

주행면 단차에 의한 경량전철 교량의 충격 시뮬레이션 및 실험

Simulation and Experimental Study on the Impact of Light Railway Train Bridge Due to Concrete Rail Prominence

전준태* · 송재필**

Jeon, Jun-Tal · Song, Jae-Pil

Abstract

This study pointed on the dynamic impact of AGT (Automated Guide-way Transit) bridge, due to concrete rail prominence. An experiment was done with 30 m P.S.C. bridge in AGT test line in KyungSan. An artificial prominence with 10 mm height, was installed at the mid span of concrete rail. And computer simulation was executed for the artificial prominence. As an experiment result, in the case of with prominence, bridge acceleration responses are increased 50% at the speed range of 20 km/h~60 km/h, and bridge displacement responses increased slightly. With these results, the prominence of concrete rail can be induce excess impact and vibration. And the computer program simulated much the same as experiments. So this program can be used for AGT bridge design and formulate the standard of concrete rail management.

Keywords : bridge, railway prominence, LRT(Light Railway Train), AGT(Automated Guide-way Transit), D.I.F.(Dynamic Increment Factor), dynamic interaction

요 지

본 연구는 AGT 시스템의 콘크리트 주행면에 발생할 수 있는 요철이 교량 구조물에 미치는 영향을 파악하고자 경북 경산의 경량전철 시험선 중 30 m P.S.C. 교량을 대상으로 시간 증양에 10 mm의 단차를 설치하여 교량에 가해지는 충격량을 실험을 통해 확인하였다. 아울러 이미 개발된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램과 실험을 비교하여 시뮬레이션 프로그램의 실무 적용 가능성을 평가하였다. 실험 결과 콘크리트 주행면에 단차가 있는 경우 교량 변위는 미약하게 증가하였으나 가속도 응답은 5 km/h의 주행속도에서는 평균 345%, 20 km/h부터 60 km/h까지는 평균 50%가 증가하여 콘크리트 주행면 단차가 교량에 과도한 충격 및 진동을 유발하여 교량 내구성에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 아울러 개발된 AGT 차량 및 교량 동적 상호작용 해석 프로그램으로 단차에 의한 교량 변위 및 가속도 응답 해석을 수행한 결과 실험과 유사한 응답 시뮬레이션이 가능하였다. 이는 추후 AGT 교량 설계와 AGT 콘크리트 주행면 관리를 위한 기준 설정에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 교량, 경량전철, 주행면 단차, 안내 궤도식 자동운전철도, 동적증가계수, 동적상호작용

1. 서 론

본 논문은 국내에서 경량전철을 성공적으로 건설 및 운영하여 자체의 경량전철 기술을 확보하기 위하여 경제적인 구조물 및 시스템을 개발하고 시험운행 등을 통한 시스템 업그레이드 단계를 추진함에 있어 그 일부로서 열차운행 중 차량의 진동, 동요에 의한 승차감에 많은 영향을 주는 콘크리트 주행면 요철의 실험적인 기준의 타당성을 확보하여 경제적이고 효율적인 설계 및 시공방안을 제시하는데 그 목적이 있다.

안내 궤도식 자동운전 철도(AGT, Automated Guideway Transit)시스템은 차륜이 고무인 이유로 차륜 주행면을 연속

철근 콘크리트 포장(CRPC, 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.(남영국, 2004) 이와 같이 AGT 시스템 콘크리트 주행면은 재료의 특성상 스포일 등과 같이 외부 하중과 온도변화 및 충격 등에 의해 균열이 발생하여 손상을 받기 쉽다. 주행면에 손상이 있을 경우 차량 및 교량의 진동이 증가하여 승차감을 저해할 뿐만 아니라 교량에도 악영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 AGT 교량 주행면에 단차가 발생하였을 때 교량 및 차량에 가해지는 충격량을 실험 및 해석에 의해

*정회원 · 인하공업전문대학 토목환경과 교수 (E-mail : jtjeon@inhatc.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 슈어테크(주) BMS사업부 부장 (E-mail : jpsong@suretech.co.kr)

검토하였다. 실험은 경북 경산의 경량전철 시험선 구간 중 지간 30 m의 P.S.C. 교량에서 수행하였으며, 해석은 BADIA(송재필, 2002)를 이용하여 수행하였다.

2. 콘크리트 주행면 단차 주행 실험

2.1 실험 대상 교량 및 차량

2.1.1 실험 대상 교량

본 연구에서는 경북 경산에 위치한 경량전철 시험선의 P.S.C 교량을 실험 대상으로 하였다. 실험 대상 교량은 지간 30 m의 경량전철 표준도면(한국철도기술연구원, 2001)에 의해 시공된 단경간 교량으로 2 개의 P.S.C. 주형과 콘크리트 슬래브 그리고 5 m 간격의 6개의 가로보로 구성되어 있다. 슬래브 상부는 그림 1과 같이 높이 25 cm의 콘크리트 주행면과 측벽에 AGT 차량 조항을 위한 안내레일이 부착되어 있다. 그림 1은 실험 대상 PSC 교량의 표준 단면도이고, 교량의 제원은 표 1에 나타내었다.

