탄성받침용 혼합고무재료의 노화에 따른 전단 특성 변화

Shear Characteristic Changes in Blended Rubber of Elastomeric Bearings due to Aging

선창호* · 김익현**

Sun, Changho*, and Kim, Ickhyun**

Abstract

Rubber bearings are widely used for seismic retrofit of bridges because they reduce the seismic force by making the vibration period of the bridge longer and distributing the seismic force to all the piers. However, they have the disadvantage of being easily aged compared to steel bearings as well as having variations in the shear stiffness. The shear characteristic changes in the blended rubber for the rubber bearings were analyzed, specifically, the aging accelerated by heat. The higher the aging temperature and longer the exposure time, the greater is the maximum stress and strain at that time, and the greater is the shear stiffness. This implies that the seismic performance gradually deteriorates due to aging as the service period becomes longer. This can provide the basis for the mechanical model of the aging bearing.

Key words : Rubber Bearing, Elastomeric Bearing, Aging (Deterioration), Shear Characteristics, Accelerated Aging Test

요 지

교량의 고무계열 받침은 교량을 장주기화하여 지진력을 감소시키고 또한 지진력을 모든 교각으로 분산시키기 때문에 교량의 내진보강용으로 많이 사용되고 있다. 그러나 강재받침에 비해 노화가 쉽게 진행되어 전단강성에 변화가 생긴다는 단점도 지니고 있다. 고무받침에 사용되는 혼합고무를 대상으로 열에 의한 노화를 촉진하여 전단특성의 변화를 분석하였다. 노화촉진온도가 높고 노출시간이 길수록 최대응력과 그때의 변형률이 크게 감소하고 전단강성이 증가하였다. 이는 공용기간이 길어질수록 노화가 심화되어 내진성능이 점차 저하된다는 것을 의미하며 노후받침의 역학모델의 기초지료를 제공한다.

핵심용어 : 고무받침, 탄성받침, 노화(열화), 전단특성, 노화촉진시험

1. 서 론

경주(2016) 및 포항(2017) 지진 이후 구조물의 내진보강에 대한 관심이 늘어나고 있다. 교량은 인적, 물적 자원의 수송을 담당하는 중요한 기간시설물로서 지진시에 피해를 입으면 사상자의 이송 및 긴급 복구물자의 수송에 지장이 초래되어 피해가 확대되게 된다. 교량 상부구조의 무거운 중량을 지지하면서 고정, 힌지 및 롤러와 같은 지점조건을 구현하기 위하여 강재계열의 교량받침이 지진하중을 고려하기 이전에는 많이 사용되었다. 그러나 이러한 구조시스템은 큰 지진

하중이 소수의 고정단 교각에 집중되는 지진에 매우 취약한 구조이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근에는 유연한 횡방향 강성을 갖는 고무계열의 탄성받침이 널리 적용되고 있다.

탄성받침에 사용되는 고무재료는 상대적으로 단가가 저렴한 천연고무(Natural Rubber, NR)가 가장 많이 사용되고 있지만 내구성이 강한 합성고무(Chloroprene Rubber, CR) 또는 천연고무와 합성고무를 일정비율로 배합(Blending)한 혼합고무(Blended Rubber: NR+CR)도 많이 사용되고 있다. 그러나 탄성받침에 사용되는 고무재료는 열, 오존, 염소,

*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 연구교수(E-mail: sunchc@daum.net)

Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

**교신저자, 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수(Tel: +82-52-259-2278, Fax: +82-52-259-2629, E-mail: ickhyun@ulsan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

산성비, 반복하중, 자외선 등 다양한 요인에 의한 노화가 강재에 비하여 빠르기 때문에 교량의 공용기간 중 성능저하가 상대적으로 빠른 단점도 있다. 일본에서는 동북대지진(2011년, 규모9.0) 이후 공용 중인 탄성받침에서 많은 균열이 발견되었으며 이에 대한 원인조사 및 실험연구가 수행된 바 있다. 공용 중인 기존 고무받침과 새로운 받침의 성능 비교에서 고무재료의 노화가 고무받침의 전단강성을 증가(고무받침에 작용하는 지진력의 증가)시키고 전단변형성능을 저하시키는 주요 요인으로 보고하였다(Takahashi, 2012; Soda et al., 2013; Hoshikuma et al., 2015). 한편, 다른 연구에서는 여러 노화 요인 중에서도 열에 의한 노화 현상이 가장 큰 것으로 나타났다(Mott and Roland, 2001; Gu et al., 2015).

