

철도차량 장치의 진동 및 충격시험 방법 비교 분석

Comparison and Analysis of Vibration and Shock Test Methods for Rolling Stock Equipment

김영국 · 박찬경* · 류준형

Young Guk Kim · Chankyong Park · Joon-Hyoun Ryu

Abstract The vibration characteristics of railway vehicles are very complex because they are not only dependent on vehicle and track conditions but also on operating conditions. Vibration can cause the failure of rolling stock equipment. To verify that the quality of rolling stock equipment is acceptable, it should be able to withstand vibration tests of reasonable magnitude and duration. There are many standards for vibration and shock tests of equipment in Korea. In this paper, we have reviewed and compared the standards (KS R 9144, R 9146 and IEC 61373) for vibration and shock tests.

Keywords : Vibration & shock, Sinusoidal vibration, Random vibration, Functional test, Endurance test

초 록 철도차량은 차량조건, 선로조건 및 운행조건들에 의한 많은 진동원에 의해 매우 복잡한 형태의 진동과 충격이 발생한다. 진동과 충격은 철도차량에 부착되어 있는 부품 및 구성품을 고장시키는 원인이 된다. 이러한 진동 및 충격에 의한 장치의 고장을 줄이기 위해서는 개발단계에서부터 진동과 충격시험을 통해 장치가 진동과 충격에 견디는 지를 확인한 후에 철도차량에 장착하고 있다. 국내에는 서로 상이한 방법을 적용한 여러 가지의 철도차량 진동 및 충격시험 규격이 사용되고 있다. 본 논문에서는 국내에서 대표적으로 사용되는 규격인 IEC 61373과 KS R 9144, KS R 9146에 대해 상대적 비교를 통해 진동과 충격시험의 방법에 대한 차이점을 고찰함으로써 진동시험 관련자들이 정확한 진동 및 충격시험을 할 수 있도록 하고자 한다.

주요어 : 진동 및 충격시험, 정현파 진동, 랜덤 진동, 진동기능 시험, 진동내구 시험

1. 서 론

철도는 다른 교통수단에 비해 승객과 화물의 대량 수송, 안전성, 정시성(定時性) 및 환경 친화성 등의 장점을 갖고 있기 때문에 많은 국가에서 철도를 대중교통으로 운영하고 있으며, 다른 교통수단과의 경쟁력을 강화시키기 위해 열차의 속도 및 여객수송의 품질 등을 향상시키려는 노력을 하고 있다.

철도차량에서는 현가장치(suspension) 종류, 휠의 형상(wheel profile) 및 구동모터, 콤프레서, 대용량 차단기, 주회로 차단기, 전원 콘택터, 변압기 등의 상태와 같은 차량조건, 레일형상(rail profile), 레일 불규칙도(rail irregularities), 분기기, 캔트(cant)와 곡선(curvature) 등 선로조건, 도시교통의 빈번한 급가속 및 급제동, 속도제한 등과 같은 운행조건들에 의해 매우 복잡한 형태의 진동과 충격이 발생한다[1]. 이러한 철도의 진동과 충격은 열차의 속도증가에 따라 더욱 증가하며, 이때 발생된 열차의 진동과 충격은 승객의 승차

감을 악화시킬 뿐만 아니라 철도차량에 부착되어 있는 장치의 고장을 발생시켜 최악의 경우에는 열차의 운행을 중지시키는 결과를 초래할 수도 있다[1-3]. 철도차량의 부품(component), 구성품(assembly) 등을 포함하는 장치는 발생된 진동과 충격을 견디게 하기 위하여 개발단계에서부터 장치를 진동시험기에서 진동과 충격시험을 실시하여 진동과 충격에 대한 장치의 신뢰성을 확보한 후 철도차량에 부착하고 있다. 철도차량의 진동 및 충격 시험규격은 KS R 9144[4], KS R 9146[5], IEC 61373[6], KS C IEC 61373[7], JIS E 4031[8], BS EN 61373[9] 등이 있으나, 국내에서 대표적으로 사용되는 것은 IEC 61373와 KS R 9144, KS R 9146이다. KS R 9144과 KS R 9146은 철도 차량에 장착되는 기기 및 부품에 대한 진동시험과 충격시험에 대한 방법을 각각 제시하고 있으며, IEC 61373은 철도차량 장치에 대한 진동시험과 충격시험에 대한 방법을 제시하고 있다. 그러나, 이 규격들이 서로 상이한 시험방법을 적용하여 장치에 대한 진동 및 충격을 평가하기 때문에 장치 제작자, 시험평가자, 운영자 등의 관련자에게 진동과 충격시험 방법의 선택에 혼란을 초래하는 경우가 많다. 본 논문에서는 이 규격들의 상대적 비교를 통해 진동과 충격시험의 방법과 기준에 대한 차이점을 고찰함으로써 진동시험 관련자들이 정확한 진동 및 충격시험을 할 수 있도록 한다.

