

## 콘크리트의 동결융해 내구성에 공기량, 제설제, 노출조건이 미치는 영향에 관한 연구

### Effect of Air Contents, Deicing Salts, and Exposure Conditions on the Freeze-Thaw Durability of the Concrete

이 병 덕 Lee, Byung Duk | 정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : lbdh@ex.co.kr)

#### ABSTRACT

In this study, the relative effects of low-chloride deicer(LCD) and two other deicing agents on the scaling of concrete were conducted in a series of tests at laboratory accordance with the ASTM C 672. The solutions concentration of deicers tested included 1, 4, 10%. Tap water was used as control. The amount of scaling was evaluated gravimetrically. As test result of deicer solution types, when applied to 4% solutions, surface scaling of concrete after 56 freeze-thaw cycles was produced significantly as about 9 times on LCD solution, as about 18 times on CaCl<sub>2</sub> solution, and as about 33 times on NaCl solution comparing with tap water. As test result of deicer solution concentrations, relatively low concentrations (of the 4% by weight) of deicer were produced more surface scaling than higher concentrations (of the 10% by weight) or lower concentrations (of the 1% by weight) of deicer. It show that the damaging concentration is of the order of 3~4% for previous research result. It appears that the mechanism of surface scaling is primarily physical rather than chemical. Also, the effect of chloride deicer types, freeze-thaw cycling, and air contents on the performance of concrete was experimentally investigated. The results show that the concrete specimens subjected to freeze-thaw cycling scaled more severely in exposure to deicing salt than those in non-exposure to deicing salt, weight losses of the specimens tested in exposure to deicing salt were twice as much as those tested in non-exposure to deicing salt. Relative dynamic modulus of elasticity of concrete specimens decreased more quickly in exposure to deicing salt than in non-exposure to deicing salt. Also, relative dynamic modulus of elasticity of concrete specimens in exposure to sodium chloride deicing salt was decreased more quickly comparing with exposure to LCD salt. It is also shown that the chloride contents according to concrete specimen depths was more largely in exposure to LCD salt. When concrete specimen is exposed to chloride deicing salts and freeze-thaw cycling, performance degradation in the entrained air concrete(AE concrete) retarded more considerably comparing with non-entrained air concrete(Non-AE concrete).

#### KEYWORDS

*deicing chemicals, calcium chloride, sodium chloride, low chloride deicer(LCD), scaling, freeze-thaw, relative dynamic modulus of elasticity*

#### 요지

콘크리트의 박리(scaling)는 수분의 존재하에 동결융해 사이클에 따른 콘크리트의 점진적인 표면열화이다. 특히, 이것은 제설제에 염화물의 존재가 콘크리트 표면박리(스켈링)와 더불어 심한 경우, 굵은골재의 노출 및 탈리로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 스켈링에 대한 저염화물계 제설제(low chloride deicer, LCD)와 염화칼슘 및 염화나트륨 제설제의 상대적인 영향을 ASTM C 672에 준하여 실시하였다. 시험 제설제의 농도는 1, 4, 10% 이고, 수돗물은 기준으로 사용하였다. 박리량은 중량으로 평가하였다. 연구결과 4% 농도를 적용하였을 때, 동결융해 56 사이클 후 콘크리트의 박리는 수돗물에 비해 LCD 용액에서 약 9배, 염화칼슘 용액에서 약 18배, 염화나트륨 용액에서 약 33배 정도 크게 발생하였다. 용액의 농도에 따라서는 고농도인 10%에 비해 4% 농도에서 표면 박리가 가장 현저하게 발생하였는데, 이는 스켈링 발생이 염농도가 3~4%일 때 가장 현저해진다는 기존의 연구결과와 일치함을 알 수 있었다(일본콘크리트공학회, 1999). 또한 콘크리트가 경화된 후, 현장에서 염화나트륨 및 저염화물계 제설제(LCD, 염소이온 중량비 50%)가 살포되고 동결융해 사이클에 노출된 경우, 제설제에 노출되지 않은 경우의 콘크리트 동해열화에 대해, 콘크리트의 공기량에 따른 영향을 실험적으로 연구하였다. 연구 결과 동결융해 사이클에 따른 콘크리트 시편은 제설제에 노출되지 않은 것 보다 염

화물 제설제 노출에서 스킨링이 더 심한 것으로 나타났고, 염화물 제설제에 노출된 시편이 노출되지 않은 시편 보다 중량 손실이 2배나 되었다. 콘크리트 시편의 상대 동탄성계수는 염화물 제설제에 노출되지 않은 것과 비교하여 염화물 제설제에 노출된 것에서 더 빠르게 감소하였다. 또한 염화나트륨 제설제에 노출된 콘크리트 시편의 상대 동탄성계수는 저염화물계 제설제에 노출된 것 보다 더 빠르게 감소하였다. AE 콘크리트는 염화물과 동결융해 사이클에 노출되었을 때, Non-AE 콘크리트 보다 성능저하가 크게 지연되었다.

