

철도차량용 공기스프링 신뢰성 시험 및 평가

우창수* · 김완두* · 이학주* · 정승일**

*한국기계연구원 구조연구부 · **유일 엔시스 기술연구소

Reliability Test and Evaluation of Air Spring for Railway Vehicle

Changsu Woo* · Wandoo Kim* · Hakjoo Lee* · Sungil Jeong**

* Structural Engineering Department, Korea Institute of Machinery & Materials

** R & D Center, YOUIL ENSYS

Abstract

Air spring system was 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 domestic development productions are obtained the 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.

1. 서 론

철도차량은 대량으로 많은 승객 및 화물 등을 안전하게 수송·전달할 수 있는 대중 교통수단으로서 안전성과 경제성 측면에서 큰 강점을 지니고 있으며, 국내에서도 고속전철 운행과 대도시 지하철 증설 및 신설 등 철도차량에 대한 수요는 날로 증가되고 있다. 철도차량이 한층 더 발전되어 이용자에게 쾌적하고 신속한 교통수단으로 자리 잡기 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 진동·소음을 감소시키기 위한 현가요소 부품인 공기스프링은 1950년대 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 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 제정하였다.

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

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

시 험 항 목		평 가 기 준	
고 무 물 성 시 험	인 장 시 험	인장강도	· 내층 18 MPa, 외층 15 MPa 이상
		연신율	· 내층 400%, 외층 350% 이상
	경 도 시 험	경도	· 내외층 55±5(IRHD)
	노 화 시 험	인장강도 변화율	· 내외층 ±20% 이내
		연신율 변화율	· 내외층 ±20% 이내
오 존 균 열	균열상태	· 내외층 A-2 이내	
종 합 성 능 시 험	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%		
안 전 도 시 험	내압시험	· 공기누설 및 이상변형 없을 것	
	파괴시험	· 파괴내압 2 MPa 이상	
수 명 시 험	수직방향	· 수직변위 ±30 mm에서 120만회 반복시험하여 파손이 없을 것	
	수평방향	· 수평변위 ±75 mm, 회전반경 1000 mm로 60만회 반복시험하여 파손이 없을 것	
	수명시험 후 종합 성능시험	· 수명시험 후 성능변화는 초기성능의 10% 이내이어야 한다.	

3. 신뢰성시험 및 평가

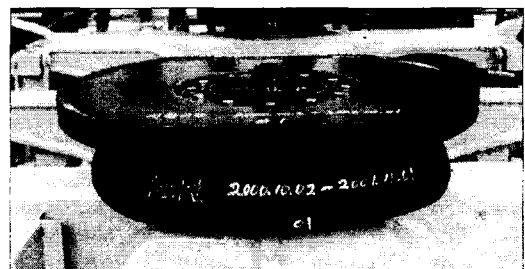
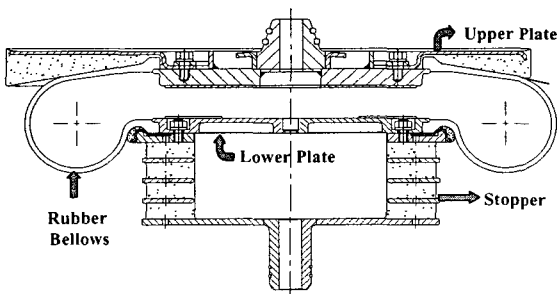
3.1 시험 대상품 및 시험장치

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 밸브를 통해서 압력이 조정됨으로 하중에 관계없이 자동 높이 제어가 이루어지며 지지 하중에 관계없이 모든 조건에서 동일한 승차감을 느낄 수 있는 특징을 지니고 있다.

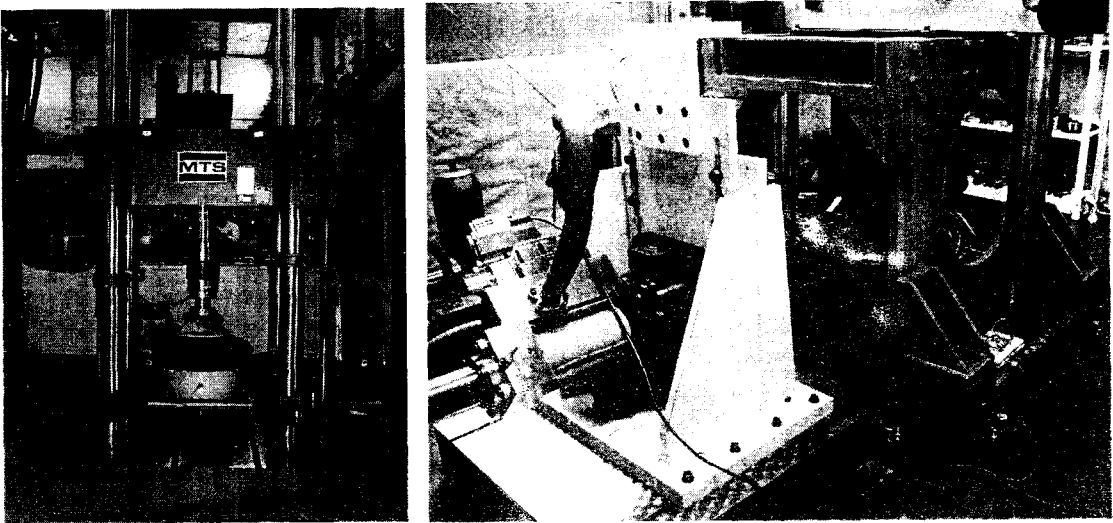
주요 구성부품은 그림 1에서 보는바와 같이 상판(upper plate), 고무 벨로우즈(rubber bellows), 하판(lower plate), 보조 고무스프링(stoper) 등이다. 고무 벨로우즈의 내층과 외층은 NR과 CR이 혼합된 고무 층이며, 중간에는 고무보다 탄성계수가 훨씬 큰 나일론 보강코드가 삽입되어 있는 복합재료 형태를 띠고 있으며, 고무층과 보강코드로 인하여 이방성과 비선형성을 갖게 된다.

