

전동차용 공기스프링 내구성평가 및 실차시험

Durability Evaluation and Train Test of Air Spring for Electric Railway

김완두*, 우창수*, 이학주*, 정승일**, 김석원**, 김영구**, 최경진***, 이동형***

W. D. Kim*, C. S. Woo*, H. J. Lee*, S. I. Jung**, S. W. Kim**, Y. K. Kim**, K. J. Choi***, D. H. Lee***

ABSTRACT

An air spring was accepted for rail vehicle secondary suspension to reduce and absorb the vibration and the noise. The air spring for the electric railway was developed with domestic technology, which consisted of a cord reinforced rubber bellows, a upper plate, a lower plate and a stopper rubber spring. The fatigue test was conducted in laboratory by using servo hydraulic fatigue testing system to verify the durability. And to guarantee the adaptation of this air spring, the ride comfort and the air pressure variation were measured in train test on Boondang line.

1. 서론

철도 차량은 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.

최근 철도차량 2차 현가장치인 공기스프링에 대한 설계·해석기술과 특성 평가 기술의 확보를 통하여 그간 전량 수입에 의존해 오던 공기스프링의 국산화가 가능하게 되었다^[1]. 동 부품은 철도 차량의 진동·소음을 감소시키기 위한 현가장치에 사용되는 부품으로서 차량 수명동안 정숙성 및 승차감을 유지하고 부품의 보증기간을 확보하기 위하여 높은 신뢰성이 요구되며, 실험실 차원에서의 내구성 평가는 물론이고 일정 기간동안의 실차시험을 통하여 신뢰성을 보증하여야 한다^[2,3].

공기스프링은 코드로 강화된 고무벨로우즈에 채워진 공기 압력을 이용하여 하중을 지지하고 진동을 감쇄시켜 주는 역할을 하며, 세부 구성부품은 상판, 고무벨로우즈, 하판, 보조 고무스프링(Stopper) 등이다. 고무벨로우즈의 내부에는 고무보다 탄성계수가 훨씬 큰 보강코드가 삽입되어 있는 복합재료 형태를 띠고 있으며, 고무 층과 보강코드로 인하여 이방성과 비선형성을 띤다. 공기스프링은 내부 압력 변화에 따른 수직지지하중, 수직 및 수평 방향의 강성, 피로내구성 등이 주요 설계 변수로서, 고무벨로우즈의 형상, 코드의 각도, 고정 부위인 상·하판의 모양에 따라 특성이 바뀌게 된다^[4,5].

본 연구에서는 하중지지 용량 및 수직·수평 강성이 요구되는 설계 조건을 만족하는 전동차용 공기스프링에 대한 내구성 시험을 실시하여 실험실 차원에서의 신뢰성을 평가하고, 실제 차량에의 적용성을 보증하기 위한 실차시험을 수행하였으며, 또한, 실제 차량에 장착되어 6년 동안 사용되어 온 제품과 동일 회사의 신제품과의 특성을 비교 평가하여 특성 변화 양상을 파악하였다.

* 한국기계연구원, 정회원

** 유일산업(주)

*** 한국철도기술연구원, 정회원

2. 공기스프링의 제작

공기스프링의 요구 특성은 수직지지하중, 수직·수평방향 강성, 스토퍼의 강성 및 피로내구성 등이다. 공기스프링에 대한 여러 가지 해석 및 시험 등을 통하여 지지하중과 강성을 만족하는 시제품을 만든 후 최종적으로 제품의 신뢰성을 확보하기 위한 피로내구성 평가를 실시한다.

공기스프링의 주요 구성부품인 상판, 고무벨로우즈, 하판 및 보조공기스프링 등은 각각 제작 금형에 의해 성형된 후 조립·완성된다. 공기스프링의 특성에 큰 영향을 끼치는 고무벨로우즈는 나일론수지재질의 코드를 4층 접합시켰으며, 각 층 사이에 얇은 고무판을 삽입하여 성형하였다. 내층과 외층은 NR과 CR이 혼합된 고무 재질을 사용하였다. Fig. 1과 2는 본 연구의 시험 대상품인 전동차용 공기스프링의 형상과 대차에 설치된 모습을 보여준다.

