

철도교용 고무패드의 강성 추정기법

The Estimated Stiffness of Rubber Pads for Railway Bridges

오 세 환¹⁾ · 최 은 수²⁾ · 정 희 영³⁾

Oh, Saeh Wan, Choi, Eun Soo, Jung, Hie Young

요약 : 본 연구에서는 철도교량에 교량받침으로 사용될 수 있는 4종류의 고무패드의 사용상의 특성을 분석하고, 강성과 감쇠비를 결정하기 위한 방법을 제시하였다. 고무패드의 강성을 결정하기 위해서는 정적 실험을 통한 직접적인 방법과 동적 실험을 통한 간접적인 방법이 가능하다. 본 연구에서 두 가지 방법에 의해서 고무패드의 강성을 평가하고 비교하였다. 고무패드의 감쇠비는 동적 실험에 의해서만 파악이 가능하며 폴리우레탄 고무의 경우 천연고무나 크로로프렌 고무와 유사한 감쇠비를 가지는 것으로 나타났다. 폴리우레탄 고무는 천연고무나 크로로프렌 고무에 비해 경도가 크기 때문에 작은 면적으로도 큰 하중을 견딜 수 있으며, 또한 같은 형상계수를 가지는 패드에서도 더 큰 강성을 보여 철도교의 교좌로서 활용성이 더 큰 것으로 판단되었다. 천연고무나 크로로프렌 고무 패드는 수직하중에 의한 수평 변형이 크게 발생하는데 비해, 폴리우레탄 고무패드는 수직하중에 의한 수평방향의 변형이 거의 발생하지 않기 때문에 보강재에 의한 보강이 필요하지 않다.

ABSTRACT : This study analyzed the characteristics of four kinds of bridge rubber pads and suggested a method of determining the stiffness and the damping ratio of the pads. The stiffness of rubber pads can be estimated by a direct static test and a dynamic test indirectly. This study used both methods to determine the pad's stiffness. The damping ratio of pads can be obtained using the dynamic test and the damping ratio of polyurethane rubber pads was estimated to approximate that of natural and chloroprene rubber pads. The polyurethane rubber pads are harder than natural and chloroprene rubber pads and thus carry larger load bearing capacity. In addition, they showed higher stiffness with the same shape factor than the others and thus are more available for bridge bearings. Although natural and chloroprene rubber pads are elongated to large deformation in the horizontal direction due to vertical loads, polyurethane rubber pads almost do not generate horizontal deformation due to vertical loads regardless of the thickness and hardness of the pads. Therefore, they do not need reinforced plate to restrict horizontal deformation.

핵심어 : 철도교량, 교량받침, 고무패드, 폴리우레탄 고무, 패드 강성

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

1. 서론

현재 국내의 철도교 상황은 총 2626개의 교량이 있으며, 이 중 판형교가 약 46.8%(1192개) 및 PSC 거더교가 약 33.5%(853개)로 두 형식의 교량이 전체 철도교의 약 80%를 차지하고 있다(최진유 외, 2002). 철도교량에서는 도로교와 다르게 철도차량의 주행 중에 상당한 충격과 소음이 발생하고 있으며, 이러한 철도교량의 충격을 흡수하고 소음을 저감하는 수단으로 교량받침에 고무패드를 사용하고 있다. 특히, 판형교는 PSC 거더교와는 다르게 오래전에 건설된 것이

대부분이며, 도상이 없어 침목이 교량의 강거더에 직접 접촉하고 있기 때문에 소음이 심하게 발생하고 있으며(그림 7 참조), 충격을 그대로 하부구조에 전달하므로 하부구조의 손상과 교량의 소음이 크게 발생하고 있다. 특히, 교량받침으로 사용하고 있는 면받침(그림 1)은 온도팽창에 의해서 교량이 원위치에서 벗어날 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 수단으로 교좌에 고무패드를 설치하는 것은 상당히 합리적이다. 이러한 고무패드의 장점은 1)충격을 완화하고 소음을 차단하며, 2)내구성이 뛰어나고 부식의 위험이 없으며, 3)고무패드 자체의 변형으로 회전에 대해서도 탄성지지를 해준다.

1) 정희원, (주)서영엔지니어링 이사
(Tel.02-589-4264, Fax.02-589-4195, E-mail: shoh@seoyeong.co.kr)
2) 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원(enusoochoi@krii.re.kr)
3) 서울시립대학교, 토목공학과, 부교수(hyjung@uos.ac.kr)

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

또한 4) 움직이는 부분이 없으므로 유지관리에 효과적이며, 5) 단순하며 경제적인 도구이다. 단순한 고무패드의 사용에서도 다른 장치를 보완적으로 활용하여 온도팽창 등에 의한 교량의 수평방향 움직임을 흡수할 수 있으며, 온도팽창이나 브레이크 하중에 의한 거더의 이동현상도 전단키를 활용하여 예방할 수 있다.



(a) 판형교 면받침의 형상



(b) 판형교 선받침의 형상

그림 1. 판형교 교량받침의 형상

천연고무나 크로로프렌 고무의 패드를 교량받침에 사용한 역사는 상당히 길며, 크로로프렌 고무패드는 1931년에 개발된 이후 교량받침으로서 30년 이상 사용되었다 (Burpulis et al., 1990). 그러나 폴리우레탄 고무는 최근에 교량용 패드로 사용되고 있으며, 따라서 천연고무와 크로로프렌 고무뿐 아니라 폴리우레탄 고무를 패드의 역학적 거동을 파악하고 교량용 패드로 활용될 경우, 해석모델에서 강성의 결정 방법을 본 연구에서 제시하고자 한다.