*Corresponding author.

Tel.: +82-32-460-5613, E-mail: ckpark@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.4.246>

2. 철도차량 장치의 진동 및 충격시험 방법

국내에서 사용중인 철도차량 장치의 진동과 충격시험에 관한 규격은 서론에서 설명한 바와 같이 KS R 9144, KS R 9146, IEC 61373이 있다. 철도차량 장치의 진동시험 방법은 KS R 9144와 IEC 61373에서, 충격시험 방법은 KS R 9146과 IEC 61373에서 규정하고 있다. Fig. 1은 철도차량 장치의 진동시험에 사용되는 진동신호를 주파수에 대해 나타낸 것으로 IEC 61373의 경우는 (a)와 같이 정해진 진동 주파수 범위 내의 랜덤 진동을 사용하는 반면에 KS R 9146의 경우는 (b)와 같이 정해진 진동 주파수 범위 내에서 일정한 온진폭이나 가속도 온진폭을 갖는 정현파 진동을 연속적으로 상승 또는 하강시키면서 진동시험을 진행한다.

2.1 IEC 61373에 따른 진동 및 충격시험[6]

IEC 61373에서는 기능랜덤 시험(functional random test), 모의 장기 수명시험(simulated long-life test)과 충격시험(shock test)으로 구분하여 상하(z축), 좌우(y축), 전후(x축) 방향에 대해 실시하며, 시험의 순서는 모의 장기 수명시험, 충

격시험, 기능랜덤 시험 순서로 진행하는 것이 원칙이지만 설치 지그(jig)의 효율성을 위해 변경할 수 있다. 철도차량에 장치가 부착되는 위치에 따라 차체(body)에 부착되는 1종(category 1), 대차(bogie)에 부착되는 2종(category 2) 및 윤축(axle)에 부착되는 3종(category 3)으로 구분되며, 1종의 경우에는 차체에 직접적으로 부착되는 A등급과 캐비닛과 같은 별도의 부착물에 부착되는 B등급으로 나누어진다. 철도차량의 부착된 장치의 대부분은 차체에 직접적으로 부착되기 때문에 1종 A등급(category 1 class A)으로 진동 및 충격 시험을 수행하여야 하는 경우가 많다.

Fig. 1(a)는 기능랜덤 시험과 모의 장기 수명시험에 사용하는 제1종의 랜덤 진동을 주파수에 대한 가속도 스펙트럼(ASD)으로 나타낸 것으로 그림에서 주파수 f_1 과 f_2 는 부착 장치의 질량에 따라 변화한다. 제2종과 제3종의 경우에도 제1종과 동일한 형태의 랜덤 진동을 이용하며, 이들 경우에도 일부 주파수(2종은 f_1, f_2 , 3종은 f_2)는 장치의 질량에 따라 변화한다. Table 1은 1종, 2종 및 3종에 대한 가속도 스펙트럼을 장치의 질량이 한계 최소질량(1종: 500kg, 2종: 100kg, 3종: 50kg)보다 작은 경우에 대해 요약한 것으로 표와 같은 가속도 스펙트럼 크기로 기능랜덤 시험은 10분 이상, 모의

