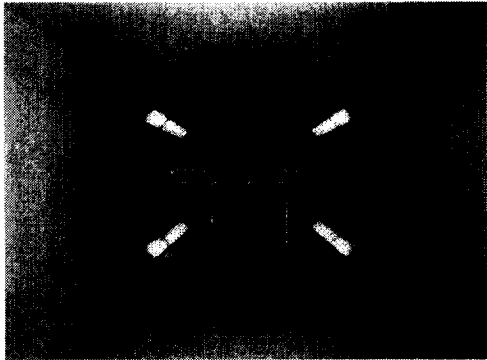


그림 3. 부분 모형 실험

2.1 실험 장치

부분 모형 실험은 서울대학교에 있는 Göttingen type의 풍동을 사용하였다. 사용한 풍동의 실험 구간 크기는 폭이 1.37m이고 높이는 0.95m이다. 실험 구간 내에서 난류 강도와 풍속 분포는 각각

1.0% 이하로 양호하다. 난류를 구현하기 위해서는 격자를 사용하였는데, 여러번의 시행착오 끝에 원하는 난류강도가 나오도록 하였다. 모형의 응답을 측정하기 위해서는 진동에 전혀 영향을 주지 않는 비접촉 광학식 변위계를 사용하였고, 모형의 감쇠를 조절하기 위해서는 oil damper를 사용하였다. 난류를 측정하기 위해서는 열선 풍속계(hot-wire anemometer)를 사용하였고, 정적 공기력 계수는 천평식 3분력계를 사용하여 측정하였다.

전교 모형 실험을 위해서는 실험구간의 폭이 16m이고 높이 1.9m인 東京大學 土木工學科의 Göttingen type 풍동을 사용하였다. 모형의 응답은 중앙 경간 1/2 지점과 1/4 지점의 수직, 비틀 응답을 측정하였다. 영각은 바닥판의 경사를 조절하여 변화시켰다.

전교 모형 실험에서도 난류를 모사하기 위해 격자를 사용하였다. 측정에 사용된 격자난류는 integral scale이 수평방향이 약 0.60m이고 수직방향이 약 0.30m 정도로 나타났다. Harris와 Panofsky가 제안한 방법⁽³⁾에 따라 계산한 교량에 작용하는 난류의 수평방향 integral scale은 모형으로 환산했을 때 1.47m이고 수직방향은 0.34m이다. 베펜딩 응답은 수평방향보다는 수직방향을의 난류성분에 의



그림 4. 전교 모형 실험

하여 지배되므로 본 실험에 사용한 격자난류는 자연상태의 응답을 예측하는데 무리가 없다고 판단된다.

2.2 실험 모형

부분 모형은 국부적인 변형이 발생하지 않는 강체 모형(rigid model)으로 스프링지지 모형 실험과 정적 공기력 계수 및 플러터 계수 측정 실험을 위해서 사용된다. 모형의 축척은 1:100으로 결정하였으며, 최소 치수는 1mm로 가능한 모든 부분을 세밀히 모사하였다. 구조적 특성치는 표 1에 나타내었다.

표 1. 부분 모형의 구조 특성치

	실교	모형	
		요구치	실측치
단위길이당 질량	45.38 t/m	4.538 Kg/m	4.537 kg/m
단위길이당 질량관성 모멘트	7068.0 t · m ² /m	7.068 kg · cm/cm	7.130 kg · cm/cm
진동수	0.4535 Hz	-	3.2410 Hz
	1.2228 Hz	-	5.5786 Hz
감쇠비	-	0.477 %	0.455 %
	-	0.477 %	0.473 %

표 2. 전교 모형의 구조 특성치

	실교	모형	
		요구치	실측치
모형길이	550 m	550 cm	550 cm
단위길이당 질량	45.38 t/m	4.538 kg/m	4.539 kg/m
단위길이당 질량관성 모멘트	7068.0 t · m ² /m	7.068 kg · cm/cm	7.089 kg · cm/cm
단면2차 모멘트	24.57 m ⁴	0.2456 cm ⁴	0.2480 cm ⁴
	217.39 m ⁴	2.1738 cm ⁴	2.1316 cm ⁴
비틀상수	25.78 m ⁴	0.2578 cm ⁴	0.2583 cm ⁴
케이블 단면적	0.1289 m ²	0.1289 cm ²	0.1257 cm ²
고유진동수			
Vert. Symm. 1	0.4535 Hz	4.535 Hz	4.785 Hz
Vert. Antisy. 1	0.7499 Hz	7.499 Hz	7.813 Hz
Vert. Symm. 2	1.1329 Hz	11.329 Hz	10.938 Hz
Tors. Symm. 1	1.2228 Hz	12.228 Hz	12.207 Hz
Tors. Antisy. 2	1.5700 Hz	15.700 Hz	15.723 Hz
감쇠비			
Vert. Symm. 1	-	-	0.49 %
Vert. Antisy. 1	-	-	0.21 %
Tors. Symm. 1	-	-	0.47 %

