

## 장경간 보도교의 내풍안정성에 관한 연구

이승호\* · 정희갑\*\* · 권순덕\*\*\*

Lee, Seungho\* · Jeong, Houigab\*\* · Kwon, Soon-Duck\*\*\*

### A Study on the Aerodynamic Stability of Long Span Pedestrian Bridges

#### ABSTRACT

In recent years, a number of long span cable-stayed pedestrian bridges have been constructed to the advantages of relatively low cost construction and the many tourists visiting. However, most of the pedestrian bridges are located in parks or sightseeing areas, so they are conducted without proper review and design process. It is necessary to review the aerodynamic stability of the long span cable-stayed pedestrian bridge, and it should be designed in detail from various points of view rather than the road bridge. In this study, we investigated the wind characteristics of the cable-stayed pedestrian bridge, and the empirical equations for the relationship between the main span length and the fundamental natural frequencies are presented for future use. In addition, the flutter wind speed limit of the flat plate deck pedestrian bridge calculated using the Selberg's equation is also presented. The final aerodynamic bridge section which satisfied the aerodynamic stability was found from open grating method. The proposed method can be used for long span cable-stayed pedestrian bridge in the future.

**Key words :** Pedestrian bridge, Aerodynamic stability, Wind tunnel test, Open grating

#### 초 록

최근 지자체들이 경쟁하듯이 건설하고 있는 장경간 케이블 보도교(일명 출렁다리)는 공원 시설로 인식되어 제대로 된 검토와 설계 없이 진행되는 경우가 있다. 케이블 보도교는 기존 도로 현수교보다 훨씬 유연한 특성으로 인하여 내풍안정성 확보는 반드시 필요하며, 오히려 더 기존의 도로교보다 다양한 관점에서 상세하게 검토되어야 한다. 이에 본 연구에서는 케이블 보도교의 내풍 특성을 파악하고, 고유진동수를 추정할 수 있는 추정식을 제시하였다. 또한 경간장에 따른 플러터 풍속 추정에 대한 추세를 제시하여 평판 거더 보도교의 내풍안정성 확보의 어려움과 그 한계를 제시하였다. 그리고 풍동실험을 통해 바닥 데크 그레이팅 적용 비율 변화를 통해 내풍안정성을 만족하는 단면을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 향후 세장 케이블 보도교 계획시 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**검색어 :** 보도교, 내풍안정성, 풍동실험, 그레이팅

## 1. 서론

최근 들어 국내외에서 다양한 형식의 보도교가 계획되고 건설되고 있다. 전국의 산과 강, 섬 등에 설치된 ‘출렁다리’가 관광 핫플레이스로 부상하면서 지역의 랜드마크 및 관광산업의 일환으로 지자체들이 경쟁하듯이 장경간의 유연한 구조를 가지는 보도교를 다수 건설하고 있다. 또한 최고 및 최장이라는 타이틀을 획득하기 위해서 보다 긴 경간장을 가지는 보도교의 건설이 계획되어 있다. 하지만 이러한

\* 정희원 · 전북대학교 KOCED 대형풍동실험센터 책임연구원 (Chonbuk National University · shlee.wind@gmail.com)

\*\* 정희원 · 전북대학교 토목공학과 박사후과정 (Chonbuk National University · jeonghg@jbnu.ac.kr)

\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Chonbuk National University · sdkwon@jbnu.ac.kr)

Received January 8, 2019/ revised February 22, 2019/ accepted February 27, 2019

출렁다리의 경우 도로법의 적용을 받지 않는다는 이유로 ‘시설물 안전 및 유지관리에 관한 특별법’과 ‘재난 및 안전관리 기본법’ 관리 대상에서도 제외되어 있다. 보도교에 대한 용어 자체도 “흔들다리”, “출렁다리”, “무주탑 현수교”, “보도 현수교(사장교)”, “스트레스 리본교” 등 다양하게 혼재되어 사용되고 있다.

케이블 교량의 강성(혹은 유연성)을 표현하기 위한 지표로 변장비(주경간장/교폭)를 자주 사용한다(Kwon, 2010). 현재 국내에서 건설된 주요 출렁다리를 보면(Table 1), 변장비가 최대 159에 이른다. 이는 이순신대교의 변장비 53보다 월등히 높고, 현재 계획 중인 주경간장 3,300 m인 이탈리아 메시나교의 변장비 64보다 2.5배 크다. 이를 볼 때 케이블 보도교는 유사한 도로교보다 훨씬 유연한 구조임을 알 수 있다.

일반 도로교와는 달리 케이블 보도교는 상당히 출렁거리어서 보행자로 하여금 어느 정도 스틸을 즐기도록 설계하고 있다. 장경간 출렁다리의 경우에 관광객에 의한 보도하중과 바람에 의한 풍하중이 지배적인 하중이 된다(Jeong, 2017; Lee, 2018). 하지만 설계시에 도로법의 적용을 받지 않고, 설계 및 설치에 관한 규정이 전무하다

보니 이러한 주요 하중에 대한 최소한의 검토도 이루어지지 않고 설계되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다.

Fig. 1에서 보듯이 최근 태풍 콩레이 내습시 진동이 발생한 통영 연대-만지도 보도교의 동영상(youtube, 2018)을 보면, 미국 타코마 내로우교의 붕괴를 유발한 플러터와 동일한 현상으로 판단된다. 당시 통영 기상대의 풍속 자료를 분석한 결과, 약 20 m/s 정도의 낮은 풍속 조건에서 플러터가 발생하였다. 그리고 하단부에 설치된 내풍 케이블이 장력이 없는 것처럼 자유롭게 흔들리는 것을 보면 소기의 역할을 수행하지 못하고 있다. 이러한 점을 고려하면 상기 보도교는 공기역학적 불안정 현상을 방지하기 위한 내풍설계가 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

