

단경간 장대 현수교의 플러터 특성

Investigations on Flutter Instability of a Single Span Suspension Bridge

박종화¹⁾ · 이정환²⁾ · 고현무³⁾ · 조병완⁴⁾ · 이승우⁵⁾ · 김기남⁶⁾

Park, Jong-Hwa · Lee, Jung-Han · Koh, Hyun-Moo · Jo, Byung-Wan · Lee, Seung-Woo · Kim, Gi-Nam

Abstract : Since the coupled flutter instability may lead to the collapse of the stiffened girder, its stabilization is the most important issue for the feasibility of long-span suspension bridges. Not only two dimensional section model tests on bimodal system but also the precise understanding on the generation mechanism of multi-mode coupled flutter instability is indispensable in order to effectively stabilize this divergent type vibration. In this study, the characteristics of coupled flutter instability in a single span suspension bridge are investigated from the viewpoints of the section model tests and the aeroelastic energy acting on stiffened girder, which is closely related to the flutter generation mechanism.

Key words : single span suspension bridge, stiffened girder, coupled flutter instability, section model test, aeroelastic energy

요약 : 자려진동인 플러터는, 한계풍속을 초과하면 그 진폭이 급격히 발산되는 공력불안정 현상으로서, 조사풍속이 내에서 플러터 발현을 억제하는 것이 장대 현수교의 설계상 가장 중요한 과제라고 할 수 있다. 장대 현수교에 있어서 이러한 플러터 발현을 억제하기 위해서는, 2차원 보강형의 플러터 거동특성과 다자유도/다중모드를 고려한 연성플러터의 발현 메커니즘을 엄밀히 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 단경간 장대 현수교(경간장 1150m)를 대상으로, 다양한 영각을 고려한 2차원 보강형 단면의 플러터 거동특성과 공력탄성 에너지의 개념에 기초한 다자유도/다중모드 연성플러터 특성을 검토하였다. 검토결과, 목표 한계풍속인 72m/s를 상회하는 플러터 거동특성을 확보하고 있음을 확인하였다.

키워드 : 단경간 장대 현수교, 보강형, 연성플러터, 2차원 보강형 단면 풍동실험, 공력탄성 에너지

1. 서론

Akashi Kaikyo Bridge(1998)의 건설 이후, 세계각국에서 계획중인 케이블 교량의 건설프로젝트에서는, 중앙 경간장 2000m를 초과하는 초장대 현수교가 다수 검토되고 있다. 이러한 초장대 교량의 건설에서, 사회적인 consensus를 얻기 위해서는 건설비용의 대폭 절감을 포함한 기술개발의 성과,

자연환경에 미치는 영향, 비용대비 효과 등이 필수적으로 검토되어야 한다. 이러한 배경에 따라, 초장대 현수교에 대한 연구의 중심은, 보다 경제적이고 합리적인 상부구조, 특히 새로운 보강형의 개발로 이행하고 있으며, 이러한 보강형 구조의 계획에 있어서 해결해야할 문제로서는, 경제성의 개선을 전제로, 플러터(flutter), 면외좌굴(lateral-torsional buckling) 등에 대한 내풍안정성의 확보이다.

본 연구에서 대상으로 하는 장대 현수교의 경우, 교량의 전체강성은 작고, 수평, 연직, 비틀림 방향의 고유진동수가 낮아서, 종래의 일반교량에서는 상당한 고풍속에서만 발생하는 각종 공력진동 현상이 설계풍속이하에서 나타날 가능성이 있다. 이러한 공력진동 현상중에서 the old Tacoma Narrows Bridge(1940)의 붕괴원인이었던 플러터는, 비틀림을 주체로 하는 발산진동으로서, 구조계의 진동에 따라 동반되는 자려공기력(self-excited force)이 일으키는 부감쇠 작용(negative damping effect)이 발생원인이다. 즉, 유체와 구조물의 상호

- 1) 현대건설 기술개발원 상무, 토목구조 기술사 (parkjh@hdec.co.kr)
- 2) 정회원, 교신저자, 현대건설 기술개발원 차장, 토목구조/토질 · 기초 기술사(davinci@hdec.co.kr)
- 3) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사 (hmkoh@snu.ac.kr)
- 4) 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (joycon@hanmail.net)
- 5) 티이솔루션 차장(swlee@tesolution.com)
- 6) 현대건설 기술개발원 과장, 공학박사(gnkim@hdec.co.kr)

작용에 의해 유체로부터 공급되는 에너지가 보강형의 운동을 통해 상쇄되는 에너지보다 크게 되는 풍속역에서 플러터가 발생되며, 이러한 플러터의 발현은 곧 보강형의 붕괴를 의미하므로, 한계풍속(설계풍속의 약 1.2배)이내에서 플러터가 발현되지 않도록 하는 것이 장대 현수교의 실현을 위해서는 가장 중요한 검토항목이라고 할 수 있다.

1940년 비틀림 플러터에 의한 the old Tacoma Narrows Bridge의 낙교이후, 장대 현수교의 보강형에 대한 플러터 안정성 확보를 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이러한 내풍안정성의 확보의 방법은 크게 2가지로 구분할 수가 있는데, 첫 번째는, 보강형 그 자체의 중량을 크게 하거나 혹은 비틀림 강성이 큰 트러스를 적용하고, 상판에는 교축방향으로 open grating(강재로 이루어진 격자구조)이라고 하는 바람의 통풍구를 설치하는 것이다. 이러한 형식은, 미국과 일본을 중심으로 발전되어 왔으며, 중앙지간장 1991m를 갖는 Akashi Kaikyo Bridge의 건설에서 그 기술의 정점을 과시하였다. 두 번째는, 보강형의 단면형상을 가능한 유선형에 가깝게 함으로써 플러터 성능의 향상을 도모한 보강형 형식으로, 이는 유럽을 중심으로 발전되었고 현재 중앙지간장 1624m를 갖는 Great Belt East Bridge(1998)가 공용중에 있다.

이렇듯, 현재에 이르기까지 장대 현수교의 플러터 안정성의 문제는, 다수의 장대 현수교의 건설과 함께 다양한 연구가 진행되어 내풍성이 우수한 보강형이 제안되어 왔다. 그러나, 그 대부분이 보강형 단면의 기하형상을 시행착오적으로 변화시킴으로써 개발되어 온 것으로, 플러터의 발생메커니즘, 그 자체에 대한 연구는 체계적으로 수행되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는, 현재 계획중인 단경간 장대 현수교안(경간장 1150m)을 대상으로, 2차원 보강형 단면의 풍동 실험을 실시하여 bimodal 관점(연직 및 비틀림 1차모드)에서 플러터 거동을 분석한 뒤, 다자유도/다중모드 플러터 해석을 수행하여 보강형의 공력탄성 에너지의 개념^(1,2)에 기초한 연성플러터의 발생메커니즘을 검토하고자 한다.

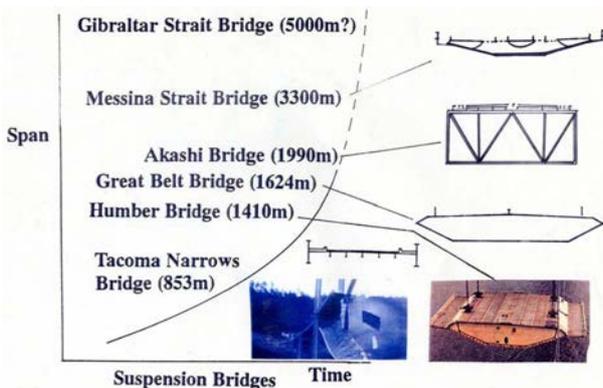


그림 1. 장대 현수교 보강형의 evolution

2. 단경간 장대 현수교의 해석모델

2.1 수치해석모델

검토대상인 단경간 장대 현수교의 해석모델 및 제원을 그림 2와 표 1에 각각 나타내었다⁽³⁾. 현재 계획중인 본 현수교는 단경간 현수교로서는 세계 3위의 중앙경간장(1150m)을 갖는다. 본 연구에 있어서는, 측경간의 접속교는 모델화하지 않고 중앙경간만을 고려하여 해석모델을 구축하였다. 본 교량의 주케이블 형식으로는, 평행식(parallel type)을 채택하고 있으며, 보강형은 steel 1-box, 주탑은 콘크리트 형식을 각각 채택하고 있다. 다자유도/다중모드 플러터 해석에 선행하여 비선형 초기형상해석과 고유진동해석을 수행하였으며, 그 결과인 주요 고유진동모드를 표 2에 요약하였다.

