

폴리우레탄 고무 스프링의 압축 강성도 추정 및 적용

최은수^{1*} · 박승진² · 우대승²

¹교수, 홍익대학교, 토목공학과 ²석사과정, 홍익대학교, 토목공학과

Estimation of Compressive Stiffness of Polyurethane Rubber Springs and Its Application

Choi, Eunsoo^{1*}, Park, Seungjin², Woo, Daeseung²

¹Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

²Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

Abstract - The purpose of this study is to investigate the behavior and characteristics of rubber springs and calculate the compressive stiffness by performing dynamic compression tests of rubber springs. In order to carry out the dynamic compression test of rubber spring, total 9 rubber springs were tailored by calculating the shape factor of L80-D55, L90-D58, and L100-D60, and used for the experiments. Experiments were performed by controlling the compression according to the length of the rubber spring, and the compression was increased in the order of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% of the strain. From the experimental results, the force-strain curves were obtained and it was confirmed that strength decrease and strength increase phenomenon occurred as the strain increased. In addition, it was confirmed that the decrease of stiffness and the increase of stiffness were clearly observed according to the size and diameter of the rubber spring, and the effective compression stiffness was estimated using the slope of the force-strain curve. By using the effective compressive stiffness, design values that can be used in actual design were presented.

Keywords - Effective compressive stiffness, Pre-compressed rubber spring, Strength hardening, Strength softening, Design compressive stiffness

1. 서론

폴리우레탄 고무(polyurethane rubber)는 천연고무(natural rubber)에 비해 경도(hardness)가 크기 때문에 상대적으로 더 큰 하중을 지지할 수 있는 능력이 있다. 천연고무의 경우 경도가 50A-70A인데 비해 폴리우레탄 고무는 95A-65D로 월등히 크기 때문에, 고무의 탄성계수가 크고 같은 크기와 모양의 고무스프링에서 천연고무에 비해 작은

변형을 일으키며 동일한 하중을 지지할 수 있다^[1]. 따라서 폴리우레탄 고무는 실린더 형태로 다양한 스프링에 적용되고 있다. 또한 폴리우레탄 고무는 내마모성(anti-abrasion performance)이 우수하여 다양한 상업용도로 사용되고 있다^[2].

폴리우레탄 고무로 제작된 디스크(원판 모양으로 중앙에 구멍이 있음)는 교량받침에서 탄성지지 재료로 20여 년 동안 사용되고 있다. 폴리우레탄 고무 디스크는 천연고무로 제작된 탄성받침과는 다르게 내부에 측면 팽창을 방지하는 보강재 - 일반적으로 강판(steel shim)을 사용 - 가 없이 제작되므로 제작이 용이하고, 작은 높이의 디스크로 큰 하중을 지지하기 때문에 천연고무 탄성받침에 비해 사용성이 우수하다^{[3],[4]}. 또한 폴리우레탄 고무스프링은 EQS (Eradi-Quake System) 지진격리받침에서 복원력을 제공하는 스프링으로 사용되고 있다^[5].

Note.-Discussion open until December 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 11, 2017; revised April 27, 2017; approved on May 16, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-320-3060 Fax. +82-2-320-1244

E-mail. eunsochoi@hongik.ac.kr

최근에는 스마트 댐퍼의 개발에 폴리우레탄 고무스프링이 이용된 사례가 있다. 폴리우레탄 고무스프링은 기압축 상태에서 작용을 하게 되면 초기에 강체거동(rigid-body behavior)을 보이는데, 이를 이용하여 댐퍼의 복원력(self-centering capacity)을 확보할 수 있다^{[6],[7],[8]}. 폴리우레탄 고무스프링은 스마트 댐퍼에서 복원력을 제공하는 형상기억합금과 같은 스마트 재료에 비해서 가격이 월등히 저렴하며^[9], 스프링-와셔 시스템 보다 기계적으로 아주 간단하다. 따라서 폴리우레탄 고무스프링은 경제적으로 저렴하며 기계적으로 내구성이 우수하여 상업화에 유리하다.