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 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.



<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 ± 1 . C에서 96시간 가열하여 노화시킨 후, 시험 전·후의 인장강도 및 연신율의 변화율을 산출하였다. 시험결과는 표 2에서 보는바와 같이 고무 물성은 모든 시험항목에서 평가 기준을 만족하였다.

<표 2> 고무 물성시험 결과

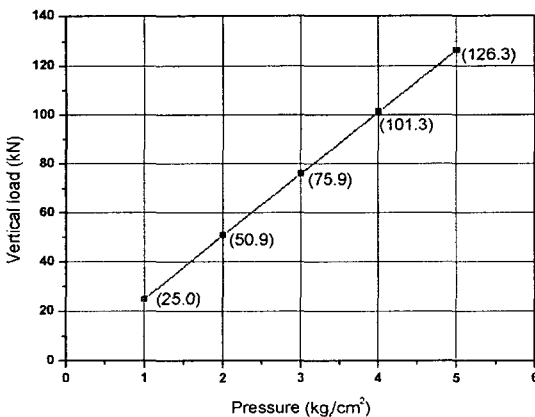
시 험 항 목			시 험 결 과		평가기준 만 족
			시편 #1	시편 #2	
고무물성 시 험	인장시험	인 장 강 도	18.82 MPa	18.86 MPa	만족
		연 신 율	611%	605%	만족
	경도시험	경 도	52.3	53.8	만족
	노화시험	인장강도 변화율	15% 감소	15.7% 감소	만족
		연신율 변화율	18% 감소	15.2% 감소	만족
	오준관열	관 열 상 태	A-2 이내	A-2 이내	만족

3.3 종합 성능시험

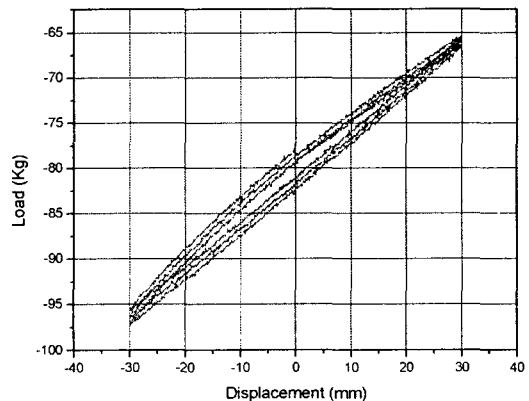
공기스프링의 종합성능시험은 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준에 규정되어 있는 시험방법에 따라 수행하였다[5]. 기본적인 시험으로 외관 및 치수검사, 기밀시험, 신축시험을 하였으며, 특성시험으로 그림 3에서와 같이 공기압력 변화에 따른 수직 지지하중과 수직 및 수평 방향의 정·동적 강성 측정시험, 내용적 및 최대 횡 변위시험, 스톱퍼 특성시험을 실시하였다.

공기스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에서 가장 기본이 되는 수직 지지하중은 압력 변화에 따른 수직 지지하중이 선형적인 관계를 나타내었으며, 시험기준인 0.3 MPa에서의 수직 지지하중은 75.9 kN으로 평가기준인 76 kN±5%를 만족하였다. 정·동하중시험은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 수직방향으로 ±30 mm, 수평방향으로 ±40 mm의 변위를 주어 하중과 변위와의 관계를 통하여 수직 정강성 및 수평 정·동강성을 구한결과, 상용내압인 0.3 MPa에서 수직 정강성은 348 kN/m, 수평 정·동강성은 각각 137 kN/m과 180 kN/m으로 평가기준을 만족하였다. 공기스프링의 내용적 시험은 상용 최고내압의 물을 넣은 후 내부의 물을 서서히 빼내는 것에 의해서 내압을 떨어뜨려 내압에 대한 내부수량을 측정 한 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 mm±15%을 만족하는 8.37 mm의 변위를 나타내었다.

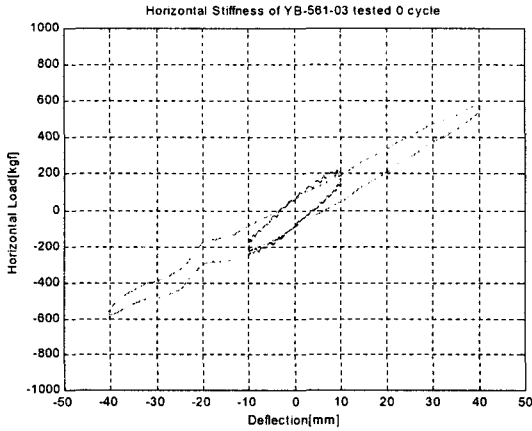
국내에서 개발된 공기스프링에 대한 종합 성능시험 결과, 평가기준을 모두 만족하는 양호한 결과를 얻었으며, 사용기간이 오래될수록 고무 자체의 노화현상으로 인해 강성이 증가하여 승차감에 영향을 미칠 것으로 예상되어 초기 특성 값을 기준 값의 하한선에 맞추면 장기간 사용 후에도 기준범위를 크게 벗어나지 않으리라 사료된다.