전교 모형은 제작후 이동의 편의성과 안전성을 고려하여 축척 1:100인 총 길이 5.5m로 제작하였다. 전교 모형은 강성을 구현하기 위하여 모형 내부에 설치되는 강성봉과 목재로 제작되는 외형으로 구성된다. 모형의 주요 제원은 표 2에 나타나 있는데, 제작중 수차례의 정적 및 동적 시험을 통해 정밀도를 확보하였다.

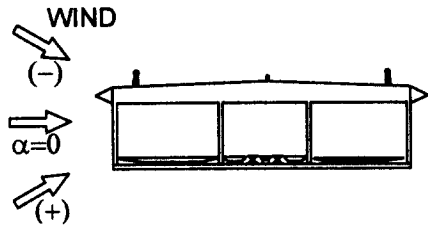


그림 5. 영각의 정의

2.3 실험 방법

부분 모형 실험은 먼저 등류(uniform flow)에 대하여 영각 -7°~+7°의 범위에서 2° 간격으로 실시하였다. 기본단면에 대한 실험 후에는 수정단면에 대한 실험을 실시하였다. 이때 영각은 그림 5의 부호규약을 따랐고, 기본 단면과 수정 단면은 그림 6에 표시되어 있다. 난류는 강도 12%와 18% 두가지 경우에 대하여 실시하였다.

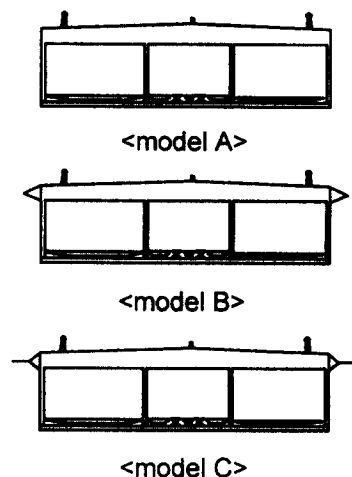


그림 6. 기본 단면 및 수정 단면

수정된 단면이 내풍안정성을 만족하는 경우에는 공기력 계수 측정실험을 수행하였다. 공기력계수 측정을 위한 기류조건은 등류로만 고정하였다. 영각은 -15도부터 +15도까지 1도 간격으로 조정하면서 측정하였다. Reynolds number에 따른 영향을 검토하기 위하여 측정 풍속은 8m/s와 10m/s 두가지를 사용하였다. 본 연구에 사용된 항력, 양력 및 피칭 모멘트 계수의 정의는 식 (1)과 같고, A는 전체 면적의 45%를, B는 41.0m를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 C_D &= \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \\
 C_L &= \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 B} \\
 C_M &= \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 B^2}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, C_D : 항력계수 C_L : 양력계수
 C_M : 피칭 모멘트 계수
D : 항력 L : 양력
M : 피칭 모멘트
V : 평균풍속 ρ : 공기밀도
A : 유효 투영 면적
B : 대표적인 길이(단면 폭)

수정단면에 대한 플러터 계수 H_1^* , A_2^* , A_3^* 는 자유진동법⁽³⁾으로 측정하였다. 이때 비정상 공기력계수의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{2} \rho V^2 (2B) \left[kH_1^* \frac{\dot{h}}{V} + kH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{V} + k^2 H_3^* \alpha \right] \\
 M &= \frac{1}{2} \rho V^2 (2B^2) \left[kA_1^* \frac{\dot{h}}{V} + kA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{V} + k^2 A_3^* \alpha \right]
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, a : 비틀변위 h : 수직변위
 ω : 진동수
 $k = \frac{B\omega}{V}$: 무차원 진동수

전교 모형 실험은 최종단면에 대하여 등류와 난류하에서 실시하였다. 사용된 난류의 강도는 약 10%이었다. 영각은 0°, 2°, 3°로 변경시키며 수행하였다.

