기존선에서 가설교량 시공에 따른 열차의 주행안전성 평가

Evaluation of Train Running Safety During Construction of Temporary Bridge on Existing Railway

엄기영¹ · 배재형¹ · 최찬용[†]

Ki-Young Eum · Jae-Hyoung Bae · Chan-Yong Choi

Abstract Installing the temporary bridge after excavating the railway requires installing movable cross beam, but as it doesn't requires isolating the catenary or cutting the rail, it's applicable to double-track with frequent operation. In this study, a displacement meter was placed on temporary bridge to monitor the displacement pattern in curve section (R400) completed using temporary bridge method, and wheel load, lateral pressure and derailment coefficient were measured to evaluate the load imposed on track and the stability in curve section (R400) for quantitative evaluation of training running safety. As a result of the measurement, when trains passing over a temporary bridge, the maximum value of Wheel load and Lateral Force is analyzed as the 51% and 81% of standard level according to foreign country's performance tests, There is no trouble with stability analysis in Wheel load and Lateral Force occurring. Additionally, Wheel load and Lateral Force considered as the safety standard are tested 49% of limiting value regardless of trains, which the norm value quite well, there is no problem with train running.

Keywords : Temporary bridge, Wheel load, Lateral force, Derailment coefficient, Wheel unloading ratio

초 록 선로하부를 굴착한 후의 가설교량 설치공법은 이동형 가로보를 갖는 공법으로 시공시 전차선 차단 및 레일절단이 불필요하고 열차운행 횟수가 많은 복선부에서도 적용 가능한 공법이다. 본 논문에서는 공사구간이 곡선부(R400)구간으로 가설교량 공법 시공 후의 변위특성을 검토하기 위해 변위계를 설치하고 열차 통과 시의 윤중·횡압을 계측하여 곡선부(R400)의 주행안전성 검토를 평가하였다. 측정결과 가설교량을 통과시 열차중별 윤중과 횡압의 최대값은 각각 국외 궤도성능평가 기준의 51%, 81% 수준으로 분석되어 윤중, 횡압 발생에 따른 궤도 안전성 측면에서는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 주행안전성의 평가기준이 되는 최대 탈선계수와 최대 윤중감소율은 열차중별에 관계없이 허용한계치의 49% 수준으로 그 기준치에는 못 미치는 것으로 나타나 열차 통과시의 주행안전성 확보에는 큰 문제가 없는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 가설교량, 윤중, 횡압, 탈선계수, 윤중감소율

1. 서 론

현재 가설교량 공법으로 가받침 공법이 많이 시공되고 있다. 가받침 공법은 공사용 가교량을 설치하여 열차하중을 임시로 지지하고 선로하부를 굴착한 후 하부형단 구조물을 축조해 나가며 가교량을 철거 및 복구하는 공법이나, 이러한 가설교량공법으로 공사 진행시 열차운행을 지연시키는 등의 문제점이 발생하고 있어 이에 대한 개선이 필요하다. PMT (Push in cross beam Moving with Temporary bridge method) 공법은 동일한 개착식 공법이나 기존선의 선로를 굴착 한 후 이동형 가로보를 갖는 공법으로 시공시 열차 상간을 이용하여 기존선로(전차선 및 궤도)를 유지하고 열차운행 횟수가 많은 복선부에서도 열차운행에 지장을 주지 않는 장점을 가지고 있어 적용이 기대되는 공법이다. 하지만 PMT 공법은

열차의 주행안전성 등에 대한 계측사례가 많이 부족하므로 이에 대한 평가가 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 곡선부(R400)구간인 PMT 가설교량 구간을 열차가 통과할 경우 궤도 각부의 거동특성을 파악하기 위해 윤중, 횡압 및 변위 등에 대한 현장계측을 수행하였다. 이때 주행안전성 평가항목으로는 탈선계수(Q/P)와 윤중감소율을 이용하였고 그 결과로부터 가설교량에 대한 열차의 궤도부담력 및 주행안전성을 검토하여 실제 운행 중인 열차가 가설교량에 미치는 영향에 대해 정량적으로 평가하였다[1].

