

와전류 제동장치 설계검증을 위한 동역학적 해석

Dynamic analysis of eddy current brake system for design evaluation

정경렬* · 김정택* · 백진성* · T. Benker**

Kyung-Ryul Chung, Kyung-Taek Kim, Jin-Sung Paik and T. Benker

Key Words : 동적거동(Dynamic behavior), 와전류 제동장치(Eddy current brake system), 궤도 불규칙도(Track irregularity), 차륜-레일 단면(Wheel-rail profile), 제동력(Braking force)

ABSTRACT

In this paper, the results of an analysis of the dynamic behavior of the eddy current brake(ECB) system are presented. The measured irregularity of the track in Korean high speed line and the track irregularity given by ERRI(high level) were used for simulation. The wheel-rail profile combination were analyzed with different rail gauges. A model of the bogie with an substitute body for the carbody was implemented in the Multi-Body-Simulation Program SIMPACK. The ECB frame was modelled both as flexible body and as rigid body. Four different driving conditions were analyzed. In this study dynamic behavior in general were performed to evaluate the design of eddy current brake system and specially the effect of damper was also studied. A comparison of simulations with and without damper shows that the damper have most effect for lower speed. The simulation results will be verified by comparison with measured data from on line test and also used for improving design.

1. 서 론

전도기술개발사업(일명 G7사업)으로 수행중인 '고속 전철기술개발'사업에서 제작되어 시험운전중인 시제차량의 최고 속도는 350 km/h를 목표로 하고 있다. 동력집중식의 고속전철 차량에서 운행속도가 350 km/h인 경우에 안전한 제동거리를 확보하기 위해서는 기존의 제동장치, 즉 회생제동(전기제동), 디스크제동 및 답면제동(공기 또는 기계제동)만으로는 안전한 제동거리 확보가 어렵다. 이는 독일에서 가장 최근에 개발되어 운행되고 있는 최고속도 330 km/h의 ICE3에서도 기존의 제동장치 뿐만 아니라 와전류 제동장치를 추가로 채택한 점을 미루어 보면 알 수 있다. 개발중인 한국형 고속전철 시제차량(HSR 350X)에서도 와전류 제동장치를 추가로 부착하여 제동시스템이 구성되어 있는데 본 논문에서는 국내 최초로 독자적으로 설계되어 제작된 와전류 제동장치의 동역학적 특성검증을 위한 해석결과를 요약하여 정리하였다

다. 와전류 제동장치의 기계적인 구성요소는 중량뿐만 아니라 고속주행 중에서 강한 자력에 의해 발생하는 하중을 견뎌야 한다. 뿐만 아니라 와전류를 발생시키는 마그네트와 레일 사이의 간격이 일정간격(설계치 7 mm)으로 유지되어야 하기 때문에 마그네트를 포함, 와전류 제동장치의 프레임과 현가장치의 동적거동과 더불어 프레임의 기계적 강도는 성능을 만족시키는데 매우 중요한 영향을 미친다.

2. 시제차량 편성과 와전류 제동장치

2.1 시제차량 편성

시제차량은 그림 1에서 나타내는 바와 같이 양끝에 2대의 동력차와 2대의 동력객차가 있으며 가운데 3대의 객차로 구성되어 전체길이는 145 m가 된다. 7량의 시제차량에는 10개의 대차가 있으며 이중 6개는 동력대차이고 4개는 부수대차이다. 각 부수대차에는 와전류 제동장치가 부착되어 있다.^[1]

2.2 와전류 제동장치의 개요

* 한국생산기술연구원 시스템엔지니어링팀
E-mail : chungkr@kitech.re.kr
Tel : (041) 5898-251, Fax : (041) 5898-230
** Logomotive사 (독일)

