

고속열차 감속기의 상시감시시스템 설계 및 가변속주행시 안정성 향상을 위한 동특성해석

Dynamic Characteristics Analysis

for the Online Monitoring System Designing KTX MRU and Improvement of the Stability Related Variable High Speed

박 병 수[†] · 김 진 우^{*} · 최 상 락^{*} · 송 영 천^{**}

Byung Su Park, Jin Woo Kim, Sang Rak Choi and Young Chun Song

(Received July 18, 2012 ; Revised January 17, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

Key Words : Gear Mesh Frequency(기어맞물림주파수), MRU(모터감속기), EMA(experimental modal analysis), Transient Analysis(과도해석), Gear Box(기어박스)

ABSTRACT

MRU(motor reduction unit) for KTX is a assembled complex structure that is equipped with a lot of parts at the express train KTX and that is the core power source operating variable speeds. This study is recorded the dynamic characteristics analysis results tested by EMA which is done through the parts and assembly test, transient analysis and stoped train test in order to design the online monitoring system for KTX MRU. And the mode shapes result from critical vibration frequency explain the relation with variable speeds of express train over 250 km/hr. Also these variable speeds make variable operational frequencies at pinion, axle gear mesh frequency and normal bearing fault frequencies. As the specified speed can make resonance with natural frequencies of the MRU, for the train operating stability, this study also presents the MRU's critical speeds calculated by the each train speed.

기 호 설 명

- 1X : 1차회전수
- 2X : 2차회전수
- Bd : 볼 또는 롤러의 지름
- BPFI : 내륜통과주파수
- BPFO : 외륜통과주파수
- BSF : 볼통과주파수
- FTF : 케이지주파수
- GMF : 기어맞물림주파수

- Nb : 볼의 수
- Pd : 피치지름
- Rs : 열차속도
- S : 초당 회전수
- Wd : 차륜직경
- # : 기어의 이수

1. 서 론

대한민국의 고속철도차량은 프랑스TGV와의 기술
협약에 이은 1세대 KTX에 이어 ‘KTX-산천’, 최근

[†] Corresponding Author ; KTM engineering Inc.
E-mail : ktme@ktme.com
Tel : +82-31-776-2200, Fax : +82-31-776-3119

^{*} KORAIL Research Institute Technology Research Department

^{**} Member, KTM engineering Inc.

[‡] Recommended by Editor Moon Kyu Kwak

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

에는 ‘HEMU-430X’로 발전하고 있으며 430 km/h의 속력으로 주행이 가능한 우수하고 안전한 고속열차로서의 역할을 지향하고 있다. 그러나 고속열차의 핵심 동력원인 모터감속기(MRU)에는 제조사로부터 받은 진동해석에 대한 기본 자료가 전무하고 또한 기본설계 이후에 발생하는 trouble shooting에 대한 자료는 매우 귀중한 자료이나 수집이 불가능한 실정이다. 또한 설비의 유지보수 효율화 측면에서 상시감시시스템(online monitoring system)이 요구되고 있으며 이 시스템은 각 감속기의 현재의 운행상태에 대한 안정성과 향후 정비시점의 적절한 파악을 위해 진동과 온도 그리고 윤활기술을 통한 실시간 데이터 저장, 진단, 위험 등을 모니터링하는 역할을 수행할 예정이다. 따라서 이 시스템의 기본적인 설계 자료를 위해서는 감속기 관련 위험속도를 포함한 기본적인 진동특성에 관한 검토가 필요하다.

철도차량은 기본적으로 차륜-레일간의 강한 충격 진동이 있으며 가변속(variable speed)이므로 상시감시시스템을 설계함에 그 어떤 기기보다 가장 어려운 조건을 가지고 있다. 또한 주행 중에 발생이 가능한 결함을 파악하는데 있어 설비진단의 개념이 중요하게 포함되어야 하는 이유는 가변상태의 주요 가진주파수와 감속기 유닛이 내포하고 있는 고유치와의 관련성(공진)을 검토해야 하기 때문이다. 이 논문에서는 감속기를 대상으로 계측장비를 활용한 실험적 모드해석을 수행하고 데이터를 분석한 내용을 언급하였다. 이 연구결과는 고속철도차량(KTX)의 핵심 주요 부품인 감속기의 상시감시시스템 설계 및 고속철도의 주행 시 안정성 향상 확보를 위한 중요한 기초 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 감속기의 구조 및 상시감시시스템 설계

