

# 3차원 케이블 및 내풍향상형 보강거더를 적용한 보행현수교의 설계

구기정<sup>1\*</sup> · 안정균<sup>2</sup> · 신상훈<sup>3</sup> · 김호경<sup>4</sup>

<sup>1</sup>이사, (주)케이블브릿지, 교량설계팀, <sup>2</sup>대리, (주)케이블브릿지, 교량설계팀,

<sup>3</sup>대표이사, (주)케이블브릿지, <sup>4</sup>교수, 서울대학교, 건설환경공학부

## Design of Pedestrian Suspension Bridge with 3-Dimensional Cable and Wind Resistant Stiffened Girder

Koo, Gi Jung<sup>1\*</sup>, An, Jeong Kyoon<sup>2</sup>, Shin, Sang Hun<sup>3</sup>, Kim, Ho Kyung<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Director, Bridge Design Team, CABLEBRIDGE Co., Ltd., Seoul, 07806, Korea

<sup>2</sup>Assistant Manager, Bridge Design Team, CABLEBRIDGE Co., Ltd., Seoul, 07806, Korea

<sup>3</sup>CEO, CABLEBRIDGE Co., Ltd., Seoul, 07806, Korea

<sup>4</sup>POSCO Chair Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

**Abstract** - The 404 m long 404 SkyBridge, installed in Ganhyeon tourist district in Wonju-si, Gangwon-do, is renowned as the longest pedestrian suspension bridge in Korea. Considering the structural characteristic of the 404 SkyBridge which is classified as a special slender bridge located 100 m above the ground level, requires an understanding of aerodynamic wind behavior. As a part of the solution to achieve aerodynamics, a parametric study which considered variables including; the vertical, lateral and angular displacement of the girder, and the length and tension of the cable, was conducted to derive the optimum three-dimensional orientation of the main cable. A truss-type wind-resistant stiffened girder was developed to enhance aerodynamic performance. Wind tunnel test was performed to analyze the vertical and torsional response of the girder under uniform and turbulent flows. In addition, the buffeting behavior of the girder under a high speed wind was evaluated.

**Keywords** - 404 SkyBridge, Pedestrian suspension bridge, Three-dimension, Wind-resistant stiffened girder, Wind tunnel test

### 1. 서론

현재 강원도 원주시는 지역을 대표하는 관광명소인 간현유원지 관광활성화 계획에 따라 외부 관광객을 유인할 수 있는 다양한 관광 콘텐츠 사업이 추진 중에 있다. 사업 구간 내에는 케이블카, 미디어파사드, 산악 잔도길, 산악 에스컬레이터, 전망대 및 보행현수교 등 다양한 시설계획이 수립<sup>[1]</sup>되어 있으며 이를 통해 간현유원지를 방문하는 관광객들에게 색다른 볼거리와 체험공간을 제공하고 있다.

이 중에서 3차원 보행현수교인 소금산 울릉다리(404

SkyBridge)는 앞서 개통되어 문화체육관광부와 한국관광공사가 선정한 한국관광 100선(2019~2020년)<sup>[2]</sup>에 소개될 만큼 많은 인기를 누렸던 무주탑 출렁다리 형태의 기존 소금산 울릉다리( $L = 200$  m)에 비해 총연장 404 m로 약 2배 이상 길게 계획되었다<sup>[3]</sup>. 소금산 등산코스 정비계획에 따라 기존 소금산 급경사부에 설치되어 있던 404개의 철계단을 철거하고 새로운 랜드마크로서의 상징성을 위해 설치된 소금산 울릉다리는 소금산의 대표 명소로 손꼽히던 기존 철계단의 상징성을 교량 연장으로 표현하여 계획된 2022년 현재 국내 최장 보행현수교이다.

교량의 설치 위치는 Fig. 1과 같이 지표고도 약 100 m 상공이고 주탑간 거리는 404 m이며, 주탑 및 주케이블 정착을 위한 앵커리지 구조체를 설치할 수 있는 위치는 시·종점부로 제약되므로 이러한 지형적 한계를 극복하기 위해서는 장경간 교량 계획이 필요하다. 또한, 간현유원지만의 특색있는 랜드마크를 위해 기존에 설치되어 있던 소금산 울릉다리와 차별화 및 상징성을 갖는 교량 형식이 요구된다.

Note.-Discussion open until April 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 20, 2022; revised on September 05, 2022; approved on September 05, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-6341-5123 Fax. +82-2-369-7203

E-mail. kgj1977@cablebridge.com

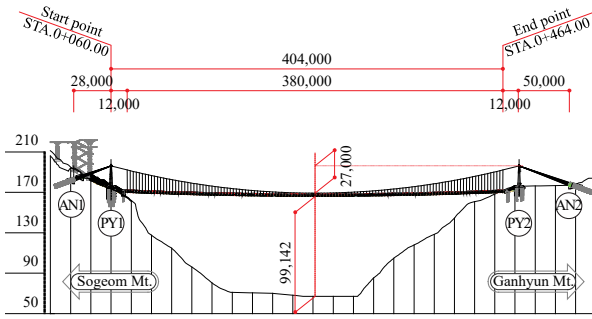


Fig. 1. Bridge plan (404 SkyBridge)

이에 따라, 발주기관 및 관계기관의 요구조건과 지형적 조건을 만족시키는 장경간 현수교 계획으로 계곡부 내에 주탑 설치를 원천 배제함으로써 고교각 설치에 따른 불합리성을 제거하고 이용자의 보행동선을 고려한 시·종점부 위치 선정, 주탑 및 앵커리지 배치로 시공성과 환경성을 향상시키는 최적화된 국내 최장 산악형 보행현수교 계획이 수립되었다.

본 연구에서는 국내 최장 경간으로 계획되고 지표고도가 높아 내풍안정성 확보가 요구되며 구조 특성상 세장한 특수교량으로 분류되는 보행현수교의 공기역학적 내풍 특성을 해결하기 위해, 3차원 케이블의 형상변화에 따른 거동 특성을 검토하여 정적하중 및 풍하중에 대한 최적화된 형상을 결정하고, 내풍성능 향상을 위해 개발된 내풍향상형 보강거더의 풍동실험결과를 분석하여 3차원 케이블 및 내풍향상형 보강거더가 장경간 보행현수교의 내풍성능 향상에 기여하는 역할에 대해 확인하고자 한다.

