

실측자료에 근거한 도개교량의 거동 분석

공병승¹, 노동오², 경갑수^{3*}

Analysis of Bascule Bridge Behavior Based on Measurement Data

Byung-Seung Kong¹, Dong-Oh Noh², Kab-Soo Kyung^{3*}

Abstract: Bascule bridge, with its use to help vessels ply, has a several examples overseas of being serviced for more than decades years by careful maintenance, admitted its significance as landmarks for its rareness. Yeongdo Bridge, the sole bascule bridge in Korea was reconstructed in 2013 after being demolished because of its corrosion and aging, and now operates once in a day. Recently, safety inspections are executed thanks to demands getting higher for maintenance and safety of bridges, but measurement and analysis about bascule bridges are scarce. This study includes the analysis of the bascule bridge's behavior such as stress, vibration and reaction in normal condition and while it lifts up, based on measurement. We expect that this study will be used as an initial data to compare and confirm bridge's changes as service year and the number of operation increase.

Keywords: Bascule bridge, Counter weight, Measurement, Natural frequency, Strain, Stress, Structural analysis

1. 서 론

하천이나 운하 등 수로를 횡단하는 교량의 경우, 선박운항을 위하여 일시적으로 횡단교량의 일부를 들어 올리거나 이동할 수 있도록 가설된 교량들이 있다. 이러한 교량을 가동교(Movable Bridge)라고 하며, 가동되는 형식에 따라 도개교(Bascule Bridge), 선개교(Swing Bridge), 승개교(Lift-Up Bridge) 등의 여러 종류로 분류한다.

한국의 경우 2개의 가동교가 가설된 사례가 있으며, 하나는 평안북도 신의주와 중국 단동을 연결하는 압록강 철교로서 1911년에 완공되었고, 회전식 개폐교량인 선개교 형식으로 1934년까지 선개 후 고정된 것으로 알려져 있다.

두 번째 가동교는 부산의 중구와 영도구를 연결하는 영도대교로서 부산 남항과 북항의 선박 통항을 위하여 1934년에 일엽식 도개교 형식으로 완공되었으며 1966년까지 도개 후 고정되었고 2009년부터 철거 후 2013년 재가설 되었다.

가동교는 선박이 통과할 때 교량을 이용할 수 없기 때문에 선박출입이 많거나, 교량 상부 교통량이 많은 경우에는 적합하지 않을 수 있다. 또한 가동을 위한 별도의 구조 및 부속장치

가 필요하여 공사비가 높고 유지관리비용도 일반교량에 비해 많이 소요되어 흔히 가설되는 교량은 아니었으나, 최근의 경우에는 그 희소성으로 인해 해당지역의 랜드마크로 활용하기 위하여 신규 또는 과거의 가동교를 재가설 하는 경우도 있다. Table 1은 가동교의 주요형식과 각 형식별 대표적인 교량을 예시한 것이다.

부산 영도대교의 경우에도 한국 근현대사의 상징적 가치를 인정받아, 노후화로 철거된 이후 당초교량과 거의 동일한 형태로 재가설 되었으며, 1일 1회 도개를 재개하여 현재는 해당지역의 랜드마크로서의 역할도 담당하고 있다.

Table 1에서 예시한 바와 같이 가동교들은 그 희소성과 상징성을 인정받아 100년이 넘도록 유지관리되는 국외 교량의 사례도 있으나, 국내 영도대교의 경우 1969년에 노후조사를 실시한 기록 외에는 당시까지 특별한 유지관리가 이루어지지 않았다. 해상구간의 선박통항을 위해 트러스 형식의 도개교 구간(L=31.3 m)과 총 8경간의 Plate Girder교가 Gerber형식으로 구성되어 있던 기존의 영도대교는, 준공 후 50여년이 지난 1986년도부터 안전진단이 수행되고 노후 및 부식으로 인하여 전반적인 도장 및 바닥판 교체 등의 보수가 수반되었다. 1994년에는 부식이 심한 도개교구간 하부에 Bracket을 이용한 Plate Girder를 설치하여 해당구간을 지지하도록 하는 보강공사가 이루어졌다. Photo 1은 도개교가 보강된 후 2002년 당시의 상태를 나타낸 것이다.

“시설물의 안전관리에 관한 특별법”이 1995년 제정된 이후 주기적으로 해당 교량에 대한 정밀안전진단 등 유지관리 활

¹정회원, 동서대학교 건축토목공학부 교수

²정회원, 씨티씨주식회사 이사

³정회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: kyungks@kmou.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 5월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Types and examples of movable bridges

Type	Br. name	Location	Completion year
Bascule Br. (Double-Leaf)	Tower bridge	London, England	1894
Bascule Br. (Single-Leaf)	Yeongdo bridge (2nd)	Busan, Korea	2013
Folding Br.	Hörn bridge	Kiel, Germany	1997
Vertical Lift Br.	Bridgewater bridge	Tasmania, Australia	1946
Swing Br.	El ferdan bridge (5th)	Ismailia, Egypt	2001
Transporter Br.	Vizcaya bridge	Vizcaya Spain	1893
Tilt Br.	Gateshead millennium bridge	Gateshead, England	2001



Photo 1 Yeongdo bascule bridge in 2002

동이 수행되었으나, 정·동적 재하시험에 의한 교량 거동의 계측은 Plate Girder로 이루어진 Gerber구간 중 Suspended Span의 경간에서만 수행되었을 뿐, 도개교 구간에 대해서는 별도의 계측자료가 확인되지 않았다. 이와 같이 국내에서 도개교는 영도대교가 유일한 교량일뿐더러 도개교 구간에 대한 거동계측이나 분석은 그 사례가 거의 없다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 도개교인 영도대교가 재가설 된지 약 1년이 경과한 시점에서 도개교의 도개과정 및 상시 거동을 계측하고, 구조해석을 실시하여 이론적인 거동과 비교·분석하며, 도개교의 실제거동을 파악하고자 하였다.

