

소형로봇의 도약용 원추형 스프링의 해석 Analysis of conical spring for jumping of a small robot

*김병상¹, #송재복²

*B. S. Kim¹, #J. B. Song(jbsong@korea.ac.kr)²

¹ 고려대학교 기계공학과, ² 고려대학교 기계공학과

Key words : Jumping robot, Conical spring, Nonlinear spring, Hardening spring, Stress analysis, Load-deformation curve

1. 서론

소형로봇은 이동 공간에 제약을 받지 않고, 휴대하기 용이하도록 크기가 작고, 무게가 가벼워야 한다. 동시에 다양한 환경에서 이동할 수 있도록 높은 이동성(mobility)을 가지고 있어야 한다. 하지만 로봇의 크기가 작으면 극복할 수 있는 장애물의 높이 또한 낮아지므로, 단순히 바퀴를 이용하여 험지를 주행하는 데 한계가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 트랙바퀴 또는 변형바퀴를 이용하여 이동성을 향상시키거나, 상황에 따라 도약을 하여 장애물을 극복하는 방법이 있다. 특히, 도약을 이용한 이동은 평지를 주행할 때 바퀴에 비하여 비효율적이지만, 장애물을 극복하는 데 있어서는 매우 효과적이다.

도약 기능은 스프링의 탄성에너지, 공기의 압력, 화학 연료의 폭발력 등을 이용하여 구현할 수 있다. 스프링의 탄성에너지는 다른 에너지에 비하여 사용하기 용이하며, 로봇을 소형으로 구현할 수 있는 장점을 가진다. 스프링을 이용한 도약 로봇 중에는 얇은 판 스프링을 이용하거나[1], 원추형 스프링을 이용한 로봇이 있다[2]. 판 스프링(leaf spring)은 지면에 상관없이 안정적인 도약 기능을 구현할 수 있도록 해 주며, 원추형 스프링(conical spring)은 도약 높이와 각도 조절을 용이하게 해준다. 이와 같이 소형로봇의 도약성능은 스프링의 특성과 밀접한 관계가 있으므로, 로봇의 도약 특성에 맞는 스프링을 설계하는 것은 매우 중요하다. 동시에 사용하고 있는 스프링의 특성을 잘 파악하면, 다양한 도약 기능을 구현할 수 있다.

본 연구에서는 소형 도약로봇에 적합한 원추형 스프링에 대하여 살펴보았다. 원추형 스프링은 대표적인 비선형 스프링 중 하나로서, 압축 길이에 따라서 스프링의 강성이 달라지는 특성을 가지고 있다. 그리고 압축될 때, 강선과 강선이 포개어지므로 주어진 공간에서 스프링의 압축길이를 최대화할 수 있다.

본 논문에서는 원추형 스프링에 하중이 가해질 경우, 스프링에 발생하는 압축길이와 응력에 대하여 해석하였으며, 실제로 원추형 스프링을 제작하여 힘-변위 관계와 변위에 따른 스프링의 강성변화 관계식을 근사적으로 구하였다.

2. 도약 메커니즘과 스프링

2.1 도약 모델링

스프링의 탄성에너지와 도약높이 사이의 관계를 얻기 위하여 소형로봇을 Fig. 1과 같이 본체와 발, 그리고 스프링으로 모델링 할 수 있다. 도약을 위하여 스프링을 압축하면(a→b) 스프링에 탄성에너지가 저장된다. 그리고 압축이 풀리면 탄성에너지는 운동에너지로 전환되어 본체를 지면에 수직인 방향으로 이동시킨다. 이 때 본체는 초기 위치를 v_1 의 속도로 지나게 된다(b→c). 본체는 관성에 의하여 발을 들어올리게 되며(c→d), 발이 떨어지는 순간 전체 시스템의 이동속도는 v_2 가 된다. v_2 가 0이 될 때, 로봇의 도약 높이는 최대가 된다. 로봇의 도약 높이는 에너지 보존법칙과 운동량 보존법칙을 이용하여 얻을 수 있으며, 탄성에너지 E_{spring} 과의 관계는 다음과 같다.