위와 같이 폴리우레탄 고무스프링의 이용은 점차 확대되고 있으나, 폴리우레탄 고무스프링에 대한 정확 거동의 예측을 통한 고무스프링의 압축강성도 추정 및 설계에 대한 연구는 미진한 상태이다. 기존의 고무스프링을 이용한 스마트 댐퍼의 개발연구에서 고무스프링에 대한 거동에 대해서 일부 연구가 진행되었으나, 댐퍼 개발을 위한 거동실험에 국한된 것이다^{[6],[7],[8]}. 따라서 이 연구에서는 폴리우레탄 고무스프링의 압축 강성도를 추정하고, 추정된 강성도와 실험치를 비교하여 설계에 사용될 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 고무스프링의 압축실험

2.1 고무스프링 시편

이 연구에 사용한 폴리우레탄 고무는 경도 95A이며, 고무스프링 시편은 3개 조(suite)에 3개씩 9개의 시편을 사용하

Table 1. Dimensions and shape factors of polyurethane rubber springs

Suite	Specimen	Length (mm)	Outer diameter (mm)	Shape factor
Suite-I	L80-D55	80	55	0.109
	L90-D58	90	58	0.104
	L100-D60	100	60	0.102
Suite-II	L80-D80	80	80	0.188
	L90-D85	90	85	0.179
	L100-D89	100	89	0.172
Suite-III	L80-D90	80	90	0.219
	L90-D95	90	95	0.209
	L100-D100	100	100	0.200

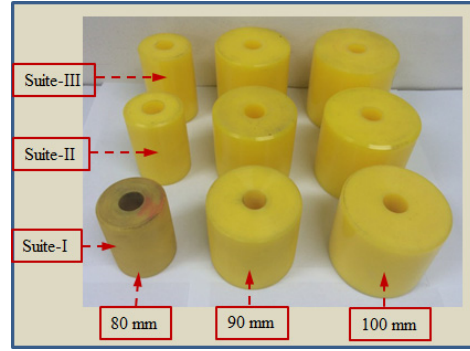


Fig. 1. Specimens of rubber springs

였다. 각 조의 고무스프링은 압축 강성도가 유사하게 나타나도록 크기를 조정하여서 제작하였다. 고무스프링은 실린더 형태로 중앙부에 내경 20mm의 원이 있어 샤프트 삽입이 가능하도록 제작되었다. 길이는 80, 90 및 100mm의 세 종류를 사용하였고, 외경은 3개조의 압축강성도를 고려하여 결정하였으며, Table 1에 나타나있다. Suite-I의 경우 외경이 각각 55, 58 및 60mm이고, Suite-II는 80, 85 및 89mm이다. Suite-III에서는 외경이 각각 90, 95 및 100mm이다. Table 1에는 각 고무스프링의 형상계수(S, shape factor)가 아래 식을 이용해서 계산되어 있다.

$$S = \frac{\text{Loaded area}}{\text{Force free area}} \quad (1)$$

고무스프링 9개의 모양이 Fig. 1에 각 조와 길이별로 나타나 있다.

2.2 압축실험 및 결과

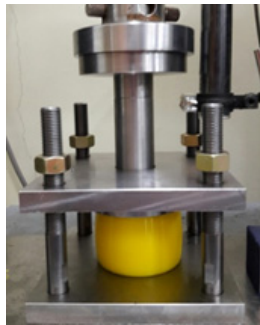
고무스프링의 압축실험을 위해 Fig. 2와 같이 특수한 장치를 제작하였다. 고무스프링을 Fig. 2(a)에서와 같이 하부 판의 샤프트에 끼워서 고정하고, 상부판을 덮어서 볼트로 고정하면 완전하게 밀착이 가능해진다. 샤프트의 지름 18mm로 고무스프링의 내경보다 약간 작으며, 높이 45mm인 강봉으로 가장 작은 시편에서 30%의 변형율을 재하하여도 상판과 접촉하지 않도록 제작하였다. 그 후, 하중을 가하여 압축을 가하여 측면의 변위계를 통해서 고무의 압축변형을 측정하였다. 하중은 실험장비의 하중계를 통해서 측정되었으며, 이를 통해서 고무스프링의 하중-변형율 곡선을 얻을 수 있다. 고무스프링은 변형율 30%까지 5회 반복재하 하였으며, 여기서 변형율은 고무스프링의 변형량을 초기 길이로 나눈



(a) A rubber spring installed on lower plate



(b) Initial state without compression



(c) Compressed state

Fig. 2. Test set-up for compression of rubber springs

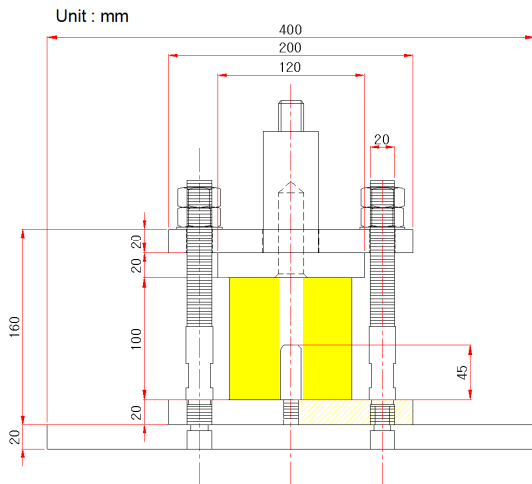


Fig. 3. Dimension of test set-up

값이다. 고무스프링의 길이가 3종류이므로 변형률을 일정하게 하여 실험을 수행하였다. Fig. 2(b)-(c)에는 초기 및 압축상태의 고무스프링이 나타나 있으며, 실험장치의 내외부 형상과 치수는 Fig. 3에 나타나 있다.

