

열차 제동하중을 고려한 차량/교량 상호 작용 해석기법 개발

Development of train/bridge interaction Analysis program Consideration braking

윤희섭*
Yun hee sub

김만철**
Kim Man-Cheol

***한상철
Han sang chel

ABSTRACT

This paper presents the effects of dynamic response of the railway bridge through the suspension system when the train is moving with uniform speed and non-uniform speed. Railway bridges are subjected to dynamic loads generated by the interaction between moving vehicles and the bridge structures. these dynamic loads result in response fluctuation in bridge members. To investigate the real dynamic behavior of the bridge, a number of analytical and experimental investigation should be carried out.

This paper, a train/bridge interaction analysis program considerate braking action. New scheme consideration of braking action on the bridge using speed-dependent braking function is presented. This program also used torsional degree of freedom and constraint equation based on geometrical relationship in order to take into consideration three-dimensional eccentricity effect due to the operation on double track through quasi-three-dimensional analysis.

Keywords: bridge/train interaction, braking force

1. 서론

중량의 차량이 고속으로 교량을 주행할 경우 열차와 교량의 상호작용으로 인하여 교량의 각부는 동적인 효과를 받게 된다. 이러한 동적인 효과는 교량 각 부재에 충격과 피로를 유발하고, 교량의 잔존 수명에 영향을 미치게 되며, 기존 재래선의 일반 열차와는 상이한 진동 특성을 보여줄 것이다. 따라서, 고속 철도 교량의 구조적 안정성 및 주행 안정성, 승차감을 확보하기 위해서는 열차/교량의 상호 작용을 고려한 고속 철도 주행에 따른 교량의 정확한 동적 특성을 분석하는 것이 매우 중요하다. 교량의 동적 특성에 영향을 주는 요소는 차량의 동적특성(중량, 현가 장치, 축의 개수와 축간 거리등), 차량의 주행방법(등속주행, 비등속 주행), 노면상태등이 있으나, 본 연구에서는 차량의 주행 방법 중 등속 주행과 비등속 주행시 교량에 미치는 영향에 대하여 연구 하였다.

국내에서 열차/교량 상호작용에 관한 연구는 경부고속철도 사업이 시작되면서부터 김만철, 양신추등에 의해 2차원해석모델을 이용한 연구가, 김성일, 곽중원, 박홍석등에 의해 3차원 해석 모델을 이용하여 철도 차량을 고려한 동적 해석 연구가 수행 되었다.

* 정회원: 서울 산업대학교 철도전문대학원 석사과정

** 정회원: 철도기술연구원 선임연구원

***정회원: 서울산업대학교 토목공학과 교수

이번 연구에서 관심이 있는 비등속 주행에 관한 연구로는, 국외에서는 유럽의 ORE(Office for Research and- Experiments of the international Union of Railways)의 D101위원회에 의해서, 1976~1979년까지 교량에서의 제동과 가속력에 관한 연구가 수행 되었으며, 국내에서는 김성일, 곽종원등에 의하여 수행되었다.

본 논문에서는 김성일, 곽종원등에 의해 연구 되었던 속도 의존적 마찰 계수(Braking Function Dependent on the Speed)를 사용하여 제동함수를 표현 하였으며 제동위치, 열차 초기 속도등의 변수를 두어 교량 상판의 수직변위와, 응력을 검토 하였다.

2. 차량/교량 상호 작용 해석 프로그램

2.1 교량 모델링

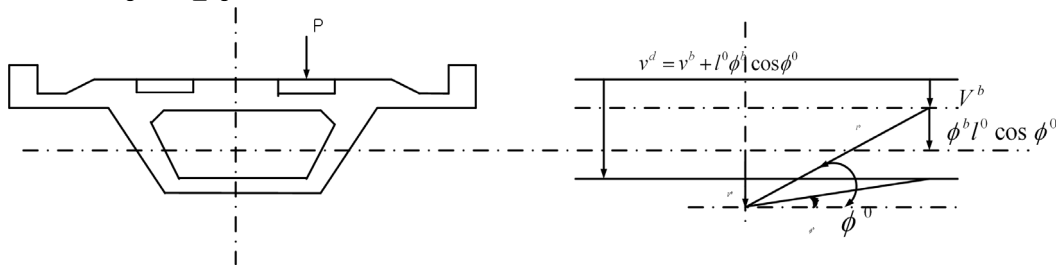


그림 1 교량의 축하중 편심모델

본 연구에서는 유한요소를 사용하여 교량의 주 부재를 모델링 하였다. 요소당 2개의 절점 당 4개의 자유도(를 가진 보 요소를 사용 하였다. 철도교량은 복선으로 건설되어 차량 주행에 의한 편심에 의한 비틀림 모멘트가 발생하게 된다. 따라서 그림1과 같은 철도교량의 상판에 궤도가 복선으로 부설된 경우에는 차량의 편심을 고려하여 해석하여야 한다.