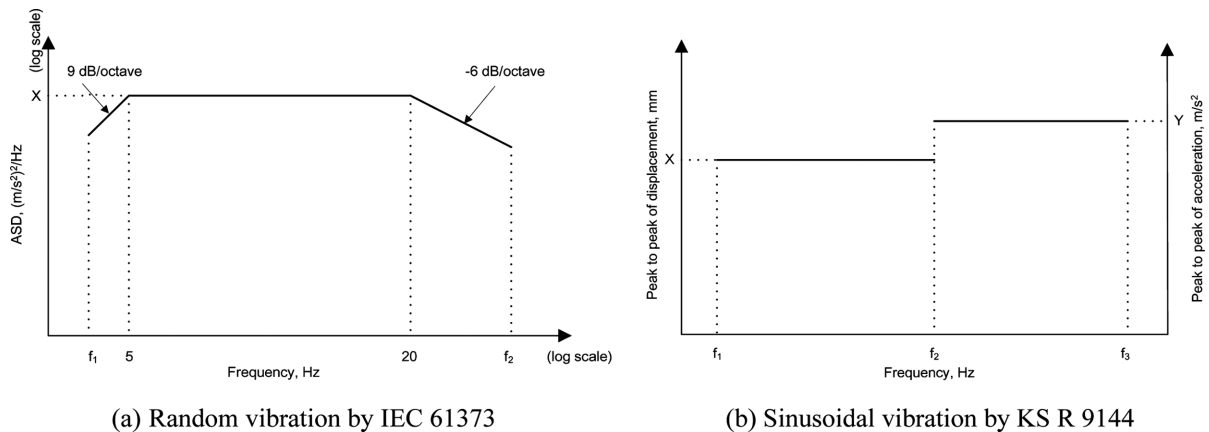


Fig. 1 Input vibration patterns according to frequency variation

Table 1 Summary of vibration conditions for functional and simulated long-life tests

Category	Orientation	ASD level, (m/s ²) ² /Hz			
		Functional test		Simulated long-life test	
		Class A	Class B	Class A	Class B
1	Vertical(z)	0.0166	0.0301	0.532	0.964
	Transverse(y)	0.0041	0.0060	0.131	0.192
	Longitudinal(x)	0.0073	0.0144	0.234	0.461
2	Vertical(z)	0.190	-	6.12	-
	Transverse(y)	0.144		4.62	
	Longitudinal(x)	0.0414		1.32	
3	Vertical(z)	8.74	-	124.9	-
	Transverse(y)	7.0		100.2	
	Longitudinal(x)	1.751		25.02	

장기 수명시험은 5시간 동안에 진동시험을 수행하여야 한다. Table 2는 충격시험에 사용하는 펄스의 피크치와 지속시간을 나타낸 것으로 각 방향에 대해 (+)방향 3회, (-)방향 3회씩 총 18회의 충격을 진동시험기에 가하여 충격시험을 수행하여야 한다.

Table 2 Summary of shock test for IEC 61373

Category	Orientation	Peak acceleration, m/s ²	Nominal duration, ms
1	Vertical(z)	30	30
	Transverse(y)	30	30
	Longitudinal(x)	50	30
2	All	300	18
3	All	1000	6

2.2 KS R 9144/KS R 9146에 따른 진동 및 충격 시험[4, 5]

KS R 9144에서 진동시험은 공진시험(resonance test), 기능시험(functional test), 내구시험(endurance test)으로 3종류로 구분하며, 각 진동시험 종류에 따라 차종별 및 부착 부분별로 6종으로 분류한다. 또한, 진동 내구시험의 경우에는 6종의 차종별 및 부착 부분별 구분을 세분화(A, B 및 C 등급(class))하고 있지만 원칙적으로는 B 등급을 사용하도록 하고 있다. 진동시험의 순서는 원칙적으로 공진시험, 기능시험, 내구시험의 순서로 진행하도록 하고 있으며, 공진과 기능시험은 동시에 수행해도 무방하다. Table 3은 6종의 차종별 및 부착 부분별 구분에 따른 공진시험과 기능시험에 사용되는 Fig. 1 (b)에 나타낸 진동신호를 정현파 진동의 주파수와 진동 크기로 정리한 것으로 진폭 크기는 저진동 주파수 범위에서는 온진폭(peak-peak of displacement)을 일정하게 하고 고진동 주파수 범위에서는 가속도 온진폭(peak-peak of

Table 3 Summary of vibration conditions for resonance and functional tests

Symbol	Frequency, Hz	Vibration level
1	1~5	Peak-peak of displacement 5mm
	5~30	Peak-peak of acceleration 4.90m/s ²
2	1~5	Peak-peak of displacement 10mm
	5~30	Peak-peak of acceleration 9.81m/s ²
3	3~7	Peak-peak of displacement 10mm
	7~40	Peak-peak of acceleration 19.6m/s ²
4	5~11	Peak-peak of displacement 10mm
	11~50	Peak-peak of acceleration 49.0m/s ²
5	7~16	Peak-peak of displacement 10mm
	16~60	Peak-peak of acceleration 98.1m/s ²
6	10~25	Peak-peak of displacement 10mm
	25~70	Peak-peak of acceleration 245m/s ²

acceleration)을 일정하게 한 것이다.