2. 본 론

2.1 PMT 공법의 개요

2.1.1 PMT 공법

PMT 공법은 기존의 가받침 공법과 달리 열차상간을 이용하여 기존선로를 유지하면서 침묵교환을 하는 방식으로 소정의 간격에 다수의 파일을 압입 고정하면서 강재와 연결부

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 고속철도 인프라시스템 연구단
E-mail : cychoi@krti.re.kr

¹한국철도기술연구원 고속철도 인프라시스템 연구단

재를 설치하고, 침목을 철거한 후 가로보 설치 및 무도상 체결장치로 레일과 일체 고정 해나가며 시공하는 공법이다 [2]. PMT 공법은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 상로형, 하로형, 상로거더형의 3가지 공법으로 이루어져 있으며, 상로형 공법은 가받침부 위에 중빔을 가설한 후 침목을 해체하고 중빔 위에 가로보를 시공하는 공법으로 주로 직·곡선부의 단선 및 복선에 적용이 가능하며, 하로형 공법은 가교량 설치를 위한 기존구조물을 철거한 후 중장비를 이용하여 가받침부 위에 횡빔을 설치한 다음 가교량을 시공하는 공법으로 주로 직·곡선부의 단선에 적용이 가능하고, 상로거더형 공법은 주행자중 경량화로 가설이 용이하고 주형과 레일의 무도상 일체 체결로 주로 직선부에 적용 가능한 공법이다[2].

2.2 궤도현황 및 측정구간

2.2.1 측정구간 궤도현황

기존선 가설교량 구간에서 곡선부 구간 주행에 따른 궤도 부담력 및 주행안전성을 평가하기 위해 곡선반경으로 되어

있는 동해남부선의 해운대~동래역 구간을 측정 구간으로 선정하였다. Table 2는 측정 대상구간의 궤도현황을, Fig. 2는 현장전경을 나타낸 것이다.

2.2.2 궤도노반 성능평가 항목 및 측정방법

측정 시의 열차는 주행하고 있는 상태이므로 실제 발생한 응답치의 왜곡이나 데이터의 손실이 발생하지 않도록 수집율(Sampling Rate)을 1kHz로 충분히 설정하였다. 그리고 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 Low-Pass filtering과 Hi-Pass filtering 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다[3]. 현장측정 시스템은 변형률 게이지와 변위계를 조합하여 8채널로 동시 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

현장측정을 위한 센서는 곡선부 궤도의 내·외측에 동일하게 설치하였으며 센서의 설치위치는 Fig. 3과 같다. 측정된 윤중 및 횡압, 변위응답의 증폭된 신호들은 EDX-2000A(데이터 로거 64ch)에 저장한 후 분석하였다. 측정에 이용된 센서와 장비들을 정리하면 Table 3과 같다.

Table 1 Comparison of open cut method

	PMT 공법	가받침 공법
단면도
공법 개요	임시 가교량을 설치하고 열차를 운행하면서 하부를 굴착하여 구조물을 설치 후 가교량을 철거하는 방법	임시 가교량을 설치하여 열차를 운행하면서 선로하부를 굴착하고, 구조물을 축조한 후, 가교량을 철거하고 선로를 복구하는 방법
장점	<ul style="list-style-type: none"> *선형에 관계없이 시공가능 *공사비 저렴 *열차상간을 이용하므로 전차선 및 선로차단, 궤도철거 복구 등이 필요 없다. *가로보와 레일 일체구조로 운행횟수에 관계 없이 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> *구조물 형상 등의 변화에 관계 없이 시공가능 *공사비 저렴 *재래공법으로 국내시공경험이 풍부
단점	<ul style="list-style-type: none"> *열차상간 이용하여 작업하므로 작업자의 안전확보 필요 *퇴메우기 시 충분한 다짐 필요 *전차선이 구조물에 충분히 이격 되지 않을 경우 이설 필요 	<ul style="list-style-type: none"> *열차정지 운행에 지장 초래 *가받침 설치 및 공사완료 시까지 서행 필요 *시공시 가받침 등의 변위에 대한 지속적인 계측관리 필요 *공사완료 후에도 노반침하로 인해 지속적인 보수관리 필요