## 핵심용어

제설제, 염화칼슘, 염화나트륨, 저염화물계 제설제, 스킨링, 동결융해, 상대동탄성계수

## 1. 서론

고속도로 상에서 제설제 살포량이 많고 살포 빈도가 높은 지역은 해발이 높는데 위치하고 있고, 동절기 강설일수가 많고 적설량 또한 많을 뿐만 아니라 동결일수가 일년 중 100일 이상인 적설한랭지에 위치하고 있다. 이와 같이 적설한랭지를 통과하는 고속도로에서는 동절기 결빙에 의한 교통 통행의 원활을 기하기 위해 제설제인 염화나트륨(sodium chloride, NaCl)과 염화칼슘(calcium chloride, CaCl<sub>2</sub>)을 살포하며, 여기에 포함되어 있는 염화물은 염해, 동결융해에 의한 동해가 복합적으로 작용하여 콘크리트에 복합열화(multi-deterioration)를 일으키게 된다. 대부분 이러한 지역에서의 콘크리트는 염화물과 동결융해 환경에 직접적으로 노출되어 있어, 콘크리트 표면의 일부가 박리(scaling)되는 현상과 염화물 이온의 침투로 인한 철근부식 등을 일으켜 손상의 가속화로 내구성이 급격하게 저하된다.

전세계적으로 염화물의 침투로 일어난 철근 부식으로 인한 공공 구조물의 피해는 여러 건이 보고되어 있으며, 이 중에서 용설(제설)제 사용으로 인한 미국 미네소타 주의 주차장의 붕괴는 널리 알려진 예이다(한국도로공사 도로교통, 2007). 또한, 미국에서 보고된 자료에 의하면 내구연한이 50년으로 설계되었던 교량 상판이 10~20년만에 교체되고 있다고 한다(한국도로공사 도로교통, 2007).

국내의 경우는 염화물에 의한 피해에 대해 전반적인 조사가 정확히 이루어지지 않은 상태이나, 강설량이 많아 염화물 제설제를 다량으로 살포하는 지역에 위치하고, 이러한 환경에 직접적으로 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 손상이 가속화 되고 있다. 특히 콘크리트 바닥판의 열화는 심각한 문제로 대두되고 있고, 최근 고속도로의 콘크리트 포장에서는 알칼리-실리카 반응(alkali-silicate reaction, 이하 알칼리골재 반응 또는 ASR)과 동결융해에 의한 포장의 조기 파손이 목격되고 있다. 이러한 콘크리트 구조물의 피해 이외에도 염화물계 제설제는 식물의 고사나 식수 오염 등의 환경적인 피해 또한 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 염화물계 제설제로 인한 영향을 최소화 하기 위해 대체 제설제와 기존의 염화물계 제설제의 종류

에 따른 콘크리트의 동결융해 내구성으로 대체 제설제의 적용성을 검토하였다. 그리고 동해와 밀접한 관련이 있는 콘크리트의 공기량과 제설제 살포에 따른 염해와 반복되는 동결융해에 의한 동해를 동시에 받는 복합열화 환경 등의 노출조건에 따른 콘크리트 동결융해 내구성 영향을 실험을 통하여 분석하는데 있다.

## 2. 실험

스켈링 저항성(ASTM C 672) 및 급속 동결융해 저항성(KS F 2456 A법) 시험에 사용한 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트로서 비중 3.15, 잔골재는 비중 2.60, 굵은골재 비중은 2.63이고, AE 콘크리트에는 AE 감수제, Non-AE 콘크리트에는 감수제를 사용하였다. 스킨링 시험에 사용한 콘크리트는 표 1의 ① 이고, 급속 동결융해 저항성 시험에 사용한 콘크리트는 표 1의 ① 및 ②와 같다.

표 1. 콘크리트 배합비

설계기준 강도( $f_{28}$ )	G <sub>max</sub> (mm)	Air (%)	Slump (cm)	W/C (%)	S/A (%)	단위량 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	혼화제
① 32 MPa	25	3.1	13.0	42.0	41	164	385	700	1066	감수제 C×0.3
② 32 MPa	25	5.8	15.0	40.0	41	154	385	680	1035	AE감수제 C×0.6

표 2. 시험용 제설제의 화학식

제설제 종류	화학식 및 조성
염화나트륨(NaCl)	Na, Cl
염화칼슘(CaCl <sub>2</sub> )	Ca, Cl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O
저염화물(LCD)	(CH <sub>3</sub> COONa-MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O(40%)-CH <sub>3</sub> COONa-NaCl(60%))

### 2.1. 스킨링 저항성 시험

본 시험의 목적은 제설방법에 따른 염화물 종류 및 동결융해 사이클이 콘크리트 표면 박리저항성에 미치는 영향을 파악하기 위해서이다.

스켈링 시험은 저염화물계 제설제(LCD), 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>),

염화나트륨(NaCl) 3종류를 사용하였다. 각 제설제는 1, 4, 10% 농도의 수용액을 사용하였다. 또한, 비교를 위해 수돗물을 사용하였다.

스켈링 저항성 시험용 몰드는 표면적이 최소 460cm<sup>2</sup>, 깊이가 최소 7.5cm인 콘크리트 슬래브를 제작하였다. 콘크리트 마감 상부표면에는 시험용액 침지를 위해 폭 2.0cm, 높이 2.0cm 정도의 다이크를 설치하였다.

