

상시 계측결과를 이용한
고속철도 교량의 유지관리 기준치 설정
Establishment of Maintenance Methods for
Express railway Bridges using High Rail Monitoring Systems

서형렬* 한상철** 지기환***
Seo, Hyeong Lyel Han, Sang Chul, Ji, Ki Hwan

ABSTRACT

Banwol bridge with steel plate girder and Pyongtaek bridge with PSC box girder have been operated maintenance measuring system by the Seoul-Chonan of Kyongbu express railway. By analyzing the theoretical and experimental values of design load for these two bridge, the establishment of reference maintenance for measuring items was deduced from research.

Two materials, steel and concrete plates, were considered as the upper structure. Actual measurement data for the behavior under speed, structural analysis results, and the presented references were analyzed and used to set up the reference establishment. The measuring items are stress(strain), displacement, dynamic acceleration, expansion movement, and dynamic frequency. The maintenance reference was established by comparing analytical and measuring values of the five items with respect to structural state class.

1. 서론

최근 과학기술발달, 대도시 인구증가로 인하여 세계 각국에서는 경쟁적으로 대형 또는 대규모의 건설 공사가 많이 진행되고 있다. 이러한 구조물들의 건설은 공사비가 많이 들고 사고 시 큰 피해를 유발하는 것이 일반적이므로 안전율을 높여 설계를 하거나 새로운 시공법을 개발 또는 도입하여 시공하는 사례가 많다. 특히 대형 구조물의 경우 사고 시 구조물 자체뿐 만아니라 주변환경 여건에 미치는 영향이 매우 크므로 계획단계에서부터 설계, 시공에 이르기까지 전 단계에 대한 세심한 주의가 요구된다. 따라서 가장 합리적이고 안전한 구조물의 설계, 시공을 위한 노력이 많은 기술자들에 의해 오래 전부터 경주되어 왔다. 이러한 노력으로부터 얻어진 방법들 중의 하나가 관측, 계측방법이다.

선진외국에서는 관측, 계측기법을 지속적으로 발전시켜 토목구조물 전반에 적용하고 있으며, 이로부터 적정설계, 적정시공방법을 개발함으로써 막대한 공비절감 등 설계VE 효과를 얻고 있다. 국내의 경우 현장계측에 큰 관심을 갖게 된 것이 최근이므로 계측수행 경험부족, 계측관련 연구미비 등으로 인해 체계적인 계측이 현장에서 수행되지 못하고 있다. 따라서 국내계측의 활성화 및 정착화를 위해서는 국외에서 생산, 보급되고 있는 계측기기 들의 사용성·효율성 분석이 이루어져야함과 동시에 계측에 관한 연구 활성화 및 체계적인 현장계측 시스템의 정립이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정

E-mail : seohl@ktx.or.kr

TEL : (042)607-4763, (010)3158-0294 FAX : (042)607-4769

** 서울산업대학교 교수

*** 주식회사 케이애틀엘 이사

고속철도가 개통되어 열차가 시속 250km/hr 이상의 속도로 고속주행하기 때문에 여러 동적, 정적 현상들이 나타난다. 따라서 이러한 현상들에 대해 구조물이 처음 설계·시공되었던 상황 그대로 제 기능을 유지할 수 있도록 관리하는 것이 매우 중요하다.

따라서 고속철도가 개통되고 운행이 되고 있는 현 시점에서 교량구간을 대상으로 고속주행에 따른 구조물의 거동을 실측·분석하여 유지관리를 효율적으로 수행할 수 있는 계측시스템의 구축과 판단기준 설정이 요구되는 실정이다. 따라서 본 논문은 경부고속철도 유지관리 계측시스템 운용 시 필요한 교량의 적절한 계측관리 기준치를 연구하는데 그 목적이 있다.

2. 연구대상 및 방법

본 연구는 경부고속철도 서울~천안 구간에 구축되어 있는 교량 구조물중 2경간(2@50) 연속 강합성 플레이트 거더교인 반월고가(고속도로 횡단구간)와 3경간(33+ 50+ 33) 연속 PSC 박스 거더교 평택고가(국도 38호선 횡단구간)를 대상으로 다음과 같은 방법에 의해 연구를 수행하였다.

