

전도성 광촉매를 이용한 콘크리트 철근의 염해 내구성 향상에 관한 연구

Improvement of Seawater Corrosion Resistance of Concrete Reinforcing Steel Using by Conductive Photocatalyst

배근국¹ · 배근우² · 안용식^{3*}Geun-Guk Bae¹ · Geun-Woo Bae² · Yong-Sik Ahn^{3*}

(Received April 28, 2017 / Revised June 12, 2017 / Accepted June 13, 2017)

In marine environment, the durability of concrete and reinforcing steel is known to be deteriorate by the permeation of chloride ion into concrete. In this study the conductive photocatalyst was used to improve the seawater corrosion resistance of the concrete and steel. Mortar and concrete samples were prepared by mixing with various amounts of conductive active carbon and photocatalytic powder(TiO₂). The compressive strength of concrete was decreased with the increase of the amount of conductive carbon powders. The samples containing conductive carbon and photocatalytic powders showed the superior seawater corrosion resistance compared with the ordinary sample, which was verified by XRF analysis showing the concentration of chloride ion(Cl⁻) of mortars and concretes. The inhibitive effect of photocatalyst against chloride attack was discussed with the diffusion coefficient of chloride ion into mortar and concrete.

키워드 : 염해 내구성, 전도성 콘크리트, 광촉매, 부식시험**Keywords** : Seawater corrosion, Conductive concrete, Photocatalyst, Corrosion test

1. 서론

일반적으로 콘크리트 내부 철근은 강알칼리성(pH 12.5~13)인 콘크리트 속에서 철근 표면에 20~60nm 두께의 부동태 피막을 형성하여 부식을 억제하고 있다. 해양 환경의 경우(3.5wt.% NaCl, pH 5.6) 염소이온(Cl⁻)의 콘크리트 내부 침투로 인하여 콘크리트 내구성 저하와 내부 철근의 부식을 촉진하게 된다(Park et al. 2011). 실제 여러 선진국에서 염해에 의한 피해를 받은 교량에서 예상 사용수명 이전에 철거되거나 개·보수비용이 초기 건설비용보다 더 많이 드는 예가 적지 않게 보고되면서 내구성능을 고려한 설계 및 유지관리 기법을 이용하여 콘크리트 구조물의 수명을 연장시키기 위한 많은 연구가 진행(Ahn et al. 2004) 되고 있다. 해안 교량용 콘크리트 내구성 향상을 위한 각종 공법들이 제안되어 있으며 대표적인 것들로는 콘크리트 표면도장, 에폭시 피복철근, 전

기방식공법, 탈염공법 등이 있는데 교량이 있는 환경, 시공성, 경제성 등을 평가하여 적절한 공법을 선정하도록 해야 한다(Cheong et al. 2004). 염해 내구성을 평가하기 위해 염소이온 확산계수를 측정하게 되는데 일반적으로 북유럽의 규격인 NT BUILD 492(Kim et al. 2009) 시험방법을 많이 사용하고 있다. 단기간에 콘크리트 내의 철근 부식을 촉진할 수 있으며 자연전위 측정에 의한 철근부식 모니터링을 실시하여 철근부식 개시시기를 평가할 수 있다(Kwon et al. 2014). 본 연구에서는 일반적인 콘크리트 배합조건에서 활성탄소와 이산화티타늄 광촉매를 첨가하여 전도성 광촉매 콘크리트를 제조하였다. 광촉매 콘크리트는 2009년 이후로 대기오염물질을 제거하기 위한 환경정화작용에 사용되어 왔다. 최근에는 대기오염물질을 제거하기 위한 광촉매 콘크리트를 도로포장 및 도로 시설물 분야에 적용하고 있다(Hong et al. 2013).

염해 내구성의 비교평가를 위해 전기화학적 부식촉진실험을 하

* Corresponding author E-mail: ysahn@pknu.ac.kr

¹부산광역시 해운대구청 경제진흥과, 부경대학교 재료공학과 박사과정 (Haeundae-gu Office Economy Promotion Division, Busan, 48095, Korea)²마린종합건설(주) (MARINE General Construction, Busan, 48211, Korea)³부경대학교 재료공학과 교수 (Dept. of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Professor, Busan, 48547, Korea)

였으며 시간 대 전류법(Chronoamperometry)으로 도출된 실험결과들을 Cottrell 식에 적용하여 염소이온 확산계수를 측정하였다(Cottrell 1903). 본 연구에서는 해양구조물로 사용되는 콘크리트 내 철근의 내구성을 향상시키기 위하여 광촉매(TiO₂)를 이용하였다. 광촉매의 영향을 최대화시키기 위해 전도성 활성탄소를 첨가하였으며 그 함량의 최적비율을 구하고자 하였다.

