

고속열차 주행에 따른 기존철도교의 동적거동 특성분석

Investigation on dynamic behaviour of conventional railway bridge subjected to high speed train loading

오 지 택*
OH, JI-TAEK

양 신 추**
Yang, Sin-Chu

민 경 주***
Min, Kyung Ju

이 중 덕****
Lee, Jong-Duk

Abstract

The purpose of this paper is to examine the validation to passage of high speed train on conventional railway bridges. The dynamic behavior of bridge is analyzed by using the developed 3-D program. The train is assumed to moving loads and track to distributed masses. The centrifugal force due to curved track is also considered. The numerical results are compared with those measured in the site to demonstrate the efficiency of the developed program. From the parametric study, it is notified that conventional bridge gives good serviceability to passage of high speed train, specially such as TGV-K.

1. 서론

경부고속철도는 신설될 고속철도전용선로와 기존선 구간에서 고속철도차량이 주행하게 된다. 본 연구에서는 기존선 구간에서의 철도교에 고속철도차량인 TGV가 주행했을 경우에 대한 동적거동을 고찰하였다. 이를 위하여 3차원 동적해석에 대한 알고리즘을 이용하여 수치해석프로그램을 개발하고 기존철도교량에 고속철도차량이 주행할 경우에 대한 동적해석을 수행하였다. 해석대상은 LS-22열차하중으로 설계된 태백선의 곡률반경 800m인 PC-BEAM교(영월교)로서 수치해석결과는 전기기관차 8000호대 (2량편성)의 현장재하결과와 비교하여 검증하였다. 이 기존철도교량에 TGV 20량 편성을 이동하중으로 재하시켜 동적결과를 산출하였다. 기존철도교의 LS-22하중과 TGV 20량편성에 의한 처짐을 비교한 결과 LS-22하중으로 설계된 교량의 경우 구조물 측면에서 충분한 사용성이 있는 것을 알 수 있었다.

2. 동적해석기법

경부고속철도에서 사용하고 있는 PC-BOX 교량과 같이 비틀림강성이 크고 횡방향으로 강성변화가 거의 없는 경우는 2차원 동적해석 결과만으로도 교량의 동적설계와 열차의 주행안전성 및 승차감의 검토에 만족하게 적용할 수 있을 것이다. 그러나 PC-BEAM교와 같이 횡방향으로의 지지강성변화가 큰 경우 2차원 해석을 수행할 경우 차량이 지나가는 궤도부에서의 응답은 과소평가하는 결과를 얻게 되고 결과적으로 교량의 동적거동을 적절히 예측하지 못하게 된다.

고속철도차량과 같이 많은 축중과 재하시간을 갖는 경우에 대하여 기존의 상용구조해석프로그램은 그 사용이 매우 곤란하며 다양한 매개변수연구를 수행하기 어렵다. 본 연구에서는 고속철도차량의 축중을 이동하중으로 고려하는 3차원 동적해석프로그램을 개발하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원 (0343-384-6684 교 192), 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원 (0343-384-6684 교 191), 정회원

*** 한국철도기술연구원 수석연구원 (0343-461-8531 교 158), 정회원

**** 국립철도전문대학 교수 (0343-461-4015 교 252), 정회원

2.1 교량모델의 유한요소

3차원 트러스교량, 라멘교량, 강합성교량 등을 모형화 할 수 있도록 하기 위하여 8절점 셸요소(Shell element)와 3차원 프레임요소(Frame element)를 사용하였으며, 궤도의 자갈도상을 모형화 하기 위하여 3차원 윈클러스프링요소(Winkler spring element)를 개발하여 도입하였다.

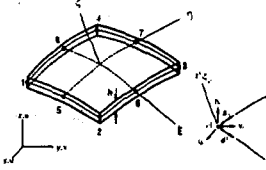


그림 1. 8절점 셸요소

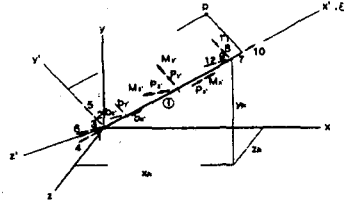
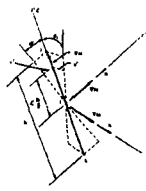