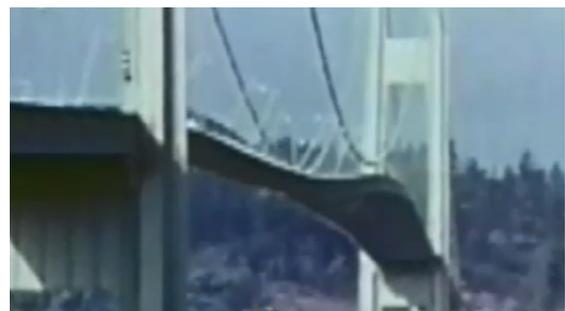
일부 보도교의 경우에 발주처와 설계자의 이해 부족 및 예산상의 문제로 인하여 엄밀한 내풍안정성 검토가 수행되지 않은 경우가 있다. 도로교의 경우 다양한 공기역학적 제진 방법을 통해 내풍안정성을 확보하고 있다(Gimsing,2009; Simiu and Miyata,2006). 하지만 현재 건설되고 있는 대부분의 출렁다리 보도교의 경우에 기존의 공기역학적 방법을 적용할 수 없는 제한된 단면 형식을

Table 1. Domestic Major Cable Suspended Pedestrian Bridges

Bridge name	Complete year	Main span (L)	Deck width (W)	Aspect ratio (L/W)
Gaudo Bridge	2011	70 m	2.6 m	27
Yeondai-Manjido Bridge	2015	98 m	2.0 m	49
Duga Bridge	2012	125 m	3.0 m	42
Seommok-gwaneumdo Bridge	2011	140 m	3.0 m	47
Tapjeong lake Bridge	2018	143 m	2.2 m	65
Yeonhwado-udo Bridge	2018	170 m	2.0 m	85
Gamak mountain Bridge	2016	150 m	1.5 m	100
Yedang reservoir Bridge	2018	201 m	2.0 m	101
Sogeum mountain Bridge	2018	200 m	1.5 m	133
Cheonjang lake Bridge	2017	207 m	1.5 m	138
Majang lake Bridge	2017	220 m	1.5 m	147
Seomjin river Bridge	2019	270 m	1.7 m	159



(a) Yeondai-Manjido Pedestrian Bridge



(b) Tacoma Narrow Bridge

Fig. 1. Flutter in Bridges

가지고 있다. 이로 인하여 하부 바닥판 그레이팅 이외에는 고려할 수 있는 공기역학적 제진 방법도 제한적이다. 이러한 바람에 의한 내풍안정성 확보는 보도교를 좁고 길게 건설하고자 하는 경우에 반드시 확보되어야 하는 필수적인 요소이다.

일반적으로 교량의 내풍안정성은 변장비에 반비례한다고 알려져 있으며, 최소한 이러한 관점에서 장경간 출렁다리의 내풍안정성 평가는 설계시에 반드시 수행되어야 한다. 아울러 출렁다리만의 내풍 특성을 충분히 고려하여 일반적인 보도교보다 오히려 더 상세하고 다양한 관점에서 검토되어야 한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 케이블 보도교의 전반적인 구조 특성을 파악하고, 내풍안정성을 향상시키기 위한 방법을 연구하였으며 그 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 보도교의 특성 분석

### 2.1 보도교의 구조적 특성

기본 계획시 보도교의 특성을 파악해야 합리적으로 제원을 설계할 수 있다. 보도교는 구조적 및 기능적 제약이 작아서 설계자의 의도에 따라 도로교에 비하여 다양한 형식과 디자인을 가질 수 있다. 보도교는 도로교와 유사한 수준의 박스 거더 형식부터 높은 산악지에 주로 설치하는 단순 목재 데크와 케이블을 조합한 출렁다리까지 다양하게 존재한다. 본 연구에서는 보도교의 특성을 파악하여 현재

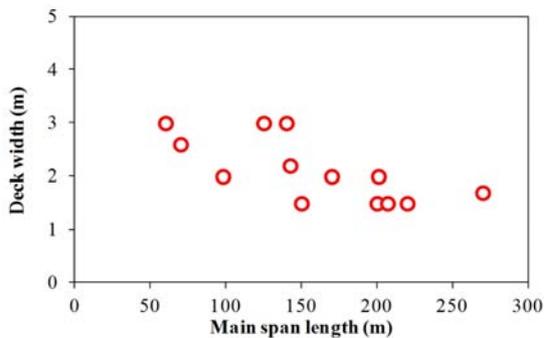


Fig. 2. Main Span Length Versus Deck Width

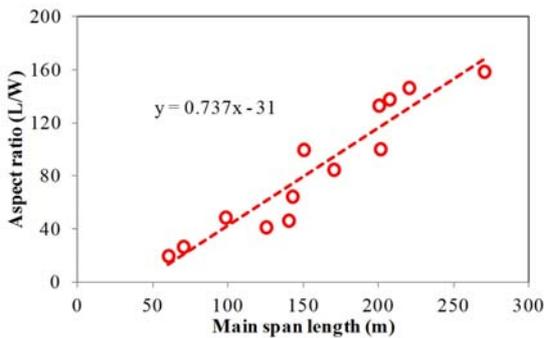


Fig. 3. Main Span Length Versus Aspect Ratio

국내 장경간 보도교에 주로 사용되는 목재 데크 채용시 설계의 한계를 도출하는데 도움을 주고자 한다. 이를 위하여 국내 건설된 주경간장 50 m 이상의 보도교의 제원을 수집하였다(Table 1).

Fig. 2에서는 Table 1의 보도교에 대한 주경간장과 교폭의 관계를 나타내었다. 주경간장 150 m 이하에서는 경간장이 증가함에 따라 교폭이 약간씩 줄어드는 경향을 보이고 있다. 하지만 주경간장 150 m 이상에서는 경간장과 교폭의 상관성은 없는 것으로 나타났다. 짧은 경간장의 보도교는 일반적으로 도로교와 유사한 강박스 등을 거더로 채용하고 있다. 하지만 긴 경간장의 보도교는 편편한 데크와 케이블로 구성된 단순한 구조체를 채용하고 있으므로 거더의 강성 기여는 거의 없고 케이블이 주구조체가 된다. 따라서 경간장이 길어지면 최소한의 통행 조건만을 부여하여 최소 폭인 1.5 m 정도로 보도교를 설계하는 경우가 많기에 주경간장과 교폭의 상관성이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 3에서는 주경간장과 변장비의 관계를 나타내었다. 도로교에서도 차선 수에 따라 교폭이 결정되는 일반적인 중단경간 교량과 달리 장경간 현수교에서는 교폭을 늘려서 내풍안정성을 향상시킨다. 대표적인 예가 Canakkale교와 Messina교로서 교폭이 각각 43 m와 51 m에 이른다. 하지만 장경간 보도교에서는 데크의 강성 기여가 거의 없으므로 데크폭 증가에 따른 구조적 이점은 별로 없어서 데크폭이 거의 일정하다. 따라서 Fig. 3에서 보듯이 장경간 보도교는 데크 폭이 거의 일정하므로 주경간과 변장비가 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다.

