

## 2단계 배합방법으로 제조된 순환굵은골재 콘크리트의 장기재령 역학적 성능 및 내구성 평가

# Evaluation on Long-term Mechanical Performance and Durability of Recycled Coarse Aggregate Concrete Produced by Two-stage Mixing Approach

허성욱<sup>1</sup> · 손정진<sup>1</sup> · 정철우<sup>2</sup> · 김영찬<sup>2\*</sup>

Seong-Uk Heo<sup>1</sup> · Jeong Jin Son<sup>1</sup> · Chul-Woo Chung<sup>2</sup> · Young Chan Kim<sup>2\*</sup>

(Received November 11, 2022 / Revised November 21, 2022 / Accepted November 22, 2022)

Recycled aggregates show high water absorption rate compared to natural aggregates due to microcrack developed during production process and adhered cement pastes at the surface of recycled aggregates. This leads to the deterioration of mechanical properties and slow work flow. Currently it is getting hard to satisfy high demand for natural aggregates. Utilizing recycled aggregate more widely may be a substitutable countermeasure for the shortage of natural resources. In this study, two-stage mixing approach(TSMA) suggested by Tam et al. is used to produce recycled aggregate concrete(RAC) with 100 % replacement of coarse natural aggregate and tests for compressive strength, elastic modulus, and chloride ion diffusion coefficient are conducted to find out the effect of TSMA compared to normal mixing method. According to experimental result compressive strength and elastic modulus of RAC with TSMA was superior to those of RAC with normal mixing irrespective of water-cement ratio, and in some cases mechanical properties of RAC with TSMA approached to those of natural aggregate concrete(NAC). However, chloride ion diffusion coefficient of RAC was higher than that of NAC. This illustrates that TSMA is not an appropriate method in reducing chloride ion diffusion coefficient, resulting in inconsequential contribution of TSMA to the durability of RAC.

**키워드** : 순환굵은골재, 2단계 배합방법, 압축강도, 탄성계수, 내구성, 염소 이온 확산계수

**Keywords** : Recycled coarse aggregate, Two-stage mixing approach, Compressive strength, Modulus of elasticity, Durability, Chloride ion diffusion coefficient

## 1. 서론

우리나라의 골재 수급은 하천, 산림, 바다 등에서 천연자원의 형태로 채취하여 왔으나, 최근 도시화 및 채취원의 감소와 더불어 환경규제 및 민원으로 장기적인 골재 수급에 어려움을 겪고 있어, 이에 대한 대체 자원 마련이 시급한 상황이다(Kim and Kang 2020). 골재 수급의 대체 자원으로 여러 종류의 후보군이 존재하지만(Choi 2019), 그 중 건설폐기물의 처리과정에서 발생하는 순환골재는 철거 후 재건축하는 건축물이 증가하는 현재 시점에서,

건설업계에서 필요로 하는 골재 수요의 일부를 담당할 수 있을 정도의 많은 량이 생산되고 있다. 그러나 건설 폐기물의 약 65.1%에 달하는 순환골재는 대부분 성·복토용 및 도로공사용 등 부가가치가 낮은 용도로 사용되고 있고, 경제적 부가가치가 상대적으로 높은 골재로의 활용은 15.7 % (콘크리트 및 콘크리트 제품 제조용 11.0 %, 아스팔트콘크리트 제조용 4.7 %) 수준에 불과한 실정이다(KICT 2014).