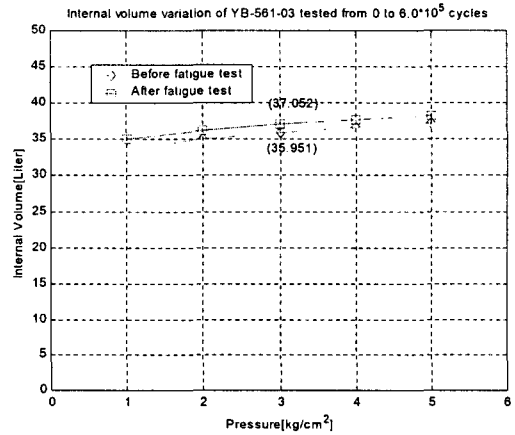
(a) 수직 지지하중



(b) 수직 정 강성



(c) 수평 정 · 동 강성



(d) 내용적 시험

<그림 3> 공기스프링에 대한 종합 성능시험

3.4 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 가 감속 시에 발생되게 되므로, 수직과 수평방향 하중에 대한 내구성시험을 2개의 시료에 대해 각각 실시하여 제품의 내구수명을 평가하였다.

3.4.1 수직방향 수명시험

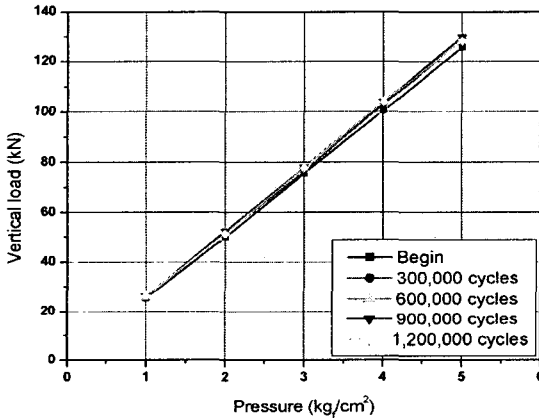
수직방향에 대한 내구수명 시험조건은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 0.5 MPa의 압력에서 수직방향으로 진폭 ± 30 mm으로 하여 120만회까지 파손 없이 작동하여야 하며, 시험 도중 30만회, 60만회, 90만회, 120만회에 수직지지 하중 및 수직 정 강성시험을 실시하여 특성변화는 초기성능의 10%이내이어야 한다.

수직방향으로 120만회 내구시험 후에 스톱퍼와 고무 벨로우즈 사이의 접촉 부위에서 미소한 마모가 발생되었으나 무시할 만한 정도였으며, 공기스프링의 다른 부위에는 아무런 이상이 발생되지 않았다. 그림 4(a),(b)에서 보는 바와 같이 수명시험 전, 후의 수직 지지 하중은 2.9%, 수직 정강성은 2.2% 변화로 초기성능의 10% 이내에 있어 평가기준을 만족하였다.

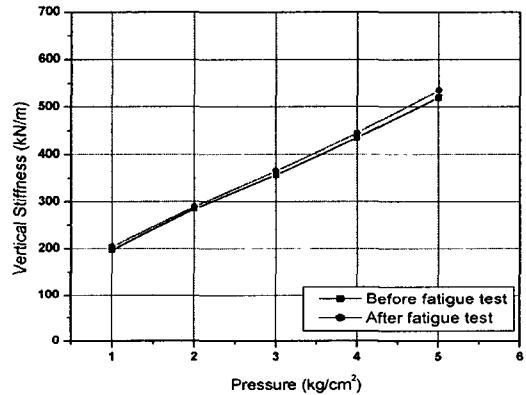
3.4.2 수평방향 수명시험

수평방향에 대한 내구수명시험조건은 공기스프링을 표준높이로 유지하고 수평방향에 대하여 진폭 ± 75 mm으로 회전반경 1000 mm의 조건으로 60만회까지 파손 없이 작동하여야 하며, 시험 도중 15만회, 30만회, 45만회, 60만회에 수평 정·동 강성시험을 실시하여 특성 변화는 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.

