

공기스프링 적용 철도차량의 동적 특성에 관한 연구

A Study on the Dynamic Characteristics of Railway Rolling Stock Applied Air Springs

허현무*
Hur, Hyun-Moo

함영삼**
Ham, Yong-Sam

최경진**
Choi, Kyung-Jin

권성태*
Kwon, Sung-Tae

ABSTRACT

Air spring for railway rolling-stock is a part of secondary suspension system which play the role of supporting load, damping vibration. Recently, air springs are actively applied to railway rolling-stock to substitute coil spring with upgrading the manufacturing skill. This study is started to get the fundamental datum related to air spring for the purpose of developing the test draft for air spring. To analyze the performance of air spring, we conducted the simulation for railway rolling-stock applied air spring and tested train in convention lines. Thus, we have obtained useful datum to develop the test draft for air spring. Here, we describe some results.

1. 서론

철도차량용 공기스프링은 주행장치인 대차와 차체간 2차 현가시스템의 구성요소로 차량의 승차감, 하중지지, 진동감쇠의 역할을 하는 철도부품이다. 그간 2차 현가계용 스프링은 코일스프링이 주로 사용되어 왔다. 코일스프링은 하중지지 및 내구성능 우수한 반면 진동에 대한 감쇠성능이 저하하고, 소음이 발생하는 등의 단점을 내포하고 있다.

최근, 철도차량의 승차감 향상을 통한 서비스 개선과 차량 유지보수의 효율성등을 도모하기 위하여, 내구성 및 진동감쇠가 우수한 고무재질의 공기스프링 적용이 활발해 지고 있는 추세이다. 국내에선 최근 개발되는 고속객차와 전동차의 대부분이 공기스프링을 적용하여 대차구성부품을 단순화시키고 있다. 공기스프링은 고무벨로우즈, 보조스프링, 상판등으로 구성되며, 요구되는 주요 성능은 기밀, 내압, 최대변위, 내용적, 수평·수직방향 스프링강성, 감쇠계수 및 내구성등이다. 현재, 국내에선 고무류 제작기술의 미흡으로 전량 수입에 의존하고 있으며, 철도차량용 공기스프링에 대한 품질규격 조차 갖추어 지고 있지 않은 실정으로 일부 관련 규격은 해외 규격을 인용하여 준용하고 있는 추세이다.

그러나, 철도차량용 공기스프링은 철도차량 현가시스템의 핵심부품으로 차량의 안전성과 승차감을 확보하여 주는 요소로서, 차량운용조건, 선로 및 환경특성등에 따라 공기스프링의 성능에 영향을 미친다고 할 수 있다. 이런 이유로 선진 철도국에선 각각 그 나라의 고유한 차량운용특성에 따라 적용되는 공기스프링의 성능 기준이 상이하고 그에 따른 시험방법도 다르다고 할 수 있다. 따라서, 국내에서도 기 적용되고 있는 철도차량용 공기스프링에 대한 유지보수와 신차개발시 제작비용 절감을 위한 철도부품 국산화 개발 노력이 활발한 즈음, 국내 공기스프링관련 기술의 향상을 도모할 목적으로 본 연구를 시작하였다.

본 연구는 철도차량용 공기스프링 시험방법에 대한 규격안을 개발하기 위한 기초 연구로서,

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

공기스프링 적용 철도차량의 동적 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 공기스프링 적용 철도차량에 대한 성능분석 측면에서의 이론해석이 수행되었으며, 규격안 관련 기준 설정을 위한 실험연구가 수행되었다. 그 결과 공기스프링 성능확보를 위한 시험규격(안) 개발에 따른 기초 데이터를 얻을 수 있었다.

2. 공기스프링 적용 철도차량의 동적 특성

공기스프링 적용 철도차량의 주행특성을 파악하기 위하여 고속객차와 전동차를 대상으로 이론 해석과 실험연구를 수행하였다.

2.1 이론 해석

가. 수직방향 감쇠특성

공기스프링 적용 철도차량의 감쇠특성을 파악하기 위하여 코일스프링 적용 철도차량과 비교하여 해석을 수행하였다. 코일스프링 적용 철도차량은 국내 무궁화객차의 주종을 이루는 NT21형 객차를 대상으로 하였으며, 공기스프링 적용 철도차량은 최근 개발되어 운용중에 있는 KT23형 객차를 대상으로 모델링하였다. 그림1은 KT23형 대차이며, 그림2와 표1은 국내 기존선 일부구간 1km를 대상으로 120km/h로 주행시의 해석결과이다.

