

전차선로 해빙시스템의 온도특성

Temperature Analysis of the De-icing System for Overhead Contact Wire

고병훈¹, 박 영², 정호성², 권삼영², 박현준^{2,a}

(Byeonghun Ko¹, Young Park², Hosung Jung², Samyoung Kwon², and Hyun-June Park^{2,a})

Abstract

The ice coats are built on 25 kV overhead contact wire when the temperature is lower than 0 °C. It generates shockwaves at the mechanical interface of the collecting strips of the pantograph and the contact wire. The de-icing processes should be performed to avoid shockwaves which are generated by a pulsed high-voltage arc discharge. This paper presents temperature analysis of the de-icing effects which could be applied to the overhead contact wire of railways using Joule heat. The results show that 350 A is the proper current for 0 °C conductor according to environmental condition such as velocity of air stream, ambient temperature and moisture.

Key Words : De-icing, Contact wire, Railway

1. 서 론

겨울철 전차선로 주변온도가 0 °C 이하일 때, 가공 전차선에서 발생한 서리 및 결빙은 팬터그래프의 습동판과 전차선 사이에 아크를 발생시켜 열차의 안전운행에 지장을 초래한다[1]. 해빙시스템은 전차선을 이용하여 임의의 폐회로를 구성하고, 폐회로에 일정 크기의 전류를 인가하여 발생하는 주울열을 이용해 서리를 녹이는 설비이다[2]. 야간에 열차운행이 없는 동안에 전차선로 착빙상을 감지하여 첫 열차 운행전 20 분에서 30 분간에 걸쳐 주울열을 이용하여 서리를 제거하는 것이며, 해빙시스템에 의한 전차선의 온도상승 효과는 인가전류의 크기 뿐 아니라, 전차선 주변의 대기온도, 풍속, 습도 등에 민감하다. 해빙시스템에 의해 전차선의 서리 제거를 위해서는 10 °C 정도의 온도상승이 필요하며, 현재까지 전류에 의한 전차선 온도

상승 효과는 이론적 정립은 되어있으나, 실제 선로에서 온도측정과 다양한 외부환경에 의한 온도변화 시험은 이루어지지 않고 있다[3].

본 논문은 동절기 전차선의 서리형성에 중요한 요소인 주변온도, 전차선온도, 풍속, 습도 등을 측정하기 위한 서리감지시스템을 개발하고, 해빙시스템의 인가전류의 크기 및 초기전차선의 온도에 따른 전차선 온도상승 효과를 분석하기 위하여 열평형방정식을 이용한 시뮬레이션과 항온·항습기 통한 모의시험을 실시하였다. 또한 충주변전소에서 현장시험을 실시하여 전차선의 실제적인 해빙효과에 관해서 종합적으로 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 열평형방정식 시뮬레이션

전차선 서리 발생 후 해빙시스템에 의한 온도상승 효과를 평가하기 위해서는 주변온도, 풍속, 일사량 등의 복잡하고 많은 변수를 고려해야 하지만, 본 연구에서는 입력함수에 의한 수치해석적 방법으로 접근하였다. 특히 해빙시스템 설계시 수행하는 전차선로의 해빙전류용량 계산은 전류인가 시간에 따라 온도변화가 크기 때문에 일반 전력계통

1. 과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학 (대전시 유성구 어은동 52)

2. 한국철도기술연구원

a. Corresponding Author : hjpark@krri.re.kr

접수일자 : 2007. 9. 6

1차 심사 : 2007. 9. 10

2차 심사 : 2007. 9. 18

심사완료 : 2007. 10. 9

에서의 전류용량 검토와는 달리 시간을 고려한 전차선의 열평형방정식을 식 (1)과 같이 수식화하였다[4]. 수식에 포함된 변수 및 상수는 IEEE의 가공선의 온도-전류관계 표준계산식을 참조하였다[5]. 수식 (1)로부터 전차선의 초기온도와 통전시킬 전류량을 초기화한 후 dT/dt 계산을 수행하였다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{A^2 s c} \left[\begin{array}{l} I^2 \rho_{20} \{1 + \alpha(T-20)\} \beta_a \\ + A d \eta H - A U h_c (T - T_a) \\ - A U \eta \sigma \{ (T+273)^4 - (T_a+273)^4 \} \end{array} \right] \quad (1)$$

