

비선형 점탄성 스프링 모델을 이용한 플로팅 슬래브 궤도의 동적 거동 해석

Analysis of Dynamic Behavior of Floating Slab Track Using a Nonlinear Visco-elastic Spring Model

박진철* · 장승엽† · 황성호* · 김 은*

Jin Chul Park, Seung Yup Jang, Sung Ho Hwang and Eun Kim

1. 서 론

최근 철도 노선의 확장에 따라 철도의 도심 통과 구간이나 선하역사의 건설이 점차 증가하면서 진동과 소음 대책에 대한 요구가 커지고 있다. 플로팅 슬래브 궤도는 궤도 전체를 하부구조와 분리해 진동 저감 효과를 얻는 구조로 철도 진동과 2차 소음 저감을 위한 가장 효율적인 대책으로 평가되고 있다. 하지만 플로팅 슬래브 궤도의 방진 스프링에 사용되는 고무재료는 점탄성과 비선형성으로 인해 매우 복잡한 동적 거동을 나타낸다. 따라서 플로팅 슬래브 궤도의 동적 거동을 보다 정확히 예측하기 위해서는 합리적인 고무 스프링 모델의 적용이 필요하다.

이에 본 연구에서는 방진고무의 점탄성과 비선형성을 고려하여 플로팅 슬래브 궤도의 동적 거동을 보다 정확히 모사하기 위하여 탄성 스프링, friction 요소 그리고 Maxwell 요소로 구성되는 비선형 점탄성 모델을 사용하여 플로팅 슬래브 궤도의 동적 유한요소 해석모델을 구성하고 모델 파라미터의 결정 방법을 제시하였다. 아울러 수치해석 결과와 실험 데이터의 비교 분석을 통해 해석에 적용된 비선형 점탄성 고무 스프링 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 비선형 점탄성 고무 스프링 모델

방진고무의 비선형성과 점탄성은 Fig.1 (a)에 나

† 교신저자 ; 한국철도기술연구원 고속철도인터페이스연구실
E-mail : syjang@krii.re.kr

Tel : 031-460-5302, Fax : 031-460-5289

* 한국철도기술연구원 고속철도인터페이스연구실

타넨 바와 같이 탄성 스프링 요소와 여러 개의 friction 요소, 그리고 맥스웰 요소의 조합으로 표현될 수 있다⁽¹⁾. 이 때 고무 스프링에 작용하는 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁾.

$$F = F_e + F_f + F_{v0} \tag{1}$$

$$\text{탄성력 } F_e = K_e x \tag{2}$$

$$\text{마찰력 } F_f = F_{y(i-1)} + \tag{3}$$

$$\left[\sum_{i=1}^n K_{f_i} u(x_{f_i} - x) \right] (x - x_{f(i-1)})$$

for $x_{f(i-1)} \leq x < x_{f_i}$

$$\text{점성력 } F_{v0} = \frac{\omega C}{1 + (\omega C / K_v)^2} x_0 \tag{4}$$

여기서, K_e : 선형 스프링 상수, K_{f_i} , x_{f_i} , F_{y_i} : 각각 i 번째 friction 요소의 스프링 상수, 항복 변위 및 항복 하중, C , K_v : Maxwell 요소의 댐핑 계수와 스프링 상수, $u(x)$: unit step function, ω : 가진 주파수, x_0 : 동적 변위진폭

위 식에 따르면 Friction 요소의 수를 n 이라고 할 때 모델 파라미터는 모두 $(2n+3)$ 개가 된다. 이를 합리적으로 결정하기 위해 본 연구에서는 Berg⁽²⁾가 제안한 모델을 바탕으로 파라미터를 산정하였다⁽³⁾.

