

# 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준 및 시험 Reliability Evaluation of Air Spring for Railway Vehicle

우창수\*, 김완두\*, 김석원\*\*, 김영구\*\*

Chang-Su Woo, Wan-Doo Kim, Suk-Won Kim, Young-Gu Kim

---

## Abstract

Air spring system in railway vehicles primarily ensure the air suspension of the vehicle body. The low natural frequency ensures a comfortable ride and an invariably good stiffness.

In this paper, the characteristics and durability test was conducted in laboratory by using servo-hydraulic fatigue testing system to reliability evaluation of air spring for electric railway vehicle. The experimental results show that the characteristics and durability of domestic development productions are obtained the good results.

---

## 1. 서론

공기스프링은 1950년 대 미국, 일본, 독일 등에서 상품화 연구를 시작하여 철도차량, 버스, 산업 용에 적용되기 시작하였으며, 국내에서는 1980년대에 타이어 업체들이 일부 개발을 진행하였으나, 국내 시장규모가 선진국에 비하여 빈약하고 해외 시장으로의 진출이 어려워지면서 공기스프링 개발 및 적용에 많은 어려움이 있었다. 그러나 최근 들어 차량의 안정성, 기능성, 편리성 등이 요구되면서 공기스프링의 수요 또한 급격히 증가하는 추세이다[1].

철도차량용 공기스프링은 차량 수명동안 정숙성 및 승차감을 유지하고 부품의 보증기간을 확보 하기 위하여 높은 신뢰성이 요구되는 부품 중의 하나이지만 고무재료의 고유한 특성으로 인하여 다른 금속재료에 비해 비교적 큰 물성치의 편차를 지니고 있으며 특성시험의 재현성도 좋지 않아 신뢰성 평가가 어려운 부품이다[2].

현재 국내 철도차량용 공기스프링은 전량 수입품으로 국산화 개발이 필요하며 신뢰성 평가는 외국 업체의 시험 성적서에 의존하고 있어 신뢰성 평가기준 제정이 절실하다 하겠다. 신뢰성을 시험하는 방법으로 고무재료의 물성시험, 특성시험, 피로시험 등이 있으나 공기스프링에 대한 신뢰성 평가기준이 정립되지 않아 제품의 신뢰성 회복에 어려움이 있다. 따라서 위와 같은 문제를 해결하기 위해서 철도차량 및 공기스프링 제조회사, 철도청, 연구소 등 관련분야의 기술위원회를 구성하여 공기스프링의 신뢰성 평가기준을 제정하여 국내에서 개발한 전동차용 공기스프링에 대해 신뢰성 시험을 수행한 결과, 모든 항목에서 평가기준을 만족하였다.

---

\* 한국기계연구원, 정회원

\*\* (주) 유일엔시스, 정회원

## 2. 신뢰성 평가항목 및 기준

철도차량용 공기스프링의 신뢰성 평가기준은 철도차량 및 공기스프링 제조회사, 철도청, 연구소 등에서 구성된 기술위원들이 기준 원안을 작성하고, 신뢰성 기술위원회에서 조정하는 형태를 취하였다. 평가기준은 제품의 특성을 충분히 파악하여 시험 가능한 항목과 안정성을 확보할 수 있는 요구 성능으로 하였으며, 제품의 외관 및 치수검사, 제품 특성시험 등에 관한 종합성능 시험규정과 안전도 시험 및 수명평가시험을 통하여 공기스프링의 신뢰성을 보다 정확히 파악하여 평가하는 것을 목적으로 하였다. 따라서 이 기준의 작성에는 KS 규격과 국제적으로도 권위가 있는 JIS, MIL, NF 등 국제규격과 선진 외국규격을 참고하여 표 1과 같이 신뢰성 평가항목 및 기준을 정하였다.[3,4]

