

## 교량-AGT 차량 상호작용에 의한 교량의 동적응답

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

송재필<sup>†</sup> · 김현호\* · 나상주\*\*

Jae-Pil Song · Hyun-Ho Kim · Sang-Ju Rha

#### Abstract

Dynamic equations of motion for the interaction system of bridge and vehicle are derived to investigate the dynamic responses of bridge and vehicles induced by moving automated guide-way transit(AGT) vehicle and surface roughness of bridge. The vehicle model for AGT vehicle is idealized as 11 DOF including yawing, lateral translation and steering of wheels, and the bridges are modeled with finite element method. The AGT vehicle model was verified by experimental study. Parametric studies are carried out to investigate the effect of vehicle speed, surface roughness, stiffness and damping of the suspension system, AGT vehicles and dynamic wheel loads of the AGT vehicles. From the parametric study it can be seen that the dynamic incremental factor of the bridge and dynamic responses of vehicles have a tendency to increase with vehicle speeds, surface roughness and the stiffness of AGT vehicle suspension system. On the other hand those dynamic wheel loads have tendencies to decrease in according to increase of damping of the suspension system.

**Keywords** : AGT(안내궤도식 자동운행 철도), Dynamic interaction of Bridge-AGT vehicle(교량-AGT 차량 동적상호작용), Dynamic incremental factor(동적증가계수), Dynamic response(동적응답)

#### 1. 서론

국내의 교통정책은 증가하는 교통량의 문제를 해결하기 위하여 도로 및 철도 등 교통시설의 공급을 확대함과 동시에 버스전용차로의 확대 등을 중심으로 추진해왔다. 그러나 도로시설의 확충은 승용차 이용을 부추기는 결과를 가져와 급증하는 노면교통수요를 감당하기에는 역부족이며 높은 용지 보상비로 인하여 추진이 용이하지 않다. 결국 대도시의 교통문제해결을 위해서 지하철 또는 전철과 같은 대량의 수송수단을 도입하여 교통수요를 처리하여야 하나 높은 투자 사업비가 소요되고 타교통수단과의 연계성 측면의 경쟁력이 떨어져 현대 도시민들의 도시철도에 대한 다양한 요구에 폭넓게 대응하지 못하는 한계성을 가지고 있다.

경량전철은 일반 철도에 비해 수송능력은 작지만 소음·진동이 적고 등판능력이 우수하며 외관이 수려하여 환경 친화

적인 구조물로 설계가 가능한 장점을 가지는 자동화된 차량 운행 시스템의 새로운 교통수단으로 평가되고 있다. 또한 도심지에 건설 시 선형계획이 용이하여 접근성 또한 우수한 시스템으로 국내와 같이 인구 밀도가 높아 도시가 복잡하고 유동인구가 많은 지역에 적합하며 도심과 부도심을 연결하는 노선으로 활용하기에 적합한 교통수단으로 판단된다. 이에 국내외적으로 설계기준의 정립과 경량전철의 정적 하중에 대한 교량 구조물의 응답 및 설계법 등에 대한 기초적인 연구는 어느 정도 이루어져 있으나 차량-교량의 상호 작용에 따른 교량 구조물의 동적 특성에 관한 검토는 아직 미진한 실정이다.

경량전철의 경우 guide-rail에 의해 차량이 조향이 이루어지므로 경량전철 차량이 주행하는 노면의 요철뿐만 아니라 guide-rail의 요철 또한 경량 전철의 주행성 및 교량 구조물에 영향을 미칠 가능성이 크다. 아울러 대부분의 국가에서 사용하고 있는 경량전철의 동적증가계수는 일반 도로교용 또는 철도교용 동적증가계수를 그대로 적용하고 있는 실정인데, 이는 경량전철이 자동차 또는 철도와 비교하여 저속으로 운행한다는 점과 경량이라는 점을 감안한다면 이에 대한 적절

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 슈어테크, 기술연구소, 팀장  
E-mail : jpsong@suretech.co.kr  
TEL : (032)433-2851 FAX : (032)433-2854

\* 정회원, 중앙대학교 건설환경연구소, 전임연구원

\*\* 정회원, 중앙대학교 대학원 박사과정

한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내의 실정에 가장 적합하다고 평가되는[1] 고무차륜 안내 궤도식 자동운전 철도(Automated Guide-way Transit: AGT)에 대해 차량 및 교량 구조물의 모델링을 통한 교량 구조물의 동적 거동을 확인하고자 한다. AGT차량의 해석모델은 요잉(yawing), 차량의 횡방향 변위, 차륜의 스티어링(steering)의 횡방향 운동을 포함하는 11자유도 3차원 모델로 개발되었으며, 교량모델은 유한요소법에 의한 3차원 모델을 사용하였다. 이와 같이 모델링 된 차량과 교량을 차량의 주행 속도, 차량 현가계의 탄성계수와 감쇠계수, 노면과 가이드 레일의 요철 등을 변수로 하여 개발된 수치해석 프로그램(Bridge-AGT Dynamic Interaction Analysis: BADIA)으로 해석을 실시하고 교량의 동적응답을 검토하였다.

