CFTA 거더교의 시공중 구조 안전성 및 공용중 진동사용성 평가

Evaluations of the Structural Safety Under Construction and the Vibration Serviceability in Service for the CFTA Girder Bridges

이상윤* · 박경훈** · 김정호*** · 김두기****

Lee, Sang Yoon · Park, Kyung Hoon · Kim, Jung Ho · Kim, Doo Ki

Abstract

The CFTA (Concrete Filled Tubular Arch) Girder bridge is a new type of bridge which improves the structural efficiency and the aesthetics by combining the characteristics of the CFT (Concrete Filled Tube) structure, PS (Pre-Stressed) structure, and arch structure. Before applying the proposed type of bridge to the real bridges, the structural safety should be evaluated not only in service but also under construction. Because the CFTA Girder bridge has the relatively slim section in the middle of the span, the vibration serviceability should be evaluated additionally. In this study, the real-scaled specimen of the CFTA Girder bridge was fabricated and the vibration test was conducted to evaluate the structural safety under construction and the vibration serviceability in service. The dynamic analysis considering the moving load was conducted by using the FE (Finite Element) model verified with the results of the vibration test. The results of the dynamic analysis reveal that the CFTA Girder bridge has the structural safety under construction and the excellent vibration serviceability.

Key words : Concrete Filled Tube, CFTA Girder, real-scaled specimen, safety under construction, vibration serviceability

요 지

CFTA(Concrete Filled Tubular Arch) 거더교는 CFT(Concrete Filled Tube) 구조, 프리스트레스 구조 및 아치구조의 특징을 복합화 하여 구조적 효율과 경관을 향상시킨 새로운 교량 형식이다. 새로이 제안된 형식의 교량을 실교량에 적용하기 위해서는 공용중 안전성 뿐만 아니라 시공중 안전성에 대한 검증이 필요하다. 또한, CFTA 거더는 경간 중앙부에서 상대적으로 슬림한 단면을 갖기 때문에, 진동사용성에 대한 검토가 추가적으로 요구된다. 본 연구에서는 CFTA 거더교의 시공중 안전성과 진동특성을 검토하기 위하여, 실물모형실험체를 제작하고 진동실험을 수행하였다. 진동실험 결과를 바탕으로 검증된 유한요소모델을 이용하여 이동하중을 고려한 동적해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 CFTA 거더교의 진동사용성을 검토하였다. 실물모형실험체 및 유한요소모델을 이용한 시공중 안전성 및 진동사용성 검토 결과, CFTA 거더는 시공중 안전성을 확보하고 있는 것을 판단되며, 우수한 진동사용성을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 콘크리트 충전 강관, CFTA 거더, 실물모형, 시공중 안전성, 진동사용성

1. 서 론

최근 국내외적으로 교량의 구조 형상 및 재료의 효율화, 복합재료의 활용 등을 통한 새로운 형태의 교량이 개발되고 있다. 이러한 복합재료 및 복합구조 교량은 구조적 효율성이 높고 경제적이며, 단면의 슬림화 또는 형상 개선을 통해 경관이 향상되는 효과를 얻을 수 있어서 개발 및 시공 사례가

늘어나고 있다(Kim, et al., 2011; Ryn and Kim, 2010; Ahn, et al., 2010; Hong, et al., 2009; Morcous, et al., 2010).

Fig. 1에 도시한 CFTA(Concrete Filled Tubular Arch) 거더교는 CFT(Concrete Filled Tube) 구조, 프리스트레스(PS) 구조 및 아치구조의 특징을 복합화 하여 구조적 효율과 경관을 향상시킨 교량 형식으로 김정호 등(KICT, 2007)에 의해 제안되었다.

