

고속철도 전차선로 고장력 실시간 모니터링 기술 구현

Implementation Technique of Real-time Monitoring System for High-Speed Rail Contact Wire with High Tension

조 용 현* · 박 영* · 정 현 진**
(Yong Hyeon Cho · Young Park · Hyun Jin Jung)

Abstract - Along with the increase of railway catenary system operation speed to 400 km/h, there have been growing demands for good quality current collection systems that satisfy quality standards as well as criteria for safe working. Retaining uniform elasticity tension of contact wires is essential in maintaining high quality contact between pantograph and OCL (Overhead Contact Line) of current collection systems in high speed railways. Therefore, the tension of contact wire must be kept within tight tolerance limits in both working conditions and adverse weather conditions of catenary system. In accordance with these conditions, this paper presents a real time monitoring system for the tensioning device of the newly installed catenary system on the special route of Honam high speed line for 400 km/h operation. For the verification of the true value of tension of contact wires, we have developed ring-type tensioning sensors which were installed on supporting points of mast which compose the catenary system. According to the field test performed on the Honam high speed line catenary system, variation of tension was measured accurately in real-time.

Key Words : Arc detector, Loss-of-contact, Current collection, Contact wire, Pantograph

1. 서 론

최근 전기철도차량이 증속됨에 따라 안정적인 운영을 위한 궤도, 신호, 전차선로 기술개발이 이루어지고 있다[1]. 이 중 전차선로는 열차의 증속을 위해 개발 되어야할 핵심 설비로 전기차량의 팬터그래프에 안정적 전기에너지를 공급하게 된다[2]. 특히 전기철도의 속도 증가에 따라 전차선로가 전기철도차량의 팬터그래프에 안정적인 전원 공급을 위해서는 집전성능 향상이 필요하다[3]. 집전성능은 팬터그래프와 전차선간의 상호 작용으로 경부고속철도 이선율 시험결과 설계 속도 330 km/h 이상 시 팬터그래프와 전차선간의 발생하는 아크의 발생 횟수, 시간이 급격히 길어져 집전성능이 저하되는 것이 보고된 바 있다[4]. 이선아크는 전차선 파동의 전파와 반사, 전차선로 자체의 강성 변화로 발생되며 파동전파속도에 접근할수록 집전성능이 저하된다[5]. 속도향상에 따라 안정적인 집전성능을 위해 유럽

철도표준규격인 EN50119에서는 열차의 최고속도를 전차선 파동전파속도의 70% 이하로 요구하고 있다[5, 6]. 전차선의 파동전파 속도는 전차선의 장력에 비례하여 증가되므로 전차선의 장력이 증가될수록 집전성능이 향상되기 때문에 프랑스 고속철도 최고속도 574.8 km/h 시험에서도 전차선의 장력은 26 kN에서 40 kN으로 증가하여 시험한 것으로 보고되고 있다[7]. 국내 적용된 400 km/h급 전차선로는 속도향상에 따른 안정적인 집전성능을 유지하도록 34 kN의 장력으로 운행되고 있다[1, 5]. 그러나 전차선 장력은 온도 변화, 전차선 마모에 상관없이 일정한 비율을 유지 하여야하나 장력을 실시간으로 모니터링 하는 기술은 보고되지 않고 있다. 특히 전차선의 장력변화가 급격히 변화될 경우 전차선의 처짐에 의해 다양한 문제점이 발생할 수 있어 장력 변화의 범위를 판단하는 기술이 필요하다[8]. 본 논문은 호남고속철도에 설치된 400 km/h급 전차선로의 34 kN급 도르래식 장력조정장치의 장력 변동률을 실시간으로 모니터링이 가능한 검측시스템 구현기술을 나타내었다. 특히 전차선의 장력 조정장치의 실시간 장력 변화 검측을 위해 장력변동률 검측이 가능한 센서를 개발하여 실시간으로 장력 값이 나타날 수 있도록 시스템을 구성하였다. 본 논문에서 제안한 장력모니터링 시스템은 장력조정장치의 도르래간 간격과 장력추의 높이를 검측하는 기존방식과 달리 센서를 이용하여 장력을 실시간으로 모니터링이 가능하다.