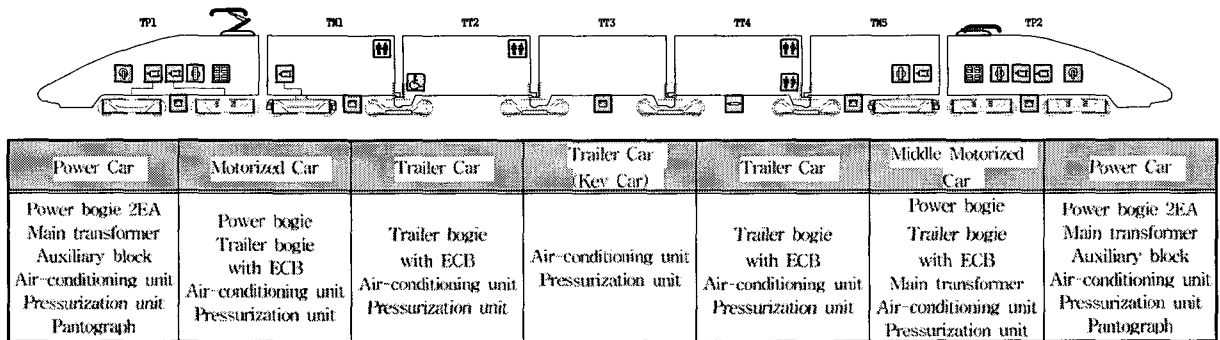


Fig.1 Formation of HSR 350X

와전류 제동장치는 레일과의 상호력을 이용하는 비접촉 제동장치로 기존의 고전적인 제동장치와 다른 작동환경과 작동조건을 가진다.

본 제동장치는 레일과 대차구조물 간의 자기력을 이용하기 때문에 제동장치와 레일간의 일정한 좁은 간격(약 7mm)을 - 특히 고속영역에서 - 유지해야 한다. 이것이 와전류 제동장치의 설계가 가지는 가장 어려운 점이다. 이를 위해 다양한 장치와 설계 기준이 제시되었다. 장치에서 가장 핵심이 되는 와전류 제동장치의 메인 프레임은 전자석을 가지런히 배치하여, 레일과 전자석의 공극을 유지할 수 있도록 한다. 전자석의 공극을 7 mm로 유지한 상태에서 전류를 전자석에 인가하면, 전자석과 레일간의 흡입력과 함께 제동력이 발생한다. 이때 와전류 제동 프레임은 흡입력과 제동력을 대차에 전달하고, 흡입력과 제동력, 그리고 대차와 와전류 제동프레임에서 전달되는 충격력에 대해 견실한 시스템을 유지가 가능하도록 설계되어야 한다.

와전류 제동 장치와 부수대차의 기계적 인터페이스는 4부분으로 나뉜다. 가장 큰 힘이 걸리는 스톱퍼 부분, 제동력을 대차에 전달하는 링크 부분, 와전류 제동 프레임 중앙에서 진동을 흡수하는 댐퍼 부분, 끝으로 제동 완해시 와전류 제동 프레임의 상승하강 작용과 고정 기능을 하는 실린더 어셈블리 부분이다. 그림 2는 와전류 제동 장치의 외형도이다.

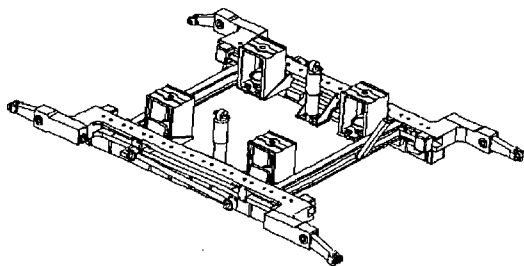


Fig.2 ECB frame layout

이상에서 언급되었던, 기계구조물 위주의 와전류 제동장치를 ECBU(eddy current brake unit)이라 칭하고, 와전류 제동장치의 전원공급장치와 제동제어기를 ECPU(eddy current brake power unit)라 한다.

ECPU의 기본 기능은 운전자의 제동지령을 받아, 요구 제동력에 해당하는 전류량을 생성, 전자석에 공급한다. 운전자의 지령은 TCN network 혹은 인통선을 통해 전달되며, 전원공급장치의 입력은 모터블럭 C/T단에서 그 전원을 받는다. 와전류 제동 프레임의 기본사양은 표 1과 같다.

