



친환경 제설제의 용빙성능 평가

Evaluation of Deicing Performance for the Eco-Friendly Deicer

이 경 배*
Lee, Kyung Bae

이 승 우**
Lee, Seung Woo

유 형 목***
Yoo, Hyung Mok

박 희 문****
Park, Hee Mun

Abstract

Recently, various damages such as corrosion of rebar, scaling on concrete pavement and environmental deteriorations caused by using the chloride-containing deicer have been reported. To solve these problems, several substitute deicers have been developed by other researchers. However, studies on evaluation of performance for the developed deicers have been limited in the basic laboratory testing. It is necessary to establish the reasonable and systematic test procedure for evaluating the deicing performance. In this study, rational and practical test methods were set up through literature review and deicing performance of Eco-Friendly Deicer(EFD), which is a kind of low chloride-containing deicer developed by our research group, was evaluated by the presented test methods. As results of the laboratory tests, initial deicing performance of EFD was similar with that of Pre-Wetted Salt(PWS) which has been used in highway deicing and it was verified by executed field tests in twice that EFD had passable deicing performance compare with PWS.

Keywords : *deicer, deicing performance, EFD, pre-wetted salt*

요 지

최근 들어 철근 부식, 콘크리트 포장표면의 박리파손, 환경 피해 등 염화물계 제설제의 사용에 따른 각종 피해가 보고되고 있으며, 이를 위해 대체 제설제의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 개발된 제설제의 성능평가에 대한 연구는 대부분 실내실험을 위주로 한 기초적이고 제한적인 성능평가에 의존하고 있는 실정이다. 특히 제설제의 용빙성능은 제설제가 갖추어야 할 기본적인 성능으로, 합리적이고 체계적인 평가방법을 통한 용빙성능의 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 보다 구체적이고 현실적인 용빙성능 평가방법을 수립하였으며 그 절차에 따라 본 연구진에 의해 개발된 저염화물계 친환경 제설제인 EFD(Eco Friendly Deicer)의 용빙성능을 평가 및 검증하였다. 실내실험 결과, EFD는 국내 고속도로에서 사용 중인 습염식 제설제와 대등한 수준의 초기 용빙성능을 나타냈으며 2회의 현장살포 실험을 통해 EFD의 용빙성능을 검토한 결과, 전체적인 용빙성능이 습염식 제설제의 용빙성능에 비해 큰 차이가 없음을 확인하였다.

핵심 용어 : *제설제, 용빙성능, EFD, 습염식 제설제*

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 과제연구원(forever6078@nate.com)
 ** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사(sw1@kangnung.ac.kr)
 *** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임기술원(naekog@kict.re.kr)
 **** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사(hpark@kict.re.kr)



1. 서론

포장 노면과 타이어 사이의 미끄럼 저항은 주행 차량의 안전성에 매우 중요한 역할을 수행한다. 하지만 겨울철 도로 위에 형성되는 결빙 또는 적설은 노면에 접촉하는 타이어의 접지면적을 크게 감소시켜 미끄럼 사고의 원인을 제공한다. 표 1은 노면 조건 별 마찰인자 값과 1,000,000km·대 당 개인 상해사고 발생 비율을 정리한 것으로 건조한 노면에 비해 결빙 또는 압설된 노면은 마찰계수가 크게 감소하여 이에 따른 상해사고 발생비율이 3배 이상 증가함을 나타내고 있다(Carl-Gustaf and Henrik, 2001).

표 1. 노면조건 별 마찰인자와 상해사고 비율

노면 상태	마찰 인자	사고율
건조 노면	0.8~1.0	0.12~0.18
결빙 노면	0.05~0.1	0.53
압설 노면	0.2~0.3	0.31

겨울철 도로관리의 가장 핵심적인 요소는 노면에 형성된 눈과 결빙을 신속하게 제거하는 것으로 볼 수 있으며 현재 국내외적으로 다양한 제설대책이 개발되고 있다. 염화물계 제설제 살포는 우수한 경제성을 바탕으로 가장 널리 사용되고 있는 제설 방법으로 소금, 염화칼슘 등이 주로 사용되고 있다. 국내 고속도로의 경우, 다년간의 시험운행을 거쳐 현재 습염살포방식(pre-wetted salt spreading)이 적용되고 있다. 습염살포방식은 염화칼슘 수용액에 고체 염화나트륨을 적셔 살포하는 방식으로 염화칼슘 수용액의 속효성과 염화나트륨의 지속성을 병합하여 용빙성능을 향상시킨 살포방법이다(조서연, 2003).

최근 들어 겨울철 고속도로의 안전성에 대한 도로이용자들의 요구가 증대되고, 제설대책이 습염살포방식으로 전환됨에 따라 염화물계 제설제의 사용량이 급격히 증가하였다. 표 2는 한국도로공사 상주시사의 동절기 별 제설제 살포량으로 습염살포방식으로 전환한 후 염화물계 제설제 사용량이

급격히 증가하였음을 알 수 있다(서진원 외, 2004).

표 2. 상주시사의 제설제 살포량 변화

연도	총 강설량	제설제 사용량(kg/km/1차로)	비고
2001~2002 (모래+염화칼슘 살포)	41cm	염화칼슘 571.48	2차로 연장 90.2km m
2002~2003 (습염살포)	65cm	염화칼슘+염화나트륨 1161.99	
2003~2004 (습염살포)	45cm	염화칼슘+염화나트륨 1255	

하지만 염화물계 제설제의 과도한 사용은 토양 및 수질 오염, 철근 부식으로 인한 콘크리트 구조물 피해, 주행 차량의 내부식성 약화, 콘크리트 포장의 표면박리 파손 유발 등 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 염화물의 함량을 최소화하면서 기존 제설제와 대등한 제설성능을 보유한 새로운 제설제의 개발이 매우 시급한 실정이다. 또한 개발된 제설제의 실용화를 위해 제설제의 다양한 성능 평가 및 검증에 관한 연구가 반드시 필요하다. 제설제는 용해도 및 pH, 용빙성능, 철근 부식에 미치는 영향, 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 영향, 토양 및 주변 식생에 미치는 영향 등 다양한 분야에서 성능평가가 이루어져야 하는데 이 중에서도 용빙성능은 제설제로 사용되기 위해 기본적으로 갖추어야 할 요소로, 차량 안전사고 시 인명 피해와 직결되기 때문에 신뢰할 수 있는 용빙성능의 평가와 검증이 반드시 필요하다.

본 논문의 주된 목적은 본 연구진에 의해 개발된 친환경 제설제 EFD(Eco-Friendly Deicer)의 용빙 성능을 평가하고 검증하는 데 있으며 또한 추후 개발되는 제설제의 용빙성능을 평가함에 있어 기초 자료로 활용할 수 있도록 연구방향 및 흐름을 제시함에 있다. EFD의 용빙성능을 평가하기 위한 비교 대상으로 국내 고속도로에 주로 적용되



고 있는 습염식 제설제(소금 + 염화칼슘 수용액)를 선정하였다. 용빙성능의 평가를 위한 항목으로 어는점 및 공용점, 얼음 용융 실험, 얼음 침투깊이 실험을 수행하였고 실제 현장 살포 후 미끄럼 저항을 측정하여 용빙성능을 검증하였다.

2. 용빙성능의 평가 및 검증을 위한 실험계획 수립

2.1 용빙성능 평가

제설제는 살포 시기에 따라 두 가지 목적으로 구분할 수 있다. 동결처리(de icing)는 이미 노면에 눈이나 얼음 등에 의해 미끄럼 저항이 감소되었을 때 미끄럼 저항을 회복시키기 위해 적용하며 동결방지(anti icing)은 적설이 되거나 결빙이 형성되기 전에 노면 미끄럼 저항의 적정 수준 유지를 위해 적용된다(Carl Gustaf and Henrik, 2001). 그림 1에 의하면 동결처리 방식에 비해 동결방지 방식이 사고비율의 증감폭이 작아 보다 안전한 살포대책임을 알 수 있다. 하지만 동결방지는 정확한 기상예측, 노면의 온·습도 측정 및 예측 등이 실시간으로 제공되는 도로 기상정보 시스템(RWIS, Roadway Weather Information System)이 구축되어 있어야 효율적인 제설효과를 기대할 수 있다. 또한 고체 제설제를 눈이나 얼음이 없는 노면에 살포할 경우 타이어와 노면 사이에 존재하는 제설제 입자의 구름(rolling) 현상으로 인해 미끄럼 저항이 오히려 감소할 수 있다(이승우 외, 2006). 따라서 제설제의 살포는 주로 동결처리 목적으로 살포된다고 볼 수 있기 때문에, 용빙성능의 평가는 적설이나 결빙 상태의 노면에 제설제가 살포되었을 경우를 가정하여 실험을 계획하였다.

제설제의 작용 메커니즘을 표 3에 나타냈다. 제설제가 살포되면 제설제와 접촉한 소량의 눈이나 얼음이 제설제의 용해도 및 어는점 강하 등에 의해 제설제 수용액 상태가 되며 연속적으로 주변의 눈이나 얼음과 반응하여 전체적인 제설 효과가 나

타나게 된다. 또한 노면에 얼음이 존재할 경우 제설제 수용액이 얼음 속으로 침투하여 노면과 얼음 사이의 결합을 끊는 역할은 하기 때문에 보다 원활한 제설 작업이 가능하도록 한다(이용은 외, 1999).

