

# 철도차량용 공기스프링의 신뢰성 평가

## Reliability Evaluation of Air Spring for Railway Vehicle

김완두\*, 우창수\*\*, 최경진\*\*\*

Wan-Doo Kim, Chang-Su Woo, Kyung-Jin Choi

---

### Abstract

The air spring is used in secondary suspension system for railway vehicle to reduce and absorb the vibration and noise. In this paper, the characteristics and durability test was conducted in laboratory by using servo hydraulic fatigue testing system to evaluate the reliability. And to guarantee the adaptation of this air spring, the ride comfort and air pressure variation were measured in train test. The experimental results show that the characteristics and durability of domestic development productions are obtained the good results and the stiffness of the air spring which had become 6 year over increased. Also, the dynamic characteristics of domestic and existing product agree well the results obtained.

---

### 1. 서론

철도차량은 대량으로 많은 승객 및 화물 등을 안전하게 수송·전달할 수 있는 대중교통 수단으로서 안전성과 경제성 측면에서 큰 강점을 지니고 있으며, 국내에서도 대도시 지하철 증설 및 신설, 고속전철의 도입 등 철도차량에 대한 수요는 날로 증가되고 있다. 철도차량이 한층 더 발전되어 이용자에게 쾌적하고 신속한 교통수단으로 자리잡기 위해서는 속도 향상은 물론이고 철도가 안고 있는 가장 큰 과제 중의 하나인 진동·소음에 관한 다양한 문제들을 적절히 극복해 승차감을 향상시키고 또한 관련 부품에 대한 신뢰성이 확보되어야 할 것이다.

철도차량의 현가 장치 부품은 차량의 동력학적 특성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 차량의 주행 안정성 및 승차감에 중요한 역할을 하며, 차량의 운동에 따른 제반 정·동적 하중을 완화시켜 차량 부품 및 궤도의 손상을 방지하고 승객과 화물에 전해지는 진동·소음을 최소화 시켜 주는 역할을 수행한다. 현가 장치 부품에는 차 축과 대차프레임 사이에 장착되는 1차 현가 장치와 대차프레임과 차체 사이에 장착되는 2차 현가 장치로 구분되며, 대표적으로 고무스프링과 공기스프링이 많이 사용되고 있다[1].

공기스프링은 1950년 대 미국, 일본, 독일 등에서 상품화 연구를 시작하여 철도차량, 버스, 산업

---

\* 한국기계연구원, 구조연구부, 책임연구원, 정회원

\*\* 한국기계연구원, 구조연구부, 선임연구원, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원, 차량연구부, 책임연구원, 정회원

용에 적용되기 시작하여 기존의 코일 또는 판 스프링보다 승차감이 월등히 개선되었다. 국내에서는 1980년대에 타이어 업체들이 일부 개발을 진행하였으나 국내 시장규모가 선진국에 비하여 빈약하고 해외 시장으로의 진출이 어려워지면서 공기스프링 개발 및 적용에 많은 어려움이 있었으나, 최근 들어 차량의 안정성, 기능성, 편리성 등이 요구되면서 공기스프링의 수요 또한 급격히 증가하는 추세이다.

현재 국내에서 사용되고 있는 철도차량용 공기스프링은 제품의 내구성 및 신뢰성으로 인해 국산화 개발에 대한 신뢰가 부족하여 전량 외국에서 수입하고 있는 실정으로, 선진 외국업체의 기술 종속에서 벗어나기 위해서 국산화 개발이 필요하다 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 개발한 전동차용 공기스프링의 특성시험과 내구피로시험을 실시하여 실험실 차원에서의 내구성을 평가하고, 실차시험을 통하여 공기스프링의 신뢰성을 평가하였다.

## 2. 철도차량용 공기스프링 특성

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 세부 구성부품은 그림 1에서 보는바와 같이 상판, 고무 벨로우즈, 하판, 보조 고무스프링(스토퍼)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 시제품을 만든 후 최종적으로 제품의 신뢰성을 확보하기 위한 피로 내구성 평가를 실시하였다.

