

철도교량용 고무패드의 특성 및 강성 추정기법

The Characteristics and Estimated Stiffness of Rubber Pads for Railway Bridges

최은수* 김현민** 오지택* 김성일*

Choi, Eunsoo, Kim, Hyunmin, Oh, Ji Taek, Kim, Sungil

ABSTRACT

This study analyzed the characteristics of four kinds of bridge rubber pads and suggested how to determine the stiffness the pads. The stiffness of rubber pads can be estimated by a direct static test. In the procedure to estimate the stiffness of a pad, the dead load(preload) of a bridge and live load of a vehicle are considered. The polyurethane rubber pads have larger hardness 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 as for bridge bearings. Although natural and chloroprene rubber pads are elongated to large deformation in horizontal direction due to vertical loads, polyurethane rubber pads almost do not generate horizontal deformation due to vertical loads regardless to the thickness and hardness of the pads. Therefore, they do not need reinforced plate to restrict horizontal deformation.

Keywords : railway bridge, bridge bearing, rubber pads, preload, pad stiffness

1. 서론

현재 국내의 철도교 상황은 중 2626개의 교량이 있으며, 이 중 관형교가 약 46.8%(1192개) 및 PSC 기둥교가 약 23.5%(853개소)로 두 형식의 교량이 전체의 약 80%를 차지하고 있다 (최진유 외, 2002). 권도교량에서는 도로교와 다르게 철도차량의 주행 중에 상당한 충격과 소음이 발생하고 있으며, 이러한 철도교량의 충격을 흡수하고 소음을 저감하는 수단으로 교화장치에 고무패드를 사용하고 있다. 특히, 환형교는 PSC 기둥교와는 다르게 오래전에 건설된 것이 대부분이며, 도상이 없어 침몰이 교량의 강저부에 직접 접촉하고 있기 때문에 소음이 심하게 발생하고 있다(그림 5 참조). 특히, 교화장치로 사용하고 있는 선반침과 면반침(그림 1)은 구조적으로 불안정하여 온도팽창에 의해서 교량이 원위치에서 벗어날 수 있으며, 충격을 그대로 하부구조에 전달하므로 하부구조의 손상과 교량의 소음이 크게 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 수단으로 교화에 고무패드를 설치하는 것은 상당히 합리적이다. 이러한 고무패드의 장점은 1)충격을 완화하고 소음을 차단하며, 2)내구성 및 뛰어난 보수의 위안이 없으며, 3)고무패드 자체의 변형으로 회전에도 대해서도 탄성지지를 해준다. 또한 4)움직이는 부분이 없으므로 유지관리에 효과적이며, 5)단순하며 경제적인 모두이다.

* 한국철도기술연구원, 신철연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원, 무철연구원, 정희원



(a) 천연교 천연결의 형상



(b) 천연교 신발결의 형상

그림 1. 천연교 교차장치의 형상

천연고무나 크로코프렌 고무의 래드를 교차에 사용한 역사는 상당히 길며, 크로코프렌 고무래드는 1931년에 개발된 이후 교차로서 50년 이상 사용되었다 (Burpulis et al., 1990). 그러나 폴리우레탄 고무는 최근에 교차용 래드로 사용되고 있으며, 따라서 천연고무와 크로코프렌 고무뿐 아니라 폴리우레탄 고무의 래드의 역학적 거동을 파악하고 교차용 래드로 활용될 경우, 해석모델에서 강성의 결정 방법을 본 연구에서 제시하고자 한다.

고무래어링에 대한 가장 중요한 연구는 실험한 것은 Stanton과 Roeder에 의해서 AASHTO를 위해서 행해진 1980년대의 연구들이다 (Stanton and Roeder, 1985; Roeder et al., 1987). 그러나 이 연구들은 고무래드를 일반적으로 포함한 고무래어링에 대한 연구들이며 비포장 고무래드에 대한 연구는 특별히 주목을 받지 못했다. 그러나 Burpulis(1990)가 지적했듯이 비포장 고무래드는 오래 전부터 교차로 미국 뿐 아니라 일본에서도 사용되고 있다. 또한 Burpulis는 사용기간이 30년 넘는 고무래드를 재처리하여 실험한 결과 상당히 양호한 상태를 보였음을 보여주고 있다.

