

철도교용 고무패드 설치에 따른 판형교의 동적 거동 분석

Analysis of Dynamic Behavior of Open-Steel-Plate-Girder Bridges Due to Installing Rubber Pads

최 은 수¹⁾ · 김 현 민²⁾ · 오 지 택³⁾ · 김 성 일⁴⁾
Choi, Eun Soo, Kim, Hyun Min, Oh, Ji Taek, Kim, Sun Gil

요약 : 본 연구에서는 '철도교용 고무패드의 강성추정기법'에서 결정된 각 고무패드의 강성과 가정된 감쇠비를 이용하여 두 판형교에서의 동적 거동을 분석하였다. 또한 패드에 의한 판형교의 동적 거동 변화가 철도교량의 거동의 한계를 규정하고 있는 규준에 적합한지도 판단하였다. 고무패드를 교좌로 판형교에 설치하면 판형교의 동적 처짐은 증가하였다. 그러나 처짐이 증가하더라도 규정에 있는 한계를 넘지는 않아 차량의 안정적 주행에 영향을 주지는 않는다. 천연고무나 크로로프렌 고무패드는 변형이 크게 발생하여 교좌로서 활용이 부적합하나, 폴리우레탄 고무패드는 변형이 작게 나타나 사용성이 우수한 것으로 판단되었다. 그러나 고속 주행을 위해서는 패드의 면적을 증가 시켜서 패드변형을 제한해야 하는 것으로 나타났다. 고무패드의 강성증가 및 감쇠비 증가가 교량의 동적 거동에 미치는 영향에 대해서 분석을 실시하였다. 고무패드의 감쇠비 증가는 교량의 동적 거동에 거의 영향을 주지 않았다. 패드의 강성 증가는 상대적으로 자중이 크고 강성이 작은 교량에서는 응답 개선 효과가 적지만, 자중이 작고 강성이 큰 즉 경간이 짧은 교량에서 상대적으로 응답 개선 효과가 크게 나타났다.

ABSTRACT : In this study, the dynamic characteristics of the two open-steel-plate-girder bridges was analyzed using the pads' stiffness estimated in the previous accompanying paper. Also, it was determined that the variation in the dynamic behavior of the two bridges due to the pads corresponds to the codes describing the restriction for the steel bridges' behavior. The pads installed at the bridges increase the displacement at mid-span. However, the increase does not exceed code restrictions and does not have an adverse effect on the riding quality of the running trains. The natural and Chloroprene rubber pads are not suitable for bridge bearings since they are more deformed than the code regulated ones.

핵심용어 : 철도교량, 교좌장치, 고무패드, 폴리우레탄 고무, 패드 강성

KEYWORDS : railway bridge, bridge bearing, rubber pads, polyurethane rubber, pad stiffness

1. 서론

판형교는 한국철도 전체 교량의 약 47%를 차지하고 있는 중요한 형식의 교량이다. 그러나 판형교의 상당수는 공용연수의 증가와 교량의 특성에 의해서 손상을 입고 있다. 설계하중 LS-18로 설계된 판형교 605개 중 13.1%가 손상을 입었으며, LS-22로 설계된 판형교 1382개 중 9.7%가 손상을 입고 있다 (최진유 외, 2002). 이러한 손상은 그림 1에서 보듯이 9, 12 및 18m 경간 길이를 갖는 교량에서 많이 발생하고 있다. 또한 판형교의 손상 부위를 나타내는 그림 2를 보면

상부구조가 23%를 차지하는데 비해 하부구조 및 교좌부가 각각 41%와 35%를 차지하고 있다. 하부구조 및 교좌부의 손상은 전체의 76%를 차지하고 있으며, 교량에서 발생하는 충격과 교좌의 구조적 불량에 주원인으로 판단된다.

따라서 이러한 교량받침 및 하부구조의 손상을 예방하기 위한 수단으로 판형교에 고무패드를 이용한 탄성받침의 설치에 기존의 기계적 거동이 불완전한 선받침과 면받침을 교체하여 교량의 안정성을 확보하고, 하부구조에 전달되는 충격을 완화하여 충격으로 인해 발생할 수 있는 하부구조의 손상을 예방할 수 있다.

1) 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
(Tel.031-460-5324, Fax.031-460-5359, E-mail: enusoochol@krii.re.kr)

2) 정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원(hnkim@krii.re.kr)

3) 한국철도기술연구원 선임연구원(jtoh@krii.re.kr)

4) 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원(sikim@krii.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

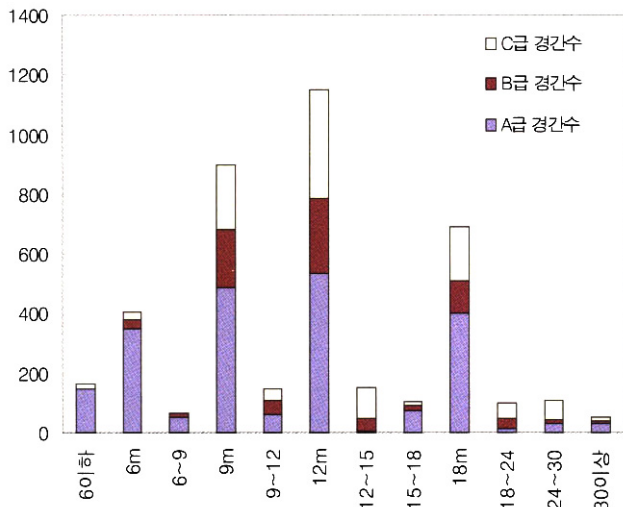


그림 1. 판형교의 경간별 분포현황 및 손상현황

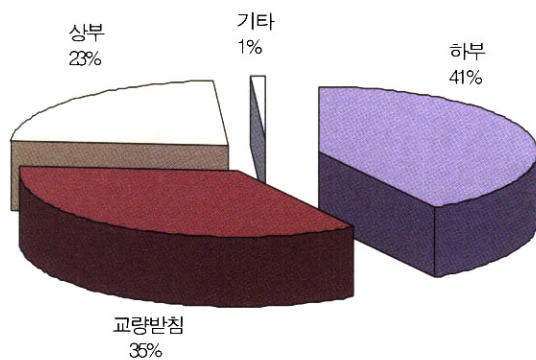


그림 2. 판형교의 손상부위 분포

차량과 철도교량의 상호작용에 대한 해석은 철도교량의 설계에 있어 중요한 관심사항이었다. 이러한 문제는 이동하중(moving loads) 또는 이동질량(moving masses)으로서 차량을 모사하여 해석적으로 수행된 연구가 다수이다 (Fryba, 1972; Warburton, 1976). 최근에는 Yang과 동료들에 의해서 차량/교량 상호작용 해석 문제가 집중적으로 연구되었다 (Yang et al., 1995; Yang et al., 1997a; Yang et al., 1997b). 특히, Yang et al.(1997a)은 이동하중에 대한 단순보의 수학적 해(closed-form solution)를 제시하여, 교량의 공진(resonance)과 소진(cancellation)의 현상을 설명하였다. 또한 Yang (1997b)은 이동차량에 의한 철도교량의 동적 해석을 위해 차량/교량 상호작용 요소를 개발하여 사용하였다. Ichikawa et al.(2000)은 이동질량에 의한 연속보의 동적 거동을 분석하기 위해 모드해석법을 사용하였다.

그러나 탄성지지된 교량의 동적 응답에 대한 연구는 매우

드물다. Yau et al. (2001)은 탄성지지된 단순보의 속도와 보길이의 함수로 표시되는 응답표면(response envelop)을 제시하였다. 또한, Yang et al. (2004)은 탄성지지 단순보의 이동하중에 의한 공진과 소진에 연구를 실시하였다.

본 연구에서는 '철도교용 고무패드의 강성추정 기법'에서 추정된 고무패드의 강성을 이용하여, 판형교에 탄성받침을 설치할 경우의 교량의 동특성의 변화 및 동적 거동의 변화를 분석하고자 한다. 이를 위해서 경간이 12.8m와 19.2m인 두 판형교를 선택하여 분석을 실시하였다.

