

고무차륜 경전철 차량의 시·제동으로 인한 교량의 하중 효과 분석

채수호¹ · 신정열² · 최상현^{3*}

¹석사과정, 한국교통대학교 철도공학부, ²책임연구원, 한국철도기술연구원,
³교수, 한국교통대학교 철도공학부

Analysis of Load Effects of a Bridge by Accelerating and Braking Forces of Rubber Wheeled LRT

Chae, Sooho¹, Shin, Jeong-Ryol², Choi, Sanghyun^{3*}

¹Graduate Student, School of Railroad Engineering, Korea National Univ. of Transportation, Uiwang, 16106, Korea

²Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 16105, Korea

³Professor, School of Railroad Engineering, Korea National Univ. of Transportation, Uiwang, 16106, Korea

Abstract - Currently in this country, a bridge structure for the LRT (light railway transit) is designed and constructed based on specifications from foreign vehicle manufacturers or existing design codes for a heavy railway transit, due to the lack of domestic design codes for the LRT. Therefore, in order to design and construct the structure for the LRT more efficiently and economically, it is necessary to establish the design standards for exclusively LRT structures reflecting the domestic environment and the characteristics of vehicles in operation. In this paper, a numerical study is conducted to investigate the effects of various influence parameters on the longitudinal loads to a bridge structure when an AGT vehicle with rubber-wheels is braked and accelerated. For the purpose of the study, flexible multibody dynamic analysis is performed using a commercial finite element analysis program, ABAQUS. The numerical analysis results shows that the acceleration and braking load is influenced by the acceleration position, the braking position, the running speed, and the coefficient of friction between the rubber wheel and the running surface of a structure.

Keywords - Acceleration and braking, LRT, AGT, Longitudinal load, Bridge

1. 서론

노면전차, 모노레일, AGT(automatic guideway transit), LIM(linear induction motor), 자기부상열차, 트로리버스 등 경전철(LRT: light rail transit)시스템은 기존 도시철도 시스템에 비하여 보다 경제적으로 건설 및 운영이 가능하여 최근 도심지 교통시스템으로 선호되고 있다. 경전철시스템은 현재 전세계적으로 130여 개의 노선이 운영되고 있으며, 국내의 경우 2011년 김해경전철을 시작으로 본격적으로 건설

이 시작되어 용인, 의정부, 부산, 대구 등의 지자체에서 운영 하고 있으며, 서울, 광주, 인천 등에서 건설을 계획 중이다.

현재 국내에서 운영 중인 경전철시스템의 노반구조물은 대부분 교량으로 건설되었으나, 경전철 교량에 대한 국내 설계기준이 별도로 마련되어 있지 않고 기존 국내 철도설계기준을 참고하여 설계되어 다수의 교량이 거더 높이가 높고 단면이 큰 육중한 기존 중전철 고가구조물 형태로 건설되어 있어 도시 미관을 해치고 있다. 따라서 보다 효율적이고 경제적인 경전철 교량의 설계 및 건설을 위해 국내 환경과 경전철 차종 특성을 반영한 설계기준 마련이 필요한 상황이다^[1].

경전철시스템은 운용하는 차량에 따라 구분할 수 있으며, 차륜이 있는 AGT, LIM 등과 자기부상열차가 있다. 차륜이 있는 시스템의 경우 고무와 철제차륜 차량으로 구분할 수 있다. 철제차륜이 있는 차량의 경우 레일을 따라 원추형 차륜이 차량을 조향하고 안내하는 반면, 고무차륜 경전철

Note.-Discussion open until October 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 20, 2020; revised March 29, 2020; approved on March 29, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-460-0560 Fax. +82-31-462-8205

E-mail. schoi@ut.ac.kr

차량은 고무타이어가 도로와 유사한 주행 궤도면을 주행하고, 대차의 안내프레임에 설치된 안내륜이 주행궤도 측벽에 설치되는 안내레일을 따라 주행하면서, 차량의 안내 및 조향을 수행한다^[2]. 또한 고무차륜형 경전철은 기존의 중량전철에 비해 규모와 용량이 30% - 50% 정도이며, 차량 크기에 제한이 있어 2량 - 6량으로 편성되어 운용되고 있다^[3]. 이 연구에서는 접촉을 고려한 다물체해석을 이용하여 고무차륜형 경전철 차량의 시·제동에 의하여 교량시스템에 작용하는 종방향 하중에 대한 연구를 수행하였다.

주행 중인 차량의 시동 또는 제동은 교량에 동적응답을 유발하며, 관련 연구는 1962년에 American Association of State Highway Transportation Officials(AASHTO)가 수행한 시험도로 조사 이래, 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔다. Kishan and Traill-Nash^[4]는 차량의 제동을 고려하여 도로교량의 동적응답을 검토할 경우 설계기준보다 높은 충격하중이 산정될 수 있음을 보였다^[5]. Machidai and Matsuura^[6]는 이론적인 연구와 현장실험을 통하여 철도차량이 교량 위를 주행할 때, 교량의 동적거동은 주행속도, 레일의 조도 성분 등을 포함한 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는다는 것을 확인하였다. Srinivas *et al.*^[7]은 철도 차량이 교량 위에서 정속 및 비정속 주행하는 경우, 교량에서 발생하는 시·제동 하중을 실험적으로 산정하였다. 검토 결과 설계 시·제동 하중은 계측된 시·제동 하중에 비하여 상당히 큰 것으로 분석되었다. Bettazzi and Dumêt^[8]은 철도 차량이 교량 위에서 제동할 때, 교각에서 계측된 변형률을 이용하여 제동하중을 산정하였다. 산정된 제동하중을 NBR 7187, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) 및 Eurocode의 설계 제동하중과 비교한 결과 설계 제동하중에 비하여 상당히 작은 것으로 나타났으며, 설계 제동하중은 상당히 보수적인 것으로 분석하였다.

국내의 경우 Kwark and Chang^[9]은 수치해석을 이용하여 견인 트레일러(tractor-trailer)가 도로교량 위에서 제동할 때, 교량의 거동을 분석하였다. 이 연구에서는 마찰력 기반 제동함수와 속도 기반 제동함수를 적용하였을 때, 교량의 거동을 비교하였다. 또한 차량모델의 구름효과는 교량의 수직방향 동적응답에 대하여 무시가 가능하며 100 km/h 이하로 주행할 때 교량은 제동에 의한 영향을 받는 것으로 분석되었다. Yun *et al.*^[10]은 속도 기반 제동함수를 사용하여 철도차량이 등속 주행 시 교량에 작용하는 수직 하중과 비등속 주행 시 교량에 작용하는 추가 시·제동 하중 및 교량

의 거동을 수치해석을 이용하여 산정하였다. 열차의 비등속 주행 시 제동 지점에 따라, 교량연직 변위에 미치는 영향이 달라지는 것을 확인하였으며 제동 시 초기속도는 교량 바닥판의 연직 변위에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. Kim and Yang^[5]은 수치해석을 통하여 철도차량의 제동 및 궤도의 조도가 교량의 동적 거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 차량이 교량에 진입 후, 제동위치가 시간의 1/4이 되는 지점에 도달하였을 때 교각의 수직반력이 최댓값을 갖는 것으로 나타났으며 열차의 속도가 증가함에 따라 상부구조의 연직변위, 휨모멘트 그리고 수직반력에 대한 충격계수는 조도성분보다는 제동하중에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 현재까지 수행된 국내외 연구는 대부분 일반철도에 대한 연구로 경량이며 고무차륜 차량을 운용하는 경전철시스템에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 상황이다.

