

발수 성분을 포함하는 프로필렌글리콜(PG) 기반 고속철도차량용 제·방빙액의 특성

박진명 · 김태현 · 양정무* · 윤차중* · 이흥기[†]

KD중앙연구소, *한국철도공사
(2022년 12월 27일 접수, 2023년 1월 16일 수정, 2023년 1월 25일 채택)

Properties of De/Anti-icing Fluid for High Speed Railway Rolling Stock Based on Propylene-glycol Containing Water Repellent Agent

Jin-Myeong Park, Tae-Hyun Kim, Jung-Mu Yang*, Cha-Jung Yun* and Hong-Ki Lee[†]

KD R&D Center, Busan 49432, Republic of Korea

*Korea Railroad Corporation, Daejeon 34618, Republic of Korea

(Received December 27, 2022; Revised January 16, 2023; Accepted January 25, 2023)

초 록

화학적 제빙 방법으로 프로필렌글리콜 제빙액은 동절기 고속철도차량 하부 및 대차부에 부착되는 설빙으로 인한 결빙을 녹이는데 적용가능하다. 프로필렌글리콜 제빙액을 운행 전 고속철도차량에 철도차량 하부 및 대차부에 미리 살포하여 눈의 부착을 최소화하면 해빙 효율을 더 높일 수 있다. 고속철도의 경우 프로필렌글리콜 제빙액을 살포하여도 고속으로 운행 시 대차 표면에서 제빙액은 거의 소실되기 때문에 눈의 부착으로 인한 결빙에 대한 방빙성능은 떨어진 다. 본 연구에서는 동절기 고속철도차량 하부 및 대차부에 부착되는 설빙으로 인한 결빙을 방지하기 위해 표면의 결빙을 방지하는 발수 성분을 포함하는 프로필렌글리콜 제·방빙액의 특성을 연구하였다. 발수제의 종류에 따른 점도, 융빙성능, 접촉각 및 방빙성능에 대한 비교 평가를 실시하여 고속철도차량 제·방빙액으로 최적의 물질을 찾고자 하였다. 평가 결과 에톡실란 타입의 발수제 성분을 포함하는 제·방빙액이 가장 적합한 것으로 확인하였다.

Abstract

As a chemical de-icing method, propylene glycol de-icing fluid is applicable for melting ice caused by snow and ice adhering to the lower part of high-speed rail rolling stock and bogie parts in winter. By spraying propylene-glycol de-icing fluid on high-speed rail rolling stock and bogie parts in advance to minimize snow adhesion, ice-melting efficiency can be further improved. In the case of high-speed rail rolling stock, even if propylene-glycol de-icing fluid is sprayed, the anti-icing performance is poor because the fluid is almost lost on the surface of the vehicle when operating at high speed. In this study, in order to prevent freezing caused by snow and ice adhering to the lower part of high-speed rail rolling stock and bogie parts, we have investigated the properties of propylene-glycol de/anti-icing fluid containing water-repellent agents that prevent surface freezing. We tried to find the optimal component for de/anti-icing fluid for high-speed rail rolling stock by evaluating the ice melting performance, contact angle, and anti-icing performance according to the types of water-repellent agent. As a result of the evaluation, it was confirmed that an de/anti-icing fluid containing an ethoxysilane-type water repellent agent was most suitable.

Keywords: High speed railway rolling stock, Anti-icing performance, De/anti-icing fluid, Spraying system, Water-repellent

1. 서 론

동절기 고속철도차량의 고속주행 시, 고속철도차량 하부 및 대차부에 착설로 인한 결빙된 설빙이 도상자갈구간에서 차량의 떨림으로 인해 고속으로 낙하하여 자갈을 비산시키게 된다. 비산된 자갈에 의해

철도차량 구조물 및 시설물의 피해가 지속적으로 발생하고 있다[1,2]. 특히, 겨울철 철도차량 유리창 파손의 주요 원인으로 차량 하부에 착설된 설빙의 낙하와 연관이 있음을 제시하였다[3]. 동절기 설빙의 낙하로 인해 발생한 물리적인 피해로는 고속철도차량 창유리 파손이 가장 많으며, 그 외 차축 보호재, 궤도 구성품, 신호 보안장치 및 주행장치 구성품 등의 파손이 있다. 이러한 파손으로 인해 차량 운행 및 유지 보수에 대한 간접적인 피해로는 열차지연, 유지보수 비용 부담 증가 및 주행 안전성 저하 등의 피해가 있다[4]. 고속철도차량 하부에 착설로 인한 결빙된 얼음에 의한 자갈비산 피해 이외에도 철도차량 출입문 동결, 제동장치 잔류수분 동결, 차량 노출부 전기장치 결빙 등

