

임피던스 측정을 통한 GGBS 콘크리트의 염화물 흡수 평가

김재환^{1*}, 조한민², 유영준³

Evaluation of Chloride Absorption in GGBS Concrete by Impedance Measurements

Jaehwan Kim^{1*}, Han-Min Cho², Young-Jun You³

Abstract: It is essential that service life of reinforced concrete structures in economic and safety aspects should be secured. It is well-known that chloride attack is a typical deterioration mechanism in field concrete structures. To prevent serious accidents like collapse, many studies have been conducted to increase resistance of chloride ingress using concrete mixed with GGBS. The usage of GGBS concrete is nowadays mandatory. Since most concretes in the field are unsaturated, study regarding chloride absorption is necessary, but many studies have focused on the chloride diffusion phenomenon. Methods for evaluating chloride absorption are cost and improper in the field. It is necessary to develop a simple method for evaluating chloride absorption in practice. This study evaluated resistance of chloride ingress in GGBS concretes with impedance measurement and absorption test. From the results, it was confirmed that the contents of absorbed chloride were linearly correlated with the measured electrical resistivities (or conductivities) in the concrete. At the end of the test, the electrical conductivities were 250.8 S/m (w/b=0.4) and 303.1 S/m (w/b=0.6) for PC concretes, and 2.6 S/m (w/b=0.4) and 64.4 S/m (w/b=0.6) for GGBS concretes, respectively. Considering influencing factors for chloride absorption and impedance measurement, chloride ingress into concrete is mainly affected by pore structures due to replacement of GGBS. Especially, formations of pore structure are different with binder, thereby binders should be considered in building reinforced concrete structures exposed to chloride environments.

Keywords: Concrete, Chloride, Absorption, Impedance, GGBS

1. 서론

철근 콘크리트 구조물에서 열화 과정은 주로 수분을 매개로 한 물질(이산화탄소, 황산염, 염화물)이 철근 깊이까지 침투하여 철근 주위의 부동태 피막을 파괴 시키고 부식을 가속화시켜 구조물의 사용성을 급격하게 저하하게 된다(Tutti, 1982). 노출 환경이나 콘크리트 배합을 고려하여 콘크리트 구조물 내에서 시간 변화에 따른 수분의 침투 깊이와 용질의 농도 프로파일을 예측할 수 있다면 구조물의 사용 수명이나 열화 속도를 정확하게 예측할 수 있을 것이다(Kim et al., 2016). 한편 현장에 설치되는 콘크리트는 다양한 환경에 노출되고, 재료적 불균질성 등 다양한 요인에 의해 성능을 정확하게 예측하거나 평가하는 데 여전히 어려움이 많다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 콘크리트 내구성 부분에서는 경험 의존적 평가가 아닌 표준화된 평가 방법에 기반한 성능 중심 평가 방

법이 제안되고 있다(BS EN 206, 2021).

대부분 콘크리트 구조물은 외부 환경에 노출된 상태로 건습 작용이 반복적으로 발생한다. 이러한 과정 동안 콘크리트(특히, 피복 콘크리트)는 수분 불포화 상태를 유지하고 있으며, 표면 콘크리트가 철근 깊이의 콘크리트 보다 상대적으로 낮은 함수율을 보인다. 이럴 때 수분을 매개로 한 물질 중 염화물이 콘크리트 내부로 침투하면 염화물의 이동은 농도 구배에 따른 확산보다는 함수율에 따른 흡수 현상이 지배적으로 될 것이다. 한편 염화물 확산의 경우 NT Build 492(1999)나 ASTM C 1202(2022)와 같은 급속 염화물 침투 시험이 제안되어 있고, 이외에도 염화물을 깊이별로 시료를 채취하여 전위차 측정법, 흡광광도법, 질산은 측정법, 이온크로마토그래피법에 의해 직접 농도를 측정할 수 있는 방법등이 제시되어 있다. 콘크리트 흡수 평가는 북미 지역 지방서에는 ASTM C1585-20, 유럽에서는 BS 1881-122가 제시하고 있다. 염화물 이동 현상을 측정하기 위해 개발된 방법들은 대부분 현장 구조물에 적용하기 위해서는 코어링 채취를 통한 측정이 필요하므로 적용의 제한성이 분명히 있다. 흡수 현상을 모니터링하기 위한 방법으로 핵자기 공명(nuclear magnetic resonance: NMR) 이미지 분석, 감마선 감쇠법(γ -ray attenuation), X-선 투과 시험(X-선 투과 시험) 등의 방법이 있지만 사용되는 장

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원

*Corresponding author: jaehwankim@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do Goyang-Si, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

비가 고가의 장비이고 운용이 어려운 단점이 있다(McCarter, 2018). 현장에 적용성이 높은 측정 방법이 필요하다.

철근 콘크리트 구조물의 사용 수명이 증가에 대한 요구는 지속해서 제기되고 있다. 염화물 침투에 의한 철근 부식은 대표적인 열화 현상이다. 구조물의 열화 과정을 늦추고 내구성을 확보하기 위하여 다양한 시멘트 재료들이 개발되어 사용되고 있으며, 대표적인 재료로 고로슬래그(Ground granulated blast-furnace slag; GGBS) 미분말을 시멘트 혼화재로 사용하고 있다. 고로슬래그 미분말은 고로에서 선철을 제조하는 공정에서 발생하는 부산물로 고온의 용융상태인 슬래그에 물을 분사하여 급랭시킨 미세한 분말의 형태로 분쇄한 것으로 시멘트 중량 대비 함유량에 따라 콘크리트 종류를 구분하고 있다(KS L 5210, 2017). 고로슬래그 미분말은 보통 포트랜드 시멘트에 비해 높은 분말도를 가지고 잠재 수경성 반응을 통해 내부 콘크리트 내부 공극 구조를 치밀하게 하는 장점이 있다. 기존의 연구에서 고로슬래그 사용에 따른 염해 저항성 향상이나 염화물 확산에 관해서는 여러 연구가 진행되었지만, 고로슬래그 콘크리트의 염화물 흡수에 관한 연구는 제한적이다(Luo et al., 2003; Kim et al., 2021; Yoon et al., 2022).

