

Multi-Rate 스프링을 이용한 제동장치의 최적설계

Design Optimization of Brake System Using Multi-Rate Spring

정의만* · 원준호** · 최주호*** · 심인섭****

Jung, Eui-Man · Won, Junho · Choi, Joo-Ho · Shim, In-Seob

요 약

본 연구에서는 탑승객의 안전과 국내 환경에 적합한 제동거리 확보를 위해 새로운 개념의 스프링을 사용한 제동장치를 설계하고자 한다. 새로운 제동장치에 사용되는 스프링은 변위에 따라 감쇠 성능 특성을 변화시키는 Multi-Rate 변위 감응형 스프링을 최적화하여 적용하였다. 이를 위한 최적화 기법으로는 비선형 최적화 기법인 순차적 2차계획법(Sequential Quadratic Programming, SQP)을 사용하였으며 먼저 Ziprider의 운동을 제동거리와 제동시 발생하는 회전각의 관계로 표현 가능한 수치모델을 개발하였다. 또한 개발된 수치모델은 Matlab을 이용하여 코드화하고 그 결과를 RecurDyn과 비교·분석하였다.

keywords : Zipride, Multi-Rate 스프링, Sequential Quadratic Programming(SQP), 최적화

1. 서 론

Ziprider(zip line cable ride)는 유럽 및 미주에서 특허를 출원한 신개념의 4계절 Ride System으로서 계곡과 계곡 사이 등 비교적 짧은 거리를 케이블을 통해 자유 낙하하여 이동하는 운송수단이다. 이러한 시스템은 우리나라와 같이 산악지형이 많아 항공운송이 부적절한 경우에 유효하게 사용될 수 있으며, 특히 최근에는 이러한 시스템이 친환경 레포츠로서 많은 인기를 누리고 있다.

레포츠로서의 Ziprider는 통상 절벽 꼭대기나 산 정상 등에 위치한 출발지에서 아래의 착지점까지 시속 90km 이상으로 질주하여 약 1~2km의 거리를 비행하므로 높은 속도감과 스릴을 느낄 수 있다. 그러나 빠른 속도로 운행되는 만큼 도착지점의 제동장치 안전성이 중요하게 고려되어야 한다. 특히 우리나라의 경우 지형적인 특성상 외국과 비교해 비교적 짧은 제동거리에서 탑승객의 안전을 보장해야 하기 때문에 제동장치에 대한 새로운 설계가 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 제동장치에 사용되는 스프링의 변위에 따라 감쇠 성능 특성을 변화시키는 Multi-Rate 변위 감응형 스프링 제동장치를 설계하고자 한다. 이러한 Multi-Rate 변위 감응형 장치는 부가적인 복잡한 장치 없이 간단한 몇 개의 추가 부품의 조립으로 짧은 제동거리와 충격흡수를 도모할 수 있다. 이러한 스프링 설계를 위해 다양한 Multi-Rate 스프링 조합을 이용하여 이들 간의 관계에 대한 파라미터 스테디를 Matlab 프로그램을 사용하여 수행하였으며, 그 결과를 상용프로그램인 RecurDyn과 비교·분석하였다. 또한 사용된 최적설계 기법은 구배기반 최적설계 기법 중 Sequential Quadratic Programming을 사용하였다.

2. 수치모델 개발 및 Multi-Rate 스프링

2.1. Ziprider 제동시스템

그림 1은 Ziprider 제동시스템의 수치모델이다. 작동 원리는 Ziprider Trolley에 탑승객이 매달린 형태로 케

* 학생회원 · 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과 emjung83@gmail.com

** 학생회원 · 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과 openworldsm@gmail.com

*** 정회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 jhchoi@kau.ac.kr

**** (주) 성원 삭도 대표 sungwontramway@hanmail.com

이블을 따라 자유낙하 후 제동장치에 의해 감속·정지하는 형태이다. 이 때 관성의 법칙에 의해 탑승객(질량 m)은 θ 의 각도로 움직이게 된다. 여기서 탑승객의 승차감을 θ 로 가정할 수 있으며, 정의된 제동구간 내에서 발생하는 θ 의 최소화가 이 연구의 목표이다.

