

일인산 암모늄 수용액 분사 및 침지처리가 순환잔골재의 물성 변화에 미치는 영향

Effect of Spray and Immersion Treatment of Mono-Ammonium Phosphate Solution on Properties of Recycled Fine Aggregate

권성준¹ · 김승호¹ · 박찬우¹ · 정철우^{2*}Seong-Jun Kwon¹ · Seong-Ho Kim¹ · Chan-Woo Park¹ · Chul-Woo Chung^{2*}

(Received September 9, 2024 / Revised September 11, 2024 / Accepted September 11, 2024)

Due to the depletion of natural aggregate resources, the use of recycled aggregates became an urgent issue. Microcracks generated during production of recycled aggregate and cement paste attached to the surface of aggregate have been the biggest obstacles to promote the use of recycled aggregate. To alleviate such problem, this study attempted the spray and immersion treatment of recycled fine aggregate using mono-ammonium phosphate solution, which is known to be effective for reducing the pH of recycled aggregate. The changes in physical properties before and after treatment were observed, and the compressive strength of mortar specimen was evaluated. According to the experimental results, the absorption capacity of the recycled fine aggregate increased with reduction in pH after mono-ammonium phosphate treatment. Calcium hydroxide and ettringite was removed, and skeletal density of recycled fine aggregate increased due to the formation of hydroxyapatite. Despite the increase in absorption capacity, the compressive strength of the mortar increased and it seems to be associated with the increase in adhesion strength at the interface between cement paste and recycled fine aggregate. When the concentration of ammonium monophosphate aqueous solution was excessive (immersion: 15% and 20%, spraying 20%), the compressive strength of the mortar decreased, which seemed to be related to the increase in the absorption capacity caused by the excessive dissolution of the hydration products such as portlandite and ettringite.

키워드 : 일인산 암모늄, 순환잔골재, 흡수율, 수산화인회석, 압축강도**Keywords** : Mono-ammonium phosphate, Recycled fine aggregate, Absorption capacity, Hydroxyapatite, Compressive strength

1. 서론

최근 천연골재의 고갈로 인한 순환골재의 사용이 증가함에 따라, 순환골재 사용이 건축법상 의무화가 되고 있으며(Sim et al. 2006; Kim 2019), 순환골재가 기존 천연골재보다 낮은 품질을 보유했으므로, 이를 보완하기 위한 많은 연구와 실험이 진행되었다(Ju et al. 2019; Knaack and Kurama 2014; Tahar et al. 2017; Xie and Ozbakkaloglu 2016; McNeil and Kang 2013; Tam et al. 2005). 순환골재의 품질이 천연골재보다 낮은 가장 주요한 이유는 순환골재를 생산하는 과정에서 물리적 파쇄과정을 거침에 따라 발생하는 미세균열 및 처리 과정에서 떨어지지 않고 골재 표면에

붙어 있는 수화된 시멘트 페이스트 때문으로 알려져 있다(Tam et al. 2005; Tam et al. 2006; Tam and Tam 2007). 순환골재 표면의 부착된 시멘트 페이스트 성분은 순환골재의 pH를 11이상으로 유지시키는 직접적인 원인이 되므로, 토양충진재로 활용하기 어려우며(Song et al. 2011), 모르타르 및 콘크리트용 골재로 사용하는 경우에도 골재 표면에 부착력을 감소시켜 강도 발현에 방해요소로 작용한다(Tam et al. 2005; Kim et al. 2020; Kim et al 2023; Heo et al. 2021).

순환골재 표면에 부착되어 있는 시멘트 페이스트 성분은 (구) 콘크리트 제조 당시 발생한 골재-시멘트 페이스트간 계면전이영역 (Interfacial transition zone; ITZ)에 해당되기 때문에, (구)콘크

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

¹국립부경대학교 건축공학과 학사 (Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea)²국립부경대학교 건축·소방공학부 교수 (Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea)

리트보다 상대적으로 높은 공극률 및 흡수율을 가진다. 또한 순환골재 제조 과정에서 발생하는 미세 균열의 대부분이 순환골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트 영역에 존재하기 때문에, 콘크리트 강도 발현의 중요한 억제 요소로서 작용하게 된다. 순환골재 표면에 부착되어 있는 시멘트 페이스트를 제거하기 위해서는 순환골재 표면을 산처리하는 방법이(Jeong and Lee 2008) 가장 일반적이며, 순환골재 분리 공정에 약 600 °C 수준으로 가열 분쇄공정을 도입하여, 골재-페이스트 계면의 탈락을 용이하게 하는 방법(An et al. 2007)도 활용되었다. 그러나 상기 제시된 처리 방법은 다량의 폐기물 발생 및 높은 에너지 소모 등의 단점을 가지고 있어, 고효율의 새로운 순환골재 처리 방법의 개발이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 이러한 목적을 달성하기 위해 일인산 암모늄을 활용해 보고자 하였다. 일인산 암모늄은 인에 암모늄을 반응시켜 생성된 화합물로, 공기중에서는 안정적이며, 방화재료, 비료용 원료, 식품첨가물(발효증진, 효모증식), 합성 팽창제 원료, 토지매양 등에 사용되고 있다. 선행 연구를 통해 인산암모늄계의 재료가 순환골재의 pH를 매우 효율적으로 감소시킬 수 있는 것이 확인되었으나(Choi and Lee 2015), 기존 문헌에서는 순환골재의 pH를 저감하기 위한 연구에 집중되어져 있고, 인산암모늄 처리 이후의 순환골재의 품질 변화에 대한 상세한 내용은 상대적으로 빈약하게 언급되어져 있는 상황이다.