콘크리트의 양생은 온도 23±1.7℃ 수조에서 14일간 양생한 후, 다시 14일간 온도 23±1.7℃, 상대습도 50±5% 양생실에서 보관한 시험체를 대상으로 시험을 하였다.

28일간 습기 및 기건양생이 끝난 후 시험용액(물, 4% 농도의 제설제 용액)을 콘크리트 상부 마감면 상부에 설치된 다이크의 폰드에 깊이 약 6mm 정도 되게 부어 넣고 시험을 시작한다. 동결융해 시험은 ASTM C 672에 의거하여 7, 14, 28, 42, 56 사이클에서의 스켈링 저항성을 박리된 콘크리트 입자로 평가하였는데, 이때 박리된 입자는 물로 씻어낸 후 상부표면을 육안 관찰 및 박리량을 무게로 측정하였다. 7 사이클 마다 시험용액을 교체하거나 부어 주었다.

동결융해 사이클은 16~18시간 동안 동결(-17.8±1.7℃), 6~8시간 동안 융해(온도 23±1.7℃, 상대 습도 45~55%)를 1 사이클로 한다.

## 2.2. 동결융해 저항성 시험

콘크리트의 동결융해 작용에 의한 성능저하 및 내구성을 측정하기 위한 시험은 콘크리트 시편에 간극수의 빙점이하의 온도, 빙점이상의 온도를 주기적으로 가하는 실험으로 KS F 2456 (급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험법)에 표준 시험 방법이 제안되어 있다. 이 기준에는 구체적으로 두 가지 시험법이 제안되어 있는데, 수중에서 급속 동결융해를 반복하는 시험(A법)과, 공기중에서 급속동결하여 수중에서 융해하는 B법이 있다. 일반적으로 수중 급속 동결융해 시험법이 공기중 급속 동결융해 시험법보다 더 큰 성능저하를 유발하는 것으로 알려져 있어, 본 시험에서는 A법인 수중 급속 동결융해 시험법에 따라 수행하였다.

시험용 공시체는 100mm×100mm×400mm의 정방형 각주 시험체이고, 동결융해 시험에 사용한 콘크리트는 28일 설계기준 압축강도가 32MPa이고, 14일 동안 실내에서 수중양생한 후 염화나트륨 제설제 노출 구간(W-A-NaCl), 저염화물계 제설제(LCD) 노출 구간(W-A-LCD), 그리고 제설제를 살포하지 않은 구간의 현장에 6개월간 노출시킨 콘크리트(W-A-NON) 시편으로 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수와 질량감소율을 측정하였다. 또한 실내에서 14일 수중양생 후 6개월간 실내에서 기건양생한 콘크리트(W-A-CON)와 비교하였다.

콘크리트의 동결융해 사이클은 2시간~4시간 사이에서 4℃에서 -18℃로 떨어뜨리고, 다음에 -18℃에서 4℃로 상승시키는 것을 1사이클로 하였으며, 시험은 30사이클까지 또는 최초 측정된 동탄성계수의 60%까지 30 사이클 주기로 융해상태에서 시험체를 꺼내어 동탄성계수시험기로 공명진동에 의한 콘크리트 상대 동탄성계수를 측정하였다.

$$P_c = [n_1^2 / n^2] \times 100$$

- $P_c$ : 동결융해 C 사이클 후의 상대동탄성계수(%)
- $n$ : 동결융해 0 사이클에서의 가로 1차 진동주파수(Hz)
- $n_1$ : 동결융해 C 사이클에서의 가로 1차 진동주파수(Hz)

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1. 스켈링 저항성

#### 3.1.1. 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)을 사용한 경우

염화칼슘의 농도에 따른 영향에 대해, 그림 1에는 단위면적당 스켈링 양의 결과를 나타내었다. 그림 1에 의하면, 1% 및 4% 농도의 경우에는 동결융해시험 초기부터 스켈링이 발생하였으며, 그 후에도 서서히 증가하던데 동결융해 14 사이클 후부터는 4% 농도의 경우에서 가장 많은 스켈링 양을 확인할 수 있었고, 다음으로 1% 및 10% 농도로 수돗물의 경우에는 아주 작은 양의 스켈링만을 확인할 수 있었다. 이는 높은 농도에서는 과냉각에 의해 동결이 적어지기 때문이라고 생각된다.

또한 육안관찰 결과 동결융해 42 사이클 후에는 4% 농도의 경우 시험면의 거의 전면에 걸쳐 굵은골재의 노출을 찾아볼 수 있었지만, 10% 농도에서는 페이스트 부분만 스켈링을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 정리해 보면, 농도가 4%인 경우 가장 많은 스켈링이 발생하고 있었다. 이것은 높은 농도에서는 과냉각에 의해 동결이 적어지기 때문이라고 생각되는데, 즉, 염농도가 높