고무베어링에 대한 가장 집중적 연구를 실행한 것은 Stanton과 Roeder에 의해서 AASHTO를 위해서 행해진 1980년대의 연구들이다(Stanton and Roeder, 1985; Roeder et al., 1987). 그러나 이 연구들은 고무패드를 강관으로 보강한 고무베어링에 대한 연구들이며 비보강 고무패드에 대한 연구는 특별히 주목을 받지 못했다. 그러나 Burpulis (1990)가 지적했듯이 비보강 고무패드는 오래 전

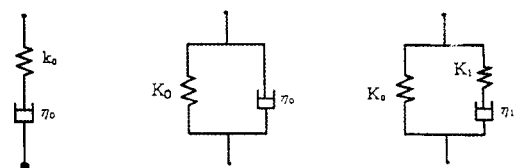
부터 교좌로 미국뿐 아니라 일본에서도 사용되었고 있다. 또한 Burpulis는 사용기간이 30년 넘는 고무패드를 채취하여 실험한 결과 상당히 양호한 상태를 보였음을 보여주고 있다.

Yazdani et al. (2000)은 유한요소 해석을 통하여 고무베어링의 각 방향 강성(stiffness)을 추정하였으며, 이를 AASHTO(1996)에서 제안한 방법에 의해서 계산과 강성과 비교하였다. 결과는 AASHTO 제안 방법에 의한 강성이 크게 나타났는데, 이는 AASHTO 공식이 고무의 비선형 거동을 고려했기 때문이다.

고무베어링 패드는 특별한 경우를 제외하고는 앵커나 볼트에 의한 거더와 연결 없이 하부에 설치되는데, 이러한 경우 수평방향에 대한 저항은 고무베어링 패드와 거더 또는 하부구조의 표면에서 발생하는 저항이 전부이다. 이러한 경우 거더의 온도에 의한 팽창과 수축에 의해서 고무베어링 패드가 원위치에서 벗어날 수 있다 (Heymsfield et al., 2001).

Wang et al.(2000)은 시드니의 RSA 선상에 있는 철도 교량의 강제받침에 의해서 소음이 5.5m 떨어진 거리에서 90dB으로 측정되었는데, 강제받침을 고무패드로 교체할 경우 소음이 약 6dB 경감되는 효과를 측정을 통해서 보여주고 있다.

고무패드의 해석모델은 그림 2에 나타난 것과 같이 serial model, parallel model 및 combination model이 사용되고 있으나, parallel 모델이 일반적으로 사용된다. 고무패드의 parallel model를 사용하기 위해서는 스프링 상수 및 손실계수의 추정이 필요하다.



a) serial model b) parallel model c) combination model

K_0 : 스프링 상수
 n_0 : 손실계수(loss factor)

그림 2. 고무패드의 수학적 모델

본 연구에서는 천연고무, 크로로프렌 고무 및 경도가 다른 폴리우레탄 고무 2종류의 패드를 연구대상으로 하였으며, 각 고무패드의 스프링 강성은 정적 실험과 동적 실험을 통해서 얻어진 결과로부터 추정하고 비교하였다.

2. 고무패드의 형상과 특징

천연고무(Natural Rubber, NR)는 고무나무 수액을 응고·건조 시킨 것으로 기계적 성질이 우수하고 가공이 쉽기 때문에 범용 고무로 사용이 용이하다. 동적 특성이 안정적이기 때문에 교량용 패드로 사용하기 쉬운 재질이다. 크로로프렌 고무(Chloroprene Rubber, CR)는 Chloroprene을 중합하여 만드는 것으로 천연고무에 비해 내후성이 강하지만 기타의 성질은 거의 동일하다.

폴리우레탄 고무(Polyurethane Rubber, PR)는 고무의 탄성과 금속의 내구성을 가진 독특한 물질로 분자 내에 우레탄 결합을 가지는 고분자 화합물이다. 폴리우레탄은 천연고무보다 강한 마찰 강도와 장력을 가지고 더 큰 물체의 하중을 견디는 특징이 있다. 또한 플라스틱에 비해 충격에 강하고 쉽게 마모되지 않는다. 표 1에는 폴리우레탄의 장점이 다른 재료와 비교되어 있다.

표 1. 다른 재료와 비교한 폴리우레탄의 장점

vs 고무
<ul style="list-style-type: none"> · 강한 마찰 내구성 및 높은 절단 저항성 · 뛰어난 하중 지지력 및 높은 경도 · 두꺼운 재료 제작 가능
vs 금속
<ul style="list-style-type: none"> · 가벼운 중량 · 소음 감소 및 마찰 저항성 · 저렴한 제작비 · 부식 및 충격 저항성 · 유연성 및 비전도성
vs 플라스틱
<ul style="list-style-type: none"> · 높은 충격 저항성 · 탄성 거동 및 마찰 저항성 · 소음 감소 및 탄성 거동 · 두꺼운 재료 제작 가능

그림 3는 각 고무 재질의 경도를 표시하고 있는데, NR과 CR은 50A-70A 사이의 경도를 가지고 있으며, PR은 이에 비해 상당히 큰 경도를 가지고 있으며, 최대 75D까지 가능함을 보여주고 있다.

비보강 고무패드를 설계할 경우 중요한 인자가 있는데 다음과 같다.