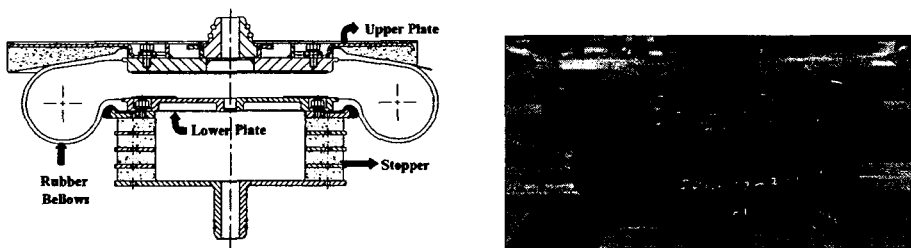


그림 1. 철도차량용 공기스프링

### 3. 특성시험 및 내구피로시험

#### 3.1 대상품 및 시험장치

철도차량용 방진고무부품인 공기스프링은 차량 수명동안 정숙성 및 승차감을 유지하고 부품의 보증기간을 확보하기 위하여 높은 신뢰성이 요구되는 부품 중의 하나이지만 고무재료의 고유한 특성으로 인하여 다른 금속재료에 비해 비교적 큰 물성치의 편차를 지니고 있으며 시험의 재현성도 좋지 않아 신뢰성 평가가 어려운 부품이다. 따라서, 국내에서 개발된 전동차용 공기스프링 시제품과 현재 사용하고 있는 외국제품의 특성을 파악하기 위하여 표 1과 같이 사용 년 수에 따른 대상품을 선정하여, 그림 2에서와 같이 100톤 용량의 구조물용 피로시험기에서 보조 공기통을 설치하여 특성시험과 내구피로시험을 수행하였다. 수평방향시험에서는 상대 운동 면의 마찰력을 최소화하여 측정값의 정확도를 높이기 위하여 곡선구름운동장치를 이용하였다.

표 1 특성시험에 사용된 전동차용 공기스프링

대상품	주행거리	비고
개발품-1	0 km	미사용
개발품-2	200,000 km	1년 시행
C사	479,929 km	3년 사용
B사	0 km	미사용
B사	? km	6년 사용
B사	676,267 km	6년 사용
T사	1,191,091 km	8년 사용



그림 2 공기스프링 시험장치

#### 3.2 특성시험

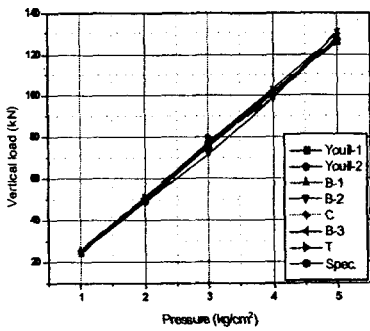
공기스프링 시험은 KSR 4001 및 일본 JRS 17304-1에 규정되어 있는 시험방법에 따라 수행하였다[3,4]. 기본적인 시험 항목에는 압력시험, 기밀시험, 신축시험, 팽창시험, 고무재료시험, 박리시험, 파괴시험 등이 있으며, 본 연구에서는 특성에 관계되는 시험인 공기압력 변화에 따른 수직 지지하중과 수직 및 수평 방향의 정·동적 강성 측정시험, 스톱퍼 특성시험과 내구성에 관련된 피로시험을 실시하였다. 표 2에 특성시험 항목 및 기준을 나타내었다.

표 2 전동차용 공기스프링 특성시험 항목 및 기준

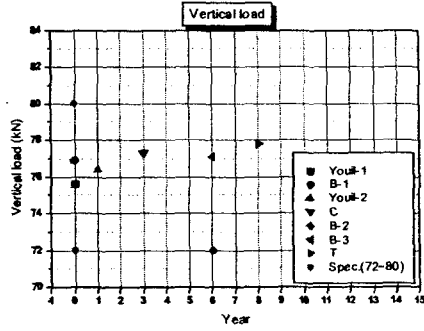
시험항목	시험방법	시험기준
수직 지지하중	압력변화에 따른 수직지지하중 값을 측정	76 kN±5%
수직 정강성	3 kg/cm <sup>2</sup> 의 압력에서 수직방향으로 ±30mm의 변위를 주어 하중과 변위와의 관계 측정	380 kN/m±10%
수평 정·동강성	3 kg/cm <sup>2</sup> 의 압력에서 수평방향으로 ±40mm(정강성), ±10mm(동강성)의 변위를 주어 하중과 변위와의 관계 측정	100 kN/m 이상 170 kN/m±15%
스톱퍼	5 kN에서 100 kN까지의 하중-변위 곡선을 구한다.	8 mm ±15%