상로형 PMT 공법

하로형 PMT 공법

상로거더 PMT 공법

Fig. 1 PMT method

Table 2 Properties of test site

구 간	곡선반경	레 일	침 목	측정위치	열차종류	측정항목
동해남부선 (해운대~동래역)	400m	장척레일 (50kg N)	가로보 (강재)	동해남부선 17.1km 지점	무궁화	윤중, 횡압 동적치짐 진동가속도
					새마을	
					화물

Fig. 2 View of test site

Fig. 3 View of sensor installation

Table 3 Sensor for measurement

구 분	측정항목	센 서
하 중	윤 중	5mm 2축 변형률 게이지
	횡 압	5mm 2축 변형률 게이지
변 위	동적치짐	50mm 변위계
가속도	수직 진동가속도	5g 진동 가속도계

2.3 현장측정 결과 및 분석

2.3.1 윤중, 횡압 측정결과

가설교량이 시공된 곡선부(R400) 구간에서 열차 주행 시 동적윤중의 거동특성을 파악하고자, 내·외측레일에 윤중 게이지를 부착하여 열차종별 발생응답을 비교·분석하고 열차가 궤도에 미치는 영향을 평가하였다. 궤도부담력을 평가하는 기준은 Table 4와 같이 일본의 신칸센 기준을 적용하였다. 이 판정의 수치는 일본에서 각종 시험궤도의 성능확인 시험을 통해 설계치에 대한 고찰 및 수정에 의해서 제안된

Table 4 Measurement standard of the shinkansen (Japan)

항목내용			윤중(KN)	횡압(KN)
측정기준	신칸센	표준치	300	68
		참고치	200	40

표준값으로 본 논문에서는 이 기준값을 사용하였다.

열차종별 및 속도별 측정 데이터의 최대값은 Table 5와 같다. 윤중 측정결과, 가설교량의 측정위치는 열차가 저속주행을 하였던 구간으로서 열차종별에 무관하게 내측 윤중이 외측 윤중보다 약 13~31KN 정도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 열차종별 윤중의 크기는 약 20~50km/h 속도대역에서 화물열차와 새마을 열차가 무궁화 열차보다 높게 발생하는 것을 알 수 있었다.

동일한 측정구간에서 동적횡압의 발생특성을 파악하고자 내·외측 레일에 횡압 게이지를 부착하여 열차종별 발생응답을 비교·분석하였다. 횡압 측정결과, 전반적인 횡압의 크기는 곡선반경(R400)의 영향을 받아 다소 크게 나타났으나 내·외측레일 모두 (+)(-) 양방향으로 일정한 방향성을 가지고 있었다. 또한 윤중 값과 유사한 수준으로 열차종별에 관계 없이 저속주행시의 최대 횡압은 내측 횡압이 외측 횡압보다 약 7~23KN정도 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 열차의 속도증가에 따라 내·외측레일의 횡압이 다소 증가하는 경향을 보였으며 횡압의 크기는 측정속도 대역에서 새마을 열차가 다른 열차에 비해 크게 나타나 선형 및 차량조건 외에도 궤도상태에 따른 영향이 반영된 결과인 것으로 판단된다.