그림 2. 3차원 프레임 요소

셸요소는 절점당 5자유도(3 병진자유도, 2 회전자유도), 프레임요소는 절점당 6자유도(3 병진자유도, 3 회전자유도)를 갖는다. 또한 교량에서 상판과 이를 지지하는 세로보 및 가로보의 단면 중립축은 일반적으로 일치하지 않는다. 따라서 이들 세로보와 가로보를 프레임요소로 이상화시키는데 있어서 추가적인 자유도를 발생시키지 않으면서 상판의 셸요소 자유도를 공유할 수 있도록 강체연결(Rigid link)효과를 프레임요소에 고려하였다.

$$K_{\text{rigid}} = \bar{R}^T K R \quad (1)$$

여기서 \bar{R} 은 상판을 모형화하는 셸요소에서의 자유도와 주형보 및 횡보를 모형화하는 프레임요소에서의 자유도와의 관계를 나타내는 행렬식으로서 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \quad R_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & c & -b \\ 0 & 1 & 0 & -c & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & b & -a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $a = x_i - x_1$, $b = y_i - y_1$, $c = z_i - z_1$ 이고 (x_i, y_i, z_i) 및 (x_1, y_1, z_1) 은 각각 프레임요소 및 셸요소에서의 절점좌표이다.

궤도를 이상화하기 위한 윈클러스프링요소의 요소강성행렬은 Hermition 형상함수와 절점변위로 표현된 레일과 바닥면에서의 변위 u_r, u_s 를 이용하여 다음과 같이 구성된다.

$$K'_b = \int_L f^T k_b f dl = \frac{L}{420} \begin{bmatrix} 140k_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70k_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 156k_v & 0 & 0 & 0 & 22k_v L & L & 54k_v & 0 & 0 & 0 & 0 & -13k_v L \\ 156k_w & 0 & 22k_w L & 0 & 0 & 0 & 54k_w & 0 & -13k_w L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4k_w L^2 & 0 & 0 & 0 & 13k_w L & 0 & 3k_w L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4k_v L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3k_v L^2 & 0 & 0 & 0 \\ 140k_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 156k_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -22k_v L & 0 & 0 & 0 \\ 54k_w & 156k_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 156k_w & 0 & -22k_w L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4k_w L^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4k_v L^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

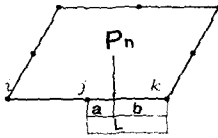
2.2 동적해석알고리즘

열차 이동충격을 받는 교량의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P(t) \quad (4)$$

여기서 M, C 및 K는 교량의 질량, 감쇠, 강성행렬이고, P(t)는 열차이동하중이다. n 번째 축중이

그림 2.2.3과 같은 절점(Node)당 5개의 자유도(Degree of freedom)의 쉘요소를 통과하는 경우 대응하는 절점하중 P_n 과 시간 t 에서의 열차하중벡터는 다음과 같다.



$$P_n = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ P_{5(j-1)+3} = \frac{b}{L} P_n \\ \vdots \\ P_{5(k-1)+3} = \frac{a}{L} P_n \\ \vdots \end{Bmatrix}, \quad P(t) = \sum_{n=1}^N P_n \quad (5)$$

그림 3. 요소재하 축중

여기서 N 은 시간 t 에서 교량상에 존재하는 열차 축중의 갯수이다.

식(4)를 모드중첩법을 사용하여 해석을 수행할 경우 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_n \ddot{U} + C_n \dot{U} + K_n U = P_n \quad (6)$$

여기서 $M_n = \phi_n^T M \phi_n$, $C_n = 2\xi \omega_n M_n$, $K_n = \phi_n^T K \phi_n = \omega_n^2 M_n$, $P_n = \phi_n^T P(t)$ 이다.

열차의 곡선부주행에 따른 원심력은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 원심력을 고려하여 교량의 동적하중을 구성하였다. 차축위치(x,y)에서 궤도중심선의 접선의 기울기 θ 는 식(8)과 같다.

$$F = \frac{Pv^2}{Rg} \quad (7)$$

$$\tan\theta = -\frac{x-L/2}{y - (-\sqrt{R^2 - L^2/4} + tw)} \quad (8)$$

여기서 P 는 축중이며, v 는 열차속도, R 은 곡선반경, g 는 중력가속도, L 은 교량길이, tw 는 거더중심선과 궤도중심선 사이의 거리이다. 원심력의 횡방향성분(F_y)과 종방향성분(F_x)은 식(9)와 같다.