Table 1 Specification of ECB frame^[3]

location	Under every trailer bogie	
Size	Length	3000 mm
	Width	1886 mm
	Height	450 mm
mass	1100 kg	
Characteristic of ECB structure	Natural Frequency (bending mode)	17-20 Hz
	Damping coefficient	100 kNs/m * 2 EA
Operation speed	80 km/h (from 150 km/h the current is reduced)	
Air gap	7 mm	

3. 동역학 해석모델 및 조건

3.1 동역학 해석 모델링

와전류 제동장치의 동적거동 특성을 분석하기 위해 상용 소프트웨어인 SIMPACK을 사용하였고, 구성모델과 실제 취부상태는 그림 3에 나타나 있다.

또한 구성모델의 동적특성치는 표 2-3에 ECB 프레임 및 대차의 현가특성치로 구분하여 나타내었다.

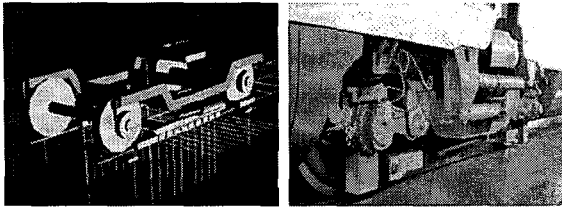


Fig. 3 The bogie with rigid ECB frame and real attachment photograph
(X : 우측상부방향, Y : 우측횡방향, Z : 하부방향)

Table 2 Characteristics of force elements in ECB frame^{[4][5]}
(Unit : Stiffness - kN/mm, Damping - kNs/m)

Position	Force elements	Stiffness & Damping	Remarks	
In upper position	4 Cylinders with stiffness	stiffness(X)	2.23	Isovibration rubber
		stiffness(Y)	2.23	
		stiffness(Z)	1.08	
	2 Dampers with stiffness and damping	stiffness	30	
		damping	42.24	
		2 Links with stiffness and damping	stiffness	35
damping			10	
In the braking position	2 Dampers with stiffness and damping	stiffness	30	
		damping	42.24	
	2 Links with stiffness and damping	stiffness	35	
		damping	10	
		stiffness(Y)	1.34	
	4 bearings with stiffness and damping	stiffness(Z) if in contact	3.925	For rigid frame
			153	For flexible frame
		damping(Z) if in contact	20	For rigid frame
			82.048	For flexible frame
	20 magnets	with braking forces(X)		Reference fig.4
with attracting forces(Z)			Reference fig.4	

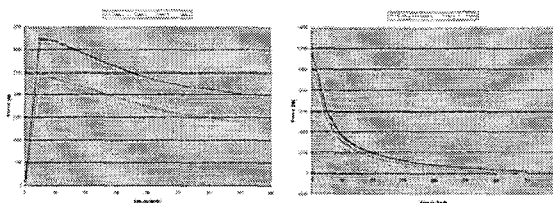


Fig.4 The braking and attracting force

3.2 철 및 레일 형상 모델링

휠 모델은 KTX 열차의 형상인 NF F 01-112 따라 프로파일 형상을 모델링하였고, 레일 모델링은 고속전철(KTX)용 신선에 적용하고 있는 UIC60 레일에 따라 프로파일 형상을 모델링하여 하였다. 철/레일 접촉의 특성은 그림 5에 나타나 있다.

Table 3 Characteristics of force elements in the bogie
(Unit : Stiffness - kN/mm, Damping - kNs/m)

Force elements	Stiffness & Damping	Remarks	
4 Primary springs with stiffness and damping	stiffness(X)	50	Resilient joint
	stiffness(Y)	8	Resilient joint
	stiffness(Z)	0.525	Iner-Outer coil spring
	damping(X)	20	
4 Primary dampers with damping	damping	5	
2 Air spring with stiffness and damping	stiffness(X)		spline(nonlinear)
	stiffness(Y)		spline(nonlinear)
	stiffness(Z)	0.303	
	damping(Y)	10	
	damping(Z)	100	
2 Yaw dampers with damping	damping	240	
1 Anti-roll bar with torsion stiffness	stiffness	3.8	[MNm/rad]

3.3 궤도 불규칙도

동역학 해석시에 유럽(ERRI B 176, Gottingen-Hanover 구간)에서의 궤도 데이터와 KTX의 시험라인에서 계측한 궤도 데이터를 적용하여 그 결과를 비교/분석하였다. 그림 6에서 보이는 것과 같이 거리에 따른 수직 방향 변위가 상당한 차이가 나는 것을 알 수 있다.

