

## 중간지점부의 캠버 조정에 따른 강합성교의 모멘트저감 효과

김경남<sup>1</sup>, 이성행<sup>2\*</sup>, 함형길<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 토목공학부, <sup>2</sup>부산대학교 사회환경시스템공학부

### Reduction Effect of Moment of Steel Composite Bridge according to Camber Control in Middle Support

Kyoung-Nam Kim<sup>1</sup>, Seong-Haeng Lee<sup>2\*</sup> and Hyung-Gil Hahm<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Chungbuk National University

<sup>2</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**요약** 본 연구에서는 구조해석 모델링의 적합성을 평가하기 위하여, 고속철도상의 2주형 거더교에서 KTX 시험 활하중에 의한 동적 거동에 대한 계측과 3D 모델링을 통한 시간이력해석이 수행된다. 이를 바탕으로 중앙지점부 캠버 조정을 통한 프리스트레스가 도입된 대상 교량에서 지점부의 모멘트저감 효과의 검토를 위하여, 시공단계 해석이 수행되며, 장기거동에 대한 응력손실까지 고려된다. 적정수준의 초기 도입력을 산정하여 경제적인 교량단면을 위한 모멘트 저감 방법이 연구된다. 최종적으로 교량 단면을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 경제적인 교량 설계방법을 제시한다.

**Abstract** In this study, both an experimental test and a time history analysis with 3D modeling were performed to verify the structural analysis model in a 2-span two girder bridge of high speed railway, which was under constructed according to the ballast load of track structure. In the basis of the structural analysis model, the analysis of construction step was carried out to investigate the reduction effect of moment in middle support of the bridge which has initial prestressing force according to camber control. The initial prestressing force of proper level was calculated, and then the reduction of moment for economical bridge section was studied. Finally, a bridge analysis method was presented for an economical and efficient design in steel composite bridge.

**Key Words** : Two girder bridge, Camber, Negative moment, Initial prestressing force, Time history analysis

### 1. 서론

2주형 플레이트 거더교는 2개의 주형만을 사용하므로 미관상 유리하며, 다주형교에 비해 상대적으로 부재수가 줄어들게 되어 제작 상에도 유리하다. 특히, 표준 2차선 도로교 및 복선 철도교의 설계시에는 최적 대안으로서 2주형 플레이트 거더교의 경제적 타당성이 인정받고 있으며, 제작과 설치 및 유지관리 측면에서도 타 형식의 교량보다 유리한 것으로 확인되고 있다[9].

한편, 거더교의 구조형식 중 단순형 거더교는 설계가

쉬우나 지간을 길게 할 수 없어 하부구조의 교각이 많아 지게 된다. 이러한 단점을 해결하는 방법이 연속형 거더교이다[5]. 그러나 2경간 이상의 연속교로 적용할 경우 지점부의 부모멘트가 크게 발생하고 중앙지점부의 반력이 크게 작용하여, 보다 경제적인 교량설계를 위해서 프리스트레싱 도입과 같은 새로운 시공시스템이 거론될 수 있다. 강합성 거더에 프리스트레싱을 도입하는 방법으로서 여러 가지 방법[3]이 가능하겠으나 최근에는 온도프리스트레싱[4]에 대한 연구가 이루어지고 있다.

프리스트레싱을 도입하는 방법으로 제작 및 시공 속은

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

\*교신저자 : 이성행(lsh77@pusan.ac.kr)

접수일 09년 11월 24일

수정일 (1차 10년 01월 20일, 2차 10년 02월 10일)

게재확정일 10년 02월 24일

을 이용한 프리스트레싱 효과에 대하여 검토하고 콘크리트와 크리프 등의 장기거동을 포함하여 적용가능한 방법이 있다. 일반적으로 프리스트레싱이 도입되는 부재는 크리프와 건조수축 등의 장기거동으로 인하여 손실이 발생되는데, 이러한 손실은 부재설계에서 큰 비중을 차지한다. 또한 저급강재가 사용될 경우 손실율은 상당히 커져 효율에 문제가 발생하게 된다. 이러한 이유는 부재설계에 있어서 가장 큰 응력 비중을 차지하는 것이 프리스트레싱 힘이기 때문이며, 프리스트레싱 힘의 감소 또는 손실이 전체 교량 설계의 건전성을 떨어뜨리게 되기 때문이다. 그러나 본 연구에서 도입되는 프리스트레싱은 2차 고정하중의 50% 정도로서 지점부에서 발생하는 부모멘트에 의한 압축응력을 일부 상쇄하는 정도이다. 크리프 등의 장기거동 계산에 적용되는 2차 고정하중의 크기를 프리스트레싱 힘을 이용하여 일부 감소시킬 경우 발생하는 크리프와 건조수축을 줄일 수 있을 것이며, 이를 통하여 단면내에 발생하는 최종응력을 감소시켜 구조물의 안전여유를 추가로 확보할 수 있는 방법이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 도상포설후 KTX시험차량에 대한 고속철도상의 2주형 플레이트 거더교의 동적 초기거동에 대한 계측을 실시하고 그 결과와 3D 모델링을 통한 구조해석을 실시한 후의 데이터를 비교 분석하여 모델링의 적합성을 평가한 후 연구대상 교량에 사용된 하중을 재하하여 대상 교량의 각 부재에 발생하는 응력값을 검토한다. 이를 바탕으로 2주형교의 중앙지점부 캠버조정을 통한 프리스트레싱을 도입하여 대상 교량의 시공단계 해석을 수행하여 모멘트저감 효과를 검토하고, 적정수준의 초기 도입력을 산정하여 교량 단면을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 경제적인 교량 설계방법을 제안한다.