순환골재의 콘크리트용 골재로서의 재활용률이 낮은 이유는 폐콘크리트를 통한 순환골재 생산에 따른 품질관리가 체계적이지

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

<sup>1</sup>부경대학교 건축·소방공학부 석사과정 (Master's Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea)

<sup>2</sup>부경대학교 건축공학부 정교수 (Professor, Department of Architectural Engineering Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea)

못하다는 제도적 문제도 있겠지만, 대부분 생산과정에서 발생한 골재 내부의 미세균열 및 골재 표면에서 제거되지 못하고 여전히 존재하는 시멘트 페이스트 성분의 존재를 그 원인으로 볼 수 있다. 국가에서는 순환골재 의무사용공시(Sim et al. 2006) 및 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률을 제정하고, 동법시행령 제 4조를 통해 순환골재 등의 재활용 용도를 정의하여(Kwon 2006) 순환골재 재활용 촉진을 도모하고 있으나, 순환골재 품질에 대한 신뢰성 부족, 현장 콘크리트 품질 관리의 어려움 등으로 인해 재활용이 여전히 제한되어 있는 상황이다.

국내·외의 많은 연구자들이 천연골재 대비 품질이 낮은 순환골재의 물리적 성능을 보완하기 위한 연구를 진행하였다. Jeong and Lee(2008)는 산처리를 통해 순환골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트를 제거하거나 강화하고자 하였고, Kim et al.(2008), Choi(2015)는 순환골재를 실리카폼 용액, 콜로이드 실리카 용액에 함침하거나 규산나트륨의 가수분해 반응으로 생성되는 SiO<sub>2</sub>를 통해 Ca(OH)<sub>2</sub>을 결속시켜 표면을 강화시키고자 하였다. 그러나 이러한 방법들은 처리 공정에서 2차 폐기물이 발생되거나 환경적인 오염 우려도 존재하므로, Vlvian W.Y Tam의 연구 그룹에서는 배합의 순서를 변화시켜 순환 골재의 품질을 개선하고자 하는 연구를 진행하였다.

Tam et al.(2005; 2006; 2007a; 2007b; 2008)이 제안한 2단계 배합 방법(Two-Stage Mixing Approach (TSMA))에서는 순환골재 내부에 존재하는 미세균열을 채우기 위해(또는 순환골재 계면의 시멘트 페이스트 부착 부위를 강화시키기 위해), 배합수의 절반만 일정 시간동안 시멘트 혼합하고, 1차 배합이 끝난 이후, 추가로 배합수를 투입하여 순환 골재 표면에 시멘트 페이스트가 더욱 많이 부착될 수 있도록 유도시켰다. TSMA 방식으로 제작된 콘크리트의 재령 28일 조건 하에서 20 % 치환된 순환골재에 대해 최대 21.19 %의 강도향상이 이루어지며, 이후 기존 TSMA 공법에 60초 동안 시멘트와 물을 사전 혼합하는 단계를 추가함으로써 강도향상의 결과도 얻었음이 보고되었다(Tam et al. 2006). 본 연구팀에서는 이에 대한 검증을 위해 순환골재를 대상으로 한 초기 연구를 진행하였고(Kim et al. 2020; Park et al. 2022), 2단계 배합방법에 역학적 성능 향상에 효과적임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 순환골재 모르타르로부터 얻은 예전 연구의 결과가 콘크리트 단계에도 적용 가능한지를 검증하고자 한다. 모르타르의 압축강도의 검증으로 마무리하였던 예전의 연구에서 부족한 데이터를 확보하기 위해, 압축강도에 더하여 구조체 콘크리트로서 필수적으로 요구되는 탄성계수 및 염소이온 침투저항성을 함께 평가하여 순환골재가 구조체용 콘크리트로 활용가능한지를

평가하고자 하였다. TSMA를 적용한 기존의 연구 결과(Tam et al. 2005; 2006; 2007a; 2007b; 2008; Kisku et al. 2020)가 28일 또는 56일 재령에서의 성능 평가에 맞추어져 있어 본 연구에서는 약 6개월간의 양생과정을 거친 장기재령 콘크리트의 물성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험재료

순환굵은골재 혼입 콘크리트의 제조에 활용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 화학적 조성은 Table 1과 같다. 순환굵은골재는 순환골재 생산 인증을 받은 국내 H사에서 생산된 것으로, bulk specific gravity (벌크 밀도)는 2.34 g/cm<sup>3</sup>이며, 흡수율은 3.43 %, 최대 치수는 13 mm, 조립률은 6.22로 측정되었다. 쇄석은 국내에서 생산되었으며, 벌크 밀도는 2.70 g/cm<sup>3</sup>이며, 흡수율은 1.23 %, 최대 치수는 20 mm, 조립률은 6.60로 측정되었다.

