

고속전철 PSC 박스거더 교량의 횡방향 해석

Transverse Analysis of Prestressed Concrete Box Girder High-Speed Railway Bridges

김 병 석*
Kim, Byung-Suk

김 영 진**
Kim, Young-Jin

박 성 용**
Park, Sung-Yong

ABSTRACT

Many kinds of methods have been developed to carry out transverse analysis of prestressed concrete(PSC) box girder bridges. However, most bridge engineers only use the simple frame model to analyze PSC box girder in transverse direction because of its simplicity and easy usage. But, this frame model has many problems such that it can't consider warping, distortion and longitudinal load distribution. In this study, the results from simple frame model and 3-dimensional shell model with UIC load are compared to show its validity. The results from frame model are slightly larger than those of shell model in symmetric loading case. But, positive bending moment of top slab is larger in shell model than frame model in case subject to anti-symmetric loading. It shows that simple frame model can't always give conservative results, so a practical tool whose treatment is easy and whose product is reliable shall be developed as soon as possible.

1. 서론

PSC 박스거더는 다양한 공법의 개발에 힘입어 지형조건에 큰 영향을 받지 않고 시공이 가능하게 되었으며, 다른 형식과 비교하여 경제성 및 구조적 안전성, 시공성 등이 상대적으로 우수하여 최근에 중장경간 교량의 가설에 많이 적용되고 있는 형식중 하나이다. 특히, 고속전철 교량의 경우에는 국내외를 막론하고 PSC 박스거더 형식이 주로 사용되고 있으며, 경부고속전철의 경우에도 대부분의 교량이 이 형식으로 건설되고 있다. 이러한 PSC 박스거더 교량의 구조 해석은 크게 종방향 해석과 횡방향 해석으로 구분할 수 있는데, 종방향 해석에는 시공단계를 모사하는 등 비교적 정밀한 해석 방법 등이 사용되고 있지만, 횡방향 해석은 상대적으로 단순한 해석만으로 만족하고 있는 실정이다. 이에 대해서는 지금까지 많은 논란이 있었으나, 프레임해석이 안전측의 결과를 유도한다는 점과 사용하기가 간편하다는 이유로 실무에서 널리 사용되고 있다. 하지만, 고속전철과 같이 활하중 효과가 크고 비대칭성이 뚜렷한 하중에 대해서도 일반 교량에서처럼 프레임해석이 안전측의 결과만을 줄 수 있는지에 대해서는 검토할 필요성이 있다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 다양한 횡방향 해석방법 중에서 주로 사용되고 있는 단순 프레임해석과 비교적 정확한 해를 준다고 알려져 있는 셸모델을 이용한 3차원 유한요소해석 결과를 비교하고자 한다. 이를 통하여 프레임해석만에 의한 횡방향 해석의 타당성을 검토하고 그에 따르는 문제점을 도출하고자 한다. 비교를 위해 사용된 대상은 경부고속전철의 대표적인 교량형식인 지간길이 40m 및 25m 형식의 PSC박스거더이고, 작용하중으로는 열차하중인 UIC하중을 복선(대칭하중) 및 단선

* 한국건설기술연구원 수석연구원

** 한국건설기술연구원, 연구원

(비대칭하중)에 대하여 재하하였다. 한편, 구조해석프로그램으로는 단순 프레임해석에는 SAP90을, 3차원 쉘모델 해석에는 LUSAS를 사용하였다.