일인산 암모늄이 순환골재 pH 저감에 매우 효율적이라는 사실은 순환골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트 성분의 제거에도 충분한 가능성을 보인다는 것을 의미한다. 또한 인산염의 존재로 인해, 시멘트 페이스트 성분에서 용출된 칼슘과 반응하여, 순환골재 표면에 수산화인회석(Hydroxyapatite, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$) 형성을 유도하여, 시멘트 페이스트에 존재하는 균열 및 공극을 메울 수 있는 가능성도 존재한다. 따라서 본 연구에서는 일인산 암모늄을 이용한 화학적 처리 방식의 적용을 통해 순환골재의 물성 변화를 관찰하고, 이러한 변화가 모르타르의 강도 형성에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 한다. 순환골재보다 순환잔골재 표면에 미세 시멘트 페이스트 입자가 많이 존재하기 때문에, 순환골재에 비해 상대적으로 품질이 떨어지는 순환잔골재를 활용하여 효과를 검증해 보고자 하였다.

이를 위해 먼저 순환잔골재를 다양한 농도의 일인산 암모늄 수용액에 침지 혹은 수용액을 순환잔골재에 분사시켜, 순환잔골재의 물성 변화를 관찰하였다. 침지 및 분사과정의 평가는 순환잔골재의 흡수율, 진밀도, 및 미세구조 변화를 통해 이루어졌고, 수산화인회석의 생성 여부는 수산화칼슘 수용액과 일인산 암모늄 수용액의 반응 침전 물질의 광물상 분석을 통해 검증하였다. 이후 시멘트

모르타르 시편을 제작하고, 역학적 성능을 평가하여, 최종적으로 일인산 암모늄 처리 방법의 효과를 판단하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료

순환잔골재 혼입 시멘트 모르타르의 제조에 활용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 화학적 조성은 Table 1과 같다. 일인산 암모늄은 삼전사의 시약을($NH_4H_2PO_4$, ammonium phosphate monobasic, 98 % purity, Samchun company, Republic of Korea) 사용하였으며, 순환잔골재는 순환골재 생산 인증을 받은 국내 H의 제품으로, 체적밀도(Bulk gravity)는 2.25 g/cm^3 , 흡수율은 5.75 %로 측정되었다.

Table 1. Chemical compositions of type I ordinary Portland cement (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
63.42	19.48	4.69	4.08	3.11	3.04
K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO	-
1.32	0.38	0.20	0.13	0.11	-

2.2 일인산 암모늄 처리

일인산 암모늄 수용액은 상기 언급된 일인산 암모늄 시약 및 초순수를(deionized water: $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$) 사용하여 농도 5 %, 10 %, 15 %, 및 20 %에 맞게 제조되었다. 순환잔골재를 각 농도의 일인산 암모늄 수용액에 20분간 분사 혹은 침지시켜 반응시키고, 분사 및 침지처리가 종료된 순환잔골재의 표면을 깨끗한 종이재질의 천으로 가볍게 닦아낸 후, 실온(21 °C)에 24시간 이상 자연 건조를 진행하여 물성 변화를 측정하였다.

2.3 순환잔골재의 물성 분석

일인산 암모늄을 이용한 순환잔골재 처리 종료 후, 순환잔골재의 흡수율, 진밀도 및 미세구조 변화를 관찰하여 순환잔골재의 물성변화를 평가하였다. 순환잔골재의 흡수율은 KS F 2504 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험방법에 따라 측정하였으며, 진밀도는 절건 상태의 순환잔골재 중량 측정 후, 이를 헬륨기체를 이용한 Pycnometer(AccuPyc II 1345, Micromeritics, USA)에 넣어 측정하였다. 또한 분사 및 침지 이후 순환잔골재의 표면의 미세구조 분석을 위해, 모르타르 시편의 표면을 백금으로 코팅한 후 전계

방사형 주사 전자현미경 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope; JEOL, JEM-2100F)을 사용하여 관찰하였다.