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

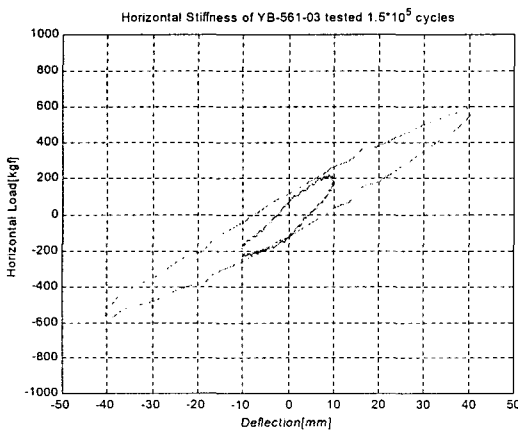


(a) 수직 지지하중

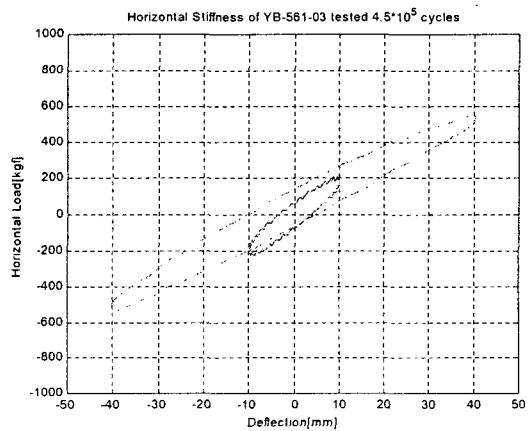


(b) 수직 정 강성

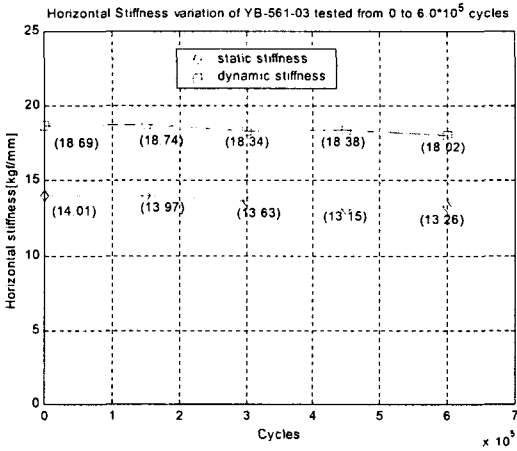
<그림 4> 수직방향 수명시험 결과



(a) 15만 수명시험 후



(b) 45만 수명시험 후



(e) 60만 수명시험 후



(f) 수명시험 전, 후의 정·동 강성

<그림 5> 수평방향 수명시험 결과

3.5 신뢰성 수명

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 β 의 값은 와이불 분포 dB에서 고무재료의 형태모수 값 $\beta=1.1$ 을 이용하여 평균수명(MTTF)에 대응하는 척도모수(θ)를 다음과 같이 구하였다.

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

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

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

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

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

4. 실차 주행시험 및 신뢰성 평가

4.1 개 요

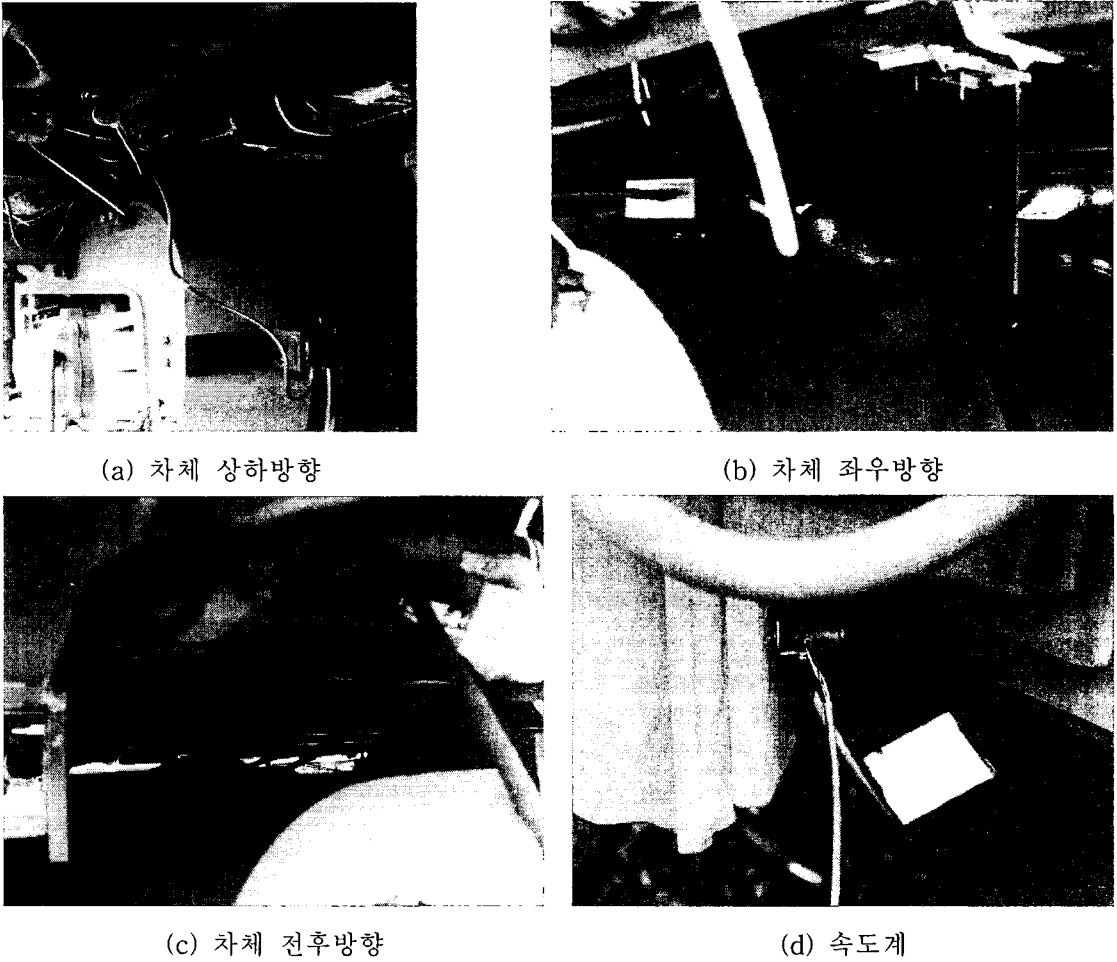
철도차량의 대차와 차체 사이에 조립되어 2차 현가장치로 사용되는 공기스프링을 설계하고 신뢰성을 평가하기 위해서는 공기스프링에 작용하는 하중을 정확히 파악하여야 한다. 그러나 공기스프링은 실제 운행 중에 선로, 정하중 및 운전 조건에 따라 차체 상하 방향, 좌우 방향 및 전후 방향으로 하중진폭, 평균하중 및 하중주파수가 매우 불규칙하게 변하는 변동하중을 받고 있으며, 실제 운행 상태에서 공기 스프링에 작용하는 하중이력을 예측하는 것은 거의 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 운행 중에 공기스프링에 작용하는 하중이력을 측정하는 실차시험을 수행하였다.

