

해빙시스템에 의한 전차선의 온도변화에 관한 연구

(A Study on Temperature Variation of Contact Wire by De-icing System)

안병립* · 이 주**

(Byeong-Lib Ahn · Joo Lee)

요 약

동절기 전차선의 서리와 결빙은 매우 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 팬터그래프의 집진 스트립의 기계적 표면과 전차선 사이에 서리 또는 결빙으로 인한 아크가 발생하게 된다. 이에 따른 전기적 저항은 팬터그래프와 전차선 사이의 전류의 품질을 감소시킨다. 해빙시스템은 동절기 전차선의 서리와 결빙을 녹이는 역할을 한다. 해빙시스템의 원리는 전차선의 임피던스의 Joule열을 이용하여 서리와 결빙을 제거하는 것이므로 전차선의 온도는 인가전류가 증가할수록 증가하였으며, 풍속이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있었다.

Abstract

The frost and freezing on contact wire in winter is a very serious problem. Shocks at the mechanical interface of the collecting strips of the pantograph and the contact wire. Extra electrical resistance, which may affect quality of current collection at the contact wire / collecting strips of pantograph interface. De-icing system is to melt frost or freezing in contact wire. The principle of de-icing system is to melt frost or ice by Joule heat of contact wire impedance. The temperature of the contact wire was increased with increasing the current. But temperature of contact wire was decreased with increasing the velocity of the wind.

Key Words : De-icing System, Overhead Contact Wire, Railway, Configuration Process

1. 서 론

동절기에 전차선로 주변의 온도가 영하인 경우 가공 전차선에 서리 또는 결빙이 형성될 수 있다. 이때 차량이 운행될 경우 팬터그래프의 습동판과 전차

선 사이에 서리 또는 결빙으로 인하여 아크가 발생하게 된다. 이러한 아크는 팬터그래프 접촉 스트립을 손상시키며, 집전전류의 품질을 저하시키며, 열차의 안전운행에 지장을 초래하게 된다. 또한 팬터그래프 습동판과 전차선 사이에 발생하는 아크는 전파를 발생시켜 선로 주변의 통신선과 일반 대중에게 영향을 줄 우려가 있다[1].

동절기 전차선에 발생하는 서리 및 결빙을 제거하기 위해서 경부고속철도 고속선에서는 해빙시스템을 도입하여 운영 중에 있다. 해빙시스템은 본선 전

* 주저자 : 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 한양대학교 전기제어공학전공 부교수

Tel : 02-2220-0349, Fax : 02-2295-7111

E-mail : Ahn21c@unitel.co.kr

접수일자 : 2008년 6월 26일

1차심사 : 2008년 7월 7일

심사완료 : 2008년 7월 22일

해빙시스템에 의한 전차선의 온도변화에 관한 연구

차선에 대하여 해당 구간 전차선을 임시로 폐회로를 형성하고, 폐회로에 일정 전류를 흘려주어 발생하는 Joule열(전류저항에 의한 발열)에 의해 서리나 결빙을 녹이고 건조하여 전차선의 결빙 형성을 막는 시스템이다[2-3].

국내의 철도시스템은 속도향상 및 효율적인 에너지 활용 등을 위하여 기존선의 전철화가 지속적으로 추진되고 있다. 기존선의 경우에는 속도향상을 위해 선로개량, 탈빙 차량 도입 등이 추진되고 있으며, 우리나라 기후 특성 및 고속화로 인한 동절기의 해빙 시스템 도입이 절실하게 요구되고 있다. 하지만 국내에는 경부고속철도에 유일하게 설치되어 운영되고 있을 뿐이며, 기존선 구간에 대해서는 기술적인 검토마저 이뤄지지 않은 실정이며, 또한 현재 경부고속선에 설치되어있는 해빙시스템은 프랑스의 기술과 엔지니어링 및 자재로 구축되어 유지 및 보수에 상당한 어려움을 겪고 있다. 따라서 기존선 구간에서의 해빙시스템 운용을 위해서는 전차선에 발생하는 정확한 서리 및 결빙 상태를 감지하는 서리 감지 센서뿐만 아니라 온도, 습도, 풍속 등의 기후조건 및 해빙구간의 토공, 교량, 터널에 대한 선로조건 검토가 있어야 한다. 또한 선로 임피던스 및 해빙 전류 등의 기술적 검토를 통한 기존선 구간에 적합한 해빙시스템 구축 방안 및 운용 방법 등에 대한 연구가 절실히 필요하다.

