

철도차량용 추진제어장치의 진동시험방법에 관한 연구

한영재*, 김길동*, 박현준*, 최성규*, 이우동*
한국철도기술연구원*

A study on vibration test methods for propulsion system of electric car.

Young-Jae Han*, Gil-Dong Kim*, Hyun-Jun Park*, Sung-Kyou Choi*, Woo-Dong Lee*
Korea Railroad Research Institute*

Abstract - In this paper, for IGBT inverter of electric car studied new vibration test method. It made a partial amendment of the existing standard. Using new vibration test method is tested actually IGBT inverter. The result on vibration test for IGBT inverter shows an excellent performance.

1. 서 론

최근 고속철도 및 도시철도차량을 포함한 철도차량 속도 향상을 위한 기술들에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 속도향상에 따라 주행중인 차량의 진동도 함께 증가되고 있다.⁽¹⁾

한편 고속철도 및 도시철도차량에는 많은 전기전자 기기들로 이루어져 있다. 이 기기들중 일부라도 진동에 대한 고려없이 설계되었을 경우에는 공진을 일으켜 심한 경우에는 부품을 소손시키게 된다.

이에 대한 사고를 방지하기 위해 진동시험이 필요하다. 또한 공진이 발생했을 경우, 공진주파수에 의한 것인가, 아님가에 대해 알기 위해 진동시험을 수행할 필요가 있다. 종래의 차량에 탑재하는 철도차량의 진동시험 방법에 대해서는 KR S 9144에서 언급하고 있다.⁽²⁾

그러나 시험방법을 규정하기 위해서는 시험 및 검사하는 방법을 규정하여 검사의 판정기준을 명확히 제시해야 하는데, 철도차량을 포괄적으로 KR S 9144규격을 적용하는데는 어려움이 따른다.

특히 공진시험에 있어서는 공진을 일으키는 것을 조사해서 시험을 해야 하는데 진동을 발생시키는 공진진동수 영역이 어느 영역인가에 따라 내구성시험방법에 많은 차이가 있다. 실제 전동차 운행시 발생하는 주파수는 저주파(10Hz미만)영역에서 관측되고 있다.

시험규정에 보면 공진시험은 1~30Hz에서 공진시험을 하여 공진점을 찾도록 되어있는데, 29Hz에서 공진이 발생한다면 그 온진폭에서 속도변위를 구해 진동내구시험을 하기 때문에 공진시험시 공진진동수 범위를 어느 범위로 기준을 세울 것인가에 대한 내용은 명확히 제시하고 있지 않다.

외국차량업체의 시험내용을 검토해 본 결과 공진시험 방식은 0~30Hz까지이나 특정주파수 이상에서 공진이 발생해도 공진진동수로 고려하고 있지 않다. 연구원에서는 추진인버터를 국내 최초로 Box Ass'y 진동시험을 실시하였는데⁽³⁾, 공진시험결과 공진진동수가 20~30Hz에 걸쳐 나타났다. 그러나, 이 주파수 범위에서 공진내구시험을 실시한다면, 인버터 안에 있는 많은 전자부품들은 진동시험에 견딜 수 없을 것으로 생각된다.

이처럼 공진주파수의 기준점을 어떻게 정하느냐에 따라 설계 및 제작비 측면에서 큰 차이가 난다고 할 수 있다. 현재 국내차량에 취부하는 대차는 그 기능이 매우 우수하여 차량에서 공진주파수가 10Hz미만까지 감소되어 있다. 이 경우, 이에 대한 명확한 기준점을 제시하지 않으면 진동시험방법을 규정하는데 문제가 발생할 소지

가 있다.

따라서 본 논문에서는 철도차량 주행시 차량의 주행 공진진동수를 파악하여 철도차량의 현실성 있는 시험방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 KS R 9144 진동시험방법

기존 철도차량용 인버터의 진동시험을 하기 위해서 적용하고 있는 시험규격은 KS R 9144 "철도차량 부품의 진동시험방법"이다. 주요내용은 다음과 같다.

2.1.1 공통적인 조건

1) 기기 단독으로 시험할 수 없는 것 또는 무게가 100kg이상인 부품의 경우는 그것을 구성하고 있는 각 부분에 대하여 진동시험을 하여도 좋다.

2) 시험의 순서

진동시험은 원칙으로 공진시험, 진동기능시험, 및 진동내구시험의 순서로 한다. 다만, 공진시험 및 진동기능시험은 병행하여 동시에 하여도 좋다.