## 2. 3차원 케이블

### 2.1 기존 윈드 케이블 시스템의 문제점

현수교 주케이블은 구조물에 재하되는 하중을 행어 케이블을 통해 앵커리지로 전달하는 주요 구조 요소로 주케이블의 장력은 케이블 일반정리에 의해 식 (1)과 같이 정의된다.

$$H = \frac{wL^2}{8f} \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 등분포하중,  $L$ 은 지간길이,  $f$ 는 케이블 새그를 의미하며 지간길이의 제곱으로 주케이블 장력이 크게 증가하므로 이를 감안한 구조계획이 선행되어야 한다. 또한,

산악환경에 설치되는 교량의 경우 가설여건을 감안하여 케이블의 인양중량을 고려한 단면 결정 및 시공 계획이 동시에 수반되어야 하며 본 교량과 같이 지표고도가 높아 풍하중의 영향이 지배적인 현수교의 경우 지형 및 고도에 따른 내풍안정성을 확보하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 교량의 내풍안정성을 확보하기 위해 기존의 보행현수교에서는 별도의 윈드 케이블을 설치하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 윈드 케이블을 설치하기 위해서는 정착을 위한 추가적인 앵커리지가 필요하며, 보강거더 하단에 설치되어 소정의 장력이 도입되어야만 제 기능이 가능한 윈드 케이블은 도입된 장력에 의한 중력방향 하향력과 추가된 윈드 케이블 자중에 의해 교량 전체의 고정하중 증가 요소로 작용하여 주케이블의 장력을 증가시키는 문제점이 있다. 또한, 보강거더 상단에 설치되어 고정하중에 대한 지지구조를 형성하는 주케이블과 달리 보강거더 하단에 설치되는 윈드 케이블은 풍하중 작용시 보강거더가 횡방향 변위에 저항하도록 초기 도입 장력을 결정하는 것이 쉽지 않고, 좌·우 윈드 케이블 정착 앵커리지 지지간격을 충분히 확보하여 3차원 배치가 되어야 제 기능이 가능하므로 정착 앵커리지 설치 공간을 위한 지형적 조건이 만족되지 못할 경우 내풍안정성 확보에 한계가 있다.

2019년 발생한 태풍의 이동경로에 위치했던 경상남도 통영에 시공 완료된 총연장 98 m 연대도~만지도 보행현수교의 경우 적절하지 못한 윈드 케이블 초기 장력 도입과 3차원 배치에 충분하지 않은 정착 앵커리지 설치 등 다양한 문제점들이 복합적으로 동반되어 Fig. 2와 같이 윈드 케이블이 설치되어 있음에도 불구하고 강풍에 대해 제 기능이 전혀 발휘되지 못해 비틀림플러터가 크게 발생되었고 이로 인해 교량 전체에 큰 변형이 유발된 사례가 있다.



Fig. 2. Yeondaedo-Manjido Pedestrian Bridge

따라서, 윈드 케이블 설계의 불확실성과 정착 앵커리지 설치 공간확보에 대한 지형적 제약사항 등의 문제점을 해소하기 위해 윈드 케이블 설치를 배제한 3차원 케이블을 계획하여 3차원 형상을 갖는 주케이블이 교량의 내풍안정성 확보에 유리한 구조인가에 대한 검토를 수행하였다. 3차원 케이블은 보강거더 하단에 3차원 형상으로 배치된 윈드 케이블을 주케이블로 동일하게 형상화하여 배치한 것으로 경사방향으로 배치되는 행어 케이블의 장력 분담 효과에 의해 풍하중에 의한 횡변위를 억제하는데 유리한 구조<sup>[4]</sup>이고, 일반적으로 사용되는 윈드 케이블보다 교량 전체구조 지지를 위해 고장력으로 구성된 주케이블이 풍하중에 저항하는 역할을 하므로 내풍안정성 확보에 유리한 장점이 있다. 또한, 윈드 케이블 정착을 위한 별도의 앵커리지를 설치하지 않아도 되므로 효율적인 현수교 계획이 가능하다.

## 2.2 3차원 케이블 적용사례

보행현수교 중 3차원 케이블을 적용한 국내외 사례는 흔치 않다. Fig. 3와 같이 영화 <아바타>가 촬영되어 아바타 산맥이라고도 불리는 중국 후난성 장자제(张家界)시 두 계곡을 연결하기 위해 2016년 6월 완공된 장자제 그랜드 캐년 유리다리는 국제적으로 유명한 건축가이자 시인인 H. Dotan에 의해 설계된 대표적인 3차원 케이블 보행현수교이다.



Fig. 3. Zhangjiajie Grand Canyon Glass Bridge (China)

지표고도 약 300 m 상공에 설치되었으며 총연장 385 m (주탑기준 430 m), 교량폭원 6 m, 케이블을 제외한 강재중량 2,200 ton으로 그 규모에서 압도적이며, 바닥판 전면이 강화유리로 구성되어 한때 안전성 문제가 제기된 적도 있다. H. Dotan은 계곡에 위치한 본 교량의 내풍안정성 및 진동안전성을 확보하기 위해 중국 창사에 있는 후난대학교에서 풍동실험을 실시하였고, 강풍에 대한 구조 응답을 최

소화하기 위해 3차원 케이블 및 보강거더 측면 페어링 설치, 감쇠 및 진동 성능을 확보하기 위해 Fig. 4와 같이 댐핑 시스템을 적용하였다<sup>[5]</sup>.



Fig. 4. Damping and anti-vibration system (China)

3차원 케이블 형상의 보행현수교는 장자제 그랜드 캐년 유리다리 이전에 국내에서 2015년 세계 최초로 적용되어 준공 완료되었다. 전라북도 진안군 구봉산(해발 1,002 m)의 4봉과 5봉을 잇는 구봉산 구름다리는 Fig. 5와 같이 3차원 케이블 보행현수교로 설계되었으며 총연장 100 m로 개통 당시 국내 최장 경간 보행현수교로서 하루 6,000여 명의 방문객이 찾는 대표적인 관광명소로 각광받았던 교량이다<sup>[6]</sup>. 교량의 총연장은 100 m로 최근 개통되는 보행현수교에 비해 규모는 작은 편이나 윈드 케이블을 배제한 3차원 케이블 배치로 상징성과 비례미를 갖춘 산악지역에 최적화된 3차원 케이블 보행현수교이다<sup>[7]</sup>.



Fig. 5. Kubongsan Mountain Cloud Bridge (Korea)

## 2.3 3차원 케이블 형상결정

### 2.3.1 구조해석

3차원 케이블 형상 결정을 위한 보강거더 변위 및 케이블 장력 비교를 위해 Fig. 6와 같이 3차원 모델을 기초로 구조해석을 수행하였으며, 대변위 해석이 가능한 범용해석 프로그램인 Bentley사의 RM Bridge Enterprise를 이용하였다. 3차원 해석모델의 주케이블 및 행어 케이블은 케이블 요소를, 트러스 단면형상을 갖는 보강거더는 빔 요소로

모델링한 후 좌·우 행어 케이블 정착위치에 강제 연결하고, 탑정새들부는 스프링 요소로 모델링하여 하중 재하시 교량의 거동이 정확하게 구현되도록 하였다.