일반 철도차량과는 달리 경전철이 주행하는 교량의 동적 거동에 관한 연구는 최근에 들어와서 제한적으로 수행되었다. Shin *et al.*^[11]은 경전철 교량의 주요 설계인자인 충격계수, 차량 횡하중에 대하여 구조물의 규모 및 공사비에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Shin *et al.*^[11]은 동적주행 시험을 통하여 고무차륜형 경전철 교량의 충격계수를 산정하였다. 시험대상 교량에 적용된 도로교 설계기준상 충격계수가 18.5%인 것에 반하여, 계측을 통하여 산출된 충격계수는 직선부에서 최대 8.2%인 것으로 나타나 현재 설계기준에 제시된 충격계수 설계식을 완화하는 것이 가능할 것으로 판단하였다. 이후 Shin *et al.*^[12]은 현장계측을 통하여 고무차륜형 경전철이 정속주행 시 발생하는 교각 변형률과 제동 시 발생하는 교각 변형률의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 가동단 받침의 마찰력에 의해 일부 시·제동력이 가동단 교각에도 작용하는 것으로 나타났으나, 고정단 교각이 가동단 교각에 비해 상대적으로 더 큰 제동에 의한 압축 변형률이 발생하는 것을 확인하였다. 열차주행속도에 증감에 따른 제동 시 교각의 변형률에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. 또한 계측시험 데이터와 수치해석을 통해 최대 제동하중은 축당 2.6 kN(축중의 4.3%)을 도출하여 고무차륜형 경전철 교량의 설계 제동하중에 대해 완화가 가능할 것으로 분석하였다. 그러나 실험결과에 기반한 연구이므로 마찰계수, 시·제동 위치, 속도 변화 등의 변화에 따른 교량 거동에 대한 검토는 수행되지 않았다.

일반적인 철도차량이 교량 위에서 시동 또는 제동하는 경

우, 교량에서 발생하는 시·제동 하중에 대한 해석 및 실험적인 연구가 국내외적으로 지속되어 왔으나, 경전철 교량에 발생하는 시·제동 하중의 관한 연구는 미흡한 상황이다. 이 연구에서는 수치해석을 이용하여 고무차륜형 AGT 차량이 교량 상에서 제동 또는 시동하는 경우, 교량에 발생하는 시·제동 하중 효과에 대하여 검토하였다.

2. 차량의 제동이론

고무차륜 차량의 제동은 일반적으로 제동함수(braking function)를 사용하여 거동을 구현하게 된다. 이러한 제동함수는 차량의 제동이 발생하는 경우, 차량의 타이어와 주행면간의 마찰력에 의해서 발생하는 제동력을 시간의 함수로 표현하게 된다. 제동함수는 크게 계단형 제동함수(step-type braking function)와 속도의존 제동함수(speed-dependent braking function)가 있다.

2.1 계단형 제동함수

계단형 제동함수는 Fig. 1과 같이 제동력이 제동이 시작되고 일정시간이 경과된 후에야 완전한 교량에 전달되기 시작하며, 차량이 정지하거나 교량에서 완전히 벗어날 때까지 작용한다는 개념으로 1970년대 영국 Transport and Road Research Laboratory(TRRL)이 수행한 실험결과를 이용하여 처음 제안되었다^[28]. Fig. 1의 제동함수 $F_B(t)$ 를 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같다^[9].

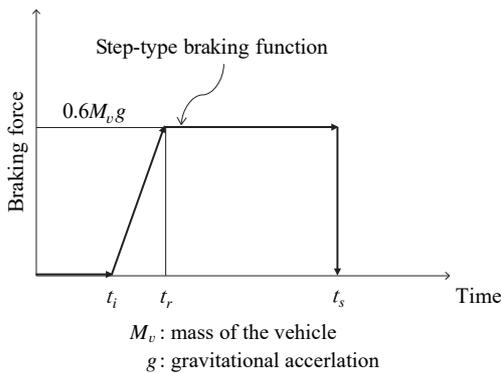


Fig. 1. Step-type braking function^[28]

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

여기서, $\mu(t)$ 는 0부터 $\mu(t_r)$ 사이의 값을 갖는 마찰계수이며 선형으로 가정한다. $P(t)$ 는 임의의 시간 t 에서의 연직 축하중, t_i , t_r , 및 t_s 는 각각 제동시작시간, 제동발현시간 및 정지시간을 의미한다^[9].

2.2 속도의존 제동함수

속도의존 제동함수는 차량 제동 시, 고무타이어와 주행면간의 마찰과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다^{[13]-[16]}. Oden and Martins^[13]은 차량의 미끄럼속도를 고려한 고무타이어와 아스팔트 주행면간의 마찰계수(μ)를 식 (2)와 같이 지수함수로 제안하였다.

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-\alpha s} \quad (2)$$

여기서, μ_k 와 μ_s 는 각각 동마찰계수 및 정마찰계수, α 는 감쇠계수, s 는 미끄럼속도이다.

주행면의 상태가 나쁠수록 정마찰계수는 감소하며 감소계수는 증가하는 것으로 알려져 있다^{[15],[17]}. Savkoor^[14]는 고무타이어의 마찰은 고무의 점탄성 거동과 관련이 있는 것을 발견했으며 마찰에 의한 차량의 미끄럼 속도의 효과를 고려한 마찰함수를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\mu = \mu_s + (\mu_m - \mu_s) \exp \left[-h^2 \log^2 \left(\frac{v_s}{v_m} \right) \right] \quad (3)$$

여기서, μ_m 는 미끄럼속도 v_m 일 때 최대 미끄럼마찰계수, v_s 는 미끄럼속도, h 는 마찰이 크게 변하는 속도 구간을 고려한 무차원 파라미터이다.

Dorsch *et al.*^[16]의 연구는 고무타이어와 아스팔트 주행면간의 마찰계수는 접촉압력, 미끄럼속도 및 온도에 영향을 받는 것으로 나타났으며 접촉수직압력, 미끄럼속도 및 온도의 효과를 고려한 마찰계수를 식 (4) 및 식 (5)로 나타내었다.

$$\mu = c_0 p^{c_1} v_s^{c_2} \quad (4)$$

$$\mu = c_0 p + c_1 p^2 + c_2 v_s + c_3 v_s^2 + c_4 p v_s \quad (5)$$

여기서, c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 : 모델의 보정계수

v_s : 미끄럼속도

p : 접촉수직압력

3. 시·제동하중 설계기준

철도차량의 시·제동하중에 대한 설계기준은 보통 차량 하중과 재하길이를 결정하도록 제시하고 있으며, 궤도에 대한 기준과 교량에 대한 기준으로 분류할 수 있다. 관련 국내의 설계기준은 Table 1과 같다.

Table 2는 동력분산 형식인 고무차륜형 AGT 차량 제원을 이용하여 국내의 교량 설계기준에서 제시하고 있는 시·제동하중 설계기준에 따라 산출한 값이다. 한국과 일본의 설계 시·제동하중의 크기는 가장 큰 358 kN으로 나타났으며 미국의 경우, 시동하중은 250 kN, 제동하중은 200 kN으로 나타났다. 유럽의 경우 180 kN으로 가장 작은 수준을 보였다.

