

세브론 스프링의 강성 변화에 따른 철도차량의 동특성 예측 연구

Prediction of Dynamic Characteristics of Railway Vehicle by Stiffness Variation of Chevron Rubber Spring

유 원 희[†] · 박 준 혁* · 박 남 철** · 구 정 서***

Wonhee You, Joonhyuk Park, Namcheol Park and Jeongseo Koo

(Received October 31, 2016 ; Revised February 7, 2017 ; Accepted February 7, 2017)

Key Words : Chevron Rubber Spring(세브론 고무스프링), Stiffness Variation(강성변화), Ride Index(승차감지수), Derailment Coefficient(탈선계수)

ABSTRACT

The chevron rubber spring is used for subway vehicle as a primary suspension. Generally, the primary suspension has an influence to the running performance and not so much effect on the ride comfort in railway vehicle. But the stiffness of chevron spring is harder and harder as time goes on because of rubber characteristics. Therefore the dynamic characteristics such as ride comfort and derailment coefficient should be reviewed according to the stiffness variation of chevron rubber spring. In this paper the effect of chevron rubber spring on dynamic characteristics was studied by considering multi-body dynamics of railway vehicle on one straight line and seven curved lines.

1. 서 론

일반적으로 철도차량의 현가장치에는 1차 현가장치와 2차 현가장치가 있다. 1차 현가장치에는 주로 코일스프링이나 세브론 고무스프링 또는 원추형 고무스프링 등이 사용되고 있으며, 주행안정성을 담당하고 있다. 2차 현가장치에는 주로 공기스프링이 사용되며 간혹 코일스프링이 사용되기도 하는데, 주로승차감을 담당하고 있다. 이 연구의 대상이 되는 세브론 고무스프링으로 이루어진 1차 현가장치의 특성은 시간이 지남에 따라 고무가 경화됨으로 인하여 강성의 증가효과를 가져온다는

것이다⁽¹⁾. 이에 따라 도시철도차량에 있어서 세브론 고무스프링의 특성변화가 진동승차감에 영향을 주고 있으며⁽²⁾, 이로부터 세브론 고무스프링의 강성변화가 주행안정성에 영향을 주는 것은 물론 승차감에도 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

이 연구에서는 1차 현가장치가 세브론 고무스프링으로 이루어진 도시철도차량을 대상으로 고무의 강성변화로 인하여 철도차량의 승차감 및 탈선계수 등 동특성이 어떻게 변하는지 다물체 동역학 프로그램인 SIMPACK을 이용하여 파악하고자 하였다. 이 때 고려된 궤도조건으로는 실제 측정된 횡방향 궤도불규칙 데이터를 사용하였으며, 직선선로 1개 구간 및 곡선선로 7개 구간에 대해 연구를 수행하였다.

[†] Corresponding Author; Member, Member, Korea Railroad Research Institute
E-mail : whyou@krrri.re.kr
* Korea Railroad Research Institute
** Seoul Metropolitan Rapid Transit
*** Seoul National University of Science and Technology

A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

2. 해석을 위한 모델링

2.1 세브론 고무스프링⁽³⁾

이 연구에서 사용된 도시철도차량의 1차 현가장치에 쓰이는 세브론 고무스프링의 모습은 Fig. 1과 같다. 이 세브론 고무스프링은 온도 25 °C에서 10년간 사용하면 약 15%의 두께 변화가 예상되고 있으며⁽¹⁾, 실제로 20년간 사용한 경우 대체로 30%~39% 까지 강성의 변화가 나타나고 있다⁽²⁾. 이 경우 도시철도차량의 승차감은 수직 승차감레벨이 2.5 dB 증가하고, 횡방향 승차감레벨은 2.0 dB 증가함을 현차시험을 통해 확인한 바 있다. 그러나 이 데이터는 유지보수를 위하여 철도차량의 중정비기지 입고 전후의 승차감을 측정한 것으로서 각종 현가장치용 부품의 청소에 의한 효과 등이 포함되어 있다. 즉, 승차감의 변화가 세브론 스프링만의 효과를 보여주는 것이 아니다. 따라서 이 연구에서는 세브론 고무스프링만의 효과를 보기 위하여 시뮬레이션을 수행하고자 하였으며, 세브론 고무스프링이 35% 경화된 경우를 고려하였다.

