

# 철도차량용 공기스프링 시험방법 규격안에 대한 연구

## A study on the testing methods of air spring for railway rolling stock

허현무\*      권성태\*      최경진\*\*      김완두\*\*\*  
Hur, Hyun-Moo   Kwon, Sung-Tae   Choi, Kyung-Jin   Kim, Wan-Doo

### ABSTRACT

Air spring for railway rolling stock is a part of secondary suspension system, which is supporting load, damping vibration. Recently, air springs are actively applied to railway rolling stock to substitute the coil spring by upgrading the manufacturing skill. This study is started to develop draft for the testing methods of air spring for railway rolling stock. We have tested several items on testing methods to guarantee the performance of air spring. Thus, we have developed the test draft for air spring.

### 1. 서론

철도차량용 공기스프링은 주행장치인 대차와 차체간 2차 현가시스템의 구성요소로 차량의 승차감, 하중지지, 진동감쇠의 역할을 하는 철도부품이다. 2차 현가계용 스프링으로는 하중지지 및 내구성능이 양호한 코일스프링이 주로 적용되어 왔으나, 취약한 진동 감쇠성능 및 소음 발생 등의 단점을 내포하고 있다. 최근, 철도차량의 승차감 향상, 차량 유지보수의 효율성을 도모하기 위하여, 내구성 및 진동감쇠가 우수한 고무재질의 공기스프링 적용이 활발해 지고 있다.

그러나, 철도차량용 공기스프링은 우수한 승차감을 제공하는 반면 정상적인 품질확보가 미흡할 경우, 차량 안정성 저하, 승차감 저하 등의 문제를 유발한다. 또한, 차량운용조건, 선로 및 환경특성등에 따라 공기스프링의 성능이 영향을 받으며, 이런 이유로 선진 철도국에선 각 국의 고유한 차량 운용특성을 고려하여 공기스프링에 대한 성능기준, 시험방법을 개발하여 적용하고 있다. 현재, 국내에선 철도차량용 공기스프링에 대한 한국산업규격은 갖추어 지고 있지 않은 실정으로 일부 관련 규격은 해외 규격을 준용하고 있으며, 공기스프링은 전량 수입에 의존하다가 최근 국산화 개발단계에 있다.

따라서, 국내에서도 기 적용되고 있는 철도차량용 공기스프링에 대한 유지보수와 신차개발시 제작비용 절감을 위한 철도부품 국산화 개발 노력이 활발한 즈음, 국내 공기스프링관련 기술의 향상을 도모할 목적으로 본 연구를 시작하였다. 본 연구는 철도차량용 공기스프링 시험방법에 대한 규격안을 개발하기 위한 연구로서 철도차량용 공기스프링의 제 성능 및 시험방법에 대한 연구를 수행하였다. 철도차량용 공기스프링의 정상적 품질확보를 위한 규격안 도출을 위하여 실차시험 및 해석, 시험안 도출 및 적합성 분석시험, 규격 최종안 도출의 연구가 수행되었다.

### 2. 철도차량용 공기스프링

철도차량용 공기스프링은 구조상 벨로즈(bellows)형과 다이어프램(diaphragm)형으로 구분된다. 국내에선 벨로즈형만 적용되고 있으며 그림1과 같이 상판, 고무벨로즈, 보조스프링으로 구성

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\*\* 한국기계연구원 책임연구원, 정회원

되어 있다. 고무막은 외층고무, 내층고무, 코드막으로 구성되어 내층은 기밀을 유지하며, 중간층은 내압에 의한 장력을 받는 층으로서 레이온 또는 나일론이 겹쳐진다.

외층은 외적 조건에 대하여 내부를 보호하는 층으로 구조는 튜브레스 타이어와 유사하다. 철도차량용 공기스프링은 최대 15ton의 하중을 지지하고 대차와 차체간의 진동감쇠 역할을 하며 차량의 동적거동을 좌우하는 현가계 요소이므로 다양한 성능을 필요로 한다.