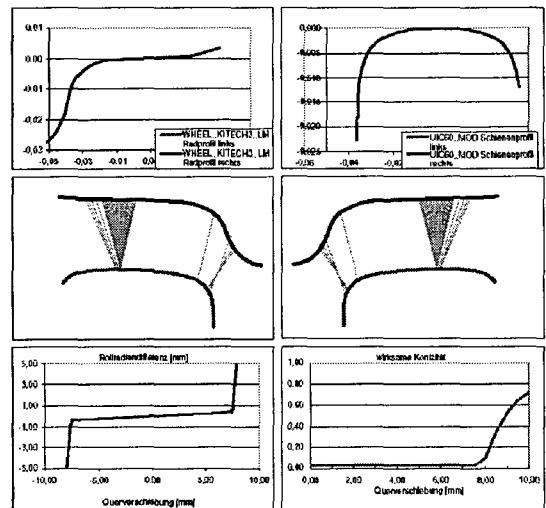


Fig.5 Pair of profiles, wheel : NF F 01-112, rail : UIC 60, gauge : 1435 mm

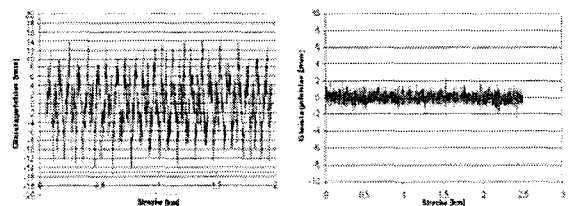


Fig.6 The comparison of track irregularities(vertical level) of ERRI & KTX high speed test line

4. 해석결과

4.1 선형해석⁶⁾

ECB 프레임의 강성모델과 탄성모델로 모델링하여 고유모드와 고유주파수를 비교하였다. 그림 7은 각각의 모델형상을 보여주며, 표 4는 고유주파수를 나타내었다.

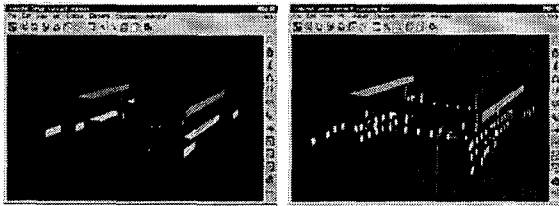


Fig.7 The linear model with rigid & flexible ECB frame

Table 4 The natural damping & frequency of rigid & flexible ECB frame

Rigid ECB frame		Flexible ECB frame	
Nat. Damping	Nat. Frequency	Nat. Damping	Nat. Frequency
0.4092	5.6504	0.0200	11.8228
0.0000	6.2547	0.0200	15.4355
0.5877	7.7322	0.0200	54.5812
0.0033	13.8287	0.0200	66.8954
0.0002	35.4675	0.0200	67.2701
0.0002	41.2018	0.0200	71.8092

4.2 시간영역해석

시간영역해석은 각기 다른 궤도데이터를 적용하여 수행하였으며 대부분의 해석결과는 KTX 시험라인의 데이터를 적용하였고 표 5에서 보이는 운용조건중 변이조건은 ERRI의 궤도 데이터만 적용하였다.

Table 5 Time integration analysis conditions

Items	Conditions
Speed	150, 250, 300, 350 km/h
ECB Frame driving conditions	Upper position(KTX) Braking position with brake(KTX, ERRI) Braking position without brake(KTX, ERRI) Transition from upper to lower position(ERRI)
Comparison items	Comparison rigid frame - flexible frame(KTX) Comparison with damper - without damper(KTX)
Data filtering	Max/Min[99.85/0.15%], rms values

* KTX : KTX 시험라인의 궤도데이터를 적용

ERRI : ERRI의 궤도데이터를 적용

(1) 제동위치의 경우(제동력 인가)

350km/h 주행시, 제동이 작용되었을 때 제동위치에서의 축베어링과 ECB 프레임의 중앙에서의 가속도(X, Y 방향)는 다음과 같다.(상 : KTX, 하 : ERRI)

해석결과를 보면, 축베어링과 ECB 프레임의 중앙에서의 X, Y방향의 가속도성분 모두 ERRI 궤도 데이터를 적용했을 때가 거의 두배 이상 큰 것을 알 수 있다.

