

# 고가교 경량화에 따른 성능개선

## Performance Improvement of Overpass Bridge by Weight Reduction

김 성 배<sup>1)</sup>

남 상 혁<sup>2)\*</sup>

김 장 호<sup>3)</sup>

Kim, Sung Bae

Nam, Sang Hyeok

Kim, Jang-Ho Jay

### Abstract

In this study, structural safety capacity analysis of the overpass railway bridge between Konkuk Univ. and Guui station railroad has been performed. The overpass is expected to have suffered durability reduction by deterioration. The weight reduction of the overpass has been implemented to prevent further durability reduction and to improve performance capacity. To reduce the weight, 3 procedures of replacing concrete soundproofing wall to light-weight soundproofing wall, replacing gravel ballast to concrete ballast, and reducing the weight of trough have been performed. The analysis of static/dynamic behaviors and improved capacity of the light-weighted overpass bridge has been performed. The structural safety verification of the improved structure has been implemented by using rating factors of load carrying capacity of PSC I girder. The results have shown that the deflection has been reduced by 2.6mm and tensile strength has been improved by 1.07MPa, which indicate that the structural capacity has effectively been improved. Also, the natural frequency has improved by approximately 30% where vibration reduction and dynamic behavior improvement have been achieved. Moreover, in the rating factor evaluation based on analysis and test results, an improvement from 1.82 to 1.93 has been observed. Therefore, weight reduction method for the overpass is effective considering overall results.

**Keywords** : Overpass bridge, Weight reduction, Performance improvement, Natural frequency, Load carrying capacity

## 1. 서론

콘크리트 구조물은 다른 재료의 구조물에 비해 내구성이 높으며 유지관리하기 쉬운 장점을 가지고 있어 매우 경제적인 구조물이지만, 부적절한 재료를 사용하거나 부실시공으로 인해 이러한 장점을 충분히 살려내지 못하는 경우도 발생한다. 또한, 적절한 재료와 시공법으로 완벽하게 구조물을 시공하였다 하더라도 외부환경에 의한 성능저하를 고려해주지 못한 경우 많은 내구적인 문제점을 보이게 되며, 결국에는 예측된 시간보다 더 이른 시점에서 그 구조물의 수명이 끝나게 된다(권영진 등, 2006; 김선웅 등, 2009; 김성수 등, 2008; 김재환 등, 2006; 송하원 등, 2009).

본 연구의 대상구간인 서울 지하철 2호선의 고가교 역시 환경적인 요인과 더불어 구조물의 노후화로 인한 성능저하현상으로 내구성의 저하가 예상되어 어떠한 조치를

취하지 않으면 내구연한의 감소가 우려되는 구조물이다. 이러한 이유로 대상 고가교의 경우 내구성 확보기간 연장 방안 및 향후 대책에 관한 연구(한국콘크리트학회, 2001)가 진행된 바 있다. 기존의 연구에서 대상구조물에 대한 내구성, 안전성, 보수·보강 현황 등을 분석하였고 현재 구조물의 성능저하상태, 내구성 확보기간 추정, 보수필요시기 추정, 보수·보강 상태, 안전성 및 사용성 상태 등을 정량적으로 평가하고 구조물별 개선방안을 제시한 바 있다(권성준 등, 2007; 권성준 등, 2008; 한국콘크리트학회, 2001). 또한 구조계 변화를 통한 구조적, 내구적 성능 개선과 시설 대책 방안을 제시하였다. 본 연구의 대상 구조물은 사용기간이 20년이 경과하여 건설초기의 결함 및 사용중의 성능저하가 진전되어 있었으며 사용중인 구조물이므로 보수·보강방법 또는 구조물의 성능개선에 많은 제약을 받게된다. 또한, 자갈도상의 교체시기가 도래하여 자갈도상을 콘크리트 도상으로 교체할 경우 경량

1) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 BK 박사후 연구원, 공학박사

2) 정회원, (주)두컴스엔지니어링코리아 대표, 공학박사

3) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 부교수, 공학박사

\* Corresponding author : ducoms@yonsei.ac.kr 02-364-4775

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

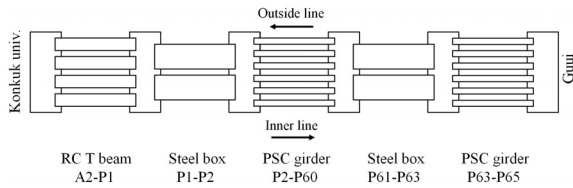


Fig. 1 Superstructure system of overpass bridge between Konkuk Univ.-Guui stations

화 효과 뿐만 아니라 연속화를 병행함으로써 유지관리에 많은 개선점을 확보 할 수 있다. 이러한 연구결과를 토대로 고가교 구조물의 경량화를 통한 성능개선 방안이 도출되었다. 따라서 본 연구는 고가교 구조물의 경량화를 실시하고 경량화에 따른 성능개선 효과를 정량적으로 평가하기 위한 것이다.

대상 고가교의 내구성 저하로 인한 내구연한의 감소를 막기 위해 방음벽을 콘크리트 방음벽에서 경량재 방음벽으로, 도상을 자갈 도상에서 콘크리트 도상으로, 마지막으로 트라프를 경량화함으로써 고가교 전체의 경량화를 유도한다. 이러한 고가교 경량화에 따른 정적 및 동적 거동 변화와 성능개선 효과를 분석하고, PSC I형교 구간의 내하율 증진에 의한 구조안전성 확보가 가능한가를 확인하는 것에 본 연구의 목적을 두고 있다.