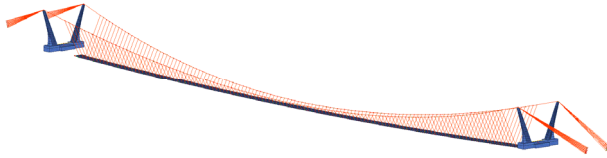


Fig. 6. Analysis modeling

### 2.3.2 파라메트릭 스텐디

3차원 케이블은 Fig. 7과 같이 교량의 중앙부와 주탑부 혹은 케이블 정착부 간 이격거리에 의해 그 형상이 결정된다. 결정된 3차원 형상은 보행현수교에 재하되는 활하중 또는 풍하중 등에 대해 보강거더의 거동과 케이블 장력을 변화시키는 주요인자로 작용하며, 3차원 케이블 형상에 따라 주케이블과 행어 케이블의 길이가 달라지므로 자재 효율성을 포함한 최적화된 선택이 요구된다. 따라서, 3차원 케이블 적용에 앞서 파라메트릭 스텐디를 통해 3차원 형상에 따른 특성을 파악하고 최적화된 3차원 케이블을 결정하였다.

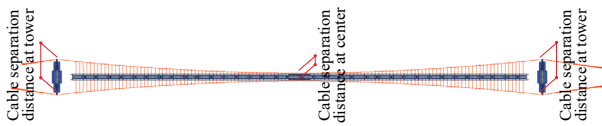


Fig. 7. Cable separation distance

구조 변수는 Fig. 8과 같이 교량 중앙부 새그점을 기준으로 시·종점 케이블 정착부의 폭을 변화시켜 V형 타입의 가로:세로비( $B:H$ ) = 1:1, 1:2, 1:3 3가지 타입과 일반적인 연직행어를 갖는 H형 타입, 보도폭원이 허용되는 범위 내에서 계획이 가능한 A형 타입을 추가 검토하여 3차원 케이블에 대한 특성을 확인하였다.  $B:H$ 는 주케이블 수평새그비에 영향을 주는 인자로 완성계시 보행현수교의 3차원 케이블 형상을 결정짓게 되고 풍하중 등의 횡방향 하중에 대해 윈드 케이블과 같은 변위 저항 요소로 기능하게 된다. 따라서, 45° 형상을 갖는 1:1을 기준으로  $B$ 는 고정하고 세로비  $H$ 의 높이를 변화시켜 수평새그비 변화에 따른 교량 거동을 분석하였다.

각각의 케이스는 Table 1과 같이 일관적인 결과 도출 및 주케이블 발생장력에 의한 케이블 직경 변화 배제를 위해 동일한 연직새그비(sag ratio = 1/15)로 계획한 후 고정하중(dead load, DC)에 대한 초기평형해석<sup>[8]</sup>을 수행하였고 도

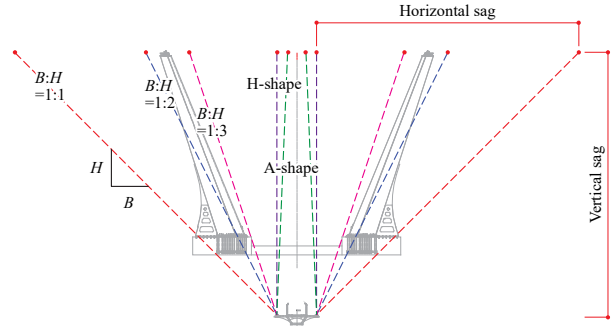


Fig. 8. Case study of various 3D cable orientation

Table 1. Parametric study case

Case	Type	$B:H$	Examination item
1	V-shape	1:1	· Load: dead load (DC), live load (PL), wind load (WS)
2		1:2	
3		1:3	
4	H-shape	-	· Girder displacement
5	A-shape	-	· Tension of cable
			· Length of cable

로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편<sup>[9]</sup>에 제시된 하중 산정 기준에 따라 계산된 정적 활하중(live load, PL) 및 풍하중(wind load, WS)을 재하하여 각각의 보강거더 변위, 케이블 장력 및 케이블 길이를 비교 검토하였다.

정적 활하중은 시간길이에 따라 감소하는 보도하중 재하 기준에 의해 산정된  $0.6/L = 1.485 \text{ kN/m}^2$ 을 재하하였고, 정적 풍하중은 대상 교량이 위치한 지역의 인근 기상대와 무인자동기상관측소 풍속자료를 활용한 풍환경 분석을 통해 얻어진 기본풍속  $V_{10} = 22.3 \text{ m/sec}$ 에 설계기준에 따른 지표조도 및 고도를 고려한 설계풍속  $V_d = 32.3 \text{ m/sec}$  산정 후 거스트계수 및 항력계수를 고려하여 계산된 풍하중 강도  $P_D = 2.303 \text{ kN/m}$ ,  $P_L = 0.251 \text{ kN/m}$  및  $P_M = 0.056 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$ 를 보강거더 전체구간에 재하하여 검토를 수행하였다.

정적 활하중 및 풍하중 재하시 보강거더에 발생하는 연직, 수평 및 회전변위에 대한 부호규약은 Fig. 9과 같다.

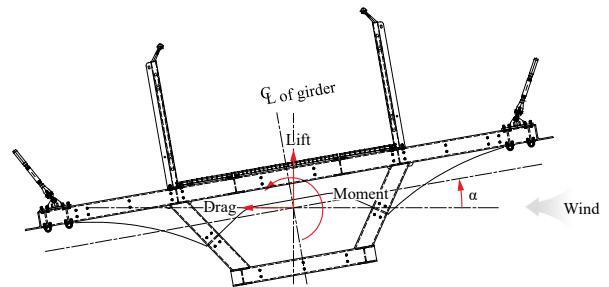


Fig. 9. Rules of signs

2.3.3 보강거더 변위 결과 분석

케이블 형상에 따라 정적 활하중 및 풍하중을 재하하였을 때 보강거더에 발생하는 연직, 수평 및 회전변위 검토결과는 Figs. 10-12와 같다. 여기서,  $x$ 축은 교량의 길이를  $y$ 축은 정적 활하중에 대한 연직변위 및 풍하중에 대한 수평변위, 회전변위를 나타낸다. 활하중과 같은 연직 하중에 대해서는 Fig. 10과 같이 교량 중앙부를 중심으로 좌우 100 m 부근에서는 Case 1의 연직변위가 약 17% 크게 발생하나, 연직새그비는 동일하게 가정되었으므로 교량 중앙부에 발생하는 최대 연직변위는 모든 case에서 유사한 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면, 풍하중과 같은 횡방향 하중에 대해서는 Fig. 11과 같이 V형 타입의 Case 1 - Case 3 이 H형 또는 A형 타입의 Case 4, Case 5에 비해 수평변위에 대한 제어 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, 케이블 형상이 45°로 구성되는 Case 1의 경우 기타 case에 비해 약 2배 이상 수평변위가 감소하므로 횡방향 하중에 대해서는 가장 효과적인 배치임을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 3차원 케이블에 의해 구성된 수평새그비가 윈드 케이블 기능을 수행한다는 가정조건에 부합하며 수평새그비가 증가할수록 효과가 증가할 수 있음을 확인시켜 준다.