첫째로 기존교량의 계측관리 기준과 각종 구조물 계측에서 기준치를 설정하는 기법들에 대한 문헌조사를 실시하였으며,

둘째로 교량의 거동을 파악하기 위해 범용유한요소 프로그램을 이용한 구조해석을 시행하였으며, 동적 구조해석인 경우 고유치 해석과 이동하중에 의한 시간이력해석을 시행하였다.

셋째로 교량구조물의 실제거동을 파악하기 위해 계측결과를 확인하였으며 앞서 언급한 바와 같이 철도교의 경우 동적거동에 의한 영향이 구조물 안전성과 사용성에 가장 큰 영향을 미치므로 고속열차 주행에 따른 실제 이동하중에 의하여 구조물의 거동을 측정하였다.

이와 같이 기존 교량계측 관리 기준에 제시한 규정치, 구조해석결과 및 재하시험결과를 종합적으로 분석하여 적절한 유지관리를 위한 계측기준치를 설정하는 방식으로 연구를 시행하였다.

3. 기존 교량 계측관리 기준

(1) 기존 교량 계측관리 기준 설정

계측시스템을 이용하여 교량을 유지관리 한다는 것은 그 주요 목적이 교량 구조물의 이상거동을 사전에 사전 감지하여 구조물의 기능과 수명을 연장시키고 궁극적으로는 안전사고를 미연에 방지하는데 있다. 이에 국내외에서는 교량구조물 특성을 고려하여 계측시스템을 구축하고, 그 상태를 평가하기 위한 관리 기준에 관한 연구가 여러 차례 산발적으로 추진되고 있으나, 아직까지 구조형식별, 계측목적별로 체계적이고 합리적인 관리기준은 제시되어 있지 않은 상태이다. 따라서 실교량 적용시에는 대부분 각각의 교량에 규정되어 있는 구조설계기준과 시방서상에 응력, 처짐, 진동가속도등에 대한 안전율을 고려한 관리 기준으로 준용하고 있는 실정이다.

(2) 기존 교량 계측관리 기준 설정 사례

국내·외 교량 구조물에서의 계측관리 기준에 대한 문헌 등을 살펴보면 Favre등(1990)은 영구변형이 발생된 PSC BOX 교량의 안전성을 확보하기 위하여 수위계(Hydrostatic Levelling System)를 이용하여 교량에 발생하는 처짐을 측정하고, 영구처짐은 스위스 시방서에 명시된 $L/700(L : 지간장)$ 이하로 제한하여 적용하고 있다. 그리고 국내문헌(경갑수 외,1998)에서는 영구처짐이 과도하게 발생된 PSC BOX 교량의 안전성을 확보하기 위해 침하계를 이용하여 교량의 처짐을 장기간 동안 계측하고, 그 결과를 구조해석에 의한 결과와 비교하여 구조물의 안전성을 확보하는 처짐관리 기준치 작성방안을 제시하고 있다. 명시된 처짐관리 기준치는 처짐을 하중으로 치환하여 그 때 발생하는 모멘트와 균열모멘트를 비교하여 제시하고 있다.

돌산대교의 경우(대림산업, 1997) 온도변화에 따른 계측결과의 변동폭이 매우 크므로 계절적 온도변화에 따른 계측치의 변동폭을 고려하여 관리기준치를 수정하는 것이 타당하다고 제시하였으며, 예를

들어 중앙경간 중앙부 수직변위에 대한 관리기준치는 온도 40℃일 경우 -16~187mm이고, -30℃인 경우 -135~65mm로 기준을 설정하여 관리하고 있으며, 건설교통부(1995)에서는 교량구조물의 외관조사에 따른 상태등급기준(안)을 제시하였다. 한편 동해도 신간선에서는 강풍과 지진 시 열차의 운행안전성을 확보하기 위해 풍속계와 지진계를 이용하여 상시 계측을 실시하고 그 결과를 종합사령실로 보내어 열차의 운영을 통제하고 있다.

일본 세토대교의 경우 장기계측자료로부터 구조물의 상태를 판단하기 위하여 그들의 시방서 등에 명시된 항복응력과 허용 변위량을 관리기준치로 사용하였다.

양근대교(서울대학교 기초전력공학 공동연구소, 1997)에서는 영구계측시스템을 설치하여 계측관리가 되고있으며, 가용되고 있는 관리기준은 설계하중에 의한 구조해석, 장기거동 해석 및 초기 재하시험 결과를 근거로 설정하였으나 그들은 PC 강선의 긴장력 변화, 콘크리트 크리프 등에 의한 장기거동의 영향을 고려하여 장기적으로 관리기준을 변경할 필요가 있다고 하였다.