### 2.2 실험방법

콘크리트 배합 상세는 Table 2에 나타났다. 공시체 명칭에서 N은 NAC, R은 RAC이고, 3과 5는 각각 물시멘트비 0.3과 0.5를 나타낸다. 골재의 체적 변화로 인한 오차를 줄이기 위해, 물결합재비에 관계없이 배합설계시 콘크리트의 잔골재 및 굵은골재의 체적은 유지하였다. 콘크리트 배합 과정은 일반 배합과정과 2단계 배합 과정으로 구분하였다. 일반 배합과정은 ASTM C 192, KS F 2425에 준해 진행되었으며, 표건 상태의 굵은 골재와 잔골재를 팬믹서(Hanshin Kumpung, Korea, HS-1250)에 투입하고, 시멘트를 첨가 후 30초간 건식 혼합 단계를 수행하였다. 이후 배합수를 투입 뒤, 30 rpm의 속도로 30초, 60 rpm의 속도로 1분간 혼합하였다.

2단계 배합과정은 Tam et al.이 제시한 여러 종류의 TSMA 방법을 본 연구팀에서 다소 개선한 방법(Kim et al. 2020; Park et al. 2022)을 사용하였는데, 먼저 표건상태의 굵은 골재와 잔골재를 팬믹서에 투입하고, 30초 동안 건식 혼합 단계를 수행하였다. 이와는

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

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
63.42	19.48	4.69	4.08	3.11	3.04
K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	ZnO	-
1.32	0.38	0.32	0.13	0.11	-

Table 2. Mix proportions of concrete

Specimen	W/C	S/a (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	NCA (kg/m <sup>3</sup> )	RCA (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (mm)
N3	0.3	40	529.56	158.87	694.55	1,090.29	-	1.66	100 ± 20
R3						-	944.91	1.85	
R3-TSMA						-	944.91	1.85	
N5	0.5	40	400	200	694.55	1,090.29	-	-	
R5						-	944.91	-	
R5-TSMA						-	944.91	-	

별도로 시멘트와 배합수를 planetary paddle mixer(Kitchen aid, USA, 5K5SS)에 투입하고 1분 동안 60 rpm으로 혼합한 후, 시멘트 페이스트를 제조하였고, 이를 건비빔이 완료된 팬믹서에 첨가한 후, 30 rpm에서 30초 및 60 rpm에서 1분간 배합하였다. 압축강도, 탄성계수, 내구성 실험 측정을 위한 공시체를 6개씩 제작하였다.

배합이 완료된 콘크리트는 ∅ 100 × 200 mm 원주형 몰드에 타설하고, 24시간 경화 후 탈형하였다. 이후 27일간 22 ± 1 °C 온도에서 포화 수산화칼슘 용액에 침지시켜 수중 양생하였다. 28 일간의 수중양생 이후 공시체는 재령 6개월까지 기건양생(22 ± 1 °C, RH 60 %)되었으며, 이후 압축강도, 탄성계수 및 염소이온 침투저항성 시험을 진행하였다.