v^b 는 2차원 보요소의 도심에서의 절점변위이며, θ^b 는 회전, ϕ^b 는 비틀림 변위이다.

차량이 주행하는 위치의 교량 상판 변위 v^d 는 교량의 도심에서의 연직변위 v^b 와 교량의 비틀림에 의한 추가적인 변위 v^i 의 합으로 나타내었다. 교량의 비틀림(ϕ^b)이 강제 운동을 하고, 그 양이 모소 하다고 가정하면 기하학적인 조건에 의해 v^d 는

$$v^d = l^0 \sin \phi^0 - l^0 \sin(\phi^0 - \phi^b) \dots \dots \dots (1)$$

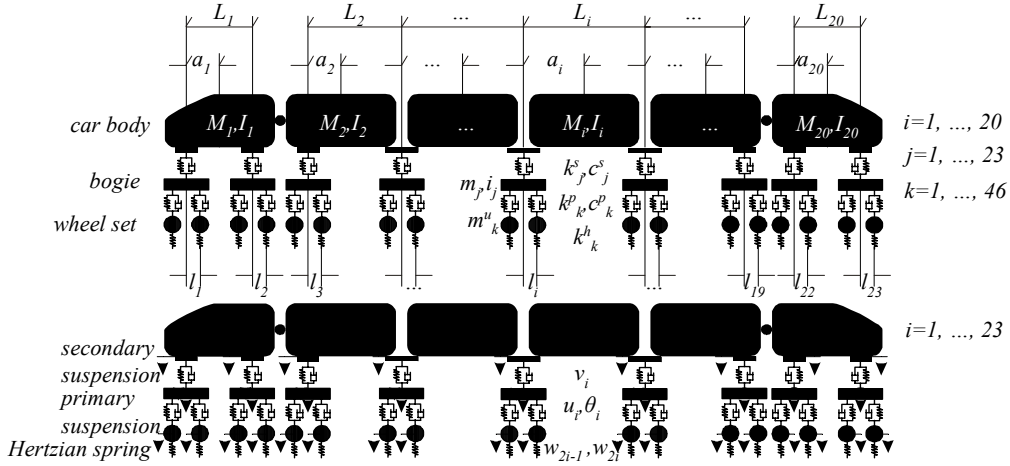
$$= \phi^b l^0 \cos \phi^0$$

여기서, a 는 도심, l^0 는 도심 a 에서 하중 P가 작용하는 지점 까지의 거리이고 ϕ^0 는 중립축과 도심 a 에서 하중 P가 작용하는 지점 까지의 선이 이루는 각이다 따라서, 임의의 위치 x_i 에서 차량이 주행하는 위치에서 교량 상판 변위 v^d 는 $v^d(x_i) = v^b(x_i) + \phi^b(x_i) \cos \phi^0$ 이다.

2.2 열차 모델링

고속철도 차량은 2PC+ 2MT+ 16IT시스템으로 2량의 동력차와 2량의 동력 객차 16량의 객차로 구성되어있으며, 총 20개의 본체와 23의대차, 46개의 윤축으로 구성되어 있다. KTX 차량의 가장 큰 특징은 2개의 동력대차가 사용되지만, 동력 객차와 객차의 연결과 객차와 객차 사이의 연결에 있어서 차체의 유동성이 증속되는 관절형 대차가 사용된다는 것이다.

관절형 대차를 사용함으로써 열차가 유기적으로 연결되어 차체의 독립적인 거동을 막아줌으로써 기존 열차에 나타나던 진동 현상을 억제한다.



한국 고

그림 2 KTX 차량 모델

본 논문에서는 그림 2와 같이 2차원으로 모델링 하였다.