일반적으로 세브론 고무스프링의 특성은 일반적으로 약한 히스테리 특성을 보여준다. 이에 따라 세브론 고무스프링의 제작사에서는 히스테리 특성을 무시하고 단순히 선형화된 스프링의 강성 데이터만을 제공한다. 따라서 이 연구에서는 부록에 기술되어 있는 데이터를 그대로 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 아울러, 세브론 고무스프링의 동력학적 특성을 정확히 표현하려면 세브론 고무스프링을 구성하는 스틸플레이트와 고무판의 결합각도 등을 고려

하여 표현함으로써 세브론 고무스프링의 동특성이 모든 방향으로 잘 나타날 수 있도록 모델링해야 한다. 그러나 이 연구에서는 시뮬레이션을 용이하게 수행하고 고무의 경화에 따른 효과를 중점적으로 보기 위하여 세브론 고무스프링의 강성이 전후, 좌우, 상하 3-방향으로 독립적으로 나타나는 것으로 가정하였다.

2.2 철도차량의 수학적 모델링

앞의 연구에서는 횡방향으로 총 17자유도만을 고려하여 수학적 모델링을 수행하고 세브론 고무스프링이 35% 경화되었을 경우 직선구간에서의 횡방향 승차감의 변화를 살펴본 결과 약 0.7 dB의 승차감 변화가 있음을 확인하였다⁽³⁾. 그러나 이 연구는 수직방향에 대한 고려가 되지 않았으며, 철도차량의 모델도 횡방향에 대해서만 수행하였기 때문에 정확성에 한계가 있다. 따라서 이 연구에서는 다물체동역학 프로그램인 SIMPACK을 사용하여 해석을 수행하고자 하였다. SIMPACK에서는 Table 1에서 보는 바와 같이 철도차량을 총 42자유도의 다물체로 모델링 한다⁽⁴⁾. 이에 대한 차량모델은 Fig. 2와 같으며, 상세한 그림은 부록에 나타내었다.