*정회원. 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 선임연구원(E-mail: sylee@kict.re.kr)

Member. Researcher, Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원(Tel: +82-31-910-0565, Fax: +82-31-910-0121, E-mail: paul@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Senior Researcher, Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

***정회원. 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 선임연구위원

Member. Senior Research Fellow, Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

****정회원. 군산대학교 토목공학과 부교수

Member. Professor, Department of Civil Engineering, Kunsan National University

Fig. 1. Concept of CFTA Girder Bridge

새로이 제안된 형식의 교량이 구조적 효율의 향상이라는 이점을 갖는다 하더라도, 실제 교량에 적용하기 위해서는 제안된 거더에 대한 구조적 안전성이 담보되어야 할 것이다. 최근, 실물모형실험체를 이용한 CFTA 거더교의 구조적 안전성과 공용중 차량 충돌에 대한 안전성에 대한 연구가 수행된 바 있으며, 이 연구결과로부터 CFTA 거더교의 공용중 구조적 안전성을 확보할 수 있는 것을 확인 할 수 있다(Lee, et al., 2011).

CFTA 거더교는 CFT 구조, 프리스트레스 구조 및 아치구조를 복합화한 교량으로, 세분화된 시공단계를 거쳐 완성되는 교량 형식이다. 시공단계가 세분화 되어 있는 새로운 형식의 교량의 경우, 각 시공단계에 대한 시공중 안전성은 실교량에 적용하는 데 있어서 중요한 요소이다. 하지만, 아직까지도 시공중 안전성에 대한 충분한 검토 없이 교량을 가설하는 도중에 시공중인 교량이 붕괴되는 사고가 종종 보고되고 있다. 즉, CFTA 거더교를 실교량에 적용하기 위해서는 시공단계에 대한 안전성이 검증되어야 할 것이다.

Fig. 1과 같이 CFTA 거더교는 지간 중앙부에서 상대적으로 슬림한 형태의 단면을 갖는다. 이러한 형상은 경관을 향상시키는 효과가 있지만, 상대적으로 낮은 단면 강성으로 인하여 과도한 진동이 발생하여 사용성이 떨어질 우려가 있다. 즉, CFTA 구조를 실교량에 적용하기 위해서는 앞서 언급한 안전성 뿐만 아니라 진동 사용성에 대한 검증이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 CFTA 거더에 대한 실물모형 실험체를 제작하면서 시공단계별 거동 및 안전성을 검토하였으며, 제작이 완료된 실험체를 이용하여 진동실험을 실시하고 진동실험 결과를 바탕으로 진동사용성에 대한 검토를 수행하였다.

본 논문에서는 CFTA 거더교의 시공단계를 고려한 실물모형 실험체의 설계 및 제작에 대하여 기술하고, 각 시공단계에서 계측된 데이터를 바탕으로 한 안전성 검토결과를 기술하였다. 또한, 실물모형실험체를 이용한 진동실험으로부터 얻은 CFTA 거더교의 진동특성을 유한요소해석 결과와 비교하여 기술하고, 검증된 유한요소모델을 이용한 진동사용성 검토 결과를 기술하였다.

2. 실물모형실험체 설계 및 제작

2.1 실물모형실험체의 설계

CFTA 거더교의 설계는 Fig. 2에 도시한 설계흐름에 따라 이루어진다. CFTA 거더교의 설계흐름은 일반적인 PSC (Prestressed Concrete) 빔교의 설계흐름과 유사하지만, 긴장

Fig. 2. Design flow of CFTA Girder Bridge

력을 도입하는 단계가 두 단계로 이루어졌다는 점에서 차이가 있다. CFTA 거더는 1차 긴장이 이루어지기 전까지 거더의 전 지간에 걸쳐 등간격으로 배치된 가지점 위에 거치되므로 무응력에 가까운 상태에 있게 되고, 1차 긴장 단계에서 단순지지 형태로 자립한다. 2차 긴장은 바닥판이 타설되고 양생이 완료된 이후에 이루어지며, 2차 긴장력은 바닥판 상단의 응력이 허용휨인장응력을 넘지 않는 범위 내에서 도입된다. 이와 같은 각 시공단계 즉, 1차 긴장 직후, 바닥판 타설 단계, 2차 긴장 단계 및 최종단계별로 허용응력을 기준으로 안전성을 검토하며, 최종적인 단계에서는 휨강도와 활하중 처짐에 대한 검토를 수행한다.