고무 재질은 원료 고무, 가황제, 충전제 및 연화제, 노화 방지제 등을 적절히 조정하여 배합되며, 굴곡 균열, 상하 접촉 부위의 마모, 외부의 이물질에 의한 오염, 내층 고무와 코드의 Topping 고무와의 접착, 그리고 공기의 내투과성을 고려하여 선택된다.

공기스프링 제조 공정은 다음과 같다.

(성형)→(Shaping)→(Moulding)→(Curing)→(사상)→(외관검사)→(단품조립)→(검사)→(포장)

성형작업은 고무 시트, 코드, 비드 등의 준비된 반제품을 이용하여 성형기에서 이루어지며, Shaping은 성형된 제품을 금형에 체결하기 전에 금형의 형상에 적당하도록 고정하는 작업이며, Curing Bladder를 Shaping된 제품에 삽입하고 가황을 실시하게 된다.

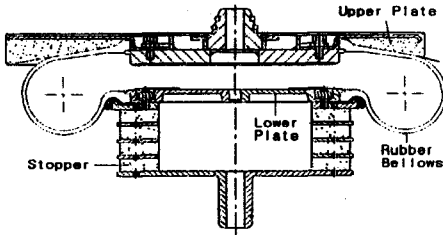


Fig. 1 전동차용 공기스프링의 형상

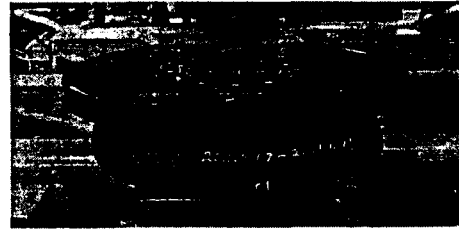


Fig. 2 대차에 장착된 공기스프링

3. 내구성 시험

전동차의 운행 중에 공기스프링에는 수직방향 하중과 수평방향 하중이 전달되게 된다. 수직방향 하중은 주로 궤도면의 상하 방향 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.

내구성 시험 조건은 실제 운행 중인 차량으로부터 측정된 운용하중과 공기스프링의 요구 수명 등을 고려하여 결정되어야 하나, 현재 이에 대한 측정된 기술 자료가 미비한 실정으로서, 외국의 기술 자료에 의하면 수평 방향으로 ± 75 mm 변위로서 110 만회를 반복하였을 경우 약 10 년의 운행 조건에 해당되는 것으로 알려져 있다^[6]. KSR 4001의 공기스프링 피로시험 조건에 의하면 상용 최고 내압 (만차 상태, 5 kg/cm^2)에서 상용 최대 수직 반복 변위 (± 30 mm)를 100 만회 가해 주도록 규정되어 있다^[7].

본 논문에서는 철도청의 전동차용 볼스타리스 대차용 공기스프링의 심사 기준^[8]에 따라 내구성 시험을 실시하였다. 시험조건은 다음과 같다.

- 1) 공기스프링을 표준 높이로 유지하고 압력 5 kg/cm^2 의 공기를 봉입한 후 수직방향에 대하여 진폭 ± 30 mm, 진동수 1~3 Hz로 100만회 반복 진동 변위를 가하여 각 부의 상태를 조사한다.
- 2) 수평 변위 진폭 ± 75 mm, 진동수 1~3 Hz, 회전반경 1,000 mm의 조건으로 50 만회 반복 진

동변위를 가하여 각 부의 상태를 조사한다.

3) 시험 중 내부압력은 5 kg/cm^2 이하로 떨어져서는 안되며 상하 면판의 구속조건은 현차와 비슷한 조건이어야 한다.

수직과 수평방향 내구시험 모두 45 리터 용량의 보조공기통을 설치하였으며, 수직방향시험은 50 톤, $\pm 75 \text{ mm}$ 용량의 구조물용 피로시험기, 수평방향시험은 25 ton, $\pm 100 \text{ mm}$ 용량의 유압식 액츄에이터를 이용하였다. Fig. 3과 4는 수직과 수평방향 내구시험 모습을 보여준다. Fig. 5는 수평방향 시험 시 곡률 반경 1000 mm를 구현할 수 있도록 특수하게 설계된 장치를 보여준다.

수직방향으로 100 만회 내구시험 후에 스톱퍼와 고무벨로우즈 사이의 접촉 부위에서 미소한 마모가 발생되었으나 무시할 만한 정도였으며, 공기스프링의 다른 부위에는 아무런 이상이 발생되지 않았다. 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 심사기준을 만족함을 알 수 있었다. Fig. 6은 스톱퍼와 접촉이 발생하는 부위에서 미소한 마모가 발생된 벨로우즈 표면의 모습이다.