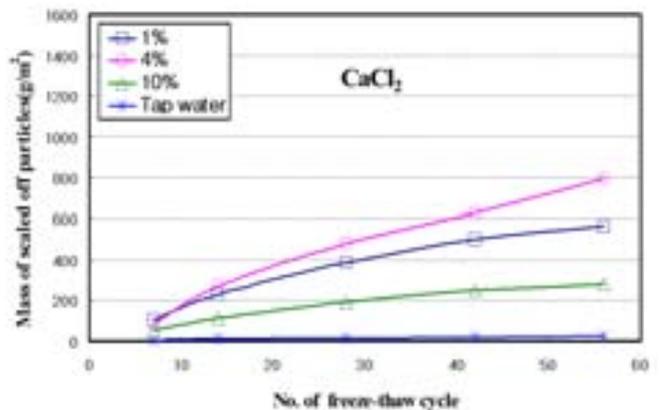


그림 1. 염화칼슘 농도와 스켈링 양의 관계

으면 얼음의 형성이 감소되며, 수압은 염농도의 증가에 따라 감소한다. 한편, 삼투압은 염농도의 증가에 따라 증대되기 때문에 저농도에서 일어나는 수압과 삼투압의 조합이 가장 불리한 내압이 발생되었기 때문인 것으로 추정된다. 실제로 제설제의 농도는 살포 직후에는 높지만 노면의 눈 및 얼음과 섞이면서 낮아지게 되어 약 4% 정도로 낮은 농도가 될 것이고 따라서 스켈링이 발생하기 쉬운 상태라고 할 수 있다.

본 연구에서는 1, 4, 10%라는 농도차로 시험을 실시하였으나, 10% 이상의 고농도 영역일 때의 콘크리트의 스켈링에 미치는 영향에 대해서는 분명하지 않다. 이들 농도에 대해서는 향후 더욱 많은 검토가 필요하다.

### 3.1.2. 염화나트륨(NaCl)을 사용한 경우

염화나트륨의 농도에 따른 영향에 대해, 그림 2에는 단위면적 당 스켈링 양을 나타내었다. 그림 2에 의하면, 4% 및 1% 농도의 경우에는 동결융해시험 개시초기부터 급격한 스켈링이 발생하였으며, 그 후에도 서서히 증가하더니 동결융해 14 사이클 후의 스켈링 양이 상당하였다. 10% 농도의 경우에는 스켈링 양이 적었다. 또한 동결융해 28 사이클 후에는 4% 및 1%의 농도의 경우 시험면 전면에 굵은골재가 노출되는 극심한 스켈링이 확인되었지만, 10% 농도에서의 스켈링은 경미한 것으로 나타났다.

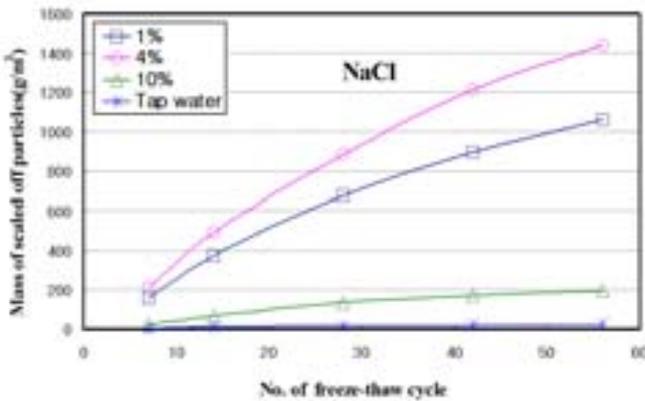


그림 2. 염화나트륨 농도와 스켈링 양의 관계

### 3.1.3. LCD를 사용한 경우

LCD의 농도에 따른 영향에 대해, 그림 3에는 단위면적 당 스켈링 양을 나타내었다. 그림 3에 의하면, 동결융해 사이클에 따른 스켈링 양은 1% 및 4% 농도의 경우에는 거의 비슷한 정도였으며, 10% 농도에서는 물과 거의 비슷한 스켈링을 나타내었다. 그러나 그 양은 아주 작은 것으로 나타났다. 또한 콘크리트의 확산계수에 있어서, 초산을 함유하고 있고  $Cl^-$  이온 함량이 상대적으로 작은 LCD 제설제의 경우 음이온인  $CH_3COO^-$  (25°C 물에서 확산계수는  $10^5 \times 1.08 cm^2 s^{-1}$ )의 확산

계수가 염소이온인  $Cl^-$  (25°C 물에서 확산계수는  $10^5 \times 2.03 cm^2 s^{-1}$ )보다 작아 콘크리트 내부로의 침투가 느려지므로 콘크리트의 손상 및 철근부식 개시가 다소 지연되는 효과가 있을 것으로 판단된다.

