

스폴링에 의한 AGT 시스템 교량의 충격에 관한 연구
A Study on the Dynamic Impact of the AGT System Bridge,
Caused by a Spall

우성원*, 윤석구**, 이인호***, 송재필****
Woo, Sung-Won Yun, Suk-Koo Lee, An-Ho Song, Jae-Pil

ABSTRACT

The dynamic responses of a PSC bridge for automated guide-way transit system are investigated by analytical approach of bridge-vehicle interaction. In this study, the dynamic responses, concerned with a spall on the surface of bridge are emphasized. A simply supported pre-stressed concrete bridge is adopted as a numerical example. Dynamics of three-dimensional dynamic interaction system between bridges and vehicles is considered in this study. The FE method and modal analysis is used for modeling a bridge for dynamic response analysis. An AGT vehicle is idealized as a model with 11DOFs including lateral motion. It was found that the dynamic responses of bridge can be affected by a spall of surface. Especially, the vibrations are increased much more when a spall is exist.

1. 서 론

교부차량 AGT(Automated Guideway Transit) 시스템은 경량전철 중 소음과 진동이 작은 시스템으로 국내외 같이 도시를 통과하는 구간이 많은 지역에 적합한 시스템이다. 현재 국내에서는 교무차량 AGT 시스템을 도입하고자 시험선 구간을 시공하여 운행 안전성 및 성능을 시험하고 있다. AGT 시스템은 차량이 고무인 이유로 차량 주행면을 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP, Continuously Reinforced Concrete Pavement)을 주로 사용한다. 연속 철근 콘크리트 포장은 무근콘크리트 포장과 비교하여 줄눈의 간격을 길게 할 수 있고, 구조물을 일체화 시킬 수 있는 장점이 있으나 콘크리트 구조물 중 유일하게 균열 발생을 허용하는 공법이다.¹⁾ 연속철근 콘크리트 포장 공법에서는 하중 조건, 온도 및 습도 변화에 따라 그림 1과 같이 철근 방향의 적각 방향으로 균열이 발생하게 된다. 균열이 발생한 곳은 균열로 인한 예각 또는 직각이 형성되어 차량 주행시의 회전과 하중에 의해 파손되어 스폴링을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 스폴링은 차량 주행 시

* (주)동명기술공사 이사, 정회원

** 서울산업대학교 교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 팀장, 정회원

**** 슈어테크 팀장, 정회원

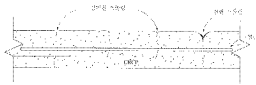


그림1. 콘크리트 포장 스프링



그림2. PSC 교량

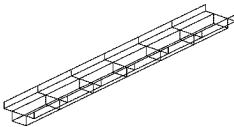


그림3. PSC 교량 이상화 모델



그림4. AGT 차량

승차감을 저해할 뿐 아니라 구조물에도 충격 하중으로 작용하여 악영향을 줄 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 이러한 요철에 의해 교량에 발생하는 충격을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구현하고자 한다. 시뮬레이션에는 AGT 시스템 차량과 교량의 동적 상호작용 해석이 가능한 BADIA II를 사용하였다. 시뮬레이션에 적용된 교량과 차량은 경량전철 시험선 구간의 지간 30m의 PSC 교량과 시험선 운행 차량을 그 대상으로 하였다.

2. AGT 교량-차량 상호 운동 방정식

본 연구에 적용된 교량은 경량전철 시험선 구간에 시공된 교량으로 지간 30m의 단경간 2주형 PSC교량이다. 그림2.는 해석 대상 교량을 보여주고 있다. 해석 대상 교량을 그림3.과 같이 절점 56개 부재 104개의 유한요소로 이상화하여 하였으며, 해석에 사용된 교량의 체원은 표 1.에 나타낸 것과 같다.

본 연구에 사용된 AGT 차량 모델은 이전의 연구에 사용된 것과 같은 것으로 이전의 연구를 통해 해석 모델의 신뢰성을 검증받은 바 있다.²⁾ 그림4.와 그림5.는 각각 해석 대상 AGT 차량의 사진과 이

표 1. PSC 교량 체원

Property		Value
Span length (m)		30
Number of girders (EA)		2
Main girder	Elastic modulus (kN/m)	2.55×10^7
	Cross sectional area (m ²)	0.6953
	Weight per unit length (kN/m)	17.393
	Torsional constant (m ⁴)	0.0080
	Moment of inertia (m ⁴)	0.3385
Cross beam	Elastic modulus (kN/m)	2.55×10^7
	Cross sectional area (m ²)	0.7080
	Weight per unit length (kN/m)	17.711
	Torsional constant (m ⁴)	0.03239
	Moment of inertia (m ⁴)	0.01848
Deck slab	Elastic modulus (kN/m)	2.55×10^7
	Thickness (m)	0.300
	Weight per unit length (kN/m)	40.776

