

Research Paper

## 반복적 염수침지가 강섬유 혼입 콘크리트의 휨성능에 미치는 영향

# Effect of Repeated Wet/Dry Cycles of Salt Solution on Flexural Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete

김지현<sup>1</sup> · 최유진<sup>2</sup> · 정철우<sup>3\*</sup>

Kim, Ji-Hyun<sup>1</sup> · Choi, Yu-Jin<sup>2</sup> · Chung, Chul-Woo<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Professor, Multidisciplinary Infra-technology Research Laboratory, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

<sup>2</sup>Master's Student, Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

<sup>3</sup>Professor of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

\*Corresponding author

Chung, Chul-Woo  
Tel : 82-51-629-6084  
E-mail : cwchung@pknu.ac.kr

ABSTRACT

Concrete is a representative composite material that shows excellent performance in the construction field. However, it is a brittle and nonhomogeneous material and exhibits weak behavior against bending and tensile forces. To compensate for such weakness, fiber reinforcement has been utilized, and steel fiber has been recognized as one of the best material for such purpose. However, steel fiber can seriously affect the durability of concrete exposed to the marine environment due to the corrosion caused by chlorine ions. This study intended to evaluate the mechanical performance of steel fiber reinforced concrete during and after repeated wet/dry cycles in salt solution. According to the experimental results, there was no reduction in the relative dynamic modulus of concrete during the repeated wet/dry cycles in salt solution for 37 weeks. Flexural strength was not decreased after completion of repeated wet/dry cycles in salt solution. There was no sign of corrosion in steel fibers after visual observation of fractured surface. However, the flexural toughness was decreased, and this is because about half of the concrete specimen showed failure before reaching the maximum displacement of 3mm. Although repeated wet/dry cycles in salt solution did not cause cracks in concrete through corrosion of steel fibers, specific attention is required because it can reduce flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.

**Keywords** : repeating wet/dry cycles, salt solution immersion, fiber reinforced concrete, flexural performance

Received : October 20, 2022  
Revised : November 8, 2022  
Accepted : November 14, 2022

## 1. 서론

콘크리트는 대표적인 복합재료로서 불균질하고 취성적인 재료로 휨이나 인장력에 대해서 취약한 거동을 보인다[1,2]. 이러한 취약점을 보완하기 위한 방법으로 섬유보강이 활용되어져 왔으며, 다양한 섬유 중 특히 강섬유는 다른 고분자 섬유에 비해 쉽게 구할 수 있고 우수한 역학적 성능을 가지므로, 콘크리트 보강재로 가장 많이 사용되어 왔다[3,4]. 그러나 해양 환경에 노출된 콘크리트에 강섬유를 사용할 경우, 염소이온의 침투에 따른 부식의 영향으로 콘크리트의 강도를 저하시킨다는 잠재적인 문제점을 가진다. 이에 대한 대안으로 고분자 섬유를 활용하는 것은 하나의 대안이 될 수 있지만, 콘크리트용 고분자 섬유의 대부분은 강섬유보다 역학적 성능이 떨어지고, 친수성의 시멘트 페이스트와의 부착성능도 떨어져, 강섬유 혼입



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

콘크리트에 비해 낮은 역학적 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다[5,6].

최근 해저터널, 해안을 가로지르는 교량, 해안가에 위치한 초고층 건축물 등의 건설이 빈번해지면서, 콘크리트 구조체가 해수에 노출되는 빈도도 함께 증가하고 있다. 이러한 점을 감안한다면, 고성능 콘크리트 재료의 활용에 대한 중요성, 특히 염해 환경에서 강섬유를 보강한 콘크리트의 사용성능에 대해 재검토할 필요성이 존재한다. 이론적으로는 콘크리트가 반복적인 습윤/건조 사이클을 겪게 되면, 콘크리트의 미세구조가 밀실 하더라도 가혹한 환경에서 발생하는 첫 번째 부식의 시작점을 지연시킬 뿐 부식을 완벽하게 막을 수 없는 것으로 알려져 있다. 이는 습윤/건조 사이클을 반복하는 동안 콘크리트 내부 공극을 통해 염소 및 산소의 이동이 진행되고, 이로 인해 공식(pitting corrosion)이 발생하게 되기 때문이다. 하지만 콘크리트 구조체의 밀실성을 증가시키면 부식에 의한 피해를 지연시켜 콘크리트의 내구연한 이상으로 버틸 수 있는 가능성도 충분히 존재하므로, 해수의 반복적인 습윤/건조의 사이클 변화에 따른 강섬유 혼입 콘크리트의 역학적 성능의 변화를 관찰할 필요성이 있다.

콘크리트 내부 강재의 부식을 측정하는 방법은 half cell potential[7] 및 linear polarization resistance[8-10]의 두 가지 방법을 주로 활용하고 있다. 하지만 이 두 가지 방법은 모두 내부에 매설된 강재가 외부에 직접적으로 연결되어 강재 내부로 전류가 흐를 수 있도록 세팅되어야 한다는 단점이 있다. ASTM G 109[11] 방법은 염해에 노출된 콘크리트 내부 철근의 부식 정도를 측정하기 위해 고안된 방법으로 이 방법 또한 철근이 외부로 노출되어 전기적으로 연결되어 있어야 한다. 또한 3% NaCl 수용액의 침지 건조 사이클은 침지 2주/건조 2주(1개월)를 1사이클로 하여, 상당히 긴 주기로 철근의 부식 정도를 측정하기 때문에 단기간에 철근의 부식 정도를 측정하기 어렵다는 단점도 존재한다. 강섬유로 보강된 콘크리트의 경우 외부로 돌출된 철근과 같은 부재가 없고, 섬유간에 전기적으로 연결되어 있지 않기 때문에 상기 제시된 방법을 통해 강섬유의 부식 정도를 판단하는 것은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 반복적 염수침지에 의한 열화 정도를 촉진시키기 위해 ASTM G 109 시험방법을 다소간 변형시켜 침지 2주/건조 2주(1개월)-1사이클을 침지 3일/건조 4일(1주일)-1사이클로 줄여 반복 염수침지시험을 진행하였다. 콘크리트 내부에 존재하는 강섬유의 부식 정도는 corrosion current density를 통한 직접 평가방법의 적용이 불가능하므로 ASTM C215[12] 시험방법에 따른 공진주파수(resonant frequency)를 측정하여 각 사이클별 콘크리트의 상대동탄성계수 변화를 통한 간접적 평가방법을 활용하고자 하였다. 이후 최종적으로 시험이 종료된 시험체에 대해 KS F 2566 섬유보강 콘크리트의 휨성능 시험방법[13]을 이용하여 휨강도 및 휨인성을 측정 후, 염소이온의 반복침지를 진행하지 않은 시험체의 휨성능과 비교하여 염소이온의 반복 침지가 강섬유 혼입 콘크리트의 휨성능에 미치는 영향을 확인해보고자 하였다. 콘크리트 시험체 자체의 염소이온 침투저항성은 NT-BUILD 492[14] 시험방법에 준해 평가하였고, 이를 반복 염수침지에 의한 휨성능 감소 정도와 연계시켜 분석하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용재료 및 배합