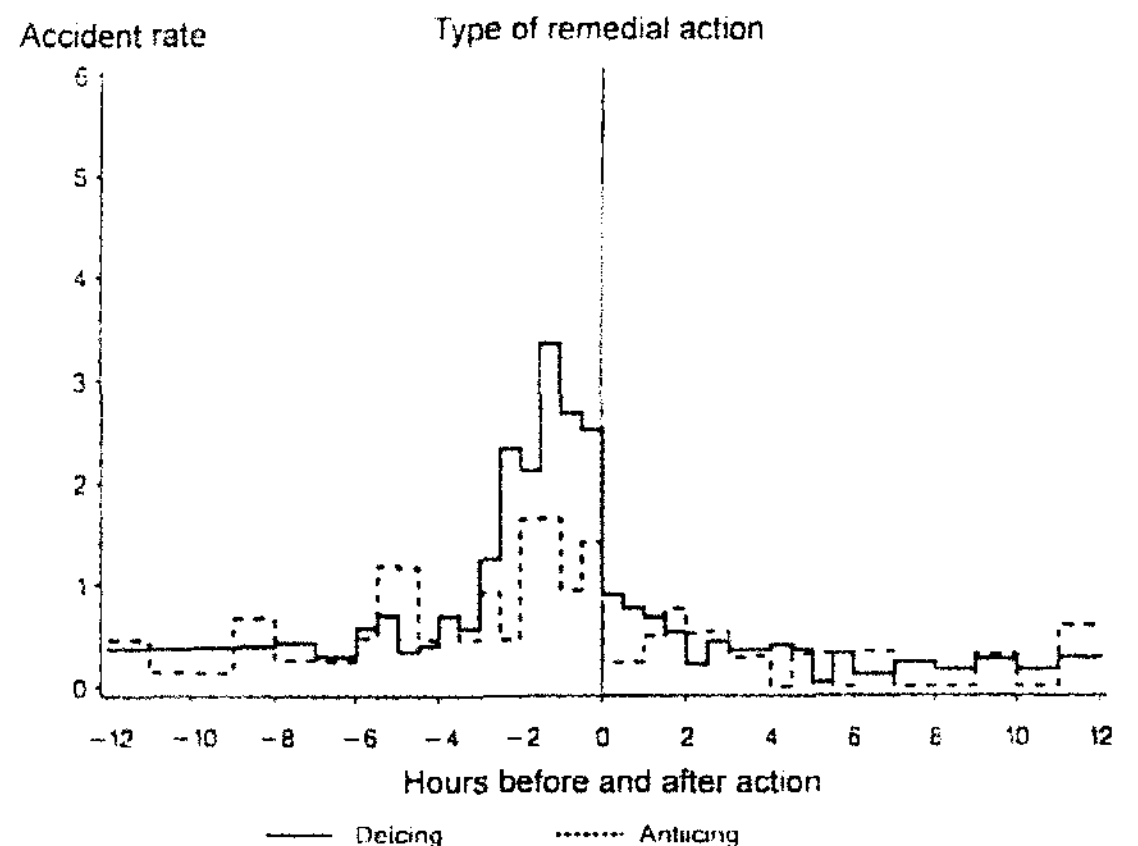
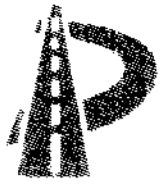


그림 1. 제설제 살포 전·후의 사고율 변화 (Carl-Gustaf and Henrik, 2001)

표 3. 용빙 메커니즘

제설 원리 및 순서	영향 인자	제설제의 필요 성능
1. 용빙제 살포		
2. 소량의 눈(얼음)을 녹이며 어는점 강하	용해도, 용해열, 흡습성, 어는점, 공용점, 구성 이온 개수, 화학식량	어는점 강하, 얼음 용융 성능
3. 얼음 속으로 침투	입자모양, 밀도, 확산 계수, 점도	얼음 침투 성능
4. 얼음과 노면 사이의 결합 절단		
5. 기계적 제거		

표 3을 바탕으로 제설제의 용빙성능에 영향을 미치는 요인을 파악하고 그에 따른 실험 항목을 선정하였다. 제설제의 고유 성질인 공용점은 외부 온도보다 충분히 낮아야 용빙 작용이 좋고, 재결빙 현상을 방지하기 때문에 어는점 특성과 함께 매우 중요한 평가 항목이다 (이용은 외, 1999). 얼음 용



용 실험은 실제 얼음에 일정량의 제설제를 살포하였을 경우 어느점, 용해열, 흡습성 등의 영향인자에 의해 용융되는 물의 양을 측정함으로써 개략적인 용빙성능을 알 수 있다. 또한 얼음 침투성능 실험은 얼음 용융실험과 함께 가장 널리 사용되는 용빙성능의 평가 항목으로, 제설제가 얼음 표면에 살포되었을 때 수직으로 얼마나 깊이 뚫고 들어갈 수 있는지 알아보는 실험으로 얼음과 노면의 결합력 제거에 매우 큰 영향을 미친다. SHRP(Strategic Highway Research Program)에서 제안한 제설제의 용빙성능 실험은 얼음용융 실험, 얼음 침투깊이 실험, 얼음-노면 간 결합력 절단 실험 등 총 세가지로 구성되어 있으나(Cecil et al., 1992) 얼음 내 제설제의 침투 성능이 얼음-노면 간 결합력을 끊는데 지배적인 역할을 하기 때문에 얼음-노면 간 결합력 절단 실험은 실험 항목에서 제외하였다.

2.2 용빙성능 검증

앞서 언급한 바와 같이, 제설제 살포의 주요 목적은 노면의 눈이나 얼음을 제거하여 노면의 미끄럼 저항을 회복시키기 위함이다. 겨울철 도로의 미끄럼 저항은 제설제의 용빙성능 외에, 노면의 온·습도, 풍속, 일조량, 차량 통행 등 외부요인에 의한 영향을 받기 때문에, 실제 도로에서 제설제의 용빙량, 얼음침투 깊이를 측정하는 것은 큰 의미가 없다. 따라서 외부요인을 포함하여 측정되는 노면의 미끄럼저항을 바탕으로 제설제의 용빙성능을 확인할 필요가 있다.

노면의 미끄럼 저항 값은 주로 미끄럼 지수인 SN(Skid Number), 또는 마찰인자(f)로 나타낸다(최고일 외, 1992).

$$SN = 100 \times f = 100 \times \frac{F}{L} \quad (1)$$

여기서, SN = 미끄럼 지수

f = 마찰 인자

F = 타이어와 포장표층 접촉면에 발생하는 마찰력

L = 타이어와 포장표층 접촉면에 발생하는 수직력

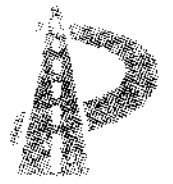
SN은 보편적으로 사용되고 있는 미끄럼지수로, ASTM E 274 "Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using Full Scale Tire"에 의거한 제동륜 측정방식으로 측정된 미끄럼저항값을 나타낸다. 같은 노면 조건이라도 실험장비의 운행속도에 따라 SN값이 다르게 측정되는데, 일반적으로 40mph(약 65km/h)로 측정된 결과를 바탕으로 노면의 미끄럼저항을 평가하며 SN40으로 나타낸다. 실험장비는 미국 K. J. Law Engineers사의 PFT(Pavement Friction Tester)가 전세계적으로 널리 사용되고 있다(엄주용 외, 1996). 그림 2는 국내에서 사용 중인 PFT로, 트레일러와 견인 차량으로 구성되어 있다.



그림 2. 포장 미끄럼저항 측정 장비(PFT)

이 외의 미끄럼저항 측정장비로 BPT(British Pendulum Tester)가 있다. 측정값은 BPN(British Pendulum Number)으로 나타내며 MID(Mean Texture Depth)값과 함께 SN값을 추정하는데 많이 사용된다. 하지만 BPN은 표면의 미세조직 특성을 분석하여 주행속도가 0에 가까운 상태에서의 미끄럼 저항을 표현하는 값으로 실제 차량이 주행하는 상태에서의 미끄럼 저항을 나타내지는 않는다(엄주용 외, 1996). 따라서 제설제를 살포한 노면의 실제 미끄럼저항을 측정하는 방법은 실제 주행차량의 미끄럼저항 특성과 유사한 결과를 얻을 수 있는 PFT를 이용하는 것이 보다 합리적이다.

미국 교통연구원의 NCHRP(National Cooperative



Highway Research Program)에서 제안한 주요 지방간선도로의 최소 SN 기준값을 표 4에 나타냈다. 차량이 50mph(80km/h)의 속도로 통행하는 포장에 대해서 PFT를 40mph로 운행할 경우 최소 37이상을 만족시켜야 하며, PFT를 50mph로 운행할 경우 최소 32이상을 만족시켜야 함을 의미한다. 국내의 경우, 체계적인 미끄럼저항 관리 기준이 아직 정립되어 있지 않으며 SN40을 기준으로 35 미만의 값을 갖는 포장에 대해서 미끄럼저항성이 불량한 포장으로 간주하고 있다(홍승호 외, 2003). PFT를 이용한 SN 측정 시, 제동분 앞부분에서 물이 분사되기 때문에 표 4에서 제시한 값은 습윤상태 노면의 SN 기준값을 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 눈이나 얼음이 형성된 도로에 제설제를 살포한 후 노면의 SN값이 습윤상태의 SN값에 도달하는 시간을 측정하여 제설제의 현장 용빙성능을 평가할 수 있다.