### 2.2 보도교의 고유진동수

일반적으로 교량의 플러터 발생 풍속은 고유진동수(특히 비틀림)와 거의 선형적인 비례 관계이므로 고유진동수를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 하지만 비선형 거동을 하는 케이블이 주부재인 보도교의 고유진동수를 산정하기 위해서는 엄밀한 구조해석이 필요하다. 따라서 기하학적 정보만 결정한 기본계획 단계에서 장경간 보도교의 타당성을 검토하기 위하여 대략적으로 고유진동수를 추정할 수 있는 방법이 있으면 유용할 것으로 판단된다.

Fig. 4에서는 보도교의 변장비와 최저차 고유진동수의 관계를 나타내었다. 여기서 변장비가 증가하여도 수직 진동수의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 경간장이 증가함에 따라 장력도 어느 정도 비례하여 늘어나는 관계로, 경간장과 장력의 함수인 고유진동수의 변화가 크지 않은 것으로 판단된다. 하지만 경간장이 늘어남에 따라 비틀림 최저차 고유진동수는 급격히 줄어들었다. 수집된 국내 장경간 보도교의 경우에 거더가 단순한 평판으로 되어 있어서 비틀림 강성에 거의 기여하지 못한다. 그리고 케이블의 폭이 고정된 상태에서는 케이블의 비틀림 강성이 변하지 않으므로 경간장이 늘어남에 따라 비틀림 고유진동수는 급격히 감소한다.

Fig. 5에서는 보도교의 주경간장과 최저차 고유진동수의 관계를 나타내었다. 그림의 추세선은 수집된 보도교의 설계치를 바탕으로 근사적으로 고유진동수를 추정할 수 있도록 제시하였다. 그림에서는 주경간과 최저차 고유진동수와 상관관계를 비교적 명확하게 확인할 수 있다. 경간장에 따른 수직 진동수의 변화는 크지 않으나 비틀림 진동수가 크게 줄어드는 이유는 교폭이 제한된 관계로 케이블이 비틀림 강성에 기여하는 정도가 일정하기 때문이다. 기존 설계치를 바탕으로 지수함수를 사용하여 주경간장과 고유진동수의 관계에 대한 추세선을 구하면 Eq. (1)과 같다. 이 때 경간장 170 m에 해당하는 유난히 높은 비틀림 진동수는 해석상의 오류일 가능성이 있어서 추세선을 구할 때 제외하였다.

$$f_v = 0.87 \times e^{-0.0029 \times L} \quad (1a)$$

$$f_t = 3.13 \times e^{-0.0061 \times L} \quad (1b)$$

여기서,  $f_v$ 와  $f_t$ 는 각각 수직 및 비틀림 최저차 고유진동수(Hz)이고,  $L$ 은 주경간장의 길이(m)이다. 향후 기본 계획시 장경간 보도교의 고유진동수를 추정하기 위해서 Eq. (1)을 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

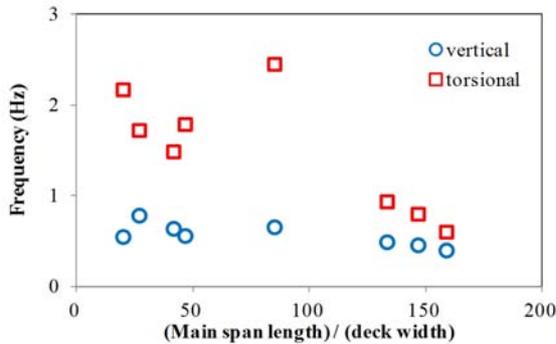


Fig. 4. Aspect Ratio Versus Natural Frequency

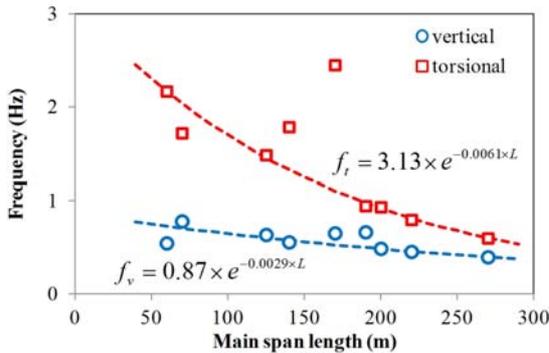


Fig. 5. Main Span Length Versus Natural Frequency

### 2.3 보도교의 한계 풍속

내풍안정성은 주형의 비틀림 강성과 상당히 밀접한 관련이 있고, 민감도 계수 분석 결과 비틀림 고유진동수와 플러터 풍속은 선형적인 비례 관계를 보이는 것으로 나타났다(Kwon, 2010). 따라서 주형의 강성을 키우면 내풍안정성에 유리하지만 출렁다리의 경우 제한된 폭의 평판 거더의 채택으로 기존의 도로교와 같은 방법으로 교폭 증가, 형고 증가, 강박스 두께 증가 등을 고려하는 방법은 매우 제한적이다. 또한 제한된 단면으로 인하여 기존의 공기역학적 개선 방법의 적용 또한 효과를 보기 어려운 상황이다. 이에 서론에서도 언급한 바와 같이 기본적으로 평판 거더를 가지는 보도교의 내풍안정성은 취약한 상황이며, 내풍안정성 확보에 대한 한계가 분명히 존재한다.