모델링에서 차체의 연직 자유도와 피칭대차의 연직과 피칭 그리고 윤축의 연직자유도를 고려하였다.차량의 지배방정식을 유도하기 위하여 라그랑지안 방정식(Lagrange`sequation)을 사용하였다.

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{g}_i} \right\} - \left\{ \frac{\partial T}{\partial g_i} \right\} + \left\{ \frac{\partial V}{\partial g_i} \right\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial \dot{g}_i} \right\} = q_i \dots\dots\dots (2)$$

T는 운동에너지, V는 변형에너지, D는소산에너지를 의미하며 g_i 는 변위 q_i 는 하중을 의미한다.

전방 동력차의 운동에너지와 변형에너지, 소산에너지는 다음 식과 같다

$$T = \frac{1}{2} \left\{ M_1 \left(\frac{(L_1 - a_1)\dot{v}_1 + a_1\dot{v}_2}{L_1} \right)^2 + I_1 \left(\frac{\dot{v}_1 - \dot{v}_2}{L_1} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^2 (m_i \dot{u}_i^2 + i_i \dot{\theta}_i^2) + \sum_{i=1}^4 m_i^u \dot{w}_i^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 k_i^s (y_i^s)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 k_i^p (y_i^p)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 k_i^h (y_i^h)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=3}^{21} c_i^s (\dot{y}_i^s)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=5}^{42} c_i^p (\dot{y}_i^p)^2$$

동력객차 및 객차의 운동에너지와 변형에너지, 소산에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=2}^{19} \left\{ M_i \left(\frac{(L_i - a_i)\dot{v}_{i+1} + a_i\dot{v}_{i+2}}{L_i} \right)^2 + I_i \left(\frac{\dot{v}_{i+1} - \dot{v}_{i+2}}{L_i} \right)^2 \right\} + \sum_{i=3}^{21} (m_i \dot{u}_i^2 + i_i \dot{\theta}_i^2) + \sum_{i=5}^{42} m_i^u \dot{w}_i^2 \right] (5)$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=3}^{21} k_i^s (y_i^s)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=5}^{42} k_i^p (y_i^p)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=5}^{42} k_i^h (y_i^h)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=3}^{21} c_i^s (\dot{y}_i^s)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=5}^{42} c_i^p (\dot{y}_i^p)^2 \dots\dots\dots (7)$$

후방 동력차의 운동에너지와 변형에너지, 소산에너지는 다음 식과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \left\{ M_{20} \left(\frac{(L_{20} - a_{20})\dot{v}_{22} + a_{20}\dot{v}_{23}}{L_{20}} \right)^2 + I_{20} \left(\frac{\dot{v}_{22} - \dot{v}_{23}}{L_{20}} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=22}^{23} (m_i \dot{u}_i^2 + i_i \dot{\theta}_i^2) + \sum_{i=43}^{46} m_i^u \dot{w}_i^2 \right\} \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=22}^{23} k_i^s (y_i^s)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=43}^{46} k_i^p (y_i^p)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=43}^{46} k_i^h (y_i^h)^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=22}^{23} c_i^s (\dot{y}_i^s)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=43}^{46} c_i^p (\dot{y}_i^p)^2 \dots\dots\dots (10)$$

여기서, M 과 I 는 차체의 질량과 회전관성, m 과 i 는 대차의 질량과 회전관성을 그리고 m^u 는 윤축 질량을 의미하고 있다. k 와 c 는 각 요소의 스프링과 감쇠를 나타내고, 상첨자 s 는 이차 현가장치, p 는 일차 현가장치를 그리고 h 는 접촉강성을 의미하고 있다.

2.3 차량 제동

본 논문에서는 열차의 속도에 따른 제동하중을 얻기 위하여 (식 12)의 속도의존적 마찰함수(Braking Function Dependent on the Speed)를 사용하여, 등속 주행시 교량에 작용하는 수직 하중외에 비등속 주행시 교량에 작용하게 되는 추가 종방향 하중을 고려하였다.

열차의 갑작스런 제동에 의해 발생하는 추가 종방향 하중은 식과 같다

$$F_B(v) = mg\mu(v) + \frac{1}{2} C_D A_f \rho v^2 + mgG \dots\dots\dots (11)$$

여기서, C_D (항력계수), A_f (차량 앞 면적) ρ (공기 밀도), G (구배)이며, 항력과 구배는 영향이 적으므로 무시하면, 레일에 부가되는 제동하중은 $F_B(v) = mg\mu(v)$ 이다.