본 연구에서는 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 염화물 흡수 현상을 전기 임피던스 측정법을 활용하여 평가하였다. 제작된 콘크리트 6개월 동안 기건 양생을 실시한 후, 염화물 흡수 시험을 하였다. 염화물 흡수 시험 시 일정 시간마다 무게 변화와 임피던스를 측정하였고, 이를 통해 고로슬래그 콘크리트의 염화물 침투 저항성 평가와 임피던스 측정법을 통한 염화물 흡수 평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험체 제작 및 사용재료

GGBS 콘크리트 내 염화물 흡수에 따른 임피던스 변화를 측정하기 위하여 OPC 및 GGBS 콘크리트 시험체를 제작하였다. 시험체에 사용된 콘크리트 배합은 Table 1과 같이 나타내었다. GGBS 치환율은 40%로 하였고, 물/결합재(w/b)는 0.4와 0.6으로 시험체를 제작하였다. 결합재의 화학적 성분을 Table 2에 나타내었다. 시험체는 $\Phi 100 \times 200$ mm 으로 제작하였고, 콘크리트는 타설 24시간 후에 몰드에서 탈형 하였다. 이후, 28일 동안 습윤 양생한 후, 임피던스 측정 및 염화물 흡수에 사용될 시험체를 재령 28일에 콘크리트 절단기 날의 두께를 고려하여 $\Phi 100 \times 50 \pm 2$ mm 로 절단하였다. 절단된 시험체는 노출면의 마감 및 재료 분리를 고려하여 시험체의 중앙부에서 2개씩 추출하였고, 흡수 시험 전까지 기건 양생을 실시하였다. 측정은 콘크리트 재령 180일에 수행하였다. 추가로 콘크리트 타설 시 압축강도 시험을 위한 공시체를 제작하

Table 1 Mix design

Mix Designation	W/B [%]	Unit Weight [kg/m ³]					
		B	C	GGBS	S	G	PL
PC40	0.4	460	460		1012	650	1.84
PC60	0.6	300	300		1101	707	
GGBS40	0.4	450	270	180	1016	652	1.35
GGBS60	0.6	300	180	120	1096	704	

* W/B: Water/Binder, W: Water, C: Cement, B: Binder, GGBS: Ground Granulated Blast-furnace Slag, S: Sand, G: Gravel, PL:Plasticizer

Table 2 Chemical compositions

	Chemical composition (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
PC	22.0	5.3	3.4	63.4	2.1	2.0	0.8
GGBS	33.4	15.8	0.6	41.8	5.3	1.5	1.5

였고, 압축강도는 28, 56, 91, 180일에 측정하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405(2010)에 따라 실시하였다.

2.2 염화물 흡수 시험

염화물 흡수 시험은 ASTM C1585-20에 따라 실시하였다. 염화물 흡수 시험을 하기 이전에 콘크리트 시험체의 염화물 흡수가 단일방향으로 침투가 진행되도록 시험체의 옆면을 에폭시 코팅하였다. 그리고 염화물 흡수가 빠르게 진행될 수 있도록 콘크리트 시험체를 건조로에서 무게 변화 1% 이하로 도달할 때까지 건조 시켰다. 건조 온도는 50 ± 2 °C로 설정하여 고온에 의한 콘크리트 내부 미세구조 변화를 최소화 되도록 하였다. 시험에 사용된 용액은 10% NaCl 용액으로 제조하여 사용하였다. Fig. 1에서는 염화물 흡수 시험 모식도를 제시하였다. 모식도를 보면 수압에 의한 영향을 최소화하기 위하여 수면을 시험체 하부에서부터 10 mm 높이를 유지하고, 염화물 침투가 최대화되기 위하여 원형 PVC 파이프 위에 시험체를 놓았다. 염화물 용액에 접촉되는 순간부터 최대 48시간까

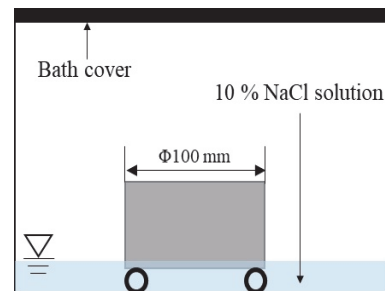


Fig. 1 Experimental setup for chloride absorption test

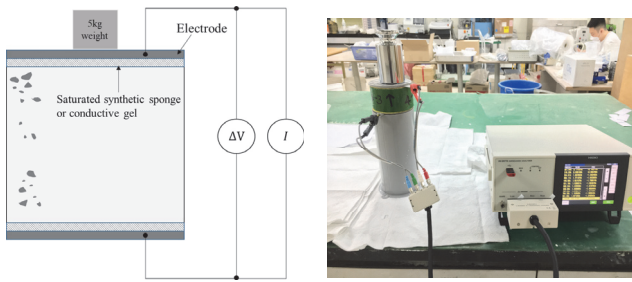


Fig. 2 Experimental set-up for impedance measurement

지 염화물 흡수 시험을 하였다. 지정된 흡수 시간(총 10단계로 5, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 480, 1,440, 2,880분)이 지나면 수조에서 시험체를 꺼내어 노출면의 물기를 제거한 후 무게와 임피던스 측정을 하였고, 총 과정은 3분 이내에 완료하였다. 무게는 정확도 $\pm 0.1g$ 의 저울을 이용하여 측정하였다.

