

## 시멘트 콘크리트 포장의 스케일링 저항성 평가방법에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on Evaluation Methods for Scaling Resistance of Cement Concrete Pavement

이 현 기<sup>1)</sup>  
Hyeon-Gi Lee

오 흥 섭<sup>2)\*</sup>  
Hong-Seob Oh

심 종 성<sup>3)</sup>  
Jong-Sung Sim

심 재 원<sup>4)</sup>  
Jae-Won Shim

#### Abstract

In cold-climate regions, deicing agents is used for smooth traffic on the road due to freezing and snowdrift in winter. The use of de-icing salts has resulted in the accelerated scaling damage of concrete with salt damage under freezing and thawing condition. Scaling is the deterioration of concrete where in the paste-mortar structure delaminates in flakes from the surface of the concrete. Due to such damage, concrete pavement causes various problems such as early deterioration according to the decrease in the thickness of cover concrete and user's stability issues. Accordingly, various tests and evaluation methods have been suggested in order to evaluate these phenomena in other countries. However, there have been no regulations for the evaluation method in South Korea, and related studies are also very rare. Therefore, in this study, the evaluation methods proposed by each institution and country were investigated and the experiments were performed according to each regulation, followed by the comparison and analysis of the results. Furthermore, this study aims to suggest the optimized experimental method adopted to domestic field through the discussion of such experimental methods and results.

Keywords : Concrete pavement, De-icing salt, Freezing and thawing condition, Scaling test methods

#### 1. 서 론

현재 국내 고속도로상의 콘크리트 포장 및 구조물에서 지속적으로 거론되고 있는 가장 큰 문제는 동결융해와 제설염에 의해 발생하는 콘크리트의 복합열화이다. 특히, 적설한랭지역에서의 콘크리트 포장 및 구조물은 동절기에 동결융해에 의한 반복적인 동해와 함께 강설시 도로는 안전한 교통흐름을 유지하기 위해 살포되는 염화물계 제설제의 침식을 복합적으로 받게 된다. 지난 10여년 동안 국내 평균강설량의 변화는 크지 않으며, 2002년 이전까지는 20kN/2차선·km의 제설제가 살포되었으나, 습염식(NaCl+CaCl<sub>2</sub>, 7:3 중량비 %) 제설제를 적용한 2002년 이후 부터 최근까지 연평균 제설제 사용량은 약 100kN/2차선·km으로 크게 증가하고 있는 상

태이다. 일반적으로 염화물 성분의 제설제는 콘크리트 포장 및 구조물로 침투하여 철근부식에 의한 성능저하를 야기하기도 하지만, 동절기 동해와 함께 복합적으로 작용하여 표면 스케일링 발생 등 콘크리트 표면이 열화되는 형태로 나타나 외관상 문제가 되고, 구조물의 열화를 더욱 가속시키기도 한다(Zi et al., 2012).

콘크리트 포장의 내구성 손상 항목으로는 제설염에 의한 스케일링과 동결융해 등을 거론할 수 있다. 동결융해에 의한 콘크리트의 내구성능 저하는 내부 미세균열 성장에 의한 치밀도 저하(상대 동탄성계수 저하) 및 표면 조직의 스케일링으로 나타난다. 일반적으로 동결융해 저항성 평가는 급속 동결융해 시험에 의한 상대 동탄성계수 변화로 평가되며, 동결융해 300사이클에서 상대 동탄성계수가 60% 이상인 경우의

1) 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정  
2) 정희원, 경남과학기술대학교 토목공학과 교수, 교신저자  
3) 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수  
4) 정희원, 한국도로공사 도로교통연구원 건설환경연구실 책임연구원

\* Corresponding author : opera69@chol.com  
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

콘크리트 배합이 저항성을 확보한 것으로 평가하고, 이는 적절한 연행공기 확보를 통하여 충족이 가능한 것으로 연구되고 있다. 반면 스케일링 저항성의 경우 외부환경에 노출된 콘크리트 표면이 동결융해 및 염해 등 여러 열화요인에 의해 복합적으로 작용하여 구조체의 표면에 손상을 일으키는 것으로 피해정도가 크고 다양하게 발생되며, 열화정도의 예측이 난해하다. 상기의 언급한 바와 같이 최근 제설제 사용량이 급증함에 따라 제설제에 의한 표면 스케일링이 크게 증가 있으며, 이에 대한 대책 및 평가방법 제정이 요구되어지고 있다 (Lee et al., 2010).

국제적으로는 콘크리트 표면손상에 대한 평가와 예측을 위하여 다양한 시험방법 및 기준들이 제시되어지고 있다. 하지만 국내에서의 평가방법은 2002년 이후 폐지되어 표면 손상에 대한 규정이 없으며, 관련 연구 또한 미미한 수준이다. 현재 국내의 평가방법은 단일의 열화요인 (동결융해)에 대하여 KS F 2456 “급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항성”으로 규정되어 있다. 스케일링의 경우 단일의 요인이 아닌 동결융해 및 제설염의 복합적인 작용에 의해 발생하는 현상이며, 단일의 열화요인으로 평가하기에는 상이한 결과를 나타내므로 스케일링 저항성에 대한 검토 및 평가가 요구되고 있다 (Zi et al., 2012).

이에 따라 본 연구에서는 국내 시멘트 콘크리트 포장에서 주로 사용되고 있는 플라이애쉬를 20% 혼입한 콘크리트와 일반 콘크리트 (OPC)에 대하여 물-시멘트비 40, 45, 50%로 설정하여 실험을 실시하였다. 먼저, 스케일링 메커니즘에 대한 고찰을 하고 각 변수별 압축강도 특성을 확인한 후 스케일링 저항성에 대한 각 기관 및 나라에서 제시되고 있는 평가방법 및 규정에 따라 실험을 수행하였다. 각각 시험에 대한 결과를 도출하여 비교·분석하고 실험결과 및 문헌 고찰을 통하여 최적화된 실험법을 제시하고자 한다.

