

철도차량용 공기스프링 실차시험 및 신뢰성 평가

Reliability Evaluation of Air Spring for Railway Vehicle

우창수¹ · 김완두² · 최경진³
Chang-Su Woo¹ · Wan-Doo Kim² · Kyung-Jin Choi³

Abstract

Air spring system was widely accepted for railway vehicle secondary suspension to reduce and absorb the vibration and noise. 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 domestically developed productions are shown in good results. And to guarantee the adaption of air spring, the ride comfort and air pressure variation were measured in train test on subway line.

Keywords : Air Spring(공기스프링), Reliability test(신뢰성시험), Rubber Material Test(고무 물성시험)

1. 서론

철도차량의 진동·소음을 감소시키기 위한 현가요소 부품인 공기스프링은 1950년 대 미국, 일본, 독일 등에서 상품화 연구를 시작하여 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 확보하기 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 의존

하고 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 제정하였다.

본 연구에서는 공기스프링 소재인 고무재료에 물성시험과 하중지지 용량 및 수직·수평방향의 하중시험을 통한 종합 성능시험과 수명시험을 실시하여 실험실 차원에서의 신뢰성을 평가하였으며, 실제 차량에의 적용성을 보증하기 위한 실차시험을 수행하여 승차감과 공기 압력의 변동을 측정하였다.

2. 신뢰성 평가기준 및 시험장치

2.1 신뢰성 평가기준

철도차량용 공기스프링의 신뢰성 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

1 정희원, 한국기계연구원 구조연구부 공학박사
2 정희원, 한국기계연구원 미래연구부 공학박사
3 정희원, 한국철도기술연구원 책임연구원

보다 정확히 파악하여 평가하는 것을 목적으로 하였다. 따라서 평가기준 작성에는 KS 규격과 국제적으로도 권위가 있는 JIS, MIL, NF 등 국제규격과 선진 외국규격을 참고하여 신뢰성 평가항목 및 기준을 정하였다[3,4].

2.2 시험 대상품

철도차량용 현가장치 부품인 공기스프링은 차량의 동력학적 특성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 차량의 주행 안정성 및 승차감에 중요한 역할을 한다. 특히, 차량의 운동에 따른 제반 정·동적 하중을 완화시켜 차량 부품 및 궤도의 손상을 방지하고 승객과 화물에 전해지는 진동·소음을 최소화 시켜 주는 역할을 수행한다. 공기스프링의 경우 하중 변화에 따라 레벨링 벨로우즈를 통해서 압력이 조정됨으로 하중에 관계없이 자동 높이 제어가 이루어지며 지지 하중에 관계없이 모든 조건에서 동일한 승차감을 느낄 수 있는 특징을 지니고 있다.

주요 구성부품은 Fig. 1에서 보는바와 같이 상판(upper plate), 고무 벨로우즈(rubber bellows), 하판(lower plate), 보조 고무스프링(stoper) 등이다. 고무 벨로우즈의 내층과 외층은 천연고무와 폴리합로프로펜 고무가 혼합된 고무 층이며 중간에는 고무보다 탄성계수가 훨씬 큰 나일론 보강코

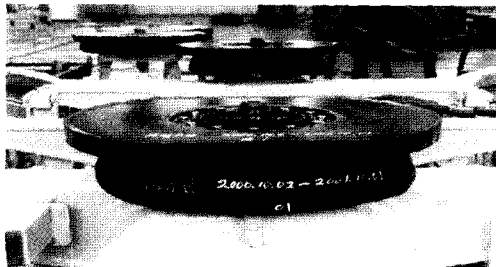


Fig. 1. Air spring for railway vehicle

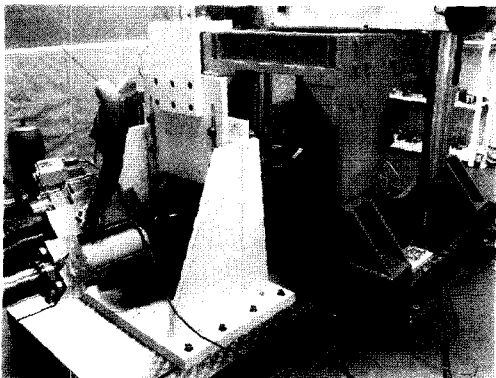


Fig. 2. Reliability test equipment

드가 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.