2. 판형교의 해석 모델과 차량 운동의 수치화

두 판형교는 SAP2000 (2002)의 보요소를 사용하여 해석 모델을 작성하였으며, 요소의 길이는 침목의 간격인 400mm로 일정하게 하였다. 표 1에는 두 판형교의 제원 및 특성이 나타나 있다. 판형교 B1(19.2m)의 침목수는 49개이며, 판형교 B2(12.8m)의 침목수는 33개이다.

고무패드의 모델은 그림 3과 같이 스프링과 댐퍼로 모델링하였으며, 스프링의 강성은 추정된 값을 사용하였고, 댐퍼의 감쇠비는 고무의 일반적인 감쇠비 3~5%에서, 보수적으로 3%로 가정하였다.

판형교의 레일선상을 통과하는 운동의 시간이력을 수치적으로 구현하기 위해 레일에 재하되는 운동을 시간에 따른 등가절점하중으로 치환하였다. 본 연구에서는 운동에 의한 모멘트 하중과 수직하중만을 고려하였으며, 직선교에서 큰 영향을 미치지 않는 비틀림 하중은 고려하지 않았다.

표 1. 판형교의 제원

교량	경간 (m)	차중 (ton)	E (ton/m ²)	I (m ⁴)	A (m ²)
B1	19.2	25.3	2.04×10 ⁷	5.629×10 ⁻²	0.09135
B2	12.8	15.4	2.04×10 ⁷	2.013×10 ⁻²	0.0822

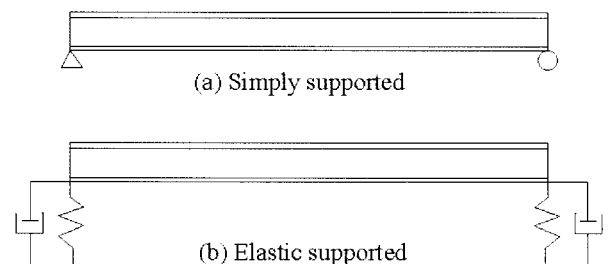


그림 3. 판형교의 단순지지 및 탄성지지 형상

다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해

석에 적용하기 위해 먼저 열차의 각 하중의 요소 내 위치를 시간 간격마다 요소길이에 대해 무차원화하여 식(1)과 같이 계산한다.

$$x_n = \frac{V_T \times T_n}{L_e} \quad (1)$$

여기서, x_n 은 절점 i 로부터의 축위치

V_T 는 열차속도

T_n 은 시간

L_e 은 요소의 길이

n : time step

임의 요소의 양단 절점 i, j 에서의 치환되는 절점 하중 및 절점 모멘트하중은 하중의 크기와 형상함수(shape function) (Cook et al., 1989)의 곱으로 나타낼 수 있으며 시간간격 (time step)마다 각 절점 별로 하중을 누적 합산하여 하중의 시간이력을 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 그림 4에는 형상함수가 나타나 있다.

$$P_i(x) = Q_i \times N_i \quad i=1,2,3,4 \quad (2a)$$

$$N_1 = 2x_n^3 - 3x_n^2 + 1$$

$$N_2 = x_n \times L_e \times (x_n - 1)^2 \quad (2b)$$

$$N_3 = -2x_n^3 + 3x_n^2$$

$$N_4 = x_n^2 \times L_e \times (x_n - 1)$$

$$(0 \leq x \leq 1)$$

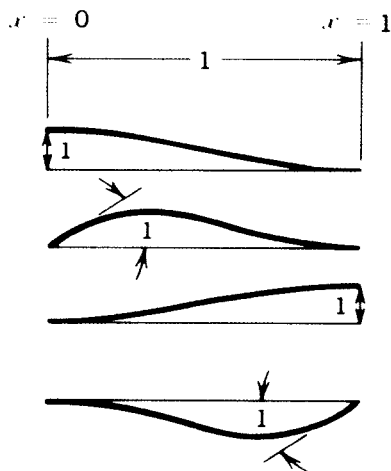


그림 4. 형상함수와 수식

위의 방법에 의해 구해진 각 침목에서의 수직하중을 그림 5로 나타내면 그림 5와 같으며, 기관차 1량과 객차 2량이

10km/h로 주행 시 침목위에 작용하는 수직하중과 모멘트 하중을 그림 6에 나타내었다.

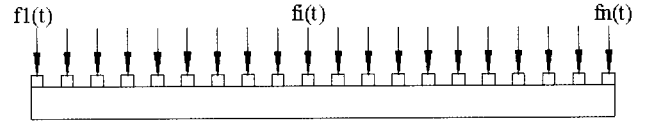
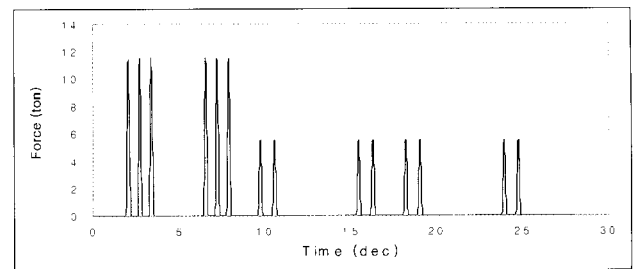
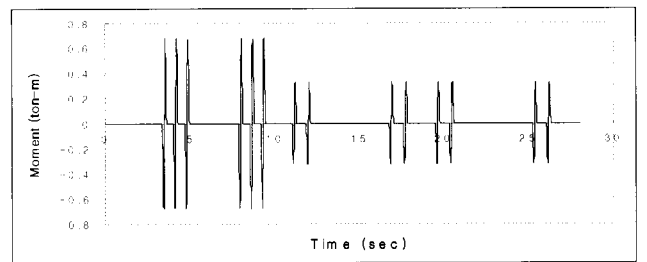


그림 5. 각 침목위에 작용하는 시간이력 하중



(a) 침목에 작용하는 수직하중의 예



(b) 침목에 작용하는 모멘트 하중의 예

그림 6. 차량 운동의 수치적 모형화의 예

그림 6(a)에 나타난 디젤기관차의 윤중은 11.5ton으로 디젤 기관차 윤중 23ton의 1/2인데, SAP2000에서 이 하중에 두 배를 곱하여 해석을 실시하였다.

3. 고무패드에 의한 판형교의 동특성 변화

판형교 B1(19.2m)과 B2(12.8m)의 1차 고유진동수는 11.64 및 18.01 Hz 이다. 또한 그림 7에는 두 교량에 대한 1차 모드형상이 나타나 있다. 교좌로 고무패드를 사용하면 구조물 전체의 강성(stiffness)이 저하하며, 이러한 강성 저하는 구조물의 고유진동수는 감소로 나타나게 된다.



그림 7. 판형교 B1(19.2m)과 B2(12.8m)의 1차 모드형상

각 진동모드에 해당하는 교량의 강성은 고유진동수의 제곱에 비례하므로, 고유진동수 제곱의 비는 그 고유진동수에 해당하는 강성의 비와 대체로 동일하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{K_p}{K_s} \approx \frac{\omega_p}{\omega_s} \quad (3)$$

여기서,

- Kp: 탄성지지 판형교의 1차모드 강성
- Ks: 단순지지 판형교의 1차모드 강성
- ωp: 탄성지지 판형교의 1차모드 고유진동수
- ωs: 단순지지 판형교의 1차모드 고유진동수

표 2에는 단순지지 상태의 1차모드 고유진동수 및 패드에 의한 탄성지지 상태의 고유진동수가 나타나 있으며, 식(3)에 의해서 구해진 고유진동수의 제곱비를 나타내어 탄성받침으로 인한 판형교의 전체 강성저하를 비교하였다. B1(19.2m) 판형교에서 천연고무(NR)와 크로로프렌고무(CR) 패드는 두께에 따라 강성저하가 81-94% 및 80-93%로 최대와 최소가 13%의 차이를 보이고 있다.