(1) 수직 지지하중

공기스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에서 가장 기본이 되는 수직지지하중 시험을 실시한 결과는 그림 3에서와 같이 압력 변화에 따른 수직 지지하중이 선형적인 관계를 나타내었으며, 모든 시험제품이 시험기준인  $3 \text{ kg/cm}^2$ 에서  $76 \text{ kN} \pm 5\%$ 를 만족하였다. 사용 년 수에 따라 큰 변화는 없었으나 오래 사용할 수록 수직지지하중은 약간 증가하는 경향을 내었다.



(a) 압력-하중 관계선도

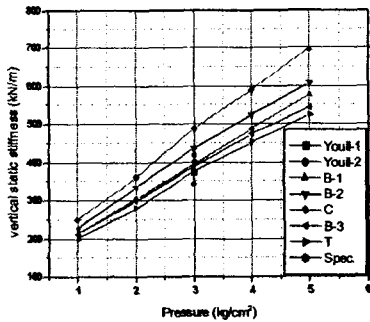


(b) 사용 년 수에 따른 수직하중 변화

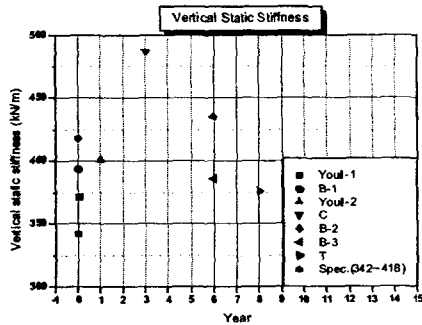
그림 3 수직 지지하중 시험결과

(2) 수직 정강성

동적 영향이 무시될 수 있도록 0.005 Hz의 시험속도로 수행한 수직 정강성시험 결과를 그림 4에 나타내었다. 개발품은 시험기준인  $3 \text{ kg/cm}^2$ 에서  $380 \text{ kN/m} \pm 10\%$ 를 만족하였으나, 3년과 6년 사용된 일부 제품은 기준보다 높게 나타났다.



(a) 압력-수직 정강성 관계선도

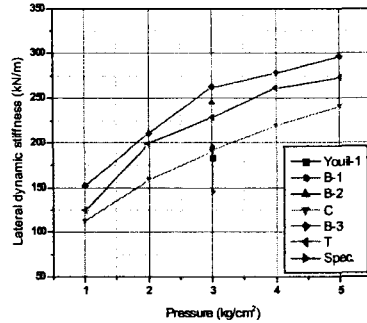
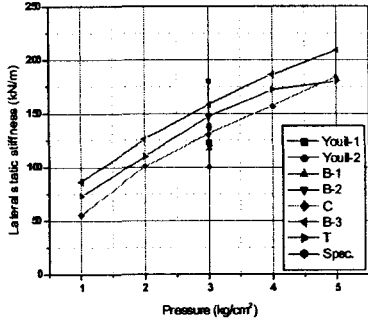


(b) 사용 년 수에 따른 수직 정강성 변화

그림 4 수직 정강성 시험결과

(3) 수평 정·동강성

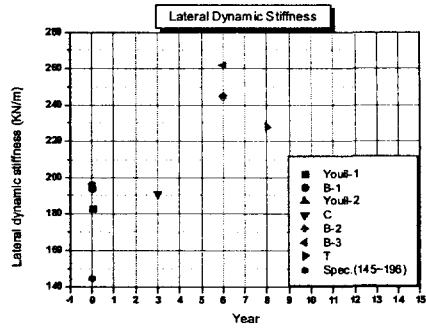
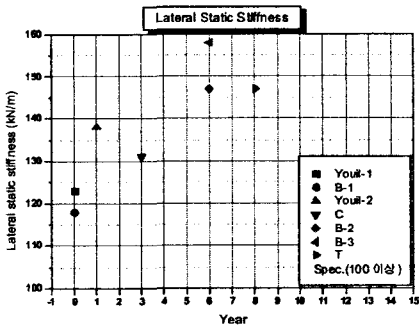
수평강성은 정적인 값과 동적인 값을 각각 100 kN/m 이상과 170 kN/m±15%로 규정하고 있다. 정적시험은 0.005 Hz, 동적시험은 1 Hz로 수행하였다. 그림 5는 압력 변화에 따른 정·동적 강성 값을 보여주며, 압력이 올라갈수록 강성 값의 증가가 둔화되는 경향을 나타내었다. 수평 정강성은 모든 제품이 시험기준을 만족하였으나, 6년 이상 사용한 제품의 동강성은 시험기준보다 훨씬 크게 나타났다. 그림 6에서 보는 바와 같이 사용 년 수가 오래 될수록 수평 정·동강성은 급격히 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 장기간 사용에 의한 고무의 노화현상으로 고무 자체의 강성이 커졌기 때문이다. 따라서, 6년 이상 사용한 제품은 요구 특성 값보다 크게 나타나 승차감에 나쁜 영향을 미칠 것으로 사료된다.