진동 내구시험은 원칙적으로 B 등급에 따라 수행하기 때문에 Table 4에 B 등급에 대해 부착 기기 및 부품의 공진이 발생한 경우와 공진이 발생하지 않은 경우로 분리하여 진동 내구시험의 조건을 정리하였다. KS R 9146에서는 철도 차량의 차체와 대차에 부착되는 기기 및 부품에 대해 충격 시험 방법을 정의하고 있으며, 차종 별로 2종으로 분류하고 이를 A, B 및 C등급으로 세분화하고 있지만 원칙적으로는 A등급을 사용하도록 하고 있다. Table 5는 A등급에 대해 충격크기 및 반복횟수를 정리한 것이며, 충격시간은 0.025초로 하고 있다. Table 3과 Table 4에서 기호(symbol)의 숫자는 6종의 차종별 및 부착 부분별 구분을, Table 5에서 기호의 숫자는 2종의 차종별 구분을 나타낸 것이다.

Table 4 Summary of conditions for endurance test(class B)

	Symbol	Frequency, Hz	Peak-peak of displacement, mm	Test time, hours		
				Longitudinal (x)	Transverse (y)	Vertical (z)
Without resonance	1	10	1.75	2	2	4
	2		3.5			
	3	20	1.8			
	4	30	2			
	5	40	2.3			
	6	50	3.5			
With resonance	Resonance	Resonance frequency	(Peak-peak of displacement according to Table 3) × 1.4	0.5		1
	No resonance	1 ~ 6	(Peak-peak of displacement according to Table 3)	1.5		3

Table 5 Summary of shock test for KS R 9146(class A)

Symbol	Shock level m/s ²	Iteration no., ea
1	29	4
2	88	-

3. 진동 및 충격시험 방법의 비교 분석

본 논문에서는 IEC 61373과 KS R 9144 규격에서 사용하는 진동시험의 용어의 차이가 있으므로 혼란을 방지하기 위해 IEC 61373에서 사용된 기능랜덤 시험과 모의 장기 수명시험이란 용어를 기능시험(functional test)과 내구시험(vibration endurance test)으로 KS R 9144와 통일시켜 사용하였다. 2장에서 설명한 바와 같이 진동시험을 IEC 61373에서는 랜덤진동을 이용하는 반면에 KS R 9144에서는 정현파 진동을 이용하기 때문에 각 시험방법에 대한 진동크기를 직접적으로 상호 비교하기가 어렵기 때문에 이들 규격에 따른 진동 기능시험과 진동 내구시험으로 구분하여 등가 가속도 실효치(equivalent rms acceleration)로 비교 분석하였다. IEC 61373과 동일한 부착 부분에 따라 상대적인 비교 분석을 위해 KS R 9144의 경우에서는 차체는 2중 B등급, 대차는 5중 B등급, 윤축은 6중 B등급을 사용하였다. 충격시험의 경우에도 진동시험과 마찬가지로 IEC 61373과 동일한 부착 부분에 따라 상대적인 비교 분석을 위해 KS R 9146의 경우에는 객차와 기관차에 해당하는 1중 A 등급을 사용하였다.

KS R 9144의 경우에 2.2절에서 설명한 바와 같이 저진동 주파수 범위에서 사용한 온진폭은 식 (1)을 사용하여 가속도 온진폭으로 환산될 수 있다.

$$2\alpha = \frac{4\pi^2}{1000} \times 2a \times f^2 \quad (1)$$

여기서, 2α 는 가속도 온진폭(m/s²), $2a$ 는 온진폭(mm), f 는 진동 주파수(Hz)이다.