- ① 형상계수 (shape factor)
- ② 패드의 두께 (pad thickness)
- ③ 경도 (hardness)
- ④ 압축 크리프 (compressive creep)

형상계수는 패드의 압축에 의한 수직변형의 특성을 결정하며 압축탄성계수와 밀접한 관계가 있다. 패드의 두께는 형상계수에 영향을 미치며, 수평방향의 강성에 큰 영향을 준다. 고무패드의 경도는 고무패드의 압축 및 전단탄성계수에 대한 상대적인 지표로 경도가 크면 동일 조건에서 압축탄성계수 및 전단탄성계수가 크게 나타난다. 고무 패드의 압축크리프는 그림 4에서 보듯이 천연고무나 크로로프렌 고무는 경도가 증가하면 증가하는 경향이 있다. 그러나 폴리우레탄 고무는 천연고무에 비해 경도가 크지만 최종 크리프 수축량이 약 20%내외인 것으로 알려져 있다.

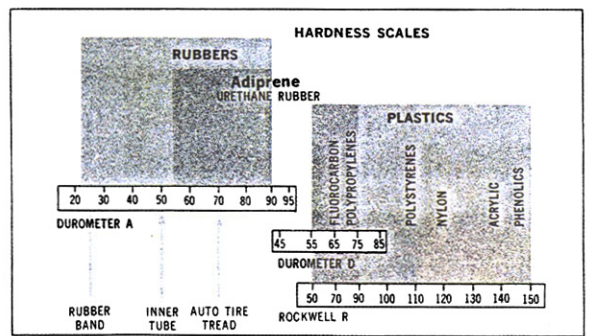


그림 3. 각 고무 재질의 경도

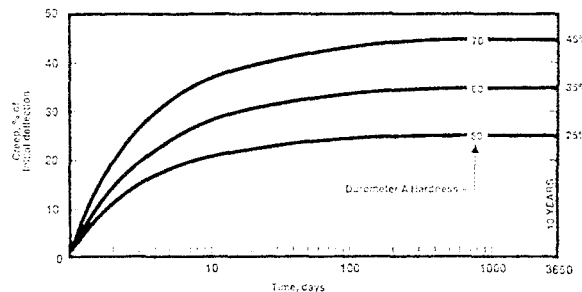


그림 4. 크로로프렌 고무의 압축에 의한 크리프

본 연구에서는 고무패드로서 천연고무와 크로로프렌 고무 그리고 폴리우레탄 고무를 선택하였다. 폴리우레탄의 경우 경도가 95A와 62D인 두 가지의 고무패드를 사용하였다. NR과 CR의 단면적은 300mm×400mm이며 PR은 200mm×200mm 이다. 고무패드의 두께는 5, 10, 15 및 20mm를 사용하였다. 표 2에 각 고무패드의 형상 및 하중 특성이 나타나 있으며, 고무패드의 하중을 받지 않는 면적에 대한 하중을 받는 면적의 비인 형상계수(shape factor)도 동시에 나타나 있다. 형상계수는 다음 식에 의해서 구해진다.

$$S = \frac{ab}{2(a+b)h} \quad (1)$$

여기서, a는 가로, b는 세로변의 길이이고, h는 패드두께.

표 2. 고무패드의 크기, 허용하중 및 경도

특성	NR 및 CR		PR95A		PR62D	
면적 (mm×mm)	300×400		200×200		200×200	
두께 (mm) 및 형상계수	5.0	17.1	5.0	10.0	5.0	10.0
	10.0	8.57	10.0	5.0	10.0	5.0
	15.0	5.71	15.0	3.3	15.0	3.3
	20.0	4.29	20.0	2.5	20.0	2.5
허용응력 (kg/cm ²)	56.0		280.0		350.0	
허용하중 (ton)	67.2		112.0		140.0	
경도	50-70A		95A		62D	

3. 고무패드의 정적 재하 실험 및 결과

고무패드의 정적실험은 실험을 통해서 얻어진 힘-변형 곡선을 이용하여 교량의 해석모델에 사용되는 고무패드의 스프링 강성을 추정하기 위하여 실시되었다. 그림 5에 나타나 있는 고무패드들을 용량 200ton의 시험기를 사용하여 하중을 재하 하였다. NR과 CR 패드에는 최대 60ton, PR95A는 80ton과 PR62D에는 최대 100ton의 하중을 가하였다. NR과 CR은 허용하중의 90%에 해당하면 PR 패드는 허용하중의 71%에 해당한다.

그림 6에 나타난 것처럼 고무패드의 거동은 비선형성이 매우 강하며, 변형이 증가함에 따라 강성(stiffness)이 급격히 증가하는 현상을 보이며, 어느 한계를 넘어서면 강성은 거의 일정하게 된다. 고무패드에는 사하중과 활하중이 작용하게 되는데 사하중은 기하중 (preload)으로 사하중이 증가하면 패드의 강성 또한 증가한다. 이러한 현상은 그림 7에 설명되어 있으며, 변형율의 함수인 λ값의 증가에 따라 탄성계수가 증가한다(Nashif, 1985). 따라서 철도교량에 사용되는 고무패드의 강성을 추정하기 위해서는 교량의 사하중(패드에 작용하는 기하중)을 고려해야 한다.



