

## 수직재 간격비에 따른 개복식 상로 아치교의 충격계수 변화 분석

홍상현<sup>1</sup>, 오종원<sup>2</sup>, 노화성<sup>3\*</sup>

# Investigation of Impact Factor Variation of Open-Spandrel Arch Bridges According to Spacing Ratio of Vertical Members

Sanghyun Hong<sup>1</sup>, Jongwon Oh<sup>2</sup>, Hwasung Roh<sup>3\*</sup>

**Abstract:** An open-spandrel arch bridges, which consists of slab deck, arch rib, and vertical members, shows a various level of moment and axial forces according to the supporting boundary condition of arch rib and vehicle speeds. Also, the definition of impact factor accepts any kind of response parameters, not only displacement response at slab deck. The present study considers concrete open-spandrel arch bridges constrained with fixed conditions at the ends of arch rib and investigates the impact factor variation due to moving load speeds, response parameters, measuring locations, and vertical member spacing ratio of the bridges. The results of Reference model show that the impact factor is biggest when the reactive moment resulted at the vehicle-inducing opposite end of the arch rib is applied. The peak impact factor is a similar level obtained for the middle of the span adjacent to the slab deck center, but it is 19% higher than the peak impact factor calculated using the axial force developed at the same location. Reducing the spacing ratio of the vertical members as half as the reference model whose ratio is 1/9.375 produces a similar level of the moment-based peak impact factor compared to the reference model. However, when the spacing ratio is doubled, the peak impact factor is 4.4 times greater than the reference model.

**Keywords:** Open-spandrel arch bridges, Impact factor, Spacing ratio of vertical members, Response parameters

## 1. 서 론

아치교는 교량형식에 있어서 오랜 역사를 가지고 있으며 구조적 효율성과 미학적인 면에서 우수한 교량형식으로 간주되고 있다. 일반적으로 아치교는 상판의 위치에 따라 상로식과 중로식, 하로식으로 구분되며 상로식 아치교는 아치리브와 상판사이가 일정한 재료로 채워진 충복식(또는 폐복식) 형태와 개방감 확보 차원에서 개복식(open-spandrel) 형태가 있다. 이러한 개복식 형태의 아치교는 상판과 아치리브, 수직재(vertical members, 상판과 아치리브를 연결하는 지지기둥)로 구성된다. 또한 한지수와 지점조건에 따라 2한지(단순지지), 3한지, 고정지점 아치교가 있는데 이중 고정지점 아치교는 지점에서 수평반력과 더불어 지점모멘트가 발생하지만 안정된 지지 기반을 확보할 수 있고 지점구속으로 인해 다른 형식에

비해 강성이 크게 되므로 장경간 아치교에 주로 적용된다. 본 연구에서는 아치리브의 양단이 고정지점인 개복식 상로 콘크리트 아치교를 대상으로 하였으며, 교량의 내하력 평가에 있어서 중요한 변수 중 하나인 충격계수를 분석하였다. 개복식 상로 아치교의 충격계수와 관련된 연구로 Chatterjee and Datta(1995)는 교량을 집중질량모델(lumped mass model)로 이상화하여 단일 이동하중(moving load)에 관한 영향을 연속질량모델과 비교하였다. 상대적으로 강한 수직재에 유연한 상판의 경우 두 방법에서 얻어진 고유진동수는 거의 일치함을 보였으나 충격계수에 있어서는 집중질량모델이 보다 높은 값을 보였다. Garrett(2007)는 기하비선형 영향과 재료, 온도 영향에 따른 개복식 상로 아치교의 내하율을 유한요소해석을 통해 분석하였으며, 이때 충격계수는 설계식으로 고려하였다. Magalhães et al.(2008)은 실교량을 대상으로 모드분석 실험을 통해 고유진동수와 모드형상을 파악하였으며 이와 더불어 고유진동수와 모드형상의 변화를 실시간으로 분석하기 위해 GPS와 연계하여 인터넷기반 상시모니터링 시스템을 구축하였다. Caglayan et al.(2012)은 철도용 실교량에 대해 동적 재하실험을 실시하여 진동수를 분석한 후, 이 결과를 바탕으로 유한요소모델을 생성하여 충격계수를 포함한 내하율을 평가하였다. 위 연구들에서는 충격계수 산정 시 설계식 또는 변

<sup>1</sup>정회원, SD E&C(주) 연구팀장

<sup>2</sup>정회원, 롯데건설 토목사업본부 수석

<sup>3</sup>정회원, 전북대학교 토목공학과 방재연구소 부교수, 교신저자

\*Corresponding author: hwasung@jbnu.ac.kr

Department of Civil Engineering & Research Institute for Disaster Prevention, Jeonbuk National University, Jeonju, 54896, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2020년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

위응답 기반으로 분석하였다. 하지만 아치교의 지점이 고정형인 경우는 이동하중에 의한 축력과 모멘트 응답이 커지기 때문에 이와 같은 응답변수를 기반으로 한 충격계수 분석도 필요하다. 한편 국내에서는 강재 아치리브의 극한강도 평가(Park et al., 2004; Kim et al., 2005), 신형식단면으로 설계된 아치리브의 비선형 좌굴(Park and Kang, 2012), KTX 타이드 아치교(하로식)의 공진현상 분석(Jang et al., 2016), 중로식 아치교의 행어파단에 의한 부재력의 변화(Yim et al., 2010)를 분석한 사례를 찾아볼 수 있으나 개복식 상로 아치교의 충격계수에 관한 연구는 미비하다. 또한 개복식 상로 아치교는 힘의 전달 개념상 수직재의 역할이 중요하므로 그 간격비 역시 중요한 설계변수 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상로 아치교의 다양한 응답변수와 측정 위치, 수직재(vertical members)의 배열 간격에 따른 충격계수 변화와 원인을 이동하중 수치해석을 통하여 비교 분석하였다.