2.3 시험장치

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

3. 신뢰성시험 및 평가

3.1 고무 물성시험

고무 물성시험은 제품과 동일한 상태로 제작된 2개의 고무 시편에 대하여 인장강도, 연신율, 경도 등을 측정하였으며, 가황 고무의 노화 정도를 측정하기 위한 노화시험은 100 ± 1°C에서 96시간 가열하여 노화시킨 후, 시험 전·후의 인장강도 및 연신율의 변화율을 산출하였다.

시험결과는 Table 1에서 보는바와 같이 고무 물성은 모든 시험항목에서 평가기준을 만족하였다.

Table 1. Result of the material test for rubber specimen

시험항목	평가 기준	시험결과		판정	
		시편 #1	시편 #2		
인장 시험	인장강도	18Mpa 이상	18.82 MPa	18.86 MPa	만족
	연신율	400% 이상	611%	605%	만족
경도 시험	경도	55 ± 5	52.3	53.8	만족
노화 시험	인장강도 변화율	+ 20%	15% 감소	15.7% 감소	만족
	연신율 변화율	+ 20%	18% 감소	15.2% 감소	만족
오존 균열	균열상태	A-2 이내	A-2 이내	A-2 이내	만족

3.2 종합 성능시험

공기스프링의 종합성능시험은 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준에 규정되어 있는 시험방법에 따라 수행하였다[5].

기본적인 시험으로 외관 및 치수검사, 기밀시험, 신축시험을 하였으며, 특성시험으로 Fig. 3에서와 같이 공기압력 변화에 따른 수직 지지하중과 수직 및 수평 방향의 정·동적 강성 측정시험, 내용적 및 최대 횡 변위시험, 스톱퍼 특성시험을 실시하였다.

공기스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에서 가장 기본이 되는 수직 지지하중은 압력 변화에 따른 수직 지지하중이 선형적인 관계를 나타내었으며, 시험기준인 0.3MPa에서의 수직 지지하중은 75.9±kN으로 평가기준인 76kN±5%를 만족하였다.

정·동하중시험은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 수직방향으로 ±30mm, 수평방향으로 ±40mm의 변위를 주어 하중과 변위와의 관계를 통하여 수직 정강성 및 수평 정·동강성을 구한결과, 상용내압인 0.3MPa에서 수직 정강성은 348kN/m, 수평 정·동강성은 각각 137kN/m과 180kN/m으로 평가기준을 만족하였다.

공기스프링의 내용적 시험은 상용 최고내압의 물을 넣은 후 내부의 물을 서서히 빼내는 것에 의해서 내압을 떨어뜨

려 내압에 대한 내부수량을 측정한 결과, 평가기준을 만족하는 내용적을 나타내었다. 스톱퍼는 공기스프링의 보조 탱크 역할과 함께 공기스프링 파피 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 8mm±15%를 만족하는 8.37mm의 변위를 나타내었다.

국내에서 개발된 공기스프링에 대한 종합 성능시험 결과, 평가기준을 모두 만족하는 양호한 결과를 얻었으며 사용기간이 오래될수록 고무 자체의 노화현상으로 인해 강성이 증가하여 승차감에 영향을 미칠 것으로 예상되어 초기 특성값을 기준 값의 하한선에 맞추면 장기간 사용 후에도 기준 범위를 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, 곡선 로 주행 및 가감속 시에 발생되게 되므로, 수직과 수평방향 하중에 대한 내구성시험을 2개의 시료에 대해 각각 실시하여 제품의 내구수명을 평가하였다.

3.3.1 수직방향 수명시험

수직방향에 대한 내구수명 시험조건은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 0.5MPa의 압력에서 수직방향으로 진폭 ±30mm으로 하여 120만회까지 파손 없이 작동해야 하며, 시험 도중 30만회, 60만회, 90만회, 120만회에 수직지지 하중 및 수직 정 강성시험을 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.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 수명시험 전, 후의 수직 지지하중은 2.9%, 수직 정강성은 2.2% 변화로 초기성능의 10% 이내에 있어 평가기준을 만족하였다.