2. 구조 해석

2.1 횡방향 해석방법 고찰

박스거더의 해석방법에 대해서는 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 이들 연구의 목적중의 하나는 실무자가 쉽게 사용할 수 있되, 요구되는 정도를 가진 방법을 제시하는 것이었다. 하지만, 아직까지는 이런 목적에 적합하다고 할 만한 해석방법이 제시되지 못하고 있는 실정이며, 이에 따라 설계 시방서에서도 횡방향 해석방법에 대한 명확한 규정을 두지 않아 실무자들이 설계 대상 교량의 특성보다는 해석방법에 대한 사용 편의성에 따라 해석방법을 결정하고 있으며, 따라서 가장 사용이 편리한 프레임해석을 선호하는 것은 어쩌면 당연한 일일 것이다. 하지만, 표 1과 같은 다양한 해석방법중에서 프레임해석은 박스거더의 구조적 특성을 제대로 고려할 수 없는 단순 해석방법으로 이에 따른 결과의 정도를 검토해 보는 것은 현 시점에서 매우 중요한 일이라 판단된다. 한편, 표 1은 B.I. Maisel 등이 박스거더고 해석과 관련한 다양한 문헌을 정리하여 해석방법을 13가지로 분류한 것이다.

표 1. 박스거더의 해석 방법의 종류 및 그 특성

해 석 방 법	가 능 한 해 석 분 야						
	종방향휨	St.Venant 비틀림	횡단면변형 (횡방향휨)	뒹-비틀림	횡단면변형 (distortion)	전단뒤집 (shear lag)	극부효과
① 단순 프레임해석	○	○					
② Knittel			○				
③ 등가보 (Richmond)			○		○		
④ Kupfer			○		○		
⑤ Kollbrunner & Hajdin				○			
⑥ BEF Analogy			○		○		
⑦ Reissner						○	
⑧ 영향면을 이용한 프레임 해석							○
⑨ 격자해석	○	○	○				
⑩ 절판법	○	○	○	○	○	○	○
⑪ FSM	○	○	○	○	○	○	○
⑫ FEM	○	○	○	○	○	○	○
⑬ Shell 이론	○	○	○	○	○	○	○

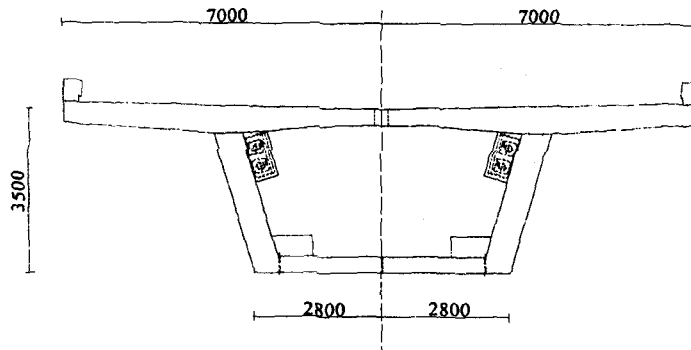
표에서 방법①은 일반적인 보이론에 따른 단순 해석방법이고, 방법②~④, ⑥은 횡단면변형 (distortion)을 고려한 해석에만 적용이 가능하다. 방법⑦의 전단뒤집은 강박스거더처럼 부재두께가 매우 얇은 경우에는 큰 영향을 미치지, 콘크리트거더처럼 부재가 큰 경우에는 유효폭 개념으로만 적용되며, 방법⑧은 바닥판 등을 설계할 때 주로 사용된다. ④~⑥의 방법을 이용하여 뒹 (warping)이나 횡단면변형(distortion)에 의한 영향을 고려할 수 있으며, ⑨~⑬방법은 주로 컴퓨터용 해석 프로그램에 적용되는 방법으로 종방향 및 횡방향 해석을 동시에 수행할 수 있다. ②~⑥의 비교적 간단한 해석방법은 기본적으로 Vlasov의 "Thin walled elastic beam"이론에 기초하고 있으며, 위에서 언급한 해석 방법 외에도 PTI(Post-Tensioning Institute)에서 제안한 해석법이 있다. 위에서 보는 바와 같이 각 해석방법에는 나름대로의 특징을 가지고 있는데, 방법①의 경우에는 계산이 간단한 반면에 횡단면변형에 의한 영향을 고려할 수 없는 등 엄밀한 해석은 불가능하며, ⑩~⑬과 같은 방법은 엄밀한 계산은 가능하지만, 그 값을 얻기 위한 노력과 비용이 매우 크

다는 단점을 안고 있다.