본 연구에서는 동절기 기존선 전철화 구간의 전차선에서 발생한 서리를 제거하는 해빙효과를 분석하기 위하여 전류량, 풍속, 대기온도에 따라 전차선의 온도 상승효과를 시뮬레이션하였다. 또한 전차선의 서리 발생을 감지하기 위한 서리감지기를 개발하였으며, 실제적인 해빙효과 및 서리감지기 동작특성을 검증하기 위한 모의시험을 실시하였다.

2. 실 험

2.1 해빙시스템의 원리 및 시뮬레이션 조건

해빙시스템의 기본 원리는 전차선이 0[°C]에 가까이 있고, 서리가 발생되었을 때 해빙시스템에 의하

여 전차선에 전류를 흘리고 Joule열에 의하여 온도를 높여 녹이는 것이다. 보통 0[°C]에 가까운 온도에서 전차선을 덮는 서리를 녹이는데 약 15분 이내의 시간이 필요한 것으로 알려져 있다. 일반적인 해빙 루프를 그림 1에 나타내었다.

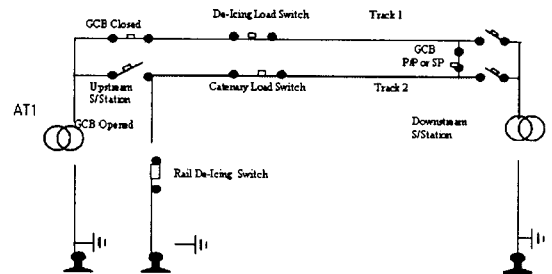


그림 1. 해빙루프의 원리
Fig. 1. Principle of de-icing loop

Joule열을 이용하여 얼음을 녹이는 효과는 여러 주변상황에 따라 민감하게 달라진다. 따라서 여러 기상상황에 대한 검토가 필요하다. 그러나 가장 큰 영향은 바람의 세기이다. 또한 온도상승을 고려할 때 역구내, 터널 등을 포함하는 넓은 구간에 걸쳐 온도가 다를 수가 있으므로 최대 한계값을 계산의 기준으로 삼아야 한다.

표 1. 전선 도체들의 제원
Table 1. Factor of contact line

계 수	전차선	조가선	단 위
단면적	1.11E-4	6.55E-5	[m ²]
비중	8,950	8,500	[kg/m ³]
비열	386	353	[J/kg °C]
저항률	1.774E-8	2.8E-8	[Ω · m]
저항의 온도계수	0.00385	0.00383	
직경	0.01234	0.0105	[m]
흡체계수	0.5	0.8	
일사량	0.1	0.1	[W/cm ²]
둘레 길이	0.0401	0.0329	[m]
주위온도	-10~0	-10~0	[°C]
볼츠만 상수	5.67E-8	5.67E-8	[W/m ² · K ⁴]
풍속	0.5~2	0.5~2	[m/s]

전차선 착빙에 대한 해빙효과를 계산을 통해 평가하기에는 영향변수가 많고, 상황설정이 매우 복잡하므로 어려운 일이다.

시뮬레이션 조건은 전류, 풍속, 터널 내, 개활지로 나누어 실시하였다. 각 전선의 특성 및 제원은 표 1과 같다. 이때 주위의 대기온도는 0[°C]와 -5[°C]로 가정하여 상정하였으며, 온도 상승 시간의 경우 해빙시스템 최대 예상 시험을 고려하여 40분으로 설정하였다.

