비염화물계 동결 억제 도로포장

권기창 | ㈜제일트레이딩 대표이사
장우성 | ㈜제일트레이딩 상무이사
이수용 | ㈜제일트레이딩 부장

1. 서론

동절기 도로 위의 눈이나 얼음의 효과적인 처리는 국가의 경제 및 공공안전을 위하여 필수적이다. 이러한 눈과 얼음을 제거하기 위해 제설제를 사용하고 있다. 현재 국내에서는 주로 염화물계 제설제인 염화칼슘($CaCl_2$)과 염화나트륨(NaCl)을 사용하고 있다.[1)]

행정안전부에 따르면, 2023년 겨울철(2022년 11월 ~ 2023년 3월) 동안 제설제 사용량이 약 73만 6천 톤으로, 이는 2020년 같은 기간 약 50만 톤에 비해 1.5배로 증가하였다고 밝혔다.[2)] 그러나 동절기 노면 위의 얼음을 녹이기 위한 제설제의 사용이 증가하면, 도로 주변 식생, 하천 및 지하수 오염 등 환경 생태학적으로 큰 위협을 줄 뿐만 아니라, 차량의 기능도 떨어트릴 수 있다. 또한, Kim, et al.에 따르면, 환경인자 중 제설제 사용량이 콘크리트 공용수명 감소에 영향을 주는 것으로 나타났다.[3)]

최근에는 염화물과 입상 고무 등의 동결 억제제를 아스팔트 혼합물에 주입하는 등의 방법에 의한 동결 억제 기능을 부여한 동결 억제 포장이 에너지 절약, 자원 절약, 노동력 절약의 관점에서 주목받고 있다. 이와 같은 동결 억제 포장은 유럽 및 일본에서는 약 30~40년 전부터 실시되어 왔고 또한, 동결 억제 포장 공법도 수많은 종류가 개발되어 실용화되고 있지만, 우리나라에서는 여전히 살포로 쌓인 눈을 제거하는 방법이 일반화되고 있다.[4) 5)]

1) Lee, Byung-Duck, et al. "Evaluation of the deicing performance and concrete structure effect with various deicing chemicals." International Journal of Highway Engineering 7.4 (2005): 113-123.
2) 이상기후에 자주 '눈 펑펑'...제설제 사용량 벌써 50만톤 넘어. 동아일보(2024).https://www.donga.com/news/Society/article/all/20240127/123254785/1
3) Kim, Chan-Woo, et al. "A study to analyze service life of expressway pavement according to traffic volumes and de-icing chemicals." International Journal of Highway Engineering 17.1 (2015): 35-41.
4) Nam, Jeong-Du, Ji-Hyeong Yu, and Seung-Won Lee. "동결억제포장의 기술적 특성 (I)." 한국도로학회지: 도로 5.4 (2003): 66-74.
5) Nam, Jeong-Du, Ji-Hyeong Yu, and Seung-Won Lee. "동결억제포장의 기술적 특성 (II)." 한국도로학회지: 도로 6.1 (2004): 32-42.

2. 재료 소개 및 시공 방법

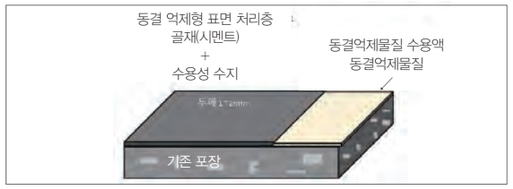
2.1 표면 처리형 동결 억제 포장 재료 및 소개

본 연구에서 사용된 프리즈 오프 코트(FREEZE OF COAT) 시공 시스템의 주요 재료는 다음과 같다. 동결 억제를 위한 표면 처리 혼합물은 고화재, 골재, 유기산의 금속염 화합물, 및 중합체 에멀션(Polymer emulsion)을 포함한다. 이 중 유기산의 금속염 화합물은 결빙 억제의 주요 역할을 하며, 특히 금속염은 도로 표면의 어는점 강하에 기여한다. 중합체 에멀션은 결빙 억제 물질을 도로 표면에 고르게 분포시키고, 안정적인 코팅막을 형성해 지속적인 효과를 유지한다. 고화재는 시공 후 표면 강도를 확보하는 데 필수적인 요소로, 사용된 시멘트는 초속경 포틀랜드 시멘트이다. 골재는 주로 결정이 작은 실리카 샌드가 사용되었으며, 이는 코팅의 균일성과 접착력을 높이는 데 역할을 한다.