표 2. 탄성받침에 의한 판형교의 고유진동수 변화 및 강성변화

교량		B1 판형교(19.2m)			B2 판형교(12.8m)		
1차모드 고유진동수		11.64 Hz			18.01 Hz		
고무패드	두께 (mm)	1차모드 고유진동수(Hz)	1차모드 강성비 (ω _p ² /ω _s ²)	패드강성 (kg/cm ²)	1차모드 고유진동수(Hz)	1차모드 강성비 (ω _p ² /ω _s ²)	패드강성 (kg/cm ²)
NR- 5T	5	11.26	0.94	40.93	16.84	0.87	25.08
NR-10T	10	10.94	0.88	21.68	16.02	0.79	14.02
NR-15T	15	10.70	0.85	15.72	15.56	0.75	11.03
NR-20T	20	10.49	0.81	12.60	15.23	0.72	9.48
CR- 5T	5	11.24	0.93	39.46	16.91	0.88	26.80
CR-10T	10	10.93	0.88	21.47	16.03	0.79	14.10
CR-15T	15	10.62	0.83	14.45	15.50	0.74	10.71
CR-20T	20	10.43	0.80	11.84	15.40	0.73	10.22
PR95A- 5T	5	11.17	0.92	33.38	16.69	0.86	22.19
PR95A-10T	10	11.11	0.91	29.34	16.60	0.85	20.58
PR95A-15T	15	11.03	0.90	25.09	16.42	0.83	17.99
PR95A-20T	20	10.87	0.87	19.66	16.05	0.79	14.27
PR62D- 5T	5	11.23	0.93	38.03	16.91	0.88	26.81
PR62D-10T	10	11.17	0.92	32.91	16.73	0.86	22.89
PR62D-15T	15	11.12	0.91	29.84	16.65	0.86	21.49
PR62D-20T	20	11.07	0.91	27.09	16.56	0.85	20.03

그러나 폴리우레탄고무(PR)의 경우, 경도 95A를 가지는

패드는 차이가 5%, 경도 62D를 가지는 패드는 차이가 2%로 패드두께에 따른 교량의 강성도 저하가 천연고무 및 크로로프렌고무에 비해 월등히 적다. B1(19.2m) 판형교와 비교할 때, 같은 패드를 사용해도 B2(12.8m) 판형교에서는 강성저하가 크게 나타난다.

이것은 같은 패드라도 추정된 패드강성이 B1(19.2m) 교량에서 더 크기 때문이며, 기하중(preload)으로 작용하는 하중이 B1(19.2m) 교량에서 더 크고, 하중이 증가할수록 강성이 증가하는 고무패드의 거동특성 때문이다.

폴리우레탄 고무패드가 천연고무에 비해 두께 변화에 따른 강성저하 현상이 작게 나타나는 것은 B2(12.8m) 판형교에서도 동일하게 나타난다. 이것은 폴리우레탄고무의 경우 패드 강성 및 교량의 강성도 저하현상이 패드의 두께변화에 민감하지 않기 때문에 실제 사용에 있어 두꺼운 패드를 보다 자유롭게 사용할 수 있음을 의미한다.

4. 고무패드에 의한 판형교의 동적 거동 변화

탄성받침 판형교의 동적 거동의 특성을 분석하기 위해서 단순지지 판형교의 거동과 비교하였다. 위에서 언급한 것처럼 판형교는 19.2m와 12.8m의 두 교량을 사용하였다. 차량 하중은 디젤 기관차 1량과 객차 2량의 조합을 활용하여 동적 응답을 비교하였다.

판형교 동적 거동에서 비교항목은 각 속도에 따른 교량중앙에서의 전체처짐(판형교의 처짐+패드의 변형, total deflection)과 탄성받침의 변형을 비교·분석하였다.

탄성받침의 경우, 패드의 변형을 제거한 순수한 거더만의 처짐인 순처짐(pure deflection)을 비교하였다. 전체처짐은 교량 상을 운행하는 차량의 승차감에 영향을 주지만, 순처짐은 교량에서 발생하는 응력과 관련이 있다. 차량속도 10km/h에서부터 160km/h 까지 10km/h 증가 시키면서 해석을 실시하였다. 160km/h를 최대속도로 한 것은 UIC에 저속의 한계를 160km/h로 보고 있기 때문이며(EERI, 1995), 현행 기준선의 최대 속도는 약 140km/h 이다.

4.1 거동의 한계

철도교량은 차량의 주행안정성과 승차감 확보를 위해서 각종 거동에 제한을 두고 있다. UIC (EERI, 1995)의 처짐에 대한 규정과 철도교 설계기준(철도청, 2000)은 표 3에 정리되어 있다. UIC에 따라 높은 수준 승차감에 대한 최대 처짐 한계를 계산하면 3-5개의 경간이 인접한 경우 및 120km/h 이상 200km/h 이하의 주행속도 시, 19.2m 판형교는

19.2 mm 이고, 12.8m 판형교는 12.8 mm 이다. 철도설계 기준에 의하면 두 판형교의 처짐 한계는 17.45mm 및 11.64mm이다.

이러한 한계 처짐은 단순지지 및 탄성지지 판형교 응답과 비교하여 주행안전성 확보 여부를 판단할 수 있다.

UIC는 또한 탄성받침으로 사용되는 패드의 변형을 제한하고 있으며, 정리하면 다음과 같다.

표 3. 철도교량 처짐의 한계 규정

◎ 보통 수준의 승차감 확보 시 (UIC)				
속도 (V, km/h)	경간길이(L)/처짐(Δ)			
	1-2개 경간이 인접 (단순 및 연속교)		3-5개 경간이 인접 (단순 및 연속교)	
	L≤25 m	L>30 m	L≤25 m	L>30 m
V≤120	350	350	450	800
120<V≤200	450	600	700	2000
V>200	550	700	700	2000
◎ 높은 수준의 승차감 확보 시 (UIC)				
V≤120	400	400	500	900
120<V≤200	500	800	1000	2200
V>200	800	1000	1000	2200
◎ 철도교 설계기준				
열차속도, V(km/h)	경간길이, L (m)	0<L<50	L≥50	
강거더교	V≤130	L/800	L/700	
	130<V≤160	L/1100	L/900	

$\Delta_{max} < 3mm$ for a Maximum Line Speed at the Site of up to 160 km/h.

$\Delta_{max} < 2mm$ for a Maximum Line Speed at the Site over 160 km/h.

위의 규정에 따르면 본 연구에서 사용한 모든 패드는 차량의 160km/h 이하 속도 주행에 의해서 3mm 이내의 변형을 가져야 한다.

4.2 B1 판형교(19.2m) 의 동적 거동 분석

표 2에서는 4가지 두께에 대한 고무패드의 강성을 추정하였지만, 실용적 측면에서 두께 10mm 이하의 패드는 사용성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 각 고무의 20mm 두께 패드에 대한 결과만을 비교 분석하도록 하겠다.

그림 8에는 B1(19.2m) 판형교에서 차량이 90km/h로 주행할 때의 중앙처짐의 시간이력 해석결과가 나타나 있다. 최대처짐이 발생하는 부분은 디젤기관차의 주행에 의한 것이며, 다음의 두 피크는 객차에 의한 것이다. 그림 9에는 각 속도별 각 응답의 최대값이 나타나 있다.

교량 중앙의 최대처짐(그림 9(a) 참조)은 단순지지의 경우 90km/h의 속도에서 11.64mm로 나타났다. 고무패드를 설치하면 최대처짐이 발생하는 속도가 70km/h로 모든 패드에서 일정하고 교량의 강성저하로 인한 1차모드 고유진동수의 감소가 원인으로 판단된다. NR-20T의 경우 15.11mm, CR-20T는 15.16mm, PR95A-20T는 14.2mm 및 PR62D-20T는 13.29mm로 나타났다.

CR-20T의 경우 단순지지에 비해 최대처짐이 30.2%증가하였으나, PR62D-20T는 14.2%만의 증가를 보였다.

