

철도차량용 코일스프링 횡강성 해석

허현무*, 안다훈
한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

Analysis on the Lateral Stiffness of Coil Spring for Railway Vehicle

Hyun-Moo Hur*, Da-Hoon Ahn

Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

요약 철도차량의 거동을 해석하기 위하여 다물체 동역학 모델을 구성함에 있어 현가시스템을 구성하는 스프링, 댐퍼와 같은 현가요소에 대한 스프링강성이나 감쇠계수와 같은 물성치 파악은 매우 중요하다. 그 중 1차, 2차 현가시스템에 주로 활용되고 있는 코일스프링에 대한 동역학 모델을 구성함에 있어 축방향 강성은 도면이나 설계자료에 명확하게 명시되어 있지만 횡방향에 대한 물성은 명시되어 있지 않아 동역학 해석 모델 구성에 어려움을 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 철도차량의 현가시스템에 폭 넓게 적용되고 있는 코일스프링에 대한 횡강성을 해석하기 위한 모델에 대하여 검토하고자 한다. 코일스프링 시료에 대한 횡강성을 해석하고자 유한요소해석 방법을 수행하였고 Krettek와 Sobczak의 코일스프링 횡강성 해석모델을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 코일스프링 시료를 대상으로 횡강성 특성시험을 수행하여 해석모델과의 적합성을 검토하였다. 시험결과와 비교한 결과, Krettek와 Sobczak의 코일스프링 횡강성 해석모델을 적용하고 보정계수를 수정한 결과가 시험결과에 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract In constructing the multi-body dynamics model to analyze the behavior of the railway vehicle, it is very important to understand the properties of the suspension elements that constitute the suspension system. Among them, coil springs, which are mainly used in primary and secondary suspension systems, clearly show the axial stiffness in the drawings, but the lateral properties of the coil springs are not specified clearly, making it difficult to construct a dynamic analysis model. Therefore, in this paper, the model for analyzing the lateral stiffness of the coil spring is examined. A finite element method was applied to analyze the lateral stiffness of the coil spring and numerical analysis was performed by applying the coil spring lateral stiffness analysis model proposed by Krettek and Sobczak. And the test to analyze the lateral stiffness of coil spring was conducted. As a result of comparing with the test results, it was found that the results obtained by applying the lateral stiffness analysis model of Krettek and Sobczak and correcting the correction coefficient are similar to those of the test results

Keywords : Coil spring, Lateral stiffness, Railway vehicle, Suspension, Test

1. 서론

철도차량의 거동이나 동적 성능을 해석하기 위한 동역학 모델을 구성함에 있어서 현가시스템을 구성하는 현가요소인 스프링, 댐퍼에 대한 특성치를 파악하는 것이

무엇보다도 중요하다. 특히 철도차량에 사용되고 있는 스프링의 횡방향 강성은 차량의 안전성과 동적성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다.[1-3]

그 중 철도차량 현가요소의 하나인 코일스프링은 1차 현가계의 상스프링으로 또는 2차현가계의 차체와 대차

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(고속대차 차륜형상 및 현가장치 고유설계를 위한 기초 기반기술 개발(PK1801B1))의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hyun-Moo Hur(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5245 email: hmhur@krrri.re.kr

Received August 10, 2018

Revised (1st September 3, 2018, 2nd September 5, 2018)

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

를 연결하는 2차스프링으로 주로 사용되고 있다. 코일스프링의 강성은 상하방향으로는 설계도면에 명시되어 있거나 계산식에 의해 알 수 있으나 횡방향 강성은 거의 대부분 명시되어 있지 않다[4]. 이는 코일스프링 설계 시 설계식이 주로 힘의 주된 작용 방향인 축방향인 상하방향의 스프링 강성 설계에 한정되기 때문이다. 따라서 횡방향 강성에 대한 특성은 대부분 알려지지 않고 있어 동역학 모델을 구성할 때 미지의 인자로 남게 된다.

이와 관련하여 본 논문에서는 코일스프링의 횡방향 강성을 파악하기 위한 해석 방법에 대하여 검토하고자 한다. 우선, 코일스프링에 대한 횡강성을 분석하기 위하여 코일스프링 유한요소 모델을 구성한 후 수직하중 작용 시에 횡강성 해석을 시도하였다. 두 번째로 Krettek와 Sobczak의 코일스프링의 횡강성 해석 모델에 기초한 횡강성 해석을 시도하였다[5-6]. 그리고 최종적으로 두가지 해석적 방법의 타당성을 검토하고자 코일스프링 시료를 대상으로 횡강성 특성시험을 수행하여 해석결과와 비교하였다. Krettek와 Sobczak가 제안한 코일스프링 횡강성 해석모델과 보정계수를 수정한 경우, 시험결과와 유사한 경향을 나타냈다.

