ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 10, pp. 1465~1469, 2013
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.10.1465

조가선 전류 검측 시스템의 활용기술 연구 – 고속선 경부2단계 시험결과를 중심으로 –

Utilizing Technology in Measurement System for Catenary Current: – Focusing on Testing Results for Kyoungbu High-speed Line in Korea –

박 영* · 정 호 성† · 이 기 원*
(Young Park · Hosung Jung · Kiwon Lee)

Abstract – The resent developed high speed train called HEMU-430X (Highspeed Electric Multiple Unit – 430㎞/h eXperiment) recorded a 421.4 km/h in Kyoungbu high speed line in Korea. A verity of measurement systems are used to check the performance between pantograph and catenary system. An innovative measurement system is adopted to check the current of catenary wire in the track side during HEMU-430X test running. This paper presents the measurement results of catenary current in kyoungbu high-speed line and describe its utilizing technology in the experimental results of catenary current. In order to analyze field testing results, the current ratio between contact and catenary current have been analyzed by means of Carson-Pollaczek equation. And the current wave forms between catenary and contact wire are presented based on the simulation results.

Key Words : Catenary wire, Contact wire, Current ratio between contact and catenary wire

1. 서 론

최근 철도차량의 고속화에 따라 현재 400 km/h 이상의 전차선로 시스템이 개발되고 있다[1]. 이를 위해 팬터그래프와 접촉하여 전기에너지를 전달하는 전차선의 장력을 높이기 위하여 강도향상을 위한 구리합금 계열이 재료가 사용되고 있다. 현재 국내의 경우 순동 전차선을 경부고속철도 구간에 사용하고 있으나, 350 km/h급 이상의 전차선은 동합금계열의 전차선이 개발되고 있다. 동합금계 전차선은 강도를 향상하여 전차선의 장력을 올리는 것은 가능하지만 순동에 비하여 전기 전도도가 낮아져서 전류용량이 제한적이므로 전차선의 전류용량에 대한 다양한 연구가 필요하다[2-4]. 특히 전차선로는 전기철도에서 열차에 동력을 전달하기 위한 핵심 설비로 차량의 팬터그래프와 접촉되는 전차선 이외에 다양한 부품과 재료로 구성되어 있다[5]. 전차선로의 각 부품은 전기적으로 연계되어 상호 등가회로로 구성되며 재료의 특성 및 형상, 연계에 따라 상호 다른 임피던스를 가지고 있다[6]. 특히 전차선과 조가선은 전기적으로 연계되어 차량의 견인 상태에 따라 전류를 분담하고 있다[7]. 전차선과 조가선의 전류분담률은 선종 및 재료에 따라 국내에서는 7:3 또는 6:4가 일반적인 것으로 보고된다[8]. 실제 전류 분담을 열차의 운행에 따라 측정한 사례는 2012년에 보고된 호남선 구간에서 전차선로 전기적 특성 평가 시스템을 적용하여 실측된 결과가 있다[7]. 또한 기존선 해빙시스템을 위한 해빙전류 예측기법 및 구성 절차에 관한 연구에서 보고된 전차선과 조가선의 공급 전압에 따른 전류비 측정결과가 보고되었다[6]. 호남선 측정결과는 전차선과 조가선의 전류비가 KTX (Korea Train eXpress)가 운행중인 경우 65.58 : 34.22, 65.36 : 34.64, 65.22 : 34.78롤 각각 3회 측정하여 보고하였으며 무궁화호가 견인한 경우 62.86 : 37.14의 전류비가 나타나는 것으로 보고되었다[7]. 충북선의 경우 가선전압을 150 V로 입력하여 측정된 보고에 따르면 전차선과 조가선의 전류비는 55.23 : 44.77로 보고되었다[9]. 이와 같이 호남선에서 실제 KTX 운행에 따라 측정된 결과와 충북선에서 측정된 결과가 서로 다른 값을 보이는 이유는 실제 운행 전압에 따라 서로 다른 임피던스가 나타나기 때문으로 사료된다[6,9]. 전차선과 조가선의 전류 분담은 설계 시 고려해야 할 중요한 요소이나 실제 실측과 이론적 결과를 설계와 시공단계에서 상호 비교한 경우는 없다. 열차 운행에 따른 전차선과 조가선의 전류 측정은 호남선 측정과 같이 전류 센서를 팬터그래프의 영향을 받지 않도록 오버랩 구간에 설치하여 측정이 가능하다[7]. 그러나 호남선은 설계속도 180 km/h 구간으로 고속선인 350 km/h 구간에 비해 상대적으로 전차선의 압상량이 작다고 보고되므로 검측용 전류 센서가 팬터그래프와 접촉될 가능성이 있다[10]. 따라서 현재까지의 전차선과 조가선의 전류 검측은 안전상의 문제로 기존선 구간인 180km/h 이하급 전차선로에서만 검측 사례가 보고된 바 있다[6,7]. 그러나 조가선은 압상량으로 인한 전차선과의 혼촉의 가능성이 없으므로 고속선에서의 조가선 전류검측은 가능하다.