3. 부분 모형 실험 결과

등류하에서 연성(coupled) 플러터와 비틀 플러터는 실교 환산풍속 100m/s까지 관측되지 않았다. 그러나 기본 단면은 풍속 34m/s 근처에서 최대진폭을 가지는 수직 와류진동(vortex induced vibration)이 발생하였고, 고풍속 영역에서 비틀 와류진동이 발생하였다. 그림 6과 같이 fairing과 spoiler가 부착된 수정 단면에서는 영각이 클 때 일부 고풍속 영역에서만 와류진동이 발생하였고, 플러터도 100m/s 이내에서는 발생하지 않았다. 와류진동의 발생풍속과 영각의 관계는 표 3에 정리되어 있다. 실험 결과를 보면 spoiler나 fairing이 설치된 단면 모두 내풍안정성이 우수하지만, fairing이 설치된 단면 B가 시공성 등에서 더 우수하므로 최종단면으로 채택하였다.

표 3. 등류하에서 와류진동의 발생풍속과 진폭

단면	영각 (°)	진동 방향	와류진동 발생풍속(m/s)			최대 배진폭
			시작	peak	끝	
A	0	비틀	53.8	57.4	60.2	0.37°
	3	비틀	52.7	57.1	66.0	0.91°
	5	수직	27.8	34.1	39.3	60.0cm
		비틀	49.2	57.7	66.0	1.12°
	7	수직	29.8	24.1	36.2	80.0cm
		비틀	50.3	65.6	56.2	0.99°
B	6	비틀	65.8	66.4	69.7	0.21°
	7	비틀	34.6	38.7	40.1	0.39°
			비틀	57.4	66.8	72.6
C	7	비틀	61.6	75.6	68.5	0.93°

최종단면에 대한 정적 공기력 계수는 표 4와 그림 7에 나타나 있다. 복층 트러스에 작용하는 항력계수는 같은 형식의 다른 교량에 대한 값들과 비슷하였다. 그러나 양력계수의 기울기가 보통의 경우보다 크게 나타났다.

표 4. 정적 공기력 계수

구분	$\alpha=0^\circ$	$\partial C/\partial \alpha$
항력계수(C_D)	2.05	-
양력계수(C_L)	0.215	5.432
피칭모멘트계수(C_M)	0.0017	1.564

그림 8에서는 영각 7도일 때 와류진동에 의한 최종단면의 비틀림 진폭과 구조 감쇠비의 관계를 나타내었다. 실험 결과를 보면 와류진동은 감쇠비의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

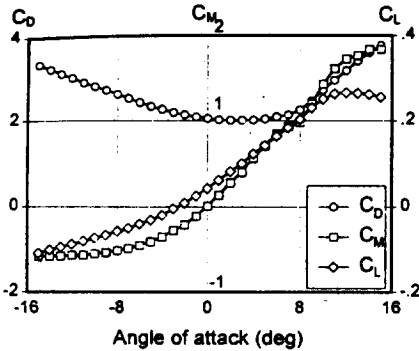


그림 7. 정적 공기력 계수

해석을 위한 기본적인 자료를 확보하기 위하여 플러터 계수 중에서 가장 중요한 H_1^* , A_2^* , A_3^* 를 자유진동법으로 구한 결과는 그림 9에 나타내었다.

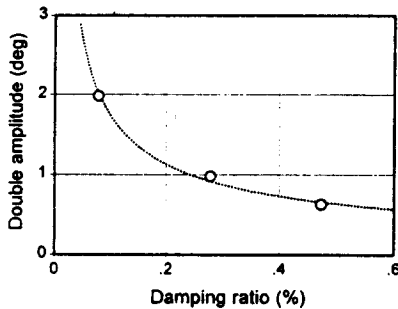
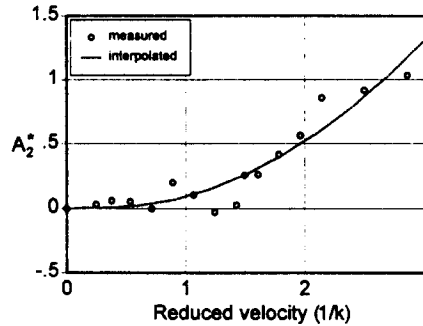


그림 8. 와류진동의 비틀림진폭과 감쇠비의 관계(모형B, 영각 7°)