$$F_x = -F \sin\theta, \quad F_y = F \cos\theta \quad (9)$$

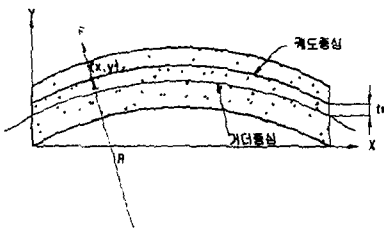


그림 4. 곡선교의 평면도

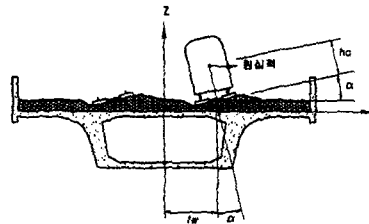


그림 5. 곡선교의 횡단면도

2.3 전기기관차 8000호대 및 TGV 열차하중

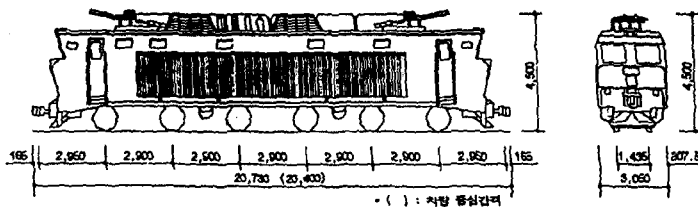


그림 6. 전기기관차 8000호대

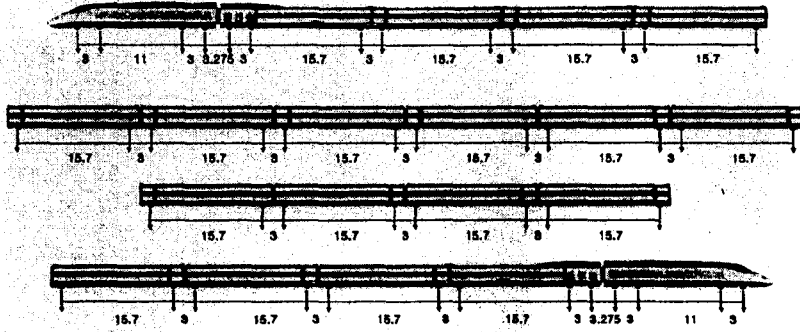


그림 7. TGV 2기관차+18객차 편성

전기기관차 8000호대의 축중은 22,000 kg으로 일정하며, TGV 열차의 축중은 해석의 편의상 17,000 kg으로 간주하였다.

3. 교량의 동적해석모델

PC-BEAM교에 대한 유한요소해석모델은 8절점 쉘요소와 등매개변수 보요소 및 강철효과를 고려하여 그림 9 및 10과 같이 구성하였다. 바닥판은 쉘요소로, PC-BEAM 및 격벽은 등가의 보요소로 모델링하였으며 도상자갈 및 궤도중량은 단지 질량으로서 쉘요소에 포함시켜 고려하였다. 곡선부에서 PC-BEAM은 직선부재이며 원심력에 의한 추가하중을 고려하였다.

표 1. PC-BEAM교에 대한 제원

교량제원	구조형식	단경간 PC-BEAM교	궤도	단일궤도
	경간	보 지간 : 28.30 m	바닥판두께	0.25 m
	교폭	6.6 m	PC-BEAM형고	2.47 m

- 활하중 : LS-22
- 충격계수 : 0.345
- 현장타설콘크리트 : $\sigma_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$
- PC-BEAM : $\sigma_{ck} = 350 \text{ kg/cm}^2$
- 궤도중량 : 800 kg/m
- 도상자갈단위중량 : 1900 kg/m³
- 곡선부 곡률반경 : 800 m

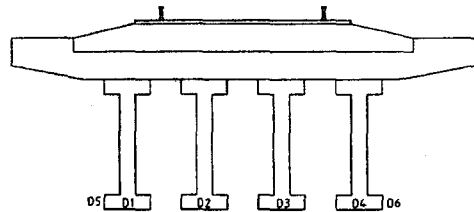


그림 8. PC-BEAM교의 횡단면 및 계측지점

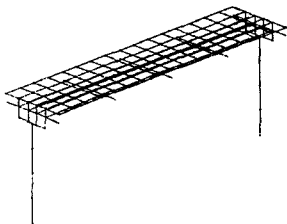


그림 9. 영월교의 유한요소해석모델
(단경간 1개 구간만 고려)