각기 다른 3종류의 콘크리트 시험체 제작을 위해 국내의 S사에서 제조된 KS L 5201 규정[15]에 준하는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), KS F 2567 규정[16]에 준하는 콘크리트용 실리카 폼(SF) 및 KS F 2563 규정[17]에 준하는 3종 콘크리트용 고로슬래그 미분말(BFS)을 사용하였다. 결합재의 화학조성은 Table 1에 표기하였다. 콘크리트의 물결합재비는 일정하게 유지하지 않고, 유사한 수준의 28일 재령 압축강도(설계기준강도 약 45MPa 수준)에 도달할 수 있도록 조정하였다. 강섬유는 양 끝단이 구부러진 형태의 Hooked End형을 사용하였으며, 강섬유 혼입량은  $37\text{kg/m}^3$ 으로 세 배합에 모두 동일하게 적용하였다. 콘크리트의 배합은 표준형 pan mixer를 이용하여 진행되었고, 본 실험에 사용된 콘크리트의 배합비율은 아래의

Table 2에 요약하였다.

**Table 1.** Chemical composition of binders

Specimens	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	L.O.I
OPC	62.5	22.1	5.4	3.2	2.1	2.2	0.9
SF	0.3	97.7	-	-	0.24	0.69	2.07
BFS	43.0	32.5	15.2	0.2	3.6	1.3	1.1

(wt.%)

**Table 2.** Mix proportion of fiber reinforced concrete

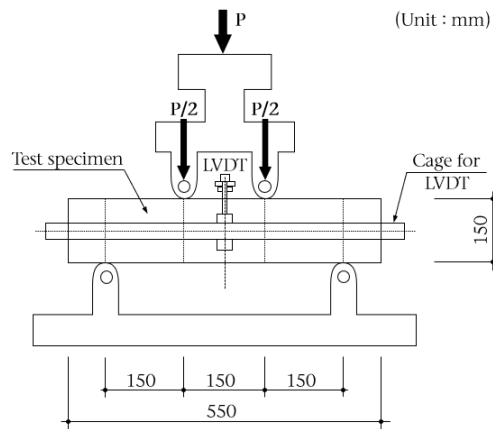
Specimens	W/B	S/a (%)	Water	Cement	Blast Furnace Slag	Silica Fume	Aggregate		Fiber
							Fine	Coarse	
OPC	0.458	65	220	480	-	-	1,014	558	37
SF	0.447	65	215	481	-	24	1,022	563	37
BFS	0.388	60	186	288	192	-	981	669	37

(kg/m<sup>3</sup>)

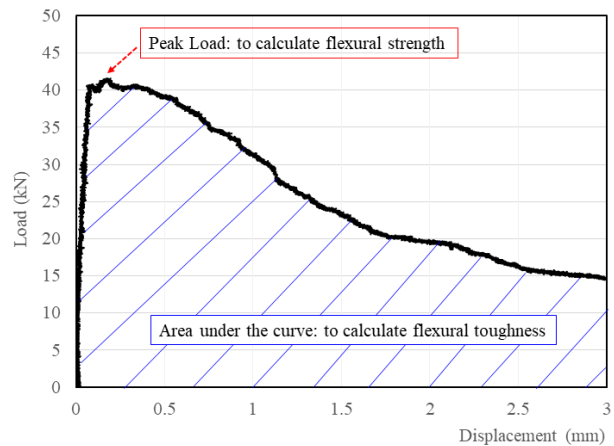
\* The volume % of steel fiber was 0.54%.

## 2.2 역학적 성능

콘크리트 배합 후 압축강도 및 염소이온 침투저항성 시험을 위해 직경 100mm×길이 200mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 원주형 공시체는 3일, 7일, 28일 동안 23±2°C 온도의 수조에서 양생되었으며, 3일, 7일, 28일 재령에 도달하였을 때, ASTM C 39 기준[18]에 따라 압축강도 시험장치를 이용하여 강도를 측정하였다. 휨강도(휨인성) 및 반복염수침지 시험을 위해서는 150mm×150mm×550mm의 각주형 공시체를 제작하였다. 콘크리트 타설 1일 후 몰드를 제거하였고, 각주형 공시체는 56일간 23±2°C의 온도에서 수중 양생을 진행한 후 KS F 2566 “섬유보강 콘크리트의 휨성능 시험방법”에 따라 4점재하(four point bending) 방법을 이용하여 휨강도 및 휨인성을 측정하였다. 휨성능 시험을 위한 test setup은 아래의 Figure 1과 같으며, 휨인성 측정에 대한 예시는 Figure 2와 같다.