## 2. 교량-AGT 차량 상호작용 시스템 및 해석모델

교량-차량 상호작용 시스템에 대한 지배미분방정식은 식 (1)에 나타난 것과 같은 Lagrange 운동방정식을 사용하여 유도하였다. Lagrange 운동방정식은 동적 시스템을 정식화하는데 가장 많이 사용되는 방법으로 임의의 동적 시스템에 대한 운동방정식의 수식화에 대해 강력하며 다양한 방법을 제공한다. 운동방정식에 대한 해는 직접적분법인 Newmark- $\beta$  방법에 의해 구하였으며, 이 때 상수  $\beta$ 는 0.25를 사용하였고 해의 오차는 0.001이하가 되도록 하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U_e}{\partial q_i} + \frac{\partial U_d}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (1)$$

표 1. AGT 차량모델의 제원

제원		기호	값
질량	몸체 (ton)	$m_{11}$	1.630
	현가시스템 (ton)	$m_{2i}$	0.153
	차륜 (ton)	$m_{12}$	1.936
스프링계수	현가계 (kN/m)	$k_{i1j}$	491, 736, 981
	타이어 (kN/m)	$k_{i2j}$	1471.5
	안내차륜 (kN/m)	$k_{i3j}$	1471.5
	조향시스템 (kN·m/rad)	$k_{i4j}$	245.25
감쇠계수	현가계 (kN·s/m)	$c_{i1j}$	4.91, 7.85, 10.79
	타이어 (kN·s/m)	$c_{i2j}$	0.00
	안내차륜 (kN·s/m)	$c_{i3j}$	9.81
	조향시스템 (kN·ms/rad)	$c_{i4j}$	58.86
형상제원	차량의 무게중심으로부터 전·후륜 중심까지의 거리 (m)	$l_{xi}$	2.50
	안내차륜으로부터 차축 중심까지의 거리 (m)	$l_{x3}$	0.50
	차량의 무게중심으로부터 좌·우 차륜까지의 거리 (m)	$l_y$	0.87
	차량의 무게중심으로부터 안내차륜까지의 거리 (m)	$l_z$	0.70

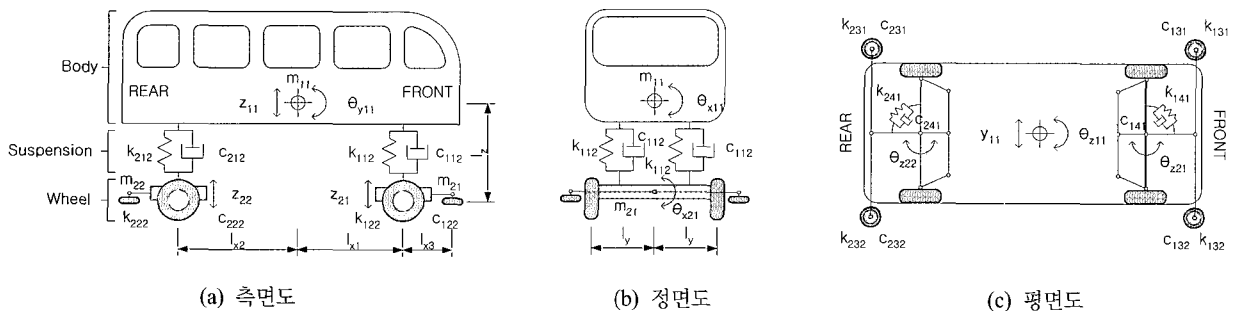


그림 1. 11자유도를 가지는 AGT 차량 모델

여기에서,  $T$ 는 운동에너지,  $U_e$ 는 탄성운동에 의한 위치에너지 그리고  $U_d$ 는 감쇠에 의한 분산에너지를 뜻하며  $q_i$ 는 시스템의 미지변수이다.

본 연구에서 사용한 해석 프로그램의 검증 및 유효성은 기존의 연구를 통해 기 확인되었다[2,3].

### 2.1 3차원 AGT 차량 모델

일반적으로 AGT 시스템은 조향 시스템에 따라 four wheel steering system, front wheel steering system, single axle bogie system으로 분류되고[4] 차륜의 재질에 따라 철제타입과 고무타입으로 나누어진다. 본 연구에서는 고무차륜타입의 four wheel steering system AGT 차량을 그림 1과 같이 횡방향 운동을 포함하는 11 자유도의 3차원 모델로 이상화하였다. 그림 1에서  $k$ 는 강성계수,  $c$ 는 감쇠계수,  $m$ 은 질량을 그리고  $y, z$ 와  $\theta$ 는 각각 변위와 회전변위를 나타내는 것이고, 첨자  $i$ 는 차량 전·후 축을 표시하는 것으로  $i=1$ 이면 전축을,  $i=2$ 이면 후축을 표시하는 것이다.  $j$ 는  $i$ 와 같은 방법으로 좌·우를 나타내기 위해 사용하였다. 상세한 첨자 설명과 제원은 표 1에 정리하였다. 이 고무차륜타입의 four wheel steering system AGT 차량은 국내에 적절한 시스템으로 평가되고 있으며[1], 현재 국내에 건설 중인 경량전철 시험선 역시 AGT 시스템을 채택하고 있다.