본 연구를 통하여 철도차량의 다물체동역학 모델 구성 시, 미지의 인자였던 코일스프링 횡강성에 대한 특성을 해석할 수 있는 해석방법을 마련하였다는 점에 큰 의미가 있다고 사료되며 이에 대하여 기술하고자 한다.

2. 코일스프링 횡강성 해석

2.1 코일스프링 시료

코일스프링에 대한 횡강성 해석과 특성시험을 위한 시료로 Fig. 1과 같이 고속철도차량의 1차 현가계에 장착되고 있는 외측 코일스프링을 대상으로 하였다. 윤축과 대차프레임 사이에 수직방향으로 장착되며 철도차량의 수직하중을 부담하고 주행 시 윤축으로부터 대차프레임으로 전달되는 진동을 감쇠하는 기능을 수행한다.

Fig. 2는 코일스프링 시료의 형상과 치수를 나타내며 Table 1은 코일스프링 시료에 대한 물성치이다. 코일스프링의 자유고는 327mm이며 평균 직경은 251mm로서 축방향 강성은 0.793MN/m (80.87kgf/mm)이다.

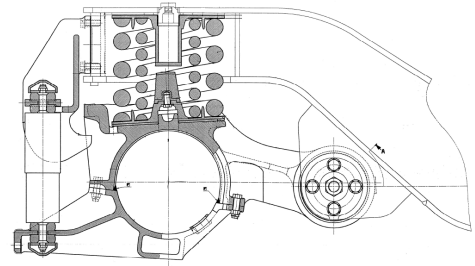


Fig. 1. Primary suspension

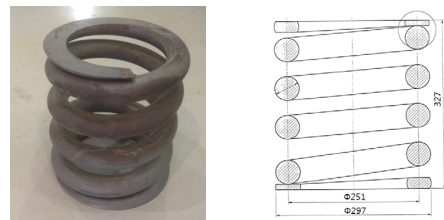


Fig. 2. Coil spring

Table 1. Properties of the coil spring

Item	Property
dia. of wire(mm)	46
mean dia. of coil(mm)	251
inside dia. of coil(mm)	205 ± 2.2
outside dia. of coil(mm)	297
active turns(turns)	3.5
total turns(turns)	5.25
free height(mm)	327
spring rate(kgf/mm)	80.87 ±4.04
direction of coiling	right
end configuration	closed taper

2.2 유한요소 해석

코일스프링 시료의 설계 변수 및 치수와 관련된 특성은 Table 1과 같으며 재질은 SUP11A 스프링강으로서 물성치는 Table 2와 같다.

유한요소해석을 해석프로그램은 Ansys Workbench v17.2를 이용하여 수행하였다. 정적 변형 해석을 통해 코일 스프링에 수직하중을 부여한 상태에서 횡방향 강성을 해석하였다.

코일스프링의 실제 차량 장착 조건을 모사하여 경계 조건을 설정하였다. 코일스프링 하단은 고정 상태로 하

였으며 상단은 자유상태로 하였다. 상단에 수직방향으로 하중을 부여한 상태에서 횡방향으로 변위 ±10mm를 인가하였다. 이 때 고정 단에서의 횡방향 작용력을 해석하였다.

그리고 모든 해석에서 스프링 강선과 강선 사이의 frictionless rigid contact으로 처리하였으며 모델의 유한 요소의 크기는 5mm 이하로 제한하였다. 해석 모델과 경계 조건은 Fig. 3와 같다. 코일스프링 1개의 바디로 구성되어 있으며 628,978개의 노드와 426,106개의 요소를 갖는다.