또한 전차선은 레일에서 5~6[m]의 위치에 있으므로 바람이 없는 날에도 지표로부터 상승기류가 항상 있다고 볼 수 있기 때문에, 개활지 풍속을 0.5 [m/s]의 환경하에서 계산한 것이다. 그리고 전차선 (Cu110)의 온도 시뮬레이션은 도체의 열평형 방정식을 이용하여 계산하였다[4]. 수식에 포함된 변수 및 상수는 IEEE의 가공선의 온도-전류관계 표준계산식을 참조하였다[5].

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

2.2 해빙효과 모의시험 조건

본 시험은 전차선 해빙효과 검증을 위해 서리가 발생하는 0[°C]이하의 온도에서 전차선에 서리를 발생시킨 후 전력 공급장치로 전류를 인가하여 온도변화를 측정하였다.

전차선 해빙효과 검증은 별도의 지그를 제작하여 전력공급 장치로 전류를 인가하였고 전차선온도는 열전대를 전차선에 부착하고 자체 제작한 온도 측정 프로그램으로 시간에 따라 측정하였다. 모의시험 중 전차선과 주변 온도는 서리발생 온도인 0~-10[°C]로 하고 발생 후 10[°C] 정도의 상승을 목표로 전류를 300~450[A]까지 흘려 측정하였다. 시험 조건은 항온·항습기 온도 0~-5[°C], 전류 350[A], 400[A], 450[A], 풍속 2.0[m/s]에서 시험하였으며 전차선의 전류는 Labview8.5을 이용한 자체 시뮬레이션 소프트웨어를 이용, K-type 열전대를 전차선에 부착하여

온도를 시간에 따라 측정하였다. 그림 2는 모의시험의 시스템 구성도를 간략하게 나타낸 것이다.

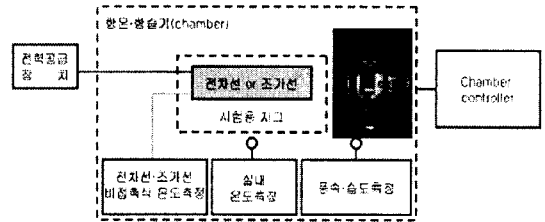


그림 2. 모의시험 시스템 구성도
Fig. 2. Configurations of lab test system

3. 결과 및 고찰

3.1 시뮬레이션 결과

그림 3은 0[°C], 350[A]의 전류를 공급하고 풍속의 변화에 따른 전차선의 온도변화를 시뮬레이션한 결과이다. 풍속에 관계없이 전류의 인가시간이 증가할수록 전차선의 온도가 상승하며 약 20분 지나면 온도 증가가 둔해지는 것을 예측할 수 있다. 풍속에 따른 전차선의 온도는 풍속이 빠를수록 전차선의 상승속도가 느리고 상승온도 또한 작은 것을 알 수가 있다. 이는 풍속이 증가할수록 전차선의 열에너지가 대기 중의 공기로 인해 방출이 쉽게 이루어지기 때문이다.

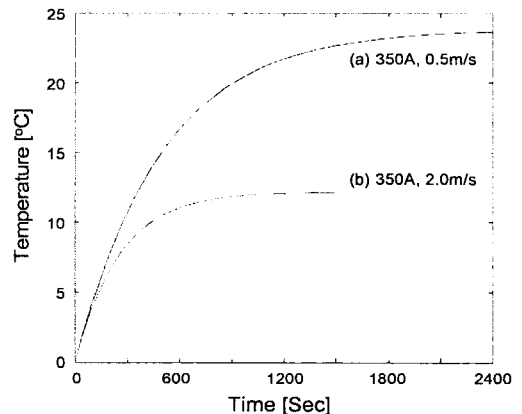


그림 3. 풍속변화에 따른 전차선 온도 변화
Fig. 3. Temperature variation of contact wire according to wind velocity

해빙시스템에 의한 전차선의 온도변화에 관한 연구

그림 4는 0.5[m/s]의 풍속에서 인가전류의 변화에 따른 전차선의 온도변화를 시뮬레이션한 결과이다. 인가전류가 증가함에 따라 전차선 온도의 상승속도가 빠르고 상승온도 또한 높다는 것을 알 수 있다. 350[A]의 인가전류와 0.5[m/s]의 풍속일 때 약 23 [°C]까지 전차선의 온도가 상승하는 것을 관찰할 수 있다.