2.3 염화물 흡수에 따른 임피던스 측정

염화물 흡수에 따른 임피던스 변화를 측정하기 위해 임피던스 분석기(Hioki IM3570)을 가지고 2점 가압 측정을 하였다. 임피던스 분석기는 전압 구동 모드로 교류 전압 350mV rms 과 측정 주파수 범위는 10 Hz ~ 1MHz 로 설정하였다.

2점 가압 측정을 위해 2개의 스테인레스 판을 전극으로 사용하였고, 전극과 콘크리트 면 사이의 전기적 흐름을 원활히 하기 위하여 $Ca(OH)_2$ 에 적신 스펀지를 전극과 콘크리트 사이에 삽입하였다. 추가로 5 kg 무게추를 시험체의 한쪽 면에 설치하였다. 임피던스 측정은 Fig. 2에서 같이 수행하였다. 임피던스 측정시간은 30초 이내이므로 측정시간 동안의 흡수된 수분의 증발에 대한 영향은 결과 분석에서 고려하지 않았다.

3. 결과 및 토의

3.1 GGBS 콘크리트의 염화물 흡수 평가

콘크리트의 기본 물성치인 압축강도를 Fig. 3에서와 같이 재령일 별로 측정하였다. 압축강도 발현에 있어서 w/b가 가장 중요한 인자로 나타나는 것을 우선 확인할 수 있다. 콘크리트 양생일이 증가하면서 강도는 지속적으로 증가하지만 증가폭은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 동일한 w/b에서 GGBS 콘크리트의 강도가 PC 콘크리트에 비해서 높게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 입도의 크기가 작은 GGBS를 사용하여 초기 강도 발현을 촉진 시킨 것으로 판단된다. 이는 일반적으로 나타날 수 있는 GGBS 콘크리트의 늦은 초기 강도 발현의 문제점을 해결할 수 있을 것으로 보인다.

GGBS60 콘크리트는 재령일 91일부터 PC60 콘크리트와의 차이가 나는 것은 GGBS의 고유 특성 중 하나인 늦은 강도 발

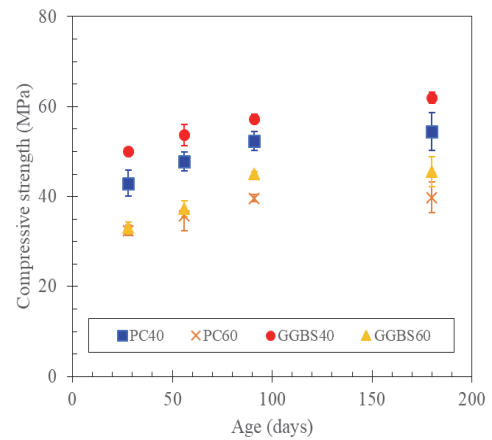


Fig. 3 Development of compressive strength

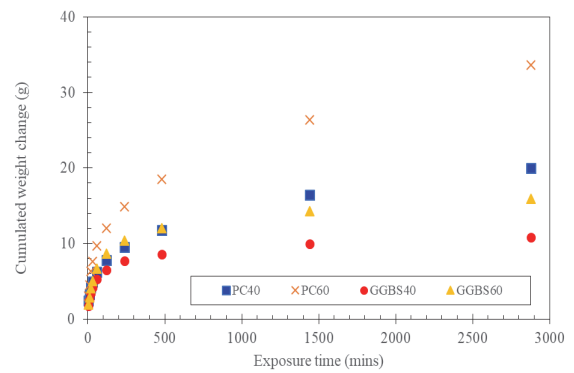


Fig. 4 Weight change of concrete with time

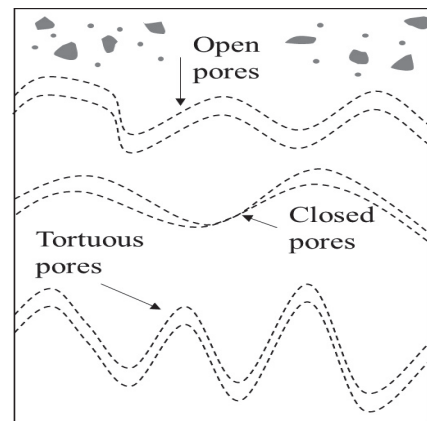


Fig. 5 Types of pores in concrete

현에 의한 것으로 보인다.