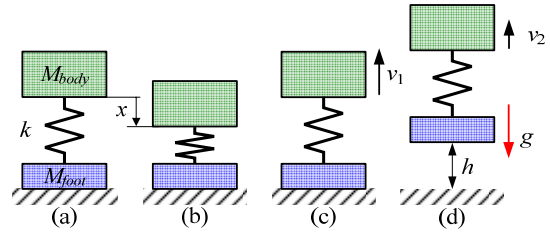


Fig. 1 Jumping model

$$= \frac{1}{g} \frac{M_b d}{(M_b d + M_f)^2} E_{spring} \quad (1)$$

여기서, $M_b d$ 는 본체의 질량, M_f 는 발의 질량, 그리고 g 는 중력가속도이다.

2.2 원추형 스프링

원추형 스프링은 압축스프링 중 하나로서, Fig. 2(a)와 같이 양단의 스프링 직경이 다르다. 따라서 스프링을 압축할 경우, 강선과 강선이 포개질 수 있다. 이와 같은 특성으로 인하여 소형로봇과 같이 축 방향의 공간이 제한적이며, 동시에 큰 변위가 필요한 경우 유용하게 사용할 수 있다[3]. (b)는 원추형 스프링의 힘-변위 관계를 보여준다. 원추형 스프링은 동작 영역이 선형구간, 비선형구간, 고체구간으로 나누어진다. 스프링에 저장된 에너지는 그래프의 면적을 구하여 얻을 수 있으며, 스프링 상수는 그래프의 기울기로부터 얻을 수 있다.

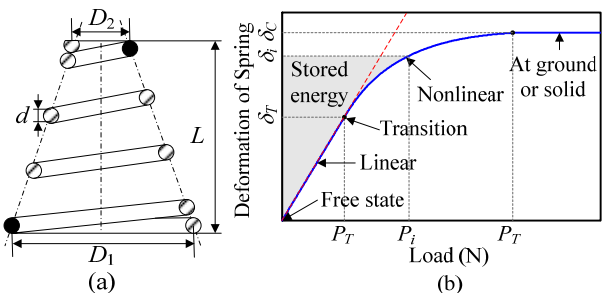


Fig. 2 Conical spring; (a) parameters of the conical spring, (b) load-deformation curve

원추형 스프링은 변위가 증가할 경우 강성이 증가하는 하드닝 스프링(hardening spring)이다. 원추형 스프링은 스프링이 압축되면서 스프링의 평균직경과 유효감수(number of active coil)가 감소한다[4]. 따라서 주어진 하중에 대한 평균 직경과 유효감수를 구한 다음, 다음 식에 대입하여 스프링 상수 k 를 근사적으로 얻을 수 있다[5].

$$k = \frac{d^4 G}{8^3 N} \quad (2)$$

여기서, d 는 강선의 직경, G 는 전단계수(shear modulus)이다. 또한, 하중이 가해질 경우 원추형 스프링에 발생하는 응력은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{8}{\pi d^2} \quad (3)$$

여기서, τ 는 스프링 지수비(spring index)이며, 스프링의 직경을 코일의 직경으로 나눈 값이다. τ 는 피로하중에 대한 스프링 보정상수인 Wahl factor이다.

3. 도약 로봇에 적합한 원추형 스프링 설계

도약 로봇에 사용하는 스프링은 로봇의 크기와 무게, 그리고 도약 높이에 제약을 받는다. 로봇의 크기는 가로x세로x높이가 30x30x30(cm³)보다 작으며, 무게는 최대 3kg, 그리고 로봇은 지면으로부터 10cm 이상 도약한다고 가정한다. 이를 바탕으로 스프링 설계에 필요한 최소 요구사항을 표 1과 같이 얻을 수 있으며, Fig. 3은 피아노선을 기준으로 설계한 스프링의 사양을 보여준다. 피아노선의 전단계수는 78x10³ N/mm²이다.

Table 1. Desired specifications of spring for jumping robot.

Desired parameter	Desired specification
l	< 70mm
F_{max}	> 300N
Solid height	< 35mm
Full length	< 150mm
Elastic energy	> 5J



l	70mm
l_2	20mm
d	3mm
l_1	130mm
τ	50N
F_{Max}	300N
N	8
	20mm
	150mm

Fig. 3 Manufactured conical spring and its specification.