Table 1. Acceleration and braking loads in design codes^{[18]-[24]}

Type	Track	Bridge
Korea	KR C-08080	KDS 24 12 20
	- Passenger and freight A: 33 kN/m/track ($L \leq 33$ m) B: 20 kN/m/track ($L \leq 400$ m) - Passenger only A: 25 kN/m/track (≤ 33 m) B: 15 kN/m/track (≤ 400 m) - EMU, LRT A: 25 % of vehicle load B: 25 % of vehicle load	- Passenger and freight A: 25 kN/m/track $\leq 1,000$ kN ($L \leq 30$ m) B: 15 kN/m/track $\leq 6,000$ kN ($L \leq 400$ m) - Passenger only A: 0.75×25 kN/m/track $\leq 1,000$ kN ($L \leq 30$ m) B: 0.75×15 kN/m/track $\leq 6,000$ kN ($L \leq 400$ m) - EMU and LRT only A: $(0.27 + 0.95L/Lv)T$ B: $(0.27 + 1.00L/Lv)T$
Europe	UIC 774-3R	Eurocode 1 Part 2
	- Conventional and high-speed A : 33 kN/m \times Lab $\leq 1,000$ kN B : 20 kN/m \times Lab $\leq 6,000$ kN - Freight A: 33 kN/m \times Lab $\leq 1,000$ kN B: 35 kN/m \times Lab - EMU, LRT A: 25 % of vehicle load B: 25 % of vehicle load	Same as UIC 774-3R
Japan	Railway Structure Design Standards – Track	Railway Structure Design Standards – Steel Composite Structure
	- High-speed (Shinkansen) A: $2(0.19+0.76L/Lv)P0$ B: $2(0.20+0.80L/Lv)P0$ - Conventional (locomotive) A: 25% of loco. axle load B: 25% of vehicle load - EMU, ICR A: $2(0.25+0.95L/Lv)P0$ B: $2(0.27+1.00L/Lv)P0$	- High-speed (Shinkansen) A: $(0.19+0.76L/Lv)T$ B: $(0.20+0.80L/Lv)T$ - Conventional (locomotive) A: 25% of loco. axle load B: 25% of vehicle load - EMU, ICR A: $(0.25+0.95L/Lv)T$ B: $(0.27+1.00L/Lv)T$
USA		AREMA
		- Conventional A: $200 \sqrt{L}$ B: $200 + 17.5L$

A: acceleration load, B: braking load, L: axle load length for acceleration load, train length for braking load (m), P0: static wheel load (kN), Lv: Length of a vehicle (m), T: axle load (kN), Lab: Length of load (m), ICR: Internal Combustion Railcar, loco.: locomotive

Table 2. Acceleration and braking load calculated based on current design codes

Type	Design load (kN)	
	Acceleration	Braking
Korea	358	358
Europe	180	180
Japan	358	358
USA	250	200

4. 수치해석

4.1 교량 모델

고무차륜 경전철 차량의 시·제동으로 인한 종방향 하중은 수치해석을 이용하여 산정하였다. 해석 대상은 국내 〇〇시에 건설되어 있는 고무차륜형 AGT 차량이 적용된 경전철 시스템이며, 교량은 건설 구간에 가장 대표적인 복선 3경간 연속 강합성 박스거더교이다. Fig. 2는 대상교량의 지지조건으로서쪽을 기준으로 두 번째 교각은 고정받침(Fig. 2의 ㉑)이며, 나머지 교각은 가동받침(Fig. 2의 ㉒)이 설치된 것으로 가정하였다.

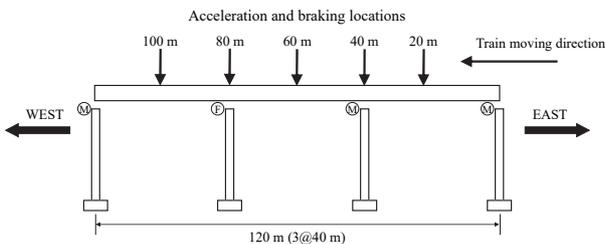


Fig. 2. Support conditions of the example bridge

교량의 상부구조는 고무차륜형 AGT 차량의 주행로 조성을 위한 철근콘크리트 바닥판과 강박스 거더로 구성되어 있다. 주거더는 가로보로 연결된 2련의 박스이며, 박스 내부는 다이어프램, 가로 및 세로 리브와 수직보강재로 보강되어 있다. 하부구조는 철근콘크리트 T형 교각이다. Fig. 3은 상부구조 단면 및 교각의 일반도이다.

교량의 수치해석 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Fig. 4와 같이 작성하였다. 철근콘크리트 바닥판 및 교각은 Solid요소(C3D8R), 주거더와 내부 보강재는 Shell요소(S4R), 가로보는 Beam요소(B31)로

모델링하였다. 고정 받침과 가동 받침에 대한 모델링은 Connector요소(CONN3D2)를 이용하여 구현하였다. 받침의 마찰계수는 철도설계기준^[25]을 참고하여 0.15를 적용하였다.