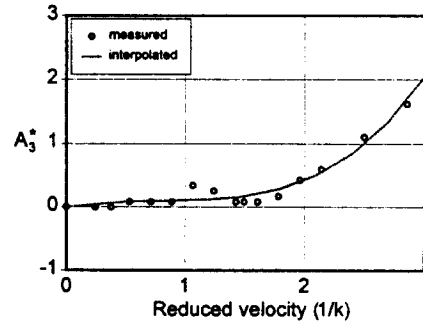
4. 전교 모형 실험 결과

동류하에서 실시한 전교 모형 실험 결과 풍속

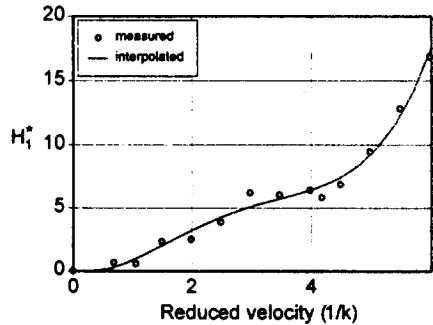
70m/s까지 플러터가 발생하지 않았으며, 와류진동도 관측되지 않았다. 단지 풍속 50m/s 근처에서 비틀림 진동이 발생하였는데, 이것은 주형 자체의 진동이 아니라 주탑의 진동이 전달되어 발생한 것으로 판단된다. 왜냐하면 주탑의 비틀림 진동수와 주형의 역대칭 비틀림 1차 모드 진동수가 거의 비슷하여 주탑 진동이 쉽게 주형으로 전달될 수 있을 뿐만 아니라, 주탑의 진동을 구속하였을 때 주형에 더 이상 비틀림 진동이 발생하지 않았기 때문이다.



(a) Measured A_2^*



(b) Measured A_3^*



(c) Measured H_1^*

그림 9. 측정된 플러터 계수

난류하에서도 풍속 70m/s까지 플러터와 와류진동이 관측되지 않았다. 그림 10에서는 영각 0도일 때 중앙 경간 1/2지점의 최대 수직 응답을 나타내었다. 최종단면의 항력계수 기울기가 급하여 난류하에서 과도한 수직응답이 발생할 가능성이 있다고 예측되었으나, 영각의 변화가 응답에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

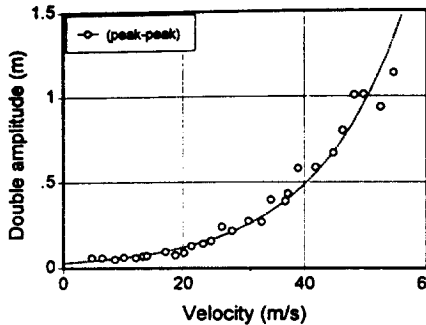
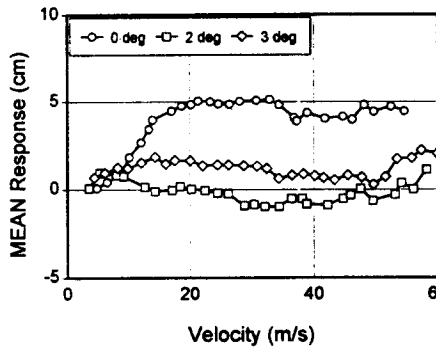
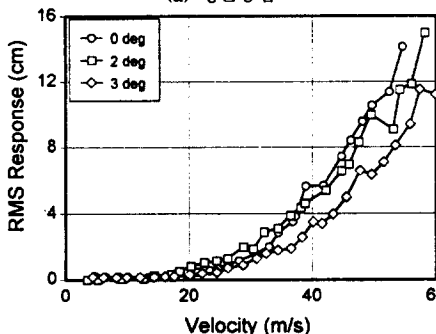


그림 10. 난류하 중앙경간 1/2지점의 최대 수직응답



(a) 평균응답



(b) RMS 응답

그림 11. 난류하 중앙경간 수직응답

그림 11과 12에서는 풍속의 변화에 따른 중앙 경간 1/2지점과 1/4지점의 수직방향 평균 및 RMS (Root Mean Square) 응답을 각각 나타내었다. 실교 환산시 10분간 응답의 power spectrum으로부터 peak factor⁽⁵⁾를 구하면 약 3.5가 되는데, 최대 진폭은 RMS 응답에 peak factor를 곱하여 추정하였다. 실제풍속에서의 최대 수직진폭은 약 56cm로 추정된다. 한편 중앙경간 1/2지점과 1/4지점의 비틀림 응답은 그림 13과 14에 나타나 있다. 최대 비틀림 진폭은 실제풍속에서 약 0.15도로 추정된다.

