

동결융해와 염해에 따른 복합열화를 고려한 콘크리트의 내구수명 예측

Durability Life Prediction of Concrete Subjected to Freezing-Thawing and Chloride Attack

황 호 재

박 동 천**

오 상 균***

Hwang, Hyo-Jae

Park, Dong-Cheon

Oh, Sang-Gyun

Abstract

As the number of concrete building structures in marine environment increases, it is important to study and predict the durability and the compound deterioration of the concrete which is exposed in both chloride and freezing-thawing damage. The concrete's resistance against freezing and thawing is tested based on KS F 2456, while its chloride ion diffusion coefficient is evaluated based on NT BUILD 492. In result, the more exposure to freezing and thawing process, the shorter life it gets, due to the increased amount of chloride ion diffusion coefficient.

키 워 드 : 염해, 동결융해, 내구수명, 염화물이온 확산계수

Keywords : Chloride Attack, Freezing-thawing Damage, Durability, Chloride Ion Diffusion Coefficient

1. 서 론

콘크리트 건축물에 대한 구조설계는 전통적으로 안전을 고려해 수행되어 왔던 반면 내구성 설계는 상대적으로 간과되어 왔다. 콘크리트 구조물은 설계·시공 및 환경조건에 의해 일정 기간이 지나게 되면 성능저하가 가속되어 더 이상 구조물로서의 기능을 발휘하지 못하게 된다.

최근, 해양 환경에 건설되는 콘크리트 구조물이 증가함에 따라 콘크리트 구조물의 구조적 성능뿐만 아니라 장기적인 내구성에 대한 관심도 커지고 있는 실정이다. 해안에 근접한 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받는 경우, 동해의 영향으로 인하여 콘크리트의 조직이 이완되고 해수에 존재하는 Cl^- 가 콘크리트 내부에 침입하게 되어 열화를 가속화시키기 때문에 해안에서 멀리 떨어진 곳의 콘크리트 구조물에 비해 내구성능 저하가 급속히 진행되므로 특별한 주의가 필요하다.

이에 현재 국내에서는 열화된 철근콘크리트구조물의 유지보수관리를 위해 내구성 평가방법이 적용되고 있다. 그러나 주로 염해나 동결융해 등의 단독열화요인만을 고려하여 수행하고 있지만 동결융해와 염해에 대한 복합열화에 대한 내구성능 저하 시험방법 및 내구수명 예측에 관한 규정은 있지 않으며 또한 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다.¹⁾²⁾

따라서 본 연구에서는 동결융해와 염해를 동시에 받는 콘크리트의 염소이온 확산계수를 도출하고 내구수명을 정량적으로 예측하여 철근콘크리트구조물의 고내구화 및 장수명화를 구축하기 위한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

2. 실험개요

2.1 사용재료 및 물성

본 연구에서 실험한 사용재료 및 물성은 표 1과 같다. 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트, 굵은골재의 밀도는 2.6, 잔골재는 밀도가 2.54인 것을 사용하였다. 혼화제는 폴리카arbon산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

2.2 실험 인자 및 수준

본 연구의 실험 인자 및 수준은 표 2와 같다. 일반적으로 콘크리트의 동결융해에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 단위수량(W)과 동결융해 Cycle 이므로, 단위수량을 165kg/m³, 175kg/m³, 185kg/m³의 3수준으로 하였고 동결융해 Cycle은 0, 100, 200, 300의 4수준으로 하였다.

2.3 콘크리트 배합

표 3은 본 실험에서 사용한 콘크리트의 중량배합을 나타낸 것이다. 슬럼프 실험 결과, 단위수량 165kg/m³, 175kg/m³,

* 동의대학교 건축공학과 대학원생, 정희원

** 해양대학교 해양공간건축학부 전임강사, 정희원

*** 동의대학교 건축공학과 부교수, 정희원

185kg/m² 일 때의 슬럼프 값은 각 12.4cm, 15.5cm, 16.3cm로 나타났다.