2. 시험방법

2.1 사용재료

시멘트는 시중에서 구입한 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 잔골재는 용원산업과 태양해운에서 생산한 두 종류를 사용하였으며 굵은 골재는 최대치수 25mm인 용원산업의 부순돌을 사용하였다. 표준사는 KCL에서 제조한 ISO 표준사, 활성탄소는 제일탄소의 분말활성탄소를, 그리고 이산화티타늄 광촉매는 빛과 환경의 NP-400을 사용하였다. 이러한 콘크리트에 활성탄소를 첨가할 경우 콘크리트는 전기전도도가 증가하기 때문에 광촉매로 인하여 발생한 전자와 정공이 콘크리트 내부에서 이동할 수 있게 된다(Kang et al. 1998). 광촉매로 인한 전자(e⁻)와 정공(e⁺)이 염소이온의 침투를 억제하는 메커니즘은 다음과 같다. 이산화티타늄 광촉매(TiO₂)이 빛을 받아 전자와 정공으로 분해될 때 전도대에서는 전자(e⁻)와 염소이온(Cl⁻)의 반발력이 작용하게 되어 가전자대에서는 정공(e⁺)과 염소이온(Cl⁻)의 산화반응이 일어난다(Robert et al. 2001). 이 반응은 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온의 확산속도를 느리게 하며 따라서 콘크리트 내부의 철근부식속도가 저하되는 효과가 나타날 수 있다.

2.2 모르타르 시험체 제작

부식촉진실험을 위해서 사용된 철근은 D사의 16mm, 22mm 이형철근이었으며, 이것을 모르타르 시험체와 콘크리트 시험체에 각

각 삽입하여 부식촉진 시험용 샘플을 제조하였다. Table 1은 시험에 사용된 전도성 광촉매 모르타르의 배합조건을 나타낸다. 각 시험편은 시멘트와 표준사양을 일정하게 한 상태에서 활성탄소 함유량을 시멘트 대비 0%와 20~40% 범위에서 5%씩 증가시키며 제조하였다. 기본(ordinary) 모르타르 시험편(OM)을 제외한 모든 전도성(conductive) 광촉매 시험편(CM)의 광촉매(TiO₂) 함유량은 시멘트 함량의 5%로 고정시켰으며 증류수 함유량은 활성탄소량이 증가함에 따라 용이한 혼합을 위해 함께 증가시켰다. 광촉매의 함유량을 5%로 고정한 이유는 이전의 연구(Hong et al. 2013)에서 광촉매의 적용방안으로 시멘트 대비 일부 치환할 경우 5%가 광촉매 효과가 나타나는 최적배합으로 알려져 있기 때문이다. 모르타르 공시체는 KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 표준에 의거하여 크기 40×40×160mm로 모르타르가 2층이 되도록 제조하였으며 진동 다짐기를 사용하여 첫 번째 모르타르 층을 단단하게 다진 후 직선 자를 사용하여 표면을 평평하게 만들었다. 각각의 성형한 틀은 온도 20±1℃, 습도 90%이상인 습기함에 넣은 후 24시간이 지나서 탈형하였고 탈형한 시험체를 온도 20±1℃에서 7일 동안 수중 양생하였다.

2.3 모르타르 압축시험 및 전기 전도도 측정

활성탄소와 광촉매의 첨가가 압축 강도에 미치는 영향을 단기간에 파악하기 위해서 압축 시험을 실시하였다. KS L 5201 물리 성능의 1종 규정에 따르면 7일 동안 수중양생한 시험편의 압축강도 기준은 22.5MPa 이상으로 되어있다.

Fig. 1에서는 전기 전도도 측정을 위한 비저항 측정방법을 도시하였다. 수분이 없는 상태에서 시험체의 비저항을 측정하기 위해 7일 동안 수중 양생한 시험체를 건조로에서 100℃, 24시간 건조하였으며 단면 전체에 균일하게 전기전도도가 이루어지도록 측정단면에 불순물을 제거하고 Silver Paste를 칠한 후 다시 100℃, 30분간 건조시켰다. 건조된 시험체에 구리판을 밀착하여 Potentiostat 273A 장비를 사용하여 2전극법으로 연결한 후 일정하게 0.001V를 인가하여 측정되는 전류값을 측정하였다. 측정된 전류값을 통하여

Table 1. Composition of mortars(weight/g)

Types	Cement	Water	Standard sand	Activated carbon	TiO ₂
OM	450	225	1350	0	0
CM20	450	285	1350	90	22.5
CM25	450	315	1350	112.5	22.5
CM30	450	335	1350	135	22.5
CM35	450	355	1350	157.5	22.5
CM40	450	375	1350	180	22.5

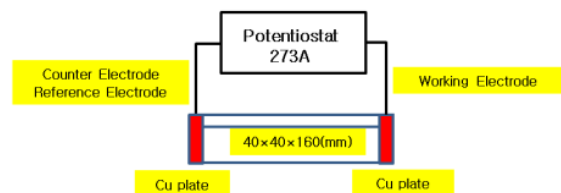


Fig. 1. The layout of resistivity test of mortar specimen

시험체의 비저항을 계산하였다. 광촉매에 작용하는 UV 자외선의 영향을 관찰하기 위해 앞의 경우와 같이 2전극법으로 연결한 후 0.1V를 일정하게 인가하여 나타나는 전류값을 측정하였다. 자외선 램프는 한성 자외선의 UV-A Type BL 15W램프를 사용하였다.