**Figure 1.** Test configuration for flexural strength and toughness



**Figure 2.** Load displacement curve of steel fiber reinforced concrete: example for calculation of flexural strength and toughness

휨강도는 아래의 식 (1)을 이용하여 구하였으며, 휨인성은 하중-변위곡선상의 면적을 이용하여 구하였다.

$$MOR = \frac{PL}{bh^2} \tag{1}$$

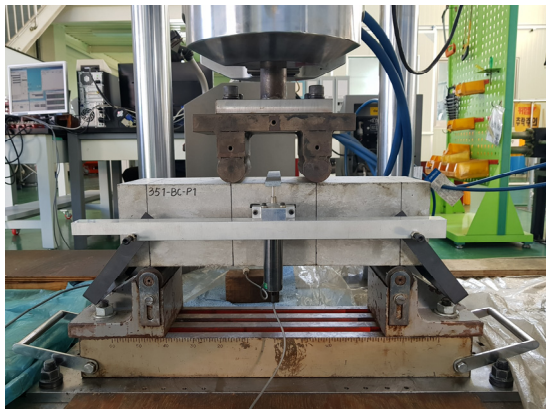
*P* : Maximum load on the load-displacement curve

*L* : Distance between points(450mm)

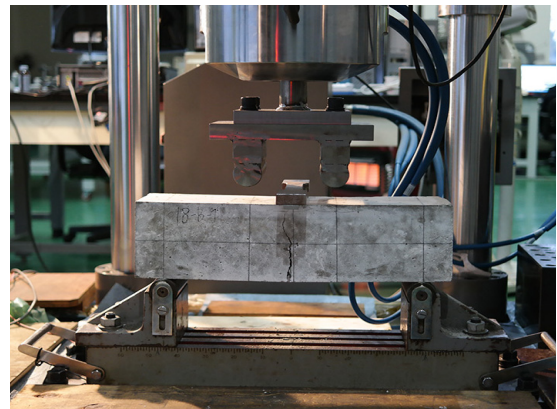
*b* : Wide of the specimen section(150mm)

*h* : Height of the specimen section(150mm)

시험의 정확성을 기하기 위하여 Figure 3과 같이 각주형 공시체의 중립축을 정확하게 표기한 후, 중립축에 guide bar가 위치하도록 고정하였다. 그리고 guide bar에 설치된 LVDT를 통하여 하중 재하시 중립축에서의 처짐을 측정하였다. 하중 재하 속도는 0.15mm/min으로 고정시켰으며, 최대변위는 KS F 2566 규준에서 제시한대로 시편길이(L)의 1/150인 3mm로 하였다. 이 때 얻은 하중-변위 곡선상의 면적을 이용하여 휨인성을 구하였다. 아래의 Figure 3은 실제 시험체의 시험 전·후의 모습을 나타낸 것이다.



(a) At the time of loading



(b) After termination of the test

Figure 3. Photographic images for flexural strength and toughness

### 2.3 염소이온 침투저항성

일반적으로 콘크리트의 염소이온 침투저항성 평가에 사용되는 ASTM C 1202 시험방법[19]은 직류 60V를 6시간 동안 가하여 측정하는데, 해당 시험법을 전기전도성 재료가 혼입된 콘크리트에 사용하게 되면, 상당히 높은 전압으로 인해 실제 염소이온의 이동량과 관계없이 콘크리트를 통해 많은 양의 전류가 흘러나가는 현상이 발생한다[5,6]. 이는 강섬유가 혼입된 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 평가할 때, 통과전하량 기반의 ASTM C 1202 시험방법은 사용이 어려움을 의미한다. 실제 강섬유 혼입 콘크리트를 대상으로 ASTM C 1202 시험방법을 적용한 결과 아래의 Figure 4와 같이 부식이 실시간으로 진행되는 결과를 얻어, 본 연구에서는 콘크리트의 염소이온 침투저항성 평가를 위해 NT Build 492 시험방법을 적용하였다.

NT Build 492 시험방법도 ASTM C 1202 시험방법과 같은 크기(직경 100mm×길이 50mm)의 시험체를 사용한다. Figure 5에 나타난 바와 같이 실험용의 케이스에 원통형 공시체를 끼운 후, 양극에 0.3N NaOH 용액을 투입하고 음극에 10%의

NaCl 용액을 투입하여 전압의 차이를 30V로(DC±30V) 24시간 동안 유지하였다. 기존의 ASTM C 1202 방법에 비해 전압의 차이를 30V 줄여, 과전류로 인한 평가오류를 낮추고자 하였다. 전압을 낮춘 대신 시험시간은 18시간 더 길게 측정하여 실험의 정확도를 유지하고자 하였다.

실험 종료 후, 염소이온의 침투깊이를 측정하기 위해 0.1M의 질산은(AgNO<sub>3</sub>) 용액을 절단된 공시체의 표면에 뿌린 후(예시 Figure 5(b)), 은색으로 변색된 부분의 침투깊이를 측정하였다. 실험이 끝난 시험체에 질산은 용액을 뿌리게 되면 콘크리트 내부에 존재하는 자유염소이온이 질산은 용액과 반응하여 질산 및 염화은(AgCl)으로 바뀌게 되는데, 이때 염화은이 은색을 띠기 때문에 선명하게 염소 이온의 침투깊이가 얼마인지 드러나게 된다. 침투깊이는 각 위치에서의 평균값을 구하였고, 아래의 식 (2)를 이용하여 염소이온의 확산계수를 계산하였다.