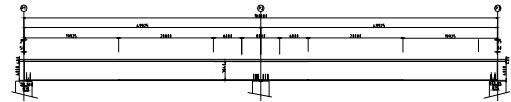
## 2. 실측 및 전산해석

### 2.1 대상 교량의 현황

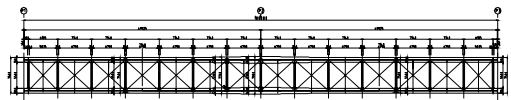
대상 교량은 경부고속철도에 위치한 고가교로, 주요 현황은 표 1, 그림 1과 같다. 교각 1로부터 18.75m 떨어진 단면에 그림 1(d)와 같이 게이지를 부착하였고, 가속도계 센서는 경간 중앙부 주형에 부착하였다.

[표 1] 대상교량의 현황

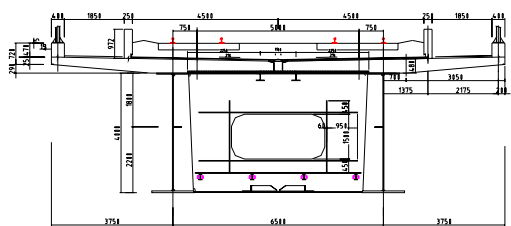
구 분	내 용	
경간구성	2@50구간	
상 부 구 조	형 식	강합성 2주형교
	교 폭	14.0m
	연 장	100.0m
하 부 구 조	중공구주식	



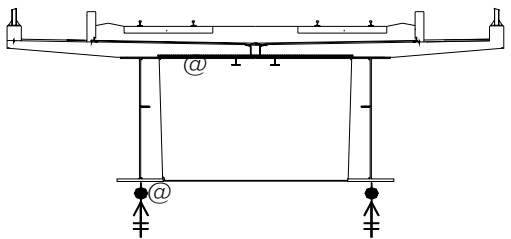
(a) 종단면도



(b) 평면도



(c) 횡단면도



(d) 게이지 부착상세

[그림 1] 단면형상 및 게이지 부착상세

[표 2] 게이지 표시

표 기	내 용
● ●	변형률 센서
@	가속도 센서
≡	변위 센서

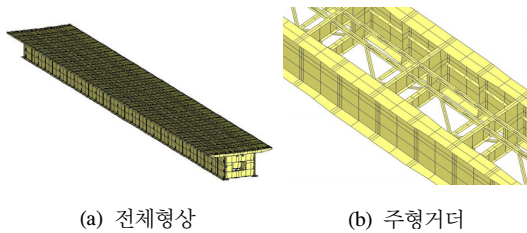
대상 2주형교의 연구를 수행하기 위해 센서를 부착(변형률, 처짐, 온도)하고, 동적주행차량에 대한 계측을 실시하였다. 활하중에 따른 변형률은 시간이력해석을 통한 전산해석으로 검증되고, 고유치해석으로 추가적인 모델링의 적정성을 검토한다. 4장에서는 중간지점부 캠버를 통한 프리스트레싱 도입 효과에 대하여 검토한다.

**2.2 시험열차에 의한 실측 및 구조해석 결과**

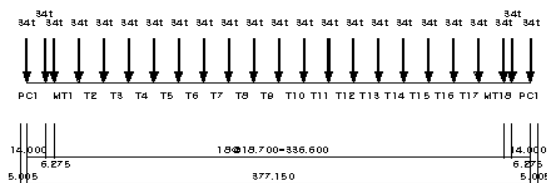
대상교량의 형식을 고려한 실거동을 최대한 정확히 나타낼 수 있도록 상용구조해석 프로그램인 EMRC NISA v.12[10]와 MIDAS CIVIL을 이용하여 실제 구조물의 형상에 적합하게 3D full 모델링을 실시하였다. 해석에서 사용된 요소는 Plate, Solid로서, 물성치는 [표 3]과 같다. 유지보수의 편의성을 위해 설치한 Lath floor는 구조물의 강성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단하여 모델링에서는 고려하지 않았다. 그림 2에 전체 모델링의 형상과 강재주형의 형상을 보였다.

[표 3] 해석상 재료상수

분류	해석 요소	단위중량 (kN/m³)	탄성계수 (MPa)	프와송비
Main Girder	Shell	78.5	2.1E5	0.3
Concrete slab	Solid	25.0	2.8E4	0.18



[그림 2] 구조해석 모델 형상



[그림 3] KTX-2 활하중모형

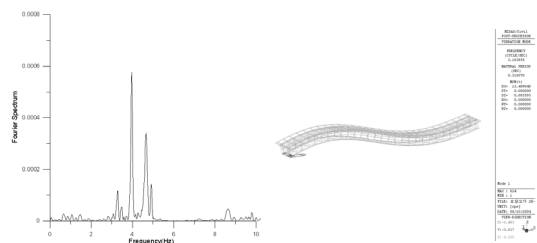
시험열차는 그림 3과 같은 실제 KTX-2차량의 제원을 고려하였다[6,8]. 표 4의 동적계측에 의한 처짐 및 응력

결과들은 서울—부산방향 300Km/h로 주행시의 실측 결과(기)와 이와 동일한 상태를 시간이력해석을 통한 수치해석으로 검토한 결과를 같이 나타내었다. 시간이력해석에서 감쇠는 실측의 감쇠율 2.5%를 이용하였으며, 이를 토대로 검토 결과를 도출하면, 실측과 구조해석 결과사이에는 응답비(측정값/해석값)가 약 0.83~1.13으로 계산된다.