4. 계측결과와 해석치의 비교

(1) 강합성 플레이트 거더교(2@50)

각 주행속도별 계측치와 해석치는 표 4-1에 정리하였으며, 계측결과와 해석치를 비교·분석한 결과 비교적 일치하는 것으로 판단된다. 또한 해석치에 대한 계측치의 비가 처짐은 0.71~0.84 그리고 진동가속도는 0.47~0.86의 범위로서 전체적으로 해석치가 계측치에 비해 다소 크게 나타나 실 거동상태는 양호한 것으로 판단된다. 또한 가속도계에 의하여 측정된 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 수행하여 고유진동수를 산출하였다. 고유진동수의 경우, 계측치가 해석치에 비해 다소 크다는 것을 알 수 있으며, 처짐의 경우에는 계측치가 해석치보다 작게 계측되었다. 따라서, 구조물의 실제 휨강성이 해석 모델에 적용된 휨강성보다 큰 것으로 판단된다.

표 4-1 반월고가의 각 주행속도별 계측치와 해석치

구 분		처짐 (mm)	진동가속도 (g)	고유진동수(Hz)	비 고
100km/hr	계측치	1.53(0.77)	0.0084(0.79)	3.08	이론 고유진동수 : 2.57(Hz)
	해석치	1.98	0.0107	-	
200km/hr	계측치	1.43(0.71)	0.0204(0.86)	3.03	
	해석치	2.02	0.0237	-	
256km/hr	계측치	1.68(0.84)	-0.0177(0.47)	3.13	
	해석치	1.99	-0.0376	-	

※ ()안의 수치는 해석치에 대한 계측치의 비

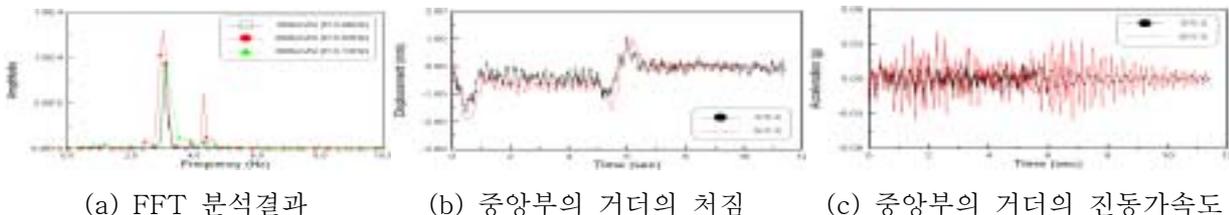


그림 1 반월고가의 계측치와 해석치의 비교 예

(2) PSC BOX 교량(33+50+33)

각 주행속도별 계측치와 해석치는 표 4-2에 정리하여 나타내었으며, 해석치에 대한 계측치의 비가 처짐은 0.82~0.99, 진동가속도는 1.41~3.11의 범위로서 상호간 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 단, 진동가속도에 대한 계측결과가 해석치에 비해 크다는 것을 알 수 있는데, 진동

가속도 계측치의 최대크기가 0.0278g로서 고속철도 설계기준인 0.35g보다 매우 작고 해석에 있어서 구조물과 열차의 동적 상호작용이 고려되지 않았다는 점을 감안하면 구조적으로 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 기본 고유진동수의 경우 FFT 분석결과가 해석치에 비해 다소 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 구조물의 실제 휨강성이 해석모델에 적용된 휨 강성보다 큰 것으로 추정된다

표 4-2 PSC BOX 교량의 각 주행속도별 계측치와 해석치

구분		처짐 (mm)	진동가속도 (g)	고유진동수 (Hz)	비고
100km/hr	계측치	1.16(0.92)	0.0140(3.11)	4.39	이론 고유진동수 : 3.01(Hz)
	해석치	1.26	0.0045	-	
200km/hr	계측치	1.29(0.99)	0.0138(1.94)	4.30	
	해석치	1.30	0.0071	-	
300km/hr	계측치	1.14(0.82)	0.0278(1.48)	4.39	
	해석치	1.39	-0.0197	-	