Fig. 2는 식 (1)을 사용하여 차체, 대차 및 윤축에 대해 온

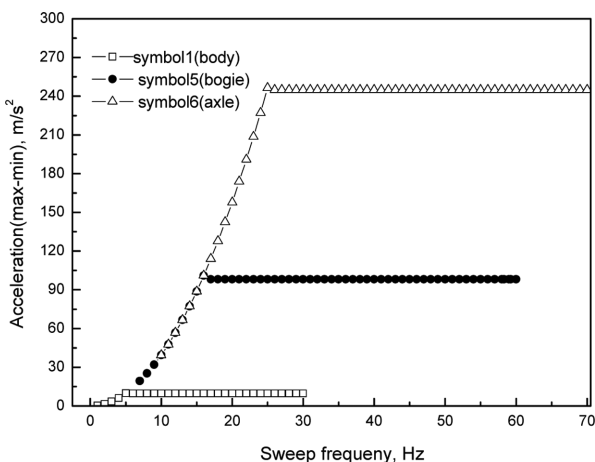


Fig. 2 Peak-peak acceleration for functional test by KS

진폭으로부터 가속도 온진폭으로 환산한 결과를 나타낸 것으로 온진폭이 일정한 저진동 주파수 범위에서는 진동 주파수가 증가함에 따라 가속도 온진폭이 증가함을 알 수 있다. 이 가속도 온진폭의 증가는 스위프 주파수(sweep frequency)의 간격(sample)에 따라 Table 3에 나타난 진동 주파수 범위 내의 전체 가속도 실효치에 영향을 줄 수 있다. Fig. 3은 스위프 주파수를 0.05Hz에서 1Hz까지 0.05Hz간격으로 증가시키면서 Table 3의 진동 주파수 범위 내의 전체 가속도 실효치를 구한 결과로 스위프 주파수의 간격이 진동 주파수 범위내의 전체 가속도 실효치에 미치는 영향이 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 부착 장치의 질량변화에 대해 Fig. 1에 나타난 가속도 스펙트럼으로부터 계산된 가속도 실효치의 변화율을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최대 질량일 때 계산된 가속도 실효치는 최소 질량일 때보다 최대 22.1%가 작아지는 경우도 있다. 이는 IEC 61373으로 진동시험을 할 때는 반드시 부착 장치의 질량을 고려한 가속도 스펙트럼 값을 갖는 랜덤 진동으로 진동시험을 수행해야 함을 의미한다.

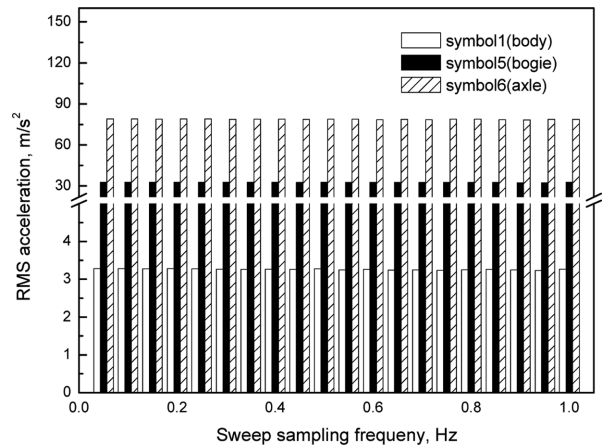


Fig. 3 RMS acceleration for functional test by KS

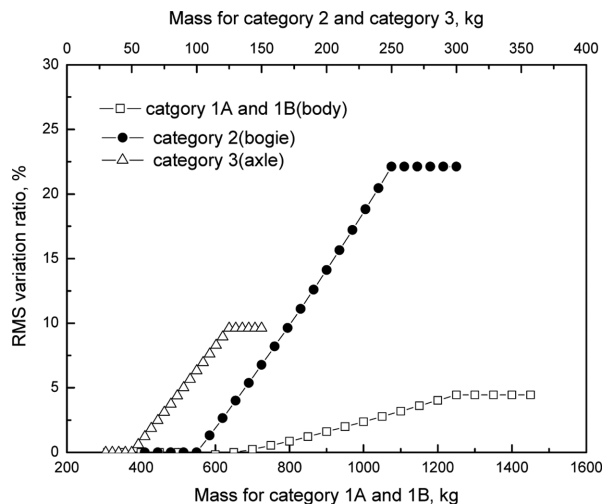


Fig. 4 Relation between rms acceleration and mass

Fig. 5~Fig. 7은 IEC 61373과 KS R 9144에 따른 기능시험의 경우에 차체, 대차 및 윤축에 대해 가속도 실효치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 차체, 대차 및 윤축에 대해 모든 방향에서 KS R 9144의 경우가 IEC 61373에 비해 가속도 실효치가 2.07배~13.05배가 크다.