2.3 압축강도 및 탄성계수

콘크리트의 압축강도는 재령 6개월에 도달한 시점에 측정하였다. 시험은 ASTM C 469에 따라 전동식 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하여 진행하였다. 시험 과정에서 편심의 발생을 방지하기 위해 공시체의 표면을 평활하게 연마한 후, Fig. 1에서 나타난 바와 같이 공시체의 중앙부에 컴프레소미터 (compressometer; Tokyo Measuring Instruments Lab’s, Japan)를 고정하고, 두 개의 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer, Tokyo Measuring Instruments Lab’s, Japan, CDP-10)를 고정시켰다. 이후 공시체를 로드셀(Load cell, Tokyo

Measuring Instruments Lab’s, Japan, CLH-1MNA)에 올린 후, 0.25 MPa/s의 속도로 강하시켰다. 변위 데이터는 컴프레소미터에 배치한 두 개의 LVDT를 통해 얻은 값의 평균을 사용하였고, 하중 데이터는 로드셀을 통해 얻은 값을 사용하였다. 계측에 사용된 data logger는 TDS-530(Tokyo Sokki Kenkyuio Co., Ltd, Japan)이다. 압축강도는 탄성계수 시험과정에서 얻은 최대하중 값을 이용하여 계산하였으며, 탄성계수는 응력-변형률 곡선을 만든 후 아래의 식 (1)에 따라 계산하였다(ASTM C 469 2020).

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.00005) \tag{1}$$

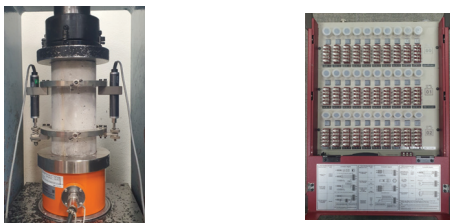
여기서, E : 코드 탄성계수(MPa), S<sub>2</sub> : 극한 하중의 40 %에 해당하는 응력, S<sub>1</sub> : 변형률 0.00005에 해당하는 응력, ε<sub>2</sub> : 극한 하중의 40 %에 대응하는 변형을 의미한다.

2.4 염해저항성 평가

순환골재와 쇠석을 골은골재로 사용한 콘크리트의 염해저항성 평가를 위해 NT Build 492(Chloride Migration Coefficient from non-steady-state Migration Experiment)시험법을 사용하였다. Fig. 2는 NT Build 492 시험에 사용된 용기의 모식도를 나타낸 것이다.

실험을 위해 원주형 실린더 몰드를 ∅ 100 × 50 mm 크기로 절단시킨 다음, 각 절단면을 0.3 N NaOH 용액과 10 % NaCl 용액에 침지시켰다. 시험 초기 단계에서 30 V의 전압으로 각 공시체에 통하는 초기 전류 값을 통해 실험에 활용될 전압을 관측하고, 규준에 따라 적용전압 값을 선택한 후, 24시간동안 실험을 진행하였다. 실험이 종료된 이후, 시편을 할렬 파괴한 후 단면에 0.1M AgNO<sub>3</sub> 용액을 분무하여 은색으로 변한 부위의 틱투 깊이를 측정하였다. Fig. 3은 염화물 침투 깊이를 측정하는 방법에 대한 예시를 나타낸 그림이다.