## 2. 동결융해와 제설염에 의한 콘크리트 손상 메커니즘

단순 동결융해에 의한 콘크리트의 성능 저하는 동해 깊이에 따라 다르며, Fig. 1과 같이 동해에 의한 스케일링 등이 발생하기까지의 ‘잠복기’, 동해는 진행되지만 강재부식에는 도달하지 않는 ‘진전기’, 동해깊이가 강재위치에 도달하여 강재부식이 진행되는 ‘가속기’, 동해깊이가 강재위치보다 높아져 내하력에 영향을 미치게 되는 ‘열화기’로 구분된다.

염해와 동해의 복합열화 경우에는 염화물 침투에 의해 콘크리트 중의 이온 농도가 높아지고, 삼투압에 의해 높아진

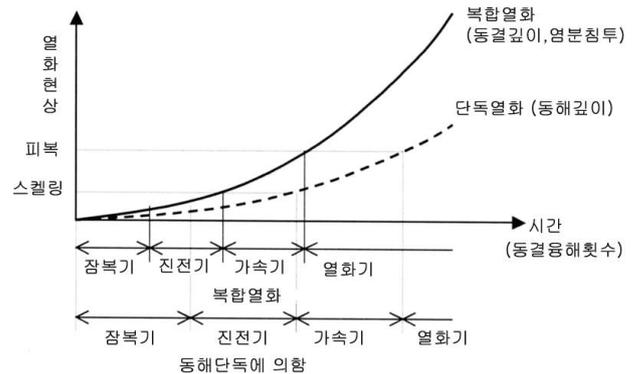


Fig. 1 Combined Deterioration Model by Freezing & Thawing Action and Chloride Penetration

정수압에 의해 스케일링 량이 증가하게 됨에 따라 철근표면까지의 피복이 감소하게 되고, 이로 인해 염화물이온의 확산이 촉진되기 쉽다.

제설제에 의한 콘크리트 열화 발생 메커니즘은 제설제의 화학성분이 콘크리트와 반응하는 화학적 메커니즘과 제설제 및 수분의 침투압 및 수압과 콘크리트의 내부 응력의 변화 등으로 인한 물리적인 메커니즘으로 구분될 수 있다. 이에 따라 동결융해 및 염해에 대한 복합적 손상 메커니즘은 물리적 요인에 의해 기인한 것으로 판단된다 (Choi, 2005).

### 2.1 화학적 메커니즘

제설제인 염화나트륨의 장기 상용으로 인한 주요 화학적 열화 메커니즘은 수산화칼슘 (calcium hydroxide, Ca(OH)<sub>2</sub>)의 용해이다. 염화나트륨 용액의 장기적 폭로에 의해 수산화칼슘 (calcium hydroxide)이 용해되고, 표면으로 빠져 나와 얼음형성의 양을 증진시키는 표층부근의 다공성 (porosity)을 증가시켜 콘크리트의 투과성 (permeability)을 증가시키게 된다. 이때의 화학반응은 식 (1)과 같다.



이때 발생한 가용성 (solubility) 염화칼슘은 반응 식 (2)에 나타난 것과 같이 알루미늄산삼칼슘 (tricalcium aluminate, C<sub>3</sub>A)과 반응하여 클로로알미네이트 (Friedel's salt)를 생성할 가능성이 있다. 폭로시간이 짧은 실험실 시험에서 이들 반응이 직접적으로 영향을 끼칠 가능성은 희박하지만, 실제로 공용되는 콘크리트 표층에서는 장기적으로 반응을 일으켜 콘크리트 표면의 스케일링을 야기시킨다.



## 2.2 물리적 메커니즘

제설제에 의한 콘크리트 표면 열화 발생 메커니즘은 본질적으로 물리적인 작용으로, 동해의 발생 메커니즘인 Power의 침투압설의 확대 해석이 기본이 되고, 그 외에도 각종 메커니즘이 제안되고 있지만, 아직도 정확하게 파악되고 있지 못한 실정이다. 이는 실험실 조건과 현장 조건과의 차이가 크고, 콘크리트 표면 스케일링 현상이 매우 복잡하고 콘크리트의 미세적인 레벨에서의 비균질성에 기인하기 때문에 각각의 현상에 대한 명확한 설명이 아직 불가능한 실정이다. 여기에서는 Powers and Helmuth (1953) 및 Marchand and Pigeon (1994)이 정리한 주요 메커니즘을 미시적 (Microstructure)인 요인, 거시적 (Macrostructure)인 요인으로 구분하여 설명하였다.

먼저, 미시적인 요인으로는 침투압의 증가 및 수압과의 복합현상, 콘크리트 포화도 증가 및 증기압차에 의한 수분이동, 혐의 결정 성장 등으로 설명될 수 있고, 거시적인 요인으로는 열충격 발생, 중간 동결에 의한 응력차 발생 등에 의한다고 설명되고 있다 (Marchand and Pigeon, 1994).

이들 여러 학설들 중에서 주요 학설을 설명해 보면 침투압설의 경우, 얼음의 형성은 보다 큰 미세공극중의 용액으로부터 시작되지만, 염화물이 존재하면 동결온도가 저하되는 과냉각 현상이 발생하므로, 물이 모두 얼지 않아, 순수한 얼음이 석출되고 남은 용액의 염분농도가 높아져 보다 작은 미세공극속의 용액과 농도차가 발생하게 된다. 이로 인한 화학적 포텐셜의 차로 작은 미세공극속의 물을 용액의 염 농도가 보다 높은 큰 미세공극으로 이동시키는 침투압이 발생해 내부 응력을 발생시킨다. 보다 큰 미세공극 중의 물은 빠져 나온 물에 의해 염 농도가 감소하므로 많은 얼음을 형성하게 된다. 또 온도의 저하는 작은 미세공극 중의 용액 혹은 염 농도가 어느 정도 높게 된 용액에 의해 얼음 형성이 가능하게 되므로 내부응력을 증대시켜 콘크리트 조직이 파괴되는 것이다.