PS 강재는 CFTA 거더교의 주요 구조부재로서 자립식 아치구조의 수평력을 지지하는 역할과 강-콘크리트 합성구조를 갖는 아치리브 단면에 긴장력을 도입하는 역할을 한다. CFTA 거더교의 휨강성은 아치리브의 축강성과 휨강성, 그리고 PS 강재의 축강성에 의해 결정되는데, 아치리브의 단면이 가정된 상태에서 활하중 처짐에 대한 규정은 PS 강재의 축강성 즉, PS 강재량을 조절하여 만족시키도록 한다. 이와 같이 결정된 PS 강재량은 1차 긴장 및 2차 긴장 단계에서 아치리브 및 PS 강재에 발생하는 단면 응력을 고려하여 배분한다.

CFTA 거더의 실물모형실험체를 설계하기 위하여, Fig. 2의 설계흐름을 따라, 30 m와 10.9 m의 교량 지간과 폭을 갖는 1등급(DB-24, DL-24) 도로교에 대해 3개의 거더로 구성된 CFTA 거더교를 설계하였다. 실물모형실험체의 대상교량 설계를 위한 구조해석은 상용 구조해석 프로그램인 Midas Civil을 이용하여 수행하였다. 거더 상부의 바닥판과 아치리

(a) Side view and overall dimensions

(b) Cross-sectional dimensions (End of Span)

(c) Cross-sectional dimensions (Middle of Span)

Fig. 3. Shape and dimensions of real-scale specimen

Table 1. Dimensions of real-scale specimen

Length of girder		30.6 m
Width of girder		2.04 m
Height of girder	End of span	1.75 m
	Middle of span	0.58 m
Effective width of deck		3.5 m
Thickness of steel plate at the middle of span	Upper flange	18 mm
	Lower flange	18 mm
	Web	10 mm
PS steel	1st PS	SWPC 7B $\phi 15.2$ mm 19 strands $\times$ 2 ducts
	2nd PS	SWPC 7B $\phi 15.2$ mm 12 strands $\times$ 2 ducts

브(강-콘크리트 합성거더)는 빔(beam)요소로 적용하고 PS강재는 트러스(truss)요소로 적용하였다. 거더에 충전되는 콘크리트와 바닥판 콘크리트의 설계기준 강도는 각각 40 MPa와 27 MPa를 적용하였고, 거더의 강재는 SM490를 적용하였다.

실물모형실험체는 외측거더를 기준으로 제작하는 것으로 계획하였다. Table 1은 실물모형실험체의 상세제원을 정리한 것이며, Fig. 3은 실물모형 실험체의 형상과 제원을 나타낸 것이다.

2.2 실물모형실험체 해석 - 유한요소해석

실물모형실험체의 각 시공단계의 거동을 비교하고 진동사용성 평가를 위한 해석모델로 활용하기 위하여 실물모형실험체에 대한 유한요소해석을 실시하였다.

유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 실물모형실험체에 대한 유한요소모델은 바닥판, 강판, 콘크리트 충전재, 철근, PS 강재로 구성된다. 바닥판과 거더 콘크리트는 8절점 육면체 요소를 적용하였고, 바닥판 철근은 truss요소를 적용하였다. 거더 콘크리트를 감싸

Fig. 4. FE model of CFTA Girder specimen

고 있는 강판은 4절점 shell요소를 적용하였고, PS 강재는 철근과 동일하게 truss요소로 모델링 하였다. 강판과 바닥판 콘크리트 및 거더 콘크리트와의 접합은 완전합성이 되는 구속조건(tie constraint)을 적용하였으며, 바닥판 철근은 바닥판 콘크리트에 매립(embed)하는 구속조건을 적용하여 바닥판 콘크리트와 완전합성으로 거동하도록 하였다. PS 강재는 거더의 양단부에서 수직으로 배치된 강판과 힌지 조건의 연결이 이루어지도록 하였다. Fig. 4는 유한요소해석 모델의 형상을 나타낸 것이다.