교량의 순처짐을 비교한 그림 9(b)를 보면, NR-20T는 13.0mm, CR-20T는 12.91mm, PR95A-20T는 12.8mm 및 PR62D-20T는 12.31mm의 최대 순처짐을 보였다. 단순지지 상태의 최대 처짐값(11.64mm)과 비교하면, NR-20T의 경우 11.7%, PR62D-20T는 5.8% 증가하는 것으로 나타나 전체 처짐의 증가에 비해 상당히 적다. 이것은 패드의 탄성지지로 인하여 판형교의 응력 증가가 크지 않다는 것을 보여준다.

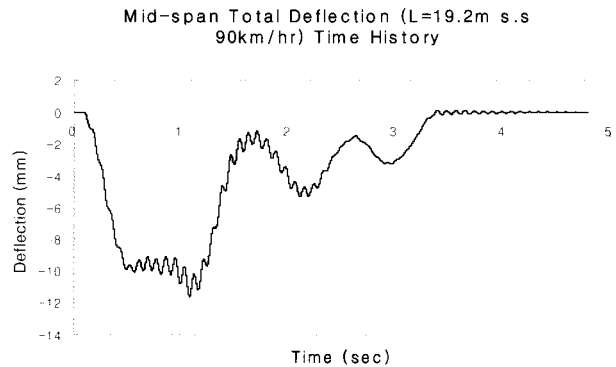


그림 8. B1 판형교의 동적 처짐 시간이력의 예

각 패드의 변형(그림 9(c) 참조)은 NR-20T는 3.6mm, CR-20T는 4.0mm, PR95A-20T는 2.2mm 및 PR62D-20T는 1.5mm로 나타났다. 따라서 NR-20T와 CR-20T는 패드의 변형 한계를 넘고 있기 때문에 사용이 불가하다. 반면, PR계열의 패드는 한계를 만족하고 있다. 그러나 160km/h 이상의 주행에서 요구되는 2mm의 한계 규정은 PR62D-20T만이 충족하고 있다. 기존선의 속도 개선으로 160km/h 이상의 속도로 차량이 주행하게 되면 PR62D-20T만을 사용할 수 있으며, PR95A의 경우는 패드의 강성을 크게 하기 위하여 면적을 확장해야 사용이 가능할 것이다.

4.3 B2 판형교 (12.8m)의 동적 거동 분석

그림 10에는 B2(12.8m) 판형교의 120km/h의 주행 속

도에서 중앙 처짐의 시간이력이 나타나 있다. 또한 그림 11에는 각 속도에 발생하는 최대 응답이 나타나 있다.

B2(12.8m) 판형교에서 교량 중앙의 최대 전체처짐은 단순지지 상태에서 8.24mm, NR-20T는 10.87mm, CR-20T는 10.74mm, PR95A-20T는 9.81mm 및 PR62D-20T는 9.43mm 이다. 고무패드에 의한 증가량은 NR-20T가 31.9% 및 PR62D-20T가 14.4% 이다. 이러한 증가분은 B1(19.2m) 판형교와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.

Mid-span Total Deflection (L=12.8m s.s 120km/hr) Time History

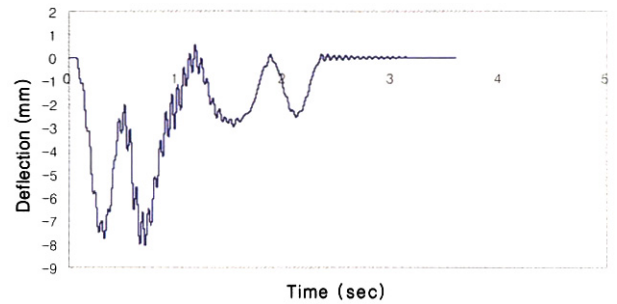


그림 10. B2 판형교의 동적 처짐 시간이력 예

순처짐의 경우 NR-20T는 8.73mm, CR-20T는 8.69mm, PR95A-20T는 8.47mm 및 PR62D-20T는 8.45mm 이다. NR-20T는 단순지지 상태의 최대 처짐(8.24mm) 보다 5.9% 증가하였고, PR62D-20T는 2.5% 증가하였다. 이러한 증가량은 B1(19.2m) 판형교에 비해 약 50% 정도 적은 것으로 경간이 작은 판형교에서 고무패드에 의한 거더의 응력증가가 경간이 큰 판형교에 비해 적음을 알 수 있다.

고무패드의 최대변형은 NR-20T의 경우 차량속도 130 km/h에서 4.40mm이며, CR-20T는 동일한 속도에서 4.25 mm 이다. PR95A-20T는 150 km/h 속도에서 2.86mm이 과, PR62D-20T는 160km/h의 속도에서 1.99mm 이다. 이러한 고무패드가 최대 변형값은 B1(19.2m) 판형교와 비교할 때, NR-20T는 22%, CR-20T는 6.3%, PR95A-20T는 30% 및 PR62D-20T는 33% 증가한 것이다.

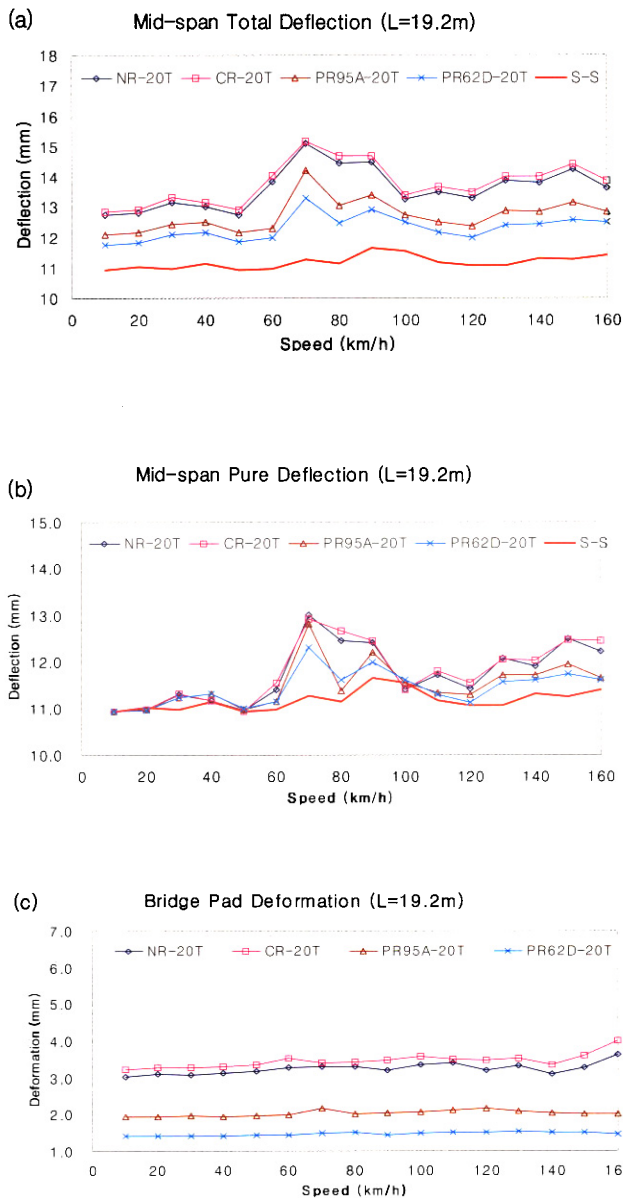
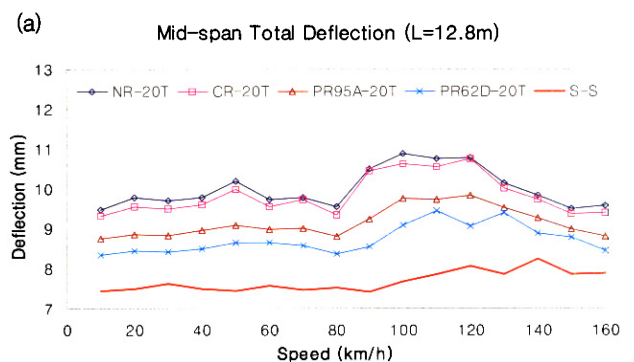