이와 별도로 일인산 암모늄 처리 이후의 순환잔골재 pH 분석을 위해, 토양오염공정시험 기준에 의한 pH 시험방법(Ministry of Environment 2008)을 인용하여 실험을 진행하였다. 실험의 진행 과정은 분쇄한 시료 5g과 초순수 25ml 용액(시료 중량:초순수 체적 = 1:5)으로 혼합하여 시료의 용출을 유도하였고, pH 미터(Orion Star A211, Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하여 매 2일, 총 10일간 측정하였다.

마지막으로 시멘트 페이스트와 일인산 암모늄 수용액과의 반응을 통한 수산화인회석 생성여부를 확인하기 위해, X선 회절분석(X-ray diffraction; Ultima IV, Rigaku)을 진행하였다. 순환잔골재와 일인산 암모늄과의 직접 반응을 통한 수산화인회석 생성 여부의 검증은 순환잔골재에 존재하는 실리카질로 인한 회석 효과로 정밀 분석이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는, 수산화칼슘 수용액을 5%, 10% 및 20% 농도의 일인산 암모늄 수용액과 반응시킨 후 자연건조된 분말을 대상으로 광물상 분석을 실시하였다.

2.4 모르타르 배합

일인산 암모늄 분사 및 침지처리가 종료된 순환잔골재를 활용한 모르타르 시편의 배합은 ASTM C 305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of

Table 2. Mix proportions of mortar made of recycled fine aggregate (g)

W/C	Water	Cement	Fine aggregate	
			Recycled	Standard
0.45	324	720	2160	2160

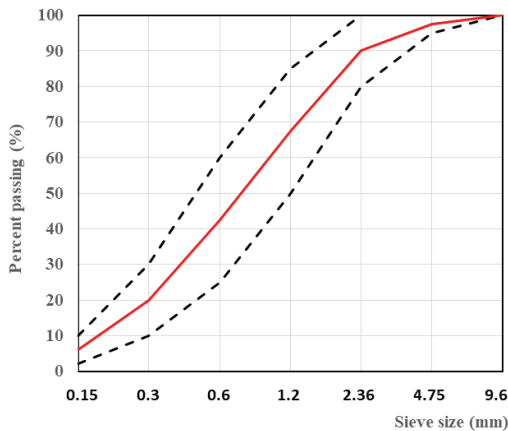


Fig. 1. Gradation of fine aggregate used in this work

Plastic Consistency에 의해 진행되었다. Table 2와 같이 모르타르 시편의 물시멘트비는 0.45, 시멘트:잔골재의 중량비는 1:3으로 고정하였으며, 모든 잔골재의 입도는 Fig. 1과 같이 표준입도곡선의 상한선 및 하한선의 중간값에 위치하도록 조절하여 사용하였다.

배합 시 잔골재의 함수상태는 미리 표건상태로 조정된 후 사용하였고, 별도의 공기연행제 및 고성능 감수제 등의 화학혼화제는 사용하지 않았다.

2.5 압축강도

강도 측정용 모르타르 시험체는 ASTM C 109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)에 따라 50 mm × 50 mm × 50 mm의 큐브 시험체로 제작하였다. 배합이 종료된 후, 큐브형 몰드의 윗면을 플라스틱 시트로 덮어 수분의 증발을 억제하여, 실험실 환경(21±2 °C)에 하루동안 양생한 후, 탈형하여 동일 온도조건의 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 27일간의 수증양생을 진행하였다. 압축강도 측정은 재령 28일에 전동식 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 흡수율

일인산 암모늄 농도별 순환잔골재 흡수율의 변화는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 따르면, 일인산 암모늄 분사 및 침지처리가 순환잔골재의 흡수율을 증가시키는 것으로 나타났다. 일인산 암모

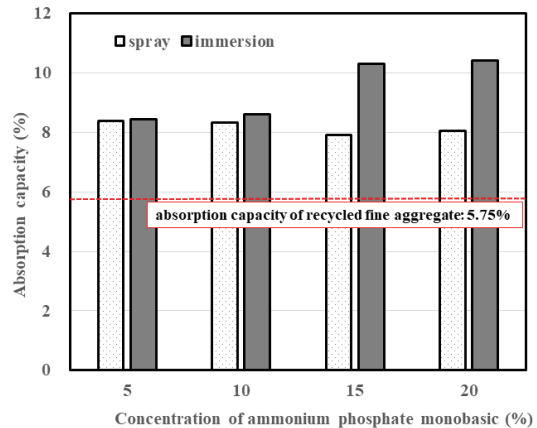


Fig. 2. Absorption capacity of recycled fine aggregate after immersion and spraying treatment of mono-ammonium phosphate solution

높은 수용액의 농도 변화에 따른 순환잔골재의 흡수율의 경우, 일인산 암모늄 수용액 농도 5% 및 10%까지는 분사 및 침지처리에서의 흡수율 차이가 거의 관찰되지 않았으나, 일인산 암모늄 수용액 농도 15% 부터는 침지처리를 진행하는 것이 흡수율의 상승에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 일인산 암모늄의 처리가 순환잔골재에 존재하는 시멘트 페이스트로 성분의 용출을 가속화시켜, 내부의 미세공극을 비워내었기 때문으로 판단된다.

