

# 긴장재 및 차량속도 변화에 따른 콘크리트 충전 타이드 아치형 거더의 동적거동

## Effects of Post-Tensioning Tendons and Vehicle Speeds on Dynamic Response of Concrete-Filled Steel Tubular Tied Arch Girder

노화성\* · 홍상현\*\* · 박경훈\*\*\* · 이종세\*\*\*\*

Roh, Hwasung · Hong, Sanghyun · Park, Kyunghoon · Lee, Jong Seh

### Abstract

The CFTA girder developed is a concrete filled steel tubular system with arched shape and external post-tensioning (PT) tendons which control the initial camber and the bending stress of the girder. In the present study the effects of the PT tendons on the dynamic behavior of the girder subjected to a moving vehicle load are numerically investigated. Various levels for the tendon quantity and the tendon forces are considered, using the existing FE model of the girder. The vehicle considered is a DB-24 truck and is modeled with two tracks-three axles. Equivalent-load pulse time histories are applied to each node to simulate the moving vehicle, depending on the time of arrival and the discretization. The vehicle speeds are varied from 40 km/hr to 100 km/hr with increment of 20 km/hr. The analysis results show that the tendon forces do not produce any influences on the dynamic responses of the girder. However the dynamic deflection of the girder increases when a smaller amount of tendons is used. The Dynamic Amplification Factors (DAF) are evaluated based on the static and dynamic responses. Much lower values of the DAF are obtained, even no tendons applied, than those provided by the design criteria of the AASHTO LRFD and the Korea Highway Standard Specification.

**Keywords** : CFTA girder, FEM analysis, post-tensioning tendon, tendon quantity, moving vehicle load, dynamic amplification factor, korea highway standard specification

### 요 지

CFTA 거더는 아치형상을 갖는 콘크리트 충전 강관구조이며 초기치짐 및 공용 중 응력제어를 위해 외부긴장재를 배치한 거더 형식이다. 본 연구에서는 차량진행에 따른 거더의 동적거동에 긴장재가 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 유한요소 프로그램을 이용하여 거더 및 긴장재 등을 수치모델링하였으며 긴장재의 양과 긴장력을 다양한 값으로 변화시켰다. 차량하중은 도로교설계기준의 DB-24 하중을 고려하였으며 3축-2트랙으로 모델링하였다. 차량하중은 등가질점하중으로 적용시켰으며 차량하중의 이동은 차량통과 시간 및 질점수를 고려한 각 질점에서의 시간함수로 나타내었다. 차량속도는 40 km/hr에서 100 km/hr까지 20 km/hr씩 증가시켰다. 해석결과 긴장재의 긴장력 변화는 거더의 동적거동에 영향을 주지않았으며 초기치짐에만 영향을 주었다. 긴장재의 양에 따라서는 거더의 동적거동이 다르게 나타났으며 긴장재의 양이 적을 수록 동적치짐은 증가하였다. 이를 바탕으로 거더의 동적증폭계수(DAF)를 산출하였으며 긴장재가 없는 경우에도 AASHTO LRFD와 도로교 표준시방서에서 정한 기준값보다 매우 작은 안정적인 거동을 보였다.

**핵심용어** : CFTA 거더, 유한요소해석, 외부긴장재, 긴장재양, 이동차량하중, 동적증폭계수, 도로교설계기준

### 1. 서 론

CFTA(Concrete-Filled steel tubular Tied Arch) 거더는 폐단면의 강재를 주체로 충전콘크리트를 일체화시킨 합성구조이다. 이 거더에서 상면을 일정한 높이로 유지하고 하면은 아치형상을 갖는 폐단면의 강재박스 내부는 콘크리트로 충

전되어 아치리브의 역할을 하며, 긴장재를 이용하여 양 단부에서 아치의 횡방향력에 저항하도록 하여 타이드 아치 구조가 이루어진다. 또한 양 단부에 고정되는 긴장재에 시공단계에서 긴장력을 도입함으로써 아치리브에 압축력을 도입하여 아치리브 내부의 콘크리트에 발생하는 인장력을 감소시켜 거더의 내하력을 증가시킨다. 즉, CFTA 거더는 콘크리트 충전

\*정회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 연구교수 (E-mail : marsroh@hanyang.ac.kr)

\*\*한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : jerom1st@hanyang.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 수석연구원 (E-mail : paul@kict.re.kr)

\*\*\*\*정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 교수 (E-mail : jonglee@hanyang.ac.kr)

구조, 아치구조, 프리스트레스 구조라는 특징을 가지고 있다.

개발된 CFTA 거더의 정적거동에 관한 연구는 최근 몇 년 동안 많은 연구가 수행되어왔다. 개발 및 설계 단계의 거더 해석에 관한 연구에서는 거더 단면의 변화와 아치형상을 고려하여 강성 중립축에 따라 아치형상의 multi-frames으로 모델링하여 긴장재의 유무에 따른 단면력의 변화나 교량 경간길이 및 긴장재량에 따른 처짐이나 거더단면 응력 변화를 분석하였다(박호 등, 2006; 박호 등, 2007; Lee 등, 2008a; 전중수 등, 2009). 정적실험에 관한 연구에서는 개발된 CFTA 거더의 가장 큰 특징인 압축력 도입효과를 확인할 수 있었으며 내하력 또한 향상되었고, 특히 파괴에 이르는 한계상태에서는 취성이 아닌 연성거동을 보여 극한상태에서의 충분한 대비시간을 확보할 수 있음을 보였다(이상윤 등, 2007; 이학 등, 2007a). 또한 보다 정밀한 수치해석을 위해 실험결과를 바탕으로 거더의 FEM 해석모델을 개발하여 국부응력 등 보다 자세한 분석을 수행하였으며(이학 등, 2007b; Lee 등, 2008b), 시공단계를 고려한 해석을 수행하여 거더의 정적거동을 검토하였다(박성재 등, 2009).

CFTA 거더의 동적안정성과 관련한 연구에서는 차량 진행에 따른 거더의 거동과 차량충돌로 인한 긴장재 및 거더의 안정성을 평가하였다. 차량진행에 따른 거더의 동적거동에 관한 연구에서는 구조해석 프로그램 Strand7(2005)을 사용한 유한요소 수치해석을 통하여 차량 속도별 Meister 진동 감각 특성 곡선을 구하여 진동성평가를 수행하였다(김정호 등, 2009). 이 결과, Meister 기준으로 평가할 경우 E등급(just perceptible, 겨우 인지할 정도)으로 평가되어 진동사용성 측면에서 우수한 것으로 판단되었다. 또한 주행중인 차량이 거더의 긴장재에 충돌할 경우를 가정하여 FEM simulation을 수행하였으며, 이 결과 차량충돌로 인한 긴장재의 일부가 파손될 수 있으나 거더의 성능변화에는 크게 영향을 미치지 못함을 보였다(Trung 등, 2008; Choi 등, 2009, 김정호 등, 2009).

이러한 CFTA 거더는 질량이 지간에 걸쳐 균일하게 분포된 구조물에 비해 Fig. 1과 같이 중앙부보다 지점부에 상대적으로 질량이 집중되어 지간 중앙부의 가속도 응답은 작게 나타나므로 동적가속도응답에 유리한 구조형식으로 알려져있다(김정호 등, 2009). 또한 아치효과와 긴장재에 의해 거더의 강성을 증가시켜 차량주행에 의한 공진대역을 벗어난 진동사용성 측면에서도 유리한 구조물로 분류되고 있다(김정호 등, 2009).