AGT 시스템에서 차량은 교량의 guide-rail과 접촉하는 guide wheel에 의해 조향되어지고 이것은 교량 및 AGT 차량에 횡력을 가하게 된다. 그리고 이러한 횡력은 교량과 차량의 동적응답에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다. AGT 차량은 몸체(Body), 현가장치(Suspension), 조향장치(axle with steering system), 차륜(wheel)의 네 부분으로 분리할 수 있으며 본 연구에 사용한 차량모델도 역시 이 네 부분으로 나누어 모델링을 실시하였다. AGT 차량의 몸체는 강체로 취급되어지며 질량은 무게중심에 집중되어지고, 몸체의 질량은 전체 차량의 응답에 영향을 미친다. 완충장치는 질량이 없는 스프링과 댐퍼의 조합으로 간주되며 이것은 교량의 진동과 동적응답에 영향을 미친다. 완충장치 스프링은 선형탄성으로 가정하고 완충장치의 감쇠는 점성으로 간주하였다. 일반적으로 AGT 차량의 축은 버스나 트럭과 비슷한 구조이나, AGT 차량의 차축은 조향 시스템을 포함하므로 더 무겁다. 축의 질량은 몸체와 같이 무게중심에 집중되어지는 것으로 취급한다. 차륜의 스프링 계수와 감쇠 계수를 평가하는 것은 어려우므로, 참고 문헌의 내용을 인용하였다[5,6]. 그리고 차륜의 질량은 축 질량에 포함되는 것으로 간주하였다.

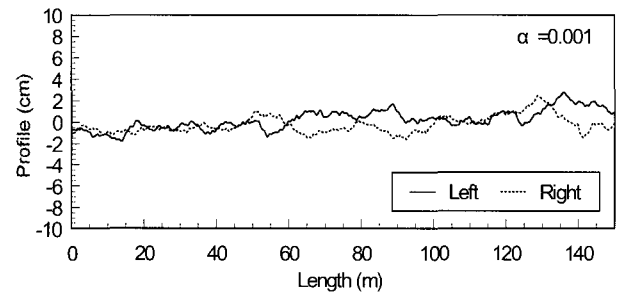
### 2.2 노면 요철

수치해석에 사용된 노면 및 안내 레일의 요철은 식 (2)의 power spectrum density(PSD) 함수에[7] 근거하여 Monte-Carlo 시뮬레이션에 의해 인공적으로 생성하였다.

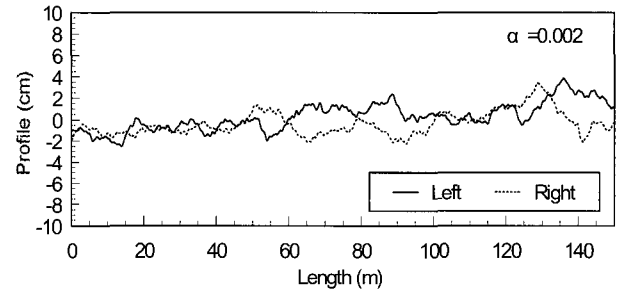
$$S(\Omega) = \frac{\alpha}{(\Omega^n + \beta^n)} \quad (2)$$

표 2. 노면 모델

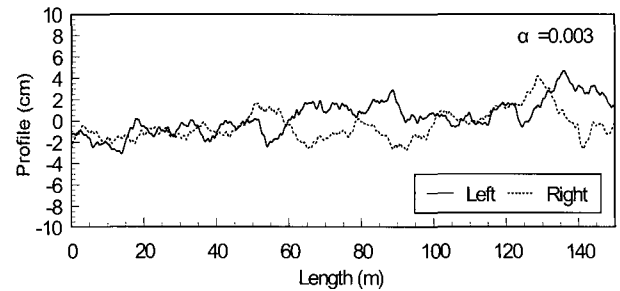
노면 모델	PSD 함수의 계수	ISO 기준
Railway 1	$\alpha=0.003, \beta=0.02$	Smooth
Railway 2	$\alpha=0.002, \beta=0.02$	Very smooth
Railway 3	$\alpha=0.001, \beta=0.02$	Very smooth
Guide-rail	$\alpha=0.001, \beta=0.02$	Very smooth



(a) railway profile ( $\alpha=0.001$ )



(b) railway profile ( $\alpha=0.002$ )



(c) railway profile ( $\alpha=0.003$ )

그림 2. 인공 노면 요철

여기서,  $\alpha(cm^2/c/m)$ 는 노면 요철의 상태를 나타내는 계수,  $\beta$ 는  $\Omega$ 가 0일 때 PSD 함수가 발산하는 것을 방지하는 변수이고  $n$ 은 PSD 곡선의 강도나 기울기의 분포를 표현하는 변수이다.

일반적으로  $\beta$ 값은 동적 응답에 대해 별다른 영향을 미치지 않으므로[7] 노면의 조건을 표현하는 변수로서  $\alpha$ 값을 사용하였다. 표 2에 승객의 승차감에 기초한 노면 요철의 ISO 분류를 나타내었다[8]. ISO 분류는 PSD 함수를 이용하여 노면조도를 평가할 수 있는 유일한 기준이다. 수치해석에 적용된 인공 노면 요철은 ISO 기준에 의하면 매우 평활(very smooth)한 상태의 노면들이다.

그림 2에  $\alpha$ 값에 따른 노면상태를 나타내었다.