위 식을 통해 t 시간 때의 도체온도 T 을 구할 수 있으며 전차선의 온도가 목표온도 이상 올라가면 전류를 0 으로 하며, 전차선 온도가 떨어져 주변온도와 수렴하게 하였다. 전차선 Cu110을 시뮬레이션과 모델링에 이용하였고, 일사량은 0 으로 하여 시뮬레이션 하였다.

2.2 서리감지시스템의 제작

서리감지시스템은 서리발생의 중요한 요소인 전차선의 온도, 주변온도, 풍속 등을 측정하여 취득한 데이터를 사령에 전달되도록 그림 1과 같이 시스템을 개발하였으며, 로점은 수식 (2)에 의해서 계산한다[6].

$$T_{df} = \frac{T_n}{\frac{m}{\log\left(\frac{P_w}{A}\right)} - 1} \quad (2)$$

여기서, T_{df} : 로점온도,

T_n : 로점 관계상수

P_w : 수증기압

A : 절대습도,

m : 온도에 따른 상수 값

전차선 온도측정은 전차선과 같은 종인 $\Phi 12 \times 300$ mm 동봉을 설치하여 서리점 오차를 최소화하였으며, 저항체 PT100 Ω EC751 CLASS $\frac{1}{2}$ B 정밀형 온도센서를 사용하여 대기의 온도와 전차선의 온도가 선로주변 환경에 의해 다르게 나타나게 하였다. 또한 로점 센서를 비롯한 풍속 변환기와 선로 온도변환기 등을 내부온도 조절기가 있는 별도의 외함에 설치함으로써 오차범위를 최소화하였다. 서리

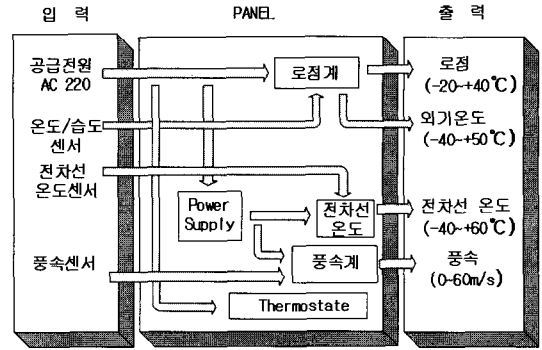
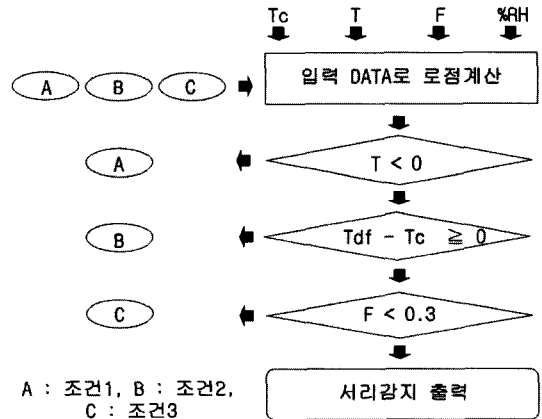


그림 1. 서리감지시스템의 입력과 출력.

Fig. 1. Input and output of the frost observation system.



A : 조건1, B : 조건2,
C : 조건3

T_c : 전차선 온도, T : 대기온도, T_{df} : 로점온도,
 F : 풍속, %RH: 상대습도

그림 2. 서리감지를 위한 알고리즘.

Fig. 2. Algorithm for the frost observation.