[†] Corresponding Author: KD R&D Center
Busan 49432, Republic of Korea
Tel: +82-51-941-0830 e-mail: lhk8765@kdmd.co.kr

의 차량 동결에 의한 열차 지연 및 부품장치 기능 저하의 문제도 함께 지속적으로 발생됨에 따라 동결기 de/anti-icing 기반 피해 예방 및 대응 기술이 필요하다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해 철도운영기관에서는 자체적으로 자갈비산방지 네트, 감속 운행, 인력에 의한 차량 제빙 등 운영 및 유지보수 관점에서의 즉각적인 대책을 수립하여 대응하고 있지만 효율성이 떨어진다[5-7]. 현재 철도차량(누리로, ITX-새마을, ITX-청춘, 무궁화호 등) 동결 및 결빙 시 제빙작업은 차량기지 내 인력에 의한 제빙에 의존하고 있고 고속차량(KTX-1, KTX-산천, SR, 호남선, 원강선 등)의 경우 이동식 열풍기를 사용하고 있지만 제빙에 소요되는 시간이 상당히 오래 걸려 에너지 효율이 떨어지며 동결기에 한정하여 일시적으로 인력이 과다하게 필요한 문제점들이 있다[8,9]. 따라서 이를 대체할 수 있는 효율적인 화학적 제·방빙 기술 개발이 필요한 실정이다[4,10]. 이전 연구에서 다양한 제빙액 물질에 대해 용빙성능 평가를 통해 살포 시스템에 적합한 프로필렌글리콜 타입의 제빙액을 선정하였다[11-14]. 제빙액은 이미 결빙된 설빙을 녹이기 위해 살포하는 것으로 결빙 부위가 클수록 얼음을 녹이는 시간 또한 길어지게 되므로, 제빙액을 고속철도차량에 미리 살포하여 눈의 부착을 최소화하면 해빙 효율을 더 높일 수 있다. 하지만 고속철도의 경우 제빙액을 살포하여도 고속으로 운행 시 대차 표면에서 거의 소실되기 때문에 눈의 부착을 방지할 수 없어 anti-icing (방빙) 성능은 떨어진다. 고속주행에서의 방빙성능 저하를 해결하기 위해 발수

제의 사용을 검토하였다. 최근 초발수성 표면을 이용하여 눈이 쌓이거나 얼음층이 형성되는 것을 막는 anti-icing 기능성 표면에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다[15-17].

따라서 본 연구에서는 효율적인 제·방빙을 모두 할 수 있는 화학적 제·방빙액 개발을 위한 기초연구로 발수 성분을 포함하는 프로필렌글리콜을 기반 de/anti-icing fluid에 대해 용빙 성능, 접촉각 및 방빙 성능에 대한 비교 평가를 실시하였다. 본 연구는 현재 살포 시스템에 적합한 제·방빙액 선정에 있어 기초 자료로 활용할 수 있다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시약

실험에 사용된 프로필렌글리콜(propylene glycol, PG) 시약은 Junsei Chemical Co., Ltd.(Japan)에서 구매하였으며, 프로필렌글리콜 70 wt%(-67.7 °C) 수용액을 제조하여 사용하였다. 용매는 전기전도도 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하 증류수를 사용하였다. 발수제는 Table 1과 같이 다양한 제품을 구입하였고, Table 2와 같이 프로필렌글리콜 수용액에 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 wt% 함량별로 첨가하여 평가를 진행하였다.

2.2. 동점도 평가

선정된 평가물질에 대한 동점도 평가는 살포시스템을 통해 분사되

Table 1. Water-Repellent Agent Type

Water-repellent agent	Maker	Type
HEXAFOR 6380P (6380P)	GCC	Meta-acrylic Fluorinated polymer
HYDROSIN NF-01 (NF-01)	GCC	Fat-modified paraffin
Q3-9030 (9030)	DOW	Fluoro-ethoxysilane
OFS-6011 (6011)	DOW	Amino-ethoxysilane

Table 2. Sample Designation, Composition, Kinematic Viscosity, Ice Melting Performance and Contact Angle of PG Based De/anti-icing Fluid