3.2 진밀도

일인산 암모늄 농도별 순환잔골재 진밀도의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 따르면, 일인산 암모늄 수용액의 농도 변화에 따른 순환잔골재의 진밀도 변화가 분사 및 침지처리에서 각기 다르게 나타나는 것이 확인된다. 분사처리의 경우 진밀도의 증가 폭은 침지처리에 비해 상대적으로 낮았으며, 15% 농도까지 점차 증가하다가 20%에서 다시 감소하는 추세를 보였다. 일인산 암모늄 수용액 농도 5% 및 20%에서의 진밀도는 일반 순환잔골재 진밀도보다 낮게 나타났다.

반면 일인산 암모늄 침지처리의 경우 일인산 암모늄 수용액 농도 10%에서 최대 진밀도를 나타내었고, 이후 농도가 증가하면서 점차적으로 진밀도가 감소하는 추세를 보였다. 분사처리와는 달리, 침지처리의 경우 일인산 암모늄의 농도변화와 관계없이 진밀도가 일반 순환잔골재의 진밀도인 2.51 g/cm³ 보다 높게 관찰되었다. 이는 침지처리가 일인산 암모늄의 진밀도 변화에 미치는 영향력이 분사처리에 비해 더욱 높음을 의미한다.

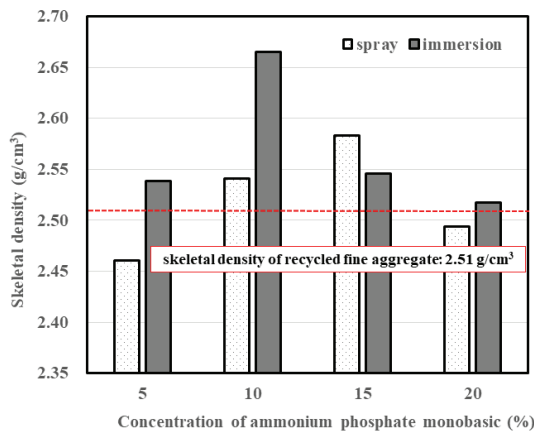


Fig. 3. Skeletal density of recycled fine aggregate after immersion and spraying treatment of mono-ammonium phosphate solution

3.3 미세구조

순환잔골재의 미세구조 변화는 일인산 암모늄 20% 수용액을 대상으로 관찰하였다. Fig. 4의 (a) 및 (b)의 일인산 암모늄 처리를 거치지 않은 순환잔골재의 FE-SEM 사진에서는 순환잔골재에 부착된 시멘트 페이스트 내부의 공극 및 미세균열에서(Fig. 4(b)의 10kx 사진 참조) 상당량의 에트리נג가이트 결정이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 시멘트페이스트와 골재 사이의 계면전이영역에서 발생하는 전형적인 특성 중 하나이다(Mehta and Monteiro 1987).

순환잔골재에 일인산 암모늄 수용액을 분사처리한 후 관찰한 Fig. 4(c) 및 (d)에서도 잔골재의 미세공극 사이에 위치한 에트리נג가이트 결정이 여전히 존재함을 확인하였다. 반면 침지처리를 진행