스프링의 특성을 살펴보기 위하여 스프링에 하중이 가해질 때 발생하는 변형과 응력에 대하여 해석하였다. 스프링 해석을 위하여 스프링의 피치(pitch) 간격은 일정하다고 가정하였다. Fig. 4(a)는 설계한 원추형 스프링의 힘-변위 특성을 보여준다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 50N까지는 선형적인 특성을 유지하며 50N 이상의 힘에 대해서는 비선형적인 특성을 보여준다. 그리고 300N의 힘을 가하면 더 이상 변위가 발생하지 않는 완전압축 상태가 된다. (b)는 하중에 대한 응력변화를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 주어진 하중에서 스프링에 파단이 일어나는지 여부를 검증할 수 있다. 스프링에 최대 하중인 300N이 가해질 경우, 스프링에 발생하는 응력은 1130MPa이다. 이 값은 피아노선이 전단력에 대하여 허용하는 최소 인장강도인 1250MPa보다 작으므로, 파단이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다.

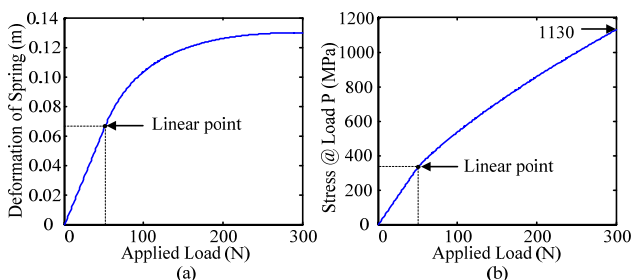


Fig. 4 Spring analysis; (a) load-deformation curve and (b) load-stress curve.

4. 원추형 스프링 특성 실험

제작한 스프링의 특성을 확인하기 위하여, 스프링에 일정한 힘을 가한 상태에서 발생한 변위를 측정하였다. Fig. 5(a)는 제작한 스프링의 힘-변위 관계를 보여주는데, 앞 절에서 해석한 결과와 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 차이가 발생하는 것은 해석에 사용한 스프링과 실제 제작한 스프링의 피치간격이 다르기 때문이다. 두 스프링의 평균 피치간격은 동일하다. 하지만 해석에 사용한 스프링은 피치간격이 일정하고, 실제 제작한 스프링의 피치간격은 일정하게 감소한다. (b)는 힘-변위 그래프의 기울기로부터 얻은 스프링상수를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 것과 같이 원추형 스프링상수는 변형이 증가할수록 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그래프를 이용하여 변위와 스프링상수 사이의 관계식을 근사적으로 얻을 수 있었으며, 이는 원추형 스프링을 도약로봇에 적용하였을 때 도약높이를 결정하기 위하여 사용할 수 있다.

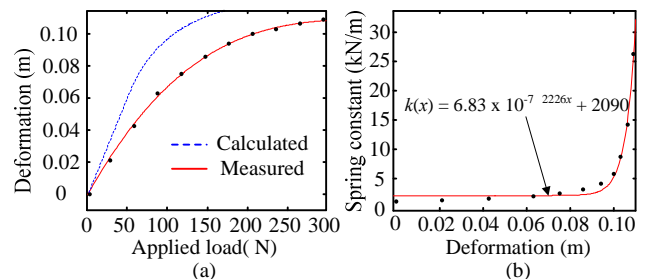


Fig. 5 Experimental result; (a) load-deformation curve, (b) deformation-spring constant curve, $k(x) = 6.83 \times 10^{-7} \cdot 2226x + 2090$

결론

본 연구에서는 소형로봇의 도약 기능을 구현하기 위하여 소형로봇에 적합한 원추형 스프링을 설계하였다. 그리고 해석을 통하여 스프링 특성을 살펴보았으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 스프링 해석을 통하여 도약 기능을 안정적으로 구현할 수 있는 스프링을 설계할 수 있었다.
2. 스프링에 발생하는 변위와 스프링 정수 사이의 관계로부터 근사식을 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 도약 높이를 조절할 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 사회안전로봇 개발사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. D. F. Hougen, S. Benjaafar, J. C. Bonney, et al., "A Miniature Robotic System for Reconnaissance and Surveillance," International Conference on Robotics and Automation, 501-507, 2000.
2. 김병상, 이장운, 김현중, Vu Quy Hung, 송재복, "소형로봇을 위한 원추형 스프링 기반의 도약 메커니즘 개발," 대한기계학회 춘계학술대회, 2877-2882, 2007.
3. N. P. Chironis, "Spring Design and Application," McGraw-Hill, 1961.
4. J. A. Roberts, "Spring Design and Calculation," Technical Research Laboratory, 7ed, 1954.
5. R. C. Juvinall, K. M. Marshek, "Fundamentals of Machine Component Design," John Wiley & Sons, Inc., 3ed, 2000.