주행면에 길이 300 mm, 폭 100 mm 그리고 두께 10 mm의 강판을 지간 중앙 주행면에 접착하여 인위적인 단차를 설치하고 AGT 차량을 주행시켜 단차에 여부 따른 교량 충격량을 비교, 검토 하였다. 일반적인 콘크리트 노면의 손상은 노면 안쪽으로 파이는 형태의 요철이 발생하나 실험 여건상 교량구조물의 손상이 불가하여 그림 2와 같은 돌출 단차를 사용하였다. 단차판은 두께 10 mm의 강철판을 지간 중앙의 양쪽 주행면에 설치하였다.

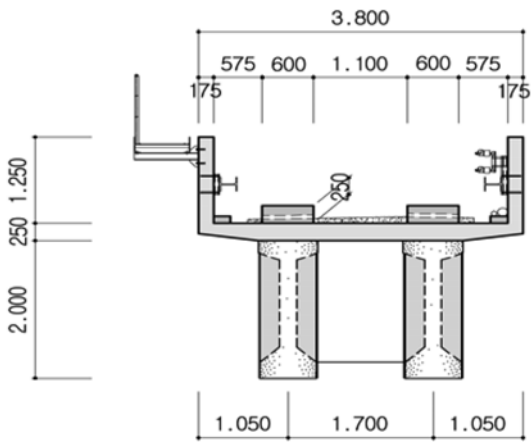


그림 1. 실험대상 교량 단면도 (단위:mm)



그림 2. 주행면 단차

표 1. 실험대상 PSC 교량의 제원

구분	제원	
경간 (m)	30	
거더 수 (ea)	2	
주거더	탄성계수 (MPa)	25,500
	단면적 (m ²)	0.6953
	단위 길이 당 무게 (kN/m)	17.38
	단면 2차모멘트 (m ⁴)	0.3385
	비틀림 상수 (m ⁴)	0.0080
가로보	탄성계수 (MPa)	25,500
	단면적 (m ²)	0.7080
	단위 길이 당 무게 (kN/m)	17.71
	단면 2차모멘트 (m ⁴)	0.01848
	비틀림 상수 (m ⁴)	0.03239
바닥판	탄성계수 (MPa)	25,500
	두께 (m)	0.250
	단위 길이 당 무게 (kN/m)	30.66

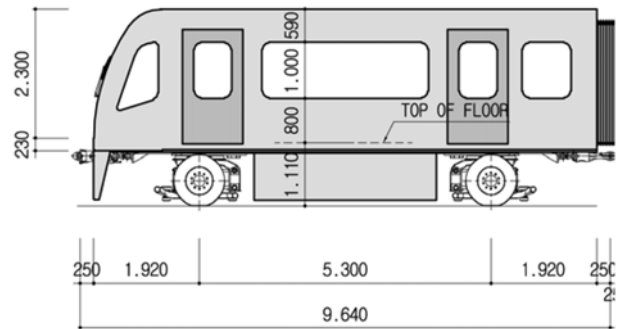


그림 3. 시험 대상 AGT 차량 제원 (단위 : mm)

2.1.2 실험 대상 차량

실험에 사용된 차량은 고무차륜을 사용한 AGT로 차량 하중은 공차 중량 156.96 kN(16tf), 만차 중량은 186.39 kN(19 tf)이다(포항산업과학연구원, 1999). 본 실험에서는 공차 중량 156.96 kN으로 실험하였다. 그림 3은 시험대상 차량의 제원을 나타낸 것이다.

2.2 실험 개요

실험은 정적실험과 동적실험으로 나누어 수행하였으며 정적실험은 차량을 지간 중앙에 재하하여 변형률과 변위를 2회 측정하였으며, 동적실험은 2량의 AGT 차량을 최저속도(약 5 km/h), 20 km/h, 40 km/h 그리고 60 km/h를 각각 2회씩 수행하였다. 아울러 콘크리트 주행면의 손상에 의한 교량 충격량을 검토하고자 주행면에 10 mm의 인위적인 단차를 설치하여, 최저속, 20 km/h, 40 km/h 그리고 60 km/h에 대한 주행시험을 각각 2회씩 수행하였다.