유한요소해석은 시공단계의 거동을 검토하기 위해 시공단계를 고려하여 단계적으로 수행한 정적해석(static analysis)과, 실물모형실험체의 고유진동수를 비교하기 위한 고유치해석(eigenvalue analysis) 및 진동사용성 평가를 위해 이동하중을 고려하여 수행한 동적해석(dynamic analysis)으로 구분하여 수행하였다.

2.3 실물모형실험체의 제작(시공)

강판으로 제작되는 실물모형실험체의 강재 거더는 10 m 씩 3 개의 세그먼트로 나누어 공장에서 제작하였으며, 제작된 강재 거더 세그먼트를 실험실로 운반하고 조립하여 가지점 위에 거치하였다. 가지점 위에 거치한 이후, 거더 콘크리트 충전(타설), 1차 긴장, 바닥판 콘크리트 타설, 그리고 2차 긴장

Fig. 5 View of 1st Prestressing

Fig. 6. View of 2nd Prestressing

Fig. 7. Concept of the anchorage for the 2nd prestressing

의 순서로 제작하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 1차 긴장과 2차 긴장에 대한 전경을 보여준다. 실제 CFTA 거더교의 시공에서 2차 긴장력은 거더를 하부구조 위에 거치한 이후에 시공되기 때문에, Fig. 7과 같이 2차 긴장을 위한 작업공간을 확보하도록 하였다. Fig. 7에 도시한 작업공간은 유지관리 목적의 추가긴장을 위한 공간으로 활용될 수도 있다.

대형 실험체를 실험실에서 제한된 시간 내에 제작하기 위하여 거더 콘크리트의 양생은 증기양생을 적용하였으며, 바닥판 콘크리트는 조기에 강도가 발현되도록 배합하였다.

3. CFTA 거더의 시공중 안전성 검토

CFTA 거더교의 시공단계별 거동과 안전성을 검토하기 위하여, 실험체를 제작하면서 주요 시공단계 즉, 1차 긴장 단계, 바닥판 타설 단계 및 2차 긴장 단계 별로 실험체에 발생하는 처짐과 변형률을 예측하고 설계 및 유한요소해석 결과와 비교하였다.

3.1 실물모형실험에서의 시공단계별 거동

Fig. 8은 주요 시공단계에 따라 실험체에 발생하는 변위를 설계를 위한 프레임해석 및 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 실험체의 변위는 1차 긴장력이 도입되면서 45.8 mm의 솟음이 발생하고, 바닥판 타설 단계에서 -22.4 mm 까지 처짐이 발생하며, 2차 긴장력이 도입되면서 2.3 mm의 수준으로 다시 솟는 과정을 겪었다. 1차 긴장력을 도입하면서 예상된 손실에 비해 긴장력의 손실이 작게 발생함에 따라 계획된 긴장력에 비해 다소 큰 긴장력이 도입되어 솟음도 크게 발생한 것으로 판단된다. 이러한 사실은 1차 긴장 단계에서 중앙부 아치리브 단면에 발생한 변형률의 분포를 비교한 Fig. 9에도 확인할 수 있다. Fig. 9에서, 1차 긴장력에 의한 실험체의 휨변형률은 프레임해석 및 유한요소해석 결과에 비해 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.

