

고속철도차량용 제빙액으로의 적용가능물질에 대한 용빙성능 평가

박경원 · 이준구* · 이흥기†

극동중앙연구소, *한국철도공사
(2019년 3월 26일 접수, 2019년 5월 7일 심사, 2019년 5월 18일 채택)

Ice Melting Capacity Evaluation of Applicable Materials of De-icing Fluid for High Speed Railway Rolling Stock

Gyoung-Won Park, Jun-Ku Lee*, and Hong-Ki Lee†

Kukdong R&D Center, 135, Hasinbeonyeong-ro, Saha-gu, Busan 49432, Republic of Korea
*Korea Railroad Corporation, 240, Jungang-ro, Dong-gu, Daejeon 34618, Republic of Korea
(Received March 26, 2019; Revised May 7, 2019; Accepted May 18, 2019)

초 록

동절기 고속철도차량 하부 및 대차부에 부착된 설빙이 차량 운행 시 도상자갈구간(침목이 받는 차량 하중 전달 및 침목 고정을 위한 자갈 구간)에서 고속으로 낙하하여 자갈을 비산시켜 이로 인한 철도차량 구조물 및 시설물의 피해가 보고되고 있으며, 이는 고속철도 개통 이후 지속되고 있다. 이러한 문제점 해결을 위해 자갈의 비산을 방지하는 네트, 인력 제빙, 이동식 열풍기 등을 사용하고 있으나 효율성이 떨어진다. 기존보다 효율적인 제빙을 위해 화학적 제빙액에 대한 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서는 화학적 제빙액으로 사용되는 물질들의 용빙성능, 동점도, 증발성 등을 평가하여 고속철도차량 제빙용으로 최적의 물질을 찾고자 한다. 평가 물질로는 유기산염류 4종(개미산나트륨, 초산나트륨, 개미산칼륨, 초산칼륨)과 알코올류 2종(프로필렌글리콜, 글리세롤)을 대상으로 하였다. 이때, 실내 평가에서는 개미산칼륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜이 유사한 용빙성능을 보였으나, 모사 살포 시스템을 이용한 용빙성능 결과, 프로필렌글리콜이 가장 우수한 성능을 보였다. 이는 프로필렌글리콜의 동점도가 2.989029 St로 다른 물질 대비 높아 얼음에서 보다 오래 체류하여 제빙하기 때문이다. 또한, 개미산칼륨과 초산칼륨은 결정이 석출되어 차량 외관에 악영향을 미치므로 사용에 어려움이 있다. 본 연구를 통해 프로필렌글리콜이 고속철도차량용 제빙액으로 최적의 물질임을 확인하였다.

Abstract

In winter season, the snow and ice accretion on the bottom of the high speed railway rolling stock and boogie part has fallen at a high speed from the ballast section (gravel section for the transmission of the rolling stock load received by sleepers and fixing sleepers), causing the gravel to be scattered, thereby damaging the railway rolling stock structures and facilities. In order to solve these problems, the gravel scattering prevention net, manual de-icing, and movable hot air machine were used, but their efficiency was low. For the more efficient de-icing than ever before, an optimum material for de-icing fluid for high speed railway rolling stock was developed by evaluating the ice melting capacity, kinematic viscosity, evaporation of the material used as a chemical de-icing fluid. Four kinds of organic acid salts (sodium formate, sodium acetate, potassium formate and potassium acetate) and two different alcohols (propylene glycol, glycerol) were used as evaluation materials. Potassium formate, potassium acetate, and propylene glycol had similar ice melting capacities in the indoor test, but the propylene glycol showed the best ice melting capacity in spraying the system simulation test. This is because the kinematic viscosity of propylene glycol was 2.989029 St, which is higher than those of other materials therefore, it could stay longer on the ice and de-icing. In addition, potassium formate and potassium acetate were difficult to be used since the crystals precipitated and adversely affected the appearance of the rolling stock. The propylene glycol is the most optimum as an de-icing fluid for the high speed railway rolling stock.

