

# 주형의 하강·상승을 이용한 연속 P.S.C빔 철도교의 휨거동 해석

## An Analysis of Bending Behavior of Continuous P.S.C Girder Railway Bridge by Using Down-Up Method

구민세\*                      위영민\*\*                      최인식\*\*\*  
Ku, Min-Se                  Wi, Young-Min                  Choi, In-Sik

### ABSTRACT

2span continuous prestressed concrete girder railway bridges, span length 21m, 25m, 30m, 35m, that down-up method is applied and that designed to satisfy service load in accordance with design criteria of railway bridge can be dropped in their height compared with existing simply supported prestressed concrete girder railway bridges. Continuous bridges result in guaranteeing safety against bending behavior by loading the practical railway moving load with each velocity. But the natural frequency of span length 21m is estimated not to satisfy recommended limitation of UIC 776-1R..

### 1. 서론

지금까지 시공되어 온 프리스트레스트 콘크리트 빔 교량은 지점마다 신축이음을 갖는 단순교로 구성되거나 주형 상부의 콘크리트 바닥판과 내측지점 가로보의 연결에 의한 부분 연속형식이 대부분이다. 신축이음장치는 주기적인 교체 또는 보수가 필요하며 방수가 완벽하지 못해 교량하부구조 및 교량받침 등의 손상을 유발시킬 수 있어서 다수의 신축이음부를 생성하는 것은 차량의 주행성 저하와 교량의 내구성에 문제점을 발생시킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하려는 노력의 일환으로 단순보형으로 제작된 보를 가로보와 바닥판으로 연속 처리하는 방법이 사용되고 있다. 그러나, 이러한 방법 또한 공용중에 연속지점 바닥판 콘크리트에 균열이 발생하여 구조물의 강성 및 내구성이 저하되는 단점이 있다. 특히 연속 프리스트레스트 콘크리트 교량의 경우 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 모멘트 재분배가 시간의 경과와 더불어 증가함으로 인해 부모멘트 구간의 바닥판에 균열이 발생하게 되며, 결국 이러한 균열은 구조 역학적으로도 불리한 거동을 유발시킨다. 따라서 국내는 물론 외국에서도 이러한 단점들을 보완할 수 있는 연속 프리스트레스트 콘크리트 교량을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 기존의 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 교량 공법에서 발생할 수 있는 연속지점부의 문제점을 해결하기 위해서 바닥판 콘크리트의 타설 및 양생 전·후에 연속화된 프리스트레스트

\* 인하대학교 교수

\*\* 인하대학교 박사과정

\*\*\* 인하대학교 박사과정

트 콘크리트 빔을 하강·상승시키는 방법을 소개하고, 이러한 방법을 통한 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 교량에 대해 철도하중과의 관계를 분석한다. 현재 사용되고 있는 철도설계기준상의 각종 설계하중을 만족하는 프리스트레스트 콘크리트 단면을 기존에 설계되어 사용되고 있는 단순지지 철도교의 프리스트레스트 콘크리트 빔을 기준으로 형고를 변화시켜가며 제시하고, 제시된 단면에 대해 고유진동해석과 현재 사용되고 있는 PMC 새마을열차와 디젤기관차(7400호대)의 동적 재하에 대한 특성을 비교, 분석한다. 본 연구에서 사용된 철도교량은 21m, 25m, 30m 및 35m의 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 교량이다.

## 2. 기존연구의 동향

교량을 연속화 할 경우 단순교량에 비해 지간 중앙의 설계모멘트를 감소시킬 수 있어 경제적인 시공이 가능하고, 유지관리의 편리성 등의 장점 때문에 프리캐스트로 제작된 보를 연속화 시키려는 노력이 오래 전부터 진행되어 왔다. 그러나 연속부에서 별도의 프리스트레스트를 도입하지 않는 연속화 방법들은 연속성을 주기 위해 사용한 시공방법, 콘크리트의 크리프와 건조수축, 온도변화, 작용하중 등 여러 가지 영향으로 장기 사용시 부모멘트에 대한 연속성이 저하되어 단순보와 유사한 거동을 하게 된다. 연속화된 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 장기거동에 영향을 주는 불확정 요인을 규명하기 위하여 PCA(Portland Cement Association)에서는 지점의 정, 부모멘트에 대한 설계방법을 체계화하였으며, 1983년 AASHTO (American of State Highway and Transportation Officials) 시방서에 정식으로 채택되었다. 그러나 PCA 설계방법이 실제 교량거동과 정확히 일치하지 않을 수 있다는 반론이 제기되면서 TRB(Transportation Research Board)에서는 PCA 설계방법을 개선·보완한 연구결과를 발표(1989)하여 AASHTO 규정중 일부의 개정을 타진하고 있다. 최근에 와서는 PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute), ASCE (American Society of Civil Engineering) 등 여러 논문집을 통해 프리스트레스트 콘크리트의 연속화를 위한 연구 결과가 발표되고 있다. 현재에는 각 국가별로 연결부 상세 기준을 제시하여 지점에서 발생하는 정, 부모멘트에 효율적으로 저항하고 교량의 공용기간 동안 충분한 내구성을 확보하게 하고 있다.