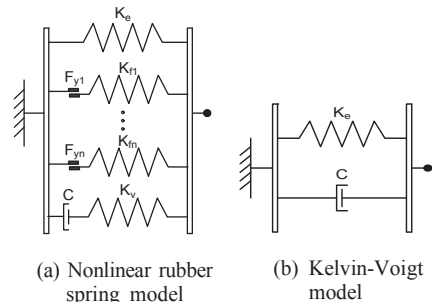


Fig. 1 Rubber spring model

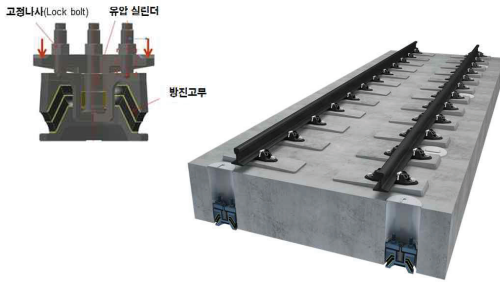


Fig.2 Floating slab track

Fig.2는 검토 대상 플로팅 슬래브궤도의 구조와 적용된 방진 고무 스프링을 보여주고 있다. 고무 스프링 단품에 대한 정적 하중-변위 곡선, 조화하중 가진 시 하중-변위 곡선으로부터 4개의 friction 요소를 사용한 모델의 파라미터를 Table 1과 같이 결정하였다. 이 때 조화하중은 가진 주파수를 플로팅 슬래브궤도의 공진 주파수에 가까운 9.84Hz로 하고 4mm의 진폭으로 가진하였다. 또 비교를 위해 일반적으로 스프링 모델로 많이 적용되는 Kelvin-Voigt 요소에 대해 스프링 상수와 댐핑 계수를 산정하였다 (Table 1 참조).

Table 1 Model parameters for rubber spring

구분	Nonlinear viscoelastic model	Kelvin-Voigt Model
	f=9.84Hz, x ₀ =4mm	f=4.92Hz
K _e (kN/mm)	13.87	19.57
K _{f1} (kN/mm)/F _{y1} (kN)	14.28/1.86	-
K _{f2} (kN/mm)/F _{y2} (kN)	3.57/1.39	-
K _{f3} (kN/mm)/F _{y3} (kN)	1.14/1.04	-
K _{f4} (kN/mm)/F _{y4} (kN)	0.05/0.61	-
K _v (kN/mm)	0.85	-
C(kNs/mm)	0.104	0.058

3. 해석 결과 및 분석

Fig.2에 나타낸 플로팅 슬래브 궤도(길이 18.87m)에 대해 슬래브 중앙에서 8~11Hz의 조화하중을 가질 때 슬래브의 처짐을 측정하였다. 그리고 실험과 동일한 하중을 재하할 때 유한요소 해석결과를 실험결과와 함께 Fig.3에 나타냈다. 그림에서 Kelvin-Voigt 모델을 적용한 경우보다 비선형 점탄성 스프링 모델을 적용한 경우가 주파수 대역별 처짐 곡선이 실험결과와 더 잘 일치함을 알 수 있다.

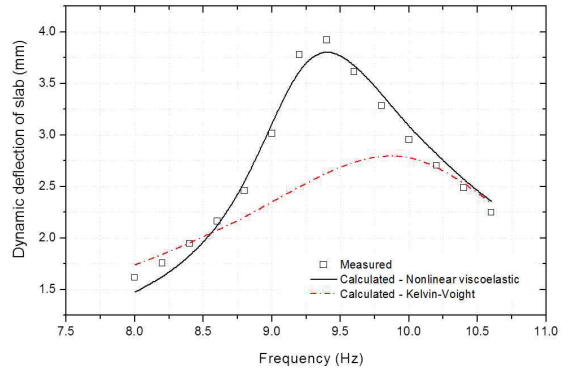


Fig.3 Maximum slab deflection

4. 결 론

본 연구에서 플로팅 슬래브 궤도의 고무 스프링에 선형 스프링, friction 요소, Maxwell 요소로 구성되는 비선형 점탄성 모델을 적용한 결과, 실제 거동과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, 따라서 플로팅 슬래브궤도의 동적 거동 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Sjöberg, M., On Dynamic Properties of Rubber Isolators, Doctoral Thesis, Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology(KTH), Stockholm, 2002.
- (2) Berg, M., A model for rubber spring in the dynamic analysis of rail vehicles, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers(IMech), Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.211, 1997, pp.95-108.
- (3) 박진철, 비선형 고무 스프링 모델을 사용한 플로팅 슬래브 궤도의 동적 해석, 석사학위논문, 건설환경시스템공학과, 성균관대학교, 2011.