Keywords: High speed railway rolling stock, Ice melting capacity, De-icing fluid, Spraying system

1. 서 론

겨울철 고속철도차량 하부 및 대차부에 부착된 설빙이 차량 운행 시 도상자갈구간에서 고속으로 낙하하여 자갈을 비산시킨다. 이로 인한 철도차량 구조물 및 시설물의 피해가 발생하고 있으며, 이러한 동

† Corresponding Author: Kukdong R&D Center
135, Hasinbeonyeong-ro, Saha-gu, Busan, 49432, Republic of Korea
Tel: +82-51-941-0830 e-mail: lkh8765@kukdongrmd.com

절기 피해는 고속철도 개통 이후 지속되고 있다[1,2]. 직접적인 피해로는 고속철도차량 창유리, 차축 보호재, 주행장치 구성품, 궤도 구성품, 신호보안장치 등의 파손이 있으며, 간접적인 피해로는 기타 장애에 의한 열차지연, 유지보수 비용 부담 증가 및 주행 안전성 저하 등의 문제가 있다[3]. 고속철도차량 설비에 의한 자갈비산 피해 이외에도 철도차량에서는 출입문 동결, 제동장치 잔류수분 동결, 차량 노출부 전기장치 결빙 등의 차량 동결에 의한 열차 지연 및 부품장치 기능저하의 주요 요인이 되고 있어, 효율적인 고속철도차량 설비 피해 예방 및 대응 방안이 필요하다. 이러한 문제점 해결을 위해 철도운영기관에서는 자체적으로 자갈비산방지 네트, 감속 운행, 인력에 의한 차량 제빙 등 운영 및 유지보수 관점에서의 대책을 수립하여 대응하고 있지만 한계점을 가지고 있다[4-6]. 현재 철도차량(누리로, ITX-새마을/청춘, 무궁화 등) 동결 및 결빙 시 제빙작업은 차량기지 내 인력에 의한 제빙에 의존하고 있고 고속차량(KTX-1, KTX-산천, SR, 호남선 등)의 경우 이동식 열풍기를 사용하고 있지만 제빙에 소요되는 시간이 상당히 오래 걸려 에너지 효율이 떨어지며 동절기에 한정하여 일시적으로 인력이 과다하게 필요한 문제점들이 있다[7,8]. 최근 평창올림픽을 목표로 건설한 강릉차량기지에서 2017년 고압온수 살포 시스템을 설치하여 고속철도차량(KTX-1, KTX-산천)을 대상으로 즉각적인 제빙을 진행하고 있지만 이는 제빙작업 이후 남은 수분이 재결빙되는 문제점을 가지고 있으며, 물을 가열하는데 보일러를 사용하여 에너지 비용이 과다 소모된다. 또한, 물은 저장탱크와 이송배관의 부식을 유발하고 보관함에 있어 결빙, 동파 등의 문제점도 함께 가지고 있어 이를 대체할 수 있는 제빙액 개발이 필요한 실정이다[3,9].

따라서 본 연구에서는 물을 대체할 수 있는 제빙액 개발을 위한 기초연구로 일반 도로용, 공항 활주로용, 항공기 동체용 등 다양한 분야에 사용되는 제빙액 물질에 대한 용빙성능(ice melting capacity)을 비교 평가하였다. 평가 대상으로는 개미산나트륨(sodium formate), 초산나트륨(sodium acetate), 개미산칼륨(potassium formate), 초산칼륨(potassium acetate) 유기산염류 4종과 프로필렌글리콜(propylene glycol), 글리세롤(glycerol) 알코올류 2종으로 선정하였으며, 용빙성능 평가, 침투력 평가, 살포 시스템 모사 평가를 통해 현재 살포 시스템에 적합한 제빙액의 물질 선정에 활용하고자 하였다[10,11].