본 연구에서 개발된 공기스프링에 레이저 변위계를 설치하여 경부선, 호남선, 중앙선 및 전라선의 일부 구간을 운행하면서 객차(10,129호)용 대차(KT-23)에 장착된 공기스프링에 작용하는 하중을 측정하고, 이를 분석하였다. 측정, 분석된 하중이력과 일전진폭하중 하에서의 피로시험 결과를 이용하여 변동하중 하에서의 피로수명을 예측하였으며, 나아가 공기스프링의 신뢰성 평가를 수행하였다.

4.2 측정시스템 및 방법

객차(10129호)용 대차(KT-23)에 개발된 공기스프링을 설치하고 약 1년간 경부선, 중앙선 및 호남선을 운행하면서 영업 운행시험을 약 12개월 정도 수행 한 후에 하중이력을 측정하였다. 운행 최고속도는 경부선, 호남선 및 전라선의 경우 각각 약 120, 100~120, 100 km/h 이었으며, 열차 편성은 하행의 경우 시험차를 후부 11량 차에 편성하였다.

공기스프링에 작용하는 차체 상하 방향, 좌우 방향 및 전후 방향의 변위를 측정하기 위해 그림 6에서와 같이 레이저 변위계 및 보조 프레임을 대차 및 차체에 부착하였으며, 속도계를 이용하여 운행속도를 측정하였다. 레이저 변위계 및 속도 신호는 테이프 레코더(Tape Recorder, XR-7000)를 이용하여 기록하였으며, 이때 테이프 기록속도는 9.8 cm/sec. 이었다.



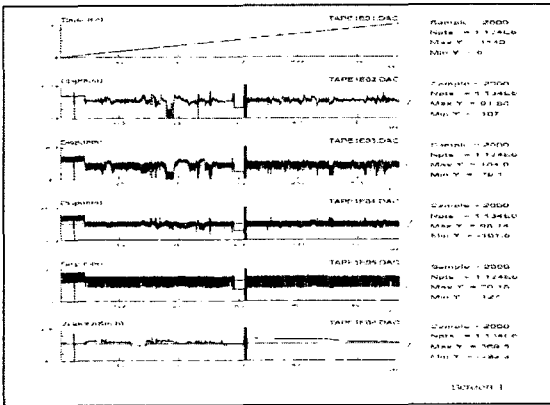
<그림 6> 대차 및 차체에 부착된 레이저 변위계 및 속도계

4.3 하중이력 측정 결과 및 데이터 처리

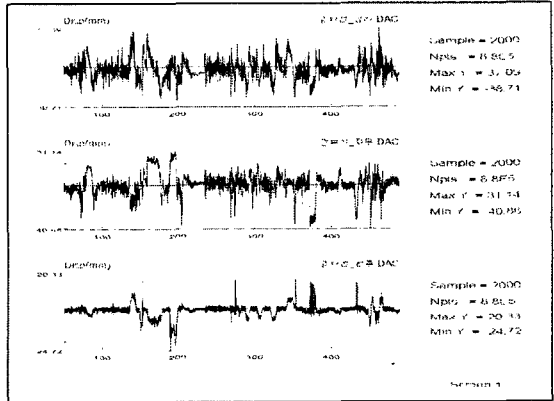
공기스프링의 실차 주행시험결과를 이용하여 공기스프링에 작용하는 하중이력을 분석하여 피로해석 및 신뢰성을 평가하였다[7]. A/D 변환기를 이용하여 2 kHz의 샘플링 비율 (sampling rate)로 변환된 하중이력의 전압 신호를 변환 요소(calibration factor)를 이용하여 변위로 단위 환산을 하여 그림 7(a)에 경부선 일부구간에서의 하중이력을 나타내었다. 하중이력을 주파수로 분석하여 Power Spectral Density를 구한 대부분 파형의 경우에 240 Hz 부근에서 노이즈가 발생됨을 알 수 있으며, 이로부터 Low Pass Filter의 Cut-off Frequency를 20 Hz로 결정하였다. Low Pass Filter된 하중이력 데이터에는 실제 운행 중

발생되는 하중이력과는 다른 외란에 의해 불필요하게 생성된 Spike 데이터가 포함하고 있으므로 본 연구에서는 Spike 데이터를 선택하여 Spike에 의한 최대치가 Spike 전후의 데이터 값의 평균값을 취하도록 하여 Spike를 제거하였다.