## 2. 아치교 및 이동하중 모델링

### 2.1 아치교의 제원 및 모델링

본 연구에서 고려한 개복식 상로 아치교의 형식은 Kawashima and Mizoguti(2000)에서 제시된 기하학적 제원을 참고하였으며, Fig. 1에서와 같이 기본적으로 상판과 수직재, 아치리브(arch rib)로 구성된다. 교량의 총 길이( $L_d$ )는 192 m, 아치리브 구간의 전체 길이( $L$ )는 150 m이며, 수직재의 간격( $C_s$ )은 16 m로서 간격비(spacing ratio,  $C_s/L$ )는 1/9.375 (0.107)이다. Palaoro(2011)에 따르면 아치교의 라이즈비(rise ratio,  $f = h/L$ )는 1/5이 가장 많이 적용되고 있으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 1/5.6 (0.176)로 적용하였다. 아치리브의 양단은 고정단이며, 수직재의 하단은 아치리브와 강결되어 있으며 상단은 상판과 핀으로 연결되어 있다. 각 구성요소의 단면은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 상판(Section A-A)은 4 m × 0.6 m, 수직재(Section B-B)는 1 m × 1 m, 아치리브(Section C-C)는 3 m × 1.5 m

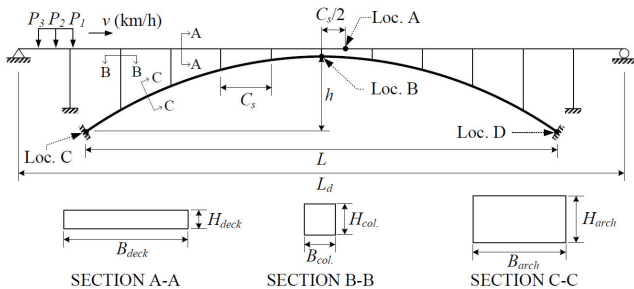


Fig. 1 Reference model ( $C_s=16\text{m}$ ,  $C_s/L=1/9.375$ )

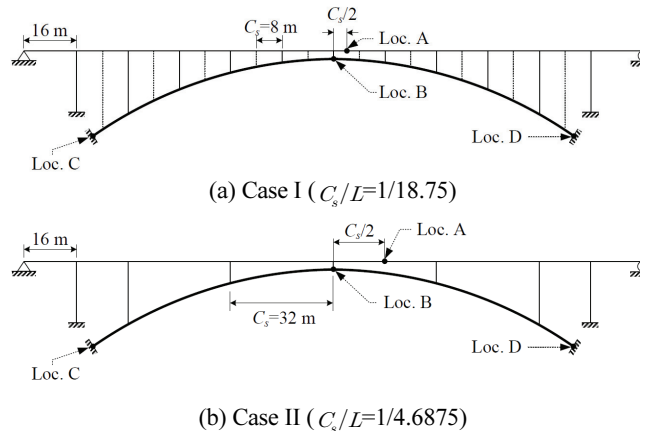


Fig. 2 Comparative cases according to spacing ratio of vertical members

로 구성하였다. 아치교의 재료는 일반 콘크리트로서 설계기준 강도( $f_{ck}$ ) 30 MPa, 포아송비 0.15, 밀도 2,380 kg/m<sup>3</sup>, 탄성계수 27.2 GPa을 동일하게 적용하였다.

수직재 배열이 이동하중에 따른 동적 응답에 미치는 영향을 분석하기 위해서 Fig. 2와 같이 기저모델(Reference model)을 포함하여 총 세 가지 경우(Case)를 고려하였으며, Case I과 II는 기저모델 간격비의 1/2( $C_s=8\text{m}$ )과 2배( $C_s=32\text{m}$ )로 변화시켰다.

### 2.2 이동하중 모델링

이동하중(moving load) 모델은 DB-24하중(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)을 기초로 하여 등가 3축 하중으로 적용하였다. DB-24 차량 하중의 총 중량은 432kN으로서 전륜 축 하중은 48kN, 중앙 및 후륜 축 하중은 각각 192kN으로 구성되며, 각 축 간격은 4.2m로 동일하게 선정하였다. 사용된 구조해석프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2020)를 이용하였으며, 아치교의 전체 구성요소는 총 423개의 2절점 보 요소(B21)로 모델링 하였다. 그리고 상판을 통과하는 차량의 축 하중은 Fig. 3과 같이 보 요소의 등가절점하중으로 변환하여 적용하였다(Goicolea et al., 2002; Brady et al., 2006). 이는 차량의 축 하중이 보 요소의 두 절점 사이를 통과할 때 각 절점에서 발생하는 반력들을 등가