재령 180일에는 염화물 흡수 시험을 하였고 무게 변화는 Fig. 4에서와 같이 나타내었다. Fig. 4에서는 염화물 용액 노출 시간(최대 48시간까지)에 따라 시험체의 누적 무게 변화를 나타내었다. 일반적으로 염화물 흡수의 경우 초기에 매우 빠르게 나타나게 되고 일정 시간이 지난 후 흡수 속도가 현저하게

줄어드는 것을 알 수 있다(Kim et al., 2020). 염화물 흡수는 콘크리트의 강도 발현과 다르게 w/b 보다는 사용된 재료에 대한 영향이 높다는 것을 확인할 수 있는데, 이는 콘크리트 내에서 염화물 이동은 미세구조의 영향을 받기 때문이다. 콘크리트 내에 형성되는 미세구조(공극의 형태)는 Fig. 5에서 나타난 것과 같이 크게 2가지 형태로 나타낼 수 있다. 첫 번째는 연속된 공극(Continuous pores)으로 염화물, 수분, 이산화탄소 등이 콘크리트 내부로 침투할 수 있는 주경로로 이용되고, 이러한 공극은 세부적으로는 비틀림(Tortuosity)에 영향을 받기도 한다. 다른 형태로는 닫힌 공극(Closed pores)으로 공극이 연속적이지 않아 철근 부식을 일으킬 수 있는 물질의 이동이 제한되는 경우이다. 이러한 공극들은 수화과정에서 수화물 생성으로 공극이 끊기는 경우와 혼화제 사용 또는 타설 중 생성되는 기포에 의해서 생성되는 경우로 나눌 수 있다. 철근 콘크리트 구조물의 내구성을 확보하기 위해서는 연속된 공극 생성을 줄일 수 있도록 할 필요가 있다.

Fig. 6에서는 염화물 흡수 속도를 각 배합별 콘크리트에 대해서 아래의 식을 활용하여 나타내었다(Alaswad, 2018).

$$i = S\sqrt{t} + i_0 \quad (1)$$

여기서, i 는 단위면적당 누적 흡수량(g/mm^2), S 는 흡수계수 ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), i_0 는 상수(mm) 이다.

Fig. 6을 살펴보면 우선 모든 배합에 대해서 염화물 흡수 현상을 두 개의 직선 형태로 표현되는 것을 확인할 수 있다. 염화물 흡수가 시작되어 1시간 이내에는 빠르게 진행되고 이후 흡수가 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 시험체는 상대적으로 건조된 상태이므로 초기 염화물 이동은 모세관 현상에 의한 흡수가 주로 영향을 미치는 것으로 보인다. 초기 흡수계수(1시간 이내)를 살펴보면, GGBS40

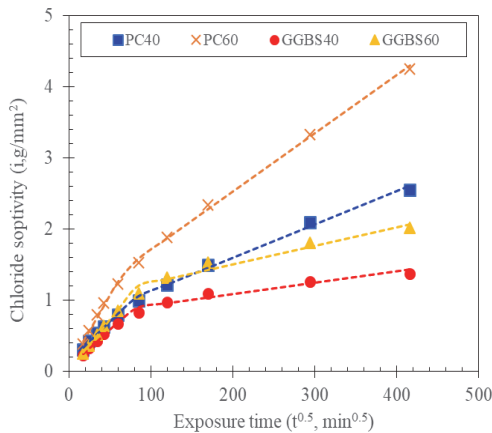


Fig. 6 Chloride absorption profile

콘크리트는 $0.0104 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$ 이고, 그에 비해 PC60 콘크리트는 대략 2배가 높은 $0.0197 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$ 로 나타난 것을 확인할 수 있었다. 한편 OPC40($0.0113 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$)이 GGBS60 ($0.0141 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$)에 비해 초기 흡수계수가 낮게 나타났지만, 이후 흡수 과정에서는 초기 흡수 현상과 반대로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 염화물 침투 과정에서 공극 구조는 중요한 요소이다. 다시 말해서, GGBS60은 PC40에 비해 미세공극이 상대적으로 많지만, 다양한 공극 중 연속적인 공극의 비틀림(Tortuosity) 높거나 닫힌 공극이 많아 상대적으로 흡수 현상이 더디게 나타나는 것으로 판단되며, 철근 콘크리트 구조물에서 염화물이나 이산화탄소와 같이 철근 부식을 일으키는 유해 물질의 침투를 늦추기 때문에 구조물의 장기 내구 성능에 효과적이라고 할 수 있다.

3.2 염화물 흡수에 따른 임피던스 변화

일반적으로 콘크리트의 임피던스를 측정하였을 때 Nyquist 선도에서는 전극부를 나타내는 직선과 콘크리트의 물성을 나타내는 반원으로 전형적인 형태가 나타난다(Kim and You, 2022). Fig. 7은 대표적으로 PC40과 GGBS40 콘크리트 시험체에 대해서 염화물 흡수 시간에 따른 임피던스의 변화를 Nyquist 선도로 나타내었고, 전형적인 콘크리트를 측정했을 때 선도의 모습을 확인할 수 있다. 염화물 흡수에 따른 임피던스 변화를 분명하게 나타내기 위해 측정시간과 측정 데이터의 일부분만을 표현하였다.

Fig. 7에서 우선 염화물 흡수 시간이 증가할수록 급격하게 임피던스의 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 콘크리트 내 빈 공극에 전도성 물질인 염화물 용액이 채워지면 콘크리트 자체

