

한국형 고속열차를 활용한 기존선 전철화 구간에서 고속열차 운행의 적합성 평가

Test and evaluation on the suitability of operating high speed train in electrified conventional line through test run of HSR-350x

목진용* 김영국** 김기환** 조민영***
Mok Jin-Yong, Kim Young-Guk, Kim Ki-Hwan, Cho Min-Young

ABSTRACT

The KTX, which have opened the revenue service in April 2004, is operating in Kyoung-Bu high-speed line and electrified conventional Ho-Nam line, and the more the electrification are enlarged, the more the requirement of operating of high speed train would be increased.

In this paper, the result of test run and evaluation on the suitability of operating high speed train in electrified conventional line between Dae-jeon and East Dae-gu was reviewed.

Evaluation and analysis was executed in specific categories, such as operation & running performance of the train considering vibration characteristics based on UIC 518, ride comfort and current collection, and response sensitivity of ATS device for signalling from track facility.

The result of this running test was evaluated and considered as a good practice for revenue operation of high speed train in electrified conventional line between Dae-jeon and Dae-gu.

1. 서론

2004년 4월 개통 이후 3년 만에 이용객 1억명을 돌파한 KTX 고속열차는 현재 서울-동대구 사이의 고속선 구간과 동대구-부산 간, 서대전-목포 간 전철화 된 기존선 구간을 연결하여 운행 중에 있다.

향후 동대구-부산 간 경부고속철도 2단계 고속선 구간의 완전개통과 호남고속철도가 완공되기까지는 현재와 같이 KTX 고속열차가 고속선과 기존선 전철화 구간을 연결하여 운행하는 패턴은 계속 확대될 것으로 보이며, 기존 재래선 구간에 대한 전철화 공사가 점차 확대됨에 따라 향후 KTX 고속열차의 기존선 운행에 대한 필요성과 요구는 더욱 증대될 것으로 보인다.

본 연구는 2007년 전철화 공사가 완공된 경부선의 대전-동대구 간 기존선로 구간에서 철도 시설물에 대한 고속열차의 운행 적합성을 평가하기 위하여 코레일과 공동으로 한국형 고속열차를 활용하여 추진한 시험운행 결과를 분석하고 기존선 구간에서 고속열차가 운행하기 위한 운행 적합성을 평가, 제시하였다. 고속열차의 운행적합성 평가는 운전시각 및 증속 시 부하전류량 평가 등 운전성능 분야, UIC 518 Code상 가속도 특성 기준으로 본 차량 진동특성, 승차감, 등가 방해전류 특성 및 집전성능 평가 등 차량 성능 분야와 신호분야로 구분해 주행시험을 실시하고 측정 결과를 분석하여 해당분야 규격 또는 기준에 따라 평가하였다. 본 연구의 시험운행 측정자료 분석 결과, 전체 평가항목에 대하여 운행적합성 측면에서 양호한 특성을 갖춘 것으로 평가되었으며, 향후 기존선 구간에 고속열차의 영업운행 확대계획 수립 시 기술적 참고자료로 활용될 수 있도록 연구 결과를 제시하였다.

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : jymok@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5622 FAX : (031) 460-5649

** 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

*** 코레일(한국철도공사), 여객사업본부

2. 본 론

2.1 기존선 운행적합성 시험의 개요

본 연구가 이루어진 기존선 운행적합성 시험은 경부선의 대전-동대구 간 기존선 선로의 전철화 공사가 2007년 초반 종료됨에 따라, 이 구간에 KTX 열차의 영업운행 계획을 검토하면서 영업용 KTX 열차의 본격 운행에 앞서 시설물과 고속열차의 운행 적합성을 판단하는 시운전 계획이 검토되었다. 즉, 영업용 KTX 고속열차를 직접 투입하기에 앞서 시험열차인 한국형 고속열차를 시험 운행함으로써 기존 선로의 시설물과 고속열차의 적합성을 검증하는 시운전 시험이 필요하였다. 본 주행시험은 일반 여객열차의 운행이 종료되는 24시 이후부터 04시 이전까지 진행되었으며, 시험측정 항목은 증속 시 부하전류량 측정 등 운전 분야, 진동특성, 승차감, 등가 방해전류 특성 등 차량성능 분야 등 3개 분야, 10개 항목으로 측정시험을 실시하였다. 시험측정 항목 중 열차의 운행적합성과 관련한 주요 항목의 측정 결과는 다음과 같았다.