Yazdani et al. (2000)은 유한요소 해석을 통하여 고무래어링의 각 방향 강성(stiffness)을 측정하였으며, 이를 AASHTO (1990)에서 제안된 방법에 의해서 계산과 강성과 비교하였다. 결과는 AASHTO 제안 방법에 의한 강성이 크게 나타났는데, 이는 AASHTO 공식이 고무의 비선형 거동을 고려했기 때문이다.

고무래어링 래드는 특별한 경우를 제외하고는 별거나 붙음에 의한 거더와 인접 없이 하부에 설치되는데, 이러한 경우 수평방향에 대한 저항은 고무래어링 래드와 거더 또는 하부구조의 표면에서 발생하는 저항이 전부이다. 이러한 경우 거더의 온도에 의한 팽창과 수축에 의해서 고무래어링 래드가 위치에서 벗어날 수 있다 (Oheynsfield et al., 2001).

본 연구에서는 천연고무, 크로코프렌 고무 및 경도가 다른 폴리우레탄 고무 2종류의 래드를 연구대상으로 하였으며, 각 고무래드의 스프링 강성은 정적 실험과 동적 실험을 통해서 얻어진 결과로부터 측정하고 비교하였다.

2. 고무래드의 형상과 특성

천연고무(Natural Rubber, NR)는 고무나무 수액을 응고·건조 시킨 것으로 기계적 성질이 우수하고 가격이 저렴 때문에 많은 고무로 사용이 용이하다. 동적 특성이 안정적이기 때문에 교차용 래드로 사용하기 쉬운 재질이다. 크로코프렌 고무(Chloroprene Rubber, CR)는 Chloroprene를 중합하여 만드는 것으로 천연고무에 비해 내후성이 강하지만 커다라 실험은 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 강적을 가지고 더 큰 용적의 파동을 견디는 특성이 있다. 또한 플라스틱에 비해 충격에 강하고 쉽게 마모되지 않는다. 표 1에는 폴리우레탄의 장점이 다른 래드와 비교되어 있다. 그림 2는 각 고무 재질의 경도를 표시하고 있는데, NR과 CR은 50A-70A 사이인 경도를 가지고 있으며, PR은 이에 비해 상당히 큰 경도를 가지고 있으며, 최대 75D까지 가능성을 보여주고 있다.

표 1. 다른 재료와 비교한 폴리우레탄의 장점

vs. 고무	vs. 금속	vs. 플라스틱
<ul style="list-style-type: none"> · 마찰 내구성 및 원단 저항성 · 하중 지지력 및 높은 강도 · 부피운 재료 제작 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 가벼운 중량 · 소음 감소 및 마찰 저항성 · 저렴한 제작비 · 부식 및 충격 저항성 · 유연성 및 비점도성 	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 충격 저항성 · 탄성 거동 및 마찰 저항성 · 소음 감소 및 탄성 거동 · 부피운 재료 제작 가능



그림 2. 각 고무 제천에 따른 경도

본 연구에서는 고무패드로서 천연고무와 크로모프렌 고무 그리고 폴리우레탄 고무를 선택하였다. 폴리우레탄의 경우 경도가 95A와 62D인 두 가지의 고무패드를 선택하였다. NR과 CR의 단면적은 300 mm × 400 mm이며 PR은 200 mm × 200 mm 이다. 고무패드의 두께는 5, 10, 15 및 20 mm를 선택하였다. 표 2에 각 고무패드의 열상 및 하중 특성이 나타나 있으며, 고무패드의 하중을 받기 앞는 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 세로면의 길이이고, h는 패드두께.