2. 도개교의 거동 측정

2.1 측정조건 및 방법

원형과 거의 유사한 형태로 복원된 영도대교는 전체 연장

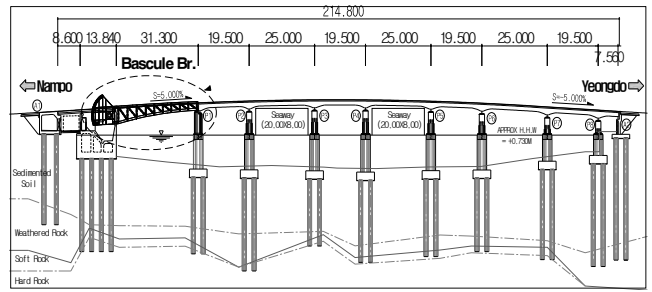
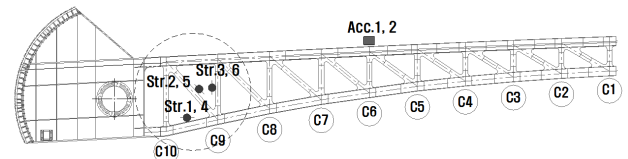


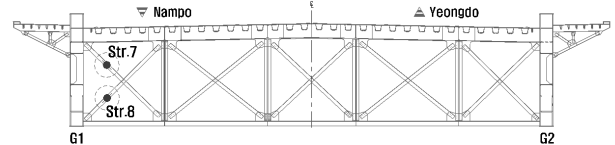
Fig. 1 Longitudinal section of Yeongdo bridge

Table 2 Status of Measurement

Period	4 days of Oct. 2014
Measure time	Open time : 12:00~12:15
	Normal time : 30 minute (before and after open time)
Sensor	Strain gauge
	Lower chord member : 2ea(Str.1, Str.4)
	Diagonal member : 2ea(Str.2, Str.5)
Accelerometer	Vertical member : 2ea(Str.3, Str.6)
	Vertical Bracing : 2ea(Str.7, Str.8)
Accelerometer	Midpoint of girder 2 : 2ea(Acc.1, Acc.2)
	Acc.1 : Vertical direction Acc.2 : Transverse direction



(a) Longitudinal section



(b) Cross section at C9

Fig. 2 Sensor location map

214.8 m구간 중 기계실과 교각P1 사이의 31.3 m 구간이 도개교 구간이며, 전체적인 형상은 Fig. 1에 나타나 있다. 도개교 구간의 상부구조는 트러스 형태의 주부재인 좌측거더 G1, 우측거더 G2, 강바닥판 및 기타부재로 이루어져 있다.

대상교량의 거동측정은 도개시와 상시로 구별하여 실시하였으며, 전체적인 측정현황은 Table 2에 기재하고 각 센서부착 위치는 Fig. 2에 나타내었다.

도개시 거동 측정은 도개교가 상승, 하강하는 약 15분 동안의 전체과정을 500 Hz의 빈도로 응답을 측정하고, 상시 거동 측정은 도개 전, 후 일반차량이 통행하는 상태에서 중,대형 차량 통행시를 주요 측정점으로 약 30분 동안 실시하였다.

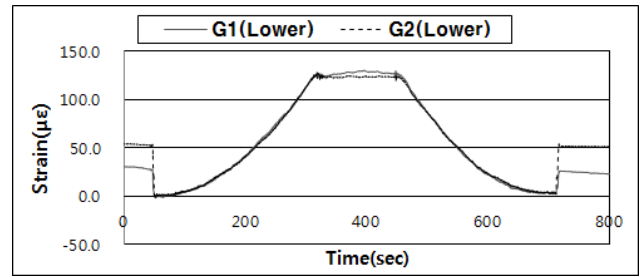
대상 교량은 왕복 6차선의 도로교량이지만 도개과정은 모든 차량을 통제된 후 진행되므로 도개시에는 일체의 활하중 없이 고정하중만 작용하는 상태이다. 거동 측정은 차량이 완전히 통제된 이후 또는 일체의 차량하중 없이 고정하중만 작용하는 상태를 초기치로 설정하여 변형을 및 가속도 응답변화를 측정하였다.

2.2 변형을 측정

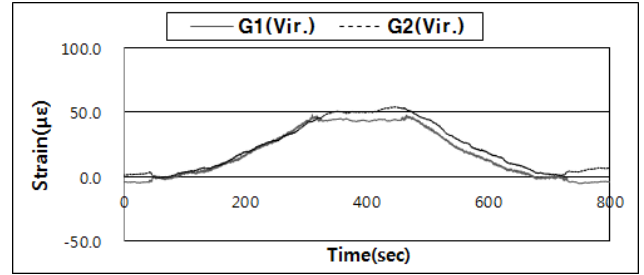
2.2.1 도개시 변형을 측정결과

4일간 측정된 주요부재의 변형을 측정데이터를 약 2 Hz로 필터링하여 도개시 발생할 수 있는 미세 진동성분 및 전기신호 Noise 등을 감쇠하고 결과를 정리하였다.