그림 9. 패드에 의한 B1 판형교의 동적 거동



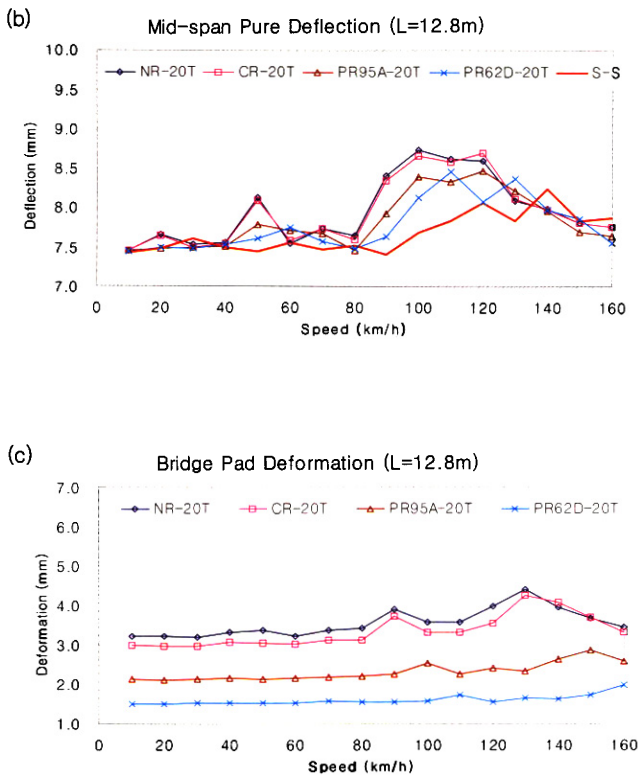


그림 11. 패드에 의한 B2 판형교의 동적 거동

5. 고무패드의 기하중 효과(Preload effect)

제 4절의 결과를 보면 같은 패드를 사용하는 경우에도 B1(19.2m)과 B2(12.8m)에서의 추정된 고무패드의 강성이 차이가 나고, 이로 인하여 각종 응답에도 차이가 나타난다. 이는 고무패드의 기하중 효과(preload effect) 때문이다.

기하중 효과는 패드에 하중을 가한 상태에서 추정하는 강성이 하중이 없는 상태에서 추정하는 강성보다 크다는 것이다. 이는 그림 15에 보이는 고무패드의 힘-변형 곡선을 보면 이해될 수 있다. 고무패드는 비선형 거동을 하며, 하중이 증가할수록 변형에 대한 저항성이 증가한다. 따라서 일정 하중을 재하한 상태에서의 패드 강성은 하중이 없는 경우에 비해 크다. 교량에서는 사하중이 기하중으로 작용하며 경간이 큰 B1(19.2m) 판형교가 B2(12.8m) 판형교에 비해 기하중이 크다. 따라서 같은 패드라도 B1(19.2m) 판형교에 사용되는 패드의 강성이 B2(12.8m) 판형교에 사용되는 패드의 강성에 비해 크게 추정된다.

그림 11에서 보면 B2(12.8m) 판형교의 최대 응답이 발생하는 속도가 고무패드를 설치할 경우 분명하게 나타나지 않으며, 이것은 B1(19.2m) 판형교와 다른 현상이다. 그림 9(a)에서는 고무패드를 설치하여도 단순지지의 최대 처짐 곡

선의 형상을 유지하고 최대값이 발생하는 속도가 저속으로 이동하였을 뿐이지만, 그림 11(a)에서 PR62D-20T를 제외하고는 단순지지의 최대 처짐 곡선의 형상을 유지하고 있지 않다.

B2(12.8m) 판형교의 1차모드 고유진동수는 표 2에서 보듯이 B1(19.8m) 판형교의 1차모드 고유진동수에 비해 약 55% 크다. 또한, 단순지지 상태에서 주행속도 10km/h의 저속에서 B2(12.8m)의 최대 처짐은 7.44mm로 B1(19.2m)의 최대 처짐 10.92mm 보다 약 32% 적다. 이것은 단순지지 상태에서 B2(12.8m)의 교량의 강성이 B1(19.8m)의 강성보다 크다는 것을 의미한다. 반면, B2(12.8m) 판형교에서는 패드의 추정된 강성이 상대적으로 적기 때문에 1차모드의 고유진동수 변화가 크고, 이에 상응하는 강성 또한 크게 저하한다. 따라서 그림 11(a)에서 나타난 B2(12.8m) 판형교의 최대 처짐 곡선의 형상이 고무패드 부착으로 인해 그림 9(a)의 B1(19.2m)에 비해 더 크게 변화한다.

차량하중에 의한 패드의 변형은 B2(12.8m) 판형교에서 6-33% 정도 크게 나타나고 있으며, 이것 또한 기하중 효과에 의한 추정된 패드 강성이 적기 때문이다. 사하중과 활하중은 B2(12.8m) 판형교가 B1(19.8m) 판형교 보다 작기 때문에, 패드의 응력을 고려하면 B2(12.8m) 판형교에 상대적으로 작은 면적의 패드를 사용해야 한다고 판단된다. 그러나 패드의 변형과 1차 모드 고유진동수의 변화를 고려하면, 오히려 경간이 짧은, 즉 사하중이 작은 B2(12.8m) 판형교에 상대적으로 면적이 넓은 패드를 사용하여, 추정된 강성을 증가시켜 패드의 변형과 고유진동수의 저하를 감소시킬 수 있다.

표 2의 고무패드로 인한 고유진동수의 감소에서 NR-20T로 인해 1차 고유진동수가 B1(19.2m) 판형교는 19% 감소하였으나 원래의 처짐 곡선 형상을 유지하고 있고, B2(12.8m) 판형교에서는 PR95A-20T의 경우 1차 고유진동수가 21% 감소하여 원래의 처짐 곡선 형상이 변형되어 나타나고 있다. 이것으로 판단하면 고무패드에 의해서 단순지지 상태의 1차 고유진동수의 약 80% 이상을 유지해야 교량의 전체적인 동적 거동 특성에 큰 변화가 나타나지 않는다고 판단할 수 있다.

6. 고무패드의 의한 충격효과

교량의 동적 거동 분석에서 동적 특성을 나타내는 인자로 충격계수(impact factor)를 사용한다. 충격계수는 정적 응답에 대한 동적 응답의 특징을 나타내는 것으로, 본 연구에서는 아래와 같은 식의 충격계수를 사용하였다.

$$I_f = \frac{R_d - R_s}{R_s} \quad (4)$$

여기서, R_d : 동적 처짐응답

R_s : 유사 정적 처짐응답으로 10km/h 주행 시 응답

I_f : 충격계수, $0.0 \leq I_f \leq 1.0$

본 연구에서 교량의 처짐은 패드의 변형과 교량의 처짐을 합한 전체처짐과 교량만의 변형에 의한 순처짐을 제시하였다. 충격계수는 충격효과에 의한 활하중의 응력을 증가시키기 위해 도입된 것이므로, 교량 부재의 응력과 관련이 있는 순처짐을 사용하여 충격계수를 구하는 것이 타당할 것이다. 또한 정적 처짐의 경우 단순지지나 탄성지지 모두 10.92mm로 거의 동일하기 때문에 이를 기준으로 충격계수를 계산 한다면 교량 상호간의 충격계수 비교도 가능하다. 또한 본 연구에서 얻어진 충격계수들을 철도교 설계기준에서 규정하고 있는 강교 및 강합성교의 충격계수와 비교하였으며, 설계기준은 아래와 같다.

① $L < 24$ (m) 인 경우:

$$\left(50 - \frac{L^2}{48}\right) / 100 \quad (5)$$

② $L \geq 24$ (m) 인 경우 :

$$\left(\frac{180}{L - 9} + 26\right) / 100 \quad (6)$$

여기서, L : 경간 길이(m)

12.8m 및 19.2m의 판형교는 24m보다 경간이 작기 때문에 식(5)를 이용하면, 12.8m 판형교에 대한 설계 충격계수는 0.466이며, 19.2m에 대한 설계 충격계수는 0.423 이다.