표 1. 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가 항목 및 기준

시험항목		평가기준	
고무물성시험	인장시험	인장강도	· 내층 18 MPa, 외층 15 MPa 이상
		연신율	· 내층 400%, 외층 350% 이상
	경도시험	경도	· 내외층 55±5(IRHD)
	노화시험	인장강도 변화율	· 내외층 ±20% 이내
		연신율 변화율	· 내외층 ±20% 이내
오존균열	균열상태	· 내외층 A-2 이내	
종합성능시험	외관검사	· 표면이 매끈하고 결함이 없어야 함	
	치수검사	· 제작도면에 의거	
	기밀시험	· 압력강하 20 kPa 이하	
	신축시험	· 각부 이상 없을 것	
	수직지지하중시험	· 76 kN ± 5% (상용내압 0.3 MPa)	
	정하중시험	수직방향	· 380 kN/m 이상
		수평방향	· 100 kN/m 이상
	동하중시험	수평방향	· 170 kN/m 이상
	내용적시험	· 37 liter ± 5%	
	최대횡변위시험	· 105 mm 이상에서 결함 없을 것	
스톱퍼시험	· 8 mm ±15%		
안전도시험	내압시험	· 공기누설 및 이상변형 없을 것	
	파괴시험	· 파괴내압 2 MPa 이상	
수명시험	수직방향	· 수직변위 ±30 mm에서 120만회 반복시험하여 파손이 없을 것	
	수평방향	· 수평변위 ±75 mm, 회전반경 1000 mm로 60만회 반복시험하여 파손이 없을 것	
	수명시험 후 종합성능시험	· 수명시험 후 성능변화는 초기성능의 10% 이내이어야 한다.	

### 3. 신뢰성시험 및 평가

#### 3.1 대상품 및 시험장치

공기스프링은 코드로 강화된 고무 벨로우즈에 채워진 공기 압력을 이용하여 하중을 지지하고 진동을 감쇠시켜주며, 외부 하중변화에 따라 레벨링 밸브를 통해서 압력이 조정됨으로써 하중에 관계없이 자동 높이 제어가 이루어지게 되어 지지하중에 관계없이 모든 조건에서 동일한 승차감을 느낄 수 있는 특징을 가지고 있다[2].

주요 구성부품은 그림 1에서 보는바와 같이 상판(upper plate), 고무 벨로우즈(rubber bellows), 하판(lower plate), 보조 고무스프링(stoper) 등이다. 고무 벨로우즈의 내층과 외층은 NR과 CR이 혼합된 고무 층이며, 중간에는 고무보다 탄성계수가 훨씬 큰 나일론 보강코드가 삽입되어 있는 복합재료 형태를 띠고 있으며, 고무 층과 보강코드로 인하여 이방성과 비선형성을 갖게 된다.

공기스프링은 내부 압력 변화에 따른 수직지지하중과 수직 및 수평 방향의 강성 등이 주요 설계 변수로서, 고무 벨로우즈의 형상, 코드의 각도, 고정 부위인 상·하판의 모양에 따라 특성이 바뀌게 되므로 여러 가지 해석 및 시험 등을 통하여 설계 변수의 영향을 규명하고, 요구되는 특성을 만족하는 제품을 만든 후 최종적으로 제품의 신뢰성을 확보하기 위한 시험을 실시하였다.

국내에서 개발된 전동차용 공기스프링의 신뢰성을 평가하기 위해, 그림 2에서와 같이 100톤 용량의 구조물용 피로시험기에서 보조 공기통을 설치하여 종합성능시험과 수명시험을 수행하였다. 수평방향시험에서는 상대 운동 면의 마찰력을 최소화하여 측정값의 정확도를 높이기 위하여 곡선 구름운동장치를 이용하였다.

