

## Development of a Measurement System for Contact Force Analysis of Trolley Line

김인철\* · 최규형†  
(In-Chol Kim · Kyu-Hyoung Choi)

**Abstract** - A measurement system of contact force between overhead contact line and pantograph of train is developed which measures the contact force by using four sets of full-bridge strain gauges instead of load cells and accelerometers. The sensors are installed on the pan head of pantograph and the measured data from the sensors are transmitted to a server system in the train by way of wireless Lan. This configuration of the measuring system makes it easy to install on the trains without any alteration of train system. The measurement system is applied to KTX on the Kyungbu high speed line, and the measured contact force data shows good agreement with those measured by load cell and accelerometers.

The waveform of the contact force between overhead contact line and pantograph contains essential information about their conditions. The proposed measurement system can probe any defects on overhead contact lines with train running at high speed, which will be a powerful solution for the maintenance of long-distance overhead contact lines.

**Key Words** : Electric railway, Overhead contact line, Pantograph, Contact force, Measurement system

### 1. 서론

전기철도에서는 전차선과 전기차의 집전장치(팬터그래프)가 불완전 접촉상태에서 주행중인 전기차의 운전전력을 공급하여야 하기 때문에, 전차선과 집전장치 사이의 접촉력을 적절하게 유지할 것이 요구된다. 즉, 접촉력이 "0"이 되면, 전차선과 집전장치가 이선되면서 전기차에의 전력공급이 중단됨과 동시에 아크가 발생하여 전차선과 집전장치의 소손 및 전자파 장애 등을 유발할 수 있다. 또한, 접촉력이 과도하게 높을 경우에는 전차선의 마모 및 손상을 촉진하여 수명을 단축하고 열차운행에 지장을 초래할 위험이 있기 때문에, 접촉력을 적절한 수준으로 유지하는 것이 중요한 과제로 되어 있다[1].

전기철도는 에너지 효율이 높고 열차견인력을 향상시킬 수 있으며 환경친화적이기 때문에 국내에서도 최근 전기철도 보급이 증대하고 있다. 2004년도에 고속철도가 개통되면서 전철화율이 지속적으로 증가하여, 2009년도에는 2004년도 대비 266% 증가한 55.9%에 달하고 있다. 이에 따라 전차선로는 수백 km에 걸쳐 시설되어 있으나, 이를 유지보수하기

위한 기술인력은 철도 민영화에 따른 경영 효율화 정책에 따라 감소되고 있는 실정이다. 특히, 최근 전기철도는 고속화 및 고밀도 열차운행을 통하여 수송용량이 증대되면서 전차선에 가해지는 부담이 증가하여 사고 요인이 증가하는 추세에 있어, 적정 수준의 접촉력 유지 및 효과적인 전차선의 보수관리 대책이 절실하다[2][3].

이와 같이 전기철도의 증가와 기존선 속도향상 등에 따라 다양한 전차선 검측기술과 규격이 요구되고 있어 선진외국의 경우 전차선로-집전장치간 상호 영향을 예측하고, 성능평가를 위한 시험기술 개발이 꾸준히 진행되고 있다[4]-[7]. 국내에서는 고속열차나 틸팅열차 등 신차 개발시 집전장치의 집전성능 평가 측면에서 시험연구를 수행하고 있으나, 전차선 유지보수 측면에서 접촉력 검측을 통한 관리는 이루어지지 않고 있어 관련 기술의 개발과 규격화가 필요한 실정이다[8]-[10].

본 연구에서는 이와 같은 전차선로 유지보수 효율화의 일환으로, 열차 주행시 전차선에 작용하는 접촉력을 실시간으로 측정하는 전차선 접촉력 검측시스템을 개발하였다. 전차선 접촉력 검측은 25[kV]의 고전압이 인가되어 있는 상태에서 전기차가 고속으로 주행하면서 집전장치가 접촉하는 짧은 시간에 측정을 하여야 하므로 응답속도가 빠르고 측정오차가 적으며 위치 변화에 유연한 시스템이 요구된다. 전차선 접촉력을 측정하는 방법으로는 가속도계(accelerometer)와 로드셀(load cell)을 함께 이용하는 방법이 주로 사용되고 있으나, 기 도입되어 운용중인 차량의 경우에는 집전장치에 장착하기가 곤란하다는 문제가 있다[11][12]. 개발된 검측시스템은 스트레인 게이지(strain gauge)를 집전장치의 집전판