### 2.3 교량의 수치해석 모델

본 연구에서 사용된 교량의 모델은 단순 지지된 Prestressed Concrete(PSC) 교량으로 30m의 지간인 직선교를 3차원 프레임 요소로 모델링하였다. 표 3에 교량의 제원을 나타내었으며 주거터와 가로보의 무게는 1개의 값을 표시한 것이다. 수치해석에 사용된 교량의 상세도와 유한요소모델을 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

## 3. 교량의 동적응답

교량-AGT 차량 상호작용 수치해석 프로그램(BAIDA)을 이용하여 차량의 주행 속도, 차량의 수, 차량 현가계의 탄성계

표 3. 교량의 제원

형식		PSC 교량
경간 (m)		30
거터 수		2
주거터	탄성계수 (kN/m)	$2.55 \times 10^7$
	단면적 ( $m^2$ )	0.6953
	단위 길이 당 무게 (kN)	17.393
	단면2차모멘트 ( $m^4$ )	0.3385
가로보	탄성계수 (kN/m)	$2.55 \times 10^7$
	단면적 ( $m^2$ )	0.7080
	단위 길이 당 무게 (kN)	17.711
	단면2차모멘트 ( $m^4$ )	0.01848
바닥판	탄성계수 (kN/m)	$2.55 \times 10^7$
	두께 (m)	0.300
	단위 길이 당 무게 (kN/m)	40.776

수(K)와 감쇠계수(D), 노면과 가이드 레일의 요철 등을 변수로 하여 교량 동적응답의 변화를 시뮬레이션 하였다. 차량의 주행속도는 10km/hr에서 일반적인 경량전철의 최고속도인 80km/hr까지 5km/hr씩 증가시키며 해석을 실시하였다. 교량 변위는 차량이 교량에 정지해 있을 때보다 주행 중일 때 최고치를 나타낸다. 이것은 교량의 진동, 차량 및 노면 요철 때문에 기인한 것이다. 차량 주행 시 발생하는 교량의 동적 변이증가량의 비교를 위한 동적 증가 계수(Dynamic Increment Factor: DIF)는 식 (3)과 그림 5에 표현된 것처럼 최대 정적 응답을 포함한 동적 응답의 최대 1주기 동안의 동적 및 정적 응답 사이의 절대 최대 차이 비로 정의된다.

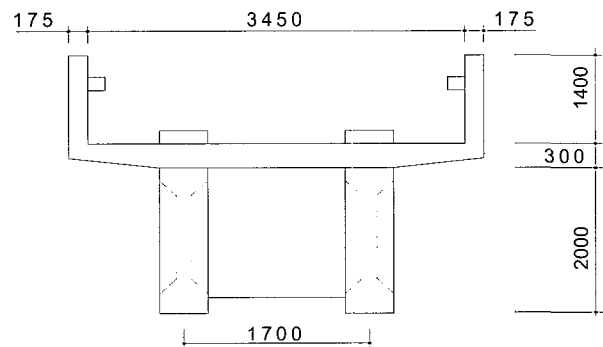


그림 3. PSC 교량의 단면도(units:mm)

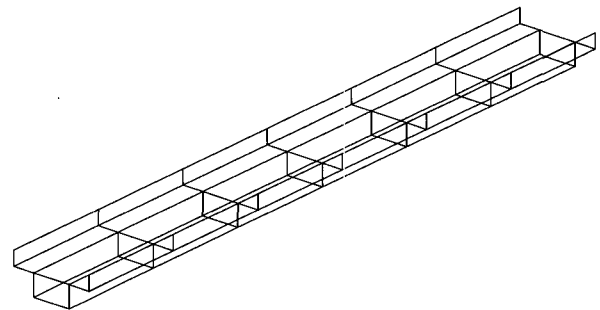


그림 4. PSC 교량의 유한요소 모델

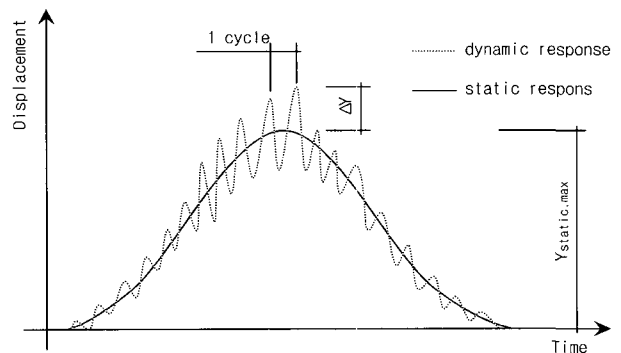


그림 5. 동적 증가 계수(DIF)의 정의

$$DIF = \frac{|\Delta Y|_{\max}}{Y_{\text{static},\max}} + 1 \quad (3)$$

### 3.1 교량의 동적증가계수(DIF)

교량의 DIF를 주행속도, 차량대수, 차량의 현가계의 강성 및 감쇠, 노면조도, 차량의 중량 등의 영향을 고려하여 각 변수의 변화에 따른 DIF의 변화를 그림 6~그림 9에 나타내었다. 여기서 강성과 감쇠값은 현재 국내에 운행중인 AGT 시스템이 없는 이유로 AGT 차량과 유사한 구조의 2축 트럭 값을 기준으로 하였다. 해석 결과를 보면 AGT 차량의 주행 속도가 일정하게 증가함에 따라 DIF의 값들이 파동형태의 오르내림을 보였으며 차량 대수가 2대(NV=2)인 경우보다 4대(NV=4)인 경우가 더 큰 값을 나타내었다.

그림 6은 차량의 현가계 강성에 대한 DIF의 변화를 나타낸 것이다. 노면조도 계수는  $\alpha=0.001$ 을 사용하였다. 전반적으로 현가계의 강성이 증가함에 따라 DIF도 증가하였으며, 주행속도가 45km/hr~50km/hr 근처에서 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 일반적인 경량전철의 주행속도가 30km/hr~

60km/hr인 점을 고려해보면 공용 주행속도 내에서 DIF의 최대점이 발생하지 않도록 현가계 강성의 선택에 있어서 주의해야 할 필요가 있다고 판단되었다.