[표 4] 변위 및 응력 결과

구 분	위치	실측	구조해석	응답비
주형의 처짐 (mm)	좌측	-2.717	-3.293	0.83
	우측	-1.768	-2.062	0.85
주형하부의 응력 (MPa)	좌측	11.69	11.21	1.04
	우측	6.64	5.87	1.13

대상교량에 대하여 고속철도 시험운행 기간 중 진동가속도계를 부착하고, 여기로부터 얻은 데이터를 FFT분석을 통하여 고유진동수를 계산한 결과, 그림 4(a)와 같이 1차 모드에서 3.20Hz로 나타났다. 구조해석에서는 실제 구조물의 자중과 해석모델간의 차이를 고려하기 위하여 강재자중에 활중을 도입하였고, 도상하중 및 2차 고정하중은 Load to Mass기능을 이용하여 Nodal Mass로 고려되었다. MIDAS Civil을 이용하여 구조해석을 수행한 결과 계산된 1차모드 고유진동수는 그림 4(b)의 모드형상에서 3.167Hz로서 구조물의 질량, 강성이 해석모델에 잘 적용된 것으로 판단된다.



(a)FFT 분석 (b)고유치해석

[그림 4] 고유진동수 결과

동적측정에 의한 처짐, 응력과 고유진동수를 종합하여 비교한 결과, 본 연구에서 다루고 있는 모델링의 적합성 및 타당성이 충분하다고 판단되었으며, 허용응력에 대한 여유분 검토 및 지점부 솟음을 이용한 프리스트레싱 도입에도 본 모델을 적용함에 문제가 없을 것으로 판단하였다.

### 3. 캠버 조절을 이용한 경제적 시공법

#### 3.1 허용응력법에 따른 여유도 분석

주형과 콘크리트 슬래브는 추후 합성거동을 하기 때문에 전산해석에서는 다음과 같은 단계에 따라 해석을 실시하고[1,2,11], 각 단계별로 결과를 표 5에 정리하였다.

1단계 : 주형 거치

- 주형 : 강성 有, 고정하중 有

2단계 : 콘크리트 슬래브 타설

- 주형 : 강성 有, 고정하중 無
- 콘크리트 슬래브 : 강성 無, 고정하중 有

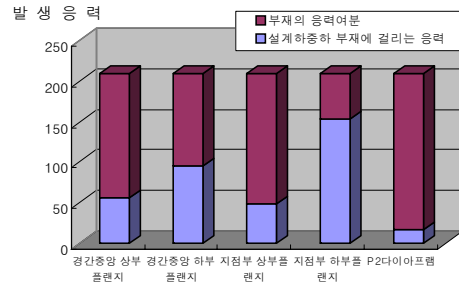
3단계 : 합성후 고정하중 + 활하중 재하시

- 주형 : 강성 有, 고정하중 無
- 콘크리트 슬래브 : 강성 有, 고정하중 無
- 도상 : 강성 無, 고정하중 有
- 활하중 재하

[표 5] 최대 응력과 변위 (MPa, mm)

위치			하중구분				합계
			강재 고정하중	합성전 콘크리트 고정하중	합성후 도상하중	활하중 (철도하중)	
정모멘트부	P1-P2 경간 중앙	상부 플랜지	-20.15	-27.94	-7.37	-1.45	-56.91
		하부 플랜지	15.15	31.76	41.10	8.47	96.48
부모멘트부	P2 중간 지점부	상부 플랜지	15.15	24.92	7.71	0.77	48.55
		하부 플랜지	-20.15	-54.60	-73.29	-5.76	-153.80
다이어프램(지점부)			1.85	4.52	10.86	0.99	18.22
최대처짐(mm)			5.9	16.69	14.41	3.22	40.22

그림 5는 설계 하중하에서 각 부재에 걸리는 응력의 합을 나타낸 그래프로써, 온도, 크리프, 건조수축과 풍속 등 각종 환경 매개 변수의 영향이 배제된 결과이며, 활하중도 동적인 거동이 고려되지 않은 값이기 때문에 각 부재당 설계하중 하에서 많은 응력 여유분이 있는 것으로 나타난다. 특히, 지점부 하부플랜지의 경우 여유분이 경간중앙 하부플랜지에 비하여 상당히 적기 때문에 응력분포를 효율적으로 조절할 수 있다면 경제적인 교량설계를 기대할 수 있을 것이다.

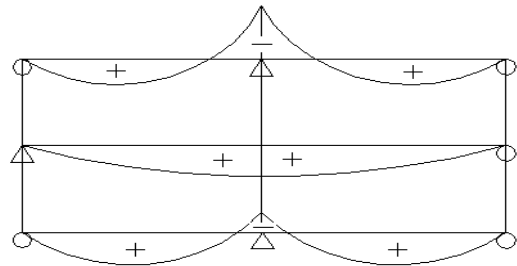


[그림 5] 각 부재의 사용하중과 응력여분

#### 3.2 공법 개념 및 장단점

일반 교량에서는 교량에 사용된 각 부재의 고정하중에 대한 처짐을 이용하여 캠버를 주어 시공하고 있지만, 본 개념에서는 경간 중앙 교각부에 일정 높이의 캠버를 작업장치 등을 이용하여 유지한 채, 상부 슬래브 타설을 실시하여 소정의 강도가 나올 때까지 양생한다. 이후 작업한 캠버를 원상태로 복원하여 교각에 정착시키게 되면, 상부 콘크리트와 강형이 완전 합성된 상태로 거동하여, 상부 콘크리트 및 상부플랜지에는 초기압축력, 하부플랜지에는 초기인장력이 도입된다.

중간 교각부의 경우, 상부 콘크리트 및 상부플랜지에는 추가 고정하중 및 활하중으로 인하여 인장력이 추가 되는데, 이를 서로 상쇄시켜 단면을 효율적으로 사용하는 것이 가능하다. 동일하게, 하부플랜지에는 연속지점의 효과로 압축력이 발생하게 되며, 이는 시공방법에 의해 초기 도입된 인장력에 의해 일부 상쇄되어 발생하는 응력 값을 감소시킬 수 있다.