2.4 전기화학적 부식촉진실험 및 XRF 측정

Fig. 2는 전기화학적 부식촉진 실험방법을 나타내고 있다. 부식 촉진실험에서는 3.5wt.% NaCl 수용액을 전해액으로 사용하였으며 산화전극으로는 모르타르 시험체 내부에 삽입한 직경 16mm 내부철근을, 환원전극으로는 type 316 스테인리스 강봉을 사용하였다. Potentiostat 273A 장비를 이용하여 2전극법으로 전기화학 셀을 구성하였으며 철근과 스테인리스강 사이에 D.C. 6V를 일정하게 인가하여 철근의 부식을 촉진하였다. 철근의 부식으로 콘크리트에 균열이 발생하는 시점을 측정하기 위해서 시간에 따른 부식전류를 모니터링 하였다. 전기화학적 부식촉진실험을 마친 후 모르타르 시험체 표면부의 염소이온농도를 측정하기 위해서 시료에 1차 X선을 조사하여 발생하는 형광 X선을 분광결정에 의하여 분광하여 그 강도를 검출기로 측정(측정장비: XRF-1800)하는 XRF 분광분석시험을 실시하였다. Fig. 3은 XRF 시험편을 만든 방

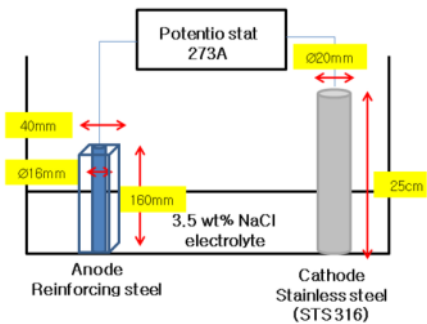


Fig. 2. The layout of corrosion accelerated test of the mortars reinforced by steel

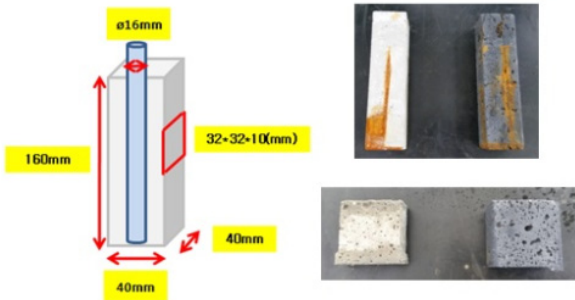


Fig. 3. The specimens for X ray fluorescence spectroscopic analysis

법을 나타내고 있으며 각 시험체는 표층부에서 32×32×10mm 크기의 육면체 형태로 절단해 내었다.

2.5 원형 콘크리트 공시체 제작 및 시험

Table 2는 일반 콘크리트와 전도성 콘크리트 공시체의 배합조건을 나타낸다. OC는 일반(ordinary) 콘크리트 공시체를 나타내며, CC20, CC40은 이산화티타늄 광촉매 5%에 활성탄소가 각각 20%, 40% 첨가된 것이다. 본 연구에서 제작한 원형 콘크리트 공시체의 설계기준강도는 18MPa, 목표 슬럼프는 120±25mm, 그리고 목표 공기량은 4.5±1.5%로 콘크리트 배합설계를 하였으며 굵은 골재 최대치는 25mm이며 혼합 잔골재 두 종류를 사용하였으며 모든 콘크리트 시험체에는 굵은 골재와 잔골재를 각각 1059kg/m³와 724kg/m³로 동일하게 첨가하였다. 공시체는 통상적인 방법과 같이 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후 시험 전까지 20±3℃의 온도로 습윤 양생하였으며 전기화학적 부식촉진실험을 위해서 철근 상부를 노출시킨 원형 공시체와 통상적인 원형 공시체를 제작하였다.

원형 공시체의 압축시험은 KS F 2405에 따르며 Table 2에 나타난 콘크리트 공시체 3 종류에 대한 압축시험을 실시하였다. 원형 콘크리트공시체의 경우에도 전기화학적 부식촉진실험 및 XRF 시험 등을 모르타르 시험체의 경우와 동일한 방법으로 실시하였다. 다만 형광분석 시험에서는 표층부로부터 깊이 19mm 지점에서 시

Table 2. Mixture composition of concrete samples

Specimen	W/C(%)	Unit mass(kg/m ³)			
		Water	Cement	Activated carbon	TiO ₂
OC	64	195	305	0	0
CC20	73	223	305	61	15.25
CC40	93	284	305	122	15.25

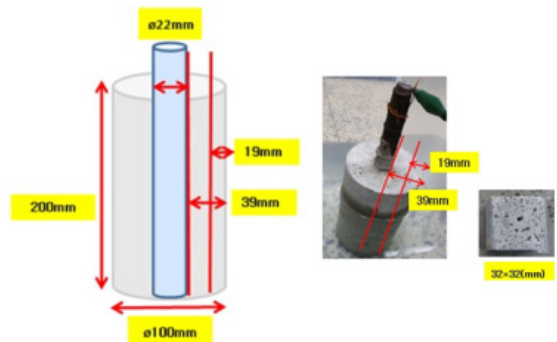


Fig. 4. The specimens of X ray fluorescence spectroscopic analysis

협체의 염소이온농도를 측정하였으며 이를 위해 Fig. 4와 같이 원형콘크리트로부터 32×32×10mm의 육면체 형태로 시험체를 절단해 내었다.