Sample designation (No.)	Composition (wt%)							Kinematic Viscosity (cSt, 60 °C)	Amount of ice melted (g)	Contact Angle (°)	
	PG	Water	6380P	NF-01	9030	6011	Total			1st	2nd
1	70.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	2.99	10.9478	15.4	25.6
2	69.5	30.0	0.5				100	2.97	10.9322	15.4	25.4
3	69.0	30.0	1.0				100	2.93	10.9166	15.4	25.5
4	68.5	30.0	1.5				100	2.88	10.9005	15.5	25.6
5	68.0	30.0	2.0				100	2.83	10.8853	15.5	25.6
6	69.5	30.0		0.5			100	2.95	10.9325	15.4	25.5
7	69.0	30.0		1.0			100	2.87	10.9164	15.4	25.6
8	68.5	30.0		1.5			100	2.80	10.8998	15.4	25.6
9	68.0	30.0		2.0			100	2.72	10.8851	15.5	25.6
10	69.5	30.0			0.5		100	2.96	10.9318	15.3	96.4
11	69.0	30.0			1.0		100	2.91	10.9163	15.4	103.1
12	68.5	30.0			1.5		100	2.87	10.9013	15.5	103.3
13	68.0	30.0			2.0		100	2.82	10.8861	15.5	103.4
14	69.5	30.0				0.5	100	2.95	10.9324	15.4	86.7
15	69.0	30.0				1.0	100	2.90	10.9157	15.4	92.4
16	68.5	30.0				1.5	100	2.85	10.9002	15.4	92.5
17	68.0	30.0				2.0	100	2.78	10.8858	15.5	92.5

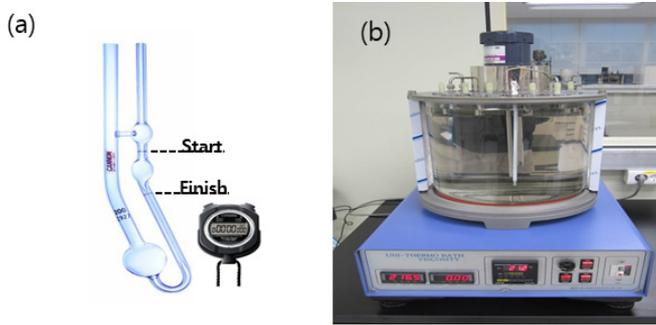


Figure 1. Kinematic viscosity equipment image of (a) test tube (b) oil bath.

는 분사 능력과 관련되어 있다. 제조된 제·방빙액에 대한 점도 성능 평가를 위해, 국제 동점도 규격인 ASTM D455-06에 따라 시험을 진행하였다. 본 시험 방법은 동점도관(Figure 1a)을 아세톤으로 세척·건조 후 일정량의 시료를 투입하여 측정고자 하는 온도와 시험액의 온도가 평행 상태가 되기 위해 측정 온도의 오일 베스(Figure 1b)에 20분 침지한다. 20분 후 압력을 이용하여 시험액을 시작점에 위치시켜 시험액이 시작점-종료점을 이동한 시간을 측정하여 동점도를 계산한다. 시험은 평가 물질 당 3회 이상 평가하여 평균값을 계산하였고, 소수점 둘째자리까지 기록하였다.

2.3. 용빙성능 평가

선정된 평가물질에 대한 용빙성능 평가는 환경부 고시 환경표지 인증기준 EL610. 제설제 내 EM502-3 (2015)에 따라 평가를 진행하였다. 시험 방법은 직경 23.0 cm, 깊이 2.0 cm 시험용기(Figure 2a)에 5 mm 두께의 균일한 얼음을 생성하여 그 위로 평가물질 3.2 mL를 살포하고 시험온도 영하 20 °C에서 30분 동안 방치 후 용빙액의 부피를 측정하였다. 시험온도는 저온항온조(Figure 2b)를 이용하여 유지하였다. 시험은 평가물질 당 3회 이상 평가하여 평균값을 계산하였으며, 용빙액의 무게 측정은 주사기를 이용하여 채취한 뒤 소수점 넷째자리까지 측정하였다[12].

2.4. 접촉각 평가

선정된 평가물질에 대한 접촉각을 평가는 한국산업표준(KS) 인증기준 자동차용 발수성 위셔액 KS M 2163 평가 항목 중 7.7 발수성 항목에 준하여 시험을 진행하였다. 본 시험 방법은 5 × 5 cm 시험편(강판, 고속철도 하부 재질)에 평가액을 도포 후 10분 동안 상온에 방치하고 시험편에 물을 떨어뜨려 액체-고체 표면사이의 계면에 발생하

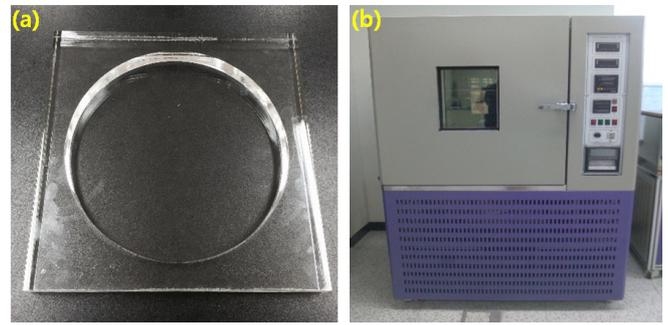


Figure 2. Ice melting capacity test equipment images of (a) test tray and (b) low-temperature test chamber.