\* 정 회 원 : 서울산업대학교 철도전문대학원  
철도전기신호공학과 박사과정

† 교신저자, 정 회 원 : 서울산업대학교 철도전문대학원  
철도전기신호공학과 교수

E-mail : kchoi@snut.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 28일

최종완료 : 2009년 11월 27일

에 설치하여 스트레인을 측정하고, 측정 데이터를 무선 랜을 통하여 차내에 설치된 서버에 송신하여 접촉력을 측정하도록 함으로써, 신규 도입 차량뿐 아니라 기존에 도입되어 운행되고 있는 차량에도 용이하게 탑재하여 시험할 수 있도록 하였다. 또한, 접촉력 분포 그래프 및 전차선 동영상상을 현시하고 선로구간별 평균접촉력 분석이 가능한 분석 프로그램을 개발하여 전차선 평가 및 유지보수에 활용할 수 있도록 하였다. 개발된 측정시스템을 경부고속철도의 KTX열차에 탑재하여, 열차운행속도를 300[km/h]까지 증속하면서 접촉력을 측정하였다. 시험 결과, 가속도계와 로드셀을 이용하여 다른 방법으로 측정된 접촉력 수치와 일치하는 것을 확인하였다.

## 2. 전차선 접촉력 측정 기법

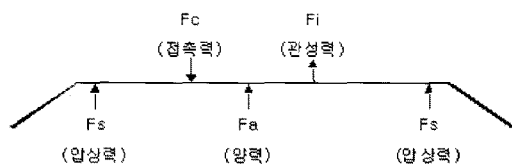
### 2.1 전차선에 작용하는 접촉력

열차가 정지해 있거나 주행하는 모든 경우에 전차선과 팬터그래프 집전판이 접촉하는 점에서 힘의 평형이 이루어지는데, 이때 전차선에 작용하는 접촉력은 그림 1에 보이는 것처럼 팬터그래프 하부의 서스펜션 스프링에 의한 압상력과 집전판 주위의 공기유동에 의한 양력, 그리고 집전판의 가속도 운동에 의한 관성력의 합과 같다. 즉, 열차 주행중의 동적접촉력은 압상력과 양력, 관성력 간에 힘의 평형관계로부터 식 (1)과 같은 힘의 평형방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$F_c = F_s + F_a - F_i \quad (1)$$

팬터그래프 집전판의 접촉력 계측은 전차선에 미치는 영향을 검증하는 수단으로서 순간적인 값보다도 일정시간 간격으로 계측된 데이터들의 평균값을 분석하여 팬터그래프의 집전상태 및 이선여부를 판단할 수 있다. 집전판의 가속도 운동에 따른 관성력( $F_i$ )는 힘의 평형위치를 기준으로 상하 변동하므로 그 평균값을 0이라고 할 때, 평균접촉력은 식 (2)와 같이 압상력과 양력의 합으로 나타난다.

$$F_{c(mean)} = F_{s(mean)} + F_{a(mean)} \quad (2)$$



- F<sub>c</sub>: 접촉력(contact force, 전차선과 집전판의 접촉력)
- F<sub>i</sub>: 관성력(inertia force, 팬터그래프 상, 하 운동의 관성력)
- F<sub>s</sub>: 압상력(spring force, 스프링에 의한 정적압상력)
- F<sub>a</sub>: 양력(aerodynamic uplifting force, 전차선과 집전판의 접촉력)

그림 1 전차선에 작용하는 접촉력

Fig. 1 Contact force applied to contact line

### 2.2 센서에 의한 접촉력 측정

팬터그래프에 로드 셀을 장착할 수 있을 경우에는, 팬터그래프의 압상력은 로드셀을 이용하여 계측할 수 있다. 그러나 기 도입되어 운행되고 있는 차량에서는 로드셀 장착이 어려운 점을 감안하여 스트레인 게이지를 이용하여 접촉력을 측정하는 방식을 적용하였다.

그림 2와 같이 팬터그래프 집전판의 N1, N2, N3, N4 지점에 스트레인게이지를 Full Bridge 방식으로 부착하고, 집전상태에서 팬터그래프 변형시 스트레인 게이지 저항값의 변화로 인해 발생하는 전위차를 이용하여 물리적인 변화량인 압상력을 측정한다. Full Bridge 방식으로 구성하는 이유는 팬터그래프 집전시 발생하는 잡음을 상쇄하고 동일한 접촉력이 작용하더라도 더 큰 신호값을 획득할 수 있는 장점이 있다.