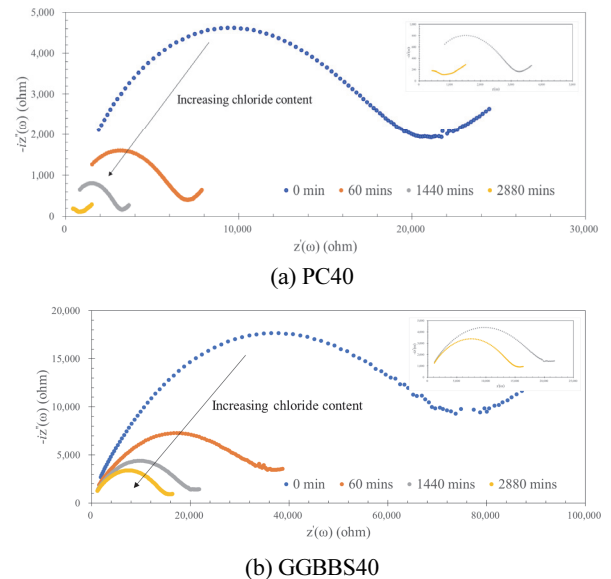


Fig. 7 Nyquist plot for concretes during absorption test

전기 비저항이 감소하기 때문이다. 한편, GGBS 콘크리트는 PC 콘크리트에 비해 임피던스가 상당히 높게 측정된 것을 알 수 있는데, 콘크리트에서 측정된 임피던스는 크게 2개의 영향인자(공극 구조, 세공 용액의 전기 비저항)를 고려해야 한다. 본 연구에서 사용된 시험체는 건조상태를 유지하였고, 염화물 용액이 침투하면서 세공 용액에 존재하는 이온 중 염화물 이온이 대부분을 차지한다고 본다면, 측정된 임피던스의 주요 영향인자는 공극 구조라 할 수 있다. 다시 말해서, GGBS 콘크리트의 공극 구조가 더 치밀하게 구성되어 있어 측정된 임피던스 값이 크게 나타난 것으로 판단된다.

측정된 임피던스 값은 단기 길이당 전기 저항의 역수인 전기 전도도(S/m)로 나타낼 수 있다. 전기 전도도는 크게 주파수 변화와 관계없이 일정한 값을 가지는 직류 전기 전도도(DC conductivity)와 주파수 변화에 따라 값이 영향을 받는 교류 전기 전도도(AC conductivity)로 나타낼 수 있다. Fig. 8에서는 전기 주파수에 따라 전기 전도도의 변화에 대한 예시를 나타내었다. Fig. 8에서 보면 주파수 범위에 따라 크게 3개의 영역으로 구분되는 것을 확인할 수 있다. 주파수의 영향을 받는 전기 전도도는 저주파수 범위와 고주파수 범위에서 각각 확인할 수 있다. 고주파수 범위에서는 콘크리트 내 분극 현상에 기인한 것으로 주로 공극수에 존재하는 이온의 영향에 의한 것이고, 저주파수 범위에서는 콘크리트와 전극 사이에 발생되는 분극 현상에 의한 것이다(McCarter, 2022). 직류 전기 전도도의 경우에는 주파수의 영향을 받지 않아 주로 콘크리트의 전기 전도도라고 할 수 있다.

Fig. 9에서는 대표적으로 PC40과 GGBS40 콘크리트 시험체에 대해서 주파수에 따른 전기 전도도 변화를 나타내었다. 본 실험에서는 저주파수 범위에서의 분극 현상은 확인되지 않았는데, 측정에서 사용된 주파수가 충분히 낮지 않았기 때문이다. 염화물 침투 시간이 증가할수록 전기 전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이때, 직류 전기 전도도가 증가하는 것과 교류 전기 전도도 구간이 증가하는 것을 모두 확인할 수 있는데, 이는 염화물 흡수 시간이 증가하게 되면서 콘크리트 내의 공극수가 증가하고, 전기 전도성 이온이 증가로 분극

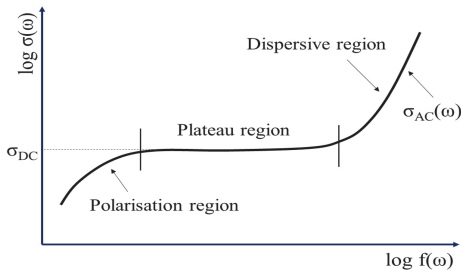


Fig. 8 Three regions identified from dispersion in conductivity (McCarter, 2022)

현상이 더 활발하게 일어난다는 것을 알 수 있다.

한편 주파수에 따른 전기 전도도는 아래의 Jonscher 멱법칙(power law)을 가지고 직류 전기 전도도를 산정 할 수 있는데, 본 연구에서는 Matlab에서 제공되는 비선형 회귀 분석툴을 활용하여 직류 전기 전도도를 산정하였다.