본 논문에서는 경부고속철도 2단계에서 HEMU-430X

* High-speed Railroad Infrastructure System Research Team, KRRI, Korea
† Corresponding Author : Intermodal Transfer Systems Research Team, KRRI, Korea
E-mail : hsjung@krri.re.kr
Received : August 22, 2013; Accepted : September 17, 2013

(Highspeed Electric Multiple Unit - 430㎞/h eXperiment)의 고속열차 운행에 따른 조가선의 전류를 실시간 모니터링 하였다. 또한 측정된 결과를 이용하여 전차선과 조가선의 전류비를 예측하여 전차선의 전류값을 도출하였다. 전류 검측 구간의 전차선과 조가선의 전류비를 계산하기 위해 전선의 자기임피던스 및 각 선간의 상호임피던스를 칼슨-폴라첵 계산식을 이용하여 계산하였다. 본 논문에서 제안한 조가선 전류값을 이용한 전차선로의 전류비와 온도상승 효과 분석 결과는 전기철도 각 부품의 전류를 실질적으로 분석할 수 있는 기술로 팬터그래프와 전차선간의 상호운영 중 발생할 수 있는 이선아크 등 다양한 분석에 활용될 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 고속전차선로의 전류 검측 방법

전차선로 전류 측정은 팬터그래프와 접촉 상태에서 검측하여야 하므로 검측에 제한 사항이 많다. 본 논문에서는 조가선 검측을 위해 무선 기반의 상태 모니터링 시스템을 사용하였다[10]. 전류 검측 시스템은 크램프 타입의 전류센서를 직접 그림 1과 같이 조가선에 부착하고 검측된 값을 2.4 GHz의 무선안테나를 통하여 지상부에 송신하였다. 전차선로에 부착한 검측 시스템은 전기적으로는 지상부 검측장치와 절연되고 별도의 배터리를 장착하여 측정결과를 1,000 Sampling/sec로 실시간으로 지상부에서 저장하도록 하였다[11]. 조가선 전류 검측 구간은 경부고속선 신경주-동대구간 305 kp (kilometer post real) 지점에 설치하였으며 본 선로의 경간은 63 m 이며 세부사진을 그림 2에 나타냈다.

2.2 조가선 전류 검측구간 전차선로 전류비 분석

본 논문에서는 크램프 타입의 전류센서를 이용하여 열차 운행에 따라 조가선의 전류값을 검측하였다. 조가선은 팬터그래프와 접촉되지 않으므로 전류센서의 부착이 가능하나 전차선은 전류센서를 부착할 경우 팬터그래프와의 접촉에 의해 사고가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 조가선의 전류값을 이용하여 전차선의 전류값을 유추하도록 전류비를 분석하였다. 표 1에 조가선 전류 검측 구간의 전차선

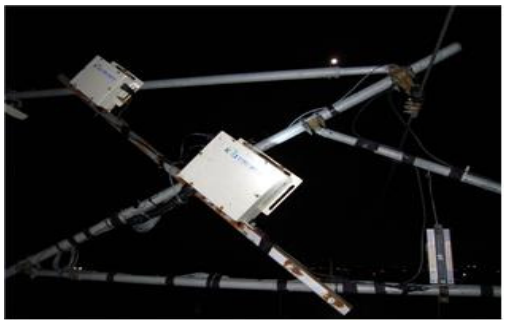


그림 1 경부2단계 고속철도 전차선로 전류검측을 위한 시스템 설치 사진

Fig. 1 Picture of current monitoring system on catenary wire in Kyoung-bu KTX II line

과 조가선의 세부 사양을 나타냈다. 검측 구간의 전차선로 세부 선종을 표 1에 나타냈다. 전차선은 Cu 150이며 조가선은 Bz 65이다. 조가선 전류 검측 구간인 경부고속선 신경주-동대구간 토공구간의 표준장주도는 그림 2에 나타내었다.