(a) 수평 정강성

(b) 수평 동강성

그림 5 압력 변화에 따른 수평 정·동강성 시험결과



(a) 수평 정강성

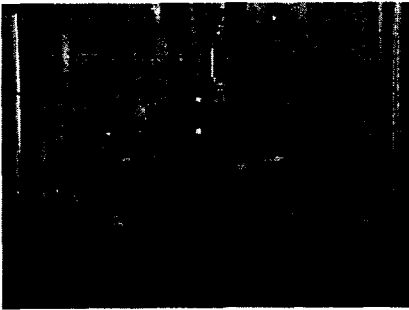
(b) 수평 동강성

그림 6 사용 년 수 따른 수평 정·동강성 시험결과

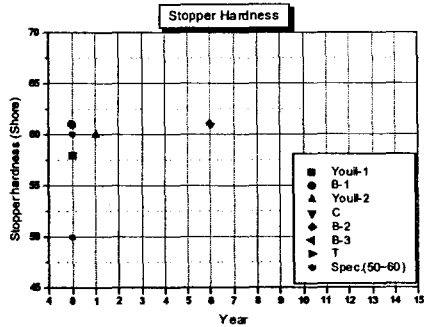
#### (4) 스톱퍼

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.

그림 7(a)에 스톱퍼의 하중-변위 시험을 모습을 나타내었으며, 그림 7(b)는 사용 년 수에 따른 스톱퍼의 변위를 나타낸 것으로 오래 사용할수록 변위가 줄어들어 즉 강성이 크게 나타났다. 이 또한 고무 자체의 노화현상으로 강성이 커졌기 때문이다.



(a) 스톱퍼 시험



(b) 사용 년 수 에 따른 스톱퍼 변위

그림 7 스톱퍼 시험결과

#### (5) 특성시험결과 검토

공기스프링에 대한 특성시험을 통하여 국산화 개발한 제품의 특성은 시험기준을 모두 만족하는 양호한 결과를 얻었으며, 사용기간이 오래될수록 고무 자체의 노화현상으로 인해 특성 값들이 크게 증가하여 기준을 만족하지 못함을 알 수 있었다. 대체로 사용기간이 6년이 지나면 강성이 크게 나타나 승차감에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서, 이를 극복하기 위해서는 초기 특성 값을 기준 값의 하한선에 맞추면 장기간 사용 후에도 기준범위를 크게 벗어나지 않으리라 사료된다.

### 3.3 내구피로시험

차량 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 각각 실시하여 제품의 신뢰성을 평가하여야 한다. 본 연구에서는 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준(RS B 0009)에 따라 개발품에 대한 내구피로시험을 실시하였다[5].

#### (1) 수직방향 내구피로시험

수직방향에 대한 내구피로시험조건은 공기스프링을 표준 높이로 유지하고 압력 5 kg/cm<sup>2</sup>의 공기를 봉입한 후 수직방향에 대하여 진폭 ±30 mm으로 하여 120만회까지 파손 없이 작동하여야 하

며, 시험 도중 30만회, 60만회, 90만회, 120만회에 수직지지 하중 및 수직 정강성시험을 실시하여 특성변화는 초기성능의 10%이내이어야 한다.