실험결과 각 고무스프링의 하중-변형을 곡선은 Fig. 4에 나타나 있다. 고무스프링은 하중재하에 의해서 약 5%의 변형율에서 강도감소(strength softening) 현상이 발생하고, 약 15% 변형을 이후에는 강도증가(strength hardening) 현상이 발생하였다. 하중제거에 의한 이력은 하중재하 시와 상이하게 발생하며, 이것은 고무의 점성(viscosity)에 의해서 발생하는 것이다. 하중이 완전히 제거되면 잔류변형이 남고, 이 중 일부는 즉시 회복되며, 나머지는 상당시간이 흐른 후에 회복이 이루어진다.

이 연구에서는 연속적으로 5회의 반복하중을 가하였으므로, 잔류변형이 남은 상태에서 2회 이후의 하중이 다시 재하/loading)되었다. 따라서 고무스프링은 첫 하중재하에 의한 곡선과 2회 이후의 곡선이 상이하게 나타난다. 2회 이후의 하중-변형률 곡선은 첫 번째와 비교하여 큰 변화가 없고 거의 동일하게 형태로 나타나며, 모든 횟수의 반복하중에서 제하곡선(unloading path)은 거의 동일하다. 같은 조(suite)에 속한 고무스프링의 경우에도, 길이가 긴 고무스프링 경우, 지름도 상대적으로 커지기 때문에 전체적으로 크기가 크며, 강성저하 및 강성증가 현상이 길이가 작은 고무스프링에 비해 확연하게 나타나는 현상을 보이고 있다.

3. 고무스프링의 압축강성도 추정

3.1 압축강성도 계산

고무스프링의 압축강성도(compressive stiffness)는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$k = \frac{E_a A}{L} \quad (2)$$

여기서, A 와 L 은 각각 고무스프링의 단면적과 길이를 나타내며, E_a 는 고무스프링의 겉보기 탄성계수(apparent elastic modulus)로 고무스프링의 형상계수 S 와 고무의 탄성계수 E 의 함수로 아래 식을 이용해서 구할 수 있다^{[10],[11]}.