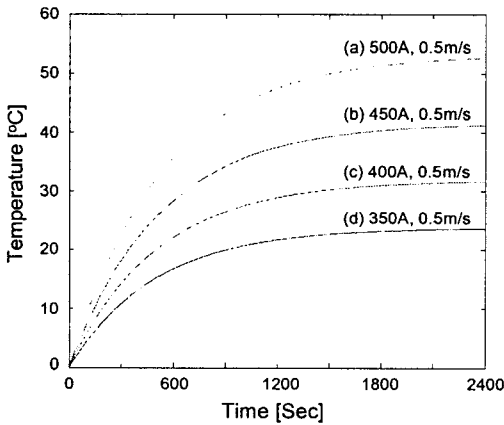


그림 4. 전류 변화에 따른 전차선 온도변화
Fig. 4. Temperature variation of contact wire according to current

그림 5는 350[A], 바람이 없는 터널안의 전차선의 온도변화를 시뮬레이션한 것이다. 터널안은 개활지가 0[°C]일 때 상대적으로 온도가 높기 때문에 5[°C]로 설정을 하였다. 전류의 인가시간이 증가할수록 온도는 차츰 증가하였으며 40분 경과 시 약 45[°C]까지 상승하였다.

해빙전류를 흘려준 후 전차선 온도가 목표온도가 도달하면 전류를 제한하여야 한다. 목표 온도를 10 [°C]로 잡고 전차선 온도가 그 이상일 때 제한하여 초기 상태로 복귀할 때까지 시간을 시뮬레이션하였다.

그림 6은 전류에 따른 목표온도(10[°C]) 도달시간을 시뮬레이션한 것이다. 인가전류가 증가할수록 10[°C]의 목표온도에 도달하는 시간은 급격히 짧아지는 것을 알 수 있다. 350[A]의 인가전류를 가했을 때 약 660초 만에 10[°C] 상승하였다. 초기온도 도달 시간은 거의 인가전류에 영향을 받지 않는 것을 예상할 수 있다.

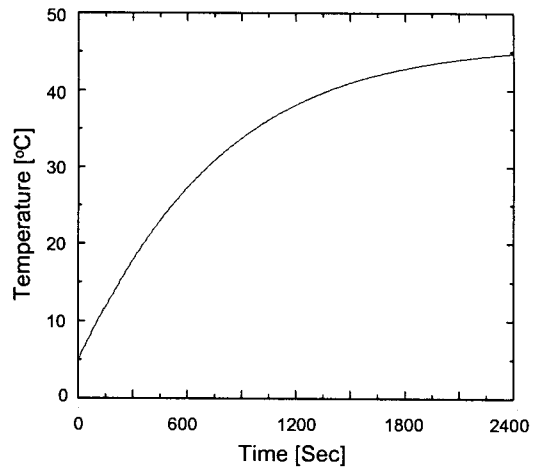


그림 5. 터널안의 전차선 온도변화
Fig. 5. Temperature variation of contact wire in the tunnel

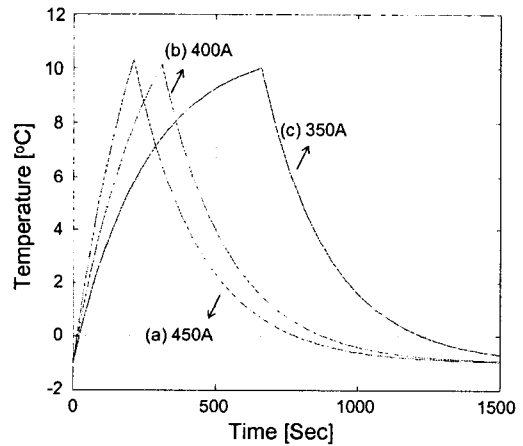


그림 6. 전류에 따른 목표온도(10[°C]) 도달시간
Fig. 6. Attainment time of a target temperature(10[°C]) according to current

그림 7은 전차선 초기 온도 변화에 따른 온도변화를 시뮬레이션한 결과이다. 초기온도에 관계없이 약 10분이 초과되면 10[°C]의 온도상승이 일어나며, 초기 온도가 낮을 때 온도가 10[°C]상승하는데 걸리는 시간이 적게 걸리는 것을 알 수 있으며 그 외에 큰 차이는 없었다.