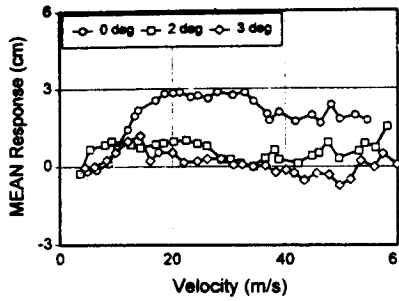
버퍼팅 응답이 교량에 미치는 영향으로는 강재의 피로 문제와 사용성 문제를 들 수 있다. 본 연구 대상 교량은 철도 통과 교량이므로 차량하중에 의한 피로 문제 발생 여부에 대해서 검토가 이루어 졌는데, 측정된 응답은 기 검토된 결과와 비교하여 안전측에 속해 있었다.

표 5. 난류에 의한 최대 수직응답

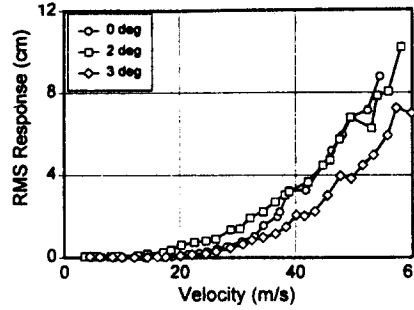
풍속(m/s)	배진폭(cm)(가속도(gal))		
	영각 0°	영각 2°	영각 3°
20	9.14	12.1	10.4
	(37.1)	(49.1)	(42.1)
30	21.9	17.34	22.3
	(88.9)	(70.4)	(90.4)
55	113.6	87.9	90.1
	(461.2)	(356.7)	(365.8)

표 5에서는 주요 풍속별 최대 배진폭과 가속도를 나타내었다. 교량의 사용성에 대한 정확한 기준은 없으나 참고문헌(4)에서는 허용가속도를 100gal, 참고문헌(5)에서는 허용가속도를 124gal로 규정하고 있다. 차량 주행이 가능한 풍속 30m/s 이내에서는 측정된 최대 가속도가 90gal 이하로 나타났다. 따라서 교량의 사용성은 공학적 관점에서 허용할 만한 수준인 것으로 판단된다.

주형은 트리스와 박스로 이루어져서 수평면적이 넓고 항력계수가 매우 크므로 일반적인 형식의 현수교의 경우에는 횡방향 진폭이 상당히 클 것으로 예측되었다. 그러나 측정된 수평방향 RMS 응답은 실제풍속에서 실교 환산치가 약 2.0cm로, 최대변위는 약 7cm로 추정된다. 수평방향 진폭이