2. 실험

2.1. 재료 및 시약

실험에 사용된 개미산나트륨, 초산나트륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜, 글리세롤 시약은 Junsei Chemical Co., Ltd. (Japan)에서 구매하였으며, 개미산칼륨 시약은 Sigma-Aldrich (USA)에서 구매하여 사용하였다. 평가물질들은 살포 시스템 적용을 위해 수용액으로 평가하였으며, 그 농도는 각 물질의 최저 어는점일 때의 농도로 개미산나트륨 25 wt% (-22.5 °C), 초산나트륨 25 wt% (-13.2 °C), 개미산칼륨 50 wt% (-54.6 °C), 초산칼륨 50 wt% (-60.0 °C), 프로필렌글리콜 70 wt% (-67.7 °C), 글리세롤 65 wt% (-42.8 °C) 수용액을 제조하였다. 구매한 시약은 추가적인 정제과정 없이 사용하였으며, 용매는 전기전도도 10 μS/cm 이하 증류수를 사용하였다.

2.2. 용빙성능 평가

선정된 평가물질에 대한 용빙성능 평가를 위해, 환경부 고시 환경표지 인증기준 EL610, 제설제 내 EMS02-3 (2015)에 따라 시험을 진행하였다. 본 시험 방법은 직경 23.0 cm, 깊이 2.0 cm 시험용기(Figure 1(a))

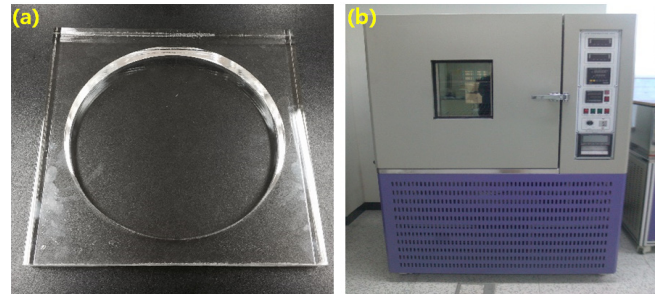


Figure 1. Ice melting capacity test equipment images of (a) test tray and (b) low-temperature test chamber.

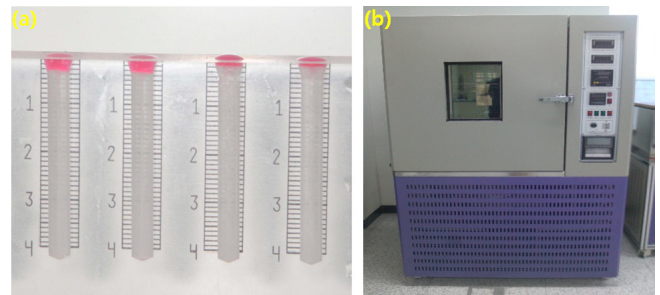


Figure 2. Ice penetration test equipment images of (a) test tray and (b) low-temperature test chamber.

에 5 mm 두께의 균일한 얼음을 생성하여 그 위로 평가물질 3.2 mL를 살포하고 시험온도 영하 20 °C에서 30 min 동안 방치 후 용빙액의 부피를 측정하였다. 시험온도는 저온항온조(Figure 1(b))를 이용하여 유지하였다. 시험은 평가물질당 3회 이상 평가하여 평균값을 계산하였으며, 용빙액의 무게 측정은 주사기를 이용하여 채취한 뒤 소수점 넷째자리까지 측정하였다[12].

