

상태감시시스템을 이용한 팬터그래프-전차선로 동특성 분석에 관한 연구

Analysis for the dynamic responses of pantograph-overhead contact line coupled system by using a condition monitoring system

조용현† · 박영, 이기원, 권삼영, 박현준**

Yong Hyeon Cho, Young Park, Kiwon Lee, Samyoung Kwon, and Hyunjune Park

Key Words : Overhead contact lines, pantograph, condition monitoring, contact wire

ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the dynamic responses of pantograph-overhead contact line coupled system by using a condition monitoring system. The monitoring items are strain, vertical displacement and acceleration of a contact wire. Both strain and vertical displacement in the contact wire depends on uplift force and train velocity. Measurement of acceleration shows that the passage of the pantograph gives an impact force to a hard point on a contact wire.

1. 서론

KTX 와 같은 고속전철은 주행에 필요한 에너지를 가공 전차선로로부터 받는다. 차량 지붕에 탑재된 팬터그래프(Pantograph)는 전차선과의 접촉을 위하여 전차선(Contact wire)을 압상하면서 주행하므로 전차선로(Overhead contact lines)에 진동을 발생시킨다. 열차 운행으로 인한 과도한 진동으로 인하여 전차선로가 종종 고장나거나 파손되는 일이 발생한다.

최근 유럽에서는 열차 통과로 인한 전차선로의 영향을 평가하기 위하여 전차선로에 상태감시시스템을 설치하여 팬터그래프-전차선로의 동특성을 실시간으로 측정하는 연구를 수행하고 있다 [1, 2]. 국내에서는 한국철도기술연구원에서 팬터그래프-전차선로의 동특성 측정을 위한 상태감시시스템을 개발하여 기존선과 고속선에 적용하는 방안을 연구하고 있다 [3, 4].

본 연구의 목적은 실시간 상태감시시스템을 사용하여 열차가 통과할 때의 전차선로 동특성을 측정하여 동적인 변위, 변형을 그리고 가속도의 특성을 분석하는 것이다. 전차선로 동특성 분석을 통하여 향후 전차선로의 상태감시를 하기 위한 방안을 모색하고자 한다.

2 장에서는 이동하는 팬터그래프에 의한 전차선의 동특성을 소개하고, 3 장에서는 전차선로 동특성 모니터링시스템의 구성에 대하여 논하고, 4 장에서는

열차가 통과할 때 측정된 전차선로 동특성 측정결과를 분석하고 5 장에서는 본 연구에 대한 결론을 맺도록 하겠다.

2. 전차선 동특성 이론

전차선을 그림 1 에 나타낸 바와 같이 장력이 작용하는 단순지지 보로 가정하자. 팬터그래프를 하중 P 로 나타낸다면 속도 v 로 이동하는 팬터그래프에 의한 전차선의 운동방정식은 다음과 같다.

$$EIw^{IV} - Tw'' + \rho\ddot{w} = P\delta(x - vt) \quad (1)$$

여기서 P 는 수직하중, v 는 속도, EI 는 굽힘강성, ρ 은 보의 선밀도이고 w 는 보의 수직 변위를 나타낸다.

초기조건으로 보의 변위와 속도를 0 으로 두면 보의 변위는 다음과 같이 쓸 수 있다 [5].

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2P/S}{EI(j\pi/S)^4 + T(j\pi/S)^2 - \rho(j\pi v/S)^2} \sin \frac{j\pi vt}{S} \sin \frac{j\pi x}{S} \quad (2)$$

여기서 S 는 경간 길이, T 는 장력이다.

전차선의 변위는 앞의 식에서 볼 수 있듯이 수직하중이 커지거나 운동속도가 다음의 파동전파속도에 가까워지면 증가하게 된다.

$$c = \sqrt{\left(\frac{j\pi}{S}\right)^2 \frac{EI}{\rho} + \frac{T}{\rho}} \quad (3)$$

† 조용현; 한국철도기술연구원 리니어전철팀

E-mail : yhcho@krri.re.kr

Tel : (031) 460-5112, Fax : (031) 460-5459

* 한국철도기술연구원

[5].

$$\sigma(x,t) = \frac{1}{Z} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2PEI/S}{(EI(j\pi/S)^2 + T - \rho v^2)} \sin \frac{j\pi v t}{S} \sin \frac{j\pi x}{S} \quad (4)$$

여기서 Z 는 단면계수이다. 응력은 변위와 마찬가지로 수직방향 힘이 커지거나 이동속도가 파동전파속도에 가까워질수록 증가하게 된다.