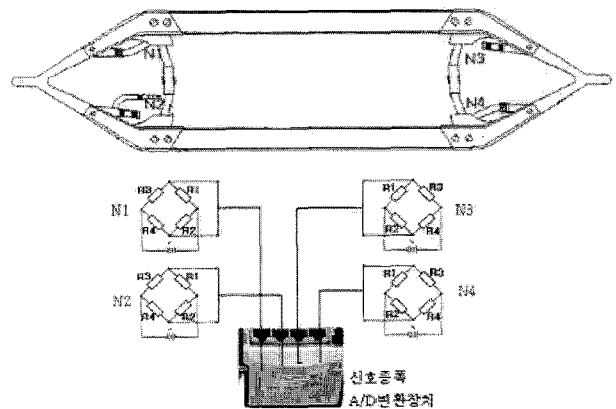


그림 2 스트레인 게이지를 이용한 접촉력 측정.

Fig. 2 Contact force measurement using strain gauge.

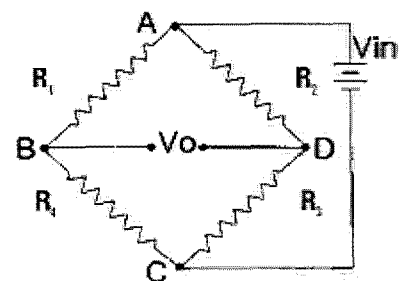


그림 3 Full-bridge 스트레인 게이지.

Fig. 3 Full-bridge strain gauge.

전차선과 팬터그래프 간에 접촉력이 발생하면 그림 4와 같이 N1, N2, N3, N4 지점으로 접촉력이 분산되어지므로, 접촉력은 식(3)과 같이 각 스트레인 게이지에서 구해진 접촉력의 합으로 구할 수 있다.

$$F_N = F_{M1} + F_{M2} + F_{M3} + F_{M4} \quad (3)$$

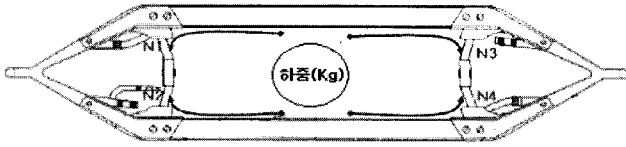


그림 4 하중 분포.  
Fig. 4 Load distribution.

스트레인게이지의 출력 전압값은 집전상태에서 팬터그래프 변형시 발생하는 저항값에 대한 아날로그 출력값으로서, 그림 2에서 스트레인게이지가 부착되는 면에 따라 N1, N2, N3, N4 지점에서의 출력전압은 서로 다른 특성값을 가진다. 따라서 N1, N2, N3, N4 지점에서의 스트레인게이지 출력전압을 힘의 양으로 맵핑하기 위해서는 다음과 같이 팬터그래프에 일정량의 하중[Kg]을 인가할 때 얻어지는 스트레인게이지의 출력전압을 기반으로 한 실험적인 데이터를 사용한다.

표 1은 팬터그래프 중앙에 일정량의 하중(Kg)을 가했을 때 N1, N2, N3, N4지점에서 측정된 스트레인 게이지 출력 전압이다. 그림 5는 팬터그래프에 가하는 하중과 N1, N2, N3, N4 지점에서의 스트레인게이지 출력전압의 상관관계를 나타낸 것으로서 선형 관계가 됨을 알 수 있다. 이상과 같은 하중과 스트레인게이지 출력전압과의 비례상수는 팬터그래프에 따라 다르게 나타나므로, 시험하고자하는 열차의 팬터그래프에 대하여 실험을 통해 비례상수를 구하여야 한다.

표 1 스트레인 게이지 비례상수.