2.2 운행적합성 시험 결과

2.2.1 열차의 부하전류 특성

대전-동대구 구간에서 고속열차의 운행 중 부하전류 측정시험은 한국형고속열차에 탑재된 4대의 모터 블럭을 기동하는 조건으로 열차의 속도를 각각 90, 110, 135km/h로 운행할 때 주 변압기 1차 측에서 실효치 부하전류를 측정하였으며, 본 시험에는 Fluke社의 Power Quality Recorder 1760 Topas 장비를 사용하였다. 대전-동대구 구간에서 운행하는 고속열차가 소비하는 만 편성당 부하전류 측정시험 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 요약할 수 있다. 표 1에서 보이는 바와 같이 고속열차의 속도가 증가함에 따라 부하전류도 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 그림 1은 일부구간에서 측정된 부하전류 상세를, 그림 2는 전체구간에서 측정된 부하전류를 나타낸 것으로서 이를 통해 열차운행 중 부하전류 증가량은 전반적으로 전 구간에서 적정한 것으로 평가되었다.

표 1. 부하전류 측정시험 결과

시험운행 구간 (열차속도)	부하 전류(A)	
	최대 값	평균 값
대전 ⇨ 동대구(90km/h)	98.48	32.02
동대구 ⇨ 대전(110km/h)	124.01	36.64
대전 ⇨ 동대구(135km/h)	144.54	48.39
동대구 ⇨ 대전(135km/h)	146.68	45.72

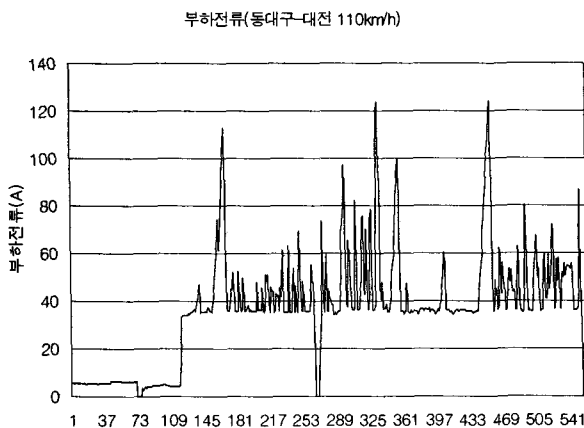


그림 1. 부하전류 (동대구⇨대전, 110km/h)

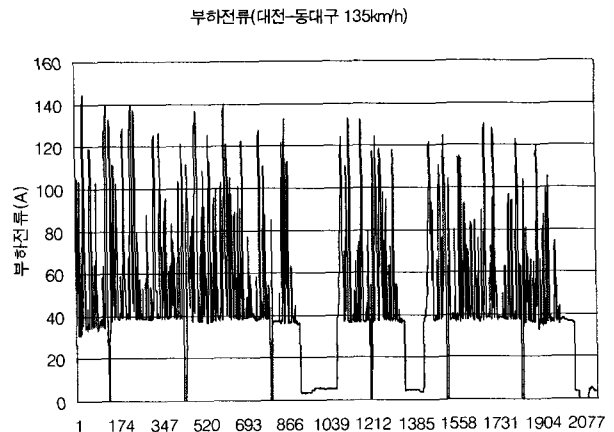


그림 2. 부하전류 (대전⇨동대구, 135km/h)