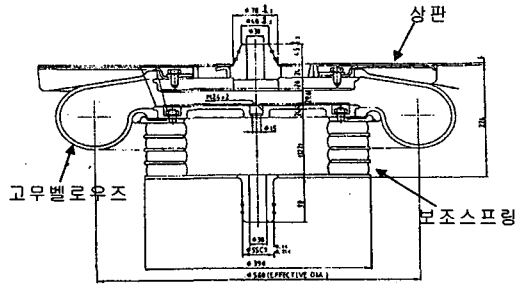


그림1. 전동차용 공기스프링

이에 따른 주요 요구성능은 기밀, 내압, 상용최대변위, 가능최대변위, 내용적, 수평·수직방향 정적스프링강성, 동적스프링강성, 피로내구성, 고무막의 기계적, 화학적 성능등이 충족되어야 한다.

### 2.1 국내·외 규격 제정 현황

철도차량용 공기스프링 관련 규격으로 국제규격이나, 지역블록규격은 없으며 일본, 프랑스 등 철도선진국의 국가규격으로 일부 제정되어 있다. 아직 국제규격이나 지역블록규격이 제정되지 않은 것은 철도차량용 공기스프링이 각 국의 철도차량 특성과 철도환경에 밀접하게 영향을 받으므로 범용화된 규격을 제정하기엔 어려움이 있음을 반증하는 예라 할 수 있다.

일본에선 JIS D 4101 Testing Method of Rubber Bellows for Air Springs에 범용 공기스프링 고무 벨로우즈에 대한 시험방법을 규정하고 있으며, 철도차량 적용 관련규격으로는 JIS E 4206 鐵道車輛用ばね装置(Spring Rigging for Railway Rolling Stock)에 일본의 철도차량용 공기스프링장치에 대한 주요성능과 시험방법을 규정하고 있다. 프랑스에선 NF F 18-805 Railway Rolling Stock : Rubber Diaphragms for Pneumatic Suspension Springs에 공기스프링용 고무 다이아프램에 대하여 규정하고 있다.

국내에선 KS R 4001 공기스프링용 고무 벨로우즈 시험방법에 범용 공기스프링 벨로우즈에 대한 시험일반을 규정하고 있으나 이는 JIS D 4101 Testing Method of Rubber Bellows for Air Springs을 번역한 것으로 철도차량용 공기스프링에 대한 시험 규격은 없는 실정이다. 따라서, 국내 철도차량에 적용되고 있는 공기스프링, 그리고 향후 개발에 대비하여 국내 철도실정에 적합한 공기스프링 시험규격 개발이 시급히 요구되고 있다.

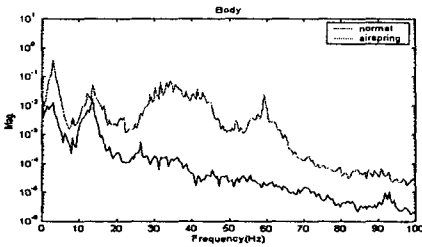
### 2.2 공기스프링 적용차량의 동적 특성

규격 시험항목 및 기준치 도출을 위하여 공기스프링 적용 철도차량을 대상으로 해석 및 실험을 수행하여 주행특성을 분석하였으며 표1과 같다.