2.6 염소이온 확산계수 및 염해 내구성 비교

평형을 이루고 있는 전극에 전기화학 반응을 유도할 수 있는 충분히 큰 값의 전위를 스텝으로 인가하게 되면 전류의 흐름이 관찰된다. 이와 같은 시간 대 전류법을 이용한 용액 내 활성물질을 측정하는 경우 Cottrell 식에 의해 염소이온 확산계수를 구할 수 있다(D. Brynn Hibbert, 1993) 시험체의 부식촉진실험 종료 후 측정된 시간에 따른 전류값과 X선 형광분석시험에 의한 시험체의 염소이온농도를 측정된 결과를 이용하여 아래의 Cottrell 식에 대입하면 염소이온 확산계수를 구할 수 있다. 이렇게 도출된 염소이온 확산계수를 구함으로써 전도성 광촉매 콘크리트 시험체의 염해 내구성을 비교할 수 있다.

$$I(t) = \frac{nFAC_0\sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}} \tag{1}$$

여기서, D는 염소이온 확산계수(cm²/s), C₀는 염소이온농도(mol/cm³), A는 단면적(cm²), F는 패러데이 상수(96,485C/mol), n은 염소이온 원자가의 절대값(n=1), I(t)는 시간에 따른 전류값(A)을 나타낸다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 모르타르 압축강도시험 및 전기 전도도

Fig. 5에서 보면 모르타르에 활성탄소가 0%에서 40% 첨가량이 증가함에 따라 압축강도는 48MPa에서 31MPa로 감소하며, 반대로 전기 전도도는 증가하고 있다. 즉 활성탄소의 첨가량이 증가하게 되면 전기전도도가 증가하면서 광촉매 TiO₂의 활성도를 높여 염해내식성을 향상시키는 데에는 유리하게 작용하지만, 압축강도가 감소하는 부정적인 영향을 미치고 있다. 활성탄소가 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 것은, 활성탄소의 증가에 따라 시멘트 바인더의 첨가비율이 상대적으로 감소하게 되며 미세세공이 잘 발달한 다공질 활성탄소의 영향으로 비교적 공극직경이 큰 갭형 공기가 많이 생성되기 때문에 사료된다.

본 시험에 적용된 조건범위 내에서는 활성탄소가 40%로 가장 많이 첨가되어 가장 낮은 압축강도(31MPa)를 나타내었던 경우에

도 KS L 5201 물리성능 1종 규정에 따른 제한강도(22.5MPa)를 벗어나지는 않았으나, 실제 적용 시에는 시험체의 전기전도도와 내염해 부식성이 적합한 조건에서 활성탄소 첨가량을 최소화하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 자외선에 의한 광전류의 발생현상을 파악하기 위해서 Fig. 10에서 나타낸 방법으로 전기전도도를 측정된 결과로서, 광촉

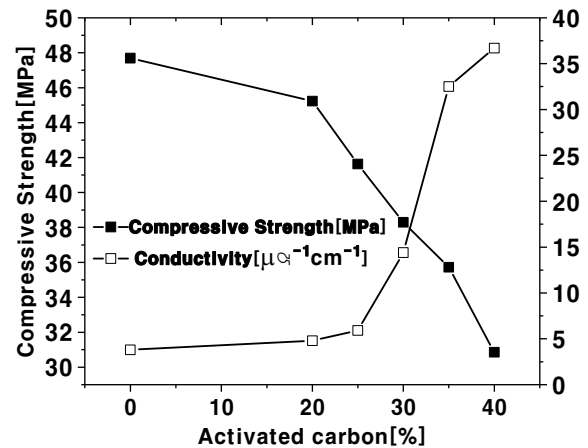


Fig. 5. Compressive strength and conductivity of mortar containing 5% TiO₂ for different content of activated carbon