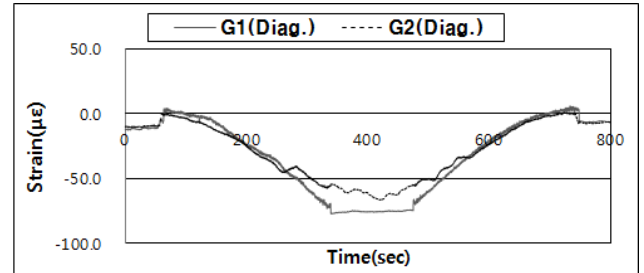
매 도개시 마다 다소의 오차는 있으나 거의 유사한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었으므로, 각 측정일의 결과 정리는 가장 큰 응답을 나타낸 하현재의 측정결과만을 정리하여 Table 3에 수록하였고, Table 4에는 해당기간의 동일한 측정에서 각 부재의 도개 단계별 변형을 및 응력의 평균값을 정리하였다.



(a) Lower chord member



(b) Vertical member



(c) Diagonal member

Fig. 3 History of strain in bascule process

도개시 좌, 우 거더의 균형상태와 응력상태를 상호 비교하기 위하여 도개과정의 시작단계인 도개 직후 약 2초간의 변형을 평균값을 각 부재의 초기치로 설정하여 변형율 그래프를 이동(Shift)하고, 좌측거더 G1과 우측거더 G2 부재의 변형율 변화이력 그래프의 일례를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

각 측정일별 하현재 측정값인 Table 3 및 측정기간의 평균값인 Table 4의 하현재 측정값을 살펴보면 각 단계마다 G1과 G2의 변형율이 약 25×10^{-6} 정도의 차이를 나타내고 있으나, 도개과정에서의 전체 변동폭은 거의 유사하며, Fig. 3(a)에서 나타난 바와 같이 초기응답에서는 차이를 나타내지만, 상승 및 하강하는 도개과정에서는 G1과 G2가 거의 일치하는 변형을 변화를 나타내고 있다. 또한 수직재와 사재도 전반적인 거동응답이 유사하게 측정되었다.

도개 직전 도개교의 선단이 교각 P1에 지지되고 고정하중만 작용하는 상태에서 측정 초기치를 설정한 후 전체 도개과정을 측정하였다. 그러므로, Fig. 3(a)의 도개 초기 변화량을 고려하면, 도개 전에 거더가 교각에 거치된 상태에서 좌측거

Table 3 Max. strain of lower chord member

Date	Girder Num.	Step 1 (App. 0°) [μ]	Step 2 (55°) [μ]	Step 3 (App. 0°) [μ]	Range of strain (0°→55°) [μ]
6 Oct.	G1	-44.002	86.083	-33.354	130.085
	G2	-65.616	58.909	-61.934	124.525
7 Oct.	G1	-24.630	104.109	-20.404	128.739
	G2	-50.925	73.826	-48.392	124.751
8 Oct.	G1	-30.084	97.731	-26.567	127.815
	G2	-53.716	69.542	-50.916	123.258
9 Oct.	G1	-32.381	93.155	-32.847	125.536
	G2	-59.692	64.838	-59.507	124.530

Step 1 : Begin of lift-up

Step 2 : Complete open

Step 3 : Just before close down

Table 4 Average strain and stress of girder

Div.	Girder Num.	Step 1(0°)		Step 2(55°)		Range	
		Strain [μ]	Stress [MPa]	Strain [μ]	Stress [MPa]	Strain [μ]	Stress [MPa]
Lower chord	G1	-32.8	-6.7	95.3	19.5	128.0	26.2
	G2	-57.5	-11.8	66.8	13.7	124.3	25.5
Ver. Mem.	G1	2.2	0.5	47.9	9.8	45.6	9.4
	G2	-2.6	-0.5	48.5	9.9	51.1	10.5
Diag. Mem.	G1	-7.4	1.5	-68.3	-14.0	-75.7	-15.5
	G2	-7.9	1.6	-47.1	-9.7	-55.0	-11.3

더 G1과 우측거더 G2의 초기 응력상태에 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 또한 Table 3의 각 측정일별 하현재의 응력에서도 최종 응력상태가 상이하므로 P1에서의 반력도 매회 도개시 마다 오차가 있을 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 도개 직후 캔틸레버 구조가 된 이후로는 도개과정에서 좌, 우 거더의 상승 및 하강 거동이 균형을 잘 이루고 있으며, 응력 변화량 및 변화이력도 좌, 우 거더가 거의 동일하게 변화하는 것으로 판단할 수 있다.

2.2.2 상시 변형을 측정결과

도개과정에서 발생할 수 있는 구조역계의 변화 또는 1일 1회 도개 후 P1 거치상태의 변화 등 도개 전, 후의 변화발생 여부를 확인하기 위하여 도개 전 상시 측정과 도개 후 상시 측정을 실시하였다.