$$\sigma(\omega) = \sigma_{DC} + A\omega^n \quad (2)$$

여기서, σ 는 전기 전도도 (S/m), σ_{DC} 는 직류 전기 전도도

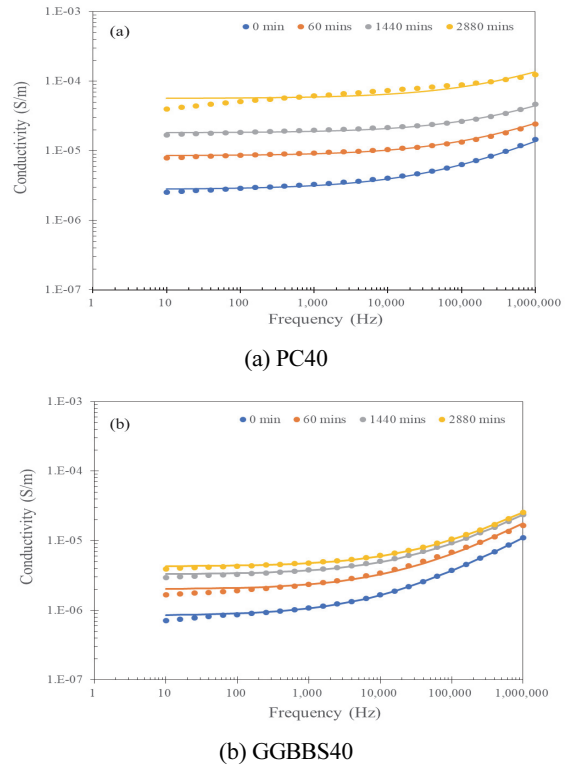


Fig. 9 Conductivity response with frequency for PC40 and GGBS 40

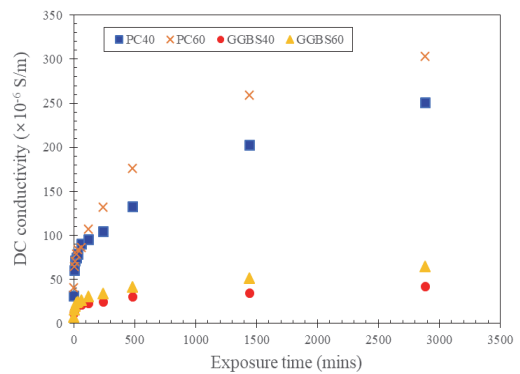


Fig. 10 DC conductivity with time

(S/m), A 는 층돌 빈도 상수, n 은 주파수(w)에 대한 지수이다.

Fig. 10에서는 흡수 시간에 따른 직류 전기 전도도의 변화를 각 배합별로 나타내었는데, 일반적인 경향은 앞에서 무게 변화와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 한편, GGBS 콘크리트가 일반 콘크리트에 비해 전기 전도도가 상당히 낮게 나타났는데, 염화물 흡수가 상대적으로 적어 나타난 것으로 GGBS 콘크리트가 염해 저항성이 높다는 것을 알 수 있다.

3.3 GGBS 콘크리트의 염해 저항성

GGBS를 혼입한 콘크리트가 염해 저항성이 높다는 것은 이전의 연구에서 잘 알려진 사실이다(Ran Huang et al., 2005; Yoon et al., 2019). GGBS 콘크리트의 염해 저항성은 크게 2가지로 나타낼 수 있다. 우선은 염화물 이온과 콘크리트 내 수화 생성물의 화학적 반응 또는 물리적 흡착에 의한 염화물 고정화 능력이 일반 콘크리트 비해 높다는 점과 다른 하나는 미세 분말을 사용하여 콘크리트 공극 구조가 밀실하다는 점이다. 본 연구에서는 염화물 흡수 실험의 결과로 콘크리트 염화물 고정화 평가를 평가하기에는 콘크리트 내에서의 염화물 이동 속도가 상당히 빠르게 진행되므로 GGBS 콘크리트의 염화물

고정화 능력 평가에 대한 부분은 제외하고 공극 구조에 의한 염해 저항성 부분에 대해서 나타내었다.

Fig. 11은 염화물 흡수에 따른 콘크리트 시험체 무게 변화와 직류 전기 전도도의 상관관계를 나타내었다. 이전 결과에서 알 수 있듯이 선형관계가 분명하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 콘크리트 내에 존재하는 염화물 이동 경로와 전기를 흐르게 하는 이동 경로가 상당히 유사하다는 것을 알 수 있으며, 콘크리트 내 존재하는 연속된 공극이 염화물의 주요 이동 경로인 것을 확인할 수 있다. 일반 콘크리트 시험체보다 GGBS 콘크리트의 경우 전기 전도도가 상당히 낮게 나타났고, 무게 변화도 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 GGBS 콘크리트에는 비틀린 공극이나 닫힌 공극이 많이 존재하기 때문이다. 닫힌 공극이나 비틀린 공극 생성은 결과적으로 GGBS 콘크리트 공극 구조의 밀실화와 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다(McCarter et al., 2015). 다시 말해서, 미세 분말 사용에 따라 공극이 밀실하고 GGBS의 특성인 추가적인 수화 반응에 의해 생성된 수화 생성물은 기존에 생성된 밀실한 공극을 닫힌 공극의 형태나 비틀림이 높은 형태로 변형시키는데 이바지한다고 판단된다.

한편, 전기 전도도와 염화물 흡수량 관계는 GGBS 콘크리트와 PC 콘크리트 모두 선형의 관계를 나타내지만, 콘크리트의 종류에 따라 기울기의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 우선, 콘크리트 내 공극수에 존재하는 이온의 차이(이온의 종류 및 양)가 기울기 차이를 나타낼 수 있지만, 본 연구에서 염화물 흡수 시험 시작 이전에 모든 시험체는 완전 건조상태에 가까웠고, 염화물 흡수 시험에서 고농도의 염화물 용액을 사용했다는 점에서 임피던스 측정 시점에서 공극수에 존재하는 이온 대부분은 염화물 이온으로 판단되므로 이 부분에 의한 영향을 미비할 것으로 보인다. 한편 w/b 에 따른 차이는 콘크리트의 종류에 비해 그 차이가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 염화물의 농도를 증가시키거나 인가 전압을 높일 경우 그차이를 더 분명하게 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

공극 구조 관점에서 보면 GGBS 콘크리트와 PC 콘크리트는 근본적으로 공극 구조가 다르다고 할 수 있다. 예를 들면 공극 구조가 유사하다면 동일한 크기의 시험체에서 동일한 양의 염화물 용액을 흡수하였다면 전기 전도도는 같게 나타날 것이다. 이는 본 연구에서 w/b 관계없이 같은 콘크리트 종류에서는 이 관계를 확인할 수 있다. w/b 는 콘크리트 내 공극 구조보다는 생성되는 공극의 양에 더 많은 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 한편 같은 양의 염화물 용액을 흡수했지만 GGBS 콘크리트와 PC 콘크리트의 전기 전도도가 다르게 나타나는 것은 결합재의 사용에 따라 생성되는 공극 구조가 다르다고 판단된다. 앞서서도 언급했듯이 GGBS 콘크리트를 사