Figure 4. Photographic images obtained from ASTM C 1202 test of steel fiber reinforced concrete

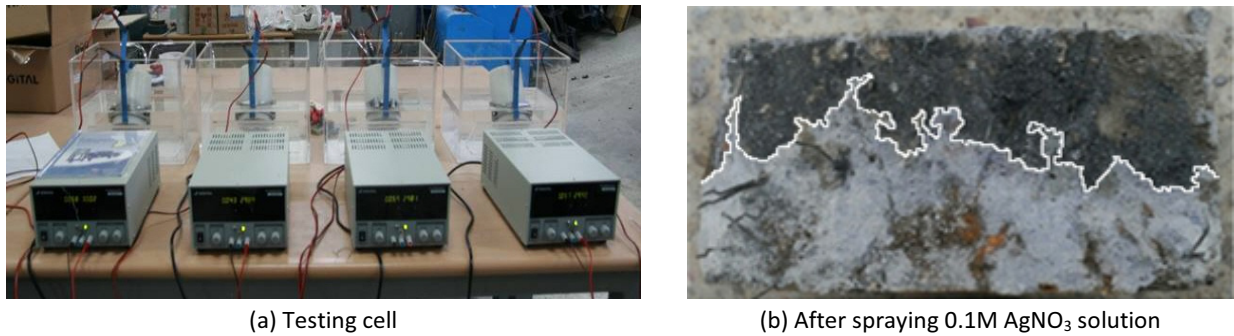


Figure 5. Photographic images obtained from NT-BUILD 492 test procedure

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left[ x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right] \quad (2)$$

$D_{nssm}$  : non-steady-state migration coefficient( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )

$U$  : absolute value of applied voltage(V)

$T$  : average value of initial and final temperatures in the anolyte solution( $^{\circ}\text{C}$ )

$L$  : thickness of the specimen(mm)

$x_d$  : average value of the penetration depths(mm)

$t$  : test duration(hr)

## 2.4 염수 침지에 의한 촉진부식시험

염수침지에 의한 촉진부식 시험은 ASTM G 109 방법을 일부 변형하여 이용하였다. 실험이 진행중인 시험체의 모습을 Figure 6(a)에 첨부하였다. 실제 ASTM G 109 방법의 경우, 3% NaCl 용액을 사용하며, 내부에 철근이 매설되어진 상태에서 외부로 노출되어 있는 철근에서 corrosion current density를 직접 측정하여 부식의 정도를 평가한다. 하지만 강섬유로 보강된 콘크리트의 경우 외부로 돌출된 철근과 같은 부재가 없기 때문에 corrosion current density를 평가할 수 없다. 따라서 이를 보완하고자 ASTM C 215에서 제시하는 공진주파수(Resonant frequency)를 활용하여, 시험 전과 후의 상대 동탄성계수의 변화를 이용하여 강섬유의 부식에 의한 열화과정을 측정하고자 하였다. 이는 초기의 부식이 발생하지 않은 값을 기준으로 하여 상대적으로 반복적인 건조 습윤 사이클을 진행할 때, 부식이 발생하게 되면 내부의 균열 발생으로 연결되기 때문에 전체적인 공진 주파수의 값에 변화를 통해 부식정도를 추정할 수 있다고 판단되었기 때문이다.

촉진 부식을 위해 본 실험에서는 콘크리트 시험체 윗면 주위를 Figure 6(a)와 같이 아크릴로 제작하여 물이 새지 않도록 처리하여 공진주파수의 초기값을 측정하였다. 공진주파수를 측정하기 위한 측정장치의 개념도는 Figure 6(b)에 표기하였다. 측정준비가 끝난 시험체에 해머를 이용하여 진동을 발생시키고, 가속도계(accelerometer)를 이용하여 데이터를 수신하였다. 이를 signal conditioner를 이용하여 증폭한 후, digital oscilloscope(NI PCI 5102 High speed digitizer)를 통해 컴퓨터에 입력하여 신호 처리를 진행하였다. 공진주파수의 측정은 Fast Fourier Transform(FFT)를 이용하여 time domain signal을 frequency domain signal로 변환시켜 측정하였다.

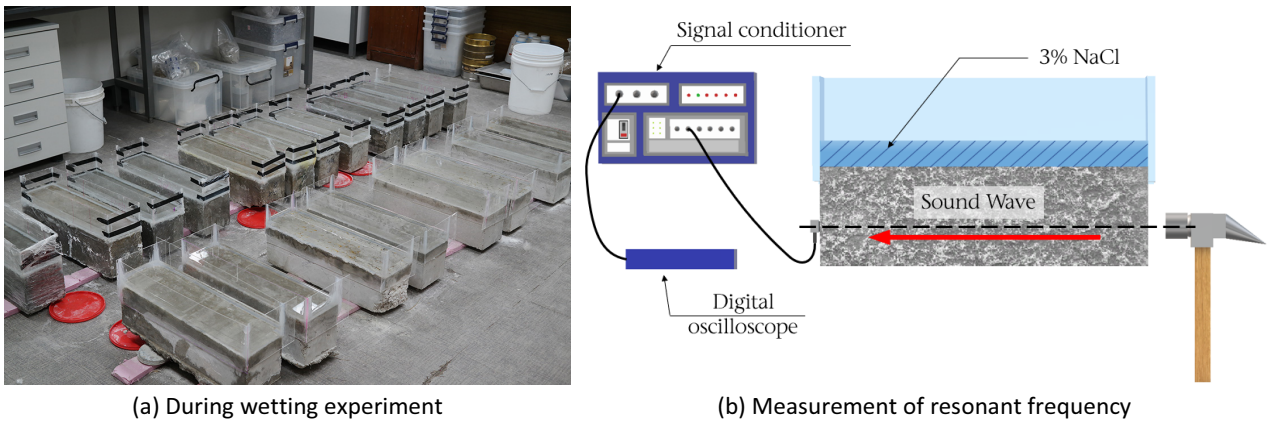


Figure 6. Photographic images of repeated cycles applied for 150mm × 150mm × 550mm prismatic specimens

염소이온의 반복침지는 아래와 같은 절차에 따라 진행하였다.