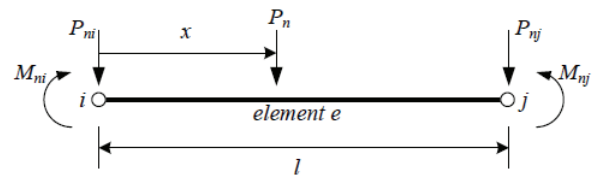


Fig. 3 Equivalent nodal loads applied for moving load analysis

절점하중으로 치환한 방법으로서 양 절점  $i$ 와  $j$ 에서 등가 집중 하중과 모멘트는 Eqs. (1)과 (2)로 각각 계산된다.

$$P_{ni} = \frac{P_n(l-x)^2(l+2x)}{l^3}; P_{nj} = \frac{P_n x^2(3l-2x)}{l^3} \quad (1)$$

$$M_{ni} = \frac{-P_n x(l-x)^2}{l^2}; M_{nj} = \frac{P_n x^2(l-x)}{l^2} \quad (2)$$

여기서,  $P_n$ 과  $M_n$ 은 요소(element)의 양 절점에 작용하는 차량 축 하중과 모멘트이며  $l$ 은 요소의 길이,  $x$ 는 축 하중이  $i$  절점에서 떨어진 거리를 나타낸다.

등가절점하중은 이동하중의 위치( $x$ )에 따라 달라지기 때문에 등속도로 이동하는 축하중의 위치를 시간에 따라 산정하여 각 절점에 작용하는 등가절점하중으로 계산하면 각 절점에 작용하는 하중을 시계열 진폭(amplitude)으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 시계열 진폭을 아치교 상판 각 절점의 집중하중 옵션에 적용하여 이동하중을 모사하였다.

### 3. 진동수 분포 분석

이동하중에 의한 아치교의 동적응답은 모드별 고유진동수에 영향을 받게 되며, 이러한 고유진동수는 수직재의 설계변수에 따라 달라진다. 이에 대한 분석을 위해 아치리브와 상판, 그리고 완성계에 대한 고유치 해석을 각각 수행하였으며, 모드형상과 고유진동수를 Fig. 4와 Table 1에 각각 나타내었다. 기저모델(Reference model)의 1차 모드의 고유진동수는

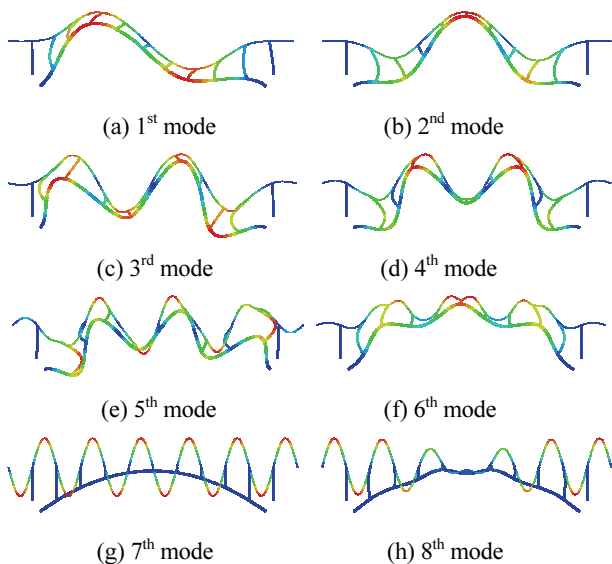


Fig. 4 Mode shapes of Reference model

0.888 Hz로서 아치리브의 거동이 지배적이지만 상당히 유연한 구조 특성을 가진다. 이에 반해 기저모델의 7차 모드 고유진동수는 3.587 Hz로서 상판만 독립적으로 해석했을 때의 12차 모드 고유진동수와 동일하다. 즉, Fig. 4에 나타난 바와 같이 1차부터 6차 모드까지는 아치리브의 거동이 아치교의 전체적인 거동을 지배하며, 7, 8차 모드에서는 상판의 거동이 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 2에 제시된 각 Case의 모드별 고유진동수를 기저모델에 대한 비로서 나타낸 것이다. 구조물의 응답을 지배하는 저차 모드를 기준으로 수직재의 간격비가 작은 Case I은 고유진동수가 소폭 증가하지만 간격비가 큰 Case II는 1차 모드에서 14.7%까지 감소한다. 또한 Case II의 7차 모드의 진동수는 기저모델에 비해 50%까지 감소하게 된다. 이는 구조물의 재료적 강도나 단면을 통해 강성을 변화시키는 것보다 훨씬 큰 수준이며 아치교 동적응답에 있어서 수직재의 간격비 영향이 클 수 있음을 의미한다.