일반차량이 주행하는 상시측정에서는 중, 대형차량이 통행하는 시점을 주요 이벤트로 측정하고자 하였으며, 실 교통상태에서 큰 응답을 나타내는 차량은 대부분 버스 차량이었고 일부 중형트럭이 포함되었다. 측정시 통행한 차량의 중량을 정확히 고려할 수는 없으나, 일반 버스차량의 경우 공차 중량이 약 90 kN 정도이고 만차 중량이 약 140 kN 정도임을 감안하면, 측정 변형율의 변화는 평균값에서 대략 $\pm 25\%$ 정도의 변화가 발생할 수 있다.

각 측정일마다 도개 전, 후의 상시측정에서 측정된 변형을 값이 Fig. 4의 일례와 같이 차량의 중량차이에 의한 예상 변화 범위 이내로 측정되었으며, 도개 전과 후의 경향이 거의 유사하게 나타났다. 또한 각 측정일별의 결과에서도 특별한 변화가 없으므로 도개에 따른 구조물의 역학적 거동의 변화 및 거치상태의 변화 등 역계의 변화는 없거나 무시할 만한 수준인 것으로 판단된다.

2.2.3 가속도 측정에 의한 진동수 분석

Girder 2의 중간지점에서 연직방향과 교축직각방향인 횡방향 진동가속도를 측정하여 도개교의 고유진동수를 분석해 보고자 하였다.

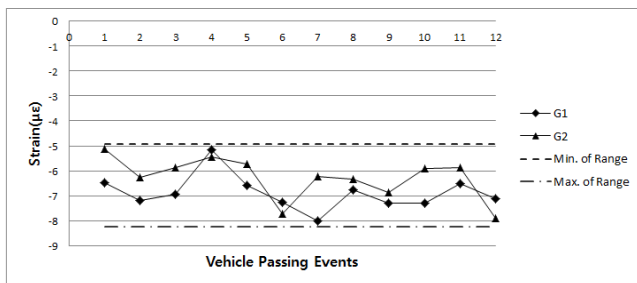
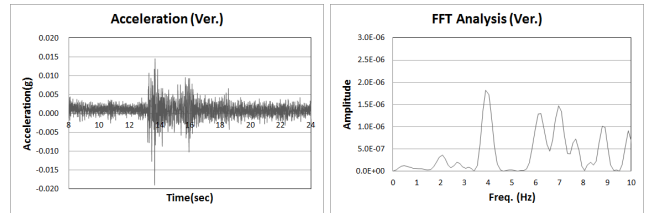


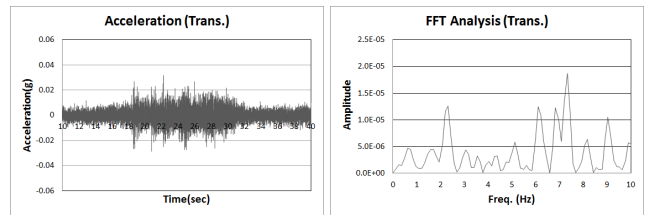
Fig. 4 Strain of lower chord member in normal state

Table 5 Natural frequency by measurement

Div.	Frequency[Hz]					
	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5	Average
Vertical direction	3.906	3.906	3.906	3.906	3.906	3.906
Transverse direction	2.319	2.319	2.075	2.441	2.563	2.343



(a) Acceleration and frequency in vertical direction



(b) Acceleration and frequency in transverse direction

Fig. 5 FFT analysis

진동가속도의 측정은 상시 일반차량이 진행하는 상태에서 측정되었으며, 변형을 측정과 동일하게 일체의 차량하중이 없는 상태를 초기치로 설정하였고 일반 중, 대형차량 통과 직후의 잔류 진동가속도 신호를 이용하여 FFT 분석을 실시하였다.

일반 상시측정에서는 중, 대형차량 외에도 소형차량의 간섭이 내포되는 경우가 대부분이므로 가능한 소형차량 등 기타하중의 간섭이 최소화된 신호 데이터 중 5개의 신호를 샘플링하여 분석하였으며 그 결과는 Table 5에 나타내었다. Fig. 5는 샘플링한 진동가속도와 FFT 분석 결과의 일례를 나타낸 것이다.

차량의 주행에 의한 진동성분을 계측하여 연직방향의 가속도 신호를 분석한 1차 모드 고유진동수는 3.906 Hz로 모든 샘플링 데이터에서 동일한 값을 나타내었으나, 연직방향 진동에 기인한 수평방향의 진동성분은 신호가 약하여 동일한 진동수를 확보하지는 못했지만 평균 약 2.343 Hz의 진동수를 나타내는 것으로 분석되었다.

3. 구조해석에 의한 분석

3.1 구조해석 조건

해당 교량의 도개교 구간을 보요소와 판요소를 이용하여 3

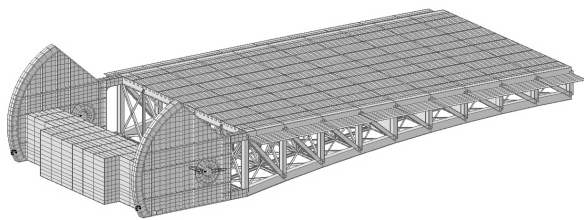
차원으로 모델링하고 설계시 예상 거동과 본 연구에서 실측한 거동에서의 차이점을 분석함으로써, 현재의 거동상태를 파악하고자 하였다. 설계시 적용했던 구조모델이 상세하게 구현되어 있으므로 이론적 거동을 분석하기 위한 구조해석 모델링은 설계 모델링을 가능한 준용하되, 각 검토단계별 경계조건 및 하중조건 등은 본 연구시 실측단계의 조건을 반영할 수 있도록 수정하였다. 구조해석에서 사용한 프로그램은 국내 범용유한요소 프로그램인 MiDAS Civil을 이용하였고, 전체 모델링형상은 Fig. 6에 나타내었다.