※ ()안의 수치는 해석치에 대한 계측치의 비

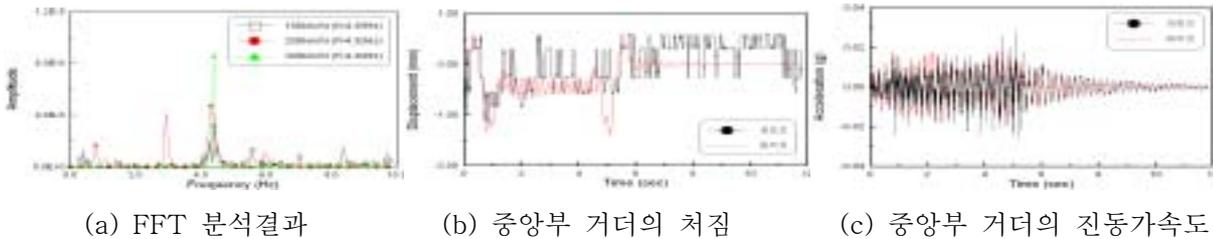


그림 2 평택고가의 계측치와 해석치의 비교 예

5. 계측관리기준 설정

경부고속철도 서울~천안 구간에 건설된 반월고가 및 평택고가의 계측관리 기준은 구조해석결과, 계측결과 및 기존의 문헌에 제시되어 있는 규정치를 종합적으로 분석하는 방법으로 설정하였다. 계측항목 중 응력, 처짐, 진동가속도 및 고유진동수는 일간 기준이며, 신축이동은 연간 기준이다. 그리고 본 논문에서는 한국철도기술연구원의 1998년도 연구보고서인 “고속철도 선로 구축물 계측시스템 구축”에서 제안한 바와 같이 구조물의 성능평가 및 열차통제에 적용하고자 한다.

표 5.1 구조물의 성능평가 및 열차통제 방안(철도기술연구원, 1998)

등급	구조물 상태	열차통제	조치사항
A	양호	정상	-
B	보통	주의	관찰 후 문제가 없으면 정상상태로 복귀, 문제점 있으면 해결시까지 150km/hr 이하로 서행시키고 유지보수 요원을 현장에 보내어 외관조사 실시
C	불량	서행	열차를 50km/hr 이하로 서행시키고 전문가에 의한 상세한 외관조사 실시하고 적절한 조치를 취한후 보통상태로 복귀
D	매우불량	운전정지	열차운행을 통제시키고 적절한 보수·보강을 실시한 후 서행 보통상태로 복귀

표 5.2 응력(변형률)에 대한 계측관리기준

등급	관리기준(kgf/cm ²)		비고
	강합성 플레이트 거더교	PSC BOX 교량	
A	인장응력	$f_t \leq 91.8$	해석결과 이하
	압축응력	$f_c \leq 117.9$	
B	인장응력	$91.8 < f_t \leq 548.0$	해석결과 초과, 여유응력의 70% 이하
	압축응력	$117.9 < f_c \leq 457.0$	
C	인장응력	$548.0 < f_t \leq 783.0$	여유응력의 70% 초과, 여유응력 이하
	압축응력	$457.0 < f_c \leq 653.0$	
D	인장응력	$783.0 < f_t$	여유응력 초과
	압축응력	$653.0 < f_c$	

표 5.3 처짐에 대한 계측관리기준

등급	관리기준(mm)		비고
	강합성 플레이트 거더교	PSC BOX 교량	
A	$\delta_v \leq 6.63$	$\delta_v \leq 2.98$	해석결과 이하
B	$6.63 < \delta_v \leq 20.6$	$2.98 < \delta_v \leq 20.6$	해석결과 초과, Δ_a 의 70% 이하
C	$20.6 < \delta_v \leq 29.4$	$20.6 < \delta_v \leq 29.4$	Δ_a 의 70% 초과, Δ_a 이하
D	$29.4 < \delta_v$	$29.4 < \delta_v$	Δ_a 초과

표 5.4 진동가속도에 대한 계측관리기준

등급	관리기준(g)		비고
	강합성 플레이트 거더교	PSC BOX 교량	
A	$a \leq 0.1285$	$a \leq 0.0555$	해석결과 이하
B	$0.1285 < a \leq 0.2450$	$0.0555 < a \leq 0.2450$	해석결과 초과, a_a 의 70% 이하
C	$0.2450 < a \leq 0.3500$	$0.2450 < a \leq 0.3500$	a_a 의 70% 초과, a_a 이하
D	$0.3500 < a$	$0.3500 < a$	a_a 초과