Table 1 DOF of vehicle model

Body	DoF	Number	Total DoF
Wheelset	6	4	24
Bogie	6	2	12
Carbody	6	1	6

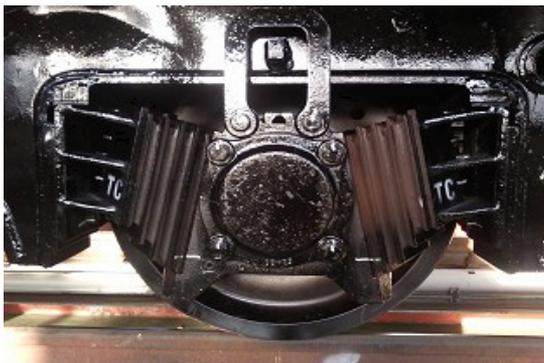


Fig. 1 Chevron rubber spring

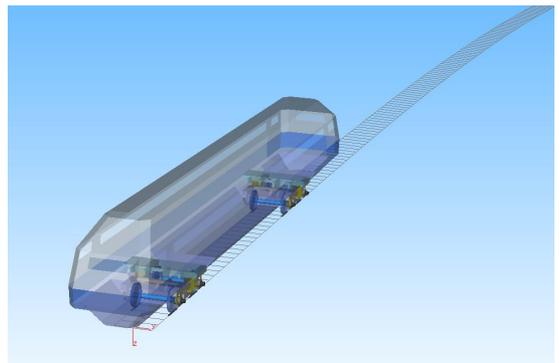


Fig. 2 SIMPACK vehicle model

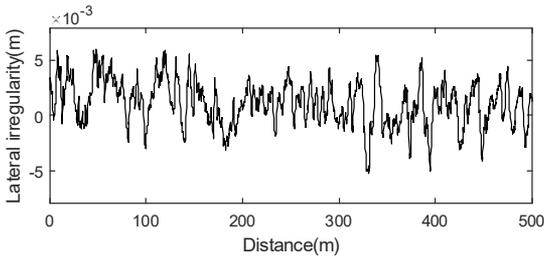


Fig. 3 Lateral track irregularity

Table 2 Characteristics of tracks for simulation

Track	Radius (m)	Curve length (m)	Cant (m)	Vehicle speed (km/h)
1	250	184	0.138	55
2	301	240	0.153	65
3	401	199	0.145	70
4	599	106	0.086	80
5	847	230	0.048	80
6	1,002	347	0.036	80
7	1,102	200	0.030	80
8	Straight	700	-	80

이 연구에서는 시뮬레이션을 위하여 철도차량의 현가장치 및 질량, 2차모멘트 등의 동역학적인 파라미터는 서울도시철도공사에서 운행하는 전동차의 특성 값을 사용하였다. 또한 세브론 고무스프링의 경화에 따른 1차 현가장치의 강성변화는 x-축, y-축 및 z-축 모두 동일한 비율로 변화됨을 고려하였다.

2.3 궤도의 모델링

철도차량의 동력학적인 특성을 해석하기 위해서는 차륜과 레일의 접촉특성 및 궤도의 불규칙에 대한 정보, 그리고 곡선선로일 경우 완화곡선부 및 곡선부의 기하학적 특성의 고려가 필수적이다. 차륜과 레일의 구름접촉특성은 하중과 응력 및 접촉면에서의 환경조건에 따라 많은 영향을 받는다. 이 논문에서는 차량의 주행성능 해석에 일반적으로 사용되고 있는 Hertz의 접촉이론과 Kalker의 차륜/레일의 접촉력 계산법을 사용하였다⁽⁵⁾.

한편, 궤도의 불규칙은 시뮬레이션을 수행할 때 가장 많이 사용하는 미국연방철도청에서 추천하는

수식을⁽⁶⁾ 사용하지 않고 실제적인 접근을 위하여 실측된 데이터를 사용하였다. Fig. 3은 이 연구에 사용된 횡방향 궤도불규칙 실측데이터 중 한 구역에 대한 것을 보여주고 있다.

이 연구에서는 이러한 횡방향의 궤도불규칙을 해석하고자 하는 구역별로 별도로 측정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석을 위해 Table 3과 같은 선로구간을 선정하였다. 이 선로구간 역시 실제 선로에서 측정된 기하학적인 특성을 반영하고 있다.

3. 시뮬레이션 결과

앞에서 언급한 바와 같이 세브론 고무스프링의 변화는 35% 경화된 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 경화가 되지 않은 정상적인 경우와 여러 측면에서 비교하였다. 비교는 차체에서의 횡방향 승차감레벨, 수직방향 승차감레벨 및 탈선계수 등이다. 해석시간은 세브론 고무스프링이 정상적인 경우와 35% 경화된 경우를 동일하게 하여 같은 조건에서 비교함으로써 정확한 결과를 얻고자 하였다.

3.1 탈선계수의 비교

철도차량의 동특성을 나타내는 항목에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서도 동적 안전성에 영향을 주는 요소는 탈선계수이다. 탈선계수는 주로 차륜과 레일의 접촉메카니즘에 따라 크게 영향을 받기 때문에 1차 현가장치의 강성변화에 따른 탈선계수의 변화를 파악하는 것이 매우 중요하다. 이 연구에서는 직선 평탄선로 및 여러 곡선선로에서 세브론 고무스프링의 강성변화에 따른 탈선계수의 변화를 파악해보았다. 일반적으로 철도차량이 곡선부를 주행할 때 전부대차의 제 1위 윤축의 곡선부 외측 차륜의 탈선계수가 가장 크다. 이는 철도차량의 현가장치들의 특성으로 인하여 철도차량이 직진성을 가지고 주행하려 하므로 외측 차륜의 플랜지가 외측 레일의 내측 측면에 가깝게 접근하기 때문이다. Fig. 4는 곡선반경이 가장 작은 track 1에서의 곡선부 외측 차륜의 탈선계수의 변화를 보여주고 있다. 138 m부터 322 m까지가 곡선반경 250 m의 원곡선부이다. 세브론 고무스프링이 경화되어 강성이 35% 높아진 경우가 오히려 곡선부 주행성능이 아주 약간 좋아진