3. 전차선로 상태감시시스템 구성

전차선로 상태감시시스템은 그림 2 에서 보는 바와 같이 4 개의 하위 시스템으로 구성되어 있다. 실시간 통신과 신호처리를 담당하는 데이터취득모듈, 전원부, 센서, 그리고 사용자 컴퓨터이다. 사용자 컴퓨터를 제외한 나머지 하위시스템은 고전압이 걸린 전차선로에 설치된다. 열차 운행 중에는 전기가 흐르므로 안전한 전차선로의 감시를 위하여 사용자 컴퓨터에서는 데이터취득모듈로부터 무선인터넷을 사용하여 데이터를 실시간으로 취득한다. 사용 가능한 센서로는 열전대, 변형율 게이지, 가속도계, 그리고 수직 변위측정계이다. 데이터 취득은 채널당 최대 100 샘플/초까지 가능하다. 전차선로에는 고전압 대전류가 흐르므로 열차가 상태감시시스템을 통과하는 순간에 아크가 발생할 수 있다. 이러한 환경에서도 전차선로 상태감시시스템은 전차선로의 동특성을 측정할 수 있다.

4. 열차 통과시 전차선로 동특성 측정 및 분석

4.1 전차선 수직변위 및 변형율

KTX 열차가 300 km/h 로 주행하는 경부고속철도 연제교 구간(Figure 3)에서 전차선의 수직변위와 변형율을 측정하였다. 열차는 대부분 300 km/h 로 측정구간을 통과하였으나 한 대의 열차가 245 km/h 로 주행하였으므로 열차속도에 따른 동특성의 변화를 측정할 수 있었다.

Figure 4 에는 전차선의 지지 역할을 하는 곡선당 김금구 위치에서 전차선 수직 변위가 나와 있다. 상태감시를 위한 수직 변위에 있어서 두 가지 점에 주목할 필요가 있다. 하나는 최대 수직변위의 크기이고 다른 하나는 최대값 발생 이전에 나타나는 작은 파동의 진동주파수이다.

최대 수직 변위는 다수의 측정을 통하여 팬터그래프 압상력, 횡풍 등 열차 운행상태가 유사한 경우 반복적으로 유사한 값을 보였다. Figure 4 에서 볼

수 있듯이 열차속도가 다른 경우에는 즉, 300 km/h 일 때와 245 km/h 일 때 최대 수직 변위는 분명한 차이를 보인다. 따라서, 수직 변위를 측정하게 되면 열차의 운행상태를 감시할 수 있을 것으로 판단된다.

작은 파동은 팬터그래프에 의한 외란에 의하여 발생한다. 이러한 외란은 팬터그래프가 전차선로의 매경간을 지날 때마다 발생한다. 작은 진동의 주파수 f_d 는 열차의 이동에 따른 도플러 효과를 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_d = \frac{C}{C-V} \frac{V}{S} \quad (5)$$

여기서 C 는 파동전파속도이다.

따라서, 작은 파동의 진동주파수를 분석해보면 열차속도를 알 수 있다. 300 km/h 의 속도에서는 측정된 수직변위가 갖는 작은 파동의 진동 주파수는 6.4 Hz 이고, 245 km/h 의 속도에서는 3.8 Hz 이다. 상식에 측정된 진동주파수를 대입하면 열차의 속도를 얻을 수 있다. 따라서, 상태감시시스템에 나타난 작은 진동의 주파수를 분석하면 열차 속도를 추정할 수 있다.

열차가 통과할 때 곡선당김금구 위치에서 측정된 전차선 변형율이 Figure 5 에 나와 있다. 최대변형율은 변위와 마찬가지로 열차속도가 커지면 증가하게 된다. 열차속도가 증가하게 되면 제 2 절에서 논의한 바와 같이 두 가지 요인에 의하여 변형율이 증가한다. 하나는 속도 증가에 따라서 팬터그래프 압상력이 증가하는 것이고, 다른 하나는 식(4)가 보여주는 바와 같이 열차의 속도가 파동전파속도에 가까워짐으로써 동적 강성이 작아져서 변형율이 증가하는 것이다. 압상력은 팬터그래프 스프링에 의한 정적압상력과 양력의 합력으로 구성된다. 양력은 속도의 제곱에 비례하므로 300 km/h 주행을 할 때의 양력을 120 N 로 가정하면 245 km/h 에서는 80 N 의 양력이 작용한다고 예측할 수 있다. 즉, 증속에 따라서 양력은 1.5 배 증가하게 된다. 한편, 동적 강성의 변화로 인한 변형율의 증가에 대하여 살펴보면 KTX 전차선에서의 파동전파속도가 440 km/h 이므로 최대 변형율은 정지하중이 작용하였을 때와 비교하여 245 km/h 로 주행하는 경우에는 1.45 배, 300 km/h 로 주행하는 경우에는 1.87 배 증가하게 된다. 다시 말해서 245km/h 에서 300 km/h 로 속도가 증가하게 되면 같은 압상력이 작용하더라도 동적 강성이 감소하게 되어 변형율이 약 1.3 배 증가한다고 예측할 수 있다. Figure 5 를 보면 최대 변형율은 속도 증가에 따라서 약 2.2 배 증가하게 되는데 이는 양력의 증가 뿐만 아니라 동적 강성의 감소 그리고 팬터그래프 정적압상력의 조정의 차이 등에 기인하는 것으로 보인다.