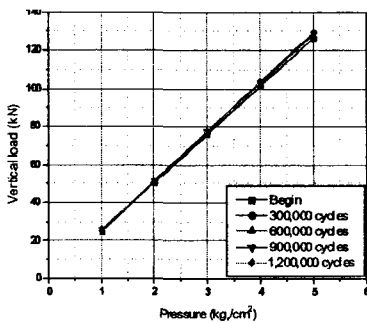
수직방향으로 120만회 내구시험 후에 스톱퍼와 고무 벨로우즈 사이의 접촉 부위에서 미소한 마모가 발생되었으나 무시할 만한 정도였으며, 공기스프링의 다른 부위에는 아무런 이상이 발생되지 않았다. 또한, 표 2~3에서 보는 바와 같이 수직 지지하중과 수직 정강성의 변화도 초기성능의 10% 이내에 있어 시험기준을 만족하였다.

표 2 피로시험전과 피로시험 후의 수직 지지하중

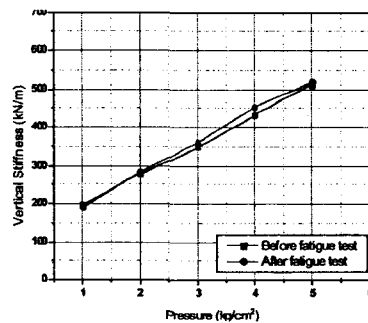
압력 (kg/cm <sup>2</sup> )	수직지지하중 (kN)					
	시험전	30만후	60만후	90만후	120만후	변화율
1	25.0	26.1	25.7	25.9	26.1	4.4%
2	50.9	51.3	51.6	51.7	51.8	1.7%
3	75.9	76.8	77.9	77.5	77.2	1.7%
4	101.3	103.8	103.6	103.2	102.8	1.5%
5	126.3	129.5	129.5	128.8	128.1	1.4%

표 3 피로시험 전과 피로시험 후의 수직 정강성

압력 (kg/cm <sup>2</sup> )	수직 정강성 (kN/m)		
	피로 시험전	피로시험 후 (120만)	변화율
1	196	190	3.06 %
2	280	285	1.78 %
3	348	361	3.73 %
4	432	453	4.86 %
5	512	520	1.56 %



(a) 수직 지지하중



(b) 수직 정강성

그림 8 수직방향 내구피로 시험결과

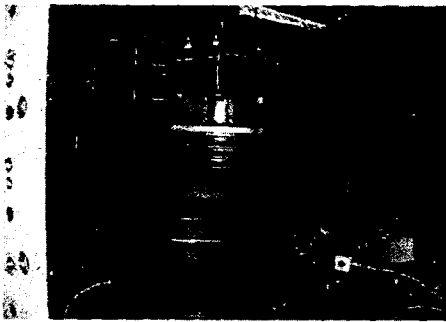
(2) 수평방향 내구피로시험

수평방향에 대한 내구피로시험은 공기스프링을 표준 높이로 유지하고 압력 5 kg/cm<sup>2</sup>의 공기를 봉입한 후, 수평방향에 대하여 진폭 ±75 mm으로 회전반경 1000 mm의 조건으로 60만회까지 파손 없이 작동하여야 한다. 시험 도중 15만회, 30만회, 45만회, 60만회에 수평 정·동강성시험을 실시하여 특성변화는 초기성능의 10%이내이어야 한다.

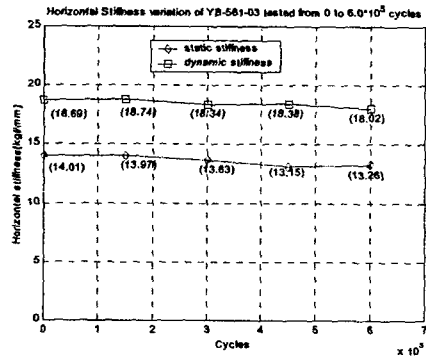
수평방향 내구시험의 경우 스톱퍼와 벨로우즈 사이와 상판의 슬라이딩시트와 벨로우즈 사이에서 비교적 큰 상대운동이 발생되어 벨로우즈 표면에 약간의 마모가 발생되었으나, 그 양이 미미하여 공기스프링의 성능 유지에 전혀 지장이 없을 정도이며 다른 부위에서도 이상이 발생되지 않아 시험기준을 만족함을 알 수 있었다. 표 4는 피로시험 전, 후의 수평 정·동강성 결과로 수평 정·동강성의 변화도 초기성능의 5% 정도로 시험기준을 만족하였다. 그림 9는 수평방향 내구시험 모습과 반복횟수에 따른 수평 정·동강성의 변화를 나타내었다.