(a) NR



(b) CR



(c) PR95A

(d) PR62D

그림 5. 고무패드의 형상

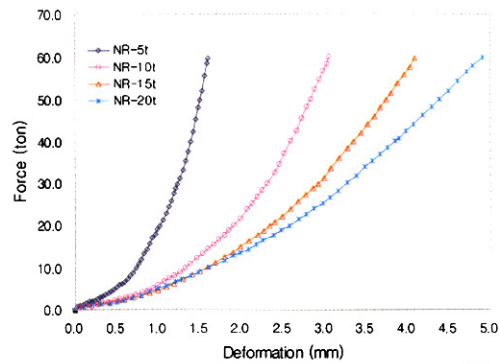
또한 사하중이 작용하는 상태에서 활하중 (주행차량의 하중)이 작용하기 때문에 본 연구에서는 고무패드의 힘-변형 곡선에서 사하중이 작용하는 점과 예상되는 최대 활하중이 작용하는 점을 선형으로 연결하여 고무패드의 강성을 구하고자 한다. 사하중 및 활하중에 대한 정확한 변형을 알기 위해서는 힘-변위 곡선에 대한 추정식이 필요하다. 곡선식은 비선형 회귀분석을 통하여 구해졌으며, 그림 6에서 보듯이 2차 또는 3차의 다항식으로 표현이 가능하며 다음과 같다.

$$F(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (2)$$

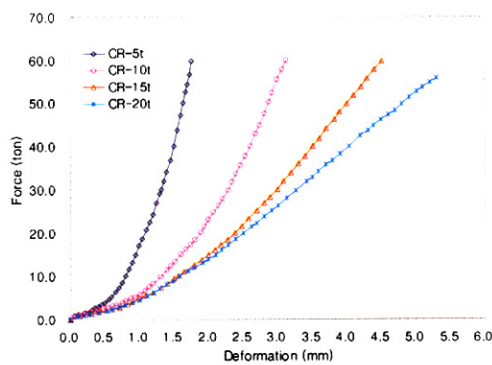
여기서, F는 하중, x는 패드 변형량, ai는 상수이며, a0=0 이다.

표 3에는 각 고무패드의 힘-변형 곡선 추정식이 대한 상수들이 정리되어 있다. CR-20T의 경우 패드 변형이 1.8mm 초과하면 힘-변형이 선형으로 나타나고 있다.

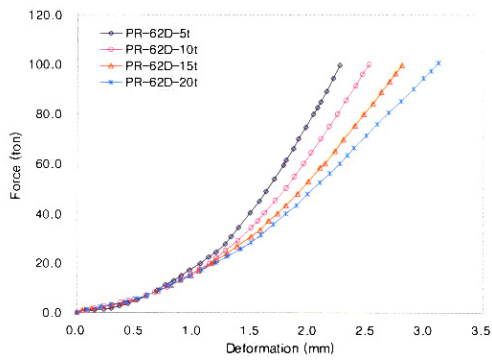
본 연구에서 사용한 철도교량은 그림 8에 보이는 것과 같은 두개의 판형교(Plate Girder Bridge, PGB)로 경간이 12.8m(PGB-1)와 19.2m(PGB-2)이다. 침목과 레일을 고려한 PGB-1의 사하중은 15.38ton이며, PGB-2의 사하중은 25.28ton 이다. 따라서 고무패드에 작용하는 사중은 총사하중의 1/4로, PGB-1은 3.845ton이며 PGB-2는 6.32ton 이다. 그림 8에는 기존선을 주행하는 디젤 기관차의 축하중이 나타나 있다. 12.8m 판형교에 작용 가능한 최대 활하중은 디젤기관차의 앞의 3축이 재하되는 것으로 69ton이며, 19.2m 판형교의 경우는 6축 재하인 138ton 이다.



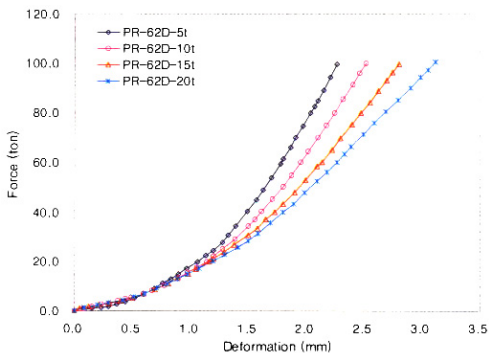
(a) NR 고무패드의 힘-변위 곡선



(b) CR 고무패드의 힘-변위 곡선



(c) PR95A 고무패드의 힘-변위 곡선



(d) PR62D 고무패드의 힘-변위 곡선

그림 6. 고무패드의 힘-변형 곡선

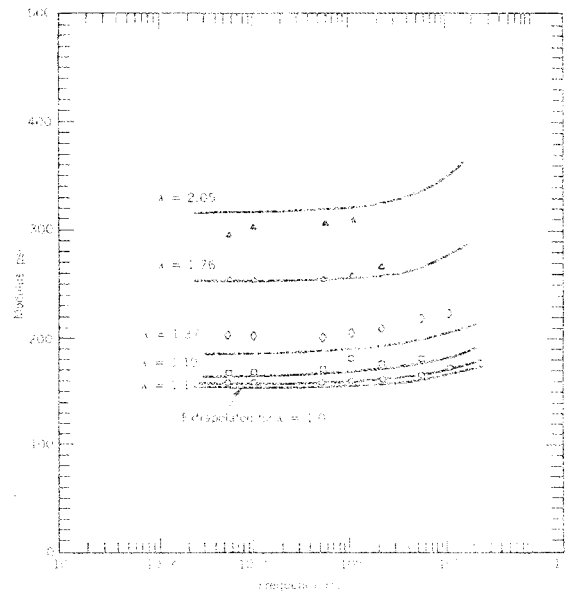


그림 7. 기하중(preload)에 따른 탄성계수의 변화

이것을 각 패드에 작용하는 하중으로 계산하면 각각 17.25ton 및 34.5ton 이다. 따라서 PGB-1(12.8m)의 경우 사하중+활하중은 21.1ton이고, PGB-2(19.2m)의 경우는 40.8ton 이다. PGB-1의 경우 21.12ton은 NR 및 CR, PR95A와 PR62D 패드의 허용하중의 31.4, 18.8 및 15.1%이다. PGB-2의 경우는 59.5, 35.7 및 28.5%에 해당한다.