계획된 긴장력에 비해 긴장력이 다소 크게 도입된 1차 긴장 단계를 제외하면, 시공이 진행되면서 변화하는 실험체의 변위는 해석결과와 대체로 유사한 거동을 보이는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 또한, 바닥판 타설 단계와 2차 긴장 단계에서 아치리브에 발생한 변형률의 분포를 나타낸 Fig. 10과 Fig. 11으로부터, 1차 긴장 이후의 시공단계 별로 단면에 발생하는 변형률이 해석적으로 예측한 결과와 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

즉, 설계단계에서 프레임해석 모델을 이용한 실험체의 거동

Fig. 8. Comparison of displacements in each construction stage

Fig. 9. Strain distribution after 1st PS

Fig. 10. Strain distribution after deck casting

Fig. 11. Strain distribution after 2nd PS

에 대한 예측은 타당하다고 할 수 있으며, 해석적으로 검토 되는 CFTA 거더의 시공단계 안전성 검토 결과는 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 시공중 안전성 검토

Table 2는 각 시공단계 별로 누적된 실험체의 변위, 중앙 부 단면의 변형률 및 응력을 해석결과 및 도로교설계기준 (KRTA, 2010)의 허용응력 기준과 비교하여 정리한 것이다. Table 2에서, Δ 는 변위, ϵ_{gt} 와 ϵ_{gb} 는 각각 거더 상단과 하단

의 변형률, ϵ_{dt} 는 바닥판 상단의 변형률, f_{sgt} 와 f_{sgb} 는 각각 강재 거더의 상단과 하단의 응력, f_{cgt} 와 f_{cgb} 는 각각 거더 콘크리트의 상단과 하단의 응력, 그리고 f_{cdt} 는 바닥판 콘크리트 상단의 응력을 의미한다.

실물모형실험체를 제작하면서 1차 긴장 단계에서 다소 큰 긴장력이 도입되어 실험체의 압축변형이 다소 크게 발생한 사실을 고려하면, 실물모형실험체와 해석모델에 각 시공단계 별로 누적된 응력은 유사하다고 할 수 있다. Table 2에 정리된 강재의 응력은 허용휨압축응력 및 허용휨인장응력에 크게 미치지 못하여 시공중에 안전적으로 거동하는 것을 알 수 있다. 또한, 실험체를 제작하면서 강재의 변형을 관찰한 결과 강재의 국부좌굴 및 거더 콘크리트와의 이격과 같은 이상은 발견되지 않았다.

CFTA 구조는 강재 거더에 충전된 거더 콘크리트의 전 단면을 유효단면으로 활용하는 개념의 교량 형식으로, 시공중에 거더 콘크리트에 균열이 발생하면 강성의 저하로 이어져 설계단계에서 예측한 것과 달리 불안정한 거동을 보일 수 있다. Table 2에 정리된 거더 콘크리트의 응력은 모두 허용응력 기준을 만족함으로써 시공중 균열의 발생가능성이 없다고 할 수 있다. 하지만, 바닥판 콘크리트 상단의 응력은 허용응력(휨강도)을 다소 상회하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는, 1차 긴장 단계와 같이, 2차 긴장 단계에서도 예측된 긴장력 손실량에 비해 적은 긴장력의 손실이 발생하여 긴장력이 다소 크게 도입된 데 원인이 있는 것으로 판단된다. 따라서, 향후 시공중 바닥판의 균열을 방지하기 위해서는 긴장력 도입 단계에서 엄격한 시공관리가 요구된다고 할 수 있다. 하지만, 2차 긴장 단계에서 발생한 일시적인 인장응력은 2차 고정하중(방호울타리 및 포장 하중)에 의해 바닥판 상부에 압축력이 작용하면서 소멸되므로 최종적인 거더의 강성 저하로 이어지지 않을 것으로 판단된다.