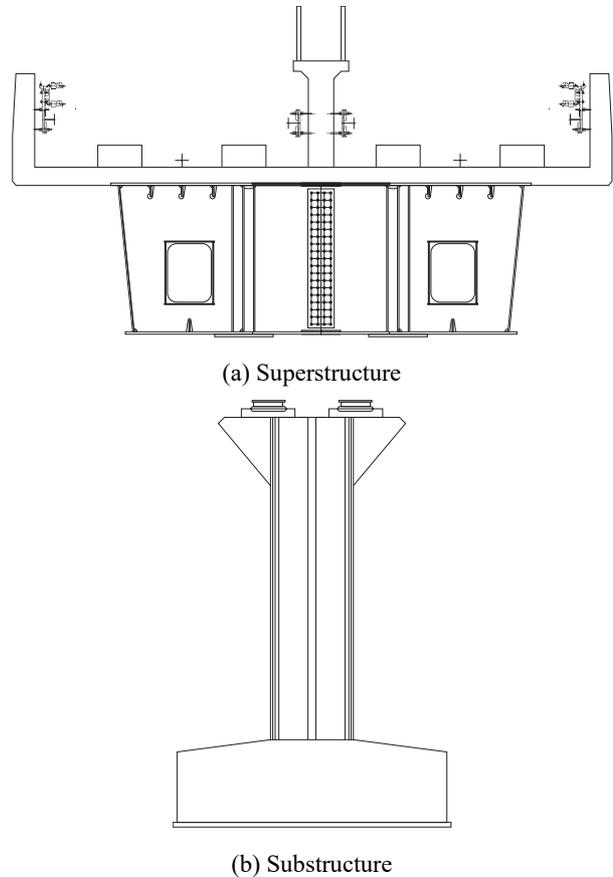


Fig. 3. Superstructure and substructure of the example bridge

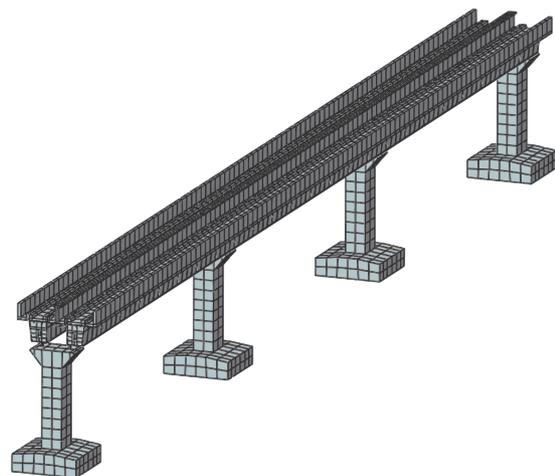


Fig. 4. Finite element model of the example bridge

4.2 차량 모델

해석에 사용된 차량 모델은 국내 〇〇사에서 운용 중인 고무차륜형 AGT 차량으로서, 성능 최고속도는 70 km/hr, 축중이 60 kN(공차)이며 열차의 길이는 1량 기준 9.640 m, 6량 1편성 기준 57.840 m이다. Fig. 5는 고무차륜형 AGT 차량의 열차 길이와 축 간격이다.

고무차륜형 AGT 차량은 크게 차체, 선회 프레임, 안내 프레임, 차축, 고무타이어, 안내륜, 현가장치로 구성되어 있다. 차량에 대한 수치해석 모델은 차체, 선회 프레임, 안내 프레임, 차축, 고무타이어는 강체, 현가장치는 connector 옵션을 이용하여 Fig. 6(a)와 같이 모델링하였다. 일반적으로 복합 구조이며 비등방성, 재료 비선형성을 갖는 고무타이어는 주행면에 비하여 강성이 작아 큰 변형이 발생하므로 탄성체로 모델링해야 하나, 이 논문에서는 고무차륜의 표면과 주행면의 마찰로 인해 발생하는 교축방향 하중의 영향을 검토하는 것이 목적이므로 과도한 해석시간을 방지하기 위하여 고무차륜을 접촉면을 갖는 강체로 모델링하였다. Fig. 6(b)는 차량에 대한 강체모델이다.

4.3 접촉을 고려한 다물체 해석

AGT 열차 주행에 따른 교량의 응답은 차량의 차륜과

교량의 접촉면간의 접촉을 고려한 유연다물체동적해석 (flexible multibody dynamic analysis) 기법을 이용하여 산정하였다. 다물체 동역학(multibody dynamics)은 변형을 고려하지 않은 여러 개의 강체 시스템의 운동을 다루는데 반하여 유연다물체동역학(flexible multibody dynamics)은 탄성변형을 하는 탄성체가 포함이 된 시스템의 운동을 다루는 차이점이 있다^[26].

차량과 접촉면과의 접촉 문제를 접근하는 방법은 크게 탄성접근법(elastic approach)과 운동학적 구속접근법(kinematic constrained approach)으로 나눌 수 있다. 탄성접근법은 차륜의 자유도를 6개로 가정하여 수직접촉력을 Hertz 접촉이론에 따라 정의한 뒤, 가정된 강성과 감쇠계수를 사용하여 해석한다. 일반적으로 탄성접근법에서는 차륜과 주행면간의 접촉점은 일치하지 않으며, 대개 어느 한 쪽 중 변형이 발생한 곳에 위치하게 된다. 따라서 탄성접근법에서의 수직접촉력은 차륜에 의한 접촉면의 압입정도에 따른 변수이며 차륜과 접촉면의 변형이 존재하여야만 수직접촉력이 발생한다. 반면 운동학적 구속접근법은 서로 다른 물체의 접촉을 직접 정의하며 차륜과 접촉면의 접촉점은 일치한다. 또한 Lagrangian multiplier method, penalty method 등의 구속관계식을 적용하기 때문에 수직접촉력은 차륜과 주행면이 접촉하는 면에서의 반력과 동일하게 평형을 이루게

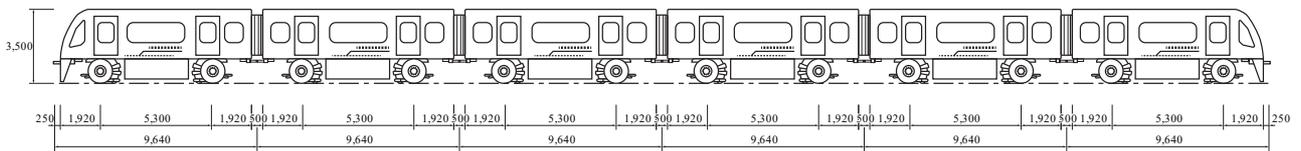
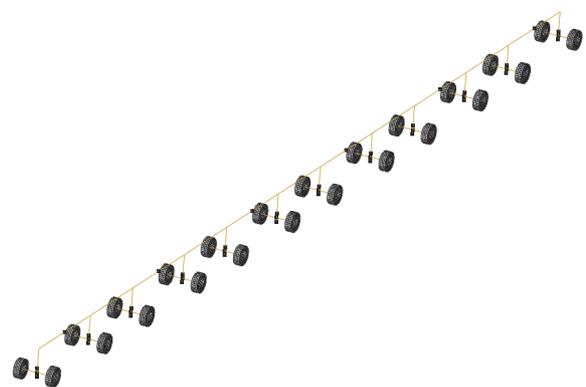
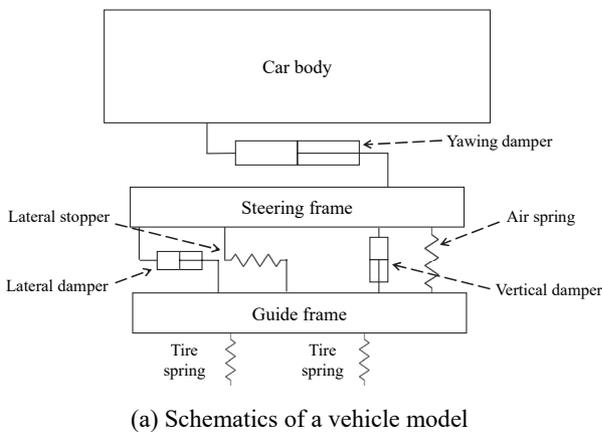


Fig. 5. AGT vehicle with rubber wheel



(a) Schematics of a vehicle model

(b) AGT vehicle model

Fig. 6. Schematics and rigid body model of the LRT vehicle

되며, 탄성접근법과는 달리 접촉면에서의 변형을 허용하지 않는다. 또한 기하학적인 적합조건 및 동적평형조건을 시간에 따라 항상 만족하게 되는 편리함이 있다^[27]. 이 논문에서는 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 차량 해석모델은 강체, 교량 해석모델은 탄성체로 모델링하였으며 차량과 교량의 접촉은 운동학적 구속접근법을 적용하여 유연다물체동적해석을 수행하였다.