2.2.2 열차의 진동 특성

일반적으로 차량의 진동특성은 UIC 518에서 정한 내용 중 일부 가속도 관련 항목을 적용한 기준으로 평가하며, 안전성 관점의 기준으로 대차 횡 가속도는 $10.44m/s^2$ 이하 (10Hz Low Pass Filter 적용 시), 차체 횡 가속도는 $3m/s^2$ 이하 (6Hz Low Pass Filter 적용 시), 차체 상하 가속도는 $3m/s^2$ 이하 (0.4~4.0 Hz Band Pass filter 적용 시)를 적용하여 평가한다. 또 주행거동 관점에서는 차체 상하·횡 가속도 (0.4~10.0Hz Band Pass Filter 적용 시)로 평가할 때, 최대값 기준 $2.5m/s^2$ 이하, RMS값 기준으로는 횡 방향 $0.5m/s^2$ 이하, 상하 방향 $0.75m/s^2$ 이하를 차량의 진동특성 평가의 기준으로 적용할 수 있다.

본 시험운행을 통해 측정된 결과를 분석한 결과, 한국형 고속열차가 대전~동대구 간 기존선 구간을 주행속도 135km/h까지 주행할 때 UIC 518 규격을 준용한 진동특성 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

표 2에 고속열차가 주행속도 135km/h로 주행할 때 진동특성을 측정, 평가한 결과를 요약하여 나타내었으며 상세한 진동특성의 분석결과 자료 예를 그림 3~6에 나타내었다.

표 2. 구간별 진동특성 평가 결과

(a) 대전 - 동대구(하행선) 구간

항 목		기 준(m/s^2)		측정 결과(m/s^2)	
안전성	대차 횡 가속도	10.4423		5.6246	
	차체 횡 가속도	3.0		1.3886	
	차체 상하 가속도	3.0		0.3882	
		Max. 기준	R.M.S 기준	Max. 기준	R.M.S 기준
주행거동	차체 횡 가속도	2.5	0.5	0.3800	0.1063
	차체 상하 가속도	2.5	0.75	0.5178	0.1527

(a) 동대구 - 대전(상행선) 구간

항 목		기 준(m/s^2)		측정 결과(m/s^2)	
안전성	대차 횡 가속도	10.4423		5.8394	
	차체 횡 가속도	3.0		1.3574	
	차체 상하 가속도	3.0		0.3916	
		Max. 기준	R.M.S 기준	Max. 기준	R.M.S 기준
주행거동	차체 횡 가속도	2.5	0.5	0.3914	0.1131
	차체 상하 가속도	2.5	0.75	0.5612	0.1718

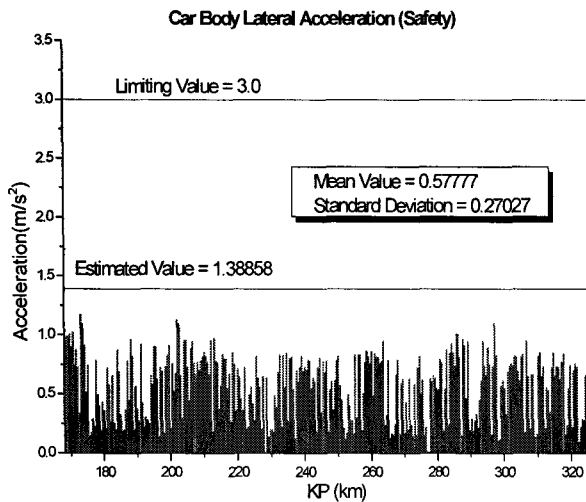


그림 3. 차체 횡 진동 특성 (안전성 관점)

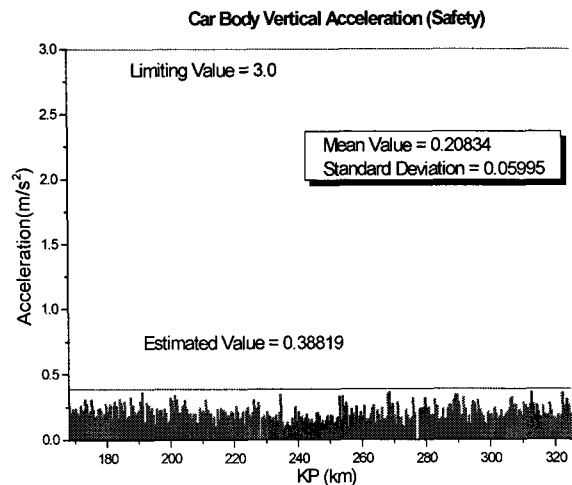


그림 4. 차체 상하진동 특성 (안전성 관점)