염소 이온의 침투깊이를 얻은 이후, 실험에 사용된 적용전압,



(a) Compressometer (b) Data logger

Fig. 1. The images of elastic modulus measurement set-up

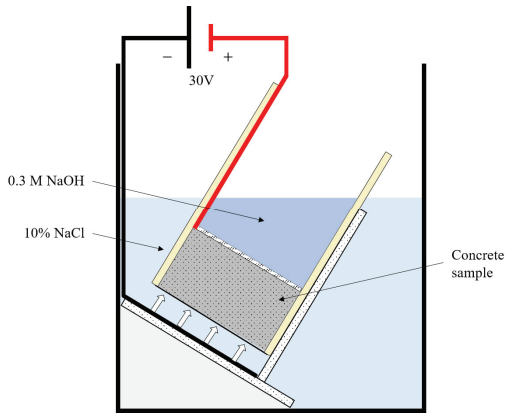


Fig. 2. Schematic diagram of chloride ion migration test

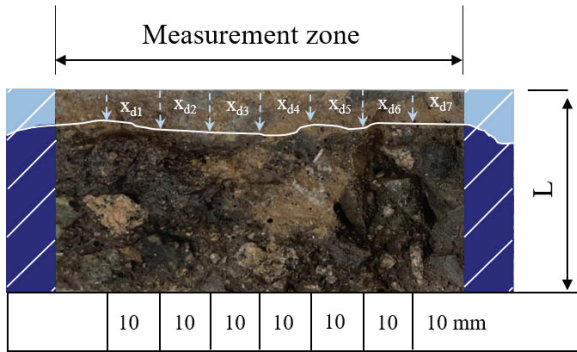


Fig. 3. Chloride ion diffusion depth measurement

시험시간, 시편의 온도 등을 아래의 식(2)에 대입하면, 콘크리트 공시체의 염소이온 확산계수를 평가할 수 있다(Nordtest 1999),

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

여기서,  $D_{nssm}$  : 불안정상태 확산계수( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ),  $U$  : 적용전압의 절대치(V),  $T$  : 용액의 초기온도와 최종온도의 평균치( $^{\circ}\text{C}$ ),  $L$  : 공시체 두께(mm),  $X_d$  : 염소 이온 침투 평균 깊이(mm),  $t$  : 시험시간(hr)을 의미한다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 하중-변위 곡선

재령 6개월의 물시멘트비 0.3과 0.5인 콘크리트의 하중-변위 곡선의 예시를 Fig. 4, 5에 나타내었다. 압축강도는 최대하중을 이용하여 구하였고, 탄성계수는 최대하중의 40 % 지점에서의 변형

률을 구하여, 식 (1)에 대입하여 구하였다.

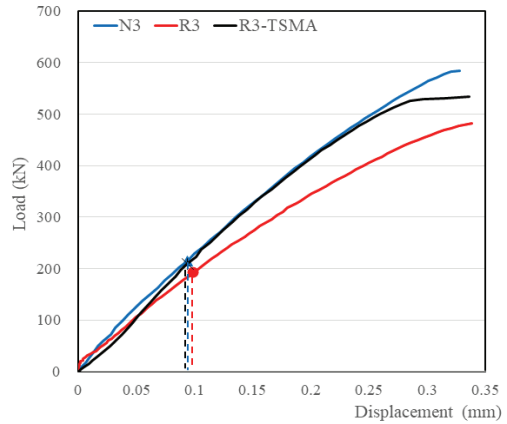


Fig. 4. w/c 0.3 concrete load-displacement graph

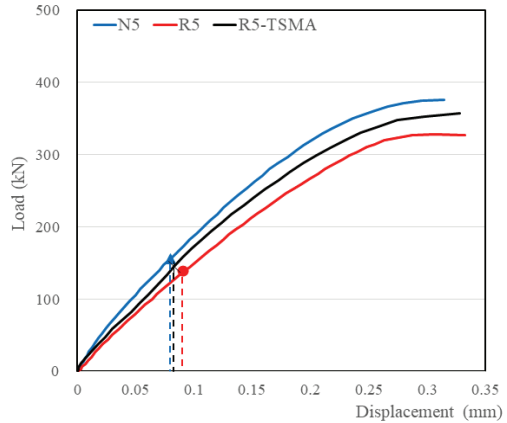


Fig. 5. w/c 0.5 concrete load-displacement graph

#### 3.2 압축강도

Fig. 6에 나타난 데이터에 따르면, 물시멘트비 0.3인 천연골재 콘크리트의 6개월 재령 압축강도는 70.16 MPa로 나타났다. 콘크리트의 굵은골재 전량을 순환굵은골재로 대체하는 경우 압축강도는 58.96 MPa로 감소하였지만, 2단계 배합을 활용하게 되면 65.53 MPa로 다시 상승하여 천연골재 콘크리트에 거의 근접하는 강도를 보이는 것이 확인되었다.