해석에 앞서 대상 교량의 역학적 조건이 일반적인 단순보 및 연속보의 구조조건과 다른 점은 다음과 같다.

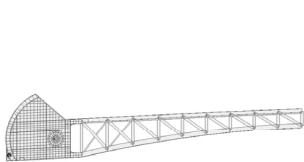
도개구간은 가능한 경량이 되도록 강바닥판 구조형식을 갖추고 있으며, 기계실 내부에는 도개구간과 밸런스를 이루도록 카운터 웨이트(Counter Weight)를 설치하여 작은 회전력으로 교량을 도개할 수 있도록 설계되었다.

이와 같은 경우, 전체 교량의 자중은 대부분 회전축에서 부담하게 되어, 도개 전 상시 상태에서 교각 P1에 지지되는 도개교의 트러스 거더 G1, G2의 선단에는 각 217.7 kN의 작은 설계반력이 작용하는 상태다. 또한, 하현재의 경우에도 일반적인 보 거동에서 나타나는 인장응력 상태가 아닌 일정수준의 압축응력을 받는 상태로 교각 P1에 거치되어 캔틸레버 거동에 가까운 상태가 된다.

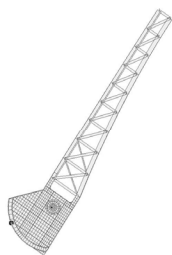
이후 도개 시작시에는 완전한 캔틸레버 거동상태가 되어 교각 P1에서 부담하는 반력이 해제되며, 하현재의 압축응력이 더욱 커지게 되고, 도개각이 점차 높아질수록 자중에 의한 모멘트가 감소하여 하현재의 압축응력이 점차 감소하는 거동을 보일 것으로 예상된다.



(a) 3D full modeling



(b) Begin of lift-up(0°)



(c) Complete open(55°)

Fig. 6 Modeling for analysis

3.2 구조해석

구조해석에서는 현재 운용상태를 고려하여 상시 거치상태에서 도개가 시작되는 단계에서의 응력변화량을 산정하고, 도개 시작시(0°)와 도개 완료시(55°)의 응력변화량을 산정하여 실제 측정된 각 단계별 응력변화량과 비교하고자 하였다. 이 연구에서는 다음과 같은 4가지 해석단계에 대하여 정적해석을 실시하였다.

- (1) Step 0(a) : 도개전 설계 반력(고정하중) 작용단계
- (2) Step 0(b) : 도개전 실제 반력(고정하중) 작용단계
- (3) Step 1 : 도개 시작단계(도개각 0°)
- (4) Step 2 : 도개 완료단계(도개각 55°)

Step 0(b)의 해석단계는 도개 시작시 G1, G2의 실측 응력변화가 상이한 것에 착안하여, 교각 P1에서 G1과 G2의 반력이 상이할 수 있는 것으로 판단하였고, 이에 실측된 응력결과와 가장 유사한 상태를 나타낼 수 있도록 G1 : 100 kN, G2 : 175 kN의 비대칭 반력이 작용하는 상태를 시행착오법으로 가정하여 구조해석 및 응력산정을 추가 실시하였다.

Step 2에서는 55°로 도개 완료 후 약 2분 30초 정도의 정지 시간동안 풍하중에 의한 실측 변형율의 변화가 거의 없었으므로 해석에서도 풍하중을 고려하지 않았다.

3.3 응력검토

각 해석단계에 대하여 구조해석을 실시하고 각 단계별 응력을 산정하여 Table 6에 정리하였으며, Table 7에는 각 단계별 응력 및 변형을 변화량을 산정하여 정리하였다.

교량의 실제 거동을 분석하기 위해 본 연구에서 측정한 실측 응력값과 구조해석에 의한 이론적 응력값을 비교하고자 하였다. Table 4에서 정리한 각 부재의 도개단계별 평균 응력값을 이용하여 상시 거치상태(Step 0)에서 도개가 시작되는 Step 1 사이의 변화량과 도개가 시작된 직후(Step 1)부터 55°의 완전도개(Step 2) 사이의 변화량을 산정하고, Table 7에 나

Table 6 Stresses at each step by analysis

Div.	Girder Num.	Stresses[MPa]			
		Step 0(a)	Step 0(b)	Step 1	Step 2
Lower chord	G1	-52.6	-60.4	-67.2	-38.9
	G2	-52.6	-55.5	-67.2	-38.9
Ver. Mem.	G1	-32.2	-33.8	-35.4	-16.5
	G2	-32.2	-32.9	-35.4	-16.5
Diag. Mem.	G1	38.5	40.1	41.8	17.5
	G2	38.5	39.3	41.8	17.5