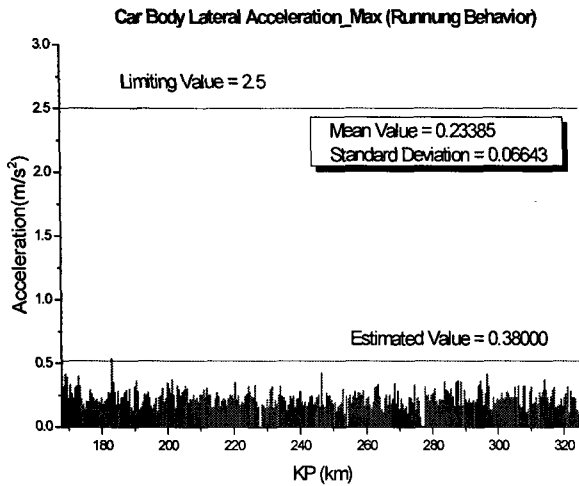


그림 5. 차체 횡 진동 특성 (주행거동 관점 / 최대값)

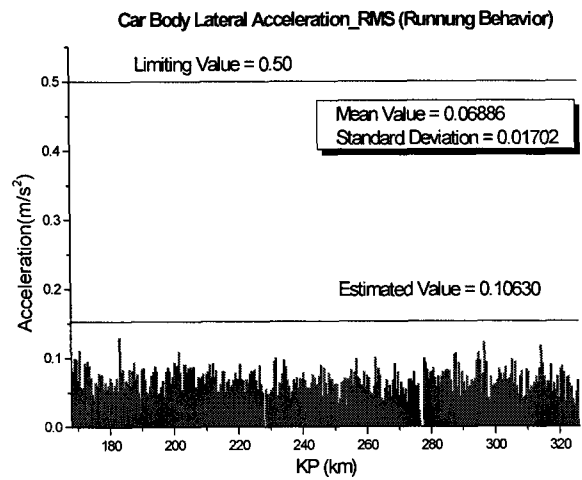


그림 6. 차체 횡 진동 특성 (주행거동 관점 / RMS)

2.2.3 열차의 승차감 특성

승차감 측정은 “철도 승차감 측정방법 (철도기술연구보, Vol. 23, No. 1, 1989)”을 준용하여 약 5분 간격의 승차감 레벨을 측정하였다. 한국형 고속열차가 대전~동대구 구간을 속도 135km/h까지 주행할 때 승차감을 측정 평가한 결과, 승차감 레벨은 열차속도 135km/h까지 "매우 안락"기준 이내로 양호하게 평가되었다.

표 3에 승차감 측정 평가 결과를 정리하였으며, 승차감 분석결과 자료 예를 그림 3~6에 나타내었다.

표 3. 대전-동대구 구간 승차감 평가 결과

구분	승차감 레벨(최대치)				평가 결과
	하행	상행	하행	상행	
최고 속도	90km/h	110km/h	135km/h	135km/h	매우 안락 (기준 103 dB 이하)
상하 방향	100.3dB	100.3dB	101.0dB	101.6dB	
횡 방향	93.1dB	93.1dB	98.1dB	93.8dB	
전후 방향	87.5dB	87.5dB	89.5dB	87.5dB	

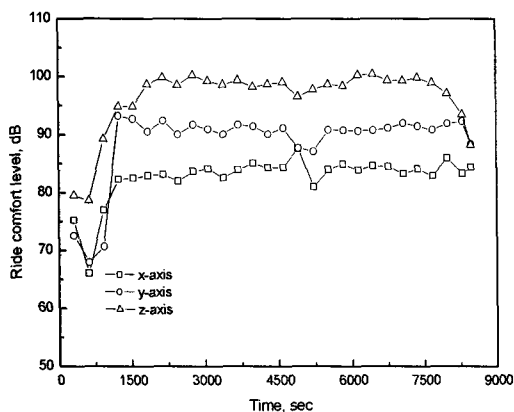


그림 7. 승차감 분석 (대전→동대구)