물시멘트비 0.5에서도 마찬가지로 순환굵은골재 혼입 콘크리트의 압축강도가 44.98 MPa로 천연골재 콘크리트의 47.9 MPa에 비해 다소 낮게 나타났지만, 2단계 배합을 활용한 순환굵은골재 콘크리트의 압축강도는 46.75 MPa로 천연골재 콘크리트의 압축강도와 거의 유사하게 나타났다. 전체적으로는 물시멘트비에 관계

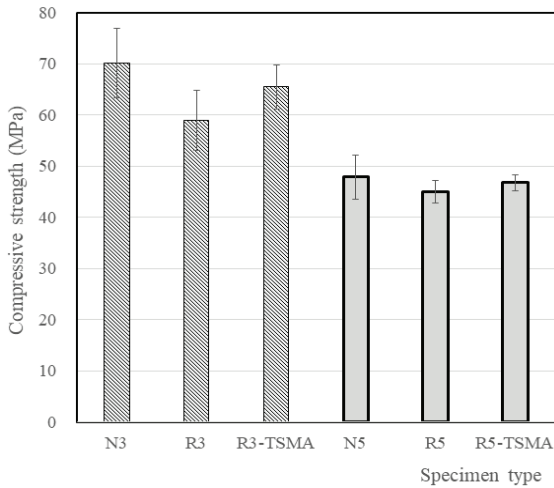


Fig. 6. Compressive strengths of concrete specimens

없이 2단계 배합을 활용하는 것이 역학적 성능에 더욱 유리한 것으로 나타났으며, 데이터 간의 편차는 물시멘트비 0.3인 콘크리트에서 더욱 큰 것으로 확인되었다.

### 3.3 탄성계수

Fig. 7에 나타난 탄성계수 데이터에 따르면, 2단계 배합의 적용은 탄성계수를 증가시키는 데 더욱 효과적인 것으로 판단된다. 물시멘트비 0.3인 천연골재 콘크리트의 6개월 재령 탄성계수는 32.23 GPa로, 콘크리트의 굵은골재 전량을 순환골은골재로 대체하는 경우, 31.33 GPa로 감소하였지만, 2단계 배합을 활용하게 되면, 탄성계수가 33.43 GPa로 천연골재 콘크리트보다 높게 나타났다.

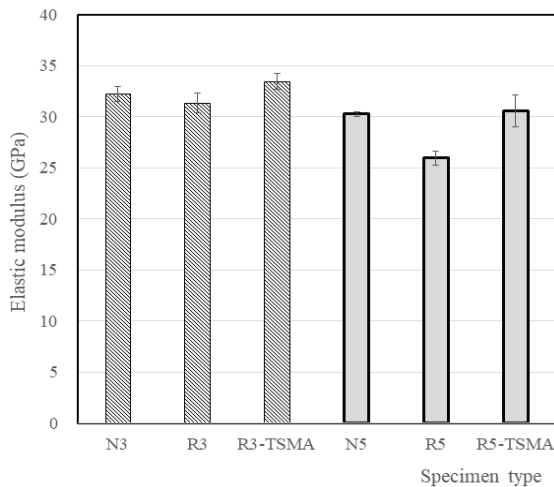


Fig. 7. Elastic modulus of concrete specimens

물시멘트비 0.5는 순환골은골재 혼입 콘크리트의 탄성계수의 감소폭이 물시멘트비 0.3에 비해 높게 나타났지만, 마찬가지로 2단계 배합을 활용한 순환골은골재 콘크리트의 탄성계수는 30.57 GPa로 천연골재 콘크리트의 탄성계수인 30.27 GPa보다 높게 나타났다. 압축강도에서의 결과와 마찬가지로, 전체적으로는 물시멘트비에 관계없이 2단계 배합을 활용하는 것이 역학적 성능에 더욱 유리한 것으로 나타났다.