윤중 및 횡압 측정결과, 측정지점을 통과한 열차가 국외 궤도노반 성능평가 기준을 만족하는 것으로 나타났고 가설

Table 5 Maximum comparison according to the measurement result

Type of the train		Mugunghwa		Saemaul		Freight	
Speed (km/h)		40km/h	48km/h	28km/h	34km/h	32km/h	41km/h
		(+8km/h speed increasing		(+6km/h speed increasing		(+9km/h speed increasing	
Wheel load (kN)	Inside rail	94	97	149	151	153	134
	Outside rail	77	79	136	124	122	117
Lateral wheel load (kN)	Inside rail	(-)30	(-)31	(-)50	(-)55	(-)38	(-)50
	Outside rail	(+)15	(+)11	(+)25	(+)48	(+)24	(+)27
Coefficient of derailment	Inside rail	0.32	0.32	0.34	0.36	0.25	0.37
	Outside rail	0.19	0.14	0.26	0.39	0.20	0.23

교량을 약 20~50km/h 속도대역에서 통과시 곡선부 주행에 따른 궤도부담력 수준은 양호할 것으로 판단된다[4].

2.3.2 동적 처짐 측정결과

동적 처짐의 측정결과 분석을 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 열차가 가설교량에서 주행할 경우의 동적 처짐은 열차종별에 무관하게 내측레일이 외측레일보다 미소하지만 크게 나타났다. 또한 열차의 속도가 증가함에 따라 처짐 값도 증가하는 경향을 보였다.

열차종별 동적 처짐의 최대 값은 화물열차로 최대 12.1mm의 처짐이 발생하였고 그 결과 값은 교량거더 허용처짐 값(철도교 설계기준)의 한계치인 50mm($V \leq 130$ km일 경우)의 범위 내로 안정적인 값을 나타냄을 알 수 있었다[5]. 다른 열차의 경우에도 한계치 기준 범위 내에 있는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 4 Result of rail displacement (inside, outside)

2.3.3 수직진동가속도 측정결과

영구구조물의 경우 진동가속도 크기는 직접적으로 구조물 손상에 영향을 주는 요소는 아니지만 장기적인 피로손상이나 주행안전성, 승차감 등에 영향을 준다. 하지만 아직 가설교량에 대한 기준은 마련되어 있지 않다[6]. 특히 열차가 주행할 때 진동가속도는 주행안전성에 큰 영향을 미치므로 차량과 구조물간의 상호작용을 고려한 동적 안전성의 확보

는 매우 중요하다고 할 수 있다. 진동가속도의 경우에는 직접적인 비교 기준이 없기 때문에 절대적인 비교가 어렵다. 현재, 호남고속철도의 경우에는 비록 도상의 교란을 방지할 목적이지만 유도상 궤도에서 0.35g, 무도상 궤도에서는 0.5g로 수직진동가속도를 제한하고 있으며 그 외의 철도교량에는 아직 그 기준이 마련되어 있지 않다. 일반적으로 판형교의 경우에는 약 2~3g가량의 최대 수직 진동가속도가 발생되는 것으로 알려져 있다[7,8].

Fig. 5는 열차가 가설교량을 주행 시 진동가속도 결과 값을 나타낸 것으로 열차종별에 무관하게 외측레일이 내측레일보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

수직 진동가속도는 무궁화열차의 경우 최대 0.53g를 나타내었으나 대체적으로 1g 미만의 값을 나타내었다. 또한 새마을열차의 경우 최대 0.45g, 화물열차의 경우는 최대 0.34g 범위 내에 있었고 이는 판형교에서 일반적으로 발생하는 수직진동가속도 범위 내로 안정적인 값을 나타내고 있다.

Fig. 5 Result of rail acceleration (inside, outside)

2.3.4 주행안전성 평가

2.3.4.1 탈선계수에 의한 평가

탈선계수는 윤증과 횡압의 비로써 나달(Nadal)의 식을 이용해 정량적으로 안전성을 평가하는 방법으로 기준 값 0.8을 사용한다. 이는 종래 일본의 JR기준 값을 사용한 것으로 기준다면 차량의 접촉각이($\alpha=60^\circ$)인 경우에 성립된다. 나달

의 식(1)의 변수들은 Fig. 6에 설명되어 있다. 이 식은 레일 위로 올라타기 발생하는 최소의 Q/P (한계탈선계수)값을 구하는 방법으로 탈선이 시작될 때의 차륜은 플랜지 부분에서 레일과 한 점에서 접촉하면서 레일을 올라타게 된다. 이 때의 차륜과 레일간의 작용력을 Fig. 6에 나타내었다. 그림 중에 T는 차륜의 Rolling contact에 의해 발생하는 접촉력이다. 차륜의 어택각이 (+)일 때, T는 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 차륜이 레일을 타고 오르는 방향으로 작용하여 이 값이 최대가 되더라도 마찰력(μ :마찰계수)을 초과하는 경우는 없다[9].