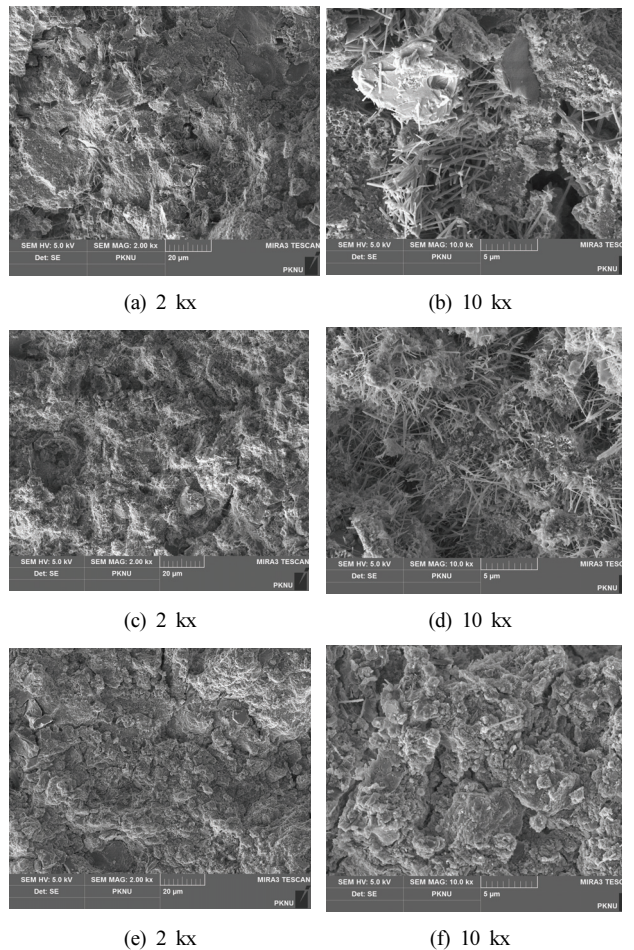


Fig. 4. FE-SEM images of recycled fine aggregate after immersion and spraying treatment of mono-ammonium phosphate solution: (a) and (b) for as received recycled fine aggregate, (c) and (d) after spraying treatment, and (e) and (f) after immersion treatment.

한 후 관찰한 Fig. 4(e) 및 (f)의 사진에서는 위의 경우와 달리 에트리팅이트 결정상이 거의 존재하지 않으며, 상대적으로 깨끗한 형태로 실리카질의 골재 및 C-S-H가 확인된다. 이는 침지처리가 순환잔골재 공극 및 균열에 존재하는 수산화칼슘 및 에트리팅이트를 효과적으로 제거할 수 있음을 의미한다.

3.4 pH 변화

일인산 암모늄 수용액과의 반응 후 용출수의 pH 값의 변화는 매 2일, 총 10일동안 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

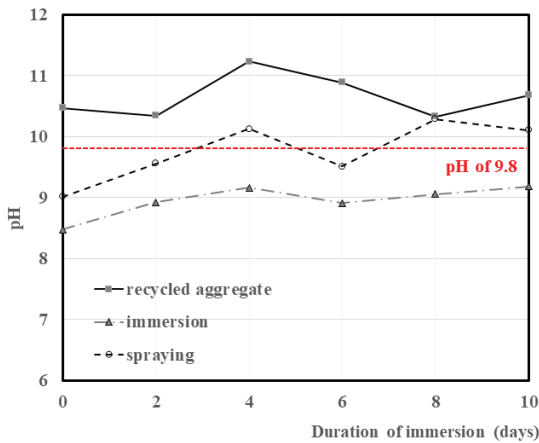


Fig. 5. pH of leachate from recycled fine aggregate after immersion and spraying treatment of mono-ammonium phosphate solution

Fig. 5에 따르면, 일인산 암모늄 처리가 진행되지 않은 순환잔골재는 평균 10.66의 pH값을 보였으며, 일인산 암모늄 분사를 진행하는 경우, 평균 9.77의 pH값을 보여 토양오염기준 pH값인 9.8을 겨우 만족하는 수준으로 나타났다. 반면 일인산 암모늄 침지처리를 진행시킨 경우, pH값 평균은 8.96으로 나타나, 기존 문헌에서의 결과와 마찬가지로(Choi and Lee 2015), 일인산 암모늄 수용액 침지처리가 순환잔골재의 pH 저감에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다. 이는 위에서 언급된 것과 마찬가지로, 침지처리가 가장 높은 반응효과를 가져옴을 의미한다.

3.5 XRD

위에서 언급된 결과에 따르면, 일인산 암모늄 수용액을 활용하여 순환잔골재를 처리하면, 순환잔골재의 흡수율은 증가하고, 진밀도 또한 증가하며, 미세구조의 변화를 발생시키는 것으로 확인되었다. 분사처리에 비해 침지처리에 의한 변화가 더욱 크게 발생

하였는데, 이는 분사처리에 비해 침지처리가 수용액이 순환잔골재 내부로 고르게 침투할 수 있도록 하였기 때문으로 파악된다.

침지 처리 후 발생한 흡수율의 증가, pH의 감소, 및 ettringite의 소멸 등은 일인산 암모늄이 순환잔골재에 부착된 시멘트 페이스트에 존재하는 수화생성물을 효과적으로 용출시킬 수 있음을 의미한다. 그리고 진밀도의 증가는 일반적인 시멘트 페이스트 및 잔골재에 존재하는 광물상들의 밀도보다 [portlandite: 2.24 g/cm³, quartz: 2.65 g/cm³, ettringite:~1.75 g/cm³, monosulfoaluminate: 1.95 g/cm³, C-S-H: 2.3~2.6 g/cm³ (Mindess et al. 2003)] 높은 진밀도를 가지는 별도의 물질이 만들어졌기 때문이며, 이는 일인산 암모늄 내에 존재하고 있던 인산염과 시멘트 성분에서 존재하는 칼슘이 상호 반응하여 생성된 수산화인회석 [밀도: 3.16 g/cm³ (Wu and Bose 2005)] 때문으로 사료된다.