한편 거시적인 요인의 열충격 발생설은 보다 쉽게 이해할 수 있는데, 제설제가 살포되면 콘크리트 표층 온도가 매우 급속하게 변화되어 열충격이 생긴다는 설이다. 즉, 염화나트륨은 물에 녹을 때 흡열반응을 수반하므로, Fig. 2와 같이 콘크리트로부터 열을 흡수하여 콘크리트 표면 온도가 급속하게 저하되고, 염화칼슘은 발열반응을 수반하므로 콘크리트

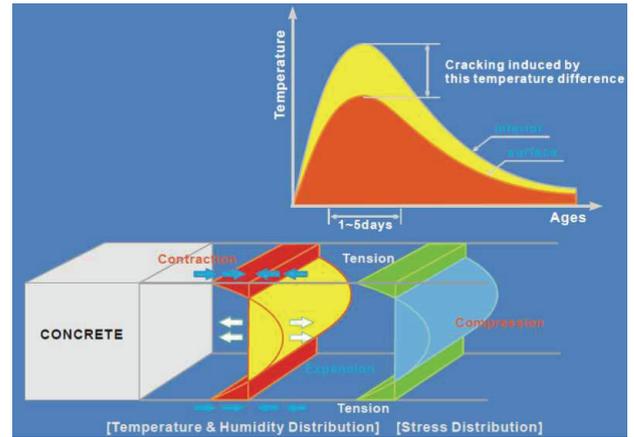


Fig. 2 Internal Stress Induced by Temperature Gradient

Table 1 Properties and Chemical Composition of Cement

Classification	Chemical composition (%)						Average particle size ( $\mu\text{m}$ )	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O		
OPC	20.1	4.64	3.76	64.2	0.107	1.04	24.63	3.13

Table 2 Properties and Chemical Composition of Fly ash

Classification	Chemical composition (%)						Average particle size ( $\mu\text{m}$ )	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O		
Fly ash	58.5	22.5	7.30	4.37	0.436	1.71	53.99	2.18

표면 온도가 급속하게 상승하게 되어 표층의 급속한 온도변화에 의해 발생된 응력이 콘크리트의 인장강도를 상회하면 미세한 균열이 발생하게 된다는 것이다.

## 3. 사용재료 및 실험방법

### 3.1 사용재료

#### 3.1.1 시멘트

본 연구에서 사용된 시멘트의 경우 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 비중은 3.15이다. 사용된 시멘트에 대한 화학성분 분석 결과는 다음 Table 1과 같다.

#### 3.1.2 플라이애시

본 연구에서는 실리카 (SiO<sub>2</sub>), 알루미나 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 산화철 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 성분비가 70% 이상인 Class F 플라이애시를 사용하였으며, 화학적 성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다.

### 3.1.3 골재

골재는 굵은 골재의 경우 최대 치수 25mm이고, 비중 2.69, 조립율 7.47인 쇄석을 사용하였으며, 잔골재의 경우 비중 2.61, 조립율 2.76인 모래를 사용하였다. 사용재료의 물리 및 화학적 특성은 다음 Table 3과 같이 나타내었다.

## 3.2 실험방법

### 3.2.1 콘크리트 배합

본 연구는 시멘트 콘크리트 포장의 스케일링 저항성 평가 방법들의 적합성을 분석하기 위한 실험으로 콘크리트 목표 설계 강도는 현재 포장용 콘크리트에서 주로 사용되고 있는 휨 강도 ( $f_{bk}$ ) 4.5MPa를 기준으로 하였으며, 배합설계는 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침 (2011)에 따라 실시하였다. 실험변수는 일반 콘크리트 포장 (OPC, 100%)와 현재 콘크리트 포장에 주로 활용되고 있는 플라이애시 20% 혼입한 콘크리트로 구성하고, 각각의 변수에 따른 물-바인더비는 40, 45, 50%로 설정하여 실험을 수행하였다. 목표 슬럼프의 경우 현장의 기계 타설을 고려한 포장용 시멘트 콘크리트의 배합기준에 의거하여 40mm 이하로 하고, 목표 공기량은 동결융해의 피해를 고려한 5~7%로 설정하였다. 각 변수에 따른 배합설계는 Table 4와 같다.

### 3.2.2 압축강도 시험

이 연구에서는 사용되는 먼저 콘크리트의 압축강도 특성을 확인하기 위하여 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험

방법”에 의거하여  $\phi 100 \times 200$ mm 공시체를 제작하여 재령 28일 수중양생 후 압축강도 측정을 실시하였다. 압축강도 측정 은 변수별 각 5개의 시험체를 사용하였다.

### 3.2.3 스케일링 저항성 시험

스케일링 저항성 시험은 국내에 잘 알려진 북미의 시험규격인 ASTM C 672 기준, 스웨덴 시험규격인 SS 13 72 44 (Borås test method), 독일에서 제안된 RILEM TC 117-FDC/CDF 등이 있으며, 캐나다의 경우 Ontario주의 MTO LS-412와 Quebec주의 규격인 BNQ NQ 2621-900으로 나눌 수 있다. 제안된 시험방법 모두 콘크리트 슬래브 상면에 각각 규정에서 제시된 일정 농도의 제설 용액을 넣고 동결융해 온도 조건에서 표면의 성상의 변화 정도를 평가하는 시험방법이다 (Dimitre, 2012).

스케일링의 시험 규준은 제설염의 종류 및 농도, 시편 크기, 마감 및 양생 방법, 동결융해 사이클, 평가 방법 등이 다소 차이를 나타내며, 각 시험방법에 대하여 구분하여 다음 Table 5에 정리하였다. ASTM과 MTO 규준의 차이는 제설 용액의 종류와 농도의 차이를 갖고 있다. ASTM의 경우  $\text{CaCl}_2$  4%가 사용되며, 그 외의 규준은 모두 NaCl 3%의 용액으로 규정하고 있다. 또한 평가 방법의 경우 ASTM의 경우 육안 평가에 의존하고 있으며, 평가 등급에 따라 5가지의 등급으로 나눌 수 있다. BNQ규준의 경우 시편의 최소 규격과 마감방법이 다소 차이가 있으며, 동결융해 사이클 및 온도의 차이를 나타낸다. BNQ의 경우 마감 방법은 규준대를 이용하여 다지며, 시편 바닥에 배수를 위한 토목섬유 (geotextile)를 설치하여야 한다. 또한 양생시 7일 동안의 제설용액에서의 전처리 기간이 요구되며, 7사이클마다 중량감소를 및 표면의 상태를 평가한다. RILEM규준의 경우 다른 규준과 달리 시험체의 설치에서 차이를 보이며, 그 시험체 설치의 차이는 Fig. 3(a)와 3(b)와 같이 표현된다.