* Corresponding Author : Dept. of High-Speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail : ypark@krii.re.kr

* Dept. of High-Speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea

** DahyunCNI Co., Ltd, Korea

Received : May 21, 2015; Accepted : July 7, 2015

2. 본 론

2.1 34 kN급 전차선 장력모니터링 기술 개발

전차선 및 조가선의 변화에 따라 전차선로의 장력을 자동으로 일정하게 유지하기 위한 장치를 자동장력조정장치라고 하며 국내에서는 활차식, 도르래식 및 스프링식이 사용되고 있다[9]. 이중 도르래식 장력조정장치는 온도변화에 따라 전차선과 조가선의 이도를 일정하게 유지할 수 있어 경부고속철도에 현재 사용되고 있으며 신규 건설한 호남고속철도에 34 kN의 장력유지를 위해 도입되어 있다[9]. 호남고속철도는 전차선의 장력이 34 kN으로 장력장치의 추 이동에 따른 장력 변동 성능의 효율 Power Factor (Pf)은 0.97 이상이어야 하므로 인가하중에 따라 3% 내로 변동해야 하며 효율 Pf는 수식 1과 같이 구할 수 있다[10]. 수식 1에서 Pf는 효율, T는 장력, P는 장력추 하중 r은 장력장치의 공칭 배력비이다.

$$Pf = \frac{P \times r}{T} \quad (1)$$

그림 1에 호남선 고속철도 전차선 장력조정장치의 설치사진을 나타내었다. 호남고속철도에 적용된 장력조정장치의 상태를 실시간 모니터링을 위해 그림 2-(a) 같이 링형 로드셀을 이용하였다. 장력모니터링 장치는 장력장치 지지용 H빔 웹(Web)부 후면에 4개의 볼트를 사용하여 지지하게 된다.



그림 1 호남고속선 장력조정장치 설치 사진

Fig. 1 Picture of tensioning device installed on Honam high-speed line.

그림 2-(b)에 H빔 후면 볼트에 체결된 장력모니터링용 로드셀 사진을 나타내었다. 장력센서는 최대 용량은 10 ton이며 측정 불확도는 ±0.5% 미만이다. 장력센서의 측정 불확도는 센서에 0에서 10ton 까지 하중을 증가 및 감소하여 각 구간별 오차를 평균하여 계산하였으며 표 1에 시험된 평균오차를 나타내었다.

본 논문에서 제안한 장력조정장치가 위치하고 있는 H빔 후면에 설치된 로드셀을 이용하여 장력을 모니터링 할 경우 전차선 방향과 수직방향으로 동시에 힘이 작용 된다. 본 논문에서는 실



(a) 장력모니터링센서 (b) 장력모니터링센서 고정사진

그림 2 전차선로 장력모니터링용 로드셀 사진

Fig. 2 Picture of washer type load cell for monitoring of tensioning device

표 1 장력센서의 측정 불확도 시험 평균 오차

Table. 1 Measurement uncertainty of tension sensor for calibration error

시험순번	평균오차(%)
1	0.22
2	0.186
3	0.212
4	0.176
5	0.192
6	0.186
7	0.194
8	0.152
9	0.132
10	0.174
평균	0.1824