Table 2. Material property of spring(SUP11A)

Density (kg/m ³)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Bulk Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)
7,700	200	0.285	155	77.8

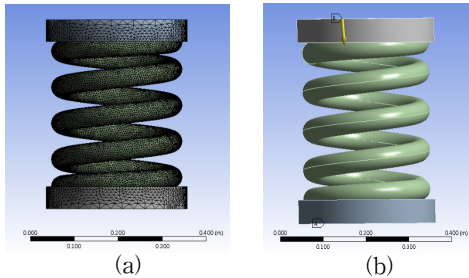


Fig. 3. Coil spring model (a) model (b) support condition

Fig. 4은 수직하중 작용 하에서 횡방향 변형을 해석한 사례이다. 각 수직하중에 따른 횡방향 강성을 해석한 결과는 Table 3과 Fig. 5와 같다. 코일스프링에 축방향 하중이 증가함에 따라 횡방향 강성이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

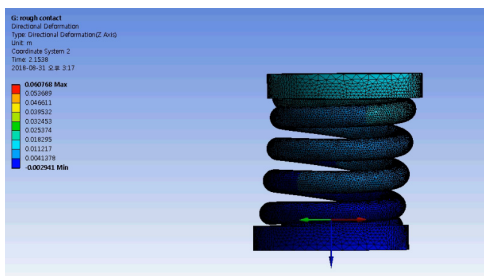


Fig. 4. Deformed shape of coil spring

Table 3. Lateral stiffness according to axle load

Axle load(kN)	Lateral stiffness(MN/m)
7.6	0.43
14.0	0.65
21.2	0.76
28.6	0.77
36.1	0.81

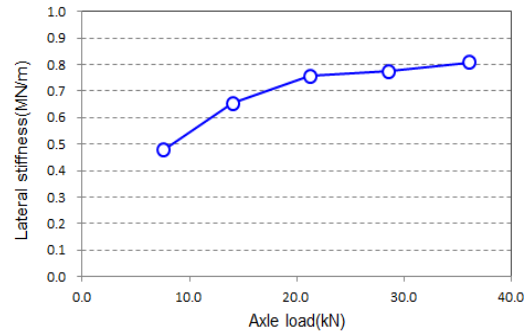


Fig. 5. Lateral stiffness according to axle load

2.3 Krettek와 Sobczak의 모델

코일스프링 횡강성 해석을 위하여 Krettek와 Sobczak가 제안한 모델을 이용하였다[5-6]. 철도차량에 적용되고 있는 코일스프링에 대한 횡강성을 해석하기 위하여 횡강성에 대한 이론식을 유도한 논문이다.

이에 의하면 Fig. 6와 같이 두 개의 평행하지 않은 평판 사이에서 코일스프링이 축방향 힘(F)에 의해 압축되고 횡방향 힘(F_Q)가 작용하고 있다고 가정할 경우, 횡방향 강성(K_y^*)은 식(1)과 같다.

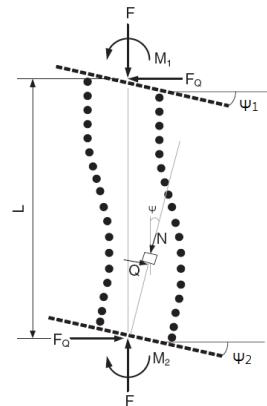


Fig. 6. Coil spring model proposed by Krettek and Sobczak

$$K_y^* = a \left(\frac{F}{2/c \cdot (1 + F/R'_Q) \cdot \tan(cL/2) - L} \right) \quad (1)$$

- 여기서, F : 축방향 힘
 L_0 : 스프링 자유고
 L : 수직하중 부가 시의 스프링 높이
 D : 평균 코일직경
 n : 유효코일 수
 d : 와이어의 공칭직경
 E : Young's modulus
 G : shear modulus
 a : 보정계수
 $(1.9619(L_0 - L)/L_0 + 0.6740)$
 $c = \sqrt{\frac{F}{R'_\psi} \left(1 + \frac{F}{R'_Q} \right)}$
 $R'_\psi = \frac{Ed^4L}{32nD(\nu+2)}$
 $R'_Q = \frac{Gd^4L}{4nD^3}(\nu+1)$
 ν : 프와송비

식 (1)에 Table. 1의 특성치를 적용하여 코일스프링 시료에 대한 횡강성을 계산하면 Fig. 7과 같다.

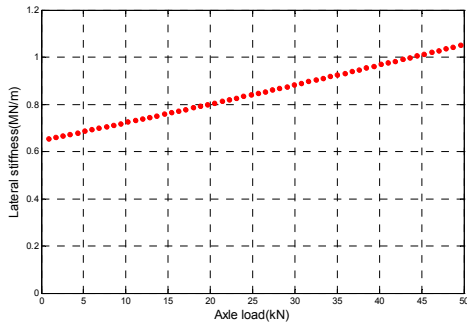


Fig. 7. Analysis results of lateral stiffness using Krettek and Sobczak's model according to axle load

3. 코일스프링 횡강성 시험

코일스프링 해석모델에 대한 해석결과의 타당성을 검증하고자 코일스프링 시료에 대한 횡강성 특성시험을 수행하였다. 시험방법은 철도차량 현가요소 코일스프링에 시험규격인 BS EN 13298 Railway applications -

Suspension components - Helical suspension springs, steel에 의거하였다[7]. Fig. 8은 BS EN 13298의 코일스프링 횡강성시험을 위한 시험방법으로 코일스프링 상단은 수직하중을 부여한 상태에서 고정하고 하단에 횡변위를 주어 그때의 변위와 하중을 측정한다.