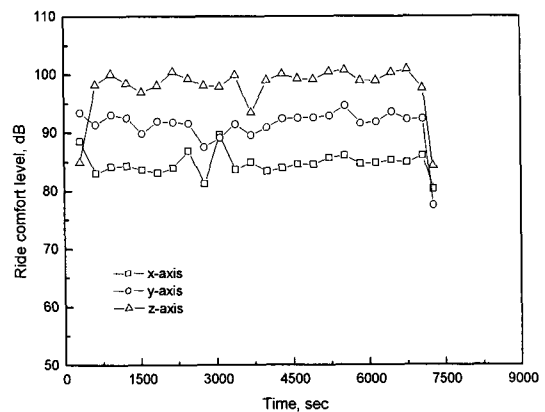


그림 8. 승차감 분석 (동대구→대전)

2.2.4 열차의 등가 방해전류 특성

한국형 고속열차의 등가 방해전류 평가는 4대의 모터블럭으로 기동하며 각각 90, 110, 135km/h로 주행할 때 주변압기 1차 측에서 부하전류를 측정하고 후처리를 통해 등가 방해전류를 계산하였다. 이 측정 시험과 고조파 계산에는 Fluke社의 Power Quality Recorder 1760 Topas 장비를 사용하였으며, 등가 방해전류 산출에는 식(1)을 사용하였다. 또한 등가 방해전류의 평가기준은 한국전력공사에서 운영하는 “영업 업무처리지침(1990.7.1)” 상의 고조파 허용 기준치인 3.8(A)를 적용하였다.

$$J_m = S_m I_n \quad (1)$$

$$J_p = \sqrt{\sum (J_m)^2}$$

여기서, J_m 은 각 고조파별 등가방해전류, S_m 은 국제전기통신연합(ITU)의 잡음평가계수, I_n 은 50차까지의 고조파 전류, J_p 는 등가 방해전류

대전-동대구 구간에서 반 편성당 등가방해전류 시험 결과를 표 4에 요약하였으며, 그림 9~10에는 구간별 상세 등가방해전류 측정결과 예를 나타내었다.

표 4. 대전-동대구 구간의 등가방해전류 시험 결과

시험운영 조건	등가 방해전류 (A)		
	최대	평균	최소
동대구->대전(110km/h)	2.45	1.73	0.07
대전->동대구(135km/h)	3.12	1.26	0.10
동대구->대전(135km/h)	3.00	1.47	0.07

한국형 고속열차가 대전-동대구 구간에서 운행할 때 등가방해전류 시험 결과를 분석한 결과, 열차의 등가방해전류는 KTX 열차의 특성과 미세한 차이는 있을 수 있으나, 전 구간에서 한국전력공사가 운용 중인 고조파 허용 기준치의 이하임을 확인하였다. 순간적으로 1초 미만의 짧은 시간동안 기준치를 상회하는 경우에는 유도장애에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있으므로 평가에 고려하지 않았다.

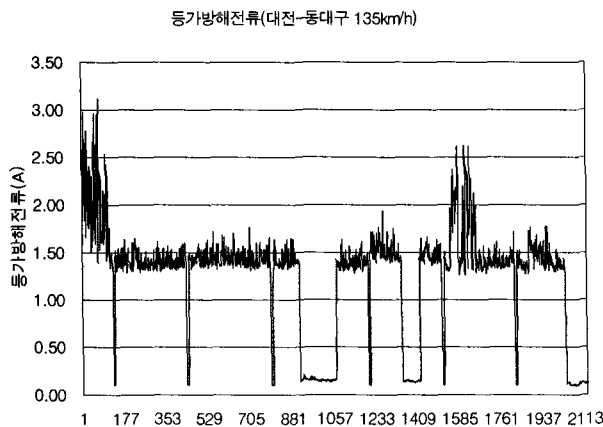


그림 9. 등가방해전류(대전→동대구,135km/h)