- a) 초기 공진주파수를 측정하고, 아크릴로 구성된 프레임 공간의 내부(콘크리트의 윗면)에 3% NaCl 용액을 붓고 3일 동안 습윤상태로 보관
- b) 습윤상태로 3일 경과 후, 3% NaCl 수용액을 제거하고 콘크리트 표면을 건조
- c) 건조상태로 4일 경과 후, 각 사이클에서의 공진주파수를 측정

염소이온 반복침지 시험은 항상 3일 습윤, 4일 건조의 사이클을 유지하였으며, 매 1주일마다 공진주파수를 측정하여 최대 37주 동안 실험을 진행하였다. ASTM G 109 규준에서 제시한 2주 침지 및 2주 건조를 반복하게 되면, 시험에 너무 오랜 기간이 걸리며, 부식 정도가 느릴 것으로 예상하여, 1주일마다 변화를 체크하기 위해 사이클을 조정하였다. 37주 동안의 염소이

온 반복침지 시험이 종료된 이후 상수도물을 이용하여 총 19주간의 사이클을 추가로 진행하여, 총 56주 동안 공진주파수의 변화를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 역학적 성능

Figure 7에 재령 3일, 7일, 28일의 콘크리트 압축강도를 정리하였다. 재령 3일 압축강도 측정결과, OPC 배합 보다 실리카 섬유가 혼입된 배합(SF)에서 압축강도가 다소 높게 측정되었으며, 물결합재비가 낮음에도 불구하고 고로슬래그 미분말이 혼입된 배합(BFS)의 압축강도가 낮게 나타났다. 재령 7일의 압축강도는 모든 콘크리트가 유사한 강도를 보였으며, 재령 28일에 도달한 후에는 물결합재비가 가장 낮은 고로슬래그 미분말을 혼입한 배합의 압축강도가 가장 높게 나타났다. 콘크리트의 압축강도는 재령 28일의 목표 압축강도인 45MPa를 모두 상회하는 것으로 나타났다.

Figure 8에는 56일 재령에서의 휨강도 및 휨인성 데이터를 정리하였다. 휨강도 또한 압축강도와 마찬가지로 고로슬래그 미분말을 혼입하고 물결합재비가 가장 낮은 콘크리트에서 가장 높게 나타났는데, 휨인성의 경우에는 강도가 높은 BFS 배합이 가장 낮은 것으로 나타났다. 휨인성의 감소는 휨강도의 상승으로 인한 취성적 거동이 그 이유로 판단된다.

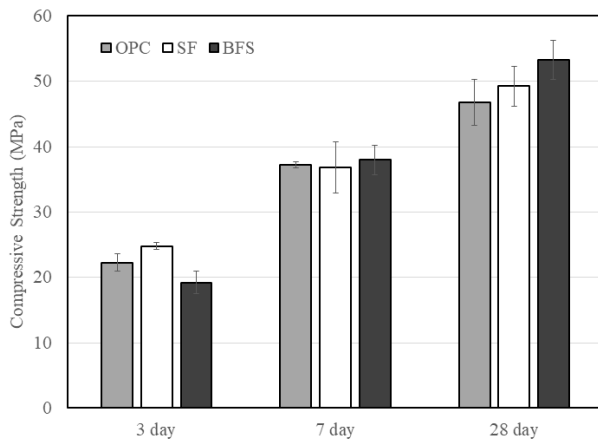


Figure 7. Compressive strength of steel fiber reinforced concrete specimens

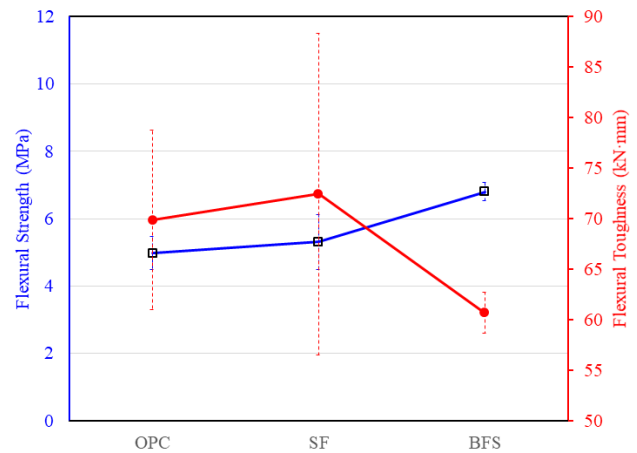


Figure 8. 56-day flexural strength and toughness of steel fiber reinforced concrete

#### 3.2 염소이온 침투저항성

앞서 언급된 바와 같이, 콘크리트에 강섬유가 혼입되면 강섬유가 없는 동일배합의 콘크리트에 비해 높은 통과전하량 값을 보이게 된다. 이는 콘크리트에 존재하는 강섬유들이 전기적인 도체이기 때문에 시멘트 골재의 매트릭스가 전류의 흐름을 방해하여도 강섬유를 통해 많은 전류가 흘러 통과전하량이 과다하게 측정되기 때문이다.

이러한 이유로 본 실험에서는 ASTM C 1202에서 제안한 통과전하량 시험방법을 적용할 수 없었으며, 이보다 낮은 전압을 사용하는 NT BUILD 492 방법을 이용하였다. Figure 9에 따르면, OPC 배합, SF배합, BFS배합의 순으로 염소이온 확산 계수가 가장 높게 나타났다. 이는 염소이온의 침투저항성 증대에 효과적인 시멘트 대체 재료의 활용뿐만 아니라, 물결합재비의 감소(특히 BFS 배합)로 인한 결과로 볼 수 있다.

### 3.3 염수의 반복침지 사이클에 따른 상대동탄성계수

염수의 반복침지에 의한 37주간의 축진 부식 시험 과정에서 OPC, SF 및 BFS 콘크리트의 상대동탄성계수 변화는 Figure 10에 표현하였다. Figure 10에 따르면 전체적으로 3%의 NaCl 수용액을 콘크리트 반복 침지시키게 되면 전반적으로 시험체의 상대동탄성계수 값의 증가하였다. 모든 시편에서 반복적 사이클에 의한 상대동탄성계수 값의 감소를 확인할 수 없었다. OPC의 경우 다른 시험체와 다소 상이한 거동을 보였으나, BFS 콘크리트에 비해 오차율이 2~3% 수준에 그쳐 유의미한 차이를 보였다고 판단하기는 어려울 것으로 사료된다.