3.3.2 수평방향 수명시험

수평방향에 대한 내구수명 시험조건은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 수평방향에 대하여 진폭 ±75mm으로

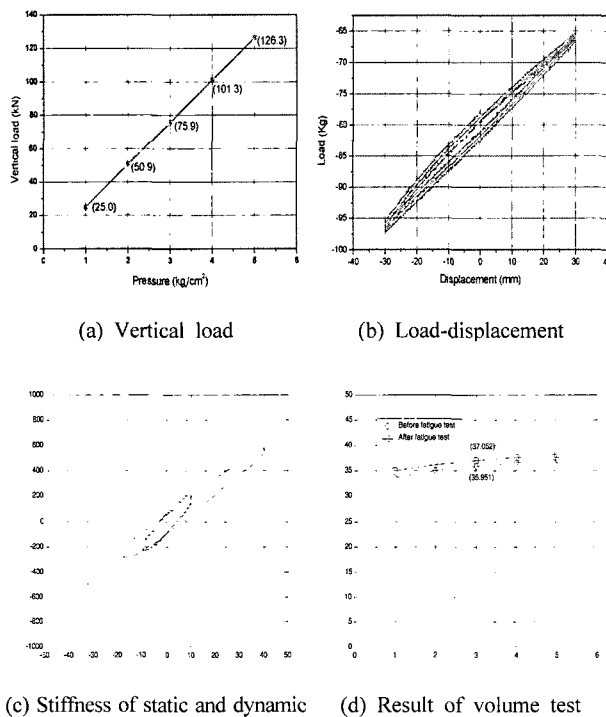


Fig. 3. Results of the characteristics test for air spring

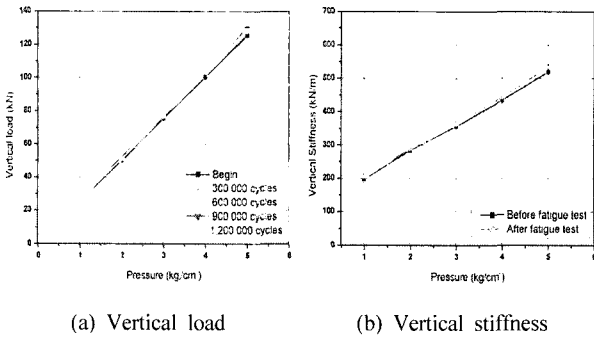


Fig. 4. Results of fatigue test for vertical direction

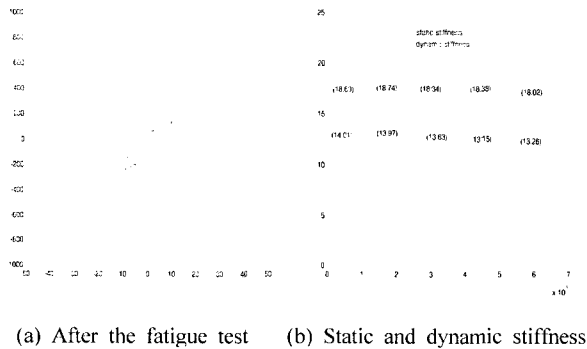


Fig. 5. Results of fatigue test for lateral direction

회전반경 1000mm의 조건으로 60만회까지 파손없이 작동하여야 하며, 시험 도중 15만회, 30만회, 45만회, 60만회에 수평 정·동 강성시험을 실시하여 특성변화는 초기성능의 10%이내이어야 한다.

수평방향 내구수명시험의 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 만족하였다. Fig. 5는 수평방향 내구시험 모습과 반복횟수에 따른 수평 정·동강성의 변화를 나타낸 것으로 수평 정·동강성의 변화도 초기성능의 5% 정도로 시험기준을 만족하였다.

3.4 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 철도차

량용 공기스프링의 신뢰성 평가도 기계류 부품의 수명분포로 널리 사용되는 와이블(weibull) 분포의 무고장 데이터 분석을 이용하였다.