또한, 프리즈 오프 코트는 얇은 막 형성층을 통해 결빙 억제 기능을 수행한다. 표면 처리층은 두께 약 1~2mm로, 기존 도로 구조에 큰 영향을 미치지 않으며, 다양한 온도 및 환경 조건에서도 우수한 내구성을 보인다.

기존 포장 표면에 동결 억제제 수용액을 살포하여 수지 모르타르를 도포하는 방법으로 표면 처리형의 화학계 동결 억제 포장이다[그림 1]. 시공 후 동결 억제제가 침지하여 노면의 동결을 억제하게 된다. 이러한 '표면 처리형 동결 억제 포장'은 기존 도로 표면을 철거하지 않고도 동결 억제 효과를 부여할 수 있는 효과적인 공법이며, 기존 노면 위에 동결 억제제 수용액을 살포한 후, 수지 모르타르를 도포한 후 마무리하는 간단한 시공 방법을 제공한다. 이를 통해 기존 노면을 활용하면서 신속한 시공이 가능하며, 별도의 대규모 철거 과정이 필요하지 않다.

[그림 1] 표면 처리형 동결 억제 포장

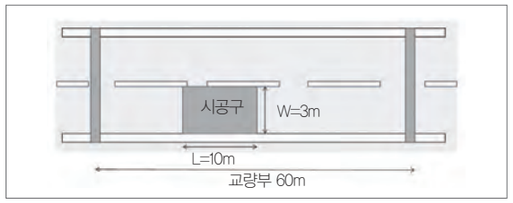


2.2 시공 자료

노면 온도 −5℃까지 동결 억제 효과를 발휘할 수 있으며, 표면 처리 공법이기 때문에 저렴한 비용으로 시공할 수 있다. 또한, 동결 억제 효과와 함께 겨울철 노면 관리로 살포한 제설제가 노면에 머무르는 효과를 갖는다. 상온 시공으로 인해 작업자가 화상을 입지 않고, 여름철 시공 시 열사병 위험을 줄일 수 있으며, 비염화물계 동결 억제제를 사용하여 금속 부식성이 낮으며 염해 우려가 없다. 작업환경 및 주변환경의 피해를 줄일 수 있는 특징을 갖고 있다. 또한, 기존 염화물 기반 기술 대비 약 15%의 비용 절감 효과를 보인다.

시공 장소는 일본 미야기현 리후초(교량부)에서 진행하였으며, 시공일은 2022년 12월 5일이다. 시험 시공 규모는 길이 10m, 폭 3m로 진행하였다[그림 2, 3].

[그림 2] 시험 시공 개요



① 교통 규제 개방
② 공사 준비(포장 상태, 재료 준비)
③ 수용액 분산
④ 적용 종료(도로 건조, 경도 결정, 미끄럼 측정)
⑤ 교통 개방

[그림 3] 현장 공법 적용

3. 시험 방법 소개

3.1 공시체 형성 과정

프리즈 오프 코트 공시체는 유기산의 금속염 화합물로서 포름산 나트륨, 중합체 에멀션으로서 아크릴산에스테르 중합체의 에멀션, 고화재인 초속경 시멘트, 세골재로 이용되는 실리카 샌드를 혼합하여 제작하였다. 이 혼합물을 −5℃ 환경에서 밀입도 아스팔트 혼합물(13) 공시체 표면에 약 1mm 두께로 도포한 후 실온에서 2시간 방치하여 형성하였다.

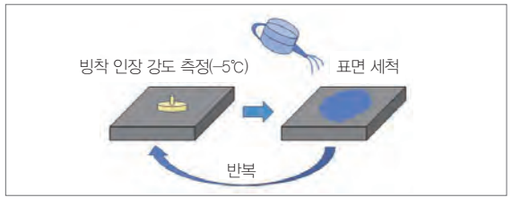
비교예 1의 공시체는 밀입도 아스팔트 혼합물(13)의 필러분을 염화나트륨으로 치환하여 제작하였다. 이 혼합물을 동일한 다짐 온도에서 거푸집에 투입하고 양면 50회 다짐 후, 온도 20℃, 습도 60% 조건에서 7일간 양생하여 공시체를 완성하였다.