2.2 설계풍속의 산정 및 동적 내풍설계의 판정

본 교량의 설계풍속(V_d)은 도로교 설계기준⁽⁴⁾ 및 케이블 강교량 설계지침⁽⁵⁾에 기초하여 60.1m/s로 산정되었으며, 플러터 조사풍속(V_{cr})은 영각 0도를 기준으로 설계풍속에 대해 1.2의 안전율을 고려하여 72.1m/s로 설정하였다. 또한, 영각에 따른 플러터 조사풍속의 저감은 케이블 강교량 설계

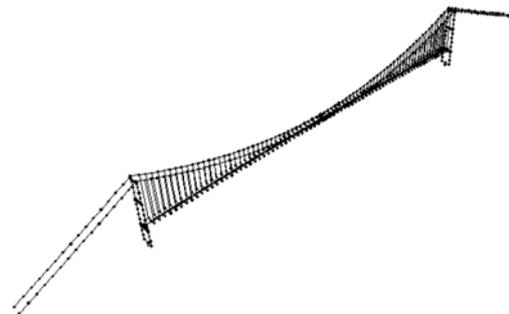


그림 2. 단경간 장대 현수교의 유한요소해석모델

표 1. 단경간 장대 현수교의 구조제원

항 목		구조제원
형 식	구조형식	단경간
	경간장	1150 m(세계 3위)
	새그비	1/9
주케이블	단면적	0.19 m ²
보강형 (steel 1-box)	폭원	25.6 m
	형고	3.50 m
	단면적	0.94 m ²
	연직휨 강성	2.09 m ⁴
	수평휨 강성	46.88 m ⁴
	비틀림 강성	5.46 m ⁴
	질량관성 모멘트	652.4 t·m ² /m
사하중	보강형	14.02 tf/m
	케이블	1.50 tf/m

표 2. 단경간 장대 현수교의 주요 고유진동모드

Mode No.	진동수(Hz)	Vibration mode type
1 st	0.055	대칭 1차 수평모드 (Sym. 1st Sway Mode: Sym. S1)
2 nd	0.098	역대칭 1차 연직모드 (Asym. 1st Vertical Mode: Asym. V1)
3 rd	0.141	대칭 1차 연직모드 (Sym. 1st Vertical Mode: Sym. V1)
5 th	0.192	대칭 2차 연직모드 (Sym. 2nd Vertical Mode: Sym. V2)
6 th	0.222	역대칭 2차 연직모드 (Asym. 2nd Vertical Mode: Asym. V2)
7 th	0.280	대칭 2차 수평모드(비틀림 연성) (Sym. 2nd Sway Mode: Sym. S2)
11 th	0.293	대칭 3차 연직모드 (Sym. 3rd Vertical Mode: Sym. V3)
16 th	0.367	역대칭 3차 연직모드 (Asym. 3rd Vertical Mode: Asym. V3)
17 th	0.368	대칭 4차 수평모드(비틀림 연성) (Sym. 4th Sway Mode: Sym. S4)
19 th	0.386	대칭 1차 비틀림 모드 (Sym. 1st Torsional Mode: Sym. T1)
33 th	0.533	역대칭 1차 비틀림 모드 (Asym. 1st Torsional Mode: Asym. T1)

지침에 준하여 그림 3에서와 같이 산정하였다(영각 0도, ±2.5도: 72.1m/s, ±5도: 21.6m/s).

다음으로, 2차원 보강형 풍동실험에 선행하여, 일본 도로교 내풍설계편람⁽⁶⁾에서 제시된 동적 내풍설계의 판정식에 기초하여 본 교량의 공력진동 발생 가능성을 우선 검토하였다(표 3). 참고로 표 3의 판정식에서는 모든 조건이 “NG”일 경우 해당되는 진동현상이 발생할 수 있다고 가정한다⁽⁶⁾. 판정 결과, 비틀림 발산진동과 와류진동의 발생가능성이 예측

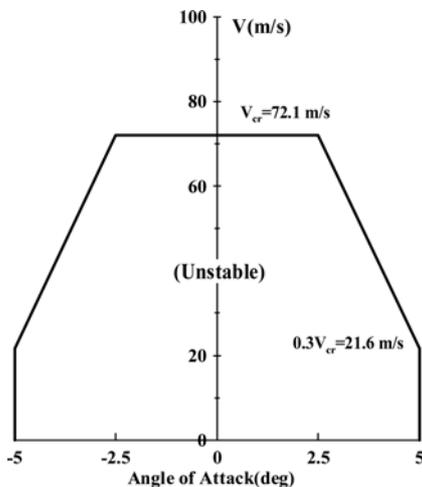


그림 3. 영각(angle of attack)의 변화에 따른 플러터 조사풍속



그림 4. 2차원 보강형 풍동실험에서의 영각의 정의

표 3. 동적 내풍설계의 판정결과(일본 도로교 내풍설계편람)

대상진동	판정	발생가능성
비틀림 발산진동	$LV_d/B=2700>520$ (NG)	있음
연직 발산진동	$LV_d/B=2700>330$ (NG) $B/d=6.56>5$ (NG) $I_u=0.11>0.15$ (OK)	없음
와류진동	$LV_d/B=2700>200$ (NG) $I_u=0.11>0.20$ (NG)	있음

L: 경간장(1150m), B: 보강형 폭원(25.6m), d: 유효형고(3.9m), Iu: 난류강도(11%)

되었다. 따라서, 보강형에 대한 플러터 안정성을 중심으로 공력진동 현상을 엄밀히 검토하기 위하여 2차원 보강형 단면에 대한 풍동실험을 수행하였다.

3. 2차원 보강형 단면의 풍동실험

3.1 모형의 set-up

풍동실험은 (주)티이솔루션의 2차원 소형풍동에서 수행되었으며, 사용된 풍동의 크기는 폭×높이×길이=1m×1.5m×6m, 풍속범위는 0.3m/s~22.5m/s이다. 풍동실험에 있어서, 보강형 단면의 모형 상사율은 1/65이며, 모형의 자유도는 8개의 스프링을 이용하여 연직 및 비틀림의 2자유도의 연성계(vertical-torsional coupled system)로 구성하였다. 또한, 보강형의 측면에 설치된 페어링의 형상에 따라 그림 5와 같이 3종류의 보강형 단면을 제작하여 등류 및 난류하에서 공력진동 실험을 수행하였으며(영각: -5~+5도, 2.5도씩 증분), 이 중에서 기본단면의 동적상사 결과를 표 4에 나타내었다. 한편, 표 4에서 보강형의 단위길이당 질량 및 질량관성모멘트의 경우, 표 1의 현수교 구조시스템의 제원과 상이한 점을 알 수 있는데, 이는 2차원 보강형 풍동실험에 있어서는, 보강형의 질량 및 질량관성모멘트에 대한 주케이블 및 행어의 기여분을 고려했기 때문이다.