고무재료에 대한 대부분의 기존 연구는 천연고무(NR) 재료를 대상으로 하였으며 천연고무(NR)와 합성고무(CR)가 일정한 비율로 배합된 혼합고무(Blended Rubber: NR+CR)에 대한 실험적 연구는 전무하다. 이에 이 연구에서는 탄성받침용 혼합고무를 대상으로 일정 노출시간동안 가속열로 노화 촉진시킨 후 노화 정도에 따른 혼합고무의 전단역학적 특성 변화를 분석하였다.

2. 노화촉진시험 및 전단성능시험

2.1 시험체 구성 및 노화촉진시험

재료의 인장 및 전단의 역학적 성질은 매우 중요한 정보이며, 지진하중과 같은 수평력을 받는 부재의 경우에는 전단특성이 특히 중요하다.

KS F 4420 (2013 Confirm)에는 탄성받침의 설계, 성능평가, 시공 등과 관련한 전반적인 내용을 담고 있으며 고무재료의 전단탄성계수별 고무재료 함량을 Table 1과 같이 규정하고 있으며 혼합고무도 동일한 함량을 만족하여야 한다.

이 연구에서 사용된 복합고무(NR+CR)는 천연고무(NR)와 합성고무(CR)가 약 1:1의 비율로 배합 되었으며, Table 2와 같이 노화촉진온도(3가지)와 노출시간(10가지)을 변수로 하였으며 노화촉진온도 및 노출시간별 시험체 개수는 4개씩으로 총 120개의 전단시험체를 제작하였다.

전단시험체는 KS M ISO 1827 (2014)에 따라 두께 4 mm, 너비 25 mm, 길이 25 mm인 4개의 고무시편(Fig. 1의 4)을 4개의 플레이트(Fig. 1의 1, 2)에 부착하여 이중 샌드위치 구조로 제작하였다.

KS M ISO 11346 (2014)은 열-산화 노화에 의한 재료특성을 분석하기 위해서는 최소한 3가지 이상의 온도를 선택하도록 규정하고 있다. 그리고 KS M 6518 (2016)에서는 공기 가열 노화시험 온도는 별도의 규정이 없는 한 70 °C에서 수행하고, 고온일 경우는 100 °C 또는 120 °C로 규정하고 있다. 하지만 기초시험을 통해 100 °C 이상의 고온에서는 재료특성을 분석하기 어려울 정도로 파단이 빨리 발생하고, 70 °C 미만의 낮은 온도에서는 노화촉진이 매우 더디게

발생하기 때문에 이 연구에서는 노화촉진온도의 변수를 70 °C, 80 °C, 90 °C로 하였다. KS M ISO 11346 (2014)에서는 노출시간에 대해서는 명확히 제시하고 있지는 않지만 충분한 특성이 나타날 수 있도록 적정한 노출시간을 정하도록 하고 있다. 다만 KS M ISO 23529 (2016)에서는 장기간 노출시간에 대해서는 168시간(7일)의 배수로 권고하고 있다. 따라서 이 논문에서의 노출시간은 충분한 재료특성 분석이 가능하도록 Fresh (노화촉진을 하지 않은 시험체)를 포함하여 10단계로 결정하였다. 노화촉진시험은 KS M ISO 188 (2014)에 따라 강제 공기 순환형 건조기 3개(70 °C, 80 °C, 90 °C)를 이용하여 Table 2와 같이 3일~168일까지 노화촉진 시험을 수행하였다.

Table 1. Content Composition Ratio

Modulus of shear	Composition ratio		
	0.7 MPa	0.9 MPa	1.15 MPa
Natural	More than	More than	More than
Chloroprene	60%	55%	50%

Table 2. Test Variables

Rubber	Temperature	Aging (days)
Blended	70 °C 80 °C 90 °C	Fresh
		3
		7
		14
		28
		56
		84
		112
		140
		168

Fig. 1. Design of Test Specimen

2.2 전단성능시험

50 kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 KS M ISO 1827 (2014)에 따라 5 mm/min의 재하속도로 시험체가

Fig. 2. Installation of Specimen

파단될 때까지 변위제어로 재하하여 하중-변위를 획득하였다. Fig. 2는 시험체 설치모습과 파단된 시험체 형상이다. 모든 시험체의 파단은 고무와 플레이트 접착부 박리가 아닌 고무시편의 파단이였다.