KTX 모터감속기는 견인전동기로부터 발생하는 회전력을 차륜에 전달하는 동력전달장치로서 편성된 차량의 선두 및 후미에 있는 각각 3개의 동력 대차(bogie)의 하부에 배치되어 있으며 각 대차별로 2세트가 서로 마주보고 설치된 구조로서 대차 1세트당 2개의 감속기(1차감속기, 2차감속기)로 구성되어 있다. 따라서 KTX차량 1개 편성에는 총 12세트의 감속기가 설치되어 있다. 일반적인 편성(8~12)으로 구성된 KTX 감속기유닛의 배치도(중간 객차 생략)

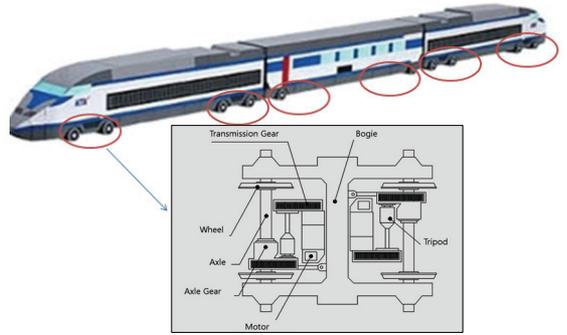


Fig. 1 KTX gear reduction system layout

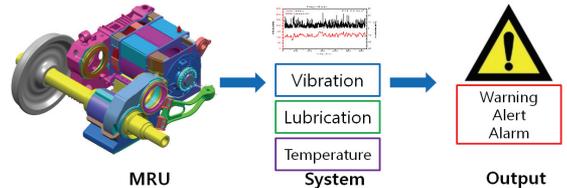


Fig. 2 Online monitoring system design concept for KTX

와 대차 및 감속기의 주요 구성도는 Fig. 1과 같다. 또한 KTX의 감속기 상시감시시스템의 주요 구성도는 Fig. 2와 같다.

3. 주요 가진주파수의 해석

KTX 모터감속기(MRU)에서 발생하는 차륜-레일 간 광대역 충격진동주파수를 제외한 주요 가진 이산 주파수에는 모터에서 발생하는 회전주파수, 감속기의 각 축에서 발생하는 회전주파수, 차륜의 회전주파수 및 기어맞물림주파수(GMF)와 베어링의 접촉 기본주파수(외륜, 내륜, 볼, 케이지) 등 으로 나열할 수 있다. 이들 가진주파수는 열차의 주행속도에 따라 수시로 변동하므로 감속기의 종합구성체에서 내포하고 있는 고유주파수들과의 관련성은 공진과 밀접한 의미가 있다 할 수 있다.

감속기에서 발생할 수 있는 주요 진동주파수와 그 계산식을 정리하면 다음과 같다.

- 피니언 및 기어에 장착된 베어링의 결함주파수와 그 조화파(harmonics)
- 피니언축, 기어축의 회전주파수 및 그 조화파

- 기어맞물림 주파수(GMF)와 그 조화파
- GMF와 관련된 측대파(sidebands)
- 기어공진주파수(disc wobble)
- 여러 개의 기어간 공진(tooth resonance)
- 축의 굽힘, 공진(shaft deflection, resonance)
- 기어이의 하중에 의한 베어링 변형
- GMF Axle : Axle Hz × Axle Gear #
- 1X Axle Axis : $R_s \times 1000 / (3600 \text{ sec} \times 3.14 \times W_d)$
- 1X Tripod : $1X \text{ Axle Axis} \times \text{Axle Gear \#} / \text{Axle Input Gear \#}$
- 1X Trans : $1X \text{ Tripod} \times \text{Motor Out Gear \#} / \text{Transmission Gear \#}$
- 1X Drive : $1X \text{ Trans} \times \text{Transmission Gear \#} / \text{Driving Pinion Gear \#}$
- GMF Trans & Drive : $1X \text{ Trans} \times \text{Transmission Gear \#}$
- BPFI : $(N_b/2) \times S \times (1 + B_d / P_d \times \cos\Theta)$
- BPFO : $(N_b/2) \times S \times (1 - B_d / P_d \times \cos\Theta)$
- BSF : $(P_d/2B_d) \times B_d \times [1 - (B_d/P_d)^2 \times (\cos\Theta)^2]$
- FTF : $S / 2 \times (1 - B_d / P_d \times \cos\Theta)$