Table 1 Constants of strain gauge

하중 [kg]	N1	N2	N3	N4
0	-0.004970159	0.015338033	-0.00446166	0.015281231
5	-0.006757573	0.014063506	-0.005531086	0.013497467
10	-0.00795671	0.013125171	0.006692880	0.01289087
15	-0.008672265	0.012080782	-0.007926004	0.01162924
20	-0.0010286185	0.008032276	-0.008586073	0.010483909

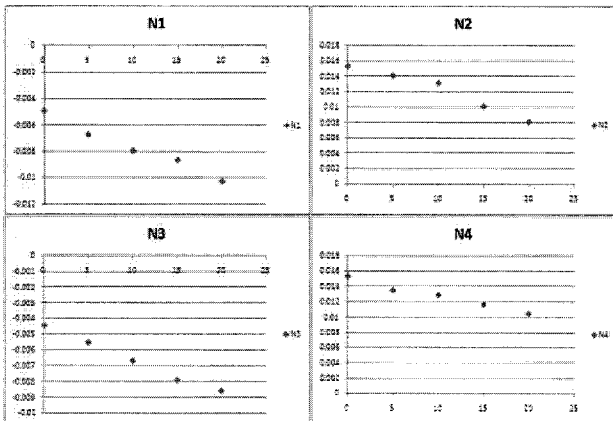


그림 5 하중에 따른 스트레인게이지 출력전압.  
Fig. 5 Strain gauge output vs applied load.

이상과 같이 전차선에 가해지는 접촉력과 스트레인 게이지 N1, N2, N3, N4의 출력전압은 선형관계에 있으므로, 전차선에 임의의 접촉력이 작용할 경우 그때의 스트레인 게이지 출력전압을 측정함으로써 접촉력을 역산해 낼 수 있다. 즉, 스트레인 게이지 N1에서 측정된 출력전압을  $X_1$  이라고 할 경우, 하중이 "0" 일 때의 출력전압을  $X_{11}$ , 하중이 20[kg] 일 때의 출력전압을  $X_{12}$  이라고 하면, 그림 6의 선형관계로부터 식 (4)와 같은 1차방정식이 얻어지므로, 이로부터 전차선으로부터 N1에 분산된 접촉력을 구할 수 있다. 여기서,  $N_r = 20 \times 9.8/4 = 49[N]$  이며,  $A_1$ 은 직선의 기울기,  $N_{1Y}$ 는  $X_1$  이 "0"일 때의 접촉력이다. 다른 스트레인 게이지 N2, N3, N4에 대해서도 같은 방식으로 접촉력을 계산하여, 식 (3)과 같이 이들의 합계로부터 전차선에 가해지는 접촉력을 계산할 수 있다.

$$F_M = A_1 X_1 + N_{1Y} \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{N_r}{(X_{12} - X_{11})} \quad (5)$$

$$N_{1Y} = \frac{N_r X_{11}}{(X_{12} - X_{11})} \quad (6)$$

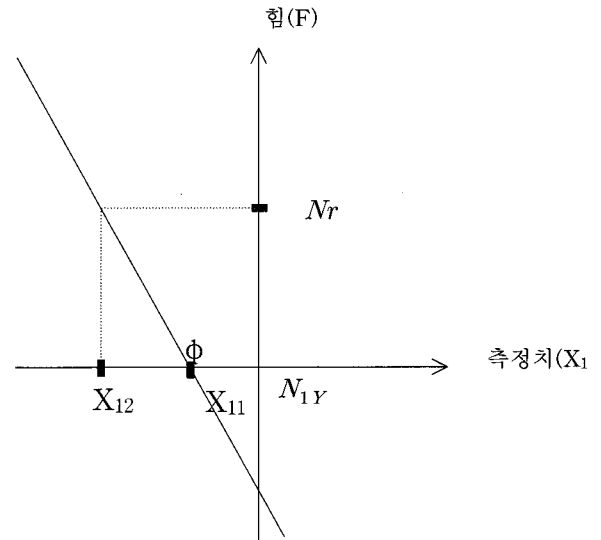


그림 6 측정전압과 접촉력의 함수관계.

Fig. 6 Functional relation between measured voltage and force.

### 3. 접촉력 측정 시스템

열차 주행시 전차선 접촉력 시스템은 차탑에 설치된 『접촉력 계측장치』와 차상에 설치된 『데이터수집 동기화장치』, 그리고 접촉력 계측장치와 데이터수집 동기화장치 간에 데이터 송수신을 위한 『광무선 송수신장치』로 구성되며, 시스템 구성도는 그림 7과 같다.

### 3.1 접촉력 계측장치

전차선과 팬터그래프 집전판 간에 접촉력을 측정하고 수집하기 위한 장치로써, 그림 8과 같이 팬터그래프 집전판 양단에 설치되는 스트레인 게이지와 스트레인게이지로부터 검지되는 접촉력 아날로그 신호를 증폭하고 초당 2000번 (2KHz) 샘플링하여 디지털 신호로 변환하는 "신호증폭 A/D 변환장치(Signal Conditioner)", 그리고 접촉력 센서데이터를 차상 데이터수집장치에 전송하는 "제어/계측 컴퓨터 (Simultaneous DAQ) 등으로 구성된다.