는 액체의 표면장력에 의한 접촉각을 측정하는 방법이다. 고속철도의 경우 300 km/h 고속 주행으로 인해 살포된 제·방빙액이 대차표면에서 거의 소실될 것으로 예상되어, 본 평가에서는 위의 절차로 시행한 1차 접촉각 측정과 그 표면을 천으로 닦은 후의 2차 접촉각을 측정하였다. 시험은 평가물질 당 임의로 3지점에서 접촉각을 측정하고 평균을 구하여 소수점 첫째자리까지 측정하였다.

2.5. 방빙성능 평가

선정된 평가물질에 대한 방빙성능 평가는 항공기 동체용 인증기준 AS5901 “Water Spray and High Humidity Endurance Test Method for SAE AMS 1424 SAE AMS 1428 Aircraft De-icing/Anti-icing Fluids” 중 강설 대한 결빙 방지성능을 평가하는 WSET (Water Spray Endurance Test) 평가방법으로 진행하였다. 국내에서 WSET 평가 진행이 불가하여 본 연구에서 진행한 WSET 시험 방법은 AS5901 조건을 고속철도 용에 적합하도록 변경한 조건으로 진행하였으며, 평가에 사용된 장비의 사진은 Figure 3에 나타내었고 평가 조건은 Table 3에 정리하였다. 평가 방법은 동결 조건에서 10 (W) × 30 (L) cm 시험편(강판, 고속철도 하부 재질)에 5 g의 용액을 도포 후 스프레이 삭제, 노즐(Figure 3a)을 통해 물이 2시간 동안 계속 살포되며, 살포된 물은 도포된 시험편(Figure 3b)에 부착되어 동결 조건(저온항온챔버(Figure 3d) -10~-5 °C 유지)에 의해 시험편 표면에서 결빙을 형성하게 되며, 시험편에 결빙이 발생하는 시간을 측정하여 결빙 방지 성능을 평가하는 방법이다. 본 평가는 내부 구조(Figure 3c)로 인해 시험편의 경사면이 80° 이상으로 제·방빙액 도포 시 거의 대부분 경사면을 따라 아래로 흐르게 되며, 첨가된 발수제 성분이 시험편 표면에 잔류하여 결빙을 방지할 것으로 예상하였다. 아래 표에 평가 조건에 대해 정리하였다. 시험은 평가물질 당 3회 이상 평가하여 시험편 결빙이 발생하는 시간과 시험편 전체에 결빙이 발생하는 시간을 측정하였다.

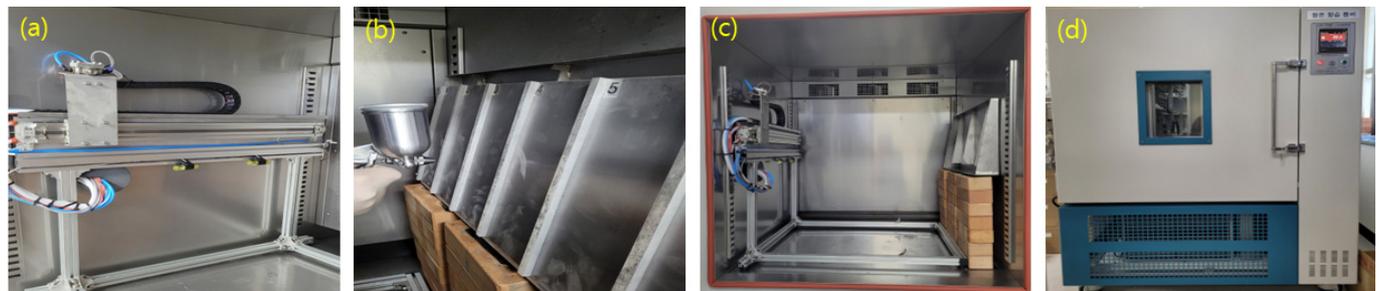


Figure 3. Water spray endurance test (WSET) equipment images of (a) nozzle, (b) test tray, (c) internal structure and (d) low-temperature test chamber.