4.4 차륜-교량 간 접촉모델

고무차륜형 AGT 차량의 시동 및 제동을 고려하기 위하여 고무 차륜과 교량의 접촉 모델은 속도 의존 마찰함수를 적용하여 모델링하였다. 국내 도입된 고무차륜형 AGT 차량은 콘크리트 주행로를 주행하나, 현재까지 AGT 차량의 고무타이어와 콘크리트면 간의 마찰함수 모델에 대한 연구 결과가 없어 고무타이어와 아스팔트 주행면의 마찰함수 모델 중 가장 보편적으로 적용되고 있는 Oden and Martins^[13]의 모델을 활용하였다. 마찰계수의 크기는 주행면의 상태는 양호하다는 가정 하에 Henry^[15], Wang *et al.*^[17]의 연구 결과를 참고하여 정마찰계수 0.6, 동마찰계수 0.3, 감소계수 0.05를 적용하였다. 마찰함수는 Fig. 7과 같다. 참고로 구름 마찰계수(rolling friction coefficient)는 일반적으로 미끄럼 마찰계수(sliding friction coefficient)에 비하여 작은 크기를 가지며, 제동력이 충분히 큰 경우 더욱 작아지므로 무시하였다.

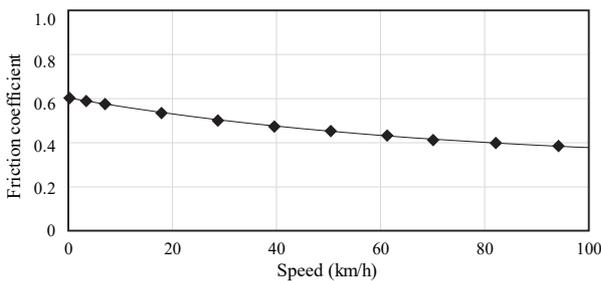


Fig. 7. Friction function model ($\mu_s = 0.6, \mu_k = 0.3, \alpha = 0.05$)

5. 수치해석 결과

5.1 제동하중

차량-교량 상호작용 수치해석 모델을 이용하여 고무차륜형 AGT 차량의 교량 설계에 필요한 제동하중에 대한 매

개변수해석을 수행하였다. 매개변수는 차량의 제동위치, 차량의 주행속도 및 마찰함수를 고려하였다. 교량받침은 교각 당 2개가 있으므로 제동하중은 Fig. 2의 서쪽으로 열차가 주행하는 것을 기준으로 열차가 주행하는 선로 하부 우측 고정단 받침과 주행하지 않는 좌측 고정단 받침에서의 반력을 검토하였다. 제동하중은 열차가 정속 주행하는 경우와 제동하는 경우의 받침 반력의 차이를 비교하여 산출하였다. 차량이 제동 시, 차량의 감속도는 비상 감속도인 4.5 km/h/s를 고려하였다.

5.1.1 제동위치

해석에서 고려한 차량의 제동위치는 Fig. 2에 제시하였다. 차량의 제동위치는 동측을 기준으로 교량 진입 후 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m를 고려하였다. 열차의 주행속도는 성능 최고속도인 70 km/h를 고려하였으며 고무차륜과 주행면의 접촉은 Fig. 7의 마찰함수 모델을 적용하였다. 해석 결과는 Table 3 및 Fig. 8과 같다. Table 3에서 열차가 주행하는 우측선로(loaded) 하부 고정단 받침의 반력이 좌측(unloaded)보다 2배 - 3배 크게 발생하며, 좌우측 최대 반력이 발생하는 제동위치는 상이한 것으로 나타났다. 좌우측 제동하중의 합은 제동위치가 80 m 또는 고정단 교각에서 가

Table 3. Braking forces by braking locations

Type	Reaction	Braking position (m)				
		20	40	60	80	100
Braking force (kN)	Loaded	63	56	58	58	58
	Unloaded	19	22	27	30	21
	Loaded + unloaded	82	78	85	88	79

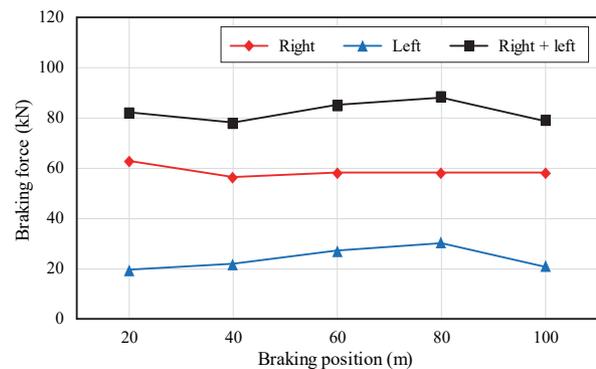


Fig. 8. Braking forces by braking locations

장크게 나타났으며, 최솟값 대비 113%, 평균값 대비 107%로 큰 변동은 없는 것으로 나타났다. 참고로 차량의 축중이 60 kN, 열차하중이 120 kN임을 고려할 때 최대 제동하중은 차량하중의 12% 정도에 해당한다.

5.1.2 주행속도

열차의 주행속도는 고무차륜형 AGT 차량의 성능 최대속도가 70 km/h인 것을 참고하여 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h를 고려하였다. 이때 열차의 제동위치는 고정단 부근인 60 m 지점을 선정하였으며 Fig. 7의 마찰합수를 적용하였다. Table 4 및 Fig. 9는 열차속도 변화에 따른 최대 반력 비교 결과이다. 제동하중의 합은 속도가 커짐에 따라 증가하나, 60 km/h 이상에서는 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 적용된 마찰합수가 60 km/h 부근에서부터 속도 증가에 따른 마찰계수 변화가 작아져 속도 변화가 제동하중 크기에 미치는 영향이 작아졌기 때문으로 판단된다.

5.1.3 정마찰계수

Oden and Martins^[13]의 모델을 이용하여 정마찰계수 크기 변화에 따라 발생하는 제동하중에 대해 검토하였다. 정

마찰계수(μ_s)는 주행면의 상태가 양호한 경우인 0.6를 기준으로 0.5 - 1.0을 고려하였다. 동마찰계수(μ_k) 및 감소계수(α)는 양호한 주행면 상태를 가정하여 0.3과 0.05를 각각 적용하였다. 열차의 주행속도는 70 km/h를 적용하였으며, 제동위치는 교량의 중간지점으로 선정하였다. 해석결과는 Table 5 및 Fig. 10에 제시하였다. 정마찰계수의 크기가 증가할수록 우측(loaded) 및 좌측(unloaded) 받침에서 발생하는 제동하중의 크기는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 우측 받침의 제동하중이 좌측 받침의 제동하중보다 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

5.1.4 마찰합수 감소계수

Oden and Martins^[13]의 마찰합수 감소계수(decay coefficient) 변화에 따라서 발생하는 제동하중에 대해 검토하였다. 감소계수는 주행면의 상태에 따라 그 크기가 변화하며 주행면이 좋지 않을수록 큰 크기를 갖는다. 이때 감소계수(α)는 주행면의 상태가 양호한 경우에서 양호하지 않은 경우를 고려하여 0.05에서 0.2까지 고려하였으며, 정마찰계수(μ_s)는 0.6, 동마찰계수(μ_k)는 0.3를 적용하였다. 열차의 주행속도는 70 km/h를 적용하였으며 제동위치는 교량의 중간지점으로 선정하였다.