표 1. 사용재료의 물성 및 기초

사용재료	물리적 특성		기호
시멘트	밀도(g/cm ³)	3.15	C
	비표면적(cm ² /g)	3310	
	압축강도(N/mm ²)	63	
	수화열(J/g)	375	
잔골재	절건 밀도(g/cm ³)	2.64	S
	표건 밀도(g/cm ³)	2.67	
	흡수율(%)	0.8	
	FM	2.68	
굵은 골재	절건 밀도(g/cm ³)	2.59	G
	표건 밀도(g/cm ³)	2.62	
	흡수율(%)	1.28	
	FM	6.63	
고성능AE감수제	폴리카르본산계 (비중:1.07)		SP

표 2. 실험 인자 및 수준

인 자	수 준	수 준 수
단위수량 W(kg/m ³)	165, 175, 185	3
동결융해 Cycle	0, 100, 200, 300	4

표 3. 콘크리트 배합

W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	Unit Weight (kg/m ³)			SP (C×%)
			C	S	G	
60	45	165	275	898	1077	0.5
		175	292	880	1055	0.5
		185	308	862	1030	0.5

2.4 시험체 제작

시험체 제작은 KS F 2403(콘크리트의 강도시험용 공시체)에 따라 100×200(mm)의 시험체를 3개씩을 제작한 후 KS F 2456(급속동결에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)의 기중동결수중용해의 B방법에 따라 공시체는 14일간 수중양생을 실시한 후 동결융해시험기에 투입하여 일련의 동결융해시험을 실시하였다.

염화물이온 확산계수 측정용 시료는 동결융해시험을 실시한 콘크리트의 원주형 시험체를 두께 50±2(mm)로 중간부를 절단하여, 3시간 진공처리한 후, Ca(OH)₂용액에서 20시간 침지하는 것으로 측정 시료의 전처리를 마쳤다.

2.5 염화물이온 이동 저항성 측정

염화물이온 이동계수는 NT BUILD 492⁵⁾에 준해서 실시하였다. 20(V)의 전압을 20시간 가인한 후, 시료를 절단면에

0.1N의 초산은을 분무하여 염화물이온 침투 깊이를 측정하였다. 염화물이온 이동계수는 식(1)~식(3)에 의해 유도된 식(4)에 의해서 산출하였으며, 각각 2개 시료의 평균값을 구하였다. 그림 1은 염화물이온 이동계수의 개념도이며, 양극액은 0.3N의 NaCl, 음극액은 10%의 NaOH를 사용하였다. 측정된 염화물이온의 깊이와 가인 조건에 의해 식(4)로부터 염화물이온 이동계수를 산출할 수 있다.

$$(1)$$

여기서,

$$(2)$$

$$(3)$$

여기서,

- α : 비정상 상태의 염화물 이동계수(m²/s)
- γ : 염화물이온 원자가의 절대 값 ($\gamma=1$)
- β : 패러데이 정수 $\beta=9.648 \times 10^4$ (J/(V mol))
- V : 가인 전압의 절대 값 (V)
- R : 기체 정수 $R=8.314$ J/(K mol)
- T : 측정 전후의 양극액의 평균 온도(k)
- d : 시험체 두께(m)
- x : 염화물이온 침투 깊이(m)
- t : 측정 시간(second)
- C_0 : 변색부에서의 염화물이온 농도 ($C_0=0.07$)
- C_1 : 음극액의 염화물이온 농도($C_1=2N$)

그리고,

이므로 식(1)은 식(4)로 표현할

수 있다.

$$(4)$$

여기서,

- α : 비정상 상태의 염화물 이동계수 ($\times 10^{-12}$ m²/s)
- V : 가인 전압의 절대 값 (V)
- T : 측정 전후의 양극액의 평균 온도(°C)
- d : 시험체 두께(mm)
- x : 염화물이온 침투 깊이(mm)