2.3. 침투력 평가

선정된 평가물질에 대한 침투력을 평가하기 위해, 국제자동차기술자협회 SAE 규정 시험 방법 AIR 6211에 따라 시험을 진행하였다. 본 시험 방법은 가로 10.5 cm, 세로 2.5 cm, 높이 6.0 cm 직사각형 시험용기(Figure 2(a)) 내 직경 0.5 cm, 깊이 4.0 cm 구멍에 균일한 높이의 얼음을 생성하여 그 위로 염료를 혼합하여 색을 띄는 평가물질 25.0 μL를 살포하고 시험온도 영하 20 °C에서 5 min 동안 방치 후 평가물질의 침투높이를 측정하였다. 시험온도는 저온항온조(Figure 2(b))를 이용하여 유지하였다. 시험은 평가물질당 3회 이상 평가하여 평균값을 계산하였으며, 침투높이 측정은 육안으로 소수점 첫째자리까지 측정하였다.

2.4. 살포 시스템 모사 평가

현재 설치되어 있는 고압온수 살포 시스템에 대한 평가물질의 적용 평가를 위해, 실제 살포 시스템을 실험실적으로 모사하여 시험 진행하였다. 본 시험 방법은 먼저 가로 35.0 cm, 세로 32.5 cm, 높이 20.0 cm 직사각형 시험용기(Figure 3(a))에 220 g 얼음을 생성하여 1차 무게를 측정하고 용기 틀에 맞게 제작된 노즐 가리개(Figure 3(b))를 시험용기에 장착하여 준비한다. 준비된 시험용기에 60 °C의 평가물질을 노즐(Figure 3(c))을 통해 1 min 동안 살포하고 남은 얼음의 2차 무게를 측정하여 그 차를 이용하여 용빙량을 측정하였다. 시험은 평가물질당

Table 1. Quantitative Results of Ice Melting Capacity Test

| Material | Concentration (wt%) | Amount of ice melted (g) |
|-------------------|---------------------|--------------------------|
| Sodium formate | 25 | 0.9950 |
| Sodium acetate | 25 | 0.5512 |
| Potassium formate | 50 | 11.0559 |
| Potassium acetate | 50 | 11.1996 |
| Propylene glycol | 70 | 10.9478 |
| Glycerol | 65 | 8.5797 |

Table 2. Quantitative Results of Ice Penetration Test

| Material | Concentration (wt%) | Height of ice penetrated (mm) |
|-------------------|---------------------|-------------------------------|
| Sodium formate | 25 | 1.5 |
| Sodium acetate | 25 | 0.8 |
| Potassium formate | 50 | 3.5 |
| Potassium acetate | 50 | 3.5 |
| Propylene glycol | 70 | 3.4 |
| Glycerol | 65 | 2.7 |

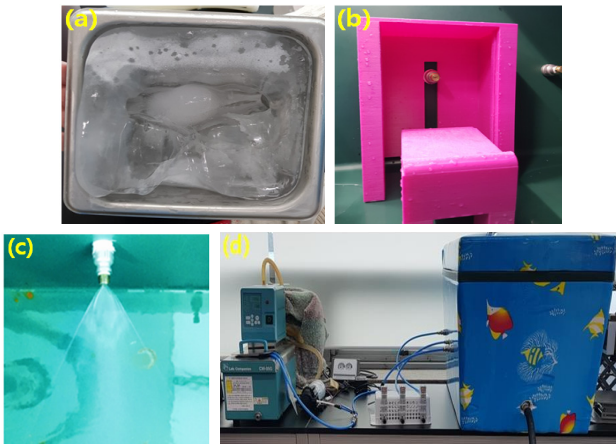


Figure 3. Spraying system simulating test equipment images of (a) test tray, (b) nozzle cover, (c) spraying nozzle and (d) total simulation equipment.

3회 이상 평가하여 평균값을 계산하였으며, 용빙량 측정은 저울을 이용하여 소수점 첫째자리까지 측정하였다[13].