의 감지조건은 센서에서 측정한 전차선 온도, 풍속 등이 다음 3가지 조건이 동시에 나타날 때 서리감지시스템의 알람이 동작하도록 하였다.

- 조건 1. 전차선 온도가 이슬점온도 보다 낮을 때
- 조건 2. 전차선 온도가 0 °C 이하일 때
- 조건 3. 풍속 < 3 m/s 때

그림 2는 서리감지를 위한 알고리즘을 나타낸다. 전차선의 온도, 대기온도, 로점온도, 풍속 등을 종합적으로 판별하여 서리의 발생유무를 판별하도록 구현하였으며, 별도의 모니터 설치하여 전차선과 주변 환경에 대한 모니터링이 가능하게 하였다.

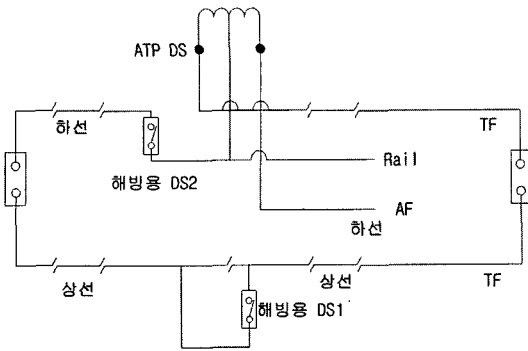


그림 3. 현장시험을 위한 해빙루프 구성.
 Fig. 3. Configuration of the De-icing loop for the field test.

2.3 해빙효과 검증을 위한 현장시험

인가전류의 크기 따른 해빙효과를 평가하기 위해서 항온·항습기내에 지그를 설치하고, 유입변압기를 통하여 200 A에서 450 A까지 전류를 공급하면서 최대온도상승폭과 해빙에 필요한 시간을 측정하였다. 또한 초기전차선 온도에 따른 해빙효과를 분석하기 위하여 항온·항습기의 온도조절의 온도조절을 통해 전차선의 초기온도에 따른 전차선온도상승 측정하였다. 모의시험을 통하여 인가된 전류크기와 전차선 초기온도에 따른 온도상승 효과를 평가할 수 있었다.

선로주변 온도, 습도, 풍향 등이 해빙효과에 미치는 영향을 검증하기 위한 현장시험은 그림 3과 같이 중복선 음성 급전구분소 (SP : Sectioning Post)와 충주 전철변전소 (SS : Substation)에서 봉양SP까지 총 50.79 km에 대하여 변전소 절연구간에 단로기와 AT (Auto Transformer) 중성점 연결용 단로기를 추가 설치하여 실시하였으며, 해빙 전류와 루프를 바꾸어 가며 전차선의 온도변화를 측정하였다[7]. 현장 시험시 열화상 카메라 (TH9100, NEC San-ei)를 전차선과 동일한 높이에 설치하고 온도계, 습도계 등을 현장주위에 설치하여 주변 환경이 전차선온도상승효과에 미치는 영향에 대해서 평가하였다[8].

3. 결과 및 고찰

주울열을 이용하여 서리를 녹이는 효과는 주변 온도, 습도, 풍량 등에 따라 민감하게 달라진다. 따라서 여러 주변 환경에 대한 검토가 필요하다. 그

러나 온도상승을 고려할 때 역구내, 터널 등을 포함하는 넓은 구간에 걸쳐 온도가 다를 수가 있으므로 최대 한계 값을 계산의 기준으로 삼아야 한다.