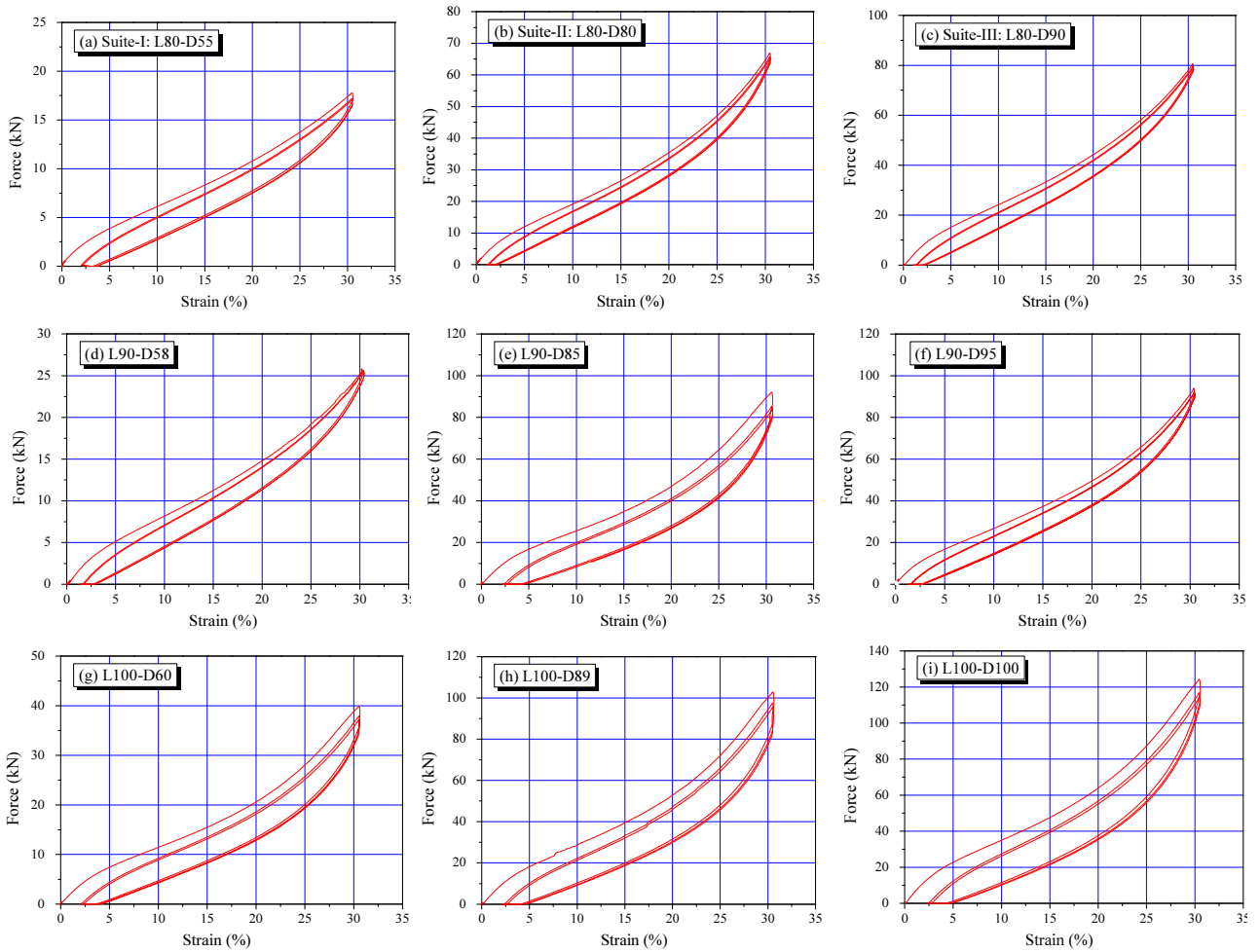


Fig. 4. Force-strain curves of nine rubber springs

Table 2. Calculated and estimated compressive stiffnesses of rubber spring

Suite	Specimen	Ea (MPa)	k (kN/mm)	ke-max (kN/mm)	k_{e-max}/k (%)	ke-min (kN/mm)	k_{e-min}/k_{e-max} (%)
Suite- I	L80-D55	54.06	1.393	1.575	1.13	0.6750	0.43
	L90-D58	53.94	1.362	1.62	1.19	0.8211	0.51
	L100-D60	53.89	1.389	1.72	1.24	0.8811	0.51
	Average	53.96	1.381	1.638	1.19	0.79	0.48
Suite- II	L80-D80	56.51	3.329	4.435	1.33	2.1949	0.49
	L90-D85	56.20	3.310	5.156	1.56	2.5569	0.50
	L100-D89	55.93	3.294	5.44	1.65	2.3474	0.43
	Average	56.21	3.311	5.010	1.51	2.37	0.47
Suite- III	L80-D90	57.85	4.373	5.010	1.15	2.5535	0.51
	L90-D95	57.41	4.340	5.811	1.34	2.7074	0.47
	L100-D100	57.04	4.311	5.650	1.31	2.7744	0.49
	Average	57.43	4.341	5.490	1.26	2.68	0.49

$$E_u = E(1 + \beta S^2) \quad (3)$$

여기서, β 는 실험적으로 얻어지는 상수로서 단면이 정방형, 원형 또는 길이/높이 비가 일반적인 사각형인 경우 $\beta = 2$ 를 사용해야 한다. 이 연구에서 사용된 경도 95A 폴리우레탄 고무의 탄성계수는 52.8MPa로 이전 연구에서 추정되었다. Table 2에는 식 (2)와 (3)를 이용하여 계산한 각 고무스프링의 겹보기 탄성계수와 압축강성도가 나타나있다. Suite-II 고무스프링의 평균 압축강성도는 3,311kN/mm로 Suite-I 고무스프링 압축강성도 1,381kN/mm의 2.4배이다.

Suite-III 고무스프링 압축강성도는 4,341kN/mm로 Suite-I 고무스프링 압축강성도의 3.1배로 계산되었다. 같은 조(suite)에서 세 고무스프링의 압축강성도의 차이는 2% 이내로 예상과 같이 같은 조에서 압축강성도가 거의 동일하게 나타나고 있다.

3.2 압축강성도 추정

각 고무스프링의 힘-변형률 곡선에서 활선기울기를 이용하여 1% 변형률에서부터 1%씩 증가시키면서 변형률 30%까지 유효 압축강성도(effective compressive stiffness)를 추정하였다. Fig. 5에는 첫 번째 하중재하에 곡선에서 추정된 압축강성도를 보여주고 있으며, Fig. 6은 두 번째 재하곡선에서 추정된 압축강성도를 나타내고 있다. Fig. 6의 압축강성도 계산 시, 잔류변형은 고려하지 않고 잔류변형율을 원점으로 해서 압축강성도를 추정하였다. Figs. 5 및 6에는 식 (2)에서 계산된 압축강성도를 수평점선으로 표시하여 추정된 유효 압축강성도와 비교하였다.