이에 본 연구에서는 평판 거더 장경간 보도교의 내풍안정성의 한계를 간접적으로 추정하기 위하여 유선형 단면의 경우 잘 맞다고 알려져 있는 Selberg의 근사식을 적용(Strommen, 2005)하여 장경간 보도교의 플러터 발생 풍속을 추정하여 보았다. Selberg 근사식에 고려한 고유진동수는 앞에서 제시한 추세선을 이용하여 경간장에 따른 수직과 비틀림 고유진동수이다. 나머지 주요 변수는 경간장이 200 m가 넘는 주요 보도교의 평균 단면 특성 값을 고려하여, 단면폭은 2 m, 질량과 질량관성모멘트는 각각 0.3 t/m와 0.3 t-m<sup>2</sup>/m로 가정하여 예상 한계치를 추정하였다. 주경간장에 따른 보도교의 플러터 발현풍속 추정 결과를 그레이팅을 적용하지 않은 일부 풍동실험 결과와 함께 비교하였고, 그 결과는 Fig. 6에 나타나있다. 분석 결과 주경간장이 140 m를 넘게 되면 플러터 발현풍속은 약 50 m/s 추정되며, 주경간장이 170 m가 넘게 되면 40 m/s 이상의 플러터 발현풍속 확보가 어려운 것으로 파악되었다. 본 연구에서 제시된 추세식을 이용하면 대상 교량의 풍동실험 필요 여부 및 스톱 케이블, 거더 단면 그레이팅 적용 등의 공기역학적 대책 수립 여부에 어느 정도 참고가 가능하다고 판단된다.

### 2.4 보도교의 내풍 특성

도로교 계획시에는 내풍안정성과 경제성을 동시에 만족하는

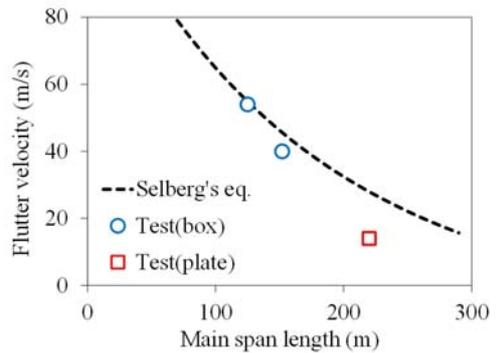


Fig. 6. Flutter Velocity of Pedestrian Suspension Bridge

최적 단면을 찾기 위해 다양한 실험과 해석을 수행한다. 일본의 Akashi Kaikyo교의 경우에도 싱글박스, 트윈박스, 트러스 등의 다양한 단면에 대한 풍동실험을 수행한 끝에 최종적으로 트러스 단면을 선택하였다(Miyata, 1992). 반면 최근 건설되는 장경간 케이블 보도교의 경우는 주변 경관과 잘 어울리며 자연 훼손을 최소화하여야 한다는 전제 조건으로 인하여, 사람 두 명이 동시에 지나갈 수 있는 최소한의 폭(1.5 m)만 고려한 설계를 수행하고 있다. 제한된 설계 조건의 한계를 극복하기 위해 다수의 케이블 배치나 난간 일체형 강계프레임 등을 통해서 전체 구조계의 강성을 키우고 있다. 하지만 전반적으로 난간과 데크를 포함한 거더가 역 II-형상으로 공기역학적 성능이 좋지 않다.

세장한 보도교의 경우 진동 모드가 2-3개의 진동 형상이 커플링 되어 동시에 나타나는 경우가 자주 발생한다. 이는 교량 단면을 통해 충분한 비틀 강성을 확보하지 못하는 케이블 보도교의 구조적인 특성으로 인한 결과이다. 도로교의 2차원 부분모형 풍동실험의 경우는 교량의 상부구조가 2차원성이 강하다는 전제하여 중앙부 대표 단면에 대하여 수직(vertical)과 비틀(torsional) 2개의 자유도로 지지하여 기본적인 공기역학적 특성을 파악하나, 세장한 케이블 보도교처럼 모드 형상이 커플링된 구조계의 경우는 2차원 부분모형 풍동실험에서 목표로 하는 대상 진동수에 대한 충분한 검토가 전제되어야 한다.

일반적으로 바람에 의해 교량에서 발생하는 진동현상에는 단면의 형상에 따라 발생하는 와류 방출주기와 교량의 고유 주기가 일치하여 발생하는 “와류진동(Vortex-induced vibration)”과 비정상공기력에 의해 발생하는 “플러터(Flutter)”, 바람의 변동성분이 강제 공기력으로 작용하여 발생하는 “버페팅(Buffeting)” 등이 있으며, 이들 현상을 분류하면 Fig. 7과 같다. 이러한 바람에 의한 교량의 진동 응답 중에 세장한 케이블 보도교의 경우 도로교에 비하여 교량 자체의 자중이 낮을 뿐만 아니라 세장한 특징으로 인하여 버페팅 응답의 경우 도로교에 비하여 훨씬 더 과도하게 나타나게 된다. 또한 바람에 의한 유해진동 발생시 도로교의 경우 유선형 단면, 트윈 박스 및 트리플 박스 등의 단면 채택과 fairing,

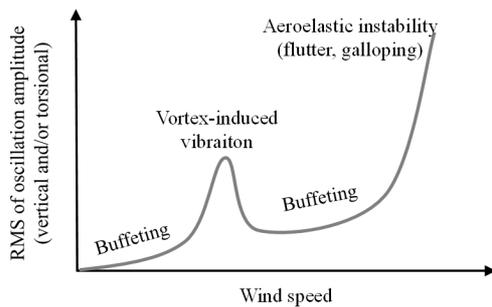


Fig. 7. A Generic Graph of the Relative Amplitudes of the Various Flow-Induced Vibrations

spoiler, flap, baffle plate 등의 부가적인 공기역학적 제진 방법을 통해 내풍안정성을 확보하고 있다. 반면 세장한 보도교에 사용된 단면의 형상 제약으로 인해 이러한 공기역학적 제진 방법을 고려했기 어렵다는 특징이 있다.

일반적인 도로교와 달리 상대적으로 좁은 교폭으로 설계되는 세장한 케이블 보도교가 가지는 공기역학적 특징을 요약하면 다음과 같다. 먼저 바람에 의한 유해한 진동발생시 단면 채택에 제약으로 인해 페어링과 같은 기존의 잘 알려진 공기역학적 제진 방법의 적용이 어렵고, 모드 형상이 커플링 되어 2차원 부분모형 실험시 고려하는 목표 고유진동수(특히 비틀진동수)에 대한 보다 상세한 검토가 필요하다는 점, 그리고 가볍고 유연한 특징으로 인하여 일반적인 케이블 교량에 비하여 버페팅 응답이 상당히 크다는 점이다. 큰 변장비를 가지는 세장한 케이블 보도교 내풍 설계시 이러한 보도교의 공기역학적 특성을 고려하여 풍동실험 및 내풍 해석을 수행하여야 한다.