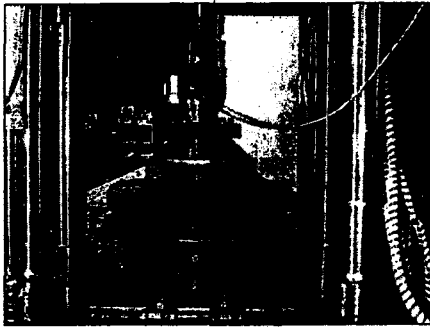


Fig. 3 수직방향 내구시험 ($\pm 30\text{mm}$)

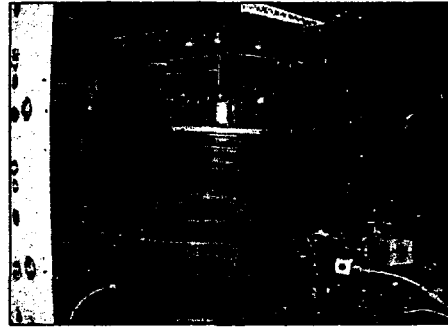


Fig. 4 수평방향 내구시험 ($\pm 75\text{mm}$)

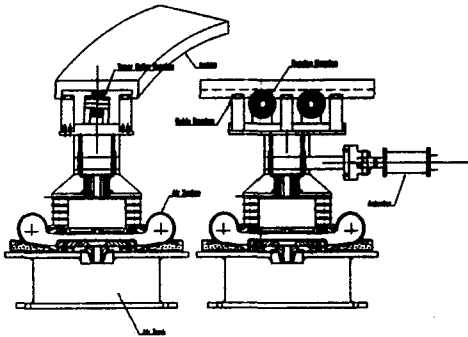


Fig. 5 수평방향 내구시험장치

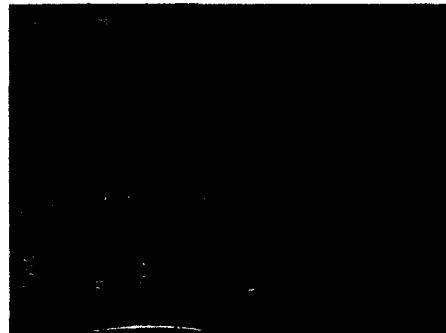


Fig. 6 수직방향 내구시험 후의 벨로우즈 표면

4. 사용품과 신제품과의 특성 비교

실제 차량에 장착되어 사용되어 온 제품의 특성 변화를 파악하고 내구성 평가의 기초 기술 자료를 구축하기 위하여 수도권 전철 노선에서 6년 동안 사용되어 온 제품을 채취하여 동일 회사의 신제품과의 특성을 비교 평가하였다. Table 1에 각 시험 항목에 대한 결과치를 보여준다. Fig. 7은 사용 제품과 신제품의 압력에 따른 수직강성 변화를 보여주며, Fig. 8은 스톱퍼의 하중-변위 관계 선도를 보여준다. Fig. 9와 10은 사용 제품과 신제품의 수평방향 정·동적 하중-변위 선도이다.

6년 사용 제품의 경우 시험 항목 모두 초기의 성능 규격을 만족시켜주지 못하였으나, 신제품의 경우 경도를 제외하고는 규격을 만족하고 있었다. 일반적으로 고무 제품이 열화되면 경도가 높아져 딱딱하게 되어 강성이 높아지는 경향과 잘 일치하고 있으며, 6년 동안에 강성이 약 10~25% 정도 증가되었음을 알았다. Fig. 11은 고무벨로우즈의 형상으로서 사용 제품의 경우 영구 변형되어 접혀져 있는 모습을 볼 수 있다. Fig. 12는 벨로우즈 표면의 마모가 발생된 모습을 보여 주고 있으나 파손의 염려나 성능 저하 등의 우려는 없는 정도에 지나지 않았다.