본 실험에 사용된 AGT차량은 자동운전이 가능한 시스템이나 다양한 주행 속도로 실험하기 위하여 수동운전을 실시하였다. 계측 장비는 동적 측정 장비를 사용하였으며 계측 빈도는 100 Hz로 하였고 30 Hz Low-pass filter를 적용하여 안내레일이 설치되어 있는 고압선에서 발생하는 전기적 노이즈를 제거하였다. 본 실험 대상교량에 대한 고유진동 해

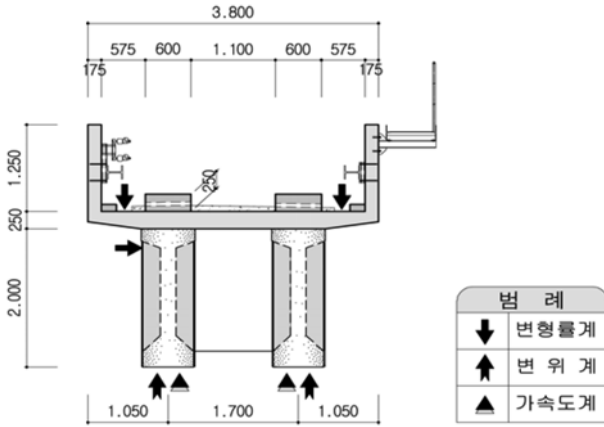


그림 4. 센서 부착 위치 (단위 : mm)



그림 5. 변위계 및 가속도계 설치

석은 이미 수행하였으며(송재필, 2002) 고유진동수가 각각 1st mode 3.88 Hz, 2nd mode 5.37 Hz, 3rd mode 5.72 Hz, 4th mode 13.18 Hz, 5th mode 13.37 Hz, 6th mode 14.18 Hz, 7th mode 22.68 Hz 그리고 8th mode 25.23 Hz로 8차 모드 이하에서는 모두 30 Hz 이하의 저진동을 보이므로 30 Hz low-pass filter로 원 측정 데이터에 대한 왜곡은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 계측 센서는 그림 4와 같이 가속도계 2개, 변위계 2개 그리고 변형률계를 3곳에 2개씩 부착하여 측정하였다. 그림 5는 P.S.C. 주형 하부에 설치된 가속도계와 변위계를 보여준다.

3. 콘크리트 주행면 단차 시뮬레이션

본 실험에 사용된 해석 프로그램은 BADIA(Bridge-AGT Vehicle Dynamic Interaction Analysis II)로 주행면 및 안내레일의 요철을 고려한 AGT 차량과 교량의 상호작용에 의한 교량 및 차량의 동적응답의 시뮬레이션이 가능한 프로그램이다. BADIAII는 동적 시스템을 정식화하는데 가장 많이 사용되는 방법인 식 (1)의 Lagrange 운동방정식을 사용하여 차량-교량 상호운동 방정식을 개발하였다(Thomson, 1988).

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

식 (1)에서, T 는 운동에너지, U_e 는 탄성운동에 의한 위치에너지 그리고 U_d 는 감쇠에 의한 분산에너지를 뜻하며

q_i 는 시스템에서의 미지변수이다. P_E 는 외부에서 작용하는 하중으로 이 연구에서는 외부에서 작용하는 하중이 없으므로 0이 된다. 그림 6과 같이 11자유도로 이상화된 AGT 차량에 대한 교량-차량 상호작용 시스템의 운동에너지, 위치에너지 그리고 점성 감쇠에 의한 분산에너지의 운동방정식은 다음과 같이 정리가 가능하다(송재필, 김현호, 나상주, 2006).

$$T = \frac{1}{2} \left[\dot{D}^T M_b \dot{D} + \sum_{v=1}^{nv} \left\{ m_{v11} \dot{z}_{v11}^2 + m_{v12} \dot{v}_{v11}^2 + I_{vx11} \dot{\theta}_{vx11}^2 + I_{vy11} \dot{\theta}_{vy11}^2 + I_{vz11} \dot{\theta}_{vz11}^2 + \sum_{j=1}^2 \left(m_{v2j} \dot{z}_{v2j}^2 + I_{vx2j} \dot{\theta}_{vx2j}^2 + I_{vz2j} \dot{\theta}_{vz2j}^2 \right) \right\} \right] \quad (2)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \left[\dot{D}^T K_b \dot{D} + \sum_{v=1}^{nv} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 k_{vi1j} R_{vi1j}^2 + k_{v2j} (R_{vi2j} + z_{v0j} + \Psi_{vxi2j} D + \Psi_{vyi2j} D)^2 + k_{vi3j} (R_{vi3j} + (-1)^j (v_{v0j} + \Psi_{vxi3j} D + \Psi_{vyi3j} D))^2 \right\} + \sum_{i=1}^2 \left\{ k_{vi41} R_{vi41}^2 \right\} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left\{ m_{v11} g (z_{v0j} + \Psi_{vxi2j} D + \Psi_{vyi2j} D) \left(1 - \frac{l_{vxj}}{l_{vx1} + l_{vx2}} \right) + m_{v2j} g (z_{v0j} + \Psi_{vxi2j} D + \Psi_{vyi2j} D) \right\} \right] \quad (3)$$

$$U_d = \frac{1}{2} \left[\dot{D}^T C_b \dot{D} + \sum_{v=1}^{nv} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left\{ c_{vi1j} R_{vi1j}^2 + c_{vi2j} (R_{vi2j} + z_{v0j} + \Psi_{vxi2j} D + \Psi_{vyi2j} D)^2 + (c_{vi3j} R_{vi3j} + (-1)^j (v_{v0j} + \Psi_{vxi3j} D + \Psi_{vyi3j} D))^2 \right\} \right\} + \sum_{i=1}^2 \left\{ c_{vi41} R_{vi41}^2 \right\} \right] \quad (4)$$