3.2 실내 빙착 인장 강도 시험

동결 억제 효과를 실험적으로 검증하기 위해 빙착 인장 강도 시험을 시행하였다. 이 시험은 "포장 조사 및 시험법 C049" 기준에 따라 진행되었으며, 프리즈 오프 코트 공시체, 비교예 1의 공시체, 그리고 밀입도 아스팔트 혼합물(13)의 공시체를 사용하여 실내 환경에서 동결 억제 효과를 평가하였다.

시험은 다음과 같은 절차로 진행되었다. 시험 온도를 −5℃로 설정한 후, 각 공시체의 표면에 얇은 얼음 막을 형성하였다. 이후, 부직포를 부착한 측정 지그(Measurement jig)를 준비하여 부직포를 물로 포화시킨 다음 공시체 표면에 설치하였다. 공시체와 부직포가 안정적으로 접촉되도록 접지압 4kPa이 가해진 상태로, −5℃의 환경에서 4시간 동안 양생을 진행하였다. 양생이 완료된 후, 측정 지그 위에 고무판을 설치하고, 그 위에서 420g의 강구를 25cm 높이에서 10회 낙하시켜 충격을 가하였다. 이후, 측정 지그를 공시체에서 떼어내는 과정에서 발생한 최대 하중을 측정하였다. 이를 통해 인장 강도를 계산하였으며, 강도가 낮을수록 동결 억제 효과가 뛰어난 것으로 판단하였다[그림 4].

[그림 4] 동결 억제 효과의 실험 방법



3.3 금속 부식성 시험

본 시험은 프리즈 오프 코트 및 비교예 1의 공시체가 금속 표면의 부식에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 프리즈 오프 코트는 유기산 금속염 화합물로서 포름산 나트륨 3g을 증류수 100mL에 용해하여 프리즈 오프 코트 수용액을 조제하였다.

비교예 1에서는 염화나트륨 3g을 증류수 100mL 용해하여 비교예 1의 수용액을 조제하였다. 추가적으로 아무 첨가물이 없는 증류수는 대조군으로 설정되었다.

시험은 아연 도금이 제거된 철편을 각 수용액에 24시간 침지시킨 후, 취출하여 실온에서 24시간 방치하는 과정을 포함하였다. 이러한 침지 및 방치 과정을 4회 반복한 뒤, 네 번째 침지 과정이 끝난 철편에서 녹을 완전히 제거하고 중량을 측정하였다. 시험 전 철편의 중량과 시험 후 철편의 중량 차이를 부식 감소량으로 정의하고, 이를 통해 각 수용액의 금속 부식 억제 효과를 평가하였다. 부식 감소량이 적을수록 부식 억제 효과가 우수한 것으로 간주하였다.

3.4 고무호스 라벨링 시험을 통한 미끄럼 저항 평가

본 연구에서는 고무호스 라벨링 시험을 통해 미끄럼 저항성을 평가하였다. 시험 대상은 프리즈 오프 코트 공시체, 비교예 1의 공시체, 그리고 밀입도 아스팔트 혼합물(13) 공시체로 구성되었으며, 밀입도 아스팔트 혼합물(13)의 공시체는 염화나트륨을 함유하지 않은 별도의 공시체로 준비하였다.

시험은 각 공시체를 −5℃의 온도로 유지한 환경에서 수행되었다. 각 공시체의 표면(10cm x 30cm 범위)에 얇은 얼음 막을 형성한 후, 라벨링 시험기("NKA-121", 닉켄 주식회사)를 사용하여 미끄럼 저항(BPN, British Pendulum Number)을 경시적으로 측정하였다. 라벨링 시험기의 체인 부분에는 고무호스가 장착되어 있으며, 이를 이용해 공시체 표면에서의 마찰 저항을 측정하였다. 시험 시간은 60분으로 설정하였으며, 경과 시간에 따른 BPN 값을 기록하였다.

추가적으로, 시험은 공시체의 수중 양생 처리가 미끄럼 저항에 미치는 영향을 분석하기 위해 세 가지 조건에서 수행되었다. 첫 번째로는 수중 양생 처리를 하지 않은 공시체를 사용하였고, 두 번째는 20℃의 항온조에서 24시간 수중 양생 처리를 1회 수행한 공시체를 사용하였다. 세 번째로는 동일한 환경에서 수중 양생 처리를 2회 수행한 공시체를 사용하였다. 각 시험 조건에서는 얼음 막 형성 전 공시체의 미끄럼 저항 값도 비교를 위해 측정하였다.