## 2. 고가교 경량화 방안 및 계측 방법

### 2.1 대상 구조물의 제원 및 현황

본 연구의 대상구조물인 지하철 2호선 고가교 구간에 대한 상부구조 형식을 도시하면 Fig. 1과 같이 대부분이

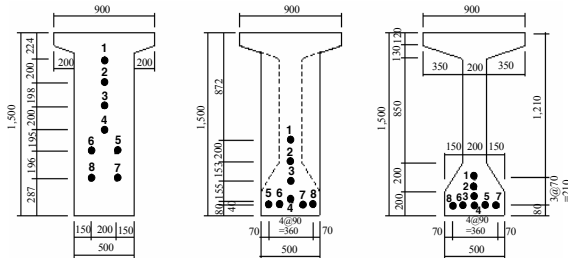
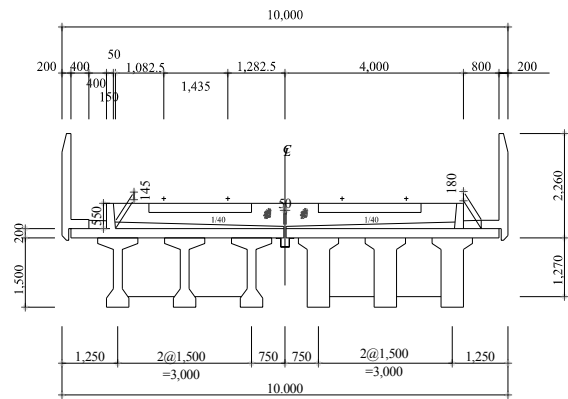


Fig. 2 Cross-sections of PSC girder bridge

PSC 거더교 형식이다. 대상구간인 P26~P27 경간사이의 상부구조형식은 PSC I형 거더교로 경간 19.96m의 단순 보이며, 단면제원은 Fig. 2와 같다.

### 2.2 고가교 경량화 방안

본 연구의 대상구조물인 지하철 고가교는 외부 환경적인 요인에 의한 성능저하현상으로 내구성의 저하가 예상되고 있다. 따라서 고가교의 내구성 저하로 인한 내구연한의 감소를 방지하기 위하여 기존의 콘크리트 방음벽을

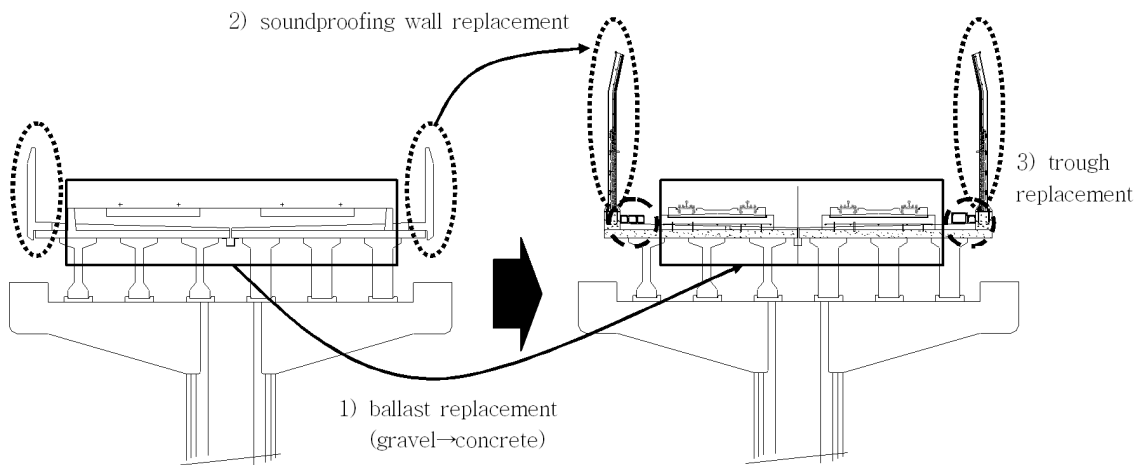


Fig. 3 Weight reduction procedure diagram

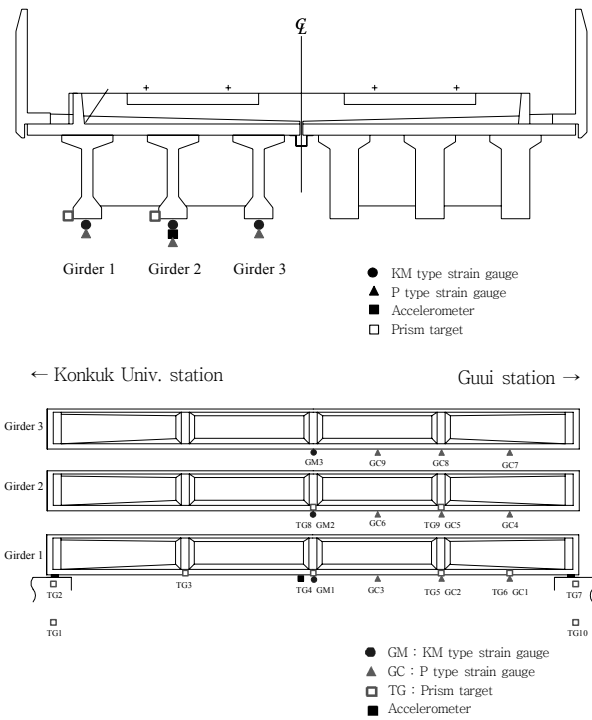


Fig. 4 Gauge placement locations

경량재 방음벽으로 교체하며, 도상을 자갈 도상에서 콘크리트 도상으로 교체한다. 마지막으로 레일 및 트라프를 경량화 함으로써 고가교 전체의 경량화를 유도한다. Fig. 3은 경량화를 시행하는 위치와 대상항목에 대한 개략적인 모식도를 나타내고 있다.

### 2.3 대상 구조물의 계측방법

대상 구조물의 처짐은 약 1년 6개월에 걸쳐 장기계측을 실시하기 때문에 계측 위치인 거더 중앙 하면 및 교각 등에 타겟(reflective sheet target)을 설치한 후 측점 위치에 외부 환경변화에  $\pm 3'$ 의 작동 범위내의 기울어짐을 자동적으로 보정할 수 있는 토탈 스테이션(total station)을 설치하고, 구조체에 부착된 타겟을 시준하여 구조체의 변위를 측정한다. 계측 위치는 Fig. 4와 같이 측정의 편의를 위하여 최외측 거더인 G1과 교각, 내측 거더인 G2에 타겟을 각각 설치하여 거더의 연직변위 변화를 계측하였다.