표 2. 고무패드의 크기, 허용하중 및 경도

고무패드 면적 (mm×mm)	NR 및 CR				PR95A				PR62D			
	300×400				200×200				200×200			
두께 (mm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
형상계수	17.1	8.6	5.7	4.3	10.0	5.0	3.3	2.5	10.0	5.0	3.3	2.5
허용중력	56 kg/cm ²				280 kg/cm ²				350 kg/cm ²			
허용하중	67.2 ton				112 ton				140 ton			

3. 고무패드의 경직 재하 실험 및 결과

고무패드의 경직실험은 직립을 통해서 알려진 임-변형 곡선을 이용하여 교량의 회전모멘트에 사용되는데 고무패드의 스프링 강성은 추정하기 위하여 실시되었다. 그림 3에 나타나 있는 고무패드들은 총량 200 ton의 시정기를 사용하여 하중을 재하 하였다. NR과 CR 제에는 최대 60 ton, PR95A는 80 ton 과 PR62D에는 최대 100 ton의 하중을 가하였다. NR과 CR은 허용하중의 90%에 해당하면 PR 제는 허용하중의 71%에 해당한다.

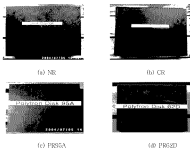


그림 3. 고무레드의 형상

그림 4에 나타낸 것처럼 고무레드는 대변형 거동을 보이며, 변형이 증가함에 따라 강성(stiffness)이 급격히 증가하는 현상을 보이며, 어느 한계를 넘어지면 강성은 거의 일정하게 된다. 고무레드에는 사화중이 함유되어 작용하게 되는데 사화중을 기화중(greased)으로 사화중이 증가하면 레드의 강성 또한 증가한다. 즉, 변형률의 증가에 따라 탄성계수가 증가 된다 (Nashif, 1985). 따라서 앞으로항에 사용되는 고무레드의 강성을 추정하기 위해서는 교량의 사화중(레드에 작용하는 기화중)을 고려해야 한다.

또한 사화중이 작용하는 상태에서 원하중(주행차량의 하중)이 작용하기 때문에 본 연구에서는 고무레드의 원-변형 거동에서 사화중이 작용하는 길과 레딩되는 최대 원하중이 작용하는 점을 선형으로 연결하여 고무레드의 강성을 구하고자 한다. 사화중 및 원하중에 대한 경하중 변형은 알기 위해서는 원-변위 곡선에 대한 추정치가 필요하다. 곡선식은 비선형 회귀분석을 통하여 구해졌으며, 그림 4에서 보듯이 2차 또는 3차의 다항식으로 표현이 가능하여 다음과 같다. 표 3에는 각 고무레드의 원-변형 곡선 추정식에 대한 상수들이 정리되어 있다.

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

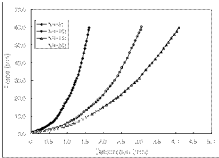
여기서, F는 하중, x는 변위 변위량, a_2 는 상수이며, $a_0=0$ 이다.

본 연구에서 사용한 실험보양은 그림 5에 보이는 것과 같은 두개의 좌평50Plane Girder Bridge, PGB00 경간이 13 m(PGB-1)와 19 m(PGB-2)이다. 실험용 레일을 고려한 PGB-1의 사화중은 15.28 ton이며, PGB-2의 사화중은 25.28 ton 이다. 따라서 고무레드에 작용하는 하중은 통사화중의 1/4로, PGB-1은 3.845 ton이며 PGB-2는 6.32 ton 이다. 그림 6에는 기준선을 주행하는 디젤 기관차의 축하중이 나타나 있다. 13 m 관형교에 적용 가능한 최대 원하중은 디젤기관차의 앞의 3축이 재하되는 것으로 60 ton이며, 19 m 관형교의 경우는 6축 재하인 138 ton 이다.

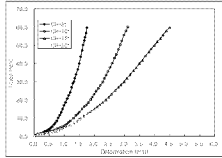
이것을 각 레드에 작용하는 하중으로 계산하면 각각 17.25ton 및 31.5 ton 이다. 따라서 PGB-1(13 m)의 경우 사화중+원하중은 21.1 ton이고, PGB-2(19 m)의 경우는 40.8 ton 이다. PGB-1의 경우 21.12 ton은 NR 및 CR, PR55A와 PR52D 레드의 허용하중의 31.4, 18.8 및 15.1% 이다. PGB-2의 경우는 59.5, 35.7 및 28.5%에 해당한다.