공기스프링이 사용되는 차량의 승차감 향상 및 진동·소음 저감 성능을 오랫동안 유지시켜주기 위해서는 초기 제품의 강성을 하한값에 가깝게 관리하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Table 1 사용 제품과 신제품의 특성 비교 결과

시험항목	6년 사용 제품 (1993년 3월 제조)	신제품 (1997년 6월 제조)	규격
스토퍼 경도	68~70	60~62	55±5
스토퍼 변위 (mm)	5.85	7.01	8±1.2
스토퍼 영구 변형 (mm)	1.0	0	
고무벨로우즈 표면 경도	64	62	55±5
고무벨로우즈 형상	영구 변형(접혀짐)	탄성 유지	-
수직지지하중 (kg)	7335	7854	7700±200
수직강성 (kg/mm)	44.4	40.2	38±10%
수평정강성 (kg/mm)	15.0	12.1	10 이상
수평동강성 (kg/mm)	25.0	19.2	17±15%

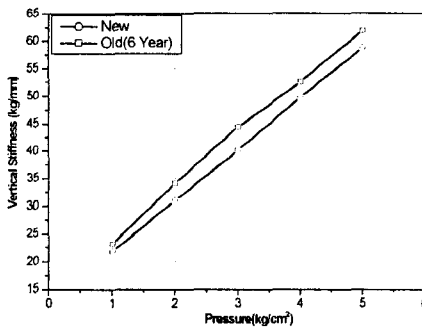


Fig. 7 사용 제품과 신제품의 수직강성

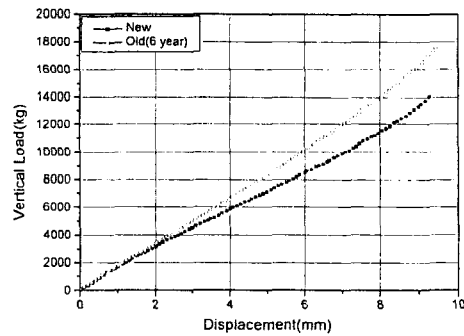


Fig. 8 스토퍼의 하중-변위 선도

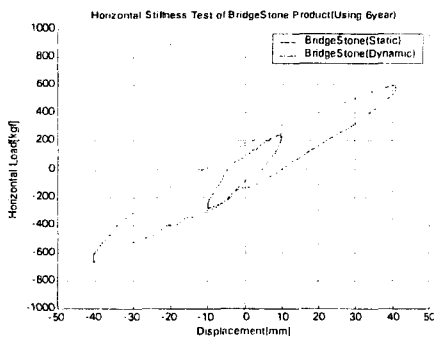


Fig. 9 사용제품의 수평방향 하중-변위 선도

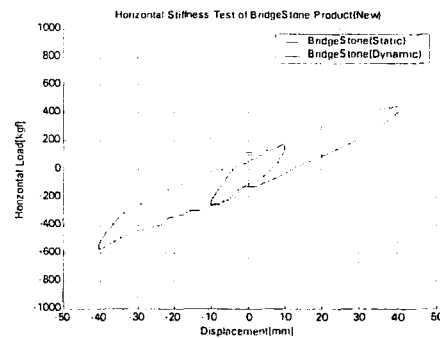


Fig. 10 신제품의 수평방향 하중-변위 선도

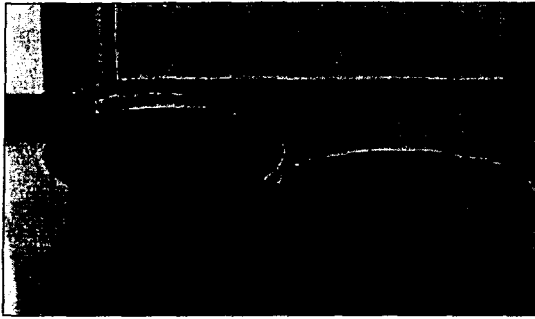


Fig. 11 신제품과 사용 제품의 고무 벨로우즈의 형상



Fig. 12 고무 벨로우즈 표면의 모습

4. 실차시험

1) 측정 개요

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 측정하였다.

공기압력은 공기스프링의 공급압력에 대하여 실시간으로 데이터를 수집한 후 선로상태에 따른 압력변화를 분석하였으며, 주행 상태에 따른 승차감을 측정하였다. 실차시험을 실시한 전동차는 총 10 량으로서 공기스프링 시제품은 2046호에 장착되었으며, 비교 객차는 2246호이다. Fig. 13은 실차시험을 위한 전동차 차량 편성을 보여주며, Fig. 14는 시험 대기 중인 전동차를 보여준다. Table 2는 승차감 측정 및 공기스프링 압력측정을 위한 장비이다.