시간 모니터링 장치 구현과 관련 장력 보정 수식 도출을 위해 선형 시스템으로 가정하여 전차선 방향 힘과 수직 방향 힘을 따로 적용시킨 후 이들을 합하는 중첩의 원리를 적용하였다. 그림 3에 장력센서로부터 검출된 값을 장력값으로 보정하기 위한 개념도를 나타내었다. 그림 3에서와 같이 장력센서는 상단측정값 X1과 하단측정값 X2는 장력 T와 수직력 S와의 상관관계가 있다. 이때 T만 작용되는 경우를 가정하여 T하중을 상하 로드셀의 중심으로 이동하면 등가 하중은 상하 로드셀의 중심에 작용하는 T와 토크모멘트 T×a로 나타낼 수 있고, 이들은 수식 2와 수식 3과 같이 정리할 수 있다. 여기서 l은 상위 로드셀과 하위 로드셀 사이의 수직 거리이고, a는 H빔 고정점과 전차선 사이의 수직 거리이다. 하중이 수평으로만 작용하는 경우는 그림 3-(b)와 같이 로드셀에 R1, R2의 반력이 작용하고, 하중이 수직으로만 작용하는 경우 그림 3-(c)와 같이 로드셀에 R3, R4의 반력이 작용되는 것으로 가정할 수 있다. 구조물에 수평 및 수직 외력인 T와 S가 동시에 작용하게 되면 로드셀에 X1과 X2의 반력이 작용하게 될 것이다. 수식 2, 수식 3, 수식 4 및 수식 5를 연립하여 R3와 R4

를 수식 6과 수식 7과 같이 구할 수 있다. 수평방향 힘만을 추출하기 위해서는 로드셀로 검측한 X_1 과 X_2 로부터 사전에 추를 상승, 하강하면서 구한 \tilde{R}_3 와 \tilde{R}_4 의 평균값을 각각 빼 주면 된다.

$$R_1 + R_2 = T \tag{2}$$

$$\frac{R_1 - R_2}{2} \ell = Ta \tag{3}$$

$$R_1 + R_3 = X_1 \tag{4}$$

$$R_2 + R_4 = X_2 \tag{5}$$

$$R_3 = X_1 - \frac{T}{2} (1 + 2 \frac{a}{\ell}) \tag{6}$$

$$R_4 = X_2 - \frac{T}{2} (1 - 2 \frac{a}{\ell}) \tag{7}$$

$$R_1 = X_1 - \tilde{R}_3 \tag{8}$$

$$R_2 = X_2 - \tilde{R}_4 \tag{9}$$

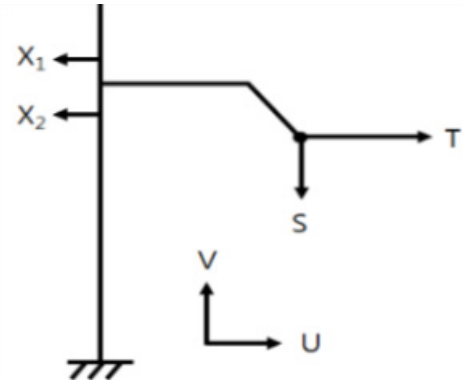
장력센서의 보정식의 검증을 위해 그림 3-(a)의 T방향의 장력을 측정하여 그림 2-(b)와 같이 설치한 센서와 비교하였다. T 방향의 센서는 실제 장력값과 일치한다고 가정하고 설치된 4개의 센서를 교정수식과 비교하였다. 표 2에 실제 장력과 장력센서 4개의 교정값과의 비교 결과를 나타내었다. 표 2의 측정값은 실제 장력을 유지하도록 하고 추의 높이를 최저점에서 최대 4 m 까지 20 cm 간격으로 증가시켜 장력의 변동률을 측정된 것으로 상승과 하강은 높이 변화에 따라 상승시와 하강시를 나타낸다. 이때 기준 장력은 34 kN으로 장력의 추 높이에 따라 장력의 변화값을 실제 장력값과 본 논문에서 제안한 센서의 교정값과 비교하여 오차를 나타내었다. 총 2회 시험의 평균 오차율은 0.306%로 나타났다. 이는 본 논문에서 제안한 장력모니터링장치로 측정된 값, 즉 $\Delta X_1 + \Delta X_2$ 은 T 방향의 힘, 즉 장력 변화와 잘 일치하고 있음을 의미한다. 수식 8과 수식 9를 보면 T 방향 전차선 장력의 절대값을 알기 위해서는 추를 상승, 하강하면서 구한 \tilde{R}_3 와 \tilde{R}_4 의 평균값을 사전에 알아야 하나, 전차선 장력의 변화, 즉 $\Delta R_1 + \Delta R_2$ 만을 알려면 장력모니터링장치로 측정된 값의 변화, 즉 $\Delta X_1 + \Delta X_2$ 만을 알면 된다. 따라서, T방향의 전차선 장력 변화는 별도의 사전 측정 혹은 보정 없이도 기존 혹은 신규 전차선로에 장력모니터링장치를 설치하기만 하면 바로 모니터링 할