4. 결과

4.1 추적 조사 결과

시공 후 약 2주가 지난 시점에, 전날 눈이 내려 약 2cm 적설량이 기록되었다. 오전에는 차량 통행량이 증가하면서 노면에 얇은 압설 상태가 형성되었다. 그러나 시험 시공 구간에서는 차량 주행이 이루어진 부분의 노면 노출률이 높아진 것을 확인하였다. 이후 약 3개월 후 다시 조사한 결과, 마찬가지로 높은 노면 노출률을 확인할 수 있었다〈표 1〉, [그림 5, 6].

〈표 1〉 추적 조사 결과

조사일 (Y, M, D)	시간 (시)	기온 (℃)	주변의 노면 상태	동결 억제 효과
22. 12. 11	14	2		–
22. 12. 15	7	−2	소금 염화칼슘 살포 있음, 동결 없음	–
22. 12. 19	6	2	노면의 얇은 압설	◎
22. 12. 25	9	–	5cm 정도의 적설	–
22. 12. 26	9	–	노면 압설	–
23. 02. 09	11	–	건조	–
23. 02. 10	13	−3	노면 압설	–
23. 02. 14	7	−1	노면의 얇은 압설	◎
23. 02. 21	7	−1	노면의 얇은 압설	◎
23. 02. 21	14	15	눈에 띄는 박리나 마모는 없음	–

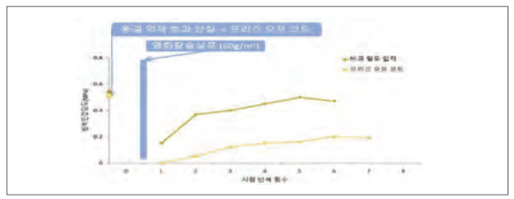
[그림 5] 늦겨울 노면 노출 상태

[그림 6] 시공 도로 노출 상태

4.2 제설제 살포 효과의 지속성 개선

프리즈 오프 코트의 동결 억제제가 소모되어 동결 억제 효과가 줄어들더라도, 제설제를 살포하면 모르타르에 제설제가 흡수된다. 이로 인해 밀입 노면에 비해 제설제의 효과가 더 오래 지속되는 것으로 확인된다[그림 7].

[그림 7] 제설제 살포 효과의 지속성 개선

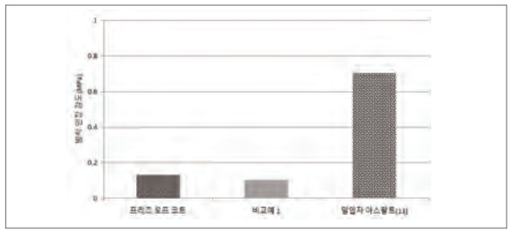


4.3 빙착 인장 강도 시험 결과

빙착 인장 강도 시험 결과를 [그림 8]에 나타냈다. 빙착 인장 강도가 낮을수록 노면에서 빙막(얼음막)이 더 쉽게 분리됨을 의미한다.

프리즈 오프 코트의 빙착 인장 강도는 0.1MPa로 밀입도 아스팔트 혼합물(13)의 빙착 인장 강도 0.7MPa보다 훨씬 낮은 수치를 기록하였으며, 비교예 1의 공시체와 동일한 정도로 나타났다. 또한, 염화칼슘 기반 동결 억제제와 비교했을 때, 비염화물 기반 조성물은 유사한 빙착 감소 효과를 보이면서도 금속 부식성 및 환경 피해를 크게 줄였다. 동결 방지 모르타르와 기존 포장 사이의 접착 강도는 인장 속도 1mm/min, 온도 20℃ 조건에서 0.6MPa로 나타났다.

[그림 8] 동결 억제 효과의 실내 실험 결과 그래프



4.4 금속 부식성 시험 결과

시험 결과는 〈표 2〉에 나타냈으며, 이는 각 수용액에 따른 부식 감소량(mdd, Milligrams perdecimeter squared)을 나타낸다.