표 4. 미국 주요 간선도로의 미끄럼지수 최소 기준

Traffic speed(mph)	SN measured at traffic speed	SN measured at 40 mph
30	36	31
40	33	33
50	32	37
60	31	41
70	31	46

EFD의 용빙성능을 평가하기 위하여 문헌 고찰을 통해 다음과 같이 용빙성능 평가방법 및 흐름을 제시하였다. 우선적으로 어는점 및 공용점 특성, 용빙량 및 얼음 침투깊이의 측정을 통해 제설제의 실내 기초 용빙성능을 비교, 평가하였다. 그리고 실내 용빙성능 실험을 바탕으로 EFD의 최적농도를 도출하여 적설이나 결빙이 형성된 실제 도로에 살포한 후, 시간 경과에 따른 노면의 미끄럼저항 회복속도를 측정하였다. 비교대상으로 현재 국내에서 사용 중인 습염식 제설제(PWS, Pre-Wetted Salt)를 선정하여 보다 현실성있는 연구를 수행하였으며, PFT를 이용한 미끄럼지수(SN) 측정을 통해 정량적인 결과를 도출하였다.

3. 실내 실험방법

3.1 사용 제설제

실험에 사용된 제설제의 성분 배합을 표 5에 정리하였다. 습염식 제설제는 도로공사에서 사용 중인 염화칼슘 및 염화나트륨과 동일한 순도의 제설제를 구입하여 자체 제조하였으며 EFD는 표 5의 성분 구성을 바탕으로 제조하였다.

표 5. 실험에 사용된 제설제의 성분 구성
(● : 주요 성분, ○ : 중량비 10% 미만의 성분)

제설제	구성 성분					
	염화나트륨 NaCl	염화칼슘 CaCl ₂	수산화칼륨 KOH	초산 CH ₃ COOH	프로피온산 CH ₃ CH ₂ COOH	물 H ₂ O
EFD	○		●	●	●	○
PWS	●	○				●

EFD는 염화물이 소량 첨가된 저염화물계 제설제로, 총 유기산의 약 10%에 해당되는 양의 염화물이 첨가되었다. EFD는 추후 음식물 쓰레기나 하수 슬러지에서 추출되는 유기산을 이용하여 제조되는데, 음식물 쓰레기의 산 발효액 분포에 의하면 추출되는 유기산의 약 10% 정도를 염화물이 차지한다(우창완, 2006). 제설제 내 염화물은 콘크리트 구조물과 식생 및 토양 환경에 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나 저염화물계 제설제인 EFD는 식물 발아 및 생장에 미치는 영향, 철근 부식 및 염화물 침투, 동결융해 피해 등 콘크리트 구조물의 내구성에 미치는 영향을 평가한 결과, 기존 염화물계 제설제에 비해 상대적으로 적은 피해를 주는 것으로 나타났다(양은익 외, 2007).



3.2 어는점 및 공융점 측정

ASTM D 1177 "Standard Test Method for Freezing Point of Aqueous Engine Coolants"에 의거하여 EFD와 PWS의 어는점 및 공융점을 측정하였다. 측정방법은 드라이아이스를 이용하여 에탄올의 온도를 -75°C 이하로 유지시키며 제설제 수용액의 온도를 2분 간격으로 기록하였다. 그림 4는 어는점 실험 장치의 모습을 나타내고 있다.



그림 4. 어는점 실험 모습

물질의 고유 성질인 공융점 및 어는점 곡선을 얻기 위해, 표 6과 같이 15°C 실내에서의 용해도를 초과하지 않는 범위에서 제설제 수용액의 농도를 변화시켜 각 농도별 어는점을 측정하였다.

표 6. 어는점 실험에 사용된 제설제 수용액의 농도

제설제	용해도 (15°C)	제설제 수용액의 농도				
		5wt%	10wt%	20wt%	30wt%	45wt%
EFD	52wt%	5wt%	10wt%	20wt%	30wt%	45wt%
PWS	27wt%	5wt%	10wt%	15wt%	20wt%	25wt%

3.3 얼음 용융 실험

SHRP H-205.1/2 "Test Method for Ice Melting of Solid/Liquid Deicing Chemicals"에 의거하여 얼음 용융 실험을 진행하였다. 실험방법은 특수 제작

된 동결접시에 물을 얼린 후 일정량의 제설제를 살포하여 시간 간격 별로 녹은 물의 양을 측정하는 것으로 실험 모습을 그림 5에 나타냈다.

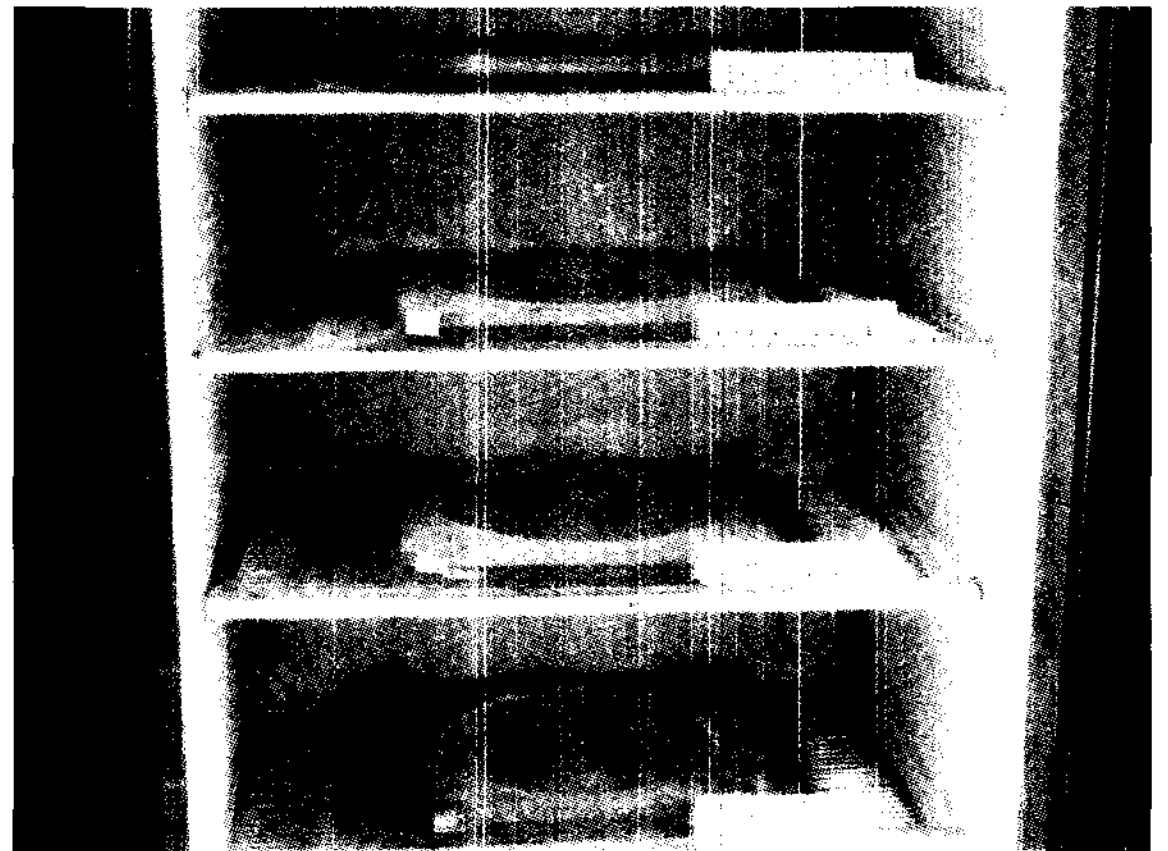


그림 5. 얼음 용융 실험 모습

일반적으로 액상 제설제는 고체상태의 제설제에 비해 도로면에 균일하게 살포하기가 쉽고 상대적으로 용빙효과도 빠르게 나타나기 때문에(이용은 외, 1999) EFD를 액상으로 살포하는 것이 보다 효율적이다. EFD 수용액의 농도를 20wt%, 30wt%, 45wt%로 조절하여 EFD의 농도 변화에 따른 용빙량을 측정하였고 이를 PWS의 용빙량과 상대 비교하였다. 또한 온도 변화에 따른 용빙량의 변화를 알아보기 위해 -5°C 와 -10°C 의 온도에서 실험을 수행하였다.

3.4 얼음 침투깊이 실험

SHRP H-205.3/4 "Test Method for Ice Penetration of Solid/Liquid Deicing Chemicals"에 의거하여 EFD와 PWS의 얼음 침투 성능을 평가하였다. 실험 방법은 침투시험기의 흡에 주사기로 물을 넣어 초저온 냉동고를 사용하여 얼린 후 일정량의 제설제를 살포하여 시간대 별로 얼음 속으로 침투한 용빙액의 깊이를 측정하였다. 제설제는 얼음 용융실험과 동일한 조건의 농도를 사용하였으며 마찬가지로 -5°C 와 -10°C 의 온도에서 실험을 수행하였다.