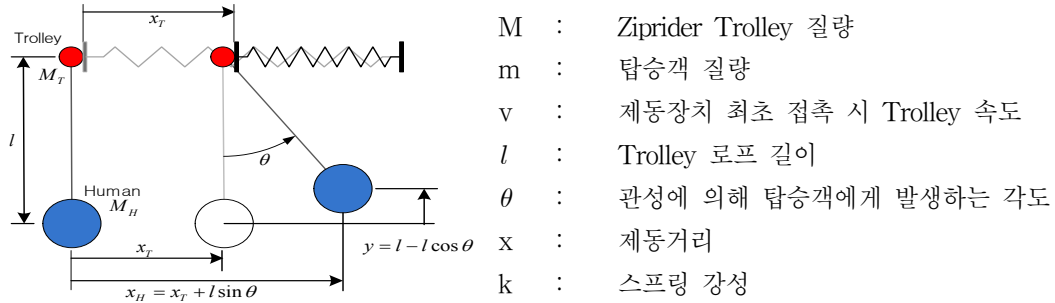


그림 1 Ziprider 제동시스템의 수치모델

위 수치모델은 라그랑주 방정식을 이용하여 x 와 θ 에 대한 상미분방정식 식(1),(2)로 표현 가능하다.

$$\ddot{x} = \frac{-kx + m \sin \theta (g \cos \theta + l \dot{\theta}^2)}{(M+m) - m \cos^2 \theta} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{l} (-g \sin \theta - \ddot{x} \cos \theta) \quad (2)$$

2.2. 제동용 Multi-Rate 스프링

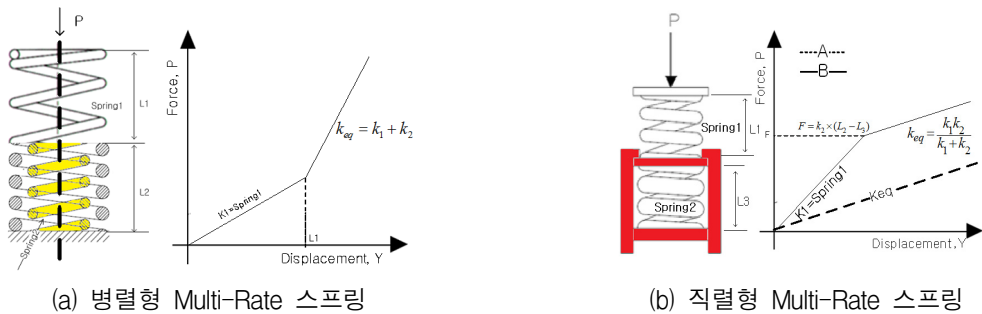


그림 2 Multi-Rate 스프링의 기본 형상 및 힘과 변위의 관계 그래프

2.2.1 병렬형 Multi-Rate 스프링

그림 2(a)와 같이 스프링1을 스프링2의 내부에(또는 외부에) 배치함으로써 하중에 의한 변위가 L_1 이하일 경우 단일 강성만 적용되고, L_1 이상의 변위에 대해서는 두 스프링의 강성이 모두 적용된다. 그 결과는 Fig. 4의 우측 그래프와 유사한 개념을 가지게 된다.

2.2.1 직렬형 Multi-Rate 스프링

일반적인 스프링의 직렬연결은 그림 2(b)의 A와 같은 하중-변위 거동을 보인다. 그러나 스프링1과 예하중 F가 적용된 스프링의 직렬연결은 그림 2(b)의 B와 같은 거동을 보이게 된다.

3. 스프링 분석 및 최적화

스프링 경향 분석은 병렬·직렬형 Multi-Rate 스프링에 따라 각 12가지 케이스씩 총 24가지 케이스를 비교·분석하

였다.