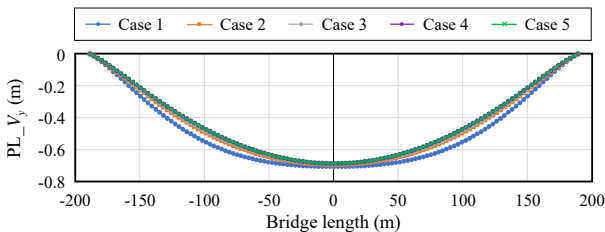


Fig. 10. Vertical displacement of girder ( $V_y$ )

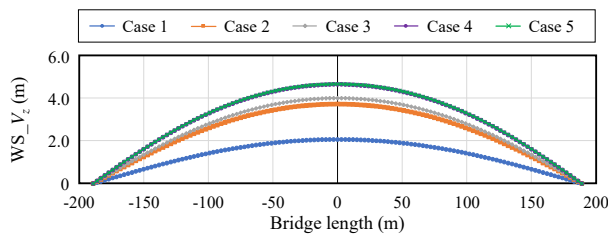


Fig. 11. Lateral displacement of girder ( $V_z$ )

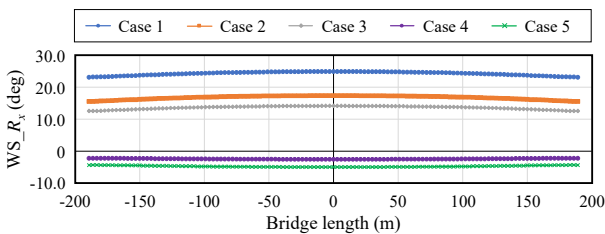


Fig. 12. Angular displacement of girder ( $R_x$ )

정적 풍하중에 의한 보강거더 회전변위에 의한 거동은 Fig. 12 및 Table 2와 같이 V형 타입과 H형·A형 타입의 경우 상이한 결과가 나타난다. V형 타입의 Case 1 - Case 3의 경우 하중재하 방향에 대해 보강거더가 위로 들리는 거동 (nose up)이 발생하며 그 회전각 역시 Case 1에서 Case 3으로 갈수록 점차 감소하는 추세이나, H형 및 A형 타입인 Case 4, Case 5의 경우 이와 반대로 보강거더가 아래로 내려가는 거동(nose down)이 발생한다. 이러한 결과가 교량의 동적거동을 포함한 내풍 특성을 모두 대변할 수는 없으나 보강거더의 nose up 현상은 V형 타입을 갖는 3차원 케이블 형상의 고유한 특성<sup>[10]</sup>임을 알 수 있으며 케이블 장력 결과 분석을 통해 그 이유를 확인할 수 있다.

Table 2. Rotation behavior of girder (scale factor = 2)

Case	Rotation shape	Behavior
1		Nose up
2		Nose up
3		Nose up
4		Nose down
5		Nose down

2.3.4 케이블 장력 결과 분석

주케이블 및 행어 케이블의 장력은 DC+PL, DC+WS 하중 조합을 통해 검토를 수행하였으며 검토결과는 Figs. 13-15 및 Figs. 16-18과 같다. 정적 활하중 조합에 의한 주케이블 장력은 Fig. 13과 같이 Case 2 - Case 5의 경우 비슷한 장

력 분포를 보이거나 Case 1의 경우 상대적으로 높은 장력 분포를 보이는 경향을 확인할 수 있다. 정적 풍하중 조합에 의한 풍상측과 풍하측 주케이블 장력 분포는 Figs. 14-15과 같이 V형 타입과 H형 또는 A형 타입이 서로 다른 경향을 나타낸다. 풍상측과 풍하측 주케이블 장력이 서로 유사한 H형 또는 A형 타입의 Case 4, Case 5에 비해 V형 타입의 Case 1 - Case 3의 경우 풍상측에 위치하는 주케이블 장력 분포가 풍하측 주케이블에 비해 상대적으로 높은 경향을 나타낸다.

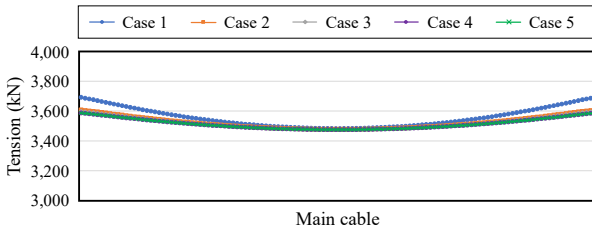


Fig. 13. Tension of main cable (DC+PL)

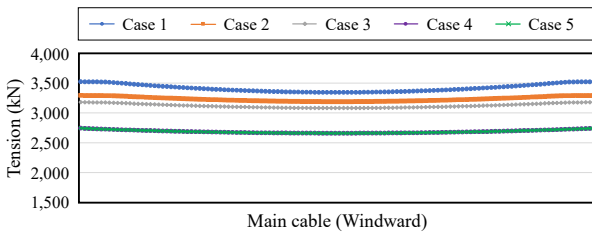


Fig. 14. Tension of main cable (DC+WS, Windward)

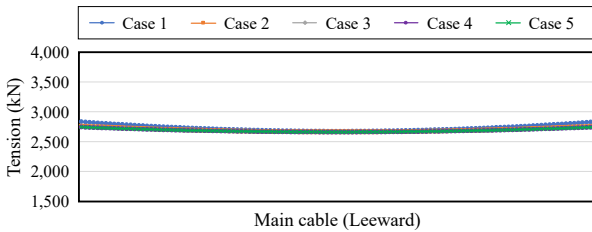
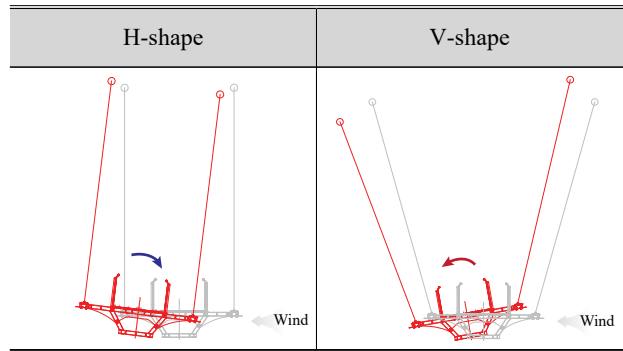


Fig. 15. Tension of main cable (DC+WS, Leeward)

즉, H형 및 A형 타입의 경우 Table 3와 같이 풍하중과 같은 횡방향 하중에 대해 좌·우 주케이블을 기점으로 보강 거더가 회전하는 진자운동(pendulum movement) 거동이 구현되는 반면 V형 타입의 3차원 케이블 형상은 풍상측 주케이블이 저항함으로써 풍하중에 대한 변위 억제 요소로 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 풍상측 및 풍하측의 장력 차이는 좌·우 주케이블의 위상차를 발생시키며 풍상측에 비해 작은 장력을 발생시키는 풍하측 케이블이 풍상측에 비해 하향함으로써 보강거더를 회전시키고 nose up 현상으로 구현되는 거동에 대한 설명을 가능하게 한다.