구조물의 변형률은 PSC 거더 하면에 KM형(고정식) 및 P형(표면부착식) 전기저항식 변형률 게이지를 부착하여 하중 재하에 따른 대상 구조물의 변형률 변화를 측정하였다. Fig. 4와 같이 내선 방향의 최외측 거더를 G1으

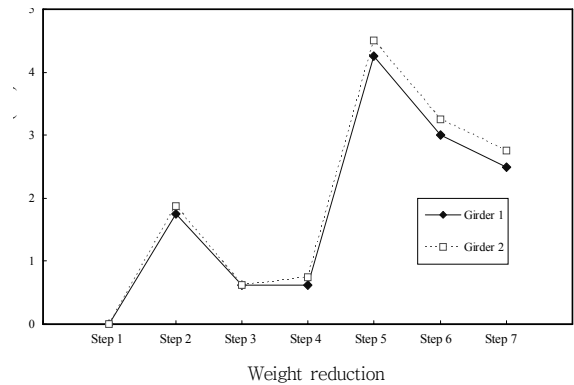


Fig. 5 Deflection reduction in center of PSC girder

로 설정하고 내측에 위치한 거더를 순서대로 G2, G3로 지정하였다. P형 변형률게이지의 부착위치와 KM형 변형률게이지의 부착위치는 Fig. 4와 같다. P형 변형률게이지는 거더당 3개씩 총 9개의 게이지를 부착하였고, KM형 변형률게이지는 거더당 1개씩 총 3개의 게이지를 부착하였다. 처짐이나 굽음에 대해 가장 많은 변화율을 보일 것으로 예상되는 거더 중앙 부분에 고정밀도의 KM형 변형률게이지를 부착하고, 그 외의 부분에 대해서는 P형 변형률게이지를 부착하였다.

### 3. 고가교 경량화에 따른 실험 결과

본 연구는 대상 구조물의 초기상태(경량화 실시 이전 상태)에 대한 제1차 계측을 시작으로, 자갈도상을 제거한 이후에 제2차 계측, 콘크리트 도상을 타설한 후 제3차 계측을 실시하였다. 이 후 콘크리트 도상의 경화가 완료된 이후 제4차 계측을 실시하였으며, 콘크리트 방음벽을 철거한 후 제5차 계측, 경량 방음벽을 설치한 후 제6차 계측을 실시하였으며, 레일과 트라프를 교체한 이후 제7차 계측을 끝으로 최종계측 하였다.

#### 3.1 처짐 계측 결과

고가교 경량화에 따른 PSC 거더교의 변위 변화를 측정하기 위해 토탈 스테이션을 이용하였다. 매 계측시마다 3~5회 반복 계측하여 그 평균값을 취하였으며 그 결과는 Table 1과 Figs. 5~6에 나타내었다. 초기상태에서 자갈도상의 제거 공정에 의해 약 1.75mm의 처짐량이 감소하는 것으로 시작하여 콘크리트 방음벽 제거에 따른 최대 처짐 감소량은 4.25mm이고 최종적으로 2.5mm의 처짐

Table 1 Vertical deflection reduction in PSC girder(mm)

Step	Structural condition	TG3	TG4	TG5	TG8	TG9
1	Initial condition	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	Gravel ballast removal	0.625	1.750	0.750	1.875	1.125
3	Concrete ballast casting	0.125	0.625	0.125	0.625	0.250
4	Curing of concrete finish	0.125	0.625	0.250	0.750	0.375
5	Concrete soundproof wall removal	1.750	4.250	1.875	4.500	2.125
6	Light-weight soundproof wall installation	0.750	3.000	1.000	3.250	1.125
7	Rail change and trough installation	0.625	2.500	0.875	2.750	0.875

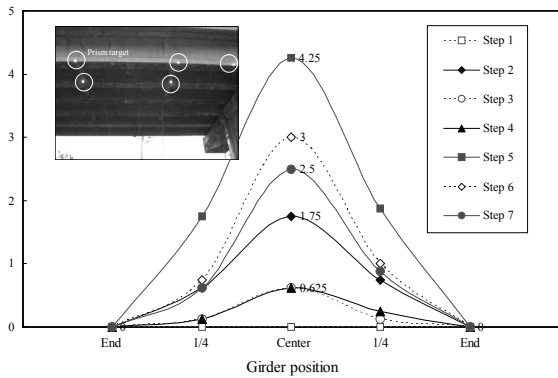


Fig. 6 Deflection reduction in PSC girder(G1) at various positions

량 감소효과를 보이고 있다. 이와 같이 고가교 경량화에 의한 자중 변화에 따라 연직 변위의 변화가 적절하게 나타나고 있다. 따라서 계측방법 및 결과가 타당하다는 것을 알 수 있다.

경량화 작업에 따른 처짐 감소량은 자갈도상을 콘크리트로 교체하였을 때 약 0.625mm의 처짐 감소량을 보였으며, 콘크리트 방음벽을 경량방음벽으로 교체할 때 약 2.38mm의 감소 효과를 보여 전체 경량화 작업에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

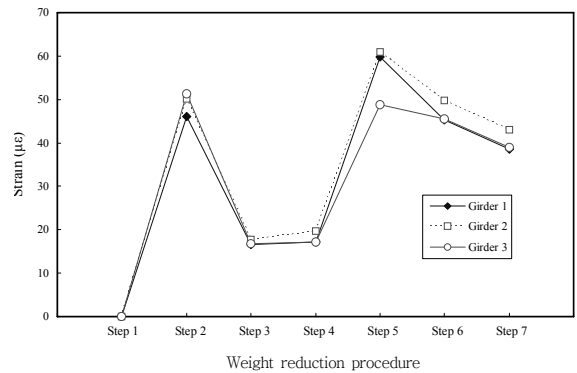
### 3.2 변형률 계측 결과

KM형 변형률계이지는 P형 변형률계이지에 비해 외부 충격이나 온도에 대한 자기보상과 저항성이 뛰어나기 때문에 그 계측값을 더 신뢰할 수 있다. Table 2는 거더 하단 중앙부에 부착한 KM형 변형률계이지에서 계측된 값이고, Fig. 7은 계측값을 토대로 각 거더의 변형률과 인장응력의 감소량을 비교한 것이다.