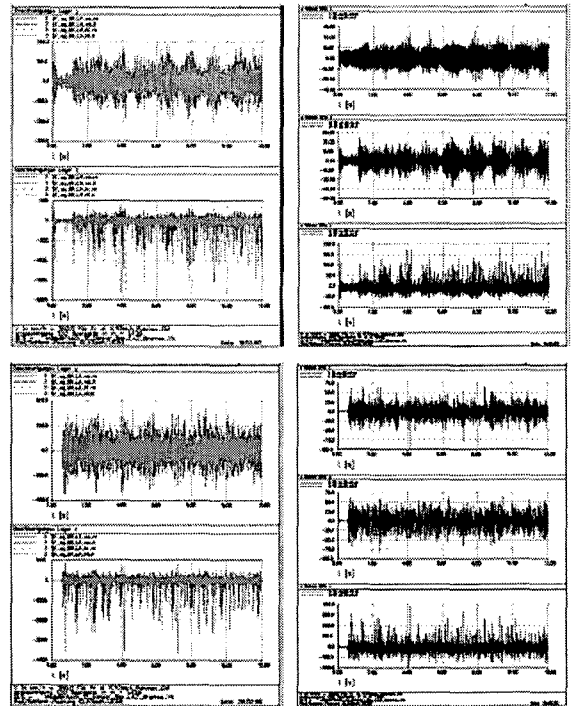


Fig.8 The acceleration of wheelset & ECB frame center when speed is 350 km/h

350km/h 주행시, 제동이 작용되었을 때 축베어링의 하중(X, Y, Z방향)은 다음과 같다.(좌 : KTX, 우 : ERRI)

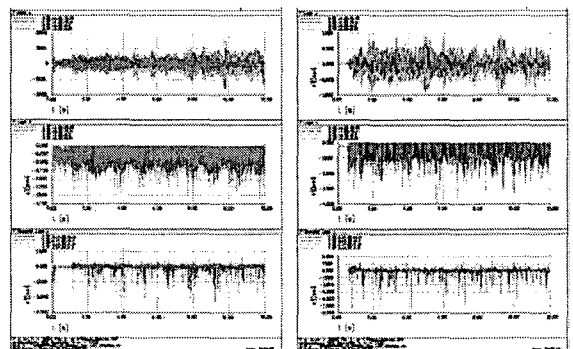
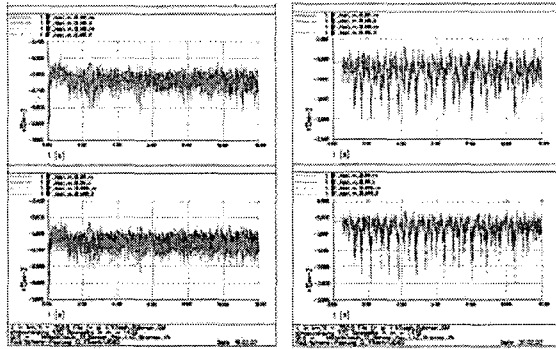


Fig.9 The forces of wheelset when speed is 350 km/h

하중의 경우도 가속도 결과와 마찬가지로 ERRI 궤도 데이터를 적용했을때가 2배 정도 큰 것을 알 수 있다. 고속영역에서의 제동시 축베어링 부위의 높은 가속도와

하중은 ECB 프레임의 리프팅과 피칭 모드에 의한 것으로 판단되면 이는 ECB arm에 피로문제를 야기시킬 수 있다.

350km/h 주행시, 제동이 작용되었을 때 레일과 ECB 마그네트의 간격(마그네트 1, 10)은 다음과 같다.(좌 : KTX, 우 : ERRI)



* Magnet 1 : The nearest magnet from ECB frame center,
Magnet 10 : The furthest magnet from ECB frame center

Fig.10 The distance between railand magnets when speed is 350 km/h

가속도와 하중의 경우와 달리 레일과 마그네트와의 간격은 KTX 레도 데이터를 적용했을 때가 2배이상 큰 것을 알 수가 있다.