1회 하중재하에 의해서 얻어진 압축강성도의 변화는 초기에 최대치가 나타나며 약 15% 변형률까지 급격히 감소한 후, 30% 변형률까지 약간 증가하는 형태로 나타난다. 이것은 힘-변위 곡선에서 강도감소 및 증가현상에서 기인한다. 1회 재하 시, 압축 변형률에 따라 추정된 최대(k_{e-max}) 및 최소(k_{e-min}) 압축강성도가 Table 2에 나타나 있다.

또한 추정된 최대 압축강성도와 계산된 압축강성도의 비(k_{e-max}/k) 및 추정된 최소와 최대 압축강성도의 비(k_{e-max}/k_{e-min})를 표시하였다. 1회 거동에서 얻어진 압축강성도 최소치는 최대치의 평균적으로 47~49%로 약 1/2정도로 감소한다. 식 (3)을 사용하여 계산된 압축강성도와 비교하면, 최대값은 Suite-I에서 19%, Suite-II에서 51% 및 Suite-III에서

26% 계산된 압축강성도 보다 크다.

Suite-II의 고무스프링이 다른 조의 고무스프링에 비해 압축강성도가 크게 나타남을 알 수 있다. 압축강성도는 같은 조에서도 크기가 작은 것이 상대적으로 작게 나타나고 있으나, 압축강성도가 증가하면서 이러한 현상은 감소하고 있다. Fig. 5(c)를 보면 세 곡선이 거의 일치하는 것은 압축강성도가 고무스프링의 크기에 크게 영향을 받지 않는 것을 보여준다. 계산된 압축강성도와 일치하는 추정된 압축강성도가 발

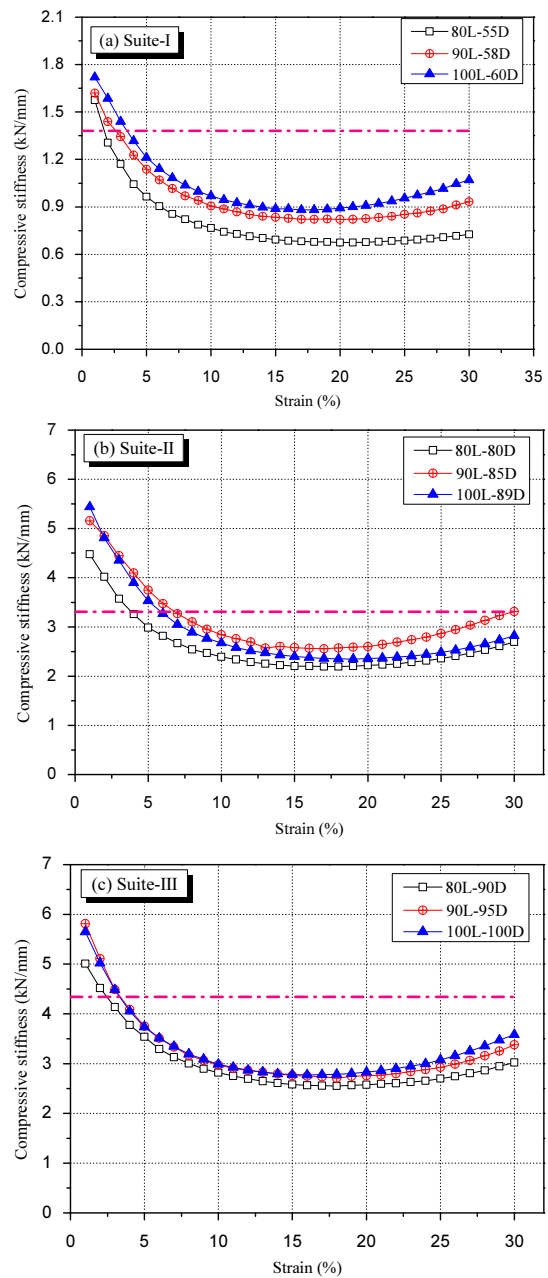


Fig. 5. Compressive stiffness of the first cycle behavior

생하는 각 고무스프링의 변형율을 1회 하중재하 거동에서 추정된 변형률이 Table 3에 나타나 있다. Suite-I 및 -III에서는 평균 변형율이 2.6%와 2.97%인데, Suite-II에서는

