

# AGT 시스템 교량-차량 상호작용에 의한 교량응답 시뮬레이션 및 실험

## The Simulation and Experimental Study on the Bridge Response of AGT Bridge - Vehicle interaction System

나상주\*      김기봉\*\*      송재필\*\*\*      김현호\*\*\*\*  
Na, Sang Ju    Kim, Ki Bong    Song, Jae Pil    Kim, Hyun Ho

### ABSTRACT

LRT(Light Railway Train), which is a intermediate system of train and bus, is arose for the solution of subway construction cost and the transportation capacity of bus. LRT was introduced in 1980's. About 30 local governments are plan to introduce LRT or constructing LRT, at present. AGT(Automated Guide-way Transit) system, which is a kind of LRT, is operated without driver. Rubber wheeled AGT system can reduce the noise and vibration compare to steel wheeled AGT, so it is estimated as ideal transportation system for urban area. And live loads at bridge are classified as the static load of vehicle and the dynamic wheel contact load which is occurred from the interaction of bridge and vehicle vibration, and the surface roughness. In the case of AGT system, the dynamic increment factor of bridge is greater than the normal train bridge and roadway bridge, because, the weight of AGT vehicle is more light than the train of truck. The exact method for dynamic increment factor is experiment. But this method is needed much money and time, moreover, this method cannot be adopted in design. Therefore, a simulation program for the interaction of AGT bridge, vehicle and surface roughness was developed, in this study. And the program was verified by experiment. As a result, the accuracy of the simulation program can be verified.

### 1. 서 론

지하철과 버스의 중간 형태인 경전철은 지하철의 사업비 부담과 버스의 공해성, 수송용량의 한계 등을 동시에 해결 할 수 있는 새로운 대중교통 시스템으로 선진국에서는 1980년대 이후 본격 실용화 되었다. 경전철은 건설비용이 일반 전철의 절반 정도에 불과한데다 저렴한 유지운영비, 저공해 환경친화성 측면에서 우수하여 각광받고 있어<sup>1</sup>. 우리나라에서도 그 필요성이 강력하게 대두되어 전국 30여개 지방자치단체에서 건설 또는 계획 중에 있다. 경전철의 한 분류인 AGT(Automated Guid-way Transit) 시스템은 운전자 없이 자동으로 운행되는 시스템으로 '자동안내주행차량'이라고도 불리며 종류는 고무차륜형과 철체 차륜형이 있다. 고무차륜 방식의 경우 철제바퀴에 비해 주행소음과 진동을 줄일 수 있는 장점이 있어 도심 통과 구간에 가장 적합한 형식의 경전철 시스템이다. 아울러 교량구조물에 작용하는 주요 활하중은 차량의 정적하중과 차량과 교량의 동적 거동과 이를 유발하는 노면 요철의 연성작용에 의해 발생하는 동적 접지력이라 할 수 있다. 특히 경량전철은 일반 차량이나 철도차량과 비교하여 차량의 중량이 작아 동적 증폭계수의 영향이 더 클 것으로 판단된다. 현재 정밀한 동적 증가계수를 구할 수 있는 방법은 실 교량

\* 중앙대학교, 대학원, 박사과정, 정회원

E-mail : rsj9323@hanmail.net

TEL : (011-203-7918) FAX : (02-418-7918)

\*\* 중앙대학교, 건설대학, 교수

\*\*\* 슈어 테크, BMS사업부, 부장

\*\*\*\* 중앙대학교, 건설환경연구소, 연구원

실험에 의한 방법이 있으나 이 방법은 비용과 시간이 많이 소요되고 설계단계에서는 적용할 수 없는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 AGT 차량과 교량 그리고 노면요철의 상호작용에 의한 동적거동을 수학적으로 모델링하고 컴퓨터 모의 기법을 통해 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하고 이를 AGT 전용 시험선에 가설된 PSC beam 교량을 대상으로 하고 현장실험을 실시하여 검증하였다.

## 2. AGT 교량 시험

AGT 교량에 대한 시험은 경북 경산에 위치한 경량전철 시험선의 지간 30m의 PSC 교량에 대하여 수행하였다. 시험선에는 지간 160m의 3경간 연속 강박스 거더교량과 지간 30m의 PSC 교량이 있는데 강박스 거더교량의 경우 곡선교이고 하향 구배가 심하여 해석과 실험에 유리한 PSC 교량을 대상으로 시험하였다. 시험은 정적 시험과 동적 시험으로 나누어 수행하였으며 정적 시험은 차량을 지간 중앙에 재하하여 변형률과 변위를 2회 측정하였으며, 동적시험은 최저속(약 10km/h), 20km/h, 40km/h 그리고 60km/h를 각각 2회씩 수행하였다.