Table 1 Natural frequencies of Reference model

Mode	Components of arch bridge		Reference model [Hz]
	Arch rib [Hz]	Deck [Hz]	
1	0.508	0.025	0.888
2	0.996	0.100	0.931
3	1.734	0.225	1.571
4	2.544	0.399	2.206
5	3.642	0.624	3.049
6	4.050	0.898	3.172
7	4.949	1.222	3.587
8	6.227	1.596	3.631
9	7.799	2.019	3.675
10	9.456	2.492	3.729

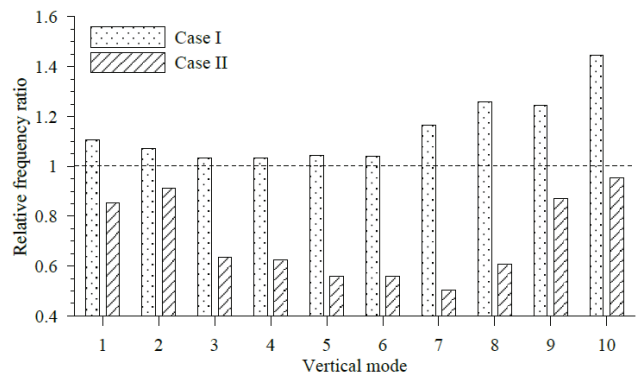


Fig. 5 Relative frequencies distribution for vertical modes

## 4. 응답변수와 충격계수

### 4.1 계측위치 및 응답변수

최대 정적응답과 최대 동적응답의 비로 나타내는 충격계수 (impact factor)는 Eq. (3)과 같이 계산되며 이는 동적증폭 (Dynamic Amplification, DA)으로 명명되기도 한다(Wolff and Starossek, 2008).

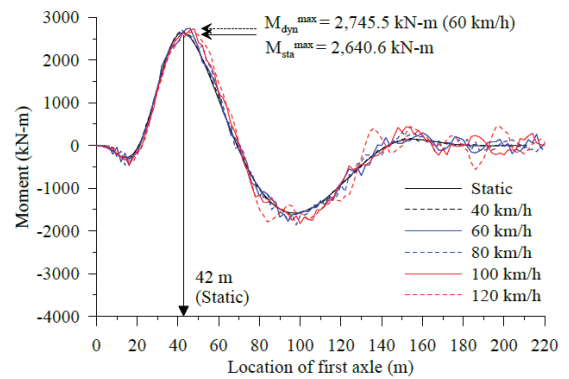
$$i = \frac{R_{dyn} - R_{st}}{R_{st}} \quad (3)$$

여기서,  $R_{dyn}$ 은 최대 동적응답이며,  $R_{st}$ 는 최대 정적응답을 나타낸다. 응답에는 여러 응답변수가 고려될 수 있다. 본 연구에서는 Table 2에서 나타낸 바와 같이 상판 중앙부 인근 지간 (Loc. A)에서의 변위와 휨모멘트, 아치리브 중앙부(Loc. B)에서의 휨모멘트와 축력, 그리고 아치리브 양 지점(Loc. C & D)에서의 반력(축력, 모멘트)을 고려하였다. 이에 대한 위치는 Figs. 1과 2에 나타낸 바와 같이 아치리브 중앙 인근 상판(Loc. A)과 아치리브 중앙(crown, Loc. B), 아치리브 지점부(Loc. C와 Loc. D)를 대상으로 하였으며 여기서 Loc. C는 이동하중 진행방향 지점이고 Loc. D는 이동하중 진입 반대 쪽 지점으로 명명하였다. 이동하중 속도는 40 km/h부터 120 km/h까지 20 km/h씩 변화시키면서 동적응답해석을 수행하였다.

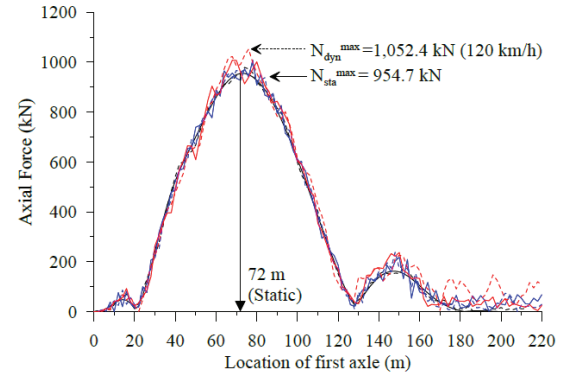
Fig. 6은 이동하중을 Fig. 1과 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 진행시켰을 때 거저모델의 아치리브 양 지점에서 발생하는 정적과 동적 반력을 차량하중위치에 대해 나타낸 것이다. Figs. 6(a)와 6(b)를 보듯이 좌측 지점(진입하는 쪽, Loc. C)의 최대 정적 모멘트와 축력은 2,640.6 kN-m, 954.7 kN으로서 차량의 위치가 각각 42 m, 72 m 일 때 발생하며, 우측 지점(진입 반대 쪽, Loc. D)에서는 Figs. 6(c)와 6(d)에 나타낸 바와 같이 최대 정적 모멘트와 축력은 2,616.3 kN-m, 957.9 kN 으로서 각각 130 m, 160 m 일 때 발생한다. 이와 같이 양 지점에서 최대 정적 반력의 크기는 거의 유사하며 교량의 대칭성으로 인해 차량 위치도 대칭적으로 나타난다. 반면 동적 응답에 있어서 최대 모멘트는 이동하중이 좌측 첫 번째 수직재를 통과(약 40 m) 한 시점 이후부터 이동하중의 가진(exciting) 효과가 동적응답