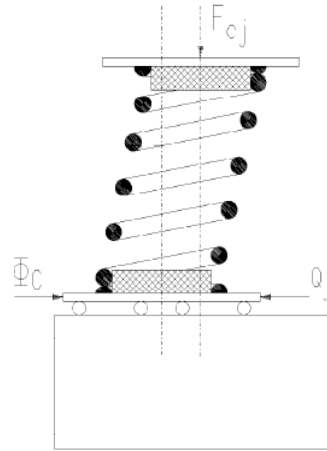


Fig. 8. Test method for lateral stiffness according to axle load of the coil spring of BS EN 13298

시험은 Fig. 9와 같이 철도차량 현가요소 시험기인 스프링시험기를 이용하여 수행되었다. 코일스프링 시료에 수직액추에이터로 수직하중을 부가한 후, 횡방향 액추에이터로 코일스프링 하단에 횡변위를 부여하여 횡방향 하중과 변위를 측정하였다. 이때 횡방향 변위 진폭은 ±10mm로 하였다.

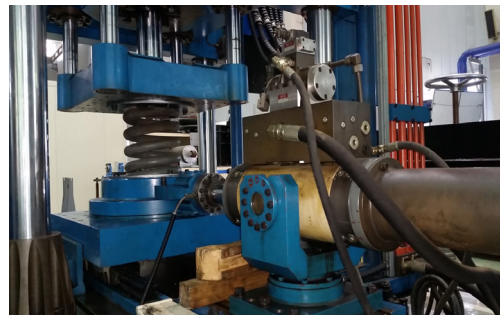
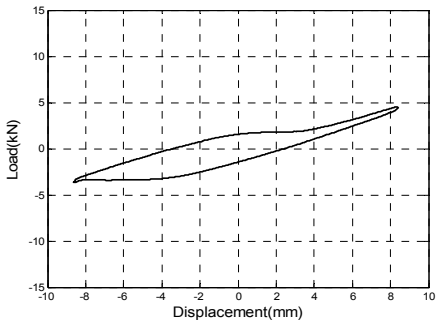


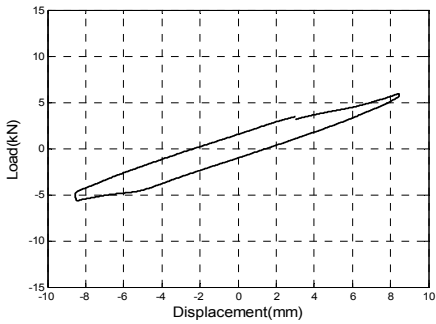
Fig. 9. Coil spring test

Fig. 10은 코일스프링 수직하중에 따른 횡방향 하중-변위 시험데이터 선도이다. Table 4와 Fig. 11은 코일스프링 횡강성 시험결과를 나타낸다. 수직하중이 증가함에

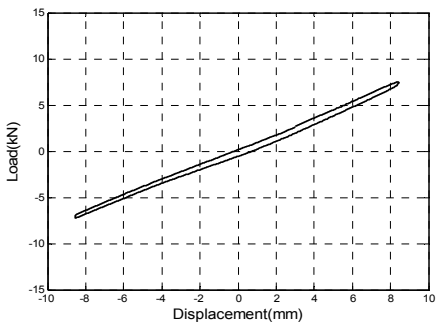
따라 횡방향 하중도 증가하며 이에 따른 횡강성도 비례하는 경향을 보이고 있다.