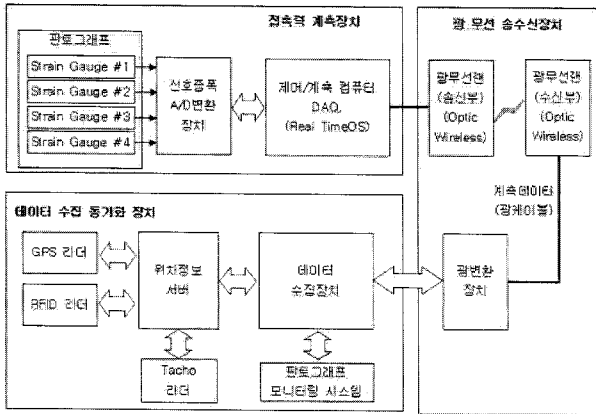


그림 7 전차선 접촉력 검측시스템 구성.  
Fig. 7 Configuration of contact force measurement system.

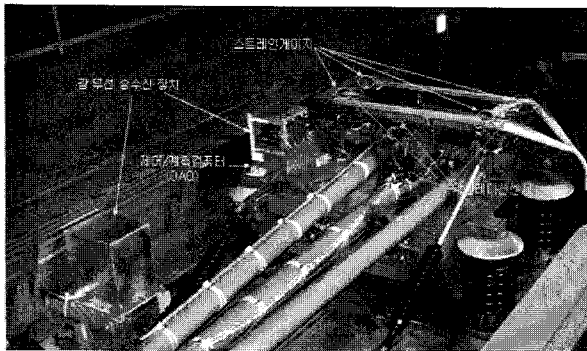


그림 8 접촉력 계측장치 및 무선송수신 장치.  
Fig. 8 Sensing devices and wireless transmitter.

### 3.2 광무선 송수신장치

25KV 고전압환경에서 발생할 수 있는 전기적인 영향을 고려하여, 접촉력 계측장치와 데이터 수집장치 간을 전기적으로 절연시키고 팬터그래프 집전시 발생하는 잡음(아크, 누설전류등)으로부터 계측데이터의 손실을 최소화하기 위하여 "광무선랜(Optical Wireless LAN)"을 적용하고, 광무선랜과 데이터수집장치 간에 인터페이스(광통신 ↔ LAN 통신)를 위한 "광변환장치"로 구성된다(그림 9).

### 3.3 데이터 수집 동기화장치

접촉력 계측장치로부터 전송된 접촉력 계측데이터를 수집하기 위한 "데이터수집장치"와 "GPS", "RFID", "Tachometer" 리더에서 위치정보데이터를 수집하여 열차의 검측위치를 정확하게 인지하기 위한 "위치정보서버", 그리고 팬터그래프의 이션 및 아크발생을 육안으로 확인하기 위한 "화상모니터링 장치"로 그림 10과 같이 구성하였다. "위치정보 서버"는 접촉력 계측데이터와 팬터그래프 모니터링 영상데이터에 동일한 시간코드 및 동일한 위치정보를 공유하도록 하도록 하기 위한 것으로서, 그림 11에 보이는 것처럼 차륜에 부착된 타코메타(Tachometer) 데이터로부터 주행거리를 산정하여 열차 위치 정보를 생성하고, GPS 수신정보와 선로변 전주에 10km마다 설치된 RFID로부터 인지한 기준위치정보로부터 검측위치 산정에서의 누적 오차를 보정하여 정확한 열차위치정보를 제공한다.

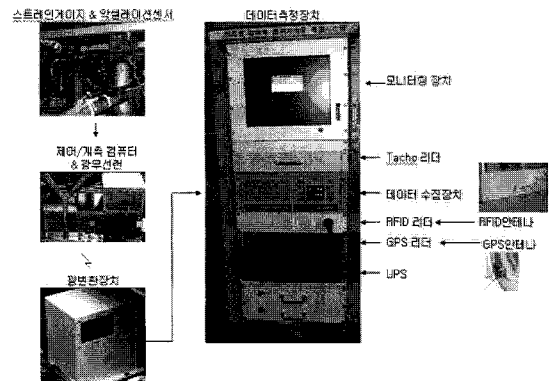


그림 10 차상 데이터 수집동기화장치 구성.  
Fig. 10 Configuration of Data Acquisition and Synchronization Device.