수직방향의 감쇠특성을 살펴보면 코일스프링 적용 차량의 진행방향 후부대차 진동이 121.9dB, 후부대차 상부의 차체진동이 108.7dB로 13.2dB 감쇠하고 있다. 반면 공기스프링 적용 차량의 진동 특성은 같은 위치의 대차 및 차체에서 125.6dB, 101.5dB로 24.2dB의 감쇠효과를 보이고 있다. 이는 두 차종이 현가계 물성치 및 제원, 대차구조가 상이함에 따라 직접적인 비교는 무리가 있지만 공기스프링 적용 차량의 대차/차체간 현가계의 수직방향 진동저감효과가 우수함을 보이고 있는 사례라 할 수 있다.

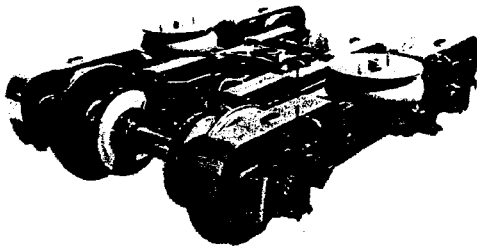


그림1 무궁화객차용 KT23형 대차

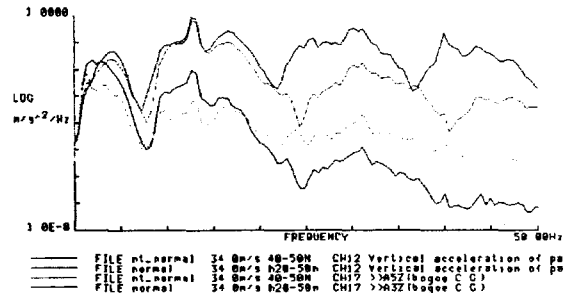


그림2 공기스프링 적용 철도차량의 수직방향 진동특성 해석

표1 공기스프링 적용 철도차량의 진동 감쇠특성

구분	NT21		KT23		비고
	RMS(%)	dB	RMS(%)	dB	
대차	1.253	121.9	1.921	125.6	후부대차 중심
차체	0.275	108.7	0.120	101.5	후부대차 상부
진동저감		13.2		24.2	

나. 공기스프링 강성 허용범위에 따른 진동특성

공기스프링의 스프링 강성시험은 정적강성시험과 동적강성시험을 행한다. 강성시험에 따른 수직 및 수평방향 강성의 허용범위는 선진국에선 $\pm 10\%$ 이내, 국내에서는 $\pm 15\%$ 이내로 적용하고 있다. 따라서, 강성의 허용범위에 따른 강성변화시의 차량의 주행특성 영향을 분석하기 위하여 $\pm 15\%$ 의 범위 내로 강성을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석구간 및 주행속도는 상기한 바와 같다.

표2는 수직 및 수평방향 공기스프링 강성을 15%범위 내에서 증감시킬 경우의 해석결과로서, 진행 방향 후부대차 상부 차체에서의 진동특성을 정리한 표이다. 강성 15% 증가시 수직방향의 진동은 0.9dB 증가하였으며, 수평방향은 0.1dB 증가하였다. 강성 15% 감소시 수직방향의 진동은 0.8dB 감소하였으며, 수평방향은 0.2dB 감소하였다. 강성변화에 대한 영향은 수직방향이 -0.8~0.9dB, 수평방향이 -0.2~0.1dB로 수직방향의 영향이 더 큼을 알 수 있다. 그리고 강성 감소시의 진동특성이 나아짐을 알 수 있다. 그러나 그 크기가 모두 1dB 미만으로 허용범위내에서의 진동변화는 미미함을 알 수 있고, 강성 감소시의 진동저감이 다소 나아지는 것은 차량현가계 물성치에 대한 최적화가 반영되지 않은 결과로 추정된다.