표 4. 기본단면의 동특성 상사결과(S=1/65)

항목	실교치	실험치
연직 진동수	0.141 Hz	1.55 Hz
비틀림 진동수	0.386 Hz	4.21 Hz
진동수비	2.74	2.71
단위길이당 질량	17.63 t/m	4.16 kg/m
단위길이당 질량관성모멘트	1244.33 t·m ² /m	683.84 kg·cm ² /m
대수감쇠율	연직	비틀림
	0.021	0.022

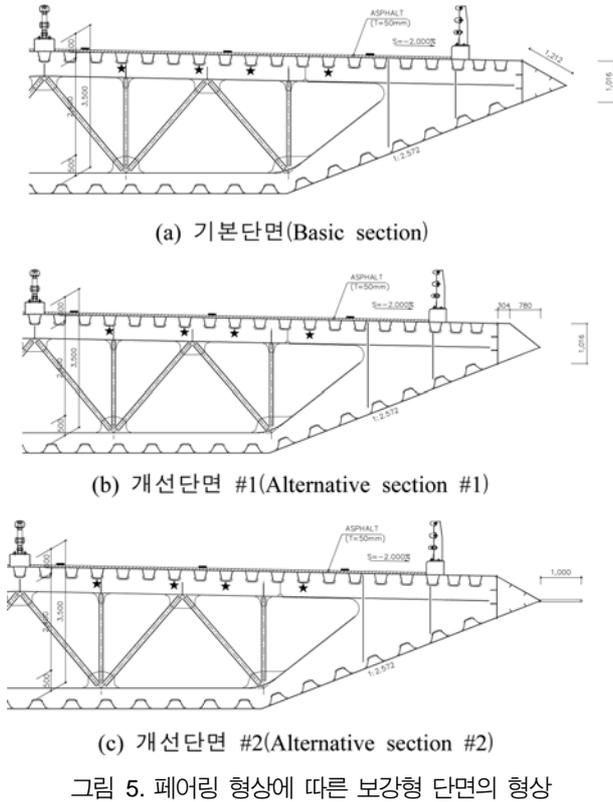


그림 5. 페어링 형상에 따른 보강형 단면의 형상

3.2 등류하에서의 플러터 발현풍속의 검토

등류(Uniform flow)하에서의 2차원 보강형 풍동실험의 전경과 그 결과를 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 실험결과, 전반적인 경향으로서, “-”의 영역에서보다는 “+” 영역에서 플러터 안정성이 저하되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 기본단면(Basic section)과 개선단면 #1(Alternative section #1)의 플러터 특성은 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, 영각 0도에서는 플러터 조사풍속(72.1m/s) 이상의 플러터 발현풍속을 확보하고 있으나, 영각 +2.5도의 경우 조사풍속 이내에서 플러터가 발현하므로, 기본단면 페어링 형상의 minor modification으로는 플러터 성능의 향상을 꾀할 수 없으며, 추가적인 제진대책이 요구된다고 할 수 있다. 한편, 개선단면 #2(Alternative section #2)의 경우, 고려하고 있는 전 영각의 범위에서 플러터 조사풍속 이상의 충분한 플러터 발현풍속을 확보하고 있는데, 이는 기본단면의 페어링 단부에 설치된 splitter plate에 의한 바리버블의 저감 및 그에 따른 비정상 공기력의 저감효과로 판단된다.

3.3 난류하에서의 플러터 발현풍속의 검토

전술한 풍동실험의 결과는 등류하에서의 플러터 특성이 다. 그러나, 실제 대기류에는 상당한 난류성분(turbulence)을 포함하고 있으며, 본 교량 보강형의 계획고(약 63m)를 고려할 때, 난류강도는 약 11% 이상으로 예측된다. 본 난류실험

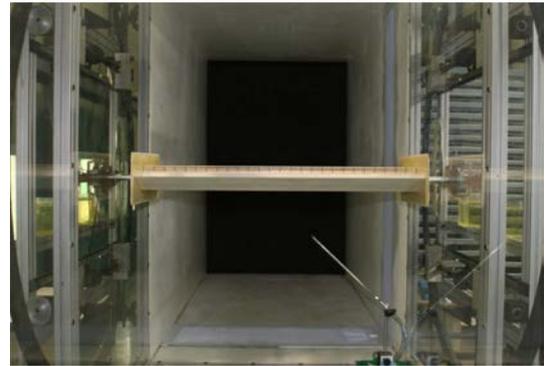


그림 6. 2차원 보강형 풍동실험 전경(등류)

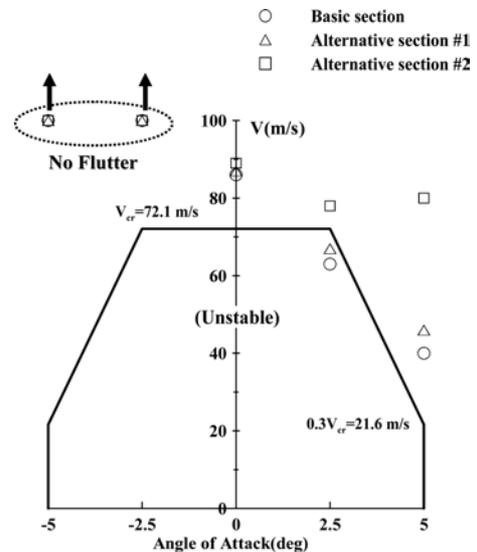


그림 7. 등류하에서의 플러터 발현풍속

에서는 시방서에 규정된 난류강도에 비해 안전측인 7%의 난류강도하에서 실험을 수행하였다(그림 8).

실험결과, 그림 9에 도시된 바와 같이, 등류하에서와 동일하게 전반적으로 “+”의 영역에서보다는 “-” 영역에서 내풍성이 향상되고 있음을 알 수 있다. 한편, 난류하에서는, 3가지 보강형 단면의 플러터 성능은 플러터 조사풍속이상의 플러터 발현풍속을 확보하고 있으며, 개선단면 #2의 경우는 실험상 고려된 전 영각의 범위내에서는 플러터가 발생하지 않았다. 또한, 등류하에서보다는 난류하에서, 본 교량 보강형의 플러터 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

등류 및 난류하에서의 실험결과, 일반적인 상형단면의 플러터 특성과 유사하게 “-” 영각의 경우가 “+” 영각의 경우보다 플러터 발현풍속이 높다는 점을 확인하였다. 또한, 개선단면 #2의 경우가 다양한 영각의 범위에 대해 플러터 성능이 가장 우수하다는 결과를 얻었다.

그러나, 실제 자연풍에는 상당한 난류성분이 포함되어 있고, 난류하에서의 공력진동 특성이 실제로 더욱 가깝다는 점

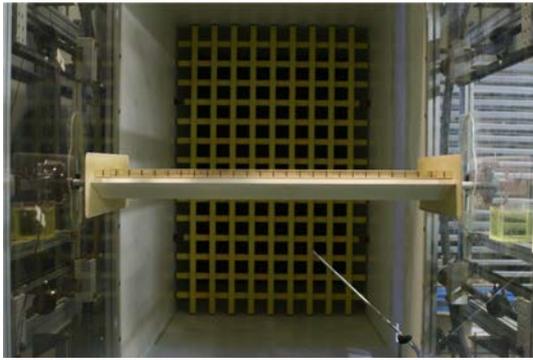


그림 8. 2차원 보강형 풍동실험 전경(난류)

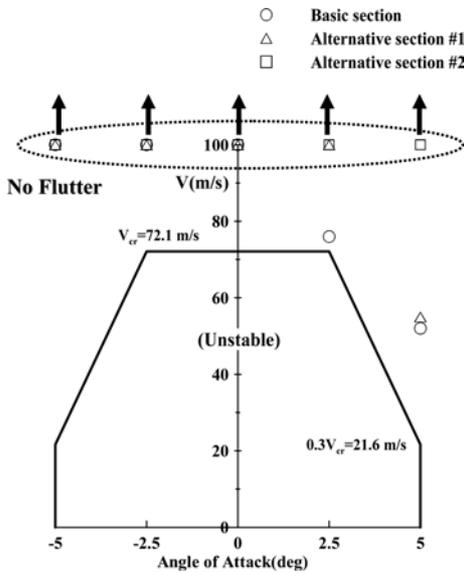


그림 9. 난류하에서의 플러터 발현풍속

을 감안하면, 개선단면 #1의 경우도 본 연구에서의 대상교량인 단경간 장대 현수교의 보강형으로서 적용가능성이 크다고 할 수 있다. 또한, 개선단면 #1의 경우, 경제성, 미관, 유지관리 등의 측면에서 개선단면 #2에 비해 우수하고, 또한 교량의 점점차 레일을 대체할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 다만, 개선단면 #1의 경우, 등류하의 영각 +2.5도에 있어서, 플러터 성능을 보다 더 향상시키기 위해서는 추후 공력학적 및 구조동력학적인 관점에서 보다 더 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 다자유도/다중모드 플러터 해석을 이용한 연성플러터 발생메커니즘의 검토