표 1 동일한 최종 등가 스프링 강성에서의 경향 분석 결과

스프링 종류	스프링 강성(N/m)	최종 등가스프링강성(N/m)	제동거리(m)	제동시 회전각(θ)
단일	54.65	54.65	12.24	40.84
병렬형 Multi-Rate	10, 20, 25 (스프링 간격, 각 1m)	55	18.32	28.73
직렬형 Multi-Rate	100, 200, 300 (예하중 200N, 400N)	54.65	10.36	45.72

표 1은 최종 등가 스프링 강성이 동일한 상태에서의 스프링 종류별 제동거리와 회전각의 최대값을 나타낸 것이다. 표를 통해 알 수 있듯이 직렬형 Multi-Rate 스프링의 경우 단일 스프링에 비해 제동거리는 15.36%의 감소하였고 회전각은 11.95% 증가하였다. 반면 병렬형 Multi-Rate 스프링의 경우 단일 스프링에 비해 제동거리는 49.67% 증가, 회전각은 29.65% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 병렬형 Multi-Rate 스프링과 직렬형 Multi-Rate 스프링의 비교를 위해 제동거리가 같다는 조건을 부여하면 표 2와 같은 결과를 얻을 수 있으며 동일한 제동거리에서 직렬형 Multi-Rate 스프링이 병렬형 Multi-Rate 스프링보다 회전각이 14.17% 감소하는 효과를 얻을 수 있었다.

표 2 동일한 제동거리에서의 Multi-Rate 스프링별 결과

스프링 종류	스프링 강성(N/m)	최종 등가스프링강성(N/m)	제동거리(m)	제동시 회전각(θ)
병렬형 Multi-Rate	10, 40, 80 (스프링 간격, 각 1m)	130	10.33	53.27
직렬형 Multi-Rate	100, 200, 300 (예하중 200N, 400N)	54.65	10.36	45.72

스프링 경향 분석을 통해 병렬형 Multi-Rate 스프링보다 예하중을 적용한 직렬형 Multi-Rate 스프링이 더 짧은 변위와 θ 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 본 연구 목적에 적합한 직렬형 Multi-Rate 스프링에 대하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계는 탑승자와 Trolley가 이루는 각도가 θ (제동시 탑승객에게 발생하는 회전각)가 60도를 넘지 않는 범위에서 제동거리(압축거리)가 최소가 되는 Multi-rate 직렬연결 스프링의 설계안을 찾는 것이다. 최적화에 이용한 툴은 Visual-DOC이며, 사용한 최적설계 기법은 구배기반 최적설계 기법 중 Sequential Quadratic Programming을 사용하였다.

최적화를 위해서 TBS 스프링의 구간을 5개로 구분하고, 각 구간에 필요한 스프링의 길이와 등가강성을 산정하고, 이를 바탕으로 실제 최적화를 실시한다.

Find
 $k_{1 \sim 5}, Preload_{2 \sim 5}$
 to minimize
 Compression length x
 subject to
 $\theta \leq 60^\circ$

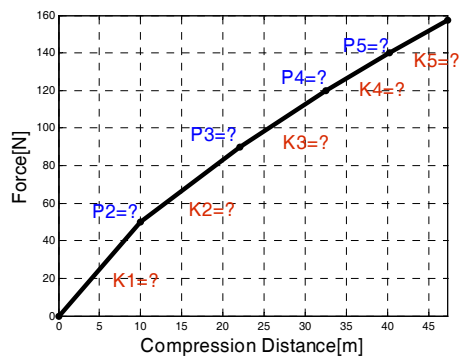
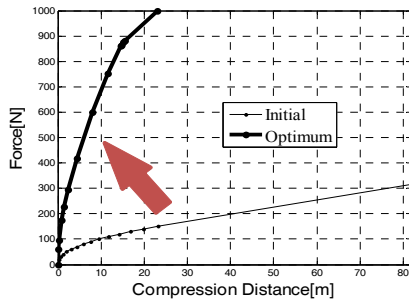
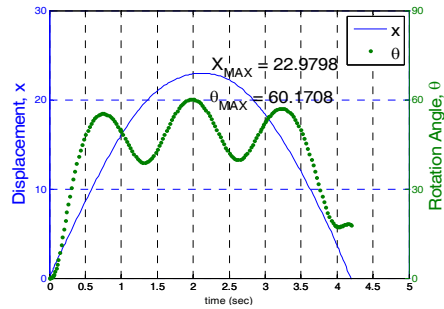