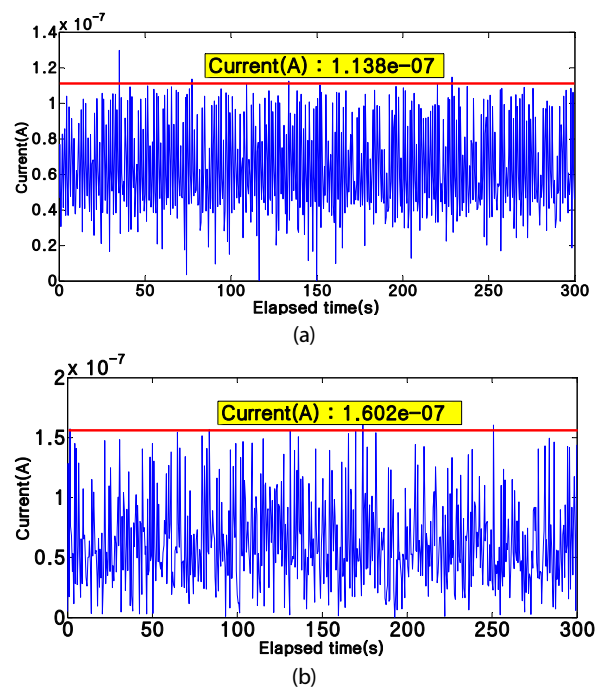


Fig. 6. Current versus elapsed time during supplying 0.1 V. for the mortar containing 40% activated carbon and 5% TiO₂ (a) none using and (b) by using UV lamp

매 5%, 활성탄소 40% 첨가한 모르타르 시험체에 일정전압 0.1V를 인가하였을 때 나타나는 시간에 따른 전류값 변화를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 자외선을 쬐지 않은 상태에서 측정된 결과로 최대 전류값이 약 0.11 μ A 이었으며, UV-A Type의 자외선을 쬐 시편의 경우(Fig. 6(b)) 인가시간이 지남에 따라 최대전류값이 약 0.16 μ A 로 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 자외선에 의해서 TiO₂ 광촉매가 전자와 정공으로 분해되어 발생하는 광전류 때문 (Kang et al, 2009)인 것으로 판단된다. 광전류의 발생량을 알아보기 위해 인가전압을 1V, 10V로 변화를 주며 측정을 한 결과 광전류의 발생량은 본 연구에서의 인가량(0.1V)과 거의 차이가 없이 일정하게 나타났다.

3.2 모르타르 전기화학적 부식촉진실험

Fig. 7은 전도성 광촉매 첨가 모르타르 시험체(CM40)와 일반 시험체(OM)를 가지고 3.5wt.% NaCl 수용액을 전해액으로 사용하여 6V 정전위 부식촉진실험을 실시한 결과를 나타낸다. 일반적으로 해수에서는 양극의 산화반응 즉 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ 와 음극의 환원 반응 즉 용존산소의 환원반응 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 에 의해서 부식이 발생하게 되는데 이때 양극의 산화반응에 미치는 인자는 Cl⁻ 이온이며 염소반응에 의해 산화피막의 파괴가 빠르게 일어날수록 양극의 활성화 반응은 촉진되어 부식전위가 낮고 부식속도가 증가하게 된다. 즉 Cl⁻이온이 양극의 철근에 빠른 속도로 많이 도달할수록 부식이 잘 발생하게 된다.

그림에서 보면 일반 모르타르 시험체(OM)는 12시간까지 전류값이 지속적으로 감소하다가 이후 약 90mA에서 정체되는 거동을 나타내고 있는데 이와 같이 전류밀도가 감소하는 것은 초기 환원

전극의 표면에서 환원속도의 감소에 따른 것으로 생각되며 이러한 환원속도의 감소현상은 전도성광촉매를 첨가한 모르타르(CM40)의 경우 그 속도가 훨씬 빨라 2시간 이후 최저에 도달하였고 이후 다시 급격히 증가하다가 15시간 이후 안정화에 이르는 것으로 나타난다. 이러한 현상은 CM40 시험체의 경우 활성용해반응에 의해 일시적으로 전류가 급격히 증가하나, 광촉매에 의한 염소이온의 내부확산이 억제됨으로써 다시 전류밀도가 감소하여 안정화되었기 때문이라고 생각된다. 두 종류의 시험편은 전류값이 안정화된 12시간(OM) 및 15시간(CM40) 이후 각각 모르타르 시험체에 균열이 발생하였으며 이때 내부 철근의 부식 생성물이 외부 전해질 용액으로 용출되어 나오는 현상이 발생하였다. Fig. 7에서 보면 CM40 시험체에서 균열의 발생도 지연되었고, 전류가 안정화된 이후 전류값이 약 60mA로 OM의 경우(90mA) 보다 뚜렷하게 낮아 염해에서의 부식속도가 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이는 광촉매에서 발생한 전자와 정공의 효과로 인하여 염소이온의 침투가 억제되어 나타난 결과로 판단된다.