3. 결과 및 고찰

3.1. 용빙성능 평가 결과

고속철도차량용 제빙액 개발을 위해 선정된 평가물질 6종이 동일한 조건 속에서 녹일 수 있는 얼음의 양에 대한 기초실험을 진행하였다. 평가 결과, 용빙량의 정량적 결과는 Table 1과 같이 나타났으며, 비교 평가 결과 Figure 4와 같이 나타났다. 유기산염류에서는 초산칼륨, 개미산칼륨과 같이 칼륨염 물질이 초산나트륨, 개미산나트륨과 같은 나트륨염 물질보다 우수한 용빙성능을 보였으며, 알코올류에서는 프로필렌글리콜이 글리세롤보다 우수한 용빙성능을 보였다. 이는 알칼리 금속의 1차 이온화 에너지 및 원자화 에너지 특성에 의해 칼륨이온이 나트륨이온보다 반응성이 크고, 분자 구조상 프로필렌글리콜이 글리세롤보다 분자 크기가 작아 보다 우수한 성능을 보인 것으로 판단된다. 본 실험을 통해 개미산나트륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜 수용액이 기존 고압온수의 대체제로 유효한 재료임을 확인하였다.

3.2. 침투력 평가 결과

고속철도차량용 제빙액은 철도차량 하부에 부착된 두꺼운 설빙을 빠르게 침투하여 제빙하기 위해 우수한 침투력이 요구된다. 선정된 평가물질 6종이 동일 조건 속에서 얼음을 침투하는 높이에 대한 기초 실험을 진행하였다. 평가 결과, 침투높이의 정량적 결과는 Table 2와

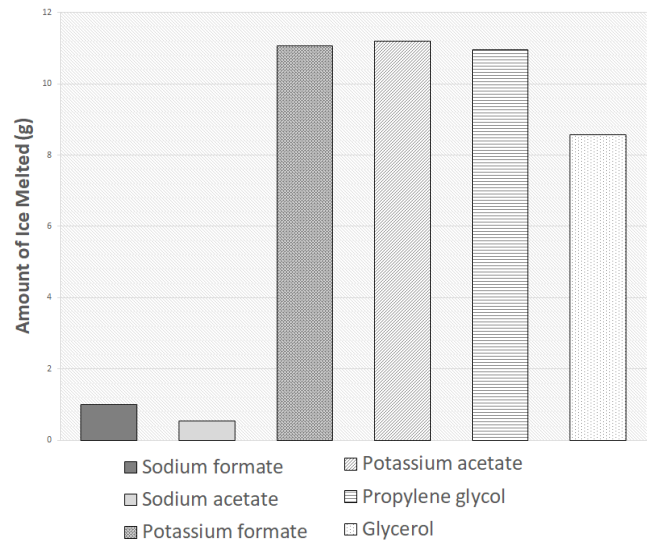


Figure 4. Comparative results of ice melting capacity.

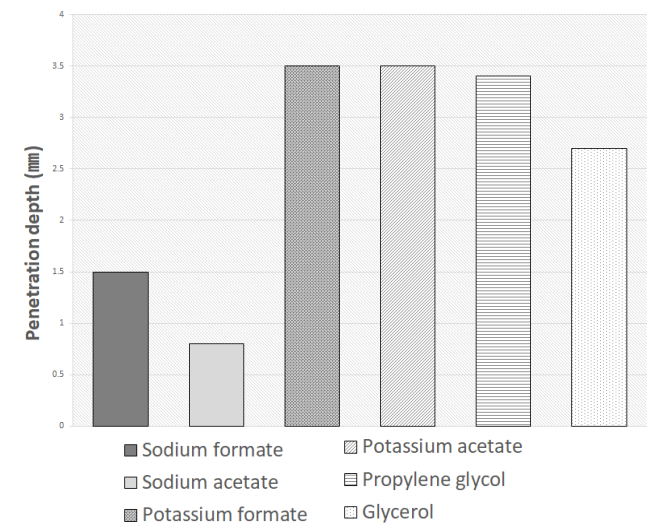


Figure 5. Comparative results of ice penetration test.