Table 3. Test Condition of WSET

Test Condition	Bath, Test Plate Temp.	Angle	Water spray intensity	Test time
WSET	-10~-5 °C	80.0 ± 0.2°	2.0 g/dm ² /h	120 min

3. 결과 및 고찰

3.1. 등점도 평가 결과

점도 특성은 propylene glycol 기반 제·방빙액이 효율적인 화학적 제·방빙 방법으로서 인력이 아닌 살포시스템을 통해 살포 가능 여부와 관련되어 있다. 고속철도차량용 제·방빙액 개발을 위해 선정된 4종의 발수제를 프로필렌글리콜 수용액에 최대 2 wt% 첨가 시 점도 특성에 대해 Table 2에 정리하였고, 등점도 평가 결과 2.72~2.99 cSt 사이로 순수한 프로필렌글리콜 70 wt% 수용액과 크게 차이나지 않음을 확인하였다. 제·방빙액의 점도 특성은 68~70%를 차지하고 있는 기재인 프로필렌글리콜과 30%를 차지하고 있는 물로 인한 프로필렌글리콜 수용액의 특성에 의해 결정되는 것으로 확인되었다. 본 연구를 통해 발수 성분을 포함하는 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액 또한 살포시스템에 적용 가능할 것으로 판단하였다.

3.2. 용빙성능 평가 결과

고속철도차량용 제·방빙액 개발을 위해 제빙액의 특성인 용빙성능 평가를 진행하였고, 선정된 발수제의 종류 및 함량에 대해 동일한 조건 속에서 녹일 수 있는 얼음의 양에 대한 평가를 진행하였다. 용빙성능은 Table 2에 정리하였다. 용빙성능 평가 결과 녹은 얼음의 양은 10.8853 g부터 10.9478 g까지 용빙성능은 99.4~100%로, 순수한 프로필렌글리콜 70 wt% 수용액과 크게 차이나지 않음을 확인하였다. 용성성능 특성 또한 점도 특성과 동일하게 68~70%를 차지하고 있는 기재인 프로필렌글리콜과 30%를 차지하고 있는 물로 인한 프로필렌글리콜 수용액의 특성에 의해 결정되는 것으로 확인되었다. 발수 성분이 포함된 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액의 경우 발수제를 넣지 않는 순수한 프로필렌글리콜 수용액과 비교 시 용빙성능은 거의 동등하였으며, 제빙액으로서의 유효한 성능을 확인하였다.

3.3. 접촉각 평가 결과

동절기 고속철도의 경우 대설 지역을 운행 시 비산된 눈과 얼음이 대차표면에 부착되어 결빙을 형성하게 되고 이러한 결빙이 도산 자갈 구갈을 운행 시 떨림에 의해 떨어져 자갈을 비산시키게 되고 비산된 자갈에 의해 유리창 파손과 같은 겨울철 안전사고가 발생하게 된다. 따라서 겨울철 사고를 방지하기 위해 대차 표면에 눈과 얼음의 형성을 방해하거나 지연시키는 성능이 요구된다. 본 연구에서는 발수 능력을 가진 발수제를 프로필렌글리콜 제빙액에 첨가하여 대차 표면에 살포 후 빠르게 발수층을 형성시켜 발수층에 의해 눈과 얼음의 형성을 억제하는 방빙액으로서 유효한 성능을 가지는지 연구하였다. 접촉각 측정을 통해 높은 접촉각을 나타낼수록 발수 능력이 우수하며, 높은 발수력은 동절기 눈의 부착 및 결빙을 방지하거나 지연시킬 수 있을 것으로 판단하였다. 고속철도차량용 제·방빙액 개발을 위해 선정된 4종의 발수제를 프로필렌글리콜 수용액에 0.5, 1, 1.5, 2.0 wt% 첨가한 제·방빙액의 접촉각 평가를 진행하였고, Table 2에 정리하였다. 제·방빙액을 도포하지 않은 시험편의 물에 대한 접촉각은 25.6°로 측정되었으며, 순수한 프로필렌글리콜 70% 수용액을 도포한 시험편의

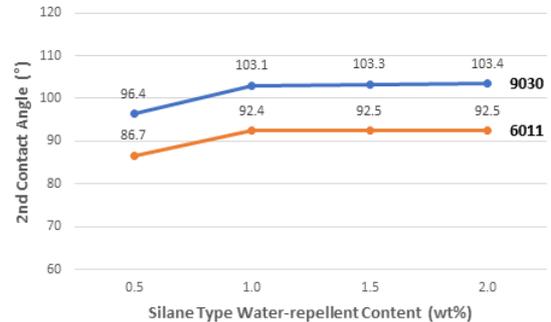


Figure 4. Effect of silane type water-repellent content on 2nd contact angle.