수산화인회석의 생성 여부를 검증하기 위해 5%, 10% 및 20%의 일인산 암모늄 수용액과 수산화칼슘 수용액을 반응시킨 후, 자연 건조된 분말 시료를 대상으로 X선 회절분석을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 따르면, 5% 일인산 암모늄 수용액과 수산화칼슘 수용액을 반응시킨 경우, 건조된 분말에서 portlandite가 관찰되어, 현탁액에 존재하던 모든 수산화칼슘이 반응하지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한 일부 수산화칼슘이 자연 건조 과정에서 탄산화되어 calcite 결정이 석출된 것도 확인된다. 그러나 일인산 암모늄 수용액의 농도가 10% 이상으로 증가하게 되면, 모든 수산화칼슘은 수산화인회석 생성반응에 참가한 것으로 판단되며, 그 결과로 portlandite 및 이의 탄산화로 인해 생성되었던 calcite 결정상은 확인되지 않았다.

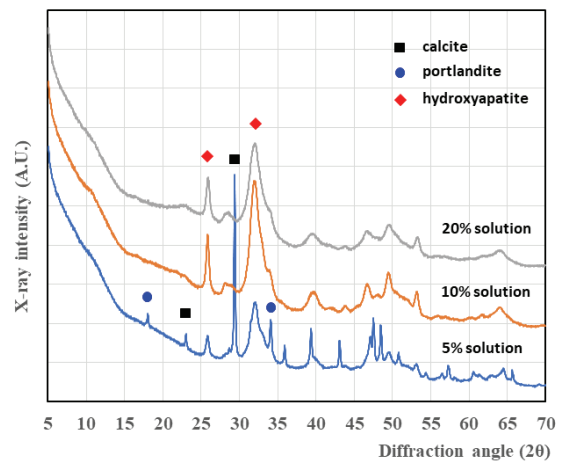


Fig. 6 XRD patterns of precipitated powders after reaction between calcium hydroxide and mono-ammonium phosphate solution

수산화인회석의 생성이 10 % 농도에서 활성화 된 것으로 판단할 수 있는데, 이는 10 % 농도를 사용하여 침지시킨 경우, 흡수율 및 진밀도가 크게 증가한 것과 일치한다. 10 % 보다 높은 농도의 일인산 암모늄으로 순환잔골재를 반응시키는 경우 흡수율 및 진밀도 상승이 10 %보다 낮은 이유는 수용액의 높은 점도로 인한 침투력 저하 혹은 시멘트 페이스트 표면 접촉시 다량의 반응이 발생하여, 용출을 오히려 억제한 경우(dissolution barrier의 역할 발생)로 추정된다.

3.6 압축강도

일인산 암모늄 처리된 순환잔골재로 제조된 w/c 0.45 모르타르 시편의 28일 재령 압축강도는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 따르면, 일반 순환잔골재로 제조된 모르타르의 압축강도는 16.05 MPa로 나타났으며, 일인산 암모늄으로 침지 처리하게 되는 경우 압축강도가 최대 43 % (23.02 MPa) 수준까지 상승하는 것으로 확인되었다. 최대 강도는 10 % 농도의 일인산 암모늄 수용액에 침지 처리한 경우에 발생하였으며, 침지처리를 실시하는 경우 10 % 이상의 농도로 처리하게 되면 오히려 강도가 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다.

반면 분사처리의 경우 강도의 최대 증가 폭은 침지처리에 비해 낮은 29 % (20.71 MPa) 수준이었으나, 15 % 수용액 농도까지는 강도가 상승하는 경향을 보였다. 또한 10 % 수용액 농도를 제외하고는 분사처리가 침지처리에 비해 압축강도 측면에서 유리한 것으로 확인되었다.

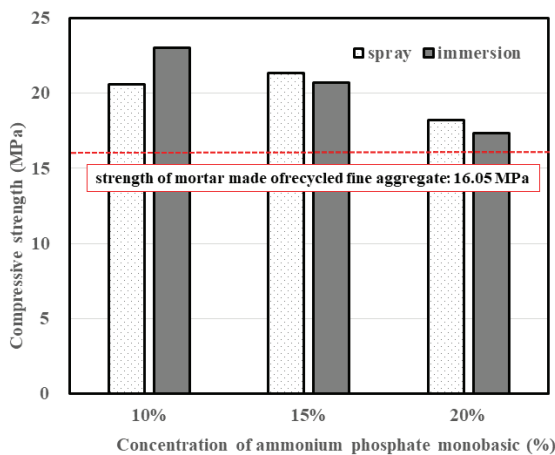


Fig. 7. The 28 day compressive strengths of mortar specimens made of recycled aggregate after immersion and spraying treatment of mono-ammonium phosphate solution