3) 진동을 주는 방법

부품의 부착 자세에 대한 전후 좌우 및 상하의 직교 3방향의 단진동을 임의의 순서로 준다. 다만 지면에 따라 3방향의 일부를 생략하여도 좋다. 또한, 전후 및 상하의 방향이란 부품을 차량에 부착하였을 때, 차량의 전후 좌우 및 상하 방향으로 각각 같은 방향을 말한다.

2.1.2 시험방법

2.1.2.1 공진시험

1) 각 종류는 표 1에 표시한 진동수 범위에서 진동수를 연속적으로 상승 및 하강시킨다.

2) 진동수의 변화 속도는 공진 진동수를 놓치지 않을 정도로 한다.

3) 최저, 최고의 진동수사이 (보기를 들면 1종에 대하여 1~30Hz)를 1왕복하는 데 요하는 시간은 공진 진동수를 놓치지 않도록 충분히 길게 한다.

4) 진동수의 왕복 회수는 1회 이상으로 한다.

5) 진동수의 크기는 저진동수 범위에서는 온진폭을 일정하게 하고 고진동수 범위에서는 가속도 온진폭을 일정하게 한다.

표 1. 공진시험

번호	진동수 범위 (Hz)	진동의 크기
1	1~5	온 진폭 5mm
	5~30	가속도 온 진폭 0.5g(4.90m/s ²)
2	1~5	온 진폭 10mm
	5~30	가속도 온 진폭 1g(9.81m/s ²)

(주) 가속도 온 진폭과 진동의 온 진동 및 진동수와의 관계를 식 (1)로 표시하였다.

$$2a = \frac{4\pi^2}{1000} \times 2a \times f^2 = 2a \left(\frac{f}{5}\right)^2 \quad (\text{식 1})$$

2a : 가속도 온 진폭 (mg)
2a : 온 진폭 (mm)
f : 진동수 (Hz)

2.1.2.2 진동내구시험

진동내구시험은 각 종류에 대하여 공진이 있는 경우와 없는 경우로 분리한다. 진동내구시험은 원칙적으로 B종에 의한 것으로 하고 시험시간, 진동 시험기의 능력 등의 조건에 따라서는 A종 또는 C종에 따라도 좋다. 각 종류의 진동내구시험은 다음에 따른다.

- 1) 공진이 없는 경우
공진이 없는 경우는 표 2에 따른다.

표 2. 진동내구시험(공진이 없는 경우)

기 진 동 수 호 (Hz)	진 폭 mm	A종			B종						
		참 고 가속도온진 폭(m/s ²)	시 험 시 간 (min)		온 진 폭 mm	참 고 가속도온진 폭(m/s ²)	시 험 시 간 (h)				
			전 후	좌 우 상 하			전 후	좌 우 상 하			
1	10	5.0	2.0(19.6)	12	12	24	3.5	1.4(13.7)	2	2	4

(※ C종은 생략하여 표기함)

- 2) 공진이 있는 경우
 - (a) 부품의 공진 진동수가 하나 있는 경우
표 1과 같은 온 진폭 또는 공진진동수에서 가속도 온 진폭에 대응하는 온 진폭을 2a mm로 할 때, 각 종류는 표 3에 따라 시험한다. 다만, 공진 진동수로 가속도 온 진폭에 대응하는 온 진폭은 식 (1)에 따라 구한다. 또한 이 경우 다시 표 2와 같은 온 진폭에 따라 표 4에 표시한 시험시간으로 계속하여 시험한다.

표 3. 진동내구시험(공진 상태의 경우)

진 동 수 (Hz)	A종			B종				
	온진폭 mm	시 험 시 간 (min)			온진폭 mm	시 험 시 간 (h)		
		전 후	좌 우	상 하		전 후	좌 우	상 하
공진 진동수	5.0	12	12	24	2.8a	0.5	1	

표 4. 진동내구시험(공진 상태가 아닌 경우)

기 호	시 험 시 간 (min)			시 험 시 간 (h)		
	전 후	좌 우	상 하	전 후	좌 우	상 하
1~6	12	12	24	0.5		1

- (b) 부품의 공진 진동수가 2개 이상 있는 경우
엄격한 쪽의 진동수로 위 (a)의 규정에 준하여 시험한다.