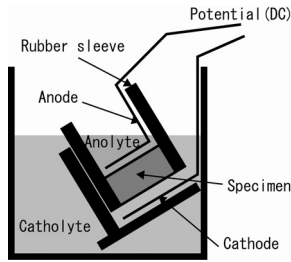


그림 1. 실험 장치 개념도

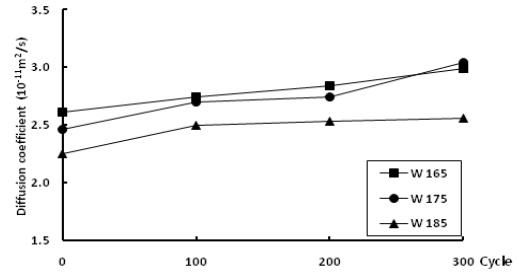


그림 3. 동결융해 Cycle에 따른 염화물이온 확산계수

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 염화물이온 확산계수 측정

3.1.1 단위수량에 따른 염화물이온 확산계수

그림 2는 단위수량(W)에 따른 염화물이온의 확산계수를 나타낸 것이다. W165에서 염화물이온 확산계수는 2.61~2.99($10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$)의 범위로 나타났고, W175에서는 2.46~3.04($10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$), W185에서는 2.25~2.65($10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$)의 범위로 각각 단위수량(W)이 증가함에 따라 염화물이온 확산계수가 감소하는 것을 나타냈다. 이는 단위수량이 증가할수록 단위시멘트량도 증가하고 상대적으로 단위 골재량이 감소하여 골재와 페이스트 사이의 천이대가 작아지기 때문에 염화물이온 확산계수가 감소되는 것으로 판단된다.

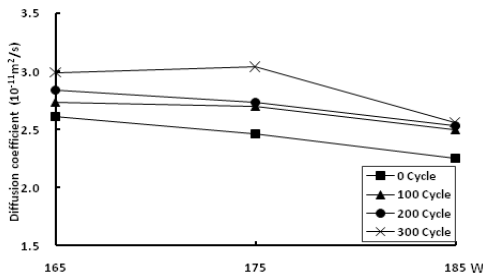


그림 2. 단위수량에 따른 염화물이온 확산계수

3.1.2 동결융해 Cycle에 따른 염화물이온 확산계수

그림 3은 동결융해 Cycle에 따른 염화물이온의 확산계수를 나타낸 것이다. 0 Cycle에서의 염화물이온 확산계수는 2.25~2.61($10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$)의 범위로 나타났고, 100, 200 Cycle에서 계속 증가하는 경향을 보였다. 300 Cycle에서는 2.56~3.04($10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$)의 범위로 나타나 동결융해 Cycle이 증가할수록 염화물이온 확산계수는 증가되는 것으로 나타내었다. 이는 동결융해의 과정에서 팽창 수축을 반복하면서 골재계면 사이가 이완되어 염화물이온 확산계수가 증가되는 것으로 판단된다.

3.2 염화물이온 확산에 따른 내구수명 예측

염화물이온 확산에 따른 내구수명 예측에서 경계조건으로서 해안으로부터 0.5km 떨어진 지점의 구조물로 가정하고 표면염화물이온 농도를 $2.0 \text{kg}/\text{m}^3$ 으로 하였다³⁾. 그리고 표면의 염소이온농도가 항상 일정하다는 가정 하에 일차원의 Fick의 확산 방정식인 식(5)를 이용하여 예측을 실시하였다. 또한 본 실험에서 사용한 실험방법은 Tang's method로서 비정상상태에서의 침투깊이로 확산계수를 평가하는 방법이지만 정상상태법에 기초한 확산계수 산출 시험결과에 비해 약 10배정도의 큰 확산계수 값으로 평가되어짐으로⁴⁾ 이를 적용한 확산계수 값으로 내구수명 예측을 실시하였다.

$$C = (C_0 - C_{init}) \cdot \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C_{init} \quad (5)$$

C : 철근위치에 따른 염화물이온량(kg/m^3)