Table 4. Braking forces by vehicle velocities

Type	Reaction	Velocity (km/h)				
		30	40	50	60	70
Braking force (kN)	Loaded	52	57	58	63	58
	Unloaded	8	12	20	22	27
	Loaded + unloaded	60	70	78	85	85

Table 5. Braking forces for increasing static friction coefficient

Type	Reaction	Static friction coefficient					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Braking force (kN)	Loaded	39	58	78	98	118	138
	Unloaded	19	27	35	44	52	60
	Loaded + unloaded	57	85	113	142	170	198

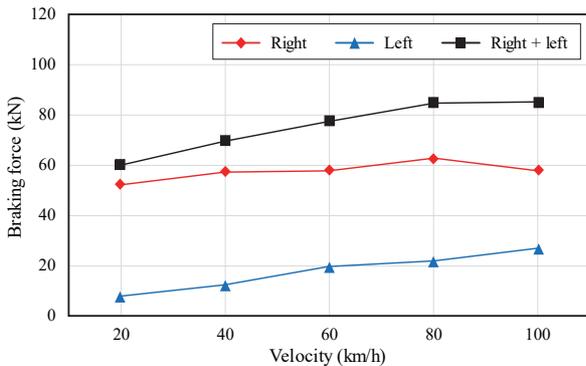


Fig. 9. Braking forces by vehicle velocities

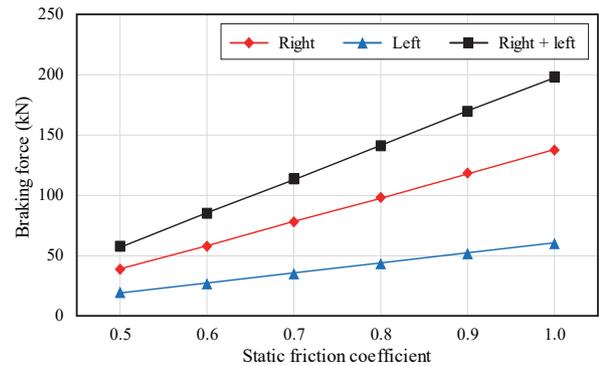


Fig. 10. Braking forces for increasing static friction coefficient

Table 6 및 Fig. 11은 마찰함수 감소계수 변화에 따른 해석결과이다. 감소계수의 크기가 증가할수록 우측(loaded) 및 좌측(unloaded) 받침에서 발생하는 제동하중의 크기는 기하급수적으로 감소하였다. 이때 우측 받침의 제동하중 감소폭이 좌측 받침의 제동하중 감소폭보다 큰 것으로 나타났다.

5.2 시동하중

차량-교량 상호작용 수치해석 모델을 이용하여 고무차륜형 AGT 차량의 교량 설계에 필요한 시동하중의 매개변수 해석을 수행하였다. 매개변수는 차량의 시동위치, 마찰계수를 고려하였다. 이때 차량이 시동하는 경우의 특성이 반영되는 마찰에 관한 연구결과는 현재까지 거의 진행되어 있지 않아 제동 시 고려되는 마찰함수를 이용하여 시동하중 해석을 수행하였다. 교량받침에서의 반력은 제동하중과 마찬가지로 서쪽으로 열차가 주행하는 것을 기준으로 열차가 주행하는 선로 하부 우측 고정단 받침과 주행하지 않는 좌측 고정단 받침에서 검토를 수행하였다. 시동하중은 제동하중과 마찬가지로 열차가 정속 주행하는 경우와 시동하는 경우의 받침 반력의 차이를 비교하여 산출하였다. 차량이 시동 시, 차량의 가속도는 3.5 km/h/s를 고려하였다.

Table 6. Braking forces for increasing decay coefficient

Type	Reaction	Decay coefficient						
		0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2
Braking force (kN)	Loaded	58	35	22	13	8	5	3
	Unloaded	27	18	12	8	6	5	4
	Loaded + unloaded	85	53	33	21	14	9	7

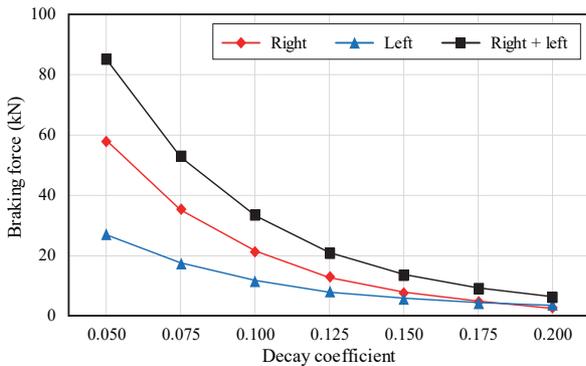


Fig. 11. Braking forces for increasing decay coefficient

5.2.1 시동위치

해석에서 고려한 차량의 시동위치는 Fig. 2에 제시된 제동 위치와 같다. 열차의 주행속도는 성능 최고속도인 70 km/h를 고려하였다. 고무차륜과 주행면의 접촉에 대한 마찰함수 모델은 Oden and Martins^[13]의 모델을 사용하였으며 Fig. 12와 같다. 이때 마찰함수는 물체가 마찰을 가지는 표면 위를 움직일 때 사용되는 기본적인 마찰이론을 참고하였으며, 정마찰계수는 0.6, 동마찰계수는 0.3을 적용하였다.

열차 시동 시 발생하는 받침의 반력과 정속 주행 시 발생하는 받침의 반력의 최댓값의 차이를 통하여 시동하중을 산출하였으며, Table 7 및 Fig. 13에 정리하였다. 참고로 시동 위치가 20 m와 40 m인 경우는 열차를 구성하는 6량의 차량

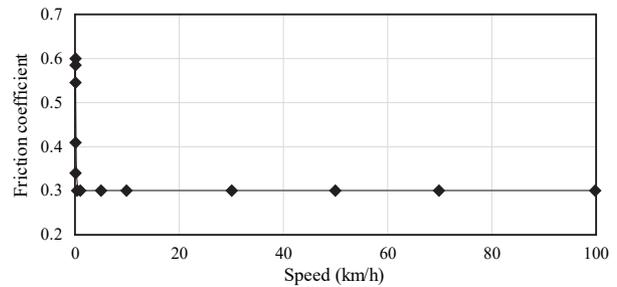


Fig. 12. Friction function utilized in analysis for acceleration force

Table 7. Acceleration forces for different locations

Type	Reaction	Acceleration position (m)				
		20	40	60	80	100
Acceleration force (kN)	Loaded	-4	10	71	83	46
	Unloaded	-6	55	76	50	111
	Loaded + unloaded	-10	65	146	133	157

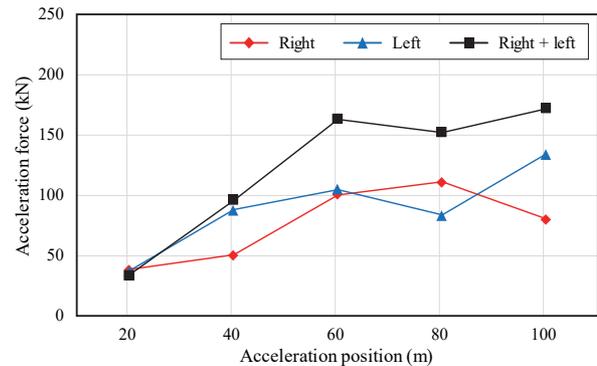


Fig. 13. Acceleration force for different locations

모두가 교량 위에 올라와 있지 않는 경우이다. 따라서 이때의 시동하중의 크기는 시동위치가 60 m, 80 m, 100 m인 경우에 비하여 작게 나온 것으로 판단하였다. 또한, 시동위치가 20 m인 경우, 시동에 의한 반력이 정속주행시의 반력보다 작아서 반대 방향의 하중이 산정되었다. 우측(loaded) 받침의 시동하중은 시동위치가 80 m일 때 가장 큰 것으로 나타났으며 좌측(unloaded) 받침의 시동하중은 100 m일 때 가장 큰 것으로 나타났다. 좌측 및 우측 시동하중의 합은 100 m일 때 가장 큰 것으로 나타났다. 시동하중은 시동위치에 따라서 영향을 크게 받으며 고정단 부근에서 시동할 경우 큰 크기를 갖는 것으로 나타났다. 참고로 최대 시동하중은 차량하중의 21.8 %에 해당한다.