전차선과 조가선의 전류분배는 임피던스와 전류의 관계식을 이용하여 구할 수 있다. 특히 전차선과 조가선의 자기임피던스 및 상호임피던스를 각각 고려하여 구하는 것이 일반적이다. 이때 전차선로의 자기 임피던스 및 상호임피던스는 칼슨-폴라첵의 식이 이용된다. 조가선 검측 구간의 전차선과 조가선의 전류비를 계산하기 위해 전선의 자기임피던스 및 각 선간의 상호임피던스를 칼슨-폴라첵 계산식을 이용하여 아래와 같이 계산하였다[6].

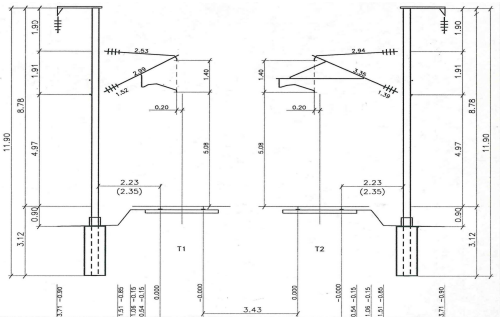


그림 2 경부고속선 신경주-동대구간 토공구간 장주도

Fig. 2 Infrastructure gauge of Kyoung-bu KTX Line from Shinkyoungju to Dongdaegu

표 1 경부고속선 전차선 및 조가선 세부사양

Table 1 Physical properties of overhead contact wire and catenary wire

	전차선	조가선
표준타입	Cu 150	Bz 65
지름 [mm]	13.6	10.5
전기저항 [Ω/km]	0.1173	0.4474
설치 높이 [m]	5.08	6.48
장력 [kgf]	2000	1400
무게 [kg/m]	1.334	0.605

전차선 자기 임피던스(Z_T, Cu 150㎟)는 식 (1)과 같이 계산되며, 이 때 전차선의 내부 임피던스와 외부 임피던스 Z_{Ti} = 0.1173 + j0.0188 [Ω/㎞] 및 Z_{To} = 0.0584 + j0.8857 [Ω/㎞] 이다.

$$Z_T = Z_{Ti} + Z_{To} = 0.1757 + j0.9046\ [\Omega/㎞] \quad (1)$$

또한 조가선의 자기 임피던스(Z_M, Bz 65㎟)는 식 (3)에 의해 계산할 수 있다.

여기서, 등가높이는 아래와 같이 계산된다.

$$h_{M0} - \frac{2}{3} \cdot \frac{WL^2}{8T} \times 100 = 6.39[\mathrm{m}] \quad (2)$$

(W : 무게, L : 경간길이(50m), T : 장력)

이 때 조가선의 내부 임피던스와 외부 임피던스는 각각 Z_{Mi} = 0.4474 + j0.0188 [Ω/㎞] 및 Z_{Mo} = 0.0582 + j0.9054 [Ω/㎞] 이다.

$$Z_M = Z_{Mi} + Z_{Mo} = 0.5056 + j0.9243\ [\Omega/㎞] \quad (3)$$

또한, 조가선의 높이(h_M) = 6.39 [m]이고 전차선의 높이(h_T) = 5.08 [m]이며 두선의 수평거리(b) = 0 [m] 일 때, 전차선과 조가선의 상호 임피던스(Z_{TM}) 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{TM} = 0.0583 + j0.4900\ [\Omega/㎞] \quad (4)$$

전차선과 조가선에 흐르는 전류비를 예측하기 위해서 단위길이당 전압강하가 동일한 특성을 이용하였다.

전차선 전압강하와 조가선 전압강하가 같기 때문에 아래 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있으며 전차선과 조가선에 흐르는 전류를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 전차선과 조가선의 전류비를 계산하여 식 (8)에 나타내었다.