하지만 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 강성의 분포는 중앙부가 상대적으로 다른 지점부에 비해 작아서 변위응답에는

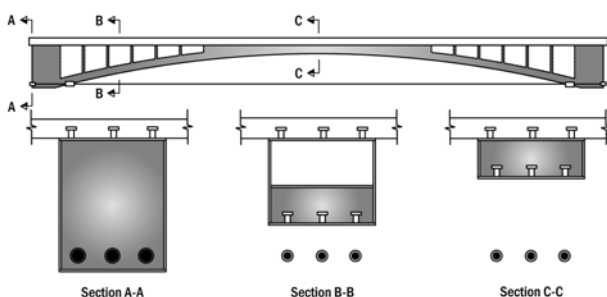


Fig. 1 Geometry of CFTA girder (Lee et al., 2008)

취약할 수 있는 구조이며 긴장재를 통해 이러한 처짐을 제어하고 있다. 이처럼 CFTA 거더에 있어서 긴장재의 역할은 매우 중요하다. CFTA 거더의 긴장재는 통상의 PSC 거더와는 달리 긴장력을 도입하기 위한 매개체인 동시에 외부하중을 지지하기 위한 구조부재의 역할 또한 담당한다(박호 등, 2007). 즉, CFTA 거더에서의 긴장재는 동적응답측면에서 다음과 같은 2가지 기능을 가지고 있다. i) 긴장재 양에 따른 거더의 질량 및 강성변화: 긴장재가 구조부재로서 가능하게 되므로 긴장재의 강성은 거더 전체의 거동에 영향을 준다(박호 등, 2007). ii) 긴장력 정도에 따른 외력변화: 가해진 긴장력은 동적거동에 있어 외력으로 작용하여 차량에 의한 동적처짐 및 가속도응답에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 개발된 CFTA 거더에 차량이 다양한 속도로 통과할 때 긴장재의 긴장력과 긴장재 양을 변화시켜 동적거동을 보다 상세히 분석하여 긴장재가 거더에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. CFTA 거더의 FEM 동적 모델링

### 2.1 CFTA 거더 형상 및 제원

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였으며 고려된 CFTA 거더는 경간 30.6 m, 폭 3.5 m에 단순지지조건이며, 구성요소는 강재주형, 내부충전 콘크리트, 슬래브 콘크리트, 슬래브 철근, 긴장재로 되어 있다. 강재주형은 4절점 쉘 요소(S4), 내부충전 콘크리트와 슬래브 콘크리트는 8절점 솔리드 요소(C3D8), 그리고 슬래브 철근과 긴장재는 트러스 요소(T3D2)로 모델링 하였으며 총 48,960개의 요소를 사용하였다. 각각의 구성요소는 시공단계를 거친 후 일체거동을 하므로 슬래브 철근은 embed, 나머지 구성요소는 절점공유(tie)를 통하여 경계면을 모델링 하였으며, 긴장재의 긴장력은 트러스 요소에 초기응력(initial stress)을 작용함으로써 구현하였다(이학 등, 2007b). CFTA 거더의 물성치는 Table 1에서 나타난 바와 같이 강재주형과 슬래브 철근에 사용되는 강재, 내부충전 콘크리트, 슬래브에 사용되는 콘크리트, 그리고 긴장재 세 가지의 탄성모델이 사용되었으며, CFTA 거더 모델의 재료에 따른 각 구성요소는 Fig. 2에 나타난 바와 같다(김정호 등, 2009). 한편 모드형상 및 고유진동수 추정을 위해 기존에 실시된 충격실험을 통하여 본 구조물의 감쇠비는 1.76%로 산정되었으며(김정호 등, 2009), 이를 바탕으로 본 연구에서는 2%의 감쇠비를 적용하였다.

### 2.2 긴장력 모델링

CFTA 거더에서 긴장재는 Fig. 3과 같이 총 네 가닥으로 배치된다. 긴장재 중 내부의 두 가닥은 1차 긴장재로 작용하며, 외측의 두 가닥은 2차 긴장재로 작용한다. ABAQUS

Table 1. Material properties used in FEM modeling

	Mass density (ton/mm <sup>3</sup> )	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson ratio
Steel	7.85E-09	210,000	0.3
Concrete	2.32E-09	29,000	0.167
Tendon	8.00E-09	200,000	0.3

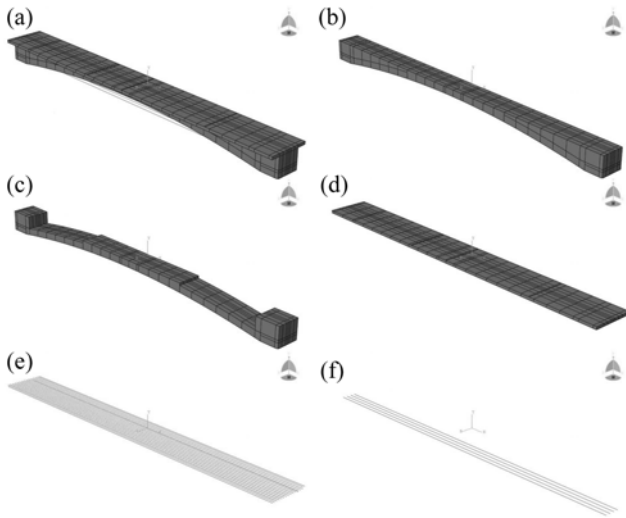


Fig. 2 FEM modeling of structural components of CFTA girder. (a) overall, (b) steel box, (c) in-filled concrete, (d) slab concrete, (e) slab steel, and (f) post-tensioning tendons

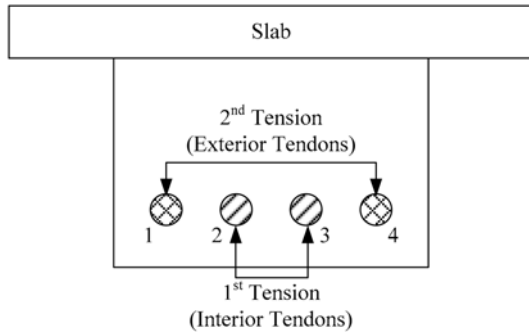


Fig. 3 Tendon arrangement and sequences of post-tensioning

에서 CFTA 거더의 시공단계에서 나타나는 내부응력 및 변위를 반영하기 위해 총 4단계로 하중을 재하하였으며 단계별 조건은 다음과 같다.

- Step 1: 콘크리트와 강재거더의 자중
- Step 2: 1차 긴장(내부긴장재 2, 3)
- Step 3: 슬래브 타설
- Step 4: 슬래브와 강재박스의 합성 후 2차 긴장(외부긴장재 1, 4)

CFTA 거더의 설계에 있어서 긴장력은 정적처짐 제어, 휨 균열방지 및 설계강도 확보 등을 고려하여 결정되었다(김정호 등, 2009). 본 연구에서는 기존의 ABAQUS 모델(김정호 등, 2009)에서 사용된 긴장력의 크기를 변화시켜 보다 실험치와 보다 가까운 모델을 만들었다. 이에 따른 결과 사용된 긴장

Table 2. Input data for post-tensioning tendons

Area/duct (mm <sup>2</sup> )	Interior tendons	2635.30
	Exterior tendons	1664.40
Initial stress/duct (N/ mm <sup>2</sup> )	Interior tendons	902.74
	Exterior tendons	444.60
Force/duct (kN)	Interior tendons	2379
	Exterior tendons	740
Sum (×2, kN)	Interior tendons	4758
	Exterior tendons	1480

재의 제원과 초기 긴장력으로 작용시킨 초기응력(initial stress)으로 인해 긴장재에 작용되는 긴장력은 Table 2와 같으며 1차 긴장재의 긴장력은 항복강도의 약 53.1%(4,758 kN), 2차 긴장재의 긴장력은 항복강도의 약 26.2%(1,480 kN)이다. Table 3에서 보듯이 각각의 시공단계에 따라 거더의 1차와 2차 긴장으로 인해 1차 긴장력은 항복강도의 약 51.24%(4590.90 kN), 2차 긴장력은 항복강도의 약 24.74%(1400.00 kN)로 바뀌게 되며 최종적인 동적해석모델의 내부 긴장재와 외부긴장재 긴장력은 모두 실험결과와 유사하다.