물에 대한 접촉은 15.4°로 측정되었다. 친수성의 프로필렌글리콜 수용액이 시험편 전체 표면을 덮고 있어 물이 시험편에 접촉 시 시험편 전체에 넓게 확산되어 더 낮은 접촉각이 측정된 것으로 판단하였다. 발수성분이 포함된 4종의 제·방빙액에 대한 함량별 1차 접촉각 측정 결과 발수 성분이 포함되어 있지 않은 프로필렌글리콜 수용액의 접촉각과 동일한 15.4° 정도의 낮은 접촉각이 측정되었다. 그 이유는 동일하게 기재인 친수성의 프로필렌글리콜 수용액이 시험편 전체 표면을 덮고 있어 발수제의 영향 보다 기재인 프로필렌글리콜의 영향으로 인해 낮은 접촉각을 보인 것으로 판단된다. 그러나 고속열차의 경우 고속주행으로 인해 프로필렌글리콜은 소실되어 사라지게 되므로, 실제 차량에서 발생할 수 있는 환경에 대한 평가가 필요하여 2차 접촉각에 대해 측정을 하였다. 2차 접촉각 측정 결과 GCC사의 HEXAFOR 6380P 제품과 HYDROSIN NF-01 발수제를 함량별로 첨가한 제·방빙액의 경우 도포하지 않은 시험편과 비슷한 25.4~25.6° 정도의 접촉각이 측정되었고, DOW사의 OFS-6011은 최대 92.5° 정도의 접촉각과 Q3-9030 발수제의 경우 최대 103.4° 정도의 높은 접촉각이 측정되었다. GCC사의 두 발수제의 경우 짧은 시간동안 시험편 표면에 발수층을 형성하지 못하고 프로필렌글리콜과 함께 쉽게 제거되는 것으로 판단된다. DOW사 ethoxysilane type의 두 발수제의 경우 분자 내 ethoxysilane 분자와 물이 반응하여 짧은 시간동안 시험편 표면에 부착되어 발수층을 형성하여 높은 발수력을 나타내며, fluoro 성분이 포함된 Q3-9030의 발수제의 경우 분자 내 낮은 표면 에너지를 가지는 -CF₃의 구조로 인해 더 높은 접촉각을 나타낸 것으로 판단된다. DOW사의 두 발수제에 대한 함량별 접촉각 측정 시 Figure 4에 나타난 그래프와 같이 1 wt% 함량부터 접촉각은 크게 변화하지 않는 것을 확인하였다. 발수 성분이 포함된 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액에 대한 접촉각 평가 시 ethoxysilane type 발수제가 적합하였으며, 함량은 1 wt% 이하로 사용하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다.

3.4. 방빙성능 평가 결과

3.3 2차 접촉각 측정을 통해 프로필렌글리콜 수용액이 사라진 환경에서 ethoxysilane type 발수제가 시험편 표면에 빠르게 발수층을 형성하여 높은 접촉각을 가지는 것을 확인하였다. 방빙성능에 대한 평가

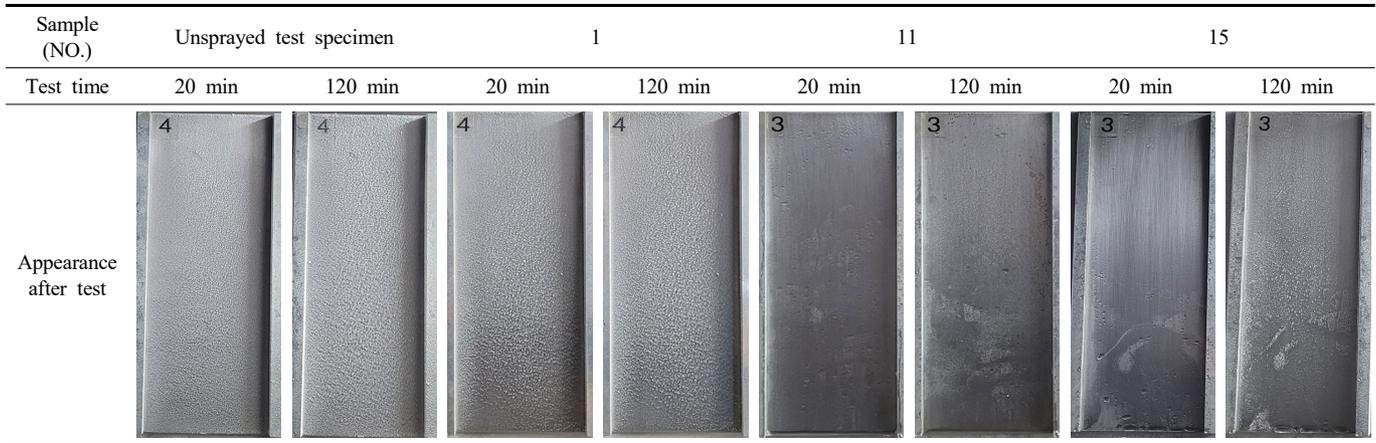


Figure 5. Effect of de/anti-icing fluid containing ethoxysilane type water-repellent on WSET.