4.1 다자유도/다중모드 플러터 해석방법

다자유도/다중모드 플러터 해석방법으로서, 식 (1)의 운동방정식에 있어서, 우변의 비정상 공기력(unsteady aerodynamic forces; 식 (2), (3))을 모달좌표계(modal coordinate)

에서 가속도 비례항으로 표현하여 식 (4)와 같이 운동방정식을 재구성 한 뒤, 이를 상태공간 방정식(state-space equation)으로 변환하여, 복소고유치 문제(complex eigenvalue problem)로 귀결시키는 K-method⁽⁷⁾를 적용하였다. 또한, 플러터 해석에 있어서, 저차의 40개 고유진동모드를 중첩시켜 사용하였으며, 복소고유치 해석결과에 대한 연성 플러터의 발현은, 임의의 진동모드의 공력감쇠(logarithmic damping decrement)의 부호가 정(+에서 부(-)로 변화하는 풍속역에서 발생하는 것으로 정의한다.

한편, 본 연구에서는 2차원 보강형 단면에 대한 비정상 공기력 계수(flutter derivatives)의 측정실험을 수행하지 않았으나, 유선형 형상의 보강형 단면을 채용하고 있는 점을 감안하면, 그 비정상 공기력 계수는 그림 10에 도시한 thin plate⁽⁸⁾의 이론적인 비정상 공기력 계수로 어느정도 모사가 가능하다고 할 수 있다. 즉, 그림 11에 나타낸 바와 같이, 본 연구의 2차원 보강형 단면 풍동실험에서 고려된 제원(표 4)과 영각 0도에서의 thin plate의 비정상 공기력 계수를 이용한 2자유도 플러터 해석결과, 풍동실험에 의한 플러터 발현 풍속(86m/s)과 거의 유사한 풍속인 89m/s에서 플러터가 발현되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 절에서는, 다자유도 플러터 해석을 수행함에 있어서, thin plate의 비정상 공기력 계수(영각 0도)를 이용하였으며, 고려된 비정상 공기력 성분은 비정상 양력(L_{ae})과 비정상 모멘트(M_{ae})이다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F_{ae}\} \quad (1)$$

여기서, $[M]$: mass matrix; $[C]$: damping matrix; $[K]$: stiffness matrix; $\{F_{ae}\} = \{L_{ae} \ M_{ae}\}^T$: unsteady aerodynamic force matrix를 의미하며, 비정상 양력과 비정상 모멘트는 식 (2), (3)과 같이 표현된다.

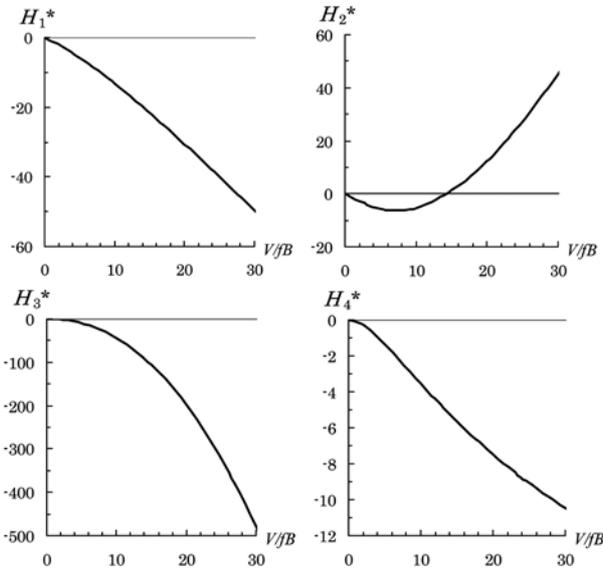
$$L_{ae} = \rho b^2 \omega_F H_1^* \dot{\eta} + \rho b^2 \omega_F^2 H_4^* \eta + \rho b^3 \omega_F H_2^* \dot{\phi} + \rho b^3 \omega_F^2 H_3^* \phi \quad (2)$$

$$M_{ae} = \rho b^2 \omega_F A_1^* \dot{\eta} + \rho b^2 \omega_F^2 A_4^* \eta + \rho b^4 \omega_F A_2^* \dot{\phi} + \rho b^4 \omega_F^2 H_3^* \phi \quad (3)$$

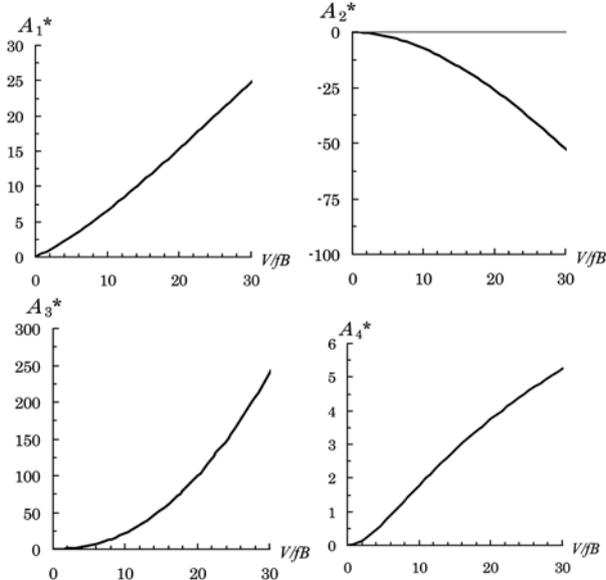
여기서, ρ : air density; b : half chord length of stiffened girder; ω_F : flutter frequency, η : 연직 좌표계; ϕ : 비틀림 좌표계; $H_1^* \sim A_4^*$: thin plate의 비정상 공기력 계수(flutter derivatives)를 의미한다.

$$[M^*]\{\ddot{\xi}\} + [C^*]\{\dot{\xi}\} + [K^*]\{\xi\} = \{0\} \quad (4)$$

여기서, $[M^*] = [\phi]^T [M - F_{ae}] [\phi]$: modified generalized mass matrix; $[C^*] = [\phi]^T [C] [\phi]$: generalized damping matrix; $[K^*] = [\phi]^T [K] [\phi]$: generalized stiffness matrix; $[\phi]$: modal vector; $[\xi]$: modal coordinate를 각각 의미한다.



(a) 양력성분의 비정상 공기력 계수



(b) 모멘트 성분의 비정상 공기력 계수

그림 10. Thin plate의 비정상 공기력 계수(영각 0도)

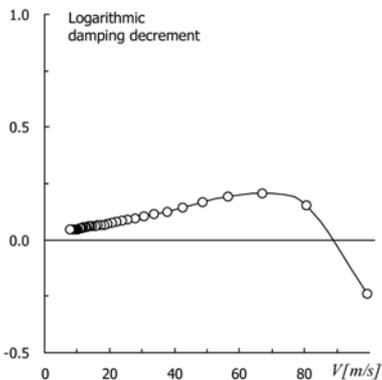


그림 11. Thin plate의 비정상 공기력 계수를 이용한 2자유도 플러터 해석 결과(영각 0도)

4.2 공력탄성 에너지의 정식화

장대 현수교에 연성플러터의 발현시 그 진동형상을 살펴 보면, 교축방향으로 각 진동성분의 진폭 및 위상차(phase difference)가 변화하게 되고, 이에 따라 비정상 공기력이 보강형에 가하는 일의 분포도 교축방향으로 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서, 비정상 공기력이 보강형에 가하는 일의 량(공력탄성 에너지)을 정량적으로 평가함으로써, 플러터 발생 메커니즘의 검토 및 플러터 안정화의 최적화를 도모할 수 있다. 비정상 공기력이 보강형에 가하는 일의 분포는 다자유도 플러터 해석의 결과로서 얻어지는 복소고유벡터(complex eigenvector)를 이용하여 구할 수 있는데, 이에 관한 개념 및 정식화의 과정을 아래에 기술한다.