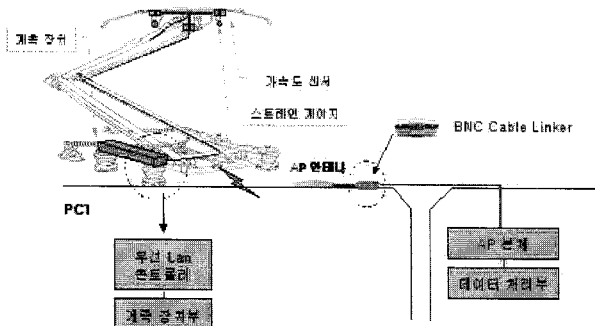


그림 9 광무선 송수신 장치 구성.  
Fig. 9 Configuration of Optical Wireless LAN.

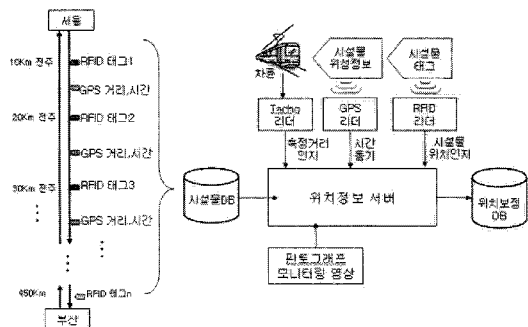


그림 11 위치정보 서버 구성.  
Fig. 11 Configuration of location information server.

3.4 분석 프로그램

가선계에 대한 펜터그래프의 집전품질을 평가 할 수 있도록 접촉력을 분석하고, 평균접촉력과 표준편차등에 대한 사후 통계처리를 근거로 집전품질을 분석한다. 그림 12는 분석프로그램의 사용자 화면으로서, 전차선 접촉력 측정데이터와 함께 열차주행시 촬영한 동영상화면을 표시하여 전차선의 이선 및 아크발생을 육안으로 확인할 수 있도록 하였다. 또한 접촉력 측정데이터는 측정 전구간에 대해서 거리별 열차주행속도와 접촉력, 충격가속도 등을 그래프로 나타내어 보여주고 있으며, 특정 지점을 선택하여 확대하여 분석할 수 있도록 하였다. 또한, 전차선 유지보수를 위해서 설정해둔 섹션 별로 구분하여 나타낼 수 있도록 하였다.

접촉력 분석결과는 그림 13에 보이는 것처럼, 검측구간 내에 포함된 섹션별 평균접촉력과 최대접촉력, 최소접촉력, 이선특성 등을 표 형태로 출력하고, 평균접촉력에 대한 간단한 필터링 기능을 제공하도록 하였다.

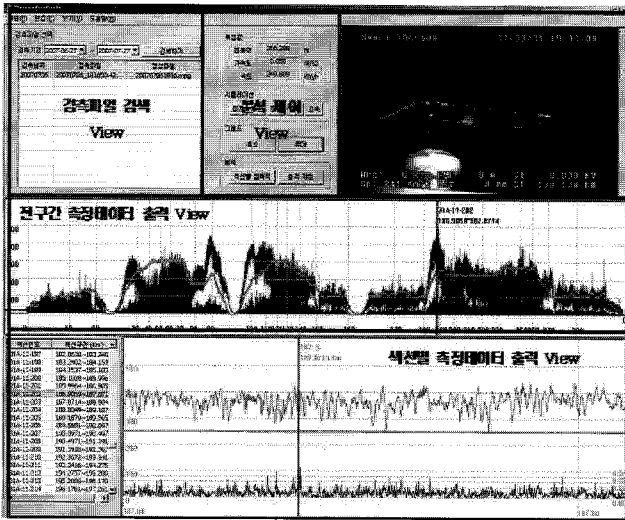


그림 12 사용자 인터페이스 화면.  
Fig. 12 User interface display.