같이 나타났으며, 비교평가 결과 Figure 5와 같이 나타났다. 용빙성능 평가 결과와 동일하게 개미산칼륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜 수용액이 우수한 침투력을 보였으며, 이 또한 알칼리 금속의 1차 이온화 에너지 및 원자화 에너지 특성에 의해 칼륨이온이 나트륨이온보다 반응성이 크고, 분자 구조상 프로필렌글리콜이 글리세롤보다 분자 크기가

Table 3. Quantitative Results of Spraying System Simulating Test

| Material | Concentration (wt%) | Amount of ice melted (g) |
|-------------------|---------------------|--------------------------|
| Sodium formate | 25 | 134.5 |
| Sodium acetate | 25 | 120.3 |
| Potassium formate | 50 | 198.0 |
| Potassium acetate | 50 | 199.2 |
| Propylene glycol | 70 | 201.6 |
| Glycerol | 65 | 180.9 |

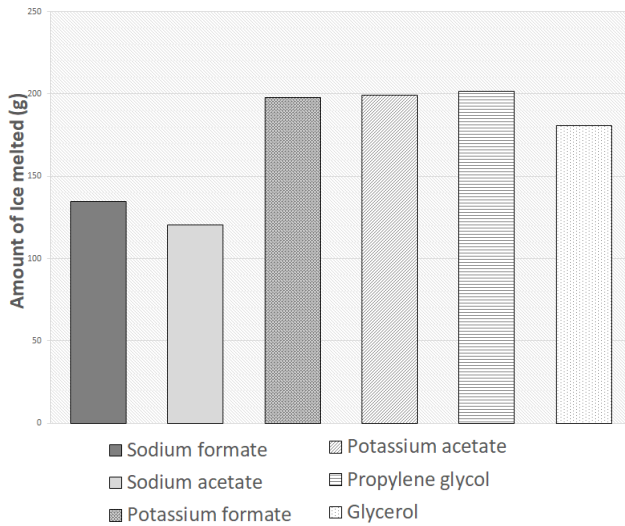


Figure 6. Comparative results of spraying system simulating test.

작아 보다 우수한 성능을 보인 것으로 판단된다. 본 실험을 통해 개미산칼륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜 수용액이 기존 고압온수의 대체제로 유효한 재료임을 확인하였다.

3.3. 살포 시스템 모사 평가 결과

3.3.1. 용빙성능 평가 결과

본 연구진이 최종적으로 개발하고자 하는 고속철도차량용 제빙액은 현재 강릉차량기지에 설치되어 있는 살포 시스템의 고압온수를 대체하기 위한 제품으로 선정된 평가물질 6종을 살포 시스템에 적용하여 평가하는 것이 실험의 요체이다. 그러나 실제 고속철도차량의 부품에 대한 부식 영향성 및 안정성 평가 등이 이루어지지 않아, 모사장비를 이용하여 진행하였다. 평가 결과, 용빙량의 정량적 결과는 Table 3과 같이 나타났으며, 비교평가 결과 Figure 6과 같이 나타나 프로필렌글리콜의 용빙성능이 가장 우수한 것을 확인하였다. 실내 평가결과와 상이하게 살포 시스템 모사 평가 결과에서는 프로필렌글리콜의 성능이 다소 우수한 것으로 나타났는데 이는 평가물질의 동점도 영향으로 판단된다.

3.3.2. 동점도 측정 결과

살포 시스템 모사 평가에서는 실내 평가와 달리 얼음에 살포된 평가물질이 중력의 영향을 받아 점차 탈락하게 되는데 이때, 평가물질의 동점도에 따라 얼음과의 접촉 시간이 변화된다. 이에 우수한 용빙성능을 보인 개미산칼륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜 수용액의 동점도

Table 4. Kinematic Viscosity of Materials

| Material | Concentration (wt%) | Kinematic viscosity (St) |
|-------------------|---------------------|--------------------------|
| Potassium formate | 50 | 0.996343 |
| Potassium acetate | 50 | 1.658821 |
| Propylene glycol | 70 | 2.989029 |