3. 전단성능시험 결과 및 분석

3.1 전단 응력-변형률 곡선

동일한 시험변수(노화촉진온도 및 노출시간)를 갖는 4개 시험체의 하중-변위 데이터를 전단 응력-변형률 곡선으로 나타내면 Figs. 3~5와 같다. 최대응력과 최대응력시의 변형률에는 다소간 차이가 있으나 전체적으로 노출온도가 높을수록 노출시간이 길수록 최대응력과 최대응력시 변형률이

Fig. 3. Shear Stress-Strain Curve of Aged Blended Rubber at 70 °C

Fig. 4. Shear Stress-Strain Curve of Aged Blended Rubber at 80 °C

줄어든다. 특히, 노화축진온도 90 °C의 경우에는 노출시간 56일부터는 최대응력 이후로 소성거동이 일부 나타난다. 그러나 최대응력에 도달하기 전까지는 4개 시험체 모두 거의 동일한 특성을 보인다. 이와 같이 고무재료의 파단 시 최대응력과 최대응력시 변형률에 상당한 변동성이 있어서 실제 탄성받침은 고무종류와 무관하게 상시에는 허용전단변형률 70%~75%, 지진시에는 허용전단변형률 150%를 적용하고 있으며 KS M ISO 1827 (2014)에서는 전단탄성계수(G)를 25% 전단변형에서 측정하도록 하고 있다.

Tables 3~5는 각각의 노화축진온도(70 °C, 80 °C, 90 °C)에 대해 노출시간별로 최대응력(Average Ultimate Stress)과 최대응력시 변형률(Average Strain at Ultimate Stress)의 평균값과 이들 값을 Fresh 상태에 대한 비율, 즉 응력비(Stress Ratio)

Table 3. Ultimate Stress and Strain of Aged Blended Rubber at 70 °C

Aging (days)	Average ultimate stress (MPa)	Stress ratio	Average strain at ultimate stress (%)	Strain ratio
Fresh	31.01	1.00	427.50	1.00
3	31.53	1.02	407.56	0.95
7	30.77	0.99	388.13	0.91
14	29.45	0.95	367.50	0.86
28	26.11	0.84	330.62	0.77
56	24.18	0.78	308.50	0.72
84	20.77	0.67	273.85	0.64
112	18.66	0.60	258.56	0.60
140	17.58	0.57	248.41	0.58
168	16.51	0.53	230.34	0.54

Table 4. Ultimate Stress and Strain of Aged Blended Rubber at 80 °C

Aging (days)	Average ultimate stress (MPa)	Stress ratio	Average strain at ultimate stress (%)	Strain ratio
Fresh	31.01	1.00	427.50	1.00
3	29.16	0.94	392.41	0.92
7	24.18	0.78	322.22	0.75
14	25.57	0.82	333.58	0.78
28	22.45	0.72	299.10	0.70
56	17.97	0.58	252.06	0.59
84	15.03	0.48	224.08	0.52
112	14.01	0.45	202.54	0.47
140	11.70	0.38	174.12	0.41
168	10.98	0.35	163.60	0.38

Table 5. Ultimate Stress and Strain of Aged Blended Rubber at 90 °C

Aging (days)	Average ultimate stress (MPa)	Stress ratio	Average strain at ultimate stress (%)	Strain ratio
Fresh	31.01	1.00	427.50	1.00
3	24.80	0.80	338.56	0.79
7	21.89	0.71	301.84	0.71
14	19.94	0.64	276.47	0.65
28	14.06	0.45	211.78	0.50
56	10.18	0.33	246.72	0.58
84	8.89	0.29	238.38	0.56
112	8.23	0.27	239.50	0.56
140	7.56	0.24	220.57	0.52
168	7.30	0.24	225.72	0.53

Fig. 5. Shear Stress-Strain Curve of Aged Blended Rubber at 90 °C

와 변형률비(Strain Ratio)를 나타낸 것이다.