### 3. 보도교 내풍안정성 확보

#### 3.1 연구 대상 교량

본 연구에서 대상으로 하는 보도교는 주경간장 220 m이며, 보도 폭원은 보행자의 교차 진행이 가능한 1.5 m로 147의 변장비를 가지는 보도교이다. 연구대상 케이블 보도교는 상단 난간부에 2개,

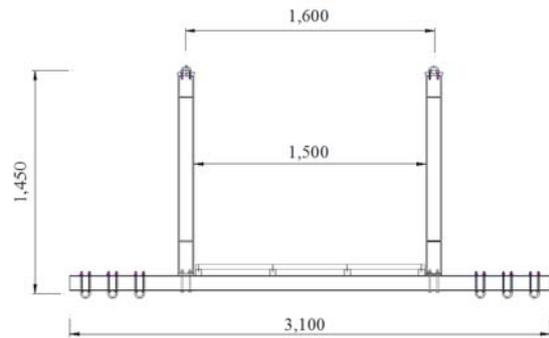


Fig. 8. Section of Girder (mm)

하단 데크 프레임부에 6개 총 8개의 케이블과 하부 데크 프레임으로 구성되어 있다. 대상 교량의 단면은 Fig. 8에 나타나 있다.

### 3.2 모달 특성

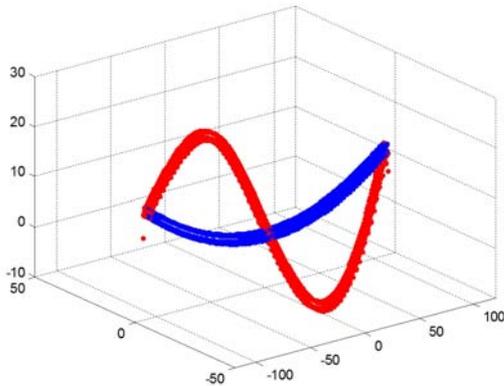
앞에서 설명한 바와 같이 변장비가 상대적으로 큰 세장한 보도교의 경우 진동 모드가 2~3개의 진동 형상이 커플링 되어 동시에 나타나는 경우가 발생한다. 본 연구 대상의 교량의 주요 모드에 대한 모달 적분 상수는 Table 2에 나타나 있고, 모드 형상은 Fig. 9에 나타나 있다. 가장 먼저 나오는 최저차 모드 형상은 수평 모드이며, 연직 대칭 모드와 연직 비대칭 모드가 2차 모드와 3차 모드에

각각 나타나고 있다. 본 연구 대상 교량의 모달 적분 상수를 보면 각각의 성분이 기여가 확실한 일반적인 보도교에 비하여, 연직 모드를 제외하고는 비틀 모드와 수평 모드가 커플링 되어 4차, 7차, 8차 모드 등에 나타나고 있다. 이는 교량 단면을 통해 충분한 비틀 강성을 확보하지 못하는 케이블 보도교의 구조적인 특성으로 인한 결과이다.

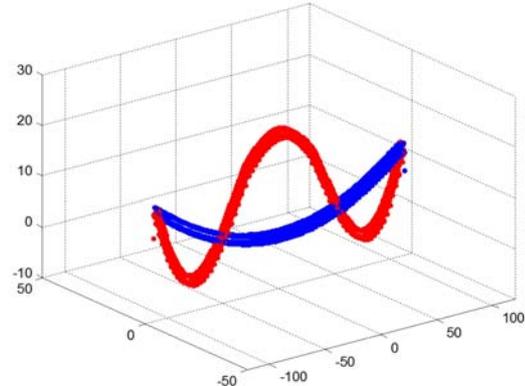
일반적으로 내풍안정성 평가를 위해 수행하는 2차원 부분모형 실험은 교량 주형을 2차원으로 단순화하여 수행하게 되므로 구조적인 3차원 효과를 알 수는 없다. 이에 장경간의 도로교의 경우 3차원 전교모형을 제작하여 3차원 효과를 고려한 내풍안정성 평가

Table 2. Modal Parameter of Bridge

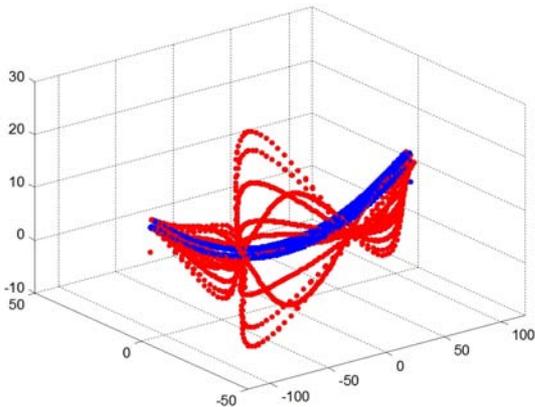
Mode #	Vertical	Lateral	Torsional	Mode #	Vertical	Lateral	Torsional
1	0	93.3	1.0	6	79.8	0	0
2	108.4	0	0	7	0	107.0	47.0
3	68.9	0	0	8	0	27.1	139.5
4	0	103.3	9.0	9	84.1	0	0
5	104.0	0	0	10	0	1.2	110.1



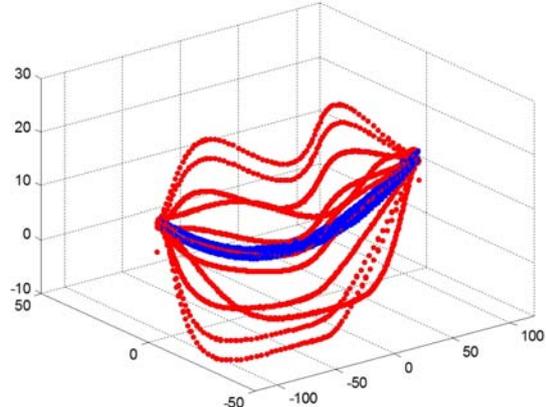
(a) Mode-2 : Anti-Sym. Vertical 1<sup>st</sup>