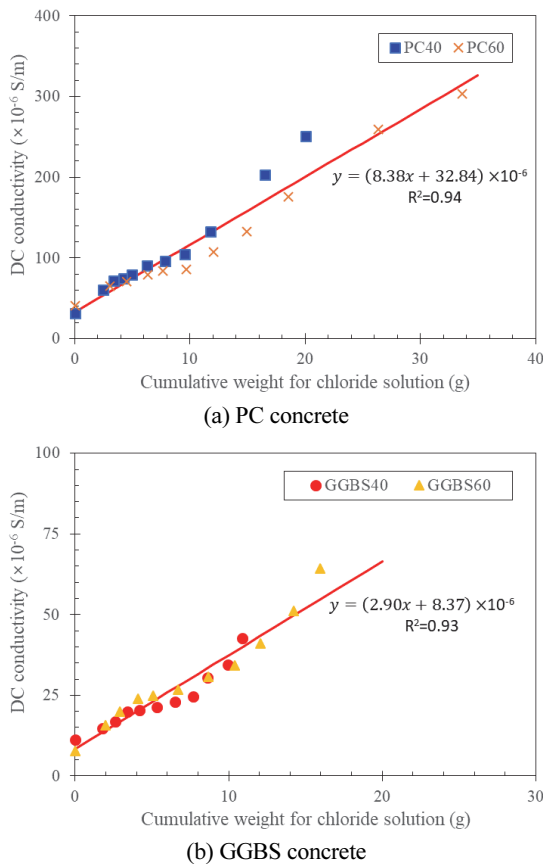


Fig. 11 Relation between DC conductivity and weight change during absorption test

용하였을 경우 닫힌 공극이나 비틀린 공극이 더 많이 생성된 것으로 판단된다. 결과적으로 GGBS 콘크리트에서는 공극 구조의 특성상 염해 저항성이 높은 것을 분명하게 확인할 수 있었다. 염해 영향을 받는 구조물에서 w/b 이외에도 결합재의 사용도 분명히 고려하여 설계할 필요가 있다. 콘크리트 내에 염화물이 정제되면 구조물의 성능 저하에 미치는 영향이 미미하기 때문이다. 본 연구 결과에서 보듯이 통제된 환경(수분 포화도, 온도, 양생 방법 및 측정 시점 등)하에서 임피던스 측정 결과를 통해 염화물 흡수량과 전기전도성이 선형적인 관계를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 현장 콘크리트에 임피던스를 측정할 경우에는 다양한 변수들에 의한 영향을 충분히 고려할 필요가 있으며, 특히 콘크리트내 수분 포화도의 영향이 지배적일 수 있으므로 이에 대한 고려가 우선적으로 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 염화물 흡수 시간에 따라 임피던스를 측정하여 GGBS 콘크리트의 염해 저항성 평가를 수행하였다. 실험 결과로부터 염화물 흡수 시간에 따른 콘크리트의 전기 전도도 변화를 평가하였고, 이를 바탕으로 GGBS 콘크리트의 염해 저항성을 평가하였다. 결론은 다음과 같다.

- 1) GGBS 콘크리트의 염해 저항성 평가를 위하여 염화물 흡수 시간에 따라 무게 변화와 임피던스를 측정하였다. 일반적으로 모든 배합에서 흡수 시간이 증가할수록 무게와 전기 전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 초기 1시간 동안 염화물 흡수계수는 평균 $0.014 \text{ mm/min}^{0.5}$ 인 반면 이후에는 $0.004 \text{ mm/min}^{0.5}$ 로 흡수 현상이 초기에 빠르게 일어나는 것을 알 수 있는데, 콘크리트 내의 모세관 흡수 때문에 발생하는 것으로 현장 노출 콘크리트의 경우에는 염화물 흡수에 대한 대책일 필요할 것으로 보인다. 추가로 GGBS 콘크리트는 상대적으로 염화물 흡수가 적게 일어나는 것으로 염해 저항성이 일반 콘크리트보다 높다는 것을 알 수 있다.
- 2) 염화물 흡수에 따른 콘크리트의 임피던스를 측정하였고, 측정된 임피던스에서 콘크리트의 고유 전기전도도를 계산하였다. 콘크리트 내 공극에 염화물이 증가하게 되면서 직류 전기 전도도가 높아지는 동시에 교류 전기 전도도 구간이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 콘크리트 내 공극수에 존재하는 이온이 전기전도도에 중요한 영향인자인 것으로 판단된다.
- 3) 염화물 흡수 시험이 완료된 시점에서 측정된 전기전도도는 PC 콘크리트의 경우 w/b 0.4에서 250.8 S/m와 w/b 0.6에서 303.1 S/m로 측정되었고, GGBS 콘크리트는

42.6 S/m(w/b=0.4)와 64.4 S/m(w/b=0.6)으로 각각 측정되었다. 결과에서 알 수 있듯이, GGBS 콘크리트의 염해 저항성이 높게 나타났으며, w/b는 공극 구조보다는 생성되는 공극의 양에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 염화물 흡수량과 전기 전도도의 선형관계를 확인하였는데, 추가 연구를 통해 충분한 검증이 이루어진다면 전기 전도도 측정을 통해 콘크리트내 염화물 정량화 기술을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구 운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20220151-001, 중소형 노후 콘크리트 교량의 상태 정량화 기술 개발).