Table 1 KTX MRU operating frequencies

Frequency	120 km/hr	290 km/hr
GMF axle	588.5 Hz	1422.2 Hz
GMF trans & drive	682.1 Hz	1648.4 Hz
1X axle axis	11.5 Hz	27.9 Hz
1X axle gear R	13.4 Hz	32.3 Hz
1X trans	16.6 Hz	40.2 Hz
1X drive	25.3 Hz	61.1 Hz
NU2315 BPFI(1X)	95 Hz	230 Hz
NU2315 BPFO(1X)	65 Hz	158 Hz
NU2315 BSF(1X)	5 Hz	13 Hz
NU2315 FTF(1X)	34 Hz	83 Hz
NUP2314 BPFI(1X)	95 Hz	230 Hz
NUP2314 BPFO(1X)	65 Hz	158 Hz
NUP2314 BSF(1X)	5 Hz	13 Hz
NUP2314 FTF(1X)	34 Hz	83 Hz
NU2315 BPFI(1X)	119 Hz	286 Hz
NU2315 BPFO(1X)	81 Hz	196 Hz
NU2315 BSF(1X)	7 Hz	16 Hz
NU2315 FTF(1X)	43 Hz	104 Hz
NUP 2314 BPFI(1X)	119 Hz	286 Hz
NUP 2314 BPFO(1X)	81 Hz	196 Hz
NUP 2314 BSF(1X)	7 Hz	16 Hz
NUP 2314 FTF(1X)	43 Hz	104 Hz
NU2220 BPFI(1X)	231 Hz	558 Hz
NU2220 BPFO(1X)	173 Hz	419 Hz
NU2220 BSF(1X)	11 Hz	26 Hz
NU2220 FTF(1X)	87 Hz	209 Hz

Table 1은 MRU에서 발생할 수 있는 가진주파수들을 상용 주요 속도인 120 km/hr와 290 km/hr의 두 가지의 속도별로 계산한 주파수 계산표이다. 베어링관련 주파수는 대체로 500 Hz이하이나 조화파가 형성이 가능하다. GMF는 최대 속도에서도 2000 Hz는 상회하지 않는다. 그러나 GMF의 조화파도 실제로 크게 가진하므로 그 이상을 초과할 수 있다.

4. 실험 방법

이 연구의 대상인 감속기 유닛은 복합 조립체이며 수치해석에 의한 결과에 비하여 더욱 신뢰할 수 있는 실험에 의한 고유치해석(experimental modal analysis)방법을 사용하였다. 세부 해석 방법으로는 독립적인 거동이 가능한 단품과 조립품의 각 동특성 해석을 이용하여 주요 고유주파수들의 분포를 확인하고 주행시 파도해석과 정지시 광대역 주파수인 충격가진에 의한 응답 해석결과를 비교 검토하고, 실험결과에 의한 모드해석을 기본으로 가진주파수와의 관련성 검토를 추가적으로 실시하였다.

실험에 사용된 S/W는 Emerson AMS suit machi-

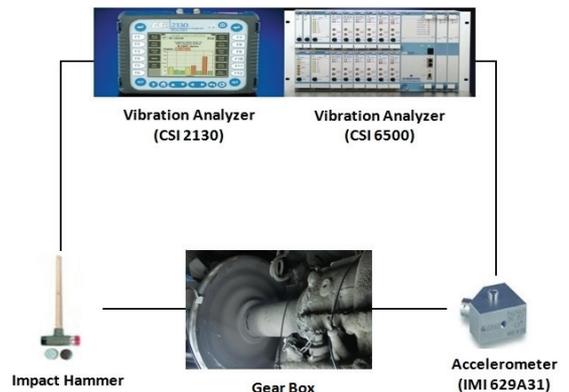


Fig. 3 Experimental system for modal test

nery health manager v5.41, Vibrant technology MEscope ODS v.4.0 이며 H/W 구성은 Fig. 3과 같다.