표2 공기스프링 강성 허용범위에 따른 차량진동특성

강성변화	수 직			수 평		
	RMS(%)	dB	편차(dB)	RMS(%)	dB	편차(dB)
+15%	0.132	102.4	+0.9	0.145	103.2	+0.1
0%	0.120	101.5	-	0.143	103.1	-
-15%	0.109	100.7	-0.8	0.141	102.9	-0.2

다. 공기스프링 변위특성

곡선통과시 발생하는 공기스프링의 상용변위를 예측하기 위하여 곡선통과를 가정한 해석을 수행하였다. KT23형 무궁화객차를 대상으로 궤도틀림이 없는 곡선반경 400m의 곡선을 90km/h의 주행속도로 통과할 때를 가정하여 해석하였다. 그림3~5는 각각 한 차량에 장착된 4개의 공기스프링에 대한 전후, 좌우, 상하방향의 변위를 나타낸 선도이다.

변위 최대값은 전후방향 22mm, 좌우방향 31mm, 상하방향 31mm 정도로서, 실제도를 가정하면 궤도틀림에 의한 진동발생으로 이 보다는 다소 클 것으로 예측된다. 그러나 정적스프링 강성시험시 기준으로 준용하고 있는 상용변위가 ±30~50mm이며, 피로내구시험시 적용하는 상용최대변위가 ±30mm정도임을 고려하면 해석결과는 적정하다고 추정된다.

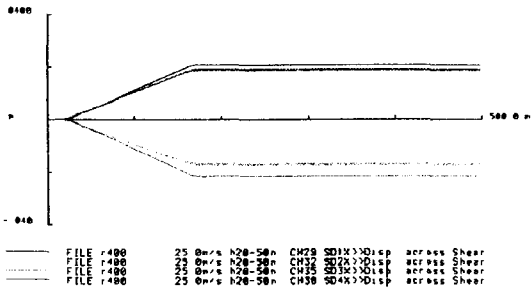


그림3 공기스프링 변위해석(전후)

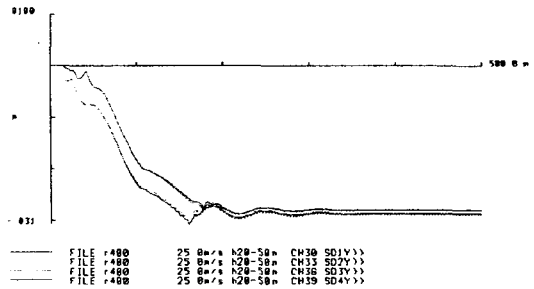


그림4 공기스프링 변위해석(좌우)

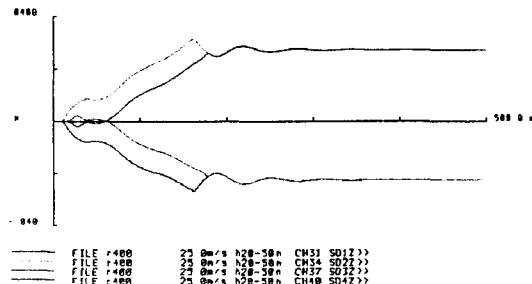


그림5 공기스프링 변위해석(상하)

2.2 실차시험

공기스프링 적용차량의 동적특성을 파악하기 위하여 실차시험을 수행하였다. 데이터 취득위치는 진행방향 후부대차의 축상, 대차, 차체로 하였으며, 측정량은 각 부의 진동과 대차/차체간 변위등을 측정하였다.

가. 공기스프링 적용차량 진동특성

공기스프링 적용 시험차량으로 객차와 전동차를 대상으로 하였다. 객차는 KT23형 무궁화 객차를 대상으로 5량 1편성으로 하였으며, 시험구간은 호남선 김제~장성구간을 대상으로 하였다. 주행속도는 정속 120km/h로 주행토록 하였으며, 축상, 대차, 차체 상하방향 진동가속도 센서를 취부하여 데이터를 취득하였다. 전동차는 과천선에 운용중인 공기스프링 적용 전동차를 대상으로 하였으며, 시험구간은 과천선 오이도~금정구간으로 하였다. 축상, 대차, 차체에 좌우, 상하방향 진동가속도 센서를 취부하여 데이터를 취득하였다.

표3은 각 차량별 축상, 대차, 차체간 진동특성을 나타낸 표이며, 그림6과 그림7은 객차와 전동차에 대한 진동감쇠를 나타내는 선도이다. 표3에서 보면 상하방향의 대차/차체간 진동감쇠는 객차에서 21.9dB, 전동차에서 22.2dB로 전역역에서 우수한 진동 감쇠효과를 보이고 있다.