### 2.3 고유치 해석

CFTA 거더 동적모델의 정확성을 검증하기 위하여 8차 모드까지 고려한 FEM 고유치 해석을 수행한 결과 모드형상은 Fig. 4와 같으며 가진실험(김정호 등, 2009)에 의한 1, 2, 3차 vertical mode의 고유진동수를 Table 4에서 비교하였다.

한편 본 연구에서는 기존에 개발된 FEM 모델에서 거더의 콘크리트 및 강재의 물성치를 재료실험 결과에 근거하여 변화시켜 보았으며, 이에 따른 1차 고유진동수가 기존의 모델에 비해 약 0.5%로 매우 작게 증가되었으며 이는 모드추정실험에서 얻어진 진동수와 비교하여 6.91%의 오차로 작게 나타났다. 고유치 해석결과 vertical mode에서 1차 지배모드(2.091 Hz)와 2차 지배모드(9.018 Hz)의 차이가 4배 이상 발생하며 이는 거더의 중앙부가 양쪽 지지부 보다 강성이 작아 나타나는 현상이다. 6번째 모드에서 발생하는 회전모드(torsional mode)는 거더가 대칭으로 이뤄져 있기 때문에 큰 편심을 가지고 차량하중이 재하되면 발생가능하나 워낙 고차모드이기 때문에 거의 발생하지 않는다고 봐도 무방하다.

한편 Tilly(1986)는 유럽의 200개 이상 교량의 길이를 대상으로 실험한 결과를 토대로 교량의 길이와 고유진동수와와의 상호관계를 통계적으로 분석하였으며, 이에 따른 통계식  $f_0 = 82L_{max}^{-0.9}$  (m, Hz)을 제안하였다. 본 연구의 CFTA 거더는

Table 3. Tendon force variation in each construction sequence

Step	Interior tendons			Exterior tendons		
	Axial stress (MPa)	Force (kN)	Sum (×2) (kN)	Axial stress (MPa)	Force (kN)	Sum (×2) (kN)
1	0	0	0	0	0	0
2	860.22	2266.93	4533.86	0	0	0
3	933.70	2460.58	4921.16	0	0	0
4	871.07	2295.54	4591.07	420.54	699.95	1399.91
Results from experiment-			4590.90	-	-	1400.00
Error			0.17%	-	-	0.09%

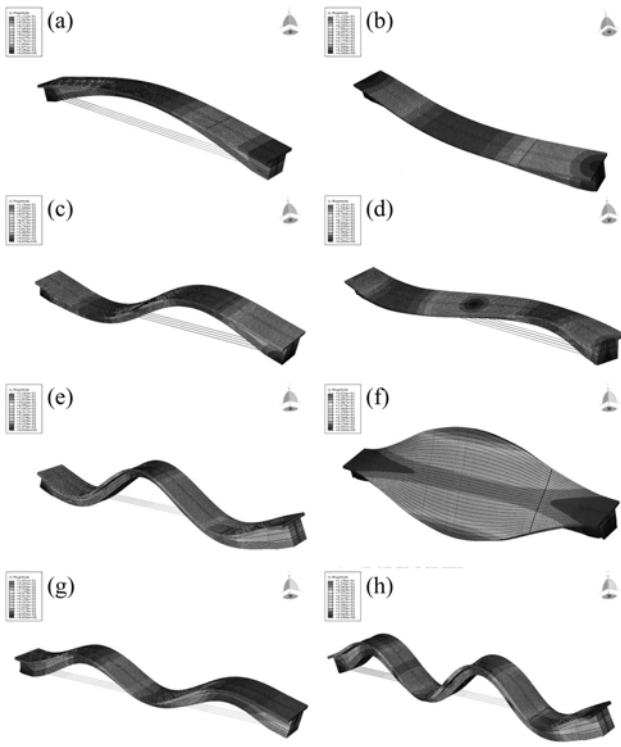


Fig. 4 Mode shapes. (a) mode 1 (vertical mode 1), (b) mode 2 (horizontal mode 1), (c) mode 3 (vertical mode 2), (d) mode 4 (horizontal mode 2), (e) mode 5 (vertical mode 3), (f) mode 6 (torsional mode 1), (g) mode 7 (vertical mode 4), and (h) mode 8 (vertical mode 5).

Table 4. Eigenvalue analysis of CFTA girder

Mode sequence	Mode	Experimental (Hz)	Numerical (Hz)	Freq. error (%)*
1	V_mode #1	2.2461	2.0910	6.91
2	H_mode #1	-	6.3859	-
3	V_mode #2	8.2031	9.0180	9.93
4	H_mode #2	-	19.9440	-
5	V_mode #3	17.6758	20.1980	14.27
6	T_mode #1	-	25.5120	-
7	V_mode #4	-	26.9240	-
8	V_mode #5	-	36.9330	-

\*Error = |FEM-Experiment| / Experiment, V: Vertical, H: Horizontal, T: Torsional

길이가 약 30 m 이므로 이 결과에 의한 고유진동수는  $f_0 = 3.84\text{Hz}$  이지만 실험에서 나타난 CFTA 거더의 1차 vertical mode는 2.246 Hz이므로 일반적인 30 m 경간의 교량에 비해 다소 유연(flexible)한 구조로 분류된다.

## 2.4 공진발생속도

구조물의 주요(main) 진동수는  $\omega = \sqrt{k/m}$  또는  $f = \omega/2\pi$  로 계산된다. 차량에 의한 교량의 공진은 점성이 매우 작은 경우 차량의 속도와 차간거리  $L$ (한 차량만 고려할 경우는 교량길이와 같음)에 따른 외적하중 주파수,  $v_{res}/L$ , 와 교량의 고유주파수 ( $\omega/2\pi$ )가 같아질 때 발생하며, 차량의 공진속도 ( $v_{res}$ )는 이 등가의 관계를 통해 구할 수 있다(Yau, 2001). 즉  $n$ 차 모드에 대한 공진속도는 다음과 같이 계산된다

$$v_{n,res}/L = \omega_n/2n\pi \rightarrow v_{n,res} = \frac{\omega_n L}{2n\pi} = \frac{f_n \times L}{n} \quad (1)$$

FEM 고유치해석을 통해 구한 고유진동수와 30 m의 교량 길이를 위 식 (1)에 대입하면 CFTA 거더의 공진 발생을 위한 차량의 속도는 1차, 2차, 3차 vertical mode에 있어서 각각 225 km/hr, 487 km/hr, 727 km/hr로 나타났다.

## 3. 이동하중의 모델링

### 3.1 DB 하중과 등가절점하중

일반적으로 트럭모델의 경우 1축 또는 3축 하중으로 고려하는데 교량의 경간이 긴 경우에는 축간 거리의 영향이 미미하여 1축 하중을 사용하여도 결과에 큰 변화는 없지만 본 연구에서 분석하고자 하는 CFTA 거더는 길이가 30.6 m로 단중 경간이므로 차량의 축간거리가 구조물의 응답에 영향을 미치므로 3축 하중으로 고려하였다. CFTA 거더에 작용하는 이동하중은 Fig. 5에 나타난 DB-24 차량 하중을 고려하였다.