[그림 6] 캠버조정에 의한 모멘트 변화

이와 유사하게 시공방법을 이용한 프리스트레싱 도입에 대한 연구로, 안진희 등[4]은 커버플레이트를 이용한 강재의 접합에 온도프리스트레싱을 이용하여 항복하중과 강성을 크게 증가시킬 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 온도프리스트레싱과 커버플레이트 대신에 추가적인 장비

가 거의 필요없는 방법을 위하여 제작 솜음에 의한 프리스트레싱과 콘크리트 슬래브를 이용한 합성거동을 검토한다. 다만, 이러한 방법으로 시공할 경우, 그림 6과 같이 교대와 교각 사이의 중앙 경간부에는 초기 도입력과 함께 고정하중 및 활하중에 의하여 동일한 부호의 단면력이 도입되므로 불리하게 된다. 그러나 일반적인 2경간 연속교의 시공법에 따라 때, 연속지점부인 교각부의 발생모멘트가 경간중앙부의 모멘트에 비하여 크기 때문에, 도입되는 초기 책업된 캠버를 조절함으로써 양측 부분에 발생하는 모멘트를 유사하게 조절할 수 있을 것이다. 또한, 연속 지점부에 Prestress 개념에 의한 상향력이 발생하게 되므로, 지점부 반력에도 재분배 효과가 발생하여, 연속 지점부 교각의 반력을 교대부의 지점으로 일부 분배하는 효과가 있을 수 있다. 결국, 교각부의 교량받침을 적절히 조절하는 것도 가능하다고 판단된다. 본 연구에서는 연구대상교가교를 대상으로 본 개념을 적용하였을 경우의 효과와 이점을 확인하고자 하였다.

### 3.3 적용 순서

도입되는 시공법은 기본 논리면에서 기존의 프리플렉스거더나 온도프리스트레싱과 유사하다. 그러나 단일보에 허용응력에 가까운 변형을 도입하는 프리플렉스보[3]와 달리, 교량 전체에 사전 변형을 도입하고 도입되는 압축력은 콘크리트가 받아주고 인장력은 강재거더가 담당하므로 재료적 성질을 고려할 수 있어 유리하며, 도입되는 응력도 50MPa를 초과하지 않기 때문에 유리하다고 할 수 있다. 제안하는 시공법에 대한 개념의 적용 순서는 다음과 같다.

#### 3.3.1 1단계

캠버를 책업된 상태로 가정하여, 교량의 설계시 사용된 고정하중(강형 고정하중 및 굳지 않은 콘크리트 하중)과 활하중에 대하여 구조해석을 실시하고, 검토 위치별 최대 응력 및 처짐을 구한다. 이 때 계산되는 결과는 비합성 상태의 2경간 연속교의 일반적인 해석방법에 따른다. 또한 본 단계의 해석에서 캠버의 양은 경간 길이에 비해 무시할 정도로 작기 때문에, 캠버를 무시하고 원위치의 형상을 이용하여 해석하였다. 실제로는 5단계에서 최종 결정되는 캠버가 미리 부여되어 형상을 구성하여야 하나, 선형 해석이므로 차이는 거의 발생하지 않는다.

#### 3.3.2 2단계

중앙 교각의 책업장치를 제거하여, 교량받침에 안착시킨다. 이 때의 계산결과는 굳은 콘크리트의 합성 강도들

고려하여, 책업장치에 발생하는 반력 P를 전체 경간 길이 2L에 집중하중 P로 재하하고, 초기도입력 F와 처짐  $\Delta$ 를 구한다. 책업장치 해제 시, 경간 길이 2L에 걸쳐, 콘크리트와 합성거동을 하는 전단면 유효상태의 교량이 반력 P에 상당하는 만큼 하향 변형하려 할 것이다. 그리고 초기 책업 캠버를  $\Delta$ 와 같게 할 경우, 고정하중에 대하여 변위가 없는 상태로서, 연속부 교각에 반력이 이론상으로 0이 되며, 추가 고정하중 및 활하중에 대하여만 반력이 발생하게 된다.

그러나 책업 캠버를  $\Delta$ 를 부여할 경우, 부재내 발생되는 단면력중 프리스트레스가 주된 단면력이 되어 장기거동을 고려한 프리스트레스 손실로 인하여 큰 효과를 거둘 수 없게 된다. 또한 교각의 상, 하부에 지나친 초기 부재력이 발생할 수 있고, 교대에서 모든 반력을 분담하게 된다. 이는 효율적인 설계로 볼 수 없으므로, 초기도입력 F를 적절히 조정하여야만 한다.

#### 3.3.3 3단계

앞의 두 단계에서 계산된 응력과 반력 및 처짐 값들을 이용하여, 적절한 초기도입력 F'과 처짐  $\Delta'$ 을 수치계산에 의하여 산정한다. 본 연구에서 사용한 방법은 경간 중앙과 교각에서 발생하는 응력을 동등 수준으로 유지하도록 수정 초기 도입력 및 처짐을 결정하는 방법이다.

#### 3.3.4 4단계

첫째 단계에서 계산한 비합성 상태의 부재력과 셋째 단계에서 산출된 부재력을 포함하여, 교량 전 구간에서 발생될 응력을 계산하고, 허용응력과 비교한다. 여기서 발생하는 안전 여유분을 이용하여, 단면의 감소를 피할 수 있다. 또한, 교각에서 발생하는 반력의 감소분은 교대에 추가 반력으로 나타나게 되므로, 최종적인 수정 교량 받침의 용량과 교량의 시공 캠버가 결정된다.