표 4 피로시험 전과 피로시험 후의 수평 정·동강성

시험 종류	상용내압 ( 3 kg/cm <sup>2</sup> )					
	피로 시험전	15만	30만	45만	피로시험 후 (60만 후)	변화율
수평 정강성 (kN/m)	137.3	136.9	133.5	128.8	130	5.3 %
수평 동강성 (kN/m)	183.1	183.6	179.7	180.1	176.6	3.5 %



(a) 수평방향 내구피로시험



(b) 수평방향 정·동강성 변화

그림 9 수평방향 내구피로 시험결과



#### 4. 실차시험

실험실 차원에서 피로 내구성 평가가 완료된 공기스프링의 최종 성능 보증을 위하여 실제 차량에 장착한 후 적용성을 평가하는 실차시험을 실시하였다. 실차시험은 공기스프링 시제품을 시운전 중인 전동차에 장착한 후 시험 선로인 분당선의 분당역과 수서역 간을 왕복하면서 승차감과 공기스프링의 공기 압력의 변동을 측정하였다.

공기스프링 시제품은 한 대의 차량, 즉 2 대의 대차에 각각 2 개씩 총 4 개를 장착하였으며, 기존 사용되어 오던 공기스프링이 장착된 객차와의 비교 평가를 위하여 2 대의 객차에서 승차감과 공기스프링의 공기압력 변동을 각각 측정하였으며, 운행기간 1년이 지난 후 실차시험을 실시한 차량으로부터 분리한 공기스프링의 특성시험을 수행하여 성능변화를 검토하였다.

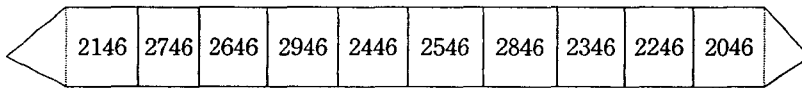
##### 4.1 승차감 측정

###### (1) 측정 개요

승차감 측정방법은 그림 10에서 보는 바와 같이 차량의 진행방향으로 후부대차의 중심에 가장 인접한 창 측 좌석 중에 진동 가속도계를 이용하여 상하, 좌우, 전후의 3방향의 승차감 계수를 측정하였다. 측정조건으로 방식형 가속도계를 지정 좌석에서 편안한 자세로 앉아서 측정하였으며, 정상 영업운전 조건에서 측정함을 원칙으로 하되 규정속도 이하의 서행개소와 역에서 정차 시는 데이터를 제외하였다. 시험 차량은 전동차용으로 개발된 공기스프링을 2046호, 비교 차량은 2246호로 하였다.



(a) 전동차용 공기스프링



(b) 승차감 측정 위치

그림 10 전동차용 공기스프링 실차시험

(2) 측정결과 및 분석

표 5는 지하철 역간의 2~3분간을 측정하여 대표 값을 분석하여 정리한 결과이며, 종합적인 측정결과는 단시간의 평균값으로서 오차범위를 고려하면 특이한 차이가 없음을 알 수 있었다. 상하 및 좌우 방향은 비교 차량보다는 약간 낮은 경향을 보이고 있으며, 전후방향은 거의 일치하는 현상을 나타내고 있었다. 시험 차량에서의 승차감이 조금이라도 낮은 경향을 나타내는 것은 시험 차량에 장착된 공기스프링의 강성이 비교 차량보다 낮은데 원인이 있는 것으로 추측된다. 국내 차량에 준용하고 있는 승차감 레벨은 103 dB 미만은 우수, 103~108 dB은 양호로 평가하기 때문에 시제품의 승차감은 대체로 양호한 것으로 나타났다.