그림 3 최적화를 위한 TBS 구간 설정

그림 4는 Trolley 및 탑승자의 질량이 각각 10, 75kg일 때 도착지점에서 75km/h의 속도로 TBS 스프링에 충돌 시 제동거리(압축거리)를 최소화 하는 최적설계 결과이며, 이 경우 탑승자의 회전각은 60도이며, 압축거리는 24.707m이다. 최적화 결과 계산된 TBS 스프링의 구간별 필요한 강성과 스프링의 예압적용을 위한 압축 길이, 그리고 실제 제동거리(압축길이)는 표 3과 같다.



(a) 하중-변위 선도



(b) 제동거리 & 회전각 이력

그림 4 직렬형 Multi-Rate 스프링의 최적화 결과

표 3 직렬형 Multi-Rate 스프링의 구간별 결과값

	구간1	구간2	구간3	구간4	구간5
스프링 강성(N/m)	116.3409	151.634	300.7541	420.956	504.076
예압적용용 압축길이[m]	0	0.3913	0.3500	0.5941	1.1325
제동 시 압축길이[m]	10.2114	7.4433	3.6	2.228	1.2243

4. 결론

본 연구는 Ziprider의 제동장치 개발을 위해 일반적인 단일 stiffness를 가지는 스프링과 다양한 형태의 Multi-Rate 스프링의 성능 차이를 분석하고 이를 바탕으로 효율적인 제동 성능을 보이는 스프링을 예측하고 최적 설계한 결과는 다음과 같다.

- 1) 병렬형 Multi-Rate 스프링의 경우 짧은 제동거리에서 탑승자의 회전각 θ 를 증가시키는 경향을 보이는 반면, 예하중을 적용한 직렬형 Multi-Rate 스프링은 θ 를 효율적으로 감소시킬 수 있었다.
- 2) Multi-Rate 스프링을 사용하여 기존의 단일 스프링으로 구성된 제동장치의 단점을 극복 할 수 있다.
- 3) 최적설계를 통해 θ 를 최소화 하는 최적의 스프링 강성과 예하중 조합 조건을 찾을 수 있었으며 단일 스프링으로 구성된 제동장치에 비해 우수한 성능을 보인다는 것에 대한 타당성을 제시하였다.
- 4) 자동화를 활용한 최적화 설계 프로그램을 자체 개발하여 Ziprider뿐만 아니라 폭넓은 활용이 가능한 독자적인 설계 개발 기술을 확보하였다.

감사의 글

본 연구는 2010년 고양시 산·학·관 공동기술개발 지원 사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박재우, 신상윤, 주동우, 김영호 (1997) 변위 감응형 충격 흡수기에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제14권, 11호, pp.11-16,
- Merian, J. L. (1981) Dynamics, Wiley, SI Verion.
- Inman, Daniel J. (2008) Engineering Vibrations, Pearson Education, 3rd ed.
- Erwin, K. (1999) Advanced Engeering Mathematics, Wiley, 7th ed.
- Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P. Design and Analysis of Computer Experiments, *Statistical Science*, Vol.4, No.4, pp.409-435.
- McKay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, *Technometrics*, Vol.21, No.2
- Arora, J. S. (2004) Optimization of Structural and mechanical System, *Work Scientific*.
- Arora, J. S. (2004) Introduction to Optimum Design, Elsevier Academic Press, 2nd ed.
- Budynas, Richard G., Keith Nisbett, J. (2008) Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw Hill, 8th ed.