그림 12에는 두 판형교의 충격계수를 나타내었다. B1 (19.2m) 판형교의 경우, 그림 12(a)에서 보듯이 최대 충격계수는 단순지지의 경우 90km/h의 속도에서 0.066를 가진다. 그러나 탄성지지의 경우는 모든 교량이 70km/h에서 최대의 충격계수를 보였으며, NR-20T는 0.187, CR-20T는 0.181, PR95A-20T는 0.175 및 PR62D-20T는 0.130의 최대 충격계수를 보였다. 탄성지지에 의한 충격효과는 단순지지에 비해 약 3배 이상 큰 것으로 나타났다. 그러나 설계 충격계수인 0.423에 비해서는 탄성지지에 의해서 나타나는 최대 충격계수인 0.187도 약 44%에 불과하다.

그림 12(b)에 B2(12.8m) 판형교의 충격계수가 나타나 있다. 단순지지 상태에서는 속도 140km/h에서 최대 충격계수가 0.107로 나타났다. 탄성지지의 경우, NR-20T, CR-

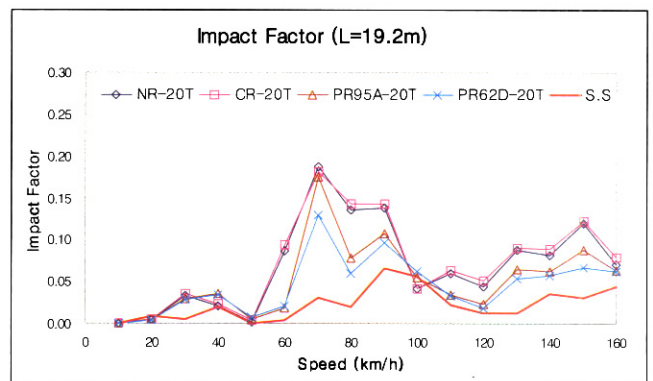
20T 및 PR95A-20T는 최대 충격계수가 각각 0.150, 0.155 및 0.123를 보였으며, PR62D-20T는 속도 110km/h에서 최대 충격계수 0.132를 보였다. 탄성지지에 의한 최대 충격계수의 증가는 약 PR62D-20T에 의해 약 27%와 CR-20T에 의해 약 45% 이다. 12.8m 판형교에서도 설계 충격계수인 0.466에 비해 단순지지 및 탄성지지의 교량의 충격계수는 현저히 작다.

단순지지 상태에서 12.8m 판형교의 최대 충격계수는 19.2m 판형교의 최대 충격계수보다 약 62% 크다. 그러나 탄성지지에 의한 최대 충격계수를 비교하면 19.2m 판형교가 약 20% 크다. 이러한 결과는 경간 길이가 증가하면, 고무패드에 의한 탄성지지에 의해서 충격효과가 더 크게 증가함을 알 수 있다.

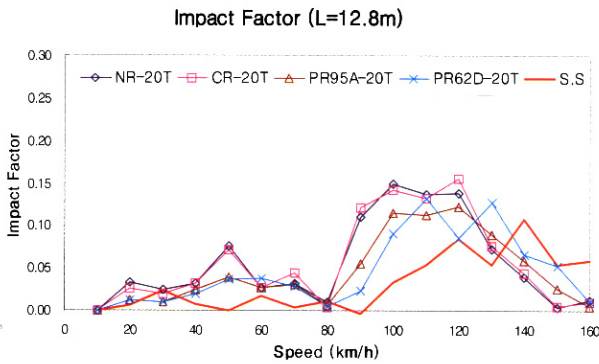
7. 고무패드의 감쇠비 영향

고무의 감쇠비는 Part I에서 언급한 것처럼 3-5%인 것으로 보고 되고 있다(Harris, 1988). 위의 연구에서는 보수적으로 고무패드에 3%의 감쇠비를 적용하였다. 그러나 최근 개발된 고감쇠 고무는 감쇠비가 10-20%에 이르고 있고(Naeim and Kelly, 1999), 폴리우레탄의 경우도 고감쇠 제품이 개발되어 최대 20%의 감쇠비가 나타나는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구는 고무패드의 감쇠비를 매개변수로 하여 감쇠비의 증가에 따른 교량의 거동 변화를 분석하였다. 감쇠비는 3, 5, 10 및 20%를 선정하였고, 고무패드는 PR62D-20T만을 대상으로 하였다.

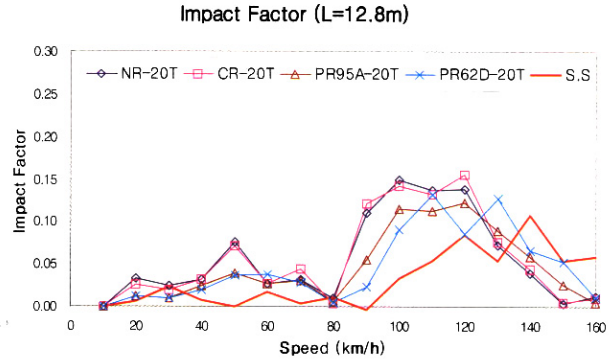
그림 13에는 고무패드 감쇠비 변화에 따른 19.2m와 12.8m 판형교의 중앙 처짐이 나타나 있다. 그림에서 보듯이 감쇠비 증가가 탄성지지 교량의 응답에 거의 영향을 주지 못하고 있다. 이것은 고무패드에 의해서 발생되는 에너지량이 극히 적다는 것을 의미한다. 따라서 감쇠비가 증가해도 전체 에너지 감소량에 미치는 영향이 극히 적게 되는 것이다.



(a) B1(19.2m) 판형교의 충격계수



(b) B2(12.8m) 판형교의 충격계수



(a) B1(19.2m) 판형교의 패드 감쇠비 영향

그림 12. 고무패드에 의한 충격계수

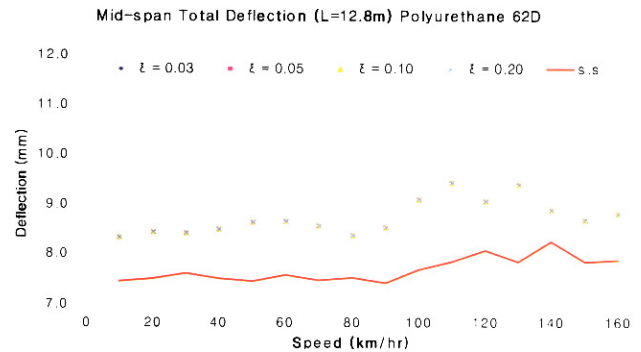
8. 면적이 증가된 고무패드의 효과

본 연구에서 패드두께 20mm에 면적이 400mm×300mm 가지는 천연고무나 크로로프렌 고무는 패드의 변형이 기준을 초과 때문에 사용이 불가능하다.

폴리우레탄고무의 변형은 PR62D-20T에서는 최대 변형이 2mm를 초과 않았으며, PR95A-20T에서는 3mm를 초과하지 않았다. 그러나 속도 향상이 160km/h 이상으로 된다면 패드의 변형을 2mm 이내로 제한하여야 한다. 또한 패드의 탄성받침으로 인한 교량의 처짐이 증가하였다. 연구결과에서 보듯이 패드 강성이 증가 하면 교량의 처짐이 개선되기 때문에 패드의 가능한 범위에서 강성을 크게 할 필요가 있다. 패드 강성을 증가 시키는 방법은 두께를 얇게 하는 방법이 있으나 실용성이 떨어지기 때문에 면적을 크게 하는 방법이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 면적이 확장된 폴리우레탄 고무패드를 사용하여 두 판형교의 동적 거동을 분석하였다.

PR95A-20T의 경우 면적이 2.25배 확장된 300mm×300mm, PR62D-20T의 경우 면적이 1.56배 증가된 250mm×250mm의 패드를 사용하였다. 그림 14는 두 패드의 하중-변위 곡선을 보여주고 있으며 두 패드의 하중-변형 곡선은 거의 동일하게 나타나고 있다.