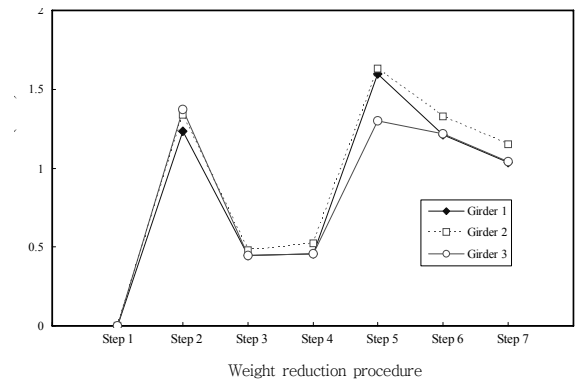
Fig. 7과 같이 초기상태에서 자갈도상의 제거공정을 시작으로 거더 하연의 인장응력이 감소하는 것을 관찰할 수

Table 2 Strain measurement results at center of each girder

Step	Structural condition	Strain ( $\mu \epsilon$ )		
		GM1	GM2	GM3
1	Initial condition	0	0	0
2	Gravel ballast removal	-46.09	-50.14	-51.30
3	Concrete ballast casting	-16.60	-17.83	-16.75
4	Curing of concrete finish	-17.18	-19.63	-17.07
5	Concrete soundproof wall removal	-59.80	-61.02	-48.70
6	Light-weight soundproof wall installation	-45.35	-49.73	-45.53
7	Rail change and trough installation	-38.65	-43.03	-38.92



(a) Strain change



(b) Stress reduction

Fig. 7 Stress and strain at center of girder

있다. 이는 고가교의 경량화에 따라 자중이 줄어들어 거더의 하면이 압축응력을 받는 것을 의미하며, 결국 자중 감소에 따라 대상구간의 거더에 솟음이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이후 콘크리트 도상으로 교체하기 위하여 콘크리트를 타설한 후에는 콘크리트 자중에 의해 인장응력의 감소량이 줄어들지만, 전체 구조계에서 높은 고정하중을 차지하고 있는 콘크리트 방음벽을 제거한 후에는 인장

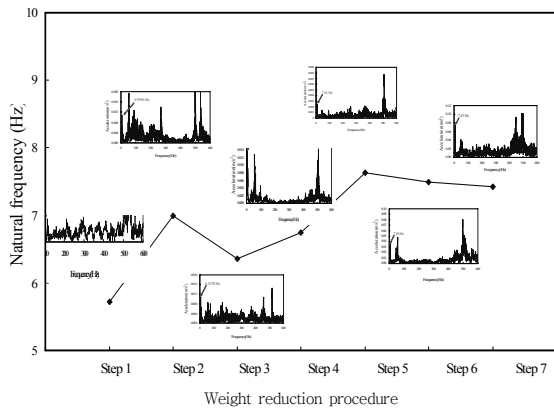


Fig. 8 Natural frequency results

응력의 감소량이 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 초기상태에서 자갈도상을 콘크리트 도상으로 교체하고 콘크리트 방음벽을 경량 방음벽으로 교체함에 따라 고가교의 경량화가 이루어졌음을 의미한다. 한편, 레일 교체 및 트라프가 설치 완료된 후 측정한 결과에서의 인장변형률의 변화량이 약  $40\mu\epsilon$ 로 측정되어 최종적으로는 약 1.07 MPa의 인장응력이 감소된 것으로 평가되었다.

### 3.3 동적 계측 결과

대상 교량의 경량화에 따라 각 단계별로 동적계측을 실시하여 고유진동수의 변화를 측정하였다. 열차하중에 의한 가진시에는 하중센서(force sensor)와 가속도계를 이용하여 계측을 하게 된다. 열차가 대상 교량을 통과하는 동안 하중센서에서는 시간에 따른 하중값을 측정하게 되고, 가속도계에서는 시간에 따른 가속도를 측정한다. 또한 임팩트해머(impact hammer)를 이용한 가진시에도 시간에 따른 하중값과 가속도가 해머와 가속도계에 의해 측정된다. 고유진동수를 구하기 위해서는 시간에 대한 값들이 아닌 주파수 대역에서의 가속도값 등을 알아야 한다. 이때 사용되는 것이 FFT(Fast Fourier Transform)이다. 따라서 가속도계 및 하중센서를 이용하여 측정된 시간대역에서의 값들을 FFT 처리를 하게 되면 주파수 대역에서의 값으로 변환하게 되고, 이를 이용하여 대상 교량의 고유진동수를 구하게 된다.

#### 3.3.1 열차하중에 의한 가진

열차하중에 의한 고가교의 동적거동을 분석하기 위해 가속도계 및 하중센서를 부착하여 고유진동수의 변화를 측정하였다. 하중단계별로 초기계측, 자갈도상 제거, 콘크리트

Table 3 Natural frequency change from procedure applications

Step	Structural condition	Train load excitation(Hz)	Impact hammer excitation(Hz)
1	Initial condition	5.72	5.80
2	Gravel ballast removal	6.99	7.07
3	Concrete ballast casting	6.36	6.12
4	Curing of concrete finish	6.75	7.10
5	Concrete soundproof wall removal	7.63	7.71
6	Light-weight soundproof wall installation	7.50	7.63
7	Rail change and trough installation	7.43	7.51

도상 타설 직후, 콘크리트 도상 경화 후로 나누어 각각에 대한 고유진동수를 구하여 그 변화 추이를 비교하였다. 가속도계 및 하중센서의 부착 위치는 Fig. 4와 같으며 열차하중에 의해 측정된 고유진동수의 변화는 Fig. 8과 같다.

#### 3.3.2 임팩트 해머를 이용한 가진

열차하중에 의한 가진이 아닌 임팩트 해머에 의한 가진을 통해 PSC 거더 고가교의 동적 특성을 분석하였다. G2 중앙에 부착되어 있는 가속도계로부터 2m 떨어진 지점을 임팩트 해머로 가진하여 동적거동 특성을 분석하였다. 이 경우에도 시공 하중 단계별로 초기계측, 자갈도상 제거, 콘크리트 도상 타설 직후, 콘크리트 도상 경화 후로 나누어 각각 계측을 실시하였고, 고유진동수의 변화 추이를 비교하였다.

#### 3.3.3 고유진동수 비교

고가교의 경량화에 의한 자중 변화에 따른 PSC 거더교의 고유진동수(natural frequency) 변화를 비교하면 Table 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 교량의 자중 변화에 따라 고유진동수가 변하게 되는 것을 알 수 있다. 그러나 자중 변화가 구조 시스템의 특성을 크게 바꿀 정도로 크지 않기 때문에 PSC 거더교의 고유진동수는 크게 변하지 않는다. 하지만 고가교의 경량화에 따른 동적특성 변화는 확인할 수 있었다.