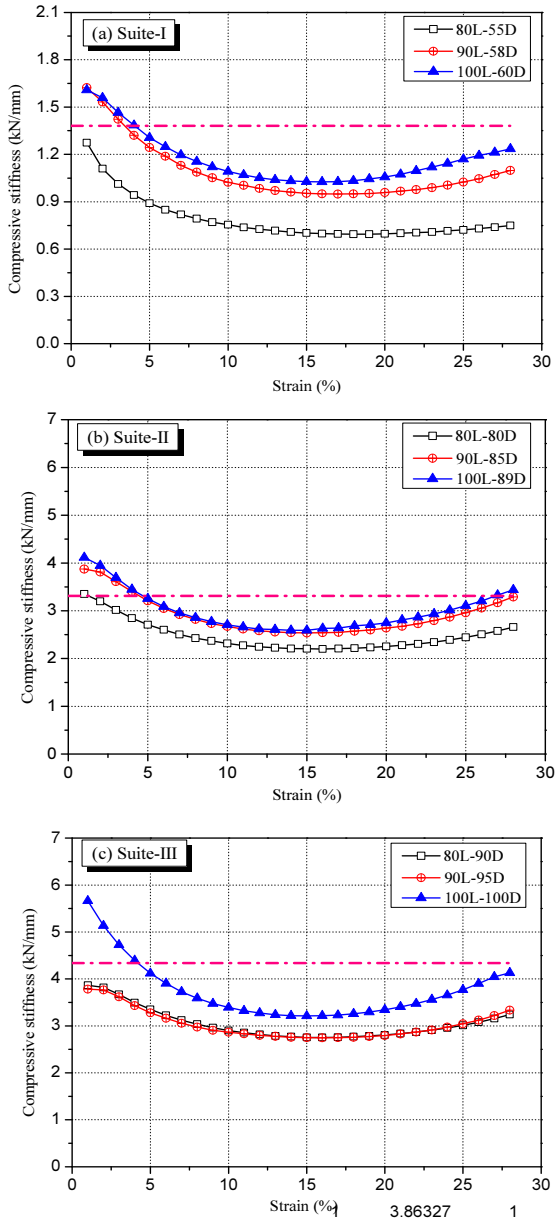


Fig. 6. Compressive stiffness of the second cycle behavior

Table 3. Corresponding strains to calculated compressive stiffness of rubber springs

Suite	80L (%)	90L (%)	100L (%)	Avg. (%)
Suite-I	1.7	2.6	3.5	2.6
Suite-II	3.8	6.7	5.8	5.4
Suite-III	2.3	3.3	3.3	2.97

5.4%이다. 이것은 위에서 언급한 것과 같이 Suite-II 고무 스프링이 계산치 보다 상대적으로 큰 압축강성도를 보이기 때문이다. 따라서 식 (3)에 의해서 계산된 압축강성도는 고무스프링의 변형율 2-5%에서 추정되는 압축강성도와 유사하다는 것을 알 수 있다. 만약 고무스프링이 변형율 5% 이내로 사용된다고 하면 식 (3)에 의해서 계산된 압축강성도를 Suite-II 고무스프링의 설계 압축강성도로 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 그러나 Suite-I 및 -III 고무스프링의 경우는 계산된 압축강성도를 약 15%정도 감소시켜서 사용해야 한다. 따라서 전체적으로 5%이내의 변형율을 사용하는 고무스프링의 경우 계산된 압축강성도의 85%를 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 고무스프링을 변형율 15% 이상으로 사용하는 경우, 15% 변형율에서 압축강성도는 계산된 압축강성도의 65-70%에 해당한다. 따라서 5% 변형율 이상 변형율을 사용하는 경우, 고무스프링의 압축강성도는 보수적으로 계산치의 65%를 설계값으로 하는 것이 적절하다고 판단된다.

Fig. 6에서 보는 것과 같이 2회 하중재하에 의한 힘-변형율 곡선에서 추정된 압축강성도는 1회 곡선에서 추정된 값과 상이하다. Fig. 7에는 각 변형율에서 두 압축강성도의 비가 있다. k_1 은 1회 곡선에서 추정된 강성도이고, k_2 는 2회 곡선에서 추정된 값이다. 그림에서 보면 5% 변형율 이내에서 평균적으로 2회 곡선에서 얻어진 압축강성도는 1회 곡선에서 얻어진 압축강성도의 약 80%정도이다. 그러나 변형율이 증가하여 10% 이상이 되면, 그 비율은 1을 상회하며, 2회 곡선에서 얻어진 압축강성도가 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 고무스프링을 5% 변형율 이내로 사용하는 경우, 2회 곡선의 압축강성도 감소로 인하여 20% 추가적으로 감소시켜 사용해야 하므로, 계산된 압축강성도의 68%를 설계 압축강성도로 사용하는 것이 적절하다. 고무스프링을 15% 변형율 이상으로 사용하는 경우는 2회 거동에서 강성도의 감소가 없으므로, 위에서 언급한 65%의 감소만을 고려하는 것이 적절하다.