Table 7 Variation of stresses and strains by analysis

Div.	Girder Num.	Step 0(a) → Step 1		Step 0(b) → Step 1		Step 1 → Step 2	
		Stress [MPa]	Strain [μ]	Stress [MPa]	Strain [μ]	Stress [MPa]	Strain [μ]
Lower chord	G1	-14.6	-71.3	-6.8	-33.0	28.3	138.3
	G2	-14.6	-71.3	-11.7	-57.1	28.3	138.3
Ver. Mem.	G1	-3.2	-15.8	-1.6	-7.8	18.9	92.0
	G2	-3.2	-15.8	-2.5	-12.2	18.9	92.0
Diag. Mem.	G1	3.3	16.2	1.7	8.1	-24.3	-118.6
	G2	3.3	16.2	2.5	12.3	-24.3	-118.6

Table 8 Compare stresses by measurement and analysis

Div.	Girder num.	Variation of strains [MPa]				
		Measurement		Analysis		
		Step 0 → Step 1	Step 1 → Step 2	Step 0(a) → Step 1	Step 0(b) → Step 1	Step 1 → Step 2
Lower chord	G1	-6.7	26.2	-14.6	-6.8	28.3
	G2	-11.8	25.5	-14.6	-11.7	28.3
Ver. Mem.	G1	0.5	9.4	-3.2	-1.6	18.9
	G2	-0.5	10.5	-3.2	-2.5	18.9
Diag. Mem.	G1	1.5	-15.5	3.3	1.7	-24.3
	G2	1.6	-11.3	3.3	2.5	-24.3

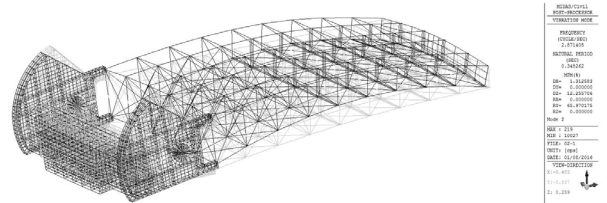
타낸 동일한 과정의 이론적 응력 변화량을 실측 변화량과 상호 비교하면 Table 8과 같다.

이 비교결과에서 실측값과 이론값의 다소 차이는 있지만 가장 큰 응답을 나타내는 하현재를 기준으로 보면 다음과 같다. 도개가 시작되는 과정, 즉 Step 0에서 Step 1로 진행되는 과정에서 발생하는 실측 응력 변화량은 설계시 예상한 약 217.7 kN의 반력이 좌, 우 대칭으로 작용하는 상태인 Step 0(a) 보다 이 연구에서 가정한 비대칭 반력이 작용하는 상태인 Step 0(b)에서 Step 1로 진행할 때의 결과와 더 유사한 거동을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

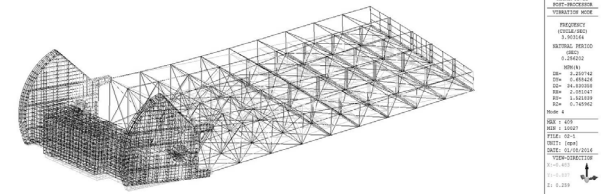
또한 Step 1에서 Step 2로 진행되는 도개과정에서는 좌, 우 측 거더 하현재의 응력변화량이 약 26 MPa로 유사하며 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 응력변화 과정도 거의 동일한 것으로 나타나 도개과정에서의 균형상태는 안정된 것으로 분석할 수 있다. 또한, 실측 변화량은 이론적 변화량인 약 28 MPa의 93% 수준으로 이론적 도개거동과 거의 일치한다고 볼 수 있다.

3.4 고유진동수 분석

진동수를 분석하기에 앞서, 변형율 측정결과와 응력해석값들을 살펴보면 교량의 실제 거치상태는 설계시 예상한 반력

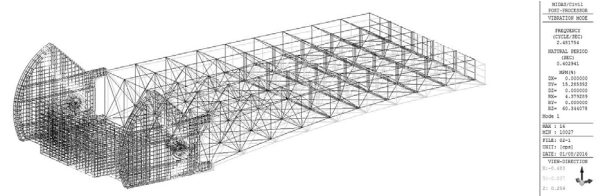


(a) Vertical mode shape of model 1

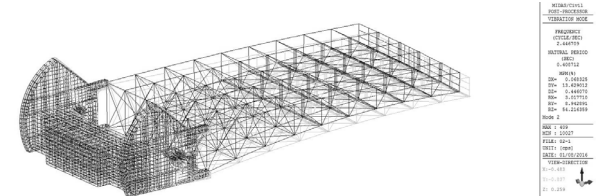


(b) Vertical mode shape of model 2

Fig. 7 Vertical mode shapes by analysis



(a) Transverse mode shape of model 1



(b) Transverse mode shape of model 2

Fig. 8 Transverse mode shapes by analysis

보다는 다소 작은 반력값을 보이고 있으며, 이는 시공 중 각종 변수로 인해 카운터 웨이트의 하중이 일부 변경되었을 개연성도 있음을 의미한다. 따라서 P1에서 좌, 우측 반력의 합력이 본 연구에서 실측 및 가정한 약 275 kN이 산정될 수 있도록 재해석시 카운터 웨이트에 1240 kN의 추가 하중을 분포하중으로 작용시켜 중량 추가를 반영하였다.

