

동역학 해석용 Air Spring Modeling 방법에 대한 고찰

Study on air spring modeling method for railway vehicle dynamics

성재호* 이강운** 박길배** 양희주**
Seong, Jae-Ho Lee, Kang-Wun Park, Gil-Bae Yang, Hee-Joo.

ABSTRACT

To predict the dynamic behaviour of railway vehicle, the complex vehicle structure has been described by mathematical model such as mass, spring and damper. Air-spring has played a major role to improve dynamic characteristics, vibration isolation and ride comfort. The mechanical behaviour of air spring is very complicated. The behaviour is based on fluid and thermodynamic mechanisms. The main parameters of air spring are stiffness due to compression of the air in the spring and surge reservoir, change of area stiffness and orifice damping. In this paper, we have studied an air-spring modeling method and compared the difference between calculation and test.

1. 서론

철도차량의 동적거동을 예측하기 위해서는 실제의 복잡한 차량 구조를 질량, 스프링 및 댐퍼 등 수학적 요소로 모델링을 해야 하며, Air Spring은 철도차량의 동적특성과 진동 및 승차감에 영향을 주는 현가장치의 중요한 요소이다.

Air Spring은 수학적인 모델로 표현하기에 매우 복잡하며, Air Spring의 중요한 변수는 공기 스프링과 보조공기통의 압축된 공기에 의한 stiffness, 공기 스프링의 유효단면적 변화에 따른 stiffness, 보조스프링의 Stiffness 및 오리피스 형상에 따른 damping coefficient이다.

본문에서는 철도차량 동특성 해석 프로그램인 VAMPIRE(Vehicle Dynamic Modeling Package In a Railway Environment)에서 제공하는 공기 스프링 요소에 대하여 고찰해 보고 실제 단품 시험결과와 비교 검토하였다.

2. 본문

2.1 이론

본문에서는 철도차량에서 2차 현가장치로 많이 사용하고 있는 공기 스프링 요소의 수직방향 모델링 방법에 대하여 고찰하였다. 철도차량에서는 승차감과 진동 및 소음을 저감하기 위하여 차체와 대차 사이에 공기스프링을 주로 사용하고 있으며, VAMPIRE®에서 제공하고 있는 공기 스프링의 수직방향 모델은 그림 2와 같다.

* 현대로템(주), 응용기술연구팀, 비회원
E-mail : jhseong@hyundai-rotam.co.kr
TEL : (031)460-1297 FAX : (031)460-1780
** 현대로템(주), 응용기술연구팀

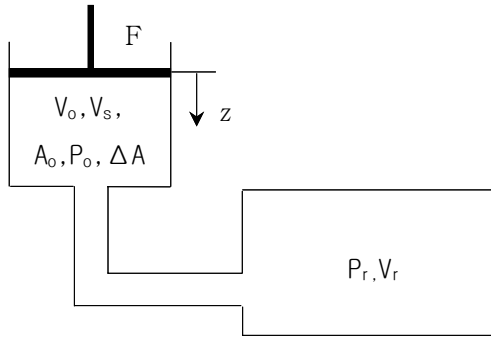


그림 1. 공기 스프링 모델

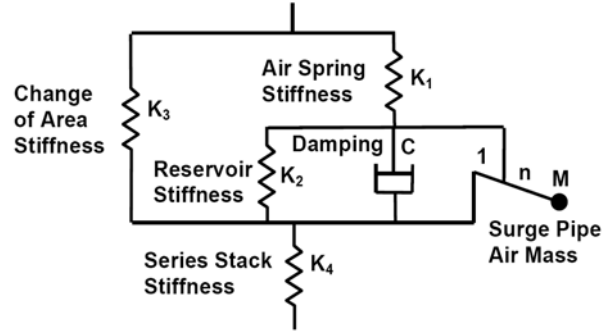


그림 2. 공기스프링의 수학적 모델 (VAMPIRE)