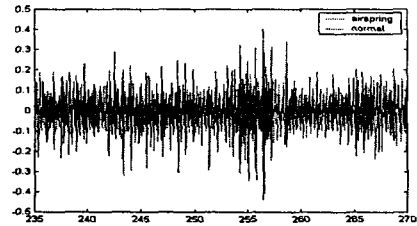
표 1 공기스프링 적용 철도차량의 동적 특성

구분	내용
공기스프링 강성 허용범위에 따른 진동특성 해석	강성 15% 변화를 가정한 해석결과, 수직방향이 -0.8~0.9dB, 수평방향이 -0.2~0.1dB로 그 크기가 모두 1dB 미만으로 허용범위내에서의 진동변화는 미미하다.
공기스프링 적용차량 진동 감쇠특성 시험	상하방향의 대차/차체간 진동감쇠는 객차에서 21.9dB, 전동차에서 22.2dB이며, 좌우방향으로는 전동차인 경우 5.6dB의 진동 감쇠효과를 보이고 있다.
공기스프링 결합시의 진동특성 시험	공기스프링 결합시를 가정한 실차 주행시험 결과, 차체진동은 전역역에서 정상차량에 비하여 비정상차량이 크게 증가하고 있다. 100Hz대역까지 정상차량의 차체진동이 105dB인 반면, 비정상차량은 117dB로 공기스프링 결합에 따라 약 12dB 진동이 증가하여 승차감 및 안정성에 악영향을 미침을 알 수 있다.
공기스프링 결합시의 진동특성 시험	공기스프링 결합시를 가정한 실차 주행시험 결과, 차체진동은 전역역에서 정상차량에 비하여 비정상차량이 크게 증가하고 있다. 100Hz대역까지 정상차량의 차체진동이 105dB인 반면, 비정상차량은 117dB로 공기스프링 결합에 따라 약 12dB 진동이 증가하여 승차감 및 안정성에 악영향을 미침을 알 수 있다.

공기스프링 변위특성 해석	무궁화객차를 대상으로 궤도틀림이 없는 곡선반경 400m의 곡선을 90km/h의 주행 속도로 통과할 때를 가정하여 해석한 결과, 최대 변위는 전후방향 22mm, 좌우방향 31mm, 상하방향 31mm 정도로 예측된다.
공기스프링 변위빈도특성 시험	상용최대변위는 좌우방향 30~40mm 정도, 상하방향 30~35mm 정도이며, 최대변위는 좌우방향으로 80.4mm의 변위가 발생하고 있다. 피로시험관련된 상용최대변위의 빈도를 살펴보면 $\pm 30$ mm 정도의 변위가 시험구간에서 좌우방향으로 12회, 상하방향으로 5회 발생하고 있다. 본 시험차량의 운용구간이 오이도~당고개 구간, 1일 3왕복함을 가정하고, 10년 운용시의 빈도를 산출하면, 좌우방향으론 700,000회, 상하방향으론 300,000회 정도로 추정된다.
공기스프링 공기압력특성 시험	주행중인 전동차의 공기스프링 공기압력을 측정된 결과, 공차시 최대치는 2.7 kgf/cm <sup>2</sup> 정도이며 공기압 변동주기는 약 1Hz 내외의 범위로 나타나고 있다.



(a)주파수 분석



(b)진동가속도 신호

그림2. 공기스프링 결합시의 차체진동특성(100Hz Filtering)

### 3. 시험규격 분석

국내외에서 철도차량용 공기스프링 제작사양 및 시험방법으로 적용중인 대차부품규격서, 제작시방서, 품질인증기준, 규격등을 조사하여 각 규격의 구성, 적용범위, 시험항목, 시험방법등을 분석하였다.(표2)

철도차량용 공기스프링의 시험규격 개발 측면에서 적용범위, 종류, 필요조건, 시험일반조건, 검사, 시험항목, 합격수준등의 항목에 대하여 분석하였다. 각 각의 항목에 대하여 분석한 결과를 토대로 시험데이터 취득과 적합성 분석을 위하여 활용될 시험안을 작성하였다.

표 2 공기스프링 시험항목 비교

항목	규격명	KNR 1호선	새마을 객차	SMSC 1호선	KNR 과천선	JIS E 4206	JIS D 4101	시험안
외관검사		○	○	○		○	○	○
치수검사		○	○	○		○	○	○
압력시험		○	○	○	○	○	○	○
기밀시험		○	○	○		○	○	○
신축시험		○	○	○			○	○
내용적시험		○	○	○	○	○		○
파괴시험		○	○	○	○	○	○	○
수직지지하중시험		○	○	○	○	○		○
수직정하중시험		○	○	○	○	○		○

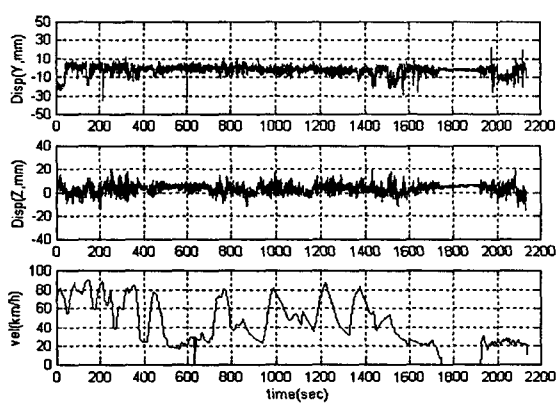


그림3. 전동차용 공기스프링 변위선도(오이도~금정구간)