### 2.1 AGT 차량

본 실험에 사용된 차량은 고무차륜 형식의 AGT 차량으로 현재 2량이 제작되어 시험선에서 운행 중에 있다. AGT 차량은 노선 측면에 설치된 가이드 레일에 의해 조향되며 차량 속도는 선로에 설치된 센서를 인식하여 차량 위치를 파악하고 위치에 따라 지정된 속도로 무인운전이 가능한 시스템이다. 본 실험에서는 다양한 주행 속도로 주행실험하기 위하여 수동운전을 실시하였다. AGT 차량 크기는 일반 버스 정도이고 차량 하중은 공차 중량 16tf, 만차 중량은 19tf이다. 본 실험에서는 공차 중량 16tf으로 실험하였다. 그림 1.은 시험선에서 운행중인 AGT 차량이고, 그림 3.은 시험선 AGT 차량 제원이다.



그림 1. AGT 차량

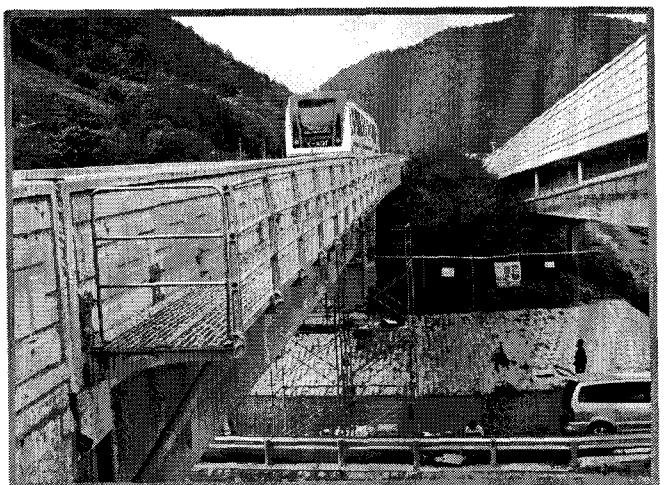


그림 2. AGT 시험선 PSC 교량

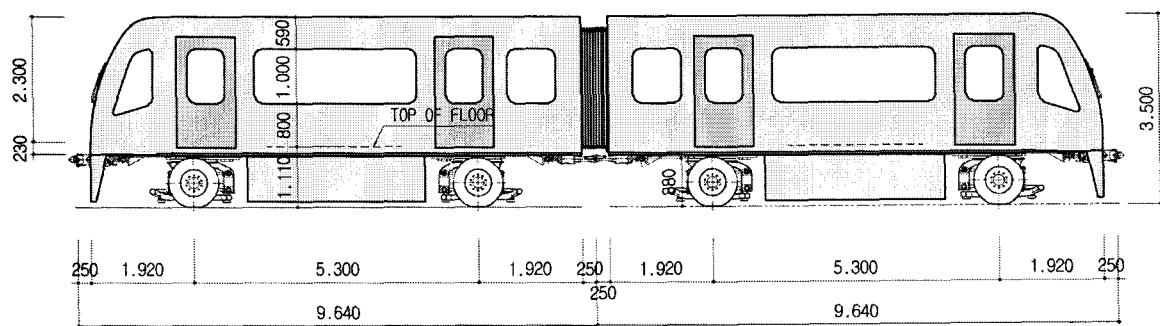


그림 3. AGT 차량 제원 (단위 : mm)

## 2.2 시험 교량

시험 대상 교량은 지간 30m의 PSC 교량으로 교량 제원은 표 1에 보이는 것과 같고 그림 4와 5는 시험 대상 교량의 단면도와 평면도를 나타낸 것이다. 계측에 사용된 센서는 그림 4에 보이는 것과 같이 가속도계 2개, 변위계 2개 그리고 변형률계를 4곳에 2개씩 부착하여 사용 했으며 계측 빈도는 초당 100회로 하여 측정하였다. 교량-차량 연성운동에 의한 교량 응답해석에 필요한 교량 주행면과 안내레일의 요철은 5cm 간격으로 측정하였으며 그 결과는 그림 6과 7에 나타내었다.