표 5.5 신축이동에 대한 계측관리기준

등급	관리기준(mm)		비고
	강합성 플레이트 거더교	PSC BOX 교량	
A	$\delta_l \leq 14.70$	$\delta_l \leq 13.60$	해석결과 이하
B	$14.70 < \delta_l \leq 16.90$	$13.60 < \delta_l \leq 15.60$	해석결과 초과, 해석결과의 115% 이하
C	$16.9 < \delta_l$	$15.60 < \delta_l$	해석결과의 115% 초과
D	$\delta_l \approx 0.00$	$\delta_l \approx 0.00$	온도변화에 대해 작동불능

표 5.6 고유진동수에 대한 계측관리기준

등급	관리기준(Hz)		비고
	강합성 플레이트 거더교	PSC BOX 교량	
A	$3.08 \leq f_{v1}$	$4.36 \leq f_{v1}$	FFT 결과 이상
B	$2.92 \leq f_{v1} < 3.08$	$4.14 \leq f_{v1} < 4.36$	FFT 결과 미만, 초기 휨강성의 90% 이상
C	$2.75 \leq f_{v1} < 2.92$	$3.90 \leq f_{v1} < 4.14$	초기 휨강성의 90% 미만, 80% 이상
D	$f_{v1} < 2.75$	$f_{v1} < 3.90$	초기 휨강성의 80% 미만

6. 결론

본 연구에서는 경부고속철도 교량에 대한 정, 동적 구조해석과 계측결과를 토대로 정량적인 관리기준 제시 등 교량의 유지관리 계측시스템 운용 중 적절한 계측기준 설정 방법과 계측항목별 계측기준을 제시하였다.

이같은 설정방법은 향후 유사교량의 유지관리 계측에 따른 기준 마련에 적용 될 수 있음은 물론, 계측기가 설치되지 않는 유사 구조물의 안전성 평가 기준으로도 널리 활용될 수 있다.

본 연구에서 해석치와 실제 고속열차 운행 시 이동하중에 의한 계측치를 고려하여 계측항목별 계측기준을 설정하였으며 구조물의 성능평가항목의 A등급을 기준으로 본 연구에서는 해석치와 실제 고속열차 운행에 의한 계측치를 비교하여 계측항목별 결론으로 도출한 계측관리기준은 다음과 같다.

1. 응력의 경우 강합성 플레이트 거더교와 PSC BOX 거더교 공히 이동하중에 의한 시간이력 해석 결과를 설정하였으며, 최대처짐은 강합성 교량의 경우 이동하중에 의한 시간이력해석 결과가 PSC교량의 경우는 정적 구조해석의 결과가 적용되었고 처짐에 대한 계측관리 기준은 모두 해석결과 이하를 계측관리 기준으로 선정하였다.
2. 진동가속도의 경우 강합성 플레이트 거더교는 해석결과 이하를 PSC BOX 거더교량은 해석결과치의 1.5배를 기준치로 설정하였다.
3. 신축이동의 경우는 강합성 플레이트 거더교와 PSC BOX 거더교 공히 해석결과 이하를 계측관리 기준으로 결정하였으며, 고유진동수는 FFT분석결과 이상을 계측관리 기준으로 설정하였다.

참고문헌

1. SYSTRA, "Bridge Desion Criteria", 1994
2. SYSTRA, "Bridge Desion Manual(BRDM) Final Report", 1994.12
3. SYSTRA, "Bridge Desion Typical", 1996
4. 서울대학교 공학연구소, 경부고속철도 교량 및 고가구조물의 동적특성에 대한 안정성 검토보고서의 분석검토 및 자문",1994.12
5. 한국철도시설공단, "공사시방서", 1997
6. 장승필, 김성일 등, "고속철도 각교량의 동적응답", 포항산업연구원,1998.2
7. 장승필, "열차의 고속주행에 따른 교량의 동적거동 검토 보고서",1995.5
8. 한국철도기술연구원, "시운전시 궤도, 노반 시설물의 성능검증". 2000.12
9. 한국철도기술연구원, "협선 구간 안전계측설비 상시계측보고서", 2002.7
10. 한국철도기술연구원, "협선 구간 안전계측설비 보고서," 2003.7
11. 한국철도기술연구원, "협선 구간 안전계측설비 상시계측보고서", 2003.12
12. 이종득, 철도공학, 1989,pp324-325
13. 신중서, "경부고속 전철건설의 필요성과 건설전망", 대한 토목학회지 제39권 제1호,1991,pp20-32