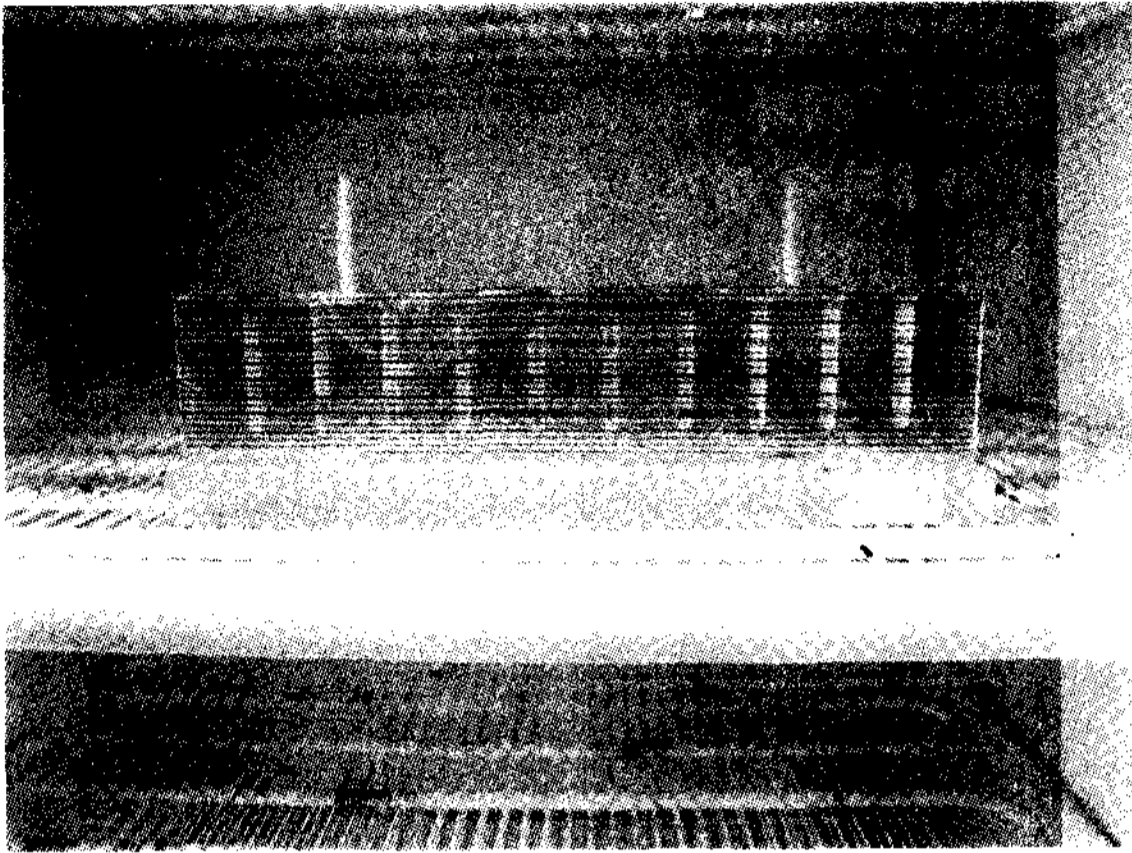


그림 6. 얼음 침투 시험기의 모습

4. 실내 실험 결과 및 분석

4.1 어는점 및 공용점 실험

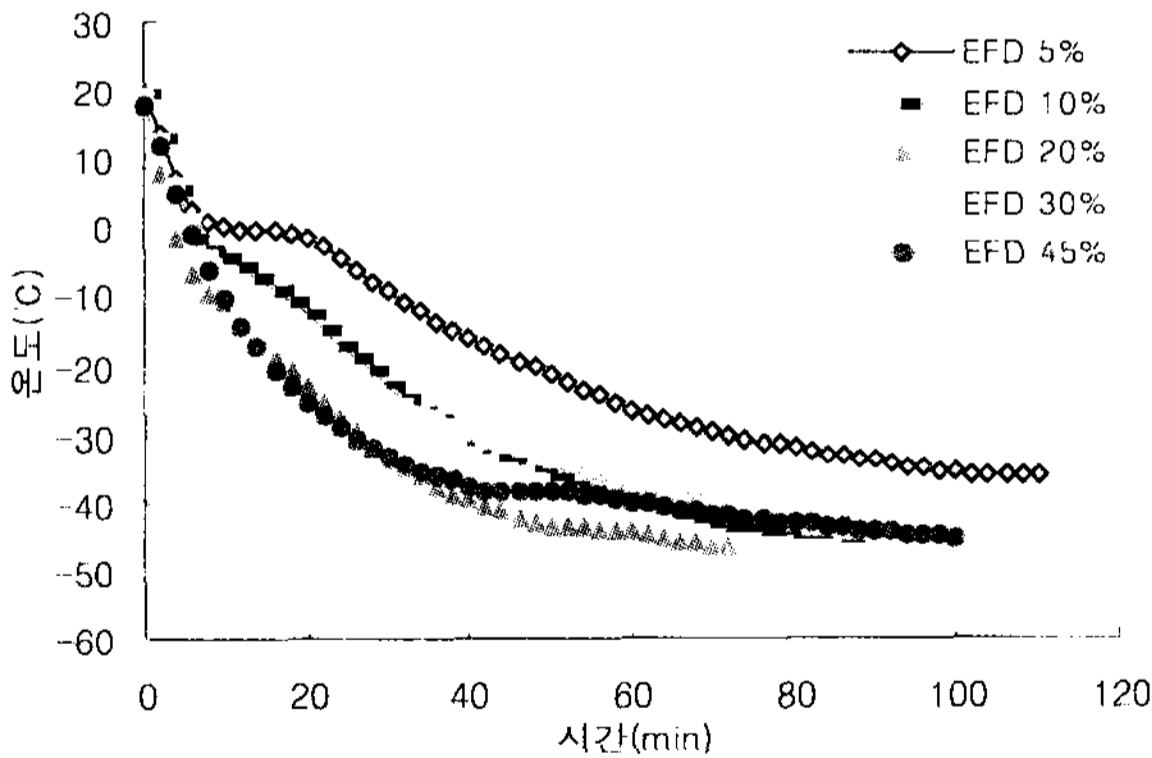


그림 7. EFD의 시간에 따른 온도 변화

EFD와 PWS의 어는점 및 공용점 실험 결과를 그림 7, 8에 나타냈다. 제설제 용액의 온도가 점차 하강하여 어는점에 도달하면 고체가 석출되기 시작하며, 물질의 상변화에 따른 일시적인 온도 상승, 또는 온도 유지가 발생하여 곡선의 기울기가 급격히 변화한다. 공용점은 용액 전체가 고체로 석출되는 시점으로 물질의 상변화가 끝나게 되어 마찬가지로

지로 일시적인 곡선 기울기의 변화가 발생한다. 5wt% EFD수용액과 45wt% PWS 수용액에서는 공용점이 측정되지 않았으며 다양한 성분으로 구성되어 있는 EFD에 비해, PWS는 어는점 및 공용점이 좀 더 명확하게 관측되는 경향을 보였다. 각 제설제의 농도 별 온도곡선을 조사하여 측정된 어는점 및 공용점을 표 7에 나타냈다.

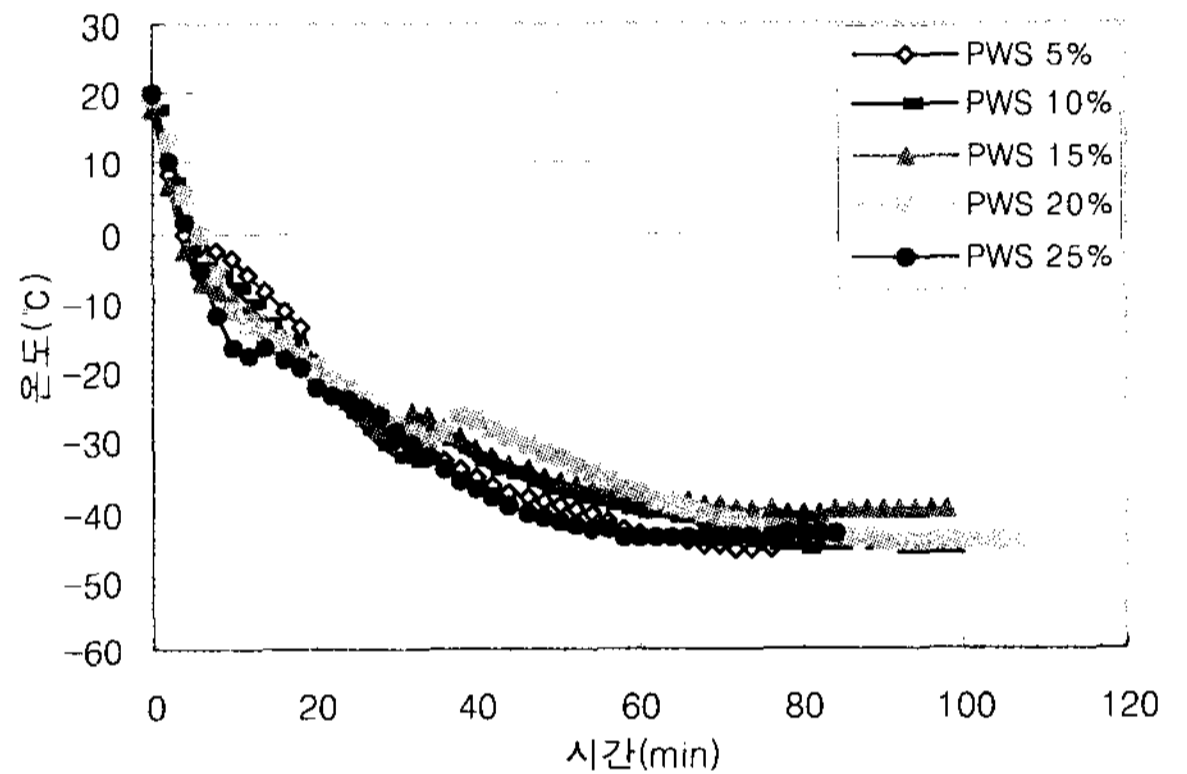


그림 8. PWS의 시간에 따른 온도 변화

표 7. 각 제설제의 농도 별 어는점 및 공용점

	농도(wt%)	5	10	20	30	45	공용점 평균값	
	EFD	어는점 (°C)	-0.5	-3.3	10.7	-17.6	-38.5	-44.7
EFD	공용점 (°C)	-	-45	-44.2	-44.8	-44.9		
	농도(wt%)	5	10	15	20	25	공용점 평균값	
	PWS	어는점 (°C)	-1.8	-5.9	-8.3	-12.7	-16.7	-27.8
	PWS	공용점 (°C)	-30.5	-28.5	25.6	-26.6		

실험 결과, EFD와 PWS 모두 농도가 높아질수록 수용액의 어는점이 낮아지는 것을 확인하였다. PWS의 공용점은 -25.6°C ~ -30.5°C 범위를 보인 반



면 EFD의 공용점은 약 -44.7°C 로 측정되어, 두 제설제 모두 국내 겨울철 기후 조건에서는 사용이 가능하지만 EFD는 약 -40°C 에서도 살포가 가능하기 때문에 극한지역에서도 사용이 가능할 것으로 나타났다. 그림 9는 두 제설제의 어는점 곡선을 나타내고 있다.