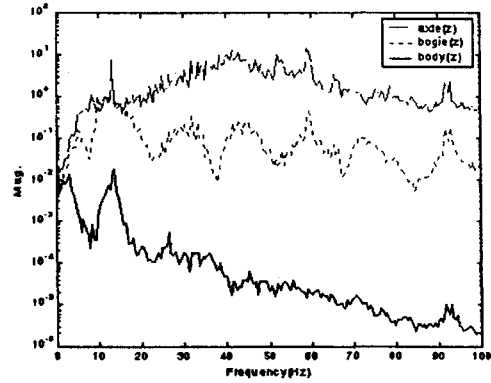
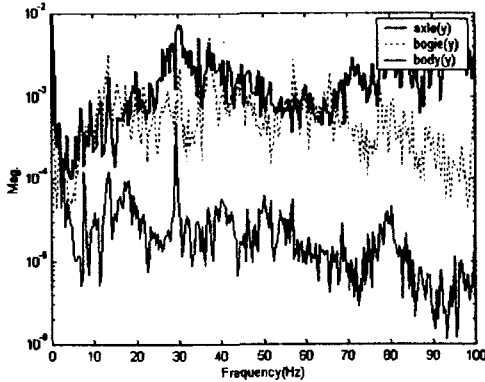
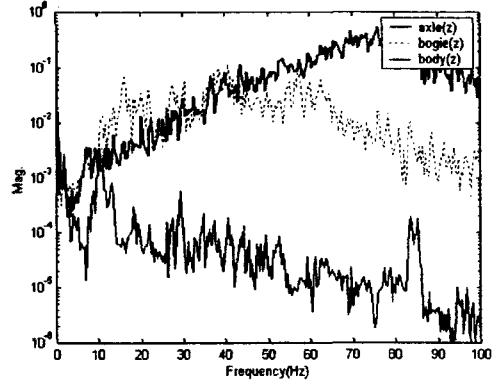


그림6 공기스프링 적용 객차의 진동특성



(a)좌우방향



(b)상하방향

그림7 공기스프링 적용 전동차의 진동특성

표3 공기스프링 적용 철도차량의 진동감쇠특성

구분	객 차			전 동 차					
	수 직			수 직			수 평		
	RMS(%)	dB	감쇠(dB)	RMS(%)	dB	감쇠(dB)	RMS(%)	dB	감쇠(dB)
축 상	1.010	139.9	-	0.297	129.3	-	0.080	117.9	-
대 차	0.220	126.6	13.3	0.148	123.3	6.0	0.042	112.2	5.7
차 체	0.018	104.7	21.9	0.012	101.1	22.2	0.022	106.6	5.6
비 고	- 시험구간 : 호남선(김제~장성) - 주행속도 : 120km/h			- 시험구간 : 오이도~금정 - 주행속도 : 90km/h					

나. 공기스프링 결합시의 진동특성

철도차량용 공기스프링의 결합시를 가정한 실차주행시험을 실시하였다. 시험조건은 공기스프링 결합시 공기스프링 공기압 소거를 가정하여 시험차량의 진행방향 후부대차의 공기스프링의 공기압을 빼고 보조스프링이 접촉되게 함으로써 결합조건을 부여하였다. 시험차량 및 시험조건은 상기한 개차와 같다.

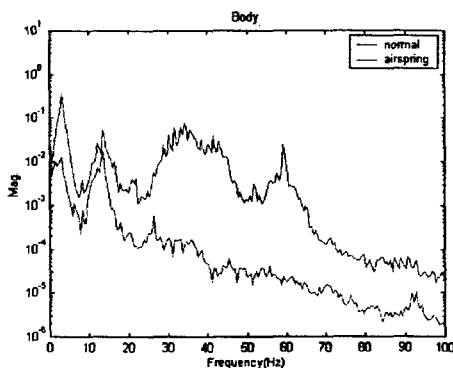
표4는 공기스프링 결합시의 진동특성을 전진폭(p-p) 최대값, 전진폭 평균, RMS값으로 정리한 표이다. 그림8은 차체진동 변화를 나타낸 선도이며, 그림9는 대차, 차체 진동의 전진폭값에 대하여 빈도처리한 선도이다. 차량 각부의 진동변화는 다음과 같다.