## 3. 주형의 하강·상승에 의한 프리스트레스트 콘크리트 빔 교량의 연속화

### 3.1 제작방법

지점 하강·상승에 의한 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 교량의 설계·시공과정은 모두 4단계의 과정을 거치며 단계별 과정은 그림 1과 같다. 그림 1에서의 제작방법 중 주형의 하강 후 바닥판 콘크리트를 전체 또는 부분 타설할 수 있으며, 본 연구에서는 바닥판 전체를 일체 타설하는 것으로 수행하였으며, 부분 타설을 할 경우는 활하중 재하시 정모멘트가 발생하는 구간, 즉, 지간 길이의 약 0.9/에 해당하는 구간에 주형의 하강전에 바닥판 콘크리트를 타설하므로써 바닥판 콘크리트의 자중에 의한 프리스트레스트력의 손실로 인하여 지점 하강량 또는 상승량의 조절이 가능하며 이 단계에서 횡으로 빔이 일체화되므로 빔 전도를 막을 수 있다. 다음의 단계에서 본 공법의 특징인 연속 교량 구조 시스템의 장점을 살리기 위한 지점의 하강과 상승을 이용하여 부모멘트에 대응되는 압축응력을 도입시키는 단계로서 설계 및 시공과정을 설명하면 다음과 같다. 1·2경간의 보를 연결시킨 후 외측 지점을 하강시킨다. 바닥판 콘크리트의 타설 및 경화후 하강된 지점을 다시 상승시켜 부모멘트 구간의 바닥판에 압축응력을 도입시키고, 연속부 주형하면에는 인

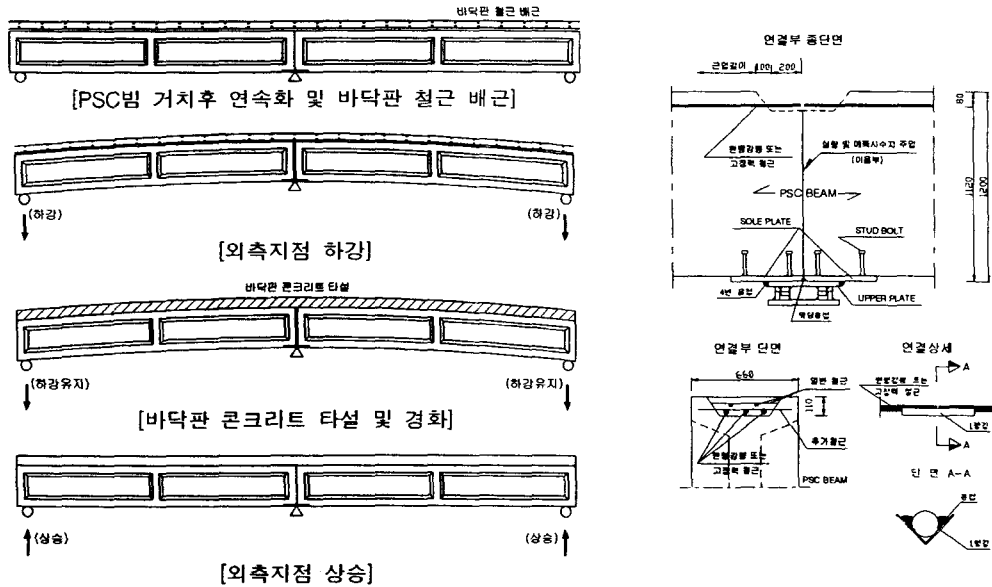


그림 1. 2경간 연속 P.S.C.빔교 시공순서 및 연속화부 상세

장응력이 잔류하여 사용하중 작용시 발생될 부재력에 대응하게 한다.