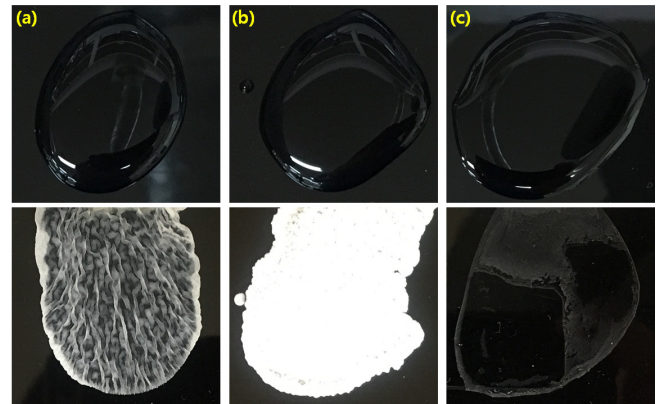


Figure 7. Evaporative test result images of (a) potassium formate, (b) potassium acetate and (c) propylene glycol.

측정을 실시하였다. 동점도(kinematic viscosity)는 중력 하에서 유체의 흐름에 대한 저항으로 정의되며, 점도계의 모세관 속으로 일정한 부피의 유체가 흐르는데 걸리는 시간을 측정하여 그 값을 구할 수 있다. 시험 방법은 KS M ISO 3104, KS M ISO 3105에 따라 측정하였으며, 시험온도 60 °C의 개미산칼륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜 수용액에 대한 동점도를 Table 4와 같이 측정하였다. 측정 결과, 프로필렌글리콜 수용액의 동점도가 2.989029 St로 가장 높았고, 이는 개미산칼륨 수용액의 약 3배, 초산칼륨 수용액의 약 1.8배에 달하는 측정값이다. 동일 중력 하에서 유체의 흐름에 대한 저항이 가장 높은 프로필렌글리콜 수용액은 얼음과의 접촉시간이 길기 때문에 개미산칼륨, 초산칼륨 수용액보다 많은 양의 얼음을 녹인 것으로 판단된다.

3.3.3. 증발성 평가 결과

본 연구진에서 개발하고자 하는 고속철도차량용 제빙액은 철도차량 하부의 제빙뿐만 아니라 지속적인 착설 방지를 위해 제빙액 도포 후 잔존액을 제거하지 않고 운행할 예정이다. 이때, 잔존액은 외부 환경 및 주행 조건 등의 조건에 따라 증발하게 되는데 증발 후 철도차량 외관에 미치는 영향을 알아보기 위해 증발성 평가를 진행하였다. 시험 방법은 동일한 도막 시험편 위에 평가물질 수용액 1 mL를 도포하여 상온(20 ± 5 °C)에서 30 days간 방치 후 육안으로 평가하였으며, 평가 결과는 Figure 7과 같이 나타났다. 개미산칼륨, 초산칼륨은 상온에서 백색 결정을 갖는 고형의 물질로써, 수용액에서 수분이 증발함에 따라 용질이 석출되어 확연하게 눈에 띄는 백색 결정이 생성되었다. 반면, 상온에서 액상을 갖는 프로필렌글리콜의 경우, 희미한 자국만이 확인되어 고속철도차량용 제빙액으로의 적용에 적합한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속철도차량 하부 및 대차부에 부착된 설빙으로 인한 피해 저감을 위한 고속철도차량용 제빙액에 적합한 물질의 평가를 위해 유기산염류 4종과 알코올류 2종의 용빙성능을 비교, 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실내 시험 결과, 용빙성능 평가 및 침투력 평가 모두에서 개미산칼륨, 초산칼륨, 프로필렌글리콜이 유사하게 우수한 성능을 보여 고압 온수를 대체할 제빙액 물질로 사용함에 있어 문제가 없을 것으로 판단된다.