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan\alpha - \mu}{1 + \mu \tan\alpha} \quad (1)$$

여기서, Q: 횡압, P: 윤중, α : 접촉각, μ : 마찰계수

열차의 탈선계수 결과를 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 윤중 값과 유사한 수준으로 내측레일이 외측레일보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 열차종별 속도증가에 따라 대체적으로 탈선계수가 증가하는 경향을 보였으며, 무궁화열차의 경우 내·외측 레일에서 최대 0.32, 0.19로 나타났고, 새마을 열차의 경우는 최대 0.36, 0.39, 화물열차의 경우 최대 0.37, 0.23의 탈선계수가 발생하였다. 이 결과로부터 가설교량을 주행 시 각 열차의 탈선계수가 한계탈선계수(0.8)에는 못 미치는 것으로 나타나 열차의 곡선부 주행

Fig. 6 Effort between a wheel and the rail

Fig. 7 Result of coefficient derailment ($\Delta P_L/P_0$) (inside, outside)

에 따른 주행안전성 확보에는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

2.3.4.2 윤중감소율에 의한 평가

탈선계수가 커지면 탈선의 위험이 커지지만 실제 탈선 사례에서는 횡압이 클 때보다 윤중 감소가 클 때 탈선 되는 경우가 많다[3]. 그래서 윤중이 감소하는 정도를 나타내는 지표로서 윤중감소율을 정하고 이것을 안전율 평가 방법으로 적용하고 있다. 이때의 윤중감소율($\Delta P_L/P_0$)은 감소된 윤중과 정적 윤중의 비로 나달의 식(2)와 같이 구할 수 있다. 이 식은 윤중중심에 탈선을 조장하는 방향으로 횡하중 F_y 가 작용하고, 정지윤중을 P_0 , 윤중의 정지윤중으로부터의 감소치를 ΔP_L 로 나타낼 때에 탈선하는 측 차륜의 윤중감소율을 나타낸 방법이다[9].

$$\frac{\Delta P_L}{P_0} = \frac{\lambda_L - \lambda_R}{\lambda_L + \lambda_R} \cdot \frac{F_y}{P_0} \times \frac{2}{\lambda_L + \lambda_R} \quad (2)$$

$$\lambda_L = \frac{\tan\alpha_L - \mu_L}{1 + \mu_L \tan\alpha_L}$$

$$\lambda_R = \frac{\tan\alpha_R + \mu_R}{1 - \mu_R \tan\alpha_R}$$

여기서, λ_L : 내측 탈선계수, λ_R : 외측 탈선계수

캔트체감에 의한 정적 윤중감소율의 기준 값으로서 0.6을, 차체진동을 고려한 차량전복에 대한 동적 윤중감소율의 기준 값으로서 0.8을 적용하였다.

식(3)과 식(4)는 이러한 감소한계치를 나타낸다.

$$\frac{W_0}{2} - P_{st} \geq \frac{W_0}{2} \times 0.6 \quad (3)$$

$$\frac{W_0}{2} - P_{dy} \geq \frac{W_0}{2} \times 0.8 \quad (4)$$

여기서, W_0 : 축중(KN), P_{st} : 정적 윤중(KN), P_{dy} : 동적 윤중(KN)

Fig. 8 Result of dynamic wheel load decrement ($\Delta P/P$) (inside, outside)

윤증감소율 결과는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 열차가 가설교량을 약 20~50km/h 속도대역에서 주행시 무궁화 열차의 경우 내·외측레일에서 최대 0.15, 0.3으로 나타났고, 새마을 열차의 경우 최대 0.37, 0.24, 화물열차의 경우는 최대 0.39, 0.11로 나타났다.