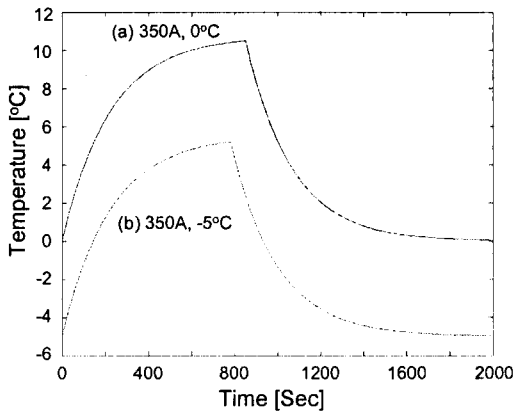


그림 7. 전차선 초기온도에 따른 온도 변화
 Fig. 7. Temperature variation according to start temperature of contact wire

표 2. 시뮬레이션 결과
 Table 2. Result of simulation

전류값	최고온도 (40분 후)	풍 속
250[A]	3.2[°C]	0.5[m/s]
300[A]	7.9[°C]	0.5[m/s]
350[A]	23[°C]	0.5[m/s]
350[A]	11[°C]	2.0[m/s]
400[A]	31[°C]	0.5[m/s]
450[A]	40[°C]	0.5[m/s]
500[A]	51[°C]	0.5[m/s]

표 2는 기준온도 0[°C]일 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 300[A]이하의 전류에서는 전차선의 온도가 해빙에 필요한 10[°C]이상 상승하지 못하는 것을 알 수 있다. 전차선 온도 상승은 해빙시스템 운영 전류에 의해 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 온도상승은 전차선 및 조가선의 기계적 강도에 영향을 주어 사고에 위험이 있다. 시뮬레이션 결과 전차선 온도상승은 전류 및 풍속에 따라 민감하게 달라지며, 해빙 효과를 나타내었다. 본 시뮬레이션을 통해 전차선로에 흐르는 전류 크기에 따라 적정한 해빙시스템 운영시간을 선택하여야만 안전운행이 가능할 것으로 판단된다.

3.2 모의시험과 시뮬레이션 비교

그림 8은 전차선의 초기온도에 따른 온도변화의 시뮬레이션과 모의시험을 비교한 것이다. 전차선의 초기온도는 각각 0[°C]와 -4.5[°C]가 되도록 냉각시켰으며, 서리를 발생시킨 후 냉각을 시켰다. 초기온도가 -4.5[°C]인 경우 350A의 전류를 흘렸을 때 약 852초 이전에 10[°C]이상 온도가 상승하였으며, 0[°C]인 경우는 약 859초 이전에 10[°C]이상 온도상승을 이루었다. 모의시험의 결과는 시뮬레이션 결과와 비교하면 약 2분 정도 온도상승 속도가 늦은 것으로 이는 항온·항습 챔버의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 그리고 이를 제외하면 시뮬레이션과 모의시험의 경향은 거의 일치하였다[6].

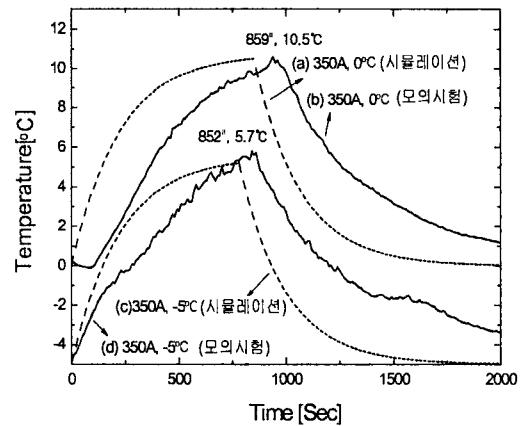


그림 8. 전차선의 초기온도에 따른 온도변화의 시뮬레이션과 모의시험의 비교
 Fig. 8. Comparison of simulation and lab test of temperature variation with start temperature of contact wire

