

차량의 제동이 교량에 미치는 영향



곽 중 원*

1. 서 론

1950년대부터 이동하중에 의한 교량의 수직방향 거동에 관한 연구가 이루어져 왔으나 차량의 제동에 의한 교량의 수직거동과 종방향거동에 관한 연구는 1970년대에 들어서 일부 연구자들에 의해서만 수행되어 왔다. 1972년부터 Kishan (1972, 1973), Gupta (1978), 그리고 Mulcahy (1983) 등은 일정속도로 이동하는 차량과 차량의 제동에 의한 교량의 동적거동에 관한 연구를 수행하였다. 차량의 제동에 관한 연구는 기계공학적인 관점에서 자동차의 제동거리에 관심을 갖고 있는 타이어분야에서 주로 수행되어 왔다.

차량의 제동에 의한 기존의 연구는 차량의 bounce와 pitch에 의한 차량의 거동특성에 따른 고려만이 이루어져 왔으며 교량의 수직방향 offset에 의한 고려는 이루어지지 않았다. 여기서 교량의 offset이란 교량의 주형과 상관 그리고 교좌부의 중심간에 수직방향 높이의 차이를 말하며, 차량의 제동이 발생할 때 이러한 offset에 의

한 추가적인 휨거동이 발생하므로 이러한 offset을 고려하여야 한다. 아울러 고속철도와 같은 중차량의 경우에는 교각의 상대적인 강성에 의한 효과도 고려되어야 할 것이다.

차량의 제동은 일반적으로 제동함수(braking functions) 또는 제동특성함수(braking characteristics functions)를 사용하여 그 거동을 구현하게 된다. 이러한 제동함수는 차량의 제동이 발생하는 경우에 차량의 타이어와 교량의 포장사이의 마찰력에 의해서 교량에 전달되는 제동력을 시간의 함수로 표현하게 된다. 기존의 국외 연구와 근래에 들어서 수행된 연구에서는 계단형 제동함수(step-type braking function)를 적용하여 왔으나 근래에 들어서 속도 의존적인 제동함수를 적용하는 사례가 늘고 있다.

2. 제동함수

2.1 계단형 제동함수(step-type braking function)

계단형 제동함수는 1970년대에 호주의 N.S.W

* 서울대학교 공학연구소 특별연구원

대학에서 Gupta를 중심으로한 연구자들이 처음으로 차량의 제동에 의한 교량의 동적거동 연구에 영국의 TRRL (Transport and Road Research Laboratory) 실험결과를 적용하였다. 이러한 제동함수는 그림 2.1에서 보이는 바와 같이 제동이 시작되는 시점으로부터 일정시간을 경과하여 완전한 제동력이 교량에 전달되기 시작하여 차량이 정지를 하거나 교량을 완전히 이탈할 때까지 제동력이 교량에 종방향력으로 작용한다는 개념이다. 제동력이 완전하게 발현되기까지 걸리는 시간을 제동발현시간(rising time ; t_r)이라고 하며 완전한 제동력이란 차량에 의한 최대정지마찰력에 의해서 전달되는 마찰력을 말한다. 이러한 제동발현시간과 최대제동력은 차량의 특성치에 의존하며 Gupta의 연구에서는 차량자중의 60%를 사용하였다. 이러한 제동함수를 수학적으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_B(t) = \begin{cases} \mu(t)P(t) & (t_i \leq t \leq t_r) \\ \mu(t_r)P(t) & (t_r \leq t \leq t_s) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $\mu(t)$ 는 0부터 $\mu(t_r)$ 사이의 값을 갖는 마찰계수이며 일반적으로 선형으로 가정한다. $P(t)$ 는 임의의 시간 t 에서의 연직 축하중, t_i , t_r 그리고 t_s 는 제동시작 시간, 제동발현시간, 그리고 정지시간이다.

계단형 제동함수를 사용한 제동력은 제동이 시작되는 시점으로부터 일정수준의 제동력에 도달할 때까지 선형적으로 증가를 하다가 발현시간이 후에는 그 제동력을 차량이 정지할 때까지 계속 유지하게 된다[Gupta (1978)].

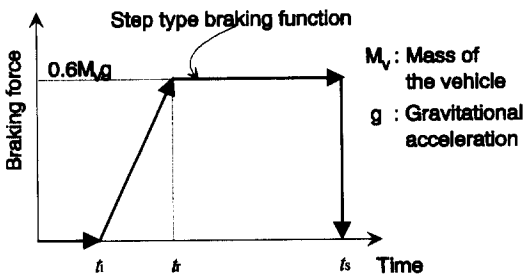


그림 2.1 계단형 제동함수

2.2 속도 의존적인 제동함수(speed-dependent braking function)

차량의 제동특성에 관한 연구는 교량의 동적거동에 관심을 갖는 분야 뿐 아니라 차량의 기계적인 진동문제와 제동거리에 관심을 갖는 기계공학적인 관점에서도 연구가 진행되어왔다. 차량의 제동거리에 관한 연구에서는 그림 2.2와 같이 차량의 바퀴와 노면간의 속도 의존적인 동마찰계수를 사용하고 있다[Henry (1986)].

타이어-포장간의 상호작용에 관한 ASTM의 실험적인 연구에서는 동마찰계수가 속도 의존적이라는 결과를 보여주었으며 이러한 마찰계수와 속도간의 관계를 규정하는 함수를 도출하여 이를 차량의 제동에 의한 교량의 동해석에 사용할 수가 있다.