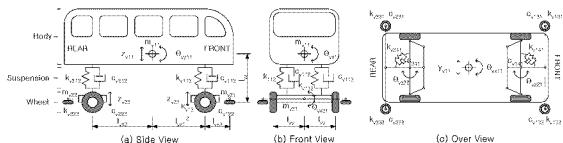


그림5. AGT 차량 모델

표 2. AGT 이상화 차량 모델 기호 및 제원

Description	Nomenclature	Value	
Mass	Body (ton)	m_{b1}	1.630
	Suspension system (ton)	m_{s2}	0.153
	Vehicle (ton)	m_{v12}	1.936
Spring constant	Suspension (kN/m)	k_{s1j}	735.8
	Tire (kN/m)	k_{t2j}	1471.5
	Guide wheel (kN/m)	k_{g3j}	1471.5
	Steering system (kN·m/rad)	k_{st4j}	245.25
Damping constant	Suspension (kNs/m)	c_{s1j}	7.848
	Tire (kNs/m)	c_{t2j}	0.00
	Guide wheel (kNs/m)	c_{g3j}	9.81
	Steering system (kNmrs/rad)	c_{st4j}	58.86
Geometry	From C.G.* of body to C.G. of front and rear axle (m)	l_{sv}	2.50
	From guide wheel to C.G. of axle (m)	l_{ws}	0.50
	From C.G. of body to left and right tire (m)	l_{ty}	0.87
	From C.G. of body to guide wheel (m)	l_{ts}	0.70

* Center of Gravity

표 3. AGT 차량 자유도

Description	Nomenclature	
Body motions	Vertical and lateral motion	z_{v11}, y_{v11}
	Rolling, pitching, and yawing	$\theta_{v11}, \theta_{v11}, \theta_{v21}$
Axle motions	Parallel hop of front and rear suspension system	z_{s21}, z_{s22}
	Axle tramp of front and rear suspension system	$\theta_{s21}, \theta_{s22}$
	Steering of front and rear suspension system	$\theta_{s21}, \theta_{s22}$

상화 모델을 보여주고 있다. AGT 차량 이상화 모델에 사용된 기호 및 제원은 표 2에 보이는 것과 같다. 표 3은 AGT 차량 이상화 모델의 11 자유도에 대한 설명을 보여준다.

해석에 사용된 노면 profile은 식(1)과 같은 PSD(Power Spectrum Density) 함수를 기초로 인공적으로 생성하여 사용하였다. 본 연구에서는 식(1)에서 α 값을 0.0005, 0.0007 그리고 0.0010 의 세 가지 값을 사용하여 인공 노면 profile을 생성하였다. 그림6은 α 값에 따른 인공 노면 profile을 보여주고 있다.

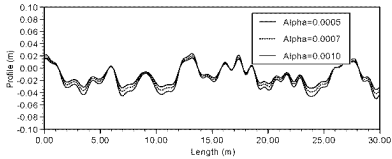


그림6. 주행 노면 Profile

$$S(\Omega) = \frac{\alpha}{\Omega^2 \beta^n} \quad (1)$$

스플링 등에 의해 발생할 수 있는 노면 요철은 시뮬레이션 프로그램에서 고려 할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 프로그램 입력 데이터 작성 시 요철의 위치와 깊이 등을 입력하면 시뮬레이션 수행 시 그림6.의 노면 profile을 변형시켜 시뮬레이션을 수행 할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 요철이 없을 경우, 깊이 1cm의 요철이 있는 경우 그리고 깊이 2cm의 요철이 있는 경우의 시뮬레이션을 수행하여 교량에 발생하는 동적응답 변화를 검토하였다.

AGT 교량-차량 상호 운동 방정식은 식(2)와 같은 Lagrange 운동방정식을 이용하여 구하였다. 식(2)에서 T 는 운동에너지, U_s 는 탄성에너지 그리고 U_g 는 소산에너지를 나타내는 것이고 q_i 는 비지 변수를 그리고 P_k 는 외부에서 가해지는 하중을 표시하는 것이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U_s}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U_g}{\partial q_i} = P_k \quad (2)$$

식(2)에 의해 유도된 운동방정식의 해는 직접적분법인 Newmark- β method에 의해 구하였으며, 이 때 상수 β 는 0.25를 사용하였고 최종적인 해의 오차는 0.001이하가 되도록 하였다. 적분 간격을 교량에 비하여 차량의 고유진동 주파수가 훨씬 큰 관계로 차량 고유진동수 최고차 모드 1/4~1/5 이하가 되도록 하였다.