변형율은 최대값을 보이기 이전에 음의 값을 가지는데 이는 팬터그래프에 의한 외란이 곡선당김금구에서 반사되기 때문이다. 또한, 변형율의 피크 파형은 수직변위의 피크 파형에 비하여 날카롭다는 특징을 가진다.

4.2 전차선 가속도

한국철도기술연구원이 개발한 틸팅열차가 호남선을 180km/h 로 주행할 때 측정된 곡선당김금구 위치에서의 전차선 가속도가 그림 5(a)에 나와 있다. 최대 가속도는 열차가 가속도계를 통과하는 순간 발생하며 약 200 m/s^2 의 크기를 갖는다. 그림 5(b)는 가속도 신호를 Short time Fourier transform 하여 얻은 시간-주파수해석 결과를 보여 준다. 팬터그래프가 가속도계를 통과하는 순간 대부분의 주파수영역에서 Power spectrum 이 존재하므로 팬터그래프는 곡선당김금구 위치에서의 전차선에 충격 가진을 하고 있음을 알 수 있다. 이것은 곡선당김금구가 앞서 언급한 바와 같이 경점 역할을 하고 있다는 것을 다시 한 번 보여주는 것이다.

5. 결론

열차의 운행에 따른 전차선로의 동특성을 측정하여 분석한 결과로부터 상태감시와 관련된 다음의 결론을 얻었다.

- 최대 수직변위는 열차의 운행상태가 유사한 경우 반복적으로 유사한 결과를 보이나, 열차속도가 변화하는 경우에는 뚜렷한 차이를 보임. 그 이유는 최대 수직변위는 압상력 뿐만 아니라 속도가 증가하면 커지기 때문이다.
- 최대 수직변위 이전에 발생하는 작은 파동의 주파수를 측정하면 도플러 효과를 이용하여 열차의 속도를 추정할 수 있음.
- 가속도 측정결과로부터 곡선당김금구와 같은 경점을 팬터그래프가 통과하는 것은 마치 전차선에 충격하중을 주는 것과 같은 효과를 준다는 것을 알 수 있음.

후 기

한국철도기술연구원 기본연구사업 전력시스템성능향상기술개발과제 및 건설교통부 틸팅열차개발사업의 연구결과물입니다.

참 고 문 헌

- (1) EUROPAC, Available online at: <http://www.uic.asso.fr/europac>.
- (2) CATIEMON, Available online at: <http://www.catiemon.org>.

(3) 조용현 등, 전력시스템성능향상기술개발과제 연구보고서, 한국철도기술연구원, 2007.

(4) Young Park, Yong Hyeon Cho, Kiwon Lee, Hosung Jung, Samyoung Kwon, Hyunjune Park, "Development of an FPGA-based Online Condition Monitoring System for Railway Catenary Application", World Congress on Railway Research 2008 submitted.

(5) T. Dahlberg, 2006, "Moving force on an axially loaded beam - with applications to a railway overhead contact wire", Vehicle System Dynamics, Vol.44, No.8, pp.631~644.

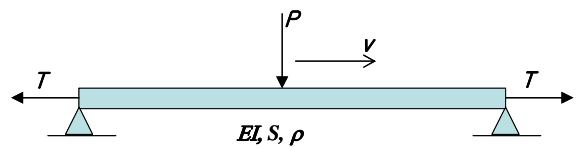
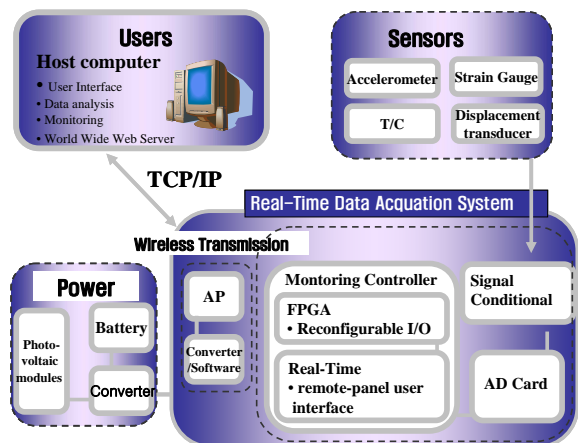
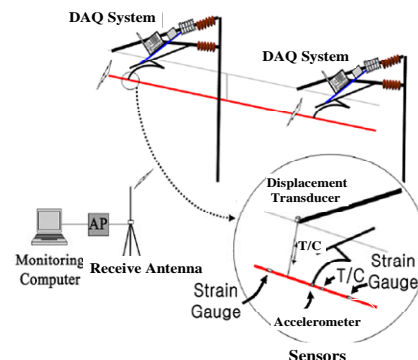