그림 4는 전차선의 초기온도가 0 °C 때 200 A, 300 A 전류를 공급하고 전차선의 온도상승을 관찰한 결과이다. 모의시험은 항온·항습기를 이용하여 전차선의 온도를 0 °C까지 냉각시킨 후 유입변압기를 이용하여 전차선에 200 A, 300 A를 흘렸다. 시험결과 시뮬레이션과 모의시험 모두에서 해빙에 필요한 10 °C 온도상승을 기록하지 못했다. 그림과 같이 전차선에 전류가 공급되고, 500 초까지 급격한 온도상승이 일어났으나, 600 초가 지난 후에는 300 A 전류공급에서는 8 °C에서 수렴되었으며, 200 A 전류에서는 3 °C에서 수렴되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 전차선의 초기온도가 0 °C 또는 -0.8 °C인 경우 300 A 이하의 전류로는 해빙이 충분하지 못함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과에서도 모의시험에서와 마찬가지로 온도상승 효과는 거의 일치하였으며, 전류 투입 직후 온도가 상승하는 기울기가 다소 차이가 보이는 것은 목표 온도 값 도달 후 전류를 제한하는 시간이 전류에 따라 온도 상승폭이 틀려 나타난 결과 때문인 것으로 보인다.

그림 5은 전차선의 초기온도가 -0.1 °C, -4.5 °C 인 경우 전류공급 변화에 따른 전차선의 온도변화를 나타내고 있다. 전차선의 초기온도는 0 °C 시험과 마찬가지로 항온·항습기를 이용하여 전차선의 초기온도를 -0.1 °C 와 -4.5 °C 가 되도록 냉각하여 서리를 발생시킨 후 전차선에 전류를 공급하였다. 시험결과 초기온도가 -4.5 °C인 경우 모의시험에서는 300 A 전류를 흘렸을 때 852 초 후 해빙목표온도인 10 °C 온도상승을 충족하였으며, 열평형방정식 시뮬레이션에서도 다소 차이가 있기는 하였으나, 850 초 이전에 해빙에 필요한 10 °C 온도상승을 기록하였다. 모의시험과 시뮬레이션 결과를 통하여 전차선의 초기온도가 -4.5 °C 인 경우 300 A의 전류공급 만으로도 충분히 해빙에 필요한 10 °C 온도상승이 일어남을 확인할 수 있다. 전차선의 초기온도가 -0.1 °C인 경우는 350 A 전류를 전차선에 공급하여 시험하였으며, 시험결과 전류공급 후 859 초가 지났을 때 해빙에 필요한 10 °C 온도상승을 기록하였다. 시뮬레이션 시험결과 역시 -0.1 °C 시험에서와 마찬가지로 최고온도 및 온도상승시간에서 다소 차이를 보였으나, 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

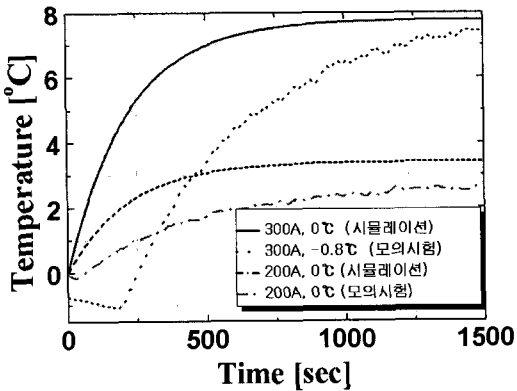


그림 4. 200 A, 300 A에서 전차선온도변화.
Fig. 4. Temperature variation of the overhead contact line with 200 A and 300 A.

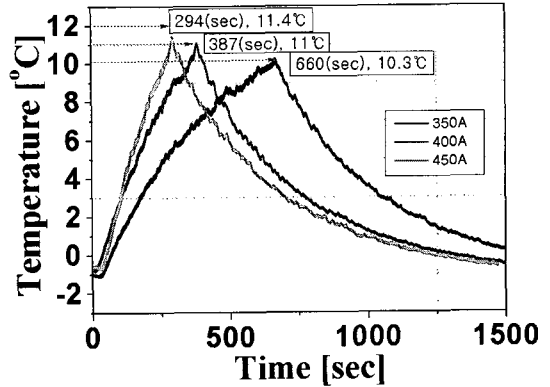


그림 6. 전류에 따른 전차선온도변화.
Fig. 6. Temperature variation of the overhead contact line according to current.

