

# 곡선 교량과 AGT 차량의 상호작용에 의한 동적 응답 해석

## Dynamic Response Analysis of Curved Bridge-AGT Vehicle Interaction System

이안호\*, 송재필\*\*, 김기봉\*\*\*

Lee, An-Ho Song, Jae-Pil Kim, Ki-Bong

---

### Abstract

The topic on today is dynamic response analysis of curved bridge-AGT(Automated Guide-way Transit) vehicle interaction system. Rubber wheel type AGT vehicle is adopted in this study, and the vehicle is idealized as three dimensional eleven DOF model. Three types of composited steel box girder bridges are modeled with F.E. method. And three types of artificially generated surface roughnesses are adopted for analysis. The dynamic equations of curved bridge, AGT vehicle and surface roughness are derived by using Lagrange's equation of motion. And the equations are solved by Newmark- $\beta$  method. As a result, The dynamic increasement factor is inverse proportional to radius curvature.

---

### 1. 서 론

AGT 시스템은 경량전철의 한 종류로 우리나라와 같이 도심지의 밀도가 높은 지역의 교통문제 해결에 적절한 수단으로, 현재 국내에서도 AGT 시스템을 도입하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. AGT 시스템은 공사비 절감과 공기 단축을 위해 고가 구조물로 건설되는 경우가 많고, 노선이 기존의 도로 위를 지나는 경우가 많아 곡선 교량의 비중이 크고, 일반 철도나 도로교량과 비교하여 교량의 곡률 반경이 작아 곡선에 대한 영향을 많이 받을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 곡선교량과 AGT 차량 그리고 노면 요철의 상호 작용에 의해 발생하는 교량과 차량의 응답을 시뮬레이션을 통해 구하여 AGT 곡선교량 설계에 필수적인 기초 자료를 확보하고자 한다.

### 2. 교량-AGT 차량 상호작용 해석

#### 2.1 AGT 차량 해석 모델

본 연구에 적용된 AGT 차량 모델은 참고문헌 1.의 내용을 참고로 하여 그림 1.과 같이 이상화

---

\* 한국철도기술연구원, 경량전철연구팀, 선임연구원, 공학석사, 031-461-8531(교427), ahlee@krrri.re.kr

\*\* 중앙대학교 건설환경연구소, 연구원, 공학박사, 031-670-4661, gagamel@ms.cau.ac.kr

\*\*\* 중앙대학교 건설대학, 교수, 공학박사, 031-670-3337, kbkim@cau.ac.kr

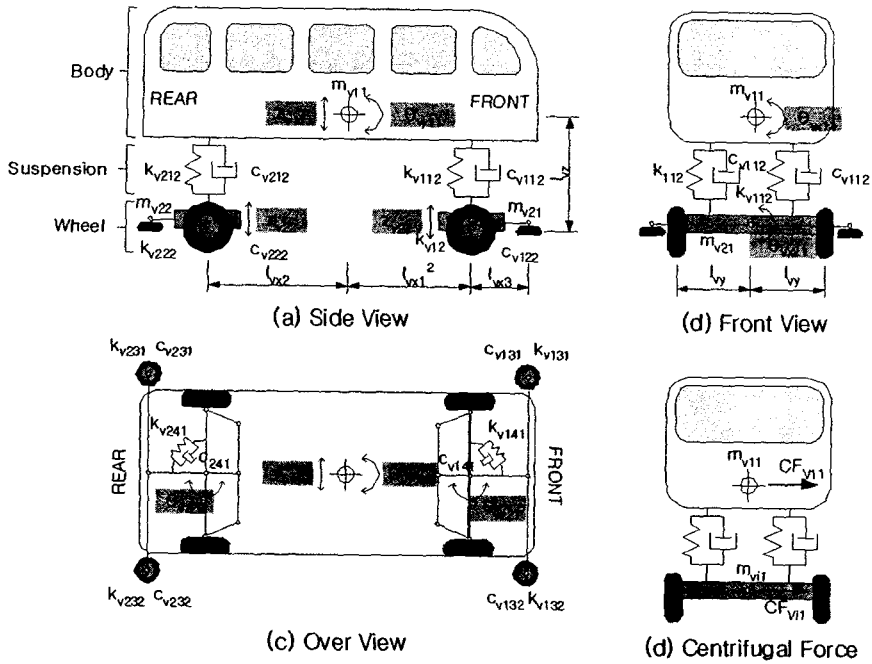


그림 1. AGT 차량 이상화 모델

하였다. 그림 1.에서  $m_{v11}$ 과  $m_{v2i}$ 는 차체와 현가계 질량을 나타내고  $k_{vij}$ 와  $c_{vij}$ 는 각각 스프링 상수와 감쇠계수를 뜻하는 것으로 상세한 설명은 표 1.에 보이는 것과 같다. 그리고 각 자유도에 대한 설명은 표 2.에 나타내었다. 그림 1.과 표 1. 그리고 표 2.에서 아래첨자  $v$ 는 차량 번호를,  $i$ 는 좌·우를 나타내는 것으로  $i=1$ 이면 좌측을  $i=2$ 이면 우측을 뜻한다. 그리고  $j$ 는  $i$ 와 같은 방법으로 앞 차축과 뒤 차축을 나타내는 것이다.