## 4. 고가교 구조물의 구조해석

대상 구조물의 경량화를 통한 성능개선효과를 분석하기 위해 3차원 정밀구조해석을 실시하여 실험을 통한 계측 결과의 타당성을 검증하였다. 또한 해석 및 실험 결과

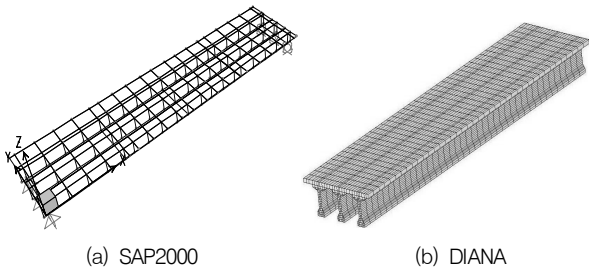


Fig. 9 FE modeling

Table 4 Comparison of FE analysis results

Structural condition		Flexural moment (kN·m)			
		Load	Girder 1	Girder 2	Girder 3
Before weight reduction	Initial condition	dead load	2210.2	1997.1	1806.0
		live load	1193.8	1279.6	1350.4
		total	3404.0	3276.7	3156.4
Weight reduction processing	Gravel ballast removal	dead load	1686.4	1466.3	1291.1
		live load	1193.8	1279.6	1350.4
		total	2880.2	2745.9	2641.5
	Concrete ballast casting	dead load	2029.2	1791.1	1574.8
		live load	1193.8	1279.6	1350.4
		total	3223.0	3070.7	2925.2
	Concrete soundproof wall removal	dead load	1673.9	1608.7	1592.3
		live load	1193.8	1279.6	1350.4
		total	2867.7	2888.3	2942.7
	Light-weight soundproof wall installation	dead load	1850.4	1698.9	1594.3
		live load	1193.8	1279.6	1350.4
		total	3044.2	2978.5	2944.7
	Rail change and trough installation	dead load	1869.1	1714.8	1600.0
		live load	1193.8	1279.6	1350.4
		total	3062.9	2994.4	2950.4
After performance improve	Weight reduction rate	89.98%	91.38%	93.47%	

를 통하여 대상 구조물의 내하력을 평가하여 현재 시점에서의 성능개선효과를 정량화하였다. 구조해석은 범용 유한해석 프로그램인 DIANA와 SAP2000을 이용하였다.

#### 4.1 구조해석 모델링

본 연구에서는 경량화에 따른 고가교의 성능개선 효과를 해석적으로 검증하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램을 이용한 3차원 구조해석을 실시하였다. 또한 구조해석은 범용유한요소해석 프로그램인 DIANA를 사용하여 해석결과를 비교함으로써 해석결과의 타당성을 추가로 검증하였다. DIANA를 이용한 모델링 형상은 Fig. 9

Table 5 Comparison of vertical deflection at center of girder

Step	Structural condition	G1 girder(mm)		G2 girder(mm)	
		Experiment	Analysis	Experiment	Analysis
1	Initial condition	0.000	0.000	0.000	0.000
2	Gravel ballast removal	1.750	2.201	1.875	2.276
3	Concrete ballast casting	0.625	0.826	0.625	0.856
4	Curing of concrete finish	0.625	0.952	0.750	0.987
5	Concrete soundproof wall removal	4.250	4.824	4.50	4.998
6	Light-weight soundproof wall installation	3.000	3.463	3.250	3.581
7	Rail change and trough installation	2.500	1.475	2.75	1.334

와 같이 상부슬래브와 I형 거더 모두 솔리드 요소로 모델링하여 3차원 정밀구조해석을 실시하였다.

#### 4.2 해석결과

구조해석은 대상구조의 경량화 공정별로 구분하여 수행하였으며, 중앙부 휨모멘트 및 거더 하부 콘크리트 응력과 처짐을 구하였다. 경량화 실시 전과 경량화 실시 후 I형 거더 중앙부에서의 휨모멘트와 하중의 변화는 Table 4와 같다. SAP2000에 의한 해석 결과에서 보이는 것과 같이 고가교 경량화에 의한 활하중의 변화는 없으며 고정하중(자중)의 변화에 의해 휨 모멘트가 감소하는 것을 알 수 있다. Table 4의 결과에서 보이는 것과 같이 하중분담률이 가장 큰 최외측 거더인 G1 거더가 경량화에 따른 고정하중의 감소에 의한 휨모멘트의 감소율이 89.98%로 경량화 전에 비해 약 10%가량 감소하는 것을 알 수 있으며, G2, G3 거더에 비해 약 1.4~3.5%가량 경량화률이 더 높은 것으로 나타났다.

#### 5. 고가교 구조물의 성능개선 평가

##### 5.1 해석결과와 실험결과의 비교

###### 5.1.1 변위에 대한 비교 분석

유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하여 해석한 거더 중앙부의 처짐과 현장실험을 통해 측정한 실험값은 Table 5와 같다. Table 5에서 알 수 있듯이 각 하중단계별로 경량화 경향을 해석에서 비교적 잘 예측하고 있다.

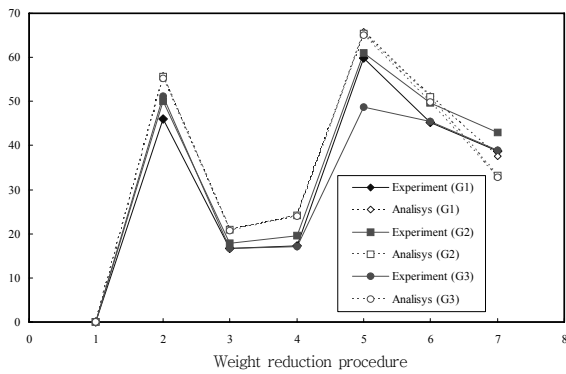


Fig. 10 Comparison of analysis and experimental results for mid-span strain procedure

한편, 최종 경량화 작업 후의 해석결과는 실험결과보다 대상교량의 성능개선 효과를 다소 적게 평가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 해석상 불가피하게 수반되는 실제구조와 상이한 경계조건과 레일의 추가 교체 등에 기인한다고 판단된다. 그러나, 해석과 실험과의 차이가 크지 않을 뿐 아니라 해석에서 실제 성능개선 효과를 안전측으로 평가하고 있으며, 실제 구조를 고려한 적절한 재료모델 및 해석모델을 적용하였기 때문에 본 연구에서 수행한 해석기법을 적용하여 대상구조의 성능개선을 예측하는 데는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

거더의 중앙부 연직 처짐을 경량화 작업 공정별로 계측 및 해석을 실시한 결과 경량화 전에 약 5.2mm 하향으로 처짐이 발생되어 있던 거더가 상부구조물의 경량화를 인하여 약 2.0mm 이상 처짐이 감소하여 구조물의 위치가 상향 조정되는 것으로 나타났다. 이러한 거더의 처짐 감소는 거더 하연의 인장응력을 감소시키고, 기 발생된 휨 균열을 폐합시킬 수 있는 효과가 있어 경량화에 따른 성능개선의 지표로 활용될 수 있다.