유체의 흐름중에서 진동하는 보강형에 얻어지는 공력탄성 에너지는 식 (5)와 같이 비정상 양력과 비정상 모멘트가 하는 일(W)로서 평가할 수 있는데, 1주기(T)당 일의 부호가 정(+)이 되면, 플러터의 발현을 의미한다. 즉, 일(W)의 부호가 부(-)에서 정(+)으로 바뀌는 풍속역과 공력감쇠의 부호가 정(+)에서 부(-)로 바뀌는 풍속역은 정확히 일치한다(그림 12). 최종적으로, 식 (2)와 식 (3)을 식 (5)에 대입하여 전개하면, 식 (6), 식 (7)과 같이 각 비정상 공기력 계수를 포함하는 에너지 값을 구할 수 있으며, 총 에너지에 대한 각 에너지 성분의 기여도를 정량적으로 평가함으로써, 플러터 발현에 미치는 각 비정상 공기력 계수의 기여도 및 플러터 발생 메커니즘을 검토할 수 있게 된다.

$$W = \oint L d\eta + \oint M d\phi = W_L + W_M \tag{5}$$

여기서, $W \geq 0$ 의 경우 플러터 발현을 의미하며, W_L , W_M 은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} W_L &= \oint L d\eta = \int_0^T L \dot{\eta} dt \\ &= \rho b^2 \omega_F^2 H_1^* \eta_0^2 \pi + \rho b^3 \omega_F^2 H_2^* \cos \psi \eta_0 \phi_0 \pi + \rho b^3 \omega_F^2 H_3^* \sin \psi \eta_0 \phi_0 \pi \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} W_M &= \oint M d\phi = \int_0^T M \dot{\eta} dt \\ &= \rho b^4 \omega_F^2 A_2^* \phi_0^2 \pi + \rho b^3 \omega_F^2 A_1^* \cos \psi \eta_0 \phi_0 \pi + \rho b^3 \omega_F^2 A_4^* \sin \psi \eta_0 \phi_0 \pi \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, η_0 , ϕ_0 : 연직 및 비틀림 변위의 진폭(amplitude); ψ : 연직계와 비틀림계의 위상차를 의미한다.

한편, 교량단면에서 발생되는 플러터의 2가지 유형으로는, Damping-driven flutter와 Stiffness-driven flutter로 구분된다⁽⁹⁾. 이러한 관점에서부터 식 (5)~(7)을 살펴보면, 에너지의 증분, 즉 공력부가감쇠에는 비정상 공기력의 기여가 지배적이라는 점, 그리고 보강형에 대한 에너지의 유입에 관해서는 식 (8)과 식 (9)와 같이, 비정상 공기력 계수중 Damping term(H_1^* , H_2^* , A_1^* , A_2^*)에 의한 에너지(Energy by

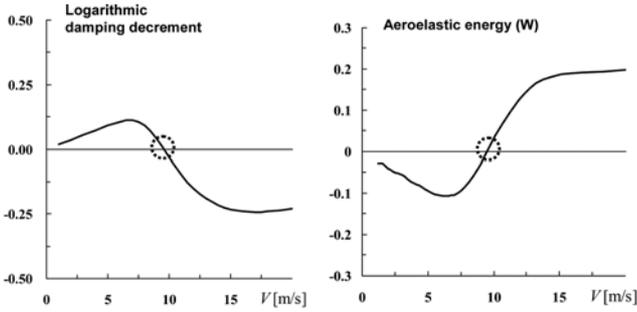


그림 12. 공력감쇠와 공력탄성 에너지의 비교(thin plate, $b=0.15m$, $M=2.4kg$, $I=0.0181kgm^2/m$, 진동수비 1.3)

Damping Term, W_D 와 Stiffness term(H_3^* , A_4^*)에 의한 에너지(Energy by Stiffness Term, W_S)의 2가지 타입으로 구분하는 것이 가능하다는 점 등을 알 수 있다. 이러한 2가지 타입의 에너지 성분의 구분에 기초하여, 플러터 발현유형을 검토할 수 있는데, 식 (8)의 Damping term에 의한 에너지가 불안정화 효과를 나타내는 플러터 유형을 Damping-driven flutter, 식 (9)의 Stiffness term에 의한 에너지가 불안정화 효과를 보이는 플러터 유형을 Stiffness-driven flutter로 정의하는 것이 가능하다.

$$W_D = \rho b^2 \omega_F^2 H_1^* \eta_0^2 \pi + \rho b^3 \omega_F^2 H_2^* \cos \psi \eta_0 \phi_0 \pi + \rho b^3 \omega_F^2 A_1^* \cos \psi \eta_0 \phi_0 \pi + \rho b^4 \omega_F^2 A_2^* \phi_0^2 \pi \quad (8)$$

$$W_S = \rho b^3 \omega_F^2 H_3^* \sin \psi \eta_0 \phi_0 \pi - \rho b^3 \omega_F^2 A_4^* \sin \psi \eta_0 \phi_0 \pi \quad (9)$$

4.3 비정상 공기력 계수의 영향

본 연구에서 검토대상 교량인 단경간 장대 현수교의 연성 플러터 발생메커니즘을 검토하기 전에 우선 고차모드의 영향을 확인하기 위해, 플러터 해석상 고려된 고유진동모드의 중첩에 따른 플러터 발현풍속의 수렴도를 확인하였다(그림 13). 검토결과, 저차의 17개 이상의 모드중첩을 고려하면서 부터 플러터가 발현되었으며, 저차의 19개 모드 이상을 고려하면, 플러터 발현풍속이 약 85m/s로 일정하게 수렴하게 된다. 따라서, 단경간 장대 현수교의 플러터 발현에 영향을 미치는 고유진동모드는 저차의 19개 모드 이내에 존재함을 알 수 있다.

단경간 장대 현수교의 40개 모드를 중첩하여 다자유도/다중모드 연성플러터 해석을 수행한 결과를 그림 14에 도시하였다. 해석결과, 풍속 85m/s에서 대칭 2차 수평모드(Sym. 2nd Sway Mode; 비틀림 연성모드)의 분기로 플러터가 발현하였다. 이러한 결과는, 보강형의 비정상 공기력 계수로서 thin plate의 비정상 공기력 계수를 가정하여 해석한 결과이지만, 영각 0도를 기준으로 한계풍속인 72.1m/s를 상회하는 플러터 안정성을 확보하고 있는 것으로 확인되었다.