윤증감소율 측정결과, 측정치 모두 동적 윤증 감소한계치를 만족하는 것으로 나타났고, 향후 유사속도대역에서 열차가 주행시 윤증 감소에 따른 열차의 탈선위험은 없을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 가설교량의 변위특성을 검토하기 위해 곡선부(R400)구간에 대한 열차 주행시 윤증, 횡압 및 변위 등에 대한 현장계측을 통하여 열차의 주행안전성을 평가하고 비교·분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 윤증 측정결과, 가설교량의 측정위치는 열차가 저속주행을 하였던 구간으로서 열차종별에 무관하게 내측 윤증이 외측 윤증보다 약 13~31KN 정도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 열차종별 윤증의 크기는 측정속도대역에서 화물열차와 새마을열차가 무궁화 열차보다 높게 발생하는 것을 알 수 있었다.

(2) 횡압 측정결과, 각 열차가 일정한 방향성을 가지고 있었으나 그 값은 윤증과 유사한 수준으로 열차종별에 관계없이 내측 횡압이 외측 횡압보다 약 7~23KN정도 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 열차의 속도 증가에 따라 내·외측레일의 횡압이 다소 증가하는 경향을 보였다. 횡압의 크기는 측정속도대역에서 새마을 열차가 다른 열차에 비해 내·외측레일에서 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

(3) 열차종별 동적 처짐 및 진동가속도를 측정한 결과, 동적 처짐의 결과를 보면 각 열차는 철도교 설계기준의 한계치 기준 범위 내에서 안정적인 값을 나타내었고, 진동가속도의 경우는 일반적으로 판형교에서 발생하는 수직진동가속도 범위 내로 안정적인 값을 나타내고 있었다.

(4) 가설교량 주행시 열차종별 탈선계수 및 윤증감소율의 현장측정을 통하여 주행안전성을 확인한 약 20~50km/h 속

도대역에 대해 측정치 모두 허용한계치(0.8) 이내로 나타나 열차의 주행안전성이 확인됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Y.G. Park, J.Y. Choi, D.Y. Sung, D.S. Chun (2007) Characteristics of Curved Track Behaviors according to Traveling Tilting Train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(6), pp. 692-700.
- [2] K.Y. Eum (2010) Push in cross beam Moving with Temporary bridge method, Korea Railroad Research Institute.
- [3] K.Y. Eum, S.S. Kim, Y.H. Kim, M.S. Lee, et al. (2009) Comparison and analysis of the running safety followed by derailment coefficient and wheel off-loading at the curves, *Journal of the Korean Society for Railway*, Jeju Special Self-Governing Province, pp. 347-358.
- [4] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: MLIT(Japan) (2002) *A technical standard about the railroad*, Appendix-2: *Evaluation technique of train operation stability*, pp. 724-731.
- [5] The National Railroad Administration (1998) The design standard of the railroad bridge, Korea Institute of Construction Technology.
- [6] Korea Railroad Research Institute (2004) Analysis on the Dynamic Behaviors of Railway Plate Girder Bridges according to speed of Train, Inha University.
- [7] H.M. Kim, J.T. Park, E.S. Cho, W.S. Hwang (2004) An Experimental Study on Vibration Characteristics for the Plate Girder Railway Bridge having a Rail Joint, *Korean Society of Civil Engineers*, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, pp. 6-11.
- [8] J.Y. Yoo (2009) The Vibration serviceability Estimation of Railway Bridges subjected to Moving Train, A graduate degree thesis, Woosong University.
- [9] S.S. Kim (2010) Evaluation of the running safety of tilting train when accelerating at curved track roadbed (R600), A graduate degree thesis, Sungkyunkwan University.

접수일(2010년 10월 7일), 수정일(2011년 1월 28일),
게재확정일(2011년 2월 24일)