그림 7(b)는 그림 7(a)의 하중이력에 대해 Low Pass Filter를 수행하고 Spike를 제거한 경부선 일부구간에서의 하중이력을 보여 주며, 그림에 자세히 보이지는 않지만 Low Pass Filter에 의해 정상적인 하중이력의 크기가 변하지 않음을 확인하였다. 그림 7(b)의 하중이력에 대해서 Peak와 Valley를 추출하고, Rainflow법을 이용하여 그림 8과 같이 파형계수를 수행하여 하중범위 - 평균하중 - 발생 빈도수 분포를 나타내었다. 그림에서 하중범위 - 평균하중 - 발생 빈도수 분포가 비교적 정상분포를 하고 있음을 알 수 있으며, 이는 하중이력 데이터 획득 및 처리가 비교적 잘 수행되었음을 간접적으로 의미한다.

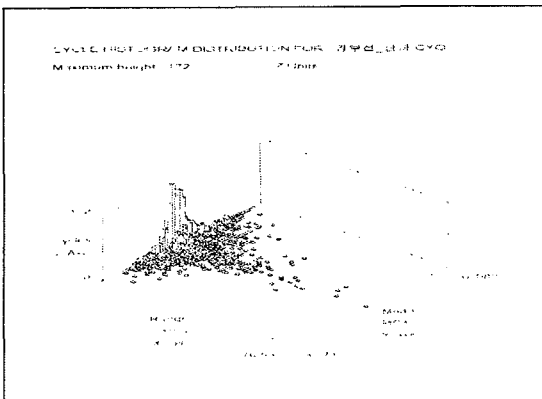


(a) 하중이력 측정 결과

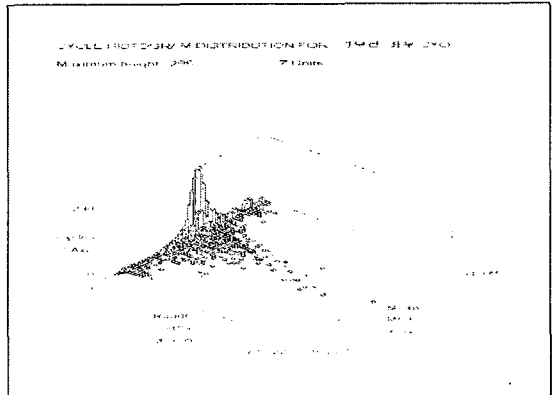


(b) Spike 제거한 하중이력

<그림 7> 경부선 일부구간에서의 하중이력 분포



(a) 경부선 상하방향



(b) 경부선 좌우방향

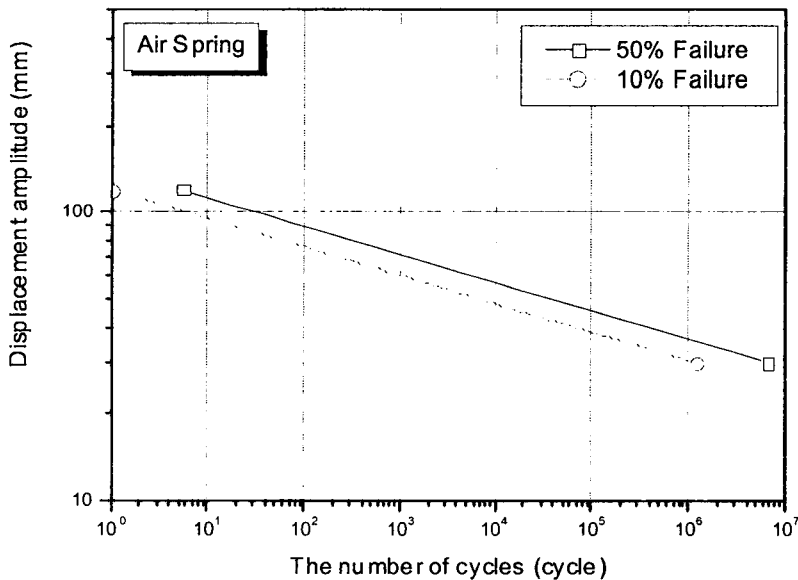
<그림 8> 공기스프링 하중 범위 - 평균하중 - 발생 빈도수 분포

그림 8에서 구한 운행 구간별로 공기스프링 차체 상하방향 최대 하중범위는 경부, 호남, 전라, 중앙선의 경우 각각 76.6, 77.1, 56.8, 24.9mm로 나타났으며, 중앙선의 경우를 제외하면 공기스프링 시험규격인 60mm와 비교적 근접한 값을 보임을 알 수 있다. 차체 좌우방향 최대 하중범위는 차체 상하방향의 최대 하중범위와 비교적 근접한 값을 보이나, 차체 전후방향 최대 하중범위는 차체 상하방향의 최대 하중범위와 비교적 차이를 보임을 알 수 있다. 최대 하중범위 분석 결과, 공기스프링의 피로수명예측 및 신뢰성평가 수행 시에는 경부, 호남, 전라선의 차체 상하방향 및 좌우방향의 하중이력만을 고려하였다.