## 4. 응력 및 반력 검토

### 4.1 캠버 조정전 응력 (1단계)

3.3.1절의 1단계에 해당하는 최대응력의 전산해석 결과는 [표 6]과 같다. 콘크리트의 장기거동은 야쓰미방법에 의하여 크리프를 고려하고, 건조수축까지 계산한다 [1,2]. 크리프에서 고려되는 하중은 합성후 도상하중 및 추가고정하중으로 하며, 크리프계수  $\phi$ 1은 도상하중이 6개월에 걸쳐 나누어 재하되는 상황을 고려하여 2.0으로 가정하였다.

[표 6] 설계하중 상태의 최대 응력 (MPa)

구분	위치	비합성 정하중 (강재+콘크리트)	합성후 도상하중 및 추가 고정하중	크리프	건조 수축	합성후 활하중	합계
경간 중앙부	콘크리트(상부)		-1.908	0.748	0.264	-0.386	-1.282
	상부플랜지	-35.693	-6.949	-16.286	-27.167	-1.330	-87.425
	하부플랜지	41.170	38.517	4.982	11.886	7.729	104.284
중간 지점부	콘크리트(상부)		2.485	-1.969	0.701	0.386	1.603
	상부플랜지	32.444	7.058	25.050	-18.921	1.131	46.762
	하부플랜지	-67.771	-64.192	-7.007	7.025	-10.096	-142.041

장기거동을 고려했을 경우, 설계하중에 대하여 경간중앙부 104MPa의 인장응력에 비하여 중간지점부의 -142MPa의 압축응력이 약 36% 크다. 또한, 중간지점부에서는 크리프와 건조수축이 서로 상쇄되고 있으며, 경간중앙부에서는 중첩되어 전체 합응력을 증가시키고 있다.

4.2 캠버 조정시 응력 (2단계)

중앙 교각의 적업 장치를 제거하여 교량받침에 안착시키면, 적업된 상태에서의 반력 P에 상당하는 만큼 하향변위가 생기려 한다. 1단계로부터 구한 적업부 반력 P는 6,204kN × 2개소이다. [표 7]에는 전체 경간 길이 2L에 1단계에서 구한 적업부의 반력 P를 초기 도입력 F로 재하여 구한 각 단면에서의 초기 도입응력  $\sigma_F$ 를 나타낸다. 이 부분에서 계산된 값은 장기거동이 제외된 결과이며, 추후 3~5단계의 계산시에는 합성후 재하되는 프리스트레스와 고정하중에 대하여 일괄적으로 장기거동 항목이 고려된다.

2단계에 의한 계산 결과, 처짐  $\Delta$  는 323 mm 이다. 여기서 구한  $\Delta$  를 초기 적업 솟음으로 가정할 경우 고정하중에 대해 변위가 0 이 된다. 즉, 교각에 반력이 생기지 않고, 추가 고정하중 및 활하중에 대해서만 반력이 발생한다. 대상교량을 선형 탄성적 거동으로 생각한다면 지점부 초기 솟음을 도입할 경우에 중간지점부 하부플랜지에서 응력감소량이 경간중앙부의 응력증가량보다 약 2.6배 ( $\frac{246.370}{94.690}$ ) 정도 발생하게 되어 충분한 실현 가능성을 확인할 수 있다. 다만, 장기거동을 고려한다면 효과의 크기는 상황에 따라 다를 수 있다.

[표 7] 집중하중 F에 의한 초기 응력  $\sigma_F$

구분	위치	초기도입 응력(MPa)	처짐 $\Delta$ (mm)
경간 중앙부	콘크리트(상부)	-4.750	145
	상부플랜지	-16.310	
	하부플랜지	94.690	
중간 지점부	콘크리트(상부)	-12.760	323
	상부플랜지	-40.000	
	하부플랜지	246.370	

4.3 적절한 초기도입력 산정 (3단계)

4.2절에서 재하한 하중 F와 계산결과인 처짐  $\Delta$  는 교각 부 반력을 0 으로 함으로서 교대부에 추가적인 반력을 크게 증가시키게 된다. 또한 경간 중앙부에는 추가적인 하중 부담으로 허용응력을 초과하는 부분이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 경간중앙부와 지점부에서 발생하는 응력이 유사하도록 하는 적절한 수정초기 도입력 F' 와 수정처짐  $\Delta'$  을 산정한다.

[표 8]  $\Delta$  의 도입에 따른 초기 응력  $\sigma_F$

위치		$\Delta \times 1$	$\Delta \times 0.5$	$\Delta \times 0.4$	$\Delta \times 0.3$	$\Delta \times 0.2$	$\Delta \times 0.1$
경간 중앙부	콘크리트(상부)	-4.75	-2.38	-1.90	-1.43	-0.95	-0.48
	상부플랜지	-16.31	8.16	-6.52	-4.89	-3.26	-1.63
	하부플랜지	94.69	47.35	37.88	28.41	18.94	9.47
중간 지점부	콘크리트(상부)	-12.76	-6.38	-5.10	-3.83	-2.55	-1.28
	상부플랜지	-40.00	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00
	하부플랜지	246.37	123.19	98.55	73.91	49.27	24.64

[표 9] 초기응력  $\sigma_F$  에 의한 최종상태응력

위치		도입 캠버					미도입
		$\Delta \times 1$	$\Delta \times 0.4$	$\Delta \times 0.3$	$\Delta \times 0.2$	$\Delta \times 0.1$	
경간 중앙부	콘크리트(상부)	-4.19	-2.45	-2.16	-1.86	-1.57	-1.28
	상부플랜지	-143.77	-109.97	-104.33	-98.70	-93.06	-87.43
	하부플랜지	211.22	147.06	136.36	125.67	114.98	104.28
중간 지점부	콘크리트(상부)	-3.60	-0.48	0.04	0.36	1.08	1.60
	상부플랜지	-89.38	-7.70	5.92	19.53	33.15	46.76
	하부플랜지	131.22	-32.73	-60.06	-87.39	-114.71	-142.04