현가계의 감쇠에 따른 DIF의 변화를 그림 7에 나타내었다. 현가계 감쇠값이 커짐에 따라 DIF의 크기는 감소하였으며 그 변화량은 다른 파라미터에 비해 작게 나타났다.

노면 요철의 정도를 나타내는  $\alpha$ 값이 커짐에 따라 동적 증가계수도 증가하는 것을 그림 8에서 볼 수 있다. 특히 50km/hr에서 차량대수 4대의 경우 DIF의 값이 급격히 증가하여 최대값을 나타내는데 이는 차량 또는 교량의 진동과 노면 요철의 공간 주파수가 공진한 것으로 판단된다. 따라서 경량전철용 주행로 노면 요철의 계측과 이를 통한 진동 특성의 검토가 필요하다고 판단되었다.

그림 9는 차량 중량(공차 및 만차)에 따른 DIF를 나타낸 것으로 AGT 차량 중량이 감소함에 따라 최대값이 발생하는 속도가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 AGT 차량 중량이 감소하는 경우, 차량 고유 진동수가 증가하여 교량과 공진이 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 전체적으로 차량 중량이 작은 경우가 DIF의 값이 더 큰 경향을 보였다. 각 변수별 동적 증

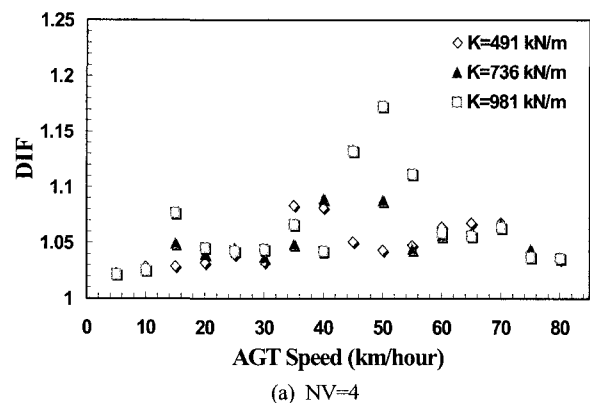
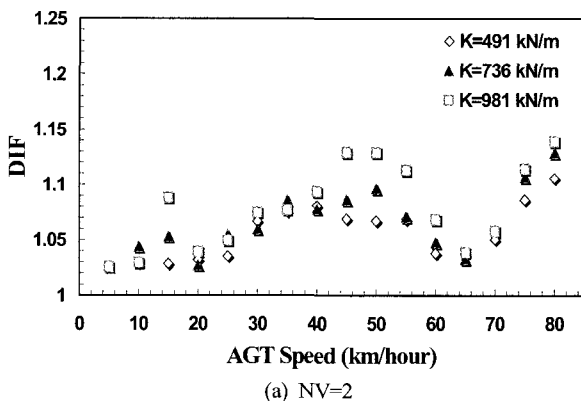


그림 6. 차량 현가계 강성에 따른 동적증가계수(D=4.91kN s/m,  $\alpha=0.001$ )

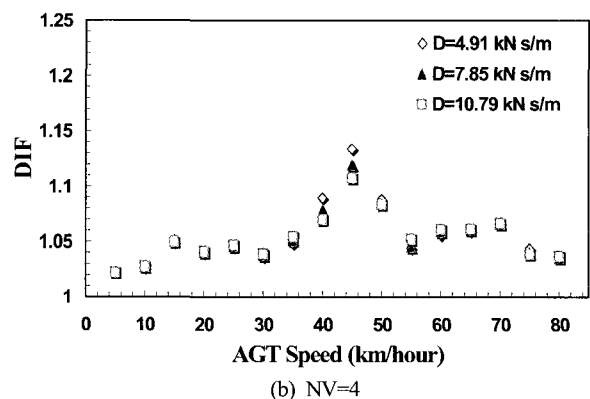
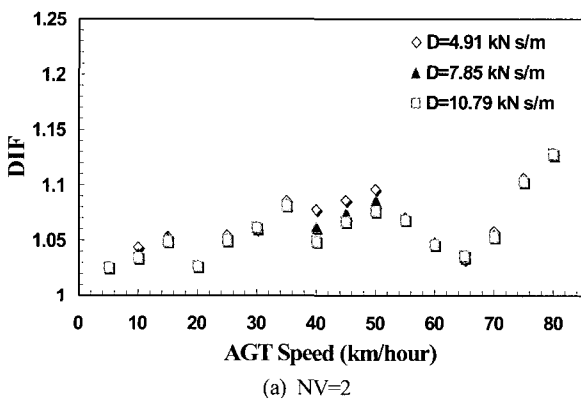


그림 7. 차량 현가계 감쇠에 따른 동적증가계수(K=736kN/m,  $\alpha=0.001$ )