### 3.2 해석 단면

본 연구는 하강·상승공법이 적용된 2경간 연속 프리스트레스트 빔교의 철도하중에 대한 동적 거동을 평가하기 위해 기존에 설계되어 사용되고 있는 단선의 단순지지 프리스트레스트 합성형교 단면을 기준으로 복부의 높이만을 변화시켜 철도교설계하중을 만족하는 단면을 선택하여 사용한다. 그림 2는 단선의 선로를 갖는 기존의 단순지지 프리스트레스트 콘크리트 빔 합성형교의 단면 형상이며, 그림 3은 지간길이 21m, 그림 4는 지간길이 25m의 단순지지 프리스트레스트 콘크리트 빔 형상이다. 그림 3과와 그림 4의 기존 철도교 프리스트레스트 콘크리트 빔의 콘크리트 설계 압축강도는  $350\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이며, 바닥판 콘크리트의 설계압축강도는  $270\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이다. 그림 5는 하강·상승공정이 적용된 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 단면을 지간별로 나타낸 것이며, 각각의 P.S.C 단면에 대한 제원과 바닥판이 합성된 단면상수 값들을 도표 1에 나타내었다.

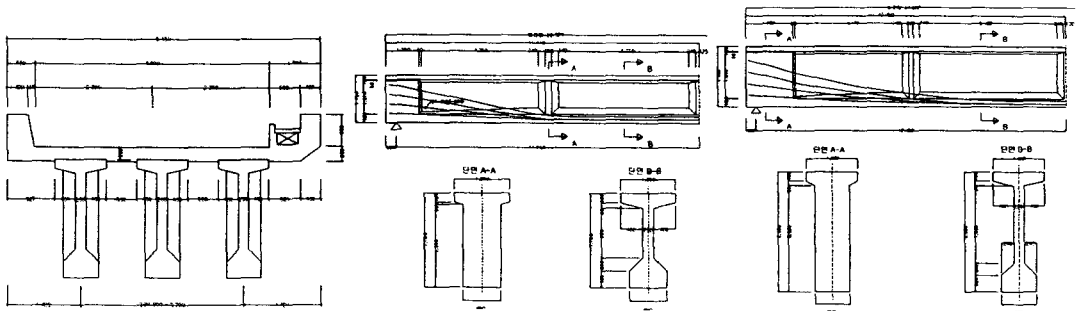


그림 2. P.S.C합성형 철도교 횡단면    그림 3. 지간길이 21m 철도교 P.S.C.빔    그림 4. 지간길이 25m 철도교 P.S.C.빔

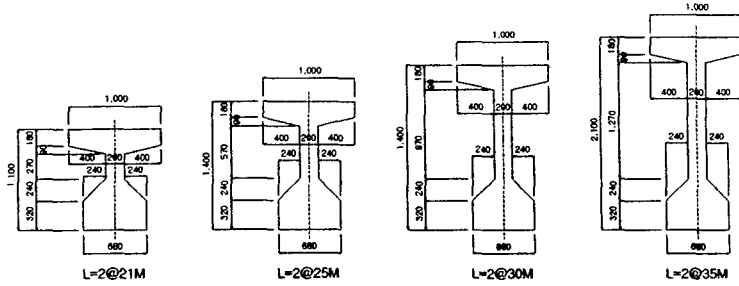


그림 5. 하강·상승공법이 적용된 2경간 연속 P.S.C빔 단면

도표 2는 하강·상승이 적용된 2경간 연속 P.S.C빔 교에 대해 철도교 설계하중인 LS-22를 충격 계수를 고려하여 정재하중 후 발생된 휨응력을 P.S.C빔 긴장력 각종 손실과 장기변형, 그리고 사 하중에 대한 휨응력 들과 중첩한 최종상태에서 교량의 잔류응력을 나타낸 것이며, 모든 경우에 대해 허용값을 만족하도록 설계하였다. 기존 단순지지 P.S.C빔에 비해 하강·상승공법을 적용한 경우 형고는 최고 40.4%, 바닥판을 포함한 단면적의 경우 최고 14.4% 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 동적 해석

##### 4.1 고유진동해석

기존에 사용되고 있는 지간길이 21m, 25m의 단순지지 프리스트레스트 콘크리트 빔 철도교와 하강·상승공법이 적용된 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 철도교에 대해 대해 보(frame) 요소를 이용하여 3차원 격자 형태로 모델링 한 후 고유진동해석 및 이동하중에 대한 동해석을 하