식 (2), (3) 그리고 (4)에서 g 는 중력가속도, m_v 는 연행하는 차량의 대수를 의미한다. 그리고 D 와 \dot{D} 는 original 좌표계에서 교량의 변위와 속도 벡터를 나타내고 M_b , C_b 그리고 K_b 는 각각 교량의 질량, 감쇠 그리고 강성매트릭스를 나타낸다. 차륜 위치 벡터 Ψ 는 교량 시스템 요소의 각 절점에 차륜하중을 분배하기 위해 도입하였다. Ψ_{vxi2j} 는 차륜 접지력을 x방향으로 분배하기 위한 위치 벡터이고 Ψ_{vyi2j} 는 차륜 접지력을 y방향으로 분배하기 위한 위치 벡터이다. R_{imj} 는 스프링 또는 댐퍼에서 상대 변위를 나타내는 것으로 참고문헌(송재필(2002))의 내용과 같다. 기타 기호에 대한 설명은 표 2와 3에 설명된 것과 같다.

본 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 주행면과 안내레일의 요철을 고려하여 차량-교량 상호작용해석이 가능한 것으로 시뮬레이션 수행을 위해서는 주행면과 안내레일 요철 데이터가 필요하다. 본 연구에서 주행면과 안내레일의 요철은 5 cm 간격으로 실측한 데이터를 사용하였으며, AGT 차륜의 접지면적이 약 100 mm임을 감안하여 3개 데이터의 평균으로 접지하는 것으로 가정하였다. 그리고 주행면 단차는 실험에서와 같이 지간 중앙에 폭 100 m에 대한 노면 요철을 10 mm 상승시켜 사용하였다.

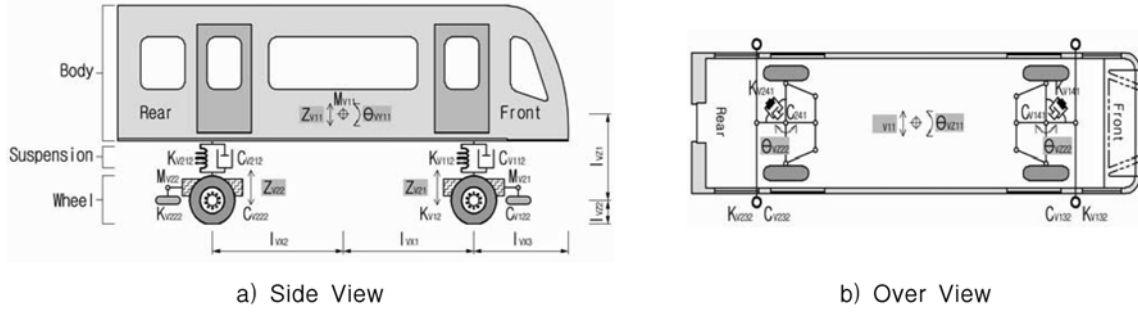


그림 6. AGT 차량 이상화 모델

표 2. AGT 차량 이상화 모델 기호

Description		Nomenclature
Mass	Body (ton)	m_{v11}
	Suspension system (ton)	m_{v2i}
	Vehicle (ton)	m_{v12}
Spring constant	Suspension (kN/m)	k_{vi1j}
	Tire (kN/m)	k_{vi2j}
	Guide wheel (kN/m)	k_{vi3j}
	Steering system (kNm/rad)	k_{vi4j}
Damping constant	Suspension (kNs/m)	C_{vi1j}
	Tire (kNs/m)	C_{vi2j}
	Guide wheel (kNs/m)	C_{vi3j}
	Steering system (kNms/rad)	C_{vi4j}
Geometry	From C.G.* of body to front and rear axle(m)	l_{vxi}
	From guide wheel to C.G.* of axle (m)	l_{vx3}
	From C.G.* of body to left and right tire (m)	l_{vy}
	From C.G.* of body to guide wheel (m)	l_{vz}

*Center of Gravity

표 3. AGT 차량 운동 기호

Description		Nomenclature
Body motions	Vertical motion	z_{v11}
	Lateral motion	y_{v11}
	Rolling	θ_{vx11}
	Pitching	θ_{vy11}
	Yawing	θ_{vz11}
Axle motions	Parallel hop of front suspension system	z_{v21}
	Parallel hop of rear suspension system	z_{v22}
	Axle tramp of front suspension system	θ_{vx21}
	Axle tramp of rear suspension system	θ_{vx22}
	Steering of front suspension system	θ_{vz21}
	Steering of rear suspension system	θ_{vz22}

4. 실험 및 해석 결과

4.1 교량 변위 응답

그림 7부터 그림 10은 대표적인 교량변위 응답 시간이력 곡선이다. 그림 7과 그림 9는 단차가 없고 AGT 차량이 약 5 km/h 그리고 40 km/h로 주행시 지간 중앙의 변위를 보여