마찰계수 μ 는 식 12과 같이 속도의 영향을 받는 속도 의존적인 함수이다.

$$\mu(v) = c_1 \frac{1 + c_2 v}{1 + c_3 v} \dots\dots\dots (12)$$

c_1, c_2, c_3 차량의 종류에 따라 변하는 계수로서 표 1에 나타내었다.

표 1

Type of the Train	c_1	c_2	c_3
Diesel Power car	0.265	0.114	0.15
Alternative Current Electric Power Car	0.326	0.279	0.369
Electric Power Car	0.245	0.050	0.100

3. 예제 해석

경부 고속철도의 대표적인 교량 형식인 PC박스 교량을 선정 하여 예제 해석을 수행 하였다. 대상 교량은 2경간 연속교로 각 경간 길이는 40m이며 교량의 제원은 표 2에 나타내었다.

표 2 대상교량제원

단면	1	2	3	4	5	6	7
단면적 A	12.26	13.33	15.99	15.73	24.10	13.99	14.53
단면 2차 모멘트 I_{33}	20.40	21.23	23.26	24.38	28.76	22.39	22.80
단면 등가 단위 중량 ρ_{eqi}	0.342	0.335	0.322	0.323	0.299	0.331	0.329
기타	$\rho_b = 0.1939, A_b = 5.5m^2, \rho = 0.2551 E = 3.52 \times 10^6$ $\xi = 0.024, \nu = 0.2$						

대상교량에 대하여 고유치 해석을 실시한 결과 첫 번째 고유치 4.18539Hz, 두 번째 고유치 6.58563Hz를 얻을 수 있었다.

그림 3과 4는 각각 Moving Mass 와 Moving Force해석에 의한 1경간과 2경간 경간 중앙부에서 각 속도에 따른 교량 상판의 최대 수직 변위를 나타낸 것이다.

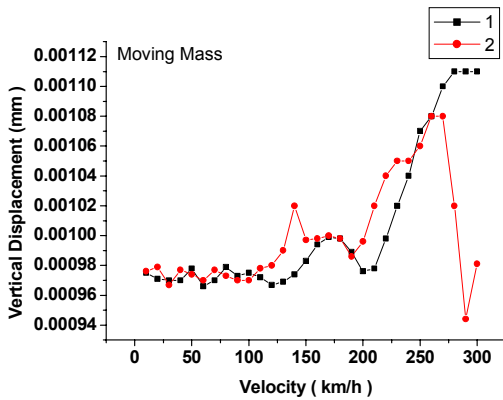


그림 3 Moving Mass 해석

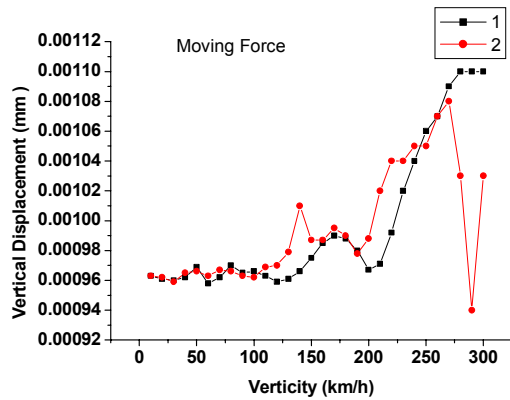


그림 4 Moving Force 해석

그림 3과 4에서 280km/h에서 수직 변위의 변화는 교량의 임계속도와 관계가 있다. 임계속도란, 교량의 임의의 지점에 대해 차량이 일정한 속도로 주행하는 경우 유효 타격거리와 속도의 함수인 0 일정한 타격주기로 교량을 가진 하는데, 이러한 가진주파수와 교량의 고유진동수가 일치 하는 경우 공진 현상이 나타나 교량에 불안정한 동적 거동을 유발 하는 현상을 나타내는 속도를 말한다. 임계속도는 $V_{cr} = \omega_1(H_z) \times d_{eff} \times 3.6$ KTX의 유효타격거리는 18.7m이므로 대상 교량의 임계속도는 281km/h이다.