C_0 : 콘크리트표면의 염화물이온량(kg/m^3)

C_{init} : 콘크리트 속의 초기염화물 이온량(kg/m^3)

erf : 오차함수

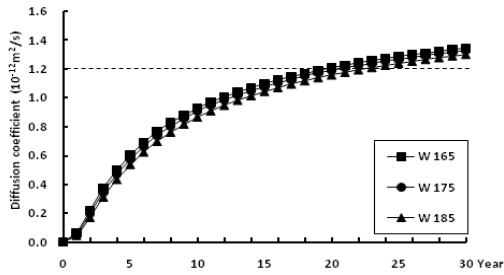
x : 철근위치의 콘크리트 표면으로부터의 두께(mm)

D : 콘크리트의 재령, 배합, 시공상태 및 함수상태에 따른 정해진 콘크리트 속의 염화물 이온의 확산계수($\text{mm}^2/\text{년}$)

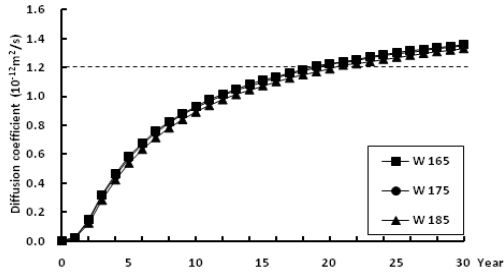
t : 재령(년)

3.2.1 단위수량에 따른 내구수명 예측

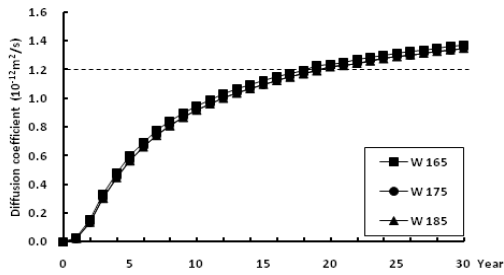
그림 4은 동일 동결융해 작용에 대해 단위수량(W)에 따른 철근콘크리트구조물의 내구수명 예측을 하고 발청 한계까지 도달하는 기간을 나타낸 것이다. 콘크리트 속 깊이 3cm 지점에서의 염화물이온 농도 값이 발청 한계에 도달하는 기간은 0Cycle의 W165, W175, W185는 약 19.9년, 약 21.1년, 약 23.1년으로 100Cycle은 약 19년, 약 19.3년, 21.8년, 200Cycle은 약 18.3년, 약 19.4년, 약 19.6년으로, 300Cycle 또한 약 17.4년, 17.1년, 약 20.3년으로 예측되어, 전반적으로 단위수량이 증가할수록 콘크리트구조물의 내구수명이 증가하는 경향을 나타내었다.