이렇게 구해진 사하중과 활하중을 표 3에 있는 힘-변형 곡선의 회귀분석식에 대입하면 사하중과 활하중에 대한 변형을 알 수 있으며, 각 고무패드의 강성을 계산할 수 있다. 그림 10에는 패드의 스프링 강성을 구하는 방법이 그래프에 나타나 있으며, 이렇게 계산된 고무패드의 강성이 표 4에 정리되어 있다. 표 4를 보면 같은 고무패드라도 기하중이 큰 PGB-2에서의 스프링 강성이 크게 나타남을 볼 수 있다. 두 관형교에 의해서 패드에 발생하는 사하중이 10ton 미만이며, 그림 5에서 보듯이 이 구간에서 패드의 강성이 변형에 민감하다. 따라서 기하중 효과도 크게 나타날 것이다.

그림 11에는 고무패드의 형상계수에 대한 스프링 강성을 그래프로 나타내었다. Skinner(1993)에 의하면 고무패드의 수직방향 강성은 전단 변형에 대한 고려 없이 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$K_v = 6GS^2A/h \quad (3)$$

여기서, K_v 는 수직강성, G 는 전단탄성계수, A 는 면적 및 h 는 높이 이다.

본 연구에서 사용한 고무패드는 같은 종류에서는 면적이 동일하므로 수직강성(Kv)은 높이(h)에 비례한다. 이러한 현상은 천연고무 및 크로로프렌 고무패드에서는 나타나지만 폴리우레탄 고무패드에서는 약간의 비선형성이 관찰되고 있으나 PR62D 패드는 거의 선형성을 보이고 있다. 또한, 폴리우레탄 고무와 같이 경도가 큰 패드가 천연고무와 크로로프렌 고무패드에 비해서 동일한 형상계수를 가질 경우 더 큰 스프링 강성을 나타내고 있다. 따라서 폴리우레탄 고무패드가 천연고무나 크로로프렌 고무에 비해 철도교량의 받침으로서 활용성이 더 크다고 판단된다.

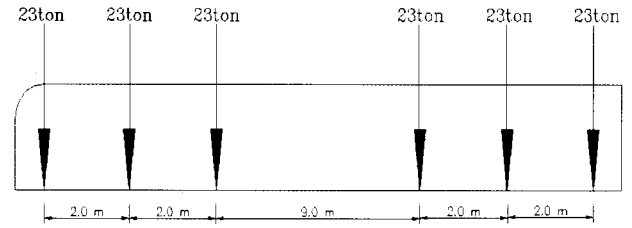


그림 9. 디젤기관차의 축하중 및 거리

표 3. 고무패드 힘-변형 추정식의 상수

고무 종류	두께 (mm)	상수		
		a ₁	a ₂	a ₃
NR	5T	14.176	-6.41	10.771
	10T	1.5545	0.2904	4.3046
	15T	0.2638	1.845	2.7217
	20T	0	1.922	2.9529
CR	5T	5.6323	7.453	3.335
	10T	0.9774	2.206	3.1679
	15T	0	2.537	2.437
	20T	1.2417	-0.35	3.7284
PR95A	5T	5.1403	2.536	7.1789
	10T	2.963	3.577	9.4738
	15T	0	7.216	2.6929
	20T	1.2368	1.222	7.7761
PR62D	5T	2.4981	12.99	2.2925
	10T	1.8954	9.252	5.1784
	15T	0.3424	10.02	5.1501
	20T	0	8.162	7.5682

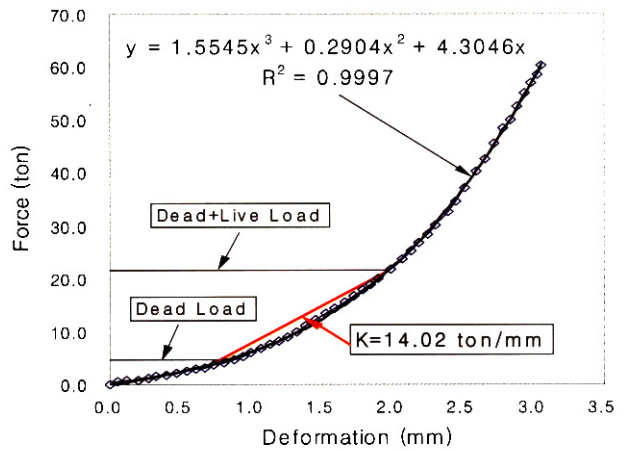


그림 10. 고무패드의 스프링 강성을 계산하는 예

표 4. 추정된 고무패드의 스프링 강성

PGB-1 (12.8m)	스프링 강성 (ton/mm)				
	두께(mm)	5	10	15	20
NR		25.08	14.02	11.03	9.48
CR		26.08	14.10	10.71	10.22
PR95A		22.19	20.58	17.99	14.27
PR62D		26.81	22.89	21.49	20.03
PGB-2 (19.2m)	스프링 강성 (ton/mm)				
두께(mm)	5	10	15	20	
NR		40.98	21.68	15.72	12.60
CR		39.46	21.47	14.45	11.84
PR95A		33.38	29.34	25.09	19.66
PR62D		38.03	32.91	29.84	27.09