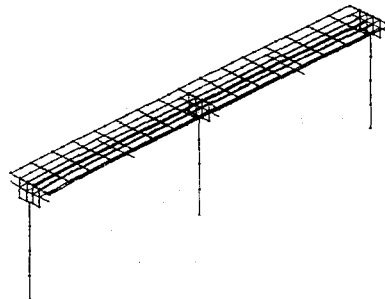


그림 10. 영월교의 유한요소해석모델
(단경간 2개 구간을 고려)

수치해석은 Newmark β 직접적분법을 사용하였으며 이때 사용한 매개변수는 $\gamma=0.5$, $\beta=0.25$ 이

며 시간간격은 0.001 sec로 설정하였다.

4. 현장제하시험결과

전기기관차 8000호대 2량편성을 10~80 km/h로 주행시켜 얻은 결과는 표 2와 같다.

표 2. PC-BEAM 경간중앙부의 연직 및 횡변위 (단위:mm)

구분	직 선 부					
	연직변위				횡변위	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
10 km/h	-3.92	-3.94	-3.92	-3.87	0.25	-0.65
20 km/h	-3.92	-3.95	-3.92	-3.86	0.23	-0.59
40 km/h	-3.93	-3.95	-3.93	-3.87	0.16	-0.53
60 km/h	-4.09	-4.11	-4.06	-3.99	0.33	-0.75
80 km/h	-4.02	-3.99	-3.99	-3.99	0.36	-0.74

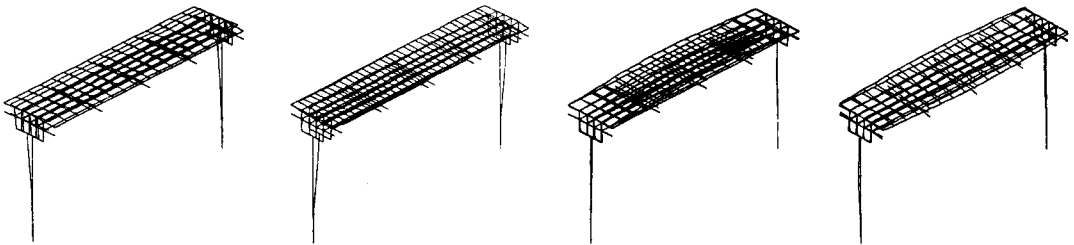
주: 곡선부에 대한 실측결과는 수치해석결과와 함께 표기함

5. 동적해석

해석프로그램의 타당성을 검증하고 TGV열차하중에 의한 동적거동을 예측하기 위하여 전기기관차 8000호대 2량편성과 TGV열차하중에 대한 교량에서의 동적응답을 산출하였다.

5.1 고유치해석

고유진동수해석결과 영월교의 진동특성은 연직방향보다는 횡방향 및 종방향 축에 대한 비틀림 진동양상이 두드러짐을 개괄적으로 파악할 수 있다. 이는 영월교의 경우 연직방향보다는 횡방향에 대한 진동이 우선할 수 있음을 의미한다. 그림 11은 고유진동해석결과를 나타낸다.



1차모드: 0.887 Hz

2차모드: 2.035 Hz

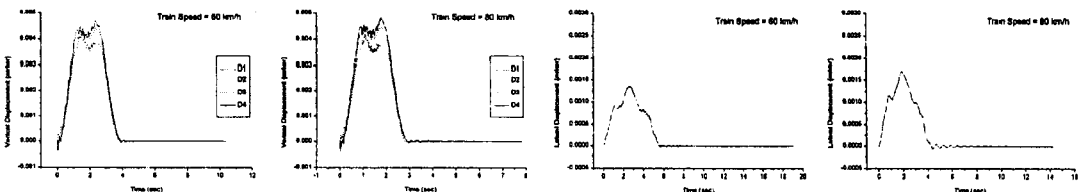
3차모드: 4.024 Hz

4차모드: 4.469 Hz

그림 11. 고유진동수 및 고유진동모드

5.2 수치해석결과 검증

전기기관차 8000호대 2량편성에 대한 동적수치해석을 수행한 결과와 실측값의 비교를 표 3에 나타내었다. 그림 12와 13은 전기기관차의 동적응답에 대한 시간이력곡선을 나타낸다.