- 축상진동은 전영역에서 분석항목 모두 정상차량과 유사한 수준을 나타내고 있다.
- 대차진동은 비정상차량이 전영역에선 다소 증가하나 30Hz 미만대역에선 전진폭 최대값, 전진폭 평균값, RMS값 모두 정상차량에 비하여 감소함을 보이고 있다. 이는 해석 및 주행시험대상의 실험결과와도 일치하는 결과로 2차스프링 강성 증가로 인한 대차진동특성 변화를 반영한 결과라고 할 수 있다.
- 차체진동은 분석항목 모두 전영역에서 비정상차량이 크게 증가하고 있다. 100Hz대역에서 정상차량의 차체진동이 105dB인 반면, 비정상차량은 117dB로 공기스프링 결합에 따른 진동증가가 약 12dB 증가하여 승차감에 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이는 해석 및 주행시험대상의 실험결과와도 일치하는 경향을 나타내며, 2차스프링 강성 증가로 인한 진동전달이 증가하고 감쇠력 저하로 인한 진동저감효과가 저하함에서 비롯된 결과라 할 수 있다.

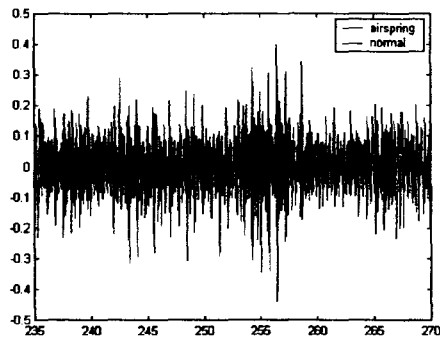
표4 공기스프링 결합시의 실차주행시험 분석결과

(단위:g)

Filter 주파수 (Hz)	결 과	축 상				대 차				차 체			
		정상	비정상	증분 (%)	비교	정상	비정상	증분 (%)	비교	정상	비정상	증분 (%)	비교
100	max	19.30	18.66	-3.3	=	3.12	3.78	21.0	<	0.099	0.840	748.1	<<
	mean	1.66	1.47	-11.5	>	0.28	0.43	51.6	<	0.016	0.096	518.0	<<
	r.m.s	1.01	0.94	-6.9	=	0.22	0.24	7.5	=	0.018	0.070	298.9	<<
30	max	7.29	8.19	12.3	<	2.35	0.96	-59.1	>	0.099	0.314	215.9	<<
	mean	0.62	0.57	-7.6	=	0.29	0.13	-55.2	>	0.027	0.059	117.0	<<
	r.m.s	0.35	0.36	0.9	=	0.17	0.07	-55.9	>	0.017	0.052	199.6	<<
10	max	1.34	1.40	4.0	=	0.47	0.28	-39.4	>	0.070	0.350	398.2	<<
	mean	0.21	0.22	5.1	=	0.11	0.06	-40.2	>	0.016	0.084	421.0	<<
	r.m.s	0.11	0.12	8.0	=	0.06	0.04	-32.6	>	0.012	0.045	260.6	<<

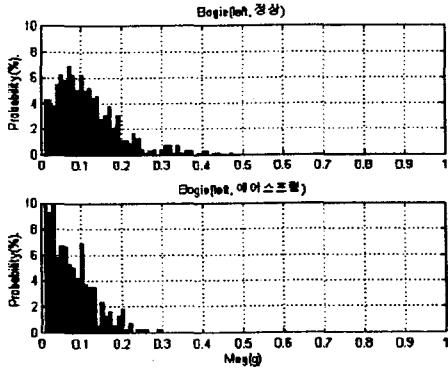


(a)주파수 분석

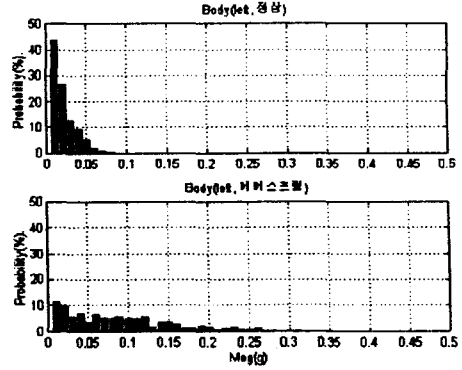


(b)진동가속도 신호

그림8 실차주행시의 차체진동특성(공기스프링 결합, 100Hz Filtering)