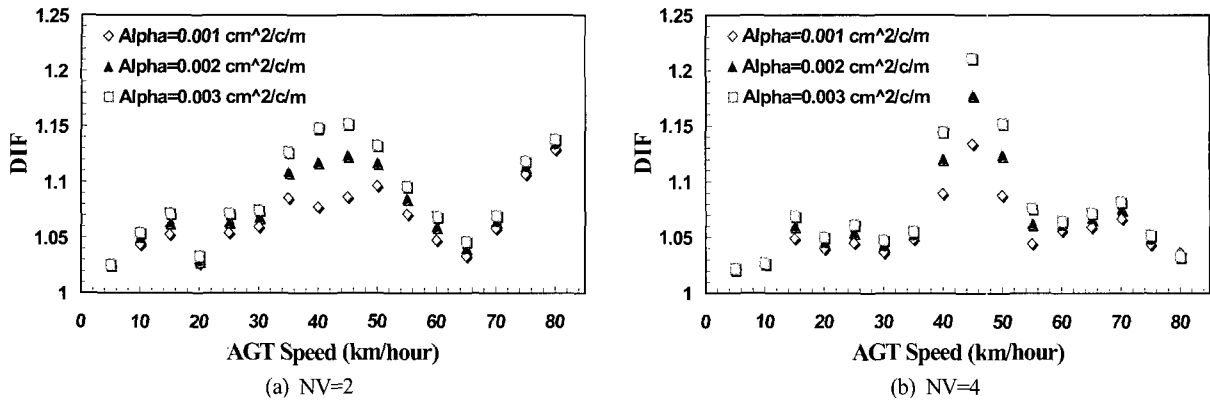


그림 8. 노면 요철에 따른 동적증가계수(K=736kN/m, D=4.91kN s/m)

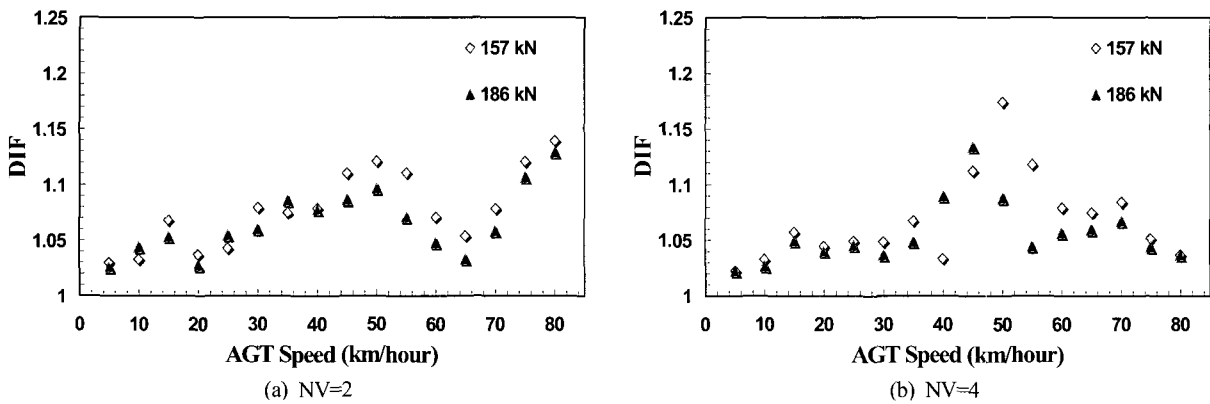


그림 9. 차량 중량에 따른 동적증가계수(K=736kN/m, D=4.91kN s/m, α=0.001)

가 계수 평균값은 1.147에서 1.164로 이는 국내 경량전철 설계기준에 의한  $\frac{15}{(40+1)} = 1.217$ [9]과 일본 경량전철 설계 기준에 의한  $\frac{7}{(50+1)} = 1.088$ [10]의 사이 값을 보였다.

### 3.2 교량의 가속도 응답

교량의 진동은 자체적으로는 물론 인근 구조물에도 해를 입히며 환경적인 문제를 야기할 수도 있다. 그러므로 AGT 교량과 같이 도심지에서는 특히 진동을 최소화하는 것이 상당히 중요하다. 이 장에서는 차량운행 속도, 차량 대수 및 곡선 반경에 따른 교량의 가속도 응답에 대한 변화를 검토하였다. 가속도 값은 음(-)과 양(+),의 값으로 구성된 진동이므로 일반적인 평균값을 사용할 경우 모든 값이 0에 가깝게 나타나기 때문에 정량적인 평가가 불가능하여 본 연구에서는 교량 가속도의 정량적 평가를 위하여 평균제곱근(Root Mean Square; RMS)을 사용하였다. 교량의 가속도의 평균제곱근을 주행속도, 차량대수, 차량의 현가계의 강성 및 감쇠, 노면조도, 차량의 중량등의 영향을 고려하여 각 변수의 변화에 따른 가속도의 평균제곱근의 변화를 그림 10~그림 13에 나타내었다. 전

반적으로 차량의 주행 속도에 따라 교량의 가속도 응답이 증가하는 경향을 보이지만 35km/hr 근처에서 peak값을 나타내고 있다. 이것은 교량과 차량의 진동 특성 그리고 노면 요철의 공간주파수가 공진을 일으킨 것으로 판단된다. 또한 각 변수에 관계없이 60km/hr 이상의 속도에서는 교량의 가속도 평균 제곱근 값이 모두 크게 나타난다. 이것은 실제 운행속도가 60km/hr 이상의 주행속도에 대해서는 특별한 대책이 요구되고 있음을 알 수 있다.

그림 10에서 결과를 살펴보면 차량의 속도 및 현가계 강성이 증가하면서 교량의 가속도 응답도 비례적으로 증가하였으며 약 35km/hr에서 최대값을 나타내고 있다.

한편 현가계 감쇠에 대해서는 차량 속도의 증가에 따라 가속도 평균제곱근 값이 증가하는 경향은 같았으나 그 차이가 아주 미미하지만 현가계 강성과는 다르게 현가계 감쇠값이 클수록 가속도 응답은 작아지는 반비례 관계를 그림 11에서 보이고 있다.