### 3.4 염해저항성 평가

재령 6개월된 각 콘크리트의 염소 이온 확산 계수를 Fig. 8에 나타냈다. 물시멘트비 0.3의 천연골재 콘크리트의 염소이온 확산 계수는  $0.76 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 낮은 값을 보였다. 순환골재 콘크리트는  $3.81 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이며, 2단계 배합방법을 활용한 순환골재 콘크리트는  $4.79 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 높은 수치를 나타냈다. 또한 물시멘트비 0.5의 천연골재 콘크리트는  $3.64 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , 순환골재 콘크리트는  $10.60 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 높았으며, 2단계 배합방법을 활용한 순환골재 콘크리트는  $8.600 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났다.

전체적으로 천연골재 콘크리트에 비해 순환골재 콘크리트의 염소이온 확산계수가 높게 나타난 점을 고려하면, 천연골재를 순환골은골재로 100% 대체하는 경우, 염소이온 침투저항성은 반드시 감소한다고 판단 가능하다. 2단계 배합의 효용성에 대한 판단에서는, 물시멘트비 0.3인 경우 2단계 배합방법을 활용한 순환골은골재 콘크리트의 염소이온 확산계수가 일반 순환골은골재 콘크리트에 비해 다소 높게 나타났으나, 물시멘트비 0.5인 경우에는 이와 상반된 결과를 보여, 2단계 배합은 순환골재 콘크리트의 역학적

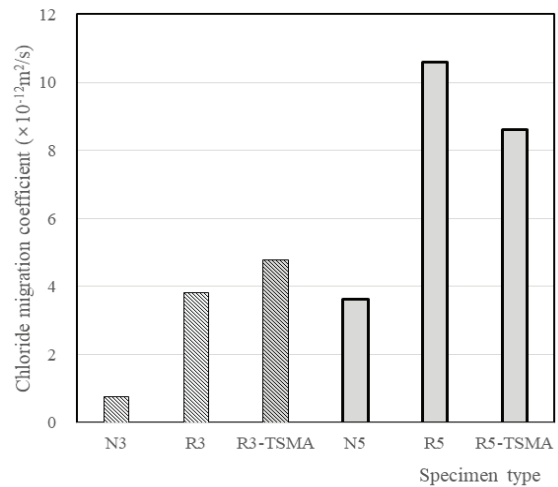


Fig. 8. Chloride ion coefficient of concrete specimens

성능 향상은 도모할 수 있지만, 염소이온 침투저항성을 증가시키지는 않는 것으로 판단해야 한다. 이 부분에 대해서는 추후 보다 면밀하게 2단계 배합을 활용한 순환골재 혼입 콘크리트의 내구성능 검증을 위한 실험을 진행하여 검증해 보고자 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2단계 배합방법을 적용한 순환골재 콘크리트의 장기재령 역학적 성능과 염소이온 확산계수를 평가한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 6개월 재령 압축강도는 물시멘트비와 관계없이 2단계 배합방법을 활용한 순환골재 콘크리트의 강도가 일반 배합과정을 활용한 순환골재 콘크리트에 비해 높게 나타났다. 순환골재 콘크리트에 2단계 배합을 진행한 경우, 압축강도는 천연골재 콘크리트의 압축강도에 거의 근접한 것으로 나타났다.
2. 탄성계수 또한 물시멘트비와 관계없이 2단계 배합방법을 활용한 순환골재 콘크리트가 일반 배합과정을 활용한 순환골재 콘크리트에 비해 높게 나타났다. 또한 천연골재 콘크리트의 탄성계수를 상회하는 값을 보여, 2단계 배합방법의 적용이 순환골재 콘크리트의 역학적 성능 향상에 기여하는 것으로 확인되었다.
3. 염소이온 확산계수의 경우 2단계 배합과정의 적용과 상관없이 순환골재 콘크리트의 확산계수가 천연골재 콘크리트의 확산계수에 비해 높게 나타났다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

#### References

American Society for Testing and Materials C 192. (2020). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken; ASTM International.