(a)대차진동 분포

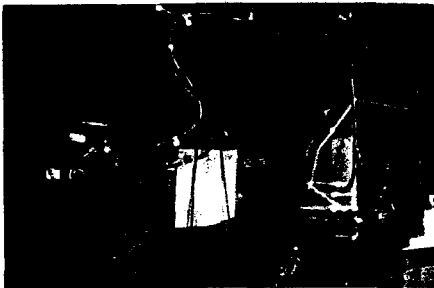


(b)차체진동 분포

그림9 실차주행시의 진동빈도분포(공기스프링 결합,p-p, 10Hz Filtering)

다. 진동차용 공기스프링 변위특성

공기스프링의 강성시험과 내구시험과 관련된 항목으로 상용변위와 최대변위를 파악하기 위하여 실차주행시험을 실시하였다. 시험차량은 공기스프링 적용 전동차를 대상으로 하였으며, 시험구간은 과천선 오이도~금정구간으로 하였다. 공기스프링 변위를 측정하기 위하여 변위계를 그림10과 같이 대차와 차체간에 좌우방향과 상하방향으로 설치하였다.



(a)좌우방향



(b)상하방향

그림10 전동차 대차/차체간 변위측정을 위하여 설치된 변위계

그림11은 오이도~금정구간에서 측정된 대차/차체간 좌우방향, 상하방향 변위와 속도를 나타낸 선도의 한 예이다. 피로내구시험과 관련된 상용변위량을 파악하기 위하여 3Hz의 저주파대역필터로 처리하였으며, 시험구간에 측정된 전 데이터를 대상으로 각 방향 변위량을 통계처리하여 그림12와 같이 나타내었다.

표5는 시험구간을 2왕복하여 측정된 변위데이터를 각 방향별로 편진폭의 크기별로 분석하고, 최대값을 구한 표이다. 표에서와 같이 좌우방향 변위의 상용최대변위는 30~40mm 정도이며, 상하방향으로 30~35mm 정도임을 알 수 있다. 최대변위는 운행 중 좌우방향에서 최대 80.4mm가 1회 발생한 경우를 볼 수 있다. 본 시험에서 측정된 데이터가 시험구간 일부에 한정되고 실제 영업운전과는 상이한 운용조건이기는 하나 국내외에서 강성시험시 적용하는 상용변위가 좌우방향 $\pm 30 \sim \pm 50$ mm 정도, 상하방향 ± 30 mm 정도임을 고려하면 비교적 실험결과가 시험기준치와 적합함을 알 수 있다. 또한, 가능최대변위는 적용되는 범위가 좌우방향으로 최대 ± 120 mm, 수직방향으로 ± 70 mm가 가능최대변위로 적용된 예를 고려하면, 본 시험에서 발생한 최대변위 80.4mm는 시험기준치 범위내에 있다고 볼 수 있다.

피로시험관련된 상용최대변위의 빈도를 살펴보면 ± 30 mm 정도의 변위가 시험구간에서 좌우방향으로 12회, 상하방향으로 5회 발생한 사례를 고려하고, 본 시험차량의 운용구간이 오이도~당교

개 구간, 1일 3왕복함을 가정하고, 10년 운용시의 빈도를 산출하면, 좌우방향으론 700,000회, 상하 방향으론 300,000회 정도로 추정된다. 따라서, 국내에서 적용되고 있는 상하방향 1,000,000회, 좌우 방향 200,000회를 고려하면, 피로내구시험관련 빈도수에 대한 검토가 필요하다고 사료된다.