Table 3. Comparison of rotation behavior



행어 케이블에 발생하는 장력 분포 경향 역시 주케이블과 유사한 결과를 나타낸다. 정적 활하중 조합에 의한 행어 케이블의 장력은 Fig. 16과 같이 Case 1에서 상대적으로 높게 발생하며, 정적 풍하중 조합에 의한 결과 또한 Fig. 17 및 Fig. 18과 같이 V형 타입 Case 1 - Case 3의 경우 풍하측에 비해 풍상측에 위치하는 행어 케이블의 장력이 높은 분포를 나타낸다.

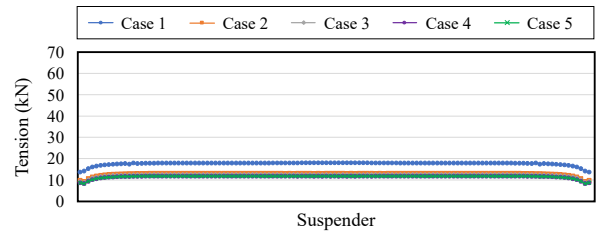


Fig. 16. Tension of suspender (DC+PL)

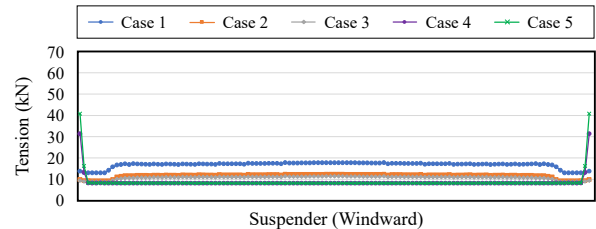


Fig. 17. Tension of suspender (DC+WS, Windward)

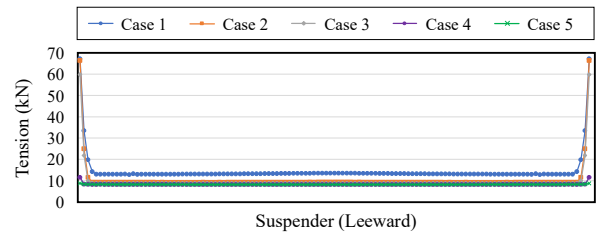


Fig. 18. Tension of suspender (DC+WS, Leeward)

### 2.3.5 케이블 길이 결과 분석

케이블 형상은 주케이블과 행어 케이블의 길이를 결정

짓는 요소이며 이는 곧 자재 효율성에 영향을 미친다. 초기 평형해석을 통한 각 case의 케이블 제작 길이를 비교해보면 Fig. 19 및 Fig. 20와 같이 3차원 형상을 갖는 동일한 V형 타입 중 Case 1의 경우 주케이블 및 행어 케이블의 길이가 Case 2 및 Case 3에 비해 상대적으로 길게 나타난다. 특히, 행어 케이블 길이의 경우 Case 3를 기준으로 약 4.3% 증가하는 Case 2에 비해 약 46.0% 증가하므로 3차원 케이블 형상에 의한 횡방향 변위 제어 효과는 우수하나 자재 효율성 측면에서는 다소 불리한 형상임을 확인할 수 있다.

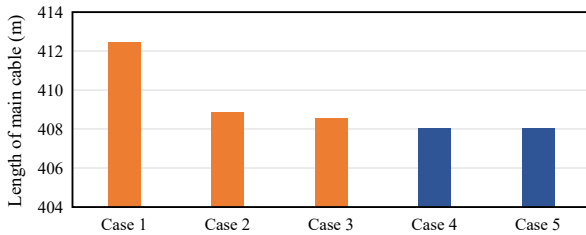


Fig. 19. Length of main cable

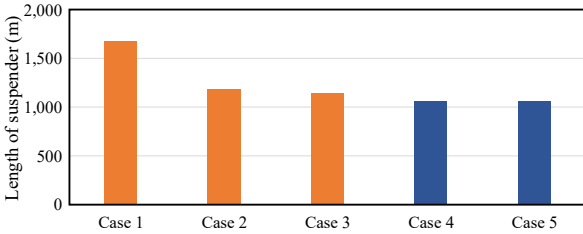


Fig. 20. Length of suspender

### 2.3.6 3차원 케이블의 결정

이상의 파라메트릭 스터디 결과를 통해 보강거더의 회전변위에 대해 부재단면의 응력수준에 문제가 없고, 풍상측에 위치한 주케이블 및 행어 케이블의 장력이 한계상태 이내의 범위에 존재한다면 별도의 윈드 케이블을 설치하지 않고도 V형 타입의 3차원 케이블 배치를 통해 횡방향 하중에 대해 효과적인 제어가 가능한 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 케이블 길이와 같은 자재 효율성까지 고려한다면 최적의 3차원 케이블 형상은 1:2에서 1:3의 B:H 범위를 알 수 있다.

이러한 결과들을 종합하여 Fig. 21과 같이 소금산 울릉다리의 3차원 케이블 형상은 V형 타입의 B:H = 1:2.35로 결정하였다. B:H = 1:2는 주탑 경사각도가 증가하여 주탑 하단부에 자중에 의한 휨모멘트가 크게 발생하고 주탑 간 좌·우 이격거리가 길어 독립주탑 상태에서 구조안전성을 확보하기 위해서는 가로보 설치게 필요하게 되며, B:H = 1:3의 경우 발주기관 및 관계기관에서 요구하는 주탑 내 교

량 통과 최소폭원 10 m를 만족시키지 못하는 문제점이 있다. 따라서, Fig. 22와 같이 3차원 케이블의 효율적인 하중 지지를 위해 경사방향으로 배치되는 주탑 내 가로보를 설치하지 않으며, 독립주탑 상태에서도 구조안전성을 확보할 수 있는 B:H = 1:2.35를 최종 결정하였다.



Fig. 21. Appearance of 3D cable system

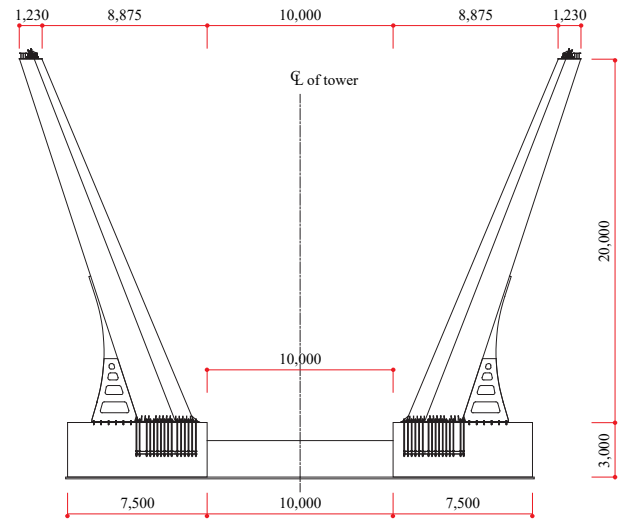


Fig. 22. V-shape tower

### 2.3.7 주케이블 및 행어 케이블의 설계

주케이블은 Fig. 23와 같이 직경 32 mm, 14 strands로 구성된 FLC(full locked coil)를 적용하였다. 14 strands 구성은 Table 4와 같이 7 strands 또는 19 strands에 비해 주케이블을 원형으로 성형하는 것이 쉽지 않고 케이블 밴드와 마찰 접촉면을 확보하는데 불리한 배열 구성이다. 따라서, 별도로 제작된 필러를 주케이블과 케이블 밴드 사이에 삽입하여 마찰력 확보 및 strand의 집속이 용이하도록 하였다. 또한, 케이블 밴드와 행어 케이블의 연결부는 3차원 대응이 가능하도록 고안된 2방향 힌지 구조를 적용하여 행어 케이블과 소켓정착부의 꺾임에 의한 2차 응력이 발생하지 않도록 계획하였다.