는 접촉각이 높은 ethoxysilane 발수제를 1 wt% 포함된 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액을 도포한 시험편, 발수 성분이 미포함된 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액을 도포한 시험편 및 제·방빙액을 도포하지 않은 시험편에 대해 비교 평가를 진행하였고, Figure 5에 정리하였다. 평가 결과 제·방빙액을 도포하지 않은 시험편과 발수 성분이 미포함된 제·방빙액을 도포한 시험편의 경우 10분부터 시험편에 결빙이 발생하였으며, 20분 후 시험편 전체에서 결빙이 발생한 것을 확인하였다. 발수 성분이 미포함된 제·방빙액을 도포한 시험편의 경우 제·방빙액 도포 시 경사면을 따라 거의 대부분 흘러내려 소실되어 동일한 결과를 보인 것으로 판단된다. Ethoxysilane 발수제 성분이 1 wt% 포함된 프로필렌글리콜 기반 2가지 제·방빙액의 경우 모두 20분부터 결빙이 시작되는 것을 확인하였고, 최종 2시간 후에도 시험편에 전체에 결빙이 발생되지 않는 것을 확인하였다. 접촉각 평가 결과와 같이 시험편 표면에 빠르게 발수층을 형성하고 높은 접촉각을 나타내는 ethoxysilane type 발수 성분이 눈의 부착 및 결빙을 방지하는 것으로 판단하였다. 참고문헌 15의 경우 알루미늄 재질에 발수를 처리한 표면과 처리하지 않은 표면에서의 결빙의 성장을 확인한 결과 발수 처리한 표면에서 얼음의 성장이 지연됨을 본 연구와 동일하게 확인하였다. 따라서 발수 성분이 포함된 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액의 경우 철도 운행 전 사전에 살포하여 발수 성분에 의해 빠르게 대차 표면에 발수층을 형성하여 눈의 부착 및 결빙을 지연시켜 운행 후 발생하는 부분적 결빙에 대해 해빙 효율을 더 높일 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구진이 최종적으로 개발하고자 하는 제빙액과 방빙액의 특성 모두 가지는 고속철도차량용 제·방빙액으로 유효한 성능을 가진 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 발수제 종류 및 함량이 프로필렌글리콜 제·방빙액에 미치는 영향을 평가하기 위해 4종의 발수제에 대해 종류 및 함량 별 점도, 융빙성능, 접촉각 및 방빙성능을 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

발수성분을 포함하는 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액의 점도 및 융빙성능은 전체 비율 중 98% 이상을 차지하고 있는 기계인 프로필렌글리콜과 물에 의한 프로필렌글리콜 수용액의 특성에 의해 결정되는 것으로 확인되었다. 발수제를 포함하여도 동일한 살포시스템을 통

해 살포 가능하며, 제빙액으로 유효한 성능을 가진다.

발수성분을 포함하는 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액의 접촉각 평가 결과, 1차 접촉각 측정 시 발수제 종류 및 함량과 관계없이 대략 15.4° 정도의 낮은 접촉각이 측정되었으며, 그 이유는 친수성의 프로필렌글리콜이 시험편 표면을 덮고 있어 프로필렌글리콜 수용액의 영향으로 인해 낮은 접촉각을 보인 것을 판단된다. 2차 접촉각 측정 시 발수제의 종류와 함량에 따라 접촉각은 크게 차이가 나며, ethoxysilane type 발수제가 짧은 시간 표면에 발수층을 형성하여 90° 이상의 높은 접촉각을 가지는 것을 확인하였다. 비 silane type 발수제의 경우 프로필렌글리콜과 함께 쉽게 제거됨을 확인하였다. 또한, ethoxysilane type의 발수제의 경우 분자 내 fluoro 성분이 포함된 경우 더 높은 접촉각을 가지는 것으로 확인되었고, 발수제 함량의 경우 1 wt% 이상 첨가 시 접촉각 변화가 크지 않은 것으로 측정되어, 발수제의 함량은 최대 1 wt%인 것을 확인하였다.