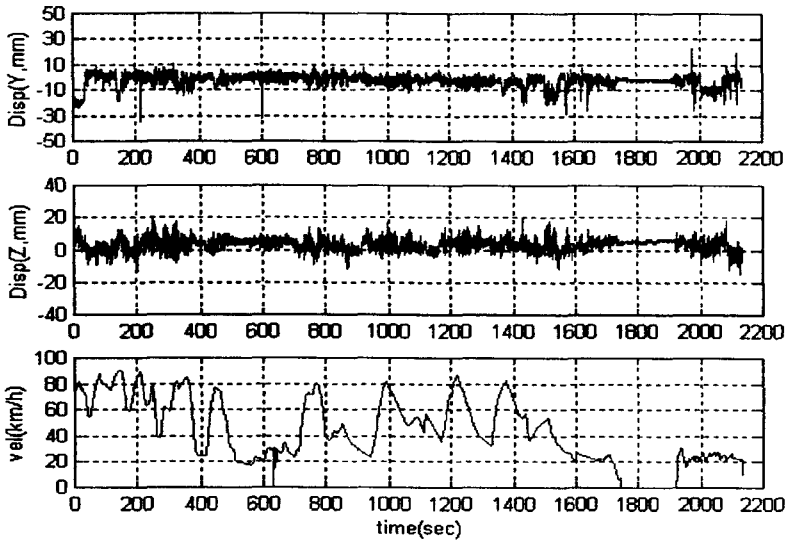
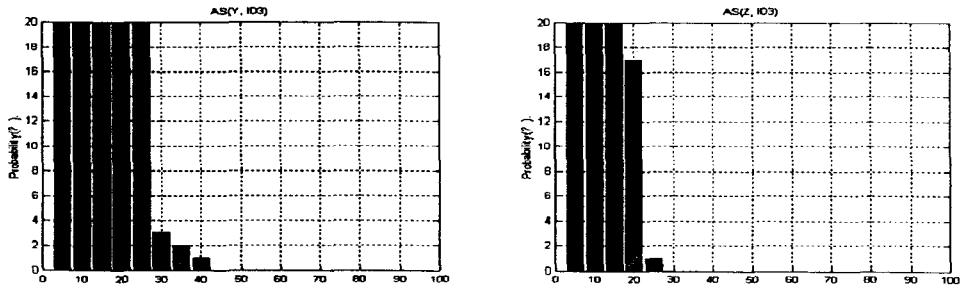


그림11 전동차용 공기스프링 변위선도(오이도~금정구간)



(a)좌우방향

(b)상하방향

그림12 전동차용 공기스프링의 변위특성(오이도~금정구간)

표5 전동차 적용 공기스프링의 변위 빈도분포

방향 ID 변위	좌 우				상 하			
	3	6	5	7	3	6	5	7
20~25					1	1	2	2
25~30	3	12	1	3		7	5	7
30~35	2	12	7	10		2	2	5
35~40	1	1						
40 이상		1						
최대값	35.1	80.4	32.6	32.6	20.4	32.7	30.8	32.3
비 고	ID3, 6 : 오이도→ 금정, ID5, 7 : 금정→오이도							

4. 결 론

본 연구는 철도차량용 공기스프링 시험방법에 대한 규격안을 개발하기 위한 기초 연구로서, 공기스프링 적용 철도차량의 동적 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 공기스프링 적용 철도차량에 대한 성능분석 측면에서의 이론해석이 수행되었으며, 규격안 관련 기준 설정을 위한 실험 연구가 수행되었다.

그 결과 정상적인 품질확보가 미흡한 경우, 즉 공기스프링 결함시는 차량의 승차감에 악영향을 주는 동시에 차체의 과도한 진동 유발로 차량의 주행안전성에 영향을 끼칠 것으로 예측된다. 또한, 실험을 통하여 취득한 변위데이터를 분석한 결과, 각 방향 상용최대변위와 가능최대변위가 현재 국내외에서 적용하고 있는 기준치 내에 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나 공기스프링의 내구수명과 관련된 상용최대변위의 빈도수 산출에 의한 피로시험시 적용하는 빈도수에 대한 검토는 국내 선로특성과 운용조건을 고려하여 재고되어야 할 것으로 사료된다.

5. 후 기

본 논문은 산자부 표준화기술개발과제인 “철도차량용 공기스프링 시험방법”개발 과제의 연구 내용 일부임을 명기한다.

참고문헌

1. Vijay K. Garg and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
2. "일본기계학회편, 철도차량의 다이내믹스", 전기차연구회(주), 1996
3. D.E. Newland and R J Cassidy, "Suspension and Structure", IMechE 1974 외
4. 허현무 외, "대차 현가계 구성요소 진단방법에 관한 연구", 한국철도학회, 2000. 11
5. "NT21대차 운행성능 향상 연구", 철도청, 1998
6. "차량 고장진단 적용기법에 관한 연구", 한국철도기술연구원, 2000