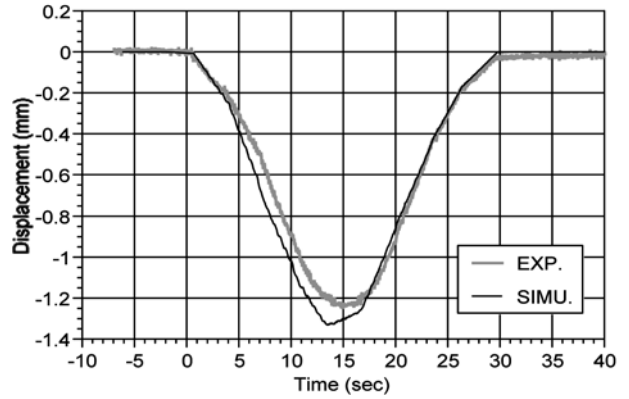


그림 7. 교량 변위 (5.2 km/h, without prominence)

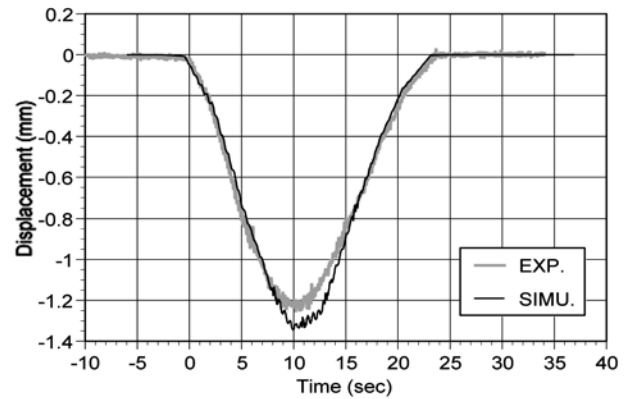


그림 8. 교량 변위 (5.6 km/h, with prominence)

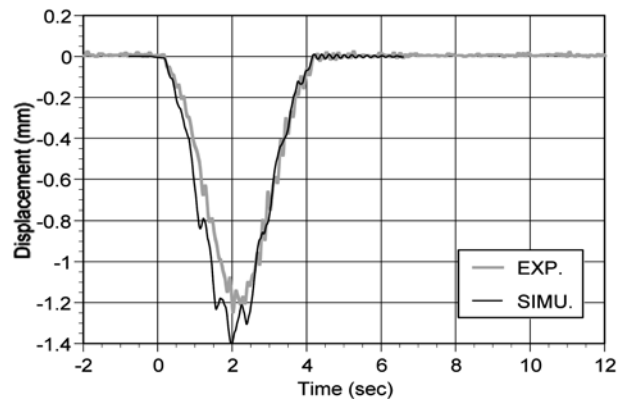


그림 9. 교량 변위 (40 km/h, without prominence)

주고, 그림 8과 그림 10은 지간 중앙에 10 mm 단차가 있고 AGT 차량이 각각 약 5 km/h 그리고 40 km/h로 주행시 변위에 대한 시간 이력곡선이다.

그림 7에서 그림 10에 보이는 것과 같이 단차가 있는 경우와 없는 경우 최대 변위는 단차가 있는 경우가 미소하게

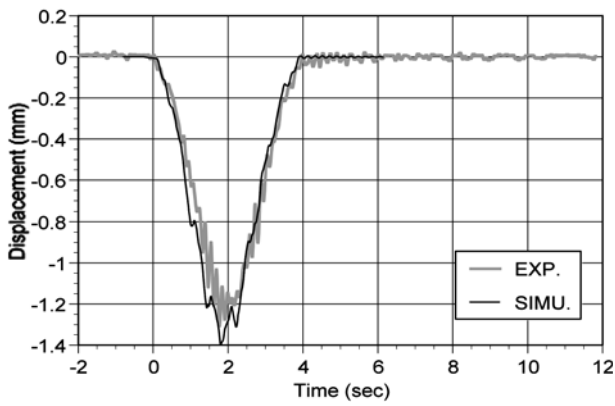


그림 10. 교량 변위 (40 km/h, with prominence)

증가하였고 AGT 차량이 단차를 통과한 이후 교량 진동에 의한 고주파 성분이 발생함을 확인할 수 있다. 그리고 그림 7부터 그림 10에 보이는 것과 같이 시뮬레이션 결과가 실험 결과보다 약 10% 큰 값을 보이나 파형은 유사한 형태를 보인다.