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

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

여기서, $\Gamma(1.909) = 0.9649$ 이므로,

$$\theta = \frac{MTTF}{\Gamma(1.909)} = 1,036,376(2)$$

합격기준을 무 고장 시험횟수 t_n 으로 구해보면,

$$R(t_n) = e^{-\left(\frac{t_n}{\theta}\right)^\beta} = (1 - CL)^{\frac{1}{\beta}} \text{ 에서}$$

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

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

4. 실차시험

4.1 측정 개요

실험실 차원에서 피로 내구성 평가가 완료된 공기스프링의 최종 성능 보증을 위하여 실제 차량에 장착한 후 적용성을 평가하는 실차시험을 실시하였다.

실차시험은 공기스프링 개발품을 시운전 중인 전동차에 장착한 후 시험 선로인 분당선의 분당역과 수서역 간을 왕복하면서 승차감과 공기스프링의 공기 압력의 변동을 측정하였다. 공기스프링 개발품은 한 대의 차량, 즉 2대의 대차에 각각 2개씩 총 4개를 장착하였으며, 기존 사용되어 오던 공기스프링이 장착된 객차와의 비교 평가를 위하여 2대의 객차에서 승차감과 공기스프링의 공기압력 변동을 각각 측정하였다. 공기압력은 공기스프링의 공급압력에 대하여 실시간으로 데이터를 수집한 후 선로상태에 따른 압력변화를 분석하였으며, 주행 상태에 따른 승차감을 측정하였다.

4.2 승차감 측정

승차감은 승차감측정기(ISO 4361, B&K 사, Triaxial Seat Accelerometer Model 4322, Human Response Vibration Meter Type 2512)를 사용하여 측정하였으며, 상하, 좌우, 전후방향의 승차감계수를 정차 역 사이에서 2~3분간 측정된 값을 평균하였다. 측정위치는 대차중앙부의 의자에서 실시하였으며, 방석 모양의 센서를 깔고 앉은 상태에서 측정하였다.

Table 2는 정차 역 사이에서 2~3분간을 측정하여 대표값을 분석하여 정리한 결과이다. 종합적인 측정결과는 단시간의 평균값으로서 오차범위를 고려하면 개발품과 기존제품과는 차이가 없었다.

4.2 공기압력 측정

전동차 공기스프링의 공기압력은 승차 인원과 주행상태에 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 Fig. 6은 차체 아래쪽의 공급 배관에 설치된 압력게이지와 객실의 의자 밑에 설치된 압력게이지의 모습을 보여준다.

Fig. 7(a)는 미금역→백궁역 구간에서 공기 압력 변동을 측정한 결과로서 정차 시 시험차량의 좌우 압력차이가 0.2 kg/cm² 정도 좌측이 높으며, 정차 시 시험차량과 비교차량의 압력도 0.1 kg/cm² 정도 시험차량이 높은 것으로 나타났다. 주행속도 80km/h에서는 비교적 변동 폭이 많이 일어남을 알 수 있으며 좌우의 변동편차는 비슷하게 발생하고 있다.

Table 2. Result of vibration test by seat accelerometer

승차감방향	상 하	좌 우	전 후
개발품	100~104	103~104	100~101
기존제품	101~104	103~105	100~101

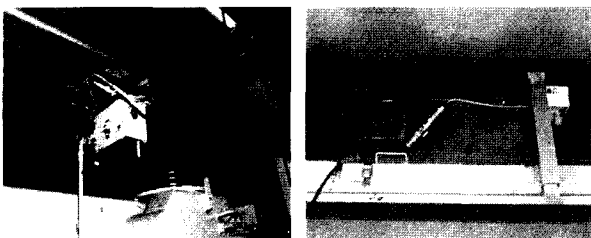
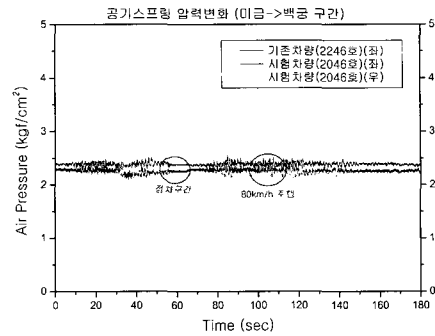
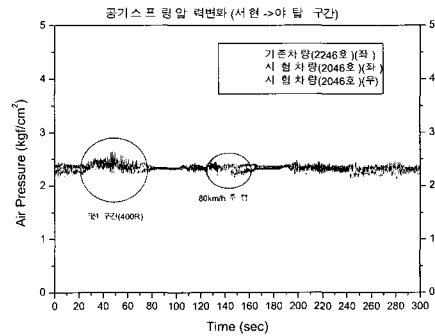