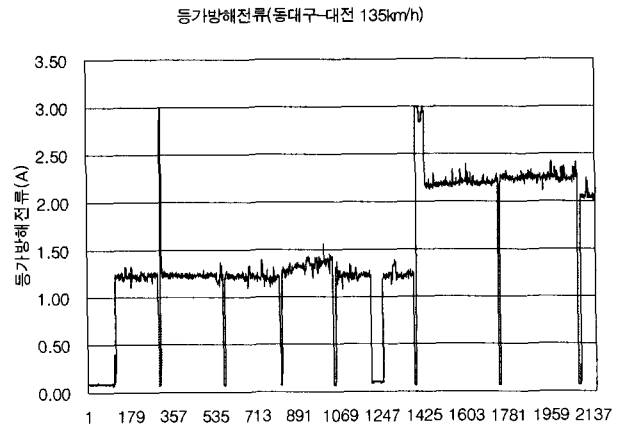


그림 10. 등가방해전류(동대구→대전,135km/h)

2.2.5 열차의 집전 특성

대전-동대구 구간에서 한국형 고속열차의 집전특성 시험은 한국형 고속열차에 장착된 집전 측정장비를 활용하여 운행 중 판도그래프와 전차선 간 접촉력을 측정하였으며, 집전특성의 평가는 BS EN 50119 규격에 정의된 동적 평균접촉력 관점의 집전품질 평가기준을 준용하여 평가하였다. 집전특성 시험측정 결과를 평가한 결과, 통계적 평균접촉력(F_{mean})과 3배 표준편차(3σ)의 차로 본 집전품질은 상/하행 선로 모두 양호한 수준으로 평가되었으며, 순간 최대접촉력의 경우도 기준인 300N을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 표 5에 속도별 집전품질 평가결과를 정리하였으며 그림 11, 그림 12에는 집전특성 평가를 위한 평균접촉력 분석 결과를, 그림 13에 순간 최대접촉력 분석 결과를 나타내었다.

표 5. 대전-동대구 구간의 집전품질 시험 결과

시험선로 구분	열차 속도	F_{mean} (N)	$F_{mean} - 3\sigma$ (N)	집전품질 평가 기준
대전-동대구(하행)	90 km/h	86~90	50 N 이상	$40 \leq F_{mean} - 3\sigma$: 양호
대구-동대구(상행)	110 km/h	91~95	60 N 이상	"
대전-동대구(하행)	135 km/h	103~110	55 N 이상	"
대구-동대구(상행)	135 km/h	95~105	55 N 이상	"

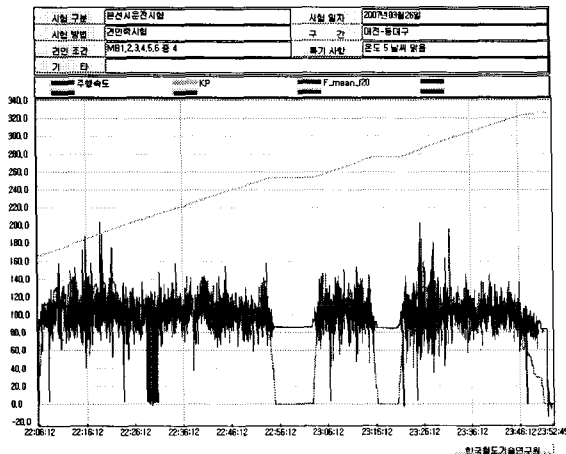


그림 11. 전체 접촉력 (135km/h, 하행선)

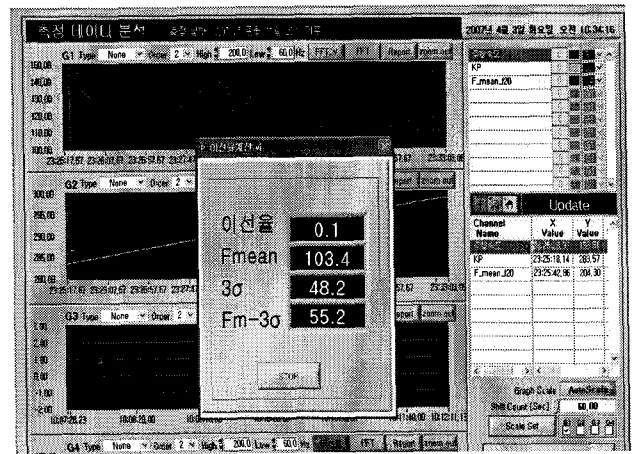


그림 12. 집전품질 분석 결과 (135km/h, 하행선)