5. 해석 결과

5.1 단품 및 조립 구성요소의 고유주파수

감속기를 구성하는 부품 중 독립적인 거동이 가능한 단품구성요소 및 조립구성요소의 고유진동수 산출을 위해 각 구성요소를 가능한 isolate된 상태에서 광대역주파수 충격가진을 가해 추출한 진동 응답 신호를 검토하여 고유주파수를 산출하였다. Fig. 4는 FRF, coherence와 phase를 통해 차축의 고유주파수를 확인한 그래프이다.

Fig. 5는 감속기의 각 요소별 고유주파수를 종합적으로 나타낸 그래프이다. 주파수 경향을 살펴보면 전반적으로 1차감속기의 기어 맞물림에 해당하는 단일구성요소들과 tripod(1,2차 감속기 연결축)는 고유

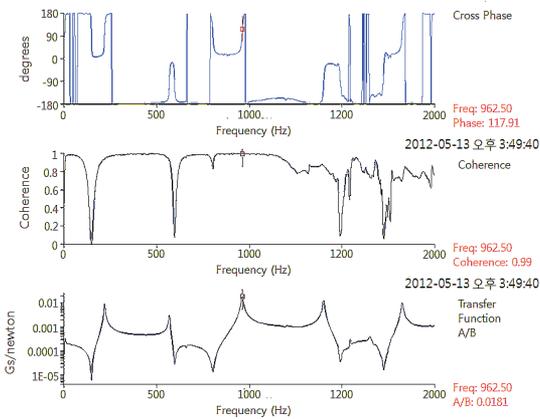


Fig. 4 FRF, Coherence and phase graph

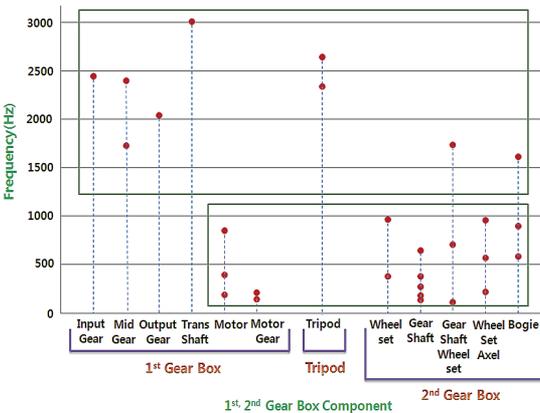


Fig. 5 Natural frequencies of MRU parts

주파수가 1000 Hz 이상의 고주파수 대역으로 나타나고 있고, 이와 다르게 모터를 포함한 1,2차 감속기 결합구성요소는 1000 Hz 이하의 저주파수 대역으로 나타나고 있다. 전체적으로 저주파수 대역에서 많은 주파수가 나타나고 있으나 실제로 KTX 운행시 구성요소만 독립적으로 분리되어 구동되는 경우는 없기 때문에 이 자료는 부품의 이탈, 교체가 빈번히 발생하는 고장상태의 파악을 위한 것으로서 그리고 정상적인 부품, 조립상태와는 다른 고장상태의 점검(강성의 변동에 의한 고유주파수의 변동)을 위한 기본 자료로서 활용될 수 있다.

5.2 실차의 MRU 고유주파수

정지상태의 KTX 실차에 MRU가 결합되어 있는 상태로 차축에 impact hammer를 이용하여 충격가진을 준 상태에서 감속기 및 차륜의 FRF를 산출하였다. 이 결과로 산출된 실차 조립품 상태에서의 주요 고유주파수는 690 Hz, 790 Hz, 1045 Hz, 1835 Hz등으로서 조립된 상태의 접촉강성이 가미된 실제 MRU 고유주파수로 파악할 수 있다. 종합적인 부품이 조립되고 서로 연성(coupling)효과로 영향을 주는 관계로 단품구성요소 및 조립구성요소의 결과 값보다 명확한 결과를 유추하기 어려운 점이 있어서 주행 중 과도해석으로 재검증이 필요했다. Fig. 6은 1차 감속기의 수직방향 고유주파수를 확인한 그래프이다.