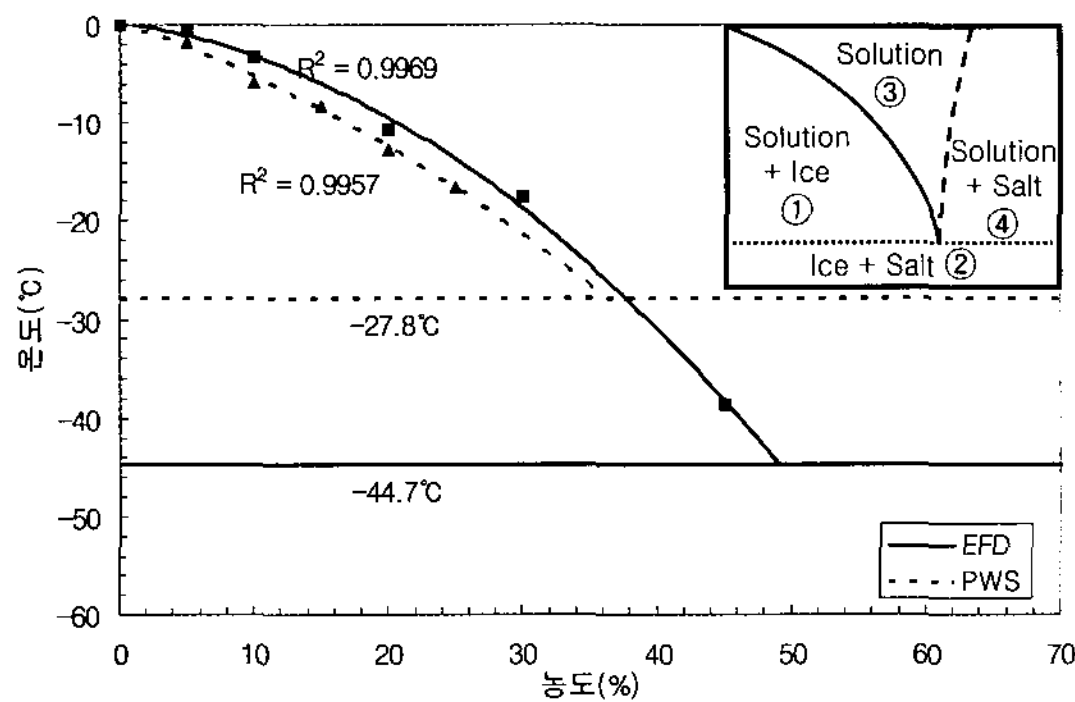


그림 9. EFD와 PWS의 어는점 곡선

액상 제설제인 EFD를 살포할 경우 그림 9의 ④ 영역은 존재하지 않는다. 온도가 공용점 아래로 내려가는 ②영역에서는 액상 제설제 자체가 동결되어 살포가 불가능하기 때문에 제설효과를 얻기 위해서는 ③영역의 온도-농도 조건을 만족시켜야 한다. 강우나 녹은 물로 인해 수용액의 농도가 점점 낮아져 ①영역에 도달하면 재결빙이 발생하기 때문에 지속적인 제설효과를 얻기 위해서는 제설제의 추가 살포를 통해 수용액의 농도를 높여야 한다.

4.2 얼음 용융 실험

용빙량은 제설제 1g이 녹인 얼음의 중량으로 나타냈으며 시간 경과에 따른 용빙량의 변화를 그림 10, 11에 나타냈다. EFD는 PWS에 비해 전체적인 얼음 용융 성능이 떨어지는 것을 알 수 있으며, 농도가 낮아질수록 얼음 용융 성능이 급격히 감소하였다. -10°C 에서의 EFD 20wt% 수용액은 어는점이 낮아 실험항목에서 제외하였다. EFD 45wt% 수용액의 경우, 살포 직후~10분까지의 초기 용빙 성능은 PWS와 대등한 수준을 보였으나 시간이 지날

수록 용빙량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 EFD 수용액이 고체 상태에 가까운 PWS에 비해 초기 살포면적이 넓기 때문에 초기 용빙 속도의 향상이 크지만, 일정 시간이 경과하면 살포면적에 의한 용빙효과의 향상은 점차 감소하는 것으로 판단된다. 하지만 살포면적에 의한 용빙효과는 재동결이 발생하지 않는 한도 내에서 시간경과에 따라 누적되기 때문에 제설제의 초기 살포면적은 전체적인 제설제의 용빙성능에 영향을 미치게 된다.

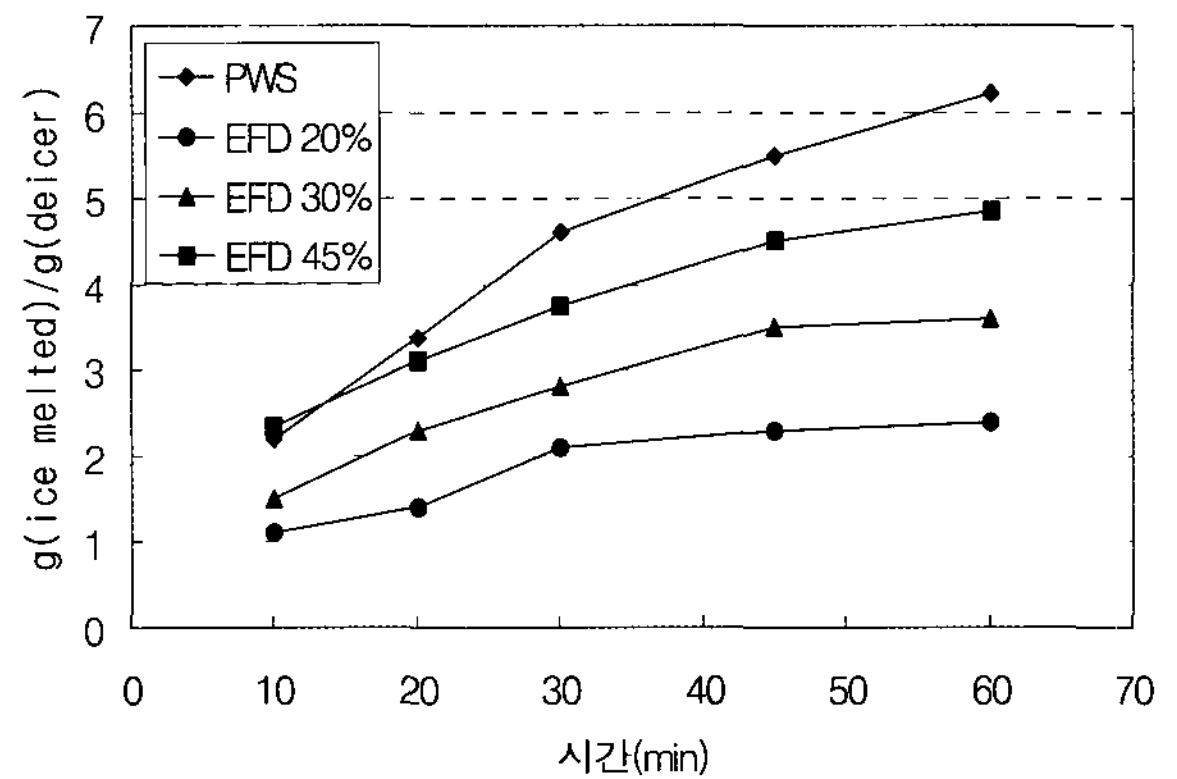


그림 10. 용빙량 측정 결과(-5°C)