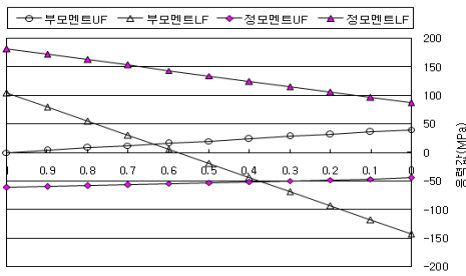
본 해석이 Hooke's law를 따르는 선형 해석이므로 초기도입력 F'와 처짐  $\Delta'$  은 선형 비례관계에 있다. 이를 이용하여 수치 계산을 통해 적절한 F'와  $\Delta'$  을 산정 하였다.

4.4 합리적인 단면 설계 (4단계)

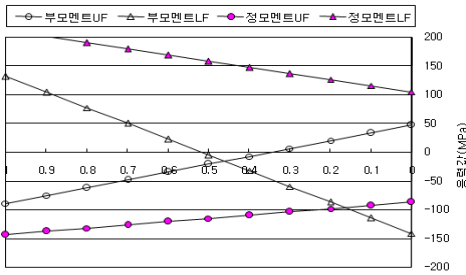
4.4.1 장기거동을 고려한 초기도입력 결정

$\Delta \times 0.1$  일 때, 장기거동을 고려할 경우의 중간지점부 하부플랜지에서 응력감소량과 경간중앙부의 응력증가량의 비율은 2.56배 ( $\frac{142.04 - 114.71}{114.98 - 104.28}$ )로서, 장기거동 미검토시와 크게 차이가 발생하지 않는다. 이러한 이유는 도입되는 프리스트레스 힘이 2차고정하중보다 작은 0.1  $\Delta$ 와 0.1F로서, 크리프와 건조수축 등의 장기거동을 고려하여도 전체 응력을 감소시키기 때문이다.

반면 일반 프리스트레스트 교량에서와 같이 주된 하중으로의 프리스트레스 힘을 부여하는  $\Delta \times 1$  일 때는 0.1배 ( $\frac{142.04 - 131.22}{211.22 - 104.28}$ ) 정도로서, 부정적인 결과가 도출되며, 발생되는 응력도 캠버 도입 전의 교량내 최대 응력인 142.04MPa을 초과하는 211.22MPa이 된다.



(a) 장기거동 미고려시



(b) 장기거동 고려시

[그림 7]  $\Delta$ 에 따른 최종응력

그림 7은 작업량에 의한 초기도입력의 변화에 가장 민감하게 반응하는 상하부 플랜지 부재의 응력을 따로 나타낸 것이다. 특히 그림 7(a)는 장기거동을 고려하지 않을 경우로서 작업량  $\Delta' = 0.2\Delta$ 에서 최대 인장압축응력은 약  $\pm 100$ MPa로서 최적의 작업량이 산정된다. 그러나 장기거동을 고려할 경우에는 그림 7(b)에 보인 바와 같이 정·부모멘트부에서 유사한 응력이 발생하는 조건은 작업

량  $\Delta' = 0.1\Delta$ 로서, 이때의 발생응력은 약  $\pm 115$ MPa이다. 그러나 다른 방법으로는  $\Delta'$  증가에 대하여 정모멘트의 응력증가보다 부모멘트부의 응력감소가 약 2.5~2.6배 더 민감하다는 점을 고려하여  $\Delta'$ 을 0.2 $\Delta$  정도로 선정하는 것도 가능하다. 이 경우 정모멘트부와 부모멘트부에 약간의 부재두께 차이를 두되, 강재중량을 최소화시킬 수 있는 최적화 문제로 귀결될 수 있다. 결국  $\Delta'$ 의 값은 교량 지간 및 고정하중에 따라 교량마다 상이하게 선정 될 것이며, 강재가 보강재를 고려하지 않을 시에는 압축보다는 인장에 더 유리할 수 있으므로 적절한 선정 과정이 필요로 될 것이다.

4.4.2 캠버조절에 따른 응력

$\Delta'$ 을 장기거동을 포함하여 0.1  $\Delta$ 로 결정했을 때 교량에 적용해야할 작업량은  $323 \times 0.1 = 32.3$ mm가 되며, 이때 교량의 거치 후 각 부재 내에서 발생하는 최종적인 응력을 계산하여 정리하면 표 10과 같으며, 캠버도입량이 0.1  $\Delta$ , 0.2  $\Delta$  그리고 미도입일 때의 응력을 표 11에 정리하였다.

또한 이때의 응력감소의 효과를 비교하기 위하여, 미도입일 때의 응력에 대한 증감분의 비를 응력증가비로 정의하여 표 12에 정리하였다. 적절한 솟음량을 도입시 중간지점부에서는 2차고정하중에 의한 모멘트를 감소시키므로 크리프의 발생량을 감소시킬 수 있으나, 경간중앙부에서는 모멘트를 증가시켜 장기거동에서 더 불리하게 된다.