표 2 장력센서의 교정값과 실제 장력값 비교표

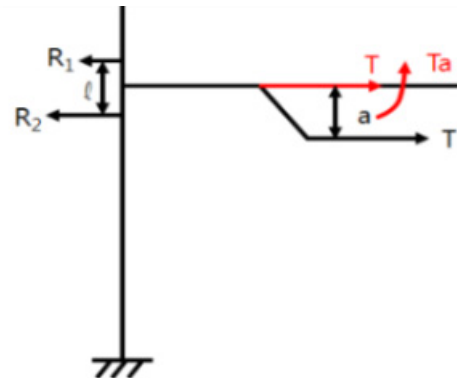
Table 2 Comparison between actual and calibration value of tensioning device

	교정값 (ton)	장력값 (ton)	평균 오차율(%)
상승 1	3.537	3.530	0.234
상승 2	3.533	3.529	0.339
하강 1	3.359	3.370	0.315
하강 2	3.359	3.370	0.336

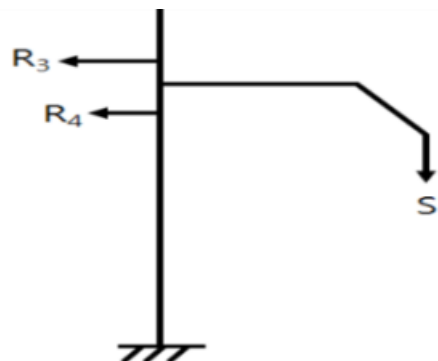
수 있다. 장력 검측을 위해 T 방향에 장력센서를 직접 설치할 경우 가압구간으로 센서의 설치가 어렵고 사고의 위험과 측정에 어려움이 있으나 본 논문에서 제안한 장력센서는 지지부에 고정이 쉬우므로 특히 현장 부설 이후에도 자유롭게 설치가 가능하여 보다 높은 실용성을 갖는 것으로 판단된다.



(a) 장력센서에 미치는 힘



(b) 수평 방향 하중만 작용하는 경우



(c) 수직 방향 하중만 작용하는 경우

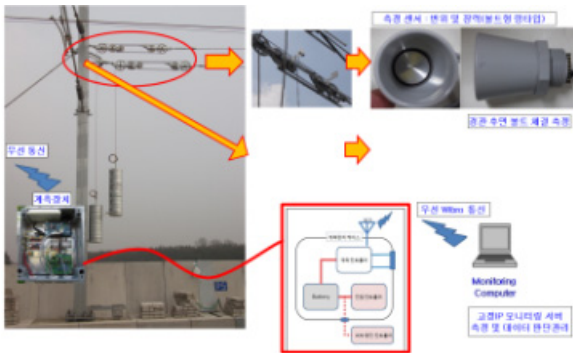
그림 3 장력센서의 보정을 위한 개념도

Fig 3 Design concept of tension sensor for calibration

2.2 호남고속철도 장력상태 모니터링

본 논문에서 제안한 장력모니터링 센서는 호남고속선의 전차선 장력을 34 kN으로 유지하기 위한 장력모니터링 장치의 장력 변화를 실시간으로 모니터링하여 이상 유무를 판단하기 위한 시스템이다. 그림 4에 호남고속선 장력모니터링 시스템 설치 사진을 나타내었다. 장력모니터링 장치는 장력센서 이외에 외부 온도와 도르래 간격 변화를 측정하기 위한 변위센서를 검측하도록 구성하였다. 변위 센서는 초음파 방식으로 측정범위는 최대 5 m이며 발진 주파수는 40 kHz 이다. 검측된 값은 주장치를 통해 전