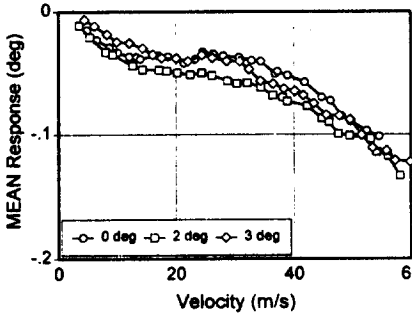


(a) 평균 응답

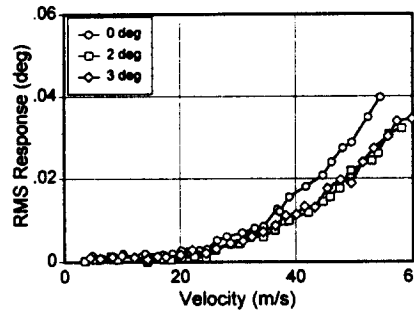


(b) RMS 응답

그림 12. 난류하 중앙경간 1/4지점의 수직 응답

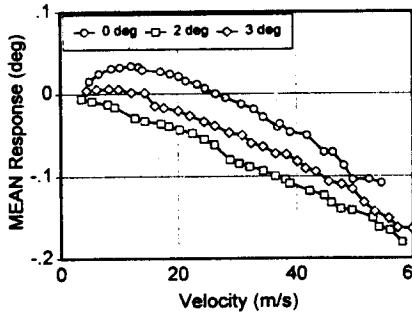


(a) 평균 응답

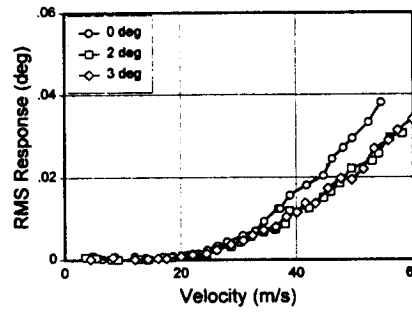


(b) RMS 응답

그림 13. 난류하 중앙경간 1/4지점의 비틀 응답



(a) 평균 응답



(b) RMS 응답

그림 14. 난류하 중앙경간 1/4지점의 비틀 응답

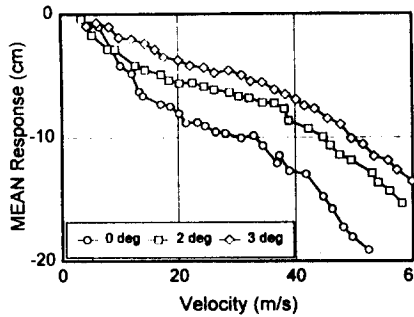
이렇게 작은 이유는 수평방향으로 경사진 주 케이 블이 횡방향 변위를 구속하기 때문인 것으로 판단 된다.

5. 결 론

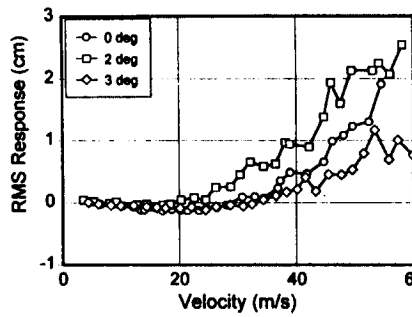
수도권 신국제공항 연육교 주경간 교량의 내풍

안정성 평가를 위한 일련의 풍동실험 결과를 주형 의 거동을 중심으로 정리하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- ① 설계풍속을 초과하는 70m/s까지 연성 플러 터나 비틀 플러터가 발생하지 않았다. 이를 볼 때 본 연구 대상 교량은 동적 불안정 현상에 대해 충 분히 안전하다고 판단된다.



(a) 평균 응답



(b) RMS 응답

그림 15. 난류하 중앙경간 1/2지점의 수평 응답

② 기본단면의 경우에는 와류진동이 발생할 가능성이 있으므로 단면을 유선형으로 개량한 수정 단면을 제시하였다. 수정단면은 유해한 진동이 설계풍속내에서는 발생하지 않으리라 판단되었으므로 최종단면으로 채택하였다.

③ 난류하에서의 주형의 응답은 피로문제 발생 여부의 검토에서 안전측으로 나타났다. 또한 사용성 검토 결과, 차량이나 기차의 통과가 가능한 풍속 30m/s 이내에서는 허용할 만한 수준인 것으로 나타났다.

④ 주형이 박스와 트러스로 이루어져 있음에도 불구하고 난류에 의한 횡방향 진폭은 매우 작은 것으로 나타났다. 이것은 주 케이블의 횡방향 sag가 횡방향 진동을 구속하기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 말

전교 모형 실험을 위한 풍동 사용을 허락해 주고 실험시 도움을 준 東京大學 土木工學科 橋梁研究室의 Y. Fujino 교수에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) 교통부 : 1993, 수도권 신국제공항 연육교 실시계획 구조제안서
- (2) 서울대학교 공학연구소 : 1993, 수도권 신국제공항 연육교 주경간 교량의 풍동실험 연구
- (3) Scanlan, R. H. : 1975, *Recent methods in the application of test results to wind design of long suspended-span bridges*, Federal Highway Administration, FHWA-RD-115
- (4) 日本道路協會 : 1991, 道路橋耐風設計便覽
- (5) 本州四國連絡橋公園 : 1990, 明石海峽大橋耐風設計要領
- (6) 首都高速道路公園 : 1979, 横浜港横斷橋風洞實驗
- (7) 大阪市 : 1983, 北港連絡橋(假稱)架設工事風洞實驗報告書
- (8) Borch, H.R. : 1987, *A wind tunnel investigation of the Deer Isle-Sedgwick bridge*, Federal Highway Administration, FHWA/RD-87/027
- (9) Zan, S.J. : 1987, *The effect of mass, wind angle, and erection technique on the aeroelastic behaviour of a cable-stayed bridge model*, National Aeronautical Establishment, NAE-AN-46

(접수일자 : 1997. 3. 24)