교량상 열차의 비등속 주행에 따른 영향을 보면, 표 3에서 열차의 제동 위치에 따른 연직 변위의 증가량을 알수 있다. 열차의 제동으로 인하여 종방향 변위가 발생하게 되며, 첫 번째 경간 중앙부에서는 연직 방향 변위가 조금 감소 하거나, 변화가 없는 반면,, 두 번째 경간 중앙부에서는 연직 방향 변위가 증가하는 것을 알수 있다.

제동 지점	첫 번째 경간 중앙점 변위				두 번째 경간 중앙점 변위			
	종방향 변위	연직 변위		연직변위 증가량	종방향 변위	연직 변위		연직변위 증가량
		제동	비제동			제동	비제동	
0	0.0078437	1.111954	1.112523	-0.05%	0.0076193	1.083955	0.9814666	10.44%
0.25L	0.0078318	1.112153	1.112523	-0.03%	0.0076166	1.095956	0.9814666	11.67%
0.5L	0.0096811	1.112523	1.112523	0%	0.0076227	1.104651	0.9814666	12.55%
0.75L	0.0096226	1.112523	1.112523	0%	0.0090946	1.108200	0.9814666	12.91%

표 3 제동 위치별 경간 중앙부 수직 처짐

열차의 초기 속도를 변수(200~300km/h)로 두고 교량상 0.75L지점에서 열차의 제동을 설정 하여 그영향을 살펴 보았다. 그림 5에서 보는것과 같이 열차의 속도를 증속 시키면서 0.75L지점에서 제동을 설정 하였을때 열차의 초기 속도는 경간 중앙부 연직 처짐에는 아무런 영향을 미치지 못하였다.

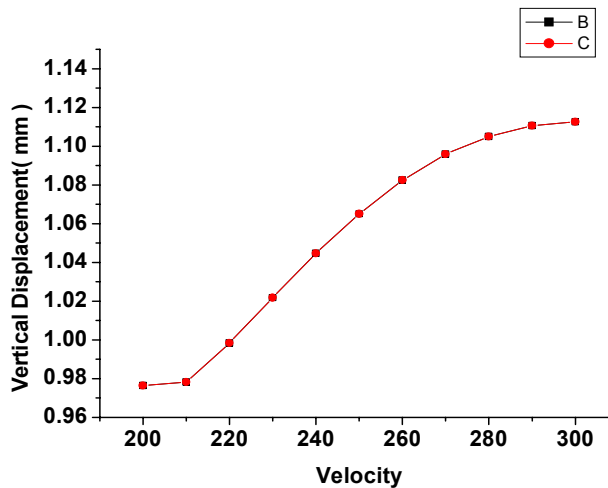


그림 5 경간중앙 연직 변위

3. 결론

본 논문에서는 속도의존적 마찰함수(Braking Function Dependent on the Speed)를 사용하여, 등속 주행시 교량에 작용하는 수직 하중외에 비등속 주행시 교량에 작용하게 되는 추가 종방향 하중을 고려하여 교량의 거동을 해석 하였다. 열차의 비등속 주행시 제동 지점에 따라, 교량/열차 상호 작용시 교량연직 변위에 미치는 영향이 달라지는 것을 확인 하였으며 제동시 초기속도는 교량과의 상호 작용해석시 교량 상판의 연직 변위에는 큰 영향을 미치지 않는다

참고 문헌

1. 김성일, 곽종원, 장승필. " 3차원 관절형 고속열차 모델을 이용한 교량/열차 상호작용해석", 대한 토목학회 논문집 , 제 19권 , 제 I~4호, 1999, pp. 648~666
2. 박홍석, "개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구", 연세대학교, 박사논문, 1998.
3. 최창근, 송명관, 양신추, " 고속철도차량(TGV)-교량 상호작용의 단순화된 3차원해석모델 ", 한국전산구조공학회 논문집 , 제 13권 제 2호 , pp. 165~178
4. 김만철, "고속철도 교량의 동특성 해석을 위한 준 3차원 차량/궤도/교량상호작용 해석 기법의 개발", 한국 전산구조공학회 논문집, 1229~3059, 제 16권 2호 ,pp.141~151.2003
5. c.Esveld.Modern Railway Track, MRT-Pro-ductions, pp.24, 121~122
6. K.J. Bathe. Finite Element Procedures. Prentice Hall, 1996, p 797
7. 곽종원.(1997). 차량의 제동을 고려한 교량의 동적거동. 박사학위논문. 서울대학교