5.2.2 정마찰계수

정마찰계수의 크기 변화에 따라서 발생하는 시동하중에 대하여 검토하였다. 정마찰계수의 크기는 주행면의 상태가 양호한 경우에서 매우 양호한 경우까지를 고려하여 0.5 - 1.0까지 고려하였다. 이때 동마찰계수는 0.3으로 고정하였다. 시동위치는 고정단 부근인 80 m 지점이다. 열차 시동 시

발생하는 반력과 정속 주행 시 발생하는 반력의 최댓값의 차이를 통하여 고정단 교각에서 발생하는 시동하중을 산출하였으며, Table 8 및 Fig. 14에 정리하였다. 정마찰계수의 크기가 증가할수록 시동하중은 미세하게 감소하는 것으로 나타났다. 동마찰계수가 일정할 때, 정마찰계수의 크기 변화는 고정단 교각에서 발생하는 시동하중에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

5.2.3 동마찰계수

동마찰계수의 크기 변화에 따라서 발생하는 시동하중에 대하여 검토하였다. 동마찰계수의 크기는 주행면의 상태가 양호하지 않은 경우에서 양호한 경우까지를 고려하여 0.1 - 0.5까지 고려하였다. 이때 정마찰계수는 0.6으로 고정하였다. 시동위치는 고정단 부근인 80 m 지점이다.

해석결과는 Table 9 및 Fig. 15에 제시하였으며, 동마찰계수의 크기가 증가할수록 시동하중이 증가하는 것으로 나타났다. 정마찰계수가 일정할 때, 동마찰계수의 크기 변화는 고정단 교각에서 발생하는 시동하중에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Table 8. Acceleration force for increasing static friction coefficient

Type	Reaction	Static friction coefficient					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Acceleration force (kN)	Loaded	84	83	83	82	82	81
	Unloaded	50	50	49	48	48	47
	Loaded + unloaded	134	133	132	131	129	128

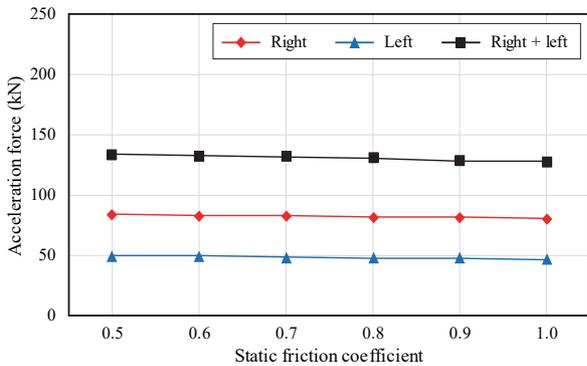


Fig. 14. Acceleration force for increasing static friction coefficient

Table 9. Acceleration force for increasing kinetic friction coefficient

Type	Reaction	Kinetic friction coefficient				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Acceleration force (kN)	Loaded	41	62	83	104	123
	Unloaded	-16	-2	50	101	153
	Loaded + unloaded	26	60	133	205	276

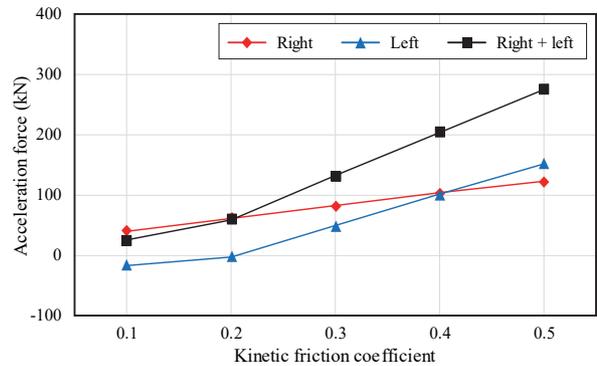


Fig. 15. Acceleration force for increasing kinetic friction coefficient

6. 결론

이 논문에서는 국내외 시·제동하중에 관한 설계기준을 분류 및 검토하였으며 차량-교량 상호작용 수치해석을 통해 고무차륜형 AGT 차량이 운행되는 교량에 대하여 제동하중 및 시동하중에 대한 다양한 매개변수해석을 수행하였다. 매개변수해석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 제동하중은 제동위치가 고정단 교각과 가까울수록 크게 발생하였으며, 고정단 교각 바로 위인 80 m 지점에서 가장 큰 제동하중이 발생하였다. 최대 제동하중은 차량하중의 12% 정도에 해당하는 것으로 나타났다.
- (2) 제동하중은 차량의 열차 주행속도가 커질수록 증가하였으나, 60 km/h 이상에서는 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났다. 제동하중은 마찰함수에 적용되는 정마찰계수의 크기가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 마찰함수의 감소계수가 증가할수록 기하급수적으로 감소하였다.
- (3) 시동하중의 경우, 시동위치가 고정단 교각 부근일수록 크게 발생하였으며 가장 큰 값은 고정단 교각 이후인 100 m 지점에서 가장 크게 발생하였다. 또한 시동위치가 고정단 교각과 멀어질수록 발생하는 시동하중은 제동하중에 비해 훨씬 작은 크기가 발생한 것으로 나타났다. 최대 시동하중은 차량하중의 21.8% 정도에 해당하는 것으로 나타났다.
- (4) 시동하중은 마찰함수에 적용되는 정마찰계수의 크기 변화에 따라서 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 동마찰계수의 크기가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 해석을 이용하여 산정된 최대 제동하중은 국내 및 일본 교량 설계기준(358 kN)의 25%, 유럽 교량 설계기준(180 kN)의 49%, 미국 교량 설계기준(200 kN)의 44%이며, 최대 시동하중은 국내 및 일본 교량 설계기준(358 kN)의 44%, 유럽 교량 설계기준(180 kN)의 87%, 미국 교량 설계기준(250 kN)의 62%인 것으로 나타났다.
- (6) 수치해석을 통하여 산정된 최대 시·제동하중은 국내외 교량설계기준에 비하여 모두 낮은 값이었으나, 시동하중보다는 제동하중이 더 작게 나타났다. 특히 국내와 일본의 설계기준의 경우 미국과 유럽의 설계기준에 비하여 더욱 큰 차이를 보이고 있으므로 향후 관련 기준 변경 시 이러한 점을 고려할 필요가 있다.