달되며 통신모듈을 통해 인터넷으로 전달되도록 구성하였다. 장력상태 모니터링 장치의 측정속도는 1 Hz로 최대 측정채널은 7 개이다. 장력모니터링장치는 호남선 익산-정읍 구간 KP 104에 2 개 소를 그림 4와 같이 설치하였다. 장력조절장치의 도르래 간격은 1 mm 정밀도와 30 mm에서 5,000 mm의 변위 측정이 가능한 초음파 센서를 이용하였으며 정밀도 향상을 위해 반사판을 그림 4-(b)와 같이 설치하였다. 전차선로 측정 중 필요 전원은 50 W 출력 단결정 태양광을 설치하였으며 검측된 결과는 4G Wibro LTE 망을 활용하여 고정 IP원격 서버로 전송하였다. 원격 서버는 검측된 결과 값을 시간, 일 단위로 관리하기 위해 이상 발생 시 경보발생, 실시간 측정 data 정보처리 및 통계분석이 가능하도록 구성하여 LabView를 이용하여 실시간으로 web기반으로 개



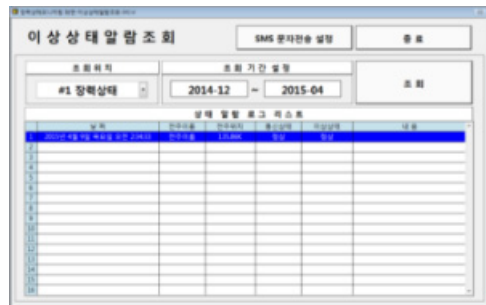
(a) 장력모니터링용 시스템 설치 세부 사진



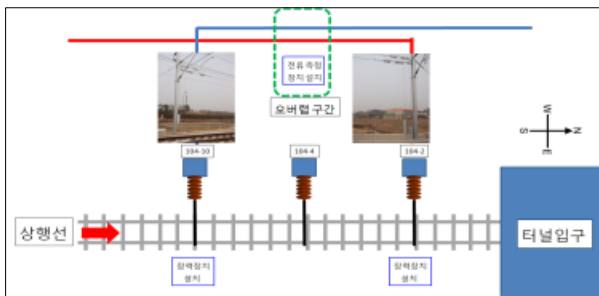
(a) 장력모니터링 주 프로그램



(b) 도르래 간격 측정용 초음파 센서 세부 사진



(b) 장력모니터링 세부 분석 프로그램



(c) 장력모니터링 시스템 호남선 설치구간 계략도



(c) 프로그램 문자 설정 화면

그림 4 호남고속선 34 kN 장력모니터링 시스템 설치 사진

Fig. 4 Picture of field application results for tensioning monitoring system with tension of 34 kN on Honam high-speed line.

그림 5 34 kN 전차선로 장력모니터링 프로그램 사진

Fig. 5 Picture of tensioning monitoring program for Tensioning device of contact wire with tension of 34 kN