따라서 5%이내의 작은 변형율에서는 68% 감소, 15% 이상의 큰 변형율에서는 65%의 감소를 고려해야 하므로, 전체적으로 식 (3)에 의해서 계산된 압축강성도의 65%를 고무스프링의 설계 압축강성도로 사용한다면 보수적인 설계값이 될 것이다.

이 연구에서는 경도가 95A인 고무스프링만을 사용하였는데, 고무의 경도가 작은 경우 소정의 압축 강성도를 얻기 위해서 고무스프링의 크기가 상대적으로 커져야 한다. 또한,

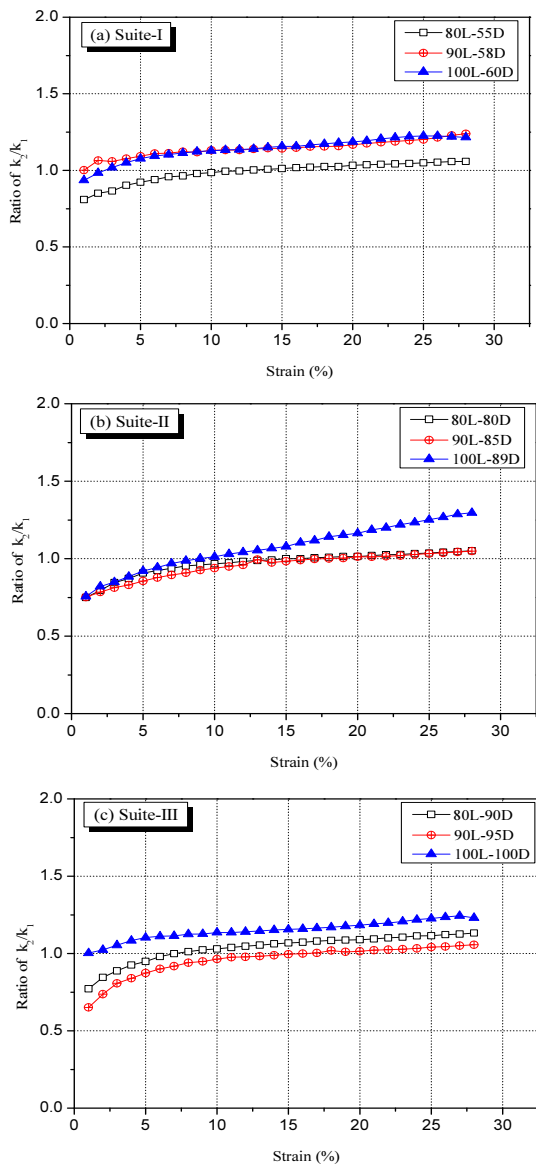


Fig. 7. Ratio of compressive stiffness of the first and second hysteretic behavior

경도 65D와 같이 큰 폴리우레탄 고무의 경우 하중 제거 후 잔류변형이 크게 남고, 반응속도가 95A 폴리우레탄 고무에 비해 느려 스프링으로 사용하기에 적절하지 않았다.

4. 결론

폴리우레탄 고무스프링의 압축 반복재하 실험을 통해서 힘-변형(또는 변형률) 곡선을 얻었고, 이를 통해서 고무스프링의 압축강성도를 추정하였다. 이 연구를 통해서 얻어진

결론을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 고무스프링은 하중재하 시에 약 5%의 변형률에서 강도 감소(strength softening) 현상이 발생하고, 약 15% 변형률 이후에는 강도증가(strength hardening) 현상이 발생한다.
- (2) 고무스프링의 1회 하중재하 곡선과 2회 이후의 곡선은 상이하게 나타나며, 2회 이후의 하중-변형률 곡선은 거의 동일한 형태로 나타난다.
- (3) 고무스프링의 크기와 지름이 클수록 크기와 지름이 작은 고무스프링에 비해 강성저하 및 강성증가 현상이 확연하게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (4) 각 고무스프링의 힘-변형률 곡선에서 할선 기울기를 이용하여 유효 압축강성도를 추정하였으며, 1회 하중재하에 의해서 얻어진 압축강성도의 변화는 초기에 최대치가 나타나며 약 15% 변형률까지 급격히 감소한 후, 30% 변형률까지 약간 증가하는 형태로 나타난다. 이것은 힘-변위 곡선에서 강도감소 및 증가현상에서 기인한다.
- (5) 고무스프링의 변형률을 5% 이내로 사용할 경우 계산된 압축강성도의 85%를 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 고무스프링의 변형률을 15% 이상으로 사용하는 경우에는 15%의 변형률에서 압축강성도는 계산된 압축강성도의 65-70%에 해당하므로 고무스프링의 압축강성도는 보수적으로 계산치의 65%를 설계값으로 하는 것이 적절하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2016년 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며, 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20151120100030).