(b) Mode-3 : Sym. Vertical 1<sup>st</sup>



(c) Mode-7 : Sym. Lateral 2<sup>nd</sup> + Torsional



(d) Mode-8 : Sym. Torsional 1<sup>st</sup> + Lateral

Fig. 9. Mode Shape

를 수행하거나, 2차원 부분모형에서 추출한 공기역학적 데이터와 3차원 구조 해석 모델을 결합한 공탄성 해석을 통하여 보완할 수 있다. 보도교에 비하여 상대적으로 세장한 구조물로 이루어진 보도교의 경우에는 축소된 3차원 전교모형의 제작시 부재 모사가 어려운 관계로 기하학적인 상사가 불가능한 경우가 대부분이다. 더욱이 난간이나 바닥판에 사용되는 그레이팅의 경우는 축소하는 방법과 충실율에 따라 기본적인 공기역학적 특성이 달라지는 것으로 알려져 있다. 이에 보도교의 3차원적인 구조 특성을 파악하기 위해서는 공탄성 해석을 통하여 추가 검토를 수행하였다.

### 3.3 공탄성 해석을 통한 고유치 검토

본 연구 대상 교량의 경우 비틀 진동수가 다른 모드와 커플링 되어 있다. 이에 풍동실험에 적용할 목표 진동수 결정을 위해서 공탄성 해석을 풍동실험 전에 먼저 수행하였다. 내풍 안정성이 가장 취약하다고 판단되는 바닥판이 100% 막혀있는 기본 단면을 대상으로 하기 때문에 평판이라고 가정하고 평판의 필터계수를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 평판의 필터계수는 Fig. 10에 나타나 있다.

교량에 작용하는 풍하중은 주형의 진동으로 인한 자발 공기력과 바람의 난류 성분에 의한 베펀팅 공기력을 나눌 수 있으며, 이때

자발 공기력과 교량 자유진동방정식을 결합하여 다음과 같은 다중 모드 공탄성 방정식을 구할 수 있다(Jain, 1996).

$$E_{ij}(K) = K^2\delta_{ij} + iKA_{ij}(K) + B_{ij}(K) \tag{2a}$$

$$A_{i,j}(K) = 2\xi_i K_i \delta - \frac{\rho B^4 L K}{2I_i} [H_1^* G_{h,h_j} + H_2^* G_{h,a_j} + H_5^* G_{h,p_j} + P_1^* G_{p,p_j} + P_2^* G_{p,a_j} + A_1^* G_{a,h_j} + A_2^* G_{a,a_j} + A_5^* G_{a,p_j}] \tag{2b}$$

$$B_{i,j}(K) = K_i^2 \delta_{ij} - \frac{\rho B^4 L K^2}{2I_i} [H_3^* G_{h,h_j} + H_6^* G_{h,a_j} + P_3^* G_{p,p_j} + P_4^* G_{p,p_j} + A_3^* G_{a,a_j} + A_4^* G_{a,h_j} + A_6^* G_{a,p_j}] \tag{2c}$$

여기서,  $h, a, p$ 는 각각 수직, 비틀, 수평 변위이며,  $B$ 는 단면폭,  $U$ 는 풍속,  $\rho$ 는 공기밀도,  $\xi$ 는 모달 구조 감쇠비,  $L$ 은 경간장,  $K(=\omega B/U)$ 는 무차원 진동수,  $\delta$ 는 Kronecker delta 함수,  $H_i^*, A_i^*, P_i^*$ 는 필터계수,  $G_{hh}, G_{aa}, G_{pp}$ 는 각각 모달적분상수 (Simiu and Scalan, 1996)이다.

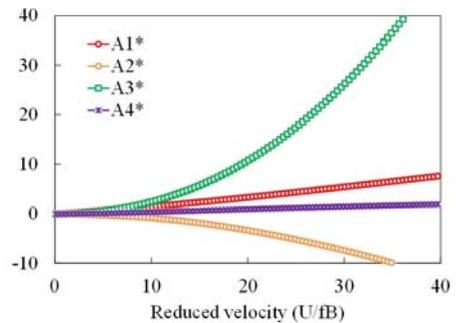
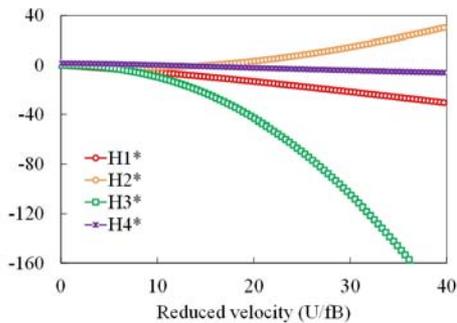
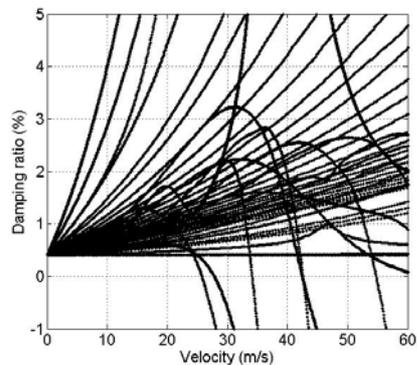
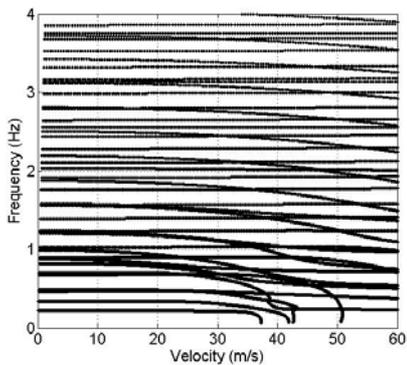


Fig. 10. Flutter Derivatives



(a) Frequency Versus Wind Velocity

(b) Damping Ratio Versus Wind Velocity

Fig. 11. Flutter Analysis Result

교량의 플러터 풍속은 Eq. (2a)의 복소고유치 문제를 풀어 구할 수 있다. 총 50개의 모드를 사용하여 플러터 해석을 수행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 교량 거더를 평판으로 가정하고 수행한 3차원 플러터 해석에서의 플러터 풍속은 26.7 m/s로 나타났다.