건설교통부(2005)에서는 DB-24 차량의 중앙축과 후륜축 간격을 4.2 m에서 9.0 m까지 선택하여 모델링하게 되어있다. 하지만 CFTA 거더의 정동적 거동은 축간거리가 짧을수록 집중하중 효과에 의해 그 응답이 더 크게 발생하여 보수적인 결과를 제공하므로 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 가장 짧은 4.2 m로 선정하였다. 이에 따른 하중 중심(Center of Gravity, CG)은 중앙축에서 후륜축 방향으로 1.4 m 떨어진 곳에 위치하게 되며 CFTA 거더의 최대 정적처짐은 하중 중심이 교량의 중간지점에 위치하였을 때 발생한다.

본 연구에서 사용한 이동차량 모델링은 시간함수를 이용한 방법(김정호 등, 2009)을 사용하였다. 이는 차량모델을 주행 속도에 따라 이동하중으로 치환하여 동적효과를 분석하는 모델링 방법이며 일반적으로 100 km/hr 이하의 속도에서 사용된다(안상경 등, 1998; Brady 등, 2006). FEM 모델에서 Fig. 6과 같이 집중하중이 요소 중간을 통과할 때 요소의 양 끝 절점에 작용하는 등가의 집중하중으로 치환이 가능하며 이를 등가절점하중이라고 한다(김기철과 이동근, 2001;

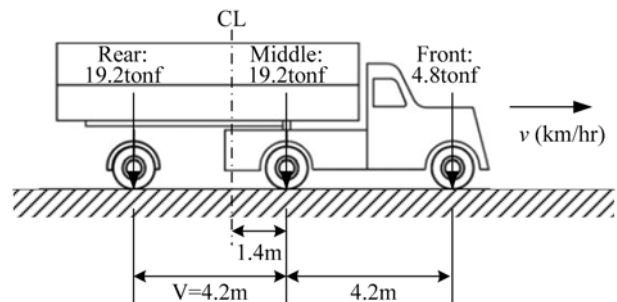


Fig. 5 DB-24 vehicle load

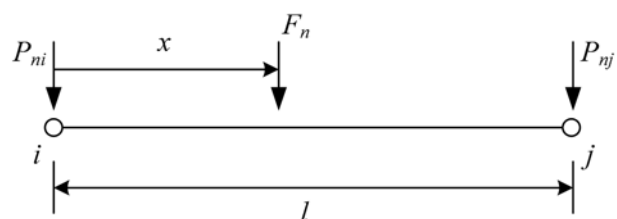


Fig. 6 Equivalent nodal load

Goicolea 등, 2002; Brady 등, 2006). Fig. 6을 바탕으로 등가절점하중은 식 (2)에 따라 계산된다. 등가절점모멘트는 FEM 모델에서의 요소간격, 즉 모멘트 팔길이(arm length)가 충분히 작으므로 모멘트 크기가 매우 작게 나타나므로 본 이동차량모델링에서는 고려하지 않았다.

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

등가절점하중은 집중하중의 위치(x)에 따라 계산되기 때문에 일정한 속도를 가지는 이동하중의 경우 시간에 따른 집중하중의 위치를 계산하여 각 절점에 작용하는 등가절점하중으로 치환하면 유한요소 프로그램에서 impulse amplitude로 쉽게 적용 가능하다.

### 3.2 One-Track과 Two-Track 모델

CFTA 거더의 교축방향으로 100 km/hr로 이동하는 DB-24 하중을 모사하기 위하여 시간에 따른 집중하중을 등가절점하중으로 치환하여 ABAQUS에서 Amplitude로 적용하였다. 그리고 3축 이동하중이 one-track과 two-track으로 작용할 때 동적 응답의 차이점을 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 2가지 경우를 고려하여 그 결과를 비교했다.

Fig. 8은 차량(DB-24)이 100 km/hr의 속도로 CFTA 거더에서 one-track으로 진행할 경우 첫 번째 절점부터 네번째 절점까지를 통과할 때 시간에 따른 하중을 amplitude로 모사한 것이다. 실제 차량 하중이 재하되는 것과 같은 two-track 모델의 축하중은 one-track 모델에서의 하중을 반으로 나누어 두 개의 track에 작용시켰다.

DB-24 하중이 100 km/hr의 속도로 30.6 m의 CFTA 거더를 통과하는데 1.404초가 걸리며, Fig. 9(a)와 같이 중앙부에서 최대 동적처짐은 27.6 mm가 발생하였다. 가속도의 경우 Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 1축, 2축, 3축 하중이

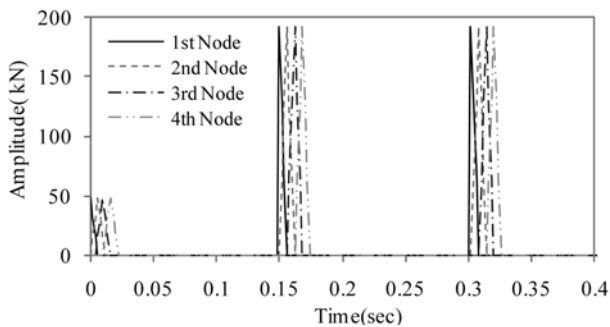


Fig. 8 Modeling of moving vehicle load (from first to fourth node under 100 km/hr vehicle speed)

거더의 중앙부를 통과함에 따라 19 g, 37 g, 90 g라는 상당히 큰 가속도응답이 발생하였다. 그러나 이는 impulse 형태의 축하중이 직접적으로 작용하는 거더중앙부 절점에서의 응답을 나타낸 것으로 소위 집중응력과 같은 국부효과가 포함된 결과이다.

중앙부에서 국부적인 영향을 배제시키기 위해 Fig. 7(b)와 같이 two-track 3축 하중을 작용시켰다. 그 결과 변위응답은 Fig. 9(a)와 같이 동일하게 나왔으며, one-track 모델에서 과도하게 발생되던 가속도의 응답은 예상한대로 Figs. 9(b) and 9(c)와 같이 크게 줄어들었다. 따라서 차량진행에 따른 교량 중앙부에서의 동적변위응답만을 본다면 one-track 모델로도 충분하며, 중앙부에서의 가속도응답까지 관찰하기 위해

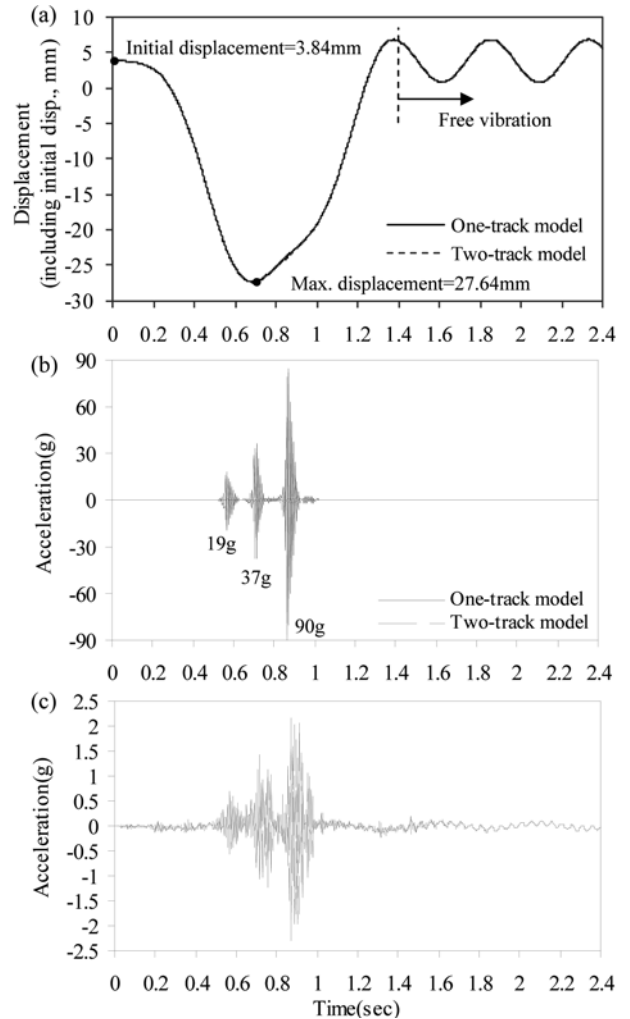


Fig. 9 Dynamic response of one track and two track models. (a) displacement, (b) acceleration, (c) acceleration of two track mode at the center of the girder