실교량의 경우, CFTA 거더교는 1차 긴장이 이루어진 이후 복수의 거더가 가로보에 의해 연결되어 교량 시스템으로 거동하므로, 본 연구에서 단일 거더를 기준으로 검토한 시공중 안전성에 비해 보다 높은 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Behaviors of models in each construction stage - mid section, accumulated values

Construction stage	Model	Δ (mm)	Strain of section (10^{-6})			Stress of steel plate (MPa)		Stress of concrete (MPa)		
			ϵ_{gt}	ϵ_{gb}	ϵ_{dt}	f_{sgt}	f_{sgb}	f_{cgt}	f_{cgb}	f_{cdt}
1st PS	Specimen	45.8	81	-314	-	16.6	-64.5	2.5	-9.7	-
	Frame model	43.4	90	-246	-	18.4	-50.4	2.8	-7.6	-
	FE model	37.9	59	-223	-	12.0	-45.6	1.8	-6.9	-
Deck Casting	Specimen	-22.4	-217	-46	-	-44.6	-9.4	-6.7	-1.4	-
	Frame model	-26.8	-220	31	-	-45.1	6.3	-6.8	1.0	-
	FE model	-27.1	-212	30	-	-43.5	6.3	-6.6	0.9	-
2nd PS	Specimen	2.3	-169	-218	128	-34.7	-44.8	-5.2	-6.7	3.6
	Frame model	-4.3	-187	-117	108	-38.3	-23.9	-5.8	-3.6	3.0
	FE model	-3.2	-175	-122	116	-35.9	-25.1	-5.4	-3.8	3.2
Allowable stress		-	-	-	-	$-190 < f_{sg} < 190$		$-16 < f_{cg} < 4.0$		3.3

Fig. 12. Positions of exciter and accelerometers

4. CFTA 거더의 진동사용성 평가

4.1 진동실험 및 결과

CFTA 거더의 진동사용성을 검토하기 위하여 Fig. 12와 같이 실험체 지간의 1/4 지점(중앙부에서 단부로 7.5 m 떨어진 위치)에 가진기를 설치하고 진동실험을 실시하였다. 진동실험은 2 회에 걸쳐 수행하였으며, 실험체 지간의 1/4 지점에 가진기를 설치하여 진동실험을 수행한 이후 실험체 지간의 3/4 지점으로 가진기를 옮겨 이전과 동일한 방법으로 진동실험을 수행하였다. 각각의 진동실험은 1.0 Hz에서부터 6.0 Hz 까지 0.5 Hz 간격으로 진동수를 증가시키면서 수행하였다.

가진기의 진동에 의한 실험체의 동적 거동을 계측하기 위하여, Fig. 12와 같이 교축방향으로 6 개의 등간격으로 분할된 위치에 바닥판의 횡방향 중심을 따라 가속도계(A1 ~ A7)를 설치하였다. 가속도는 가진기의 진동수 별로 각각 계측하였으며, 계측 시간간격은 0.001초(1000 Hz, 나이퀴스트 진동수 = 500 Hz)이며, 가진기가 멈춘 이후 거더의 동적 응답이 충분히 감소되었다고 판단될 때까지 계측하였다. Fig. 13은 진동실험 전경을 나타낸 것이며, Fig. 14는 계측된 가속도 응답의 예를 나타낸 것이다.

계측된 거더의 가속도 응답을 FDD(Frequency Domain Decomposition)법을 사용하여 거더의 고유진동수와 감쇠비, 그리고 모드형상을 추정하고 앞서 언급한 유한요소모델을 이용한 고유치해석 결과와 비교하였다. Table 3은 실험체와 유한요소모델의 고유진동수를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 15는 Table 3의 각 모드의 모드형상을 비교한 것이다. Table 3과 Fig. 15와 같이, 고유진동수와 모드형상은 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 13. View of vibration test

Fig. 14. Examples of responses - acceleration

Table 3. Natural frequencies of specimen and FE model

Mode	Frequency of specimen	Frequency of FE model
1	2.246 Hz	2.077 Hz
2	8.203 Hz	8.589 Hz
3	17.676 Hz	19.500 Hz