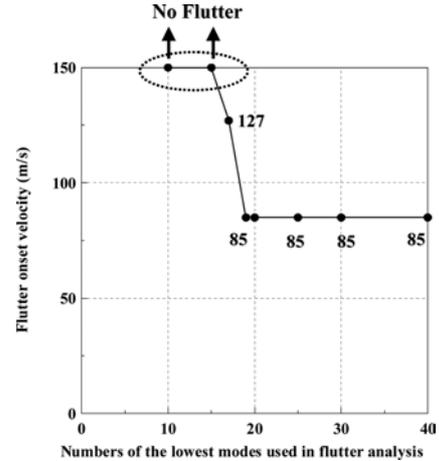


그림 13. 진동모드의 중첩에 따른 플러터 발현풍속의 수렴

한편, 2차원 보강형 단면에 대한 풍동실험에서 고려되었던 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. 1st Torsional Mode)의 경우, 풍속 약 60m/s를 초과하면서 공력감쇠가 급격히 감소하는, 즉 플러터가 발현하는 전형적인 경향으로 감쇠특성이 진행되었으나, 80m/s 부근의 풍속역에서 대칭 2차 수평모드와의 공력간섭(aerodynamic interference)이 발생하면서, 120m/s 이상의 고풍속역까지 공력감쇠의 수치가 변화없이 거의 일정하게 유지되고 있다. 즉, 2가지 기본모드(Sym. 1st Vertical Mode+Torsional mode)만을 고려한 2차원 보강형 단면의 풍동실험으로는 재현할 수 없는 복잡한 플러터 거동특성이 다자유도/다중모드 플러터 해석결과로부터 도출되었으므로, 본 교량과 같이 장대 현수교에서는 다자유도/다중모드 플러터 해석을 통한 2차원 보강형 풍동실험 결과의 재검토가 필

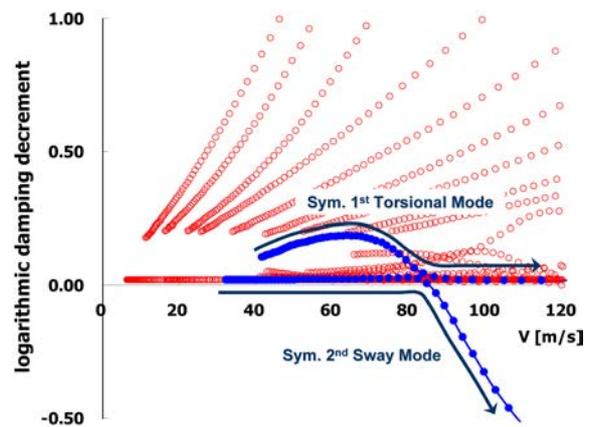


그림 14. 다자유도/다중모드 플러터 해석 결과

요하다고 판단된다.

그림 15는 대칭 2차 수평모드(Sym. 2nd Sway Mode)에 있어서 풍속별 보강형의 공력탄성 에너지의 변화를 나타낸 것이다. 그림 15(a)에 도시된 바와 같이, 양력 에너지(Lift Energy)

에 있어서는 H_3^* 에 의한 에너지 성분($\rho b^3 \omega_F^2 H_3^* \sin \psi \eta_0 \phi_0 \pi$)이 exciting의 효과, 즉 불안정화 효과를 유발하고 있으며, H_1^* 에 의한 에너지 성분($\rho b^2 \omega_F^2 H_1^* \eta_0^2 \pi$)이 안정화 효과(damping effect)를 보이고 있다. 한편, 그림 15(b)의 모멘트 에너지(Moment Energy)에 있어서는, A_1^* 의 에너지($\rho b^3 \omega_F^2 A_1^* \cos \psi \eta_0 \phi_0 \pi$)에 의한 불안정화 효과, A_2^* 의 에너지($\rho b^4 \omega_F^2 A_2^* \phi_0^2 \pi$)에 의한 안정화 효과를 나타내고 있다. 그림 15(c)에 도시된 전체적인 경향으로서는, 특히 플러터 발현 후에 있어서 전체 에너지(Total Energy)에 대한 양력 에너지(Lift Energy)의 기여가 지배적임을 알 수 있다. 또한, 식 (8)과 식 (9)에 기초하여, 대칭 2차 수평모드(Sym. 2nd Sway Mode)의 플러터 유형을 검토한 결과를 그림 15(d)에 도시하였다. 검토결과, 풍속 70m/s를 초과하면서 Stiffness term에 의한 에너지가 불안정화 효과, 즉 플러터의 발현을 주도하고 있으므로, 대칭 2차 수평모드(Sym. 2nd Sway Mode)의 플러터 유형은

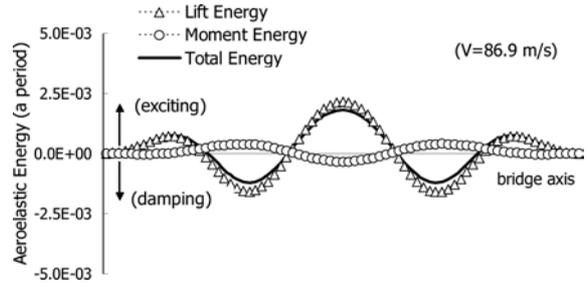


그림 16. 보강형 교축방향 공력탄성 에너지 분포

서는 damping 효과가 탁월함을 알 수 있다.

4.4 고유진동모드의 영향

Akashi Kaikyo Bridge에 대한 일련의 내풍성 검토의 결과로부터, 장대 현수교의 플러터 발현특성의 조사에 있어서는 동적구조계 및 기류의 3차원성, 다중모드의 영향을 고려할 필요성이 제기되었다⁽¹⁰⁾. 여러모드가 연성하는 플러터에 있어서, 기여도가 높은 고유진동모드를 확인할 수 있다면, 그러한 모드의 진동형상을 적절히 변화시킴으로써 플러터 발현풍속을 상승시킬 수 있다고 하는 관점에서부터, 본 연구 해석모델의 대칭 2차 수평모드(Sym. 2nd Sway Mode)의 플러터 거동에 미치는 각 진동모드의 영향을 검토하였다.

표 5는 모드조합에 따른 플러터 발현모드 및 발현풍속의 변화를 정리한 것이다. 대칭 2차와 4차 수평모드(Sym. S2, S4) 및 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. T1), 그리고 이에 선행하는 대칭 연직 1차, 2차 모드(Sym. V1, V2)를 조합한 경우(모드조합 No. 6)의 플러터 발현풍속은 86.2m/s로서, 40개 고유진동모드를 조합한 경우의 플러터 발현풍속인 85m/s와 거의 유사하다고 할 수 있다. 즉, 모드조합 No. 6에 속

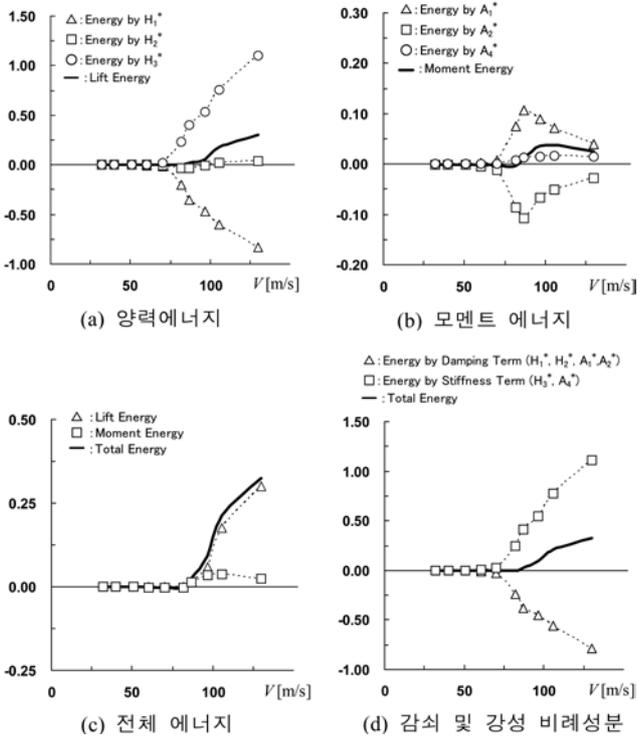


그림 15. 풍속별 공력탄성 에너지

Stiffness-driven flutter 타입인 것으로 판단할 수 있다.