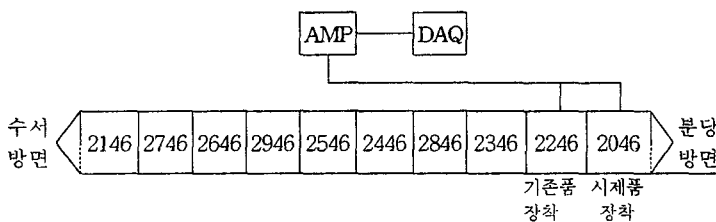


Fig. 13 실차시험 전동차 차량 편성



Fig. 14 시험 대기 중인 전동차

Table 2 실차시험 측정 장비

- Ride Quality Test Meter : ISO 4361	2 sets
- Data Acquisition System : DEWETRON3000 (Dynamic Strain Amplifier 내장)	1 set
- Air Pressure Gage 10 kg/cm ²	3 ea
- Photo Sensor	1 ea
- F/V converter	1 ea

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 승차감 계수를 정차 역 사이에서 2~3 분간 측정된 값을 평균하였다. 측정위치는 대차중앙부의 의자에서 실시하였으며, 시험자가 방석 모양의 센서를 깔고 앉은 상태에서 측정하였다. Fig. 15는 승차감 측정 센서와 계측기를 보여준다. 시험 중 최고 운행속도는 80 km/h 이었다.

Table 3은 정차 역 사이에서 2~3 분간을 측정하여 대표 값을 분석하여 정리한 결과이다. 종합적인 측정결과는 단시간의 평균값으로서 오차범위를 고려하면 시험차량과 비교 차량이 큰 차이가 없었다. 상하 및 좌우 방향은 비교 차량보다 시험 차량에서 약간 낮은 경향을 나타내고 있으며, 전후방향은 동일한 측정값을 보였다. 시험 차량에서의 승차감이 조금이라도 낮은 경향을 나타내는 것은 시험 차량에 장착된 공기스프링의 강성이 비교 차량보다 낮는데 원인이 있는 것으로 추측되며, 공기스프링의 강성이 승차감과 차체 진동에 끼치는 영향을 좀 더 명확히 규명하기 위해서는 진동 측정시험을 통한 비교 평가가 수행되어야 한다.

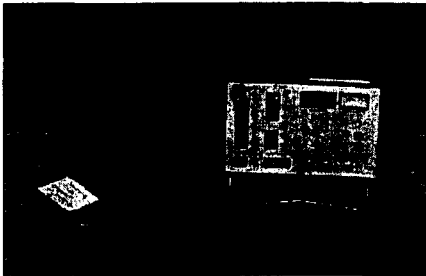


Fig. 15 승차감 측정 장비

Table 3 승차감 측정 결과

측정차량 \ 승차감방향	승차감방향		
	상 하	좌 우	전 후
시험차(2046호)	100~104	103~104	100~101
비교차(2246호)	101~104	103~105	100~101

3) 공기스프링 압력 변동 측정

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.

공기 압력 변동은 공기압 공급 배관의 분기기를 통하여 측정하였으며, Fig. 16과 17은 차체 아래쪽의 공급 배관에 설치된 압력게이지와 객실의 의자 밑에 설치된 압력게이지의 모습을 보여준다. Fig. 18은 공기 압력 측정 시스템의 구성도를 보여준다.