1사이클을 12시간으로 동결 4시간, 융해 8시간으로 규정하고 있다. 그리고 각 4, 6 또는 12사이클마다 측정하여 평가를 한다. 양생방법에도 다소 차이를 나타내었다. 각 규준들의 평가방법에 따라 규정된 사이클을 기준으로 시험체의 중량감소를 및 스케일링 양으로 측정하였으며, 중량감소 및 스케일링 양의 측정은 시편의 표면 면적당 박리량 (중량감소량)을 측정하여 식 (3)을 이용하여 산출하였다.

$$W_{sn} = \frac{(W_0 - W_n)}{A} \quad (3)$$

Table 3 Physical properties of aggregate

Classification	$G_{max}$ (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	Percentage of abrasion (%)	Solid volume (%)
Coarse aggregate	25	2.69	0.30	24.1	60.8
Fine aggregate	-	2.61	1.11	-	63.7

Table 4 Mix Proportion of Concrete Pavement

Specimens	$F_{bk}$ (MPa)	W/B (%)	Unit weight ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					Slump (mm)	Air (%)
			W	C	FA	S	G		
OPC	4.5	50	142	284	0	757	1122	20~50	6±1
		45		316	0	728	1124		
		40		355	0	697	1124		
FA		50	148	237	59	736	1095		
		45		263	66	707	1095		
		40		296	74	676	1087		

Table 5 Comparison of Various Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces

Standards Classification	ASTM C672	MTO LS-412	BNQ 2621-900	RILEM TC 117-FDC/CDF
Saline Solution	4%, CaCl <sub>2</sub>	3%, NaCl	3%, NaCl	3%, NaCl
Specimen	· Prisms measuring 280×230×75mm (0.045m <sup>2</sup> ) · Min. surface area 0.09m <sup>2</sup> · Min. 2 specimens required	· Prisms measuring 300×300×75mm (0.09m <sup>2</sup> ) · Min. surface area 0.09m <sup>2</sup> · Min. 2 specimens required	· Prisms measuring 250×200×50mm (0.05m <sup>2</sup> ) · Min. surface area 0.05m <sup>2</sup> · Min. 2 specimens required	· Min. surface area 0.08m <sup>2</sup> · Min. 5 specimens required
Finishing	After the concrete has stopped bleeding and then with a medium-stiff brush	After the concrete has stopped bleeding and then with a medium-stiff brush	Only screeding required, no final finishing, instead geotextile is placed at bottom of specimen when casting to provide drainage	Specimens shall be finished to represent the actual surface of the structure in service
Curing of Specimens	· 14days at 100%RH · 14days at 50±5%RH	· 14days at 100%RH · 14days at 50±5%RH	· 14days at 100%RH · 14days at 50±5%RH · 7days of presaturation with saline solution	· 7days at 100%RH · 21days at 65±5%RH · 7days of presaturation with saline solution
Freeze-Thaw cycles	· 50cycles of 24h · Freezing at -18±3°C for 16-18h · Thawing at 23°C for 6-8h	· 50cycles of 24h · Freezing at -18±3°C for 16-18h · Thawing at 23°C for 6-8h	· 56cycles of 24h · Freezing for 16±1h of which a maximum of 12h and a minimum 7h at -18°C · Thawing at 23°C for 8±1h	· 28cycles of 12h · Freezing for -20°C from 20°C in 4h and held there for 3h. Then thawed back to 20°C in 4h and kept there for 1h
Evaluation of surface quality	· After 5, 10, 15, 25 and 50cycles · Visual assessment of surface	· After 5, 10, 15, 25 and 50cycles · Mass measure of cumulative scaled off material in kg/m <sup>2</sup> · Visual assessment of surface not mandatory	· After 7, 21, 35, and 56cycles · Mass measure of cumulative scaled off material in kg/m <sup>2</sup> · Visual assessment of surface based on 7 categories	· After every 4, 6 or 14cycles · Mass measure of cumulative scaled off material in kg/m <sup>2</sup> · Visual assessment subjective
Acceptance criteria	No acceptance criterion specified. Some organizations specify mass measurement and 0.8kg/m <sup>2</sup> as limit of mass lost	After 50cycles the cumulative mass of scaled off material must be < 0.8kg/m <sup>2</sup>	After 56cycles the cumulative mass of scaled off material must be < 0.5kg/m <sup>2</sup>	No acceptance criterion specified