V=60km/h

V=80km/h

V=60km/h

V=80km/h

그림 12. 경간중앙점에서의 연직변위

그림 13. 경간중앙점에서의 횡변위

표 3. 경간중앙부에서의 수치해석결과와 실측치와의 비교

단위 : mm

구분		곡 선 부											
		연직변위				횡변위							
		D1	D2	D3	D4	D5	D6						
20 km/h	실측 해석	-3.96	-4.32	-3.93	-4.26	-3.96	-4.21	-4.07	-4.10	-	-	-	0.989
40 km/h	실측 해석	-3.86	-4.28	-3.97	-4.25	-4.07	-4.44	-4.15	-4.66	0.41	-	0.51	1.14
60 km/h	실측 해석	-3.76	-4.16	-3.95	-4.17	-4.13	-4.41	-4.33	-4.68	0.54	-	0.74	1.37
80 km/h	실측 해석	-3.46	-4.19	-3.78	-4.23	-4.13	-4.46	-4.59	-4.81	1.46	-	1.73	1.74

표 3의 비교로부터 해석프로그램은 실제 교량의 동적거동을 적절하게 산출함을 알 수 있다.

설계하중인 LS-22하중에 의해 발생한 경간중앙부에서의 최대연직처짐은 6.11 mm였으며, 주행 속도에 따른 원심력 효과를 고려하여 산출한 횡변위는 40, 60과 80 km/h 에 대하여 각각 0.66, 1.11 및 1.48mm로 계산되었다. 이는 28.30m인 경간길이에 대해서 일반적인 철도합성교의 처짐제한인 1/800을 크게 밑도는 처짐량이다.