댐퍼의 효과적인 작용범위는 저속영역에서이다. 다음 결과는 ECB 프레임 중앙에서의 가속도(X, Y, Z방향)를 비교한 것이다.

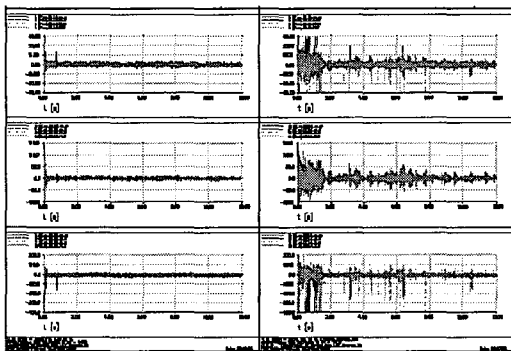


Fig.11 The comparision of acceleration of frame with damper and without damper when speed is 150 km/h

저속영역(150 km/h)에서의 댐퍼는 프레임에서의 가속도를 상당히 잘 흡수하는 것을 알 수 있는데 이는 프레임의 리프팅을 억제하는 효과가 있는 것으로 보이나 고속영역(350 km/h)에서 비교적 억제효과가 적은 것을 알 수 있으며 따라서 댐퍼의 유무는 고속영역에서 가속도 측면에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

그림 12는 와진류 제동장치 프레임의 모델차이 즉, 강성체와 탄성체의 가속도(X, Y, Z방향)를 비교한 결과이다.

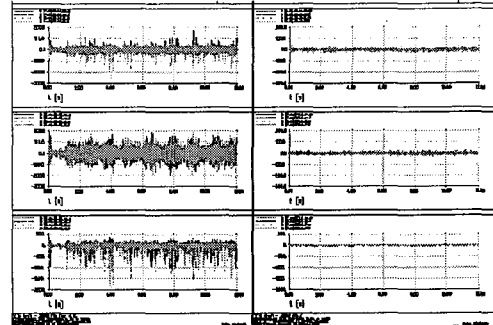


Fig.12 The comparision of acceleration of flexible frame and rigid frame when speed is 350 km/h

저속영역(150 km/h)에서의 가속도 및 하중은 프레임의 리프팅 모드가 나타나지 않아 큰 차이를 보이지 않지만 Y, Z방향은 탄성 프레임이, X방향으로는 강성 프레임이 약간 큰 것으로 나타났고 감쇄력은 탄성 프레임의 경우가 더 큰 것을 알 수 있었다. 고속영역(350 km/h)에서는 특히, Z방향으로 다소 큰 차이를 나타냈는데 이는 강성프레임의 베어링 강성이 훨씬 소프트하기 때문이다.

(2) 제동위치의 경우(제동력 완해)

그림 13은 제동력 완해상태에서 제동위치에서의 가속도 결과를 해석하기 위한 제동프레임의 가속도 위치를 나타내고 있다.

그림 14의 결과를 보면, ERRI의 레도 데이터를 적용했을 때가 가속도 레벨이 큰 것으로 나타났다.

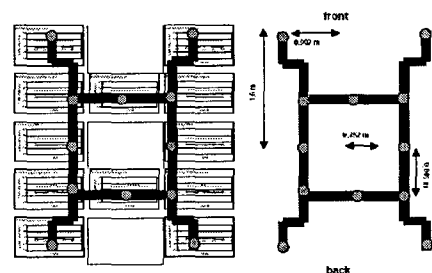


Fig.13 Acceleration sensor positions at the ECB frame

(3) 비제동위치의 경우

그림 15는 비제동위치에서의 프레임 각 부위의 가속도를 나타낸 것으로 제동위치의 결과와 비교해 보면, 가속도 레벨이 적은 것으로 알 수 있다. 이는 프레임의 리