표 1. 교량의 제원

형식		PSC 교량
경간 (m)	30	
거더 수	2	
주거더	탄성계수 ( $\text{kN}/\text{m}$ )	$2.55 \times 10^7$
	단면적 ( $\text{m}^2$ )	0.6953
	단위 길이 당 무게 (kN)	17.393
	단면2차모멘트 ( $\text{m}^4$ )	0.3385
가로보	비틀림 상수 ( $\text{m}^4$ )	0.0080
	탄성계수 ( $\text{kN}/\text{m}$ )	$2.55 \times 10^7$
	단면적 ( $\text{m}^2$ )	0.7080
	단위 길이 당 무게 (kN)	17.711
바닥판	단면2차모멘트 ( $\text{m}^4$ )	0.01848
	비틀림 상수 ( $\text{m}^4$ )	0.03239
	탄성계수 ( $\text{kN}/\text{m}$ )	$2.55 \times 10^7$
	두께 (m)	0.300
단위 길이 당 무게 ( $\text{kN}/\text{m}$ )		40.776

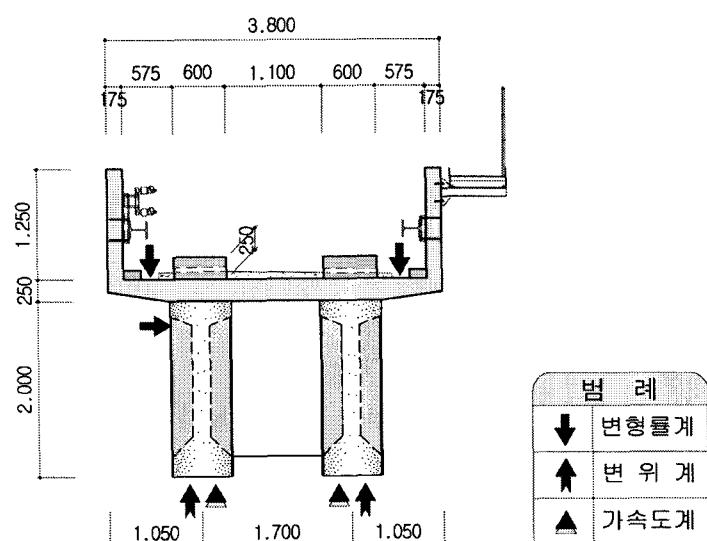


그림 4. 교량 단면도 및 센서 부착 위치

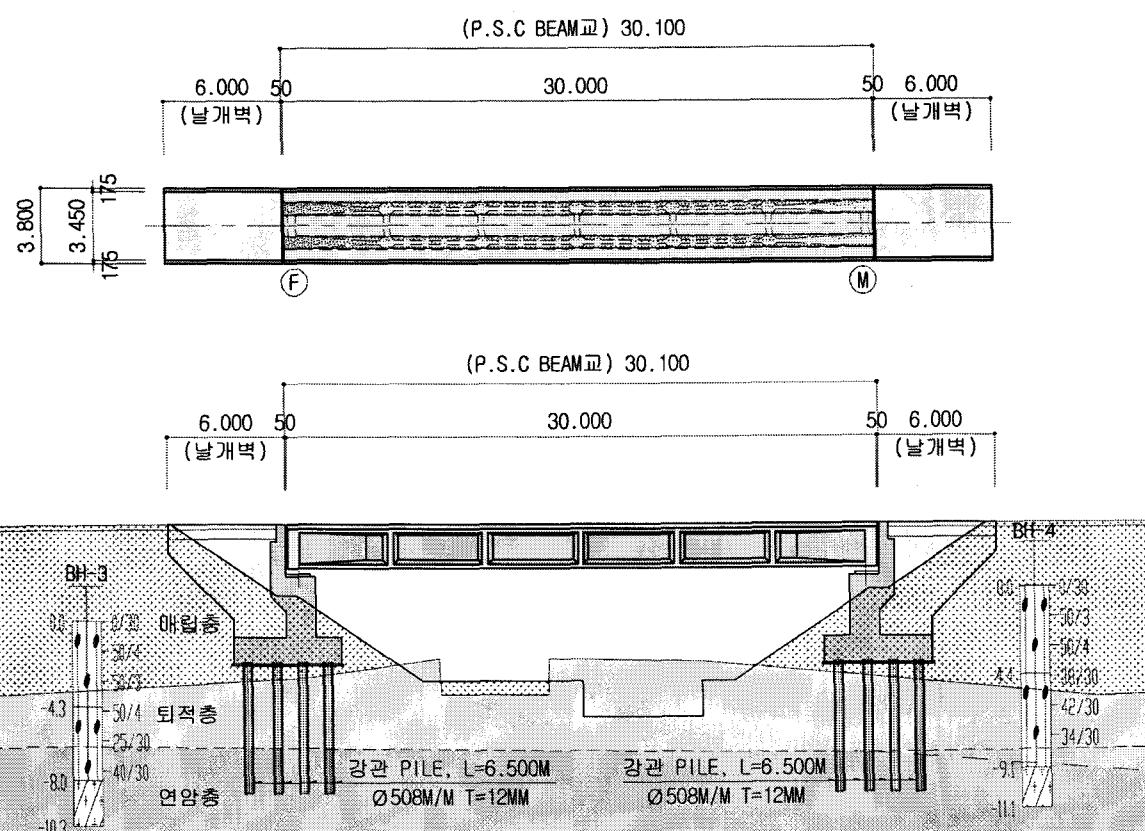


그림 5. 시험 대상교량 평면도 및 측면도

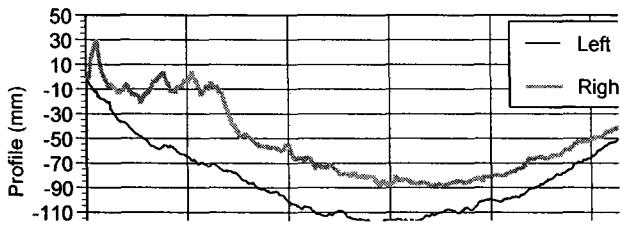


그림 6. 주행면 요철

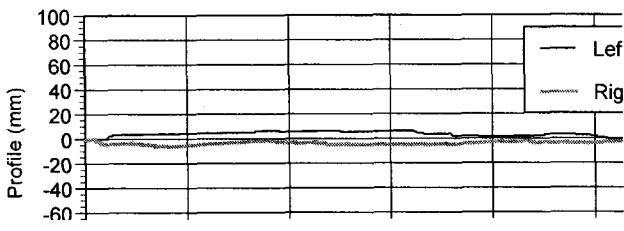


그림 7. 안내레일 요철

### 3. 시뮬레이션 프로그램

AGT 교량-차량의 연성 운동에 의한 교량 응답 시뮬레이션은 BADIA II<sup>2,3,4.</sup> 를 사용하였다. BADIA II는 AGT 시스템 교량과 차량 그리고 노면 요철에 의한 차량과 교량의 동적응답 시뮬레이션을 목적으로 개발된 프로그램으로 AGT 차량과 교량의 운동방정식을 운동방정식 정식화에 가장 널리 사용되는 식(1)과 같은 Lagrange 운동방정식을 이용하여 단일 연성 운동방정식으로 만들고 이를 식(2)와 같은 매트릭스로 구성하였다. 방정식의 해는 Newmark- $\beta$  Method를 사용하여 구하였다.

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

$$\begin{bmatrix} [M_{BB}] & [0] \\ [0] & [M_{VV}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\{q_B\}} \\ \ddot{\{q_V\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{BB}] & [C_{BV}] \\ [C_{VB}] & [C_{VV}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\{q_B\}} \\ \dot{\{q_V\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{BB}] & [K_{BV}] \\ [K_{VB}] & [K_{VV}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_B\} \\ \{q_V\} \end{Bmatrix} = \{Q\} \quad (2)$$