참고문헌(References)

- [1] Oh, S.W., Choi, E., and Jung, H.Y. (2005) The Estimated Stiffness of Rubber Pads for Railway Bridges, *Journal of Korea Society of Steel Construction*, Vol.17,3):307-316.
- [2] Qi, H.J. and Boyce, M.C. (2005) Stress-Strain Behavior of Thermoplastic Polyurethane, *Mechanics of Materials* 37,

- pp.817-839.
- [3] Choi, E., Lee, H.U., Kim, S.I., and Kim, L.H. (2006) Variation of Natural Frequency and Dynamic Behavior of Railway Open-Steel-Plate-Girder Bridge with Installing Disk Bearings, *Journal of Korea Society of Steel Construction*, Vol.18, No.4, pp.437-446.
- [4] Oh, S.W., Choi, E., Jung, H.Y., and Kim, H.S. (2006) Static and Dynamic Behavior of Disk Bearings under Railway Vehicle loading, *Journal of Korea Society of Steel Construction*, Vol.18, No.4, pp.469-480.
- [5] Choi, E., Kim, L.H., and Kim, H.S. (2005) Variation of Rail's Axial Compressive Force on Railway Bridges Due to Thermal and Seismic Loads with using EQS bearings, *Journal of Korea Society of Railway*, Vol.8, No.3, pp.1-10.
- [6] Choi, E., Choi, G., Kim, H.T., and Youn, H. (2015). Smart Damper Using the Combination of Magnetic Friction and Pre-compressed Rubber Springs, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.351, pp.68-89.
- [7] Jeong, K., Choi, E., Back, S.Y., and Kang, J.W. (2016) Smart Damper Using Sliding Friction of Aramid Brake Lining and Self-centering of Rubber Springs, *International Journal of Steel Structures*, Vol.16, No.4, pp.1239-1250.
- [8] Choi, E., Youn, H., Park, K., and Jeon, J.S. (2017) Vibration Tests of Precompressed Rubber Springs and a Flag-shaped Smart Damper, *Engineering Structures*, Vol.132, pp.372-382.
- [9] Dolce, M., Cardone, D., and Marnetto, R. (2000) Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, No.7, pp.945-968.
- [10] Koblar, D., Skofic, J., and Boltezar, M. (2014) Evaluation of the Young's Modulus of Rubber-Like Materials Bonded to Rigid Surfaces with Respect to Poisson's Ratio, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.60, No.7-8, pp.508-511.
- [11] Sim, H. and Kim, K.J. (1990) A Method to Determine the Complex Modulus and Poisson's Ratio of Viscoelastic Materials for FEM Applications, *Journal of Sounds and Vibrations*, Vol.141, No.1, pp.71-82.

요 약 : 이 연구에서는 고무스프링의 동적 압축실험을 수행하여 고무스프링의 거동 및 특성을 규명하고 압축 강성도를 계산하여 실제 설계값에 대해 알아보고자 하였다. 고무스프링의 동적 압축실험을 수행하기 위하여, L80-D55, L90-D58, L100-D60의 고무스프링의 형상계수를 구하여 총 9개의 고무스프링을 주문 제작 하여 실험에 사용하였다. 실험은 고무스프링의 길이에 따라 기압축을 제어하여 수행하였으며, 기압축은 변형률의 5%, 10%, 15%, 20%, 25% 순서로 증가시켰다. 실험결과를 통해 힘-변형률 곡선을 얻을 수 있었고, 변형률의 증가함에 따라 강도감소 현상과 강도증가 현상이 발생함을 확인하였다. 또한 고무스프링의 크기와 지름에 따라 강성저하 및 강성증가 현상이 확연하게 나타남을 확인하였고, 힘-변형률 곡선에서 할선기울기를 이용하여 유효 압축강성도를 추정하였다. 유효압축강성도를 이용하여 실제 설계에 사용할 수 있는 설계값을 제시하였다.

핵심용어 : 유효 압축 강성도, 기압축 고무스프링, 강도 증감, 설계 압축 강성도