여기에서는 단순 프레임모델(방법①)에 의한 해석과 셸모델에 의한 해석(방법 ②)을 수행하여 그 결과를 비교하고자 한다. 해석 대상으로는 활하중 효과가 상대적으로 큰 고속전철 교량으로 하였으며, 지간길이 40m와 25m인 단순교에 대하여 각각 해석을 수행하기로 한다.

2.2 해석 모델링

경부고속전철의 설계도서에 따르면 PSC 박스거더의 횡방향 해석은 대부분 단순 프레임모델을 이용하였으며, 이로 인하여 편심하중에 대한 휨(warping) 또는 횡단면변형(distortion) 및 종방향 하중분배의 영향이 전혀 반영되지 못하였다. 이는 앞에서도 언급된 바와 같이 설계 시방서에 이를 고려하도록 하는 규정을 두지 않았기 때문이며 따라서, 향후 연구를 통하여 횡방향 해석방법을 체계화하고 이를 시방서 규정에도 제시할 필요성이 있다고 판단된다. 이러한 취지하에 프레임해석만에 의한 결과가 보일 수 있는 오류의 크기를 파악하고자 본 연구가 수행되었다. 즉, 지간길이 40m와 25m인 단경간 PSC 박스거더교를 셸요소를 이용, 3차원 모델링하여 해석한 경우와 단순 프레임으로 모델링하여 해석한 경우에 대하여 상부 슬래브 중앙의 정모멘트와 복부 근처의 부모멘트 크기를 비교하였다.



- 상부슬래브 폭 : 14m · 하부슬래브 폭 : 5.6m
- 상부슬래브 두께 : 0.35m(중앙) · 하부슬래브 두께 : 0.35m(중앙)
- 복부 두께 : 0.6m

그림 1. L=40m 형식의 박스거더 단면도 및 제원

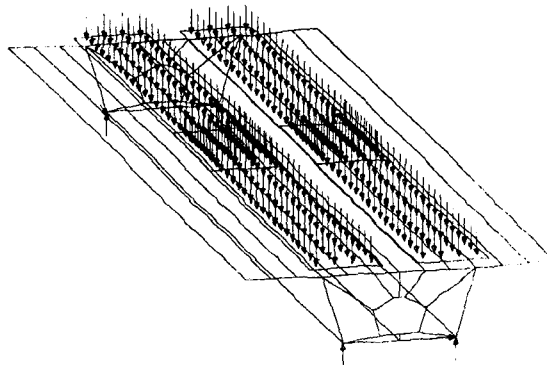


그림 2. 셸모델 (대칭하중 재하시)

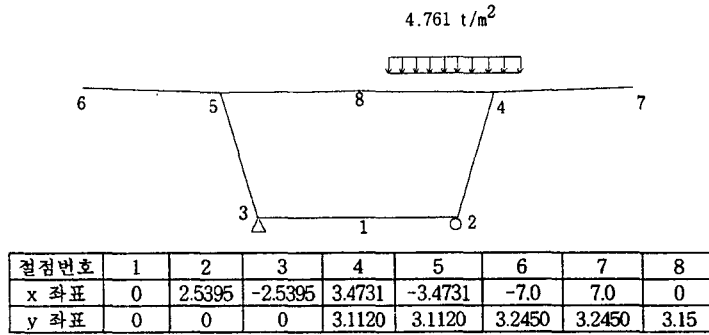


그림 3. 단순 프레임 모델 (비대칭 하중 재하시)

25m 단경간 박스거더교도 위와 동일한 방법으로 모델링하였으며, 자세한 내용은 지면관계상 생략하기로 하고 그 결과만을 다루기로 하였다. 한편, 본 해석에 적용된 하중은 그림 4와 같은 UIC 하중이며 이를 단선 및 복선에 대해 재하하였다.