**Table 2** Response parameters

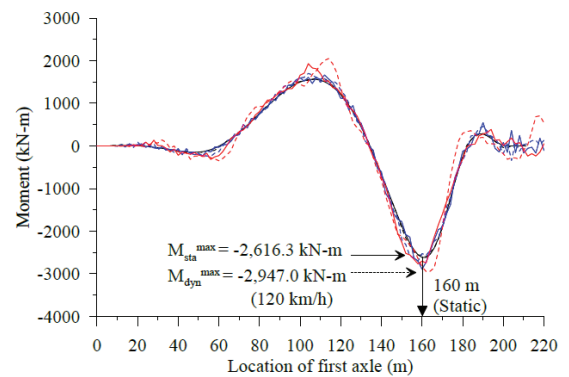
Locations	Response parameter [Index]	
Loc. A	Displacement [D]	Moment [M]
Loc. B	Axial Force [N]	Moment [M]
Loc. C	Axial Force [N]	Moment [M]
Loc. D	Axial Force [N]	Moment [M]



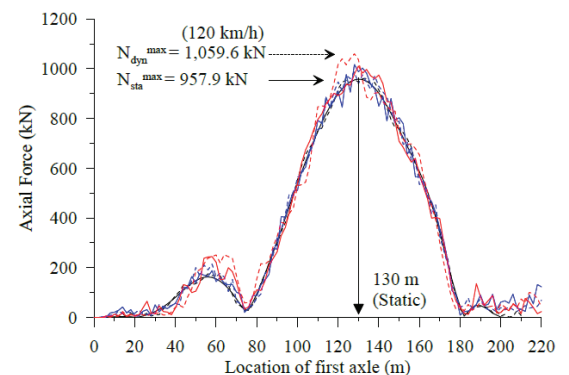
(a) Moment at the left end (Loc. C)



(b) Axial force at the left end (Loc. C)



(c) Moment at the right end (Loc. D)



(d) Axial force at the right end (Loc. D)

**Fig. 6** Reaction forces at the both ends of arch rib for Reference model



에 지속적으로 영향을 미치기 때문에 좌측 지점(Loc. C) 보다 우측 지점(Loc. D)에서 최대 7.3 % 이상 크게 발생한 것으로 나타났다.

Table 3은 기저모델의 각 위치(Loc. A, B, C, D)별 응답변수(D, M, N)에 따른 충격계수 결과를 정리한 것이다. 변위응답 기준의 경우 상판 중앙부 인접 지점(Loc. A)에서 가장 큰 충격계수를 보였으며 축력과 모멘트의 경우 차량 진입 반대쪽(Loc. D)에서 가장 큰 충격계수가 나타났다. 차량이 진입하는 쪽의 지점 모멘트(Loc. C-M)의 경우, 최대 충격계수가 60km/h의 이동하중 속도에서 0.04 ( $i_{max}=0.0398$ ) 미만으로 나타났으며, 이동하중 속도에 따른 충격계수의 표준편차도 1.19%로 가장 작게 나타났다. 이는 다른 응답변수에 비해 이동하중 속도에 덜 민감함을 의미한다. 이에 반해 다른 위치와 응답에서는 100 km/h 이상의 빠른 속도에서 최대 충격계수가 나타났다. 특히, 차량 진입 반대쪽 지점의 모멘트(Loc. D-M)에서는 최대 충격계수가 0.1264로서 가장 큰 값을 보였으며 이 값은 상판 중앙부 인접 지점의 변위응답(Loc. A-D) 기반 결과와 유사하지만 동일 위치의 축력응답(Loc. D-N) 기반 충격계수보다는 약 19% 이상 크게 나타난 값이다. 또한 이 위치와 응답(Loc. D-M)은 충격계수 표준편차에서도 4.75%로 가장

큰 값을 보여 이동하중 속도에 가장 민감함을 보였다.