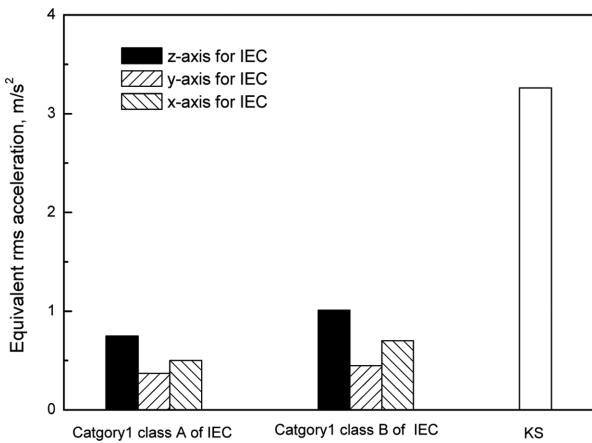


Fig. 5 RMS accelerations of body for functional test

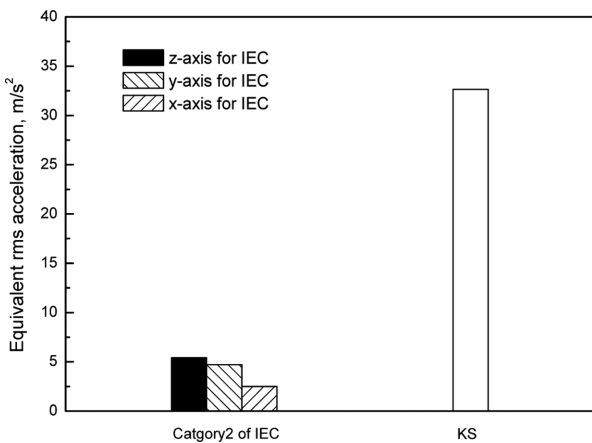


Fig. 6 RMS accelerations of bogie for functional test

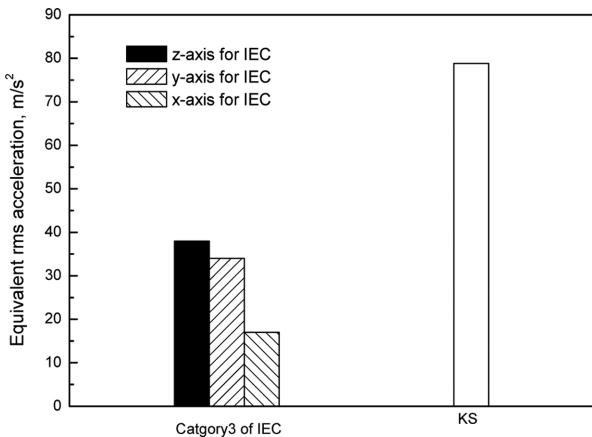


Fig. 7 RMS accelerations of axle for functional test

Fig. 8은 IEC 61373의 경우에 가속비를 나타낸 것으로 내구시험시에 필요한 가속도 실효치는 Fig. 5~Fig. 7의 기능시험시 가속도 실효치에 Fig. 8에 나타난 가속비를 곱해 구하여진다. 여기서 언급하는 가속비에 대한 정의와 가속비 및 내구시험시 필요 가속도 실효치를 계산하는 절차는 IEC 61373의 부록 A에 상세히 설명되어 있다[6].

Fig. 9는 내구시험시 가속도 실효치와 시험시간과의 관계를 나타낸 한 예로 그림에서 보는 바와 같이 내구시험의 시간을 줄이기 위해서는 가속도 실효치를 증가시켜야 하고 반대로 가속도 실효치를 줄이려면 시험시간을 늘려야 한다. 이는 내구시험을 수행하는 시험기의 용량이 허용하는 범위에서 가속도 실효치를 증가시킬 수 있다면 IEC 61373에서 규정한 시험시간을 감소시킬 수 있음을 의미한다.

Fig. 10~Fig. 12는 IEC 61373과 KS R 9144에 따른 내구시험의 경우에 차체, 대차 및 윤축에 대해 5시간으로 환산한 등가 가속도 실효치를 비교한 것이다. KS R 9144에 따른 내구시험에서는 그림에서 보는 바와 같이 공진이 발생된 경우와 발생하지 않은 경우의 등가 가속도 실효치의 비는