(b) B2(12.8m) 판형교의 패드 감쇠비 영향

그림 13. 고무패드 감쇠비 증가에 의한 동적 거동 변화

두 패드의 강성은 '철도교용 고무패드의 강성추정 기법'에서 사용한 방법을 사용하여 강성을 구하였으며, 표 4에는 두 패드의 두 판형교에 대한 강성을 보여주었고 있다. 표 4를 보면 B2(12.8m) 판형교에서는 패드의 면적 증가가 패드의 강성 증가에 PR95A의 경우는 92.9%, PR62D의 경우는 41.0%로 면적 증가가 강성 증가에 영향을 크게 주고 있으나, B1(19.2m) 판형교에서는 PR95A는 42.3%, PR62D는 4.5%로 그 영향이 상대적으로 적게 나타나고 있다. 특히 B1(19.2m) 판형교에서 PR62D를 사용하는 경우 면적이 156% 증가하여도 강성은 4.5% 증가하는데 그치고 있다.

두 패드의 거동 특성은 그림 14에서 보듯이 관심 영역인 30 ton 이하에서는 거의 동일하며, 추정된 패드의 강성 또한 모든 경우에 비슷한 값을 보이고 있다. 특히, 교량에 따라서도 비슷한 강성을 보이고 있는데, 이것은 사하중과 활하중 변화 구간에서 하중-변위의 관계가 선형이 가깝다는 것을 의미한다.

폴리우레탄 패드의 면적을 크게 한 경우의 동적 거동 특성을 비교하기 위해서 그림 15와 16에 B1(19.2m) 및 B2(12.8m) 판형교의 응답을 나타내었다. B1(19.2m) 판형교

에서는 패드의 강성이 작은 PR95A-20×20의 경우를 제외하고는 나머지 세 경우는 비슷한 응답특성을 보여주고 있다. 그러나 B2(12.8m) 관형교에서는 면적 증가에 의해서 패드의 강성이 PR95A-30×30의 경우는 92.9%, PR62D-25×25에서는 41.0% 증가하여 응답에서도 이러한 특성이 그대로 반영되고 있다. B1(19.2m) 관형교에서 PR95A-20×20에 의해서 최대 처짐이 14.2mm가 발생하였고, PR62D-20×20, PR95A-30×30 및 PR62D-25×25에 의해서는 최대 처짐이 각각 13.3, 13.1 및 13.2mm가 발생하였다. 패드의 변형도 PR95A-20×20에 의해서 최대 변형이 2.16mm가 발생하였고, PR62D-20×20, PR95A-30×30 및 PR62D-25×25에 의해서는 최대 변형이 각각 1.54, 1.44 및 1.47mm가 발생하여, 패드 PR62D-20×20에 비해 패드 면적의 증가에 따른 이득이 거의 없는 것으로 나타났다.

그러나 B2(12.8m) 관형교에서는 PR95A-20×20와 PR62D-20×20에 의해서 최대 처짐이 9.81 및 9.43mm가 발생하였고, PR95A-30×30 및 PR62D-25×25에 의해서는 최대 처짐이 각각 9.17 및 9.18mm가 발생하였다.

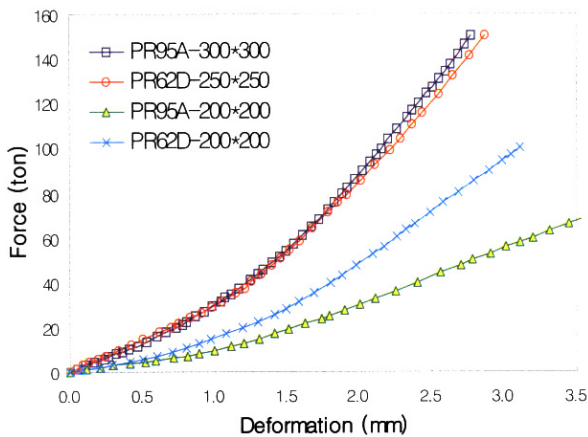


그림 14. 면적이 증가된 폴리우레탄 고무패드의 힘-변형 곡선

표 4. 면적이 증가된 폴리우레탄 고무패드의 강성

교량	PR95A (20×20) (ton/mm)	PR95A (30×30) (ton/mm)	PR62D (20×20) (ton/mm)	PR62D (25×25) (ton/mm)
B1	19.66	28.95	27.09	28.31
B2	14.27	27.54	20.03	28.25

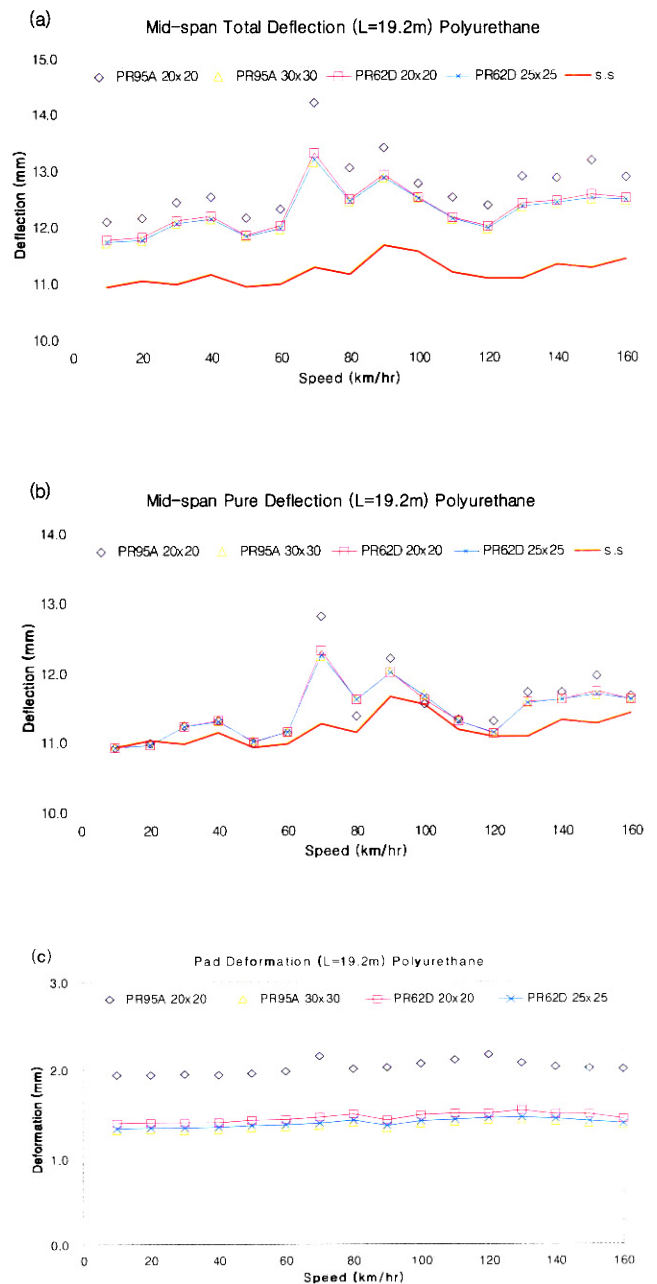


그림 15. B1(19.2m) 관형교에서 면적이 증가된 폴리우레탄 패드에 의한 동적 거동의 변화

따라서 면적 증가에 의해서 6.5% 및 2.7%의 응답 개선 효과를 가져왔다. 패드변형에서는 PR95A-20×20은 전 속도 구간에서 변형이 2.0mm를 초과하므로 160km/h 이상의 주행속도에 부적합하며, PR62D-20×20도 속도 160km/h에서 변형이 1.99mm로 한계값에 이르고 있다. 그러나 패드 면적을 증가시키면 PR95A-30×30 및 PR62D-25×25의 패드의 최대 변형이 각각 1.23 및 1.20mm로 개선효과가 약 40%에 이른다. 이러한 변형은 차량의 속도 160km/h 이하의 속도에서는 기준을 충분히 만족하고 있으며, 160km/h 이상의

속도에서 기준을 만족하리라고 예상된다.