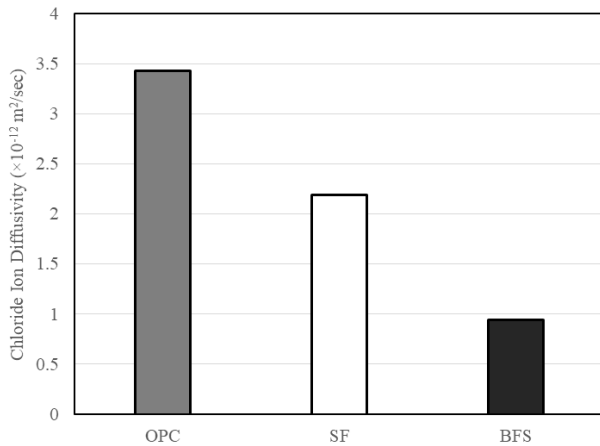


Figure 9. Chloride ion diffusivity of 28 day old concrete

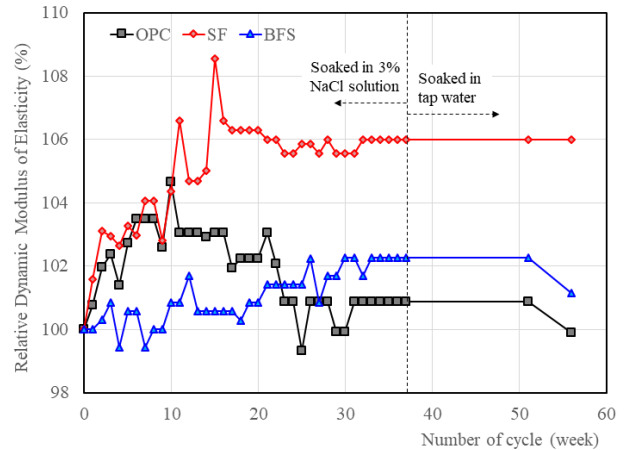


Figure 10. Changes in relative dynamic modulus of elasticity during soaking and drying cycles with 3% NaCl solution

시험 과정에서 발생한 상대동탄성 값의 증가는 37주간의 염수 침지 기간 동안 발생한 강도의 증가와 관련이 있을 수 있지만, 반복적인 습윤/건조 사이클 동안 발생한 염화나트륨(NaCl)의 결정화화도 관계가 있을 수 있다. 만약 반복적인 습윤/건조 사이클 동안 균열이 발생하였고 균열이 발생한 자리에 염화나트륨 결정이 생성되었다면, 상당한 폭의 동탄성계수의 감소가 나타나게 된다. 하지만 습윤/건조의 사이클을 반복하는 동안 이와 같은 거동을 보이지 않은 것을 고려하면, 콘크리트 내부에 존재하는 공극 내부에서 염화나트륨의 결정화가 진행된 것으로 사료된다. 이는 37주간의 반복 사이클 종료 후 56주가 되는 시점까지 상수도물에 침지시킨 후, 상대동탄성계수 값이 다시 감소하는 결과와도 관계가 있다고(공극 내부의 소금이 용해되어 더 이상 고체로서 공극을 채우고 있지 않음) 볼 수 있다. 본 연구에서 나타난 결과에 따르면 염분의 제거 이후에도 시험체 대부분의 상대동탄성계수 값이 100%에 가깝게 나타나 본 실험에 사용된 배합은 반복적인 염화나트륨 수용액의 침지에 대해 상당히 안정적인 거동을 보였음을 확인할 수 있었다.

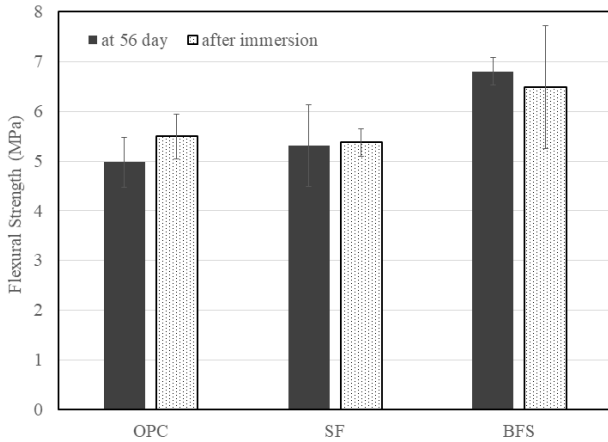
### 3.4 염수의 반복침지 후 휨성능 변화

Figure 11 및 Figure 12에 재령 56일의 휨강도 및 휨인성과 56주간의 반복 침지 시험 종료 후 휨강도 및 휨인성을 비교하였다. Figure 11에 따르면 반복적인 염수 침지 이후 휨강도는 콘크리트 종류에 따라 다소 증가하거나 감소한 결과를 보였지만, 실험적 편차를 고려하면 큰 차이가 없는 것으로 판단할 수 있다. 이는 염수 반복 침지에 의한 열화 현상을 보이지 않았던 상대동탄성 계수 측정 결과와 일치한다. 그러나 Figure 12에 나타난 휨인성 측정결과를 살펴보면, 배합의 종류와 관계없이 모든 시험체에서 염수의 반복침지 후 휨인성이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 휨인성 시험 도중 최대변위인 3mm까지 시

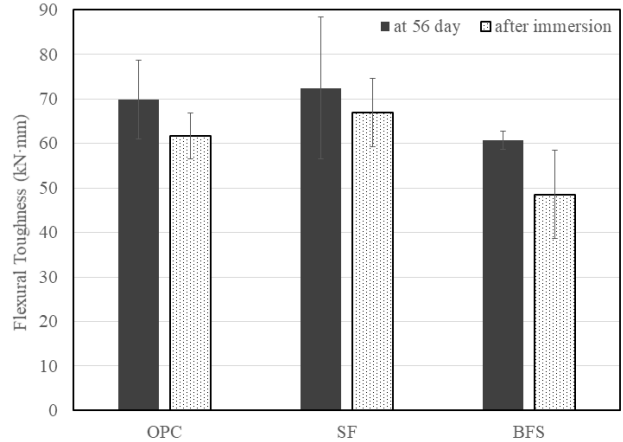


험이 진행되지 않고, 섬유의 변형 등으로 인해 시험이 빨리 종료된 경우가 발생하였기 때문이다.