표 5 공기스프링 설치후의 승차감 측정

승차감방향 측정차량	상 하	좌 우	전 후	비 고
시험 차량(2046호)	100~104 dB	103~104 dB	100~101 dB	개발품
비교 차량(2246호)	101~104 dB	103~105 dB	100~101 dB	기존제품

4.2 공기압력 측정

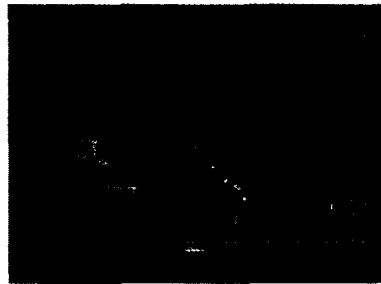
(1) 시험 개요

전동차 공기스프링의 공기 압력은 승차 인원과 주행 상태에 따라 변동하며, 공기압력의 변동 폭은 공기스프링의 내구수명에 영향을 주는 하중으로 작용한다. 측정된 공기압력의 변동은 차량의 동특성과도 밀접한 관련이 있으며, 공기스프링의 정상 동작 및 누설 여부 등을 판단할 수 있다.

공기압력 변동은 공기압 공급 배관의 분기기를 통하여 측정하였으며, 그림 12는 차체 아래쪽의 공급 배관에 설치된 압력계이지와 객실의 의자 밑에 설치된 압력계이지의 모습을 보여준다.



(a) 차체에 설치한 압력계이지



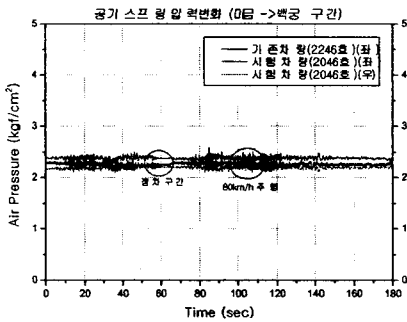
(b) 객실 내에 설치된 압력계이지

그림 11 공기압력 측정장치

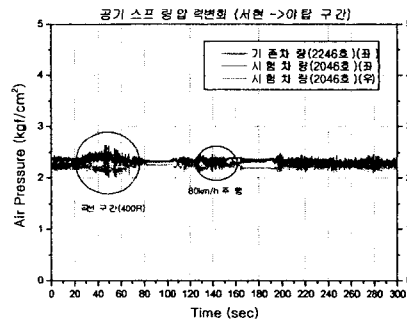
(3) 측정결과 및 분석

그림 12(a)는 미금역→백궁역 구간에서 측정한 결과로서, 정차 시 개발품을 설치한 시험차량(이하 시험차량)의 좌우 압력차이는  $0.2\text{kgf/cm}^2$  정도로 좌측이 높았으며 시험차량(좌)의 압력이 기존 차량(좌)보다  $0.1\text{kgf/cm}^2$  정도 높게 나타났다. 또한, 주행속도  $80\text{km/h}$ 에서는 비교적 변동폭이 많이 일어남을 알 수 있으며 좌우의 변동편차는 비슷하게 발생하고 있다.

그림 12(b)는 서현역→야탑역 구간에서 시험차량이 후부일때이며, 곡선구간에서의 압력변화가 비교차량(좌)과 시험차량(좌)이 거의 비슷한 경향으로 상승 및 하강하였다. 다만, 변동폭이 크게 일어나는 현상은 곡선로 진입부의 공급압력 불안정성으로 보이고, 진입후는 안정되는 것을 알 수 있었다. 곡선구간(400R)에서의 압력변화는 차체 기울기의 하중 변화에 대응으로 압력변화가 일어남을 알 수 있으므로 공기스프링의 작용은 기능적으로 양호함을 알 수 있었다.



(a) 미금-백궁 구간



(b) 서현-야탑 구간

그림 12 공기스프링 압력변화

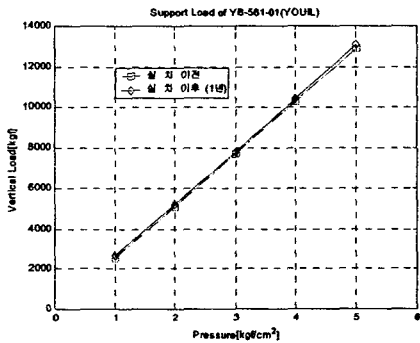
4.3 특성시험

표 6은 실 운행기간 1년 동안 실차시험을 실시한 차량으로부터 분리한 공기스프링에 대하여 특성시험을 수행하여 실차시험 전, 후의 특성시험 결과를 보여준다.