$$V_T = V = Z_T I_T + Z_{TM} I_M \quad (5)$$

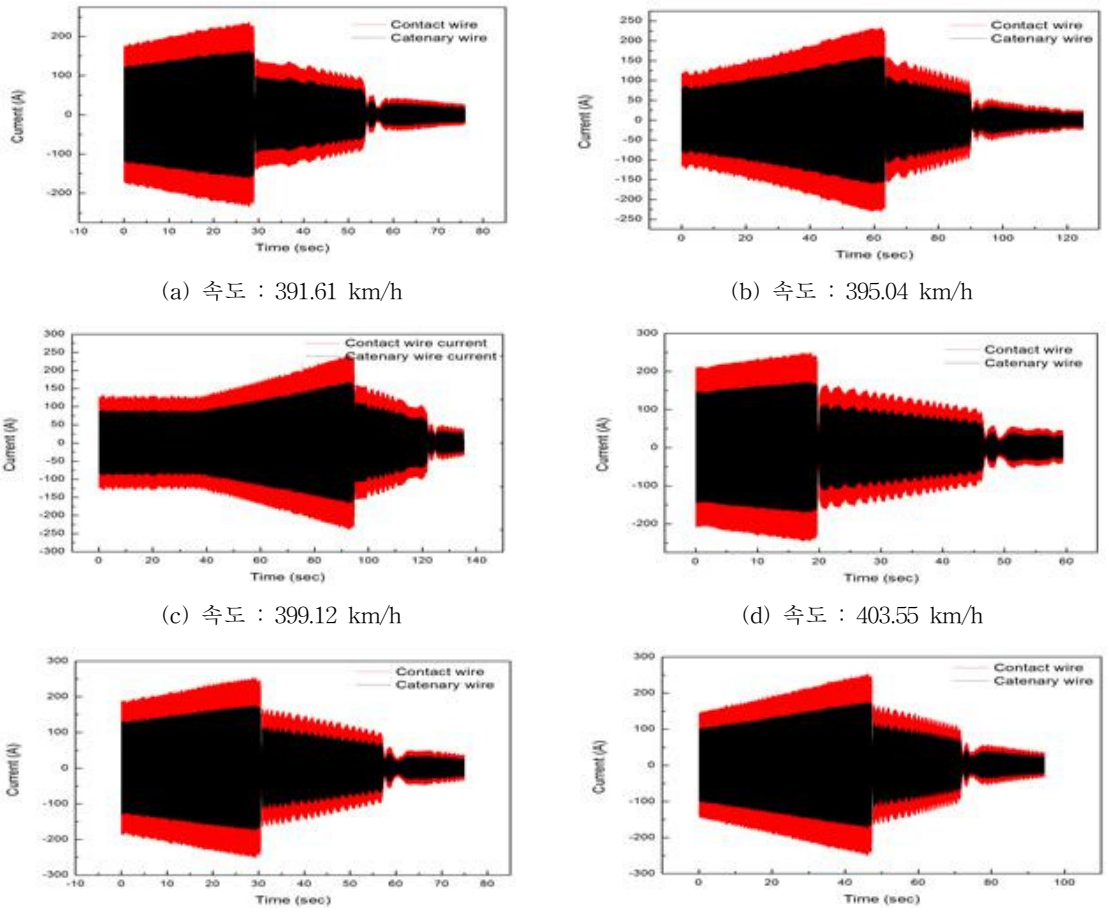
$$V_M = V = Z_{TM} I_T + Z_M I_M \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_T Z_M - Z_{TM}^2} \begin{bmatrix} Z_M & -Z_{TM} \\ -Z_{TM} & Z_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$I_T : I_M = \frac{(Z_M - Z_{TM})}{(Z_T Z_M - Z_{TM}^2)} : \frac{(Z_T - Z_{TM})}{(Z_T Z_M - Z_{TM}^2)} = 0.8206 : 0.5671 \fallingdotseq 59.1 : 40.9\ [\%] \quad (8)$$

2.3 경부고속선 전차선로 전류 검측 현장시험 결과

전차선로는 전기철도 차량에 전기에너지를 전달하며 변전소의 급전거리 이내에 복수의 전기철도 차량의 급전이 가능하다. 따라서 전차선로의 전류를 1개의 지점에서 측정하더라고 급전 범위이내에는 전기적으로 연결되어 있으므로 열차부하에 따른 전류 검측이 가능하다. 본 논문에서는 급전범위 이내에 1개의 차량이 운행 중 일때의 전류값 만을 검측하였다. 복수의 차량이 급전중인 경우 다양한 패턴이 나타날 수 있어 해석이 어려우므로 고속철도 신경주와 동대구 구간에 1개의 차량에 대해서만 조가선의 전류값을 실시간으로 모니터링 하였다. 그림 3에 신경주-동대구 구간의 경부



(a) 속도 : 391.61 km/h

(b) 속도 : 395.04 km/h

(c) 속도 : 399.12 km/h

(d) 속도 : 403.55 km/h

(e) 속도 : 405.06 km/h

(f) 속도 : 411.59 km/h

그림 3 경부고속철도 조가선 전류 검측결과 및 전류비에 따른 전차선 전류값

Fig. 3 Results of current wave from between contact and catenary wire in accordance with current ratio in overhead contact line