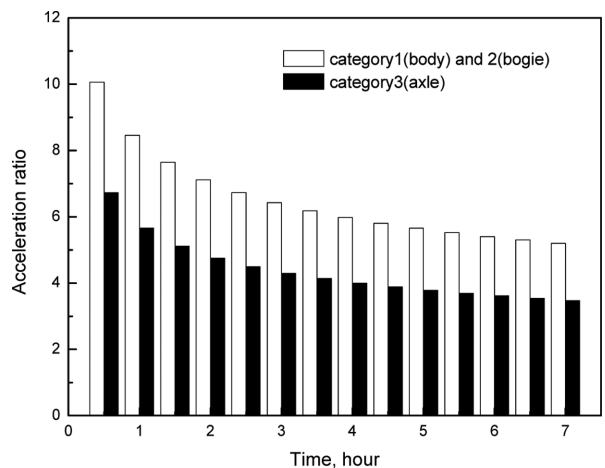


Fig. 8 Acceleration ratio

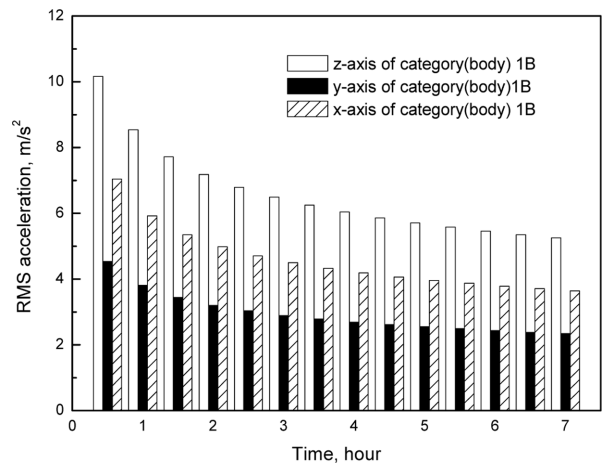


Fig. 9 Relationship between test time and rms acceleration

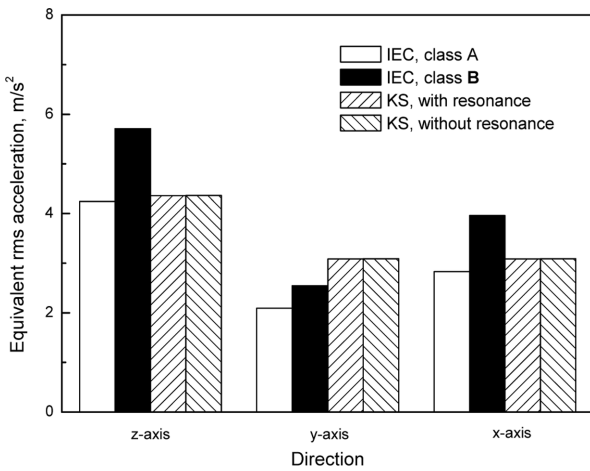


Fig. 10 RMS accelerations of body for endurance test

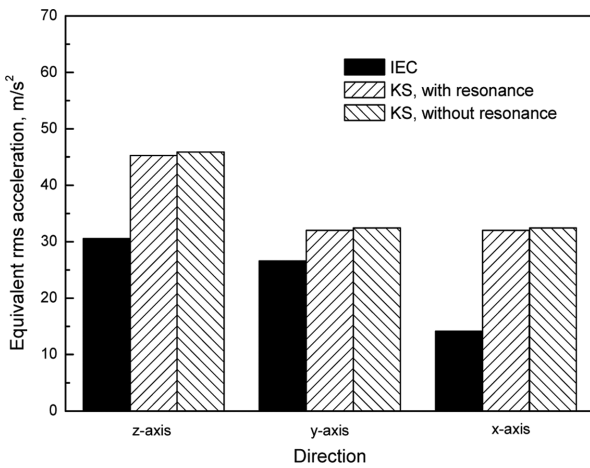


Fig. 11 RMS accelerations of bogie for endurance test

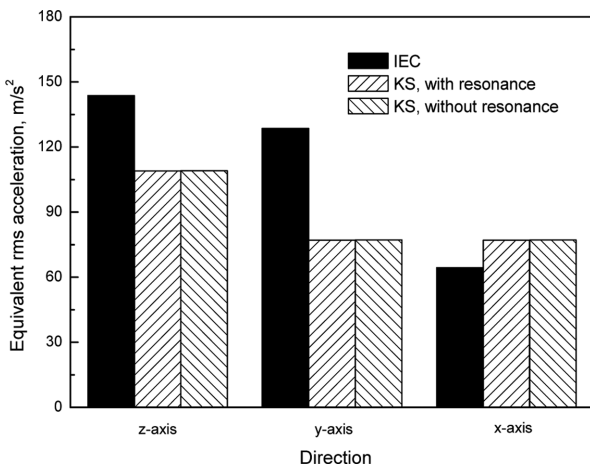


Fig. 12 RMS accelerations of axle for endurance test

0.985로 두 경우가 거의 일치한다. IEC 61373과 KS R 9144에 대해 5시간 환산 등가 가속도 실효치를 비교해 보면 KS R 9144는 1중(차체) B 등급의 x축과 z축, 3중(운측)의 y축,