그림 12에서 나타났듯이 노면 요철의 크기가 커짐에 따라 전반적으로 가속도 응답이 크게 나타났으며, 노면요철에 따

큰 충격이 직접적인 영향임을 알 수 있다. 또한 중간에 약 35km/hr 근처에서 최대값이 나타난다. 이것은 노면요철의 영향으로 공진 발생 가능성이 있음을 보여주는 것으로 교량의 설계 시 노면요철을 고려한 시뮬레이션을 통해 정밀한 해를 얻어야 함을 알 수 있다.

그림 13에서 보면 차량 중량이 큰 경우 전반적으로 가속도 평균제곱근 값이 상대적으로 작게 나타났으며 약 65km/hr 이

후부터는 반대의 현상을 보이며 70km/hr 이상에서는 차이가 뚜렷하게 나타났다.

#### 4. 결론

교량-AGT 차량의 상호작용에 의한 동적거동을 차량의 주행 속도, 차량 현가계의 탄성계수와 감쇠계수, 노면과 가이드

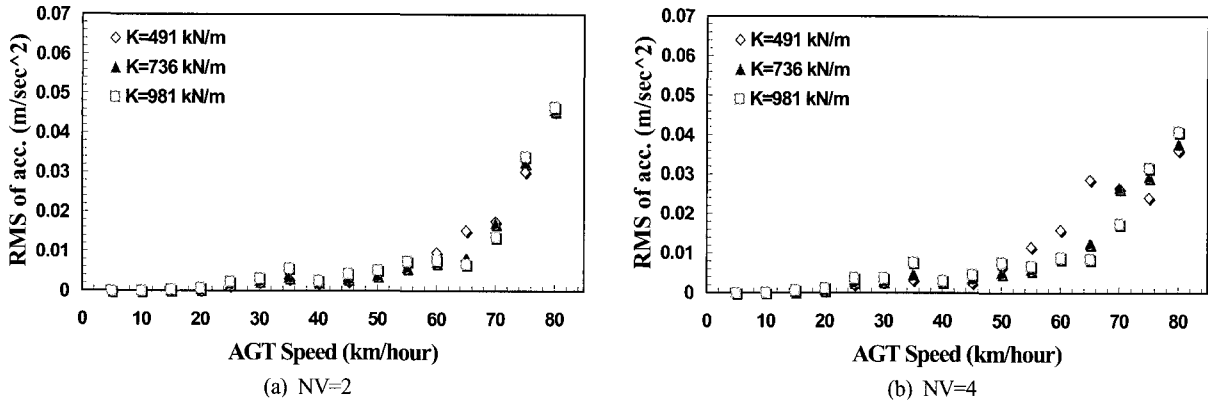


그림 10. 차량 현가계 강성에 따른 가속도 평균제곱근( $D=4.91\text{ kN s/m}$ ,  $\alpha=0.001$ )

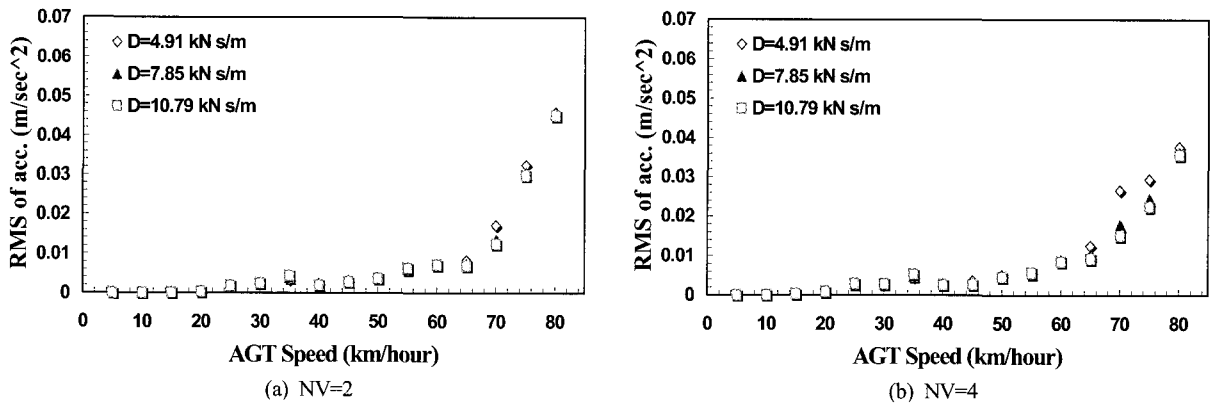


그림 11. 차량 현가계 감쇠에 따른 가속도 평균제곱근( $K=736\text{ kN/m}$ ,  $\alpha=0.001$ )