5.3 TGV열차주행시 교량의 동적응답

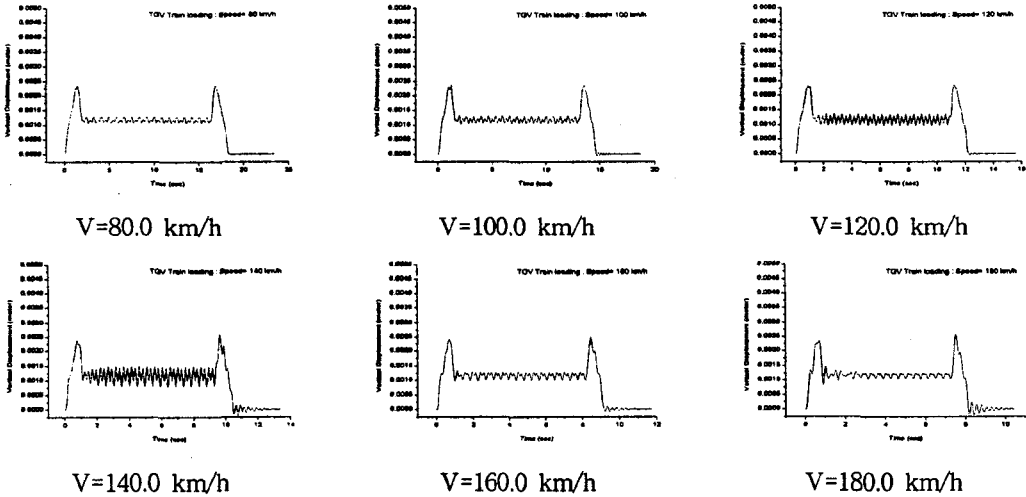


그림 14. 경간중앙점에서의 연직변위

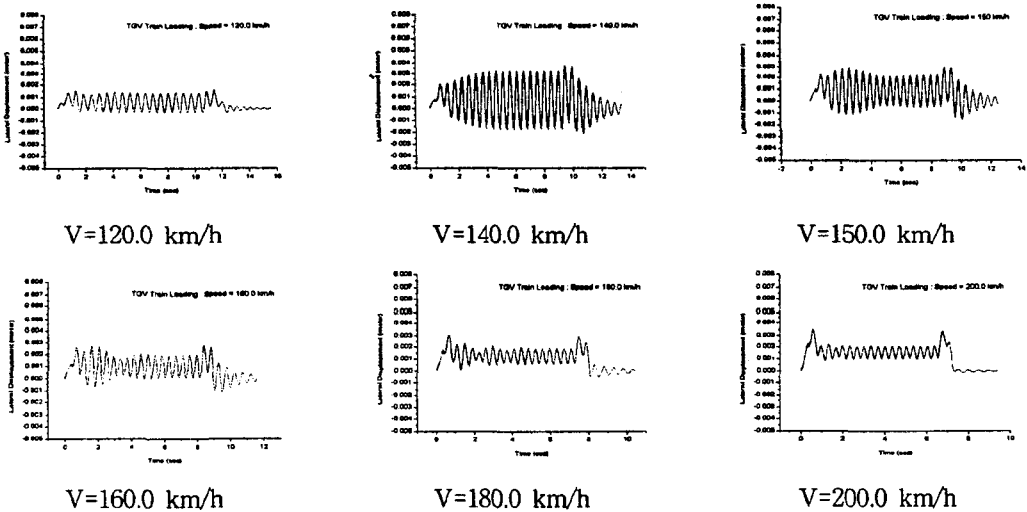


그림 15. 경간중앙점에서의 횡변위

5.4 TGV운행속도평가(UIC비교)

UIC하중재하시 주요본선의 열차운행속도에 따른 충격계수는 다음 식과 같이 모멘트에 대해 i_m , 전단력에 대하여 i_s 로 산출한다.

$$i_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_c - 0.2}} - 0.18 \quad , \quad i_s = \frac{0.96}{\sqrt{L_c - 0.2}} - 0.12 \quad (9)$$

여기서 L_c 는 충격계수를 산정하기 위한 경간길이이다.

고속철도 교량 설계기준중 처짐에 대한 제한을 PC-BEAM교에 적용하면 다음과 같다.

- 최대수직처짐비 제한 : 1/1,700으로 5.882×10^{-4}
- 상판의 최대수평처짐 : 1/4,000 으로 7.08mm

표 4. TGV에 의한 최대동적응답과 UIC정적응답 및 변위의 동적증폭계수

주행 속도 km/h	연직변위		횡변위		처짐제한				충격계수		
					최대수직처짐비 ($\times 10^{-4}$)		상판의 수평처짐				
	TGV	UIC	TGV	UIC	TGV	UIC	TGV	UIC	TGV/UIC	1+i _m	1+i _s
7.2	2.32	7.02	0.222	0.178	0.8192	5.88	0.222	7.080	0.330	1.101	1.161
60	2.35	-	0.529	0.951	0.8298	수직 처짐비 기준을 만족	0.529	수평 처짐기준 을 만족	0.335	충격 에 대해 충분 함	충격 에 대해 충분 함
70	2.37	-	0.644	1.330	0.8369		0.644		0.338		
80	2.35	-	0.772	1.590	0.8298		0.772		0.335		
100	2.37	-	1.040	2.400	0.8369		1.040		0.338		
120	2.35	-	1.580	3.330	0.8298		1.580		0.335		
140	2.59	-	3.750	4.200	0.9145		3.750		0.369		
150	2.50	-	2.980	4.980	0.8828		2.980		0.356		
160	2.50	-	2.780	5.900	0.8828		2.780		0.356		
180	2.58	-	3.070	7.890	0.9110		3.070		0.368		
200	2.66	-	3.570	9.770	0.9393		3.570		0.379		
300	2.92	-	8.470	-	1.0310		*8.470		0.335		
320	2.94	-	9.900	-	1.0380		*9.900		0.338		
340	2.93	-	11.400	-	1.0350	*11.400	0.335				
350	2.97	-	12.170	-	1.0490	*12.170	0.369				
360	2.96	-	13.000	-	1.0450	*13.000	0.356				

6. 요약 및 결론

기존철도교량위를 고속열차가 주행할 경우 교량에서의 동적응답을 고찰하였다. PC-BEAM교의 곡선부를 주행하는 전기기관차 8000호대 2량편성에 대한 현장계측과 수치해석결과는 매우 근접하여 해석에 사용한 프로그램이 적절함을 확인하였다. PC-BEAM교의 고유진동해석결과 교량은 연직방향변위보다 횡방향변위에 민감한 것으로 나타났다. 이로부터 열차의 주행속도증가시 교량의 연직변위뿐만아니라 횡방향변위에 대한 정확한 응답의 평가가 필요함을 알 수 있었다. 일반적으로 궤도의 강성 및 감쇄의 영향을 고려하면 교량에 가해지는 열차의 충격효과가 감소하는 경향이 있