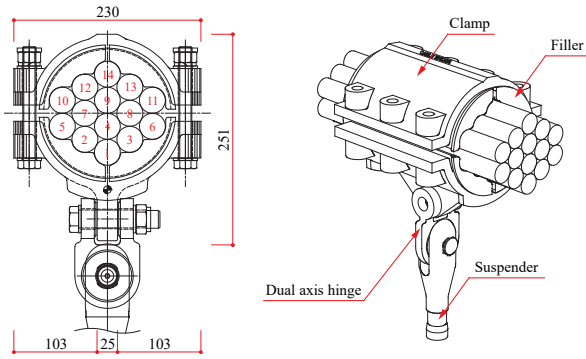


Fig. 23. Strand arrangement and cable band

Table 4. Cable strand arrangement (cross section by type)

7 strands	14 strands	19 strands

행어 케이블은 직경 16 mm, FLX(stainless steel FLC)를 적용하였다. FLX 케이블은 FLC 케이블과 동일한 아연 + 알루미늄 특수도금으로 별도의 피복구조 없이도 내식성이 우수한 장점이 있으며, 썸기형 Z타입의 표면구성으로 인해 외관이 미려하고 표면이 반짝이는 특징이 있다.

주케이블 및 행어 케이블의 설계는 도로교설계기준(한계상태설계법) - 케이블교량편<sup>[9]</sup>에 제시된 한계상태별 저항수정계수  $\Phi_{rm} = 0.71, 0.75$ 와 부재저항계수  $\Phi_{mem} = 0.74, 0.76$ 을 적용하여 Table 5와 같이 극한한계상태 및 극단상황한계상태에 대해 검토를 수행하였고, 각각의 한계상태에 대해 구조안전성을 확인하였다.

### 3. 내풍향상형 보강거더

#### 3.1 단면계획

현수교 보강거더는 요구되는 보행통로를 확보함과 동시

에 활하중에 의한 연직변위, 풍하중에 의한 수평변위에 효과적으로 저항하며 동시에 경제적이고 시공시 효율성을 감안한 계획이 필요하다. 또한, 구조 특성상 세장한 특수교량으로 분류되는 보행현수교의 경우 내풍안정성 확보가 가능한 단면 계획 수립이 무엇보다 중요하다<sup>[11]</sup>. 뿐만 아니라, 보행현수교는 도로현수교에서 흔히 적용되는 유선형 강박스 타입 보강거더를 적용하는데 사업비의 한계성이 있고, 크레인 및 인양장비의 접근이 어려운 산악 지형 가설여건을 감안, 인양중량 최소화를 고려한 단면 계획이 필요하다.

따라서, 소금산 올림다리는 내풍안정성, 구조안전성, 경제성 및 시공성 등을 고려하여 Fig. 24와 같이 내풍향상형 보강거더를 개발하여 적용하였다. 내풍향상형 보강거더는 트러스 타입의 격자구조로 재하되는 하중을 효과적으로 전달하도록 구성되어 있고, 수평면적 최소화가 가능하여 풍하중과 같은 횡방향 하중에 효율적인 대응이 가능하다.

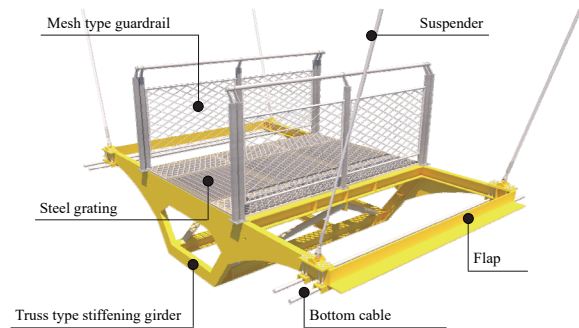


Fig. 24. Wind resistant stiffening girder

또한, Fig. 25와 같이 구조폭원을 5.0 m로 확장하여 케이블 도로현수교 수준의 변장비(L/B) 80 이하로 계획하고, 단면의 외측에는 flap을 설치하여 구조물에 유해한 진동을 일으키는 기류흐름을 제어할 수 있는 구조로 구성되어 있다. 바닥판과 난간은 원활한 공기투과와 수평면적 최소화를 위해 오픈형 스틸 그레이팅과 메쉬형 난간을 적용하여 내풍안정성 확보에 유리하며, 바닥판 하부에 4개의 추가적인 케이블(FLC,  $\Phi 32$  mm)을 배치하여 보강거더 가설시 인출을 위한 가이드 및 재하되는 하중에 보조적 역할이 가능하다.

Table 5. Cable tension by limit state

Cable	$\Phi_{rm}$	$\Phi_{mem}$	Ultimate limit state			Accidental limit state		
			$Q_{max}$ (kN)	$\Phi_{rm}R_r$ (kN)	Utilization ratio	$Q_{max}$ (kN)	$\Phi_{rm}R_r$ (kN)	Utilization ratio
Main cable	0.71	0.74	6,075	7,864	0.772	4,383	10,096	0.434
Suspender	0.75	0.76	33	91	0.360	37	114	0.328



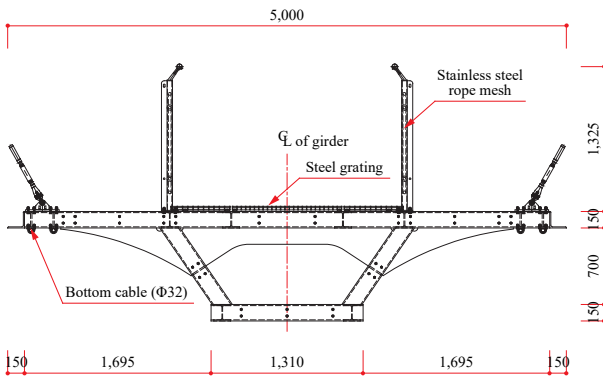


Fig. 25. Section of stiffening girder

### 3.2 풍동실험

계획된 내풍향상형 보강거더의 내풍안정성 확인과 진동 사용성 평가를 위해 서울대학교 산학협력단에서 2차원 풍동실험 및 공탄성 베퍼팅해석을 수행하였다<sup>[12]</sup>.