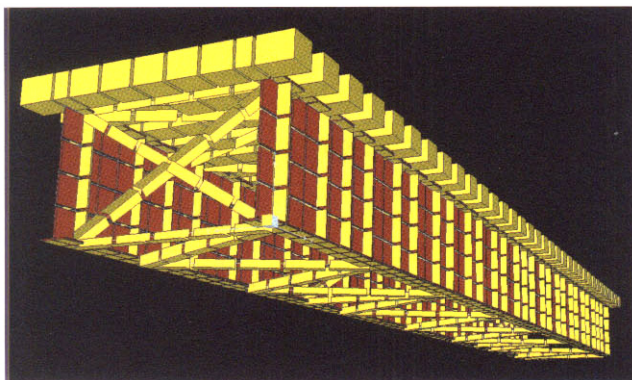
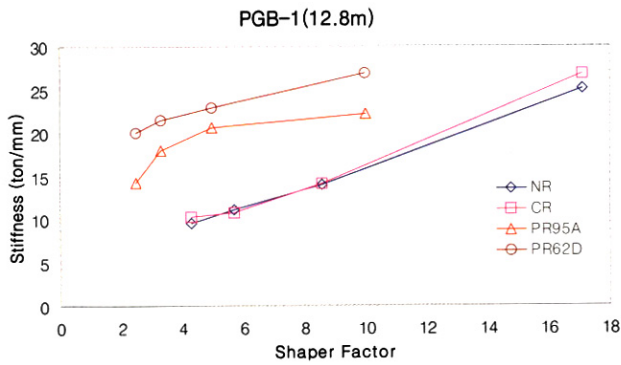
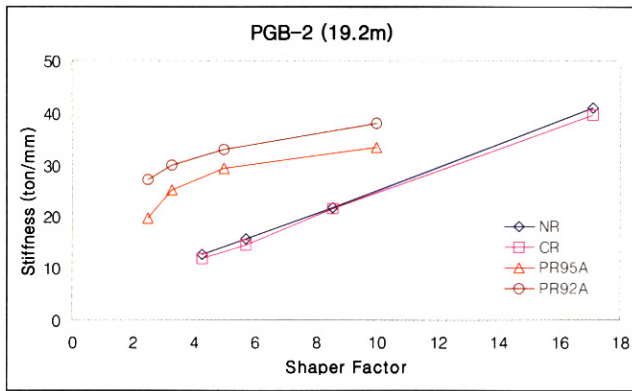


그림 8. 판형교의 형상



(a) PGB-1 (12.8 m 판형교)



(b) PGB-2 (19.2 m 판형교)

그림 11. 고무패드의 형상계수와 수직강성

본 연구에서 사용한 고무패드는 비보강 패드(plain pad)이기 때문에 수직하중에 의해서 수직변형과 더불어 수평방향의 변형이 발생한다. 표 5에는 각 고무패드에 대한 최대하중하에서 발생한 최대수직변형과 최대수평변형을 표시하고 있다. 천연고무(NR)의 경우 두께 20mm 패드에서 60ton 하중에 의해서 8.0mm 수평 변형이 발생했고, 크로로프렌 두께 20mm 고무패드는 수직하중 60ton에 의해서 9.0mm의 수평 변형이 발생하였다. 천연고무나 크로로프렌 고무패드의 경우 보강재를 이용하여 보강하는 이유가 이러한 수평 방향의 변형을 제한하여 고무패드의 압축강도 및 압축탄성계수를 증가시키기 위해서다. 폴리우레탄 고무패드의 경우 두께나 작용하는 수직하중에 관계없이 수평 변형이 1.0mm 이하로 관측되었다. 이것은 폴리우레탄 고무패드에는 보강재에 의한 보강이 필요 없음 보여주는 것이다. 천연고무 및 크로로프렌 고무패드의 상대적으로 크게 발생하는 수평 변형은 마찰에 의한 손상이 발생할 수 있기 때문에 내구성 문제를 유발할 수 있다.

표 5. 고무패드의 수직하중에 의한 수평 변형

패드 종류	두께 (mm)	최대 수직하중 (ton)	최대 수직변형 (mm)	최대 수평변형 (mm)
NR	5	60	1.61	< 1.0
	10	60	3.08	2.0
	15	60	4.12	4.0
	20	60	4.93	8.0
CR	5	60	1.76	1.0
	10	60	3.21	2.0
	15	60	4.51	5.0
	20	60	5.65	9.0
PR95A	5	80	2.18	< 1.0
	10	80	2.37	< 1.0
	15	80	3.18	< 1.0
	20	80	4.05	< 1.0
PR62D	5	100	2.27	< 1.0
	10	100	2.52	< 1.0
	15	100	2.81	< 1.0
	20	100	3.13	< 1.0

4. 고무패드의 동적 재하 실험 및 결과

고무의 동적 실험은 작은 고무시편의 저장종탄성계수(storage modulus)와 손실종탄성계수(loss modulus)를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 손실계수를 계산할 수 있다. 점탄성 물질인 고무의 동특성은 복소탄성계수 E^* 로 표현되며 다음과 같다.

$$E^* = E_1 + E_2j \tag{4a}$$

$$E^* = E_1 (1 + j\eta) \tag{4b}$$

여기서 E_1 은 저장종탄성계수, E_2 는 손실종탄성계수를 나타내며, η 는 손실계수(E_1/E_2)이다.

저장종탄성계수 및 손실계수는 기하중(preload)에 의해서 영향을 받으며 그림 12에서처럼 가진 진동수에 따라서도 크게 변화한다 (Nashif et al., 1985). 따라서 실험을 위해서는 초기응력과 가진 진동수를 결정해야 한다.

본 연구에서 사용한 고무 시편은 PR95A와 PR62D의 높이가 20mm, 직경 25mm인 원통형으로 그림 13에 시편의 형상이 나타나 있다. 또한 그림 14에는 실험을 위해 고무시편을 설치한 형상을 볼 수 있다.