Fig. 15. Comparisons of the mode shapes

4.2 차량이동에 의한 진동 사용성 평가

CFTA 거더교의 진동특성을 파악하고 유한요소모델을 검증하기 위한 진동실험을 실시한 이후, 유한요소모델을 이용하여 CFTA 거더교의 진동사용성을 평가하였다. CFTA 거더교의 공용중 진동사용성을 평가하기 위하여, 이동하중을 고려한 동적

Fig. 16. Time history function at 1st node (velocity = 100 km/hr)

해석을 수행하고 동적응답이 가장 크게 발생하는 위치에 대하여 Meister 진동감각곡선(Meister scale for sensitivity of human to vibration)을 적용하여 분석하였다.

Meister 진동감각곡선은 현재까지 각 분야에서 널리 채용되고 있는 진동사용성 평가 방법 중 하나로써, 횡축은 주파수(Hz), 종축은 변위 또는 가속도로 놓고 ‘강한 불쾌감’(A 등급)에서 ‘거우 느낌’(E등급)까지 5 가지 단계의 향으로 분류하여 진동사용성을 평가하는 방법이다(Reiher and Meister, 1931).

이동하중은 요소 내 절점에 지연시간을 고려한 시간함수를 적용하는 방법으로 적용하였다. 이동하중을 고려한 동적해석을 위한 차량은 도로교설계기준에서 제시하는 표준트럭하중(DB-24)을 적용하였으며, 차량속도는 60 km/hr, 100 km/hr를 적용하였다. Fig. 16은 차량속도 100 km/hr에 해당하는 시간함수의 예를 보여준다.

Fig. 17은 차량속도 60 km/hr를 적용한 CFTA 거더교의 동적응답을 나타낸 것이며, Fig. 18과 Fig. 19는 각각 차량속도 60 km/hr 및 100 km/hr를 적용하여 Meister 진동감각곡선으로 진동사용성을 평가한 결과이다. 교량의 동적응답으

(a) Displacement

(b) Acceleration

Fig. 17. Responses of CFTA Girder in dynamic analysis (velocity = 60 km/hr)

(a) Displacement

(b) Acceleration

Fig. 18. Meister scale for sensitivity of human to vibration (velocity = 60 km/hr)

Fig. 19. Meister scale for sensitivity of human to vibration (velocity = 100 km/hr)

로 교량 중앙지점에서의 변위와 가속도를 구한 후, 이것을 진동수영역으로 푸리에변환하여 피크값을 그래프에 나타냈다. 여기서 광대역 진동수성분이 포함된 노면조도 등을 고려하지 않았으므로 소수의 피크값으로 응답이 나타남을 알 수 있다.

차량의 속도가 증가할수록, CFTA 거더교의 변위응답과 가속도의 진동수 성분은 고차진동수영역으로 이동되었다. Meister 진동감각곡선을 기준으로 진동사용성을 평가한 결과, CFTA 거더교는 고려한 차량 속도에서 모두 E등급(거우 느낌)으로 평가되어 진동사용성 측면에서 우수하다고 할 수 있다.

참고로 이 연구의 해석대상인 교량은 첫 번째 진동모드가 동적응답의 대부분에 기여하는 단순교이고, 첫 번째 모드의 공진을 발생시키는 차량속도는 243 km/hr로 고려한 차량속도보다 매우 크므로, 차량에 의한 공진의 가능성이 낮을 것으로 사료된다. 또한, 교량의 지간이 30 m로 DB-24 차량의 재하길이(8.2~13.2 m)에 비해 길지 않다고 판단하여 이 연구에서는 차량의 연행하중효과를 고려하지는 않았다. 그러나 교량의 고유진동수 이외에도 차량의 연행하중과 노면조도 그리고 차량-교량의 동적상호작용 등을 고려할 경우에 이 연구에서 구한 동적응답보다 증가할 것으로 판단되므로 향후 해당 교량의 실용화를 위해 이에 대한 정밀해석이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 CFTA 거더에 대한 실물모형실험체의 제작(시공)을 통해 시공중 안전성을 검토하였으며, 진동실험결과를 바탕으로 유한요소모형을 이용한 진동사용성 평가를 수행하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시공단계에서 실물모형실험체의 거동은 설계단계서 수행한 프레임해석 결과 및 유한요소해석 결과와 유사한 거동을 보였다. 즉, 설계단계에서 수행하는 해석결과를 바탕으로 시공중 안전성 검토결과의 타당성을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 시공중 실물모형실험체에 발생하는 응력은 도로교설계기