4.4 피로수명예측

그림 8의 파형계수 결과를 이용하여 공기스프링의 피로수명을 예측하였다. 변동하중 하의 피로수명을 정확하게 예측하기 위해서는 실험적으로 구한 일정진폭하중 하에서의 공기스프링의 하중진폭 - 피로수명 관계를 이용하여야 하지만 이는 시간, 비용 면에서 실제 구하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성시험 기준 데이터를 이용하여 공기스프링의 하중진폭 - 피로수명 관계를 구하여서 피로수명예측에 이용하였다.

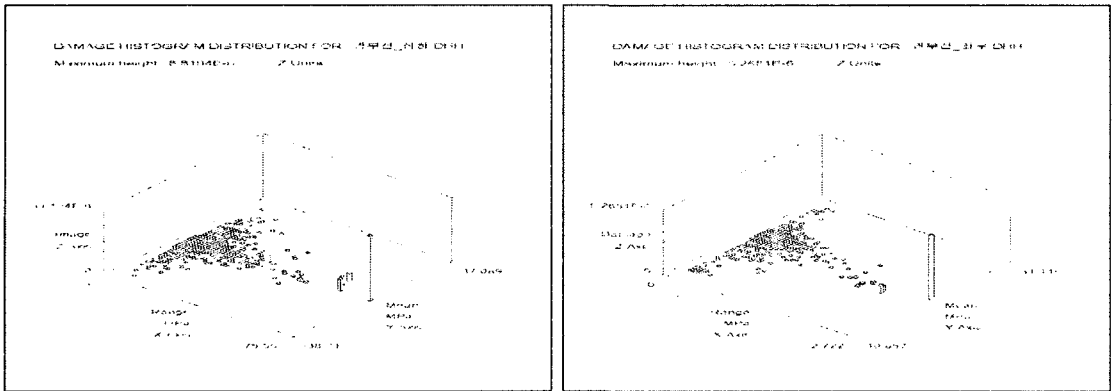
그림 9는 피로수명 예측에 사용된 공기스프링의 하중진폭 - 피로수명 관계를 보여 준다. 그림에서 점선은 공기스프링의 신뢰성시험시 사용되는 평가기준을 나타내며 이를 Weibull 분포의 B10 수명으로 가정하였다. 실선은 Weibull 분포의 B50 수명을 나타내며 이때 기울기는 고무 소재의 실험결과를 이용하여 1.1로 가정하였다.



<그림 9> 피로수명 예측에 사용된 공기스프링의 하중진폭 - 피로수명 관계

그림 10은 파형계수 결과와 그림 9의 하중진폭-피로수명 관계를 이용하여 마이너(miner) 손상법칙을 이용하여 구한 피로손상 분포로 피로손상의 대부분은 하중진폭이 큰 몇 개의 파형에 의해서 결정됨을 알 수 있으며 하중진폭이 작은 파형은 피로손상에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 피로손상 계산 시 평균응력의 영향은 고려하지 않았지만 손상에 큰 영향을 미치는 하중진폭이 큰 경우에는 평균응력이 크게 작용하지 않아서 전체 수명에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

표 3은 운행 구간별로 구한 공기스프링의 피로수명을 보여 주며, 여기서 수명은 그림 7에 나타난 하중이력을 1 Block 가정할 경우의 반복횟수를 의미한다. 그림 10의 손상 분포로부터 손상의 합을 구하여 이를 누적손상으로 정의하고, 누적손상의 역수를 취하여 이를 피로수명으로 정의하였다.



(a) 경부선 상하방향

(b) 경부선 좌우방향

<그림 10> 공기스프링 피로손상 분포

<표 3> 운행 구간별로 구한 공기스프링의 피로수명

구 간	측정거리 (km)	방 향	피로수명 (Block)
경 부 선	10.8	차 체 상 하	7.38×10^4
		차 체 좌 우	1.43×10^5
		차 체 전 후	2.12×10^7
호 남 선	20.5	차 체 상 하	7.67×10^4
		차 체 좌 우	5.29×10^5
		차 체 전 후	1.07×10^6
전 라 선	15.5	차 체 상 하	9.01×10^5
		차 체 좌 우	2.07×10^7
		차 체 전 후	1.08×10^5
중 앙 선	20.6	차 체 상 하	5.29×10^9
		차 체 좌 우	2.13×10^4
		차 체 전 후	-

4.5 공기스프링 신뢰성 평가

일반적으로 피로시험 결과는 측정데이터의 흩어짐(scatter)이 매우 큰 것으로 알려져 있으므로, 신뢰성 있는 피로수명 데이터를 얻기 위해서는 다수의 시험편의 시험결과를 이용하여 시험 데이터를 통계적으로 처리하고 평가하여야한다. 피로수명 데이터를 통계적으로 처리하는데 사용되는 수명 분포 모델로서는 대수 정규(log-normal) 분포, 와이블(Weibull) 분포 등이 많이 사용되고 있으며, 특히 부품의 피로수명을 평가 할 경우에는 와이블 분포가 유용하게 사용되고 있다. 와이블 분포를 갖는 확률변수의 데이터를 와이블 확률 용지에 PPlot 하면 직선으로 나타나므로 와이블 분포가 공학적인 문제에 훨씬 유용하게 많이 사용되고 있다.