Fig. 6. Pressure gauge

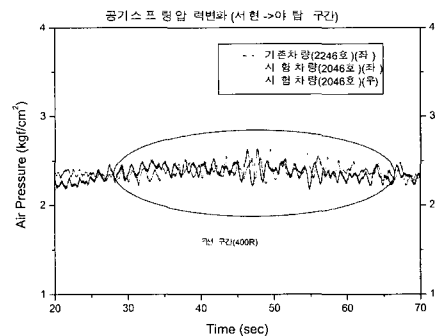
Fig. 7(b)는 서현역→야탑역 구간에서 시험차량이 후미일 때이며, 곡선구간에서의 압력변화가 비교차량과 시험차량



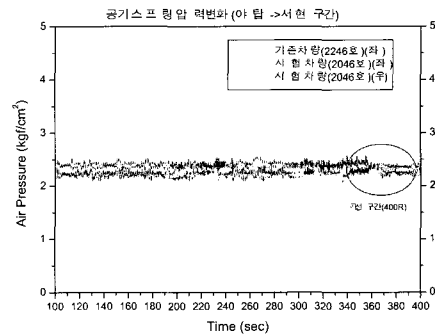
(a) Test-1



(b) Test-2



(c) Test-3



(d) Test-4

Fig. 7. Results of pressure variation

이 거의 비슷한 경향으로 상승 및 하강하였다. 다만, 변동 폭이 크게 나타나는 현상은 곡선 로 진입부의 공급압력 불안정성으로 추측되며, 진입 후에는 다시 안정된 현상을 나타내었다.

Fig. 7(c)는 곡률반경 400R인 곡선구간에서의 공기압력변화를 보여주고 있으며, 압력변동 싸이클의 경향이 차체중량의 변화와 차체진동특성에 따른 0.5~1.0Hz의 대역으로 나타나고 있다. 차체기울기의 하중변화에 능동적으로 압력변화가 일어남을 알 수 있으므로 공기스프링의 작용은 기능적으로 양호함을 알 수 있다.

Fig. 7(d) 야탑역→서현역 구간을 측정된 결과로서 시험 차량이 선두 위치일 때이며, 직선구간에서 공기압력변동이 크다가 곡선구간에서 압력변동이 작아짐을 알 수 있으며, 이 현상은 곡선 로에서 차량속도를 적정하게 감속함에 따라 안정적인 공기압력이 유지되는 것으로 분석된다.

5. 결론

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

- (1) 고무물성 및 종합 성능시험의 모든 항목에서 평가기준을 만족하였으며, 수명시험에서는 수직방향 120만회, 수평방향 60만회 동안 공기스프링에 아무런 이상이 발

생되지 않았으며, 특성변화도 초기성능의 10% 이내에서 있어 평가기준을 만족하였다.

- (2) 개발된 공기스프링에 대한 실차시험 결과, 개발품과 기존제품과는 차이가 없었으며 차체 기울기의 하중변화에 능동적으로 압력변화가 일어남을 알 수 있으므로 공기스프링의 작용은 기능적으로 양호함을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구에서 수행한 철도차량용 공기스프링에 대한 신뢰성은 신뢰수준 90%에서 평균수명 100만회를 보장할 수 있다.

참고 문헌

1. 고속전철 현가장치 개발 연구보고서, 96-II-5-2, 1996
2. 방진고무, 방진고무연구회편(1975), 일본 철도차량공업회, pp.111-134, 1975
3. 공기스프링용 고무벨로우즈의 시험방법, KSR 4001, 1995
4. 차량용 공기스프링 시험방법(1995), 일본국유철도사양서, JRS 17304-1
5. 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준(2002), 산업자원부 기술 표준원 RS B 0009
6. Nelson W(1985), "Weibull Analysis of Reliability Data with few or no failure", Journal of Quality technology, Vol.17, No.3, pp.140-160