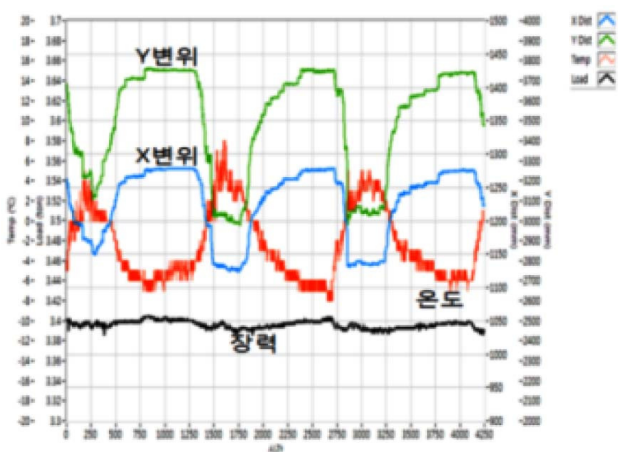
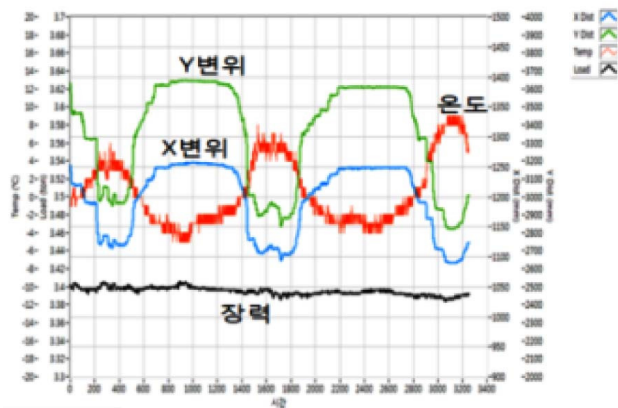
발하였다. 그림 5에 호남고속선 장력조정장치의 원격 서버 모니터링 프로그램 사진을 나타내었다. 원격 서버는 날씨 및 데이터 수신 값을 실시간으로 모니터링이 가능하도록 개발하였고 장력 이상 변동 시 사용자에게 알람을 발생시킬 수 있도록 구성하였다.

그림 6에 호남고속선 34 kN 장력모니터링 장치의 장력, 온도, 및 도르래의 X, Y 변위값 모니터링 결과를 나타내었다. 장력 변화는 그림 7-(a)의 경우 평균 3.3948 kN 이며 그림 7-(b)의 경우 평균 3.3958 kN으로 각각 나타났다. 이때의 평균온도는 8°C 정도로 최대 ±8°C의 변화가 있었다. 자동장력조정장치는 온도변화에 일정한 장력을 유지하는 장치이므로 그림 6에서 나타난 바와 같이 온도가 변화함에 따라 X 및 Y의 변위 값이 조정 되어 일정한 장력을 유지함을 알 수 있다. 그림 6에 나타난 결과는 초당 1개로 획득한 값을 1분으로 평균하여 나타낸 것으로 장력 값은 큰 변화 없이 시간에 따라 일정하게 나타남을 볼 수 있다. 특히 본 논문에서 제안한 장력모니터링 결과는 LTE 망을 이용하여 원격지에서 실시간으로 검측 하는 것을 알 수 있어 향후 전차선로의 유지보수나 사고 발생시의 변화량을 정확하게 판단이 가능함을 알 수 있다. 현재 국내에서는 전차선 장력조정장치의 이상

유무를 정해진 작업일정에 따라서 시행되는 도보 순시를 통해 확인하고 있으나, 본 시스템을 이용할 경우 분 단위의 장력 변화를 항상 모니터링 할 수 있어 전차선로의 이상상태에 대하여 즉각 대응할 수 있게 된다. 전차선의 단선 이외에도 처짐 등 전차선로 이상 현상이 발생하면 전차선 장력이 변화하게 되므로 본 논문에서 제안하는 장력모니터링 기술을 활용하여 복합적인 전차선로 진단을 할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