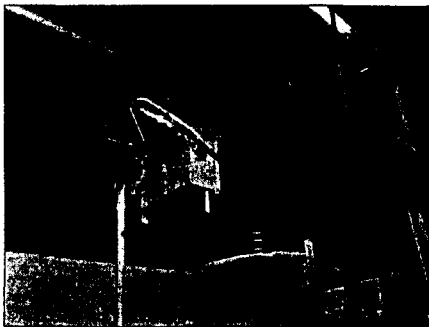


Fig. 16 차체에 설치된 압력게이지

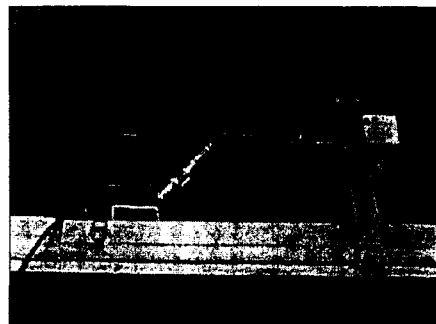


Fig. 17 객실 내에 설치된 압력게이지

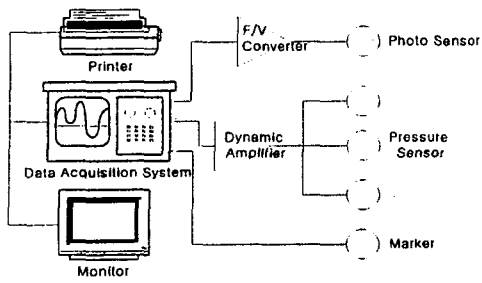


Fig. 18 공기 압력 측정 시스템 구성도

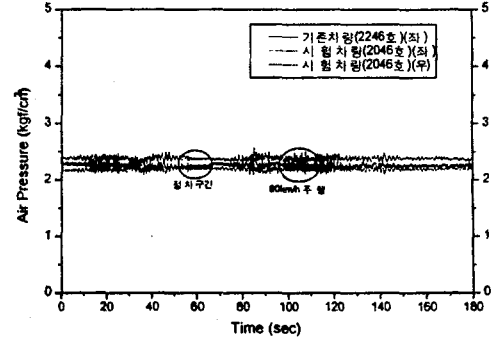


Fig. 19 공기스프링 압력 변동 (미금→백궁구간)

Fig. 19는 미금역→백궁역 구간에서 공기 압력 변동을 측정된 결과로서 정차 시 시험차량의 좌우 압력차이가 0.2 kg/cm^2 정도 좌측이 높으며, 정차 시 시험차량과 비교차량의 압력도 0.1 kg/cm^2 정도 시험차량이 높은 것으로 나타났다. 주행속도 80 km/h 에서는 비교적 변동폭이 많이 일어남을 알 수 있으며 좌우의 변동편차는 비슷하게 발생하고 있다.

Table 1의 사용 제품의 수직지지하중 및 강성 특성을 감안할 때 시험 차량의 압력이 비교 차량보다 압력이 낮아야 함에도 불구하고 오히려 높은 원인은 측정 장비와 시험자의 중량이 시험 차량에 집중되어 있었으며, 차체 중량도 시험 차량이 더 큰데 원인이 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 20은 서현역→야탑역 구간에서 시험차량이 후미일 때이며, 곡선구간에서의 압력변화가 비교차량과 시험차량이 거의 비슷한 경향으로 상승 및 하강하였다. 다만, 변동폭이 크게 나타나는 현상은 곡선로 진입부의 공급압력 불안정성으로 추측되며, 진입 후에는 다시 안정된 현상을 나타내었다. Fig. 21은 곡선구간(400R)에서의 공기압력변화를 보여주고 있으며, 압력변동 싸이클의 경향이 차체중량의 변화와 차체진동특성에 따른 $0.5 \sim 1.0 \text{ Hz}$ 의 대역으로 나타나고 있다. 차체기울기의 하중변화에 능동적으로 압력변화가 일어남을 알 수 있으므로 공기스프링의 작용은 기능적으로 양호함을 알 수 있다.

Fig. 22과 23은 야탑역→서현역 구간을 측정된 결과로서 시험차량이 선두 위치일 때이며, 직선구간에서 공기압력변동이 크다가 곡선구간에서 압력변동이 작아짐을 알 수 있으며, 이 현상은 곡선로에서 차량속도를 적절하게 감속함에 따라 안정적인 공기압력이 유지되는 것으로 분석된다.