2.2 현행 규격 시행시의 문제점

- 1) KS R 9144와 IEC 규격을 살펴보면 100kg이상인 부품의 경우에는 Module별 또는 Ass'y별로 시험해도 된다고 하는데, 이 경우 Module별로 하면 시험에 통과할 수 있고 Ass'y로 시험하면 시험을 통과할 수 없는 일이 발생할 수 있다. 이것은 진동주파수의 공진주파수 대역을 어떻게 결정하느냐에 따라 정해진다. 이만큼 공진주파수의 범위 설정은 중요하다.
- 2) 1~30Hz까지 공진탐색을 시켜 공진점이 발생하는지를 확인하는 시험을 실시하도록 되어있는데, 이 경우 철도차량에서는 차량 차체의 공진이 10Hz미만에서 발생하는데 30Hz까지 공진점을 정한다는 것은 문제가 있다.

2.3 철도차량의 차량 공진진동수

진동시험규정을 보면 공진시험은 공진진동수가 10 Hz로 정해져있다. 도시철도차량의 많은 차량이 10Hz전후에서 제작되었음을 의미한다. 국의 실노선에서 차량의 공진진동수 측정결과를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) JR北海道-721계 교류전차(8.75Hz(0.08m/s²,상하)
- 2) JR九州-813계 교류전차(6.5/7.5Hz(0.15m/s²,상하) 10/12.5Hz(0.04m/s²,좌우)
- 3) JR東海-383계 직류전차(1.5Hz(0.035m/s²,상하) 6.5Hz(0.013m/s²,전후)
- 4) JR西日本-223계 직류전차(7.5Hz(0.2m/s²,상하)

2.4 새로운 시험방법 제안

2.2절과 2.3절에서 제시한 여러 사항들을 고려하여 다음과 같은 도시철도차량용 인버터에 대한 현실에 적합한 진동시험방법의 주요내용을 제안하고자 한다.

2.4.1 시험조건

- 1) 기기를 단독으로 시험할 기기를 단독으로 시험할 수 없는 것 또는 무게가 100kg이상인 부품인 경우는 그것을 구성하고 있는 각 부분에 대하여 진동 시험을 하여도 좋다.
- 2) 도시철도차량에 부착하는 구성품의 진동내구성 시험은 공진진동수가 17Hz이하에서 발생하였을 경우 공진주파수에서 진동내구성 시험을 수행한다.
- 3) 공진주파수가 17Hz이상에서 발생할 경우에는 차량에서 발생할 수 없는 공진주파수이므로 공진없는 경우의 진동내구시험을 시행하는 것으로 한다.
- 4) 진동을 주는 방법은 부품의 부착 자세에 대한 전후, 좌우 및 상하의 직교 3방향의 단진동을 임의의 순서로 준다. 다만 지정에 따라 3방향의 일부를 생략하여도 좋다. 또한, 전후 및 상하의 방향이란 부품을 차량에 부착하였을 때, 차량의 전후 좌우 및 상하 방향으로 각각 같은 방향을 말한다.

2.4.2 시험방법

2.4.2.1 공진시험

공진시험은 진동가속도 및 진동수를 표 5와 같은 방법으로 실시한다.

표 5. 공진시험

진동수 범위	진동의 크기
1-5 5-30	온 진폭 10mm 가속도 온 진폭 1g(9.81mg)

(주) KS R 9144와 동일함

- 1) 각 종류는 표 5에 표시한 진동수 범위에서 진동수를 연속적으로 상승 및 하강시킨다.
- 2) 진동수의 변화 속도는 공진 진동수를 놓치지 않을

정도로 한다.

- 3) 최저, 최고의 진동수사이(예를 들어, 2종에 대하여 1~30Hz)를 1왕복하는데 요하는 시간은 공진진동수를 놓치지 않도록 충분히 길게 한다.
- 4) 진동수의 왕복 회수는 1회 이상으로 한다.
- 5) 진동수의 크기는 저진동수 범위에서는 온 진폭을 일정하게 하고 고진동수 범위에서는 가속도 온 진폭을 일정하게 한다.

2.5 실제의 진동시험

2.4절의 시험방법과 시험조건에 따라 도시철도 표준화사업에 의해 제작된 VVVF인버터를 한국기계연구원에서 보유하고 있는 6자유도 진동대에 그림 1과 같이 탑재하여 진동시험을 수행하였다. 시험대상품의 진동가속도를 측정하기 위하여 전후, 좌우 및 상하 방향으로 각각 3개의 가속도계를 부착하였다. 가해지는 진동가속도는 6자유도 진동대에 설치된 가속도계에서 얻어진다.

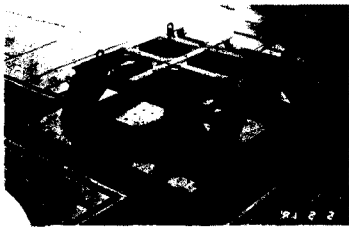
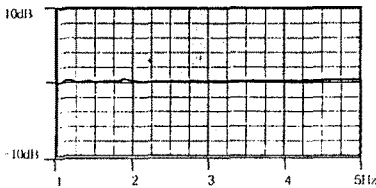


그림 1. 진동시험대에 탑재된 시험품

2.5.1 진동내구시험 결과

공진진동수를 얻기 위해서 주파수에 따라 시험대상품의 진동응답가속도와 가해진 진동가속도의 비, 즉 전달함수를 Spectrum Analyzer(HP3582A)로 분석하였다. 전후 진동시험에 대한 공진시험결과는 그림 2와 같으며, 좌우, 상하방향에 대한 공진진동수를 함께 정리하면 표 6과 같다.



(a) 가속도응답 전달함수 1~5Hz (전후방향)

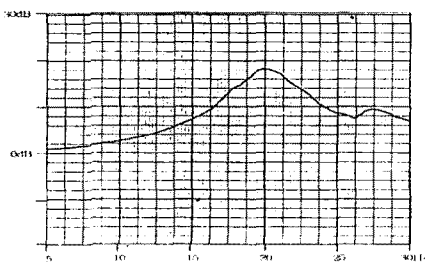


그림 2. (b) 가속도응답 전달함수 5~30Hz (전후방향)

표 6. 시험대상품의 공진진동수

방향	공진진동수 (Hz)
전 후	20.0, 27.6
좌 우	19.6, 24.8
상 하	20.4, 24.4, 27.2

2.5.1.2 진동기능시험

공진시험 및 진동내구시험 후 대상시험품에 대해 한국기계연구원 입회하여 그림 3과 같이 한국철도차량(의왕)에서 전기적 특성시험(R-L부하 : 10Ω, 입력전압 : DC 1500V를 인가하고 인버터를 고압 가동하여 출력전압 및 전류를 확인)을 수행하여 시험품의 기능 및 작동상태의 이상유무를 확인하였다.

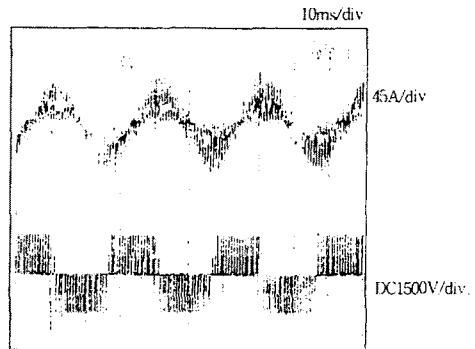


그림 3. 인버터 고압 가동시 전류 및 전압의 출력 파형

3. 결 론

본 논문에서는 현재 도시철도차량용 인버터 진동시험시에 적용하고 있는 KS R 9144 시험방법에서 명확히 제시하고 있지 않은 공진진동수의 범위에 대해, 실제 현차시험에서는 공진이 10Hz이하에서 나타나기 때문에 현실적으로 공진시험범위를 17Hz이하로 제한하는 방안을 제시하였다.

또한 도시철도차량 표준화사업의 일환으로 제작된 VVVF인버터를 대상으로 6자유도 진동대에서 전후, 좌우 및 상하 방향으로 각각 3개의 가속도계를 부착하여 현실에 적합한 새로운 시험방법을 적용하여 진동시험을 실시하였다.

이와같은 새로이 제안한 시험방법을 국내최초로 적용한 결과, 제작된 인버터가 공진시험 및 진동내구시험에도 견딜 수 있도록 설계되었으며, 진동시험이 끝난 후에 실시한 인버터에 대한 전기적 특성시험에서도 인버터의 기능 및 작동상태에 전혀 이상이 없음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국고속철도건설공단, "고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구", 한국고속철도건설공단, 1995. 3
- [2] 한국산업규격 KS R 9144, "철도차량 부품의 진동시험방법", 1992.
- [3] 한국철도기술연구원, "추진제어장치 연구개발보고서"(분야:전동차 IGBT인버터 표준설계), KRR1, 1999. 12.