철도차량 공기스프링 내부 슬라이딩 시트 파손이 다이어프램에 미치는 영향

Effect of damage of internal sliding seat of railway vehicle air spring on diaphragm

김범수*, 유영돈*†

Bum-Su Kim*, Youngdon Yu*†

초 록 본 연구는 철도차량 대차에 적용되는 공기스프링 내부 슬라이딩 시트의 파손 정도 및 유무가 다이어프램에 미치는 영향 예측을 목적으로 하며, 실제 차량 운행에 준하는 내구성 시험 및 해석을 진행했다. 해석은 벨로즈와 보조스프링이 조립된 공기스프링 완제품을 모델로 하였으며, 횡방향 단일 방향 조건과 횡방향 및 길이방향 이방성 조건으로 진행하였다. 내구성 시험은 임의 5개소 부위를 파손한 슬라이딩 시트 파손 조건과 슬라이딩 시트를 제거한 두 조건으로 반복 진행했다. 해석결과 횡방향 하중 적용 모델과 종, 횡방향 하중을 모두 적용한 모델 모두 실제 운행 조건상 균열 부위와 유사한 것을 확인했다. 내구 시험 결과 두 조건 모두 합격 판정 기준을 통과하였다.

주요어 : 공기스프링, 슬라이딩 시트, 내구 시험, 유한요소해석, 피로 파괴, 다이어프램

1. 서 론

철도차량 공기스프링의 슬라이딩 시트는 일반적으로 높은 강도의 반복 하중과 외부 조건에 노출되기 때문에 파손이 되기 쉽다. 공기스프링의 자체 강성 등에 대한 연구[1]나, 열차 내 공기스프링의 해석에 대한 연구[2]는 활발히 진행되고 있지만 복합재료로 이루어진 벨로우즈와 보강 코드인 슬라이딩 시트의 이방성 및 비선형성[3] 때문에 슬라이딩 시트 파손 방지 대책에 비해 사후 대책에 대한 부분은 부족한 실정이다. 슬라이딩 시트 손상 시 중정비 기간 전까지 긴 기간이 걸리는데 반해 예비품이 없다면 상당히 긴 시간 비정상 상태 주행을 지속하거나 주행을 중단해야한다. 이에 우리는 파손된 슬라이딩 시트를 이용한 경우의 내구성과 슬라이딩 시트를 제거한 경우의 내구성 시험 결과를 통해 철도차량 슬라이딩 시트 파손 대책을 제안하고자 한다. 본 연구에서, 내구 시험을 통해 공기 스프링 내 일정 압력 조건에서 슬라이딩 시트 손상부가 벨로우즈에 미치는 영향을 내구 시험을 통해 파악하였다. 내구성 시험 결과를 활용해 벨로우즈의 손상 유무를 확인하였다. 추후 연구 결과를 활용해 중정비 기간 전까지 손상된 슬라이딩 시트를 제거하지 않거나 제거 후 사용 등 공기 스프링 운용 방법 대책 마련에 이용할 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 선행 FEM 해석

2.1.1 해석 모델 및 해석 조건

본 해석의 모델로는 **Fig. 1** 형태의 좌우방향과 전후방향에 대해 다른 특성을 같는 양방성 공기스프링으로, 특성 및 치수는 치수는 **Table 1**과 같다. 해석 조건은 공기 스프링 종방향 및 횡방향 행정 변위인 40㎜ 및 75㎜를 기준으로

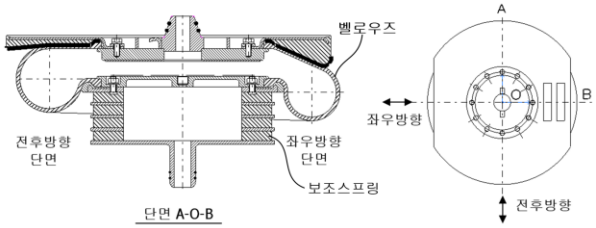

Fig. 1 Structure of air spring used in analysis

† 교신저자: 현대로템 주행장치개발팀 유영돈 책임연구원 (ydyu@hyundai-rotem.co.kr)
* 현대로템 주행장치개발팀

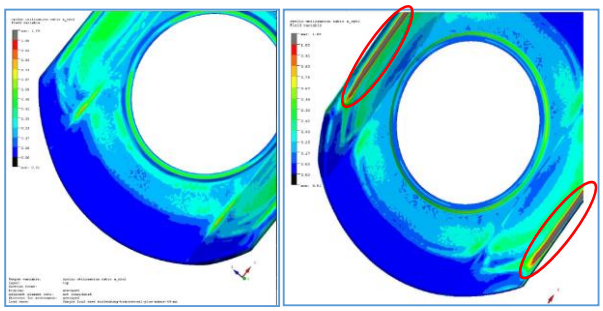

Fig. 2 (a) Analysis results that conditions with a lateral displacement of ±40mm (±27mm to the bellows) to the auxiliary spring.