References

1. Alaswad, G., Suryanto, B., and McCarter, W. J. (2018), Moisture movement within concrete exposed to simulated hot arid/semi-arid conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 171, 1-15.
2. ASTM C 1202. (2022), Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, ASTM International, West Conshohocken.
3. ASTM C 1585-20. (2020), Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, ASTM International, West Conshohocken.
4. BS 1881-122. (2020), Testing concrete. Method for determination of water absorption, British Standards, Institution, London.
5. BS EN 206. (2021), Concrete-specification, performance, production and conformity, British Standards, Institution, London.
6. Ran Huang, A. C., Wu, J., and Chen, C. (2005), Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete, *Materials Chemistry and Physics*, 93, 404-411.
7. Kim, J., McCarter, W. J., Suryanto, B., Nanukuttan, S., Basheer, P. A. M., and Chrisp, T. M. (2016), Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical- and physically-based models, *Cement and Concrete Composites*, 72, 133-145.
8. Kim, J., McCarter, W. J., and Suryanto, B. (2021), Cover-zone protective qualities under corrosive environments, *Journal of Building Engineering*, 33, 101618.
9. Kim, J., and You, Y.-J. (2022), Evaluating the chloride absorption of unsaturated cover-concrete using electrical measurements, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(3), 1354-1364.
10. Kim, K.-S., Park, K.-T., and Kim, J. (2020), Evaluating chloride absorption of reinforced concrete structures with crack widths, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(6), 10-16 (in Korean).
11. KS F 2405. (2010), Standard test method for compressive strength of concrete, Korean Standards Association, Seoul (in Korean).

12. KS L 5210. (2017), Portland blast-furnace slag cement, Korean Standards Association, Seoul (in Korean).
13. Luo, R., Cai, Y., Wang, C., and Huang, X. (2003), Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(1), 1-7.
14. McCarter, W. J., Alaswad, G., and Suryanto, B. (2018), Transient moisture profiles in cover-zone concrete during water absorption, *Cement and Concrete Research*, 108, 167-171.
15. McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Starrs, G., Basheer, P. A. M., Nanukuttan, S., Srinivasan, S., and Magee, B. J. (2015), A durability performance-index for concrete: development in a novel test method, *International Journal of Structural Engineering*, 6(1), 2-22.
16. McCarter, W. J., Suryanto, B. Taha, H. M., Starrs, G., and Jaehwan Kim, J. (2022), Features of immittance spectra as performance indicators for cement-based concretes, *Advances in Cement Research*, Online published, 1-38
17. NT Build 492. (1999), Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest, Espoo.
18. Tutti, K. (1982), Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Institute (CIB), Report No. 4-82.
19. Yoon, Y. S., Jeong, G. C., and Kwon, S. J. (2022), The comparison of apparent chloride diffusion coefficients in GGBFS concrete considering sea water exposure conditions, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(2), 18-27 (in Korean).
20. Yoon, Y.S., Cho, S., and Kwon, S.J. (2019), Prediction equation for chloride diffusion in concrete containing GGBFS based on 2-year cured results, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 1-9 (in Korean).

Received : 11/17/2022

Revised : 12/05/2022

Accepted : 12/07/2022

요 지 : 철근 콘크리트 구조물의 사용 수명 확보는 경제적인 측면과 안전성을 고려하였을 때 필수적이다. 현장에 노출된 콘크리트에서 염해는 대표적인 열화 현상으로 잘 알려져 있다. 이를 사전에 예방하기 위한 방안으로 시멘트 대체재인 고로슬래그 (Ground granulated blast-furnace slag; GGBS)를 혼입하여 염해 저항성을 높이는 연구가 다양하게 진행하였고, 현재는 GGBS를 혼입한 콘크리트의 사용이 의무화되고 있다. 현장 콘크리트는 대부분 수분 불포화 상태를 유지하기 때문에 흡수 현상에 대한 연구가 필요하지만, 기존의 연구는 염화물 확산에 초점이 맞춰진 연구가 대부분이다. 콘크리트 내의 염화물 흡수를 측정하기 위해 제시된 방법들은 대부분은 실험실에서 수행이 가능한 고가의 장비를 사용하고 있다. 흡수현상을 간단하고 실용적으로 평가할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 본 연구에서 선행 연구로 GGBS 콘크리트의 염해 저항성을 염화물 흡수 시험의 무게 변화와 임피던스 측정을 통해서 평가하였다. 실험 결과를 보면, 염화물 흡수량과 측정된 전기비저항 (또는 전기전도도)와 선형적 상관관계를 확인할 수 있었다. 흡수 시험이 완료된 시점에서 측정된 전기전도도는 PC 콘크리트의 경우 250.8 S/m (w/b=0.4)과 303.1 S/m (w/b=0.6)이고, GGBS 콘크리트는 42.6 S/m (w/b=0.4)과 64.4 S/m (w/b=0.6) 로 나타났다. GGBS 콘크리트의 염해저항성이 높은 것으로 판단된다. 본 연구에서는 염화물 흡수 및 임피던스 측정에 영향을 미치는 인자를 고려하였을 때, GGBS 사용에 따른 콘크리트의 공극 구조가 염해 저항성에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 배합시 사용되는 결합재의 종류에 따라 공극구조가 다르게 나타날 수 있으므로 염해 환경에 노출된 구조물 건설시에는 결합재 사용에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트, 염화물, 흡수, 임피던스, 고로슬래그