American Society for Testing and Materials C 469. (2020). Standard

Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete In Compression, West Conshohocken; ASTM International.

Choi, H.B. (2015). Water absorption controlling type surface treatment method for quality enhancement of recycled aggregate, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **15(6)**, 561–567 [in Korean].

Choi, W.Y. (2019). Quality standards for republic of Korea and foreign replacement aggregates, *Magazine of RCR*, **14(2)**, 77–83 [in Korean].

Jeong J.D., Lee D.H. (2008). A study for improvement of testing methods for quality control of recycled aggregate, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **8(4)**, 105–114 [In Korean].

Kim, J.M., Kang, K.W. (2020). The current status and countermeasures on the supply and demand of aggregate, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **32(4)**, 14–20 [in Korean].

Kim, N.W., 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, 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].

Kisku, N., Rajhans, P., Panda, S.K., Pandey, V., Nayak, S. (2020). Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach, *Structures*, **24**, 742–753.

Korea Institute of Construction Technology(KICT). (2014). Study on Activation Measure of Recycled Aggregate, Report No. 11–161300–000638–01, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Goyang, Gyeonggi-do, 3–34 [in Korean].

Kwon, K.C. (2006). Revision details of laws and enforcement ordinance and regulations on recycling promotion of construction wastes, *Magazine of RCR*, **2(2)**, 13–17 [in Korean].

Nordtest. (1999). Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non–Steady–State Migration Experiments, NT BUILD **492**, Nordtest.

Park, S.H., Choi, J.H., Lee, C.Y., Koo, M.S., Chung, C.W. (2022). Investigation on fire resistance of high–performance cement mortar with recycled fine aggregate mixed by two–stage mixing

approach, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **10(1)**, 23–29 [in Koreans].

Sim, H.S., Park, C.W., Park, S.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 [in Korean].

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. (2008). Diversifying two-stage mixing approach(TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA<sub>s</sub> and TSMA<sub>sc</sub>, Construction and Building Materials, **22(10)**, 2068–2077.

Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Wang, Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using tow-stage mixing approach, Construction and Building Materials, **21(10)**, 1928–1939.

**2단계 배합방법으로 제조된 순환굵은골재 콘크리트의 장기재령 역학적 성능 및 내구성 평가**

순환골재는 생산과정에서 발생하는 미세균열 및 순환골재 표면에 존재하는 시멘트 페이스트 성분의 존재로 인해, 천연골재에 비해 높은 흡수율을 가지며, 이로 인해 콘크리트에 골재로서 사용할 경우 작업성 저하, 강도의 저하 등의 문제가 발생하게 된다. 골재의 수급이 점점 어려워지고 있는 현 상황에, 골재 수급의 대안이 될 수 있는 순환골재를 적극적으로 활용하기 위한 방법으로, 본 연구에서는 Tam et al.이 제안한 2단계 배합과정을 활용하였고, 이를 이용해 제조한 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 및 염소이온 확산계수를 일반 배합과정을 적용한 천연골재 콘크리트 및 100 % 치환율의 순환골재 콘크리트와 비교 분석하였다. 실험 결과에 따르면, 압축강도와 탄성계수는 물시멘트비에 관계없이, 2단계 배합방법으로 제작한 순환골재 콘크리트가 일반배합과정으로 배합된 순환골재 콘크리트에 비해 높게 나타났으며, 천연골재 콘크리트에 근접하는 역학적 성능을 발휘하였다. 그러나 염소이온 확산계수의 경우 순환골재 콘크리트가 천연골재 콘크리트보다 높게 측정되었으며, 2단계 배합과정의 적용에 따른 염소이온 확산계수의 감소는 확인할 수 없어, 2단계 배합이 내구성에는 크게 기여하지 않는 것으로 판단된다.