모형의 축척은 풍동의 크기와 상사 조건을 고려하여 1/20을 적용하였고 등류 및 난류 기류 조건을 위해 Table 6 및 Fig. 26와 같이 실험조건을 세팅한 후 와류진동 현상은 영각 -3° - +3°, 플러터 현상에 대해서는 영각 -5° - +5°로 변화시켜가며 교량의 진동평가를 실시하였다. 또한, 설계 풍속인 32.2 m/s에서 평균 풍하중에 의해 교량 중앙부에서 비틀 변위가 발생하는 현상을 고려하여 +16°의 초기 영각을 주고 진동 응답에 대해 추가 검토하였다.

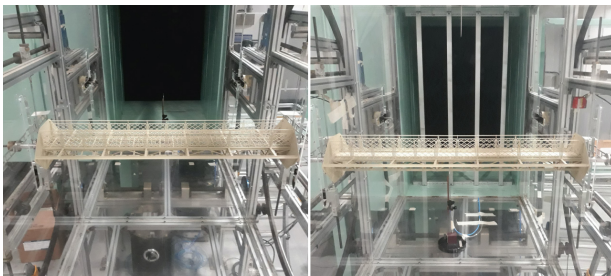


Fig. 26. Wind tunnel test settings

Table 6. Model specification (scale = 1/20)

Model	Width (m)	Mass (kg/m)	Mass moment of inertia (t·m <sup>2</sup> /m)	Frequency (Hz)		Frequency ratio
				Asymmetric vertical 1st	Asymmetric torsional 1st	
Actual	5.00	0.743	3.3810	0.224	0.482	2.148
Scaled	0.25	1.857	0.0211	1.833	3.939	2.148
Measured	0.25	1.858	0.0210	1.833	4.067	2.218
Error	0.0 %	0.1 %	-0.4 %	0.0 %	3.2 %	3.2 %

등류 및 난류의 기류 조건에서 저감쇠 조건에 대한 연직 및 비틀림 진동 응답 결과는 Fig. 27 및 Fig. 28과 같으며, 초기 영각에 의한 진동 응답은 이를 고려하지 않은 경우에 비해 크게 달라지지 않는 결과가 나타났다. 또한, 영각별 플러터 발현 풍속 평가 결과는 Table 7과 같으며 7개의 영각 조건에 대해 식 (2)와 같이 설계기준에서 제시된 안전계수 1.3<sup>[9]</sup>을 적용한 한계풍속 41.9 m/s를 상회하는 실교풍속 48.9 m/s까지 와류진동이나 플러터 발산 진동이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

$$V_{cr} > C_{SF} V_R \tag{2}$$

여기서,  $C_{SF}$ 는 안전계수,  $V_R$ 은 설계풍속을 나타낸다.

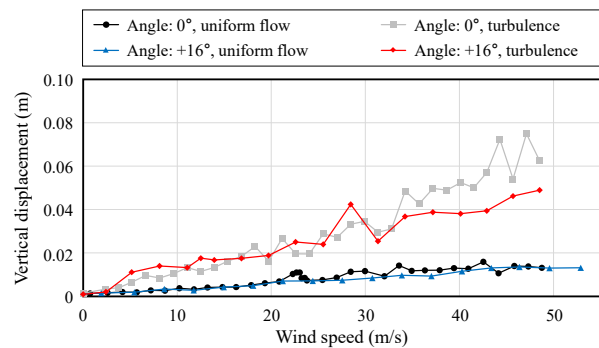


Fig. 27. Vibration response (vertical displacement)

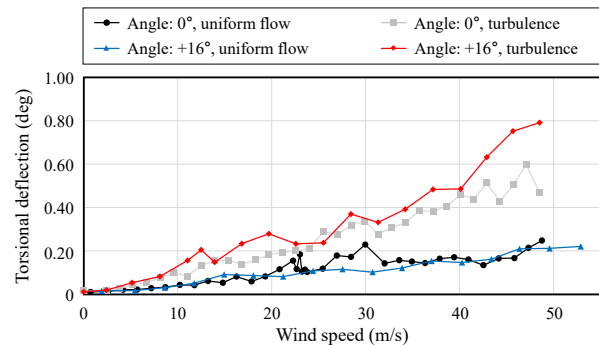


Fig. 28. Torsional response (torsional deflection)

**Table 7.** Flutter wind speed

Angle (degree)	Flutter limit (m/s)	Flutter limit graph
-5.0	12.6	
-3.0	36.0	
-1.5	41.9	
0.0	41.9	
1.5	41.9	
3.0	36.0	
5.0	12.6	

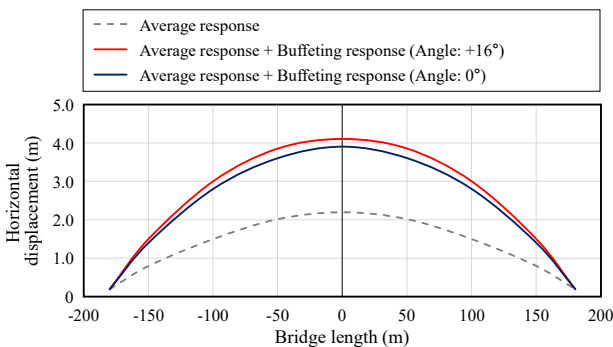
한편, 고풍속에서의 버페팅 거동 특성을 평가하기 위해 변동풍속 스펙트럼은 기류방향( $u$ )에 대해 식 (3)을, 기류수평방향( $v$ ) 및 연직방향( $w$ )에 대해서는 식 (4)의 von Karman 스펙트럼식<sup>[13]</sup>을 적용하여 설계풍속 32.2 m/s에서의 수평, 연직 및 비틀림 변위에 대한 응답을 검토하였다.

$$\frac{nS_u(z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nfL_u/z}{(1 + 70.8(fL_u/z)^2)^{5/6}} \quad (f = nz/U) \quad (3)$$

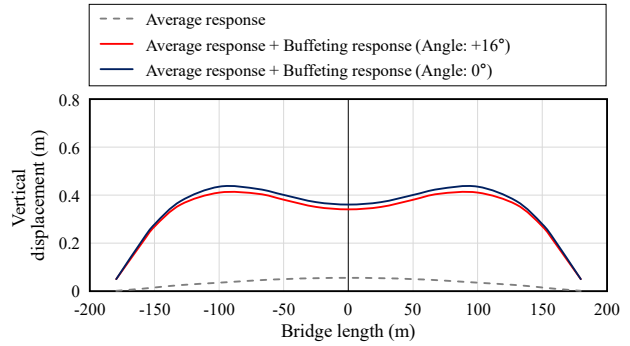
$$\frac{nS_i(z, n)}{\sigma_i^2} = \frac{4nfL_i/z(1 + 755.2(fL_i/z)^2)}{(1 + 283.2(fL_i/z)^2)^{11/6}} \quad (i = w, v) \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 주파수(Hz),  $z$ 는 평균풍속(m/s)이며,  $L_{u,i}$ (m)은 난류의 스케일로서 길이의 정수로 표현된다.