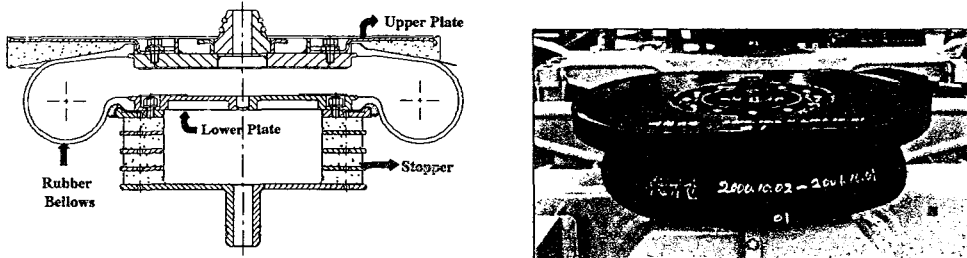


그림 1. 철도차량용 공기스프링

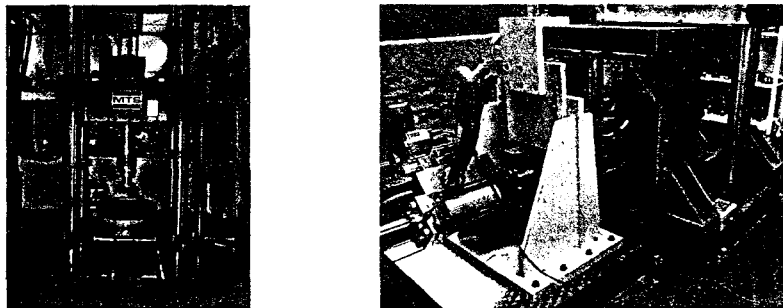


그림 2. 공기스프링 시험장치

### 3.2 고무 물성시험

고무 물성시험은 제품과 동일한 상태로 제작된 2개의 고무 시험 편에 대하여 인장강도, 연신율, 경도 등을 측정하였으며, 가황 고무의 노화 정도를 측정하기 위한 노화시험은  $100\pm 1$  °C에서 96 시간 가열하여 노화시킨 후, 시험 전·후의 인장강도 및 연신율의 변화율을 산출하였다. 시험결과는 표 2에서 보는바와 같이 고무 물성은 모든 시험항목에서 평가기준을 만족하였다.

표 2. 고무 물성시험 결과

시험항목		시험결과		평가기준	
		시편 #1	시편 #2	만족	
고무물성 시험	인장시험	인장강도	18.82 MPa	18.86 MPa	만족
		연신율	611%	605%	만족
	경도시험	경도	52.3	53.8	만족
	노화시험	인장강도 변화율	15% 감소	15.7% 감소	만족
		연신율 변화율	18% 감소	15.2% 감소	만족
	오존균열	균열상태	A-2 이내	A-2 이내	만족

### 3.3 종합성능시험

공기스프링의 종합성능시험은 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준(RS B 0009)에 규정되어 있는 시험방법에 따라 수행하였다[5]. 기본적인 시험으로 외관 및 치수검사, 기밀시험, 신축시험을 하였으며, 특성시험으로 공기압력 변화에 따른 수직 지지하중과 수직 및 수평 방향의 정·동적 강성 측정시험, 내용적 및 최대 횡변위시험, 스톱퍼 특성시험을 실시하였다.

공기스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에서 가장 기본이 되는 수직지지하중은 압력 변화에 따른 수직 지지하중이 선형적인 관계를 나타내었으며, 시험기준인 0.3 MPa에서의 수직 지지하중은 75.9 kN으로 평가기준인  $76 \text{ kN}\pm 5\%$ 를 만족하였다. 정·동하중시험은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 수직방향으로  $\pm 30 \text{ mm}$ , 수평방향으로  $\pm 40 \text{ mm}$ 의 변위를 주어 하중과 변위와의 관계를 통하여 수직 정강성 및 수평 정·동강성을 구한결과, 상용내압인 0.3 MPa에서 수직 정강성은  $348 \text{ kN/m}$ , 수평 정·동강성은 각각  $137 \text{ kN/m}$ 과  $180 \text{ kN/m}$ 으로 평가기준을 만족하였다.