표 4는 콘크리트 주행면 단차 유무에 따른 최대변위값과 이에 따른 동적 증가계수이다. 콘크리트 주행면에 단차가 있는 경우 변위에 따른 동적 증가계수 증가는 최대 8.7%, 평균 2.3%로 미미한 증가를 보였다. 이는 AGT 차량 중량 대비 교량 중량이 커서 단차에 따른 변위 증가에 크게 영향을

미치지 않은 것으로 판단된다. 표 5는 콘크리트 주행면에 10 mm의 단차가 있는 경우 실험과 시뮬레이션에 의한 동적 증가계수 값을 비교한 것이다. 표 5에 보이는 것과 같이 시뮬레이션에 의해 구한 동적 증가계수가 실험에 의한 값과 최대 17.14%, 최소 4.27% 그리고 평균 10.23%의 오차를 보여 시뮬레이션 프로그램의 정밀도를 확인할 수 있다.

4.2 교량 가속도 응답

그림 11부터 그림 14는 콘크리트 주행면에 단차가 있는 경우와 없는 경우의 교량 가속도 응답 시간 이력곡선이다. 그림 11과 그림 13은 단차가 없고 AGT 차량이 약 5 km/h 그리고 40 km/h로 주행시 가속도 응답이고, 그림 12와 그림 14는 지간 중앙에 10 mm 단차가 있고 차량이 각각 약 5 km/h, 40 km/h로 주행시의 가속도 응답이다. 그림 11부터 그림 14에 보이는 것과 같이 AGT 차량이 단차를 통과하는 순간 교량 가속도가 큰 폭으로 증가함을 확인할 수 있다. 특히 5 km/h의 저속 주행에서도 교량 가속도 응답이 크게 증가함을 확인할 수 있다.

표 6은 단차 유무에 따른 교량의 최대 가속도 응답을 보여주고 있다. 변위에 따른 동적 증가계수는 단차가 있는 경우 최대 8.8% 증가에 그쳤으나 가속도 응답은 최대 602.9%까지 증가하였으며, 일반적인 경량전철의 주행속도인 20 km/h부터 60 km/h까지에서 평균 150% 증가함을 확인할

표 4. 콘크리트 주행면 단차 유무에 따른 교량 변위 응답 비교

Test Scheme			콘크리트 주행면에 단차가 없는 경우		콘크리트 주행면에 단차가 있는 경우		동적 증가계수 증가량 (%)
			최대변위 (mm)	동적증가 계수	최대변위 (mm)	동적증가 계수	
정적시험	1차	변위계#1	1.087	-	1.087	-	-
		변위계#2	1.102	-	1.102	-	-
	평균	1.095	-	1.095			
05 km/h	1차	변위계#1	1.273	1.171	1.257	1.156	98.7
		변위계#2	1.310	1.189	1.292	1.172	98.6
	2차	변위계#1	1.245	1.145	1.305	1.201	104.9
		변위계#2	1.254	1.138	1.285	1.166	102.5
	평균	1.271	1.161	1.285	1.174	101.2	
20 km/h	1차	변위계#1	1.307	1.202	1.301	1.197	99.6
		변위계#2	1.307	1.186	1.326	1.203	101.4
	2차	변위계#1	1.292	1.189	1.241	1.142	96.0
		변위계#2	1.294	1.174	1.323	1.201	102.3
	평균	1.300	1.188	1.298	1.186	99.8	
40 km/h	1차	변위계#1	1.243	1.144	1.303	1.199	104.8
		변위계#2	1.237	1.123	1.333	1.210	107.7
	2차	변위계#1	1.244	1.144	1.304	1.200	104.9
		변위계#2	1.257	1.141	1.266	1.149	100.7
	평균	1.245	1.138	1.302	1.190	104.5	
60 km/h	1차	변위계#1	1.236	1.137	1.254	1.154	101.5
		변위계#2	1.247	1.132	1.213	1.101	97.3
	2차	변위계#1	1.320	1.214	1.408	1.295	106.7
		변위계#2	1.289	1.170	1.402	1.272	108.7
	평균	1.273	1.163	1.319	1.206	103.6	

표 5. 콘크리트 주행면 단차 시뮬레이션 동적 증가계수 비교

Test Scheme			콘크리트 주행면 단차 실험		콘크리트 주행면 단차 시뮬레이션		오차(%)
			최대변위 (mm)	동적증가 계수	최대변위 (mm)	동적증가 계수	
정적시험	1차	변위계#1	1.087	-	1.366	-	-
		변위계#2	1.102	-			
	평균	1.095					
05 km/h	1차	변위계#1	1.257	1.156	1.373	1.073	-7.18
		변위계#2	1.292	1.172			-8.45
	2차	변위계#1	1.305	1.201			-10.66
		변위계#2	1.285	1.166			-7.98
	평균	1.285	1.174	-8.79			
20 km/h	1차	변위계#1	1.301	1.197	1.374	1.064	-11.11
		변위계#2	1.326	1.203			-11.55
	2차	변위계#1	1.241	1.142			-6.83
		변위계#2	1.323	1.201			-11.41
	평균	1.298	1.186	-10.29			
40 km/h	1차	변위계#1	1.303	1.199	1.401	1.075	-10.34
		변위계#2	1.333	1.210			-11.16
	2차	변위계#1	1.304	1.200			-10.42
		변위계#2	1.266	1.149			-6.44
	평균	1.302	1.190	-9.66			
60 km/h	1차	변위계#1	1.254	1.154	1.381	1.054	-8.67
		변위계#2	1.213	1.101			-4.27
	2차	변위계#1	1.408	1.295			-18.61
		변위계#2	1.402	1.272			-17.14
	평균	1.319	1.206	-12.17			