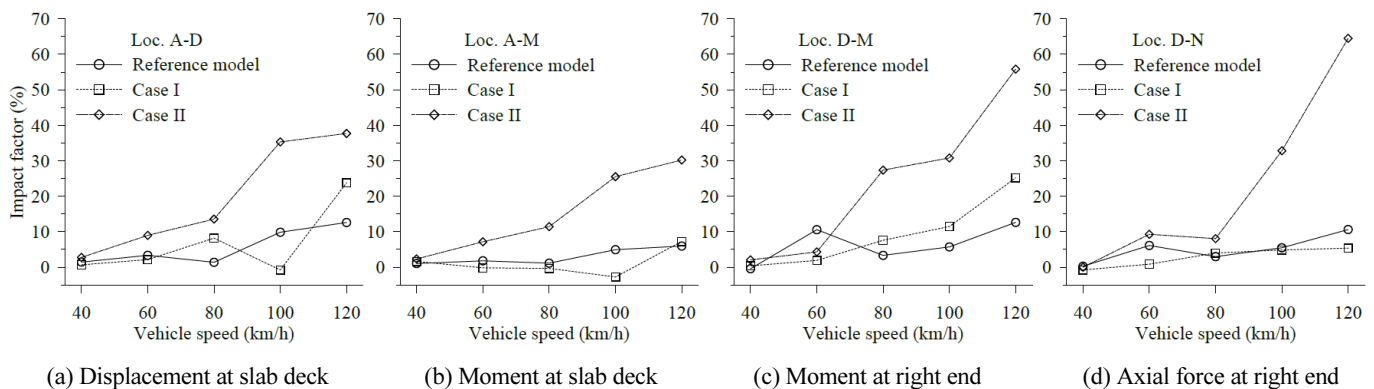
## 4.2 수직재 간격비에 따른 영향

Fig. 7은 아치리브 구간의 수직재 간격비가 달라질 경우(Case I과 Case II), 이동하중 속도에 따른 충격계수를 계측위치와 응답변수별로 나타낸 것이다. 수직재 간격비가 1/18.75로 기저모델에 비해 상대적으로 조밀한 Case I의 경우, 상판 중앙부 인접지점의 모멘트(Fig. 7(b))와 차량 진입 반대쪽(우측) 지점의 축력(Fig. 7(d)) 기반에서는 기저모델(Reference model)과 유사한 충격계수를 보였으나 Figs. 7(a)와 7(c)에서 나타난 바와 같이 상판 중앙부 인접지점의 변위와 우측 지점의 모멘트 기반 최대 충격계수는 기저모델에 비해 약 2배(변위: 189%, 모멘트: 199%) 가까이 증가하였다. 수직재 간격비가 기저모델의 두 배인 Case II의 경우 이동하중 속도 증가에 따라 충격계수도 증가하였으며, 우측 지점 모멘트(Loc. D-M)와 축력(Loc. D-N) 기반 최대 충격계수는 기저모델 보다 각각 약 4.4배와 6배 이상 크게 증가하였다.

Fig. 8은 동적응답의 차이가 두드러지는 기저모델과 Case II의 상판 중앙부 인접지점(Loc. A)에서 발생하는 가속도응답을 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 주파수 영역으로

**Table 3** Impact factor of Reference model for each speed

Locations	Parameters	Vehicle speed [km/h]					Standard deviation, $\sigma$ [%]	Peak impact factor (corresponding moving load speed)
		40	60	80	100	120		
Loc. A	Displ. (D)	0.0145	0.0336	0.0139	0.0987	0.1261	4.63	0.1261 (120km/h)
	Moment (M)	0.0104	0.0180	0.0115	0.0494	0.0597	2.06	0.0597 (120km/h)
Loc. B	Moment (M)	0.0056	-0.0022	0.0188	0.0724	0.0165	2.62	0.0724 (100km/h)
	Axial (N)	0.0276	0.0237	0.0494	0.0632	0.0504	1.49	0.0632 (100km/h)
Loc. C	Moment (M)	0.0224	0.0398	0.0184	0.0337	0.0057	1.19	0.0398 (60km/h)
	Axial (N)	0.0254	0.0559	0.0459	0.0559	0.1023	2.52	0.1023 (120km/h)
Loc. D	Moment (M)	-0.0042	0.1058	0.0334	0.0573	0.1264	4.75	0.1264 (120km/h)
	Axial (N)	0.0028	0.0613	0.0299	0.0548	0.1062	3.44	0.1062 (120km/h)



**Fig. 7** Impact factor according to spacing ratio of vertical members

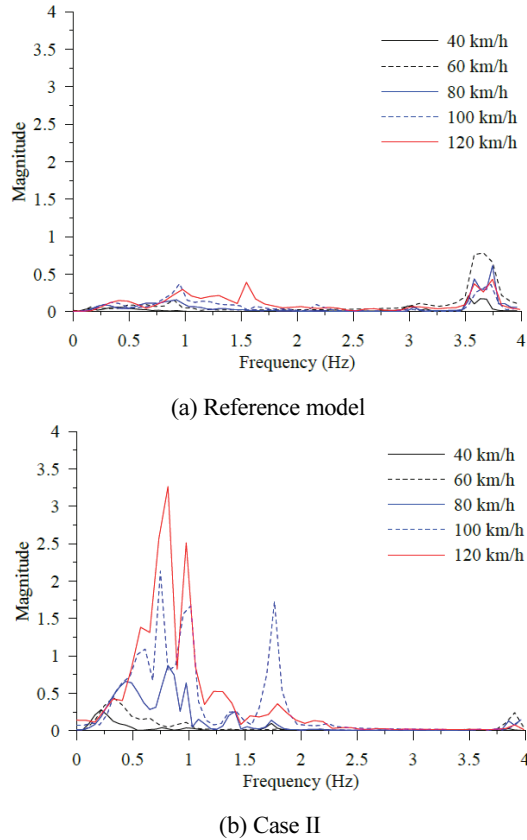


Fig. 8 FFT analysis of acceleration response at Loc. A

나타낸 것이다. 기저모델의 경우 Fig. 8(a)에서 나타낸 바와 같이 Magnitude가 0.8 이하이며, 낮은 이동속도에서는 고차 모드(Table 1 참조)에 해당하는 7에서 10차 모드까지의 영향이 크게 작용하고 속도가 빨라질수록 저차모드의 영향이 커짐을 알 수 있다. 반면에 Fig. 8(b)와 같이 Case II의 경우 전반적으로 저차 모드(Fig. 5 참조)의 영향을 받고 있으며 이동속도 100 km/h 이상부터는 Magnitude가 약 2.2에서 3.5까지 크게 증가함을 알 수 있다.