식(1)에서  $T$ 는 운동에너지,  $U_e$ 는 탄성에너지 그리고  $U_d$ 는 소산에너지를 나타내는 것이고, 식(2)에서  $[M_{BB}]$ ,  $[C_{BB}]$  그리고  $[K_{BB}]$ 는 교량의 질량 매트릭스, 감쇠 매트릭스 그리고 탄성 매트릭스를 나타내는 것이고,  $[M_{VV}]$ ,  $[C_{VV}]$  그리고  $[K_{VV}]$ 는 AGT 차량의 질량 매트릭스, 감쇠 매트릭스 그리고 탄성 매트릭스를 나타내는 것이다.  $[C_{BV}]$ ,  $[C_{VB}]$  그리고  $[K_{BV}]$ ,  $[K_{VB}]$ 는 각각 교량과 차량의 연성작용에 의한 감쇠 매트릭스와 탄성 매트릭스를 이다. 그리고  $\{\ddot{q}_B\}$ ,  $\{\ddot{q}_V\}$ ,  $\{\dot{q}_B\}$ ,  $\{\dot{q}_V\}$ ,  $\{\ddot{q}_B\}$ ,  $\{\ddot{q}_V\}$ , 그리고  $\{q_V\}$ 는 각각 교량과 차량의 가속도, 속도 및 변위 매트릭스이고  $\{Q\}$ 는 외력을 나타내는 것으로 본 연구에서는 노면 요철에 의한 힘을 외력으로 사용하였다. 시뮬레이션 프로그램은 연산속도가 빠른 Fortran 언어를 사용하여 개발하였으며 아울러 컴퓨터 프로그램의 계산시간 단축과 컴퓨터 메모리의 적절한 사용을 위해 dynamic condensation method와 normal mode method를 적용하여 계산되는 항을 최소화하였다. 시뮬레이션은 초당 1000회 실시하였으며 1/100초 간격으로 저장하여 실험에서의 저장 간격과 일치하도록 하였다.

### 4. 결과 비교

그림 8.과 9.는 대표적인 실험 결과와 시뮬레이션 결과이다. 그림 9는 40Km/h로 주행시 교량의 변위와 가속도 시간이력곡선이다. 그림 9.는 40Km/h로 주행시 시뮬레이션 결과이다. 그림 8.과 9.를 비교하면 시뮬레이션에 의한 결과값이 약간 큰 값을 보이는데 이는 당연한 결과이다. 시뮬레이션 시 콘크리트의 물성치는 콘크리트 압축강도를 사용하는데 배합강도는 보통 압축강도 보다 10% 증가된 값을 사용하고 철근은 항복강도를 사용하여 시뮬레이션을 수행하는데 철근의 항복강도는 철근의 최소 강도로 보통 철근의 실제 인장강도는 항복강도보다 10~20% 상회한다. 그러므로 실 구조물에 사용된 재료의 강도는 설계 기준강도 보다 높아 실험값이 해석값보다 작은 결과를 보인다. 실험 결과 그림에서 고주파 성분은 계측시 발생하는 노이즈에 의한 것으로 판단된다.

표 2.는 실교량 시험 및 시뮬레이션에 의한 최대 변위 및 동적증가계수를 나타낸 것이다. 실교량 시험에서 동적증가계수는 1.132에서 1.214를 보였고 시뮬레이션에서는 1.049에서 1.074를 보였다. 시험에 의한 충격계수 값이 도로교 충격계수( $i = 15/(40+L)$ )에 의해 구한 값에 근접하는 큰 값을 보인 이유는 계측시 유입된 노이즈 성분의 영향이 있는 것으로 판단된다.

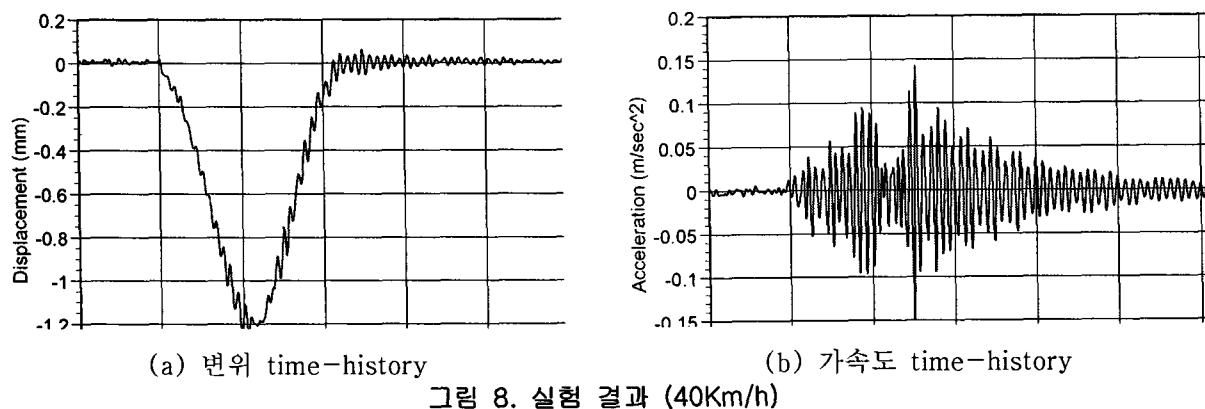


그림 8. 실험 결과 (40Km/h)