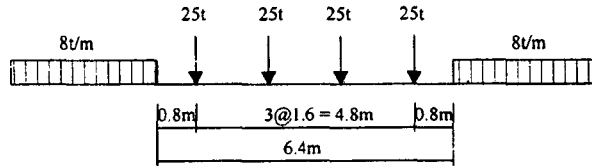


그림 4. UIC 하중 재하 방법 (종방향)

이러한 열차하중은 침목 및 자갈도상에 의해 횡방향으로 분포되어 작용하는데 분포폭(b)을 시방서 규정에 의거하여 구하면

$$b = 2.25 + 2 \times [0.386 \tan 37^\circ + (0.05 + 0.175) \tan 45^\circ] = 3.282m$$

이고, UIC하중의 분포하중은 각각 다음과 같다.

- 집중하중(25ton) : $w_c = \frac{25}{1.6 \times 3.282} = 4.761 t/m^2$
- 분포하중(8t/m) : $w_d = \frac{8}{3.282} = 2.438 t/m^2$

이러한 하중을 단선 및 복선에 대하여 적용하였으며, 셸모델은 LUSAS를 프레임모델은 SAP90을 사용하여 해석하였다.

2.3 해석결과

(1) 지간 40m인 경우

그림 5와 그림 6은 3차원 셸모델에 대칭하중(복선하중)과 비대칭하중(단선하중)을 재하했을 때 LUSAS에 의한 지간 중앙에서의 박스 세그먼트의 횡방향 모멘트도이다. 또한, 그림 7과 그림 8은 프레임모델에 대칭하중(복선)과 비대칭하중(단선)을 재하했을 때 SAP90에 의한 횡방향 모멘트도이다. 이 결과를 도표로 정리하면 표 2와 표 3과 같다.

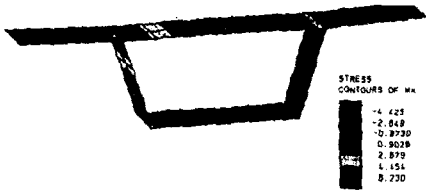


그림 5. 대칭 하중인 경우 (셸모델)

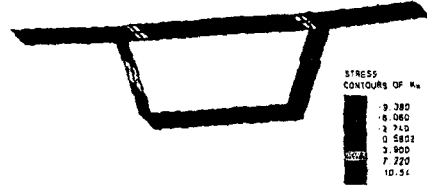


그림 6. 비대칭 하중인 경우(셸모델)

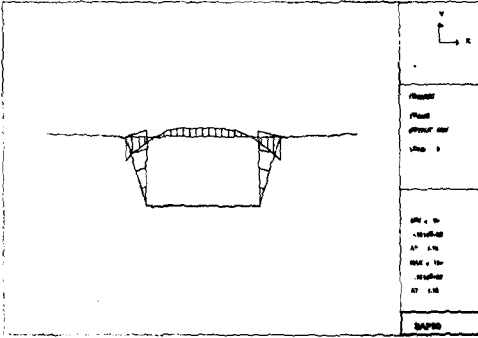


그림 7. 대칭 하중인 경우(프레임모델)

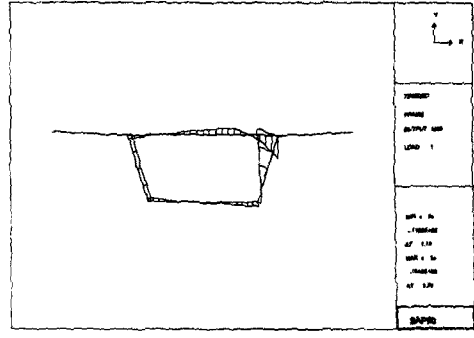


그림 8. 비대칭 하중인 경우(프레임모델)

표 2. 대칭하중에 의한 횡방향모멘트의 비교 (L=40m)