고무시편의 동적 실험은 비공진법(KS M 6604)에 의해서

실시되었다. 비공진법은 진동계를 1 자유도계로 가정하고 하중 \tilde{F} 와 변위 $u(0)$ 를 측정하여 계의 Compliance를 구하면 식(5)와 같다.

$$u(0)/\tilde{F} = \frac{1/k}{\{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (\eta\omega/\omega_n)^2\}^{1/2}} \quad (5)$$

Compliance Curve에서 구해진 고유 진동수 ω_n ($\approx \omega_d$)를 이용하여 스프링 상수 k 를 구하면 식(6)과 같다

$$k = M\omega_n^2 \quad (6)$$

손실 계수(η)와 탄성계수(E)는 아래와 같다.

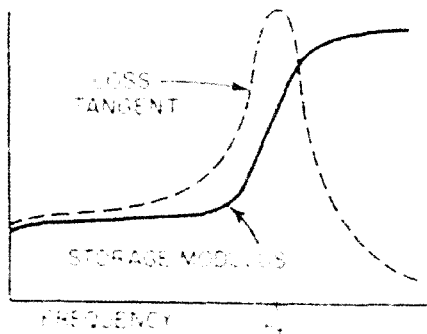


그림 12. 진동수에 따른 고무의 동특성 변화

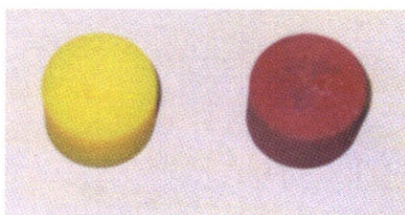


그림 13. PR95A 및 PR62D의 고무시편 형상



그림 14. 고무시편을 실험장비에 설치한 모습

$$\eta = \frac{1}{k u(0)/\tilde{F}_{\max}} \quad (7)$$

$$E_1 = Lk/A \quad (8)$$

$$E = E_1/(1 + 2\beta S^2) \quad (9)$$

여기서, β 는 고무의 경도(hardness)에 따라 결정되는 상수로서 표 6에 정리되어 있다 (ASTM, 2001). 폴리우레탄 고무의 경도는 95A와 62D로 표에 나타난 경도를 상회하므로 본 연구에서 폴리우레탄에 대한 β 값을 0.5로 가정한다.

표 6. 고무 경도에 따른 β

경도 (Shore 'A')	50	60	70
β	0.75	0.60	0.55

실험을 통해서 얻은 E_1 값을 식(9)에 대입하며 고무의 탄성계수를 구할 수 있으며, 탄성계수를 이용하여 역으로 고무패드의 저장종탄성계수를 구할 수 있다. 고무패드의 저장종탄성계수를 이용하여 고무패드의 스프링 강성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = E_1 (A/h) \quad (10)$$

여기서 K 는 고무패드의 스프링 강성, A 는 면적, h 는 높이이다.

히스테리시스 댐핑(hysteresis damping)의 손실계수와 점성댐핑(viscous damping)의 감쇠비의 관계는 아래와 같다 (Chopra, 2001).

$$\eta = 2\xi \quad (11)$$

여기서, η : 손실계수 (loss factor)

ξ : 감쇠비 (damping ratio)

따라서 고무시편의 동적 실험을 통해서도 고무패드의 스프링과 댐퍼 모델의 강성과 감쇠비를 구할 수 있다. 표 7에는 실험결과가 나타나 있으며, 가진 진동수 및 초기응력이 나타나 있다. 가진 진동수는 교량의 1차 고유진동수로 하였으며, 초기응력은 사하중에 의해서 고무패드에 발생하는 응력으로 하였다. 표 8에는 추정된 스프링 강성이 두 판형교에 대해서 나타나 있고 정적 실험에서 추정된 강성과 비교되어 있다. 고무시편의 높이가 20mm 이므로 패드의 높이도 20mm 인

경우에 한해서 스프링 강성을 비교하였다.

표 7. 고무시편의 동적 실험 결과

교량 종류		PGB-1 (12.8m)	PGB-2 (19.2m)
가진진동수 (Hz)		18.01	11.25
초기응력 (kg/cm ²)		9.625	15.8
PR95A	E ₁	99.33	88.89
	E ₂	15.32	15.06
	η	0.164	0.164
	ξ	0.082	0.082
PR62D	E ₁	204.85	195.39
	E ₂	26.86	26.02
	η	0.131	0.133
	ξ	0.066	0.067

실험 결과를 보면 폴리우레탄 고무의 감쇠비는 경도가 62D인 경우 6.6%와 경도가 95A인 경우 8.2%로 천연고무의 감쇠비 3-8%와 유사하게 나타났다 (Harris, 1988). 또한 두 판형교의 조건 하에서 감쇠비가 거의 동일함을 알 수 있다. 간접적으로 추정한 고무패드의 스프링 강성은 정적 실험을 통해서 얻은 강성에 비해 대체로 작게 나왔으며, 오차 발생에 특별한 경향이 있는 것으로는 판단되지 않는다.

표 8. 고무시편의 동적 실험에 의해 추정된 고무패드의 스프링 강성

PGB-1 (12.8m)	고무시편		고무패드		정적 실험 결과	
	E ₁ (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	E ₁ (kg/cm ²)	K (ton/mm)	K (ton/mm)	오차 (%)
PR95A	99.3	90.49	656.1	13.1	14.3	-8.1
PR62D	204.9	186.6	1353.0	27.1	20.0	35.1
PGB-2 (19.2m)	E ₁ (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	E ₁ (kg/cm ²)	K (ton/mm)	K (ton/mm)	오차 (%)
	PR95A	88.9	81.0	587.1	11.7	19.7
PR62D	195.4	178.0	1290.5	25.8	27.1	-4.7

고무시편의 형상계수(0.3125)와 고무패드의 형상계수(2.5)는 8배의 차이가 나며, 고무시편은 동적 시험에 의해서 특성을 얻었고, 고무패드는 정적 시험을 통해서 패드 강성을 결정하였으므로 동일한 결과를 얻기는 어렵다고 판단된다.