별선번호	할당장(㎞)	구간연속(㎞)	평균연속(㎞)	최소연속(㎞)	최소할당장(㎞)	이선특성	현황
31A-11-092	66.1187~87.1129	187.4769	315.4297	395.4381	223.9800	216.0444	양호
31A-11-093	87.1129~88.1438	200.7137	356.6791	442.1225	275.3548	299.4722	양호
31A-11-094	88.1438~99.2266	215.7020	390.0554	441.2022	303.2495	325.4666	양호
31A-11-095	99.2266~91.1823	226.6192	377.1246	436.3609	294.5363	297.0072	양호
31A-11-096	91.1823~92.1521	201.5817	200.5668	394.0083	265.5711	216.2269	양호
31A-11-111	92.1521~99.2266	182.0323	323.9739	377.0279	311.6680	271.5899	양호
31A-11-112	99.2266~100.2101	166.5391	342.4924	393.3570	303.0817	286.7233	양호
31A-11-113	100.2101~101.1823	182.4295	326.0686	400.4655	296.2173	317.7067	양호
31A-11-114	101.1823~102.1521	203.8394	357.9177	419.3965	317.7938	302.7531	양호
31A-11-115	102.1521~99.2266	203.7470	338.1968	375.5444	297.0861	283.5263	양호
31A-11-116	101.1823~102.1521	205.4406	328.3389	377.4807	265.6977	270.3843	양호
31A-11-121	105.5412~106.5134	232.8032	304.9413	388.0074	297.8509	287.5216	양호
31A-11-122	106.5134~107.4856	228.0622	316.0166	413.6196	226.0194	216.8474	양호
31A-11-201	107.4856~108.4578	241.4367	345.1134	410.5930	174.9719	229.7395	양호
31A-11-198	103.2462~104.2184	197.9226	321.9908	395.6104	228.0972	235.7076	양호
31A-11-199	104.2184~105.1906	215.2059	345.7592	424.5667	237.6520	244.1296	양호
31A-11-200	105.1906~106.1628	236.4944	364.8003	430.5919	287.1211	288.7997	양호
31A-11-201	106.1628~107.1350	241.9462	366.6968	449.6219	227.2935	278.4824	양호
31A-11-202	107.1350~108.1072	246.4970	399.7624	474.7993	261.8943	286.8279	양호
31A-11-200	107.1350~108.1072	242.8502	312.3771	485.7620	171.2800	191.5274	양호

그림 13 접촉력 분석표.  
Fig. 13 Table for contact force analysis.

4. 전차선 접촉력 측정 시험 및 평가

전차선의 접촉력이 "0" 일 때 전차선으로부터 펜터그래프가 이선되어지며, 전기적인 아크(Arc)가 발생한다. 전차선 접촉력의 최대허용치에 대한 국내 기준은 없으며, 유럽표준규격(EN)의 경우 교류 전기철도에서 열차주행속도가 200[Km/h] 이하에서는 최대 순간접촉력을 300[N]까지 허용하며, 200[Km/h] 이상에서는 최대 350[N] 미만으로 정의하고 있다[13].

개발된 검측시스템을 경부고속철도에 적용하여 열차운행속도를 300[km/h] 까지 상승시켜 주행하면서 측정된 전차선 접촉력 측정시험 결과를 그림 14에 보인다. 그림에서 열차주행속도의 증가에 따라 접촉력이 증가하고 편차도 크게 나타나고 있으며, 특히 열차의 속도를 높여서 가속하는 운행구간에서 특히 접촉력의 변동폭이 크고 불안정한 거동을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는, 동일한 고속철도 구간에서 가속도계와 로드셀을 이용하여 측정된 전차선 접촉력 데이터와 동일한 결과를 보여 주고 있어, 개발한 검측시스템의 유효성을 보여주고 있다[11]. 즉 열차가 300[km/h] 운행시 접촉력이 최대 200[N]까지 나타나며, 100[km/h]에서 250[km/h]까지의 가속구간에서 접촉력이 120[N]에서 180[N]까지 크게 변동하여 나타나는 등 Load Cell을 이용한 기존 방식에서 측정된 값과 일치하였다.

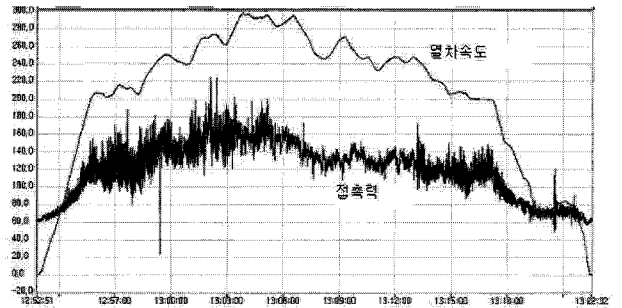


그림 14 고속선에서의 접촉력 측정 시험.  
Fig. 14 Measured contact force data at high speed line.