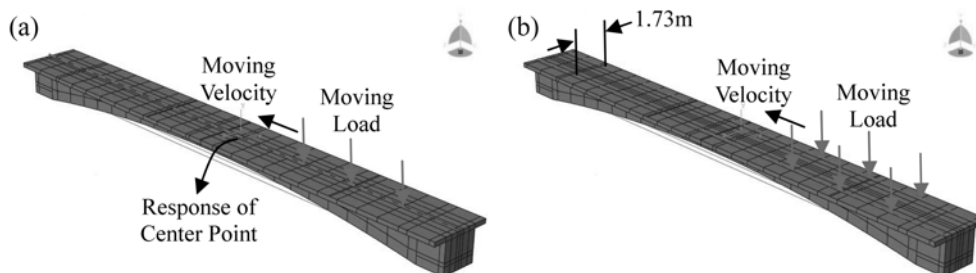


Fig. 7 Three axles-vehicle loading. (a) one-track model, (b) two-track mode

서는 two-track 모델을 사용하는 것이 합리적이라 판단하여 본 연구에서는 two-track 모델을 사용하였다.

#### 4. 긴장재 조건에 따른 동적응답

##### 4.1 긴장재 고려에 따른 거더의 고유치

프리스트레스 구조 형식을 가지는 CFTA 거더에서 긴장재가 거더의 고유치에 미치는 정도를 파악하기 위해 Table 5에 정리된 바와 같이 긴장재가 고려된 모델, 긴장재가 제거된 모델, 그리고 긴장재의 질량만 제거된 모델로 분류하여 고유치 해석을 수행하였으며, 이에 따른 결과를 Table 5 하단에 정리하였다.

Type 2와 같이 긴장재를 완전히 제거하였을 경우 1차 vertical mode에 가장 큰 영향을 주며 그 변화량은 2.09 Hz 에서 1.94 Hz로 낮아졌다. 한편 다른 고차모드에는 변화가 거의 없었다. 이는 긴장재가 거더의 종방향에 걸쳐 균일한 강성과 질량을 제공하기 때문에 이를 제거할 경우 2차 이상의 고차모드보다는 1차모드 변화에 영향을 주기 때문이다. 그리고 Type 3과 같이 긴장재의 질량만 제거하였을 경우 긴장재의 강성과 질량이 고려된 Type 1과 큰 차이가 없었다. 즉, 긴장재의 질량은 거더의 동적거동에 거의 영향을

주지 못하며 강성이 큰 영향을 주고 있음을 보여준다. 따라서 긴장재의 강성과 관련된 긴장재 양(또는 면적)에 따른 거더의 동적거동을 분석할 필요가 있다.

##### 4.2 긴장재 양에 따른 동적변위 및 가속도 응답

위 결과를 바탕으로 CFTA 거더에 이동하중이 작용할 때 긴장재 양에 따른 동적거동을 분석하기 위해 아래와 같이 총 네 가지 조건을 설정하였으며 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 10과 같다.

Case 1: 긴장재 모두 적용된 상태

Case 2: 내부 긴장재만 존재

Case 3: 내부/외부 긴장재 하나씩 제거된 상태

Case 4: 긴장재가 없는 상태

차량이동 속도는 100 km/hr인 경우를 고려하였으며, 이에 따른 결과를 Figs. 11 and 12에 나타내었다. 30.6 m의 길이를 가지는 CFTA 거더는 약 1.4초 이후에는 자유진동으로 거동하며 Fig. 11에서와 같이 긴장재 양에 따라 동적변위 응답은 다르게 나타났다. 그 크기는 Case 4 > Case 3 > Case 2 > Case 1의 순서로 크게 나타났다. 즉 차량이 재하되기 전의 초기변위를 제외한 변위(상대변위) 응답은 긴장재의 양이 적어지면 그와 반비례하게 증가한다. 이러한 결과는 긴장재

Table 5. Variation of tendon properties and eigenvalue analysis results

	Type 1: With tendon (with stiffness and mass)		Type 2: Without tendon (without stiffness and mass)		Type 3: Massless tendon (with stiffness only)	
Elastic modulus (MPa)	200,000		0		200,000	
Mass density (ton/mm <sup>3</sup> )	8.00E-09		0		0	
Mode	Hz	Effective modal mass ratio	Hz	Effective modal mass ratio	Hz	Effective modal mass ratio
Vertical #1	2.0910	0.6603	1.9403	0.6676	2.0915	0.6680
Vertical #2	9.0180	0.0023	9.0185	0.0023	9.0187	0.0023
Vertical #3	20.1980	0.0299	20.1750	0.0294	20.2200	0.0310

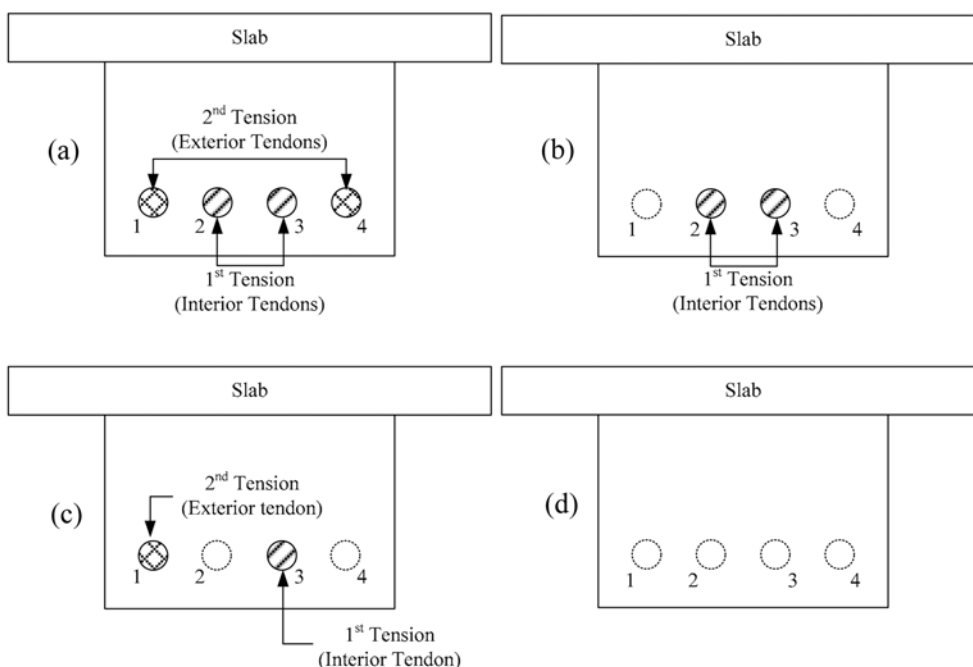


Fig. 10 Variations of tendon arrangement. (a) full tendons-Case 1, (b) only interior tendons-Case 2, (c) asymmetric tendons-Case 3, and (d) no tendons-Case 4