〈표 2〉 금속 부식성 시험 결과 표

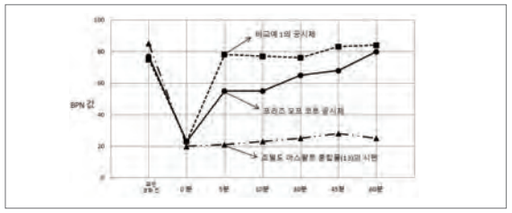
시험군	부식 감소량(mdd)
프리즈 오프 코트 수용액(포름산 나트륨)	3.72
비교예 1의 수용액(염화나트륨)	7.46
증류수(대조군)	2.02

〈표 2〉의 결과에 따르면, 프리즈 오프 코트 수용액은 비교예 1의 수용액에 비해 부식 감소량이 적었으며, 이는 부식 발생이 효과적으로 억제되었음을 나타낸다. 또한, 대조군인 증류수와 비교했을 때도 프리즈 오프 코트 수용액이 부식 억제 효과를 유지한 것으로 평가되었다. 따라서, 프리즈 오프 코트의 공시체는 비교예 1의 공시체보다 금속 부식 방지 성능이 우수한 것으로 나타난다.

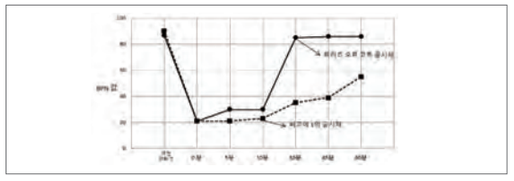
4.5 미끄럼 저항성 결과

시험 결과는 [그림 9], [그림 10], [그림 11]에 그래프로 나타냈다. [그림 9]는 수중 양생 처리를 하지 않은 공시체에 대한 시험 결과, [그림 10]은 수중 양생 처리 1회가 수행된 공시체의 시험 결과, [그림 11]은 수중 양생 처리 2회가 수행된 공시체의 시험 결과를 확인할 수 있다. 밀입도 아스팔트 혼합물(13)의 공시체는 시험 시작 후 60분이 경과해도 BPN 값이 거의 회복되지 않는 모습을 보였다. 반면, 프리즈 오프 코트의 공시체는 시험 시작 직후부터 BPN 값이 회복되기 시작하여 빠른 시간 내에 얼음 막이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 비교예 1의 공시체는 수중 양생 처리 횟수가 증가함에 따라 BPN 값의 회복 효과가 저하되었지만, 프리즈 오프 코트의 공시체는 수중 양생 처리를 받은 경우에도 BPN 값의 회복 효과가 거의 감소하지 않았다. 이를 통해 프리즈 오프 코트의 공시체가 동결 억제 효과의 지속성이 우수하다는 결론을 도출할 수 있었다. 시험 결과 수중 양생 처리가 동결 억제제의 지속성에 미치는 영향을 명확히 보여주며, 프리즈 오프 코트의 공시체가 비교적 우수한 성능을 가지는 것으로 나타났다.

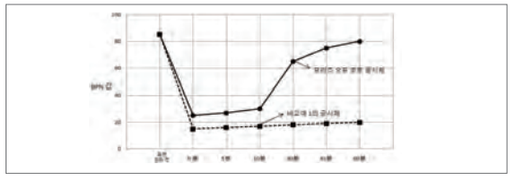
[그림 9] 수중 양생 0회 처리



[그림 10] 수중 양생 1회 처리



[그림 11] 수중 양생 2회 처리



5. 향후 전망

표면 처리형 동결 억제 포장은 초박층 표면 처리제를 기존 노면 위에 도포하여 동결을 억제하는 방식이다. 그러나, 표면 처리제가 손실되면 동결 억제 효과가 사라지는 특징 때문에 간단한 방식의 동결 억제 포장(간이 동결 억제 포장)으로 분류된다. 개발 초기 단계에서 이 포장의 동결 억제 효과는 두 계절 지속될 것으로 예상한다.

현재까지는 소규모 인력으로 시공했으나, 기계화 및 노동력 절감을 통해 범용성과 경제성을 강화하는 방향으로 개발할 것이며, 더 광범위한 공법으로 적용될 수 있도록 확립을 목표로 하고 있다.

차량 주행으로 인해 압설이 제거되면서 노면 노출률이 증가하였고, 이로 인해 결빙 억제 효과가 나타난다. 이 효과가 최소 한 계절 동안 지속되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 적설량이 많은 경우에는 기존 포장 구간과 시험 시공 구간 사이의 노출률 차이가 관찰되지 않으며, 이는 기존의 동결 억제 포장 기술과 마찬가지로, 적설량이 많을 경우 '융설' 효과를 기대하기 어려울 수 있다.