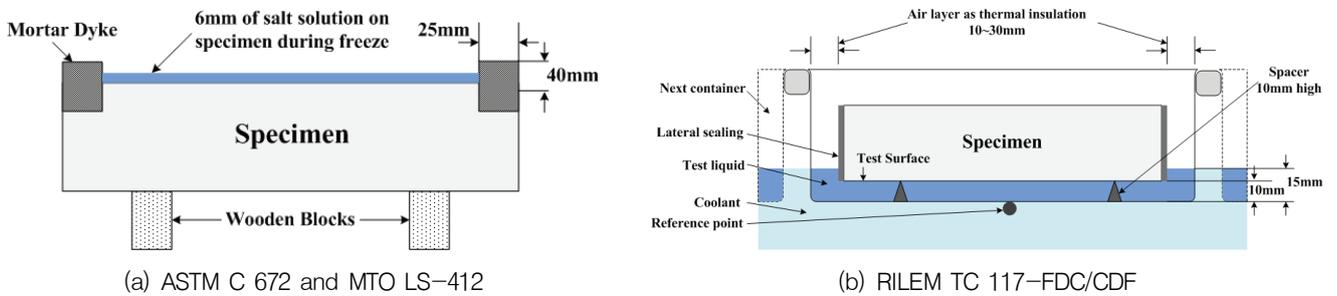


Fig. 3 Arrangement of the Scaling Resistance Test Set-up

여기서,  $W_0$ 은 동결융해시험 개시에서 시험체의 무게 (g)  $W_n$ 은 n사이클에서 시험체의 무게 (g),  $A$ 는 동결융해 시험 개시에서의 시편의 제설 용액에 노출된 표면적 (cm<sup>2</sup>)이다. 규정 사이클마다 용액을 교환하였다. 또한 정확한 시험체의 중량 측정 및 스케일링량을 측정하기 위해 시편의 흡수된 용액의 증발을 위하여 24시간 건조 후 중량 및 스케일링 육안 측정을 실시하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 압축강도 시험 결과

본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장의 물리적인 특성 확인을 위해 공시체  $\phi 100 \times 200$ mm의 크기로 제작하여 재령 28일 압축강도를 측정하였다. 각 변수별 5개의 공시체를 제작하여 실시하고 각각의 측정된 값을 평균하여 결과를 도출하였다. 그 결과는 다음 Fig. 4와 같다. 재령 28일에서 압축강도의 경우 OPC와 플라이애시 20%를 혼입한 콘크리트의 경

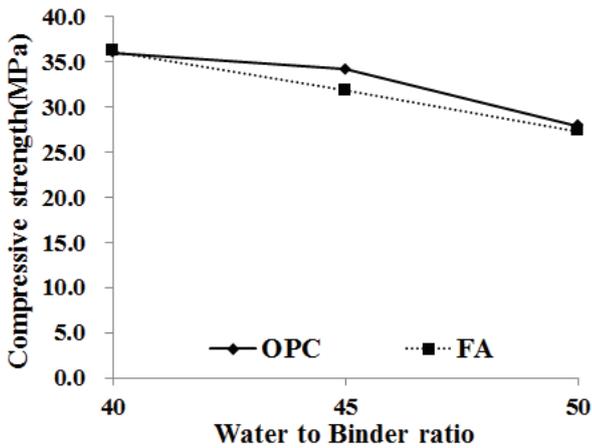


Fig. 4 Compressive Strength Variation of Cylindrical Specimen according to the W/B ratio

우 유사한 강도 발현을 나타내었으며, 물-바인더 비 45%에서 다소 차이를 보였으며, OPC가 약 2.5MPa 정도의 높은 강도를 나타내었다.

## 4.2 스케일링 저항성 시험 결과

### 4.2.1 평가기준별 시험 결과

시멘트 콘크리트 포장에 대한 스케일링 저항성을 평가하기 위하여 동결융해 사이클이 진행됨에 따라 표면 박리 정도와 정량적인 분석을 위하여 각 변수의 콘크리트 시편의 표면적에 대한 중량 감소율을 산출하였다. 이에 따라 각 국의 기관에서 제안되고 있는 규정들에 따라서 시험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 5~8에 나타내었다. 그 결과, RILEM 기준을 제외한 시험 기준은 각 변수별 경향이 유사하게 나타났으며, ASTM 기준의 경우 플라이애시를 혼입한 물-바인더비 50%를 제외하고 모든 변수가 규정을 만족하였다. 이에 반해 MTO와 BNQ 기준은 플라이애시를 혼입한 경우 모든 물-바인더비에서 규정에 부적합한 결과로 측정되었다. 이는 플라이애시를 콘크리트에 혼입할 경우 장기적인 거동 측면에서 우수한 것으로 알려져 있어 이에 따라 수중양생 14일과 기건양생 (RH50±5%)의 양생기간만으로 스케일링 저항성 측면에서 플라이애시의 성능을 검증하기에는 다소 어려움이 있는 것으로 판단된다. 또한 ASTM과 MTO 기준을 비교하면 MTO 기준으로 평가시 다소 높은 스케일링량을 나타내었으며, 이는 제설용액 특성상 NaCl과 CaCl<sub>2</sub>의 반응성 정도에 따른 수산화칼슘 용출 특성에 따른 것으로 사료된다. NaCl을 사용할 경우 높은 Cl<sup>-</sup>이온에 의해 다소 높은 열화특성을