실차상태의 고유주파수는 단품 및 조립 구성요소의 고유주파수들과 대부분 유사하지 않았으며 이는

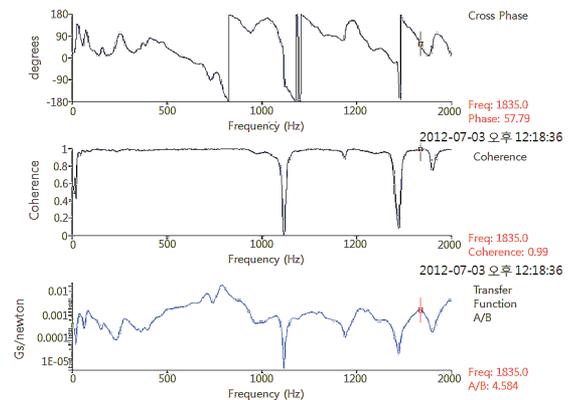


Fig. 6 FRF, Coherence and phase graph at 1st gear box vertical direction

조립이 완벽하게 이루어진 실차의 경우 레일에 인입되어 있는 종합구성체로서의 강성 및 질량의 변동이 고유주파수의 차이를 형성한다는 것을 확인 할 수 있는 결과이다. Table 2에서는 단품테스트와 실차 결합상태에서의 고유주파수를 비교한 결과를 나타내고 있다.

5.3 주행시 과도상태 동특성 해석

감속기에 가속도센서를 부착한 상태에서 실차측정을 하였다. 운행구간은 경부선 전 구간에서 수행하였으며 과도분석(transient analysis)을 하기위한

Table 2 Natural frequencies of parts and assembles

Location	Part(Hz)	Assemble(Hz)
1st gearbox	390, 881, 962, 1815	697, 790, 1835
2nd gearbox	590, 907	690, 746, 1045, 1705
Axle shaft	220, 570, 960	540, 717

조건으로 주행속도 최대 300 km/hr(차축(axle)의 회전수 29 Hz, 모터의 회전수 63 Hz)로서 정차 및 가속의 상태를 반복하여 측정된 데이터를 저장한 다음, transient waveform과 waterfall 그래프를 통해서 감속기에 영향을 주는 주요 고유주파수 등을 확인하였다.

MRU에서 측정된 waterfall plot(Fig. 7)에는 MRU에 영향을 주는 웬유닛, 기타 모터로부터 전달되는 전기적 진동(electric vibration), 펌프 유닛, 에어컨 유닛 등에 의한 영향이 데이터에 포함되어 있으므로 데이터의 분석이 쉽지 않았으나 정지 중 실차에서 측정된 고유주파수인 697 Hz, 1045 Hz 및 1835 Hz 대역에서 GMF의 증폭이 관찰되고 있고 이로부터 해당 주파수와의 공진영역을 파악할 수 있다.

5.4 모드해석

Mode shape 해석은 실차의 MRU에 충격가진 후 감쇠하는 과도진동 데이터를 바탕으로 산출한 고유주파수를 대입하여 해석하였다. 특정 주파수가 감속기에 미치는 영향을 알아보기 위함을 목적으로 구성된 모델링에 주요 고유주파수들을 입력하여 각 주파수별 mode shape를 해석한 시뮬레이션을 확인하면 Figs. 8~10과 같다.

각 주파수 별 거동현상을 살펴보면 mode shape 중에서 MRU의 1차 감속기의 거동이 특히 많이 관찰되는데 Fig. 8, Fig. 10에서 697 Hz, 1835 Hz가 이에 해당된다. MRU에서 발생할 수 있는 결합인 기어의 중간기어의 이탈 또는 기어이의 파손 등과 직접적 관련이 있는 주파수 성분은 GMF와 관련이 깊으므로 이 GMF와의 연계성 문제를 파악하기 위해서 주요 상용속도 이상으로 가동되는 조건인 500 Hz~ 2,000 Hz까지의 주파수 중에서 다음의 가진주파수와의 관련성을 해석할 필요가 있다.