도표 1. 기존 단순교 및 하강·상승공법이 적용된 2경간 연속 P.S.C합성단면의 단면상수

구 분	단순교		2경간 연속교			
	L=21m	L=25m	L=2@21m	L=2@25m	L=2@30m	L=2@35m
형 고(m)	1.75	2.35	1.1	1.4	1.8	2.1
지간 길이별 단순교 대비 형고 감소율(%)			37.1	40.4		
단면적(㎠)	11,144	12,264	9,928	10,528	11,328	11,928
지간 길이별 단순교 대비 단면적 감소율(%)			10.9	14.2		
단면2차모멘트(㎠ <sup>2</sup> )	53,433,080	105,510,900	18,956,400	32,748,290	58,192,880	82,963,320
- 2경간 연속교의 콘크리트(P.S.C빔, 바닥판) 설계압축강도 $f_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ 임.						
- 상기 값들은 P.S.C빔 중앙부의 I형 단면 기준임.						

도표 2. 하강·상승공법이 적용된 2경간 연속 P.S.C합성단면의 최종상태(LS-22재하) 응력

(+ : 인장, - : 압축, 응력단위 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

구 분		L=2@21m	L=2@25m	L=2@30m	L=2@35m
하강량/상승량(mm)		20.3/101.7	21/125.8	23.1/161.8	26.9/188.0
최종상태 발생응력 (LS-22)	정모멘트	-43.38	-61.77	-71.71	-76.5
	발생구간	빔상연	빔하연	7.71	2.19
	부모멘트	7.99	10.03	2.05	10.66
	발생구간	슬래브상연	빔하연	-112.65	-132.31
허용응력	인장	32	32	32	32
	압축	-160	-160	-160	-160

도표 3. 교량별 고유진동수

구 분	단순교		2경간 연속교				
	L=21m	L=25m	L=2@21m	L=2@25m	L=2@30m	L=2@35m	
1차모드 형 상							
진 동 수 (Hz)	1차	5.379	6.129	3.503	3.772	3.339	2.860
	2차	11.919	11.331	5.384	5.820	5.185	4.463
	3차	20.993	22.533	13.414	14.339	10.341	7.727
	4차	22.754	23.578	16.378	14.673	10.367	7.740

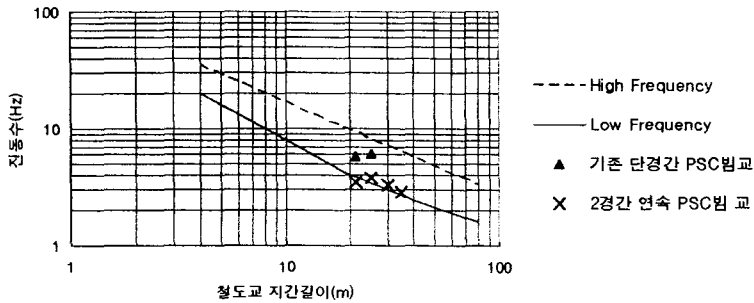


그림 6. UIC 776-1R 권장진동수 및 해석결과

였다. 도표 3은 각각의 단면에 대한 1차모드 형상이며 4차모드까지의 고유진동수를 나타내었으며, 그림 6은 1차모드에 대한 진동수를 UIC 776-1R에서 제안한 단순지지 철도교의 지간별 권장 진동수와 비교하여 나타낸 그림이다. 지간길이 21m의 2경간 연속교의 경우 UIC 776-1R의 진동수 하한값에 미치지 못하고 있다. 본 연구에서 사용된 2경간 연속 단면은 지간길이 21m, 25m의 기존 단경간 프리스트레스트 콘크리트 빔을 기준으로 설정되었으며, 지간길이 21m, 25m의 연속교와 단순교의 진동수 발생 경향이 유사하게 나타난 것으로 미루어 지간 21m 연속교의 경우 UIC 776-1R의 진동수를 만족하기 위해서는 철도교 설계기준상의 설계하중을 고려한 단면보다 더 큰 형호의 증가가 필요하다.