Model Type	상부슬래브 (내측)			복 부		비 고
	Left	Center	Right	Left	Right	
프레임모델	-13.140	4.493	-13.140	-12.390	-12.390	SAP90
셸모델	-12.200	4.200	-12.200	-11.040	-11.040	LUSAS
프레임모델 셸모델	1.08	1.07	1.08	1.12	1.12	

표 3. 비대칭하중에 의한 횡방향모멘트의 비교 (L=40m)

Model Type	상부슬래브 (내측)			복 부		비 고
	Left	Center (최대값)	Right	Left	Right	
프레임모델	-1.190	2.246 (3.292)	-11.230	-1.910	-10.480	SAP90
셸모델	-7.116	1.992 (5.312)	-5.802	-6.960	-4.080	LUSAS
프레임모델 셸모델	0.17	1.13 (0.62)	1.94	0.27	2.57	

(2) 지간 25m인 경우

40m의 경우와 마찬가지로 그림 9와 그림 10은 셸모델에 대칭하중(복선)과 비대칭하중(단선)을 재하했을 때 상부슬래브 중앙부의 박스 세그먼트의 횡방향 모멘트도이다. 그림 11과 그림 12는 프레임모델에 대칭하중(복선)과 비대칭하중(단선)을 재하했을 때 횡방향모멘트도이다. 이를 도표로 정리하여 비교한 것이 표 4와 표 5에서 보여주고 있다.

표 4. 대칭하중에 의한 횡방향모멘트의 비교 (L=25m)

Model Type	상부슬래브 (안쪽)			복 부		비 고
	Left	Center	Right	Left	Right	
프레임모델	-13.154	3.872	-13.154	-12.297	-12.297	SAP90
셀모델	-12.140	3.752	-12.140	-10.710	-10.710	LUSAS
프레임모델 셀모델	1.08	1.03	1.08	1.15	1.15	

표 5. 비대칭하중에 의한 횡방향모멘트 비교 (L=25m)

Model Type	상부슬래브 (내측)			복 부		비 고
	Left	Center (최대값)	Right	Left	Right	
프레임모델	-3.180	1.936 (3.308)	-9.975	-3.180	-9.118	SAP90
셀모델	-6.605	1.691 (4.799)	-5.311	-6.427	-4.342	LUSAS
프레임모델 셀모델	0.48	1.14 (0.67)	1.88	0.49	2.10	

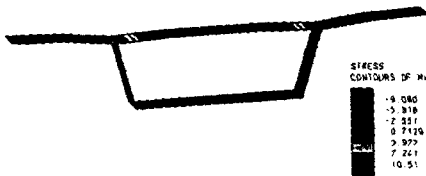


그림 9. 대칭하중인 경우(셀모델)



그림 10. 비대칭하중인 경우(셀모델)

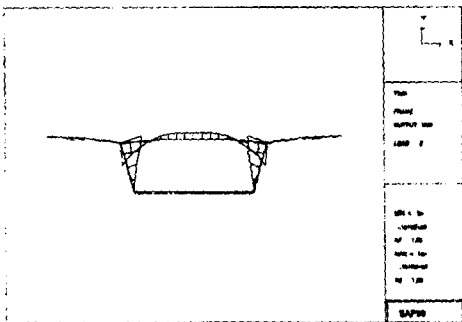


그림 11. 대칭하중인 경우(프레임모델)

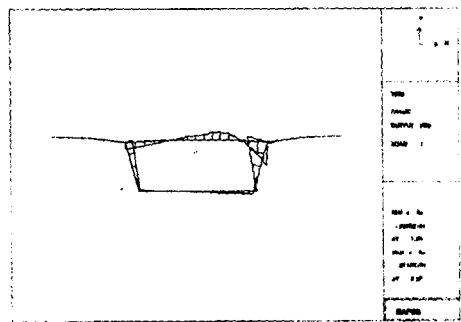


그림 12. 비대칭하중인 경우(프레임모델)