프리즘 타켓과 토탈 스테이션을 이용한 정밀 계측결과와 해석결과를 비교한 결과 계측에서는 경량화로 인한 처짐 감소(상향)가 약 2.6mm로 측정되었으며, 유한요소해석 결과에서는 처짐 감소가 약 1.4mm로 해석되었다. 계측결과와 해석결과에서 알 수 있듯이 실제 계측을 통해 구조물의 성능개선을 평가한 결과가 유한요소해석을 통해 예측한 성능개선 효과보다 우수한 것으로 나타나 본 연구에서 적용한 유한요소해석을 이용하여 고가교 구조물의 경량화에 따른 성능개선 효과를 예측하는 데는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 6 Comparison of strain at center of girder ( $\mu\epsilon$ )

Step	Structural condition	G1 girder		G2 girder		G3 girder	
		Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis
1	Initial condition	0	0	0	0	0	0
2	Gravel ballast removal	-46.09	-55.8	-50.14	-55.6	-51.30	-55.3
3	Concrete ballast casting	-16.60	-21.0	-17.83	-21.0	-16.75	-20.8
4	Curing of concrete finish	-17.18	-24.2	-19.63	-24.1	-17.07	-24.0
5	Concrete soundproof wall removal	-59.80	-65.7	-61.02	-65.4	-48.70	-65.1
6	Light-weight soundproof wall installation	-45.35	-51.2	-49.73	-51.0	-45.53	-49.9
7	Rail change and trough installation	-38.65	-37.5	-43.03	-33.1	-38.92	-32.7

### 5.1.2 변형률에 대한 비교 분석

I형 거더 중앙부 하단에 설치한 KM형 변형률게이지로부터 4차에 걸쳐 계측한 구조물의 변형률과 DIANA를 통해 해석한 I형 거더 중앙부의 변형률을 비교하면 Table 6과 같으며, 각 거더 중앙 단면에서의 변형률에 대해 해석결과와 실험결과를 비교하면 Fig. 10과 같다. Table 6과 Fig. 10에서 비교한 것과 같이 각 단계별로 거더 중앙부의 해석결과와 실험결과가 유사한 경향을 나타내고 있다. 거더의 하연 응력을 경량화 작업 공정별로 계측 및 해석을 실시한 결과 경량화 전에 약  $-1.49$  MPa (압축)이었던 응력이 상부구조물의 경량화를 인하여 약  $-1.0$  MPa의 압축응력이 추가적으로 발생하여 거더 하연에 발생 가능한 인장응력을 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 거더 하연의 압축응력은 기존의 발생됐던 균열을 폐합시킬 수 있는 효과가 있으며, 경량화로 인한 구조물의 연직변위가 상승했다는 것을 의미하는 지표이다.

한편, 계측결과와 해석결과를 비교한 결과 계측에서는 경량화로 인한 압축응력 증가(인장응력 감소)가 약  $-1.07$  MPa로 측정되었으며, 유한요소해석 결과에서는 압축응력 증가가 약  $-0.92$  MPa로 해석되어 매우 유사한 경향을 나타내었다. 특히 유한요소해석을 통해 성능개선 효과를 예측한 것보다 실제 계측을 통해 평가한 성능개선 효과가 더 뛰어난 것으로 나타났다.

Table 7 Calculated effective prestress force

Station	Measuring method	$P_i$ (kN)	$P_e$ (kN)	Camber (cm)				Effectiveness ratio
				$\Delta P_i$	Dead load	Measured value	Loss of prestress	
Chang-dong	Displacement profile	3276	2262	2.14	-0.83	-0.96	0.35	69%
	Strain		2191	strain : $2,966 \times 10^{-6}$				66.9%
Konkuk univ.- Guui	Displacement profile	3265	2051	2.33	-1.26	-0.61	0.46	69%

## 5.2 내하력 평가

### 5.2.1 내하력 평가 방법

PSC교의 내하력을 산정하기 위해 하중저항계수법에 의한 내하력을 산정하였다(한국시설안전공단, 1997; 건설교통부, 2004). 그리고 내하력 산정시 고정하중, 활하중 등 각 하중에 의한 휨모멘트를 별도로 계산하여야 하기 때문에 내하력 산정은 SAP2000에 의한 해석결과만을 적용하였다.

내하력 평가는 철도설계기준(철도교편)에 있는 콘크리트 교량의 내하력 평가방식을 사용하였다.

#### 1) 계수 정규내하율( $R_{UN}$ )

$$R_{UN} = \frac{\phi S_N - 1.1 D}{1.3 [5/3 (L + I)]} \quad (1)$$

#### 2) 계수 최대내하율( $R_{UM}$ )

$$R_{UM} = \frac{\phi S_N - 1.1 D}{1.3 (L + I)} \quad (2)$$

여기서,  $S_N$ 는 공칭강도,  $\phi$ 는 강도감소계수(=0.85),  $D$ 는 고정하중에 의한 휨모멘트,  $L$ 은 활하중에 의한 휨모멘트,  $I$ 는 충격하중에 의한 휨모멘트이다.

또한, PSC I형보의 공칭 휨모멘트강도 산정은 철도설계기준(철도교편) 제9장 프리스트레스트 콘크리트의 관련 내용(긴장재가 부착되거나 부착되지 않은 경우)을 참조하여 계산하였다(건설교통부, 2004).

### 5.2.2 유효 프리스트레스력의 산정

현재 PSC 거더교 PS 강재의 유효 프리스트레스를 추정하는 방법은 여러 가지 있으나 본 연구에서는 처짐 프

로파일(profile) 측정법을 이용하여 유효프리스트레스력을 산정하였다. 처짐 프로파일을 이용하여 유효프리스트레스력을 산정하는 방법은 다음과 같다.