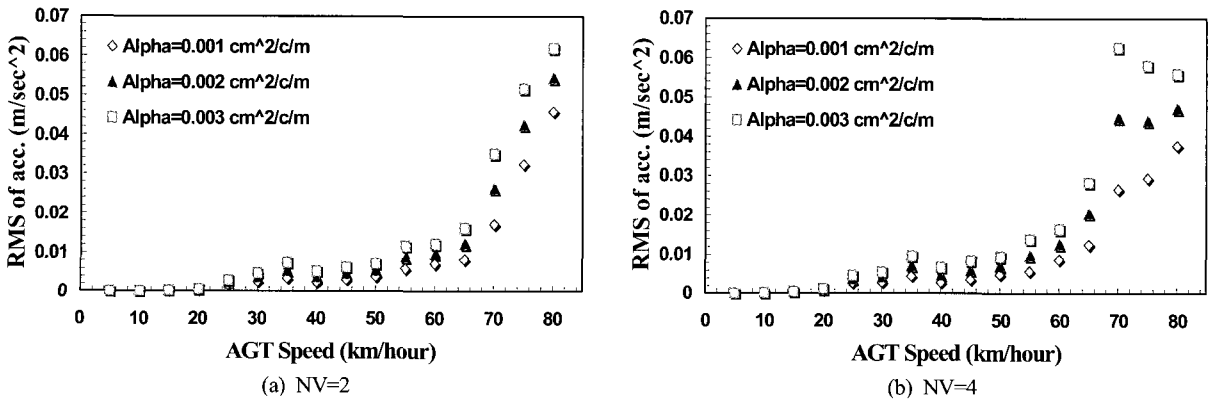


그림 12. 노면 요철에 따른 가속도 평균제곱근( $K=736\text{ kN/m}$ ,  $D=4.91\text{ kN s/m}$ )

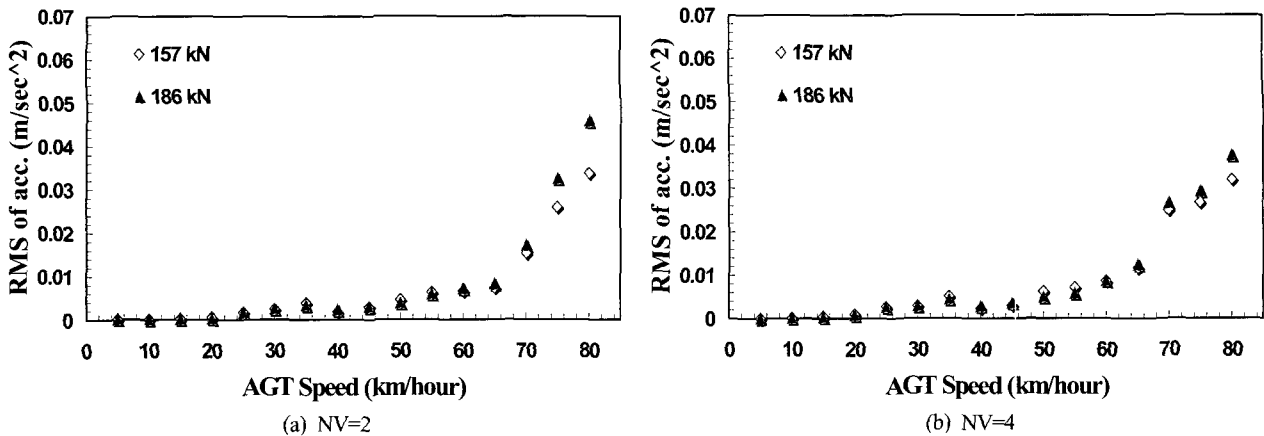


그림 13. 차량 중량에 따른 가속도 평균제곱근( $K=736kN/m, D=4.91kN s/m, \alpha=0.001$ )

레일의 요철 등을 변수로 하여 개발된 수치해석 프로그램 (BADIA)으로 해석을 실시하고 단순 지지된 PSC 교량의 동적응답을 검토하였다. 다음은 연구결과를 요약한 것이다.

- (1) 교량의 동적 증가계수와 가속도 응답은 AGT 차량의 주행속도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에 사용된 모델의 경우 동적증가계수는  $45km/hr \sim 50km/hr$  부근에서, 그리고 가속도 응답은  $35km/hr$  peak값이 발생하였는데 이는 공진에 의한 것으로 판단된다.
- (2) 교량의 동적 증가계수의 경우 AGT 차량 현가계 강성이 증가할수록 최대값이 발생하는 주행속도가 증가함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 현가계 강성의 조정을 통해 정상 주행 속도에서 최대값 발생을 회피 할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 교량의 동적증가계수와 가속도 응답이 노면 요철의 상태 뿐 아니라 AGT 차량 현가계 강성 및 감쇠계수의 영향을 받을 수 있었다. 이로써 AGT 차량 현가계 강성 및 감쇠계수의 최적화를 통해서도 교량의 동적증가계수와 가속도 응답을 감소시킬 수 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. 포항산업과학연구원 (1999), 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과 보고서.
2. 송재필 (2002), A study on dynamic response analysis and vibration serviceability of bridge-AGT vehicle interaction system, 박사학위논문, 중앙대학교.
3. 송재필, 김철우, 김기봉 (2002), 노면 요철을 고려한 AGT 차량의 동적 응답 해석, 한국소음진동공학회논문집, 제 12권, 제 12호, 한국소음진동공학회, pp.986-993.
4. 서울특별시지하철건설본부 (1999), 도시 신교통시스템.
5. 건설교통부 (1998), 경량전철 표준화 연구결과 보고서.
6. 網島均, 福本陽三 (1987), 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, pp.49-52.
7. 川谷充郎, 小菅朗, 嶋田玲志, 小松定夫路 (1987), 面不整の統計學的特と道路橋の衝擊係數, 構造工學論文集, Vol. 33A, pp.459-466
8. ISO (1972), Proposal for generalized road inputs to vehicles, ISO/DIS 2631, pp.1-7.
9. 건설교통부, “경량전철 표준화 연구결과 보고서”, 1998.
10. 日本交通計劃協會, “新交通システム土木構造物設計指針(案)”, 1985.