또한, 두께가 20mm보다 적은 고무패드의 강성을 간접적으로 추정한다면 식 (9)에서 보듯이 형상계수의 제곱에 비례하므로 오차는 더욱 커 질 것이다.

고무시편의 동적 실험을 통한 고무패드의 강성 추정은 모든 고무패드에 대해서 실험을 하지 않아도 강성을 추정할 수 있기 때문에 편리한 방법이지만, 연구 결과에서 보듯이 상당

한 오차를 발생 시키며 일정한 경향이 없으므로 오차를 보정하기도 어렵다. 따라서 이러한 간접 방법에 의한 고무패드의 강성 추정은 바람직하지 않다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 고무패드에 대한 정적 실험을 통하여 얻어진 힘-변형 곡선으로부터 고무패드의 스프링 강성을 구하는 방법을 제시하였다.

고무패드의 스프링 강성을 추정하는 과정에서 패드의 거동은 비선형성이 강하므로 이를 고려했으며, 기하중 효과 (preload effect)에 의해서 강성이 증가하므로 기하중으로 작용하는 사하중을 고려했다. 또한, 주행차량에 의한 활하중이 패드의 스프링 강성에 영향을 미치기 때문에 활하중도 고려했다.

본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 천연고무, 크로로프렌 고무 및 폴리우레탄 고무패드의 스프링 강성을 추정하였다. 추정된 고무패드의 강성은 사하중이 큰 19.2m 판형교에서 더 크게 추정되었으며, 경도가 큰 폴리우레탄 고무패드가 천연고무나 크로로프렌 고무패드에 비해 동일한 형상계수에서 더 큰 스프링 강성을 나타내었다. 패드의 스프링 강성은 천연고무와 크로로프렌 고무에서는 형상계수에 비례해서 증가하였으나, 폴리우레탄 고무패드는 형상계수와 스프링 강성 사이에 비선형 관계가 나타났다.

폴리우레탄 고무시편의 동적 실험을 통한 폴리우레탄 고무패드의 스프링 강성 추정은 각 패드에 대한 실험을 하지 않아도 되는 간편함이 있지만, 정적 실험으로부터 얻어지는 결과와 큰 오차를 보였으며, 오차에 특별한 경향이 없으므로 보정도 불가능하였다. 따라서 이러한 방법으로 폴리우레탄 고무패드의 스프링 강성을 추정하는 것을 바람직하지 않다고 판단된다.

고무시편의 동적 실험으로부터 고무의 손실계수를 얻을 수 있으며, 이 손실계수는 해석모델에서 감쇠비로 사용할 수 있다. 폴리우레탄 고무의 감쇠비는 경도 95A의 경우 8.2%, 경도 62D의 경우 6.6%로 천연고무의 감쇠비(3-8%)와 유사하게 나타났다.

본 연구에서처럼 천연고무나 크로로프렌 고무패드를 강판등으로 보강하지 않고 사용하면 수직하중에 의한 수평방향의 변형이 발생한다. 그러나 폴리우레탄 고무패드는 천연고무와 달리 수직하중에 의한 수평방향의 변형이 거의 없으므로 보강재에 의한 보강을 하지 않아도 교량용 패드로 사용이 가능하다.

폴리우레탄고무는 천연고무나 플라스틱에 비해 내구성에서

우수하며 충격과 마모에 대해서도 우수한 성능을 가지고 있다. 또한 천연고무에 비해 하중 지지능력이 크고 동일한 형상에서 압축강성도 크게 나타난다. 따라서 폴리우레탄 고무패드는 천연고무패드에 비해 철도교량의 교량받침으로서 적합하다고 판단되며, 보강 없이도 사용할 수 있으므로 사용성에서도 우수하다고 판단된다.

참 고 문 헌

최진유 외 (2002). 판형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발, 한국철도기술연구원

AASHTO (1996). *AASHTO LRFD bridge design specifications*, Washington, D.C.

ASTM (2001). Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

Burpulis J.S., Seay, J.R. and Graff, R.S. (1990). Neoprene in Bridge Bearing Pads- The Proven Performance, *Extending the Life of Bridges, ASTM STP 1100*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 32-43.

Chopra, A.K. (2001). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, The Second Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Harris, C.M. (1988). Shock and Vibration Handbook,

The Third Edition, McGraw-Hill, Inc.

Heymsfield, E., McDonald, J. and Avent R.R. (2001). Neoprene Bearing Pad Slippage at Louisiana Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE Vol. 6, No. 1, January/February, pp.30-36.

Nashif, A.D., Jone D.I.G. and Henderson, J.P. (1985). Vibration Damping, John Wiley & Sons.

Roeder, C.W. Stanton, J.F. and Taylor, A.W. (1987). Performance of elastomeric bearings, *NCHRP Rep. No. 298*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Stanton, J.F. and Roeder, C.W. (1985). Elastomeric bearings design, construction, and materials, *NCHRP Rep. No. 248*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Yazdani, N., Fellow, P.E., Eddy, S. and Chun, S. (2000). Effect of Bearing Pads on Precast Prestressed Concrete Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 3, August, pp.224 -232.

Wang, A., Cox, S.J., Gosling, D. and Prudhoe, J.E.W. (2000). Railway bridge noise control with resilient baseplates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 231, No. 3, March, pp.907-911.

(접수일자 : 2004. 12. 2 / 심사일 2004. 12. 23 / 심사완료일 2005. 4. 7)