그림 16은 플러터 발현모드인 대칭 2차 수평모드(Sym. 2nd Sway Mode)에 있어서, 플러터 발현직후의 풍속인 86.9m/s에서의 보강형 교축방향으로의 공력탄성 에너지 분포를 나타낸 것이다. 도시된 바와 같이, 플러터 발현후 전체 에너지에 대한 양력 에너지의 기여가 지배적임을 알 수 있으며, 또한 전체 에너지의 관점에서 보면, 중앙경간의 중앙부에서는 exciting 효과가 탁월하며, 중앙경간의 1/4지점에

표 5. 모드조합에 따른 플러터 발현모드 및 발현풍속

No	모드조합	플러터 발현모드	플러터 발현풍속
1	Sym. V1+T1 (3 rd + 19 th)	T1	108.8
2	Sym. V1+S2 (3 rd + 7 th)	No Flutter	
3	Sym. V1+V2+T1 (3 rd + 5 th + 19 th)	T1	92.4
4	Sym. V1+V2+S2 (3 rd + 5 th + 7 th)	No Flutter	
5	Sym. V1+V2+S2+T1 (3 rd + 5 th + 7 th + 19 th)	S2	92.2
6	Sym. V1+V2+S2+S4+T1 (3 rd + 5 th + 7 th + 17 th + 19 th)	S2	86.2
7	40 modes	S2	85.0

괄호안은 Mode No.를 의미하며, 풍속단위는 m/s임.

하는 5개의 고유진동모드(Sym. V1+V2+S2+S4+T1)의 경우가 플러터 발현에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있으며, 그림 17에서 도시하고 있는, 대칭 2차 수평모드(Sym. S2)의 플러터 발현직후의 풍속인 86.9m/s에 있어서의 Modal Energy의 검토로부터도, 40개의 고유진동모드중에서 위에서 언급한 5개 고유진동모드의 영향이 지배적이라는 것을 확인할 수 있다.

한편, 2차원 보강형 단면에 대한 풍동실험에서 고려된 대칭 1차 연직모드와 비틀림 모드를 조합한 경우(모드조합 No. 1), 다자유도 플러터 해석에 의한 플러터 발현풍속은 108.8m/s로서, 풍동실험에서의 플러터 발현풍속인 86m/s와 비교할 때 약 26%정도 상승된 결과를 보이고 있다. 이러한 플러터 발현풍속의 차이에 대해서는, 다자유도/다중모드 플러터 해석시 보강형 단면을 thin plate로 가정하여 비정상 공기력 계수를 적용한 점, 그리고 보강형 교축방향으로의 진동 진폭의 변화를 고려한 점 등이 원인으로 생각될 수 있다. 따라서, 향후 2차원 보강형 단면에 대한 비정상 공기력 계수의 추출실험, 등류하에서의 3차원 전교모형에 대한 풍동실

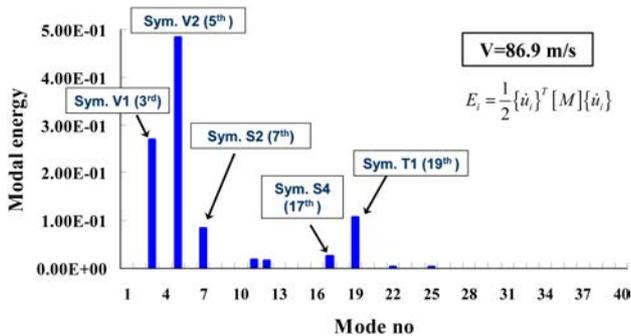


그림 17. 대칭 2차 수평모드의 플러터 발현시 각 모드의 기여율 (괄호안은 Mode no.를 의미함)

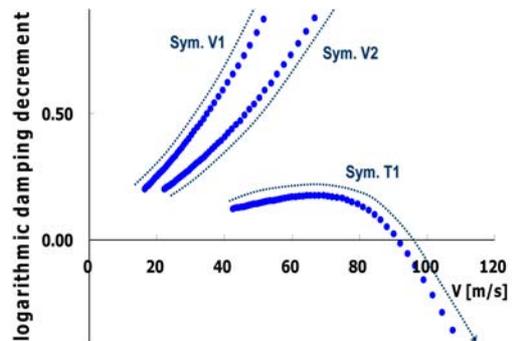
험 등을 통해서 이러한 플러터 발현풍속상의 차이점에 대한 상세한 검토가 필요하다고 판단된다.

표 5의 결과를 살펴보면, 모드조합에 따라 플러터 발현풍속 뿐만 아니라 플러터 발현모드도 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 모드조합 No.3(Sym. V1+V2+T1)의 경우, 플러터 발현모드는 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. T1)이며, 모드조합 No.5(Sym. V1+V2+S2+T1)에서는, 플러터 발현모드가 대칭 2차 수평 모드(Sym. S2)로 변화한다.

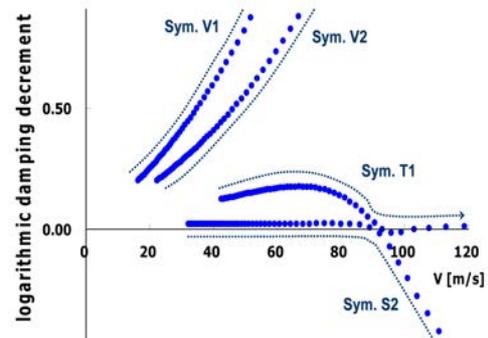
이러한 플러터 발현모드의 변화에 대한 상세한 검토를 위해, 2가지 모드조합(No. 3, No. 5)에 따른 공력감쇠 특성을 고찰하였다(그림 18). 연직모드의 경우(Sym. V1, V2), 모드조합의 차이에 관계없이, 그 공력감쇠가 풍속의 상승과 함께 급격히 증가하고 있다. 한편, 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. T1)의 경우, 모드조합 No. 3에서는 저풍속대에 있어서는 공

력감쇠가 서서히 증가하다가 약 70m/s의 풍속역에서부터 감쇠가 급격히 감소하여 92.4m/s의 풍속에서 플러터가 발현하게 된다(그림 18(a)). 그러나, 모드조합 No. 5의 경우, 풍속 90m/s 부근에서 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. T1)는 대칭 2차 수평 모드(Sym. S2)와 공력간섭이 발생하면서, 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. T1)의 공력감쇠는 고풍속역에 이르기까지 거의 일정한 값으로 유지되는데 반해, 대칭 2차 수평 모드(Sym. S2)에서 플러터가 발현하고 있다(그림 18(b)).

과거의 연구사례⁽¹¹⁾를 살펴보면, 케이블의 국부진동모드를 고려해서 다자유도/다중모드 플러터 해석을 수행한 결과, 케이블 진동모드가 플러터 발현모드로서 작용하고 있다는 결과가 얻어졌다. 이와 같이, 종래의 기본적인 2가지 고유진동모드(연직 및 비틀림 1차모드) 이외의 진동모드가 장대교량의 플러터 특성에 크게 관여할 가능성이 있는 점, 2가지 진동모드만을 고려한 해석으로는 장대교량의 플러터 특성, 특히 플러터 발현모드를 엄밀히 파악할 수 없는 점 등을 감



(a) 모드조합 No. 3(Sym. V1+V2+T1)의 플러터 해석결과



(b) 모드조합 No. 5(Sym. V1+V2+S2+T1)의 플러터 해석결과

그림 18. 모드조합에 따른 공력감쇠의 변화

안하여, 장대교량의 플러터 해석에서는 다자유도/다중모드 고려의 필요성이 기존의 연구^(12,13)에서 강조되어 왔다.