4. 고찰

본 연구에서 순환잔골재를 일인산 암모늄 5 %, 10 %, 15 %, 20 % 수용액으로 침지 및 분사처리한 경우, 일인산 암모늄 처리가 순환잔골재의 흡수율 및 진밀도를 상승시키며, pH를 저감시키는 것을 확인하였다. FE-SEM의 미세구조 분석 결과를 함께 고려하면, 흡수율의 증가는 일인산 암모늄에 의한 수산화칼슘 및 에트링가이트의 용출의 결과로 추정되며, 이로 인해 순환잔골재 용출수의 pH 또한 감소한 것으로 판단된다. 그리고 진밀도의 증가는 칼슘의 용해 후 인산염과 반응하여 생성된 수산화인회석(XRD 결과 참조)과 관련이 있는 것으로 확인되었다.

일인산 암모늄으로 분사 및 침지처리한 순환잔골재를 혼입한 모르타르 시편의 압축강도는 흡수율이 일반 순환잔골재보다 높음에도 불구하고, 일반 순환잔골재로 제조된 모르타르 시편의 압축강도 보다 높게 나타났다. 통상 순환골재 흡수율의 증가가 순환골재 생산과정에서 발생한 미세균열 및 골재 표면에 부착된 (구)계면 전이영역에 해당되는 시멘트 페이스트에 기인하기 때문에, 압축강도의 저하로 이어진다는 점을 감안하면, 이는 이외의 결과에 해당된다. 따라서 본 연구에서의 결과는 일인산 암모늄에 의한 처리 공정이 흡수율 상승에 의한 부정적 영향을 상쇄시킬 수준의 긍정적인 작용을 한 것으로 해석하는 것이 적절하다.

이러한 긍정적 작용은 1) 일인산 암모늄 처리에 의한 수산화칼슘과 에트링가이트의 제거 및 2) 분사 및 침지처리 과정에서 순환골재의 제조과정에서 부착된 미분말이 제거되어(세척 효과와 유사), (구)계면전이영역에서의 시멘트 페이스트 부착강도가 상승하였기 때문으로 판단된다. 그러나 일인산 암모늄 침지 15 % 및 20 % 농도를 사용하는 경우에는, 에트링가이트 등의 수화생성물을 과도한 수준으로 용출시켜 흡수율을 더욱 크게 상승시켰기 때문에, 강도의 감소를 동반하게 된 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 일인산 암모늄 수용액을 이용하여 분사 및 침지 처리한 순환잔골재의 물성 변화를 확인하고, 이를 혼입한 모르타르의 역학적 성능을 파악하여, 순환잔골재 재활용 확산에 기여할 수 있는 기초 연구 결과를 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일인산 암모늄 수용액으로 20분간 분사 및 침지처리를 하는 경우 순환잔골재의 흡수율은 증가하고 pH는 감소하는 것

로 나타났다.

2. 순환잔골재의 진밀도 상승은 순환잔골재로부터 용출된 칼슘과 일인산 암모늄 수용액의 인산염이 반응하여 생성된 수산화인회석에 기인한다.
3. 일인산 암모늄 수용액 분사 및 침지처리를 진행한 순환잔골재 모르타르의 압축강도는 처리하지 않은 일반 순환잔골재 모르타르의 압축강도보다 높게 나타났다. 이는 처리과정에서 용출된 수산화칼슘 및 에트링가이트의 제거와 순환잔골재 표면에 존재하는 미세분말의 세척이 동시에 발생하여 일어난 현상으로 판단된다.
4. 일인산 암모늄 수용액의 농도가 과다한 경우(침지: 15 % 이상, 분사 20 % 이상), 모르타르의 압축강도가 저하하는 현상을 보였다. 이는 과도한 용출에 의해 증가한 흡수율과 상관관계가 있는 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