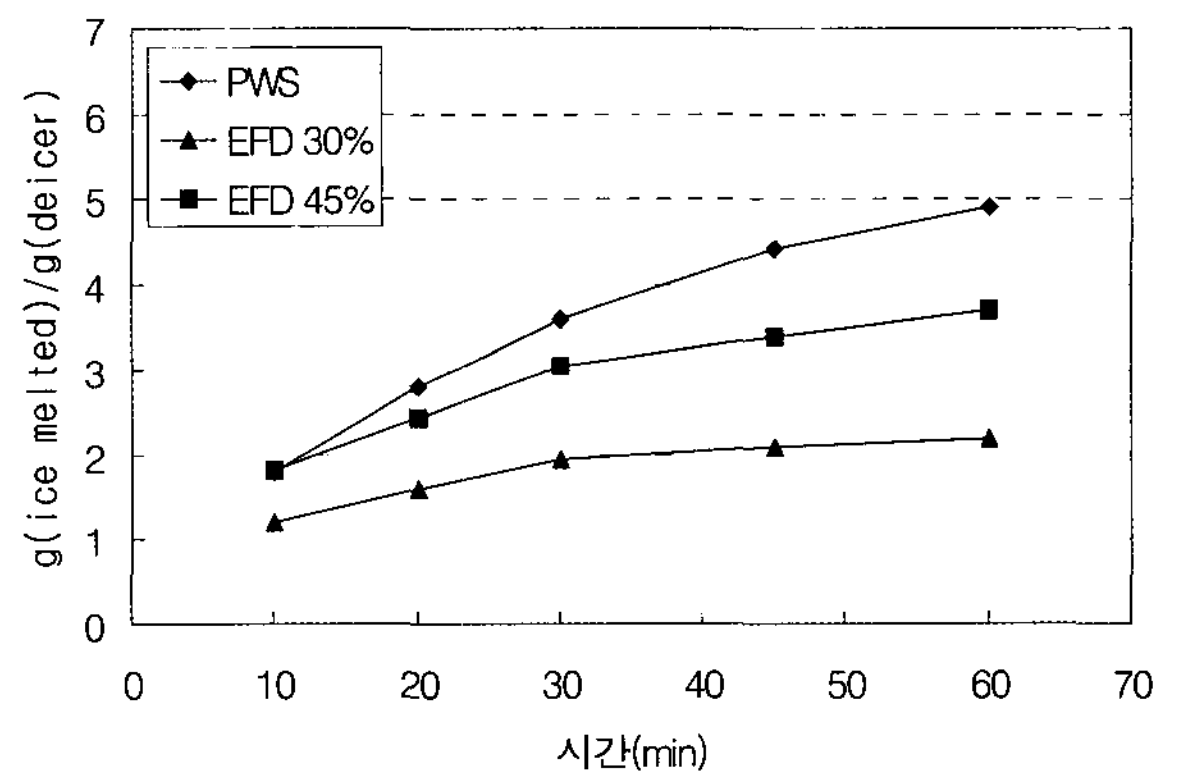


그림 11. 용빙량 측정 결과(-10°C)

4.3 얼음 침투깊이 실험

-5°C 및 -10°C 에서의 얼음 침투깊이 실험 결과

를 그림 12, 13에 나타냈다. -5°C 에서 45wt% EFD 수용액은 PWS의 70~80%의 침투성능을 보였으며 얼음 용융 실험 결과와 마찬가지로 초기 약 10분 간 침투성능은 PWS와 차이가 대동소이하였다. 20wt%의 EFD 수용액의 경우, 20분 경과후에는 침투깊이가 증가하지 않았으며, 확인한 결과, 재동결이 발생한 것으로 관측되었다. -10°C 에서의 얼음 침투깊이 실험 결과, -5°C 의 실험 결과에 비해 두 제설제 모두 침투성능이 감소하였으며 약 20분 경과 후에는 침투성능의 향상이 거의 없는 것을 알 수 있다. 20wt% EFD 수용액은 실험에서 제외하였으며 30wt% 수용액은 침투깊이가 1mm 이하로 관측되어 침투성능이 거의 없는 것으로 조사되었다.

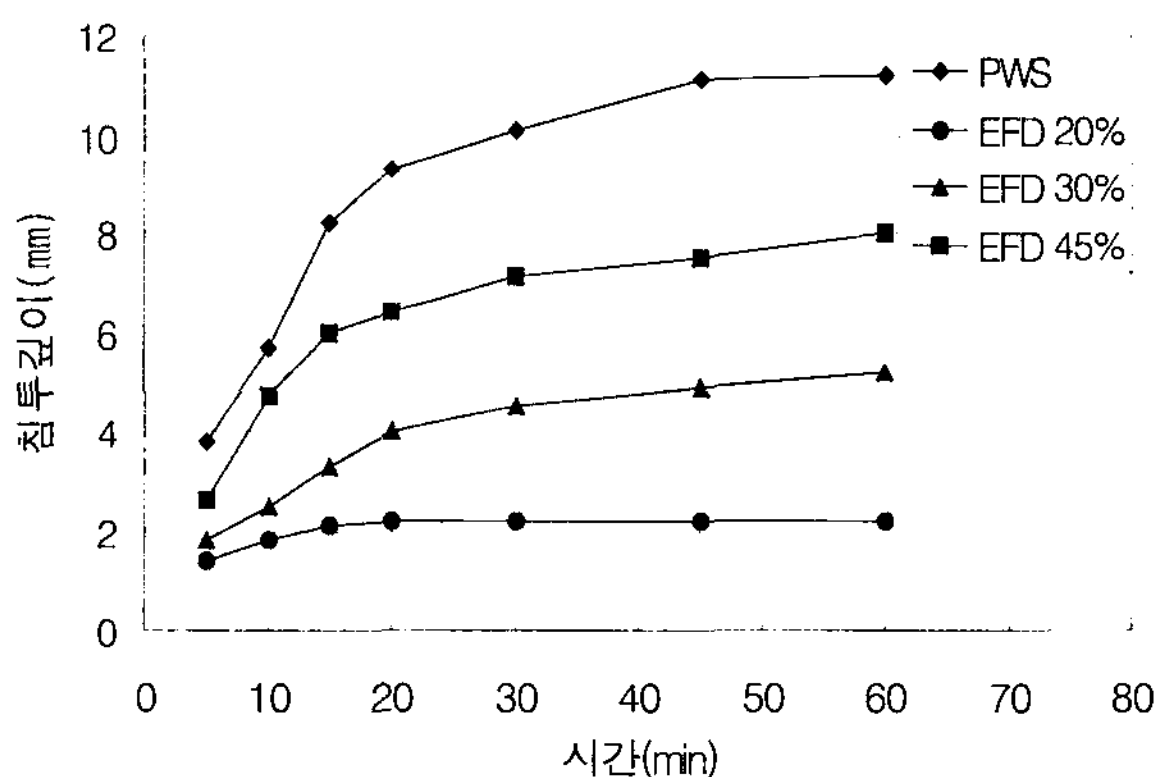


그림 12. 침투깊이 측정 결과(-5°C)

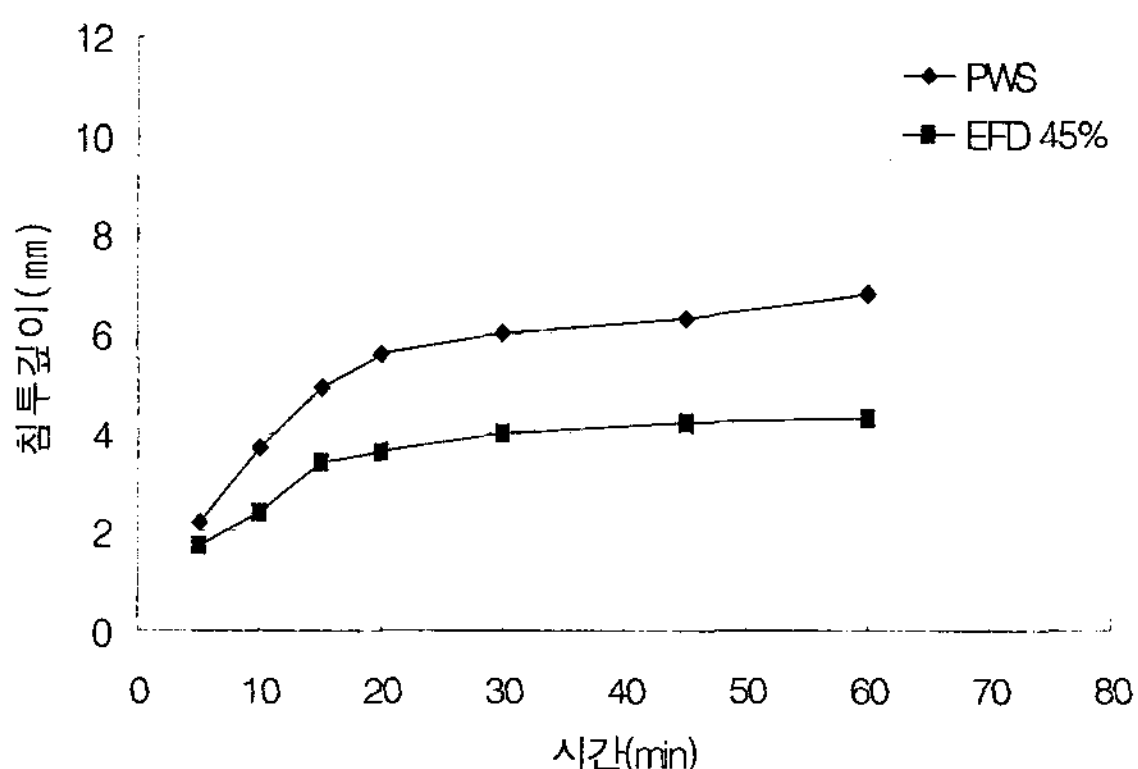


그림 13. 침투깊이 측정 결과(-10°C)

4.4 현장 살포를 위한 EFD의 최적농도 산정

국내 중부산간지역 일부를 제외한 나머지 지역의 1월 평균 기온은 $-6\sim-7^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 보이기 때문에(기상청, 2007) 약 -45°C 의 공융점을 갖는 EFD를 적용하는 데 무리가 없을 것으로 판단된다. 그림 9에서 나타낸 어는점 곡선은 액상살포가 가능한 EFD의 최소 농도 및 살포 후 재결빙이 시작되는 농도를 의미한다. EFD를 살포한 후 온도에 따른 농도의 변화범위가 ③영역과 ④영역에 존재할 경우에 한해 어는점 강하에 의한 용빙효과를 얻을 수 있기 때문에 액상 살포가 가능한 범위 내에서 가장 높은 농도를 살포하는 것이 유리하다. 얼음 용융 실험과 얼음 침투깊이 실험에서도 가장 높은 농도인 45wt% 수용액 살포 시 가장 우수한 결과를 보였으며, 30wt%수용액과 성능 차이가 확연하므로 용빙효과를 최대한 향상시키기 위하여 EFD의 최적 살포농도를 45wt%로 결정하였다.