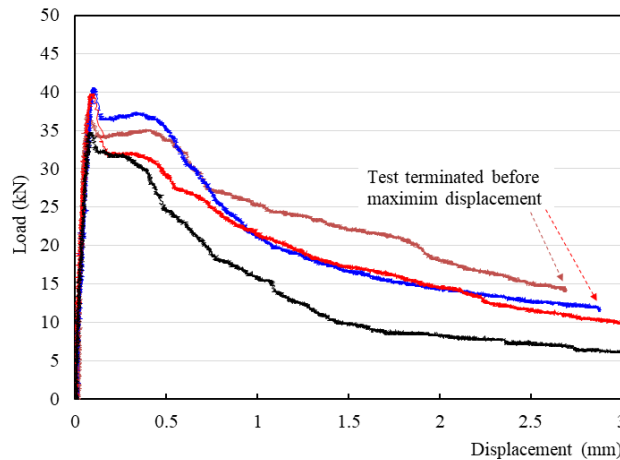
이에 대한 예시 중 실리카폼을 혼입한 콘크리트의 염수반복 침지 후 휨 하중-변위 곡선을 Figure 13에 나타내었으며, 콘크리트 종류마다 차이는 있으나 대략 50% 수준의 확률로 최대변위까지 휨인성 측정이 진행되지 않았다. 유의할만한 사항은 시험 종료 후 시험체 파단면을 육안 관찰하였을 때에도 단면에서는 부식의 증거를 찾을 수 없었다는 것인데, 이는 비록 강섬유 혼입 콘크리트 내부에서 부식이 일어나지 않는다고 하더라도 반복적인 염소이온에 대한 침투를 겪게 되면, 강섬유의 최대 변형률을 감소시켜 휨거동에 불리해 질 수 있음을 의미한다.



**Figure 11.** 56-day flexural strength and flexural strength after 56 weeks of immersion/drying cycles with 3% NaCl solution



**Figure 12.** 56-day flexural toughness and flexural toughness after 56 weeks of immersion/drying cycles with 3% NaCl solution



**Figure 13.** Load displacement curve of steel fiber reinforced concrete with silica fume after 56 weeks of immersion/drying cycles with 3% NaCl solution: cases of test termination

본 실험의 결과에서는 부식으로 인한 팽창균열이 발생하지 않았고, 강섬유-콘크리트 매트릭스에서 육안으로는 큰 변화를 관찰할 수 없었으며, 이로 인해 휨강도의 감소는 확인할 수 없었다(Figure 11). 그러나 37주간의 반복적인 염수 침지는 급격한 강섬유의 부식을 초래하지는 않았지만, 일정 부분 휨인성의 거동에서 불리하게 작용하는 것은 명확해 보인다. 이는 염

수침지를 겪지 않은 56일 재령 시험체의 휨 하중-변위 곡선 데이터가 모두 최대변위까지 급격한 파단 없이 측정이 이루어졌다는 것을 고려하면 더욱 명확하다. 비록 강섬유 재료 자체의 부식은 거의 관찰되지 않았다고 하더라도 염소 이온에 의한 반복적인 열화로 인해 강섬유의 최대 변형률이 감소하였거나, 혹은 강섬유-콘크리트 계면 부착강도에 다소간 영향을 주었을 것으로 추정 가능하다. 하지만 파단된 시험체 모두 강섬유의 끊어짐이 발생한 경우는 없었기 때문에 염소이온의 반복적 침지로 인해 강섬유-콘크리트 계면의 부착력에 문제가 발생한 것으로 보는 것이 더욱 적절할 것으로 판단된다. 그러나 이는 명확하게 검증된 사실은 아니므로, 염수 반복침지에 의한 강섬유-콘크리트 부착력에 대한 영향을 명확하게 증명하기 위해서는 SEM, Image analysis 등을 이용한 정량적, 정성적 분석이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 반복적 염수침지가 강섬유 혼입 콘크리트의 휨성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 강섬유 혼입 콘크리트의 역학적 성능 및 염소이온 침투저항성을 확인하고, ASTM C 109 시험방법을 일부 변형하여 56주간 염수 침지에 의한 축진 부식시험을 진행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 휨인성은 휨강도가 높게 측정된 시험체에서 가장 낮은 것으로 확인되었는데 이는 휨강도 상승으로 인한 취성적 거동에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 역학적 성능과 함께 강섬유가 혼입된 콘크리트의 염소이온 확산계수는 OPC > SF > BFS 콘크리트 순으로 나타났다. 물결합재비 감소 및 혼화재의 사용으로 콘크리트 공극이 밀실화되면서 발생한 현상으로 판단된다.
- 3) 반복적 염수침지에 따른 상대동탄성계수를 측정한 결과, 37주간의 염수 반복침지 시험기간 동안 상대동탄성계수의 감소는 발생하지 않았다. 오히려 상대동탄성계수 값이 증가한 경우가 관찰되었는데, 이는 콘크리트 내부 공극을 결정화된 염화나트륨이 균열을 발생시키지 않고 공극을 채우고 있기 때문으로 사료된다.
- 4) 반복적 염수침지 사이클 적용 유무에 따른 콘크리트 시험체의 휨성능 변화를 확인한 결과, 재령 56일 휨강도는 실험적 편차를 고려하면 큰 차이가 없었으나, 염수 반복 침지 후 모든 콘크리트 시험체의 휨인성은 약 10~20% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 이는 휨인성 측정과정에서 약 50%의 확률로 최대변위(3mm)까지 시험이 진행되지 못하고 강섬유의 변형 및 시험체의 파단 등으로 인해 조기 시험 종료가 발생하였기 때문이다.
- 5) 강섬유 혼입 콘크리트의 경우 반복적 염수침지로 인해 급격한 부식이나 이로 인한 팽창균열은 발생하지 않더라도, 강섬유의 최대 변형율이 감소 혹은 콘크리트 계면과의 부착강도 저하 등의 원인으로 콘크리트의 휨 거동에 부정적인 영향을 끼칠 수 있음이 확인되었다.