5.5 가진주파수(작동주파수)와의 관련성

특정 주파수가 감속기에 미치는 영향을 알아보기 위해서 3장의 주요 가진주파수와의 관계를 검토해보았다. 주요 운행속도인 저속구간의 120 km/hr, 고속구간의 290 km/hr로 운행시 발생하는 주요주파수 중에서 기어의 결합과 가장 민감한 주파수인 GMF를 살펴보면 120 km/hr에서 1차 감속기의 GMF를 살펴보면 120 km/hr에서 1차 감속기의 GMF는 682 Hz, 2X GMF가 2×682=1364 Hz로서 MRU의

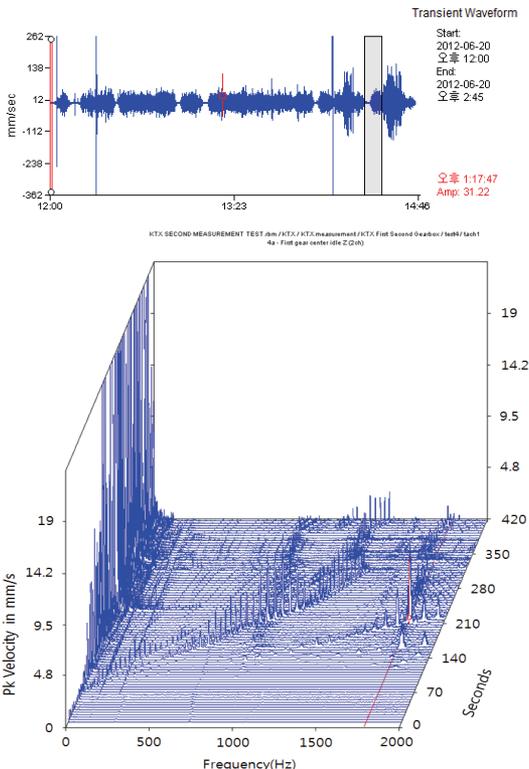


Fig. 7 Vibration transient waveform and waterfall plot for MRU

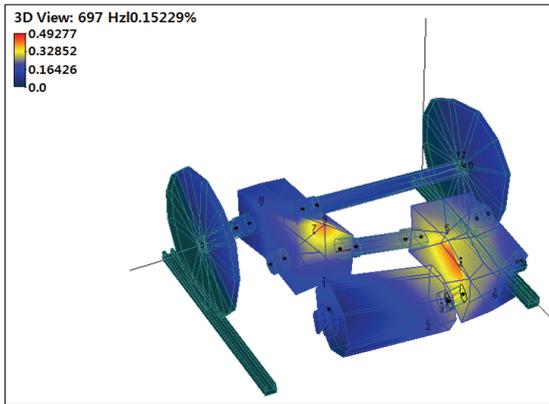


Fig. 8 Mode shape at 697 Hz

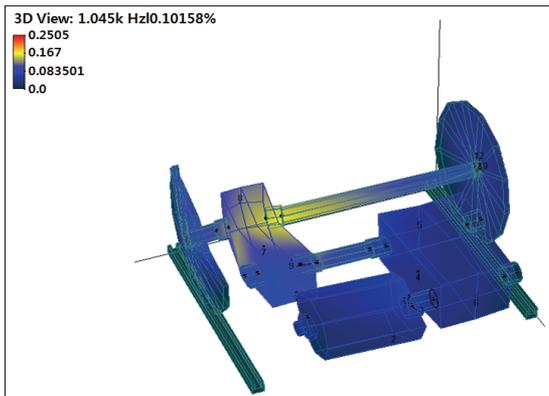


Fig. 9 Mode shape at 1045 Hz

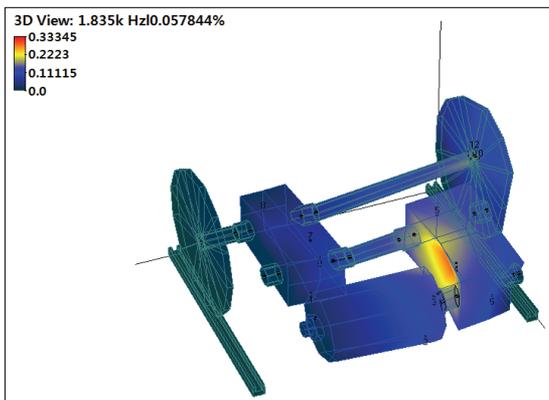


Fig. 10 Mode shape at 1835 Hz

주요 고유주파수(690 Hz)와 근접하다. 설비진단의 측면에서 해석해보면 1차 감속기의 상태가 비정상일 경우에 GMF의 진폭이 변동이 있으므로 120 km/hr로