3. 시뮬레이션 결과

컴퓨터 시뮬레이션은 주행노면에 스프링이 없는 경우(DS0), 깊이 1cm의 스프링이 발생한 경우(DS1) 그리고 깊이 2cm의 스프링이 있는 경우(DS2)에 대하여 실시하였다. 각각의 경우에 대해 시속 10km/h에서 80km/h까지 5km/h의 간격으로 AGT 차량이 주행시켰으며, 연행하는 AGT 차량의 대수는 2대와 4대로 하였다.

그림7과 그림8은 전형적인 교량의 응답을 보여주는 것으로 AGT 차량 2대가 40Km/h의 속도보 교량을 주행시 스프링이 없는 경우, 1cm 깊이의 스프링이 있는 경우 그리고 깊이 2cm의 스프링이 있는 경우의 교량 가속도 응답과 변위 응답을 보여준다. 그림7에 보이는 것과 같이 스프링이 있는 경우 AGT 차량이 스프링 지점을 통과 시 교량의 가속도가 크게 증가하는 하며 특히 후행 차량의 전륜이 스프링 지점을 통과 시 선행 차량의 후륜에 의한 진동이 남아있는 상태에서 통과하게 되어 보다 큰 진동이 발생함을 알 수 있다. 스프링 깊이에 따른 교량의 변위 응답은 가속도 응답과 같이 큰 변화는 보이지 않으나 차량이 스프링 지점을 통과시 최대 변위 값이 증가함을 그

림8을 통해 알 수 있다.

본 연구에서는 교량 가속도 응답의 정량적 평가를 위해 가속도 응답의 RMS(Root Mean Square)값을 사용하였다. 그림9는 차량 주행 속도에 따른 가속도 RMS값을 나타낸 것이다. 그림9의 a)와 b)에 보이는 것과 같이 스펙트럼 깊이가 증가 할수록 교량 가속도 RMS값은 눈에 띄게 증가하였으며 연행하는 차량의 대수가 많을수록 가속도 RMS값은 커짐을 알 수 있다. 그림8의 c)는 깊이 1cm의 스펙트럼이 있는 경우 노면 요철에 따른 가속도 RMS값을 보여주는 것으로, 스펙트럼이 있는 경우 노면 요철에 따라 가속도 RMS값이 크게 변하지 않음을 보여준다. 이는 스펙트럼에 의한 가속도 변화량이 상대적으로 커서 노면 요철에 따른 가속도 변화보다 미미하게 반영되었기 때문이다.

그림10은 교량의 정적 최대 변위와 동적 최대 변위를 비율로 나타낸 DIF(Dynamic Increment Factor)를 그림으로 나타낸 것이다. DIF역시 스펙트럼 깊이에 따라 증가하는 경향을 보여주었다. 스펙트럼이 없는 경우 DIF가 AGT 차량 주행 속도에 따라 증가하는 경향을 보여주었으나 스펙트럼이 있는 경우 그림10의 a)와 b)에 보이는 것과 같이 차량 주행속도가 증가할 수록 감소하는 경향을 보여준다. 노면 요철에 따른 DIF변화는 가속도 RMS와 같이 스펙트럼이 있는 경우 노면 요철의 영향을 미미하게 반영됨을 그림10의 c)를 통해 알 수 있다.

4. 결론 및 추후 연구과제

이상의 시뮬레이션을 통해 교량의 발생한 스펙트럼은 그 깊이가 작더라도 교량 응답에 악영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히 교량 진동의 경우 스펙트럼이 있는 경우 그 증가량이 커서 교량 내구성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되므로 AGT 교량 유지 관리 시 스펙트럼 발생에 대한 관리가 철저하게 이루어져야 할 것이다.

추후 본 연구를 통해 얻어진 시뮬레이션 결과를 실 교량 시험과 비교하여 프로그램을 검증 보완해야 할 것이며, 보다 다양한 변수에 따른 시뮬레이션 수행을 통해 AGT 차량이 교량을 주행 시 발생할 수 있는 여러 가지 현상들을 규명하여야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 남영국, (2004년), “도로포장공학”, pp.351-357.
- 2) 송재필, (2002년), “A Study on Dynamic Response Analysis and Vibration Serviceability of Bridge-AGT Vehicle Interaction System”, 박사학위논문, 중앙대학교.