3.3 모르타르 X선 형광분석시험

Table 3은 일반 모르타르 시험체(OM)와 광촉매 5%, 활성탄소 40% 첨가한 전도성 광촉매 모르타르 시험체(CM40)를 가지고 부식촉진실험 후 시험편에 화합물 형태로 존재하는 염소이온농도를 X선 형광분석시험(XRF)에 의해 측정된 결과를 나타내고 있다. 시험 전에는 전혀 검출되지 않았던 염소이온이 시험 후에는 OM 및 CM40 시험체에서 2.07% 및 1.69%를 각각 나타내고 있다. CM40 시험체의 염소이온농도가 상대적으로 낮게 나타난 것은 자외선에 의한 광전류의 영향으로 염소이온의 침투가 억제되어 나타난 결과

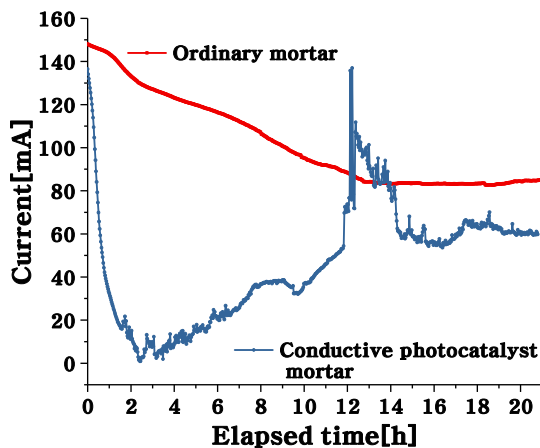


Fig. 7. Comparison of results in corrosion test for ordinary and conductive photocatalyst mortars

Table 3. The results of X ray fluorescence spectroscopic analysis with ordinary mortar(OM) and 5% TiO₂ - 40% activated carbon mortar(AM)

Analyte	Result(%)	
	OM	CM40
Ca	62.61	52.55
Si	19.46	25.64
Fe	5.11	7.15
Mg	2.32	4.29
Al	2.20	1.90
Na	2.20	1.84
Cl	2.07	1.69
K	1.55	1.61
S	0.77	1.31

로 볼 수 있다. 한편 도표에서 염소이온을 제외한 다른 성분의 농도가 다른 이유는 배합 시 투입된 모래와 시멘트의 화학성분의 차이로 발생한 것이다.

3.4 원형 콘크리트 압축강도시험 및 전기화학적 부식촉진실험

모르타르를 가지고 수행하였던 시험을 같은 조건으로 콘크리트 시험체에 적용해 보았다. Table 4에서는 일반 콘크리트 원형 공시체(OC)와 전도성 광촉매 콘크리트(CC)의 압축강도를 나타낸다. OC의 압축강도는 최대가 25.17MPa이며, 활성탄소가 첨가됨에 따라 모르타르 시험체의 경우와 같이 강도가 감소하며, 활성탄소가 40% 첨가된 CC40 시험체의 경우 평균 압축강도가 16.18MPa로 설계기준강도 18MPa를 만족하지 못하였다.

Fig. 8은 일반 콘크리트 공시체와 전도성 광촉매 콘크리트 공시체의 부식촉진실험 결과를 나타낸다. 그림에서 보면 CC40 시험체가 OC 시험체보다 훨씬 낮은 전류밀도값을 유지하고 있으며 이는 모르타르 시험체에서 행하였던 것과 같이 콘크리트에서도 광촉매의 효과가 충분히 작용한다는 것을 의미한다. 다만 콘크리트에서는 압축강도의 감소를 고려하여 전도성 활성탄소의 첨가량에 대한 최적의 조건을 찾는 것이 중요하며 이에 대해서는 향후 추가 연구

Table 4. Average compressive strength for various concretes

Types	Activated carbon(%)	Compressive strength(MPa)	Strain(mm)
OC	0%	25.17	3.02
CC20	20%	21.59	2.82
CC40	40%	16.18	1.18

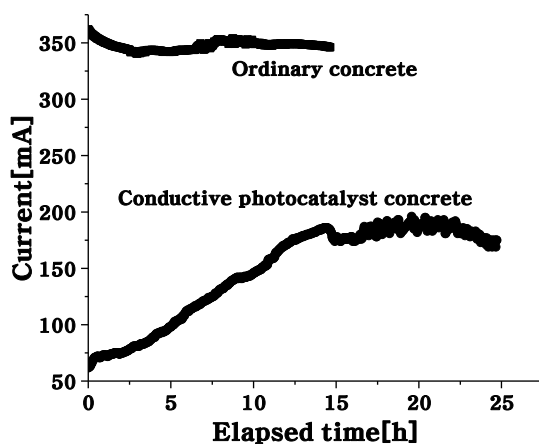


Fig. 8. Comparison of results of corrosion test for ordinary(OC) and conductive photocatalyst concretes(CC40)

Table 5. The results of X ray fluorescence spectroscopic analysis with ordinary concrete(OC) and 5% TiO₂ - 40% activated carbon concrete(CC40)

Analyte	Result(%)	
	OM	CC40
Si	39.76	49.44
Ca	24.38	24.56
Fe	11.34	3.68
Al	10.71	7.90
K	5.62	8.10
Na	3.99	2.42
Mg	1.55	0.62
Ti	1.36	1.83
S	0.51	0.68
Cl	0.24	0.19

가 필요하다고 생각된다.