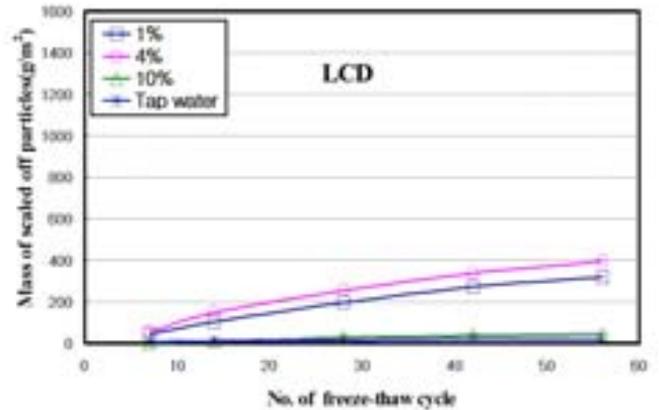


그림 3. LCD의 농도와 스켈링 양의 관계

### 3.1.4. 제설제 종류의 영향(4% 농도)

그림 4에는 4% 농도에서 제설제 종류에 따른 단위시험면적 당 스켈링 양을 나타내었다. 이들 결과에 따르면, 수돗물과 LCD로 시험한 콘크리트를 제외하고는 동결융해 14 사이클 후부터 스켈링이 크게 발생하고 있었다. 스켈링 발생은 28 사이클까지는 계속하여 증가하다가 그 이후부터는 감소하는 추세로 나타났다.

제설제의 종류에 따른 스켈링의 차이는 동결융해시험 개시의 초기단계부터 나타나고 있었다. 동결융해 14 사이클 후의 LCD의 단위시험면적 당 스켈링 양은 염화물을 주성분으로 한 제설제에 비해 적었는데, 염화나트륨을 사용한 경우의 1/4정도, 염화칼슘을 사용한 경우의 1/2정도에 그치고 있었다.

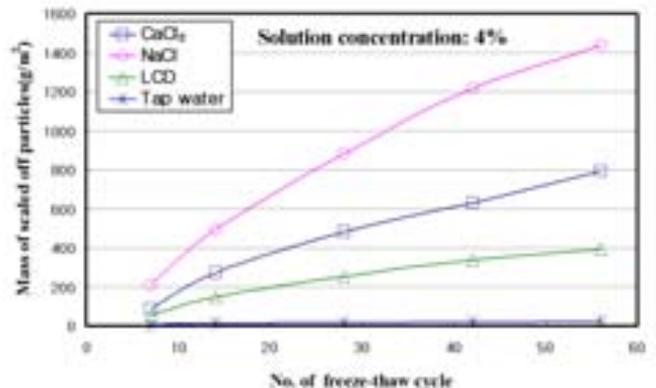


그림 4. 제설제 종류와 스켈링 양과의 관계

그림 5에서 볼 수 있듯이 시험 종료 후 육안관찰의 결과, 염화나트륨과 염화칼슘의 경우에는 시험면의 대부분 면에 걸쳐 굵은골재가 노출되고 있었던 것에 비해, LCD의 경우에는 페이스

트가 일부 노출되는 경미한 스켈링만을 확인할 수 있었다.

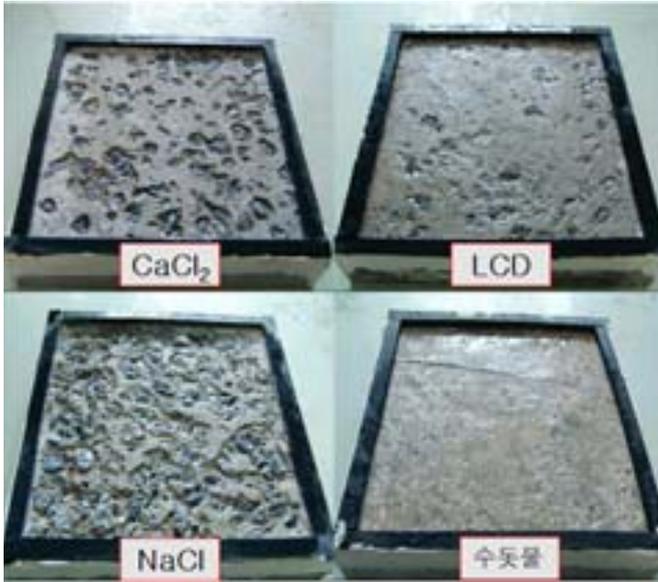


그림 5. 스켈링 시험 종료 후 육안관찰 결과

스켈링의 발생 메커니즘은 다음과 같이 추정된다. 우선, 제설제 용액의 작용에 의해 콘크리트 조직이 다공질화되고, 그곳에 제설제 용액이 침투하게 된다. 세공 속에 침투한 제설제 염화물 용액이 동결하게 되면, 체적 팽창에 의한 압력이 발생되어 스켈링이 일어난다. LCD에서는 염화나트륨이나 염화칼슘과 같은 염소이온의 작용에 의한 시멘트 페이스트 속의 수산화칼슘의 용출이 적어 시멘트 페이스트 조직의 다공질화에 의한 동결수량의 증가 및 조직의 약체화가 상대적으로 발생하기 어려웠기 때문에 스켈링 발생량이 적어졌다고 생각된다. 또한, 이밖에 제설제의 종류에 따라 동결 시 형성되는 얼음의 팽창압, 팽창량 및 정도가 다르다는 것도 생각할 수 있는데, 이 점에 대해서는 향후 더욱 많은 검토가 필요하리라고 생각된다. 이상의 실험결과로부터 초산이 함유된 제설제인 LCD는 염화물을 주성분으로 한 염화나트륨이나 염화칼슘에 비해 스켈링 발생량이 적다는 사실이 분명해졌다.