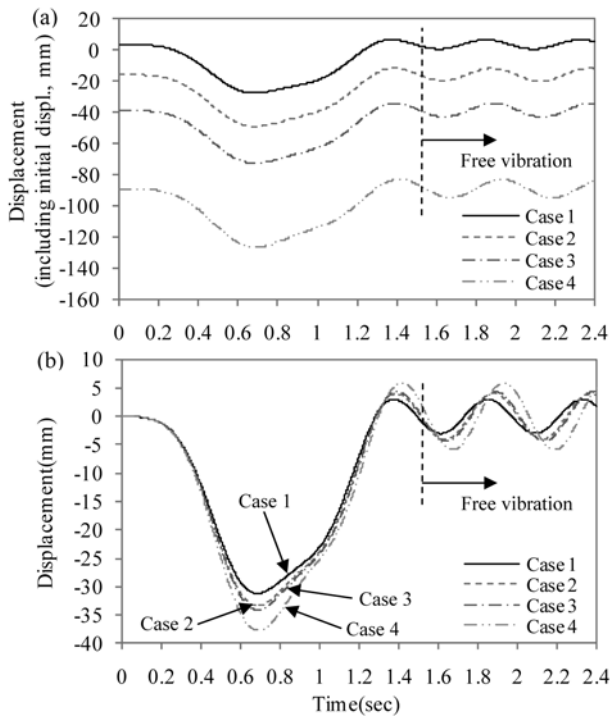


Fig. 11 Displacement response in respect to the variations of tendon arrangement ( $v = 100$  km/hr), (a) including the initial displacement (absolute displacement) and (b) extracting the initial displacement (relative displacement) at the center of the girder

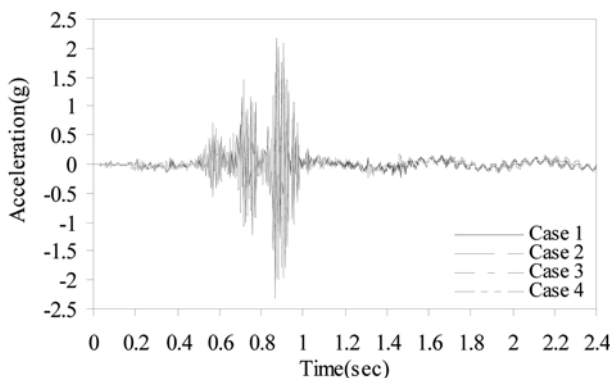


Fig. 12 Acceleration response at the center of the girder ( $v = 100$  km/hr)

의 양이 거더의 강성과 연결되어 있기 때문이다. Fig. 12에 나타난 가속도응답에서는 그 최대값이 조금 차이는 있지만 2.301 g~2.309 g로 거의 비슷한 값을 보였다. 한편 40 km/hr, 60 km/hr, 80 km/hr의 경우에 대해서도 해석을 수행하였으며 그 결과 거더 중앙부에서의 상대변위가 거의 같게 나타났다.

## 5. 긴장력에 따른 동적 거동

CFTA 거더에 속도가 다른 이동하중이 가해질 때 긴장력에 의한 영향을 확인하기 위하여 긴장력과 차량속도의 조합으로 Table 6과 같이 구성하였다. Table 2에 나타난 긴장력을 100%로 하여, 긴장력 75%, 50%, 25%, 그리고 긴장력을 가하지 않은 경우(0%)로 변화시켜 각각 Case 5, 6, 7, 8로 분류하였다. 여기에 이동하중을 40 km/hr에서 100 km/hr까지 20 km/hr씩 증가시켰으며 이를 Model A, B, C, D

Table 6. Case studies for tendon force effects

Cases	Models : vehicle speed (km/hr)		Combinations	
	Vehicle Speed	Model	Speed	Combination
Case 1	100%	A	40	Model A + Case 1, 5, 6, 7, 8
Case 5	75%	B	60	Model B + Case 1, 5, 6, 7, 8
Case 6	50%	C	80	Model C + Case 1, 5, 6, 7, 8
Case 7	25%	D	100	Model D + Case 1, 5, 6, 7, 8
Case 8	0%			

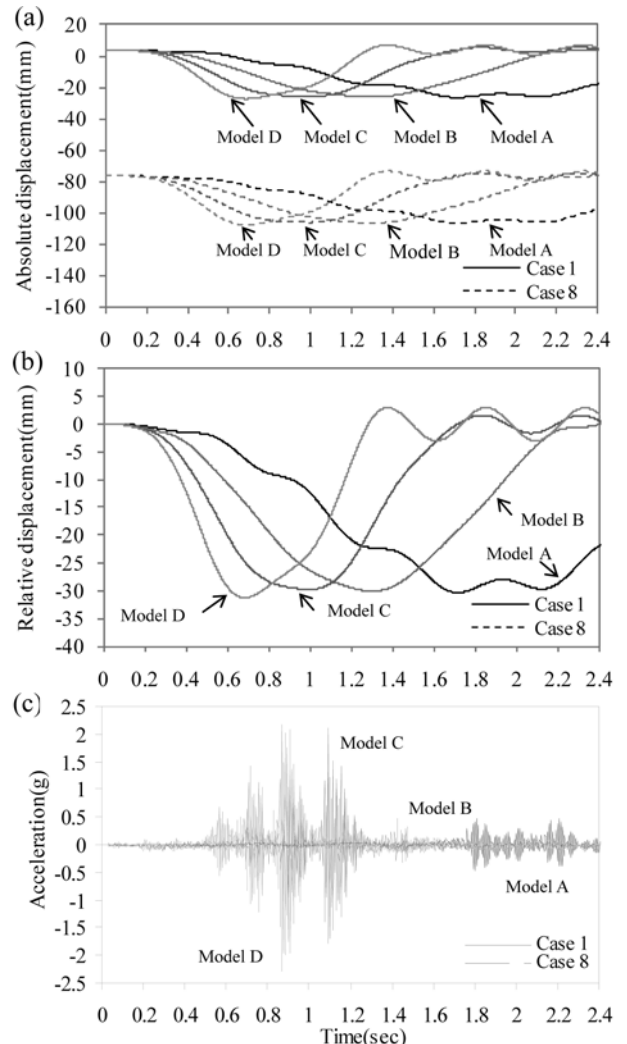


Fig. 13 Dynamic responses of Model A, B, C, D- Case 1 and Case 8 at the center of the girder. (a) absolute displacement, (b) relative displacement, and (c) acceleration

로 하였다.

Fig. 13은 각각의 Model에 대한 Case 1과 Case 8의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 13(a)는 초기변위가 포함된 거더 중앙부에서의 동적변위응답을 나타낸 것이며 Fig. 13(b)는 초기변위를 제외한 상대변위를 계산한 결과이다. Figs. 13(a) and 13(b)에서 보듯이 정적초기변위는 긴장력 정도에 따라 다르게 나타나지만 실질적인 차량이동에 따른 동적변위응답, 즉 상대변위응답은 일정한 속도하에서 같음을 알 수 있다. 가속도응답 역시 Fig. 13(c)에서 확인할 수 있듯이 차량속도가 같으면 긴장재의 긴장력에 관계없이 동일하게 나옴을 알 수 있다. 즉, 초기긴장력이 달라지더라도 같은 차량속도하에