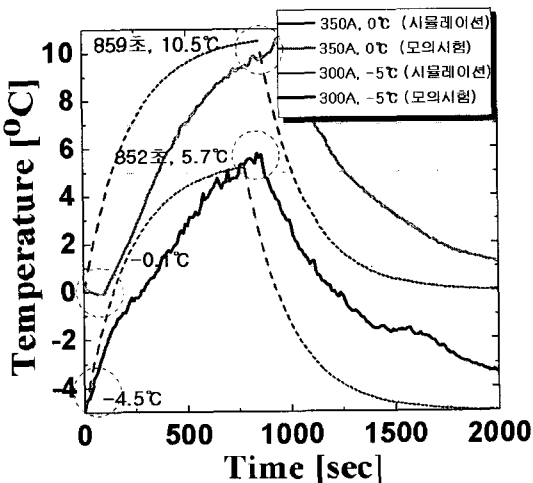


그림 5. -0.1 °C, -4.5 °C에서 전차선온도변화.
Fig. 5. Temperature variation of the overhead contact line with 0.1 °C and -4.5 °C.

시험을 통하여 전차선 해빙을 위한 적정 시험전류 및 운영시간은 전류의 크기 뿐 아니라, 전차선의 초기온도 역시 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

전류크기에 따른 전차선의 최대온도와 온도상승에 필요한 시간을 그림 6에 나타내고 있다. 그림과 같이 공급전류가 크면 클수록 전차선의 온도상승 기울기가 크게 나타났으며, 전차선의 초기온도가 -1 °C 인 경우 전차선에 전류 450 A를 공급하였을 때 최대온도상승은 11.4 °C로 나타났으며, 온도상승에 필요한 시간은 294 초가 걸렸다. 전류를 400 A 공급하였을 경우는 450 A를 공급하였을 때 보다

다소 낮은 11 °C 온도상승을 기록하였으며, 온도상승에 필요한 시간은 387 초로 기록되었고, 350 A를 공급하였을 때는 400 A 보다 낮은 10.3 °C 온도상승에 660 초의 시간이 소요되었다. 시험을 통하여 전차선해빙에 필요한 온도상승의 시간은 전차선에 공급된 전류의 크기에 큰 영향을 받은 것을 확인할 수 있었다.

주변 환경이 전차선의 온도상승 효과에 미치는 영향을 평가하기 위해서 실시한 충주변전소 현장 시험은 해빙루프에 전류를 공급하여 측정온도로부터 10 °C의 상승 이후에 전류 공급을 중지하여 실시하였으며, 현장시험의 특성상 일몰 전 시스템을 활성화 하게 되므로 일사량은 무시하고 풍속, 습도, 주변온도만을 고려하였다[9]. 현장 시험시 환경 조건과 해빙시스템 가동 후 전차선의 온도변화를 표 1에 정리하였다. 시험 전 풍속은 0.40 m/s 였으며 전차선의 온도측정 후에는 0.41 m/s 로 기록되었다. 습도는 시험 전후 49 %와 50 %로 1 % 차이가 있었으며, 대기온도는 1 °C 차이를 기록하고 있다. 현장시험결과 전차선의 초기온도는 12.8 °C 를 기록 하였고, 전차선의 최대온도가 26.5 °C 일 때 전류공급을 중단하였다.

표 1. 시험환경과 전차선 온도변화.

Table 1. Environmental condition and temperature variation of the overhead contact line.