준에서 제시하는 허용응력을 넘지 않았다. 특히 강재 거더의 응력은 허용응력에 비해 매우 낮은 수준이었으며, 시공중 강판의 국부좌굴 및 거더 콘크리트와의 이격과 같은 이상은 발견되지 않았다. 따라서, CFTA 거더교는 시공중 안전성을 확보하고 있다고 할 수 있다. 다만, 바닥 콘크리트의 균열 발생을 억제하기 위해서는 긴장력 도입에 있어서 엄격한 시공관리가 필요할 것으로 판단된다.

- 3) 실물모형실험체를 이용한 진동실험 결과를 바탕으로 진동사용성 평가를 위한 유한요소모형을 검증할 수 있었다. 검증된 유한요소해석모형을 이용하여 Meister 진동감각곡선을 기준으로 진동사용성을 평가한 결과, CFTA 거더의 진동사용성은 모두 E 등급인 것으로 나타났다. 즉, CFTA 거더는 지간 중앙부에서 상대적으로 슬림한 단면을 갖고 있음에도 불구하고 우수한 진동사용성을 보유하고 있는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부/한국건설교통기술평가원의 건설기술 혁신사업(06건설핵심D14)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.H., Yoon, J.H., Kim, S.H. and Kim, J.H. (2010) Evaluation on Behavioral Characteristics of PSC Integral Abutment Bridge, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 4A, pp. 361-373.
- Hong, W., Park, S., Kim, J., Lee, S., Kim, S. Yoon, K. and Lee, H. (2009) Composite beam composed of steel and precast concrete (Modularized Hybrid System, MHS). Part I: experimental investigation, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 19, No. 3, pp. 275-289.
- Kim, H.J., Jun, M.I., Cho, E.S. and Hwang, W.S. (2011) A Speed Increasing Test of BIMODALTRAM for Dynamic Response

- Analysis of Pipe-truss Bridges, *Journal of the Korean Society for Railway*, KSR, Vol. 14, No. 2, pp. 137-142.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2007) *The development of new type of bridge girder system taking advantage of the efficiently composite structuration of structural construction materials*, Land Transportation and Maritime R&D Report, Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning.
- Korea Road & Transportation Association (KRTA) (2010) Design Specification of Highway Bridges, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Lee, J., Jeong, M.C., Park, K.H. and Kong, J.S. (2011) Structural Performance Analysis of New Type CFTA Girder Bridge, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KSHM, Vol. 11, No. 1, pp. 15-22.
- Morcous, G., Hanna, K., Deng, Y., and Maher, T.K. (2010) Concrete-Filled Steel Tubular Tied Arch Bridge System: Application to Columbus Viaduct, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 1, pp. 107-116.
- Reiher, H. and Meister, F.J. (1931) Sensitivity of Humans to Vibration, *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Vol. 2, No. 11, pp. 381-386.
- Ryu, S.H. and Kim, H.C. (2010) Flexural Behavior of Steel-Concrete Composite Beams Strengthened by Post Tension Method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol. 14, No. 3, pp. 186-195.

◎ 논문접수일 : 2012년 10월 10일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 10월 11일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 10월 23일