전단응력비 및 전단변형률비가 Fresh 대비 0.5 (50%) 이하로 저하되는 시험조건을 살펴보면, 노화축진온도 70 °C에서는 이 연구에서의 가장 노출시간인 168일에서 각각 0.53, 0.54로 50% 이하로는 저하되지 않았다. 노화축진온도 80 °C에서 전단응력비는 노출시간 84일에서 0.48, 전단변형률비는 112일에서 0.47로 전단응력과 전단변형률 모두 50% 이하로 저하되었다. 노화축진온도 90 °C에서 전단응력비는 28일에서 0.45로 50% 이하로 저하되었다. 하지만 노화축진온도 90 °C인 Figs. 5(f)~5(j)를 보면 노출시간 56일부터는 최대응력 이후로 소성거동이 일부 나타났기 때문에 최대응력시 변형률이 상대적으로 크게 나타나는 경향이 있었다. Figs. 5(f)~5(j)를 제외한 Figs. 3~5의 전단 응력-변형률 곡선을 보면 전단변형률 100%~150% 전후로 전단 응력-변형률 곡선의 기울기가 서로 다른 2선형 모델에 가까우나 Figs. 5(f)~5(j)는 전단변형률 100%~150% 이후로 소성거동을 보인다. 이러한 소성거동에 의한 변형률을 제외하면 변형률비는 노출시간 56일에서 50% 이하로 저하되는 것으로 볼 수 있다.

3.2 노후조건에 따른 전단 응력-변형률 변화 분석

Fig. 6은 Figs. 3~5에서 변동성이 큰 최대응력 발생구간을 제외하고 전단변형률 25%, 50%, 75%, 100%, 150%, 200%, 250%, 300%에 대해서 노화축진온도별 노출시간에 따른 전단응력을 나타낸 것이다. 일부 동일 변형률에서 노출시간이 늘어날수록 전단응력이 증가하는 현상을 확인할 수 있으며 이는 혼합고무재료가 노화에 의해 경화됨으로써 발생하는 현상이다. 또한, 노화축진온도가 높을수록 노출시간이 길수록 노화가 심화되어 낮은 전단변형률에서도 고무가 빨리 파단되어 전단응력을 산출하지 못한 구간도 다수 발생하였다.

4. 노후조건에 따른 전단강성 변화 분석

4.1 노화축진온도별 노출시간에 따른 전단강성 변화

혼합고무(NR+CR) 전단시험에 대해 노화축진온도별(70 °C, 80 °C, 90 °C) 노출시간(10가지)에 따른 전단강성의 변화를 분석하였다. 전단강성은 모든 시험체의 하중-변위 곡선에서 Fig. 7과 같이 원점에서 전단변형률 25%, 50%, 75%, 100%, 150%, 200%, 250%, 300%에 해당되는 하중-변위의 직선 기울기로 계산하였다.

Fig. 8은 혼합고무(NR+CR) 전단시험에 대해서 각각의 전단변형률에서 노출시간에 따른 전단강성 변화를 나타낸 것으로 노출시간이 길수록 전단강성은 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 노화가 진행될수록 전단강성이 증가한다

(a) Blended Rubber at 70 °C

(b) Blended Rubber at 80 °C

(c) Blended Rubber at 90 °C

Fig. 6. Shear Stress-Strain Curve at Different Aging Period

Fig. 7. Shear Stiffness at Origin (k_h)

고 볼 수 있다. 일반적으로 대부분의 재료는 변형이 커질수록 강성이 줄어들지만 고무재료는 Fig. 8과 같이 전단변형률 75%~100%까지는 강성이 줄어들다가 그 이후부터는 다시 강성이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 노화된 고무와 Fresh한 고무 모두 동일하게 나타난다. 이러한 현상은 Fig. 6의 전단 응력-변형률 곡선에서도 확인할 수 있다. 또한, 동일한 변형률에서 Figs. 8(a), 8(b), 8(c)를 비교해 보면 동일한 노출시간이라도 노화축진온도가 높을수록 전단강성이 커지는 것을 알 수 있다.

(a) Blended Rubber (70 °C)

(b) Blended Rubber (80 °C)

(c) Blended Rubber (90 °C)

(a) Shear Stiffness at Strain 25%

(b) Shear Stiffness at Strain 50%

(c) Shear Stiffness at Strain 75%

(d) Shear Stiffness at Strain 100%

Fig. 8. Shear Stiffness Change at Different Aging Period

Fig. 9. Shear Stiffness Change at Each Strain Level

(e) Shear Stiffness at Strain 150%

(f) Shear Stiffness at Strain 200%

(g) Shear Stiffness at Strain 250%

(h) Shear Stiffness at Strain 300%

Fig. 9. (Continued)

4.2 전단변형률별 노출시간에 따른 전단강성 변화

Fig. 9는 혼합고무(NR+CR) 전단시편에 대해서 각각의 전단변형률(25%, 50%, 75%, 100%, 150%, 200%, 250%, 300%) 단계에서 노출시간에 따른 전단강성(Shear Stiffness)과 Fresh 대비 강성비(Shear Stiffness Ratio)의 변화를 나타낸 것으로 노화축진온도가 높을수록 노출시간이 길수록 전체적으로 강성이 증가하는 것으로 나타났다. 노화축진온도 70 °C와 80 °C에 노출된 시험체에 비해 노화축진온도 90 °C에 노출된 시험체는 노출시간이 길어질수록 파단이 빨리 발생하여 강성을 구할 수 없는 경우도 다수 있었다.