공기스프링의 내용적 시험은 상용 최고내압의 물을 넣은 후 내부의 물을 서서히 빼내는 것에 의해서 내압을 떨어뜨려 내압에 대한 내부수량을 측정한 결과, 평가기준을 만족하는 내용적을 나타내었다. 스톱퍼는 공기스프링의 보조 탱크 역할과 함께 공기스프링 파괴 시 2차 고무스프링의 역할 및 수직·수평방향의 하중을 직접적으로 지지하고 있는 중요한 부품으로, 스톱퍼 역시 고유의 하중-변위 곡선을 갖고 있어 이러한 특성을 만족시켜야만 보다 정확한 공기스프링의 특성을 얻을 수 있다. 스톱퍼의 정적하중-변위시험을 통하여 평가기준인  $8 \text{ mm}\pm 15\%$ 을 만족하는  $8.37 \text{ mm}$ 의 변위를 나타내었다.

국내에서 개발된 공기스프링에 대한 종합성능시험 결과, 평가기준을 모두 만족하는 양호한 결과를 얻었으며, 사용기간이 오래될수록 고무 자체의 노화현상으로 인해 강성이 증가하여 승차감에 영향을 미칠 것으로 예상되어 초기 특성 값을 기준 값의 하한선에 맞추면 장기간 사용 후에도 기준범위를 크게 벗어나지 않으리라 사료된다.

### 3.3 수명시험

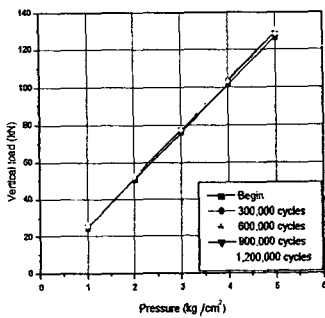
철도차량 운행 중에 공기스프링에는 수직방향 하중과 수평방향 하중이 전달되게 된다. 수직방향 하중은 주로 궤도면의 상하방향 요철과 차량의 상하방향 진동에 의해 발생되며, 수평방향 하중은 승객의 편중 승차, 곡선로 주행 및 가감속 시에 발생되게 되므로, 수직과 수평방향 하중에 대한 내구성시험을 2개의 시료에 대해 각각 실시하여 제품의 내구수명을 평가하였다.

#### (1) 수직방향 수명시험

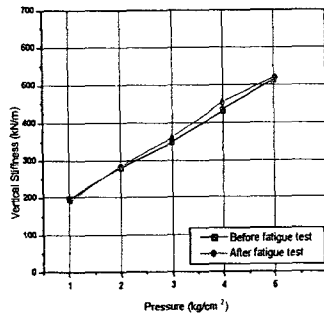
수직방향에 대한 내구수명 시험조건은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 0.5 MPa의 압력에서 수직방향으로 진폭  $\pm 30$  mm으로 하여 120만회까지 파손 없이 작동하여야 하며, 시험 도중 30만회, 60만회, 90만회, 120만회에 수직지지 하중 및 수직 정강성시험을 실시하여 특성변화는 초기성능의 10%이내이어야 한다. 수직방향으로 120만회 내구시험 후에 스토피와 고무 벨로우즈 사이의 접촉 부위에서 미소한 마모가 발생되었으나 무시할 만한 정도였으며, 공기스프링의 다른 부위에는 아무런 이상이 발생되지 않았다. 그림 3(a),(b)에서 보는 바와 같이 수명시험 전, 후의 수직 지지하중은 2.9%, 수직 정강성은 2.2% 변화로 초기성능의 10% 이내에 있어 평가기준을 만족하였다.