여기서,

K_1 : Surge pipe가 차단되었을 때, 공기 스프링의 Stiffness

K_2 : 보조 공기통에 의한 Stiffness

K_3 : 공기 스프링의 유효단면적 변화율에 의한 Stiffness

K_4 : 하중에 따른 보조 스프링의 stiffness

C : Orifice에 의한 damping coefficient

수직방향에 대하여 Air Spring안에 공기는 매우 낮은 주파수대역을 제외하면, Adiabatic gas laws를 따른다.

$$PV^\gamma = constant$$

준정적 평형 상태에서 공기스프링의 미소변형을 고려하면, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_0\gamma V_0^{\gamma-1}\delta V + V_0^\gamma\delta P = 0 \quad (1)$$

$$\delta P = -\frac{P_0\gamma V_0^{\gamma-1}}{V_0^\gamma}\delta V = -\frac{P_0\gamma}{V_0}\delta V$$

여기서,

P_0 : 공기스프링의 내부압력

V_0 : 공기스프링의 부피

γ : Gas constant

Air Spring 내부의 부피변화는 공기스프링에 작용하는 하중변화에 따라 발생하며, 공기스프링 상하 방향의 변위와 유효단면적, 보조공기통으로 흘러들어가는 유량으로 표현할 수 있으며, 식 (2)와 같다.

$$\delta V = -A_0\delta z + \delta U \quad (2)$$

여기서,

δU : 보조공기통으로 흘러들어가는 유량

δz : 공기스프링의 상하방향 변위

A_0 : 공기스프링의 유효 단면적

공기스프링에 작용하는 외력(δF)은 공기스프링에 작용하는 압력의 변화량(δP)과 유효단면적으로 표현할 수 있으며, 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \delta F &= A_0 \delta P & (3) \\
 &= -A_0 \frac{P_0 \gamma}{V_0} \delta V \\
 &= -A_0 \frac{P_0 \gamma}{V_0} (-A_0 \delta z + \delta U) \\
 &= A_0^2 \frac{P_0 \gamma}{V_0} \left(\delta z - \frac{\delta U}{A_0} \right)
 \end{aligned}$$

공기 스프링과 보조 스프링내부의 부피변화에 따른 Stiffness는 다음과 같다.

$$K = \frac{P_0 A_0^2 \gamma}{V_0}$$

따라서, Surge pipe가 차단되었을 때, 공기 스프링의 Stiffness K_1 은 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{P_0 A_0^2 \gamma}{V_0 + V_s} \quad (4)$$

여기서,

- P_0 : 공기 스프링의 내부 압력
- A_0 : 공기 스프링의 유효 단면적
- V_0 : 공기 스프링의 내부 부피
- V_s : 보조 스프링의 내부 부피
- γ : Gas constant

Air-Spring과 보조 공기통 사이에 Orifice가 연결되어 있다면, Air-Spring과 보조 공기통 사이에 압력차가 발생하게 되고, Orifice의 단면적을 a_p 라 하면, Orifice를 통과하는 공기의 속도는 식 (5)와 같다.

$$c = \frac{1}{a_p} \frac{d}{dt} (\delta U) \quad (5)$$

보조 공기통의 압력 변화는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta P_r = - \frac{P_0 \gamma}{V_r} \delta U \quad (6)$$

Orifice와 공기스프링과 보조 공기통을 연결하는 pipe에 의한 loss는 식 (7)과 같이 표현할 수 있으며,

$$\delta P_p - \delta P_r = \frac{1}{2} \rho G c^2 \quad (7)$$

여기서,

ρ : Air density

G : Orifice 및 pipe에 의한 손실계수의 합

c : Orifice를 통과하는 공기의 속도

보조 공기통에 작용하는 외력은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta F_r &= \frac{A_0^2 P_0 \gamma}{V_r} \left(\frac{\delta U}{A_0} \right) + \frac{1}{2} \rho G A_0 \left(\frac{1}{a_p} \frac{d}{dt} (dU) \right)^2 \\ &= K_2 \frac{\delta U}{A_0} + b \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta U}{A_0} \right) \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$K_2 = \frac{P_0 A_0^2 \gamma}{V_r} \text{ MN/m : 보조 공기통에 의한 Stiffness}$$

$$b = \frac{1}{2} \frac{\rho G A_0^3}{a_p^2} \text{ MN(s/m)}^2 : \text{Equivalent damping rate}$$