와이블 확률밀도함수 $f(t)$ 와 신뢰도함수 $R(t)$ 는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f(t) &= (\beta/\theta)(t/\theta)^{\beta-1} e^{-(t/\theta)^\beta} \dots\dots\dots (2) \\
 R(t) &= \exp[-(t/\theta)^\beta], \quad t \geq 0, \quad \theta, \beta > 0
 \end{aligned}$$

여기서, β 는 형상모수 또는 와이블 기울기, θ 는 척도모수 또는 특정수명이다. 100p% 백분위수는 식 (7.2)와 같이 표시할 수 있다.

$$t_p = \theta \left[\ln \left(1 - \frac{1}{1-p} \right) \right]^{1/\beta} = \theta \left[-\ln(1-p) \right]^{1/\beta} \dots\dots\dots (3)$$

Weibull 분포와 표 3에 나타난 운행 구간별로 구한 공기스프링의 피로수명(또는 누적손상)을 이용하여 개발된 공기스프링의 신뢰성을 평가하였다.

하중이력은 경부선, 호남선 및 전라선 일부구간에서 측정한 데이터를 이용하였으며, 중앙선의 경우에는 그 외의 구간과 상하방향의 피로수명이 현격한 차이를 보이므로 평가에서 제외하였다. 운행이력의 조합은 경부선, 호남선 및 전라선의 운행 비율을 1 : 1 : 1로 가정하였다.

공기스프링은 실제 운행 중에 상하, 좌우 및 전후 방향의 하중을 동시에 받는 복합 다축하중상태 하에 있으나, 이 경우에는 매우 복잡한 계산 절차가 필요하고 누적손상법칙의 적용에 제한이 있으므로 각각의 단축하중이 독립적으로 작용하는 것으로 가정하였다. 또한 실제 작동 중에 여러 가지 환경 요인에 의해서 공기스프링의 열화가 예상되지만 열화가 수명에 미치는 영향은 고려하지 않고, 신뢰성을 평가하였다. 손상법칙으로는 Miner의 누적손상법칙을 적용하여 누적손상의 합이 1에 이르는 경우를 파손수명으로 정의하였다.

표 4는 그림 9에서 구한 10 % 및 50 % 파손 선도를 기준으로 하여 구한 공기스프링의 운행거리 및 수명(년 수)를 나타내며, 공기스프링은 연간 2×10^5 km를 운행하는 것으로 가정하였다.

표에서 10 % 및 50 % 파손선도를 기준으로 하여 구한 수명은 각각 보증수명 년 수와 평균수명 년 수로 가정하였으며, 다축하중과 열화에 의한 수명감소 효과를 고려하여 보증

수명 년 수와 평균수명 년 수에 안전계수를 각각 1.3 및 5를 고려하였다.

표 4의 상하방향 하중을 기준으로 할 경우에 개발된 공기스프링의 보증수명 및 평균수명은 각각 6.5 년 및 9.3 년으로 예측할 수 있다. 보다 정확한 수명을 예측하기 위해서는 다음의 연구가 더욱 수행되어야 할 것이다.

- 1) 일정진폭하중 하에서의 공기스프링의 확률 - 하중진폭 - 수명관계의 규명
- 2) 운행노선 전체에서의 하중이력의 측정
- 3) 다축하중상태 하에서의 피로손상평가 방법의 개발
- 4) 예측된 수명의 실험적 검증을 통한 안전계수의 산출

<표 4> 공기스프링의 운행거리 및 수명(년 수)

방	향	보증운행거리(km)	평균운행거리(km)	보증수명(년)	평균수명(년)
상	하	1.69 x 10 ⁶	9.31 x 10 ⁶	6.5	9.3
좌	우	5.25 x 10 ⁶	2.89 x 10 ⁷	20.2	28.9

6. 결 론

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

- (1) 고무재료의 고유한 특성으로 신뢰성 평가가 어려운 철도차량용 공기스프링에 대해 신뢰성 평가기준을 따라 국내에서 개발한 전동차용 공기스프링에 대해 신뢰성을 시험을 수행하였다.
- (2) 고무물성 및 종합 성능시험의 모든 항목에서 평가기준을 만족하였으며, 수명시험에서는 수직방향 120만회, 수평방향 60만회 동안 공기스프링에 아무런 이상이 발생되지 않았으며, 특성변화도 초기성능의 10% 이내에 있어 평가기준을 만족하였다.
- (3) 본 연구에서 수행한 철도차량용 공기스프링에 대한 신뢰성은 신뢰수준 90%에서 평균수명 100만회를 보장할 수 있다.
- (4) 공기스프링에 대한 실차 주행시험으로 레이저 변위계를 설치하고, 경부선, 호남선, 전라선 및 중앙선을 운행하면서 운용하중이력을 측정하고, 하중이력을 분석하였다. 측정된 하중이력을 이용하여 피로수명을 예측하고 신뢰성 평가를 수행하여 공기스프링의 보증수명 및 평균수명을 예측하였다.
- (5) 공기스프링의 보증수명 및 평균수명은 각각 6.5 년, 9.3 년으로 예측되었다

참 고 문 헌

- [1] 고속전철 현가장치 개발 연구보고서(1996), 96-II-5-2
- [2] 개정 방진고무, 방진고무연구회편(1975), 일본철도차량공업회, pp. 111-134
- [3] 공기스프링용 고무벨로우즈의 시험방법(1995), KSR 4001
- [4] 차량용 공기스프링 시험방법(1995), 일본국유철도사양서, JRS 17304-1
- [5] 철도차량용 공기스프링 신뢰성 평가기준(2002), 산업자원부 기술표준원 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
- [7] nSoft User manual(1988), Ver. 1.1, nCode International Ltd.