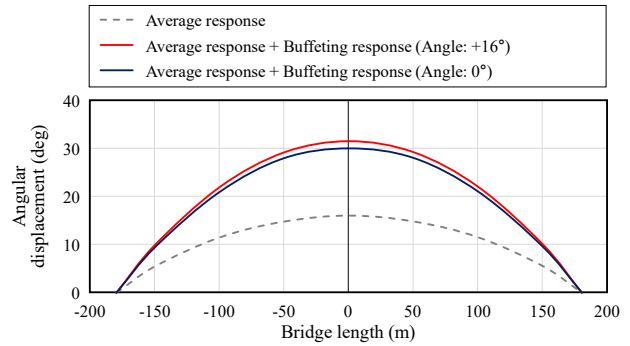
버페팅해석은 초기영각을 포함하여 식 (3) 및 식 (4)에 의해 정의된 변동풍속 스펙트럼에 의한 버페팅 응답과 기준고도 100 m에서 설계풍속 32.2 m/s에 해당하는 정적 풍하중 재하에 의한 평균 응답을 합하여 수평, 수직 및 비틀림 변위에 대한 응답<sup>[14]</sup>을 확인하였으며, 검토 결과 수평 및 비틀림 변위의 경우 Fig. 29 및 Fig. 31과 같이 중앙지점에서의 변위가 가장 크게 발생하였고, 연직변위는 Fig. 30와 같이 교량 지간의 1/4 지점에서 가장 큰 값을 나타냈다.



**Fig. 29.** Horizontal displacement response



**Fig. 30.** Vertical displacement response



**Fig. 31.** Torsional deflection response

수평 및 비틀림 변위의 경우 평균 풍하중 변위를 고려한 +16°의 초기영각에 대해 최댓값 기준으로 각각 5.6 %, 6.0 % 증가하였으나, 버페팅해석 결과 개발된 내풍향상형 보강거더가 고풍속에서의 발산진동인 플러터는 발생시키지 않는 것을 확인하였다.

이상의 풍동실험결과를 통해 개발된 내풍향상형 보강 거더가 교량의 내풍안정성 확보에 충분히 기여할 수 있는 단면임을 확인할 수 있으며, 지표고도가 높은 고풍속 환경의 장경간 보행현수교에 적용이 가능한 보강거더 단면임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 최장경간으로 계획되고 지표고도가 높아 내풍안정성이 중요한 요소로 작용하는 소금산울령다리의 공기역학적 내풍 특성을 해결하기 위해 적용한 3차원 케이블 및 내풍향상형 보강거더에 대해 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 3차원 케이블 형상 결정을 위해 보강거더의 변위, 케이블의 장력 및 케이블 길이를 고려하여 파라메트릭 스터디를 수행하였으며, 가로-세로비( $B:H$ ) 1:2

에서 1:3의 범위가 최적화된 형상임을 확인하였다. 가설식 독립주탑의 안전성을 고려하여 최종 3차원 형상은 1:2.35로 결정하였고 윈드 케이블 설치는 배제하였다.

- (2) 풍하중과 같은 횡방향 하중에 대한 효율적인 대응이 가능하도록 내풍향상형 보강거더를 계획하고 단면에 대한 풍동실험 및 버페팅해석을 수행하여 개발된 단면이 내풍안정성 확보에 유리한 구조임을 검증하였다.

### 참고문헌(References)

- [1] Wonju-si Government (2019) *Basic and Final Design Report on Comprehensive Tourism Development Project of Ganhyeon Park*, Korea (in Korean).
- [2] Ministry of Culture, Sports and Tourism (2018) *Press Release on 100 Must-Visit Tourist Spots in Korea*, Korea (in Korean).
- [3] Wonju-si Government (2017) *Final Design Report on Maintenance Project of Ganhyeon Green Refreshment Park Hiking Trail*, Korea (in Korean).
- [4] Kim, J.-H., Song, H.-G., Lee, M.-J., Kim, H.-T., Song, G.-R., Han, C.-Y., Hong, H.-S., Back, D.-J., Lim, S.-M., Kim, Y.-P., Kim, H.-C., and Jo, Y.-J. (2021) Yeosu Hwatae~Baegya Road Construction (Package No.1) Planning and Design of Hwatae-Baekya 1st (Arch Bridge), 2nd Bridge (Suspension Bridge), *Magazine of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.3, pp.55-63 (in Korean).
- [5] Dotan, H. (2016) Zhangjiajie Grand Canyon Glass Bridge, *Challenging Glass 5 (Proceedings of the Conference on Architectural and Structural Applications)*, Ghent University, Belgium.
- [6] Shin, S.H., Koo, G.J., Kim, Y.U., Lee, C.A., and Lee, H.C. (1996) The Planning and Design of 3-D Towerless Pedestrian Suspension Bridge with Under-Curved Girder in a Mountainous Area, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.133-134 (in Korean).
- [7] Shin, S.-H., Lee, E.-T., Kang, S.-I., and Lee, S.-H. (2016) Development of Pedestrian Suspension Bridge at Mountain, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.15-24 (in Korean).
- [8] Kim, M., and Kim, M.Y. (2010) Initial Shape Analysis of Suspension Bridge System Under Dead Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.511-521 (in Korean).
- [9] Korean Institute of Bridge and Structural Engineering, and Korea Bridge Design & Engineering Research Center (2018) *Commentary on Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design) for Cable-Supported Bridges*, Korea (in Korean).
- [10] Kim, J.-G., Kim, S., and Kim, H.-K. (2022) Non-linear Behavior According to Wind Speed Change of Long-Span Three-Dimensional Main Cable Suspended Footbridge, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.7-8 (in Korean).
- [11] Jeong, H.G., Lee, S.H., Shin, S.H., Koo, G.J., and Kim, B.H., Kwon, S.-D. (2017) Experimental Study on the Aerodynamic Stability of Pedestrian Suspension Bridge, *Proceedings of the KSCE 2017 Convention*, Korean Society of Civil Engineers, pp.59-60 (in Korean).
- [12] Seoul National University R&DB Foundation (2019) *A Study of Two-Dimensional Wind Tunnel Test and Buffeting Analysis of the Pedestrian Suspension Bridge in Ganhyeon Park: The Final Report*, Korea (in Korean).
- [13] von Kármán, K. (1948) Progress in the Statistical Theory of Turbulence, *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, National Academy of Science, Vol.34, No.11, pp.530-539.
- [14] Lee, H. (2006) *Estimation of Wind-Induced Response of a Suspension Bridge According to Erection Sequences*, Master's Thesis, Mokpo National University, Korea (in Korean).

**요약** : 소금산 올령다리는 지표고도 약 100 m 상공에 위치하는 총연장 404 m의 국내 최장 보행현수교로 산악지형이라는 가설여건과 공기역학적 내풍 특성을 고려하기 위해 다양한 구조계획이 적용되었다. 최적화된 3차원 케이블 형상 결정을 위해 계획단계에서 파라메트릭 스터디를 수행하여 효율적인 케이블 각도를 결정하였고, 내풍향상형 보강거더를 적용하여 내풍안정성을 확보하였으며 2차원 풍동실험 및 버페팅해석을 통해 이를 검증하였다.

**핵심용어** : 소금산 올령다리, 보행현수교, 3차원, 내풍향상형 보강거더, 풍동실험