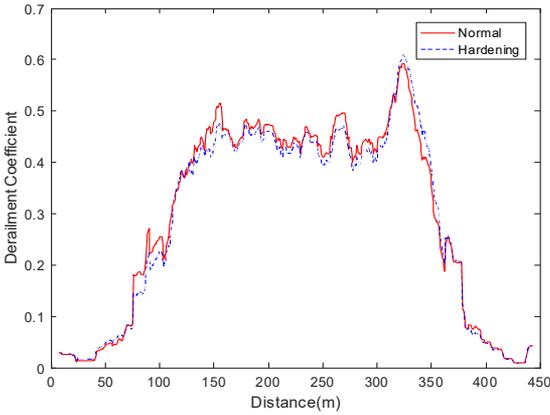


Fig. 4 Comparison of derailment coefficient between normal and hardening chevron spring

Table 3 Comparison of derailment coefficient

Track	Radius of curvature (m)	Normal chevron spring	Harden chevron spring	Ratio of change (%)
1	250	0.590	0.610	+3.4
2	301	0.598	0.597	-0.2
3	401	0.326	0.327	+0.3
4	599	0.226	0.213	-5.8
5	847	0.217	0.217	0.0
6	1,002	0.185	0.182	-1.6
7	1,102	0.153	0.162	+5.9
8	Straight	0.092	0.102	+10.9

듯 보인다. 그러나 원곡선부가 끝나는 지점, 즉 곡선부 출구측 완화곡선부가 시작되는 지점에서는 세브론 고무스프링이 경화된 경우의 탈선계수가 오히려 약가 더 크을 알 수 있다.

탈선계수는 최댓값일 때에 의미가 있으므로 이 연구에서는 8개의 track 별로 최댓값을 취하여 Table 3과 같이 정리하였다. Table 3을 보면 세브론 고무스프링의 강성변화에 따라 track 별로 약간의 탈선계수 증감을 보이고 있음을 알 수 있다. 탈선계수가 가장 많이 변하는 구간은 직선 구간으로서 10.9%의 변화를 보이고 있으나 다른 구간에 비해

Table 4 Wz evaluation scale

Ride index(Wz)	Ride comfort
1	Just noticeable
2	Clearly noticeable
2.5	More pronounced but not unpleasant
3	Strong, irregular but still toerable
3.25	Very irregular
3.5	Extremely irregular, unpleasant, annoying: prolonged exposure intolerable
4	Extremely unpleasant: prolonged exposure intolerable

그 탈선계수의 값은 매우 작다.

곡선반경 599 m인 track 4에서는 탈선계수가 5.8% 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 곧 세브론 고무스프링의 경화에 따라 오히려 탈선안전도가 좋아졌음을 의미한다.

3.2 승차감의 비교

철도차량은 대량수송이 목적이므로 철도를 이용하는 승객들의 안전이 우선이지만 이에 못지않게 중요한 요소가 바로 승차감이다. 승차감은 ISO 평가법, Wz 평가법 및 UIC 평가법 등 여러 가지가 있으나(7), 이 연구에서는 Wz 평가법을 이용하여 세브론 고무스프링이 정상적일 때와 35% 경화되었을 때 차체에서 느끼는 횡방향 승차감 및 수직방향 승차감에 대해 비교하였다. Wz의 평가기준을 표로 나타내면 Table 4와 같다.