[표 10] 최종상태응력 ( $\Delta' = 0.1 \times \Delta$ ) (MPa)

구분	위치	비합성 고정 하중	도상, 추가고정하중	초기도입력 $\Delta'=0.1\Delta$	크리프	건조수축	활하중	합계
경간 중앙부	콘크리트 (상부)	0.00	-1.91	-0.48	0.93	0.26	-0.39	-1.59
	상부플랜지	-35.69	-6.95	-1.63	-20.29	-27.17	-1.33	-93.06
	하부플랜지	41.17	38.52	9.47	6.21	11.89	7.73	114.99
중간 지점부	콘크리트 (상부)	0.00	2.49	-1.28	-1.21	0.70	0.39	1.09
	상부플랜지	32.40	7.06	-4.00	15.44	-18.92	1.13	33.11
	하부플랜지	-67.77	-64.19	24.64	-4.32	7.03	-10.10	-114.71



[표 11] 초기도입응력  $\sigma_F$ 에 따른 최종 응력 (MPa)

위치		도입 캠버		
		$\Delta \times 0.2$	$\Delta \times 0.1$	미도입
경간 중앙부	콘크리트(상부)	-1.864	-1.573	-1.282
	상부플랜지	-98.695	-93.060	-87.425
	하부플랜지	125.670	<b>114.976</b>	104.283
중간 지점부	콘크리트(상부)	0.562	1.082	1.603
	상부플랜지	19.534	33.148	46.761
	하부플랜지	-87.388	<b>-114.714</b>	-142.040

0.1 $\Delta$ 일 때 중간지점부 하부플랜지의 응력은 -114.71 MPa로 초기도입력을 고려하지 않은 설계하중 작용시의 응력 -142.04MPa 보다 19.3 %가 줄어들었으며, 0.2 $\Delta$ 일 때는 38.53%가 줄어들어 경제적인 단면을 구성할 수 있다. 중앙 경간부는 응력이 증가되나 이 단면은 응력에 여유가 많으므로 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다.

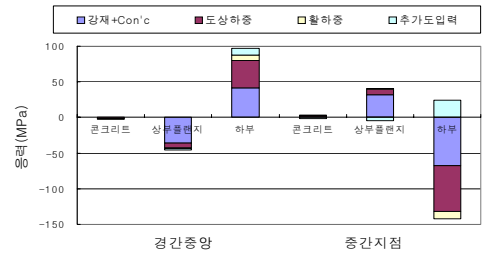
[표 12] 하부플랜지에서의 응력비

구분	초기 도입력	하부플랜지 응력 증감비(%)		비고
		중간지점부	중앙경간부	
장기거동 고려	$\Delta \times 0.1$	-19.3	+9.3	
	$\Delta \times 0.2$	-38.5	+20.5	
장기거동 미고려	$\Delta \times 0.1$	-17.34	+10.84	
	$\Delta \times 0.2$	-34.68	+21.68	

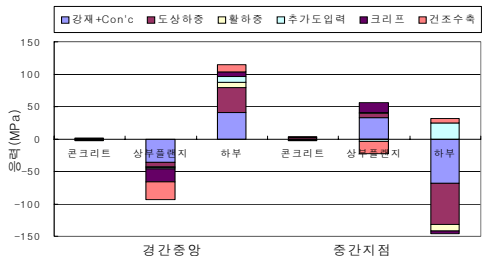
4.4.3 초기도입력에 따른 응력 변화 및 캠버량

그림 8은 초기도입력( $\Delta' = 0.1\Delta$ )이 작용시 부재내의 응력변화를 나타낸다. 초기 도입력 도입 후 부모멘트부에는 반대부호의 응력이 발생되어 상쇄시키며, 정모멘트부에서는 동일 부호의 응력으로 증첩효과가 발생됨을 보여 주고 있다.

그림 9는 초기도입력 도입을 위해 강재 제작시 고려되어야 할 캠버량을 보인 것이다. 강재 및 콘크리트 고정하중에 의한 캠버에 추가 고정하중에 대한 캠버를 고려한 뒤 추가도입력 도입을 위한  $\Delta'$ 의 책임을 고려한 강재의 최종 캠버량이 그림 12의 맨 위에 st(강재)+con(콘크리트)+dl(추가 고정하중)+ $\Delta'$ (초기 도입 처짐)으로 보이고 있다.

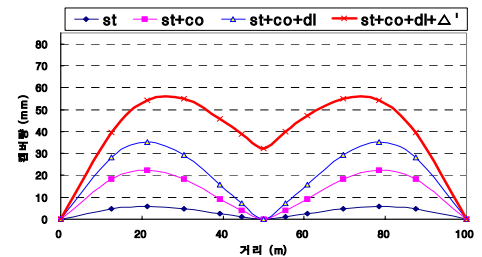


(a) 장기거동 미고려시 ( $\Delta' = 0.1\Delta$ )



(b) 장기거동 미고려시 ( $\Delta' = 0.1\Delta$ )

[그림 8] 각 단계에서 응력 변화



[그림 9] 요구되는 최종 캠버

4.5 캠버 조절에 따른 지점반력 효과

수정 책임량  $\Delta'$ 에 의한 반력의 보정은 다음과 같다.

$$6202 \text{ kN/교량받침} : 1 \times \Delta = X : \Delta' (0.1 \times \Delta)$$

위의 식에 의해서 반력 보정값은 620.2 kN/교량받침이 된다. 따라서 결과적으로 원래 교각부에 발생하던 고정하중에 의한 반력값 6202 kN/교량받침은 620.2 kN/교량받침씩 줄게 되며 여기서 줄어든 620.2 kN/교량받침은 양쪽 지점으로 분배되어 발생하게 된다. 따라서 중앙 지점부에는 5581.8 kN/교량받침( 6202 kN/교량받침 - 620.2 kN/교량받침)이 되고, 그때 양쪽 지점부에 걸리게 되는 반력값은 2119.1 kN/교량받침(1809 kN/교량받침 + 310.1 kN/교량받침)이 된다. 초기 도입력에 따른 교각과 교대의 반력 증감비를 표 13에 정리하였다.