공기스프링의 유효단면적 변화에 의한 Stiffness는 식 (9)과 같다.

$$K_3 = P_0 \Delta A \quad (9)$$

여기서,

ΔA : 공기스프링의 유효단면적 변화율

식(4), (8), (9)로부터 얻어진 K_1 , K_2 , K_3 과 보조 스프링의 Stiffness K_4 로부터 공기스프링의 수직방향 Equivalent Stiffness(K_v)를 구하면, 식(10)과 같다.

$$K_v = \frac{\left[K_3 + \frac{K_1 \times K_2}{K_1 + K_2} \right] \times K_4}{\left[K_3 + \frac{K_1 \times K_2}{K_1 + K_2} \right] + K_4} \quad (10)$$

2.2 계산 및 시험결과

공기 스프링의 stiffness를 결정하는 중요한 변수는 공기 스프링과 보조 공기통 내부의 유효압력(P_o , P_r), 유효 단면적(A_o), Gas constant(γ), 공기 스프링과 보조 스프링, 보조 공기통 내부의 부피(V_o , V_s , V_r), 공기 스프링의 유효단면적의 변화율(ΔA)이다.

하중변화에 따른 공기스프링의 시험결과(Test)를 표 1에 나타내었고, 해석적으로 구한 결과(Calculation)와 함께 그림 3에 도시하였다.

표1. 공기스프링의 수직방향 stiffness 시험결과

Load	kgf	4,071	4,286	5,191	7,013	7,230
Effective Area	cm ²	1,581	1,581	1,581	1,575	1,575
Internal pressure	kPa	252	266	322	436	450
Vertical static stiffness	MN/m	184	193	220	277	284
Diameter of orifice	mm	13				
Deflection of Emergency stopper $\delta(83.7kN) - \delta(0.98kN)$	mm	7				

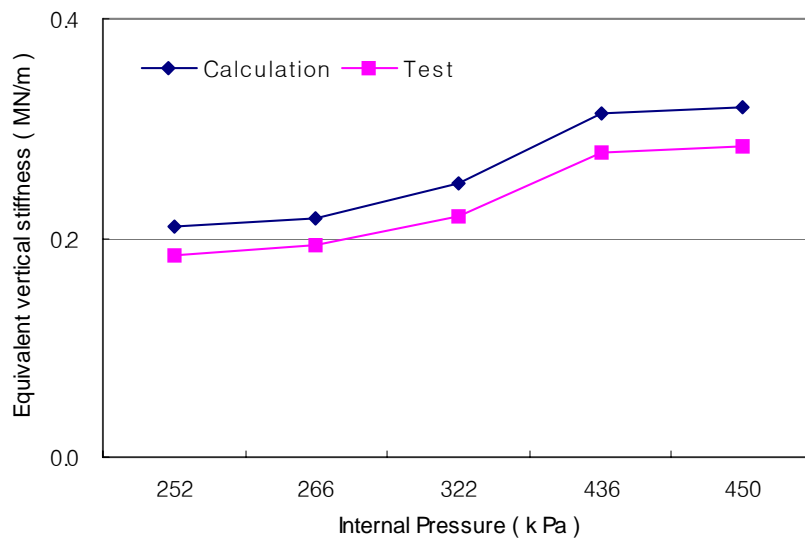


그림 3. Equivalent vertical stiffness

그림 3의 결과에서 알 수 있듯이, 공기스프링의 내부압력 변화에 따라 해석적으로 구한 상하방향 Stiffness 값과 시험결과 값이 유사한 경향을 보이나, 전체적으로 해석적으로 구한 값이 시험 값보다 10%정도 크게 나타났다.

철도차량의 성능을 평가하는 항목에는 임계속도, 탈선계수, 윤중감소율, 차륜횡압 및 승차감이 있다. 이들 항목 중 공기스프링의 수직방향 Stiffness에 대한 영향이 가장 큰 항목은 수직방향의 승차감이며, 승차감 해석 결과를 표 2에 나타내었다. 승차감 해석결과, 전위대차 및 후위대차 상부 차체바닥에서 측정된 승차감은 해석적으로 구한 값을 입력한 경우가 실험값을 입력한 경우보다 7-8%정도 크게 나타났다.