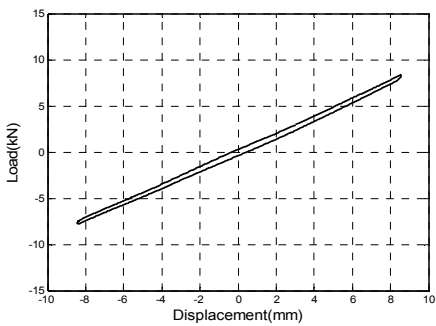
(a) 8,019N



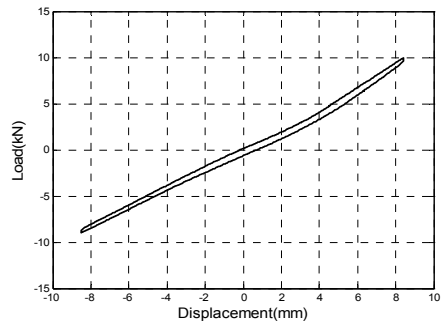
(b) 16,038N



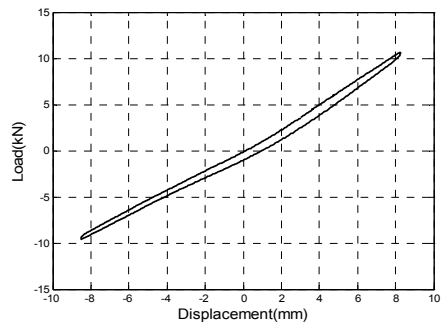
(c) 24,057N



(d) 32,076N



(e) 40,095N



(f) 44,985N

Fig. 10. Load-displacement diagram of the coil spring according to axle load

Table 4. Test result of the coil spring

Height (mm)	Displacement (mm)	Axle load	Lateral stiffness (MN/m)
330	0	-	-
320	10	8,019	0.4909
310	20	16,038	0.7249
300	30	24,057	0.8331
290	40	32,076	0.9125
280	50	40,095	1.0523
275	55	44,985	1.1511

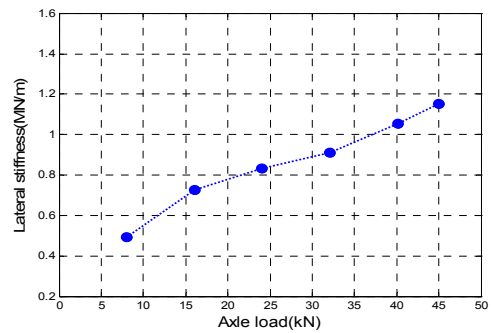


Fig. 11. Test result of the coil spring

Fig. 12는 코일스프링 수직하중에 따른 횡강성을 유한요소 해석방법, 횡강성 모델을 이용하여 해석한 결과와 시험결과를 비교한 선도이다.

유한요소 해석방법의 경우, 시험결과 비교한 결과, 축하중이 25kN 이하의 영역에선 시험결과에 근사한 결과를 보이고 있으나 축하중 25kN을 초과한 영역에선 시험결과에 비하여 작게 나타나고 있으며 편차도 크게 나타나고 있다. 시험결과와 달리 축하중과 횡강성과의 관계가 선형적이지 않음을 알 수 있다. 이에 유한요소 해석방법의 경계조건이 실제 코일스프링의 거동을 모사함에 다소 차이가 있는 것으로 추론되며 이에 대해선 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Krettek와 Sobczak가 제안한 코일스프링 횡강성 모델(Lateral stiffness model)의 경우에는 수직하중 증가에 따라 횡강성도 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 시험결과와 비교할 때 수직하중 24 ~ 30kN 영역에서는 시험결과에 비교적 근사한 결과를 보이고 있으나 24kN이하, 30kN 이상의 영역에서는 편차가 크게 나타나고 있다. 시험결과와 비교할 때 수직하중과 횡강성 간의 기울기가 시험결과에 비하여 작게 나타나고 있다.

이러한 시험결과와의 편차를 최소화하기 위하여 보정계수 a 을 수정한 모델이 Lateral stiffness model(2)이다. 이 경우 보정계수 수정을 위하여 시험결과와 해석결과와의 오차를 최소화할 수 있도록 최소자승법을 이용하여 보정계수를 수정하였다. 그 결과 수정된 보정계수 $a = 3.9238(L_0 - L)/L_0 + 0.4718$ 을 적용하여 해석한 결과를 보면 시험결과와 매우 근사함을 알 수 있다.

이와 같이 Krettek와 Sobczak 모델을 이용할 경우에는 보정계수의 영향이 매우 중요함을 알 수 있다. 보정계수는 시험결과와 이론식간의 차이를 보정하기 위한 계수이다. 그러나 코일스프링은 크기와 형상, 재료특성, 제조방법, 단부 마감상태 등이 상이하므로 보정계수가 모든 코일스프링에 대하여 고루 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서 다양한 코일스프링 시료를 대상으로 시험과 해석적 방법 간의 오차를 최소화할 수 있는 보정계수 도출과 같은 연구가 추후에도 필요하다고 사료된다.