3.5 원형 콘크리트 X선 형광분석시험

Table 5에서는 각 시험체의 부식촉진실험 후 표면부에서 19mm 깊이의 염소이온을 X선 형광분석시험(XRF)을 통해 분석한 결과를 나타내고 있다.

표에서 염소이온(Cl)농도를 보면 OM 시험체는 0.24%, CC40 시험체는 0.19%를 각각 나타내고 있다. 이것은 모르타르 시험체의 표면에서 염소이온 농도측정결과(Table 3)와 동일한 경향을 나타내는데, 즉 전도성 광촉매가 자외선에 의해 전자와 정공으로 분해되고 이것들이 콘크리트 내부로 염소이온이 침투하는 것을 억제하였기 때문에 CC40 시험체의 염소이온농도가 낮게 나타난 것이다.

3.6 염소이온 확산계수 및 염해 내구성 비교

일반 모르타르 시험체(OM)와 활성탄소 40% 포함 전도성 광촉매 모르타르 시험체(CC40)의 부식촉진실험 종료 후 실험결과와 Table 3에 나타난 XRF 시험 후 염소이온농도를 사용하여 염소이온 확산계수를 측정하였다. 또한 나타난 OC 콘크리트 공시체와 CC40 공시체의 부식촉진실험 종료 후 실험결과와 Table 5에 나타난 XRF 시험 후 염소이온농도를 사용하여 염소이온 확산계수를 측정하였다. Cottrell 식을 이용하여 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온(Cl⁻) 확산계수를 산출할 수 있으며 염소이온 확산계수 값이 클 경우 콘크리트 내부로 염소이온이 많이 침투하여 염해 내구성이 떨어지는 것으로 볼 수 있다. 모르타르 시험체의 부식촉진실험 종료 후 일반 시험편의 부식전류 0.0849A, 염소이온 전자수 1, 염

소이온농도 $5.83 \times 10^{-2} \text{ mol/cm}^3$, 패러데이 상수 96,485C/mol, 단면적 16.08 cm^2 , 전도성 광촉매 시험체의 부식전류 0.0598A, 염소이온 전자수 1, 염소이온농도 $4.76 \times 10^{-2} \text{ mol/cm}^3$, 패러데이 상수, 단면적을 동일하게 Cottrell 식에 대입하여 염소이온 확산계수를 구한다. XRF 시험결과 염소이온(Cl⁻)의 농도는 %농도이므로 염소이온의 원자량으로 나누어 몰농도로 변환하였으며 Cottrell 식에 적용하는 면적은 산화전극의 단면적으로 XRF 시험편의 32mm와 16mm 철근의 둘레 길이와의 곱으로 나타내었다. 식에 적용하는 농도는 산화전극에 인접한 모르타르 내부의 염소이온 농도를 대입하게 되는데 40mm 모르타르 시험편 내부의 16mm 철근을 제외하면 12mm 깊이의 모르타르 내부 염소이온을 측정하는 것이 바람직하나 모르타르 표면부의 염소이온농도를 측정하는 것으로 대신하였다. 각 시험체의 염소이온 확산계수를 비교한 결과 일반 모르타르 시험편의 염소이온 확산계수가 1.35배 크게 측정되었다. 따라서 전도성 모르타르 시험편의 내구성이 우수하다고 볼 수 있다.

원형 콘크리트 공시체의 부식시험 종료 후 일반 시험편의 부식전류 0.345A, 염소이온 전자수 1, 염소이온농도 $6.77 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3$, 패러데이 상수 96,485C/mol 단면적 22.11 cm^2 , 전도성 광촉매 시험체의 부식전류 0.169A, 염소이온 전자수 1, 염소이온농도 $5.36 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3$, 패러데이 상수, 단면적을 동일하게 Cottrell 식에 대입하여 염소이온 확산계수를 구하였다. XRF 시험결과 염소이온(Cl⁻)의 %농도를 역시 염소이온의 원자량으로 나누어 몰농도로 변환하였으며 Cottrell 식에 적용하는 농도는 39mm 깊이의 콘크리트 내부 염소이온을 측정하는 것이 바람직하나 모르타르의 경우와 마찬가지로 콘크리트 표면에서 19mm 깊이의 염소이온농도를 측정하는 것으로 대신하였다. 각 시험체의 염소이온 확산계수를 비교한 결과 일반 콘크리트 공시체의 염소이온 확산계수가 1.55배 크게 측정되었다.

이와 같이 광촉매 콘크리트의 경우 강도가 현저하게 낮음에도 불구하고 확산계수가 작다는 것은 콘크리트내부의 광촉매가 내염해 등 내구성 향상에 분명히 효과가 있는 것을 의미한다. 대부분의 경우 강도가 낮으면 콘크리트내 공극률이 증가함으로써 확산계수도 크게 증가하게 되어 염화물 및 이산화탄소 등의 침투에 취약하게 되지만, 본 연구에서는 역으로 내염해성을 향상시키는 결과로 나타났기 때문이다.