노면에 작용하는 제동력 F_B 는 차량의 롤링효과를 무시하는 경우에 임의의 시간 t 에서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

$$= ma = -mv \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

여기서,

- m : 차량의 질량 (Kg),
- g : 중력가속도 (m/sec²),
- C_D : 드래그 (drag) 계수,
- A_f : 차량의 앞부분 단면적 (m²),

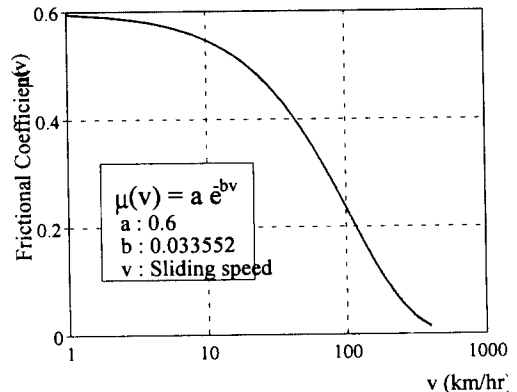


그림 2.2 속도의존형 제동함수

ρ : 상온에서의 대기 밀도 (kg/m^3),
 G : 노면의 종방향 구배,
 a, v : 차량의 진행방향 가속도 (m/sec^2) 와 속
 도 (m/sec),
 x : 제동이 시작되는 지점으로부터 진행방향
 으로의 거리 (m)

종방향 구배와 공기저항을 무시하는 경우에 차
 량의 제동거리는 다음과 같은 식으로 표현할 수
 있다.

$$dx = -\frac{1}{g\mu(v)}dv \quad (3)$$

마찰계수 $\mu(v)$ 를 속도의 함수로써 다음과 같
 이 표현된다.

$$\mu(v) = ae^{-bv} \quad (4)$$

여기서 a 는 정적 마찰계수를 의미하고 감소지
 수 b (sec/m)는 바퀴가 접하는 노면의 상태에 관
 계되는 실험치이다. 식 (3)과 식 (4)를 이용하고
 x_{i-1} 부터 x_i 까지 적분을 수행하면

$$\begin{aligned} \int_{x_{i-1}}^{x_i} dx &= -\frac{1}{g} \int_{v_{i-1}}^{v_i} \frac{v}{\mu(v)} dv \\ &= -\frac{1}{ag} \int_{v_{i-1}}^{v_i} e^{bv} v dv \\ &= -\frac{1}{ab^2g} [e^{bv_i}(bv_i-1) - e^{bv_{i-1}}(bv_{i-1}-1)] \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 여기서 v_{i-1} 와 v_i 는 위치 x_{i-1} 와 x_i 에서
 의 속도이다.

x_{i-1} 와 x_i 에서 평균적인 의미의 일정 유효마찰
 계수 $\bar{\mu}_{i-1}$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} dx = -\frac{1}{g} \int_{v_{i-1}}^{v_i} \frac{v}{\bar{\mu}_{i-1}} dv$$

$$= -\frac{1}{2g\bar{\mu}_{i-1}} (v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)으로부터 평균유효마찰계수는
 다음과 같다.

$$\bar{\mu}_{i-1} = \frac{(v_i^2 - v_{i-1}^2)ab^2}{2[e^{bv_i}(bv_i-1) - e^{bv_{i-1}}(bv_{i-1}-1)]} \quad (7)$$

대표적인 속도 의존적인 마찰계수는 그림2.2에
 보여주고 있다.

3. 제동함수에 따른 교량의 동적응답

계단형 제동함수와 속도의존형 제동함수를 사
 용한 차량의 제동하중에 의한 교량의 동적거동
 해석을 수행한 결과, 두 제동함수에 의한 응답은
 차량이 교량에 진입하기 전에 제동을 하는 경우
 에 서로 다른 양상의 결과를 보여준다(그림 3.1
 참조). 계단형 제동함수를 사용한 경우에 교량의
 중앙 구간에서의 휨모멘트에 의한 DMF는 1.0을
 초과하는 결과를 보이거나 속도 의존적인 제동함수
 를 사용한 경우에는 1.0미만의 DMF를 보이고
 있다. 이는 교량의 진입 전에 제동을 거는 경우
 에 초기의 마찰력에 있어서 차이를 갖는 결과라
 고 생각된다. 일반적으로 계단형 제동함수를 사
 용하는 경우에 더 큰 응답을 보이는 경향이 있다
 (곽종원 1997).

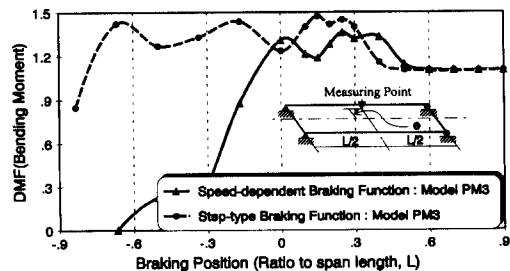


그림 3.1 제동함수 종류에 따른 교량의 응답

참 고 문 헌

1. Gupta, R.K., "The effects of acceleration and braking of vehicles on the dynamic loading of highway bridges", thesis presented to University of New South Wales, at Sydney, Australia, in 1978. in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
2. Henry, J.J., "Comparison of the friction performance of a passenger car tire and the ASTM standard test tire,," IABSE Proceedings P-97/86, May 1986, pp 219-231.
3. Kishan, H., "Dynamic loading of multispan highway bridges", Ph.D Thesis, The University of New South Wales, Australia, Dec., 1972.
4. Kishan, H. and Traill-Nash, R.W., "Calculation of response and loading of highway bridges from modal coordinate," IABSE, Pub. Vol. 33-II, Zurich, 1973.
5. Mulcahy, N.L. et al, "Vehicle properties for bridge loading studies", IABSE Proceedings P-65/83, March, 1983. pp 153, 167.
6. 곽종원, "차량의 제동을 고려한 교량의 동적 거동", 공학박사학위논문, 서울대학교, 1997년 2월. 