방빙 성능 평가 결과, ethoxysilane type 발수제를 1 wt% 포함한 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액을 도포한 시험편과 미도포 시험편 및 발수제 성분이 없는 프로필렌글리콜 기반 제·방빙액을 도포한 시험편을 비교 평가한 결과 접촉각 특성과 같이 ethoxysilane type의 발수제 성분이 포함된 제·방빙액을 도포한 시험편에서 결빙의 발생이 지연됨을 확인하였다. ethoxysilane type의 발수제가 시험편에 빠르게 발수층을 형성하여 물의 부착을 방해하여 결빙을 지연시키는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동절기 설빙으로 인한 고속철도차량의 피해 저감을 위해 프로필렌글리콜을 기재로하는 제빙액에 발수 성분을 첨가하여 방빙 기능을 부여한 제·방빙액을 설계하였다. 이러한 제·방빙액은 운행 전 살포되어 대차 표면에 발수층을 형성하여 눈의 부착 및 결빙을 지연시키고, 운행 중 발생한 작은 결빙을 쉽게 제거할 수 있어 더 효율적인 화학적 제·방빙이 가능하다.

감 사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 철도기술연구사업 “Anti-icing 기반 동절기 피해예방 기술 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (22RTRP-B146024-05)

References

1. 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).
2. 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).
3. H.-B. Gwon, B.-S. Kim, and K.-J. Yee, Study on relationship between weather condition and window glass damage by accreted snow for high-speed train, *J. Korean Soc. Railway*, **23**, 135-142 (2020).
4. 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).
5. 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, *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, May 22-24, Changwon, Korea, 1034-1039 (2014).
6. 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, *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, June 3-5, Gyeongju, Korea, 77-82 (2004).
7. Y. Ji, K. Dan, and C. Lee, A mat for preventing flying ballast in the rail road, *KR Patent* 2003646470000 (2004).
8. M. Bettez, *Winter Technologies for High Speed Rail*, Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway (2011).
9. L. Kloow and M. Jenstav, High-speed train operation in winter climate, *Stockholm Transrail Report*, BVF5 Winter R1 (2006).
10. H.-K. Lee, Watering system and heating scattering apparatus for multipurpose vehicles, *Korean Patent* 1020090046040 (2009).
11. G.-W. Park, J.-K. Lee, and H.-G. Lee, Ice melting capacity evaluation of applicable materials of de-icing fluid for high speed railway rolling stock, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 384-388 (2019).
12. H.-S. Sang, Snow removing effect of potassium acetate deicing chemicals, *Annual Conference of the Korean Society of Industrial Application*, May 31-37, Changwon, Korea, 31-37 (2006).
13. B. Lee, B. Yun, J. Lee, and Y. Chung, Deicing performance with deicer types, *Int. J. Highway Eng.*, **7**, 391-396 (2005).
14. L. Paulukuhn and X. Wu, The low temperatures technology concepts and operational experience in russian high speed train velarorus, *Foreign Rolling Stock*, **49**, 16-19 (2012).
15. Z.-J. Wang, D.-J. Kwon, K. Lawrence DeVries, and J.-M. Park, Frost formation and anti-icing performance of a hydrophobic coating on aluminum, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **60**, 132-137 (2015).
16. C. Wei, B. Jin, Q. Zhang, X. Zhan, and F. Chen, Anti-icing performance of super-wetting surfaces from icing-resistance to ice-phobic aspects: Robust hydrophobic or slippery surfaces, *J. Alloys Compd.*, **765**, 721-730 (2018).
17. J. Gao, Y.-J. Geng, S.-C. Li, X. Chen, D.-D. Shi, P.-J. Zhou, Z.-H. Zhou, and Z.-H. Wu, Effect of silane semulsion on waterproofing and anti-icing performance of foamed concrete, *Constr. Build. Mater.*, **301**, 124082 (2021).

Authors

- Jin-Myeong Park; Master's Degree, Senior Researcher KD R&D Center, Busan 49432, Republic of Korea; pjm87@kdrnd.co.kr
- Tae-Hyun Kim; Bachelor's Degree, Researcher, KD R&D Center, Busan 49432, Republic of Korea; chemical@kdrnd.co.kr
- Jung-Mu Yang; Bachelor's Degree, Senior Researcher, Korea Railroad Corporation, Daejeon 34618, Republic of Korea; loog1004@korail.com
- Cha-Jung Yun; Ph.D, Research Director, Korea Railroad Corporation, Daejeon 34618, Republic of Korea; Korea@korail.com
- Hong-Ki Lee; Bachelor's Degree, Research Director, KD R&D Center, Busan 49432, Republic of Korea; lhk8765@kdrnd.co.kr