다음 Fig. 5는 차체에서 느끼는 횡방향의 승차감지수를 표시하고 있다. 세브론 고무스프링이 경화하면 1차 현가장치의 강성증가에 따라 직선구간(track 8)과 곡선반경이 작은 곡선구간(track 1, track 2)에서는 승차감이 좋아지는 대신 곡선반경이 큰 다른 곡선구간에서는 승차감이 나빠지는 경향을 보이고 있다.

한편, Fig. 6은 수직방향 승차감지수의 변화를 나타내고 있다. 세브론 고무스프링의 경화에 따라 전체적으로 승차감이 나빠지며, 특히 곡선반경 599 m인 track 4에서 현저하게 나빠짐을 알 수 있다.

결국 세브론 스프링의 경화는 진동승차감에 영향을 미치며, 횡방향 승차감이 일부 구간을 제외하고는

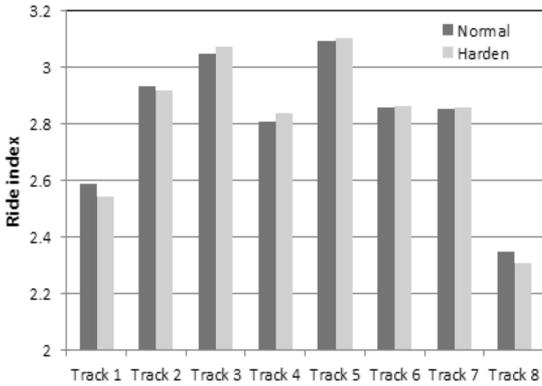


Fig. 5 Ride index in lateral direction

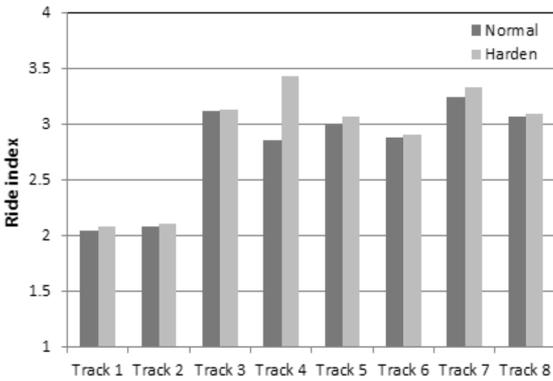


Fig. 6 Ride index in vertical direction

대부분의 선로에서 나빠짐을 알 수 있다. 특히, 수직방향의 경우에는 더 많은 악영향을 미치며, 특정 선로에서는 매우 나빠지는 경우도 있다.

4. 결 론

철도차량의 1차 현가장치에 사용되는 세브론 고무스프링의 경화에 의한 강성변화에 따라 철도차량의 동특성이 어떻게 변화하는 지 살펴보았다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 세브론 고무스프링의 경화에 따라 탈선계수가 가장 많이 변하는 구간은 직선 구간으로서 10.9%의 증가를 보이며 주행안전성이 나빠지고 있으나, 곡선반경 599 m인 track 4에서는 탈선계수가 5.8% 감소하여 오히려 탈선안전도가 좋아진다.

(2) 횡방향 승차감의 경우 8개의 선로구간 중 급곡선부와 직선부에서는 세브론 스프링의 경화에 따라 승차감이 약간 좋아지나 다른 곡선구간에서는 승차감이 약간 나빠진다.

(3) 수직방향 승차감의 경우는 세브론 스프링의 경화에 따라 모든 선로에서 승차감이 나빠지며, 곡선반경 599 m인 track 4에서는 더욱 크게 나빠진다.

후 기

이 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업의 연구과제인 ‘차세대 주행추진시스템 핵심기술개발(PK1701B)’의 일환으로 연구되었습니다.