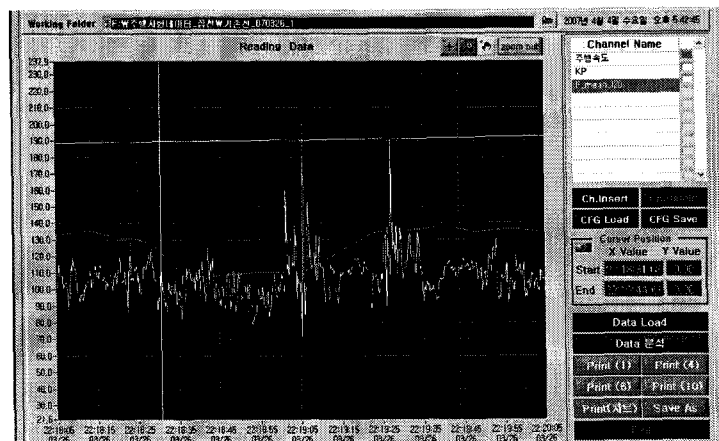


그림 13. 순간 접촉력 분석 (135km/h, 하행선)

3. 결론

본 연구에서 한국형 고속열차의 시험운행을 통한 대전-동대구 간 기존선 전철화 구간에서 운전성능, 차량성능 분야 등 기존선로에서 고속열차의 운행적합성과 관련한 주요 특성을 평가한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대전-동대구 구간에서 고속열차의 부하전류 측정시험 결과, 열차운행 중 부하전류 증가량은 전반적으로 전 구간에서 적정한 것으로 평가되며, 이와 관련한 유도장애 특성의 경우, 한국형 고속열차의 등가 방해전류는 대전-동대구 구간에서 한국전력공사의 고조파 허용 기준치 이하로 양호함을 확인하였다.
- (2) 한국형 고속열차는 대전~동대구 간 기존선 구간을 주행속도 135km/h까지 주행할 때 UIC 518 규격을 준용한 진동특성 기준에 대하여 안전성 관점과 주행거동 관점에서 모두 평가기준을 만족하는 양호한 수준의 진동특성을 확인하였으며, 승차감 특성도 열차속도 135km/h까지 "매우 안락" 기준 이내로 양호한 수준으로 분석되었다.
- (3) 한국형 고속열차가 대전-동대구 구간에서 운행할 때의 집전특성 시험 결과, BS EN 50119 규격에 정한 통계적 평균접촉력(F_{mean})과 3배 표준편차(3σ)의 차로 본 집전품질은 상/하행 선로에서 모두 양호한 수준이며 순간 최대접촉력도 기준 이내의 특성을 가지는 것으로 평가되었다.

따라서 한국형 고속열차를 활용하여 시험한 대전-동대구 간 기존선 구간에서 고속열차의 운행적합성은 종합적으로 양호한 수준으로 평가되며, 본 연구에서 제시한 시험운행 결과와 분석 자료는 고속철도 시설 유지관리 기술 분야와 고속차량의 기존선 운영을 위한 참고 자료로서 활용이 가능할 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 코레일 관계자 여러분들의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국철도기술연구원, "열차시험 및 성능평가 기술개발" 연차보고서, 2006.
2. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 최종보고서", 2002.
3. M. Ikeda and T. Usuda, "Study on the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire", RTRI Report Vol. 14, No. 6, 2000.
4. Korea High Speed Rail, "Qualification Test Procedure Train-set Pantograph Test", 2001.
5. 한국전력공사, "영업업무처리지침", 1990.
6. International Union of Railways, "UIC Code 518"
7. 철도청, "철도기술연구보", Vol. 23, No. 1, 1989
8. BS EN 50119, European Committee For Electro-technical Standardization