표 3. - 1형 곡선 추정식의 상수

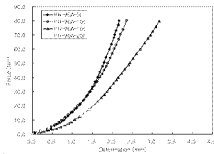
교두	두께 (mm)	NR				CR				PR95A				PR62D			
		5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
상수	a3	14.18	1.55	0.264	0	5.632	0.977	0	1.242	5.140	2.963	0	1.237	2.498	1.895	0.342	0
	a2	-6.41	0.290	1.845	1.922	7.453	2.203	2.537	-0.35	2.536	3.577	7.216	1.222	12.99	9.252	10.02	8.162
	a1	10.77	4.30	2.722	2.953	3.335	3.168	2.437	3.728	7.179	9.474	2.693	7.776	2.293	5.178	5.150	7.568



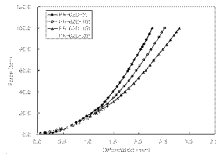
(a) NR 고무패드의 힘-변위 곡선



(b) CR 고무패드의 힘-변위 곡선



(c) PR95A 고무패드의 힘-변위 곡선



(d) PR62D 고무패드의 힘-변위 곡선

그림 4. 고무패드의 힘-변형 곡선

이렇게 구해진 사하중과 판하중을 표 3에 있는 힘-변형 곡선의 추정식에 대입하면 사하중과 판하중에 대한 변형을 알 수 있으며, 각 고무패드의 강성을 계산할 수 있다. 그림 7에는 패드의 스프링 강성을 구하는 방법이 그래프로 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 10 ton 미만이며, 그림 4에서 보듯이 이 구간에서 패드의 강성이 변형에 민감하다. 따라서 기하중 효과도 크게 나타날 것이다.

그림 8에는 고무패드의 형상계수에 대한 스프링 강성을 그래프로 나타내었다. Skinner(1993)에 의하면 고무패드의 수직방향 강성은 횡단 변형에 대한 고려 없이 다음과 같이 고려할 수 있다.

여기서, K_s 는 수직강성, G 는 전단탄성계수, A 는 면적 및 δ 는 높이 이다.

본 연구에서 사용한 고부레드는 같은 중량에서는 면적이 동일하므로 수직강성(K_s)은 높이(δ)에 비례한다. 이러한 현상은 원형고부 및 크로로프렌 고부레드에서는 나타나지만 폴리우레탄 고부레드에서는 약간의 차선 현상이 관찰되고 있으나 PFGD 레드는 거의 선형성을 보이고 있다. 또한, 폴리우레탄과 같이 경도가 큰 레드가 한일고부와 크로로프렌 고부레드에 비해서 동일한 형상계수인 가질 경우 더 큰 스트링 강성을 나타내고 있다. 따라서 폴리우레탄 고부레드가 원형고부나 크로로프렌 고부에 비해 절도교량의 교각로서 활용성이 더 크다고 판단된다.



그림 5. 관형교의 형상

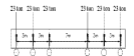


그림 6. 디벨리뷰자의 축방향 및 거리

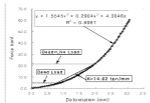
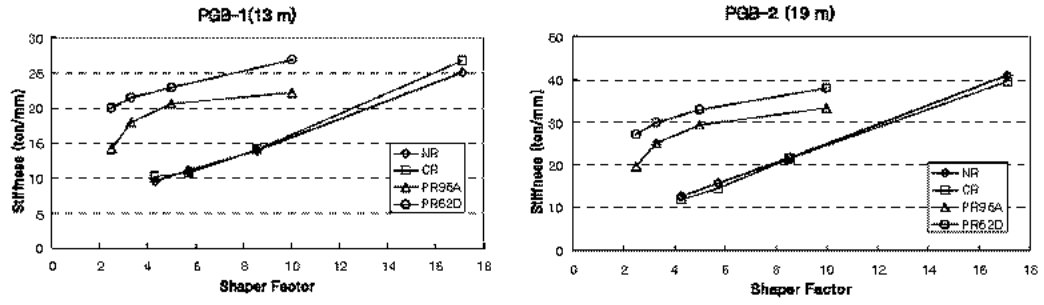