플러터 풍속에 미치는 모드의 영향을 평가하기 위해 본 연구에서는 해석에 사용된 모드수에 따라 발생하는 플러터 풍속의 변화를 살펴보았다. 해석 결과는 Fig. 12에 나타나있으며, 모드수가 15개가 넘어가면 플러터 풍속이 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 이에 수직과 비틀 모드들 각각 하나씩만 조합하여 2자유도 플러터 해석을 추가로 수행하였다. 해석 결과 플러터에 가장 지배적으로 영향을 미치는 모드는 3번 모드(수직)와 7번 모드(비틀)로 나타났으며, 이때 플러터 발현 풍속은 18.2 m/s 이다(Table 3). 해석 결과를 바탕으로 풍동실험에서는 가장 불리한 조건인 3번 모드(수직)와 7번 모드(비틀)를 고유진동수를 사용하였다.

### 3.4 풍동실험을 통한 내풍안정성 확보

연구 대상 교량의 내풍안정성 확보를 위해서 본 연구에서는 전북대학교 KOCED 소형풍동을 이용하여 풍동실험을 수행하였다 (Fig. 13). 시험부의 폭은 1 m, 높이는 1.5 m, 길이는 5 m이며 풍속은 0.3~20 m/s까지 조절이 가능하다. 2차원 부분모형 풍동 실험시 진동 변위 계측은 Hamamatsu사의 비접촉식 변위계 (C5949) 2EA를 사용하였다. 실험 모형의 감쇠비 조건은 설계감쇠를 적용하였으며, 외부에 별도의 오일을 이용하여 고려하였다. 대상 교량이 바닥 데크와 난간 그리고 다수의 케이블로 이루어진

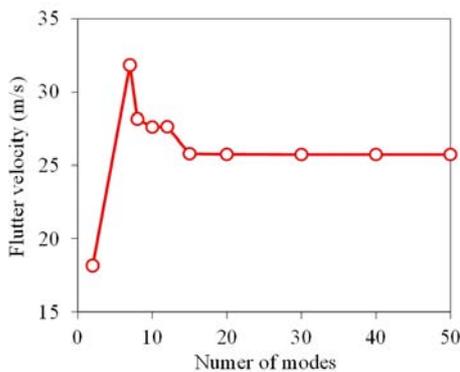


Fig. 12. Flutter Velocity Versus Number of Modes

Table 3. Flutter Analysis Result According to Mode Combination

Classification	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Vertical mode	2	2	3	3	3
Torsional mode	7	8	7	8	10
Flutter onset velocity (m/s)	∞	∞	18.2	∞	∞

단면을 가지고 있어서 기존의 페어링 및 스포일러 등과 같은 공기역학적 방법을 적용하기에는 불가능하다. 이카시대교의 경우 트러스 단면을 선택하고 내풍안정성을 높이기 위하여 트러스 상부에 open grating과 center barrier를 적용한 사례가 있다(Fujino and Yoshida, 2002). 본 연구 대상에 center barrier를 적용하면 정적 풍하중이 크게 증가하게 되므로, 이를 고려하여 본 연구 대상 교량의 내풍안정성을 확보하기 위하여 open grating을 고려하였다. 공장에서 제작되는 그레이팅의 경우 배수투과율과 지지하중의 크기에 따라 약간씩 달라지나 일반적으로 차폐면적은 약 20~25 % 정도이다. 실제 충실률은 하부 데크 가로보의 간격 및 그레이팅의 차폐면적 등을 고려해야 된다. 하지만 본 연구에서는 충실률 개념이 아닌 그레이팅 적용 비율을 기준으로 실험 조건을 정의하였다. 이에 바닥판 데크 전체가 막혀 있는 경우를 0 %로 하고, 바닥판 전체가 그레이팅을 고려한 경우를 100 %로 하여 정의하였다. 나머지 그레이팅 비율의 경우 중앙부를 기준으로 좌우 대칭되게 비율을 고려하였다. 본 연구에서 고려한 교량 데크 단면의 형상과 계산된 충실률(solidity ratio)은 Fig. 14에 나타나 있다.

### 3.5 실험 결과

그레이팅 적용 비율이 0 %인 전체가 막혀 있는 실험 조건의 경우 플러터 발현풍속이 약 14 m/s에서 발생하였다. 풍동실험 전에 평판 플러터계수로 가정하여 수행한 예비 검토 풍속인 18 m/s 보다 더 낮은 풍속에서 플러터 진동이 발생하였다. 내풍안정성 확보를 위해 고려한 그레이팅을 적용한 실험 조건의 경우 그레이팅의 비율이 높아짐에 따라 플러터 발현풍속 또한 비례하여 높아지는 것으로 나타났다. 그레이팅이 교량 단면 상하면의 압력차를 해소하여 연성플러터 또는 비틀플러터에 대한 안정성이 향상된 결과이다. 본 연구 실험 결과 30 %의 그레이팅 고려 조건에서 플러터 발현풍속은 50 m/s를 상회하게 되나, 중간에 큰 폭의 와류 진동이 발생하게 된다(Table 4). 대상 연구 교량 설치 위치나 교량의 형식에 따라