표 2. 수직방향 승차감 지수(Wz)

	계산 값을 입력한 경우	실험 값을 입력한 경우
전위대차 상부 상하방향 승차감	1.74	1.61
후위대차 상부 상하방향 승차감	1.53	1.43

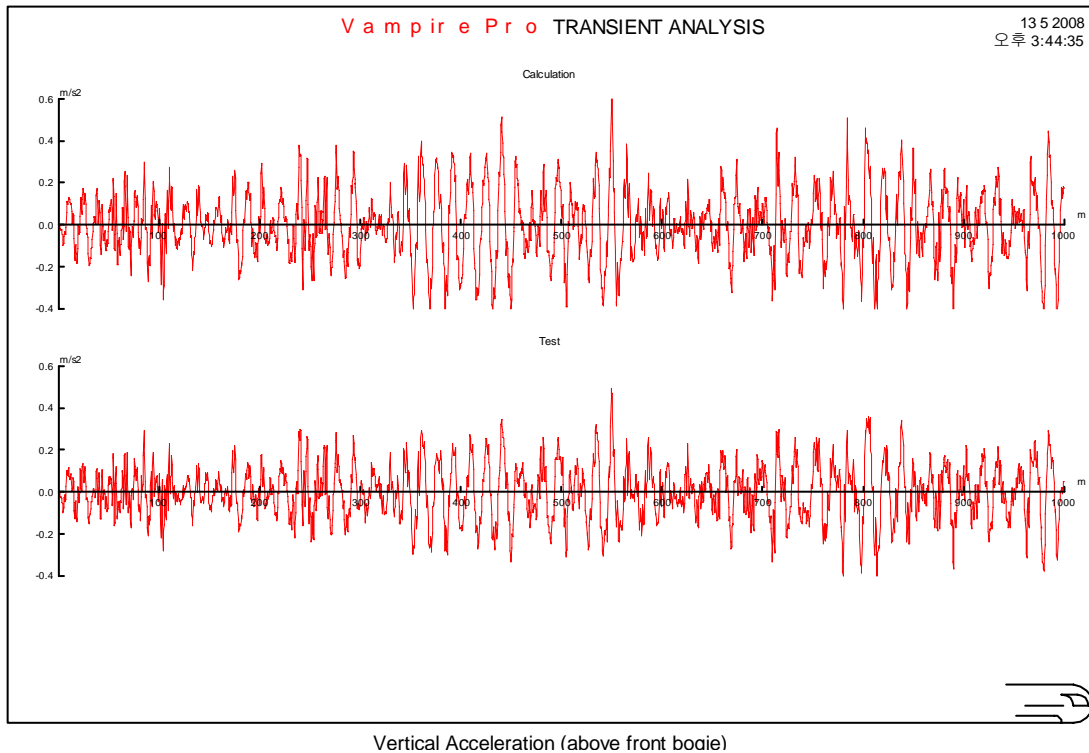


그림 4. 상하방향 진동가속도(m/sec²) - 전위대차 상부 차체바닥

3. 결론

본 논문에서는 철도차량에서 2차 현가장치로 많이 사용하고 있는 공기 스프링에 대하여, VAMPIRE PROGRAM에서 제공하는 공기스프링 요소(Element)의 이론적 설명과 함께 해석적으로 구한 공기스프링의 수직방향 Stiffness를 단품 시험결과와 비교 검토하였다.

해석적으로 구한 수직방향 Stiffness가 시험결과에 비해 다소 크게 계산되었지만, 내부 압력의 변화에 따라 매우 유사한 경향을 보였으며, 해석적으로 구한 값이 실험 결과보다 큰 값을 갖는 이유는 공기스프링의 가공(치수)오차와 더불어 Gas constant를 상수로 가정한 것에서 기인한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Vampire Manual
2. A. Minnis(1994) Vampire Training Course.2.