한편, 그림 19(a)에 도시한 바와 같이 대칭 2차 수평 모드(Sym. S2)는 보강형에 있어서 미소한 비틀림 진동성분(Torsional component)을 동반한 수평방향으로의 탁월한 진동모드이므로, 이러한 진동모드의 주도로 플러터가 발현된

다고 하는 것은 이례적이라고 할 수 있다. 따라서, 대칭 2차 수평 모드(Sym. S2)의 플러터 발현에 미치는 각 진동모드 조합의 영향을 정량적으로 분석하였다. 즉, 그림 20에 나타난 바와 같이, Stiffness-driven flutter 타입에 있어서 불안정화 효과(exciting effect)를 유발하는 강성비례항 에너지 성분의 관점에서 살펴보면, 40개의 진동모드 전체의 조합으로부터 구한 강성비례항 에너지 성분에 대해 40개의 모드중 대칭 1차 및 2차 연직모드(Sym. V1, V2)와 대칭 1차의 비틀림 모드(Sym. T1)의 연성에 의한 기여율이 탁월하다는 것을 알 수 있다. 또한, 정성적인 측면에서도 살펴보면(그림 18), 모드조합의 차이에 따른 플러터 발현풍속의 차이가 거의 없는 점, 대칭 2차 수평모드(Sym. S2)와 대칭 1차 비틀림 모드(Sym. T1)의 공력간섭이 일어나는 풍속역 이외

의 풍속대에서는 플러터가 발현하는 공력감쇠의 경향이 거의 유사하다는 점 등을 알 수 있다. 따라서, 대칭 2차 수평 모드(Sym. S2)가 최종적인 플러터 발현모드이지만, 그 플러터의 발현에 기여하는 가장 큰 역할은, 대칭 1차 및 2차 연직모드와 대칭 1차 비틀림 모드간의 연성효과라고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 단경간 장대 현수교를 대상으로 2차원 보강형 단면에 대한 플러터 발현풍속의 검토와 다자유도/다중모드의 관점에서 플러터 발생메커니즘을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 2차원 보강형 단면에 대한 분류 및 난류하에서의 풍동 실험결과, “+”영각에서보다 “-”영각에서 플러터 발현풍속이 높아지는 점을 확인하였다. 또한, 페어링 단부에 splitter plate를 부착한 개선단면 #2의 경우가 플러터 성능이 가장 우수하다는 결과를 얻었다.

2) Thin plate의 비정상 공기력 계수를 적용한 다자유도/다중모드 플러터 해석 결과, 약 85m/s의 풍속역에서 대칭 2차 수평모드의 분기로 플러터가 발현하였으며, 이는 본 교량의 플러터 조사풍속인 72.1m/s를 상회하는 결과이다.

3) 공력탄성 에너지 개념에 기초하여 대칭 2차 수평모드의 플러터 유형을 검토한 결과, 비정상 공기력 계수중 Stiffness term에 의한 에너지가 불안정화 효과를 유발하는 Stiffness-driven flutter 타입인 것을 확인하였다.

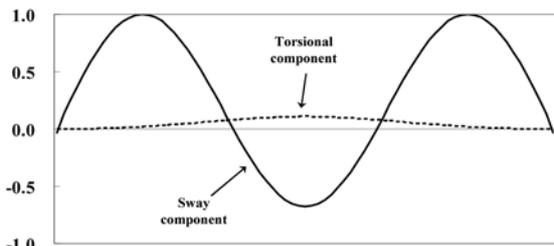
4) 대칭 2차 수평모드의 플러터 발현에 지배적인 비정상 공기력 계수를 검토한 결과, H_3^* 와 A_1^* 에 의한 에너지 성분이 exciting의 효과, H_1^* 및 A_2^* 에 의한 에너지 성분이 damping 효과를 유발하는 것으로 확인되었다.

5) 대칭 2차 수평 모드가 플러터 발현모드이지만, 그 플러터의 발현에 기여하는 가장 큰 역할은, 대칭 1차 및 2차 연직모드와 대칭 1차 비틀림 모드간의 연성효과인 것으로 판단된다.

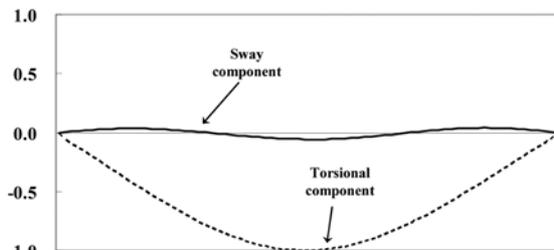
6) 향후 과제로서, 2차원 보강형 단면에 대한 강제진동실험을 실시하여 실제의 비정상 공기력 계수를 추출하고, 이를 다자유도/다중모드 플러터 해석에 적용하여 보다 엄밀한 플러터 거동을 파악해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어서 많은 도움과 조언을 주신 (주)티이솔루션의 김윤석 박사님과 김재민 대리님, 또한, (주)유신코퍼레이션의 신상훈 이사님과 백도준 차장님께 깊이 감사드립니다.



(a) 7th mode (Sym. 2nd Sway Mode)



(b) 19th mode (Sym. 1st Torsional Mode)

그림 19. 주요 고유진동 모드의 형상

□ : Energy by Stiffness Term (40 modes 전체의 기여분)
 ○ : Energy by Stiffness Term (40modes중 Sym. V1, V2, T1의 기여분)
 ◇ : Energy by Stiffness Term (40modes중 Sym. V1, V2, S2의 기여분)
 — : Total Energy (Sym. 2nd Sway Mode: Sym S2)

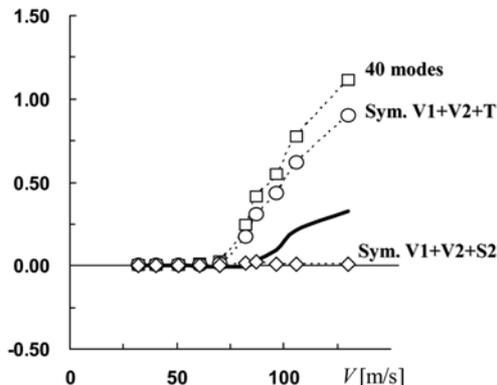


그림 20. 강성 비례항 에너지 성분에 대한 각 모드조합의 기여

참고문헌

1. Miyata, T. Yamada, H., and Kazama, K. "Discussion on aeroelastic detail and control in flutter occurrences of long-span bridges", J. Wind Eng. And Industrial Aerodynamics, No. 69-71, pp. 839-849, 1997.
2. 김기남, M. Matsumoto, 최동호, 박종화, 서주원, "초장대 현수교의 연성플러터 특성 및 안정화에 관한 연구", 대한토목학회 구조분야 합동 학술발표회 논문집, pp. 15-25, 2008.7.
3. 울산하버브릿지 주식회사, "울산대교 및 접속도로 민간제안 사업 구조계산서-1", 2008.2.
4. 한국도로교통협회, "도로교설계기준", 기문당, 2005.
5. 대한토목학회, "케이블 강교량 설계지침", 2006.
6. 日本道路協, "道路橋耐風設計便", 1991.
7. Miyata, T. and Yamada, H. "Coupled flutter estimate of a suspension bridge", J. Wind Eng. And Industrial Aerodynamics, No. 37, pp.485-492, 1997.
8. Theodorsen, Th., "General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter", J. National Advisory Committee for Aeronautics, Report No. 496, 1935.
9. Simiu, E. and Scanlan, R.H., "Wind effects on structures - 3rd edition", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
10. Katsuchi, H., Jones, N. P., Scanlan, R. H. and Akiyama, H., "A Study of mode coupling in flutter and buffeting of the Akashi Kaikyo Bridge", J. Struc. Mech. Earthquake Eng., JSCE, No. 598/-44, pp.21-36, 1998.
11. 岩本政己, 藤野陽三, 長井正嗣, "3次元有限要素モデルによる長大斜張橋のフラッター解析," 土木48回年次術講演, pp.834-835, 1994.
12. Agar, T.T.A., "Aerodynamic flutter analysis of suspension bridges by a modal technique", Engineering Structures, Vol. 11, pp.187-199, 1989.
13. Tanaka, H., Yamamura, N., and Sharaishi, N., "Multi-mode flutter analysis and two & three dimensional model tests on bridges with non-analogous modal shapes", J. Struc. Mech. Earthquake Eng., JSCE, No. 471/-24, pp.35-46, 1993.