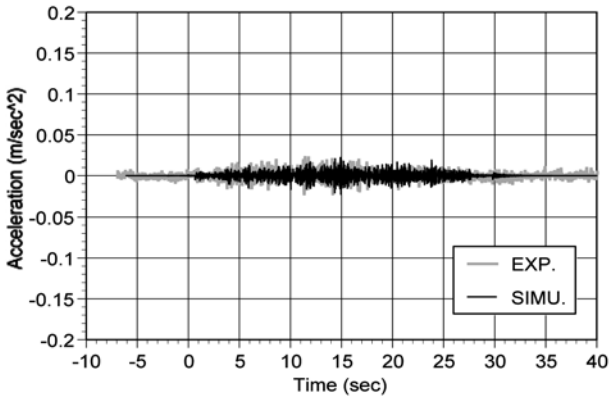


그림 11. 교량 가속도 (5 km/h, without prominence)

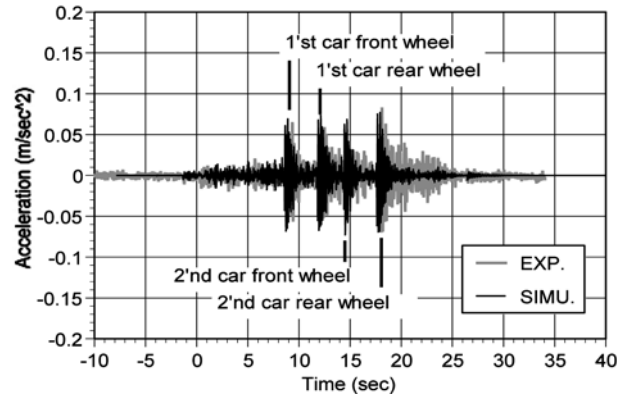


그림 12. 교량 가속도 (5 km/h, with prominence)

수 있다. 교량에 가해지는 힘은 가속도 응답과 비례함을 고려하여 볼 때 주행면 단차는 교량에 큰 부가적인 하중으로 작용함을 확인할 수 있다.

그림 11부터 그림 14에 보이는 것과 같이 단차가 있는 경우에도 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 결과가 실험에 의한 결과와 유사한 파형을 보임을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션 프로그램이 단차를 포함한 노면 요철을 정밀하게 반영하고 있음을 뜻한다.

표 7은 콘크리트 주행면에 단차가 있을 때 시뮬레이션에 의한 최대 가속도 결과를 실험 결과와 비교한 것이다. 비교

결과 시뮬레이션 최대 가속도의 오차는 최대 42.53%, 최소 7.54% 발생하였으나 가속도-시간 이력곡선의 파형은 실험결과와 유사한 형태를 보였다. 최대 가속도 오차 발생 원인은 AGT 차량 및 교량의 물성치를 정밀하게 반영하지 못한 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 AGT 시스템의 콘크리트 주행면에 발생할 수 있는 요철이 교량 구조물에 미치는 영향을 파악하고자 30

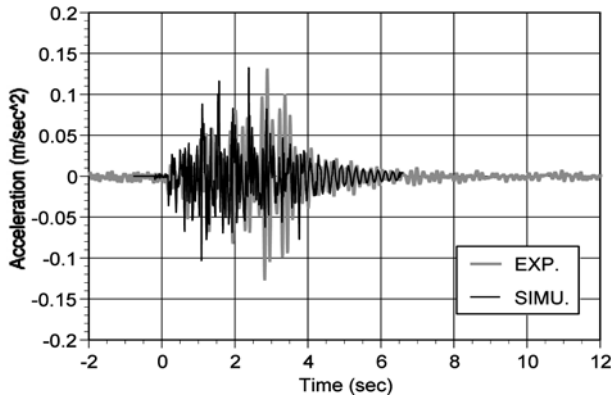


그림 13. 교량 가속도 (40 km/h, without prominence)

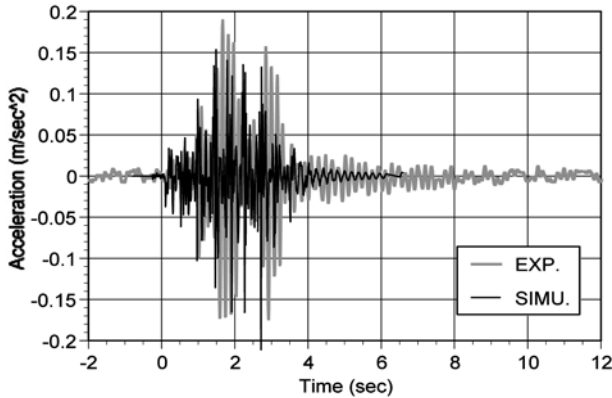


그림 14. 교량 가속도 (40 km/h, with prominence)