## 5. 가진진동수에 따른 동적응답특성

수직재의 간격비(spacing ratio)는 구조계의 동적특성을 변화시킬 뿐만 아니라 이동하중 속도와 지간길이에 따라 달라지는 가진진동수와 관련이 있어서 아치교의 최대 동적응답에 영향을 준다. 다시 말해 이동하중이 교량에 작용할 경우 이동속도( $v$ )와 지간길이에 의해 일정한 진동수로 가진하게 되며 이러한 가진진동수(exciting frequency)와 교량의 고유진동수가 유사할 경우 동적 응답이 크게 발생하게 된다(Ju and Lin, 2003). Eq. (4)는 이동하중에 의한 가진진동수를 나타낸 것이

Table 4 Exciting frequencies for first mode

Vehicle Speed [km/h]	Exciting frequencies, $\Omega_{cs}$ [Hz]		
	$C_s=8$ m (Case I)	$C_s=16$ m (Reference model)	$C_s=32$ m (Case II)
40	1.39	0.69	0.35
60	2.08	1.04	0.52
80	2.78	1.39	0.69
100	3.47	1.74	0.87
120	4.17	2.08	1.04

며 여기서  $C_s$ 는 수직재의 간격, 즉 상판의 지간길이이다. Eq. (5)는 가진진동수비( $R_{cs}$ , exciting frequency ratio)로서 이동하중 의한 가진진동수( $\Omega_{cs}$ )와 구조물의 고유진동수( $f_n$ )와의 비를 나타낸 것이다.

$$\Omega_{cs} = nv / (2C_s) \text{ [Hz]} \quad (4)$$

$$R_{cs} = \Omega_{cs} / f_n \quad (5)$$

일반적으로 단순보에서는 교량의 동적거동에 영향을 미치는 교량의 첫 번째 고유진동수를 사용하지만 Fig. 4에서 보듯이 교량의 1차 모드에서 상판의 형상이 단순보의 2차 모드와 유사하다. 이는 아치교 모드의 특성으로 이와 유사한 형태가 타이드 아치교에서도 나타난다(Jang et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 아치교의 1차 모드에 대한 가진진동수를 Eq. (6)과 같이 고려하였다.

$$\Omega_{cs} = v / C_s \text{ [Hz]} \quad (6)$$

Table 4는 Eq. (6)을 적용하여 이동하중 속도에 따른 가진진동수를 정리한 것이다. Table 4에 나타난 바와 같이 가진진동수는 0.35 Hz부터 4.17 Hz까지 넓은 범위를 가지게 되어 본 연구에서 고려한 아치교의 경우 저차모드부터 고차모드까지 전체적으로 영향을 받게 된다. 하지만 구조물의 동적응답이 크게 증폭되는 공진은 주로 저차모드에 의해 유발되므로 이에 대한 경향을 파악하기 위해 Fig. 9에 동적응답의 영향이 가장 두드러진 아치리브 우측 지점(차량 진입 반대쪽) 모멘트(Loc. D-M) 기반의 최대 충격계수와 교량의 1차 고유진동수를 고려한 120 km/h 이동하중 속도에 따른 가진진동수비( $R_{cs}$ )를 나타냈다.

Fig. 9와 같이 기저모델(Reference model)의 경우 가진진동수비( $R_{cs}$ )는 2.35 정도로서 상대적으로 작은 동적응답을 나타내는데 반해 수직재 간격이 기저모델 보다 큰 Case II의 경우 가진진동수비가 1.38으로 저차모드의 고유진동수에 가까워

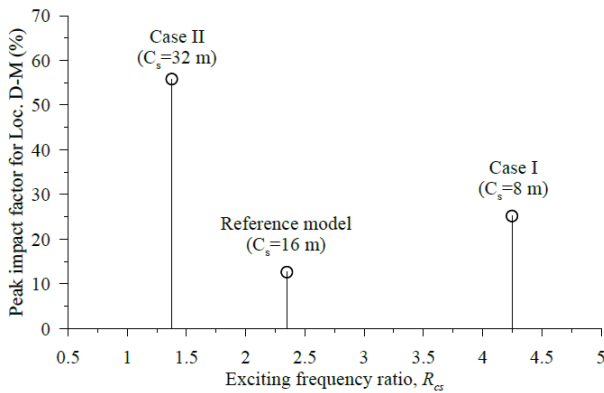


Fig. 9 Distribution of peak impact factor and exciting frequency ratios ( $v=120$  km/h)

저 동적응답이 커지게 됨을 알 수 있다. 또한 수직재 간격이 8 m인 Case I은 가진진동수비가 4.25로 저차모드 영향이 제일 작게 나타났다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 개복식 상로 아치교의 응답 변수와 측정 위치, 수직재의 배열 간격에 따른 충격계수를 비교하였다. 그 결과 변위응답 기반의 경우 상판 중앙부 인접 지간(Loc. A)에서 가장 큰 충격계수를 보였으며 모멘트와 축력의 경우 이동하중이 진입하는 반대 방향 아치리브 지점(Loc. D)에서 가장 큰 값이 나타났다. 또한 이들 중에서 가장 큰 충격계수는 모멘트 응답 기반일 경우에 발생했으며, 이 모멘트 응답 기반 충격계수는 상판 중앙부 인접 지간(Loc. A)에서의 변위응답 기반 충격계수에 비해 0.24 % 정도로 약간 높게 나타났지만 동일 위치(Loc. D)에서의 축력 기반 충격계수에 비해 19 %, 이동 하중이 진입하는 쪽 아치리브 지점(Loc. C)에서의 축력응답 기반 충격계수에 비해 23.6 % 높은 값이다. 수직재 간격비를 기저모델에 비해 1/2로 감소(Case I) 시켰을 경우 최대 충격계수는 전반적으로 기저모델과 유사한 수준으로 나타났지만 간격비를 2배 증가(Case II) 시켰을 경우 약 4.4배 증가하였다. 이는 수직재 간격이 넓어짐에 따라 이동하중의 가진진동수가 아치교 저차모드 진동수와 가까워져 동적응답이 크게 증가하기 때문이다. 본 연구 결과를 볼 때, 양단고정형 개복식 상로 아치교의 충격계수 검토 시 상판의 변위응답뿐만 아니라 아치리브 지점부의 모멘트응답도 검토되어야 하며 또한 수직재의 간격비에 따른 교량의 고유진동수와 가진진동수의 변화도 추가적으로 비교되어야 함을 알 수 있다.