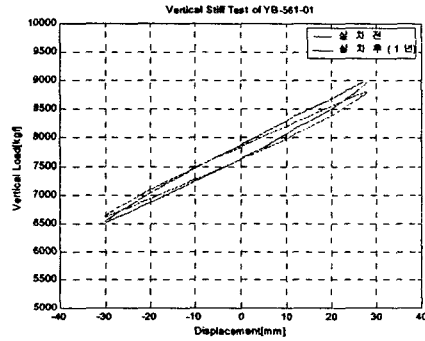
수직 지지하중은 2개의 시험편 모두 큰 변화가 없었으며, 수직 정강성은 실차시험 전보다 7~8%, 수평 정강성은 13~15%, 스톱퍼는 6~7% 정도의 변화를 나타내어 시험기준을 만족하였다. 이는 고무 제품의 노화로 인한 경도 증가로 강성 값이 조금 증가된 것으로 판단된다. 그림 13에 실차시험 전후의 특성시험결과를 나타내었다.

표 6 실차시험 전, 후의 특성변화

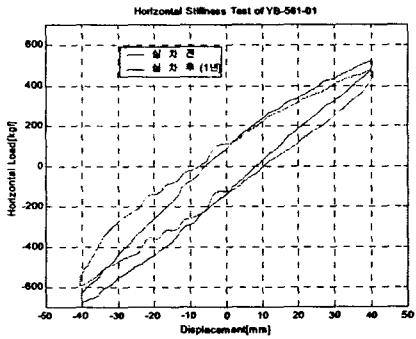
시험항목	시험편 #1		시험편 #2		시험기준
	시험 전	시험 후	시험 전	시험 후	
수직 지지하중(kg)	7,710	7,800	7,743	7,770	7,700 ±200 kg
수직 정강성(kg/mm)	37.94	40.91	38.4	40.90	38 kg/mm±10%
수평 정강성(kg/mm)	12.5	14.1	12.2	14.0	10 kg/mm 이상
스톱퍼 변위 (mm)	9.1	8.43	9.08	8.55	8 mm ±15%
경도	58	60	58	60	55±5



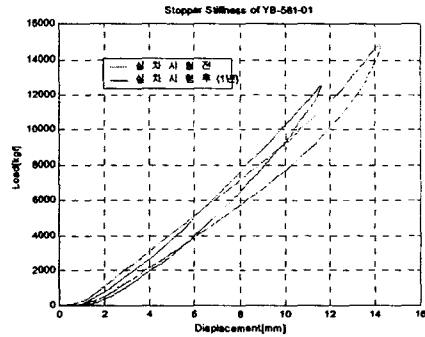
(a) 수직 지지하중



(b) 수직 정하중



(c) 수평 정하중



(d) 스톱퍼

그림 13 실차시험 전, 후의 특성시험결과

## 5. 결론

본 연구에서는 국산화 개발된 전동차용 공기스프링에 대한 특성시험과 실차시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공기스프링에 대한 특성시험을 통하여 국산화 개발한 제품의 특성은 시험기준을 모두 만족하는 양호한 결과를 얻었으며, 사용기간이 오래될수록 고무 자체의 노화현상으로 인해 특성 값들이 크게 증가하여 기준을 만족하지 못함을 알 수 있었다.
- (2) 사용기간이 6년이상 지나면 강성이 크게 나타나 승차감에 영향을 미칠 것으로 예상되므로 이를 극복하기 위해서는 초기 특성 값을 기준 값의 하한선에 맞추면 장기간 사용 후에도 기준범위를 크게 벗어나지 않으리라 사료된다.
- (3) 내구피로시험에서는 수직방향 120만회, 수평방향 60만회 동안 공기스프링에 아무런 이상이 발생되지 않았으며, 특성변화도 초기성능의 10% 이내에 있어 시험기준을 만족하였다.
- (4) 개발된 공기스프링이 장착된 시험차량과 기존제품이 장착된 비교차량의 승차감은 거의 동일 수준으로 양호하게 측정되었으며, 공기압력은 시험차량이 비교차량보다 약간 높게 측정되었다.

## 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.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중점국가연구개발사업(기계설비 요소기술 개발사업)으로 지원되어 수행하였습니다.