고속철도 조가선 전류 모니터링 결과와 조가선 전류에 따른 전차선 전류값을 나타냈다. 조가선 전류는 1,000 Hz의 속도로 검측하였으며 차세대 고속철도 차량의 운행에 따른 전류값이다. 검측 결과 조가선 전류의 경우 최대 72.4 A까지 증가 하며 운전 패턴에 따라 서로 다른 전류값을 나타내는 것을 알 수 있다. 조가선 전류 측정 구간은 차세대 고속열차 시험을 위해 최고속도 운행 이후 정지하므로 전류의 량이 시간에 따라 작아지는 패턴을 나타낸다. 식 4에 따라 조가선의 전류값을 총 전류비의 40.9%로 보고 이때 전차선의 전류값을 59.1%로 하여 전차선 전류값을 유추하였다. 조가선 전류가 54.9 A인 경우 전차선의 전류는 79.3 A 이다. 이 때 전차선로의 총 전류값은 134.2 A로 계산되었다. 자세한 결과는 표 2에 나타내었다.

표 2 조가선 및 전차선 전류의 RMS 값

Table 2 RMS value of contact and catenary wire current

속도 [km/h]	조가선전류 [A]	전차선전류 [A]	조가선과 전차선 전류합 [A]
391.61	54.9	79.3	134.2
395.04	62.6	90.4	153
399.12	67.1	97.0	164.1
403.55	59.6	86.1	145.7
405.06	60.9	88.1	149
411.59	72.4	104.6	177

3. 결 론

본 논문에서는 고속철도 구간의 전차선과 조가선의 전류비 분석 및 400km/h 이상에서의 열차 운행 중 조가선의 전류 값을 실시간으로 검측하였다. 또한 측정된 결과를 이용하여 전차선과 조가선의 전류비를 예측하여 전차선의 전류값을 도출하였다. 조가선 검측 구간의 전차선과 조가선의 전류비는 칼슨-폴라첵 계산식을 이용하여 계산하였으며 각각 59.1 : 40.9의 비율로 분석되었다. 전류 분석 결과 Cu 150 mm 전차선의 연속 허용전류 값보다 작은 값을 나타내어 속도 향상에 따른 전차선로 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 "400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발" 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] K. Y. Um, Y. G. Park, S. H. Lee, "Development of Test-bed and Infra Technologies for 400 km/h High Speed Railway", Railway Journal, Vol. 15, No. 4, pp. 55-60, 2012. 8.

[2] Y. Kim, H. Li, M. Kang, J. M. Koo, C. S. Seok, K, Lee, S. Y. Kwon, "Bending Fatigue Life Evaluation of Pure Copper and Copper Alloy Contact Wire", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 12, pp. 1346-1350, 2012. 12.

[3] Korean Railway Standards, "Hard-drawn Copper Round Trolley Wire", 2006. 5.

[4] Korean Railway Standards, "Grooved Contact Wire Cu-Sn 150mm^2", 2013. 8.

[5] I. K. Kang, "Contact Lines for Electric Railways", Sungandang, p. 5, 2006.

[6] H. Jung, S. Kwon, Y. Park, "A Study on Deicing Currnet Estimation Technique and Configuration Process for Deicing System in the Conventional Line", Journal of The Korean Society for Railway, Vol 9, No 2, pp. 237-243, 2006. 2.

[7] S. Y. Oh, Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, J. T. Song, "Implementation of Electrical Property Assessment System for Overhead Contact Lines", Journal of the Korean institute of electronic material engineers , Vol 24, No 6, pp. 497-503, 2011. 6.

[8] S. Kwon, H. S. Jung, Y. Park, H. J. Park "A Study about Current Ratio between Catenary and Contact wire in Overhead Contact Line", Korean rail technology, Vol. 4, pp. 28-33, 2005.

[9] Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, S. Kwon, "Future Research Direction in Nanotechnology to Improvement of Railway System", Proceeding of the KIEEME Annual Summer Conference 2011, Vol. 12, p. 142. 2011. 6.

[10] H. K. Na, Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, H. J. Park, S. Y. Oh, J. T. Song, "Characteristic Measurement by a Real-time Data Acquisition System in Overhead Contact Wire", Journal of the Korean institute of electronic material engineers, Vol 20, No 3, pp. 281-285, 2007.

[11] Y. Park, S. K. Shin, K. Lee, J. Kim, W. Kim, "Analysis of Current Performance using Real-time Measurement of Current for Overhead Contact Line on the Track-side", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No 4, pp. 573-576, 2013. 4.

저 자 소 개

박 영 (朴 暎)

2000년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 2004년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원

정 호 성 (鄭 澔 聖)

1998년 성균관대 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학박사), 2002년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원

이 기 원 (李 基 源)

1997년 RIT(미) 기계공학 졸업(공학석사), 2009년 성균관대 기계공학 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 선임연구원