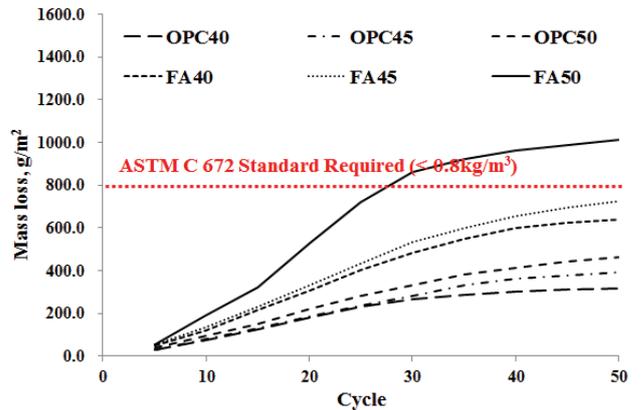


Fig. 5 Scaling Test Results by ASTM C 672

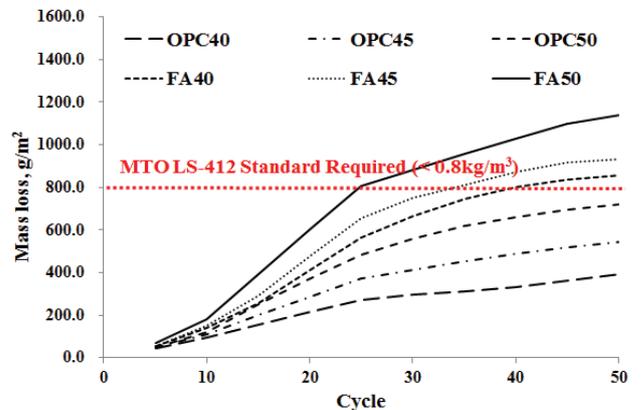


Fig. 6 Scaling Test Results by MTO LS-412

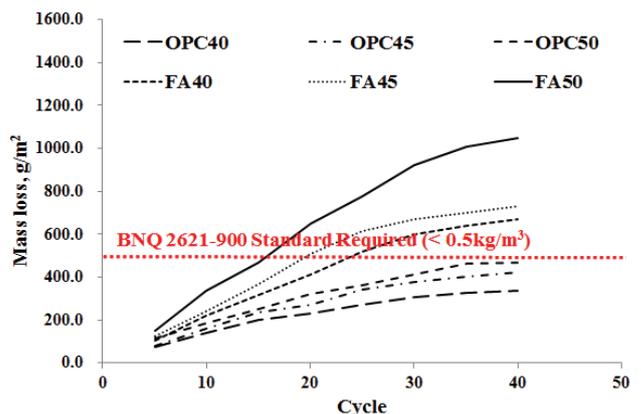


Fig. 7 Scaling Test Results by BNQ 2621-900

나타내며, 이와 같이 상이한 제설용액 및 농도를 사용하지만 동일한 스케일링량의 제한 (<math>\le 0.8 \text{ kg/m}^3</math>)을 두고 있어 MTO의 기준이 보다 엄격하게 적용되고 있는 것으로 확인된다.

MTO와 BNQ의 기준을 비교해보면 동일한 제설용액을 사

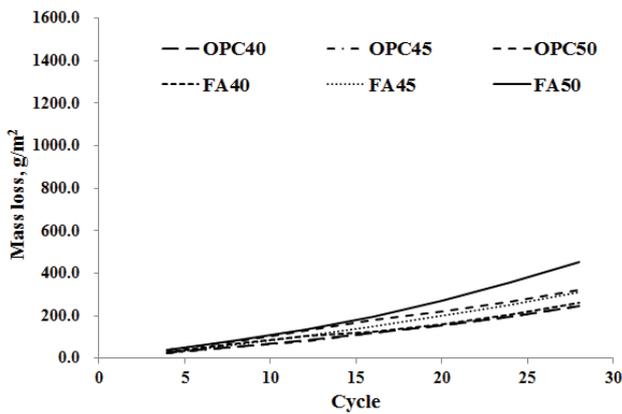


Fig. 8 Scaling Test Results by RILEM TC 117-FDC/CDF

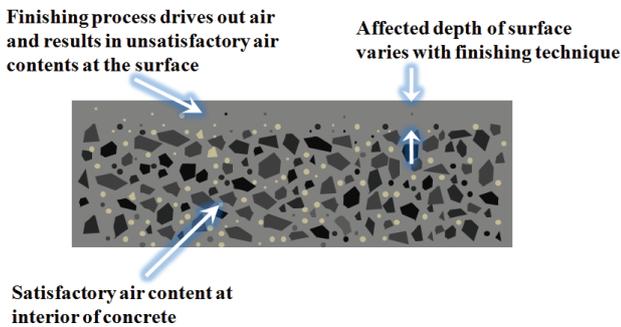


Fig. 9 Effect of finishing air-entrained concrete

용하지만 마감과 전처리 과정의 차이로 인해 BNQ의 기준이 다소 낮은 스케일링 양을 나타내었으며, 또한 BNQ기준에서 요구되는 스케일링 양 또한 낮은 수준 ( $<0.5\text{kg/m}^3$ )으로 제한을 두고 있다. 이와 같이 BNQ기준의 경우 더 많은 사이클 수에도 낮은 스케일링 양을 나타내는 것은 전 처리과정보다 마감정도 차이로 인한 것으로 판단된다. MTO의 경우 블리딩이 일어난 후 마감처리를 하며 최종적으로 medium-stiff brush를 사용하여 마감을 하도록 규정되어 있다. 이와 같이 블리딩이 일어난 후 거친 면으로 마감을 하게 될 경우 Fig. 9와 같이 블리딩 수와 동반된 기포가 콘크리트 표면 위로 상승하게 된다. 이를 최종 마감을 통하여 제거함에 따라서 콘크리트 표면의 경우 연행공기가 부족하고, 하부에 비하여 높은 물-바인더비를 나타내게 된다. 또한 거친 면으로 마감을 하면 표면의 낮은 물-바인더비로 인하여 연약한 거친 면이 동결융해 및 외부 환경에 의해 쉽게 손상될 우려가 있다.

RILEM의 경우 다른 기준들에 비하여 짧은 동결융해 기간 (동결 : 4시간, 융해 : 8시간)으로 규정되어있으며, 이에 반해 미미한 수준의 스케일링 양을 보이고 있으며, 변수별 차이도 확연하게 나타나지 않았다. RILEM 기준의 경우 콘크리트

표면이 하부로 노출이 되도록 설치를 하며, 이에 따라 보다 정확한 스케일링 양을 측정하기에는 용이하다. 하지만 시험체 설치가 다소 어려움이 있으며, 현장조건과 차이가 있어 제설용액 및 염소이온의 침투가 어렵고 마감에 대한 명확한 규정이 없어 마감에 따라 결과가 유동적일 수 있다고 판단되며, 동결융해 사이클에 대한 규정 또한 국내의 기온 조건에 부적합하다고 사료된다.

본 실험을 통하여 각 기준의 실험 및 평가방법 차이에 따라 서로 다른 실험 결과를 나타내었다. 이에 따라 동일한 시멘트 콘크리트 포장에 대한 스케일링 저항성을 평가할 시에도 상당한 차이를 보이는 결과를 나타낼 수 있으며, 따라서 보다 명확한 실험방법 및 평가기준이 제시되어야 한다고 판단된다.