그림 9는 전류변화에 따른 온도변화를 시뮬레이션과 모의시험을 비교한 것이다. 모의시험과 시뮬레이션 결과 모두 인가전류가 증가할수록 전차선의 온도는 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 모의시험과 시뮬레이션을 비교해 보면 모의시험의 온도상승 속도가 시뮬레이션에 비하여 적은 것을 제외하면 그 경향은 일치하였다.

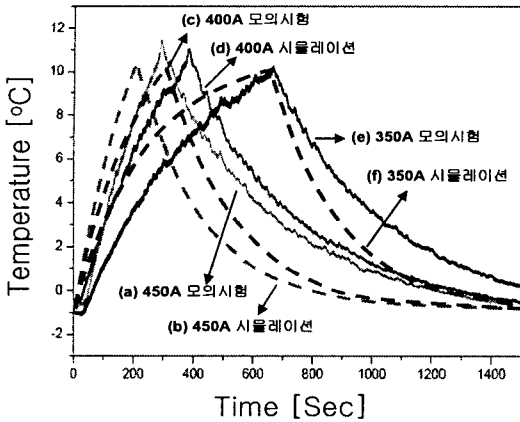


그림 9. 전류변화에 따른 온도변화의 시뮬레이션과 모의시험 비교

Fig. 9. Comparison of simulation and lab test of temperature variation with current

4. 결 론

본 연구에서는 동절기 기존선 전철화 구간의 전차선에서 발생한 서리를 제거하기 위한 해빙시스템의 해빙효과를 분석하기 위하여 전류량, 풍속, 대기온도에 따라 전차선의 온도 상승효과를 시뮬레이션하고 실제적인 해빙효과 및 서리감지기 동작특성을 검증하기 위한 모의시험을 실시하였다.

1. 300[A] 이하의 인가전류에서는 10[°C]이상 온도가 상승하지 않으며, 전차선의 온도는 인가전류가 증가함에 따라 급격히 증가하였다.
2. 전차선의 온도는 풍속이 증가할수록 감소하였으며, 초기온도에 의해 민감하게 변화하는 것을 관찰할 수 있었다.
3. 전차선의 온도변화는 시뮬레이션에 비하여 모의시험의 온도 상승속도가 약간 낮았지만 온도 변화경향은 일치하였다.
4. 350[A] 이상의 전류를 인가한 경우 약 15분 내에 전차선의 온도가 10[°C]이상 상승하였다.

References

- [1] J. L. Laforte, M. A. Allaire, and N. Laflamme, "State-of-the-art on power line de-icing", *Atmospheric Research*, Vol.46, No.1, P. 143, 1998.
- [2] Ladislav. f., "Shemal interaction of long welded rails with railway briges", *Rail International*, Vol.16, no.3, pp.5-24, 1985.
- [3] 한국철도시설공단, "해빙시스템 교육자료" 한국철도시설공단, 2002.
- [4] 김주락, 권삼영, 이기원, 창상훈, "시간변수를 고려한 전차선로 허용전류 계산 기법 연구", 대한전기학회, 전기기기 및 에너지변환시스템 2001 춘계학술대회 논문집, P. 401, 2001.
- [5] IEEE standard for calculation the current-temperature relationship of bare overhead conductors, IEEE, 1993.
- [6] 고병훈, 박영, 정호성, 권삼영, 박헌준, "전차선로 해빙시스템의 온도특성" 한국전기전자재료학회지, Vol.20, No. 11, p.1004. 2007.

◇ 저자소개 ◇

안병립 (安秉立)

1960년 6월 30일생. 2002년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대학교 전기공학과 박사과정.

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 큐슈대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 공과대학 전기 제어생체공학부 전기 제어공학전공 부교수.