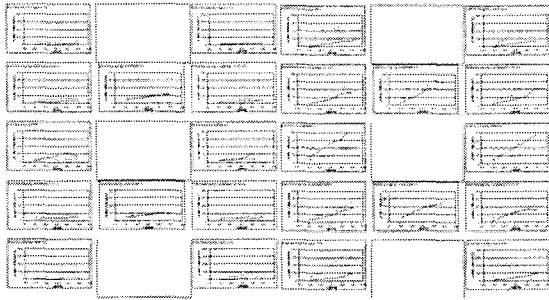


Fig.14 Acceleration results at the ECB frame

포팅 모드가 가속도 레벨에 영향을 크게 나타나는 것을 알 수 있고 1차 원가요소가 궤도의 가진력을 잘 흡수하고 있는 것을 알 수 있다.

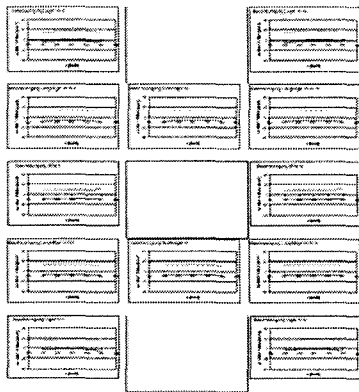


Fig.15 Acceleration results at the ECB frame

(4) Comparison of KTX and ETRI track irregularities

KTX 시험라인에서의 주행결과는 ETRI에서의 가속도나 하중면에서 거의 절반에 가까운 결과를 나타냈으나 레일과 프레임간의 간격은 2배 정도의 결과를 나타내었다.

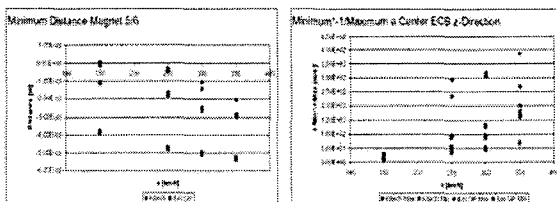


Fig.17 Minimum distance of rail & ECB frame and vertical acceleration of center ECB frame

5. 결론 및 제언

본 논문에서는 시제차량 HSR 350X 대차의 와전류 제동장치 프레임을 강성체와 탄성체로 모델링하여 이리 운용조건하에서 다물체 동역학 해석을 통한 동적거동을 비교/분석하였다.

ERRI의 궤도에서는 고속에서 제동시 와전류 프레임의 축베어링에서의 리프팅과 피칭에 의한 높은 가속도와 하중을 보이고 있어 프레임 암의 피로문제를 야기할 수 있다고 판단되었다. KTX 시험라인의 궤도에서는 ETRI 궤도에서의 가속도나 하중의 절반정도가 되나 350 km/h의 고속주행시 레일과 와전류 프레임의 간격이 2배 정도 커지는 것을 알 수 있었다.

댐퍼의 유무에 따른 시뮬레이션 결과 저속에서 큰 영향을 미친다. 그러나, 고속에서는 프레임의 리프팅에 의한 고주파수 가속도의 영향으로 댐퍼가 효과적으로 가속도를 흡수하지 못하는 것을 알 수 있다. 그러나, 고속영역에서는 레일과 프레임의 간격을 유지하는데 좋은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

완해상태에서의 가속도와 하중은 제동시보다 훨씬 적은 것을 알 수 있는데 이는 1차 원가장치에 의해 궤도 불규칙도의 영향이 적기 때문이다.

후 기

본 연구는 G7 고속철기술개발사업의 "차량시스템 엔지니어링기술개발" 과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 정경렬 외, 2001, "차량시스템 엔지니어링기술개발", 한국생산기술연구원
- (2) 김전호, 1997, "철도시스템의 이해", 자작 아카데미 pp. 132-133
- (3) 유진기공업, 2001, "The Functional Spec.", 설계자료
- (4) 한국생산기술연구원, 2001, "Technical Data for Dynamics Eng. Service", 내부기술자료
- (5) 한국생산기술연구원, 2001, "Drawing List for Dynamics Eng. Service", 내부기술자료
- (6) Logomotive, 2001, "Dynamic Analysis of Eddy Current brake frame", Technical Report : Doc. No. RW0-202-221100