곡선교량을 주행하는 차량은 그림 1.의 (d)와 같이 회전하는 반대방향으로 원심력이 작용하게 되는데 그 원심력의 크기는 식(1)과 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$CF_{v11} = m_{11} \cdot r \cdot \omega^2 = m_{11} \cdot v^2 / r \quad (1)$$

$$CF_{v2i} = m_{2i} \cdot r \cdot \omega^2 = m_{2i} \cdot v^2 / r \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서  $r$ 은 교량의 곡선반경이고  $v$ 는 AGT 차량의 주행속도이다. 본 연구에서는 곡선 주행시 발생하는 원심력을 차체와 현가계 무게중심에 횡방향 힘으로 작용시켜 해석을 실시하였다.

표 1. Properties of AGT vehicle model

Description		Nomenclature	Value
Mass	Body (ton)	$m_{v11}$	1.630
	Suspension system (ton)	$m_{v2i}$	0.153
	Vehicle (ton)	$m_{v12}$	1.936
Spring constant	Suspension (kN/m)	$k_{v1j}$	735.8
	Tire (kN/m)	$k_{v2j}$	1471.5
	Guide wheel (kN/m)	$k_{v3j}$	1471.5
	Steering system (kN·m/rad)	$k_{v4j}$	245.25
Damping constant	Suspension (kN·s/m)	$c_{v1j}$	7.848
	Tire (kN·s/m)	$c_{v2j}$	0.00
	Guide wheel (kN·s/m)	$c_{v3j}$	9.81
	Steering system (kN·m·s/rad)	$c_{i4j}$	58.86
Geometry	From C.G.* of body to C.G. of front and rear axle (m)	$l_{vx2}$	2.50
	From guide wheel to C.G. of axle (m)	$l_{vx3}$	0.50
	From C.G. of body to left and right tire (m)	$l_{vy}$	0.87
	From C.G. of body to guide wheel (m)	$l_{vx}$	0.70

\* Center of Gravity

표 2. AGT vehicle motions

Description		Nomenclature
Body motions	Vertical and lateral motion	$z_{v11}, y_{v11}$
	Rolling, pitching, and yawing	$\theta_{vx11}, \theta_{vy11}, \theta_{vz11}$
Axle motions	Parallel hop of front and rear suspension system	$z_{v21}, z_{v22}$
	Axle tramp of front and rear suspension system	$\theta_{vx21}, \theta_{vx22}$
	Steering of front and rear suspension system	$\theta_{vz21}, \theta_{vz22}$

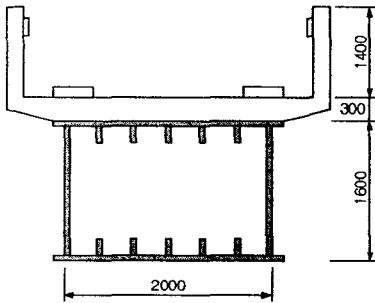


그림 2. 교량 단면도

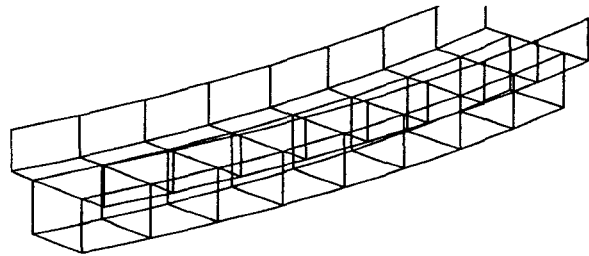


그림 3. 교량 해석 모델

## 2.2 교량 해석 모델

해석에 사용된 교량은 경량 전철 시험선 구간에 적용된 강 박스 거더 곡선 교량으로 교량의 단면은 그림 2와 같고 교량의 제원은 표 3에 나타난 것과 같다. 교량은 유한 요소법에 의해 그림 3과 같이 모델링하였다. 본 연구에서는 곡률 변화에 따른 교량의 응답 변화를 보기 위해 같은 단면의 제원은 같고 곡률 반경이 다른 세 가지 교량에 대해 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 교량의 곡률 반경은 150m, 180m 그리고 210m이다.