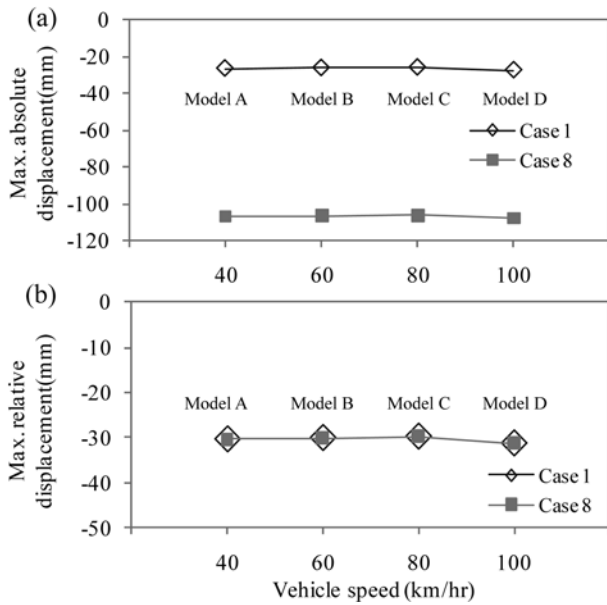


Fig. 14 Peak dynamic response. (a) absolute displacement and (b) relative displacement

서는 긴장재가 CFTA 거더의 상대변위응답 및 가속도응답에 영향을 주지 못하며, 이는 긴장력 방향이 차량에 의한 거더의 진동방향과 직각으로 작용하기 때문이다. Fig. 14는 긴장력과 차량속도에 따른 최대 동적변위응답을 비교한 것으로서 Fig. 14(a) and 14(b)에서 보듯이 차량속도가 증가함에도 불구하고 최대 동적변위응답은 긴장재의 긴장력 조건에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. 이동하중에 의한 긴장재의 응력변화는 최대 항복강도의 약 2~3%로 증가하며, 이에 따라 최종적인 긴장재의 응력은 항복강도의 약 54% 이내로 나타났다. 이는 현재 긴장재의 “사용하중 상태에서의 허용응력 기준”(도로교설계기준(2005), 4.6.3.3절)인  $0.80f_{py}$ (항복강도의 80%)을 넘지 않으며 또한 시공단계에서 증가하는 응력에 비해 매우 작으므로 설계 시에는 이러한 차량하중 진행에 따른 긴장재의 응력 변화는 고려되지 않아도 된다.

## 6. 동적 증폭 계수(Dynamic Amplification Factor)

동적증폭계수(DAF)는 동적해석에서의 최대변위응답과 정적해석을 통한 최대변위의 비율로 나타낸 계수이다. 일반적으로 교량에서 차량진행에 따른 동적증폭계수를 다음과 같이 나타낸다(Bakht and Pinjarkar, 1989; Paultre 등, 1992).

$$DAF = 1 + DA \quad (3)$$

$$여기서, DA = \frac{R_{dyn} - R_{st}}{R_{st}} = \frac{R_{dyn}}{R_{st}} - 1 \quad (4)$$

여기에서  $DA$ 는 동적증폭(Dynamic Amplification),  $R_{dyn}$ 와  $R_{st}$ 는 교량의 최대 동적 및 최대 정적 응답이며, 일반적으로 변위 또는 변형률, 모멘트 등이 사용된다. 본 연구에서는 변위응답을 고려하였다. 식 (4)에서 긴장재의 초기긴장력 및 하중에 의한 초기변위,  $R_0$ 를 제외하면 상대변위에 대한 동적증폭(DA)은 다음과 같이 계산된다(Wolff and Starossek, 2008).

$$DA = \frac{R_{dyn} - R_0}{R_{st} - R_0} - 1 \quad (5)$$

AASHTO Standard Specification(1996)과 AASHTO LRFD (1998)에서는 이 동적증폭계수를 동적허용하중(Dynamic Load Allowance, DLA)으로 대체하여 평가하고 있으며, 이와 동일한 개념으로 도로교설계기준(2005)에서는 충격계수를 사용하며 다음과 같은 식 (6)으로 나타낸다.

$$I = \frac{(R_{dyn} - R_0) - (R_{st} - R_0)}{R_{st} - R_0} \quad (6)$$

여기에서  $I$ 은 충격계수이며 위 식 (5)와 식 (6)을 비교하면 충격계수는 다음과 같이 표현된다.

$$I = DA \quad (7)$$

AASHTO Standard Specification(1996)에서는 충격계수 개념의 동적허용하중(DLA)을  $50/(L+125)$ 로 계산하며 이때 교량경간길이  $L$ 의 단위는 ft이며 DLA 계산값이 0.3(또는 30%)을 넘지 않아야 한다. 이와 유사하게 도로교설계기준(2005)의 충격계수 규정이 있으며 그 관계식은  $15/(L+40)$ 이다. 이때 사용하는  $L$ 의 단위는 m이며 그 계산값도 0.3(또는 30%)를 넘지 않아야 한다. 본 연구의 고려하고 있는 CFTA 거더는 경간길이가 30.6 m(약100ft)로서 규정에 해당하는 DLA값은 한국도로교기준의 경우 0.21(또는 21%), AASHTO Standard Spec.은 0.22(또는 22%)이다. AASHTO LRFD(1998)에서는 일반적으로 0.33(또는 33%)까지 허용한다(Cousins and Lesko, 2005). 이 세 가지의 규정들을 동적증폭계수(DAF)와 연계하면 각각 도로교, AASHTO Standard Spec., 그리고 AASHTO LRFD순으로 1.21, 1.22와 1.33이 된다. 본 연구에서는 긴장재의 긴장력을 변화하면서 차량의 속도를 변화시켰을때 거더의 동적거동에는 변화가 없었으므로 동적증폭계수에 고려하지 않았으며 긴장재 양과 차량속도 변화에 따라 거더의 동적거동이 다르게 나타났으므로 이 경우만을 고려하였다. CFTA 거더에 100 km/hr의 이동하중이

Table 7. Summary of Dynamic Amplification Factor and Dynamic Load Allowance results (100 km/hr)

Case	Description	Initial displ. ( $R_0$ , mm)	Static	Dynamic	DAF	DLA (%)	Korea Highway Standard Spec. Ch. 2 1.4 DLA (%)	AASHTO Standard Spec. Article 3.8.2 DLA (%)	AASHTO LRFD Sec. 3.6.2 DLA (%)
			Displ. ( $R_{st}$ , mm)	Displ. ( $R_{st}$ , mm)					
Case 1	Full tendons	3.843	-25.493	-27.365	1.064	6.4	21	22	33
Case 2	Only interior tendons	-15.575	-46.514	-48.996	1.080	8.0			
Case 3	Asymmetry tendons	-38.492	-69.931	-72.619	1.085	8.5			
Case 4	No tendons	-88.767	-122.701	-126.492	1.112	11.2			



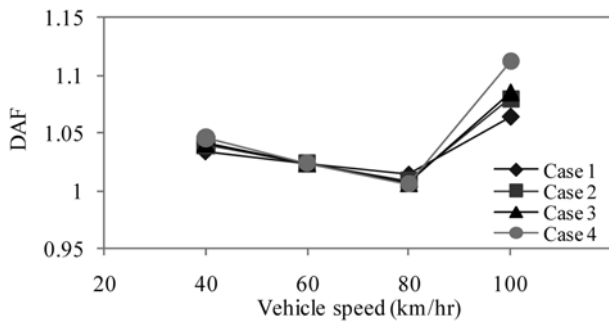


Fig. 15 Dynamic Amplification Factor (for displacement)

가해 질 때 Fig. 11에 나타난 긴장재 양에 따른 최대 동적 변위와 동적증폭계수를 Table 7에 나타내었다. 최대정적변위는 Fig. 5에 나타난 차량하중의 중심이 거더 중앙부에 위치할 때를 고려하였다. 이 결과, 100 km/hr로 진행되는 차량에 대한 긴장재의 양에 따른 CFTA 거더의 동적증폭계수는 1.112에서 1.064까지 비교적 낮은 증폭을 나타내었으며 거더의 동적안정성을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 15에서 보듯이 40 km/hr, 60 km/hr, 80 km/hr 차량속도에서도 그 증폭계수가 1.05 미만으로 안정적인 거동을 보였다.