- 1) 대상 지간의 거더에 대해 처짐을 측정하고, 거더의 평균 처짐량( $\Delta$ )을 산정한다.
  - 2) 거더의 합성전 단면에 대한 거더와 슬래브 자중에 의한 처짐( $\Delta_d$ )과 합성단면에 대한 부가 사하중에 의한 처짐( $\Delta_{add}$ )을 산정한다.
  - 3) 합성전 단면에 대한 초기 프리스트레스력( $P_i$ )에 의한 솟음(camber,  $\Delta_{pi}$ )을 산정한다.
  - 4) 현재까지 프리스트레스력 손실에 의한 솟음(camber)의 손실량( $\Delta_{loss}$ )을 산정한다.
- $$\Delta_{loss} = \Delta_{pi} - \Delta_d - \Delta_{add} - \Delta$$
- 5) 솟음(camber)의 손실량을 사용하여 합성단면에서의 프리스트레스력 손실량( $\Delta P$ )을 산정한다.
  - 6) 유효프리스트레스력( $P_e$ )은 다음과 같다.

$$P_e = P_i - \Delta P$$

본 연구에서 사용한 처짐 프로파일 측정방법에 대한 타당성을 확인하기 위해 철거 예정이었던 창동 인입교를 대상으로 실시된 실험결과와 비교하였다.

상대 비교 자료로서 창동 인입교량을 대상으로 수행한 시험결과는 Table 7과 같다. 창동 인입교는 공용연수가 15년 정도 경과한 것으로 외관은 매우 양호했으며 같은 PSC 거더교로서 상대적인 정보를 제공할 수 있었다. 창동인입교의 유효프리스트레스력의 추정에서 변형률 추정 방법은 PS 강재에 미리 게이지를 부착하고 거더의 정착구를 파괴하여 게이지의 변형률 변화량을 실험적으로 측정된 것으로 처짐 프로파일을 통한 유효프리스트레스력 추정결과와 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 처짐 프로파일 측정법의 타당성을 확인할 수 있었다.

본 연구의 대상 구간에 대해 처짐 프로파일 측정법을



Table 8 Results of load carrying capacity evaluation by weight reduction steps

Particular		Bonded tendon			Unbonded tendon			
Step	Effective prestress force	Rating factor	Outward girder	Central girder	Inner girder	Outward girder	Central girder	Inner girder
Before weight reduction	Pe=2190kN (0.63fpu)	Normal	1.851	1.811	1.788	1.286	1.284	1.289
		Maximum	3.084	3.018	2.980	2.143	2.140	2.148
Gravel ballast removal		Normal	2.073	2.022	1.981	1.509	1.495	1.482
		Maximum	3.456	3.369	3.302	2.514	2.491	2.470
After Concrete ballast replacement		Normal	1.928	1.893	1.875	1.363	1.366	1.376
		Maximum	3.213	3.155	3.125	2.271	2.277	2.293
Concrete soundproof wall removal		Normal	2.079	1.965	1.868	1.514	1.438	1.369
		Maximum	3.464	3.275	3.114	2.523	2.397	2.282
Light-weight soundproof wall installation		Normal	2.004	1.929	1.867	1.439	1.403	1.368
		Maximum	3.339	3.216	3.112	2.398	2.338	2.280
Rail replacement and trough installation	Normal	1.996	1.923	1.865	1.431	1.396	1.366	
	Maximum	3.326	3.205	3.109	2.385	2.327	2.277	

Table 9 Comparison of normal rating factor by effective prestress force and weight reduction

Particular	Effective prestress force	Bonded tendon			Unbonded tendon		
		Outward girder	Central girder	Inner girder	Outward girder	Central girder	Inner girder
Before weight reduction	Pe=1900kN (0.55fpu)	1.799	1.763	1.742	1.098	1.107	1.120
	Pe=2190kN (0.63fpu)	1.851	1.811	1.788	1.286	1.284	1.289
After weight reduction	Pe=1900kN(0.55fpu)	1.944	1.875	1.820	1.241	1.219	1.198
	Pe=2190kN (0.63fpu)	1.996	1.923	1.865	1.431	1.396	1.366

이용하여 계산한 유효 프리스트레스력은 Table 7과 같다. 계산 결과로부터 대상 구간에서는 프리스트레스 유효율이 63%로 추정되었다. 기존 연구 결과 ‘고가교의 내구성 확보기간 연장방안 및 향후 대책에 관한 연구’에서도 유효율은 59~72%정도로 평가되었으며, 구조계산에 사용되는 추정치로 사용되어졌다(한국콘크리트학회, 2001). 본 과업에서는 내하율 산정시 유효 긴장력을 59%보다 작은 값인 초기 긴장력의 55%( $P_e = 1900$  kN)을 적용하여 최악의 경우를 고려하였을 뿐만 아니라 63% ( $P_e = 2190$  kN), 74% ( $P_e = 2580$  kN)인 경우에 대해서도 계산하였으며, 긴장재는 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대하여 모두 고려하였다.

### 5.2.3 내하력 평가 및 분석

철도설계기준의 내하력 평가방법을 적용하여 경량화를 실시하지 않은 시기와 자갈도상을 콘크리트도상으로 교체한 후의 시기에서의 내하력을 평가하면 Table 8과 같다. Table 9는 유효 프리스트레스가 각각 55%와 63%인 경우 긴장재의 부착여부에 대한 각 단계별 정규내하율의 변화를 비교한 것이다. 긴장재가 비부착된 상태에서 긴장력이 도입초기의 55%만 존재하는 경우 경량화 이전의 내