표 3. Properties of PSC bridge

Property		Value
Span length (m)		30
Radious of curvature (m)		150, 180, 210
Main girder	Elastic modulus (kN/m)	$2.55 \times 10^7$
	Cross sectional area (m <sup>2</sup> )	0.0903
	Weight per unit length (kN/m)	72.205
	Moment of inertia (m <sup>4</sup> )	0.03036
Deck slab	Elastic modulus (kN/m)	$2.55 \times 10^7$
	Thickness (m)	0.300
	Weight per unit length (kN/m)	40.776

## 2.3 교량-차량 연성 운동 방정식

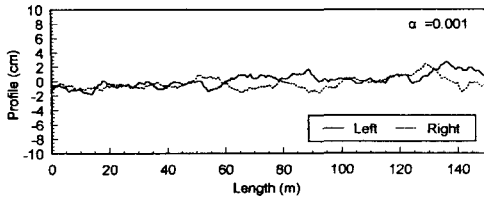
교량, 차량 그리고 노면요철의 상호작용에 의한 연성 운동 방정식은 식(3)과 같은 Lagrange 운동 방정식을 이용하여 구하였다.<sup>(2)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U_e}{\partial q_i} + \frac{\partial U_d}{\partial \dot{q}_i} = P_E \quad (3)$$

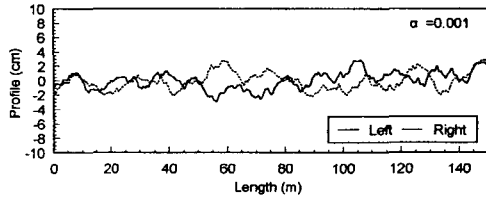
식(3)에서  $T$ ,  $U_e$  그리고  $U_d$ 는 각각 교량-차량 상호 작용 시스템에서의 운동에너지, 위치에너지 그리고 소산에너지를 나타내는 것이고  $q_i$ 는 미지변수를 뜻한다.  $P_E$ 는 외부에서 작용하는 하중으로 본 연구에서는 차량의 원심력을 외부하중으로 하였다. 교량 및 차량의 각 자유도에 대한 운동방정식은 식(3)을 각 자유도에 대해 편미분하여 구할 수 있다. 운동방정식의 해는 직접적분법인 Newmark- $\beta$  method를 이용하여 구하였으며 계산은 컴퓨터 프로그램을 사용하여 하였다. 본 연구에 사용된 교량-차량 상호작용에 의한 동적 응답 해석 프로그램의 신뢰성은 참고문헌 2에서 검증된 바 있다.

## 3. 해석 결과

해석에 사용된 차량과 제원은 표 1에 나타나 있는데 이 값은 참고문헌 3과 참고문헌 4를 참고로 하여 구하였다. 그리고 교량의 제원은 현재 건설중인 경량전철 시험선 구간의 도면을 참고로 하여 사용하였다. 본 연구는 아직 초기 단계로 여러 변수에 대한 해석은 실시하지 못하고 교량의 곡률 반경만을 변수로 하여 해석을 실시하였다. 추후 여러 변수에 대한 해석이 추가로 실시되어야 할 것이다. 그리고 본 연구에 사용된 노면과 안내 레일의 요철은 power spectral density function