마지막으로, 본 연구에서는 비교적 긴 기간 동안 실험을 진행하였음에도 불구하고, 강섬유 부식에 대한 명확한 증거는 찾을 수 없었다. 반복적 염수침지 이후 강섬유 - 콘크리트 계면의 특성 변화를 확인할 수 있는 여러 가지 분석법의 적용이 필요하고, 짧은 시험 기간 동안 염소이온에 의한 강섬유 부식 촉진 시험 방법을 찾기 위한 노력도 필요한 것으로 확인되었다. 이러한 부분은 추후 연구를 통해 보완해 나가고자 한다.

## 요약

콘크리트는 건설분야의 대표적인 복합재료로써 아주 우수한 재료이나, 불균질성을 가진 취성적 재료로 휨이나 인장력에 대해 취약한 거동을 보인다. 이러한 단점을 보완하기 위해 다양한 종류의 섬유를 보강한 콘크리트를 활용하고 있다. 특히, 강섬유는 다른 고분자 섬유에 비해 시장성이 좋으며 우수한 역학적 성능을 가지고 있어 콘크리트 보강재로 널리 사용되고 있다. 그러나 해양 환경에 노출된 부위에 시공할 때 염소이온 침투에 따른 부식의 영향으로 콘크리트의 내구성을 저하시킨다


는 문제점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 반복적 염수 침지가 강섬유 혼입 콘크리트에 미치는 다양한 영향들에 관해 평가해 보고자 하였다. 실험 결과에 따르면, 37주간의 반복적 염수 침지 기간 동안 콘크리트의 상대동탄성 계수의 감소는 관찰되지 않았고, 염수 침지 종료 후의 휨강도의 감소도 발생하지 않았다. 반복시험 종료 후 시편의 파단면 육안 관찰 시 강섬유 부식의 증거는 확인할 수 없었다. 그러나 휨인성은 감소하였는데, 이는 콘크리트 시편의 절반 정도가 휨 시험의 최대 측정변위인 3mm 지점에 도달하지 못하고 파괴가 발생하였기 때문이다. 비록 반복적 염수 침지가 강섬유의 부식을 통한 콘크리트 균열을 발생시키지 못하더라도, 휨인성에는 영향을 미칠 수 있으므로 해양환경에 강섬유 보강 콘크리트를 사용 시 이를 유의해야 할 것으로 판단된다.


키워드 : 습윤 건조 사이클, 염수 침지, 섬유보강 콘크리트, 휨 거동


## Funding

This work was supported by the Energy R&D Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea(No. 20201510300110).

## ORCID

Ji-Hyun Kim,  <https://orcid.org/0000-0003-4354-2224>

Yu-Jin Choi,  <https://orcid.org/0000-0002-9112-4265>

Chul-Woo Chung,  <https://orcid.org/0000-0002-3157-7676>

## References

1. Xia DT, Xiang K, Zhou BR. Flexural toughness of hybrid fiber reinforced high-performance concrete under three-point bending. *Applied Mechanics and Materials*. 2013 Aug;357-360:1110-4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1110>
2. Banthia N, Majdzadeh F, Wua J, Bindiganavile V. Fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*. 2014 Apr;48:91-7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>
3. Zollo RF. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*. 1997; 19(2):107-22. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)
4. Nataraja MC, Dhang N, Gupta AP. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and concrete composites*. 1999 Dec;21(5-6):383-90. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00021-9)
5. Kim HW, Lee CJ, Shon CS, Moon H, Chung CW. Mechanical performance and chloride ion penetration of polyolefin fiber reinforced concrete designed for shotcreting at marine environment. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*. 2020 Feb;5(1):8-17. <https://doi.org/10.1080/24705314.2019.1692164>
6. Lee CJ, Salas Montoya A, Moon H, Kim HW, Chung CW. The influence of the hybridization of steel and polyolefin fiber on the mechanical properties of base concrete designed for marine shotcreting purposes. *Applied Sciences*. 2021 Oct;11(20):9456. <https://doi.org/10.3390/app11209456>
7. ASTM C 876, Standards Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete. PA: American Society for

Testing and Materials; 1991.

8. ASTM G 59, Standards Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. PA: American Society for Testing and Materials; 2020.
9. Faritov AT, Rozhdestvenskii YG, Yamshchikova SA, Minnikhanova ER, Tyusenkov AS. Improvement of the linear polarization resistance method for testing steel corrosion inhibitors. *Russian Metallurgy(Metally)*. 2017 Feb;2016(11):1035-41. <https://doi.org/10.1134/S0036029516110070>
10. Ijsseling FP. Application of electrochemical methods of corrosion rate determination to systems involving corrosion product layers: part 1: linear polarization resistance measurement as an example of a simple method that can be performed with commercially available instruments. *British Corrosion Journal*. 1986;21(2):95-101. <https://doi.org/10.1179/000705986798272316>
11. ASTM G109, Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments. PA: American Society for Testing and Materials; 1995.
12. ASTM C215, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. PA: American Society for Testing and Materials; 2000.
13. KS F 2566, Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2000.
14. Nordtest method NT-BUILD 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Denmark: Nordic Council of Ministers; 1999.
15. KS L 5201, Portland cement. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2021.
16. KS F 2567, Silica fume for use in concrete. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2003.
17. KS F 2563, Ground granulated blast - furnace slag for use in concrete. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2020.
18. ASTM C 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. PA: American Society for Testing and Materials; 2010.
19. ASTM C 1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. PA: American Society for Testing and Materials; 2000.