하율이 1.096~1.120로 1.0에 매우 근접한 수치로 나타났다. 따라서, 대상교량의 노후화 및 장기안전성을 고려할 때 일정수준으로의 성능개선이 요구된다고 판단된다. 현재는 자갈도상을 콘크리트 도상으로 교체하고, 중량의 콘크리트 방음벽을 경량 방음벽으로 교체하였을 뿐 아니라 레일교체 및 트라프를 설치하여 경량화 작업을 완료한 상태이다. 본 연구에서는 계측결과 및 해석결과에 근거하여 내하율을 산정하여 최종적으로 경량화를 통한 성능개선 효과를 정량적으로 평가하였다. 초기 1.0에 매우 근접하였던 내하율은 긴장재가 비부착이고 긴장력을 55%만 고려하는 최악의 상황에서도 1.198~1.241로 증가되어 충분한 구조안전성이 확보된 것으로 평가되었다. 특히 프리스트레스 유효율이 63%로 산정된 대상 구간에서 경량화 이전의 내하율은 1.788~1.851로 나타났고, 자갈 도상을 콘크리트 도상으로 교체하고 콘크리트 방음벽을 경량 방음벽으로 교체한 후, 레일교체 및 트라프를 설치한 최종단계에서는 내하율이 1.865~1.996으로 증진되는 것을 알 수 있다. 한편, 최종 경량화 단계에서는 경량 방음벽 설치 후보다 내하율이 다소 감소하였는데, 이는 레일을 교체하고 트라프를 추가로 설치하여 고정하중이 다소 증가한데 기인한다. Table 9에 나타난 내하율 산정 결과

에서 알 수 있듯이 현재 파악이 가능한 최악의 상태인 경우(유효프리스트레스력 55%, 긴장재 비부착) 경량화 이전 정규 내하율이 1.0에 매우 근접하게 나타났다. 그러나, 실제 강재의 유효 프리스트레스력은 초기 긴장력의 55%~74% 범위에 있고, 긴장재의 부착 형태 또한 완전 비부착 상태가 아니기 때문에 대상 교량의 실제 내하율은 1.0을 상회하여 비부착과 부착 상태의 사이에서 나타날 것으로 판단된다.

특히 유효 프리스트레스가 63%인 대상 구간(P26~P27 사이 경간)은 긴장재 비부착인 경우와 부착인 경우에 대해 정규 내하율 변화를 비교한 결과 내하율은 1.0을 상회하여 나타나고 있어 경량화에 따른 성능 개선 효과가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

건대-구의간 고가교의 고정하중 경감을 통한 성능개선을 평가하기 위하여 수행된 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 성능개선 전의 자갈도상과 콘크리트 방음벽을 철거하고 콘크리트 도상, 경량방음벽 및 레일을 교체하고 마지막으로 트라프를 설치하여 성능을 개선한 결과 전체적인 미관이 향상되고 소음이 저하되었다.
- 2) 성능개선 전보다 성능개선 후의 전체하중이 약 8.6%가 감소되어 처짐이 2.6mm가 감소하였으며, 이로인해 응력이 1.07 MPa이 감소한 것으로 예측되어 대상구조의 구조성능 개선이 효과적으로 이루어졌음이 판명되었다.
- 3) 해석 및 예측결과를 근거로 하여 대상교량의 내하

력을 평가한 결과, 성능개선 전 1.82가 성능개선 후 1.93으로 증가하여 경량화에 따른 성능개선 효과가 우수한 것으로 판명되었다.

- 4) 고가교의 고유진동수가 성능개선 전보다 성능개선 후 약 30% 증가하여 진동이 감소하고 동적거동이 향상되었음이 판명되었다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 철도교설계기준, 2004.
2. 권성준, 박상순, 남상혁, 노병철, "탄산화에 노출된 콘크리트 취약부의 확률론적 내구수명 평가", 한국구조물진단학회지, 제 12권, 2호, 2008, pp.49-58.
3. 권성준, 박상순, 남상혁, 조호진, "국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화 조사에 대한 연구", 한국구조물진단학회지, 제 11권, 3호, 2007, pp.116-122.
4. 권영진, 김재환, 한병찬, 백용관, "동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성 설계", 한국콘크리트학회지, Vol. 18, No. 4, 2006, pp.41-48.
5. 김선웅, 안계현, "국내 안전 및 유지관리의 문제점 및 개선방안에 관한 연구", 한국구조물진단학회지, Vol. 13, No.4 2009, pp.101-106.
6. 김성수, 이정배, 한승우, "나노합성 세라믹계 도장재를 도포한 콘크리트의 내구성능", 한국콘크리트학회논문집, Vol. 19, No. 5, 2007, pp.639-646.
7. 김재환, 한병찬, 장승엽, 백용관, 권용진, "고인성 모르타르를 사용한 RC 구조물의 새로운 보수·보강공법", 한국구조물진단학회지, Vol. 10, No.5 2006, pp.29-36.
8. 송하원, 이창홍, 이근주, "부식 저항성 평가에 따른 균열 콘크리트 보의 부식전위 연구", 한국구조물진단학회지, Vol. 13, No.1 2009, pp.97-105.
9. 한국시설안전공단, 교량 정밀안전진단 및 통과허용하중 산정 기법개선, 1997.
10. 한국콘크리트학회, 고가교의 내구성 확보기간 연장방안 및 향후 대책에 관한 연구, 서울특별시지하철공사, 2001.

(접수일자 : 2010년 6월 30일)

(수정일자 : 2010년 9월 29일)

(심사완료일자 : 2010년 11월 11일)

## 요 지

본 연구에서는 환경적인 요인으로 인한 성능저하현상으로 내구성 저하가 예상되는 건대-구의간 고가교의 현재 상태를 분석하고 내구성 저하로 인한 내구연한의 감소를 막기 위하여 고가교 구조물의 경량화를 통한 성능개선을 수행하고자 한다. 경량화 작업은 콘크리트 방음벽을 경량재 방음벽으로, 도상을 자갈도상에서 콘크리트 도상으로, 마지막으로 트라프를 경량화 함으로써 고가교 전체의 경량화를 유도한다. 이러한 고가교 경량화에 따른 정적 및 동적 거동 변화와 성능개선 효과를 분석하고, PSC I 형교 구간의 내하율 증진에 의한 구조안전성을 확인한다. 경량화 결과 구조물의 처짐이 2.6mm가 감소하고 1.07MPa의 인장응력이 감소된 것으로 평가되어 대상 구조물의 구조성능이 효과적으로 개선되었음을 알 수 있다. 고유진동수도 경량화에 따라 약 30% 증가하여 진동이 감소하고 동적거동이 향상되었다. 또한, 해석 및 예측 결과를 근거로 하여 대상교량의 내하력을 평가한 결과, 경량화에 따라 내하율이 1.82에서 1.93으로 증가하여 경량화에 따른 성능개선 효과가 우수한 것으로 판명되었다.

**핵심 용어** : 고가교, 경량화, 성능개선, 고유진동수, 내하력