수평동하중시험	○	○	○	○	○	○	○
피로시험	○	○	○	○	○	○	○
스톱퍼시험	○	○	○	○			○
인장시험	○	DIN	○	○	○	○	○
노화시험	○		○	○	○	○	○
반복굽곡시험	○		○	○	○		○
옥의노출시험	○		○	○	○		
기타재료시험					내저온성, 내후성, 내영구 변형을		경도 오른균열

#### 4. 공기스프링 시험안 적합성 분석

시험안에 의거하여, 외산 공기스프링 시료를 대상으로 외산 시료에 대한 성능데이터를 확보하고 시험안에 대한 적합성을 분석하고자 시험을 실시하였다. 시험품은 국내 철도차량에 적용중인 일본 Bridgestone사의 고무벨로즈형 공기스프링을 대상으로 하였다. 또한, 현 국산화 개발 중인 국산 공기스프링 시료의 성능수준 분석, 시험안과의 부합 여부를 분석하기 위하여 국산 공기스프링 시료를 대상으로 시험을 실시하였다.

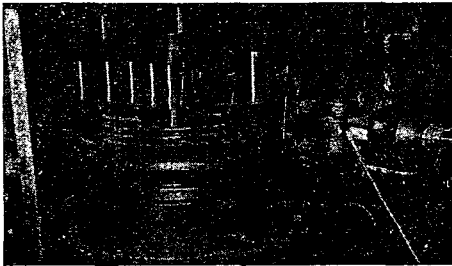


그림4. 수평방향 피로시험장치

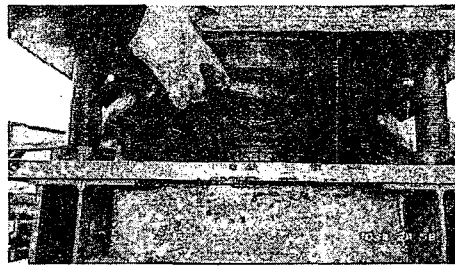


그림5. 파괴시험 후 파괴된 시료

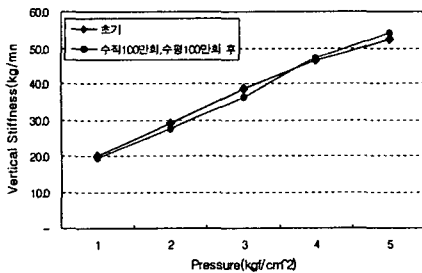


그림6. 수직 정강성 변화(외산, 100만회 후)

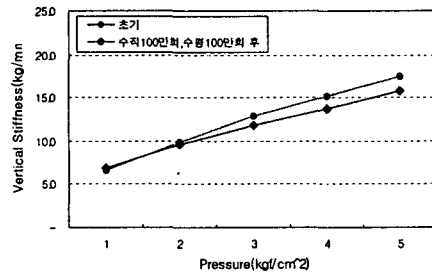


그림7. 수평 정강성 변화(외산, 100만회 후)

표 3 외산 시료 시험결과

구분	기준치	측정값	결과
외관검사	결합이 없을 것	이상없음	적합
치수검사	제작도면상 기준치에 적합	이상없음	적합
압력시험	공기누설 및 변형이 없을 것	공기누설 및 변형이 없음	적합
기밀시험	압력강하 0.098N/mm <sup>2</sup> (0.1kgf/cm <sup>2</sup> )이하	압력강하 0.005kgf/cm <sup>2</sup> (전수시험적용시)	적합
신축시험	공기누설, 파손, 이상변형 등의 결함을 발생하지 않을 것	공기누설, 파손, 이상 변형 등의 결함 발생 없음	적합
파괴시험	누수 및 파손이 없을 것	18kgf/cm <sup>2</sup> 에서 파괴	기준치 이하에서 파괴
내용적시험	-	33.37 ℓ at 3kgf/cm <sup>2</sup>	-
수직정하중시험	38kgf/mm ± 10% at 3kgf/cm <sup>2</sup>	39.2kgf/mm	적합
수평정하중시험	10kgf/mm 이상 at 3kgf/cm <sup>2</sup>	11.8kgf/mm	적합
수평동하중시험	17kgf/mm ± 15% at 3kgf/cm <sup>2</sup>	17.0kgf/mm, 1Hz	적합
피로시험	결합이 없을 것	이상 없음	적합