**[표 13] 지점부 반력 증감비**

초기도입력	지점부 반력 증감비 (%)		비고
	중간 교각	양측 교대	
$\Delta \times 0.1$	-10.0	+17.1	
$\Delta \times 0.2$	-20.0	+34.2	

### 5. 결론

1. 강재 제작시 고려된 캠버 이외에 2경간 연속 교량의 중앙 지점부에서 부가적인 초기 캠버를 도입한 교량설계에서, 교량의 정모멘트부에서는 인장응력이 다소 증가하게 되지만 단면이 큰 부모멘트부에서는 초기도입력으로 인해 압축 응력이 19.3~38.5%까지 크게 줄어들어 경제적인 단면을 구성할 수 있음을 확인할 수 있었다.
2. 대상교량에서 지점부 초기 솟음을 도입할 경우에 중간지점부에서의 응력감소현상이 경간중앙부의 응력증가보다 2.6배정도 큰 것으로 확인된다.
3. 본 대상 교량의 경우 장기거동을 고려할 경우에는 책임량  $\Delta' = 0.1\Delta$ 에서 최적의 책임량이 산정된다. 그러나  $\Delta'$ 증가에 따라 정모멘트의 응력증가보다 부모멘트부의 응력감소가 약 2.5~2.6배 더 민감하다는 점을 고려하여  $\Delta'$ 을 0.2 $\Delta$ 정도로 선정하는 것도 가능한 방법이다.
4. 캠버 조정전 장기거동에 의한 응력을 검토해 보면, 경간 중앙부에는 응력이 불리하게 작용하나, 단면을 줄이고자하는 중간지점부에서는 크리프와 건조수축이 서로 상쇄되어 장기거동의 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 적절한 솟음량이 도입된 후에는 중간지점부에서는 2차고정하중에 의한 모멘트를 감소시키므로 크리프의 발생량을 감소시켜 더 유리하게 작용하나, 경간중앙부에서는 모멘트를 증가시켜 불리하게 된다
5. 경간중앙부에서는 초기도입력에 따라 모멘트를 증가시켜 장기거동 고려시 응력이 9.3~20.5% 더 불리하게 된다. 이로 인하여 도입되는 솟음량이 제한되어, 장기거동을 고려하지 않을 경우 책임량  $\Delta' = 0.2\Delta$ 에서 최적의 책임량이 산정되나, 장기거동을 고려할 경우에는 책임량  $\Delta' = 0.1\Delta$ 에서 최적의 책임량이 산정된다.
6. 중앙 지점으로 집중되는 반력은 초기 도입력에 따라 10~20% 감소하고, 감소된 부분만큼 양측 교대부에서 받아주게 되어 교대부 반력은 17.1~34.2%

증가한다. 이는 어느 정도 교각과 교대의 반력을 분배할 수 있어 교좌의 합리적인 설계도 가능할 것으로 판단된다.

추후, 2주형교뿐 아니라 여러 형식의 교량에 대한 파라메타 연구가 계속되어질 것이며, 2경간 연속이 아닌 3경간 이상의 연속교량에서 현재 사용되는 경간 길이 분할률을 조정하여 폼셴에 기초한 제작단가를 낮추는 부분의 연구가 계속될 경우, 경제적인 교량의 설계방법에도움이 될 것이다.

### 참고문헌

- [1] 건설교통부, "도로교설계편람(III)", 제5편 교량, pp.103-125, 2001.
- [2] 건설교통부, "도로교설계기준", 제3장 강교편, pp. 50-208, 2005.
- [3] 대한건설협회, "프리플렉스 합성형 공법", <월간>건설, 216호, pp.39-46, 1994.
- [4] 안진희, 정치영, 김준환, 김상효, "다단계 온도프리스 트레싱 도입 강재보의 정적거동평가를 위한 실험적 연구", 한국강구조학회논문집, Vol. 20, No.2, pp.247-258, 2008.
- [5] 조효남, "교량공학", 구미서관, pp.12-13, 2002.
- [6] 철도청, "철도설계기준(철도교편)", pp.11-37, 1999.
- [7] 한국구조안전기술원, "경부고속전철 8-2공구 강합성형교 초기거동계측 보고서", pp.35-41, 2003.
- [8] 황낙연, 김창환, "경부 고속철도 교량 건설공법 - 8-2공구를 중심으로", 한국철도학회지 제4권 제2호, pp. 19~28, 2001.
- [9] 황민오, 윤태양, "합리화 2주형 플레이트 거더교", 한국강구조학회지, 통권 46호, pp.31-35, 2001.
- [10] Engineering Mechanics Research Co., "EMRC NISA 9.0 User Manual", 1999.
- [11] Rist 철강엔지니어링 센터, "플레이트 거더교 설계요령" 포항산업과학기술연구원, pp. 1-4~126, 1998.

---

**김 경 남** (Kyoung-Nam Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 충북대학교 일반대학원 구조시스템공학과 (구조시스템공학석사)
- 2007년 2월 : 충북대학교 일반대학원 구조시스템공학과 (전산구조공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2008년 6월 : 충북대학교 건설기술연구소 조교
- 2008년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 건설기술연구소 선임연구원

<관심분야>

강구조, 피로와 파괴, 초장대교량, 인공지능경망

---

**이 성 행** (Seong-Haeng Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

강구조, 강교량, 수리구조물 진동

---

**함 형 길** (Hyung-Gil Hahm)

[정회원]



- 1974년 2월 : 강원대학교 농공학과 (학사)
- 1980년 2월 : 강원대학교 대학원 (석사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 대학원 (공학박사)
- 1981년 4월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조재료