Table 6에서, 지진 시 허용전단변형률인 150%에서의 전단강성을 분석해보면 노출시간 28일째 Fresh대비 전단강성비는 노화축진온도 70 °C, 80 °C, 90 °C에서 각각 1.29배, 1.36배, 1.76배 증가하는 것으로 나타났다. 상시의 허용전단변형률인 75%에서 노출시간 112일째 Fresh대비 전단강성비는 노화축진온도 70 °C, 80 °C, 90 °C에서 각각 1.53배, 1.76배, 2.04배 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 KS M ISO 1827 (2014)에 따라 전단탄성계수를 산정할 때 적용하는 전단변형률 25%에서 노출시간 168일째 Fresh 대비 전단강성비는 노화축진온도 70 °C, 80 °C, 90 °C에서 각각 1.47배, 1.63배, 2.67배 증가하는 것으로 나타났다. 이상에서와 같이 탄성받침의 고무재료의 하나인 혼합고무는 노화가 진행될수록(노화축진온도와 노출시간이 증가할수록) 전단강성이 증가하는 것으로 나타났으며 이는 노화에 의해 경화됨을 의미한다.

강재받침의 지점조건에 따라 고정단, 가동단 교각으로 구분되는 것과 달리 고무계 받침은 모든 교각이 유연한 강성을 갖는 고정단 교각이 된다. 유연한 받침으로 교량이 장주기화 되어 지진력이 저감되고 이들 지진력이 모든 교각으로 분산되어 교량의 내진성능이 크게 향상된다. 받침의 노화로 전단강성이 증가한다는 것은 그만큼 지진력이 증가하여 교량의 내진성능이 저하된다는 것을 의미한다. 추후 고무계 받침의 노화에 따른 전단특성 연구결과가 많이 축적되면 공용 중인 교량(구조물)의 경과 연수에 따른 내진성능을 평가할 수 있을 것이다.

5. 결론

교량의 내진보강 방법 중 하나로 기존의 강재계 받침을 유연한 횡강성을 갖는 고무계 받침으로 교체하는 내진보강이 널리 적용되고 있다. 그러나 이러한 고무계 받침은 공용기간 중 여러 요인에 의해 노화(열화)되어 성능이 점차 저하되는 단점을 지니고도 있다.

이 연구에서는 탄성받침에 사용되는 고무재료 중 혼합고무(NR+CR)재료의 노화에 따른 전단특성 변화를 분석하기 위하여 노화축진시험을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 시험체는 KS M ISO 1827 (2014)에 따라 총 120개를

Table 6. Shear Stiffness Ratio of Aged to Fresh

Shear Strain ϵ (%)		25	50	75	100	150	200	250	300
Aged	Fresh	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	70 °C	3 day	0.94	0.97	0.98	0.99	1.02	1.04	1.05
		7 day	1.02	1.04	1.07	1.09	1.11	1.13	1.12
		14 day	1.02	1.06	1.09	1.11	1.15	1.17	1.15
		28 day	1.10	1.15	1.20	1.24	1.29	1.30	1.28
		56 day	1.24	1.31	1.37	1.41	1.45	1.42	1.25
		84 day	1.32	1.42	1.50	1.55	1.59	1.53	
		112 day	1.35	1.45	1.53	1.58	1.58	1.50	
		140 day	1.39	1.51	1.61	1.66	1.66	1.57	
		168 day	1.47	1.61	1.71	1.77	1.76	1.61	
	80 °C	3 day	0.96	0.98	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05
		7 day	1.15	1.22	1.27	1.31	1.35	1.33	1.21
		14 day	1.01	1.05	1.10	1.14	1.19	1.21	1.18
		28 day	1.18	1.23	1.29	1.32	1.36	1.34	1.29
		56 day	1.30	1.41	1.51	1.57	1.61	1.55	
		84 day	1.39	1.51	1.60	1.66	1.66		
		112 day	1.49	1.65	1.76	1.83	1.82		
		140 day	1.55	1.76	1.90	1.98	1.91		
		168 day	1.63	1.86	2.00	2.08	1.89		
	90 °C	3 day	1.01	1.04	1.07	1.09	1.12	1.14	1.13
		7 day	1.11	1.17	1.23	1.26	1.31	1.31	1.28
		14 day	1.25	1.34	1.41	1.46	1.49	1.46	
		28 day	1.37	1.52	1.63	1.71	1.76		
		56 day	1.99	2.01	1.89				
		84 day	2.30	2.29	2.08				
		112 day	2.29	2.30	2.04				
		140 day	2.63	2.54					
		168 day	2.67	2.52					