- An, J.H., Lee, S.Y., Yoo, Y.H., Han, K.S., Han, K.C., Yoo, G.S., Lee, H.J. (2007). Method to Produce High Quality Recycled Aggregate, Korea Patent No. KR1020060102991A [In Korean].
- Choi, J.G., Lee, G.C. (2015). Study on performance of pH reducing agent applied for wet process of recycled aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(4)**, 366–373 [In Korean].
- Heo, S.U., Kim, J.H., Chung, C.W. (2021). The effect of supercritical carbonation on quality improvement of recycled fine aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(1)**, 33–40 [In Korean].
- Jeong, J.D., Lee, D.H. (2008). An experimental study on the improvement of test methods for quality evaluation of recycled aggregate, *Korea Society of Fine Arts*, **8(4)**, 105–114 [In Korean].
- Ju, M., Park, K., Park, W.J. (2019). Mechanical behavior of recycled fine aggregate concrete with high slump property in normal- and high-strength, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **13**, 61.
- Kim, J.H. (2019). A Study on the Quality Improvement Methods of Recycled Fine Aggregate for Manufacturing of High Quality Recycled Aggregate Concrete, Ph.D Thesis, Graduate School of Architecture, Konkuk University. [In Korean].
- Kim, N.Y., Kim, H.J., Bae, J.S. (2008). A study on the property estimation of recycled coarse aggregate and characteristic of recycled aggregate concrete using the surface coated treatment method, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **28(4A)**, 603–609 [In Korean].
- Kim, S.W., Moon, R.G., Cho, E.B., Chung, C.W. (2023). Investigation on the mechanical properties of high-strength recycled fine aggregate mortar made of nanosilica dispersed by sonication, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **11(2)**, 97–104 [In Korean].
- Kim, Y.J., Kim, G.W., Chung, C.W. (2020). Contribution of two-stage mixing approach on compressive strength of mortar made of recycled fine aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(4)**, 490–497 [In Korean].
- Knaack, A.M., Kurama, Y.C. (2014). Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates, *Journal of Structural Engineering*, **141(3)**, B4014009.
- McNeil, K., Kang, T.H.K. (2013). Recycled concrete aggregates: A review, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **7(1)**, 61–69.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1987). Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, **114**, 65.
- Mindess, S., Young, F., Darwin, D. (2003). *Concrete* 2nd ed, Prentice Hall, 644.
- Ministry of Environment (2008). Test Standards for Soil Pollution Process Hydrogen Ion Concentration (pH) [In Korean].
- Sim, H.S., Park, C.W., Park, S.J., Kim, G.J., Kim, H.J., Kim, T.G., Lim, C.H. (2006). Development of Recycling & Practical Using for Value Added Resourcing of the Recycled Aggregate Obtained from Waste-Concrete, The Final Report of Hanyang University's Industrial-Academic Cooperation Group.
- Song, T.H., Lee, J.C., Lee, S.H. (2011). A study on the pH characteristic of recycle aggregate according to test methods and elapsed time, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(3)**, 61–68 [In Korean].
- Tahar, Z.E.A., Ngo, T.T., Kadri, E.H., Bouvet, A., Debieb, F.,

- Aggoun, S. (2017). Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete, *Construction and Building Materials*, **149**, 91–102.
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, **35(6)**, 1195–1203.
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. (2006). Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, **58(7)**, 477–484.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach, *Journal of Materials Science*, **42(10)**, 3592–3602.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Wang, Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, *Construction and Building Materials*, **21(10)**, 1928–1939.
- Wu, Y., Bose, S. (2005). Nanocrystalline hydroxyapatite: micelle templated synthesis and characterization, *Langmuir*, **21(8)**, 3232–3234.
- Xie, T., Ozbakkaloglu, T. (2016). Behavior of recycled aggregate concrete-filled basalt and carbon FRP tubes, *Construction and Building Materials*, **105**, 132–143.

일인산 암모늄 수용액 분사 및 침지처리가 순환잔골재의 물성 변화에 미치는 영향

최근 천연골재의 고갈로 순환골재의 재활용 확대가 절실한 상황에 도달하였다. 순환골재 생산 공정에서 발생된 미세균열 및 표면에 부착된 시멘트 페이스트는 순환골재 재활용의 가장 큰 걸림돌로 작용해 왔는데, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 순환골재의 pH 저감에 효과적으로 알려진 일인산 암모늄 수용액을 활용하였다. 다양한 농도의 일인산 암모늄 수용액을 활용하여 순환잔골재의 분사 및 침지처리를 실시하였고, 처리 전 후의 물성 변화를 관찰하였으며, 최종적으로 모르타르 시험체를 제작하여 압축강도를 평가하였다. 실험 결과에 따르면, 일인산 암모늄 수용액 분사 및 침지처리를 하는 경우 순환잔골재의 흡수율은 증가하고 pH는 감소하였다. 내부의 공극 및 균열에 존재하는 수산화칼슘 및 에트리נג가이트는 용출되었으며, 수산화인회석의 생성으로 인해 진밀도가 상승하였다. 흡수율의 증가에도 불구하고, 모르타르 시편의 압축강도 또한 증가하였는데, 이는 분사 및 침지처리과정에서 용출된 수산화칼슘 및 에트리נג가이트의 제거와 순환잔골재 표면에 존재하는 미세분말의 세척으로 인한 부착강도의 증가가 주요한 원인으로 파악되었다. 일인산 암모늄 수용액의 농도가 과다한 경우(침지: 15 % 이상, 분사 20 % 이상), 모르타르의 압축강도는 저하하는 현상을 보였는데, 이는 수화생성물의 과도한 용출에 의해 증가한 흡수율과 관련된 것으로 판단된다.