장소	구분	시험전	시험결과	변화량	비고
충주선	풍속 m/s	0.40 m/s	0.41 m/s	0.01 m/s	개활지
	습도	49 %	50 %	1 %	
	전차선온도	12.8 °C	26.5 °C	13.7 °C	
	대기 온도	13.5 °C	12.5 °C	1 °C	

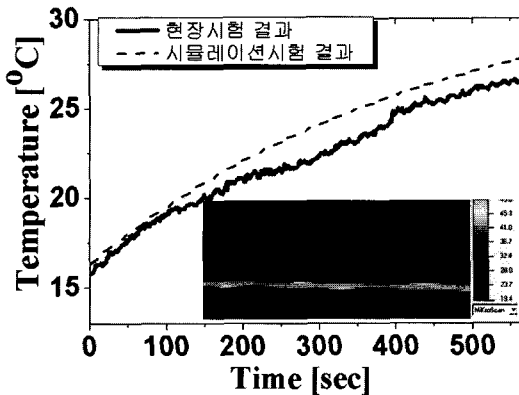


그림 7. 시뮬레이션과 현장시험 결과 비교와 전차선 열화영상.

Fig. 7. Comparison of simulation result with the field test result and thermal image of overhead contact line.

그림 7은 현장 시험시 얻은 전차선의 열화 이미지와 전차선 전류공급에 따른 온도상승 효과의 시뮬레이션 결과와 현장시험 결과를 비교 한 것이며, 200 초와 550 초 사이에서 다소 온도차이가 있지만 그림과 같이 거의 일치하였다.

4. 결론

본 논문에서는 해빙시스템 인가전류의 크기, 초기전차선의 온도 그리고 선로주변 환경에 따른 전차선의 온도상승효과를 평가하기 위하여 열평형 방정식 시뮬레이션, 항온·항습기를 통한 모의시험, 충주변전소에서 현장시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전차선의 초기온도가 0 °C 일 때는 300 A 이하의 전류로는 해빙에 필요한 10 °C 상승이 불가능하였으며, 350 A 가 적정함을 시뮬레이션과 모의시험을 통하여 확인할 수 있었다.
2. 초기전차선 온도가 -4.5 °C인 경우는 300 A 만으로 해빙목표를 충족하여 전차선 초기온도에 따라 적절한 전류의 크기가 다르다는 것을 알 수 있었다.

3. 전류크기에 따른 온도상승시험을 350 A, 400 A, 450 A를 인가하여 실시하였으며, 그 결과 -0.1 °C의 전차선을 해빙목표인 10 °C 상승하는데 660 초, 387 초, 294 초가 각각 걸리는 것으로 평가하였다.

해빙시스템 인가전류의 크기와 전차선의 초기온도 및 선로주변 환경에 따른 전차선의 온도상승효과를 평가한 본 연구결과는 해빙시스템을 위한 서리감지시스템의 개발과 동절기 해빙시스템 운영에 기여할 것이다.

참고 문헌

- [1] J. L. Laforte, M. A. Allaire, and J. Laflamme, "State-of-the-art on power line de-icing", Atmospheric Research, Vol. 46, No. 1, p. 143, 1998.
- [2] Ladislav F., "Thermal interaction of long welded rails with railway bridges", Rail international, Vol. 16, No. 3, p. 5, 1985.
- [3] 정호성, 권삼영, 박영, "기존선 해빙시스템을 위한 해빙전류 예측기법 및 구성 절차에 관한연구", 한국철도학회논문지, 9권, 2호, p. 237, 2006.
- [4] 김주락, 권삼영, 이기원, 창상훈, "시간 변수를 고려한 전차선로 허용전류 계산 기법 연구", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 2001춘계학술대회논문집, p. 401, 2001.
- [5] IEEE standard for calculation the current-temperature relationship of bare overhead conductors, IEEE, 1993.
- [6] "해빙시스템용 서리감지기 개발 및 성능평가 보고서", 한국철도기술연구원, 2005.
- [7] 박영, 권삼영, 정호성, 박현준, 조용현, 김주락, 안병립, 원우식, 이주, "해빙 시스템을 이용한 전차선 온도 특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 2005하계학술대회논문집, p. 601, 2005.
- [8] "전차선 해빙시스템 구성에 대한 시뮬레이션 및 성능평가 보고서", 한국철도기술연구원, 2005.
- [9] "해빙시스템 교육자료", 한국철도시설공단, 2002.