### 3.2. 연행공기 유·무 및 노출조건에 따른 콘크리트의 동결융해 내구성

#### 3.2.1. AE 콘크리트의 동결융해저항성

그림 6에는 염화나트륨 살포구간, 저염화물계 제설제(LCD) 살포 구간, 그리고 제설제를 살포하지 않은 구간(기준 구간)의 노출조건에 따라 AE 콘크리트의 동결융해 사이클수에 따른 질량감소율의 결과를 나타내었다. 비교를 위해 현장노출 시간과 동일한 기간으로 실내에서 6개월간 기건양생한 콘크리트에 대한 시험데이터를 나타내었다.

동결융해의 초기 사이클에 있어, 수중양생 후 실내에서 기건양생한 W-A-CON 질량감소율은 동결융해 사이클의 영향만을

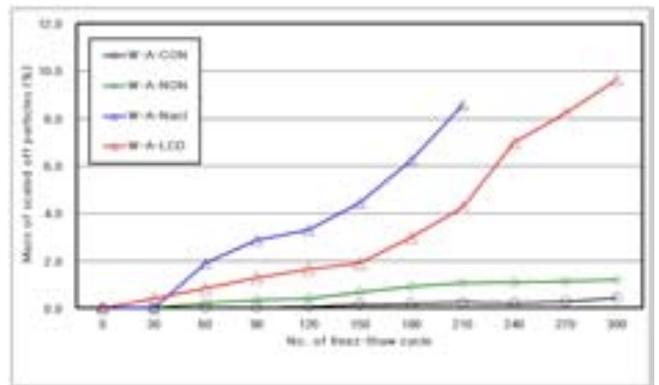


그림 6. 노출조건별 AE 콘크리트의 질량감소율

받은 W-A-NON, 제설제 및 동결융해 사이클의 영향을 모두 받은 W-A-NaCl과 W-A-LCD의 조건에 비해 상당히 작은 값을 나타내고 있었다. 제설제 및 동결융해 사이클의 영향을 모두 받은 W-A-NaCl과 W-A-LCD에서는 동결융해 사이클의 영향만을 받은 W-A-NON에 비해 직선적인 질량감소율의 급격한 증가가 나타났으며, 열화 진행 속도 또한 빠르게 나타났다. 특히, W-A-NaCl에서는 콘크리트의 손상이 너무 심하게 나타나 210 사이클에 시험을 종료하였다.

이로부터, NaCl의 영향을 받은 콘크리트의 표면손상은 그 영향을 받지 않은 W-A-CON과 동결융해 사이클의 영향만을 받은 W-A-NON의 경우에 비해 상당히 커진다는 사실을 알 수 있었다. 각 공시체의 질량감소율은 W-A-CON < W-A-NON < W-A-LCD < W-A-NaCl 순으로 커지는 스켈링에 의한 손상 정도를 나타내었다.

그림 7에는 조건별 노출후 AE 콘크리트의 동결융해 사이클에 따른 상대 동탄성계수의 결과를 나타낸 것이다.

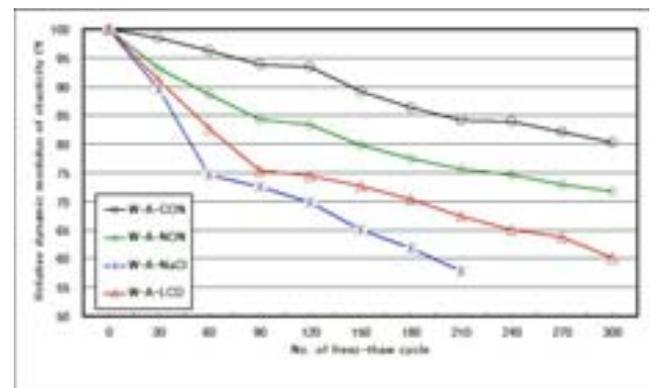


그림 7. 노출조건별 AE 콘크리트의 상대동탄성계수

W-A-NaCl의 경우, 동결융해시험 개시부터 상대 동탄성계수가 급속하게 저하되더니 210 사이클에서 60% 이하로 떨어져 시험을 종료하였다.

W-A-NaCl 및 W-A-LCD의 공시체와 비교하여 제설제와 동결융해 사이클의 영향을 받지 않은 W-A-CON에서는 시험

종료 300 사이클까지 비교적 완만한 열화경향을 보였으며, 시험 종료 시에도 상대 동탄성계수가 80% 이상인 것으로 나타났다.

다음으로 동결융해 사이클의 영향만을 받은 W-A-NON의 경우, W-A-CON에 비해서는 동결융해 사이클에 따라 열화 진행 속도가 다소 빨리 나타났다. 이는 초기양생 단계에서 동결융해 작용이 콘크리트의 열화에 영향을 미칠 수 있다는 것을 증명해 주는 것으로 볼 수 있다. 반면에 W-A-NaCl 및 W-A-LCD의 공시체에 비해서는 열화가 느리게 진행되는 것으로 나타나, 콘크리트의 내구성에는 동결융해에 염화물계 제설제가 복합적으로 작용하면 손상정도가 크고 열화 속도 또한 가속화 되는 것으로 나타났다.