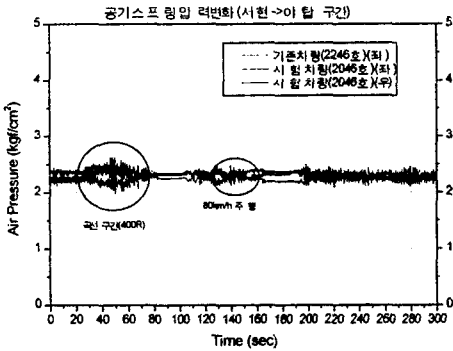


Fig. 20 서현→야탑 구간 공기 압력 변동

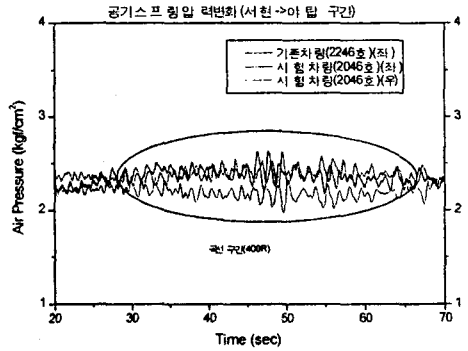


Fig. 21 서현→야탑 곡선 구간 공기 압력 변동

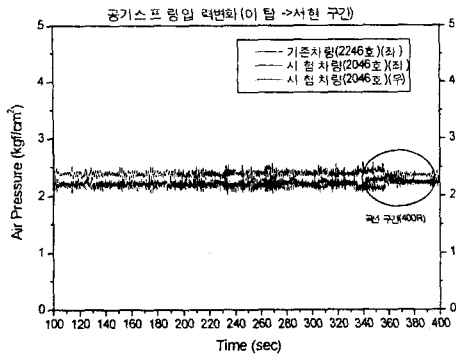


Fig. 22 야탑→서현 구간 공기 압력 변동

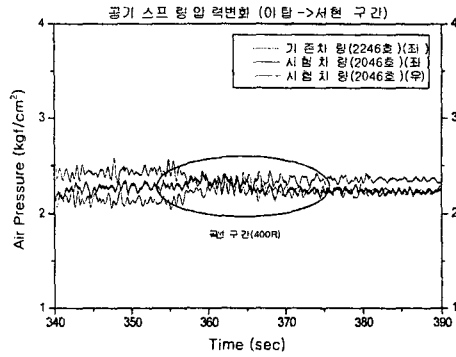


Fig. 23 야탑→서현 곡선 구간 공기 압력 변동

5. 결론

본 연구에서는 순수 국내 기술로서 개발된 전동차용 공기스프링의 피로 내구성 시험과 실차시험을 실시하였으며, 실제 차량에 장착되어 6년 동안 사용되어 온 제품과 동일 회사의 신제품과의 특성을 비교 평가하여 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 공기스프링의 내구성 시험은 수직방향과 수평방향 시험을 각각 실시하며, 수직방향 변위 ± 30 mm로 100 만회, 수평방향 변위 ± 75 mm로 50 만회 수행까지 고무벨로우즈의 마찰부위의 미소한 마모 외에 특별한 이상이 없어 내구성이 양호한 것으로 판명되었다.
- 2) 동일한 회사의 6년 사용한 제품과 신제품과의 특성 비교시험을 통하여 사용된 제품의 경도가 약 10 도 증가하였으며, 수평 및 수평방향 강성과 스톱퍼의 강성도 약 10~25 % 증가되어 고무의 노화가 상당히 진행되었음을 알았다.
- 3) 시제 공기스프링이 장착된 시험 차량과 6년 사용되어 온 기존 제품이 장착된 비교 차량의 승차감 시험 결과 승차감이 거의 동일한 것으로 측정되었다.
- 4) 공기스프링의 압력은 속도가 올라갈수록 변동폭이 커졌으며, 곡선로 주행 시는 시험 차량이 후미에 있을 경우 상당히 커졌으며, 선두에 있을 경우는 적절한 감속으로 인해 변동폭이 오히려 감소하였다.

참고 문헌

1. 김완두 외, "공기스프링용 코드강화 고무벨로우즈 국산화 개발", 중소기업 수탁지원사업 결과보고서, 2000. 1. 20.
2. 개정 방진고무, 방진고무연구회편, 일본철도차량공업회, 1975, p. 111
3. B. M. Eickhoff, J. R. Evans and A. J. Minnis, "A Review of Modelling Methods for Railway Vehicle Suspension Components," Vehicle System Dynamics, pp. 469-496, 1995.
4. 김완두 외, "철도차량용 코드강화 공기스프링의 특성 예측 및 평가," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 626-633, 2000.
5. 허 훈 외, "공기스프링 FEM 해석 기법 개발" G7고속전철기술개발사업-현가장치 개발과제 보고서, 1998. 10.
6. Technical Data for Taegu Subway No. 1, Bridgestone, 1993.
7. KSR 4001-1985, 공기스프링용 고무벨로우즈의 시험방법
8. 전동차용 공기스프링 심사기준, 철도청, 2000.

후 기

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