## 7. 결 론

개발된 CFTA 거더는 중앙지점의 질량은 작으나 강성이 상대적으로 작아 1차 vertical 모드가 크게 지배하는 형식이며 특히 긴장재의 유무에 따라 약 14% 강성의 차이가 있음을 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 긴장재의 긴장력과 긴장재 양, 그리고 차량이동속도에 따른 거더의 동적응답을 분석하였다. 긴장력 및 긴장재 양, 차량(DB-24)의 속도를 조합하여 다양한 경우들에 대해 분석을 수행하였다. 해석 결과 본 거더의 동적응답은 긴장재의 긴장력 변화로 인한 영향은 없었으며, 이 긴장력은 오직 초기변위(initial camber)에만 영향을 주었다. 하지만 긴장재의 강성에 영향을 미치는 긴장재의 양을 달리할 경우 동적변위응답 및 동적가속도응답은 변화하였으며, 긴장재의 양이 적을수록 그 응답이 크게 나타남을 알 수 있었다. 하지만 가속도응답은 100 km/hr의 차량속도에서는 그 변화정도가 2.301 g에서 2.309 g로 그 변화가 매우 작았다. 최대동적증폭계수는 긴장재가 없는 경우 1.112, 긴장재가 모두 존재하는 경우 1.064로 나타났다. 이 두 값은 한국도로교와 AASHTO LRFD에서 규정하는 한계점인 1.21과 1.33보다 아래에 있어 안정적인 거동을 보였다. 일반적으로 교량강성이 작아서 고유진동수가 낮게 나오는 유연한 교량에서는 동적증폭계수가 크게 나타나지만 본 연구에서의 CFTA 거더는 단경간 교량으로서 실질적으로 차량하중이 거더에 재하되는 시간이 매우 짧아서 동적증폭계수가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 본 연구에서 고려된 CFTA 거더는 동적증폭계수에 있어 현행 설계기준을 사용해도 만족하지만 경간이 보다 긴 거더를 설계할 경우에는 거더의 전체 질량과 강성이 변하므로 이에 따른 고유진동수나 모드형상 등 동적특성을 분석이 이뤄져야 하며, 이를 바탕으로 중차량 진행에 따른 동적처짐이나 긴장재 응력변화, 동적증폭계수와 같은 설계요소에 대한 검토가 이루어져야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 신형식 거더 실용화사업 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부(2005) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
- 김기철, 이동근(2001) 보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석. 한국지진공학회는논문집, 한국지진공학회, 제5권, 제1호, pp. 21-29.
- 김정호 등(2009) 건설구조재료의 효율적 복합구조화를 통한 신형식 교량용 거더 시스템 개발. 최종보고서, 국토해양부 건설기술혁신사업 R&D/06건설핵심D14, 한국건설기술연구원.
- 박성재, 김용재, 진중수, 박명균, 박경훈(2009) 시공단계를 고려한 CFTA 거더의 해석기법. 2009년도 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 한국콘크리트학회, pp. 167-168.
- 박 호, 박명균, 박경훈, 김정호(2006) 콘크리트 충전된 타이드 아치형 강재 합성거더(CFTA)의 개발. 2006년도 대한토목학회 정기학술대회논문집, 대한토목학회, pp. 2289-2292.
- 박 호, 이은호, 박경훈, 박명균, 황윤국(2007) 외부긴장재를 갖는 콘크리트 충전 강합성 아치거더 교량의 설계. 2007년도 한국강구조학회 학술발표회논문집, 한국강구조학회, pp. 552-557.
- 안상경, 김태호, 김진구, 이동근(1998) 이동하중을 받는 골조 구조물의 진동 해석. 1998년도 대한건축학회 춘계발표회논문집, 대한건축학회, 제18권 1호, pp. 855-858.
- 이상윤, 박경훈, 김정호, 이은호, 공정식(2007) 타이드 아치형 콘크리트 충전 강재 합성거더의 정적재하 실험. 2007년도 한국강구조학회 학술발표회논문집, 한국강구조학회, pp. 576-580.
- 이학, 박호, 이상윤, 박경훈, 공정식(2007a) CFTA 복합거더의 정적거동 분석. 2007년도 한국강구조학회 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp. 514-517.
- 이학, 이상윤, 박경훈, 공정식(2007b) CFTA 거더의 선형 거동에 관한 연구. 2007년도 대한토목학회 정기학술대회논문집, 대한토목학회, pp. 4016-4019.
- 진중수, 박성재, 김용재, 박명균, 김정호(2009) CFTA 거더의 해석모델 개발. 2009년도 한국콘크리트학회 봄 학술대회논문집, 한국콘크리트학회, pp. 169-170.
- AASHTO (1996) *Standard specifications for highway bridges*. 14th ed., The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO (1998) *LRFD bridge design specifications*. 2nd ed., The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ABAQUS (2007) *ABAQUS/CAE user's manual*. version 6.7, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
- Bakht, B. and Pinjakar, S.G. (1989) *Review of dynamic testing of highway bridges*. Structural Research Report SRR-89-01, Ministry of Transportation of Ontario, Downsview, Ont., Canada.
- 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. *J. of Bridge Engrg.*, Vol. 11, No. 2, pp. 241-249.
- Choi, S.W., Trung, T.T., Jeong, M.C., and Kong, J.S. (2009) Non-linear behavior analysis and collision simulation of CFTA girder. *Proc. of the 5th Int. Symp. on Steel Structures*, Seoul, Korea, pp. 382-387.
- Cousins, T.E. and Lesko, J.J. (2005) *Construction of a Virginia short-span bridge with the Strongwell 36-inch bouble web I-beam*. ReportNo. FHWA/VTRC 06-CR5, Virginia Transforta-

- tion Research Council, V.A., USA.
- Goicolea, J., Dominguez, J., Gabaldon, F., and Navarro, J. (2002) Resonant effects in the short span high speed railway bridge: modeling and design issues. *Proc. of the 4th Int. Conf. on Structural Dynamics*, Taylor & Francis, Munich, Germany, Vol. 2, pp. 1077.
- Lee, E.H., Lee, H., Park, M.G., Park, K.H., Lee, S.Y., and Kim, J.H. (2008a) Analysis of static behavior of CFTA girder. *Proc. of the 4th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Seoul, Korea, pp. 1128-1135.
- Lee, H., Park, K.H., and Kong J.S. (2008b) Analysis of static behavior of CFTA girder. *Proc. of the 4th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Seoul, Korea, pp. 1065-1071.
- Paultre, P., Chaallal, O., and Proulx, J. (1992) Bridge dynamics and dynamic amplification factors-a review of analytical and experimental findings. *Canadian J. of Civil Engrg.*, Vol. 19, pp. 260-278.
- Strand7 (2005) *Strand7 user's manual*. Release 2.4, Sydney, Australia.
- Tilly, G.P. (1986) *Dynamic behavior of concrete structures*. Development in Civil Engineering, 13, Report of the RILEM 65MDB Committee, Elsevier, New York, N.Y., USA.
- Trung, T.T., Kim, J.H., Park, K.H., and Kong, J.S. (2008) Dynamic behavior and reliability assesment of a CFTA girder subjected to truck collision. *Int. J. of Steel Structures*, Vol. 8, No. 4, pp. 315-324.
- Wolff, M. and Starossek, U. (2008) Robustness assesment of a cable-stayed bridge. *Proc. of the 4th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Managemnt(IABMAS)*, Seoul, Korea, pp. 690.
- Yau, J.D. (2001) Resonance of continuous bridges due to high speed trains. *J. of Marine Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 14-20.

(접수일: 2010.12.9/심사일: 2011.2.25/심사완료일: 2011.2.25)