5. 현장 실험을 통한 EFD의 용빙성능 검증

5.1 현장 실험 개요

현장 살포 시 제설제의 용빙성능은 기온, 노면 온도, 풍속, 차량 통행 등 다양한 변수에 의해 영향을 받을 수 있고, 변수를 제한하는 데 있어 어려움이 따르기 때문에 가능한 다양한 노면 및 기후 조건에서 실시할 필요가 있다. 본 연구에서는 결빙노면 및 압설노면을 인위적으로 모사하여 총 2회의 현장 살포 실험을 진행하였으며 살포 후 실제 미끄럼저항을 측정하여 정량적인 결과값의 비교를 통해 결론을 도출하였다. 실험은 지방도 456호선(구 영동고속도로)에 인접한 구 대관령 휴게소에서 실시되었으며 실험 구역의 개요도는 그림 14와 같다. 미끄럼 저항 측정은 그림 2의 locked wheel trailer 방식의 PFT(모델명 : M 1290)를 사용하였고 PWS의 살포는 한국도로공사에서 사용 중인 습염 살포차량을 이용하였다. 그림 15는 현장 실험에 사용된 습염 살포차량의 모습을 나타내고 있다.

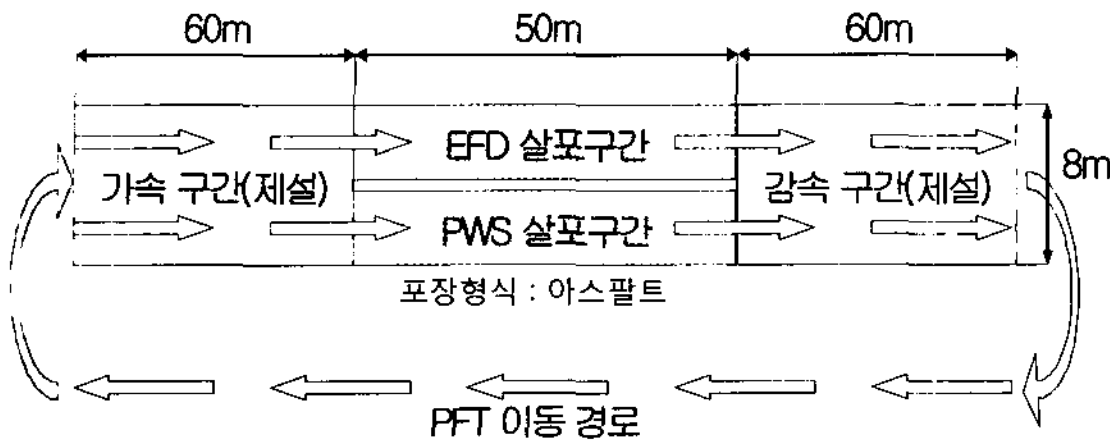


그림 14. 현장 실험 개요도

EFD는 45%의 농도로 살포하였으며 EFD 내의 수분을 제외한 나머지 고형물의 양을 계산하여 PWS의 살포량과 동일한 양을 살포한 후, 시간에 따른 노면의 미끄럼지수(SN)를 측정하였다. 실험 전경을 그림 16에 나타냈다.

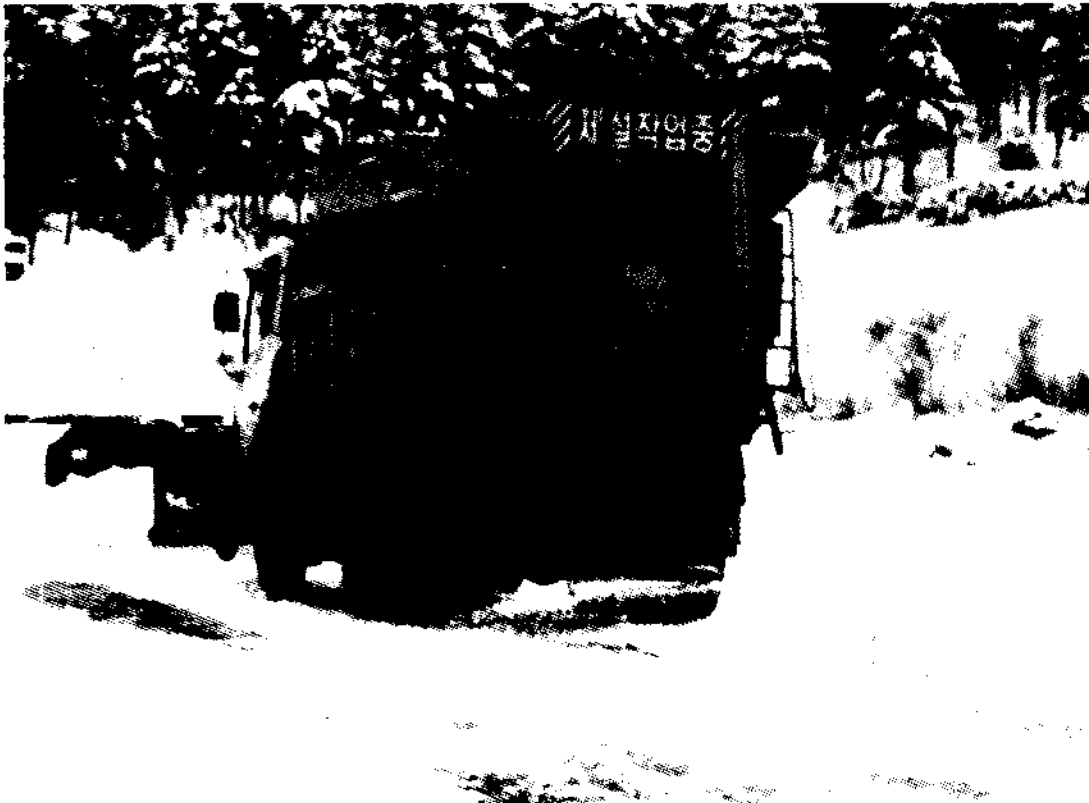


그림 15. PWS 살포 모습

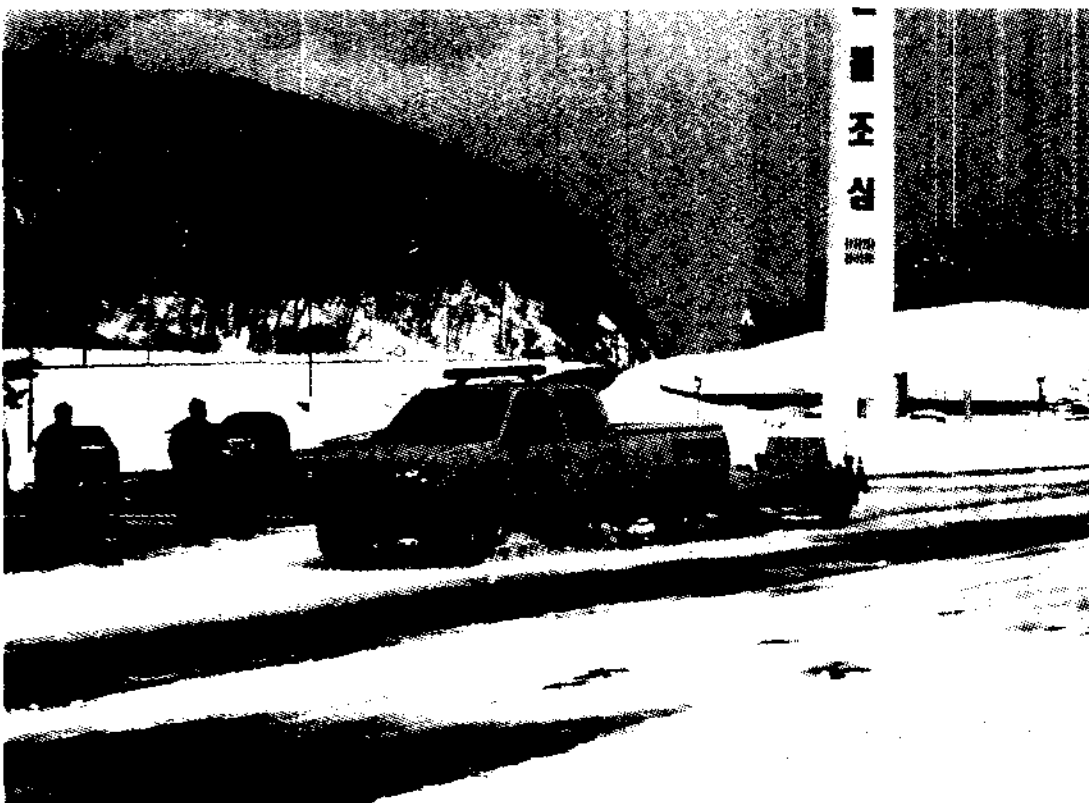


그림 16. PFT를 이용한 미끄럼저항 측정

5.2 현장 실험 결과

2회에 걸친 현장 실험의 미끄럼 저항 측정 결과와 환경 조건을 표 8에 정리하였다.