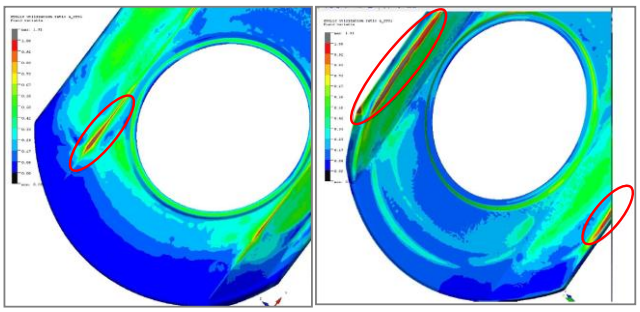

Fig. 2 (b) Analysis results that conditions with a lateral displacement of ±40 mm(±27 mm to the bellows) and a longitudinal displacement of ±75 mm(±51 mm to the bellows) to the auxiliary spring.

정하였다. 횡방향 단일 행정만 고려한 조건1, 횡방향 및 종방향을 모두 고려한 조건2로 나누어 해석을 진행했다.

2.1.2 해석 결과

해석 결과 조건 1에서 슬라이딩 시트 횡방향 양쪽 끝 부분(**Fig. 2 (a)**)에서 최대 순환 이용률(cyclic utilization ratio, 1.68)이 발생했다. 조건 2에서는 슬라이딩 시트의 굴곡 부위 및 횡방향 끝 부위(**Fig. 2(b)**)에서 최대 순환 이용률(1.81)이 발생했다. 대차 프레임과 구성품에 대한 안전 설계 규격인 BS EN 13749[4] 에 의하면 대차 및 대차 구성품의 이용률(Utilization) 은 1보다 낮아야 한다. 공기스프링 또한 이에 포함되는데, 해석 결과 가장 큰 이용률이 가해지는 부위는 이용률 기준치를 넘기에 파손 위험이 크다. 실제로 Fig. 3을 통해 알 수 있듯이, 해석 조건과 동일한 특성 및 하중조건으로 운행한 전동차[5]에서 발생한 공기스프링 균열 부위가 해석 결과 부위와 유사함을 알 수 있다.

Table 1 Properties of materials.

Materials	Properties		
Sliding Sheet	Tensile Strength (MPa)		26.2
	Elongation (%)		518
	Hardness(Shore D)		65
	Flexural Modulus(GPa)		1.34
	Izod Impact Strength(A, J/m)		477
	Thickness(mm)		1.5
Air spring Standard	Vertical	Static Characteristics (N/mm)	310±10%
		Weight(kg)	5,790
	Longitudinal	Static Characteristics (N/mm)	> 80 (±40mm Stroke)
		Dynamic Characteristics (N/mm)	152±15% (±75mm Stroke)
	Transverse	Static Characteristics (N/mm)	60±15%
	Auxiliary reservoir capacity(L)		50

2.2 내구성 시험

2.2.1 시험 구성

해석 결과 횡변위 시험으로 종, 횡변위 시험과 유사한 결과를 얻을 수 있으므로, 슬라이딩 시트 내구성 시험은 횡변위 시험으로 진행했다. 시험은 기밀 및 외관 검사로 이루어졌으며, 임의로 파손한 슬라이딩 시트를 포함한 1차 시험과 슬라이딩 시트를 제거한 2차 시험으로 나누어 진행했다. 공통으로 10만, 20만회 내구 시험 (변위±75mm, 0.7Hz)을 마친 후, 추가 1만회(변위±100mm, 0.5Hz) 시험을 실시해 각각 결과를 확인했다. 각 시험의 합격 판정 기준은 KS R 9243 철도차량용 시험방법[6]에 의거해 결정했다. 내구성 시험 합격 기준은 압력 7.5bar를 유지해 안정된 후 3분간 내부 압력 강하량이 0.2bar 이내여야 한다. 외관 검사 합격 기준은 손상으로 발생한 깊이 1mm 기준으로, 마찰 혹은 손상으로 고무 내측 코드지가 드러나지 않을 것으로 정하였다.