표 4 국산 시료 시험결과

구분	기준치	측정값	결과	
의관검사	결함이 없을 것	이상없음	적합	
치수검사	제작도면상 기준치에 적합	이상없음	적합	
압력시험	공기누설 및 변형이 없을 것	공기누설 및 변형이 없음	적합	
기밀시험	-전수검사: 압력강하 0.098N/mm <sup>2</sup> (0.1kgf/cm <sup>2</sup> ) 이하 -형식검사: 압력강하 0.1961N/mm <sup>2</sup> (0.2kgf/cm <sup>2</sup> ) 이하	-전수검사: 압력강하 0.005kgf/cm <sup>2</sup> -형식검사: 압력강하 0.064kgf/cm <sup>2</sup>	적합	
신축시험	공기누설, 파손, 이상변형 등의 결함을 발생하지 않을 것	공기누설, 파손, 이상 변형 등의 결함 발생 없음	적합	
파괴시험	누수 및 파손이 없을 것	21kgf/cm <sup>2</sup> 에서 파괴	적합	
내용적시험	-	36.76 ℓ at 3kgf/cm <sup>2</sup>	-	
수직정하중시험	38kg/mm±10% at 3kgf/cm <sup>2</sup>	40.3kg/mm	적합	
수평정하중시험	10kg/mm이상 at 3kgf/cm <sup>2</sup>	13.7kg/mm	적합	
수평동하중시험	17kg/mm±15% at 3kgf/cm <sup>2</sup>	19.0kg/mm, 1Hz	적합	
피로시험	결함이 없을 것	이상 없음	적합	
고무재료시험	인장시험	-내층: 인장강도 180kg/cm <sup>2</sup> 이상, 연신율 400% 이상 -외층: 인장강도 150kg/cm <sup>2</sup> 이상, 연신율 350% 이상	-인장강도: 187.8kgf/cm <sup>2</sup> -신장율: 534%	적합
	노화시험	-내층: 인장강도 변화율, 연신율 변화율 : 노화전의 ±20% 이내 -외층: 인장강도 변화율, 연신율 변화율 : 노화전의 -30%~+20% 이내	-인장강도 변화율: 10.4% -연신율 변화율: 20%	적합
	경도시험	Hs 55 ±5	54	적합
	반복굴곡시험	육안으로 볼 때, 균열이 없을 것	No Crack	적합
	오존균열시험	A-2이내	No Crack	적합

5. 철도차량용 공기스프링 시험방법 규격안 도출

철도차량용 공기스프링에 대한 특성 분석, 실차시험 데이터 분석, 시험안 작성, 외산 및 국산 시료에 대한 시험데이터 취득 및 시험안 적합성 분석등 연구내용에 의거하여 규격안을 도출하였다. 규격의 구성은 적용범위, 인용규격, 정의, 종류, 성능, 검사 및 시험, 검사방식으로 하였다.

규격의 각 시험항목은 본 규격과 관련된 한국산업규격과 부합하게 작성하였으며, 시험방법에 따른 성능기준은 균일한 동적성능 확보와 내구성 향상을 목적으로 국내 철도기술 수준을 고려하여 국제수준에 부합, 국내 기술수준 제고 측면에서 고려되었다. 또한 본 규격관련 최종안 도출과 관련하여 철도차량용 공기스프링관련 기관인 철도운영처, 차량제작사, 부품제작사등의 자문을 구하여 규격의 완성도를 제고하고자 노력하였다. 표5는 규격안 주요 시험항목에 대하여 비교한 표이다.