Fig. 13. Bridge Section Model

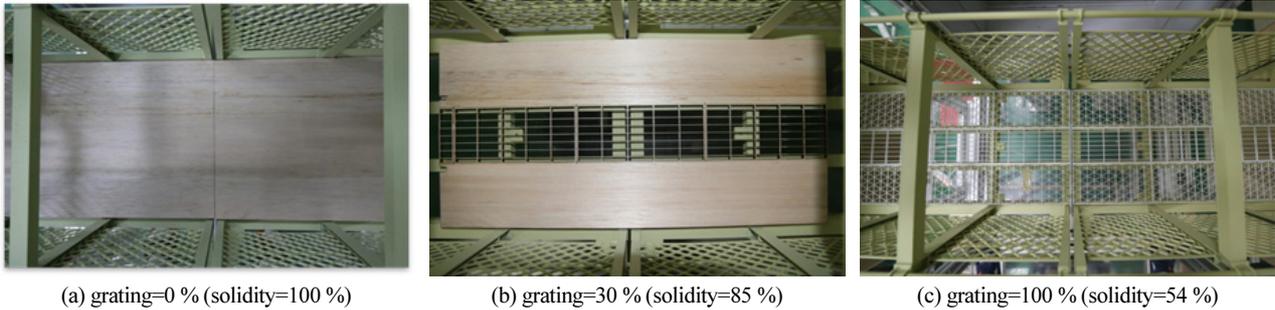


Fig. 14. Deck with Open Grating

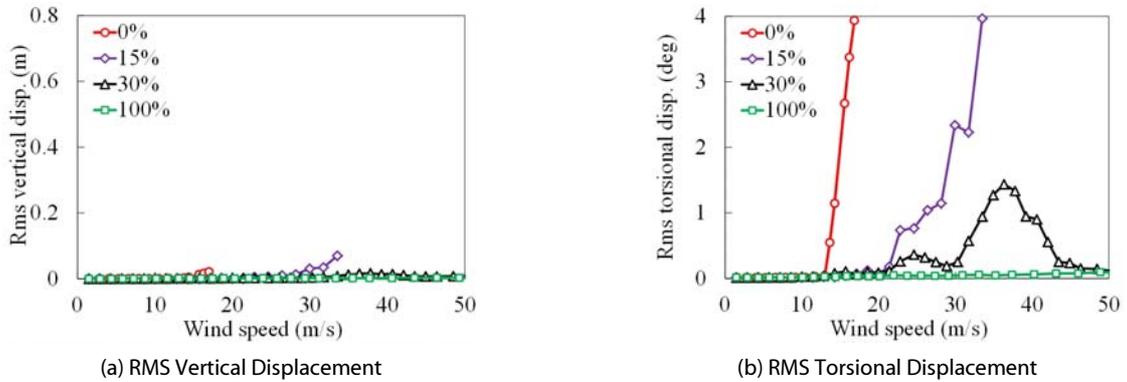


Fig. 15. Wind Tunnel Test Result of Decks with Various Open Grating

Table 4. Test Result

Vibration	Ratio of open grating (%)			
	0	15	30	100
Flutter onset velocity	14 m/s	28 m/s	50 m/s	50 m/s
VIV	Not observed	Not observed	29-44m/s	Not observed

조금씩 달라지나 변장비가 상대적으로 높은 보도교의 경우 내풍안정성 확보를 위해서는 전면 그레이팅을 사용하여야 한다. 향후 전체 교량에 대한 그레이팅의 비율과 최적화된 그레이팅 조합의 경우에는 보다 다양한 실험을 통한 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서 적용한 4가지 조건의 그레이팅 비율에 따른 풍속별 교량의 수직 및 비틀 응답은 Fig. 15에 나타나 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 장경간 보도교의 내풍안정성 확보를 위한 방법과 그 필요성을 제시하는데 목적을 두고 있다. 이를 위하여 기존 보도교의 제원을 수집하여 그 특성을 분석하고 변장비가 내풍안정성에 미치는 상대적인 영향을 평가하였다. 그 결과를 보면 보도교에서 변장비가 고유진동수와 내풍안정성에 미치는 영향은 밀접한 것으로 나타났으며, 보도교의 폭을 통행에 필요한 최소한의 폭만 확보하

는 관례로 주경간장에 비례하여 변장비가 커지는 것으로 나타났다. 이렇게 수집된 보도교의 제원을 바탕으로 보도교 설계 초기 단계에서 근사적으로 고유진동수를 추정할 수 있는 추정식을 제시하였다. 또한 평판 거더 장경간 보도교의 내풍안정성의 한계를 간접적으로 추정하기 위하여 Selberg의 근사식을 적용하여 장경간 보도교의 플러터 발생 풍속을 추정하여 제시하였다. 분석 결과 주경간장이 140 m를 넘게 되면 플러터 발현풍속은 약 50 m/s 추정되며, 주경간장이 170 m가 넘게 되면 40 m/s 이상의 플러터 발현풍속 확보가 어려운 것으로 파악되었다.

마지막으로 풍동실험을 통해 평판 거더에 적용할 수 있는 공기역학적 제진 대책인 그레이팅의 효과에 대한 정량적인 평가를 수행하였으며, 그레이팅 적용 비율 변화를 통해 플러터 발현풍속을 50 m/s 이상 확보할 수 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 향후 세장 케이블 보도교 설계시 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (19CTAPB132923-03)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

## References

- Fujino, Y. and Yoshida, Y. (2002). "Wind-induced vibration and control of trans-tokyo bay crossing bridge." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 8, pp. 1012-1025.
- Gimsing, N. J. (2009). *Cable supported bridges*. John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A.
- Jain, A., Jones, N. P. and Scanlan, R. H. (1996). "Coupled flutter and buffeting analysis of long-span bridges." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 7, pp. 716-725.
- Jeong, H. G., Lee, S. H., Shin, S. H., Koo, G. J., Kim, B. H. and Kwon, S. D. (2017). "Experimental study on the aerodynamic stability of pedestrian suspension bridge." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 59-60.
- Korean Society of Civil Engineers (KSCE) (2006). *Design guideline for cable supported steel bridges*, haklimsa.
- Kwon, S. D., Lee, M. J., Cho, E. and Lee, S. H. (2010). "Development of slender aerodynamic girder for suspension bridges." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 30, No. 3A, pp. 241-256 (in Korean).
- Lee, S. H., Jeong, H. G. and Kwon, S. D. (2018). "A study on the aerodynamic stability of long-span pedestrian bridge." *Proc. of the KSCE 2018 Conf.*, KSCE, pp. 64-65 (in Korean).
- Miyata, T., Yokoyama, K., Yasuda, M. and Hikami, Y. (1992). "Akashi Kaikyo Bridge: wind effects and full model wind tunnel tests." *Proceedings of the First International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges*, Balkema, pp. 217-236.
- Simiu, E. and Miyata, T. (2006). *Design of buildings and bridges for wind*. John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A.
- Simiu, E. and Scanlan, R. H. (1996). *Wind effects on structures*. 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A.
- Strommen, E. N. (2005). *Theory of bridge aerodynamics*. Springer.
- Youtube (2018). *Tongyeong Yeongdaedo Bridge*, YouTube KR Movie Clip, Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=pVM69wdXm9A> (Accessed: October 11, 2018)