## References

1. ABAQUS (2020). ABAQUS/CAE user's manual. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
2. Brady, S. P., O'Brien, E. J., and Znidaric, A. (2006), Effect of Vehicle Velocity on the Dynamic Amplification of a Vehicle Crossing a Simply Supported Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 11(2), 241-249.
3. Caglayan, B. O., Ozakgul, K., and Tezer, O. (2012), Assessment of a Concrete Arch Bridge using Static and Dynamic Load Tests, *Structural Engineering and Mechanics*, 41(1), 83-94.
4. Chatterjee, P. K. and Datta, T. K. (1995), Dynamic Analysis of Arch Bridges under Travelling Loads, *International Journal of Solids and Structures*, 32(11), 1585-1594.
5. Garrett, G. P. (2007), Analytical Load Rating of an Open-Spandrel Arch Bridge: Case Study, *Journal of Bridge Engineering*, 12(1), 13-20.
6. Goicolea, J., Dominguez, J., Gabaldon, F., and Navarro, J. (2002), Resonant Effects in the Short Span High Speed Railway Bridge: Modeling and Design Issues, *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Dynamics*, Taylor & Francis, Munich, Germany, 2, 1077.
7. Magalhães, F., Cunha, A., and Caetano, E. (2008), Dynamic Monitoring of a Long Span Arch Bridge, *Engineering Structures*, 30(11), 3034-3044.
8. Jang, J. H., Min, D. J., and Kim, M. Y. (2016), Investigation of Resonance Occurrence Conditions by Dynamic Interaction Analysis between Arch Bridge and KTX Trains, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 20(2), 103-112 (in Korean).
9. Ju, S.-H. and Lin, H.-T (2003), Numerical Investigation of a Steel Arch Bridge and Interaction with High-Speed Trains, *Engineering Structures*, 25, 241-250.
10. Kawashima, K., and Mizoguti, A. (2000), Seismic Response of a Reinforced Concrete Arch Bridge, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 1824.
11. Kim, I. T., Kwon, Y. B., Lee, W. S., and Lee, Y. H. (2005), The Ultimate Behavior of the Circular Hollow Section Arch Rib for Steel Arch Deck Bridges, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 25(3A), 511-519 (in Korean).
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) Design Code for Highway Bridge (in Korea). Korea Road & Transportation Association.
13. Park, J. S. and Kang, S. Y. (2012), A Numerical Study on In-plane Nonlinear Buckling Strengths of New Arches Subjected to Uniformly Distributed Loading, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 13(1), 399-405 (in Korean).
14. Park, Y. M., Heo, T. Y., Lee, P. G., and Noh, K. B. (2004), Evaluation of In-plane Buckling and Ultimate Strength for Braced Arch Ribs, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 16(6), 759-768 (in Korean).
15. Wolff, M., and Starossek, U. (2008), Robustness Assessment of a Cable-stayed Bridge, *Proceedings of the 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*,

16. Yim, S. S., Kong, M. S., and Yoo, Y. S. (2010), Dynamic Analysis of Long-span Arch Bridge by Fracturing Hangers, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 14(2), 113-120 (in Korean).

---

**요 지** : 상판과 아치리브, 수직재로 구성된 개복식 상로 아치교는 아치리브 지점 조건과 차량 이동속도에 따라 지점에서의 축력과 모멘트의 정도가 달라진다. 또한 충격계수 정의에는 상판 변위응답뿐만 아니라 다양한 종류의 응답이 고려된다. 본 논문은 양단 고정지점 콘크리트 개복식 상로 아치교에 대해 측정 위치와 응답변수, 수직재의 간격비에 따른 충격계수를 분석하였다. 수직재 간격비가 1/9.375인 기저모델의 경우 이동하중 진입 반대 쪽 아치리브 지점에서 모멘트 기반 충격계수가 가장 큰 값을 보였으며, 이 값은 상판 중앙부 인접지점 변위응답 기반 최대 충격계수와는 비슷한 수준이지만 동일 위치에서의 축력 기반 충격계수에 비해 19% 높은 값이다. 수직재 배열에 있어서 간격비를 기저모델에 비해 1/2로 감소시켰을 경우, 모멘트 기반 최대 충격계수는 기저모델과 유사한 수준이었지만 간격비를 2배 증가시켰을 경우는 기저모델 대비 4.4배 증가하였다.

**핵심용어** : 개복식 상로 아치교, 충격계수, 수직재 간격비, 응답변수

---