Table 3 KTX speed versus MRU critical frequency

km/hr	690 Hz	790 Hz	1045 Hz	1835 Hz
121	GMF trans & drive		-	-
141	GMF axle			
70	-	2XGMF trans & drive	-	-
81	-	2XGMF axle		
92	-	-	2XGMF trans & drive	-
106	-	-	2XGMF axle	-
139	-	GMF trans & drive	-	-
161	-	GMF axle	-	-
161	-	-	-	2XGMF trans & drive
187	-	-	-	2XGMF axle
184	-	-	GMF trans & drive	-
213	-	-	GMF axle	-
323	-	-	-	GMF trans & drive
374	-	-	-	GMF axle

주행 중일 때에는 해당 주파수와 근접하여 공진이 발생할 가능성이 있다. 또한, 161 km/hr로 운행시 고유주파수 790 Hz에서 GMF Axle주파수와 일치하고, 고유주파수 1835 Hz에서 2X GMF Trans&Drive와 일치하므로 감속기에는 좋지 않은 열차의 주행속도라고 할 수 있다. 이처럼 KTX의 주행속도별로 MRU의 위험속도에 관련된 주파수와 가진주파수와의 관계를 정리하면 Table 3과 같다.

6. 결 론

이 연구에서는 다양한 실험적인 방법을 이용하여 KTX MRU의 실차 및 구성부품의 고유진동수를 산출하고 MRU에 관련된 위험속도를 구하여 mode shape를 통해 그 거동을 분석하였다. 또한 MRU에서 발생할 수 있는 가진주파수를 열거하고 고유주파수와의 연동성을 확인하였다. 특히 단일부품 및 조합형 부품으로부터 산출한 고유주파수와 실차 시험

에서 산출한 고유주파수가 종합적인 조립상태와 레일에 지지한 상태의 강성 및 질량의 변동으로 인하여 거의 유사하지 않은 것을 확인하였으며, 상용 주행 속도 120 km/hr에서는 MRU의 위험속도와 1차 감속기의 GMF와도 일부 근접하는 것으로 파악되므로 MRU의 상태측면에서 주파수의 조정을 확인해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) KTX MRU의 각 단일부품 및 조립부품의 각 고유주파수 산출
- (2) KTX MRU 작동주파수(가진주파수)의 산출과 고유주파수와의 연관성
- (3) 주요 상용속도에서의 KTX MRU 위험속도와의 연관성 검토

다음 연구방향으로는 유지보수시점의 파악을 위한 기계건강상태에 대한 안정성, 안정성의 측면에서 MRU의 모터관련 전기적 진동주파수를 포함한 산천, 해무 차량에 이르는 확대적용으로의 검토가 있을 예정이다.

후 기

이 과제는 국토해양부 고속철도 시행한 미래철도 기술개발사업(11PRTD-B061487-01)의 사업비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, S. H., Kim, K. J. and Ha, J. Y., 2000, An Experimental Study on Tooth-meshing Frequency Components in Noise/Vibration of a Gearbox Under Operational Conditions, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1096~1101.
- (2) Eom, B. G. and Lee, H. S., 2012, Dynamic

Analysis for Improvement of Running Stability of Rubber Tired AGT Localization Bogie, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 307~317.

- (3) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing 2nd Ed, Research Studies Press LTD, Hertfordshire.
- (4) Randall, R. B., 2011, Vibration-based Condition Monitoring, John Wiley & Sons, Inc. West Sussex.
- (5) Smith, J. D., 2003, Gear Noise and Vibration 2nd Ed, Marcell Dekker INC, New York.
- (6) Berry, J. E., 2003, Analysis Special Vibration Signature Analysis Time Waveforms and Related Technologies Required to Evaluate Low High and Variable Speed Machines, Technical Associates of Charlotte, P.C, Charlotte.
- (7) Crawford, A. R. and Crawford, S., 1992, The Simplified Handbook of Vibration Analysis Volume 2, Computational Systems Incorporated, Knoxville.



analysis.

Byung Su Park is the consulting engineer for vibration & noise at KTM engineering Inc. He is a vibration analyst certified with ISO 18436-2. His engineering job research interests are online monitoring system and machine health



studies are mechanical vibration and system diagnosis.

Jin Woo Kim Received his PhD degree in Mechatronics Engineering from Hanyang University, Korea, in 2007. He is a deputy general manager of KORAIL Research Institute Technology Research Department. A field of