제작하여 고온의 노화축진온도(70 °C, 80 °C, 90 °C)에서 노출시간(10단계)을 변수로 하여 KS M ISO 188 (2014)에 따라 노후축진시험을 수행하였다.

- (2) 노화축진온도가 높을수록 노출시간이 길수록 최대응력과 최대응력시 변형률이 크게 줄어들며, 노화축진온도 90 °C에서는 노출시간 56일부터 최대응력 이후로 소성거동이 일부 나타났다.
- (3) 최대응력이 Fresh 대비 50% 이하로 저하되는 노출시간은 노화축진온도 80 °C, 90 °C에서 각각 84일, 28일이다. 노화축진온도 70 °C에서는 노출시간 168일까지 50% 이하로 저하되지 않았다.
- (4) 최대응력시의 변형률이 Fresh 대비 50% 이하로 저하되는 노출시간은 노화축진온도 80 °C, 90 °C에서 각각 112일, 56일(소성거동구간 제외)이다. 노화축진온도 70 °C에서는 노출시간 168일까지 Fresh 대비 50%

이하로 저하되지 않았다.

- (5) 지진시의 허용전단변형률인 150%에서의 전단강성비(노출시간 28일째 Fresh 대비)는 노화축진온도 70 °C, 80 °C, 90 °C에서 각각 1.29배, 1.36배, 1.76배 증가하였다.
- (6) 상시의 허용전단변형률인 75%에서의 전단강성비(노출시간 112일째 fresh 대비)는 노화축진온도 70 °C, 80 °C, 90 °C에서 각각 1.53배, 1.76배, 2.04배 증가하였다.
- (7) 혼합고무는 노화가 진행될수록(노화축진온도와 노출시간이 증가) 경화되어 전단강성이 증가하며, 이는 교량을 내진성능의 저하로 이어질 수 있다. 다만, 탄성받침은 고무와 강재 보강판이 적층으로 구성되기 때문에 고무재료에서의 전단탄성의 변화율 보다 작을 것이다. 추후 노화된 탄성받침의 전단변형률 특성 변화에 관한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원 (19SCIP-B146946-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Gu, H., Itoh, Y., and Satoh, K. (2005). Effect of rubber bearing ageing on seismic response of base-isolated steel bridges. *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, Vol. 2, pp. 1627-1632.
- Hoshikuma, J., Shinohara, M., and Okada, T. (2015). *Recent researches on properties of laminated elastomeric rubber bearings under cyclic loading*. PWRI.
- KS F 4420. (2013). *Steel-Laminated elastomeric bearing for bridge*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M 6518. (2016). *Physical testing methods for vulcanized rubber*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M ISO 11346. (2014). *Rubber, vulcanized or thermoplastic Estimation of life-time and maximum temperature of use*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M ISO 1827. (2014). *Rubber, vulcanized or thermoplastic Determination of modulus in shear or adhesion to rigid plates Quadruple shear method*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M ISO 188. (2014). *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Accelerated ageing and heat resistance tests*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M ISO 23529. (2016). *Rubber-General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Mott, P.H., and Roland, C.M. (2001). Aging of natural rubber in air and seawater. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 74, pp. 79-88.
- Soda, N., Yamada, K., Kimizu, T., Hirose, T., and Suzuki, M. (2013). Performance test of natural rubber bearing ruptured according to the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake. *Journal of Structural Engineering, A., JSCE*, Vol. 59A, pp. 516-526.
- Takahashi, Y. (2012). Damage of rubber bearings and dampers of bridges in 2011 great east Japan earthquake. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp. 1333-1342.

Received	October 19, 2021
Revised	October 19, 2021
Accepted	October 29, 2021