#### 4.2 이동하중에 대한 동적해석

2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 철도교에 실제로 재하되는 그림 7의 PMC 새마을열차와 디젤기관차(7400호대)에 대해 10km/hr부터 150km/hr까지 10km/hr간격으로 이동재하 시키가며, 교량에 가장 불리한 영향을 미치는 휨용력을 속도대별로 분석하였고, 교량의 안전성을 확인하였다. 도표 4와 도표 5는 주형의 하강·상승공법이 적용된 지간길이 21m, 25m, 30m, 35m의 2경간

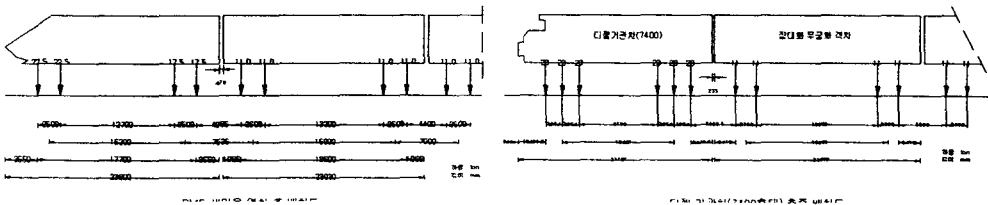


그림 7. PMC 새마을열차 및 디젤기관차(7400호대) 하중

도표 4. PMC 새마을 열차 하중 재하에 따른 최대 휨응력 및 속도

구 분	L=2@21m		L=2@25m		L=2@30m		L=2@35m	
	중앙부	연속부	중앙부	연속부	중앙부	연속부	중앙부	연속부
최대 휨응력(kg/cm <sup>2</sup> )	3.5(압축)	0.4(인장)	25.0(압축)	9.0(압축)	18.9(압축)	18.8(압축)	42.8(압축)	20.7(압축)
속도(km/hr)	130	130	140	140	150	40	150	40

도표 5. 디젤기관차(7400호대) 하중 재하에 따른 최대 휨응력 및 속도

구 분	L=2@21m		L=2@25m		L=2@30m		L=2@35m	
	중앙부	연속부	중앙부	연속부	중앙부	연속부	중앙부	연속부
최대 휨응력(kg/cm <sup>2</sup> )	7.3(인장)	4.6(인장)	16.3(압축)	5.9(압축)	12.1(압축)	16.3(압축)	32.9(압축)	15.5(압축)
속도(km/hr)	130	130	140	140	150	120	150	40

연속 철도교에 국내 철도교의 실제 이동하중인 PMC 새마을열차와 디젤기관차(7400호대)를 속도 별로 재하했을 때의 가장 불리한 휨응력의 크기와 속도대를 나타낸 것으로 해석결과 허용응력(인장 : 32kg/cm<sup>2</sup>, 압축 : 160kg/cm<sup>2</sup>)을 만족하는 것으로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 지점 하강·상승을 이용한 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔 연속 철도교에 대해 정, 동적 휨해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 공법을 적용하여 철도교 설계하중인 LS-22를 기준으로 설계된 프리스트레스트 콘크리트 빔은 PMC 새마을 열차와 디젤기관차(7400호대)의 이동하중을 최고속도 150km/hr까지 재하시킨 결과 동적 휨거동에 있어 안전성을 확보하고 있다.
- 2) 지점 하강·상승과 주형의 연속화를 통해서 기존의 단순지지 프리스트레스트 콘크리트 빔에 비해 형고의 경우 최대 40.4%, 단면적의 경우 14.2%의 감소가 가능하다.
- 3) 연구 대상 모델중 지간 길이 21m의 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 빔교의 고유진동수가 UIC 766-1R의 단순지지 철도교에 대한 권장 제한값 미치지 못하는 것으로 나타났으며, 이러한 권장 제한값을 만족하기 위해서는 철도교 설계기준상의 설계하중을 고려한 단면보다 더 큰 형고의 설계가 필요하다.

## 참고문헌

1. 구민세(1999), "P.S.C 빔교의 연속화 공법", 대한토목학회지, Vol.47, No.8, pp.31-36
2. 구민세, 박영제, 김민관(1999), "지점 상승·하강을 이용한 P.S.C.교의 연속화 공법", 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.89-92
3. 김 경수 (1999), "지점 상승·하강에 의한 2경간 연속 PSC 합성부의 Prestressing 효과에 관한 연구." 공학석사학위논문, 인하대학교
4. 철도설계기준(철도교편)
5. 한국건설기술연구원(1992), "프리캐스트 PS콘크리트 교량의 설계에 관한 연구"
6. Allouche, Erez N., Green, Mark F., and Soudki, Khaled A.(1998), "Tendon stress in continuous unbonded prestressed concrete members." Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.43, pp.86-93.
7. International Union of Railways(1994), "UIC Code 776-1R", 4th Edition, pp.57-65
8. Nawy, Edward G.(1996), Prestressed concrete, 2nd Edition, Prentice Hall