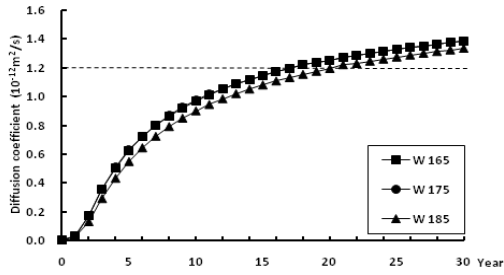
0Cycle일 때



100Cycle일 때



200Cycle일 때



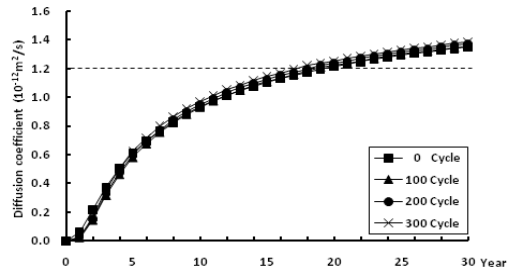
300 Cycle일 때

그림 4. 단위수량에 따른 내구수명 예측

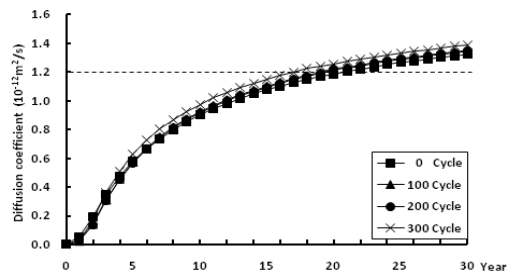
3.2.2 동결융해 Cycle에 따른 내구수명 예측

그림 5는 동일 단위수량(W)에 대해 동결융해 Cycle에 따른 철근콘크리트구조물의 내구수명 예측을 하고 발청 한계까지 도달하는 기간을 나타낸 것이다. 콘크리트 속 깊이 3cm 지점에서의 염화물이온 농도 값이 발청 한계에 도달하는 기간은 W165의 0, 100, 200, 300Cycle은 약 19.9년, 약 19년, 약 18.3년, 약 17.4년, W175에서는 약 21.1년, 약 19.3년 약 19.4년, 약

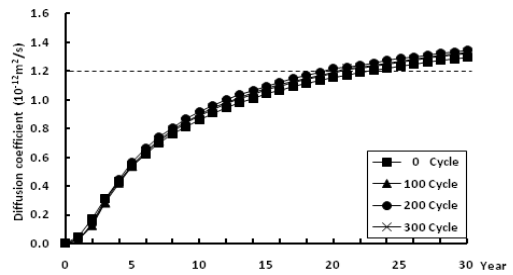
17.1년, W185에서는 약 23.1년, 약 21.8년, 약 19.6년, 약 20.3년으로 예측되어, 전반적으로 동결융해 Cycle이 증가할수록 콘크리트구조물의 내구수명이 단축하는 경향을 나타내었다.



W165일 때



W175일 때



W185일 때

그림 5. 동결융해 Cycle에 따른 내구수명 예측

4. 결 론

본 연구에서는 유럽의 시험 기준인 NT BUILD 492에 준하여 동해와 염해의 복합작용을 받은 콘크리트의 염화물이온 확산계수를 측정하고 이를 바탕으로 염화물이온 확산에 따른 내구수명 예측을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 염화물이온 확산계수는 동일 동결융해 Cycle에 대해 단위수량(W)이 증가함에 따라 확산계수는 감소하였으며, 동일 단위수량(W)에 대해 동결융해 Cycle이 증가할수록 확산계수가 증가 하는 것으로 나타났다.
- 2) 철근콘크리트 구조물의 내구수명예측을 한 결과 발청 한

계 농도에 이르는 기간이 동일 동결융해 Cycle에 대해 단위수량(W)이 증가함에 따라 내구수명이 증가하였고, 동일 단위수량(W)에 대해 동결융해 Cycle이 증가할수록 발청 한계 농도에 이르는 기간이 단축되어 콘크리트구조물의 내구수명이 단축 된 것으로 나타났다.

본 연구의 동결융해시험에 있어서 시험체는 원주형 시험체의 중간부분($50\pm 2\text{mm}$)을 절단하여 사용하였다. 그러나 시험체의 중간부분은 동결융해의 영향이 거의 없어, 실험결과 확산 계수의 뚜렷한 차이를 얻을 수 없었던 것으로 판단된다. 따라서, 향후 시험체의 제작과 실험방법에 대한 보다 개선된 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, 한국콘크리트학회 논문집, 동결융해와, 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성 성능 저하 평가. 2001
2. 이준구, 박광수, 조영권, 김명원, 김관호, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 염해와 동해를 받는 콘크리트의 내구성 평가실험. 2005
3. 이찬영 외, 학술발표대회 논문집, 콘크리트의 염소이온 확산 계수 평가를 위한 시험방법 비교, 2008.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 내구성편 해설, 2004.
5. Nortest Method, NT BUILD 492, CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR MATERIALS: CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON- STEADY MIGRATION EXPERIMENTS., 1999