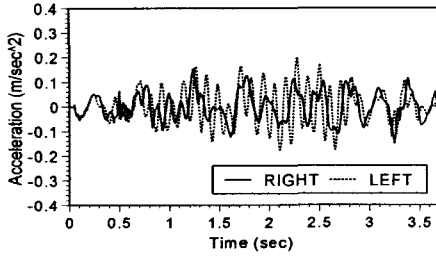


a) Railway profile

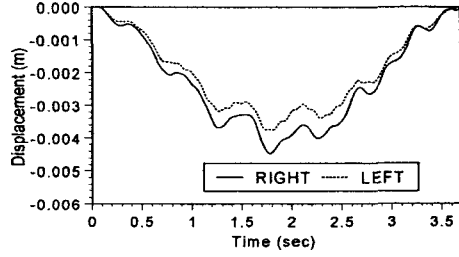


b) Guide-rail profile

그림 4. 노면 요철

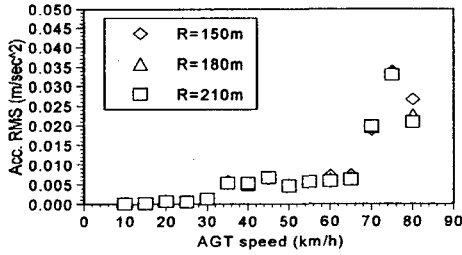


a) 가속도 응답

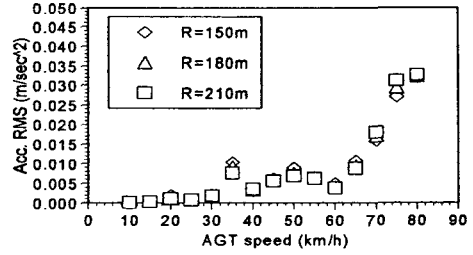


b) 변위 응답

그림 5. 교량응답 시간 이력 곡선 (R=180m, V=40km/h)

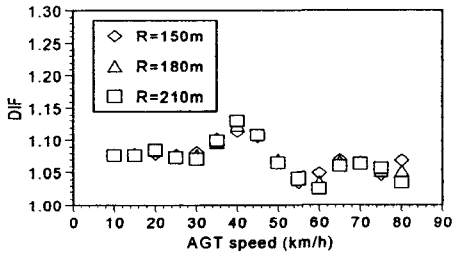


a) 내측

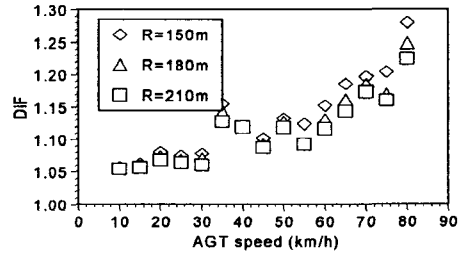


b) 외측

그림 6. 가속도 평균제곱근



a) 내측



b) 외측

그림 7. 동적증가계수

을 기초로 하여 생성한 것으로<sup>(5)</sup> 승차감을 기준으로 한 ISO 기준에 의하면 매우 평활(Very smooth)한 상태의 노면이다. 노면과 안내 레일의 요철은 그림 4.에 나타난 것과 같다.

AGT 차량의 주행속도는 10km/h에서 80km/h까지 5km/h 씩 증가시키며 해석을 실시하였다. 그림 5.는 교량의 곡선 반경이 180m이고 차량 주행 속도가 40km/h인 경우 지간 중앙 내측(left)과 외측(right)의 수직방향 가속도와 변위를 나타낸 것이다. 그림 6.은 지간 중앙에서 곡선 내측과 외측의 가속도 평균제곱근 값을 속도와 곡선반경에 의해 나타낸 것이다. 가속도 응답의 경우 곡선반경 변화에 따라 어떤 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 지간 중앙의 내측과 외측의 변위를 통해 구한 동적증가계수는 그림 7.과 같다. 그림 7.(a)와 (b)에 보이는 것과 같이 외측 변위로 구한 동적 증가 계수 값이 더 큰 값을 보였으며, 교량 곡률반경의 변화에 대해서는 내측점의 경우 변화가 거의 없었으나 외측점은 교량의 곡률이 작을수록 더 큰 값을 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 곡선교량과 AGT 차량의 상호작용에 의한 동적응답을 시뮬레이션에 의해 구하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 교량 곡률 반경 변화에 따른 교량의 가속도 응답은 큰 차이를 보이지 않는다.
2. 동적 증가 계수는 곡률 반경 외측점의 변위를 통해 구한 값이 더 큰 값을 보였다.
3. 내측점에서 구한 동적 증가는 곡률 반경 변화에 따라 큰 변화가 없었으나 외측점에서 구한 동적 증가 계수는 곡률 반경이 작아질수록 증가하는 경향을 보였다.

#### 참고문헌

1. 송재필, "A Study on Dynamic Response Analysis and Vibration Serviceability of Bridge-AGT Vehicle Interaction System", 박사학위논문, 중앙대학교, 2002.
2. Thomson W. T., *Theory of Vibration with Applications*, Prentice-Hall, New York, 1988, pp. 196-198
3. 건설교통부, "경량전철 표준과 연구결과 보고서", 1998
4. 網島均, 福本陽三, "新交通車輛の走行シミュレーション", 神戸製鋼技報, Vol. 37, No. 4, 1987, pp.49-52.
5. 川谷充郎, 小菅朗, 嶋田玲志, 小松定夫, 1987, "路面不整の統計學的特性と道路橋の衝擊係數", 構造工學論文集, Vol.33A, pp.459-466.

#### 감사의 글

본 연구는 "포스코 기술연구소"의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 깊이 감사드립니다.