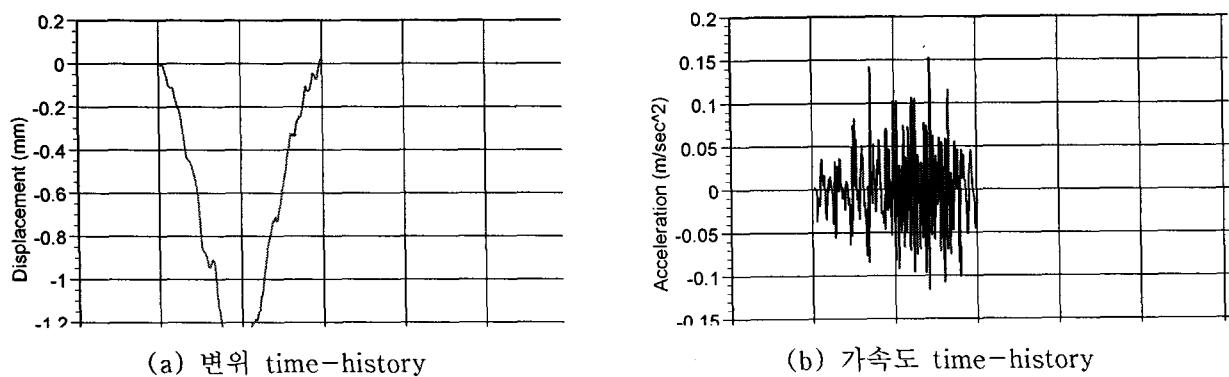


그림 9. 시뮬레이션 결과 (40Km/h)

표 2. 실교량 시험 및 시뮬레이션 결과 비교

Test Scheme			실교량 시험		시뮬레이션	
			최대 처짐	동적증가계수	최대 처짐	동적증가계수
정적 시험	1차	변위계#1	1.0874	-	1.280	-
		변위계#2	1.1017	-		
05Km/h	1차	변위계#1	1.2725	1.170		
		변위계#2	1.3103	1.189		
	2차	변위계#1	1.2454	1.145	1.343	1.049
		변위계#2	1.2539	1.138		
20Km/h	1차	변위계#1	1.3074	1.202	1.375	1.074
		변위계#2	1.3069	1.186		
	2차	변위계#1	1.2919	1.188		
		변위계#2	1.2935	1.174		
40Km/h	1차	변위계#1	1.2431	1.143	1.374	1.073
		변위계#2	1.2368	1.123		
	2차	변위계#1	1.2437	1.144		
		변위계#2	1.2569	1.141		
60Km/h	1차	변위계#1	1.2364	1.137	1.352	1.056
		변위계#2	1.2474	1.132		
	2차	변위계#1	1.3202	1.214		
		변위계#2	1.2889	1.170		

## 5. 결 론

본 연구에서는 AGT 시스템 교량, 차량 및 노면 요철의 연성작용에 의한 동적 거동을 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하고 이를 실교량 시험을 통해 검증하였다. 검증 결과 변위 및 가속도 시뮬레이션 결과가 실교량 실험과 유사한 결과와 경향을 보여 컴퓨터 해석을 통한 교량 동적 실험 시뮬레이션 가능성이 충분함을 확인할 수 있었다.

실교량의 최대 변위 및 동적증가계수가 시뮬레이션 결과 보다 다소 큰 값을 보였는데 이는 실교량에 사용된 재료의 물성치를 정확히 입력하지 못하고 아울러 계측시 발생하는 노이즈를 제거하지 못하여 오차가 커진 것으로 판단된다. 추후 보다 정밀한 시뮬레이션을 위해서는 교량의 물성치를 사전 실험을 통해 정밀히 측정하고 계측시 발생하는 전기적 노이즈를 최소화 할 수 있는 방안이 강구되어야 할 것이다. 아울러 시뮬레이션 프로그램의 보완을 통해 실무에 적용 가능하도록 개선하여야 할 것이다.

## 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”, 한국소음진동 공학회논문집, 제12권, 제12호, 한국소음진동공학회, pp.986-993.
4. 송재필, 김현호, 나상주 (2006), “교량-AGT 차량 상호작용에 의한 교량의 동적응답”, 한국철도학회 논문집, 제9권, 제5호, pp.561-568