#### (2) 수평방향 수명시험

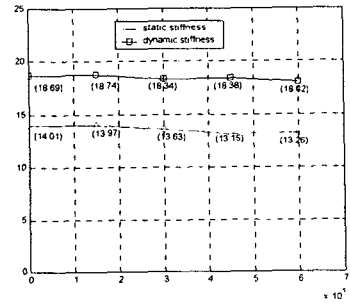
수평방향에 대한 내구수명시험조건은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 수평방향에 대하여 진폭  $\pm 75$  mm으로 회전반경 1000 mm의 조건으로 60만회까지 파손 없이 작동하여야 하며, 시험 도중 15만회, 30만회, 45만회, 60만회에 수평 정·동강성시험을 실시하여 특성변화는 초기성능의 10%이내이어야 한다. 수평방향 내구수명시험의 경우 스토피와 벨로우즈 사이의 상판의 슬라이딩시트와 벨로우즈 사이에서 비교적 큰 상대운동이 발생되어 벨로우즈 표면에 약간의 마모가 발생되었으나, 그 양이 미미하여 공기스프링의 성능 유지에 전혀 지장이 없을 정도이며 다른 부위에서도 이상이 발생되지 않아 시험기준을 만족하였다. 그림 3(c)는 수평방향 내구시험 모습과 반복횟수에 따른 수평 정·동강성의 변화를 나타낸 것으로 수평 정·동강성의 변화도 초기성능의 5% 정도로 시험 기준을 만족하였다.



(a) 수직 지지하중



(b) 수직 정강성



(c) 수평방향 정·동강성 변화

그림 3. 내구수명 시험결과

### 3.4 실차시험

실험실 차원에서 내구수명평가가 완료된 공기스프링의 최종 성능보증을 위하여 실제 차량에 장착한 후 적용성을 평가하는 실차시험을 실시하였다. 개발된 공기스프링을 전동차에 장착한 후 시험 선로인 분당선의 분당역과 수서역 간을 왕복하면서 승차감을 측정한 결과, 상하 및 좌우방향은 비교 차량보다는 약간 낮은 경향을 보이고 있으며, 전후방향은 거의 일치하는 현상을 나타내었는데, 시험차량에서의 승차감이 조금이라도 낮은 경향을 나타내는 것은 시험차량에 장착된 공기스프링의 강성이 비교차량보다 낮는데 원인이 있는 것으로 추측된다. 그림 4는 운행기간 1년 동안 실차시험을 실시한 차량으로부터 분리한 공기스프링에 대한 특성시험을 수행하여 실차시험 전, 후의 시험결과를 보여준다. 수직 지지하중은 2개의 시험편 모두 큰 변화가 없었으며, 수직 정강성은 실차시험 전보다 4~5%, 수평 정강성은 7~8%, 스톱퍼는 6~7 % 정도의 변화를 나타내었다. 이는 고무제품의 노화로 인한 경도 증가로 강성 값이 조금 증가된 것으로 판단된다.