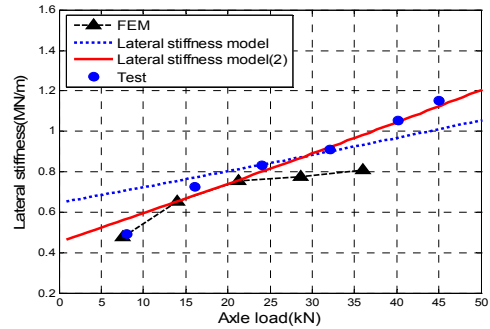


Fig. 12. Comparison of analysis and test results

4. 결론

철도차량의 1차, 2차 현가계의 구성요소로 폭 넓게 사용되고 있는 코일스프링에 대한 횡강성을 해석하기 위한 연구를 수행하였다. 그리고 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 특성시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 유한요소 해석방법을 이용한 코일스프링 횡강성 해석결과, 시험결과는 축하중이 증가함에 따라 횡강성도 비례하여 증가하는 특성을 보이고 있는 반면 유한요소 해석결과는 그러한 특성을 보이고 있지 않고 축하중이 25kN을 초과한 영역에선 시험결과와 편차가 크게 나타나고 있다.
2. Krettek와 Sobczak가 제안한 코일스프링 횡강성 모델(Lateral stiffness model)을 적용하여 해석한 결과, 시험결과와 같이 축하중이 증가함에 따라 횡강성도 비례하여 증가하는 특성을 보이고 있다. 그러나 비례하는 기울기가 시험결과에 비하여 작게 나타난다. 이를 보정하기 위하여 보정계수를 수정한 모델(Lateral stiffness model(2))의 경우 시험결과에 매우 근사한 결과를 나타냈다.
3. 따라서 철도차량용 코일스프링 횡강성을 해석하기 위한 해석 방법으로는 유한요소 해석방법보다는 Krettek와 Sobczak의 모델을 적용하고 보정계수를 수정한 모델이 시험결과에 더 근사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 해석적방법의 오차를 최소화하기 위한 보정계수에 대한 연구는 향후 다양한 형상, 크기 제질특성, 제조방법 등이 상

이한 코일스프링 시료를 대상으로 지속적으로 수행할 계획이다.

4. 본 논문을 통하여 그 동안 차량동역학 해석을 위한 동적모델 구성 시 미지의 인자로 남아있던 코일스프링 횡강성 값을 파악할 수 있는 해석방법을 마련하였다는 점에 큰 의미가 있다고 사료된다.

References

- [1] V. K. Garg, R. V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", pp.257-261, Academic Press, 1984
- [2] C. S. Jeon, S. H. Choi, "A Study on the Vibration Reduction of the Commercial High-speed Train", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.11, pp.697-704, 2017
- [3] C. S. Jeon, "A study on the Dynamic Behavior Enhancement of the Korean High-speed Train", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.10, pp.81-87, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.81>
- [4] A. D. Kelly, C. E. Knight, "Helical Coil Suspension Spring in Finite Element Models of Compressors", *International Compressor Engineering Conference*, pp.779-787, 1992.
- [5] S. Bruni, J. Vinolas, M. Berg, O. Polach, S. Stichel, "Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context", *Vehicle System Dynamics*, Vol.49, No.7, pp.1021-1072, 2011.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/00423114.2011.586430>
- [6] O. Krettek, M. Sobczak, "Zur Berechnung der Quer und Biegekennung von Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge", *ZEV-GlasersAnnalen*, Vol.112, No.9, Aachen, pp.321-326, September, 1988.
- [7] British Standards Institution, "BS EN 13298-2003 Railway applications - Suspension components - Helical suspension springs, steel", 2003.

허 현 무(Hyun-Moo Hur)

[정회원]



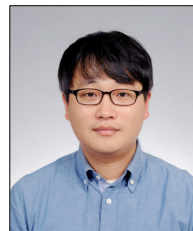
- 1990년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (기계공학 석사)
- 2009년 8월 : 아주대학교 대학원 기계공학과 (기계공학 박사)
- 1993년 5월 ~ 1996년 6월 : 고등기술연구원 주임연구원
- 1996년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

철도차량, 주행장치

안 다 훈(Da-Hoon Ahn)

[정회원]



- 2006년 2월 : 카이스트 기계공학과 (공학사)
- 2013년 8월 : 카이스트 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

정밀 모션 기구, 에너지 하베스팅