2. 살포 시스템 모사 시험 결과, 프로필렌글리콜, 초산칼륨, 개미산칼륨 순으로 우수한 용빙성능을 보였으며, 실내 평가 결과와 상이한 이유로는 각 평가물질의 동점도 차이에 따른 얼음과의 접촉시간 차이로 판단된다.

3. 동점도 측정 결과, 살포 시스템 모사 시험 결과와 동일하게 프로필렌글리콜, 초산칼륨, 개미산칼륨 순으로 높은 동점도를 보여 동일한 조건에서 살포할 경우 프로필렌글리콜이 가장 오래 얼음과 접촉하는 것으로 나타나 비교적 많은 얼음을 녹이는 것으로 판단된다.

4. 중발성 평가 결과, 개미산칼륨과 초산칼륨에서는 흰색 결정이 석출되었으며, 프로필렌글리콜에서는 희미한 자국만이 남은 것으로 나타났다.

5. 용빙성능뿐만 아니라 고속철도차량 외관에 대한 문제점 등 모두를 고려할 때, 프로필렌글리콜이 현재 고속철도차량 제빙을 위한 살포 시스템에 가장 적합하다는 결론을 도출하였다.

감 사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 철도기술연구사업 “Anti-icing 기반 동절기 피해예방 기술 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다(19RTRP-B146026-02-000000).

References

1. J. Wang, J. Zhang, F. Xie, and Y. Zhang, A study of snow accumulating on the bogie and the effects of deflectors on the de-icing performance in the bogie region of a high-speed train, *Cold Reg. Sci. Technol.*, **148**, 121-130 (2018).
2. F. Xie, J. Zhang, G. Gao, K. Zhang, and J. Wang, Study of snow accumulation on a high-speed train's bogies based on the discrete phase model, *J. Appl. Fluid Mech.*, **10**, 1729-1745 (2017).
3. H.-B. Gwon, A study on the running speed control according to the snow accretion under the car body during the heavy snow, *J. Korean Soc. Railway*, **18**, 26-43 (2015).
4. H. Jeong, D.-S. Kim, J.-S. So, J.-W. Kim, S.-J. Lee, D.-H. Kang, and Y.-H. Kim, Operator requirement analysis of the double deck high speed train, *J. Korean Soc. Railway*, **10**, 1034-1039 (2014).
5. H.-B. Gwon, S.-W. Nam, D.-S. Kim, I.-W. Lee, and J.-S. Han, Research on countermeasures for ballast-flying phenomenon by accreted snow/ice from high-speed trains, *J. Korean Soc. Railway*, 77-82 (2004).
6. Y. Ji, K. Dan, and C. Lee, A mat for preventing flying ballast in the rail road, *Korean Patent* 2003646470000 (2004).
7. M. Bettez, *Winter Technologies for High Speed Rail*, Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology (2011).
8. L. Kloow and M. Jenstav, High-speed train operation in winter climate, *Stockholm Transrail Report*, BVF5 Winter R1 (2006).
9. H.-K. Lee, Watering system and heating scattering apparatus for multipurpose vehicles, *Korean Patent* 1020090046040 (2009).
10. H.-S. Sang, Snow removing effect of potassium acetate deicing chemicals, *Annual Conference of The Korean Society of Industrial Application*, 31-37 (2006).
11. B. Lee, B. Yun, J. Lee, and Y. Chung, Deicing performance with deicer types, *Int. J. Highway Eng.*, **7**, 391-396 (2005).
12. Y. Kim, K. You, C. Jo, and N.-H. Cho, Pavement impact evaluation of basic materials of airport airside deicers, *Int. J. Highway Eng.*, **18**, 25-34 (2016).
13. P.-S. Jang, Y.-S. Choi, and C. Park, Proposal of laboratory test and field test for performance qualification of anti-icing materials, *Annual Conference of The Korean Society of Disaster Information*, 127-128 (2017).