Fig. 1. Simplified model for a pantograph and a contact line



(a)

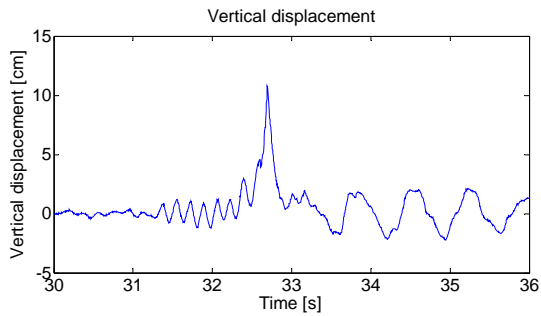


(b)

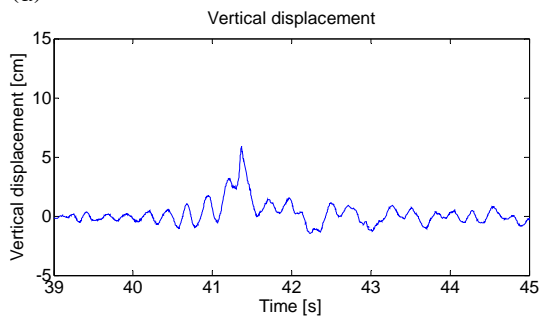
Fig. 2. Wireless internet based condition monitoring system for railway overhead contact lines: (a) Subsystem of the monitoring system, (b) Schematic of the monitoring system.



Fig. 3 Photo for the overhead contact line monitoring system installed at Yeonje bridge in Korean high-speed line.

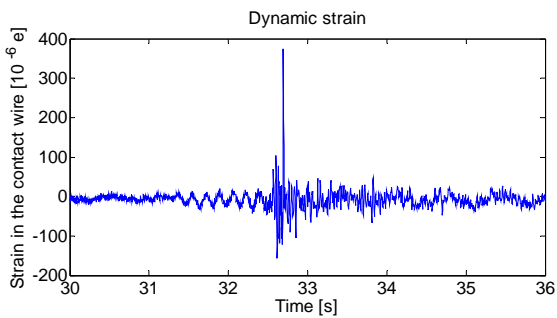


(a)

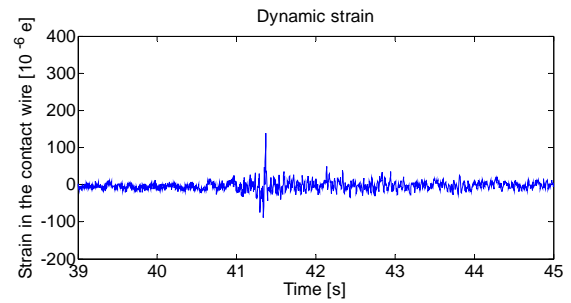


(b)

Fig. 4. Vertical displacement of contact wire in Korean High-speed line: (a) Displacement at 300 km/h operation, (b) Displacement at 245 km/h operation.

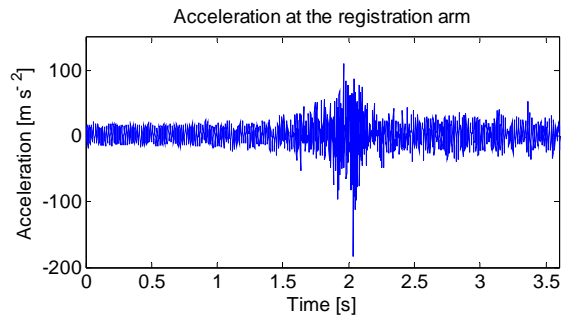


(a)

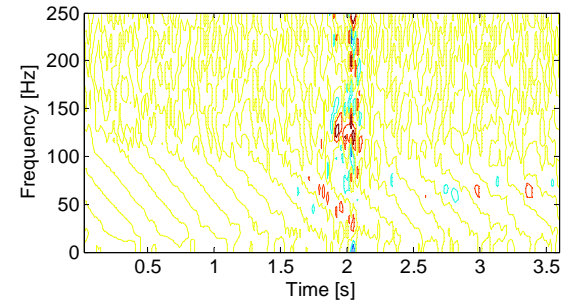


(b)

Fig. 5 Dynamic strain of contact wire in Korean High-speed line: (a) Strain at 300 km/h operation, (b) Strain at 245 km/h operation.



(a)



(b)

Fig. 6 Acceleration of contact wire at 180 km/h operation in Honam conventional line: (a) Time history of the acceleration, (b) Time-frequency anal