이상으로부터 AE 콘크리트의 경우, 동결융해 초기에서는 노출조건이 그 열화에 커다란 영향을 미치고 있어 제설제의 영향을 받은 콘크리트의 동해는 일반적인 동해보다도 크게 손상된다는 사실을 알 수 있다.

### 3.2.2. Non-AE 콘크리트의 동결융해저항성

그림 8에는 노출조건에 따른 Non-AE 콘크리트의 동결융해 각 사이클 수별 질량감소율을 나타내었다.

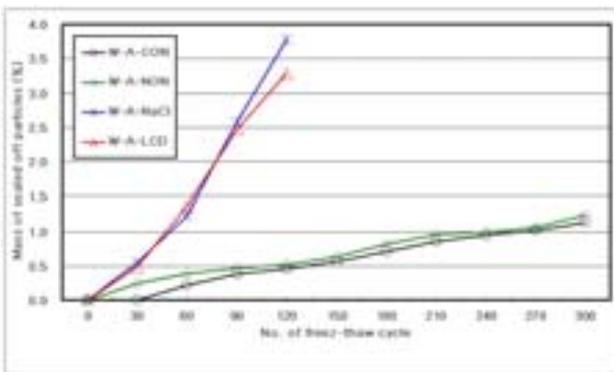


그림 8. 노출조건별 Non-AE 콘크리트의 질량감소율

Non-AE 콘크리트의 경우, AE 콘크리트의 경우와 마찬가지로 W-A-CON < W-A-NON < W-A-LCD < W-A-NaCl의 순으로 질량감소가 커졌으며, 이들 공시체의 질량감소율은 AE 콘크리트에 비해 2~3배 정도 큰 것으로 나타났다.

W-A-NON의 경우, AE 콘크리트의 경우와 유사한 박리에 의한 열화의 경향을 보이고는 있었는데, W-A-CON의 경우는 AE 콘크리트에 비해 Non-AE 콘크리트의 박리에 의한 중량손실률이 2배 정도 큰 것으로 나타났다. W-A-NaCl 조건에서 AE 콘크리트(180 사이클 시험 종료)에 비해 Non-AE 콘크리트에서는 90 사이클의 시험을 마지막으로 측정 불능상태가 되었다.

이러한 원인은 보통 콘크리트에서의 수화반응 완료(약 95%) 시점인 28일이 경과하지 않은 상태에서 콘크리트를 동

해와 염해를 받는 조건에 노출하므로 인해 콘크리트가 수화반응 과정 중에 내부의 공극구조와 수화물질의 변화 때문인 것으로 판단된다. 또한 연행공기 콘크리트가 동결융해저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 콘크리트에서 적정한 간격으로 연행공극이 내구성 증진에 크게 기여할 수 있는 것임을 알 수 있었다.

그림 9에는 노출조건에 따른 Non-AE 콘크리트의 상대동탄성계수의 결과를 나타내었다.

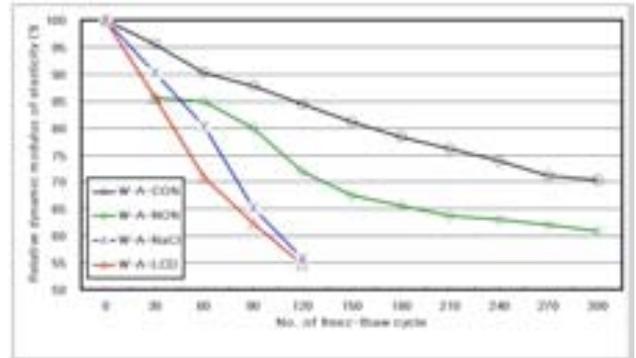


그림 9. 노출조건별 Non-AE 콘크리트의 상대동탄성계수

Non-AE 콘크리트의 경우, 동결융해와 제설제 염화물에 의한 영향을 받은 W-A-NaCl 및 W-A-LCD 공시체에서는 시험 초기 60 사이클에서 약 70~80%까지 상대동탄성계수가 급속하게 저하되고 있었다. 그밖에 노출조건의 W-A-NON의 공시체에서는 AE 콘크리트에 비해 상대동탄성계수의 저하가 큰 것으로 나타났다. 또한 W-A-CON에서도 완만하기는 했지만 AE 콘크리트에 비해 열화속도가 더 급속하게 증가되는 경향을 보이고 있었다.

이처럼, AE 콘크리트의 손상정도와와의 비교에서도 알 수 있듯이, Non-AE 콘크리트의 경우에는 염화물계 제설제의 영향을 받게 되면 그 열화가 더욱 커질 가능성이 있다.