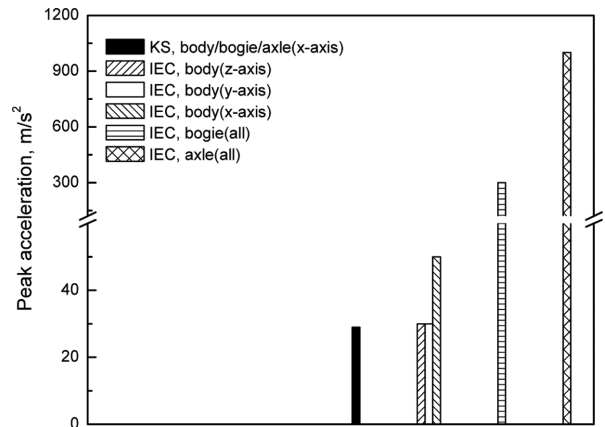


Fig. 13 Peak accelerations for shock test

z축 방향에서는 IEC 61373에 비해 1.28배 ~ 1.67배가 작지만 1중(차체) A 등급의 모든 방향, 1중(차체) B 등급의 y축, 2중(대차)의 모든 방향, 3중(운측)의 x축 방향에서는 1.03배 ~ 2.30배가 크다.

Fig. 13은 KS R 9146과 IEC 61373에서 규정하고 있는 충격시험에 대해 피크 가속도를 비교한 것으로 IEC 61373의 피크 가속도가 KS R 9144에 비해 1.03배~34.48배가 크다.

3. 결 론

본 연구에서는 철도차량에 부착되는 장치의 진동 및 충격 시험에 대한 국내의 대표적인 규격인 IEC 61373, KS R 9144와 KS R 9146에 대하여 등가 가속도 실효치를 사용한 비교 분석을 통해 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 기능시험과 내구시험에 대해 비교한 결과, 내구시험의 일부 경우를 제외하고는 KS R 9144가 IEC 61373에 비해 가속도 실효치가 크기 때문에 KS R 9144의 시험조건이 보다 엄격함을 알 수 있다. 그러나, 충격시험은 그와 반대로 IEC 61373이 KS R 9144에 비해 충격치가 크므로 시험조건이 보다 엄격한 것으로 판단된다.

(2) 진동 내구시험 시간과 가속도 실효치는 지수적으로 감소하는 관계가 있으므로 진동 내구시험을 수행하는 시험기의 용량이 허용하는 범위에서 가속도 실효치를 증가시킬 수 있다면 IEC 61373에서 규정한 시험시간을 감소시킬 수 있다.

(3) 진동시험으로 IEC 61373을 적용할 때에 철도차량에 부착되는 질량의 변화가 가속도 실효치에 미치는 영향이 상당히 크기 때문에 가속도 스펙트럼 선정 시에 부착 장치의 질량 변화를 반드시 고려하여야 한다.

(4) 향후에는 실제 운행되고 있는 철도차량에서 가속도를 측정하여 진동 및 충격시험 규격에 대한 적용성 검토가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업 “차량궤도 환

경분야 철도용품 인증을 위한 실내/현장 시험규격 정비 및 인증체계 개선방향 연구” 과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

References

- [1] Y.G. Kim, C.K. Park, S.W. Kim, K.H. Kim, J.S. Paik (2010) Analysis of the frequency weighting curve for the evaluation of ride comfort, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(6), pp. 552-558.
- [2] Suzuki, H. (1998) Research trends on riding comfort evaluation in Japan, *Proc. Instn. Mech. Engrs. (Part F)*, 212, pp. 61-72.
- [3] Y.G. Kim, S.W. Kim, J.Y. Mok, S.S. Kim (2007) Estimation of ride comfort for Korean high speed train at high speed, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(2), pp. 146-152.
- [4] Korean Agency for Technology and Standards (1992), Test methods for vibration of parts of railway rolling stock, KS R9144.
- [5] Korean Agency for Technology and Standards (2002) Railway rolling stock parts-Test methods for shock, KS R 9146.
- [6] International Electrical Commission (2010) Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests, IEC 61373.

- [7] Korean Agency for Technology and Standards (2002) Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests, KS C IEC 61373.
- [8] Japanese Standards Association (2008) Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests, JIS E 4031.
- [9] British Standards Institution (1999) Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests, BS EN 61373.

접수일(2013년 2월 26일), 수정일(2013년 7월 10일),
게재확정일(2013년 7월 16일)

Young Guk Kim : ygkim@krii.re.kr

Testing and Certification Center, Korea Railroad Research Institute,
176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Chankyong Park : ckpark@krii.re.kr

Railroad Standards Team, Testing and Certification Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Joon-Hyoung Ryu : jhryu@krii.re.kr

Testing and Certification Center, Korea Railroad Research Institute,
176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea