

FRF를 이용한 KTX 차륜 경년변화 분석

Analysis KTX wheel aged deterioration using Frequency Response Function

윤차중† (한국철도공사) · 이성욱* (한국철도공사) · 조광우** (한국철도공사)

Yun, Cha-Jung,

Lee, Sung-Uk

Jo, Kwang-Woo

Key Words :

KTX wheel(KTX 차륜), Frequency Response Function(주파수 응답함수), aged deterioration(경년변화)

Abstract

KTX Railway rolling stock wheel run its course to corrode, deteriorate and wear away through out the time. So it is natural that the performance and ability of wheel gets declined. The frequency characteristic analysis were accomplished to above trend and shock wave flow to wheels were examined. The result will be used to find Railway rolling stock wheel crack and maintenance method hereafter.

1. 서론

대중교통의 혁명이라고 표현되고 있는 고속철도 시대가 열린지 벌써 2년여 기간이 지났다. 당초 예상했던 교통수요량에는 크게 못 미치고 있지만 이용승객은 벌써 6,000만명을 넘어섰고, 이를 이용하는 승객들에게는 정시성과 쾌속성에서 좋은 반향이 일어나고 있다. 이러한 시점에서 시속 300km으로 고속 주행하는 KTX의 안전주행에 대한 안정성 연구는 매우 중요하다. 본 연구는 KTX 차량 주행장치부(대차)중에서 차륜 중심으로 안정성을 부여하고, 유지보수 측면에서 효율적이고 경제적으로 수행할 수 있는 방법을 찾는 데 그 목적이 있다. 이를 위하여 향후 연구되어야 할 고속철도차량 안정성분야 중에서 차륜의 경년변화에 대한 자세한 분석이 필요하다고 생각한다. 개통 2년을 맞이하는 KTX 차량에 대해서 시간의 경과로 인하여 자연열화를 포함하여 부식, 마모, 물리적인 성질의 변화 등으로 계의 성능이나 기능이 떨어지는 경년변화(aged deterioration)현상이 있을 것으로 보고, 현재 운행 중인 차량의 차륜에 어떠한 시점에 이러한 현상이 일어났는지 여부와 향후 지속적으로 연구되어질 기초 데이터를 확보하고자 하였다. 고속 반복 진동이 차륜에 미친 영향에 대하여 주파수 특성, 피로특성 등을 분석하여야 하지만 이를 분석하기에는 너무나 많은 시간과 방대한 데이

터 분석이 필요하여 차륜의 경년변화를 분석하는 가장 쉬운 접근법으로 주파수 응답함수를 이용하여 시간의 변화에 따른 차륜의 강성을 분석하였다. 이를 통해 차중별, 대차별, 차륜별 고유진동주파수를 분석하여 차륜의 강성변화를 예측할 수 있으며 이를 데이터베이스화하여 이상 발생 가능상태를 미리 예측할 수 있도록 하여 향후 KTX 차량의 유지보수 업무에 활용할 수 있는 방안을 제시하여 차량의 유지보수 업무에 필요한 데이터 베이스를 작성하고자 한다.

2. KTX 차륜의 관리 현황

2.1 KTX 차륜의 형태 및 형상

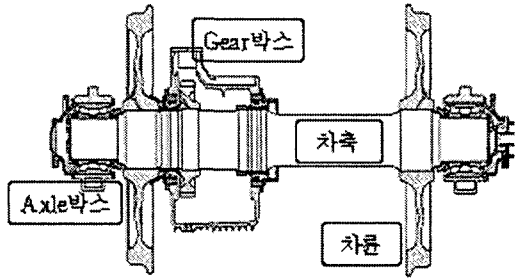
KTX 차량의 차륜은 대차의 종류에 따라 달라지지만 그 일반적인 형태는 그림 1에서와 같이 차축, 차륜, 기어박스 및 액슬박스로 구성되어 있으며 재질은 UIC R7의 탄소강으로 제작을 하며 허브 휠센터 타이어림으로 구성된다. 특히 차륜의 크기는 제작 시 정상 직경은 920mm로 제작이 되지만 KTX에 장착되어 운행하다보면 운행으로 인한 마모가 발생하여 마모 발생 시 차륜의 마모한도는 850mm이며 차륜의 직경이 그 이하일 경우에는 교체하여야 한다.

또한 차륜단면의 형상은 일정한 반경을 가지지 않고 구배를 가지는데 객차용 대차의 차륜단면은 1/40 구배를 사용하도록 되어 있으나 현재는 1/20 구배의 프로파일로 작성하여 사용하고 있으며 동력용 객차의 차륜단면은 1/40과 1/6.7의 이단구배를 이용하여 사용하게 된다. 표 1은 KTX 차륜의 형상에 따른 기준값을 나타내고 있다.

† 한국철도공사 연구개발센터
E-mail : korea@korail.com
Tel : (042)608-4821, Fax : (042)608-4815

* 한국철도공사 연구개발센터 팀장

** 한국철도공사 연구개발센터 부장



[그림 1] KTX 동력차 Wheel set

[표 1] KTX 차륜의 기준값

측정대상	정상값		삭정값	교환값	삭정후	
	최소	최대			최소	최대
직경 (동력차, 객차 동일)	920	924	-	860	852(취부축) 860(취거축)	
플랜지 두께	28	32.5	28근접 32.5근접			32.5
플랜지 높이	동력차 (GY40)	27.5	28.5	36근접	27.5	28.5
	객차 (XP55)	28.5	29.5	36근접	28.5	29.5

[표 2] 차륜, 플랜지의 결함 기준

항목	역대	삭정 및 교환
자륜플랜지 충격에 의한 결함		깊이 2 mm 이상(그림 1)
금속충격 (Metal Acquisitions)	AM	두께 1 mm 이상
자륜알상 (Wheel Flats)	MP	길이 80 mm 이상 (교환 : 60 mm 이상)
자륜막리 (Chipping)	EC	길이 20 mm 보다 길거나, (교환 : 40 mm 이상) 깊이 1 mm 보다 깊으면 (교환 : 2 mm 이상)
파상형 균열	EX	길이 20 mm 보다 길거나, 깊이 1mm 보다 크면
미세균열에 의한 결간 박리	EXC	길이 20 mm 보다 길거나, 깊이 1 mm 보다 크면
단면 외측부의 균열		균열이 있으면

2.2 KTX 차륜 차축 관리기준

현재 KTX 운행 중에 발생하는 차륜 및 플랜지의 결함의 종류 및 결함 발생 시 대처방법을 표 2에 나타내었다. KTX 차륜, 차축의 유지보수 기준은 몇 가지가 있으며 차륜의 진원도 측정을 위해서는 운행거리 최대 5,500Km 초과 이전에 차륜의 진원도 검사를 실시하여 이상 발생 시 차륜을 삭정하거나 차륜을 교체한다. 차축 박스의 급유는 SHELL HX VI2858(80g)을 사용하며 매 300,000~400,000Km마다 시행하도록 되어 있다. 또한 KTX 운행에 가장 큰 영향을 미치는 차륜 및 차축의 균열은 초음파 탐상 검사를 이용하여

최대 450,000Km 주행 이전에 시행하도록 되어 있으나 이 초음파 탐상검사 주기가 거의 1년이 된다.

KTX 차량의 검수주기는 운행시간과 거리를 병행하여 시행한다. 즉, 운행시간 또는 정해진 주행거리 중 먼저 도달하는 기준을 적용하여 시행하여 [표 3]은 KTX 검수현황을 나타내고 있으며 [표 4]는 차륜 및 플랜지의 결함 기준을 나타내고 있다.

[표 3] KTX 정기 검수 주기

검수 종류	검수주기 기준	
	기간	주행거리(km)
일상검수(ES)	3일	3,500
주행기어검수(RGI)	9일	15,000
살내설비검수(CE)	9일	15,000
체계검수(SWT)	-	55,000
제한검수(LI)	4개월	165,000
일반검수(GI)	8개월	330,000
전반검수(FGI)	16개월	660,000

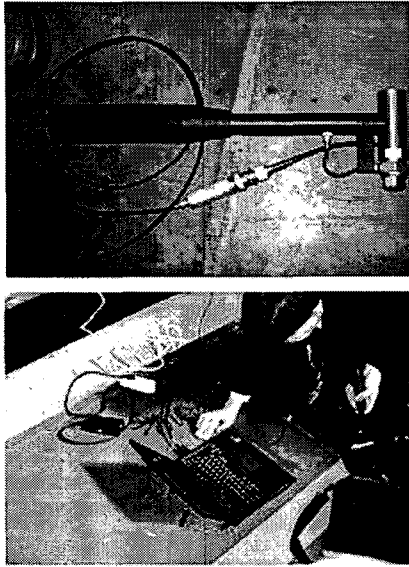
3. 측정 및 분석

3.1 시험방법

[그림 2]는 KTX 차량에 대한 모듈 테스트 사진을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 x축과 y축 방향에 대하여 모듈 테스트를 수행하였다. [그림 3]는 본 시험에 대한 장치 구성도이다.



[그림 2]



[그림 3]

3.2 시험 및 측정

본 시험은 2006년 3월 15일 고양고속철도 차량관리단에서 시행하였으며 정기검사를 위해 차량관리단에 입고된 차량 중에서 차량이 조립된 상태에서 측정을 시행하였다. [표 5]는 KTX 시험 대상 차량 및 차륜을 나타낸 것으로 본 시험에서는 3량의 차량을 시험하였으며 각각의 차량에 대하여 동력대차 차륜, 동력 객차대차 차륜, 객차대차 차륜의 주파수 응답함수를 각각 측정하여 분석하였다. 본 차량의 시험시 사용되는 장비는 Smart Office를 이용하였으며 측정 장비 및 설명은 [표 4]에 자세히 명기하였다.

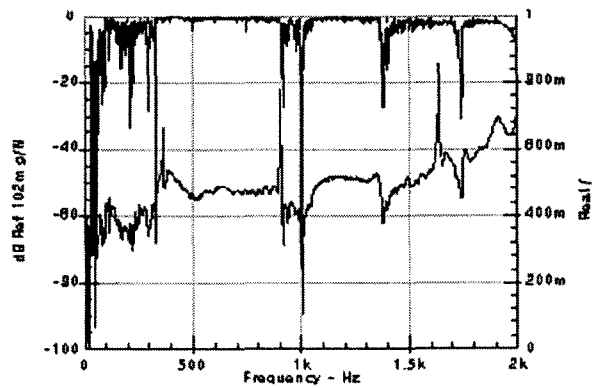
[그림 2]는 KTX 동력 대차의 주파수 응답함수와 코히어런스 이다. [그림 2]에서와 같이 상당히 많은 노이즈성분이 포함되어 있는데 이는 KTX 차량이 조립되어 있고 차량이 레일위에 놓여 있어 차량의 영향 및 레일을 타고 들어오는 노이즈 성분의 영향이라고 생각이 되며 그림에서와 같이 주파수 응답함수만을 가지고는 고유진동수 성분을 정확하게 파악하기 어렵기 때문에 [그림 3]과 같이 측정 데이터를 이용한 모달 분석과정에서 생성되는 합성된 주파수 응답함수(Synthesised FRF)를 이용하였다.

[표 4] 시험장비 사양

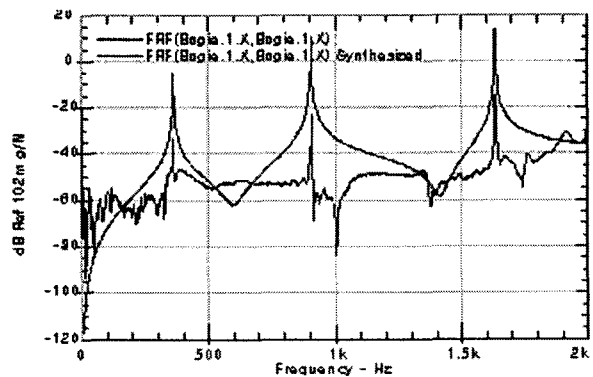
분석 장비	m+p International사의 Smart Office
분석 모듈	Impact Testing, Modal Analysis
Front-end	8-Channel Portable Analyzer
Impact Hammer	Type 820Z & Charge Converter
Accelerometer	ICP 단축 가속도계 Type 4507

[표 5] KTX의 시험 대상 차량 및 차륜

차호	도입 년도	Check Point	차륜 교환일
KTX 05호	2000. 9. 25	동력대차 #23 B축 R	'05.09.22
		동력대차 #22 B축 R	'06.01.17
		동력객차대차 #21 A축 R	'05.12.02
		객차대차 #20 A축 R	'04.04.09
		객차대차 #20 B축 L	'04.09.29
KTX 14호	2002. 6. 26	동력대차 #23 B축 L	'05.06.04
		동력대차 #22 B축 L	'05.02.09
		동력객차대차 #21 A축 L	'05.03.10
		객차대차 #20 A축 L	'04.07.07
		객차대차 #20 B축 L	'04.12.28
KTX 25호	2002. 11. 29	동력대차 #23 B축 L	'06.02.07
		동력대차 #22 B축 L	'05.11.19
		동력객차대차 #21 A축 L	'05.04.05
		객차대차 #20 A축 L	'05.03.03
		객차대차 #20 B축 L	'05.06.12



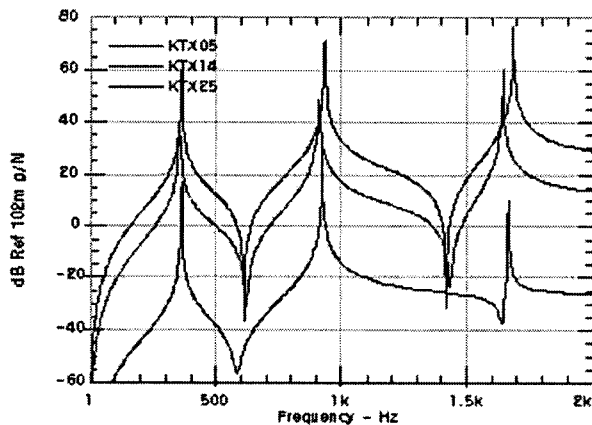
[그림 2] KTX 동력대차의 FRF & Coherence



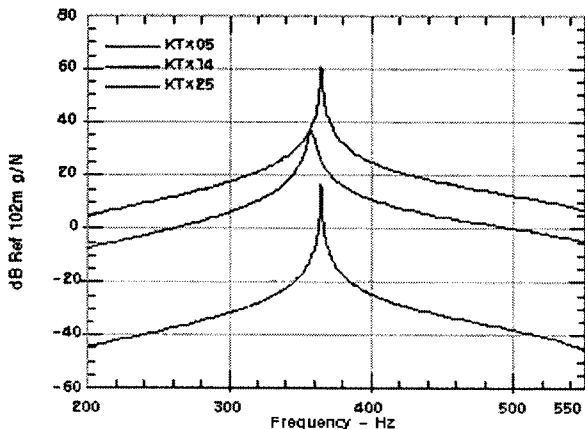
[그림 3] Measured FRF vs. Synthesis FRF

3.3 결과 및 분석

측정 데이터들 이용하여 분석결과 3개의 고유진동수들 추출할 수 있었으며 그림 4는 각 차량별 동력대차(23번) B 축의 오른쪽 바퀴에서 측정된 데이터들 분석한 합성된 주파수 응답함수(Synthesized FRF)이며 그림에서 볼 수 있듯이 열차에 따라서 각각의 고유진동수가 변하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 특히 1차 고유진동수를 확대하여 본 그림을 나타내고 있다. 이들 고유진동수의 변화는 제조상의 오차, 차륜의 장과 부품들의 영향, 차체의 영향 등 많은 영향을 포함하고 있으나 정확하게 어떤 영향이라는 것을 밝혀내기에는 상당히 많은 어려움이 있다. 따라서 여기에 대한 영향은 차후에 별도의 연구 과제들 통하여 밝혀내기로 하고 여기서는 차륜의 사용일 수에 따르는 고유진동수의 영향만을 평가하여 보기로 하였다. 그러나 차륜 자체의 고유진동수 오차는 본 연구 과제와 연관하여 규명할 필요가 있으며 차륜의 제조시 고유진동수 오차범위를 설정하여야 본 연구의 결과가 더 좋은 결과를 얻으리라고 생각이 된다.



[그림 4] 동력대차에서 고유진동수의 비교



[그림 5] 동일 측정점에서 1차 고유진동수의 비교

[표 6]은 각 KTX 차량별 측정 차륜의 교환일과 각각의 고유진동수들 분석하여 정리하여 놓은 것이다. 차륜의 사용일수는 차륜 교환 일을 기준으로 하여 매일 동일한 거리를 운용한 것으로 가정하여 분석을 하였다. 이들 고유진동수의 비교는 각각의 KTX 차종에 따라 동일한 차륜 위치에서 측정 및 분석한 데이터들 기준으로 비교 평가하여야 하지만 영업운행을 위해 계획된 정비시간의 일부들 할애 받아 시험하여야 하는 관계로 상당한 어려움이 있어 다양한 종류의 열차들 대상으로 측정하지 못하였고 3편성 열차로만 측정하다 보니 비교 분석하기 위한 열차의 차량 수가 너무 적어 고유진동수의 분석은 차륜의 사용일수에 대하여만 분석하였으며 대차의 종류 및 차륜의 위치에 대한 분석은 추후 더 많은 연구가 진행되면 자연스럽게 분석이 가능할 것으로 판단된다.

[그림 6], [그림 7], [그림 8]은 차륜의 사용일 수에 따른 1차, 2차, 3차 고유진동수의 변화를 나타낸 그림이다. 이들 그림에서 보면 사용일 수가 증가할수록 고유진동수가 차수에 관계없이 동일하게 증가한다는 것을 알 수 있으며 이는 측정 데이터의 양이 적어서 측정 데이터를 가지고 선형으로 Curve Fitting하여 분석한 결과이다. 즉 차륜의 교환 직후에는 고유진동수가 차수에 관계없이 낮게 나타나고 있으며 차륜의 사용일 수가 증가 할수록 고유진동수가 증가한다는 것을 알 수 있다. 물론 측정대상의 차륜에서는 균열이 발생하지 않아 균열에 대한 영향은 없었던 것으로 생각된다. 그렇다 하더라도 본 연구의 분석 결과는 예측했던 결과와 반대의 결과가 나타났다.

본 연구 초기에는 차륜의 사용에 따라 강성이 감소할 것이라는 생각을 가지고 시작하였으나 막상 분석 결과는 고유진동수가 감소하지 않고 오히려 증가하는 경향을 보이는데 이는 강성이 감소하지 않고 증가하거나 또는 질량의 감소에 따른 원인으로 고유진동수가 증가한다고 볼 수 있다. 이들의 원인으로 첫째는, 열차의 운행으로 인하여 차륜의 강성이 증가한 것을 예상할 수 있는데, 이는 일반적으로는 예상하기가 상당히 어려운 가정이 될 수 있다. 그러나 미리 결과를 가정하고 가능성을 부정하여 연구를 하게 되면 잘못된 결과가 나타날 수 있으므로 충분히 가능성이 있다고 보고 차량의 운행에 따른 강성의 증가는 추후에 연구과제로서 필요하다고 판단된다.

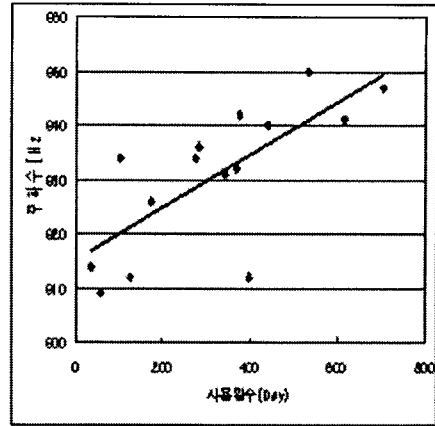
둘째는 질량의 감소들 들 수 있는데 이는 충분히 가능한 것으로 차량의 제동 시 차륜과 레일의 마찰에 의하여 차륜의 질량이 감소할 수 있으며 또 하나는 차량과 레일의 마찰에 의하여 차륜손상이 발생되면 차륜의 회전 시 덜컹거리는 소음과 차량의 승차감에 영향을 미치므로 정기적으로 삭정을 하게 되는데 삭정의 영향으로 질량의 감소가 이루어진다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 보면 본 연구는 주파수 응답함수들 이용하여

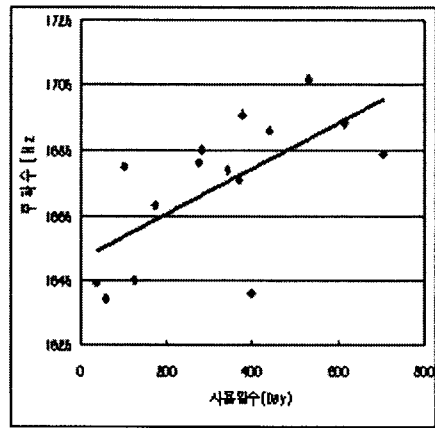
차륜의 경년변화를 분석하여 차량의 유지보수 작업 시 쉽고 간단하게 접근할 수 있는 데이터베이스를 작성하는 초기 연구였으나 오히려 더 많은 과제를 가지게 되었다.

[표 6] 차륜의 사용일수에 따른 고유진동수 값

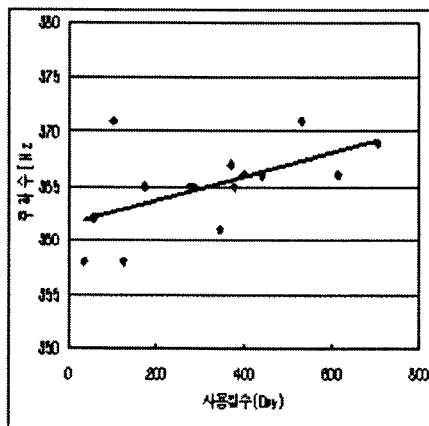
차호	차륜 교환일	차륜 사용일	고유진동수(Hz)		
			1차	2차	3차
KTX05	'05. 09. 22	174	365	926	1668
	'06. 01. 17	57	362	909	1639
	'05. 12. 02	103	371	934	1680
	'04. 04. 09	705	369	947	1684
	'04. 09. 29	532	371	950	1707
KTX14	'05. 06. 04	284	365	936	1685
	'05. 02. 09	399	366	912	1641
	'05. 03. 10	370	367	932	1680
	'04. 07. 07	616	366	941	1693
	'04. 12. 18	442	366	940	1691
KTX25	'06. 02. 07	36	358	914	1644
	'05. 11. 19	126	358	912	1645
	'05. 04. 05	344	361	931	1679
	'05. 03. 03	377	365	942	1696
	'05. 06. 12	276	365	934	1681



[그림 7] 2차 고유진동수의 경향



[그림 8] 3차 고유진동수의 경향



[그림 9] 1차 고유진동수의 경향

4. 결론

본 연구는 주파수 응답함수를 이용한 차륜의 경년변화를 분석하기 위한 초기연구로서 현재 운행 중인 3대의 KTX 열차의 각 차량별로 5개 차륜의 고유진동수를 측정 분석하였다.

분석결과 KTX 차륜의 고유진동수 1차가 359~371 [Hz], 2차가 914~950 [Hz], 3차가 1639~1707 [Hz]범위에 걸쳐서 나타났다.

차륜의 사용일수에 따르는 고유진동수의 변화는 실제로 상당히 크게 나타나고 있으며 이들이 개별 오차인지 아니면 실제 차륜의 경년변화에 따른 것인지는 판별하기에는 어려움이 존재하지만 차륜의 사용일수가 증가 할수록 고유진동수가 증가한다는 것은 측정 데이터의 분석 결과로서 알 수 있다.

차륜의 사용일 수의 증가에 대한 고유진동수의 증가는 두 가지로 예측할 수 있으며 첫째는 차륜의 강성의 증가이고

둘째는 차륜의 질량의 감소이다. 차륜의 강성의 증가는 쉽게 이해되지 않으며 이에 대해서는 차후에 더 자세한 연구가 필요하다고 생각이 된다. 차륜 질량의 감소는 차량의 운행 및 제동시 차륜과 레일의 마찰에 의하여 질량이 감소할 수 있으며 차륜의 기준을 초과하는 손상이 발생되어 소음 및 승차감의 문제가 발생할 수 있을 경우를 대비하여 정기적으로 차륜의 식경을 하게 되는데 이로 인해라도 질량의 감소는 존재하고 이는 고유진동수의 변화에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

마지막으로 추가적인 측정 및 분석을 통하여 차륜의 경년 변화가 데이터베이스로 축적되면 KTX차량의 유지 보수 및 KTX 차량의 안전운행에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구를 수행하기 위해서는 사업운행중인 KTX 열차를 시험 대상으로 하고 있기 때문에 시험일정을 잡기가 어렵고, 더욱이 검수 중 일 때는 검수장비의 동작과 설비의 잡음으로 인해 고유진동수를 측정하기 위한 어려움과 이를 해석하고 분석할 때 어려움이 있었다. 이 연구가 이번 단 한번에 그치지 않고 수년간에 걸쳐 지속적으로 수행되어 경년변화에 따른 충분한 데이터를 확보하고 데이터베이스화 한다면, 간단한 점검과정에서도 확실하고 신뢰성이 부여되는 결과를 얻어 처음에 목적했던 유지보수 업무에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 철도차량 운영자와 관련분야 종사자들의 지속적인 관심과 중단 없는 연구가 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

- (1) KTX 정비 지침서
- (2) D.J.Warwins, "Modal Testing : Theory and Practice", Research Studies Press Ltd., Letchworth, Herts, England, 1984
- (3) 이시우, 철도차량의 진동전파 특성, 홍익대학교 대학원
- (4) 기득염, 전기동차 소음 방사 특성에 관한 연구 서울산업대학교 철도기술대학원
- (5) 최연선, 적응신호처리에 의한 주행전기동차의 진동신호해석, 한국철도학회논문집 제2권 PP13-20
- (6) 역자 양보석, 진동모형실험법, Σ 시그마프레스, 1998
- (7) 김재철 등, "차륜/레일의 전동음 저감방안 연구" 기존선 고속화 기술개발(KRFI 연구 00-42), 한국철도기술연구원, 2000.12.
- (8) 은희준, "철도소음:특성과 방지대책", 대한기계학회지, 제35권, 제10호, 1995
- (9) 환경부, "소음진동규제법시행규칙 제37조 별표10(총리령 제92호 일부개정 2000.5.4)