2.2.2 시험 결과

총 21만 회의 1차 시험 후 외관은 **(fig.4(a))**

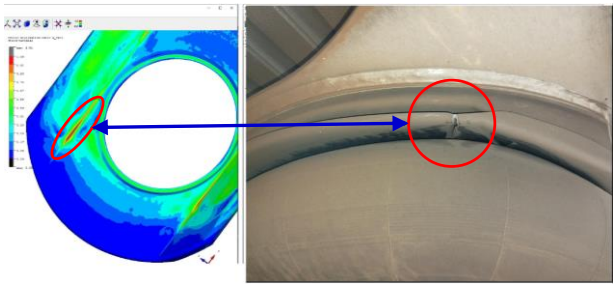

Fig. 3 Comparison of the locations of air spring sliding seat damage that occurred in 448 KORAIL trains and the location of damage as a result of analysis

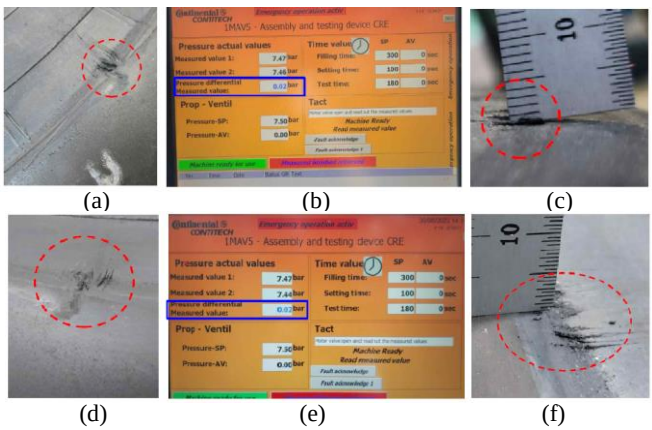

Fig. 4 The 1'st test results (a) Figure of external damage to the air spring at 3 o'clock (b) Internal pressure difference (c). The 2'nd test results (d) Figure of external damage to the air spring at 3 o'clock (e) Internal pressure difference (f).

와 같이 에어스프링의 3시방향 손상이 가장 컸다. 기밀 시험 결과 **(fig.4(b))** 압력 차이가 0.02bar로 적합하며, 외부 손상 최대 깊이도 1mm 미만으로 **(fig.4(c)),** 합격 기준을 만족하였다. 2차 시험은 슬라이딩 시트를 제거하고 총 21만 회 시험하였다. **fig.4(d)**와 같이 2차 시험 또한 3시방향 손상이 가장 컸으며 기밀 시험 압력 차이 0.02bar **(fig.4(e))**, 외부 손상 최대 깊이 1mm 미만으로**(fig.4(f))** 합격 기준을 만족하였다.

Table 2 Properties of materials.

items	Test pass criteria	1st test	2nd test
Pressure Differential (bar)	0.2	0.02	0.02
Maximum external damage depth (mm)	1	< 0.5	< 0.5

3. 결 론

슬라이딩 시트 임의 파손 후 **Table 2**와 같이 1,2차 내구 시험 모두 공기스프링 특성 시험 기준값을 만족하였다. 따라서 철도차량 운행 중 슬라이딩 시트 균열이 발생할 경우 유지보수 전까지 슬라이딩 시트 균열이 발생한 상태로 차량 운행을 지속하거나, 슬라이딩 시트를 제거하는 방안을 고려할 수 있다. 철도차량 공기스프링의 예비품이 없을 때, 제작 및 교체까지 많은 시간이 소요된다. 본 연구 결과를 통해, 정비 기간 동안 운행 계획 및 운행 결과를 예측할 수 있다.

다음으로 슬라이딩 시트 여부에 상관없이 외관에 가장 큰 손상이 가해지는 위치가 동일했다. 이는 실제 공기스프링 파손에 기여하는 여러 인자 중 슬라이딩 시트 파손은 낮은 우선순위에서 고려하는 것이 바람직하다.

참고문헌

[1] I. M. Garcia, N. G. Negrete, F.J. Nieto, A. Facchinetti, S. Bruni (2022). Analysis of the axial and transversal stiffness of an air spring suspension of a railway vehicle: mathematical modelling and experiments, *International Journal of Rail Transportation*, 12(1), pp. 56-75.

[2] S. Toyokawa, M. Shiozaki, J. Yoshida, D. Watanabe, T. Sawa, H. Haraguchi (2020). Simulation Technology for Air Springs of Railway Systems, *SEI TECHNICAL REVIEW*, 90, pp. 13-16.

[3] 우창수, 김완두, 최경진, 철도차량용 공기스프링 실차시험 및 신뢰성 평가(2005). 한국철도학회논문집, 8(2), pp. 182-187.

[4] BS EN 13749 (2021), Railway applications—wheelsets and bogies—Method of specifying the structural requirements of bogie frames, British Standard, E.4.2, pp. 35.

[5] "현대로템, 코레일 노후 전동차 교체 사업 수주", 레일&뉴스, 2019.12.24, http://www.railn.kr/news/articleView.html?idxno=271

[6] KS R 9243 (2023), Testing methods of air spring for railway rolling stock , Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

(한국철도학회 정기학술대회 Full Paper - Template 작성일: 2024.3.24)