- (7) 산정된 시·제동하중은 고무차륜과 아스팔트 주행면 간의 마찰특성 모델을 적용한 것으로 향후 보다 결과의 신뢰도 제고를 위해서는 고무차륜 AGT 차량이 시·제동하는 경우 콘크리트면 간의 마찰특성을 반영한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “도시경관 친화형 경전철 고가구조물 설계기술 개발(20RTRP-C146000-3)”과 2019년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Shin, J.-R., Lee, A.-H., Park, J.-I., and Shin., I.-J. (2013) A Field-Test Study on the Dynamic Factor of Elevated Structures for Rubber-Tired Light Rail Transit, *Proceedings of Annual Fall Conference of the Korean Society for Railway*, KSR, KSR2013A205 (in Korean).
- [2] Jung, J.R. (2013) *A Study on the Decrease of Lateral Acceleration Depending on Speed-up of Rubber Tired AGT Vehicle*, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Korea (in Korean).
- [3] Jeon, K.-S., Lee, U., and Yun, S.-H. (1999) Dynamics of an AGT System Light Rail Transit with Rubber Tires, *Proceedings of Annual Spring Conference of the Korean Society for Railway*, KSR, pp.135-142 (in Korean).
- [4] Kishan, H., and Traill-Nash, R.W. (1977) A Modal Method for Calculation of Highway Bridge Response with Vehicle Braking, *Civil Engineering Transactions*, Institution of Engineers, Vol.CE19, No.1, pp.44-50.
- [5] Kim, D.-K., and Yang, S.-C. (2010) The Effects of Braking of Trains and Roughness of Rails on the Dynamic Behaviors of Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.14 No.5, pp.93-101 (in Korean).
- [6] Machida, F., and Matsuura, A. (1983) Dynamic Response of Concrete Railway Bridges, *IABSE Proceedings*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.7, pp.53-68.
- [7] Srinivas, V., Ramanjaneyulu, K., Saravana Kumar, K., Parivallal, S., Kesavan, K., Ravisankar, K., Lakshmanan, N., and Iyer, N.R. (2013) Evaluation of Longitudinal Force on a Railway Bridge Based on Strain Measurements, *Experimental Techniques*, Springer, Vol.37, pp.

- 55-67.
- [8] Bettazzi, G.C., and Dumêt, T.B. (2014) Analysis of the Braking Longitudinal Force Considered by NBR7187 (2003) Through a Case Study, *Ibracon Structures and Materials Journal*, Instituto Brasileiro do Concreto, Vol. 7, No.5, pp.801-816.
- [9] Kwark, J.W., and Chang, S.P. (1997) The Dynamic Behavior of Highway Bridge Due to the Braking Action of a Moving Vehicle in 3D, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.17, No.1-6, pp. 897-908.
- [10] Yun, H.S., Kim, M.-C., and Han, S.C. (2005) Development of Train/Bridge Interaction Analysis Program Consideration Braking, *Proceedings of Annual Fall Conference of the Korean Society for Railway*, KSR, pp.1177-1183 (in Korean).
- [11] Shin, J.-R., Lee, A.-H., Park, W.-B., Lim, C.-S., and Cho, G.-H. (2013) The Effectiveness Analysis of Design Code on the Scale of Elevated Light-Rail Structures, *Proceedings of Annual Spring Conference of the Korean Society for Railway*, KSR, KSR2013S244 (in Korean).
- [12] Shin, J.-R., Lee, A.-H., Park, J.-I., and Shin, I.-J. (2014) A Field-Test Study of the Design Standards of Elevated Structures for Rubber-Wheeled Light Rail Transit: Braking Force, *Journal of Korean Society for Railway*, KSR, Vol.17, No.2, pp.133-139 (in Korean).
- [13] Oden, J.T., and Martins, J.A.C. (1985) Models and Computational Methods for Dynamic Friction Phenomena, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, Vol.52, pp.527-634.
- [14] Savkoor, A.R. (1986) Mechanics of Sliding Friction of Elastomers, *Wear*, Elsevier, Vol.113, No.1, pp.37-60.
- [15] Henry, J.J. (2000) *Evaluation of Pavement Friction Characteristics: A Synthesis of Highway Practice (NCHRP Synthesis 291)*, National Academy Press, USA.
- [16] Dorsch, V., Becker, A., and Vossen, L. (2002) Enhanced Rubber Friction Model for Finite Element Simulations of Rolling Tyres, *Plastics, Rubber and Composites*, Taylor & Francis, Vol.31, No.10, pp.458-464.
- [17] Wang, H., Al-Qadi, I.L., and Stanculescu, I. (2014) Effect of Surface Friction on Tire-Pavement Contact Stresses During Vehicle Maneuvering, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.140, No.4, 04014001.
- [18] Korea Rail Network Authority (2017) *Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis (KR C-08080)*, Korea (in Korean).
- [19] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018) *Bridge Design Load (KDS 24 12 20: 2018)*, Korea (in Korean).
- [20] Union Internationale des Chemins de fer (2001) *Track/Bridge Interaction Recommendations for Calculations (UIC 774-3R)*, France.
- [21] European Committee for Standardization (2003) *Eurocode 1: Actions on Structures, Part 2: Traffic Loads on Bridges (EN 1991-2)*, Belgium.
- [22] Railway Technical Research Institute (2012) *Design Standards for Railway Structures and Commentary - Track*, Japan (in Japanese).
- [23] Railway Technical Research Institute (2009) *Design Standards for Railway Structures and Commentary - Steel Composite Structure*, Japan (in Japanese).
- [24] American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (2019) *Manual for Railway Engineering*, Chapter 15: Steel Structures, USA.
- [25] Korea Rail Network Authority (2016) *Railway Design Standard*, Korea (in Korean).
- [26] Chae, S., Yoo, Y., Park, Y., and Choi, S. (2018) Dynamic Response Analysis of a Ballastless Steel Plate Girder Bridge Due to a Rail Joint, *Journal of the Korean Society for Railway*, KSR, Vol.21, No.11, pp.1104-1115 (in Korean).
- [27] Rhee, I.K., and Roh, Y.S. (2015) Dynamic Analysis of Railway Structures Using Multibody Contacts, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.15, No.6, pp.293-299 (in Korean).
- [28] Kwark, J.-W. (1997) The Effect of Vehicle Braking on a Bridge, *Computational Structural Engineering*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.10, No.4, pp.30-33 (in Korean).

요약: 현재 국내에는 경전철(LRT, light rail transit)의 특성을 반영한 설계기준이 없어 교량 설계 시 해외 경전철시스템 기업의 자체 기준이나 중량철도에 대한 국내기준을 이용하고 있어 다수의 교량들이 단면이 크고 육중하게 건설되었다. 경전철 교량을 보다 효율적이고 경제적으로 건설하기 위해서는 국내 환경과 운용 중인 경전철 차량의 특성을 고려한 설계기준 개발이 필요한 상황이다. 이 논문에서는 다양한 인자들의 변화에 따라 고무차륜형 AGT의 시제동이 교량에 작용하는 종방향 하중에 미치는 영향을 수치해석 연구를 수행하였다. 연구의 목적을 위하여 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 유연다물체동적해석을 수행하였다. 수치해석 결과 시제동 하중은 시제동위치, 주행속도, 고무와 교량 주행면 간의 마찰계수 등의 인자에 의하여 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어: 시·제동, LRT, AGT, 종방향 하중, 교량