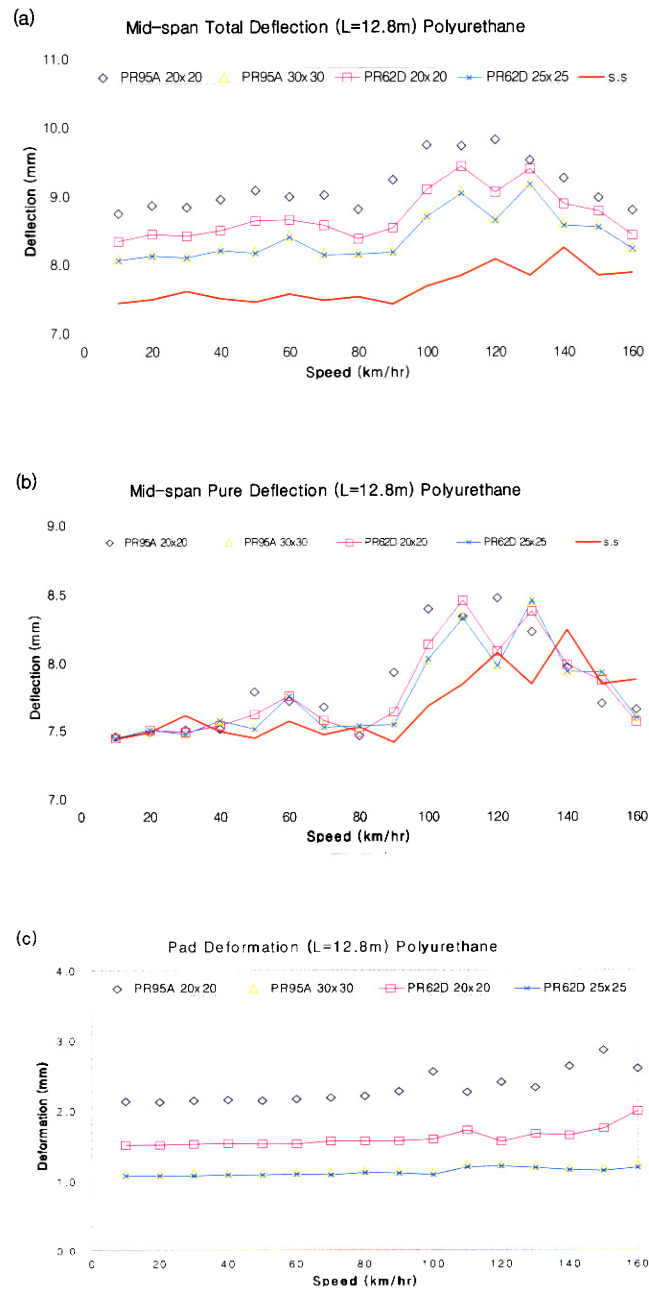


그림 16. B2(12.8m) 판형교에서 면적이 증가된 폴리우레탄 패드에 의한 동적 거동의 변화

패드의 면적 증가는 교량의 자중이나 강성에 따라서 교량의 동적 응답 개선에 미치는 효과가 다르게 나타남을 알 수 있었으며, 상대적으로 자중은 작고 강성이 큰 12.8m 판형교의 응답 개선 효과가 19.8m 판형교에서 보다 크게 나타났다.

위 결과를 보면 사하중이 큰 교량에서는 패드의 면적을 증가시켜도 패드의 강성 증가효과가 적고, 따라서 응답의 개선 효과도 크지 않다. 그러나 사하중이 작은 교량에서는 패드의

면적 증가가 강성 증가에 상대적으로 크게 영향을 주며 교량의 응답 개선에도 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 패드의 변형은 크게 개선되는 것으로 나타났다.

9. 결론

본 연구에서는 한국철도의 대표적인 교량 형식인 판형교의 교좌로서 고무패드를 사용한 경우 동적 거동 특성을 분석하였다. 고무패드는 스프링과 댐퍼로 모델링할 수 있는데, 이를 위해서 추정된 고무패드의 강성 및 가정된 감쇠비를 사용하였다.

판형교에 고무패드에 의한 탄성지지를 하면 구조물의 전체적인 강성이 저하하여 교량의 1차 고유진동수가 감소하게 된다. 이러한 고유진동수의 저하는 차량 주행과 교량의 상호작용에 영향을 주어 최대값이 발생하는 속도에 영향을 주며, 속도에 따른 치짐 곡선 형상에도 영향을 준다. 본 연구에서 나타난 결과를 보면, 탄성지지의 경우 단순지지 상태 보다 저속에서 교량의 최대 응답이 발행하며, 단순지지 상태의 강성에 비해 80% 이하로 강성이 저하하면 전체적인 속도에 대한 치짐 곡선 형상이 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 탄성지지에 의한 강성이 단순지지 상태의 80% 이하로 되는 것은 바람직하지 않다고 판단된다.

고무패드에 의한 탄성지지를 하면 판형교의 전체적인 중앙치짐은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 차량의 주행 안정성과 승차감에 크게 영향을 줄 정도로 증가하는 것은 아니었다.

고무패드의 감쇠비를 증가시키는 것은 교량의 응답 개선에 거의 효과가 없는 것으로 나타났다.

고무패드의 면적을 증가시키면 19.2m 판형교에서 고무패드의 강성증가 효과가 미약하고 응답의 개선효과도 크지 않았다. 그러나 12.8m 판형교에서는 고무패드의 면적 증가가 강성증가에 크게 영향을 주었으며, 응답의 개선에도 영향을 주었다. 특히 고무패드의 변형을 감소시키는데 크게 영향을 주었다. 따라서 경간이 짧고 자중이 작은 판형교에서는 상대적으로 면적이 큰 고무패드를 사용하는 것이 바람직하다. 경간이 짧은 교량은 사하중이 작기 때문에 기하중 효과에 의해서 추정되는 고무패드의 강성이 상대적으로 작다. 이것은 고무패드의 변형 증가와 구조물 전체의 고유진동수 저하 증가에 영향을 주기 때문에, 짧은 경간의 판형교에는 오히려 상대적으로 큰 면적의 패드를 사용하여야 한다.

참 고 문 헌

- 최진유 외 (2002). 관형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발, 한국철도기술연구원
- 철도청 (1999). 철도설계기준(철도교편)
- Cook, R.D., Malkus, D.S. and Plesha, M.E. (1989). Concepts and Applications of Finite Element Method, John Wiley & Sons, Inc.
- ERRI D 190 (1995) Permissible Deflection of Steel and Composite Bridges for Velocities $V > 160\text{km}$: RP 5 Parametric Study Studies-Summary and Recommendations Final Report.
- Harris, C.M. (1988). Shock and Vibration Handbook, The Third Edition, McGraw-Hill, Inc.
- Ichikawa, M., Miyakawa, Y. and Matsuda, A. (2000). Vibration analysis of the continuous beam subjected to a moving mass, *Journal of Sound and Vibration*, 230, pp.492-506.
- Fryba, L. (1972). vibration of Solids and Structures under Moving Loads, Groningen, The Netherlands: Noordhoff International Publishing.
- SAP2000 (2002). COMPUTERS & STRUCTURES, Inc., California, USA.
- Yau, J.D., Wu, Y.S. and Yang, Y.B. (2001). Impact response of bridges with elastic bearings to moving loads, *Journal of Sound and Vibration*, 248 (1), pp.9-30.
- Yang, Y.B., Liao, S.S., and Lin, B.H. (1995). Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams, ASCE, *Journal of Structural Engineering*, 121 (11), pp.1644-1650.
- Yang, Y.B., Yau, J.D., and Hsu, L.C. (1997a). Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds, *Engineering Structures*, 19 (11), pp.936-944.
- Yang, Y.B., and Yau, J.D. (1997b). Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis, ASCE, *Journal of Structure Engineering*, 123 (11), pp.1512-1518.
- Yang, Y.B., Lin, C.L., Yau, J.D., and Chang, D.W. (2004). Mechanism of resonance and cancellation for train-induced vibrations on bridges with elastic bearings.
- Warburton, G.B. (1976). The Dynamic Behavior of Structures, Oxford: Pergamon

(접수일자 : 2004. 12. 2 / 심사일 2004. 12. 23 /
심사완료일 2005. 5. 25)