좌, 우측의 비대칭 반력이 실측되는 것은 시공 중 해당 교량을 조립, 거치하는 과정 또는 카운터 웨이트에 중량 콘크리트를 충전하는 과정 등에서 횡방향 강성이 작은 상부 구조의 경미한 비틀림 오차가 발생했을 확률도 있다. 그러나 이러한 기하형상의 경미한 오차는 정확한 실측 및 해석모델링의 반영이 어려우므로 P1에 설치된 탄성받침 중 G2의 받침은 설계도면에 제시된 605,000 kN/m의 탄성 스프링 지점으로 적용하되, G1의 받침은 약 1%인 6,353 kN/m로 스프링계수를 수정

Table 9 Compare frequency by measurement and analysis

Div.	Measurement		Analysis		
	Frequency [Hz]		Frequency [Hz]		Reaction at P1[kN]
	Ver.	Trans.	Ver.	Trans.	
Model 1	3.906	2.343	2.871	2.482	G1 : 137.8 G2 : 137.8
Model 2	(Average)	(Average)	3.903	2.447	G1 : 99.7 G2 : 175.6

하는 경계조건의 보정으로 구현하고자 하였다.

상기에 제시한 추가 중량 및 수정 스프링 계수는 시행착오 방법으로 산정한 값이며, 진동수 분석을 위한 재해석에서는 카운터 웨이트의 중량만 수정한 모델(Model 1)과 카운터 웨이트의 중량 및 경계조건인 스프링 계수를 모두 수정한 모델(Model 2)을 구분하여 해석하였다.

실측에서 진동 가속도 측정방향이 연직 및 수평방향이었으므로 해석결과에서도 진동모드의 차수에 관계없이 측정방향의 고유진동수 값을 정리하였으며, Model 2의 경우, G1의 스프링 계수 감소에 의해 제 1차 모드에서 1.659 Hz의 진동수와 G1의 비틀림 모드형상(Mode Shape)이 나타났으나, 연직방향의 질량기여도가 없어 비교대상에서 제외하였다.

카운터 웨이트의 추가 중량은 교량의 질량증가로 고유진동수 감소효과가 있으며, G1받침장치의 탄성 스프링계수 감소는 비대칭 반력과 연관성이 있다. 각 모델의 적정성을 검증하기 위해 구조해석 모드형상인 Fig. 7, 8과 더불어 Table 9에는 P1에서의 반력을 함께 검토하였으며, 반력의 합이 약 275 kN 이므로 카운터 웨이트의 추가하중은 적절하게 반영한 것으로 판단되고, 이는 고유진동수 산정을 위한 교량의 질량이 실제 교량과 거의 유사하게 반영되었음을 의미한다. 또한 Model 2에서의 반력은 변형률 및 응력검토시 가정한 G1 및 G2의 비대칭 반력과 거의 동일하여 교각P1에서 G1의 탄성받침 스프링계수의 가정도 적절한 것으로 판단된다.

거더 G2의 중간지점에서 측정된 진동가속도를 이용한 연직방향의 실측 탁월진동수는 3.906 Hz이며, 구조해석에 의한 고유진동수는 Model 1에서 2.871 Hz, Model 2에서 3.903 Hz로 분석되어 Model 2의 결과가 실측 진동수와 거의 일치하였다. 수평방향의 실측 평균 진동수인 2.343 Hz는 차량의 주행에 의한 연직방향의 진동에서 파생된 수평방향의 진동성분을 분석한 값이므로 정확성이 다소 부족할 수는 있지만 이론적 해석 값과는 유사하게 나타났다.

이와 같은 결과를 감안하면, 수평방향의 진동수는 다소 차이가 있지만 교량의 실제 거동은 Model 1보다 Model 2가 더욱 유사한 것으로 예상할 수 있다.

4. 도개교의 거동 분석

본 연구에서는 도개교량을 상승, 하강 시키는 도개과정과 일반 차량이 통행하는 상시 사용상태에 대하여 실거동을 측정하였으며, 구조해석에서는 가능한 실제와 유사하게 Model 을 구현하고 비교하여 다음과 같은 사항을 유추하였다.