표 5 규격안 주요 시험항목 비교

규격명 항목	철도용품품질규격 KRS 2240-2541	JIS E-4206	JIS D 4101 (KS R 4001)	규격안
압력시험	KS R 4001	7.6kgf/cm <sup>2</sup> 압력(3분)	상용최고내압의 2.5배(3분)	KS R 4001
기밀시험	KS R 4001 -형식시험:5kgf/cm <sup>2</sup> 압력(24시간), 압력강하 0.2kgf/cm <sup>2</sup> 이하 -전수시험:6kgf/cm <sup>2</sup> 압력(3분), 압력강하 0.3kgf/cm <sup>2</sup> 이하	상용최대압력	상용최고내압 (24시간)	-형식시험:상용최고 내압(24시간), 압력강하 0.2kgf/cm <sup>2</sup> 이하 -전수시험:상용최고내 압의 1.5배(3분), 압력강하 0.1kgf/cm <sup>2</sup> 이하
신축시험	KS R 4001	-	상용최고내압, 가능최대신장·압축	KS R 4001

수직지지 하중특성	기준치의 $\pm 200\text{kg}$ 이내	-	-	도면에 명시된 기준치의 $\pm 3\%$ 이내
수직정적 스프링정수	기준치의 $\pm 10\%$ 이내	-	-	도면에 명시된 스프링 정수의 $\pm 10\%$ 이내
수평정적 스프링정수	기준치 이상	-	-	도면에 명시된 스프링 정수 이상
수평동적 스프링정수	기준치의 $\pm 15\%$ 이내	-	-	도면에 명시된 스프링 정수 $\pm 15\%$ 이내
내용적시험	$\pm 2$ liter	$\pm 3\%$	-	기준치의 $\pm 3\%$
피로시험	-수직:진동수1~3Hz, 진폭 $\pm 30\text{mm}$ , 100만회 -수평:진동수1~3Hz, 진폭 $\pm 75\text{mm}$ , 50만회	-수직:진동수1~3Hz, 상용최대변위진폭, 100만회 -수평:진동수0.5~1.5 Hz, 상용최대변위진폭, 20만회	-수직:진동수1~3Hz, 상용최대변위진폭, 100만회	-수직:진동수1~3Hz, 상용최대변위진폭, 100만회 -수평:진동수1~3Hz, 상용최대변위진폭, 100만회
오존 균열시험	A-2이내( $50 \pm 5\text{pphm}$ , $40^\circ\text{C}$ , 24시간)	A-2이내( $50 \pm 5\text{pphm}$ , $40^\circ\text{C}$ , 72시간)	-	A-2이내( $50 \pm 5\text{pphm}$ , $40^\circ\text{C}$ , 72시간)

## 6. 결론

철도차량용 공기스프링의 정상적 품질확보를 위한 시험규격을 개발하기 위하여 공기스프링의 제 성능 및 시험방법에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 관련된 자료 조사 및 분석, 실차시험 및 해석, 시험안 도출 및 적합성 분석시험, 규격 최종안 도출의 일련의 연구가 수행되었다.

철도차량용 공기스프링에 대한 균일한 동적성능 및 주행 안전성 확보를 위하여, 국제규격 수준과 부합하고 국내 철도현실에 적합한 철도차량용 공기스프링 시험방법에 대한 한국산업규격(안)을 개발하였다. 향후 본 규격안은 한국산업규격으로 제정되어 철도관련 수요자에게 철도부품에 대한 시험규격으로 적극 활용될 것으로 기대된다.

## 7. 후 기

본 논문은 산자부 표준화기술개발과제인 “철도차량용 공기스프링 시험방법”개발 과제의 연구 내용 일부임을 명기한다.

## 참고문헌

1. Vijay K. Garg and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
2. “日本機械學會編, 鐵道車輛의 그이네믹스”, 電氣車研究會(株), 1996
3. D.E. Newland and R J Cassidy, "Suspension and Structure", IMechE 1974 외
4. 허현무 외, “대차 현가계 구성요소 진단방법에 관한 연구”, 한국철도학회, 2000. 11
5. “차량 고장진단 적용기법에 관한 연구”, 한국철도기술연구원, 2000
6. 허현무 외, “공기스프링 적용 철도차량의 동적 특성에 관한 연구”, 한국철도학회, 2001. 11
7. “철도차량용 공기스프링 시험방법”, 한국철도기술연구원, 2003