5. 결 론

열차주행중에 전차선에 작용하는 접촉력을 실시간으로 측정하여 분석할 수 있는 측정기법을 제시하고 전차선 접촉력 검측시스템을 개발하였다. 운영 중인 차량에 장착하기 용이하도록 로드셀을 사용하지 않고 스트레인 게이지를 이용하여 접촉력을 측정하는 방식을 채택하였으며, 고전압이 인가된 차량 지붕 상부에 설치되는 센서로부터 측정신호를 차내의 서버에 안정적으로 전송하기 위해서 무선랜 방식을 이용하여 시스템을 구현하였다. 개발된 접촉력 검측시스템을 고속철도구간에 적용하여 전차선 접촉력을 측정된 결과, 기존의 로드셀을 이용하여 측정된 접촉력 데이터와 동일한 결과를 얻음으로써 개발된 시스템의 유효성을 확인하였다.

개발된 검측시스템은 열차를 고속으로 주행시키면서 실시간으로 전차선의 접촉력을 측정하고 이로부터 전차선의 이상 개소를 용이하게 검출할 수 있게 함으로써, 전차선로 유

지보수 성력화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 신규 전철화사업 및 향후 건설될 호남선 고속철도 건설사업 등에서 전차선로 및 집전품질을 평가하는데 유용한 검측시스템으로 응용될 수 있다.

**참 고 문 헌**

[1] M. Ikeda, "The Contact Force between Pantograph and Contact Wire". Quarterly Report of RTRI, Vol. 45, No. 2 pp.80-85, 2004

[2] L.-M. Cléon, A. Bobillot, A. Collina, O. Mohamed, V. Loverre, "Pantograph-Catenary: A European Couple", WCRR 2006, T3.2.2, 2006

[3] C.Yamashita, A.Sugahara, "Influence of mean stress on contact wire fatigue", QR of RTRI, Vol.47, No.1, pp.46-51, 2006

[4] M.Aboshi, K.Manabe, "Analyses of Contact Force Fluctuation between Catenary and Pantograph", Quarterly Report of RTRI, 2000.

[5] A. Pisano, E. Usai, "Contact force estimation and regulation in active pantographs: an algebraic observability approach", Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans USA, 2007.

[6] M. Ikeda, "A Study on the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire (1st Report, Extension of the Frequency Range for Contact Force Measurement by an Improved Method of Evaluating the Pantograph Inertia Force)", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C, VOL.70; NO.694; PAGE. 1636-1643, 2004

[7] M. Ikeda, "Power Supply Technology. Study of the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire", RTRI Report Vol.4, No. 6, pp.7-12, 2000

[8] 서승일 외 3인, "한국형 고속전철 집전장치 접촉력 계측에 관한 연구", 대한기계학회 2003년도 추계학술대회 논문집, pp.1435-1457, 2003

[9] 이시우 외 3인, "주행 중 발생하는 고속전철 집전계 신호의 특성", 한국철도학회논문집, 제7권 제3호, pp.232-238, 2004

[10] 목진용, 이희성, "350km/h 본선 주행시험을 통한 한국형 고속열차 판토품의 접촉력 특성 평가 연구", 한국철도학회논문집 제8권 제4호 pp.342-347, 2005

[11] Seo, Y Cho, J Mok, C Park, KH Kim, "A Study on the Measurement of Contact Force of Pantograph on High Speed Train", ICCAS2005, 2005.

[12] S. Kasumi, T. Fukutani, K. Nezu, "Diagnosis of Overhead Contact Line based on Contact Force", Quarterly Report of RTRI, 2006

[13] EN 50367:2006, "Railway applications-Current collections systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line", 2006.

**저 자 소 개**



**김 인 철 (金仁哲)**

1958년 4월 2일생. 2003년 2월 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 석사과정 졸업. 1983년~현재 한국철도공사 전차선팀장.  
Tel : 02-2639-3643  
E-mail : catenaryknr@yahoo.co.kr



**최 규 형 (崔圭亨)**

1959년 1월 31일생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982년 홋카이도(北海道)대학 전기공학전공 박사과정 졸업(공박). 2005년~현재 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 부교수.  
Tel : 02-970-6873  
Fax : 02-979-6873  
E-mail : khchoi@snut.ac.kr