그림 7. 고부레드의 스트링 강성을 계산하는 예

표 4. 추정된 고부레드의 스트링 강성

PGB-1 (15 m)	스트링 강성 (ton/mm)			
부재(mm)	5	10	15	20
NK	25.08	14.02	11.03	9.48
CR	25.08	14.10	10.71	10.22
PB5A	22.19	20.68	17.98	14.27
PFGD	25.81	22.89	21.49	20.03
PGB-2 (10 m)	스트링 강성 (ton/mm)			
부재(mm)	5	10	15	20
NK	40.98	21.68	15.72	12.60
CR	39.46	21.47	14.45	11.84
PB5A	53.59	29.34	25.08	19.66
PFGD	38.03	32.91	29.84	27.09

본 연구에서 사용한 고부레드는 데모강 레드(plain rod)이기 때문에 수직하중에 의해서 수직변형과 더불어 수평변형의 변형이 발생한다. 표 5에는 각 고부레드에 대한 최대하중 하에서 발생한 최대수직변형과 최대수평변형을 표시하고 있다. 원형고부(NR)의 경우 두께 20 mm 레드에서 60 ton 하중에 의해서 8.0 mm 수평 변형이 발생했고, 크로로프렌 두께 20 mm 고부레드는 수직하중 60 ton에 의해서 9.0 mm 의 수평 변형이 발생하였다. 원형고부나 크로로프렌 고부레드의 경우 보강재를 이용하여 보강하는 이유가 이러한 수평 변형의 변형을 제한하여 고부레드의 압축강도 및 압축탄성계수를 증가시키기 위해서이다.



(a) PGB-1 (b) PGB-2

그림 8. 고무패드 의 형상계수와 수직강성)

폴리우레탄 고무패드의 경우 두께나 작용하는 수직하중에 관계없이 수평 변형이 1.0mm 이하로 판측되었다. 이것은 폴리우레탄 고무패드에는 보강재에 의한 보강이 필요 없음을 보여주는 것이다. 천연고무 및 크로로프렌 고무 패드의 상대적으로 크게 발생하는 수평 변형은 마찰에 의한 손상이 발생할 수 있기 때문에 내구성 문제를 유발할 수 있다.

표 5. 고무패드의 수직하중에 의한 수직 및 수평 최대변형

고무패드 수직하중	NR				CR				PR95D				PR62D			
	60 ton				60 ton				80 ton				100 ton			
두께 (mm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
수직 (mm)	1.61	3.08	4.12	4.93	1.76	3.21	4.51	5.65	2.18	2.37	3.18	4.05	2.27	2.52	2.81	3.13
수평 (mm)	<1.0	2.0	4.0	8.0	1.0	2.0	5.0	9.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0

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(pretload 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 고무 패드의 스프링 강성을 추정하였다. 추정된 고무패드의 강성은 사하중이 큰 19 m 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.

본 연구에서처럼 천연고무나 크로로프렌 고무 패드를 강판 등으로 보강하지 않고 사용하면 수직하중에 의한 수평방향의 변형이 발생한다. 따라서 천연고무는 보강재에 의해서 보강하여 베어링 패드로 사용하면, 이런 경우 수직하중 저항능력이 증가한다. 그러나 폴리우레탄 고무패드는 천연고무와 달리 수직하중에 의한 수평방향의 변형이 거의 없으므로 보강재의 보강이 필요하지 않으며 경도가 크기 때문에 압축탄성계수 상대

적으로 크게 나타난다.

폴리우레탄 고무는 천연고무나 플라스틱에 비해 내구성에서 우수하며 충격과 마모에 대해서도 우수한 성능을 가지고 있다. 또한 천연고무에 비해 하중 지지능력이 크고 동일한 형상에서 스프링 강성도 크게 나타난다. 따라서 폴리우레탄 고무패드는 천연고무패드에 비해 철도교량의 교좌로서 적합하다고 판단되며, 보강 없이도 사용할 수 있으므로 사용성에서도 우수하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최진유 외 (2002). "판형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발," 한국철도기술연구원
2. AASHTO (1996). *AASHTO LRPD bridge design specifications*. Washington, D.C.
3. 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.
4. 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.
5. Nashif, A.D., Jone D.I.G. and Henderson, J.P. (1985). "Vibration Damping," John Wiley & Sons.
6. 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.
7. Stanton, J.F. and Roeder, C.W. (1985). "Elastomeric bearings design, construction, and materials," *NCHRP Rep. No. 248*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
8. 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.