References

- (1) Woo, C. S., Park, H. S. and Park D. C., 2007, Characteristics and Useful Life Prediction of Rubber Spring for Railway Vehicle, Journal of Korean Society of Railway, Vol. 10, No. 2, pp. 211~216.
- (2) Park, N. C. and Koo, J. S., 2016, A Study on the Effect of Changes in Chevron Rubber Characteristic on the Vibrational Ride Comfort Level of Subway Vehicle, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 57~65.
- (3) You, W. H., Shin, Y. J. and Hur H. M., 2016, The Effect of Primary Suspension Stiffness on Ride Comfort of Passenger in Subway Vehicle, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference.
- (4) SIMPACK AG, 2013, SIMPACK 9.4 Documentation.
- (5) You W. H., Shin Y. J., Hur H. M. and Park J. H., 2012, Carbody Lateral Displacement of Railway Vehicle According to 2nd Lateral Damper and Track Characteristics, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 722~718.
- (6) Yang, Y. B., Yau J. D. and Wu, Y. S., 2004, Vehicle-Bridge Interaction Dynamics, World Scientific.
- (7) Kim, Y. K., Park, C. K., Lee, E. H., Park T. W. and Bae, D. S., 2002, Analysis of Correlation with Evaluation Methods of Ride Comfort for the Railway, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 204~212.

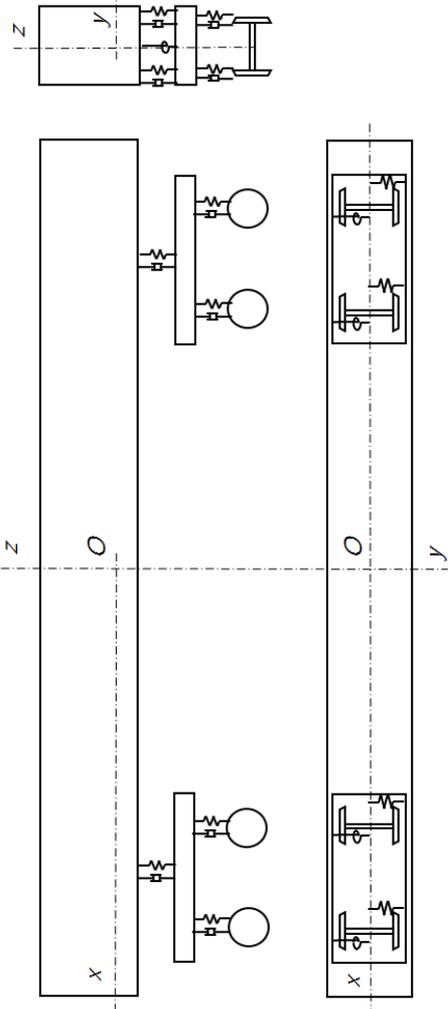
(8) Krzyztof, Z., 2015, Modeling, Simulation, and Results of Their Use in Railway Vehicle Dynamics Studies, Railway Research – Selected Topics on Development, Safety and Technology, Chap. 6.

또한, 이 연구에서 사용된 현가장치의 특성을 고려한 철도차량의 상세한 모델은 다음과 같다⁽⁸⁾.

부 록

이 연구에서 사용된 현가장치 및 동특성 파라미터는 다음과 같다.

구분	특 성 치	단위	물성치
차체	길이	m	19.5
	질량	kg	18 062
	Roll관성 모멘트	kgm ²	41 500
	Pitch관성 모멘트	"	545 700
	Yaw관성 모멘트	"	545 700
대차 프레임	질량	kg	2394
	Roll관성 모멘트	kgm ²	970
	Pitch관성 모멘트	"	1197
	Yaw관성 모멘트	"	2036
윤축	질량	kg	1637
	Roll관성 모멘트	kgm ²	844
	Pitch관성 모멘트	"	244
	Yaw관성 모멘트	"	844
1차 스프링	전후방향 강성	MN/m	정상 : 16.5 경화 : 22.275
	횡방향 강성	"	정상 : 7.8 경화 : 10.53
	수직방향 강성	"	정상 : 2.0 경화 : 2.7
2차 스프링	전후방향 강성	MN/m	0.16
	횡방향 강성	"	0.16
	수직방향 강성	"	0.4



Wonhee You received Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Yonsei University in 1993. He is currently a Executive Researcher at Korea Railroad Research Institute. He has studied the active suspension system for railway vehicle and noise/vibration control.