(3) 결과 분석

대칭하중을 재하한 경우에는 상부슬래브와 복부가 접하는 부분에서 프레임모델이 셀모델에 비해 최대 15%정도, 상부슬래브 중앙부 최대모멘트는 3~7%정도 크게 계산되었다. 비대칭하중인 경우에는 상부슬래브와 복부가 접하는 부분에서 하중 비재하측은 프레임모델이 셀모델보다 51~73% 정도 작게, 하중 재하측은 110~157%정도 크게 계산되었으며, 상부슬래브 중앙부에서는 최대모멘트가 셀모델보다 33~37% 정도 작게 나타났다. 또한, 복부와 접하는 곳에서는 하중재하측은 프레임모델이 셀모델에 비해 52~83% 정도 작게, 그리고 하중재하측은 88~94% 정도 크게 계산

되었다. 위의 계산 결과에서 알 수 있듯이 대칭하중인 경우에는 프레임모델을 사용하면 셸모델의 결과와 거의 일치하거나 안전측의 결과를 주지만 비대칭하중인 경우에는 뒀 및 종방향 하중분배의 영향으로 그렇지 못한 부분이 있음을 알 수 있었으며, 전체적인 휨모멘트 분포도 매우 상이하게 나타남을 알 수 있었다.

3. 결론

PSC 박스거더 교량의 횡방향 해석을 단순 프레임모델과 3차원 셸모델을 통해 수행하였다. 하중은 고속전철의 열차하중을 이용하였으며, 복선 재하에 의한 대칭하중과 단선 재하에 의한 비대칭하중을 각각 재하하여 그 결과를 비교하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 대칭하중에 대한 단순 프레임 모델과 3차원 셸모델에 의한 해석 결과는 큰 차이는 없었으나, 대체로 프레임모델이 셸모델보다 다소 큰 값을 보여주고 있다.
- (2) 비대칭하중에 대해서는 두 모델간의 해석 결과에 큰 차이를 보였다. 즉, 상부슬래브의 휨모멘트에 있어서 하중이 재하된 부분에서는 프레임모델이, 반대편에서는 셸모델이 매우 큰 비율로 더 큰 값을 보여주었다. 이는 3차원 셸모델에서는 뒀 및 횡단면 변형, 종방향 하중분배의 영향을 고려하고 있으나, 프레임모델에서는 이를 고려하지 못한 결과인 것으로 보인다. 특히, 상부슬래브의 최대 정모멘트는 셸모델이 프레임모델에 비해 61%까지 크게 나타났으며, 이 값은 대칭하중인 경우의 프레임모델보다도 18%정도 크게 나타나 설계시 지배 단면력이 되는 것으로 나타났다.
- (3) 현행대로 프레임모델로 간단히 해석을 수행하는 것은 셸모델에 비해 대부분 안전측의 결과를 유도하고 있으나, 상부슬래브의 정모멘트는 오히려 셸모델에 의한 해석결과가 더 큰 값을 주어 프레임모델에 의한 해석만 한 경우에는 결코 안전측의 설계를 할 수 없음을 알 수 있었다. 하지만, 셸모델을 이용한 해석은 설계측면에서 보았을 때 너무 복잡하고 비경제적인 면이 크므로, 향후에 이에 대한 깊은 연구를 통해 정확하면서도 간편한 설계 방법을 고안해 내는 것이 시급할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구의 수행에 도움을 주신 건설교통부, 통산산업부 및 과학기술부 등의 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국고속철도건설공단, 경부고속전철 설계도서
2. SYSTRA(1995), Bridge Design Manual
3. 고속전철사업기획단(1991), 고속철도 콘크리트구조물(RC 및 PC) 설계표준시방서(안)
4. 한국건설기술연구원(1986), 경제적인 PS 콘크리트교량 건설공법에 관한 연구
5. B.I. Maisel, R.E. Rowe and A.R. Swan(1973), Concrete Box-Girder Bridges, The Structural Engineers, Vol. 51, No.10
6. 건설교통부(1997), 고속전철교량기술개발(1차년도 연차보고서)