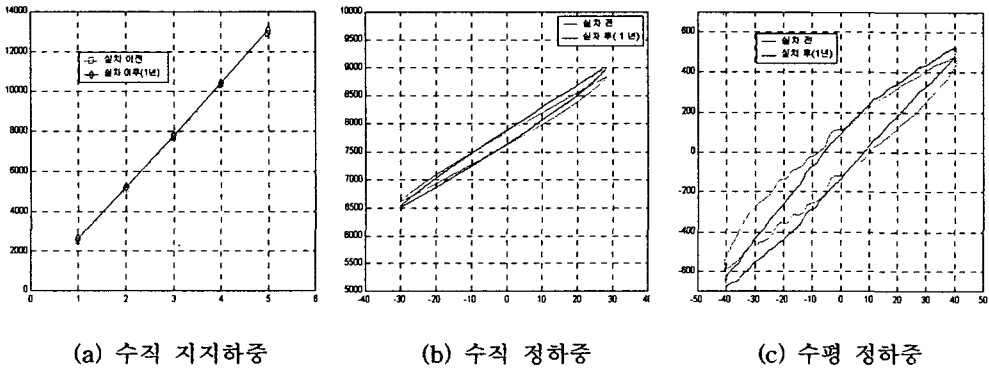


그림 4. 실차시험 전, 후의 특성시험결과

### 4. 신뢰성 평가

실제로 수명시험을 시행할 때 흔히 겪는 문제의 하나는 수명시험에 소요되는 시간 및 비용이 높아 시료수가 극히 적고 또한, 고장 및 파손 데이터의 수가 매우 적거나 무고장인 경우가 많다는 점이다. 이런 경우에는 시험대상부품의 수명이나 신뢰도 추정 값을 구하여 신뢰성 평가지표로 사용하는 방안을 제시하고 있다[6]. 본 연구의 대상품인 철도차량용 공기스프링의 신뢰성 평가도 기계류 부품의 수명분포로 널리 사용되는 와이불(weibull) 분포의 무고장 데이터 분석을 이용하였다.

철도차량용 공기스프링은 100만회를 수명으로 하는데, 이 수명을 보장하는 의미는 다음과 같다. 본 연구에서는 형태모수  $\beta$ 의 값은 와이불 분포 dB에서 고무재료의 형태모수 값  $\beta=1.1$ 을 이용하여 평균수명(MTTF)에 대응하는 척도모수( $\theta$ )를 다음과 같이 구하였다.

$$MTTF = \theta \Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) = \theta \Gamma\left(\frac{2.1}{1.1}\right)$$

여기서,  $\Gamma(1.909)=0.9649$  이므로,  $\theta = \frac{MTTF}{\Gamma(1.909)} = 1,036,376$

합격기준을 무고장 시험횟수  $t_n$ 으로 구해보면,  $R(t_n) = e^{-\left(\frac{t_n}{\theta}\right)^\beta} = (1-CL)^{\frac{1}{\beta}}$  에서

$$t_n = \theta \left( \frac{-\ln(1-CL)}{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} = 1,036,376 \left( \frac{-\ln(1-0.9)}{2} \right)^{\frac{1}{1.1}} = 1,177,947 \text{회이다.}$$

따라서, 본 연구에서 수행한 철도차량용 공기스프링에 대한 신뢰성은 2개의 시료를 시험하여 120만 동안 무고장이기 때문에 신뢰수준 90%에서 평균수명 100만회가 보장된다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국산화 개발된 철도차량용 공기스프링에 대한 신뢰성시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고무재료의 고유한 특성으로 신뢰성 평가가 어려운 철도차량용 공기스프링에 대한 신뢰성 평가기준(RS B 0009)을 관련분야의 기술위원회를 구성하여 제정하였다.
- (2) 신뢰성 평가기준을 따라 국내에서 개발한 전동차용 공기스프링에 대해 고무물성 및 종합성능시험의 모든 항목에서 평가기준을 만족하였으며, 수명시험에서는 수직방향 120만회, 수평방향 60만회 동안 공기스프링에 아무런 이상이 발생되지 않았으며, 특성변화도 초기성능의 10% 이내에 있어 평가기준을 만족하였다.
- (3) 개발된 공기스프링에 대한 실차시험 결과, 시험차량과 기존제품이 장착된 비교차량의 승차감보다 약간 낮은 경향을 나타내었는데, 이는 시험차량에 장착된 공기스프링의 강성이 비교차량보다 낮는데 원인이 있는 것으로 추측된다.
- (4) 본 연구에서 수행한 철도차량용 공기스프링에 대한 신뢰성은 신뢰수준 90%에서 평균수명 100만회를 보장할 수 있다.

## 참고문헌

1. 고속전철 현가장치 개발 연구보고서, 96-II-5-2, 1996.
2. 개정 방진고무, 방진고무연구회편, 일본철도차량공업회, 1975, p. 111.
3. KSR 4001, 공기스프링용 고무벨로우즈의 시험방법, 1995
4. JRS 17304-1, 차량용 공기스프링 시험방법, 일본국유철도사양서
5. 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준, 산업자원부 기술표준원 RS B 0009, 2002.
6. Nelson W., "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No failure", Journal of Qualitytechnology, Vol. 17, No.3, pp. 140-160., 1985.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하는 신뢰성향상 기반구축사업으로 지원되어 수행하였습니다.