4. 결론

전도성 광촉매(TiO₂)를 이용한 콘크리트 철근의 염해 내구성 향상에 관한 연구를 통해 도출된 연구결과는 다음과 같이 요약될 수

있다.

1. 모르타르에 첨가되는 광촉매의 효과를 증대시키기 위해서는 전도성 활성탄소를 첨가하는 것이 필요하며, 활성탄소의 함량이 시멘트함량의 30%일 때 모르타르 및 콘크리트의 전기전도도가 뚜렷이 증가하며, 40%일 때 광촉매의 작용을 촉진시킬 수 있을 만큼 충분한 값을 가지는데, 반면에 압축강도는 활성탄소의 함량이 증가할수록 감소한다. 따라서 광촉매효과도 나타내고 압축강도도 적정선을 유지하기 위해서는 활성탄소를 30~40%의 범위에서 첨가하는 것이 적합하다.
2. 부식촉진시험 결과 전도성 광촉매는 모르타르 및 콘크리트의 내염해부식성을 향상시키는데 뚜렷한 효과가 있으며, 이것은 광촉매의 분해반응으로 인하여 모르타르 또는 콘크리트 내로 염소이온이 확산되는 것이 억제되기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년) 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Antoine, P., Didier, R., Jean, V. (2001). Influence of pH and chloride anion on the photocatalytic degradation of organic compounds, *Journal of Applied Catalysis B, Environmental* **35**, 117–124.
- Cheong, H.M., Ahn, T.S., Lee, K.M. (2004). Improved technologies of durability of concrete bridge for chloride attack, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **16(2)**, 31–37 [In Korean].
- Cho, S.H., Han, N.H., Chung, L. (2002). A Study on non-destructive method to measure the corrosion level of reinforcing bar, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **18(8)**, 19–26 [In Korean].
- Hong, S.J., Lee, S.W. (2013). An experimental study for the construction of photocatalytic method concrete road structure, *Journal of Highway Engineering*, **15(6)**, 1–9 [In Korean].
- Kang, S.H. (1998). Electrically conductive concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **10(6)**, 34–40 [In Korean].
- Kang, T.G., Jang, Y.H., Park, K.C. (2009). Photoelectrical conductivity and photodegradation properties of TiO₂ and

- Ag sputtered TiO₂ plasma spraying coatings, Journal of Korea Electrotechnology Research Institute, **27(2)**, 156–161 [In Korean].
- Kim, K.H., Cha, S.W. (2009). Chloride diffusion coefficient model considering the initiation time of exposure to chloride environment, Journal of the Korea Concrete Institute, **21(3)**, 377–386 [In Korean].
- Lee, H.H., Kwon, S.J. (2013). Evaluation of chloride penetration in concrete with ground granulated blast furnace slag considering fineness and replacement ratio, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **1(1)**, 26–34 [In Korean].
- Michael, V., Allen, J. (1991). Direct determination of diffusion coefficients by chronoamperometry at microdisk electrodes, Journal of Electroanal. Chem., **308**, 27–38.
- Oh, B.H., Jang, S.Y., Shin, Y.S. (1999). Corrosion characteristics of steel reinforcements induced by internal chlorides in concrete and determination of chloride thresholds, Journal of the Korea Concrete Institute, **11(3)**, 193–203 [In Korean].
- So, H.S., Choi, S.H., Seo, C.S. (2014). Influence of temperature on chloride ion diffusion of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(1)**, 71–78 [In Korean].
- So, H.S., Oh, J.S., Park, G.B. (2011). Permeability and Transport Mechanisms of Media into Concrete, Report No.37, Kistec, 53–77.
- Yi, S.Y., Lee, J.B. (2000). Application of electrochemical corrosion measurement techniques for rebars in concrete, Journal of Corros. Sci. Soc. of Korea, **29(6)**, 313–324 [In Korean].

전도성 광촉매를 이용한 콘크리트 철근의 염해 내구성 향상에 관한 연구

해양환경에서 콘크리트의 내구성과 철근의 부식은 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온에 의해 악화된다. 본 연구에서는 염소이온에 의해 야기되는 콘크리트의 염해부식에 대한 저항성을 향상시키기 위해 전도성 광촉매를 사용하였다. 시험체로는 전도성 활성탄소와 광촉매(TiO₂)분말을 혼합하여 모르타르와 콘크리트를 제작하였다. 전도성 탄소의 함량이 증가할수록 압축강도는 감소하였다. 전도성 광촉매가 첨가된 시험체가 일반 시험체보다 월등히 우수한 내염해부식성을 나타내었으며 이것은 XRF 시험에 의한 분석 결과 모르타르 또는 콘크리트 내부로의 염소이온 확산이 광촉매 작용에 의해 억제되었기 때문인 것으로 판단되었다. 모르타르 및 콘크리트 내부로의 염소이온 확산계수를 구함으로써 광촉매에 의한 염소이온 확산에 대한 억제반응이 분석되었다.