전차선로의 장력은 전기철도 차량의 안정적인 집전성능을 위해 가장 중요한 인자이다. 본 논문에서는 호남고속철도에 설치된 400 km/h급 전차선로의 34 kN급 도르래식 장력조정장치의 장력 변동률을 실시간으로 검측시스템 구현기술을 나타내었다. 장력센서는 전차선 지지물에 뒤쪽에 링 형식으로 개발하여 기존 시스템에 영향을 주지 않고 설치가 가능하도록 개발하였다. 개발된 장력센서를 실제 장력과 비교 시험한 결과 0.4%의 평균 오차를 나타내었다. 전차선 장력모니터링 시스템은 원격지에서 검측이 가능하도록 LTE 망을 이용하여 web 기반으로 실시간 검측이 가능하도록 구성하였다. 호남고속선 34 kN 장력모니터링 장치의 장력, 온도 및 도르래의 좌우·상하 변위를 측정된 결과 원격지에서 성공적으로 검측할 수 있었으며 평균 3.3958 ton으로 실제 장력을 모니터링 함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 경관 링형 장력센서는 장력조정장치의 지지부 후면에 쉽게 탈부착이 가능하므로 신규 고속철도뿐만 아니라 기존에 사용 중인 전기철도에도 자유롭게 적용할 수 있다. 제한된 유지관리 인력과 관리 대상 선로가 길어서 유지보수에 어려움을 겪는 경우 본 연구에서 제안한 장력모니터링 시스템을 도입하게 되면 전차선로의 장력상태를 실시간으로 모니터링하여 복합적인 전차선로 상태 진단을 할 수 있어 철도 안전을 향상할 수 있을 것으로 판단된다.



(b) 70시간 모니터링 결과

그림 6 호남선 실시간 장력모니터링 결과

Fig. 6 Results of field test for tensioning device on Honam high-speed line

References

- [1] C. M. Park, Y. Park, Kiwon Lee, S. Y. Kwon, J. M. Kim, "Evaluation schedule for current collection performance of 400 km/h catenary system in Honam high-speed line", Annual Summer Cerence of Korean Institute of Electrical Enginerrns, 2014.
- [2] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider, "Contact Lines for Electrical Railways: Planning- Design- Implementation- Maintenance", WILEY, 2008.
- [3] Y. H. Cho, "Analysis of the Major Design Parameters of a Pantograph-Railway Catenary System for Improving the Current Collection Quality", Journal of the korean society for railway vol. 17, no. 1, pp. 7~13, 2014. 2.
- [4] Young Park · Kiwon Lee · Sam-Young Kwon · Chulmin Park · Jae-Kwang Kim · Won Seok Choi, "Analysis of Percentage of Arcing between Pantograph and Overhead Contact Line as a Function of Duration of Arc", 2014

[5] K. Lee, "A Experimental Study on Train Speed and Wave Propagation Speed of Contact Wire according to the Speed-up", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 12, pp. 1820-1823, 2013.

[6] EN 50119:2001, "The European Standard, Railway applications-Fixed installations-Electric traction overhead contact lines", 2001.

[7] S. Midya, D. Bormann, A. Larsson, T. Schutte, R. Thottappillil, "Pantograph arcing in electrified railway-Mechanism and influence of various parameters-Par II: With AC tractoin power supply", IEEE Trans. Power Deliv. No 24, pp.1940-1950, 2009.

[8] H. R. Cho, S. S. Lee, Y. K. Sung, K. Lee, S. Y. Kwon, "Development of a pully type tension device with stop fal device", Journal of the korean society for railway, KSR2012A251, 2012.

[9] K. Lee, Y. C. Cho, Y. Park, "Development of pulley-type Tensioning Device", Journal of the korean society for railway, Vol.12, No.5, pp.663-669, 2009.

[10] Korea Rail Network Authority, "Pulley Type Tensioning Device", KRSA-3068, 2013.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 및 국토교통부 『증속에 따른 전차선로 시스템 기술개발』 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

저자 소개



조 용 현 (Yong Hyeon Cho)

1992년 한국과학기술원 기계공학 석사
2008년 서울대 기계공학 박사
현재 한국철도기술연구원 수석연구원
Tel : 031-460-5112
E-mail : yhcho@krri.re.kr



박 영 (Young Park)

2004 성균관대학교 전자전기공학 박사
현재 한국철도기술연구원 책임연구원
Tel : 031-460-5434
E-mail : ypark@krri.re.kr



정 현 진 (Hyun Jin Jung)

한양대학교 전자전기컴퓨터 공학
2004년 (주)다현씨엔아이 개발부
현재 (주)다현씨엔아이 기업부설연구소 소장