으므로 본 연구에서는 교량에 불리한 하중조건하에서 동적응답을 얻기 위하여 이들의 영향을 제외하였다. 이상과 같은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ▷ 해석대상인 PC-BEAM교는 고유진동해석결과로부터 연직방향에 비하여 상대적으로 횡방향 강성이 낮음을 나타내었다.
- ▷ LS-22하중재하와 전기기관차의 재하결과 PC-BEAM교에서의 처짐이 1/800에 비하여 현저하게 발생하여 사용성은 양호하였다.
- ▷ 전기기관차를 재하시킨 교량에서 연직변위에 공진의 현상은 발견할 수 없었으나 횡변위에 대해서는 열차운행속도 약 80 km/h전후로 하여 열차의 교량통과후 약 2초간 횡진동에 대한 여진현상이 발생하였다. 약 60 km/h의 주행속도까지는 횡방향으로의 공진정후는 나타나지 않았다.
- ▷ TGV열차 20량편성을 재하시킨 교량에서는 주행속도 120 km/h부터 연직진동의 증폭현상이 나타나다 140 km/h근방에서 그 현상이 증가함을 나타내었다.
- ▷ TGV열차재하시 120 km/h이전까지는 횡방향으로의 공진정후는 나타나지 않았으나 120~160 km/h사이에서 공진현상이 나타났으며 140 km/h대에서 가장 큰 공진현상이 나타났다.
- ▷ 기존철도교량의 설계하중인 LS-22하중은 UIC하중의 약 87%정도의 처짐량을 나타내어 UIC 하중이 LS-22하중에 비하여 구조물에 큰 하중임을 나타내었다.
- ▷ TGV열차재하에 따른 PC-BEAM교에서의 연직처짐은 360 km/h까지의 주행속도에 대해서 고속철도 처짐제한을 크게 밑도는 낮은 값을 나타내었으나 횡방향(수평)변위는 300 km/h에서부터 기준을 초과하였다.
- ▷ TGV열차로 인한 동적효과는 고속철도교량의 충격계수에 비하여 현저히 낮은 값을 나타내었다. 그러나 고속주행시 충격에 지대한 영향을 끼치는 요소를 배제하여 해석하였기 때문에 시속 200 km/h미만의 결과만이 어느정도 합리적인 것이라 판단된다.

이상과 같은 결과로부터 결론을 도출하면 다음과 같다.

- 1) 기존철도교량에 TGV와 같은 고속열차가 주행할 경우 구조물 측면에서는 200 km/h까지 안전할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 열차의 주행안전성 및 승차감등을 검토하기 위해서는 주행열차를 이동질량으로 고려하여야 하며 궤도의 동특성이 고려된 상호작용해석이 필요하다.
- 2) 교량의 동적응답결과로부터 열차의 축중크기 및 축중배치에 따라서 공진의 발생이 가능한 주행속도범위가 바뀔수 있으므로 교량 및 차량의 동적안전성을 평가하기 위해서는 고속(200 km/h이상)이 아닐지라도 실차주행에 따른 검토가 필요함을 확인하였다.
- 3) 본 연구에서 개발한 3차원 동적해석프로그램은 기존철도교량의 동적응답을 합리적으로 예측하였으며 실무에의 활용이 가능함을 알 수 있었다.
- 4) 향후 열차의 현가장치에 대한 강성, 감쇄 및 관성특성과 궤도의 동특성을 고려하여 교량과의 3차원 동적상호작용해석을 수행할 경우 좀더 정확하고 신뢰도 높은 열차 주행안전성, 승차감 및 교량의 사용성등에 대한 결과를 얻을 수 있다.

7. 참고문헌

- 1) T.L. Wang et al, 'Railway Bridge/Vehicle Interaction Studies with New Vehicle Model', Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 7, pp. 2099-2116, 1991
- 2) UIC Code, 776-1, Loads to be considered in railway bridge design, International Union of Railways
- 3) UIC Code, 776-2, Bridges for high and very high speeds, International Union of Railways
- 4) UIC Code, 776-3, Deformation of bridges, International Union of Railways