- 1) 대상 교량은 도개과정이 아닌 상시 거치 상태에서도 도개를 용이하게 하기 위한 카운터 웨이트의 하중 균형으로 도개구간 거더의 하현재는 고정하중 작용상태에서 압축응력을 받고 있으며, 캔틸레버에 가까운 거치 상태이다.
- 2) 1일 1회 반복하는 도개구간의 도개전과 도개후의 상태에서 구조역계의 특별한 변화는 발생하지 않는 것으로 측정되었다. 단, 기계적 장치에 의해 자동으로 도개과정을 수행하더라도 교각 P1에 도개교의 캔틸레버 선단을 거치시 좌, 우측 거더에서 약 30 kN 정도의 반력오차는 매회 발생할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 도개 시작시 초기 응력상태와 도개 종료시 최종 응력상태를 분석하면 자중을 포함한 고정하중에 의한 P1에서의 반력이 상시 거치 상태에서 좌, 우 비대칭으로 판단된다.
- 4) 도개교 구간의 중량과 기계실 내 카운터 웨이트의 중량의 균형을 맞추어 P1의 반력을 최소화 시켰고, 상부구조의 횡방향 강성과 제작 및 시공시 내포될 수 있는 여러 가지 오차로 P1에서 비대칭 반력이 작용하는 경우가 있더라도 측정 기간 내 고정하중에 의한 부반력이 발생하는 경우는 없었으므로 불안정한 상태는 아닌 것으로 판단된다.
- 5) 도개가 진행되는 과정에서는 좌, 우측 거더가 균형을 이루며 동일한 응력상태로 상승, 하강과정이 진행되며, 좌, 우의 불균형 진동은 측정되지 않았고, 도개 중 발생하는 응력의 변화량은 해석에 의한 예상치의 93%수준으로 유사하며 안전성도 만족하는 것으로 분석되었다.
- 6) 설계시 적용한 구조해석 Model에서 본 연구의 변형을 측정 결과에 의하여 카운터 웨이트의 중량을 보정하고 P1에서의 반력상태를 고려하여 경계조건을 수정함으로써 가능한 실제 교량과 유사한 Model을 구현하고 구조해석을 수행한 결과, 실측치와 거의 동일한 반력 및 고유진동수를 산정할 수 있었다.
- 7) 당초 설계시의 예상보다는 다소 작은 P1의 반력상태로 분석되었지만, 발생 응력과 고유진동수를 고려하면 현재 도개교는 설계시 목표와 거의 유사한 거동상태 및 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 유일의 도개교량에 대하여 도개시 및 상시의 실제 거동을 측정하고 이에 근거하여 구조해석에 의한 비교 분석 등 도개교량의 거동을 분석해 보고자 하였으며, 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 철거 전 기존의 도개교량에 대하여 정밀안전진단 등이 수행되었으나, 도개구간의 실제 거동분석을 위한 재하시험 및 측정이 수행된 사례가 없었으며, 재가설 후의 초기안전 점검에서도 도개과정에 대한 거동 측정 및 분석이 수행된 사례가 없으므로, 본 연구의 결과는 추후 해당교량의 도개시 거동분석과 더불어 도개구간 전체의 거동분석시에도 비교 기준치가 되는 초기자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 재가설된 도개교는 설계에서 계획한 바와 거의 유사하게 복원되었고, 그 거동도 설계의 목표치를 만족할 수 있을 것으로 판단되며, 1일 1회의 도개과정의 반복에서도 구조역계의 특별한 변화 없이 양호한 도개과정을 보여주고 있는 것으로 나타났다.
- 3) 도개구간의 경량화를 위해 적용된 강바닥판의 상부구조 형식과 중량 콘크리트로 충전된 카운터 웨이트, 그 외 해상구간에서의 조립, 거치 등의 시공과정을 감안하면 정확한 대칭성 및 균형상태를 유지하기 어려울 수 있으므로, 추후에도 공용연수 증가 및 도개횟수의 증가에 따른 교량거동의 변동 추세를 분석하기 위해 본 연구결과를 토대로 지속적인 관리 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Commission on Chicago Landmarks (2007), Landmark Designation Report : Historic Chicago Bridges, Chicago, 12-15.
2. Industrial Safety Management Corporation (2014), Yeongdo Bridge Initial Safety Inspection Report, Lotte Engineering and Construction, 173-200 (In Korean).
3. Jungshin Engineering Corporation (2000), Yeongdo Bridge In-depth Safety Inspection Report, Busan Metropolitan city, 13-15 (In Korean).
4. Koglin, T. L. (2003), Movable Bridge Engineering, John Wiley & Sons Inc., U.S.A, 20-54.
5. Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (1999), Improving for In-depth Safety Inspection of Bridge and Calculation Method of Load Carrying Capacity, Vol. 2 (In Korean).
6. Korea Road & Transportation Association (2008), Bridge Design Specification (In Korean).
7. Lotte Shopping Corporation (2012), Busan Lotte World and Yeongdo Bridge Design Report (In Korean).
8. Ryall, M. J., Parke, G. A. R., and Harding J. E. (2000), Manual of Bridge Engineering, Thomas Telford Publishing, London, 663-698.
9. Wongong Engineering Corporation (2002), Yeongdo Bridge In-depth Safety Inspection Report, Busan Metropolitan city, 132-149 (In Korean).
10. Wongong Engineering Corporation (2003), Yeongdo Bridge In-depth Safety Inspection Report by Typhoon Damage, Busan Metropolitan city, 86-101 (In Korean).
11. Xanthakos, P. P. (1994), Thoery and Design of Bridges, John Wiley & Sons Inc., U.S.A, 823-836.
12. Yooshin Engineering Corporation (2005), Yeongdo Bridge In-depth Safety Inspection Report, Busan Metropolitan city, 134-137 (In Korean).

Received : 08/17/2015

Revised : 12/15/2015

Accepted : 12/30/2015

요 지 : 하천 또는 해안의 선박운항을 위한 도개교는 그 희소성으로 인해 최근에는 랜드마크로의 역할을 인정받으면서, 국외의 경우 세심한 유지관리로 수십 년 이상 공용기간을 지속하고 있는 사례가 적지 않다. 국내 유일의 도개교인 영도대교는 부식과 노화로 철거 후, 2013년에 재가설 되었으며, 현재 1일 1회 도개를 실시하고 있다. 최근 교량의 안전과 유지관리에 대한 요구가 높아지면서 주기적인 안전진단이 수행되지 만 도개교에 대한 계측 및 분석 사례는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 도개교가 상승 및 하강하는 도개과정과 상시 사용상태에서의 계측자료를 토대로 구조해석을 실시하여 도개교의 응력, 진동, 반력 등 실제 거동을 분석하고자 하였으며, 이 결과는 추후 공용연수의 증가 및 도개횟수의 증가에 따른 교량거동의 변동 추세를 분석하기 위한 초기 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 도개교, 평형추, 계측, 고유진동수, 변형율, 응력, 구조해석