이상으로부터, 제설제의 영향을 받은 AE 콘크리트에서는 Non-AE 콘크리트와 마찬가지로 표면박리에 의한 손상의 경향을 보였지만, Non-AE 콘크리트는 AE 콘크리트에 비해 그 질량손실은 약 2배나 되었다. 그리고 단기간 양생(초기재령) 후 동결융해 사이클을 받는 조건에서는 제설제 염화물의 영향 유무에 상관없이 열화가 진전될 가능성이 있다. 더욱이, 동결융해 작용과 더불어 제설제 염화물을 받는 조건에서는 한층 강화된 물리·화학적 작용에 의해 콘크리트 열화가 가속될 수 있다. 이러한 현상은 기온변화에 따른 동결융해, 제설제 염화물로 인한 층간동결 및 급격한 열충격, 삼투압으로 인한 얼음결정의 성장 작용으로 인해 적절한 크기와 간격의 공극을 확보하지 못하는 Non-AE 콘크리트에서 더 큰 피해를 입을 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

- 1, 4, 10%의 농도에 따른 시험 결과, 제설제의 종류와 상관없이 농도가 4%일 때 가장 많은 스케일링 양을 보였으며, 농도가 높은 10% 경우가 상대적으로 저농도인 4%에 비해 콘크리트의 스케일링에 미치는 영향이 작았다.
- 초산이 함유된 저염화물 제설제(LCD)는 염화물을 주성분으로 한 염화나트륨이나 염화칼슘에 비해 콘크리트의 스케일링에 미치는 영향이 작았는데, 이는 염소(Cl<sup>-</sup>)이온 및 Na 양의 차이에 의한 것으로 판단된다.
- 염화물 제설제가 살포되는 적설한랭지의 환경에 있는 콘크리트의 동해열화는 제설제의 영향을 크게 받아 일반적인 동해와는 다른 열화라는 것을 알 수 있었다.
- AE 콘크리트의 경우에는 노출조건과 상관없이 모두 스케일링에 의한 표면열화이며, 동해만을 받는 조건에서는 열화가 상당히 지연되는 경향을 보였다. 그러나 동결융해 작용과 염화물 제설제가 살포되는 적설한랭지에서는 콘크리트 열화가 가속화되는 것을 알 수 있었다. 따라서 이러한 조건하에서 콘크리트 구조물을 만드는 경우에는 가급적이면 물-시멘트 비를 작게 하고 적당한 공기량을 가지는 AE 콘크리트를 사용하여야 한다는 사실을 추론할 수 있었다.
- Non-AE 콘크리트의 경우, AE 콘크리트와 비교하여 노출조건의 차이에 따라 동결열화에 커다란 차이가 생긴다는 사실을 알 수 있었다. 즉, 동해를 받는 환경하에서는 AE 콘크리트에서 보다 큰 덩어리 형상의 박리마저 일으킬 가능성이 있었다. 특히 동결융해 작용과 염화물 제설제를 받은 공시체에서는 축방향을 따라 미세균열 발생과 동결융해 사이클이 진행됨에 따라 폭넓은 균열로 확대되어 급격한 열화로 이어져 덩어리로 박리되는 열화현상을 일으킬 가능성이 크므로 특별한 주의가 필요할 것으로 사료된다.
- AE제 연행 콘크리트일지라도 초기재령에서 동해와 제설제 염화물 환경에서는 복합열화에 의한 영향을 방지하는데 공기연행체가 크게 효과가 없는 것으로 나타났다. 그 이유로는 콘크리트가 경화되기 전에 동해를 받으면 콘크리트내 공극벽의 낮은 강도와 공극 주변의 자유수들이 얼음결정을 형성하여 공극벽을 밀어냄으로 공극 형상이 완전하게 구성되지 못하고, 제 기능도 발휘하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 즉 콘크리트에서 동해저항성은 수화가 진행되면서 얼음결정의 팽창압에 대한 페이스트의 저

항성과 배합수의 많은 부분이 시멘트와 결합하여 동결수량이 감소하고, 자유수의 대부분이 미세공극에 위치하고 있어 쉽게 얼지 않기 때문이다.

## 참고 문헌

- 이병덕, 윤병성, 이주광, (2005), "제설제 종류에 따른 융빙성능 및 콘크리트에 미치는 영향 평가에 관한 연구", *한국도로학회 학회지*, 제7권 4호, pp. 113~123.
- 이병덕, (2007), "염화마그네슘계 제설제가 강재부식성 및 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 영향", *한국콘크리트학회, 2007년 봄학술발표회 논문*, pp. 681~684.
- 이병덕, 김현중, (2007), "염화물계 제설제가 콘크리트의 스케일링에 미치는 영향", *대한도목학회, 제33회 정기학술발대회 발표논문*, pp. 54~688.
- 한국도로공사, (2007), "제설방법에 따른 염화물이 콘크리트 구조물과 환경에 미치는 영향 및 대책", 한국도로공사 도로교통연구원, 도로교통 ME-07-20.
- 한국산업규격, KS F 2456, (2008), "급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험방법".
- ACPA, (1996), "Scale-Resistant Concrete Pavements", American Concrete Pavement Association,
- ASTM C 672-84:(1984), Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, *ASTM Standard*, pp. 332~334.
- HITEC, (1999), "Summary of Evaluation Findings for the Testing of ICE BAN<sup>®</sup>", *Technical Evaluation Report, Highway Innovative Technology Evaluation Center, a Service Center of the Civil Engineering Research Foundation*, pp. 9~22.
- 日本コンクリート工學協會, (1999), 融雪劑によるコンクリート構造物の劣化研究委員會報告書 論文集, pp. 167~182.

접 수 일 : 2010. 3. 12  
심 사 일 : 2010. 3. 15  
심사완료일 : 2010. 4. 15