#### 4.2.2 스케일링 시험법에 대한 고찰 및 제안

본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장의 내구성 시험법 중 스케일링 시험법을 수행하였으며, 시험법은 국외 각국에서 제안되고 있는 시험법을 적용하여 평가하였다. 시멘트 콘크리트 포장의 변수는 일반 콘크리트와 현재 현장에서 주로 적용되고 있는 플라이애시를 혼입한 콘크리트로 변수를 설정하였으며, 물-바인더비 40~50%로 구분하여 시험을 수행하였다. 각국에서 제안되고 있는 평가기준은 시험방법에 따라 크게 제설용액, 시편 표면적의 크기, 마감, 시편 양생, 동결융해 사이클 및 기간, 표면 평가 방법, 평가기준으로 구분되어 규정하고 있다. 이에 따라 국외의 각 관련 기관에 따라 다소 상이하며, 그 결과도 차이를 나타내었다. 이 같은 평가방법 중 실험결과에 다른 가장 큰 영향인자는 제설용액 및 다짐방법 차이에 의한 것으로 사료된다. 제설용액에 경우 여러 연구자들에 의해 NaCl 및  $\text{CaCl}_2$ 에 대한 열화 정도의 차이는 연구결과를 통하여 보고되었으며, 동결융해시 NaCl에 의한 열화가  $\text{CaCl}_2$ 에 의한 열화보다 농도마다 다소 차이를 보이지만 약 3~4배정도 많은 스케일링량을 나타내었다. 이에 따라 NaCl을 사용한 ASTM의 기준으로 평가시 과소평가 경향이 있을 것으로 판단된다. 또한 최근 국내의 경우 살포방식이 습염식 살포방식으로 변경되면서 일반적으로 NaCl과  $\text{CaCl}_2$ 을 7:3비율로 사용하고 있다. NaCl을 제설용액으로 단독으로 사용시 NaCl과  $\text{CaCl}_2$ 를 7:3비율로 혼입할 경우 같은 농도에 대한 스케일링 시험시 NaCl을 단독으로 사용할 경우가 높은 스케일링 양을 나타내었다. 이와 같이 제설용액 및 농도에 따라 결과가 상당히 큰 차이를 보이고 있어 국내 규정으로 제정시 이와 같은 사항이 반영되어야 한다고 판단된

다 (Lee et al., 2011; Dipayan, 2007).

또한 스케일링의 경우 과도한 블리딩 (bleeding), 소성수축 균열 (plastic shrinkage cracking), 불량한 표면마무리, 양생 부족 등이 표면 강도를 저하시켜 스케일링을 일으키는 간접적인 요인으로 작용하게 된다. 시멘트 콘크리트 포장의 경우 대부분이 기계 타설 (slip form paver)이며, 진동다짐에 의해 타설되므로 이에 따라 마감에 대한 규정 뿐 아니라 블리딩에 의한 사항 또한 고려되어야 한다. 기존 문헌을 통하여 일반시멘트 콘크리트 포장의 경우 물-바인더비 40%일 경우 컨시스턴시를 고려하여 약 30초의 진동다짐이 요구되어진다. 따라서 컨시스턴시를 고려한 진동다짐 시간 및 범위에 대한 기준이 추가적으로 규정 범위 안에 포함시켜야 할 것으로 사료된다 (Bouzoubaâ et al., 2012).

표면 마무리의 경우, 일반적으로 도로포장 시공에서는 미끄럼 저항성 증진과 수막현상 및 태양광 반사 방지의 목적으로 거친 면으로 마무리를 하게 된다. 따라서 표면 마무리의 경우 뾰뚱한 솔 (Stiff brush)로 마무리를 하고, 표면을 제외한 바닥을 포함한 면에 방수 및 단열을 위한 설치를 마감을 하여 표면 외의 다른 면에서 열화에 의한 손실을 방지해야 할 것으로 판단된다. 콘크리트의 양생과 동결융해 온도 및 싸이클은 ASTM 및 MTO의 규정을 따르며, 평가는 표면의 박리 및 굽은 골재 노출 등에 대한 사항은 육안평가가 선행되어야 하며, 보다 정량적인 비교를 위해서는 표면 ( $m^2$ )에

대한 박리량 (g)산정을 통하여 평가되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기존 실험방법 및 현행 도로포장 현장에서의 적용되고 있는 시공법을 기반으로 하여 여러 문헌들의 고찰을 통하여 스케일링 시험법에 대한 국내 현장에 유사한 평가방법을 제안하고자 하였다. 이에 따른 평가방법은 국외에서 제시되고 있는 시험방법의 범위 내에서 수정 및 추가하여 선정하였다. 이에 따른 국내현장에 적용이 가능한 평가방법은 다음 Table 6과 같이 정리하였다.

## 5. 결론

최근 국내의 과도한 제설제의 사용에 따른 국내 콘크리트 포장에서의 스케일링이 심각한 문제로 부각되고 있지만, 국내 스케일링 관련 시험 규정이 2002년 폐지된 이후 이에 새로운 시험 규정 또는 박리저항성 평가방법 등에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 일반 콘크리트와 국내에서 주로 사용되어지는 플라이애쉬 20% 혼입한 콘크리트의 물-바인더비를 변화하여 국외 기관에서 제안되고 있는 시험법에 대하여 실험을 수행하였다. 또한 실험결과 및 문헌 고찰을 통하여 국내 콘크리트 포장 시공 현장 조건에 맞는 시험법을 제안하고자 하였다. 따라서 본 연구에서의 문헌고찰 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 일반 콘크리트 (OPC)와 플라이애쉬 (FA)를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 재령 28일에서 그 차이는 크지 않았으며, 물-바인더비 45%에서 가장 큰 차이를 나타내었고, 재령 28일에서는 플라이애쉬를 혼입한 경우 다소 낮은 강도발현을 확인하였다.
- (2) 각 기관에서 제안된 방법에 따라 스케일링 저항성 시험을 수행하였으며, 제설용액, 마감, 양생, 동결융해 싸이클 등 여러 시험요인 따라 상이한 결과를 나타내었다. 제설용액에 따른 스케일링 같은 경우에는 대부분이 외부 표면 노출이 큰 콘크리트 도로 포장에서 발생되므로 국내 콘크리트 포장의 시공 현장을 고려하고 시험결과 및 관련 문헌 고찰을 통하여 시험방법을 제안하고자 한다.
- (3) 제설용액, 마감 및 동결융해 온도 및 싸이클에 따라 스케일링량의 차이가 크게 발생되었으며, 현재 국내 콘크리트 포장의 경우 대부분이 기계 타설로 이루어짐에 따라 진동다짐에 의한 규정도 추가하였다. 제설용액에 경우 현재 고속도로 제설용액으로 사용되어지고 있는