표 6. 콘크리트 주행면 단차 유무에 따른 교량 가속도 응답

Test Scheme		단차가 없는 경우	단차가 있는 경우	증가량 (%)
		최대 가속도 (m/sec ²)	최대 가속도 (m/sec ²)	
05 km/h	1차	0.0319	0.0919	288.1
	2차	0.0232	0.1399	603.0
	평균	0.0276	0.1159	445.6
	1차	0.1360	0.1996	146.8
	2차	0.1245	0.2031	163.1
	평균	0.1303	0.2014	154.9
	1차	0.1500	0.2692	179.5
	2차	0.1309	0.1896	144.8
	평균	0.1404	0.2294	162.2
60 km/h	1차	0.1500	0.1777	118.5
	2차	0.2279	0.3364	147.6
	평균	0.1890	0.2571	133.1

m P.S.C. 교량을 대상으로 지간 중앙에 10 mm의 단차를 설치하여 교량에 가해지는 충격량을 실험을 통해 확인하였다. 아울러 이미 개발된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램과 실험을 비교하여 시뮬레이션 프로그램의 실무 적용 가능성을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있겠다.

1. AGT 교량 주행면에 10 mm 단차가 있는 경우 최대변위와 이에 따른 동적 증가계수 증가는 최대 8.7%로 단차가 교량 변위 증가에 큰 영향을 주지는 못하였다.
2. 10 mm의 단차가 있는 경우 교량 가속도 응답은 최대 약

표 7. 콘크리트 주행면 단차 시뮬레이션 최대 가속도 비교

Test Scheme		단차 실험 최대 가속도 (m/sec ²)	단차시뮬레이션 최대 가속도 (m/sec ²)	오차 (%)
05 km/h	1차	0.0919	0.0804	-12.51
	2차	0.1399		-42.53
	평균	0.1159		-27.52
20 km/h	1차	0.1996	0.1484	-25.65
	2차	0.2031		-26.93
	평균	0.2014		-26.29
40 km/h	1차	0.2692	0.2039	-24.26
	2차	0.1896		7.54
	평균	0.2294		-8.36
60 km/h	1차	0.1777	0.2355	32.53
	2차	0.3364		-30.0
	평균	0.2571		1.26

500% 그리고 일반적인 경량전철 평균 주행 속도인 20 km/h~60 km/h에서는 평균 50% 증가하였다. 콘크리트 주행면 단차는 교량에 과도한 충격 및 진동을 유발하여 내구성을 저하시킬 수 있음을 확인하였다. 그러므로 적절한 노면 요철 관리로 교량 수명 단축과 AGT 차량 승차감 저하를 예방하여야 하며 이를 위해 AGT 교량 주행면에 대한 관리 기준이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

3. 주행면 단차 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 비교할 때 동적 증가계수는 최대 17.14%, 최소 4.27%. 평균 10.23%의 오차가 발생하였다. 이는 시뮬레이션 프로그램이 노면 요철 영향을 정밀히 반영하고 있음을 뜻한다.
4. 주행면에 단차가 있는 경우 최대 가속도의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하면 5 km/h의 주행속도에서 최대 42.53%의 오차가 발생하였으나 일반적인 경량전철 주행속도인 20~60 km/h에서는 평균 12.0% 오차로 비교적 정확한 시뮬레이션이 가능하였다.
5. 이상의 연구를 통해 콘크리트 주행면에 단차가 발생하는 경우 교량의 충격 및 진동을 증가시켜 교량 내구성에 악영향을 줄 수 있음을 확인하였고, 시뮬레이션 프로그램의 노면 단차에 대한 정밀도를 확인할 수 있었다.

추후 보다 정밀하고 다양한 실험을 통해 콘크리트 주행면 요철이 AGT 교량 내구성과 AGT 차량 승차감에 미치는 영향을 분석하여야 할 것이다. 또한 다양한 AGT 교량 타입과 주행면 요철에 대한 AGT 교량과 차량 그리고 콘크리트 주행면 요철에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 경량전철 교량 설계기준의 기초를 확보해야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

남영국(2004) 도로포장공학, pp. 351-357.

송재필(2002) A Study on Dynamic Response Analysis and Vibration Serviceability of Bridge-AGT Vehicle Interaction System, 박사학위논문, 중앙대학교.
송재필, 김현호, 나상주(2006) 교량-AGT 차량 상호작용에 의한 교량의 동적응답, 한국철도학회논문집, 한국철도학회, 제9권, 제5호, pp. 561-568.
포항산업과학연구원(1999) 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도

연구결과 보고서.
한국철도기술연구원(2001) 경량전철 시스템 기술개발사업 3차년도 연구결과 보고서.
Thomson, W.T. (1988) Theory of Vibration with Applications, Prentice-Hall, pp. 196-198.
(접수일: 2009.12.8/심사일: 2009.12.27/심사완료일: 2009.12.27)