표 8. 현장 실험 결과

측정 항목	1차 현장실험		2차 현장 실험		
	EFD	PWS	EFD	PWS	
미끄럼 저항 (SN)	살포 전	15	15	15	17
	15분	42	48	19	18
	30분	58	57	29	34
	45분	-	-	46	51
	60분	61	60	57	58
PFT 운행속도	40mph				
노면 조건	빙판 2~4mm		압설 2~3cm		
기온	-2~-4℃		5~6℃		
상대습도	60%		77%		
노면 온도	0~-4℃		1~-3℃		
평균 풍속	7m/s		2.8m/s		

2~4mm의 얼음 두께를 인위적으로 형성시킨 1차 실험에서는 제설제 살포 후 30분만에 일반적인 습윤상태 아스팔트 포장의 미끄럼저항을 회복하였다. 형성된 얼음두께가 얇기 때문에 어느점 강하에 의한 제설효과보다는 제설제의 침투 후 노면-얼음 간 분리, 실험 차량의 통행으로 인한 물리적 제설 효과에 의한 것으로 판단된다. 반면 압설노면을 모사한 2차 현장실험에서는 살포 초기 소량의 용설 효과 및 어느점 강하에 의한 제설효과 확산에 의해 제설효과가 나타난 것으로 판단된다.

제설제 별 용빙, 용설 성능의 비교를 위해 시간대 별 미끄럼 지수를 그래프로 도식하여 그림 17에 나타냈다. 제설제가 미끄럼저항을 회복시키는 속도는 EFD에 비해 PWS가 다소 빠르게 나타났으나 성능차이는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. SN40값은 60을 전후하여 더 이상 증가하지 않는다는 실험이 수행된 포장이 습윤상태일 경우 약 60 정도의 SN40값을 갖는 것을 의미한다. 실험구역의 미끄럼저항을 습윤상태의 미끄럼저항까지 회복시키는데 걸리는 시간은 두 제설제 모두 1차 현장실험에서 약 30분, 2차 현장실험에서 약 60분으로 제

설제 종류에 따른 용빙성능의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이 포장의 50mph(80km/h)의 통행 속도를 갖는 도로일 경우, 표 4에 의한 최소 SN40값은 37이며 이를 기준으로 제설제의 용빙성능을 평가하면 미끄럼지수를 최소 요구값까지 회복시키는데 걸리는 시간은 PWS가 EFD에 비해 3분 가량 빠른 것으로 나타났다.

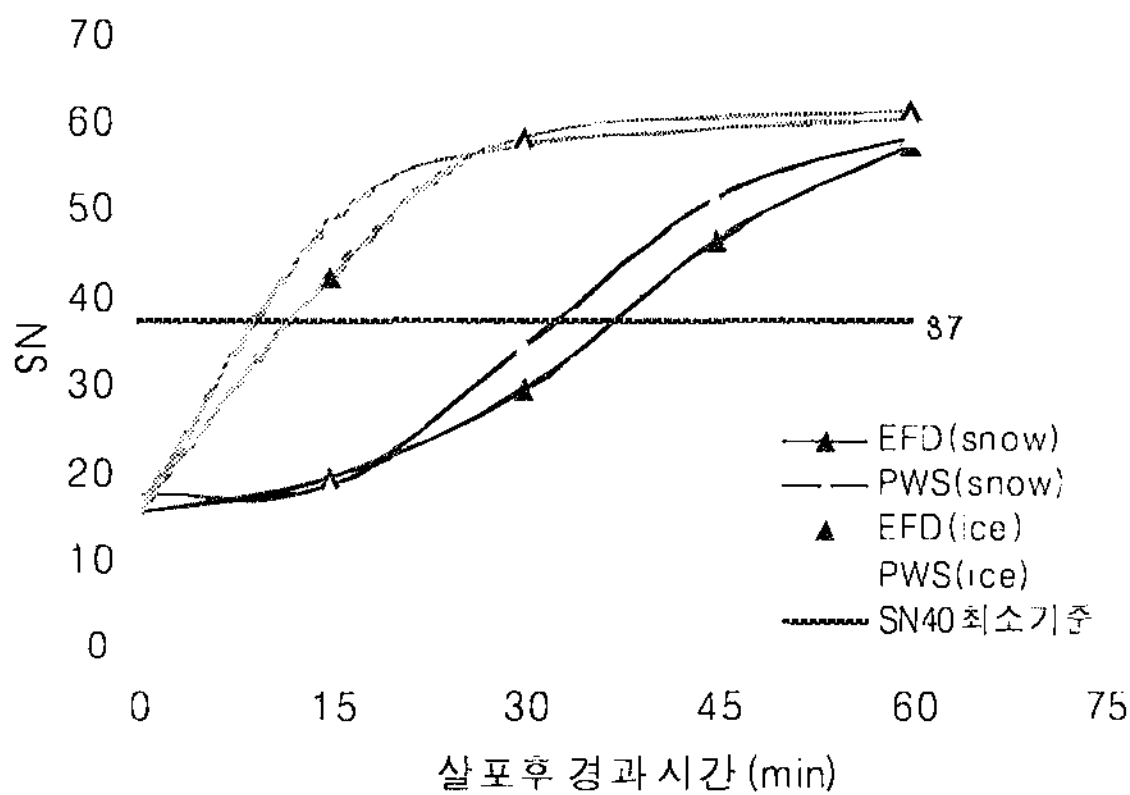


그림 17. 시간 경과에 따른 미끄럼 지수 변화

5. 결론

본 연구에서는 개발된 친환경 제설제의 실제 도입, 적용을 위해 가장 우선적으로 평가되어야 하는 제설제의 용빙성능을 평가하였다. 실내실험을 통해 EFD와 PWS의 용빙성능에 관련된 항목을 평가하였고 용빙성능을 극대화시키기 위한 EFD의 최적 농도를 제시하였다. 또한 2회의 현장살포 실험을 수행하여 미끄럼저항 회복성능을 바탕으로 EFD의 용빙성능을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 어는점 및 공용점 측정 결과, EFD와 PWS는 어는점 강하에 의한 용빙성능이 유사한 것으로 나타났다. 하지만 EFD의 공용점이 PWS의 공용점에 비해 약 17°C 더 낮게 측정되어 보다 넓은 온도범위에서 사용이 가능한 것으로

판단된다.

2. 얼음 용융 실험 및 얼음 침투깊이 실험 결과, PWS의 용빙성능이 EFD에 비해 다소 우수한 것으로 측정되었다. 또한 EFD의 농도가 높을수록 우수한 용빙성능을 보였으며 살포 초기 용빙성능은 PWS와 대등한 수준을 나타내 액상화 살포에 의한 초기 용빙효과 향상을 확인하였다.
3. 실내 실험을 바탕으로 EFD의 최적농도를 45wt%로 제시하였으며 압설 및 결빙노면에 대하여 2회의 현장살포 실험을 수행하였다. 노면의 미끄럼 저항측정을 통해 EFD의 용빙성능을 검토한 결과, EFD와 PWS는 빙결 및 압설 노면의 미끄럼 저항값을 습윤 상태의 미끄럼 저항값까지 도달시키는데 걸리는 시간이 대등하게 나타나, EFD의 현장 용빙성능이 우수함을 알 수 있었다.
4. 저염화물계 제설제인 EFD는 액상화 살포가 가능하고 특히 어는점 강하에 의한 용빙효과가 우수하기 때문에 용설액 자동분사 시스템, anti-icing을 위한 예비살포, 교량 등 특수지역에 사용할 수 있어 대체 제설제로서 적용 범위가 넓을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설핵심기술 연구개발사업의 일환인 친환경성 액상 유기산 제설제 개발 및 실용화 기술 과제(C104A1000016-04A0200-01610)의 일부 성과물입니다. 또한 현장실험에 많은 도움을 주신 한국도로공사 강릉지사 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청 홈페이지(2007), "www.kma.go.kr"
 서진원 외(2004), "콘크리트 노출 바닥판의 적용 및 유지관리에 관한 연구" 연구보고서, 도교기 ST-04-03, 도로교통기술원, 한국도로공사



- 양은익 외(2007), “친환경성 액상유기산 제설제 개발 및 실용화” 연구보고서, 산학연 A02-07, 한국건설교통기술평가원, 건설교통부
- 엄주용 외(1996), “노면 미끄럼저항 증진방안에 대한 연구(II)” 연구보고서, 도로연 96-46-26, 한국도로공사
- 우창완(2006), “겨울철 도로 관리를 위한 제설 성능 평가에 대한 연구” 석사학위논문, 강릉대학교
- 이승우, 우창완(2006), “제설제 사용으로 인한 노면 미끄럼저항 특성 연구” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol.26 No.5, pp.813~819
- 이용은 외(1999), “비염화물계 융빙제의 개발” 연구보고서, 도로연 99-47-40, 한국도로공사
- 조서연(2003), “‘습염살포’ 제설작업 소개” 대한토목학회지, 대한토목학회, Vol.51 No.5, pp.16~19
- 최고일 외(1992), “포장의 미끄럼저항 특성 연구” 연구보고서, 도로연 92-13-10, 한국도로공사
- 홍승호 외(2003), “포장 기능성 평가기준 및 미끄럼 관리기준 설정 연구” 연구보고서, 도교기 PA-03-09, 도로교통기술원, 한국도로공사
- American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Freezing Point of Aqueous Engine Coolants” ASTM Standard D 1177-88
- American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surface Using a Full-scale Tire” ASTM Standard E 274-97
- Carl-Gustaf Wallman and Henrik Astrom(2001), “Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety” VTI Meddelande 911A, Swedish National Road & Transport Research Institute
- Cecil C. Chappelow et al.(1992), “Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers” SHRP-H-332, Strategic Highway Research Program

접 수 일: 2007. 6.12
심 사 일: 2007. 6.19
심사완료일: 2008. 2.20