Table 6 Proposal of scaling resistance test method

Standards Classification	Proposal of test method
Saline Solution	4%, (NaCl+CaCl <sub>2</sub> , 7:3) - Existing concentration of deicing agents
Specimen	· Prisms measuring 300×300×75mm(0.09m <sup>2</sup> ) · Min. surface area 0.09m <sup>2</sup> · Min. 3 specimens required
Compaction	Concrete is compacted with vibrator enough to consistency of concrete
Finishing	After the concrete has stopped bleeding and then with a medium-stiff brush. And heat insulating material is installed except surface of specimen.
Curing of Specimens	· 14days at 100%RH · 14days at 50±5%RH
Freeze-Thaw cycles	· 50cycles of 24h · Freezing at -18±3°C for 16-18h · Thawing at 23°C for 6-8h
Evaluation of surface quality	· After 5, 10, 15, 25 and 50cycles · Visual assessment of surface · Mass measure of cumulative scaled off material in kg/m <sup>2</sup>
Acceptance criteria	After 50cycles the cumulative mass of scaled off material must be < 0.8kg/m <sup>2</sup>

NaCl, CaCl<sub>2</sub>를 7:3의 비율로 혼합한 4%의 용액으로 제안하였으며, 다짐에 대한 부분도 콘크리트 포장의 컨시스턴스를 충분히 고려한 진동다짐을 하도록 제안하였다.

- (4) 실험체의 표면 마무리의 경우, 박리 발생과 산정에 주요한 인자이며, 일반적으로 시공시 거친 면으로 마무리를 하고 있기 때문에 블리딩 후 뺏뺏한 솔 (Stiff brush)을 활용함으로써 현장과 유사한 표면상태를 제공하고, 표면에서의 정확한 스케일링량 측정을 위해 표면을 제외한 시험체에 방수제 및 단열체를 설치하여 표면이외에서의 열화로 인한 손실이 제외될 수 있도록 제시하였다. 양생 및 동결융해에 대한 규정은 ASTM와 MTO의 규정에 따르며, 정량적 평가를 위해 표면 (m<sup>2</sup>)에 대한 박리량 (g)을 측정하여 평가하도록 제안하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 도로교통연구원 2013년 연구지원과 에너지기술평가원의 연구비 지원 (0000000015513)에 의해 수행되었고, 저자들은 이에 감사드립니다.

#### References

1. Bouzoubaâ, N., Bilodeau, A., and Fournier, B. (2004), R&D Consortium on De-Icing Salt Scaling Resistance of Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials, MIL/CANMET, 12-25.

2. Choi, S. D. (2005), A Study on the Compound Deterioration of Concrete Subjected to Freezing-Thawing and Chloride Attack, *Dessertation of MS in civil engineering*, Seoul National University of Science and Technology, 9-17.

3. Dimitre, G. V. (2012), Evaluation of Test Methods for De-Icer Scaling Resistance of Concrete, *Dessertation of MS in civil engineering*, University of Toronto, 4-46.

4. Dipayan, J. (2007), Concrete Scaling - A Critical Review, *Proceeding of the 29th Conference on Cement Microscopy*, Canada, 91-130.

5. Lee, B. D., An, T. S., Hong, S. H., Kim, C. J., and An, J. K. (2011), Improvement for Specified Mix Proportion of Minor-Structure Concrete Considering Multi-Deterioration Environment, Report of Korea Expressway Corporation Research Institute, Republic of Korea, 14-41.

6. Lee, Y. J., Kim, D. S., Lee, B. D., and Hong, S. H. (2010), Policy of Quality Control on Cement Concrete Pavement, *Proceedings of Korean Society of Road Engineers conference-Fall*, Korean Society of Road Engineers, 175-178.

7. Marchand, E. J., and Pigeon, M. (1994), The Deicer Salt Scaling Deterioration of Concrete, A Overview, ACI SP-145, 46.

8. Powers, T. C., and Helmuth, R. H. (1953), Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste during Freezing, *Highway Research Board*, 32, 259-297.

9. Zi, G., Oh, H., Sim, J., and Yi, C. (2012), Development of a Concrete with High Durability and Better visibility by using Waste-Glass, Report of Korea Expressway Corporation Research Institute, Republic of Korea.

Received : 03/09/2015  
 Revised : 03/31/2015  
 Accepted : 04/07/2015

## 요 지

적설한랭지의 경우, 동절기의 동해 및 적설에 의한 교통통행의 원활을 기하기 위하여 제설제를 사용한다. 이와 같은 제설염의 사용은 동결융해 및 염화물에 의해 콘크리트의 급속한 스케일링 피해를 야기시킨다. 이에 대한 피해로 인하여 콘크리트 포장은 콘크리트의 피복두께 감소에 따른 조기 열화 및 사용자의 안정성 등 여러 가지 문제를 발생시킨다. 이에 따라 국외적으로 이와 같은 현상에 대하여 평가를 하기 위해 다양한 시험 및 평가 방법이 제시되고 있다. 하지만 국내에서는 아직 평가방법에 대한 규정은 없으며, 관련 연구 또한 미미한 수준이다. 따라서 본 논문에서는 각 기관 및 나라에서 제시되고 있는 평가방법을 조사하고, 각각의 규정에 따라 실험을 수행하여 결과를 도출하여 비교·분석하였다. 나아가 이와 같은 실험방법과 실험결과의 고찰을 통하여 국내현장에 맞는 실험법을 제안하고자 한다.

**핵심 용어** : 콘크리트 포장, 제설염, 동결융해 조건, 스케일링 시험법